



华龙一号工程建设经验交流汇报

中国核工业第二二建设有限公司

2022年9月 福建·漳州



CONTENTS

01 海南昌江核电简介

02 华龙一号施工工艺创新

03 华龙一号施工技术创新

04 华龙一号智能建造



01

海南昌江核电简介





海南昌江核电厂厂址位于海南省昌江县海尾镇塘兴村，濒临北部湾。厂址东北距海口市直线距离约160km，东南距三亚市直线距离约150km。



图 1.1-2 海南昌江核电厂厂址地理位置图

监督单位	生态环境部华南核与辐射安全监督站 核工业工程质量监督第二十二中心站
建设单位	华能海南昌江核电有限公司 海南核电有限公司
EPC单位	中国核电工程有限公司
勘察单位	郑州中核岩土工程有限公司
监理单位	中核工程咨询有限公司
施工单位	中核二二公司、中核五公司

01 海南昌江核电简介

一期二台CNP650机组已商运，目前二期工程和海南小堆工程在建。



二期工程（3、4#机组）为两台华龙一号（ACP1000）机组，单机组装机容量120万千瓦。单台机组建设周期为60个月，3#、4#机组分别于2021年3月31日、2021年12月28日实现FCD。

海南小堆采用具有中核集团自主知识产权的“玲龙一号”（ACP100）技术，建设一台装机容量12.5万千瓦的压水堆核电机组，建设周期为55个月，2021年7月13日实现FCD。

01 海南昌江核电简介

海南昌江华龙一号核电土建工程主要工程量

序号	施工范围	开工时间	混凝土 (万m ³)	钢筋 (万T)	埋件 (T)
1	海南昌江核电厂3、4号机组核岛土建工程	2021.3.31	53.35	16.67	5315
2	海南昌江核电厂3、4号机组常规岛 (含PM)土建工程	2021.9.30	35.78	5.16	685.67
		合计	89.13	21.83	6000.67

海南昌江华龙一号主要施工重难点

主要施工重点

- 核岛筏基大体积混凝土施工
- 反应堆内部结构施工
- 核岛双层安全壳施工
- 核岛倒“U”型预应力施工
- 核岛钢衬里模块化施工
- 核岛不锈钢模块化施工
- 核岛外挂水箱施工
- 常规岛汽轮机运转平台施工
- 泵房蜗壳泵施工

主要施工难点

- 华龙一号工程量大，资源投入集中
- 核岛周边厂房布置紧凑，相邻厂房相互制约，流水施工组织困难
- 结构设计复杂、材料种类多，标准化、集约化施工难度大
- 钢筋、埋件布置密集，钢筋、埋件施工工效不高
- 钢筋混凝土工程以现浇为主，难以模块化提升工效
- 基坑边坡比较大，塔机运输效率不高
- 厂址交通不便，气候炎热，人力资源组织困难

围绕施工重、难点开展工艺和技术创新，以需求为导向解决现场难题。



02

华龙一号施工工艺创新



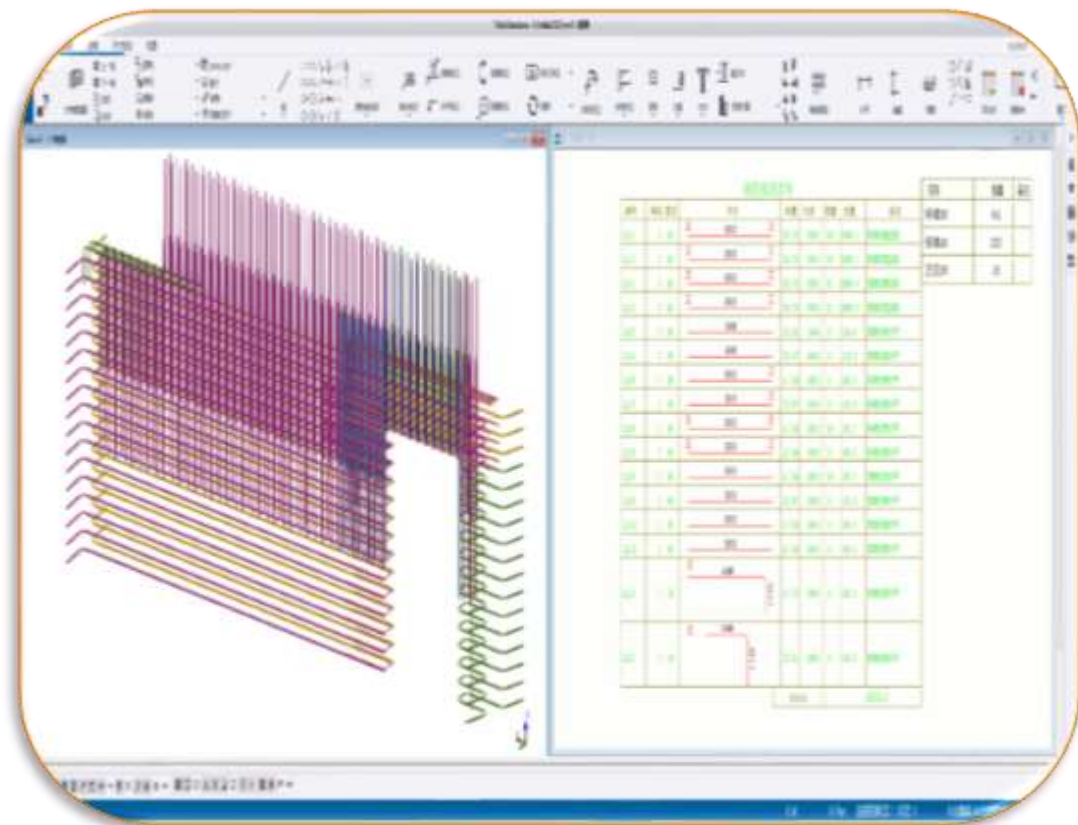
02 华龙一号施工工艺创新

一、钢筋施工工艺创新

1、智能下料与加工

钢筋自动下料

- ◆ 对三维软件进行二次开发，定制钢筋下料规则、输出文件模板，实现自动生成**复杂节点详图**、**钢筋料单**。
- ◆ 实现埋件、钢筋碰撞检查。
- ◆ 后续与设计对接，利用设计三维模型直接下料，推进设计、施工、运维全周期一模到底。



02 华龙一号施工工艺创新

一、钢筋施工工艺创新

1、智能下料与加工

钢筋自动加工

通过钢筋管理平台与数控钢筋加工设备对接，实现钢筋自动、少人工干预加工，提升钢筋加工效率。



02 华龙一号施工工艺创新

一、钢筋施工工艺创新

2、新型钢筋安装设备应用



使用**电动套筒扳手**，提高现场套筒连接速度，提高工作效率。



PORTABLE REBAR CUTTER.
手持钢筋切断机 CE-25
仅重3.4kg



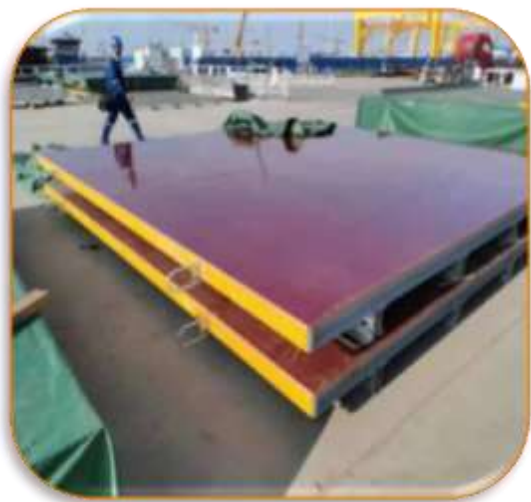
采用**手持式钢筋切断机**、**手持式钢筋弯曲机**，现场冷切割钢筋，方便现场处理异常钢筋。

