



华龙一号土建施工关键建造技术 创新应用

中国核工业华兴建设有限公司

2022.09



CONTENTS

01

“华龙一号”建造
业绩展示

02

关键建造技术应用
情况

03

关键建造技术后续
部署



01

“华龙一号”
建造业绩展示



卡拉奇K2/K3核电项目

巴基斯坦卡拉奇K2/K3核电项目是“华龙一号”落户海外的第一站，项目为两台“华龙一号”核电机组，K2于2015年9月18日开工，2021年5月20日商运，K3于2016年5月31日开工，2022年4月18日商运。

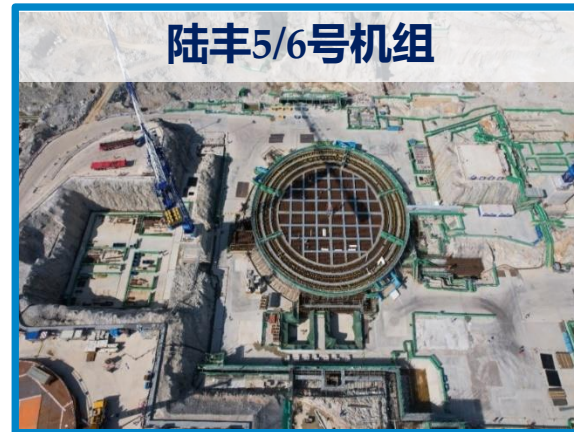


浙江三澳核电项目

浙江三澳核电项目是我司承建的华龙一号技术融合后的广核项目，三澳核电1#机组于2020年12月31日开工、2#机组于2021年12月30日开工。

广东太平岭核电项目

国内首个采用半地下室布局结构形式百万千瓦级核电常规岛工程。华兴首次承建的华龙一号常规岛工程，工程包含两台华龙一号常规岛，1#常规岛于2020年10月24日开工，2#常规岛于2021年8月6日开工。



广东陆丰核电项目

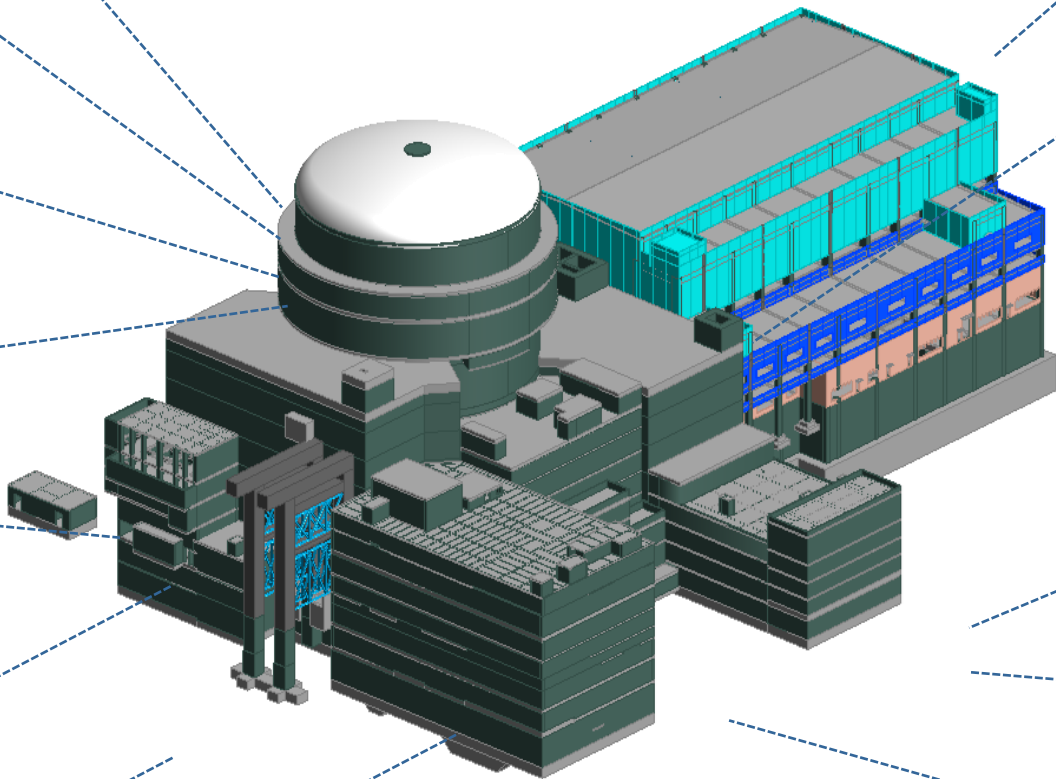
广东陆丰核电项目与浙江三澳同属广核华龙一号堆型，目前陆丰5#机组于2022年9月8日FCD。



