

# 华龙核电技术用户要求文件

## （征求意见稿）

# 目 录

0 缩略语及相关术语.....	6
<b>1 通用要求 .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 概述 .....</b>	<b>11</b>
1.1.1 背景.....	11
1.1.2 目的和范围.....	12
1.1.3 文件结构.....	12
<b>1.2 指导原则 .....</b>	<b>12</b>
1.2.1 简化.....	12
1.2.2 设计裕量.....	13
1.2.3 纵深防御.....	13
1.2.4 能动与非能动结合.....	13
1.2.5 人因.....	14
1.2.6 设计基准和安全裕量的平衡.....	14
1.2.7 审评经验反馈.....	14
1.2.8 标准化.....	14
1.2.9 应用成熟技术.....	14
1.2.10 可维修性.....	15
1.2.11 质量保证.....	15
1.2.12 经济性.....	15
1.2.13 实物保护.....	15
1.2.14 环境友好.....	16
<b>1.3 顶层要求 .....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 安全性 .....</b>	<b>16</b>
1.4.2 经济性.....	19
1.4.3 性能.....	19
1.4.4 可建造性.....	21
1.4.5 设计过程.....	22
<b>1.5 应用说明 .....</b>	<b>23</b>
1.5.1 概述.....	23
1.5.2 用户要求在应用中的作用.....	23
1.5.3 首堆应用实施.....	24
1.5.4 实施条件.....	24
1.5.5 实施过程.....	25
<b>2 华龙核电技术要求 .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 总体要求 .....</b>	<b>25</b>
2.1.1 概述.....	25
2.1.2 安全设计要求.....	26
2.1.3 安全分级.....	36
2.1.4 性能设计要求.....	41

2.1.5 结构设计基准.....	42
2.1.6 内外部灾害防护总原则.....	56
2.1.7 建造和可建造性.....	62
2.1.8 可运行性与可维修性.....	66
2.1.9 质量保证.....	73
2.1.10 执照申请.....	76
2.1.11 设计过程.....	77
2.1.12 设备监测.....	82
2.1.13 信息管理系统.....	93
<b>2.2 堆芯设计 .....</b>	<b>96</b>
2.2.1 通用要求.....	96
2.2.2 燃料系统设计.....	100
2.2.3 堆芯核设计.....	102
2.2.4 热工水力设计.....	105
<b>2.3 反应堆冷却剂系统及其相连系统.....</b>	<b>106</b>
2.3.1 通用要求.....	106
2.3.2 反应堆冷却剂系统.....	108
2.3.3 化学和容积控制系统.....	113
2.3.4 硼和水补给系统.....	118
2.3.5 硼回收系统.....	121
2.3.6 余热排出系统.....	126
<b>2.4 安全系统 .....</b>	<b>131</b>
2.4.1 通用要求.....	131
2.4.2 设计基准工况应对措施.....	133
2.4.3 设计扩展工况应对措施.....	146
<b>2.5 核辅助系统 .....</b>	<b>156</b>
2.5.1 通用要求.....	156
2.5.2 乏燃料水池和换料水池冷却和净化处理系统.....	158
2.5.3 设备冷却水系统.....	161
2.5.4 重要厂用水系统.....	165
2.5.5 蒸汽发生器排污系统.....	168
2.5.6 核取样系统.....	170
2.5.7 气体相关系统.....	174
<b>2.6 仪表和控制系统 .....</b>	<b>177</b>
2.6.1 目标和原则说明.....	177
2.6.2 关键要求.....	185
2.6.3 控制室要求.....	200
2.6.4 控制系统通用要求.....	218
2.6.5 电厂、反应堆和反应堆冷却剂系统的仪表和控制要求.....	234
2.6.6 反应堆保护系统和安全系统.....	241
2.6.7 发电和主汽轮发电机的仪表和控制要求.....	248
2.6.8 辅助系统和电厂支持服务系统的仪表和控制要求.....	254
2.6.9 远程监测技术.....	258
<b>2.7 电力系统 .....</b>	<b>259</b>

2.7.1 概述.....	259
2.7.2 通用要求.....	262
2.7.3 厂外电力系统.....	270
2.7.4 中压交流配电系统.....	274
2.7.5 厂内交流电源系统.....	280
2.7.6 低压交流配电系统.....	286
2.7.7 直流和交流不间断电源系统.....	291
2.7.8 正常照明系统和应急照明系统.....	296
2.7.9 电气保护系统.....	301
<b>2.8 电厂支持系统 .....</b>	<b>304</b>
2.8.1 消防相关系统.....	304
2.8.2 供热、通风和空调系统(HVAC).....	307
2.8.3 冷冻水相关系统.....	316
2.8.4 环境监测系统(EMS) .....	320
2.8.5 实物保护系统.....	323
2.8.6 核电厂通信系统.....	327
<b>2.9 放射性废物处理系统 .....</b>	<b>331</b>
2.9.1 通用要求.....	331
2.9.2 放射性废气处理系统.....	333
2.9.3 放射性废液处理系统.....	337
2.9.4 放射性固体废物处理系统.....	345
<b>2.10 燃料操作和贮存系统 .....</b>	<b>354</b>
2.10.1 定义和系统功能.....	354
2.10.2 原则要求.....	354
2.10.3 一般要求.....	354
2.10.4 临界安全设计.....	356
<b>2.11 设备通用要求 .....</b>	<b>356</b>
2.11.1 反应堆本体结构.....	356
2.11.2 反应堆冷却剂系统主要设备.....	361
2.11.3 辅助设备.....	367
2.11.4 材料.....	380
2.11.5 在役检查.....	389
2.11.6 力学.....	390
2.11.7 管道和管件.....	391
<b>2.12 电力生产系统 .....</b>	<b>392</b>
2.12.1 前言.....	392
2.12.2 通用要求.....	396
2.12.3 主蒸汽系统.....	396
2.12.4 主给水流量控制系统(核岛部分) .....	400
2.12.5 主蒸汽/旁路系统.....	402
2.12.6 凝结水抽取系统.....	404
2.12.7 化学品添加系统.....	407
2.12.8 除盐水生产系统.....	409
2.12.9 辅助蒸汽系统.....	411

2.12.10 低压给水加热器系统.....	412
2.12.11 低压给水加热器疏水回收系统.....	414
2.12.12 主给水除氧器系统.....	416
2.12.13 电动给水泵系统.....	417
2.12.14 高压给水加热器系统.....	419
2.12.15 主给水流量控制系统.....	422
<b>2.13 汽轮机系统 .....</b>	<b>422</b>
2.13.2 主发电机系统.....	429
<b>2.14 布置设计 .....</b>	<b>431</b>
2.14.1 概述.....	431
2.14.2 总体要求.....	432
2.14.3 总平面布置.....	438
2.14.4 核岛厂房.....	443
2.14.5 常规岛厂房.....	459
<b>2.15 概率安全分析 .....</b>	<b>460</b>
2.15.1 概述.....	460
2.15.2 通用要求.....	461
2.15.3 内部事件一级 PSA .....	464
2.15.4 内部事件二级 PSA .....	465
2.15.5 外部事件风险评价.....	467
2.15.6 乏燃料水池风险评估.....	469
<b>2.16 经济性评价 .....</b>	<b>469</b>
2.16.1 费用估算.....	469
2.16.2 财务分析计算参数.....	469
2.16.3 盈利能力分析.....	470
2.16.4 补充要求.....	470

## 0 缩略语及相关术语

相关术语：

- 1) 能动系统：包含有转动或往复运动的部件（例如泵）或可调部件的系统。
- 2) 正常运行：核动力厂在规定的运行限值和条件范围内的运行。
- 3) 预计运行事件：在核电厂运行寿期内预计至少发生一次的偏离正常运行的各种运行过程；由于设计中已采取响应措施，这类事件不至于引起安全重要物项的严重损坏，也不至于导致事故工况。
- 4) 事故工况：偏离正常运行，比预计运行事件发生频率低但更严重的工况。包括设计基准事故和设计扩展工况。
- 5) 设计基准事故：导致核动力厂事故工况的假设事故，这些事故的放射性物质释放在可接受限值以内，该核动力厂是按确定的设计准则和保守的方法来设计的。
- 6) 设计扩展工况：不在设计基准事故考虑范围的事故工况，在设计过程中应该按最佳估算方法加以考虑，并且该事故工况的放射性物质释放在可接受限值以内。设计扩展工况包括没有造成堆芯明显损伤的工况和堆芯熔化（严重事故）工况。
- 7) 预计瞬态：在机组寿期内预计出现一次或两次的正常运行工况。
- 8) 陡边效应：在核动力厂中，由微小变化的输入引发核动力厂状态的重大突变。
- 9) 未能紧急停堆的预计瞬态：与全部或部分反应堆保护系统同时故障的预计瞬态。
- 10) 可靠性：部件或系统失效频度的量度。
- 11) 单一故障：导致单一系统或部件不能执行其预定安全功能的一种故障，以及由此引起的各种继发故障。
- 12) 实体隔离：由几何隔离（距离、方位等）、适当的屏障或二者结合形成的隔离。
- 13) 安全重要物项：属于某一安全组合的一部分，其失效或故障可能导致对厂区人员或公众的辐射照射的物项。
- 14) 严重事故：严重性超过设计基准事故并造成明显堆芯恶化的事故工况。
- 15) 集体剂量：群体所受的总辐射剂量的一种表示，定义为受某一辐射源照射的群体的成员数与他们所受的平均辐射剂量的乘积。
- 16) 源项：对给定的辐射源所实际或可能释放的辐射或放射性物质的一种描述。
- 17) 放射性流出物：通常情况下，核电厂以气体、气溶胶、粉尘和液体等形态排入环境并在环境中得到稀释和弥散的放射性物质。
- 18) 安全级：电气设备和系统的安全级别，它们是完成反应堆紧急停堆、安全壳隔离以及安全壳和反应堆余热排出所必需的，或者防止放射性物质向环境大量排放所必需的。
- 19) 序列：一组要求完成某一功能的设备，例如泵、电动机、管道、阀门、电源和仪表以及支持系统例如HVAC、冷却水等。符合该定义的多个序列不完全相同。
- 20) 等效不可用因数：由于机组计划和非计划停机，而减少的发电量占机组额定

发电量的百分率。

21) 负载组：由母线、变压器、开关设备和由同序列内共用电源供电的负载共同组成。

22) 厂外电力系统：由与厂外输电系统、电厂主发电机与厂内配电系统连接的设备 and 电路组成的系统。

23) 常备厂用负荷：在所有时间包括当机组停堆时，那些要求一直保持运行的非安全负载。

24) 全厂断电：核电厂内向安全级的和非安全级的开关设备母线供电的交流电源全部丧失。因此，全厂断电包括厂外电源丧失的同时汽轮机跳闸和厂内应急交流电力系统故障，但由厂内蓄电池通过逆变器送到母线的交流电力或替代交流电源的电力没有丧失。

25) 不间断电源：当正常电源不能正常运行时用于提供没有延时或瞬变供电的系统。

26) 多样性：为执行某一确定功能设置两个或多个独立（或冗余）的系统或部件，这些不同的系统或部件具有不同的属性，从而减少了共因故障（包括共模故障）的可能性。

27) 固件：驻留在一种存储器（如只读存储器）内的计算机程序和数据，在计算机运行期间不能被动态修改。

28) 运行人员：在主控制室或远程停堆站内，“操纵员”指拥有执照的个人。在其他情况下，“运行人员”指得到许可或在有执照的运行人员指导下在电厂进行运行操作的任何人。“运行人员”不包括维修技术人员、施工人员、所有支持人员（如辐射防护或化学技术人员），也不包括电厂职员和管理人员。

29) 冗余：硬件和软件的并行重复，以确保出现故障时仍能连续运行。

30) 分段：指功能和实体隔离的应用，其目的是为了防止一个控制系统或功能的故障扩散到其他部分，从而降低复杂电厂瞬态出现的几率。

31) 隔离：指设备的物理隔离（通过距离和屏障），目的是为了防止由于局部外部事件引起的共因故障。

32) 软件：为协助执行问题程序而设计的任何程序或程序系列；操作系统的监控程序；为完成特殊功能运行而设计的程序，该程序用于其他任何需要这种服务的程序。

33) 废物最小化：在从设施设计到退役的各个阶段，通过减少废物的产生、进行再循环与再利用、对一次废物和二次废物做适当处理等措施，使放射性废物的体积和放射性活度均保持在可合理达到的尽量低水平。

#### 缩略语：

序号	缩写	英文描述	中文描述
1	A/D	Analog to Digital	模/数转换
2	ALARA	As Low as Reasonable Achievable	可合理达到的尽量低
3	AOV	Air Operated Valve	气动阀
4	ATWS	Anticipated Transient Without Scram	未能紧急停堆的预期瞬态
5	BCD	Binary Coded Decimal	二-十进制编码

序号	缩写	英文描述	中文描述
6	BDB	Beyond Design Basis	超设计基准
7	BFW	Backup Feedwater	备用给水
8	BIL	Basic Insulation Level	基本脉冲电平
9	BOP	Balance of Plant	核电厂辅助系统
10	CCF	Common Cause Failure	共因故障
11	CDA	Critical Digital Assets	关键数字资产
12	COTS	Commercial-off-the-shelf	商品级物项
13	CPU	Central Processing Unit	中央处理器
14	CRAS	Control Rod Assemblies	控制棒组件
15	CRD	Control Rod Drive	控制棒驱动机构
16	D/A	Digital to Analog	数/量转换
17	DAS	Diverse Actuation System	多样性驱动系统
18	DBA	Design Basis Accident	设计基准事故
19	DBC	Design Basis Condition	设计基准工况
20	DCS	Distributed Control System	分布式控制系统
21	DEC	Design Extension Condition	设计扩展工况
22	DEC-A	Design Extension Condition A	设计扩展工况 A
23	DEC-B	Design Extension Condition B	设计扩展工况 B
24	DHR	Decay Heat Removal	衰变热导出
25	DI&C	Digital Instrumentation and Controls	数字化仪表和控制
26	DiD	Defence in Depth	纵深防御
27	DLL	Dynamically Linked Libraries	动态链接库
28	DNB	Departure from Nucleate Boiling	偏离泡核沸腾
29	EDG	Emergency Diesel Generator	应急柴油发电机组
30	EFT	Electrical Fast Transients	电快速瞬变
31	EMI	Electromagnetic Interference	电磁干扰
32	EOF	Emergency Operations Facility	应急运行设施
33	EPC	Engineering, Procurement & Construction	工程总承包



序号	缩写	英文描述	中文描述
34	ESD	Electrostatic Discharge	静电放电
35	ESF	Engineered Safety Feature	专设安全设施
36	EUF	Equivalent Unavailability Factor	等效不可用因数
37	FMEA	Failure Modes and Effects Analysis	失效模式和影响分析
38	FPGA	Field Programmable Gate Array	现场可编程逻辑门阵列
39	FPLC	Fission Product Leakage Control	裂变产物泄漏控制
40	GIS	Gas Insulated Station	气体绝缘开关站
41	GPS	Global Positioning System	全球定位系统
42	HCLPF	High Confidence and Low Probability of Failure	高置信度低失效概率
43	HFE	Human Factors Engineering	人因工程
44	HIC	High Integrity Container	高完整性容器
45	HID	High Intensity Discharge	高强度气体放电
46	HRD	Hualong Requirements Document	华龙技术电厂用户要求
47	HSI	Human System Interface	人机接口
48	HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning	暖通空调系统
49	I&C	Instrumentation & Control	仪表和控制
50	I/O	Input/Output	输入/输出
51	IAEA	International atomic energy agency	国际原子能机构
52	IASCC	Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking	辐照应力腐蚀裂纹
53	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	电气与电子工程师协会
54	IMS	Information Management System	信息管理系统
55	IRWST	In-Containment Refueling Water Storage Tank	安全壳内置换料水箱
56	IT	Information Technology	信息技术
57	LAN	Local Area Network	局域网
58	LBB	Leak Before Break	破前漏
59	LCO	Limiting Condition for Operation	运行限制条件
60	LED	Light Emitting Diode	发光二极管

序号	缩写	英文描述	中文描述
61	LOCA	Loss of Coolant Accident	冷却剂丧失事故
62	LOOP	Loss of Offsite Power	丧失厂外电源
63	MCR	Main Control Room	主控室
64	MOV	Motor Operated Valve	电动阀
65	MOV	Motor Operated Valve	电动阀
66	MSIV	Main Steam Isolation Valve	主蒸汽隔离阀
67	MSLB	Main Steam Line Break	主蒸汽管线破裂
68	MTBF	Mean Time Between Failures	平均无故障时间
69	NPSH	Net Positive Suction Head	汽蚀余量或净正吸入压头
70	NSSS	Nuclear Steam Supply System	核蒸汽供应系统
71	NTS	Network Time Server	网络时间服务器
72	OBE	Operating-basis Earthquake	运营基准地震
73	OEM	Original Equipment Manufacturer	设备制造商
74	PCI	Pellet-Clad Interaction	燃料芯块与包壳的相互作用
75	PCT	Peaking Cladding Temperature	包壳峰值温度
76	PDS	Previously Developed Software	预开发软件
77	PSA	Probabilistic safety assessment	概率安全评价
78	PVC	Polyvinyl Chloride	聚氯乙烯
79	QA	Quality Assurance	质量保证
80	RAM	Random Access Memory	随机存取存储器
81	RAT	Reserve Auxiliary Transformer	辅助变压器
82	RCS	Reactor Coolant System	反应堆冷却剂系统
83	RFI	Radio Frequency Interference	射频干扰
84	RFPY	reactor full power years	满功率年
85	RI/O	Remote Input/Output	远程输入/输出
86	RO	Reactor Operator	反应堆操纵员
87	ROM	Read Only Memory	只读存储器
88	RPS	Reactor Protection System	反应堆保护系统

序号	缩写	英文描述	中文描述
89	RPV	Reactor Pressure Vessel	反应堆压力容器
90	RTNDT	Reference nil-ductility transition temperature	无延性转变温度
91	RTD	Resistance Temperature Detector	热电阻温度计
92	SF6	Sulfur Hexafluoride	六氟化硫
93	SI	Safety Injection	安全注入
94	SL-2	UltimateSafety Seismic Ground Motion	极限安全地震动
95	SMA	Seismic Margin Assessment	抗震裕度评价
96	SME	Seismic Margin Earthquake	抗震裕度地震
97	SOER	Significant Operating Experience Report	重要运行经验报告
98	SOV	Solenoid Operated Valve	电磁阀
99	SRO	Senior Reactor Operator	高级反应堆操纵员
100	SSC	Structures, Systems and Components	结构、系统和设备
101	SSE	Safe Shutdown Earthquake	安全停堆地震
102	STA	Shift Technical Advisor	值班技术顾问
103	SVVP	Software Verification and Validation Plan	软件验证和确认计划
104	TSC	Technical Support Center	技术支持中心
105	UAT	Unit Auxiliary Transformer	厂用变压器
106	UPS	Uninterruptible Power Supply	不间断电源
107	V&V	Verification and Validation	验证和确认
108	VDU	Video Display Unit	可视显示单元
109	VPE	Vacuum Pressure Encapsulated	真空压力封装
110	VPI	Vacuum Pressure Impregnated	真空压力浸渍

## 1 通用要求

本章确定了采用华龙核电技术的核电厂（即华龙技术电厂）的总体要求，包括概述、指导原则、顶层要求和应用说明。

### 1.1 概述

#### 1.1.1 背景

华龙一号是中国自主开发的第三代压水堆核电技术。华龙一号的研发设计充分汲取了我国三十多年的核电设计、建造和运行经验，主要技术经过多年的科学研究、自主研发、设计建造和试验验证。华龙一号采用成熟的压水堆核电技术，安全系统采用能动与非能动相结合，具有完善的严重事故预防与缓解措施，可以很好地应对福岛等类似核事故，具有极高的安全性。作为中国第三代核电技术，华龙一号具有安全性高，成熟性好、经济性可竞争的特点，并在工程实践中不断优化，持续改进提升。

制定核电技术用户要求文件是国际三代核电技术的标志。华龙一号作为中国自主三代核电，制定华龙核电技术用户要求文件，可以确定华龙核电技术的顶层设计要求，形成一套华龙技术核电厂的全面设计技术要求，规范华龙技术核电厂的设计，充分吸收华龙首批核电机组在研发、设计、建造和调试运行方面的经验反馈，更好地满足华龙技术核电厂的用户需求，更好地满足中国核电的发展需要，保持华龙核电技术在国际核电市场的竞争地位。

《华龙技术核电厂用户要求》编制工作由中国核能行业协会组织，华龙国际核电技术有限公司为技术责任单位，中国核工业集团有限公司相关单位、中国广核集团有限公司相关单位、国家核安全监管技术支持机构、华东电力设计院有限公司等单位参加了编制。国内其他相关单位为编制工作提供了多方面的支持和帮助。

1.1.2 目的和范围

HRD 的目的是基于国内成熟的核电技术，对华龙技术电厂选址、设计、建造、运行、退役等方面的内容进行统一规范，消除各方面存在的问题，提升华龙技术电厂安全性与经济性并保证工程质量。

1.1.3 文件结构

HRD 分为两个层次，分别是通用要求和华龙核电技术要求。华龙核电技术要求又分为总体要求以及建（构）筑物、系统、设备及其它具体要求。文件结构如下图所示。

第一层次	第一章 通用要求											
第二层次	第二章 第2.1节 总体要求											
	安全设计	安全分级	性能设计	结构设计	内外部灾害防护总原则	建造和可建造性	可运行性与可维修性	质量保证	执照申请	设计过程	部件监测	信息管理系统功能要求
	第二章 第2.2-2.16节 系统、设备及其他具体要求											

1.2 指导原则

1.2.1 简化

简化原则是强调在华龙技术电厂的设计、建造和运行等各个方面都要追求简化。设计需要从优化成本的角度上对方案进行比选，并在设计决策中赋予方案简化更高的重要性。设计在多方面都应遵循简化原则，特别是简化运行。简化要求包括：

- 1) 使用尽量少数量的系统、阀门、泵、仪表和其它机械和电气设备，以完成重要的功能；
- 2) 提供人机界面以简化华龙技术电厂的运行，适应操纵员的需求和能力；

- 3) 系统和部件的设计应确保技术改进可以减少在各种运行工况下对操纵员的依赖;
- 4) 设备的设计和布置应便于维修;
- 5) 保护逻辑和触发系统应比现役核电厂简化;
- 6) 使用标准化部件以便于运行和维修;
- 7) 设计应简化建造过程。

### 1.2.2 设计裕量

设计裕量是在满足安全监管要求的前提下,通过对系统及部件设计设置一定的裕量,保证电厂具有必要的容错能力并优化电厂经济性。

### 1.2.3 纵深防御

华龙技术电厂的基本安全目标是建立并保持对放射性危害的有效防御,以保护人与环境免受放射性危害。为此,华龙技术电厂采取以下措施:

- 1) 控制在运行状态下对人员的辐射照射和放射性物质向环境的释放;
- 2) 限制导致华龙技术电厂反应堆堆芯、乏燃料、放射性废物或任何其它放射源失控事件发生的可能性;
- 3) 如果上述事件发生,减轻这些事件产生的后果。

华龙技术电厂应用纵深防御概念以防止电厂发生事故和减轻事故后果。纵深防御概念贯彻于华龙技术电厂安全有关的全部活动,涉及电厂各种功率及停堆状态下有关的组织、人员行为或设计,以保证这些活动均置于各种独立的、不同层次措施的防御之下。纵深防御(DiD)分为5个层次,分别是:

- a. 第1层次(DiD-1)通过按照恰当的质量水平和经验证的工程实践正确并保守地设计华龙技术电厂,防止华龙技术电厂偏离正常运行及防止安全物项的失效;
- b. 第2层次(DiD-2)通过检测和控制偏离正常运行状态,以防止预计运行事件升级为事故工况;
- c. 第3层次(DiD-3)通过固有安全特性、专设安全设施、安全系统和规程防止造成反应堆堆芯损伤或需要采取场外干预措施的放射性释放,并能使华龙技术电厂回到安全状态;
- d. 第4层次(DiD-4)通过控制事故进展和减轻严重事故的后果来减轻第三层次纵深防御失效所导致的事故后果。这要求可能导致早期放射性释放或者大量放射性释放的事件序列被实际消除;
- e. 第5层次(DiD-5)通过配备适当的应急设施及场内、场外应急响应计划和响应程序减轻可能由事故工况引起潜在的放射性物质释放造成的放射性后果。

### 1.2.4 能动与非能动结合

华龙技术电厂安全系统采用能动与非能动相结合的设计理念,以实现多样性原则下的优势互补,提高可靠性,保证华龙技术电厂的长期安全运行和应对各种事故工况。

能动系统是指利用能动部件的系统。能动部件是依靠触发、机械运动或动力源等外部输入而执行功能的部件。

非能动系统是指利用非能动部件的系统。主要依赖于自然力。非能动部件不依靠触发、机械运动或动力源等外部输入而执行功能的部件。

在能动与非能动相结合的设计时,须明确两者的功能定位与衔接关系,充分考虑二者的配合关系。

### 1.2.5 人因

华龙技术电厂在设计过程初期就必须在系统、设施、设备设计时采用系统性方法考虑人因工程设计（包括人机接口），并贯彻于设计全过程。设计应在如下方面考虑人因：

- 1) 操纵员的监测、控制和保护功能；
- 2) 在所有运行工况下，华龙技术电厂工作人员应执行的监测和诊断功能；
- 3) 维修人员的检查、在线和离线监测试验、预防性维修和纠正性维修功能。

为实现人因原则，尤其人机接口的人因原则，人机接口在设计初期由具有运行、维修经验的人员和人因工程专家参与尤其重要。通过搭建模型仿真、模拟机等仿真环境，开展MOCK-UP设计验证活动。同时为最小化人因失误，应在设计时充分考虑在运核电厂的运行和维修经验反馈。

主控制室人机接口应基于DCS现代的数字化技术，特别在华龙技术电厂的先进主控制室设计中，采用先进的控制理念，人机接口设计整合显示、报警、规程和控制器为操纵员提供一个简洁的工作站。

### 1.2.6 设计基准和安全裕量的平衡

华龙技术电厂遵循安全监管部门制定的安全设计基准，其中包括设计基准工况（DBC）和设计扩展工况（DEC）的设计和评价方法及其对应的验收准则。DBC要求采用保守假设和计算方法，应假设非安全级系统失效，采用安全级防护系统，并采用包络计算方法，满足单一故障准则等。DEC可以采用现实假设和最佳估算法，采用附加的用于设计扩展工况的安全设施，不必满足单一故障准则。另外，为了增强电厂应对事故的能力以及运行的灵活性，可以提出额外的安全裕量要求，以实现电厂安全性与经济性的平衡，达到最佳的社会效益。

### 1.2.7 审评经验反馈

审评经验反馈的目的是保证执照申请的高度有效性，建议说明执照申请过程中未能及时解决的条件或共性安全问题，例如环境影响评价报告（EIR）、安全分析报告（SAR）和建造许可证（CP）条件等。同时，HRD与现行有效的核安全法规的要求应保持一致，可以参考如下建议：

- 1) 1安全监管部门审查HRD，提供咨询意见，确认HRD的有效性。对于不符合核安全法规的要求提出修改要求；
- 2) 在监管要求过去不明确或仍在发展的领域，HRD可提出具体要求进行补充；
- 3) HRD的设计要求应明确是否满足或超过适用的HAF/HAD。此外，设计者做出的设计应符合适用的相关HAD，或其它可替代导则类文件。

HRD的内容和HAF/HAD都在不断演变。修订后的HRD提供了监管范围内需要突出和强调的要素。HRD还提供了许多处于监管范围之外但行业上有需求的内容。

### 1.2.8 标准化

华龙技术电厂的标准化设计和历史上的个性化都很重要。因此，通过HRD建立了技术基础以指导标准化的详细设计。HRD足够详细地说明了华龙技术电厂的主要特征，更程度地实现标准化。真正和持续标准化的重要步骤就是开发行业内和安全监管部门都认可的技术要求。这个步骤通过法规对标准化进行重要补充，因为法规提供了设计者、潜在用户和安全监管部门标准化设计决策的承诺。

### 1.2.9 应用成熟技术

华龙技术电厂在整个电厂采用已验证的技术，包括系统和部件设计、可维修性和可运行

性以及建造技术，目的是利用现有压水堆的丰富经验，最大限度地降低对用户的风险，确保可靠性，对进度和成本进行控制，并确保不需要建设原型电厂。

华龙技术电厂设计将充分借鉴在运核电厂运行经验，详细研究良好经验、重大事件和意外停堆，并在华龙核技术电厂设计中体现。

华龙核技术电厂仍积极使用先进的技术。当引入未经验证的设计或设施，或存在偏离已有工程实践的情况时，将借助适当的支持性研究计划、特定验收准则的性能试验，或通过其他相关应用中获得的运行经验的检验，来证明其安全性是合适的。新的设计、设施或实践必须在投入使用前经过充分的试验，并在使用中进行监测，以验证达到了预期效果。

#### 1.2.10 可维修性

华龙技术电厂在设计之初就应秉承着在整个寿命期内易于维修的理念，即采用标准化部件、设计高可靠性设备、减少设备维修工作量、减少职业暴露，以及满足现有的维修需求，在全寿期内进行设备和系统检查、测试、维修和更换等支持性活动，确保提供足够的通道、存放空间、工具和服务，这也是华龙技术电厂基本设计的一部分。维修需求还包括对维护活动环境的考虑。在可维修性需求以及其它要求（如可施工性和设计裕度）方面，预计华龙技术电厂每千瓦时将比现有轻水堆有更多利润空间。

华龙技术电厂高可靠性的发电期望需要高可靠性的设备支撑。通过早期的核电厂发现，只有通过某种系统性过程来处理各种设备可靠性问题，电厂才能高可靠、高水平地持续运行发电，高可靠性发电支持高水平的核安全性能。在关键和重要部件的设计、采购、储存、建造和测试过程中应关注和加强设备可靠性，建立和维护一个功能强大的华龙技术电厂可靠性设计大纲来实现高发电可靠性至关重要。

#### 1.2.11 质量保证

华龙技术电厂必须制定和实施描述华龙技术电厂的管理、执行和评价的总体安排的质量保证大纲。大纲包括保证华龙技术电厂的每个构筑物、系统和部件以及总体设计质量的措施，包括确定和纠正设计缺陷、检验设计的恰当性和控制设计变更的措施。

华龙技术电厂设计包括变更、修改或安全改进，必须按照合适的工程规范和标准所确定的程序进行，并必须体现适用的要求和设计基准，必须确定和控制设计接口。

华龙技术电厂设计（包括设计手段和设计输入与输出）的恰当与否，必须由原先从事此工作的人员以外的个人或团体进行验证和确认。在设计和建造过程中应尽早完成验证、确认和批准，最迟不晚于首次装料。

#### 1.2.12 经济性

华龙技术电厂的经济性原则如下：

- 1) 在满足本 HRD 的安全原则前提下，尽可能降低发电成本；
- 2) 发电成本和上网电价具有市场竞争力，以抵消较高的投资风险；
- 3) 对成本风险因素进行量化处理，以确保对发电成本的有效控制；
- 4) 经济评价体系采用《核电厂建设项目经济评价方法》（NB/T 20048-2011）。

#### 1.2.13 实物保护

华龙技术电厂的安防系统包含出入口控制，入侵探测，安保组织管理，以及安防程序和响应力量的能力，安防设计应综合最终华龙技术电厂布置，安全系统隔离和建筑设计，使华龙技术电厂的安防设计能满足要求。

华龙技术电厂蓄意破坏的防护原则需要从设计初始提供如下内容：

- 1) 蓄意破坏的防护总体设计应综合考虑安全性, 可操作性和经济性;
- 2) 具有防止蓄意破坏的能力和延迟蓄意破坏行动的能力;
- 3) 电厂安防系统设计防止蓄意破坏。

电厂的安防系统包含出入口控制, 入侵探测, 安保组织管理, 以及安防程序和响应力量的能力, 安防设计应综合最终华龙技术电厂布置和建筑设计, 防蓄意破坏的延迟能力可通过利用电厂布置和建筑设计, 使华龙技术电厂的安防设计能满足要求。

#### 1.2.14 环境友好

华龙技术电厂环境友好原则包括如下三个方面:

- 1) 华龙技术电厂对周围环境及人群应是友好的, 为实现该策略, 应采取具体要求以限制正常运行时的放射性释放, 对固态放射性废物的产生量、液态及气态放射性物质的释放量进行限制。此外, 有害化学废物的释放也应满足法律法规及标准的要求;
- 2) 华龙技术电厂应造福当地社会, 通过安全运行、经济贡献、低成本的服务、无干扰的应急计划、良好的建筑设计、以及上面提到的正常运行废物限制等方面的要求来达到该目标;
- 3) 华龙技术电厂设计应保证事故工况下放射性释放后果的控制。

### 1.3 顶层要求

本章论述了顶层设计要求的摘要。顶层要求按照功能划分为: 安全、性能、可建造性和设计过程。

#### 1.4 安全性

电厂的安全性通过满足安全设计要求实现, 安全设计要求包括通用要求和华龙技术电厂要求。其中通用要求与纵深防御的五个层次相适应, 华龙技术电厂要求给出华龙技术电厂的特有安全设计要求。

##### 1.4.1.1 通用要求

###### 1.4.1.1.1 防止偏离正常运行及防止安全重要物项的故障

防止偏离正常运行及防止安全重要物项的故障是第一层级要求, 该层级要求:

- 1) 如第1.2章指导原则所述的简化原则应重点关注;
- 2) 设计应留有充足的裕量, 以保华龙技术电厂更稳定和可靠, 包括:
  - a. 燃料设计留有 15% 的热工裕量;
  - b. 采用大的稳压器和蒸汽发生器二次侧的水装量;
  - c. 压力容器最大出口温度不超过 330℃。
- 3) 安全停堆地震 (SSE) 不低于 0.2g, 并根据厂址地震条件适当提高设计限值;
- 4) 反应堆设计应保证在所有工况下功率反应性系数为负;
- 5) 根据在役轻水堆电厂的大量运行经验, 选择使用最佳材料和水化学条件;
- 6) 正确并保守地维修和运行电厂;
- 7) 充分利用成熟的电厂运行方式和运行经验。

###### 1.4.1.1.2 防止事故发生

通过检测和控制偏离正常运行状态, 以防止预计运行事件升级为事故工况。要求如下:

- 1) 设置特定的系统和设施, 通过安全分析确认其有效性, 并制定运行规程以防



- 止始发事件的发生，或尽量减小其造成的后果，使华龙技术电厂回到安全状态；
- 2) 使用先进的人机接口系统，尽可能保证正常运行期间无差错，并能快速精确地诊断偏离正常运行；
  - 3) 使用成熟的诊断监测技术来监测泄漏、振动和其它潜在问题，以减小重要转动设备和高压系统失效的可能；
  - 4) 出于保护投资，操纵员应有足够的时间（第一个关键信号后30分钟或更长时间）采取动作来阻止设备损坏或阻止可能导致严重故障的华龙技术电厂工况。

#### 1.4.1.1.3 防止堆芯损坏

防止堆芯损坏是第三层级要求，要求如下：

- 1) 设计者应提供有助于预防堆芯核乏燃料组件损坏的事故管理技术基础，包括从设计和厂址两方面考虑的可信内外部事件清单中选取可信最不利组合的逻辑；
- 2) 设计者应最大限度地考虑反应堆核乏燃料水池冷却和补水设备可用。这些特别考虑包括冷却和补水设备标高和位置的多样化，以及冷却和补水水源的多样化。当常设设备或水源因故障不可用时，应能提供便捷的可替代临时设施，能够实现不同列/分区间的手动交叉连接；
- 3) 设计者应最大限度地考虑交/直流电源系统或设备可用。这些特别考虑包括交/直流电源系统标高和位置地多样化。当常设电源系统因故障不可用时，应能提供便捷的可替代临时设施，能够实现不同列/分区间的手动交叉连接；
- 4) 华龙技术电厂安全系统设计和分析以及安全系统对管理要求的瞬态和事故的响应必须满足适用的核安全监管要求；
- 5) 操纵员的角色，应在偏离正常运行事件中作为聪明的监督者。华龙技术电厂设计应给操纵员足够的时间判断电厂状态并决定采取何种操作。设计应保证任何时候都不会闭锁操纵员的操作。然而，华龙技术电厂设计应保证只要有有效的安全系统触发信号存在，操纵员就不能无视安全系统功能；
- 6) 出于保护投资，需增强应对比设计基准事故更严重的或包含多重故障的事故的承受能力，避免不可接受的放射性后果，以进一步改进华龙技术电厂的安全性。设计必须考虑这些DEC来确定额外的事故假设，并针对这类事故制定切实可行的预防和缓解措施；
- 7) 主控室操纵员应当知道华龙技术电厂在正常、异常和假定的DEC下所有堆芯冷却模式的状态，并在需要时将这些状态信息提供给应急响应决策人员。厂内工作人员应当知道如何启动每一个堆芯冷却模式。；
- 8) 设计应使用概率安全评价（PSA）方法评价平均每年的堆芯损坏频率，并经设计者确认该频率小于 $1 \times 10^{-5}$ /堆·年，包括内部事件和外部事件。PSA应作为详细设计的一部分，作为设计人员识别和解决任何潜在的堆芯损坏和风险薄弱点的一种工具。PSA应为编制和确定华龙技术电厂技术规格书、应急规程导则以及维修优先级提供参考；
- 9) 作为PSA的一部分，设计者应定义技术基准，以允许业主保证在华龙技术电厂整个寿期内，能够维持高风险系统、结构和部件的设计可靠性，满足关键的PSA假设。

#### 1.4.1.1.4 限制裂变产物释放

限制裂变产物释放是第四层级安全要求，其设计要求应满足我国核安全法规和标准要求。这些设计要求包括：

- 1) 严重事故预防核缓解措施研究设计人员应对严重事故进程核严重事故现象有深刻的认识。燃料丧失完整性和形成堆芯熔融物不可接受，因此要求华龙技术电厂配备可靠的、时间敏感的安全相关系统和严重事故预防缓解系统；
- 2) 在电厂设计中应尽早确定严重事故应对策略（例如规程），同时不断发展PSA，应用于系统和核电厂优化，以提高华龙技术电厂安全和缓解行动的坚实性和及时性；
- 3) 华龙技术电厂设计应具备高可靠性的反应堆冷却能力，应提供具有多样化运输方式的多样化冷源，并在设计中考考虑悬浮的碎屑和固体对流动通道的影响；
- 4) 安全壳厂房应设计得坚固、自由容积足够大并配套相应的安全壳系统，用于热量排出和裂变产物滞留。安全壳设计压力应基于最极限的冷却剂丧失事故或蒸汽管道破裂事故；
- 5) 事故源项分析采用NB/T 20444-2017RK，在适用的情况下应采用NUREG-1465或更先进的分析方法；
- 6) 华龙技术电厂应控制安全壳内氢气浓度，保证在可燃气体控制系统可用情况下安全壳内的可燃气体浓度在燃料包壳活性段区域完全氧化产生氢气时不会超过10%，使用最佳方法估算压力容器内和压力容器外共同产生的氢气总量，并证明满足严重事故缓解要求；
- 7) 应提供措施以防止安全壳内和/或其他厂房内不可控的氢气聚集；
- 8) 通过工程措施预防可能同时出现或导致安全壳失效的（如安全壳旁通和安全壳直接加热序列）堆芯熔化序列，使这些序列出现概率极小；
- 9) 确保安全壳完整性的安全壳系统的部件（如安全壳隔离阀）是冗余的，并与失效会导致堆芯损坏的系统完全独立，这样可以避免引起共因失效的薄弱环节；
- 10) 应PSA评估严重事故风险，证明二级PSA分析中总的放射性大量释放频率小于 $1 \times 10^{-6}$ /堆·年，且DEC-B的放射性后果满足《“华龙技术电厂”融合方案核电项目核安全审评原则》相关限值要求；
- 11) 临时存放区、通往厂区入口路径、厂区入口、主要通道、路径和使用点应能适应预留设备的移动和使用，这些设备在DEC-B策略和程序中应保证可信。迅速进入首选和备用设备的使用地点对事故缓解响应至关重要；
- 12) 设计应确保所用的标准机械和电气接口与厂内和厂外预先部署的DEC缓解设备（移动电源、移动水源等）是兼容的；
- 13) 设计中应做好准备，为预先准备的泵和备用水源提供可达、简单和冗余的连接点，这些泵和水源在DEC策略和规程中应保证可信；
- 14) 设计中应做好准备，为预先准备的电源提供可达、简单和冗余的连接点，这些电源在DEC策略和规程中是可信的。

#### 1.4.1.1.5 场内、场外应急

场内、场外应急为安全原则的第五层级，目的是减轻可能由事故工况引起的潜在放射性释放造成的放射性后果。该层次要求配备恰当的应急设施，制定用于场内、场外应急响应的应急计划和应急程序。

#### 1.4.1.2 华龙技术电厂要求

以下是对于华龙技术电厂的顶层安全要求：

- 1) 安全系统相对于现有华龙技术电厂尽量简化，降低复杂度，可以采用全新设计方案，包括能动与非能动技术，尽量减少能动设备的数量。安全系统还应借鉴

在运华龙技术电厂的运行经验；

- 2) 至少应从电网引入两路相互独立的交流电源，以降低丧失厂外电的影响；
- 3) 应在现有华龙技术电厂的基础上增加操纵员的反应时间。如果发生事故，操纵员不干预时间应不小于30分钟；
- 4) 丧失所有给水后，在没有操纵员动作的情况下，应保证至少2小时内不出现燃料损坏；
- 5) 华龙技术电厂应能承受丧失厂外和厂内交流电源8小时，而不会导致燃料损坏；
- 6) 除了为每个安全系列提供一个独立的、安全相关的厂内交流电源外，华龙技术电厂设计中还应提供一个厂内交流电源来降低全厂断电（SBO）的风险；
- 7) 安全壳系统的设计应保证满足体积泄漏率不高于0.3%每天的泄漏限值。

#### 1.4.2 经济性

本文件要求确保华龙技术电厂的发电成本与当前国内外主流三代堆型相比具有竞争力。

#### 1.4.3 性能

华龙技术电厂性能设计要求被归纳为五类。第一类规定了华龙技术电厂特性的要求，例如功率和设计寿命。第二类规定了机动和瞬态响应要求，例如启堆、停堆和负荷跟踪要求。第三类是可靠性和可用率要求。第四类是运行、维修和试验要求。第五类是人机接口系统要求。

##### 1.4.3.1 华龙技术电厂特性

本章所述华龙技术电厂特性具体如下：

- 1) 华龙技术电厂要求适用于一个较宽的电厂规模范围，约1200MWe；
- 2) 设计应保证可以运行60年。在该寿期内，应考虑部件更换，同时应进行数据采集和分析以支持材料的设计寿命，并且应重点关注相关材料问题，如疲劳、腐蚀、热老化和辐照脆化效应；
- 3) 华龙技术电厂应具有在18个月换料周期（从换料后启动到下一个换料后启动）下运行的能力；
- 4) 燃料的机械设计应保证组件的平均燃耗至少为52000MWd/tU；
- 5) 由于制造缺陷导致的早期燃料失效率应小于1/50000；
- 6) 放射性废物和水处理系统、电厂屏蔽设计基准使用的燃料破损率应与监管要求保持一致。评价正常运行的性能时，燃料元件破损率取0.25%；
- 7) 设计和建造应保证电厂排出的放射性气体、液体废物量不大于中国在役的同类型电站。放射性废物离堆处理，待处置固体废物年产生量小于50m<sup>3</sup>/堆·年，厂内贮存量应至少能满足6个月的贮存量，按最大产生率算的放射性固体废物总量；
- 8) 湿法贮存容量应能确保贮存电厂运行10个燃料循环卸出的乏燃料并外加一个堆芯的卸料；
- 9) 在华龙技术电厂整个运行寿期内平均职业辐照剂量小于0.6人·Sv/堆·年。

##### 1.4.3.2 机动和瞬态响应要求

华龙技术电厂机动和瞬态响应要求如下：

- 1) 有能力在24小时内完成从温度低于60℃的正常冷停堆状态过渡到热备用状态（此时一回路的压力和温度都达到电厂功率运行所对应水平）。同样地，电厂具备

在24小时内从热备用状态冷却到冷却剂温度低于60°C的正常冷停堆状态；

- 2) 应具有负荷跟踪能力：当机组运行于50%~100%FP之间的任一功率水平时，在前85%燃料循环长度中，能进行功率变化形式为12-3-6-3的日负荷跟踪，即反应堆在12小时满功率运行后在3小时内功率线性变化到50%满功率，在50%满功率运行6小时后在3小时内功率线性增大到满功率水平；
- 3) 设计应可以远程控制负荷跟踪；
- 4) 设计应允许电网正常的频率控制；
- 5) 应允许发电机从100%或较低功率甩负荷，而不会导致反应堆停堆或汽轮机停机，不会触发主蒸汽安全阀，并且可以在最小厂用电负荷下继续稳定运行。

#### 1.4.3.3 可靠性和可利用率要求

华龙技术电厂可靠性和可利用率要求如下：

全寿期均摊到每年平均可利用率不低于 90%，其中：

- 1) 重大部件更换时间为全寿期电厂计划停堆250天；
- 2) 基于设备可靠性的非计划自动停堆次数小于1次/年；
- 3) 非计划停堆时间平均5天/年；
- 4) 除了重大部件更换时间和非计划停堆时间外，剩余的不可用时间为计划停堆时间。

#### 1.4.3.4 运行、维修和试验要求

华龙技术电厂运行、维修和试验要求如下：

- 1) 应通过采取相关措施保证电厂运行的简便性，如在检测、控制和保护功能中使用现代数字技术、对异常工况的准确响应、设计裕量和考虑操纵员工作环境；
- 2) 应考虑对在役电厂存在的运行和维修问题进行识别和提供解决方案；
- 3) 为了满足简化要求，应通过标准化来尽量减少设备类型，如阀门、泵、仪表和电气设备，除了需采用多样性来防止共因故障的那些设备；
- 4) 应在保证设计可利用率限值的前提下使得更换设备更为便利，包括蒸汽发生器等主要设备；
- 5) 设备设计应减少和简化维修需求，并尽可能使维修便捷；
- 6) 系统布置应考虑维修地需要，如进入通道、移动空间、堆放空间和重物吊装；
- 7) 应保证设备维修和试验环境满足工作条件，包括温度、剂量、通风和照明；
- 8) 应采取相关措施以便于使用机器人进行电厂维修活动。这些措施包括提供便于移动的布置空间、进入设备必要的进口、机器人通讯以及机器人储存和去污；
- 9) 监督试验的设计应能够简单直接地测量系统设计基准性能参数，这些参数应尽量为电厂功率运行时所需要的参数，以避免在计划停堆时期内增加任务。机械和电气系统设计应避免引起电厂停堆。电厂设备和布置应使检查试验便捷和简单。适当情况下，可以延长两次任务之间允许的时间间隔。如果是必须在大修期间执行的监督任务，则设计应确保试验不会成为大修的关键路径；
- 10) 安全系统的保护系统和控制系统的设计应保证：
  - a. 一个保护通道试验或旁通时（由于故障或其它原因），电厂仍然能以满功率长期安全运行；
  - b. 一个继发的单一故障不会导致电厂停堆；
  - c. 相对于现役电厂，人机接口系统的试验和维修应大幅简化。例如，应提供自检

功能，试验应根据实际情况尽可能自动化。

#### 1.4.3.5 人机接口和系统要求

华龙技术电厂的人机接口系统顶层要求如下：

- 1) 人机接口系统应使用现代数字技术，包括光纤技术，用于监测、控制和保护功能。适当情况下，现代数字通信可用于任何功能，包括安全功能，并可降低整个电厂电缆敷设的成本和复杂性；
- 2) 现有的监管要求规定安全和保护系统必须分组并且进行隔离。此外，对于华龙技术电厂主要的控制和监测功能，人机接口系统应采用以下措施来提高可靠性，将主要功能进行分组、组内冗余设备隔离并采用容错设备。防止故障在冗余设备之间传递或从一个分组传递到另一个分组。人机接口系统应保证“正常”故障发生时允许华龙技术电厂根据实际情况继续运行；
- 3) 仪控系统设计应与华龙技术电厂设计的其它部分充分的结合。仪控系统设计应与电厂其它设计进行反复迭代，并使用实体模型（mock-ups）、动态模拟以及在设计中纳入运行和维护人员提供的输入；
- 4) 主控室设计应保证任何运行模式下指定数量操纵员（2人或3人）都可以操纵华龙技术电厂。应有足够的空间和适当的布置保证最多可以容纳10人。设计应保证正常功率运行时，一个操纵员可以控制华龙技术电厂；
- 5) 主控室应包含紧凑、冗余的操纵员工作站和控制设备，带有多个显示和控制装置，提供对警报、显示器和控制装置的有序、分层访问。每一台工作站都能够执行主控室的所有功能，并且可以支持操纵员的工作。主控室还包括一台机组长工作站；
- 6) 主控室应使用现代化显示器，以提供优化的信息跟踪功能、有效数据、报警优先级和监控，以及具有嵌入式动态指示和报警信息的正常、异常和应急操作操作规程。此外，应广泛使用数据管理和计算机辅助设计(CAD)技术，以适当的详细程度显示设备信息，并更新设备状态指示；
- 7) 主控室应包括大型、直立、空间专用大屏幕，该大屏幕提供一体化集成的设备模拟，指示设备状态、设备参数和高级警报；
- 8) 主控室和控制站环境，如照明水平、供暖、通风和空调（HVAC）、噪声级、颜色等，应提供舒适、专业的环境氛围，以提高操纵员的效率和警觉性；
- 9) 就地和独立控制系统的设计应与主控室系统一样严格，并使用一致的标签和术语。需要特别注意的是可见性、颜色编码、模拟的使用、入口、照明和通信；
- 10) 应为华龙技术电厂建造和运营提供全厂范围内的一体化通信系统。

#### 1.4.4 可建造性

华龙技术电厂的可建造性要求包含如下方面：建造周期和设计进度要求、建造和设计协调、先进建造技术、一体化建造计划和进度、确保建造适宜性的检查、试验和分析。

##### 1.4.4.1 设计完成度要求

1.4.4.2 结构混凝土开始浇灌前，应完成工程设计文件，包括厂址详细设计文件，以便用于建造、采购或其它用途。应完成用于提供给供应商开展相关设计文件的接口资料。建造和设计协调

1.4.4.3 建造人员应参与设计过程，以保证建造要求得到充分落实。设计过程中应明确考虑简化、便利建造和调试的设计规定。应采用标准化的组件尺寸、类型和安装接口，以提

高生产率，减少材料种类。应规定合理的建造误差，以减少不必要的返工，提高生产率。应对以往建造问题的经验进行总结，确保在新的设计和建造过程中应用这些经验。先进建造技术

应在仪表和控制系统中广泛应用多路技术，以减少电气接线槽和电缆拉线。建议将成套设备和结构部件模块化，采用模块化时应预留空间用于维修、试验。

#### 1.4.4.4 一体化建造计划和进度

建造开始前，设计方、建造方和调试方应利用主要供应商和分包商的输入信息联合制定一份详细的现场建造计划，确定总体方案，并建立制定和评价进度的基准。应联合制定详细的进度，包括设计、采购、建造和启动调试、业主的验收。启动调试要求中，应建立系统移交顺序和进度的逻辑，包括定义系统边界、建立系统编号和确保按时移交要求。

应使用适用于特定活动（如焊缝的数量、电缆的长度）的定量方法来监督建造进度，从而及时作出进度评估，并预估进度拖延，确保能够及时采取适当的行动解决问题，保证进度里程碑的实现。进度应随着建造进度进行更新，以真实反映实际的建造状态。

#### 1.4.4.5 确保建造适宜性和检查、试验和分析

设计者应制定试验、监督和分析计划以及相应的验收准则，以证明电厂建造和运营满足相关法律、法规要求，并提供相应的技术基准。验收准则的内容和详细程度应保证监管方可以验证是否满足验收准则。

施工单位应制定材料采购程序并确认分承包活动，包括分合同包、投标、裁决和分合同的行政管理。

#### 1.4.5 设计过程

本章节提出了华龙技术电厂的设计过程要求。该设计过程包括各种活动，例如：开发、试验、分析、技术规格书和图纸的准备、建模、报告编制、执照申请、建造、以及电厂启动和向运行人员的移交。顶层设计过程要求分为四方面内容：设计一体化、技术状态管理、信息管理系统和工程验证。

##### 1.4.5.1 设计一体化

早期对华龙技术电厂设计重要的所有因素进行综合和成套，已经表明可以改善电厂整个寿期内的费用，减少计划停机时间。设计单位应使项目作为一个单一、完整的过程来管理，设计单位有责任将这些要求转化为在所有设计过程中各方都应遵循的专门要求和程序。设计单位应为电厂中的每一个系统或子系统制定一个顶层设计准则，该顶层设计准则文件应足够完备，以便能够从顶层设计要求开发出合格的设计和评价竣工电厂。各专业间的设计审查应贯穿于整个设计和建造的过程之中。设计单位应提供一个模拟机/性能模型，在研究电厂响应，电厂控制和控制室设计的人因工程方面，以及开电厂的正常、异常和事故运行程序方面，模拟机可以作为设计工具使用。

##### 1.4.5.2 技术状态管理

设计单位应制定一套综合的技术状态管理程序以确保电厂结构、系统、部件和计算机软件满足已确认的设计要求。实施技术状态管理的目的是在华龙技术电厂的设计要求、物项技术状态和技术状态信息之间建立三者的一致性，在华龙技术电厂寿期内，特别是在产生技术状态变更时保持这种一致性，并在电厂全寿期内确保设计基准得到维护。

设计和建造阶段的目标重点是实现三者之间的一致性，是通过设计建造过程，逐步形成

三者一致性的过程。

技术状态管理程序应适用于电厂整个寿期，包括设计阶段，并应提供给业主在调试和运行中使用。技术状态管理程序包括如下要素：

- 1) 用于控制及保证设计基准文件使用的方法；
- 2) 用于确保所有硬件和软件设计满足设计基准文件的验证方法；
- 3) 变更控制方法：确保初始设计的所有变更得到相应级别的设计单位和业主审批，并用文件记录，在电厂整个寿期内进行保存；
- 4) 确保程序数据收集、更新、修改、传播和安全的验证过程和审计过程；
- 5) 技术状态管理程序和数据的定期审计和审查。

#### 1.4.5.3 信息管理系统

设计单位应在设计过程中使用适当的计算机硬件和软件建立、管理和运营信息管理系统(IMS)，并将其移交给业主，以供建造、调试和运营时使用。应提供一个有效的方法来获得、贮存、检索和使用文件和数据（包括分析结果），对设计、建造、启动、运行和维修电厂，这些文件和数据是必需的。应在设计和建造期间，以及将电厂移交给运行单位以后，有效的使用计算机辅助设计和进行工程管理。应保证建造和运行所需的信息都贮存在信息管理系统中，并且在电厂被移交给电厂业主后是可用的。

#### 1.4.5.4 工程验证

作为设计过程的一部分，设计单位应确定并完成必要的工程现场验证活动，以证实该装置的适当性。这些工程验证是除了建造工作的正常质量控制验证以外的活动。适用下列专门的要求：

- 1) 建造早期就应确定工程验证活动并安排进度；
- 2) 工程验证活动应包括地震检测以验证概率安全分析（PSA）中所有主要的假设；
- 3) 应尽实际可能包括可以减少建造过程中工程验证的复杂度和范围的规定。必须进行验证的地方，设计者应制定大纲，包括检测目标和范围、评价过程以及不满足设计目的的项目的解决过程。

### 1.5 应用说明

#### 1.5.1 概述

本节的目的是对华龙技术电厂如何实施进行定义，并讨论实施的合理情景。实施包括电厂的详细设计、认证、执照申请、施工等各个过程。对实施情景的讨论则涵盖关于时间、建设电厂需求、利益相关方以及监管者的假设。

#### 1.5.2 用户要求在应用中的作用

HRD 在实施情景中有四个基本作用：为完成详细设计提供输入、为监管要求的提供支持、为供应商的产品验收提供要求、用于标准化电厂的设计和执照申请。

- 1) 为完成详细设计提供输入，HRD的第一个作用是作为业主的技术要求，为标准化电厂的详细设计提供输入。
- 2) 制定稳定的监管支持，华龙技术电厂应在以下四个方面建立应对监管要求的支持：
  - a. 执照申请问题的解决；
  - b. 法规要求优化；

- c. 确定可接受的严重事故预防措施；
- d. 实现满足法规要求的设计。
  - 3) 为供应商的产品验收提供一套标准化的技术要求。供应商应尽力达到这些要求，因为HRD可以建立应对监管要求的支撑，也因为这些要求反映了具有核电运行经验的电力行业需求。
  - 4) 用于标准化电站的设计和执照申请。投资者均希望所投资的设计具有执照申请的保障。

### 1.5.3 首堆应用实施

尽管所有的机组都是标准化华龙技术电厂是最理想状态，但是必须认识到过去的监管倾向和公众参与造成每一期华龙技术电厂都会有一定差别，首堆可以作为设计基础，即参考电厂。HRD有必要考虑确保首个华龙核电机组项目的落地规定讨论如下。

首先，对于首个华龙技术电厂的建设和未来的运行，投资信心必须有很强，投资风险必须最小。为了获得最强的投资信心，需满足如下要求：

- 1) 提供非常可信的执照申请保证要求。这些要求包括以上描述取得监管稳定性的4个行动和从安全监管部门运行许可授权的大量轻水堆重要经验基础；
- 2) 提供有效的无重大问题和延误的电厂建造要求。这通过易于建造的设计方案、较短的建造计划、开工前完成90%设计以及明确使用最新、成熟的建造技术（例如模块化）；
- 3) 提供很高的可用率，结合国内现有核电厂很多堆年的运行经验。

其次，必须论证没有原型电厂的商业和管理可行性。不建议将设计、建造和原型电厂获取的重要经验（包括时间和费用等）有意作为近期（例如 5-10 年）建设的商业选项。HRD的原则是使用无原型电厂成熟技术来达到华龙技术电厂的可行性。

### 1.5.4 实施条件

为满足华龙技术电厂未来发展，进行以下假设：

- 1) 电力需求和政策环境方面，《巴黎气候协定》致力于全球低碳社会建设，核电是化石能源的重要替代。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》规划了每年开工5-6台核电机组，目前已接近尾声。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划纲要》的发布迫在眉睫，电力需求和政策环境都有较好预期。
- 2) 体制因素方面，我国电力具有一定的独立、公众参与和数据共享的体制特点，具体如下：
  - a. 架构独立性方面，中国的电力工业实行厂网分开。核电作为电力的重要选择，由各相关企业分别进行设计、建造、调试和运行。核电的执照申请由国务院核安全监督管理部门负责，项目申请由国家发展改革部门报国务院核准后出具核准文件。核电首先应该开展初步可行性研究、可行性研究以获得项目核准。项目获核准文件后，必须向国务院核安全监督管理部门提交执照申请文件，例如安全分析报告和环境影响评价报告。公众参与方面，中国核电在选址、建造、调试、运行和退役阶段环境影响评价均需要按照我国法规标准开展公众参与活动。
  - b. 数据共享方面，中国核电运行阶段的数据，例如正常停堆、事故停堆和设备可靠性数据，应分层级在行业内进行共享，有利于经验反馈，促进行业发展。
  - 3) 监管架构方面，华龙技术电厂严格满足我国核安全法规规定的监管架构，接受安全审评，包括安全分析报告和环境影响评价报告的审评。



### 1.5.5 实施过程

为满足华龙技术电厂未来发展，假定以下实施方案：

- 1) 把握适当时机，华龙技术电厂项目应安排在不受国家政策或额外的执照申请要求限制的时期前后。
- 2) 安全监管部门审查了HRD并提出了咨询意见。这表明华龙技术电厂的稳定监管基础已经成功。HRD将与安全分析报告一起，形成执照申请基础。
- 3) 华龙技术电厂落地在具体项目后，应该按照执照申请要求，提交《初步安全分析》和《环境影响评价报告》以及支持性材料，获得安全监管当局认可。
- 4) 全范围的标准电厂设计。
  - a. 华龙技术电厂在首次开工前，投资方应该完成项目组建和资金全部到位。资金期待着在两个阶段注入：
    - 明确厂址、标准电厂设计和执照申请；
    - 建造。
  - b. 标准电厂早期设计有如下重要步骤：
    - 投资方可以选择华龙核电技术作为可长远发展的设计，然后启动详细工程直至完工。详细工程假定在华龙技术电厂完成大部分施工图设计的基础上再需要 30 个月。尽管大量的启动资金来源于第二阶段投资（设备制造和建造），本阶段仍然是一个重要的阶段。它的花费并非都是工程，也包括了华龙技术电厂设备的采购。采购活动必须在设备工程能够结束以及可信地在华龙技术电厂设计中采用的那一点进行。某些情况下，这要求实际地订购材料，特别是在建设计划中必须早点安装地长周期材料。提前采购假定在里程碑“浇筑第一罐混凝土”前 30 个月启动；
    - 厂址选择和评审。第一个华龙技术电厂按照有关核安全法规进行选择、评审和执照申请。厂址选择获得评审通过后促进了最短的总进度，可以分别开展建造和运行的准备活动。从执照申请承诺到商业运行的时长可以缩短大约 12 个月。能开展的有限的建造工作包括厂址准备、临时设施建造和主要的开挖。采用现有的厂址可以更加快捷地开展厂址选择和评审。
- 5) 执照申请方面，华龙技术电厂严格按照《中华人民共和国核安全法》《中华人民共和国民用核设施安全监督管理条例实施细则之一——核电厂安全许可证件的申请和颁发》（HAF001/01）等法律法规开展执照申请。
- 6) 建造进度要求方面，业主承诺在设计启动和厂址获批之后的12个月开工。在这一刻，华龙技术电厂的投资方必须承诺平衡完成施工图设计和建造的启动资金。这是一项很大的承诺，但是风险可以管控。建造周期从业主承诺算起到商业运行，可以满足72个月的顶层要求。

## 2 华龙核电技术要求

### 2.1 总体要求

#### 2.1.1 概述

用户要求文件提出的要求框架覆盖了所有华龙技术电厂核电厂。本文分为两个部分分别是通用要求和华龙技术电厂要求。

文件第一章对华龙技术电厂的指导原则和顶层设计要求进行了详细描述，覆盖了所有的华龙技术电厂核电厂。这些通用要求也是对整个核电厂设计最具影响力的要求，基于此构成了后面特定类型要求的基础。

本节主要介绍华龙技术电厂的总体要求，范围包括：安全设计、安全分级、性能设计、

结构设计、内外部灾害防护总原则、建造和可建造性、可运行性和可维修性、质量保证、执照申请、设计过程、部件监测、信息管理系统功能等方面的要求。本节为其余各节提出了电厂设计的总体框架。其余各节提供了保证电厂安全要求和性能的特定要求。

## 2.1.2 安全设计要求

### 2.1.2.1 概述

本节确定了华龙技术电厂安全设计的主要要求。华龙技术电厂对纵深防御要求包括五个层次：防止偏离正常运行及防止安全重要物项故障、防止事故发生、防止堆芯损坏、限制裂变产物释放、场内和场外应急。包括以下具体要求：提高华龙技术电厂抵御事故的能力，提高防止堆芯损坏的能力，或减轻不太可能发生的导致堆芯损坏的事故后果。

安全设计要求包括以下两方面：

满足核监管要求而必须分析的一系列事故、相关的边界条件和假设。对于设计基准工况分析，必须采用保守的、经核监管当局认可的计算方法和假设开展，或采用经核监管当局认可的最佳估算加不确定性分析方法开展，假设仅安全级设备可用，且满足安审的强制性可接受准则。对于发生多重失效的事故如ATWS和全厂断电事故，以及发生堆芯熔化的严重事故，可采用现实假设和最佳估算方法。严重事故预防引入监管政策层级的指导，在严重事故下提供更高的安全壳完整性和放射性物质低泄漏保障。

超出核监管最低要求的设计要求，这些要求提供额外的安全保障。这是在核电厂业主倡导下确定的，以加强投资保护和严重事故防护。加强投资保护强调了业主降低财政风险，同时通过提升事故预防以提高安全的愿望。相关分析可采用现实假设和最佳估算方法。

### 2.1.2.2 抗事故能力要求

华龙技术电厂的设计特征：利用专设安全设施来实现安全并保护电厂业主的投资，但同时还要尽可能减少对专设安全设施的依赖。应当简化专设安全设施，降低系统的复杂性，减少或避免执行安全功能时的再调整，以及尽量减少能动部件的数量。采用的设计特征详见以下各节。

#### 1) 简化

在华龙技术电厂的设计中应强调简化，以加强抗事故能力。

#### 2) 设计裕量

为了提高抗事故能力，华龙技术电厂的设计应留有足够的裕量。关键的设计裕量要求包括：

- a. 在极限功率参数情况下，电厂设计应有 15%热工裕量；
- b. 为运行瞬态提供更大裕量，如采用更大容量的反应堆压力容器、更大容量的稳压器、更大二次侧容量的蒸汽发生器、瞬态工况更长的响应时间等设计特征；
- c. 提供足够的裕量以减少超过运行限值和条件的可能性；
- d. 在正常运行范围和反应堆停堆整定值间提供足够裕量，使电厂可利用率达到预期目标。

#### 3) 材料和水化学

应基于核电厂广泛的运行经验，在设计中综合考虑安全性、可获得性、经济性、环境友好性等方面选用材料和水化学条件。

#### 4) 诊断性监测

- a. 在泄漏探测、震动和其它潜在问题中，采用经证明的诊断监测技术；
- b. 在设计和采购开始时，确定对设备运行、设备可靠性例行监测和诊断性监测的要求。

### 5) 反应性系数

反应堆的设计应在任何工况下反应性系数为负。

## 2.1.2.3 防止堆芯损坏的要求

防止堆芯损坏的要求主要应用于安全系统。

### 1) 通用要求

a. 核电厂设计者应定义并分析设计基准事件,核电厂的设计应适应这些设计基准事件。华龙技术电厂设计基准工况分析应表明:

- 在许可证申请中开展的设计基准事故分析满足核监管当局的准则;
- 设计特征足以保护电厂业主的投资。

b. 核电厂设计者应确定一整套安全有关的设计基准事件和瞬态,且此项工作应按在时间上符合进度安排的设计进程内尽早完成。

c. 对安全有关的设计基准事件和瞬态的任何改变均应论证。

d. 电厂设计者应开展最佳估算分析,以支持正常、瞬态、应急运行规程的制定及操纵员培训材料的编制,运行规程应由核电厂设计者提供。

e. 核电厂的设计应允许操纵员有足够的时间来评估电厂状态,并决定采取何种手动操作,该时间应不低于 30 分钟。

f. 核电厂设计应将系统相互作用的可能性降到最低,应消除在设计或审查过程中发现的任何不利的系统相互作用。

g. 对于华龙技术电厂,至少应能提供两列相互分离、独立的厂内交流电源。

h. 电厂设计应具有在安全系统驱动信号有效时可防止操纵员误动作的能力。

i. 对于设计基准事故,核电厂应有能力仅采用安全级设备,且假设最极限的单一故障,能使电厂达到安全停堆状态。

j. 华龙技术电厂的标准设计应以表 2.1.2.3-5(华龙技术电厂包络的厂址设计参数)列出的包络性设计参数为基础,该标准设计应适用于中国大部分可用的厂址。核电厂设计者应在开始详细的、特定厂址的设计之前审查这些参数。对于业主的厂址,以书面形式告知业主任何需要评估和可能修改的设计参数。最终所用的设计参数应由核电厂业主以书面形式批准。

### 2) 核监管要求

电厂设计人员应对电厂对预期的工艺参数变化和设备故障的响应进行分析评价。

#### a. 预计运行事件和事故

表2.1.2.3-1(始发事件示例和频率分类)给出了应进行分析的典型预计运行事件和事故。核电厂在这些事件中应能仅利用安全相关设备达到停堆。

b. 核电厂设计者应进行审查,确认是否应增加适用于电厂特定设计的始发事件。审查应重点关注电厂独有的特征。增加的单一始发事件类型包括但不限于:

- 导致与电厂正常运行相关的系统或设备失效的能动设备失效或操纵员失误,如泵、阀门、控制器等;
- 备用系统或设备的意外运行,包括专设安全设备;
- 非能动失效,如管道破裂或断裂;
- 丧失厂外电源或应急交流电源;
- 含有气态或液态放射性的能动或非能动设备失效或故障。

与ATWS和全厂断电相关的包含能动设备多重故障的事件,其分析和验收准则应分别满足相关要求。

c. 表 2.1.2.3-1(始发事件和频率分类)中的始发事件应按表中给出的发生频率进

行分类。

若华龙技术电厂采用先进技术，拟消除表2.1.2.3-1中的始发事件，或降低其发生频率或减轻其后果，则应对这些始发事件或其发生频率进行修正，并进行恰当评价。

在没有其它独立事件发生的情况下，任一类别中的事件本身不能造成更严重的事故。

d. 应将新增事件归到其中一个频率类别中。对于新增的始发事件，核电厂设计者应记录将其按频率分类的基准。

e. 单一故障

对于设计基准工况，电厂设计者应确认与始发事件同时发生的可能的单一设备故障。

所选择的单一故障对始发事件的后果是最恶劣的，详见表2.1.2.3-2。需考虑的单一故障包括但不限于：

- 能动部件失效：
  - 不能运行；
  - 错误运行。
- 电气设备失效
  - 电源的一个序列失效；
  - 序列级上不能产生电信号；
  - 错误信号和共用传感器失效。
- 非能动失效（始发事件后 24 小时）
  - 阀门的密封填料泄漏；
  - 密封泄漏；
  - 法兰泄漏。

单一故障示例见表2.1.2.3-2：华龙技术电厂单一故障示例。

f. 燃料、反应堆压力边界和安全壳设计限值

燃料、反应堆压力边界满足与事故类别对应的特定限值，安全壳满足特定的温度和压力限值。应按事故分析相关要求，对所分析事件下核电厂响应重要的关键参数作出假设。

g. 剂量后果限值

核电厂设计者应对以下事件进行后果分析：

- 中等频率事故，在考虑单一故障情况下，安全分析表明不会达到特定的燃料设计限值；
- 稀有事故和极限事故，剂量后果的可接受准则见《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249-2011），详见表 2.1.2.3-3：后果分析限值。

h. 对于新增事故，燃料、反应堆压力边界满足与事故类别对应的特定限值，安全壳满足特定的温度和压力限值。厂外放射性剂量后果验收准则见表 2.1.2.3-3：后果分析限值。

i. 华龙技术电厂应允许足够的操纵员响应时间。对于所分析的瞬态和事故，第一个关键信号后至少 30 分钟内无需操纵员干预即能满足相关限值要求，其中设计基准工况还应考虑单一故障。表 2.1.2.3-4（提升电厂响应时间的特性）包含了对操纵员时间的特定要求。

j. 除了独立的、安全级的交流电源，华龙技术电厂应提供非安全级的、可替换的厂内交流电源，如 SBO 柴油机，以降低全厂断电的风险。

k. 应使用 PSA 来评价设计核电厂的堆芯损坏频率，并确认该频率小于等于  $1.0E-05$ /堆年，其分析范围包括内部事件和外部事件（不包括恐怖袭击事件），分析工况包括功率工况、低功率和停堆工况，且在设计过程中持续更新 PSA。

l.

m. 电厂设计人员应制定包括应急操作规程在内的严重事故管理大纲,用于确保预防和缓解堆芯损坏,满足厂外剂量限值。核电厂设计者应将电厂设计基准转换成运行限值和运行响应,进而由业主将其写入规程指南和培训。核电厂设计者应使用电厂详细的 PSA 和其它相关信息来确认电厂设计与应急操作规程和严重事故管理大纲是相容的。

n. 自然现象和人为危害

- 核电厂设计者应针对自然现象作出相应设计,如:

- 地震
- 飓风
- 洪水
- 龙卷风或飞射物攻击
- 暴风雪(冰雹和大雪)
- 海啸或湖震
- 核电厂设计者应分析人为危害,如:
- 飞机坠落或恶意撞击
- 舰艇撞击
- 工业事故
- 管道事故
- 地面交通工具事故
- 有毒或有害气体释放
- 丙烷或其它可燃液体爆炸
- 内部火灾
- 人为蓄意破坏
- 水淹

3) 超出核监管最低要求的设计要求

a. 要求华龙技术电厂的永久设备应能容易的与厂外救援移动设备相连接。并要求尽可能的减小这些设备在连接时受到的放射性照射。

b. 电厂设计人员应使用 PSA 来识别并解决任何可能的堆芯损坏和风险薄弱环节,并将其作为电厂技术规格书、应急规程和维修要点的输入。

c. 作为 PSA 工作的一部分,电厂设计人员应完整定义并记录 PSA 的技术基准,以便允许电厂业主保证风险重要的系统、构筑物和部件的可靠性得到维持,从而确保在电厂整个寿期内满足 PSA 的关键假设。

d. 对于不断升级的电厂花费和可用措施,利用非安全相关设备内在的抗震性能来使备用的各种应对 SL-2 地震事件的堆芯冷却措施的可用性最大化。应特别注意设备锚固、构筑物-系统间相互作用、支持系统间的接口等。应通过统计学分析或其他对比方法来确认构筑物和设备的抗震能力,以证明所采用的设备满足相关要求。

e. 要求华龙技术电厂在丧失全部给水后,在没有操纵员动作的情况下至少 2 小时内不会造成燃料损坏。

f. 华龙技术电厂的堆芯应能够承受丧失厂外和厂内交流电源至少 8 小时,而不发生燃料损坏。

#### 2.1.2.4 缓解要求

1) 应设置安全壳厂房和相关的安全壳系统,以便在设计基准工况下排出热量并包容放射性物质。安全壳设计压力应基于最极限的冷却剂丧失事故或主蒸汽管道

断裂事故。应证明在安全壳设计泄漏率为0.3% $\Delta V$ /天的情况下满足GB6249-2011的放射性释放限值。

2) 设计基准事故源项分析应采用基于物理机理的源项。裂变产物从燃料中释放的起始时间、释放持续时长、核素种类、裂变产物释放量、碘的化学形态等参照《压水堆核电厂设计基准事故源项分析准则》(NB/T20444)。

3) 电厂设计应设置可燃气体控制系统以便在发生堆芯损坏事故后维持安全壳内可燃气体浓度小于可能会发生燃耗或爆炸的水平,避免威胁到安全壳的完整性。设计应保证发生氢气产生事件期间或之后,电厂能够执行必要的事事故预防和缓解功能。

4) 应通过设计上的固有保守性和其它措施来提供充分的严重事故保护,用以限制对安全壳的直接加热、保证堆芯碎片的冷却以及避免氢气达到可爆炸浓度。

5) 在可燃气体控制系统作用下,氢气总量相当于堆芯活性段区域100%燃料包壳氧化产氢量时,安全壳内平均氢气浓度不超过10%。

6) 在评估华龙技术电厂对严重事故保护的充分性时,考虑满足监管要求的保守性和超出监管最低要求的设计裕量。

7) 应利用PSA评价严重事故风险,设计者应证明每堆年发生大量放射性物质释放的概率低于 $10^{-6}$ 。PSA分析范围应包括内部事件和外部事件(不包括恐怖袭击事件),分析工况包括功率工况,低功率和停堆工况。

#### 2.1.2.5 分析要求和可接受准则

##### 1) 总体要求

a. 对于为了满足监管要求而进行的设计基准工况分析,必须采用保守的、经核监管当局认可的计算方法和假设开展。对于设计扩展工况及超出核监管最低要求的分析,可采用现实假设和最佳估算方法。包括内外部事件的PSA分析可用于评价华龙技术电厂设计及其满足风险评价准则的能力。

b. 电厂设计人员应采用基于所分析事故或瞬态的实际物理状态的分析假设和限值,而不是选择便于分析的假设和限值。保守性应与监管要求保持一致。

c. 分析技术应通过先前的使用经验证明是成熟的。如使用新技术或对现有技术进行修改,则应进行确认和评价。

d. 对于设计基准工况分析,除非非安全级系统对事故是有利的,则不应考虑非安全级系统可用。设计扩展工况分析可采用非安全级系统,但应证明在设计扩展工况下这些非安全级系统是可用的。

##### 2) 满足核监管的分析要求

a. 对于为了满足核监管要求而进行的事事故或瞬态分析,电厂设计人员应向业主提交对于关键假设、所用方法和验收准则的描述。

b. 应使用核监管当局认证的方法。

c. 对于提交给核监管部门的执照申请分析,电源的处理应与国内相关要求保持一致。

d. 所假设的操纵员动作应满足核管当局的要求。任何关于操纵员动作的必要假设都应基于经验丰富的操纵员的人因工程评价。

e. 验收准则应与核监管当局的要求相一致。

##### 3) 超出核监管最低要求的分析要求

a. 电厂设计人员应定义这些要求和验收准则,这些要求和验收准则应基于最佳估

算模型。这些模型应通过电厂运行数据或适当的试验数据进行验证。使用最佳估算参数的设计基准工况分析程序可用于证明满足投资保护和设计扩展工况要求。

b. 对厂外及辅助电源的可用性评估和应用应基于电厂所处的实际状态和环境条件。

#### 2.1.2.6 应急计划的准则和方法

华龙技术电厂的设计应允许应急计划的简化和标准化。电厂设计者应评估用于应对以下安全壳性能和厂外剂量两个应急计划技术准则的电厂设计,在该评估中应采用用于证明该准则的特定方法。

电厂设计者应开展补充PSA评估,用于支持对两个应急计划准则的评估。

##### 1) 安全壳性能准则

对于华龙技术电厂应急计划,电厂应具有能力处理严重事故对安全壳的挑战,这包括采用设计措施和特征防止出现安全壳旁通的堆芯损坏序列、承受代表相应堆芯损坏序列施加的载荷。

从燃料开始释放裂变产物起约24小时的时间内,不应超过LOCA加氢气载荷限值。

提供实现安全壳的局部手动排气和远程自动排气的措施。

超过24小时后提供防止裂变产物从安全壳不可控释放的措施。

##### 2) 剂量准则

对于设计基准工况,根据《核动力厂环境辐射防护规定》(GB6249-2011)的要求,需对非居住区边界和规划限制区边界的人员剂量进行计算,以保证剂量限值满足国标要求。对于设计扩展工况,根据《“华龙一号”融合方案核电项目核安全审评原则》评估放射性后果,以保证剂量限值满足安全审评要求。

##### 3) PSA补充评估

应开展PSA评价以证明满足如下安全目标:

- a. 堆芯损坏频率(CDF)  $\leq 1.0E-05$ /堆年;
- b. 大量放射性释放频率(LRF)  $\leq 1.0E-06$ /堆年。

##### 4) 论证安全壳性能准则的方法

电厂设计者应证明与堆芯损坏序列有关的压力和温度荷载不会超过LOCA加氢气峰值荷载。堆芯损坏序列的特征如下:

- 安全壳是隔离的,否则安全壳应是完整的(如没有发生旁通);
- 反应堆冷却剂系统降压至 $<0.7\text{MPa (g)}$ ;
- 安全壳热量充分排出;
- 可燃气体控制系统在运行。

评估荷载时可采用最佳估算方法,应使用公认的工业计算机程序。

##### 5) 源项和剂量计算方法

设计基准源项计算应基于保守的分析方法和假设,可参照《压水堆核电厂设计基准事故源项分析准则》(NB/T20444)中规定的方法和假设,设计扩展工况源项计算可基于最佳估算的分析方法和假设。剂量计算的方法应满足国家法规和标准的要求。

应用于事故后果评价的大气弥散因子可参考美国核管会的RG1.145管理导则推荐的模式和方法。剂量转换因子、干沉积速率、呼吸率的选取可分别参考国家标准GB18871、国际原子能机构(IAEA)19号报告、国际辐射防护委员会(ICRP)71号报告、美国联邦导则12号报告、美国核管会的RG1.183管理导则等。本段提出的参考报告,除了中国国家标准外,其余报告并非强制性要求,而作为一种选择。

#### 2.1.2.7 表格

表2.1.2.3-1始发事件示例和频率分类

1.	二次侧排热增加		频率分类 <sup>(1)</sup>
	1.1	给水系统单一故障导致给水温度降低	中等
	1.2	给水系统单一故障导致给水流量增加	中等
	1.3	蒸汽系统单一故障导致蒸汽流量增加	中等
	1.4	蒸汽发生器释放阀或安全阀误开启	稀有
	1.5	安全壳内或安全壳外蒸汽管道破裂 <sup>(2)</sup>	稀有或极限
	1.6	非能动余热排出系统误启动	稀有
2.	二次侧排热减少		频率分类 <sup>(1)</sup>
	2.1	蒸汽系统单一故障导致蒸汽流量减小	中等
	2.2	失去厂外电负荷	中等
	2.3	汽轮机停机	中等
	2.4	主蒸汽隔离阀意外关闭	中等
	2.5	冷凝器丧失真空	中等或稀有
	2.6	失去厂外或厂内交流电源 <sup>(3)</sup>	中等
	2.7	失去正常给水	中等
	2.8	主给水管道的破裂	极限
3.	反应堆冷却剂流量降低		频率分类 <sup>(1)</sup>
	3.1	反应堆冷却剂泵停转	中等 <sup>(4)</sup>
	3.2	反应堆冷却剂泵卡轴	极限 <sup>(4)</sup>
	3.3	反应堆冷却剂泵断轴	极限 <sup>(4)</sup>
4.	反应性和功率分布异常		频率分类 <sup>(1)</sup>
	4.1	次临界或低功率下控制棒不可控提出（假设堆芯和反应堆冷却剂最不利的反应性工况）	中等 <sup>(4)</sup>
	4.2	功率下导致最严重后果的控制棒不可控提出（假设堆芯和反应堆冷却剂最不利的反应性工况）	中等 <sup>(4)</sup>
	4.3	控制棒误操作（系统故障或人为失误）	中等 <sup>(4)</sup>
	4.4	在错误温度启动停运环路	中等
	4.5	导致反应堆冷却剂硼浓度降低的故障	中等
	4.6	燃料组件误操作	极限
	4.7	弹棒事故	极限
5.	反应堆冷却剂装量增加		频率分类 <sup>(1)</sup>
	5.1	功率运行时高压补给系统误启动（如应急硼注入系统误动作）	中等
	5.2	导致反应堆冷却剂装量增加的化学和容积控制系统故障	中等
6.	反应堆冷却剂装量减少		频率分类 <sup>(1)</sup>
	6.1	稳压器安全阀误开启	稀有 <sup>(4)</sup>
	6.2	贯穿安全壳的与反应堆冷却剂系统相连的仪表管线或其它管线破裂	稀有
	6.3	蒸汽发生器传热管破裂 <sup>(5)</sup>	稀有或极限
	6.4	不同尺寸管道破裂导致的反应堆冷却剂丧失 <sup>(6)</sup>	稀有或极限
7	子系统或部件的放射性释放		频率分类 <sup>(1)</sup>
	7.1	放射性废气系统破裂或故障	(3)
	7.2	放射性废液系统破裂或故障	(3)
	7.3	液体储存罐失效造成的假想放射性释放	(3)
	7.4	安全壳和乏燃料厂房内燃料操作基准事故	极限
	7.5	乏燃料桶跌落事故	极限
8	设计扩展工况-A <sup>(7)</sup>		
	8.1	完全丧失给水	DEC-A
	8.2	全厂断电事故	DEC-A
	8.3	未能紧急停堆的预计瞬态	DEC-A
	8.4	蒸汽发生器多根传热管破裂	DEC-A
	8.5	主蒸汽管道破裂诱发蒸汽发生器传热管破裂	DEC-A
9	设计扩展工况-B <sup>(8)</sup>		
	9.1	冷却剂丧失事故叠加安全注入失效	DEC-B
	9.2	丧失所有交流电源叠加二次侧余热排出失效	DEC-B



注：（1）始发事件频率中，中等、稀有和极限事故分别对应中等频率事故（DBC-2）、稀有事故（DBC-3）和极限事故（DBC-4）。

（2）小尺寸蒸汽管道破裂为“稀有”、主蒸汽管道破裂为“极限”。

（3）短时间失去交流电源为“中等”、长时间失去交流电源为“稀有”。

（4）与燃料无关的放射性源失效（如放射性废物）导致的事件不进行频率分类，但若没有安全相关设备提供保护，则这些事件有放射性释放限值，这些限值应满足GB-6249（2011）的相关规定。

（5）设计特征、闭锁和检查将避免控制棒组件故障。

（6）伴随事故并发碘峰的蒸汽发生器传热管破裂为“稀有”，伴随事故前碘峰的蒸汽发生器传热管破裂为“极限”。

（7）电厂功率运行工况下的小尺寸管道破裂导致的反应堆冷却剂丧失为“稀有”，停堆工况下的小尺寸管道破裂导致的反应堆冷却剂丧失为“极限”，大尺寸管道破裂导致的反应堆冷却剂丧失为“极限”。

（8）仅列出典型的设计扩展工况-A的始发事件。

（9）仅列出典型的设计扩展工况-B的始发事件。

表2.1.2.3-2单一故障示例

<p>蒸汽排放和旁路控制系统</p> <p>1、 不能按需要模式打开：</p> <p>    a) 一个阀不能打开；</p> <p>    b) 几个阀不能打开；</p> <p>    c) 全部阀门不能打开。</p> <p>2、 不能按需求快速打开：</p> <p>    a) 一个阀门不能快速打开；</p> <p>    b) 有阀门不能快速打开。</p> <p>3、 在完成蒸汽旁通之后一个旁通阀门不能快速关闭。初始情况可能是：</p> <p>    a) 一个阀门初始是开的；</p> <p>    b) 全部阀门初始是开的。</p> <p>4、 比例/积分/微分控制器发生故障处于旁通状态（在需要部分旁通流量时）而造成的过大的蒸汽旁通流量。</p> <p>5、 蒸汽旁通运行期间未能产生自动解除隔离信号；</p> <p>6、 所有的旁通阀既不能按预定模式打开，又不能快速打开；</p> <p>7、 在需要手动打开时，不能手动打开所有旁通阀。</p>
<p>反应性控制系统</p> <p>1、 单根控制棒卡死，其余控制棒可移动；</p> <p>2、 一个控制棒组卡死，其余子组可移动；</p> <p>3、 一个调节棒组不能插入或抽出，其余组可插入抽出；</p> <p>4、 反应性控制系统不能正确控制棒提出；</p> <p>5、 在禁止自动提棒或禁止提棒情况下控制棒提出；</p> <p>6、 不能实现阻止提棒功能（从反应性控制系统收到错误提棒命令，控制棒提出）；</p> <p>7、 错误的实施阻止提棒功能（一个控制棒在需要提出时不能提出）；</p> <p>8、 在需要时棒组抽或插失步。</p>
<p>给水调节系统</p> <p>1、 给水不能回调，（即汽机脱扣后超量）。汽机脱扣后，由于单一故障可能导致以下一种或两种情况：</p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>a) 一个给水控制旁通阀不能开启到规定的位置；</li> <li>b) 一个主给水控制阀不能关闭。</li> </ul> <p>2、 蒸汽发生器高水位超程故障。在蒸汽发生器发生高水位后，由于单一故障可能导致以下一种或两种情况：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 一个给水控制旁通阀不能开启到规定的位置；</li> <li>b) 一个主给水控制阀不能关闭。</li> </ul> <p>3、 一个给水控制旁通阀在需要时不能调节（开启或关闭）；</p> <p>4、 主给水泵循环阀不能关闭。</p>
<p>汽轮发电机控制系统</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1、 一个或所有的汽轮机控制阀不能调节；</li> <li>2、 在以下情况下不能使汽轮机减速； <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 一个主给水泵丧失功能；</li> <li>b) 两台加热器排污泵丧失功能</li> </ul> </li> <li>3、 除超转速外，其他参数不能使汽轮机停转。</li> </ul>
<p>反应堆冷却剂压力控制系统</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1、 稳压器压力高时喷淋控制阀不能开启；</li> <li>2、 稳压器压力从高压状态恢复后，喷淋控制阀停在打开状态或处于故障开状态。（降压效应部分地被稳压器压力控制系统的备份加热器的自动启动所抵消）。</li> <li>3、 稳压器压力低时，备份加热器不能够投入；</li> <li>4、 稳压器压力从低压状态恢复后，备份加热器处于故障接通状态。（这种效应可由喷淋控制阀自动开启所抵消）。</li> </ul>
<p>稳压器水位控制</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1、 一个或两个备份上充泵不能投入；</li> <li>2、 一个或两个备份上充泵不能关闭；</li> <li>3、 在低水位状态时下泄流量控制阀不能关到最小流量位置。（正常情况下只用一个下泄流道，备份下泄流道是隔离的，只有操纵员才能使其打开。）</li> <li>4、 在高水位状态时，下泄流量控制阀不能打开。</li> <li>5、 错误的低水位信号使下泄流量控制阀关到了零流量状态。</li> <li>6、 上充泵流量控制失效。</li> </ul>
<p>凝结水和给水系统</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1、 一个逆止阀未能关闭；</li> <li>2、 在主给水隔离信号时，一个主给水隔离阀不能关闭；</li> <li>3、 凝结水循环阀不能关闭；</li> <li>4、 一个主给水泵不能停运。</li> </ul>
<p>主蒸汽供应系统</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1、 在主蒸汽隔离信号触发时，一个主蒸汽隔离阀不能关闭；</li> <li>2、 一个主蒸汽安全阀不能回座；</li> <li>3、 一个大气释放阀不能再关闭。</li> </ul>
<p>辅助给水系统</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1、 一台辅助给水系统不能投入</li> </ul>
<p>稳压器安全和卸压阀</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1、 一个安全阀不能回座；</li> </ul>

化学和容积控制系统
1、 在接到安全壳隔离信号或安注信号后，下泄管线上一个隔离阀（安全壳内或外）不能够再打开，因而不能再建立下泄流量；
2、 当为停堆冷却建立辅助喷淋时，上充管线（再生换热器下游）一个阀门不能关闭，或辅助喷淋阀不能打开。
安注系统
1、 一个安注箱阀门不能打开；
2、 一个IRWST补水阀门在需要时不能打开；
3、 一个减压阀在需要时不能打开
厂内应急电源系统
1、 丧失一列直流电源；
2、 丧失一列交流电源。
反应堆保护系统
不能假设整个系统失效。系统的设计应能保证在最不利的单一故障情况下系统仍能执行其功能。
专设安全系统驱动系统
不能假设整个系统失效。系统的设计应能保证在最不利的单一故障情况下系统仍能执行其功能。

表2.1.2.3-3后果分析限值<sup>(1)</sup>

事故分类	验收限值 <sup>(2)</sup>
DBC-3	事故后2小时在非居住区边界及在整个事故持续期间在规划限制区外边界全身有效剂量小于5 mSv，甲状腺剂量小于50 mSv
DBC-4	事故后2小时在非居住区边界及在整个事故持续期间在规划限制区外边界全身有效剂量小于0.1 Sv，甲状腺剂量小于1 Sv

注：（1）放射性后果分析所用的燃料包壳失效输入数据基于最小DNBR限值（双95%）。

（2）采用GB-6249（2011）中的验收限值。

表2.1.2.3-4提升电厂响应时间的特性

响应时间		工程判断	电厂特性
自动响应			
1	应定义厂内交流电源的启动和加载时间，以维持电厂寿期内高可靠性	增加柴油机加载序列时间，在控制系统设计中允许更长的响应时间，减少交流电源维护问题	厂内交流电源设备
2	应不要求30秒内自动启动或隔离流体系统（如安全壳隔离），不包括主蒸汽或主给水隔离。	选择经证明的硬件，减小对更昂贵且需要更多维护的快速动作阀门的依赖	设备响应时间
操纵员响应			
1	在正常给水流量全部丧失事件中，为了防止SG蒸干，不要求在30分钟内手动启动启动给水	允许防止SG蒸干的充足响应时间。最小化蒸干SG再灌水的疲劳应力。SG蒸干后避免RCS加热和主回路流体排放。	SG装量
2	不要求在30分钟内手动控制备用给水流量以防止RCS过冷	备用给水流量过大可引起RCS快速冷却。提供充足的响应时间，确保由冷却剂收缩和压力降低导致的稳压器水位下降不会触发卸压系统。	RCS过度冷却、失去RCS压力控制
3	低水位报警后30分钟内，不要求手动控制上充和下泄以控制稳压器水位	改进RCS压力控制。低水位预报警和报警将允许操纵员有充足时间手动控制冷却剂装量补充。	RCS压力控制和稳压器装量
4	在SGTR事故后30分钟内，不要求操纵员采取手动动作防止SG满溢	为操纵员提供充足时间隔离受影响的SG	RCS装量和热量导出

表2.1.2.3-5厂址设计包络性参数

参数	数值
一、采暖、通风与空气调节的设计参数	
冬季采暖室外计算温度	-16℃
冬季空调室外计算温度	-19℃
冬季通风室外计算温度	-14℃
夏季通风室外计算温度	33℃
夏季空调室外计算干球温度	36℃
夏季空调室外计算湿球温度	29℃
冬季空调室外计算相对湿度	83%
夏季通风室外计算相对湿度	87%
最高正常设计干球温度	35℃
最高正常设计湿球温度	29℃
最低正常设计干球温度	-22℃
最低正常设计湿球温度	-23℃
最高安全设计干球温度	44℃
最高安全设计湿球温度	35.0℃
最低安全设计干球温度	-26.0℃
最低安全设计湿球温度	-27.0℃
二、极端温度	
100年一遇极端最高气温：	44℃
100年一遇极端最低气温	-33℃
三、极端降水/降雪	
100年一遇最大雪压	0.8 KN/m <sup>2</sup>
可能最大降水量	1600mm/24h
四、极端风速（厂址地坪10米高度处设计基准风速）	
100年一遇最大风速（10分钟平均风速）	55m/s
100年一遇极大风速（3秒阵风）	80m/s
五、龙卷风	
最大风速	102.8 m/s
平移风速	20.6 m/s
最大切向风速	82.2 m/s
最大切向风速半径	45.7m
压力降	8.3 kpa
压降速率	3.7 kpa/s
六、最高设计水位	
设计基准洪水位（考虑波浪影响）	设计厂坪标高以下
六、海水水温	
T7	33℃
七、极限安全地震	
水平方向峰值	0.30g
竖直方向峰值	0.20g
地面基岩加速度反应谱	RG1.60谱
八、工程地质参数（基于基岩厂址）	
静态地基承载力特征值	≥0.80MPa
剪切波速	≥800m/s
液化程度	无
九、爆炸冲击波	
最大超压	10kPa
持续期	300ms
波形	阶梯前置三角波

### 2.1.3 安全分级

### 2.1.3.1 概述

核电厂在正常运行、灾害、事故过程中的安全是依靠构筑物、系统和部件（SSC）执行安全功能来实现。安全分级的目的是确保物项的设计、制造、建造、调试和运行采用恰当的要求，以确保物项在所有预期的运行工况下有适宜的质量，确保安全功能的实现。安全分级既影响核设施的安全性，同样也严重影响核电发展的成本和代价。

### 2.1.3.2 方法与原则

华龙技术电厂采用IAEA SSG-30的分级方法。

电厂主要安全功能分为：在所有电厂状态下（包括所有的正常运行模式）需要实现主要安全功能的所有功能和对预防事故发生或在运行状态下限制危害，保护工作人员、公众和环境免受辐射风险所必须的设计预防措施两类。

#### 2.1.3.2.1 安全功能分级输入

识别安全功能的重要性，对安全功能进行分级，主要基于以下因素：

- 不能执行安全功能的后果；
- 需要该物项执行某一安全功能的频率；
- 假想始发事件后需要该物项执行安全功能的时间或时段。

##### 1) 不能执行安全功能的后果

根据“不能执行安全功能的后果”要求，将安全功能失效后引起的后果分为“高”、“中”、“低”三类，其定义如下：

高：

- 直接导致放射性物质释放超过 DBC-3、4 限值；或
- 引起关键物理参数超过 DBC-3、4 验收准则。

中：

- 直接导致放射性物质释放超过 DBC-2 限值，但在 DBC-3、4 限值内；或
- 引起关键物理参数超过 DBC-2 的限值，但在 DBC-3、4 验收准则内。

低：

- 导致工作人员剂量超过法规限值，但放射性物质释放不超过 DBC-2 限值。

##### 2) 需要该物项执行某一安全功能的频率

具体安全功能执行的频率，实际体现的是DBC-2、DBC-3、DBC-4和DEC发生的频率。

##### 3) 假想始发事件后需要该物项执行安全功能的时间或时间阶段

时间是考虑控制和缓解DBC-2、DBC-3、DBC-4和DEC的过程，例如，对DBC-3、4类工况应尽快先到达一个可控状态，然后再实现安全状态，并维持一个必要的时间长度。因为有充足的时间来使用到达并维持安全状态的功能，所以其功能级别可以低于达到可控状态的安全功能级别。

在DBC-3、4事故处理过程中定义了可控状态和安全状态，对于DEC-A定义了事故最终状态，同时定义了严重事故分析的最终状态，其定义如下：

##### b. 对于反应堆

- DBC-2、3 和 4 工况的可控状态：
  - 堆芯处于次临界（在操作员动作前，对于少数事件，仅在短期内引起低核功率的反应堆重返临界是可以接受的）；
  - 确保短期内热量的导出，如经蒸汽发生器；
  - 堆芯冷却剂装量稳定；
  - 放射性的释放保持在可接受水平。

- DBC-2、3 和 4 工况的安全状态：
  - 堆芯处于次临界；
  - 确保长期的余热导出；
  - 堆芯冷却剂装量稳定；
  - 放射性的释放保持在可接受水平。
- DEC-A 类工况分析的最终状态：
  - 堆芯处于次临界；
  - 确保堆芯余热经一次侧或二次侧系统导出；
  - 放射性的释放保持在可接受水平。
- 严重事故分析的最终状态：
  - 堆芯熔融物稳定；
  - 安全壳内热量可以导出；
  - 安全壳完整性得以保证。
- c. 对于乏燃料
  - DBC-2、3 和 4 工况的可控状态：
    - 燃料格架结构完整，乏燃料水池壁完整；
    - 乏燃料水池水装量稳定，可以确保乏燃料的冷却和放射性包容。
  - DBC-2、3 和 4 工况的安全状态：
    - 燃料格架结构完整，乏燃料水池壁完整；
    - 乏燃料水池水装量稳定；
    - 乏燃料水池可以确保长期的冷却。
  - DEC-A 类工况分析的最终状态：
    - 燃料格架结构完整，乏燃料水池壁完整；
    - 乏燃料水池水装量稳定，可以确保乏燃料的冷却和放射性包容。

#### 2.1.3.2.2 根据安全功能进行分级

根据“不能执行安全功能的后果”、“需要该物项执行某一安全功能的频率”、“假想始发事件后需要该物项执行安全功能的时间或时段”，将安全功能分为安全1类功能、安全2类功能和安全3类功能。

- 1) 安全1类功能（FC1）：
  - 在 DBC-2、3、4 中达到可控状态所需要的功能，其失效会导致“高”后果。
- 2) 安全2类功能（FC2）：
  - 在 DBC-2、3、4 中达到可控状态所需要执行的功能，其失效会导致“中”后果；
  - 在 DBC-2、3、4 中达到和维持安全状态所需要的功能，其失效会导致“高”后果。
- 3) 安全3类功能（FC3）：
  - 在 DBC-2、3、4 中，其失效会导致“低”后果的功能；
  - 在 DBC-2、3、4 中达到和维持安全状态所需要的功能，其失效会导致“中”后果；
  - 任何缓解 DEC 工况的功能，其失效会导致“高”后果；
  - 在偏离正常运行期间，防止自动启动紧急停堆和专设安全系统的功能；
  - 在 DBC-3、4 和 DEC 工况中，为工作人员和厂区应急响应提供必要的监视信息和通讯手段的功能；

- 在灾害分析中，用于实现灾害防护目标的功能；
- 用于隔离不同安全等级物项的隔离功能最低为 FC3。

执行安全1类功能（FC1）物项应为安全功能1级物项（F-SC1），执行安全2类功能（FC2）物项应为安全功能2级物项（F-SC2），执行安全3类功能（FC3）物项应为安全功能3级物项（F-SC3）；用于实现灾害防护目标的物项，其分级最低为灾害功能3级（Z-SC3）。

### 2.1.3.2.3 根据设计预防措施进行分级

对于根据设计预防措施进行设计的物项，其物项分级直接根据物项失效后果进行分级，其失效后果与安全功能分类依据的失效后果一致，后果同样分为“高”、“中”和“低”三个类别，此外，还考虑设计预防措施本身的特点直接确定物项的安全级别。其分级原则如下：

- DBC-1 类工况中，物项失效后将导致“高”后果（DPH），其分级为屏障 1 级（B-SC1）；
- DBC-1 类工况中，物项失效后将导致“中”后果（DPM），其分级为屏障 2 级（B-SC2）；
- 在各类运行工况中，物项失效后将导致“低”后果（DPL），其分级为屏障 3 级（B-SC3）；
- 在灾害分析中，用于实现灾害防护目标的物项（DPZ），其分级最低为灾害防护 3 级（Z-SC3）；

除 DPH、DPM、DPL、DPZ 以外的其他 DP 情况均定义为 DPA，包括：

- 对于一回路压力边界，如果管线破裂，无法通过正常的补给方法（如，一个化容泵）补偿泄漏的冷却剂量的管道，虽然物项失效后是“中”后果（DPM），但是其设备安全分级根据实际压水堆的工程设计经验，规定其为屏障 1 级 B-SC1；
- 对于一回路压力边界，如果管线破裂，可以通过正常的补给方法（如，一个化容泵）补偿泄漏的冷却剂量的管道，根据实际压水堆的工程设计经验，规定其为屏障 2 级 B-SC2。
- 在 DBC-2、3、4 和 DEC 工况下，需要与主回路相连，包容较高放射性流体（燃料包壳完整性丧失后被污染的放射性冷却剂流体）的设备为屏障 2 级 B-SC2；
- 在 DBC-2、3、4 和 DEC 工况下，其失效会导致安全壳被旁通的物项为屏障 2 级 B-SC2。

### 2.1.3.3 设计要求

#### 2.1.3.3.1 功能和系统设计要求

功能设计要求直接影响执行功能的具体物项设计要求，特别是系统设计，其要求内容包括：

- 单一故障准则；
- 实体隔离和电气隔离；
- 应急供电；
- 定期试验；
- 环境鉴定；
- 内外部灾害防护（包括抗震）。

各安全功能和系统设计要求见表1。

表 1 功能和系统设计要求

功能分类	物项功能分级	单一故障准则	实体隔离 电气隔离	应急供电	定期试验	环境鉴定	内外部灾害防护 （包括抗震）
------	--------	--------	--------------	------	------	------	-------------------

FC1	F-SC1	有 系统层次	有	有	有	有	有
FC2	F-SC2	有 功能层次	有	有	有	有	有
FC3	F-SC3	无	特殊要求	逐个分析	有	逐个分析	逐个分析

#### 2.1.3.3.2 承压设备要求

各安全级别的承压设备规范设计要求如下：

B-SC1承压设备设计要求不低于RCC-M1级要求；

B-SC2承压设备设计要求不低于RCC-M2级要求；

B-SC3、F-SC1和F-SC2承压设备设计要求不低于RCC-M3级要求；

F-SC3和Z-SC3物项采用常规工业要求。

同一物项，很可能由于不同的分级原则（设计预防措施和安全功能分类），满足不同安全级别的规范要求，则物项应选用最高类别的规范设计要求。

#### 2.1.3.3.3 非承压设备要求

RCC-M1级要求的设备的支承件为RCC-M H篇S1级，RCC-M2级或RCC-M3级要求的设备的支承件为RCC-M H篇S2级，当不同级别的设备共用一个支承件时，该支承件级别应按最严级别的设备来定级。

其他电气设备的支承（电缆、接头和密封头等）按照RCC-E和RCC-M中相应要求执行。

对于B-SC1、B-SC2、F-SC1和F-SC2非承压设备的支撑参考RCC-MH篇S2级要求进行设计。

对于B-SC3和F-SC3非承压设备的支撑按设备的支座或基础考虑，根据设备设计所选用的标准进行设计。

燃料贮存水池内部构件的支撑构件采用RCC-M H篇S2要求。

预埋的支撑构件或相关部件的设计按照国内相关规范执行。

反应堆压力容器堆内构件，包括堆芯支承结构按RCC-M G篇设计。

燃料组件和控制棒设计采用RCC-C要求。

#### 2.1.3.3.4 电气仪控设备要求

对于电气设备和仪控设备的硬件采用RCC-E标准，其中F-SC1电气和仪控设备要求为C1，F-SC2电仪设备要求为C2，F-SC3电仪设备要求为C3，或是专用的设计标准

仪控软件功能设计要求按照GB/T15474中的要求执行，其中：

执行FC1级软件功能采用A类要求；

执行FC2级软件功能采用B类要求；

执行FC3级软件功能采用C类要求。

#### 2.1.3.3.5 构筑物设计

B-SC1、B-SC2、B-SC3、F-SC1、F-SC2级构筑物执行我国核行业核安全相关构筑物设计规范。对于F-SC3级构筑物，应设计成具有其包容或保护的系统等等的灾害防护能力，并按适用的规范进行设计。

#### 2.1.3.3.6 抗震分类

抗震分类定义了2个抗震类别，分别是抗震I类和抗震II类，无强制抗震要求的用“NO”标示。



### 1) 抗震I类

抗震I类设备和（建）构筑物及相关要求描述如下：

B-SC1、B-SC2、F-SC1和F-SC2 物项为抗震I类；

一般来说，F-SC3的设备不需要定为抗震I类。但下列F-SC3物项必须明确的分为抗震I类：

- DEC-A 工况中需要使反应堆或乏燃料达到最终状态的设备；
- DEC-B 工况下保证安全壳完整性，执行安全壳余热导出功能的系统，以及保证乏燃料水池长期热量导出系统；
- 执行 FC1 和 FC2 功能的机械、电气或仪控设备所在厂房中的分区隔离、探测和消防系统；
- 某些对于维持安全状态不重要，但在 24 到 72 小时期间需要的额外功能(FC3)的系统；
- 过程信息和控制系统的一部分。

一般来说，对于抗震I类电气和仪控设备，在地震期间和之后，均要求保持“可运行性”功能。

一般来说，对于抗震I类机械设备，要求保持地震后的“功能容量”和“可运行性”功能。

### 2) 抗震II类

抗震II类设备和构筑物及其相关要求描述如下：

非抗震I类的设备和构筑物，若因地震而引发内部灾害可能会对抗震I类设备造成不可接受影响，这些设备和构筑物为抗震II类。由地震引发的不可接受的影响可能是来自下列次生的内部灾害：抗震II类物项倾倒或坠落到抗震I类设备上、飞射物、高能设备故障造成的影响、管道容器和蓄水池故障导致的水淹、爆炸、火灾。

抗震II类设备和构筑物须满足的要求如下：

对于抗震II类设备和构筑物，采用符合相应要求的方法进行设计。通常，抗震II类构筑物有稳定性要求，抗震II类设备有稳定性和/或完整性要求，一些抗震II类能动设备还有可运行性要求，如一些抗震II类管道上的卸压阀。

## 2.1.4 性能设计要求

### 2.1.4.1 概述

本节提出的设计基准要求并非首先与安全或投资保护有关。这些要求是业主委托提出的对核电厂的能力要求，这关系到核电厂的规模、寿命、操作能力、事件瞬态响应、对事件的响应时间。本节还涉及堆芯、放射性废物、厂区辐射照射等方面要求。

### 2.1.4.2 电厂规模

本章要求机组额定功率范围约为1200MWe。应在一定的功率范围内对设计和成本进行研究。

### 2.1.4.3 电厂设计寿命

设计寿命为60年。核电厂的设备设计应保证不可更换零件的设计寿命为60年。

### 2.1.4.4 事件响应能力

#### 1) 启动和停堆时间

电厂应能在24小时内从冷停堆状态启动至全压全温度的热备用状态。同样地，电厂应能在24小时内从全压全温度的反应堆临界状态停堆至 60℃。这些要求不包括由于特殊试验规

程导致的延迟和不是正常启动或停堆过程的行政管理延迟。

2) 主泵的可靠运行

设计应保证主泵可以在较低功率下可靠运行。此外，系统应允许在限定工况下重启主泵。

3) 反应堆停堆应不会导致如下动作：

- a. 启动应急堆芯冷却系统；
- b. 触发主系统安全阀；
- c. 稳压器加热器裸露；
- d. 启动应急给水系统，假设不是给水系统导致的停堆。

4) 汽轮机停堆的响应

华龙技术电厂应具有汽轮机从100%满功率或较低功率完全甩负荷的能力，而不会引起反应堆停堆，并且不会开启主蒸汽安全阀。不允许通过向大气释放蒸汽来实现这种能力。

5) 丧失给水泵的响应

满功率运行时，在备用泵可正常启动工况下，丧失一台主给水泵或凝结水泵不会导致反应堆停堆。在备用泵不可正常启动工况下，机组需达到85%满功率，并且保证丧失一台主给水泵或凝结水泵不会导致反应堆停堆。

6) 控制棒误插的响应

单一故障引起的一束控制棒插入不会导致反应堆停堆。

#### 2.1.4.5 堆芯性能

1) 换料周期

换料周期，从一个换料后启动至下一个换料后启动，可以达到18至24个月。

2) 燃料机械耐力

燃料机械设计应保证组件平均燃耗至少达到52000MWD/MTU。

3) 燃料包壳失效率

由于制造缺陷导致燃料的早期失效率应小于1/50000。

#### 2.1.4.6 放射性废物处理

##### 2.1.4.6.1 乏燃料

华龙技术电厂乏燃料采用湿法贮存，湿法贮存容量应保证可以贮存核电厂10个燃料循环堆芯卸出的乏燃料组件加上一个全堆芯的强迫卸料量。

##### 2.1.4.6.2 中、低水平放射性废物

1) 排出限值

华龙技术电厂的设计和建造应保证运出厂外的待处置固体废物年产生量小于50 m<sup>3</sup>/堆·年。

2) 暂存能力

华龙技术电厂中、低水平放射性固体废物暂存库贮存量不应低于核电厂三个月所产生的废物量，并且不超过核电厂五年所产生的废物量。

##### 2.1.4.7 职业照射

华龙技术电厂设计和建造应使得电厂寿期内平均职业照射集体剂量小于0.6人·Sv/（堆·年）。

#### 2.1.5 结构设计基准

### 2.1.5.1 概述

结构设计基准的目标是提高华龙技术电厂结构安全性、施工、维修便利性，降低整体造价。

本节给出了适用于华龙技术电厂建筑物、构筑物、系统和设备的结构设计总准则；建立了关于功能和结构完整性统一分类的要求，明确了采用的规范和标准，并确定验收准则。规定了设计荷载、荷载组合以及为减轻核电厂厂内灾害后果需要采取的措施；包括了针对不同厂址相关的标准设计（包括不同自然现象和环境条件）。

### 2.1.5.2 分级要求

核电厂设计者必须按功能要求和设计预防措施要求对构筑物、系统和设备进行分级。这种分级必须针对核电厂的全部构筑物、系统和设备。

#### 1) 安全分级

应该根据构筑物、系统和设备所执行的安全功能进行安全分级。分级原则应执行IAEA SSG-30。构筑物、系统和设备可按其功能划分为安全1级（F-SC1）、安全2级（F-SC2）、安全3级（F-SC3）和非安全级（NC），按其设计预防措施划分为屏障1级（B-SC1）、屏障2级（B-SC2）、屏障3级（B-SC3）、灾害防护3级（Z-SC3）。在任何失效模式下，非安全级的构筑物和设备失效不应引起安全级设备和构筑物的安全功能丧失。

#### 2) 抗震分类

应该根据构筑物、系统和设备在安全停堆地震下的影响进行抗震分类，分为抗震I类、抗震II类和非抗震类。其划分依据见以下各节。

##### a. 抗震I类

抗震I类应包括所有安全等级为B-SC1、B-SC2、F-SC1和F-SC2的构筑物、系统和部件。抗震I类还应该包括乏燃料水池构筑物，包括全部的燃料格架。

必须确定在SL-2地震期间和地震后应满足的详细性能要求。抗震I类系统和设备应能承受SL-2地震，并执行其相应功能。构筑物和承压边界应遵守相应规范要求。

##### b. 抗震II类

抗震II类适用于如下构筑物、系统和部件：这些构筑物、系统和部件不执行安全功能，地震时不需要继续执行功能，但其结构的破坏或结构相互作用可能导致抗震I类构筑物、系统和部件执行功能的能力降低到不可接受的安全水平，或者使主控室人员受到伤害以至于不能履行其职责。

在SL-2作用下，抗震II类构筑物、系统和部件不应对抗震I类构筑物、系统和部件产生不可接受的影响。对于处于敏感设备附近的流体系统，要求保持合适的压力边界完整性。应使用适当的地震延性系数分析抗震II类构筑物、系统和部件的SL-2荷载，以考虑实际的能量耗散量。

抗震II类结构应按《核电厂抗震设计规范》GB50267-97设计为极限状态A（较大的永久变形，不存在坍塌）。应提供与安全相关结构、系统和部件的隔离以适应变形量，或应评估地震造成的影响。如果地震裕度分析的成功路径筛选目标要求在审查级地震中不发生坍塌，则极限状态A的设计应基于审查级地震。

##### c. 非抗震类

没有根据2)和3)条定义为抗震I类和抗震II类的构筑物为非抗震构筑物，这些非抗震级的构筑物抗震设计应符合相应的国标规范。

### 2.1.5.3 法规与标准

华龙技术电厂的结构设计优先选用我国现行有效的标准，并充分考虑本行业国际、国外

有关标准。在构筑物、系统和设备的设计、制造和安装中应采用现有且适用的核动力工业和标准。核电厂设计者应列出所有适用的规范和标准及适用的版本。

#### 1) 主要设计建造规范

不同安全等级的构筑物采用的规范标准见表2.1.5-1。满足华龙技术电厂厂房结构设计和建造主要规范见表2.1.5-2。

#### 2) 核安全部门的见解

适用于华龙技术电站结构设计依据是我国GB、NB等相关标准规范。针对华龙技术电站的详细技术见解在下各节叙述。

- a. 对于应用破前漏（LBB）技术的高能管道系统或管道系统区段，不考虑管道破裂态效应。
- b. 在建筑物、构筑物和设备分析中，核电厂设计者应采用经批准的现实的阻尼准则。
- c. 可利用经批准的独立的反应谱进行抗震计算。
- d. 频谱转换分析可作为频谱拓宽的替代办法。
- e. 对具有显著高频振动荷载输入的分析，可采用代数法组合高频模态响应。非线性动力学分析可以考虑管道和支撑之间的间隙。
- f. 经验数据可作为环境鉴定的一部分或全部依据。华龙技术电厂源项应基于物理的源项。
- g. 核电厂设计者应使用华龙技术电厂厂址设计参数包络中描述的龙卷风效应。

### 2.1.5.4 设计荷载与工况

#### 2.1.5.4.1 荷载与工况介绍

- a. 应利用现行规范、标准和实践为核电厂建筑物、构筑物、系统和设备规定的荷载组合方法，并遵守已出版的核安全管理标准的规定。
- b. 根据具体情况，可在国家核安全相关部门认可后，使用概率论方法，依据规定的设计基准事故，开展定量的设计荷载和荷载组合的计算。
- c. 应尽早确定设计中要用到的荷载与荷载组合的量值，确定量值的时间应与建造开始之前需完成的设计工作相适应。结构设计的荷载取值，应根据厂址条件、工艺要求或现行国家相关标准的规定确定。结构设计应根据结构功能和性能要求，按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别定义荷载组合。

#### 2.1.5.4.2 自然现象

在设计电厂的结构、系统和部件时，自然条件以厂址参数包络值为基础。

##### 1) 风荷载

- a. 风荷载的取值以厂址参数包络值为基础。
- b. 核电厂采用厂址条件风速，考虑到使用的方便及设计习惯，沿用了传统的基本风压计算公式。同时根据现行国家标准《核电厂工程气象技术规范》GB/T 50674-2013，明确风压采用 100 年重现期。参考《核电厂厂房设计荷载规范》NB/T 20105-2012 和《核电厂混凝土结构技术标准》GB / T 51390-2019，厂址的基本风压荷载按 100 年一遇的 3s 的平均最大风速（距地面以上 10m 高度处阵风）确定。
- c. 对风荷载比较敏感的结构来说，风荷载很重要，而计算风荷载的各种因素和方法还不十分确定，因此基本风压应适当提高。如何提高基本风压值，可由各结构设计规范，根据结构的自身特点确定，没有规定的可以考虑适当提高其重现期来确定基本风压。对于其他设计情况，其重现期也可由有关的设计规范另行规定，或由设

计人员自行选用,《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012 附录 E 给出了不同重现期风压的换算公式。

#### 2) 水文

a. 应获得并评价厂址的具体水文数据。水文数据包括但不限于:海水水位、降雨量,降雪量、地下水水位等记录。与厂址水文有关的设计条件或荷载要求应依据厂址参数包络。对偏离厂址参数包络的厂址应进行专门的评价。

b. 应确定需要防洪的建筑物、防洪需要采取的措施以及由此对结构设计基准造成的影响。

#### 3) 地质与基础条件要求

a. 应调查并分析厂址的地基条件。建筑的场地类别,应根据土层等效剪切波速和场地覆盖层厚度按《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010(2016 年版)的规定划分为四类,其中 I 类分为 I0、I1 两个亚类。标准的抗震设计应以厂址参数包络为基础。

b. 地基条件调查包括但不限于以下参数:承重地层剪切波速度;潜在液化;土的允许承载压力;侧向土压;剪切摩擦角及其他强度参数(如依赖于应变的剪切模量);单位体积土的重量(密度);依赖于应变的阻尼值;可能的沉降;土和基底层之间的摩擦系数。

#### 4) 地震

a. 设计基准地震作用按现行国家标准《核电厂抗震设计规范》GB50267-97 取值,SL-2 地震通常为预估的核电厂所在地区可能遭遇的最大潜在地震动(在设计基准期中的年超越概率为万分之一)产生的地震作用。设计基准地震作用包括地震动引起的结构、管道和设备的地震作用,土的地震作用,水池中水的地震作用等内容。为保证公众的健康和安全,必须确定用于核电厂设计的安全停堆地震的要求。当地基条件对结构的内力和变形有显著影响时,结构分析中应考虑地基与结构相互作用效应。

b. 必须确定用于针对 SL-2 设计的单一自由场地震运动的输入谱。谱的输入运动应拟合到适合于结构分析模型特定点,其中要考虑土和结构的相互作用(SS1)现象。

c. 在具体厂址的详细设计开始之前,应审查包络性地面反应谱和厂址的具体反应谱,并确定设计参数未被包络的数据。对未被包络的参数数据应进行特别的评价。最终的厂址反应谱应得到国家核安全相关部门的批准。

#### 5) 龙卷风

a. 对核电厂中安全相关土建结构的设计,应在遭受设计基准龙卷风条件下保持安全功能,包括不得倒塌,不被飞射物贯穿和不产生二次飞射物。

b. 龙卷风荷载的设计基准应以表华龙技术电厂厂址设计参数包络为基础,超出设计基准的厂址要做单独评价。

c. 在考虑结构抗飞射物设计中,墙壁和屋顶必须设计成阻止厂房内部产生二次飞射物。最小的厚度要满足《核电厂安全相关土建结构抗龙卷风设计规定》NB/T 20360-2015 中经验公式要求。

#### 6) 火山活动

在厂址选择时应排除火山活动影响的厂址。

### 2.1.5.4.3 厂址周边人为灾害

电厂设计要考虑周边的人为灾害,如周边的工业事故或者交通产生的事故对电厂的影响。应根据厂址条件适当考虑自然灾害与人为灾害的组合,以及考虑核电厂周边设施可能对

电厂造成的影响。

工业：电厂设计应考虑厂址潜在的危害来源，如附近的工业，军事设施或厂址附近的管道。这些潜在的危害包括：火灾、爆炸、飞射物及有毒或可燃气体的释放。

交通：应考虑潜在的核电厂周边交通灾害，如地面车辆爆炸及撞击、飞机撞击影响。只要有可能，应从理论上论证这些灾害可以从设计基准中移除。

溃坝：电厂设计要考虑上游堤坝溃坏对电厂水淹的影响。如果厂址在这样潜在灾害的下游，应评价其导致的最大水淹量可以接受。

#### 2.1.5.4.4 电厂运行荷载

##### 1) 预期电厂工况荷载

- a. 要考虑和尽量最小化任何或者全部运行工况的荷载。
- b. 电厂运行的各类工况的荷载均要考虑，包括预期的电厂瞬态。
- c. 应考虑并最大限度降低由往复运动、旋转运转、泵的脉动、阀门快速开关、流致振动、泄压阀排放、气蚀效应以及其他的流体效应造成的结构和设备荷载。应合理地旋转某些重要特性，比如阀门的开启和关闭时间、泵的启动和关闭时间、泵的启动和流量衰减时间等，以避免不必要的保守。在系统设计中应考虑潜在的水锤事件。
- d. 应借助于系统设计、设备选择以及在流体系统中利用稳压箱最大限度降低正常运行期间的振动。对于在现有核电厂已发生过问题的系统应加以重视。在无合理的办法避免振动时，应当采用吸能器、阻尼器或其他装置以便吸收或减低振动荷载。应注意避免把地震减震器用作振动减振器。

##### 2) 极端电厂工况荷载

- a. 应根据《核电厂厂房设计荷载规范》NB/T 20105-2012 和《核电厂混凝土结构技术标准》GB / T 51390-2019 确定核电厂异常工况下所有建筑物、构筑物、系统和设备的荷载。异常荷载包括由设计基准事故引起的压力荷载、温度作用、管道和设备反力、局部荷载，内部水淹作用于安全壳的荷载。在确定这些荷载时应尽可能最大限度地利用考虑到与荷载相关的运行状态的设计方法。应清楚地、完整地规定鉴别荷载的依据（或概率论法，或确定论法）
- b. 核电厂极端工况荷载对建筑物、构筑物、系统和设备的效应需要借助于降低或隔离荷载的设计加以减轻，或借助于在核电厂设计早期阶段计及这些荷载加以缓解。

#### 2.1.5.4.5 内部灾害

设计者应考虑在正常运行和事故工况的环境条件下内部灾害对SSCs的影响。主要包括：管道破裂、内部水淹和内部火灾、内部飞射物。

##### 1) 管道破裂

- a. 应识别高能管道和中能管道。核电厂内的流体管道根据压力、温度、流体性质等条件划分为高能管道和中能管道。高能管道定义为在电厂正常运行工况下最高运行压力大于等于 2MPa（表压）或最高运行温度大于等于 100°C 的管道。其它管道为中能管道。如果安全级管道公称直径大于等于 50 毫米，且作为高能系统运行的持续时间小于或等于电厂寿期的 2%，则将其视为中能管道。
- b. 应根据管道的特性（应力值、疲劳因子等）采用合理的方法确定破裂位置，包括管道的端点（固定点、与大管道或部件的连接处）和中间位置。参照 EJ/T 335-1998。
- c. 对于高能管道破裂考虑射流冲击、管道甩击、冲击波等局部效应和水淹、高压、

温度升高、湿度升高、放射性升高等全局效应；对于中能管道破裂仅考虑水淹、温度升高、湿度升高和放射性升高等全局效应。设计者应该保护安全重要 SSCs 免受这些效应影响。

d. 采用如下措施来预防高能管道失效：采用适当的措施，例如监视措施（增加在役检查或监测泄漏、振动和疲劳、水化学、零件松动、位移和侵蚀等），减少管道破裂的可能性；采用破前漏、破裂排除等技术，防止出现破裂。

e. 采用如下措施防护高能管道失效：在电厂布置上根据实际可能，应把冗余安全系统布置在分离的隔间内；安全相关的系统应尽量远离高能管道；如有必要，对那些在管道破裂事故后仍需维持功能的系统，应设置专门的部件来保证其冗余特性；应利用墙体、地板等结构来隔离高能管道破裂的效应；在隔离提供的保护不够的地方必须提供额外的屏障，如挡板或防护罩；在现有的隔离、屏障不能提供足够的保护时，可以设置管道防甩件限值管道的甩击；对于高能管道破裂产生的射流，可以采取限制射流的时间和/或空间的方法。例如，安装在上游的阀门和安装在故障点下游的止回阀可以在射流发生后快速停止喷射；为防止隔室超压可以在墙体、地板上开孔可以降低隔室压力荷载。对存在放射源的隔间开孔，要进行放射性评估。

f. 华龙一号机组应能承受任何大小的假设管道破裂，包括安全壳内的双端剪切断裂，其作为安全壳结构和安注系统的设计基准。

## 2) 飞射物

a. 内部飞射物防护主要考虑核电厂内部潜在飞射物源项对于安全功能的影响，内部飞射物不能妨碍核电厂三大基本安全功能的实现。内部飞射物不能破坏安全系列之间的分隔。内部飞射不应造成设计上不考虑失效的设备受到不可接受的影响。

b. 对于泵的飞射物，可考虑飞射物是由于转动部件超速、故障或应力超过极限而产生的。如果可以保证叶轮故障产生的飞射物不会穿透泵壳，则可以不考虑泵的故障产生的飞射物，否则需对其效应进行评估。同样的原则适用于风机和压缩机，以及电机（考虑定子对转子的包容）。对于反应堆冷却剂泵，为了预防其飞轮的瓦解，飞轮在材料、设计、制造和检查应执行严格的要求，以便在所有运行条件下，排除飞轮故障产生飞射物的可能性，否则应考虑其可能对周围设备和结构造成的破坏。

c. 对于汽轮机飞射物，应考虑汽轮机转子的解体。一般将汽轮机飞射物分为两种类型：高轨道飞射物：穿透汽缸向上飞射，如果下落时击中安全相关 SSC 可能造成损坏。高轨道汽轮机飞射物或者由于具有足够的速度而落于厂房外，或者由于速度甚低而对电厂大部分构筑物的撞击不构成重大危害。低轨道飞射物：穿透汽缸飞射，并可能直接击中安全相关 SSC。低轨道飞射物主要集中在汽轮机两端、轴线垂直方向 $\pm 25^\circ$ 角区域范围内。

d. 对于高能流体系统部件，考虑阀门及容器的失效导致的飞射物，考虑管道上传动器作为飞射物。

## 3) 水淹

应识别不能被水淹的系统设备，必须保证发生水淹时水淹源项对其的影响可以接受。对于核电厂内部水淹而言，需考虑厂房范围内的所有流体系统和箱体发生以下的情形：

- a. 高能和中能管道的泄漏和破裂。
- b. 消防系统动作（包括误动作）。
- c. 实现安全壳喷淋功能的系统误动作。
- d. 水箱失效或满溢。
- e. 设备隔离失效。

- f. 来自相邻厂房的水导致的水淹。
- 4) 内部火灾
  - a. 火灾对 SSCs 的影响除了直接影响外，还应考虑热辐射、烟气等影响。
  - b. 核电厂的构筑物、系统和部件的设计、布置应尽可能降低火灾发生的可能性，将火灾的影响降至最低。从核安全、人员安全、工业安全角度出发，有如下要求：必须在火灾发生时和发生后确保核电厂安全停堆、排出余热、包容放射性物质和监测核电厂状态的能力；设计应采取措施限制那些可能导致核电厂长期不可用的火灾；采取一定措施在发生火灾时能使工作人员安全疏散，并且为消防队员创造灭火救援条件。
  - c. 对于核电厂内部火灾而言，灾害源为核电厂中的可燃物。应考虑核电厂厂房内任何可燃物被点燃的情况。在核电厂中大量使用和存在的可燃物主要有：电缆、电气和仪控机柜、润滑油、活性炭（过滤设备滤芯）、燃油、其他含有大量塑料部件的设备、衣物和纸张等。对于采用防火包裹、防火箱体或其他有效手段保护的可燃物在保护手段有效的情况下不考虑其作为源项，例如长期位于水池中的可燃物。除可燃物外，也应对核电厂内点燃源和可能存在的临时点燃源进行识别，主要如下：能够产生点燃源（包括明火、火花和热表面）的固定设备和工序；由于设备故障包括突然释放能量、摩擦发热、电弧以及自燃所产生的点燃源；由于运行或建造活动包括焊接、切割、打磨以及使用热源或火源所造成的点燃源；其他所有可能的临时点燃源。
- 5) 内部爆炸
  - a. 应考虑地震导致的含有爆炸源的非抗震设备、部件失效引起的爆炸，以及高能管道甩击导致运输爆炸危险物质的管线破损，考虑爆炸引起的火灾对电厂的影响等。内部爆炸是指核电厂场区范围内发生的爆炸，内部爆炸又分为核安全相关建（构）筑物内部的爆炸和场区范围内的其它爆炸。
  - b. 设计和布置安全重要构筑物、系统和部件时，除满足其他安全要求外，还必须尽量降低外部或内部事件引发内部爆炸的可能性及其后果。对于厂区范围的其他爆炸，爆炸后果不能对核安全物项相关的厂房或区域造成影响。
  - c. 应对安全相关建（构）筑物内的爆炸，以及其他对安全重要物项有明显爆炸危害的区域识别爆炸源项。爆炸源项可分为化学爆炸源和物理爆炸源：化学爆炸源项主要有易燃易爆气体、液体（例如氢气、油雾）等；物理爆炸源项需考虑可能产生高压电弧的设备、可能产生沸腾液体蒸汽爆炸（BLEVE）的设备等。
- 6) 重物坠落
  - a. 在吊运设备运行过程中，吊运设备不能控制吊钩上的载荷时会有重物坠落的风险，本标准的重物坠落针对的是被吊物项的坠落。
    - a. 重物坠落可能导致在吊运区域内的设备和构筑物损坏，这取决于坠落物的重量、高度和设备与构筑物承受冲击的能力。同时还应考虑冲击可能导致坠落物损害的情况，尤其在坠落物中装有放射性物质的情况（如燃料组件）。
    - b. 除吊运重物外，地震也可能引起处于高处设备的坠落，在抗震分类和地震安全评价时应考虑其效应。

#### 2.1.5.4.6 LBB 评估

应用LBB技术的管道系统不考虑管道双端剪切破裂对结构、设备和部件产生的动态影响，应对管道应用LBB技术进行分析论证进行分析论证，主要技术内容包括：先决条件评估、泄漏监测能力评估、临界裂纹计算（裂纹稳定性分析）、泄漏可监测裂纹计算。



### 1) 先决条件评估

水锤、蠕变、腐蚀、侵蚀和疲劳等因素将影响断裂力学分析中裂纹形状的假设、荷载条件、材料性能等，导致分析结论的不可靠。因此需对LBB应用对象进行分析，以证明管道在服役条件下发生上述情况的可能性极低，除非在分析中可以精确地考虑这些因素的影响。先决条件的评估主要内容如下：

- 应评价由于不利的流动状态和水化学条件引起的侵蚀、冲蚀和空洞现象导致的管道退化的可能；
- 应评估材料对腐蚀的敏感性、潜在的高残余应力和易腐蚀的环境条件，这些因素同时存在会导致应力腐蚀裂纹；
- 应评价对象管道发生水锤的概率非常低；
- 需证明管道对蠕变和蠕变疲劳不敏感，低于 371.1℃的铁素体钢和低于 426.7℃的奥氏体钢可以不考虑蠕变的影响；
- 应保证管道材料在整个系统运行温度范围内对脆性机理断裂不敏感；
- 应评价热或机械荷载造成的疲劳不会导致管道失效。管道系统在历史记录中未出现疲劳裂纹和疲劳失效。应证明：管道中的冷热流体充分混合，热分层应力足够小；不会疲劳失效。

### 2) 材料需求

应用LBB技术的管道材料要求为高韧性材料，且需要有较强的抗腐蚀、抗老化的能力，在寿期内材料不会有明显的弱化。断裂力学和泄漏率计算中需要材料的弹性模量E、屈服强度 $S_y$ 、抗拉强度 $S_u$ 、材料真实应力-应变曲线、J-R曲线。上述材料力学性能可以通过两种途径获取：工业通用数据库；开展特殊的力学性能试验。工业通用数据库是指代表单个或一类材料的韧性和真实应力-应变数据，材料性能的下限值，需要足够的代表性和合理的保守性。

### 3) 分析位置

分析位置应选择应力最高和材料性能最差的部位，当应力最大部位和材料性能最差的位置不一致时应分别考虑。

### 4) 荷载及荷载组合

泄漏率计算采用正常运行工况的荷载（压力、自重和热膨胀的组合），临界裂纹长度计算采用电厂运行工况最大荷载（压力、自重、热膨胀和SL-2的组合）。泄漏率计算时正常工况的荷载采用代数和组合，临界裂纹计算时采用绝对值和组合（采用代数和时应乘以1.4的系数）。

### 5) 泄漏监测能力评估

监测能力需满足相关标准或规范的要求。泄漏监测系统应包括两种或以上定量监测装置和一种定位监测装置。两种定量监测装置应使用不同的监测机理，不会导致共因失效，且能在主控室发生报警，使泄漏监测系统具有足够的可靠性、灵敏性和监测手段的冗余性。

### 6) 泄漏可监测裂纹尺寸的确定

对于压水堆核电厂小破口失水事故问题，泄漏率的计算采用两相流理论，根据监测系统灵敏度和计算荷载确定可监测裂纹长度。考虑泄漏可监测裂纹源被微粒堵塞、泄漏预测和测量技术、人因和检查频度等因素，同时考虑裂纹张开面积、表面粗糙度和两相流计算等因素，可监测裂纹长度应考虑10倍裕量。

### 7) 临界裂纹计算

临界裂纹尺寸计算考虑2倍裕量。

## 2.1.5.4.7 飞机坠毁及商用飞机撞击

应采用筛选距离值法或筛选概率水平法评估可能的飞机坠毁事件。

参考HAD101/04的附录I, 筛选距离值需考虑的因素包括: 机场、航线、起落通道、起落次数、机场距离、军事设施或轰炸演习空域等。若给定厂址不在筛选距离内, 则飞机坠毁危险可以不考虑。

当给定厂址上的飞机坠毁概率等于或大于设计基准概率值时, 应在设计基准外部事件中考虑飞机坠毁。

通过结构设计、冗余、几何分隔等手段, 在飞机坠毁时, 保证反应堆停堆和维持安全停堆状态设备的可用性以及限制不可接受放射性泄漏后果。

对于设计基准飞机坠毁, 安全级厂房或构筑物外墙厚度应能足够防御撞击, 不会出现穿透, 碎甲, 各构筑物之间的安全级管道也应进行防御。

商用飞机恶意撞击作为超设计基准事件, 应保证在电厂经受撞击后, 仍能保证:

- 1) 反应堆保持冷却, 或安全壳保持完整性;
- 2) 乏燃料保持冷却, 或乏燃料池保持完整性。

#### 2.1.5.4.8 荷载工况组合

##### 1) 厂房与结构

- a. 预应力混凝土安全壳根据《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》(NB/T 20303-2014)及 NB/T、EJ 系列规范进行设计, 同时参考相关国内外法规要求。
- b. 抗震 I 类核相关厂房包含混凝土结构(普通混凝土结构和预应力钢筋混凝土结构)和钢结构, 按照《核电厂混凝土结构技术标准》GB/T51390-2019、NB/T 及 EJ 系列规范设计, 同时参考相关国内外法规要求。
- c. 当管道被证明适用 LBB 技术时, 则不应把破管荷载与地震荷载叠加。否则对于特定的载荷, 需要考虑管道破裂动态效应和地震载荷的组合作用。。
- d. 荷载组合时任何一种荷载足以减小其他荷载的效应时, 若该荷载经常出现或与其他荷载同时发生, 则该荷载效应的荷载分项系数应取 0.9。否则取 0, 即不参与组合。
- e. 抗震 I 类的建构筑物的基础设计需进行包括抗滑、抗倾覆和抗浮的稳定性验算, 其稳定安全系数应满足《核电厂混凝土结构技术标准》GB/T51390-2019 的要求。进行抗震计算时需考虑包括地下水影响的土-结相互作用。
- f. 非核厂房的荷载工况依据一般国家标准设计规范和相关行业设计标准进行确定。
- g. 如果特定的荷载组合对结构产生的作用无确定的规律, 需根据本手册有关荷载组合的要求, 采用多种方法和力学理论对荷载组合进行分析。荷载组合应尽可能与实际情况相符。当采用概率论荷载组合方法时, 应进行合理性论证。

设计时应根据现行核相关国家和行业标准的要求确定荷载组合。应基于确定论和概率论方法对荷载组合进行综合评估, 发生频率小于 $10^{-6}$ /堆年的事故导致的荷载不需考虑。

结构及构件的承载力设计采用极限状态设计方法, 满足下式要求:

$$R \geq S$$

R——结构的承载力设计值;

S——荷载效应组合设计值,  $S_i = \sum_j (\gamma_{ij} \cdot S_{ij})$ , 其中 $S_{ij}$ 为荷载标准值,  $\gamma_{ij}$ 为相应的荷载分项系数, 具体数值依据相关规范标准确定。

##### 2) 系统和设备

应根据管道系统和设备在核电厂中的功能和位置, 并按照相关规定进行分级。根据设计基准事件和事件组合中得出荷载和荷载组合。在选择荷载组合方法时, 应尽可能反应真实情

况，考虑实际事件序列和相对时间顺序。

对于每个系统和设备，运行条件要基于设计基准工况加以确定，设计基准工况包括设计基准一、二、三和四类工况。应对各工况的荷载组合进行力学分析和评定。同时发生的概率极低的事件不必组合，动荷载最大值同时出现的概率很低，采用SRSS方法进行组合。正常工况支架计算应考虑管道移动产生的摩擦力，但动荷载不考虑摩擦力。应用LBB技术的高能管道，不考破裂动态荷载的影响，支架设计不考虑管道甩动和喷射产生的荷载影响。

#### 2.1.5.5 设计方法

##### 1) 简介

- a. 华龙技术电厂的设计必须满足指定的工业和规范标准。所有的分析和设计技术应该与这些规范和技术保持一致，应进行鉴别和证实。
- b. 电厂设计者要考虑当前轻水堆电厂设计时的经验，辨识那些影响造价、进度、可维修性、可操作性和便于退役的设计难题，并针对这些因素采取一系列措施。
- c. 要贯彻最小化无必要考虑原则，该原则方法基于实际和可接受值。
- d. 当进行最合适、平衡且经济的设计时，应利用公认的动态分析技术，使电厂设计中采用最合理的假定。优化应基于电厂生命周期内的初始硬件造价、运行成本及维修成本的评估。
- e. 电厂设计要定一个设计方法，允许建造和安装误差，以及布置和定位时的潜在误差。设备设计要有一定的裕量以应对将来的预期修改。
- f. 应充分利用已证明的计算化设计工具以提高经济性、效率和设计质量，简化和控制信息交换。
- g. 应设计出一套保护设备免受外部腐蚀的方法。

##### 2) 厂房和结构

- a. 混凝土安全壳的设计、建造和试验应符合《压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范》NB/T 20303-2014、《压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构建造规范》EJ/T 997-96 和《压水堆核电厂安全壳结构整体性试验》NB/T20017-2010 等。
- b. 其他钢筋混凝土结构建筑物和构筑物应满足《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010（2015 年版）、《核电厂混凝土结构技术标准》GB/T51390-2019 和《压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构设计要求》NB/T 20012-2010 等；钢结构部分内容满足《钢结构设计标准》GB50017-2017 和《压水堆核电厂核安全有关的钢结构设计要求》NB/T 20011-2010 等。
- c. 动力学分析方法应符合《核电厂抗震设计规范》GB50267-97 的要求，所有的分析和设计程序都应符合适用的规范和标准，并经过鉴定和验证。反应堆冷却系统中主要部件的动力模型应与建筑模型耦合。
  - 土-结构相互作用：电厂设计者要基于代表性土层的土，对厂房进行土-结构相互作用分析。土-结构相互作用分析要考虑随着土层变化的场地运动（水平和竖向）。要采用经过验证的二维和三维的土-结构相互作用计算分析软件开展分析工作。要通过参数的变化和敏感性研究解决土-结构相互影响的不确定性。不确定性包括土壤参数和结构之间的相互作用，部分土壤和侧壁分离，地基的不对称性，不均匀土层和场地水位变化。扭转效应不在动力分析中考虑，但在设计中考虑。
  - 当基础埋置较深时，在计算模型中要评估厂房埋置效应的影响。当必须考虑时，应对外墙与回填土之间空隙进行适当的假设。
- d. 建筑物的抗震分析应在设计的早期阶段进行，以便为所有系统和设备提供合理的地震设计包络谱或设计时程曲线。同样，对作为主结构的子系统，比如主控制盘，

也应在设计中尽早进行抗震分析。如果在设计中引入了质量分布和刚度的明显改变，则应在建筑结构和主设备进入最终设计阶段后进行确认分析。

e. 楼面反应谱应从考虑土-结构相互作用分析中获得，并通过评估不同土壤的情况。通过组合多个土-结构相互作用分析的结果，并拓宽 15% 的峰值，按相关规范的要求形成包络的反应谱。

f. 用于动态分析的结构阻尼值是基于规范规定、经验值或试验值。

g. 砌体结构用于抗震 I 类厂房结构的可移动或者永久性分隔时，要考虑成厂房的子结构，并且考虑其对安全物项的影响。

h. 设计用于连接到混凝土表面的支撑应通过带锚栓的预埋件或其它合适的连接方式；混凝土表面的连接支撑通过混凝土预埋板或者其它锚固系统连接；混凝土膨胀螺栓用来在混凝土浇筑之后进行重新定位支撑。如果膨胀螺栓承担设备的振动荷载，应选用具有延性的膨胀螺栓。

i. 非核级结构、系统及部件应满足相应 GB 标准的要求。

### 3) 系统和设备

所有分析和设计程序应符合相应的规范和标准，并应经过评审和验证。应合理应用先进技术消除设计和分析中的过度保守。

机械系统和设备的动力学设计应基于结构的实际阻尼，以便合理应用柔性系统设计，设计中可通过使用吸能支架来增加系统阻尼。

应按 GB50267-97 中 3.3.2.3 节对楼层反应谱峰值进行拓宽。响应振型和空间分量应根据 GB50267-97 中 3.2.4 节进行组合，但对具有明显高频荷载成分的高于零周期加速度对应截止频率的模态响应，可采用绝对值法进行组合。

对于管道跨越多个楼层的谱分析，可采用多点谱分析法，多点谱分析法可以减少采用包络谱的单点谱分析法的过度保守。

刚性支架应满足“刚性”支架对应的刚度值，若不满足则应在管道应力分析模型中考虑支架刚度。如果模型中考虑了支架刚度，则应在所有荷载工况分析中一致地使用刚度值。如果无法设计成刚性支架，则可在管道分析模型中建立支架结构，或使用计算的刚度值。主管与支管直径之比大于等于 4，或惯性矩之比大于等于 100，则可解耦进行应力分析，主管分析模型不考虑支管，支管分析考虑主管的影响。管道分析中应合理考虑设备接管的刚度。

应根据连接管道的尺寸和强度确定合理的通用设计接管荷载。接管荷载设计值应作为采购规范的一部分提供给设备供应商。阀门采购规范中应规定合理的通用阀门加速度限值。

在线弹性地震动力学分析中，反应堆冷却剂系统和设备阻尼：SL-1 为 2%、SL-2 为 4%，管道阻尼：SL-1 为 3%，SL-2 为 4%。

在事故工况（D 级）荷载组合中，应考虑 SL-2 地震锚固运动（SAM）。

为了更合理的结构设计，应对主要设备和支架进行动力学分析，分析时考虑支架和主要结构件的显著惯性、刚度和连接件的影响。

事故工况（D 级）分析应考虑管道系统的非线性和固有能量吸收。应尽量减少阻尼器的使用，合理设置吸能支架来增强系统阻尼。非线性分析的应充分结合经验和理论，使用统一的非线性分析程序。

在监管规范允许的情况下，设备支架在事故工况下可采用非线性分析设计。可对具有显著高频（33~100Hz）含量的振动荷载进行非线性分析。管道所有支架的抗震设计荷载应基于对管道系统施加等效加速度荷载，该荷载可取为不低于 1.5 倍 SL-2 峰值加速度。

应确保参考反应谱包络设计反应谱。应制定分隔准则，以排除抗震 II 类管道、NS 管道和安全物项之间的地震相互作用。

应分析非抗震管道与抗震管道连接接口附近的管道和支架，以确保抗震设计管道的结构

完整性和规范边界处隔离阀的功能。抗震和非抗震管道区域的设计方法：

- a. 非抗震设计管段和系统抗震设计管段采用锚固点隔离；
- b. 采用三个方向的限位支架约束，将传输到抗震设计管段的响应限制在规范允许范围内。

应确保为管道和设备设计编制的程序包括了限制使用普通硬件的措施。其中包括管道和结构拐弯的剪切偏心，管道和大法兰面与扭矩有关翘曲。

附件和混凝土的连接采用预埋钢板或其它合适的预埋件，如带有锚栓的轧制槽钢或其它结构型材。如果混凝土浇筑后需要使用膨胀锚栓，为确保螺栓韧性应使螺栓直接受压或受剪。对于不受设备振动或管道动态条件影响的小荷载，采用楔形或套筒式锚固件代替剪力锚固件。

应制定合理的设计方法尽量减少设备分析和设计的迭代。尽可能利用成熟的计算机设计工具，以提高结构设计经济性、效率和质量。应考虑各设计专业之间的接口要求，并为简化和受控的信息交换作出适当规定，尽可能地利用计算机信息库。

管道和设备各工况的计算应力应小于相应工况的应力限值。正常工况采用A级应力准则，异常工况采用B级应力准则，紧急工况采用C级应力准则，事故工况采用D级应力准则。

设备及其支架之间的管辖边界，以及不同级别设备之间的边界，应按照相应规范的定义。直接连接到建筑结构的补充结构构件应视为建筑结构的延伸，并应遵守与建筑结构相同的规范和标准。如果不使用辅助钢，设备支架和建筑结构之间的管辖边界应位于标准支架和辅助钢或建筑结构的接口处。将支架连接到建筑结构或辅助钢（如焊缝或螺栓）的方式应在部件标准支架的管辖范围内。

其它设备及其支架设计应考虑静荷载、动荷载及其荷载组合。荷载和荷载组合应与分级、几何形状、位置和功能相适应。结构的强度和动态响应尽可能通过静态和动力试验或鉴定确定。应尽量使用标准化通用设计，以便于设计、制造和安装。

抗震I类风管和支架应考虑局部荷载进行设计，包括内压和外压、风阀和电机惯性荷载以及其它附件的惯性荷载。

应建立间隔距离准则，以避免结构、系统和设备之间的干涉。

标准设计的非抗震设备的锚固件，应根据制造商提供的操作荷载进行设计，必要时，由设备设计师进行补充，以及根据建筑分析确定的地震荷载。应评估供应商对建筑接口处的锚固规定要求（例如地脚螺栓尺寸、数量和配置）。地震荷载作用下的设备锚固仅为保护目标物和人员安全，非安全相关设备的采购规范不包括任何其它抗震设计要求。

#### 2.1.5.6 试验和鉴定

应根据适用的规范和标准对系统、构筑物和设备进行试验和鉴定，以确保在设计条件下能够执行其预期功能。

##### 1) 机械和电气设备的抗震和动力学鉴定

通常抗震要求分为：可运行性（O）、功能容量（F）、完整性（I）、稳定性（S）。需鉴定设备的抗震要求应与其预定功能相匹配。

抗震I类设备应设计成能承受安全停堆地震，且在地震发生时和/或发生后都能保持其安全功能。抗震I类的机械和电气仪控设备需考虑采用设备鉴定的方式证明设备在地震发生时和/或发生后仍能执行其预定的安全功能。抗震I类设备的鉴定准则要求如下：

- 可运行性：要求能机械设备和电气仪控设备在地震发生时和发生后仍能具有可运行（或可操作）的能力，以达到其安全功能；可运行性包含了功能容量、完整性和稳定性的要求。
- 功能容量：要求机械设备的所有零部件均具备承受地震荷载的能力，以限制部

件变形，保证其安全功能不受损害，功能容量包含了完整性的要求；

- 完整性：当机械设备作为压力边界的一部分时，要求其承受地震荷载后仍保持结构完整；
- 稳定性：要求机械设备承受因地震可能引起的方向或位置变化的荷载的能力（如，不可接受的摇摆、跌落或滑移，或部件剪切）。设备的稳定性包括其锚固和支承件抵御位移的能力。

抗震Ⅱ类设备是为了保护抗震Ⅰ类设备或者避免对抗震Ⅰ类设备产生不可接受影响。此类设备通常是在安装和设计过程中对其锚固和支承进行适当的分析，从而满足设计要求。

抗震鉴定输入：机械和电气仪控设备的抗震鉴定应考虑具体厂址的地震数据，这些数据可从各厂房楼层响应谱中查到。在抗震鉴定试验中，为保守起见，一般要求设备连续经受5次SL-1和1次SL-2的地震荷载仍能保持预期的安全功能。当用其它地震荷载替代5次SL-1，应提供充分的论证来说明其合理性。

对于需进行抗震鉴定的设备，尤其是要求具备可运行性的设备，应制定专门的抗震鉴定大纲来明确将进行的抗震鉴定活动。对于一些设备，可与环境鉴定大纲合并编写。抗震鉴定大纲的内容至少包含：设备的类型和设备标识；抗震鉴定的方法；鉴定的验收准则。

机械和电气设备抗震鉴定采用的方法有：

- 试验法
- 分析法：单独的分析法鉴定用于论证结构完整性以保证设计功能的实现，设备的可运行性不应仅用分析法验证。
- 试验和分析综合法：当仅仅采用试验法进行抗震鉴定受限制时，可采用试验和分析组合的方法。例如用试验法证明设备的可操作性，而用分析法证明设备结构和支承的完整性。
- 类比法：对于只有微小差异的同一类型设备，例如阀门和仪表，可以通过类比逻辑推理的方法进行鉴定。
- 经验数据法：当同类设备在真实环境中已经经受 SL-2 地震荷载后仍能保持其预期功能，可考虑用经验数据的方法来论证本设备在抗震上是可接受的。采用经验数据的方法有以下条件：
  - 经验数据库是可获取的；
  - 对有代表性的数据逐一分析；
  - 设备经受荷载的经验数据应与 5 次 SL-1 和 1 次 SL-2 的荷载相当。

## 2) 机械和电气设备环境鉴定

应确保机械和电气设备的鉴定是在其所处的运行环境下进行的。机械设备鉴定可根据适用的标准、预防性维护、定期检查、监督试验的要求，以评估所涉及设备等级在设计基准条件下的能力和性能。在恶劣环境条件下工作时，1E级电气设备应符合相应的环境要求。

应从设计工况的环境分析中提供环境包络参数，用于鉴定的环境条件无需过度保守。应充分考虑来自组合参数的共同作用。相应的环境鉴定参量包括但不限于：温度、压力、湿度、辐射、化学喷淋、振动和老化。

对于抗震Ⅰ类设备，其鉴定按如下顺序：

- a. 热老化；
- b. 运行老化；
- c. 辐照老化；
- d. 振动老化；
- e. 抗震鉴定试验；
- f. 事故辐照；

- g. 设计基准事故（LOCA）环境模拟试验；
- h. 事故后环境。

该序列中的试验并不是对所有设备都是必须的，可以根据设备需要鉴定的环境条件选择必要项进行鉴定试验。如果能证明是等效的，也可以采用其它的鉴定顺序。

#### 2.1.5.7 鉴定结果的保持

设计者应建立一个预防性维修、在役检查、定期试验以及更换计划以确定在核电厂整个寿期内维持设备处于鉴定合格状态。对于每种类型设备，都应建立一个测试清单以确定可能使鉴定失效的因素。应确定所有会使得鉴定失效的变更。

表2.1.5-1 不同安全等级的构筑物采用的规范标准

序号	结构类型	抗震I类	抗震II类	非抗震类
1	建筑物基础	NB/T 20308-2014等 NB系列标准	NB/T 20308-2014 等NB系列标准	GB 50007-2011等 GB系列标准
2	预应力混凝土结构	NB/T 20303-2014等 NB系列标准及《核 电厂混凝土结构技 术标准》 GB/T51390-2019	NB/T 20303-2014 等NB系列标准及 《核电厂混凝土结 构技术标准》 GB/T51390-2019	GB 50010-2010 （2015年版）等 GB系列标准
3	混凝土结构	NB/T 20012-2010等 NB系列标准及《核 电厂混凝土结构技 术标准》 GB/T51390-2019	NB/T 20012-2010 等NB系列标准及 《核电厂混凝土结 构技术标准》 GB/T51390-2019	GB 50010-2010 （2015年版）等 GB系列标准
4	钢结构	NB/T 20011-2010等 NB系列标准	NB/T 20011-2010 等NB系列标准	GB 50017-2017等 GB系列标准

表2.1.5-2 厂房结构设计和建造主要规范

序号	规范编码	规范名称
	HAF101-1991	核电厂厂址选择安全规定
	HAF102-2004	核电厂设计安全规定
	HAD101/01-1994	核电厂厂址选择中的地震问题
	HAD102/02-1996	核电厂的抗震设计与鉴定
	HAD101/04-1989	核电厂厂址选择的外部人为事件
	HAD101/12-1990	核电厂的地基安全问题
	HAD102/04-1986	核电厂内部飞射物及其二次效应的防护
	HAD102/05-1989	与核电厂设计有关的外部人为事件
	NB/T 20105-2012	核电厂厂房设计荷载规范
	NB/T 20012-2010	压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构设计要求
	EJ/T 997-96	压水堆核电厂核安全有关的混凝土结构建造规范
	NB/T 20303-2014	压水堆核电厂预应力混凝土安全壳设计规范
	NB/T 20332-2015	压水堆核电厂预应力混凝土安全壳建造规范
	NB/T 20011-2010	压水堆核电厂核安全有关的钢结构设计要求
	NB/T 20308-2014	压水堆核电厂核安全有关厂房地基基础设计规范
	EJ/T 1063-98	压水堆核电厂核安全有关的钢结构建造规范
	NB/T 20017-2010	压水堆核电厂安全壳结构整体性试验
	GB 50204-2015	混凝土结构工程施工质量验收规范
	GB 50205-2001	钢结构工程施工质量验收规范
	GB 50011-2010（2016年版）	建筑抗震设计规范
	GB 50267-1997	核电厂抗震设计规范
	GB 50009-2012	建筑结构荷载规范
	GB 50010-2010（2015年版）	混凝土结构设计规范
	GB 50017-2017	钢结构设计标准
	GB 50007-2011	建筑地基基础设计规范
	GB/T 50476-2008	混凝土结构耐久性设计规范

	GB/T51390-2019	核电厂混凝土结构技术标准
--	----------------	--------------

### 2.1.6 内外部灾害防护总原则

#### 2.1.6.1 核电厂内部灾害的防护层次

在设计中采用保守的设计，降低始发事件发生的频率（P1）。如适当地应用安全因子、全面地控制材料特性等。在核动力厂设计过程中采取某些措施，降低SSC受影响的概率（P2）。如在源和靶物之间设置屏障。或者在设计过程中，针对不同的内部灾害设置恰当的监测系统，以便在灾害发生之初或之前能及时探测并报警，便于人员及时干预，从而降低灾害的严重程度。如设置火灾自动报警系统、管道的破损监测和转动设备的超速监测等。如果系统受影响，对可能受影响的目标设备进行全面设计和鉴定，降低不可接受后果的概率（P3）。

设计过程中，SSCs的设计都应尽量采用故障安全设计。即这些物项失效将把核动力厂带到趋于安全的工况。部件应该经过假设始发事件对应的环境下的合格鉴定，具有抗灾害的能力。

按优先级顺序排列，最佳的设计方法应是实际消除假设始发事件（F1减小到可接受）；其次是将SSCs与灾害源隔离（P2减小到可接受）；使后果可以接受也是一种选择（P3减小到可接受）。应尽可能保证第二层次的有效性，必要时还应保证第三层次的有效性。某些情况下可能需要使用所有三个层次防护的组合。

#### 2.1.6.2 核电厂设计中应从以下方面考虑内部灾害的防护

为了防止安全功能的丧失，执行同一安全功能的冗余物项之间必须尽可能地实体隔离，以保证内部灾害不能同时影响冗余系列的安全系列或执行同一安全功能的不同系统。作为实体隔离屏障的结构部件应能承受内部灾害的效应影响。采用几何分隔的方式应能保证灾害源项与需防护物项有足够的距离，保证需防护物项不会被同时影响，安全功能仍能保证。

内部灾害发生后需要保证不影响设计中不考虑失效的设备的功能。

应保证主控室可居留性，一旦主控室受灾害影响不可用，必须保证远程停堆站的可用性及可达性。

核电厂SSCs设计应尽可能避免由内部灾害引发事故工况。

独立于事故工况的内部灾害，为限制其影响范围，应将其影响限定在建构筑物或分区内，对于包容放射性物质的厂房，应保证放射性物质的包容。

事故工况造成的内部灾害效应（如主给水管道破裂事故的甩击、喷射、水淹等效应），可应用事故分析的原则和验收准则，保证用来处理这些事故的安全级SSCs在事故发生后不受该内部灾害的影响，仍能执行原有的安全功能。

内部灾害防护措施应进行安全分级，防护措施的安全分级应与其失效后果对安全的影响相匹配。

核电厂内部灾害防护设计应考虑足够的保守度以涵盖在识别和量化内部灾害效应方面的不确定性。

应根据内部灾害防护设计目标开展核电厂内部灾害安全评价，以证明核电厂内部灾害防护设计是恰当的。

核电厂应具有尽早探测和有效干预内部灾害的能力。

#### 2.1.6.3 典型内部灾害防护原则

##### 2.1.6.3.1 内部火灾

###### 1) 火灾预防



尽可能选用不燃材料的设备和介质。

高温、高风险点燃源应该与其他设备、可燃物尽可能隔离。

## 2) 火灾分隔

对核安全相关物项，需将火灾的影响范围限定于冗余安全系统的一个系列。

对于人员安全和工业安全，火灾影响的范围应控制在防火分区内，且不应该妨碍人员疏散及灭火行动。

## 3) 火灾控制

火灾探测应实现快速探测早期火灾、定位起火点位置、触发报警、并在一定情况下启动自动装置。

在假定可能发生火灾的所有工况下，火灾自动报警系统均应是可用的。

固定式或便携式灭火设施的设置情况取决于火灾特性及受保护设备的类型，当火灾荷载大到发生的火灾有可能影响到执行安全功能的冗余设备时，则必须设置。

火灾控制各相关系统安全分级的确定应充分考虑其所保护目标失效的安全后果。

火灾探测器和灭火系统形式的选择应基于所保护的目标，并与使用的环境和火灾特性相匹配，且不应影响核安全和人员安全。

室外消火栓和室内消防竖管应分配给所在区域足够的消防用水。

### 2.1.6.3.2 内部爆炸

#### 1) 内部爆炸的预防

应采取措施将内部爆炸风险减至最小

氢气瓶或氢气专用容器以及供应管线应尽量设置在包含安全重要物项的区域以外的区域或室外。若布置在室内，设备应设置在靠近厂房外墙位置，且与包容安全重要物项的区域相隔离，并在贮存处设置通风系统，以保证在发生气体泄漏时维持氢气浓度远低于爆炸下限。应设置能在适当的低氢气浓度水平下报警的氢气探测设备。

应在氢气冷却汽轮发电机组处设置监测装置，以指示冷却系统中的氢气压力和浓度。在充、排气前后应使用惰性气体（如二氧化碳或氮气）清扫充氢气部件、相关管道和风管系统。

应考虑使用氢气释放量较少的蓄电池，但不能认为该措施可以消除产生氢气的风险。应在运行中可能产生氢气的蓄电池间设置独立的排风系统，并直接排风至厂房外，使氢气浓度保持在低于爆炸下限的安全水平。

蓄电池间应设置氢气探测系统和通风系统传感器，氢气浓度接近燃烧下限水平和通风系统故障等信号应能在主控制室报警和显示。应在蓄电池间布置和通风系统设计中防止氢气局部积聚。若蓄电池间通风系统中设有防火阀，应考虑其关闭对氢气积聚的影响。

所有失效可能导致内部爆炸发生的物项需能够承受设计基准地震。

#### 2) 内部爆炸的防护

应尽可能将可能产生或有助于产生爆炸性混合气体的易燃气体、可燃液体和可燃物料远离安全重要物项所在区域，同时应避免通风系统将爆炸性物质传递至安全相关区域的可能。如不能实现，应严格限制这些材料的数量和提供足够的贮存设施，并将活性物质、氧化剂和可燃物料相互隔离。

易燃压缩气体钢瓶应安全地存放在远离主厂房的专用围场内，并根据所处局部环境条件提供适当的保护。

制氢站等存储有大量爆炸性物质的场所应该与核安全相关厂房保持必要的安全距离。

设计中应采取措施限制冲击波超压、飞射物和火灾等内部爆炸的后果，具体措施包括泄爆（如爆破膜或其他压力释放装置），安全重要物项多重系统的防护分隔等。

对于不能消除的爆炸危害，应根据安全目标评价假想爆炸对安全系统的影响，识别爆炸

后需要维持其功能的设备，并对其进行适当的防护设计或鉴定，确保其可靠性。还应评价爆炸对主控室和辅助控制室运行人员的疏散和撤离路线的影响，必要时应采取特定的措施。

#### 2.1.6.3.3 内部水淹

##### 1) 内部水淹预防

采用高要求的标准规范进行设计和采购，如采用破裂排除准则或采用破前漏技术等，尽可能地减少容器或者管道破裂或泄漏的频率。

容器、水池四周宜设置水密性衬里，以防发生泄漏。水密性衬里（或密封件）应采用不易退化的材料，并且能承受所预计的最大载荷。

在设计中应提供预防水箱满溢的设计措施（如传感器），以限制由于水箱满溢导致的内部水淹的可能性。

对于需要满足水密要求的贯穿件，应采用不易退化的材料，并且尽可能地布置在方便检查和维修的位置。

合理布置，尽可能地减少内部水淹源对核安全重要物项以及易受水淹影响设备的影响。应提供足够的监督措施，如对可能发生破裂或泄漏的容器或管道进行定期检查，尽可能地减少管道破裂的可能性。

进入核电厂的人员应通过严格的培训，必须严格按照满足电厂安全要求的程序来执行所必须的操作，以尽量避免人因失误所导致的内部水淹。

##### 2) 内部水淹分隔

对核安全相关物项，应尽可能地将内部水淹的影响范围限定于冗余安全系统的一个系列；如不可避免地有冗余安全系统的多个系列布置在一起的情况，需满足一定的空间分隔，避免内部水淹对冗余安全系统的多个系列造成威胁。

限制内部水淹蔓延可通过划分水淹分区的方式来实现。水淹分区的实体屏障限制了内部水淹从一个分区向另一分区蔓延。

##### 3) 内部水淹控制

设置排水设施。

对泄漏位置进行探测和隔离。

#### 2.1.6.3.4 高能管道失效

##### 1) 高能管道失效预防

采用适当的措施，例如监视措施（增加在役检查或监测泄漏、振动和疲劳、水化学、零件松动、位移和侵蚀等），减少管道破裂的可能性。

采用破前漏、破裂排除等技术，防止出现破裂。

##### 2) 高能管道失效防护

在电厂布置上根据实际可能，应把冗余安全系统布置在分离的隔间内。

安全相关的系统应尽量远离高能管道。

对那些可能受到管道破裂事故影响并仍需维持功能的系统，宜设置专门的部件来保证其冗余特性。

在隔离提供的保护不够的地方必须提供额外的屏障，也可以设置管道防甩件限值管道的甩击。

对于高能管道破裂产生的射流，可以采取限制射流的时间和/或空间的方法。

为防止隔壁超压可以在墙体、地板上开孔降低隔壁压力载荷。对存在放射源的隔间开孔，要进行放射性评估。

#### 2.1.6.3.5 内部飞射物

#### 1) 内部飞射物预防

高速旋转的泵或者风机应有足够坚固的外壳保证叶片飞射物能够滞留在设备内部,或者降低飞射物的能量以保证不会危及安全重要物项。

阀门安装应尽量保证阀杆飞射物不朝向安全重要物项,在阀门设计中尽量减少飞射物的产生,如阀杆带有托座能够防止在损坏时成为飞射物。

汽轮机轴向沿核反应堆厂房径向布置,并对汽轮机进行超速试验。汽轮机轴向垂直方向的 $\pm 25^\circ$ 锥形区域不应布置有安全级物项。

#### 2) 内部飞射物防护

通过距离使需防护对象在潜在飞射物的射程之外。

通过设备(部件)的设计和方位布置进行防护,例如改变飞射物的方向以阻止其击中安全重要设备;或者将这些飞射物反射到一个无害方向的装置。在某些情况下对旋转设备可增设这样的装置。

可能被同一可信的飞射物源同时影响的各冗余系统实体隔离防止共模失效。

必要时,可设计设备使之可经受对应飞射物的荷载。

### 2.1.6.3.6 重物坠落

#### 1) 重物坠落预防

厂房布置设计时应尽可能满足架空起重机主要的单一直线运动的吊运空间,减少重物吊运时的操作。

若在与安全级SSCs无法实现隔离的区域吊运设备,则在SSCs附近进行设备吊运时需采取额外保护措施。

除燃料组件外,重物吊运不允许在燃料(包括受辐照的燃料)上空或附近经过,防止乏燃料运输容器或其他重物跌落在燃料上对燃料造成破坏。

在安全停堆地震期间和地震之后,吊车的设计应能保持住载荷不发生坠落。

提供足够的设计措施来降低故障的概率。

对吊车的联锁设计、电缆、制动器、绞索、传送带、挂钩和相关物项等应进行定期检查和维修。

仅在特定的正常运行工况下进行吊运。

降低潜在的重物坠落风险,对吊运装置的操作管理和吊运路线的规划上采取措施并通过行政管理来加强。

#### 2) 重物坠落防护

重物坠落防护可以通过厂房布置上将冗余系统分隔布置、冗余设备的分隔布置等来避免同时受到重物坠落的影响。

对楼板或者地板加厚或者采用加气混凝土,使其能够承受重物坠落的荷载,进而避免影响下一层房间布置的安全重要设备。

### 2.1.6.4 核电厂外部灾害的防护层次

保护构筑物、系统和部件(将核动力厂带到并维持安全停堆状态所必需的或其失效会导致不可接受的放射性释放)免受所考虑的假设始发事件对其产生的所有可能影响。

构筑物、系统和部件本身的抗灾害能力(如其质量鉴定)。

其他特性,如可能的固有安全特性、安全重要系统的多重性、多样性和实体分隔。

应根据不同厂址确定厂址特有的外部灾害类型和设计基准。

超设计基准灾害应考虑陡边效应,可考虑确定论和概率论分析方法,采用足够的裕量来应对外部灾害避免发生陡边效应。

设计基准外部灾害及已考虑的超设计基准外部灾害发生后应保证主控室和远程停堆站可用性和可达性。

外部灾害防护设计时，应考虑长期缓慢的现象，应能够对其检测预警，长期后果也应予以考虑。

#### 2.1.6.5 典型外部灾害防护设计原则

##### 2.1.6.5.1 飞机坠毁

设计基准飞机坠毁事件应考虑撞击、二次飞射物和燃油燃烧引起的影响。

应考虑飞机坠毁的撞击效应的防护，墙壁和屋顶结构不得在撞击下发生贯穿穿透；构筑物、系统和部件在撞击下的任何变形或振动应能满足其安全功能执行，可考虑采用减震等措施。

如果建筑结构损坏（包括隆起）可引起安全设备损坏而削弱安全功能时，则应增加结构强度或确保多重设备之间具有足够的距离。

撞击导致装有放射性物料的设施损坏不应引起释放的放射性剂量超过容许限值。

如果评估设备满足设备鉴定地震谱的要求，但不满足飞机坠毁高频振动的要求，则应对该设备制订特定的设备鉴定方案。

考虑飞机坠毁产生二次飞射物的影响及燃料引起的火灾和爆炸。飞机坠毁导致的厂房外部的SSCs损坏不应影响安全功能的实现，防止燃烧产物进入通风或空气供应系统内，防止燃烧产物及燃油通过通道或可能由坠毁造成的开孔，或以蒸汽或气溶胶形式通过进口风道进入建筑物内，导致可能的着火、爆炸或有害副作用。