02 华龙一号施工工艺创新

二、模板施工工艺创新

1、铝工字梁大模板应用

采用新型铝工字梁大模板体系，该体系具有**安全性高、重量轻、受力好、周转率高、混凝土成型质量好**等特点。



02 华龙一号施工工艺创新

二、模板施工工艺创新

2、可调弧形大模板应用

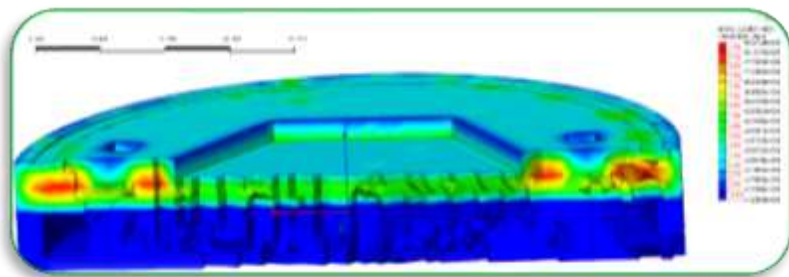
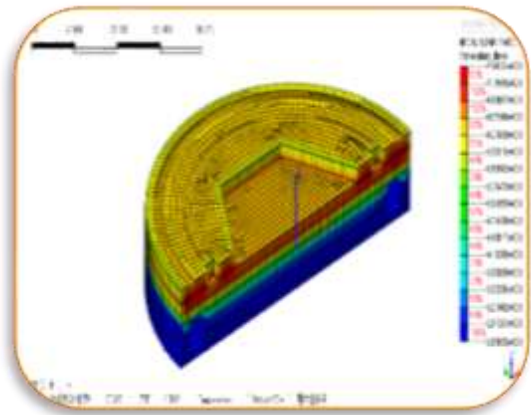
可调弧形大模板：内部结构弧形墙采用新型可调弧形大模板体系，该体系弧度可调范围为5m~30m，适用于内部结构各种弧度的墙体，具有安拆快捷、快速周转、混凝土成型质量好等特点。

单侧墙悬臂模板：内安全壳外侧、内部结构单侧环形墙、其他单侧墙等采用定制单侧悬臂模板体系，采用无对拉螺杆加固，减少模板安装时间和难度，降低安全、质量风险。

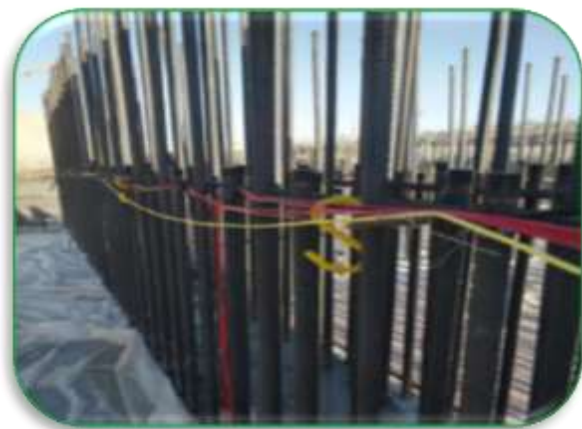


三、混凝土施工工艺创新

1、有限元分析+无线测温



利用有限元软件对大体积混凝土**温度和应力模拟分析**、**无线自动**采集温控数据，有效控制大体积混凝土有害温度裂缝产生，保证大体积混凝土施工质量。



02 华龙一号施工工艺创新

四、埋件施工工艺创新

1、埋件批量化加工生产技术

对于核岛标准埋件，采取批量化、集约化加工储备，达到“埋件超市”效果。充分发挥工厂加工潜能，有效避免埋件加工不及时的问题，确保埋件供应的连续性，为现场埋件安装顺利进行提供条件。



02 华龙一号施工工艺创新

四、埋件施工工艺创新

2、埋件加工、安装工效提升

埋件加工工效提升：将带焊接锚板的埋件，优化为**全锚固块机械连接**，减少核岛埋件80%的焊接量。

埋件安装工效提升：钢筋密集处，先将机械锚固块拆除，埋件钢筋锚爪穿过结构钢筋后再拧紧锚固块，极大提高埋件安装工效。



五、先进设备的研究与应用

加强与设备厂商合作，采取共同研发、定制生产、软件开发、多厂商集成研发、直接采购等多种灵活模式提高设备适用性、先进性，增加设备与公司信息平台互联互通，提高设备自动化、信息化生产能力。



无附着式施工升降机



定制室内起重设备



集成自动焊接设备



平台与设备互联互通



03

华龙一号施工技术创新

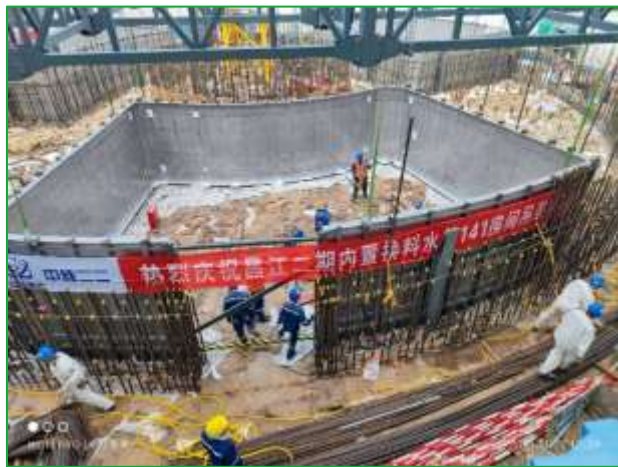


04 华龙一号施工技术创新

一、模块化施工技术

1、不锈钢模块化施工技术

反应堆厂房内**置换料水箱**、**非能动堆腔注水箱**、**堆内构件存放池及换料水池**均采用模块化施工，在拼装场地拼装成整体，采用2000T履带吊整体吊装就位。