02 关键建造技术应用情况

02 关键建造技术应用情况

中核华兴针对K2K3、三澳华龙一号核电项目堆型特点及施工难点，开展多项关键技术研究，解决了大量工程建设中的重大技术难题，实现了预期建造目标，现重点介绍以下关键建造技术。



开顶法施工技术



预应力施工技术



模块化施工技术



智能化焊接建造技术



焊接智能化生产车间



高温环境下石灰石粉混凝土施工技术



BIM技术应用



E型支架设计技术



钢筋自动化加工技术



工程物项安装的智能质量检测技术



模板支撑体系在线安全监测技术



混凝土智能振捣技术



三维扫描技术



弧形密闭带垫板不锈钢水池施工技术



安全壳设备闸门施工技术

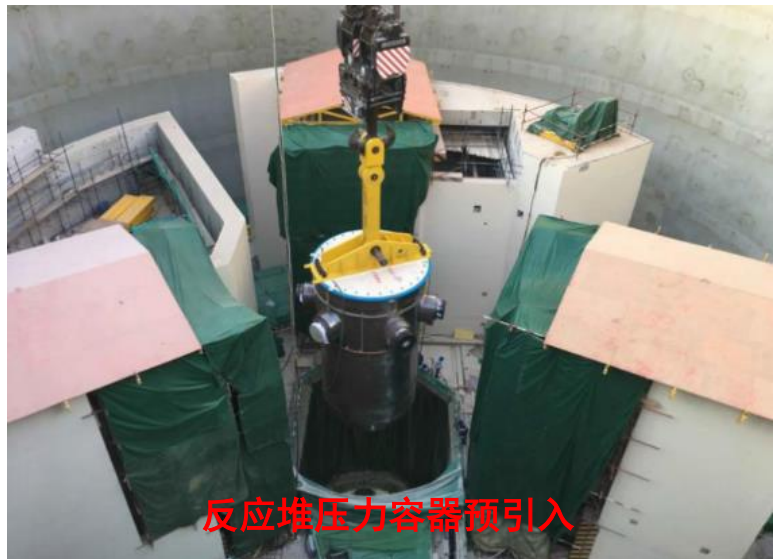
02 关键建造技术应用情况

应用1：开顶法施工技术

卡拉奇K2K3项目首次采用开顶法施工技术，通过采取**堆腔不锈钢模块工艺、隔离隔断提前介入装修、设备支撑支架提前引入安装、土建油漆和主设备露天防护措施**等手段，实行土建安装施工的深度交叉。采用重型吊车在穹顶吊装之前提前引入4大主设备（1台反应堆压力容器+3台蒸发器），提前启动安装工作。

➤ 取得的效果：

使K项目主管道焊接较传统施工方法K2、K3分别**提前7.5、9个月启动**，提前原进度计划**4.5、7.5个月完成**。缩短了核岛总体建造工期，推动了我国核电土建建造技术升级。

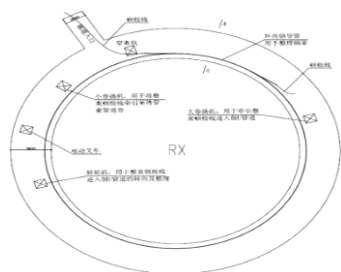


应用2：预应力施工技术

通过对预应力施工技术创新（**三管道穿束下料、整体编束墩锚和牵引**）及预应力专用设备研发（**双层预应力水平张拉平台、倒U型整体牵引成套设备**），攻克华龙一号堆型倒U型预应力系统施工难点，在满足质量和安全的条件下，缩短了预应力施工工期、提高了施工工效。

①技术创新

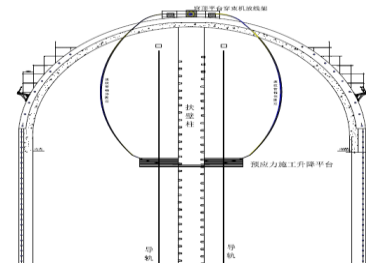
单管下料增加到**三管道穿束下料法**；快速下料、整体编束墩锚和牵引同时施工的方法