应采用现实模型来评价和确定核电厂抗商用飞机撞击的措施，评价内容包括撞击造成的整体效应、局部效应、振动效应和燃油（火灾和爆炸）效应。评价结果应表明，设计可以维持反应堆冷却或安全壳完好，以及乏燃料水池的完整性或乏燃料的冷却。

在具备超设计基准飞机坠毁可能的厂址，反应堆所在厂房、乏燃料水池所在厂房、主控室所在厂房必须考虑超设计基准飞机坠毁。

##### 2.1.6.5.2 外部爆炸

应确定可能的爆炸源项，爆炸波的大小，地面效应和产生的飞射物，评估其对相关构筑物的影响。

外部爆炸源项应考虑涉及固体、液体、蒸汽或气体的化学反应。

外部爆炸产生的冲击波和飞射物不得威胁安全相关构筑物。

##### 2.1.6.5.3 极端温度

在核电厂设计中要考虑气温低于零度时结冰对厂区设施的影响，冻雨和冰雹对厂房结构荷载增加的影响，考虑低水温和海面结冰对最终热阱造成影响。

低温会导致安全关键部件（例如起重机，加油机门架和支撑结构）发生脆性断裂的风险增加，低温使暖通空调设备的热负荷增加。

考虑盐基除冰剂的长期腐蚀作用，考虑长期高温对厂区表面材料的影响，考虑高温对厂房结构的热荷载，考虑长期高温引发的极端气象情况，如雷暴、强降雨或干旱导致水位降低，考虑长期高温对最终热阱及通风系统换热效率的影响。

考虑极端温度下的人为因素可能会影响人员执行安全相关任务的能力。

##### 2.1.6.5.4 极端风

风造成的灾害考虑空气压力和飞射物对厂房构筑物的影响。

核电厂极端风要考虑强风、热带气旋和龙卷风，其中热带气旋的效应可以被强风和龙卷风的效应包络。

应根据风产生的空气压力对构筑物进行评价和防护设计。

必须考虑强风和龙卷风造成的飞射物对构筑物的影响，包括下列三种飞射物：

- 1) 具有高能动、在冲撞时将发生变形的重飞射物；
- 2) 大的坚硬飞射物（对此必须提供穿透保护）；
- 3) 尺寸足够小能够通过保护屏障的坚硬飞射物。

需要对安全相关SSCs进行极端风及其飞射物防护设计，在厂房内的SSCs所在厂房能够抵御极端风及其飞射物荷载，参照现行NB/T 20105。

极端风对厂房外部的设备所引起的损坏不会造成使机组达到并维持安全停堆状态所需设备的二次损害。这些设备包括LOOP或LUHS以及LOOP和LUHS的组合工况下用于事故处理的设备。

#### 2.1.6.5.5 外部水淹

在厂址选择时充分调研水文条件，至少调研30年的数据，考虑异常海平面现象，推测未来几十年海平面变化，选择合理的厂址。

外部水淹源项除考虑洪水、降雨外，还应包括厂区蓄水结构或设备破坏造成的水淹。

安全相关SSCs设置在设计基准洪水位以上，或者应具有足够的工程设计来保护这些SSCs并确保缓解对SSCs的水淹荷载，厂房地坪与室外地坪标高差不小于设计基准条件下厂区水淹高度，保证厂房内安全相关设备不受外部水淹影响。

要考虑由于地下水的影 响，在场地边界可能存在侵蚀，在结构周围冲刷或回填的内部侵蚀。

要证明超设计外部水淹发生的概率很小，或为设计基准水淹提供足够的裕量，以证明所选的超设计基准洪水是合适的。

应考虑气候变化对水文的影响，包括对未来温室气体排放导致的全球温度变化引起水位变化。

#### 2.1.6.5.6 地震

地震防护应确保使电厂达到并维持安全停堆状态的安全系统能执行其功能，并保持其完整性或稳定性，且保证足够的裕度满足整个核电厂概率安全目标。

在选址调研时，应根据可能对核电厂设施、安全产生影响的地震产生的潜在危险现象的类型、大小和从源头到现场的 距离来确定。

核电厂抗震设计应避免陡边效应，以便地震危险不会对整体风险造成不成比例的影响。应评价安全功能失效可能对核安全造成的影响，可以通过地震PSA提供评价，以证明风险达到合理可行尽量低。

考虑地震情况下非抗震设备对抗震设备的影响，同时需要考虑地震导致的其他灾害。

#### 2.1.6.5.7 雷击

核电厂设计时要求考虑防止由于雷电造成的二次灾害和间接影响，确保安全功能的执行。

#### 2.1.6.5.8 生物现象

应防止海藻、蚌类或蛤的过度生长或过多的鱼或水母而造成的阻塞影响最终热阱的冷却水系统及服务用水的供应。

应防止由于树叶、昆虫、鸟类等阻塞过滤器可能会造成的通风和空调系统故障。

应防止落叶和类似的碎片会堵塞排水沟和冲沟。

应防止老鼠及细菌破坏I&C电缆。

应防止硫酸盐还原菌诱导暴露于海洋环境的钢结构的腐蚀效应及加速老化。

#### 2.1.6.6 灾害组合

应考虑下面三种灾害组合形式：

- 1) 伴随出现的灾害，如洪水和降雨伴随出现。
- 2) 因果关系的灾害（即灾害导致的危险），即两个灾害之间存在一定的因果关系，如地震导致内部火灾。
- 3) 独立灾害间的组合以及灾害与事件工况的组合，如在DBC2工况下发生地震。在组合时可适当降低各独立灾害的设计基准。

#### 2.1.7 建造和可建造性

##### 2.1.7.1 引言

华龙技术电厂的建造最低要求要支持华龙技术电厂计划总目标，要在提高生产率，改进施工技术、有效缩短施工时间、降低电厂投资成本和使用风险方面起到作用。必须将设计过程与建造要求紧密结合，增加施工能力，策划和控制好电厂设计者与建造者之间的接口。

华龙技术电厂的建造要求要在如下方面做出要求：项目计划目标，设计、施工和启动计划的结合，在设计、施工和启动活动的计划和控制中使用先进的计算机技术，系统完工、试验与业主（运营者）验收的结合。

##### 2.1.7.2 建造计划

###### 1) 计划和时间表

华龙技术电厂设计、建造、采购、检验和试验活动应充分计划并制定时间表。时间表应确定每个主要实体之间重要活动的接口。控制和实施部门应计划和编制其活动时间表，并保证计划的有效性。

###### 2) 里程碑总进度表

里程碑总进度表应是最高层次的进度表，是对工程设计、采购、施工和系统启动活动的总体概括及进度安排，规定主要工程活动计划的日期和持续时间并用于向业主报告的进度状态。进度表日历的单位应使用月表。业主应指定单位负责制定里程碑总进度表。设计单位、建造单位和调试启动单位以及业主应提供支持该进度表的持续时间和网络关系的输入。进度表应由指定的单位定期确定其状态。里程碑总进度表及其更改应由业主批准。

里程碑总进度表中表示的施工时间，从第一罐混凝土开始到首次装料，不应超过48个月，从第一罐混凝土开始到电厂担保期完工总的时间不应超过54个月。对特定现场，允许有18个月的现场准备时间。

###### 3) 施工总进度表

施工总进度表应作为施工时间表的最高层次，在适合施工计划层次上规定活动网络关系和持续时间。施工总进度表应根据前期的设施或建筑物施工进度、后期的系统安装进度来编制，并覆盖全部施工现场活动，包括现场准备和施工设施安装。

施工总进度表的逻辑关系应规定与设计完成的总进度的接口以及与系统建造完工向启动试验或启动队移交的启动总进度的接口，包括重要模块制造的移交。施工总进度表应以周为日历单位，显示主要合同活动，其里程碑应与里程碑总进度表显示的日期一致。

在施工总进度表应识别全部主要施工设施。应识别施工过程中的电厂永久性设施、设备的初始安装和整修活动。

分承包商应指定与施工总进度表、其它电厂时间表一致的时间表。

随着施工进度，应定期评估施工总进度表的适用性和有效性。

#### 4) 中层施工时间表

中层施工时间表应比施工总进度表更详细，并覆盖前6个月的施工。按照比当前施工活动提前6个月的原则每月滚动更新中层施工时间表。表中的关键日期应与施工总进度表中表示的里程碑一致。

#### 5) 月和周施工时间表

月和周施工时间表用以保证设计文件、材料和技工可用或在特定日期可用，应覆盖适合于计划近期工作活动的持续时间，并与项目时间表一体化。月和周施工时间表的持续时间和范围应适合从区域监督员到领班工作的需要。

#### 6) 启动总进度表

启动总进度表用于规定启动试验活动的网络关系和时间。应在工程前期以系统和子系统为基础制定启动总进度表，用以详细规定系统试验的顺序。启动总进度表的里程碑应与里程碑总进度表表示的日期一致，以周为日历单位。

启动总进度表应从系统移交活动为开始，以超过燃料装料日期（施工完工）6个月（或保证证明完工日期）为结束。启动持续时间应与施工持续时间相衔接，以便从开始施工至保证期完成的总时间应不超过54个月。

负责施工时间表的人员应参加设计总进度表和启动总进度表的审查，以便保证适当地进度接口，及其与施工时间表的一致性。

#### 7) 施工计划

工程前期应使用叙述形式制定施工计划，用以描述怎样管理施工活动，并建立制定施工总进度表的基础。施工计划应描述主要活动方法或工作顺序、领班工人的可用性、根据生产评价确定的领班配备手段；重要里程碑时间表；施工单位；安装数量跟踪和报告方法；材料控制和仓库，户外贮存和材料向工作区的投送；大型施工起重机的使用；现场临时施工设施，商店和办公室；现场模块化；系统完工和向调试单位移交计划和识别分包合同的工作范围。业主应审查和批准施工计划、施工计划的修改。施工计划应按照所选厂址气候严酷度明确气候防护要求。

施工计划应说明设计计算机模型、塑料模型的使用方式，以确认施工安装顺序和接口点。应说明计算机模型技术的使用方式，以改进施工接口时间表。

应使用现代技术制定施工顺序图，以识别完成施工任务的每个主要活动区域。需要识别的项目包括材料和支撑设备和材料处理、人力和要求的出入口、要完成的检验和要求的文件。

#### 8) 程序控制

在施工和启动试验阶段，施工人员应对计划的每周安装目标进行实际监测，并向项目数据库输入准确的数据。数据库应根据每一电厂区域的货物和系统调整状态。应使用适合测量的定量术语对大宗物项的施工进展进行监测。当安装优先权相对系统完工基准有所变更时，应对区域和系统的完成情况进行定量测量和报告。

### 2.1.7.3 设计/建造的一体化

施工人员应审查用于制造、安装等文件，所有工程设计文件应在文件控制系统上可查。施工前应进行下列活动：

#### 1) 施工审查：

施工、设计和质量控制人员对施工顺序和技术进行审查，以保证电厂采用的是最佳施工。审查应使用缩小比例的电厂塑料模型或3D计算机模型，并向业主提供建议及结论。

#### 2) 确定边界：

在流体和电气系统图上确定启动系统和子系统的边界。启动和试验人员应根据启动总进度表建立每个子系统完工和施工移交的优先顺序。

#### 2.1.7.4 设计/建造的接口

设计和施工期间，应指定施工审查大纲以评估设计变动的成本和进度表的有效性。施工审查组应包括来自施工单位、工程设计单位、业主单位有相关经验和知识的人员。审查过程中，可提出更具有施工优越性的设计变更。

#### 2.1.7.5 现场采购和材料控制

##### 1) 采购大纲

施工人员应指定材料采购程序并确认分承包活动，包括分合同包、投标、裁决和分合同的行政管理。

##### 2) 现场分包合同和行政管理

施工人员应制定工作大纲和承包方清单明确对分承包方的行政管理和工作计划，并得到业主的批准。应与电厂设计者协调分承包合同的合同范围和设计文件。

##### 3) 材料控制和设备贮存

承包方应制定现场材料控制程序，并在施工现场接受交付之前得到业主批准，以满足规定的设备贮存和防护技术规格书的要求。现场材料控制程序应包括如下内容：仓库内部件和材料的防护、贮存和监督；接搜检验；贮存材料的识别、定位和检索；装卸设备。

如果启动试验活动包括建造承包方，承包方应协调购买备件的工作计划，确认启动期间能够实现快速响应备件可用的方法。

材料控制人员应制定在施工后期材料从临时仓库设施移至永久仓库的移交计划。

#### 2.1.7.6 先进的建造技术

在施工计划中，应对将要实施的先进建造技术及其实践方式进行说明。施工承包方应在施工前与设计单位就施工计划的实施细节进行协商沟通，以确保设计特征能落实到施工建造中。

#### 2.1.7.7 模块化建造设计

华龙技术电厂应在设计的前期阶段确定用于电厂模件类型的清单。模件类型如下：完全在现场外制造的、主要部分现场外制造最终在现场或存放区装配、或完全在现场模件装配区制造。设计人员和施工人员应致力于通过设计推动模块化建造。

模块的设计应尽量使用标准的元件和部件，应考虑用于安装、施工装配、维修、运行、搬运和更换部件的进出空间。模块交付制造时，模块设计应全部完成。

对于由场外制造商提供的复杂模件，在设计过程中应就如下方面对制造商进行咨询确认：运输因素、模块接口的制造容差、用于运行和维修时设施的进出措施。

##### 1) 模块化计划

对于包含复杂接口（永久性结构、多专业部件或材料）的大型设备应制定模块化计划，并确定是否由现场外供应商制造或制造商现场转配。制定计划时，应完成对供应商、制造商采购和检验过程的评估。业主应批准模块化计划。

##### 2) 模块安装顺序

应确认模块安装路径和安装顺序，以便根据安装优先顺序确定制造和交付要求，同时应考虑启动试验系统时间表的要求。应确定外部建筑物扩围的开孔和墙、地板上临时开孔的尺寸和位置。



应提供大容量起重机以便于大型模块的操作和安装、支持“垂直”建造技术。厂外模块制造商必须使用要求的识别材料和部件、报告模板、公用工程数据库资料，并与建造单位的程序/格式标准化。

现场劳动协议应按照国家法律法规要求制定。

#### 2.1.7.8 建造设施

##### 1) 建造使用的永久性电厂系统

承包方建议使用的系统或部件应得到业主的同意。设计单位应审查附加服务要求，证明采购和设计要求是兼容的，并充分反映了采购规格书的要求。承包商应负责系统维护工作，并保证当系统专为电厂永久性使用时，是处在较新的状态。

##### 2) 临时现场设施

建造方应制定现场计划用于安排现场临时设施的空间和位置。现场计划应明确临时设施与永久建筑物之间的关系，模块化制造车间，分承包方的设施、仓库、工具间、中间集结待运区、特殊试验设施的位置，并说明永久性电厂结构建造的顺序。设施布置方式应能够满足有效利用空间、减少工艺活动、便利调用工具和材料的要求。现场计划应说明工作人员停车、进入现场、材料部件和大型模块组件运送到安装区的位置。

承包方应制定办公设施计划，满足业主批准的建造人员的办公需求。办公设施应包含办公室、会议室和支持服务。承包方应规划现场混凝土搅拌站和备用搅拌站的位置和进出路线，并考虑材料供应和混凝土运送车辆对其它建造活动的影响。

##### 3) 建造吊车的进出

承包方应确保在建造的各阶段吊车的摆动、臂长和能力能充分覆盖电厂结构，并在第一罐混凝土之前12个月完成确认。吊车应具有以下能力：至少能吊1000吨重物，塔吊至少有6000米吨的能力，吊车接近主结构时能起吊结构中心的货物。

#### 2.1.7.9 系统完成和调试试验

##### 1) 启动试验系统边界

应在建造开始前，确定启动试验的移交边界。系统边界图应明确标明子系统边界及范围。当进入启动试验阶段时，施工单位和启动试验单位应就建造完工状态的范围达成一致。

##### 2) 建造和启动试验接口

施工单位与启动试验单位应就所有系统活动进行密切协作，以便保证从建造完工到启动试验阶段的顺利过渡，包括对启动总进度表和支持计划的审查。

##### 3) 设备维修

在建造和启动试验阶段，施工单位应制定有关固定设备维修工作的管理和控制流程。规程应明确建造单位、启动试验单位之间的责任划分，并达成启动试验协议。

##### 4) 业主的使用

应明确设备移交前，业主用于试验可占用的设备范围。

##### 5) 启动试验及接口矩阵

应制定启动计划规定在启动试验活动中各单位的责任接口矩阵。接口矩阵应建立在系统设计的基础上，并规定从建造移交到启动试验、开始运行和商业运行的活动。启动计划的编制责任单位应由业主指定，启动计划需得到业主的批准。

##### 6) 启动工作批准

启动试验单位应制定大纲用于在建造移交后对系统活动的控制，需包括下列要素：建立隔离和安全边界，规定启动试验单位在边界内的工作授权程序，制定工艺保护标记程序，保证设备的可用性，规定必需的操作协作。

### 7) 验证竣工条件

设计单位应明确需要工程单位人员进行安装条件现场验证的设计范围,确保设计意图得到正确的实施。建造开始前,应明确设计验证的范围和时间表,以保证对现场演示和数据后续评估活动与建造竣工或启动试验里程碑相关联。

每个验证活动结束时,应起草最终报告,用于说明调查结论的评估和处理。

### 8) 业主对系统的接收

业主应设置启动试验管理机构,在系统和子系统建造竣工时,代表业主进行系统和子系统的验收活动。该机构完成的活动应包括如下方面:监督子系统预运行试验的进展,参与每个子系统的巡视和竣工审查,同意系统移交前要求竣工的项目清单,规定业主的文件移交要求,监督安装和启动试验活动的文件提交,审查预运行试验程序和验收标准,对已竣工但业主没有接受的部分系统进行监管,对安装竣工的但还没有完成接收试验和移交的部件进行监管,监督启动试验活动的进度执行,编写预运行程序并完成启动试验机构指定的试验项目。

应制定业主接收程序,并验证如下内容:受影响的系统的所有建造试验是否全面,系统的接受试验是否全面,能够纳入电厂竣工清单的未关闭项目,竣工进度表,维修和贮存记录的完整性及可提交性,标注按照竣工条件可移交的系统边界范围,巡视系统或区域实际条件,配置管理系统是否已具备移交业主的条件,不符合项关闭项目的标识和状态。

## 2.1.8 可运行性与可维修性

### 2.1.8.1 引言

本节通过结合电力生产中的运行和维修经验教训,规定了提高电厂可运行性和可维修性的要求。设计者和建造者必须保证可运行性和可维修性达到所规定的可利用率要求。应使用验证过的设备和系统、以及设计采用高可靠性的设备和运行裕量来达到上述目的。设计者和建造者还应确保设备有足够的空间和通道进行检查和维修,并且易于更换。

### 2.1.8.2 提高可运行性和可维修性的规定

#### 1) 解决已知的运行和维修问题

- a. 电厂设计者和建造者应在电厂交付前供营运单位审查用的报告中用书面说明华龙技术电厂设计的运行和维修问题的具体细节及其解决办法。
- b. 报告应涵盖所有电厂性能,不限制核或非核设备,并应足够详细,以便确定根本原因并制定适当的解决方案。电厂设计者应对报告中确定的具有重大风险的、或对华龙技术电厂有许可证审批设计基准要求的行业事件进行最佳估算分析。该分析应足以为验证并提供一个编写正常和应急操作程序、技术规范和操作员培训材料提供依据。
- c. 为减少所有电厂运行模式期间的运行和维修错误,对于华龙技术电厂的每个运行或维修工作场合,在全过程应始终如一地应用人因设计原理。

#### 2) 程序 and 培训

- a. 按照标准电厂设计原则,运行和维修的程序和培训也应标准化。对华龙技术电厂设计应研究、编制一套标准的运行和维修程序及培训。此外,应尽可能实现设计标准化。
- b. 应为培训和考核电厂启动运营的工作人员提供足够的培训材料和培训模拟机。
- c. 应鉴别重大风险停堆问题,并确定解决这些问题所必须的适当应急程序。审查的目的应包括:

识别在停堆期间可能发生的与事件相关的潜在安全问题;识别可能存在并影响停堆事故严重性的电厂配置;识别可用于防止或减轻上述影响的电厂特征;识别技术规格书要求,以

尽量降低潜在事件概率和减小事件影响。在审查中为了确定应急程序要求,应考虑反应堆冷却剂装量控制、停堆反应性控制、安全壳隔离要求(包括燃料在容器内的时间要求)、衰变热排出要求和电源要求。

为在停堆和低功率运行期间使用而制定的应急程序,应具有停堆条件和低功率运行所专有的程序输入条件。

### 3) 设备

a. 根据总体简化要求,应尽量减少阀门、泵、其他部件和系统的不同类型和尺寸,以及使用的不同类型的仪表、控制和电力设备。但是,每种设备必须满足其专门所要求的功能。

b. 应尽可能使用“市场现有”的设备,而不是“专门订购/设计”的设备。

c. 考虑到设备在运行过程中发生磨损、正常腐蚀和侵蚀等情况,在至少 60 年的运行期内或根据第 2.1.11.3 节制定的设计寿期内,部件的设计应留有足够的裕量。

d. 在设备供应商的支持下,电厂设计者应建立电厂的预防性维修计划和数据库。

### 4) 与人因要求相关的操作

#### a. 仪控

仪表和控制系统应设计成能就地进行标定,其线路应设计成允许进行规定的定期试验而又不使电厂处于不能接受的二取一或三取一的停堆逻辑。这也应适用于汽轮发电机控制逻辑线路。

#### b. 控制室设计

应使用人因分析制定控制室的设计要求,包括由一名操纵员从一个单一控制台进行正常操作的可能性,和建立支持人员高水平工作的环境条件。

多机组电厂应具有相同但独立的控制室,两机组共用部分的控制除外。

#### c. 多机组

每台机组应具有相同的设备、相同的设备和系统的布置和方位。

#### d. 运行区域环境

华龙技术电厂的设计应包括保证有足够的空间、照明、噪声水平和环境控制的人因考虑。

#### • 通风

电厂连续运行或电厂正常停堆工况要求的所有通风和环境控制系统,通过设备的冗余、适当的设计裕量组合和推荐的部件更换时间,应能够实际达到100%的可用性。

为了人员的工作效率和消除尽可能多的潜在热应力,工作辐射区的温度和湿度应保持在所要求的水平。

应对电厂中的所有区域提供适当的环境条件,以保证电厂工作人员的舒适和安全,以及电厂设备在正常运行和假设设计基准事故条件下的可操作性。

#### • 照明

电厂所有区域应提供充足的照明。照明设备应能在不使用脚手架的情况下直接使用,或具有将灯具带到易于接近的区域、以及高强度和长寿命设计。

所有厂区照明,应用于支持电厂活动。

#### • 噪声水平

电厂的设计应考虑减少和减弱噪声源,以减少对运行和维修人员的噪声危害。应为人员提供不会造成人员伤害、干扰语音或其他通信、导致疲劳或降低整个系统效能的声学环境。

### 5) 与人因要求相关的维修

a. 华龙技术电厂应提高可维修性,考虑人因并提供适当的空间、照明、平台、起

吊设备、装卸装置、屏蔽、通讯系统、HVAC 和压缩空气。

b. 应采用可以移出进行维修或更换的设备模块。在预期存在高放射性的区域，电厂布置设计时应考虑使用远距离操作装置。

电厂设计者应提供有利于进行关键性维修活动的设施，应考虑提供关键性设备的实体模型，便于进行培训、最大限度地降低维修错误发生的可能性、并减少工作人员在高放射性区域所受到的辐照剂量。

c. 支持系统

应在设计中确定并提供进行关键维修活动所需的专门支持系统。

d. 路径

应在电厂设计中提供通向重型工具、设备或替换部件必须通行到选定位置的通道。图纸和其他设计文件必须注明这些通道并指出有关构筑物的界线。

e. 设备定位和进出

设备的定位方向应便于维修操作，而无需安装临时的平台和梯子，尤其是对于经常维修的部件或预计定期更换的那些部件。

应制定索具/吊装规定，入口设计应包括不受设备周围错综复杂的设施、深沟和路缘限制的通道设计、预期的设备移动和长物件（如脚手架杆）的限制。

6) 运行和维修要求

a. 组织

华龙技术电厂的运行和维修组织的规模应确保通过相关人员和行政政策及程序的管理能有效控制并完成所有运行和维修活动。

b. 设备标识

应在设计阶段建立并实施设备标识系统，使其成为电厂控制系统的一部分，并通过采购、安装和备件控制进行维护。该系统应清楚地识别整个电厂的系统和设备。启动试验时应及时安装永久性标识。标识的大小和位置应便于从所在楼层读数。

不能直接从地面（高架）接近关键或频繁操作/读数的设备，应使用带有方向指示的定位标识，以便将工作人员引导至合适位置。

c. 预防性维修和检查

电厂设计者应建立电厂设备的预防性维修数据库。预防性维修包括预期的、基于时间和故障的预防性任务。该数据库应在采购期间与设备供应商一起建立，以确保将设备设计者的见解纳入其中。电厂业主将把预防性维修数据库纳入预防性维修计划，以保证电厂设备的最佳性能和可靠性。这些预防性维修计划应包括设计时采用的规范和标准中规定的设备检查和试验要求。

d. 电厂环境监测

设计者或建造者应对业主使用的电厂环境监测系统提出建议，以确保电厂环境在整个电厂寿期保持在设计值范围内。应综合使用永久或便携式仪表，以记录所有设备系统、结构和部件内部（其老化退化或失效可能对安全性、可靠性或运行和维修成本产生重大不利影响）和周围的环境数据（例如温度、湿度、放射性、压力和振动）。电厂环境监测系统应与设计寿命计划以及其他环境监测需求进行配合和协调，如工艺过程条件、人员环境和现场条件。

e. 人员

电厂设计者和建造者在签约建造华龙技术电厂后应尽快确定电厂运行和维修人员的配置，包括所有职能组织部门和职责划分，也包括由其他公司或组织机构提供的支持。

在电厂总承包合同签订后应尽早落实电厂关键岗位人员。这些关键人员应具有充足的在役核电厂的管理经验。

管理和监督设计、建造和电厂启动的人员应与相关的业主人员一起参加由业主制定的培

训。为核电厂运行管理部门所选拔和培训的人员应满足HAD103/05“核动力厂人员的招聘、培训和授权”的要求。

建造者应保证已完工的设施可用，以便电厂运行部门的主要管理和监督者、以及行政、运行和维修人员，在首个系统冲洗或充注、和/或第一台永久性设备投运时，能够在现场永久性办公室就位。

#### 7) 远程技术

反应堆设计应包括一个硬接线、灵活、可扩展和强大的远程技术基础设施，该基础设施可支持以下应用的永久性和临时性的功能：

- a. 放射控制区域和放射重要区域的电子物理访问控制。
- b. 辐射工作许可证更换站。
- c. 计划使用便携式设备加强区域辐射监测。
- d. 设备辐射监测。
- e. 实时人员接触监测。
- f. 安保控制和放射性控制区域访问控制的集成。
- g. 允许多个频率的全厂音频通信系统。
- h. 在线性能监测和采样/分析。
- i. 泄漏检测系统。全球定位系统跟踪人员和主要或关键部件。
- j. 用于放射性废物或材料控制的射频识别（RFID）技术。

### 2.1.8.3 工作人员的最低剂量水平

#### 1) 减小辐射水平要求的特点

华龙技术电站中应具备旨在减小辐射水平的专门的设计特性。华龙核电技术用户要求文件的其它章节会给出所要求的这些专门的设计特点。

#### 2) 基本要求

在设计和建造过程中，为了获得低辐射水平，应满足的基本要求是：

- a. “零泄漏”燃料；
- b. 设计并安装合适的水处理和废物处理系统，以保证高质量的水化学标准，并有效处理放射性废液；
- c. 控制材料选用，应尽可能地把钴含量限制到最低，并控制材料加工方法，以尽量减少腐蚀产物释放速率；
- d. 华龙技术电站设计过程中，可将锌作为一次冷却剂的添加剂；
- e. 选择经过实践验证过的热功能试验条件和持续时间，以降低腐蚀产物释放率；
- f. 足够的维修和设备更换空间；
- g. 适当的屏蔽（临时或永久性的）；
- h. 尽量减少管道系统中的盲管段和积垢阱，为无法取消的排水管和存水弯提供水冲洗；控制给水含氧量从而减少腐蚀；
- i. 设计、设备选择和施工时，应尽可能减少测试和维护要求；
- j. 部件和系统的设计，应最大限度地减少通过沉积产生放射性的可能性；
- k. 对于那些不能通过设计充分控制放射性累积的部件和系统，应进行清洗和化学去污；
- l. 应有进行远距离试验和检查的仪器仪表；
- m. 在清洗、维修和检查中采用遥控装置；
- n. 华龙技术电站的布置设计应使得工作人员能在厂内穿行而不靠近放射性源区；
- o. 华龙技术电站的布置设计应使得有放射性的部件与正常工作区之间有适当的

屏蔽，部件的屏蔽应严密，以允许该系统在运行时能进行维修；

p. 应有适当的系统用以远距离装卸带有废物处置包装的被污染的树脂和过滤材料；

q. 模块化设备包装能迅速拆卸以便进行检查或维修；

r. 管线应能迅速断开以便快速更换设备；

s. 供暖和通风系统应设计成能控制放射性工作区的温度和湿度。

3) 表面预处理—电解抛光、稳定化和钝化处理

除非经过详细的成本效益分析表明其经济性，否则华龙技术电站设计者应要求在机组的某些区域使用预处理（例如，稳定的铬酸盐、电抛光、钝化）表面。应至少对下列区域可能应用电解抛光处理：

a. 大直径反应堆系统管道；

b. 反应堆冷却剂再循环泵外壳和内部部件；

c. 蒸汽发生器一次侧封头和分隔板；

d. 反应堆换料腔和运输通道衬里；

e. 暴露在放射性液体中的反应堆冷却剂泵外壳和内部部件。

4) 检验和修理操作的自动设备

a. 自动化应用分析

华龙技术电站设计者应结合厂房设计和布置中所述的可维护性评估和运行检查等因素进行自动化分析。分析还应考虑在涉及堆芯损坏的事故发生后，自动化技术在事故管理和电厂恢复中的可能用途。该分析的目的是确定设计中应考虑的设备的选择性活动。华龙技术电站设计者应根据成本效益考虑，制定一份自动化设备应用功能清单，在初步设计阶段或后续引入华龙技术电站。

b. 对自动设备电厂的设计措施

对自动设备的有效运行具有重要意义的具体设计特征应纳入机组的设计中。设计特征应基于自动化应用分析确定的支持功能而开发。厂房设计和布置提供了厂房设计和布置中需要考虑的要求，以便于自动化技术的使用。

5) 永久屏蔽和临时屏蔽

应完成永久性屏蔽分析。评估应确定在功率运行和停堆条件下剂量率较高，且不会因结构和部件的设计或位置而降低剂量率的区域。

设计时应考虑是否有必要加入临时屏蔽结构，以便在特殊情况需要时进行临时屏蔽。安全壳内外部高度使用区域及用久安装的存储容器附近应为临时屏蔽提供空间、支撑点及操作设备。

#### 2.1.8.4 设施要求

华龙技术电站设计应为人员和设备提供足够的支持设施，并应包括以下段落中规定的功能。其他设施要求在第2.6 “厂房设计和布置”中说明。

电厂内操作、控制和处理辐射防护人员的设施要求如下：

1) 控制进出

应提供足够的设施用于控制人员进入电厂。人员访问门（PAP）的设计应能够在30分钟内处理500名具有通行权限的人员。该人员进出设施应有足够的空间以防止拥挤，并应设计成对人员进出有几个独立的直通通道。

应提供以下附加措施：

— 金属探测器，爆炸物探测器和受控检修门。

— 在单独的房间里处理没有通行权限的访客和人员。

- 带有电话服务的出入口污染监控器。
- 保护区外的办公室和工作空间。
- 经校准的测量和测试设备的安全存储。
- 其他房间，即急救室，会议室，消防储藏室，盥洗室和冷藏室。
- 非放射性工作场所的有包装食品和饮料的区域。

## 2) 放射性工作区

除了一般的安全法规外，华龙技术电站的设计应包括下列有关控制污染和辐射照射的操作和处理人员的规定：

- 分配和处理剂量测定设备的保护区。
- 储存和发放防护服的设施不应干扰人员流动。应储存足够的可更换衣物。
- 呼吸设备的储存、发放和处理设施，其储存空间应足以储存足够的呼吸器，处理系统应具备足够的处理能力。
- 更衣室位于受污染的工作区域附近，至少一间更衣室位于反应堆厂房人员出入口附近。这些更衣室应满足男性和女性的更衣功能，并应包括卫生设施。电厂内应提供足够的储物柜。更衣室不得靠近辐射源。
- 具备经常用于操作和维护受污染设备和工具的存储区域/设施（泵检修工具，蒸汽发生器检查设备，法兰，软管，临时仪表等）。

## 放射控制区访问：

应尽量减少进入核电站所需的辐射控制点数量。中央控制点应具有足够的空间和电气、照明、暖通空调、除盐水和和其他服务设施，以支持2.6节厂房设计和布置中有关放射控制区域通道中所述的功能。

## 3) 电厂服务

华龙技术电厂设计应在需要的时间和地点提供高质量的电厂服务。这些包括：

- 专用防火装置。
- 厂用水，而不是直接用于冷却设备的未经处理的厂用水。
- 厂用空气，仪表空气，防毒和防有害污染物污染的独立呼吸空气系统，以及用于在线操作和维护所有主要组件的除盐水系统，其容量应远远超过电厂正常运行和维修所需容量。
- 整个电厂和安全壳中的通信系统应包括电话，有线广播系统，点对点通讯的声力系统或专门线路。
- 第 2.11.12 节中描述的利用信息管理系统的计算机终端和特定工作站。这些计算机将用于各种操作和维护功能，例如工作计划和保健物理应使用计算机。在本地工作区具有可访问性的 IMS 及其数据库很有价值。
- 便携式人员和区域辐射监测，通风空调系统和视听设备的电源插座。
- 对电厂所有较高操作高度以内的需要实现维修或操作活动的地方，以及较少进行维护或操作活动的位置或经常集中工作的地方，应对所有服务系统（压缩空气，呼吸空气，通讯，厂用水，除盐水，380V 三相电源，220V 单相电源，真空清洁系统，视频和数据收集电缆）提供服务接口。对于饮用水和厂用水，特别是在安全壳中可以有例外。
- 用于便携式设备和维修活动的电源插座上应标明电压和容量，并且与仪表和控制装置或其它电厂的作设备的配电电源无任何连接。
- 饮用水和除盐水系统，包括洗眼和应急淋浴，应确保与任何可能被放射性污染的系统完全隔离。止回阀不得用于隔离。设计还应防止交叉污染，例如辅助锅炉与蒸汽系统，下水道污泥与处理系统等。

- 在辐射控制区域，化学实验室，化学加药罐附近和腐蚀性储罐附近提供应急洗眼和淋浴设备。
- 在需要穿防护服装的所有区域，在合理可行的范围内，提供电梯、坡道或台阶代替梯子，以供人员在不同高度的盖板、地板和平台之间活动。电梯的尺寸应能容纳大型物品（例如脚手架）。

#### 4) 维修车间要求

在电厂运行期间，应提供从所有工作区域直接可进出的设备齐全的维修车间，以维修机械、电气和仪表设备。维修车间可能是一个或多个设施，但放射性工作区应与清洁工作区分开。仪器，控制和电子区域也应适当的方式分开。

##### a. 电厂维修设施应具有以下最低要求：

- 仪器，控制和电子区域与机械维修部分进行物理隔离。
- 配备有起重机或其他合适的起重设备以及运输设备。
- 焊接，钻孔，铣削和车床操作。
- 对拆卸零件的检验和尺寸检查。
- 工具和维护设备的安全存放。
- 仪器和控制组件的诊断和维修。
- 小型部件防拆卸、检查和维修（例如，阀门，泵，马达和小型热交换器）。
- 对带入维修车间的物品放射性污染程度进行监测的能力。

##### b. 对被污染维修车间的要求：

放射性维修车间的设施和设备应为穿着防护服的人员提供便利。

该车间应配备足够的通风流量和设备，例如在维修活动期间控制气载粒子的挠性排气管。对受污染或具有放射性物品的维修工作需要采取特殊预防措施，以减少人员接触和污染扩散。

应当为以下内容做出附加措施：

- 易于进出受污染物品的区域。
- 对进入维修车间的物品进行消毒。
- 对大型部件的拆卸，加工和翻新。
- 对维修车间中存储的设备进行临时屏蔽。
- 对进出库房的卡车进行包装或运输。

##### c. 清洁维修车间的措施

除安全要求外，干净的维修车间应允许电厂运行期间不受限制地进出，应要求对带入车间的物品进行监控，以确保它们未被污染。此类维修车间应位于地上一层，并且应尽可能接近要维护的设备。应要求在湿度和温度受控的环境中修理仪表，控件和电子设备。车间应靠建筑外墙，并应配备卡车托架。

#### 5) 备件供应、存储和控制

电厂设计方向电厂所有者提出建议，电厂所有者将根据设备供应商的建议和运行中的核电站的维修经验，为整个电厂准备备件清单。备件清单应足够详细，以便订购备件。建议备件清单应在电厂预定燃料装载之前至少36个月内编写。对于主要设备和选定设备，应在最初订购时适当考虑订购备件。

应提供与其他电厂数据库兼容的计算机化系统，以进行备件库存的控制、设备历史记录和备件跟踪。系统数据库应包括每台电厂设备的名称、供应商、功能、技术手册参考、备件清单以及备件的库存和位置。当现有存储的数量少于指定的最小库存水平时，系统应准备备件的采购申请。备件库存系统应是综合电厂配置管理系统的一部分。

### 2.1.8.5 对主要部件更换的要求



除压力容器和电站基础构筑物与电站设计寿命一致外,电厂布置设计中要考虑寿期内主要设备的更换,留有足够的空间以贮存设备及部件。应详细规划设备及部件的运输通道和更换路径,并确保特殊设备能在寿期内能够进行移除和更换。在电站设计和停役计划中应考虑对于电站寿期内那些由于性能降级或者技术发展而需要更换的系统或部件。电厂设计对运输和贮存的设备要求:

- 设计者要考虑从预计可能被污染或有放射性的厂房中,移出的主要的部件、专用工具和设备。
- 设计者要提供在未来可能难以采购到设备清单,以及满足要求的备品和消耗品的数量。
- 设计者要列出电厂寿期内不可更换的主要设备清单。
- 寿期内需要更换的设备(如重型设备 SG),需要明确安装及拆装的方案。

#### 2.1.8.6 检查和试验

##### 1) 在役检查特点

功能与安全相关的部件(包括RCCM1、2、3级的泵和阀门),在设计时应考虑方便进行在役检查和试验,以评估其状态。

##### 2) 在役检查技术

在役检查按RSE-M规范要求执行。

##### 3) 检查性试验

电厂设计应允许在功率运行状态进行尽可能多的监督试验,且不干扰正常运行、提升负荷或物理闭锁继电器。应允许在尽可能接近正常操作条件下测试系统/子系统或仪表回路。在功率运行状态下进行试验时,应确保人员辐射剂量与核电厂停堆期间做相同试验相比不增加。

监督试验应采用非侵入技术或使监督试验本身造成的磨损量最小化的技术。

##### 4) 启动试验

启动试验应是综合的系统试验,在一定程度上证明实际整个系统的功能能力,包括各子系统组合在一起时的能力。不应因各种原因而进行分散性试验。这些试验的本质是检查系统是否按照设计要求安装、设备联锁是否进行过性能试验、临时安装的构件是否已经拆除或计划在装料前拆除。在试验过程中应记录启动试验数据,以便对系统性能进行基准测试,以供将来参考和比较。

启动试验应包括化学试验性能,以收集有用的基础信息。

如有可能,启动试验应在设计的化学条件下进行,以促使反应堆冷却剂系统表面保护性氧化物形成,尽量减少腐蚀产物后续向冷却剂的释放。

#### 2.1.8.7 危险、有毒化学物品

应使危险和有毒化学物品在厂内的使用尽可能减少。此外,在放射性控制区应避免使用危险的化学物品,除非无法找到替代方案。在必须使用这些物质时,电厂设计应提供由电厂运行人员实施的监测和控制措施,以把这些危险物对人员和环境的影响减至最小。这些控制措施应满足相应法律法规的要求。

#### 2.1.9 质量保证

##### 2.1.9.1 引言

本节论述了华龙核电技术质量保证必须满足的基本要求。这些要求适用于对物项和服务质量有影响的各种工作(包括设计、采购、加工、制造、装卸、运输、贮存、清洗、土建施

工、安装、调试等)。这些工作的实施必须遵照事先制定的程序和计划,遵循公认的工程规范、标准、技术规格书和实践经验,选择合格的人员、使用合适的设备和物项并创造良好的工作环境去完成。工作的结果应经过验证,记录应作为客观证据妥善保存,以证实达到了预定的质量要求,防止已出现的各别质量问题再次发生。

这些要求适用于所有对核电项目负有责任的组织和人员、设计人员、设备供应厂商、工程公司、建造人员以及参与影响质量活动的其他组织和人员。在完成某一特定工作时,对要达到的质量负主要责任的是该工作的承担者,而不是那些验证质量的人员。质量保证机构负责检查和督促各种工作是否正确地按规定进行。

#### 2.1.9.2 基本要求

##### 1) 质量保证大纲

为履行保证核电项目、工作人员、公众以及环境的安全的责任,业主负责遵照现行有效的《中华人民共和国核安全法》(主席令第73号)、《建设工程质量管理条例》(国务院第279号令)、《中华人民共和国民用核设施监督管理条例》(HAF001)、《核电厂质量保证安全规定》(HAF003)及相应导则的要求制定质量保证总大纲,并报国家核安全部门审核。质量保证总大纲作为实施质量保证工作的纲领性文件,对质量保证工作提出目标和原则性要求。

工程总承包商必须编制其工作范围内的质量保证大纲,大纲需经业主审评认可,业主对总承包商质量保证大纲实施有效性的监督、检查,不减轻或减免总承包商的义务或法律责任。当工程总承包商将其承担的任务委托给其他分包商(例如设计方、建造方等)去实施时,工程总承包商必须要求分包商编制相应的质量保证分大纲。分包商编制的质量保证分大纲需经工程总承包商审评认可。总承包商应监督分包商对质量保证大纲的实施情况。

质量保证大纲应包括管理者质量政策声明,阐明管理者对质量和核安全文化的承诺。

##### 2) 程序、细则和图纸

必须有计划、系统地制定用来执行其质量保证大纲的工作程序、细则和图纸,凡是对质量有影响的工作都必须遵照适用于该工作的书面程序、细则和图纸来完成。各类程序及细则必须根据需要进行审查和修订,以保证所有影响质量的工作都得到考虑而无遗漏,并且用正确的方法在适当受控的条件下完成。

##### 3) 核安全文化

必须承诺和明确开展核安全文化,积极培育和提升自身和分包商的核安全文化。

##### 4) 质保分级

必须根据物项、服务或过程对核安全和可利用率方面的相对重要性,实施质量保证分级管理。制定相应的程序对这些物项、服务和过程规定不同的质保要求及相应的管理和验证方法。

##### 5) 组织和资源

必须建立有明文规定的组织机构并明确规定其职责、权限及内外联络渠道。明确实施质量保证大纲的人员既包括活动的从事者也包括验证人员。负责质量保证职能的人员和部门应具有足够的组织独立性。

必须选择并配备足够数量的合格人员、提供开展工作和满足要求所需要的基础设施和工作环境。

#### 2.1.9.3 执行

##### 1) 设计

工程总承包商及其设计分包商必须按照《核电厂质量保证安全规定》及其导则的要求制定与设计任务相一致的设计质量保证大纲,建立设计质量保证组织机构,制定一整套的设计

控制程序，以保证把规定的设计要求（例如核安全法规、设计基准、规范和标准等）都正确地体现在技术条件、图纸、细则、程序或说明书中。

工程总承包商及其设计分包商必须对其设计任务的设计输入、设计实施过程、设计接口、设计验证、设计变更、设计输出控制负直接责任。其他单位的任何形式的验证并不减轻设计单位的责任。

必须按照经批准的最新的或当前适用的规范和标准进行设计，其设计必须是此前在相当使用条件下验证过的。对于用作设计准则的规范和标准必须加以鉴别和评价，以确定其适用性、恰当性和充分性，并根据需要进行补充或修改，以保证最终的质量与所需的安全功能相适应。

当引入未经验证的设计或设施，或存在偏离已有的工程实践时，必须借助适当的支持性研究计划、具有明确准则的性能试验或通过其他相关应用中获得的运行经验的检验，来证明其安全性是合适的。

在设计中必须充分考虑从运行和在建核电厂中取得的成熟经验，充分吸纳安全改进成果。

## 2) 采购

必须确保物项或服务的采购活动符合核安全法规和导则、设计基准、标准、技术规格书、设计输出文件、采购文件的要求。

工程总承包商负责按业主规定的采购要求提供合格的物项或服务，负责评价、选择合格的分包商，并将相应采购文件要求贯彻到各级分包商，负责对各级分包商所承担的具体活动进行验证。工程总承包商及其分包商必须为业主履行对其采购活动的验证职能提供便利条件。

## 3) 物项制造

必须确保物项制造活动符合核安全法规和导则、设计基准、标准、技术规格书、设计输出文件、采购文件的要求。

必须明确规定对于所有影响质量的活动（例如人员配备、设计、加工、标识、装卸、贮存、运输、工艺过程控制、检查、试验等）的控制措施。必须由合格的人员、使用合格的设备，按照批准的程序在合适的环境下从事制造活动。应出示足够的质量证明文件，证明确实按照规定的要求履行其职责，并且所制造的物项的质量是令人满意的。

## 4) 建造

必须制定建造质量保证大纲及相应的控制程序，并在建造活动中有效实施、文明施工，确保建造高质量的核电项目。

必须制定现场制造计划并形成文件。计划必须明确要进行的作业，作业系统的顺序进程，每项活动的负责人和为确保达到规定的质量所采取的措施。必须明确规定建造和安装期间的场地管理、材料的接收和贮存、设备的安装、检查和试验、测量和试验设备的管理、人员资格和培训等方面的控制措施并按要求执行。

业主通过对工程总承包商、分包商进行质保监查、监督及见证等方法，对建造活动进行必要的控制。各级承包商应为业主开展验证活动提供便利条件。

## 5) 文件控制和记录

必须建立适用的文件管理制度，对文件的编制、审核、批准、发放、保管、变更等进行控制并严格遵照执行。同时负责监督其分包商按要求建立各自的文件管理制度并严格遵照执行。

必须建立适用的记录管理制度，保证有足够的记录以便证明对质量有影响的各项活动均已按规定要求完成，并已达到和保持所要求的质量。必须对质量保证记录的编写、分类、收集、索引、分发、修正和增补、归档、贮存、保管和处置做出具体规定。

业主有权查询工程总承包商及其分包商与质量相关的文件和记录。

#### 2.1.9.4 评定和改进

必须根据规定实施自我评定、独立评定，以验证质量保证大纲实施的有效性，并根据评价结果修订质量保证大纲和相关的程序，持续改进质量体系，实现质量目标，提高总体业绩。

##### 1) 自我评定

必须按预定的时间间隔对质量保证大纲的执行情况和适用性进行自我评审，及时确认、评价和纠正薄弱环节和妨碍因素。评审结果应形成文件，及时跟踪做出的决策和有关行动的落实情况。

##### 2) 独立评定

必须执行有计划的、有文件规定的内部及外部质量保证监查和监督活动，验证质量保证大纲实施的有效性。监查和监督结果必须形成文件，发给被监查的部门或单位。被监查的单位或部门必须调查监查发现的问题，提出纠正措施和完成纠正措施的计划，并且在承诺的期限内按要求向监查单位报告完成纠正措施的情况。监查单位必须采取后续行动，以验证纠正行动的实施。

##### 3) 不符合及纠正和预防措施

必须建立识别、报告、审查、控制和记录不符合的管理流程。分析不符合产生的根本原因并采取措施防止其重复发生。尤其应制定和落实预防人因失误的措施，通过利用从内部和外部组织获得的反馈、利用技术进步和研究、共享知识和经验以及利用最佳实践等方式实现。当出现严重影响质量的情况时，业主有权发出停工令，相关组织应迅速采取一切必要纠正措施，直到业主满意才能复工。

##### 4) 改进

必须充分利用各项评定结果以及内外部信息，识别并确定改进机会。必须对改进措施进行检测并检查其有效性。

#### 2.1.10 执照申请

本节规定了华龙技术电厂的核安全许可要求。这些要求提出，在华龙技术电厂的准备过程中，在用户文件的批准过程中，以及在新电厂的使用过程中，国家核安全相关法律、法规、导则、标准等可能会发生变化。为确保获得核安全相关许可文件，华龙技术电厂设计单位应当承诺处理核安全相关审评问题。

执照申请要求包括厂址选择、建造、调试、运行和退役五个阶段：

##### 1) 厂址选择

厂址选择许可申请应当遵守《核电厂厂址选择安全规定》(HAF101)及其他核安全部门规定的补充准则及其他有关规定；

设计师应当协助业主编写厂址评价报告，充分说明在该厂址上能够建造拟建的核电厂，并能在整个预计寿期内安全运行；

设计师应当协助业主获得必要的许可证，为此需要协助业主准备获取许可证所需的所有材料。

##### 2) 建造

建造许可申请应当遵守《核电厂安全许可证件的申请和颁发》(HAF001/01)其他核安全部门规定的补充准则及其他有关规定；

设计师应当协助业主编写《核电厂可行性研究报告》等申请建造许可证所必需的材料；

设计师应协助业主制定并实施许可计划，该计划确定、定义并安排为获得建造和运营电厂所需的所有许可证和许可所需的各项活动。本计划应尽早完成，以便按计划实施，并在与电厂建设计划相适应的时间表上获得所有所需的许可证和执照。许可计划应随着电厂许可和建造的进展进行适当的修订和更新。

### 3) 调试

调试许可证申请应当遵守《核电厂安全许可证件的申请和颁发》(HAF001/01)其他核安全部门规定的补充准则及其他有关规定;

设计师应当协助业主编写《核电厂最终安全分析报告》等申请调试许可证所必需的材料。

### 4) 运行

运行许可证申请应当遵守《核电厂安全许可证件的申请和颁发》(HAF001/01)其他核安全部门规定的补充准则及其他有关规定;

设计师应当协助业主编写《核电厂装料后调试报告和试运行报告》等申请运行许可证所必需的材料。

### 5) 退役

退役许可证申请应当遵守《核电厂安全许可证件的申请和颁发》(HAF001/01)其他核安全部门规定的补充准则及其他有关规定;

设计师应当协助业主编写《核电厂退役报告》等申请退役许可证所必需的材料;

在核电厂设计、建造和运行的不同阶段,设计师必须对将来核电厂的退役进行充分考虑,并按国家核安全监管部门的要求制定相应的退役计划。当核电厂关闭被提上日程后,需要根据电厂实际状态制定详细的退役计划,并明确需要采取的特殊措施;

退役计划分为初步退役计划和最终退役计划。对于多堆厂址,在制定退役计划时,应对可能受影响的公用构筑物 and 系统进行考虑。对于非核基础设施,应说明将对其进行退役还是进一步使用。

## 2.1.11 设计过程

### 2.1.11.1 引言

#### 1) 目的和范围

本节提出了华龙技术电厂设计中要执行的过程要求。它涵盖整个设计所需的全部过程。其起始点是华龙技术用户要求文件,该文件规定了用户要求。该设计过程包括诸如研发、试验、分析、技术规格书和图纸的准备、建模、报告编制、执照申请活动。这些设计过程要求覆盖本要求文件中定义的整个电厂范围。

电厂设计单位应将项目作为一个单一、完整的过程来管理,电厂设计单位有责任将这些要求转化为在设计过程中各方都应遵循的专门要求和程序。

#### 2) 原则

**设计平衡:**设计过程应按一定的优先顺序解决互相有冲突的问题,如公众和人员安全、电厂性能、电厂成本。

**经验反馈及优化改进:**设计过程将持续记录和纠正可在建造性、可操作性和可维修性方面影响电厂或人员安全、可利用率、容量和可靠性的重大历史遗留问题。轻水堆电厂中的经验反馈应反映在早期的设计过程中。

**设计确保可建造性:**应按某种形式组织设计过程,这种形式证实系统设计与可建造性、可操作性、可维修性以及相关的人员配备及培训之间联系紧密。

**规范和标准:**电厂设计单位必须遵守国家和政府部门以及核安全监管单位所颁布的强制执行的法律、法规和标准。按国家要求执行“最先进的标准”,满足国家核安全局已颁发的现行有效的核安全法规和核安全导则的要求,同时参照国际原子能机构所颁布的最新安全标准的要求。

### 2.1.11.2 技术基础

华龙技术电厂中的安全相关重要构筑物、系统和部件必须按照经批准的最新的或当前适

用的规范和标准进行设计；其设计必须是此前在相当的使用条件下验证过的；并且这些物项的选择必须与安全所要求的核电厂可靠性目标一致。对于用作设计准则的规范和标准必须加以鉴别和评价，以确定其适用性、恰当性和充分性，并根据需要进行补充或修改，以保证最终的质量与所需的安全功能相适应。

当引入未经验证的设计或设施，或存在偏离已有的工程实践时，必须借助适当的辅助性研究计划、具有明确准则的性能试验或通过其他相关应用中获得的运行经验的检验，来证明其安全性是合适的。这种开发性工作必须在投入使用前经过充分的试验，并在使用中进行监测，以便验证已达到了预期效果。

新建核电厂在设计中必须充分考虑从运行和在建核电厂中取得的成熟经验，充分吸收安全改进成果。

### 2.1.11.3 设计寿命

华龙技术电厂的设计寿命至少应达60年。应制定设计寿命计划，以满足可靠性标准，并且使得在设计寿命期内所有系统、结构和部件的采购和维护费用降到最低。这个计划应该包括设计寿命分类系统、状态监测，以及电厂的环境监测系统。

电厂设计单位应提出一个设计寿命分类体系，按照设计寿命能力列出分类项目，设计单位应提出对策用来满足60年寿命的要求。

60年设计寿命要求电厂所有重要部件和设备能满足这个设计寿命的要求。然而，应确保除反应堆压力容器外，所有电厂的运行部件和设备都应是可更换的。对于那些陈旧的或者为避免早期失效希望更换的部件，电厂设计单位应提供一个更换、维修计划，以保证在最低成本下达到整个电厂的设计寿命。

保证60年设计寿命的附加要求如下：

- 1) 状态监督：设计寿命计划和预防性维修大纲包括对所有部件、系统和结构件的状态监测，这样的监测相对于安全、可靠性和维修费用是省钱的。
- 2) 瞬态：华龙技术电站设计者应设计降低瞬态频率和等级。华龙技术电站设计者应评估尽量减少电厂瞬态事件或减轻其影响的电厂特性，并纳入具有适当经济性的电厂特性。
- 3) 仪表和控制：电厂设计单位应保证提供足够的和合适的仪表系统，以检测和记录整个设计寿命期内的重要的瞬态。对提高使用因子，减少瞬态次数影响显著的关键电厂部件和系统以及设计，应给以特别的考虑。电厂设计单位应该推荐一个综合的计划，以便获得评价长寿命部件的实际的寿命能力数据，获得数据的依据是它们的运行历史和它们的寿命限制特性的测量。
- 4) 环境：电厂设计单位进行布置设备和部件时，应使设备和部件尽可能避免或减少处于有害的或可能的影响寿命的环境的频率和强度。
- 5) 文件编制：在电厂整个寿命期间应该在文档管理大纲的指导下保管文件。设计寿命、环境限制的验收准则以及有关参数应在设计文档中应予以清晰地确定并纳入电厂数据管理系统中。

### 2.1.11.4 电厂简化

电厂应使用与系统、可用率、可维修性和试验能力等主要功能要求相一致的最少数量的阀门、泵、热交换器、缓冲器和其他机械部件。

电厂应用最少量的测量仪表、控制功能元件和控制回路，要与系统、利用率、可维修性和能进行试验的容量等主要功能要求一致。

电厂应设计成在电厂所有运行模式下可简化操作，包括操纵员判断和处理正常和事故工

况的操作。

#### 2.1.11.5 标准化

电厂设计应提出一个像在本节（设计过程）中叙述的那样的标准化设计。应包括：一个完整电厂的标准设计基准；标准的厂址包络；有特殊接口要求的非标设备；设计基础和最终设计的标准技术文件等。

#### 2.1.11.6 特殊分析和评价

电厂设计单位应使用由可用的标准、规范和条例所要求的设计方法，以及自身的经验、方法和设计工具。此外，下列各节描述的专门研究、评价和设计手段应予以遵循。

##### 1) 专题研究

华龙技术电厂要求文件可能存在的研究和评价，它们是电厂设计单位在完成电厂标准设计过程中要进行的。应把这些研究确定为满足相关设计决策需要和其它信息需要的设计执行计划的行为、明确地规定的职责和要完成的进度。该研究结果将以统一的形式正式地编写成文件，并存入技术数据库。

2) 电厂设计单位应向电厂业主提供电厂运行和维修所要求的专门软件，包括由供货商完成的设备评价和维修所需要的软件。

3) 可靠性和概率安全评价：应对核电厂的设计开展系统的综合评价；可靠性和可用性评价应在保证满足华龙技术电厂要求的设计过程下开展。关于安全系统和人机接口系统的附加要求在第2.5章和第2.10章中给出；应在核电厂设计过程中开展概率安全评价，这与第2.1.15节中规定的PSA方法一致。PSA应与设计过程相结合，以便PSA结果可用来改进和优化设计。根据PSA见解带来了重大设计变更应作为PSA报告的一部分。

#### 2.1.11.7 工程信息系统

应该建立工程信息系统，该网络规定整个电厂循环的活动、机构、属性和关系。该网络由所有电厂设计单位在编制和识别设计过程工作产物时使用。工程信息网络应提供如下内容：

- 1) 对电厂系统的合理划分。
- 2) 用作电厂数据库框架的电厂数据模型。
- 3) 向数据库增加信息的系统性的规则和方法。
- 4) 数据检索的方法。
- 5) 用于系统、设备、部件和装置，以及所有文件的标准标识方法。
- 6) 用户能够在信息管理系统中直接通过计算机获得数据和文件。
- 7) 尽可能提供所有技术数据的单一的正式来源。

#### 2.1.11.8 设计研发计划

在设计工作的初始阶段，华龙技术电厂的设计单位应制定一份书面的计划，以便开展研发和设计。该计划至少应规定一个设计组织，该组织负责制定在设计过程的各方面的职责和权力。

应制定业主单位参与设计开发和执行的全过程的程序，并对过程加以管理以防偏离标准设计。

应在设计单位内部和不同的设计单位之间建立正式的通讯渠道，以保证设计工作有效协调。

该进度表应围绕整个设计过程，包括设计、分析、设计、试验、采购、现场支持等等。电厂设计单位应该维护一个总体设计进度表，该进度表汇集了全体设计参加者的进度。

#### 2.1.11.9 技术状态管理

技术状态管理是在整个核电厂寿期内，运用技术和行政的手段，对技术状态项以及有关的产品技术状态信息进行管理的一种活动；该活动包括维持设计要求、技术状态信息以及物项技术状态全寿期内的一致性，并要求在该一致性遭到破坏时恢复其一致性。

##### 1) 目的

实施技术状态管理的目的是在核电厂的设计要求、物项技术状态和技术状态信息之间建立三者的一致性，在核电厂寿期内，特别是在产生技术状态变更时保持这种一致性，并在电厂全寿期内确保设计基准得到维护。

核电厂设计和建造阶段的目标重点是实现三者之间的一致性，是通过设计建造过程，逐步形成三者一致性的过程。

##### 2) 技术状态管理体系构架

技术状态管理体系应按照技术状态管理标准建立，该体系框架应包含以下主要方面：

- a. 技术状态管理策划
- b. 技术状态标识
- c. 技术状态记录
- d. 技术状态变更控制
- e. 技术状态审核

##### 3) 技术状态管理的要求有如下要点：

- a. 电厂设计单位应提出一个综合的技术状态管理程序，以用于包括设计和建造阶段。该程序应保证在确定设计基准、技术基线和接口要求时，电厂系统和设备的实际配置和电厂建造、运行和维护程序以及所有相关保障重要文件，在电厂整个寿期内都能够获取。
- b. 电厂在移交给业主商业运行之前，电厂设计单位应负责技术状态管理。正式移交过程应保证全部技术状态信息是以受控的方式提供给业主。
- c. 技术状态管理程序应包含变更控制过程，应明确规定变更批准准则，并且应为变更实体提供有关提出、评审、批准、实施、配置、文件更新和分发等的准则和程序。

#### 2.1.11.10 设计一体化

电厂设计单位应为电厂中每一个系统或子系统制定一个顶层设计准则。顶层设计准则文件应是足够完备的，以便能够从顶层设计要求开发出合格的设计和评价竣工电厂对用户要求的可接受性和适应性，两者都不用依靠下一层次的设计文件。

电厂设计单位应准备系统、设备和部件的技术规格书、设计图纸和系统说明书，以保证满足顶层设计准则，并将设计、计算、制造、建造和试验信息及要求形成文件。

电厂设计单位应开发设计和建造时使用的电厂布置模型。

电厂设计单位应与建造和调试机构协调一致，以保证设计的实施、试验和相关程序符合设计准则和性能目标。建造和调试单位应：对技术接口文件审查并提出书面意见；参加设计会议，根据它们的建造和运行相关的重要因素的输入，保证优化设计；准备和提供他们的程序，用于电厂业主审查和与电厂设计单位一同进行的接口审查。

电厂设计单位应根据运行经验和应用PSA来审查设计文件。

电厂设计单位应为所有安全相关系统、结构和部件制定设计、试验和技术规格书要求。



### 2.1.11.11 设计审查

应由电厂设计单位在设计和建造的全过程中实施专业间的设计审查。应邀请潜在的电厂业主和他们的代表参加这些审查。

下列特定要求用于专业间设计审查：

- 1) 应建立一个独立的专业间审查小组，这个小组应向参加的组织机构的高级领导报告。
- 2) 应由电厂设计单位确定审查小组的审查和活动范围及授权。审查组应包括但不限于土建、电气、机械、化学、材料和核工程，以及核电厂运行、维修和建造方面的有经验的人员。审查组应包含人因法则、辐射防护专业的人员。每次审查的各个参加者的专业应与被审题目相一致。
- 3) 技术审查应使用严格的系统分析技术，例如：热工水力瞬态分析、安全和故障分析、可靠性分析和概率风险评价。应对系统间的相互作用给予特别注意。
- 4) 在设计过程早期应制定一个审查进度表，并定期修改。
- 5) 审查应形成文件并作为电厂设计记录的一部分加以保存。

### 2.1.11.12 信息管理系统

在设计期间，电厂设计单位应使用适合的计算机软硬件来建立、管理和运行一个信息管理系统（IMS）在建造期间使用，并将IMS数据移交给电厂业主在运行期间使用。

IMS的主要目标如下：

- 1) 提供一个有效的方法来获得、贮存、检索和使用对设计、建造、调试、运行和维修电厂所必需的文件和数据。
- 2) 在设计和建造期间，以及将电厂数据移交给运行单位以后，有效的使用计算机辅助设计和工程管理。

在第2.1.13中更详细地规定了IMS的功能要求。

### 2.1.11.13 设计建造一体化

电厂建造进度计划应基于标准电厂设计，除了厂址特定工程设计以外，该标准电厂设计是应已完成的。由于在标准电厂设计中使用厂址包络基准，可有计划的将厂址特定工程设计减至最少。

FCD前提供的施工图设计文件数量，与施工方法的选择有关。预制和模块化施工水平越高，需要的设计文件数量越多。

FCD前应该明确与建筑物安全相关的所有静力学载荷、完整的静力学分析。建造过程中，应该有适当的裕量允许少量的修改。

如果广泛使用模块化施工，在群堆的首台机组的第一罐混凝土浇筑前，应完成更高比率的施工图设计文件卷册。开始施工作业前应完成最重要部分的全部设计，并且有足够的裕度。

浇筑混凝土前，应该确定好土建与机械部分的接口例如预埋件等。

施工人员应该确保厂房或房间施工开始前已完成全部设计工作。在施工作业开始前，应核查后续工作的实施计划，设计单位应该在设计程序中明确详细设计的要求和准则。

### 2.1.11.14 竣工状态现场验证

作为设计过程的一部分，电厂设计单位应确定并完成必要的工程现场验证活动，以证实该装置的适当性。这些工程验证是除了建造工作中正常质量控制验证以外的活动。适用下列专门的规定：

- 1) 建造早期应确定工程验证活动和进度安排；

- 2) 工程验证活动应包括地震检测以验证概率安全分析（PSA）中所有主要的假设；
- 3) 设计应尽实际可能包括可以减少建造过程中工程验证的复杂度和范围的规定。必须进行验证的地方，电厂设计单位应制定大纲，包括检测目标和范围、评价过程以及不满足设计目的的遗留项的解决过程。

## 2.1.12 设备监测

华龙技术核电厂在设计时应考虑对主要辅助系统的设备进行监测。通过设备监测可确定系统和/或设备状态参数，这些参数可用于状态评估，以便提高设备的可用性、可靠性，进而降低操作和维护（O&M）成本。

设备监测可达到以下预期效果：

- 支持设备预期的设计寿命
- 提高循环效率
- 允许对设备和系统状况进行监控和趋势分析
- 减少放射量
- 提高维护的便利性，从而降低维护维修成本
- 提供增强的诊断

本节提供了监视电气和机械部件的运行参数的建议。这些建议包括要监测的具体参数、监测方法（如适用）、以及监测类型，或应根据需要安装仪器仪表而无需对设备进行改动。

表 2.1.12-1 公用/仪用空气压缩机/干燥系统维修空气

监测参数	仪用空压机	公用空压机	空气干燥器	集流管	储气罐	电机
振动分析	1, 2	1, 2				1, 2
油分析	3	3				
低油液位	1	1				
电机曲线						1
级间压力	1	1				
级间温度	1	1				
阀门位置指示	1	1	1			
后置冷却器空气温度	1	1				
后置冷却器空气压力	1	1				
冷却水入口/出口温度	1	1				
油温度	1	1				
空气流量	1	1	1	1		
空气温度	1	1				
油压力	1	1				
曲轴箱润滑油压力	1	1				
空气出口压力（单独设备）	1	1		1	1	
湿度（露点）			1	1		
空气过滤器压差	1	1				
空气干燥器前空气质量（露点/碳氢化合物）			3			
后置过滤器下游空气质量（露点/碳氢化合物）				3		
运行/装载时间	1	1				
空气取样口干燥剂			3			

注1：建议使用远传信号仪表。注2：建议安装就地仪表。

注3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或系统排空。

表 2.1.12-2 冷却器

监测参数	注释
环境温度	2
冷冻水：流量，进水温度和出水温度	1, 2
冷水机组运行时间	1
冷水机组推力轴承温度	1
冷凝器（水）吸入和排出压力	1
冷凝器制冷剂压力	1
冷凝器水流量，进水温度和出水温度	1, 2
蒸发器（水侧）入口和出口压力	1
蒸发器压力	1
导叶/滑阀定位器	1
湿度指示观察窗	2
电动机电流	1, 2
电机轴承温度	1
电机功率分析	3
电机转速	1
电机温度（绕组）	1
油分析	3
油冷却器出口温度	1
机油滤清器压差	1, 2
油加热器指示	1
油位观察窗	2
油压	1, 2
油底壳温度	1
冷凝器中的制冷剂分析（请参阅 NHUG）	3
制冷剂温度（蒸发器，冷凝器和压缩机出口）	1, 2
送风温度（仅风冷）	1
振动分析	1

注1：建议使用远传信号的仪表。

注2：建议安装就地仪表。

注3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

表 2.1.12-3 换热器

工艺参数	冷凝(冷凝器)	给水	余热排出系统	部件冷却水	汽轮机厂房部件冷却水	汽水分离再热器
壳程工艺入口流量	-	-	1	1	1	-
壳程工艺出口流量	2：如果在冷凝泵排放时进行测量	1：排水流量	-	-	-	1：排水流量
管程入口流量	5：如果对	1：总流量	1	1	1	1：第2阶段

	循环泵流量 进行测量	(进口或出口)				
管程出口流量	-	1: 总流量 (进口或出口)	-	-	-	1: 第1阶段 排水流量
壳程入口工艺 温度	-	-	1	1	1	5: 在高压温 度出口
壳程出口工艺 温度	3: 每个部分	1: 排水出口	1	3	3	4: 第1阶段 1: 第2阶段
管程入口温度	1: 每个水箱	1	1	1	1	1: 第1、2阶段
管程出口温度	1: 每个水箱	1	1	1	1	5: 在疏水罐 处理
壳程入口工艺 压力	1: 每个部分的背压	1	1	1	1	5: 在高压汽 轮机出口处 理
壳程出口工艺 压力	-	-	1	1	1	5: 在低压汽 轮机入口处 理
管程入口冷却 压力	1	3	1	-	-	1: 第1、2阶段
管程出口冷却 压力	1	3	1	-	-	-
振动-超声	1	1	3	3	3	1: 第1、2阶段

注 1: 建议使用远传信号的仪表。

注 2: 所需参数的测量与部件无关。

注 3: 安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

注 4: 希望获得该参数, 但需要解决如何获取问题。

注 5: 所需参数是独立于系统进行测量的。

表 2.1.12-4 中小型泵

监测参数	重要	非重要	辐射(剂量区)
流量	1	3	1
入口/出口压力	1	3	1
入口温度	1	3	1
振动幅度/相位	1	-	1
轴承温度	1	-	1
机械密封腔压力/温度	1	3	1
油位监测(仪器或相机)			2

注 1: 推荐采用连续量监测的仪表; 。

注 2: 该参数应可获取, 如何获取应依据具体情况实现题。

注 3: 安装监测仪表, 安装时不需加工、切割或对系统排水。

说明:

1) 监测项目: 油润滑设备上应设置油取样接头(注 2 或注 1), 水平布置、采用滑动轴承设备设置推力监测。

应监测滚动轴承的油温、径向/推力轴承的油温和轴承金属温度, 并对推力轴承的两侧轴瓦进行推力监测(加载/卸载)。

2) 振动监测设备: 对于采用滚动轴承的设备, 轴承室和轴承上安装加速度振动测量传感器; 对于采用滑动轴承的设备, 轴承上安装加速度振动测量传感器和在轴承位置安装承插式传感器。

表 2.1.12-5 大型泵

监测参数	循环水泵	工业水泵	凝结水泵	给水/凝结水泵前置泵	给水泵	启动给水泵	加热器疏水泵	余热排出泵 (RNS)	给水泵齿轮箱
单泵流量	4	1	1	1	1	1	1	1	
入口温度	5	5	5	1	1	-	1	-	
出口温度	1	1	1	1	1	1	1	-	
入口压力	-	-	1	1	1	1	1	1	
出口压力	1	1	1	1	1	1	1	1	
振动振幅和相位	1	1	1	1	1	1	1	3	1
油分析	3	3	3	3	3	3	3	3	3
输入电源	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	

注 1: 推荐采用连续量监测仪表。

注 2: 推荐安装就地仪表。

注 3: 安装监测仪表, 安装时不需加工、切割或对系统排水。

注 4: 该参数应可获取, 如何获取应依据具体情况实现。

注 5: 所需参数应独立于系统、单独监测。

说明:

1) 监测项目: 油润滑设备上应设置油取样接头 (注 2 或注 1), 水平布置、采用滑动轴承设备设置推力监测。

应监测滚动轴承的油温、径向/推力轴承的油温和轴承金属温度, 并对推力轴承的两侧轴瓦进行推力监测 (加载/卸载)。

2) 振动监测设备: 对于采用滚动轴承的设备, 轴承室和轴承上安装加速度振动测量传感器; 对于采用滑动轴承的设备, 轴承上安装加速度振动测量传感器和在轴承位置安装承插式传感器。

表 2.1.12-6 调速驱动器/变频驱动器

监测参数	ASD/VFD
子系统泵/风机的振幅和相位	1
变压器振动 (如果是油浸式变压器)	1
油分析 (如果是油浸式变压器)	3
输入和输出 ASD 电源信号分析	1, 3
输入和输出 ASD 电压, 电流和频率	1
电机转速	4
动态扭振监测器 (电机)	4
热成像-ASD 中安装检查孔的滑动门螺栓连接	3
所有可用的变压器、整流器和逆变器温度	1
冷却水压力、温度 (入口和出口) 和流量 (如适用)	1
油位 (如果是油浸式变压器)	1
油温 (如果是油浸式变压器)	1
漏水检测器-用于水冷式 ASD	1
运行时间和启动次数	1
局部放电/EMI	1
强制系统的油流量 (如果是油浸式变压器)	1
环境温度和机柜空气温度	1
压差过滤计 (风冷)	1, 2
入口/出口强制空气变压器温度	
溶解气体分析 (DGA)	1

注 1: 建议使用远传信号的仪表。

注 2: 建议安装就地仪表。

注 3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

注 4：所需参数是独立于系统进行测量的。

表 2.1.12-7 止回阀

监测参数	低/无剂量区域	高辐射区域
超声波(角速度/开启角度)	3	2
声发射	3	1
电磁脉冲	3	2

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：建议安装就地仪表。

注 3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或排放系统。

表 2.1.12-8 气动阀（AOV）控制阀

AOV控制阀监测参数	阀	执行机构	上/下游管道
阀杆位置	1		
调压后供气压力		1	
控制信号到定位器/控制器(电流/电压)		1	
定位器输出信号/出口气压		1	
定位器反馈信号		1	
阀杆推力/扭矩	2		
膜片压力		1	
AOV常闭（排放阀）控制阀监测参数	阀	执行机构	上/下游管道
阀杆位置	1		
热电偶			1
调压后供气压力		1	
控制信号到定位器/控制器(电流/电压)		1	
定位器输出信号/出口气压		1	
定位器反馈信号		1	
阀杆推力/扭矩	2		
膜片压力		1	
AOV热性能开关阀监测参数	阀	执行机构	上/下游管道
热电偶			1
限位开关	1		

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

表 2.1.12-9 电动阀

电厂辅助系统电动阀无推荐参数需要监测。

表 2.1.12-10 直流电源

监测参数	蓄电池	蓄电池充电器	不间断电源（逆变器）	直流母线	220伏交流仪表总线
室温	1	4	4		
蓄电池充电器输出电压		2			
蓄电池充电器输出电流		2			
逆变器输出电压			2		
逆变器输出电流			2		
逆变器输入电压			2		
逆变器输入电流			2		

电池单体电压	3				
蓄电池放电/充电电流	2				
蓄电池端子电压	1				
蓄电池浮充电流	1				
蓄电池电解液液位（液位标记）	2				
蓄电池电解液比重（仅限充满电的电池）	3				
电池电解液温度（仅限充满电的电池）	3				
负极柱上的电池温度（仅限阀控铅酸蓄电池）	3				
蓄电池单元内部欧姆测量（仅限阀控铅酸蓄电池）	3				
电池间连接器电阻	3				
铁磁谐振直流电压			2		
绝缘电阻监测系统				1	
接地检测				1	1

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：建议安装就地仪表。

注 3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

注 4：所需参数是独立于系统进行测量的。

表 2.1.12-11 柴油发电机

监测参数	发动机	发电机	励磁器	控制器
振动分析	1	1		
热成像		3	3	3
轴电压/电流监测		1		
润滑油/脂分析	3	3		
燃料油分析	3			
冷却剂分析	3			
发动机转速	1			
发动机性能分析	3			
发电机性能分析		3		
发电机电压、电流、频率		1		
功率因数		1		
发电机无功功率和有功功率		1		
励磁机磁场电压和电流			1	
磁场接地电压			1	
定子绕组温度（多个）		1		
轴颈轴承金属温度		1		
发电机空间加热器		1		
冷却剂进出口温度	1			
冷却泵出口压力	1			
冷却剂液位	1			
润滑油冷却器进出口温度	1			
润滑油温度	1			
润滑油压力	1			
气缸排气温	1			
涡轮增压器入口/出口排气压力	3			
后置冷却器入口空气压力	3			
后置冷却器出口空气压力	1			

涡轮增压器入口/出口排气温度	1			
燃烧空气过滤器压差	2			
燃烧空气温度	1			
燃料油压力	1			
燃料油温度	3			
运行时间	2			
启动空气压力	1			
燃料架位置	2			
润滑油液位	2			
启动计数器	2			
环境放射检测	4			
大气压力	5			
涡轮增压力矩监测	3			
涡轮增压转速	3			
输出断路器位置		1		
发动机控制开关位置				1

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：建议安装就地仪表。

注 3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

注 4：希望获得该参数，需要解决如何获取问题。

注 5：所需参数是独立于系统进行测量的。

表 2.1.12-12 低压和中压断路器

监测参数	低压断路器	中压断路器
热效应	-	-
电机电流和功率特征分析（380V 电机）	1	1
用于测量和监控的温度传感器（光纤）关键母线接头	1	1
远程机架系统扭矩传感器	2	2
接地故障检测系统（高电阻接地或不接地系统）	1	1
监控断路器跳闸轴扭矩和关闭轴扭矩	1	1
接触磨损指示器	1	1
母线电压谐波监测仪	1	1
局部放电监测仪	-	1
观察弧光以检测故障的光学传感器	1	1
监测跳闸和闭合线圈电流	1	1
冲击和稳态电流振幅（充电电机）	1	1
断路器跳闸时间	-	1

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：建议安装就地仪表。

表 2.1.12-13 380V 电动机

高达440机架、600V、随机绕组结构的感应电动机的监测参数	NEMA框架，滚动元件，润滑轴承	NEMA框架，滚动元件，油润滑	NEMA框架，轴颈轴承，油（抛油环）	NEMA框架，滑动轴承，油（强制供给）
震动感应器	C:1	C:1	-	-
热效应	-	-	-	-
油分析（如果适用）		3	-	-
电机转速	C:1	C:1	-	-
电机电流和功率特征分析	BKR	BKR	-	-
绕组温度	C:1	C:1	-	-



轴承温度	C:1	C:1	-	-
电机电压和电流	C:1,or C:2	C:1,or C:2	-	-
油位（如适用）	-	C:1	-	-

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：建议安装就地仪表。

注 3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

C 为“关键”或处于高辐射区域的电机

BKR 为与部件相关的断路器，用于监控电机电流和功率特征分析

振动仪器：1）带滚柱轴承的机器：机壳，衬垫式加速度计。2）带轴颈轴承的机器：  
在每个可接近的轴承位置安装套管、衬垫式加速计和接近探头。

表 2.1.12-14 大型电机（10kV）

监测参数	CW	SW	条件	FW/ 条件助推 器	FW	启动 FW	加热器 排水管	RNS
振幅和相位	1	1	1	1	1	1	1	1
油分析	3	3	3	3	3	3	3	3
电机电流和功率 信号 分析	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2
电机转速	5	5	5	5	5	5	5	5
热效应-电机连接 处的螺栓连接	3	3	3	3	3	3	3	3
所有可用的绕组 温度	1	1	1	1	1	1	1	1
轴承金属温度-双 重，独立的温度 探头，彼此分开 90度，用于轴颈 轴承设备	1	1	1	1	1	1	1	1
电源电压和电机 电流	5	5	5	5	5	5	5	5
冷却水压力、温 度和流量（如适 用）	1	1	1	1	1	1	1	1
油位	1, 4	1, 4	1, 4	1, 4	1, 4	1, 4	1, 4	1, 4
储油器温度	1	1	1	1	1	1	1	1
空气进入电机温 度-用于全封闭水 冷式电机	1	1	1	1	1	1	1	1
漏水探测器-用于 全封闭水冷式电 机	1	1	1	1	1	1	1	1
运行时间和启动 次数（在适当和 可测量的情况 下）	5	5	5	5	5	5	5	5
局部放电/EMI	1	1	1	1	1	1	1	1
旋转二极管监视 器 （仅限同步应用 程序）	1	1	1	1	1	1	1	1
旋转绕组接地故 障检测（仅同步 应用）	1	1	1	1	1	1	1	1

同步转子温度 (仅限同步应用)	1	1	1	1	1	1	1	1
强制系统的油流量	1	1	1	1	1	1	1	1

关于油的说明：所有水平径向轴承设备上设有油取样接头（注 2 或注 1）、插入式监测的油润滑设备；滚子轴承油槽温度；径向/推力轴承的油槽和轴承金属温度；需双侧监测的推力轴承（加载/卸载）。

振动监测仪表：1)带滚子轴承的机器：轴承外壳，基座式安装加速度计；2)带径向轴承的机器：安装于每个人员可达轴承位置的基座式安装加速度计和接近式探针。

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：建议安装就地仪表。

注 3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

注 4：希望获得该参数，但需要解决如何获取问题。

注 5：所需参数是独立于系统进行测量的。

表 2.1.12-15 低压厂用变压器

监测参数	油浸式变压器	干式变压器
溶解气体分析与油品质量	3	-
在配电柜母线处进行变压器电流/电压监测	4	4
通过“红外窗口”在大型和/或临界负载变压器上进行热效应	-	3
直接绕组温度	1 或 2	1 或 2
直接油温	1 或 2	-
油箱压力读数	2	-
油位	2	-

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：建议安装就地仪表。

注 3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

注 4：所需参数是独立于系统进行测量的。

表 2.1.12-16 主变压器/辅助厂用变压器/高压厂用变压器

监测参数	主升压变压器	机组辅助变压器 (UAT)	备用辅助变压器 (RAT)
振动分析/声级测试冷却泵	1	1	1
主油箱振动分析/声级测试	3	3	3
风机、冷却泵、主水箱的 声/超声噪声分析。	3	3	3
冷却泵、冷却风扇的电机 电流分析（电源电路）。	1	1	1
热效应	4	4	4
直接绕组温度	1	1	1
直接油温	1	1	1
油箱压力读数	1	1	1
油位	1	1	1
冷却器性能（温度）	1	1	1
套管监视器	1	1	1
接地电流监测器	1	1	1
接地端RF监视器	1	1	1
避雷器漏电流	1	-	1
变压器内部局部放电活动	3	3	3
备用变压器水监控器	4	4	4
LTC腔室中的油温（仅限	-	1	1

LTC设计)			
LTC 油位	-	1	1
LTC DGA	-	1	1
抽头操作次数	-	2	2
抽头位置	-	1	1
自动/手动控制和指示	-	1	

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：建议安装就地仪表。

注 3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把排系统排空。

注 4：希望获得该参数，但需要解决如何获取问题。

表 2.1.12-17 离相封闭母线

监测参数	母线	母线槽	冷却风扇/电机	热交换器
安装温度传感器（建议使用光纤或红外温度计），用于测量和监测关键母线接头	1	1		
振动和轴承温度监测			1, 2	
接地故障检测系统（回馈运行时高电阻接地或不接地系统）	1			
热交换器检漏仪（液位开关）				1
露点监测器		1		
发电机线路和中性点终端的氢气监测器		1		
进出口温度（空气和水）				1
空气过滤器压差			1	
漏水探测器（液位开关）		1	1	
局部放电探测器/EMI（发电机外部）		3		
用于检漏的气流（补给）		1		
同相接触温度传感器（建议使用光纤或红外温度计）	1			

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：建议安装就地仪表。

注 3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

表 2.1.12-18 发电机/励磁器

监测参数	发电机	励磁器
轴和轴承振动分析（振幅和相位）	1	1
轴电压监测	1	1
轴颈轴承进口集管油温	1	1
轴颈轴承金属温度	1	1
扭转振动	1	1
户外接地探测器	1	1
轴承绝缘状态监测器（需要双绝缘轴承）	2	2
发电机转子电压和电流（如可得到）	1	
发电机总实际功率	1	
发电机实际净功率（低压侧变压器）	1	
发电机总无功功率（VAR）	1	
发电机净无功功率（低压侧变压器、VAR）	1	
定子绕组温度（多个电阻式温度检测器）	1	
定子绕组冷却线圈入口温度	1	
定子绕组冷却线圈出口温度（每个棒/线圈上有双热电偶）	1	
局部放电监测	1	
高压套管温度	1	
铁芯端或磁通屏蔽温度	1	

集热环冷却空气入口和出口温度	1	
发生器液体检测	1	
定子冷却水进出口电导率	1	
定子冷却水pH值（适用于低氧系统）	1	
定子冷却水氧气	1	
定子冷却水流量	1	
二氧化碳流量计	1	
定子冷却水进出口压力	1	
每个冷却器的氢气冷却器气体入口和出口温度	1	
氢冷却水进出口温度	1	
每个冷却器的氢冷却水流量	1	
氢封油温	1	
氢密封油压差	1	
氢气纯度	1	
氢气露点	1	
发电机氢壳压力	1	
发电机铁芯监测器	1	
温度（仅限静态整流器）		4
端部绕组定子振动（光纤）	3	
棒端定子振动（光纤）	3	
氢气风机压差	1	
供氢（流量计）表	1	
通量探测器	1	
压差容器（安装在沸水堆励磁机端）	2	
轴承密封腔氢检漏仪	1	
氢封油入口流量	1	
氢封油出口流量	1	
发电机主相螺栓载流连接温度（光纤）	1	
励磁器励磁电压和电流		1
氢气探测器		1

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：建议安装就地仪表。

注 3：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

注 4：希望获得该参数，但需要解决如何获取问题。

表2.1.12-19 主汽轮发电机

监测参数	注释
油分析	2
轴电压监测	1
转子转速	1
推力轴承磨损	1
径向轴承振动（x-y）和相位角	1
轴颈和推力轴承温度	1
轴承油压	1
轴承油集管温度	1
润滑油箱温度	1
转子偏心距	1
膨胀壳	1
转子/壳体差动膨胀	1
涡轮水感应	1
真空冷凝器	1
排烟温度	1
液压控制液压力	1
停止、调节器/控制和截流阀位置	1

截止阀金属温度（内部和外部）	1
一级金属温度（内外）	1
第一级压力	1
再热截止阀进口蒸汽温度	1
再热截止阀进口蒸汽压力	1
MS再热出口/低压入口温度	1
MS再热出口/低压入口压力	1
汽封集箱温度	1
汽封母管压力	1
汽封凝汽器出口温度	1
汽封凝汽器压力	1
扭转振动	1
低压涡轮叶尖振动	1
通过截止阀的压差	1
单个汽封蒸汽供应压力	1
单个轴封排汽真空	1
汽封蒸汽流量计汽柜	1
高压汽轮机汽封蒸汽流量计	1
独立EHC泵流量	1

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

表2.1.12-20 500kV GIS

监测参数	断路器
热效应	-
超声波泄漏检测	-
油分析（仅限充油）	2
电晕	-
气压	1
环境温度	1
故障电流	1
断路器定时	1
电弧/局部放电	1
套管污染监测器	1

注 1：建议使用远传信号的仪表。

注 2：安装仪表时无需使用机械加工、切割或把系统排空。

表2.1.12-21 发电机出口断路器

监测参数	分段
热效应	-
外观	-
电晕	-
故障电流	1
电弧放电/局部放电	1

注 1：建议使用远传信号的仪表。

## 2.1.13 信息管理系统

### 2.1.13.1 IMS 的责任

本文件的目的是为华龙技术电厂设计中使用的成本效益、最先进的、完全集成的IMS提供最低功能要求的定义，并定义系统如何从设计工具转换为施工工具，最后转变为电厂业主的操作工具。

本文件旨在为电厂设计师提供指导。重点放在系统预期的功能上，即性能要求，而不是

一个适合采购的完整系统定义。预计电厂设计师将根据这些要求，在必要时制定更详细的硬件和软件规范和程序。电厂设计师负责开发IMS，并在设计过程中生成技术数据库。电厂设计师旨在代表负责开发和完成设计的实体。人们认识到，在现实中，电厂设计将由多个组织执行；然而，其目的是通过一个单一的、集成的过程来管理工作。电厂设计师应在IMS中以适当的形式和格式，将其他项目参与者生成的信息纳入数据库。电厂设计方应提供电厂建造方和操作人员所需的技术数据库和IMS硬件和软件。电厂设计师应建立一个软件控制系统，供IMS开发和准备的所有参与者使用。

#### 2.1.13.2 IMS 规格书的准备

电厂设计人员应为IMS编制一份规范，该规范整合了本文件的要求和必要时的附加要求，以产生一个能有效满足规定目标的系统。

应包含以下要素：

活动清单：电厂整个生命周期内发生的所有活动的清单和简短说明。

活动文件包：设计过程中使用的每个活动的文件包，其中包含活动范围、主要数据项、与其他活动的接口以及活动的数据库模型。

电厂数据模型：将所有数据模型汇编成一个电厂数据的综合模型。它包括所有数据名称和定义以及数据之间的关系的列表。

在开发特定的华龙技术电厂管脚和电厂数据模型时，电厂设计师应在设计过程中包括具体的华龙技术电厂要求，并应与华龙技术电厂设计和范围一致。

华龙技术电厂数据模型应集成到执行所述功能所需的软件包中；作为IMS一部分产生的所有数据应与该模型一致。

#### 2.1.13.3 IMS 的功能要素

##### 1) 信息处理与控制

所有信息均通过专用软件进行处理和控制。为此，数据管理软件模块（DMSM）或其等效物应提供访问方法，以允许集成以下各段所述的各种IMS系统功能以及工程和设计包或模块以及功能辅助工具。为满足这些要求而选择的方法应包括在有新功能，新包装或新模块时增加新部件的规定。软件模块应包括单个执行控件，该控件提供对任何IMS功能，程序包或模块的图形或键盘访问。搜索，检索和链接功能应包括规则库和归纳法，即不限于关键字搜索。

##### 2) 工程和设计功能

为IMS的工程和设计功能指定的要求分为两部分。基本一般要求的特征可以是无维度的，也可以是具有单独提供的与特殊目的学科相关功能（工程包）的维度的要求。

##### 3) 功能性辅助工具

包括项目控制功能、建筑的功能、函数的操作、维护功能。

#### 2.1.13.4 IMS 的一般要求

##### 1) 生成信息

在带有IMS的核电厂移交给电厂业主之前，信息管理、分发和控制是电厂设计者的责任。电厂设计人员只负责设计相关的所有信息，建造和运行过程所产生的信息由建造人员和运行人员负责维护。信息在IMS中输入时，应包括从IMS中任何位置搜索和链接信息以及维护单个经过验证的官方可追溯信息源所必需的所有实体，属性和关系。

##### 2) 生成信息的兼容性

电厂设计师应负责提供确保IMS中信息兼容性的服务。因此，电厂设计师应及时输入从

任何来源收到的设计、建造和运行核电站所需的所有信息。信息输入IMS时，应包括从IMS任何地点搜索和链接信息所需的所有实体和属性，并保持信息的单一经核实的官方可追踪来源。

### 3) 灵活性和适应性

规定在不影响数据库结构的情况下，简单地添加新模块，如商用计算机设计应用程序、成本控制应用程序、项目调度应用程序等。在选择新模块时应考虑其灵活性和适应性。

### 4) 硬件兼容性

电厂设计师应负责制定计划，以确保和证明整个核电厂项目（包括营业额）中计算机硬件和软件的兼容性。

### 5) 设计验证

IMS应用于定义和记录设计评审和设计验证要求，以及每个信息集的验收标准。指定负责审查和批准的个人应通过符合3A安全标准的身份验证技术进行识别。

### 6) 对设计更改的请求

IMS中应为数据和功能权限访问控制。这些人审查和批准设计，以确保其与施工，操作和维护有关。

### 7) 在IMS中维护信息有效性和完整性的控制和程序

IMS应包括电子变更控制和定期系统IMS备份的可靠方法。

### 8) 质量保证

随着设计的发展，IMS应该能够自动维护设计的完整记录。

### 9) 计算机及网络安全

IMS安全等级以及已实现的必要风险等级所采用的方法应由电厂设计师提出，通过电厂业主审查和批准。

## 2.1.13.5 移交电厂业主

电厂设计者应向电厂所有者提供完整的IMS，包括硬件和软件，以执行本文档中描述的功能。该软件将包含计算机化技术数据库。硬件将包括足够数量的工作站，足够的内存和计算能力，以执行所有者的预期目标，以在建设者和操作员的活动中的最佳利用计算机技术数据库。它还将包括系统内部以及用户之间进行通信所需的系统和设备。

技术数据库应包括所有者在建造，维护和运营电厂所需的设计过程中生成的所有信息。它还应包括电厂所有者提供的信息，该信息可能不在电厂设计范围之内，但对于施工或操作是必需的。（例如，这可能包括选址和准备工作以及所有者提供的设备和服务。）所有技术数据应符合电厂数据模型。电厂所有者应向电厂设计者提供信息以这种格式。

IMS硬件应与电厂所有者的内部计算机信息系统兼容；但是，它必须与电厂中提供的用于非信号处理和非控制功能的计算机完全兼容（即与用于操作员辅助，维护，性能计算等的计算机兼容）。

电厂设计人员应为参与施工和运营活动的所有电厂所有者指定的人员提供有关IMS操作和维护的培训和最终用户文档。

在开始施工时，电厂设计人员应向电厂现场交付功能齐全的IMS系统（硬件和软件）。那时，系统应在机器可读介质上记录构成技术数据库的所有完整设计信息以及所有者提供的技术数据库信息。

在设计和施工期间直至移交给业主期间，电厂设计师应负责更新和控制技术数据库，并维护IMS，包括软件控制。移交后，业主将负责电厂特定IMS的这些功能。电厂设计师应在业主批准的情况下制定程序，允许指定的施工人员和操作人员使用IMS。这将包括访问数据、检索、生成硬拷贝和选定的交互功能。后者将包括利用CAD进行研究的能力，生成报告，以

及开发电厂业主特定信息。

随着描述的管脚和工接近完成，系统移交给操作员，作为移交过程的一部分，电厂设计师应确保相应的信息集与实际建造的描述的管脚和工完全一致。计算机模型巡检应与实际电厂巡检同时进行。信息集应包含操作和维护系统中考虑移交的设备所需的所有数据。

## 2.2 堆芯设计

### 2.2.1 通用要求

#### 2.2.1.1 定义

##### 1) 范围

本节定义了华龙技术电站的堆芯和燃料要求，包括燃料组件、燃料棒、反应性控制设备、中子源和堆芯仪表。

##### 2) 功能

华龙技术电站燃料和反应性控制系统的功能要求如下：

- 提供合适的燃料富集度和可燃毒物的组合，以达到堆芯功率和循环长度目标；
- 作为阻止燃料和放射性裂变产物释放到环境中的第一道屏障，燃料包壳应该能够包容燃料和裂变产物；
- 能够控制堆芯剩余反应性；
- 堆芯中的反应性控制依赖于控制棒、冷却剂中的可溶硼和其它毒物。硼浓度控制是化学和容积控制系统的功能之一。“化学和容积控制系统”中给出了硼稀释和注入速度的要求。堆芯中过剩反应性的控制依赖于冷却剂中可溶硼的量。硼浓度通常用来调节堆芯中慢反应性的引入（例如：由于燃料燃耗等）。

#### 2.2.1.2 性能要求

##### 2.2.1.2.1 堆芯设计要求

##### 1) 防止裂变产物释放的屏障

反应堆系统应设计两套独立的屏障，以防止裂变产物释放：燃料包壳和反应堆冷却系统压力边界。

##### 2) 压力边界完整性

反应堆压力容器（RPV）应采用成熟的技术来设计和制造。反应堆压力容器的材料、设计和制造方法应选择使材料不呈现出脆性行为，不发生裂纹快速扩展，或者其它的没能考虑环境条件产生的破坏，环境条件是指在所有的正常运行和事故中存在的工况，这些事故的频率和种类在2.1.2节“安全设计要求”中定义。

##### 3) 负的反应性系数

反应堆应设计成在所有的运行工况下核反应性反馈能抑制功率的快速增长。在所有的工况下功率反应性系数应是负的。功率反应性系数包括燃料的多普勒系数、慢化剂温度系数、必要时还包括慢化剂空泡系数。

##### 4) 抗功率振荡

反应堆堆芯应设计成：对任何功率波动，不用操作者的动作而通过堆芯固有的特性或反应堆保护系统的保护，能够保证堆芯的任何功率振荡都不会导致超出燃料安全限值。

##### 5) 正常运行及瞬态的裕量

反应堆系统设计应保证燃料棒运行在特定的燃料设计限值以下，并应具有15%的最小运行裕量。

##### 6) 反应性控制的可靠性



反应性控制系统的设计应确保其在正常运行、中等频率事故、稀有事故和极限事故工况下执行安全功能。另外，它们也应该能够执行地震（SSE）事故下的预期功能。

堆芯反应性控制要求设计两套独立的控制系统，两套系统的固有设计原理必须不同。在冷停堆状态下，这两个系统中至少有一个能够保持反应堆次临界。

#### 7) 停堆裕量

反应性控制系统应设计成，在反应堆全寿期中，冷态工况下最大反应性时刻以及最大价值的一束控制棒完全抽出堆芯时，堆芯能够保持至少1%的次临界。与堆芯保护系统配合，反应性控制系统要限制反应性引入的总量和速率，以确保假设的反应性事故情况下（比如PWR的弹棒事故）不会导致堆芯熔毁、反应堆冷却剂压力边界破坏、堆芯充分冷却能力丧失。

#### 8) 次临界度

反应堆堆芯及相关元件或系统的设计应保证换料期间堆芯处于次临界状态。对于华龙技术电站而言：在堆外，正常工况下新燃料 $K_{eff}$ 建议小于0.95，事故工况下新燃料 $K_{eff}$ 建议小于0.98，乏燃料 $K_{eff}$ 建议小于0.95；在堆内， $k_{eff}$ 应小于0.99。所有预期工况下，都必须维持这一次临界度，包括计划的中间倒料、任何单一故障或者程序差错。换料时，可通过适当的硼化达到次临界要求。

#### 9) 燃料循环

初始核设计和燃料循环成本评估应以铀燃料循环一次通过为基础。

设计堆芯时应评估哪些附加的反应堆特性是必须的要考虑的，包括提供足够的裕量用来支持后续的燃料技术改进或者基于经济性的燃料循环的改进（如，高燃耗、自增殖钚循环等）。如果反应堆的设计者很难确定哪些特征在寿期中需要改进时，应当在初始设计中给出包括这些特点的费用预估。

### 2.2.1.2.2 堆芯和燃料能量的产生

#### 1) 基本性能要求

堆芯和燃料的基本性能要求在整个计划的运行循环期间产生并输出额定值的热量，并有足够的裕度和控制能力以使预期的电站瞬态和计划的机动运行都能调节在规定的限值以内。所有堆芯和燃料设计特性的计算应采用与第2.1.2节“安全设计要求”中一致的分析方法来做。为管理审批所作的计算应采用审批当局批准的方法。

#### 2) 稳定运行

堆芯的运行特性应当具备在所有预期的运行工况下稳定运行的能力，这一特性也应当使操纵员能够在系统受到扰动或进行调试时辨认出即将出现的不稳定运行并采取行动避开不稳定运行。然而，即使操纵员不采取任何行动，燃料的热工限值也不应当被超过。应当用厂内试验或其它试验证明新型设计的热工水力稳定性。

#### 3) 燃料设计裕度和运行限值

反应堆系统设计应满足下列燃料设计准则：

##### a. 失水事故(LOCA)限值

对于在第2.5节“安全系统”中规定的所有假想的失水事故，最大极限的燃料棒应满足HAF102的要求。

##### b. 正常运行、中等频率事件的限值

- 最小 DNBR 应使在 95%置信度下至少 95%概率保证具有最小 DNBR 的燃料棒不会发生偏离泡核沸腾（DNB）；
- 寿期内二氧化铀燃料和含钐燃料芯块的峰值温度应低于芯块熔点 2590℃；
- 均燃料棒周向平均不可恢复应变应不大于 1%。

##### c. 稀有事故的限值

- 允许有 5%以下的燃料棒发生 DNB；
- 包壳温度峰值（PCT）应当维持在 1204℃以下；
- 等效被反应的铀要保证在 17%以下。
- 4) 负荷跟踪和机动运行的能力
  - 与远程系统调频控制或经济运行相关的小的阶跃载荷变化控制主要机理应是慢化剂温度变化；
  - 计划的负荷循环运行控制的主要机理是采用包含低价值控制棒的进行反应性和功率分布控制的控制棒系统；
  - 堆芯和相关系统应根据电厂要求，决定是否具备循环寿期末的延伸运行，滑功率运行以及低功率延长运行能力。
- 5) 增强堆芯反应性控制

堆芯应具有足够的可引入的负反应性，使在进行机动运行和中等频率事故时控制堆芯功率对硼浓度变化的要求可最小。

#### 6) 掉棒运行

在功率运行期间，反应堆设计应能适应下列非计划落棒事件：

- 在任何单束控制棒全部插入的情况下降功率运行四小时；
- 在不引起紧急停堆或超过燃料设计限值的条件下恢复控制棒棒位。

### 2.2.1.2.3 燃料的燃耗、可靠性和寿期

#### 1) 燃料制造可靠性

燃料可靠性是一个最高目标，对于因制造缺陷使燃料过早破损的概率应少于1/50000，力求达到1/100000，该指标按工业界一致认可的方法来测定。

#### 2) 燃料燃耗和寿命

基本的燃料机械设计应使燃料组件平均燃耗能至少达到52000MWd/tU。

燃料棒和组件结构部件设计为：在堆芯最少停留6年，乏燃料池最少停留60年。

#### 3) 控制棒组件寿期

控制棒组件（RCCA）寿命应设计为：最少运行时间为15堆满功率年（RFPY），目标为20堆满功率年（RFPY）。

### 2.2.1.3 设备设计要求

#### 1) 结构要求

燃料组件及堆内结构的机械设计应能承受除燃料包壳破损或者导致停堆和余热排出的功能丧失以外的各种极限设计事故。在确定设计载荷时可以应用破前漏（LBB）技术。

辐照前，燃料组件的设计应保证在运输和吊装过程中承受横向6g、轴向4g作用力的情况下，没有任何损伤。

#### 2) 可再组装性

燃料组件的设计应满足所有的燃料棒能够再组装，再组装包括对已辐照的燃料组件出于检查、维修或其他原因而进行的部分拆卸和以后的重新组装。再组装的方法应得到验证，下列情况不作要求：

- a. 翻转燃料组件；
  - b. 焊接或切割过程中产生掉渣或松动部件；
  - c. 对于松动部件的处理（如螺钉、弹簧、夹子），除非这些部件可用拆卸的工具所捕获。
- #### 3) 燃料操作

- a. 燃料组件的设计应使换料无任何困难，且对燃料的损伤风险最小。设计者为满足该要求而采用的设计方法应在使用中被证明它对燃料的操作和装载本质上不会带来麻烦。
- b. 非燃料的堆芯部件应设计为能从堆芯上方很容易辨别出的特殊形状。每个燃料组件和其他插入的堆芯部件（如压水堆控制组件和可燃毒物组件）都应被标记，以便它们本身能通过位于堆芯上方的水下观测装置轻易的辨别出来，其最低要求应满足国家相关法规要求。
- c. 燃料组件的设计应具有易于观察的机械特征（如一种方向性标识），以便使操作员在换料和换料的过程中进行观察。

#### 4) 抵抗芯块包壳相互作用（PCI）

燃料棒应使用成熟的设计使由于芯块-包壳相互作用和沿包壳内表面的应力腐蚀开裂而失效的可能性为最低。

#### 5) 机械设计

- a. 堆芯应由开式栅元、无盒燃料组件、呈方形布置的燃料棒、可移动的细棒型控制棒组成。所有的燃料组件和控制棒组件应当使用经过商运电站成功检验过的类似机械设计。
- b. 燃料组件应能够在没有横向支撑的情况下直立于堆芯内。
- c. 燃料应设计成具有防碎块的能力。下管座应设计成：1）不增加燃料组件内压降，2）防止大量的异物与水垢沉积而产生流道阻塞。燃料的设计应该阻止可在定位格架内滞留的尺寸的碎块进入燃料组件。此要求应由水力试验所证明，试验中像上述尺寸大小的碎块应不能进入燃料组件。设计还需要通过先导组件的堆内运行及对下管座的检查来保证不会出现明显的流道堵塞。

#### 6) 核设计

- a. 平衡循环堆芯装载方案和堆芯外围区域的设计应该使沿堆芯边界的中子泄漏尽量低。
- b. 燃料循环周期应与电厂可利用率和换料周期的要求一致。
- c. 燃料循环设计应满足：在整个燃料循环周期内，当反应堆处于临界运行工况下具有非正的慢化剂温度系数。
- d. 控制棒由高价值和少数低价值棒组成。
- e. 从核设计和机械的观点来看，同种控制棒应是可以互换的。
- f. 所有棒都可以快速下落，并且没有棒会在下落的任何一过程中，导致正反应性引入。

#### 7) 热工水力设计

堆芯设计应使在正常满功率运行工况下，在堆芯热通道中无整体沸腾。

#### 8) 材料

- a. 燃料组件材料应采用经过已商运电站的成功运行经验证明过的材料，并且符合所规定的材料要求。
- b. 锆合金燃料棒包壳应是抗腐蚀的，它在规定的燃耗限值内，在堆芯内可最大限度地减少水侧生成的氧化膜厚度，同时吸收最少量的氢。
- c. 控制棒材料应采用经过已商运电站的成功运行经验证明过的材料，以下材料满足要求：
  - 星型架和驱动杆组件：304L 或 316L 不锈钢（碳含量 $<0.02\%$ ，固溶退火）
  - 吸收棒包壳：304L 或 316L 不锈钢（碳含量 $<0.02\%$ ，固溶退火）其他的特殊要求是减少对晶间应力腐蚀相关的辐照应力腐蚀裂纹（IASCC）的敏感性。625 合

金管材也满足要求。特殊的设计应当考虑应变限值,这需要通过实际应用予以验证。

- 为达到 15 年的使用寿命,吸收体材料可能会随着采用的控制棒设计和功能要求不同而变化。可以使用 Ag-In-Cd 或者 Ag-In-Cd 与 B4C 混合式控制棒 (Ag-In-Cd 在高辐照区, B4C 在低辐照区)。不能使用铅包壳。
- 吸收棒包壳或裸吸收体材料的选择准则应包括与其它堆内相接触材料磨损的相容性。如果是包壳,应考虑对辐照应力腐蚀裂纹(IASCC)的应变能力。

#### 9) 芯块氢含量的控制

芯块总氢含量(包括水蒸气)不超过2ppm(相当于铀重量)。

#### 10) 微振腐蚀

- a. 避免燃料格架支撑点发生微振腐蚀。
- b. 燃料组件的设计应最大限度地减少和考虑在燃料组件内和组件之间重新分配,如出现在管座和定位格架附近的流量再分配,以及相邻燃料组件之间流量不匹配。
- c. 控制棒导向管的微振磨蚀不会使控制棒导向管发生不可接受的减薄。

#### 11) 燃料组件压紧力

- a. 应当提供措施确保燃料组件在任何运行、设计工况下不脱离并上浮,除了电厂甩负荷导致的汽轮机超速,导致燃料组件的短暂上浮,但要有措施使得上升的燃料组件能归位而不发生损坏。
- b. 燃料组件压紧力须满足在可接受的温度下允许一台或多台主冷却剂泵运行。

#### 12) 压紧弹簧

- a. 压紧弹簧的设计应当考虑弹簧松弛、燃料组件长度变化、中子通量、部件之间的热膨胀差异。
- b. 压紧弹簧应覆盖燃料组件的长度变化,部件的公差及部件间的热膨胀差。
- c. 弹簧的选材、热处理及最终表面状态应考虑工作环境(温度、中子通量、腐蚀等因素)。
- d. 压紧弹簧应有适当尺寸以使弹簧被上栅格板压紧之前能在上部堆内构件导向装置与燃料组件的管座之间充分啮合。

#### 13) 包壳坍塌

燃料棒应设计成使包壳在服役寿期内不会因蠕变长期效应而坍塌。应能证明在一般的,非循环的特定基础上包壳在服役寿期内不会坍塌,并不需要按循环逐次进行评价。

#### 14) 燃料棒弯曲

通过通用认可的棒弯曲评估模型,燃料棒间距变化不会引起不可接受的功率峰或者 DNBR。

#### 15) 燃料组件弯曲

燃料组件设计应采用经压水堆验证的材料热处理和机械特性(控制棒导向管),限制组件在堆内弯曲的程度,使组件弯曲不损害堆芯的性能或者不损害可重装载的能力,应该采纳已经被证实了的能够限制燃料组件残余弯曲的制造技术。

## 2.2.2 燃料系统设计

### 2.2.2.1 包壳

#### 1) 材料和机械性能

燃料棒包壳具有低的热中子吸收截面;对冷却剂、燃料和裂变产物具有高的抗腐蚀性能;在运行温度下具有高强度、高延性和高可靠性。

在燃料棒寿期内,如果芯块隙中有空腔时包壳也不会坍塌。

#### 2) 应力-应变限值

在DBC-1 和DBC-2 类工况下,包壳体积平均有效应力不应超过考虑了温度和辐照影响的包壳材料的屈服强度。

稳态运行时,从未辐照状态算起的包壳周向拉伸应变(塑性应变和蠕变)通常应低于1%;对每一瞬态事件,包壳周向拉伸应变(弹性、塑性应变和蠕变)通常不应超过由当时稳态工况算起的1%。

### 3) 疲劳和振动

#### a. 疲劳

包壳累计应变疲劳循环次数必须低于设计的应变疲劳寿命。该设计寿命应是下列两者的较小值:在实际应力幅下达到破坏时的循环数除以20;在2倍应力幅下达到破坏的循环数。

#### b. 振动

包壳磨蚀深度不能超过包壳壁厚的10%。

### 4) 包壳的化学特性

限制DNB以限制包壳温度。

燃料棒包壳表面温度(氧化物与金属界面处)不应高于包壳材料的运行温度限值。燃料棒稳态运行时,腐蚀导致的包壳金属壁厚减少量不得超过其名义值的10%。设计寿期末,燃料棒包壳氧化膜厚度应小于100  $\mu\text{m}$ 。

## 2.2.2.2 燃料

燃料的主要设计准则是其最高温度必须低于其熔点。二氧化铀燃料和含钐燃料芯块的熔点随燃耗而变化。在考虑了制造公差、芯块开裂的影响和分析模型的不确定性,以及考虑了燃料的物理参数(热传导,密度等)在辐照过程中的变化(密实化、肿胀等)等因素后,取二氧化铀燃料和含钐燃料芯块的温度限值为2590℃。

## 2.2.2.3 燃料棒

设计中应防止燃料温度过高,燃料棒内压过高(由于裂变气体释放)、包壳应力及应变过大,以保证燃料棒的完整性。

燃料棒内压应限制在下述值以下:能使燃料芯块-包壳接触后径向间隙再打开或使间隙变大的值。该准则防止包壳向外蠕变速率超过芯块的肿胀速率,保证在稳态运行中芯块-包壳接触后不会重新出现芯块-包壳径向间隙或者该间隙尺寸增大现象。

## 2.2.2.4 定位格架

### 1) 材料性能

燃料组件的格架条带合金应具有如下综合性能:低的热中子吸收截面;对冷却剂具有高的抗腐蚀性能;在运行温度下具有高强度、高延性和高可靠性。

### 2) 机械设计限值

由地震或LOCA 事故所引起的横向载荷不应产生不可接受的格架塑性变形,每个燃料组件的几何形状应予保持,以使燃料棒维持一个适合于冷却的排列。

### 3) 振动和疲劳

定位格架为燃料棒提供足够的支承,以限制燃料棒振动,并保持包壳的磨蚀深度在可接受的限值之内。使用因科镍夹持弹簧,保证燃料棒上有永久压力,避免燃料棒、弹簧夹和相应的刚凸有任何相对滑动。

## 2.2.2.5 燃料组件

燃料组件的结构完整性由应力和变形的规定限值所保证,这些应力和变形是由于各种非

运行载荷、运行载荷和事故载荷所引起的。这些限值用于上管座、下管座、导向管、定位格架和导向管连接的设计和评价。

评价燃料组件结构完整性的设计基准是：

- a. 非运行载荷—在 4g 轴向和 6g 横向载荷作用下仍具有尺寸稳定性；
- b. 在 DBC-1 类工况和 DBC-2 类工况的正常和非正常载荷作用下，根据 RCC-M 第 1 卷 G 册，按材料分类（奥氏体不锈钢、锆合金和因科镍）分别制定燃料组件各部件的结构设计基准。

应力分级和应力强度限值满足 RCC-M 中的规定。

对于导向管、仪表管和格架，应力强度、设计应力强度和应力强度限值按 RCC-M 的通用规则进行计算。

在 DBC-3 类工况或 DBC-4 类工况的非正常载荷下，以 LOCA 事故的喷放载荷和地震载荷为最不利的情况。部件的变形和损坏不能妨碍反应堆停堆和对燃料棒的应急冷却。

燃料组件的不锈钢部件和锆合金部件的应力，在事故情况下主要采用 RCC-M ZF 附录提出的方法进行评价。

## 2.2.2.6 燃料相关组件

燃料相关组件由控制棒组件、一次中子源组件、二次中子源组件和阻流塞组件组成。

### 1) 控制棒组件

控制棒的机械设计基准应于 RCC-C 规定的载荷状态相一致。

### 2) 中子源组件和阻流塞组件是固定不动的燃料相关组件。这些组件的机械设计应满足以下规定：

- 应能适应燃料组件和堆内构件之间不同的热膨胀；
- 同燃料组件和堆内构件保持可靠的接触。

### 3) 吸收体材料的热物理特性

控制棒组件的吸收体材料为 Ag-In-Cd。吸收体材料的温度不应超过该材料的熔点（Ag-In-Cd 的熔点为 790℃）。

### 4) 吸收体和包壳材料的相容性

控制棒包壳材料与水及其他相接触金属之间的反应率在运行温度下应是可忽略的。

### 5) 燃料相关组件包壳的应力和应变限值

对 DBC-1 类工况和 DBC-2 类工况，为防止包壳损坏应给出应力限值。RCC-M 的 1 卷 G 册给出了应力限值。包壳应力随相应组件的类型而变化：

- 对于控制棒，其应力主要由控制棒驱动机构移动造成的惯性力和一回路冷却剂压力引起。不考虑内压，因为 Ag-In-Cd 吸收体不释放裂变气体。但应考虑由于磨损导致包壳厚度减薄；
- 二次中子源包壳要同时考虑外压和内压的作用。制造时采用了氦预充压，在中子源整个寿期内内压一直在增加；
- 一次中子源的使用寿命非常有限，在寿期内包壳仅受到冷却剂外压的作用。

相关组件的包壳材料应保证在上述载荷作用下，包壳几何尺寸的变化适应运行功能的要求。

### 6) 吸收体材料的辐照行为

辐照对 Ag-In-Cd 性能的影响在堆内的腐蚀行为与在堆外腐蚀行为相近，在含氧量低的水中腐蚀速率是低的。

## 2.2.3 堆芯核设计

### 2.2.3.1 燃料燃耗

最大卸料燃耗深度不超过燃料组件性能分析确定的燃耗限值。同时，为了分区卸料燃耗深度达到预期值，堆芯的燃料装载必须提供足够的过剩反应性。

### 2.2.3.2 功率分布

在考虑5%的计算偏差时，计算程序所得的95%计算数据和实测数据相符，程序具有95%的置信度。在置信度至少为95%的条件下，功率分布控制必须满足：

- 1) 在正常运行工况下燃料棒线功率密度不大于安全分析确定的限值；
- 2) 在非正常工况下（包括最大超功率工况，“非正常工况”指从DBC-1 时由于人为误操作或设备故障原因过渡来的中等频率事件，即DBC-2），最大的峰值功率不致引起燃料芯块熔化；
- 3) 在DBC-1 和DBC-2（包括最大超功率工况），堆芯功率分布不得导致在燃料棒表面发生在偏离泡核沸腾现象；
- 4) 燃料管理设计应该使燃料棒产生的功率和燃耗与第2.2.2节中所描述的燃料棒机械完整性分析所采用的假设相一致。

### 2.2.3.3 反应性系数

燃料温度系数应为负值；当反应堆达到临界，冷却剂系统处于正常运行温度，燃料循环设计都应确保在整个燃料循环内任何功率运行工况下都具有非正的慢化剂温度系数。

### 2.2.3.4 堆芯控制

#### 2.2.3.4.1 最大可控反应性引入速率

必须限制由控制棒的提升或可溶硼的稀释引起的最大反应性引入速率。在控制棒组事故提升情况下，最大的反应性变化速率是这样确定的：燃料棒的峰值释热率不得超过超功率工况下的最大允许值，以及DNBR大于超功率工况下的最低允许值。

限制控制棒的最大反应性价值和控制棒引入的最大反应性变化速率，是为了防止在发生提棒或弹棒事故时，冷却剂压力边界破坏或堆内构件的损坏而损坏堆芯冷却能力。

对于诸如弹棒或主蒸汽管断裂等任何工况IV类事件，反应堆应能处于停堆状态，并且堆芯能够维持可接受传热的几何形状。

#### 2.2.3.4.2 反应性控制

通过溶解在冷却剂中的化学毒物、棒束控制组件和可燃毒物棒来控制堆芯反应性。

##### 1) 化学毒物

硼以硼酸形式溶解在冷却剂中，需抵消下列因素引起的较大缓慢的反应性变化：

- a. 慢化剂温度由冷停堆到热态零功率运行温度变化引起的反应性变化；
- b. 由于功率变化后或控制棒位置变化引起氙和钐的瞬态变化；
- c. 补偿燃料燃耗和长寿命裂变产物积累所需的剩余反应性；
- d. 可燃毒物的燃耗。

##### 2) 棒束控制组件

控制棒应提供足够的负反应性，以抵消从满功率降至零功率的功率系数效应以及满足停堆深度的要求。棒束控制组件用于停堆和补偿由于下列原因引起的快速反应性变化：

- a. 在热态零功率及卡棒条件下所需要的停堆深度；
- b. 补偿从热态零功率开始的功率上升引起的反应性变化，这其中包括多普勒和慢

化剂反应性变化的功率亏损；

- c. 硼浓度、冷却剂温度或氘浓度的异常波动（控制棒不超过允许的插入极限）；
- d. 负荷变化引起的反应性突变。

### 3) 可燃毒物棒

可燃毒物棒用来控制堆芯部分过剩反应性。可燃毒物应随着燃耗加深而缓慢消耗，以使功率运行时任何燃耗时慢化剂温度系数保持负值。

## 2.2.3.5 停堆裕量

反应堆无论在功率运行状态或停堆状态下都要求有适当的停堆深度或堆芯的次临界度。在涉及到反应堆事故停堆的所有分析中，都要假定一束价值最高的控制棒处于全提出堆芯的位置（卡棒准则）。

当燃料组件已放入压力容器内而顶盖尚未就位时，要通过插入控制棒和充硼溶液使堆芯 $k_{eff}$ 不超过0.95。此外，即使所有的控制棒束提出堆芯，反应堆仍能有足够的次临界度。

## 2.2.3.6 稳定性

反应堆在基模式（基模式为基负荷运行，即反应堆运行在额定功率或者接近额定功率）运行堆芯对于功率振荡应具有固有的稳定性。在功率输出不变情况下，如果堆芯发生空间功率振荡，应能可靠而又容易地测出来并加以抑制。

## 2.2.3.7 控制棒布置和反应性价值

- 1) 控制棒组总的反应性价值必须适当，满足安全分析的要求；
- 2) 鉴于功率运行时可能有部分控制棒插入堆芯，通过合理的分组使总的功率峰值因子足够小，以保证满足功率能力的要求。
- 3) 停堆棒组提供附加的负反应性，以保证足够的停堆深度。

## 2.2.3.8 反应堆压力容器辐照

- 1) 严格控制反应堆压力容器用材料的辐照脆化敏感元素含量，提高材料的性能、降低缺陷产生的可能性和缺陷的尺寸；
- 2) 降低反应堆压力容器堆芯段筒体及焊缝的初始 $RT_{NDT}$ 温度（无延性转变温度）。
- 3) 合理设置堆芯段筒体内径、吊篮外表面与筒体内表面间的水隙厚度，降低反应堆压力容器内表面快中子注量；
- 4) 结构上取消压力容器堆芯段筒体环焊缝，尽量使辐照敏感性高的焊缝金属离开活性区，提高压力容器耐辐照能力；
- 5) 采用低泄漏燃料管理策略，降低反应堆压力容器内表面快中子注量。

## 2.2.3.9 中子源和测量仪表

### 1) 中子源

堆外源量程核仪器能够提供足够的中子源强信号用于首循环和后续循环启动。中子源元件包括中子源材料（如钷-252/铍或钷-238/铍）和支持材料（铍/铍）。中子源元件应该由不锈钢作包壳，对于启动中子源应采用双层密封，中子源元件应以简单的、经过验证的方式安装并固定在堆芯，并且易于安装或卸除。

### 2) 堆芯功率水平测量仪表

堆芯功率水平由位于压力容器外干仪表井内的堆外中子探测器监控。在换料水池充满或



未充水的情况下，都能容易地维护和更换这些探测器。

3) 堆芯功率分布测量仪表

a. 堆芯功率分布由位于堆内的中子探测器监控，它能够测量整个堆芯有代表性位置的中子通量。

b. 每一个堆内中子探测器组件应由一系列在轴向上间隔开的且数量足够的中子探测器组成，以便每个组件都能够提供表征反应堆轴向功率分布的信息。建议探测器处于定位格架之间。

c. 与仪表密封管相邻的或上方安装的设备应按抗震 I 类设计。

d. 堆芯功率分布仪表应能够清楚地探测和指示堆芯功率振荡。

4) 堆芯出口温度测量仪表

监控堆芯出口温度的热电偶与中子探测器集成到一起安装。需要挑选恰当的安装位置以便测量典型的堆芯出口温度。如果在容器顶盖和上部堆内构件下使用热电偶，应对其必要性予以说明，并形成文件供相关部门查阅。

## 2.2.4 热工水力设计

反应堆堆芯热工和水力设计的总目的是提供足够的与堆芯发热分布相适应的传热能力，使得由反应堆冷却剂系统或安注系统（当应用时）带走的热量能确保满足下述性能和安全准则的要求：

1) 在正常运行和运行瞬态（DBC-1 类工况）或由中等频率事故引起的任何瞬态（DBC-2 类工况）中，预计不出现燃料破损（定义为裂变产物穿透屏障即燃料棒包壳）。然而，不能排除很少量燃料棒的破损，但这种破损不应超出电站放射性废物净化系统的处理能力，并符合电站的设计基准。

2) 对DBC-3 类工况仅有小份额的燃料棒破损（见上述定义），虽然可能发生燃料棒破损，反应堆不能立即恢复运行，但能使反应堆返回安全状态。

3) 在发生DBC-4 类工况所引起的瞬态时，反应堆能返回安全状态，堆芯能保持次临界和可接受的传热几何形状。

### 1.1.1.2 偏离泡核沸腾

在正常运行和运行瞬变以及中等频率故障引起的任何瞬态（DBC-1 类工况、DBC-2 类工况）时，堆芯极限燃料棒不发生偏离泡核沸腾的概率在95%的置信水平下至少为95%。

在DBC-1 和DBC-2 类工况时，通过限制最小偏离泡核沸腾比（MDNBR）高于设计限值来满足上述基准。

### 2.2.4.2 燃料温度

在DBC-1 类工况和DBC-2 类工况相关的运行模式中，燃料棒峰值线功率不导致 $\text{UO}_2$ 达到熔化温度的概率在95%置信水平上至少为95%。未辐照的 $\text{UO}_2$ 的熔点为 $2804^\circ\text{C}$ ，每 $10000\text{MWd/tU}$  损耗， $\text{UO}_2$ 的熔点下降 $32^\circ\text{C}$ 。防止 $\text{UO}_2$ 熔化，就能维持燃料的几何形状，并消除熔化的 $\text{UO}_2$ 对包壳可能产生的不利影响。为了防止中心熔化并作为超功率系统整定值的基准，计算的 $\text{UO}_2$ 燃料芯块中心温度 $2590^\circ\text{C}$ 被选定作为超功率限值。考虑含钚燃料芯块的物理参数（热传导，密度等）在辐照过程中的变化（密实化、肿胀等）等因素后，含钚燃料芯块采用与 $\text{UO}_2$ 燃料芯块相同的温度限值 $2590^\circ\text{C}$ 。

### 2.2.4.3 堆芯流量

至少要有93.5%的热工水力设计流量通过堆芯的燃料棒区，并有效地冷却燃料棒，通过

导向管的冷却剂流量以及从堆芯吊篮与围板间的漏流，对排热来说认为是无效的。

#### 2.2.4.4 水力学稳定性

与DBC-1 类工况和DBC-2 类工况事件有关的运行模式不应导致水力学不稳定性。

### 2.3 反应堆冷却剂系统及其相连系统

#### 2.3.1 通用要求

##### 2.3.1.1 定义

本节详细说明了华龙核电技术反应堆冷却剂系统及其相连系统的通用要求，以避免在本章其它节中重复。

##### 2.3.1.2 通用要求

###### 1) 安全壳内部件的防护

应保护那些位于安全壳内在冷却剂丧失（LOCA）或主蒸汽管道破裂（MSLB）事故后投入运行的设备，包括测量和控制设备，以免它们因LOCA或MSLB事故所产生的氢爆和水淹而遭到破坏。系统布置和设备设计应能防护由于临近高压系统泄漏而导致的喷射，而且泄漏不会影响系统或设备的功能。

在泄漏发生后，将反应堆带至安全停堆工况所需投入运行的系统和设备均应满足该要求。

在LOCA或MSLB工况下需要执行功能的设备，如果无法保证安装在水淹高度之上，则设备及支撑（如接头和机柜）必须完成水淹环境鉴定。

对需要在LOCA或MSLB事故后执行功能的主要设备（包括仪控设备），电厂设计者应明确其具体的环境要求。应在其进行现场安装之前完成产品鉴定试验和各种不符合项的处理。

应保护那些位于安全壳内的电气设备，其失效不应妨碍1E级电源为设施提供电力以完成其预期的安全功能。

###### 2) 结构要求

设备的完整性设计和设备支承设计应满足结构设计基准。

###### 3) 喷射流冲击屏蔽和管道甩击限制器

在反应堆冷却剂系统设计及其材料选择时，应取消那些针对主管道破裂而设置的防飞射物屏蔽和管道防甩击限制器。与主管道连接的小口径管道设计和材料选择，应尽量减少防飞射物屏蔽和管道防甩击限制器的要求。

###### 4) 疏水、充水和水压试验

应为反应堆冷却剂系统及其相连系统的疏水、充水和排气提供适当的疏排管线及隔离阀。在设备和管系的布置中应注意不要出现无法排水的低点。

建造期间（水压试验或冲洗）的排气阀和疏水阀，在电厂启动前应全部移除，电厂运行所要求（包括随后的维护或水压试验）的除外。试验和去污/冲洗连接应使用串联的两个阀、带管帽或盲法兰的一个阀门作为隔离边界。所有的排气应连接到同一背压区域。

设计中应考虑足够的疏水和排气接口保证系统的疏排能力，特别需要保证可能出现不可凝气体聚集区域的排气功能。同时避免设计过多的疏排口，以最小化疏水流量和不可凝气体的聚集。

设备应以便于维修操作的方式进行疏排和相关试验，特别是对于需要高频维修的部件或预计将定期更换的部件。

应提供足够的连接以对反应堆冷却剂系统在换料后进行水压试验或密封试验，以及对各辅助系统箱罐和管道在维护和日常监测后进行的试验。密封试验（不是水压试验）尽可能用

已安装的固定设备进行。

由于很少进行水压试验，所以不宜设置固定安装的水泵来专门用于水压试验。

5) 保温

管道和设备的保温是减少正常运行期间的热损失。在热停堆期间操作人员需要接触的设备，其外表面温度不应超过60℃。

反应堆冷却剂系统及其相连系统在役检查需要接触的设备，采用可重复使用的快拆式保温结构，主要是带有快松式紧固装置的金属反射型或玻璃纤维型。管道布置时应考虑足够的保温材料拆卸堆放空间。

面板应通过一个大型的、可见的、永久性的编号系统进行唯一标识，面板配置以及参照这些编号的安装和拆卸逻辑应在工厂图纸上体现。

如果采用纤维型保温材料，设计者应对保温系统进行分析并证明其是可行的，分析主要包括保温系统与安全壳地坑过滤器、安全壳内置换料水箱以及所有杂质截留部件的交互作用，这些杂质截留部件用于限制因管道破裂时飞射物冲击和管道甩击而产生的碎片的迁徙。

保温系统用材所含的有限的腐蚀化学品不应与奥氏体不锈钢表面的应力腐蚀破裂发挥作用。

电厂设计者应制定保温层的规格特性和偏差要求，以使保温层的连接处和管道支承件附近的热损失最小。对连接件的易锁紧性能以及保温层的抗压碎性能也应给出详细说明。

保温层及其支承结构应能补偿保温设备的热膨胀，不会出现导致热损失增加的缝隙和空穴。

安全壳内设备和管道的保温结构应易于拆装、去污（如果需要）和更换。该要求与卸压事件恢复工作的要求一致。

在设计中应对保温系统考虑适当的抗震要求。应采取足够的质量控制以保证保温结构满足材料要求。

保温系统设计应考虑为经常接触的部件或管道安装屏蔽保温板，这些部件或管道要么用于检查和维护，要么作为日常操作或停电人员往来的通道。

6) 最大流速

系统管道中的流速选取，应从两方面综合考虑进行优化，一方面是采用细管道所带来的阻力损失，另一方面是采用粗管道所带来的设备费用。

7) 流动加速腐蚀的可能性

高能流体（如给水、湿蒸汽）管道的结构材料、尺寸和几何形状必须能降低管道的流动加速腐蚀（FAC）。容易遭受FAC的管道部位应能检查。

8) 仪表

..... 传

传感器布置

监测仪表及脉冲管的布置应当确保探头（传感器）位于低放射性且可接近区域，以减少在校验和/或维修操作时工作人员的辐照。每个压力传感器的隔离阀应当安装在尽量低放射性水平区域，以实现最低人员照射。

..... 仪

表和取样接头定位要求

与反应堆冷却剂系统及其相连系统的连接仪表必须满足仪控功能和安装要求。采样接头应该安装在工艺管道或部件的具有最小热位移的地方（如支撑附件）。尽可能考虑：小尺寸采样或仪表接头（比如进入较大管线或部件的压力、液位和流量接头）远离需要检查和维修的区域，以及位于水平工艺管道的侧面或顶部。

9) 测温套管

反应堆冷却剂系统温度传感器应采用相关规范中焊接在管道中的温度计套管或绑在管道上的温度探头。

不应使用直接浸入式温度传感器，测温探头和测温套管的组合体应当设计成容易抽出和插入，并减少热响应时间。对于测温探头、测温套管组合，核电厂控制和保护系统应当设计成可接受对其所预计的较长热响应时间。

#### 10) 机器人技术的应用

为减少检修维护人员的辐照剂量，建议采用机器人技术进行检修和维护操作。反应堆冷却剂系统设备的布置应考虑方便机器人技术的采用。

反应堆冷却剂压力边界上所有主要开孔的螺母（如法兰上的螺母，压力容器、蒸汽发生器和循环泵上人孔和检查孔上的螺母等）应便于与长臂工具或自动化工具相配合。

#### 11) 反应堆冷却剂接口系统

与反应堆冷却剂系统连接而延伸到安全壳边界以外的所有系统和子系统的设计应在切实可行的范围内使它们能承受至少等于RCS全压力的极限破坏强度。

对于不能满足RCS极限破坏强度要求的接口系统和子系统，电厂设计者应通过评价确定其隔离的质量和级别或潜在的压力危险的严重性已降低到足以排除界面LOCA。

高压到低压的每一个接口（即：正常时直接承受RCS压力的系统与低压系统的交界处）应具有下列防护措施：

- a. 能进行压力隔离阀的泄漏试验；
- b. 在主控制室有阀门位置指示，甚至当隔离阀操作机构动力源中断时亦有阀门位置指示；
- c. 当压力升高到接近被连接的低压系统的设计压力而两个隔离阀未关闭时有高压报警信号通知主控制室操纵员。

#### 12) 严重事故设备可用性

在严重事故管理导则中规定要用的系统和必要的设备应满足设备可用性要求。

### 2.3.2 反应堆冷却剂系统

#### 2.3.2.1 定义

##### 2.3.2.1.1 范围

反应堆冷却剂系统及其边界包括稳压器、稳压器波动管、喷淋管线、稳压器安全阀（包括其与稳压器的接管）、反应堆冷却剂泵（主泵）以及焊接连接压力容器及蒸汽发生器的反应堆冷却剂主管道。

这章的要求也包括：

- 1) 所有与主管道、稳压器和主泵连接的管道直到并包括第二道隔离阀；
- 2) 反应堆冷却剂系统的疏排水管道；
- 3) 主管道、与主管道连接的管道以及与稳压器安全阀、稳压器和主泵连接的管道。

##### 2.3.2.1.2 功能

反应堆冷却剂系统执行如下功能：

- 1) 通过反应堆冷却剂的强迫循环将反应堆中产生的热量从反应堆压力容器传递给蒸汽发生器，并将冷的反应堆冷却剂从蒸汽发生器输送回反应堆压力容器。
- 2) 在正常运行和扰动运行工况下，保持一个高度完整的边界，这一边界应防止反应堆冷却剂丧失、流入安全壳及其它电厂系统或空间中。

- 3) 在正常运行和扰动运行工况下, 在不需要启动压力释放装置的条件下, 维持运行压力在限值范围内。
- 4) 在冷停堆到满功率运行范围内, 提供反应堆冷却剂的强迫循环或自然循环。
- 5) 在停堆后, 在无强迫循环的情况下(如自然循环)将足够的热能从反应堆压力容器传递给蒸汽发生器, 以便导出堆芯余热。
- 6) 在设计基准事故工况下, 通过压力释放装置提供反应堆冷却剂系统的超压保护。
- 7) 在正常运行和扰动运行工况下, 确保在稳压器中有一个可监测的汽水界面。
- 8) 在压力容器顶部存在不凝结气体影响到自然循环时, 在反应堆冷却剂系统的高点, 提供不可凝气体的排放。

### 2.3.2.1.3 接口

反应堆冷却剂系统的接口如下所示:

- 1) 交流和直流配电系统与反应堆冷却剂系统间的接口。
- 2) 反应堆冷却剂系统与人机接口系统的接口。
- 3) 化学和容积控制系统从反应堆冷却剂系统接受下泄流, 加以净化并执行反应性控制和容积控制, 还将具有所要求硼和氢浓度的净化流作为补给水送回反应堆冷却剂系统。在正常冷停堆的最终阶段化学和容积控制系统提供稳压器的辅助喷淋以便操纵员控制反应堆冷却剂系统的压力。提供主泵的轴封注入流。
- 4) 设备冷却水系统提供每台主泵的冷却水。
- 5) 安全注入系统在设计基准事件发生后提供应急堆芯冷却。
- 6) 余热排出系统在反应堆停堆冷却的后阶段排出余热, 并在换料和维修操作期间维持系统低温度。
- 7) 核取样系统提供从反应堆冷却剂系统远距离采样的手段以便进行化学的和放化的实验室分析。
- 8) 仪表空气系统和厂用空气系统为仪表和控制装置压力调节提供压缩空气。
- 9) 安全壳通风系统排出反应堆冷却剂系统部件产生的热量和维持安全壳温度在部件要求的范围内。

### 2.3.2.2 性能要求

#### 1) 运行能力

反应堆冷却剂系统应能够针对第1章总体要求中定义的事件和本节的具体要求执行其要求的功能。

##### a. 手动控制能力

在整个功率范围内反应堆冷却剂系统应允许反应堆手动控制反应性以代替自动的反应性控制。在一台主给水泵失效或甩负荷后, 使用反应性手动控制模式时, 为了避免反应堆自动停堆, 如果有必要, 可以采用自动优先动作降低功率。

##### b. 甩负荷

对不同程度的甩负荷包括全部甩负荷所造成的对电气系统的影响(如超频率或超电压), 反应堆冷却剂系统的设计应有专门的技术准备, 这包括考虑诸多因素, 如电机超负荷或由此引起的超流量和水力学问题。

##### c. 加热

反应堆冷却剂系统的设计应能利用反应堆冷却剂泵加热系统。

#### 2) 设计压力

反应堆冷却剂系统的设计特性和运行压力应与设计压力相匹配。

### 3) 热段温度

反应堆冷却剂系统热段平均温度不超过某一合理温度值，允许短期内（如负荷跟踪期间）超过该值，但是设计者应确定临时运行温度和持续时间不会加速蒸汽发生器传热管的腐蚀。

## 2.3.2.3 系统特征

### 2.3.2.3.1 布置

反应堆冷却剂系统的布置应满足切实可行的施工和维修要求以及下列特定要求。

#### 1) 保证唯一汽水界面

反应堆冷却剂系统必须配备设施并须布置成仅有一个自由界面正常地存在于反应堆冷却剂系统中。

稳压器波动管必须从稳压器向主环路逐渐向下倾斜。

应提供一种排气方法使在异常（故障）工况下反应堆容器内的气体或蒸汽能排到稳压器卸压箱或安全壳内置换料水箱（IRWST）中，以便再建立稳压器中的单一汽水界面。

设计者应明确说明排放位置（如稳压器卸压箱或IRWST）的选择基准。排气应布置成一个阀门失效（开或关）将不影响排气功能的执行。

#### 2) 应对小LOCA性能

冷却剂环路的几何外形、结构和布置必须满足如下要求，即在小破口LOCA时具有足够的冷却剂水装量以防止堆芯裸露。特别是RCP吸入口过渡管道或任何其它部件相对于反应堆堆芯的标高，应使LOCA瞬态时水位扰动最小，且应避免由于扰动而使堆芯裸露。

#### 3) 事故后排气

反应堆冷却剂系统的布置设计应能从主控室可控排放在严重事故过程中系统里产生的不凝结气体。无需为蒸汽发生器垂直U型管顶部提供排气设施。

#### 4) 自然循环

反应堆冷却剂系统布置（特别是相对标高位置）的设计应能使得通过一台蒸汽发生器的自然循环可排出最大的反应堆衰变热量，且不超过正常运行的最高设计温度。

### 2.3.2.3.2 低温超压保护

反应堆冷却剂系统的低温超压保护应由余热排出系统中的装置提供。反应堆冷却剂系统超压保护装置的正常运行设定值必须能直接适用于低温超压保护而不必重新设定。

### 2.3.2.3.3 反应堆冷却剂水化学

电厂设计需满足相关水化学要求，以保证燃料包壳和压力边界完整性，减少堆外放射性水平。

### 2.3.2.3.4 泄漏监测能力

反应堆冷却剂系统的设计应能提供反应堆冷却剂系统的泄漏监测以便压力边界的泄漏能被充分可信的监测到，从而作为破前漏（LBB）方法的支持。人机接口系统规定了反应堆冷却剂系统泄漏监测系统的完整要求。为了便于泄漏监测，以下规定了反应堆冷却剂系统中所需的特定设施。

泄漏探测系统应有足够的灵敏度，以识别可能导致主系统冷却剂不可接受的泄漏。

## 2.3.2.4 关键设备特性

### 1) 反应堆冷却剂管道和管件

反应堆冷却剂管道和管件加工制造材料应符合有关要求。反应堆冷却剂管道和管件是关键部件，所采用材料应检验合格。

## 2) 反应堆冷却剂泵

反应堆冷却剂泵（以下简称“主泵”）的设计应满足系统性能设计要求，提供足够的堆芯冷却循环流量以维持 偏离泡核沸腾比（DNBR）大于最小允许值，系统运行中泵的有效汽蚀余量（NPSHa）应大于其要求汽蚀余量或净正吸入压头（NPSHr）。

主泵的轴封应满足可控泄漏的要求，应对轴封泄漏应进行有效收集。

主泵的轴承应在其寿期内可保证正常运行。

飞轮、泵转子和电动机转子一起，应为主泵提供足够的转动惯量。在主泵供电丧失以后，在主泵惰转期间能为堆芯冷却提供足够的流量，避免在反应堆自动停堆前发生偏离泡核沸腾。

泵的转速应避开设备的临界转速。主泵电动机进行超速试验时，转速达到（并包括）125%额定转速时，不应发生机械损坏。

主泵的设计应考虑飞射物的风险，并对飞轮的完整性进行分析。

主泵应避免发生倒转，设置有防倒转装置。

## 3) 稳压器

稳压器的设计必须：

- a. 水体积应足以保证正常瞬态时在相关稳压器仪控装置调节下能够淹没电加热器。
- b. 水体积应足够大，以补偿正常瞬态时0%至100%升功率引起的冷却剂膨胀。
- c. 蒸汽体积应足够大，以满足DBC-2到DBC-4类事故工况下反应堆冷却剂系统超压标准。
- d. 稳压器容积应足够大，以避免正常运行期间压力控制设备（喷淋系统和加热器）的频繁动作。
- e. 反应堆紧急停堆和汽轮机脱扣，应不触发安全注射信号。
- f. 在反应堆停堆后防止加热器裸露。

## 安全阀

### a. 材料

安全阀是关键部件，必须注明加工制造所采用材料，并说明其相关法规标准要求。

### b. 性能和运行

必须为稳压器的蒸汽空间设置安全阀，其设计必须能完成超压保护功能（即自动打开以防止反应堆冷却剂系统超压，自动再关闭以防止反应堆冷却剂系统过度降压）。稳压器安全阀必须符合第1章的性能要求。这包括能排放蒸汽亦能排放水。

### c. 阻塞流影响

安全阀的设计必须使阀门在水团条件下运行，如果在汽态条件下运行亦不会导致阀门损坏。阀门所允许通过水团的容量必须由试验证明。

### d. 阀门排放和泄漏

安全阀排放管道的布置必须使由于安全阀的渗漏和缓慢沸腾导致安全壳沾污的可能性降至最低，而又不影响安全阀满足其功能要求的能力。

### e. 整定压力

电站设计者必须根据试验或电站的实际经验证明在实际工作条件（尤其温度）下即使不作调整，安全阀的整定点是在可接受的公差范围内。

## 2.3.2.5 仪表和控制

反应堆冷却剂系统的温度传感器套管设计要求：使用相关规范的焊在管道上的测温套管

或与管道搭接的测温探头；测温套管和探头的组合件应容易拆装，同时要求有最小的响应时间；电厂控制和保护系统应能接受测温套管和探头组合件的预计的较慢响应时间。

### 1) 控制操作

除了反应堆冷却剂系统水装量的控制，即用化学容积控制系统和反应堆冷却剂系统的应急降压（依赖于降压系统）手段来达到稳压器的液位控制以外，电站设计者还必须提供反应堆冷却剂系统的下列控制操作：

反应堆冷却剂压力的自动和手动控制，由操作稳压器加热器和主喷淋阀或辅助喷淋阀实现。

反应堆冷却剂泵和为其提供冷却及轴封注入流的有关辅助系统的手动启动和停止。当泵和系统达到限值条件时必须能自动停泵。

### 2) 监测运行

电站设计者应提供必要的用于功能和任务分析所要求的监测能力，包括：

- 堆芯出口的欠冷度；
- 反应堆冷却剂流量；
- 反应堆冷却剂温度（例如，热段、冷段、差值和平均值）；
- 反应堆冷却剂泵转速；
- 反应堆冷却剂泵振动；
- 反应堆冷却剂泵冷却水流量、温度和比活度；
- 反应堆冷却剂泵和电机轴承温度；
- 稳压器液位；
- 稳压器压力；
- 稳压器主喷雾和辅助喷雾温度；
- 反应堆冷却剂泵密封泄漏量并能记录；
- 反应堆冷却剂泵密封注射流量和温度并能记录；
- 反应堆冷却剂泵密封腔压力和温度；
- 反应堆冷却剂泵油位；
- 反应堆冷却剂泵油压；
- 反应堆冷却剂泵电机定子温度；
- 反应堆冷却剂泵电机振动。

#### b. 事故后监测

应提供一种用于监测事故后堆芯充分冷却和堆芯状态的仪表。

#### c. 松脱部件的监测

应提供一种仪表用于探测反应堆冷却剂系统中存在的松脱部件。

#### d. 反应堆冷却剂泵振动监测

反应堆冷却剂泵和电机中，应至少能在下列位置安装径向非接触性近程探头：

- 泵和电机的连接处；
- 电机的两个不同的轴向位置。

应该提供电机每一圈给出一个信号的仪表。

布置这些近程探头及其引线时，应考虑到在泵常规维修(例如更换密封和将电机与泵对准)时无需移动它们。如果无法实施，设计应方便探头和电缆的拆装(包括探头的标定和间隙定位)。

### 3) 套管

对于在热分层不清楚且会产生测量不确定性位置上的温度测量应在管道的轴向布置足够多的测温套管，这样，即使存在着热分层，也能将温度测量的不确定度降至可接受的水平。



如果为了将热分层的后果降至最低而安装了多个测温套管，设计人员应规定求平均测量温度的通用方法。还应确定测温套管的特定方位。

反应堆冷却剂系统的设计应不引入温度测量的旁路支管。

#### 2.3.2.6 维修

##### 1) 稳压器维修

作为维修评估的一部分，电厂设计者应评估可利用性方面的潜在改进，并使用稳压器的入孔密封环来减少放射性辐射。这种入孔密封环采用了多头螺栓拉伸机和特殊的装卸装置。蒸汽发生器的人孔也采用相同的设计和支撑装置。这与电厂可利用性的目标及ALARA目标一致。

##### 2) 安全阀维修

稳压器的每一个安全阀设有用于远程和精确的在线整定值验证的接口，需要时连接压力整定装置。

#### 2.3.3 化学和容积控制系统

##### 2.3.3.1 定义

###### 2.3.3.1.1 范围

化学和容积控制系统包括再生热交换器、下泄热交换器、下泄流控制阀、净化过滤器、除盐装置、容积控制箱、上充泵、密封注入过滤器、主泵密封水的排出控制、上充回路及稳压器辅助喷淋装置。

该系统边界还包括部件支承，直至第一个隔离阀的附加管道、排气及疏水管道、化学和容积控制系统仪表和控制部件。

###### 2.3.3.1.2 功能

- 1) 在正常运行、功率变化、启动和停堆期间，维持反应堆冷却剂系统中所要求的水装量。
- 2) 提供稳压器辅助喷淋水以用于降压。
- 3) 为主泵轴封提供堆用等级轴封水并接受主泵泄漏轴封水。
- 4) 在正常运行和正常停堆过程中，控制反应堆冷却剂系统的硼浓度。
- 5) 提供化学试剂的添加手段。
- 6) 在正常运行和换料停堆期间，提供反应堆冷却剂的除盐和过滤手段。
- 7) 提供从反应堆冷却剂下泄流中除去惰性气体的手段。
- 8) 为反应堆冷却剂系统管道小泄漏提供补水。
- 9) 为氢添加到反应堆冷却剂系统内提供措施。

###### 2.3.3.1.3 接口

化学和容积控制系统的接口系统如下：反应堆冷却剂系统、反应堆硼和水补给系统、余热排出系统、安注系统、核取样系统、核岛排气和疏水系统、固体废物处理系统、氢气供应系统、交流与直流配电系统、设备冷却水系统、人-机界面系统。

##### 2.3.3.2 性能要求

###### 1) 不考虑安全相关的功能

化学和容积控制系统应提供维持反应堆冷却剂系统水装量和一回路水化学特性的措施。

## 2) 硼浓度控制

要求达到两方面要求：

- a. 提供硼浓度调节措施。
- b. 限制硼的稀释（防误稀释保护要求）。

## 3) 反应堆冷却剂装量控制

- a. 补给能力要求：

需满足停堆时冷却剂降温收缩和一回路最大允许运行泄漏的补给，且必须满足“补偿反应堆冷却剂压力边界内一根小管破损时的最大允许运行泄漏”的要求。

- b. 下泄能力要求：

需满足反应堆加热和功率增加时的冷却剂膨胀要求。

## 4) 容量

需满足反应堆冷却剂化学控制、反应性控制、稳压器辅助喷淋和主泵轴封注入的设计基准要求。

## 5) 下泄流范围的限制

在发生能导致高放射性反应堆冷却剂泄漏的事件后，不需要将反应堆冷却剂向安全壳外的系统输送。

### 2.3.3.3 系统特征

#### 2.3.3.3.1 配置

- 1) 离心上充泵须行使对反应堆冷却剂系统的所有充水功能。至少提供二台上充泵，并且每台泵具有系统的设计流量。
- 2) 必须借助下泄流量控制阀的运行，完成下泄流控制。下泄流控制阀应布置在安全壳外。
- 3) 下泄流控制装置应布置在下泄热交换器的下游。
- 4) 下泄热交换器既可以布置在安全壳内，也可以布置在安全壳外。
- 5) 必须提供单一的上充流通道和单一的辅助喷淋流通道。系统流量控制阀不需要满足单一故障准则。
- 6) 主泵轴封注入应作为化学和容积控制系统的一部分提供。
- 7) 必须接纳低压运行时从余热排出系统来的下泄冷却剂流。
- 8) 容控箱不接受任何非受控的排放或泄放流。卸压阀应排到容控箱以外的其他容器。
- 9) 化学制剂的添加必须经由化学制剂添加装置完成，并应防止浓集的化学制剂注入到主泵轴封装置。
- 10) 系统的配置必须能旁通除盐装置，以保护树脂免受高温而又不中断下泄流。
- 11) 下泄系统的配置必须能执行反应堆冷却剂系统的净化和容积控制两项功能。
- 12) 应当由离子交换器提供除硼能力，以有利于在接近运行循环末期时，反应堆冷却剂运行在低硼浓度下。

#### 2.3.3.3.2 布置

- 1) 高维修率的设备（如阀门）和其他部件（如仪表）必须布置在低放射区域。
- 2) 除盐装置和过滤器应当单独可隔离和屏蔽，以便当接近一个时不必排放另一个。
- 3) 管道的敷设和管道支承的定位必须保证在役检查时有足够的可达性。
- 4) 从反应堆冷却剂系统来的下泄净化管道的设计必须使流体从下泄管道接头流

到安全壳贯穿件的允许时间尽可能短。

5) 保证上充泵气蚀可能性和影响减至最小,包括以下几点:容控箱低液位报警时,吸入口自动切换至备用硼化水源;保证此时容控箱与上充泵的隔离;自动切换具有连锁功能;上充泵能有效地排气。

6) 布置在安全壳外的系统高温高压管道应尽量少。辅助厂房的布置应将系统管道破裂的影响限制在厂房内。

7) 系统的设计和布置必须便于对整个系统进行化学清洗和/或去污,并且便于将再生热换热器与系统的其余部分隔离。

#### 2.3.3.3 结构要求

除通用结构要求外,设计必须保证无泄放口的容器被抽空时所产生的真空状态不会因外压导致容器塌陷。

#### 2.3.3.4 关键设备特性

##### 1) 上充泵

###### a. 材料:

满足通用材料使用要求。

###### b. 轴封设计:

轴封的设计必须使压力和温度的变化对轴封性能的影响减至最小;轴封设计必须使轴封能在泵关闭扬程下运行;装配带有安全衬套的机械密封;对密封装置提供密封水和冲洗水;机械密封经验证为最小泄漏。

###### c. 泵的连接:

法兰连接。

###### d. 轴封泄漏排水:

底盘设计必须能将全部密封泄漏水排到适当的疏水装置。

##### 2) 热交换器

###### a. 材料:

满足通用材料使用要求。

###### b. 容量:

足以处理所有可预计进入流量的组合。

###### c. 更换:

设计和布置必须便于热交换器的更换。

###### d. 设备本体:

壳体必须全部焊接(为便于进入壳体进行检查、清洗或堵管所要求的开孔除外);传热管必须与管板焊接;传热管设计必须具备5%的堵管裕量;从反应堆冷却剂系统来的水必须流经再生和下泄热交换器的管侧;必须进行结构的应力分析,以证明再生和下泄热交换器的设计能充分满足必要的运行循环次数;下泄热交换器的设计必须使来自再生热换热器出口最高温度的水在正常运行工况下冷却至54℃或以下。下泄热交换器的出口温度在瞬态工况下允许到57℃;下泄热换热器可布置在壳内或壳外;反应堆冷却剂必须流经热交换器的管侧,同时设备冷却水流经热交换器的壳侧。设计必须提供下泄热换热器传热管的5%堵管裕量。必须进行结构的应力分析,以证明热交换器的设计能充分满足必要的运行循环次数;热交换器的设计必须使上充泵最小再循环流加主泵轴封的受控泄漏流在最大的正常设备冷却水温度条件下能维持电站设计者规定的轴封注入水温度。

##### 3) 容积控制箱

a. 布置:

容控箱布置在设有冲洗管道和地面集水坑的屏蔽隔间内,通风良好,用于冲洗设备间的阀门必须装在该区域以外;箱体具有弧形或倾斜的底部;配备带罩的地面排水装置和围板;隔间的定位和布置考虑氢爆炸效应。

b. 材料:

满足通用要求。

c. 尺寸:

能够补偿10gpm的最大反应堆冷却剂1小时的泄漏量;在低水位和低—低水位设定点之间有足够容积,以维持额定上充流量时有运行10分钟的足够的吸入量。在低—低液位整定点以下,其最小容积至少必须有容积控制箱容积的5%,以允许上充泵吸入口自动调整而不断流;补给水系统额定设计流量下能容纳5分钟的稀释量;有足够的气体空间,以适应所有自动补给运行,或接收5分钟的稀释量而不会导致能引起频繁报警或释放阀动作或维修;容控箱气空间高度和容控箱喷淋管嘴设计的组合必须容许有足够的加氢能力;必须考虑仪表的误差。

d. 加氢控制:

提供对冷却剂加氢的手段。

e. 注意事项:

系统设计和布置必须使氢引燃的可能性和影响减至最小。

f. 界面:

在容积控制箱内必须设置喷雾嘴,保证足够介面。

g. 其它:

须设置泄压保护、气空间的取样和氮气吹扫、去放射性气体废物处理系统的接管;容积控制箱必须装设仪表,提供箱子全高度的远传水位指示。必须设置容积控制箱内水位的控制系统。这控制系统的设计必须在控制系统部件单一故障下能维持水位的自动控制。对每一个水位仪表必须提供独立的参考管。

4) 除气

a. 布置:

通过将下泄流分流到脱气装置并使其返回到容积控制箱,以提供除气手段。

b. 确定尺寸:

脱气装置必须根据下泄流的最大设计流量。

5) 除盐装置

a. 配置:

在除盐装置的进出流体管道上设置取样接口;应选择合适的净化离子交换树脂中阴阳树脂体积比,目的在于保证对于反应堆冷却剂中的阴阳树脂具有大约相等的交换容量。

b. 能力:

阳床和混合床除盐装置的设计必须使净化流中离子同位素浓度降低的因子最少为10(铯、钷和钼除外);阳床除盐装置必须具备足够的能力以使在0.25%燃料元件破损时冷却剂中铯-137的浓度低于1.0microCi/cc ( $3.7 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ );净化除盐装置的综合处理能力能在反应堆冷却剂最大允许活性水平下足以运行一年;能够处理最后10%的燃料循环周期。

c. 确定尺寸:

应该选用合适的树脂床深度以防止形成穿流。入口分配器和下部排水系统的设计必须使整个树脂床的水流均匀。除盐装置容器和内件的设计必须便于树脂的运送并能承受可能发生的最大压降。

6) 过滤器

a. 容量:

每台过滤器的额定流量必须考虑各种特殊应用和布置位置情况下的最大预计流量。

b. 反向冲洗系统:

如果采用可反向冲洗过滤器,则反冲液必须排至废液处理系统,并不得与其他液流相混。

7) 下泄流控制装置

a. 配置:

应设置两个能够单独隔离的下泄流控制阀,安全壳内外各一只。

b. 流量和压力控制:

下泄流控制阀的设计应保证设计下泄流量范围内的流量通过;下泄流控制阀应保证低压反应堆冷却剂的压力控制。

c. 材料:

流量控制部件必须由低碳奥氏体不锈钢或其他能耐腐蚀的材料制成。

8) 阀门

a. 满足通用要求。

b. 所有阀门失效时必须处于安全位置,对安全壳隔离必须规定为全关位置。如果失效位置对安全无关紧要,则应是最可能维持系统运行的位置。

c. 满足通用材料要求。

9) 管道

反应堆冷却剂管路和连接件的总体要求也适用于化学与容积控制系统。

### 2.3.3.5 仪表和控制

#### 2.3.3.5.1 通用要求

系统的仪表和控制满足反应堆的仪表和控制的通用要求。

#### 2.3.3.5.2 特殊要求

仪表和控制的特殊要求概述于下:

1) 过程仪表

必须提供过程仪表以取得系统的关键参数。仪表必须提供系统中的温度、压力、流量及水位监测和/或报警的输入信号。过程仪表的配置必须便于用装量平衡办法评价反应堆冷却剂系统的不明泄漏。

2) 仪表接头的定位

小直径接头易于捕集流体中的一些杂质,必须将这些接头布置在远离需要进行检查或维修的区域。这种接头的数量应减至最小。

3) 容积控制箱水位指示和控制

水位仪表和配置必须提供冗余度和可靠度,以使由于容积控制箱覆盖气体进入上充泵吸入集管引起的上充流损失减至最少。这冗余度和可靠度的内容如下:

a. 至少提供包括参考管在内的两套完整的冗余的仪表通道。

b. 在控制室提供每个冗余通道的指示,以便进行手动控制和通道测量对比。推荐可接受的办法是:

- 独立水位指示器;
- 一个带通道选择开关的指示器或;
- 一个专用指示器,另一通道设对比失效报警器。

c. 应提供每个通道的就地指示。

d. 每个冗余仪表环路应经适当的隔离装置对容控箱水位控制回路和报警逻辑电

路提供输入。

e. 每个通道应由不同的电气母线供电。

f. 水位仪表和控制的设计必须包括下列运行模式：

- 自动模式：维持水位在正常控制范围内。要求操纵员预选所希望的补给水混合流量。
- 硼化模式：半自动功能，这是为操纵员手动起动硼酸投放而设计的，投放能自动终止。必须要求操纵员预选希望的硼酸流量和投放的数量。
- 稀释模式：半自动功能，这是为操纵员手动起动反应堆补给水投放而设计的，投放能自动终止。必须要求操纵员预选所希望的补给水放的数量。
- 手动模式：允许给水系统单独部件的手动控制。

g. 必须提供手动和自动操作容控箱进口阀的控制功能，当水位达到改变流向设点时，使下泄流流向硼回收系统。

h. 在容控箱改变下泄流向设定点以上，应设置高水位报警整定点。

i. 在正常水位控制范围以下，应设置低水位报警整定点。

j. 必须提供最少一套水位控制功能。这些逻辑设计必须能用任何一个水位冗余通道作为传感器的输入。

k. 仪表和控制的电源必须取自用作受控流体系统部件动力电源的同一电气母线，或仪表电源通道。

l. 如果一个公共控制逻辑电路向多个或冗余部件控制提供输出，则必须对公共控制逻辑电路提供两个不同的电源。以电池作备用的逻辑电路或具有发出最大脉冲的交流/直流电源是可接受的满足要求的设计方法。

m. 为了更好的的人-机联系，在主控室内应对容控箱补给运行模式逻辑、容控箱入口转换阀和容控箱出口阀提供遥控装置和状态指示。必须根据主控制室操纵员目标分析的结果规定具体详细要求。

n. 必须评价若干所选用的人-机接口是否应在遥控停堆站中设置，包括维持稳压器正常水位控制和主泵轴封注入流。

#### 4) 稳压器水位控制

对稳压器水位控制，下泄流和上充流的正常控制模式应是自动的。半自动的或手动控制模式必须限于起动、停堆或其他异常操作。在自动控制模式下，最小的下泄和上充流必须大于最大下泄流量的一半。

#### 5) 热保护仪表

必须尽可能避免由于超温保护自动隔离下泄流。仪表应报警以警告操纵员，或者系统应自动节流下泄流至最小流量。

### 2.3.3.6 维修

遵循通用要求，系统的设计必须便于维修，包括在役检查。

### 2.3.4 硼和水补给系统

#### 2.3.4.1 定义

##### 2.3.4.1.1 范围

硼和水补给系统包括硼酸贮存箱、硼酸输送泵、除盐水泵、硼/水补给调节阀等。

该系统边界还包括部件支承、排气及疏水管道、硼和水补给系统仪表和控制部件。

##### 2.3.4.1.2 功能

- 1) 通过化学和容积控制系统向反应堆冷却剂系统补水和补硼，以调节反应堆冷却剂系统硼浓度，控制堆芯慢反应性变化。
- 2) 提供正常运行时贮存硼化水的设施。
- 3) 对乏燃料池和换料水贮存箱提供硼化补给水。
- 4) 对各种辅助设备提供反应堆冷却剂补给水。

#### 2.3.4.1.3 接口

硼和水补给系统的接口系统如下：化学和容积控制系统、设备冷却水系统、反应堆水池和燃料水池冷却和处理系统、应急硼化系统、硼回收系统、核取样系统、核岛排气和疏水系统、废气处理系统、氮气分配系统、交流与直流配电系统、人-机界面系统。

#### 2.3.4.2 性能要求

- 1) 预防硼析出

在任何贮存硼酸箱体中的最大容许硼酸浓度不超过2.5%重量比，因为此浓度对应的硼结晶温度为0℃，所以相关设备、管道仅需考虑防冻需求。

#### 2.3.4.3 系统特征

##### 2.3.4.3.1 配置

- 1) 硼酸的配制与分配部分由一个硼酸配料箱、一台硼酸供给泵、泵上游过滤器和相连的管道、阀门及仪表组成。
- 2) 硼酸贮存和注入部分由两台硼酸贮存箱、两台硼酸输送泵和相连的管道、阀门及仪表组成。
- 3) 除盐除氧水注入部分由两台除盐水泵、两台除盐水流调节阀和相连的管道、阀门及仪表组成。

##### 2.3.4.3.2 布置

- 1) 高维修率的设备（如阀门）和其他部件（如仪表）必须布置在低放射区域。
- 2) 过滤器应当单独可隔离和屏蔽。
- 3) 管道的敷设和管道支承的定位必须保证在役检查时有足够的可达性。
- 4) 辅助厂房的布置应将系统管道破裂的影响限制在厂房内。
- 5) 系统的设计和布置必须便于对整个系统进行化学清洗和/或去污。

##### 2.3.4.3.3 结构要求

除通用结构要求外，设计必须保证无泄放口的容器被抽空时所产生的真空状态不会因外压导致容器塌陷。

##### 2.3.4.4 关键设备特性

- 1) 硼酸输送泵

###### a. 材料：

满足通用材料使用要求，用于泵轴封的材料合适性必须在服役所要求的硼酸浓度中使用过并得到验证。

###### b. 轴封设计：

轴封的设计必须使压力和温度的变化对轴封性能的影响减至最小；轴封设计必须使轴封能在泵关闭扬程下运行；装配带有安全衬套的机械密封；对密封装置提供密封水和冲洗水；机械密封经验证为最小泄漏，并且经验证它在硼酸中应用具有长期的可靠性。

c. 泵的连接：

法兰连接。

d. 轴封泄漏排水：

底盘设计必须能将全部密封泄漏水排到适当的疏水装置。

2) 硼酸贮存箱

a. 确定尺寸和浓度：

硼酸贮存箱容量必须在堆内燃料循环过程中活性区条件最苛刻并有一根最大反应性的控制棒抽出条件下足以允许一次换料停堆和一次冷停堆叠加的硼酸容量。箱内的最大硼酸浓度必须等于或小于4%重量比。

b. 材料：

满足通用要求。

c. 氧控制：

必须提供防止氧气溶入箱内硼酸的措施。

3) 硼酸配料箱

a. 混合能力要求：

配料箱应当具备搅拌器和加热器，以便在配料操作中增进搅混。另外，在配料系统操作时还应提供取样手段和粗过滤器，后者应具有压差指示和报警。

b. 防止硼酸结晶的温度要求：

配备适当的设施，用来加热硼酸制备箱及其与硼酸贮存箱间的连接管道，预防在制备过程中硼酸在箱子和管道内结晶。在电厂停闭和所有其他运行模式下，加热设施必须可用。

c. 材料：

满足通用要求。

d. 操作要求：

制备箱应配备相应的设备，以便操作硼酸袋或桶，如配置一个平台和提升硼酸袋的措施。对块状硼酸必须提供粉碎措施。

4) 过滤器

a. 容量：

过滤器的额定流量必须考虑各种特殊应用和布置位置情况下的最大预计流量。

b. 反向冲洗系统：

如果采用可反向冲洗过滤器，则反冲液必须排至废液处理系统，并不得与其他液流相混。

## 2.3.4.5 仪表和控制

### 2.3.4.5.1 通用要求

系统的仪表和控制满足反应堆的仪表和控制的通用要求。

### 2.3.4.5.2 特殊要求

仪表和控制的特殊要求概述于下：

1) 过程仪表

必须提供过程仪表以取得系统的关键参数。仪表必须提供系统中的温度、压力、流量及水位监测和/或报警的输入信号。过程仪表的配置必须便于用装量平衡办法评价反应堆冷却剂系统的不明泄漏。



## 2) 仪表接头的定位

小直径接头易于捕集流体中的一些杂质,必须将这些接头布置在远离需要进行检查或维修的区域。这种接头的数量应减至最小。

### 2.3.4.6 维修

遵循通用要求,系统的设计必须便于维修,包括在役检查。

### 2.3.5 硼回收系统

#### 2.3.5.1 定义

##### 2.3.5.1.1 范围

硼回收系统接收和贮存电站正常运行中可复用一回路冷却剂,通过蒸发工艺,制取反应堆补给水和硼酸溶液返回一回路复用。

通过除气工艺,降低一回路冷却剂中放射性水平。

##### 2.3.5.1.2 功能

硼回收系统功能如下:

- 1) 接收和贮存机组正常运行中由于燃耗、负荷变化(包括负荷跟踪)和启动与停机瞬态从反应堆通过化学和容积控制系统排放的冷却剂;
- 2) 贮存除气后的蒸馏液(补给水),并通过反应堆硼和水补给系统输送到反应堆冷却剂系统,用于反应堆冷却剂的补给和更换;
- 3) 将机组正常运行中被排出且暂存在硼回收系统中的反应堆冷却剂分离成浓缩硼酸溶液和蒸馏液(补给水),进一步在反应堆冷却剂系统中被再利用;
- 4) 去除溶解在反应堆冷却剂中不能被离子交换器或过滤器去除的气体,不改变硼的浓度而直接通过化学和容积控制再注入;
- 5) 作为控制反应堆冷却剂中氚浓度的主要方式;
- 6) 保护电厂人员免受放射性辐照,通过使用自动系统、合适的布置、可靠方便的操作以及可维修的设备、屏蔽和远程操作的仪表和控制实现ALARA原则。

##### 2.3.5.1.3 接口

本节列出典型核电厂硼回收系统接口,具体接口取决于华龙系列电厂的详细设计,接口如下:

###### 1) 化学和容积控制系统

硼回收系统接收化学和容积控制系统下泄的一回路冷却剂。

###### 2) 核岛排气和疏水系统

硼回收系统接收核岛排气和疏水系统输送过来的一回路冷却剂。

核岛排气和疏水系统接收硼回收系统的疏水和排气。

###### 3) 反应堆硼和水补给系统

硼回收系统为反应堆硼和水补给系统提供补给水和浓硼酸。

###### 4) 核岛通风系统

核岛通风系统接收硼回收系统释放的不含放射性气体。

###### 5) 工艺取样系统

工艺取样系统为硼回收系统取样检测。

###### 6) 设冷水系统

设冷水系统为硼回收系统提供冷却水。

#### 7) 除盐水系统

除盐水系统为硼回收系统提供除盐水。

#### 8) 氮气供应系统

氮气供应系统为硼回收系统提供氮气。

#### 9) 放射性废气处理系统

放射性废气处理系统接收硼回收系统产生的放射性废气。

#### 10) 放射性废液处理系统

放射性废液处理系统接收硼回收系统需要排放的废液。

#### 11) 放射性固体废物处理系统

放射性固体废物处理系统接收硼回收系统产生的放射性固体废物。

### 2.3.5.2 性能要求

#### 2.3.5.2.1 容量要求

硼回收系统以机组正常运行瞬态为设计基准,同时满足机组基本负荷运行和负荷跟踪运行的要求。

在机组基本负荷运行期间,需要处理的冷却剂和除盐水的容积是整个换料循环内燃耗补偿所需的容积。

硼回收系统的设计只考虑典型日负荷跟踪工况,当机组运行于50%~100%额定功率之间的任一功率水平时,在前85%燃料循环长度中,能进行功率变化形式为12-3-6-3的日负荷跟踪。

在系统的设计中考虑到以下的运行瞬态:

- 1) 短时间热停堆大约6到8小时(在氙峰值下启堆);
- 2) 长时间热停堆大概在90小时(在氙衰变后启堆);
- 3) 冷停堆(在氙衰变后启堆);
- 4) 换料停堆。

#### 2.3.5.2.2 贮槽要求

硼回收系统连接通风系统或废气处理系统的箱体大小应有足够的容积,以便在机组正常运行瞬态,满足功率下降又回升瞬态冷停堆和启动时不影响电厂运行。

同时满足在脱气装置设备故障时不影响电厂运行。

### 2.3.5.3 系统特征

#### 2.3.5.3.1 配置

系统配置应满足如下要求:

处理区域和设备应为预期放射源提供足够的屏蔽,包括液体和固体废物的积累和活度变化。

设施的设计应充分将废物分类、处理和存储。

设备、部件的设计应可达,并可由起重机移走。

#### 2.3.5.3.2 工艺

含硼和氢的废液将通过硼回收系统进行收集和处理。

硼回收系统收集、处理来自化学和容积控制系统以及核岛排气和疏水系统的反应堆冷却剂。

连续接收来自化学和容积控制系统的下泄废液，进行脱气并返回化学和容积控制系统。处理反应堆冷却剂疏水箱和其他可复用的一回路冷却剂。

采用蒸发工艺，蒸发器的底部废液（浓硼酸）再循环到硼和水补给系统。浓缩液可能会交替地进行排放。蒸发器的蒸馏液暂存供一回路复用，其余经放射性废液处理系统监测后排放。

#### 2.3.5.4 关键设备特性

##### 2.3.5.4.1 管道

在蒸发器中，其含有浓缩液的阀门和管道均应设有冲洗措施，并应设计成能预防这些浓缩液在管路中结晶。

浓缩液贮槽排放管道应设计成防止冷冻或堵塞。

##### 2.3.5.4.2 阀门

###### 1) 可操作性

在正常运行时需要变动阀位的工艺管道阀门均应在控制室操纵屏上进行远距离操作。所有远距离操作阀门均应设有阀位指示。

###### 2) 阀门类型

远距离操作的隔离阀应采用球阀或旋塞阀。

浓缩液管道上阀门应是全流道的阀门，这样浓缩液不会影响阀门的操作。

###### 3) 阀门密封件

用作阀门密封件的材料应具有适当的耐辐照性，并能适应预期的用途和使用寿命。聚四氟乙烯可考虑用作阀门密封件。

##### 2.3.5.4.3 泵

###### 1) 轴封

泵应配备可靠的高质量的机械轴封，该轴封应是经过考验的，并应设计成易于维修。泵及其相关管道的连接应设计成易于轴封的更换和维修。

先进的、动压密封技术满足泵的要求，可应用于核电站。

当系统的水质满足密封注入水水质要求时，优先选用系统水用于密封注入，不需要外部水源。

当需使用泵输送高浓度浓缩液时，应提供密封水来密封，密封水自动阀与泵同时运行。系统设计应满足对密封水泄漏进行集中收集。

轴封泵不适用于输送高硼酸浓缩液或较多悬浮物。可用于相对清洁或经过滤后低杂质含量的场合。

暴露在外部的泵旋转部件应设置防飞射物装置。

###### 2) 排气及疏水

泵壳应设置排气和疏水连接，泵基的疏水管道应与泵轴封泄漏和泵壳疏水管道分别设置。泵及其连接管道应设置必要管道用于冲洗。

###### 3) 润滑

如果泵或电机为油润滑，则应配备集油装置，以防止油对排水系统造成交叉污染。

自动给油装置应设计成易于精准加油，以防止溢油。禁止使用倒置油杯加油方式。

###### 4) 浓缩液泵

对于高固体浓度废液的泵应采用被工业应用的结构形式。推荐使用气动隔膜泵，螺杆泵也可用于浓缩液。

#### 5) 泵的维护

泵与其排出和吸入管道之间应采用法兰联接。

泵应安装在远离箱体底部、过滤器和离子交换床的地方。

泵应设置吊耳或其他用于吊装的部件。

### 2.3.5.4.4 常压贮槽

#### 1) 排气及溢流

常压贮槽应设排气管。排气管的尺寸应能防止贮槽在最大充灌和疏排流量时，不致产生超压或真空的现象。对有空气进入的贮槽其排气管应使用接管接至核电厂的通风系统，并相应加以过滤。

#### 2) 疏排及清洗

贮槽应满足以下规定，以尽量减少贮槽底部固体废物的堆积。

用于高固体含量液体收集系统的立式液体收集罐（如浓缩液）应该有锥形底部，并将其排放和疏水管道设在贮箱的最低点。箱体应尽量采用圆筒形，浓缩液贮槽以及相分离器等要求采用圆筒型。

卧式贮槽不应用于可能积聚固体物质的系统。

贮槽在制造过程中不应形成缝隙和腐蚀积垢物的集聚点。

凡采用油润滑的泵及电机均应设有甩油环及集油装置，以使油不致污染其他的疏水。

#### 3) 梯子

在贮槽外侧便于人员进入贮槽处应设有梯子。

#### 4) 人孔

贮箱应设有足够大的人员出入口，以便允许穿着防护衣服、并随带移动式的通风、照明及维修设备的工作人员进入。至少应该有一个椭圆形顶部或侧面入口通道（直径最少DN600）在靠近罐体顶部的位置。且最好配置有专门用于通风等服务设施的第二人孔。

为了快速拆卸和放置人孔盖，应提供局部固定装置或链条。

对于顶部入口的人孔，应在箱体顶部留有足够的空间。

#### 5) 箱体的连接

贮槽的所有连接和配件均应焊接。

#### 6) 搅拌措施

收集箱和监测箱应设置可搅拌其内废液的措施，以便能提供有代表性的样品，并使箱内的固体颗粒被搅拌成悬浮状态，在输送箱内废液时被排走。还应提供能定期将箱内沉淀的淤泥排走的措施。搅拌应采用流体动力装置，而不允许采用机械搅拌器。

#### 7) 贮槽抗真空设计

对封闭的和加热的贮槽应按能抗全真空的要求设计。

#### 8) 钢覆面

对于放射性活度浓度较大的非抗震类贮槽，其设备间的滞留池宜设置不锈钢覆面，钢覆面的高度应确保能容纳贮槽内的全部废液。

#### 9) 贮槽的气体覆盖

贮槽需采取一定的措施，以防放射性气体的释放，并避免氢爆。典型的方法是隔膜覆盖或惰性气体覆盖。

### 2.3.5.4.5 离子交换床

设计者应为每台离子交换床规定树脂的类型和形式，树脂应在较高温度下使用（不超过60℃），使用寿命应长。

树脂类型除采用特殊的选择性离子树脂外，一般应采用强酸型苯乙烯-二乙烯基苯阳离子树脂和强碱型季胺基阴离子树脂。

树脂型式除用于除硼外，阳树脂应选用H<sup>+</sup>型，阴树脂应选用OH<sup>-</sup>型。

#### 2.3.5.4.6 蒸发器

##### 1) 设计要求

蒸发器结构材料的选择应该考虑料液的化学成分，同时应考虑料液中可能存在的杂质和化学调节剂，要能够经受在浓缩液沸腾条件下的腐蚀，并留有足够的腐蚀裕量。

对于带有独立加热器的蒸发器，其加热器应可拆换。

蒸发器应能完全排空后进行清洗。

蒸发器的设计应尽可能降低二次蒸汽中夹带液滴量，以提高蒸发器的去污因子。

蒸发器应远距离操作。设计和布置蒸发器时，应该考虑尽量减少维修期间对工作人员的照射。

##### 2) 布置

蒸发器应设计成能允许检查其内部构件。要求人员通道应达到足以能适应一个穿防护衣和戴空气面罩的人员出入。蒸发器还应设计成易于拆移其内部构件，并提供为这类拆移或其他维修操作所需的专门工具。

蒸发器的所有部件应设计、建造和布置在分隔的屏蔽区内，以减少在维修活动中来自邻近部件的辐照。

为蒸发器装置服务的各种管道阀门和仪表均应布置在蒸发器隔间的外面。

蒸发器冷凝器和排气冷凝器应布置在高位，其高度足以能正常疏水。

#### 2.3.5.4.7 脱气装置

所采用的脱气方法至少应具有1000的脱气去污因子，应允脱气后常压暂存，并能符合系统对放射性浓度的要求。

所采用的脱气方法应能在全部流率的范围内处理其连续的下泄流，还能处理反应堆冷却剂疏水箱内的疏水。

应留有足够的空间以供脱气装置维修之用，诸如：泵密封件或热交换器管束的更换，此外，还应提供临时屏蔽措施。

脱气装置应布置在分隔的屏蔽室内，其泵和仪表应与脱气塔分开布置并屏蔽。

#### 2.3.5.5 仪表和控制

硼回收系统的处理和蒸发可在集中控制室遥控手动操作，但有关反应堆冷却剂下泄或收集贮槽本身状况的控制和仪表应设在主控制室，但其信号同时在集中控制室显示。

##### 2.3.5.5.1 贮槽入口

采用两台并联使用的贮槽时，当第一台贮槽充满时，应由仪表自动切换进水阀门使水送至第二台贮槽，即当一台贮槽出现高液位时应自动将其入口的水流切换至另一台贮槽内。

##### 2.3.5.5.2 联锁

对定期有废液批量输入至贮槽的应设置贮槽的液位指示。

##### 2.3.5.5.3 调节阀

凡需要启动和停闭的子系统，其工艺调节阀前后均应配备适当的隔离阀。

#### 2.3.5.5.4 浓缩液流

##### 1) 传感器的隔离

设在高固体浓度的液流（蒸发器浓缩液）中的仪表传感器应设置隔离阀，并具有冲洗传感器管线的措施。

##### 2) 不堵的传感器

仪表传感器应尽量选用不易堵的传感器。

##### 3) 传感器的布置

仪表传感器应设置在不易堵塞且能提供精确和稳定读数的位置。

##### 4) 传感器型式

应采用外部的传感器。

#### 2.3.5.5.5 贮槽液位

设计者可参考和比较以往贮槽所含有的固体（浓缩液）液位的测量方法，并从其中选用一种已被实践证明获得成功的方法。

#### 2.3.5.5.6 脱气装置

脱气装置应设有适当的控制和指示。特殊要求的控制和指示的选用应取决于系统设计本身。脱气状态的指示及一回路流体的控制应设在主控制室（但其信号同时在集中控制室显示）。其他的指示和控制可设在主控室、集中控制室的控制屏上或者是两者的组合。这些应由核电厂的设计者根据系统本身特点、操纵人员的配置以及人员因素等综合研究而定。

收集箱、暂存箱应设有在脱气装置一旦长期停运时能用氮气进行覆盖或用高流速气流扫气至箱体排气系统的接管。

#### 2.3.5.6 维修

遵循通用要求，系统的设计必须便于维修，包括在役检查。应尽量减少维修操作对机组运行的影响。

### 2.3.6 余热排出系统

#### 2.3.6.1 定义

##### 2.3.6.1.1 范围

余热排出系统包含泵、热交换器、控制阀、卸压阀以及相关的管道、控制和仪表，还包括设备支架、附属管道以及疏水和排气管道。

##### 2.3.6.1.2 功能

- 1) 在冷停堆时导出堆芯余热和主泵产生的热量；
- 2) 停堆卸料、换料、维修及其它操作时维持反应堆冷却剂系统所要求的温度；
- 3) 在主泵停运时用余热排出泵进行反应堆冷却剂系统流量控制；
- 4) 在反应堆冷却剂系统降压后，将反应堆冷却剂转送到化学和容积控制系统进行净化；
- 5) 在蒸汽管道破裂或小破口LOCA后，提供长期的堆芯冷却；
- 6) 为反应堆冷却剂系统提供低温超压保护。

### 2.3.6.1.3 接口

余热排出系统与下列系统有接口：

- 1) 反应堆冷却剂系统：从反应堆冷却剂系统热段引入流体，并返回到反应堆冷却剂系统冷段；
- 2) 设备冷却水系统：供应冷却水到余热排出泵和余热排出热交换器的壳侧；
- 3) 化学和容积控制系统：当反应堆冷却剂系统降压后，化学和容积控制系统从余热排出系统接收反应堆冷却剂进行净化；
- 4) 安全注入系统：余热排出系统通过安全注入管线返回到反应堆冷却剂系统冷段；
- 5) 核取样系统：对每个余热排出系统系列进行取样，收集有代表性样品；
- 6) 电源供电系统；
- 7) 仪表和控制系统。

### 2.3.6.2 性能要求

#### 2.3.6.2.1 正常冷停堆

该系统有能力在停堆约20小时将反应堆冷却剂温度冷却至60℃。

#### 2.3.6.2.2 安全冷停堆

该系统在反应堆停堆后4至14小时之间任何时刻启动，且在发生单一故障情况下，有足够的容量将反应堆冷却剂温度冷却至90℃。

#### 2.3.6.2.3 反应堆冷却速率控制

该系统能使操纵员控制反应堆冷却剂系统冷却速率不超过28℃/h。

#### 2.3.6.2.4 运行寿命

电厂寿期内而无需更换主要设备或管路，但主要设备和厂房布置在设计时需要考虑在必要时能够进行更换。

### 2.3.6.3 系统特征

#### 2.3.6.3.1 系统布置

##### 1) 系列数量

余热排出系统应至少提供两个独立的系列，每个系列有其专属的反应堆冷却剂系统吸入口以及向反应堆冷却剂系统注水口。应采取措施确保当一台余热排出泵发生故障时仍能保证衰变热导出能力不会丧失。两个系列应足可满足单一故障准则、堆芯破损频率要求以及电厂可利用率要求。

##### 2) 反应堆冷却剂系统水位下降时丧失余热排出系统

当反应堆冷却剂系统水位由于蒸汽发生器或泵维修而降低时，为防止或减缓余热排出泵吸水功能丧失，应采取如下各种措施：

- a. 应对与反应堆冷却剂系统的连接接头和余热排出入口管线进行设计和分析，使其形成漩涡和吸入空气的可能性降至最低。
- b. 反应堆冷却剂系统正常疏排管的安装位置应使反应堆冷却剂系统水位不会被疏排到低于在维修时余热排出系统能连续运行所需的最低水位。应另设置独立的疏排管用于反应堆卸料。或者反应堆装料操作和维修时所需额定水位、导致漩涡开始形成的反应堆冷却剂系统水位二者之间保证具有相当的差值。为维修所需的反应堆

冷却剂系统水位应考虑到水位指示的偏差，导致漩涡开始形成的水位应基于余热排出系统的全流量即未被节流。

- c. 应严格关注余热排出系统及其与反应堆冷却剂系统和其他系统的接口布置与形状以实现(1)在反应堆冷却剂系统部分疏排，减少余热排出系统功能丧失的可能性(2)假若发生余热排出系统功能丧失，使易于复原可能性最大化。尽可能地按如下进行设计：

反应堆冷却剂系统吸入管和排水管设有自排气；

在余热排出系统进口和排水管之间消除中间高位点，包括垂直热膨胀环路；

使全部水平管都有斜坡；

减少或取消低于余热排出系统泵位的管路。

- d. 余热排出系统至化容系统的低压下泄和净化流的接管应设计成能排除积聚在或进入余热排出系统中的空气/气体，其位置、走向和下泄流速度应进行优化设计，使得能排出余热排出系统中的空气/气体。
- e. 余热排出系统的布置和结构应设计成尽可能排除反应堆冷却剂系统最低水位以上的任何水容积以便于反应堆装料和维修操作。余热排出系统应设计成在系统维修后排出存在系统内的任何空气/气体。在所有运行工况下(包括反应堆冷却剂系统疏排流量被节流的情况)系统管路或部件用足够高流速吹扫以防止积聚空气/气体。采用全流量试验管路的结构能够更好地实现上述目标，避免余热排出系统因其内存在空气/气体而失效。
- f. 应采取措施在余热排出系统泵的全性能范围内保证一旦泵无法正常吸水时实施迅速排气并重新启动余热排出系统泵。尽可能在主控制室使系统恢复运行，也应提供允许就地进行系统复原的备用措施。这些措施包括便于操纵员操作的布置特点、控制室和余热排出泵房间的通讯设施、就地仪表、可接近性和可操作性的设计考虑。

### 3) 在系统设备的位置

余热排出泵和热交换器应布置在安全壳外，以方便检修，并减少安全壳内的拥挤程度。

## 2.3.6.3.2 压力和温度

余热排出系统设计压力不低于6.21MPa，设计温度180℃。

## 2.3.6.3.3 超压保护

1) 设置卸压阀以保证在发生最极限事故下也不致超过余热排出系统的设计压力。应按余热排出系统运行期间超压瞬态(包括安注泵误启动、主泵误启动等)经验来确定最极限事故。卸压阀应位于安全壳内，为防止超压，卸压阀应设计有足够的快速卸压能力。

2) 卸压阀应对反应堆冷却剂系统提供低温超压保护(LTOP)，在卸压容量中应考虑寿期末最小卸压整定值。

3) 余热排出系统进口隔离阀应提供联锁以防在电厂正常运行期间反应堆冷却剂系统压力超过余热排出系统设计压力时的情况下该阀开启。隔离阀高压自动关闭的联锁则不必提供，以减少当余热排出系统运行时丧失衰变热导出能力的可能性。

4) 余热排出系统直接与反应堆冷却剂系统相连接的部分应设计成能在反应堆冷却剂系统全压力下保证不会超过设备的极限断裂强度。从反应堆冷却剂系统外端隔离阀至IRWST吸水管线隔离阀、其它支管上的第一个常关阀(联锁关闭或电动关闭)之间的管段也满足这一要求。此要求基于避免一回路接口系统管道发生LOCA。



5) 对应设计压力时,余热排出系统在通常瞬态和最大限度质量或热量输入之后的超压瞬态下均应能实现限制泄漏量。假设对应设计压力时一个泵密封损坏,其泄漏量应不超过化容系统正常上充容量。可通过设计失效时泄漏量小的密封、减少与换热器的法兰连接实现。

#### 2.3.6.3.4 排气和疏水措施

从余热排出泵至连接反应堆冷却剂系统位置间的余热排出管道应持续保持上斜,使得实际上几乎没有高位点。系统的高位点和低位点应分别设置排气阀和疏水阀。为保证余热排出系统各台设备的维修需设置必要的排气和疏水阀,阀门数量应考虑实际范围要求。

#### 2.3.6.3.5 隔离

1) 余热排出系统与反应堆冷却剂系统之间有双阀隔离,电动阀应能从控制室遥控操作,无需跟随安全壳隔离信号自动关闭。这两个阀应按反应堆冷却剂系统全压力和温度进行设计。

2) 上述隔离阀应设计成当阀间或阀腔内死水区受热膨胀而升压(锅炉效应)时保证能被打开。此问题尤其涉及闸阀。

#### 2.3.6.3.6 泄漏探测能力

1) 设置冗余的泄漏探测设施,对每个系列微小的泄漏(如泵密封故障泄漏)进行监测。

2) 冗余泵房之间实体隔离,以保证一个泵房内的泄漏不会影响其他隔间内泵的运行,并且不会影响其他隔间内的泄漏探测设施的动作。此外,泵房隔间内的通风系统还应具备剂量监测功能以探测由于泵的泄漏造成泵间大气中存在放射性。

#### 2.3.6.3.7 化学控制

在电厂冷却期间,在余热排出系统开始运行前,应对余热排出系统硼浓度的取样,并在需要时调整其硼浓度,以确保余热排出系统的运行不会造成反应堆冷却剂系统硼稀释。在反应堆冷却剂系统异常工况下(即冷却剂中有高裂变产物放射性时)也能对余热排出系统取样分析。

#### 2.3.6.3.8 试验能力

应有措施可确保对余热排出系统泵和电动阀进行定期监测试验。

1) 应允许泵通过余排热换热器进行再循环模式运行,从而提供进行泵的定期试验的能力。

2) 在正常运行情况下,应具备反复开关等阀门定期试验能力。对于余热排出系统入口阀门,它们不能在机组正常运行时反复开关,应明确其定期试验的替代方法,例如连续检查其电气部分。

3) 应确定支持实现余热排出隔离阀泄漏率试验的所有设备的设计,并确定对这个试验的泄漏率验收准则的基准。试验措施应保证为实施此试验所需的设备是有效的,其布置是合理的。这些设备应包括专用机械设备,如试验集管和阀门、仪表、通讯以及为完成试验所需要的照明。

#### 2.3.6.4 关键设备特性

##### 2.3.6.4.1 泵

- 1) 泵应为有机械密封的离心泵或屏蔽式电动泵。
- 2) 机械密封泵的密封设计应能适应最高6.21MPa的设计压力，应有能力承受反应堆冷却剂系统的全压而不会使密封泄漏率超过化学与容积控制系统正常上充能力。
- 3) 泵应能承受从室温到180℃的温升而不会卡住，也不必对余热排出系统启动程序附加特殊的限制。
- 4) 余热排出泵应能承受相当数量的空泡或空气进入泵产生的异常工况，通过高强度的泵设计和操纵员可用的响应时间相组合可使泵在异常运行工况下运行而不发生泵损坏。

#### 2.3.6.4.2 热交换器

- 1) 传热管应采用奥氏体不锈钢并在管板全厚度上作胀接。
- 2) 热交换器应具备清洁壳侧传热管的能力，以确保电厂寿期内余热排出热交换器的换热能力。

#### 2.3.6.4.3 阀门

- 1) 设计应当鉴别在阀门开启期间和反向流动期间余热排出系统内的所有要经受反向压力的阀门。经受这种工况的阀门的设计要保证在这些条件下安全可靠地运行，不发生损坏，不会因颤动或用力打开而损坏。
- 2) 设计应当鉴别需要闭锁的阀门和需要在主控室内提供开度指示的阀门。

#### 2.3.6.5 仪表和控制

##### 2.3.6.5.1 控制

- 1) 余热排出系统为手动启动系统，应设计成能在主控制室和远程停堆站进行手动启动和控制运行。机械密封泵的密封设计应能适应最高6.21MPa的设计压力，应有能力承受反应堆冷却剂系统的全压而不会使密封泄漏率超过化容系统正常上充能力。
- 2) 余热排出系统应设计成在所有运行状态(直至反应堆冷却剂温度上升至180℃)防止热交换器壳侧的冷却水沸腾，以避免水锤等不利影响。这应由合适的热工设计与管道结构来实现，不依靠电气联锁或复杂的控制设施。
- 3) 余热排出系统运行期间，反应堆冷却剂系统冷却速率的控制应由通过余热排出系统热交换器管侧的反应堆冷却剂的流量变化来实现。
- 4) 允许从远程停堆站控制余热排出系统运行，并可为操纵员提供充分的信息，以便其快速完成操作。

##### 2.3.6.5.2 仪表

- 1) 设计者应在主控制室和远程停堆站提供下列监测（符号\*表示远程停堆站可能需要的项目）：
  - a. 余热排出泵出口压力\*；
  - b. 余热排出系统流量、泵总流量\*；
  - c. 余热排出系统向化容系统净化的下泄流量；
  - d. 余热排出系统低流量报警\*。
- 2) 在应用于停堆或部分疏排反应堆冷却剂系统功能的反应堆冷却剂系统液位指示仪之前，应已优先设置有永久性安装的、多重的、安全级的反应堆冷却剂系统

液位指示仪，其量程应与其他反应堆冷却剂系统仪表(例如稳压器液位)相重叠，以允许验证其可运行性。当系统动态响应(例如疏排反应堆冷却剂系统)期间，反应堆冷却剂系统停堆液位指示仪的显示应偏于保守(即读值低于真实值)，并应参照稳压器汽空间而不是安全壳大气。

#### 2.3.6.6 维修

余热排出系统应设计成允许在维修前和维修后对安全壳外部分进行疏排和清洗以便于定期维修。

### 2.4 安全系统

#### 2.4.1 通用要求

##### 2.4.1.1 定义

本节说明华龙技术电厂安全系统相关的通用要求，与后文2.4.2和2.4.3节相应内容相结合，提供了华龙技术电厂安全相关系统设计的完整要求。

##### 2.4.1.2 原则说明

华龙技术电厂在核安全相关活动中全面贯彻纵深防御理念，纵深防御（DiD）分为5个层次，分别是：

- 1) 第1层次（DiD-1）通过按照恰当的质量水平和经验证的工程实践正确并保守地设计核电厂，防止核电厂偏离正常运行及防止安全物项的失效；
- 2) 第2层次（DiD-2）通过检测和控制偏离正常运行状态，以防止预计运行事件升级为事故工况；
- 3) 第3层次（DiD-3）通过固有安全特性、专设安全设施、安全系统和规程防止造成反应堆堆芯损伤或需要采取场外干预措施的放射性释放，并能使核动力厂回到安全状态；
- 4) 第4层次（DiD-4）通过控制事故进展和减轻严重事故的后果来减轻第三层次纵深防御失效所导致的事故后果。这要求可能导致早期放射性释放或者大量放射性释放的事件序列被实际消除；
- 5) 第5层次（DiD-5）通过配备适当的应急设施及厂内、厂外应急响应计划和响应程序减轻可能由事故工况引起潜在的放射性物质释放造成的放射性后果。

其中本节讨论的安全相关系统配置及其执行的基本安全功能主要用于实现纵深防御第三和第四层次的防御目的。

根据纵深防御原则，将安全相关系统划分为“设计基准工况应对措施”和“设计扩展工况应对措施”两大类。

设计基准工况应对措施，其主要目标为防止堆芯损坏，包含了用于执行堆芯冷却剂装量控制，衰变热排出，堆芯反应性控制等功能的系统。对应纵深防御的第三层级，以能动的高级系统为主，辅以部分非能动的安全手段（如安注箱、弹簧式安全阀等）。

设计扩展工况应对措施，主要目标为堆芯损坏事故后果的缓解，对应纵深防御的第四层级，以能动和非能动的系统相结合的方式实现。另外，设计扩展工况应对措施又分为两类：应对多重失效的DEC-A措施和缓解堆芯损坏后果的严重事故缓解措施。

纵深防御的各层次之间必须尽实际可能地相互独立，避免一个层次防御的失效降低其他层次的有效性。为此，安全相关系统应尽量避免跨层级使用，避免因一个系统的失效导致多个层级的防护失效。

### 2.4.1.3 总体要求

#### 1) 系统功能要求

安全系统应能执行其指定的安全功能，以应对相关事故工况。

#### 2) 系统配置要求

每个应对设计基准事故的安全级系统应有不少于两个独立的序列，以保证在发生设计基准事件，且假设在系统中存在一个单一故障时，能执行其功能。每个序列又应包含有足够的冗余度，用以保证在该序列内存在初始管道破裂时，能执行其功能。

同时，安全系统的设计应当适当简化，以便：

- a. 可使操纵员的操作规程不致太复杂，不致关联性太大，特别对于紧急工况；
- b. 减少为实施其功能所需的系统切换数目和相关操作数；
- c. 减少保护联锁的需要；
- d. 减少为实现功能、安全和可靠性目标所需的设备。

在余热排出系统设计中，对来自于裂变产物放射性衰变而产生的热量，应按照监管部门认可的标准来确定系统设计容量，并在设计工况中考虑丧失余热排出系统运行列。

安全系统应具有足够的鲁棒性设计，容许安全系统发生一定保守次数的虚假动作或误动作，而无需跟着进行验证系统完整性和可运行性试验或检查。

安全系统设计的特点、配置与分隔区的隔离应与厂房设计和电厂现场的支持系统相匹配，以增强电厂抵御灾害的能力。

#### 3) 设备相关要求

安全系统设备分级应与安全系统执行的安全功能级别相一致，且按照其应对的事故工况环境条件进行鉴定。

第1章中关于反应堆在役所用阀门的一般要求，可适用于安全系统中的阀门。

安全系统设备和结构应按结构设计基准进行设计，并满足法规要求的安全级设备的地震和安全等级要求。

#### 4) 布置要求

安全系统布置时应考虑实体隔离，不同系列应布置在不同的安全分区内。

应充分考虑内外部灾害的防护。

设备和管线的布置应充分考虑疏水和排气的需求，设置适当的疏排管线及隔离阀，避免出现不可凝气体聚积和低点无法排水的问题。

#### 5) 用电要求

每个分隔区所需的动力电应由独立的交流或直流应急厂用电源提供。独立的厂用电源被规定用来提供高效的电源给安全系统。

为了能启动和运行安全停堆所需的全部安全级载荷，至少应提供两个完全分开和独立的厂外交流电源。

#### 6) 仪表和控制要求

反应堆在役所使用仪表与控制的相关要求与规定，可适用于安全系统的仪表和控制。仪表接口是系统部件与传感器的连接处。控制接口是传送动力或信号的线路或管路的最终动作的连接处。

设计者应明确仪表的所有功能，包括试验、级别(安全级或非安全级)、精度(要求的和/或提供的)、仪表使用状况(固定或临时)和计算基准(仪表误差分析和假设，恶劣的环境状况等)。

反应堆冷却剂系统或反应堆压力容器的排放阀处于排放状态时应能在不依靠非安全“交流电”的情况下关闭。

#### 7) 应能在控制室内清晰显示阀门故障，显示阀门是否开启。在全厂断电情况下

阀门故障应仍能在控制室被清晰显示。

#### 8) 系统可靠性

应评定专设安全系统及其支持系统的可靠性(系统布置、部件故障率、试验频率等)。

电厂设计者应在停役期间,特别在水装量减少的工况下提供一些经济有效的措施、能力和适当的操作导则使操纵员能发挥最佳作用以满足华龙技术电厂的安全目标。为了保证能够满足这些安全目标,应评价停役特定工况的如下指标:

- a. 在停堆期间(诸如衰变热导出(DHR)能力丧失或冷却剂丧失事故(LOCA))对事故的发生以及进一步扩展可能性的诊断能力;
- b. 实施恢复动作的能力,包括对燃料裸露影响下的可居留性的考虑;
- c. 水装量足够提供 72 小时反应堆冷却剂系统丧失量的补给;
- d. 为了优化操纵员的操作和满足临界安全功能,提供系统自动或非能动响应的能力;
- e. 估计向环境释放的可接受性;
- f. 通过简单的手动动作而恢复安全壳封闭性的能力。

### 2.4.2 设计基准工况应对措施

#### 2.4.2.1 安全注入系统

##### 2.4.2.1.1 定义

##### 1) 范围

安全注入系统包括安注泵、安注箱、安全壳内置换料水箱(IRWST)和相关阀门、管线、控制和仪表。

##### 2) 功能

安全注入系统是一个专设安全系统,执行的功能如下:

- a. 在 LOCA 工况下,向反应堆冷却剂系统(RCS)提供冷却水,以保证堆芯有足够的冷却水进行冷却。
- b. 小 LOCA 工况下,配合硼和水补给系统向反应堆冷却剂系统注入硼酸溶液,以达到安全停堆。
- c. 在发生主蒸汽管道破裂事故时,向 RCS 注入硼酸溶液,以补偿堆芯过度冷却引入的正反应性。
- d. 在冷段大 LOCA 的长期阶段,通过冷热段同时注入防止 RCS 中的硼结晶。
- e. 在蒸汽发生器不可用的设计扩展工况下,采用充-排操作,导出余热。

##### 3) 接口

安全注入系统的接口系统有:

- a. 反应堆冷却剂系统:安全注入系统向反应堆冷却剂系统提供含硼水。
- b. 设备冷却水系统:设备冷却水系统向安注泵提供冷却水。
- c. 化学和容积控制系统或反应堆硼和水补给系统:向 IRWST 和安注箱提供含硼水。
- d. 氮气供应系统:氮气供应系统向安注箱提供氮气,以维持需要的压力。
- e. 取样系统:从每个安注箱收集取样。
- f. 1E 级供电系统。
- g. 仪表和控制系统。
- h. 针对安全注入系统安全壳外的管道破口,设置监测系统。
- i. IRWST 的净化:通过乏燃料水池的净化系统。

j. 额外冷却系统（如有）：冷却安注泵。

#### 2.4.2.1.2 性能要求

##### 1) LOCA后向RCS注水

- a. 考虑丧失厂外电且叠加最恶劣的单一故障，安全注入系统必须要有足够的能力保证堆芯状态低于安全限值要求。
- b. 对于小破口事故，安全注入系统必须保证没有燃料损坏。
- c. 安注泵的容量需要应对各类不同位置的破口事故，这样安注泵（冗余设置）可不必严格地匹配流量-扬程曲线。安注泵的容量设计需要考虑流量溢出的影响，但是对泵的流量-扬程曲线不会增加额外的限制条件。

##### 2) 提供硼用于安全冷停堆

可将安注箱和内置换料水箱的的硼水注入到反应堆冷却剂系统内，参与反应性控制。

##### 3) 主蒸汽管道破裂事故后的硼化

在发生主蒸汽管道破裂事故时，安全注入系统向RCS注入足够的硼酸溶液，补偿堆芯过冷引入的正反应性，确保堆芯燃料状态不超过限值。

##### 4) 利用充-排操作实现应急余热排出

利用安注泵，可实现充-排操作，导出堆芯热量。

##### 5) 长期注入阶段的接管配置

安注泵与IRWST的接管应满足所有运行模式，包括事故工况。目前有电站将IRWST置于安全壳外，宜放置安全壳内，进而取消安注泵的取水切换。

##### 6) 注入压头

安注系统的注入压头必须足够高，且满足下述要求：

- a. 确保所有的设计基准事故都能满足验收准则。
- b. 确保充-排操作时具有足够的余热排出能力。
- c. 安注系统的注入压力比 RCS 正常运行压力低，以防止在正常运行期间误启动，向 RCS 误注入。
- d. 安注泵不能采用串联布置的方式，串联布置使得运行和管道布置复杂化并降低安注的可靠性。

##### 7) 系统启动时间

安注系统的启动时间与相应柴油机的启动加载时间一致，以保证其所要求的功能。

#### 2.4.2.1.3 系统特征

##### 1) 系统方案

##### a. 系列数量

安全注入系统由至少2个或2个以上的冗余系列组成。每个系列包含IRWST吸入管线、安注泵、与RCS系统相连的注入管线。

##### b. 安注泵的汽蚀余量

安全注入系统的设计（包括安注泵的标高）应保证在所有运行工况下泵的汽蚀余量。IRWST的水位应假设为最低水位，并假设具有最不利的仪表误差。

##### c. 设备位置

安注泵应位于安全壳外，以便于维修。

##### 2) 设计压力

- a. 安注泵下游的设计压力至少需要考虑泵的关闭扬程+最大的吸入压头。
- b. 安注泵上游的设计压力至少需要考虑安全壳的设计压力+IRWST 的静压头。

### 3) 超压保护

在两个常关的隔离阀之间的管道, 需要考虑设置超压保护装置。这种保护装置包括可卸压至RCS的止回阀。如此可以避免RCS冷却剂流失, 并避免了采用安全阀需要的定期维护、校验, 以及相关法兰连接设置。

### 4) 疏水和排气措施

- a. 应提供疏水和排气措施, 以允许安注系统在维修前进行疏水和清洗, 以及维修后再充水。
- b. 在 LOCA 后的长期阶段, 在系统管道内可能存在高放射性流体时, 也应提供维修路径。

### 5) 隔离

- a. 安注泵的吸入管线上需要设置一个远程控制的电动隔离阀。
- b. 采用单阀设置可以提高系统可靠性。

### 6) 泄漏探测和终止

应有措施能探测和终止安全壳外的泄漏, 包括非能动故障造成的有限泄漏(如泵密封失效), 这些措施包括:

- a. 冗余泄漏探测设施。比如每个系列地坑隔间液位的探测, 并在主控室指示;
- b. 冗余泵房间的隔离。可保证每一个泵房中的泄漏不会影响到另一个泵房中的泵的正常运行, 也不会引起其他泵房中泄漏探测设施的动作;
- c. 能够从控制室对每一个系列进行隔离。

## 2.4.2.1.4 关键设备特性

### 1) 泵

安注泵应是多级离心泵。

### 2) 安注箱

- a. 应根据安全注入功能要求、可利用率和确定论/概率论的目标, 使安注箱数量减至最少, 以简化设计。
- b. 安注箱的数量应考虑管道破口的影响, 即使有一台安注箱不可用仍可满足堆芯冷却要求。
- c. 设计者应确定安注箱压力、液位和硼浓度的允许范围, 应保证这些允许范围足够宽, 以避免在正常运行时操纵员过多的动作。
- d. 对安注箱及其相关联的支持系统的设计, 应保证按技术规格书所要求的对安注箱的参数调节易于实现。安全壳内用于这种调节的阀门应能从控制室进行远距离操作, 位于安全壳外的阀门应是便于接近的。

### 3) IRWST

- a. IRWST 提供换料水, 是安注泵和安喷泵的唯一水源。
- b. IRWST 的水容积, 必须满足正常换料期间的用水, 同时假设 RCS 的水位处于热管段的半管位置。IRWST 水容积必须足够大, 以保证在下述假设条件下泵的运行:
  - 发生 LOCA 的同时给 RCS 充水;
  - 一个安注箱不可用;
  - 必须考虑安全壳大气处于设计压力的蒸汽和安全壳表面上的水。
- c. 安注泵、安喷泵的取水管线与 IRWST 相连, 且 IRWST 内需设置滤网。
- d. 安全壳内应设置回流通路, 确保事故后的水回流至 IRWST 内。应设置栅格或其他装置以防止碎片进入 IRWST。

- e. 考虑安注泵、安喷泵的取水要求，职业辐照、可维修性及建造，IRWST 应尽量布置在较低的标高。
  - f. 需提供措施确保 IRWST 的排水、净化和回水，以及取样和水化学调节、水位和硼浓度调节，以及事故后长期阶段 pH 值的调节。
  - g. 设置相应的管线使得有换热器可以对 IRWST 进行冷却。
  - h. IRWST 的内表面采用不锈钢结构。
  - i. 需提供进入 IRWST 内部的通道，以便对 IRWST 进行检查和维修。
  - j. 需要评估 LOCA 或安全阀的排放对 IRWST 内产生的载荷及影响。
- 4) 阀门

安注泵吸入管线和安注箱排放管线上的隔离阀应采用常开的电动隔离阀。

#### 2.4.2.1.5 仪表和控制

- 1) 应提供仪表和控制，以保证在设计基准事故后，当出现稳压器压力低或安全壳压力高时自动投运安全注入系统。
- 2) 应有措施实现手动投运安全注入系统，能在控制室和远程停堆站操作所有电动设备。
- 3) 应在主控室和远程停堆站提供必要的监测能力和报警，包括如下：
  - a. IRWST 液位；
  - b. 安注箱液位和压力；
  - c. 安注泵流量；
  - d. 阀门状态。

#### 2.4.2.2 安全壳喷淋系统

如果采用安全级安全壳喷淋系统来应对设计基准工况，则需满足本节要求。

##### 2.4.2.2.1 定义

###### 1) 范围

安全壳喷淋系统执行安全壳热量导出和放射性包容功能。这包括安全壳喷淋泵、从 IRWST 来的进水管、热交换器、到安全壳喷淋母管的出水管以及相关的管道、控制和仪表，还包括设备支架、附属管道以及疏水和排气管道。

###### 2) 功能

安全壳喷淋系统用于执行下列功能：

- a. 在设计基准事故后排出安全壳大气内的热量，以防止安全壳压力超过设计压力；
- b. 在 LOCA 或主蒸汽管道破裂事故后，快速降低安全壳的压力和温度，并维持其在设计值以内；
- c. 在 LOCA 后的运行期间，从 IRWST 取水然后返回 IRWST，通过热交换器实现衰变热排出；
- d. 在一回路和二回路管道破裂事故下，减少安全壳气空间内的气载裂变产物到核安全要求的限值内，从而减少放射性裂变产物向环境的释放；
- e. IRWST 水温超过限值时，可为其提供冷却；
- f. 在反应堆冷停堆时，若核岛消防系统失效，安全壳喷淋系统可用于消防，防止在反应堆厂房发生火灾蔓延。

###### 3) 接口

下列系统与安全壳喷淋系统有接口：



- a. 安全注入系统：IRWST 是安全壳喷淋泵的喷淋水源；
- b. 设备冷却水系统：给安全壳喷淋泵和热交换器壳侧提供冷却水；
- c. 电源系统：需保证在假设单一故障时，能用厂内电源或厂外电源运行；
- d. 仪表和控制系统。

#### 2.4.2.2.2 性能要求

- 1) 冷却能力
  - a. 安全壳喷淋系统应有足够的容量在设计基准事故后将安全壳的压力和温度降低至设计限值内；
  - b. 安全壳喷淋系统应有足够的能力冷却并维持 IRWST 内存水的温度。
- 2) 裂变产物清除能力
  - a. 对于设计基准事故，安全壳喷淋系统应将安全壳内大气的裂变产物浓度充分降低，以满足设计基准中泄漏要求；
  - b. 禁止使用 NaOH 之类的喷淋添加剂，对于清除裂变产物来说，不需要喷淋添加剂，因为碘的主要形式是高可溶性的 CsI，取消添加剂，以避免高苛性溶液增加了偶然启动喷淋时损坏安全壳内设备的可能性。
  - c. 安全壳喷淋系统应设计成在柴油发电机启动/加载时间内执行其功能。

#### 2.4.2.2.3 系统特征

- 1) 系统布置
  - a. 系列数量
    - 安全壳喷淋系统由两个系列组成，每一系列有从 IRWST 的进水管、泵、向安全壳喷淋集流管的出口管道，两个系列以满足单一故障准则；
    - 每个系列有安全壳冷却和裂变产物清除的 100%喷淋流量。
  - b. 系统设备位置

安全壳喷淋系统泵和热交换器应布置在安全壳外。

##### c. 泵 NPSH

安全壳喷淋系统设计，包括泵的标高，应保证在所有运行条件下，可获得所需要的NPSH。支持性分析应考虑进水管和其他压头损失。不采用冷却剂的潜热和高的安全壳压力。在计算泵的有效汽蚀余量时应按照较高的电网频率对应的流量，并考虑适当的不确定度和IRWST的最低液位。与IRWST相连的进水管应设计得可确保不出现漩涡/吸入空气。

##### 2) 压力和温度

安全壳喷淋系统若存在与其它系统备用/共用时，应考虑与其共用系统的设计压力要求。

##### 3) 超压保护

应为常闭隔离阀之间的管道部分提供超压保护。

##### 4) 排气和疏水措施

为了允许正常运行期的任何必须的维修后充排操作，应提供高位排气和低位疏水装置。

##### 5) 隔离

- a. 系列数量安全壳喷淋系统出水管道的提供两道隔离阀以便与安全壳集流管隔离，且至少有一个电动常闭的阀门可以从主控制室远程操作；
- b. 应给安全壳喷淋系统进水管道的提供单个隔离阀，该阀要安装在安全壳外近实际可能靠近安全壳的地方。此阀应常开，且可从主控制室远程操作。

##### 6) 化学控制

应当提供措施允许对系统内的水进行取样，允许加阻蚀剂，有需要可用净化水替换。

#### 7) 结构

安全壳喷淋系统应满足结构设计基准。

#### 2.4.2.2.4 关键设备特性

##### 1) 泵

泵应该是有机械密封的离心泵或屏蔽式电动泵。

##### 2) 热交换器

- a. 传热管应采用奥氏体不锈钢并在管板全厚度上作胀接；
- b. 热交换器应具备清洁壳侧传热管的能力，以满足电厂寿期内，安全壳喷淋热交换器确保换热能力。

##### 3) 分配集流管和喷嘴

分配集流管及相关喷嘴应安装在高于操作平台的安全域，集流管和喷嘴应设计得可覆盖安全壳的全部面积，喷嘴直径应大于能通过IRWST筛网的碎块直径。

#### 2.4.2.2.5 仪表和控制

安全壳喷淋系统满足反应堆仪表和控制的总要求，安全壳喷淋系统应设计成自动启动系统。阀门的运行状态和安全壳喷淋泵的运行流量应在主控制室和远程停堆站提供监测。

#### 2.4.2.2.6 维修

安全壳喷淋系统满足有关维修可达性和工作人员辐照剂量最小化的总原则，且应当提供特性以保证在通气试验期间能观察到喷淋集流管嘴气流流动，且要保证，在需要时，可完成喷淋嘴的修理和更换。

#### 2.4.2.3 应急给水系统

##### 2.4.2.3.1 定义

##### 1) 范围

应急给水系统包括将水供应至蒸汽发生器的应急给水泵，应急给水箱、从应急给水箱供应应急给水的进口管、通向蒸汽发生器的排水管、以及相关的阀门、控制和仪表。应急给水系统还包括设备支架、排气和疏水管以及其他附属管路。

##### 2) 功能

应急给水系统是一个专设安全系统，用于在主给水系统或启动给水系统失效或丧失的设计基准事件或设计扩展事故工况时，向蒸汽发生器提供“给水”以导出一回路的热量，应急给水系统不参与严重事故的缓解。事故期间，应急给水系统向蒸汽发生器提供给水，恢复或维持蒸汽发生器水位，反应堆的衰变热和显热通过蒸汽发生器从一次侧传导到二次侧，在汽机旁路或蒸汽排大气系统的配合下，将热量导出到最终热阱（大气或海水）。

##### 3) 接口

与应急给水系统接口的系统如下：

- a. 蒸汽发生器系统(第3章)，从应急给水系统接收应急给水并把给水转换成蒸汽，并导出一回路的热量；
- b. 主蒸汽/抽汽系统(第2章)，将蒸汽发生器中蒸汽排放到冷凝器或大气中；
- c. 除盐水生产系统，为应急给水箱提供正常补水
- d. 核岛排气和疏水系统(第2章)，收集应急给水系统的疏水和排气；
- e. 1E级电力系统(第11章)，为应急给水系统的电动泵、电动阀以及关键的控制、

仪表提供电源；

f. 应急给水系统和仪表与控制系统(第 10 章)的接口。

#### 2.4.2.3.2 性能要求

##### 1) 系统流量

a. 供给蒸汽发生器的最小流量应能保证在设计基准事故工况下,足以排出反应堆冷却剂系统的热量。该流量还应叠加如下效应:

- 由于蒸汽发生器故障产生泄漏;
- 反应堆冷却剂泵运行或不运行时应急给水系统运行;
- 单一故障。

b. 应急给水系统(与华龙技术电厂的其他特性,例如较大的稳压器相组合)应能够满足反应堆冷却剂系统安全阀启跳和反应堆冷却剂系统运行压力的要求。在瞬态(包括 LOCA 事件)之后,应急给水系统应向蒸汽发生器供水,支持反应堆冷却剂系统以 28°C/小时或 56°C/小时(根据可用的应急硼注入系统的列数选择)的速率降温。

c. 供给蒸汽发生器的最小流量要保证能从反应堆冷却剂系统导出充分的热量。对堆芯破损频率的最佳评价应根据如下情况考虑:

- 仅向一台蒸汽发生器供水;
- 在没有安全注入流时在堆芯裸露之前启动应急给水;
- 衰变热按 2.2.3 节计算。

d. 设计流量应在满足设计基准工况所要求的最小流量基础下尽量小。以避免与过大的应急给水流量可能带来的以下不利影响:

- 在主给水丧失情况下一回路过冷和蒸汽发生器满溢;
- 在主蒸汽管线断裂后,增加安全壳内的压力;
- 不必要的柴油发电机容量。

##### 2) 防止安全壳超压

电厂设计者应确定在主蒸汽管道断裂后由于应急给水系统向受影响的蒸汽发生器供水而引发向安全壳释放的质量和能量,且应保证此类情况在安全壳设计中已经考虑。应假设在事故后30分钟内操纵员不干预,不隔离向受影响的蒸汽发生器供水。该系统不依赖自动隔离应急给水来防止安全壳超压。

##### 3) 给水水源

a. 应提供足够的安全级给水以实现安全冷停堆,其基准为:

- 主给水管线断裂事故,应急给水未隔离,持续向受影响的蒸汽发生器供水 30 分钟;
- 向完好的蒸汽发生器充水;
- 在热备用状态下运行 8 小时;
- 接着在 6 小时内将一回路冷却到允许余热排出系统投运的状态;
- 一台反应堆冷却剂泵在继续运行。

b. 在全厂断电情况下(丧失所有交流电源 8 小时),应能供应足够的给水,以维持电厂运行在热备用状态,并在全厂断电恢复后冷却到余热排出系统可投入运行工况。该工况下假设:

- 安全级给水水源可用;
- 非安全级给水水源可用。

c. 应供应足够的安全级给水以允许反应堆在自然循环状况下冷却。

#### 4) 应急给水泵启动

- 为减少运行时对蒸汽发生器的不利影响,供应到蒸汽发生器的应急给水水质应与达到二次侧补水的水质要求,但氧的要求除外。二次侧补水水质要求见第3章。此处不对应急给水箱内储水的氧含量作出要求,是因为多数瞬态使用正常给水系统给蒸汽发生器供水,应急给水系统仅在事故工况下使用,使用频率低。
- 设计上要采取锁闭手动阀等措施以避免劣质水(例如厂用水)供给蒸汽发生器。

### 2.4.2.3.3 系统特征

#### 1) 系统配置

应急给水系统配置应充分考虑系统可靠性、冗余性和单一故障准则,系统应由至少两个序列组成,每一序列有至少一台应急给水泵,通过将应急给水水箱的水供给蒸汽发生器而排出衰变热。

##### a. 系列布置

应急给水系统的每个独立列应布置在不同的厂房,实现列与列之间的实体隔离。安全列之间尽量不采用交叉连接,除非证明对安全、可利用率、可运行性有改善。

##### b. 泵进口管线

泵吸入管设计应能保证满足泵启动和稳态运行的净正吸入压头(NPSH)要求。尤其是管长、直径、液流收缩和启动时的流体加速率。应当使得当给水供水箱在最低水位和蒸汽发生器为大气压时从给水供应到泵进口部分不会出现过大的压降。

##### c. 泵的出口管线

在通到每个蒸汽发生器的泵出口管上应设置有限流装置,以防止泵超速运行而造成汽蚀,也可减少由于过大的应急给水量而造成其它潜在的不良影响。例如:蒸汽发生器满溢、反应堆冷却剂系统过冷率、蒸汽管路破裂后过大的蒸汽质量/能量进入安全壳。

#### 2) 附加的系统要求

##### a. 设计压力

系统中泵下游部分应设计成其压力至少等于超速机械脱扣时的关闭扬程加上最大进口压力。到泵上游隔离阀的泵进口管部分应设计成和出口管有相同的压力。

##### b. 泵的汽塞

应有措施监测由于泵出口管线上止回阀的水泄漏而汽化引起可能的泵的汽塞。它包括在泵出口管止回阀上游部分的温度监测仪(在控制室有指示和报警)。从蒸汽发生器到止回阀应有足够长距离以保证通过止回阀的导热不会造成真空而汽化。应有合适的排气和疏排,用于发生汽塞时排除蒸汽。

##### c. 试验能力

应有措施允许对应急给水泵和阀们进行定期的监测试验,对整个系统运行进行功能性试验。应能防止试验时液流流到蒸汽发生器、以免发生不必要的热冲击和含氧水进入蒸汽发生器的情况。为了能够按第1章所述的对动力阀进行现场试验,应当提供合适的通道。应有措施能在反应堆运行情况下以设计流量进行泵试验。

##### d. 结构

应急给水系统应能满足第1章4节中的结构设计基准,应急给水系统的主要设备应设计成抗震I类和机械设备规范要求应为M3级,但在隔离阀后连接到蒸汽发生器的部分应为M2级。

### 2.4.2.3.4 关键设备特性

#### 1) 泵

应急给水系统应至少使用两台电动泵。每一台泵的流量都应能满足2.4.2.3.2节的要求。

此外,每台泵还要有足够的额外流量使其在最小流量保护及冷却的再循环模式下仍能持续运行,还需考虑长期使用后水质劣化的允许量。除此之外,应急给水泵还应满足如下特性:

- a. 应使用多级离心泵;
- b. 泵的冷却方式为自冷却;
- c. 泵的出口和入口应为法兰连接,并有泵壳疏水装置,以便维修;
- d. 电动泵应能在电厂设计者所规定的降电压和降频率的情况下启动运行。

#### 2) 水箱

- a. 应急给水系统应有至少两个安全级的专用水箱。水箱采用抗震设计,水箱总容积满足应急给水总需求水量的 100%;
- b. 在两个应急给水箱之间设置连接管线,以便允许向所有应急给水泵提供应急给水;
- c. 应当为应急给水箱提供备用水源,在全厂断电情况下,能将备用水源输送到应急给水箱。备用水源无需安全级,除了与应急给水水箱的接管,应不影响水箱的安全/抗震性能。

#### 3) 阀门

- a. 第 1 章中对于反应堆系统使用阀门的一般要求,适用于应急给水系统中的阀门;
- b. 电动泵出口管线上的隔离阀和流量调节阀应由 IE 级电源供电。这些阀门应能手动操作,以便在丧失电源时调节阀门开度;
- c. 设计者应对要求锁定的和/或在控制室提供有位置指示的所有阀门加以标识。

### 2.4.2.3.5 仪表和控制

- 1) 在接收到触发信号后,应急给水系统能够自动启动,向蒸汽发生器注水。在事故中,操纵员在主控室也能通过安全级的控制系统,手动操作投入或停运。
- 2) 在一、二次侧连通的蒸汽发生器受损的事故中(SGTR),应急给水系统应能自动向未受损的蒸汽发生器注水。同时,在设计中应能自动终止应急给水系统向受损蒸汽发生器的注入。在MSLB或FLB事故中,在向受影响的蒸汽发生器的应急给水未得到隔离的影响(SG快速卸压),应急给水系统向未受影响的蒸汽发生器注入的流量能够满足带走热量所需的最小流量要求。
- 3) 在ATWS事故中,应急给水系统能够自动启动。
- 4) 应急给水系统应有能力监测、收集和控制系统的泄漏,并在超过正常泄漏或部件失效的情况下应能对系统进行部分的隔离。
- 5) 应急给水系统在备用或运行中,应能够检验系统是否处在正确的运行模式。
- 6) 不要采用低吸入压力停泵的设计。这种停泵方式会引起当一台泵启动,所有泵处于低吸入压力而停泵。采用进口压力监测和报警做为停泵的另一方法。
- 7) 电厂设计者应在主控制室和遥控停堆站提供监测能力和报警。包括下列内容:
  - a. 泵出口压力;
  - b. 泵进口压力(有低压报警);
  - c. 泵再循环流量监测;
  - d. 应急给水箱水位(有水位报警);
  - e. 阀位指示。

### 2.4.2.3.6 维修

每个换料周期在停堆期间对应急给水系统进行一次预定维修工作。

#### 2.4.2.4 应急硼注入系统

##### 2.4.2.4.1 定义

###### 1) 范围

本节提供了华龙技术电厂对压水堆电厂中应急硼注入系统的要求。应急硼注入系统包括应急硼注入泵，应急硼酸箱，从应急硼酸箱取水的管线，将浓硼酸注入一回路的硼酸注入管线，以及相关的阀门、控制和仪表。应急硼注入系统还应包括设备支架、排气和疏水管以及其他附属管路。

###### 2) 功能

应急硼注入系统是一个专设安全系统，在事故情况下对堆芯进行硼化，用于补偿由于堆芯冷却或氙毒减少引入的正反应性。在设计基准（DBC 2-4）事故中，当电厂达到可控状态后由操作员手动投入应急硼注入系统，使得电厂可以进一步降温、降压，直到余热排出系统投入的安全停堆状态。在设计扩展工况（DEC-A）下，如果需要，操作员手动启动应急硼注入系统对反应堆冷却剂系统进行硼化。在发生由控制棒故障引起的未能紧急停堆的预期瞬态（ATWS）时，应急硼注入系统应能自动投入运行，保证堆芯处于次临界状态。

###### 3) 接口

与应急硼注入系统接口的系统如下：

- a. 安全注入系统，应急硼注入系统借用安注系统注入管线向反应堆冷却剂系统注入浓硼酸；
- b. 反应堆硼和水补给系统，为应急硼注入系统提供合适浓度的硼酸溶液；
- c. 核取样系统，应急硼注入系统水质监测；
- d. 核岛排气和疏水系统(第 2 章)，收集应急硼注入系统的疏水和排气；
- e. 1E 级电力系统(第 11 章)，为应急硼注入系统的电动泵、电动阀以及关键的控制、仪表提供电源；
- f. 应急硼注入系统和仪表与控制系统(第 10 章)的接口。

##### 2.4.2.4.2 性能要求

###### 1) 系统流量

- a. 最小流量下引入的负反应性能够补偿反应堆冷却剂系统因冷却和氙毒减少所引入的正反应性，即在事故后堆芯冷却过程中，一回路冷却剂中的硼浓度必须保证堆芯次临界并保持所要求的停堆深度。该流量还应叠加如下效应：

- 一回路破口导致的破口流失；
- 单一故障。

- b. 使用应急硼注入系统注硼的冷却阶段需要保证稳压器安全阀不打开、稳压器不满溢，即应急硼注入系统的最大流量不能使稳压器满溢并导致稳压器安全阀开启，保证一回路压力边界的完整性。

###### 2) 设计压力

应急硼注泵的压头应保证在 ATWS 工况下能向一回路注入硼酸溶液，并且满足如下要求：

- a. 对于丧失正常给水的 ATWS，一回路压力不应超过最大允许压力；
- b. 对于电厂辅助设备丧失非应急交流电源的 ATWS，偏离泡核沸腾比率（DNBR）必须大于限制值。

###### 3) 水源

应急硼酸箱内的硼酸总装量应保证电厂进入安全停堆后停堆深度满足要求。

#### 4) 应急硼注泵启动

应急硼注入系统应能自动或手动启动。在设计基准工况下,当堆芯达到可控状态后,需要操纵员手动启动应急硼注入系统。在ATWS工况下,要求应急硼注入系统应能由ATWS信号处罚自动启动。

### 2.4.2.4.3 系统特征

#### 1) 系统配置

应急硼注入系统应由至少两列构成,每列包含一台电动泵和一个应急硼酸箱,应急给硼注入泵从应硼酸箱取水,进入安全壳后借用安注系统的一回路注入管线,将浓硼酸注入一回路,以控制堆芯反应性。

##### a. 系列布置

应急硼注入系统的每个独立列应布置在不同的房间,实现列与列之间的实体隔离。安全列之间尽量不采用交叉连接,除非证明对安全、可利用率、可运行性有改善。

##### b. 泵进口管线

泵吸入管设计应能保证满足泵启动和稳态运行的净正吸入压头(NPSH)要求。应当使得当水箱在最低水位和一回路为大气压时从水箱到泵进口部分不会出现过大的压降。

#### 2) 附加的系统要求

##### a. 试验能力

应有措施允许对应急硼注入泵和阀们进行定期试验,对整个系统运行进行功能性试验。试验时应防止浓硼酸进入反应堆冷却剂系统,导致意外的反应性波动。为了能够电动阀进行现场试验,应当提供合适的通道。应有措施能在反应堆运行情况下以设计流量进行泵试验。

##### b. 结构

应急硼注入系统的主要设备应设计成抗震I类和机械设备规范要求应为M3级,但在反应堆冷却剂系统压力边界隔离阀至一回路接口部分应为M1级。

##### c. 保温和伴热

应急硼注入系统在备用时管路中充满浓度较高的硼酸溶液,因此必须有安全级的暖通系统或保温和伴热系统维持管路和设备中硼酸温度高于规定的温度值,该温度下对应的硼酸溶解度不低于应急硼注入系统的硼酸浓度,以防止硼结晶。

### 2.4.2.4.4 关键设备特性

#### 1) 泵

应急硼注入系统应至少使用两台电动泵。每一台泵的流量都应能满足2.4.2.4.3的要求。此外,还应满足如下特性:

- a. 应使用低流量、高扬程容积泵;
- b. 泵的冷却方式为空冷;
- c. 泵的出口和入口应为法兰连接,并有泵壳疏水装置,以便维修;
- d. 电动泵应能在电厂设计者所规定的降电压和降频率的情况下启动运行。

#### 2) 水箱

- a. 应急硼注入系统应有至少两个安全级的水箱。水箱采用抗震设计,每个可以供应应急硼注入总需求水量的 100%。
- b. 在两个应急硼酸箱之间设置连接管线,以便允许向所有应急硼注入泵提供浓硼酸。

#### 3) 阀门

- a. 第 1 章中对于反应堆系统使用阀门的一般要求,适用于应急硼注入系统中的

阀门。

- b. 电动泵出口管线上的电动隔离阀应由 IE 级电源供电。这些阀门应能手动操作，以便在丧失电源时使用。
- c. 设计者应对要求锁定的和/或在控制室提供有位置指示的所有阀门加以标识。

#### 2.4.2.4.5 仪表和控制

- 1) 电厂设计者应对应急硼注入系统的每一个自动控制回路进行分析以确认在各种可能的运行条件下能实现稳定运行。
- 2) 电厂设计者应在主控制室和遥控停堆站提供监测能力和报警。包括下列内容：
  - a. 泵出口压力；
  - b. 泵进口压力(有低压报警)；
  - c. 泵流量监测；
  - d. 应急硼酸箱水位(有水位报警)；
  - e. 应急硼酸箱温度监测（有低温报警）；
  - f. 阀位指示。

#### 2.4.2.4.6 维修

每个换料周期在停堆期间对应急给水系统进行一次预定维修工作。

#### 2.4.2.5 蒸汽排大气系统

##### 2.4.2.5.1 定义

###### 1) 目的

蒸汽排大气系统用于执行下述功能：

- a. 在机组启动期间，可通过主蒸汽释放阀排出蒸汽，控制一回路温度；
- b. 通过关闭主蒸汽释放隔离阀，限制二次侧排热能力增加及放射性外泄；
- c. 通过主蒸汽释放阀（MSRIV 及 MSRCV）的蒸汽排放，确保二次侧压力边界的完整性；
- d. 如果凝汽器不可用，通过主蒸汽释放阀排出多余蒸汽；
- e. 在发生中小 LOCA 或 SGTR 时，通过主蒸汽释放阀降低一回路压力和温度，称为快速冷却。

###### 2) 系统边界

- a. 蒸汽排放管道；
- b. 主蒸汽释放隔离阀（MSRIV）；
- c. 主蒸汽释放调节阀（MSRCV）；
- d. 消音器。

###### 3) 接口

与蒸汽排大气系统接口的系统主要有：

- a. 主蒸汽系统；
- b. 核岛疏水排气系统。

##### 2.4.2.5.2 性能要求

- 1) 发生二次侧排热增加事故时，通过关闭主蒸汽释放隔离阀限制一回路过冷；
- 2) 在 DBC2-4 事故工况下，蒸汽排大气系统通过主蒸汽管道将蒸汽排放到大气



(凝汽器不可用时), 导出堆芯余热, 冷却一回路, 直到机组达到可控状态或安全停堆状态;

3) 在DEC-A事故工况下, 蒸汽排大气系统通过主蒸汽管道将蒸汽排放到大气(凝汽器不可用时), 冷却一回路, 直到机组达到最终状态;

4) 在发生小、中破口失水事故或SGTR时, 主蒸汽系统通过蒸汽排大气系统向大气排放蒸汽, 导出衰变热, 对一回路降温降压, 达到安全注入系统注入的压力条件, 这个过程称为快速冷却;

5) 快速冷却完成后, 通过提高主蒸汽释放阀的整定值, 参与隔离受损SG;

6) 超压事故工况下, 通过MSSV及主蒸汽释放阀(MSRIV/MSRCV)的蒸汽排放, 确保二次侧压力边界的完整性。

#### 2.4.2.5.3 系统特征

主蒸汽管道上的主蒸汽释放阀应布置在安全壳外主蒸汽隔离阀前, 并排向大气。

#### 2.4.2.5.4 关键设备特性

1) 主蒸汽释放阀

a. 每条主蒸汽管道至少安装一台主蒸汽释放隔离阀和一台主蒸汽释放调节阀, 主蒸汽释放隔离阀应布置在主蒸汽释放调节阀上游;

b. 一旦丧失电源或控制信号, 主蒸汽释放阀应维持隔离。阀门误开引起的瞬态应经过事故分析评价, 并满足相应准则;

c. 管道和阀门的布置应尽量减少对附件的荷载。需要根据 RCCM 规范的要求对设计进行分析确认;

d. 阀门应直接向大气排放, 每个阀门尽量配置独立的排放管道;

e. 释放阀的排放管道设计时需要防止凝结水在管道中的聚集, 并且避免背压建立后在阀门动作时产生的瞬态;

f. 阀门应便于快速更换修理。阀门内部构件应能在不拆卸整体阀门时进行拆卸;

g. 阀门的设计应考虑电站运行工况及内外部灾害带来的荷载;

h. 在环境鉴定时, 需要考虑在流体为汽水混合物的情况下运行(包括由汽变水过程中的水锤);

i. 阀门的开启时间需要满足应对快速冷却及超压保护的要求;

j. 阀门的关闭时间需要满足应对蒸汽流量过度增加事故及二次侧隔离的要求。

#### 2.4.2.5.5 仪表和控制

1) 主蒸汽释放阀:

a. 同时支持自动和手动控制模式;

b. 自动控制不因单独信号失效导致一个以上的阀门开启;

c. 检测到蒸汽流量过度增加时, 执行隔离功能;

d. 检测到主蒸汽压力超过整定值时, 执行超压保护功能;

e. 检测到快速冷却信号后, 执行快速冷却功能。

#### 2.4.2.5.6 维修

更换管道或管束时应不需要拆卸墙、主要管道或电缆托盘。外部和上部的工程移动墙是可以的。在设计阶段以下系统的维修方案应特别考虑:

垂直布置的大阀门处应设有足够的维修空间和维修通道;

对于小拆卸的阀门部件，应考虑足够的空间和起重措施；  
设备管道布置确保维修时的人员安全。

### 2.4.3 设计扩展工况应对措施

#### 2.4.3.1 二次侧非能动余热排出系统

##### 2.4.3.1.1 定义

###### 1) 目的

在全部丧失给水情况下，排出一回路热量。

###### 2) 系统边界

- a. 入口隔离阀；
  - b. 出口隔离阀；
  - c. 出口止回阀；
  - d. 冷凝器。
- ###### 3) 接口
- a. 主蒸汽系统为本系统提供蒸汽；
  - b. 主给水系统或应急给水系统接收冷凝水。

##### 2.4.3.1.2 性能要求

二次侧非能动余热排出系统的定容工况为全部丧失给水。本系统的设计主要针对DEC事故，应对的工况需要应急给水系统投运以排出一回路热量但未投运的事故工况。

在SGTR工况下，作为SG压力边界范围的设备参与隔离功能。

##### 2.4.3.1.3 系统特征

###### 1) 布置

本系统的冷热芯高度差需满足工艺要求，即冷凝器出口管嘴与回水管路的SG入口管嘴之间的高度差应足够。

按流体方向，蒸汽入口管道应保持上行趋势；冷凝回流管道应按照先下行后上行的方式，最低点应低于回流管道进入SG的管嘴位置，以使整个回流管道形成U型结构，确保回流管道中形成水柱，以利于系统稳定运行。

作为应急给水系统的后备，本系统需与应急给水系统之间进行实体隔离。

本系统设备应布置在合理的辐射防护分区。

设备应具备良好的可达性，有足够的空间来维护和更换设备。

###### 2) 防烫伤要求

为了人员安全，人员可达的设备或管道，表面温度高的需要进行保温，以防止人员烫伤。该要求适用于管道和所有阀门。

###### 3) 预防流体动态效应（汽锤）的相关要求

高温蒸汽与冷水接触时，可能会产生快速汽锤现象，造成压力冲击、管道振动等影响。在系统设计中，通过尽量减小高温蒸汽与冷水的接触面积，并设计合理的隔离阀开启时间来缓和蒸汽冷却速率，避免不可接受的瞬态发生。

##### 2.4.3.1.4 关键设备特性

本系统的主要设备为冷凝器。

冷凝器为C型结构，浸泡于外挂水箱底部。

作为自然循环的关键设备，冷凝器应有足够的换热能力，以保证在事故后能长期排出一回路产生的热量，从而缓解事故工况下一、二回路的过热，防止事故进一步恶化。

#### 2.4.3.1.5 仪表和控制

本系统所有能动阀门均可在主控制室（包括后备盘）及远程停堆站手动操作，蒸汽及凝结水管道上的阀门可根据系统启动信号自动开启。在主控制室和后备盘显示阀门的状态，对能动阀门在主控制室的操作按钮加锁，以防止在电站正常运行时的误动作。

#### 2.4.3.1.6 维修

初始维修计划在设备相关供应商反馈后进行制定。

反应堆停堆期间，可以隔离冷凝器进行维修。

### 2.4.3.2 DEC 工况安全壳热量导出系统

#### 2.4.3.2.1 定义

##### 1) 概述

DEC工况下安全壳热量导出系统根据采用的驱动方式不同可以有能动方式和非能动方式。

能动方式的系统配置主要由内置换料水箱取水口过滤器、安全壳热量导出泵、安全壳热量导出热交换器、以及相关管道和阀门组成，能动方式一般由设备冷却水系统进行冷却，也可以采用多样化冷链系统导出热量。

非能动方式的系统配置主要由非能动安全壳热量导出热交换、安全壳外冷却水箱、以及相关管道和阀门组成。

##### 2) 系统功能

DEC工况安全壳热量导出系统作为严重事故预防和缓解措施的一部分，用于在DBC工况下安全壳热量导出系统功能失效后，导出安全壳热量，限制安全壳超压，保证安全壳的完整性。

##### 3) 接口

a. 与能动方式的安全壳热量导出系统接口的系统如下：

- 设备冷却水系统为能动型安全壳热量导出换热器、安全壳热量导出泵电机和轴封提供冷却水；
- 多样化冷链系统在设备冷却水系统失效后，为能动型安全壳热量导出换热器、安全壳热量导出泵电机和轴封提供冷却水；
- 除盐水分配系统为安全壳热量导出系统的冲洗提供除盐水；
- 核取样系统为安全壳热量导出热交换器下游提供取样监测；
- 交流供电系统为安全壳热量导出泵提供动力电源；
- 直流电源供电系统为管线相关阀门提供控制电源；
- 安全壳热量导出系统与人机接口系统的接口。

b. 与非能动方式的安全壳热量导出系统接口的系统如下：

- 核岛除盐水分配系统为非能动型安全壳热量导出系统的冲洗提供除盐水，为安全壳外冷却水箱提供补水；
- 直流电源供电系统给安全壳隔离阀提供动力电源；
- 人机接口系统为系统的自动启动和停运提供控制。

#### 2.4.3.2.2 性能要求

DEC工况下安全壳热量导出系统,在DBC安全壳热量导出系统失效的情况下,无需操作人员干预,可以将安全壳温度、压力降低到可以接受的限值内,并能维持至少72小时的持续热量导出而安全壳不会超压。

在事故后12小时宽限期后启动安全壳热量导出系统,可以使安全壳内的压力维持在安全壳设计压力以下。

在事故后长期运行期间,安全壳热量导出系统可以使安全壳压力维持在0.2MPa abs以下。

非能动型安全壳热量导出系统的安全外冷却水箱能提供72小时冷却水。

#### 2.4.3.2.3 系统特征

##### 1) 能动型安全壳热量导出系统

对于能动型安全壳热量导出系统,尽量配置两列以上的冷却系列,分两列冷却系列尽量能实现物理分离和实体隔离要求。由于在DEC工况下系统输送的是高放射性流体,因此建议整个系统布置在控制区。

能动型安全壳热量导出泵的布置应保证泵有足够的净正吸入压头。

能动型安全壳热量导出系统布置在安全壳外的设备应在机组正常运行期间可以进行维修操作。

对于系统主要的仪表应尽量布置在安全壳厂房以外,以避免不必要的设备鉴定需求。

系统应设置合理的疏水排气接口,以允许在电厂正常运行期间的对系统的维修操作和维修后充排操作。

##### 2) 非能动型安全壳热量导出系统

非能动型安全壳热量导出系统的冷却水池和换热器的布置应保证足够的高度差,以便在事故期间实现非能动方式导出安全壳热量。

非能动安全壳热量导出热交换器应尽量沿着安全壳内壳圆周布置,同时应避免由于管道设备破裂甩击对系统管道和设备的损坏。

系统设备的布置应考虑便于日常维护和维修,安全壳外的设备在电站正常运行期间能进行维修操作。

对于系统主要的仪表应尽量布置在安全壳厂房以外,以避免不必要的设备鉴定需求。

系统应设置合理的疏水排气接口,以允许在电厂正常运行期间的对系统的维修操作和维修后充排操作。

在电厂正常运行期间,应提供对安全壳外冷却水箱内水进行取样的手段,并提供水化学处理的手段保证水箱内水的水化学要求。

#### 2.4.3.2.4 关键设备特性

能动型安全壳热量导出泵的有效汽蚀余量应高于设备厂家确定的必需汽蚀余量,在计算泵的有效汽蚀余量时应按照电网频率50.5Hz时的泵流量,并考虑适当的不确定度和事故后内置换料水箱的最低液位和介质最高温度。还需要考虑适当的冷却水流量保证泵电机和轴封的有效冷却。

能动型安全壳热量导出换热器应选取合理的热负荷作为设计工况,保证在所有运行范围能保证功能的执行。建议采用管壳式热交换执行冷却功能。

非能动型安全壳热量导出系统的热交换器布置在安全壳内,通过冷凝安全壳内的高温蒸汽或蒸汽-空气混合物来实现导出安全壳内热量。在进行换热器设计时应考虑足够的传热管高度保证非能动冷却的驱动力。应考虑应对DEC工况的换热器的安全等级至少为F-SC3级。

非能动型安全壳热量导出系统的安全壳外冷却水池应设计为60年寿期内无须进行大规模清洗而保持完整性。冷却水箱应具备隔热措施和配置非安全级的加热装置保证冷却水箱内

水温处于正常范围。应设计合理的水质净化装置保证水质满足水化学相关要求。水池应允许进入对水箱内部定期检查和清洗。

#### 2.4.3.2.5 仪表和控制

能动型安全壳热量导出系统应对DEC工况时可以采用手动启动的方式投运。操作员根据事故进程，在事故后12小时不干预的情况下如果存在安全壳压力高信号，可以手动启动安全壳热量导出系统对安全壳进行冷却。

非能动安全壳热量导出系统应对DEC工况是应采用自动启动的方式投运。采用安全壳压力高4信号叠加DBC安全壳热量导出系统功能失效信号来自动触发非能动安全壳热量导出系统启动。也可以通过操作员手动启动该系统。

#### 2.4.3.2.6 维修

能动型安全壳热量导出系统应设计成运行在维修前和维修后，对系统管网、泵和换热器进行疏排和清洗，以便于定期维护。

非能动安全壳热量导出系统应包含如下维修和检查操作：

- 1) 检查安全壳外冷却水池的内、外表面；
- 2) 检查供水和排水管线；
- 3) 能不从冷却水箱中排水的情况下维修或替换管线的隔离阀；
- 4) 替换所有的仪表和控制部件。

#### 2.4.3.3 堆腔注水冷却系统

##### 2.4.3.3.1 定义

###### 1) 范围

堆腔注水冷却系统包括非能动堆腔注水箱、堆腔注水泵、多样化水源接口以及相关阀门、管线、控制和仪表，设有非能动子系统和能动子系统。

###### 2) 功能

在严重事故过程中，堆腔注水冷却系统向堆坑注入足够水量进行压力容器外部冷却，将熔融碎片、放射性物质滞留在压力容器中。堆腔注水冷却系统主要履行放射性包容的功能。

###### a. 严重事故时放射性包容功能

- 严重事故过程中，堆腔注水冷却系统可根据需要向堆坑注入足够水量进行压力容器外部冷却，将熔融碎片、放射性物质滞留在压力容器中。
- 对压力容器进行外部冷却时，使用能动或非能动的方式使合适流量的水流过压力容器外表面，将热量带走。
- 在发生不需要堆腔注水冷却系统运行的事故和电站正常运行期间，堆腔注水冷却系统参与安全壳隔离。
- 在发生需要堆腔注水冷却系统运行的事故过程中，堆腔注水冷却系统位于安全壳外的部分构成第三道屏障的一部分，保存安全壳的完整性和包容放射性物质。

###### b. 净化功能

非能动堆腔注水箱中的水或硼水应可净化，可与其他系统共用净化装置。

###### c. 其他功能

视情况，在不影响上述功能和系统配置基本不变的前提下，堆腔注水冷却系统也可执行其他功能。

例如：维修冷停堆阶段，如果完全丧失冷链或发生全厂断电事故，非能动注水箱通过可用管线向一回路注入含硼水，实施堆内冷却。

### 3) 接口

堆腔注水冷却系统与电厂主要的接口列表如下。

- a. 安全壳喷淋系统；
- b. 燃料水池系统；
- c. 消防水系统；
- d. 仪表和控制系统；
- e. 电气系统。

## 2.4.3.3.2 性能要求

### 1) 性能

#### a. 严重事故时放射性包容

- 严重事故过程中,堆腔注水冷却系统可根据需要向堆坑注入足够水量进行压力容器外部冷却,将熔融碎片、放射性物质滞留在压力容器中。
- 该系统启动后,应在 30 分钟内将堆腔注满水,可使用能动或非能动子系统实现。
- 堆腔注满水后,应持续对堆腔补水,以弥补因蒸发而损失的水体积。

#### b. 净化功能

非能动堆腔注水箱中的水或硼水应定期净化,保持水质稳定。

#### c. 容量

- 堆腔注水冷却系统需要有足够的排热能力和足够的冷却水流量,配套合适的容量的能动系列和非能动系列水源,可实现短时间内大流量注满堆腔和长期小流量补水,满足性能和时间要求的同时,避免过大的冗余,以提升电厂的经济性。
- 系统启动后,30 分钟内将堆腔注满水。
- 持续补水的时间应满足严重事故的应对策略要求。
- 堆腔注满水后,应持续对堆腔补水,以弥补因蒸发而损失的水体积。补水流量需考虑所用水源的过冷程度。
- 持续补水的时间应满足严重事故的应对策略要求。
- 应考虑严重事故时使用临时水源及设置合适的接入位置。

### 2) 系统设计

非能动堆腔注水箱内水应定期净化,避免水质变差,导致堵塞管道影响冷却效果。可与其他系统共用水质净化装置,无需单独设置水质净化装置。

向系统初次充水的人工操作应能在一个合理的时间(约4小时)内完成,可远距离手动操作。

### 3) 泄漏检测

非能动堆腔注水箱应具备监测措施。应设置一个连续在线监测系统,以探测和鉴别箱体泄漏。

## 2.4.3.3.3 系统特征

堆腔注水冷却系统由非能动子系统和能动子系统组成。

非能动子系统的非能动堆腔注水箱可布置在安全壳内,与堆腔保持合适的高度差,保证箱内水可按指定流量自流进入堆腔,实施非能动的堆腔注水冷却功能。

能动子系统冗余设计,每列由独立的设备、管道组合而成,有泵、控制和测量仪表,以及为调节流量所需的相关设备。

用于系统运行和监测的仪表应进行严重事故环境条件下的鉴定,以保证其在严重事故工况下的可用性。

#### 2.4.3.3.4 关键设备特性

堆腔注水泵：

- 1) 泵必须装配机械轴密封，密封应可快速更换。密封的引漏用管子输送到地坑或疏水箱。
- 2) 可用离心泵，重点考虑净正吸入压头的可利用率和可维修性。
- 3) 泵必须能在最大流量下运行，不会因此导致泵或系统的不稳定性。
- 4) 泵应在各种工况下保持流量稳定和足够的气蚀余量，使用安全壳内水源时注意安全壳内的温度、压力环境。

#### 2.4.3.4 可燃气体控制系统

##### 2.4.3.4.1 定义

###### 1) 范围

可燃气体控制由非能动氢复合器和氢气监测系统组成。包括固有的非能动特性（即安全壳容积、大气自然混合特性等）以及特定的硬件系统（如非能动氢复合器、仪表和控制）。

###### 2) 功能

电厂设计应提供控制氢产生、释放和燃烧的措施以保证当事故发生和事故后产生氢时所需事故防范和缓解功能能够实施。可燃气体控制方法应有能力实施下列功能：

- a. 控制安全壳内的氢气浓度，包括设计基准事故工况下的消氢和严重事故工况下的消氢；
- b. 确保维持安全壳结构完整性；
- c. 测量安全壳内氢气的浓度。

###### 3) 接口

可燃气体控制系统除了供电系统外，无需其它支持系统。

##### 2.4.3.4.2 性能要求

- 1) 可燃气体控制措施应满足执照申请设计基准和安全裕量基准要求。
- 2) 对非惰性安全壳大气应能通过自然循环进行大气混合，从而避免氢气的局部燃爆。氢气复合器的运行可以加强混合效果。
- 3) 在安全壳内应提供测量氢气浓度的手段。
- 4) 电厂设计应实施分析以提供对活性燃料包壳氧化产生氢以及事故后辐射分解产生氢和氧的后果的评价。该分析应当：
  - a. 使用事故序列，该序列描述在发生导致包壳氧化的事故期间和事故之后反应堆系统的行为；
  - b. 包含对所使用事故序列的支持性说明；
  - c. 包括从恶化状态恢复周期的考虑；
  - d. 设计应评估蒸汽冷凝在安全壳穹顶内表面上对氢分层潜在的影响。

##### 2.4.3.4.3 系统特征

###### 1) 非能动氢复合器

非能动氢复合器由一系列的非能动氢复合器组成。非能动氢复合器没有能动部件，自动催化消氢，不需要电源以及其它支持系统。在机组正常运行时，非能动氢复合器处于备用状态；当安全壳内的氢浓度达到设备的启动阈值时，非能动氢复合器自动工作，使安全壳内气体混合物中的氢气和氧气在催化剂的催化复合作用下成为水蒸汽，可以有效地将安全壳内的

氢浓度控制在安全范围之内。与此同时，非能动氢复合器启动后的烟囱效应，可以有效的促进安全壳大气的自然对流和搅浑，避免局部氢气浓度过高达到爆炸限值。

对于设计基准事故下的消氢，非能动氢复合器采用FC2级的非能动氢复合器来实现消氢功能。设计时考虑了单一故障准则和冗余性要求，设置了两台非能动氢复合器。

对于超设计基准事故下的消氢，系统设置了27台FC3级的非能动氢气复合器，不考虑单一故障准则要求。

## 2) 氢气监测系统

氢气监测系统由两个冗余的系列组成，每列包含布置在安全壳穹顶和环形空间的5个氢传感器以及安全壳外的仪控处理柜单元组成。

系统连续在线监测安全壳内的氢气浓度，并且在主控室和远程停堆站显示。当氢气浓度高过报警值会产生报警。氢气监测系统处理柜将测量的氢气浓度信号、故障信号、设备运行状态指示分别送至主控室严重事故控制盘和DCS，在严重事故控制盘和DCS上进行显示和报警。操作员可从严重事故控制盘和DCS上对系统进行启动和停运操作。

### 2.4.3.4.4 关键设备特性

#### 1) 非能动氢复合器

非能动氢复合器由不锈钢壳体和催化剂单元组成。复合器的外部金属壳体引导含氢气体向上流过装置（气体从复合器的底部进入，从顶部排出）。壳体内部有一定数量的涂有催化活性涂层的耐热不锈钢板，垂直插在箱体底部的框架上，在定期检查和试验时可以方便的取出。复合器内部金属板的催化剂涂层具有防水和耐热性，可以保证设备长时间有效。催化剂在各种工况下（包括在不利的严重事故的环境条件下，如释放出堆气溶胶、喷淋系统投入运行和电缆燃烧等工况）的性能都得到保证。

#### 2) 氢传感器

氢气监测系统采用就地氢传感器，通过传感器内的敏感元件或二次仪表，将氢浓度转化成电信号，通过电缆传输到安全壳外。氢气监测系统的运行时间为24小时，长期考虑7天。

### 2.4.3.4.5 仪表和控制

可燃气体控制系统满足反应堆仪表和控制的总要求。

### 2.4.3.4.6 维修

1) 非能动氢复合器催化板在安装前因经过供货厂家的抽样性能检验，性能满足技术规格书要求，设备安装后需对壳体和支撑进行目视检查。电厂运行后定期对非能动氢复合器的催化剂进行性能检查，如果试验中发现催化剂的性能下降，必须对催化金属板进行再生，再生的目的是恢复催化板的催化活性。

2) 电厂在役期间需定期对非能动氢复合器和氢传感器的壳体、支撑进行目视检查。

### 2.4.3.5 安全壳过滤排放系统

#### 2.4.3.5.1 定义

##### 1) 目的

在发生严重事故后，为保证安全壳内的压力不超过其承载限值，通过安全壳过滤排放系统主动卸压确保安全壳的完整性。

##### 2) 系统边界

安全壳内大气通过系统进口管线至两道安全隔离阀，然后经过一套过滤组合装置，再经限流孔板，反冲洗阀和爆破膜排放到烟囱。系统包括过滤组合装置所联接支持管线（氮气供



给管线、除盐水供给管线、疏水管线和连接到安全壳的废液回流管线), 和相应辐射监测仪表。

### 3) 接口

- a. 除盐水供给系统为系统充水, 过滤排放后用于清洗相关设备;
- b. 在烟囱前的排放管道上设置辐射监测仪, 用于监测系统排放气体中的放射性剂量;
- c. 安全壳泄漏率试验和监测系统用于系统安全壳隔离阀的泄漏回收;
- d. 核岛排气和疏水系统用于接收调试试验和配药期间化学加药箱的排水和正常运行期间文丘里水洗器内已变质的不合格药液。

## 2.4.3.5.2 性能要求

严重事故发生24小时后, 当安全壳内的压力值高于其设计压力时, 可通过手动开启安全壳隔离阀启动本系统。由现场应急指挥中心决定本系统的启动时机。在打开安全壳隔离阀至少30min之前, 应启动放射性活度监测仪(其启动时间需要30min), 在确认其能够正常工作之后, 再行开启安全壳隔离阀。

手动开启安全壳隔离阀是在屏蔽墙后执行远距离手动操作。

系统的设计需将向环境释放的放射性限制到了最低程度。

当发生低低液位报警时, 必须中断过滤排放, 只有在完成补液操作后才可以继续进行过滤排放。

## 2.4.3.5.3 系统特征

### 1) 系统配置

安全壳内大气通过安全壳过滤排放系统进口管线至两道安全隔离阀, 然后经过一套过滤组合装置, 再经反冲洗阀、限流孔板和爆破膜排放到烟囱。

过滤组合装置连接有4条管线, 分别为氮气供给管线、除盐水供给管线、疏水管线和连接到安全壳的废液回流管线。在排放到烟囱前设置一套辐射监测仪进行监测。

### 2) 系统运行要求

在电厂正常运行期间, 系统处于备用状态。

系统仅在严重事故工况下运行, 当安全壳压力超过其设计限值时, 系统开启对安全壳进行卸压。

通过远传手动开启安全壳隔离阀, 系统开始过滤排放安全壳气体。当爆破膜前管线内压力超过其爆破整定值时, 爆破膜爆破开启, 气体排向大气。

当安全壳压力约为其设计限值的一半时, 关闭安全壳隔离阀, 中断过滤排放, 避免安全壳由于水蒸汽冷凝产生负压。

当发生低低液位报警时, 必须中断过滤排放, 只有在完成补液操作后才可以继续进行过滤排放。

通过开启废液回流管线上的阀门, 将过滤容器内的废液回流到安全壳。

## 2.4.3.5.4 关键设备特性

### 1) 安全壳隔离阀

安全壳隔离阀是远距离手动隔离阀, 其远距离手动操作在屏蔽墙后执行。

### 2) 过滤组合装置

过滤组合装置内设置有过滤器, 内装有化学药, 可以有效的滞留排放气体中的放射性气溶胶和碘。

### 3) 限流孔板

在过滤组合装置后的出口管线上设置一个限流孔板,限制安全壳过滤排放系统的排放气体流量,使过滤组合装置可以保持最佳的过滤效果。

### 4) 爆破膜

在限流孔板后设置一个爆破膜,其爆破整定值可以维持安全壳过滤排放系统在备用模式下的充氮保护功能。

## 2.4.3.5.5 仪表和控制

系统需对过滤组合装置的液位和系统压力、系统流量进行监测,并将信号传送到主控。通过限位开关监测安全壳隔离阀位置(开或关)。

## 2.4.3.5.6 维修

每个换料周期进行一次预定的维护保养工作。

过滤组合装置中的容器每十年进行一次压力试验。

过滤组合装置内溶液在运行一年后进行化学分析,后续定期试验周期依据分析结果安排。

安全壳隔离阀每个换料周期进行一次功能检查,包含远传机构手动操作和报警传送到主控。

安全壳隔离阀每个换料周期进行一次密封性检查。

反冲洗阀每年进行一次功能检查,包含远传机构手动操作。

废液回流隔离阀每年进行一次功能检查,包含远传机构手动操作。

其它阀门每年进行一次功能检查。

安全阀每五年进行一次检查,维护时间间隔依据国家法规和机组设备规定而确定。

## 2.4.3.6 额外冷却系统

### 2.4.3.6.1 定义

#### 1) 概述

核电厂在部分DEC-A和DEC-B工况下,采用机械通风冷却塔及中间回路和终端回路,移出堆芯及安全壳内余热和乏燃料水池的衰变热。

#### 2) 系统功能

a. 在部分复杂事故序列(DEC-A)工况(如完全丧失热阱,全厂断电)及严重事故工况(DEC-B)下,通过冷却安全壳热量导出系统A列或B列移出堆芯及安全壳内余热;

b. 在部分DEC-A工况及严重事故工况(DEC-B)下,通过冷却反应堆水池和燃料水池冷却和处理系统A或B列移出燃料厂房乏燃料水池的衰变热。

#### 接口

接口系统信息仅为流体系统接口信息,不包含与电气和仪控系统的接口。

#### c. 用户系统

- 安全壳热量导出系统
- 反应堆换料水池和乏燃料水池冷却和处理系统

#### d. 支持系统

- 核岛除盐水分配系统
- 电站污水系统
- 饮用水系统
- 核岛排气和疏水系统

- 临时移动和补水设备系统
- 厂房通风系统

#### 2.4.3.6.2 性能要求

额外冷却系统是基于电厂运行工况（部分DEC-A 和DEC-B），需要导出的衰变热进行设计：

- 1) 冷却安全壳热量导出系统的A列或B列：最保守的工况为部分复杂事故序列（DEC-A）工况。
- 2) 冷却反应堆水池和燃料水池冷却和处理系统的A列或B列：最保守工况是机组在完全卸料状态，全堆芯组件卸出到乏燃料水池，此时发生全厂断电或完全丧失热阱。
- 3) 额外冷却系统机械通风冷却塔补给水池的容量可满足系统连续运行24小时需要的补充水量。采用饮用水系统补水，在饮用水系统不可用时，可通过临时移动补水泵等设备抽取其他水源（甚至海水）补充到冷却塔集水池。

#### 2.4.3.6.3 系统特征

- 1) 电厂正常运行工况，额外冷却系统不投入运行，处于备用状态。终端回路和中间回路均充满水，处于备用状态，同时补给水池保持在正常水位。
- 2) 电厂事故工况，在电厂DBC2-4 事故工况下，额外冷却系统同样处于备用状态。
- 3) DEC工况，DEC-A-电厂功率运行工况完全丧失RRI/SEC冷却系统叠加主泵轴封破裂，电厂功率运行期间，如果发生RRI/SEC冷却系统完全丧失，同时主泵轴封破裂，堆芯大部分余热通过蒸汽发生器二次侧带出，其余部分由冷却剂通过主泵轴封破口蒸发带入安全壳内，导致安全壳和安全壳内置换料水箱水温上升，当安全壳内置换料水箱水温上升到100℃时，需手动启动额外冷却系统，冷却安全壳热量导出系统确保安全壳内置换料水箱的水温低于120℃，冷却反应堆水池和乏燃料水池保证乏池温度不超过限值。
- 4) DEC-A-电厂停堆工况下完全丧失 RRI/SEC 冷却系统，在电厂停堆工况下，由于某种原因而完全丧失正常冷链系统 RRI/SEC时，经短期的滞后，反应堆冷却剂系统相关的冷却系统丧失，此时，机组不可能返回到通过二回路导出热量。堆芯的衰变热使一回路介质蒸发，以带走热量。随着蒸汽的蒸发，安全壳的压力温度上升，达到阈值时，需要投运安全壳热量导出系统和额外冷却系统，通过额外冷却系统将安全壳内热量排至最终热阱—大气，同时通过额外冷却系统冷却反应堆水池和乏燃料水池冷却系统保证乏池温度不超过限值。
- 5) DEC-B-严重事故工况，考虑到安全壳（容积、设计及热惯性）和安全壳内置换料水箱特性，在严重事故发生后 12小时内，即使安全壳内的热量不被排出，安全壳内的压力仍然低于其设计压力。进入严重事故后12小时，启动一列安全壳热量导出系统，通过安全壳热量导出系统和额外冷却系统投运将安全壳内的热量排至最终热阱—大气，将安全壳压力降至设计压力以下，此时额外冷却系统还需冷却反应堆水池和乏燃料水池冷却系统。

#### 2.4.3.6.4 关键设备特性

- 1) 中间循环泵

由电动机直接驱动的卧式离心泵。电动机冷却方式为空气冷却。电动机由 380V 交流电

源供电，且连接应急柴油机、全厂断电柴油机和移动电源供电。

#### 2) 中间换热器

为板式换热器，换热器冷侧流体按海水设计，热侧流体按除盐水设计，换热板采用钛板材料。

#### 3) 中间波动箱

通过压缩空气维持中间回路的运行压力高于用户介质侧的运行压力，确保换热器破损泄漏时安全壳热量导出系统侧的放射性流体不流入额外冷却系统。

#### 4) 终端循环泵

由电动机直接驱动的卧式离心泵。电动机冷却方式为空气冷却。电动机为 380V 电源供电，且连接应急柴油机、全厂断电柴油机和移动电源供电。

#### 5) 终端过滤器

额外冷却系统终端回路取水口采用非能动筛网过滤器，主体材料采用耐海水不锈钢，用于对终端回路的淡水/海水进行粗过滤。终端过滤器位于中间换热器冷侧入口端，用于对终端回路的淡水/海水进行细过滤。

#### 6) 冷却塔

采用抗震机械通风冷却塔，热负荷按用户最大可能的导出热量设计。补给水池储水量满足额外冷却系统连续运行 24 小时的使用要求。

### 2.4.3.6.5 仪表和控制

额外冷却系统的投运和退出全部通过操作员手动实现，为了从控制室可以监控回路的状态，终端回路主要阀门设置阀位监测开关。

额外冷却系统中间回路设置承压波动箱，保持中间回路水装量以及压力的稳定。波动箱内充有压缩空气确保系统内的压力大于安全壳热量导出系统的运行压力，箱内的压力随水位变化而变化，但在系统运行工况时，箱内水位必须保持在 MIN1 和 MAX1 之间。

### 2.4.3.6.6 维修

在机组正常运行期间，可对额外冷却系统的主要设备（泵、换热器、过滤器、阀门等）进行预防性维修。

## 2.5 核辅助系统

### 2.5.1 通用要求

#### 2.5.1.1 概述

##### 2.5.1.1.1 通用要求

本节以下所列的通用要求均适用于核辅助系统该类的所有系统。

- 1) 系统要求；
- 2) 设备要求；
- 3) 分析；
- 4) 试验。

##### 2.5.1.1.2 补充要求

第2.5.2~2.5.8节对乏燃料水池和换料水池冷却和净化处理系统、设备冷却水系统、重要厂用水系统、蒸汽发生器排污系统、核取样系统、气体相关系统、水化学相关系统列出了补充要求。

### 2.5.1.2 系统要求

#### 1) 正常流速

正常运行工况下冷却用未经处理的水（以下简称“生水”）流速不应超过3.65m/s，不低于2.45m/s。如果生水系统直接使用碳钢管道，则流速应低于2.45m/s。

#### 2) 疏水排气

含水管道所有的高点必须设置排气，所有的低点必须设置疏水。自动排气装置不应用于生水系统上，可用于净化后的水系统，使用时必须设置直径足够大排气管道和隔离排气管路的阀门。

#### 3) 管道布置

管道布置应使局部高点和低点的数量最少。电厂设计人员应保证管道的各个部分均能疏水和/或排气，排气应易于操作。

#### 4) 水锤

含水管道排气点布置必须便于系统运行，使管道保持充满水的状态以减少泵起动后发生水锤的几率。

#### 5) 冲洗管道

管道在全流量运行时如有不能冲洗到的死角，必须采取措施使之可被冲洗到。

#### 6) 在役检查

系统设计应包括安全相关的泵和阀门在役试验的措施，试验用的管路应系统图中画出。

### 2.5.1.3 设备通用要求

#### 2.5.1.3.1 阀门

在手动操作不可行或安全功能有需要的地方应设置远程电动驱动装置。电厂设计者应确定每个远程驱动阀门的功能并证明远距离操作的要求是合适的。大口径阀门（大于DN600）应设置动力辅助操作装置。

所有就地操作和远程操作的阀门应设置在不阻碍、可充分接近的位置，以便可以就地操作和拆卸修理。

系统的设计应使调节阀的数量最少。

电厂设计人员在设计时应执行阀门在役检查和试验的规定。应指明在每次计划停堆期间必须检验和维修的阀门。

阀门应只选择被那些被证明有能力在本系统介质环境（化学性质、温度、压力）中能执行其功能且可靠运行的阀门，证明方式应包括试验验证。

#### 2.5.1.3.2 过滤器

必须留有足够的空间，以便取出过滤器芯进行清洗和对过滤器进行维修。

#### 2.5.1.3.3 孔板

孔板尺寸应使其产生的压降尽量低，以防止在正常运行条件下产生气蚀现象。可视情况使用双孔板或多级孔板。所有的孔板应有标记，指明规格和流动方向。

### 2.5.1.4 分析

#### 2.5.1.4.1 设计基准

电厂设计人员应对系统的设计基准进行分析。依据厂址特点对参考的电站作适应调整，应考虑以下几点：

成本/性能评价。

在各种工况下比如功率运行、停堆、非满功率运行以及事故工况，不同工况下系统的流量的变化关系，优化设计。

热工/应力和系统热工性能的分析。

#### 2.5.1.4.2 流体力学分析

对系统做详细的流体力学分析，分析时应使用最新的管道和部件信息，并采用部件可预期的退化（管道表面变粗糙和结垢、泵退化）情况。选用边界条件时需考虑各种运行工况（包括功率运行、部分功率运行、停堆），最终的流体力学分析报告应包括正常、最大、最小流量情况的结果。

#### 2.5.1.4.3 性能分析

必须对所有的系统进行详细的性能分析，以保证在所有相关厂址参数的包络条件下能满足全部设计基准要求和正常运行的要求。

#### 2.5.1.4.4 软件

分析时使用的商业软件应经过认证。

### 2.5.2 乏燃料水池和换料水池冷却和净化处理系统

#### 2.5.2.1 定义

本章节提供了华龙技术电厂乏燃料水池和换料水池冷却和净化系统的要求。

##### 1) 范围

在换料期间，“燃料水池系统”由通过燃料传输管道与换料水池（它包括堆内构件贮存坑）连接的乏燃料水池组成的，它们形成了一个共用水容积。在电厂正常运行下燃料传输通道、传输管以及换料池是排空的，只有乏燃料水池的水必须处理。

燃料水池冷却和净化系统包括不同水池的溢流收集系统、循环泵、热交换器以及返回水池的水管。净化回路用来净化乏燃料水池、换料水池以及安全壳内置换料水箱中的水。

##### 2) 功能

燃料水池冷却和净化系统主要功能如下：

- a. 将乏燃料水池的水温保持规定的温度限值以下（安全相关的）；
- b. 维持乏燃料水池、换料水池以及安全壳内置换料水箱水的质量处于化学、放射性和清洁度的规定限值之内（非安全相关）；
- c. 对乏燃料水池常规补水（非安全相关）；
- d. 对乏燃料水池的备用补水（非安全相关）；
- e. 为燃料厂房工作人员提供生物屏蔽条件。

##### 3) 接口

燃料池冷却和净化系统与下列电厂系统有接口：

- a. 乏燃料水池常规补水来自硼酸贮存箱；
- b. 再循环排放装置连接到硼回收系统；
- c. 设备冷却水系统向燃料池冷却和净化系统的热交换器和设备提供冷却水；
- d. 燃料水池冷却和净化系统为安全壳内置换料水箱提供净化功能，并且获得换料水池满水的水源。

#### 2.5.2.2 性能要求

### 1) 热负荷

系统设计需考虑以下热负荷：

- a. 正常功率运行工况最大热负荷为正常功率运行工况下，乏燃料水池中累积的最大贮存容量（预留一个完整堆芯燃料贮存位置）乏燃料产生的衰变热。
- b. 正常换料大修工况最大热负荷为正常功率运行工况最大热负荷加上乏燃料水池在换料过程中放入的停堆 100 小时后的一个完整堆芯燃料所产生的衰变热。
- c. 电厂异常工况最大热负荷由安全分析考虑的异常工况来确定。

### 2) 温度限值

正常功率运行工况和正常换料大修工况下，维持乏燃料水池的温度低于 50℃；

在设计基准事故工况下，维持乏燃料水池的温度低于 80℃。

### 3) 安全功能

燃料水池冷却和净化系统的乏燃料水池冷却功能应规定为安全相关级，并应符合以下要求：

- a. 在正常功率运行工况和正常换料大修工况下，系统应维持乏燃料水池水温度保持在 50℃以下。
- b. 在电厂异常工况最大热负荷或设计基准事故工况下，同时假定最不利单一故障，系统应保持乏燃料水池温度保持在 80℃以下。
- c. 系统不容许乏燃料水池水位降低到低于乏燃料冷却和放射性屏蔽所要求的水位。

### 4) 净化功能

- a. 系统应为乏燃料水池和安全壳内置换料水箱提供净化功能，排除微粒（包括腐蚀产物）、已溶化和未溶化的裂变产物以及水池中水表面的污物。水化学应符合相关要求。
- b. 净化功能设计流量应能满足乏燃料水池水质洁净度要求。
- c. 应提供 2×100%容量的净化装置，系统应允许二个装置同时运行。

### 5) 补水和充满功能

- a. 系统应维持乏燃料水位在规定的限值之内。最小水位应基于操纵员对乏燃料的辐射防护以及在常规工况下的蒸发损失。对超过最大运行水位应提供溢流保护。应提供主控中的手动控制。
- b. 在换料之前，系统应用含硼水(在规定限值之内)充满整个水池系统(包括换料池)，并且在换料操作完成后，将燃料贮存水池以外所有区域的水排净。系统应有足够的充排能力，换料水池的充排操作不应成为停堆换料安排的关键路径。

## 2.5.2.3 系统特征

- 1) 采用多列设备序列执行冷却功能，冷却列的数量应能满足系统冗余性要求和单一故障准则要求。
- 2) 乏燃料水池不得存在能使水位降到乏燃料上部最低水位以下的排水管线。
- 3) 燃料水池的水通常是再循环的。应从水池表面收集池水(通过撇渣器溢流堰或排水口)，通过净化单元和/或热交换器进行循环，再通过位于燃料水池足够低的扩散器返回确保充分搅浑。
- 4) 应提供措施，使安全壳内置换料水箱的水通过所要求的净化单元进行连续循环，以保持水的规定质量。
- 5) 应为安全级设备的在役检查和功能试验制订措施。
- 6) 应为换料水池和燃料传输通道的排水制订措施。
- 7) 系统设计应包括每个冗余系列能各自独立隔离的功能。

- 8) 系统应设计成能通过远程操作将系统中安全相关的冷却部分与非安全部分实施隔离。
- 9) 系统的管道设计中应含防虹吸的措施,以防止乏燃料水池由于系统中低于水池正常液位下方的管道或设备排水而导致意外疏水,保证能满足水位要求。
- 10) 用于系统排热的冷却水应取自设备冷却水系统。热交换器设备冷却水的压力应高于乏燃料水池侧的压力。

#### 2.5.2.4 关键设备特性

- 1) 乏燃料水池冷却
  - a. 冷却功能是安全相关的,设备序列中的每一个安全序列(即:泵、热交换器、阀门、仪表和控制器)应提供隔离的电源和冷却水,并且应满足有关隔离要求的专设安全功能要求。
  - b. 系统设计应包括搅混返回乏燃料水池水流的设施,以使整个具有满装载贮存架的水池的水温均衡。乏燃料水池温度差范围不宜大于 11℃。
- 2) 水的净化
  - a. 水净化装置设计要求应与化学和容积控制系统的除盐装置的要求相同。
  - b. 应提供日常维修操作的自动化,例如,树脂的填装以及卸除。
  - c. 换料水池的充水管线(取自安全壳内置换料水箱)应与净化单元相连接并且可以返回水源。
  - d. 乏燃料水池以及换料水池应设置撇沫装置,撇沫装置应与净化单元相连接,经净化后返回到水池。水池应设置溢流管接受水池的适当溢流。
- 3) 补水和充水
  - a. 对燃料贮存水池的常规补水应来自符合规定水化学要求的水源,不需要设计成抗震 I 类和安全级。针对华龙技术核电机组,该水源应是硼酸贮存箱。
  - b. 应提供一个乏燃料水池补充的备用方法。如果为此目的而使用生水,那么生水管线上应设置一个可拆卸的接头。
  - c. 换料水池充水应将净化单元相连接作为第一位水源。
- 4) 电源

电厂正常运行期间,电力应取自常规电厂辅助电源。

乏燃料水池的不同的冷却列应由不同的电气分区供电,并可在设计基准事故中失电工况下由应急柴油发电机保证供电。

为提高可用性,系统中两台净化泵宜由两个不同的电气分区供电。

安全壳隔离阀均需由应急柴油发电机和蓄电池供电。

水池取水管线上执行水池安全隔离功能的电动阀门需由应急柴油发电机和蓄电池供电,冗余设置的两个电动阀必须由不同的电气分区供电。

#### 2.5.2.5 仪表和控制

- 1) 测量仪表应包括:
  - a. 在主控室内,反应堆水池和乏燃料水池水位指示,以及低和高水位的报警;
  - b. 在主控室内,乏燃料水池温度指示,以及高温报警;
  - c. 系统压力指示器,用来监测泵运行状态以及严重的压力下降;
  - d. 为监测和评定系统和设备的性能和确定要求的操纵员行动所要求的流量、温度和其他测量数值。
- 2) 控制应包括以下项目:



- a. 净化设备自动控制的就地启动；
- b. 有关正常运行设备或过程异常采取纠正行动所要求的泵和阀门的主控室远距离控制。

#### 2.5.2.6 维修

乏燃料水池冷却回路自身的维修通常在功率运行期间，最好在循环末期。每次仅对一列进行维修，在此期间，使用另一列进行冷却。

除了反应堆厂房内的设备，净化和水传输回路可在机组功率运行期间进行维修。

换料停堆工况，反应堆水池排空后，可进行反应堆水池净化回路安全壳内部分和反应堆水池撇沫泵的维修。反应堆厂房外的反应堆水池净化回路可在机组功率运行期间进行维修。

除了燃料转运期间，乏燃料水池撇沫系统的维修可在机组功率运行时进行。

#### 2.5.3 设备冷却水系统

##### 2.5.3.1 定义

###### 1) 范围

设备冷却水系统履行安全相关和非安全相关的两类功能。

设备冷却水系统由泵、热交换器、波动箱、管道、阀门以及有关的控制和测量仪表所组成。

核岛所有设备，无论是与安全相关还是非安全相关，其冷却均由设备冷却水系统来完成（不含风冷设备）；不得直接使用厂用水冷却。

###### 2) 功能

###### a. 衰变热导出功能

设备冷却水系统与余热排出系统或安喷系统以及安全厂用水系统相连接，安全相关的衰变热导出功能如下：

- 当需要使电厂进入冷停堆状态时，导出堆芯衰变热和反应堆冷却剂系统的显热，以及冷停堆工况下导出堆芯的衰变热；
- 在失水事故后应通过安全壳喷淋系统换热器来导出堆芯衰变热和安全壳热量；
- 在内置换料水箱充水和排水期间，导出其热量；
- 导出来自乏燃料池的衰变热。

###### b. 废热导出功能

设备冷却水系统的安全相关废热导出功能如下（与安全厂用水系统一起运行）：

- 导出来自安全相关的冷冻机组的热量；
- 导出来自安全相关的设备的热量。
- 设备冷却水系统的非安全相关的废热导出功能如下：
- 来自反应堆非安全相关辅助系统的设备冷却水系统的热负荷；
- 导出来自非安全相关的冷冻机组的热量。

###### c. 屏障

设备冷却水系统应起到屏障作用，防止放射性物质从反应堆冷却剂系统泄漏到热阱，防止生水泄漏进入安全壳和反应堆系统。

###### 3) 接口

设备冷却水系统与电厂主要冷却负荷的接口列表如下。这是一个典型的负荷清单，有效性须经电厂设计者确认。

###### a. 安全相关的接口

- 余排换热器及泵

- 安喷换热器及泵
- 乏池换热器
- 安注及应急给水泵
- 取样冷却器
- 安全冷冻水
- b. 非安全相关的接口
  - 反应堆冷却剂系统设备，如反应堆冷却剂泵（热屏、润滑油冷却器）
  - 非安全冷冻水机组冷凝器
  - 取样冷却器
  - 排污热交换器
  - 硼回收系统
  - 上充泵
  - 仪器空气压缩机
  - 废物处理设备

#### 2.5.3.2 性能要求

- 1) 性能要求
  - a. 冷却乏池的功能
    - 乏池冷却功能由重要厂用水系统和乏池冷却系统配合核岛设备冷却水系统实现。应有各自冗余的冷却系列。
    - 电厂功率运行和换料、维修等期间该系统将燃料的衰变热从乏池换热器中移出。
    - 该功能一般由操作员手动启动或关闭。
    - 在安全信号发出时，自动隔离流向乏池冷却系统换热器的冷却水。恢复时可由操纵员手动操作。
  - b. 事故后的安全壳排热
    - 安全壳排热功能由安全厂用水系统和安全壳喷淋系统配合核岛设备冷却水系统来实现，应有各自冗余的冷却系列执行功能。
    - 系统需具备在设计基准事故下导出堆芯衰变热和安全壳的热量的功能。
    - 安全壳喷淋泵出口温度变高后应自动向安全壳喷淋系统换热器提供冷却水，此处的冷却水停运由操纵员操作。
    - 核岛设备冷却水系统具备冷却内置换料水箱的功能，在内置换料水箱充排时实施冷却。
  - c. 余热排出
    - 正常冷停堆过程中，蒸发器带热阶段后的冷却功能由重要厂用水和余热排出系统来配合核岛设备冷却水系统来实现，这两个系统均由两个独立的列组成。
    - 系统必须具备导出余热（衰变热和显热）能力，以确保正常停堆和安全冷停堆，并在换料和维修停运期间能保持反应堆处于停堆状态。
    - 这些功能应由操纵员动作来启停。
  - d. 安全相关热负荷
    - 对安全相关的用户泵、电机、风扇、冷冻机组等用户的冷却功能将由对应数量的列来执行，同样数量的厂用水系统列配合运行。
    - 电厂正常运行期间，发生设计基准事故迭加丧失厂外电的事故时，系统应具备将废热从上述设备或系统中走的能力。
    - 电厂设计人员确定各系统的要求，依照系统要求设计自动或操纵员动作来启动

和终止冷却功能。自动执行或者终止的装置应减至最少。

e. 非安全相关的热负荷

- 核岛设备冷却水系统与厂用水系统联合运行,在正常运行状态下对非安全相关的核辅助系统设备提供冷却水。专设安全系统发出信号时,这些非安全相关的热负荷会被自动隔离,仅有热负荷很小且在紧急情况下有需要的热负荷可保留。
- 电厂设计人员确定各系统的要求,依照系统要求设计自动或操纵员动作来启动和终止冷却功能。自动执行或者终止的装置应减至最少。

2) 容量

- 设备冷却水系统需要有足够的排热能力和足够的冷却水流量,在所有运行模式下满足性能和时间上的要求。电厂设计者来确定各工况下的冷却流量的分配和时机选择,包含以下排热功能:
- 正常运行期间反应堆非安全相关的辅助系统;
- 正常停堆过程中的衰变热和显热(蒸发器带热后);
- 换料和维修期间的衰变热排出系统;
- 设计基准事故后衰变热和显热的排出(长期或短期);
- 紧急停堆 36 小时以内的冷却使用安全级的余热排出系统,该系统应满足单一故障准则;
- 导出设计基准事故后的废热。

如因单一故障妨碍了单个或多个非安全相关物项的隔离,对安全相关设备的冷却流量不降低。

b. 核岛设备冷却水系统每列配置有两台泵和两个重要厂用水换热器。泵和换热器的容量按以下考虑:运行的泵及换热器组合需要提供各工况的冷却水流量及热负荷。

- 正常运行:单列单泵加两换热器。
- 正常停堆:每列两泵加两换热器,所有列均运行。
- LOCA 后和安全停堆:两列中有一列两泵加两换热器。

核岛设备冷却水系统设计成在停堆过程中余排系统流量最大时也不会沸腾。

3) 系统布置

- 设备冷却水系统与安全厂用水系统联合运行,冷却安全相关和非安全相关的反应堆辅助设施。列间设备实体隔离。每个列对其安全相关的热负荷进行冷却。非安全相关的热负荷在各列间的分配大致相同,因此各列的流量和热负荷大致相同。
- 每列由独立的设备、管道组合而成,有两台泵、两台热交换器、控制和测量仪表,以及为调节流量所需的相关设备。
- 必须为换热器单独设置隔离区,使厂用水不会流到地面排水的沟道,避免去往放射性废水处理系统。
- 为保证泵在各种工况下流量稳定和足够的气蚀余量,应配置必要的装置,比如流量孔板和波动箱。
- 如果厂用水恒流量运行,闭式冷却环路的水温可由换热器旁路的控制阀来调节。旁通阀选择故障后状态为关的阀门。
- 电厂正常运行时,非安全相关热负荷的冷却水一般正常开启,专设安全系统信号触发后,非安全相关热负荷的冷却水被自动隔离,也可以在控制室远距离操作。安全级系统和非安全级系统之间有明显泄漏时,也应隔离。
- 常规补水可以由非安全级水源提供。如果常规补水源不是安全级,那么必须提供安全级的补水源作为备用。这个备用水源应有与常规补水源相同的容量。并需要运行人员操作。

- 如果生水被用作安全级的水源,应在已确定的补水管道中安装可拆卸移动的管线保证补给水的供给。

### 2.5.3.3 系统特征

#### 1) 系统设计

- a. 泵吸入口连接一个高位波动箱,该水箱为每个冷却水系列提供补水。波动箱应保持管道系统充满水,减少系统压力变化,有助于保持合适的净正吸入压头,以及承受热膨胀和收缩。波动箱应设有补水口和排气口,波动箱的补水应为净化后的水。
- b. 波动箱尺寸的确定应考虑以下因素:应能承受由于热膨胀或收缩所产生的最大和最小的容积波动,以及容纳系统的泄漏。
- c. 向系统初次充水的人工操作应能在一个合理的时间(约4小时)内完成,可远距离手动操作。
- d. 正常运行应自动补水,并能补偿安全阀的最大卡开的情况,为防止设备损坏应及时报警和为运行人员操作提供足够的时间。

#### 2) 泄漏检测

- a. 应具备监测措施。设冷水系统应设置一个连续在线监测系统,以探测和鉴别有放射性的系统介质泄漏进入本系统,在污染的水和厂用水系统间提供一个屏障。设冷水系统的放射性水平高时应在控制室内发出报警。重要厂用水系统每周定期取样和分析,或者在设冷水系统的放射性水平高时进行取样分析。
- b. 波动箱水位应可对设备冷却水系统的泄漏(漏入和漏出)起到监测和报警作用。可定期(每周或每月)隔离补给水并维持指定的时间,监测波动箱水位。
- c. 定时取样可作为检测反应堆冷却剂泄漏进入设备冷却水系统的一种方法。
- d. 检测到从安全系统泄漏到非安全系统的大量泄漏(表明非安全系统压力边界发生破损)应被用作隔离信号。流量或波动箱的液位可以提供这类信号。

### 2.5.3.4 关键设备特性

泵:

- a. 泵必须装配机械轴密封,密封应可快速更换。密封的引漏用管子输送到地坑或疏水箱。地坑或疏水箱的取样将确定再循环或处置的方法。
- b. 离心泵可用卧式或立式泵;重点考虑净正吸入压头的可利用率和可维修性。
- c. 泵需运行时,向泵机械密封和电机轴承供应的冷却水(如果需要)必须可用,可从泵出口引出冷却水用于上述冷却,然后接到泵入口,循环使用可减少冷却水的损失。原水泵的轴封冷却水在注入泵前必须过滤。
- d. 波动箱应处于高位,保证泵及其排出口管始终被水所充满,以避免水锤效应。
- e. 泵必须能在最大流量下运行,不会因此导致泵或系统的不稳定性。

### 2.5.3.5 仪表和控制

系统设计中应对冷却水进行放射性剂量监测和定期水质检测,以便及时发现泄漏。

应对波动箱设置液位监测和报警。

对所有换热器提供温度和压力仪表,仪表能在不中断系统运行的情况下校准。

泵出口压力、流量监测和报警。

专设安全系统信号触发后,自动隔离非安全相关热负荷的冷却水。

### 2.5.3.6 维修

换热器外形尺寸大，为便于维修，附近应设置足够大的地面面积以及无障碍的空间，以保证可抽出换热管或者换热片，如检修换热板片，宜设置专用的板片移动、清洗设备和存放空间。

#### 2.5.4 重要厂用水系统

##### 2.5.4.1 定义

###### 1) 概述

重要厂用水系统（SEC）通过冷却设备冷却水系统（RRI）的RRI/SEC换热器，把RRI系统收集的热负荷输送至热阱一大海。

###### 2) 系统功能

正常运行和事故工况下把从安全有关构筑物、系统和部件传来的热量输送到最终热阱。设备冷却水系统从各种系统或通过各种系统收集这些构筑物、系统和部件的热负荷，如专设安全设施系统及其支持系统等。

SEC系统通过冷却RRI/SEC 换热器，保证了主泵热屏的冷却，间接的保证了二回路边界（主回路系统）的完整性。同时，在事故工况下 SEC 系统可用时，通过冷却 RRI/SEC 换热器，排出安全壳热量导出系统的热负荷，也间接地保证了第三道屏障（安全壳）的完整性。

###### 3) 接口

###### a. 支持系统（不含供电和仪控）

- 循环水处理系统
- 联合泵房及SEC供水廊道通风系统
- 安全厂房非控制区通风系统
- 循环水过滤系统
- 生产水系统
- 公用压缩空气分配系统
- 电站污水系统

###### b. 用户系统

- 设备冷却水系统

##### 2.5.4.2 性能要求

1) 排出主回路余热：在电厂冷停堆工况（DBC1）和事故工况（DBC2 至 DBC4，或某些 DEC-A）期间，通过余热排出模式，SEC系统通过冷却 RRI/SEC 换热器间接冷却安全注入系统及其热交换器；

2) 排出燃料水池余热：在电厂正常运行工况和事故工况（DBC1 至 DBC4）期间，SEC系统通过冷却 RRI/SEC 换热器间接冷却反应堆水池和燃料水池冷却和处理系统热交换器；在某些 DEC工况下，如果SEC系统可用， SEC系统仍可以通过冷却 RRI/SEC 换热器为反应堆水池和燃料水池冷却和处理系统提供间接冷却；

3) 排出安全级冷冻水系统的余热（DBC2 至 DBC4）；

4) 在DBC4 及DEC-A工况（SEC系统若可用）下，SEC系统通过冷却RRI/SEC 换热器间接冷却安全壳热量导出系统换热器。

##### 2.5.4.3 系统特征

###### 2.5.4.3.1 设计基准

### 1) 系统设计

#### a. 原则

重要厂用水系统设计成有两个或多个系列的系统，每个系列为：

- 直流式的海水回路；
- 与安全有关的系统。

每个回路的设计要保证可以冷却RRI/SEC板式热交换器。

#### b. 直流式海水回路的设计

- 海水水位在设计最低水位和设计最高水位之间波动。
- 重要厂用水系统是从位于联合泵房的循环水过滤系统鼓形滤网滤后水取水。排水则是通过核岛厂房外的重要厂用水系统接收池排入重要厂用水排水管道，然后由排水管道汇流至虹吸井，最终排入大海。
- 对水中贝类、水母等有机物的防护，在泵房进水渠道和重要厂用水系统取水口前投加 NaClO溶液，抑制和杀死海水中的贝类、水母等有机物。
- 在重要厂用水泵之后的出水管上，进入RRI/SEC板式热交换器之前设置贝类捕集器，防止贝类、水母等海生物滋生对板式热交换器的危害。
- 辐射防护，不要求。
- 防腐，系统采用耐海水腐蚀的材料，并采取相应的防腐措施。

## 2.5.4.3.2 安全准则

### 1) 分级

#### a. 系统和机械设备分级

- 重要厂水系统的安全等级为FC1；
- 重要厂用水系统的主要设备部件为F-SC1级。

#### b. 抗震分级

- 所有安全级设备均为抗震SSE1级。

### 2) 设备冗余及单一故障准则的应用

#### a. 重要厂用水系统设计满足单一故障准则

重要厂用水系统分成A系列、B系列等并联系列，满足冗余度要求、实体隔离要求以及应急供电要求（从相应的应急柴油发电机组供电）等。

### 3) 灾害防护

重要厂用水系统设计考虑的内部灾害主要包括：内部水淹、火灾、内部爆炸、内部飞射物、重物跌落和丧失电源；

重要水系统设计考虑应对外部灾害包括：管道甩击、外部飞射物、飞机撞击、极限安全地震震动（SSE1）、外部水淹、干旱、爆炸（厂区内）、火灾、龙卷风、极端低水位和生物污染。

#### a. 在役检查和定期试验

重要厂用水系统的设计能够实现：

- a. 对主要部件进行定期检查；
- b. 定期功能试验，以确保其设备的完整性，并在尽可能接近设计的条件下，检查系统能动部件的可使用性和要求的功能特性。

#### b. 超压保护

在重要厂用水泵出水管以后的所有设备要求能承受由于瞬态而引起的超压。

### 4) 生物防护

- a. 在泵房进水渠道和重要厂用水系统取水口前投加NaClO溶液，抑制和杀死海水中的

贝类、水母等有机物；

- b. 在重要厂用水泵之后的出水管上，进入RRI/SEC板式热交换器之前设置贝类捕集器，防止贝类、水母等海生物滋生对板式热交换器的危害。

#### 2.5.4.3.3 运行

- 1) 重要厂用水系统由主控制室进行控制。重要厂用水泵可以从远程停堆站进行操作。
- 2) 在机组正常运行工况下，一个系列以一台泵执行其功能，另一个系列处于备用状态。
- 3) 重要厂用水系统和设备冷却水系统的系列是对应运行的，其中一个系统中系列的切换会导致另一个系统相应系列的切换。
- 4) 当一台重要厂用水泵故障时，会自动切换至同系列的另一台泵。
- 5) 除止回阀和贝类捕集器的自动排水阀外，其他阀门都是手动操作的。
- 6) 重要厂用水泵和贝类捕集器的应急电源都由应急柴油发电机供电。当失去厂内电源时，每个系列的重要厂用水泵和贝类捕集器由相应系列的应急柴油发电机组应急供电。
- 7) 每个系列有两台100%容量的重要厂用水泵，它可以在系列或机组不停运的情况下进行维修。

#### 2.5.4.4 关键设备特性

##### 2.5.4.4.1 系统配置

每个系列的配置应相同，每个系列包含下列部分：

- 1) 一条SEC系统专用取水管道；
- 2) 两台海水循环泵，将海水输送到RRI/SEC热交换器；
- 3) 每一系列RRI/SEC热交换器的容量为2×50%；
- 4) 一条供水母管；
- 5) 两台贝类捕集器；
- 6) 两台电动蝶阀；
- 7) 一条排水母管。

##### 2.5.4.4.2 部件描述

###### 1) SEC泵

为立式离心泵。泵电机由 10kV 配电盘供电并后备应急柴油机应急供电。

###### 2) 贝类捕集器

为了防止海水中的水生物影响，在每台RRI/SEC板式热交换器前都装了一台贝类捕集器。

与贝类捕集器反冲洗功能相关的用电设备，由此安全列相对应系列的安全电源供电，并后备应急柴油机。

###### 3) 电动蝶阀

为了实现在同一列中的 RRI/SEC换热器跟随RRI系统需求完成切换，在 A/B列的每台换热器前各设置一台电动蝶阀，通过阀门开闭，完成对应列换热器的切换。电机由 10kV 配电盘供电并后备应急柴油机应急供电。

##### 2.5.4.4.3 材料选择和构造

- 1) RRI/SEC板式热交换器采用钛板材质。

- 2) 重要厂用水泵采用双相不锈钢材料的泵壳和叶轮。
- 3) 联合泵房内管材为钢衬胶管道和带阴极保护并具有防腐涂层的钢管。
- 4) 重要厂用水廊道内管材为带阴极保护并具有防腐涂层的钢管。
- 5) 核岛厂房内管材为钢衬胶管道和带阴极保护并具有防腐涂层的钢管。

#### 2.5.4.5 仪表和控制

##### 2.5.4.5.1 SEC 泵

SEC泵的控制由主控制室和远程停堆站进行控制。在主控制室和远程停堆站设有手动启停按钮。这两个手动按钮不能同时操作，由位于远程停堆站的隔离开关进行选择。

在SEC系列的出水管上的压力开关可以在本系列运行泵发生故障时启动另一台泵。

##### 2.5.4.5.2 贝类捕集器

对贝类捕集器的控制是指对设备上驱动装置和冲洗阀的控制。正常工作状态下，由定时电路控制冲洗阀动作，同时，由测量前后压差的压力开关靠设定的前后压差值优先控制贝类捕集器的冲洗程序启动。贝类捕集器可以在主控制室手动启动其冲洗程序，并将压差报警信号发至主控制室。

#### 2.5.4.6 维修

SEC系统在电厂正常运行期间，必须保证供给RRI/SEC换热器足够的冷却水流量，满足机组的安全运行，因此SEC系统设计允许在运行期间和停堆期间对执行FC1、FC2 功能的停运设备进行维修。

其它设备的设计和布置，便于在电厂换料停堆期间进行维修。

#### 2.5.5 蒸汽发生器排污系统

##### 2.5.5.1 定义

###### 2.5.5.1.1 范围

蒸汽发生器排污系统包括换热器、除盐器、过滤器及排污调节阀等。

该系统边界还包括部件支承、处置和凝水或给水系统的接口以及蒸汽发生器排污系统仪表和控制部件。

###### 2.5.5.1.2 功能

蒸汽发生器排污系统应完成下列功能：

- 1) 无论是循环式还是直流蒸汽发生器，其二次侧都能连续排污。循环式蒸汽发生器能够利用其排污水进行热量回收、净化以及再利用。蒸汽发生器的排污速率的确定要考虑电厂合理的加热能力，也要考虑到在8小时内水质由冷态保养到热备用的水化学转换的要求。
- 2) 在去氧、pH控制工况下，完全满足蒸汽发生器的湿保养要求。

###### 2.5.5.1.3 接口

蒸汽发生器排污系统的主要接口系统如下：反应堆冷却剂系统、给水和凝结水系统、核取样系统、核岛排气和疏水系统、氮气分配系统、固体废物处理系统、交流与直流配电系统、人-机界面系统。



### 2.5.5.2 性能要求

#### 1) 水位控制

需保证蒸汽发生器在电站启动和运行到满功率的全部功率量程内稳定的水位自动控制，在加热和热备用期间，必须保持1%额定给水流量的排污率。如仅用反应堆冷却剂泵达到电站的适当加热速度，则在电站加热的有限时间内，较低的排污率是可以接受的。

#### 2) 二回路水化学

对蒸汽发生器以一定流量排污，使蒸汽发生器二次侧的水化学条件满足《二回路水化学》要求。

### 2.5.5.3 系统特征

#### 2.5.5.3.1 配置

##### 1) 底部排污

必须提供一个包括排污热回收和净化的底部排污系统。排污系统的容量即最大连续排污流量应当设计为具有最大蒸发速率的1%，并能进行热量回收、净化和排污水再利用，包括满足最大蒸发速率的1%的连续排污/净化速率以及以运行所允许的限值从一次侧向二次侧的泄漏具有该流速的排污水，可以去正常凝结水净化设备直接净化。

排污系统必须具备在热回收系统故障情况下将排污水从电站排出去的能力。

##### 2) 喷氮扰动

排污设施必须包括经底部排污连接管引入氮气的措施，以便对蒸汽发生器二次侧料液进行喷雾和扰动。

如果不具备独立的排污净化能力，则在使用全流量凝结水净化处理装置时可将正常速率的排污排到凝汽器热井，或在使用部分流量处理时可排到净化处理装置的上游。即正常排污流量可能使用正常凝结水净化设备。排污系统必须提供相应的设施以使短时间的最大速率的排污不会排到正常凝结水净化系统或热井。

#### 2.5.5.3.2 布置

##### 1) 蒸汽发生器排水

必须为蒸汽发生器一、二次侧提供排水装置。蒸汽发生器的几何形状和排水口位置必须保证蒸汽发生器处于冷保养的静压头条件下8小时内能彻底排尽一次侧和二次侧水。排水系统的设计必须提供在任何温度包括热备用条件下对蒸汽发生器排水的能力。排污系统的设备可以用来提供这种热态排水的能力。

##### 2) 二次侧清洗措施

蒸汽发生器设计应当方便蒸汽发生器二次侧清洗。所采用的参考清洗程序应当由电站设计者确定，并且清洗程序是在某个在运核电站使用过的。

### 2.5.5.4 关键设备特性

#### 1) 蒸汽发生器排污阀

- a. 调节蒸汽发生器排污流速的阀门不应当用作隔离。对系统隔离和流量调节必须提供各自独立的阀门。
- b. 蒸汽发生器排污调节阀的阀体和堆焊材料必须能适应节流/闪蒸的工作条件，并具有好的抗汽蚀和浸蚀能力。
- c. 调节蒸汽发生器排污的阀门应当在最大排污流速的 0.2%到 1%之间进行调整。最高排污流速应当由一个串联有流量限制孔板的简单隔离阀控制。这些阀门应当可

以或者靠动力手动控制或者直接手动操作。

#### 2.5.5.5 仪表和控制

##### 1) 冗余

仪表的配置必须有足够的冗余,以便能承受任何仪表的丧失或故障而不必停堆和进入安全壳。此外在非计划停机后,任何仪表的丧失或故障必须不妨碍恢复功率。

##### 2) 流量测量接管嘴

在每一个排污管道上必须提供流量测量装置。流量测量装置的设计必须能防止污物阻塞。必须提供检查、清洗和检定的措施。

#### 2.5.5.6 维修

遵循通用要求,系统的设计必须便于维修,包括在役检查。

### 2.5.6 核取样系统

#### 2.5.6.1 定义

##### 2.5.6.1.1 范围

核取样系统主要包括取样冷却器、泵、阀门、仪表、罐体等设备以及取样手套箱等

##### 2.5.6.1.2 功能

核取样系统可以通过手动或自动收集有代表性的液体和气体样品供化学分析和放射化学分析,可在线监测有代表性工艺流体参数,事故后,可提供安全壳内具有代表性的样品以供分析。

##### 2.5.6.1.3 接口

核取样系统与电厂中的大部分液体和气体系统有接口,取样点位置即为接口位置。除涉及取样接口之外,核取样系统还有如下接口:

- 1) 核岛除盐水分系统:提供除盐水,用于样品稀释和冲洗;
- 2) 氮气分配系统:提供氮气,用于吹扫;
- 3) 设备冷却水系统:用于冷却高温取样冷却器中的样品;
- 4) 冷冻水系统:用于冷却低温取样冷却器中的样品;
- 5) 电厂辐射监测系统:用于监测一回路冷却剂和蒸汽发生器排污水的放射性;
- 6) 电源供电系统;
- 7) 仪表和控制系统。

#### 2.5.6.2 性能要求

##### 2.5.6.2.1 取样要求

核取样系统提供符合所有核安全管理要求和运行需要的取样。核取样系统应当提供一次侧系统和二次侧系统连续和间断取样,频率与所要求的监测相匹配。

##### 2.5.6.2.2 在线监测仪表流量

系统应当给连续在线监测仪表提供一个恒定且连续的采样流量。

##### 2.5.6.2.3 降压和降温

样品的压力应当减小到适应在线监测器和分析器的压力,和达到采集不溶性气体分析样品的压力。在线监测器和分析器的样品应当冷却至25℃及以下,如果需要,应控制在一个恒定温度。

#### 2.5.6.2.4 手动取样

除分析溶解气体外,手动取样必须处于大气压条件下,对液体系统手动取样测量pH值和电导率时,必须设置一个取样槽,以使样品流经便携式测量设备。加压取样(即为分析溶解气体或气体取样)需要专用的取样瓶以便取得样品。所有的取样点都应能进行手动取样,以验证或确认系统的运行情况。便携测量设备仅用于校验在线仪表,不用于连续样品监测。

#### 2.5.6.2.5 样品的代表性

对容器的取样,必须配以相应设施,以便在容器内介质的再循环回路上取样,避免在底部或潜在的沉积阱取样。对工艺流的取样,取样点必须在湍流区。由于样品未混合,应避免在静止区域取样。

#### 2.5.6.2.6 样品分离

对不同的样品(低电导率、高电导率、固体等)进行隔离,以防止混合。分析器中样品添加了化学物质(如,钠和二氧化硅分析器),化学污染、放射性污染样品分别回收(如,来自分析器的液体应被排放到高电导率废物罐,有放射性和潜在放射性的样品应当与非放射性样品分离开来)。对于分析后的样品,应尽量回收至被取样的系统。

#### 2.5.6.2.7 取样流量

取样流量应保证取样点或监测部位上游的取样管线流体是湍流。取样流量的大小应该根据取样管子的尺寸、流体温度和取样站的位置而确定,以保证满足湍流要求。对连续取样,必须保持恒定流量。

#### 2.5.6.2.8 事故后取样

事故后取样可以通过核取样系统来实现,事故后,可对安全壳大气,地坑水进行取样分析。

- 1) 核取样系统设计时,应当考虑正常和事故后的功能,以便电厂操纵员熟悉事故后可能的操作;
- 2) 在正常取样期间未执行的功能,都应有试验能力,以确保对其可操作性进行定期验证和保证操纵员对系统操作的熟悉程度;
- 3) 应当有措施对液体和气体样品进行稀释以便进行放射性分析。稀释应当在取样站或实验室完成,无论在何处,应采用较简单的设备,并可降低对人员的放射性辐照。事故后的取样和稀释应当远距离操作完成;
- 4) 所有用于取样的远距离操作阀门,应当有可靠的动力源,并应用在安全壳隔离后,允许无需消除其它安全壳隔离阀隔离信号就可重新打开该取样阀的系统重新配置特性。为允许在系统重新配置后打开取样阀,应提供个别阀门的复位特性。对在事故期间不可达的阀门和执行机构,为确保在事故工况下的可操作性应进行环境的识别鉴定。

#### 2.5.6.3 系统特征

##### 2.5.6.3.1 配置

- 1) 正常工况下, 来自大量不同位置的样品被输送到一个或多个取样手套箱, 样品根据需要进行冷却和降压。包含有不溶性气体的液体样品的取样容器, 应当放置在每个样品冷却器的出口以方便样品的收集。在事故工况下, 安全壳大气样品和安全壳地坑液体样品应可输送到一个可达的地方以便获取;
- 2) 取样接头及其与管道的连接应当确保取样接头的结构完整性, 应设计成有足够的强度, 以消除由于振动和腐蚀造成故障;
- 3) 将取样管线集中布置在相对低放射性的屏蔽墙后, 以便系统在无需进入安全壳或进入高放射性区域情况下就可以取样。

#### 2.5.6.3.2 布置

- 1) 气体样品的取样管线应当连续向上倾斜直到取样站, 应当避免在管线中出现沉积的位置, 避免在气体取样点收集到可能使样品污染的液体;
- 2) 在取样管嘴下游的取样管线上应当安装截止阀, 截止阀靠近取样点, 以便需要时隔离取样点;
- 3) 对取样站位置的选择, 应使各种取样能合并到一个位置, 或布置在符合下列要求的位置:
  - a. 公用厂房区域;
  - b. 尽可能减少取样管线长度;
  - c. 减少取样人员的取样时间;
  - d. 工作人员的可达性;
  - e. 区域放射性尽可能低, 以使电厂人员放射性剂量减至最小;
  - f. 化学实验室与取样站距离近;
  - g. 尽实际可能使液体取样管向取样站连续向下倾斜。
- 4) 尽可能将含放射性的取样设备, 比如取样冷却器、隔离阀、排放管线等应安装在辐射屏蔽墙内, 以减少工作人员的辐射照射;
- 5) 应在放射性系统的适当地方安装取样用的快拆接头, 同时取样快拆接头的拆卸和更换应尽可能简单。

#### 2.5.6.3.3 超压保护

设置卸压阀以提供超压保护。

#### 2.5.6.3.4 手套箱的应用

放射性样品的取样点必须布置在手套箱内。手套箱应能限制任何放射性样品的泄漏或溅出。该柜必须设置一个污水槽, 以收集泄漏并排放到高电导率的废液箱或设备排水系统, 以便通过放射性废液系统进行处理。放射性废物和凝结水手动取样点和其他专门试验用的取样, 其辐射照射为正常值, 则可不配置手套箱。

#### 2.5.6.3.5 取样管线的清洗

- 1) 为了能使连续样品通过在线仪表并且使取样管线和取样容器在收集样品之前得到清洗, 应当提供样品收集阱、排放地坑或收集母管;
- 2) 样品清洗收集母管应当返回原系统或工艺参数相同的废物系统。如果不允许如此循环, 那么清洗水就应当直接排到与样品的化学及活度相一致的收集箱内。

#### 2.5.6.4 关键设备特性

#### 2.5.6.4.1 材料

材料满足相关章节要求，另外需确保系统不会由于钴或腐蚀产物的释放而污染样品。

#### 2.5.6.4.2 取样管线

取样管线设备和连接件应按最大压力和最高温度设计采购。

#### 2.5.6.4.3 反应堆冷却剂取样管线

管道必须提供至少60秒（在安全壳内）的衰变时间（借助足够长的管道长度），使N-16的活性在离开安全壳前得以衰变。这需要与其他重要的取样要求综合考虑，并可能要采用附加的屏蔽。

#### 2.5.6.4.4 隔离阀

安全壳隔离阀在失去电源或失去控制信号时应确保安全。

#### 2.5.6.4.5 样品冷却器

样品冷却器的盘管（或传热管）的两侧分别由抗样品液体腐蚀和抗冷却水腐蚀的材料制成，为了避免样品污染，材料必须抗腐蚀；

冷却器盘管最好连续无缝隙，以防止由冷却水引起的污染或稀释。

#### 2.5.6.5 仪表和控制

##### 2.5.6.5.1 控制

系统必须允许间断的手动或远距离手动操作，以提供实验室分析的手动取样，取样系统也应提供在线仪表的连续流。

##### 2.5.6.5.2 仪表

每个冷却器下游应设置取样流的温度和压力指示。在每根取样管线上应设置流量指示。必须根据取样进口温度、连续参数监测和需要快速纠正动作的可能瞬态，按情况提供报警。

##### 2.5.6.5.3 硼浓度测量仪和放射性监测器

###### 1) 总要求

a. 对反应堆冷却剂系统硼浓度和放射性水平必须至少提供一个在线监测通道。在主控制室必须提供这些参数的连续指示和记录。被监测流的手动取样点也必须提供，以作校核并作为在线监测的备用；

b. 监测仪表的取样点必须提供电站运行和事故工况包括反应堆冷却剂低温和低压工况宽阔范围内的具有代表性的连续试样，取样点的位置和取样流量的设计必须具有小于2分钟的响应时间；

c. 必须设置可用手动阀隔离的替代取样点，以便反应堆冷却剂系统环路排水时监测反应堆冷却剂硼浓度。

###### 2) 硼表要求

硼浓度测量仪应该采用最直接的方法测量硼浓度，在主控制室必须能调节硼浓度高值和低值报警的设定点。

###### 3) 工艺辐射监测要求

放射性监测器的设计必须能监测反应堆冷却剂系统总的活性水平,在主控制室必须能调节反应堆冷却剂系统活性水平高报警的设定点。

#### 2.5.6.6 维修

##### 2.5.6.6.1 一般要求

满足维修的通用要求,保证取样系统部件的可达性和工作人员受照剂量最小化的规定。

##### 2.5.6.6.2 放射性样品

含放射性试样的阀门、部件和管道必须与包容非放射性试样的阀门、部件和管道分隔开。

##### 2.5.6.6.3 取样阀门的可维护性

对可能含有放射性物质的取样阀门必须进行维修性评价。

##### 2.5.6.6.4 法兰配件

对释放阀和其他部件,有必要采用法兰连接,以便维修时拆卸。

##### 2.5.6.6.5 可维护性评估-校准

对标定在线监测仪的操作必须进行可维修性评价。

#### 2.5.7 气体相关系统

##### 2.5.7.1 仪表用压缩空气分配系统

###### 2.5.7.1.1 系统定义

###### 1) 范围

仪用压缩空气系统为核电厂各个场所的气动控制装置供应仪表用压缩空气。

###### 2) 功能

压缩空气和气体系统为所有气动仪表和仪器连续供应干燥、无油、过滤的仪用压缩空气。

###### 2.5.7.1.2 性能要求

###### 1) 安全功能要求

仪表用压缩空气分配系统是与核安全无关的系统,不执行核安全功能。

###### 2) 运行要求

在核电厂的各种运行模式下,包括瞬态工况和停堆期间,仪用压缩空气应执行其功能。

###### 2.5.7.1.3 系统特征

###### 1) 系统配置

公用压缩空气分配管线和仪用压缩空气分配管线在进入核岛后应采用相互独立的管线设计。

核电厂设计者应对按照核电厂设备编码程序对每个气体系统的设备进行编码涂色。不需要固定的焊接气体管线,应留有便于安装的快速接头。

###### 2) 设计特征

###### a. 冗余性

核电厂设计者应确定所需全部系统的总容量及各独立分系统和/或备用设备的数目。

b. 设计压力和温度

根据系统运行情况和设计标准，确定系统合理的设计压力和温度。

3) 空气质量

仪用空气质量

- a. 含尘: $<0.1\ \mu\text{m}$ ;
- b. 含油: $<0.1\ \mu\text{mg}/\text{m}^3$ ;
- c. 露点:  $-20^{\circ}\text{C}$  (1.0 MPa (abs.))。

4) 仪用空气取样

a. 取样管线

为从核电厂气动安全相关设备中获得空气样本，应安装仪用空气取样管线和阀门。取样管线上取样开关的位置应尽可能靠近起动装置的地方，并选在可保证从远距离空气供应处获得有代表性样品的地方。

b. 定期取样

为保证华龙技术核电厂 仪用空气系统的可靠性和适用性，要求制定定期的仪用空气质量取样计划。核电厂设计者应以设备和空气质量要求为基础，规定进行空气取样所需的时间间隔和取样开关所在的位置。

#### 2.5.7.1.4 关键设备特性

1) 主要部件

- a. 为满足本章所述的空气质量设计要求，应尽可能采用易得到的商用设备。
- b. 对厂区环境，核电厂设计者应规定噪音消除方法，以保证空气压缩机的噪音水平在国家工业环境标准所规定的范围内。

2) 阀门和管道

a. 总则

核电厂设计者应给出空气系统管道、接头和部件的检查 and 清洗方法。

b. 材料

- 仪用空气供气联箱所有管道都应采用防腐材料，比如不锈钢。
- 管道支架的设计应选择合适的材料用来降低管道震动，并且，材料的选择还应考虑电厂 60 年寿命或超过 60 年的可能。

c. 阀门

- 阀门设计

应对系统中使用的所有阀门进行设计，尤其是气用阀门应设计采用弹性材料用于表面密封。

- 无填料阀

有害气体系统供应管线上使用的阀门不应使用填料密封，而应尽可能使用隔膜或波纹管密封，以防止或尽可能减少潜在气体泄漏。

#### 2.5.7.1.5 仪表和控制

1) 控制设备

- a. 系统应自动控制，如果运行压力低于预设的压力限值时，应自动转换到备用设备或设备列。
- b. 在试验、校准等过程中经常使用或运行的就地控制设备宜设计成使其手控阀门或开关，只能置于正确位置而不能处于其它位置上。(例如，带有能回复到正常运行位置或被锁定和连接在正确位置的弹簧)。

c. 所有自动或遥控启动阀门故障都应出现在系统处于可运行和可控的状态下。

#### 2) 仪表

根据需要,应配备仪表以便根据需要远距离监测所有空气供应系统的运行状态。至少应包括测量下列参数的多通道监测器:

- a. 储气罐压力;
- b. 压缩空气含水量;
- c. 储气罐温度。

### 2.5.7.1.6 维修

安全壳贯穿件的设计允许执行定期渗漏密封性测试和阀门运行测试。

### 2.5.7.2 公用压缩空气分配系统

#### 2.5.7.2.1 系统定义

##### 1) 范围

公用压缩空气系统为核电厂动力设施运行和维修提供压缩空气。

##### 2) 功能

为各类气动工具、各种设备和维修工作,连续供应干燥的公用压缩空气。

#### 2.5.7.2.2 性能要求

##### 1) 安全功能要求

公用压缩空气分配系统是与核安全无关的系统,不执行核安全功能。

##### 2) 运行要求

在核电厂的各种运行模式下,包括瞬态工况和停堆期间,公用压缩空气应执行其功能。

#### 2.5.7.2.3 系统特征

##### 1) 系统配置

公用压缩空气分配管线和仪用压缩空气分配管线在进入核岛后应采用相互独立的管线设计。

核电厂设计者应对按照核电厂设备编码程序对每个气体系统的设备进行编码涂色。不需要固定的焊接气体管线,应留有便于安装的快速接头。

##### 2) 设计特征

###### a. 冗余性

核电厂设计者应确定所需全部系统的总容量及各独立分系统和/或备用设备的数目。

###### b. 设计压力和温度

根据系统运行情况和设计标准,确定系统合理的设计压力和温度。

##### 3) 空气质量

设计者应确保采用符合电厂需要和当前技术水平的最高空气质量标准。

###### a. 含尘: $<1\mu\text{m}$ ;

###### b. 露点: $-15^{\circ}\text{C}$ ( $1.0\text{ MPa (abs.)}$ )。

#### 2.5.7.2.4 关键设备特性

##### 1) 主要部件

a. 为满足本章所述的空气质量设计要求,应尽可能采用易得到的商用设备。

b. 对厂区环境,核电厂设计者应规定噪音消除方法,以保证空气压缩机的噪音水



平在国家工业环境标准所规定的范围内。

## 2) 阀门和管道

### a. 总则

核电厂设计者应给出空气系统管道、接头和部件的检查和清洗方法。

### b. 材料

- 空气供气管道都应采用防腐材料，比如不锈钢。
- 管道支架的设计应选择合适的材料用来降低管道震动，并且，材料的选择还应考虑电厂 60 年寿命或超过 60 年的可能。

### c. 阀门

#### • 阀门设计

应对系统中使用的所有阀门进行设计，尤其是气用阀门应设计采用弹性材料用于表面密封。

#### • 无填料阀

有害气体系统供应管线上使用的阀门不应使用填料密封，而应尽可能使用隔膜或波纹管密封，以防止或尽可能减少潜在气体泄漏。

## 2.5.7.2.5 仪表和控制

### 1) 控制设备

a. 系统应自动控制，如果运行压力低于预设的压力限值时，应自动转换到备用设备或设备列。

b. 在试验、校准等过程中经常使用或运行的就地控制设备宜设计成使其手控阀门或开关，只能置于正确位置而不能处于其它位置上。(例如，带有能回复到正常运行位置或被锁定和连接在正确位置的弹簧)。

c. 所有自动或遥控启动阀门故障都应出现在系统处于可运行和可控的状态下。

### 2) 仪表

根据需要，应配备仪表以便根据需要远距离监测所有空气供应系统的运行状态。至少应包括测量下列参数的多通道监测器：

- a. 压缩空气压力；
- b. 压缩空气含水量；
- c. 压缩空气温度。

## 2.5.7.2.6 维修

安全壳贯穿件的设计允许执行定期渗漏密封性测试和阀门运行测试。

## 2.6 仪表和控制系统

### 2.6.1 目标和原则说明

本章制定了华龙技术电厂仪表与控制系统的要求。这些要求与华龙技术电厂的原则和目标一致。执行监测、控制和保护功能的这些系统称为仪表和控制系统。

每个仪表和控制子系统均由下列功能块进行不同程度的组合构成：

- 1) 数据采集设备，用于监测设备和过程变量；
- 2) 数据通讯设备，在数据处理设备与数据采集设备/电厂信息显示及控制设备/输出处理设备传输信息或控制指令；
- 3) 数据处理设备，对接受的数据（信息和指令）进行处理以供电厂工作人员使用，和/或执行保护和控制功能；

- 4) 电厂信息显示及控制设备,为电厂工作人员提供报警及显示装置,使他们能得到电厂过程信息和设备状态信息,并控制设备的操作;
- 5) 输出处理设备,在电厂控制装置与电厂设备执行机构之间提供必需的接口。

#### 2.6.1.2 范围

本章要求适用于华龙技术电厂的所有仪表和控制系统。仪控系统对电厂所有正常运行工况(即启动、停堆、备用、功率运行和换料),预计运行事件工况、设计基准事故工况和设计扩展工况有关的所有必要的监测、控制和保护功能。本章的要求是电厂设计人员的指南,同时也适用于仪表和控制系统的所有设备供应商,包括代理商。

与用户要求文件的其他章节一样,本章的要求不是全部要求。然而,这些要求的详尽程度和具体程度能保证电厂营运方的目标得到满足和/或消除现存的问题。有些要求是具体的,有些要求是总体性的,需要引用有关标准以及设计实践。

本章涉及的仪表和控制要求包括:

- a. 全厂所有系统的仪表,包括安全级、非安全级的传感器和就地仪表;
- b. 所有安全级与非安全级系统的自动与手动控制;
- c. 保护功能,包括安全级系统和非安全级系统;
- d. 诊断系统,例如松脱部件监测系统,旋转机械诊断,中子噪声监测,泄露监测以及疲劳监测等系统;
- e. 电厂系统的监控站,包括主控制室(MCR),远程停堆控制站,技术支持中心(TSC),应急指挥中心和就地控制站。用户要求未对每块就地控制屏作具体规定,但就什么情况下应提供就地控制以及如何将就地控制器固定和布置在就地屏上提出了要求;
- f. 仪表与控制系统的供电、接地以及环境兼容性;
- g. 用于控制、数据采集、显示、存取、监测与报警、技术支持和运行支持的计算机系统;
- h. 电厂模拟机/培训中心没有包括在用户要求文件的范围内,本章中规定的模拟机要求的范围限于模拟机在仪表和控制的设计、验证与确认中的应用。
- i. 第三方系统包括但不限于如下系统:冷水机组、辅助锅炉、空气压缩机、水处理系统、化学取样系统和冷凝管清洗系统等。如果第三方系统的故障直接影响电厂安全性或可用性,则第三方系统应满足相关的接口、质量、人因、配置管理、电磁干扰、测试和文件的相关要求。

#### 2.6.1.3 目标

##### 1) 利于操纵员

仪表和控制设计应充分利用操纵员的能力,但同时需考虑操纵员在各种工况下的工作负荷,不应超过其极限。人机接口设计应充分考虑“人”的特征要素,以纠正人机接口设计中对操纵员的重视聚焦程度不够的问题。

##### 2) 与电厂总体设计协调一致

为了使设计者能和电厂系统及土建结构的设计人员相互沟通,仪表和控制设计应与整个华龙技术电厂设计协调。这种协调应在整个设计过程中迭代进行,并应防止对仪表和控制系统或电厂设备的设计提出不切实际的限制性或复杂性的要求。

##### 3) 一体化设计

仪表和控制系统的控制、保护与监测功能应以一致的、一体化的方法进行设计,以便能够协调工作,增强电厂运行能力并减轻操纵员的负担。所有控制站应是一体化的,为电厂运

行与维护人员提供一个一致的、易于理解与操作的仪表和控制系统。

#### 4) 高可靠性

仪表和控制系统应达到非常高的可靠性。应由高可靠性的部件与设备组成，在安装、运行前及过程中经过充分分析和试验验证。仪表和控制系统的设计应使一个功能的故障和问题不会蔓延影响到其它功能的实现，从而使发生异常的范围尽量小且不增加操纵员负担。

#### 5) 可维修性

仪表和控制设备的设计与建造应从一开始就充分地认识其整个寿期内维修、试验与检查的需要。这包括在设计中具体考虑在电厂寿期内设备更换和升级的需要。

### 2.6.1.4 原则说明

本原则提供了全面指导与方向，并形成以下各章节中各个要求的基础。本原则内容的目的是给出总体性和方向性要求，为后续章节内容提供指导。

#### 1) 设计方法

仪表和控制系统将使用现代数字化技术实现华龙技术电厂的监视、控制和保护功能。系统设计，包括主要功能的分区，同一分区内冗余设备的隔离，以及容错设备以获得高可靠性并防止故障扩散。尽量减少供应商的特殊的仪控平台以便简化系统的数据通信以及系统维护和设计。对被选参数进行信号确认用来保证操纵员和自动控制系统得到高质量和高可靠的数据。为了减少仪表与控制电缆的敷设及成本，降低复杂程度，包括在安全功能在内的任何功能上，在经论证可行的情况下，宜使用远程输入输出的数据通信技术。数字系统高精度和无偏差运行将降低总的维修与校验负担。在适宜的情况下，使用光纤电缆传输数据，实现高速率数据传输的同时还可以以较低的成本实现电气隔离和电磁干扰保护。全厂高速局域网架构利于音频、视频和数据的通信，无线网络架构可以对将来可能的设备监视需求提供便利条件，即只增加少量的电缆敷设就可实现。

为了简化维修和防止设备过时淘汰，采用标准化的硬件与软件及模块化设计。宜提供内置式的试验装置，实现数字化硬件和通讯路径的连续的自诊断并告知检测到的故障。内置式试验装置具有计算机辅助定期试验功能，试验装置自动检验系统功能一旦手动启动，就会自动验证系统功能，检测到故障后进行定位并记录试验结果。大多数仪控设备位于设备间内，其环境条件由可靠的HVAC系统控制和保持。所有仪控设备选型应在正常工况和故障工况下的环境，满足功能要求。

模块化设计和灵活的系统架构可实现变更灵活。此外，老化管理应包含安装升级和模块置换能力，而无需对基础设施进行大规模更改。这一点是非常必要的，因为几乎所有的仪表和控制系统的寿命都比电厂的寿期短得多。预计大多数关键的仪表和控制系统组件在电厂寿期内均需要进行一次或多次升级。

#### 2) 设计过程

仪控设计过程由对整个仪控设计负责的唯一团队主导，这个团队是由一个多学科的设计队伍组成，并且包含电厂业主的直接参与，其中包括工程技术人员、维修人员以及熟悉电厂正常、异常和事故操作规程的操纵员。这个过程确保了仪表和控制设计队伍与电厂系统设计人员协同工作，设计时就考虑了运行/维修需求作为输入，从而强化了设计间协调。设计过程还要求把人因考虑综合到系统设计中，包括在设计早期利用制作模型和仿真来评估具体的设计特性和所做的选择，并为设计的迭代发展与确认提供支持。此外，为了保证最终的产品是满足要求的、强大的并且防止因疏忽而造成失误，有一个独立的小组与设计并行地进行持续的验证与确认工作（见2.6.2节），特别是软件的验证和确认。设计过程包含对安全和非安全的标准商业产品的评估和确认。信息安全应纳入到各个设计阶段。仪控设计正式文件的完成包括在整个电厂的设计文件和配置控制过程中。

### 3) 固有可靠性

仪表和控制设计通过分区、独立性和其它的一些措施,应具有足够的抵御故障蔓延的功能,使电厂低级别系统的单一控制功能故障和异常不会蔓延到其它的高级别电厂控制功能中去,因而也不会因复杂的瞬态事件而过度加重操纵员的负担。此外,仪表和控制设计应足够坚固,以防止由仪表和控制设备随机的单一故障引起强制的停机。仪控系统不应存在可能导致电厂跳机或瞬态的单点漏洞,或设备超出维修大纲中止服务时间。例如预期需要采用多台计算机,以及广泛采用分布式微处理器。重点是确保故障能得到妥善处理,操作员不会负担过重,不会导致关键能力丧失。

### 4) 试验

对华龙技术电厂的仪控设计,在系统试验方面要做一些适应性改进。相应地,设计和配置的设备应通过以下一些措施,使其便于支持在役试验。这些措施是:体现良好的人因原则;避免采用不希望的措施,如添加试验跳线或拆线;提供内置的试验能力,包括连续在线测试的自诊断和定期监督试验的自动功能试验。

在设计开发及实施期间,要按成文的试验计划进行大量的试验。安装前的试验应确认硬件与软件的性能满足设计要求。安装前试验程序应作为安装后确认试验及证实所安装系统可运行性的长期监督与维修的基础。

### 5) 经验证的成熟技术

由于最新可用的先进技术优于现在华龙技术电厂上所应用的某些技术,应鼓励采用新技术来解决存在的问题并对过去的设计作重要改进。通过遵守华龙技术电厂设计原则,即对于设备的控制/监视及其有关的软件/硬件应采用经过验证的技术,将避免引入新的问题。

### 6) 经济性

设通过实现较高的电厂可利用因子,先进的仪表和控制在电厂寿期内将明显为节省费用做出重要贡献。例如通过改善了人一机接口和提高了控制系统稳定性(如低功率给水水位控制),以及提高了仪表和控制的可试验能力而减少试验错误的数量,这些都将减少电厂意外停机的次数。长期看来操作和维修也可通过自动试验,先进的监视设备和改进设备实现成本节约的经济性效益。

### 7) 运行人员配置

对于电厂控制连续可用的操纵员的人数、受教育与培训的水平影响到自动化程度、控制设备的规模以及控制器与显示装置的选择与布置。在设计过程中通过使用实体模型和动态仿真检验操纵员配置水平是否合适。

预期在正常功率运行期间,一个反应堆操纵员(RO)能够在MCR执行控制电厂的功能。然而,设计者宜通过仪控系统提供充分的过程信息实现,这些信息使主控制室的人员持续保持对执行过程的认知,同时不被不必要的信息增加控制室当班值的负荷。在启动、停堆、瞬态及应急工况期间,主控制区将需要容纳更多的操纵员。对于电厂工况这些演变的操作任务应在连续可用的较多的操纵员间进行分配并且操纵员预计是2至3个人。为了提供一个仪和制设计基准,也为了保证在需要时主控制区能容纳更多的操纵员,包含操纵员和观察员必须的最大容纳能力的设计基准(维修活动涉及的人员除外),如下:

数量	职务	资格
1	值班长	SRO
1	高级反应堆操纵员	SRO
3	反应堆操纵员	RO
1	安全技术顾问	—
2	设备操作员	—
1	NNSA 观察员	—

1	电厂业主管理部门观察员	—
1	通信人员	—

典型的华龙技术电厂控制室人员每个反应堆至少包括三名持照操纵员(一名高级反应堆操纵员和两名反应堆操纵员), 以及一个持照的值班长。可根据给定的自动化水平优化控制室人员数量, 优化的控制室人员配置必须足以确保在正常和瞬态工况下电厂安全运行。对操纵员的培训宜将更多精力放在自动化过程中的“智能监督员”角色, 其中自动地提醒操作员发生偏离正常预期情况的事件。另外, 可能需要考虑最佳的人员配置, 以便响应电厂瞬态必要时, 使操作员的注意力集中在需要的地方。

## 8) 人因工程

在华龙技术电厂, 人因工程必须从设计活动开始就参与电厂设计, 并作为设计的重要组成部分, 不能设计完成后再考虑。人因工程原则将作为仪表和控制设计过程与设计验证过程的正式组成部分。

人的因素和可能的人员失误是实现必要的电厂安全性与可用性的重要因素。先前的人因研究成果在可行和适用的地方, 支持设计决策和具体的设计特性。在缺乏人因研究和具体的设计指导的领域内, 例如在华龙技术电厂采用某些较新的技术时, 应采用迭代设计的方法对设计过程提供全面的人因评价。设计的原始基础放置在本章的要求、过去的设计数据和运行经验、适用的研究结果、人因工程在其他行业应用的业内研究成果, 监管的要求以及其它适用的工业标准与导则上。随着设计的进展, 在设计各阶段采用实体模型、原理样机和仿真, 并利用收集的数据进行试验以支持设计决策和具体特性。集成设计(逻辑拟用于所有电厂系统和控制室显示器)将采用全范围的模拟机进行设计验证。设计的迭代试验与评价应特别包括环节中的人, 例如: 包括在实体模型上、部分或全部模拟的工作站上以及全范围模拟装置上预演的操纵员, 还包括维修接口的实体模型和原理样机上的维修人员。评价应基于定性与定量两个方面所选择的人的特性的度量, 以及预先规定的验收标准。特性准则应根据所作的特定的评价来选择, 并将包括减少出错、响应时间和精神上的工作负荷等方面的量化。

对于减少可能的人为错误, 仪表和控制设计将特别着重于:

- a. 消除可能的人因失误源——基于人因与行为科学的现代最新技术, 并基于对现有设计的经验审查, 在设计中应用功能与任务分析, 以及在设计验证与确认中利用实体模型和仿真, 尽可能地消除可能的人因错误源。
- b. 通过仔细地选择和分配任务以降低人因失误的概率, 详细地评价信息与控制需求为规定的任务提供正确的支持, 在任务分析、设计的硬件与软件实施、运行规程、MCR 环境条件、以及人员培训需求等方面之间严格实施一致性并进行综合, 在设计中优先考虑降低操纵员和电厂维修人员的人误可能性。
- c. 检测与纠正人因失误(万一它们发生)的措施—应提供强大的系统设计, 利用运行团队概念的优势(操纵员与监督员一起工作并相互支持)并采用了具有自动检查与报警功能的现代化数据处理和显示技术, 可在失误(如果它们发生)影响电厂之前发现它们并纠正它们。

这样做的目的在于保证在整个仪表和控制设计中始终如一地贯彻人因原则, 并将人因问题(如对以往核电厂控制室设计审查中发现的那些人因问题)减至最少。

## 9) 自动化水平

作为设计过程的一部分, 设计者要评价每个监测、控制和保护功能。并且在适当考虑操纵员工作负荷的情况下(包括自动设备可能的故障情况), 确定每个功能适当的自动化水平。这种评价应包括考虑系统响应的要求、操作的复杂性、操作员负担、要求操纵员关注的程度与持续时间等因素。在选择自动化水平时, 设计者必须处理的需求是保持操纵员对电厂状态循环和能力的了解, 因此他们保持警觉, 并在需要时能干预电厂的运行。设计者还应认识到:

随着自动化水平的提高,操纵员的作用由直接操作变为管理和监督,宜改变提供给操纵员的数据形式和深度。作为自动或手动控制器选择过程的一部分,宜提出自动控制系统的故障的影响。只要可能,根据系统和电厂要求自动控制系统应采用故障安全的特性。自动控制系统必须执行自检测和自诊断确保自动系统的失误和失效可以被检测到,并通知控制室工作人员。

#### 10) 主控室设计

华龙技术电厂人-机接口中心的是MCR。通过专门的多学科的控制室设计团队设计,MCR将作为协调的整体设计,设计团队是整个仪控设计队伍的一个组,且包括了参与仪控系统设计的预演及其它评审活动的运行与维修人员。这样的设计过程,再加上采用先进的信息与通信技术,将使控制室设计比现有的以往电厂有较大的改进。

MCR的位置与合适的布置将基于减少电厂其他人员进入主控制室的需要,还要保持MCR人员与现场设备操纵员及维修人员有效沟通的能力。应用人因原则设计MCR环境,为操纵员提供舒适的、专业性的环境,提高他们的工作效率。还要注意应用颜色和照明亮度来增强操纵员的警觉性和降低操纵员的疲劳程度。

MCR的布置及报警器、显示装置和控制器的数量将作为设计过程的一部分,以便清晰、全面、一致地支持一种从上到下的、以功能为基础,用于研究、规划、实施和检验电厂所有工况控制的决策方法。此外,主控制室的设备与信息要与电厂其它职能:工程、维修、管理和应急响应设施(技术支持中心和应急指挥中心)的整合和调整。

作为设计的起始点,MCR宜包含有紧凑的、冗余的、装有多显示和控制设备的操纵员工作站,提供有组织的、多层次的对报警、显示装置和控制器的访问手段。每个工作站应具有执行MCR全部功能以及支持在两个操纵员间分配任务的全部能力。在MCR中应设有一个附加的工作站供监督员使用。应提供冗余的工作站,以便任何一个工作站不能工作时不会妨碍不同工作站的两个操纵员共同承担他们的任务。此外,某些安全重要的控制器应采用隔离和多样化的方式设置(例如常规的硬接线的控制器)。这些控制器将提供一个多样化的独立于工作站的后备能力。要为操纵员提供一种易于获得工作站显示的硬拷贝输出的手段。

这里描述的具体特性将作为设计概述。它们必须作为以上描述的和2.6.2节、第2.6.3节更详细描述仪表和控制设计过程的一部分进行试验与验证,并且人因研究和人因性能评价用作设计与验证的基础。据于设计过程和设计的试验与验证提出的要求是最重要的,并且,在评价表明存在矛盾或需要修改的场合,设计过程的要求应优先于作为起点提出的具体特性。该测试必须确保自动化系统的正确运行,并证明操纵员有能力在非正常条件下确定自动化系统所采取的措施。

在第3)节所描述的设计过程中应确定冗余工作站显示与控制部件的选择与配置。设计应应用多功能的显示与控制部件,最终实现一体化、紧凑的工作站设计,为所有工况和操作提供一个一致的接口。这包括,例如利用一个多功能的控制装置来操作冗余的安全序列及操作安全与非安全两种设备。