内置换料水箱



非能动堆腔注水箱



堆内构件存放池

04 华龙一号施工技术创新

一、模块化施工技术

2、钢衬里模块化施工技术

反应堆厂房安全壳钢衬里筒壁和穹顶均采用模块化施工，模块一到模块五及钢穹顶在拼装场地拼装成整体，采用大型履带吊整体吊装就位。

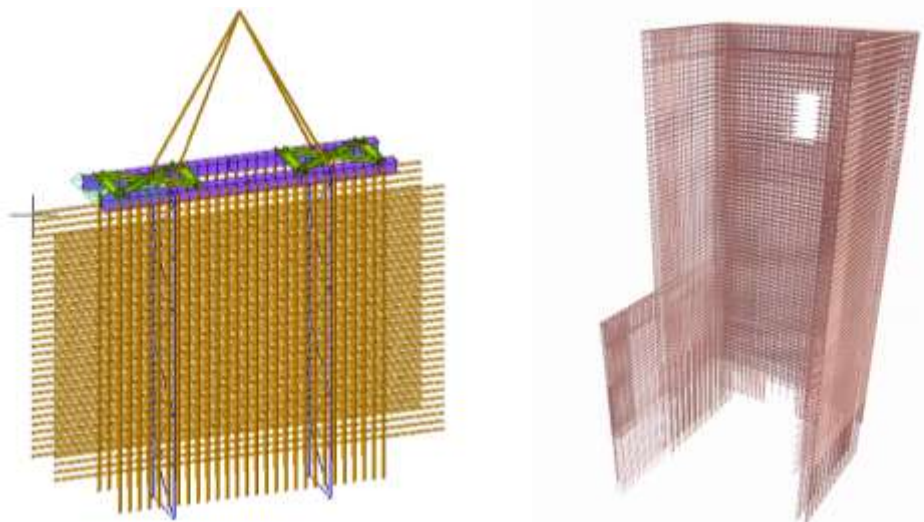


04 华龙一号施工技术创新

一、模块化施工技术

3、钢筋模块化施工技术

结合公司其他核电项目钢筋笼模块化施工经验，昌江项目部采用锥套锁紧工艺进行墙体和内部结构SG2钢筋模块化施工。

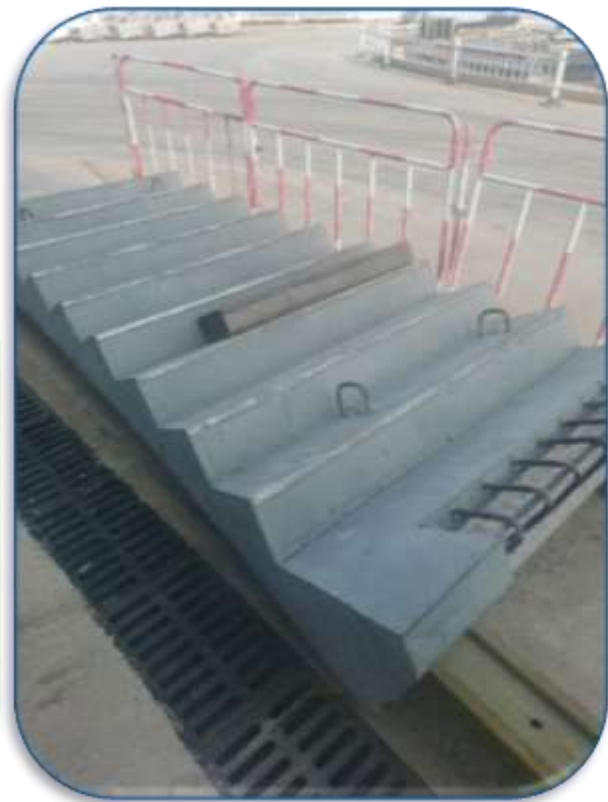


04 华龙一号施工技术创新

一、模块化施工技术

4、楼梯模块化施工技术

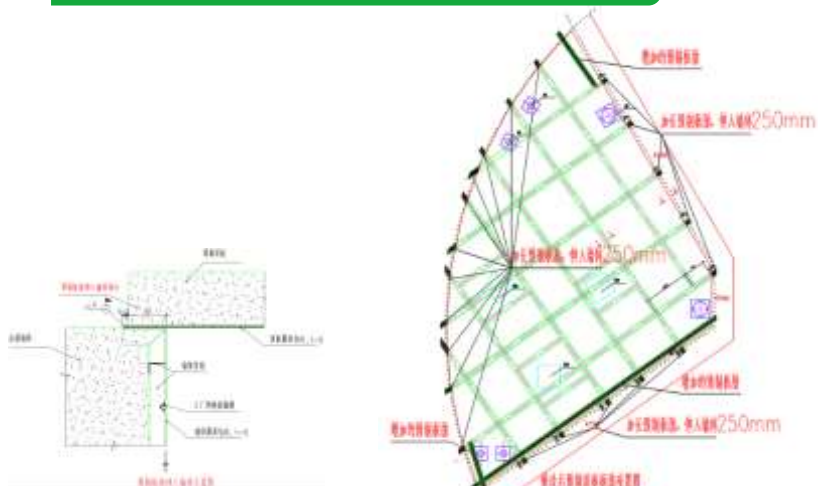
反应堆厂房周边主厂房**楼梯**采用模块化施工，厂外预制、厂内吊、安装，楼梯间平行施工，降低施工难度及施工时间。



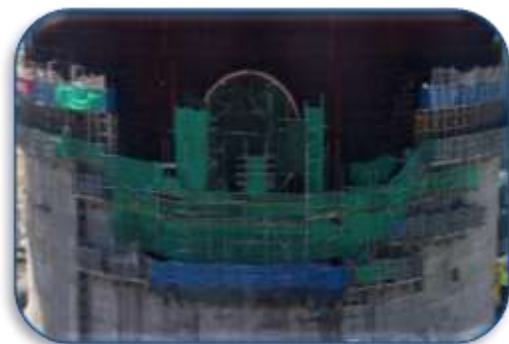
04 华龙一号施工技术创新

一、模块化施工技术

5、其他模块化施工准备



非能动堆腔注水箱顶板模块



闸门模块

非能动堆腔注水箱采用常规施工方法支撑架搭设高度高（0.94~22m）、成品保护困难，拟在4#核岛采用模块化施工，将不锈钢覆面和混凝土结构共同预制成模块，整体吊装。

RC厂房闸门工序多，钢筋密集，中间穿插预应力导管，施工困难，施工周期长。拟将套筒与钢筋、预应力导管预制成闸门组合模块，整体吊装就位。

04 华龙一号施工技术创新

一、模块化施工技术

5、其他模块化施工准备

GB沟R9段拟采用模块化施工，沟道模块车间预制，现场拼安装。标准段为“1m预制结构”每段重约26T，分为上、下两部分，纵、横向接缝均采用锁紧承插式接头，预应力钢束加固，目前已完成技术准备。



模块生产、运输



现场拼安装
沟道模块化施工



预应力张拉、防水处理

04 华龙一号施工技术创新

二、焊接技术创新

1、埋弧焊技术

公司首次实现在华龙一号钢衬里底板现场安装焊缝上使用半自动埋弧焊技术。



04 华龙一号施工技术创新

二、焊接技术创新

2、预埋件钢筋摩擦焊技术

预埋件钢筋摩擦焊技术具有以下优点：①固相焊接（非熔化焊），质量优异且稳定；②操作简单、适应性好、焊接效率高（焊接时间一般只需不到几十秒，可达传统焊接工艺的10倍）③无电弧光污染和气体污染，节能、节材。（无需填充材料和保护气）④所需功率仅是传统焊接工艺的1/5 ~ 1/15，成本可低至传统工艺的1/10；⑤可替代预埋件钢筋穿孔塞焊或T接角焊技术。

摩擦焊施工



摩擦焊成品

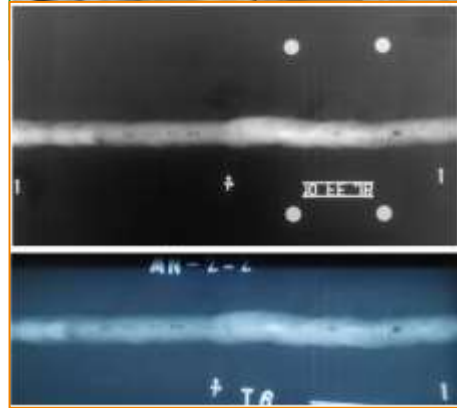


04 华龙一号施工技术创新

二、焊接技术创新

3、冷阴极X 射线检测技术

冷阴极X 射线检测技术已成功应用在焊工练习试件检测、缺陷去除后确认等内部检测中。通过使用该技术，大大缩短了检验结果的反馈时间，为焊工提供了更多的训练时间；同时，对返修焊缝实施挖凿后检测，为缺陷去除提供了保障，一次返修成功率得到了明显改善。



三、预应力施工技术国产化

与设备生产商合作，开展“中核华龙一号”**预应力施工设备国产化**的研究，为华龙一号设计专用设备，目前进展顺利，相关**核心设备均已设计完成**，并已有部分成品生产完成进入了试验阶段。