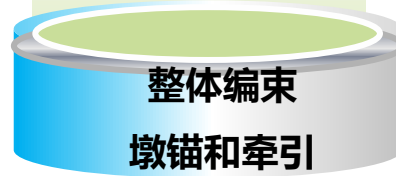
穿束时间缩短1/3

作业效率提高2/5

总体时间缩短1/2



双驱动力穿束和牵引工艺的关键技术，解决水平钢束孔道长、闸门贯穿件多，孔道起伏曲线多、穿束难度大的难题



千斤顶位移、举升

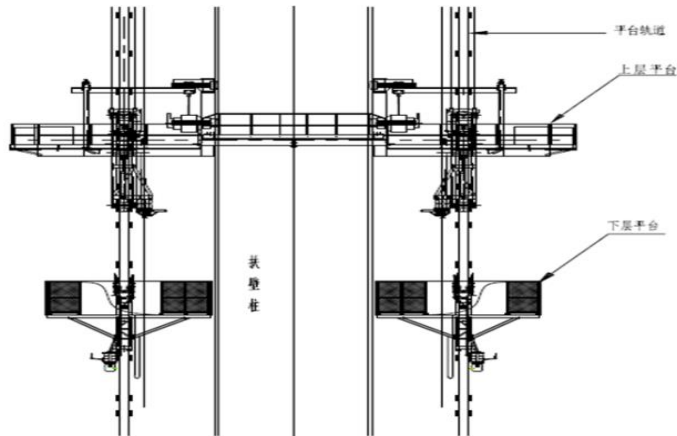
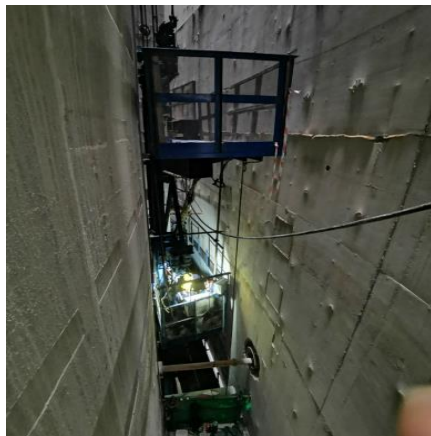
设计一套快速安装千斤顶的方法，解决了廊道空间限制下千斤顶无法安装、倒运难。

应用2：预应力施工技术

② 预应力专用设备研发

双层预应力水平张拉平台：

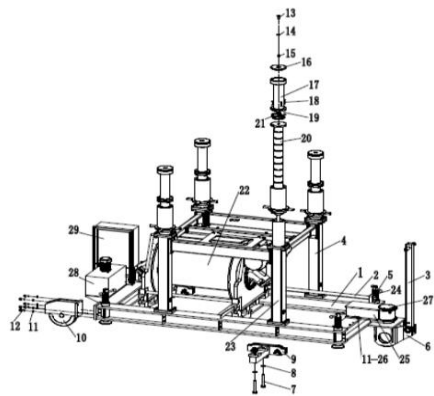
载重量大，上下层平台同步作业，多工序作业。



传统预应力平台，只能进行**单项作业**；而自研双层施工平台**能实现上下两个平台同步作业，多工序连续施工**，施工效率提高**1倍多**。

倒U型整体牵引成套设备：

相关的主要设备包括 30t 液压卷扬系统设备及油泵、预应力束导向装置、钢丝绳与钢绞线接头装置、整体编束设备等。



倒U型整体牵引成套设备成功应用，缩短倒U型钢束的施工工期，每天穿束量由**1束**提高到**3束**，每天张拉由**2束**提高到**6束**水平钢束，施工效率得到提升。