工作站设计应满足现有法规,例如:安全级电路的隔离与独立性要求(GB/T 13286-2008),保护系统准则(GB/T 13284.1和GB/T 13629);系统级保护动作手动触发要求。设计者应恰当地应用现有的防御措施(例如分区、隔离、独立性、多样性、容错技术、信号验证、自检、误差校核、“看门狗”监督程序)以保证工作站不违反现行法规的要求,包括上面提到的采用多功能控制装置来操作安全与非安全设备。

工作站提供如下特性:

- a. 宜数字设备显示正常、异常和应急操作规程。(注:提供电子异常和紧急操作程序并不能消除MCR中对纸质副本的监管要求,应将其纳入总体MCR设计中。)
- b. 根据操纵员的任务和事件种类,电子显示所呈现的电厂运行参数与技术数据以

图示和图表的形式显示、由操作员选择不同时间间隔内的趋势、容许的范围、整定值、控制带、相互关系以及其它说明性的资料。

c. 简化图纸、仪表图和仪表和控制硬件和软件配置信息应在 MCR 的工作站上提供, 以便于维护、操纵和工程人员之间进行维护和操作决策。

d. 由计算机辅助设计软件或类似技术生成的电子管道与仪表图, 对这些图进行逻辑编排以便于访问和动态更新设备状态信息。从工作站访问信息应与决策方法、概览显示及工作站的其它功能相协调。操作员应能迅速地、容易地选取不同的显示, 而不致在选择过程中失去对它们的逻辑编排的理解。

e. 为了尽量减少多余报警, 特别设计(根据电厂工况)数字报警显示。做为支持决策的方法, 报警信息应进行组织, 并应与最高级别的报警以及工作站的显示与控制相协调。为了提供基本原因和建议的恢复措施信息, 工作站应提供报警刷新能力, 并提供访问数字显示的报警数据表的能力。应采用诊断支持帮助操作员探明问题并计划恢复措施。

f. 电厂设备控制器与决策方法, 大型电厂状态显示屏和报警显示, 以及工作站显示应很好地协调。控制器不必布置在专门的区域, 它的设计和布置应有助于有效、可靠地动作, 并能防止意外动作。控制器宜清晰地标记, 并应采用系统的一致配置适当地进行功能组织。

大屏幕应设置专门的布置空间、连续可视的, 以直观方式显示电厂综合的状态模拟图, 它的信息更为详细, 使操作员能有效评估MCR操作的重要设备的状态。大屏幕是对工作站上那些信息的显示的补充。因此, 大屏的信息有益于在正常、异常与应急状态下MCR人员之间的协调, 并为操作员在工作站执行任务时迅速地评价电厂状态提供一个清晰的、简明的和连续的参考。它们还将是在倒班交接期间用来评价电厂维护活动和主控制室中的培训活动的一种有效手段。

#### 11) 其他控制和监测站

在设计技术支持中心、应急指挥中心、远程停堆站、就地控制站和那些对支持电厂安全或可用性紧要的任务相关的其它监测设施时, 对于仪表和控制将采用同样严格的方法。仪表和控制设计的一个重要部分将是确定技术支持中心和应急指挥中心的数据通信与显示的要求。远程停堆站具有控制与监测电厂安全停堆的能力, 包括启动并无限期地控制余热排出的能力。从远程停堆站进行的控制将依赖若干所选设备的就地操作。

操纵员的通讯手段宜采用通讯设备集成到工作站。其中包括厂内通讯及诸如紧急情况通知、事故管理等需要的特殊通讯。

适当的条件下, 对电厂安全或可用性至关重要的就地控制站宜与仪表和控制的设计尽可能一致的要求。操纵员要易于接近就地控制站, 这些控制站要便于使用。为了提高操纵员的效率并减少错误要遵循人因原则。其所用的颜色标识、模拟图、标记和区域划分要与主控制盘尽可能保持一致。最后, 就地控制站的环境要保护操纵员和设备, 并减少在正常运行和事故运行两种情况下由压力引起的故障。

考虑技术顾问以及电厂的与现场的管理部门的需要和任务, 为他们提供监测设备并使之与华龙技术电厂仪表和控制相一致。

#### 12) 设备老化管理

仪表与控制的技术水平在不断地变化, 要经常关注设备的过时问题。为了尽量减小在华龙技术电厂的整个寿命期内仪表和控制设备过时的影响, 仪表和控制的设备设计应是模块化结构(硬件与软件), 并采用标准化的仪表和控制设备, 使得易于维修培训、简化备件要求并便于仪表和控制设备的更换和升级, 终端(包括配线架)的设计应能够支持单一模块更换, 无需大量拆卸和更换周围环境的组件或支持系统, 结构和组件。 仪表和控制基本软件和固

件应能够就地升级和安装新版本，错误修复程序以及补丁程序，需要进行常规配置控制以及验证和确认（V&V）程序。老化管理不应要求进行重大变更，仅可使用同等组件或系统进行替换，或进行更小的修改。

#### 13) 法规适用性

华龙技术电厂要满足现有的法规要求。然而，要注意到现有的许多适用于仪控系统与设备的法规导则与标准没有考虑到可能应用的现代化技术。因此，详细设计的展开可能需要对现有导则与标准的目的和用途作新的说明。

### 2.6.1.5 本章结构

第 2.6.1 节 目标与原则说明，它们为仪表和控制设计与实施提供总的方向和指导。

第 2.6.2 节 关键要求提供了对仪表和控制的顶层设计要求。。

第 2.6.3、2.6.4 节是适用于整个仪表和控制的顶层通用要求。它们适用于在仪表和控制范围内的所有设备、系统和硬件。

第 2.6.5、2.6.7、2.6.8 节提供了关于实现电厂功能所需仪表和控制系统的特定要求。

第 2.6.9 节“远程监测技术”提供了实时的安全信息、设备的状态信息并提升辐射防护技术，以便保证电厂工作人员免受辐射危害，保证工作人员安全。

### 2.6.1.6 接口

本章内容覆盖了电厂所有系统的仪表和控制，所以宜在电厂工作人员（如：操纵员与维修人员，电厂设备与系统管理员）之间构建适宜的信息交换接口。本章与用户要求的其它各章之间有许多接口。例如，仪表和控制的许多功能与性能要求受其它章涉及的系统与设备的功能与性能要求约束。

#### 1) 与第2.1章的接口

第2.1章是总体要求，它包含了许多华龙技术电厂通用的要求。本章的要求与第2.1章协调一致。

#### 2) 与电厂各工艺系统的接口

电厂各工艺系统相关章节提出了为实现其功能及性能要求而对仪表与控制系统的特定要求。与堆芯设计的接口（第 2.2 章）；与反应堆冷却剂系统的接口（第 2.3 章）；与安全系统的接口（第 2.4 章）；与电力生产系统的接口（第 2.12 章）；以及与供热、通风及空调系统的接口（第 2.8 章）等等。读者可参阅华龙技术电厂用户要求文件的目录要快速找到特定系统的要求。在本章中规定了仪表与控制总体要求、功能要求以及软硬件要求。

工艺系统与仪表之间的接口在传感器与工艺系统管道或设备的连接处。例如，连至压力传感器的管道是工艺系统设计的一部分，而压力传感器则是仪表和控制设计的一部分。工艺系统与控制装置之间的接口是最终的执行机构的电气接线以及执行机构所在工艺管道的机械连接。在某些情况下，执行机构和最终的控制部件的一些特性将由仪控系统设计者给出，以满足控制系统设计的特性要求。所有执行机构都是它们所隶属的工艺系统或控制系统的一部分。正如以上指出的，为保证正确地处理这些接口，将要求工艺系统设计人员与仪控系统设计人员之间反复和协同设计。

#### 3) 与配电系统的接口

第 2.7 章包括对仪表与控制系统相关的配电系统特定的功能性能要求。在第 2.7 章中详细规定配电系统的范围。它包括正常和应急的交流配电系统与电源，以及正常和应急的直流配电系统与电源。本章涉及与远程监测和控制厂内配电系统和性能有关的仪表，控制和供电的设计要求，以及通过发电机出口断路器电力输出的要求。（不包括除发电机出口断路器到电网外的主输/配电系统的特定的监测与控制要求，因为这些将由电厂营运方和电网确定）。



本章还涉及远程监测与控制向配电系统供电的厂内电源所必需的仪表与控制装置。最后，作为整个仪表和控制验证的一部分，从整个电厂运行的角度来看，本章的要求对保证电力系统的自动切换等方面是可接受和适宜的。

第 2.7 章涉及电力系统的就地（在设备处或靠近设备处）仪表与控制装置的要求，包括传感器和执行机构。第 2.6 章与第 2.7 章的设备间的接口应在传输远程监测或控制信号的仪表或控制电缆的现场端子处。电力系统的自动切换装置，如自动切换开关，以及保护装置，在第 2.7 章中阐述。

#### 4) 与电厂布置的接口

第 2.14 章“厂房设计与布置”针对电厂整体布置对仪表和控制系统提出了全面要求与接口。特定的仪表和控制系统的布置要求则在本章规定，特别是：

第 2.14 章提供了主要的仪表和控制系统所在控制区在电厂发电综合结构内的位置要求，以及与其他设备相对位置的要求。仪控系统设计者根据功能要求提出仪表和控制区域大小的要求，同时规定仪表和控制系统与设备在该区域内的布置要求。

第 2.14 章与第 2.8 章还提出了电厂其余系统对仪表和控制系统所在区域或房间的要求，例如通风空调、防火要求等。本章提供关于这些接口的功能与性能要求，还规定这些系统的接口要求。第 2.8 章阐述通风空调系统的性能要求和防火要求。本章还将说明在通风空调系统完好以及性能退化后仪表和控制系统的性能要求。

第 2.14 章提供了电缆通道、管道等的布置要求，以保证足够的防火分隔和防御共模故障等。本章提供对仪表与控制系统的电缆自身的要求。

### 2.6.1.7 审评经验反馈

本章要求适用于用户要求发布后的新建的华龙技术电厂。对于在建的华龙技术电厂参照本章要求确定差异并与电厂营运方和电厂设计人员确定差异的适当性。

## 2.6.2 关键要求

### 2.6.2.1 设计过程要求

仪表和控制设计应根据已规定的设计过程开展，这个过程与电厂其他设计过程并行开展，并且同时满足第 2.1 章总体要求和本节的要求。

#### 1) 设计过程总要求

仪表和控制的详细设计过程应确保电厂系统功能要求和其它设计要求都得到满足，并且尽量避免不必要的复杂化设计以及使用未经证实的或开发程度很高的控制方案。

#### a. 功能分组设计方法

设计过程应强调以电厂功能分组的架构设计，而不是传统的以工艺系统为基础的分组方式进行构建。特别是设计过程应该从以下基本功能的角度处理反应堆的总体控制：

- 反应性控制；
- 反应堆冷却剂压力控制；
- 反应堆冷却剂容积和化学控制；
- 反应堆堆芯热量导出；
- 蒸汽发生器水位控制。

对于电厂的其它部分，也应利用上述相似的功能分组的方法，例如：

- 按照能量产生、传输等流程进行分组的控制；
- 电厂当地环境控制；
- 向环境的物质释放控制；
- 供水，供气，供电分组控制。

#### b. 迭代设计

仪表和控制设计过程应完全地融入电厂的总体设计过程中。应进行系统要求与仪表和控制要求的迭代交互过程，确保对所有运行模式如启动、停堆、功率运行、换料、预期瞬态和包括严重事故的紧急事件下符合设计要求。

#### c. 一致性原则

一致性原则应适用于所有接口设计，包括电厂、运行人员以及支持人员之间的仪表和控制系统设计，不宜因不同的系统（NSSS系统或BOP系统等）、不同的安全分级、不同的应对工况、不同的控制站而使设计有所差异对待，宜保持其设计风格的一致性。

### 2) 设计组织结构和计划

#### a. 设计责任

仪表和控制设计工作应正式组成团队并接受单一领导，该团队负责仪控系统的总体设计工作。

#### b. 设计队伍

作为整个仪表和控制设计工作组的一部分，设计者应组织和指导服务于特定主要接口的设计工作队。至少应建立这样的工作小组用于MCR设计的总协调，MCR设计队至少应包括如下人员：

- 核蒸汽供应系统的工程师和设计者；
- 电厂相关系统的工程师和设计人员；
- 人因工程专家；
- 营运单位工程、运行和维修人员的代表。

#### c. 独立审评

仪表和控制设计过程应包括对仪控设计进行独立审评。验证过程包含设计的各个阶段正确性，验证从一个阶段到另一个阶段的信息已被恰当地实现。

#### d. 设计策划

仪控系统设计者应编制用于仪表和控制设计和实施的全部计划，至少包括以下内容：

- 设计方法说明；
- 进度计划；
- 设计工具和设计组态控制；
- 评审计划；
- 接口交换计划；
- 设计开发与实施、测试和安装的工程技术服务、运行、有害辐射防护及维修工作人员的条款规定；

### 3) 设计过程要点

#### a. 设计经验反馈

仪表和控制设计过程应确保鉴别出在以往电厂仪表和控制设计中的问题并确保在提供了对这些问题满意解决方法的华龙技术电厂仪表和控制中结合了相应的特征。包括下列内容：

- 在设计过程开始时，宜系统性的评审以确定那些会导致安全相关、减少电厂可用性或增加维修负担的问题。
- 每一个确定的问题进行其华龙技术电厂适用性的评估。
- 最终仪表和控制设计应特别确定怎样解决每一个适用的问题。
- 问题的鉴别、评估和解决进行独立的评审。

#### b. 简化和标准化

设计过程应包括下列特征，旨在实现一个简洁的、全厂范围的标准化设计的华龙技术电厂目标：

- 设计过程应提供作为仪表和控制标准设计实施指导方针的准备条件。
- 设计过程应提供标准部件和系统命名及术语的开发与使用。
- 设计过程应积极地跟踪在仪表和控制中部件的数目和部件不同种类的数目。
- c. 仪表和控制功能和任务的识别

设计过程应明确为支持电厂系统和电厂总体运行所需的仪表和控制功能。仪表和控制设计过程也应明确为执行这些功能所必需的脑力与体力的独立任务。

- 功能与任务的范围

功能与任务应包括所有那些影响仪表和控制设计的全部内容。设计过程应提供在仪表和控制设计开发过程中对功能和任务的补充以及对最初设置的修改。

- 功能与任务的分析

设计过程应包含有经验的电厂运行人员使用全范围仿真机或其他仿真工具对功能和任务进行分析与确认。

- 功能与任务分析结果的应用

仪表和控制设计过程应至少在下列活动中应用已识别功能和任务：

- 在自动和手动控制之间功能的分配；
- 在工作站之间任务的分配；
- 控制和运行策略的开发；
- 运行班组责任的分配；
- 操纵员脑力与体力两方面工作负荷的评估；
- 工作站的布置；
- 显示类型和它们详细特征的选择；
- 控制手段和它们详细特征的选择；
- 选择和设置报警和集成报警的控制站的设计
- 运行规程和培训需求的开发；
- 可信的仪表和控制设备失效影响的评估；
- 验证与确认（V&V）的评审；
- 就地或远程控制系统的选择。
- 功能与任务的文档

仪表和控制设计过程应提供已识别功能和任务的受控文档。

- d. 潜在设备失效的考虑

- 仪表和控制设计过程应清楚地考虑对于电厂仪表和控制系统部件失效的潜在因素和后果。这就是由操纵员处理设备失效所产生的功能和任务应被视为仪表和控制系统设计依据的一部分；
- 安全系统的故障安全逻辑和电厂实物保护方案和设备动作应进行电厂丧失交流和/或直流供电的评估分析。
- 长期失去电源后，对堆芯和安全壳进行评估以监视冷却效果的关键事故后仪表仍应能保持供电或便于通过便携式设备进行监视。

- e. 分析要求

- 功能需求确认

仪表和控制设计过程应包括快速开发原型，其强调点应放在开发过程中的早期开发原型，以允许支持设计过程的及早反馈和分析。

- 验证平台

仪表和控制设计过程应包括以数字计算机为基础的动态模型的开发。这些模型用于整个电厂响应以及单个的控制系统，包括运行人员的动作。这些动态模型应适合于稳态和瞬态的行为分析、用于证实控制流程的恰当性、用于验证自动控制系统或操纵员的控制功能分配、用于开发和确认电厂运行规程等；

f. 系统和设备试验

- 试验计划

试验计划中应定义对系统和设备的测试要求。应包括证实仪表和控制设计的人因工程符合程度所必需的测试。所有为证明仪表和控制系统设计正确、准备系统运行所要求的测试和在系统服役和维修之后所要求的测试都应包括在内。每一个试验计划应至少包括：试验项目描述、那些在测试时不测试的系统的所有特征以及为什么不进行测试的原因、测试方法、测试情况技术规格书、验收准则、测试环境、测试设备、测试人员要求、测试顺序等。

- 在役监督试验

仪表和控制设计过程应包括对要求确保设备长期正常运行和满足所有适用法规要求的仪表和控制部件与电厂部件的全部在役监督测试的清晰认定。

- 安装和启动试验

仪表和控制设计过程应包括测试计划和一些通用规程的准备，这些计划与规程用于仪表和控制系统部件与系统安装到电厂后进行的测试，也用于由电厂业主运行成员作为初始电厂启动的一部分所执行的测试。

g. 网络安全和安全的开发操作环境

- 防御策略

仪表和控制的结果和设计应基于总体防御策略所定义多个安全防护级别。

数字化系统和具有影响关键工厂的潜在安全功能的组件应标识为关键数字资产（CDA）。具有最高的网络安全风险的CDS应定义为最高水平，和/或提供最严格的防护措施。

- 网络安全纵深防御

仪表和控制防御策略应采用多种保护方法防御等级之间的通信，和访问CDA。

- 网络安全计划

根据国家对网络安全法的相关法律法规及监管机构的具体要求来实施。

设计者和每个仪表和控制供应商应协助营运单位持续评估和改善网络在整个设计过程中的安全性，并须向营运单位提供培训。

- 支持仪控网络安全的实物保护

- 所有包含网络和远程输入/输出设备的仪表和控制机构应安装在上锁的房间里。
- 网络通讯设备（例如，交换机和路由器）应安装在上锁的房间。
- 仪表和控制网络通讯设备应与其他网络设备分开，包括电话和信息技术。
- 这些房间应为仪表和控制专用，并应最小化（最好消除）任何有访问要求的支持设备，包括 HVAC，信息技术等。
- 每个房间都应采用读卡器控制出入。 营运单位应考虑仪表和控制的门采用“双人双锁”原则的读卡器，这样的安保技防和管理措施的结合，可以确保一个人不能留在房间里。

- 工程师站的出入控制

即使工程师站在上锁的仪控系统专用房间里，也应安装在上锁的机柜里。

4) 设计过程的独立评审

仪表和控制设计过程应提供对其所有活动和由此得到的仪表和控制设计的独立的评审。评审工作队应在技术上、管理上和财务上独立于设计工作队。应提供三种级别的独立的评审：

整个仪表和控制设计过程、系统和系统部件执行其预期功能的独立确认、在设计过程中单个步骤适当执行的独立验证。

a. 评审者资格

独立的评审工作队应具有相应资质并独立于仪表和控制设计队。

b. 评审计划

启动设计过程之前建立一个初步的用于独立评审的计划；最终的评审计划应由独立的评审工作队和设计者共同制定。

c. 评审时间

独立的评审应在设计过程启动后尽快地开始并应连续对完成设计的系统进行测试。

d. V&V 评审

设计过程V&V评审的最小范围包括：

- 功能要求评审

评审团队应对仪表和控制系统功能要求和系统功能设计进行评审并提供对电厂系统功能满足要求的意见。

- 需求评审

评审团队应对硬件和软件需求进行评审，并证实由这些需求可获得实现功能设计的实施。这些评审也应考虑设计中的系统结构、接口、可测试性、可靠性和人因等方面。

- 设计选择和变更的评审

评审应包括对由设计者和建立这些要求与技术规格的其他人所考虑的变更与替换的评估。评审应针对设计的所有方面：简化要求、标准化要求、可靠性和可用性、共模失效、失电分析电源、与环境的兼容性，包括：温度、湿度、辐射、电磁干扰、振动和地震、火灾等、可测试性、可维修性、人因（操作与维修）、设备老化、可扩展性等

- 测试评审

评审团队应评审用于电厂和启动测试的系统和部件的测试计划，应见证测试并评审测试结果。评审应清楚地包括用以验证和确认仪表和控制的人因工程已执行的测试。

- 文件评审

评审队应为他们的所有评审提供在文件上的证明。评审文件应明确由评审所鉴别的不足和问题。

5) 全厂数据库

设计者应定义，创建，移植，维护和控制一个完整定义仪表和控制中传输的数据的全厂数据库。数据库维护贯穿于仪表和控制的整个生命周期。

6) 仪表和控制系统设计信息的移交

项目早期，EPC承包商应制定仪表和控制设计信息移交计划，并提交业主获得批准。这个计划应确定仪表和控制设计信息的范围和类型。

## 2.6.2.2 成熟技术

根据总体要求，电厂应采用成熟技术；但是如果满足本节规定的，在其它应用场合的应用得到了证实，华龙电厂采用一些未曾使用过的先进的系统、设备、软件和固件也是合理的。

1) 成熟技术的应用准则

除了在 2.1 中对成熟技术的定义外，满足下述要求仪表和控制系统或设备也可被认为是成熟的：

- a. 它在类似于以往电站的电厂应用中作为子系统模块至少有 3 年满意的应用，且有文档记录。或者：

- b. 完成了指定样机的试验程序，该程序是为验证设备在华龙技术电厂仪表和控制

应用中的性能而设计的。

## 2) 非成熟技术的应用准则

对于任何软件、固件、部件或系统，如果尚未按照要求加以证明，但是使用它们可以获得仪控系统简单化或性能方面有明显改善，则必须满足下列要求方可考虑使用：

- a. 已制定了用于测试或收集满足准则经验的详细计划；
- b. 定义了具体的备选方法，并在必要的范围内将其纳入仪表和控制设计过程，以便在无法充分证明部件或系统的情况下，也可以满足华龙技术电厂的限制性要求；
- c. 可以完成并评估所需的测试或经验数据收集，并在不影响整个电厂计划的情况下在备选方案之间作出选择。

### 2.6.2.3 经济性

仪表和控制系统的造价应与第 1 章华龙技术电厂造价目标和经济评估假定是一致的。尤其是，仪表和控制系统应以在整个电厂寿期中营运方对造价的评估为基础。变更仪表和控制设计的造价评估应考虑营运方在如下项目的造价：

- 1) 运行、维护和维修，包括放射性泄漏和污染控制；
- 2) 计划停闭和非计划停闭；
- 3) 操纵员和技术人员的培训；
- 4) 启动和监督测试；
- 5) 分析与仿真；
- 6) 更换、替代。

### 2.6.2.4 操纵员的行为

仪表和控制设计应明确操纵员和电厂其他工作人员为操作和运行电厂所执行的动作。这些动作应该在所有操纵员能力范围之内。

#### 1) 操纵员的工作负担和警觉性

##### a. 操纵员工作负荷

仪表和控制设计不应要求操纵员执行超出其能力负担之外的任务，尤其是在紧急或混乱的情况下。对本要求可通过对这些任务的动态仿真进行验证。

##### b. 操纵员警觉性

仪表和控制设计应包括趋向于让操纵员保持注意和警觉，使操纵员活动更便利的特征。

##### c. 团队行为

仪表和控制设计应包括支持和促进工作团队的特征。这其中包括加强团队沟通和凝聚力以及团队成员提供相互支持与相互后备能力的特征。

#### 2) 运行规程

用于华龙技术电厂的运行规程应作为仪表和控制设计的一个组成部分来开发并作为仪表和控制的一部分提供。

##### a. 规程的验证与确认

- 仪表和控制设计过程应包括验证所有指派给电厂操纵员的功能与任务，都包含在了运行规程中的步骤。
- 仪表和控制设计过程应包括对使用电厂仿真机和使用在电站模拟机和性能模型对每一个运行规程进行确认。

##### b. 计算机化规程

对MCR操纵员工作站，在实际可行的情况下，以及其他使用了电子可选择显示装置的其它工作站，其规程应以电子显示的方式进行。

- 设计者应建立和用文件归档规程显示、准备实施内容和导则，并使用有效的仿真来确认这些内容。
- 计算机化规程的内容和结构应以使用经过培训的、与实际电站的操纵员相同或等效的操纵员进行的主动模拟为基础。包括：
  - 规程为逻辑或流程图的形式。
  - 规程通常应在与规程同一的显示器上为操纵员提供做出每一个要求的决定所必需的参数。
  - 规程应提供操纵员访问执行任务所需的控制。
  - 程序宜提供用于验证操纵员决定的软件；操纵员应保留控制权并应拥有是否继续进行下去的最终权力。应提供对那些不一致情况进行自动记录的能力。
  - 作为规程显示一部分所呈现的电厂参数和状态应连续地被更新。
  - 在适当的地方，这些程序应提供追溯某些步骤序列的软件以确保对系统或部件适当状态的维持。这些步骤不应包括操纵员为控制部件所采取的动作。

#### c. 纸质规程

对于使用计算机化规程不实际的那些控制站和为了对整个计算机化规程进行补重，设计者应提供硬拷贝规程。

- 除了对于计算机化规程外，对使用有效信息的纸质规程，设计者也应建立准备实施导则（见 2.6.2.4）
- 纸质规程应在格式和内容上与计算机化规程一致。除了在正常的电子显示不可用时的使用外，它们的实施还应考虑这些纸质规程作为研究指导的潜在用途。

#### 3) 自动控制和手动控制的选择

有关自动与手动监控的设计选择应以特别包括考虑如下内容的评估为基础：

- 操纵员工作负荷，包括并行或潜在同时发生的紧急活动；
- 操纵员能力，包括反应时间、熟练程度和准确度；
- 自动或手动监控在以往类似应用中的经验；
- 操纵员警惕性和需要保持操纵员对电厂状态介入和理解的需要；
- 仪表和控制设备的数目与复杂性（包括软件）和相应的维修与试验的负担；
- 对自动化设备故障和对于运行错误所导致的结果与潜在的可能性；
- 法规要求。

第2.3至第2.6.章描述了关于应用于仪表和控制特定部分的自动或手动控制选择上的约束条件。仪表和控制设计文件编制应专门区分在自动和手动控制之间作出特别选择的情况，包括这些选择的依据。

#### 4) 远程和就地控制的选择

关于远程与就地控制和监测的设计选择，以特别包括如下考虑的评估为基础：

- 操纵员工作负荷，包括到达就地设备时间的影响和其它并列或潜在同时发生的操纵员任务的影响；
- 操纵员能力，包括在采取一项控制行动时反馈和监测的需要；
- 就地环境条件，如到达困难程度、温度、辐射和污染水平、泄漏以及其它人员的危险性；
- 需要运行人员监测的就地状态，这种监测远程实现起来很困难，如小泄漏、受损部件、不正常噪声等的监测；
- 仪表和控制设备和电厂系统设备的数目与复杂性以及相应的维修与测试的负担；
- 远程设备失效的后果；
- 远程或就地控制过去在类似应用中的经验。

第2.3至第2.6章描述了有关应用于仪表和控制特定部分的远程或就地控制和监测选择的特别的约束条件。另外，第2.6.3.8-1特别禁止在MCR中的一些控制和显示，除非这些控制和显示支持用于控制室操纵员的一项确定任务。

#### 5) 操纵员辅助措施

仪表和控制设计应包括在执行特定任务时，提供对操纵员辅助的特征的定义。这些操纵员辅助应作为整个仪表和控制设计的一个组成部分而加以考虑并应包括在对控制站和仪表和控制设计的所有的评估中。这些操纵员辅助应包括：

- 计算机化的辅助显示在提供了整理与处理数据信息的适宜的终端上，这样它以一种为操纵员执行规定的功能和任务直接可用的形式而呈现。
- 永久性布置的信息、仪表或警示以减少操纵员记忆负担。（见 2.6.3.4-8）

除了以上的操纵员帮助，设计者应评估引入主动系统来为操纵员预告潜在动作的结果。

### 2.6.2.5 可用性和可靠性

设计者应确定和记录仪表和控制的系统的定量可靠性和可用性准则，这些准则应与第一章总体需求相一致。此外，仪表和控制的设计应满足本文中关于仪表和控制部件的可用性与可靠性要求。

#### 1) 假定仪表和控制系统失效的影响

##### a. 优先选用的故障后状态

在设计过程中，仪控系统设计与电厂设计者应一起逐个具体分析电厂设备（如泵和阀）在失去动力时（电动、气动或液压）合适的故障状态。对于保护系统，典型的优先选择的故障状态应是安全状态，但也应该考虑故障保持状态。对于控制系统，典型的优先选择的故障状态应是最稳定的状态。控制系统的动力恢复时，仪表和控制不应改变被控部件的状态，并应以手动方式启动。

##### b. 单一故障的影响

仪表和控制设备，连同电厂系统的设计，宜设计成：尽实际可能地使任何仪表和控制设备或它的支持设备的单一随机故障都不会迫使电厂停运，造成对安全系统的挑战、安全系统误动作、超出运行技术规范的限制条件，导致设备大量停用时间，或者引起需要申报电厂处于某类紧急状态的工况。这一准则对所有正常运行和仪表和控制的试验模式，包括在线自诊断和定期试验状态，都应满足。这一准则适用于可能因故障而引起的自动停闭，也适用于由于一个故障产生的工况而要求操纵员必须执行的停闭。

#### 2) 顶层可靠性要求

##### a. 强迫停机频率

仪表和控制设备故障引起的强迫停机之间的平均时间设计目标是在 50 堆年内至多发生一次故障。可实现的平均时间应通过有文档记录的计算来证明。关于这一要求，强迫停机应包括直接由故障引起的停闭，以及运行人员必须执行的关闭，以避免因这些故障而违反电厂技术规范。

##### b. 可用性丧失

导致电厂可用性降低的仪表和控制设备故障的平均无故障时间，在仪表和控制设备的整个设计寿期应大于 5 年。对于这一要求，电厂可用性丧失定义为一种状态，在这一状态中电厂在保证输出范围内的任何运行点上不能达到或不能维持稳定运行状态。

##### c. 维修频率

在仪表和控制设备的整个设计寿期内，任何下列主要部件进行纠正性维护的频次不应超过每 14 天 1 次。承包商应计算需要纠正维修的故障频率。冗余模块的故障应被视为需要纠正措施的故障。



- 反应堆保护系统（RPS）与安全系统；
  - 电厂控制系统；
  - 电厂信息与监测系统，包括事故后监视。
- 3) 可用性和可靠性设计要求

a. 主要功能的分组

仪表和控制控制系统应设计成防止仪表和控制设备发生故障，降低多个主要控制功能的性能。这些系统的功能设计与实体设计都应是分组的，或明确纳入其它功能防御措施，以抑制故障在主要功能之间的蔓延。在设计中应分组或纳入功能防御措施的主要控制功能，至少包括表 2.6.2.10-1 中的功能。

在主要控制功能严格地进行分组是不切实际或者设计者可以提出替代的设计方法达到同样的功能要求，防止不可预见的故障在主要功能间蔓延，设计者应具体地确定并证明替代设计方法的合理性。仅仅依靠冗余作为分组的替代方法是不可接受的。没有保持主要功能严格分组的设计部分应在设计文件中特别指明，并且应记录保持功能分隔的备选设计准则。

- 探测器及数据传输的分组

功能设计应是每个分组的功能使用不同的过程变量来完成控制功能。对于每个分组的功能，只要是实际可行的都应使用不同的传感器和变送器，以及从与传感器和变送器到数据处理设备的不同的数据通信路径。

并不打算禁止一个控制功能所用的被测变量信号在另外的控制功能中用于信号的验证、信号的交叉比较或校准 / 补偿。但是，如果被测变量用于这一目的，设计者应保证用于相互校验的变量的仪表完全失效将不会妨碍接收方充分地完成任务 / 监测功能。

- 处理功能及供电的分组

每个被分组的功能（即主要的控制和监测功能），即使采用了冗余技术，在实际可能的情况下，应采用不同的处理器和供电（但不必使用不同的输电或电源）。也就是说，在实际应用程度上，一个分组部分的功能，不应在单个处理器或一组处理器中，或者在供电上与另一个分组部分的功能组合在一起。

电源模块应提供输出的故障状态。

- 设备的实体分隔

不同的分组部分（即主要的控制和监测功能）的数据处理和通信电子设备，应在实际可行的情况下，尽可能放置在分隔的空间内。被分组功能的设备可以共用房间或隔间，经受共同的环境条件。用于分组部分的数据通信链不应共用导管或其它的通信路径包壳，除非不在同一导管或路径包壳中还有冗余的路径来传输数据。

- 分组部分的实体分隔

对于不同的被分组的功能（即主要的控制和监测功能），用于将信息传送到 MCR 的显示装置与报警器的，以及用于将控制指令从控制室传送到数据处理或输出设备的信号通信通道、多路转换器和信号分离单元应有分割的供电，并应尽最大实际可能放置在控制室外分隔的空间内。

- 主要功能内的分组

尽最大实际可能，仪表和控制主要功能内部的分组应模拟被监测和控制的机械系统的分区。在单个机械部件故障可能导致工厂跳闸或重大瞬态(例如，给水调节阀的丧失)的情况下，仪表和控制设计仍应提供冗余和分组特性，以消除围绕单个机械部件或元件的仪表和控制单点故障。

- RPS 及安全系统仪表和控制的分组

除了满足适用的规则外，设计者应在实际可行的范围内，对 RPS 及安全系统采用类似于上述对非安全控制与监测系统规定的相同的分组方法。这应包括按本条例的要求，在单个

的安全系统及 RPS 之间以及在各序列之间进行分割。

#### b. 共因故障

设计者在确定仪表和控制的结构和选择硬件与软件中应考虑潜在的共因故障和它们的影响。在实际情况下,仪表和控制设备不应对这些系统所支持的电厂功能的不可用性有太大的影响。这应包括潜在的硬件共因故障、软件故障和维修故障。设计者应具体指出要考虑的故障,对每个故障至少应作定性的易受影响性评价,并确定为防止这些故障而采取的设计措施。共因故障的评估应具体评价纵深防御所提供的自动控制系统、数据系统、自动紧急停堆系统和自动专设系统的设计,加上多样性驱动系统 DAS,以及操纵员从控制室和电厂就地采取的手动后备控制与保护动作的能力。

仪表和控制设计应对共因故障采取防御措施。

仪表和控制设计还应符合 NUREG 0800 BTP7-19 的要求。

设计者对潜在共因故障的分析和总体解决办法应形成文件并作为仪表和控制设计基础文件的一部分提供。

#### c. 环境条件

仪表和控制设备必须设计为在正常和异常两种工况下,能经受所处环境并在这一环境下满足所有的可靠性与可用性要求。仪表和控制和其它电厂系统的设计者应迭代各自的设计,以最简单、最健壮的方式符合适用的要求。应优先选用非能动的环境防护技术,例如自然循环冷却、降额运行的健壮的硬件等。

##### • 丧失环境控制的指示

应提供手段在仪控系统的机柜在环境控制丧失时向电厂操纵员发出警告,并对受影响的机柜尽量能迅速定位。

仪表和控制设备的可靠性对温度和湿度是敏感的。在电厂寿期内可能会出现某些丧失环境控制的情况。为了减轻这些事件的后果,对于这种工况应向电厂操纵员发出警报,并尽量能够快速定位受影响的机柜,确保维修人员及时修理。

##### • 对于丧失环境控制采取措施的时间

在厂内和厂外交流电源两者都失去以后,仪控设备宜设计成能够耐受 1 个小时来应对丧失环境条件的控制。具体地讲,如果该设备所处环境控制丧失后在 1 个小时内采取适当的措施,就不会造成其永久性功能的丧失(例如不能产生信号或产生错误的信号或产生不希望的设备动作),恢复正常的环境条件将使设备能够在不更换部件的情况下恢复使用。

#### 4) 可靠性与可维修性分析

##### a. 可靠性分析

仪表和控制的设计者应完成分析、预测仪控系统的可靠性。这些分析(称为“可靠性”分析)应使用一致、系统的与可追踪的方法及适当的分析工具来完成。这些分析通常应符合 GB/T 9225《核电厂安全系统可靠性分析一般原则》中规定的准则。分析应考虑预期的正常的运行与环境条件、人因错误、可信的异常运行与环境条件,以及任何其它的适用的不利因素(例如转换瞬态)。这包括评估对于最极限环境条件偏离的概率,评估中考虑 HVAC 系统或部件的故障,并考虑在分析中的这些偏差。这些分析应编制成文件,并在仪表和控制设计过程中独立地进行审评。

可靠性分析是论证仪表和控制设计符合定量的可靠性与可用性目标。因为环境条件对电子设备的平均故障率(或 MTBF)有大的影响,因此在评估中明确地考虑由可能发生的暖通空调系统故障和正常情况下造成的环境条件是非常重要的。

##### • 部件可靠性基准

对于可靠性分析,设计者可参考采用 GJB/Z 299《电子设备可靠性预计手册》或其它等效出版物的可用的部件可靠性数据。不能得到可靠性数据的仪表和控制部件,它们的可靠性

数据可基于由本节要求的可靠性试验和设计分析得到的结果。仪表和控制部件的平均故障率或 MTBF 及部件的可靠性基准宜形成文件，并在仪表和控制设计过程中独立地进行审评。

如果在 GJB/Z 299《电子设备可靠性预计手册》或其它等效出版物中不能得到合适的可靠性数据时，设计者宜完成可靠性测试以确定系统部件的平均故障率或 MTBF。

可靠性测试结果的统计分析可以用来确定被试部件平均故障率或 MTBF 的单边、低端 95% 置信区间，在随后的可靠性分析中可使用这些数据。完成这些可靠性测试所用的方法通常与 GJB 899《可靠性鉴定与验收试验》中规定的一致；进一步的统计分析宜与 MIL-HDBK-338《电子设备可靠性设计手册》中规定的一致。测试与分析宜编制成文件并在仪表和控制设计过程中独立地进行审查。

#### b. 寄生电路分析

设计者宜完成所有仪表和控制硬件与软件的分析以识别计划外的运行方式，包括要求的功能被禁止和不需要的功能被启动。这些分析被称为“寄生电路分析”（SCA），宜采用一致的、系统的方法和合适的分析工具来完成这些分析。这些分析宜符合 MIL-HDBK-338《电子设备可靠性设计手册》中规定的准则，并在仪表和控制设计过程中加以记录和独立审查。

#### c. 故障模式和影响分析

仪控系统设计者应完成分析以识别由于仪表和控制单个部件中可信故障引起的重大影响。这些分析被称为“故障模式和影响分析”（FMEA），分析应采用一致的方法和适当的分析工具来完成，并且符合 GJB/Z 1391《故障模式、影响及危害性分析指南》和 MIL-HDBK-338《电子设备可靠性设计手册》所规定的准则。这些分析应编制成文件并在仪表和控制设计过程中独立地进行审评。有关其他导则，可参阅 IEEE 352。

#### d. 可维修性分析

仪控系统设计者宜进行所有仪表和控制硬件的分析，预测系统或部件因维修活动不能工作的总的时间。这些分析应采用一致的、系统的方法和适当的分析工具进行。这些分析应符合 GJB/Z 57《维修性分配与预计手册》中规定的准则，并形成文件且在仪表和控制设计过程中独立地进行审评。对于智能传感器、智能执行机构和其它数字设备，维护活动可能包括固件的必要升级。

#### e. 网络安全分析

宜在 NEI08-09“核动力反应堆网络安全计划”的指导下，制定网络安全计划，为保护与核电站安全和应急准备功能有关的数字计算机和通信系统及网络免受网络攻击提供高度保障。该计划应包括与电厂可靠运行相关的数字资产，包括电站停闭期间所需的资产。

仪表和控制设计人员应进行网络安全评估，确定关键数字资产 CDA，评估每个 CDA 对网络安全威胁的敏感性，并说明网络安全威胁。

参考 RG1.152，仪表和控制设计人员应拥有一个安全的开发环境，通过确保不将多余的、不需要的、无正式文档说明的功能引入数字安全系统，使系统更难侵入，并且可以实现安全的运行环境，从而支持软件的开发。仪表和控制还应确保数字化安全系统和非安全级系统的可靠运行，不会因系统的不良行为和无意中对系统的访问而引发事件。

### 2.6.2.6 试验要求

#### 1) 连续在线试验

应为尽可能多的仪表和控制硬件完整性提供连续在线自检能力，试验不应影响系统功能，应该在模块上进行。这些试验可包括（但不限于）RAM 和 ROM 失效检查、算术处理单元失效检查、数据缓冲器检查和看门狗定时器的 CPU 复位。自动化试验的覆盖范围应足以减少或消除对定期功能测试的需求。

#### 2) 定期试验

定期试验应为系统提供定期的功能试验能力。定期试验宜手动启动，但一旦启动将自动完成，并应满足 RG1.22 与 RG1.118 和 GB/T 5204 的要求。在试验不降低系统功能的情况下，可以提供定期试验自动启动。

### 3) 试验的可靠性

仪表和控制连续在线自检设施及定期功能试验设施的 MTBF，应大于被试验的设备的 MTBF。

### 4) 故障检测后的重新配置

系统应设计成在仪表和控制中检测到一个故障时，它在结构中可以被配置成一个附加的单一故障不会妨碍系统级保护或安全动作。在连续在线自检能向操纵员告知新的配置的情况下，这种重新配置应是自动的。在系统配置具有足够的冗余来满足可靠性目标而不需要自动重新配置的场合，不需要提供这种自动重新配置；然而必须警告操纵员由在线自检所检测到的任何故障。

### 5) 故障定位

仪表和控制诊断和测试功能应识别检测到的故障位置，直至最低可更换模块。

### 6) 自动试验回路的分级

仪表和控制安全级的自动测试功能（在线自动测试）应归类为相关的安全级电路，并应满足在 GB/T 13286-2008 核电厂安全级电气设备和电路独立性准则中描述的相关电路的要求，和本章的可靠性要求。

### 7) 分组试验

为了需要时进行定期的功能试验，应提供内置的自动试验设施，以减少系统结构上的改变（例如增加跨接线、拆下导线、对换电缆）。但是，定期的自动功能试验的启动应满足 2.6.2.6-2 节的要求。

### 8) 安全级系统的试验

安全相关系统（如反应堆保护和安全系统）内的连续自动测试和定期试验的组合，以及这些测试之间的重叠，应足以满足定期监督的技术规范要求，以确认满足 GB/T 5204-2008 核电厂安全系统定期试验与监测规定的系统设计或相关规定。

### 9) 试验性能

仪表和控制的试验设施应尽实际可能地设计成在电厂功率运行时完成试验而不会引起紧急停堆装置或安全系统部件错误动作。在功率运行下的试验会干扰电厂运行或损坏设备的情况中，应采取措施在电厂处于降功率运行或处于一种停堆状态下时对试验设备进行试验。

要求保持电厂功率或增加功率完成的所有试验都应在不引起停堆或降功率情况下完成。

### 10) 自动旁通

在功能试验装置允许工作并手动启动试验顺序后，除非已建立了适当的旁通，否则不得进行试验。试验要求的旁通条件应自动建立。

### 11) 试验和旁通状态的显示

对于定期功能试验，试验装置应在就地机柜上设置指示器，提供试验通过或未通过以及旁通状态的快速指示。

### 12) 试验结果记录

仪表和控制设计应具有试验结果打印功能。打印的试验结果至少应包括对子试验的名称以及该子试验通过或未通过状态的识别。

此外，试验结果应被记录并存储起来，以便以后在仪表和控制内部或通过防火墙网关存储到历史数据记录服务器中以便以后检索。

### 13) 自动旁通的解除

在试验顺序完成时，自动试验装置应撤除为了能进行自动试验而建立的所有旁通。实际

的指示设施应包括在设计中，以便使电厂人员能够确定已撤除了所有的试验旁通，并确定为了正常运行已使系统重新进行配置。

#### 14) 试验输入信号

在定期的功能试验期间，紧急停堆系统与安全系统的功能处理器应与正常的执行通路脱开。因此，由自动试验装置进行的所有输入与输出功能试验应采用模拟的过程输入信号。

#### 15) 处理器初始化试验

所有处理器在初始状态下完成综合的自诊断例行程序。

#### 16) 网络安全测试

应该测试网络安全功能，以 V&V 安全要求是否已正确实施。

网络安全威胁经常变化，因此需要进行持续的网络安全测试。

### 2.6.2.7 可维修性

仪表和控制应设计成在整个电厂寿期内简化并减少要求维修的次数和难度。

#### 1) 维修控制

设计者应依据维修技术人员的维修次数与技能以及需要的操纵员的时间，定量地确定预期的仪表和控制设备合计的维修负荷。这是以 MTBF 和维修所用平均时间作为依据，并考虑所有的冗余通道和设备。这还将包括预防性的维修，电厂运行期间要求的安全有关设备的定期功能试验以及计划的更换。

#### 2) 设备更换

最理想的情况下仪表和控制设备有足够长的工作寿命，在电厂寿期内不需要替换。在实际情况中，数字化系统和其部件要比电厂的寿命短很多。因此设计者应采取必要措施将部件更换带来的影响降低至最少，并保证到寿期后不降低电厂可用性。仪表和控制设计应提出必须替换的所有设备的工作寿命，大致安排出后勤支持（如设备与人力）的时间，这些对于营运方是需要的。

#### 3) 模块更换

仪表和控制设备的修理通常应是在现场通过简单的模块替换来完成，也就是说重新接线或替换单个小的部件应在工厂进行，不应在现场机柜上来做。仪表和控制的设计应使得升级版本替换过时的模块无需进行重大修改。组件也应该是模块化的，并且易于更换，而无需大量拆卸或拆除周围的系统、结构和组件。

#### 4) 故障检测和修复时间

故障检测和维修，对于所有类型的控制设备，直至最低级别的可更换模块所需要的平均时间应短于 4 小时。检测和维修任何控制模块故障的最长时间应小于 8 小时。这一时间包括：发现故障、到达故障设备的地方、确定必需的修理、得到必需的替换件或备件、进行修理或更换以及检验已成功完成了修理的时间。修理时间的评估应假定技术人员具有必要的技术水平以及在现场可得到合理的后勤支持。

#### 5) 在线校准

任何模块其校准频度高于每个燃料周期一次，在维持适当的控制、监测及系统性能的同时，需考虑在线校准能力。

如果校准必须在计划停堆之间进行，则不应妨碍电厂运行。

#### 6) 在线维修

与仪表和控制设备预期的维护或修理有关的活动都不应妨碍任何电厂安全或保护系统完成它需要的功能。而且仪表和控制应设计成在最大程度上尽实际可能允许在电厂运行时完成预期的维修。设计应提供维修旁通以允许在线维修，包括适当的闭锁或联锁，以保证在维修过程中操纵员的错误不会导致电厂停机。仪表和控制必须清楚地指示通道故障，以便在将

其他通道置于断开、旁路或测试模式之前警告操纵员和技术人员。

#### 7) 维修中人因工程

系统的维修的应依照良好的人因工程原则来设计。仪控系统设计者宜参考 NUREG 0700 “人机界面设计审查指南”。下面规定了一些应提供的具体特征。

##### a. 确定维修任务

设计者应系统地指出维修仪表和控制设备需要的任务，包括规定技能、工具、试验设备和权限定义等。这些任务应包括维修完成后将设备恢复服务所需要的试验。这一分析结果应作为仪控系统设计的一部分提供。

##### b. 评估维修任务

设计者应评估维修任务，保证所需的维修活动是简单且易于理解的，并在维修技术人员预期的能力内的。在设计过程足够早的时候完成评估，以便能将反馈结果结合到设备设计中去，减轻由任务评估发现的矛盾。任务评估的结果应作为仪控系统设计资料的一部分提供。对于电厂安全或可用性至关重要的维修程序，应在维修培训和开发环境中的设备上得到最大程度的验证。

##### c. 有关维修的设备设计

仪表和控制设备（电路板、机架、终端设备等）应设计成便于维修，并在操作过程中尽量减少出现混淆和出错的可能。这包括下列措施：

- 位置与配置符合功能逻辑；
- 标识与电厂标识保持一致，在机柜内和机柜外进行标识；
- 具有可达性与可识别性的试验点；
- 对误动作、端子的短接、零部件的脱落等提供适当的防护；
- 试验设备的供电；
- 贴出注意事项与关键性的说明；
- 在需要维修、观察与试验的场所设计有各位置间的通信措施；
- 在需要访问以支持维修或故障排除的地方，应提供维修或工程师站。

##### d. 维修路径

仪表和控制机柜应设计成便于维修人员接近。仪表和控制机柜的设计应允许专门的维修技术人员在不影响其他技术人员服务设备的情况下操作其特定设备。装有仪表和控制机柜的地方的门和通道的尺寸应能够便于机柜被拆除和更换。例如，MCR 入口门和内部间隔应允许单个工作站可以移动和重新放置。

##### e. 维修场所

对于连续的由人操作的控制站，特别是在 MCR 中，维修人员在一个区域内应能查找故障、完成有关试验和修理仪控设备，在这一区域的工作不会影响操纵员接近控制器与显示装置，不会干扰操纵员对控制屏的观察。例外情况是，应允许维修人员在需要维修设备的前部通道时接近控制开关或模块以及前面板的显示装置。当然应尽量减少维修人员接近控制屏正面的需要。仪表和控制的设计者应考虑使用绞接式或平铺式面板以使其可访问而不会在面板下方、内部或后面爬行。

##### f. 影响操纵员行为的维修

仪表和控制设备通常接受工作站或控制台上控制器来的输入并驱动指示器或显示仪。在维修期间，除非前面板上的设备正在维修，否则操纵员不需要采取动作来提供输入或监视显示装置或指示器，设备应能够接受用来模拟控制器的信号输入并能够提供和监测输出。但是，在进行试验时应给操纵员提供指示，这些试验会影响设备或系统的可操作性，或是设备或系统更容易受异常事件（如误停堆）的影响。指示应包括如柜门打开、通道旁路、通道跳闸和通道置于试验位置等。

#### g. 维修用的控制器和显示

只能由技术人员在维修过程中使用的控制器和显示仪表（即操纵员从未使用过的），不得由操纵员访问。应在可能有用的地方提供本地维修和工程师站，与用于正常、异常和紧急操作的操纵员站分开。同样，操纵员也不应使用操作员站访问维修和工程相关功能。当系统或部件因例行维修或纠正性维修而无法正常使用时，仪表和控制必须清楚指示这些组件的状态（如安全标签、隔离状态、无法操作等）。在基于通用产品（如 DCS）的环境中，维修工作站、工程师站和操作员站可能具有几乎相同的硬件和基本软件。维修工作站和工程师站之间的区别是基于个人用户的身份验证以及适当特权与特定工作站和/或个人角色（如操纵员、主管、工程师、维修人员）的管理关联。

### 2.6.2.8 设备制造要求

仪表和控制设计应结合进一步减少仪表和控制设备制造与安装时间和工作量的特点。这些特点不应应对设备的运行、试验、维修和检修等能力有不利的影响。本节将对这些特点提出一些具体的要求。

#### 1) 使用成熟技术

仪表和控制设备的制造与安装应基于证实过的制造、组装和安装技术。

#### 2) 现场操作最简化

设计仪控系统应体现一些尽量减少在现场安装仪表和控制设备所需的工作量并降低工作难度。这些特点包括下面提出的一些条款。

##### a. 模块化设计

设计仪表和控制系统部件应使每个模块在完成系统集成前可以单独地进行安装与功能测试。控制系统机柜与屏应在它们作为电厂模块在安装前制造、接线和功能测试。

##### b. 现场接线

仪表和控制设计应限制现场进行的接线数量。最大限度采用多导线的连接器并在组装前做好连接用的导线夹。在使用导线连接器的地方，应提供措施保证适当地做标志，并确保对短路或偶然的接触的防护，应避免单根的线一线或线一端子连接。

接线端子的设计和制造应达到或超过国家或行业标准规定的拉力测试要求。

恶劣环境中与安全相关的连接器应符合环境要求。干节点电路应用的连接器应适合干节点电路条件。

##### c. 备用导线

在实际可能的地方，线束与电缆应包括备用的导线。这些备件应用来为电厂维修或改进提供适应能力（见 2.6.2.9 节）。在敷设期间为能保证没有其它导线受到损坏，备用的导线可用来替换损坏的导线。光纤干线、纤芯段、边缘段和配线架应使用至少 100% 的备用光纤进行设计。建议在边缘或现场段进行局部数据采集和集中。

#### 3) 标准化制造

只要实际可能，在仪控系统中会影响现场工作的一些特点应标准化。它包括如下一些措施：

- a. 连接器和线束的大小与类型；
- b. 机柜的处理、发货和硬件的安装；
- c. 模块与部件的标识和识别。

#### 4) 进度匹配要求

设计者应确保仪控系统设备到现场后的安装和调试进度完全能保障华龙技术电厂的建造与启动实验的进度。设计者特别应根据下列原则来制定计划：为了电厂试验与启动采用永久安装的电厂仪表与控制装置，减少临时性安装的仪表，并减少因为电厂设备和有关的仪表

与控制装置没有适当地协调而造成的需要重新校正和试验的返工的数量。

电厂建设进度表应在进度表中尽早进行仪表和控制的设计，以便尽早完成设备模拟机。

2.6.2.9 设计灵活性

仪表和控制设计应提供对设计变更的灵活的适应能力，并提供因老化、磨损或过时替换设备的能力。具体地设计应包括如下一些设计特点：

- 1) 功能和物理上的模块化设计，无需进行重大改造即可适应更换和升级；
- 2) 仪表屏、控制台、端子排与布线路径等在实体上都具有冗余容量；
- 3) 冗余的输入与输出容量（逻辑和物理两方面），计算机系统存储容量和处理容量；
- 4) 在报警与显示系统中，在信息处理和实体的显示两方面都有冗余容量；
- 5) 数据通信的冗余容量（系统加载等）；
- 6) 供电与HVAC的冗余容量。

模块化升级应“按原样”（相同）或“等效”（相同的装配、形式和功能）更改，以免电缆、线束、电源、端子、配线架、设备机架和其他支持基础设施需要修改或更换。但是在某些情况下，市场上可能无法提供适当完整性或质量的等效替代品，并且可能需要功能升级。

电缆桥架、走线槽、导线管、防火屏障和贯穿件中至少有 50% 的冗余容量。

电厂配置与设计文件应具体地说明这些特点并概要说明如何利用这些特点。

2.6.2.10 附表

表2.6.2.10-1 需要细分的控制和监视功能

分类	范围
反应性控制	自动和手动控制和监测棒位，以及手动控制和监测硼浓度和中子通量。
蒸汽发生器装载量控制	控制和监控主给水流量，主给水泵和蒸汽发生器装载量。
汽轮机蒸汽需求控制	汽轮机流阀和旁通阀的控制和监控
稳压器压力控制	控制和监控稳压器加热器以及喷淋和 RCS 压力。
RCS 控制	控制和监视补给和调配、RCS 装载量以及化学容积和控制系统

2.6.3 控制室要求

2.6.3.1 设计过程要求

仪表和控制的设计人员必须确定一个过程，保证对仪表和控制中电厂的所有控制站采用一个一致的设计方法。对这个过程的要求在本节和2.6.2.1节中阐述。就地控制站包括电厂操纵员或电厂人员（如化学、辐射防护、安全、信息技术（IT）等）根据功能和任务采取行动的所有地方。例如，它包括单个设备控制站，现场操作员在其中执行为就地操作一个设备而调节一个手动节流阀开度这样的任务。

功能和任务的应用

控制站的设计过程应该基于并结合2.2.2.1-3中所识别的必须的功能和任务。

控制站概念设计

设计过程必须包括对每一个控制站根据初始确定的任务及早进行概念设计。这些概念设计应该足够完整以便进行第2.6.3.1-3节中规定的审查，包括：



- 控制站的布置图；
- 确定控制器和显示器及其主要特性；
- 按序排列的任务清单及其对信息和控制的要求；
- 控制站的初步操作规程。

#### 1) 概念设计审查

设计过程应考虑对每个控制站的概念设计和分配给控制站的功能和任务的兼容性进行各学科间的审查。

#### b. 评审组组成

每个控制站的评审队伍，应至少包括工程技术人员、具有运行经验人员、人因专家，特别是：

- 现在和过去取得执照的、有经验的操纵员（最好包括无执照等级的、RO 等级的和 SRO 等级的有经验的人员）；
- 仪表和控制工程师；
- 熟悉控制站系统控制的系统工程师；
- 人因专家；
- 熟悉特定控制站有关功能的其他专业的人员，如：维修、试验、规程、照明、辐射防护、通讯、持有操纵员执照、化学、安全、IT 和反应堆工程。

控制站设计受各种因素的影响；因此，审查小组应该能够代表来自各个方面的观点。

#### c. 控制站模型的应用

设计过程应该为每个控制站提供实体模型（静态模型、动态数字仿真和/或虚拟现实模型）以供审查过程中使用。模型应该做得易于修改从而可以方便的进行修改和评价。模型在电站设计初期就应该可用，以便评价结果能改进仪表和控制 and 电厂系统的设计。

#### d. 动态模拟器的应用

控制站设计审查过程必须考虑控制站的动态模拟。在设计过程早期就应使用动态模拟设备，随着设计进程的深入，动态模拟的范围应逐步扩展到全范围模拟，以便评价结果能改进仪表和控制 and 电厂系统设计。

使用模拟机进行的评价应基于适当的人机性能（human-system performance）的定性和定量的措施以及预定的验收准则，这些应由审查组进行特别审查。对于涉及运行组或操作试验人员的评价，还应包括班组效能的定性和定量的度量方法。

#### 2) 功能、任务和设计的迭代

设计过程应该对控制站设计与分配给它们的功能和任务反复迭代。也就是说，单个控制站的设计过程应对控制站整体功能和任务的识别以及分配提供反馈。设计过程应根据审查过程中发现的困难重新对任务进行分配。否则，初始的功能和任务分配得不到纠正将导致控制站设计的不合理。

#### 3) 设计规范的定义

a. 设计过程应定义设计所需的详细设计规范。这些规定宜根据已发布的关于人因工程方面的导则，如 NUREG 0711。这些规定包括：

- 控制器和显示器的种类；
- 标签；
- 颜色编码；
- 界限；
- 术语；
- 位置规定；
- 模拟图规定和符号。

写缩略词。控制室设计的一致性将

b. 如果现行的人因导则对仪表和控制系统设计者选用的新技术（例如，软控制）指导有限，仪表和控制设计人员应根据最佳可用信息制定必要的设计规定。这种设计规定随后必须通过实验，包括动态仿真进行检验并明确地包括在设计审查过程中。评审小组应特别确定是否需要人因工程专家对设计实践进行进一步评审。

c. 广泛用于核电厂，且已证明令人满意的设计实践，并且在其他行业中已被证明是可靠的功能设计实践，宜由设计者优先采用。当所接受的人因导则不优先选择这些广泛应用的实践时，宜由设计者进行特殊的评价和审查并形成文件，以验证操纵员的效能不因它们的使用而下降。

#### 4) 最终设计文件

应该提供所有控制站详细的最终设计文件。最起码应该满足以下要求。

电厂业主需要最终设计的详细文件，以支持操纵员培训、运行规程的编制，以及未来电厂的改造。

#### a. 设计配置

应该提供每个控制站配置的完整定义。包括：

- 仪表板和其它设备的布置；
- 控制器类型；
- 显示器类型；
- 颜色、抛光和材料；
- 标签和运行辅助。

纸应提供控制站的正确图示。控制站设计配置的控制是很薄弱的环节。控制屏的图纸往往是针对制造（特别是布线）而不是向操纵员展示和使用。因此，一些不正确和不合适的配置要到电厂建成的时候才会发现。另外，有关信息往往是零碎的并难于在培训和计划的修改中使用。

#### b. 功能和任务的定义

每个控制站的设计文件必须规定该控制站上要执行的功能和任务。

#### c. 设计规范

设计文件应规定所有控制站的通用设计规范。任何偏离通用设计规范的改动及改动的原因都应该记录在案。

#### d. 运行规程

每个控制台的设计文件应该包括其运行规程。可访问其他系统及其系统画面的控制站宜配备电子化规程或数字化规程。这些规程应作为第2.6.3.1-3节要求的控制站设计审查的组成部分进行审查。该审查包括使用实体模型和动态仿真的方法进行验证。

### 2.6.3.2 运行人员

#### 1) 正常现场值班人员

仪表和控制设计应该基于本节规定的正常运行时的运行值班人员配置，也就是说，电厂在正常运行时的功能和任务应该由下面这些限定了资格和岗位的运行人员来完成。

仪表和控制设计应适应以下在正常运行时的值班人员配置：

- 每个运行值应该有一位值长。他对整个电厂的运行负责并具有反应堆高级操纵员(SRO)执照。他通常的工作场所是在与 MCR（主控制室）相邻的值长办公室，在当班期间，值长也可以去电厂范围内的任何地方。
- 每个运行值还应有另一位具有 SRO 执照的机组长。他负责对主控室中的操纵员进行监督。机组长正常工作场所位于 MCR 的控制区，在当班期间，他也可以在

MCR 的任何位置。

- 每个运行值还拥有两名拥有反应堆操纵员（RO）执照的人员，他们负责主控室里的控制操作。操纵员通常位于主控室内的控制区。他们中的一人（或另一名 RO/SRO）需一直保持在控制区内，其他人所有时间都在主控室内。
- 每个运行值还应该有一个额外的操纵员作为运行与电厂其他专业人员的接口，协助其他两名操纵员（例如，为维修人员进行设备切换和挂牌）。他通常位于与 MCR 的控制区直接相连的区域内，他可以在控制区内替换或协助另一位 RO 或者在电厂范围内的任何位置。
- 现场值班人员还包括一个具有资质的核安全技术顾问（STA），STA 通常位于紧邻主控室的办公室内，而且，当班期间可以去电厂范围内的任何地方。
- 每个运行值还应有两个以上具有在就地控制站操作电厂设备资质的现场操作员（EOs）。现操通常不在主控室，而是根据操作要求在电厂现场的不同位置。
- 每个运行值还需要有一个具有一定资质和受过训练的人来辅助值长处理行政事务，如，查找资料、处理通讯联系等等。他通常在值长办公室或在其附近的位置，也可以在电厂中的任何位置。

#### b. 运行人员的职责

设计者应在设计中规定每个运行人员承担的职责。包括监控的职责并应考虑所有电厂运行模式。

#### 2) 应急期间的工作人员

a. 在 2.6.2.1-3 中规定的在仪表和控制设计过程进行的瞬态和应急工况分析应以下面的假设为基础：

- 功率运行期间，至少有一个操纵员一直都处于主控室的控制区内，并且他能对任何偏离正常运行的工况立即进行响应。
- 当需要时另外两个操纵员（至少一个是 SRO）能在一分钟到达主控室控制区。
- 两个现场操作员通过声音通讯（如广播）可立即响应来自主控操纵员的命令；
- 值长、STA 和另一位 RO 能通过声音通讯立即响应主控制室的操纵员，并能在十分钟之内到达主控室控制区。

从主控室撤离后可利用的运行人员在 2.6.3.8-3 中规定。

b. 应急工况下，从该情况发生到要求操纵员必须采取措施的时间间隔不得少于 30 分钟或符合 2.1.2 和 1.2.8 的要求，而且，在这个时间之前仪表和控制的设计也不应妨碍操纵员动作。

#### 3) 最大工作人员数量

控制室设计（大小、环境、布局、数量和工作站设计等）应该满足在紧急情况下由以下人员组成的最大规模的团队人员同时在 MCR 的主要控制区完成各项操作：两个具有 SRO 执照的人员、三个具有 RO 执照的人员、一个 STA；两个现场操作员。

还需要在主控室的控制区预留三个观察员和辅助人员的位置：一个来自核安全监督站、一个来自营运单位管理部门的人员、一个处理通讯交流的人员。

#### 4) 正常运行所要求的操纵员

仪表和控制设计应能够满足单个操纵员就可以完成把电厂从热备工况带到满功率工况、维持满功率运行以及把电厂降到热备用状态所需的监控和操作。

#### 5) 升温启动和降温停运所需要的操纵员

对于从冷停堆到热备用的启动以及从热备用到冷停堆的停运过程，仪表和控制的设计应该使必须的监控和操作由在 2.6.3.2-1 中定义的正常运行班组人员来完成。

#### 6) 操纵员的资格鉴定

运行班组人员的培训、资格和经验应该用作仪表和控制的设计基础，这是典型的运行实践。

### 2.6.3.3 报警

#### 1) 报警系统的总体要求

仪表和控制设计应包括主控室的主要过程报警系统，以及就地控制站中用于支持分配给控制站的功能和任务的报警系统的设计。

##### a. 设计基准

华龙技术电厂机组的报警系统应设计为：

- 提醒操纵员偏离正常运行的工况以及需要采取的措施。
- 最大程度的指导操纵员作出正确的响应。
- 协助操纵员了解和保持对电厂状态及其系统和功能的认知。
- 减少报警系统对操纵员的干扰和不必要的负担。

##### b. 功能和任务分析的综合

第 2.6.2.1-3 节要求的功能和任务分析中，应特别确定报警信息在何处以及如何与其他信息一起用于执行功能和任务，或者在何处可以启动和修改任务以响应报警。

##### c. 试验

报警系统应提供给操纵员定期地确认系统功能正确的能力。对于报警系统中任何不能通过内置测试特性来连续检查的部分都应该由操纵员通过定期的功能试验来检查。试验能力应易于了解和使用。为了确保并增强报警系统的正常使用能力，应对试验“任务”进行人因评估。

##### d. 仿真评估

应通过实时的动态仿真以证明报警系统的有效性。仿真评估应包括报警系统重要的设计性能和特性的专门评估——被选的特殊报警的恰当性、声响和显示的有效性、以及操纵员与报警系统之间交互的方法和设备（确认，消音，显示选择等）。某些设计特性的评估可以用非全范围模拟机实现，或使用与华龙技术电厂配置接近的模拟机来完成。但是，要使用全范围的模拟机和 2.1.12 节要求的性能模型来完成整个报警系统有效性的最后验证。报警系统有效性的最后评估应和人—机接口系统及主控制室的全面验证和确认试验结合进行。应根据报警系统特殊的设计目标，由设计者规定特殊的方法来判断报警系统的有效性。因此，在设计过程中应尽早定义这些措施，并与用于判断整个控制室和工作站有效性的措施密切配合。

#### 2) 报警条件的选择

##### a. 方法

应用一致的方法和原则用来选择电厂报警的条件。为了满足单独的系统要求，选择过程要基于电厂系统设计者和人—机接口系统设计者之间的相互配合，同时，要使用统一的准则并保证报警系统和操纵员的需求和能力相适应。

##### b. 选择的准则

选择报警条件的准则包括：

- 每一个报警都规定了操纵员应采取的响应措施；
- 应基于“功率运行暗盘”原理来选择报警条件——当电厂在满功率正常运行且所有系统处于其正常配置时，不宜出现报警。
- 每个报警定值的选择应使报警系统能足够早提醒操纵员以便有时间采取适当措施，但是整定值也不能太接近正常运行范围，以免产生不必要的干扰报警。
- 实际应用中，应在主要系统和设备的故障导致不可用（如电厂停堆）、设备损坏、违反技术规范、或其他严重的后果之前，提供报警来提醒操纵员。如 2.6.3.3-

3a 和 2.6.3.3-3b 中所描述的设计者要确保这些先兆预警不会变成虚假的干扰报警。

- 如有可能,关于过程偏差的报警应基于确认的过程信号而不是单个传感器的指示。

#### c. 报警手册

对于每一种报警条件,设计者应编制报警手册,并规定操纵员要采取的动作和给出其他需要的信息以保证恰当的响应。

#### d. 操纵员定义的临时报警

应为操纵员提供在特定情况下设置临时的报警和整定值的能力。在这种情况下,所设置的报警对操纵员选择的进程(如,对有问题的设备增加监测的临时报警,或当操纵员想知道某一个变量是偏离还是接近它的限值)是有帮助的。

#### e. 报警选择的准则文件

设计者应编写报警选择的准则文件,作为正式设计基准的一部分,包括所要求动作的定义、选择报警整定值的准则等。

### 3) 报警处理

#### a. 干扰报警

报警系统的设计应该最大限度减少潜在的干扰报警。为了消除潜在的干扰报警,报警系统应包括如下特性:

- 能对报警输入采用时间过滤和(或)时间延迟,以过滤噪声和消除不需要的瞬时报警;
- 能对报警输入进行逻辑处理,即将输入报警条件与其他信号、报警、计算条件和电厂模式等相结合,以便能构成更“智能”或“有限制”的灵活逻辑来避免不必要的报警出现。

#### b. 潜在的干扰报警的评估

应评估每一单独的报警成为干扰报警的潜在可能性——当不需要操纵员采取行动时,报警出现的潜在可能性。评估应考虑如下:

- 电厂和相关联的系统运行的所有模式;
- 相关系统或设备的维修(例如,由于机组大修或设备停运产生的许多报警的可能性);
- 由于设备启动可能产生的瞬时报警(如当泵启动,但泵出口压力的建立需要时间而导致泵的出口压力低报警出现);
- 系统对电厂瞬态或干扰的动态响应,这些瞬态或干扰触发报警,但不代表实际的报警条件(例如,汽轮机跳闸后蒸汽管道内的压力波动,或由于电厂功率变化导致蒸汽发生器液位仪表的波动或给水加热器或水箱的水位波动等);
- 在报警输入端的潜在噪声源(电磁的,接触器触点抖动等);
- 相关系统或设备不经常(似乎合理地)的在线配置方式;
- 可能导致不必要报警发生的其他条件。

#### c. 重闪的能力

任何报警可由多个输入报警通过“或”逻辑组合而形成(如一个“故障”报警包含着一个设备或系统的几个可能的问题,轴承温度报警包含一个或多个设备上的多个轴承),当第一个报警已出现和确认以后,后序报警情况又出现时,报警逻辑系统应具有“重闪”的能力——报警的可听和可视化指示再次激活。为实现组合报警的“重闪”需要,应针对每个报警的实际情况进行评估,需考虑提醒操纵员注意后续的报警条件的必要性,以及如果采用不必要的重闪可能对操纵员产生的干扰。对组合报警,操纵员应有能力在所要求采取措施的时间限制内确定哪个输入的报警条件激活此报警。

#### d. 减少干扰报警数量

报警系统的设计应最大程度减少在电厂扰动和紧急情况下出现的报警数量,并和提供给操纵员以作出正确的响应必需的信息相一致。应通过滤波、逻辑处理以及其他处理,减少不必要的报警,使出现的报警有尽可能多的信息。

应通过使用适用于单个报警并基于系统和设备的逻辑使得报警更加智能以减少扰动期间的报警数量和频率(见上面 2.6.3.3-3a 节和 2.6.3.3-3b 节)。另一方面,可采用更“全面”或全厂范围的报警抑制方案,如模式抑制(当电厂在特定的运行模式时,阻止激活一组报警)或事件抑制(当如反应堆停堆或安全注入信号出现时,阻止激活一组报警)。然而,人一机接口设计者应提供以这种方式抑制所有报警的正当理由,确保不丢失操纵员在任何情况下可能需要的信息。再有,当采用这样的全面抑制方案时,应考虑操纵员能手动获取被抑制的报警信息。

#### e. 报警的旁通或停用

报警系统应包括准确地处理停用报警的特性和能力。对专用区域和连续显示的报警,人一机接口系统设计者要特殊考虑提供方法,指示操纵员报警何时失效(报警不可用,旁通,或退出运行)。为了对报警条件提供恰当的覆盖范围,当一种特定报警退出运行时,人一机接口系统设计者要提供操纵员采取什么行动的指南。在报警长期激活的情况下(例如,现场部分设备的维修),设计者也要考虑是否提供给操纵员旁通或使所选报警的失效的能力。管理上应该严格地控制旁通报警特性的使用。报警系统应能列出所有被旁通或退出运行报警的清单。

### 4) 报警的显示

#### a. 位置和类型

报警显示的位置和类型,以及在每个显示器上显示的特定报警应确保下面几点:

- 为完成分配的任务,每个操纵员有需要的报警信息,要意识到不同的操纵员为不同的目的使用报警信息。
- 每种报警信息的显示特点是和信息的使用目的相一致(如短时间内偏离正常情况的快速响应,设备问题的长期诊断和事故后分析等等)。
- 报警显示能满足所有操纵员对于保持电厂和主要系统状态的了解需要。报警信息和另一些提供给操纵员的过程信息集成一起,允许操纵员在监测和诊断问题时在其他显示器上使用报警。

#### b. 显示的特性

需要操纵员快速响应的报警,和在诊断和响应电厂扰动或包含许多报警的事件中使用的主要过程报警,或为保持操纵员对电厂和系统状态的总体了解时使用的主要报警,在显示器上的显示宜有下列的特性:

- 专用区域——报警信息在显示器上总是出现在同一位置,以便操纵员在检查状态时,通过使用位置的和图形的辨识很容易找到报警。
- 连续地,并列(平铺)地呈现——报警信息对操纵员总是可用的(可直接看到),这和操纵员必需选择要看的信息的串联显示方式不同。
- 相关显示的共同放置——在相关显示附近呈现报警,帮助操纵员快速地把报警和影响的电厂系统或功能区关联在一起。
- 显示正常状态和报警状态——显示能够使操纵员能快速判断报警是否“存在”(在报警状态),或工况是否正常,这样操纵员能够确定没有问题(根据报警不“存在”),操纵员能够用报警去检验什么是错误的假设等等。(这并不意味着要在正常情况出现报警,相反这指的是常规的窗式报警器特性,该特性允许操纵员很容易浏览和确定是否有特定的报警出现以及整个系统是否无报警出现等等。)

需要提醒操纵员迅速采取行动以保证安全且不提供自动动作的报警，应显示在 2.6.3.3-4 节所描述的专用区域显示器中。

在 2.6.3.3-4 节所描述的专用区域显示器包括处理器、电源、数据通讯通道和显示装置本身，其设计应该满足，该设备中单一故障不会导致操纵员的报警信息大范围的丢失。应尽可能对 2.6.3.3-4 节和 2.6.3.3-4 节定义的信号使用合适的信号确认技术，确保显示的信息是高质量的。

在 2.6.3.3-4b 节和 2.6.3.3-4b 节中规定的使用专用区域显示器的报警信息也应显示在工作站上的显示器上供控制室的操纵员和机组长使用。这些显示器不需要专用区域的。

#### c. 报警分组

报警的专用区域显示应以电厂系统或功能分组的形式编组。系统/功能组应清楚地描述和加以标识，以便运行团队的任何人员在主要的操作区域的任何地方，能容易地确定哪个系统一直存在报警，哪个系统有新报警出现。

#### d. 报警的优先级

报警应以优先级的方式呈现，以便操纵员能根据它们相对的重要性或紧急性和必需采取行动的时间限制来作出响应。

- 确定报警优先级的准则

优先级的分配应根据已形成的文件准则，此准则是 2.6.3.1-5 节要求的规定设计通则的一部分。

- 高优先级报警的数量

分配最高优先级的报警数量应受到限制，以便在引起多报警的可信扰动或事故时，不会给操纵员显示过多的最高优先级的报警。

- 列表显示的优先级

当报警在液晶显示器或相似设备上以列表形式显示时，人一机接口系统的设计者应证明最高优先级报警的数量不超过显示可信事故情景的能力。也就是说，最高优先级的报警显示在一页内。

- 通过实时仿真，在实际扰动和事故工况下来评估优先级和编码方式的有效性。

#### e. 报警系统的控制

为操纵员提供的报警显示和控制装置（确认，抑制，复位等等）的布置和位置应确保：

- 响应报警的运行团队人员能有足够的时间获得报警信息以恰当地响应报警。
- 要避免一个人读取报警信息，然后转诉给需要响应的另外一个人听的做法。
- 操纵员可从进行确认操作的工作站上读取报警信息。
- 当操纵员工作在工作站时，应尽量避免为了确认报警，而离开工作站。

#### f. 报警的音调

报警系统有产生多种音调或信号以通告报警条件的能力。应按下面所述要求提供音调或信号的类型和音量强弱：

- 能提醒操纵员存在报警。
- 操纵员能够从特殊的音调和/或声音的方向，快速地辨认报警优先级或定位报警起源在哪（电厂的哪个功能区，或那个工作站），因而直接地给予注意。
- 通过报警的选择，可听通告方案的设计，和抑制可听声音的措施减少对运行人员的干扰及其承担的压力。
- 新出报警的音调要与“清除”的报警声音分开和区别，后者是暂时的或是“自行静音”的。

#### g. 与控制站设计的集成

在控制站提供的报警应作为控制站盘面设计的整体集成部分进行处理，例如，它们应包

括在任何模型和仿真中。

#### h. 报警的时间顺序

作为报警处理的一部分,报警系统应对每个报警标注出现的时间,这样可获得报警时间顺序的信息,宜在 200 毫秒或更少的时间内分辨清。对于指定作为事件顺序点的那类报警,时间分辨率宜是 10 毫秒或更少,除了在特殊的情况下,人一机接口系统设计者应根据操纵员对时间顺序信息的需要,确定较粗略的时间分辨是恰当的。

通过在线显示和打印形式,在任何时候应该提供给操纵员获得之前的历史时期内所出现的报警时间顺序的能力,并至少覆盖 4 个小时。报警系统硬件和软件应具有足够的计算速度 and 能力,缓存能力等等,以确保在电厂可能遭遇的最坏的扰动和紧急情况下不会丢失历史记录中的报警信息(包括电源的丧失和另一些可能出现许多报警的情况)。报警顺序信息应在主控制室的工作站和技术支持中心(TSC)可用。

### 2.6.3.4 显示

设计者应为控制站的显示制定符合NUREG 0700指南的规范。

当选择显示类型时,宜确定必须考虑的属性和必要的设计细节,形成特殊的设计通则(见 2.6.3.1-5节)。

#### 1) 一致的显示

仪表和控制设计的目标是尽量减少向操作员提供信息的显示类型的数量。不同类型的显示应与操作员使用信息的特征或用途相关。控制站的设计规定应充分说明选择显示类型的逻辑。

#### 2) 要求的指示

提供给操纵员的位置或状态指示,应尽可能是实际部件状态或位置。只有当“需求”指示为操纵员提供必须信息,才显示“要求”指示,如电磁阀的供电或气动执行机构的压力。

#### 3) 显示故障指示

当指示可能出错时,例如失去了电源,或丢失了输入信号,必须向操纵员提供鉴别手段。对于通过数字数据流(如串行BCD二—十进制编码)定期更新的显示,当最后一次更新超时,应有手段识别指示故障。

满足此要求的一种机制是在每个显示器上提供“心跳”指示,表示每个指示的“心跳”已发生一次更新。

#### 4) 阀门的位置指示

所有阀门在受控位置应有阀位指示,即开或关。在功能和任务分析需要时,应在其他控制站提供位置指示。

#### 5) 电机的电流指示

操纵员从控制站启动的任何转动设备(例如泵和风机),应提供其主要电动机的电流指示,电动机的电流为该设备正常启动和运行提供有效的指示。

#### 6) 指示灯

应不使用依靠单一发光元件(白炽灯,发关二极管等等)的指示灯,即单个发光元件的故障不得导致信息丢失。此外,任何故障都应是明显的,易于操纵员自己替换。通常,应避免使用短寿命(少于10000小时)的发光元件。

#### 7) 运行趋势信息

运行趋势信息显示在显示器上,不需要纸,墨等等。设计者应确定哪些趋势应连续显示还是调用后才显示。

#### 8) 显示和模拟的集成



设计者应评估在一个房间或工作区域中设置多个单独的控制站或工作站的必要性,并在必要时提供集成的显示器和模拟设备,以协调各个站的任务。

提供独立于其它显示器的关键参数和状态指示,提供的信息将立即提供给所有操纵员和任何观察者,而不会给正常显示设备增加负担,而且不需要观察者任何直接操作。

a. 设计过程中集成显示的合并

任何集成显示应明确地包括在仪表和控制设计开发过程中,特别是它服务的工作站或控制站的设计。包括如下几点:

- 分配给概观显示的功能和任务的特定标识。
- 将显示融入模拟器和实体模型中。
- 在运行程序中,概观显示使用的规格书。

b. 主控制室集成的显示和模拟

仪表和控制设计应包括在MCR中集成的概观显示和模拟。这种显示要满足第2.6.3.4-8节要求的集成到仪表和控制设计过程中的要求,此外,还应满足以下要求。

- MCR 的概观和模拟应包括在第二卷第 2.1.12 要求的电厂模拟器和性能模型中。通过实时的仿真,确认概貌画面的适用性。
- 概貌图显示要提供有限数量的关键运行参数的显示。特殊参数要在设计过程中确定;但应特别考虑以下内容:
  - 功率水平;
  - 反应堆冷却剂系统压力;
  - 反应堆冷却剂系统温度;
  - 饱和裕量;
  - 反应堆冷却剂流速;
  - 蒸汽发生器水位;
  - 稳压器水位;
  - 蒸汽压力;
  - 蒸汽流量。
- 概貌图显示应能显示由 MCR 控制或监视的有限数量的基本部件的运行状态,如:流量有或无,通电或失电,开或关,打开或关闭等等。具体显示应在设计过程中确定;但应特别考虑以下内容:
  - 反应堆冷却剂泵;
  - 给水和冷凝系统泵;
  - 隔离阀(如主蒸汽和给水);
  - 安全系统阀门;
  - 余热排出泵和阀;
  - 电源断路器;
  - 辅助电源发电机;
  - 安全阀和释放阀;
  - 循环水泵。
- 当设计过程表明这样的信息直接支持概观显示的使用时,概观显示应提供高级导出量的显示,如依赖于特殊逻辑算法的量。在设计过程中应确定这些特殊的量;但应特别考虑以下内容:
  - 电厂模式或状态;
  - 安全系统或功能的可用性。
- 概观显示应提供特定关键报警或类似报警信息的空间专用显示,这些信息需要

引起操纵员的注意。在报警系统的仪表和控制设计过程中,确定要显示的具体项目,与概观显示的总体协调功能及在 2.6.3.4-8 节中讨论的分配给它的具体功能一致。

- 应用实时仿真确认概观模拟设计规范和显示指南。这些设计规范和指南应形成文件,并应包括下面几点:

- 应从 MCR 的工作站,以及观察者或支持者的可能位置上可视和可用概观显示。概观显示的可读性应利于协调控制室的活动。

- 部件的状态可通过多种方法来显示,表现方法可包括颜色、形状或位置编码。

- 要尽量减少远距离读标签;然而,当从近距离看显示时,每一显示量要通过近距离的可读标签来专门辩识。

- 概貌图显示应提供从盘背后进行日常维修的功能。

- 概览显示器的布置应确保单个光元件的丢失不会导致信息丢失。此外,所有灯均应能通过显示器前面的简单控制器进行测试。

- 概览模拟设计要具有灵活性。

- 概观显示应提供所需的信息,以支持使用任何系统级的手动驱动控制(见 2.6.3.5-6),这些控制器基于需要使用他们的事件的任务分析(参见 2.6.3.5-6 节)。这应包括操纵员确定需要系统级驱动所需的信息。一旦操作已经执行,概观显示也要提供反馈信息,除非,该反馈是手动控制器本身的显示器提供。

第2.6.3.5-6节要求的手动驱动控制旨在允许操纵员在紧凑型工作站不运行的情况下采取必要的措施;但是,当工作站停止运行时,操纵员必须有提供手动操作的信息源,已提供有关采取手动措施的依据。概观显示旨在提供这种信息。控制室的操纵员也可以通过与另一些操纵员的通讯,从MCR外的就地控制屏上获取信息;但是,那样的信息对MCR中的应用是充分的和及时的假定将似乎不大可能。

- 在停堆情况及功率运行时,概观显示要包括必需的信息,以支持控制室人员的整合和调整。应通过 2.6.3.4-8 节的动态仿真,来确认特殊的停堆信息的效用。

#### 9) 工作站上的数字显示

MCR工作站上的电厂参数和部件状态应通过VDU上的电子技术完成。对特定电子显示器的应用已有的人因指南,那些电子显示要满足这些指南要求,另外,也要满足本节的要求。

a. 显示的格式要标准,通过实际仿真,建立和确认特殊的设计通则并形成文件。

a. 操纵员能够选择用于显示的参数,既可以是一系列值,也可以是专用的图形趋势。每个操纵员工作站能够显示至少 100 个这样的特殊量。

b. 工作站显示设计要便于操纵员调用之前的显示内容。可为操纵员的先前显示的特定数量应通过动态模拟予以确定。

c. 工作站显示设计应整合转换和标记操作,以便清晰的显示处于非正常状态(例如已标记停用)的部件。安全的标记操作用于防止网络安全威胁。网络安全要求见第 2.6.2.5-4 节。

d. 在正常和紧急两种情况下,为了使操纵员和机组长容易全局查看,应提供总体画面,它们将许多不同的量组合在一个显示屏上。

e. 如果特殊的传感器或仪表停止工作,操纵员应能够在显示器上替换其他冗余的或多样仪表中得到的读数。替换点或静态值应清楚标记、标记或以其他方式区分。

f. 工作站显示设计应有灵活多样的方法使操纵员访问显示。这包括下面几种方式:主题、系统名称或部分系统名称、图上的连续箭头、根据对具体活动的特殊显示。

g. 如果提供了多个显示位置,如多个 VDU,操纵员应能灵活的将特定的内容分配到任意一个显示单元上。

h. 提供给操纵员的显示在操纵员无动作时不应变化,如显示不能在经过一定的时

间间隔后返回上一页或改变刻度以达到满屏。

i. 在可行的情况下,显示系统应检查显示的数量是否有效。为支持向操纵员提供复合显示数据真实质量信息的能力,系统设计应确保:所有底层过程数据应具有兼容且清晰的含义的数据质量标志;有一种清晰明确的方法来确定由低级数据组成的更高级别数据的质量。

j. 工作站上应成组显示信息,包括 MCR 概观模拟显示屏上提供的所有信息。

k. 工作站应提供任何显示屏幕的硬拷贝能力。

l. 仪控系统应具有存档和检索历史过程变量(如趋势图)的能力。存档可以是本地的,也可以通过网关的数据历史服务器提供。历史信息要有明确的标识,与实时信息分开。

#### 10) 视听监督

应提供对由于高辐射或其它危险而操纵员通常不进入的地方进行视听监控。应在控制和工作站上提供显示器,依靠视听监视执行的特殊功能和任务的监视。

整个电厂应提供100%的备用宽带网络能力,以便随着时间的推移确定具体需求时,可以方便可安装额外的摄像机。该备用带宽和相关的物理基础设施段(如主干网、边缘段、接线板等)也可用于提供独立和隔离段的容量,供安全、化学、辐射防护和电厂运行和维护以外的其他用户使用。

11) 额外的宽带基础设施:应在整个电厂提供足够的宽带网络能力,以便在电厂寿期内,随着产品和技术的发展,增加额外的设备监控和其它数据密集型能力。

华龙技术电厂的人机接口设计应提供无线通信协议的使用,以允许临时设备监控、通信或音频视频接口。设计应满足网络安全要求。

### 2.6.3.5 控制

设计者宜制定与NUREG 0700指南一致的控制站控制规范。

规定选择控制器类型时必须遵循的原则,但没有规定设计的细节。仪表和控制的设计者宜作出特定的选择以制定专门的设计规范(见2.6.3.1节)。

#### 1) 控制器类型的一致性

仪表和控制设计的目标之一是尽量减少提供给操作员使用的控制器的类型。应为具有不同特点和用途的控制提供不同类型的控制器。控制站的设计规范(见2.6.3.1-5)应充分说明选择控制器的逻辑和惯例。控制器类型的最小化,除了有利于维修,还能减少备件和培训。当控制器执行不同功能时,需要有不同的外形,这样可有助于操纵员避免混淆控制器。

#### 2) 动力源的识别

设计者应遵循一致和有效的方法,给出每个控制设备动力源的信息。并支持操纵员应对失去电源或仪表气源对控制部件有影响的扰动。

#### 3) 正常控制位置的识别

在适当的情况下,仪表和控制设计应提供一致的方法,以确定每一个控制器的规定正常位置。这不需要覆盖不同电厂运行模式的实际系统。

#### 4) 意外操作和控制闭锁

应通过控制装置的类型和位置和简单的防护装置来防止意外启动控制装置。如果可行,应该减少使用钥匙闭锁控制器。特别是在紧急情况中必须及时启动控制器时不应使用钥匙闭锁控制器。

#### 5) 工作站的电子控制

MCR工作站上对电厂设备和系统的控制通常应为电子控制或“软”控制，如触摸屏或其它非硬接线设备，除非有相反的特殊要求，如2.6.3.5-6中提到的手动启动安全功能的控制。如所用软控制有可适用的人因导则，则这些软控制必须符合人因导则和本节的要求。

- a. 操纵员进行控制操作的操作顺序应尽可能标准化。应通过实时仿真建立和验证操纵员使用的这些标准操作顺序及其方法。标准化的规范应成文。
  - b. 对特定软控制的访问应灵活。操纵员至少应能从系统层面（如从图表或系统画面）或从功能层面（如从规程画面）进入特定控制。
  - c. 当一项控制操作因联锁不能进行时，仪表和控制应以清晰的方式告知采取此类操作的操纵员，也应自动记录联锁动作。
  - d. 在操纵员进入具体操作的控制后，应允许操纵员暂停那个临时操作然后返回继续原来的动作序列。当操作暂停有效时，应向操纵员提供一个这种暂停有效的提示（如在屏幕上显示信息）。此外，为使操纵员返回先前的操作宜要求最少数量的动作。
  - e. 工作站中某些操作在必要的情况下需要值长授权。这种需授权才能操作的情况应尽量少并需提供在紧急情况下可越权的手段（越权操作需记录）。
  - f. 工作站设计应能清晰区分哪些动作是于选择画面或控制器，哪些动作用于改变电厂设备状态。
  - g. 在执行某一动作但未完成该动作前，对应的反馈信息应提供给操纵员。
- 6) 手动驱动安全功能的控制

自动启动的安全功能，例如反应堆停堆、降压、安注、应急给水、安全壳隔离和任何其他具有系统级启动的安全功能，应在MCR中提供手动系统级驱动控制。这些手动控制装置应满足以下要求：

这项要求是为了确保在所有的紧凑型工作站都不工作时，操纵员也能启动系统级的安全功能。安全功能的手动启动是极少发生的事情，操纵员需要经过深思熟虑的选择。为完成这些任务而使用的不同的控制器和显示器不应成为操纵员的负担，同时应确保这些设备不会被误操作。

- NUREG 0800:BTP 7-19，主要控制失效时支持安全功能的手动控制的相关监管要求。
- 这些控制器的功能不依赖于任何一个主控室工作站的运行性。
- 这些控制器必须与 MCR 中其他控制器进行实体隔离，并满足适用的实体隔离准则。
- 这些控制器应方便地用硬接线连接至仪表和控制系统结构的下层，并可实现对系统级的操作。
- 优先逻辑模块可以考虑满足这一要求。
- 这些控制器应可被操纵员容易接近并可由一名运行人员控制。
- 这些控制器应可防止意外启动；不宜使用钥匙锁定控制装置或需要有源系统或特殊装置启动的控制装置。
- 尽管可采用多控制器用来确保分段和隔离，但操纵员应该能够通过简单的控制操作触发有效的系统动作。例如，通过少量的简单手动操作即可完成触发动作，不宜要求通过复杂的序列和组合完成这些手动操作。
- 这些控制器的布置应使操纵员在要求的动作发生后立即得到反馈。这种反馈可以显示在手动控制站的显示器上或总体画面（见 2.6.3.4-8 节）上；而不是在常规工作站的显示器上。

本要求包括安全级系统或设备的系统级或设备级驱动的就地控制。

#### 2.6.3.6 布置、环境和设备

仪表和控制的设计者宜为控制站提供与NUREG 0700相一致的设计、布置、环境和设备。

##### 1) 与功能和任务的匹配

所有控制站的布置、环境和设备都应与其分配的功能和任务相匹配。应考虑活动路径、支持设备的使用、控制站上操纵员之间及操纵员与其它位置人员间的沟通、可能恶化的环境条件（如使用应急照明）。这些任务也包括必须由控制站执行或支持的定期试验。

##### 2) 操纵员次要的任务和职责

每个控制站的设计应特殊考虑操纵员执行的行政管理性功能和任务，这些功能和任务不直接涉及电厂设备操作，但属于操纵员必须执行的职责。每个控制站的设计宜有利于这些任务的执行，如：设备切换和挂牌、记录值班日志、编制报告、交接班活动。

##### 3) 试验和维护

每个控制站的设计应考虑可能在该控制站上进行的试验与维护操作。应识别此类任务，并在控制站的功能与任务分析中考虑。应考虑：盘面上组件的维修、拆卸和更换、测试与维护专用的控制和显示与操作的控制与显示间的隔离、专用试验设备或维护所需的临时空间。

4) 照明：应为控制站提供可由操纵员调节的照明，使灯光亮度调节到明亮和刺眼之间最佳的平衡值。

5) 材料和物品存放：控制站的设计应考虑站内或周边对材料和物品的存放，以供控制站使用。材料和物品的存放不应违反系统、结构和部件的抗震要求。

##### 6) 噪声

对通常连续有人操作的控制站，如主控室、技术支持中心、应急指挥中心等，环境噪声水平应不超过 55dB (A)。此限值适用于上述控制站所有区域内的正常或应急采暖、通风和空调系统 (HVAC)，以保证操纵员间的交流不受影响。

##### 7) 装饰材料

应为长时间可能连续有人操作的所有控制站（如主控室、技术支持中心和应急指挥中心）提供可吸音的墙壁和天花板。所使用的材料应阻燃，易于保养，耐用，防静电，具备吸音能力以及合适的外观。

#### 2.6.3.7 控制盘

仪表和控制的设计者应遵循国家或行业的相关标准的规定和本节的要求来设计控制站内的控制盘。

##### 1) 控制盘上部件的布置

仪表和控制的设计者应基于所识别的控制站的功能和任务（见 2.6.2.1 节），布置控制站内控制盘上的控制和显示。控制盘的设计应确定哪些控制和显示的位置需保持一致，并确定哪些控制和显示仅在操纵员要求时才可用。布置应按照 2.6.3.1 节的要求予以评估，通过实物模型 (mock-ups) 进行审查。主控室的最终布置应在全范围模拟机上进行集成系统确认后确定。

##### 2) 控制盘及其部件的标识

仪表和控制的设计者应建立完整的、一致的方法对控制盘及其部件进行功能分区，该方法应作为控制站设计规范的一部分进行完整描述。就此，仪表和控制的设计者应制定供控制站使用的缩略语、符号、首字母缩写清单。

##### 3) 控制盘的改造

按照 2.6.2.9 节的要求，控制盘的设计应便于未来的改造。满足改造要求的设计特性应

在控制站的概念设计中确定，并在设计规范中描述。

#### 4) 操纵员辅助

当功能和任务分析表明操纵员辅助有助于提高操纵员表现时，则应将其整合在控制盘上。应在设计布置图中定义操纵员辅助区域。仪表和控制的设计者应对操纵员辅助进行识别并将其作为控制站设计的一部分加以考虑。

### 2.6.3.8 特殊控制站

#### 1) 主控室

主控室设计应符合国家或行业的相关标准以及本节的要求。主控室应在其安全边界内包括支持操纵员所需的区域。

##### a. 功能和任务应用

主控室控制站应考虑他们所承担任务的性能。对不需要执行规定任务的控制器和显示器进行管理控制，防止未经授权的人员使用。

##### b. 主控室位置和通道

功能和任务分析应特别包括对从主控室到电厂其他地方的通行方式的评估。下面给出关于主控室出入口的附加要求。

MCR基本上是所有电厂活动的中心。进出主控室的通道在许多正常操作和紧急操作中起重要的作用。

- 运行人员通道

设计者应特别标识操纵员执行特殊任务的出入主控室的路径。另外，主控室应提供下述更常规的出入要求：

- 现场操作员要有从电厂的各个部位到主控室的通道，以便他们可以直接与主控室操作员沟通。
- 从主控室有通往可能需要现场操作员在异常工况下进行就地操作的电厂的各部位的通道。
- 除非有必要进行有效沟通，否则该通道不应妨碍主控室主控区内运行组的活动。
- 特别是，除了主控制区有足够的空间供来访的电厂人员使用外，主控制区外还应提供会议空间。进入该空间的通道不需要通过主控制区。

- 非电厂运行人员和其他人员进入主控室

主控室的位置、布置和设备应便于主控室的操纵员同其他人员之间的必要互动，即使这些互动并没有明确地反映在分配给主控室操纵员的任务中。主控室设计应规定在设计基准中已考虑到所有这样的相互配合或接触。主控室布置的目标是要限制非运行人员的接触，以使其正常情况下不会分散主控室主控制区的操纵人员的注意力。特别是，与值长、值长文员、负责转换操作和挂牌操作的RO、或值班技术顾问的日常联系，不得要求他人通过主控室的主控制区域。

此外，还应包括下面这些特殊要求：

- 值班长的出入以及他们与总部、值长、与电厂业主管理层通信不会干扰主控室活动。
- 用于完成与操纵员操作有关的维修任务的维修人员通道。
- 当操纵员要求支援时，电厂人员（例如工艺技术人员和辐射防护人员）的出入。
- 主控室设备维护通道、用于行政管理的值长通道、消防通道、行政管理支持人员用的通道。
- 主控室撤离

主控室至少应配备两个独立的撤离通道，在主控室必须疏散的情况下可使用。操纵员可从任一出口进入远程停堆站，无需使用钥匙或门禁卡等安全装置，也无需电力。

- c. 操作员休息区：主控室的布局应包括指定为操作员放松用的区域。
- d. 卫生间和厨房设备：应提供一个男女均可使用的卫生间。
- e. 工作站同主控室其他区域的通讯。
- f. 倒班轮换区：主控室的布置特别要考虑到倒班运转。要提供交接区。
- g. 应急设备：主控室应包括用于应急设备存放的区域。
- h. 事故后监测

应使用正常的电厂仪表进行主控室里的事故后工况监测。应提供一块独立于正常工作站外的、显示一组最少事故后参数的显示、使用安全级的直流电源供电的专用屏。在该专用屏上显示参数应基于事故后监测功能和任务的分析，以及支持操纵员可能的行动。与监测堆芯冷却、安全壳状态和乏燃料池水位相关的参数应为自供电，或由远程面板上的便携式设备轻松读取，假设1E直流电源发生故障。

#### i. 主控室紧凑型工作站

主控室里的操纵员工作站和机组长工作站是紧凑的且由计算机驱动。他们应包括电子化显示的以及非常规的电子控制手段。对这些工作站的附加要求见 2.6.3.4 和 2.6.3.5。

- 每一操纵员工作站应具备所有完成主控室功能的能力。工作站的设计应具备灵活性以便处于两个不同的工作站的两个操纵员之间实现操纵员任务共享。应该提供冗余以使一个完整的工作站可以不运行，且有能力保持在两个工作站之间共享任务。
- 通常至少有一个工作站可供机组长使用，并完全支持由功能和任务分析确定的机组长的需求。
- 工作站的可靠性要满足 3.5 章节的要求。应完成相应的可靠性分析以表明同 2.6.2.5-2 顶级可靠性要求相一致。工作站内的单一故障不应导致任何其他工作站的不可用。
- 主控室的工作站的布置应有利于各工作站的操作员之间的直接通讯。这包括直接对话和视觉接触的能力。
- 分布式控制和权限

工作站应提供方法辨认在进行操控的操纵员；但是，在紧急情况下应提供相应的越权措施。如：身份验证、紧急撤销认证要求，值长将能够暂时中止管理控制，如身份验证和权限限制。

除了大屏幕，应在紧凑型工作站上提供显示器，以便于其他操纵员和值长了解每个操纵员的活动。

在较高的层次上，总体显示提供了共享视图的有效机制。然而，单独的紧凑型工作站对于深入解决问题和采取行动也是必要的。由于操作员可能倾向于在紧凑型工作站上集中精力于详细信息或特定任务，因此必须特别注意保持机组人员对电厂整体情况的认识，并保持机组成员的协调。单个操纵员的隔离增加了他们的行动可能产生冲突、或共同不完整的可能性。

- 不经常使用的冗余工作站应具有定期试验其可运行性的能力。另外，这样的设备正常情况下并不用，他们的动作不应导致开关瞬态（如电压尖峰或电涌）、异常的设备或系统动作。

#### 2) 就地控制站

就地控制站应是仪表和控制系统设计过程的一部分，并应满足除本节外与主控室相同的要求。

##### a. 就地操作优先于 MCR

对可能在就地控制站采取行动的情况，它优先于主控室中的控制或者在主控室中产生错误的显示信号（比如，为了支持就地维修或试验操作）。

此外，主控室操纵员应有允许优先操作的控制，或有确信的手段去通知操作人员不要控制或有一个不可操作的显示。

#### b. 环境、设备和通道

对不经常使用，且在超过几个小时不配备人员值班的就地控制站，可以接受不太严格的环境要求、更有限的设备和更有限的通道是可接受的；但在任何情况下，也不应妨碍操作员在事故条件下及正常条件下执行所安排的任务。

#### c. 就地控制站的人员安排

就地控制站应设计为一个人操作。但无论如何，其空间也不会限制到不能容纳两个人。

#### d. 意外启动

就地工作站的设计应尽可能避免任何控制装置的意外启动。这应考虑电厂人员处在本地控制盘区域的可能性。

#### e. 未授权使用

仪控系统应识别无人值守就地控制站的非法控制，未经授权的人员操控将造成严重的后果，包括如下：违反电厂技术规范、反应堆紧急停堆、安全系统动作、贵重设备的损坏或要求长时间停运来进行检修。

在可行的情况下，防止未经授权的关键操作将受到以下限制：

- 与 MCR 中使用的验证方法类似的个人身份认证，在特殊情况下由值长撤销；
- 提示授权用户正在尝试控制操作；
- MCR 操纵员允许操作。

#### f. 功能、任务和集中化

设计者应就地控制站的所有功能和任务。设计者应特别考虑将功能集中，而不是把功能分配在几个本地工作站中，因为分配这些功能可能会给通信、机组协调或与执行所需操作相关的操作员工作量带来不必要的负担。定义的功能和任务应用于选择每个就地控制站所需的特定控制、显示、通信设备和其他设备。

#### g. 一致性

在适当可行的情况下，MCR操纵员可能使用的就地控制站应基于和主控制室相似的工作站技术。

### 3) 远程停堆站

仪表和控制设计应提供主控制室以外的控制站，它能够使反应堆进入热备用状态，并长时期的使其保持在那种工况下。仪表和控制设计还应通过这些控制站和就地操作，将机组带到冷停堆状态。远程停堆站还应考虑按本章的其它节和其它章中的规定执行特殊功能和任务。

#### a. 功能和任务的使用

仪表和控制设计应确定远程停堆操作涉及的所有功能和任务。应包括任何其它就地控制站上的任务和专用的远程停堆控制站上的任务。为远程停堆站制定的功能和任务应用于选择在该站提供的特定控制和显示。

#### b. 撤离的条件

远程停堆站设计应该基于主控制室撤离而没机会去执行任何涉及停堆的任务。然而，在撤离MCR前，还应确定远程停堆站与操纵员执行的几项任务是兼容的，如，反应堆停堆或启动给水流量。任何关于这些任务的限制或假设应在远程停堆控制站设计基准中予以规定并形成文件。

#### c. 远程停堆站的仿真



电厂模拟机应包括任何远程停堆控制站并应能使用远程停堆设施实际模拟停堆。

d. 远程停堆站的人员配置

远程停堆操作应该建立在减少操纵员数量的基础上,具体而言,应假设在短期内,即将反应堆带入热备用,仅需两名有许可证的操作员(SRO和RO)和两名现场操作员(EOS)。对后续操作,应保证有一个正常的班组可利用。

e. 盘台布置和设计通则

远程停堆站的设计应使显示和控制单元的布置与MCR中类似单元的布置一致。其它的设计通则,例如,标记,术语,颜色代码等等应与MCR一致。

f. 正常运行时远程停堆控制站的使用

设计者应评估远程停堆控制站用于测试、监控或其它操作的可能常规使用。作为该评价结果,分配到远程停堆站的常规操作,应作为远程停堆站和整个仪表和控制设计基准的一部分予以规定并形成文件。

g. 参考资料:将对远程停堆站所分配功能和任务的分析用于确定该站需要的参考资料。

h. 远程停堆站的启动

主控制室中任何操作员的动作或设备故障都不会妨碍远程停堆站执行它的功能。也就是说,应使用适当的切换装置启动远程停堆站进行控制,而不考虑MCR中可能发生的故障。另外,切换装置不会引入可能会导致主控室和远程停堆两者均丧失可操作性的共同的致命伤。但是,为使远程停堆站或控制权转移至该站而采取的任何行动应在MCR中通知。仪表和控制设计人员应使用分析和实际模拟(包括与保安人员支持有关的假设)进行评估,即MCR中的通告提供足够的时间为操纵员和电厂保安人员采取措施,以防止在未授权使用远程停堆站情况下发生严重事故。启用远程停堆站所需的操作应要求最少的操作步骤,符合可靠性(例如,分隔)要求和能防止误操作或未授权使用(见2.6.3.8-2)。

4) 应急响应支持设施

仪表和控制设计应包括在支持应急操作进程中和人员对接的这些应急支持设备。这些设施的设计应符合国家核安全法规的要求标准以及本节的附加要求。它们基本上是MCR的扩展,是紧急情况下电厂整体控制的一部分。因此,将其纳入设计者的权限范围是合理的。

a. 技术支持中心(TSC)

• MCR和TSC之间的通道

技术支持中心的位置应确保人员从MCR到TSC(反之亦然)的时间少于两分钟。在紧急情况下,应能够修改正常的安全边界(使用规定的程序),以便人员可以在两个设施之间移动,而无需越过安全边界。从TSC到MCR的路径应易于由MCR人员和电厂管理人员进行管理控制,避免来自TSC的人员干扰MCR的操作。

• 技术支持中心非紧急状态时的使用

设计者应评价TSC支持电厂运行的例行使用,其条件是能表明,有理由预计这些使用将不削弱它在应急情况下的使用。作为评测结果,分配到TSC的常规用途应作为TSC和整个华龙技术电厂仪表和控制设计基准的一部分予以规定并形成文件。

b. 应急指挥中心

通过连接应急指挥中心到电厂工艺数据库,以支持MCR、TSC或其它电厂控制站(例如远程停堆站)之用。

设计者应确保在设计时,考虑从福岛事件中吸取有关应急指挥中心(和TSC)的需求和使用的经验教训。

设计者应确保MCR、TSC、应急指挥中心和外部实体(包括监管机构)之间存在足够的通信能力。

c. 数据处理和计算机设备

- 数据的可用性

TSC和应急指挥中心的人员应能访问VDU或类似计算机接口设备上MCR操纵员可访问的所有监测数据以及在MCR概览显示器上的信息。这些人员应能以尽可能与MCR中使用的显示器相同的形式获得显示数据。

- 数据传输的可靠性

TSC和应急指挥中心数据传输路径的设计应确保单一故障不会切断传输路径。同样，危害任何给定网段带宽的网络或组件故障模式不应传播到其他网段。

- 处理能力

应提供数据存储、处理和显示能力，供TSC和应急指挥中心人员从存储、操作和显示数据中调用。

这些功能的执行不应增加MCR和这些设备之间的电厂计算机或数据通信链路的负荷。

- 其它用户访问数据

设计应兼容其他用户（如电厂管理人员以及电厂内外的小组）对数据的使用。

## 2.6.4 控制系统通用要求

### 2.6.4.1 通用要求

#### 1) 定义

##### a. 目的

本节的目的是确定仪表和控制系统的设计、选型和安装的通用要求。

##### b. 范围

本节中的通用要求覆盖了电厂中所有需要运行和维修的控制系统。

#### 2) 设计要求

a. 所有安全相关的控制系统，在电源中断时其软件应当保持。

b. 避免在安全相关系统和非安全系统之间设置软件接口。

c. 在评估稳定性和响应速度时，设计者应考虑以下因素：

- 电厂和设备的非线性特性。必要时对这些非线性进行补偿，以便为所有预期的运行点组合提供所需的响应和稳定性。
- 电厂设备和过程中的延时效应。
- 当使用数据采集系统时，采样率和精度的影响。
- 敏感的子部件（如传感器、仪表通道和减振器）对系统性能的潜在影响。
- 极端的环境条件和工艺条件对控制设备和传感部件的潜在影响。

d. 定值、校准常数、传感器限值等关键过程常数应防止在电源中断时丢失。

e. 系统和部件在失电恢复后（控制或动力电）能保持在预期的安全状态。

f. 安全相关的过程控制和监测软件应保持隔离和独立。

#### 3) 性能要求

a. 控制算法应包含防积分饱和功能。

b. 手动和自动控制之间的切换应是无扰的。

c. 确定并证明所有控制参数满足控制系统的分辨率和精度要求。

d. 控制系统的信号采集要求：模拟信号滤波满足抗噪声要求、数字信号采样速率满足要求、信号重建满足输出信号幅度中的瞬变波动（即毛刺）、出现频率和畸变的要求。

e. 应尽量减少在具有直接的保护和控制功能的主要的功能处理器中使用中断。在中断确实能够改善系统的可靠性或需用于完成实时的保护或其它功能时，允许使用

中断。

f. 仪表和控制控制系统处理器中没有直接保护或控制功能的中断,仅限于关键时间功能、运行人员输入、网络通信、处理器故障诊断、已证明对可靠性和/或简化程度有明显改善作用的软件简化。

g. 如果需要在限制范围内使用中断,则保护功能应具有最高的优先级,其次是控制功能。监测功能的优先级最低。

h. 仪控系统的设计应当包含对运行前首次电厂启动试验要求的考虑。系统应设计成能在启动试验数据校准阶段尽量减少对特殊传感器和特殊连接等的需求。

#### 4) 可用性/可运行性

a. 非安全级系统应使用可靠的部件来达到其可用性。高可用性要求建议模块化冗余。

b. 在可能的情况下,控制系统中可以引入其它系统的信号,以提高可用性

c. 在可能的情况下,在检测到控制计算机故障时,控制计算机之间的控制任务应当进行重新分配以增强可靠性。

d. 仪控系统应是分布式系统,可行的情况下采用现场总线技术等。

#### 5) 冗余处理要求

对冗余系统,设计者应确定准则以便在出现不一致时选择正确控制。

#### 6) 可维护性和便捷性

a. 维修接口应提供访问所有诊断、校准和其它维修辅助设备的能力。其设计应满足以下要求:

- 为防止对系统的未经授权的访问,应提供硬件和软件控制以控制访问关键系统参数。

- 维修接口功能不应放置在任何干扰电厂运行的位置。

- 维修接口连接应通过电气隔离测试点和/或隔离的数据链路。

b. 应提供对所有系统输入和输出的维护访问,并为故障排除工作提供接入点。

c. 维修活动正在进行的状态应在主控室中提供提醒指示。

#### 7) 数据采集要求

##### a. 信号要求

- 对模拟输入信号来说,用于数据采集的硬件、软件必须保证它们所提供的信号能满足信号所有指定用途的要求。应包括:精度、分辨率、采样频率、重复性、响应频率、安全等级、量程。

- 对离散和脉冲输入信号来说,为防止系统接收虚假信号,数据采集过程应满足:抗扰度要求、采集频率、触点容量、防开关抖动、故障模式识别要求。

- 所提供信号应满足所有使用该信号的系统对每项要求的最严格的要求。

b. 信号滤波要求足以减少信号噪声至可接受水平

#### 8) 信号传输

##### a. 数据信号标签

- 在全厂数据总线上传输的所有数据应具有与每个数据项相关的信息识别信息。

- 所有数据,包括计算数据,应具有与其相关的信号质量标签。

##### b. 数据传输保真度

数据传输过程将提供足够的内部完整性检查与出错检查,以保证在传输过程中出现的随机错误不会降低使用这些数据的系统和功能块的可利用率和可靠性。

#### 9) 信号处理

任何信号处理,如:标定、放大、线性化和变化率计算等,应确保处理结果的准确度、

分辨率、精度和响应速率并且在发生电源中断和可能潜在破坏它们的其他事件后必须保持它们的值，此外，应在每个仪表和控制子系统的设计中纳入定期验证系数和因子的规定；

信号处理组件和设备应根据组件和设备的安全分类进行电磁干扰测试。

数据系统在信号处理时要用适当的方法进行信号有效性检查在实际情况下，应尽量减少安全系统中的数据有效性检查。虽然信号有效性检查是保证数据可靠的一个重要方面。但是，避免安全系统的复杂性也是一个重要的考虑因素。

#### 2.6.4.2 通用软件要求

##### 1) 设计过程

###### a. 软件生命周期

完整的软件生命周期程序应定义并应用于设计者或分包商为设计者准备的每个软件产品中。软件生命周期策略、大纲、程序和说明须应用于所有软件开发过程。

软件质量保证大纲（SQAP）应满足 GB/T13629《核电厂安全系统中数字计算机的适用准则》。对于安全相关软件，SQAP 需遵循 HAF003 所规定的要求。软件生命周期策略应提供软件 QA 的分级方法。

###### b. 责任方

设计者将建立软件生命周期，以对任何软件系统的开发、使用和运行提供系统化的方式。应严格采纳和使用软件生命周期。安全系统应遵照 NB/T20336-2015。

设计者负责确保软件生命周期在收到设备后继续应用，并移交给营运方。营运方应明确所有系统的软件生命周期（如 SQAP 分级方法），之后设计者可以评估和建立每个子系统或子系统等级的软件生命周期更详细的过程和说明。

###### c. 软件生命周期步骤和活动

软件生命周期至少应产生：系统需求规格说明书、软件需求规格说明书、详细的软件设计规格书、编码和软件生成、测试、安装和调试、责任转移、运行、维护、项目管理、V&V、软件/系统安全分析、软件质量保证。

##### 2) 软件设计

a. 自上而下设计方法：对所有软件的设计都应采用自上而下的设计方法。

b. 软件文档的编写应同软件设计同时进行。文档应包括系统、硬件和软件规范。

c. 应包括防御措施：包括限值检查、设定缺省值以防止软件不稳定、超出范围的设计禁止以阻止错误输入、对因通讯错误引入的错误的输入参数的逻辑检查等等，以防止软件不稳定性、错误计算或控制其它不利的结果。

d. 根据 GB/T13629《核电厂安全系统中数字计算机的适用准则》制定软件开发计划，包括实现模块化的要求和方法。

e. 操作系统软件不允许修改。

f. 迁移策略：系统和应用软件应与仪表和控制平台的迁移策略兼容。

g. 软件设计应采用层次化设计结构和模块化设计原则，具有连贯、衔接的模块。

h. 软件类型应尽可能少，软件易于购买。

i. 编程要求：编程时应使用已被广泛认可的适用于编程算法的高级语言。

j. 软件支持计划应包含所有用到的软件确保完整性并说明提供支持的时间期限。

k. 仪表和控制的保护、控制、报警和显示功能应基于数字化技术特点。

l. 初始阶段要执行全面的诊断工作。维修时，诊断工作要有旁路措施。

m. 程序按照一系列程序模块进行开发。

n. 参数共享：采用全局变量方式等，为实用参数被几个软件模块所共用。

o. 网络安全：应采取措施防止在软件系统内传播的寄生软件（病毒）。

p. 数据库管理保证适宜的数据存储、传播和应用。包括在线系统数据和长期数据存储

q. 存储和恢复：应提供适合数据和数据使用的各种类型的存储介质和环境。

3) 性能要求

a. 运行裕量

计算机系统应根据最大设计负荷工况来设计，以具有足够的运行裕量。最大负荷工况至少应包括：数据扫描、数据通讯、数据处理、运算处理、分析计算、控制指令执行、显示处理、操纵员指令处理、以及数据存储和恢复；另外，计算机系统应设计有合理的可扩展裕量使得营运方将来可以增加一些功能。

b. 在线诊断能力

计算机系统应具有足够的在线诊断能力，以检测出致命的故障。故障应通告电厂运行人员。所有诊断出的错误连同时间和日期应通过在线打印机打印记录。

c. 定期试验：检测硬件状态，并对软件错误功能或未授权修改进行比较测试。

4) 验证、测试和质量鉴定

a. 测试大纲

设计者应开发工具和技术手段，用于开发操作软件系统或用于软件质量保证体系以提高软件的质量和可靠性。应编写系统测试大纲。软件测试应遵循相关标准。

b. 工具要求

工具和技术的设计、开发、测试和文档化应与使用这些工具的可交付软件具有相同的严谨性和详细程度。工具和技术应置于配置管理控制之下，并需维护和文档。

c. V&V 要求

V&V 应采用人工测试方式（例如代码审查、团队审核）和基于计算机的测试。

d. 监测主体要求

负责软件开发的个人或集体不能执行软件的检测工作。由软件设计者以外的其他人来判断软件是否满足事先确定的要求和目标。对于安全系统，应提供 GB/T13629 和 RG 1.168 中需提供的独立性要求。营运方应确定适当的独立性要求，以提高质量和安全系统的重要性。

e. 期望值要求：对于每项试验，应预先给出期望值，以避免将错误理解为正确结果。

f. 定期试验：基于软件的设计应支持 GB/T13284《核电厂安全系统准则》的可测试性、校准和旁路要求。

g. 可测试性要求：集成系统（包括硬件和软件）的设计应符合本文可测试性要求。

5) 可用性和可靠性

a. 应制定验证和确认计划，并包括系统化的质量保证活动。

b. 多样性和冗余要求：设计者应评估每个仪表和控制子系统的多样性和冗余要求，应考虑是否需要 DAS，以符合纵深防御与多样性要求。

c. 可靠性评估：提供可靠性评估，以确保最终的系统设计（包括所有的模块）同硬件结合在一起的整体性能满足系统要求。

d. 网络安全：网络安全保护水平应按照标准要求确定。对于在软件中很难检测的未授权的篡改编码的防护，应通过软件或硬件或二者一起结合在设计之中。对于电厂操作人员、授权软件工程师，至少应该有两个防护等级。

e. 基于软件的安全系统应遵循基本的核电厂设计原则如深度防御、冗余、实体分离、独立性和多样性。应该仔细检查满足原则的方式，因为相关的硬件也应满足所有的设计原则，但具有固有的不同的故障模式。

6) 可维护性和便捷性

a. 供应商手册

设计者应将所有供应商手册转交给营运方，由其负责仪表和控制的操作和维护。除设计者提供的用户手册外，还应提供供应商手册。营运方是设备的最终使用者，必须维护系统。应提供适当的手册以支持此类维护。

b. 设计者应向负责仪表和控制操作和维护的营运方提供维护和修改系统所需的所有文件（手册和图纸）、诊断工具、校准工具、开发站等。

c. 软件维护计划

设计者应制定一份软件维护计划，该计划应符合国家相关标准法规要求。设计者应规定，电厂营运方保持与设计者所需的软件维护目标质量水平一致。

7) 软件要求的适用性

本节明确软件生命周期过程需求的定义。设计者应记录分配给每个软件项目的级别。

描述与安全有关的系统中使用的软件，应满足本节的所有要求。

本段所列类别应满足本节的要求，但该软件的 SQAP 不需要满足 HAF003 的要求。这些类别包括：

a. 在非安全相关系统中使用的软件，如 PRA 分析所示，具有重大风险。

b. 备份安全系统（如多样化反应堆保护系统）的系统中使用的软件。

c. 在安全重要或需要提高质量的系统中使用的软件。

## 2.6.4.3 通用硬件要求

1) 范围

本节中的要求适用于所有仪表和控制的硬件，并按以下顺序加以组织：总体要求、计算机系统、开关、传感器、隔离装置、阀门、仪控供电、接地要求、仪控贯穿件和密封、电缆、光纤和电缆通道要求。

2) 总则

a. 控制系统应满足规定的通用系统和设备的要求。

b. 控制系统设计应使其能够提供平稳的全厂控制，从而满足所有设计基准工况。

c. 控制系统的监测功能应当为操纵员提供足够的系统和设备运行方面的信息，以便其监视系统和设备的性能变化趋势，并在系统和/或设备误操作或发生故障时采取合适的行动。

d. 任何运行所需的基于微处理器、微控制器、计算机或可编程逻辑器件的仪表和控制，在电源恢复时都应能“自启动”，而无需人员干预。相关的非安全级系统在没有运行人员动作或授权的情况下，不宜允许自动重新启动或执行控制。数字系统宜自启动。但是非安全级系统在执行控制功能前宜先进行运行人员操作或授权。安全级系统在完成必要的自诊断后应自启动，以确保自动功能。然后安全系统根据当前监测数据执行安全功能。

e. 过程仪表一次元件、阀门本体的安装应使用单独竖立或墙装仪表架，以便于维护、更换和校准。在可能的情况下，过程仪表的二次元件、驱动电磁阀以及相关线缆，也宜以这种方式安装，以便于方便这类设备的维护和试验。仪表架上的所有仪表管和电线电缆宜与仪表架一同采购。

f. 现场总线连接可根据附近端接点进行组织并符合仪表和控制分组策略。主干线和现场分支宜符合现场总线标准和制造商推荐，并满足最小化现场电缆和仪表管敷设的目标原则。

g. 当使用现场总线技术时，区域内安装的仪表单元和数据传输带宽要求应考虑浪

涌和电压跌落。应对会导致整个现场总线或任意现场总线段失效的模式进行分析考虑。单段现场总线上所有设备同时失效在电厂安全和可用性分析时应进行考虑。

h. 机架内所有需要外接的线缆都应引至由厂商提供的固定在机架上的端子盒或连接器。

i. 过程仪表管线不应敷设过远的距离,否则会影响被测参数的精度、响应时间和灵敏度。通常,这些管线宜在不超过 30m 的范围内敷设,以使仪表中响应的衰减降到最小。

j. 应通过仪控设备和部件的设计、布置以及保护性边界或壳体的使用来避免其遭受潜在的灾害。电厂设计者应通过灾害分析明确设备得到有效防护。

k. 仪表量程应覆盖系统所用变量信息的变化范围并有合理的裕量。已确定的量程应考虑到正常、瞬态和事故运行工况。设计者应负责确定裕量。应显示仪表的全量程。

l. 正常运行工况应尽可能地保持在仪表量程的中部。宜尽可能避免运行于量程的上下限内。

m. 所有模拟信号应是电流输入或差分电压输入。除非无法避免,否则不能使用单端电压信号。

n. 仪表中定值点的漂移不应超出技术规格书中的限值。设计者应提供仪表定值漂移计算所需的足够信息。

o. 所有设备和装置应当不受电磁干扰的影响,或者安装有合适的屏蔽和隔离装置,从而将干扰降低到可接受的水平。安全级仪表和控制和部件应根据相关标准的要求进行电磁兼容鉴定。

p. 仪表和控制设备的设计、材料和建造选择应减小静电释放的潜在可能。

q. 仪表和控制设备的设计应满足在其安装环境内的运行可靠性。

对于严重事故工况,包括全厂失电和失去厂外电源,设计者应确保仪表和控制可以提供足够的安全功能以保护用户资产投资。

室外的仪表和控制设备应满足在其最高和最低的温湿度区间内运行的要求。此外,还应考虑设备防冻保护。

r. 当输入电压和频率发生预计的变化(满足规定的裕量)时,设备应能运行在性能限值内。

s. 仪表和控制设计应使得对电源和 HVAC(采暖、通风和空调系统)等支持系统的要求降到最低限度。设计者宜考虑使用低功率和小发热量的固态设备。

t. 设计者应明确无法达到 60 年设计寿命的控制和仪表装置,并提供适当的时候进行更换或维修的手段,以达到整个电厂的可用性和设计寿命。

u. 大型重要的仪控系统应进行最大限度的预装并在最终配置下的进行测试。测试应包括针对性能要求的调试和验证。需进行整体系统试验和确认,以确保系统的可靠性。

v. 危险区域,诸如高压区域等危险地带应根据国家和地方法规加以标识和隔离。

w. 如果设计中用了电路卡或模块,在通道旁通期间这些部件应是可更换的,且不会影响系统的安全性和可靠性。

x. 所有对安全极其重要的、控制的和电厂可用性相关系统均应进行信号确认。设计者应当为每种应用场合确定相应的信号确认的复杂水平。根据 GB/T 13629,安全级系统不应采用复杂信号确认,包络交叉通道检查。

y. 信号确认是一个通过检查信号精度来确保使用该信号的运行人员或处理过程能够达到其目标和功能的过程。目前用到的一些基本技术有:限值检查、脉冲选择、

仪表回路整体性检查、同类传感器的比较和校验检查。

当高数据质量对于安全和（或）运行至关重要，或相同类型冗余传感器不足以提供高数据质量时，可以对信号确认采用更有效得统计方法。这些方法可以归为两类：

- 基于多重相同并独立仪表传感器的冗余技术，以确定偏离异常或趋于质量变化趋势的信号通道。

- 基于信号多样性的非冗余技术，可以弥补相同冗余技术的缺点。信号多样性，可以根据关联信号但非相同冗余信号判断是否有信号源发生了降级。

z. 所有仪控设备都应设计成能够完成电路板或模块级的诊断和故障排除。

aa. 设计者应当为机箱内的电路板或模块的检测提供条件。应提供扩展板、检测点或其它适合的手段以方便诊断和试验。提供诊断和试验条件，使系统停机时间减到最少。

bb. 在机柜、内部开间和其它的设备所处位置应提供标准三孔 220VAC 公共电源插座，以方便非安全机柜内进行的维修活动。对安全相关机柜而言，其附近应提供非安全级电源供电公共电源插座。在确定位置时，设计者应考虑人员安全、电厂运行时的危害、可动性、电磁干扰效应和其它危险因素。这些公共插座能够方便备用照明灯和电气设备的使用以完成维修活动。应当为维修活动提供方便的公共电源插座。当这些公共电源来自不同于被检修设备的电源时，公共检修电源与仪表和控制设备电源的不同接地不应导致设备故障或失效。

cc. 宜避免在机柜内对仪表和控制设备进行维修，即，最好在机柜外操作或者将设备从机柜内取出后维修。但是，当就地环境、设备或维修任务的特性使得在机柜内部维修最为切实可行时，机柜设计应考虑长期有效的内部照明。长期照明不应造成人员危险或需要维修技术员工作于上电设备。

dd. 应保护仪控设备和部件，使其不受邻近危险的影响。电厂设计者应进行灾害分析以证明仪控设备的设计、定位和保护性外罩已经考虑了对邻近危险带来的后果所采取的保护措施。

### 3) 计算机系统

a. 遍布全电厂的各类软硬件应尽量标准化。

b. 设计者应确定计算机系统及其外设的设计寿命。应提供手段以方便报废设备的更换。各部分的设计寿命应明确存档并提供给营运方。设备更换时，如供应商提供了新（升级）设备对于已安装设备替换的兼容性，宜使用新设备进行更换。

比起电厂的设计寿命，计算机系统的设计寿命相当短，而且生产商提供的备品备件的可用品也是一个制约因素。因此，必须为容纳所更换设备提供足够的空间和外壳。

c. 包括商用计算机及其外设的所有设备，均应满足组态管理控制要求。需进行设备级、组件级和板卡级的配置管理控制，以保持服务合同条件。

d. 系统的试验和确认应在软硬件完全集成的情况下进行。所需的硬件、软件、可编程逻辑器件和组态应与实际供货一致，最好采用实际供货产品进行。

e. 为确保对交互式任务已作了测试，需要进行全面的集成测试和确认并记录。所有的确认和试验应有文件证明并保留作历史记录。

应进行仪表和控制的集成确认。如不可行，在设备发货现场前应进行足够的覆盖测试，并在现场进行更全面的安装测试以确保设备在现场的可靠运行。

f. 设计者应当评估并确定计算机及其外设的冗余度和多样性要求，包括软件和硬件。

设计者可以进行设备可靠性分析并确定冗余度和多样性要求。

g. 所有开发、诊断、维修和运行用硬件应连同说明书一起提交给营运方，以进行



存档和使用期间的培训，除非营运方对此责任进行免除。应证明上述所有设备与供货商在开发、验证和试验期间所用设备相同。

营运方应有能力对已交付系统进行修改、增加新的功能、排除故障和维修，或者能获得进行上述活动时的技术支持。应提供维护培训和开发设施，以确认维护程序、硬件故障排除和软件失效模式，并支持软硬件变更的开发。如无法对所有设备提供上述设施，则至少应提供对应一列、一个分组或通道的设施，以模拟或激励电厂信号和响应。所提供的设备和软件应与现场运行设备一致。

h. 计算机或外设生产商应向营运方提供所有软硬件的合格证和保修证，以及所有设备文档。

i. 所有需要投入运行的数字化系统如需授时同步或更新，均应采用网络时钟服务器或同等设备进行。

为降低复杂程度，安全级系统不应采用实时时钟和日历，以避免由于外部系统授时和时钟同步带来的影响。

事件序列数据应通过隔离部件或模拟量输出发往非安全系统，以便进行精确时间标记。

不支持授时同步或不含有精确时间戳记的非安全级系统的时间记录序列，可以同样采用上述处理方式。

在电源中断时，时钟时间和日历能够保持。否则，运行人员必须输入数据以建立正确的时间和日期。

j. 网络时钟服务器应电池后备，并应提供对电池故障的在线警告。

在线自诊断测试的一种可能的方法是测试电池的电压。电池电压反映了电池剩余容量，且应高于系统工作电压至计划运行时间及更换时间。

k. 维修和更换供电系统不应中断系统运行。电源模块故障应提供在线警告。

l. 对于供电或紧急操作至关重要的非安全级工作站、服务器和设备机架应配备不间断电源。如无法连接至集中蓄电池，设计者应提供现场不间断电源，并根据恢复供正常电源期间设备所需电源需求确定不间断电源容量。

#### 4) 开关

本节中规定的要求适用于但不限于以下种类的开关：接近开关、触点开关、液位开关、压力开关、位置开关。

a. 根据每类开关的应用和运行条件，设计者应当为其确定精度和重复性要求。

b. 为简化仪表和控制的操纵员信息，设计者宜鼓励使用开关组合逻辑。如果使用了组合逻辑，设计者应提供除逻辑输出外的单个的开关位置读数。

c. 根据开关的应用条件，设计者应确定是用“湿”触点还是“干”触点。严酷环境条件下的安全级开关应根据该环境条件进行鉴定。。

d. 根据每类开关的应用和运行条件，设计者应当为其确定设计生命周期和鉴定寿命（鉴定裕量）。在鉴定寿命期内，开关的精度和重复性应是合格的。

e. 为了检测开关故障，设计者应当考虑智能化逻辑判断功能的设计。软件算法（现场微处理器或中央处理器逻辑）或硬件逻辑是实现逻辑判断功能的可接受的方法。

f. 应当提供测试所有开关性能的手段。设计者应提供测试设备的连接和信号输出的手段。

g. 应当为开关作模块化设计，以便单独更换。

h. 开关应设计成在需要时能进行位置调整。

#### 5) 传感器

本节中规定的要求适用于但不限于以下种类的传感器：温度、压力、声学、光学、振动、流量、中子、辐射、液位、电流、电压。

- a. 设计者应根据应用、特性和检修等方面的要求选择温度测量装置。设计者应证明所选装置满足这些要求。
- b. 温度场的不均匀分布可能导致温度测量的不确定性增大。应提供并布置足够数量的温度计套管以将测量的不确定性降低到可接受的水平。应标明温度计套管的方向。此外，设计者应确定合适的温度测量组合方法。
- c. 根据传感器的应用、设计和运行条件，设计者应当为其确定精度和重复性要求。
- d. 设计者应当确定传感器的校准精度要求。
- e. 可以根据需要使用喷嘴、均速皮托管和涡街流量计等进行流量测量。如果需要远传指示或记录，应使用线性刻度尺或刻度记录纸。
- f. 设计者应考虑使用热电偶或 RTD 以外的测温装置。比如集成电路测温装置无需冷端补偿即可进行电压或电流输出，可直接被数字采集系统接收。
- g. 所有传感器在包括正常、瞬态和异常运行的整个运行范围内均应合格。
- h. 设计者负责确定传感器的工作范围和条件，并证明其合格。
- i. 所有传感器应能与测试设备相连接，该设备提供直接的输入并接收直接的输出，以便使用基于微处理器的系统进行校准。直接的输出读数能减小处理校准数据时潜在的误差。此外还能无需手记而获得直接的数据，从而加快校准进度。
- j. 设计者应明确传感器隔离阀的布置原则以减少不恰当布置，或是校准后将阀门位置遗留在不正确的位置的避免方法。
- k. 如果传感器需要就地逻辑控制，应无需更换整个传感器就能更换逻辑模块。
- l. 所有传感器应能进行基准校准和现场校准。应具有直接的输入和输出以进行试验和诊断。
- m. 传感器应当尽量没有不可检测的故障模式。电厂设计者应确认出那些无法满足此要求的传感器，并给出不能进行在线诊断和校准的理由。
- n. 多样性应包含运行和功能原则，以最大程度减少共模故障。

#### 6) 隔离装置

- a. 根据隔离准则的要求，为了保持安全级设备的完整性，安全信号隔离装置应提供安全级设备到非安全级设备的数字和模拟信号隔离。

隔离装置的最低验收准则如下：

- 对用于完成电气隔离的装置，应对证明该装置可以验收而作的特殊试验加以描述。
- 应有可用数据证明试验中用到的最大可能故障条件是该装置可能遇到的最大的电压和电流。应存档确定最大的电压和电流的方法。
- 应有可用数据证明最大可能故障条件以横截模式（信号与回路之间）施加于装置的输出端。
- 试验前就应建立并存档验收准则。
- 应对每一装置的抗震和环境认证进行验证并存档。
- 应描述并存档为保护安全系统不受电气干扰的影响（如，电磁干扰、静电耦合和交调失真）而采取的措施。
- 用于安全系统和非安全系统的隔离作用的设备或部件应当由安全级电源供电。

根据GB/T13284和GB/T13629专设安全信号隔离装置必须经过试验证明能在最大可能故障条件下进行隔离。

- b. 多路传输器与其它数采设备间的光纤隔离是一种可接受的设计。
- c. 设计者应当根据设计应用和环境要求选择隔离器的类型。光耦合、变压器耦合或诸如固态隔离器的其它合适类型都是可行的。设计者应负责证明所选的隔离装置

满足输入电压保护要求。应考虑配电和布线时线路互连的热短路。

- d. 模拟隔离器的使用不应使得仪表回路中的安全相关部分的精度低于安全分析所需精度。
- e. 模拟隔离器的线性度和稳定性不应随时间和温度变化而显著降低。
- f. 接地保护

设计者应根据隔离器的应用条件选择用于共模抑制的隔离器类型。设计者应证明所选装置满足应用要求。该装置至少应提供80dB的共模抑制。

#### 7) 阀门（I&C设备）

- a. 电动阀应设计有独立的阀门控制信号和位置指示信号器。应避免与其他阀门有共模失效。
- b. 所有电动阀应尽可能使用标准设计，以便维护和部件的互换。
- c. 阀门应具有以下特点：
  - 所有电动阀应满足手动控制电动阀单一故障准则要求，尽量减少断电才能满足单一故障准则的电动阀门数量。
  - 对电动阀而言，应有阀位探测、防止阀门全开或全关操作中的机械过载并满足可靠性、可用性和可维修性要求。
  - 安全级系统中的气动阀在丧失气源或控制信号时应处于故障安全位置。
  - 根据NB/T20089的规定，安全级电动阀宜设置热过载限值并触发主控室报警。
  - 所有用于开关或旁通的非调节类阀门应配有控制电路以防止阀门在任何中间位置反向，除非由于电源丧失或力矩开关动作导致阀门传动机构失电。安全级阀门控制电路应设计成能确保安全相关的自控信号优先于所有其它的过程控制信号。
  - 当需在中间行程转换方向时，阀门选型应尽量避免非调节型阀门。
  - 在气源丧失后，如果需要气动阀动作至其要求位置，则应为其配备气罐。
  - 位于惰性气体或高辐射剂量的容器内的气动阀，其电磁阀应位于容器之外。
  - 无论是调节或非调节气动阀，都应配有位置指示和就地端子盒。除非安装在机架上，电磁阀也应连接到就地端子盒。严酷环境内的安全级气动阀限位开关应根据用途进行鉴定。如使用了干触点电路，应按照2.6.4.4-2节进行鉴定。
  - 气动阀的位置指示器应既能提供位置指示，又能提供位置控制。
  - 阀位指示应直接从阀杆获取。
  - 对所有安全级电动阀，其控制和动力电应当由同一安全级序列电源供给。对所有非安全级电动阀，其控制和动力电应当由同一路非安全级序列电源供给。
  - 触点的公共端不应当用于不同相位、不同类型或不同电压水平的电路中。
- d. 如果动力阀的阀杆位置不可见或不能指示阀门位置则应配备就地位置指示装置。所有手动阀应根据需要配备安全锁定装置且宜配有阀位变送器。
- e. 重要阀门需要进行外部和/或内部泄漏监测。电厂运行时宜探测外部泄漏。
- f. 应提供排除故障所需的诊断、校准和其它专用工具，且在交付前贴上永久的标识信息。

#### 8) I&C的供电

- a. 在输入电压和频率产生预期的变化时，仪表和控制设备应能包含规定的裕量的性能极限范围内工作。
- b. 仪表和控制设备应设计成能工作在考虑了2.7.7节规定的电池电压变化（含设计极限）的直流输入电压范围内。

9) 应根据适当的标准设计并试验电源输入端的浪涌保护功能，以承受这些标准中规定的最坏情况的浪涌限值，并不应造成电源或与电源相连接的设备的损坏。

浪涌消除后，设备应能执行所有功能并满足所有性能限值，而无需电厂人员的维修或重新校准。对电源输入端的浪涌承受能力的要求仅适用于贯穿机柜组件边界的电源电缆。

- a. 应当在保护功能机柜组件中为交流输入馈线配备过流保护。
- b. 应当为机柜子系统的直流电源提供过压和过流保护。电源保护功能的运行不能导致设备损坏。一旦故障条件消除、直流电源恢复，并且系统已完全初始化，设备就应在性能限值范围内正确执行其功能。这可能需要电厂人员在将子系统恢复到运行工况之前，先手动复位子系统的电源保护装置。
- c. 从交流输入馈线端点到机柜内各机架的交流和直流（如电池）配电部件应位于机柜组件内。电源的输入连接点必须位于保护屏障内并且易于接近。
- d. 在机柜的一个机架内的设备，其所用的所有直流电均应由安装在同一机架的直流电源供给。直流电母线不应在机柜组件内的各个机架之间走线。在经过论证后，可以允许例外情况。
- e. 从电源单元到负载的电缆应根据机柜的每个机架内的设计负荷确定。

电源输出分配必须使用不会产生过多压降或导体过热的电缆。

- f. 非安全级系统的仪控设备以及需要使其完成功能的所有设备都应连接到非安全级电源和配电系统，而不能连接到安全级电源和配电系统。
- g. 如果一个仪表回路由一条不间断电源母线供电，则其所有的功能（指示、报警等）均应由一条不间断电源母线供电。
- h. 显示装置、就地指示器和仪表回路中需要用电的设备应当有明确的方式指示电源的丧失。
- i. 当特殊仪表需要用指定电源以外的特殊电源时，被供电的子系统应当为其提供电源。
- j. 该要求旨在涵盖如下情况-当由特殊的供货商提供的设备需要不同于设计者提供的电压水平时。

#### 10) 接地

所有仪表和控制设备的接地应当满足国家或行业标准中规定的要求。确保使用可靠的接地设计。

- a. 保护和电源接地
  - 保护性电源输出地线应独立于信号地连接到机柜接地点。
  - 应采取适当措施将所有设备、机柜的机架及其门通过机柜接地点接地。
  - 使用 50V 或更大工作电压的金属封装设备和模块应进行保护地的浪涌承受能力试验。
  - 保护地应当与电源地连接，以便当任何设备从地线断开时不会与其它设备断开。
  - 必须为所有电气设备提供当其不在役时通电部件的接地措施。接地时应具备足够长度的便携式接地电缆以便能将最远的部件连接到接地系统接头或设备接地总线。
  - 机柜接地总线网络应设计成能够尽量减小机柜内子系统间的共模电压。公共接地总线应连接到电厂接地总线上的足够大的接地螺栓上。最好用专用的足够粗的接地电缆将机柜内的接地总线直接连到主要的电厂接地网络。最好使用至少 100 方以上的电缆。
  - 应当为低电压电流提供一条从负载返回到电源公共地的通路。电源公共地应与机柜接地总线进行单点连接。
- b. 仪表接地

- 电缆屏蔽层的接地应独立于模块，以便从线路中移走一个模块时不会妨碍屏蔽层的连接。
- 机柜组件中使用的屏蔽电缆最少应提供 95% 的有效屏蔽覆盖。
- 模拟信号应只在一处接地，以防止地电流流入信号端。
- 仪表电缆屏蔽层应只在一点接地。
- 仪表电缆屏蔽层应在紧邻信号线的端子排上进行端接。
- 屏蔽层应接地以使得屏蔽层电位尽可能接近于信号源的地电位。并且，屏蔽层电流不能流入接地参考或信号线内。一般而言，仪表电缆的屏蔽层应在仪表回路的电源处接地。至于监测过程中所用的热电偶，则应是非接地型，屏蔽层应在接收装置处接地。
- 各个设备的地电位存在电位差时，设备间的信号传输应采用差分电压、电流、光耦合或交流耦合。各个系统的地线之间应有足够的隔离地以防止接地回路。
- 电厂仪表地应设计成能够确保系统间的地电位差不会由于过高的共模电平而损坏接口设备。系统间的信号连接应采用隔离器件以防止设备损坏。
- 组件、部件和子系统的信号接地应采用“分支”方案以使地电流不会在不同部件之间流动。
- 应采用已设计成能预防腐蚀的材料和工艺进行与仪表接地总线的连接。
- 通信系统不能共享仪表地。

#### 11) 电气贯穿件和密封

- a. 如果使用了隔板式贯穿件连接器，仪表和控制信号不能因此而衰减。在不会造成信号衰减的情况下允许绞接。干触点的连接器应适当涂层以防腐蚀。严酷环境使用的安全级连接器应根据干触点工况进行鉴定。
- b. 所有隔板式贯穿件连接器均应有备用件。设计者应确定备用连接器的数量。
- c. 仪控贯穿件的设计应考虑来自其它的电缆贯穿件的电磁干扰/射频干扰效应。

贯穿件之间相互靠得太近会引起仪控信号的衰减。

- d. 安全壳电气贯穿件应根据 GB/T13538 进行鉴定。

确保贯穿件的机械和电气完整性在设计基准事故下得以保持。

- e. 一个安全壳电气贯穿件只能敷设一种电压的电缆，即贯穿件应分为中压、低压、测量、控制贯穿件。模块化贯穿件中，如回路电阻热量不会对光纤电路的功能产生影响，光纤可以与中压和低压模块位于一个贯穿件组件。
- f. 安全级贯穿件不能用于非安全及电路敷设，并不得与其他安全列的电缆混合敷设。

#### 12) 电缆、光缆和管道

##### a. 设备电缆

- 设计者应在考虑电缆更换成本、复杂性和电厂停机时间等因素后确定对备用电缆的要求。备用导体和线缆应在电厂图纸中标识。在电厂建设期间，应移除缺陷电缆。在电缆故障时，需考虑在现场安装成本和备用电缆间作一个经济性的权衡。宜对故障废弃电缆进行记录以防止误用，以及未来由此引发故障导致的不必要可运行性评估。
- 应当为所有控制和测量电缆用颜色编以代码，并为其分配标识编号。设计者应建立颜色代码和标识编号的标准。应尽可能遵循工业标准。
- 多芯控制电缆的芯线应加以标识。如用于颜色标识的绝缘颜料未和电缆进线环境鉴定，该颜料不得用于电缆标识而应用颜色代码对绝缘表面进行标识。
- 屏蔽双绞线应包有至少一层屏蔽层。屏蔽层应单端直流接地，最好在处理单元

/DCS 侧接地。当需要满足 EMC 要求时,可在电缆的另一端进行容性接地。应尽可能使用多对绞线电缆。每对线应包含编以色码的芯线。

- 根据为全电厂设计建立的颜色和标识编号标准,设计者应建立面板内部的接线标准。
- 所有测量和控制电缆应是最大程度可投入使用的预装电缆,除非安装时对电缆的拉拔会造成预装连接器的连接降级。预装电缆降低了现场安装和维修时错误连接的可能性。
- 仪表和控制的数据传输电缆应满足 GB/T 13286 第 6 节中规定的隔离准则。数据传输电缆需加以保护以尽量减小对仪表和控制的潜在干扰。
- 仪控电缆的绝缘层和护套包括面板内部接线应符合第 11 章 2.7.2 要求。
- 所有安全级电缆应满足最新版 IEEESTd.383 的相关规定。
- 除非有专用接线箱提供保护,禁止使用电缆铰接。电缆铰接材料应符合运行环境使用要求。安全级严酷环境内电路的铰接器和连接器应进行相应鉴定。
- 电缆系统设计应保证敷设工程量、电缆弯曲半径最小化,并保证电缆拉伸力不会超出供应商保证的电缆自身弹性允许限制以及墙装支撑件允许压力。拉伸力和最大允许拉伸距离计算书应符合最新版 IEEE Std.690 的要求。
- 仪控电缆敷设路径应符合 2.7.2 的要求。

#### b. 电缆通道

- 电缆通道屏蔽

低电平的控制和测量电缆的托盘系统应当与电力电缆的托盘系统隔离开来,以尽量减少对信号的干扰。接地的金属托盘和空间隔离是提供电缆通道屏蔽的可接受方法。

- 电力电缆屏蔽

电力电缆应加以屏蔽并接地。低压电力电缆可采用铠装电缆,见第2.7.2节。

- 电缆通道的载荷

面板内侧电缆槽的载荷不宜超过40%容量。

- 下列隔离准则应当用于内部面板布线:
  - 交流和直流线路应保持隔离。
  - 测量信号线应独立于电源线或控制线单独走线。应通过分离的走线来实现隔离。不允许将测量信号线与电源线和控制信号线捆扎。
  - 安全级电路与非安全级电路和冗余安全级电路之间的隔离应满足 IEEE Std. 384 的要求。
  - 冗余安全级设备与控制配电盘内电缆之间的分隔距离至少应为 15cm,或者为对所建议安装方式加以分析而得到的距离值。分析结果应基于已作试验。该试验用以确定电缆、电缆材料、设备和其它与设计相关材料的阻燃剂特性。在达不到所需分隔距离的情况下,应当在冗余安全级设备和电缆之间安装阻挡层。
  - 非安全级电缆不能和安全级或安全级相关的电缆捆扎。无套管光纤和有套管光纤的分离要求遵循 GB/T 13286。
  - 安全级配电板上所开的导线孔应加以密封。
  - 反应堆电缆通道和防火屏障。

当电缆贯穿防火屏障是时,电缆通道设计应采用特殊要求以确保防火屏障密封的完整性不会因贯穿其电缆引起的问题(如火灾)受到影响。

#### c. 测量电缆

对包含两根或多根绞合芯线的测量(信号)电缆,需要对单独的绞合芯线加以屏蔽,也需要带有一根漏线(与屏蔽层相连)的总屏蔽。

d. 光纤

- 用于光纤电缆的电缆支承、通道和贯穿件应当考虑光纤电缆的最小弯曲半径。
- 设计者应在建造期间安装备用的光纤电缆。备用电缆的批准使用应基于：
  - 更换受损电缆所需的成本、复杂程度和工作量，
  - 受损电缆导致设备或电厂停运的可能性。安装期间因缺陷废弃使用的光纤应在其上加以记录。

建造期间安装备用的光纤电缆旨在尽量减少复杂和昂贵的电缆更换、维修，和/或设备和电厂停运时间。应对故障废弃光纤进行记录以防止误用，以及未来由此引发故障导致的不必要可运行性评估。

每条光纤应至少有100%的备用光纤。

- 光纤和内部导管至少应符合最新版 IEEE Std.383 的阻燃要求。具有压力通风系统和立管防火等级光纤可以考虑使用。光纤的屏蔽和内部导管应选用低烟无卤型。
- 设计者应建立颜色代码和标识编号的标准，见 2.4.4.4-12。
- 设计应考虑由电缆铰接导致的光纤传输信号衰减。
- 安装使用的光纤，其种类应尽可能统一或最少，并应符合 IEEE Std.1428 的要求。

e. 光纤通道要求

- 当光纤敷设于桥架中，以下选项可以接受：
  - 如光纤得到有效防护时（如铠装）以耐受梯形桥架的挤压（尤其是从电力电缆桥架引入时），则可以使用梯形桥架敷设。
  - 如光纤有内部导管时，可以考虑梯形桥架敷设。内部导管可用于任意类型电缆桥架中光纤的敷设，以防止相邻电缆对光纤的挤压。
  - 当光纤的防护足以抵御来自相同桥架内电力电缆的挤压，则光纤可以敷设于硬质或槽型底桥架。

桥架台阶和电力电缆有可能损坏光缆，尤其当桥架内有电力电缆敷设并位于光缆之上时。因此光纤必须进行保护，并不得受到单点受力载荷。同理桥架系统应设计成避免单点挤压载荷，或采用内部导管及其他手段防止光纤损坏。

- 光纤分离应满足 GB/T 13286 的要求。

13) 现场端接和绞接

a. 现场端接和绞接方式应具备下列特性：

- 具有牢靠的紧固性以承受设计基准地震事件和电厂设备振动而不会随意断开。
- 需权衡圆形接线柱的优劣。圆形接线柱能确保紧固性，但圆形接线柱有现场端接耗时过长和需要额外空间的缺点。该要求允许电厂设计者选择其它端接方式。
- 保证工作空间以改善可维修性。如严格遵循了制造商安装指导，可以使用极紧凑型端子模块。
- 这是针对机柜的要求；但是，考虑到可维修性已经成为以前电厂设计的一个问题，值得在此对该要求加以规定。不同的现场电缆端接方式已经能够改善可维修性。
- 易于断开以便进行维护、维修和更换。
- 配备端子标识。
- 使用与环境条件相匹配的材料以便信号不会衰减。
- 环境条件可能会引起材料的老化，从而导致信号的衰减。材料的兼容性问题也可能导致信号衰减。
- 电厂营运方应使用直接和简单的现场端接和绞接操作规程而无需过多的或经常的培训或专门设计的工具。

- 应遵守 RG1.75 中关于现场端接和绞接的规定。
- b. 当现场线束端子在一处集中, 不易于接近, 或空间内紧密集中时, 宜考虑使用集线盘或集线装置。

#### 2.6.4.4 操纵员辅助手段

操纵员辅助手段是为操纵员提供信息以帮助操纵员进行电厂监控的系统。该系统的所有功能符合 2.6.4.2 节的要求, 并具有自诊断、信号故障检测等功能, 而且当系统或专有子系统不可用时, 能随时向操纵员发出警报。

操纵员辅助手段具有信号处理功能, 所以在应用中要符合 2.6.4.2-9 节的要求。操纵员必须随时意识到当辅助功能失效时, 要采用另一种方法替代它。

##### 1) 技术规范监测功能

技术规范监控功能应具备以下能力, 在接近或违反运行技术规格书时, 向操纵员发出警告, 并告知需采取进一步操作前的剩余时间:

- 系统宜使用有关设备状态、堆芯限值和裕度的适当信息及其它适当数据, 以确定接近运行技术规格书规定的限制条件的方法。在可行的情况下, 系统还应尽可能指明避免违反运行技术规格书的适当措施;
- 提供为确定接近运行技术规格书规定的限制条件所要采集和处理的信息。在可行的情况下, 这种信息应该由系统自动采集, 任何对运行技术规格书规定的限制条件会造成影响的自动测试也由系统自动完成;
- 当发生超出运行技术规格书规定的限制条件时, 为操纵员发出警告, 并为其作上标识。在可行的情况下, 系统也应指出从运行技术规格书规定的限制条件恢复所需要的操作。对所有超出运行技术规格书规定的限制条件的情况和恢复时间进行自动的日志记录。
- 进行计算以建立监测运行技术规格书规定的限制条件所需的反应堆和堆芯参数, 如热工裕度、功率分布、热产生率等。这些计算结果应在操纵员显示器上提供, 并且当条件不在限制范围内时提醒操纵员;
- 对不能由系统自动监测的运行限值条件, 系统应有手动输入能力。应包括对报警条件的确认功能。
- 技术规范监控能帮助操纵员维护电厂运行, 从而改善电厂的可用性;
- 为了对操纵员提供最大限度的帮助, 需要向操纵员提供所出现的运行技术规格书规定的限制条件状态信息, 并给出如何避免它出现的相关操作;
  - 故障、维修活动以及试验操作是确定运行技术规格书规定的限制条件的重要数据。自动的信息采集将减轻操纵员的负担, 并且当活动不由操纵员启动时要求自动获取信息。
- 必须向操纵员提示运行技术规格书规定的限制条件的偏离情况, 因为这是系统的基本功能, 并且必须指明从限值恢复的措施;
- 判断运行技术规格书规定的限制条件的出现或存在, 需要提供多种堆芯参数和电厂参数, 计算结果有助于操纵员进行正常的电厂监测;
- 采用计算机化的系统对所有运行限制条件进行监测, 将大大减轻由于日志记录和跟踪运行限制条件造成的操纵员管理负担。报警状态确认表明操纵员知道并确定了运行中存在的问题

##### b. 保护系统和安全系统可用性监测功能

仪表和控制应向操纵员提供 RPS 和安全系统可用有两种情况: 长期可用和短期可用。在可能的情况下, 此项功能可作为技术规范监控功能的子功能。仪控系统具有:



- 对执行安全功能不重要的监控功能应由安全系统外的非安全相关设备执行，以降低安全系统的复杂性。
- 监视能对 RPS 和安全系统可用性造成影响的支持服务（如：电压、冷却水、油压和液位等）。这种监视包括对两种设备系统的可用性监视，一种是启动设备（如：传感器、控制系统等），一种是执行设备（如：泵、阀等）。应监测主要和备用服务资源的可用性；
- 监视能对 RPS 和安全系统成功运行造成影响的过程参数（如：反应堆压力、储水箱液位、环境指标等）；
- 为保证 RPS 和安全系统的可操作性，提供采集维护、校准和试验数据的措施。

为建立 RPS 和安全系统的可操作性所需的卸载、储存和检索、维护、校准和测试数据提供规定。

## 2) 电厂计算机辅助诊断、维修和试验

电厂应包含有助于周期性监督试验、专项测试、维护和检查计划以及识别潜在设备退化的功能。电厂设计者应提供适当的数据采集、数据分析、数据库管理和操纵员界面来完成如下任务：

- 根据技术规格书中的要求，提供满足周期性监督试验所需要的日志记录、历史信息 and 辅助设备。应提供试验中使用的跟踪仪器、试验中使用的程序、验证试验前和试验后条件以及收集和储存试验结果；
- 提供适合的检查计划。该计划中使用包含元器件有关设计、前期检查结果、维修记录、运行记录、规则和服务信息等资料来指导电厂的检查；
- 为设备应力因子合格鉴定和寿命延长，对设备使用进行监督并作日志记录。
- 监测电厂性能，以确定电厂设备中可能出现的退化。应使用核蒸汽供应系统（NSSS）和 BOP 数据（如反应堆功率水平、给水温度和流量、汽轮机蒸汽流量和蒸汽条件、凝汽器真空、辅助设备消耗的能量）定期评估电厂的整体效率等。评估应与当前电厂条件下的预期性能进行比较。这些评估应作为确定电厂整体性能退化的辅助手段，并确定导致退化的参数。；
- 为水化学提供监测和管理。提供适合的传感器、数据采集、数据存贮和分析工具辅助电厂化学师进行分析、诊断和校正异常现象，也要提供预测腐蚀度的分析工具；
- 提供数据采集和分析用于标识设备降级和所选重要设备的退化或故障。本系统采用直接技术（如：泄漏率测量）和特殊分析技术两种方法来识别潜在的设备降级。特殊分析技术包括：噪声分析、监督试验结果分析法和其它的一些用来识别设备降级、设备故障或组件内部存在异物（如：压力容器内脱落部件监测）的技术。
- 为电厂初始启动试验提供所需要的传感器、数据采集、数据分析、数据存贮和数据显示。也要提供后勤服务能力，用于标识和跟踪所用的专门试验设备，确定试验前、后的状况且完成启动试验、最终试验。特别注意要保证所提供数据具有足够的精度、分辨率和响应速率，从而满足初始试验时启动测试的要求。初始启动试验中将最大程度的应用电厂长期使用的传感器和仪器。尽可能地减少专门连线，除非特别的原因，不允许断开电厂线路。

## 3) 安全级到非安全级的隔离

根据标准 GB/T 13284.1 和 GB/T 13629 的要求，安全系统的数据应与非安全网络隔离。非安全系统中的故障不得传播到安全系统中。

## 4) 网络安全边界内的数据

通过直接连接到控制站、工程师站或其他直接连接到安全或非安全系统的仪表和控制提供给用户的数据应受到保护，但不要求与安全或非安全系统隔离。此类接口可能影响仪表和控制使用的数据，并应评估对网络安全的影响。

#### 5) 网络安全边界外的数据

提供给其他用户的数据应隔离开来，以确保用户行为不会影响电厂的安全、可靠运行。这种隔离需要一种方法，以确保当前和历史数据可供用户使用，而不会对仪表和控制用于保护和控制电厂的数据造成不利影响。

应将当前和历史数据提供给历史数据库，该历史数据库可作为技术支持中心、应急设施、系统和设计工程师、控制室外操作人员、管理人员和其他职能部门的数据源。

数据应提供给电厂的所有适当用户。访问数据不应危及仪表和控制的安全、可靠运行，从而危及电厂。

#### 6) 技术支持中心

TSC 位于 MCR 附近，它是在现场紧急情况期间为操纵员提供支持的部门。TSC 的数据系统应满足所有适用的管理导则和标准的要求，包括网络安全。

#### 7) 应急指挥中心

应在厂址附近提供应急指挥中心，以便在厂内与厂外应急处理人员之间提供协调和通信，应急指挥中心应满足所有适用的管理导则和标准的要求，包括网络安全。

#### 8) 停堆后审查数据和信息的能力

停堆后审查数据和信息功能应提供数据收集能力，以便进行停堆后的审查。该功能还支持停堆后审查分析并确定电厂能安全重新启动。

应对所有非计划停堆进行停堆后审查和分析。此操纵员辅助系统将帮助操纵员使电厂回到正常运行工况。

#### 9) 电厂数据的其他使用

应向控制室、TSC 和应急指挥中心以外的用户提供电厂数据。该数据应包括当前采样数据和历史数据。该数据应通过单向通信路径隔离，以确保保护和控制系统内的数据不会损坏。可能需要增加历史数据库，向包括应急指挥中心、TSC 等用户提供数据。

### 2.6.5 电厂、反应堆和反应堆冷却剂系统的仪表和控制要求

#### 2.6.5.1 目的和范围

反应堆和反应堆冷却剂系统指的是第2,3章所涉及的系统。本节除了提出对这些系统的用户要求外，还包含对电厂整个发电过程进行监测和控制的要求，以及对控制系统和仪表(例如，传感器，指示器，控制装置，数据传输和处理设备，以及报警等)的一些要求。本节着重于有关电厂控制方面的要求，以及有关反应堆和反应堆冷却剂系统协调一致方面的要求，控制系统的总体要求在第2.6章的其他章节中详述。

第2.6章的这一节仅包括对这些系统的仪控方面的要求。在其他章中特别是第2.3、2.4章对这些工艺系统有许多要求,都将同样适用于这些系统；那些要求将不再在本节中重述，除非需要它们对仪表控制有特殊要求。本节提出的要求包括：

- 1) 各系统的仪控功能要求；
- 2) 各系统的仪表控制的实体边界和接口；
- 3) 控制和监测策略（例如，手动还是自动，就地还是远程），该策略应遵循各种运行工况，例如，功率运行、启动、正常运行、停运、换料和试验；

每个系统的监视控制要求和整个电厂的监视控制要求应协调统一。

#### 2.6.5.2 电厂、反应堆及其冷却剂系统的仪控系统总体要求

### 1) 功能

设计者应在电厂整体监控和单个电厂系统监控之间进行合理的功能分配,以完成设计过程中确定的功能和任务(2.6.2.1-3 节)。设计者的基本责任是使仪控系统能够与工艺系统运行协调一致,使得全部功能均能良好地执行。如果其他的功能分配方法表明能极大地改进电厂的可操作性、简单性或可靠性,并且完全符合第 2.6.2.1 节中设计过程的要求,特别是功能设计方法与功能及任务分析的要求一致方可使用。

#### a. 能量的产生、输送和转换

仪表和控制应对反应堆堆芯中产生的能量,并最终输送部分能量给电网用户和把其余部分排放到热阱和环境中的整个过程提供监测和控制。仪表和控制整体功能的最终实现需要对单个电厂系统的仪表和控制进行与工艺系统运行协调一致。

#### b. 反应堆能量产生

仪表和控制应提供对反应堆堆芯能量的产生的监测和控制。这种功能应通过监测中子通量和调节反应性以维持裂变能量的产生和能量的分布来完成。对压水堆来说,也包括监测反应堆堆芯出口温度。该功能主要通过控制棒、冷却剂中的可溶硼(通常仅对压水堆),以及堆芯冷却剂温度和流速来实现。

#### c. 反应堆冷却剂压力

仪表和控制应提供维持反应堆冷却剂压力在适当的运行范围和设计限值内所要求的控制和监测。这种功能主要用反应堆冷却剂系统的仪表和控制来实现(特别是卸压阀以及压水堆核电站中的稳压器加热器和喷淋装置)。冷停堆工况,泄压由余热排出系统来完成。

#### d. 反应堆冷却剂总装载量和化学性质

仪表和控制系统应提供维持反应堆冷却剂系统中冷却剂的合适装载量,并确保冷却剂化学成分在适当范围内所要求的控制和监测。这种功能主要由反应堆冷却剂系统以及化容控制系统(压水堆)的仪表和控制来完成。化学成分监测主要由核取样系统的仪表和控制来完成。反应堆冷却剂泄漏的监测主要由反应堆冷却剂泄漏探测系统的仪表和控制来完成。

#### e. 反应堆堆芯热量的导出

仪表和控制应提供导出反应堆堆芯产生的热量所要求的控制和监测。对于压水堆电站,包括将堆芯到蒸汽发生器之间的反应堆冷却剂冷、热两段的监控。反应堆堆芯热量导出正常情况下由反应堆冷却剂系统完成。冷停堆工况由反应堆余热排出系统来完成。

#### f. 蒸汽的产生

仪表和控制应提供蒸汽发生器的控制和监测,包括维持蒸汽发生器中适当的水位,保证蒸汽发生器不满足。

### 2) 边界和接口

本节列出的是一些典型的接口。构成反应堆和反应堆冷却剂系统功能组的每个系统的实体边界在第 2.3 和 2.2 章专门的章节规定。针对这个系统功能组的仪表和控制的边界应和电厂系统边界相一致。包含的仪表和控制硬件有:

- a. 仪表传感器;
- b. 数据传输设备;
- c. 数据处理设备;
- d. 控制器和逻辑器件;
- e. 仪表和控制硬件(例如,控制器和指示器);
- f. 支持仪表和控制硬件的软件。

构成反应堆和反应堆冷却剂系统组的单个系统的接口由第 2.3 和 2.2 章专门的章节规定。系统组的仪表和控制的接口应和这些电厂系统的接口相一致;仪表和控制的接口应在仪表和控制的“设计策划大纲”(2.6.2.1-2 节)中正式定义和控制。即使有些接口没有在第 2.3 和

2.2 章中定义为接口，如果仪表和控制系统的设计人员认为系统的运行可能需要与工艺系统运行协调一致时，也应定义和协调不同的仪表和控制与其他电厂系统之间的其他接口。

### 3) 电厂、反应堆和反应堆冷却剂系统通用的控制和监测策略

仪表和控制系统设计人员对电厂和反应堆冷却剂系统组的仪表和控制的所有部分应使用一致的控制和监测策略，除了由单个系统的仪表和控制要求修改以外。这种共同的控制策略也应符合仪表和控制系统的其余部分所用的控制策略。

（一致的控制策略支持华龙技术电厂高度标准化的总目标，它也有助于简化操纵员和维修人员的培训。例如，一致的控制策略可引向使用类似的控制器、显示器、和控制站。）

#### a. 启动和停运操作

这组系统的仪表和控制应是自动化的，尽管仪表和控制应提供操纵员启动或停运系统所需的监控和控制，即控制应允许手动操作。

（启动和停运操作大多由操纵员完成，它可能包含非常多个单步操作，例如阀门复位，这些操作的自动化会大大地增加电厂的复杂性，是不希望的。可以使部分的启动和停运操作自动化，这样能减少启动时间或降低出现差错的风险。）

#### b. 正常运行

这组系统的仪表和控制通常应为连续或经常重复的任务提供自动操作。

#### c. 重新配置操作

在必要时，仪控系统宜对系统进行自动重新配置（例如关机），以避免人员危险、重大设备损坏或支持电厂其它部分的动作，例如，当反应堆由反应堆保护系统自动停堆或安全系统启动时。

由于时间限制或错误风险，某些重新配置不能依赖于操纵员。此外，自动执行这些任务一直是一种做法。

在自动重新配置后系统要复位到初始状态，正常的情况应由操纵员来操作而不是自动操作。但如果仪表和控制的设计人员确认这种自动动作能大大地有助于如下几点则也可自动进行配置：

- 减少对保护和系统的挑战；
- 降低对人员的伤害；
- 改进电厂的可用性；
- 降低电厂主设备的损坏风险。
- 应向操纵员报告初始组态的任何自动复位。（操纵员应察觉系统中的配置变化）

#### d. 试验操作

该系统组的仪表和控制通常应考虑仅在操纵员指导下进行在线试验。试验本身应如 2.6.2.6 节要求的那样自动进行并能得到帮助，以使操纵员的动作简单并使对电厂产生干扰的风险小。

### 4) 与工艺系统运行协调一致

对这组系统的仪表和控制的设计应被与工艺系统运行协调一致，使得电厂性能和功能要求以及单个系统的性能和功能要求均被满足。这些要求在华龙技术电厂用户要求文件的第 2.1 章节和其他各章，特别是第 2.3 和 2.2 章中可以找到。此外，仪表和控制的设计人员应将该系统组的设计特性与仪表和控制的其他部分，特别是能量转换和电力产生的仪表和控制部分（例如 2.13）相协调。

## 2.6.5.3 全厂的仪表和控制

### 1) 功能

整个电厂的仪表和控制的功能是保证能量输送主过程的所有部分均以高效和有效的方

式运行，并将所要求的能量传输给外电网。

#### 2) 控制和监控策略

仪表和控制应根据 2.1.4 的性能设计要求，使用负荷调节器实现对电厂功率水平的调节。在这些条件下，仪表和控制应保证速率和幅度限制在电厂可接受的范围内。如果所有的系统均正常运行的话，负荷调节器应不采取任何将引起电厂脱扣或保护和系统挑战的偶然的或有意的动作。仪表和控制应提供改变功率的能力，并且在改变功率之前先由操纵员确认。

此外，当系统或部件故障时，负荷调节器应能闭锁功率控制，仪表和控制系统应提供有调整远程功率调节范围限值的能力。主控室操纵员可不进行任何操作便能及时发现所有的负荷调节器要求的功率改变。此外，应为控制室操纵员提供及时和简便的使电厂控制脱离负荷调节器的控制手段。在操纵员和负荷调节器之间的信息交互应明确包括在功能分析和任务分析中。