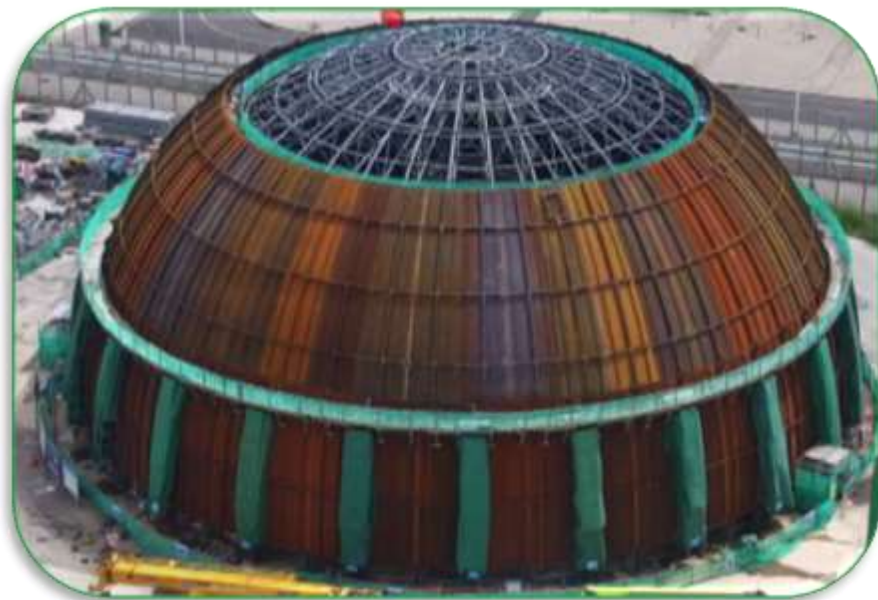
张拉千斤顶性能测试

04 华龙一号施工技术创新

四、球面穹顶建造技术

设计多适应性穹顶成型胎具，一个成型胎具满足穹顶各层钢衬里板成型需求，改变过往穹顶施工胎具数量种类多、占地大、材料多、制作任务重的不利局面。在施工过程中得到良好验证，成型尺寸效果及效率双丰收。

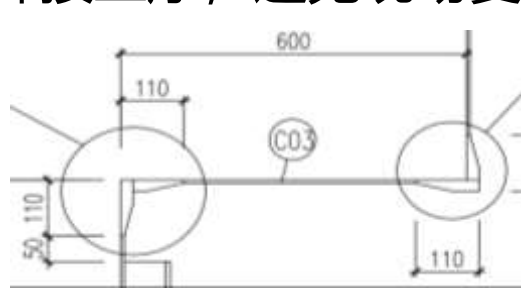
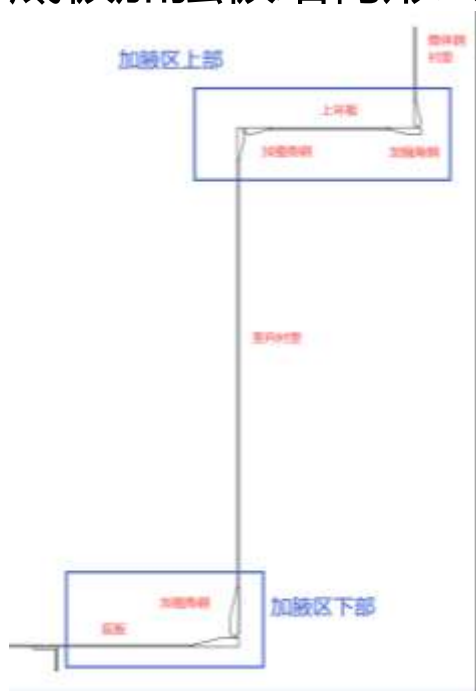
统筹喷淋管道等安装需求，现场采用零脚手架-全网架钢结构胎架拼装穹顶，结构更稳固，更有利于穹顶整体拼装尺寸保证，为喷淋管道等安装提供便利，消除了反复搭拆脚手架工作。



04 华龙一号施工技术创新

五、钢衬里加腋区施工优化

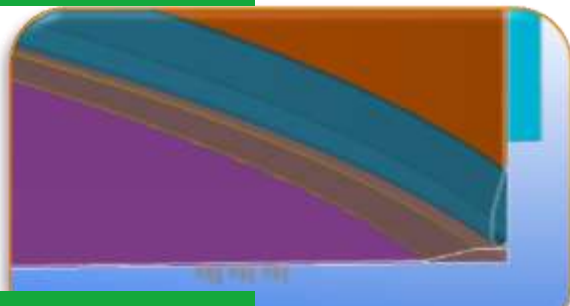
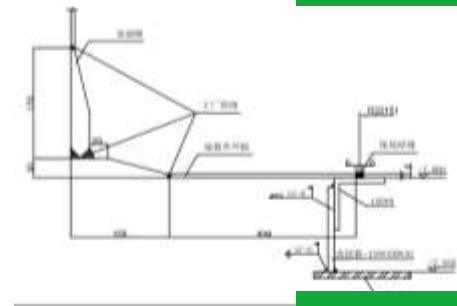
在3RC钢衬里加腋区水平段施工基础上优化：1、针对4RC模块一加腋区水平段原设计结构，提出合理性设计建议，并成功推动、应用到4RC钢衬里施工中，**减少厚板弧形大斜边加工、厚板等强全熔透对接焊缝各140余米，免除射线拍片量500余张**，从而优化了施工进度。2、优化调整底板加强板结构形式及焊接工序，避免现场复杂、困难空间操作，保证焊缝质量，提高效能。



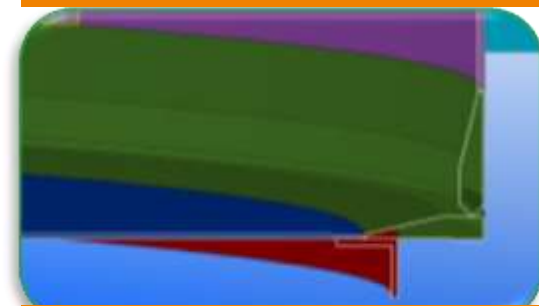
加腋区上部变更前



加腋区上部变更后



加腋区下部变更前



加腋区下部变更后

六、其他施工技术优化

1、高效拼板技术



过程实时监控



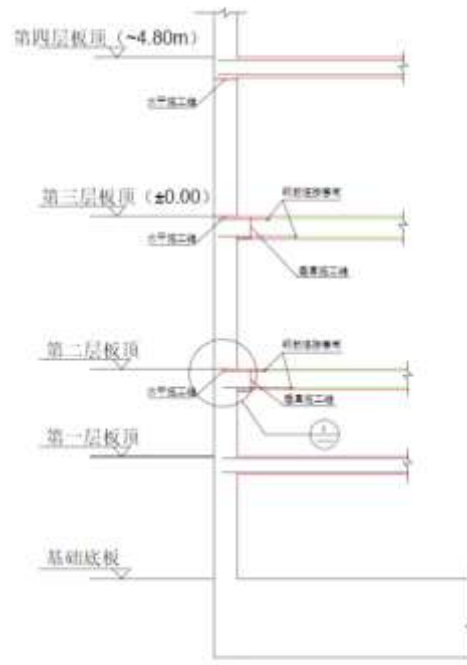
高效拼板设备及产品

六、其他施工技术优化

2、墙板平行施工技术

为加快核岛基坑回填，增加各子项堆场，提高核岛区域塔吊使用效率，优先启动核岛周边厂房外墙施工，将外墙与楼板施工缝由水平调整到墙侧，解除楼板对外墙刚性逻辑约束，实现墙板自由平行施工。

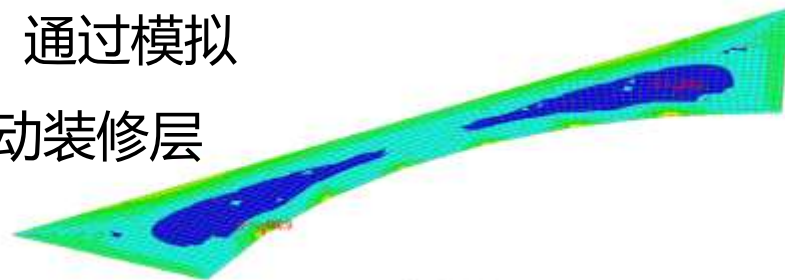
实施区域由设计计算外墙回填土压力满足要求后确定。



外墙施工缝留设示意图

3、N+0的施工技术

为减少房间移交压力，保证核岛区房间装修能够提前启动，通过模拟计算，在保证质量、安全的前提下将传统的N（施工层）+2启动装修层调整为N+0启动装修层施工，大幅提前房间装修启动时间。



(a) 绕 x 轴方向



04 华龙一号智能建造

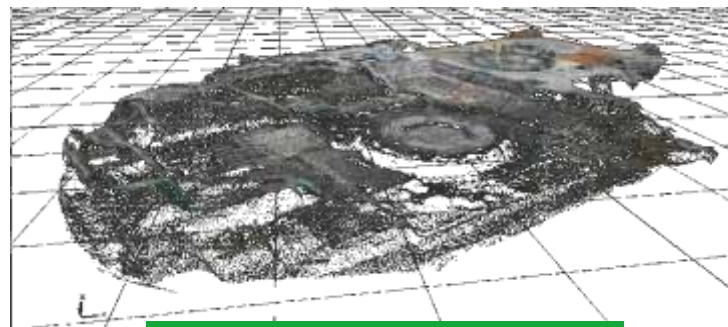


一、BIM施工技术

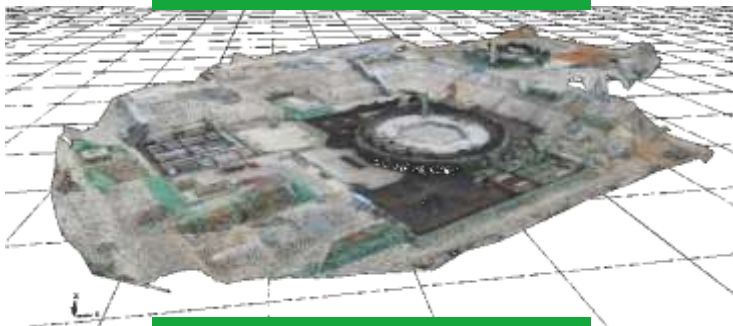
1、无人机+BIM施工模拟技术



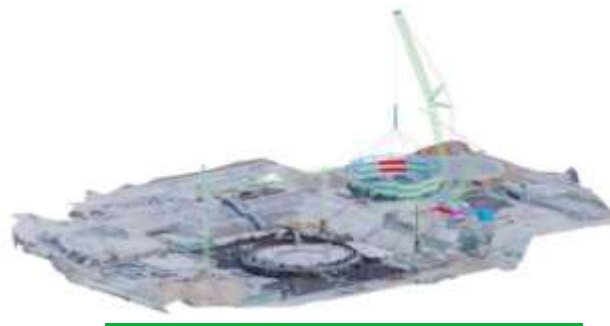
1. 获取航拍图



2. 点云生成网格



3. 网格生成实景



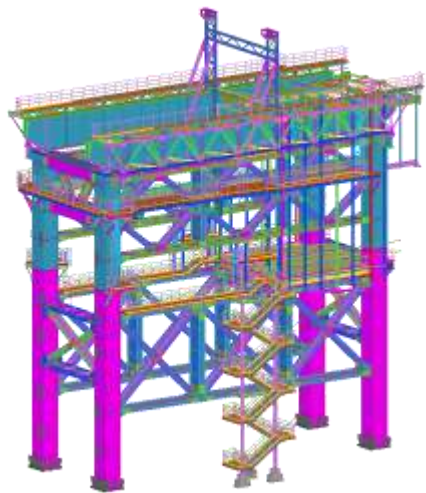
4. 整合模型

通过吊装施工方案模拟，模拟整个施工过程的可行性和与周边环境的干涉，确保吊装施工顺利进行。

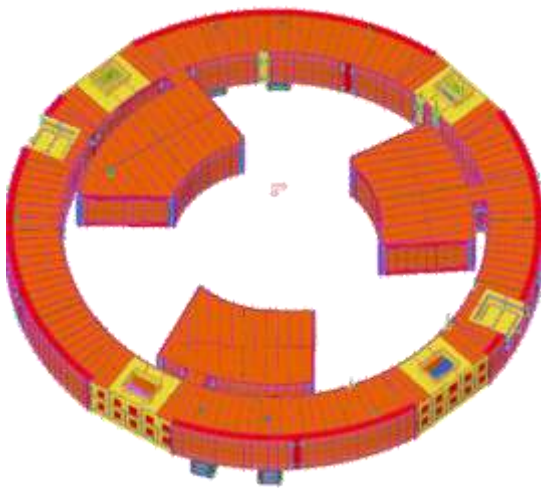
一、BIM施工技术

2、BIM技术---深化设计

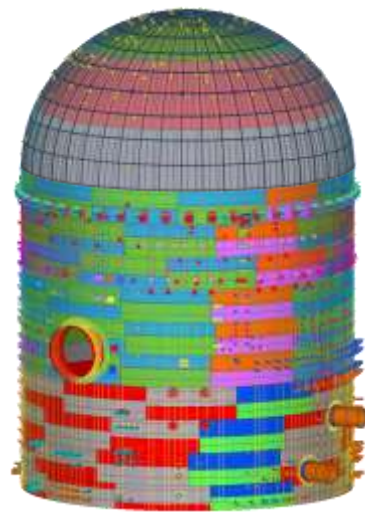
核电结构设计复杂、多样，二次深化设计量大。利用**BIM模型**将设计信息转化为可操作的施工信息，能更加高效的指导生产施工。基于模型输出零件数字文件，自动生成材料排版图纸，提高材料利用率。通过数控设备读取数字文件实现自动套料和切割，提高下料效率和精度。