#### 3) 与工艺系统运行协调一致

整个电厂仪表和控制应按 2.6.5.2-2 节的要求与电厂的其他仪表和控制与工艺系统运行协调一致。这应具体考虑：

- a. 反应堆中的能量产生；
- b. 蒸汽在汽轮发电机中转换为电能。

#### 4) 性能监测

电厂的总仪表和控制应为操纵员提供调用电厂的热平衡和所有主部件是否均在有效和高效地运行的监测显示。这种对操纵员的支持应提供给操纵员测试其他设备的组合，设定值等（在技术规格说明书的限度内）的能力，以确定是否会提供更有效的运行能力或是否会使性能恶化。

### 2.6.5.4 中子监测系统的仪表和控制

#### 1) 功能

中子监测系统的仪表和控制应提供确定堆芯中的裂变能量产生的总量、变化速率、和分布是否在可接受的范围之内的监测要求。

#### 2) 监控策略

仪表和控制的设计人员应通过分析包含中子通量水平或分布内容的功能和任务来确定监控策略：

- a. 必须自动进行的监测，以及根据操纵员要求可以进行的监测；
- b. 必须提交给操纵员的数据，包括单个读数的特殊处理或简化，使得信息对操纵员立即有用；
- c. 需要报警或其他引起操纵员注意的情况。

#### 3) 与工艺系统运行协调一致

中子监测系统的仪表和控制应如 2.6.5.2-2 节要求的那样，与电厂其他系统的仪表和控制与工艺系统运行协调一致，这应具体考虑：

- a. 控制棒的操作；
- b. 化容系统的运行；
- c. 反应堆保护系统的运行；
- d. 堆芯出口温度的监测。

### 2.6.5.5 棒控系统仪表和控制

#### 1) 功能

压水堆棒控系统的仪表和控制应提供确定控制棒位置所需的监测和控制，使得堆芯中裂

变能量生产的幅度和分布对堆芯寿期和电厂各种工况来说均在可接受的范围内。

#### 2) 控制和监控策略

正常的停堆和启动应是自动化的,并提供直接手动控制的能力。仪表和控制设计人员应通过功能和任务的分析实现操作部分自动化,该操作部分将要求操纵员对重要的时段持续关注。

#### 3) 与工艺系统运行协调一致

压水堆棒控系统的仪表和控制如 2.6.5.2-2 节所要求的那样,应与电厂其他系统的仪表和控制系统与工艺系统运行协调一致。这应具体考虑:

- a. 反应堆保护系统的运行;
- b. 化容系统的运行;
- c. 从中子监测系统得到的信息。

### 2.6.5.6 冷却剂系统仪表和控制

#### 1) 功能

压水反应堆冷却剂系统的仪表和控制应提供所需的监测和控制:

- a. 维持反应堆冷却剂系统的压力在适合的限值内;
- b. 维持反应堆冷却剂系统中冷却剂合适的装载量;
- c. 在功率运行和停堆时,导出堆芯中产生的热量,使其不超出适合的限值。

#### 2) 控制和监控策略

压水反应堆冷却剂系统的仪表和控制应提供不需操纵员直接关注而完成所需功能的能力,但是,如果在自动控制中出现问题的话,应提供适宜的监测方法和控制,使得操纵员手动控制功能是有实效的。

#### 3) 与工艺系统运行协调一致

压水反应堆冷却剂系统的仪表和控制应如 2.6.5.2-2 节所要求的那样,与电厂其他系统的仪表和控制与工艺系统运行协调一致。这应具体考虑:

- a. 棒控系统的运行;
- b. 化容系统的运行;
- c. 蒸汽发生器系统的运行。

### 2.6.5.7 化容系统仪表和控制

#### 1) 功能

化容系统的仪表和控制功能应提供必要的监测和控制:

- a. 维持反应堆冷却剂中的硼浓度在必要的数值,以保证控制堆芯反应性,也就是能量的生产能够得到充分的控制;
- b. 维持反应堆冷却剂系统的反应堆冷却剂合适的总装载量;
- c. 维持反应堆冷却剂的化学性质在合适的范围内。

#### 2) 控制和监控策略

化容系统的仪表和控制应特别为 2.3.3 节中补水流量控制、容控箱和稳压器液位控制的运行方式提供详细要求。

- a. 正常运行时,容控箱的水位自动控制;
- b. 操纵员动作时,半自动的硼化和稀释调节;
- c. 手动后备支持能力;
- d. 容控箱低水位时,上充泵吸入口的自动调整;
- e. 正常运行时,下泄流量和上充流量的自动控制。

### 3) 与工艺系统运行协调一致

化容系统的仪表和控制应如 2.6.5.2-2 节所要求那样, 与电厂其他系统的仪表和控制与工艺系统运行协调一致。这应具体考虑:

- a. 用控制棒控制反应堆功率水平;
- b. 反应堆冷却剂系统的压力控制, 包括泄压阀的运行;
- c. 对非能动电厂, 当反应堆冷却剂泵停运时, 提供流过化容系统流量的反应堆停堆冷却系统的控制;
- d. 如果有, 硼酸再循环系统的控制;
- e. 用核取样系统提供监测。

## 2.6.5.8 过程采样系统仪表和控制

### 1) 功能

核取样系统的仪表和控制应提供必要的控制和监测:

- a. 从各种所选的电厂液体和气体系统采集有代表性的样品;
- b. 从各种所选的电厂液体和气体系统去确定工艺过程系统的情况;

### 2) 控制和监控策略

#### a. 采样

系统的采样应就地人工启动; 但是, 为便于正规的和定期的监测, 应给操纵员提供帮助以保证满足采样的次数和周期。应提供适当的闭锁装置或自动程序的采样活动以保证取样中的操纵员差错不会损害电厂的可利用性。

#### b. 工艺过程监测

连续或高度重复地监测工艺流体应不需要操纵员的启动或动作。数据应以直观的形式提供给操纵员或电厂值班员, 即如果预计操纵员将立即对信息采取行动, 应不要求手动数据简化。当过程采样结果要求自动动作导致系统停运或重新配置的时, 应向操纵员进行通告。

### 3) 与工艺系统运行协调一致

核取样系统的仪表和控制如 2.6.5.2-2 节所要求的那样, 应与被监测的工艺系统和被提取样本的这些系统的仪表和控制与工艺系统运行协调一致。

## 2.6.5.9 硼酸再循环系统的仪表和控制

### 1) 功能

如果提供硼再循环设备, 则仪表和控制应提供所需的监测和控制, 用来处理反应堆冷却剂中的液体和提供再循环补充水及合适化学成分的硼酸, 以备在反应堆冷却剂系统中重复使用。

### 2) 与工艺系统运行协调一致

硼再循环系统的仪表和控制如 2.6.5.2-2 节要求的那样, 应与电厂其他系统的仪表和控制与工艺系统运行协调一致。这应具体考虑:

- a. 化容系统控制反应堆冷却剂总量的运行控制;
- b. 放射性排放系统的运行;
- c. 为除气器和蒸发器运行服务的辅助蒸汽系统和设备冷却水系统的运行。

## 2.6.5.10 蒸汽发生器系统的仪表和控制

### 1) 功能

蒸汽发生器系统的仪表和控制应提供所需的监测和控制:

- a. 产生适量的蒸汽以将反应堆堆芯中产生的能量运送到主蒸汽和汽轮发电机系

统。具体说，这包含维持蒸汽发生器中适当的装载量（液位），以便从反应堆冷却剂中移出热量，能提供合适条件（压力和品质）的蒸汽给主蒸汽和汽轮发电机，并能防止蒸汽发生器的过溢。

b. 在某些停堆工况下排出反应堆的衰变热。在这种情况下，如同功率运行一样将产生蒸汽，然而，其蒸汽量将少得多，并不用于汽轮发电机。在这些工况下，仪表和控制的主功能将是保证反应堆堆芯的衰变热充分的传输给热阱，即冷凝器，或排放到大气。

## 2) 控制和监控策略

### a. 启动操作

蒸汽发生器系统仪表和控制应为自动化系统，并能从 MCR 提供在所有反应堆模式下自动运行的能力。这应适用于应急给水泵或主给水泵的操作。MCR 中应提供有效的手动控制。

### b. 正常操作

当电厂正在带功率运行时，蒸汽发生器系统的仪表和控制应提供液位的自动控制功能。但是，仪表和控制也应提供恰当的监测信息和控制器，以使主控室的手动液位控制操作可用。

### c. 停运或重新配置

当蒸汽发生器在计划内或计划外正常停运时（如由于反应堆停堆和汽轮机跳闸），在没有要求主控室操纵员对蒸汽发生器控制连续注意时，蒸汽发生器的液位控制应是自动的。如果自动控制不能维持蒸汽发生器的液位，应为操纵员提供手动控制所需的必要信息和控制。

## 3) 与工艺系统运行协调一致

蒸汽发生器系统的仪表和控制如 2.6.5.2-2 节所要求的那样，应与电厂其他系统的仪表和控制与工艺系统运行协调一致。这应具体考虑：

- a. 应急给水系统的运行；
- b. 给水系统与凝结水系统的运行；
- c. 反应堆与反应堆冷却剂系统的运行。
- d. 主蒸汽和抽汽系统的运行。

## 2.6.5.11 反应堆冷却剂系统泄漏监测的仪表和控制

### 1) 功能

反应堆冷却剂系统泄漏监测的仪表和控制应提供所需的监测，确保反应堆冷却剂系统的泄漏在可接受的限值内。

### 2) 监控策略

反应堆冷却剂系统泄漏监测仪表和控制应监测所需的物理量和参数，以确定反应堆冷却剂泄漏（包括蒸汽发生器泄漏）的大小和尽可能真实的位置。这种监测应是自动的，并存储数据作永久记录。仪表和控制应提供这些数据的简化，并用操纵员辅助（显示）向操纵员提供基本上连续的显示，简述现时估计的泄漏率和指示反应堆冷却剂可能泄漏的其他指示量，例如：

- a. 反应堆冷却剂总量平衡的结果（包括容控箱液位和补给流量等相关参数）；
  - b. 蒸汽和区域辐射监测的结果；
  - c. 到集水坑和排放水箱的流量；
  - d. 安全壳冷却器的冷凝流量；
  - e. 安全阀/释放阀的泄漏指示；
  - f. 泄漏到其他系统的指示（例如，冷却水系统中波动水箱高液位）；
  - g. 声音监测。
- ### 3) 与工艺系统运行协调一致



反应堆冷却剂系统泄漏检测仪表和控制如 2.6.5.2-2 节所要求的那样, 应与电厂其他系统的仪表和控制与工艺系统运行协调一致。这种与工艺系统运行协调一致应使提供给操纵员的泄漏结果是对电厂的泄漏事件适当地校正过的, 提供给操纵员的有可能产生误解的结果的可能性很小, 例如, 在仪表和控制设计中必须正确地考虑电厂和系统瞬态对装载量的影响。

## 2.6.6 反应堆保护系统和安全系统

### 2.6.6.1 目的和范围

本节涵盖了反应堆保护的仪表和控制的要求。本节包括对直接相关的控制和仪表设备的要求, 比如: 探测器、指示器、控制装置、数据传输和处理设备, 以及报警。只有与反应堆保护和安全系统应用有关的要求在本节范围内; 构成单个系统的机械和电气部件, 比如: 泵、发动机、水箱、管道、阀门、电缆, 以及开关, 都归属于要求文件的其它章。

本节特别提供了包括下列内容的要求:

- 1) 针对此类系统, 仪表和控制功能在电厂系统的仪表和控制中的分配;
- 2) 为了定义对这组系统的要求的范围, 鉴别仪表和控制的物理边界和接口;
- 3) 控制和监测策略(比如, 手动或自动, 以及就地或远程), 这些都应跟随电厂系统的不同运行模式, 比如: 系统的启动、正常运行、停闭或重新配置, 以及试验;
- 4) 单个系统的仪表和控制与全厂仪表和控制与其它电厂系统仪表和控制的集成, 以及它们运行的协调。

### 2.6.6.2 反应堆保护系统和安全系统的仪表和控制总体要求

#### 1) 功能

反应堆保护和安全系统的仪表和控制应该提供必要的监测和控制, 以执行必需的电厂和系统功能。

设计者应在反应堆保护系统和单个安全系统的仪表和控制中分配不同的仪表和控制功能。反应堆保护和安全系统的仪表和控制功能分为下面几个主要部分:

- 与防止堆芯损坏有关的功能;
- 与缓解因堆芯损坏而引起的后果有关的功能;
- 乏池保护的功能等。

尽管有预防功能的实行, 但还是可能发生导致一些堆芯损坏的事件, 结果是缓解功能将被执行。对于这样的事件, 仪表和控制还是应将损坏预防功能定位在尽可能高的级别, 以限制堆芯损坏的数量。

由于针对这一组电厂系统的仪表和控制包括了对安全相关功能的监测和控制, 这些仪表和控制几乎都是安全相关的。

#### b. 对限制反应堆功率水平的控制和监测

作为防止堆芯损坏的总体功能的一部分, 仪表和控制设计应提供把反应堆能量的产生限制在不会导致堆芯损坏的等级以内所必需的控制和监测。该功能主要是由反应堆保护系统完成的。它监测功率水平和其它电厂参数, 并触发控制棒移动(比如释放)来降低堆芯反应性。对于很长期限的工况, 提供了引入可溶毒物进入反应堆的方法, 来降低反应性和能量的产生。

#### c. 反应堆冷却剂压力降低

作为防止堆芯损坏的总体功能的一部分, 仪表和控制设计应提供把反应堆(和反应堆冷却剂系统)压力降低到对电厂状况适宜的一个值所必需的控制和监测。对于大部分情况而言, 压力控制和监测是由反应堆冷却剂系统仪表和控制(见 2.3)来提供的。对于防止堆芯损坏功能而进行的适当降低反应堆冷却剂系统压力的安全相关的功能, 应提供一个独立于正常反

应堆冷却剂系统仪表和控制的仪表和控制系统。

d. 维持反应堆冷却剂装载量

作为防止堆芯损坏的总体功能的一部分，仪表和控制设计应提供维持反应堆和反应堆冷却剂系统内反应堆冷却剂有足够的装载量所必需的控制和监测。在大多数情况下，反应堆冷却剂存留应该是被反应堆冷却剂系统仪表和控制以及反应堆冷却剂系统泄漏探测仪表和控制控制和监测的。对于维持反应堆冷却剂装载量的安全相关功能，应提供一个独立于正常反应堆冷却剂系统仪表和控制的仪表和控制系统。

e. 排出堆芯余热

作为防止堆芯损坏的总体功能的一部分，仪表和控制应提供必要的控制和监测，保证排出反应堆堆芯中产生的余热，而温度不超过使堆芯损坏的程度。对于排出堆芯余热的安全相关功能，应提供一个独立于正常反应堆冷却剂系统仪表和控制的仪表和控制系统。

f. 安全壳隔离

作为缓解堆芯损坏后果的总体功能的一部分，仪表和控制设计应提供建立触发安全壳隔离所必需的监测，提供对完成隔离的控制，以及提供必要的监测来确认隔离的完成和维持。

g. 维持安全壳的完整性

作为缓解堆芯损坏后果的总体功能的一部分，仪表和控制设计应提供维护安全壳边界完整性的必要的控制和监测。这包括提供安全壳的冷却，并防止会导致结构损坏或泄漏增加的过压。仪表和控制还应提供一种手段来监测影响安全壳完整性的参数，比如：在还没有堆芯损坏时，抑制水池水位和温度，以便如果需要安全壳起作用时，能执行其安全功能。

h. 限制放射性释放

作为缓解堆芯损坏后果的总体功能的一部分，仪表和控制设计应提供确认放射性释放可能性所必需的监测，以及将释放限制到可接收的足够小的数量所必需的控制。

2) 边界和接口

系统的仪表和控制的边界应和电厂系统的物理边界一致；它们还是应该包含仪表和控制的硬件，包括：

- a. 仪表探测器；
- b. 数据传输设备；
- c. 数据处理设备；
- d. 控制和逻辑装置；
- e. 运行人员接口硬件（比如，控制器、指示器）；
- f. 支持仪表和控制硬件的软件。

3) 反应堆保护系统和安全系统的通用控制和监测策略

设计者应对系统仪表和控制的所有部分采用一致的控制和监测策略，除了根据个别系统的仪表和控制要求修改之外。共用的控制策略也应与那些用于仪表和控制其余部分的控制策略一致。

一致的控制策略有利于支持高度标准化的总体目标。这也有助于简化对运行人员和维修人员的培训。比如，一致的控制策略可以带来相似的控制、显示和控制站。

a. 启动和触发操作

为了自动启动和触发，通常应提供保护和安全系统的仪表和控制。即，要求保护或安全动作的工况应触发适当的系统动作而不需运行人员干预。但是，运行人员也可以手动触发系统动作。保护和安全系统的触发应在 MCR 报警，并向 MCR 运行人员提供足够的信息，以确认：

- 触发是必要的，即，是对一个真实的电厂需求的响应；
- 触发导致预期的系统动作，比如，泵的启动，阀门打开等；

#### b. 正常运行

保护和安全系统的仪表和控制应规定该系统在驱动至少 30 分钟后继续自动运行。在这段时间之后,可能要求某些手动动作;然而,基本不需要连续的人力资源在较长的时间内执行保护或安全功能,比如,几小时或几天。

#### c. 停堆或重新配置运行

这些保护和安全系统的仪表和控制通常应提供由运行人员手动完成的停堆功能(或回到备用状态)。仪表和控制应提供必要的最少的联锁,来保证仅当有必要防止增加事件严重性的时候,才对保护系统或安全系统手动停闭或重新配置。系统的自动停闭或重新配置来防止设备损坏应减到最小程度。即,优先权应提供给维持安全功能。

#### d. 试验操作

保护和安全系统的仪表和控制应正常提供在运行人员指导下启动试验,但试验本身很大程度上是自动的。一些系统试验时不需要系统部件动作,对于这些系统的仪表和控制的某些部分,自动试验的加入应由设计者来评估。在自动试验不能实行的地方,设计者应为运行人员提供帮助或其他装置以使运行人员可能的错误降到最少。在任何情况下,测试不得损害执行保护和安全功能的能力。在实际可行的情况下,系统在测试时应自动调整其动作。

#### 4) 与工艺系统运行协调一致

这一组系统的仪表和控制设计应集成在一起并相互协调,以便满足整个电厂以及单个系统的性能和功能要求。设计者应将设计特性和仪表和控制的其他部分相协调,特别是发电相关的仪表和控制的那些部分。设计者应明确地将保护和安全系统的仪表和控制和供电系统的仪表和控制相协调,保证对重要功能的正确供电,特别是要求失去交流电时执行功能的系统。

#### 5) 反应堆保护系统的安全系统的通用性能要求

##### a. 触发信号

设计者应选择一组电厂过程变量,用于反应堆停堆和其他安全功能(提供在需要驱动信号的多样性以减少共模故障的可能性和需要防止由大量输入信号引起的虚假动作之间的平衡)的自动触发。设计者应保证所有的信号,特别是那些被大量选用来提供多样性的信号是明确的,即:检测到的工况总是表示对触发的需要。预期的触发应只在如果需要改善响应时间,以及信号是明确的情况下采用,即:应该确定预期信号会导致需要致动的情况。

##### b. 动作的完成

一旦系统逻辑触发动作来驱动一个系统,该动作应进行到完成。

##### c. 复位

一旦系统动作导致了系统驱动,就有针对管理控制的适当条款的手动动作应被要求用来复位系统逻辑。

##### d. 故障对保护动作的影响

系统中的任何单一故障都不应阻止或导致保护动作的触发。系统中的第二个故障不应阻止保护动作;但它可能导致反应堆停堆或系统驱动。这种双重故障要求被限制在系统的探测器和驱动部分的范围内,不包括反应堆停堆或其他最终的驱动装置。此外,双重故障要求的适用性被限制在系统的非试验状态。

##### e. 信号的符合逻辑

RPS 和安全系统的逻辑应该是这样的:它要求同一变量或变量的同一组合的两个或更多通道相符合来触发系统动作。即,来自两个或多个不同变量中的每个单个信号的耦合,应不会引起保护动作。

##### f. 手动和自动触发的独立性

手动启动系统动作应符合第 2.6.3.5-6 节的要求。

##### g. 环境对设备的影响

RPS 和安全系统应能在可能遇到的极端的环境条件下执行它们的安全功能，这些条件包括：

- 正常运行；
- 环境压力因素，例如温度、湿度、辐射以及电磁或射频干扰；
- 维修；
- 假想事故，比如，LOCA 和设计基准事故；
- 电源（交流和直流）丧失；
- 灭火系统的运行，比如喷水装置、碳卤化合物灭火装置，或二氧化碳系统（不包括 RPS 和安全系统设备上的高压或低压手动消防水龙直接喷射）。

#### 2.6.6.3 反应堆保护系统

##### 1) 系统定义

###### a. 范围

RPS 包括下列控制和仪表设备：

- 探测器，产生 RPS 使用的信号；
- 处理设备，处理 RPS 接收的信号；
- 数据传送设备，传送 RPS 使用的信号；
- 包括电缆、停堆断路器，以及用来产生保护动作的继电器等设备；
- 保持 RPS 处于准备状态、确认其运行状态或确定故障类型和位置所需的测试和诊断设备。

###### b. 功能

RPS 应监测关键电厂参数，并基于那些参数确定反应堆是否必须停堆以防止堆芯损坏。如果 RPS 确定反应堆必须停闭，RPS 应提供控制信号到反应堆控制棒的控制驱动系统，通过插入控制棒来降低反应性（和能量的产生）。

###### c. 接口

RPS 和下列系统接口：

- 中子监测系统提供关于反应堆堆芯中子功率的大小和分布的信息，作为 RPS 逻辑的输入，并用来确认它的有效性；
- 反应堆和反应堆冷却剂系统提供产生用作 RPS 逻辑的输入信号的探测器；
- 主蒸汽系统、主汽轮发电机系统，以及其他电厂系统，可以提供产生用作 RPS 逻辑的输入信号的探测器；
- 控制棒驱动系统响应由 RPS 逻辑发出的命令，提供控制棒的运动，还提供确认其有效性的信号；
- 从重要的、冗余的和多样的电源的配电系统为提供 RPS 运行必需的电源；
- 采暖、通风和空调系统为 RPS 设备提供环境的控制。

##### 2) 后备系统和定期试验要求

###### a. RPS 动作的后备系统

对于华龙技术电厂，根据法规要求应提供一个反应堆停堆系统的后备，或者应证实电厂设计特性允许反应堆和反应堆冷却剂系统经历未能紧急停堆的预期瞬态（ATWS），而没有堆芯损坏，也没有丧失反应堆冷却剂系统或安全壳边界的完整性。另外，还应针对数字化 RPS 的软件共因故障提供后备手段。不管采用哪一种方式，电厂设计者都应以适当的形式，为某一选择而独立进行的技术合理性审查提供文件证明。

###### b. 试验

RPS 的定期测试应符合“保护系统启动功能的定期测试”。RPS 应尽可能地提供系统自

检。即 RPS 只能在自动试验不能实行的地方才要求由运行人员启动试验。

### 3) 配置

#### a. 布置

布置 RPS 设备应做到局部的事件不会妨碍 RPS 执行其保护功能。RPS 应布置在一个重要的区域之内，系统的各个分组的布置应做到单一事件不能影响一个以上的分组。

#### b. RPS 动作和状态的确认

应该为 MCR 运行人员提供运行人员帮助（显示），这些帮助甚至在丧失交流电源的情况下，能提供迅速和明确判断下列情况的能力：

- 已经触发了 RPS 动作；
- RPS 动作已经完成，而且如果没有完成，还需要完成什么动作；
- RPS 的动作是基于实际的工况，即，没有误停堆；
- RPS 处在对误触发低抵抗能力的工况下。

#### c. 定值修改

系统构成中应提供针对 RPS 定值无意的和未经许可的修改的防护。这应包括这样的措施，就是保证一个定值的修改有适当的批准，而且不能没有生成足够的修改记录而进行修改。

### 4) 设备要求

RPS 所使用的设备应大体上与安全系统以及其他要求高可靠性部件的系统所使用的设备相同。对这些部件的要求在 2.6.4 中和下面有详细说明。

#### a. 停堆断路器经验反馈

作为在第 2.6.2.1-3 节中所要求的经验回顾的一部分，设计者应识别与现有停堆断路器的设计、运行、维护以及试验有关的问题。设计者应为特别针对现有停堆断路器有关问题的华龙技术电厂停堆装置，建立功能和设计的要求、制造规格书和工厂测试计划。

#### b. 停堆断路器的运行工作周期

设计者应选择一个停堆装置，它专门设计成在整个电厂寿期内，经受不降低性能的，与维修、试验以及真实停堆有关的预期操作次数。

#### c. 停堆断路器辅助功能

设计者应考虑在停堆断路器中加入一些功能，从而使得难以以防止停堆断路器运行的方式对其篡改。这些功能应已经被检验验证，而且不应有妨碍断路器断开的可能。

## 2.6.6.4 安全壳隔离系统的仪表和控制

### 1) 功能

安全壳隔离的仪表和控制提供必要的监测和控制来隔离安全壳，使对环境的放射性释放降到最低。

### 2) 控制和监测策略

#### a. 确认隔离动作

安全壳隔离的触发和完成应不需要运行人员干预。应为运行人员提供全面的帮助（显示）和适当的控制，以允许他们迅速有效地进行：

- 确认所需的隔离已经完成，并在如果必要的话并采取手动操作以完成隔离；
- 确认隔离的触发是基于有效的信息；
- 当工况允许时，采取手动控制，使隔离的系统回到运行状态。

#### b. 针对意外隔离的保护

安全壳隔离的仪表和控制应针对无意的自动触发安全壳隔离提供有效的保护。

与无意的安全壳隔离有关的系统瞬态是严重的，会导致不能发电。无意的隔离和华龙技术电厂可利用率目标不一致。

### 3) 与工艺系统运行协调一致

安全壳隔离的仪表和控制应与 2.4 中要求的其他电厂系统的仪表和控制集成并协调。要特别考虑：

- a. 提供作为触发隔离基础的信号的系统；
- b. 含有作为安全壳隔离的一部分而被自动控制的部件的系统。

#### 2.6.6.5 安全壳系统的仪表和控制

##### 1) 功能

安全壳系统的仪表和控制提供将潜在的放射性物质包容在安全壳容器内所必需的监测和控制。

##### 2) 控制与监测策略

安全壳内的状态监测应不需要运行人员直接干预。应为 MCR 运行人员提供帮助(显示)，它能简明地表示：

- a. 安全壳系统的状态；
- b. 在事故过程中安全壳的状态，包括处理数据的适当算法，比如传感线路的实际温度补偿水平指示。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

安全壳系统的仪表和控制不需要与电厂其他的仪表和控制系统有大量的集成和协调。

#### 2.6.6.6 裂变产物泄漏控制系统的仪表和控制

##### 1) 功能

系统的仪表和控制应提供限制对环境可能的放射性泄漏所必需的控制和监测。

##### 2) 控制和监测策略

系统的仪表和控制应提供对任何可能的放射性排放的自动监测，并应提供自动联锁，以防止对环境的意外的超过允许值的释放。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

系统的仪表和控制应与 2.6.6.2-4 中要求的其他电厂系统的仪表和控制集成并协调。特别应包括对下面的考虑：

- a. 由辐射监测系统进行的放射性水平监测；
- b. 安全壳隔离仪表和控制的运行；
- c. 采暖、通风和空调系统。

#### 2.6.6.7 可燃气体控制系统的仪表和控制

##### 1) 功能

在事故中，即使在可燃气体已经释放的情况下，为了能维持安全壳的完整性，可燃气体控制系统的仪表和控制应提供必要的监测和控制。

##### 2) 控制和监测策略

如果使用惰性系统，则仪控宜提供从 MCR 控制和监视惰性系统运行的功能。还应提供就地面板来执行与惰性有关的所有操作。

仪表和控制应提供对密闭性空间（包括局部区域）中可燃气体含量的监控，并向操纵员提供适当的信息显示。系统组件的驱动应是手动的。。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

设计者应使对可燃气体控制系统仪表和控制和其他电厂仪表和控制的与工艺系统运行协调一致的需要最小化。

#### 2.6.6.8 余热排出系统

##### 1) 功能

当 RCS 处于减压状态时，仪表和控制应提供必要的监视和控制，以消除堆芯衰减热和显热。这包括通过直接冷却反应堆冷却剂和冷却期间间接冷却安全壳燃料水箱的正常冷却和安全的冷停堆。

##### 2) 控制和监测策略

余热排出系统宜采用自动控制，且应具有从 MCR 手动启动的能力。在正常运行中，该系统宜不需要操纵员持续关注。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

余热排出系统的仪表和控制必须按照第 2.6.6.2-4 节的要求与其他电厂系统的仪表和控制进行与工艺系统运行协调一致。这包括对以下方面的特殊考虑：

- a. 反应堆冷却剂系统的运行；
- b. 安全壳喷淋系统的运行；
- c. 化学和容积控制系统的运行，当反应堆冷却剂系统处于低压时，提供反应堆冷却剂净化。

#### 2.6.6.9 应急给水系统的仪表和控制

##### 1) 功能

当主给水系统和启动给水系统不可用时，应急给水系统的仪表和控制应提供必要的监视和控制，以保护蒸汽发生器。

##### 2) 控制和监测策略

仪表和控制应提供足够的监视能力（例如报警和过程变量显示），以便操纵员可以在大多数情况下，由操作员在自动启动发生之前的大多数涉及主给水或启动给水的损失事件中手动启动该系统。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

系统的仪表和控制必须按照第 2.6.6.2-4 节的要求与其他电厂系统的仪表和控制进行与工艺系统运行协调一致。这应特别考虑以下方面：

- a. 来自蒸汽发生器系统、主给水系统和 RCS 的启动和控制信号；
- b. 应急电力系统（用于完全失去交流电的情况）。

#### 2.6.6.10 安注系统的仪表和控制

##### 1) 功能

SI 系统的仪表和控制必须提供必要的监视和控制以：

- a. 保持 RCS 水位；
- b. 通过注入高浓度中子吸收剂的水来控制反应堆堆芯的过度反应；
- c. 通过从安全壳水箱中注入冷水并使用安全降压和通风系统从 RCS 排放高温水来排除反应堆的衰变热。

##### 2) 控制和监测策略

在自动启动 SI 系统并且动作已将水位恢复到安全水平之后，SI 系统的仪表和控制除了提供自动流量控制外，还应具备从 MCR 手动控制注入流量的能力。用于 SI 系统的仪表和控制应提供手动启动和操作以及引气冷却。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

SI 系统的仪表和控制必须按照第 2.6.6.2-4 节的要求与其他电厂系统的仪表和控制与工艺系统运行协调一致。这应特别考虑以下方面：

- a. 来自 RCS、化学和容积控制系统以及安全壳系统的启动和控制信号；
- b. 进排气冷却过程中安全泄压和排气系统的操作。

#### 2.6.6.11 安全泄压和通风系统的仪表和控制

##### 1) 功能

SDV 系统的仪表和控制应提供必要的监视和控制，以：

- a. 在无法使用正常的减压方法时，将 RCS 压力保持在一定水平，以使其他系统正常运行；
- b. 作为进排气方法的一部分，从 RCS 中抽出反应堆冷却剂，以消除堆芯衰减热。

##### 2) 控制和监测策略

SDV 系统的仪表和控制应提供操纵员直接手动控制的功能。系统不应自动启动，此外设计者还应提供有效的保护，以防止由于操作员的失误而意外启动。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

SDV 系统的仪表和控制必须按照第 2.6.6.2-42.4 节的要求与其他电厂系统的仪表和控制与工艺系统运行协调一致。特别是，这包括以下方面的考虑：

- a. RCS 的状态；
- b. 其他安全系统的状态可能不可用。

#### 2.6.6.12 安全壳喷淋系统的仪表和控制（如有）

##### 1) 功能

安全壳喷淋系统的仪表和控制应提供必要的控制和监视，以：

- a. 事故发生后，从安全壳大气中带走热量，以控制安全壳内的温度和压力，从而保持安全壳的结构完整性；
- b. 降低事故发生后安全壳大气中裂变产物的浓度；
- c. 清除 LOCA 后运行期间反应堆的衰减热量（这些热量会转移到内部换料水箱中）；

##### 2) 控制和监测策略

- a. 安全壳喷淋系统的启动应是自动的，并且在系统级和部件级可以手动启动的功能后备。应设计手段确保无意自动或手动启动（例如通过不正确的测试操作）不可实现的功能。
- b. 除非第2.6.2.4-3节中要求的评估确定首选手动控制，否则重新调整系统以将RHR泵用于堆芯喷淋或在RHR系统中使用堆芯喷淋泵所需的操作是自动化的。如果使用手动控制并且一旦系统重新调整完成，则系统操作应等同于泵重新对准之前。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

安全壳喷淋系统的仪表和控制必须按照第 2.6.6.2-4 节的要求与其他电厂的仪表和控制进行与工艺系统运行协调一致。特别是，这应包括以下方面的考虑：

- a. 安全壳系统中有关安全壳状态的信息；
- b. 在 RHR 系统中使用备用 RHR 泵来提供喷淋功能，并备用使用安全壳喷淋泵。

#### 2.6.7 发电和主汽轮发电机的仪表和控制要求

##### 2.6.7.1 目的和范围

发电和主汽轮发电机系统包括《华龙核电技术用户要求文件》第 2.12、2.13 章描述的单个电厂系统。本节的要求仅适用于发电和主汽轮发电机系统的仪表和控制，包括与其直接相关的仪表和控制设备，例如，传感器、指示器、控制装置、数据传输和处理设备以及报警装



置。本节仅包含该系统使用的相关要求，有关各类设备使用的总体要求在第 2.6 章的其他节中描述。构成单个系统的机械和电气部件，例如泵、电动机、水箱、管道、阀门、电力电缆和开关装置，在《华龙核电技术用户要求文件》的其他章节中描述。

本节仅描述了该系统仪表和控制的部分要求。在其他章节，特别是第 2.12 和 2.13 章中有关电厂系统的多数要求直接适用于该系统的仪表和控制；本节将不再复述这些要求，除非需补充说明其对仪表和控制的适用性或需特殊强调其重要性。本节特别阐述的要求如下：

- 1) 发电和主汽轮发电机系统中各单个电厂系统仪表和控制的功能分配；
- 2) 为界定发电和主汽轮发电机系统仪表和控制要求的范围，仪表和控制实体边界和接口的识别；
- 3) 单个电厂系统在各种正常或异常运行模式和瞬态情况下（如启动、正常运行、停机和试验）应遵守的监测和控制策略（如手动或自动、就地或远程）；
- 4) 单个电厂系统的仪表和控制与其他电厂系统仪表和控制的集成以及运行的协调。

#### 2.6.7.2 发电和主汽轮机-发电机系统仪表和控制总体要求

##### 1) 功能

该系统的仪表和控制应为发电和主汽轮机-发电机系统的单个系统完成所要求的功能提供必要的监测和控制。第 2.12 和 2.13 章中规定了这些电厂系统的功能。

设计者应为单个电厂系统的仪表和控制分配不同的功能，以满足设计过程（见 2.6.2.1）中所确定需要的功能和任务。本节为这些仪表和控制的功能提供了初始分配；然而，设计者的主要职责是与工艺系统运行协调一致所有仪表和控制的运行，以便充分执行所有功能。也可使用其他功能分配方法，如果其能显著改善电厂的可操作性、简单性、可靠性，或如果该方法完全符合第 2.6.2 节中的仪表和控制设计过程，特别是符合功能设计方法以及功能和任务的分析。

##### a. 能量的流动和转换

发电和主汽轮机-发电机系统的仪表和控制应对蒸汽从蒸汽发生器输送到主汽轮机过程中的能量进行监测和控制。能量输送功能主要由主蒸汽系统和抽汽系统实现。能量从蒸汽到电能的转换由主汽轮机和发电机系统完成。设计者应在仪表和控制上对这些系统的运行进行集成以及协调它们与反应堆冷却剂系统和配电系统的运行。仪表和控制还应控制和监测蒸汽旁通装置或卸压装置的运行，当主汽轮发电机系统中的能量转换受限或与能量的产生之间失去平衡时，以保证能量的流动。

##### b. 蒸汽状态

发电和主汽轮机-发电机系统的仪表和控制应将蒸汽状态（如压力和品质）保持在可接受的范围内。仪表和控制应主要通过主蒸汽系统和抽汽系统的运行以监测和控制蒸汽状态。由于能量流动的控制将直接影响蒸汽状态，此功能要求设计者对主蒸汽系统和抽汽系统的运行与能量流动的控制进行集成。

##### c. 补给水和冷凝水的供给

发电和主汽轮机-发电机系统的仪表和控制应提供对补给水和冷凝水系统运行的控制和监测，以保证电厂系统可用满足一定条件（如温度和压力）的补给水控制蒸汽发生器的水装量。补给水和冷凝水系统的仪表和控制运行应与液位控制系统的仪表和控制以及与主蒸汽和汽轮发电机系统的仪表和控制相协调。除对压力和温度状态进行控制和监测外，该系统的仪表和控制还应监测和控制补给水的化学状态。此功能主要由化学加药系统、冷凝水补给净化系统以及这些电厂系统的仪表和控制实现。

##### d. 辅助蒸汽

发电和主汽轮机-发电机系统的仪表和控制应监测和控制辅助蒸汽的状态，以保证使用辅助蒸汽的系统能执行它们的功能。应由辅助蒸汽系统完成对辅助蒸汽的监测和控制，但其仪表和控制应与整个用户系统的仪表和控制相协调，且当主蒸汽是辅助蒸汽的来源时，应与主蒸汽系统和抽汽系统的仪表和控制相集成。

## 2) 边界和接口

构成发电和主汽轮机-发电机系统的单个系统的边界在第 2.12、2.13 章的相应部分定义。该系统的仪表和控制边界应与电厂系统的实体边界保持一致，还应包含以下仪表和控制硬件：

- 仪表传感器；
- 数据传输设备；
- 数据处理设备；
- 控制器和逻辑装置；
- 操纵员接口硬件（例如，控制器、指示器）；
- 支持仪表和控制硬件的软件。

构成发电和主汽轮机-发电机系统的单个系统的接口在第 2.12、2.13 章的相应部分定义。该系统的仪表和控制的接口应与单个电厂系统的接口保持一致。应按仪表和控制的设计计划（见 2.6.2.1）定义和管理仪表和控制的接口。设计者应定义和管理配合电厂系统运行所需集成的其他各种电厂系统仪表和控制，即使这些接口在第 2.12、2.13 章中并未作为实体接口定义。

## 3) 通用的控制和监测策略

设计者应对该系统的仪表和控制的所有部分（个别修改的系统仪表和控制除外）采用一致的控制和监测策略。该通用控制和监测策略也应与整个仪表和控制其余部分采用的策略保持一致。

### a. 启动和停机操作

该系统的仪表和控制应是自动的，即使如此，仪表和控制仍应提供由操纵员执行手动启动或停机所必需的控制和监测手段（即启动应可手动执行）。如果功能和任务的分析（见 2.6.2.1 节）表明手动操作会加重操纵员负担或分散操纵员的注意力，则所涉及的特殊任务自动完成。

### b. 正常运行

该系统的仪表和控制应为持续的或经常重复的任务提供自动操作。

### c. 重新配置操作

- 当需要避免人员伤害、主设备损坏，或需要支持电厂其他仪表和控制的动作时（例如，反应堆自动停堆或安全系统运行），仪表和控制的设计应保证系统的重新配置或自动停机。
- 系统自动重新配置返回到其初始配置，应由操纵员确认，即无操纵员确认，则不能自动配置。自动返回到初始配置而无需操纵员确认的条件是，设计者可确定自动操作能显著有利于以下方面：
  - 减少保护系统和安全系统的动作；
  - 降低人员的伤害；
  - 改善电厂的可用性；
  - 降低损坏电厂主设备的风险。
- 任何自动返回初始配置的情况应提示操纵员。

### d. 试验操作

该系统的仪表和控制仅应在操纵员的指导下进行在线试验。试验自身宜按 2.6.2.6 节的

要求自动并予以辅助进行，以便简化操纵员动作并几乎无引起电厂扰动的风险。

应提供持续的内部自检及诊断，适当的故障及失效在主控制室提供报警。

#### 4) 与工艺系统运行协调一致

该系统中各系统仪表和控制的设计应与工艺系统运行协调一致，以便满足整个电厂及单个系统的性能要求和功能要求（《华龙核电技术用户要求文件》第 2.1 章及特别是第 2.12 和 2.13 章中的要求）。另外，设计者应将设计与仪表和控制的其他部分，特别是与控制能量产生相关的仪表和控制（例如第 2.6.5 节）相协调。

### 2.6.7.3 主蒸汽和抽气系统的仪表和控制

#### 1) 功能

主蒸汽系统和抽气系统的仪表和控制应提供必要的监测和控制，以确保：

- 将从蒸汽发生器接收的能量有效地传送给主汽轮机；
- 向主汽轮机供应的蒸汽状态（压力和品质）在功率输出可接受的范围内；
- 系统或连接的系统（如蒸汽发生器或主汽轮机）不超过设计条件（如压力或温度变化率）。

#### 2) 控制和监测策略

##### a. 手动控制与自动控制之间的切换

设计者应确保电厂正常运行时处于自动控制但可能切换为手动控制的系统，能够在电厂进展过程中适时在自动控制与手动控制之间平稳切换。

##### b. 负荷调节和跟踪

仪表和控制应特别考虑第 2.1 章定义的负荷调节和跟踪事件，可无需操纵员短期操作而对系统重新调整和重新配置。

##### c. 自动重新配置

仪表和控制的动作应与任何同时发生的反应堆和安全系统的操作（无论手动或自动）相一致，特别是，当汽轮发电机或主冷凝器不可用时，自动维持主蒸汽系统从反应堆带出热量并限制系统压力。

##### d. 在线试验

仪表和控制的控制策略应与汽轮机截流阀和能扰动主蒸汽系统和抽气系统状态的其他主设备的在线试验相兼容。

应为冗余多样的超速跳闸系统提供在线试验。执行这些试验时应考虑汽轮机转速低于设定的跳闸转速。

#### 3) 与工艺系统运行协调一致

主蒸汽系统和抽气系统的仪表和控制应与 2.6.7.2 节要求的其他电厂系统的仪表和控制运行协调一致。这应包括以下特殊考虑：

- 反应堆功率的控制；
- 主汽轮机和主发电机的控制；
- 蒸汽发生器状态和水装量的控制；
- 旁通阀和安全阀（卸压阀）的控制；
- 主蒸汽隔离阀的控制。

### 2.6.7.4 主汽轮机系统的仪表和控制

#### 1) 功能

为将主蒸汽系统供应的蒸汽转换成驱动主发电机的机械能，主汽轮机系统的仪表和控制应提供必要的监测和控制。

与工艺系统运行协调一致

主汽轮机的仪表和控制系统应与 2.6.7.2 节要求的其他电厂系统的仪表和控制系统运行协调一致。这应包括以下特殊考虑：

- 主蒸汽系统和抽汽系统供应给主汽轮机的蒸汽流量的控制；
- 主冷凝器、补给水和冷凝水系统以及循环水系统的状态的控制；
- 主发电机的控制；
- 反应堆功率以及蒸汽发生器蒸汽产生的控制。

设

#### 2.6.7.5 主发电机系统的仪表和控制

##### 1) 功能

将主汽轮机产生的机械能转换为电能，主发电机系统的仪表和控制应提供必要的监测和控制。

##### 2) 与工艺系统运行协调一致

主发电机的仪表和控制应与 2.6.7.2 节要求的其他电厂系统的仪表和控制运行协调一致。这应包括以下特殊考虑：

- 主汽轮机的控制；
- 电厂电力系统的控制。

#### 2.6.7.6 给水和凝结水系统

##### 1) 功能

为保证足量化学性质适宜的补给水从冷凝器热阱输送到将补给水引导进入蒸汽发生器的控制阀门，给水和凝结水系统的仪表和控制应提供必要的监测和控制。

##### 2) 控制和监测策略

###### a. 启动和停机

仪表和控制的设计应确保：

- 提供了电厂所有工况下正确执行功能所需的自动操作及主控制室的备用手动控制；
- 低功率水平的运行不要求操纵员持续关注，例如，可能由控制阀门泄漏引起的事件；
- 在启动过程中将电厂正常运行时会处于自动控制的系统适时平稳地切换到自动控制。

给水和凝结水系统的启动和停机宜是自动的。当功能和任务分析表明自动化操作在可操作性方面有很大的潜力时，不宜使用手动操作。包括在启动之前将一些系统切换到自动控制，或在停机之后保持自动控制，还包括无需操作员持续关注的不可避免的控制阀门泄露。

###### b. 正常功率变化

给水和凝结水系统的仪表和控制应确保正常功率变化无需短期的操纵员动作。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

给水和凝结水系统的仪表和控制应与 2.6.7.2 节要求的其他电厂系统的仪表和控制运行协调一致。这应包括以下特殊考虑：

- 蒸汽发生器水位的控制；
- 反应堆衰变热排出的控制；
- 主蒸汽系统和抽汽系统的控制；
- 主汽轮机的控制；

- 冷凝水补给净化和化学加药系统的控制。

#### 2.6.7.7 化学加药系统的仪表和控制

##### 1) 功能

为保证凝结水、补给水的化学性质维持在要求的限值内，化学加药系统的仪表和控制应提供必要的监测和控制。

##### 2) 控制和监测策略

###### a. 操作位置

设计者应评价就地操作替代主控制室操作的程度。任何情况下，仪表和控制应能使控制室操纵员确认已采用了合适的化学加药并提醒操纵员需要化学加药。

###### b. 自动停机或重新配置操作的影响

仪表和控制的设计应确保，化学加药系统的自动操作，无论来自预期的控制动作或部件故障，均不引起其他电厂系统的停机。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

化学加药系统的仪表和控制应与 2.6.7.2 节要求的其他电厂系统的仪表和控制运行协调一致。对给水和凝结水系统的控制应特殊考虑，应提供就地控制站以允许通常不在主控制室执行的系统操作。

#### 2.6.7.8 凝结水补给和净化系统

##### 1) 功能

为保证仪表和控制对凝结水水装量的控制有足够的、品质合格的补给凝结水供应，凝结水补给和净化系统的仪表和控制应提供必要的监测和控制。

##### 2) 控制和监测策略

###### a. 正常运行

仪表和控制应考虑不需要操纵员的短期动作而正常改变功率。仪表和控制还应为操纵员提供确认凝结水补给和净化系统正常运行的能力，并适当地提醒操纵员关注。

###### b. 停机或重新配置

设计者应确保，凝结水补给和净化系统的自动操作，无论来自预期的控制动作或部件故障，均不引起其他电厂系统的停机，除非停机是为防止损坏其他设备或防止伤害人员。

##### 3) 与工艺系统运行协调一致

冷凝水补给和净化系统的仪表和控制应与 2.6.7.2-2 节要求的其他电厂系统的仪表和控制运行协调一致。对给水和凝结水系统的控制应特殊考虑，凝结水补给和净化系统的仪表和控制可与其他电厂系统的仪表和控制分离，或为其提供就地控制站。

#### 2.6.7.9 辅助蒸汽系统

##### 1) 功能

为确保向使用辅助蒸汽执行其功能的系统充分供应化学性质和状态（例如压力）都满足要求的辅助蒸汽（低压蒸汽），辅助蒸汽系统的仪表和控制应提供必要的监测和控制。

##### 2) 控制和监测策略

###### a. 操作位置

设计者应将辅助蒸汽系统的控制集成到仪表和控制中。应在主控制室中提供对辅助蒸汽系统的控制，除非功能和任务分析（见 2.6.2.1 节）以及远程-就地控制评估表明辅助蒸汽系统应就地控制。

###### b. 对自动停机或重新配置的影响

设计者应确保,辅助蒸汽系统中的自动操作,无论来自预期的控制动作或部件故障,均不引起其他电厂系统的停机。

### 3) 与工艺系统运行协调一致

辅助蒸汽系统的仪表和控制应与 2.6.7.2 节要求的其他电厂系统的仪表和控制运行协调一致。由于辅助蒸汽系统为很多不同的系统提供蒸汽(见第 2.12 章),其仪表和控制设计将与大多数系统密切相关,因此其与工艺系统运行协调一致特别重要。辅助蒸汽系统蒸汽生产部分的仪表和控制应与其他电厂系统的仪表和控制分离。

## 2.6.8 辅助系统和电厂支持服务系统的仪表和控制要求

### 2.6.8.1 目的和范围

辅助系统包括本用户要求文件覆盖的下述系统:

- 压缩空气生产系统;
- 电力系统。

电厂支持服务系统的组合包括本用户要求文件覆盖的下述系统:

- 燃料操作与贮存系统;
- 核岛消防系统;
- 辐射监测系统;
- 厂址实物保护系统;
- 去污系统(设施);
- 实验室;
- 放射性废物处理系统。

本节包含控制和监测这些系统的仪表和控制要求。这包括该系统组合直接相关的仪表和控制设备,例如,传感器、指示器、控制装置、数据传输和处理设备以及报警装置。本节仅仅包括与电厂系统的辅助组合或电厂支持服务组合中使用有关的要求:关于这类设备使用的总体要求在本章的其他章节中叙述。在本用户要求文件的其他章中描述构成单个系统的机械和电气部件,例如泵、电动机、水箱、管道、阀门、电力电缆和开关装置。

本节仅描述这些系统仪表和控制要求的一部分。特别是,本节提供的要求将覆盖:

- 为电厂系统中的这个系统组合分配各系统的仪表和控制功能;
- 为规定该系统组合的仪表和控制要求的范围,标识仪表和控制的实际边界和接口;
- 控制和监测的策略(例如,手动或自动,就地控制或遥控),它应遵循单个电厂系统不同的正常或异常的运行模式和瞬变过程,例如启动、正常运行、停机和试验;
- 单个电厂系统的仪表和控制与其他电厂系统的仪表和控制的总合以及它们运行的协调。

### 2.6.8.2 辅助系统和电厂支持服务系统组合的仪表和控制总体要求

#### 1) 功能

这些系统组合的仪表和控制应为单个系统完成所要求的功能提供必要的监测和控制。

设计者应在单个电厂系统的仪表和控制之间分配不同的仪表和控制功能,以便能满意实现设计过程(见 2.6.2.1-3)中所确定要求的功能和任务。本节提供这些仪表和控制功能的初始分配;然而,设计者的基本职责是总合和协调所有仪表和控制的运行,以便充分执行所有功能。如果表明其他功能分配方法能显著改善电厂的可操作性、简单性或可靠性,或如果该

方法完全符合2.6.2中的仪表和控制设计过程，特别是符合功能设计方法（2.6.2.1-1）以及功能和任务的分析（2.6.2.1-3），则能使用其他功能分配方法。

a. 冷却水

辅助系统组合的仪表和控制应监测和控制从电厂系统、构筑物 and 部件排出的热量以及将这些热负荷传送到环境的过程。这个能量输送功能将由设备冷却水系统、厂用水系统、循环水系统、电厂热阱、冷冻水系统和燃料水池冷却和净化系统等实现。仪表和控制应提供正常运行、瞬态、停机和事故工况期间的监测和控制。

b. 空气和气体

辅助系统组合的仪表和控制应对压缩空气和气体的供应和分配提供监测和控制。空气服务功能由电厂公用空气系统、仪表用空气系统和通气系统实现。在隔离和绝缘的子系统从高压气缸提供压缩气体服务。这些系统的仪表和控制应适应服务，并在要求空气或气体服务的所有电厂工况下提供控制和监测。

c. 环境控制

辅助系统组合的仪表和控制应对保护环境的服务进行监测和控制，该服务保证电厂环境在正常哪些和预计运行时间期间适合电厂人员的安全和舒适以及适合电厂设备的可操作性。辅助系统组合的仪表和控制还应为保护电厂环境而对有毒气体或放射性排出流的收集、过滤和排放进行监测和控制。环境控制服务功能由供热、通风和空调系统以及相关的气体处理、清洁和净化子系统实现。

d. 电源

辅助系统组合的仪表和控制应对向电厂辅助负荷和厂内负荷，包括仪表和控制系统负荷供应电力的系统进行监测和控制。由厂外供电系统、厂内备用AC供电系统、DC和重要仪表AC供电系统以及照明和电气保护系统提供电力服务功能。仪表和控制应在电厂正常运行、启动和正常停堆期间对电厂电源的非安全负载提供监测和控制；并对缓解事故和安全停堆的安全系统的供电提供监测和控制。

e. 燃料装卸

电厂支持服务组合的仪表和控制应监测和控制燃料装卸活动。燃料装卸功能由换料机械和相关设备完成。在燃料装卸操作期间，即在其他电厂系统已无显著功能的运行模式期间，仪表和控制应提供监测和控制。

f. 消防

电厂支持服务组合的仪表和控制应对火的探测和扑灭进行监测和控制。在电厂正常运行、停堆和事故工况下，仪表和控制应对电厂消防系统提供监测和控制。

g. 辐射监测

电厂支持服务组合的仪表和控制应提供辐射监测系统的数据管理并对其进行监测和控制。这些系统为控制电厂的排放和评定释放的排除流对环境的影响提供必要的的数据。在正常运行、停堆和事故工况期间，仪表和控制应提供监测、控制和数据管理。

h. 厂址实物保护

电厂支持服务组合的仪表和控制所提供厂址实物保护系统的数据管理，并对其进行监测和控制。该系统：

- 防止未经授权进入重要区和防护区；
- 探查未经授权或将未批准的材料引入该区域的企图；
- 在防护区和重要区内有利于授权的活动和调节；
- 保证授权的进入并探查到未经授权穿过保护区和重要边界的事件。

在正常运行、停堆和事故工况期间，仪表和控制应提供监测、控制和数据管理。电厂实物保护系统的仪表和控制应满足第2.8.6的特殊要求，并适用于2.6中仪表和控制的总体要求。另外，设计者应考虑指明保持记录的要求。

#### i. 去污

电厂支持服务组合的仪表和控制应对排出和降低电厂设备、防护衣具和人员的放射性污染的去污系统和设施进行监测和控制。这项去污功能由传输系统控制器、喷淋嘴组件(装置)、化学和(或)研磨的供应系统、收集和贮存箱、高压泵、过滤器、除盐装置以及与废物处理装置连接的管道等实现。仪表和控制应提供正常运行、启动、停机和事故工况期间的监测和控制。

#### j. 实验室

电厂支持服务组合的仪表和控制应对分析电厂系统和环境的采样的实验室提供数据管理并对其进行监测和控制。电厂实验室包括分析化学实验室和放射化学实验室。实验室还包括能与主电厂数据库计算机系统接口的、基于数据管理系统的计算机。仪表和控制应提供正常运行、启动、停机和事故工况期间的监测、控制和数据管理。

#### k. 放射性废物处理

电厂支持服务系统组合的仪表和控制应监测和控制放射性废物处理系统，该系统对安全监督排放和处理的放射性废物进行收集、分离、贮存和处理。放射性废物处理功能由气体、液体和固体的放射性废物处理系统实现。仪表和控制应提供正常运行、启动、停机和事故工况期间的监测和控制。

#### 1. 区域放射性监测

电厂支持服务组合的仪表和控制应监测电厂某些区域的放射性，即可能有放射源和人员可能居留的那些区域。这项监测所提供本地和远距离的指示，并提供与被测放射性水平的重要性和用途相适应的报警。当需要支持人员照射的控制、提供设备不工作的指示和满足适用的管理规程时，仪表和控制应与工艺流放射性监测（第3章和本章的7节、7.10节）的人接口系统总合和协调。仪表和控制应提供正常运行、启动、停机和事故工况期间的监测。

#### 2) 边界和接口

它们也包括仪表和控制硬件：

- 仪表传感器；
- 数据传输设备；
- 数据处理设备；
- 控制器和逻辑装置；
- 操纵员接口硬件（例如，控制器、指示器）；
- 支持仪表和控制硬件的软件。

应按仪表和控制设计电厂（见2.6.2.1-2）正式定义和控制仪表和控制接口。

#### 3) 控制和监测策略

设计者应对该系统组合仪表和控制的所有部分（除由其他章中特殊要求的修改时）使用一致的策略。这个通用控制策略也应与仪表和控制其余部分使用的策略一致。控制和监测不应发生在MCR中或有操纵员参与，除非功能和任务分析表明他们的参与对功能是必要的。

#### a. 启动和停机操作

该系统组合的仪表和控制应对由操纵员或电厂合格人员就地完成的启动或停机提供必要的控制和监测，即控制和监测可以手动的或自动的。设计者应对系统是在MCR操作还是就地操作进行评估（见2.6.2.4-4）。如果功能和任务分析（见2.6.2.1-3）表明手动或就地操作是操纵员的重要负担或是操纵员精神涣散，或可能是不可靠的，则所涉及的特殊任务可以自动或在MCR中执行。



该组合系统的启动和停机主要由操纵员设置并可包括大量单个操作，特别是就地操作，例如改变阀门的位置。因此，部分操作可能适宜自动或MCR操作，以减少启动或停机的时间或降低错误风险。

#### b. 正常运行

当电厂在正常稳定运行，包括正常功率改变时，该系统组合的仪表和控制通常应提供自动的或无人值班的运行。在电厂正常运行的同时，这适用于连续的和重复的任务。在系统不以连续方式运行的情况下，许多操纵员动作本来不能自动化；然而，这种系统的操纵员（例如，保卫官员）不宜承担需要保持系统配置的常规任务，以便操纵员或电厂值班人员能完成他们的正常任务。

该系统组合的自动无人值班的目的符合2.6.3.2-2中MCR人员配备的要求。如果操纵员由于需要控制该组合中的系统而占用太多时间，预期不能满足那项要求。这些系统在无操纵员长久关注的情况下运行也是现行常规。在相对长的时间讲个手动完成的任务，例如，等于检修时间的再配置一个系统，大概不需要自动。

#### c. 再配置操作

当需要避免人员伤害、主设备损坏，或需要电厂仪表和控制的其他部分采取支持措施时，例如，在反应堆自动停堆或驱动安全系统时，仪表和控制应保证系统的再配置（例如停机）。对配置中的其他改变和恢复系统正常状态的运行，应提供MCR外的必要的手自动控制和监测。可自动返回到初始配置的条件是，设计者确认自动操作可能显著有效于：

- 减少对保护系统和安全系统的威胁；
- 降低人员的伤害；
- 改善电厂的可用性；
- 降低损坏电厂主设备的风险。

应将任何这样自动返回初始配置的情况通告操纵员。

因为定时限制或错误风险，有些再配置操作不能依靠操纵员。另外，自动执行这样的任务已成为常规。自动户系统配置变更可以尽可能减少操纵员负担和失误。就地控制站的使用既可以达到与仪表和控制集成的目的，还可以尽可能减少MCR操纵员的负担和失误。

#### d. 试验运行

该系统组合的仪表和控制通常应考虑仅在操纵员或电厂合格人员的指导下进行在线试验。试验自身宜如2.6.2.6所述要求自动进行并得到帮助，以便简化操纵员的动作，并几乎没有引起电厂扰动的风险。至于这些系统的其他操作，应在MCR外由手动正常进行试验。

#### 4) 与工艺系统运行协调一致

该系统组合中的仪表和控制设计应与工艺系统运行协调一致，以便满足整个电厂的性能要求和功能要求以及单个系统的那些要求。在本用户要求的第1章和其他章中找到那些要求。另外，设计者应将这些设计性能与仪表和控制的其他部分相系协调。

尽管单个系统的要求规定了功能和接口，设计者的基本责任仍是以明智的和有效的方式将不同系统与其要求相关联。用于将不同系统运行与逻辑相联系的特殊方法由设计者选择。本用户要求文件未明确该联系如何实现的方法规定，是为了使设计者不限于现行惯例，并鼓励开发考虑不同系统间许多相互影响的控制策略。

#### 5) 独立性和冗余性要求

仪表和控制设计应满足在辅助组合的单个系统章节中包含的独立性和冗余性要求。特别是，这些系统的仪表和控制故障不应影响电厂可用性或对反应堆保护系统或安全系统造成影响。

这个仪表和控制的与工艺系统运行协调一致的要求不得损害单个系统的独立性和冗余性要求。完整的可用性目标要求辅助系统和支持系统时很可靠的。这些系统的仪表和控制还必须满足很高标准的可靠性。

#### 6) 消防和保卫

仪表和控制设计应提高电厂消防和保卫的能力。特别是,这些辅助系统的仪表和控制应提供替代的控制、监测策略和设计性能,以便可能不要求电厂停役的火灾和喷洒灭火,因为仪表和控制设备的不可用性而不引起停机。仪表和控制设计还应尽可能减少那样的一些性能,即它们可能允许违反保卫规章以损坏这个系统、引起电厂停役或损坏需要执行安全功能的系统的一部分。

第9章包含主动的消防和保卫要求,而第6章中包含被动的消防要求。仪表和控制需要尽可能减少有关消防与保卫的关联以及方便这些防护系统的设计。

### 2.6.9 远程监测技术

#### 2.6.9.1 目的和范围

电厂的监控使用仪表和控制系统实现,电厂的维护、定期试验、检查等操作需另外的系统和设备来实现,还包括对这些系统和设备的远程监测。目前多数核电厂不具备使用远程监测的能力,这限制了采用已有的远程监测技术和采用其它新技术。为提高效率要增加这些功能再进行改造将耗费大量财力物力。本节提供了华龙技术核电厂应用此类技术的基本要求。

#### 2.6.9.2 总体要求

##### 1) 总体功能要求

仪表和控制的设计者应为华龙技术核电厂所提供远程监测技术基础设施制定设计基准。设计基准应基于对运行经验和当前技术的审查。

电厂设计应包含永久安装的、灵活的、可本地扩展的技术基础设施,以支持远程监测。须包含的功能类型示例如下:

- 支持和提供用于辐射控制区或高辐射区出入通道控制的方式,如操作盘。
- 支持在关键位置(如换料平台、安全壳底部)提供辐射工作许可站。
- 支持和提供增强的区域辐射监测设备,包括便携式设备(如电子放射量测定器)。支持为需定期进行辐射监测的设备(如除盐装置、过滤器和样品槽)提供永久的辐射监测。
- 支持并提供远程、链式的辐射监测设备。链式布置允许单个探测器/发射器/摄像机按要求放置,同时保持其供电状态并连接至电厂数据系统。
- 支持实时人员辐射暴露监测。这有助于减少人员辐射暴露和简化人员监测任务。
- 支持并提供全厂范围的视频监测,特别在经常使用的工作区域和需要定期进入进行维护或检查的辐射重要区域。这可提供先前人员进入辐射区域的信息。
- 支持并提供对预定义位置的在线监测以及对设备的临时性监测,以进行故障排除、性能分析、泄漏检测和采样。这可优化人员配置,减少人员辐射暴露。
- 支持泄漏检测系统,包括便携式检测设备,如热成像仪和流量计。
- 支持并提供电子识别标记和跟踪,如与全球定位系统相结合的射频识别。这可跟踪人员、设备、敏感设备或包裹,如放射性废物,并有助于减少设备识别错误。

##### 2) 远程监测设计特点

为支持远程监测,电厂设计时应提供永久安装的、灵活的、可本地扩展的技术基础设施,同时该系统应设计有网络安全保护。远程监测系统的设计要求如下:

- 远程监测架构应既支持正式远程监测也支持临时系统安装。

- 应为功率运行和停堆提供永久的远程监测，此类远程监测的配置由电厂配置过程进行控制。
- 应为大修和有特殊要求已明确有远程监测需求的提供永久性或临时的远程监测的连接方式，临时连接方式应使用程序控制。
- 设计者初始设计时应提供扩展能力以支持将来远程监控设备连接需要。
- 系统的“插件”应符合规定的配置和性能要求，符合所需功能，并与永久性安装的基础设施兼容。
- 正式和临时系统设计应采用“即插即用”模块化设计，以便于简化使用和减少修改，并减少特殊校准要求。
- 支持安防监控和大修期间的临时安防监控要求。
- 在设计技术基础设施时，应尽可能考虑材料、设备和传输技术的未来变化。
- 数据测量记录仪器的实时数据传输。
- 支持遥测的无线局域网系统的使用不得干扰核电厂仪控设备的正常运行。
- 在需要的地方配备耐辐照和防雾的摄像机，以及用于临时安装的摄像机。
- 对有要求的辐射监测设备无需进入即可对其进行检测、检查、修理和校准，例如使用管道或臂架安装方式。
- 人员进入特定区域的警报。
- 整合在线日常设备和系统监视，代替某些操作员巡检。

## 2.7 电力系统

### 2.7.1 概述

#### 2.7.1.1 目的

华龙核电技术用户要求文件第2.7节制定电厂电力系统的要求，这些要求与华龙核电技术大纲的目标和原则一致。

本节规定的要求将涉及电厂电力系统的设计以及电力系统设备的制造和安装。为达到电厂安全性、可用性和整体简化的目的，通过制定相应的设计要求，提高核电厂电力系统的标准化程度。

电力系统的通用要求见第2.7.2.2节，针对电力系统各部分的详细要求见本节其他内容。

#### 2.7.1.2 范围

本节包含了为电厂辅助设备和运行负载（包括仪表和控制系统负载）供电的电源系统。它们由厂外电力系统、厂内中压和低压交流配电系统、厂内交流电源系统、厂内直流和交流不间断电源系统、照明系统以及电气保护系统组成。厂内交流和直流供电系统包括安全级系统和非安全级系统。

本节包含了组成各个电力系统的设备，包括用于就地（靠近设备安装位置）监测和控制这些设备的仪表和控制器，以及连接配电系统与其负载的电缆、连接器、贯穿件等。

#### 2.7.1.3 功能

在电厂正常运行、启动和正常停堆以及为减轻事故影响而紧急停堆时，电力系统向安全级设备和非安全级设备供电。

电力系统具有如下功能：

- 1) 厂外电力系统由厂外输电系统与厂内配电系统连接的电路和部件组成。在电厂所有运行工况（包括设计基准事故）下，当由厂外输电系统供电时，由厂外电

力系统为电厂各工艺系统供电。

2) 中压和低压交流配电系统为电厂辅助设备和运行负载以及仪表和控制系统负载供电。这些系统分为安全级系统（专为安全级负载供电）和非安全级系统（为所有非安全级负载供电）。

3) 厂内电力系统由电厂主发电机及厂内交流电源系统组成，其中厂内交流电源系统由几个独立的柴油发电机组构成。正常运行时由主发电机提供电源，在电厂主发电机停机且丧失厂外电力的情况下，由厂内交流电源系统向电厂的安全系统和部分的非安全系统供电。厂内交流电源系统分为安全级系统和非安全级系统。

4) 在正常和应急工况下，厂内直流和交流不间断电源系统向保护继电器、控制和仪表系统以及其它不允许短暂失电的负荷供电。在丧失所有交流电源的事件中，以蓄电池作为电源。直流和交流不间断电源系统分为安全级系统（专为安全级负载供电）和非安全级系统（为所有非安全级负载供电）。

#### 2.7.1.4 接口

电力系统为电厂大多数辅助系统的驱动和控制提供电源。在本节中这些接口称为“电气接口”。这种接口也包括不同电力系统之间的接口。

电力系统与电厂仪表和控制系统（见第2.6节）的接口，为远距离监测及控制其相关的运行情况提供和/或接收信息。这些接口称为“控制接口”。

电力系统与辅助冷却或加热系统（见第2.5节和第2.8节）之间的接口，用于热能交换。这些接口称为“热接口”，它包括电气设备所在厂房的冷却或加热。

第四类接口称为“保护接口”，它包括电厂设备与电厂电气保护系统的接口，例如阴极保护系统、接地系统等。

本节涉及系统的主要接口在有关这些系统的正文中描述。参考本节中涉及连接系统规定的要求，规定特殊的接口要求。

本节内以系统部设备实际外壳和接口位置来规定下列专有电力系统的边界：

- 1) 电气接口：在负载的输入端，也就是在电缆、连接器、断路器的负载端，或在直接与负载连接的接触器的负载端。
- 2) 控制接口：在系统设备的内部仪表布线与将该设备与远距离仪表连接的电缆之间的连接点上。
- 3) 热接口：在冷却或加热系统与系统设备外壳的连接点上。
- 4) 保护接口：在电气保护装置（例如阴极保护整流器、加热器电缆等）与被保护设备（例如管道、水箱等）的连接点或接触表面上。

#### 2.7.1.5 原则说明

下述章节给出了几个华龙技术电厂电力系统的原则说明。这些说明构成了包括在下述章节中的一些特殊设计要求的基础并有助于理解这些要求。

##### 2.7.1.5.1 目的

本节给出的对电力系统的设计要求的目的是为实现2.1节中描述的华龙技术电厂目标特性。采用的方法是在获得的现有电厂电力系统和设备的运行经验教训基础上进行设计改进。第2.1.2节的指南已经对使用的现代技术来优化系统的方法进行了评价。

##### 2.7.1.5.2 电力的可用性

由于电力是华龙技术电厂辅助和服务系统运行所必需的，电力系统的可用性和可靠性对

于实现华龙技术电厂安全性和可用性目标至关重要。此外，由于增加了机械和流体系统的可用性和可靠性，提高电力系统可用性和可靠性也非常重要。

虽然核电厂的电源系统和配电系统都比较可靠，但是概率表明：包括电力系统故障在内的事件对在运核电厂的堆芯损坏和严重事故频度有潜在的主要影响。华龙技术电厂的设计通过使用能动与非能动相结合的安全系统大大降低了这种潜在影响，因为某些非能动系统依赖蓄电池向启动和控制系统供电，电厂安全级蓄电池和直流配电系统的故障概率必须控制到最小，以获得非能动系统固有可靠性。为达到电厂安全的主要目的并从改善流体和机械安全系统中获益，必须增加现有电厂设计中电力系统的可靠性。特别要把重点放在厂外电力系统、厂内应急供电系统和直流系统的设计，从而减少厂外电力丧失事件的频度和丧失全部重要交流及直流电源出现的概率。

厂外电力系统、厂内中低压交流系统和直流系统的设计应尽量减少厂外电源事件的发生频率和所有必要的交流和直流电源发生损坏的概率，电厂设计须采用一些特殊的方法，包括设置必要的冗余和备用设备，以保证在输电系统扰动、电厂工况异常或设备故障对厂外或厂内电力的可用性造成不利影响时电力系统仍然可用，满足纵深防御的要求，并起到电厂投资保护的作用。为了提高设备的可靠性，应改善电力系统和直流系统的可试验性和可维修性。

在华龙技术电厂设计中，可考虑增强对直流电池和厂内交流电源进行“在线”维护的设计，从而在对安全性和经济性改善的同时也提高电厂可用性

华龙技术电厂应配置与安全序列相对应的多台厂内应急交流电源。厂内应急交流电源容量应确保在发生厂外电源丧失的情况下能够向应急厂用设备提供足够的电力，使机组安全停运。该电源应具备高可靠性和高可用性水平，同时将成本降至最低，并在失去厂外电源的情况下简化核电厂的运行。厂内应急电源的冗余配置也可避免由于电源检修或试验而导致的电厂可用性的下降。

#### 2.7.1.5.3 失去交流电源

华龙技术电厂设计须考虑全厂断电事故导致堆芯损坏的风险，并制定相应的措施以降低全厂断电事件的出现概率和对电厂安全的影响。

措施包括：

- 1) 改善厂外电源的可靠性，从而降低厂外电力丧失的出现频度和持续时间；
- 2) 改善电力系统对丧失厂外电力的瞬态响应；
- 3) 提高用于电厂停堆和安全系统的厂内交流电源的可靠性；
- 4) 在完全丧失所有厂外和厂内电源的事件中，提供最少8h 维持电厂处于安全状态所必需的设计特性。

#### 2.7.1.5.4 系统的简化

为提高电厂的安全性、可靠性和可用性以及结构合理性，电力系统的结构应尽量简化，尽量使用最少的设备和内部连接为电厂的安全性和可用性提供所需的备用及冗余设备。

简化电力系统可基于对由电力系统供电的各负载类型进行分级分类，确保为各个不同分级分类的负载提供相应等级的电源系统进行供电，同时满足其功能要求，简化操作流程。必须评估不同负载类型的特性和重要性以确定由电厂设计提供的电源数量和种类。必须将不同类型负载所需的电源和配电系统之间的功能及操作上的相关性减至最小。

#### 2.7.1.5.5 标准化

电厂设计的标准化工作是一种降低成本和加强管理的有效方法。为支持标准化的工作，第2.7节对电力系统规定了特殊的配置要求。

电力系统的配置会由于电厂实际容量、与电厂连接的厂外输电系统的特性和其他特殊厂址条件的不同而产生一些变化。本节给出了适合大多数华龙技术电厂厂外和厂内电力系统通用的系统配置。

本节规定了符合华龙技术电厂的安全性、可用性和简化目的的配置要求。

## 2.7.2 通用要求

### 2.7.2.1 定义

本部分规定的要求适用于华龙技术电厂电力系统。

这些要求包括了电力系统的主要性能特性以及电力系统在电厂的布置。

这些要求还包括主要电气设备的一般设计和制造特性。

### 2.7.2.2 功能和运行要求

#### 2.7.2.2.1 设计基准事故

电力系统应在2.1.4节描述的所有设计基准事故中能够按本节的规定运行。

#### 2.7.2.2.2 安全目标

为了保证华龙技术电厂达到或超过2.1节总体要求中规定的安全原则，电力系统应具备要求的容量、独立性、冗余度和可试验性以保证在电厂运行的全部工况下为电厂的安全和非安全系统供电。

#### 2.7.2.2.3 平均年可用率

电力系统的平均年可用率应能使华龙技术电厂达到90%的平均年可用率的目标。

### 2.7.2.3 系统配置

#### 2.7.2.3.1 简化设计要求

电力系统应简化设计，目的是：

- 1) 将操作程序的复杂性和相互关联度减至最小，特别是在应急情况下；
- 2) 最小化系统设备的数量和简化维修方法以满足华龙技术电厂的安全性、可靠性和可用性目的。

#### 2.7.2.3.2 厂用电负荷分类

- 1) 单元厂用设备
  - a. 这些设备是电站单元机组正常运行时所需要的设备。当机组停运后，这些设备均可停用。
  - b. 这些设备只需一个厂外电源，该电源在机组起动、并网、满功率运行及带厂用电运行时都应有效。它们均由高压厂用工作变压器供电。
- 2) 常备厂用设备
  - a. 它们是核电机组正常运行时需要工作，且在正常停运过程中以及停运期间（包括机组检修）还需要运行的设备。
  - b. 这些设备需要两个厂外电源，正常时由工作电源（主电源）供电。当工作电源故障时，经电源自动切换，能够由辅助电源供电。
- 3) 应急厂用设备：它们是核安全和保护电厂主要设备所必需的设备，包括核安全厂用设备及主设备安全厂用设备。

- a. 核安全厂用设备：这些设备用来防止、限制、减少放射性物质的泄漏。
- b. 主设备安全厂用设备：这些设备保障电站主要设备的安全，以维持发电设备在可运行状态。

应急厂用设备在两个厂外电源均失去时，需要由厂内应急电源供电，以保证核电站的安全。应急交流负荷由应急柴油发电机组供电的10kV、380V交流系统供电。应急直流负荷由直流电源系统供给。供电不能间断的交流负荷由交流不间断电源系统供给。

#### 2.7.2.3.3 非安全级配电系统

非安全配电系统由母线、变压器和开关设备等组成，并向单元厂用设备和常备厂用设备供电。

#### 2.7.2.3.4 安全级配电系统

根据专设安全系统和本节规定的冗余和序列隔离要求，厂内安全级配电系统应分成独立的序列。各序列应为独立的和具有功能冗余的应急厂用设备供电。

#### 2.7.2.3.5 应急交流和直流电源

应为安全级配电系统的每个序列提供实体隔离和电气独立的厂内应急交流和直流电源，以在丧失所有其他电源的情况下为专设安全系统提供应急电源。此外，每个序列设计中宜包括为安全负载供电的移动式柴油发电机的接入方式。

为保证向安全系统可靠供电，要规定独立的厂内应急交流电源。每个厂内应急电源需与其他应急电源隔离并独立于其他应急电源，使一个电源故障不会影响其他电源的运行。详见第2.7.5.3节功能要求和运行要求。

#### 2.7.2.3.6 支持设备电源要求

与特殊安全序列有关的安全系统的运行和控制所要求的辅助或支持设备，例如润滑油泵、冷却泵、风扇、仪表等，由属于相应安全系统的同一序列的安全级母线供电。从而防止由于另一系列中丧失设备功能而导致本序列中电力的丧失。

#### 2.7.2.3.7 安全级设备

华龙技术电厂应根据适用法规来优化安全级设备的数量，避免出现将电厂设备升级为安全级要求等不必要的保守设计。电厂设计者应就哪些系统、设备、部件和部分对执行和支持安全相关功能是必需的作详细地系统分析，并相应分配分级和鉴定要求。

#### 2.7.2.3.8 非安全级电路连接

电厂配电系统的设计应尽量减少非安全级回路与安全级电路或电源之间的连接。如连接，则应在非安全级负载和安全级母线之间设置安全级隔离装置。

#### 2.7.2.3.9 隔离和独立

组成不同序列的安全级配电系统之间应采用实体分隔和电气隔离。并且符合GB/T 13286-2008 《核电厂安全级电气设备和电路独立性准则》中的要求。属于不同安全序列母线之间或电路之间不允许使用跨接。完全的电气独立和实体分隔可避免故障从一个序列向另一个序列蔓延，保证单个设备的故障不妨碍安全系统的运行。

在整个电厂中，非安全电路与安全电路保持实体隔离。其实体隔离要求以及无法满足实体隔离的解决方案应符合GB/T 13286-2008 《核电厂安全级电气设备和电路独立性准则》。

#### 2.7.2.3.10 安全停堆

安全级和非安全级电力系统的布置应保证在任一防火区由于火灾、烟、热气或灭火剂导致所有设备不能运行且没有可能恢复时，仍能实现安全停堆。

#### 2.7.2.3.11 支持设备电源

与一特定非安全序列有关的一回路系统运行和控制所需的交流或直流辅助或支持设备，例如润滑油泵、冷却泵、风扇、蓄电池充电器、仪表等，应由属于相应一回路系统所在的同一序列的交流或直流母线供电。

#### 2.7.2.3.12 电厂支持系统

安全和非安全配电系统的特性、配置和序列隔离应结合电厂支持系统（2.8节）的设计，以提高电厂的防火能力。

第2.8节电厂支持系统给出了更详细的防火要求。电力系统设计特性（例如：序列隔离、功能隔离、控制类型等）的选择必须将火灾隐患减至最小。

#### 2.7.2.3.13 大修再供电

在电厂大修期间，电力系统应为需要供电的负荷提供一个独立的电力回路。这一独立的供电回路可来自同一厂址中另一发电机组或单一机组厂址中其他电厂配电装置或独立的厂外电源。这一供电回路至少应能为大修期间需供电的负荷供电以维持冷停堆，同时为正常的维修负荷供电。

#### 2.7.2.3.14 临时电源连接

华龙技术电厂应依据电厂规程，为电厂电力系统供电提供预留接口，移动式交流发电机可以与预留接口进行连接。

### 2.7.2.4 容量裕度

在电厂建设期间或电厂建成之后，为了将可能的系统改造费用减至最低，电力系统的设计应包括负载容量裕度和负载连接裕度。在增加允许的预留负载后，这些裕度除应满足管理要求，还应使电力系统本身满足其所有功能要求和运行要求，例如：电压调整、电动机启动能力、最大故障电流等。应与营运单位协商，由电厂设计者对组成电力系统的所有相关类型的设备规定具体的裕度。在规定这些裕度时，应重点考虑华龙技术电厂预期60年或更长寿期的结论（见2.7.5.3.1和2.7.4.2.2）。

### 2.7.2.5 分析

#### 2.7.2.5.1 容量和能力

电厂设计者应采用由工业标准推荐的分析方法，以证明电力系统的容量和能力在所有正常和异常运行工况下能满足要求。（包括2.1.4节描述的电厂性能事件）。

#### 2.7.2.5.2 文件

电厂设计者应为营运单位提供足够的设计分析的文件，特别应包括（但不限于）计算、分析模型、计算机程序、假设的说明和输入及输出数据。

#### 2.7.2.5.3 接口规格



电厂接口管理工程师应为电厂交流和直流供电系统编制一份接口技术要求。接口技术要求包括完整的负载清单以及所有必要的设计参数，以保证电源、配电系统和负载之间的匹配性。编制的负载清单应方便操纵员识别给定断路器或开关动作所影响的所有负载。

#### 2.7.2.5.4 设计程序要求

电力系统设计程序应按2.1节总体要求的设计程序要求设计。电厂设计者使用的一些数据源列于2.1.7节中。设计者据此应鉴别在电力系统的详细设计中所使用的特定设计准则并在正式的设计控制过程中包括这些设计准则，以保证执行这些准则。

#### 2.7.2.6 设备

##### 2.7.2.6.1 通用要求

- 1) 安全系统的设备按安全级设备设计和鉴定，以满足为电厂安全系统运行规定的环境条件和工作周期。鉴定要求应符合GB/T 12727《核电厂安全级电气设备鉴定》。
- 2) 所有安全级设备例如开关装置、母线、电缆、电缆通道、电动机以及其他给定安全序列的电气负载应使用容易识别的颜色编码。
- 3) 所有安全级设备和支撑结构均应设计满足2.1.4规定的结构设计要求，满足抗震Ⅰ类要求。鉴定要求符合最新版本GB/T 13625《核电厂安全级电气设备抗震鉴定》。
- 4) 为减少华龙技术电厂遭受地震风险，应特别关注对地震敏感的以及因设计及安装导致在宽幅地震动下易损的安全级设备，保证它们具有足够的抗安全停堆地震（SSE）裕度。电厂设计应能充分利用蓄电池、蓄电池充电器、逆变器、继电器、电气盘箱柜、电缆和导管接头等与抗震设计有关的可用经验。
- 5) 如果非安全级设备及其支撑结构位于安全级设备或支撑结构的附近，设计时需满足抗震Ⅱ类要求（见2.1.5节）。
- 6) 电力系统非安全级设备支撑结构的运行和地震负载应按照2.1.5节规定的统一建筑物规定来设计。
- 7) 电力系统中不易更换的主要部件或电缆应按60年，也考虑可能延长到60年以上的电厂寿期。然而，如果系统设计和建筑物布置允许进行设备更换的话，则无需提出此要求。60年或更长的寿命要求特别适用于主升压变压器、机组辅助变压器、机组变电站变压器、离相母线、气体绝缘母线、发电机断路器和电厂电缆线路系统，包括电气贯穿件。预期寿命短的部件，例如连续通电的继电器、电子部件等，电厂设计者应确定部件的预期寿命值并采取易于更换部件的设计措施。
- 8) 电气配电柜等设备应尽量远离辐射控制区。

##### 2.7.2.6.2 电动机和驱动系统

- 1) 整个电厂的电动机额定电压的选择应协调一致，即由相同额定电压（例如10.5kV、400V）母线供电的电动机应具有相同的额定电压（例如10kV、380V）。所有电动机的设计应使其在电压变化为电动机额定电压的 $\pm 10\%$ 时仍能运行。
- 2) 在电厂运行期间为便于电压调整，要求有一致的额定电压和运行范围。
- 3) 通常，非安全级电动机在最低为80%额定端电压时能够启动它们的负载。
- 4) 除电动阀门（MOV）电动机以外，安全级电动机在要求的时间内能够在最低为75%额定端电压下启动。安全级MOV电动机（交流或直流）能够在最低为80%额定端电压下启动。对于每一个阀门，应通过计算证明80%的启动电压是足够

的，或根据计算结果应规定一个合适的更低的启动电压。

5) 当在额定电压和额定频率条件下运行时，电厂电动机具有的连续额定功率应大于极限运行工况下驱动负载的最大额定功率。应按照最新版本的NB/T 20093-2012《核电厂安全级阀门驱动装置的鉴定》鉴定安全级阀门电动机。应按照最新版本的NB/T 20290-2014《核电厂安全级连续工作制电动机的鉴定》鉴定其他安全级电动机。

6) 除非另有规定，在电厂正常运行期间，要求连续工作的中压电动机设计成B级温升并提供至少F级绝缘结构。

7) 应对电厂正常运行期间连续工作的中压电动机提供热电偶或热电阻测温装置，以测量绕组和轴承的温度。

8) 安全级中压电动机应采用全封闭的水—空气冷却设计。通过电动机自身所带的泵或相同安全序列的设备冷却系统提供排热的循环水，并保护电动机内部零件。

9) 调速装置具有的谐波畸变应设计为对电厂电力系统电压的影响最小。特别是由这种设备运行产生的总电压畸变限制在3%以内。

10) 采购调速装置的说明中应包括电厂的电压上下限值。此外，应该指定调速装置启动和运行的最小工作电压，还要考虑电网降级的影响。

11) 调速装置宜考虑其所控制的电机在所有运行影响因素下具备全范围的调速能力，可能的情况下，电机及其调速装置宜成套供货。

12) 调速器控制盘宜做联锁设计以便带电情况下可以进行热成像检查。对于调速器控制盘应便于维护。

13) 为了保证调速装置的温度不超过原始设备制造商推荐的温度，应考虑对其进行冷却。如果未设计专用冷却装置，设计者应保证预期最高环境温度不会影响调速装置性能或运行寿命。

14) 设备制造商应提供设备的：

- a. 升级和淘汰的全寿命管理方法
- b. 调速装置运行、维护和检修的培训教材
- c. 一整套图纸（外形图、正面图、逻辑、连接件和电路图），还有检修指南和故障诊断代码
- d. 要求维护的设备的完整清单和更换频率
- e. 能输出开放式结构数据的软件
- f. 调速装置硬件/软件/固件升级的通知

15) 接线盒应足够大以满足电缆的弯曲半径要求，并允许重复使用端接设备。

16) 所有的中型/小型电动机最大转速应达1500rpm。推荐使用GB/T 755-2019《旋转电机 定额和性能》中的平衡规格，并且振动限值应小于等于此规范限制要求的50%。

17) 中型/小型电动机应使用铜转子结构。转子中不宜含有镁。电机绕组端部宜进行缠绕回旋和/或使用缠绕线圈结构。

18) 中型/小型电动机应视其大小配备检查塞/窗口来检查线圈端部、转子和绕组的状态。如果配备冷却扇，其应为金属的。根据使用环境，考虑配备除湿用加热器。

19) 电动机技术规格中应要求对油润滑电机轴承配备润滑油排放装置以避免润滑油注入过多而使润滑油溢入绕组中。设备制造商应提供润滑油容存空间以及润滑油填充液位百分比指示。

- 20) 设备供货商应提供5级或更高级别的紧固件及其扭矩值。
- 21) 中型/小型电动机供货商应提供足够信息用于运行维护。
- 22) 大型电动机的油封轴承设计时应针对所有预期的电动机工作范围（空载到最大负载）进行轴承稳定性分析。推荐使用轴承隔离装置（如油封）。

#### 2.7.2.6.3 电缆

- 1) 按预期运行环境的要求，电缆绝缘材料和电缆套材料应耐热、防潮、抗冲击、抗臭氧和抗核辐射。应选择专用电缆绝缘材料和电缆套材料，以满足电厂60年及60年以上运行寿命的要求
- 2) 电缆绝缘材料、护套和填充材料应为低烟无卤型。在电厂建筑物内，电缆绝缘和电缆套材料不应使用聚氯乙烯（PVC）和氯丁橡胶。但是近来经验表明低烟无卤材料的电缆非常难于制造，安装过程中容易导致绝缘或电缆护套受损失效。应评估材料和制造方法中最新技术以确认更好地进行核电厂电缆设计。
- 3) 所有安全级电缆应符合最新版本IEEE Std 383《核电厂安全级电缆、现场电缆接头和连接的型式试验》规定的要求。
- 4) 应根据额定电流、容许电压降和故障电流容量选择电缆。选择电缆应使用下述最低准则：
  - a. 为连续工作制电动机供电的电缆，其载流量至少为电动机满负荷电流总和的125%；
  - b. 为交流或直流消防泵电动机供电的电缆，应能耐受堵转电流；
  - c. 为安全级 MOV 电动机供电的电缆，应能耐受堵转电流；
  - d. 为变压器馈电线供电的电缆，其载流量可为变压器额定值的100%。
- 5) 除有特殊需要并使用接线盒进行很好地保护外，禁止使用电缆接头。需要进行连接的电缆或导线应是类似的（例如：虽然是不同的制造商，但是具有相同的导体尺寸、额定功率和结构）。接头只能使用特别批准的可在预期运行环境下使用的材料。在恶劣环境中的安全级电缆接头应作环境方面的鉴定。所有接头（安全级和非安全级）的位置应在设计图中记录。
- 6) 电缆系统的设计应满足电缆的最小弯曲半径的原则并保证电缆的牵拉负载不超过供货方承诺的电缆侧壁支撑压力和抗拉强度的允许限值。牵引拉力和最大允许牵拉长度的计算应符合最新版本的NB/T 20052-2011《核电厂安全级电路电缆系统的设计和安装》。电缆的技术要求应标准化，以便在规定尺寸范围内的所有电缆满足相同的最小牵拉负载值。
- 7) 电力电缆应用接地屏蔽线防护，以使接地噪声最小。对于低压电缆，其铠装层可以作为屏蔽层。
- 8) 电缆敷设应尽可能避免恶劣环境。恶劣环境包括高温、高辐射、遭受化学品暴露的区域和潮湿区域。这包括大环境（厂房内）上避免有蒸汽管道，小环境（同一厂房内）尽量远离热管道或热阀门。
- 9) 必须在恶劣环境中运行的电缆可能要求在电厂寿期中进行更换。这样的电缆路径应考虑可达性和将对更换过程的影响降至最小。这包括为允许检查和更换而保证相邻电缆桥架之间足够的距离和根据需要被破坏的防火封堵的数量最小而规划电缆路径。
- 10) 位于地下、难以达到或电缆沟中的电缆应保护免于受潮或被水淹。

#### 2.7.2.6.4 电缆通道

- 1) 根据电缆的功能和电压级别, 电缆通道从上到下应按如下实际布置:
  - a. 中压电力电缆;
  - b. 低压电力电缆;
  - c. 控制电缆;
  - d. 模拟信号或数字信号电缆。

若低压电力电缆与高电平信号和控制电缆的尺寸差别不大并且运行温度要求相似, 可以将其混合布置在同一电缆通道。此时在计算电缆载流量时, 应假设桥架中所有的电缆都是电力电缆, 除非可以控制位置和分组。除此之外, 为单一等级的电缆而设的电缆通道中应只能包含同一等级的电缆。

- 2) 包含仪表电缆的电缆托架应提供防止干扰信号源影响的保护措施。
- 3) 电缆托架用金属制作。架在空中的电缆导管宜使用刚性金属导管或金属屏蔽层。仅在设备连接处的一小段长度使用金属软管。只有当用混凝土封闭或直接埋入地下的管道才允许使用非金属导管。
- 4) 在电缆穿过挡防火墙的地方, 电缆通道的设计中应包括一些特殊措施, 以保证挡防火墙密封的完整性不因火灾丧失电缆支架而受影响。

#### 2.7.2.6.5 安全壳电气贯穿件

- 1) 应对安全壳电气贯穿件分类和保护, 以便在保护装置单一故障事件中贯穿件的任何电路故障不会导致超过贯穿件耐受的“电流-时间”能力。贯穿件的设计应符合最新版本GB/T 13538 《核电厂安全壳电气贯穿件》规定的要求。
- 2) 每个贯穿件只能承载一种电压等级的电缆, 即要求贯穿件分别用于中压电缆、低压电缆和仪表电缆。在模块化贯穿件中, 光缆模块可与仪表和控制电缆模块混合在一个贯穿件组件中。
- 3) 连接安全级负载的电缆的芯棒(馈通线)不能用于非安全级电路, 只能用于同属于一个安全序列的安全级电路。
- 4) 连接中压电力电缆的贯穿件配备热电偶监测热点处的温度。
- 5) 所有穿过电气贯穿件的中压和低压电路宜配备主保护和备用保护装置, 保护装置能够限制因故障电流或过载电流(I<sup>2</sup>T)在贯穿件处产生的最大热量在其允许接受的热限值内。电厂设计者应选择符合安全和功能要求的保护装置, 以便将定期试验和维修要求降至最低。
- 6) 电厂设计者在设计穿过电气贯穿件的控制电路、控制电力电路和仪表电路时应充分考虑将故障电流或过载电流对贯穿件的影响减至最小, 以便无需对贯穿件增加保护要求即可使满足贯穿件不超过其热限值。例如: 对贯穿件分类, 以抵御连续的最大短路电流等。如果必须使用保护装置, 应满足上述5)的要求
- 7) 使用保护装置的贯穿件, 其主保护装置故障时, 贯穿件应仍能抵御可能的最大故障电流和过载电流一段时间, 以足以使备用装置投入保护。
- 8) 根据最新版本的NB/T 20089 《核电厂安全级电力系统及设备保护准则》, 保护安全级电路的主保护和备用保护装置应是安全级的。保护非安全级电路的主保护和备用保护装置应是非安全级的。
- 9) 所有的安全壳电气贯穿件的导体应有裕量。电厂设计者应确定需提供的导体和连接器的备用数量。

#### 2.7.2.7 仪表和控制

##### 2.7.2.7.1 运行参数要求

为了便于电厂运行和保证安全,应配置足够的仪表用于电力系统的运行参数超过正常预期范围和性能异常的监测。应配置适宜的手动和自动控制将这些参数和系统保持在规定的运行范围内,特别地,允许进行下列操作:

- 1) 为特殊的配电系统选择最合适的电源;
- 2) 当正常和备用电源不可用时,断开相应的负载。

#### 2.7.2.7.2 性能监测

应监测开关设备的下列性能:

- 1) 开关设备断路器负载电流和电源母线电流应在就地和主控制室(以及远程停堆控制室,如适用)指示;
- 2) 开关设备母线电压应在就地和主控制室(以及远程停堆控制室,如适用)指示。措施宜包括监测负载或部件的动作频次和持续时间,例如断路器运行监测。

#### 2.7.2.7.3 主控制室外的指示

除了主控制室内的控制器和指示器,在主控制室外也应提供有控制和指示的设备有:

- 1) 断路器,特别是把常备厂用负荷从正常电源切换到备用电源的断路器或者那些把安全级母线和安全级负载从主电源切换到备用电源的断路器;
- 2) 辅助支持系统,例如变压器风扇、加热器等。

#### 2.7.2.7.4 就地控制器

就地控制器应位于机柜门后面或采取其他措施防止误触发,例如用钥匙或联锁保护。

#### 2.7.2.7.5 保护方案

保护方案应使用带主保护和备用保护功能的区域重叠继电保护。

#### 2.7.2.7.6 隔离装置

在非安全供电电路用于为安全系统供电的场合,应提供GB/T 13286-2008《核电厂安全级电气设备和电路独立性准则》中描述的隔离装置,使安全系统与非安全电源隔离。这样非安全级电源中假设的电气故障不会损坏安全级负载,也不会丧失他们执行预期安全功能的能力。这些隔离装置应按安全级鉴定。

#### 2.7.2.7.7 机电控制继电器

不能把机电控制继电器安装在门上或易受偶然振动影响的设备上。

#### 2.7.2.7.8 保护

电力系统的保护应符合NB/T 20089-2012《核电厂安全级电力系统及设备保护准则》。

#### 2.7.2.8 厂房布置

##### 2.7.2.8.1 特点、配置方案和序列隔离

交流和直流配电系统的设计特点、配置方案和序列隔离应与建筑物设计(第2.6节:建筑物设计和布置)统筹考虑,以提高电厂的防火能力。

##### 2.7.2.8.2 设备布置

厂内配电系统设备布置应保证防止水灾、洪水、飞机碰撞和附近管道故障导致的管道用

击。

#### 2.7.2.8.3 暴露于消防喷头

一般不将电气设备置于暴露在消防喷头的地方。如果这种情况不能避免,电气设备应使用《外壳防护等级(IP代码)》中IPX6等级的外壳保护。

#### 2.7.2.8.4 检查

设备的厂房和布置设计允许在所有运行工况下对其进行本体检查。

#### 2.7.2.9 试验

##### 2.7.2.9.1 可操作性试验

系统和设备的设计应允许在电厂正常运行期间对不正常运行的设备可进行维修。

##### 2.7.2.9.2 系统隔离

为防止系统试验对机组运行产生不可接受的干扰,应采取足够的措施对系统予以隔离。为监测系统进行试验的情况,应提供连续的指示。为避免人员接触带电设备,应提供接地和试验开关。

#### 2.7.3 厂外电力系统

##### 2.7.3.1 系统定义

###### 2.7.3.1.1 范围

- 1) 厂外电力系统是由一组电气回路和相关设备所组成,这些回路和设备用来把厂外输电系统、核电厂的主发电机、以及厂内配电系统相互连接起来。它包括核电厂的高压配电装置或远端开关站、主升压变压器、单元辅助变压器(单元厂变)和备用变压器、高压联络线、和分相封闭母线、以及与它们相关的辅助系统、包括继电保护装置和就地的仪表和控制装置。
- 2) 厂外电力系统的始端在于连接开关站至厂外输电系统的断路器之输电系统一侧的终端,其末端在核电厂主发电机的终端和辅助变压器、备用变压器的低压侧终端。

###### 2.7.3.1.2 功能

- 1) 当核电厂起动、正常或紧急停机、或当核电厂停运时,厂外电力系统用于从厂外输电系统向核电厂的厂用负荷供电。
- 2) 在核电厂正常运行时,厂外电力系统用来将发电机产生的电力输送到厂外输电系统、和核电厂的厂用负荷。

###### 2.7.3.1.3 接口

- 1) 在正常运行时受电,在核电厂起动、停机或核电厂停役时供电的厂外输电系统;
- 2) 正常运行时供电的核电厂主发电机;
- 3) 接受并分配电力到核电厂的厂用负荷的中压交流配电系统;
- 4) 供电给各系统的辅助设备,如风机、泵、加热器等,并使之运转的低压交流配电系统;

5) 供电给仪表和控制负荷的直流供电系统。

### 2.7.3.2 功能和运行要求

#### 2.7.3.2.1 正常供电

厂外电力系统应设计成：

- 1) 在核电厂起动、正常或紧急停机时，或核电厂停役时，安全级和非安全级的厂内配电系统，二者都应由厂外输电系统供电；
- 2) 在核电厂正常运转时，和在核电厂从输电系统解列之后，而汽轮机不跳闸时，安全级和非安全级的厂内配电系统，二者通常均应由核电厂的主发电机直接馈电（即电力通道不应经过开关站）。

#### 2.7.3.2.2 供电连续性

厂外电力系统应设计成，当系统无故障时，厂内配电系统的安全级和非安全级在核电厂的起动、正常运行、正常或紧急停机的整个过程中，二者都能获得连续馈电而不切换（即没有负荷切换）。

#### 2.7.3.2.3 厂外辅助电源

厂外辅助电源应设计成一旦正常供电回路故障或不能利用时，厂外电力可通过切换至辅助电源供电使核电厂的安全级负荷和常备厂用负荷仍能运转。

#### 2.7.3.2.4 电压波动范围

厂外电力系统应设计成能限制厂内配电系统工作电压的变动在合适的范围之内，借以确保：

- 1) 所有核电厂负荷的正常和安全稳定运行；
- 2) 在有部分负荷仍在工作的情况下，使有限的驱动系统起动并加速；
- 3) 在电压下降的情况下，控制和保护系统能可靠工作；
- 4) 具体来说，当在负荷的终端进行测量时，按全电压水平的电压变化不应超过：
  - a. 在所有的稳态运行模式下，负荷额定电压的+10%或-10%；
  - b. 当电动机起动时，电动机额定电压的-20%；
  - c. 应按可能发生的厂外输电系统和主发电机电压变化预期的整个范围，对最大和最小负荷工况下辅助和备用变压器的低压端电压水平进行分析。对厂外供电系统的每种可能的回路组态应进行单独的分析。

#### 2.7.3.2.5 电力线路

核电厂的设计单位应对推荐的引入核电厂的电力线路的具体组态以及核电厂所连接的输电系统的特性进行复核，以确定厂外电力系统的可靠性，并验证它是和概率风险分析的关键性假定和基本准则相一致的。

### 2.7.3.3 系统配置

#### 2.7.3.3.1 厂外主电源

通常应有一个厂外主电源，经由一个开关站，即核电厂的高压配电装置，把核电厂的主发电机、厂内配电系统和厂外输电系统连接起来。这一回路应具有如下要求的容量和能力：

- 1) 输送主发电机的最大电出力;
- 2) 在核电厂起动、正常运转、正常或紧急停机时, 输送核电厂安全级系统和非安全级系统运行所需的电力, 当这一电力是由厂外输电系统供给, 或者是由主发电机供给的情况下。

#### 2.7.3.3.2 厂外辅助电源

通常应有一个厂外辅助电源, 经由一个开关站、即核电厂的高压配电装置, 用来把厂内配电系统和厂外输电系统连接起来。这一回路应明确地专用于把厂外电力供给到核电厂的安全级系统和不停止运转的非安全级系统。这一备用回路的容量和能力应能在这一电力由厂外输电系统供给的所有预期的运行工况下, 而厂外主电力回路不可用时, 确保向这些系统安全、可靠供电。

#### 2.7.3.3.3 隔离

厂外主电力回路和备用回路在电气上应是独立的, 物理上应是分隔的。

#### 2.7.3.3.4 开关站

厂外主电力回路和备用回路应连接到独立的, 分隔的开关站。具体地说, 应利用厂外备用回路容量要求低的优点, 将其连接到不同的输电系统, 常用的做法是将其接到一地区电网, 该电网的容量和电压均低于和厂外主电力回路相连接的输电系统。

#### 2.7.3.3.5 开关站配置

厂外主电力回路和备用回路连接线所接入的开关站的配置, 亦即母线和断路器的布置, 应能做到: 只要接到同一开关站的输电线路进线(即引自厂外输电系统)至少有一回是带电的, 则这些连接线仍然是带电的。

#### 2.7.3.3.6 开关站布置

厂外主电源的连接线所接入的开关站应设置2组全容量的主母线, 并应布置成:

- 1) 任一引进或引出的输电线路可以切换, 而不影响另外的线路;
- 2) 任一单台断路器可以隔离进行维修, 而不会中断任一回路的运行;
- 3) 一组主母线的故障可进行隔离而不会中断任一回路的运行。

#### 2.7.3.4 设备

##### 2.7.3.4.1 新建开关站

如必须建设一个新的开关站, 那新开关站的架空线设计、选择屋外或屋内式GIS设计将取决于当地的环境、气象条件以及系统电压要求。应采用适当的模拟技术进行分析研究来选定最佳方案, 使之满足实际厂址条件的华龙核电的可靠性和经济性要求。

##### 2.7.3.4.2 厂外主电力设备

厂外主电源应包括下列主要设备:

- 1) 一台主变压器;
- 2) 一回连接主变压器至开关站的连接线;(如果连接线长度约大于2.4公里, 应考虑在靠近主变压器侧安装一组高压断路器);
- 3) 一台给厂内配电系统供电的高压厂用变压器;
- 4) 一组连接主变压器的低压侧至发电机和高压厂用变压器高压侧的离相封闭母



线系统：

- 5) 一台位于发电机和主变压器、高压厂用变压器之间的发电机出口断路器，并和离相封闭母线组合在一起。

#### 2.7.3.4.3 主变压器

主变压器组应由三台单相变压器组成，并另加一台备用相。应采取措施保证，当正常工作的一台单相变压器发生故障后，在12小时之内能将备用相接入并带电。根据电压调整的需要，应装设无载或有载开关。

#### 2.7.3.4.4 厂址环境及气象条件

和开关站的情况一样，厂外主电力回路连接线路的不同设计方案的选择，诸如选用常规架空线、气体绝缘导管、离相封闭母线、高压电缆等，应取决于当地的环境和气象条件以及系统电压要求。

#### 2.7.3.4.5 架空设备

如采用架空设备，则架空线、配电装置的母线、杆塔结构等，应按适合于特定厂址所在处的温度变化、风速、冰雪负载进行设计，并应符合国家标准对导体载荷的相关要求。

#### 2.7.3.4.6 高压厂用变压器

高压厂用变压器组应由2台三相变压器组成，高压厂用变压器为分裂变压器。每台变压器应能在最大可能出现的同时负载条件下，包括所有必要的裕度、具备供应核电厂安全级和非安全级系统运转所需的50%电力的容量和能力。变压器应根据需要装设无载或有载开关，以便在变压器所有可预见的载荷条件下，直到最大出力条件下，维持变压器的二次侧电压在限值之内。

#### 2.7.3.4.7 发电机出口断路器

发电机出口断路器应按能承受最大的均方根值（有效值）和瞬时峰值电流设计。并能切断在产生最大故障电流处的金属性三相短路故障所确定的最大非对称和对称电流。

#### 2.7.3.4.8 厂外辅助电源

厂外辅助电源应包括下列主要设备：

- 1) 一台向核电厂安全级系统、常备厂用负荷和一些其他负荷供电辅助变压器；
- 2) 经开关站把辅助变压器连接到厂外输电系统的连接线。

#### 2.7.3.4.9 变压器设计要求

主变压器、高压厂用变压器以及辅助变压器的设计和构造应能承受由于外部短路所产生的机械应力和热应力、并应满足国家标准的相关要求。

#### 2.7.3.5 厂房布置

##### 2.7.3.5.1 主变压器及高压厂用变压器布置

主变压器和高压厂用变压器应并排布置在汽机房外靠近发电机端和发电机断路器之处。变压器间的防火墙以及集油措施应满足国家标准的要求。

##### 2.7.3.5.2 辅助变压器布置

辅助变压器应布置在反应堆建筑物之外、离开主变压器和高压厂用变压器一定距离之处，并靠近内部设有供电给安全级负荷和不停止运转的非安全级负荷母线的配电装置室附近。辅助变压器应最大限度地和其它变压器分隔，以便把火灾和环境因素的共同后果降至最小。

#### 2.7.3.6 仪表和控制

##### 2.7.3.6.1 机组同期

机组的同期通常应经过低压发电机断路器。应采用重合的三取三逻辑方案和同期校核继电器以避免误同期。还应有措施使机组可经过开关站的断路器进行同期。

##### 2.7.3.6.2 继电保护

所有用于厂外电力回路和开关站设备保护的继电保护方案应是冗余的，并应包含后备保护特性。所有的断路器应装有双跳闸线圈。供给跳闸信号的每一冗余的保护回路应接至一独立的跳闸线圈。与每一冗余系统有关的所有设备和电缆布线应是物理上分隔的。

##### 2.7.3.6.3 保护和控制直流电源

厂外电力系统的冗余保护和控制设备工作所需的直流电力应由两组分隔的、专用的开关站蓄电池供电，每一组蓄电池带有一蓄电池充电器，充电器由一组分隔的交流母线馈电。每组蓄电池应能为开关站设备的正常运转供应所需的直流电力。

##### 2.7.3.6.4 低压交流供电系统

应设置两路冗余的低压交流供电系统将交流电力供至开关站的辅助负荷。每路系统应由分隔的、独立的交流电母线供电。每路系统的容量应足够满足开关站设备正常运转所需的交流电力需要。

##### 2.7.3.6.5 变压器保护装置

每台变压器应设置有主保护和后备保护装置。接到主保护和后备保护装置的直流电力应由分隔的直流电源供给。

#### 2.7.4 中压交流配电系统

##### 2.7.4.1 系统定义

###### 2.7.4.1.1 范围

本节为华龙技术电厂中压交流配电系统提供了系统设计和性能要求。

中压交流配电系统由工作电压为10kV配电回路组成，为中压交流负荷供电。该系统始于高压厂用变压器和厂用辅助变压器低压侧以及厂内中压柴油发电机组电源断路器的输出端，终止于中压负荷的输入端。该系统主要中压负荷设备包括中压电动机及低压厂用变压器。中压交流系统还包括开关设备、母线设备、就地仪表、继电保护装置等设备，以及连接开关设备和所有负荷或母线的电缆。中压交流配电系统的容量应满足各种运行工况下，中压负荷对交流电源的要求。中压交流配电系统应符合现行标准规定。每个高压厂用变压器和厂用辅助变压器应配置相应的主保护和后备保护装置，相应的直流电源应由不同的直流电源回路供电。

###### 2.7.4.1.2 功能

中压交流配电系统供电要求：

- 1) 确保机组在启动、正常运行、正常停堆期间，单元厂用负荷的用电要求（见第2.7.2.3.2节）；
- 2) 机组运行或在电厂停运期间，必须保持独立运行的常备厂用负荷的用电要求（见第2.7.2.3.2节）；
- 3) 为缓解事故或安全停堆时，应急厂用（包括安全及其它应急厂用设备）负荷的用电要求（见第2.7.2.3.2节）。

#### 2.7.4.1.3 接口

为中压交流配电系统供电的系统包括：

- 1) 厂外主电源系统（第2.7.3节），电源来自厂外输电系统或来自电厂主发电机，在所有工况下由高压厂用变压器为中压交流厂用设备供电。
- 2) 厂外辅助电源系统（第2.7.3节），当失去厂外主电力系统及主发电机电源时，由辅助变压器向机组的常备厂用设备、应急厂用设备（包括安全及其它应急厂用设备）、共用厂用设备供电。
- 3) 厂内交流电源系统（第2.7.5节），厂内交流电源来自应急柴油发电机、附加柴油发电机、SBO柴油发电机、移动柴油发电机，分别应对失去厂外交流电源的各种工况下对应的中、低压厂用设备供电。
- 4) 低压交流配电系统（第2.7.6节），为中压交流配电系统的辅助设备供电，如冷却风扇、加热器等。
- 5) 直流和不间断交流电源系统（第2.7.7节），为中压交流配电系统仪表和控制负载供电。

由中压交流配电系统供电的系统包括：

- 2) 为低压交流配电系统提供电源（第2.7.6节），为低压负载配电。
- 6) 为电力生产系统（第2.12节）提供电源。主要包括给水增压泵、主泵、给水泵、冷凝泵和辅助蒸汽锅炉泵。
- 7) 为反应堆冷却剂及其相连系统（第2.3节）提供电源。主要负荷包括反应堆冷却剂泵、化学和容积控制增压泵、稳压器加热器。
- 8) 为安全系统（第2.4节）提供电源。主要负荷包括安注泵、安全壳喷淋泵、应急给水泵、余热排出泵。
- 9) 为核辅助系统（第2.5节）提供电源。主要负荷包括乏燃料池冷却泵、循环水泵、厂用水泵和部件冷却水泵。
- 10) 为电厂支持系统（第2.8节）提供电源。主要负荷包括电厂暖通空调系统、消防泵、电厂空气压缩机。
- 11) 为仪表和控制系统（第2.6节）提供电源。
- 12) 为放射性废物处理系统（第2.9节）提供电源。
- 13) 为汽轮发电机系统（第2.13节）提供电源。
- 14) 为便携式设备的主要和备用连接，如为电厂制定的超出设计基准的策略和程序提供电源。

#### 2.7.4.2 功能和运行要求

##### 2.7.4.2.1 中压交流配电设计

中压交流配电系统应为以下设备供电：

- 1) 由高压厂用变压器为用于机组正常运行的单元厂用负荷供电；
- 2) 为常备厂用负荷供电，分为以下供电电源：

- 厂外主电源，即厂用变压器；
- 厂外辅助电源，即辅助变压器。
- 3) 为应急厂用负荷供电，分为以下供电电源：
  - 厂外主电源，即厂用变压器；
  - 厂外辅助电源，即辅助变压器；
  - 厂内电源，即厂内柴油发电机组；（见第 2.7.5 节）。

#### 2.7.4.2.2 厂外主电源丧失

对于厂外主电源丧失工况，常备厂用母线采用自动慢切换方式切换到厂外辅助电源供电，为常备厂用设备及部分共用厂用设备供电，进行相应的停堆操作，实现停堆。

#### 2.7.4.2.3 厂外主电源和辅助电源全部丧失

当厂外主电源和辅助失去电源时，EDG应急柴油发电机组经自动启动后分别连接到应急母线上。每一台EDG柴油发电机组的容量可承担一个机组的一个安全系列的所有厂用设备的用电，包括安全级厂用设备及主设备安全厂用设备的用电。所有安全级厂用设备及主设备安全厂用设备应自动转移到厂内应急电源系统。为了简化自动切换过程，并保持足够的柴油发电机容量裕度，应使本部分负荷减少到最小。厂内交流电源系统详见第2.7.5节内容。

#### 2.7.4.2.4 电源切换

为满足第2.7.4.2.2节和第2.7.4.2.3节对华龙技术电厂的要求，电厂设计人员应选择简单、可靠的自动切换方案，并利用电厂的运行裕度，以尽量减少电源的互连，并降低在切换过程运行期间损坏电机和其他设备的风险。

#### 2.7.4.2.5 厂内应急电源

在汽轮机跳闸、厂外电源丧失的情况下，华龙技术电厂应配置厂内应急电源向安全级负载供电。应急电源由与专设安全系统相对应的多台柴油发电机组组成，每台柴油发电机组可以为厂内相应序列的应急厂用设备提供电能，以确保核电机组的安全停堆以及防止主要设备损坏。

#### 2.7.4.2.6 厂区附加电源

可根据需要是否设置厂区附加电源。厂区附加电源可由与应急柴油发电机等容量的柴油发电机组组成。该电源不执行安全功能，可在单元机组失去全部厂外和厂内电源时向所需的核辅助设备供电。另外，在核电站正常运行期间，当某一台应急柴油发电机组不可用时，可由厂区附加柴油发电机组临时替代。

#### 2.7.4.2.7 SBO 电源

在全厂断电工况下，设置SBO柴油发电机组，为全厂断电时需要恢复供电的负荷提供电源。

#### 2.7.4.2.8 切换装置操作电源

电厂系统的设计应能最大限度地提高开关操作电源的可靠性，确保在负载切换期间，最大程度地减少正常电源和辅助电源并联故障以及辅助电源过载的风险。

#### 2.7.4.2.9 移动式柴油发电机电源

移动式应急电源是为应对与日本福岛核电站事故类似的严重事故设置的。该电源不在电厂所属设备范围内，只在厂用电系统的电源全部丧失时提供来自厂外的应急电源。作为纵深防御的一种手段，华龙技术电厂应设置有一台10kV和一台380V移动式应急柴油发电机组，用于核电厂严重事故工况下在厂内外交流电源全部丧失时，为应急措施提供临时动力，以缓解事故后果，并为恢复厂内外交流电源提供时间窗口。

#### **2.7.4.3 系统配置**

##### **2.7.4.3.1 中压交流系统电压等级**

根据对厂外电力系统电压变化分析（见第2.7.3.2.4节），优化中压交流配电系统的电压等级，确保电厂设备的良好运行。新建华龙技术电厂机组，整个中压交流配电系统应使用单一电压中压等级10kV。采用10kV的单一电压等级，有利于减少母线、电动机和开关设备的采购成本。

##### **2.7.4.3.2 单元厂用设备母线设置**

单元厂用设备母线应根据不同的工艺系统中负荷的情况进行设置，直接影响电厂正常运行的负载在非安全供电母线的分配应能对应地体现出这些负载归属在不同的工艺系统的布置要求，目的是为操纵员提供各个工艺系统清晰、统一的布置，系统的操作简洁且灵活。冗余的泵或泵组应由不同的母线供电。正常独立的母线数量应尽量减少，负载应尽量均匀对称地分布在母线上，以便于电压调节。

##### **2.7.4.3.3 常备厂用设备母线设置**

常备厂用设备母线应设置不少于两条专用母线，常备厂用设备应大致均匀对称地分布在这些专用母线上。

##### **2.7.4.3.4 应急厂用设备母线设置**

应急厂用设备母线的设置应符合第2.7.2.3节规定的冗余和系列隔离要求。应设置与专设安全设施序列相对应的多条独立的中压应急母线段。

#### **2.7.4.4 设备**

##### **2.7.4.4.1 中压开关柜短路保护能力**

中压开关设备应具有断开短路电流的能力，在所有需要限流保护的场合，其短路保护能力应通过设备型式试验验证能够超过开关设备端子上可能出现的最大短路电流。断路器选型应符合相应国内国际标准。

##### **2.7.4.4.2 中压开关柜设计**

中压开关设备的设计应基于现代成熟技术。开关装置应使用真空或六氟化硫（SF<sub>6</sub>）技术。

##### **2.7.4.4.3 中压开关设备**

应采取必要措施确保在没有任何直流或交流电源的情况下可以手动打开和闭合所有中压开关设备。

##### **2.7.4.4.4 室内变压器**

位于室内的变压器应为阻燃类型。

#### 2.7.4.4.5 变压器短路设计

变压器的设计和制造应使其能承受外部短路产生的机械和热应力。具体而言，干式变压器应满足GB 1094《电力变压器》及GB/T 10228《干式电力变压器技术参数和要求》，包括具有实心铸造和/或树脂封装绕组的变压器的要求。

#### 2.7.4.4.6 配电室

配电室的工作空间应符合国家电气安全规范。开关设备间应设计有不同的或备用的交流、直流和照明电源。配电室暖通空调应与配电室电源分开供电。留出充足空间主要是为安全拆除，安装和维护断路器。

#### 2.7.4.4.7 开关柜支撑结构

中压开关柜支撑结构和地板的水平偏离范围应避免断路器合闸和拉闸时受力不均匀，同时关闭柜门而不会损坏断路器。

#### 2.7.4.4.8 开关设备环境

开关设备所处环境应保证空气质量（温度、湿度、化学物质、油接触）。断路器应避免暴露在事故后严酷环境下。

#### 2.7.4.4.9 耐电弧开关设备

宜使用耐电弧开关设备。建议在使用附加保护装置时配置光学传感器观察弧光故障探测。

#### 2.7.4.4.10 互感器

互感器的一次侧宜连接在主断路器的负载侧。

#### 2.7.4.4.11 断路器监控软件

应使用开放数据结构、有良好的供应商支持、用户友好的软件来进行断路器监测。

#### 2.7.4.4.12 备用断路器

开关柜内宜提供10%至25%裕度的备用断路器位置并提供相应的断路器。用于将来负荷的增长和/或维护灵活性。

#### 2.7.4.4.13 断路器操作

所有电动断路器应设计为可进行远程操作（控制面板上）。

#### 2.7.4.4.14 断路器储存要求

供应商应在所有运输集装箱的外部清楚地标明断路器的储存要求和保质期。

#### 2.7.4.4.15 模块化接口设计

如采用模块化设计的电子或光纤接口，宜集成在监测装置内以便于运行维修。

#### 2.7.4.4.16 断路器监测

断路器监控应与保护控制功能分开以确保保护控制功能免受监视故障的影响。

#### 2.7.4.5 仪表和控制

##### 2.7.4.5.1 正常和备用电源断路器控制

用于将母线连接至其正常电源的断路器应手动控制。用于将母线连接至其备用电源的断路器应根据需要采用自动或手动控制。

##### 2.7.4.5.2 继电保护装置

应配置继电保护装置以执行以下功能：

- 1) 人员保护；
- 2) 单元变电站变压器保护；
- 3) 开关设备的保护；
- 4) 电缆保护；
- 5) 保护电机和工作负载；
- 6) 发出报警。

选择正确的继电器特性确保特性相配，并满足以下要求：

- 1) 可在离故障最近的上游断路器处将故障清除；
- 2) 应提供重叠保护区和后备保护；
- 3) 保护方案应能区分实际故障和过载/启动电流，防止误跳闸；
- 4) 母线电压监测与保护。

安全级母线和为常备厂用负荷供电的非安全级母线均应配备两套独立的母线电压监测和保护方案，一个用于监测低电压，一个用于监测失压。监测与保护方案应符合最新版NB/T 20089-2012《核电厂安全级电力系统和设备保护准则》。两套保护方案均应使用符合逻辑（例如：三相中至少两相符合），以避免保护功能的误动。应基于总线自动切换逻辑的时序要求为失压继电器动作设置适宜的时间延时，以防止在母线切换过程中不必要地启动厂内备用电源。此外，根据NB/T 20089-2012中的建议，应为低电压保护设置两个不同的时间延迟。

##### 2.7.4.5.3 测试开关

应提供测试开关，在无需启动备用电源和触发卸载和加载程序的情况下，即可进行独立欠压保护方案可操作性测试。

##### 2.7.4.5.4 自动切换方案

根据2.7.4.2.2、2.7.4.2.3、2.7.4.2.4节的电源切换需求，自动切换方案应能确保负载切换过程中备用电源的电压和频率维持在允许范围内。如果备用电源在加载期间或加载之后跳闸，在电源恢复后，加载程序应能自动重启并向指定的负载恢复供电。EDG加载程序应确保机组在不同运行模式之间的可靠切换。无论是发生LOOP事故的同时或之后出现LOCA事故，或是发生LOCA事故的同时或之后出现LOOP事故，EDG带载的LOCA负载均能按既定顺序加载，以满足电厂关键工艺系统的功能要求，确保设备连续可用。

##### 2.7.4.5.5 开关设备监测和指示仪表

应提供必要的仪表，以便对以下开关设备运行参数进行就地监测：

- 1) 电流：开关柜母线电流和馈线电流；
- 2) 电压：开关柜母线电压和输入电源电压；
- 3) 变压器监测。

应提供必要的装置对以下变压器运行参数进行适当的就地监测：

- 1) 绕组温度;
- 2) 液体/气体温度;
- 3) 液位;
- 4) 气体压力。

#### 2.7.4.5.6 就地手动开关设备控制

应在所有电源和负载断路器的开关室中提供就地手动开关设备控制装置。

#### 2.7.5 厂内交流电源系统

##### 2.7.5.1 系统定义

###### 2.7.5.1.1 范围

本节为华龙技术电厂交流电源系统的系统设计提出了性能要求,系统包括厂内交流电源直至厂内交流配电系统相关的供电电路。厂内电源系统包括原动机和交流发电机、辅助系统(启动、润滑、冷却、燃料供应、励磁等)、燃料储存和输送系统以及相关的就地(靠近设备位置)仪表和控制装置系统要求中,本节使用的术语“备用电源”的内容涉及的安全级和非安全级电源。必要时区分安全和非安全。

###### 2.7.5.1.2 功能

厂内交流电源系统的设计目的是在主发电机跳闸和厂外电源丧失的情况下,向电厂部分非安全级负荷和安全级负荷提供交流电源。系统的运行需要确保核安全,向专设安全设施提供交流电源,以缓解事故或安全停堆。厂内交流电源系统的一部分设计用于在主发电机跳闸和失去厂外电源(回路)时向电厂部分非安全级厂用负荷提供交流电源。此外,它还设计为为电厂安全级负荷提供交流电源来源。

###### 2.7.5.1.3 接口

厂内交流电源系统安全级部分与之接口的系统包括:

- 1) 为发电机冷却提供冷却水的安全设备冷却水系统(第2.5节:核辅助系统);
- 2) 向辅助和控制系统提供直流电源的安全级直流电源系统(第2.7.7节);
- 3) 为房间和设备冷却提供空气的电厂暖通空调系统(第2.8节:电厂支持系统);
- 4) 仪表和控制系统(第2.6节:仪表和控制系统),用于在启动、负载排序、正常运行和关机期间远程控制电源;
- 5) 中压交流配电系统(第2.7.4节);
- 6) 低压交流配电系统(第2.7.6节),在正常情况下为应急安全电源的辅助系统提供交流电源;
- 7) 向辅助和控制系统供电的直流及交流不间断电源系统(第2.7.7节)。

##### 2.7.5.2 通用要求

- 1) 应提供两个厂内安全级电源,以便在主发电机回路跳闸伴随失去厂外电源的情况下,向电厂部分非安全级负荷和安全级负荷提供交流电源。安全级电源按规定的冗余和分区要求配置。每个安全电源应包括一台应急柴油发电机组(EDG)。柴油发电机用作安全电源是成熟的技术、积累了丰富的经验,可以为EDG设备提供高可靠性。



- 2) 为实现负载成功启动和成功运行, EDG机组可靠性应足够高。
- 3) EDG装置的设计标准, 设计特征和鉴定程序应符合EJ/T625-2004, GB/T 12727-2017。
- 4) 宜提供备用厂内非安全电源附加柴油发电机, 以在规定的时限替代任何一台不可用的应急柴油发电机组(EDG)。
- 5) 为实现负载成功启动和成功运行, 附加柴油发电机的可靠性应足够高;
- 6) 附加柴油发电机的初始设计鉴定程序应符合EJ/T625-2004规范中“初始型式试验”的要求。
- 7) 附加柴油发电机不宜直接连接到电厂的主电源或备用厂外电源或安全交流配电系统。
- 8) 应提供应对全厂断电事故的SBO柴油发电机, 可在全厂失电的情况下, 用来向防止、限制和减少放射性物质泄漏的核安全厂用设备供电, 以确保主控室的可居留性, 必要的通信和照明, 以及机组运行所必需的仪控功能。
- 9) 应将厂内备用电源与厂外电源系统发生共模失效的概率控制在最小。特别是要确保在与天气有关的事件或单一故障导致厂外电力系统丧失与同时使厂内电源失去之间不存在任何单一脆弱点。
- 10) 设备制造商应提供柴油发电机维护说明, 包括所有供应设备的全套图纸、示意图和零件清单。

### 2.7.5.3 功能和运行要求

#### 2.7.5.3.1 负载能力

- 1) 每台EDG机组应能提供服务专设安全设施所需的电力, 以便在失水事故伴随厂外电源丧失的情况下, 仍能将电厂维持在安全状态, 以确保核电机组的安全停堆以及防止主要设备损坏。
- 2) 每台EDG机组的连续额定功率应根据其最恶劣工况下的满足其所供电的安全序列的安全系统负荷启动以及稳态运行来确定, 应大于任何工况下由该装置供电的所有安全负载之和。连续额定功率应留有足够的裕度来允许电厂将来可能的负荷增加, 通常裕度考虑10~15%。
- 3) 在启动和负荷加载过程中, 在达到最大短时额定功率期间, 每个电源都应能够从比预计负荷曲线中最严重负荷阶跃大110%的负荷阶跃中恢复, 如下所示:
  - a. 电压和频率在任何时候均不得低于额定值的 80%和 95%;
  - b. 在加载程序时间间隔的 60%的时间内, 电压和频率均应恢复到其额定值的 90%和 98%范围。甩负荷至其最大短时额定功率时, 机组转速的增加不得超过额定转速与超速跳闸设定值之差的 75%或高于 15%的额定值, 以较低者为准。
- 4) 附加柴油发电机组负载能力可替代任何一台不可用的应急柴油发电机组(EDG)。
- 5) SBO柴油发电机组应能提供SBO工况下所需的电力, 用来向防止、限制和减少放射性物质泄漏的核安全厂用设备供电, 以确保主控室的可居留性, 必要的通信和照明, 以及机组运行所必需的仪控功能。

#### 2.7.5.3.2 启动时间

- 1) EDG机组应在收到启动信号后自动启动、加速至额定转速、达到额定电压并开始加载负载。每个EDG的组合启动和相关负荷加载时间应在收到启动信号后的50秒内。负荷加载顺序和时间依据限制设计基准事故(典型的如: 大破口失水事

故)扩展的安全系统需要启动的时间顺序而定。启动时间满足电厂工艺加载负荷的要求。

2) EDG机组应能在非部件故障引起的任何停机后可迅速再次重新启动,即开始新的启动顺序。此要求确保在电站启动和正常运行过程中的任何EDG的误触发后具备再次正确启动的能力。

3) 附加柴油发电机组宜自动启动,加速至额定速度,达到标称电压,启动时间满足电厂工艺加载负荷的要求。

4) SBO柴油发电机组采用自动或手动启动方式,加速至额定速度,达到标称电压,并在收到启动信号后两分钟内准备好加载负载。

### 2.7.5.3.3 运行方式

1) 在正常核电厂运行条件下,每个电源应能持续保持在备用状态。

2) 对于未失去厂外电源的LOCA事故,每台EDG机组应自动启动,加速至额定转速,并达到额定电压。此后,机组应继续空载、额定电压和频率运行,等待加载或停机控制信号。

3) 失去厂外电源后,各应急柴油发电机组(EDG)应自动启动,加速至额定转速,达到额定电压,并准备向安全负荷供电。

4) 每个应急柴油发电机组(EDG)应专用于向安全负荷提供应急电源。但是,在非安全负荷失去所有电源的情况下,应急柴油发电机组(EDG)也可用于向选定的部分常备非安全负荷供电。

5) 在一个应急柴油发电机组(EDG)不可运行的情况下,厂区附加柴油发电机组作为附加电源替代EDG机组运行,附加电源被设计成非安全级系统。在电厂运行期间厂区附加柴油发电机组不执行安全功能。厂区附加柴油发电机组与应急柴油发电机组(EDG)不应共用的能动部件和非能动部件,厂区附加柴油发电机组的故障不应影响应急柴油发电机组的运行。

6) 在应急母线同时失去电压的情况下,SBO柴油发电机组应自动启动,通过其配电柜向SBO工况下需要运行的用电负荷供电。

### 2.7.5.4 系统配置

#### 2.7.5.4.1 系统电源要求

启动和操作电源所需的辅助交流或直流系统应使用与厂内交流电源供电的相同序列或分区相关的交流和直流电源。

#### 2.7.5.4.2 系统配置

每个机组的厂内应急电源系统应包括与专设安全设施序列相对应的多个相同的、功能冗余、电气独立的EDG装置,电厂应急配电系统的每个独立序列配置一台。每个机组的厂内附加电源系统宜包括一台附加柴油发电机组,当一个核电单元机组失去全部厂外和厂内电源时,厂区附加柴油发电机组应给所需的核辅助设备供电。此时,厂区附加柴油发电机组为手动启动和带载。每个机组的厂内应设置一台或两台应对全厂断电事故的SBO柴油发电机,可在全厂失电的情况下,用来向防止、限制和减少放射性物质泄漏的核安全厂用设备供电。

### 2.7.5.5 设备

#### 2.7.5.5.1 总则

- 1) 厂内交流电源需进行空载或轻载试验。
- 2) 每个厂内交流电源应是全封闭的、完全装配好的和经试验的机组。提供的设备应包括所有必需的辅助系统和就地仪表及控制系统。仪表和控制系统宜单独落地安装。部分辅助系统也可能需要独立安装。
- 3) 必要时为每个厂内交流电源提供预热系统和预润滑/后润滑系统。
- 4) 每个厂内交流电源均应具有液体燃料运行能力。允许由厂内燃料箱提供燃料使机组运行。
- 5) 建议安装曲轴箱超压保护装置。
- 6) 电厂厂内交流电源应能在没有任何交流或直流电源的情况下手动启动。

#### 2.7.5.5.2 启动系统

- 1) 华龙技术电厂应配备厂内交流电源，华龙技术每个厂内交流电源都应配备可靠的启动系统。
- 2) 空气启动系统应由一组能够满足启动要求的空气启动电机、供气管线和供气控制器组成。电磁阀应具有就地手动操作功能。
- 3) 应为每个空气启动系统装备空气干燥器和空气过滤器。
- 4) 空气启动系统应包括一个专用空气压缩机。应由贮气罐压力自动控制空气压缩机。
- 5) 每个空气启动系统的管道材料应是不锈钢或铜。

#### 2.7.5.5.3 燃气进气和排气系统

- 1) 应为每个厂内交流电源提供一个独立的燃烧进气和排气系统。
- 2) 燃烧进气系统应配置减少空气中悬浮粒子进入系统的措施，防止在设计基准事故（如龙卷风、沙尘暴等）中降低发电机性能。
- 3) 进气口和排气结构的布置和定位应防止由于排出的气体、烟尘和其他稀释剂（例如灭火剂）进入进气口而导致发电机功率输出降低，这些稀释剂可能会将氧含量降低到可接受的水平以下。
- 4) 应保护暴露在大气条件下的燃烧气体进气和排气系统的部件，避免由于冰、雪、灰尘等造成的堵塞。

#### 2.7.5.5.4 燃料系统

厂内交流电源装备发动机驱动的燃料泵用来满足满载运行所需的燃料供应要求。燃油箱的排油口应倾斜，以便排空燃油箱的最下部或排出积水。

#### 2.7.5.5.5 冷却系统

- 1) 厂内交流电源本身应具有独立的冷却系统。
- 2) 建议在冷却液热交换器的最大散热率上留出15%的余量。
- 3) 不应使用铬酸盐冷却剂添加剂。
- 4) 建议使用电动风扇而不是动力输出。
- 5) 从设备冷却水系统到换热器的管道见第2.85.3节：设备冷却水系统。
- 6) 应为每个EDG机组装备一套发动机驱动的冷却水泵以满足满载运行对于通过主发电机和涡轮增压器冷却回路水循环的要求。

#### 2.7.5.5.6 润滑系统

- 1) 每个厂内交流电源本身应具有独立的润滑系统。
- 2) 应为每个厂内交流电源装备一套润滑油泵，用于满足机组在满载运行时的润滑要求。
- 3) 应为每个厂内交流电源提供由一台交流电动机驱动泵组成的预润滑系统，用于保证在备用状态时的预润滑。除非设计者找到可靠且更具成本效益的替代方案，否则该预润滑泵将由柴油机输出的同一交流电源进行供电。
- 4) 应提供在运行期间添加润滑油的规定。

#### 2.7.5.5.7 调速器

- 1) 应为每个厂内交流电源装备一个电气液压调速器，用于机组在下降或同步状态下运行。在机组启动期间，无论是监督试验还是对实际要求作出响应，调速器应按照可调的斜坡函数控制加速度。调速器应提供快的和可靠的超速保护。在待机或紧急模式下，调速器应能够在110%负载下对满负载抑制作出响应，而不会出现超速跳闸。
- 2) 为了防止机组启动期间的超速，要求使用斜坡发生器。超速已经成为引起启动跳闸和设备损坏（特别是柴油发电机的涡轮增压器）的常见原因。110%的甩负荷能力避免了对设备的不利影响。
- 3) 在调速器电子部分故障或不可用的情况下，控制备用电力机组的调速器机械液压部分应设计为启动和正常运行提供全速控制。
- 4) 调速器油泵应由发动机驱动。

#### 2.7.5.5.8 交流发电机

- 1) 发电机外壳应具有自通风功能，并能防止水滴侵入。
- 2) 发电机绝热等级应为H或者更高。
- 3) OEM应根据温度提供EDG降额信息。

#### 2.7.5.5.9 励磁机和调压器

- 1) 应为每个厂内交流电源装备一台由并联、冗余、固态调压器控制的静止或无刷旋转励磁机。每个调压器应能提供全电压控制。
- 2) 当机组处于下降状态时，应为调压器提供用于机组运行的一个Kw控制器和一个Kva/PF控制器。当机组切换到同步状态时，这些控制器应自动停止工作。
- 3) 在故障期间，调压器应能提供足够的发电机励磁，用于使发电机的输出电压和电流维持在要求的水平上，以保证保护继电器动作。
- 4) 输出电压偏差应在 $\pm 10\%$ 以内。频率偏差应在 $\pm 2\%$ 以内。

#### 2.7.5.5.10 供油

- 1) 应为每个厂内交流电源提供独立的供油系统。每个供油系统由一个贮存罐、一个运输泵、一个日用油罐和连接管道组成。
- 2) 每个供油系统应包括燃油从日用油罐返回到贮存罐的再循环措施。
- 3) 每个贮油罐应具有足够的容量使有关的备用电源以其最大额定功率运行不少于下列时间中较长的时间：
  - a. 七天；
  - b. 在设计基准事故以后，从其他处重新补充燃油所需的时间。
- 4) 每个日常油罐应有足够的容量，能使机组以其最大额定功率至少运行

60min。

- 5) 每个燃油管应具有检测罐内是否有水的能力，如有必要应能将水从罐底抽出。
- 6) 在供油系统中应提供燃油取样的合适方法。
- 7) 应为贮油罐和相关管道的内表面和外表面提供防腐处理。防腐处理应根据特定的厂址条件和燃油特性并使用高效防护材料。

#### 2.7.5.6 厂房布置

##### 2.7.5.6.1 EDG 抗震设计

启动空气压缩机下游的EDG机组和相关支持系统应设计为抗震 I 类设备。

##### 2.7.5.6.2 EDG 外部事件保护

应保护EDG不受到洪水、龙卷风、飞射物、破坏和火灾的影响。

##### 2.7.5.6.3 EDG 通风系统

每个EDG外壳应设置单独的专用通风系统。

##### 2.7.5.6.4 其他要求

厂区附加柴油发电机组作为附加电源被设计成非安全级系统。厂区附加柴油发电机组和设备通过建筑物的墙，门及专用装置防止台风的破坏。其厂房设计不考虑飞机撞击。

SBO 柴油发电机厂房、柴油发电机本体、相关的辅助设备及电缆通道可设计成能够承受安全停堆地震(SSE)。SBO 柴油发电机组所在建筑物应能够防止龙卷风的破坏。在设计、制造和安装期间，采取有效的措施，以保证柴油发电机的性能和质量。

#### 2.7.5.7 仪表和控制

##### 2.7.5.7.1 启停控制与监视

每个电源应配备适用于手动启动和关闭以及运行期间监测和控制的本地仪表和控制系统。应能远程控制自动启动和负载顺序。(自动启动和加载要求见第2.7.5.3.3节。)

##### 2.7.5.7.2 就地机电仪表

应为每个电源提供就地机械和电气仪表，以监测成功运行所需的变量，包括发动机和发电机振动。监测系统应包括启动、冷却、润滑和燃料供应系统、进气和排气系统以及励磁和电压调节系统。还应提供仪表以监测室温、控制电源、前/后润滑和预热情况的监控。

##### 2.7.5.7.3 环境条件评价

就地仪表和控制系统的的设计应确保这些系统不受其运行环境条件的影响，特别是不受温度、振动、湿度和电触点污染方面的影响。

##### 2.7.5.7.4 保护跳闸功能

在所有机组运行模式下，保护机组免受会导致关键部件快速退化的条件影响的每个电源的保护跳闸功能应保持正常。应根据需要使用重合跳闸逻辑方案和跳闸旁路方案，以避免运行期间不必要的机组跳闸。对于EDG机组，应根据需要使用跳闸旁路方案，以避免在事故条件下运行期间不必要的机组跳闸。这些方案的实施应符合EJ/T625-2004，并经适用法规修改。

#### 2.7.5.7.5 自动切换

每个电源控制系统的设计应在接收到LOOP信号（或LOCA信号- EDG机组）时,使机组从任何试验模式或峰值运行模式自动切换至正常备用运行模式的功能。

#### 2.7.5.7.6 专用电源

仪表和控制电源应来自专用的220VDC和220VAC配电盘，这些配电盘是与各机组安全序列或负荷组相关的直流和重要仪表交流电力系统的一部分。

#### 2.7.5.8 试验

##### 2.7.5.8.1 电源并联

每年应进行每个电源与电厂厂外电力系统并网的试验。应提供保护装置（如同步检查继电器），以确保正确的同步顺序。

##### 2.7.5.8.2 电源试验

厂内交流电源系统的设计应能在电厂正常运行或停堆期间试验任何电源（不影响电厂的安全功能）。设计应包括确保机组试验达到模拟系统实际需求时预期的运行参数的规定。EDG应具有试验模式终止方式，以便在出现紧急启动信号时，EDG可从试验模式返回到应急模式（EJ/T625-2004）。

##### 2.7.5.8.3 运行前或改造后试验

厂内交流电源系统的设计应允许对电源进行投运前或检修后试验，以证明在所有可能的运行配置情况下，电源的完整独立性。

##### 2.7.5.8.4 扭转试验

在厂内安装启动试验之前，应进行扭转试验，以评估耦合发动机/发电机的可接受性能。

#### 2.7.6 低压交流配电系统

##### 2.7.6.1 系统定义

###### 2.7.6.1.1 范围

本节提出了华龙技术电厂的低压交流配电系统的设计和性能要求。

低压交流配电系统由为安全和非安全负荷提供380V电源的厂内配电回路组成。本节涉及的系统不包括交流不间断电源系统，也不包括正常和应急照明系统。这些系统分别在2.7.7和2.7.8中规定。低压交流配电系统始于由中压交流配电系统供电的变压器的高压侧，并终止于负荷（电动机、加热器等）的输入端、直流和交流不间断电源系统蓄电池充电器的输入端、调压变压器的输入端以及照明变压器的一次侧。

低压交流配电系统包括配电变压器以及与继电保护和仪表控制有关的配电盘。还包括电缆、接头和电气贯穿件。对于华龙技术电厂，安全是系统的一个限制因素。

###### 2.7.6.1.2 功能

低压交流配电系统的安全级配电系统可在失去所有交流电源时为安全级的直流蓄电池充电器供电以减轻事故或用于安全停堆。低压交流配电系统的非安全级配电系统是根据电厂运行的不同状态为非安全负荷供电。

低压交流配电系统为低压配电盘、电动机负荷、电动阀和其他负荷供电。低压配电盘通过变压器为直流和交流不间断电源系统、照明系统和其他负荷供电。

#### 2.7.6.1.3 接口

为低压交流配电系统供电的系统包括：

- 1) 中压交流配电系统（2.7.4），为低压负荷供电；
- 2) 直流和交流不间断电源系统（2.7.7），为系统的仪表、控制和保护设备供电。

由低压交流配电系统供电的系统或设备包括：

电厂安全和非安全低压负荷（例如电动机、阀门驱动器、加热器、仪表和控制负荷）；  
直流和交流不间断电源系统（2.7.7）；  
电厂正常照明系统和应急照明系统（2.7.8）。

支持低压交流配电系统运行的系统包括：

- 1) 电厂暖通空调系统（2.8），提供运行环境的控制；
- 2) 仪表和控制系统（2.6），提供远程监测和控制。

#### 2.7.6.2 功能和运行要求

##### 2.7.6.2.1 低压交流配电系统设计

对于华龙技术电厂，低压交流配电系统的设计应确保向2.7.4.2.1节中压交流配电系统规定的机组运行专用的常备厂用负荷供电。

低压交流配电系统的设计应为三种类型的低压负载供电，即按照2.7.4.2.1节中压交流配电系统要求中规定的专用于机组运行要求的单元厂用负荷、常备厂用负荷和应急厂用负荷（安全级负荷）。

这一要求是根据2.7.2节和2.7.4节的配置要求，其目的在于：

- 1) 根据负载的性质，分为两个级别的非能动电站交流电源的可靠性，以同时满足安全性、可用性和简化目标；
- 2) 按负荷性质提供不同冗余度和可靠性的电源，以同时满足安全性、可用性和简化目标。

##### 2.7.6.2.2 单一故障

设计的系统应使某一个开关站或配电变压器在故障或不可用时不影响整个低压系统的连续运行。保证可靠的供电并允许在电厂正常运行期间进行维修和试验。

##### 2.7.6.2.3 母线供电设计

与系统母线或配电盘连接的冗余电源不能同时运行。如单母线只能由一路电源供电；分段母线可以由两路电源供电，但应打开母线联络断路器。根据负荷特性要求提供自动或手动的电源切换方案。

为了保证系统的可靠性和降低短路要求，宜始终保持冗余电源的独立性。

##### 2.7.6.2.4 移动柴油发电机

应确保能够通过移动柴油发电机建立简单的连接，向直流和交流不间断电源系统的应急厂用负荷（安全级负荷）供电。

本要求旨在提供方便和安全的方法，在失去所有电源后，恢复对电厂安全级负荷的长期供电。

#### 2.7.6.2.5 主要和备用接口

低压交流系统的设计应允许按照为电厂制定的超出设计基准策略和程序的要求连接移动式柴油发电机。

#### 2.7.6.3 系统配置

##### 2.7.6.3.1 概述

低压交流配电系统的配置应与三类负荷需求相对应,并满足2.7.2.3规定的隔离要求。为安全级负荷或常备厂用负荷供电的低压系统部分,是为同一类型等级负荷供电的中压交流配电系统部分的延续。不同安全序列的电源系统之间不能交叉连接。清晰的系统配置有助于运行程序简化,并将保证安全和非安全电源的隔离和独立。

##### 2.7.6.3.2 电厂可靠性

低压交流配电系统安全级配电系统的设计应尽可能提高电厂低压安全负荷供电系统的可靠性。

电厂安全系统的可操作性在很大程度上取决于给低压负荷供电。此外,电气安全系统的试验和维修对电厂的可用性产生重要的不利影响。这一要求用于:

- 1) 将电路故障对电厂安全系统可操作性的影响降至最低;
- 2) 为了允许在线试验和维修,在低压交流配电系统部分不能工作的情况下保证连续为低压负荷供电。

##### 2.7.6.3.3 非安全低压交流装置

在进行低压交流配电系统非安全部分的配置时,电厂设计者应建立和使用一套合理、一致的设计准则,该准则应能体现清晰的系统结构,并能在保证系统运行的可靠性的原则和减少系统部件及精简系统运行程序的原则两者之间达到最佳平衡。电厂设计者应重点采用下述准则:

- 1) 安全级低压交流配电系统由相应的安全级中压交流配电系统的单回路供电;
- 2) 非安全级低压交流配电系统由相应的非安全级中压交流配电系统的单回路供电;
- 3) 冗余设备应由不同的低压交流配电系统供电。

必须采取一致的设计原则,它可帮助运行人员在应急情况下进行分析。考虑到低压负荷的多样性,不能规定一个详细的系统配置。然而,设计特性宜协调整个系统并使其获得最佳组合,以达到设计目标。

列出的设计准则希望既能提供所需的系统可靠性和运行灵活性,又能减少馈线和开关装置的数量。特别是,为大量的低压负荷提供冗余馈线并不合理,并且这种配置可以切换负荷组而不是单个负荷。例如,与多个低压负荷转移相比,单次负荷中心转移是更可取的。

##### 2.7.6.3.4 设备位置

配电变压器和配电盘宜尽量靠近负荷中心布置。这样设计可以将配电盘与其负载之间的电缆长度和电压减至最小。

##### 2.7.6.3.5 供电线路

冗余电源应采用不同的路径敷设,两者之间应相互隔离。这样设计既保持电缆路径的独立性又可以提高系统的可靠性和可用性。

#### 2.7.6.4 设备



#### 2.7.6.4.1 低压开关装置结构

低压开关装置应具有金属外壳。开关装置结构应设计成能抵御由设备运行产生的所有应力而不变形或损坏。开关装置的结构应符合最新版本的GB/T 7251-2013《低压成套开关设备和控制设备》。

认为金属外壳防护是合适的。GB/T 7251-2013《低压成套开关设备和控制设备》提供了适用于华龙技术电厂的设计要求。

#### 2.7.6.4.2 变压器类型

位于室内的机组变电站变压器是阻燃型的，即变压器是由无闪点、无燃点、在空气中阻燃的材料制造。

消除火灾危险。希望优先选择设计与油浸变压器具有相同BIL（基本脉冲电平）要求的全封闭无通风干式变压器。

#### 2.7.6.4.3 低压开关柜设计

低压开关装置的设计应采用现代成熟技术，包括断路器和熔断器-接触器，其目的在于减少空间和维修要求以及改善可靠性、人员安全和使用寿命。

#### 2.7.6.4.4 变压器设计

低压配电变压器在容量设计时，应考虑特殊的操作或环境条件，以确保在规范中要求的适当裕度。

应确保变压器设计中包含适当的裕度。特殊的操作或环境条件以及极端的当地条件，如高/低环境温度、海拔高度等应考虑在其中。

#### 2.7.6.4.5 变压器额定容量

变压器的额定容量应大于最大预期负载。

#### 2.7.6.4.6 基本脉冲电平

低压配电变压器应采用GB 1094《电力变压器》GB/T 10228-2015《干式电力变压器技术参数和要求》标准中列出的最高基本脉冲电平（BIL）。

具有更大的承受开关瞬变和工作压力的能力，从而提高了长期可靠性。

#### 2.7.6.4.7 变压器铁芯

低压配电变压器的铁芯应单点接地，并与地有良好的绝缘。任何载流部件或装置都不应将变压器负载限制在低于铁芯和线圈容量的范围内。

#### 2.7.6.4.8 避雷器

避雷器应安装在尽可能靠近低压配电变压器的地方。保护变压器免受瞬态过电压的影响。

#### 2.7.6.4.9 温度监控装置

绕组的温度由温控系统监测。

#### 2.7.6.4.10 额定电压

一次额定电压应与预期输入电压匹配，二次额定电压应补偿负载变动时的电压调节。防止低压配电变压器铁心过励磁，确保选择适当的额定电压。

#### 2.7.6.4.11 油浸式变压器

室内不应使用油浸式变压器。

#### 2.7.6.4.12 干式变压器空气过滤器

当空气过滤器用于干式变压器时，空气过滤器应安装在机柜外部，便于在运行时更换。及时更换空气过滤器对于确保变压器使用寿命至关重要。外部安装确保过滤器更换的安全性。

#### 2.7.6.4.13 干式变压器检修口

干式变压器设计应考虑足够的检修距离，以查看关键位置（如变压器线圈、导线或连接）。如果检修距离不够，则应安装红外窗口以查看这些关键位置。

#### 2.7.6.4.14 干式变压器开口

干式变压器应具有防止小动物侵入的措施。

#### 2.7.6.4.15 干式变压器绝缘系统

干式变压器应考虑采用铸圈真空压力浸渍（VPI）、真空压力封装（VPE）或其他提供额外环境隔离的绝缘系统的设计。通过在使用寿命期间承受湿气和其他污染物，提高变压器绝缘系统的使用寿命。

#### 2.7.6.4.16 绝缘电阻测试

进行工厂铁芯“绝缘电阻”测试，建议最小电阻为100兆欧。绝缘电阻测试确保变压器铁心绝缘系统的完整性。

#### 2.7.6.4.17 变压器仓库备件

应保证重要变压器的库存备件充足。备件或集合库存提供及时恢复电力的能力。

#### 2.7.6.4.18 变压器温升

与绝缘系统允许温升定值相比，变压器的允许温升应设计的尽量保守。

#### 2.7.6.4.19 断路器要求

有关断路器要求，请参阅第2.7.4.4.6至2.7.4.4.19节。

### 2.7.6.5 仪表和控制装置

#### 2.7.6.5.1 冗余电源联锁设计

由冗余电源供电的单母线配电盘，应保证进线断路器之间的电气联锁。分段母线应设计在进线断路器或联络断路器之间提供机械联锁或电气联锁。

#### 2.7.6.5.2 热过载装置

应提供热过载装置以保护阀门电动机驱动器，并防止电动机故障。对于安全级驱动器，合适的机械和热过载装置应用于提供最大的驱动器保护，以避免对系统的安全功能造成不可接受的危害。为此，热过载装置的选择和容量确定应按照最新版本的NB/T 20089-2012《核电厂安全级电力系统及设备保护准则》。当有必要防止电动机故障和产生指示误操作报警时，

装置通常应用于使驱动器跳闸。一般不应提供用于限制驱动器保护的旁路设施。

## 2.7.7 直流和交流不间断电源系统

### 2.7.7.1 系统定义

#### 2.7.7.1.1 范围

本部分为华龙技术电厂的直流和交流不间断电源系统提供了系统设计和性能要求。

直流电源系统由为电厂直流负荷提供直流电力的供电和配电设备及电路组成。系统范围始于电厂安全级和非安全级蓄电池充电器的电源端，终止于电厂直流负荷（电动机、控制负荷等）的输入端和交流不间断电源系统逆变器的输入端。

交流不间断电源系统由为连续运行的安全级仪表负荷、计算机系统和其他重要的电厂负荷提供低压交流电力的供电和配电设备及电路组成。系统范围始于逆变器和备用调压变压器的输入端，终止于系统负荷的输入端。

系统包括蓄电池组、蓄电池充电器、逆变器、不间断电源（UPS）、调压变压器、配电盘、有关的保护继电器和仪表，以及所有从电源端到系统负荷端的电缆和接线。

#### 2.7.7.1.2 功能

设计的直流和交流不间断电源系统为控制和仪表负荷（例如反应堆保护和安全设施驱动系统）和电厂启动、正常运行以及正常或应急停堆所要求的其他直流和重要交流负荷提供连续、可靠的电力。

在厂外或厂内交流电源完全丧失的事件中，由蓄电池组向直流和交流不间断系统负荷提供运行所需的电源。

在DBA（设计基准事故）工况中，安全停堆所要求的直流和交流不间断电源系统部分的设备按安全级设计。与投资保护有关的支持功能的系统部分按非安全级设计并认为是电厂非安全级系统的一部分。

#### 2.7.7.1.3 接口

下列是华龙技术电厂的典型接口。根据设计的详细信息，这些接口可能不适用。支持直流和交流不间断电源系统运行的系统包括：

- 1) 低压交流配电系统（第2.7.6节），为蓄电池充电器、调压变压器、UPS和逆变器供电并为其辅助设备例如冷却风扇、加热器等的运行供电；
- 2) 暖通和空调系统（第2.8节：电厂支持系统），为安装这些系统设备的空间提供温度控制；
- 3) 仪表和控制系统（第2.6节：仪表和控制系统），提供遥控和指示功能；
- 4) 接地系统（第2.7.9节：接地），提供接地保护。

由直流和交流不间断电源系统供电的系统包括：

- 1) 电力生产系统（第2.12节：电力生产系统）；
- 2) 反应堆冷却剂及其相连系统（第2.3节：反应堆冷却剂系统及其相连系统）；
- 3) 安全系统（第2.4节：安全系统）；
- 4) 燃料操作与贮存系统（第2.10节：燃料操作与贮存系统）；
- 5) 核辅助系统（第2.5节：核辅助系统）；
- 6) 放射性废物处理系统（第2.9节：放射性废物处理系统）；
- 7) 汽轮发电机系统（第2.13节：汽轮发电机系统）。

下列系统也是由直流和交流不间断电源系统供电：

- 3) 电厂支持系统（第2.8节：电厂支持系统）。负荷包括火灾探测系统、环境监测系统、保安系统、公共广播系统、电话系统、远距离无线通讯系统和专用对讲系统；
- 5) 仪表和控制系统（第2.6节：仪表和控制系统）。典型的负荷包括反应堆保护系统、安全系统、紧急停堆系统、备用紧急停堆系统、安全逻辑和驱动系统、电厂计算机系统和许多设备遥控和指示系统；
- 6) 电厂照明系统（第2.7.8节）。

## 2.7.7.2 功能和运行要求

### 2.7.7.2.1 母线冗余

设计的安全级直流和交流不间断电源应具有足够的冗余度，以保证：

- 1) 单个安全级直流或交流不间断配电母线的丧失不会导致电厂瞬变，同时系统可对该单一故障事故作出响应。

在厂外电源丧失且汽轮机跳闸的情况下，任一电厂蓄电池或直流母线的丧失，以及停堆冷却所需其他系统同时发生单一独立故障，将不会导致反应堆冷却能力的完全丧失。

### 2.7.7.2.2 设备冗余

设计的直流和交流不间断电源系统设备应具有足够的冗余度，以保证：

- 1) 单组蓄电池、单个蓄电池充电器或逆变器的故障或不可用不会导致电厂跳闸或强制停堆。
- 2) 运行技术规格书中规定，蓄电池试验或其他对单节蓄电池、蓄电池充电器或逆变器进行单独试验或维修应采用离线形式进行，并且不影响电厂以100%功率连续运行至少7天。

### 2.7.7.2.3 蓄电池容量

直流电源系统的蓄电池容量应满足下列运行要求：

- 1) 无需甩负荷的情况下，根据极限载荷曲线，为其负荷至少提供2h的电力。2h的最短周期保证了仪表和控制系统在交流电源完全丧失以后能连续运行，并且在交流电源在2h内不能恢复的事件中以延长预期的应对周期而为操纵员动作提供时间。
- 2) 允许选定的安全负荷在严重事故条件（包括丧失所有交流电源）下运行至少12h而无需采取手动甩负荷或负荷管理程序。12h载荷曲线应包括那些在严重事故条件下进行事故后监测和电厂控制所需的直流和交流不间断负荷。
- 3) 假设采取了手动甩负荷和负荷管理程序，允许应对全厂断电的系统运行8h。假设在全厂断电之前或期间没有立即发生DBA（设计基准事故）或其他独立的故障，8h应对时间的载荷曲线应包括在全厂断电期间要求运行的那些直流和不间断交流负荷。
- 4) 根据电厂为应对设计扩展工况建立的策略和程序，系统应能接入移动式柴油发电机，从而为负荷提供足够长时间的供电。
- 5) 蓄电池容量的计算应按最新版本的NB/T 20028.1-2010《核电厂用蓄电池第1部分：容量确定》。对于12h工作周期的蓄电池，建议使用蓄电池生产厂家推荐的温度系数。用于确定蓄电池大小的载荷曲线应包括短时和瞬态负荷，例如断路器开关负荷、直流电动机负荷，要求在计划应对时间结束时（例如2h或12h）为蓄电池充电并采取其他适当的恢复措施。

#### 2.7.7.2.4 应对时间

应对设计基准事故所需的直流和交流不间断电源系统的部件应设计为在缺少强制冷却或自然冷却（HVAC）时至少运行2h。

应对所有交流电源丧失所需的直流和交流不间断电源系统的部件应设计为在缺少强制冷却或自然冷却（HVAC）时至少运行12h。

#### 2.7.7.2.5 连续运行

在正常运行期间，蓄电池充电器、UPS和逆变器一般应连续带载运行。

#### 2.7.7.2.6 母线连接

在电厂正常运行期间，蓄电池组和蓄电池充电器一般应与直流配电母线保持连接，保证系统处于备用状态。蓄电池在正常运行期间必须保持满充电，在交流电力丧失或蓄电池充电器故障的情况下自动带载。

#### 2.7.7.2.7 运行电压范围

直流电源系统的设计应保证系统的负荷和设备在工作电压（包括浮充、均充和放电末期）的整个范围内可靠运行，并对工作电压维持能保证可靠运行的范围内进行分析。分析内容应包括电缆的电压降并给出所有预期的运行工况包括稳定状态和开关瞬态。如果电压过低可能导致不可接受的设备损坏或意外操作，则应安装具有充分滤波和选择性的欠压分断元件。保证系统的负荷和设备在所有预期的运行工况下按设计要求运行并不会损坏。

#### 2.7.7.2.8 开关操作

设计的系统应减少并便于所需的开关操作，从而在应急情况下可合理使用蓄电池的总供电容量。

### 2.7.7.3 系统配置

#### 2.7.7.3.1 总则

- 1) 直流电源系统的设计应符合最新版本的GB/T 14546-2008《核电厂直流电力系统设计推荐实施办法》。
- 2) 直流电源系统应不接地运行，确保单点接地故障不影响系统运行。建议安装一个永久接地故障电流检测系统，该系统在做年度“电介质强度试验”时应断开。可使用“钳式”监测探头进行接地电流检测。永久接地故障电流检测系统和“钳式”监控探头的使用提供了灵活性，并且易于测试。
- 3) 为安全级负荷供电的电源和电路应与为非安全级负荷供电的电源和电路保持实体隔离和电气独立；安全级电源和电路不应向非安全级负荷供电。
- 4) 直流电源系统的设计应最大程度地提高电厂正常和应急工况的安全级和非安全级直流负荷供电的可用性。每条直流母线一般应与一组蓄电池和至少一台蓄电池充电器连接。
- 5) 直流和交流不间断电源系统的设计应减少系统部件的数量，以符合本部分规定的其他要求，实现系统简化的目的和降低维修要求。
- 6) 应为每个逆变器或不间断电源提供低压交流电源，如一个具有足够容量的调压变压器，在单个逆变器故障或不可用的情况下以使系统正常运行。对于安全级逆变器或不间断电源，低压交流电源应为安全级。

### 2.7.7.3.2 安全级系统

- 1) 直流和交流不间断电源系统的安全级部分应设置与专设安全设施的序列相对应的多个独立序列，根据需要满足第5章安全系统规定的冗余和序列隔离要求以及本节第2部分规定的其他配置要求。各个序列的部件之间应保持实体隔离和电气隔离。不同安全序列的系统之间不可设置母线联络。直流和低压交流电源系统的隔离、独立性和冗余的其他要求见下文第2、4、5条。
- 2) 安全级直流和交流不间断电源系统的布置应符合第2.6节：仪表和控制系统中规定的反应堆保护通道的数量和独立性要求以及反应堆紧急停堆逻辑要求。
- 3) 如果在电厂某些区域无法应用此类标准，则设计者可以使用其他布置，只需冗余分区之间的物理隔离规定与消防系统（第2.8.1节）、内外部灾害（第2.1.6）和单一故障准则的要求相一致。
- 4) 应为交流不间断安全级负荷（包括反应堆保护和安全系统驱动通道）以及安全系统仪表和控制负荷配置UPS或逆变器。
- 5) 用于确保严重事故条件下12h最短应对时间的蓄电池所供电的负荷数量应尽可能小。特别是该类负荷应限于保持运行的负荷，以确保在事故情况（包括丧失所有交流电源）下进行充分的监测和控制。
- 6) 在不同的安全级直流和低压交流电源之间分配负荷时，应确保任何单个安全级直流或低压交流母线的丧失不会导致电厂瞬变，同时系统可对该单一故障事故作出响应。

### 2.7.7.3.3 非安全级系统

- 1) 应将直流和交流不间断电源系统的非安全级部分认为是常设非安全系统的一部分。
- 2) 应为电厂大型负荷（例如备用润滑油泵或密封油泵）的运行提供单独的非安全直流电源系统。相对于由母线同时向大型直流负荷和控制负荷供电的系统而言，为了简化接地和保护系统方案并保护典型的诸如电厂控制器、报警和仪表系统等负荷不受大型负荷运行可能引起的干扰，最好使用单独的直流系统。
- 3) 非安全级直流电源系统应包括冗余供电母线、蓄电池组和蓄电池充电器。冗余的充电器应由不同的交流母线充电。按照2.7.3.6.3节的要求，应提供双重冗余的专用蓄电池组为开关站负荷供电。
- 4) 应为非安全级交流不间断系统包括电厂计算机、仪表和控制负荷以及火灾探测系统的运行配置UPS或逆变器。

### 2.7.7.4 设备

#### 2.7.7.4.1 总则

- 1) 所有用于直流和交流不间断电源系统的部件应能在按照7.2.7确定的电压变化范围内运行。经验已经表明：在没有适当控制的情况下，直流电源系统设备电压的额定值有本质的不同，这种不同会降低系统对电压变化的容差。
- 2) 为了避免部件的快速热老化，蓄电池充电器和逆变器的设计应考虑保守的温度裕度。为了保证所有部件都得到较低的运行温度，对额定值超过50kVA的蓄电池充电器和逆变器宜采用强制空气冷却（同2.7.7.2-4）节）。建议采购带温度补偿的蓄电池充电器。建议在蓄电池充电器和逆变器上安装测试端子，以避免现场接线。

- 3) 作为蓄电池充电器和逆变器一部分的变压器应具有H级或更好的绝缘系统并设计不超过F级的温升。
- 4) 应在所有蓄电池充电器、UPS和逆变器的输入端提供浪涌抑制装置。将可能由电气瞬态引起的部件损坏减至最少。

#### 2.7.7.4.2 蓄电池组

- 1) 直流电源系统安全级部分的蓄电池组应符合最新版本的IEEE Std535《核电厂安全级蓄电池质量鉴定》的要求。
- 2) 考虑到将来负荷的增加，蓄电池的容量裕度应为10%到15%，这一要求在规定的保证满足系统性能的最小容量裕度。提供的这一裕度除了所要求的容量裕度以外还应补偿温度效应、老化和初始容量。建议蓄电池组定容时采用的设计温度不超过25℃。
- 3) 蓄电池组的设计应允许更换单节蓄电池。每组蓄电池应配置相应的隔离开关以便于维护。建议在蓄电池上安装测试端子，以免影响其他接线。为了便于维护和/或更换蓄电池，蓄电池架应设计留有足够的间隙。
- 4) 蓄电池类型的选择目标是在不影响性能和可靠性的情况下，将维护要求和受地震破坏的脆弱性降至最低，有助于提高直流电源系统的可靠性。
- 5) 选择不同安全序列的蓄电池时应考虑将影响单个序列蓄电池共模故障的风险尽量降低。

#### 2.7.7.4.3 蓄电池充电器

- 1) 工作蓄电池充电器和备用蓄电池充电器应能在最大预期负荷的情况下为与其相连的稳态负荷供电，另一方面可将蓄电池组在24h内从设计的最低带电状态重新充电至满充电状态的95%。推荐的充电时间在8h~12h之间。蓄电池总容量较大（见7.2.3的要求）和有利于限制蓄电池充电容量的情况下，不超过24h的更长充电时间都可接受。
- 2) 系统蓄电池充电器应具有降压输出特性，这一特性导致所有负荷在超过充电器额定值时由系统蓄电池组供电，保护蓄电池充电器不因过载而损坏。
- 3) 设计的系统蓄电池充电器应防止其因交流电源丧失后为充电器供电的交流电力由于电力反馈而变成系统蓄电池的负荷，有助于保护蓄电池。

#### 2.7.7.4.4 不间断电源（UPS）

- 1) UPS应由380V交流电源和带蓄电池的直流电源并联供电，在交流电源丧失时由直流电源提供冗余。它提供了两个电源间的无扰动切换。整流器应配备一个隔离二极管，以防止蓄电池对其放电。
- 2) 每个不间断电源应配置先通后断式静态开关，用于在逆变器故障时自动将负荷切换至备用交流电源上。每个直流序列应配备专用的调压变压器作为备用电源。应提供手动开关，用于在逆变器或静态开关维修时手动将负荷切换至备用电源上。以此将UPS或逆变器故障对安全级交流电源的影响减至最低，并允许正常运行期间对UPS、逆变器和静态开关进行维修。

#### 2.7.7.5 厂房布置

##### 2.7.7.5.1 蓄电池安装

电厂蓄电池的安装应符合最新版本的NB/T 20028.2-2010《核电厂用蓄电池第2部分：安

装设计和安装准则》的推荐方法。

#### 2.7.7.5.2 通风系统要求

建议将HVAC系统设计为将蓄电池间的平均环境温度保持在一定范围内，以使蓄电池内部平均温度保持在20℃和25℃之间。发生在交流电力丧失期间的预期最大温度变化不应超过在这一事件期间与蓄电池要求的性能相适应的值。

#### 2.7.7.5.3 相邻布置

与每个蓄电池组有关的充电器和主配电盘应安装在尽可能靠近蓄电池组的位置。应采取保护措施以保证断路器产生的火花不会在由蓄电池可能产生的气体放电的区域出现。

#### 2.7.7.5.4 试验负载连接

应采取措施防止在连接蓄电池与其试验负载时人员接触到带电部件，保证人员安全。

#### 2.7.7.6 仪表和控制

##### 2.7.7.6.1 热过载保护

应向装备直流电动机的阀门执行机构提供热过载保护。对于安全级执行机构，应采用合适的工艺和热过载装置提供最大程度的保护，从而避免对系统的安全功能造成不可接受的危害。当有必要用于防止电动机故障和产生报警以指示误操作时，装置通常应用于断开执行机构。

##### 2.7.7.6.2 指示和报警系统

每个蓄电池和蓄电池充电器的安装应包括下列仪表和报警系统：

- 1) 指示：
  - a. 指示直流母线电压的电压表；
  - b. 指示蓄电池（充电和放电）电流的电流表；
  - c. 指示工作充电器和备用充电器输出电流的电流表；
  - d. 指示蓄电池充电器输出电压的电压表。
- 2) 报警：
  - a. 蓄电池高、低电压报警；
  - b. 直流母线高、低电压报警；
  - c. 蓄电池充电器欠压；
  - d. 蓄电池放电报警；
  - e. 断路器断开报警（至少包括蓄电池和蓄电池充电器输入和输出断路器）；
  - f. 接地故障探测器报警。