高39m，长35.16m，宽11m
总重量930t



高2.84m，直径44.08m
总重量200t



高76.33m，直径46.8m
总重量1317t



一模到底

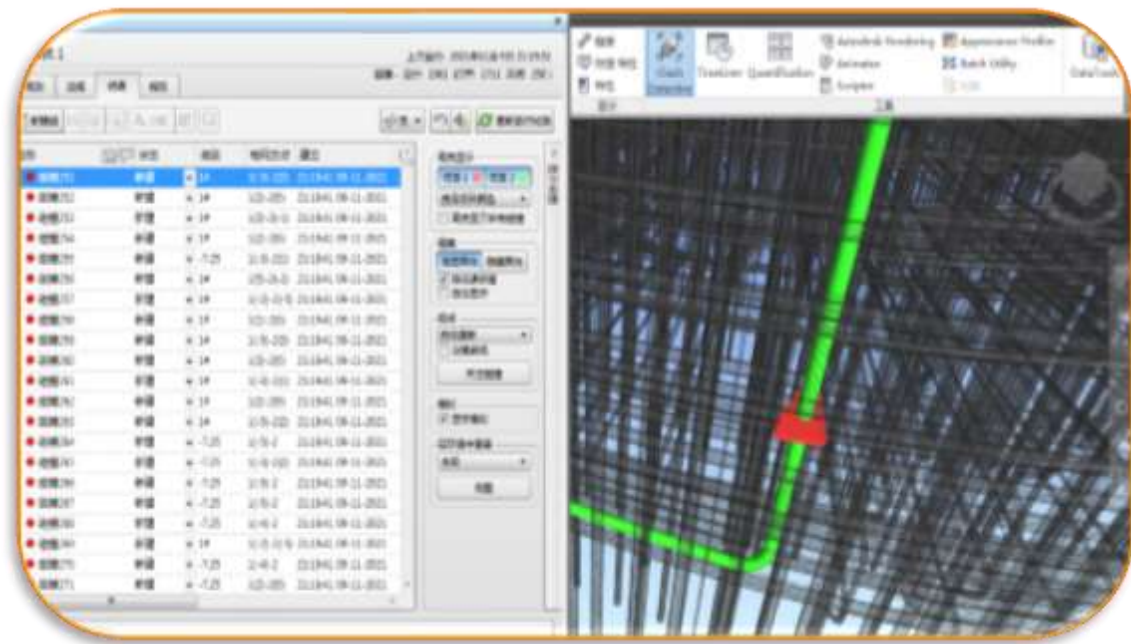
04 华龙一号智能建造

一、BIM施工技术

3、BIM技术---碰撞检查

“华龙一号”钢筋大部分使用32、40钢筋，钢筋密集，施工过程中存在较多埋件贯穿件碰撞问题，影响工效。

利用BIM碰撞检查，提前进行避让，有效减少实际施工中碰撞问题，提高工程质量和施工工效。



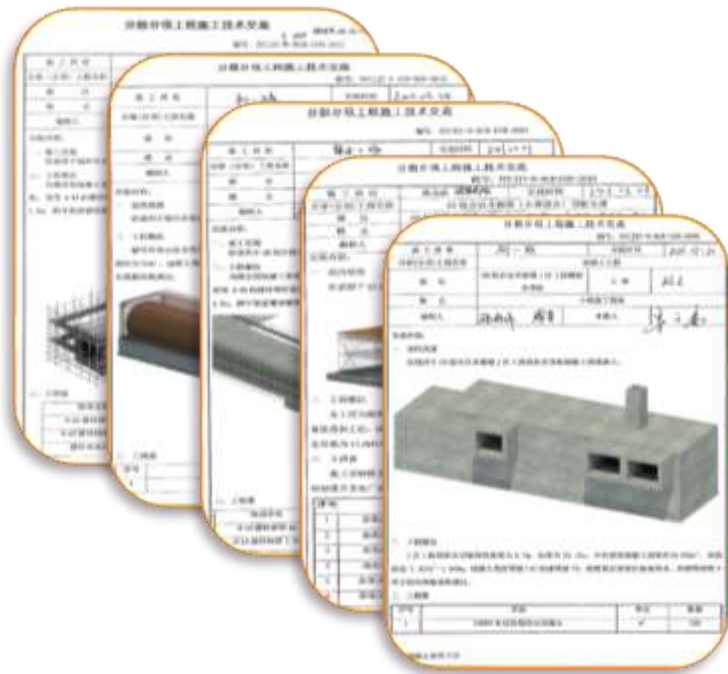
Navisworks钢筋碰撞检测

04 华龙一号智能建造

一、BIM施工技术

4、BIM技术---可视化交底

技术交底文件



现场视频交底



施工方案交底

04 华龙一号智能建造

一、BIM施工技术

5、3D沙盘推演

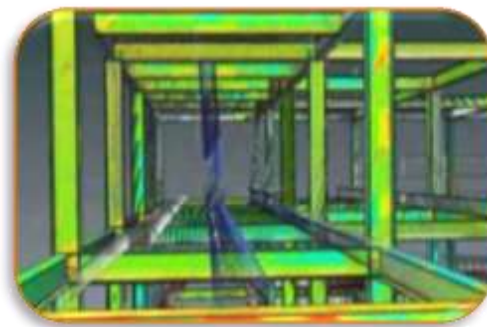
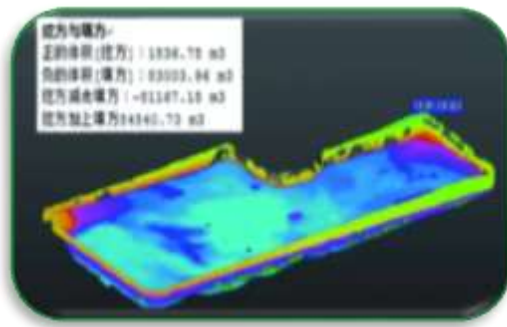
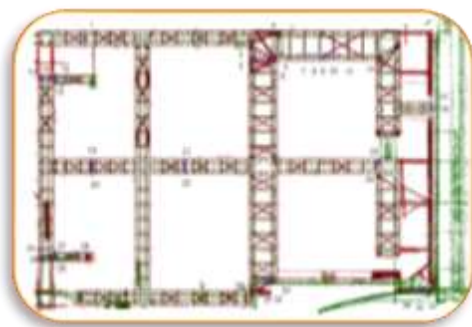
为了直观展现华龙一号结构特点和施工部署，应用**3D打印技术**，对华龙一号3#、4#机组按区域、厂房、分层打印。

3D模型可按施工层拼拆，能直观反应各厂房施工逻辑，用于厂房逻辑分析、施工沙盘推演。



二、激光三维扫描测量技术-矢量化数据

- 1、三维激光扫描仪在土方测量方面的应用：通过三维激光扫描仪对不同时间点的地形地貌进行扫描测量，自动获取精准、快速、完整的非接触式大空间数据信息。
- 2、BIM+三维激光扫描仪在施工模拟方面的应用：施工模块吊装前对模块外观、插筋等进行三维扫描，在软件中进行拟合，提前发现碰撞位置，采取措施避免。
- 3、BIM+三维激光扫描仪在质量验证方面的应用：通过三维扫描仪快速获取高精度实体点云模型，与BIM模型对比，快速检测模块拼装、埋件安装、混凝土外观尺寸等的误差，验证施工质量。
- 4、三维激光扫描仪对已完工程数字化保存：通过三维激光扫描仪对已完工程进行扫描，转化为实体点云数据，替代传统房间移交测量，也可作为运维阶段参考数据。



三、智能装备技术

智能加工设备



焊接机器人



自动化钢筋加工线

海南昌江核电现场建成月产能1.3万吨钢筋加工车间，月产能400吨钢结构生产车间。

车间均大量装备自动、智能数控设备，极大提高了加工效率。

智能变配电技术



以信息网络为载体，将传感器采集到的配电信息作为故障决策依据，**时刻监控施工现场临时用电安全隐患问题**，减少人因失误，有效的避免事故发生，提升施工运作效率。

四、物联网智能物资管理



基于**二维码+RFID技术**物联网智能物资管理系统通过互联网、终端设备等元素实现数据的采集、传递、处理、执行，构建来源可查、去向可追、责任可究的供应链可追溯管理体系，对工程项目的设计、生产、采购、施工、运维等全生命周期价值链的环节改进，提高了资源配置能力和使用效率。

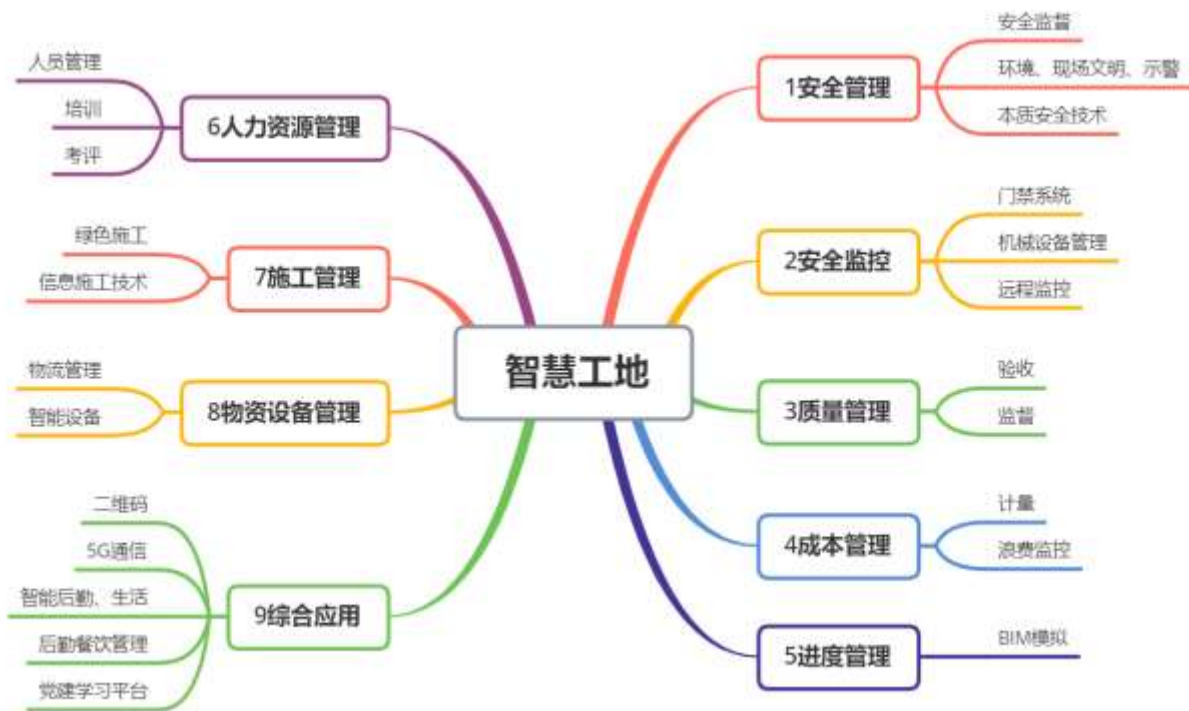
五、智慧工地

1、智慧工地平台---架构

智慧工地应用系统充分和公司现有管理平台融合，逐步打通各平台应用模块数据接口，充分实现整合各平台数据资源，最大化实现施工管理信息化、智能化。



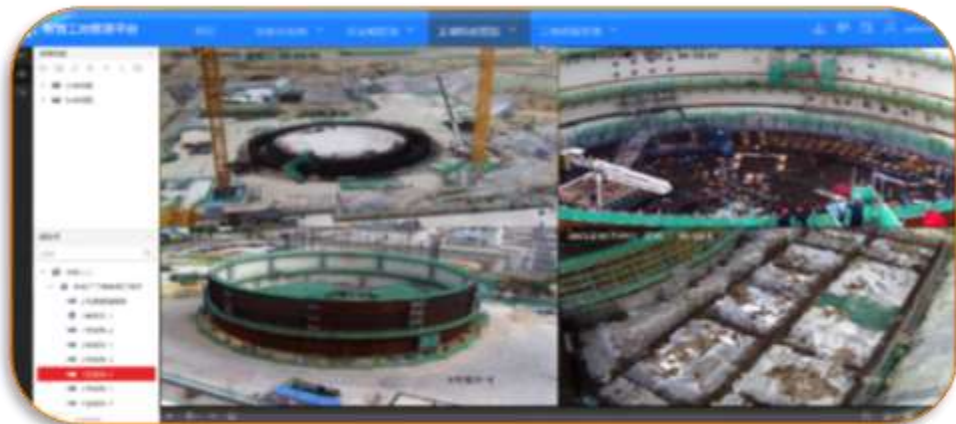
五、智慧工地



序号	功能模块	序号	功能模块
1	智慧党建	11	自动喷淋降尘
2	视频会议系统	12	巡检系统
3	移动终端	13	多媒体安全培训
4	实名制门禁	14	塔吊运行监控
5	人员考勤	15	吊钩可视化
6	工地广播系统	16	安全培训工具箱
7	视频监控	17	施工升降机监控
8	车辆识别系统	18	卸料平台监控
9	智能地磅	19	配电箱检测系统
10	环境监测	20	BIM场布

围绕项目质量、安全、进度、成本等主控要素启用了20个智慧工地应用模块，后续根据项目需求适时增加应用模块。

五、智慧工地



视频监控、人员定位



塔吊监控



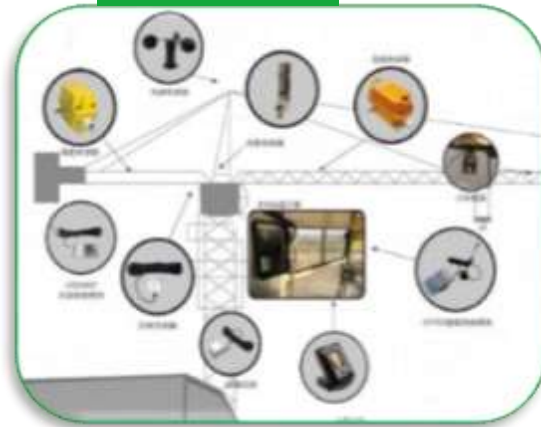
吊钩可视化



工地综合管控



门禁系统



塔吊防碰撞及监控



施工升降机监控

六、数字化建造

数字大脑

BIM技术为核心的智慧决策平台

采用基于BIM模型的智能分析技术，实现对建造过程**数字模拟**、**仿真分析**、基于数字孪生的**虚拟建造**

数字抓手

移动APP

数字化装备

物联网设备

智能设备

提升效率

数字躯干

项目施工管理平台

智慧工地管理平台

全过程

互联互通
实时交换

全要素

支撑工程建造数字化

数字抓手

智慧工地终端

建筑机器人

监控监测

智能计量

降低成本

六、数字化建造

企业数字信息化管理系统

企业数字信息化管理系统，涵盖公司现有全部业务，全员使用

统一规划

统一建设

集中部署

全员使用

数据统一存放

人力资源
管理系统

财务
管理系统

综合
项目
管理系统

核电
施工
管理系统

智能
印章
管理系统

智慧
党建
管理系统

数据
决策
支持
系统

企业
级
BIM
协同
平台

数字
协同
办公
系统

数字
档案
管理
系统

基于**同一PKPM平台技术架构**进行程序设计，综合项目管理系统涵盖**项目全生命周期业务**，主要包括：招投标、项目立项、合同管理、采购管理、供应链、质量、安全、技术、成本、竣工等内容。

六、数字化建造

工程子项	工程部位	计划量	入库量	验收量	出库量	确认量	总重量(T)	需用日期	编制人
4# 机组反应堆厂房(4RX)4RX	4RX反应堆厂房内部-3.32m板、梁、-3.32~0.00m墙体	11596	0	0	0	0	10.84	2022-09-20	朱建明
联合泵房(BPM)8PM	8PM泵房	18	0	0	0	0	0.03	2022-08-23	李善源
3# 机组反应堆厂房(3RX)3RX	二期-3RS内部结构标高7.5~13.5m墙R5401、R5404	112	14	0	0	0	0.47	2022-08-26	苏龙
3# 机组反应堆厂房(3RX)3RX	二期-3RS内部结构标高6.152~7.5m墙R5402	881	738	0	0	0	6.40	2022-08-26	苏龙
3# 机组反应堆厂房(3RX)3RX	二期-3RS内部结构标高7.5~13.5m墙R5402	3930	3338	0	0	0	31.14	2022-08-31	苏龙
联合泵房(BPM)8PM	D3锚充区第4次浇筑	183	0	0	0	0	2.80	2022-09-10	卢新
3# 机组反应堆厂房(3RX)3RX	二期-3RS内部结构标高7.5~13.5m墙R5401、R5404	1154	1118	0	0	0	7.10	2022-08-31	苏龙
3# 机组燃料厂房(3KA)3KA	二期3KA燃料厂房-5.300~-0.050m KA-2层K2004墙	1280	1280	0	0	0	2.77	2022-08-24	卢海安
3# 机组核辅助厂房(3NH)3NH	3NH厂房-5.3m一段墙体钢筋	270	160	160	0	0	0.88	2022-08-21	武品印
3#常规高电压母线(3GK)3GK	3GK-1/3GK-2	3369	0	0	0	0	92.78	2022-08-26	刘家乐
3# 机组燃料厂房(3KA)3KA	3KA厂房-0.050m楼梯KA-1段	418	407	0	0	0	17.92	2022-08-31	侯玉梅
3# 机组燃料厂房(3KA)3KA	3KA厂房-5.300~-0.050m 墙体	3000	0	0	0	0	126.78	2022-09-02	黄朝鹏