#### 2.7.8 正常照明系统和应急照明系统

##### 2.7.8.1 系统定义

###### 2.7.8.1.1 范围

本节对华龙技术电厂的正常和应急照明系统提出了设计要求和性能要求。本节包括厂区内所有房间、空间和室外区域的照明系统。这些照明系统分为正常照明系统、安全照明系统和应急照明系统。



#### 2.7.8.1.2 功能

正常照明系统用于在电厂运行期间、维修期间和试验条件下为电厂提供照明。

安全照明系统用于在电厂正常运行以及失去所有交流电源时，为监测隔离区和其他重要区域提供必需的照明。

应急照明系统用于在正常照明系统失效时为整个电厂，特别是进行应急操作的区域（例如控制室、蓄电池室、安全壳等）提供设计可接受最低照度水平的照明。

#### 2.7.8.1.3 接口

向照明系统供电的系统包括：

- 1) 低压交流配电系统（2.7.6），通过配电盘提供正常或备用交流电源；
- 2) 直流和交流不间断电源系统（2.7.7），在完全失去交流电源的情况下为应急和安全照明系统提供不间断电源。

#### 2.7.8.2 通用要求

##### 2.7.8.2.1 照明准则

电厂设计者在设计时应根据《照明设计手册（第三版）》为电厂的每个区域提供照明。电厂设计应合理选择光源类型和安装位置。核电厂照明设计应基于以下要求：

- 1) 在电厂不同区域操作时的照明要求；
- 2) 避免由于眩光或亮度对比度过大造成人员不舒适；
- 3) 提高人员的注意力所需的特殊照明。

##### 2.7.8.2.2 照明类型

照明灯具应选择寿命长维修率低的灯，例如荧光灯、金属卤化物、高压钠灯和LED灯。一般在不经常使用的区域选择LED灯。在燃料操作区域不应使用汞灯。荧光灯通常在下列区域使用：

- 1) 电厂内的楼梯和楼梯间；
- 2) 电动机控制中心和开关柜，仪表柜周围；
- 3) 在高强度气体放电（HID）光源的启动时间（或在电力瞬时失去到重新启动）内提供局部照明，以作为HID光源的补充。

##### 2.7.8.2.3 材料

照明系统设计应使用标准材料。在不能使用标准材料时，应限制使用“特殊的”或“定制的”装置或材料。

##### 2.7.8.2.4 眩光

电厂设计者应根据照明系统的设计特性以及照明对象的性质进行照明设计，并尽量减小眩光给人带来的不适。

##### 2.7.8.2.5 部件损坏

选择照明系统的部件，照明灯具及材料的选择应最大可能的降低对人员的潜在影响或对设备的潜在危害。应特别对灯泡可能发生的破裂后果进行评估。

##### 2.7.8.2.6 照明配电箱容量

应为每个照明配电箱设置一个主断路器，并预留20%的裕度以满足后期可能增加的照明负荷。

2.7.8.2.7 照明配电箱检修

照明配电箱应安装在易于便于安装、维修、试验和操作的区域。

2.7.8.2.8 维修

同样，照明灯具装置的设计和安装位置应易于后期的维修和更换，并应考虑到维修和更换的安全问题。

2.7.8.2.9 改造

考虑到后期房间、空间或区域的改建，电厂设计者应采取措施允许移动和重新安装照明设备。

2.7.8.2.10 行业标准

电厂照明系统的设计应符合工业标准中对于照明装置、电缆、接地、贯穿件、导管和控制的要求。除了本部分规定的特殊要求以外，还要求系统设计和设备满足工业标准。

2.7.8.2.11 支撑件和锚件

需特别注意的是，应提高布置在狭窄区域或安全级设备处的支撑件、锚件、以及其他部件的抗震能力，以便在经受设计基准地震荷载时不会给人员和设备造成危害。

2.7.8.2.12 频闪效应

应采取措施减少灯具频闪所带来的影响。可以考虑在这些区域中使用高强度气体放电灯、LED灯、适合色温的光源以及高频电子镇流器。

2.7.8.2.13 高辐射区域照明

高辐射区域的照明装置，应对其进行特殊设计，包括在低辐射区安装照明装置、使用长寿命照明装置和采取易于接近灯具的措施，以减少在更换和维修期间对人员的辐射。照明技术上应采用先进的、长寿命的灯，如高强度气体放电灯或LED灯，并最大限度地利用光亮、反光的表面。应在每间房间安装灯的开关以便随时关灯，来延长灯泡的寿命并减少更换频率。控制室和辅助关闭室应使用调光器和调光镇流器。工作量较大、效率要求较高的区域应适当增加该区域的照度。

2.7.8.3 正常照明系统

2.7.8.3.1 视觉要求

正常照明系统的设计应满足电厂各区域的视觉要求，以使得工作人员能够在这些区域对目标对象、监视对象进行安全的操作和有效管理。表2.7.8.3-1给出了根据现行推荐值宜达到的典型照明范围，应根据所在区域的功能选择相应的照度。

表 2.7.8.3-1 正常照明的典型照度范围

正常室内区域	照度范围
辅助厂房、非控制区	75lx（局部 200lx）
控制区	

正常室内区域	照度范围
-计算机房	200~500lx
-实验室	200~500lx
-保健物理办公室	500~750lx
-医疗救护室	500~750lx
-热洗衣房	200~500lx
-贮藏室	100~200lx
-专设安全设施设备	200~500lx
-蓄电池室	200~500lx
柴油机房	200lx
燃料操作厂房	
-操作层	200~500lx
-操作层以下	150lx
放射性废物厂房	200~500lx
反应堆厂房	
-操作层	200~500lx
-操作层以下	75lx
控制室	
-主控制盘	300~500lx
-辅助控制盘	300~500lx
-操纵员的岗位	300~500lx
汽轮机厂房	
-操作层	200~500 lx
-操作层以下	100~200 lx
开关装置和电动机控制中心	200~500lx
HVAC 设备区	50~100 lx
正常室外区域	20~50lx

#### 2.7.8.3.2 连续照明

室内照明应有良好的均匀度。除办公区域和高辐射区域外，灯具的开闭应由单独的断路器控制。室外照明应由光控开关控制。在电厂正常工况下保证室内区域的连续照明。

#### 2.7.8.3.3 系统分类

正常照明系统是电厂常备厂用负荷的一部分。因此，正常照明系统应尽可能的由厂外电

源或厂内交流电源持续供电。

#### 2.7.8.3.4 交错布置

独立照明装置的供电回路应尽可能与其他供电回路错开，并由独立的电气序列供电，以确保这个房间的照明不会因线路故障而失去。

#### 2.7.8.3.5 地震

布置在正常工作区域或安全设备附近的照明设备，应能承受地震带来的影响，并且不应対人员及设备带来危害。

#### 2.7.8.4 安全照明系统

##### 2.7.8.4.1 电力供应

安全照明系统是2.8.5所述专用备用电源供电范围的一部分。在正常电源中断时，安全照明系统可以通过不间断电源供电，以保证或维持对电厂的照明。

##### 2.7.8.4.2 照度水平

安全照明系统的照度应满足安全级监测设备的监视要求，对保护区域而言，不应低于该场所一般照明照度标准值的10%，且至少应达到15lx。

#### 2.7.8.5 应急照明系统

##### 2.7.8.5.1 照度水平

在电厂应急操作可能需要读取打印或手写材料或看清刻度和长度的地方，应急照明系统应在所有工作站提供100lx的最低照明水平。这些区域典型的是控制室或就地控制站。在电厂的其他区域，应急照明的照度应至少达到20lx。

100lx的照度要求足以完成必要的任务，特别是那些需要阅读的任务。在电厂其他部分，提供较低水平的照明就足够了，不要求增加设备和电源容量。

##### 2.7.8.5.2 操作注意事项

应急照明由下列系统供电：

- 1) 主控制室：应急照明系统由安全级不间断交直流电源供电；
- 2) 主控制室外：应急照明系统由自备直流系统、蓄电池组供电。

应急照明系统应在所有紧急状态，包括全厂断电和失去所有交流电源工况下运行在那些需要恢复供电的区域（例如配电控制盘和应急发电机及其控制器），应使用应急照明系统提供足够的照明。

##### 2.7.8.5.3 疏散照明

疏散照明系统应满足下列要求：

- 蓄电池在额定功率下可持续工作 2小时；
- 伴随温度的变化，负荷总量不应超过额定值的 80%；
- 在正常照明恢复后，疏散照明应延迟关闭；
- 应采取措施闭锁向该装置供电并处于通电位置的进线电源断路器。

这些要求是根据自备电池照明装置的经验制定的。这些要求意在提供设计裕度和保证可靠性。将断路器闭锁的能力有助于保证装置在维修或试验期间不会因疏忽处于放电状态。

#### 2.7.8.5.4 主控制室

主控制室应同时布置有应急照明系统和正常照明系统,应急照明系统应由不同的序列供电。

应急照明电路宜采用交错排列,交错排列的电路由独立的安全序列供电,以保证在电路故障的事件中仍保持主控制室内的足够照明。

#### 2.7.8.5.5 地震因素

为主控制室和可能进行安全停堆操作的电厂其他区域的应急照明系统的设计,应满足应急照明在设计基准事件如在承受安全停堆地震(SSE)影响后,仍保持功能。

#### 2.7.8.5.6 安全规程

根据国家防火协会的全国电气规程及人身安全规程的适用部分,在厂区应安装疏散照明系统,以提供疏散照明保证人员安全。

#### 2.7.8.5.7 应对时间

用于向主控制室应急照明系统供电的蓄电池容量应能在设计基准事件(包括失去所有交流电源)发生后至少12小时内保持第2.7.8.5.1)中规定的照度水平。

### 2.7.9 电气保护系统

#### 2.7.9.1 系统定义

##### 2.7.9.1.1 范围

本节对电厂接地系统、过压保护系统、阴极保护系统和电伴热系统提出设计和性能要求。

##### 2.7.9.1.2 功能

电厂接地系统的设计应在正常或异常工况下对人员和设备提供保护。

该系统的主要功能要求如下:

- 1) 通过降低和减少电击伤害实现人身保护;
- 2) 通过降低瞬时过压实现设备保护;
- 3) 为接地故障电流、闪电放电和开关冲击电流提供低阻抗接地通路,有助于继电保护快速动作,清除接地故障;
- 4) 平抑电压波动,并为控制和仪表系统提供电压基准。

电厂接地系统包括:

- 1) 接地主网,提供与地的低电阻连接;
- 2) 电厂配电系统接地,将电气设备的中性点与地连接;
- 3) 设备和建(构)筑物接地,将建(构)筑物和设备外壳与地连接;
- 4) 仪表和控制系统接地。

过压保护系统应能保护电厂设备不受由闪电雷击和开关操作产生的瞬时过压的影响。过压保护系统包括避雷器、阻容过电压吸收器以及防雷装置。

阴极保护系统提供地下和水下金属表面的防腐。为了避免或降低维修或更换费用以及电厂停堆,阴极保护系统还用于防止可能与腐蚀喷射物、水和不同金属接触的地下埋管、水箱和其他金属设备的长期腐蚀。

电伴热系统应对电厂正常和瞬态运行所需的流体提供有效加热。电伴热系统是用于电厂流体系统包括管道、泵、滤网、阀门、水箱等,它由电加热电缆、温度控制器、电源、报警

和监测装置以及有关的硬件组成。

## 2.7.9.2 接地

### 2.7.9.2.1 接地网

- 1) 应提供由裸铜电缆组成的电厂接地网，该接地网将故障情况下人员的跨步电压和感应电动势限制在安全值。所有电气地下导管和设备应通过铜制连接件与建（构）筑物内接地系统连接。接地系统的设计和分析应遵循最新版本的GB/T 50065《交流电气装置的接地设计规范》推荐的方法。
- 2) 应在每个建（构）筑物中提供与电厂接地网连接的接地系统。至少应将建（构）筑物的所有接地钢筋与接地网直接连接。
- 3) 靠近地下阴极保护部件或结构的电厂接地网埋地材料可选用镀锡裸铜缆和不锈钢接地棒而非裸铜电缆和包铜接地棒。

### 2.7.9.2.2 系统接地

电厂配电系统的接地应按如下规定：

- 1) 主发电机的接地参照第2.13.4.2.1中规定的要求。当发电机断开时，应采取措施保证离相母线的正确接地。
- 2) 厂内中压交流配电系统应在厂用变压器和备用辅助变压器的低压侧做中性点经消弧线圈接地或不接地。
- 3) 厂内安全和非安全备用发电机的中性点应通过配电变压器和负载电阻接地，配电变压器和负载电阻应根据接地故障情况下连续运行要求进行定容。
- 4) 低压交流配电系统中性点直接接地，以提供有效的接地故障保护。
- 5) 直流系统不应接地。

### 2.7.9.2.3 设备接地

电厂设备的接地要求如下：

- 1) 应为每个设备的、金属结构或金属容器提供两个对角的接地连接。
- 2) 所有配电盘柜和控制箱应至少与电厂接地网一点连接。
- 3) 所有地下电气导管和人孔中的金属构件均应通过连接至裸铜电缆进行接地。

### 2.7.9.2.4 仪表接地

- 1) 电厂的仪表应通过由仪表接地母线和绝缘电缆组成的独立接地系统接地。仪表接地系统应在电厂接地网上一一点接地，并与所有其他接地电路隔离。
- 2) 应为电厂的模拟和数字仪表系统分别提供独立的仪表接地系统。

## 2.7.9.3 过电压保护

### 2.7.9.3.1 防雷保护系统设计与安装

应为电厂所有主要的建（构）筑物包括安全壳周围的建筑物提供防雷接地系统。该系统的设计和安装应符合GB 50057《建筑物防雷设计规范》。

### 2.7.9.3.2 避雷器

应在电厂电力系统与开关站和厂外输电系统的每一相线上装设避雷器。这些避雷器应装设在主升压变压器和辅助变压器的高压端侧。

### 2.7.9.3.3 浪涌保护

位于室外的或与室外电缆连接的电厂仪表和监测设备应装设抑压装置,以保护设备不因闪电电涌而损坏。

### 2.7.9.4 阴极保护

#### 2.7.9.4.1 厂址勘察

在早期建设阶段、厂址勘察时应确定阴极保护的需要。厂址勘察应包括对电厂建设前、电厂建设期间和电厂建成以后的土壤电阻率、化学数据(PH值、硫化物、硫酸盐、氯化物)、氢氧还原电位、湿度的分析及厂址历史数据的收集。调查结果应在现场完成。针对水下被保护部件或结构应开展电阻率或导电率、PH值、固体溶解率、硫酸盐及氯化物浓度分析。

#### 2.7.9.4.2 外加电流保护

如果需要大的保护电流,通常应使用由成套的高硅合金阳极和变压器-整流器组成的外加电流系统。

#### 2.7.9.4.3 电厂接地网

外加电流阴极保护装置应与电厂接地网连接。如埋地管道利用直流去耦原理与接地网直接连接,可显著提高阴极保护的有效性。设计者应综合考虑厂址条件内实施阴极保护有效性和采用直流去耦带来的监测维修要求增加之间的设计平衡。

#### 2.7.9.4.4 牺牲阳极法阴极保护系统

如被保护部件未与电厂接地网连接或位于外围地区,牺牲阳极法阴极保护系统可作为外加电流阴极保护系统和保护表面的补充采用。

#### 2.7.9.4.5 镀锌电极

在不宜接近的被保护表面的附近,应安装永久的表面镀锌电极,并通过测量电位来监测腐蚀情况。

#### 2.7.9.4.6 检测台

应在靠近被保护结构和常设参比电极测试导线引出端的保护区域安装检测台。

#### 2.7.9.4.7 参比电极

宜选用铜/硫酸铜参比电极测量埋地部件表面的阴极电位。其他种类的参比电极根据实际需要选用并做好记录。

#### 2.7.9.4.8 电缆连接

阴极保护电缆应直接焊接到保护部件上,禁止使用如接线板等其他机械附件。

#### 2.7.9.4.9 电位差异

阴极保护系统应充分考虑到埋地部件及被保护材料的变化带来的不同电位保护需求。不同电位输出保护电流受到多种因素影响,包括被保护材料、土壤特性、涂敷管道电阻率及邻近部件或构筑物。

#### 2.7.9.4.10 碳钢储罐底板

碳钢等类型的储罐底板应根据2.7.9.4.1节勘察情况确定是否需要实施相应的阴极保护防腐。

#### 2.7.9.4.11 其他要求

其他要求参见NB/T 20274 《核电厂埋地金属构筑物阴极保护设计规范》。

#### 2.7.9.5 电伴热系统

##### 2.7.9.5.1 功能：

- 1) 厂址位置决定的电厂运行流体管道系统的户外防冻保护；
- 2) 在运行温度高于环境温度的场合，与户外和/或室内工艺流体管道有关的非安全管道伴热功能；
- 3) 在系统运行要求提高温度的场合，与关键工艺流体管道（例如浓缩的硼化水）有关的关键管道伴热功能。

##### 2.7.9.5.2 标准

应按照最新版本的NB/T 20321《核电厂电伴热系统设计和安装》标准进行电伴热系统的设计和安装。

##### 2.7.9.5.3 要求

- 1) 专用于防冻保护和非安全管道伴热的电伴热系统，应根据实际需要，使用带单个电源、电伴热回路或冗余电源、电伴热回路进行供电和报警。这些系统可视为电厂永久性非安全负载的一部分并相应的进行供电。
- 2) 专用于关键管道伴热的电伴热系统，应配置冗余的电加热回路、温度控制器和报警，并由冗余的安全级电源供电。
- 3) 设置的电伴热回路故障（断路）识别装置无需拆卸管道的保温层即可定位故障。

#### 2.8 电厂支持系统

##### 2.8.1 消防相关系统

###### 2.8.1.1 核岛消防系统

###### 2.8.1.1.1 定义

核岛消防系统是通过纵深防御设计方法来确保与安全有关系统执行其安全停堆功能的能力，并保证在火灾时将放射性释放到环境中去的可能性及对人员的危险性降至最低，并减少由于火灾带来的财产损失。

###### 1) 范围

为保护核电厂免遭火灾危害、确保火灾事件中能实现和保持安全停堆状况所需要的各系统，防火系统要确保厂内人员的生命安全、保护财产和保持电力生产的连续性。

本系统包括火灾和烟雾探测系统、自动和手动灭火系统。

###### 2) 功能

防火系统具有如下功能：

- a. 通过防火区探测和定位火灾，并及时报警；
- b. 迅速扑灭火灾，把火灾对安全重要结构、系统、部件和发电的不利影响降至最



小；

- c. 为自动灭火系统提供手动备用灭火系统；
- d. 限制火灾蔓延；
- e. 确保实现安全停堆所必需的冗余设备序列之一不受到火灾的危害；
- f. 把火灾造成的放射性或有害化学物质对人员的照射及向环境排放的后果降至最小。

### 3) 接口

- a. 支持系统（不含供电和仪控）
  - 消防水生产系统
  - 电站污水系统
  - 核岛排气和疏水系统
  - 公用压缩空气分配系统
- b. 用户系统
  - 常规岛水消防系统
  - 核岛柴油发电机厂房灭火系统
  - 设备冷却水系统
  - 安全壳内部过滤系统
  - 主控室空调系统
  - 安全壳换气通风系统
  - 安全壳环廊通风系统
  - 安全厂房控制区通风系统
  - 核辅助厂房通风系统

## 2.8.1.1.2 性能要求

### 1) 概述

核电厂消防系统的设计、安装和试验应符合《核电厂防火设计规范》（GB 22158）的规定。消防系统的方针是通过纵深防御确保火灾不妨碍核电厂执行必需的安全停堆功能，而且不会大幅度增加放射性向环境释放的风险。

### 2) 灾危害性分析

- a. 应当对与安全相关的建（构）筑物、系统及设备开展火灾危害性分析工作。
- b. 设计单位负责对电厂核安全相关区域进行火灾危害性分析。对于非核安全相关区域进行的火灾危害性分析主要考虑不能对核安全区域造成影响。通过设计要求、可燃物分隔、变压器及电缆等一系列具体设备的防火设计等等，来验证这些区域的设计及布置可以降低火灾造成不可接受后果的风险。另外，火灾危害性分析还需要包括火灾探测、灭火设施的设计情况，如自动喷水灭火系统、消火栓、二氧化碳灭火系统、便携式灭火器等等。

非安全相关区域的火灾危害性分析不需要考虑SSE地震条件下设备的可运行性。

## 2.8.1.1.3 系统特征

### 1) 冗余安全分隔区保护

应对安装有冗余安全停堆设备的区域进行完全实体隔离，以确保电厂在假想火灾情况下有充分的安全停堆能力。

由于反应堆停堆操作可在远程停堆站上实现，因此对于主控室则没有这方面的要求。另外，安全壳内冗余安全停堆系统也没有这方面的要求，但是需要进行空间分隔、限制可燃物、

火灾探测及消防联动等措施来实现防火的要求。

#### 2) 部件更换

消防系统的设计和安装应满足由于预期的老化、早期故障或者报废引起的可能更换。

#### 3) 扩展的防火范围

- a. 安装了自动灭火系统的所有核电厂区域也应同时配备手动备用灭火装置。在不需要自动灭火系统的区域，应根据火灾危害性分析结果安装手动灭火装置。
- b. 火灾危害性分析为确定防火区内含有的可燃材料达到了必须安装固定灭火系统的标准，则应配备自动固定水灭火装置。
- c. 由火灾危害性分析确认的火灾危害没有达到必须配备固定灭火系统的区域，应配备火灾自动探测设备。
- d. 放有贵重设备和易燃的重要电力生产用材料的仓库，如电缆或对其他发电重要建筑物构成火灾威胁的那些设备，应配备自动洒水灭火设备。
- e. 对于每个建筑物内每个区域都应安装足够数量的消防栓以便能形成两路消防水流。水龙带的长度不应超过 30 米。每个消防栓都应配备单独的隔离阀。
- f. 对于汇集有可燃材料并且火灾危害性分析已确定有可能受到火灾危害的通风过滤器，应安装灭火系统。

### 2.8.1.1.4 关键设备特性

#### 1) 预作用喷水灭火系统

如果泄漏或意外操作的不良后果很严重，则应使用预作用喷水灭火系统。如果由于地震事件导致的泄漏或意外启动可能导致电厂运行设备上的水排放，则不得使用充满水的喷水灭火系统。预作用系统可降低因泄漏或误激活而导致设备意外受潮的风险。

#### 2) 消防泵

- a. 应设置两台或多台消防泵，以便在假设最大容量泵发生故障或失去厂外电源的情况下仍提供 100%的设计容量。电动消防泵的电源应符合电力系统相关章节的规定。柴油驱动消防泵应提供至少 100%的设计消防泵容量。
- b. 消防泵应自动启动，以保持消防总管压力。消防泵的关闭只能手动停止。
- c. 对于由水箱或类似专用水供应的消防泵，应提供带有流量指示的 100%流量再循环管线，以进行泵试验。

#### 3) 水源

- a. 消防用水应由来自专门的供水水源。应进行处理以减少生物污垢，并经过滤去除泥砂和碎屑。
- b. 由于辐射区采用水系统灭火有可能引起污染扩散，在辐射区使用水系统灭火应是最后的手段。
- c. 应分析安全停堆所需设备区域内的消防水源、供水设备及消防水管系统供应立管和软管连接，分析在 SSE 地震下保持功能有效，以确保在这种情况下系统的完整性。
- d. 设计应确保有足够的隔离阀，以便进行预期和预防性维护。
- e. 初期火灾消防水

对于火灾扩散速度较快的油类火灾，应设置初期火灾消防水，并应采取能够在1min之内释放初期消防水量的措施。

#### 4) 稳压泵

稳压泵的总水头应维持在消防泵的初始启动压力值以上至少7mH<sub>2</sub>O，首选使用管道补压泵。

#### 5) 二氧化碳

- a. 应尽量减少使用全淹没固定式二氧化碳灭火系统,只在确实需要并有明显好处的区域才使用。例如,有明显电气火灾危险的区域,使用其他药剂可能损坏设备,可使用二氧化碳进行保护。
- b. 二氧化碳灭火系统中使用的连接装置,应该可以通过使用空气而不是二氧化碳完成检查性实验,以证明集管和支嘴没有堵塞。
- c. 固定式二氧化碳灭火系统中使用的继电器应该是抗震的。

#### 6) 电缆托盘的防火

应对自动喷水灭火器的灵敏度进行测试,并证明其足以满足电缆槽组的防火要求。此外,喷水装置的设计应确保对预期电缆槽火灾具有适当的敏感性。或在主要不确定的区域,可能需要使用选定的洒水器进行全尺寸火灾试验,以确保电缆槽得到充分保护。

#### 7) 手提式灭火器

除非火灾危险性分析表明存在特定要求,否则手提式灭火器不应放置在高放射性区域;若确实需要,便携式灭火器的位置应确保其不受阻碍,且易于接近高放射性区域。在可能的情况下,软管站应位于高放射性区域之外;软管站的位置必须确保任何包含或可能对安全相关设备造成危害的位置都可以通过至少一个有效的软管流(最大长度30m)到达。

### 2.8.1.1.5 仪表和控制

系统中所有设备的控制均应能通过 DCS 完成。

电动阀门除主控室内远程手动启闭外,应设置就地按钮直接启闭,同时通知主控室内进行了相关操作。

### 2.8.1.1.6 维修

日常应进行以下检查,发现故障及时维修:

#### 1) 消火栓

- a. 所有设备组件的安装都不应缺少并且型号匹配;
- b. 所有的阀门应能够操作并工作正常;
- c. 消火栓不应有损坏、腐蚀或泄漏痕迹;
- d. 消火栓必须处在准工作状态,保证供水和足够的压力;
- e. 最不利点的消火栓的压力不能低于 4bar.g。

#### 2) 固定灭火系统

- a. 固定灭火系统入口处的水压应满足要求;
- b. 湿式自动喷水灭火系统入口阀门应处于开启状态;
- c. 手动干式闭式灭火系统入口阀门应处于关闭状态,且检漏管不应有水漏出,如出现应急时维修;
- d. 水喷雾灭火系统的喷头朝向保护对象。
- e. 碘吸附器灭火系统入口阀门应处于关闭状态,且检漏管不应有水漏出,如出现应急时维修。

#### 3) 其它

定期检查减压阀上的压力表指示值是否正常,设备完好。

## 2.8.2 供热、通风和空调系统(HVAC)

### 2.8.2.1 系统定义

#### 1) 范围

本节范围包括厂址内为每个建筑物提供适当的通风、供热和冷却所需的系统。这些系统还可对有毒或放射性物质进行收集、过滤和排放。

#### 2) 功能

- 使工作环境保持在运行和维修人员所需的舒适程度内。
- 确保设备和构筑物处于适当的环境中。
- 系统流道路径进行设计能确保气载放射性不会从潜在高剂量区流向潜在低剂量区。
- 系统分区设计符合防火分区要求。
- 系统屏障设计满足防飞射物和限制人员进出的保卫系统要求。
- 系统能保持建筑物或区域内适当的相对压力，以控制潜在放射性流出物的泄漏流向。
- 系统配备适当的通风系统过滤装置，去除和限制污染物的扩散。
- 系统在正常和事故条件下向环境的排放满足规定的要求。
- 系统在正常和预期运行事件情况下能达到设计的功能目标。
- 系统能防止烟、热气和灭火剂扩散到其他防火区而对安全停堆能力，包括对操纵员的行动构成威胁。

#### 3) 接口

以下为通风系统系统的主要接口：

- 仪表和控制系统；
- 冷冻水系统(安全相关和非安全相关的)；
- 辐射监测系统；
- 厂内应急交流电源；
- 非安全级电源；
- 火灾自动报警系统；
- 仪用和厂用空气系统；
- 核电厂信号系统；
- 放射性废物处理系统；
- 非放射性废物处理系统；
- 厂区安保系统（屏障）；
- 环境监测系统；
- 放射性设备排气装置；
- 气态放射性废物处理系统向核电厂受控排气装置的排放。

### 2.8.2.2 性能要求

#### a. 安全相关和非安全相关系统

- 通风系统应提供适宜的环境，确保在正常运行和假想设计基准事故条件下电厂人员的安全和舒适以及电厂设备可正常运行。

通风系统设计依据的室外和室内温度如下：

室外空气设计温度应根据如下规定确定：

- 核安全相关系统 / 部件的区域、建筑物和隔间，其通风系统建议按《核电厂工程气象技术规范》GB/T50674 中全年不保证 2h 的干球温度和对应的湿球温度的数值进行设计。
- 汽轮机厂房等非安全相关建筑的通风系统应以《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB50019-2015 规定的数值进行设计。

室内温度应根据建筑物 / 区域正常运行工况时的功能确定：

- 居留区：轻体力工作（办公室、实验室等）没有特殊电子设备：18℃～26℃；
- 居留区：中等体力工作（车间、维修设施）18℃～30℃；
- 非通行区（没有敏感电子设备）10℃～45℃；
- 不经常检查或维修活动的区域：温度随工作服和工作时间确定；
- 经常检查 / 维修区（没有敏感电子设备）10℃～38℃；
- 电子设备区温度：18℃～26℃；具体根据第 10 章电子设备的湿度要求确定；
- 特定区域 / 部件的温度详见相关段落。
- 对于可能含有放射性的区域（厂房），其通风系统应设计成：
  - 为减少不可控放射性物质向环境的排放，保持该区域相对于大气和邻近区域为负压；
  - 为减少受控放射性物质向环境的排放，对排出气体进行过滤；
  - 对每个潜在受污染的排放点应对排风设置连续监测，并在控制室内备有高放水平报警器；
  - 为保证不超过最大允许浓度(MPC)水平并符合 ALARA 原则，应有室内净化和室外供气设施；
  - 提供能确定并隔离放射性泄漏区域的排风措施。
- 通风系统应设计成空气不能直接从潜在的高气载放射性区域流向潜在低放射性区域。
- 防火屏障上用于通风系统的贯穿开口应使用同防火屏障具有同等耐火极限的防火阀进行防护。穿过保卫边界的通风管道贯穿件应装备适当的屏障。
- 通风系统应配备足够的仪表和控制装置以确保系统安全、有效和可靠地运行。
- 通风系统控制和显示应集中并满足人因要求。
- 为进行证明其性能参数在运行限值以内的部件和设备的初始试验和定期试验，应在恰当位置上安装适当规模的、具有足够数量的仪表和仪表接头。
  - 所有核级空气处理过滤系统应根据 NB/T20038,NB/T20039 进行设计、制造、安装和试验。
  - 应尽量减少设备如风机、过滤器、盘管、挡板等的类型和尺寸的多样性。
  - 由于实际冷/热负荷可能比计算负荷高，所以冷/热负荷容量应按下列裕度进行设计：
    - 总负荷的 10%；
    - 风机压差的 10%。
- 为了把通风设计中的不确定因素降至最小：
  - 通风系统性能应以设计模型和设计分析为基础；
  - 设计者应评估现有类似设备的运行问题。
- 为了对设备进行实验和维修，所有自动控制设备也应能够手动控制；
- 通风系统应配备足够数量的平衡阀以保证充分的流量平衡；
- 来自于洁净空气的凝结水应排到“清洁集水坑”；
- 采用气体灭火系统的防火区，其通风系统应随气体灭火系统起动而停运，以防防火区内灭火气体稀释；
- 设备设计应包括必要的降低噪音的措施，包括减震垫或减震支座，进出口软连接等；
- 通风空气吸入口应处于合适的位置，以避免吸入电厂排放的气体，诸如蒸汽发生器大气排放阀、安全阀、辅助锅炉燃气等排出的气体；
- 通风系统的电机、风机、风阀等部件应能在正常环境下运行；
  - 安全壳贯穿件隔离部件应设计为安全 2 级，抗震 1 类设备；

- 通风系统的布置应同防火边界相匹配；
- 为确保设备能承受安全停堆地震荷载而不影响其操作性，空气处理设备宜刚性安装或配备防止晃动的装置。长轴轴流风机应在电动机和风机之间有轴承并且在电动机和风机上都设有轴承；
  - 非抗震 I 类通风系统和设备应设计和防止其失效不会影响或损伤抗震 I 类设备。通风风管部件的支架应设计为满足安全隔离功能，例如隔离阀的动作，设计、建造和安装应符合 NB/T20038, NB/T20039 的规定；
- 活性炭过滤

核电厂设计者应进行分析确定运行中是否需要活性炭过滤器并对厂内满足 ALARA 原则情况进行评估。当通风系统所在区域需要使用活性炭过滤器，为降低正常运行期间包括预期运行事件时产生的放射性活度，安全级活性炭过滤器应设计具有如下特征：

- 活性炭过滤器和相关部件的设计应符合 NB/T20038, NB/T20039。
- 活性炭吸附器的上游安装初效过滤器和高效空气 (HEPA) 过滤器 (这也是其它含活性炭过滤器通风系统的普遍要求)。
- 对于安全级活性炭过滤器，对应的电加热器应由厂内应急交流电源供电。
- 活性炭过滤器的任何故障，不应阻碍其所在安全有关系统执行其安全有关的功能。

另外，为满足简化、标准化、经济性和易于检修目标，核电厂设计者应考虑如下要求：

- 炭阱尺寸应标准化使其具有单一尺寸或处于一定的尺寸范围内以降低成本和减少零配件，并能简化应急情况下的活性炭更换过程。
- 维修期间由于水分、有机物、灰尘或其它污染物可能污染活性炭，所以活性炭系统应设计得可被保护或隔离。
- 活性炭过滤器的消防措施应使用就地灭火系统，例如能被隔离并能够手动接入消防软管的系统。
- 为卸下被污染的活性炭，设计应提供接近活性炭床和临时停放活性炭更换装置的适当通道。

- 设备冗余

下列区域的通风系统应具有足够的冗余度，使得最大容量部件（风机、过滤器、盘管）由于维修或检修停运时，仍能保持设计条件（流量、温度、湿度、压力）：

- 所有布置有安全相关设备的区域
- 主控室
- 装备有对温度敏感的试验仪器的实验室，例如放射性化学、健康物理实验室和出入口监视区域
- 人员长期使用的区域

对于其他区域，由于最大容量部件（风机、过滤器、盘管）维修或检修停运导致的不可用，使设计温度和湿度临时不满足设计值，则应遵守以下原则：

- 通过降级的系统以暂时满足人员温度需求和使设备通风、冷却区域不超过供应商要求的设备可靠运行的温度范围。
- 气流组织方向应遵守 ALARA 原则。
- 辐射防护区应形成负压。

- 通风冗余列的控制应与电厂火灾探测和消防计划相匹配以防止烟气和热气串至冗余列；

通风系统的布置应与防火分区相匹配。

- 通常通风设备应安装在室内以防止气象灾害,对于空冷机组等依赖外界环境的设备为能有效运行则安装在室外。

用于盥洗室和蓄电池间排风的风机和风管室外安装部分应选择合理的设计,例如选择抗腐蚀的材料等。卫生间的室外排风管道应避免可能的泄露会进入其他区域。

- 通风系统的系统和设备安全分级参照IAEA的安全分级原则(SSG-30)进行分级。  
核电厂烟囱应能够混合、监测和排放电厂所有的废气。应该慎重地选择好电厂烟囱的地点,以便尽量减少排出废气再返回到电厂新鲜空气入口处的可能性。

b. 只适用于安全相关系统的要求

- 在假设发生单一能动故障和丧失厂外电源的情况下,通风系统应设计的可承受安全停堆地震并能完成其预期功能。
- 通风设备列之间应采用实体屏障完全隔离。
- 外部空气吸入口和排出孔应进行保护以免遭受龙卷风的影响。
- 接到安全触发信号或有关安全设备的联锁启动要求时,通风系统应自动启动运行。即使保护动作信号复位,投运设备的保护功能不应受到影响。
- 通风系统的电动机、风机、阀门和其他部件应设计成在正常和事故工况有关的环境下都能运行。
- 通风系统设有包括便于在主控制室内监测有关系统运行的配套设施。
- 所有通风装置/部件和支承/吊架的设计、建造和安装应符合NBT20038,NBT20039的规定。
- 通过自动触发的冗余阀门,通风系统应有能力把重要部件与非重要部件隔开。阀门应为安全级抗震I类设备。安全壳贯穿隔离部件应为安全2级、抗震I类设备。

### 2.8.2.3 通风系统的性能要求

本节对各厂房、区域通风系统的要求做出规定。

#### 1) 安全壳冷却通风系统

安全壳冷却通风系统用于保证电站运行及维修/换料停堆期间安全壳内环境在设计范围内。反应堆顶盖主螺栓拧紧期间,安全壳内空气温度应符合技术规范书要求。

- a. 系统冷风机组应合理布置,要有足够冗余度,即使一台冷风盘管机组停运,系统仍可满足需求。
- b. 冷却盘管应由非安全冷冻水系统供冷却水。
- c. 冷风机组应由主控室手动启动。
- d. 系统的运行情况应能在主控制室内利用风机出风温度来监测。房间温度应靠合理布置的温度敏感元件和指示器来监测。
- e. 在失去厂外电源期间需要投入运行冷风机,应由应急电源供电。

#### 2) 安全壳空气净化系统

安全壳空气净化系统应由非安全级电源供电。

- a. 安全壳空气净化系统应设计成能提供空气循环和就地过滤以减少气载放射性浓度。
- b. 系统至少应由高效过滤器(HEPA)、碘吸附器、排风机、风阀、风管以及相关的控制和测量仪表组成。
- c. 应合理布置过滤器装置的排风,防止送风和排风气流之间发生短路。
- d. 系统应由主控制室内通过手动开关启停。

#### 3) 控制棒驱动机构(CRDM)通风系统

CRDM 通风系统应由应急柴油机供电。

- a. 系统应能建立反应堆堆顶排风罩的空气流场,以保持 CRDM 温度在运行限值以内(由反应堆供方决定此运行温度限值),空气经吸收热量以后经过供以设备冷却水的冷却盘管冷却后进入安全壳内大气环境。
  - b. 系统应由运行风机和备用风机组成。
  - c. 系统应由主控制室内手动开关启停,通过状态指示和电机跳闸报警控制和监视。
- 4) 堆坑冷却通风系统

堆坑通风系统应由应急柴油机供电,在电站正常运行和丧失厂外电源期间运行。

- a. 系统应能保持下列温度限值:
    - a. 堆坑底部到 RPV 支承环区域的通风温度限值: 50°C
    - b. 堆坑主管道开孔处混凝土表面温度限值: 80°C
    - c. 系统应提供容量为 2×50%的二个系列,每个系列至少包括送风机、风阀和有关仪表。
    - d. 管网布置应保证有足够冷却空气流过整个堆腔空间。
    - e. 确定系统容量时,除了考虑设备和管道散热外,还应考虑来自中子和 γ 辐射的热负荷。
    - f. 系统运行应通过状态指示灯、高温报警和电机跳闸报警器主控室屏上手动控制并监视。
- 5) 安全壳换气通风系统

安全壳换气通风系统的安全壳隔离阀应设计为安全 2 级,抗震 I 类,位于安全壳内的通风管网根据需求设计为抗震 I/II 类。该系统由大流量和小流量两个子系统组成。

a. 大流量子系统

大流量子系统应能在冷停堆和换料期间工作人员进入安全壳前及进入期间提供 100%处理后新风,排风经过滤和监测后排入烟囱,由核辅助厂房通风系统提供送、排风。系统设计应确保当设备闸门或人员闸门打开时,气流流向是从反应堆厂房外流向反应堆厂房内。

- 此子系统应设计成能保持安全壳温度在 2.8.2.2 共用性能要求 给定的范围之内。
- 子系统管网的布置应保证安全壳内通风气流的合理分布。
- 子系统应由主控室手动控制
- 安全壳隔离阀应能在 LOCA 事故、主蒸汽/主给水管道破裂造成的高压和潮湿环境中以及安全壳整体泄漏试验情况下保持密封。
- 安全壳隔离信号出现时,送、排风应能隔离。
- 安全壳电动隔离阀由厂内应急交流级电源供电,阀门位置应在主控室有显示。

b. 小流量子系统

小流量子系统应按安全级系统设计,能在运行基准地震下保持运行,由厂内应急交流电源供电。该子系统用于控制反应堆厂房内的压力,降低厂房内惰性气体和氙水蒸气的放射性水平,满足 ALARA 原则要求。

- 根据情况,送风可由核辅助厂房通风系统或燃料厂房通风系统提供。
- 排风部分单独设置 2×100% 的碘排风列,每列由预过滤器、高效过滤器、电加热器、碘吸附器、排风机、防火阀组成。
- 系统应能在主控室手动控制。
- 安全壳隔离阀应能在 LOCA 事故、主蒸汽/主给水管道破裂造成的高压和潮湿环境中以及安全壳整体泄漏试验情况下保持密封。
- 安全壳隔离信号出现时,能隔离送、排风。
- 安全壳电动隔离阀由厂内应急交流级电源供电,阀门位置应在主控室有指示。

6) 安全壳环廊通风系统



- a. 安全壳环廊通风系统适用于一、二次安全壳之间环形空间的通风。安全壳环廊通风系统设计通过维持环形空间的负压，保证来自内层安全壳内部的空气在排放前经过过滤，避免被污染的空气直接流向环境。
- b. 安全壳环廊通风系统由  $2 \times 100\%$  碘过滤列和  $1 \times 100\%$  正常运行列组成。碘过滤列由初效过滤器、高效过滤器、碘过滤器、电加热器、风机、防火阀等组成。正常运行列由初效过滤器、高效过滤器、风机、防火阀等组成。
- c. 安全壳隔离信号出现时正常运行列停运，碘排风列启动。

#### 7) 主控室

- b. 主控室空调系统在所有运行模式下，包括主控室在设定的持续应急响应期间昼夜有人值班的设计基准事故下，主控室空调系统应使主控室的温度处于  $18 \sim 24^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度  $30\% \sim 75\%$ 。第 10 章 4.9 给出了主控室包括后援办公室的定义。
  - a. 在任何假想设计基准事故期间，控制室人员所受的辐射照射应不超过限值要求。
  - b. 一旦探测到烟尘进入控制室或控制室人员受到高剂量气载放射性的意外照射时，主控室空调系统应能够从正常运行模式自动转换到应急或隔离模式。
  - c. 正常运行期间，主控室空调系统应使控制室相对于周围区域一直保持轻微正压以防止外部高压区的灰尘、烟雾和气载放射性物质进入控制室。放射性事故期间，控制室应急区的压力相对于周围区域至少应大于  $30\text{Pa}$ 。
  - d. 主控室空调系统应具有足够的冗余度并应与安全相关电气系统的设计相兼容。由于空间有限，一般要为主控制室设计共用分配风管。
  - e. 每序列设备至少应由空气处理装置(AHU)、排烟风机、应急过滤装置(EFU)、有关电源和控制装置组成。
  - f. 每序列空气处理装置应由前置过滤器、高中效空气过滤器、加热盘管、冷却盘管和送风机组成。冷却盘管应由安全冷冻水系统供水。
  - g. 每套 EFU 装置至少应由前置过滤器、高效空气(HEPA)过滤器和碘过滤器和风机组成。
  - h. 外部空气吸入口应安装多重探测器（放射性以及烟气）以便一接到高辐射探测信号就关闭主控室正常新风隔离阀。隔离阀应具有密封结构并带有故障 / 关闭控制器。气载放射性水平过高时，应通过 EFU 装置供应补充的新风。探测到部烟气时，控制室空调系统应按循环方式运行而不补充新风。一旦出现气载污染物浓度过高信号并/或触发安全信号，EFU 装置应自动启动。
  - i. 主控室空调系统的各设备列之间应通过实体屏障进行隔离，使得任何一列设备的故障不会危害到其他设备列。所有非安全相关设备的设计不应产生任何飞射物并应符合抗震 II/I 类准则。
  - j. 火灾后主控室空调系统应能够遵过手动触发方式排出控制室烟气。
  - k. 盥洗室/厨房排气、加湿、供热分系统应为非安全相关系统。安全厂房/控制厂房（电气厂房）非控制区周边的排风管线应安装冗余隔离阀，此阀门应按抗震 1 类要求进行建造。
  - l. 贯穿主控室重要边界的风管开孔应按防飞射物要求设计。

#### 8) 控制机柜间

为冷却设备，每列控制机柜间应配置  $2 \times 100\%$  容量的冗余空调冷却机组，此空调冷却机组应至少有一列设计成安全相关的、抗震装置，它由安全冷冻水系统冷却。风机由厂内应急交流电源供电。应根据电子设备制造商的建议调整该温度限值。

#### 9) 电气设备间

电气设备间室通风系统用以保持环境温度为  $15 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 。具体应根据电气设备制造商的建

议调整该温度限值。

- a. 通风系统应由满足安全相关电气系统要求的多个序列组成。
- b. 通风系统的冷却盘管应由安全冷冻水系统供水。
- c. 风机应由厂内应急交流电源系统供电。
- d. 应从主控室控制通风系统。

#### 10) 蓄电池间

蓄电池间的通风系统应使房间内的环境温度保持在 18~28℃。具体应根据蓄电池设备制造商的建议调整该温度限值。

蓄电池间应采用独立的排风系统，此系统应设计成防爆风机。

#### 11) 安全相关的制冷机房

安全相关制冷机房安装通风系统以保证设备工作的环境温度。

- a. 冷却盘管应由安全冷冻水系统供水。
- b. 风机应由厂内应急交流电源供电。
- c. 通风系统应能控制制冷剂泄漏带来的风险
- d. 建议制冷剂安全阀通过管道连接至外界环境。

#### 12) 远程停堆站

- a. 远程停堆站通风系统应用于维持远程停堆站环境件保持在 2.8.2.2 共用性能要求给定设计范围内。
- b. 远程停堆站的通风系统应设计成与主控室系统完全独立并在主控室丧失功能时，为必需的安全相关系统和执行核电厂安全停堆功能的人员提供适宜的环境条件。
- c. 当主控室丧失功能时，主控室对安全相关通风系统的控制应能够转换为由远程停堆站对其进行控制。只有用于安全停堆的那些系统需要作这种转换。

#### 13) 蒸汽管廊道

蒸汽管廊道的通风应根据廊道的结构以及对廊道的温度要求进行分析制定通风方案。

#### 14) 安全厂房/控制厂房控制区

- a. 安全厂房/控制厂房控制区通风由正常通风系统和应急通风系统组成。
- b. 安全厂房/控制厂房控制区的应急通风系统应设计为由安全级电源供电。
- c. 安全厂房/控制厂房控制区的正常通风系统的设计应使隔间温度保持在 2.8.2.2 共用性能要求所规定的范围内。
- d. 安全厂房/控制厂房控制区应由安全冷冻水或其他安全级闭式冷却系统提供冷源的风机盘管机组进行冷却。
- e. 风机盘管装置应通过专设安全设施触发信号、泵启动或高温开关自动启动。为进行试验和维修，此空调装置也应具备手动启停功能。
- f. 每个风机盘管机组应允许从主控室对其进行远距离控制。

#### 15) 核辅助厂房通风

核辅助厂房通风由送风系统、排风系统和碘排风系统组成。

- a. 系统由非安全级电源供电。
- b. 系统功能
  - 将厂房温度保持在2.8.2.2共用性能要求 所规定的范围内。
  - 保持厂房内压力略低于大气压。
  - 气流流向从潜在低污染区流向潜在高污染区。
  - 电厂正常运行期间，为厂房内的设备提供通风空调服务。提供经过滤的室外空气，使房间内的最大允许浓度水平（MPC）满足ALARA 准则要求。

- c. 送风子系统应由过滤器组、加热盘管、非安全冷冻水系统供水的冷却盘管以及送风机组成。送风子系统的风机应与排风机连锁,即当排风机运行时,送风机运行;当排风机停运时,送风机停运。
- d. 排风子系统由预过滤器、高效过滤器、排风机和自动风量调节阀组成。
- e. 碘排风子系统由碘过滤器、电加热器、风机、防火阀组成。
- f. 系统应由主控室控制,并配备风机轴承温度显示以及风机运行状态指示。
- g. 排风管道上一旦接收到高辐照信号时,该列排风切换为碘过滤器排风。
- h. 如果核辅助厂房布置有专设安全设施设备,应设置应急通风系统。

#### 16) 燃料厂房

燃料厂房通风系统分为正常送排风系统和事故排风系统。

##### a. 正常送排风系统

- 将室温保持在 2.8.2.2 共用性能要求 给定的范围之内。
- 保持厂房内压力相对于大气压力为微负压。
- 排风有足够的过滤能力,以减少放射性向环境释放。
- 在所有正常预期运行模式下,能保持燃料厂房大厅区域内湿球温度低于 35℃。

只要厂房中存有燃料,系统应保持持续运行。

- 风管布置应能控制气流从较低潜在污染区流向较高潜在污染区,控制水池周围的环境条件,排出来自水池的水汽,为换料桥架提供冷却。
- 送排风可由核辅助厂房通风系统提供,也可单独设置送排风系统。
- 送风与排风连锁设计,即当排风机手动启动时,其对应的送风机应自动启动。

##### b. 事故排风系统

- 事故排风系统应按安全级、抗震I类系统设计,在厂外电源丧失时由厂内应急交流电源供电。
- 系统设2×100%容量的系列,每列由初效过滤器、高效过滤器(HEPA)、碘吸附器、电加热器、排风机等组成。
- 系统设备尽量考虑与其它功能相似的系统设备共用,以简化设计,提升经济性。
- 当排风管道中监测到高放射性时,正常送排风系统停运,事故排风系统自动启动。
- 事故排风系统应由主控室来控制。

#### 17) 烟控系统

烟控系统是用于排烟和烟气控制的通风系统。该系统仅用于火灾情况下,电厂正常运行过程中不运行。

烟控系统确保受保护通道为正压。通过送入外部空气使这些区域为正压,保证相邻房间内发生火灾时,烟气不蔓延至此。

应为非控制区高火灾载荷区域(如电气机柜间、开关柜间、仪控机柜间)以及主控室设置机械排烟系统。排烟系统将着火区域的烟气排出,也可用于火灾后清洁室内空气。

采用不同区域交叉供电形式,由其它防火分区电源进行供电;

#### 18) 放射性废物处理厂房

#### 19) 进出厂房

#### 20) 柴油发电机房

#### 21) 重要厂用水泵房

#### 22) 汽轮机厂房

#### 23) 放射性机加工车间

#### 24) 水处理厂房

#### 25) 辅助锅炉房

- 26) 仓库
- 27) 非放射性车间
- 28) 行政和公用设施
- 29) 应急指挥中心
- 30) 警卫楼、中心报警站
- 31) 开关站
- 32) 培训中心 / 模拟机

### 2.8.3 冷冻水相关系统

#### 2.8.3.1 行冷冻水系统

##### 2.8.3.1.1 定义

###### 1) 范围

运行冷冻水系统为核岛厂房非安全相关暖通空调系统及需要的工艺冷却器冷却负荷提供冷冻水，执行非安全有关的功能。

系统是闭式回路系统，为需要的暖通空调系统及工艺冷却器提供冷冻水进行冷却。

系统由制冷单元、泵、膨胀定压设备、以及相应的管道和控制器组成。冷冻水系统的冷却水取自设备冷却水系统。

###### 2) 功能

运行冷冻水系统应能提供和分配足够数量的冷冻水，通过专用的管道系统，分配到电厂特定区域的冷却器单元。核岛厂房冷冻水系统应划分为安全冷冻水系统和非安全冷冻水系统（即运行冷冻水系统）。由运行冷冻水系统排除所有非安全相关的暖通空调系统及部分工艺系统正常运行时传递的热量。

###### 3) 接口

运行冷冻水系统与下列电厂系统接口：

- a. 系统提供冷冻水至非安全相关暖通空调系统（第 2.8.2 节 暖通空调系统）；
- b. 设备冷却水系统（第 2.5.3 节 设备冷却水系统）；
- c. 系统由除盐水生产系统（第 2.12.8 节 除盐水生产系统）提供补给水。

##### 2.8.3.1.2 性能要求

###### 1) 暖通空调负荷

运行冷冻水系统应按第 2.8.2 节规定向非安全相关暖通空调负荷提供冷冻水。

###### 2) 非暖通空调负荷

系统应为合适的或由电厂设计人员确定的非暖通空调负荷的冷却提供冷冻水。

###### 3) 温度要求

冷冻机的性能应基于以下因素：由电厂设计人员确定的设备冷却水温度（第 2.5.3 节 设备冷却水系统）、反应堆满功率运行、停堆运行以及事故后工况要求的冷负荷和大气温度。

###### 4) 冷冻水温度要求

系统应提供足够数量的冷冻水至相应的暖通空调系统冷冻水盘管，供水温度 7℃，水温 12℃，供回水温差为 5℃。

###### 5) 容量要求

系统应有足够的容量以满足所服务系统在所有运行模式下的冷冻水流量要求。

运行冷冻水系统负荷和流量的合理配置和时机（影响稳态和峰值所要求的能力）应由电厂设计者根据华龙技术电厂暖通空调系统（第 2.8.2 节 暖通相关系统）设计来确定。

#### 6) 运行工况分析

电厂设计者应提供所有可能的运行工况下的分析,在确定所要求的容量中,这些分析正确考虑不确定性和可能的误差原因。

### 2.8.3.1.3 系统特征

- 1) 核岛厂房的冷冻水系统应细分为两个系统组:一个用于安全相关负荷(安全冷冻水系统);另一个用于非安全相关负荷(运行冷冻水系统)。安全相关和非安全相关负荷隔离会简化设计。
- 2) 运行冷冻水系统为集中式系统,为不同的暖通空调系统和工艺负荷服务。如果厂房布置不允许冷冻水系统为所有厂房设计为一个集中式系统,每个厂房可单独设一个集中式冷冻水系统。系统应包含一个膨胀定压设备、至少二个制冷单元、二个冷冻水泵、控制、测量仪表和调节流量所需的有关设备。在至少有一个制冷单元和一个冷冻水泵停运的情况,系统仍能承担预期的峰值负荷。
- 3) 运行冷冻水系统的主要设备可设置冗余,保证系统的多样性和可靠性。设计人员应考虑满足华龙技术电厂可利用率的目标所需要的冗余度、通用标准设备的大小和系统的预期运行,来确定制冷单元和冷冻水泵的数量。
- 4) 应考虑设备冷却水系统和暖通空调系统负荷的位置,来确定运行冷冻水系统主要设备的位置和布置。不过,还应着重考虑集中布置,以便于维修。
- 5) 常规补水应由除盐水提供。
- 6) 贯穿安全壳的冷冻水进出口管道应合理设置隔离阀。
- 7) 安全壳区域设计基准如下:
  - a. 供给安全壳通风系统的冷冻水不是必需为安全级,可以由安全冷冻水系统或运行冷冻水系统任何一个供给;
  - b. 给安全壳通风系统供应冷冻水所需要的冷冻水泵和制冷单元,需接应急柴油机供电;
  - c. 在抗震 I 级的厂房范围内,冷冻水管道和设备部件应按照抗震 II 级设计。这是为在发生地震情况下,避免对安全相关设备的损坏。

### 2.8.3.1.4 关键设备特性

- 1) 制冷压缩机应采用效率更高且有利于装置寿命的转动装置。
- 2) 制冷单元的设计应考虑:
  - a. 冷凝器进水口设计温度应涵盖所有可能的极端工况,尤其需注重进水口极端的低温情况。
  - b. 需设置制冷剂泄漏监测系统和制冷剂泄放管路系统。
  - c. 若冷凝器冷却水系统未采用闭式系统,则需设再循环流量控制器。
  - d. 关键系统应设隔离阀(例如,冷凝器流量控制阀,蒸发器/冷凝器进出口隔离阀等),在维修情况下仍能实现隔离效果。
- 3) 不应使用插板阀或蝶阀进行流量控制。
- 4) 供应商手册应包含所有关键图纸,包括所有制造商设计图纸和材料规格表。供应商手册还应包括详细的拆卸和检修说明、故障排除和故障代码。
- 5) 确保制冷单元拆卸和更换所需的通道,包括用于吊装和安装重型制冷单元部件的单轨。

### 2.8.3.1.5 仪表和控制

- 1) 冷冻水系统应与相关的暖通空调系统一起运行以满足该系统的冷却要求。每

一个设备部件应有通过就地仪表盘启动的能力。

- 2) 每一制冷机组应安装内部保护装置,防止结冰、制冷剂高压、制冷剂低压、高排放温度、马达超负荷、润滑油失效和马达高温;
- 3) 如果通过正在运行的制冷机组的冷冻水流量因任何原因而丧失,则制冷机组和冷冻水泵应通过冷冻水回路中的流量联锁装置而自动关闭,在就地控制屏上也应报警;
- 4) 如果在任何运行的制冷机组入口处不论任何原因丧失电厂设备冷却水水压,则制冷机组应延迟一段时间后经连锁装置而自动关闭;
- 5) 每个制冷机组应与其相关的泵连锁,只有当水泵运行情况下,才允许制冷机组运行;
- 6) 每个泵/制冷机组的组合(即一个回路)应对于其他组合是独立的;
- 7) 通过制冷机组的冷冻水流量丧失应在主控制台上报警;
- 8) 每个冷冻机应提供必要的控制装置,以便保持出口设计水温;
- 9) 应提供历史数据和事件序列数据存储设备和软件,可查看故障代码及其含义。

#### 2.8.3.1.6 维修

在机组正常运行期间,可对运行冷冻水系统的主要设备进行预防性维修。

#### 2.8.3.2 安全冷冻水系统

##### 2.8.3.2.1 定义

###### 1) 范围

安全冷冻水系统为核岛厂房安全相关暖通空调系统及需要的工艺冷却器冷却负荷提供冷冻水,执行安全有关的功能。

系统是闭式回路系统,为需要的暖通空调系统及工艺冷却器提供冷冻水进行冷却。

系统由制冷单元、泵、膨胀定压设备、以及相应的管道和控制器组成。对于安全相关部分,要求隔离成序列。冷冻水系统的冷却水取自设备冷却水系统。

###### 2) 功能

安全冷冻水系统应能提供和分配足够数量的冷冻水,通过专用的管道系统,分配到电厂特定区域的冷却器单元。核岛厂房冷冻水系统应划分为安全冷冻水系统和非安全冷冻水系统(即运行冷冻水系统)。由安全冷冻水系统排除安全相关暖通空调系统冷冻水盘管传递的热量,以及为安注泵电机提供冷却。

###### 3) 接口

安全冷冻水系统与下列电厂系统接口:

- a. 系统提供冷冻水至安全相关暖通空调系统(第2.8.2节 暖通空调系统);
- b. 设备冷却水系统(第2.5.3节 设备冷却水系统);
- c. 系统为丧失最终热阱时A列安全注入系统提供冷冻水,冷却A列安注泵;
- d. 系统由除盐水生产系统(第2.12.8节 除盐水生产系统)提供补给水。

##### 2.8.3.2.2 性能要求

###### 1) 暖通空调负荷

安全冷冻水系统应按第2.8.2节规定向安全相关暖通空调负荷提供冷冻水。

###### 2) 非暖通空调负荷

系统应为合适的或由电厂设计人员确定的非暖通空调负荷的冷却提供冷冻水。

### 3) 温度要求

冷冻机的性能应基于以下因素：由电厂设计人员确定的设备冷却水温度（第2.5.3节 设备冷却水系统）、反应堆满功率运行、停堆运行以及事故后工况要求的冷负荷和大气温度。

### 4) 冷冻水温度要求

系统应提供足够数量的冷冻水至相应的暖通空调系统冷冻水盘管，供水温度7℃，水温度12℃，供回水温差为5℃。

### 5) 容量要求

系统应有足够的容量以满足所服务系统在所有运行模式下的冷冻水流量要求。

安全冷冻水系统负荷和流量的合理配置和时机（影响稳态和峰值所要求的能力）应由电厂设计者根据华龙技术电厂暖通空调系统（第2.8.2节 暖通相关系统）设计来确定。

### 6) 运行工况分析

电厂设计者应提供所有可能的运行工况下的分析，在确定所要求的容量中，这些分析正确考虑不确定性和可能的误差原因。分析应包括以下内容：

- a. 在换料期间，在环绕堆压力容器顶盖的区域内以及在燃料厂房内侧区域，安全壳空间冷负荷随时间的变化；
- b. 在正常的电厂运行工况下，在安全壳内侧或堆腔内的冷却负荷，包括主要设备支撑的冷却；
- c. 在设计基准事件后同时发生的安全相关的冷却负荷，这其中可包括关于控制室区域、辅助厂房电气设备区，以及安全暖通空调、冷冻水系统和专设安全设施的设

备区的要求。

## 2.8.3.2.3 系统特征

- 1) 核岛厂房的冷冻水系统应细分为两个系统组：一个用于安全相关负荷（安全冷冻水系统）；另一个用于非安全相关负荷（运行冷冻水系统）。安全相关和非安全相关负荷隔离会简化设计。
- 2) 安全冷冻水系统的设计和设备应按照相关国家标准的适用部分来进行。
- 3) 系统的安全有关的部分应有防飞射物、火灾、爆炸和淹没等防灾害的保护措施。
- 4) 安全冷冻水系统组应由两个或三个（数目与所支持的专设安全系统一致）大致相同的序列组成，每一序列为该序列的安全负荷提供冷冻水。
- 5) 安全相关序列应由独立的管道系统构成，每一序列包括制冷单元、泵、膨胀定压设备、控制和测量仪表，以及调节流量所需的相关设备。
- 6) 每一个安全序列应完全独立，在机械和电气上隔离。每个序列列的电气设备应由独立的电气柜来供电。在第2.4节安全系统中提供了对机械隔离的要求。
- 7) 应考虑设备冷却水系统和暖通空调系统负荷的位置，来确定安全冷冻水系统序列的位置和布置。不过，还应着重考虑集中布置，以便于维修。
- 8) 常规补水应由除盐水提供。安全冷冻水系统可采用安全级补水（如有）。
- 9) 贯穿安全壳的冷冻水进出口管道应合理设置隔离阀。

## 2.8.3.2.4 关键设备特性

- 1) 安全壳区域设计基准如下：
  - a. 供给安全壳通风系统的冷冻水不是必需为安全级，可以由安全冷冻水系统或非安全冷冻水系统任何一个供给；
  - b. 给安全壳通风系统供应冷冻水所需要的冷冻水泵和制冷单元，需接应急柴油机供电；

- c. 在抗震 I 级的厂房范围内, 冷冻水管道和设备部件应按照抗震 II 级设计。这是为在发生地震情况下, 避免对安全相关设备的损坏。
  - 2) 制冷压缩机应采用效率更高且有利于装置寿命的转动装置。
  - 3) 制冷单元的设计应考虑:
    - a. 冷凝器进水口设计温度应涵盖所有可能的极端工况, 尤其需注重进水口极端的低温情况。
    - b. 需设置制冷剂泄漏监测系统和制冷剂泄放管路系统。
    - c. 若冷凝器冷却水系统未采用闭式系统, 则需设再循环流量控制器。
    - d. 关键系统应设隔离阀(例如, 冷凝器流量控制阀, 蒸发器/冷凝器进出口隔离阀等), 在维修情况下仍能实现隔离效果。
      - 4) 不应使用插板阀或蝶阀进行流量控制。
      - 5) 供应商手册应包含所有关键图纸, 包括所有制造商设计图纸和材料规格表。供应商手册还应包括详细的拆卸和检修说明、故障排除和故障代码。
      - 6) 确保制冷单元拆卸和更换所需的通道, 包括用于吊装和安装重型制冷单元部件的单轨。

#### 2.8.3.2.5 仪表和控制

- 1) 安全冷冻水系统应与相关的暖通空调系统一起运行以满足该系统的冷却要求。每一个设备部件应有通过就地仪表盘启动的能力。安全冷冻水系统应能自动启动, 以满足第2.8.2节 暖通空调系统的要求;
- 2) 每一制冷机组应安装内部保护装置, 防止结冰、制冷剂高压、制冷剂低压、高排放温度、马达超负荷、润滑油失效和马达高温;
- 3) 如果通过正在运行的制冷机组的冷冻水流量因任何原因而丧失, 则制冷机组和冷冻水泵应通过冷冻水回路中的流量联锁装置而自动关闭, 在就地控制屏上也应报警;
- 4) 如果在任何运行的制冷机组入口处不论任何原因丧失电厂设备冷却水水压, 则制冷机组应延迟一段时间后经连锁装置而自动关闭;
- 5) 每个制冷机组应与其相关的泵连锁, 只有当水泵运行情况下, 才允许制冷机组运行;
- 6) 每个泵/制冷机组的组合(即一个回路)应对于其他组合是独立的;
- 7) 通过制冷机组的冷冻水流量丧失应在主控制台上报警;
- 8) 每个冷冻机应提供必要的控制装置, 以便保持出口设计水温;
- 9) 主控室的冷冻水系统每个部分应可以在主控制室内的暖通空调系统屏上手动启动。
- 10) 应提供历史数据和事件序列数据存储设备和软件, 可查看故障代码及其含义。

#### 2.8.3.2.6 维修

在机组正常运行期间, 可对安全冷冻水系统的主要设备进行预防性维修。

### 2.8.4 环境监测系统(EMS)

#### 2.8.4.1 系统定义

##### 1) 范围

根据本节和第1章总的要求, 提出华龙一号核电厂EMS的设计要求。



EMS是为控制电厂排放提供必要数据和评价核电厂流出物对环境的影响所需的系统。EMS包括的系统有核电厂气象系统、水质监测、固体废物处理系统、用于监测事故前、事故期间和事故后核电厂排出物影响的厂区和厂区外的放射性取样站。其中气体和液体流出物的排放限制满足GB6249-2011中相关要求。

## 2) 功能

环境监测系统（EMS）具有如下功能：

- a. 在核电厂建造和运行前收集必要的的数据，以便在申请执照过程中提供必要的原始资料；
- b. 在正常和应急情况下，收集进行放射性流出物弥散分析所必需的气象数据，以确定核电厂对周围环境的影响；
- c. 收集必要的放射性和非放射性数据，以评价正常运行期间所有液体和气体排放对环境的影响；
- d. 如果超过规定的放射性限制，自动隔离液体和气体的排放通道。

## 3) 接口

- a. 辐射监测系统（2.10：人-机接口系统）
- b. 实验室设施（2.9.9）
- c. 核电厂通信系统（2.10：人-机接口系统）
- d. 核电厂计算机数据库系统（2.10：人-机接口系统）
- e. 核电厂公用水系统（2.8：核电厂冷却水系统）
- f. 化学添加系统（2.2）
- g. 供热、通风和空调系统（HVAC）（2.9.8）
- h. 废气处理系统（2.12：放射性废物处理系统）
- i. 放射性废物处理系统（2.12：放射性废物处理系统）
- j. 应急响应系统（2.10：人-机接口系统）
- k. 核电厂冷却水系统（2.8）

### 2.8.4.2 性能要求

#### 1) 气象数据

核电厂审批许可需满足下列要求：

- a. 为获得数据评价大气的稳定性，应设置监测风速、风向和垂直温度梯度的气象仪表。
- b. 在厂内和厂外规定的地方，设置固定的气象传感器、仪表和记录仪，监测风速风向，且其联合年获取率不小于90%，完成大气稳定性参数的计算。
- c. 气象数据采集和记录的时间间隔按标准QX/T 369-2016的要求进行设计。
- d. 应制定连续24个月有价值的气象数据收集的条款，另见2.8.5.5中的1) 总体设计。
- e. 执照申请要求，最少提供12个月连续的有代表性的气象数据；如果可能，建议提供24个月的气象数据。
- f. 所有运行工况下，气象监测设备应有能力对远距离场所，如控制室、应急响应设施（当被启动时）等提供连续的实时数据。

#### 2) 水质数据

根据GB3838、GB/T14848和GB3097的要求，核电厂EMS应配备必要的传感器和设备，需完成EMS众多参数的监测和评价。

### 2.8.4.3 系统特征

#### 1) 主气象塔

- a. 为了获得稳定的温度梯度和评价地面和排气口排出物的迁移和扩散,在主气象塔的 10 米标高处和主通风口排放点的相近高度处设置温度传感器和风速风向测量仪表。
- b. 10 米标高处设置设备用于测量垂直风速变化的标准偏差以评估大气的稳定性,代替或作为垂直温度梯度的补充,垂直和水平风向的标准偏差作为大气稳定性的指示器。对于设置了冷却塔的核电厂,冷却塔运行时需要给出可见度、露点温度和太阳辐射的测量值。
- c. 为了计算近似于环境条件下烟羽抬升高度对厂外剂量的影响,如果排气口高度超过 60 米,需在主气象塔中设置第 3 套传感器。
- d. 气象系统的设计应考虑便于日常校正和预防性维修的可达性。

#### 2) 辅助气象塔

当厂址附件地形非常不平坦或者厂址周围存在比较长的海岸线,对当地大气弥散有很大影响的特殊情况下,为了正确监测厂址的气象条件,根据厂址地形、当地气象条件和建筑物的位置可配置多个辅助气象塔。

#### 3) 气象塔的位置

建议气象塔所处的位置能提供有代表性的有关厂址大气迁移和扩散特性的测量结果。对测量数据有潜在空气动力影响的主要障碍物,如建筑、树或其它大型构筑物离气象塔的距离不应小于10倍障碍物的高度。

#### 4) 仪表控制站

- a. 对气象系统仪表进行控制的场所,应在气象塔附近、带有避雷保护和不受天气影响的建筑物内。
- b. 建议仪表控制站有足够的HVAC能力,以满足仪器设备运行时的环境要求,确保数据的再现率和可靠性。

#### 5) 气象保护

- a. 气象传感器、仪表和电缆应带有避雷针、浪涌保护和加热保护设备,仪表电缆应进行屏蔽。
- b. 对于遭遇冰冻的厂址,传感器应采用加热器进行保护和/或在设计上采取措施把结冰的可能性降至最小(例如,对风速计进行密封并装入套筒)。
- c. 对于滨海核电厂,应提供防止或消除盐分在传感器上积聚的措施。

#### 6) 系统电源

- a. 厂内环境监测系统应由厂内电力分配系统供电,厂内备用交流电源系统的非安全部分应为它提供备用电源,确保失去外电源时维持 EMS 的可靠运行。
- b. 厂外远距离 EMS 用电设备应带备用电池。

### 2.8.4.4 仪表与控制

#### 1) 总要求

- a. 人-机接口系统,给出了用于样品分析和监测的仪表和控制的总要求,应在所有取样系统中使用标准的商用仪表和元件。
- b. 为了避免EMS监测仪和核电厂数据获取系统故障导致的操作问题,核电厂设计者还应附加数据记录器或图形记录仪进行评定。

#### 2) 通用仪表

在可能的地方,应规定使用具有通用设计的标准EMS仪表和元件。

#### 3) 仪表附带文件

作为刚出厂的所有环境监测仪表,核电厂设计者应要求供货商提供下列资料:

- a. 每个仪表的功能;
- b. 要求的显示记录和报警信号;
- c. 要求的控制动作, 如果有;
- d. 仪表量程;
- e. 预期辐射本底;
- f. 仪表的精度和响应时间;
- g. 故障模式和能导致仪表损害或故障的任何环境危害。

#### 4) 试验和校准

应根据制造商的建议和管理导则RG1.23和RG1.97的数据要求提出仪表的试验和校准要求, 辐射监测仪表应能够就地校准。

#### 5) 仪表量程

核电厂环境排放监测仪的探测范围应符合探测器报警设定值的要求。管理导则RG1.23和RG1.97详细规定了仪表的探测范围。

为设定适当水平的报警和可接受的响应时间, 需要足够的探测量程。

在正常运行范围内, 如果监测仪表所需的量程使仪表的灵敏度变差时, 应采用具有重叠量程的多个独立仪表。

### 2.8.4.5 数据管理

#### 1) 总体设计

设计基于计算机的数据管理和监视系统, 用于输入和调用EMS、核电厂实验室和化学分析数据, 并与核电厂数据管理系统建立接口。通过样品数据的输入, 本系统应能对每天的放射性状况、放射性传播途径及放射性趋势图进行评价。

建议气象软件能提供实时的统计检查, 例如超量程、与相邻值进行比较及异常高或异常低的变化率。

#### 2) 设计接口

为了保存和共享核电厂的数据和信息, 所有EMS仪表通道和数据管理系统的设计应与核电厂数据传输和数据库系统存在接口。

#### 3) 数据标识

建议恰当标识所有EMS数据, 建议数据的储存方式便于调用事故前24小时和事故后24小时的数据。

#### 4) 系统后备

因为EMS数据对评价事故状态具有重要意义, 所以建议考虑使用冗余或备用系统储存EMS数据。

### 2.8.5 实物保护系统

#### 2.8.5.1 系统定义

##### 1) 范围

本章应说明实物保护系统具备保护核电厂和防止放射性蓄意破坏的能力, 其设计的能力要与国内核安全导则中的要求一致。

##### 2) 功能

为实现预期安保功能, 现场安防系统和安保组织管理应包含但不限于下述能力(并需满足2.9.5.2节的特殊要求):

- a. 阻止无相应保卫区域出入授权的人员, 车辆和物品进入要害区、保护区和控制区;

- b. 系统可探测未经授权的人员和核材料出入保护区和要害区的情况；
- c. 系统明确保护区和要害区授权的活动和条件；
- d. 系统提供授权出入、探测、评估和响应手段，能发现未经授权入侵保护区和要害区边界的情况。

#### 3) 设计基准

为防止放射性蓄意破坏事件，电厂安防系统的设计应能完成预期实物保护功能，按照各个项目的实际情况确定设计基准的要求，并使用以下的基准假设：

- a. 内部威胁基于一个独立的有一定电厂知识的人，不携带武器和爆炸物；
- b. 安保探测系统在没有探测情况下不能失效，应由保安人防力量及时响应；
- c. 进入控制室须有授权，控制室应设置为要害区，遵循核安全导则的要求；
- d. 指定为要害设备和系统在任何工况下保卫区域等级不变；
- e. 假定入侵电厂事件与电厂单一故障或单一始发事件不叠加；
- f. 安防出入控制系统的设计，不应妨碍操纵员在任何工况下执行其功能。

#### 4) 接口系统

支持电厂安防系统的接口系统功能如下：

- a. 配电系统：在正常和应急情况下，可以为电厂安防系统的装置，探测设备，照明和控制提供电源；
- b. 主控制室警报：当外部入侵力量对电厂安全有严重威胁时，控制室应可发出警报；
- c. 电厂通信系统：电厂通信系统应采用有线和无线两种通信方式，通信频率由当地无委会给出；
- d. 总图：在电厂实物保护的保卫区域设置实体出入口控制设施，保护区和要害区围栏；
- e. 管廊：通风，管道，电缆的跨保护区和要害区的管廊，围栏，实体墙的孔洞等需要实施实体的出入控制手段；
- f. 照明系统：保护区和要害区围栏或实体墙应设计照明系统，保护区和要害区边界和闭路电视监视的照度需要；
- g. 接地系统：现场设置的照明和探测设备应配置防浪涌保护装置；
- h. 防雷系统：实物保护系统的平台设备，闭路电视，入侵探测元器件应设计防雷保护。

实物保护名词定义

实物保护系统的名词定义可参看HAD501/02给出的定义。

### 2.8.5.2 系统性能要求

#### 1) 保护策略

- a. 实物保护系统根据设计基准保护核设施、核材料，避免蓄意破坏或盗窃；
- b. 实物保护系统应保护要害设备，以防止对核设施系统安全相关要害设备蓄意破坏；
- c. 实物保护系统应对蓄意篡改设备设置的情况发出报警。

#### 2) 防护方法

- a. 在施工设计前实物保护设计方案包含薄弱性进行分析。方案包括设计基准威胁的确定，薄弱性分析应并与设计的基准保持一致。

#### 3) 实体屏障的布置

- a. 从实物保护的角度分析，应根据实物保护分级原则，将保护目标设置在相应的

保卫区域内。

- 围栏的设计应满足 HAD502/01 导则的要求；
- 要害区边界的门和围栏应与其边界具有相同的强度，以满足实物保护设计均衡性的性能要求，相同的强度即指相同区域的围栏应具有相同的延迟能力；
- 跨不同保卫区域电缆和管道敷设，在保卫区域的下方的管廊设置出入口设施，如管廊在非要害区域无终端也可不必设置相应的出入口设施；
- 尽可能将电厂主要的水泵如重要厂用水泵纳入到保卫区域内，如不再保卫区域内，应设置与保卫区域相同保卫级别的独立保卫区域。

b. 实物保护系统应包含管理措施和应急响应制度，确保在应急运行时，安保系统仍可运行，并满足安保要求。

#### 4) 实物保护系统探测

保卫区域设计应考虑实物保护系统和安保探测设备的结构设计要求。

- 要害区边界的墙，地板，吊顶应与围栏具有相同的延迟防护能力。
- 保卫控制中心和主控制室和需要保护的站的结构应具备防弹能力。
- 尽可能减少在要害区边界开孔。
- 墙和门的设计的安保硬件应尽可能设置在受保护的区域一侧(除出入口读卡器设备外)。

#### 5) 保卫区域和边界

电厂的实体边界应考虑与电厂其他功能兼容，如在保卫边界上设置车辆出入口，人员出入口，保卫控制中心应设置在保卫区域边界内。授权人员和车辆允许在出入口控制点进出核电厂。

保卫区域和边界实物保护设计要求如下：

- 配套建筑物的位置应满足安保检查的要求；
- 人员、车辆、物品通道的位置和规模应确保核电厂在所有工况下都能快速处理车辆和人员的通行；
- 厂区布置保卫区域边界的地势尽量平坦，围栏布局尽量减少转角，围栏两侧尽量留出 6 米的空旷隔离带；
- 保护区隔离带尺寸应能满足探测设备安装使用；
- 尽量避免以水为围栏边界；
- 保护区隔离带的照明、探测和入侵探测设备应对隔离带边界内部对人员活动进行探测；
- 根据入侵报警控制台的报警可以定位入侵发生的位置；
- 保卫区域边界下面的廊道尽可能少，应对跨域区域的廊道进行与保卫区域边界同等延迟能力的加固，防止由廊道进入保卫区域，管道内截面积小于 60 平方厘米或孔洞直径小于 15 厘米；
- 保卫控制中心和安保习题的设施和设备应置于保卫区域内，防止被破坏。

#### 6) 实物保护其他设计

a. 在实物保护系统内，实物保护设计应尽可能灵活，其要求如下：

- 实物保护集成控制台的布置应留有足够的维修，安装空间；
- 围栏边应设计电缆沟，以便保卫区域的照明，闭路电视，入侵探测设备和出入口控制设备电缆敷设；
- 保卫控制中心应设计静电地板便于电缆敷设；
- 安保的各个子系统应具有较强的扩展能力(如集成管理系统，实物保护供电系统，出入口控制，入侵探测系统)。

#### 7) 出入控制

- a. 所有车辆和人员出入口的设计是能够控制人员或车辆进入要害区和保护区：
  - 对要求和允许进入保卫区域的授权人员和车辆具备鉴别授权的手段；
  - 对需要进入保卫区域的人员设置检查设施，应包括可藏在包裹或物料中手持带进保卫区域的枪支，爆炸物的探测和报警，如手持式金属探测器，X 光机等设备。
  - 在进入保卫区域前，应设置一个防弹的授权控制点，在那里可以获得进入保卫区域的授权，通过出入口设备控制出入；
  - 进入要害区域应有识别措施和设备（如控制室，反应堆厂房，柴油发电机间）
  - 任何情况下，非授权出入都会在集成管理平台上产生报警，保护区和要害区每个出入口的通行信息都有集成保安管理系统记录和控制，便于允许人员出入或禁止出入。
  - 要害区出入口应确保只有授权人员才能进入保卫要害区，应对所有重要的区域进行有效的出入控制。
- b. 对安保系统的通行控制应满足紧急情况下快速进出要害区的需求。

#### 8) 通信

- a. 保安通信子系统应满足下列要求：
  - 核电厂的报警工作站都有人员值守，每位安保管理人员和警卫人员应能保持通信联系，可以通过多个频道的无线通信和有线电话保持语音通话；
  - 保卫控制中心与当地公安机关，电厂武警营房有专用报警通信系统；
  - 核电厂主控室和保卫控制中心有通信渠道（保卫区域外不设置保安通信终端设备）。

#### 9) 电源

- a. 安保电源子系统应满足核安保导则和相关标准规定的最低要求及整个安保系统的供电需求。保卫控制中心的集成管理平台设置电源监视系统，确保值班保安能够及时察觉到电源系统故障或遭到破坏。
- b. 丧失正常电源后，保安电源应设置备用电源为安保系统提供电力，此备用电源应布置在要害区内，正常电源应自动切换到备用电源，并将状态反馈到集成保安平台上。
- c. 备用电源系统应包括一个不间断供电系统，其容量满足为所有重要监视功能起支持作用的设备供电，如入侵探测，集成管理平台，部分保安照明，出入口控制系统，蓄电池的容量应足够这些设备运行 2 小时，备用电源应包括柴油发电机，容量至少满足所有安保系统包括保安照明运行 8 小时，备用发电机的启动时间不应超过 30 秒。

#### 10) 数据管理

- a. 整个核电厂的安保系统应设置主在线冗余服务器，远距离全功能工作站自带存储设备，以便在主服务器工作站中断通信时，远程全功能工作站仍然可以独立工作。在第 10 章里有关防范计算机病毒的要求。所有的全功能工作站只能执行保卫功能，与其他保卫无关的系统无接口（如火灾探测或保护系统监测或控制功能）。
- b. 为确保所有保卫信息的显示方式便于评估和判断，在安保系统的设计中，应考虑把人因工程原则应用到集成保安管理系统中（集成管理平台，就地控制站）的设计中。

#### 11) 试验

- a. 应为入侵探测报警，出入口报警，通信设备，实体屏障和与保卫系统相关的其他安保设备和装置编制试验和检查程序。

b. 安保系统的设备部件应具有故障报警功能。

#### 12) 维修

a. 保卫系统, 子系统和部件的设计和布局应考虑维修要求。

b. 第一章包括了适用于安保系统维修的总要求。

### 2.8.6 核电厂通信系统

#### 2.8.6.1 统定义

##### 1) 范围

本章对华龙一号电厂的通信系统提出了设计要求和性能要求。

核电厂通信系统不是核安全级系统, 但对核电机组的安全运行起着重要作用。核电厂通信系统在正常运行及事故工况下可提供厂内及厂外的通信手段, 特别是在应急状态下必须保证与上级各主管部门的通信畅通。

##### 2) 功能

核电厂通信系统设计应满足核电厂相关要求, 具有冗余性、多样性, 应经过必要的安全分析, 保证在任何工况下有可用的通信手段。

全厂通信系统应具有多样性和足够的冗余度; 每个通信子系统的供电电源都必须稳定可靠; 全厂通信系统的设计不能因为其中一个通信子系统的故障而影响其它各通信子系统的可靠性。

核电厂通信应包括, 但不限于以下子系统: 行政电话系统、安全电话系统、对讲电话系统、电力调度电话系统、无线电话系统、声力电话系统、综合布线系统、警报系统、有线广播系统、时钟系统。

#### 2.8.6.2 总体要求

核电厂全厂通信系统主要用于电厂内生产调度和核电厂设备的运行管理和正常维护检修期间的通信联络。全厂通信系统必须在核电厂正常工况和事故工况下都能为核电厂各工作岗位与核岛主控室及远离核电厂的一些岗位之间提供可靠而有效的通信。当一个通信子系统出现故障时不应影响其它通信子系统的可靠性。对于一些与电厂运行调度和核应急有关的通信系统如电力调度电话系统、安全电话系统和内部对讲电话系统等均设有电话录音装置。

通信系统设计准则: 全厂通信系统应具有多样性、独立性和足够的冗余度; 在任何事故工况下都必须有可用的通信手段; 每个通信子系统都尽可能采用独立的供电电源和布线网络; 每个通信子系统其主设备箱体和供电电源都尽可能考虑分开布置, 以减少因一个机房的火灾导致多个系统瘫痪的可能性; 电话系统一般由一个蓄电池组和互为备用的两个整流器供电。

#### 2.8.6.3 电话系统

##### 2.8.6.3.1 行政电话系统

为满足核电厂行政管理及正常运行通信需要, 厂内应至少设置一套行政电话系统。分期建设的核电厂, 每期均可设置局站, 各期应联网。

行政电话交换机位于核电厂专用通信机房, 它为核电厂厂内提供电话通信, 且可授权一些电话分机与公网进行直接通信。为了防止行政电话交换机故障而引起电话网失效, 在核电厂内设置若干直通线, 不通过行政电话交换机而直接与公网相连(对外通信)。

核电厂内行政电话交换机与公网的中继连接应通过不同的路由, 宜连接不同局向。

核电厂主控室应根据操作岗位使用需求设置多部电话机; 壁挂式或桌式电话机可作为办

公用电话机；环境噪音较大的厂房中，电话机宜设置在隔音小室或隔音罩内并配有声光显示装置等附件；环境较为恶劣的厂房应设置壁挂式工业型电话机。

#### 2.8.6.3.2 安全电话系统

安全电话系统连接核电厂内各个关键和重要的岗位，使之在事故和应急状态下保持专用可靠和有效的通信联系。安全电话系统执行事故处理的调度指挥通信功能并接入公网，实现对外通信。

核电厂安全电话系统应在应急指挥中心设置程控交换机，其容量应根据机组数量的实际情况确定。

安全电话系统宜由安全电话程控交换机、配线架、维护终端、安全电话机及辅助设备组成。

安全电话系统应具备扩容能力以满足使用需要。安全电话系统宜选用与行政电话系统和电力调度电话系统不同的话机，即话机采用不同颜色或标签来区分行政电话系统、安全电话系统和电力调度电话系统。安全电话系统是一个与行政电话系统相互独立的系统，电缆不宜同沟、同路由敷设。安全电话系统应具备电话录音装置。

#### 2.8.6.3.3 对讲电话系统

在核电厂正常运行工况下，为满足生产调度需求，应设置一套专用对讲电话系统。多机组核电厂主控室之间的通话可通过对讲电话系统进行。对讲电话系统宜具备在特定核电厂机组内部同时召开电话会议的能力。对讲电话系统应具备扩容能力以满足运行需要。对讲电话系统在功能和设备的设置上与行政电话系统分为两个各自独立的系统。对讲电话系统宜使用独立的线路网络。

对讲电话系统宜由对讲电话交换机、配线架、调度台、对讲终端及辅助设备组成。调度台宜配置直通键和标准键盘，亦可采用触摸屏等方式实现调度操作。对讲终端应具备多种类型以满足现场使用环境的要求。对讲电话系统应具备电话录音装置。

#### 2.8.6.3.4 电力调度电话系统

核电厂电力调度电话系统宜在网控楼（开关站）设置一套数字调度程控交换机，其配置包括调度台及数字录音系统。由于核电厂电力调度的重要性，要求电力调度交换机具有完善的调度和组网功能，具有很高的可靠性和灵活性。

除在核电厂内必要场所设置电力调度电话分机外，宜在核岛主控室设置调度台，以保证核电厂正常运行通信需要。电力调度交换机的设备选型应满足当地电网技术要求。电力调度电话系统可实现厂内电力调度通信并与网调、省调、厂外变电所建立中继通信。

#### 2.8.6.3.5 无线电话系统

无线电话系统用于核电厂内部无线通信。在正常及事故工况下，提供有效的通信手段。核电厂无线电话系统应采用适合核电厂使用的无线接入技术，系统的配置应根据工程实际需求确定。无线电话设备的使用不得干扰核电厂安全运行相关监测及控制等设备的正常运行，同时设备使用应遵守核电厂相关管理规定。无线电话系统在满足电磁兼容性指标要求及不影响核电厂安全运行的前提下，在厂区范围内宜做有效覆盖。

核电厂无线电话系统网络应包含以下基本部件：天馈线、接入设备、交换层控制设备、手持移动终端。为保证核电厂安全运行，进入核电厂使用的无线电话设备应进行相关试验验证。核电厂无线电话系统所选用设备应满足电磁兼容性指标及系统安全性指标，应符合GB/T 11684和GB/T 17626.3的相关要求。



#### 2.8.6.3.6 声力电话系统

声力电话系统适用于工作人员设备调试、维修、检测时的通信。本系统为自供电式电话系统，可允许多组工作人员在多条通话链路上同时进行各自独立的通话。

声力电话系统宜包括以下基本设备：声力电话转接箱、就地声力电话插座盒、多种声力电话机。

声力电话网通过电话电缆连接厂房内就地声力电话插座盒和主控室声力电话转接箱。

本系统网络根据工艺需求可设置多个分支分布在不同厂房内。分支内的声力电话插座盒通过电话电缆连接到主控室转接箱，通过转接箱的跳接，可实现各分支间的通话。

本系统采用共线式通话模式。

声力电话机应具有抗噪声通话功能，可通过电话连接线的插头插入就地声力电话插座盒的不同插座选择和建立通话链路。

#### 2.8.6.4 综合布线系统

综合布线系统应根据核电厂各建筑物性质，功能及用户近期实际使用及中远期发展的需求，确定系统链路等级，进行系统配置。综合布线系统应为开放式网络拓扑结构，应能支持语音、数据、图像、多媒体业务等信息的传递。核岛内综合布线系统线缆应满足核电厂电缆相关技术要求。

建筑群配线设备（CD）宜设置在厂区办公楼或网络中心；建筑物配线设备（BD）宜设置在厂区办公楼、核岛通信设备间等处。

数据传输干线为光缆，语音传输干线为大对数电缆或光缆。至信息插座的水平线缆均为六类及以上非屏蔽双绞线缆。

本系统可支持厂内行政电话交换机用户和计算机网络用户。

#### 2.8.6.5 警报系统和有线广播系统

##### 2.8.6.5.1 警报系统

核电厂警报系统包括声警报装置和光警报装置。本系统作为核电厂厂区统一的警报网，多机组布置的核电厂，宜按期建设并独立设置警报系统主设备，各期警报系统主设备之间宜联网运行，在厂区应急状态下通知整个核电厂各期机组范围的区域。核电厂警报系统设计应考虑主要设备冗余（终端设备除外），保证单一故障情况下系统可用。

核电厂应划分若干警报区域，相关区域可直接发出单一警报、分组警报和全厂警报。警报系统设置应覆盖整个核电厂厂区。警报系统设备由控制主机、警报站、警报器和手动触发警报盒组成。事故工况下根据运行规程启用警报系统，并通过有线广播系统，告知相关人员警报发出的原因。

控制装置应保证操作的安全，不发生误动作。中央警报装置故障时应在主控室发出声光报警信号。

每个警报信号均可由一个或多个警报站手动触发。警报站应设置在应急指挥中心、主控室、远程停堆站等。设置在应急指挥中心的警报站级别最高。

每个警报站为不同警报信号设置一套操作装置。

每次发出的警报信号均应被自动记录，包括警报发出的时间。同时在警报站发出声光报警指示。

声警报信号的响度应高于听力阈值。因此正常运行期间其响度应比噪声电平至少高15dB(A)。如果警报信号的响度高于噪声电平不足15dB(A)时，则应证实警报信号响度明显超过听力阈值。

警报信号的最高响度在距声源1m处不应超过110dB(A)。

噪声电平超过90dB (A)，除发出声音警报信号外，还应增加光显示信号。

声警报、光显示信号应至少持续1min，应能从警报站及相应的控制区域采取措施中断声、光警报信号。

#### 2.8.6.5.2 有线广播系统：

核电厂厂区建筑物内外应设置有线广播系统，满足各种工况下广播寻人、发布指令的需求。

本系统作为核电厂全厂统一的有线广播网，若为多机组布置，宜按期建设并应独立设置有线广播系统主设备，各期有线广播系统主设备之间应联网运行，在厂区应急状态下可通知到整个核电厂厂区。

有线广播系统设备主要由广播主机、功率放大器、广播控制台、扬声器及配件等组成,主要设备放置在核电厂通信机房。

有线广播系统宜采用定压输出，输出电压宜采用70V或100V等。

有线广播系统设计应考虑线路损耗，以满足信号传输要求。

有线广播系统的功能如下：向核电厂全厂或部分区域进行广播；向核电厂全厂或部分区域进行紧急呼叫；除了在主控制室、远程停堆站、应急指挥中心以及行政办公楼的广播控制台发出呼叫外，还可以从应急指挥中心、主控室和远程停堆站启动录音装置发送多种信息；具有分区呼叫和优先呼叫功能。

系统对广播分区和控制台优先级应能进行灵活设置，不同控制台选择不同广播分区时，互不干扰，可同时广播。不同控制台选择相同广播分区或有重叠的广播分区时，高优先级的控制台可以正常广播，低优先级的控制台则被屏蔽，不能广播。

任何一个控制台在广播时，在其它控制台上应有提示信号。

核电厂内广播控制台的优先级顺序从高到低依次为：应急指挥中心、主控室(远程停堆站)及行政办公楼。

核电厂可选用功率可调的筒形、吸顶及号角扬声器等，以满足不同背景噪声等级需求。

扬声器设置的原则是：针对某一区域的统一广播，尽量选择多数量小功率的扬声器分布，而不选择少量大功率的扬声器，以保证声场均匀。放大器的实际负荷应占其额定功率的75%。这样可以避免过负荷、短路和断路。有线广播系统功放设备应设置备用单元，备用单元应具有自动或手动投入环节。

#### 2.8.6.6 时钟系统

核电厂厂区应设置全厂统一联网的时钟授时系统。核电厂时钟系统应为同步时钟系统，作为整个核电厂的时间基准源。二级主时钟、扩展时钟设备、核电厂重要需授时系统，宜由主、备主时钟分别提供两路时间信号。核电厂子钟由二级主时钟提供时间信号。

核电厂时钟系统应具备完善的自身时间校验功能，能及时发现系统内时间信号错误，同时立即停止错误时间信号的输出。核电厂重要需授时系统，应设置本系统时间服务器，服务器自备时钟源，实时与来自核电厂时钟系统的时钟信号进行比对，一旦发现接收的时钟信号异常，应及时切换到自有时间，保持自身系统时间的稳定。

母钟应主、备冗余配置。母钟应接收北斗卫星导航信号、全球卫星定位系统（GPS）信号或其它标准时钟信号作为时间基准信号。

当设置石英钟作为显示子钟时，应配置母钟同步校正信号装置。

时钟系统可根据电气系统、仪控系统及计算机网络等对时间信号的需求，配置各种类型的硬件接口。

时钟系统主设备宜设置在核电厂通信机房和网控楼（开关站）等。

#### 2.8.6.7 核电厂对外通信

在核电厂发生设计基准事故、外部事件及其它事故时，应保证至少有一种通信手段能实现对外通信。与电网相关的对外通信方式应根据当地电网入网要求及核电厂调度管理规定设计。

在核电厂每个机组的主控制室、远程停堆站、应急指挥中心及其他相应重要岗位应设置直通线。核电厂应急指挥中心宜设置卫星电话以保证对外应急通信的可靠性。

#### 2.8.6.8 通信电源

核电厂通信系统应由不间断可靠电源供电，可采用交流或直流两种供电方式。核电厂通信系统中与应急相关的子系统如安全电话系统、警报系统等，其供电电源应由两路独立电源（其中一路应来自柴油发电机组）提供；其它通信系统宜由两路独立电源供电。电网相关通信系统电源要求除符合以上规定外，还应执行电网相关标准规定。

核电厂通信系统电源的雷电过电压保护设计应根据通信设备安装的具体情况，确定被保护对象和保护等级。

通信系统电源的雷电过电压保护设计应建立在共用接地、均压等电位基础上，并应根据雷电电磁场分布情况对系统内的接地线进行合理布放。

通信系统电源雷电过电压保护工程，应选用经过国家认可的第三方检测部门测试合格的防雷器。

### 2.9 放射性废物处理系统

本节的目的是明确华龙技术电厂放射性废物处理系统（气体、液体、固体）的要求，使其符合华龙核电技术用户要求的目标和原则以及我国法规标准要求。

#### 2.9.1 通用要求

本节说明放射性废物处理系统的主要性能要求。放射性废物处理系统的主要性能要求包括：

- 1) 流出物与厂址符合性；
- 2) 变更的灵活性；
- 3) 源项；
- 4) 人员操作优化；
- 5) 废物最小化；
- 6) ALARA原则。

##### 2.9.1.2 流出物与厂址符合性

放射性流出物（固体、液体和气体）应降低至最小程度，并切实考虑对公众和环境的影响以及固体废物的产生。

流出物应小于法规标准的要求。

对于液态流出物应考虑厂址条件和运行策略。

流出物指标应基于运行最佳的电厂性能和可行的处理技术。

固体废物的产生量满足2.1.4.7节放射性废物处理的要求。

放射性废液的排放满足法规标准的同时，可能不适合部分厂址条件，例如：

- 1) 厂址受纳水体的可用性；

- 2) 化学成分排放的限值;
- 3) 地方标准和政策。

为应对上述厂址条件,对液体和固体废物,要求增加处理设备。

### 2.9.1.3 变更的灵活性

为提供将来的变更和考虑新技术的开发应用,放射性废物处理系统应具备工艺灵活性和一定的厂房空间使用新设备,并在需要时可提供替代设备处理的路径。

为使放射性废物处理系统的操作及其设备能适应今后潜在的变更,放射性废物厂房的毗邻处应留有足够空间以供将来厂房扩建或重大改建之用。同时,应能增加合适的服务系统和消防管道。为了提供毗邻空间,放射性废物厂房应提供合理的变化。设备的可替代性也作为一个要求以便提供合适变化的能力。

允许使用移动设备作为正常处理放射性废物的固定设施的补充,应通过厂房布置保证足够的空间,并留有必要的接口。另外,允许单独依靠移动设备代替永久设备的安装,运行经验证明经常采用移动设备是可接受的。在经常使用移动设备的地方,增大移动设备使用率的能力将通过合适的厂房空间分配和工艺接口维持。

在所有的放射性废物处理系统中尽可能采用较少的设备和不复杂的设备及控制,以达到简化的目的。

### 2.9.1.4 源项

在进行排放源项计算时,采用如下三套假设。

#### 2.9.1.4.1 预期工况

在这种工况下,对于燃料行为、废物处理系统运行以及放射性物质释放的假设,均尽可能地基于在运核电站的经验反馈。此工况下的源项称为“现实源项”,在整个燃料循环中,反应堆冷却剂的放射性浓度取为0.1GBq/t I-131当量,该活度谱主要用于现实排放源项计算和放射性废物最小化管理。

#### 2.9.1.4.2 运行工况

在这种工况下,对于燃料行为、废物处理系统运行以及放射性物质释放的假设,基于在运核电站的长期运行经验反馈的包络值。此工况下的源项称为“运行源项”,在整个燃料循环中,反应堆冷却剂的放射性浓度取为5.0GBq/t I-131当量。该活度谱用于环境影响评价和排放量申请的设计需要。

#### 2.9.1.4.3 设计工况

对裂变产物,该工况对应于0.25%燃料元件发生破损的极限假设,此工况下的源项称为“设计源项”。对于设计工况,其分析对应于反应堆冷却剂活度较大的设计工况,这是由于0.25%的燃料元件发生破损造成的。对设计工况分析时,在整个燃料循环中,反应堆冷却剂的放射性浓度取为37GBq/t I-131当量。该活度谱是其他情况的包络值,主要用于事故分析、废物管理系统设计和作为技术规格书限值。

### 2.9.1.5 人员操作优化

为优化华龙技术电厂安全和有效的操作,设计中应包括优化人员操作的要求。例如,音频/视频监视系统、远程设备和/或控制和监控、系统处理能力和裕度、低维护系统以及货车装卸区或坡道。

#### 2.9.1.6 废物最小化

通过尽量减少湿、干废物的产生以及通过固体废物处理系统的处理，以减少固体废物的数量。

实现废物最小化不仅需要适当的设计，而且取决于电厂运行方式以及管理措施，且满足废物最小化的相关法规标准要求。

#### 2.9.1.7 ALARA 原则

降低在放射性废物处理区域内工作人员所受的辐照，以便达到可合理达到的尽量低（ALARA）。

要点如下：

- 1) 采用远距离集中操作的设计，尽量减少在操作时工作人员所受辐照；
- 2) 选用和设计可靠和容易使用的设备，尽量减少维修工作，以及维修期间人员所受辐照；
- 3) 采用远距离操作设备（特别对固体废物），尽量降低人员所受辐照；
- 4) 采用适当的布置和屏蔽，使在运行和维修时所受辐照达到可合理达到的尽量低（ALARA）。
- 5) 考虑系统及设备的去污设计。

### 2.9.2 放射性废气处理系统

#### 2.9.2.1 定义

##### 2.9.2.1.1 范围

本节说明了华龙技术电厂放射性废气处理系统的要求。放射性废气处理系统应能在核电厂正常运行以及预计运行事件的所有工况下有效地运行。

放射性废气处理系统处理来自反应堆冷却系统的稳压器、化学和容积控制系统的容控箱、硼回收系统的脱气塔以及相关系统产生的放射性废气。

放射性废气处理系统处理达标的废气通过通风系统烟囱排放至环境。

本节以活性炭滞留衰变工艺为例说明放射性废气处理系统要求，其他处理工艺参考执行。

##### 2.9.2.1.2 功能

放射性废气处理系统功能如下：

- 1) 接收和/或收集来自反应堆冷却系统及相关支持系统产生的放射性废气，并在排放前通过滞留衰变工艺处理达标；
- 2) 维持放射性废气处理系统内气体不可燃；
- 3) 为保证活性炭的吸附性能，应控制放射性废气的湿度和温度；
- 4) 为放射性核素（如Kr和Xe）提供足够的滞留衰变时间；
- 5) 处理后的放射性废气送至通风系统烟囱，监测并排放至大气；
- 6) 提供辐射监测和报警功能，以防止放射性核素向环境中意外大量的释放；
- 7) 确保放射性废气处理系统运行和维修的职业辐射剂量预期满足ALARA原则。

##### 2.9.2.1.3 接口

本节列出典型核电厂放射性废气处理系统接口，具体接口取决于华龙系列电厂的详细设计，接口如下：

- 1) 废气收集

反应堆冷却剂疏水箱、辅助厂房疏水箱、反应堆冷却剂容控箱、硼回收系统脱气塔排气进入放射性废气处理系统。

2) 冷冻水系统

冷冻水系统用于冷却气体冷却器。

3) 氮气供给系统

氮气供给用于系统防爆。

4) 通风系统

通风系统用于系统排放和设备通风。

5) 放射性废液处理系统

放射性废液处理系统用于收集、处理系统疏排水。

6) 取样系统

气体排放和收集的取样点取样，取样后排回本系统。

## 2.9.2.2 性能要求

### 2.9.2.2.1 排放目标

放射性废气处理系统流出物限值满足GB6249及相关法规标准要求，建议考虑氢氧复合等工艺降低废气产生量。

### 2.9.2.2.2 系统要求

1) 定义

放射性废气处理系统是一个采用活性炭滞留衰变工艺的常温系统，用冷冻水冷却方式达到放射性废气的设计湿度要求。

通过活性炭滞留衰变降低放射性废气的放射性活度浓度。

2) 设计参数

放射性废气排放前，在活性炭滞留床内的滞留衰变时间应满足前述废气排放目标要求，并同时考虑其他释放源，如通风系统的排放。

活性炭装填量参考公式如下：

$$M=FT/Kd$$

其中：

M为活性炭质量，g；

F为载气流量，mL/s；

T为平均滞留时间，s；

Kd为动态吸附系数，mL/g。

所有数值指运行工况下的值。

3) 流速

放射性废气处理系统应可以连续运行或定期运行，流速应满足化学和容积控制系统和硼回收系统等上游系统的设计要求。

4) 活性炭温度

活性炭床可以在环境温度条件下运行，最大环境温度取决于电厂总体要求确定的废气处理系统所在厂房的温度。

5) 温度和湿度

输入活性炭床的放射性废气应满足活性性能要求的温度和相对湿度条件。

通过冷冻水冷却来进行湿度控制，从而达到活性炭设计要求的湿度。

6) 气体排放

放射性废气应排放至通风系统的烟囱监测排放。

#### 7) 氢气控制

##### a. 系统完整性控制

在可能存在氢气和氧气混合爆炸的情况下,放射性废气处理系统的设计应保持系统的完整性。

应使用并联的气体分析仪,以探测混合气体的形成和累积,分析仪应能就地及在控制室发出报警信号。

应限制有潜在易燃气体的部件或系统排气进入本系统。

##### b. 非可燃性控制

放射性废气处理系统应始终保持不可燃,即自由氧含量少于4%(体积)。

放射性废气处理系统中气体压力应保持比大气压略高,设计者应考虑避免发生系统压力低于大气压,如由于连接箱体中水位的变化引起系统压力的变化。

在反应堆冷却剂含氢较大以及含氧较大工况下,应通过氮气稀释废气。

取样箱及相连设备应设计为在取样瓶使用期间允许用氮气吹扫。

### 2.9.2.3 系统特征

#### 2.9.2.3.1 系统配置

放射性废气的湿度应通过冷冻水冷却方式降低至设计者提出的活性炭运行规范要求。

至少配置两台活性炭床和一台保护床,活性炭床最小容量应满足任意旁路一台活性炭床而不影响系统运行的设计要求。

#### 2.9.2.3.2 可靠性

##### 1) 保护床

应在收集的放射性废气和活性炭吸附剂之间设置一台保护床。

保护床的容量应满足冷却失效工况下可以除去来废气中的水分直至替代单元投入运行。

用于干燥保护床的气体应能再循环或经放射性废气处理系统后监测排放。

##### 2) 室内可燃气体的控制

通风系统应提供连续通风,以便排来自放射性废气处理系统设备所在房间的可燃气体和/或放射性气体。

### 2.9.2.4 关键设备特性

#### 2.9.2.4.1 管道和阀门

阀门应采用密封性能较好的隔膜阀、波纹管阀或其他具有相似密封特性的阀门。

疏水管道和阀门应选择合适的尺寸并具有连续坡度。

排气口应连接至受控的通风系统。

设备疏水应是采用闭式漏斗或者提供密封,应提供疏水的可视措施。

#### 2.9.2.4.2 系统泄漏

放射性废气处理系统设备应尽量减少泄漏,泄漏限值应在法规标准规定的限值内。

仪表和阀门正常泄漏率不得高于法规标准规定的限值。

正常运行工况下,房间空气的放射性泄漏浓度不超过燃料破损设计的基本假设。

#### 2.9.2.4.3 活性炭床

活性炭床的卸压和排放，应排放至受控系统内。

活性炭床的设计应做到：如果气体垂直向上流动，则在任何预期工况下，活性炭床不会流体化。

进入第一个活性炭床的气体应自上而下，其后串联的活性炭床，要尽量减少管道连接长度。

活性炭床的设计应为活性炭的添加和去除提供措施。

活性炭床的设计应有足够容量，在设计流速下，废气通过活性炭滞留床的速度不应低于1mm/s，不应因轴向扩散造成滞留的效率降低。

活性炭床上应设置疏水管道，以便在水压试验后或检修前能将水排净。

#### 2.9.2.4.4 热交换器

##### 1) 连接

热交换器中可能导致放射性物质泄漏到环境中的泄漏点，在列管和管板的连接处应进行密封焊接。

热交换器的设计应设置一个可拆卸的封头盖，以便于检修人员检修管板。

应能拆卸封头盖对热交换器内的任意一根管进行封堵。

##### 2) 排气和疏水

3) 应提供排气和疏水措施以便热交换器启动和维修。在用蒸汽加热的预热器中，应防止运行期间不凝气体的累积。

排气和疏水应安装在换热器屏蔽墙外侧可接近区域或者可进行远距离操作。

应设置地坑或排水管道，防止启动和瞬态及正常运行期间废水累积。

在蒸汽装置中的换热器应具有蒸汽侧排水措施。

在要求由捕集器的地方，应安装过滤器，并应选择不易堵塞的类型。

捕集器、过滤器以及远距离操作都应安装在低辐射区域。

#### 2.9.2.5 仪表和控制

##### 2.9.2.5.1 仪表和控制

手动操作系统中经常操作的阀门和部件应安装带有指示的远距离手动控制器。

##### 2.9.2.5.2 氢气仪表

在设有带压力的放射性废气处理系统又会发生氢气泄漏的房间内必须设置氢气泄漏监测装置。

放射性废气处理系统房间内的氢气泄漏监测应能在主控制室进行报警。

对于布置在可能发生氢气泄漏的设备间内的，或直接与含氢废气接触的仪控设备、电气设备，有防爆设计要求。

##### 2.9.2.5.3 辐射监测

放射性废气处理系统通过通风系统进行连续监测排放，对放射性活度浓度超过设定值时进行报警和自动停止排气。

##### 2.9.2.5.4 仪表的检定

放射性废气处理系统的设计应允许对仪表进行定期校验。

仪表的选型宜便于进行校验。



## 2.9.3 放射性废液处理系统

### 2.9.3.1 定义

#### 2.9.3.1.1 范围

放射性废液处理系统用于接收、贮存、取样、处理、监测和排放核电站正常运行以及预计运行事件产生的放射性废液。

本系统工艺设备主要包括接收废液的贮槽，处理设备如过滤器、离子交换床、蒸发器、取样箱等，以及相关的仪表、控制器、泵、管道和阀门等。

放射性废液处理系统产生的废树脂、废过滤器芯、浓缩液等送至放射性固体废物处理系统处理。

#### 2.9.3.1.2 功能

放射性废液处理系统功能如下：

- 1) 把废物进行分类收集，并把废物分别输送到各子系统中；
- 2) 在不影响电厂可利用率情况下，提供暂存和处理在电厂正常运行和预计运行事件期间产生的液体放射性废物的能力；
- 3) 提供替代或冗余的工艺流程，保证电厂具有利用率以及连续收集废物的能力。这包括使用移动式处理设备或使用交叉连接等措施；
- 4) 便于废过滤器滤芯、浓缩液以及废树脂输送到放射性固体废物处理系统中；
- 5) 在电厂内，再利用可复用的废液；
- 6) 经处理后的废液可监测排放到环境中；
- 7) 按照相应的管理要求，控制和监测废液处理系统化学和放射性物质向环境的释放；
- 8) 保护电厂人员免受放射性辐照，通过使用自动系统、合适的布置、可靠方便的操作以及可维修的设备、屏蔽和远程操作的仪表和控制实现ALARA原则。

#### 2.9.3.1.3 接口

本节列出典型核电厂放射性废液处理系统接口，具体接口取决于华龙系列电厂的详细设计，接口如下：

##### 1) 废液收集

接收和收集来自各种系统中释放阀、设备排放和泄漏的反应堆冷却剂。

收集安全壳内的泄漏。

来自乏燃料水池冷却和净化系统的排放连接到放射性废液处理系统中。

当蒸汽发生器传热管泄漏导致在蒸汽发生器下泄二次侧、汽轮机厂房设备和地面排放装置中存在放射性情况下，则可向废液处理系统监测排放，以避免放射性物质排放到环境中。

来自化容控制系统容控箱、热交换器和离子交换床的排放进入到放射性废液处理系统中。

##### 2) 设冷水

设备冷却水系统向蒸发装置设备提供设冷水，并从蒸发装置设备中返回。

##### 3) 通风系统

通风系统接收设备排气及维持设备所在房间温度。

##### 4) 除盐水

除盐水系统为系统运行提供除盐水。

##### 5) 压缩空气

压缩空气为系统运行提供压缩空气。

#### 6) 放射性固体废物处理系统

放射性固体废物处理系统接收并处理系统运行产生的二次废物。

### 2.9.3.2 性能要求

#### 2.9.3.2.1 净化目标

放射性废液处理系统应设计成满足GB6249及相关法规标准的排放目标。

#### 2.9.3.2.2 先进技术

放射性废液处理系统设计应采用经济性好和性能经过工程实践的技术。

#### 2.9.3.2.3 放射性废液输入

##### 1) 按子系统分类

- a. 工艺废液：一般是被稀释了的或被污染了的反应堆冷却剂。
- b. 地面废液：通常为固体颗粒含量不定的高传导性废物。
- c. 化学废液：通常为来自实验室的废液和化学去污废液。
- d. 洗衣废液：通常为衣物清洗的废水、淋浴水和其他去污废水。

废液需有效的分类以保证固体废物体积最小化。

##### 2) 子系统内的分类

核电厂中通常含有氢及裂变气体的反应堆冷却剂，应该被收集在密封的疏水箱内，或直接经化学和容积控制系统排至硼回收系统。含氢废物应避免暴露在空气中，可使用氮气覆盖。

在核电厂中从不含氢但带有放射性或潜在放射性的各系统中排出的放射性废液，应直接用管道引至各厂房地坑、贮槽、废液收集箱。

- c. 每个厂房至少有一个地坑为放射性废液处理系统服务，并且该地坑位于厂房低点。
  - a. 靠重力排入地坑。
  - b. 来自泵轴密封泄漏和泵体的废液应该收集并排入相应的放射性废液处理系统的子系统。
  - c. 泵底座废液可能含有废油，因此被排入地面疏水子系统。尽管如此，应采取各种措施尽量减少废油的泄漏，避免废油进入放射性废液处理系统。
  - d. 每个收集点（地坑或贮槽）的废液源和水量应该可以确认，并且可以测量。所有地坑和贮槽都应提供取样点。

#### 2.9.3.2.4 放射性废液输入最小化

应在切实可行的基础上，收集反应堆冷却剂，尽可能收集在反应堆厂房和核辅助厂房的贮槽内，再通过硼回收系统处理。

#### 2.9.3.2.5 废物处置要求

##### 1) 排放至环境

- a. 应设置槽式排放和排放总管监测排入环境

要求如下：

任何时候都应该保证稀释液体的最小流量；

基于厂址相关特性及循环冷却水的排放流量，核电站设计者确定最小流量；

如果循环冷却水的排放不符合稀释流量的要求，则停止废液排放。

##### b. 化学物质的排放

在化学与放射性监测范围内可将产生的废液排至环境中。此外，添加剂的使用应评估其

释放到环境中的潜在毒性。

c. 槽式排放

在排放前，所有排放到环境中的放射性废液必须在贮槽经过混匀、采样、检测合格，并且满足GB6249等相关法规标准要求。

d. 避免自流

避免废液由于重力、虹吸导致的误排。

e. 两步排放

首先启动排放泵对废液贮存罐中的废液进行充分混匀，待混合均匀并取样合格后打开排放阀进行废液排放。

2) 废液的复用

所有处理后的废液在排放或复用之前应先通过监测箱，在箱内经混合、取样及被检测合格后方可排出。

放射性废液监测箱不允许存在有重力流或虹吸流排往复用箱的可能性。

### 2.9.3.2.6 容量

1) 处理流量及储存容量

放射性废液处理系统的每一个子系统应具有足够的处理流量及储存容量以处理其每日所输入的废液。这些废液指核电厂正常运行和预期运行事件期间，包括换料、停堆、维修、启动及其初始启动所产生的各种废液。综合处理流量及储存容量应能合理安排放射性废液处理系统的运行。

2) 收集箱

对大容量子系统应设置两台并联的收集箱。对于小容量子系统，采用单个收集箱也是可接受的。

3) 监测箱

对大容量的子系统应设置两台并联的监测箱，它们还交叉与两台并联的泵相联。对于小容量子系统，采用单个监测箱也是可接受的。

监测箱泵的容量应满足按照工艺要求，满足混匀、取样、排放要求。

4) 额外容量

核电厂设计应衡量每一个放射性废液处理子系统储存容量和处理流量是否与其最大预期输入（不考虑发生的频率）相匹配，以确定其在最大量的低概率废液输入时的后果及可处理性。若确认为不足时，则可设置附加的容量。

5) 设计容量裕度

每一个常压的贮箱和地坑均应在其总容量中包括一个较大的裕度。

### 2.9.3.2.7 其他

在控制区内的旋转设备的轴承密封或是轴承润滑等应该被收集起来，而不能任由其坠落或飞溅到底盘或地面。水压设备应该有存放和收集油质的措施，以防落其在地面或流入地面废液里。含油系统在维修期间应自设收集措施，以防废油滴落在地板上或进入地面废液。尽量避免出现大面积的积油，如有有此情况则不可排往地面废液，需设置一个单独收集此部分废油的地坑。收集的含油废物考虑场内暂存。

### 2.9.3.3 系统特征

#### 2.9.3.3.1 配置

系统配置应满足如下要求：

#### 1) 废液处理时的人员辐照

废液处理区域和设备应设计成为预期放射源提供足够的屏蔽,包括液体和固体废物的积累和活度的变化。

设施的设计应充分将废物分类、处理和存储。

#### 2) 主要部件更换

设备、部件的设计应可达,并可由起重机移走。这包括大型设备周围的墙面和可拆除面板。

### 2.9.3.3.2 冗余度及灵活性

#### 1) 灵活性

大型设施的设计和运行的各个方面都应考虑灵活性,包括有关流入和流出物容量的最大灵活性,移动式处理设备和废物隔离的灵活性。

#### 2) 运行的独立性

应采用冗余或替代的工艺为每个子系统提供必须提供持续的废物接收能力和设备的可用性,考虑正常的设备故障,如介质更换。

### 2.9.3.3.3 工艺废液

在核电厂中,工艺废液一般是被稀释了的或被污染了的反应堆冷却剂,应该被单独分开收集在工艺废液贮槽。

### 2.9.3.3.4 地面废液

地面废液和其它高杂质较多疏水应进入收集贮槽和过滤子系统,也可进入蒸发子系统。

地面废液可考虑使用移动式处理设备,采用的技术和配置基于预期的废液特点、工业和设备供应商的经验。

### 2.9.3.3.5 化学废液

化学废液应被分开收集并暂存在化学废物贮槽内,并在通过过滤、蒸发后再取样分析后排放。

不含去污剂的溶剂、化学取样疏水和放化实验室的疏水被认为是化学废液。

化学废液贮槽内废液的PH值应被测量,并添加必要的化学物质中和废液,来满足蒸发子系统要求。

在高放射性含量的情况下,应通过蒸发子系统进行处理。

大规模去污废物可考虑由去污承包商处理,残余或泄漏应收集并输送到化学废液贮槽。

### 2.9.3.3.6 洗衣废液

所有洗衣废液应被单独收集并在洗衣废液系统处理。

洗衣废液应能在分批取样和分析后被输送到洗衣废液贮槽进行过滤和监控释放。

在高放射性含量的情况下,系统设计处理液体应通过蒸发子系统或移动式处理设备。

### 2.9.3.3.7 常规岛废液排放

核电厂汽轮机厂房的设备疏水及地面疏水应分别加以收集。通常,它们与放射性废液处理系统无关,在经检测其放射性含量后便经常规岛废液排放系统单独排放。一旦汽轮机厂房和它的疏水出现放射性超出规定限值时,其监测仪会将这些疏水引导至相应的核岛放射性废液排放系统的贮存箱内,待检测后决定是否需按放射性废液来进行处理。

#### 2.9.3.3.8 化学预处理

化学预处理系统将支持所需的添加剂按照处理技术规范添加。

#### 2.9.3.3.9 系统运行

远程操作应被指定为移动处理技术所能支持的运行方式。

启动后，子系统应开始运行，在收集贮槽低液位时停止运行，高液位时自动切换到另一个收集贮槽，或者当处理设备出现了高压差、高电导率和类似的信号时停止运行。

#### 2.9.3.3.10 设备旁路和隔离

核电厂的设计者应为处理设备设置设备启动和运行灵活性所需要的旁路。

### 2.9.3.4 关键设备特性

#### 2.9.3.4.1 管道

##### 1) 浓缩液的阀门及管道

在蒸发器中，其含有浓缩液的阀门和管道均应设有冲洗措施，并应设计成能预防这些浓缩液在管路中结晶。

浓缩液贮槽排放管道应设计成防止冷冻或堵塞。

##### 2) 地面废液疏水管道

在控制区应设置地面疏水管道，废液排向就近的地面废液地坑。

在不希望有交叉污染的厂房各房间和/或隔间之间的地面疏水管道，应分隔排出和/或加以密封，可采用两种方法：

隔离地面排水管网；

在相关区域的地面废液母管上设置水封装置。

管道的布置应尽量减少放射性废液、浓缩液、树脂的剂量影响，这包括非放射区和放射区。

##### 3) 水封

对管道存在间断排水的情况，其系统的工艺管道均应设置充有水的U型管水封和相应的隔离阀。

凡设有充水的U型管水封之处，均应采取措施以确保其水封完整，并不会因蒸发而失水。如果没有充满水，那么密封是无效的。

由于部分水封需在冰冻情况下使用，需有保温和伴热措施以保证水封装置不失效。

对于液位比较高的水封装置，应设置一定的系统压力的足够的空间防止水封液位波动。

#### 2.9.3.4.2 阀门

##### 1) 可操作性

在正常运行时需要变动阀位的放射性废液处理系统的工艺管道阀门均应在放射性废液处理系统的控制室操纵屏上进行远距离操作。所有远距离操作阀门均应设有阀位指示。

##### 2) 阀门类型

远距离操作的隔离阀应采用球阀或旋塞阀。

浓缩液管道上阀门应是全流道的阀门，这样浓缩液不会影响阀门的操作。

##### 3) 阀门密封件

用作阀门密封件的材料应具有适当的耐辐照性，并能适应预期的用途和使用寿命。聚四氟乙烯可考虑用作阀门密封件。

### 2.9.3.4.3 泵

#### 1) 轴封

泵应配备可靠的高质量的机械轴封，该轴封应是经过考验的，并应设计成易于维修。泵及其相关管道的连接应设计成易于轴封的更换和维修。

先进的、动压密封技术满足泵的要求，可应用于核电站。

当系统的水质满足密封注入水水质要求时，优先选用系统水用于密封注入，不需要外部水源。

当需使用泵输送高浓度浓缩液时，应提供密封水来密封，密封水自动阀与泵同时运行。系统设计应满足对密封水泄漏进行集中收集。

轴封泵不适用于输送高硼酸浓缩液或较多悬浮物。可用于相对清洁或经过滤后低杂质含量的场合。

暴露在外部的泵旋转部件应设置防飞射物装置。

#### 2) 排气及疏水

泵壳应设置排气和疏水连接，泵基的疏水管道应与泵轴封泄漏和泵壳疏水管道分别设置。泵及其连接管道应设置必要管道用于冲洗。

#### 3) 润滑

如果泵或电机为油润滑，则应配备集油装置，以防止油对排水系统造成交叉污染。

自动给油装置应设计成易于精准加油，以防止溢油。禁止使用倒置油杯加油方式。

#### 4) 浓缩液泵

对于高固体浓度废液的泵应采用已被工业应用的结构形式。推荐使用气动隔膜泵，螺杆泵也可用于浓缩液。

#### 5) 泵的维护

泵与其排出和吸入管道之间应采用法兰联接。

泵应安装在远离箱体底部、过滤器和离子交换床的地方。

泵应设置吊耳或其他用于吊装的部件。

#### 6) 地坑泵

泵入口应设置与泵流量匹配的，易于清洁的过滤网。

泵应便于拆装和维护。

### 2.9.3.4.4 常压贮槽

#### 1) 排气及溢流

常压贮槽应设排气管。排气管的尺寸应能防止贮槽在最大充灌和疏排流量时，不致产生超压或真空的现象。对有空气进入的贮槽其排气管应使用接管接至核电厂的通风系统，并相应加以过滤。

#### 2) 疏排及清洗

贮槽应满足以下规定，以尽量减少贮槽底部固体废物的堆积。

用于高固体含量液体收集系统的立式液体收集罐（如浓缩液、树脂等）应该有锥形底部，并将其排放和疏水管道设在贮箱的最低点。箱体应尽量采用圆筒形，树脂贮槽、浓缩液贮槽以及相分离器等要求采用圆筒型。

卧式贮槽不应用于可能积聚固体物质的系统（如反应堆冷却剂疏水箱，地面废液贮槽，树脂贮槽等）。

贮槽在制造过程中不应形成缝隙和腐蚀积垢物的集聚点。

凡采用油润滑的泵及电机均应设有甩油环及集油装置，以使油不致污染其他的疏水。

#### 3) 梯子

在贮槽外侧便于人员进入贮槽处应设有梯子。

#### 4) 人孔

贮箱应设有足够大的人员入口，以便允许穿着防护衣服、并随带移动式的通风、照明及维修设备的工作人员进入。至少应该有一个椭圆形顶部或侧面入口通道(直径最少DN600)在靠近罐体顶部的位置。且最好配置有专门用于通风等服务设施的第二人孔。

为了快速拆卸和放置人孔盖，应提供局部固定装置或链条。

对于顶部入口的人孔，应在箱体顶部留有足够的空间。

#### 5) 箱体的连接

贮槽的所有连接和配件均应焊接。

#### 6) 搅拌措施

收集箱和监测箱应设置可搅拌其内废液的措施，以便能提供有代表性的样品，并使箱内的固体颗粒被搅拌成悬浮状态，在输送箱内废液时被排走。还应提供能定期将箱内沉淀的淤泥排走的措施。搅拌应采用流体动力装置，而不允许采用机械搅拌器。

#### 7) 贮槽抗真空设计

对封闭的和加热的贮槽应按能抗全真空的要求设计。

#### 8) 钢覆面

对于放射性活度浓度较大的非抗震类废液贮槽，其设备间的滞留池宜设置不锈钢覆面，钢覆面的高度应确保能容纳贮槽内的全部废液。

### 2.9.3.4.5 地坑

#### 1) 排气

为控制气载污染，其地坑的排气应引至通风系统。

#### 2) 地坑盖

地坑应加盖以防止碎屑物落入。盖子应是可移动的，或设置人孔，以供人员出入。

#### 3) 内衬

地坑应有涂层或内衬有大于60年寿命的耐腐蚀材料(随地坑位置而定)。

#### 4) 地坑泵

在控制区的地坑一般是不易接近的，例如：安全壳地坑，需设置冗余泵。但如地坑内废液放射性水平比较小或可控，且地坑具备可达性，则设置一台地坑即可。地坑泵应采用立式地坑泵。

#### 5) 地坑清洗

所有地坑均应设有清除积油和淤泥的措施。所设置的措施，诸如搅拌装置，至少在泵排出时应起搅拌作用，将此类积聚减至最少。

### 2.9.3.4.6 添加剂子系统

#### 1) 设备

废液子系统若需用化学物品、絮凝剂等，则应包括混合箱、搅拌器、计量装置等设备以及管道、阀门。

#### 2) 位置

添加剂设备应布置在总是能进入的低辐射的区。

#### 3) 贮箱容量

每一个添加剂箱应既是一个混合箱又是一个供应箱，其容量应能供应在正常流量下一周的混合添加剂用量。

#### 4) 布置

应设置永久性通道或将贮箱穿过楼板布置,使箱顶便于人员接近进行添加剂的添加和观察。

#### 5) 计量泵

每台计量泵连续的可调范围应能包络添加剂预期的最小至最大的流率。

#### 6) 箱体排气

凡需去除烟雾和尘埃的箱体排气均应引往通风系统。

### 2.9.3.4.7 疏水箱的覆盖

反应堆厂房反应堆冷却剂疏水箱、核辅助厂房反应堆疏水箱及其具备同样功能的废液处理系统的设备均需采取一定的措施,以防放射性气体的释放,并避免氢爆。典型的方法是隔膜覆盖或惰性气体覆盖。

### 2.9.3.4.8 离子交换床

设计者应为每台离子交换床规定树脂的类型和形式,树脂应在较高温度下使用(不超过60°C),使用寿命应长。

树脂类型除采用特殊的选择性离子树脂外,一般应采用强酸型苯乙烯-二乙烯基苯阳离子树脂和强碱型季胺基阴离子树脂。

树脂型式除用于除硼外,阳树脂应选用H<sup>+</sup>型,阴树脂应选用OH<sup>-</sup>型。

### 2.9.3.4.9 蒸发器

#### 1) 设计要求

蒸发器结构材料的选择应该考虑料液的化学成分,同时应考虑料液中可能存在的杂质和化学调节剂,要能够经受在浓缩液沸腾条件下的腐蚀,并留有足够的腐蚀裕量。

对于带有独立加热器的蒸发器,其加热器应可拆换。

蒸发器应能完全排空后进行清洗。

蒸发器的设计应尽可能降低二次蒸汽中夹带液滴量,以提高蒸发器的去污因子。

蒸发器应远距离操作。设计和布置蒸发器时,应该考虑尽量减少维修期间对工作人员的照射。

#### 2) 布置

蒸发器应设计成能允许检查其内部构件。要求人员通道应达到足以能适应一个穿防护衣和戴空气面罩的人员出入。蒸发器还应设计成易于拆移其内部构件,并应提供为这类拆移或其他维修操作所需的专门工具。

蒸发器的所有部件应设计、建造和布置在分隔的屏蔽区内,以减少在维修活动中来自邻近部件的辐照。

为蒸发器成套装置服务的各种管道阀门和仪表均应布置在蒸发器隔间的外面。

蒸发器冷凝器和排气冷凝器应布置在高位,其高度足以能正常地疏水。

### 2.9.3.5 仪表和控制

#### 2.9.3.5.1 地坑泵

##### 1) 自动运行

地坑泵应能分别在高、低液位的控制下自动交替启动和停运,在高高液位的信号下发出报警信号通知运行人员。

##### 2) 运行状态

所有地坑泵的运行均应在放射性废物集中控制室内加以显示。



#### 2.9.3.5.2 贮槽入口

采用两台并联使用的贮槽时，当第一台贮槽充满时，应由仪表自动切换进水阀门使水送至第二台贮槽，即当一台贮槽出现高液位时应自动将其入口的水流切换至另一台贮槽内。

#### 2.9.3.5.3 联锁

对定期有废液批量输入至贮槽的应设置贮槽的液位指示。

#### 2.9.3.5.4 调节阀

凡需要启动和停闭的子系统，其工艺调节阀前后均应配备适当的隔离阀。

#### 2.9.3.5.5 浓缩液流

##### 1) 传感器的隔离

设在高固体浓度的液流（蒸发器浓缩液）中的仪表传感器应设置隔离阀，并具有冲洗传感器管线的措施。

##### 2) 不堵的传感器

仪表传感器应尽量选用不易堵的传感器。

##### 3) 传感器的布置

仪表传感器应设置在不易堵塞且能提供精确和稳定读数的位置。

##### 4) 传感器型式

应采用外部的传感器。

#### 2.9.3.5.6 贮槽液位

设计者可参考和比较以往贮槽所含有的固体（浓缩液）液位的测量方法，并从其中选用一种已被实践证明获得成功的方法。

#### 2.9.3.5.7 排放管线监测

在排放管线上应设置放射性浓度监测系统、流量测量装置、自动和手动隔离阀，以测量流出物的放射性浓度，瞬时流量和累计流量，以及避免在排放废液时的人为错误。

### 2.9.4 放射性固体废物处理系统

#### 2.9.4.1 定义

##### 2.9.4.1.1 范围

本节说明了华龙技术电厂放射性固体废物处理系统的要求。

放射性固体废物处理系统处理电厂正常运行及预计运行事件产生的放射性固体废物，包括：

##### 1) 湿废物处理系统

湿废物是指水处理系统产生的废物，如废树脂、废过滤器芯、浓缩液等。湿废物处理系统应能处理所有此类废物，包括不同类别和放射性水平废物。

##### 2) 干废物处理系统

干废物处理系统，包括干废物分拣设施、可压缩废物的压缩设施以及包装设施。干废物处理系统包括干废物的厂内运输、处理设备本身以及相关的仪表和控制。

##### 3) 放射性固体废物暂存库。

设计也可考虑如下内容：

a. 移动式处理设备

固体废物的处理（预处理、处理、整备）可考虑采用灵活性高和经济效益好的移动处理设备。

如果设计者采用了固定式设备处理，应评估其经济效益和操作灵活性。

b. 厂外处理设施

设计者可以考虑厂外处理设施，如焚烧、超压、固化、脱水等设施。

固体废物处理不要求完全依赖电厂，厂外处理设施可作为选项。

#### 2.9.4.1.2 功能

1) 湿废物处理系统

湿废物处理系统接收和处理电厂产生的湿废物，包括：废树脂、浓缩液、废过滤器芯等。主要功能如下：

- a. 输送、接收、暂存和处理废树脂、浓缩液等；
- b. 在有代表性的地方对废物进行取样；
- c. 将废树脂、浓缩液等输送到暂存或处理容器中，并将其脱水，或水泥固化；
- d. 将废过滤器芯转移到屏蔽容器中，随后送至暂存或处理容器中；
- e. 将产生的废液送至放射性废液处理系统；
- f. 用盖子和其他方式密封处理容器；
- g. 送放射性废物暂存库；
- h. 容器表面处理以防止表面沾污。

在将废树脂等送往废树脂贮槽或处理容器的过程中，应有取样接口；循环管道提供取样接口，废树脂贮槽旁路管道提供取样接口。

在废过滤器滤芯从过滤器取出时，应提供取样接口或表面污染物测量。在取样或测量时，应尽量减少职业辐射暴露。

设计中可考虑使用移动式处理设备增加湿废物处理系统处理能力。

2) 干废物处理系统

干废物处理系统运输、处理、整备电厂产生的干废物，包括可压缩废物，如纸张、擦拭材料、衣物等；不可压缩废物，如受污染的工具、放射性设备部件和维修产生的废物等。

主要功能如下：

- a. 对废物进行就地分类；
- b. 将废物转运至处理设施；
- c. 为废物提供中间暂存；
- d. 废物分拣（可压缩与不可压缩、不适于手工分拣的高剂量废物、非放废物和可循环使用物品）；
- e. 压缩可压缩废物；
- f. 将可压缩和不可压缩废物包装入容器或水泥固定用于暂存和运输；
- g. 将装满废物的容器转运至运输车辆或者放射性固体废物暂存库；
- h. 检测废物桶。

3) 放射性固体废物暂存库

在送往处置场之前暂存放射性固体废物，放射性固体废物暂存库容量满足2.1.4.7节放射性废物处理的要求。

主要功能如下：

- a. 放射性固体废物暂存库提供不超过 5 年的暂存期；
- b. 根据需求设置屏蔽措施；

- c. 提供运输、放置和回取整备后的废物包；
- d. 提供放射性气溶胶的监测；
- e. 废物包运输前提供设置有屏蔽的空间用于放射性物质的衰变。

#### 2.9.4.1.3 接口

本节列出典型核电厂放射性固体废物处理系统接口，具体接口取决于华龙系列电厂的详细设计，接口如下：

##### 1) 湿废物处理系统

湿废物处理系统从电厂放射性水处理系统和放射性废液处理系统容器的废树脂、浓缩液、废过滤器芯排放点开始。

湿废物处理系统终点是将废物送至放射性固体废物暂存库或厂外处置厂。

湿废物处理系统终点也包括将产生的废气和废液送至通风系统和放射性废液处理系统。

湿废物处理系统接口包括：

##### a. 湿废物接收

水处理系统、废液处理系统等产生的废树脂。

水处理系统、废液处理系统等产生的废过滤器芯。

##### b. 放射性废液处理系统

放射性废液处理系统接收湿废物处理系统产生的废液。

##### c. 通风系统

通风系统接收湿废物处理系统产生的废气。

##### d. 电气系统

电气系统提供用电。

##### e. 仪表和控制系统

仪表和控制系统提供测量和控制。

##### f. 除盐水系统

除盐水系统提供除盐水。

##### g. 压缩空气系统

压缩空气系统提供用气。

##### h. 处置厂

转运至处置厂。

##### i. 移动式处理设备

潜在的移动式处理设备。

##### 2) 干废物处理系统

系统包括废物通过通道从各不同产地送至处理设施，因此干废物处理系统仅部分是实体的。为了保证厂内废物处理活动有足够的空间，废物收集地点和转运通道等需作为系统边界。

通常情况下，不同类型的干废物采用不同颜色的塑料袋收集，废过滤器芯单独收集。

系统终点在为将经处理和整备后的废物转运至处置场或者厂内废物暂存库。

同样系统排气送通风系统和废液返回放射性废液处理系统。

干废物处理系统接口如下：

##### a. 干废物接收

接收来自废物产生点的废物。

接收来自通风系统的废滤芯。

水处理系统产生废过滤器芯也可能作为干废物处理。

##### b. 通风系统

通风系统接收来系统的排气。

c. 电气系统

电气系统提供用电。

d. 压缩空气系统

压缩空气系统提供用气。

e. 去污系统

提供去污和循环使用工具和设备。

f. 处置厂

转运至处置场。

g. 移动式处理设备

潜在的移动式处理设备。

## 2.9.4.2 性能要求

### 2.9.4.2.1 暂存

放射性固体废物暂存库的设计前提是处置厂可用，固体废物暂存库贮存量不应低于核电厂三个月所产生的废物量，并且不超过核电厂五年所产生的废物量。

设计应考虑暂存库的扩建，如果处置厂不可用，应不影响电厂寿期内的正常运行。建议暂存库考虑全厂共用的设计要求。

暂存库建议考虑放射性固体废物处理系统处理产生的废物包以及装有蒸汽发生器排污系统废树脂的钢桶、废通风过滤器芯和受到轻微污染的大尺寸废物等。

### 2.9.4.2.2 废物最小化

#### 1) 湿废物

湿废物的来源包括废过滤器芯、废膜、浓缩液、废树脂等核电厂水处理系统产生的废物。

通过减少放射性水处理系统的污染物的输入和废液体积输入，并利用先进废物减容技术，以实现废物最小化。

设计者应充分考虑有效的经验反馈，以减少湿废物产生。

设计者应考虑实施废物清洁解控，实现废物最小化。

#### 2) 干废物

减少干废物产生的举措包括：

设计便于维护的厂房和设备；

合理管理维修活动，包括根据放射性水平、废物来源进行废物分类；

将废物分为放射性废物和非放射性废物；

减少和回收利用纸张、塑料、脚手架、工具等。

上述举措通常在运行程序中体现而不是在设计或者技术规范中体现，但是为了实现废物最小化的目标需要上述实践。

电厂设计者需对干废物产量做出合理的估计，以便提供减容措施，以满足电厂总体目标。

设计者应充分考虑有效的经验反馈，并将有效的干废物最小化举措纳入电厂设计。

设计者应考虑实施废物清洁解控，实现废物最小化。

### 2.9.4.2.3 人员辐射暴露

经验表明，在操作和设备维修过程中，由于核素累积，需要安装屏蔽措施。

这对于长期、低放射性废物或高放射性废物处理、分类和暂存区域（例如，废物容器装载、部分分类装填容器和废树脂/浓缩物输送管道）特别关键。

处理区域和设备的设计应包括对源项进行充分屏蔽。这包括固体废物积累和活度变化。废物处理设施的设计应充分考虑分类收集、处理和暂存活动。

#### 2.9.4.2.4 湿废物处理系统

湿废物处理系统的性能标准以最佳运行的电厂为基础，会随现有技术、法规要求、行业标准 and 环境问题不断发生变化。

实现废物目标不仅需要合理的设计，而且取决于电厂运行、相关的国家和地方法规标准以及暂存、运输和处置废物的形式和活度水平。储存、运输和处置的要求由国家相关机构制定，与电厂的设计和操作系统方式无关。

#### 2.9.4.2.5 干废物处理系统

干废物应进行分类收集。

在放射性废物设施、移动系统设施或其他收集地点应提供空间，以测量进入的废物容器的表面剂量率。应预留空间，以便将剩余废物按预期的处理方法分类。

必须提供空间和支持设备（例如，压缩空气、除盐水、电气、通风等）来处理干废物。可以通过使用固定设施和设备来实现，也可以通过使用移动式处理设备实现。

#### 2.9.4.2.6 放射性固体废物暂存库

##### 1) 贮存要求

放射性固体废物暂存库容量满足2.1.4.7节放射性废物处理要求。

暂存库需适应废物最终处置容器。

暂存库可通过在单独设施或者共用设施的空间实现。若现场暂存库为单独的设施，则需与其他设施邻近并处于低辐射控制区。

高放射性废物包贮存区域应与放射性废物包分离。

暂存库需室内贮存。

暂存库需在贮存容器外运区域为卡车提供泊位。

##### 2) 屏蔽要求

满足电站辐射限制要求。

可不受限制的接近贮存区外。

降低对邻近区域的辐射影响。

##### 3) 意外破损

保持移出废物的能力。

监测和控制潜在的放射性气溶胶污染，例如通过厂房通风系统。

##### 4) 其他要求

暂存库需具有火灾自动报警和灭火系统。

暂存库及其处理和转运设备需适废物包容器的要求。

高剂量废物包贮存区域需满足贮存的废物包逐一回取原则。

高剂量废物包贮存区域需提供具有可识别特定废物容器的远程监视手段。

在高剂量和低剂量区域中的废物包的运输设备需满足湿废物处理系统和干废物处理系统中对于废物包的要求。

暂存库应设置废物包信息存储系统，包括废物包位置信息和核素信息。

#### 2.9.4.3 系统特征

##### 2.9.4.3.1 湿废物处理系统

废树脂和浓缩液处理应包括运输、收集、浓缩和临时暂存，然后直接在用于处置的容器内脱水或水泥固化。

#### 1) 废物分类

所有的湿废物应进行分类收集，且应存具有暂存能力，如废树脂贮槽、屏蔽容器等。

至少应设置两个废树脂贮槽，以分别贮存不同放射性活度浓度的废树脂，但废树脂贮槽的进料管道应相互连接，以便必要时废树脂贮槽可互为备用。

#### 2) 废树脂

废树脂应按其放射性水平分类收集，存于不同的废树脂贮槽，能进行清洁解控的应进行清洁解控。

通过输送泵或压缩空气，将废树脂从离子交换床输送至废树脂贮槽。

设计应能旁路废树脂贮槽，而将废树脂直接输送至处理处置容器。

#### 3) 脱水系统物理特性

设计应定义脱水系统湿废物的物理特性，包括：

正常和异常操作工况下，单位时间的体积和年平均值；

放射性核素和活度水平；

废树脂等物理形态和浓度。

#### 4) 系统容量

废树脂贮槽容量要求如下：

废树脂贮槽容量应至少能够容纳一批次最大废树脂输入；

废树脂贮槽容量应考虑脱水和转运因素；

应根据废树脂接收贮槽及废过滤器贮存设施规模合理确定高完整性容器（HIC）脱水装置的数量及脱水能力；

在转运车辆装卸区，应提供专用的装卸工具和建筑空间。

#### 5) 废物包

最终废物包应符合国家法规标准和处置厂的要求。

### 2.9.4.3.2 干废物处理系统

#### 1) 系统容量

干废物暂存区的容量应不少于预期最大输入时7天产生的干废物的量。

压实装置的处理能力应能处理预期最大输入的废物量。

#### 2) 废物包

最终废物包应符合国家法规标准和处置厂的要求。

### 2.9.4.4 关键设备特性

#### 2.9.4.4.1 湿废物处理系统

#### 1) 布置

基于系统部件故障率和部件维修更换难易程度，应考虑对废树脂输送和脱水系统中的部分组件设置冗余。

脱水系统包括收集废树脂的管道和阀门，排放废液和废气的管道、阀门和软管，以及脱水设备本身。

电站设计者应定义处置容器的尺寸和所需其他容器的尺寸。处置容器应满足处置场的要求。

电站设计者应设计完整的脱水系统，包括废树脂排放和脱水后废液排放的管道和阀门，可移动设备的特殊接口和运行要求。

人员在低放射性时才可以进入废物处理区域。正常情况下所有通道应为紧闭状态。

## 2) 脱水系统设备

脱水系统设备特征：

容器设计应有屏蔽；

便于向容器添加废树脂；

通过软管连接容器和填充管道。

树脂输送管与软管连接阀门须是三通阀，允许除盐水冲洗管道。

脱水系统功能：

将废树脂排入容器；

将脱水后的废液排入废液处理系统；

检测排入脱水容器中的液位；

对液位进行视频监控；

脱水完毕后对容器进行封盖；

废气排放。

脱水容器内的组件应包括终端带有多层过滤器的脱水管道，脱水完成后过滤器保留在容器中。

设计应确保废树脂等废物在脱水容器中的溢流不会对容器和装载区域产生沾污。

设计应使在脱水操作时人员所受辐照剂量最小。设计时应设置人员就近操作或远程操作。

脱水容器泄露废物量应最小化。

脱水操作应在一个装填站中进行，并邻近转运拖车位置。

装填区域应包括脱水头以及其清洗所需的其他设备的暂存区域。

## 3) 脱水容器的操作

应采取措施完成脱水容器转运操作。

装填后的容器转运应通过远程操控完成，除非容器已屏蔽保护。

装填后的容器从装填区和暂存库吊装至拖车时，既有屏蔽过程又有未屏蔽过程。

需对容器安装顶部屏蔽盖。

从库房将空桶运至装填区域。

转运设备应为成熟可靠的设备，有工程经验。

应具备远程观察未屏蔽的容器转运操作的功能。

应尽量减少转运容器所需的不同设备种类，所有的转运操作应在同一个楼层或类似的简单设计进行。

应考虑转运操作中所有的可能潜在的故障，并提供容器转运故障的恢复措施。

## 4) 管道和阀门

管道和阀门应满足放射性废液处理系统关于管道和阀门的要求。

用于水力输送废物（如废树脂等）的管道应进行特殊设计以实现无故障操作：

输送废树脂等的管道尺寸应至少为DN50；

管道中的流速应满足一定要求，并应具有足够的液/固比例，在树脂排放时容器内必须充满足够的水；

管道应直接连接至屏蔽容器；

弯管应有至少5倍管道直径；

宜采用对接焊；

管道设计应减少废物沉积，以易于输送树脂；

管道上应预留冲洗管接头以使管道堵塞时易于管道的冲洗，冲洗管接头应与管道成45度角，并配有空法兰冒；

管道支管连接应使废物沉积可能性降至最低，支管应设计水平连接在主管道在中心部位，管道的底部中心部位不应连接支管；

管道在端部和底部都应该连接冲洗管道；

废树脂等输送应由泵或容器的压力提供足够在压头克服管道中压力的损失和使管道中树脂保持悬浮状，应提供足够在水，以维持足够的液/固比例，此外还应提供超压保护；

输送管道在输送完废树脂后应提供管道的自动冲洗功能，并提供至少两倍管道容积的冲洗水量。

从废树脂贮槽中排往脱水系统的水应通过泵送回废树脂贮槽中。

输送泵应为叶轮类型，需提供足够的压头克服管道中压力损失。

应提供除盐水冲洗能力，用于稀释废树脂、管道冲洗和降低放热反应影响。

输送树脂的阀门应采用全流道形式，并且不存在滞留固体颗粒在空间。

所有含有液体或潮湿空气的设备应采用抗腐蚀材料，如奥氏体不锈钢。

#### 5) 废树脂贮罐

废树脂贮槽应由奥氏体不锈钢制造，以满足耐腐蚀的性能要求。

贮罐底部设置水力混合使罐体中废物混合均匀，不沉淀，便于排出。

贮罐底部设置泵力输送。

易造成阻塞的杂质不能进入贮罐或搅拌装置中。

装填废树脂的贮罐应设置安装有滤筛的溢流管。

贮罐应安装过滤筛。

树脂滤筛应安装在贮罐内部，以使树脂可以落回贮罐内，而不造成滤筛的堵塞。

滤筛应足够大以使它具备足够的过滤能力。

废树脂贮槽应具备通过动力混合器进行树脂的疏松功能，树脂的疏松使得树脂取样装置可以正常取样。

### 2.9.4.4.2 干废物处理系统

#### 1) 布置

放射性废物处理设施需为固定设备以及与其等效的移动式处理设备提供空间，已满足如下功能：

运输容器的运输通道和贮存空间完全可达；

干废物在压缩前的暂存和运输，包括必须的辐射屏蔽和人员隔离；

干废物分拣；

压实；

经整備后废物暂存的空间；

运输。

需为接收干废物提供暂存空间，该空间需为单独房间。该房间需具有隔离中、低放射性水平废物的能力。需将高放射性水平废物暂存区和低放射性水平废物暂存区隔离。

布置需便于通向放射性废物暂存库。

保证物流通道，充分考虑物料移动、与操作员相互影响以及通风。

需提供屏蔽用于废物运输容器外表面污染检测和必要时的表面去污。

#### 2) 对压实装置的要求

压实装置按压力一般分为初级压实装置和超级压实装置两类，初级压实装置一般采用100~1000kN的压实机。

压实装置排风系统的设计应能保证压实区域保持一定的负压。

压实装置的排气应排往厂房排风系统的吸入口。



压实装置需具备足够的结构强度以承受可能发生的最不利的偏心载荷。

压实装置需具有连锁以防止通风系统故障或者门未关闭的情况下运行。

压实装置的液压软管不能暴露在人员易于接近的地方。

需提供压头导向、容器对中和满载容器卸出功能。

压实装置需能够安全的将容器保持在压头所在位置。

压缩过程需能够允许使用防废物反弹装置。

### 3) 干废物分拣设备

分拣设备应考虑去污手段，下部设置相应的排水口；

为提高废物分拣效率，干废物分拣设备一般设有多个工位，用于将分拣出不同类型的废物放入相应的废物收集容器；

分拣台的边缘需能够防止废物滑落到地面；

宜采用密封式分拣设备，应设置排气净化装置和照明设备。

### 4) 废过滤器芯处理

设计需包括在最少人员剂量和污染扩散条件下，将废过滤器芯转运到干废物包装站。通常的方法为使用单轨吊或者转运小车。需提供滤芯更换、屏蔽和转运的方法。

系统设计需保证转运废过滤器芯时避免从转运小车上泄漏。

为了实现辐射防护的ALARA原则，转运小车需设置屏蔽。

将废过滤器芯装载到转运小车的过程应可采用不需目视监测的远程操作。

废过滤器芯子应整备在钢桶或者高完整性容器（HIC）中。

### 5) 无屏蔽的干废物运输

设计者应为不需屏蔽的干废物设计便利高效的处理和转运。

### 6) 需屏蔽的干废物的运输

设计者应为需屏蔽的干废物设计转运设备。

### 7) 废物包运输

需提供将废物包运输到放射性废物暂存库和厂外处置厂的运输方法。操作人员受辐照剂量应通过设备的屏蔽保持在低水平。

### 8) 干废物容器检测

需提供检测干废物容器的方法，以便确定其分类。

## 2.9.4.5 仪表和控制

### 2.9.4.5.1 湿废物处理系统

#### 1) 控制

仪表和控制应具备湿固体废物处理系统的集中控制室和可进入区域的就地控制；

集中控制应包括湿固体废物处理系统所有的仪表显示和控制需求，包括废树脂贮槽相关的树脂转运控制；

对于自动控制过程步骤均应预留手动控制功能。

以下这些参数应在集中控制盘上显示或报警

废树脂贮槽液位显示，并与树脂转运操作进行连锁；

容器的液位；

泵和阀门的状态；

所有摄像头配对的显示器。

仪表传感器应满足可用于带有大量固体颗粒流体的测量的要求，并且满足规定的湿废物液位测量要求。

#### 2) 废过滤器芯处理

设计应将废过滤器芯运送到湿废物处理设备,同时最大限度地减少人员接触和污染扩散。  
系统设计应防止在运输废过滤器芯时从运输车辆泄漏。  
转运车辆应进行屏蔽防护,以减少对操作人员的辐射。  
废过滤器芯在钢容器或高完整性容器(HIC)中或水泥固化处置。  
应提供方法,对每个废物容器进行辐射调查。  
应提供方法,允许定期取样或表面检测,以确定和核实废物分类。

### 3) 远程操作

设计应考虑到高放射性水平废物的远程操作。

## 2.9.4.5.2 干废物处理系统

设计应考虑到高放射性水平废物的远程操作。

## 2.10 燃料操作和贮存系统

### 2.10.1 定义和系统功能

用于核电厂内装卸和贮存燃料组件及其相关组件的系统。该系统包括,从核电厂接收新燃料组件起,经装堆、堆内运行后卸出、转运、厂内贮存,到装入乏燃料运输容器准备发送出厂整个过程使用的设备、工具。燃料装卸和贮存系统由新燃料贮存系统、燃料装卸系统、乏燃料及其他已辐照部件的装卸和贮存系统等系统、设备组成。

### 2.10.2 原则要求

压水堆核电厂燃料装卸和贮存系统在设计时,应满足以下原则要求:

- 1) 应保证在各运行状态和设计基准事故工况期间及其后不会形成临界布置;
- 2) 应贯彻使工作人员在各种工况下遭受的辐射照射合理可行尽量低的原则;
- 3) 应为已辐照燃料的装卸、转运和贮存提供充分的冷却,保证在各种工况燃料不过热;
- 4) 燃料装卸设备的设计应能防止燃料组件机械损伤或跌落,并避免对燃料组件施加不可接受的装卸应力;
- 5) 应保证在各种工况下向厂外非限制区的排放符合GB 6249《核动力厂环境辐射防护规定》的要求;
- 6) 应能在燃料装卸贮存期间检测燃料破损和事故工况所造成的放射性物质的释放量,以及操作人员受到的辐照,并使其保持在可接受的限值内;
- 7) 应统筹考虑燃料装卸和贮存系统和其他相关系统的设计,以保证系统内、外部合适的接口;
- 8) 燃料贮存和装卸设施及设备的设计应能保证设备检查、试验和维修所必需的可达性,并便于进行辐射监测和污染检查;
- 9) 应保证系统和部件有足够的承受能力来承受可能施加在它们上面的重要载荷(如:楼板载荷、地震和动载荷)。

### 2.10.3 一般要求

#### 2.10.3.1 新燃料贮存系统

- 1) 在各种工况下,新燃料贮存架应具有防止临界的结构和排列。格架中的每一个贮存单元应有足够的间距,以保证燃料操作期间不损坏或破坏燃料组件。
- 2) 为了保证与燃料组件的接触是安全的,新燃料贮存架应选择与燃料组件材料

相容的材料作为贮存单元的表面。接触表面不能用易于碎裂、易于剥落、或者易于在摩擦接触中损坏脱落的涂层。

3) 应防止慢化材料（例如水）淹没新燃料干法贮存区。系统计划的干式贮存架应有一个排水系统用来预防水的积聚。排水系统不允许逆流。排水系统应能容纳、排放区域中的管道断裂产生的最大水流。

4) 新燃料贮存区应保证不积聚慢化剂（对于干法贮存）。

5) 应提供充分的手段来检查新燃料并为检查新燃料组件提供场地和设施。

6) 应保证燃料组件在装卸、检查和贮存的过程中不受损伤或不减少次临界要求的裕量。

7) 贮存架内燃料组件的最小装量，应为一个正常换料循环中向堆芯补充的燃料组件的最大数量。

8) 应考虑新燃料的实体保卫以防止燃料丢失或损坏。

9) 新燃料贮存架应按抗震I类设计。

### 2.10.3.2 燃料装卸系统

1) 所有装卸新燃料组件或乏燃料组件的设备应能够防止意外临界。

2) 含有抓取、锁销、转运、转动、支承或提升燃料组件功能的设备，其设计应力应保证不发生能导致燃料组件坠落或损伤的任何零件的结构性失效。

3) 应设置适当的机械、电气装置，保证：

a. 装卸操作按规定程序进行；

b. 不发生燃料坠落或被碰撞损伤等事故；

c. 燃料组件的提升高度，提升力和下插力处在安全限值的范围内；

d. 设备故障或失电时，应有能力移动一组燃料单元或一组控制组件，确保被装卸的燃料组件处于安全状态。

4) 应考虑设备的设计寿期、可维修性和可去污性，以及材料、元器件的耐腐蚀能力。

5) 设备应根据有关规定或技术文件的要求进行检查和试验。

6) 应尽量减少与存、取燃料组件或控制组件操作无关的重物，采取措施防止重物对燃料组件造成损伤，禁止乏燃料运输容器通过燃料贮存区上方。

7) 设计上应采取必要措施，防止乏燃料运输容器装卸操作时发生坠落、完整性或设计功能破坏的事故。

8) 设计上应采取必要措施，保证操作或维修时物料（包括油质）不掉入反应堆、燃料组件或乏燃料贮存水池内。

9) 设计上应保证操作人员能清楚地观察到被操作的燃料组件所处的位置和整体状态。

10) 应避免燃料装卸装置尖锐边缘对燃料表面的损坏。

11) 应提供充分的手段来检查已辐照燃料。

### 2.10.3.3 其他已辐照部件的装卸和贮存系统

应在装卸和贮存系统中考虑其他已辐照部件的装卸和贮存，例如控制棒组件、可燃吸收体和中子源组件等。

### 2.10.3.4 乏燃料贮存架

1) 乏燃料贮存架应具有在保证次临界安全的结构和排列。

- 2) 贮存架应具有形成自然循环的能力和在各种工况下均可充分冷却被贮存的燃料组件的结构。
- 3) 贮存架的材料应与燃料及环境相容, 且贮存架结构不应因正常装卸和贮存操作而损伤燃料。
- 4) 应按反应堆寿期内任何时间需要的最大贮存量进行设计。贮存架内燃料组件的最小贮存容量, 至少应为一个正常换料循环中从堆芯卸出的燃料组件最大数量, 加上一个完整堆芯的燃料组件的数量。设计时, 应在最小贮存容量的基础上, 结合换料周期考虑从堆芯内卸出的已辐照燃料发运前在水池内贮存所需的贮存容量后, 确定一个不小于上述贮存容量之和的贮存架贮存量。
- 5) 乏燃料贮存架应按抗震I类设计。
- 6) 乏燃料贮存架的设计应具有足够安全裕度以承受在倾斜、摇摆、事故超载、运行基准地震、安全停堆地震等工况下独立或联合产生的应力。
- 7) 格架设计中如采用中子毒物作为临界控制手段, 应对中子毒物在寿期内的有效性进行论证。

#### 2.10.4 临界安全设计

##### 2.10.4.1 临界安全评定

- 1) 应对燃料组件装卸、转运和贮存的每个系统进行临界安全分析。
- 2) 临界安全分析应论证每个系统满足各种工况下规定的次临界限值。
- 3) 应对所有的运行状态和设计基准事故期间及其后的工况进行临界安全分析, 应包括下述可信事件:
  - a. 燃料组件倾倒;
  - b. 贮存架倾倒;
  - c. 燃料组件错放位置;
  - d. 燃料坠落;
  - e. 燃料组件沿贮存架外侧插下。
- 4) 当有两个独立的异常事件同时发生时, 才可能发生临界事故。
- 5) 临界安全分析应清楚地验证燃料操作过程和贮存工况的次临界特征。
- 6) 临界安全分析应清楚地证明, 贮存架在制造或建造后所做的实体验证符合次临界设计限值的要求。

##### 2.10.4.2 临界计算

燃料装卸和贮存系统设计的临界计算和安全分析按预期最高反应性的燃料组件浸没在水中为依据, 可适当考虑计算程序和制造公差等导致的各种不确定性和偏差。

新燃料浸没在纯水中,  $K_{eff}$ 在95%的概率和95%的置信度下, 正常运行工况 $K_{eff}$ 最大值不超过0.95; 事故工况 $K_{eff}$ 最大值不超过0.98。

乏燃料浸没在纯水中,  $K_{eff}$ 在95%的概率和95%的置信度下, 任何工况下 $K_{eff}$ 最大值不超过0.95。

#### 2.11 设备通用要求

##### 2.11.1 反应堆本体结构

本节仅规定了反应堆压力容器、控制棒驱动机构、堆内构件及堆顶结构的通用要求。

###### 2.11.1.1 反应堆压力容器

### 2.11.1.1.1 性能要求

反应堆压力容器设计中考虑到的瞬态工况是核电厂运行期间发生的典型工况。设备的设计寿命为60年。为确保反应堆冷却剂系统设备的完整性，所选择的瞬态工况是评估反应堆冷却剂系统的参考基础。

反应堆压力容器设计寿命应为60年。设计人员应当参照相关标准规范、已运行电厂或材料试验上获得的数据来进行设计。反应堆容器压力边界材料在整个寿期必须考虑低合金钢的辐射损伤。

### 2.11.1.1.2 设计要求

#### 1) 材料

反应堆压力容器应采用规范要求及工程上成熟的材料，保证60年的设计寿命，反应堆压力容器主体材料和焊接材料的化学成分应予以控制，降低材料对中子辐照损伤的敏感性，设计阶段应预测辐照对压力容器堆芯活性区材料性能变化的影响。

为了监督容器的辐照及辐照对容器材料性能的影响，需要编写材料辐照监督大纲。通过辐照监督试样获得压力容器堆芯环带区材料辐照后的力学性能、脆化程度，验证压力容器参考无延性转变温度的变化与设计阶段预测的一致性，并为确定在役阶段水压试验的试验温度、压力-温度运行限值曲线等数据提供依据，监测应在整个容器设计寿期内进行，这既要考虑材料所经历的中子注量率也要考虑在燃料管理方面的变化。

在电厂运行一开始就应将辐照监督管插入反应堆容器。监督大纲应给出监督管的安装位置、试样设置和监督管插拔计划。试件应包括足够的备用材料以便有可能制造追加的试样。

#### 2) 容器

反应堆压力容器设计应在满足疲劳设计准则方面应有较大的安全裕度。应当对压力容器关键部件进行鉴别、分析或试验验证，以证实满足疲劳设计准则。

反应堆压力容器设计应减少焊缝数量，焊缝应尽量避开高中子注量区，以减少在役检查工作量及提高使用寿命。

#### 3) 反应堆压力容器支承

反应堆压力容器支承承受反应堆本体及相关设备和介质的重量载荷，以及所支承设备在各类工况下产生的载荷，并将载荷传递给混凝土基座。

反应堆压力容器支承在结构选型、总体设计、厚板焊接设计、不等厚的焊接连接等方面应尽量做到完善，以保证结构设计的完整性。

#### 4) 顶盖排气管

反应堆压力容器上封头应设计排气管，以便排出压力容器内的蒸汽和不可凝结气体。同时排气管的尺寸应与反应堆冷却剂系统排放操作时的预期排放率相匹配。

#### 5) 贯穿件

反应堆压力容器应为堆内测量仪表组件提供导向通道及支承。堆内测量仪表组件均从压力容器上封头引入，以保证压力容器下封头的结构完整性。

反应堆压力容器上封头应设置贯穿件以便控制棒驱动机构从压力容器顶部插入堆芯。

#### 6) 反应堆压力容器接管

除了进出口接管和仪表管座，反应堆压力容器上也可以有其他功能类型的接管，这些结构需要与相关的系统功能相匹配。压力容器上接管的位置均应高于堆芯活性区，接管的位置不能影响换料、维护及在役检查等操作。

#### 7) 主螺栓的拆卸

按照ALARA的要求，反应堆压力容器主螺栓应可远距离拆卸和转运，螺栓孔在螺栓拆卸期间需要防护，主螺栓操作系统应该简单可靠。

为了缩短电厂换料大修时间，反应堆压力容器顶盖、顶盖中心保温层及堆顶应可整体吊装；设计中的可拆卸的接头均应快速可靠。

#### 8) 换料密封环

- a. 换料密封环应尽量设置在压力容器高位，以减少容器外表面被含硼水浸泡面积。换料密封环位置不影响顶盖的安装和拆卸。
- b. 堆腔密封环设计时，应考虑适当的通道，以便在进行在役检查时可接近压力容器底部，堆腔内应可通风冷却混凝土，保证混凝土温度在规范要求以下。
- c. 换料密封环应选用合适的耐腐蚀材料，以满足 60 年的设计寿命。密封性能不依赖于密封剂，密封环焊缝可以进行在役检查。
- d. 换料密封环设计时应考虑密封环失效导致反应堆内水位下降的单一故障，设计人员应根据系统的堆芯给水能力确定密封环损坏泄漏的设计准则，保证在密封损坏时堆芯仍能充分冷却，同时需要考虑误操作产生的密封失效。密封环的清洁应可远程操作，清洁人员不需要接近堆芯。

#### 9) 主螺栓布置

主螺栓应布置在顶盖法兰连接处，这样可以在顶盖密封处发生泄漏时主螺栓附近的冷却剂最少。

### 2.11.1.1.3 在役检查

- 1) 设计方应提供接近被检查部位的通道，并提供装备以便对容器所有焊缝(包括接管焊缝)进行自动在役检查。
- 2) 反应堆压力容器螺栓孔在换料期间应予以保护。螺栓孔塞的设计应设置可靠的密封以防止含硼水或腐蚀产物进入螺栓孔。

### 2.11.1.2 控制棒驱动机构

#### 2.11.1.2.1 性能要求

##### 1) 使用寿命

- a. 控制棒驱动机构压力边界应设计为使用寿命 60 年。非承压边界的零件使用寿命可以低于 60 年，但应可维修和替换；
- b. 控制棒驱动机构设计应考虑正常运行、事故工况和试验的载荷循环总次数（包括反应堆冷却剂压力边界的压力试验和反应堆运行期间的紧急停堆和落棒停堆试验），要求如下：反应堆驱动线抗震试验 OBE（运营基准地震）5 次；SSE（安全停堆地震）1 次；钩爪组件不检修的最小累积步数：6.1E6 步，设计和试验准则应与设计寿期 60 年相一致；
- c. CRDM 应配备外部冷却装置，或使用耐高温线圈应提供证明材料供业主查阅，以便在高温条件下能够保证其功能正常运行。

##### 2) 紧急停堆时间

当切断控制棒驱动机构的线圈电源时，在重力作用下，控制棒能够在预定的落棒时间内，从全提升高度完全插入堆芯。总的落棒时间从一次传感器感应到检测参数的变化开始到控制棒完全插入堆芯，该时间应满足事故分析的最大限定值。紧急落棒时间应包括机电延迟时间。

##### 3) 响应和棒位探测能力

- a. 控制棒驱动系统的响应时间和位置指示精度应能使堆芯反应性引入速率提供一个可以控制的运行特性（如期望的功率水平和功率分配），并且避免由于误操作而造成不可接受的反应性引入速率；

- b. 控制棒驱动系统棒位探测方法应采用冗余设计,以增加每一组控制棒从全插入到全提升高度的位置探测的可靠性,并且至少采用一种直接棒位探测方法。在这里,如果棒位作为一个输入参数提供给电厂保护系统,为防止棒位指示偏差事故时,所有的棒位探测方法都应采用直接探测方法;
- c. 安全性和可靠性;
- d. 控制棒驱动机构应设计成在任何一个部件或设备单一故障的情况下,不会妨碍落棒的安全的功能;
- e. 控制棒驱动机构应设计成在外部冷却中断(短时间)的情况下,仍能正常运行,并且不会造成设备损坏。

#### 2.11.1.2.2 设计要求

控制棒驱动机构耐压壳属于冷却剂一回路压力边界,结构应按照反应堆压力容器结构的相关要求进行。

##### 1) 材料

在选择材料时要考虑相应规范和标准的要求及在工程上的应用数据。选择用于焊接顶盖密封件的材料、所焊接方法使焊接密封件发生IGSCC(晶间应力腐蚀开裂)的概率降至最低。

##### 2) 密封

控制棒驱动机构密封设计均采用焊接密封,以防止冷却剂泄漏。为了方便检验及维护,在不拆卸相邻驱动机构的情况下应该接近密封结构。

##### 3) 行程限制

为了防止驱动机构插入或提升控制棒超过某一限定位置而降低其安全功能的能力,控制棒驱动机构的机械结构在所有运行载荷下均不能失效。

##### 4) 控制棒解扣

- a. 控制棒驱动机构设计应具备释放驱动杆的能力,以便压力容器顶盖拆卸;
- b. 控制棒驱动机构设计应能在提升、下插控制棒以及紧急落棒期间,驱动杆和控制棒组件不会因出现误操作而解扣;
- c. 为了方便能通过将反应堆压力容器顶盖提升至高于驱动杆组件时拆卸顶盖,驱动杆组件在任意高度位置时(例如控制棒保持在某一位置)均应能释放;
- d. 为了防止在反应堆大修期间控制棒组件误操作地从堆芯中提出,反应堆设计应提供一个清晰的、可视的方法来检查驱动杆组件是否与控制棒组件脱开、分离并提升了足够的安全距离。