核电施工管理系统涵盖人员、物项、技术准备、加工、质量、安全、进度、成本等主控要素。

04 华龙一号智能建造

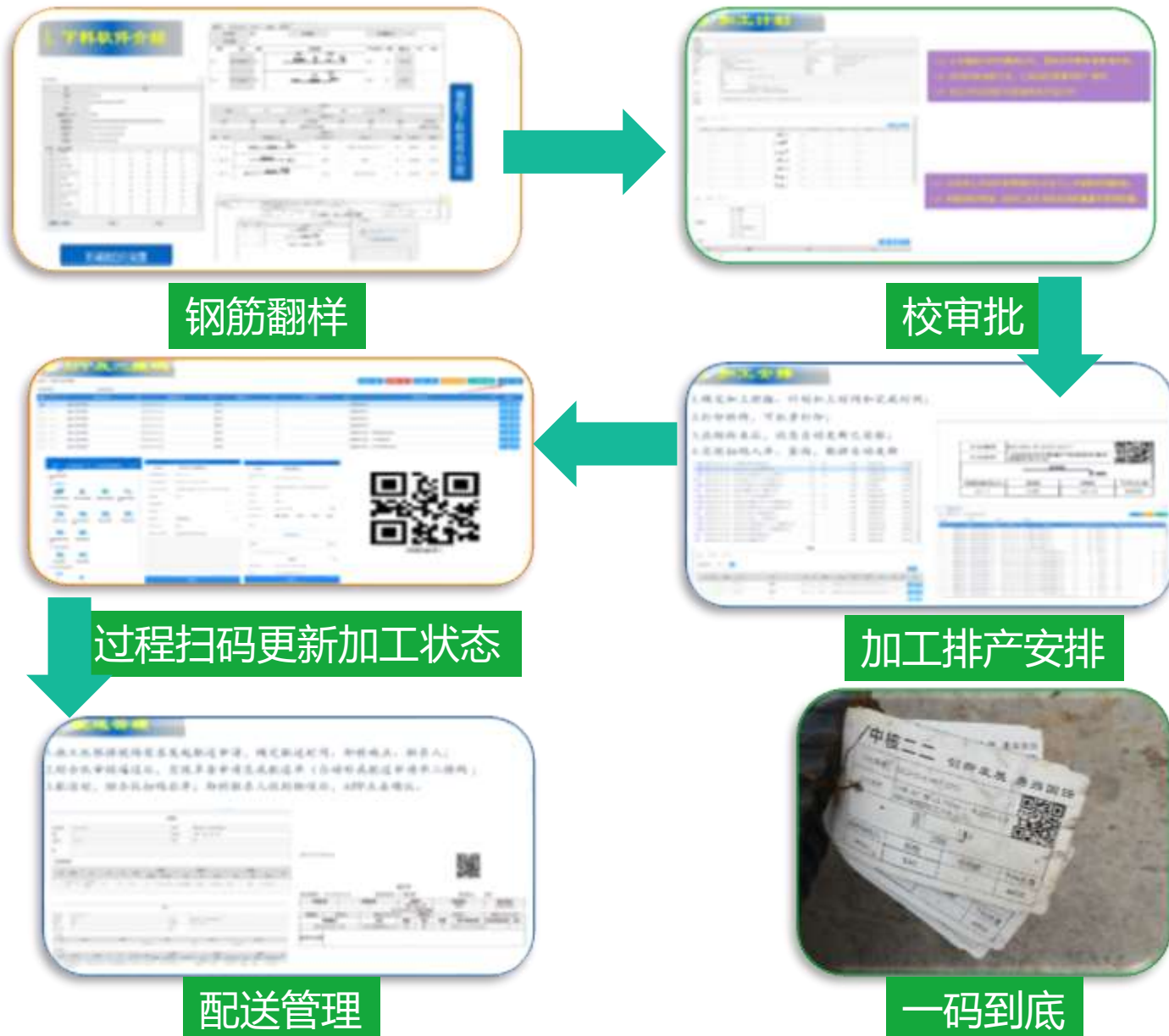
六、数字化建造

加工管理模块

钢筋、埋件、模板、模块支持线上翻样下单、审批、任务下达、加工、配送全流程功能；

配套APP、专用扫码设备辅助出入库管理；

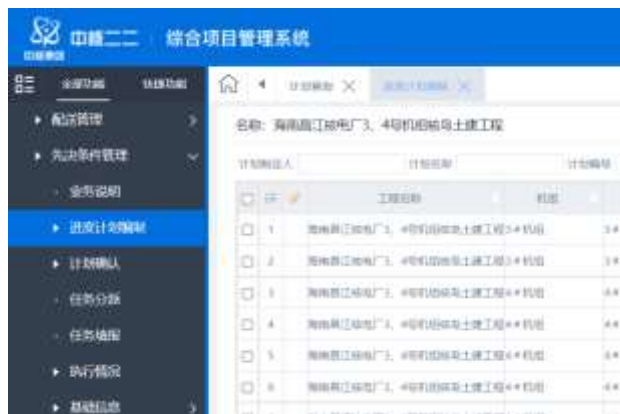
加工物项完工、验收、出入库状态扫码即同步到平台。



04 华龙一号智能建造

六、数字化建造

先决条件管理



导入工程进度计划

序号	项目	名称	计划完成时间
1	施工图纸	编制	2022-01-26
2	施工图纸	评审	2022-02-25
3	施工图纸	图转台账	2022-03-27
4	施工图纸	交底、答疑	2022-04-26
5	施工图纸	开工报	2022-04-26
6	安全	混凝土专项	2022-06-20
7	配合比	混凝土配合比	2022-05-26
8	施工方案	方案	2022-04-26
9	施工方案	方案变更	2022-06-11

形成准备清单

项目	施工图纸
计划完成时间	2022-01-26

序号	文件编号	文件名称
1	141830A-JG502-001	应急柴油发电机房A列30A-10.600m至0.500m楼板梁板设计说明
2	141830A-JG502-002	应急柴油发电机房A列30A-4.800m至-2.300m板梁板板图
3	141830A-JG502-003	应急柴油发电机房A列30A-4.800m至-2.300m板梁板板图
4	141830A-JG502-004	应急柴油发电机房A列30A-10.600m至0.500m楼板梁 顶板封固
5	141830A-JG502-005	应急柴油发电机房A列30A-10.600m至0.500m楼板梁 第二层封固图 (文件目录)

在线完成工作

2) 预警天数 n

$$n = \text{开工日期} - \text{当前日期}$$

n > 距开工最高天数 (150) 白色

n < 距开工最高天数 150 n > 距开工最低天数 120 黄色

n < 最高天数 120 红色

是否完成为是 绿色

定义技术文件准备预警值

计划完成时间	预警天数	实际完成时间	部门	责任人	是否完成
2022-01-26	0	2022-08-28	技术一部	张晗	是
2022-02-25	0	2022-08-28	技术一部	张晗	是
2022-03-27	0	2022-08-28	技术一部	张晗	是
2022-04-26	-123		技术二部	陈浩东	

工作状态自动预警

在总结多年核电建造经验的基础上，借鉴业内同行良好实践，海南昌江华龙一号实现了钢衬里模块、不锈钢模块、先进焊接技术、楼梯模块、BIM技术、智慧工地等当前主流核电建造先进技术。

中核二二将继续秉承“兴企之道、创新为本”的发展思路，深入推进华龙一号技术创新应用，大力研发华龙一号模块化施工、数字化建造、智能装备等先进技术，助力“华龙一号”打造国家名片。

谢谢

THANK YOU