#### 2.11.1.2.3 在役检查

控制棒驱动机构所有主要部件应能单独更换,线圈应能互换,线圈及所有电气部件应能在不破坏一回路压力边界和不拆除邻近驱动机构的情况下进行更换。

控制棒驱动机构与电气部件的连接,都应采用可靠性高且成熟设计的快拆结构的连接接头。连接接头应可在不拆卸其它设备的情况下能够接近。

控制棒驱动机构所有部件包括驱动杆组件,均应能单独拆卸。

#### 2.11.1.3 堆内构件

##### 2.11.1.3.1 性能要求

堆内构件的设计寿命建议为60年,尤其是对于不可更换的堆内构件设计上应尽可能考虑提高设计寿期,对于不满足设计寿期的部件应予以识别供业主查阅。

堆内构件的结构设计应使冷却剂流量分配充分冷却堆芯,并且满足安全分析的热工裕量

要求。反应堆内冷却剂的自然循环应足以有效地使堆芯冷却和排出衰变热。

#### 2.11.1.3.2 设计要求

##### 1) 材料

在长期高辐照条件下，堆内构件所用材料应能保证足够的力学性能及较低的活性积累，尽量限制或禁用含有活性截面大、半衰期长及辐照后易脆化元素的材料。材料应具有良好的耐腐蚀性能和耐磨蚀性能，同时也应具有良好的工艺性能。

##### 2) 水力学设计

- a. 反应堆本体下腔室应在满足堆芯入口冷却剂流量分配要求的前提下容积尽可能缩小，这样可以降低堆芯再淹没时间；
- b. 下腔室设计应开展水力学模拟试验，验证堆芯流量分配的合理性及避免下腔室底部出现涡流；
- c. 堆内构件设计方案应考虑为压力容器顶盖实施冷却，这样在顶盖腔室不会产生热分层而影响反应堆正常运行；
- d. 在正常运行工况下堆内构件应使冷却剂沿堆芯向上流动，避免由于压力导致冷却剂对堆芯外围燃料组件的喷射。

##### 3) 流致振动

堆内构件设计应考虑流致振动的影响。在电厂的运行前和启动阶段应该进行流致振动监测。如果堆内构件为原型设计，在设计阶段需要对流致振动进行评价，评价应包括堆内构件流致振动试验。如果堆内构件为非原型设计，那么应将已验证可接受流致振动的分类依据及试验数据或在役检查数据形成文件，并应将文件保存以备营运单位查阅。

##### 4) 螺栓

一般来说，堆内构件的螺栓应采用超低碳控氮不锈钢，如果需要提高螺栓强度，可采用冷加工制造。如果需要使用高强度螺栓，则可使用镍基合金代替，而此类螺栓在使用过程中涉及到的材料、采购、质保等文件应予以保存，以便业主查阅。

堆内构件长期处在高辐照环境条件下，尤其是围筒等下部堆内构件建议多采用焊接式结构，尽量减少螺栓连接，这样可以提高使用寿命。

#### 2.11.1.3.3 在役检查

上部堆内构件和下部堆内构件均应可作为整体从反应堆压力容器内垂直吊出，堆内构件的吊装应与反应堆停堆换料的总体要求保持一致。

在核电厂寿期内反应堆堆内构件设计应可远程自动检查紧固件、焊缝和其他结构。反应堆停堆换料时应对堆内构件结构完整性和表面沉积物等进行检查。对于堆内构件结构性能可能发生退化的零部件设计上应便于在役检查。

#### 2.11.1.4 堆顶结构

##### 2.11.1.4.1 性能要求

堆顶结构应能保证顶盖组件吊装需求，有效限制控制棒驱动机构的过度变形以维持其正常功能，利于控制棒驱动机构线圈散热，合理引导堆顶的所有电缆。

##### 2.11.1.4.2 设计要求

堆顶结构设计应能满足各类功能要求，具体如下：

- 1) 推荐采用一体化堆顶结构，尽可能整合反应堆堆顶结构相关部件，减少反应堆开扣盖操作步骤，节省反应堆开扣盖时间，减小操作人员受辐照剂量；



- 2) 在地震情况下限制控制棒驱动机构的过度变形以维持其正常功能, 保证在事故工况下的功能完整性;
- 3) 能够带走控制棒驱动机构线圈的发热, 以保证控制棒驱动机构正常工作;
- 4) 将反应堆顶的所有电缆引到规定土建接口处;
- 5) 在安装、换料和检修时与压力容器顶盖吊具连接将整个堆顶结构吊到(离)压力容器;
- 6) 尽量减少制造、安装及在役检查难度, 尽量减轻反应堆堆顶结构重量, 尽可能提升经济性;
- 7) 在堆顶结构设计时建议考虑防止控制棒驱动机构驱动杆及行程套管的弹射。

#### 2.11.1.4.3 在役检查

堆顶结构应便于对其内部相关部件进行在役检查操作。

### 2.11.2 反应堆冷却剂系统主要设备

#### 2.11.2.1 蒸汽发生器

##### 2.11.2.1.1 功能要求

蒸汽发生器作用是将反应堆产生的热量通过冷却剂传递给二次侧的水, 水被加热转变为蒸汽, 蒸汽经汽水分离和干燥后去驱动汽轮机发电, 蒸汽发生器需满足如下功能要求。

- 1) 为核电厂提供性能参数合格的蒸汽。
- 2) 为核电厂提供可靠的第二道安全屏障。
- 3) 为反应堆冷却剂系统提供有效的自然循环冷却能力。

##### 2.11.2.1.2 设计要求

###### 1) 材料

对蒸汽发生器材料的总要求详见2.11.4节, 此外, 传热管、传热管支承、给水环、管板和其他内件的材料应具有足够的抗损伤的能力, 如传热管的耗蚀和减薄、凹陷, 由于热工水力条件和腐蚀性化学品造成的侵蚀和腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀裂纹、传热管点蚀和破裂、传热管的磨损以及其他已知的劣化因素。

###### 2) 传热管支承要求

管束布置及传热管支承的设计需要经运行经验或分析的验证, 以排除在运行工况下蒸汽发生器传热管流致振动造成的损坏。

###### 3) 内件的结构适应性

蒸汽发生器内件设计应考虑下列动载荷的作用。

- a. 一回路和二回路系统管道破裂, 包括不能用先漏后破方法排除的支管破裂;
- b. 满功率下汽机旁排的误开启。

这些动载荷的作用应与其他载荷组合, 如: 地震载荷。给水环、接管防热冲击衬套和其他内件应耐热疲劳。

###### 4) 人孔和检查孔

在二次侧壳体上临近管板上表面处设检查孔, 设计蒸汽发生器的入孔和检查孔的方位时, 应考虑可达性。

###### 5) 传热管与管板连接

蒸汽发生器传热管与管板连接应采用全深度胀接管板一次侧密封焊的结构, 这种结构消除了缝隙。为降低胀管过渡区的残余应力, 胀管设备和工艺应经验证。

#### 6) 减小泥渣沉积

蒸汽发生器下排污收集管和排污管嘴的数量、规格和位置要足以满足热态运行工况下排污的要求，减少泥渣在管板上的积聚，减小非挥发性溶解杂质浓度。

#### 7) 水锤的预防

蒸汽发生器的设计及给水管道的布置，应减小主给水管或应急给水管、排污管道、取样管道内或蒸汽发生器内件上发生水锤的可能性。

#### 8) 满功率蒸汽流量和压力

蒸汽发生器在满功率工况下，二次侧产生的蒸汽满足压力和质量流量要求。此外，蒸汽发生器传热面积要有足够的余量，以保证在堵管 10% 时，二次侧产生满足满功率要求的蒸汽。

#### 9) 蒸汽湿度

在反应堆冷却剂系统及给水系统以规定参数运行时，蒸汽发生器应按规定的压力、温度和流量提供湿度不大于 0.25% 的蒸汽。

#### 10) 二回路侧水装量

蒸汽发生器二次侧要有足够的水容积，以便在完全丧失正常给水后，应在一定时间内不要求启动应急给水，水位不会达到低水位停堆整定值。一定时间内蒸汽发生器不蒸干。同时尽量使水装量控制简化。

#### 11) 循环倍率

蒸汽发生器二次侧应有合适的循环倍率和良好的流动状态。

### 2.11.2.1.3 维护

蒸汽发生器下封头内的空间和布置应便于对所有传热管进行检查和维护，包括堵管、衬管和拆堵头。下封头的布置，尤其是由此产生的辐射水平不应成为限制工作人员进入下封头进行检查和堵管的因素。

### 2.11.2.2 稳压器

#### 2.11.2.2.1 功能要求

稳压器对一回路主系统进行压力、容积的调节和控制，对保障一回路主系统压力边界完整性有重要的作用，在与其相关的设备和管系的共同配合下需满足如下功能要求。

- 1) 当核电厂正常运行时，把系统压力控制在正常范围内。这些工况包括：启、停堆，升、降温，功率运行，负荷线性变化，甩负荷等。
- 2) 当核电厂处于异常工况或发生事故时，会引起系统的压力急剧上升或下降，这时，应在相关辅助系统配合下，把系统压力变化控制在允许范围内。这些工况包括：流量部分丧失，断电故障，阀门故障等。
- 3) 其所设置的安全阀，可对整个系统实现超压保护，以维护一回路压力边界的完整性。
- 4) 稳压器有足够的容积，使得当一回路冷却剂由于温度变化而变化时，其变化部分可由稳压器内水容积的变化来得到补偿。
- 5) 稳压器电加热器提供部分热源，和反应堆冷却剂泵一起，在反应堆启动时，满足系统升温、升压要求。

#### 2.11.2.2.2 设计要求

##### 1) 材料

对稳压器材料的总要求详见 2.11.4 节，禁止使用 600 合金。

## 2) 稳压器电加热器

稳压器电加热器应采用成熟的产品或经验证的产品。

稳压器加热器设计应使加热器裸露时不会造成反应堆冷却剂边界的破口，也不会损坏稳压器外壳，或在电加热器裸露时，提供冗余的切断电加热器电源的方法。

稳压器加热器在设计上应考虑备用和单独更换，布置电加热器时，应处理好与波动管在布置上的关系。

## 3) 稳压器喷雾器

- a. 要求喷雾器有足够大的流量，以满足瞬态压力波动要求。喷雾器应能产生角度适中的全圆锥形均匀的雾化流。
- b. 喷雾器压降应较小，雾化颗粒应较细。
- c. 喷雾器最小连续喷雾流量应能补偿喷雾管、波动管及所属管件的散热损失，并保证稳压器中有均匀的水质和硼浓度。
- d. 稳压器喷雾管穿过稳压器上封头处应设置热套管，以降低冷的喷雾水喷入时引起高的热应力。
- e. 喷雾器应便于更换，通常用螺纹连接并用锁紧块锁紧，然后通过焊接予以固定。

## 4) 稳压器安全阀

稳压器上设置具有超压保护功能的安全阀，安全阀在通过蒸汽和水两相流条件下不会引起阀门损坏。通过试验或根据电站的实际经验证明在实际工作条件下即使不作调整，安全阀的设定值在可接受的公差范围内。

### 2.11.2.2.3 维护

稳压器应按在役检查大纲要求完成大修时的在役检查，具体要求按专用技术条件执行。

### 2.11.2.3 反应堆冷却剂泵

#### 2.11.2.3.1 性能要求

##### 1) 热备用运行

在反应堆冷却剂系统正常工作压力和温度下，处于热备用状态的反应堆冷却剂泵应能够重新启动。

泵的设计应能承受在停泵时有轴封注入、但设备冷却水丧失的工况；或者有设冷水供应、但轴封注入丧失的工况。当泵重新启动时，需恢复提供设备冷却水和密封注入。

##### 2) 热瞬态

除应承受反应堆冷却系统的热瞬态之外，反应堆冷却泵包括电机应该能够承受其它相关的热瞬态（如启停泵、设备冷却水和轴封注入水流量及温度变化）。

##### 3) 惰转

每一台反应堆冷却剂泵应具有惰转特性，以保证泵失去供电后惰转期间提供足够冷却剂流量。应满足以下要求：

- a. 电机组件自身应能提供足够的转动惯量。
- b. 确定所需转动惯性应充分考虑到所有的反应堆冷却剂系统的特性，包括自然循环。
- c. 应考虑泵运行时电网频率下降。
- d. 在电动机顶轴油装置不可用时，反应堆冷却剂泵能安全惰转而无损伤。

#### 2.11.2.3.2 设计要求

##### 1) 材料

反应堆冷却剂泵须写明全部主要材料并应符合有关材料要求。

反应堆冷却剂泵泵壳设计寿命应为60年，推荐采用锻造泵壳。

与一回路冷却剂接触的零部件材料应与去污所使用的溶液相容。不相容时，在设计中应保证不采用不相容的材料或在不影响去污效果前提下对零件进行有效隔离。

## 2) 泵轴和叶轮

在热水和冷水混合区域，泵轴应设置保护轴套。泵轴径向支承的设计应能在不拆拆除主法兰螺栓条件下取出。

泵的水力部件（包括叶轮和导叶）应能从泵壳中取出，泵做分析，以考虑所有预计的稳态和瞬态工况，包括泵处于热备用状态、泵从热备用状态启动、轴封注入丧失和恢复等恶劣工况下运行的情况。

泵热屏热量排出的功能不需泵轴转动来保持，当轴封注入中断时其仍可可靠运行。

## 3) 轴密封要求

轴密封的设计应易于拆装，其设计应考虑：起吊和搬运维修通道、用于密封和联轴器零件的专用设备和工具。电站设计者优先考虑使用盒式密封，该密封可在外部台架上试验和组装而不必就地进行操作。

轴密封应具有2年以上的最短工作寿命。轴密封的寿命必须由以前的电站经验或型式试验和鉴定所证明。

轴密封应选用三级动压轴封。轴密封的设计应允许在多级密封中某一级失效后泵仍能连续运行。此外，必须提供能在泵停转时承受全压的停车密封。

应确保在全厂断电工况（SBO）下反应堆冷却剂泵轴封的完整性。

需设置监测仪表系统，使操作员能判定轴密封是否正常运行、是否劣化或故障，以及监测劣化或故障的密封级运行情况。

## 4) 螺栓紧固件

用于反应堆冷却剂泵和电机组件的螺纹紧固件和锁紧装置必须符合相关要求。

泵壳螺栓应设计成通过液压或热膨胀方式进行安装。

## 5) 倒转

泵的设计应保证在某台泵停运、其它泵仍运行时不倒转，除非该泵的设计能接受倒转并能承受倒转时的启动载荷。应采用试验或分析方法证明可满足倒转设计要求。

每台反应堆冷却剂泵应设置防倒转装置。

## 6) 泵的排气

泵及密封的设计应允许在充水期间自行排气，而不需要其它特殊的排气装置。泵及密封的泄漏排放管线应避免在高点聚集空气。

## 7) 润滑油系统要求

电机供油管道禁止使用螺纹连接附件。对公称直径 $\geq 50\text{mm}$ 的管道，所有焊接必须采用全焊透对接焊。对所有预计的工况（如运行过程的振动、安全停堆地震、热膨胀和压力）必须通过应力分析以证明管道及其支承具有严密的承压完整性。如使用软管，可采用全金属材料。

所有可能造成油泄漏的外部非焊接接头和连接必须配置润滑油收集系统，此收集系统的设计必须能承受安全停堆地震要求。

电机润滑油箱应具有可远距离指示的油位传感器。

## 8) 设备冷却水系统

反应堆冷却剂泵及电机设备冷却水应具有可靠性，以确保满足总体可靠性要求。泵组件冷却水供电电源应能够从场外或现场备用交流电源供电。

连接到反应堆冷却剂泵的任何辅助管道连接不得使用螺纹连接。

反应堆冷却剂泵必须配备轴封注入水和设备冷却水，轴封设计需满足在失去上述两个系

统之一的情况下仍能运行而不发生故障。

### 2. 11. 2. 3. 3 试验要求

电厂的设计人员应编制试验要求。该要求应包括特定试验的技术依据, 并应覆盖泵整个寿期内所要求的主要试验(如部件试验、首件试验、产品试验和维修后验证试验等)。

对每一类泵的首件应进行性能试验以确定其是否满足全部功能要求, 试验应包括:

- 1) 至少包括200小时的厂内运行(例如在实际的温度、压力、扬程、流量和水化学条件下);
- 2) 包括在全尺寸试验装置实际限值内的瞬态和扰动, 以保证在实际运行时满足设计要求;
- 3) 证明在丧失全部交流电的情况下密封的泄漏符合规定限值, 可通过密封装置而不必使用整台泵即可实现;
- 4) 包括试验后拆卸和检查;
- 5) 有具体的验收准则。

如果所采用泵的设计已在现有压水堆中类似运行条件下有长期、成功运行经验, 则首件试验的范围可以缩减; 但应对泵设计和运行条件与现有泵设计和运行条件进行对比分析, 并说明省略首件试验的详细技术依据。

除了上述的首件试验, 在电厂安装前, 应单独对每一台泵(泵及电机组件)进行性能试验。这些试验应包括: 至少包括50小时的厂内运行(如在正常运行温度和压力以及有代表性的扬程和流量下)。

### 2. 11. 2. 3. 4 维修要求

#### 1) 通道

反应堆冷却剂系统的布置应提供维修通道, 包括平台、提升装置和运输通道。辅助管道与反应堆冷却剂泵的连接应为凸缘短管连接, 以方便管子的拆卸和反应堆冷却剂泵电机的拆除。

#### 2) 密封组件更换

应为反应堆冷却剂泵提供操作设备, 以便完成密封组件的拆卸、更换以及泵电机的重新组装。

应给出更换密封操作的具体维修手册, 给出更换密封所要求的时间。

反应堆冷却剂泵的设计应考虑到更换密封时不需排空反应堆冷却剂系统。

应设置中间轴, 中间轴应允许反应堆冷却剂泵在不拆除电机的情况下检修和更换轴封系统和泵水导轴承。

#### 3) 辅助管线

反应堆冷却剂泵的布置应满足对所有带密封垫的辅助连接接头拆装要求, 以便更换密封时不需要对泵进行拆卸。

#### 4) 润滑油更换

系统设计应便于停堆换料期间更换反应堆冷却剂泵电机的润滑油; 在换油后, 应保证供油管线排空。

#### 5) 排水

对于装有燃料的反应堆, 反应堆冷却剂泵的设计应保证进行维修(泵壳的更换除外)时, 反应堆冷却剂系统的水位不需排空至低于系统要求的最低水位。

#### 6) 对中

泵的设计应满足对电机轴和泵轴的精确对中。对中时不需将泵盖螺栓松开; 对已连接的

电机和泵轴，仅通过对电机/泵转子组件适度调整，便可满足对中要求。

#### 7) 电机和飞轮

对反应堆冷却剂泵电机和飞轮的维修进行评估，内容包括：

- a. 确定在设计寿期内反应堆冷却剂泵电机和飞轮所要求的潜在维修(范围和频次)。例如：径向轴承和止推轴承的检查和更换；
- b. 计划性维修的依据，应考虑到运行经历、法规要求。
- c. 评价设计和布置的适当性，应考虑到诸如维修通道、装卸设备、部件存放空间、工具、人员配备和完成时间等因素。

#### 8) 电气和仪表

电气和仪表与反应堆冷却剂泵的连接应采用快速接头连接形式，并具有可靠性。

### 2.11.2.3.5 在役检查

泵的设计应满足所需的在役检查项目在现场条件下可有效执行，并明确在役检查的实施范围、实施条件、实施细则、所用工器具及验收准则等。

### 2.11.2.4 主管道及波动管

#### 2.11.2.4.1 主管道

##### 1) 性能要求

主管道连接反应堆压力容器、蒸汽发生器和主泵，构成封闭的反应堆冷却剂循环的环路，应保证反应堆冷却剂系统压力边界完整性。

##### 2) 设计要求

- a. 主管道及其上的接管嘴是关键部件，应符合第 2.11.4 节中有关材料要求，所有的材料应是经过鉴定的。主管道材料应选择超低碳控氮奥氏体不锈钢。
- b. 主管道应采用锻造制造，应是无缝的。
- c. 主管道应采用 LBB 技术，降低主管道破裂风险。
- d. 应尽量减少主管道上的焊缝数量，提高设备安全性，并缩减在役检查工作量。

##### 3) 在役检查

主管道在役检查按相关标准要求执行，应充分考虑在役检查可达性。

#### 2.11.2.4.2 波动管

##### 1) 性能要求

波动管连接稳压器和主管道，应保证反应堆冷却剂系统压力边界完整性。

##### 2) 设计要求

- a. 波动管是关键部件，应符合第 2.11.4 节中有关材料要求，所有的材料应是经过鉴定的。波动管材料应选择超低碳控氮奥氏体不锈钢。
- b. 应确定波动管的尺寸并合理布置波动管，在符合其他功能和布置要求条件下，尽可能减小流阻。波动管应利于稳压器内的液体排向反应堆冷却剂系统，并减少进入稳压器的液体。
- c. 波动管应从稳压器向主管道逐渐向下倾斜。波动管的设计应考虑可能发生的热分层现象，尽可能缓解热分层。
- d. 波动管应采用 LBB 技术，降低波动管破裂风险。
- e. 应尽量减少波动管上的焊缝数量，提高设备安全性，并缩减在役检查工作量。

##### 3) 在役检查

波动管在役检查按相关标准要求执行，应充分考虑在役检查可达性。

### 2.11.3 辅助设备

#### 2.11.3.1 泵

##### 2.11.3.1.1 性能要求

- 1) 具有稳定的扬程-流量曲线（即从最大流量到零流量扬程曲线呈连续上升趋势，无驼峰）。
- 2) 泵的设计应确保在设计工作区内正常运行（如最大压力、最大流体温度、最大流量等），并考虑泵运行寿期的正常磨损。
- 3) 执行安全功能的泵组及其部件应设计成能承受安全停堆地震（SSE）而不降低性能，即在SSE期间和以后泵组应保持结构完整及可运行性。

##### 2.11.3.1.2 设计要求

- 1) 系统设计要求
  - a. 系统设计应确保泵不会在低于最小流量下运行。如要求设置最小再循环流量管线，则管线的尺寸应确保不因连续运行导致性能降低。
  - b. 应优先选用外部调节阀对泵进行调节，如不适用，可考虑用节流孔板来调节。
  - c. 应尽可能避免出现泵串联运行，如使用前置增压泵，应保证泵在启动及停止瞬态下运行压力和流量，避免出现汽蚀。
- 2) 转速
  - a. 当条件允许时，在同样性能条件下应优先选用低速泵。
  - b. 对于中小型泵,第一阶临界转速应至少大于运行转速 20%。
- 3) 泵壳

泵壳的开口应满足将其内部所有零部件拆除，不应有部件无法从泵壳中取出。

- 4) 叶轮和口环
  - a. 叶轮应整体制造，并进行锁紧装配，其设计应使磨蚀效应减至最小。
  - b. 静止部件上装设口环，以避免泵运行期间泵壳与叶轮接触而损坏。
  - c. 当有特殊设计需求时，应考虑采用硬化处理的耐磨环。
  - d. 材料之间的硬度差应至少有 50HB 的布氏硬度值。
- 5) 轴密封和轴承
  - a. 泵密封件、电动机密封件以及轴承的设计应易于更换。
  - b. 密封的设计应确保将压力和温度变化对密封性能的影响降到最低。
  - c. 密封应能保证在阀关死点压力下运行。
  - d. 密封材料应与工艺流体的化学成分相兼容。
  - e. 应从泵供应商处获取所需的密封水质及温度要求，系统设计应确保满足这些要求，并在设计文件中告知电厂运行单位。
  - f. 放射性场所运行的泵应具有长寿命轴承、持久润滑。泵的内部构件应设计成易于拆卸进行维修，否则应设计成易于拆卸和更换，如采用法兰连接等。与放射性介质接触的泵应设置去污疏水和冲洗连接件。有关放射性废物系统设备的密封和轴承需考虑因素，详见 2.9.3 节。

##### 6) 轴套

在使用轴套的场合，应对其进行锁紧和固定。应通过紧配合或装配限漏密封等方法，防止相配表面腐蚀。

##### 7) 联轴器

动力传输中，应考虑使用不需润滑的、带垫片联轴器。对于大型泵，应配备中间轴，

能够不拆除电机或增速齿轮箱就可拆卸泵轴承和机械密封。

联轴器应配置可拆卸封闭安全罩,防止转动件外露和限制联轴器部件在破损后飞射。

#### 8) 疏水和排气

在泵壳体上应设置排气管线以防存气,除非气体可从泵进、出口排出;在泵壳体上应设置疏水管线,且泵基础板的疏水管线应与泵轴封泄漏和泵壳疏水管线分别设置,除非规格书另有规定。

#### 9) 润滑油

a. 在所有可能的运行工况下(包括启动和停运瞬态),应对泵的机械部件提供润滑。

b. 如采用润滑油系统润滑,应包括监测其运行所需的所有仪表和辅助装置(如辅助油泵)。

c. 如采用润滑剂(如润滑油或润滑脂)润滑,应提供第一次充灌及后续更换或添加润滑剂所要求的润滑剂种类、牌号、数量及更换时间间隔。

d. 润滑油系统管道的连接应采用焊接,法兰仅允许用于管道与设备连接或要求易于拆卸的场合。禁止使用螺纹连接,但软管除外。

#### 10) 辅助系统

a. 泵的设计应尽量减少对其它辅助系统的需求,应由电厂设计者判定其必要性。

b. 泵及电机的冷却应采用设备冷却水或周围空气,被冷却部位应明确。

#### 11) 仪表和控制

仪表配线应合并为单个接线盒,并尽可能利用快速接头连接。

正常运行工况下,泵的启动、运行和停止均应远距离控制。

#### 12) 其它

对于采用先进设计技术的泵设备(先进设计技术包括:新功能、安装方法或未有成熟电站运行经验验证的操作条件),应进行验证试验以证明泵在寿期内的运行条件下,其运行性能可接受。如采用新技术,需向电厂提供验证证明材料。

### 2.11.3.1.3 试验要求

- 1) 系统设计应确保可定期进行泵性能试验,试验流量应能充分验证泵可运行性,并不会导致泵性能下降;实际试验应接近于设计流量。
- 2) 系统设计应设置必要试验仪器和管线用于泵在役试验。
- 3) 应允许开展定期最小流量试验以验证其流量与设计一致性。
- 4) 在泵的性能验证试验中,从最小流量至最大流量、预期或规定操作运行范围内的任何不稳定运行区域都应被标识出,即应给出泵优先选用的工作区。
- 5) 对每一类泵的样机或首件应进行鉴定试验以确定其是否满足全部功能要求,试验应至少包括200小时的厂内耐久运行(例如在实际的温度、压力、扬程、流量和水化学条件下)。

### 2.11.3.1.4 维修要求

- 1) 泵的设计应尽可能采用模块化,应对泵拆卸和更换作出相关规定(如:泵维修时间及易损部件的维修时间)。泵的设计和制造应保证主要组件(相同参数和规格的泵叶轮、机械密封等)的可互换性。
- 2) 泵与其排出和吸入管道之间应采用法兰联接。
- 3) 泵及零部件的紧固螺栓应设计成易于拆卸和重装。
- 4) 泵应安装在远离箱体底部、过滤器和离子交换床的地方。



- 5) 泵应设置吊耳或其他用于吊装的部件,以便流体部件等大部件拆卸。
- 6) 应提供维修通道,包括平台、提升装置和运输通道,以降低泵维修的工作难度。辅助管道与泵的连接应便于管道的拆卸。

#### 2.11.3.1.5 应急给水泵的要求

应急给水泵优先选自身输送水来冷却。

#### 2.11.3.1.6 屏蔽泵的要求

- 1) 屏蔽泵的设计和制造均应保证可进行在役检查。
- 2) 应允许拆卸泵的内部构件及屏蔽电机,以便对其进行检查。
- 3) 在保证系统安全运行前提下,应尽量减少例行检查和维护活动的频率和时间。
- 4) 应配备冲洗水,以减少放射性物质在泵和电机内的沉积。

#### 2.11.3.2 阀

##### 2.11.3.2.1 阀门

- 1) 应用
  - a. 在满足安全要求、功能要求、可靠性要求和可用性要求的前提下,系统设计应尽可能减少阀门的数量。应基于如下方面评估每个阀门的必要性:
    - 系统安全功能;
    - 系统运行功能;
    - 预期流量范围;
    - 设计压降范围;
    - 可靠性要求;
    - 冗余要求;
    - 规范要求;
    - 监管要求;
    - 隔离或维修要求。
  - b. 在电厂设计过程中,阀门的数量最小化和简化应遵循如下准则:
    - 尽可能减少使用双阀(即两个相似阀门串联);
    - 行业规范限制要求;
    - 工业标准、导则和实践;
    - 系统压力和温度;
    - 系统安全功能;
    - 电厂运行和维修要求;
    - 单阀失效的安全影响。
  - c. 应用隔离阀实现“阻断和排放”功能。“阻断和排放”功能包括上、下游阀座之间压力密封的获得和阀座之间的压力通过泄放阀或排气塞释放到大气或储罐中。这种阀门通常为闸阀。
  - d. 设备及仪表的布置应便于通过单独的旁通或隔离阀组实现一个以上部件的旁通或隔离。
  - e. 应对动力驱动阀门的数量加以限制。应用动力驱动阀时,应考虑操作频率、系统配置、功能要求等因素。
  - f. 阀瓣易于在流体力作用下移动的阀门,不应应用于高流速、变流速、变压力或流体

闪蒸的工况。

- g. 闸阀不能用于流量调节或节流。
- h. 刚性闸板楔式闸阀不应用于温度超过 65 摄氏度的系统，刚性闸板易因热变形而卡住。
- i. 仪表隔离阀应为针形阀或截止阀。仪表隔离阀应用于低温和低压系统时，可以考虑使用金属隔膜阀。
- j. 除非是成熟设计且具有成功运行经验，流量控制调节阀不能用于系统隔离。
- k. 止回阀的应用应确保：
  - 止回阀只在必要时使用；
  - 每个止回阀都有明确的系统要求，如关闭时间、泄漏率和流量等；
  - 所选阀门类型和尺寸应经过实际验证，且与电厂环境和系统要求相适应；
  - 阀门在管道系统中的位置和方向正确；
  - 确定的设计特征有利于延长阀门使用寿命和提高可靠性；
  - 制造商提供阀门的详细图纸，图纸信息包括所有部件的尺寸和重量、运动部件的配合间隙、完整的材料清单、所有紧固件的扭矩、紧固件组装前的润滑剂，以及所有锁紧和保持装置的详细信息；
  - 充分考虑与实际运行介质条件相关的部件间隙、阀瓣稳定性和磨损情况。
- l. 电动阀的应用应确保：
  - 电动阀只在必要时使用；
  - 规定完整的系统要求和条件，如动作时间、运行压力、压差、运行温度、流量、泄漏率和动作循环次数；
  - 所选阀门类型经过实际验证且与电厂环境和系统要求相适应；
  - 阀门位置和方向正确，便于维修和试验；
  - 确定的设计特征有利于延长阀门使用寿命和提高可靠性；
  - 对于安全相关电动阀，提供与流体温度（过冷）相关的执行机构负荷以及阀门的精确内部尺寸，并考虑了地震或动态效应。
- m. 安全阀应用要求：
  - 先导式阀门用于超压保护或作为动力驱动释放阀用于对系统减压时，其设计应经实际运行证明成熟，且为避免先导式阀门曾出现过的问题采取了专门设计；
  - 先导式阀门的主阀瓣/阀座设计应经过验证可最大限度减少阀座泄漏；触发开启时，主阀应可全行程启闭，以防止阀座和阀瓣受到侵蚀；
  - 安全阀设计应杜绝开启和关闭整定值发生明显变化，或者由于先导阀卡住、金属对金属黏结而导致开启或关闭失效；
  - 用于超压保护的安全阀应允许远程和精确的在线整定值验证，且阀瓣、阀座无损伤；
  - 放废系统的安全阀应用参见本用户要求 2.9 章。
- n. 当使用蝶阀进行节流调节时，应考虑高性能蝶阀。
- o. “Y”型截止阀不应用于生水系统。这类阀门应用于生水时，其阀内缝隙处易积聚腐蚀杂质，增加了执行机构的负荷。

## 2) 设计

### a. 阀门材料要求：

- 阀门设计和制造中的材料应为经应用证明具有高抗腐蚀性和高抗侵蚀性。应特别注意气蚀条件下阀门材料的选择；
- 用于生水系统的阀内件应用不锈钢材质，防止因腐蚀而退化；
- 可能被阀门填料或密封垫片处泄漏的含硼水浸湿的阀门外部部件，应采用不锈钢或

其他抗硼酸材料。阀门支架和执行机构可以是碳钢；

- 在选择弹性材料时，隔膜和“O”形环用三元乙丙橡胶(EPDM)，丁腈橡胶不推荐使用；
- 为降低阀门对流体加速腐蚀的敏感性，抽汽或排放止回阀应用铬钼钢或不锈钢制成。
  - b. 闸阀、截止阀和蝶阀等阀门采用可由多个制造商制造的标准化设计，以便在其中某个制造商遇到质量问题时能灵活处理。
  - c. 如果阀门采用法兰连接（如阀盖与阀体的法兰连接），法兰应配置贯穿螺栓。通常不使用阀体上攻螺纹孔这种设计，必须应用时，其设计应考虑螺栓先于阀体上的螺纹孔失效，且便于拆卸、避免擦伤，以及并可对损坏的螺纹进行现场修复。
  - d. 采用垫片密封(如阀体和阀盖之间的垫片密封)并安装于放射性系统中的阀门，其设计应允许对密封连接处进行现场密封焊，用于必要时代替垫片更换。
  - e. 阀门阀盖和阀瓣的设计应可防止阀腔内的流体因被加热而升压，尤其应防止阀腔内压力超过上游和下游管道内压力。阀腔因封闭于腔内的流体被加热而超压可能导致阀门压力边界破坏或电动执行机构力矩增加。
  - f. 阀门设计应尽可能防止压力锁定和避免热黏结。
  - g. 阀门设计应尽量避免使用螺纹阀盖或密封焊阀盖。经验表明，此类设计带来过度维修。
  - h. 所有规定了扭矩值的螺栓，应使用硬化垫圈，确保施加的扭矩不会损害阀体表面，且避免扭矩的损失。
  - i. 尽量避免使用压力密封阀盖。系统压力和温度的波动可能对这种类型阀盖的密封功能产生不利影响。
  - j. 阀体、阀盖和支架结构应能够承受由阀门执行机构施加的最大压缩、拉伸和剪切载荷(包括地震)，以及其他设计载荷。
  - k. 尽可能不在电动阀上使用上升旋转阀杆。
  - l. 阀杆的设计应可承受阀门执行机构产生的最大压缩、拉伸和扭转载荷，例如电动执行机构输出的堵转转矩产生的载荷。这些载荷应与其他载荷（如压力、热或外部施加的载荷）组合在一起考虑。在施加这些载荷时，阀杆不应发生永久变形。阀杆负荷超过设计允许负荷时可能导致阀杆变形，从而可能导致阀杆功能丧失或阀杆密封泄漏。
  - m. 对于正常位置下（开或关）阀杆受压的阀门，且当这些阀门位于反应堆冷却剂边界第二道隔离阀范围内或一旦泄漏将导致放射性或危害的应用场合（如放废和化学系统）时，适用如下要求：
    - 除了调节阀，DN50 及以下阀门的阀杆通常应为波纹管密封或隔膜密封；
    - 大于 DN50 或用于调节的阀门应使用活荷载填料，即用锥形弹簧垫圈（碟簧）或与之相当的方式在填料上维持一个压缩力。高温应用的阀杆填料应使用与系统流体和阀杆材料兼容的石墨填料。
    - n. 尽量避免采用双填料加灯笼环的阀杆引漏设计。必须对来自反应堆冷却剂系统的低水平不明泄漏进行监测的场合，阀杆引漏阀门的使用应基于必要性和成熟设计。阀杆引漏管的布置要求见本用户要求 2.14.4.1 节。
    - o. 阀门及其执行机构的匹配应确保阀门在设计基准流量和压降工况范围内正常运行，包括从可能的误动作中恢复。执行机构的设计和选型应考虑所有的运行模式、正常运行与最坏情况下的压差、流体温度范围 and 环境影响。执行机构和阀门应为一个相匹配的系统，能够在设计基准工况全范围内正常运行。阀门结构，一般由阀体、阀瓣、阀杆、阀盖、支架和阀门与执行机构之间的连接组成，应可承受执行机构所

能产生的最大推力或扭矩（例如电动执行机构在最大供电电压下的堵转转矩或推力）。

p. 为便于运行工况的确定和将来电厂改造，阀门供应商应该提供有关流量控制阀和止回阀的技术数据。这些数据是除本用户要求第 2.11 章要求的设备运行维护手册、图纸、图表等之外应提供的信息，详细包括：

- 阀门流阻或流量系数；
- 阀门的气蚀特性；
- 执行机构负荷（与流量和压差相关）；
- 阀瓣全开时的最小流速和对应压降（适用于止回阀）；
- 影响阀瓣稳定性的因素。

放射性废物系统阀门设计应注意事项参见本用户要求 2.9 章。

q. 阀门内部滑动表面应硬化或硬质堆焊。

r. 阀门内螺纹部件锁紧装置的设计应尽可能避免产生松动部件。通常焊接锁紧设计较为可靠，可有效防止内部部件因振动而松动。

s. 蝶阀中的弹性密封可能会受到挤压，成为异物的来源，因此弹性密封不应用于 HVAC 系统以外的蝶阀阀座。

t. 为便于阀门维修的计划和实施，阀门制造商应提供以下设计信息：

- 对于电动阀，提供选型计算、工厂订单和具体设计信息(间隙、材料、选型方法)，以及所采购电动阀的“薄弱环节”分析；
- 对于气动阀，提供选型计算、工厂订单和具体设计信息(相对于阀位的有效隔膜面积、间隙、材料、选型方法)、与阀位相关的流量系数、与阀门或执行机构位置有关的执行机构扭矩输出，以及所采购气动阀的“薄弱环节”分析。
- u. 为降低填料载荷和保证平稳运行，电厂辅助系统中的气动阀应使用低摩擦填料，例如含有特氟隆（聚四氟乙烯）的填料。填料必须与制成填料的材料和运行环境兼容。
- v. 如下要求适用于止回阀：
  - 止回阀销轴的密封应使用低摩擦材料；
  - 为减少维修、延长寿命，止回阀的设计应考虑阀内部件的腐蚀和侵蚀；
  - 止回阀内固定阀瓣的螺母应当用耐腐蚀实心销锁紧（开口销、卷销和锁紧丝在许多应用中被证明无效），保持销子牢固的方法应在设备运行维护手册和装配图上显示清楚；
  - 为避免水平止回阀用于垂直应用之类的错误，止回阀的安装方向应明确告知阀门制造商；
  - 在低于全开位置下工作的止回阀会出现磨损和损坏，带来明显的维修成本上升。应告知制造商止回阀的预期流量范围（最小到最大），而不仅仅是正常流量；
  - 对于新的或可重复使用的止回阀内子部件，制造商应提供可接受的允许公差、公称尺寸和重量，以便评估阀内件的磨损和疲劳情况，确定部件更换周期；
  - 为降低阀内件磨损，选择止回阀时应考虑阀门的最小速度系数；
  - 止回阀压力边界应尽量避免使用贯穿件，以减少泄漏和维修；
  - 止回阀应用压力密封时应使用石墨密封，以降低阀门组装过程中潜在的损坏风险；
  - 出于安全考虑，防止被加压的销轴变成飞射物，止回阀的设计需考虑阀轴（或销轴）在压力下的保持；
  - 止回阀内的相对旋转运动部位应使用衬套，以减少维修时间，降低维修成本；
  - 止回阀内易磨损部件表面应硬化，且这些部件应易于更换，以延长维修周期，减少

部件磨损；

- 旋启式止回阀的设计应具备开启止位可调整特征，以应对不同的流量需求；
- 阀盖悬挂阀瓣的设计不应使用；
- 止回阀的阀瓣应有防转装置，避免不必要的磨损；
- 止回阀（轴流式止回阀除外）的安装位置与下游任何可导致液流扰动的障碍物（如限流器、管件、调节阀、泵等）之间的距离应至少为 5 倍管道直径；
- 止回阀应易于从管道上拆卸，便于在不必切割、研磨和重新焊接阀内件的条件下检查和维修阀门；
- 止回阀应配备便于诊断试验（如超声、声发射、脉冲电磁等）的接口或设施，用于必要时通过诊断试验获得一致性分析所需的精确可信数据。数据收集点位置和界面要求另外规定。

### 3) 鉴定

- a. 安全相关阀门及其执行机构应经过鉴定试验，以证明阀门组件能够在规定的全部设计工况下运行。这些试验应在预期电厂出现的正常和事故工况下全流量、压力、温度、压差、环境条件和外部动力源变化范围等条件下完成，阀门在相应条件下执行要求的功能。
- b. 相同类型、尺寸和运行条件的阀门中挑出至少一台阀门和执行机构组件用于试验。
- c. 应提供证明，说明鉴定试验适用于其他类型相同且运行条件相似的阀门。试验可以在试验设施或现场进行。
- d. 应要求如下属性通过试验得到验证：操作阀门所需的力、正确的执行机构选型以及恰当的使用工况。

### 4) 安装

- a. 带阀杆的阀门应垂直向上安装，偏离这一要求时(例如“Y”型阀门)，应评估阀门可运行性降级和维修难度增加等因素。水平安装的阀门不能实现阀杆垂直向上时，应针对支架或执行机构支承的设计、填料配置和导向结构设计给予特别关注。
- b. 用于节流或调节的控制阀应用于容易出现汽蚀的条件时，其安装位置与下游弯头、三通、和泵之间直管长度应为至少 10 倍直管直径。对于性能可能受上游流体扰动影响的阀门，其安装位置与上游的泵和管件之间应有足够长度的直管，以消除这种影响。该上游直管长度的确定应基于已有的工程实践。如果上游直管不能满足上述要求，则应使用稳流器。含有正常运行位置上不引起重大流向或流量改变的阀门和管件的管段也被视为直管，阀门和管件如闸阀、球阀、变径管和三通直管（分支通常关闭）。
- c. 除了必须从系统中拆除以进行维修、校准和测试的阀门(例如安全阀)，一次侧和二次侧主传热系统中的阀门应通过将阀门与管端全熔透对接焊接的方式进行安装连接，承插焊只允许应用于非放射性系统中 DN50 及以下的小尺寸阀门。
- d. 阀门尽量由其管端连接提供支承。除非阀门执行机构很大，否则不应为阀门执行机构附加额外的支承。
- e. 除非有特殊要求，常闭截止阀的方向应为高压侧在阀瓣下方。
- f. 外部动力源与执行机构的连接应有足够的弹性，以适应阀门的任何运动或位移，确保动力源的可靠连接。放射性废物系统阀门设计应注意事项参见本用户要求 2.9 章。
- g. 外部电源或气源的连接件及柔性管等部件应足够长，便于将阀门执行机构移除，对阀门实施维修。对于电动阀，该要求还意味着可在不拆开机电缆的情况下移出执行机构。

#### 5) 运行

- a. 阀门供应商应在提供的设备运行维修手册中说明阀门的操作和运行要求，便于电厂正确操作。
- b. 阀门执行机构的运行要求见本用户要求 2.11.3.2.2 节相关内容。

#### 6) 维修

通用的维修要求见本用户要求2.11章。

#### 7) 试验

- a. 重要阀门应按照 RSE-M 的要求进行试验。
- b. 系统设计应具备对重要阀门进行试验所需的仪表和接头，以监测阀门性能及变化趋势。
- c. 系统设计应允许对安全相关止回阀进行全流量试验，以验证阀门在设计工况下的可运行性。应识别所有需免除全流量试验的阀门，并准备好相应的证明文件。应对所有免除可运行性验证试验的阀门建立替代方法，替代方法可以为定期试验、全行程试验、诊断试验等，也可以是阀门在小流量条件下执行了安全功能基础上的分析证明。
- d. 系统设计应允许对安全相关止回阀的反向流隔离功能进行验证，可通过直接试验或诊断试验的方法来完成。应识别不能进行反向流试验的阀门，并准备好相应的证明文件。
- e. 如果无法通过直接的全流量或反向流试验进行验证，阀门和系统设计应考虑应用非介入式诊断。
- f. 如果止回阀的可运行性是用工艺流体进行验证，应通过位于低剂量区域的数据中心进行验证试验和数据采集。
- g. 应建立可靠的方法论，以验证电厂内安装的安全相关电动阀的可运行性。该方法论包括但不限于：
  - 获得和应用鉴定试验中积累的数据，以及其他试验中可用于对比的数据；
  - 建立用于可靠监测关键运行参数（如电机负载、阀杆推力）的仪表，及时发现电动阀的任何退化；
  - 执行低于设计条件下的现场可运行性试验，同时监测关键参数；
  - 执行全设计条件下（流量、压力、温度、压差）现场可运行性试验，同时监测关键参数。
- h. 对于需按照 RSE-M 要求进行检查和试验的阀门，应建立必要频率的解体和检查计划，以便检测到通过先进非介入技术不能检测到的不可接受退化。

### 2.11.3.2.2 阀门执行机构

#### 1) 应用

- a. 尽可能减少执行机构类型和设计（尺寸、型号等）的数量。
- b. 对于要求快速驱动至完全打开或关闭位置的阀门，应配备气动、液压、爆破或电磁执行机构，具体选择取决于阀门的尺寸和驱动阀门动作需要的阀杆推力（或扭矩）。这类装置应可在失去外部动力源时通过配置的弹簧或其他方式将阀门置于规定位置（开启或关闭）。利用系统内介质压力的执行机构也属于此类。
- c. 对于接受仪表信号来控制系统参数（如流量）的阀门，应配备气动或电磁驱动执行机构。这类阀门必须能在失去外部动力时通过配置的弹簧或其他方式来到达指定位置（关闭或开启）。
- d. 对于要求相对较长的时间内保持在固定位置的阀门，例如开启、关闭或中间位

置，应配备电动执行机构。驱动速度应适中，且执行机构应具有自锁功能，以使阀门在失去外部电源时保持在其最后位置，且不因内部流量或压力而漂移。

e. 直流电动执行机构仅用于在失去厂内和厂外交流电源的情况下必须运行的阀门。

f. 蒸汽系统中的闸阀尽可能不使用气动活塞式执行机构，这种阀门易于开启过快且无法控制。

## 2) 设计

a. 所有阀门执行机构和铰架结构的设计应尽可能确保其一阶自然频率不低于 33 Hz。

b. 应保护阀门执行机构所必需的辅助装置，如位置开关、开关臂、供气管和管接头，以防意外的机械损坏。辅助装置（如凸轮、开关臂和开关座）均应有确保锁紧措施。

c. 电动执行机构应具有防水的插头或电缆接头，以减少因水分侵入而引起电气故障。

d. 对于承受管路中较大温差阀门的电动执行机构，应评估双向推力补偿弹簧组应用于电动执行机构的必要性。

e. 阀门执行机构非金属件的选择应考虑尽可能长的使用寿命和尽可能少的维修要求。应识别所有执行机构非金属件的推荐更换周期。更换周期应基于部件的磨损、温度、压力、湿度和辐照环境来确定。

f. 动力驱动阀应配备带有管理控制装置（如链条和锁）的就地手动操作机构，且配有内置手动锁紧装置。

g. 远距离操纵装置（阀门远传）设计要求：

- 操纵杆操作（远传）只能用于手动阀门，其布置应允许人员可达，结构和支撑应简化。操纵杆应尽可能采用单根直线段。通过恰当的阀门布置和安装来减少操纵杆万向节、柔性缆绳和锥齿轮的使用；

- 阀门操纵杆、手轮和齿轮应与阀门的尺寸和操作扭矩要求相匹配，且手动操作不会损坏阀门和执行机构。

h. 手动或动力驱动阀应具有全行程机械指示，可通过直接观察而无需仪器或电源来确定阀位（包括部分开启阀门的中间位置）。

i. 动力驱动阀门组件应配备易于接近的标准测试接头，以便在不拆卸执行机构的情况下进行试验和曲线记录。作为一个目标，应具备将重要执行机构的信息即时发送至电厂相关人员的方式。用于评价和诊断的参数有：行程时间、运转电流、脉冲电流及其衰变时间、开关位置、阀杆推力和执行机构扭矩（有些阀门仅需要扭矩，如蝶阀）、振动以及声发射特征。

j. 气动阀在选型设计中应保证至少 25%的推力或扭矩裕度。

k. 执行机构与阀盖之间的阀杆无螺纹部分应足够长，便于安装和接近诊断用感应元件，且感应元件不会随着阀杆运动妨碍填料或进入执行机构。

l. 对于大多数阀门运行于高温或高速条件下的力矩关电动阀，应考虑使用弹簧补偿执行机构，以限制惯性载荷。

m. 对于气动阀，应将调节功能与行程时间要求的快速“卸载”功能分离。一个气动阀难以兼顾这两种功能。

n. 气动阀供气减压阀的选型应确保支持气动阀所需的空气流量为减压阀工作范围的 50%至 75%。

o. 气源与气动阀执行机构的操作装置之间应使用柔性软管连接，降低振动对阀门的影响。

p. 气动阀执行机构的供气管线应装有空气过滤器。

q. 正常为通电状态的电磁阀应为长寿命设计（40 年或 60 年），以提高气动阀的可靠性

和可用性。

- r. 考虑使用经过高温、辐照等环境鉴定的减压阀和定位器，提高气动阀的可靠性和可用性，减少维修。
- s. 对于可能对安全相关部件的可操作性或持续电厂运行产生重大影响的阀门，应考虑采用鲁棒设计，防止单点失效导致阀门可用性受限或降低，并允许进行在线维修。例如：冗余定位器和电磁阀。
- t. 弹簧膜片应用于高温环境时，其设计应允许需要时调整弹簧张力，以补偿弹簧松弛。
- u. 弹簧膜片的应用应考虑对弹簧预加载，降低弹簧松弛的可能性。
- v. 气动阀的设计应避免阀杆侧面加载，以防止阀杆错位和粘连。
- w. 不应使用碳膜电位器，最好使用非接触式电位器。

### 3) 鉴定

阀门及阀门执行机构组件的鉴定试验要求见本用户要求第2卷1.12.2节。对于某型号执行机构，为确定辐射、温度、湿度、环境压力、水分侵入、老化和地震加速度等因素的影响，可分开进行不同类别的鉴定试验，以支持阀门和执行机构组件的整体鉴定。

### 4) 安装

- a. 阀门和执行机构的布置和定位应确保阀门和执行机构易于维修、校准和试验，这包括平台、永久性梯子、头部空间和起重/索具。预计的维修应包括彻底拆除执行机构和阀门内部构件。执行机构的位置也应符合制造商的要求，以防止阀门内的黏结、电气外壳或电机内的油或油脂积聚。
- b. 重型电动阀执行机构应包含用于为执行机构设计的二次支承点的设备。支承点应能够容纳支架、吊耳、法兰或其他合适的构件，尽可能靠近执行机构的重心。支承点应能够限制执行机构的重量在任何方向的组合最大加速度作用下作用于阀杆轴心。二次支承的设计应确保管道的热运动不受限制。如果二次支承是刚性的，则管道也应在同一方向上靠近阀门和共用结构处被支承。对执行机构的分析应包括二次支承施加的载荷。

### 5) 运行

应避免在全面系统清洁和电厂启动准备之前启动阀门。在此期间，阀门最好保持在完全关闭和落座位置。应避免使用临时和可能受到污染的气动或液压外源。

气动和液压外源应符合执行机构制造商的要求。这些要求包括但不限于：清洁度、干燥度和不受驱动介质的液体污染物的影响。

### 6) 维修

维修要求参见本用户要求2.11章。

### 7) 试验

适用于阀门和阀门执行机构组件的试验要求参见本用户要求2.11.3.2.1节相关内容。

## 2.11.3.3 换热器

换热器（包括蒸汽发生器）的设计应避免在最大预期流量和设计温度条件下出现换热管流致振动。可采用以下任一准则：

- 1) 相同的换热器在相同的流量和温度条件下运行良好。
- 2) 换热器应按相应标准进行流致振动分析，以确保在壳程设计流量时，换热管振动不会成为问题。

结构设计应考虑便于检查、测试、维护、净化和更换。接触放射性或潜在放射性液体的换热器应考虑介质可以排净及对设备进行冲洗。系统应设置相关阀门、仪表和控制装置用于换热器的隔离及放射性的监测，以满足设备的操作、检查和维护。



污垢系数应根据系统和设备设计以及预期运行工况，考虑材料累积且保守的原则确定。换热面积应考虑不小于 10% 的堵管裕量。

为避免换热器的换热管、管板和其它内部零件的冲蚀，换热器管壳程入口处应按相关标准设置防冲板或导流筒等。

换热器应按照 RCC-M 进行设计和制造。设计中应纳入设计持证单位和制造商之间的经验总结。

在考虑换热器的节流设计和布置时，应在工艺出口节流。更容易导致污垢的流体应位于管程，以便清洁。人孔直径应考虑方便人员进出。

换热器必须能够在流体温度低于 100°C 时，或者温差低时，随时运行，不需要任何特殊的准备或状态调整。当可行时，温差高的情况也应满足该要求。

当蒸汽发生器采用先进设计技术特性、安装方法或运行条件（如水化学、温度和速度）时，由于没有核电厂成功运行经验，需进行鉴定试验，以证明蒸汽发生器在寿期内的所有运行工况下满足要求。

#### 2.11.3.4 容器

装放射性或潜在放射性液体的容器，设计时应根据有利于成本和性能，尤其防止意外颗粒物的滞留，考虑以下措施：

- 1) 进入容器之前净化放射性液体（过滤和离子交换）；
- 2) 锥形（首选）或倾斜容器底；
- 3) 对于放射性液体废物罐，立式圆筒、锥底容器侧面设置人孔，并在靠近人孔的地方为人员和清洗设备提供通道；
- 4) 对于卧式容器，在上端设置法兰式通道；
- 5) 含有可能积聚污泥的放射性液体的容器（如放射性废物地漏容器、洗衣房/去污/化学废物），对表面预处理至特定值（如机械或电子抛光）；
- 6) 容器冲洗能力；
- 7) 通过强劲的循环流方式（包括喷雾器）进行搅拌；
- 8) 喷枪或化学清洗能力；
- 9) 泵送最低-低液位，定期完全排空容器内的液体。

现场制作容器应严格执行设计规范和制造控制，以确保放射性或潜在放射性液体容器的制造质量。无损检测完整性验证应持续在设备制造以及电站运行的整个寿期内。溢流口应采用硬管连接至接收容器或室内集水坑，并应设置高水位警报装置。

#### 2.11.3.5 过滤器和离子交换器

本节中包括对在放射性条件下使用的过滤器、离子交换器和过滤/除盐装置有关要求。同时，本节也包括放射性废物处理系统过滤器和离子交换器。

##### 2.11.3.5.1 通用零部件

###### 1) 疏水和排气

工艺容器应该设置疏水和排气接口，可以做到完全疏水。排气管道和接口不应干扰远程拆卸。疏水和排气口应该通过管道连接到疏水和排气系统，或者最好连接到就地系统接收容器。疏水和排气阀应设置于容器外。排气口应该足够大，以确保设备在疏水过程中不会出现真空，接口用法兰连接，以便在高辐射情况下能够远程拆卸。

###### 2) 容器检修孔

- a. 容器上的检修孔应设计成易于拆卸和安装，并能为设备内件的取出、维护和更换提

供通道。

- b. 容器上的检修孔设计应尽量满足无需搭设临时平台或需要其他便携式接近工具的要求。
- c. 应根据容器直径和设备内件的复杂程度，来选用法兰封头或人孔。

## 2.11.3.5.2 过滤器

### 1) 功能要求

电厂设计者应选用满足以下功能要求的过滤器：

满足工艺上充分去除固体颗粒的要求。

具有足够的纳污容量来过滤预期数量的固体颗粒。

对于反冲式过滤器，通常要求反冲间隔时间不得小于 8 小时；过滤器在高离子含量的条件下工作的能力可以通过调整凝聚添加剂和/或调整过滤本体材料装量的办法来实现，应对这种情况进行评估，并相应地调整过滤器的尺寸。

过滤器维护工作量尽量少。

当滤芯元件需要金属结构支撑时，应考虑在过滤器容器设计中提供支撑架。此外，过滤器应该考虑以下设计属性：

- a. 在放射性条件下能够保证过滤的效率。
- b. 在放射性条件下，能够在非金属介质中应用。
- c. 放射性液体中的过滤器外壳应充分屏蔽，使一般区域工作剂量率维持在低水平。
- d. 放射性液体中的过滤器外壳设置易于接近的远程辐射剂量探测器。

### 2) 通用要求

- a. 具有在不需要任何准备和处理的情况下，使流体以最大压力和全流量进入的能力，按正常规定将过滤器投入运行的操作除外。
- b. 对于同种类型的设备，相同零件应是可以不需要任何附加措施而能互换的。
- c. 设计应使在役检查和试验能够容易进行。
- d. 支撑件应能通过均匀分布载荷的垫板固定在设备的壳体上。垫板应采用同壳体相同级别的材料。
- e. 为便于设备的安装或拆卸，设备应安装有吊耳或其它可用于吊装的装置。
- f. 滤芯所用滤材一般采用金属纤维、金属薄膜、金属滤网、玻璃纤维、纤维素等。

### 3) 反冲洗过滤器的布置

反冲洗过滤器应在其旁边布置反冲流体接收箱，反冲下来的液体依靠重力就可以流到该接收箱中去。

### 4) 空气反冲

对于通过空气吹扫排放固体颗粒的过滤器，应对其反冲气体接收箱的排放气体进行放射性控制。

### 5) 过滤器压降

系统应允许过滤器有足够的压降，以得到满意的使用效果。

### 6) 内件耐压能力

过滤器的内件应能够承受系统所能产生的最大压差。

### 7) 过滤器使用的阀门

- a. 反冲使用的阀门应是快开式的。
- b. 过滤器使用的阀门在关闭时不能泄漏。
- c. 选择减少放射性累积的阀门（例如全流道球阀）。

### 8) 按过滤器类型提出的特殊要求

滤芯式过滤器的特殊要求如下：

- a. 滤芯应设计成：进行废物处置时，使用远程工具用标准容器进行包装。
- b. 在整个电厂，进行过滤器维护和滤芯更换的处理规程和设备应是标准化的。
- c. 更换标准和仪器要求应该基于压差大小、使用时间或辐射水平。压差标准应该建立在制造商允许的最高值上。
- d. 如果一个过滤器需要多个滤芯，则滤芯必须置于滤筐内以便能够通过一次操作装入过滤器或从过滤器中取出。

篮式过滤器的特殊要求如下：

- f. 为确保设备持续服务的最佳安全性和可用性，应该使用被验证过的设备。对于必须使用新设备的情况，设备额定流量压降试验满足 JB/T 7538 《管道用篮式过滤器》要求，试验程序需和提交给购买方的试验程序相一致。
- e. 设备应便于迅速拆卸和重新组装。
- f. 更换滤篮从过滤器侧面完成，供应商应在设备外形轮廓图上明确标出拆卸的空间要求。

袋式过滤器的特殊要求如下：

- g. 应根据颗粒大小和要求的去除效率来选择过滤材料的孔隙率，以满足系统性能要求。
- g. 设计过滤器外壳、进口管嘴和内件时应防止流体旁通过滤材料。
- h. 应根据压降或放射性水平来确定更换准则和要求使用的仪表。
- i. 过滤器外壳应该设计为易于使用长手柄或远程工具拆卸。
- j. 更换标准和仪器要求应该基于压差大小、使用时间或辐射水平。压差标准应该建立在制造商允许的最高值上。
- k. 袋式过滤器应设置屏蔽，在达到预定的放射性剂量水平之前就要更换过滤材料。

### 2.11.3.5.3 离子交换器

- 1) 树脂床深度、体积和类型的确定应考虑工艺流流量和污染物水平、出水质量要求、允许压降和每体积处理液产生的废物量。最大深度应由干树脂层的最大允许压降来决定，并且应小于可能造成树脂床机械损伤的数值。设计应考虑在核电厂满功率运行情况时更换任何树脂床，而不会因此起额外的泄露。用于放射性废物处理的离子交换容器应设计用于在完全或部分介质负载(如短负载)情况下运行，并允许将来添加叠加介质。
- 2) 离子交换器应该是深床式的。设计应按更换树脂而不是再生树脂来考虑。
- 3) 应合理选择树脂床的横截面积，以得到合适的体积流速和足够的容量。
- 4) 应根据具体情况来选择混床中阳离子和阴离子的比例，以得到最大的经济性。采用单床和多床的设计时，应对所有放射性进行评估。还应考虑改变每个容器中树脂的类型和体积。
- 5) 应使用强酸苯乙烯-二乙烯基苯阳离子和强基四元胺树脂，除非在使用特殊离子树脂的场合，如：对放射性地面排水。
- 6) 每个离子交换树脂容器及其内部部件都应该用奥氏体不锈钢制造或内衬。凝结水精处理或补水处理系统的容器例外，可采用橡胶或陶瓷内衬碳钢。
- 7) 树脂的使用温度应不超过140°F(60°C)。系统中应具备相应的设施（自动或手动都可以）来保证不超过该温度。
- 8) 如果认为有必要对树脂进行反洗以延长其使用寿命（根据压降限值），应有充分的自由空间以允许树脂膨胀。对反洗水的温度范围也应加以规定。在离子交换器的反冲出口上应设置树脂收集装置，以回收和返回树脂；不允许在工艺容器内

进行反冲洗。

9) 应具备对离子交换容器和树脂床进行排水和清洗(从上向下清洗)的条件。

10) 应使用远距离液压工具从离子交换容器中取出树脂,应从可接近区域用液压或重力的方法来添加树脂。添加和取出树脂是经常进行的、需要远程控制的操作。在废树脂罐和/或废树脂罐的管道的进口和出口应配备远程操作的树脂浆取样器。添加口应设置在容器顶部。取出口应该在排水口的上面。要求接头的直径最少为2英寸。树脂罐或储罐闸口的设计应将冲洗水回流到用过的树脂储罐中。应当有措施来确保阳离子和阴离子树脂在添加之前被充分混合,并在装载到容器内部后也保持混合;或有措施来使树脂在容器内混合而不分层。

11) 应在离子交换器的下游设置树脂收集器(筛网或能够保持破裂树脂颗粒的滤心),在交换器内部筛网失效的情况下可以收集树脂。树脂过滤器应该位于离子交换器外壳的外面,如果可能,应该具有远程反冲洗能力。对于不能反冲洗的疏水器,应提供在过滤器或滤筒移除期间防止人员受辐射的措施。

12) 离子交换容器的排气口应设置筛网以防止树脂上溢到排水收集器中去。

13) 排水口应设计成能够阻止树脂和碎屑通过。排水口和入口流量分配器应保持流体均匀通过树脂床。排水口应有足够的强度和足够强度的支撑,以免承受树脂施加的水力载荷、树脂床两端最大设计压降、和/或树脂移动产生的压力时产生移动或变形。

### 2.11.3.6 环吊

环吊的设计应满足核电厂建造和运行阶段的吊运服务,环吊服务半径应考虑设备和部件的吊装路径。环吊外形轮廓与安全壳穹顶上安装的喷淋管、风管应保持必要的距离。环吊在LOCA时无操作要求,但设计上应考虑其影响,环吊的重要部件应能经受LOCA的环境条件考验,以便在LOCA后能参与处理事故。环吊的布置应使它在整个行程内的任意位置都便于维修或运行人员使用,因此须合理规划安全壳布置。

环吊的电气部件,包括控制器、马达、传感器和调节装置,应满足设计对运行温度和湿度等要求。电气部件应设计需便于更换。

环吊的承载量应根据正常维修或换料操作起吊的最大重量决定(环吊的承载设计应根据核电厂建造阶段的吊装,运行阶段停堆换料和设备维修所需吊装的重量确定)。环吊桥梁应按起吊一台蒸汽发生器确定尺寸。

安全壳布置应便于安全壳内吊车的动载荷试验。

### 2.11.4 材料

#### 2.11.4.1 引言

本节根据国内外核电厂设计和运行的经验教训,提出了材料的通用要求。设备选材需考虑设备的设计要求和系统内的相互作用。因此,除了需要辨识出经过验证的材料外,还应指导制造和焊接中的过程控制,以及对在电厂运行过程中影响材料性能的环境条件进行控制。

本节主要目的是为了避免因各种原因(如晶间腐蚀、应力腐蚀开裂、缝隙腐蚀、热疲劳和机械疲劳、辐照效应、焊接缺陷、螺栓连接失效、铸造缺陷等)造成的材料性能降低,并将产生的腐蚀产物及特定性产物(如Co-59)降至最少。对于只适用于特定设备的材料要求、材料详细设计要求以及不常用的材料在对应系统和设备的相关章节中予以介绍。

## 2.11.4.2 通用要求

### 2.11.4.2.1 选材责任

电厂设计者应规定电厂构筑物、系统、设备的材料。

#### 1) 经验证材料的使用

材料应从经以往核电厂验证过的材料中选取。经验证的材料是指与现有核电厂所用的材料相比,具有相同组分、相同、工艺(如热处理、制造、安装)以及相同、工作条件(如应力水平、水化学条件或温度)的那些材料,且这些材料是在已有核电厂中经过一段时间使用的。需要注意的是,一些材料退化机制的潜伏期较长(可能长达20年以上)。因此,为了能够从在役材料中合理选材,需充分借鉴国内外电厂反馈数据、研究成果及工业成果。应尽量减少焊接结构。例如,部分厚截面设备可直接锻造而不是由钢板焊接而成(如支撑环)。

如果要使用未经过经验验证的技术、材料,需提供包含经验、测试或分析在内的证明。

一般焊接过程中应禁止使用衬垫,如需使用应满足相关规范的要求。

在主系统和腐蚀产物可进入主系统的其它系统中,应严格控制材料中的钴含量。对于高中子通量区域的部件(如燃料包壳、堆芯支撑板、反射层、控制棒、压力容器堆焊层等)、与主系统冷却剂接触面积较大的部件,也应限制所用的不锈钢和镍基合金中的钴含量。

#### 2) 未经验证材料的使用

如果电厂设计者需采用不符合上述要求的未经验证的材料,则应以书面形式提请业主注意该材料及其特殊用途,并书面论证为何要采用该材料以及选择依据。论证应包括该材料所用之处的峰值应力和应变、局部水化学、预计的辐照环境和温度等条件。

### 2.11.4.2.2 确定关键部件材料

对于本文件中规定的关键部件,应确定其所有材料类型、主要选材原则和所有特殊要求。

### 2.11.4.2.3 法规 and 标准

电厂材料应符合相应的设计建造法规和标准中的要求。但需要注意的是,电厂中的实际使用条件可能比规范规定的更恶劣,因此可能需要标准之外的附加要求。

### 2.11.4.2.4 设计基准条件

电厂使用的材料应满足本文件中设计基准规定的特定工况要求。重点要求如下:

- 1) 在可行并且满足使用条件 and 设计性能目标的情况下,选用材料的类型 and 等级应尽量少。除非业主批准,否则应避免使用定制 or 专用合金。
- 2) 设计寿命要求应包含寿期内所有环境条件 and 使用工况,包括影响设备寿命的异常工况。
- 3) 优先采用在性能限值范围内具有良好服役表现的常用材料。如果可能,尽量选择低强度的紧固件。如果要使用高强度紧固件,需进行适当的热处理来降低设计许用值,获得更高的失效裕量。

### 2.11.4.2.5 有害材料

在没有合适替代材料时,才可允许采用对人体和设备有害的材料(如放射性、毒性、

易燃性、腐蚀性的材料)。在需要使用有害材料时,电厂设计者应根据相应规章和实际操作的要求,规定材料的装运、储存、操作和使用的方式,以将危害降到最低。应设置有毒有害废物暂存区域。

#### 2.11.4.2.6 金属材料

- 1) 与反应堆冷却剂接触的金属材料应能抵抗各种形式的腐蚀,如侵蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀开裂和不同材料间的接触腐蚀等。对于奥氏体不锈钢或镍基合金部件,其Co含量应严格控制,不超过相应标准的规定。应尽量避免采用硬质钴基合金来制造耐磨层。若必须采用,设计者应说明所有选用钴基合金的部件,并提供选材的技术论证。用于主回路系统湿表面的材料(如蒸汽发生器传热管),应采用经电厂经验证明可长期保持低腐蚀速率的工艺方法进行制造。
- 2) 铁素体材料的压力边界材料应抗脆性断裂,无延性转变温度( $RT_{NDT}$ )不应超过相应标准规定。对反应堆压力容器的专门要求见第2.11.1.1节。对可能导致辐照脆化的微量元素,进行控制其含量。
- 3) 低熔点金属及其合金不得与主回路系统部件和二次侧系统中不锈钢和镍基合金部件接触,如铅、铋、镉、铟、汞、锌、铊和锡及其合金。此外,这些材料也禁止用于二次侧系统组件。对二次侧的泵轴承材料,其设计应避免进入主给水中的有害低熔点材料含量对不锈钢和镍基合金制造的部件造成危害。冷却剂中可以加入少量的铋,其含量按ZnO含量要求同等控制。铜合金可以在不会扩散至反应堆冷却剂的部件中极少量使用。
- 4) 反应堆压力容器内部支撑件所用材料应能抗脆性断裂,并且在寿期内因中子影响造成的 $RT_{NDT}$ 变化最小。应对反应堆压力容器内部支撑件进行分析,以证明其在最大电厂设计寿命和功率下的可接受性,并应识别所有操作限制以避免可能出现脆性断裂。应提供足够的通往压力容器支撑结构的通道,以便在需要时能够对材料温度进行监测,对结构材料进行改造或热处理。

#### 2.11.4.2.7 非金属材料

核蒸汽供应系统及其相关系统中使用的非金属材料中的杂质水平应控制在规定限值以下。特定位置的限值要求如下:

- 1) 对以下条件中反应堆冷却剂系统所用的非金属材料,应对其杂质含量进行限制:
    - a. 在运行时,材料与反应堆冷却剂相接触;
    - b. 材料用在可能与反应堆冷却剂相接触的表面,并在运行前不能彻底清除;
    - c. 由于设计原因或投入运行前不能完全从接触面清除,而与反应堆冷却剂系统设备外表面的不锈钢和镍基合金接触;
    - d. 在设备设计寿期内,材料所经受的辐照剂量大于 1000Gy 或产生热老化。
- 杂质含量限值如下:
- h. Cl、F、Br 总量: 不超过 200ppm;
    - e. Hg: 不超过 1ppm;
    - f. As: 不超过 2ppm;
    - g. Pb: 不超过 10ppm;
    - h. S: 不超过 200ppm;
    - i. Zn: 不超过 200ppm;
    - j. Hg、As、Pb、S、Zn 总量: 不超过 300ppm。

2) 对于二次侧部件中可能污染主给水的非金属材料, 以及用于清洗二次侧部件中的不锈钢或镍基合金的材料, 其杂质限值如下:

- a. Cl、F、Br 总量: 不超过 200ppm;
- b. S: 不超过 250ppm;
- c. 重金属 (Hg、As、Pb 总量): 不超过 200ppm。

3) 对于安全壳内其它设备, 在制造、运输和贮存中与钢或镍基合金接触的非金属材料, 其杂质限值如下:

- a. Cl: 不超过 500ppm;
- b. F、Br 总量: 不超过 300ppm;
- c. S: 不超过 700ppm;
- d. 低熔点金属元素总量: 不超过 500ppm;
- e. 单个低熔点金属元素: 不超过 200ppm。

放射性系统 (如放射性流体系统或潜在放射性流体系统) 中禁止使用聚合材料。

放射性环境 (如放射性系统所在隔间或走廊) 中应尽可能不使用聚合材料。禁止高累积剂量区的聚合材料因性能退化而损害系统或设备功能。

#### 2.11.4.3 选材

应根据实际经验或质量鉴定选择使用材料。

##### 2.11.4.3.1 反应堆冷却剂系统和相关系统的材料

本节描述了冷却剂系统和相关系统 (1级部件、2级部件, 包括CS级堆芯支承结构和其他堆内构件) 的材料使用及有关要求。

#### 1) 锻制奥氏体不锈钢

奥氏体不锈钢使用应遵守以下规定:

- a. 以固溶热处理状态供货, 或在后期进行固溶热处理。固溶热处理温度为 1050℃~1150℃。
- b. 与硼酸水接触的奥氏体不锈钢、焊后没有固溶热处理或其它焊后热处理的奥氏体不锈钢, 均应采用抗敏化和抗晶间腐蚀开裂的材料。
- c. 应按照相应的标准规定对锻造奥氏体不锈钢材料进行抗敏性试验, 来证明其抗晶间腐蚀能力。
- d. 冷加工控制: 若其在硼水中、或是压力边界、或是堆内构件, 应确保满足以下所有要求:
  - 对于可能处于异常水化学环境 (如富氧死水区域) 中的组件, 应满足: 与成型设备 (如轧辊、芯轴等) 接触的表面, 应进行评估以避免过度表面冷加工; 避免在机加工和打磨过程中对材料表面造成冷加工; 如果存在表面过度冷加工, 尤其是对于待焊材料, 应采取缓解措施 (如抛光) 以减轻或消除表面冷加工。
  - 在没有经验证的可替代材料时, 冷加工奥氏体不锈钢可用在没有焊接结构的部件上, 如销、紧固件、套筒、拉杆等。应对每处应用进行技术论证, 包括有关试验、服役经验、允许的最大冷加工量, 以及能确保材料不会超过最大冷加工量的过程控制手段。
- e. 铁素体控制: 对于与硼酸水接触的部件在制造和装配过程中所用的不锈钢焊材及垫板, 应控制其铁素体含量在 5%~15%之间。

#### 2) 马氏体不锈钢

马氏体不锈钢锻件及铸件的使用应满足以下要求:

- a. 热处理：采用马氏体不锈钢锻件和铸件制造的部件，应按相应标准要求进行热处理。对于可能产生应力腐蚀开裂的地方，应通过适当的热处理以控制材料硬度。
- b. 焊接控制：铸件焊接修补后应按相应标准要求进行完整的热处理，热处理可以是改变力学性能热处理，也可以是消除应力热处理。除铸件外其它马氏体不锈钢制品不允许进行焊接修补。

### 3) 镍基合金

在需要利用镍基合金特殊性能时，设计者应论证其满足第2.11.4.2.1节中关于使用未经验证材料的相关要求。论证应突出说明：特殊需求、缺乏合适的替代材料、在预期条件下良好的使用性能等。也应考虑要容易检查和更换。

经验证明，热处理态Inconel690和对应的焊接材料ERNiCrFe-7和ENiCrFe-7能够满足2.11.4.2节的要求。

选用Inconel690则要对其做特殊的热处理，以改善其抗应力腐蚀的能力。热处理态的Inconel690可用于制造蒸汽发生器传热管和其它主系统的热交换管。

禁止对所有镍基合金的浸湿表面进行酸洗。

禁止在使用Inconel 600及其焊材ENiCrFe-3。

### 4) 奥氏体不锈钢铸件

- a. 固溶热处理：所有铸件均应按相应标准要求进行固溶热处理，热处理温度应在1050℃~1150℃之间。
- b. 所有与硼酸水接触的奥氏体不锈钢铸件，如果焊后不进行固溶热处理，则最大碳含量应限制在0.04%。
- c. 铁素体控制：对于处在冷却剂压力边界中水或蒸汽环境下的奥氏体不锈钢铸件，应按相应标准要求测定铁素体含量，进行铁素体控制。
- d. 焊接修补：根据相应规范进行补焊。熔敷金属的牌号应与母材相同。补焊后不要求进行固溶热处理。补焊后应对焊接部分按照相应规范区域进行无损检测。
- e. 热老化：为减少奥氏体不锈钢铸件热老化，碳含量最大不能超过0.04%；铸件和焊材中的铁素体按相应标准要求控制；为确定在寿期末材料韧性不会降低到设计所要求的限值以下，应进行分析或加速试验。
- f. 在焊制且需要进行在役检查的主回路系统部件中，应限制使用奥氏体不锈钢铸件。设计人员可以根据需要开发专门的检验技术，证明铸件能够按照相应标准要求进行检验。设计人员应将专用技术、结果证明等技术文件提交业主，以便业主根据相应的规定进行在役检查。

### 5) 碳钢和低合金钢

#### a. 腐蚀裕量

对于所有暴露在水环境中且未经保护的碳钢、低合金钢，应考虑腐蚀裕量（一般腐蚀、点蚀和缝隙腐蚀）。

#### b. 压力容器用钢

16MND5锻件可以用于反应堆压力容器和主回路系统容器。

与反应堆冷却剂接触的低合金钢、碳钢承压容器和管道应堆焊奥氏体不锈钢，堆焊层铁素体含量应为5%~15%之间（最好不超过12%）。

#### c. 无缝钢管

无缝钢管可根据对应级别选用10、20、25、15Mn、P280GH等牌号的无缝碳钢管。应对其全长进行正火热处理。暴露在反应堆冷却剂中的任何铁素体钢管道都应该在内壁堆焊不锈钢。

#### d. 焊制管



碳钢焊制管可根据对应级别选用Q235、Q265HR、Q295HR、Q355HR、15MnHR等牌号的碳钢焊制管。焊接管应按相应标准进行焊接。暴露在反应堆冷却剂中的任何铁素体钢管道都应该在内壁堆焊不锈钢。如有需要，可用低合金钢管代替普通碳钢。

e. 板材

可根据用途不同选用16MND5、18MND5型钢板，并按相关标准要求控制其性能。

f. 锻件

可根据用途不同选用16MND5、18MND5型锻件，并按相关标准要求控制其性能。

g. 铸件

普通碳钢铸件材料可选用ZG235-470、ZG275-485等牌号。应满足对应标准对冲击性能的要求。铸铁不应用在核安全相关设备的重要功能部件上，如阀座。

#### 2.11.4.3.2 给水、蒸汽和冷凝系统中的材料

给水、蒸汽和冷凝系统的材料选择应考虑限制杂质和铁进入蒸汽发生器。

与给水、蒸汽或冷凝水接触部件中禁止使用铜合金。其余部件中所有铜合金应用应由设计者根据目前的经验提供理论分析。

二次侧系统材料选择时，设计者应根据经验关注减少氧致腐蚀。

处于湿蒸汽、闪蒸液态流、单相湍流中的部件，因流体作用容易产生材料丧失，需选用抗流致加速腐蚀的材料。材料抗流动加速腐蚀能力应与设备所处液流条件相匹配，如温度、湿度、湿蒸汽流速、氧含量、pH等。

#### 2.11.4.3.3 紧固件和粘合剂

##### 1) 金属紧固件

应根据相似应用中的良好经验来选择以下螺纹紧固件的用材：保持反应堆冷却剂及相关系统、蒸汽、给水及冷凝系统压力边界完整的紧固件；在以上系统内设备和管道上使用的紧固件。相似性应基于以下几点：

- a. 相似的温度和环境，包括辐照剂量和异常工况，如由于密封泄漏导致的受潮；
- b. 相似的应力水平（包括一次应力、二次应力、峰值应力）和影响应力的设计细节（如螺纹形状、螺帽形状、装配和公差）；
- c. 相似的载荷和循环次数，包括大小和频率；
- d. 相似的制造和安装，如热处理、喷涂或其它表面处理、螺纹成形、清洁、润滑、预加载荷等；
- e. 在制造、安装和使用中使用相似的检验方法。

螺纹紧固件的使用应符合第2.11.4.6节及相关规范的要求。

所有高强度低合金钢螺栓的硬度应按相应标准规定进行控制。

用于主回路系统或二次侧系统内部部件且与水接触的螺纹紧固件材料应符合本节的要求。

##### 2) 螺纹紧固件润滑剂

设计者应在相应的图纸和规格书中规定以下螺纹紧固件使用的润滑剂：用于保持反应堆冷却剂及相关系统、蒸汽、给水及冷凝系统的压力边界完整性的螺纹紧固件，这些系统内部的螺纹紧固件，以及这些系统管道和设备支撑的螺纹紧固件。禁止现场选择螺纹润滑剂。应基于经验和试验数据选择适用的润滑剂，且润滑剂不会引起和加速紧固件的腐蚀。例如，在主回路系统、二次侧系统中的潮湿处，应禁止使用二硫化钼润滑剂。如果在螺纹紧固件上使用泄漏密封剂，或在使用过程中密封剂与紧固件可能接触，应基于经验和试验数据选择合适的密封剂。应避免密封剂和润滑剂可能出现不利的相互作用。

### 3) 非金属粘合剂

非金属粘合剂应与所应用的材料应兼容，并应通过经验或测试证明其不会导致相接触的金属材料性能退化。

- a. 连续工作温度不超过 200℃，采用硅化物；
- b. 连续工作温度不超过 90℃，采用聚醚聚氨酯。

可根据经验和/或鉴定试验替换上述材料。

#### 2.11.4.3.4 保温材料

在需要在役检查或可能污染而不适合采用非金属保温材料的地方，应采用金属保温材料或有金属外罩的保温毡进行管道和设备保温。

对于需要从外部进行在役检查的反应堆系统和非安全辅助系统管道和设备，需采用可快拆的金属反射型或玻璃纤维保温层，并使用快拆紧固件。

#### 2.11.4.3.5 密封、垫圈、填充材料、轴承、爆破片、密封剂、油漆和防护涂层、润滑剂和液压流体、清洗、包装和贮存材料

设计者应制定计划来评估准备使用的材料在正常工况和事故工况下对其它设备的影响。设备供应商提供的信息只有被运行经验证实后才能采用。该计划涵盖的材料类别如下：添加剂、粘合剂、防冻剂、水泥、清洁剂、布、涂料、缓蚀剂、切削油、干燥剂、洗涤剂、显影剂、染色标记、过滤介质、垫圈和O形圈、胶、除草剂、软管、液压液、抑制剂、杀虫剂、绝缘材料、标签、润滑剂、记号笔(蜡笔)、填充物、标记、纸、笔迹、塑料薄膜、防腐剂、橡胶制品、密封剂、溶剂、标签、胶带、传动液、处理剂、超声波耦合剂、焊接保护纸、包装材料。

设计者应根据相关标准提供对材料的推荐和限制要求。如有可能，对用于核蒸汽供应系统及电厂其它部分的每种材料都进行评估。

在主系统或二回路冷却剂浸湿的地方，禁止使用铅及铅合金，如冷凝泵轴承或汽轮机爆破片。

#### 2.11.4.3.6 电气材料

在电厂的电气系统中使用的材料，尤其是在那些安全相关的应用中使用的材料应该在正常工况、异常工况以及事故工况中进行功能可靠性检查，包括老化影响分析。电气系统使用的材料需具备阻燃特性，以最大限度的降低火灾的可能性以及火灾后引起的后果。在第 2.6 章仪表和控制系统和第 2.7 章电力系统中提出了对仪控系统和电气系统材料使用的特殊要求。对于压力容器内的电气部件（如 CRDM、反应堆冷却剂泵）应符合预期的环境要求并给予证明。

#### 2.11.4.3.7 焊接材料

- 1) 铁素体钢焊接：铁素体钢焊材强度和韧性应大于或等于母材。
- 2) 焊接耗材：焊接耗材应满足对应标准的要求。不锈钢焊材的化学成分和铁素体含量、镍基合金焊材化学成分应满足本节对应条款的要求。

#### 2.11.4.4 过程控制

##### 2.11.4.4.1 表面状态

制造和安装工艺（如成形、弯曲、焊接、热处理、表面打磨）可能对材料表面状态和微观结构产生不利影响，需对工艺加以控制以确保产品满足使用要求。应根据电厂建造时

的规范和工业水平，制定制造、运输和储存过程中的清洁度标准。

#### 2.11.4.4.2 制造控制

应对制造和焊接过程进行控制。焊接产生的污染物应加以控制，以确保它们不会导致腐蚀问题。

应尽可能减少由制造工艺（焊接、机加工、表面处理等）带来的残余应力。如果材料有出现疲劳或应力腐蚀开裂的风险，需根据实际情况进行消应力热处理。

#### 2.11.4.4.3 检查和试验

材料和设备在制造过程中及制造完工后应进行相关检验，以确定符合使用要求。至少如下：

- 1) 承压材料应进行力学性能试验和化学分析，以确保符合材料技术要求。
- 2) 承压材料及焊缝应按相关标准进行体积检验(超声波检测、射线检测)和表面检验(目视检验、渗透检验、磁粉检验、涡流检验)。
- 3) 在拉伸试件和冲击试件中使用的材料应按相应规范进行热处理。
- 4) 与反应堆冷却剂相接触的奥氏体不锈钢和镍金合金组件、部件和原材料，应当成功经受晶间腐蚀试验。
- 5) 在要求对设备或焊缝实行在役超声检查地方，在设备或焊缝的设计要求、材料要求和制造检查要求中要确保现场超声波检测的可行性。应控制材料晶粒度及均匀度，以便进行超声波检测。部件和焊接接头的设计应保证可使用自动超声波检测并100%覆盖对应标准要求的检测区域。焊缝应加工平整，以便进行自动超声波检测。对于计划使用射线检测的焊缝，应考虑设计超声波全厚度检测，以便使用超声波检测代替射线检测。
- 6) 在可检性方面，部件设计时还应考虑以下几点：
  - a. 应尽量减少现场焊接。
  - b. 永久螺栓连接设计不应阻挡超声波检测。螺栓端部不应该覆盖防旋转护套或其他障碍物。
  - c. 所有焊缝应有基准标记，以便作为检验参考。
  - d. 检查记录应按相关规定妥善保存以便查阅，记录应包括材料证书和位置图。
  - e. 所有焊缝完工状态应有完整的文件记录。
  - f. 焊缝和部件(泵、阀门、吊架)应该在焊缝附近有永久性标识，便于后续焊缝检查。
  - g. 应尽量避免将焊缝设计在变径段上或其附近。如果确实不可避免，变径段应从焊缝处逐渐向设备过渡。

#### 2.11.4.4.4 运输和贮存

所有的材料和设备在运输和贮存中应按相关规定进行保护，以防止由环境条件造成损坏。

#### 2.11.4.4.5 安装

在电厂施工过程中，所有的材料和设备的操作应符合现场要求。

#### 2.11.4.4.6 液体冲洗和贮存

材料和设备的现场清洁、清洁度控制、试运行清洁、液体系统的贮存应满足相关要

求。

#### 2.11.4.5 关键材料管理开口

根据国内外核电厂材料问题经验，对尚未解决的材料老化、维修、管理或检验问题，在新设计中应提前考虑。

#### 2.11.4.6 螺栓连接件和螺纹紧固件

##### 2.11.4.6.1 螺栓连接件的使用

螺栓连接件和螺纹紧固件只应在必要时使用。使用螺栓连接件时不仅要考虑初投资，还要考虑后续维护、使用故障风险和放射性废物收集风险。当必须使用螺栓连接件来满足功能要求时，其设计应简单、牢固，不依靠高强度或特殊材料、精密零件、专门组件和检查方法。

除非另有说明，本节中的要求适用于反应堆冷却剂系统及相关系统、蒸汽系统、给水系统和冷凝系统的压力边界、结构件、具有重要机械功能的接头（如阀门驱动机构与阀杆或阀体的连接）。此外，本节要求也适用于本文件其他章节定义的关键部件的螺栓连接，在此应用中需按照本节要求对连接件材料进行鉴定。

螺栓连接件（包括螺纹紧固件、锁紧装置、润滑剂和垫圈材料）的材料应符合本节的相关要求。

螺栓连接件的结构应根据类似条件下的使用经验和电厂设计时的实际工业水平来确定。相似性应基于以下方面：

- 1) 材料相似，包括紧固件、垫圈、锁定装置、润滑剂、经表面处理（如电镀）的垫片、密封、法兰和其它连接部件所用的材料；
- 2) 温度和使用环境相似，包括：辐照剂量、保温层的类型和位置、异常环境如垫片泄漏或去污溶液导致的润湿；
- 3) 应力相似，包括一次、二次和峰值应力。影响应力的具体设计细节也应相似，如：螺纹类型、螺纹结构、配合、公差和刚度；
- 4) 载荷和循环次数相似，包括大小和频率；
- 5) 制造和安装工艺相似，如：金属加工方法（如端头或螺纹加工）、电镀或其它表面处理方法、润滑和预紧；
- 6) 在制造、安装和在役检查中的检验方法相似；
- 7) 相似的螺纹紧固件的锁紧和保持方法。

##### 2.11.4.6.2 连接结构和设计

为压力边界（特别是工作介质带放射性、有毒或腐蚀性）提供密封的螺栓连接，其结构设计应尽可能降低泄漏风险和泄漏后果，如使用耐腐蚀材料、有利于泄漏监测的结构设计等。

- 1) 在垫圈泄漏会导致连接件腐蚀和明显的结构损坏的地方（如硼水落在碳钢材料上），应该使用良好的耐腐蚀材料零部件，但不允许降低连接件的功能要求（如密封性能）。
- 2) 如果在某些特殊的连接中不能使用耐腐蚀的紧固件，而泄漏会导致腐蚀，则该紧固件必须可检、可维护。设计者应书面将此类连接告知业主，并说明依据和如何进行检查和维护。

连接件的结构（包括螺纹紧固件）应该有利于检查其状况，如：不拆卸就能够目视检查承载部分。

连接件的设计应考虑制造公差、安装时预紧载荷的变化以及使用中有可能发生的预紧载荷改变（如：松弛）。

对于使用预紧载荷的螺栓连接，设计者应书面（图纸或规程）规定需要的预紧载荷，以及如何预紧，如：螺杆润滑剂和加载力矩的顺序。预紧载荷设定和预紧方法不能由制造商确定或现场确定。

#### 2.11.4.6.3 螺纹紧固件的锁紧和保持

在以下条件螺栓连接应锁紧：

- 1) 在螺栓连接承受交变载荷（占最小预紧载荷的比例较大），特别是紧固件或连接部件产生微小变形，就可以解除预紧载荷；
- 2) 螺栓连接不能有效预紧，即使所需要的载荷小也无法有效预紧。

当螺纹紧固件要求锁紧时，除其材料应满足本节要求外，还应满足：

- 2) 应证明锁紧方法在同样的使用条件下是满足要求的，如：载荷、环境、尺寸和结构；
- 3) 当利用材料塑性变形进行锁紧时，变形应控制与在材料延伸率范围内；
- 4) 锁紧装置中不应有任何过度振动的零部件；
- 5) 锁紧要求的技术水平应尽量较低；
- 6) 锁紧装置在不拆卸的情况下可便捷验证其安装是否正确；
- 7) 设计者应书面（图纸或规程）规定锁紧装置的细节及锁紧方法，不允许在车间和现场进行规定。

如果螺纹紧固件承载部分发生故障而松动时会对其它部件造成破坏，从而造成严重的人员伤亡或电厂长时间停运和昂贵的维修，则其锁紧手段还应包括防止断裂紧固件的脱落或转动。

对于使用焊接来锁紧和保持的情况，应满足以下要求：

- 3) 设计者应该文件（图纸或规程）规定焊接的有关要求，包括：尺寸、位置、焊接规程和检验等。锁紧或保持焊接不允许由制造单位或安装单位确定；
- 8) 应和结构焊缝一样对待，如：应由具有资格的焊工按照有效的规程进行施焊，焊接完成后应采用适当的方法进行检验；
- 9) 应考虑焊接热量对连接件材料和预紧的影响。

#### 2.11.4.7 涂层鉴定要求

暴露在安全壳大气中的油漆和涂层应按 NB/T 20133.1《压水堆核电厂设施设备防护涂层规范 第1部分：通用要求》进行鉴定。

#### 2.11.5 在役检查

在役检查要求应符合RSE-M《压水堆核电厂在役检查规则》（2010版）。

电厂的布置设计应为管道、容器和部件的在役检查提供条件：

- 1) 管道、管道支撑位置、保温、吊架和支架挡块的设计应不妨碍检查设备和人员。如果存在干扰，相关部件需可以利用最少的专用装卸设备快速便捷拆除。
- 2) 反应堆压力容器外应设置永久性通道，以便对反应堆压力容器、管嘴、压力容器下封头进行在役检查。
- 3) 在役检查中需要进行体积检验或外观检验时，管道或设备焊缝周围至少应有足够的净操作空间。
- 4) 在放射水平超过0.05 rem/h、实体限制、禁止手动操作的区域，应考虑自动检

测。

5) 管道布置应按标准规定,在相邻管道焊缝之间、穿墙管道焊缝与墙体之间、设备管嘴、三通、弯头、阀门、直管连接和其它附属件之间应预留适当距离,以便有空间以执行在役检查。

6) 在役检查中需进行体积检验的焊缝,应设计为人员、远距离自动焊接设备和超声波检验设备充分可达。对需要进行体积检验、表面检查、维修的焊缝,应设置平台、通道等以便到达焊缝位置。

7) 对要求进行现场试验的安全相关级阀门,应保证可达性。

需在役检查的焊缝表面轮廓和完工要求应在焊接数据单上明确。考虑到后续便于开展在役检查,应合理设计焊缝余高和完工表面粗糙度要求。

## 2.11.6 力学

### 2.11.6.1 系统力学

应根据管道分级(见§2.1.3)采用合理的计算方法对安全相关管道进行各类工况下的应力分析与评定,使设计满足标准规范的要求。管道系统力学分析的一些原则或要求如下:

1) 管系计算边界可为设备接口、固定支架、贯穿件、大管道和自由端,对小管道( $DN \leq 50\text{mm}$ )可以三向限位CB支架为边界;

2) 当主管与支管直径之比大于等于4或惯性矩之比大于等于100时,主管和支管可解耦进行应力分析,主管分析模型不考虑支管,支管分析考虑主管的影响;

3) 刚性支架应满足“刚性”支架对应的刚度值,若不满足则应在管道应力分析模型中考虑支架刚度,计算模型应合理地考虑设备接管的刚度;

4) 需考虑支架与管道之间的间隙、支架非线性以及其它非线性因素时,可采用非线性瞬态动力学分析法(时程法);

5) 对于跨越多个楼层或跨厂房的管道,可采用多点谱分析法;

6) 地震动力学分析中反应堆冷却剂系统阻尼建议:SL-1取2%,SL-2取4%,其它管系阻尼建议:SL-1取3%,SL-2取4%;

7) 应用破前漏(LBB)技术的高能管道不考虑自身破裂产生的局部动态影响;

8) 当采用反应谱法时,管道的最大反应值可取各振型最大反应值的平方和的平方根。对有密集模态的分析对象,可先对密集模态进行分组组合并考虑耦合效应,再与其它振型的最大反应值按平方之和的平方根(SRSS)进行组合,也可采用完全二次型(CQC)进行组合;

9) 地震震动的三个分量引起的反应值,当采用反应谱法时,可取每个分量在管道同一方向引起震动的最大反应值,按平方和的平方根法进行组合。当采用时程法时,且地震时程激励的三个分量相互独立,可求出时间历程函数反应分量的代数,并取组合反应值的最大值;

10) 当采用反应谱法进行地震分析时,应提取反应谱截止频率以下所有模态,有效质量系数应大于90%,若小于90%则应采用合适的方法对结果进行修正;

11) 载荷组合应尽可能反应真实情况,考虑实际事件序列和相对时间顺序。同时发生的概率极低的事件不必组合。多种动态载荷最大值同时出现的概率很低,推荐采用SRSS方法进行组合。

### 2.11.6.2 设备力学

应根据设备分级(见§2.1.3)采用合理的计算方法对安全相关设备进行各类工况下的应力分析与评定,使设计满足标准规范的要求。设备力学分析的一些原则或要求如下:

- 1) 应对承受外压的容器进行稳定性分析;
- 2) 地震动力学分析中, 反应堆冷却剂系统设备的阻尼建议: SL-1取2%, SL-2取4%, 其它设备应基于实际情况(设备类型、安装方式、与系统的连接等), 按照相应的标准取值;
- 3) 地震分析采用反应谱法时的振型组合见§2.11.6.1 第8)条, 地震震动的三个分量引起的反应值的组合见§2.11.6.1 第9)条;
- 4) 载荷组合要求见§2.11.6.1 第11)条;
- 5) 疲劳分析中考虑的运行安全地震SL-1的循环次数: 发生 $N_s$ 次SL-1, 每次有 $n_s$ 个最大响应循环, 其中 $1/2N_s$ 次循环叠加到最严重的瞬态组合之上, 其余 $N_s(n_s-1/2)$ 次循环作为独立的瞬态考虑(可与其它瞬态组合);
  - a. 对于设计寿命为 60 年的设备部件和管道,  $N_s=30$ 、 $n_s=20$ 、 $1/2N_s=15$ 、 $N_s(n_s-1/2)=585$ ;
  - b. 对于设计寿命为 40 年的设备部件和管道,  $N_s=20$ 、 $n_s=20$ 、 $1/2N_s=10$ 、 $N_s(n_s-1/2)=390$ 。
- 6) RCC-M1级设备应进行一类、三类、四类和试验工况下的一次应力分析、二类工况下的疲劳和热棘轮分析, 二类、三类、四类和试验工况下的抗快速断裂分析;
- 7) RCC-M2级设备应力分析按C3200, 对于不承受显著循环载荷(按C3112的定义)的设备可按C3300; RCC-M3级设备按C3300(特殊要求见D3300);
- 8) RCC-M1级设备和管道的支承为S1级, 应力分析按H3200; RCC-M2、3级设备和管道的支承为S2级, 应力分析按H3300; 线型支承应力分析按ZVI;
- 9) 堆内构件的应力分析按RCC-M G3200。

## 2.11.7 管道和管件

### 2.11.7.1 通用要求

工作介质为放射性流体的管道应全部采用对接焊, 除因维护要求频繁拆卸而使用法兰。

放射性或潜在放射性液体应尽量避免使用埋管。确需使用埋管的, 应尽可能对管道进行泄漏检测和监测功能。应尽可能将管道设计在人员可进入的地下通道中。应详细记录地下管道和埋管的位置, 包括以下信息:

- 1) 系统名称/管线编号/流体类型;
- 2) 标准分类;
- 3) 材料及接头类型;
- 4) 子项名称;
- 5) 充填和埋地条件, 包括使用低强度混凝土材料(可流动的填充);
- 6) 阴极保护的阳极床或阳极点、导向、试验点、解耦器、隔离组件、参考电极等的位置;
- 7) 接地格栅;
- 8) 涂层和衬里的信息;
- 9) 检查、泄漏和维修的位置和日期;
- 10) 周边的设备、构筑物、大件转运通道和埋件等。

所有放射性废物系统和其监控系统之间的连接都应位于建筑物内, 以便有效控制系统之间连接处的泄漏, 消除未知、未监测到的泄露可能性, 也便于检查和维修。

管道的设计和结构应该尽量减少污染积聚。应尽量使用对接焊, 应消除或减少使用承

插焊。确保废物系统和其他高固体含量管道结构便于进行清洗、去污。

尽量减少埋入混凝土结构中的管道。对于贮水池、管槽和嵌入式管道，设计应考虑进行泄漏检测，以确定是否有流体可以进入周围环境（地下水）。

高能管道系统上的焊接接头数量应尽量少，应尽可能采用弯管代替直管和弯头之间的焊缝。

应尽量避免在安全壳贯穿件导管内设置承压焊缝。连接导管和工艺管道的管件应焊接在工艺管道上，且不破坏管道压力边界。

埋地和地下管道系统应尽量提供进行远程检测的条件，包括：

- 4) 具备可达管道外表面的通道，以便定期在管道外表面安装临时传感器。
  - 11) 安装导波传感器，用于定期导波检查。
  - 12) 提供可进入管道内部的通道，以便检查设备可以进入管内。通道应能保证检查设备的进入和回收。同时应根据管道布置和不干扰检查设备的移动路径设置多个回收点，这些回收点可为原地修复提供通道，如原地修复管道。
  - 13) 应设计备用流道，确保在不影响电厂运行的情况可拆卸管线。

因为埋地深度不同，核电厂埋地管道通常会具有复杂的几何形状。在这种情况下，应考虑用奥氏体不锈钢等耐腐蚀材料制造深度较大的管道。不被其他管道或结构所阻碍的近地管道可以用碳钢制造，以降低成本。

2.11.7.2 限流器

应合理设计限流器（如孔板）的尺寸以尽可能降低流阻，从而避免在正常工况下出现空泡现象，可根据需要串联使用两个或多个限流器。本规定不适用于利用空泡效应来限制流量的设备（如空泡文丘里管）；但是设计者应完整识别这类设备，并证明不会造成管道损伤。

节流孔板应设计为在正常运行时不会产生空泡，其安装位置上下游必须有足够的直管段长度。用于流量测量的量孔板应按相关规范要求安装，且在维修时能够移除。

设计应保证通过直接目视检查就能验证限流器在系统中的安装位置。限流器应有规格和流向标识，且尽可能不拆开系统就能直接观察验证。标识应由供应商安装，应是永久性的、和限流器结合成一体、且现场安装操作不会对其造成改变的。允许现场拆除保温层进行标识。对于那些不能满足该要求的限流器，如蒸汽发生器出口限流器，设计者应进行识别并告知业主。

2.12 电力生产系统

2.12.1 前言

2.12.1.1 目的

华龙核电技术用户要求文件本章的目的是定义先进压水堆发电系统的功能性要求。有关整体的更详细讨论，请参阅2.1.1 华龙核电技术用户要求文件的目的。

2.12.1.2 范围

本章涵盖以下内容：

章节号	章节标题
2.12.3	主蒸汽系统（核岛部分）
2.12.4	主给水流量调节（核岛部分）
2.12.5	主蒸汽/旁路系统



2.12.6	凝结水抽取系统
2.12.7	化学品添加系统
2.12.8	除盐水生产系统
2.12.9	辅助蒸汽系统
2.12.10	低压给水加热器系统
2.12.11	低压给水加热器疏水回收系统
2.12.12	主给水除氧器系统
2.12.13	电动给水泵系统
2.12.14	高压给水加热器系统
2.12.15	主给水流量控制系统
图 2.12.1-1	原则性热力系统图

### 2.12.1.3 功能

每个系统的具体功能参见每个系统的各自章节，如上表所示。

### 2.12.1.4 边界和接口

列出的界面是核电厂的典型界面。根据各个压水堆核电厂设计的详细信息，这些接口可能不适用。一般而言，发电系统的边界和接口见第3至13节。所有这些系统的共同点是与仪表、控制和电力系统的接口。因此，下面将讨论这两个系统的接口和边界。

#### 1) 仪表与控制

在本章中，定义了影响仪表和控制装置类型、范围和位置的功能要求。其他设计要求见第10章：人机接口系统。

一般而言，发电系统及其仪表之间的接口在传感器与系统管道或部件的连接处。传感器被认为是人机接口系统（第10章：人机接口系统）的一部分。对于执行机构，接口位于致动器与其线路或管道的连接处，通过这些线路或管道传输电力或控制信号。执行器是发电系统的一部分。

#### 2) 电力系统

发电系统和电力系统之间的边界位于配电子系统与相关部件（电机、致动器等）的连接处。电力系统的一般设计要求见第11章：电力系统。

### 2.12.1.5 政策声明

以下是与华龙核电发电系统相关的项目政策声明。这些不是要求，但它们的目的是帮助理解需求及其制定过程中采用的方法。

#### 1) 可靠性和可用性

给水和凝结水系统对电厂的可靠性和可用性有两个直接的负面影响：导致反应堆停堆，以及在部件停止运行时对功率水平的限制。此外，该系统对压水堆蒸汽发生器的沉积物堆积、管-支承结构结垢、管支架和管子腐蚀以及压水堆燃料性能和停堆辐射水平的影响，对可靠性产生了重大影响。

a. 给水和凝结水系统是核电站反应堆停堆的主要原因。第 4 节规定了减少此类跳闸的要求，包括：

- 尽量减少仪表控制功能和控制回路的数量；
- 泵的设计应防止在低净正吸入压头（汽蚀余量）时需要停泵。

b. 电厂作为电网电源的可靠性通过在合理的高功率水平下运行的能力而得到提高，即使某些部件停止运行。第 4 节规定了给水和凝结水系统保持高功率水平的要

求，包括：

- 凝结水泵、主给水泵允许在一台泵停止运行的情况下以 100%功率运行；
- 当一台低压（LP）或高压（HP）给水加热器停止运行时要求电厂能够在 70%满功率下运行。

c. 汽轮机跳闸和主蒸汽隔离阀（MSIV）关闭后恢复发电的能力通过以下方式得到改善：

- 辅助蒸汽供应连接至汽轮机轴封。
- 排水和通风系统确保蒸汽管道快速加热，以便重新启动。

d. 加强反应堆和蒸汽发生器的化学的设计要求：

- 系统材料（见下文材料）；
- 除盐装置和冷凝水精处理装置设计要求；
- 再循环净化容量；
- 冷凝器完整性要求。

## 2) 简化

第2.1总体要求中华龙技术核电厂相对于较老的电厂应显著简化。在本章中，在确定要求时，考虑了简化和易于量化的因素（如资本成本、燃料成本）。

## 3) 可维护性

发电系统包含许多需要定期维护的部件，并且可能需要在电厂寿命期间进行更换。本章节包括确保此类维护和更换能够轻松完成的要求。这些要求包括，例如，为再热器、给水加热器和冷凝器更换管子或管束提供足够的通道和空间的要求。

## 4) 材料

由于流动加速腐蚀（FAC）和材料选择不当导致的腐蚀，发电系统中的管道和部件在运行中出现問題。这些问题包括管道或部件的故障和腐蚀产物的产生，这些腐蚀产物可以被输送到反应堆或蒸汽发生器（PWR）。在确定本章中对这些地点所用材料的要求时，已经考虑了这一经验。示例包括管道材料（再热器、给水加热器、冷凝器）、管道材料（抽汽管道、加热器排水管道、给水管）、给水加热器和汽水分离器外壳和内部，以及给水加热器和汽水分离器外壳和内件材料。

## 5) 纵深防御

### a. 主动防御

通过为反应堆堆芯衰变控制系统提供与堆芯衰变热相关的蒸汽发生器和堆芯衰变热控制。在涉及汽轮机跳闸和主蒸汽隔离阀关闭的事件中，主给水泵的可用性通过使用电动给水泵代替蒸汽轮机驱动装置来提高。

### b. 被动防御

第2.5节：专设安全系统为衰变热排出的安全功能建立了纵深防御要求。对于华龙技术核电厂，非能动安全注入功能涉及将反应堆冷却剂释放到安全壳大气中，这增加了避免使用非能动安全特性的动机。本章包含压水堆备用给水系统的要求，该系统在主给水事件发生时作为第一道防线。

## 2.12.1.6 附图部分

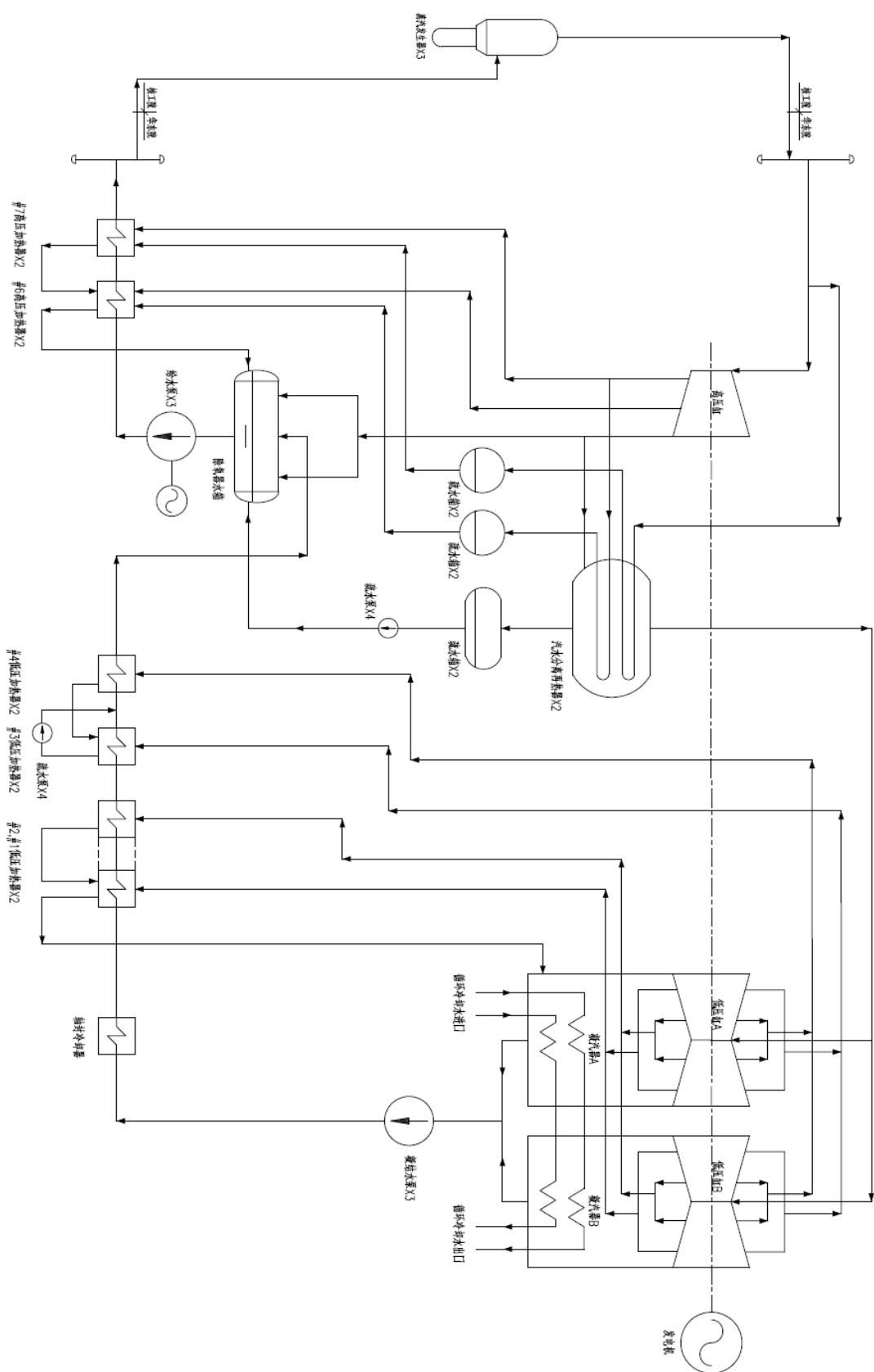


图2. 12. 1-1 原则性热力系统图

## 2.12.2 通用要求

### 2.12.2.1 总则

本章所涵盖系统的设计应符合第2.2章的要求。

### 2.12.2.2 特定的要求

#### 1) 阀门

第2.1.12.2节规定了适用于华龙技术核电厂的阀门和阀门致动器要求。在 2.1章总的要求中的关键要求包括：

- a. 尽量减少阀门和阀门执行机构的数量；
- b. 尽量减少阀门和阀门执行机构的类型、尺寸和型号；
- c. 使用经过验证的设计的阀门和执行机构，强调可接近性、可维护性、耐用性和简单性；
- d. 阀门填料设计，以消除填料泄漏。

以下要求特别适用于发电系统：

- a. 暴露在真空中的阀门应规定包括一个或多个以下特点：
  - 无填料（波纹管）密封；
  - 填料上的水封；
  - 带弹性材料的活载/人字形填料。
- e. 所有排放到冷凝器或相当低压力点的阀门应安装在尽可能靠近排放点的位置，以尽量减少闪蒸流造成的侵蚀。

#### 2) 材料

第2.1.5节规定了华龙技术核电厂的材料要求，包含给水、蒸汽和冷凝水系统的具体要求，包括尽量减少铜合金的使用，以及对暴露在湿蒸汽或闪蒸液体流中的管道和部件使用FAC和防腐蚀/耐腐蚀材料（非碳钢）的要求。

第3部分至第8部分包含其他具体的材料要求。

#### 3) 仪表和控制

发电系统的仪表和控制设备应符合第10章：人机接口系统的要求。应通过分析第10章：人机界面系统要求的功能和任务，确定控制和显示器及其位置。更多具体要求载于第3至8部分。

## 2.12.3 主蒸汽系统

### 2.12.3.1 系统定义

#### 2.12.3.1.1 目的

主蒸汽及蒸汽排大气系统用于执行下述功能：

- 1) 向汽轮机和其它蒸汽用户提供SG产生的蒸汽；
- 2) 在机组启动期间，对主蒸汽隔离阀下游蒸汽管道预热；
- 3) 排出蒸汽管道内的冷凝水；
- 4) 向应急给水系统的汽动泵供汽（如有）；
- 5) 通过关闭主蒸汽隔离阀，限制二次侧排热能力增加及放射性外泄；
- 6) 通过主蒸汽安全阀的蒸汽排放，确保二次侧压力边界的完整性。

#### 2.12.3.1.2 系统边界

主蒸汽管道；  
主蒸汽隔离阀（MSIV）；  
主蒸汽安全阀（MSSV）；  
主蒸汽隔离阀旁路管道及其隔离阀与控制阀。

#### 2.12.3.1.3 接口

- 1) 蒸汽发生器（SG）；
- 2) 汽轮发电机系统；
- 3) 辅助蒸汽系统；
- 4) 二次侧非能动余热排出系统；
- 5) 应急给水系统（如采用汽动泵）；
- 6) 凝汽器；
- 7) 蒸汽排大气系统；
- 8) 常规岛取样系统从主蒸汽系统取样并提供化学分析。

#### 2.12.3.2 性能要求

- 1) 发生二次侧排热增加事故时，通过MSIV隔离主蒸汽管道限制一回路过冷及安全壳超压（断裂发生在安全壳内）；
- 2) 正常停堆过程中，将蒸汽排放到凝汽器，导出堆芯余热，直至RHR接入一回路；
- 3) 在DBC2-4事故工况下，汽机旁路系统通过主蒸汽管道将蒸汽排放到凝汽器或者蒸汽排大气系统通过主蒸汽管道将蒸汽排放到大气（凝汽器不可用时），导出堆芯余热，冷却一回路，直到机组达到可控状态或安全停堆状态；
- 4) 在DEC-A事故工况下，汽机旁路系统通过主蒸汽管道将蒸汽排放到凝汽器或蒸汽排大气系统通过主蒸汽管道将蒸汽排放到大气（凝汽器不可用时），冷却一回路，直到机组达到最终状态；
- 5) 在DEC-A事故工况下，如应急给水系统失效，二次侧非能动余热排出系统通过主蒸汽管道冷却蒸汽，排出余热；
- 6) MSLB事故工况下，自动保护信号会触发MSIV快速关闭，隔离主蒸汽管道，以限制一回路过冷，避免反应堆压力容器脆性断裂；
- 7) SGTR事故工况下，通过主蒸汽隔离阀隔离受影响SG的二次侧（蒸汽侧），包容放射性物质；
- 8) SGTR工况下，应确保MSSV不开启；
- 9) 超压事故工况下，通过MSSV及主蒸汽释放阀（MSRIV/MSRCV）的蒸汽排放，确保二次侧压力边界的完整性；
- 10) LOCA事故或严重事故（主蒸汽管线未断裂）工况下，安全壳内的主蒸汽管道作为第三道屏障（安全壳）的一部分，应该确保其完整性。

#### 2.12.3.3 系统特性

##### 2.12.3.3.1 布置

- 1) 主蒸汽管道上的安全阀应布置在安全壳外主蒸汽隔离阀前，并排向大气；
- 2) 主蒸汽管道布置应避免过多的低点；
- 3) 主蒸汽系统不应使用螺纹或法兰连接，除非需要拆卸维修的部件处。

##### 2.12.3.3.2 系统压降和系统容积

在额定功率运行下的最大压降不能使汽轮机主汽门进口处蒸汽的湿度超过0.5%。应根据部件受压降影响程度对其进行优化，以达到最经济的配置。

任意两个蒸汽发生器出口管嘴之间的压差必须满足如下限制：

对于稳定运行工况，压差不得超过10psi；

对于时间不超过1分钟的瞬态工况，压差不得超过30psi。

设计必须考虑以下两点：

- 1) 蒸汽管道布置的差异；
- 2) 运行过程中环路的潜在压差（蒸汽发生器的堵管数量）。

### 2.12.3.3.3 蒸汽管道疏水

尺寸

主蒸汽管道的疏水系统设计应使在汽轮机启动之前、启动过程中以及停机时将疏水排除。疏水不得超过3m/s的速度。

为防止管道阻塞，所有主蒸汽系统疏水管道及阀门连接处的内径不得小于25mm。

位置

疏水处应位于主蒸汽管道的各个低点，可在机组启动、停堆或正常运行过程中收集疏水。在确认各低点位置时，应考虑热态和冷态的管道状态。在无明显低点的长管道敷设时，应在汽轮机端部区域设置低位疏水。如主蒸汽管道分成一个以上支路进入汽轮机时，应在各支路及主管道均设置疏水点。疏水装置采用直径大于300mm的输水罐。

主蒸汽管道低点的数量应控制到最少。

在每个主蒸汽隔离阀上游均应设置疏水点。

流向

- a. 疏水管道应向下敷设，而水平管道应向水流方向并设置至少 0.01 的坡度；
- b. 主蒸汽疏水管应排向凝汽器；
- c. 主蒸汽系统的疏水装置，不得连接到汽轮机节流阀下游的疏水集管上；
- d. 对系统运行必不可少的疏水管道不得使用疏水器，除非与另一个冗余的全自动疏水系统一起使用。

### 2.12.3.4 关键设备特性

#### 2.12.3.4.1 主蒸汽管道

主蒸汽管道面积应根据成功运行经验及蒸汽流速进行选择，并考虑流体的预期工况（压力、温度和湿度）和以下规定的材料要求。正常工况下满功率运行时，主蒸汽管道的流速宜低于55m/s。

应尽量避免使用90°的弯管、斜接缝等。

主蒸汽管道材料选择应考虑一般腐蚀及FAC。

#### 2.12.3.4.2 阀门

##### 1) 主蒸汽隔离阀

阀门应为以下类型之一：

- a. 球阀-气液联动、空气和弹簧驱动或主蒸汽驱动；
- b. 闸阀/双滑阀—气液联动或主蒸汽驱动。

应着重提供在阀门运行试验期间持续可靠运行的阀门，阀门或驱动机构不卡死或意外关闭。

阀门的设计应使阀门在设计工况下关闭时不受到损伤。

应确保阀门的设计便于维护和修理（例如，阀门填料的更换、阀座的打磨、传动装置的更换）。

如果可行，当阀门全开时，阀门设计特性应包括阀杆后座。

在额定流速下当阀门全开时，从阀门入口到出口，不可逆的压力损失不超过3psi。

主蒸汽隔离阀的性能要求见表2.3.1（表格请统一编号）。

## 2) 安全阀

安全阀应为弹簧加载安全阀而不是先导式安全阀。

安全阀的设计应以事故工况下还能执行功能为基础。在运行试验期间，当压力在可接受限值的范围内并接近整定值时，应使阀门始终处于全开状态的成熟设计。核电厂设计者应根据瞬态分析和控制系统的设计，详细规定可接受的限制条件。

安全阀入口管道不应采用环形水封，除非已经证明在实际试验条件下带有初始充水环形水封的阀门能够满足功能要求（如流速的瞬变）而不损害自身或下游排放管道。

管道和阀门的布置应尽可能减少对固有装置的荷载，而且应进行分析。

当压力接近整定值，在阀门开启动作前必须将轻微泄漏降至最低。

安全阀的容量应根据RCCM规范的要求确定。

## 3) 主蒸汽隔离阀旁路隔离阀与控制阀

主蒸汽隔离阀设置一个旁路管道及相应的隔离阀和调节阀。旁路上隔离阀应该满足除关闭时间外其它所有隔离准则。旁路管道上的调节阀应该具有作为旁路隔离阀的冗余隔离的功能。旁路管道上的调节阀需要具有流量控制功能。

### 2.12.3.5 仪表和控制

#### 1) 蒸汽管道破口探测

主蒸汽管道破裂事故下的安全壳压力高或蒸汽管道压力低等信号可以触发主蒸汽隔离阀关闭。当正常升温降温过程中，安注系统被手动隔离时，在蒸汽管道压力低时，可以由蒸汽管道压降高替代管道压力低信号。

#### 2) 阀门

##### a. 主蒸汽隔离阀

应为MSIV配备自动和手动控制装置，同时还应配备能测试阀门运行状态的设备。

应给出在主蒸汽隔离信号发出后，关闭MSIV的独立且冗余的措施。

##### b. 主蒸汽隔离阀旁路隔离阀与控制阀

应配备主蒸汽隔离阀控制系统的操作界面。应能从主控室手动打开、关闭，并能查看阀门开度。

### 2.12.3.6 维修

更换管道或管束时应不需要拆卸墙、主要管道或电缆托盘。外部和上部的工程移动墙是可以的。在设计阶段以下系统的维修方案应特别考虑：

- 1) 主蒸汽隔离阀、汽轮机主汽门及垂直布置的大阀门处应设有足够的维修空间和维修通道；
- 2) 对于小拆卸的阀门部件，应考虑足够的空间和起重措施；
- 3) 设备管道布置确保维修时的人员安全。

### 2.12.3.7 图表

表2.3.1 主蒸汽隔离阀的性能要求

- 1) 在接收到安全信号5秒内，故障关闭的双向阀门能阻止蒸汽管道断裂（SLB）

产生的蒸汽流量（注：如果经过安全分析论证也可采用较长的关闭时间）；

- 2) 具有冗余且独立的控制系统部件；
- 3) 具有在线进行功能试验的能力；
- 4) 具有全关、全开和部分开度（功能试验）位置的远传显示功能；
- 5) 设计压力和设计温度不能低于蒸汽发生器相关参数；
- 6) 对压力、温度和流体系统的瞬态设计与核蒸汽供应系统的瞬态设计相似；
- 7) 主蒸汽隔离阀的驱动力应满足单一故障准则；
- 8) 正常运行工况及蒸汽管道断裂工况均需要进行环境鉴定；
- 9) 阀门要在双向、任意温度至设计温度、主阀座两侧压差从0至设计压力，都要保证密封性；
- 10) 在正常运行、扰动、应急和故障工况下能保持结构完整和功能可用性。

## 2.12.4 主给水流量控制系统（核岛部分）

### 2.12.4.1 系统定义

#### 1) 目的

主给水流量控制系统主要用于为蒸汽发生器提供给水并调节给水流量，维持蒸汽发生器液位在对应工况的整定值范围内。

#### 2) 系统边界

来自高压加热器系统的给水，通过常规岛的主给水母管分配到三列独的主给水母管，经过安全厂房主阀站被分别送至每个蒸汽发生器。系统以核岛与常规岛分界线，从主给水母管到蒸汽发生器之间的给水部分为本系统的范围。此外，蒸汽发生器上的液位测量也是主给水流量控制系统的一部分。

#### 3) 接口

- a. 为蒸汽发生器供应给水；
- b. 仪用压缩空气系统保证调节阀的压缩空气供应；
- c. 通风系统保证主给水阀室通风；
- d. 启动给水系统保证电厂启动和停堆的给水；
- e. 参与主蒸汽系统的蒸汽流量测量。

### 2.12.4.2 性能要求

主给水流量控制系统属于正常运行系统，不属于专设安全系统，但系统参与执行三大安全功能。

在设计基准事故时，可通过关闭主给水流量控制系统的隔离阀实现主给水的有效隔离，防止一回路过冷、限制能量释放和防止放射性物质泄漏到环境中。

系统的测量通道要向反应堆保护系统提供蒸汽发生器的液位信息，以便进行事故监测。

系统根据蒸汽发生器液位自动调节给水流量。如果给水管线破裂，则隔离受影响的蒸汽发生器。

当主给水流量控制系统失效时，通过辅助给水系统继续向蒸汽发生器供水。

功率运行时，由主给水泵提供给水，并通过低负荷调节阀或满负荷调节阀控制给水流量；在机组启动和停堆阶段，由启动和停堆给水系统提供给水，由低负荷调节阀调节给水流量。

### 2.12.4.3 系统特性

#### 1) 布置

- a. 通过合理的布置设计可使主给水流量控制系统发生共因失效的可能性降低到



最小；

- b. 主给水管线分成三列，位于三个阀站内，保证了实体隔离；
- c. 主给水止回阀，布置在靠近蒸汽发生器的管道上，减少发生不可隔离破口的管道长度；
- d. 蒸汽发生器液位仪表，液位测量配置有蒸汽冷凝罐，连接蒸汽发生器和冷凝罐的引压管线布置有一定坡度，维持冷凝罐的参考液位恒定，确保测量精度；
- e. 布置设计应考虑对阀门进行检查、维修（阀体和驱动机构）的可达性。

#### 2) 系统配置

每列主给水管线，在调节阀下游与反应堆厂房贯穿件上游之间安装有一台主隔离阀（MIV），在反应堆厂房内靠近SG给水管嘴处安装有一台止回阀，用于执行安全壳隔离功能；

每列主给水管线由并联的一条满负荷管线和一条低负荷管线组成。满负荷管线安装有一台满负荷调节阀（FLCV）和两台满负荷隔离阀（FLIV）。低负荷管线安装有一台低负荷调节阀（LLCV）和两台低负荷隔离阀（LLIV）以及一台位于LLCV上游隔离阀上游的流量计（文丘里管）。此外，一台低低负荷调节阀（VLLCV）与LLCV并联安装；

每台蒸汽发生器设置8个位测量通道（包括四个窄量程水位测量通道和四个宽量程水位测量通道），用于水位调节和触发反应堆保护动作。

#### 3) 系统运行要求

正常运行时，蒸汽发生器二次侧水源由电动主给水泵系统或者启动和停堆给水系统提供。主给水流量控制系统通过调节阀控制给水流量维持蒸汽发生器液位在整定值范围。

事故工况下，主给水流量控制系统不要求运行。此时，由应急给水系统执行给SG供水。若触发主给水隔离命令，主给水流量控制系统通过调节阀和隔离阀实现主给水的有效隔离。

### 2. 12. 4. 4 设备特性

#### 1) 满负荷调节阀（FLCV）

每列给水管道上有一台满负荷调节阀，为气动截止型调节阀，布置在安全厂房内的满负荷管线上。FLCV用于高功率（约20%额定功率以上）的给水流量调节。

#### 2) 满负荷隔离阀（FLIV）

每列给水管道上有两台满负荷隔离阀，分别位于FLCV的上下游。FLIV是气-液联动闸阀，在事故工况下阀门能够在5秒内快速关闭，保证满负荷管线的隔离。

#### 3) 低负荷隔离阀（LLIV）

每列给水管道上有两台低负荷隔离阀，分别位于LLCV的上下游。LLIV是电动闸阀，在事故工况下阀门能够在20秒内快速关闭，保证低负荷管线的隔离。

#### 4) 主隔离阀（MIV）

每列给水管道上有一台主隔离阀，布置在安全厂房内，靠近安全壳贯穿件，MIV是电动闸阀，能在严重事故工况下长期隔离主给水管道，防止安全壳被旁通。

#### 5) 安全壳内止回阀

每列给水管道上有一台止回阀，布置在反应堆厂房内，尽量靠近蒸汽发生器的给水管嘴。止回阀是缓闭式角型阀门。当阀门上游给水管道断裂时，止回阀能防止蒸汽发生器的排空。

### 2. 12. 4. 5 仪表和控制

机组正常运行工况下，主给水流量控制系统调节主给水流量，控制蒸汽发生器液位。根据反应堆功率水平，通过自动调节系统的调节阀和主给水泵转速，将蒸汽发生器液位控制在允许范围内。

事故工况下，主给水流量控制系统调节阀不执行安全功能，隔离阀接受反应堆保护系统

安全级隔离信号后自动关闭。

主给水流量控制系统的蒸汽发生器水位测量仪表不仅参与给水流量调节,还参与反应堆保护系统控制触发安全级设备动作。

#### 2.12.4.6 维修

调节阀处应有足够的维修空间和便利的维修通道;

在电厂正常运行时,有足够的空间区域用于检修设备。

通过定期试验来检查设备的可用性和特性数据的正确性。

对主给水流量控制系统在安全壳内设备的在役检查,应在停堆状态下进行(功率运行阶段不要求进行检查),并在限定的时间内完成。

#### 2.12.5 主蒸汽/旁路系统

##### 2.12.5.1 系统定义

1) 常规岛主蒸汽系统(TSM)是将蒸汽发生器产生的主蒸汽输送到下列设备和系统:

- a. 汽轮机高压缸或高中压合缸;
- b. 汽水分离再热器系统的第二级再热器;
- c. 通往凝汽器的汽轮机旁路系统(TSC);
- d. 汽轮机轴封蒸汽系统(TSS);
- e. 辅助蒸汽分配系统(WSD)。

另外,系统收集主蒸汽系统中各路蒸汽管线的疏水,排向凝汽器、常规岛废液收集系统(WLC)。

2) 汽轮机旁路系统是当反应堆功率与汽轮机负荷不一致时,汽轮机旁路排放系统通过把多余的蒸汽排向冷凝器(TSC)或大气(TSA),为反应堆提供一个“人为”的负荷,从而避免核蒸汽供应系统(NSSS)中温度和压力超过保护阈值,确保核电站的安全。

##### 2.12.5.2 性能要求

1) 汽轮机旁路系统-C(TSC)设计应满足以下要求:

- a. 允许汽轮机突然降负荷而不引起紧急停堆,也不会引发蒸汽发生器及主蒸汽安全阀动作;
- b. 允许在某些工况下汽轮机脱扣而反应堆不紧急停堆;
- c. 允许反应堆接受不超过 $\pm 10\%$ 额定负荷的阶跃变化和每分钟 $\pm 5\%$ 额定负荷的线性变化;
- d. 在紧急停堆期间,防止一回路升温使蒸汽发生器及主蒸汽安全阀开启;
- e. 使一回路冷却,直至余热排出系统(RHR)投入运行;
- f. 允许汽轮机启动前对二回路暖管,还允许在手动棒控范围( $0\% \sim 15\%$ 额定功率)内汽轮机加负荷。
- g. 汽轮机旁路蒸汽应排入凝汽器。

2) 旁路蒸汽排放阀性能要求如下:

- a. 阀门具有线性特性;
- b. 在 $0.5 \text{ MPa(a)}$ 至蒸发器设计压力的整个蒸汽压力范围内,阀门可模拟调节,全行程的最大时间为 $10\text{S}$ ;
- c. 在 $5 \text{ MPa(a)}$ 至蒸发器设计压力的整个蒸汽压力范围内,收到快开信号后,第一

组阀门由全关到全开的最长行程时间为 2.5S（含驱动电磁阀所需要的时间），其他旁路阀门由全关到全开的最长行程时间为 2S（含驱动电磁阀所需要的时间）；

d. 在 0.5MPa(a)至蒸发器设计压力的整个蒸汽压力范围内，收到快关信号后，旁路阀门由全开到全关的时间小于 5S（含电磁阀断电时间）；

e. 在 0.5MPa(a)至蒸发器设计压力的整个蒸汽压力范围内，阀门的最小可控蒸汽流量必须小于其流通能力的 15%；

f. 在 0.5MPa(a)至蒸发器设计压力的整个蒸汽压力范围和整个调节范围内，当接收到恒定的调节信号时，阀门的流量偏差不能超过其流通能力的 1%。

### 2.12.5.3 系统特性

#### 1) 布置

a. 主蒸汽在进入汽轮机之前应有消除压力、流量偏差的措施。应设置主蒸汽母管（或交叉管）连接主蒸汽截止阀的下游管道和汽轮机主汽阀的上游管道。蒸汽发生器产生的主蒸汽可以通过主蒸汽支管汇集到主蒸汽母管，再从主蒸汽联箱上接出各路主蒸汽支管连接到汽轮机主汽阀，通过主蒸汽母管实现主蒸汽压力和流量的平衡。

b. 在主蒸汽截止阀的下游，汽轮机主汽阀的上游，应设有连接于主蒸汽母管（或交叉管）上的汽轮机旁路管道，旁路蒸汽应通过旁路阀排放到凝汽器。

c. 主蒸汽、汽轮机旁路管道的布置应避免有多处低位点。

d. 除了因维修需要容许部件进行拆卸的地方之外，主蒸汽、汽轮机旁路系统不应采用螺纹和法兰连接。

#### 2) 系统压降和容量

a. 在满负荷工况下，主蒸汽管道的压降应保证汽轮机主汽阀入口处的蒸汽湿度不大于 0.5%。

b. 汽轮机旁路系统应有足够的容量和瞬态响应能力满足核电厂启动、负荷突降、带厂用电运行、停机不停堆等要求。

#### 3) 蒸汽管道疏水

主蒸汽和汽轮机旁路系统设计应满足汽轮机防进水要求，疏水系统的设计应满足下列规定：

a. 主蒸汽和汽轮机旁路系统应配置自动疏水系统以满足机组启动、正常运行和停机时的管道疏水要求。疏水管道宜单独接入疏水扩容器或集管，不应与不同工作压力的其它系统进行疏水转注或疏水合并；

b. 汽轮机主汽阀前管道、主蒸汽母管/联箱以及管道的低位点应设置疏水罐，疏水罐的公称通径不应小于 DN200；

c. 管道疏水宜采用气动疏水阀和疏水器并联的疏水方式。气动疏水阀应能在主控室进行操作，疏水器应采用机械式；

d. 疏水管道和阀门的通流截面应按机组在各种运行工况下可能出现的最大疏水量设计，并应能满足在最小压差的情况下排出可能出现最大水量的要求，且内径不应小于 25mm。

### 2.12.5.4 部件特征

#### 1) 主蒸汽和汽轮机旁路管道

a. 主蒸汽和汽轮机旁路管道的通流截面应根据成熟的运行经验，考虑介质参数（压力、温度、湿度）和材料要求，选用合适的蒸汽流速。在满负荷额定运行条件下主蒸汽管道的介质流速宜在 40m/s～55m/s 范围内；汽轮机旁路阀上游管道的介质

流速宜在 45m/s~80m/s 范围内,汽轮机旁路阀下游管道的介质流速宜在 100m/s 以内。

- b. 管道布置应力求减少使用 90° 弯头、斜接管等。
- c. 主蒸汽、旁路系统主管道材料应选用控铬的优质碳素钢或低合金钢。

#### 2) 阀门

- a. 汽轮机旁路阀的数量、分组、单阀的最小排放量和最大排放量以及动作时间应满足核岛要求。
- b. 汽轮机旁路阀应能调节蒸汽流量以满足 2.2.3.2 节的要求;
- c. 汽轮机旁路阀在失去电源或失去控制气源时必须处于关闭状态;

### 2.12.5.5 仪表和控制

#### 1) 汽轮机主蒸汽旁路阀控制

- a. 当汽轮机甩负荷或跳闸时,汽轮机旁路阀应开启。开启的旁路阀数量视甩掉负荷的数量大小而定。
- b. 当凝汽器压力高、凝汽器喷水压力低时,汽轮机旁路阀应关闭。
- c. 应装设真空传感器,在凝汽器压力上升至规定的整定值时将蒸汽旁路阀关闭。

#### 2) 主蒸汽管道的疏水罐、疏水阀

- a. 应为操作员配备操作疏水阀的手段并能够就地自动控制。
- b. 应采用液位开关对疏水罐进行监视和高水位报警。

#### 3) 防止汽轮机进水的控制措施

- a. 主蒸汽管道应装备有自动疏水和水位控制设备,以转移在主蒸汽管道中不正常的凝结水积聚。
- b. 最新版的 NB/T 25039 标准《核电厂汽轮机防进水导则》应作为基本设计的准则。
- c. 用于主蒸汽管道上的阀门设计应能进行规定间隔的和经常性的检查,以确定阀门及其操作器是否正确动作。

### 2.12.5.6 维修

- 1) 一般的维修建议已在第1章中提到。
- 2) 应设有足够的空间和场地以及起吊设施用于设备和阀门的检修维护。
- 3) 主蒸汽疏水器、疏水调节阀、疏水扩容器、管道支吊架、阻尼器等应按设备厂家操作和维护手册的说明执行。
- 4) 设备、阀门维修应当在电厂停运时进行。但是在确保系统安全运行的前提下,主蒸汽疏水调节阀或主蒸汽疏水器可以在隔离阀关闭下进行维护。

### 2.12.6 凝结水抽取系统

#### 2.12.6.1 系统定义

凝结水抽取系统定义如下:

- 1) 接受汽轮机排汽并将其冷却成凝结水;
- 2) 当排向凝汽器的旁路排放系统运行时接受旁路蒸汽,并对其减压减温;
- 3) 正常运行时接受低压加热器疏水、各种管道疏水和蒸汽发生器排污水,在启动、低负荷和特殊运行工况运行时接受高压加热器疏水、除氧器溢放水、减温水和各种设备管道疏水;
- 4) 接受除盐水分配系统的补水;

- 5) 为回热系统贮存适当的凝结水量;
- 6) 对凝结水进行除氧;
- 7) 将凝汽器中的凝结水送入各级低压加热器和除氧器。
- 8) 向辅助给水箱提供凝结水;
- 9) 向进入凝汽器的旁路蒸汽提供减温水;
- 10) 向蒸汽发生器排污水提供减温水;
- 11) 向汽轮机低压缸排汽口喷淋系统提供减温水;
- 12) 向凝汽器疏水扩容器提供减温水;
- 13) 向凝结水泵提供轴封冷却水;
- 14) 向凝汽器真空破坏阀提供密封水;

#### 2.12.6.2 性能要求

凝结水抽取系统设计应满足下列要求:

- 1) 为汽轮机提供一个经济的背压;
- 2) 在规定的冷却水温度范围和运行工况下安全和可靠地运行;
- 3) 满足要求的热力性能;
- 4) 凝结所有进入的蒸汽,并按照HEI标准保持合适的含氧量;
- 5) 提供充分的凝结水储存能力;
- 6) 在所有的运行方式下,向除氧器输送所要求的凝结水量;
- 7) 根据除氧器和凝汽器的热井水位,调节系统内的凝结水量。

#### 2.12.6.3 系统特性

三台50%容量的凝结水泵从凝汽器热井吸水,升压后经过轴封冷却器后,将凝结水送入低压加热器系统。

每台凝结水泵进口有一个电动蝶阀、一台过滤器和一个不锈钢波形补偿器,每台凝结水泵出口安装了一个止回阀和一个电动蝶阀。

三台凝结水泵出口汇集成一根母管后通过一根凝结水管道将凝结水送到汽轮机轴封冷却器,由于汽轮机轴封冷却器所需凝结水量较小,因此设置一个带有孔板的凝结水旁路管。

汽轮机轴封冷却器下游的凝结水管道上依次安装了一个凝结水精处理装置和凝结水流量测量装置,在凝结水精处理装置的下游管道上接出若干分支管道,主要有凝结水系统排水管道、高压加热器冲洗/上水管道、凝结水减温水用户母管和凝结水再循环管道,凝结水最后进入凝结水流量控制站。

凝结水流量控制站有两个并列的气动调节阀,主调节阀容量为70%额定流量,副调节阀容量为30%额定流量。

位于凝汽器两侧的疏水扩容器接受汽轮机热力系统的各类疏水,扩容器的疏水及排汽排至凝汽器。

#### 2.12.6.4 部件特征

- 1) 凝汽器
  - a. 在机组 VWO 工况、能力工况以及高背压的事故工况下,凝汽器均能够运行并满足除氧要求。
  - b. 凝汽器内部旁路蒸汽分布管道的设计能够避免蒸汽冲击管束和仪表。
  - c. 每个凝汽器设计有两个独立的水室,循环水从一个入口流向一个出口。
  - d. 管子与管板严密连接,连接处采用钛管的胀焊工艺以防止循环水漏入凝结水中。

- e. 根据厂址条件, 可以为凝汽器配置胶球清洗系统。
- f. 凝汽器喉部抽汽管道的布置不影响凝汽器的性能。
- g. 凝汽器的滑动支座、固定支座以及所需的导向结构等设施可以保证凝汽器热膨胀。
- h. 凝汽器腐蚀裕度符合 HEI 标准。

#### 2) 喉部

凝汽器排汽喉部的设计中为安装低压加热器提供必要的留孔、支座以及隔板。

#### 3) 壳体

凝汽器壳体为焊接结构, 并有足够的刚度和强度要求, 能防止来自汽轮发电机组的振动的影响。

壳体采取特殊的措施确保流量分配装置和挡板具有足够的强度, 以防止高速、高温汽流冲击凝汽器管和内部构件。

壳体的设计能同时承受存在的管子传递荷载和内部设计压力。

凝汽器壳体在管束上方设置人孔门。壳体上部设置临时格栅通道以便管束、加热器和抽汽管道的检查和维护。

凡与凝汽器壳体相连的管道接口, 疏水排汽运行温度在150℃及以上者均设隔热套管。

#### 4) 水室

凝汽器包括进口水室和出口水室, 均由碳钢板制成。其内表面均有衬胶, 免受侵蚀。水室设计成表面光滑连续, 从而确保将冷却水均匀地分配到管中。

水室上部设有必要的通风排气口, 下部设有一个放水口。并且, 每个水室均设有两个人孔。每个人孔门盖为绞接转向螺钉固紧的绞接快速开启门盖。

水室内可能同循环水接触的螺钉、销钉和螺母等均采用防腐材料。每个水室均装有安装起吊用的吊耳。

#### 5) 热井

壳体下部包括一个聚集凝结水的热井。配有凝结水出口。蒸汽在管束、凝结水面上方流动, 这样可以提高冷凝效率, 降低含氧量及过冷度。

凝结水出水口设置防涡流装置。凝结水出水口底部高出热井底部5~15cm, 从而防止碎片进入凝结水管道。

热井设置人孔门, 每个人孔门盖为绞接转向螺钉固紧的绞接快速开启门盖。

热井放水管能在1小时或更少时间内排出正常运行水位下的全部凝结水。

在每个热井设置取样水槽和取样管接口, 以监视各个水室管束的严密性。

凝汽器内部支撑元件例如管道支架等具有疏水孔, 以防止在凝汽器试运行或检修时水或者污染物在不流动区域沉积。

#### 6) 凝结水泵

首级叶轮采用双吸式叶轮, 同时采用ASTM标准抗汽蚀材料CA-6NM, 保证在运行范围内有良好的抗汽蚀性能。

次级叶轮上置, 大幅改善了转子动力学性能。

每级叶轮和中间接管处均设有介质润滑高分子材料AC-3的水导径向轴承, 此泵共设有9处水导轴承。在整个长轴系中均匀分配径向力, 提高转子稳定性。

#### 7) 轴封冷却器

轴封冷却器为表面式热交换器。凝结水进入轴封冷却器的前水室, 流经管子后从后水室排出。阀杆漏汽和汽封漏汽通过两个蒸汽入口进入凝汽区, 经冷却, 凝结水通过壳体疏水口排至凝汽器。

轴封冷却器应配备电动排气风机以维持部分真空。排气风机用以排出轴封冷却器内不凝

结的气体，并在故障条件下可以承受最大蒸汽温度。轴封蒸汽冷却器采用不锈钢管。

## 2.12.6.5 仪表和控制

### 1) 凝汽器热井水位仪表

凝汽器热井水位应设置三冗余的液位变送器，用来测量凝汽器热井水位。三个凝汽器热井水位信号经过三取中模块后，输出的信号值作为凝汽器热井水位调节回路的被调量。当三个凝汽器热井水位变送器中有两个故障时，调节回路自动切换到手动控制。

### 2) 凝汽器热井水位控制

凝汽器热井的水位应由正常/应急凝结水补水阀和溢流阀联合维持。正常补水阀应维持热井的正常水位，而当不正常情况时，则由应急补水阀快速补充凝结水。当运行在自动模式下，水位控制应是稳定的。应能自动补水，并在出现超过正常的水位控制范围时，拒绝凝结水进水。溢流管和补水管相类似，也采用正常/应急溢流阀并联组合而成。

### 3) 凝结水泵本体仪表及控制

a. 机组正常运行时，两台凝结水泵流量即可满足要求，第三台水泵作为备用。当运行的泵跳闸时，备用泵自动启动。

b. 凝结水泵在凝汽器热井水位出现超低水位信号时应自动进行保护跳闸。凝结水泵在泵的轴承温度过高、轴承振动过高及电机线圈温度过高时应能发出报警信号，并根据设备制造厂的要求进行保护跳闸。

### 4) 凝结水调节阀的控制

凝结水调节阀应由除氧器水位控制系统进行控制。应提供两种模式的自动控制，即单冲量和三冲量的控制。

## 2.12.6.6 维修

### 1) 凝汽器

当凝汽器冷却管脏污或损漏，需进行半边清洗和堵管时，凝汽器允许单侧壳体运行，此工况汽轮机的最大负荷允许带至额定负荷的75%。

当凝汽器短期停用时，为了避免下次启动设备时形成气囊，凝汽器的水侧应充满水；凝汽器的汽侧不需要采取措施。

当凝汽器长期停用时，冷却水应从水室中排出，并打开水室人孔盖检查，清除水室内部的杂物；凝汽器热井内的凝结水需排干。

### 2) 凝结水泵

凝结水泵通常在计划停运期间、不带负荷的情况下维修。如果出现故障情况，可以通过泵前后所设置的隔离阀来隔离单台泵进行维修。

## 2.12.7 化学品添加系统

### 2.12.7.1 系统定义

#### 1) 目的

化学加药系统的设计是通过添加必要的液态化学药品来维持凝结水和给水的化学指标在要求范围内。

#### 2) 系统界限

化学加药系统包括药品溶液箱，泵、管道、仪表和凝结水/给水系统的加药点。

水质监测设备不属于化学加药系统，但为化学加药系统的控制提供了输入数据。

#### 3) 系统接口

化学加药系统的接口如下：

- a. 化学加药系统向给水和凝结水系统提供定量的化学药剂用于控制水质。
- b. 水汽取样系统向化学加药系统提供控制数据。

#### 2.12.7.2 性能要求

- 1) 要求1: 系统应保持适合电厂长期运行的水化学工况。此要求适用于所有电厂条件, 包括电力操作、启动、关闭和长时间停机。
- 2) 要求2: 系统应能够独立注入定量的联氨或其他除氧剂, 以及控制pH值的碱化剂。系统也应能够在设备保养时添加除氧剂和碱化剂。注入联氨的目的是为了除氧, 注入氨或胺是为了控制pH值。
- 3) 要求3: 该系统应适用于商用浓度的散装化学品, 并将其与除盐水稀释混合。
- 4) 要求4: 在正常加药速率条件下, 该系统应具有足够的容量, 以保证24小时内连续添加化学药剂。操作简单, 每天只需配一次药品。

#### 2.12.7.3 系统特性

- 1) 要求1: 应为联氨和碱化剂提供单独的添加设备和加药管。每台机组的二回路化学加药系统由给水、凝结水加氨装置、给水、凝结水加联氨装置、以及辅助给水系统加氨/联氨装置、核岛给水加氨/联氨装置和闭冷水缓蚀剂加药装置组成。加药速率取决于机组功率和二回路水化学控制调试。应考虑公用加药点, 以尽量减少管道管件。
- 2) 要求2: 化学品将投加入凝结水精处理出口的凝结水管、启动给水泵进口管和除氧器下降管。
- 3) 要求3: 应在每台计量泵出口安装一个脉冲阻尼器带集油器。如果计量泵带内部泄漏检测的双隔膜, 则不需要设置集油器。脉冲阻尼器能提供均匀的流量, 并减少管道部件的振动磨损。同时能够防止泵中隔膜破裂时的油污染。
- 4) 要求4: 药品贮存罐的溢流、底部排污等将被送至电厂的化学废水中和池。
- 5) 要求5: 建议化学加药系统采用撬装式, 撬装内应完成所有的管道连接和电控接线, 并留有连接主系统的接口。
- 6) 要求6: 药品溶液罐旁边必须有足够大的区域。应设置围堰, 围堰容积应大于最大一台贮存设备的容积。
- 7) 要求7: 系统应与外部环境隔离。该区域应提供适当的安全措施, 如带洗眼器的安全淋浴器、良好的空气流通条件和通风设备等。
- 8) 要求8: 系统部件应采用能够耐联氨、其他除氧剂、氨和其他碱化剂(例如, 乙醇胺(ETA)、甲基丙胺(MPA)和脱氢表雄酮(DEHA))接触的材料制成。
- 9) 取样点

根据需要, 将在化学加药系统及其注入的工艺系统上设置取样点, 以监控化学加药系统的正常运行。

#### 2.12.7.4 部件特点

- 1) 化学品加药泵
  - a. 要求 1: 除氧剂和 pH 控制剂的加药泵应为隔膜泵。除隔膜外, 所有过流部件应采用 316 型不锈钢制造。  
基本原理: 选择隔膜泵是由于其具有相当的可靠性。
  - b. 要求 2: 每台泵的出力应根据配药浓度进行计算, 且扬程应大于凝结水泵的闭泵扬程。



## 2) 药品溶液罐

- a. 要求 1: 溶液罐应由 304 型不锈钢制成, 常压。溶液罐通过抽桶泵或卸药泵从药桶或吨桶/槽罐车中抽取原药。
- b. 要求 2: 每个溶液罐应具有进药口、除盐水进水口、泵吸入口、泵安全阀回流口、液位仪表接管口、排水口和密封溢流的接口。
- c. 要求 3: 作为现场设置溶液罐的替代方案, 允许使用由厂外供应商提供的移动式储罐和已配置好浓度的药品溶液。
- d. 要求 4: 补给水源应靠近或连接到带有搅拌装置的储罐。
- e. 溶液箱应有 3 个液位开关:
  - 隔离除盐水的高位开关;
  - 低液位开关, 用于报警;
  - 与加药泵连锁的低低液位开关, 该开关还应连锁系统隔离阀。

液位的开关应设计成能够将数字信号输出到电厂计算机的形式。

## b. 计量泵应一用一备。

- f. 每台泵进口支管或进口母管上应配备一个过滤器或过滤网, 来防止药品中固体颗粒影响加药系统。
- g. 如果上述溶液箱不设备用, 泵扬程和出力的设计应确保在泵不能满负荷运行的条件下, 不会出现任何不利于反应堆管理的问题。
- h. 数字流量指示信息应远传至厂内计算机。
- i. 泵的位置应位于通风处。
- j. 应提供泵的扬程/出力校验系统。
- k. 在一台泵维护期间, 其电源应被隔离, 从而不影响其他加药泵。
- l. 应设置安全阀和止回阀来保护系统不会受到超压和回流的影响。
- m. 系统内所有元件均可隔断, 以便进行检修维护。
- n. 系统应具有远程控制停机的功能。

## 2. 12. 7. 5 仪表和控制

- 1) 联氨加药泵的流量应按凝结水中的联氨浓度进行自动控制。氨加药泵的流量应按凝结水电导率进行自动控制。联氨和氨的控制器设置在凝结水精处理系统中。加药泵还必须能手动控制。
- 2) 每台加药箱上应安装带低液位报警和泵跳闸触点的液位开关。

## 2. 12. 7. 6 维修

化学加药系统的撬装装置应设计为便于检修, 其中的管件、设备等应方便替换。

## 2. 12. 8 除盐水生产系统

### 2. 12. 8. 1 系统定义

#### 1) 目的

除盐水制备系统从原水补给系统中取水, 并对水进行进一步处理和储存, 用于核岛和常规岛的除盐水补水。

#### 2) 系统界限

除盐水制备系统包括除盐设备 (离子交换器或膜系统), 压水堆需配置用于去除溶解氧的除氧单元, 可取样的除盐水箱和凝结水精处理系统中再生用除盐水箱。其中, 反渗透设备经常用于预处理, 并且根据除盐水产水要求, 可能需要增设过滤, 澄清, 软化, 氯化/脱氯

等其他预处理设备。该系统的安装可以是固定的，也可采用撬装或安装于便携式拖车中。

### 3) 系统接口

本文列出的接口是非能动核电厂和先进型核电厂的典型接口。根据单个小型模块化轻水堆设计的细节，这些接口可能不适用。除盐水制备系统的接口如下：

- a. 为除盐水制备系统提供清水的原水预处理系统。
- b. 除盐水制备系统向常规岛给水和凝结水系统提供除盐水。
- c. 除盐水制备系统向化学加药系统提供除盐水。
- d. 除盐水制备系统向核岛提供除盐水。
- e. 除盐水制备系统向水汽取样系统和化学分析提供除盐水。

## 2.12.8.2 性能要求

### 1) 质量和容量

要求：除盐水制备系统应提供适合核电厂长期运行的合格除盐水，并且满足核电厂的所有工况下的需水量和除盐水质要求，包括正常运行，启动，关闭，长时间停机等工况。通过与化学加药系统和水汽取样系统相结合，提供满足压水堆蒸汽发生器的水质。

### 2) 化学要求

要求：本系统的设计取决于核电厂的原水取水水质。为确保所有水质的限值相互兼容并符合相关规定，必须有一套总的水质要求。

### 3) 压水堆容量要求

要求：除盐水制备系统的容量应综合评估，以确保补给水容量不受限制，也无需从场外借调。在一些投运的核电厂中，现场补充水供应一直是一个问题，导致启动延迟，并且外购补给水造成昂贵的费用。

## 2.12.8.3 系统特点

### 1) 初步系统评估

要求：设计人员应评估并选择一个适合现场原水水质的系统，同时确定设备为固定安装还是移动式或撬装式。为了提高系统的经济性和性能，在核电站运行中可使用几种类型的膜系统。例如，反渗透+EDI系统已经取代了一些电厂的常规净化+除盐系统。

出于经济和技术原因，许多电厂通过招标系统供应商来提供除盐水制备系统。这种方法实现了以最低成本，利用最新技术获得高质量的除盐水。

### 2) 除盐水箱

要求：除盐水箱应能贮存除盐水制备系统的产水，并且带有取样口，然后再输送至除盐水各用户。除盐水箱的设计均应保证水质不受污染。

基本原理：取样是为了确保除盐水箱中的除盐水输送至凝补水箱之前，水质是符合标准的。

在蒸汽发生器启动和关闭期间，压水堆系统的除盐水均需除氧。

## 2.12.8.4 部件特点

### 1) 脱气器（如果适用）

#### a. 配置

- 要求 1：可以使用真空脱气器、催化除氧系统、膜脱气机系统实现除氧。如选择真空脱气器，则应设计为填充式喷雾塔式，补给水通过分配器系统注入床的顶部。并且，为保持系统真空，应设置两个真空泵。

催化除氧系统的脱气器应包括一个去除小颗粒的过滤器，一个混合室和一个催化树

脂罐。氢或肼都可以用作催化剂。

- 要求 2: 至少应配备两台泵。
- b. 材料要求: 脱气器(如果适用)由碳钢衬胶制成。所有管道阀门和配件应为 304 不锈钢。

## 2) 除盐水箱

### a. 配置:

- 要求 1: 应设置除盐水箱, 以便监测水质。
- 要求 2: 至少应配备两台除盐水泵。

基本原理: 尽管水箱浮顶设计相当有效, 但在浮顶和水箱壁之间的密封处可能会出现一些空气进入。因此, 建议在水质不达标的时候, 将水箱的水回流至脱气器入口。

### b. 材料要求: 除盐水箱应由不锈钢制成。

- 要求: 建议在除盐水箱上安装不锈钢浮顶, 以最大程度地减少空气进入。

基本原理: 浮顶是防止空气进入的有效方法。尽管可以使用其他方法, 但经验表明, 合成隔膜容易变质, 并且氮气覆盖不如不锈钢浮顶有效 (EPRI NP-2294)。

## 2.12.8.5 仪表和控制

除盐水制备系统应能在就地或汽机房的控制室进行控制与监测。

应为程序控制的所有序设置手动控制手段, 作为自动和半自动控制的后备。

应安装适当的自动跳闸和/或隔离装置, 以防化学药品的入侵(即当除盐装置出水中二氧化硅、钠、或导电度超过限值时)。

## 2.12.8.6 维修

除盐水取样系统应带有防护罩并安装在设备附近。

## 2.12.9 辅助蒸汽系统

### 2.12.9.1 系统定义

- 1) 辅助蒸汽分配系统 (WSD) 是把由辅助锅炉 (在机组停运和启动期间) 产生的或主蒸汽 (机组正常运行期间) 减压产生的辅助蒸汽分配到各用户。
- 2) 辅助蒸汽系统为下列用户和设备提供蒸汽:
  - 除氧器稳压和加热蒸汽;
  - 汽轮机轴封系统;
  - 热水生产分配系统;
  - 核岛用户。

### 2.12.9.2 性能要求

- 1) 辅助蒸汽系统应满足机组调试、启动、正常运行、低负荷运行、甩负荷和停机等工况下, 各蒸汽用户所需要蒸汽的压力、温度和流量要求。
- 2) 辅助蒸汽分配系统 (WSD) (常规岛部分) 能够将由辅助锅炉或主蒸汽减压产生的辅助蒸汽分配到各用户。
- 3) 在启动期间由辅助锅炉通过核岛高压辅助蒸汽母管提供蒸汽。在正常运行工况下, 由主蒸汽减压提供。
- 4) 辅助蒸汽系统的额定容量不小于一台机组正常运行同时一台机组冷态启动期间所需要的辅助蒸汽量总和。

### 2.12.9.3 系统特性

- 1) 辅助蒸汽来源
  - a. 辅助锅炉供给：机组启动阶段，辅助锅炉提供符合用户参数要求的辅助蒸汽。
  - b. 主蒸汽供给：主蒸汽通过减压阀减压产生辅助蒸汽，减压阀前设有电动隔离阀。减压阀后配两个安全阀，为辅助蒸汽系统提供过压保护。
- 2) 辅助蒸汽用户
  - a. 根据蒸汽用户参数要求设置高压和低压供汽母管。
  - b. 高压供汽母管，为主给水除氧器、汽轮机轴封系统、辅助给水汽动泵定期试验、热水生产分配系统(冬季)提供辅助蒸汽。
  - c. 低压供汽母管，为核岛三废处理、辅助给水系统除氧器提供辅助蒸汽。

### 2.12.9.4 部件特征

#### 1) 高压蒸汽减压站

高压蒸汽减压站设置在常规岛汽机厂房内，将主蒸汽减压产生辅助蒸汽。高压蒸汽减压站主要由一组气动调节阀以及前后隔离阀组成，并在高压蒸汽减压站后设置两组安全阀排放管路。

#### 2) 低压蒸汽减压站

低压蒸汽减压站设置在常规岛汽机厂房内，将由辅助锅炉（在机组停运和启动期间）或主蒸汽减压（机组正常运行期间）产生的压力高压辅助蒸汽减压为低压辅汽。低压蒸汽减压站主要由两组并列的气动调节阀以及前后隔离阀组成，两路减压阀一用一备。

#### 3) 安全阀

辅助蒸汽母管应设置全启式弹簧安全阀。

### 2.12.9.5 仪表和控制

无。

### 2.12.9.6 维修

- 1) 一般的维修建议已在第1章中提到。
- 2) 应设有足够的空间和场地以及起吊设施用于设备和阀门的检修维护。
- 3) 辅助蒸汽系统的疏水器、调节阀、管道支吊架等应按设备厂家操作和维护手册的说明执行。
- 4) 设备、阀门维修应当在电厂停运时进行。

## 2.12.10 低压给水加热器系统

### 2.12.10.1 系统定义

低压加热器系统的功能是利用汽轮机的抽汽来加热凝结水，加热器壳侧的疏水排至低一级加热器或低压给水加热器疏水回收系统或凝汽器，同时将加热器壳侧的不凝结气体排至凝汽器。以提高机组的热效率。

### 2.12.10.2 性能要求

低压加热器系统满足下列要求：

- 1) 满足要求的热力性能；
- 2) 防止蒸汽或疏水反向流动，以保护汽轮机；

- 3) 在所有的运行工况下能安全可靠地运行;
- 4) 在所有的运行工况下保证凝结水流向除氧器;
- 5) 尽量减少加热器及其管道受腐蚀的程度;
- 6) 尽量减少要进行更换的部件数;
- 7) 保证加热器和抽汽管道疏水流畅。

### 2.12.10.3 系统特性

低压加热器系统主要由双列、多级低压加热器及其凝结水、抽汽、疏水及排气系统组成。每级低压加热器包括LPA列和LPB列两台低压加热器。

根据工艺流程低压加热器系统可分为凝结水系统、抽汽系统、疏水系统和排气系统。

凝结水系统: 凝结水从凝结水抽取系统进入本系统后分成两路, 分别送进LPA列和LPB列复合式加热器进行加热。

抽汽系统: 低压加热器抽汽来自汽轮机低压缸。抽汽管道上安装了一只气动逆止阀和一只电动隔离阀。逆止阀靠近汽轮机抽汽口安装, 以减少抽汽管道容积, 防止汽轮机脱扣甩负荷时蒸汽倒入汽轮机引起汽轮机超速或损坏叶片; 抽汽管道上的电动隔离阀靠加热器布置, 在加热器内管束破裂或疏水受堵不畅时, 防止加热器满水倒灌进汽轮机引起大轴弯曲和动静碰撞事故。

疏水系统: 加热器壳侧的疏水排至低一级加热器或低压给水加热器疏水回收系统或凝汽器。低压加热器的紧急疏水排至凝汽器。

排气系统: 为了及时排除机组运行时抽汽凝结过程中析出的气体, 提高加热器管束传热效率, 每个低压加热器壳侧均设置了运行排气管, 将析出的气体排向凝汽器。在加热器运行之初, 为了排除加热器及抽汽管道内积聚的不凝结气体, 每个低压加热器壳侧均设置了启动排气管。

### 2.12.10.4 部件特征

低压加热器

低压加热器分为两列, 每列容量为额定容量的50%。采用卧式、U型管、双流程、表面加热的型式。低压加热器壳侧设有蒸汽凝结段和疏水冷却段。低压加热器均设计为全焊接结构, 且壳体可以切割并抽出, 以方便检查和维修。

管子管板连接采用胀接加焊接。先在管板上堆焊一层不锈钢用以提高焊接性能; 并用先进的钻孔工具, 充分保证孔径、光洁度、孔距, 从而保证焊接和胀管质量; 先进的管子管板全位置自动氩弧焊, 保证焊接质量。低压加热器采用机械胀管。

凝结段是利用蒸汽冷凝时的潜热加热凝结水。一组隔板使蒸汽沿着加热器长度方向均匀地分布, 起支撑传热管的作用。

蒸汽进入凝结段, 从壳体与管束之间的空间沿轴向充满整个管束外围, 在抽空气区形成的压差作用下, 蒸汽从外围向内部抽空气区流动, 此间充分与冷却管换热, 将凝结水加热, 蒸汽被冷却成疏水, 最终在壳体下部进入疏冷区。在蒸汽及疏水入口区均设置有不锈钢挡板, 以防止流体对管束的冲刷。

疏水冷却段是把离开凝结段的疏水的热量传给进入加热器的凝结水, 而使疏水温度降至饱和温度以下, 有利于顺利疏水, 大大减弱对疏水调节阀和管道的冲蚀、振动。

### 2.12.10.5 仪表和控制

- 1) 低压加热器的隔离

当列内任何一台加热器水位过高，应关闭与加热器相对应的进汽电动阀、进汽气动逆止阀和进出水电动阀，并开启加热器旁路阀。给水加热器的电动进口/出口隔离阀应能在主控制室进行遥控和手操。

#### 2) 低压加热器进汽电动阀

正常运行时，应由主控制室操作员控制。在大部分时间内，这些阀门是开启的（即使在停机期间），除非长期停机（例如检修）。当汽轮机脱扣或受影响的列内任何一台加热器超高水位，这些阀门自动关闭。当这些阀门的关闭条件消除后，由操作员重新打开阀门。这些阀门的状态在主控制室的操作员站上应有显示。

#### 3) 低压加热器抽汽止回阀

这些阀门应配有电磁阀操作的气动执行机构。一旦汽机脱扣或列内任何一台低加解列，电磁阀控制回路动作，关闭对应的抽汽止回阀。

#### 4) 低压加热器进出水电动阀和旁路阀

这些阀门可以在就地执行机构处操作或在主控制室远方操作。在正常运行和正常停机的工况下，进出水电动阀都是全开的，旁路阀全关。当运行的加热器解列时，其进出水电动阀自动关闭，同时旁路阀自动打开。在受影响的加热器恢复到正常水位时，并满足开启条件后，应由操作员重新打开进出水电动阀。当所有相应的进出水电动阀均全开时，旁路阀才可以关闭。

#### 5) 防止汽轮机进水的控制措施

- a. 抽汽管道应装备有自动疏水和水位控制设备，以防止在循环系统中不正常的凝结水积聚。
- b. 最新版的 NB/T 25039 标准《核电厂汽轮机防进水导则》应作为基本设计的准则。
- c. 用于抽汽管道上的阀门设计应能进行规定间隔的和经常性的检查，以确定阀门及其操作器是否正确动作。

### 2.12.10.6 维修

一般情况下，不推荐在带负荷情况下对设备和阀门进行维修。

如果发生一列低压加热器需要隔离的故障情况，应在下一次计划停役和无负荷的情况下进行内部检查和修理。

### 2.12.11 低压给水加热器疏水回收系统

#### 2.12.11.1 系统定义

收集LP3和LP4低压加热器壳侧疏水，通过疏水箱、疏水泵将疏水送入LP3低压加热器凝结水出口，提高回热系统效率；当疏水箱发生高高水位时，疏水直接排入凝汽器。

#### 2.12.11.2 性能要求

低压加热器系统满足下列要求：

- 1) 满足热力性能的要求；
- 2) 在所有的运行工况下能安全可靠地运行；
- 3) 尽量减少加热器、管道和扩容器的冲刷和腐蚀时危险性；
- 4) 尽量减少需更换的设备数目；
- 5) 保证积聚在加热器壳侧的凝结水能有效和可控地排出。

### 2.12.11.3 系统特性

低压加热器疏水回收系统由两台并列的疏水箱、4台疏水泵及其管道阀门组成，两列LP4低压加热器的疏水分别经疏水调节阀流进两列LP3低压加热器。两列LP3低压加热器的疏水直接流入对应的疏水箱。当LP4低压加热器出现高高水位时，危急疏水调节阀自动开启，将危急疏水排向凝汽器。

每台疏水箱下方各设有两台疏水泵，将各自疏水箱中的疏水升压后送入各列LP3低压加热器凝结水出口管道。当两台疏水泵均失效或疏水箱出现高高水位时通过开启疏水调节阀，将疏水直接排向凝汽器。当疏水箱出现低低水位时开启疏水再循环调节阀，将疏水送回疏水箱，保证疏水泵的安全运行。疏水泵出口母管上安装了流量测量装置和疏水调节阀，根据疏水箱水位信号控制疏水调节阀开度。

两列低加疏水回收系统各自独立运行。机组在额定功率运行时，两列低压加热器投入运行，两台疏水箱和疏水泵均处于正常工况下运行，疏水箱水位处于正常水位。

### 2.12.11.4 部件特征

#### 1) 低加疏水泵

本系统每列低加疏水箱配置2台50%容量的低加疏水泵，一用一备，每台机组配置4台低加疏水泵。

#### 2) 低加疏水箱

低加疏水箱为带有半球形封头的圆筒形压力容器，通过两个支座水平安装，其中一个为滑动支座，另一个为固定支座。

疏水箱上设置低压加热器疏水进口，正常疏水出口，紧急疏水出口，疏水泵再循环接口，人孔，以及热控仪表接口。疏水箱设有与LP3的汽平衡接口。

### 2.12.11.5 仪表和控制

#### 1) 低压给水加热器水位仪表

低压给水加热器水位应设置三冗余的液位变送器，用来测量水位。三个水位信号经过三取中模块后，输出的信号值作为水位调节回路的被调量。当三个水位变送器中有两个故障时，调节回路自动切换到手动控制。

#### 2) 给水加热器疏水控制

a. 低压给水加热器的水位应由正常疏水阀和应急疏水阀组合来维持。正常疏水阀应维持加热器的正常水位，而应急疏水阀则在不正常工况时为了快速排水至凝汽器热井而设置。

b. 最新版的NB/T 25039标准《核电厂汽轮机防进水导则》应作为基本设计的准则。

#### 3) 低加疏水泵本体仪表及控制

低加疏水泵在低加疏水箱位出现超低水位信号时应自动进行保护跳闸。低加疏水泵在泵的轴承温度过高、电机线圈温度过高时应能发出报警信号，并根据设备制造厂的要求进行保护跳闸。

### 2.12.11.6 维修

#### 1) 低加疏水泵

低加疏水泵一般在计划停运时进行维修。

当疏水泵故障而被迫停运时，疏水泵与系统隔离后可进行检修。由于低加疏水箱设有紧急疏水管路排向主凝汽器，因此机组隔离低压疏水泵时不需停用相应系列的3号和4号低压加

热器。泵组接口为法兰连接，方便在检修时完全拆除泵体。

#### 2) 低加疏水箱

疏水箱一般在计划停运时无负荷进行维修。

当疏水箱故障而需维修时，可以隔离相应系列的3号和4号低压加热器和低加疏水泵，安全隔离后可以非计划检修。

### 2.12.12 主给水除氧器系统

#### 2.12.12.1 系统定义

主给水除氧器系统通过汽轮机抽汽对来自低压加热器的凝结水进行加热和除氧，向给水泵和启动给水泵提供符合蒸汽发生器给水含氧量要求的给水。通过除氧器提供给水泵和启动给水泵充分的净正吸入压头，并储存足够的水量以满足蒸汽发生器需水量和凝汽器供水量不匹配时的瞬态工况，同时将非凝结性气体排向凝汽器和大气。系统还满足使凝结水能够循环回至凝汽器以满足系统冲洗、启动或试验的要求。

#### 2.12.12.2 性能要求

系统设计满足以下性能要求：

- 1) 汽轮机抽汽将进入除氧器的凝结水加热并除氧到规定的状态，正常运行工况时，除氧器出口的给水含氧量 $\leq 5 \mu\text{g/l}$ 。
- 2) 辅助蒸汽用于在零负荷时进行加热和除氧。辅助蒸汽也用于在短期停运时将贮水箱内的水保持在饱和温度。
- 3) 汽轮机甩负荷时用来自主蒸汽的辅助蒸汽来维持除氧器压力和给水泵净正吸入压头。
- 4) 除氧器储存足够的水量以满足蒸汽发生器需水量和凝汽器供水量不匹配时的瞬态工况。

#### 2.12.12.3 系统特性

##### 1) 布置

系统的除氧器相当于5级加热器。在正常水位时除氧水箱的储水量至少应等于4分钟的设计给水流量。系统设置有辅助蒸汽供汽，以保证在低负荷和启机时除氧器压力。除氧器和连接的汽、水管道的的设计应避免发生水锤。除氧器储水箱的标高应能在正常和瞬态条件下为给水泵提供合适的NPSH。

在通往除氧器的抽汽管道上应装设隔断阀和带辅助动力的逆止阀，对这些阀门应配置就地的和远方的手动控制装置。抽汽阀门相对于除氧器的布置应尽可能减少汽轮机进水或汽轮机超速的可能性。

##### 2) 蒸汽管道疏水

在机组启动、停机或正常运行时有可能积水的加热蒸汽管道系统的低位点应布置疏水点，疏水点设置疏水罐。疏水管道宜采用气动疏水阀和疏水器并联的疏水方式，气动疏水阀应能在主控室进行操作，疏水器应采用机械式，疏水管道应坡向疏水方向。

#### 2.12.12.4 部件特征

抽汽管道的通流截面应根据成熟的运行经验,考虑介质参数(压力、温度、湿度)选用合适的蒸汽流速。在满负荷额定运行条件下抽汽管道的介质流速宜在20m/s~35m/s范围内。

管道布置应力求减少使用90°弯头、斜接管等。

除氧器一般设置为卧式无头除氧器，由壳体、支座、给水装置、弹簧喷嘴、排汽装置、



加热蒸汽装置、高加疏水装置、再沸腾装置及水泵再循环管等组成。

来自低压加热器系统的凝结水管道应设计成能避免冲刷损伤，选用控铬的优质碳素钢；本系统加热蒸汽管道材料选用低合金钢，连续排气系统管道材料选用不锈钢。

## 2. 12. 12. 5 仪表和控制

### 1) 主给水除氧器水位仪表

主给水除氧器水位应设置三冗余的液位变送器，用来测量水位，采用三取中模块。三个水位信号经过三取中模块后，输出的信号值作为水位调节回路的被调量。当三个水位变送器中有两个故障时，调节回路自动切换到手动控制。

### 2) 除氧器给水箱的水位控制

- a. 除氧加热器的水位应由两只水位控制范围分开的气动凝结水调节阀维持。在启动和低负荷时，一只阀门将正常地调整流量，而第二只阀保持关闭状态。随着负荷增加，第二只阀门将调整流量，而第一只阀门仍保持开启。
- b. 凝结水调节阀应由除氧器水位控制系统进行控制。应提供两种模式的自动控制，即单冲量和三冲量的控制。在单冲量控制中，除氧加热器的水位对两只调节阀有不受约束的影响。在三冲量控制中，除氧器出口给水流量用作为前馈要求信号，而以测得的除氧器入口凝结水量和除氧加热器水位的反馈对控制作修正。

### 3) 防止汽轮机进水的控制措施

- a. 进入除氧器的抽汽管道应装备有自动疏水和水位控制设备，以防止在循环系统中不正常的凝结水积聚。
- b. 最新版的 NB/T 25039 标准《核电厂汽轮机防进水导则》应作为基本设计的准则。
- c. 用于抽汽管道上的阀门设计应能进行规定间隔的和经常性的检查，以确定阀门及其操作器是否正确动作。

### 4) 除氧器的压力控制

- a. 正常运行工况，当高压缸排汽压力大于某一定值，采用高压缸排汽供汽，其压力是汽轮机负荷的函数。
- b. 当高压缸排汽压力衰减率大于某一速率时（甩负荷工况），应采用除氧器保压阀将除氧器压力维持在甩负荷之前的压力一段时间，控制进入除氧器的新蒸汽以保证给水泵不发生汽蚀。

## 2. 12. 12. 6 维修

一般的维修建议已在第1章中提到。

应设有足够的空间和场地以及起吊设施用于设备和阀门的检修维护。

抽汽管道疏水器、疏水调节阀、管道支吊架等应按设备厂家操作和维护手册的说明执行。

设备维修应当在电厂停运时进行。但是在确保系统安全运行的前提下，加热蒸汽疏水调节阀或疏水器可以在隔离阀关闭下进行维护。

## 2. 12. 13 电动给水泵系统

### 2. 12. 13. 1 系统定义

电动给水泵系统是将除氧器的水抽出并升压，经高压加热器系统向蒸汽发生器供应品质合格的给水。

### 2. 12. 13. 2 性能要求

给水泵具有调速功能，能在启动、带负荷直至带额定负荷停机、以及核电厂的设计瞬态条件下具有自动地向给水系统供应所需流量的能力，而不致中断运转或损伤设备。

当一台运行中的给水泵退出运行时，处于备用状态下的电动给水泵组可快速启动，核电厂应能在100%功率下运转。

电动给水泵组设有最小流量保护系统——最小流量再循环系统。当泵组的流量降低到某一预定值时，最小流量保护系统即投入运行。

### 2.12.13.3 系统特性

系统设计应采用3台并联的电动给水泵组，正常运行时两台运行，一台备用，三台泵组可以任意切换。

每台电动给水泵组由前置泵、主给水泵、电动机、变速齿轮箱或液力耦合器组成，电动机一端直接连接前置泵，电动机另一端通过变速齿轮箱或液力耦合器连接主给水泵。

每台前置泵应供水给一台主给水泵。在前置泵和主给水泵之间应不设母管、隔断阀、或逆止阀。

泵组设置再循环系统，以备在低流量时保护泵组。应在每台给水泵的下游设置单独的通流管道引到除氧器，其尺寸应按给水泵所要求的最小流量选择。再循环回路包含调节阀及其前后隔离阀，并使阀组尽可能靠近除氧器布置。

给水泵要求的最小流量一般约为其额定流量的35%。

### 2.12.13.4 部件特征

#### 1) 给水管道

给水管道所有元件的设计压力应等于或大于无流量情况下电动给水泵的排出压力(泵的关闭压头)。

给水应设计成能避免冲刷损伤。管道系统的设计和布置应考虑流体速度、弯头位置、闪发点位置对管道材料的影响。应根据成功的运行经验选择管道布置、流速和材料。在满负荷额定运行条件下，前置泵入口管道的介质流速宜在0.5m/s~3.0m/s范围内，主给水泵出口管道流速在3m/s~6m/s范围内。

给水管道选用控铬的优质碳素钢。

#### 2) 电动给水泵

三台水泵应有完全相同的特性曲线，三台泵在容量、运行转速、吸水要求和机械设计方面应完全相同。

每台泵的设备规范书应要求作工厂性能试验，以验证其压头-流量特性、NPSH、功率要求和设计相符合，且在泵的流量和转速的整个运转范围内不致遭遇汽蚀或过份的振动。

在所有运行工况范围内，前置泵NPSH比其所要求的NPSH宜高出60%的裕度。前置泵的扬程应大于主给水泵所需的必须汽蚀余量并留有足够裕量(用以抵消电厂中系统瞬变引起的变化)，裕量不小于1.8倍。

每台机组配置3×50%电动调速给水泵。电动给水泵组的前置泵和主给水泵由同一台电动机驱动。前置泵采用定速，主给水泵采用变速齿轮箱或液力耦合器调速。给水泵组应能在最大运行工况点连续长期运行，同时又能满足蒸汽发生器各种运行工况下给水的需要量。

### 2.12.13.5 仪表和控制

#### 1) 电动给水泵的控制

- a. 电动给水泵系统设置三台电动给水泵。正常运行时，两台泵运行，一台泵备用，任何一台给水泵均可作为备用泵，当两台运行泵中有一台事故停运时，备用泵自动

投入运行。

b. 运行人员可以在 DCS 操作员站上启停电动给水泵，电动给水泵出口阀的控制应随运行工况决定它的启闭。当启动在役电动给水泵时，应采用出口电动阀关闭的启动方式，待电动给水泵启动后，再开启该泵的出口电动阀。当自动启动备用泵时，应采用出口电动阀开启的启动方式，当给水泵出口压力大于给水母管压力时，冲开给水泵出口的逆止门，向蒸发器供水。

c. 电动给水泵的转速由核岛负责控制。

d. 电动给水泵在除氧器水位出现超低水位信号时应自动进行保护跳闸。电动给水泵在泵的轴承温度过高、轴承振动过高及电机线圈温度过高等本体设备故障时应能发出报警信号，并根据设备制造厂的要求进行保护跳闸。

## 2) 最小流量再循环阀控制

a. 每台电动给水泵均设有最小流量再循环系统。用于保证电动给水泵的安全启动。最小流量再循环系统根据电动给水泵流量进行控制。当电动给水泵流量低时，最小流量再循环阀处于开启状态，当流量高时，再循环阀关闭。

b. 当给水泵准备投入运行前，运行人员应确保最小流量再循环管路上的所有阀门（包括手动阀）处于开启状态。

## 3) 电动主给水泵油系统控制

a. 电动主给水泵油系统向前置泵、电动机和主给水泵提供轴承润滑油，这个系统也向液力耦合器提供工作油。

b. 通过改变电动给水泵液力耦合器内勺管的高低位置，可以改变液力耦合器中油池的充油率，继而改变电动给水泵的转速，勺管的高低位置决定了电动给水泵的转速。勺管的位置由电动执行机构进行操作。

## 2. 12. 13. 6 维修

一般的维修建议已在第1章中提到。

应设有足够的空间和场地以及起吊设施用于电动给水泵设备和阀门的检修维护。

再循环调节阀、管道支吊架等应按设备厂家操作和维护手册的说明执行。

设备维修应当在电厂停运时进行。

## 2. 12. 14 高压给水加热器系统

### 2. 12. 14. 1 系统定义

高压给水加热器系统是利用汽轮机高压缸抽汽加热高压给水，并接受汽水分离再热器第一级和第二级再热器疏水和排气，最后将疏水送入除氧器，以提高回热系统的效率。

### 2. 12. 14. 2 性能要求

系统设计满足以下性能要求：

1) 高压给水加热器系统应设计成能在启动、带负荷直至带额定负荷停机、以及核电厂的设计瞬态条件下具有向蒸汽发生器供应所需流量的能力，而不致中断运转或损伤设备。

2) 系统应设计成容许在最低可行的汽轮机功率下开始给水加热，最好是在同步后带初始负荷时就进行加热。

3) 给水加热器系统应设计成能提供核电厂运行经验范围内的最终给水温度。在所有的负荷下，宜保持连续、稳定的给水流量。

4) 当一列高压加热器被隔离时，系统应能正常运转。

- 5) 系统设计应保护汽轮机防止发生蒸汽或给水的反向流动;
- 6) 系统设计应保证加热器和抽汽管道充分疏水, 应能防止加热器满水。

### 2. 12. 14. 3 系统特性

- 1) 布置
  - a. 应设置两列并联的可以隔离的高压加热器。
  - b. 只对每一整列的高压加热器提供隔离措施。不应为任一单台高压加热器设旁路管线。隔离一列高压加热器后剩下的加热器应按能带 65%功率运行进行设计, 其余 35%给水流量通过旁路运行。
  - c. 对并联的高压给水加热器的各列应设单阀门隔离。
  - d. 在通往高压给水加热器的抽汽管道上应装设隔断阀和带辅助动力的逆止阀。对这些阀门应配置就地的和远方的手动控制装置。
  - e. 抽汽阀门相对于给水加热器的布置应尽可能减少汽轮机进水或汽轮机超速的可能性。
- 2) 高压加热器疏水及抽汽管道疏水
  - a. 2 台高压加热器的疏水应逐级疏放到除氧器。在两列中的一列或两列都投运时, 高压加热器的疏水系统应能运行。
  - b. 当正常疏水不合适时(如: 启动工况和微小的加热管泄漏), 应具备有把疏水从每台高压加热器直接送到凝汽器热井的措施。
  - c. 高压加热器疏水及其相关控制装置的设计应按照汽轮机防止进水伤害的推荐经验。
  - d. 给水加热器的放气不应逐级排放, 高压加热器的放气应各自地排向除氧器箱。
  - e. 在机组启动、停机或正常运行时有可能积水的加热蒸汽管道系统的低位点应布置疏水点, 疏水点设置疏水罐。疏水管道宜采用气动疏水阀和疏水器并联的疏水方式, 气动疏水阀应能在主控室进行操作, 疏水器应采用机械式, 疏水管道应坡向疏水方向。

### 2. 12. 14. 4 部件特征

#### 1) 抽汽管道:

抽汽管道的通流截面应根据成熟的运行经验,考虑介质参数(压力、温度、湿度)选用合适的蒸汽流速。在满负荷额定运行条件下抽汽管道的介质流速宜在20m/s~35m/s范围内。

管道布置应力求减少使用90°弯头、斜接管等。

本系统加热蒸汽管道材料选用合金钢。

与蒸汽接触的元素禁止使用铜合金。

#### 2) 给水及疏水管道

给水管道所有元素的设计压力应等于或大于无流量情况下电动给水泵的排出压力(泵的关闭压头)。

给水和疏水应设计成能避免冲刷损伤。管道系统的设计和布置应考虑流体速度、弯头位置、闪发点位置对管道材料的影响。应根据成功的运行经验选择管道布置、流速和材料, 在满负荷额定运行条件下给水管道的介质流速宜在3m/s~6m/s范围内, 疏水管道流速在0.8m/s~2.0m/s范围内。给水管道的材料选用控格的优质碳素钢, 疏水管道采用控格的优质碳素钢, 疏水调节阀后采用合金钢或不锈钢。

与给水接触的元素禁止使用铜合金。

#### 3) 加热器

给水加热器的管束应是SA803TP439不锈钢，管束与管板应采用焊接。加热器在停运期间应采用氮气保养。

给水加热器应按ASME《锅炉和压力容器规范》第Ⅷ部份和热交换协会(HEI)标准或者国家标准《压力容器》和《热交换器》设计。

所有的给水加热器应水平安装。

#### 4) 调节阀

高压加热器疏水调节阀，应采用适当材料防止汽蚀。

### 2.12.14.5 仪表和控制

#### 1) 高压给水加热器水位仪表

高压给水加热器水位应设置三冗余的液位变送器，用来测量水位，采用三取中模块。三个水位信号经过三取中模块后，输出的信号值作为水位调节回路的被调量。当三个水位变送器中有两个故障时，调节回路自动切换到手动控制。

#### 2) 高压给水加热器水位控制

a. 高压给水加热器的水位应由正常疏水阀和应急疏水阀组合来维持。正常疏水阀应维持加热器的正常水位，而应急疏水阀则在不正常工况时为了快速排水至凝汽器热井而设置。

b. 当列内任何一台加热器水位过高，应关闭与加热器相对应的进汽电动阀、进汽气动逆止阀和进出水电动阀，并开启加热器旁路阀。给水加热器的电动进口/出口隔离阀应能在主控制室进行遥控和手操。

#### 3) 高压加热器进汽电动阀

正常运行时，应由主控制室操作员控制。在大部分时间内，这些阀门是开启的（即使在停机期间），除非长期停机（例如检修）。当汽轮机脱扣或受影响的列内任何一台加热器高高水位，这些阀门自动关闭。当这些阀门的关闭条件消除后，由操作员重新打开阀门。这些阀门的状态在主控制室的操作员站上应有显示。

#### 4) 高压加热器抽汽止回阀

这些阀门应配有电磁阀操作的气动执行机构。一旦汽机脱扣或列内任何一台高加解列，电磁阀控制回路动作，关闭对应的抽汽止回阀。

#### 5) 高压加热器进出水电动阀和旁路阀

a. 这些阀门可以在就地执行机构处操作或主控制室远方操作。在正常运行和正常停机的工况下，进出水电动阀都是全开的，旁路阀全关。当运行的加热器解列时，其进出水电动阀自动关闭，同时旁路阀自动打开。

b. 在受影响的加热器恢复到正常水位时，并满足开启条件后，应由操作员重新打开进出水电动阀。当所有相应的进出水电动阀均全开时，旁路阀才可以关闭。

#### 6) 防止汽轮机进水的控制措施

a. 抽汽管道应装备有自动疏水和水位控制设备，以防止在循环系统中不正常的凝结水积聚。

b. 最新版的NB/T 25039标准《核电厂汽轮机防进水导则》应作为基本设计的准则。

c. 用于抽汽管道上的阀门设计应能进行规定间隔的和经常性的检查，以确定阀门及其操作器是否正确动作。

### 2.12.14.6 维修

一般的维修建议已在第1章中提到。

应设有足够的空间和场地用于高压加热器抽管束和阀门的检修维护。

抽汽管道疏水器、疏水调节阀、管道支吊架等应按设备厂家操作和维护手册的说明执行。

设备维修应当在电厂停运时进行。但是在确保系统安全运行的前提下，加热蒸汽疏水调节阀或疏水器可以在隔离阀关闭下进行维护。

## 2.12.15 主给水流量控制系统

### 2.12.15.1 系统定义

主给水流量控制系统是控制向蒸汽发生器输送的给水流量，保证蒸汽发生器二回路侧的水位维持在整定值。

### 2.12.15.2 性能要求

- 1) 主给水流量控制系统应设置流量测量装置，用于蒸汽发生器水位控制及相应的反应堆保护通道。
- 2) 主给水流量控制系统应设有用于核电站启动期间核性能试验时标定核校核仪表的措施。

### 2.12.15.3 系统特性

- 1) 给水系统的布置、阀门的特性等应设计成使水锤荷载低于蒸汽发生器/反应堆的设计限值。
- 2) 主给水流量控制系统的给水母管上的进口和出口支管的布置，应能保证在给水进入调节站之前，其温度得到均匀的混合。
- 3) 设置给水系统清洗管道，清洗管道通向凝汽器。

### 2.12.15.4 部件特征

- 1) 主给水管道的通流截面应根据成熟的运行经验，考虑介质参数(压力、温度、湿度)和材料要求，选用合适的流速。
- 2) 主给水管材料应选用控铬的优质碳素钢或低合金钢。

### 2.12.15.5 仪表和控制

无。

### 2.12.15.6 维修

- 1) 一般的维修建议已在第1章中提到。
- 2) 应设有足够的空间和场地以及起吊设施用于设备和阀门的检修维护。
- 3) 主给水流量控制系统的阀门、管道支吊架等应按设备厂家操作和维护手册的说明执行。
- 4) 设备、阀门维修应当在电厂停运时进行。

## 2.13 汽轮机系统

### 2.13.1.1 定义

#### 1) 范围

主汽轮机系统主要包括下列子系统：

#### a. 主汽轮机

- b. MSR 系统
- c. 润滑油系统
- d. 汽轮机控制系统
- e. 轴封系统
- f. 仪表装置
- 2) 功能
  - a. 主汽轮机
    - 把热能转换成旋转能。
    - 控制蒸汽流量以满足电功率输出的需求。
    - 为给水加热器和再热器供应抽汽。
    - 把蒸汽导引到凝汽器。
    - 支承主要管道如主蒸汽、再热蒸汽、抽汽、排汽管系统的连接反力。
  - b. MSR 系统
    - 从高压缸排汽中除去约 98%的水分。
    - 在蒸汽进入低压缸之前提高它的温度。
  - c. 润滑油系统
    - 为汽轮机、发电机、励磁机供给正常的和紧急的用油。
    - 提供冗余度，使单一元件或电源故障不会导致系统失效。
    - 保持油质在运行的许可限度之内。
    - 为汽轮机正常运行及盘车维持油温在运行的许可限度之内。
    - 使系统中保持低的氢浓度。
  - d. 汽轮机控制系统
    - 控制汽轮机转速与发电机出力。
    - 为热力、液力和电参数提供监测，对安全和经济运行所必需的设备部件进行控制。
    - 在主汽轮机系统中检测到有不安全的事件时，提供自动报警、触发汽轮发电机停机。
  - e. 轴封系统
    - 在真空状态下防止空气漏入汽轮机，在承压状态下防止蒸汽漏出汽轮机。
    - 备有冗余的汽源和控制装置可供利用，使汽源或控制装置的单一故障在任一设计运行工况下，不致使系统失效。
- 3) 系统边界与接口

### 2.13.1.2 性能与运行要求

- 1) 主汽轮机
  - a. 应有超出汽轮机最大保证出力所需流量的 5% 的流量裕度。当汽轮机调节阀处的蒸汽湿度达 0.5% 时仍能发出最大保证出力。
  - b. 汽轮机应能连续地在阀门全开(VWO)、额定蒸汽压力、所有抽汽都投入的工况下运转，而不会缩减其可用率或工作寿命。
  - c. 当汽轮机的功率水平处于 50~100% 的范围时，汽轮机应能在 60 秒内作 10% 的阶跃式负荷增、减，而不会引起汽轮机跳闸。
  - d. 汽轮机应能作负荷跟踪运行。
  - e. 当一整列的高压加热器或低压加热器退出运行时，汽轮机应能令人满意地带 70% 的满负荷运行。

- f. 在汽-汽再热器部份或全部退出运行时, 汽轮机应能连续, 长期在最大节流流量下运转。汽轮机的供货商应对运行限制提出定量化要求, 或者对与此种运行方式有关的不利于汽轮机部件的影响提出定量化意见。
- g. 包括转子预热, 汽轮机应能在 12 小时内从冷态起动到带满负荷。
- h. 在制造期间, 汽轮机转子应在工厂的试验台架上作从 0~120%额定转速的动平衡。额定转速时在轴头处测得的最大振动水平应低于 2mils(约 0.05mm)全幅值(正负峰到峰), 包括电气的与机械的径向摆动度。
- i. 假定任何单一部件故障(例如某一抽汽管上的逆止阀故障), 汽轮机应不超出其超速的限值。
- j. 转子或静止部件的挠曲不致引起相互干扰、磨擦或发生正常运行时和设计瞬态时的部件损坏。
- k. 排汽缸的喷水应能自动和手操。
- l. 主截止阀、调节阀、中间调节阀、再热截止阀应按危急跳闸系统的动作在一定时限内关闭, 以防止汽轮机的不安全超速。此外, 阀门的布置和阀门的关闭时间应做到当一只阀门关闭失效时, 一起跳闸信号事件不会引起汽轮机的不安全超速。
- m. 调节阀和中间调节阀应能在要求的时限之内关闭, 以防止汽轮机、发电机负载不平衡时发生汽轮机超速跳闸。
- n. 盘车装置应配以自动和手动控制。当处于自动控制状态, 在润滑油压足够、汽轮机转子零转速时, 盘车装置应啮合并起动, 在汽轮机开始升速时解除啮合。
- o. 疏水管道应有足够大的截面, 以便能在各种运行工况, 最小压差的条件下排出最大流量的疏水。

## 2) MSR系统

- a. 汽水分离再热器 (MSR) 接收来自汽轮机高压缸的高湿度排汽, 利用其底部的分离器去除高湿蒸汽中的水份, 并经汽轮机抽汽和新汽(主蒸汽)加热至过热状态后送入低压缸, 以保护汽轮机低压缸叶片免受刷蚀并提高汽轮机热效率, 进而提高机组的发电效率。
- b. 系统的性能应考虑对压降和再热器温度端差的综合权衡作优化确定。
- c. 应装设排气和/或其它装置以确保非凝结气体从再热器管束中连续排出, 并确保以最小的过冷却把凝结水从加热管中稳定排出。
- d. 汽水分离器和每一级再热器的管束应有它自己的独立的疏水系统。
- e. 汽水分离器的疏水装置选择应能使疏水凭重力自行下流至分离器的疏水箱, 使得在负荷下降的瞬态时系统能正常排水。此外, 在每一疏水箱水位的上方应接出一独立的排汽管返回接到汽水分离器(即汽平衡管), 以避免负荷下降的瞬态时发生阻塞的可能性。
- f. 应对全部的疏水系统进行瞬态和稳态的水力分析, 以确保在所有的运行工况下的稳定性。这对于汽水分离器的疏水系统特别重要。这一分析应包括疏水箱上游和下游的全部管道, 上自从汽水分离器、再热器的集水点开始下至接到给水加热器和凝汽器的排水点为止。在需要的地方, 还应在疏水调节阀的上游装设一逆止阀, 以减免在降负荷瞬变时闪发蒸汽倒回疏水箱。逆止阀应尽可能靠近疏水箱装设, 以减少饱和水的不可控储量。

## 3) 润滑油系统

- a. 应能为汽轮发电机的轴承、密封油系统、盘车装置在各种运行情况下(包括停机、正常和紧急状态)提供 100%的所需油量, 并考虑足够的流量裕度以适应可能出现的偏离设计工况和磨损(汽轮机供货商一般提供 50~100%的油量裕度)。



- b. 在主油泵的下游应设全流量的过滤系统,过滤能力要达到 10microns (微米)或更佳,过滤系统要能在线不中断油流清洗过滤器,当过滤器前后出现高压差时能自动旁路。
- c. 要有带水分分离能力的润滑油净化/调整的旁路系统,过滤能力要达到3微米。
- d. 在检修停机时,对润滑油系统的管道要有高速冲洗(油流湍动)的手段。
- e. 当主油泵故障时,交流电动油泵的容量应足以保持至各轴承的油压。
- f. 当主要的和紧急的密封油泵都不能工作时,润滑油系统应以全流量供油至主发电机的密封油系统,此时,发电机氢压必须降低至汽轮机润滑油母管压力之下。
- g. 在所有的设计运行条件下,润滑油冷却器和加热器应维持供油温度处于 110 F(43.4℃)至 120 F(48.9℃)之间,报警温度为 125 F(51.8℃)。
- h. 当汽轮机的转速不足以为主轴油泵提供足够的泵送能力时,交流电动吸油泵(如装设)和交流电动辅助油泵应自动起动,该泵还应有手动控制手段。
- i. 当主轴油泵,交流电动吸油泵和交流电动辅助油泵都不能工作时,直流电动危急供油泵应自动起动,轴承危急供油泵还应有手动控制手段。

#### 4) 汽轮机控制系统

- a. 应为主汽轮机及其辅助系统提供汽轮机预热,安全起动、运行、停机、以及 BWR 反应堆压力控制用的手动和自动控制。
- b. 设备和部件的自动控制装置应尽量减少运行人员的操作而优化系统的性能。
- c. 在控制室内应能对汽轮机的预热、起动、从空载加荷至满负荷、连续运行时的负荷调节、正常的(定期的)试验功能、以及机组停机减负荷进行自动和手动控制。
- d. 当从负荷调度系统给出一个输入信号,或从控制室给出一个手动信号时,汽轮机控制装置应能自动地匹配核电厂的电力输出。
- e. 自动控制装置应设有可调的不连续的加载率。
- f. 在全部的速度范围内,自动控制装置应设有若干不连续的速率和加速率的整定值来控制汽轮机的速度和加速度。自动控制功能应设计成避免汽轮机、发电机在其转子的临界转速点停留。
- g. 当机组脱离原有的自动控制装置时,后备的手动控制应承担起机组的速度与负荷的控制。
- h. 用于正常速度—负荷控制的调速器应能在 105%额定转速时使调节阀与中间调节阀完全关闭。
- i. 当失去一个正常的调速装置时,可能达到的最大转速不应超过额定转速的 105%。
- j. 当汽轮机从第 2 章(发电系统)所规定的负荷水平发生甩负荷事件时,自动控制应能避免汽轮机跳闸,并能容许汽轮机带厂用负荷运行。
- k. 当发电机负荷和发电机功率短时(7 周波或更短)失调,自动控制应能快速调节阀门使汽轮机、发电机负荷重新匹配,而不致于发生在负荷失调瞬态直至满功率时失去同步。
- l. 电液调节控制阀装置和操作器应能在单阀(全周进汽)和顺序阀门动作(局部进汽)之间进行在线切换。
- m. 在轴承建立足够的润滑油压之前,应有限制汽轮机进汽,限制汽轮机阀门控制装置的联锁,此外,当失去润滑油压时,盘车装置应跳开。
- n. 当发生不安全的运行事件时,应有保护跳闸系统使主截止阀、调节阀、再热截止阀、中间调节阀迅速关闭。这一系统还应设计成在跳闸系统正常运行和试验时把虚假动作和误动作减少到最低限度。

- o. 超速保护系统中一个部件或电源的单一故障应不致于造成汽轮机的不安全超速或跳闸动作。
- p. 应设有机电超速跳闸机构，能在转速约达 111%额定转速时完全关闭阀门。
- q. 应设有独立的、冗余的后备电气超速跳闸回路，当转速约达 112%额定转速时使阀门完全关闭。
- r. 汽轮机的跳闸点和轴承的机械设计转子振动限值之间的裕度至少为 5mils(约 0.127mm)全幅值(峰到峰)。
- s. 应有紧急跳闸系统的在线试验手段包括单独的跳闸机构的试验。
- t. 主截止阀、调节阀、再热截止阀和中间调节阀的液力控制器应能在接收到跳闸信号后使这些阀门在足够快的时间内关闭，以防汽轮机不安全超速。控制器的响应要考虑阀门与汽轮机之间的管道中残留的蒸汽量。
- 5) 轴封系统
  - a. 轴封系统应能供汽到(或引出自)所有的汽轮机汽缸的轴封，还应具有轴封间隙增大时的足够的轴封汽溢出能力。
  - b. 应具有轴封蒸汽压力和温度(必要时)的自动和手动控制手段。
  - c. 轴封冷却器应维持部份真空。轴封排汽系统应设计成防止轴封蒸汽凝结水中挟带有空气。
  - d. 应有从辅助蒸汽系统(辅助锅炉)供应轴封蒸汽的措施。

### 2.13.1.3 系统和设备要求

- 1) 主汽轮机
  - a. 高压或高中压和低压汽轮机
    - 汽轮机的转子和叶片材料以及制造工艺应有成熟的高度抗应力腐蚀裂纹(SCC)特性。应考虑材料强度、热处理、低合金钢的回火致脆、以及不锈钢的敏感性的影响。
    - 机械加工、清洗、无损探伤、以及在制造、贮存、安装和检验过程中采用的其它化合物应加以控制，以免被含有氯和硫成份的化合物污染。当使用此类化合物不能避免时，汽轮机的供货商应说明使用理由，并采取措施以减少污染。
    - 隔板叶片/导叶/分隔板所选用的材料应是现场可修理的，需要高温预热和焊后热处理的材料应避免使用。
    - 汽轮机横向的和扭转的自然频率不应与汽轮机的运行转速、试验转速的谐波和线频率相重合，在整个汽轮机、发电机的设计中应有适当的阻尼以减小临界振幅。
    - 叶片的调谐频率应通过试验加以验证。叶片频率的计算应包括离心力、金属温度、叶根固定因数、叶片成组装置(如拉金、固定环等)的影响。
    - 转子和壳体的设计应避免有尖锐的转角半径和裂隙。
    - 汽轮机高压第 1 级叶片应设计成能承受连续的部份圆周进汽所引起的循环负载。
    - 所有的转子都应是按单体设计的，或者是按整体锻造或焊接设计的。
    - 汽轮机、发电机的联轴器设计应能适应发电机的短路事故，而不超出联轴器或螺栓的最小屈服应力。
    - 在汽轮发电机厂房内的汽轮机方位和布置应使与汽轮发电机主轴相垂直的平面不会和一回路的安全壳结构相交。应证明发生飞射物的故障概率是小于  $10^{-4}$ /堆年。此外，由于汽轮机飞射物对安全相关的系统和部件造成难以承受的损坏的概率宜小于  $10^{-7}$ /年，汽轮机发生飞射物的概率按相关标准规定的方法计算。

- 对于汽轮机的叶片和喷嘴应根据需要采用防冲刷材料、汽水分离措施或/和防护罩,做到在设计运行工况下至少 30 年不更换整列叶片。如机组在低负荷工况下运行超过期限,或再热器没有投入运行,则 30 年的要求不能适用。
  - 应有减少汽轮机喷嘴和低压内缸冲刷的措施,以及改善蒸汽流道的低压级水份排出的措施。
  - 低压转子,包括轴承应能互换(即低压转子 A 能适用于低压转子 B 的汽缸,反之亦如此),不同机组的高压和低压转子应能互换。
  - 汽轮机低压排汽缸应装有通大气的隔膜。
  - 对于新的或有重大设计更改的第 1 台产品,汽轮机的蒸汽流道包括转子和相关的静子部份以及汽缸,应完整地在工厂内组装以校验其不存在任何干扰。
  - 低压转子是否需要中心钻孔应根据各厂的特定条件评估确定。
- b. 主汽截止阀、调节阀、再热截止阀和中间调节阀
- 这些阀门及其支架应设计成不会因汽轮机的工作谐振和阀门中汽流或液力不稳定而激发起过量的振动。
  - 阀门的操作机构应属于故障安全(即故障时关闭)的设计,藉以减少复杂的联动,并应采用有成熟经验的部件。
  - 这些阀门的限位开关和阀位逻辑指示应有成熟经验。当限位开关尚无足够的实用经验时,应设置冗余的开关。所有的就地汽轮机控制开关和逻辑试验限位开关以及现场终端接线盒都应有密封外罩。同时,从开关位置至现场第一只接线盒应有备用电缆通路。
  - 带有先导阀的阀门应是具有成熟经验的。
  - 阀门的壳体应按其所连接管道的设定的力矩设计,该连接管道所引起的应力相当于 ANSI B31.1 对一次加二次应力的容许值,但如果连接点的反力对汽轮机的稳定性影响有更多的控制,则供货商应对核电厂的设计者明确阀门能接受的接口负载。
  - 调节阀应能在线在全周进汽和局部进汽之间进行切换,这一切换不应导致伺服机构和液压管道的振动。
  - 汽轮机的阀门宜设计成在核电厂处于满负荷运行时可以进行任何经常需要的试验。由于试验中包含有阀门的动作,可能会有负荷下降,这是可容许的。
  - 控制/调速阀应设计成能承受在低于满负荷,包括负荷跟踪条件下延长期限运行。
- c. 汽轮机阀门、壳体间和 MSR 系统之间的蒸汽和再热蒸汽管道
- 主蒸汽和热再热蒸汽管道应按第 2 章规定的接至汽轮机阀门的管道具有相同的材料(按第 2 章第 3.4.1.3 节,主蒸汽和热再热蒸汽管道应采用碳钢材料)。
  - 蒸汽管道的通流截面应根据成熟的运行经验,考虑预期的介质参数(压力、温度、湿度)和下述的材料要求,选用合适的蒸汽流速。
  - 对于不能进行内部检查的管道,管道包括保温层与附近楼板、设备、保温的管道宜至少保持 1 尺(约 0.3 米)的间隙,此外,管道的布置宜容许对焊缝、管件、弯管和弯头进行无损检验。
  - 管道的布置应减少 90° 弯头和斜接管,有条件时应采用弯曲半径较大的弯管。斜接管宜带有导向叶片以减少湍流。
  - 导汽管和再热蒸汽管道应设低位疏水管,在运行时有可能集水的地方应设连续排放型疏水。
  - 热再热管道中的膨胀节材料应有成熟的抗应力腐蚀裂纹的特性。
  - 冷再热管道的材料应采用符合第 1 章要求的耐腐蚀材料。不应使用碳钢。

d. 抽汽管道接口

由于抽汽及疏水管道不属于汽轮机范围之内,汽轮机外壳应按其所连接管道的设定的力矩设计,该连接管道所引起的应力相当于ANSI B31.1对一次加二次应力的容许值,但如果连接点的反力对汽轮机稳定性的影响有更多的限制,则供货商应对核电厂的设计者明确接口能容许的负载。

e. 疏水和放气接口以及相关的阀门和管道

- 汽轮机疏水管道应选用耐冲刷的材料。
- 所有会积聚凝结水的汽轮机内部凹槽处应有适当的疏水。
- 阀门和管道应有合适的支架以适应自重、热力、流体静力和动力荷载。

f. 汽轮机的径向和推力轴承及其罩壳

汽轮机轴承的罩壳应装有转子轴的油密封,以防漏油并减少空气漏入。

g. 维修(略)

2) MSR系统

a. 汽水分离再热器壳体材料应符合 TSG R0004-2009《固定式压力容器安全技术监察规程》和 GB150-2011《压力容器》的规定,采用韧性好、可焊性高的 Q245R 优质碳素容器钢。暴露在湿蒸汽或者两相流液体中可能产生严重腐蚀的部件应采用铁素体不锈钢材料。与湿蒸汽接触的汽水分离再热器壳体区域应采用不锈钢防护板或采用内衬不锈钢的复合钢板,不锈钢复层厚度不小于 6mm。

b. 汽水分离器再热器应采用恰当设计的安全释放阀对其进行保护,以确保在汽轮发电机最不利的运行条件下不致超压。

c. 分离元件采用波纹板型或者类似的可靠、高效、低压降的除湿分离元件。分离元件应有足够厚度和刚度,能够承受高湿度蒸汽流体冲击引起的弹性振动。分离元件应由不锈钢制造。应进行以试验为依据的分析,确保汽流在汽水分离器进口平面上的良好分布,从而最大限度地提高效益,避免由于局部高速汽流可能引发的结构损坏。

d. 再热器管束支撑板的结构型式和支撑板跨距设计,应保证蒸汽流速小于引起振动的临界流速,避免发生管束振动磨损。

e. 再热器管束的设计和制造的精确度应确保在所有的运行条件下,加热管能自由热膨胀而不产生过大应力或损坏管束的构架。

f. 应备有适合于汽水分离器再热器材料的停用保养措施。管侧的保养应使用经过处理的水、氮、或干燥的清洁空气。壳侧的保养应采用经过处理的水或干燥的清洁空气。

g. 汽水分离器的结构设计应便于分离元件的更换拆卸和从筒体内到筒体外的搬运,便于再热器堵管和抽管束。在汽水分离器顶部和再热器端部应设置操作维修平台,并供应一、二级再热器检修抽管束用移动托架。

3) 润滑油系统

a. 应有一个与主发电机密封油系统连接的接口,以便于利用汽轮机润滑油系统作为发电机氢密封油系统的后备。

b. 应备有一台直流电动紧急油泵,其容量应足够供应汽轮机轴承所需的油量,以防止交流电源故障时造成损伤,或由于失去润滑油压致使汽轮机跳闸。

c. 用于控制交流油泵的直流电源应与用于直流电动紧急油泵的控制及动力直流电源分开。

d. 对于所有的汽轮机和发电机轴承,应备有顶轴油系统,供盘车时使用。

e. 应尽最大可能使管道和设备的联接点处于储油箱之内,或者处于防护罩、盖、

箱等之内。

- f. 润滑油箱应布置在低于汽轮发电机轴承的低排油点标高以下。
  - g. 在润滑油箱的顶部应设有防爆门。
  - h. 所有的油管道应坡向润滑油箱。
  - i. 在全流量滤油器下游的润滑油系统管道材料应是耐腐蚀的，如不锈钢。
  - j. 应配备有从润滑油系统中除去夹带的空气、氢气和湿气的措施。
  - k. 应配备有在停机末期的 24 小时内除去润滑油中水份的措施。
  - l. 润滑油系统应有单独的排气口，其位置应防止排出的雾气和油气与明火或火花接触，排气口还应避开空气压缩机的吸入口布置。
  - m. 润滑油系统应设有油雾消除器，其位置应尽可能靠近排气口的出口端布置。
  - n. 应设有油箱、供油管和回油管的冲洗措施。
  - o. 应设有冲洗时使润滑油加热的措施。
  - p. 润滑油的供油和排油管道应尽最大可能采用全焊接结构。
  - q. 润滑油的供油管应装设防护套管。
  - r. 交流与直流油泵应能连续排气以排出夹带的空气，排气管应有足够的截面尺寸以防堵塞。
  - s. 应设有在线取样的措施。
- 4) 汽轮机控制系统
  - 5) 轴封系统
    - a. 应设有自动和手动控制装置以调节轴封蒸汽的压力和温度。
    - b. 在正常和瞬态运行工况时，轴封系统应至少能从两个独立的汽源获得蒸汽。
    - c. 应设有冗余的，100%独立的电动或气动风机以维持轴封凝汽器的真空。
    - d. 汽封疏水应坡向轴封冷却器，轴封冷却器应低于汽轮机标高布置。

#### 2.13.1.4 仪表

应配置汽轮机的监控仪表以监测其热力、液力和机械参数，并实现控制功能、触发自动报警，在汽轮发电机组处于不安全状态下触发汽轮发电机组跳闸。

##### 1) 汽轮机监控仪表(TSI)

应配置汽轮机的监控仪表以监测其热力、液力和机械参数，下列参数在所要求的TSI中应予以考虑：监测项目包括转速、键相、振动（轴振动、轴承振动）、大轴偏心度、汽缸绝对膨胀、相对膨胀和轴向位移。

##### 2) 汽轮机/反应堆接口信号

应提供冗余、可靠的用于表征汽轮机已经跳闸的信号，该信号应送至反应堆保护系统用于表征汽轮机已经跳闸。

##### 3) 在线诊断

应设置一套汽轮发电机组轴系振动故障分析与诊断系统，具有振动数据采集和故障诊断功能，能诊断汽轮机故障和指导汽轮机在线运行操作。

#### 2.13.2 主发电机系统

##### 2.13.2.1 性能与运行要求

###### 1) 定子冷却水系统(如装设)

- a. 在任何正常运行和设计瞬态条件下，定子水冷却器应能维持冷却水温度在允许范围内。
- b. 去离子设备应能维持冷却水电导率小于 0.3  $\mu\text{S/cm}$  的水平。

c. 冷却水过滤器应能维持冷却水在制造商规定的允许清洁度范围内。

## 2) 氢冷却系统

应装设用水冷却的氢气冷却器以带走氢气在发电机中所收集的热量损失,并保持氢气温度在允许的限值之内。

## 3) 氢密封油系统

a. 系统应能维持其密封油压力大于发电机内氢气的压力,并有足够的压差防止氢气从发电机的端部逸出。

b. 在正常运行并连续补氢的条件下,密封油系统能维持氢气纯度为大于 98%。

c. 提供全流量过滤器,过滤器的精度为 10 微米或更好,过滤器能在线清洗,并设有旁路系统,当过滤器前后出现高压差时应自动旁路。

d. 当系统内的一些部件如泵和控制阀产生故障时,仍能保持发电机的全负荷运行。

## 4) 发电机氢气和二氧化碳系统

a. 氢气的贮存量应满足净化二氧化碳所需的氢气量的三倍,从而使发电机加压到工作压力。

b. 二氧化碳储罐的容量应至少是驱走发电机内氢气所需气量的 3 倍,此外还应是停机状态驱走空气所需气量的 3 倍。应根据厂外获得气源的条件来评估是否需要额外储存量。

c. 充氢系统应维持氢压在 0.2~0.57MPa 之间。

d. 氢气的纯度在停机时应维持在 95%以上,运行时应维持在 98%以上。

e. 应配置气体干燥器用于去除气体中的湿气,使其干度尽可能达到 100%的水平。

## 2.13.2.2 系统和设备要求

### 1) 定子冷却水系统(如装设)

a. 与发电机组的进出口连接布置应能保证在任何条件下,管路内始终充满水。

b. 应提供二套 100%容量的冷却水泵、冷却器和二套 100%容量的过滤器及滤网,并能平稳从一列切换到另一列,不影响冷却水流量,过滤器的精度为 3 微米或更好。

c. 应提供一套或二套去离子器及相关的树脂捕捉器。

d. 不同类型材料之间的连接和材料选择应保证避免任何制造缺陷的产生,避免采用钎焊连接和螺纹连接,不同金属之间的连接应避免产生电腐蚀。

e. 系统设计应考虑防止冷却水的铜污染的问题。

f. 发电机冷却水管道系统设计应考虑有对定子绕组进行反冲洗装置。

g. 定子绕组冷却水系统采用集装式。水系统的阀门、滤网、管道、水泵等均采用不锈钢材质(不低于 0Cr18Ni9)。

### 2) 氢冷却系统

a. 冷却器的设计能保证其热阻不大于  $3.522 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  ( $0.002 \text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F/Btu}$ )。

b. 冷却器的材料应与冷却水的化学性能相适应。

c. 冷却器的设计还应考虑采取一些措施,包括水侧在线清洗、防止氢气的聚集等。

d. 发电机氢冷系统及氢气控制装置的所有管道、管件、阀门(选用进口阀门)、有关的设备装置及其正、反法兰和附件,材质采用不锈钢材料(不低于 0Cr18Ni9),并使布置便于运行操作,监视和维护检修。

### 3) 氢密封油系统

a. 本系统应按所在地区设计温度和相对湿度条件下运行进行设计。

b. 密封油系统应低于发电机布置,使所有的排油管均坡向储油箱或真空油箱。

- c. 应设有维持油位的措施，以防止氢气通过排油管泄漏出来。
- d. 应装设一台主密封油泵和一台应急密封油泵。
- e. 应急密封油泵应由直流电源供电和控制。
- f. 与汽轮机润滑油和轴承油母管的连接应设置一路恒定补充油和一路备用油至发电机轴承密封，以在主油泵不能工作时，仍保证密封油正常供油，同时设有降低发电机氢压低于汽轮机润滑油压力的措施。
- g. 密封油系统及密封油控制装置所有管道、管件、阀门、有关的设备装置及正、反法兰和附件，材质采用不锈钢材料(不低于 0Cr18Ni9)。
- h. 密封油冷却器应满足：
  - 油冷却器应干净，确保安全没有管垢，所有和油接触的表面应涂上一层能与汽轮机润滑油相容的防腐材料。
  - 冷却器的设计能保证其热阻不大于  $3.522 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} (0.002 \text{ hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F/Btu})$ 。
  - 冷却器的材料应与冷却水的化学性能相适应。
- 4) 发电机的氢气和二氧化碳系统
  - a. 本系统应按所在地区设计温度和相对湿度条件下运行进行设计。
  - b. 在氢气供应设备压力调节阀和氢气供给隔离阀之间应装设一根短管。
  - c. 配置氢气干燥器用于去除在发电机内循环的氢气中的湿气。
  - d. 应提供用于测量氢气泄漏量的装置和测量环境氢气浓度装置。
  - e. 应提供发电机内氢气浓度在线取样的装置。
  - f. 发电机氢冷系统及气体置换装置能满足发电机充氢、自动补氢、排氢及中间气体介质置换工作的要求，能自动监测和保持氢气的额定压力、规定纯度及冷氢温度、湿度、CO<sub>2</sub> 纯度等。

## 2.14 布置设计

### 2.14.1 概述

本章节主要规定了核电厂在布置设计方面的要求。

#### 2.14.1.1 目的

本章节对核电厂核岛、常规岛和核电厂配套设施-核电厂其余部分（除核岛和常规岛外）中各厂房和设施的功能提出详细要求，并对其建筑结构、机械和电气及其他特殊设施也提出具体要求，以确定核岛、常规岛和核电厂配套设施-核电厂其余部分（除核岛和常规岛外）厂房的功能及结构。

#### 2.14.1.2 范围

本章节内容涵盖了厂房、管道、电气、仪控、通风以及设备的总体布置、接口、支撑要求，且涉及核电厂寿期内从设计、建造、安装、调试、试验和运维所有阶段的布置要求。

#### 2.14.1.3 功能

核电厂首先应设计为能实现热工水力、发电、运行等功能，还应具有良好的经济性。因此应当把功能上有联系、运行上互相配合的各个系统、回路或成套的机械电气设备组合在一起，分别安装在各厂房中，并且最合理地安排各厂房间相互位置，从而得到一个具有最佳发电效果的核电厂房的总体平面布局。

#### 2.14.1.4 接口

本章节内容与所有章节均存在接口关系，在其他章节中也包含了特殊的布置要求。

#### 2.14.1.5 原则说明

核电厂布置主要遵循的原则有：可建造性、可操作性、可维修性、尽量减少放射性危害以及标准化等。

### 2.14.2 总体要求

#### 2.14.2.1 总体设计

##### 1) 人因

核电厂布置和设计符合人因工程原则。设计采取适当措施使运行人员操作方便和舒适。

设计考虑提高可运行性和可维修性的设计特性和要求。对于通常不可接近区域，仅限于布置在运行期间不要求监督试验、高可靠性或失效后不影响核电厂可利用率的设备。人力无法移动的设备，布置在可以直接通向吊装设备以及吊装孔的位置。

##### 2) 核电厂空间优化

核电厂厂房和其内部房间的空间布置考虑人员和设备的进入以及建造、运行、维修期间所需要的充足的作业空间。同时避免挖方、混凝土、管道、输水管、电缆等局部大量堆积对建造、维修、试验、检查和运行造成的不利影响。

##### 3) 建筑

为使建筑外观给人以良好的视觉感受，单体建构筑物 and 核电厂整体建筑风格按最新的现代化核电厂进行设计和规划布局，并适当考虑经济性。

核电厂厂房建筑内部的设计，在照明、通风、装修、陈设、颜色选择及空间分配方面考虑人的心理因素和人的行为因素（人因工程学）。

建筑的构配件选择注重适用性和可靠性原则，建筑构配件耐久性满足核电厂寿命及使用期内维修更换期限的要求。

##### 4) 标准化

设计人员对核电厂主要生产设施（核岛及常规岛的汽轮发电机厂房）进行标准化的布置，对核岛厂房群、常规岛厂房、重要的辅助生产类厂房进行标准化设计，以方便重复利用建造，提高工程质量及降低工程造价。

“标准化”核电厂为适应特定厂址项目而制定的接口要求，能甄别确定特定厂址项目的哪些区域可以适应核电厂的“标准化”，而对特定厂址不能进行标准化的范围达到尽量小。

核电厂厂房土建设计和系统设备在可能的范围内尽量标准化。标准化范围包括建筑结构构件、系统管道支撑、电气管道等各种工艺管道及采购设备（如阀门、仪表、电动装置等），尽最大程度上采用标准化的产品系列部件。

##### 5) 结构设计基准

核厂房设计遵循通用结构设计基准要求，设计人员设计时还参考本章内容及其他要求作为补充。厂房详细设计按60年寿期要求进行选材，并最大限度考虑经济性和适用性。

厂房结构及构件设计时考虑合理的建造公差要求。

##### 6) 电厂寿期

华龙技术电厂的设计寿期为 60 年。

##### 7) 厂址包络

结构设计和核电厂布置时考虑以下厂址条件的要求：

基岩距地面平均距离取包络值。



冷凝器冷却水和非安全相关厂用水的热阱根据相关要求确定。核电厂冷却水系统依据标准厂址包络参数进行设计，包络以外的其它厂址条件需作为特殊厂址处理。

#### 8) 设计方法

对于核电厂的结构设计和力学分析，设计的复杂程度和所采用的分析技术与结构和构件本身的复杂性和重要性相一致。

建立核电厂三维模型，方便设计、施工、运行和维修。

### 2.14.2.2 施工设计

#### 1) 概述

综合考虑核电厂运行、维修需要及总成本费用，使施工设计达到最佳化。

#### 2) 施工顺序

根据核电厂中厂房设计和布置选择合适的施工顺序。

#### 3) 安全相关和非安全相关施工区的隔离

考虑安全和非安全相关区域的隔离以降低非安全相关区域的建造成本。同时还考虑实体隔离（如空间和屏障）以及不同的设计要求、施工活动和质量保证中所要求的隔离。

#### 4) 模块化

设计允许采用大型模块进行装配和安装。设备组件模块满足可运行性和可维修性要求。同时，结合施工顺序对模块设计及选择范围进行评估。

#### 5) 启动试验

核电厂设计包括系统完工、预运行试验和启动试验的有关要求。

### 2.14.2.3 安全设计

#### 2.14.2.3.1 总体要求

安全要求融于核电厂厂房设计和设备布置中，利用结构来满足安全要求。本节所述的安全要求还与运行和维修要求如放射性屏蔽、出入控制等结合考虑，最大可能地利用所需要的结构达到最佳设计。

#### 2.14.2.3.2 安全系列分区隔离和保护

安全设备的分离按照系统分级规定进行。

非安全相关的管道、电缆桥架或管道系统尽量避开安全相关的设备、管道、电缆桥架或管道系统附近布置，以免发生相互影响。不能避免时，非安全相关的部件的设计按照抗震Ⅱ类要求执行。

核电厂布置考虑保护安全相关的仪器仪表设备不受内部灾害的影响，以及与非安全级辅助设备分隔。

#### 2.14.2.3.3 消防

- 1) 建筑物的建筑材料符合HAD102/11的防火要求。
- 2) 防火屏障的开口处设计符合HAD102/11的防火要求。
- 3) 安全相关构筑物外墙满足相应防火分区的耐火极限要求，防火屏障的开口和贯穿件尽可能少，并使用与防火屏障耐火极限相同的防火材料进行封堵。
- 4) 安全相关系统仪表和控制系统，以及通信和电源与冗余列分隔。
- 5) 冗余的安全相关电源相互分隔，非安全级电源与安全级电源相互分隔。
- 6) 控制室综合体应设置为独立的防火分区，将其与厂房中的其余部分隔开。

- 7) 每个防火分区都设置人员疏散通道,通向室外的楼梯作为主要逃生通道,并用于消防干预路径,反应堆停堆操作必需路径,应当配置足够的应急照明。疏散通道的设计应符合GB/T 22158(升版后)的要求。
- 8) 应考虑因消防水造成的内部水淹,在安装了固定灭火系统的区域应设置地漏,以防止安全级系统设备因消防水淹没。排出含有易燃液体时应防止易燃液体回流。
- 9) 柴油燃油贮存区不得设在装有与燃油系统无关的安全设备的建筑物内。罐体被安置在单独的建筑物或地下室中。
- 10) 变压器防火设计遵照GB50016建筑设计防火规范进行设计。
- 11) 冷却塔为不燃结构(滨河厂址适用)。

#### 2.14.2.3.4 事故后通道

核电厂的布置,应提供事故后为了监视和恢复运行需要的人员进出通道。该人员进出通道应能够防止高水平的辐射,并应适当的利用远程控制技术。

#### 2.14.2.3.5 安保要求

评估核电厂保护区和要害区的出入口在施工(燃料进场后)、换料和大修期应与正常运行功能相同。

核电厂的布置和厂房设计应为人员控制和材料的运输提供最少的安保和放射控制点。监控点尺寸确定应根据满足工作人员短时间逗留、重要的维修作业或正常运行中所需要的最大空间来确定位置尺寸。厂房外部的安保区域需要设置入侵探测设备,应尽量减少建筑物不规则外形。

设计应明确定义在应急情况下人员要使用的出入路线,例如,主控制室至远程停堆站、技术支持中心和现场应急电源。安保措施应不容许在应急期间妨碍必需的操纵人员出入。

核电厂的布置和厂房设计特征满足安保的要求,这种布置和厂房设计一定程度上可以增强核电厂抵抗放射性破坏的外部威胁能力。特别是,应在要害区周界设置受控的安保出入口。

设计应将实物保护探测措施纳入到核电厂设计中,例如将要害设备布置在要害区内;安装入侵检测系统和评估系统等。

#### 2.14.2.3.6 内部灾害

设计者应考虑管道破裂产生的射流冲击、管道甩击、飞射物、环境变化等效应。

非安全级流体系统的泄漏导致的水淹不应导致同区域的安全级设备失效。对核安全相关物项,应尽可能地将内部水淹的影响范围限定于冗余安全系统的一个系列;如不可避免地有冗余安全系统的多个系列布置在一起的情况,需满足一定的空间分隔,避免由于内部水淹造成冗余安全系统的多个系列造成威胁。

内部水淹分隔可采用下面方式:

- 1) 限制内部水淹蔓延可通过划分水淹分区的方式来实现。水淹分区的实体屏障限制了内部水淹从一个分区向另一分区蔓延。
- 2) 应将存在执行安全功能的系统和设备的房间划分为水淹分区。
- 3) 针对分区划分的具体措施,应尽可能通过实体屏障来实现,所有构筑物的外墙、基础、楼板必须为水淹分区提供实体边界。
- 4) 应对核安全相关物项进行必要的防护。
- 5) 通过设置门槛、挡水堰等方式限制内部水淹的蔓延,以达到尽可能地减少需防护设备所在区域受到内部水淹影响的目的。

- 6) 如果需防护的设备位置低于最大内部水淹水位且无法证明其能在被水淹情况下运行, 则可以通过采取提高设备安装高度的内部水淹防护措施, 使得需防护设备免受内部水淹影响。

内部水淹控制是指使用分流疏排、泄漏探测和隔离的方式来控制和缓解内部水淹的后果。具体可采取以下防护措施:

设置排水设施。

泄漏的探测和隔离。

#### 2. 14. 2. 3. 7 严重事故考虑

核电厂关于严重事故保护的总目标是要充分利用核电厂必要或必需的一些特点, 来执行预防功能和严重事故缓解功能。

#### 2. 14. 2. 3. 8 外部事件的防护

外部事件应防护外部人为事件和外部自然事件。外部人为事件应包括: 飞机坠毁、外部爆炸、外部火灾、毒性气体、腐蚀性流体释放; 外部自然事件应包括: 极端风、极端温度、外部洪水、降水(冰冻及积雪)、地震、极端低水位、雷击、生物现象、漂浮物及泥沙。

外部事件防护设计是为了实现核电厂基本安全目标: 在核电厂中建立并保持对放射性危害的有效防御, 以保护人与环境免受放射性危害。

外部事件防护设计需考虑在发生设计基准外部事件时, 保护安全重要物项的安全功能, 在发生超设计基准灾害时, 应避免发生陡边效应, 保护用于防止早期放射性释放或大量放射性释放所需的物项。

#### 2. 14. 2. 3. 9 有毒和易燃物质

应识别核电厂区边界内存放物质及其特征(比如数量, 物理状态和化学构成, 种类, 储存方式), 以确定何种物质的释放会影响安全系统相关的设备或执行安全行动的人员。识别过程需要考虑物质的储存位置、分配或运送的路径。

有毒有害物质释放应遵守以下准则:

- 1) 尽量减少释放的可能性, 包括保守设计、材料选择、高质量建造、施工和在役阶段的检查等。针对有毒有害物质释放, 主要包括储存罐、分配系统的设计及其在役检修。
- 2) 核电厂系统和设备设计, 应考虑能应对气体或蒸汽的影响, 同样包括保守设计、材料选择、高质量建造、施工和在役阶段的检查等。如果有电缆和机柜靠近有毒有害物质释放源, 需要通过设计和布置将有毒有害物质释放的损害降到最低。
- 3) 采取合理的总体设计原则, 比如考虑冗余性、多样性、实体分隔和空间分离等, 通过合理设计系统和有毒有害物质储存点的相对位置关系, 消除有毒有害物质释放的不利影响。
- 4) 宜将安全重要物项布置在建筑物内部, 则在气云进入厂房前, 已被吹走或者浓度减小, 从而缓解可能的影响。
- 5) 对厂房、控制室的通风系统的控制: 控制系统应该关闭通风系统的进风口而使相关区域进入自循环通风模式, 从而避免对人员的影响。
- 6) 针对化学品释放可能意外混合并且形成二次产物的情况, 防护措施还应包括接受和储存化学品的管理控制, 以及必要的设计措施, 如酸、碱的供应使用不同的软管接头。

应避免储存可燃气体(丙烷、氢气等)的大储存罐靠近厂房结构, 埋设的储存罐应由耐腐

材料构成。气体储存罐的位置应考虑潜在火灾、设备失效、操作事故，并考虑气象条件、地形、地质条件和人员所处位置（如：控制室新风口和电厂设备）。

#### 2.14.2.4 运行和维修设计

##### 2.14.2.4.1 可维修性评价

核电厂设计人员应在设计电厂布置图的同时进行可维修性评价。可维修性评价应对受限制的作业（如受走廊通道、人孔和起重设备等尺寸限制的作业）提供详细的评价，以说明这些作业在以下范围能够执行：

- 1) 在核电厂运行期间的设备使用。
- 2) 在核电厂停堆期间的换料和主要的检查、试验和维修。

应对吊装载荷及其运行空间、墙和天花板及楼板上的吊装点、作业空间和间距、适当的作业平台和梯子、运行路线以及用于设备、工具和人员的运输设备等进行评价。根据评价结果确定合理的通道宽度和高度、进出设备通道、运输设备（包括单轨吊车、起重机、升降机和机动运输装置等）、临时吊点及堆放位置等。

当移动大型放射性设备、废料以及其他放射性原料时，应尽可能平行移动。

对于正常或异常运行、维修、试验或需要进行定期检查的设备，应提供楼梯、工作平台以及充足的工作人员。

设计人员应考虑在重要的厂房如反应堆厂房内预留临时脚手架的储存位置。

可维修性评价应系统地评价整个核电厂的维修活动，重点考虑进出通道和运输设施受限的情况。

设计应考虑机器人在进行可维修性评价和在役检查时的应用。

设计应标明在高密集区域的维修和运行进出路线。

##### 2.14.2.4.2 可维修性设施

- 1) 走廊通道：要保证所有设备的运输，考虑从安装点到吊装孔或电梯沿垂直方向到达厂房出口的路径。通道的尺寸应能适应小型自动装卸车或机动小车的进入和运输。走廊通道也应适应施工活动，包括易于施工人员活动和施工材料运输。
- 2) 升降通道：对于通过多层楼层的垂直起吊，升降通道应尽量垂直。考虑分段运输，可在中间的楼层上设成转换吊装层。通道口盖板应易于拆卸，采用易于去污的表面且有防泄漏的接缝做法。
- 3) 可移动墙：在墙上开洞通常是便于设备的移动和安装。洞口的填充材料应易于更换，同时具备必要的屏蔽功能和在正常运行期间要求的其他功能。应对填充材料的初始放射性物质含量进行评估。墙体结构和填充材料表面应进行表面光洁度处理，便于去污。
- 4) 坡道，升降机和楼梯：应尽量利用坡道和通往设备的地面通道。坡道应设计成适当的坡度，以便于使用千斤顶、叉车、手推车等运输工具移动设备和材料。坡道设计荷载需考虑运送已使用的过滤器、树脂或其他放射性物质的重型屏蔽容器。较大高度的运输路径，应提供升降机。设计应依据可维修性评价，为运送货物和人员提供升降机。反应堆堆腔通道应考虑使用可移动楼梯井。升降机的尺寸应满足大型物件的需求（如脚手架）。升降机应提供单独的动力系统已确保能持续使用。
- 5) 提升和悬挂措施：应提供起吊和装卸较大设备及其部件的措施，包括厂房起重机用的楼板顶柱和升降口、单轨卷扬机、辅助旋臂吊车和悬挂固定点。如有必要应在墙、楼板上提供预埋件和可能偶尔需要特殊悬挂的高架装置。应标明每一个预埋件的设计载荷。应在厂房内提供厂房起重机或外部起重机备用的起卸通道。当厂房内局部

区域剂量率超标时，应使用远程操作电动升降机进行操作。设计应对施工和维修人员使用的提升和悬挂设备作出明确规定。

- 6) 核电厂辅助装置：应提供核电厂辅助装置。还应提供维修方面的附加辅助装置，如氩、氮和含碳的气体装置。电气连接应包括所需的焊接。整个核电厂的辅助装置连接件应标准化。

#### 2.14.2.4.3 应用遥控设备的核电厂设计

设计人员应考虑遥控设备在核电厂运行和维修阶段的应用，并为遥控设备预留运行空间，尽量减少工作人员可能受到的辐射伤害。

- 1) 遥控设备贮存及去污：应用遥控设备的核电厂布置，应考虑遥控设备去污措施规定的安全区域。
- 2) 门、楼梯和走廊通道：应用遥控设备的厂房，在可能使用遥控设备的场所（包括平台、梯子和人员通道），其要求应与遥控设备的使用方式相适应。
- 3) 闸门和设备升降口：在核电厂功率运行和安全壳可进入期间(即停堆期间)，对于进入安全壳内的遥控装置，辅助设备的设计应考虑安全壳贯穿件的隔离。使用的辅助设备应包括电气电源和控制电源及相应进行监视的隔离系统。需通过的闸门大小应考虑大型遥控搬运装置和支撑设备的合理尺寸。
- 4) 平台、钢梯和人行通道：在确认使用遥控设备的地方，平台、钢梯和人行通道，为方便遥控设备使用应进行如下设计：
  - a. 平台尺寸便于遥控设备和维修人员使用；
  - b. 为产生最佳的生产效率，用于遥控设备活动的平台设置参数应与遥控设备形状相匹配(机身中部高度)；
  - c. 用于遥控设备活动的钢梯的梯级设计应考虑便于遥控设备的移动、推进和运输；
  - d. 提升遥控设备的升降井要靠近钢梯；
  - e. 在钢梯上为遥控设备宜采用摩擦制动或重力制动的轨道；
  - f. 竖向钢梯安全罩尺寸应便于遥控装置通过；
  - g. 用于遥控设备活动的标准化的人行通道，其开间尺寸、敞开角度、螺栓配置、排水设备尺寸和位置宜标准化；
  - h. 设计应考虑在遥控设备活动的轨道或支撑装置内，避免出现泥浆的堆积阻塞。
- 5) 遥控设备其它操作考虑：应用遥控设备的核电厂厂房特性设计，设计应包括便于遥控装置操作的其它专有特性：如辐照、内部检查、电气接线盒设置、充电、通讯和照明等。

#### 2.14.2.4.4 辐射防护要求

核电厂厂房设计和布置应满足：工作人员进入较低辐射区（或较低污染区）时不必穿过较高辐射区（或较高污染区），应把穿过辐射区和污染区的通行路线尽可能缩至最短。

对实施计划维修任务的人员数量和维修所需时间、工作区的预期辐射水平以及往返工作区的路径进行研究，以确认满足第1章：总体要求中的辐射防护目标值。

设计人员应根据核监管要求和现有的核电厂运行反馈确定屏蔽设计所用正常源项、停堆源项和事故源项。源项应考虑反应堆冷却剂水化学条件，包括添加剂。

#### 2.14.2.4.5 支持设施

核电厂厂区布置应提供支持核电站运行所需的办公室和其他设施。规定从其他厂区和场外进入这些设施的通道。划定重载运输路线以及荷载限制、屏蔽要求等。通道设计尽量减少

人员通过高噪音、放射性物质或不便于核电厂周围人员行动及行动受制约的其他危险或限制的区域。核电厂厂区布置应在重要和保护区域外提供适合的办公设施，尽可能减少必须进入高安全区域的人员数量。

核电厂厂区布置应为受污染和未受污染的设备提供车间和仓库设施。从核电厂其他区域以及从核电厂外部到这些区域的主要路线。特别是仓库设施应能通过外部走廊进入，而不必进入重要或受保护的区域。此外，受污染设备的车间和仓库的通道应与未受污染设备的相应通道分开，并应为封闭通道，以防止放射性物质进入环境。

#### 2.14.2.4.6 风雨防护设施

核电厂的布置和厂房设计应尽可能为设备提供防风雨保护，以防止恶劣天气的影响并为运行和维护人员提供舒适的环境。除了大型容器及其配套的支持设备、因安全原因不能放置在室内的危险品和通常设置在室外的大型设备外，所有发电设备均应设置在室内。当必须放置在室外的设备需要进行日常维护时，应制定保护人员免受天气影响的措施（即在需要维护的设备周围提供庇护所）。

### 2.14.3 总平面布置

#### 2.14.3.1 概述

##### 1) 目的

本章节提供了核电厂厂区设施布置的要求。内容涉及核电厂在建造、调试、运行及大修期间的厂区布置考虑及需要解决的注意事项。

##### 2) 厂址适用性

本章规定的要求，必须根据所选特定厂址的地形和特征进行适应性选取。如果相关要求与特定厂址条件不相符，则核电厂设计方应为电厂业主提出合理可行的解决方案。

设计人员应考虑核电厂多机组布置的情况，坚持尽可能利用厂址多堆机组建设的原则，节省厂址开发成本。设计应考虑多机组布置的相互影响并在合理条件下对有限厂址空间进行充分利用。在多机组厂址中应考虑多机组对辅助配套功能设施共同利用的可能性，但是通常情况下不建议核安全相关的设施采取共用设计。多机组核电厂应该参照复制原则而避免镜像原则进行布置，多机组布置时应避免汽轮发电机断裂或飞射物对反应堆厂房、主控制室等安全重要建构筑物影响。

##### 3) 布置设施的分类

核电厂厂区的设施主要分为以下几类：

主生产设施区（主要为核岛主厂房群和常规岛）：核岛主厂房群一般由反应堆厂房、燃料厂房、安全厂房、控制厂房（或电气厂房）、核辅助厂房、核废物厂房（也可做离堆设计）、运行服务厂房（内含卫生出入口）以及应急柴油发电机厂房等设施组成。常规岛一般由汽轮机发电机厂房及其附属设施组成。

辅助生产设施区：辅助生产设施区主要有配电装置设施、放射性辅助生产厂房（仓库）、非放射性辅助生产厂房（仓库）、厂内水输送及处理设施（包括厂生产用水、生活用水）、实物保护及辐射控制设施、储罐与材料堆场设施、厂区公用设施等。配电装置设施主要包括开关站、网控楼及相关输变电等设施。厂区公用设施包括运输设施（包括公路、铁路的进出和水路装卸码头设施、厂内进出道路和停车场等）、绿化、厂界围栏、厂区各类管沟及管廊等。

厂前建筑区及其他服务设施区：厂前建筑区主要由综合办公楼、档案馆、餐厅等组成。其他服务设施区包括宣传展览中心、培训中心和应急控制中心，武警营房、消防站、气象站、环境实验室、环境监测站、宿舍楼等组成。

施工建造区：布置应同时考虑核电厂在建造期间的施工区布置安排（用于建造方的管理、生产、组装、存储及生活服务设施）。

#### 2.14.3.2 接口

核电厂布局通常要与产业政策、电力负荷、区域发展、土地资源、环境保护、社会人口相协调，根据厂址条件、规划容量和核电厂生产、运维要求，厂内外设施、非居住区、施工区、防洪排涝设施、交通运输及设施、出线走廊等内容，并兼顾远期发展，进行统筹规划。核电厂区总平面布置应在总体规划基础上，结合特定厂址内的地形、地质、水文、气象、水源、厂内外运输条件和建设顺序等特点，落实生产流程组织、应急、安全、环境、卫生、消防、抗震、辐射控制、实物保护、人物流交通、土建施工、设备安装及检修、土方平衡等不同接口的要求。

#### 2.14.3.3 厂区总平面布置要求

##### 2.14.3.3.1 厂区布置原则

- 1) 满足核电厂近、远期规划容量及其配套设施所需用地面积。
- 2) 满足核岛等安全重要建构筑物和其它重要建构筑物对地基的要求。
- 3) 满足工艺流程、功能分区要求；应近远期结合，方便施工，有利于扩建；应满足实保要求合理设置控制区、保护区和要害区，合理划分放射区和非放射区。
- 4) 核电厂区用地应结合反应堆厂房位置和非居住区半径，应充分利用非居住区用地，减少征地拆迁和居民搬迁量。
- 5) 各配套设施应根据核电厂规划容量和分期建设要求合理配置，宜在满足有关规范且符合安全的前提下，相对集中布置并与核电厂区邻近。
- 6) 按照确定的核电厂设计基准洪水位要求，结合厂址地形条件，合理规划防排洪设施。
- 7) 因地制宜，优化主厂房与其它辅助厂房及循环水管沟之间的功能联系；冷却水取、排水系统和电力出线满足工艺流程，力求线路短捷顺畅，电缆和管道敷设距离尽可能短；起重机及吊装工具的通道，能够满足核电厂建设各阶段的使用需求。
- 8) 核电厂对外交通运输方式应结合当地交通运输状况合理选择确定，保证施工、运行和应急期间的运输需要；厂区内通道应满足消防、卫生、安全、实物保护、管网布置及施工安装等要求。交通运输应保证核电厂新燃料、乏燃料及放射性废物的贮存和运输安全。
- 9) 充分利用自然条件，减少厂区工程量和基建费用。

##### 2.14.3.3.2 厂区布置要求

###### 1) 厂区设施方位

华龙技术核电厂厂区建筑设施通常情况下需要满足以下的布局要求，其中对于特定厂址的特殊需求，设计方应统筹协调解决。

核电厂区布置宜位于附近城镇或居民区常年最小风频的上风侧。核岛厂房布置宜使其毗邻的常规岛有便捷的取、排水条件和电缆敷设条件，宜有利于放射性厂房成区布置，并处于盛行风向下风向，应有利于新、乏燃料和放射性废物的运输，厂房地基应在稳定的、岩土性质均匀的地基上，地基岩土参数应符合核电厂设计的要求。

汽轮发电机厂房布置应紧靠核岛，其汽机长轴方向宜与反应堆呈径向布置，应使循环水管线短捷，应使高压输电线出线方便，炎热地区宜使汽轮发电机厂房面向夏季盛行风向。室外配电装置宜布置在循环水冷却设施冬季盛行风向的上风侧。

放射性辅助生产厂房宜相对集中、独立成区布置在厂区一角，常年最小风频的上风侧且厂区地形最低的地段，且应有对外运输的单独出入口，并应布置在保护区内，与核岛之间的管线和道路连接方便便捷。

非放射性仓库宜集中或联合布置，各类仓库应按贮存物料的性质、管理特性，确定其朝向并设置必要的露天作业场地。仓库区宜靠近对外物料运输的出入口，宜布置在保护区外。机、电修理车间宜集中或联合布置，应设置必要的露天堆场和作业场，仪修车间应远离振源。

动力和气体供应设施宜相对集中于一区，并应靠近核岛、常规岛。压缩空气站应布置在主要服务对象附近或靠近负荷中心。贮气罐宜布置在压缩空气站室外较阴凉的一面。制氢站及氢气储供车间应单独布置，并应布置在常年最小风频的下风侧，应远离明火或散发火花的地点，宜在厂区边缘且不窝风的地段，泄压面不应面对人员集中的地方和主要交通道路。

为降低污染物对主厂房区的影响，废气处理厂房、污水处理厂、任何气态氯设施等应尽可能设置在主厂房区下风向位置。循环水系统的主要进水（和排水）与汽轮机厂房之间的管道布置应力求短捷，并应减少相互之间及与其他管线的交叉。

冷却塔宜靠近汽轮发电机厂房，不宜布置在厂区扩建端，不宜布置在室外配电装置和主厂房建筑群冬季盛行风向的上风侧。冷却塔的组（强制通风）方向应以主要通风冷却效果最佳化的方式确定方向方位。冷却塔应与安全重要建筑物、构筑物保持安全距离，确保其损坏不会危及抗震Ⅰ类建构筑物，最大程度减少其他设备的损坏。

厂前区建筑宜布置在厂区常年最小风频的下风侧，其中餐厅宜布置在厂前区常年或夏季盛行风向下风侧，宜集中布置在保护区外且对外联系方便、面向厂外主要干道的地段，并应靠近厂区主要人流出入口处。

宣传展览中心、培训中心和厂区生活服务设施可集中或分区布置，宜靠近厂前区，布置在进厂道路附近，并应布置在控制区外。

武警营房应布置在靠近核电厂且交通便利地段，满足核电厂保卫、实物保护、突发事件和应急状态下的处置要求。

消防站宜设在厂前区边缘，在通往厂区主厂房建筑群最短捷的出入口附近，或布置在责任区的适中位置，并能顺利通往责任区内各个地段，应保证在接到报警后5分钟内消防队可以到达责任区边缘。

应急控制中心布置应设在厂址征地边界内与主控制室相分离的地方，应保证应急期间的应急指挥人员可以快速到达，并满足在严重事故状态下的可居留性要求。

气象站应符合国家有关气象技术的法规标准要求，应布置在核电厂厂址盛行风向的上风向。其位置能较好地反映本地气象要素特点，四周应空旷平坦，海拔高度宜与厂址地坪相适应；由气象站探测的气象信息能用于判定放射性气体在核电厂大气水平方向和厂区环境中散逸释放等技术问题。

厂区出入口设置应满足人、货分流和应急撤离要求，应设有两个不同方向的出入口，其位置应使厂内、外联系方便，且方便进厂道路与地方公路的连接。

## 2) 厂区排水

核电厂厂区排水能力应确保厂区可能的最大降水量及邻近区域地段疏排来的水流不会淹没厂区，将由降雨导致的洪灾淹没厂区的可能性降至最低。核电厂厂区排水应结合地形、地质条件、竖向布置充分利用和保护自然的排水系统。场地排水宜采用管道式排水，当设置排水管道有困难或经济上不合理时，可采用明沟排水方式。挡土墙、边坡坡顶应设截水沟。当采用管道排水时道路雨水口的型式、数量和布置应按汇水面积范围内的流量、雨水口的泄水能力、道路纵坡和路面种类等因素确定，场地雨水口设置应按汇水面积范围内的流量和雨水口的泄水能力等因素确定。

## 3) 厂区地坪标高及土建埋深



#### a. 厂区地坪标高

厂区地坪标高应满足生产、运输与装卸、工程管线布置、防洪、场地排水、土石方平衡以及施工等要求。核电厂场地标高应符合安全应急的要求，需要考虑超设计基准水淹情况（设计基准洪水水位情况下，叠加千年一遇降水）。安全重要建、构筑物的场地标高应高于设计基准洪水水位，并应考虑相应的波浪影响。常规岛区域场地设计标高应高于防洪标准（重现期）0.5m。核电厂的设计基准洪水应按《滨圩核电厂厂址设计基准洪水的确定》HAD101/08或《滨海核电厂厂址设计基准洪水的确定》HAD101 /09 确定。

建筑物的室内地坪设计标高应与联系密切的车间、仓库之间所采用的运输方式相适应，进入建筑物的运输线路应符合相应技术条件，应考虑燃料容器操作设施通道进行燃料桶装卸作业的便利性。

易燃、可燃、腐蚀性液体仓库室内地坪宜低于仓库门口的地坪，或入口处设置门槛，应确保液体无外流的可能。固定露天（仓库）堆场地坪标高宜高于周围场地。山坡地区厂区竖向布置，在满足生产、运输等要求下，宜采用阶梯式布置。当电厂采用直流冷却供水，场地标高与取水标高相差较大时，宜将反应堆厂房与汽机厂房错层布置。

#### b. 厂区土建结构埋深

厂区土建结构埋深考虑如下：

- 核岛厂房群：反应堆厂房土建结构埋深应在建造施工成本、正常运行维护、维修便利性等因素之间取得合理平衡。反应堆厂房安全壳及其它核岛厂房的土建结构埋深应满足有关车辆通道能够直接从室外地面到达厂房内位于吊装操作平台下方的设备维修转运通道的要求。
- 常规岛汽轮机厂房：常规岛汽轮机厂房应具有适当的结构埋深。其结构埋深是根据厂址条件、循环水取排水方案、建造成本、汽轮机冷端优化及凝汽器布置高度要求来确定的。

#### 4) 厂区分区、安全及防水

场地布置应按生产功能联系，人物分流、安保要求、放射性控制、环境污染等进行分区和区内相对集中布置。场地内具有同类需求、用途的建筑物或设施，应根据功能相互联系考虑进行简短便捷路线的布局，并避免生产与施工、维修和运行等交通流线的相互交叉干扰。厂区内综合管线设施也应进行分区和集中布置，尽量减少路线相互干扰。应对主蒸汽和给水管线、发电机隔离段管道、循环水管道、动力线、放射性控制区域的排风管线和公用设施给予特殊注意，以降低成本，并减少人员不必要的接触。

处理潜在有害材料的厂房或设施(如氯气罐、氢气罐、酸罐等)不应设置在安全控制设施的附近。电厂设计方应对靠近控制设施的相关危险厂房或设施进行评价，并应采取措施降低此类设施污染或进入控制设施的可能性。

#### 5) 厂区外部接口

核电厂区布置的以下外部接口：

- a. 供水包括生活用水、厂用水和冷却水路线；
- b. 厂区排水、下水道和污水管道排出路线；
- c. 电力输入和输出路线；
- d. 运输（如铁路、公路、海运或河运）路线。

#### 6) 厂区综合管沟、管廊

管线综合布置应结合厂区机组容量、厂区建筑布置、厂区地坪标高、交通运输以及管线特性、施工维修等基本要求统一规划；应使管线之间、管线与建构筑物、道路、铁路之间，在平面及竖向布置上协调紧凑、安全合理。

当核电厂分期建设时，厂区管线综合布置应按规划容量统一规划，近期集中，远近期

结合，近期管线穿越远期用地时，不应影响核电厂将来的扩建和发展。地下综合廊道内宜预留远期管线布置的空间。近期管线布置时考虑与远期管线的接口衔接关系。

管线地下或地上敷设方式的选择，应根据管线内介质的性质、生产安全、辐射防护、卫生、检修和美观等因素经技术经济比较后择优确定，在符合安全、辐射防护、卫生和检修等条件下，管线宜采用共沟或共架敷设。

管线布置应短捷顺直，适当集中，管线与建筑物、构筑物、铁路、道路应平行布置，管线与道路、铁路及其他干管应减少交叉。一般管线不宜穿越与其无关的建筑物、构筑物，必须穿越时应采取相应措施来确保建筑物和管线的安全及正常使用功能。管线布置应满足管道防冻要求，地下管线不应敷设在酸、碱等腐蚀性物料的装卸场地下面。在严寒或寒冷地区，给水管道、排水管道直埋时应位于冰冻线以下。地下管线不宜布置在建、构筑物的基础压力影响范围内，并应考虑管线在施工和检修开挖时，对建、构筑物基础的影响。架空管线布置不应影响交通运输、人流及消防车通行，满足实物保护要求，多管共架敷设时管道的排列方式及布置尺寸应便于管道安装和维修，且保证管架荷载分布合理和避免相互影响。安全级重要廊道应满足地基和抗震要求，宜布置在稳定的、岩土性质均匀的地基上，地基岩土参数应满足抗震Ⅰ类物项的要求。

通行管廊和管沟应布置相应的人行道、入口通道、阶梯、照明和通风，以便满足在核电厂施工期间和日后进入进行施工、维修和检查需求。应保存地下通行管廊和人孔准确的建造记录。所有的电缆管道、管廊和管沟应具有相应的排水性能。排水系统设计应尽量减少所需的排水泵数。所有的电缆通道、管廊和管沟布置应保证其不会成为可能造成厂房内部水淹的进水路径。

#### 7) 厂区施工场地

施工区规划应包括施工生产区和施工生活区。施工区用地内不应设置永久性设施。

施工生产区宜布置在厂区扩建端，且靠近施工场地和对外交通运输方便的地段。施工生产周转场地及临时堆场宜利用扩建工程用地。

施工生活区宜靠近核电厂或电厂附近县、乡镇，且应交通运输便捷，并应具有一定规模的生活配套条件。

施工生产区应合理规划施工生产临建、设备材料堆场、建筑垃圾堆场及施工临时供水、供电、供热等设施，并应布置紧凑、分区明确、节约用地。

施工生产区应按核设施质量保证相关要求为交付的设备提供相应防护等级的设施。应避免施工现场因腐蚀或其他环境破坏而发生交付设备丢失或损坏的情况。

施工生产区所确定的主要运输路线的道路设计应考虑不同天气对道路使用的影响（包括高温、雨雪雾天、路面结冰等），尽量确保在恶劣气象条件下路面可用性，满足重型车辆及设备的运输。

在施工开挖区的护坡工程应安全可靠并符合相关标准规定的要求，并满足相关起重机和其他交通工具吊装和运输设备的要求。

施工区宜设置单独的临时排水设施，以及适当的照明和防雨设施。

#### 8) 厂区交通运输

核电厂交通运输应结合当地交通运输现状和发展规划，应满足核电厂生产运行的运输、建设期间的运输和核电厂应急计划实施的要求，且应便于经营管理，兼顾地方交通运输。

对外运输方式可采用公路、水路、铁路进行联合运输。大件设备的运输宜采用水路和公路联运的方式。核燃料、乏燃料、放射性废物运输应选择安全可靠、路径短捷的运输方式。运输路线宜避开繁忙的国家干线，应避免穿越城镇居民区。

核电厂应设置执行应急计划所需的场地、撤离道路、运输和通信方面的设施。

核电厂进厂道路应合理利用现有的国家公路及城镇道路，设置不同方向的主要和次要进厂道路，与国家公路或城镇道路连接的进厂道路线路应合理、短捷。

核电厂内道路布置应满足生产、运输、安装、检修、消防及环境等要求。厂区内所有区域和建构筑物均应设有疏散路线；厂区交通运输布置，应使物料流程顺畅短捷，并宜做到人货分流和避免交叉，放射性物流与非放射性物流宜分流运输。厂内道路宜平行或垂直于主要建、构筑物，主厂房建筑群四周应设环形道路。

核电厂的厂内、外道路设计应考虑在建造和运行期间大件设备或大型模块的运输、装卸对道路设施和作业场地的要求。厂区通道宽度应满足建构筑物、露天设备对防火、防爆、卫生间距的要求，并符合管线、管廊、道路等布置要求。

铁路和公路线的布置应尽可能减少大量有害材料（可燃、爆炸等）紧靠安全相关厂房进行运输的情况。铁轨的布置应使发动机失控时不会损坏安全有关的建筑物或设备。

#### 9) 厂区绿化

核电厂绿化应根据自然条件和厂内各区的功能和性质应统一考虑布置。

核电厂保护区内不应绿化。

冷却塔区周围的空地在不影响冷却效果和不污染水质的前提下宜进行绿化。挡土墙、护坡宜进行垂直绿化。

### 2.14.4 核岛厂房

#### 2.14.4.1 通用要求

##### 2.14.4.1.1 总体布置

- 1) 核岛厂房及常规岛厂房的布置与设计应考虑核电站运行的安全性、可靠性、施工和维修的便利性及经济性、设备可达性。总体布置应满足核蒸汽供应系统和发电系统功能要求进行布置。
- 2) 应遵照功能分区原则进行，各个不同功能的系统、设备，按功能分区，合理划分放射性厂房和非放射性厂房的位置。厂房布置要考虑采取隔离措施，防止内外部灾害。
- 3) 布置设计中考虑操作通道、维修通道、人员通道以及疏散通道及临时工作区通道。
- 4) 布置设计应采取相关措施以便于使用机器人进行电厂维修活动，包括提供便于移动的布置、进入设备必要的进口、机器人通讯以及机器人储存和去污等。
- 5) 辐射防护ALARA原则，即合理可行尽量低。
- 6) 高放射性区应尽可能紧凑，在满足防火疏散要求前提下设置一个出入口。
- 7) 电缆和管道敷设距离尽可能短。
- 8) 在贯穿墙体和楼板时，尽可能地采用多根管道共同开孔。但统筹考虑不同热胀程度管道进行合并贯穿孔洞，以免增加封堵设计的难度。工艺管道与电气应分开设置贯穿孔洞。
- 9) 主厂房与其他辅助厂房及循环水管沟在功能上的相互联系。
- 10) 安全壳和主控制室外的安全级和非安全级系统，应通过防火屏障实现防火分隔。
- 11) 厂区供电高压输电线路的连接。
- 12) 厂区基准标高的确定应考虑暴风雨、河流和海水水位变化带来的潜在水淹。
- 13) 设计应考虑起重机及吊装工具的通道，能够满足电厂建设各阶段的使用需

求。

14) 建筑学、厂区周围的景观美化及环境养护。

#### 2.14.4.1.2 设备布置

- 1) 设备布置应满足工艺设计要求。
- 2) 设备布置应满足核岛厂房总体布局要求。
- 3) 设备布置应充分考虑有毒、有害、可燃、可爆炸、高温等工艺设备对人员及周边物项（尤其是核安全物项）的危害，应采取防范措施用以避免或减少其危害。
- 4) 设备布置应充分考虑设备的分级（含核安全功能等级、抗震等级、规范等级及质保等级等）及类别（比如储罐、泵、除盐床等），合理的分区布置。
- 5) 设备布置应满足与其核安全重要性相对应的内部灾害和外部灾害防护要求。
- 6) 设备布置应充分考虑其放射性的影响，避免增加人员不合理的辐射照射，避免造成环境污染或不合理的增加放射性废物的量，并满足国家相关的辐射防护规定。
- 7) 设备布置应根据设备本身的特点，合理的设置运输路径、搁置空间、安装空间、操作空间、运行和维护空间、在役检查空间、替换空间及退役空间，用以满足建造、运行、维修、在役检查和退役的要求。
- 8) 应为设备的安装、操作、检查等活动提供适当的附属设施，比如钢平台、钢爬梯、起吊设施等。
- 9) 设备布置应充分考虑核电厂的运行要求、运营单位提出的合理要求及运营人员的能力和局限性，确保能安全高效的运行核电厂。
- 10) 设备的布置应便于核电厂的退役。
- 11) 设备的布置应在满足工艺要求、总体布局、安全性的、安装维护空间要求等前提下，尽可能的减少放射性废物的产生，尽可能减少占地，减少管道和线缆长度，节约电能，以提高整体经济性。

#### 2.14.4.1.3 支架布置

- 1) 支吊架（用于工艺管道、风管、电缆桥架、护管等物项的）设计应选用适当的标准，即在满足支吊架功能要求和安全要求的前提下，优先选用更经济的支吊架标准。
- 2) 支吊架结构的设计应尽量简单，支吊架的类型应尽量少。尽量采用标准化设计，但应充分考虑经济性。
- 3) 支吊架的设计和布局应考虑便于操作和维护，避免干扰其他物项的检查、操作、维修等活动，否则应设计成可拆结构。
- 4) 同一系列的安全相关系统管道及支管宜采用共用支吊架。应避免不同专业物项使用公共支吊架，否则需核实管道间附加影响。
- 5) 除非必要，应尽量减少在放射性污染区内布置支吊架。
- 6) 支吊架生根形式主要有钢结构生根、预埋板生根及膨胀螺栓生根形式。优先采用钢结构生根和预埋板生根形式，膨胀螺栓生根形式可作为预埋板生根方式的补充方案。安全壳上不允许采用膨胀螺栓生根形式。
- 7) 应尽量减少使用流体阻尼器，尽可能使用标准或行业认可的震动吸收装置。在必须采用流体阻尼器处，例如蒸汽发生器支撑，需明确测试要求，测试要求应包括测试方法和频率，并确保测试缓冲器的动态特性。

- 8) 支吊架设计应在满足功能要求、安全要求和空间要求的前提下,尽可能的经济。
- 9) 支吊架的图纸应包含相关所有信息,图纸要求如下:
  - a. 常用的配件及小支架可使用一套典型图纸;
  - b. 其它支架应配备相应的支吊架图纸;
  - c. 支吊架所在的管道图、电缆图及风管图等图上,应通过系统元件,管道元件等进行定位;
  - d. 支吊架图纸内的要求:
    - 关键尺寸及其公差应标识清晰;
    - 支吊架图中应包含完整的材料清单;
    - 支吊架图应包含焊接文件及所有现场焊点;
    - 支吊架图中应明确支吊架检查要求;
    - 必要的技术说明。

#### 2.14.4.1.4 管道布置

- 1) 管道布置应满足安全列的隔离、系统内设备的逻辑分组、系统设备可操作性以及维修通道的要求,以减少火灾、高能管道等内部灾害造成的间接破坏。
- 2) 满足系统功能要求下,管道长度尽量短。管道的高低点数量保证最少。尽量采用弯管代替弯头。抗震管道不宜布置在非抗震管道下方,如无法避免,应采取评估其影响可接受或单独布置。管道布置应避免形成水锤。
- 3) 为了维修和定期检查应设置永久或者临时出入通道;管道布置应遵守不阻碍主要设备的运行和维修的原则。
- 4) 安全壳主蒸汽管道应尽量路径简短,且避免影响操作平台上的设备布置;电厂设计应避免噪声大、振动严重、散热量大的管道靠近主控制室。
- 5) 法兰连接只在需要日常维修的设备上使用,如泵等设备。流量限制器的位置应满足正常运行的直管长度的要求。
- 6) 阀门应布置于易接近操作和维修的区域。管道布置为管道保温层提供安装空间,管道的保温层在需要时可快速拆卸。
- 7) 所有管道宜根据流向设置坡度。树脂、放射性泥浆管道应连续坡度到箱体。
- 8) 硼酸管线应布置在满足温度要求的房间内,否则应考虑伴热。
- 9) 对放射性和非放射性管道尽量进行隔离,运送放射性液体的管道尽量只通过控制区,并且尽量短。放射性管道尽量接近其目标设备,或者布置在屏蔽结构之后,或者远离正常通行区域以减少人员在正常运行及检修期间的剂量。对于低流速或间歇运行的放射性管道,应避免使用垂直膨胀补偿,避免U型积污;地面排水应设置水封装置,避免放射性气体通过管道流通。
- 10) 放射性系统的管道布置应避免死管段和存污管段。管道焊缝不能导致活化腐蚀。放射性管道避免采用承插焊接。
- 11) 管道、仪表、电缆桥架和暖通风管应靠近土建结构进行布置,以便于生根支架。在满足相关的隔离要求外,工艺管道、风管和电缆导管等管道应集中布置。

#### 2.14.4.1.5 暖通布置

- 1) 主控制室所需的所有空气调节装置、过滤、净化和加压设备建议设置在主控制室压力边界外的单独设备室。
- 2) 建筑物房间或小室的气流,应从较清洁区流至污染区或可能污染区。

- 3) 对于可能污染的那些小室, 建筑物墙和(或)楼板之间的抗震缝应加以密封。
- 4) 通风系统的进风口应布置在尽可能高的地方, 而排风口的布置位置不应导致排气直接回流到新风口。
- 5) 通风进气口应设置成能减少污染空气进入的可能性。
- 6) 除风冷机组等特殊要求的设备以外, 空气处理机组、冷水机组、冷热盘管、风阀和风管等设备应布置在厂房内部。

#### 2.14.4.1.6 电仪布置

- 1) 电缆桥架、传感器、相关支架、仪表管线和导管应与高能管道系统以及阀体和法兰保持足够的距离, 以防止由于环境温度升高而降低电缆载流量和/或使用屏障的必要性。如有可能, 应使电缆穿过电厂低温区域, 而不要穿过温度会升高的房间。
- 2) 传感器和相关支架、仪表管线布置应满足安全列的隔离、系统内设备的逻辑分组、可操作性以及维修通道的要求, 以减少火灾、高能管道等内部灾害造成的间接破坏。
- 3) 在安全系列内的多层电缆桥架系统之间, 至少应在上部桥架底部和下部桥架顶部之间留出至少150mm的垂直间距, 并在相邻桥架之间留出至少100mm的水平间距。电力系统中规定了冗余安全系列之间的隔离要求。从而为电缆牵引设备提供足够的空间。
- 4) 在可行的情况下, 应在电气装置的入口处设置滴水环路, 电气导管应从顶部进入, 并在需要维护设备合格性时作为设备密封型硬件的替代品。只有在滴水环路的最低点不允许通过管道绕过环境屏障的情况下, 才应在每个滴水环路的最低点提供一个排水点。当滴水环路不可用时, 则应提供其他方法来防止水分进入导管。这种布置将满足制造商的要求并保持设备环境条件。排水点可确保水分不会聚集在导管中。
- 5) 在电缆沟槽中, 电缆桥架支撑结构应采用落地式安装, 且只能安装在干燥的区域。电厂设计者应论证其技术可接受性。
- 6) 在设备布置、电缆桥架路径和导管路径的设计中应包括电缆牵引规划, 以便在可行的范围内最大程度地牵引电缆。电厂设计者应将这些信息形成文件以便建造单位使用。
- 7) 为便于电缆敷设, 应酌情将各桥架通道和走廊指定(分配)给各个安全系列。

#### 2.14.4.1.7 通道设计

- 1) 人员通行通道
  - a. 人员通行通道尺寸宽度不小于 0.6 米, 高度宜按照大于等于 2.10 米控制, 最低应不低于 2.0 米。当营运单位提出其他合理要求的, 可按营运单位要求进行适当调整。
  - b. 应确保所有设备的操作、检查或维修等活动的位置的人员可达性。
  - c. 应在高差超过一个台阶高度位置设置台阶, 并设置警示标识。台阶高出侧面 500mm 以上时, 应考虑设置扶手或护栏。
  - d. 受控人员进入厂区的通道应设置足够的通行控制设施, 通行控制门应满足在 30 分钟内 500 人通过的最大人员流通能力要求。出入口部分应有足够的缓冲空间, 并对出口和入口的通道进行分隔。

## 2) 设备运输通道

- a. 应确保在不破坏厂房结构、不拆卸管道、电缆及其他物项的前提下，对设备进行运输，除非营运单位有特殊要求。
- b. 应尽可能减少在设备运输路径上出现不台阶，如不可避免，则应采取适当应对措施。

## 3) 人员疏散通道

- a. 疏散通道的数量和宽度都应满足最大通行人数的要求。
  - b. 疏散路线通道的净高请按照 GB/T22158 执行。
  - c. 疏散路线通道的宽度应满足如下条件：
    - 疏散通道的宽度以0.60m为基本宽度单位。
    - 当为1个基本宽度单位时，宽度为0.9m。
    - 两个基本宽度单位时，宽度为1.4m。
    - 当疏散人流大于2个基本宽度单位时，疏散宽度的数值为0.6m的倍数。
    - 从楼梯口（不含门）至安全出口间的疏散通道的最小宽度请按照GB/T22158执行。
  - d. 安全疏散距离应符合下列规定：
    - 除反应堆厂房，其他厂房内从任意工作点到疏散楼梯的距离 $\leq 40\text{m}$ 。
    - 任一疏散楼梯间在逃生层到建筑物安全出口的距离 $\leq 20\text{m}$ 。
    - 逃生通道的袋形走道长度请按照GB/T22158执行。
  - e. 电梯和升降机不应作为安全疏散设施。
  - f. 为便于使用卡车和手推车，主通道(疏散通道和主通行区域)上禁止设置单独台阶。
  - g. 疏散通道应设置清晰的永久性指示牌、安全照明、应急照明等。标识指向最近的安全出口。
  - h. 正常运行情况下，疏散通道应经由楼梯间和走道通过进出厂房到达室外。除紧急出口外，不允许从放射性控制区域疏散至非放射性控制区域或直通室外。
  - i. 疏散通道布置应力求简捷，避免迷宫式、口中门的设计，出入路线尽可能短直。尽量避免单一疏散路径、袋形走道，不可避免时应尽量短，且应免受火灾威胁。
  - j. 所有可达房间应至少设置一个出口，该出口能直接或穿过其余房间到达受保护疏散通道。
  - k. 使用频率较高且面积超过 180 平米的房间应设置第二个出口(相对于第一个出口而言)，以便能直接到达或通过其它房间到达受保护疏散通道。两个出口需分散布置。
  - l. 可采用较小的非安全楼梯间作为第二种替代撤离方法，例如，辅助楼梯间、圆形楼梯间。如有必要，可使用梯子。但出于职业安全的原因，勿将梯子作为通往房间或隔间的唯一方式，而只能作为替代撤离方式。
- ## 4) 门
- a. 主要疏散楼梯间的门和其他房间的疏散门应向疏散方向开启，除了下列情况：
    - （除甲、乙类生产车间外）人数不超过60人且每撞门的平均疏散人数不超过30人的房间，其疏散门的开启方向可以不限。
    - 由于两侧的压差原因，疏散门不宜朝疏散方向开启；
    - 其他特殊原因导致门无法朝疏散方向开启
  - b. 应考虑在电厂寿期内运输重型设备的门槛便于拆除或采取其他措施。
  - c. 当门两侧通风系统独立设置形成压差时，应保证门的正常开启和关闭。（包括事故工况下形成极大压差时）。

- d. 停堆换料期间,用于管线临时穿过的洞口应在门旁设置,其封堵后耐火极限与门相同。
- e. 厂房的疏散用门不应采用推拉门、滑升门。
- f. 设置变形缝的两个厂房之间的门,两侧墙上的洞口尺寸应一致并对齐。
- 5) 楼梯
  - a. 所有疏散楼梯间在各层的平面位置不应改变,并通至厂房出口所在的楼层。
  - b. 梯段改变方向时,扶手转向端处的平台最小宽度不应小于梯段宽度,并不得小于 1m,当有搬运大型物件需要时应适量加宽。如需要,平台的宽度宜考虑便于担架水平转向通过。
  - c. 楼梯平台上部及下部人员通行通道尺寸应按照 GB/22158 执行。
  - d. 楼梯踏步基本尺寸宽度 W 为 0.22-0.32m,高度 H 为 0.14-0.21(优先选 0.18m,高度可根据具体情况在 0.17m 到 0.19m 之间调整),总范围控制在: $0.6m \leq W+2H \leq 0.64m$ ,同一段楼梯的踏步尺寸应保持一致。
  - e. 对于疏散楼梯间,厂房出口所在的楼层的上升段和下降段应分别设置门进行分隔,并设置明显的标识,以保证人员疏散至正确的楼层。
- 6) 廊道
  - a. 最大间距:
    - 两个安全出口之间的距离:有高能管道时不超过70m,其他不超过350m。
    - 通道袋形区:有高能管道时不超过10m,其他不超过50m。
  - b. 通行最小尺寸:
    - 正常通行宽度不小于600mm。
    - 疏散通道宽度不小于900mm。
    - 高度不小于2200mm。

#### 2.14.4.1.8 安全设计

- 1) 内部火灾防护设计要求
  - a. 电缆布置位置距离外表面温度高于 100°C的管道、设备或者包含易燃物质管道、设备应该不少于 1m,除非该电缆用于为管道和设备提供供电或者控制服务。
  - b. 电缆托盘、仪表管穿过防火分区边界时需要穿孔位置进行防火封堵。
  - c. 反应堆安全壳上的电仪贯穿件应该与机械贯穿分开布置。
  - d. 低压电缆或者采用防火保护措施(如防火包裹)的设备、电缆可不将其考虑为点火源。
  - e. 对于竖向电缆的情况,每层的楼板位置应该设置挡板,如果某层天花板和楼板之间的距离超过 8m,则应该每隔 5m 设置耐火隔板,以防止火灾的蔓延。
  - f. 对于水平电缆的情况,如果电缆托盘距离天花板的距离少于 1m,且未安装水基的固定灭火系统,则应该每隔 25m 设置耐火隔板,以防止火灾的蔓延。
  - g. 安全相关控制电缆,测量电缆敷设的沟槽不应有被易燃液体侵入的可能。
  - h. 不同列的电缆应该通过防火屏障进行实体隔离。
  - i. 正常供电电缆和应急供电电缆可以安装在同一个房间内,非安全级电缆和安全级电缆可以安装在同一个房间内。
  - j. 电气配电盘和仪控机柜布置在不同的房间,动力电缆与控制及测量电缆需要布置在不同的桥架上。
  - k. 远程停堆站的电缆不能被主控制室的火灾影响。
  - l. 电缆应尽量采用下进线的方式连入机柜。



m. 人员疏散通道防火区内尽量不考虑布置电缆托盘、机柜等，如无法避免，则考虑保护措施。

n. 应该考虑动力电缆的发热效应，对于动力电缆穿过较厚墙体的情况，应该避免在墙壁两端均安装封堵，以防止热量积累。

o. 电缆包裹可以用于降低可燃物风险特性，也可以用于安全列之间的隔离。

p. 尽量避免三层（含三层）以上主托盘平行集中布置的情况尽量不设多层水平桥架，如必须设置则需要考虑给桥架上方留有足够的空间以便设置固定灭火系统。

q. 所有电气柜和电缆密闭间必须易于接近以便于灭火，同时必须遵守有效的电气安全规则。

r. 尽可能减少电缆布置在其他冗余列的情况，以避免带来的共模风险。若在设计中不可避免出现这种情况，则必须采取措施进行防护。

s. 不同保护组的仪控电缆、机柜应尽量进行实体隔离，避免一场火灾导致多于一个保护组的电缆失效，引起保护组误动作。

t. 只要可行，油压管道应当敷设在金属套管内或布置在混凝土地沟内以防止管道破裂时发生油扩散。

u. 安全级暖通设备不应布置在人员疏散防火分区或非功能性防火分区内。

v. 为疏散通道正压送风的风机应尽量布置在该人员疏散防火分区内。

w. 排烟系统的风机应布置在所服务区域防火分区之外。

x. 防火区的新风入口必须远离其他防火分区的排风口和排烟孔，远离的程度必须足以防止吸入烟气或燃烧产物，以防止火灾蔓延造成重要安全物项失效，或者可能导致放射性物质不可接受的释放。

y. 若通风系统的过滤器所用滤芯是可燃的，且这些过滤器失效或故障引起的放射性物项释放不可接受，则必须用适当的防护屏障将过滤器组与其它设备隔开，必须防止过滤器受火灾影响，必须于过滤器组前后的风管内安装火灾探测器。

## 2) 内部水淹防护设计要求

a. 电气和仪控设备可能由于水淹出现失效，单电缆不认为受到水淹影响，除非水淹的部位是电缆的接头位置。因此设备和电缆接头位置应布置在水淹风险较小的区域。

b. 考虑到液体管线可能导致的温度、湿度、射流、水淹等效应对电仪设备的破坏和影响，在布置时应考虑电仪相关设备远离液体管线或实体隔离。

c. 考虑到机柜本身对火灾蔓延有一定的阻隔作用，且设备功能易被水影响。电气机柜间一般不设置水基的固定灭火系统，仅设置火灾后排烟措施，因此机柜间尽量布置大量电缆、油或者其他快速可燃物，以保护设备可用性。

d. 应优先考虑流体系统，储存水箱与安全级设备支架的实体隔离。

e. 电气、仪控机柜所在的房间内应避免液体管道经过。

f. 主控制室及燃料干式贮存区禁止布置液体管道。

g. 若暖通风管穿越不同的水淹分区，应尽量通风口位置高于所在区域的水淹高度，避免水在不同水淹分区间蔓延。

h. 冷冻水和热水管道不应穿越乏燃料水池区域、核燃料干式贮存区和主控制室。

i. 冷冻水和热水管道尽量避免穿越电气间或者仪控机柜间。

## 3) 内部爆炸防护设计要求

a. 在具有爆炸风险的区域中需设计有除静电装置，用于人体静电释放，需设置风险警示装置，提示操作人员避免不当行为。

b. 应通过选择适当的电气部件（如短路器）和通过设计来限制电弧可能出现

的概率、大小和持续时间，把物理爆炸灾害（如那些由高电压电弧产生的爆炸）减至最小。

- c. 安全级电缆、电气机柜、仪表管线应远离具有爆炸风险的区域布置。
- d. 蓄电池间必须布置有氢气探测系统，设置有通风系统保证一定频率的通风换气。且必须采用防爆的电气仪控设备，以免出现电火花和电弧等。
- e. 高能管道尽量避免与含氢管道布置在同一房间，如不能避免，应尽可能远地分隔布置。
- f. 蓄电池间排风管道应尽量避免穿过安全级物项所在的区域。
- g. 含氢气管道布置路径上有可拆卸部件（法兰、阀门等）的位置所在区域应采用氢气探测报警装置，并且配有通风系统。

#### 4) 内部飞射物防护设计要求

在安全列完全实体分隔的厂房（且屏障不会被飞射物突破，其影响可以限制在一个安全列）不需要对飞射物的防护进行详细分析，但如果两列及以上安全列的电气设备或者电缆、仪表管布置在同一个区域，则需要关注周围是否有高能系统阀门、高能的罐体，在布置阶段应考虑避免该飞射物影响到多列冗余设备。

#### 5) 重物坠落防护设计要求

- a. 重物坠落可能发生在吊车吊运路径上的任何位置，安全级电缆、电气设备应尽量避免避开吊车的吊运路径，或者采用冗余列屏障分隔或距离分隔布置的防护方式。
- b. 尽量避免安全级管道布置在吊车的吊运路径垂直投影范围内。
- c. 应避免冗余安全级暖通系统物项同时布置吊车服务区域范围内。

#### 6) 管道破裂防护设计要求

- a. 对于高能管道，其破裂导致的局部效应如甩击、射流等荷载会导致安全级的电缆托架、电气设备、仪表失效。因此需关注布置位置的合理性。高能管道破裂或泄漏导致的高温、高压、放射性等全局效应对电气设备的影响。
- b. 不会引发设计基准事故：
  - 不危及一回路压力边界的完整性
    - 非一回路压力边界的高能管道断裂，不影响一回路压力边界的完整性；
    - 防止反应堆系统某一环路管道破裂导致同一环路或其他环路的其他管道破裂；
    - 二次侧的灾害不能影响一次侧的完整性。
  - 不危及蒸汽发生器二次侧边界的完整性
    - 其他管道破裂（包括一次侧管道的断裂）不能影响与蒸汽发生器连接的管道（直至第一道或第二道隔离阀），以保证二次侧压力边界的完整性。
  - 不影响安全壳完整性：
    - 甩击和射流不危及安全壳壳体结构的完整性；
    - 甩击和射流要保证安全壳贯穿区的完整性；
    - 安全壳贯穿区管道的长度要切合实际地尽量短；
    - 穿过双层安全壳环廊的管道，如果其假想破损会影响安全壳构筑物的承压完整性，或会引起安全壳环廊中的压力升高到超出其设计限值，则应设置封闭的防护结构（防护套管）；
    - 甩击和射流不危及布置安全级物项的厂房的主体结构稳定性。
  - 不影响缓解设计基准事故的系统物项的安全功能（需要考虑单一故障准则）：
    - 破口发生后，允许其所在列的系统功能丧失，但不影响其它冗余列的功能；
    - 安全功能仅有两套设施来保障时，不允许任何一套受到危害；
  - 不受影响安全系列之间的隔离：

- 工艺管道应布置在较低的位置，安全级电缆桥架尽量不布置在高能管道附近，以免甩击及喷射影响桥架的稳定性。但如果这种情况不可避免，则管道和桥架间的距离应符合布置要求。

- 避免冗余安全级暖通系统相关物项布置在同一高能管道甩击、射流的影响范围内；

- 同一列暖通风管尽量不穿越不同列安全设备所在的区域，以避免高能管道破口引起的蒸汽或水通过暖通管道影响不同列的安全设备。

#### 7) 飞机撞击防护设计要求

- a. 安全级电缆托盘的支架尽量避免固定在厂房外墙和屋面上，除非证明该区域不会受到飞机撞击或者该墙体在撞击情况下发生的变形、振动不会引起电缆、电缆托盘失效。

- b. 安全级厂房或廊道的某些结构可能无须抵御小飞机撞击。这些结构由于飞机撞击破损后不能影响安全级电缆和电仪设备的功能，或者通过防护设计避免这些影响。

- c. 安全级管道尽量避免固定在厂房外边界墙体及飞机撞击影响区域，如不可避免，冗余列安全级管道或不同环路的主管道应尽量分开布置，以防止飞机撞击对安全功能产生影响。

- d. 对冗余安全级暖通系统的送/排风口，应分开布置，同时通风口尽量朝不同的方向。

#### 8) 地震防护设计要求

- a. 安全相关厂房中的电缆桥架在地震中需要满足稳定性要求，以防止其失效可能导致火灾发生。

- b. 安全级的电缆、电气设备、仪表和仪表管需要满足相应的抗震要求，确保在地震情况下其功能便会丧失。

- c. 安全级电缆、电气设备布置、仪表和仪表管布置位置需保证其在地震情况下不被非抗震设备影响和破坏。

- d. 抗震管道宜布置在一起。抗震管道和非抗震管道应尽量分开布置、避免交叉。抗震管道、抗震阀门、抗震风管、抗震桥架和抗震设备的正上方不应布置非抗震物项，避免非抗震物项对抗震物项的影响。

- e. 抗震管道不应布置在非抗震的壁面、钢结构区域。

- f. 核岛房间内布置有安全级设备时，非抗震管道不宜布置在该房间内，除非经过评估后影响结果可接受。

- g. 含氢管道需进行抗震设计。

- h. 非抗震的暖通设备应避免布置在抗震设备上方。

- i. 冗余安全级暖通系统物项应避免布置在非抗震吊车驻车位置正下方。

#### 9) 外部爆炸防护设计要求

- a. 避免将安全级电缆桥架、电气设备、仪表和仪表管布置在厂房永久开口的房间或区域，若不可避免，则需评价其可接受性或设置防护措施。

- b. 避免将安全级管道布置在厂房外边界永久开口的房间或区域，若不可避免，则需评价其可接受性或设置防护措施。

#### 10) 极端气象防护设计要求

- a. 安全级电缆托盘的支架尽量避免固定在厂房外墙和屋面上。

- b. 避免将安全级电缆桥架、电仪设备等布置在厂房中有对外开口的房间或区域，除非证明该区域电仪设备不会受到极端气象条件（如强风、暴雪、暴雨、雷击等）的影响。

- c. 避免将安全级管道布置在厂房外边界永久开口的房间或区域,若不可避免,则需评价其可接受性或设置防护措施。
- d. 厂房边界和屋顶暖通系统开口应设置防雨水措施。
- e. 厂房边界安全级通风系统的开口应采取防龙卷风飞射物的防护措施。
- f. 厂房边界非安全级通风系统的开口(包括通风口、门、孔洞)附近应尽量避免布置安全级物项。

#### 11) 电磁干扰防护设计要求

对于厂房内的高压配电装置、电缆等应考虑提供适当的屏障进行防护以避免电磁干扰对安全级设备的影响。

### 2.14.4.1.9 辐射防护

#### 1) 设备布置的辐射防护

- a. 放射性部件应依据系统和辐射水平分组,减少非必要的分区隔离及维护,或涉及 ALARA 原则进行的隔离,从而可减少屏蔽。
- b. 安全壳外的管道贯穿区域应分为放射性区和非放射性区。相邻的放射性和非放射性隔间之间应提供屏蔽。
- c. 放射性管道和设备应与非放射性管道和设备隔离,以便在工作人员受照最少的情况下对非放射性部件进行维护,有必要连接的除外。
- d. 放射性管道和设备应尽可能利用现有结构作为屏蔽。
- e. 电子设备应尽可能组合封闭在一个隔间内,以便保持对环境的适当控制。
- f. 在设计基准事故(DBC)期间和之后运行所需的监测仪表和电气设备控制面板应位于可接近区域。
- g. 作为辐射照射重要来源的放射性部件,如过滤器、除盐装置和储罐,宜放置在单独的隔间内,如没有单独隔间,需则要经过评估。每个隔间应提供预期维护操作的空间。过滤器要具备无需进入隔间进行过滤器元件更换和潜在维修操作的措施,可将多个过滤器放置在一个公共隔间内。
- h. 积聚放射性物质的部件,如过滤器、储罐和除盐装置,应与同一系统的泵和阀门分开。
- i. 冗余放射性系统(包括管道、支架、阀门、泵等)应相互隔离。
- j. 放射性地坑和非放射性地坑应进行隔离。在布置有安全级设备的隔间,其地漏布置必须能防止水淹在隔间之间扩散。连续和经常使用的设备疏水需通过管道排往地坑。
- k. 容纳放射性设备的隔间入口可进行迷宫式通道或屏蔽门设计。

#### 2) 辐射区和屏蔽

- a. 设备屏蔽应布置足够的操作和维护空间。所有放射性设备及其部件的设计必须满足以下辐射防护要求:
- b. 可操作性,必须可进行检查;
- c. 可维护性,能够进行检查及按照要求进行维修操作;如法规要求,审管部门的要求,运行程序,运行维修手册相关要求等;
- d. 可更换性,对于设计使用寿命较电厂运行寿命短的设备,应可执行更换。
- e. 运行期间,由于高放射性水平不允许进入的隔间,手动阀、阀门操作装置、就地控制器、远程操作阀门或部件以及仪表盘应设置于屏蔽层外部。
- f. 在可能超过辐射区指定值的设备上提供(并根据需要使用)可拆卸的局部屏蔽。设计上应尽量减少拆除和更换时对人员的照射。

- g. 如果分析表明已超过设备的耐受剂量（特定设备可承受的剂量水平），则应在隔间内的设备之间提供屏蔽。
- h. 在电厂布置设计时评估屏蔽墙的可替代方案。设计替代方案包括设备重新定位、设备上的局部高密度屏蔽、其他非放射性设备的屏蔽等。
- i. 在临时屏蔽作为预期维护计划一部分的场所，应为临时屏蔽提供空间、支撑点和操作设备。
- j. 在放射性管道必须穿过正常可进入区域时，则应提供屏蔽套管。
- k. 高放射性部件应通过屏蔽或距离与低放射性或非放射性部件分开，或从布置上满足在运行、试验和维修活动中减少对人员的照射。
- l. 厂房布置应最大限度地使用共用屏蔽墙和楼板。

### 3) 高辐射区的设计

部件和系统的设计应消除在电厂运行模式下人员接触大于 $1\text{mSv/h}$ （高放射区）区域的可能。对于那些无法消除的区域，应在设计时尽量减少或消除对工作人员进行例行操作的需求。在需要操作和维护人员执行其职责时，应使用以下设计方法将辐射水平降至最低。

- a. 提供远程观察装置进行日常监视。
- b. 将阀门操作装置设置在低放区。
- c. 在低放射性区设置仪表指示器、电磁阀、控制盘和 E/P 转换器。
- d. 对于高放射性区的传感元件，在低放射性区设置转换读数装置。
- e. 仪表隔离阀位于屏蔽墙低辐射侧的贯穿件之外，以便在核电厂运行期间进行维护。
- f. 合理布置仪表及其隔离阀的位置，在不拆卸或拆除管道、格栅或其他结构的情况下使用、校准和维修。
- g. 使用长寿命及较少维修和校准的仪表设备。
- h. 使高放射性隔间的放射性监控器允许从临近的低放射区进行定期校准。
- i. 将穿过屏蔽墙的管道、风管设置在人员头部高度以上，以尽量减少对人员的照射。在辐射源和居留区域之间不应有直线贯穿孔道。
- j. 合理设置阀门位置并在必要时加装屏蔽，以便在阀门的维修时不会受到大的放射性照射。
- k. 管道布置应尽量减少应尽量减少穿越高放射性区。例如，通向正在维修的机柜内设备的支管总管，即使在冲洗机柜设备时也可能导致高辐射水平。
- l. 阀门及其驱动机构不会阻挡或占用设备维护所需的通道或走廊。
- m. 远程控制摄像机应设置于高辐射区域，以便对这些区域进行远程监控。
- n. 远程监控设备，包括音频、视频、人员展示、区域剂量率、设备运行参数等。
- o. 设计人员评估可能出现瞬态高辐射的区域（即：靠近燃料输送管、反应堆堆坑），通过将一般区域剂量率保持在正常、非瞬态水平，最大限度地降低此类瞬态源不必要辐射照射的可能性。
- p. 设计人员应确定，在正常和预期运行事件期间，人员在一小时内可能受到  $1\text{mSv}$  及以上辐射剂量的区域。应通过设计避免这些区域的可接近性，或者当无法通过设计消除时，应通过可靠的控制措施将潜在影响降至最低。

### 4) 污染控制

核电厂的布置和厂房设计应提供有下列特性的结构表面，以减少放射性污染扩散的可能性，且便于清理。

- a. 需要排水的地板表面应倾斜至排水沟或地坑，排水沟和地坑的尺寸应与清洗水流速适应。
- b. 含有污染流体的箱子和可能有污染流体泄漏的区域的周围应设置屏蔽。

- c. 可能存在放射性污染的结构表面（例如，混凝土和防火）应进行保护，并应防水，尽量减少污染物的吸收。这些表面包括操作台表面以及房间内可能发生泄漏和含有放射性污染的流体淹没或喷射的表面。

辐射控制区内的地下结构应采用先进材料衬里或耐用、耐穿透、光滑的饰面涂层。这适用于所有楼层的内部表面和形成外部边界的墙壁。

#### 2.14.4.1.10 结构设计

##### 1) 基础

基础和上部结构的设计应考虑防止放射性液体渗透到地下水中。

##### 2) 结构之间的相互影响

当经济且可行时，可使用整体结构；当整体结构不适用时，结构之间应设置抗震缝，以避免地震时厂房之间的相互影响。厂房设计时应尽可能采用统一的楼板标高，方便厂房之间建立通道，有利于材料和设备在不同厂房之间运输。

##### 3) 厂房构造

设计时应适当考虑后续施工方法和难度，适当考虑可预制构件及组合构件，尽量减少现场施工工作量，缩短施工工期。混凝土墙体设计时应考虑所需设置的预埋件及管道，以避免局部钢筋密集干扰。设计时应考虑附着物的局部效应以及对整体结构的影响。

##### 4) 厂房布置

除安全壳外的厂房平面应尽量设计为矩形等规则平面，楼层高度及柱间距尽量一致，同一楼层上的房间及通道尺寸尽可能统一。

##### 5) 混凝土设计

- 楼板和墙体施工图上应标明所有的预埋件和贯穿件，并注明详细信息；
- 结构设计应允许采用大块整体式混凝土浇筑；
- 应考虑在垂直的结构缝中使用金属网片；
- 应考虑使用减水剂以提高钢筋与预埋件密集区域混凝土浇注质量；
- 混凝土墙和楼板设计时应考虑如下因素：
  - 在贯穿件套管处应避免大的隔断；
  - 钢筋尽可能通长布置；
  - 水平钢筋尽可能布置在一层。
- 大型的、独立的混凝土墙，应考虑滑模施工设计。滑模施工时应有可靠工艺保障预埋件的允许公差；
- 混凝土墙体设计在竖向上应尽可能上下连续；
- 预埋板设计时应考虑其制作及安装允许公差的影响；
- 针对不同荷载要求，预埋件应考虑标准化设计，埋件的锚固应与墙体中钢筋布置相协调。

##### 6) 钢筋设计

- 钢筋设计应允许预装配法，接头优先考虑机械接头，钢筋详图中应注明接头区域及钢筋形式。如果钢筋场外制作，则钢筋应按标号设置标签、捆扎和装运。钢筋分布密集区域应单独设计并制作放样图。
- 钢筋应尽可能采用直线式布置。
- 在钢筋接头区域，设计者应按规范要求注明接头类型及材料，并应根据施工费用及工期要求评估各种接头方式的合理性。

##### 7) 钢结构设计

- 技术可行时，钢结构梁、柱宜设计为统一的断面。钢结构设计中应尽量采用螺栓连

接替代焊接。

#### 8) 平台、爬梯、楼梯设计

- 厂房中永久平台、爬梯及楼梯设计时应考虑在厂房施工阶段中的使用。特别是在高辐射区,尽量使用楼梯代替爬梯。钢筋混凝土厂房中的楼梯宜设计为独立钢结构形式,以便进行模块化安装。平台设计时应注意不得与管道、设备、进出通道发生干扰。进行平台布置设计时应考虑可能的施工及检查操作需要,减少临时脚手架。
- 在施工图设计阶段应仔细确定平台、爬梯及楼梯的位置,避免在厂房施工和运行时对其造成干扰。
- 平台设计时应应对构件进行结构分析。

### 2.14.4.1.11 施工建造

#### 1) 结构和部件的模块化

- a. 从核电厂设计初期,有必要开始考虑结构和构件的模块化设计。
- b. 但模块设计需注意:
  - 核岛厂房的设计和布置应考虑最大的模块组合后的尺寸,模块组合后的重量应考虑吊车的起重能力。
  - 在保证经济性可行的条件下,模块的设计应与核岛厂房的框架设计相结合,利用厂房框架作为内部模块的支撑。
  - 模块的牛腿、支撑框架等提升装置应该与模块一起设计和制作。
  - 应提前考虑好模块的建造和搬运,模块预制厂的预装配区和车间应适应所有建造阶段的模块组装。应考虑模块从预装配区到安装现场的转移。

#### 2) 施工出入口

- a. 核电厂内设置清晰的设备、材料和人员通道。
- b. 在多层和大工程量的核岛厂房建造过程中,应在相邻厂房预留出用于安装临时电梯的空间,临时电梯用于施工人员高峰期间使用。核电厂的永久电梯应尽早设计和安装,并能承担建造期间重负荷运行的能力。
- c. 核电厂内的永久单轨吊车和起重机应尽早设计并安装,以便建造期间使用。为确保施工人员在最好的工作条件下使用单轨吊车和起重机,使用前需进行吊车试验检查。垂直升降口处应预留临时吊车起吊设备的空间,以便在施工高峰期间吊装永久设备。
- d. 应为核岛厂房内混凝土附件和钢结构附属装置提供临时起吊索具等。
- e. 核岛厂房的基础和结构设计应能为建造施工期间使用的塔式起重机提供足够的支撑,确保塔式起重机可用。
- f. 设计人员应考虑临时厂房延伸场地或平台的位置,以便在建造的所有阶段进入电厂永久设施

#### 3) 起重机路径

- b. 设计人员应提供或指明吊车在不同区域转运所有重物的安全路径。
- c. 对所有重物或危险物应明确临时放置区,包括所有可能跌落后影响安全停堆装置的设备。

### 7.12.4.1 反应堆厂房

#### 1) 概述

反应堆厂房主要布置主回路的压力容器与其相连的三条输热环路,每条环路包含一台蒸汽发生器、一台反应堆冷却剂泵和主管道,在其中一个环路上连接一台稳压器。机组正常运

行（包括机组停堆维修）时，保证反应堆冷却剂系统的运行，保证人员进出、设备安装及其他活动；事故工况下，作为生物屏障，包容放射性物质不向外界环境不可接受地释放。

2) 总体要求

a. 检修空间

- 提供足够的维修操作空间。
- 在反应堆厂房不同标高的低放射区，设置维修操作空间。在每个维修操作空间应提供配套设施，如压缩空气、动力电、冷却水、照明、除盐水、通讯和贮存设施的操作台和有标识的设备存放区。
- 在上述工作区、管理或控制区，应有视频和音频设施。并保证维修人员和管理人员之间的通讯。
- 应为停堆期间用于反应堆厂房内部检修的便携工具、设备和仪表中可拆除的部分提供清洁处理和测试区。
- 反应堆厂房内设备和系统的布置应减少必须在操作平台上执行的维修操作，并将环吊的吊装操作减至最小。
- 尽管量减少反应堆厂房在维修、反应堆换料停堆期间的维修操作密集度。

b. 反应堆厂房大气混合

- 反应堆厂房的布置应确保在可行的范围内，最大限度地提高自然循环中的混合速率，并最大限度地降低氢气局部积聚的可能性。设计中，应避免有氢气源项的小型封闭空间，应尽量减少可能导致火焰加速和燃爆转变（DDT）的几何形状。

c. 反应堆厂房安全壳泄漏率

- 在最极限的冷却剂丧失和主蒸汽管道断裂设计基准事故情况下，反应堆厂房安全壳泄漏率应确保放射性释放满足 GB6249-2011 中的相关限值，该泄漏率通常为不大于  $0.3\% \Delta V/\text{天}$ 。”
- 注：华龙技术核电厂的反应堆厂房安全壳泄漏率为不大于  $0.3\% \Delta V/\text{天}$ ，这里加了“通常”二字，考虑到 URD（美国核电用户手册）中要求的是不大于  $0.5\% \Delta V/\text{天}$ ，并考虑在华龙优化中可能采用钢安全壳，钢安全壳的泄漏率可达到  $0.1\% \Delta V/\text{天}$ 。

d. 反应堆堆腔

- 应设置堆腔注水措施，以在严重事故情况下冷却压力容器下封头，保证压力容器完整性，确保堆芯熔融物滞留在压力容器内。

e. 子隔间设计

- 包含高能管道的隔间应有足够的通风孔，以限制隔间内的温度和压力上升，确保不会超过隔间边界和安全相关设备的设计限值。
- 设备隔间（如蒸汽发生器隔间、安注箱隔间、阀门隔间/稳压器隔间、主泵隔间等）的布置应为检修和换料期间移动设备和人员提供进出通道。

f. 反应堆厂房地坑

• 泄漏收集

- 安全壳地坑的布置应有利于收集安全壳内的泄漏。
- 安全壳地坑如需用于测量安全壳内泄漏可设计为便于泄漏监测。
- 安全壳地坑的设置应使来自非反应堆的泄漏不会与反应堆泄漏收集在同一地坑内。
- 安全壳地坑应提供足够的泄漏收集能力。

• 严重事故缓解措施

- 反应堆压力容器堆腔的布置不允许堆芯熔融材料在堆腔中积聚，它会引起混凝土的逐渐退化，导致安全壳完整性的丧失。堆腔的几何形状和相应的排水或泵的排出管道的布置，应能阻止由于重力的作用使堆芯熔融物从安全壳内转移。



### 3) 一般要求

#### a. 概述

- 反应堆厂房安全壳内径应保证留有足够的空间以便于停堆期间在操作平台和其他平面上搁置和装卸设备。

#### b. 反应堆厂房内环廊布置及功能要求

- 应优化设计反应堆压力容器和反应堆冷却剂系统回路与安全壳中心的距离，使在反应堆冷却剂系统回路的布置和维修闸门之间有足够的存放空间和暂存区。
- 设计人员在操作平台预留出足够的维修区和存储区，在内部屏蔽墙内为蒸汽发生器的维修提供适当的通道，且确保屏蔽墙和安全壳之间足够的维修和检查通道。
- 围绕反应堆冷却剂系统回路部件的屏蔽墙和安全壳之间，换料水池边界和安全壳之间，确保预留足够的维修和检查通道。

#### c. 防止氢气局部积聚对厂房的布置要求

- 反应堆厂房布置应确保一回路隔间内的氢气（例如反应堆冷却剂系统回路隔间），可直接排放到反应堆厂房安全壳内自然循环气流中，以保证大气能充分混合。
- 蒸汽发生器隔间和稳压器隔间的顶部应设置通风孔。

#### d. 备用贯穿件的要求

- 在安全壳上适当设置备用贯穿件，以便于在核电厂停运期间临时接一些电缆、管道或软管和核电厂运行后设计改造使用。

## 2.14.4.2 安全厂房

### 1) 概述

安全厂房为主要用于布置安全系统、电气系统、仪控系统及通风系统的厂房，与相应的安全系列对应设置。

### 2) 总体要求

安全厂房设计除需满足前文本节《核岛厂房》中通用要求外，还需满足以下要求：

- a. 根据三个基本的辐射量（外照射水平、表面污染和气载污染）将厂房划分为控制区和非控制区，除紧急出口外，必须保证两者通道完全独立、隔离，正常工况下不允许直接从控制区通往非控制区。
- b. 为尽量减少人员受辐照剂量，控制区主通道层宜与热更衣室设置在同一楼层。
- c. 充分考虑主通道层的走廊规划与其他厂房接口的合理性。
- d. 合理设置紧急出口，可以直接通向厂区或其他厂房，以满足人员紧急疏散要求。
- e. 如设置有主设备转运通道，其设计应满足最大、最重的设备运输要求。
- f. 将安全系统按系列布置在与之相应的厂房内。
- g. 厂房应考虑外部灾害的影响，确保在发生外部灾害时不丧失其安全功能。
- h. 确保任一厂房内发生水淹不会危及其他安全级厂房或分区。
- i. 确保任何水淹都不会导致多余列执行安全功能的冗余系统（包括支持系统）故障，必要时应采取实体隔离及提高设备布置标高等方法。
- j. 冗余的安全系统之间、设备之间应进行实体隔离，以抵御火灾、内部飞射物及水淹等内部灾害。

## 2.14.4.3 控制厂房

### 1) 概述

控制厂房为主要布置控制室综合体、远程停堆站、技术支持中心、工艺系统、电气系统、仪控系统及通风系统的厂房或相应功能区，可以用其他厂房名称（如电气厂房）独立设置，

亦可作为安全厂房的一部分设置。控制室综合体包括主控制室和其他支持主控制室运行的房间；支持主控制室运行的房间包括电缆敷设间、计算机房、设备间、办公室及仪表间等房间。

## 2) 总体要求

控制厂房设计除需满足前文本节《核岛厂房》中通用要求外，还需满足以下要求：

- a. 如有必要，应根据三个基本的辐射量（外照射水平、表面污染和气载污染）将厂房划分为控制区和非控制区，除紧急出口外，必须保证两者通道完全独立、隔离，正常工况下不允许直接从控制区通往非控制区。
- b. 应合理设置紧急出口，可以直接通向厂区或其他厂房，以满足人员紧急疏散要求。
- c. 应充分考虑主通道层的走廊规划与其他厂房接口的合理性。
- d. 厂房应考虑外部灾害的影响，确保在发生外部灾害时不丧失其安全功能，为保证主控制室安全，还需保证其能抵御大型商用飞机的撞击。
- e. 应确保厂房内发生水淹不会危及其他安全级厂房或分区。
- f. 应确保任何水淹都不会导致多余列执行安全功能的冗余系统（包括支持系统）故障，必要时应采取实体隔离及提高设备布置标高等方法（如有）。
- g. 冗余的安全系统之间、设备之间应进行实体隔离，以抵御火灾、内部飞射物及水淹等内部灾害（如有）。

## 3) 特殊要求

### a. 控制室综合体

控制室综合体应布置于反应堆厂房和汽轮机厂房之间，以便满足分隔和隔离要求；同时其布置及设计还需满足以下要求：

- 应尽量使动力电缆和控制电缆的敷设量最小化，以降低成本；
  - 应保证能为电缆的布线和控制室设备的连接提供充足的空间；
  - 应保证能为主控制室提供所有假想设计工况下的人员通道及可居留性；
  - 当发生可能导致控制室撤离的火灾或其他危害时，应保证工作人员可从控制室经由房间或走廊进入远程停堆站；
  - 应保证能满足运行要求和功能要求，并考虑人因工程；
  - 应保证控制室综合体的防火区与远程停堆站的防火区不共用带有贯穿件、门或闸门的隔离屏障，以确保控制室综合体内的灾害（其中一些可能导致控制室撤离）不影响远程停堆站的使用；
  - 应保证重要文件查阅档案室、计算机房（如果是应急响应计划的必要组成部分）、值班长办公室、卫生间和厨房/就餐区域等人员持续或频繁居留的区域与主控制室相同的可居留性，以满足异常工况下的电厂操作要求及人因工程原则。
- b. 远程停堆站
- 远程停堆工作站是为了能远距离操作以将核电厂引导至安全停堆状态，应将其布置在与主控制室相隔离的位置；
  - 远程停堆工作站的位置应结合人因工程学考虑，并确保主控制室发生火灾情况下人员撤离后可以到达。
- c. 技术支持中心（厂房内）
- 应遵循相应的法律法规要求布置，其位置应考虑保障技术支持中心与控制室之间人员能安全往来；
  - 应具有与主控制室相同的可居留性；
  - 应能抵御设计基准外部事件（如设计基准地震、强风和洪水等）。

## 2.14.4.4 燃料厂房

### 1) 概述

燃料厂房是指核电厂中进行新燃料接收、储存、检查、运输和乏燃料搬运、倒换、储存、检查、修理和发运的建筑物。

### 2) 总体要求

- a. 燃料厂房应与反应堆厂房紧密相连，且正对燃料转运通道。
- b. 燃料厂房外轮廓应考虑设计成矩形（必须的连结区除外），尽可能提高空间利用率。
- c. 燃料厂房燃料操作大厅标高设置应考虑与反应堆厂房内操作大厅的操作便利性，乏燃料水池周围应预留足够空间便于人员通行。
- d. 为了减少飞机撞击危害，应考虑使乏燃料水池不与外墙直接连接。
- e. 燃料厂房应考虑设置两个（或以上）楼梯间和电梯。
- f. 燃料厂房工艺布置区应考虑按照工艺系统要求进行分区布置。
- g. 承担乏燃料水池冷却功能的系统，应考虑使其阻力尽可能小，以便减少电力消耗。

## 2.14.4.5 核辅助厂房

### 1) 概述

核辅助厂房主要布置核岛安全系统以外的辅助系统设施，并作为核岛废物收集处理中转站。

### 2) 总体要求

- a. 核辅助厂房应尽量靠近反应堆厂房和燃料厂房，与燃料厂房之间的连接区应尽可能宽敞，满足贯穿区布置的要求。
- b. 应根据三个基本的辐射量（外照射水平、表面污染和气载污染）将厂房划分为控制区和非控制区，除紧急出口外，必须保证两者通道完全独立、隔离，正常工况下不允许直接从控制区通往非控制区。
- c. 应合理设置紧急出口，可以直接通向厂区或其他厂房，以满足人员紧急疏散要求。
- d. 控制区和非控制区应分别合理设置电梯，以满足人员通行及小负荷物资运输使用要求。
- e. 如设置有主要设备转运通道，其设计应满足最大、最重的设备运输要求。
- f. 应按系统/专业采用“集中布置”原则划分功能区，其中工艺系统主要布置于下部楼层，电气、仪控系统主要布置于中间楼层，暖通系统主要布置于高处楼层。
- g. 高放射性的除盐床应集中布置，以便集中冲排操作。
- h. 高放射性的过滤器应集中布置，以便滤芯更换和转运操作。
- i. 放射性贮罐应考虑破损时就地滞纳，避免污染扩大。
- j. 转运废树脂和废滤芯的通道应尽可能靠近废物处理区域。

## 2.14.5 常规岛厂房

汽轮发电机厂房一般由汽机房和除氧间组成，其中包括凝结水精处理车间、油箱室等。

### 1) 建筑设计原则：

建(构)筑物的防火及耐火等级根据各单体的不同性质和功能，并依据《建筑设计防火规范》(2018年版)》(GB50016-2014)、《核电厂常规岛设计防火规范》(GB50745-2012)等的要求具体确定：汽轮发电机厂房地上部分火灾危险性分类为丁类，耐火等级为二级；汽轮发电机厂房地下部分火灾危险性分类为丁类，耐火等级为一级。

汽轮发电厂房不划分防火分区。厂房内的下列场所进行防火分隔：电缆竖井、电缆夹层、

电子设备间、配电间、蓄电池室、通风设备间、润滑油间、润滑油转运间、疏散楼梯。

防火分隔墙的耐火极限不应低于2.00h，分隔楼板、梁的耐火极限不应低于1.00h。防火分隔墙上设置的门、窗，应为甲级防火门、窗。汽轮发电机厂房的屋面承重构件的耐火极限不应低于1.00h。

汽轮发电机厂房的疏散楼梯采用封闭楼梯间或室外楼梯，厂房内设一部客货两用梯。人员可从厂房内的楼梯间、电梯到达各楼层及工作平台。大件通过吊物孔吊运，小件也可以通过电梯搬运至所需楼层。

厂房内地上部分最远工作地点到外部出口或疏散楼梯的距离不大于75m；厂房内地下部分最远工作地点到疏散楼梯的距离不大于45m。

汽轮发电机厂房外墙运转层以下采用砌体围护，外刷外墙涂料，运转层以上根据工程所在地气候情况采用单层压型钢板或双层带保温压型钢板围护。窗采用彩色铝合金窗、门采用成品钢质门、钢质防火门、电动钢质卷帘门等，门窗满足抗风压、水密、气密三性指标的要求。

汽机房屋面防水等级为Ⅰ级，两道防水设防。屋面根据需要采用现浇钢筋混凝土屋面板带保温层，上铺设两道防水卷材，或双层带保温压型钢板屋面带防水垫层。屋面设备留孔均有可靠的防水处理。汽机房的屋面排水为重力有组织外排水，雨水均通过雨水管排至厂区排水系统。

压型钢板墙面板及屋面板应根据工程所在地具体情况考虑防盐雾腐蚀及抗台风措施，并提供防水检测及抗台风试验的报告。

## 2) 结构设计原则：

汽轮发电机厂房一般采用现浇钢筋混凝土框、排架结构。

汽轮发电机厂房零米以下采用钢筋混凝土地下室，±0.00m层采用现浇钢筋混凝土楼板；其它各层楼层结构一般采用钢次梁上压型钢板作底模的现浇钢筋混凝土楼板；汽机房屋面结构采用钢屋架钢檩条上铺设压型钢板作底模的现浇钢筋混凝土屋面板或钢屋架钢檩条上铺设带保温彩钢板轻型屋面。

汽机基座优先采用弹簧隔振技术；设置于隔振弹簧上的钢筋混凝土基座台板与厂房楼面结构脱开布置，下部基座结构为整体框架式现浇钢筋混凝土结构。

汽轮发电厂房定义为Ⅲ类物项，即核电厂中与核安全无关的物项，按《建筑抗震设计规范》进行抗震设计，同时保证在Ⅰ类物项设计基准地震动SSE作用下不发生倒塌，避免危及核岛厂房（Ⅰ类物项）。

## 2.15 概率安全分析

### 2.15.1 概述

#### 2.15.1.1 目的

概率安全分析（PSA）的目的在于：

- 1) 基于风险的观点平衡电厂设计，确保没有对整体风险有较大贡献的因素；
- 2) 验证电厂设计（详细设计）符合用户要求，堆芯损坏频率小于 $10^{-5}$ /堆·年；
- 3) 验证电厂设计（详细设计、考虑厂址因素）符合用户要求，放射性大量释放频率小于 $10^{-6}$ /堆·年；
- 4) PSA作为设计过程中的一种工具，基于利益-代价分析的角度支持电厂设计，提高安全性能。

此外，PSA分析的作用还包括：

- 1) 确定风险重要的事故序列；

- 2) 确定潜在的电厂薄弱环节;
- 3) 满足核安全监管当局要求;
- 4) 为严重事故现象分析提供事故序列;
- 5) 为事故管理提供参考。

为了获得对堆芯损坏频率和风险贡献有价值的评价, PSA分析采用最佳估算的方法、数据、假设。

本节的目的是:

- 1) 定义PSA的目标;
- 2) 详述PSA的范围, 包括所考虑的风险源、事件类型和对它们的筛选准则, 以及分析的详细程度;
- 3) 确定执行PSA时所需的方法论和假设, 可参考通用的方法, 或者使用新的改进方法。

### 2.15.1.2 分析范围

PSA分析范围应包括内部事件和外部事件(但不包括恐怖袭击事件), 电厂运行状态包括功率工况及低功率和停堆工况。分析层级方面应包括一级和二级, 在分析对象方面包括堆芯和乏燃料贮存设施。具体应包括:

- 1) 内部事件一级PSA;
- 2) 内部事件二级PSA;
- 3) 外部事件筛选;
- 4) 内部水淹PSA;
- 5) 内部火灾PSA;
- 6) 地震PSA;
- 7) 其他外部灾害风险评估;
- 8) 乏燃料水池风险评估。

功率工况及低功率和停堆工况PSA分析的要求和方法基本一致。需要注意的是:

- 1) 电厂运行状态(POS)划分应包括反应堆运行的完整运行周期, 同时各个POS应不重叠, POS划分过程中做出的假设和说明应形成记录;
- 2) 低功率和停堆工况始发事件清单在参考功率工况PSA时, 应考虑对各个POS的适用性, 并对低功率和停堆工况下特有的始发事件进行梳理和补充;
- 3) 应充分考虑电厂在低功率和停堆工况下的特性, 包括系统配置的变化、热量排出方式、维修活动的影响等。

## 2.15.2 通用要求

### 2.15.2.1 模型结构

电厂模型应包括事件树模型和故障树模型。事件树由始发事件和功能题头(或系统)的成功与否构成, 每棵事件树的终态为“成功(OK)”或“堆芯损坏(CD)”(对于一级PSA而言。对于二级PSA, 为“大量放射性释放(LR)”)。故障树是以基本事件(设备失效、人误事件等)的形式来描述系统如何失效。

对于堆芯损坏的事故序列, 需进行电厂损伤状态分析。根据电厂损伤状态分组后, 进行用于维持安全壳完整性的系统分析及安全壳响应的物理进程分析。

### 2.15.2.2 堆芯损坏的定义

堆芯损坏的定义为堆芯裸露和升温到预计会造成包括堆芯相当大的一部分区域长期氧

化和严重的燃料损坏。根据该定义，可依据以下准则判断堆芯是否损坏：

- 1) 水位在一段较长的时间内维持在堆芯活性区的顶部以下；或者
- 2) 采用具有详细堆芯模型的程序预计的堆芯燃料包壳表面峰值节点温度高于1204°C；或者
- 3) 采用具有简化堆芯模型（例如，单节点堆芯模型，集总参数）的程序预计的堆芯燃料包壳表面峰值节点温度高于982°C；或者
- 4) 采用具有简化堆芯模型的程序预计的堆芯出口温度持续30min高于650°C；或者
- 5) 采取间接的判别准则。例如某个维持堆芯安全所必需的功能预计会发生不可恢复或者长时间的失效，也可以作为堆芯损伤的判断依据。

### 2.15.2.3 始发事件

应给出PSA分析需要考虑的所有可能的始发事件完整清单。应综合使用详细的工程判断、参考以往清单、演绎分析方法（即主逻辑图法）和电厂运行经验等四种方法来确保清单的完整性。

始发事件的筛选应包括当前电厂运行经验总结、相似电厂的参考和对系统设计的考虑。对电厂设计的每个系统进行筛查，找出可能导致反应堆停堆、或使防止堆芯损坏或者厂址放射性释放的一个或多个系统降级的失效。为了便于分析，可将具有相似电厂响应的始发事件进行归并分类。

### 2.15.2.4 成功准则

在定义事件序列中的功能和系统的成功或失效时，需基于现实的电厂响应分析。

优先采用最佳估计的方式给出系统的成功或失效准则。

为避免不恰当的保守，应使用经验证的热工水力分析程序。

必须明确所采用的保守假设，必须对结果进行检查以保证这些保守性不会导致对结果的见解与现实情况严重不符。

### 2.15.2.5 任务时间

始发事件发生后，为了保证堆芯冷却而需要持续运行的设备，任务时间至少应为24小时。对于特定的系统，如果其任务时间小于24小时，则使用其特定的任务时间。在24小时以后需要的动作要明确说明（例如系统组态改变以及补充水源等）。

对于采用模化的设备和人员动作仍不能在24h内达到稳定的电厂状态的序列，则采用适当技术进行附加的评估或模化工作，采用的适当方法包括：

- 1) 为该序列指定一个合适的电厂损伤状态(对于一级PSA，一般为堆芯损伤)；
- 2) 延长任务时间，并调整受影响的分析使得电厂工况能表明电厂达到可接受的值；或者
- 3) 按照本部分的系统分析和人员可靠性分析要素中所述的要求，对该序列模化附加的系统恢复或操纵员动作，以证明达到成功的结果。

对于维持安全壳完整性所需的系统，通用的任务时间是24小时，对于堆芯损坏已经发生，而设备未能修复的事件序列，使用更长的任务时间。

对于长期堆芯冷却或者安全壳热量排出所需要的系统，需要对任务时间进行敏感性分析。

### 2.15.2.6 安全壳系统响应和模化

应考虑事件树和安全壳系统及其响应之间的影响，特别需要关注安全壳系统及其响应对

堆芯损坏是否有影响。

#### 2.15.2.7 相关性分析

需明确模化的相关性包括事件序列功能相关性，系统间相关性，部件间相关性，人员动作导致的相关性，堆芯冷却系统和安全壳系统间的相关性。

事件序列功能相关性在事件树或等同的序列逻辑中考虑。

系统间相关性要考虑硬件相关以及功能相关，要在系统故障树或其它模型中考虑。

部件间相关性不仅要考虑同一系统内相同部件，也要考虑不同系统的类似部件，推荐使用最新的方法和数据。

人员动作可能导致一系列部件不可用，因此要予以考虑。

如果没有适当考虑堆芯冷却系统和安全壳系统之间的相关性，可能会低估释放频率。推荐使用整合了堆芯冷却系统和安全壳系统的模型。

需要对共因始发事件进行分析。识别共因始发事件并在PSA模型中进行模化。共因始发事件限定为厂内系统的失效，例如控制和保护系统、电源系统、重要厂用水系统或者其他支持系统的失效。

需要进行部件共因失效分析。共因故障在系统模型中体现，应达到共因失效数据所能支持的程度。

#### 2.15.2.8 人员可靠性分析

PSA应进行人员可靠性分析。分析必须至少包括：

- 1) 对风险重要的人员动作的识别；
- 2) 对风险重要的人员动作的量化分析；
- 3) 人员可靠性分析参数的敏感性分析。

必须考虑如下类型的人员动作：

- 1) 始发事件前人员动作；
- 2) 如有必要，导致始发事件的人员动作；
- 3) 始发事件后人员动作。

在人员可靠性分析中，须充分考虑任务之间的相关性问题的。

#### 2.15.2.9 数据分析

在PSA分析中，所使用的数据主要分为以下三种：

- 1) 设备可靠性数据（包括共因失效、试验及维修不可用）；
- 2) 始发事件频率；
- 3) 人因失误数据。

始发事件频率与人因失误数据分别在始发事件分析和人员可靠性分析中考虑，因此一般来说，数据分析主要针对设备可靠性数据进行。数据分析应满足以下基本原则：

- 1) 设备可靠性数据应能如实反映电厂配置和运行情况；
- 2) 考虑因试验、维护或维修导致的系统或设备不可用；
- 3) 考虑数据的不确定性。

华龙技术核电厂设备可靠性数据推荐采用国家核安全局正式发布的最新版核电厂设备可靠性数据为通用数据。

#### 2.15.2.10 定量化

事件序列模型定量化应该是一个整体的过程。

对于每个事件序列，必须保留频率大于割集中最大发生频率的1%的割集。截断值应不大于 $10^{-8}$ 。

如果结果存在逻辑上不合理的情形，则需要对结果进行修正。

必须获得风险评价的点估计值。对于没有进行不确定分析的情况，点估计值可以通过均值获得。

#### 2.15.2.11 不确定性、敏感性、重要度分析

应使用适当的不确定性、敏感性和重要度分析审查不确定性。

##### 2.15.2.11.1 不确定性和敏感性分析

对潜在的风险影响因素必须进行不确定性分析。

量化的不确定性分析应由定性的不确定性分析进行补充，不确定性分析是PSA分析的一部分。不确定性分析至少包括以下内容：

- 1) 对重要不确定性因素的识别和描述；
- 2) 对建模的重要假设开展不确定性与敏感性分析；
- 3) 从PSA结果和结论的角度出发对不确定性因素的评价。

不确定性分析必须由一系列定量的敏感性分析进行补充支持。需要针对部分重要的不确定性因素（如PSA的假设、参数方面等）的潜在影响进行敏感性分析。

##### 2.15.2.11.2 重要度分析

重要度必须提供一种PSA结果的解释方法。因此，必须计算事件和事件组的重要度。

#### 2.15.2.12 文档记录

PSA分析需形成正式的文档。

PSA分析的模型、数据和假设等形成文档，其详细程度足以确保未参加过此PSA分析的人员可以在和原分析人员最少沟通的前提下对分析结果进行再现。文档记录应包括的主要内容如下：

- 1) 对始发事件组的理解，通过对电厂经验反馈和电厂设计的审查确定始发事件组；
- 2) 基于事件树，给出系统的成功准则；
- 3) 系统故障树模型，包括在未完成电厂详细设计时所作的假设、考虑的故障模式（包括故障模式排除的理由）、共因故障的处理、人因相关性、可靠性数据库；
- 4) 详细的人员可靠性分析；
- 5) 始发事件频率、设备故障率、共因失效参数、维修不可用相关的数据库；
- 6) 事件序列量化过程，包括截断值的选取等；
- 7) 安全壳事件树的发展，以及所考虑的安全壳事件树的合理性，包括给出不考虑某些安全壳事件树的理由；
- 8) 安全壳事件树分析中最佳估算值选取的依据；
- 9) 放射性源项分析；
- 10) PSA分析结果应给出量化分析结果、电厂设计特性和不同的运行状态对风险的贡献；
- 11) 给出基于PSA分析，进行的设计改进或技术决策。

#### 2.15.3 内部事件一级 PSA



内部事件一级PSA应按照2.15.2节通用要求开展分析工作，此外，还应满足下列要求。

#### 2.15.3.1 事件序列建模

事件树由始发事件和功能事件组成。

功能事件是前沿系统或人员动作为实现反应性可控和持续冷却的稳定状态而做出的响应。功能事件应首先按照响应顺序给出，然后以优化事件序列的方式（如按照系统之间的功能关系、硬件之间的关系等）进行调整。

始发事件对系统可用性的影响要细致检查。

堆芯损坏的序列必须对安全壳系统的可用性进行处理，在二级PSA中这些系统可能影响防止堆芯损坏的系统的可用性，安全壳系统的状态必须在事件树中考虑，这样每个序列才能给出准确的事故进程后果。

#### 2.15.3.2 故障树建模

应使用故障树或等效的数学方法建立系统失效模型。

基本事件应考虑设备失效、人误和试验维修导致的不可用。

应采用系统化或穷尽的方式建立基本事件，包括：

- 1) 失效模式与影响分析（FMEA）；
- 2) 试验维修规程分析。

由于试验维修导致的设备或系统不可用必须考虑，分析应清晰的给出这方面是如何处理和考虑的，且应与可靠性数据相一致。

在基本事件层级上考虑人误事件。

基本事件的编码应利于最终割集的阅读和理解。不管采用何种编码方式，应包括如下内容：

- 1) 设备失效模式；
- 2) 共因失效；
- 3) 特定设备类型；
- 4) 设备所在系统。

#### 2.15.3.3 不确定性和敏感性分析

为了计算堆芯损坏频率，对于电厂模型里的基本事件，需要考虑概率分布。这些分布要能够在结果中反映，以得到堆芯损坏频率的量化特性以及和频率值相关的不确定性。

这些分布要辅以良好的敏感性分析以确定不确定性来源。

对堆芯损坏频率不确定性有重要贡献的因素包括但不限于以下要素：

- 1) 与现有电厂所用部件不同的部件失效率；
- 2) 共因故障参数；
- 3) 始发事件后人员相互作用；
- 4) LOCA频率，低功率及停堆工况下不同运行状态的持续时间。

#### 2.15.4 内部事件二级 PSA

内部事件二级PSA应满足2.15.2节通用要求相关规定，此外，还应满足下列要求。

##### 2.15.4.1 堆芯损坏序列归并分组

应将堆芯损坏序列分组。

对于每一堆芯损坏分组，应确保特定组内的所有序列相对于安全壳序列和源项现象都会

产生类似的影响。堆芯损坏分组的定义应提供一种确保可完全区分堆芯损坏序列描述的方法，以便提供与安全壳分析相适应的合理水平。

#### 2.15.4.2 系统分析

二级PSA分析中，应进行系统分析，以确定缓解堆芯损坏后果防止放射性物质释放的系统的可靠性，并明确地考虑同时影响防止堆芯损坏的系统与维持安全壳完整的系统的失效模式。

#### 2.15.4.3 安全壳隔离

在评估安全壳泄漏路径时，应考虑安全壳贯穿件的影响。应分析以下两种释放路径的贯穿件：

- 1) 不能隔离的常开管道，或在事故时可能会打开的常闭管道（如阀门位置错误）；
- 2) 通过密闭贯穿件的泄漏（如，经关闭的阀门座、电气贯穿件、人员气锁闸门等的泄漏）。

如果安全壳贯穿件满足以下标准之一，则可从分析中筛选掉：

- 5) 泄漏或故障隔离的条件概率很小（例如小于 $10^{-3}$ /事件）；
- 3) 事故后果影响较低（例如，释放必须通过某管道才能发生，但该管道在整个事故过程中一直充满水）；
- 4) 安全壳内部或外部的闭合环路；
- 5) 尺寸小的贯穿件，通过该路径的释放在可接受的标准范围内。

#### 2.15.4.4 安全壳旁通

应对安全壳旁通序列进行评估，这包括所有与反应堆冷却剂系统连接的、可能导致反应堆冷却剂系统放射性大量释放的连接。

#### 2.15.4.5 安全壳性能评价

应对安全壳保持完整性和密封性的承压能力采用安全壳结构性能分析方法进行评估，包括所有用于维持安全壳完整性的物项。安全壳性能的计算应考虑导致以下功能失效带来的影响：反应性引入、一回路压降、堆芯冷却剂存量控制、安全壳压力/温度控制、可燃气体控制、安全壳隔离和旁通控制、其他失效会导致安全壳受到挑战的功能。

#### 2.15.4.6 安全壳事件树分析

安全壳事件树应包括与安全壳载荷和（或）源项演变相关的重要现象学问题。

应使用最佳估算值对安全壳事件树中事件及建立的事件树模型进行量化。在可行范围内，这些值应为平均值。如果事件代表严重事故现象或堆芯恶化和安全壳响应的其他方面，且事件有较大不确定性，并且对于发生释放的可能性很重要，则应在明确考虑与这些事件相关的不确定性的基础上确定这些值。

用于确定安全壳事件树概率的基础和支持信息应全部编制文件进行记录。

#### 2.15.4.7 源项分析

对每个释放类应选择典型序列，该序列应能现实地代表该释放类中所有序列的源项。用于选择各释放类的代表性二级PSA事故序列的属性，应考虑二级PSA事故序列的频率、裂变产物向环境的释放量和释放时间。应使用现实的模型、经验关系式和参数值表征显著影响裂

变产物输运计算的物理过程，裂变产物输运从放射源（燃料）开始，通过包括反应堆冷却剂系统和安全壳在内的释放路径向环境释放。

#### 2.15.4.8 核电厂放射性释放类

将各安全壳事件树的序列终态进行归并，得到有限数量的几组释放类，并开展源项分析。

#### 2.15.4.9 晚期释放评估

二级PSA分析中，对于72小时内不会导致安全壳严重失效的每个序列，应证明72小时后可采取简单可行的人为行动，以保持安全壳的完整性并终止放射性释放。

#### 2.15.4.10 不确定性和敏感性分析

需要对影响放射性释放频率的事件和现象的不确定性进行分析。可能影响释放频率的事件和现象中的不确定性应予以考虑。尤其是在安全壳事件树中特别重要事件。此外还应通过敏感性分析来确定这些不确定性对各种事故结果频率的影响。建议至少应包括下列各相关参数的敏感性问题：

- 1) 氢气燃烧风险相关的参数，如氢气产生速率、绝热燃烧温度等；
- 2) 压力容器失效后对堆芯碎片的冷却能力，包括可用的水量和热量传递路径的有效性；
- 3) 安全壳的承压能力、安全壳压力载荷导致的破口位置和尺寸；
- 4) 影响高压熔喷的参数，包括压力容器破口尺寸、压力容器失效时一回路的压力、压力容器失效时释放的堆芯熔融物的数量；
- 5) 压力容器外可燃气体的相关参数，例如包括MCCI反应的持续时间和气体产生速率；
- 6) 影响事故进程的操纵员动作，例如氢气大量聚集的情况下恢复安全壳冷却操作。

### 2.15.5 外部事件风险评价

外部事件PSA应满足2.15.2节通用要求相关规定，此外，还应满足下列要求。

#### 2.15.5.1 外部事件识别与筛选

##### 2.15.5.1.1 外部事件识别

可依据NB/T 20037.6-2017RK附录A中列出的外部事件在华龙技术核电厂PSA中进行分析。

##### 2.15.5.1.2 外部事件初步筛选

在初步筛选中，以下筛选准则中的任意一条都可以作为筛除外部事件的合理依据：

- 1) 该事件不适用于分析的厂址；
- 2) 该事件的潜在危害等同或小于电厂设计事件；
- 3) 该事件发生位置距电厂较远，不足以对电厂造成影响；
- 4) 该事件已经包含在另一事件的定义中；
- 5) 该事件发展缓慢，并且可以证明有足够的时间排出危险源或者采取措施使电厂不会受到该事件的影响。

##### 2.15.5.1.3 外部事件定量筛选

在定量筛选中，满足以下准则之一，可筛除该外部事件：

- 1) 外部事件发生频率 $<10^{-6}$ /年，且CCDP $<0.1$ ；
- 2) 采用包络或保守分析，证明外部事件导致的CDF均值 $<10^{-7}$ /堆年。

#### 2.15.5.2 内部水淹 PSA

应对核电厂的内部水淹风险进行评估。

- 1) 应对可能导致堆芯损坏的内部水淹开展评估；
- 2) 应对水淹区域进行详细的水淹风险分析。

内部水淹PSA的执行必须包括下列步骤：

- 1) 电厂分区的定性筛选；
- 2) 基于水淹蔓延分析对所选房间开展水淹情景的定量评价；
- 3) 以内部事件PSA模型为基础建立水淹PSA模型，反映水淹导致的设备不可用，计算水淹导致的堆芯损坏频率。

可依据NB/T 20037.3-2012、NB/T 20425-2017进行内部水淹PSA分析。

#### 2.15.5.3 内部火灾 PSA

应对核电厂的内部火灾风险进行评估。

- 1) 应对可能导致堆芯损坏的内部火灾开展评估；
- 2) 应对火灾区域进行详细的火灾风险分析。

内部火灾PSA的执行必须包括下列步骤：

- 1) 电厂分区的定性筛选；
- 2) 基于火灾蔓延分析对所选房间开展火灾情景的定量评价。潜在的蔓延路径必须考虑，如通风设备或电缆通道；
- 3) 以内部事件PSA模型为基础建立火灾PSA模型，反映火灾导致的设备不可用，计算火灾导致的堆芯损坏频率。

可依据NB/T 20037.4-2013进行火灾风险评价。

#### 2.15.5.4 地震 PSA

应开展地震PSA，以从地震风险影响的角度检查核电厂设计平衡性。

华龙技术核电厂地震风险的量化应包括对如下内容的评估：

风险支配性割集和电厂易损度参数；  
地震导致的堆芯损坏频率和大量放射性释放频率。

地震PSA的执行必须包括如下内容：

- 1) 应开展厂址特定的地震危险性分析工作，获得厂址地区地震危险性分析曲线簇和均一危险性反应谱。
- 2) 应对安全相关构筑物和设备开展地震易损度分析。
  - a. 根据内部事件 PSA 模型提出所有涉及的安全相关构筑物和设备；
  - b. 应对构筑物和设备的清单进行筛选，筛除的构筑物和设备的风险贡献应是足够低的、不重要的；
  - c. 对未筛除的构筑物和设备应计算其地震易损度，评价其抗震能力。
- 6) 应对能够引起或传播地震导致的堆芯损坏事故序列的SSC失效组合进行地震PSA建模工作。
  - d. 以地震为始发事件进行事故序列分析并建立地震 PSA 模型；
  - e. 应将地震危险性分析和易损度分析结果并入到地震 PSA 模型中，完成量化。

- 3) 应对满足条件的核电厂开展核电厂走访,验证构筑物和设备的抗震能力情况。

可依据NB/T 20037.5-2013进行地震风险评价。

## 2.15.6 乏燃料水池风险评估

乏燃料水池风险评估应满足2.15.2节通用要求来开展分析工作,此外,还应满足下列要求。

### 2.15.6.1 燃料损坏定义

燃料损坏是指由于乏燃料水池丧失冷却水或水流失导致乏燃料水池水位下降而引起的燃料裸露。

## 2.16 经济性评价

### 2.16.1 费用估算

费用估算应采用以市场价格体系为基础的预测价格。在建设期内,应尽可能考虑投入的相对价格变动,又考虑价格总水平变动。设计者应提供工程造价和发电能力等相关数据,尽可能贴近实际发生的价格水平,以便能综合所有必要的资料来计算发电成本,使财务分析合理并准确。

- 1) 项目总投资:项目总投资指核电厂建设项目自前期工作开始之全部建成投产运营所需要投入的资金总额。包括工程建成价和生产流动资金。工程建成价分别形成固定资产、无形资产、其他资产。
- 2) 项目资本金和债务资金:项目资本金工程建成价的比例应符合国家法定资本家制度。建设项目的资金使用应根据项目的建设工期合理安排、明确项目资本金和债务资金的年度使用计划
- 3) 总成本费用:总成本费用分为固定成本和可变成本。其中固定成本包括折旧费、摊销费、修理费、工资及福利费、退役基金、保险费、其他费用及财务费用;可变成本包括和燃料费、乏燃料后处理费、材料费、水费、中低放废物处理处置费、核应急费等。同时要求计算单位生产总成本。
- 4) 经营成本:经营成本包括核燃料费、乏燃料后处理费、材料费、水费、中低放废物处理处置费、核应急费、修理费、工资及福利费、退役基金、保险费、其他费用。
- 5) 经营成本=总成本费用-折旧费-摊销费-财务费用
- 6) 财务效益:财务效益指销售产品所获得的收入,包括但不限于售电收入,采用不含增值税的价格计算。销售税金及附加费:销售税金及附加费应包括增值税、城市维护建设税、教育费附加等。
- 7) 企业所得税:应根据税法规定,并注意正确使用相关优惠政策。

### 2.16.2 财务分析计算参数

参数的测定和选用应坚持谨慎性和准确性原则,财务分析工作需要大量预测的基础上进行,对参数不能简单套用。而是在充分论证分析的基础上,结合具体情况合理选定相应参数,每个参数均有其自身的有效期,都需要适时的进行调整。

- 1) 机组年利用小时数:机组年利用小时数=8760小时×负荷因子
- 2) 电厂经济寿命期:经济寿期参考《核电厂建设项目经济评价方法》选取。
- 3) 项目建设工期:设计者应提供给业主关于电厂建设进度的信息,以便业主决

定电厂建设融资方面时借贷资本成本。

- 4) 价格基准日期：核电厂经济评价应选取一个固定的基准日期。
- 5) 借款利率：按项目法人与银行签订的还款协议中约定的利率，没有签订协议之前，按中国人民银行发布的编制当期的贷款利率。
- 6) 汇率：核电厂经济评价应采用与基准日期相一致的汇率。

### 2.16.3 盈利能力分析

盈利能力分析主要以项目投资财务内部收益率、项目资本金财务内部收益率和项目投资回收期为主要指标，以项目投资财务净现值、总投资收益率和项目资本净利润为辅助指标。盈利能力分析应给出以下指标

- 1) 资本金内部收益率
- 2) 财务基准收益率
- 3) 利息备付率
- 4) 偿债备付率
- 5) 资产负债率
- 6) 流动比率
- 7) 速动比率

### 2.16.4 补充要求

基础信息应考虑下面的额外因素：

- 1) 不确定性与风险分析：应根据实际需求进行不确定性与风险分析，包括盈亏平衡分析、敏感性分析、风险分析等。
- 2) 提供设计输出功率：包括确定的数值和期望范围。数据应是合理评估值。