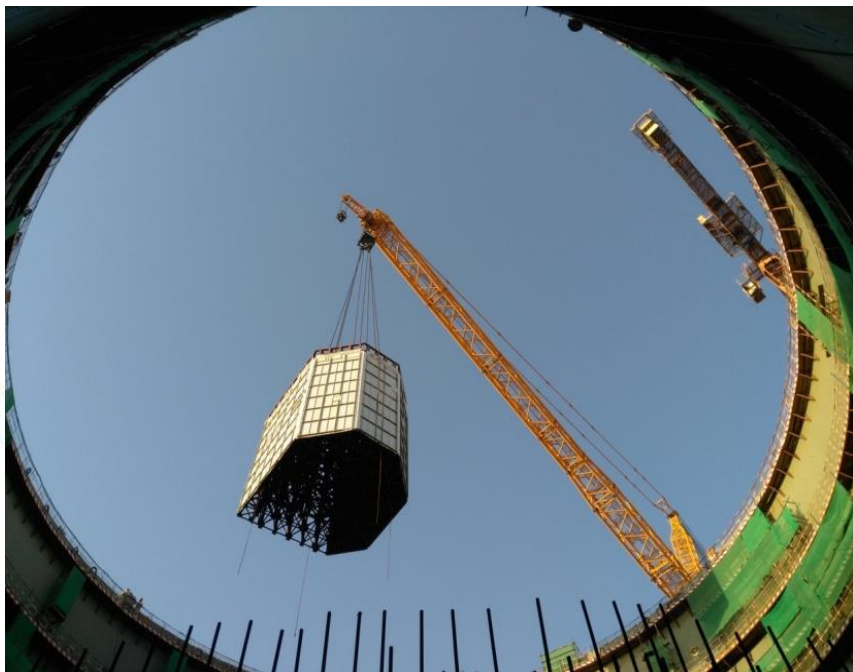
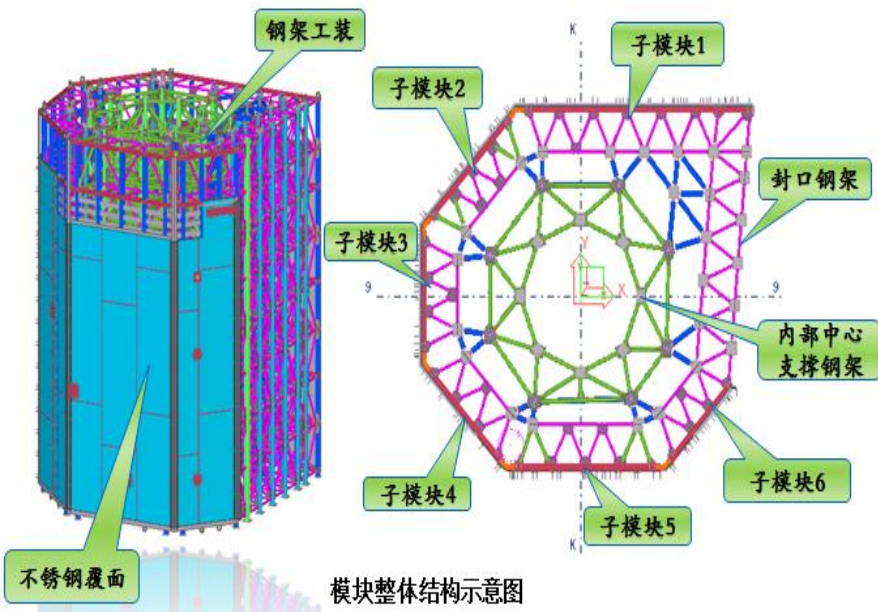
核电站预应力施工专用设备申请专利7件，已授权发明3件，实用新型2件。

突破了国外专用设备的限制，解决了半球形穹顶曲面预应力施工难题。

应用3：模块化施工技术

➤ 堆腔不锈钢水池模块化

为核岛安装关键路径压力容器引入和主管道焊接工作提前开始，K-2/K-3项目创新采用“先贴法”施工工艺，首次把模块化施工技术运用到海外“华龙一号”堆型堆腔不锈钢水池建造领域，实现了核电堆腔水池不锈钢覆面建造模块化设计、模块化制造和一次性整体吊装。缩短堆腔施工的关键路径，为堆腔内压力容器**提前5个月引入**创造了条件。



02 关键建造技术应用情况

应用3：模块化施工技术

➤ 外壳钢穹顶模块(钢制内模技术)

K3机组外穹顶首次采用钢制内模技术，为内层安全壳及其内部结构提供保护。穹顶重约366吨，是一个直径53米的多曲面组合壳体，由四层共63块预制单元体构件组成。应用了**分阶段双曲面成型技术、H型钢冷弯成型技术、型钢框胎膜成型技术、型钢框免翻身焊接技术、钢板壳免卷制成型**等一系列新技术。采用外壳钢穹顶整体实施方案，有效避免了对安全壳整体试验的影响，**释放工期达8个月**，同时也大大提高了外穹顶施工安全系数。

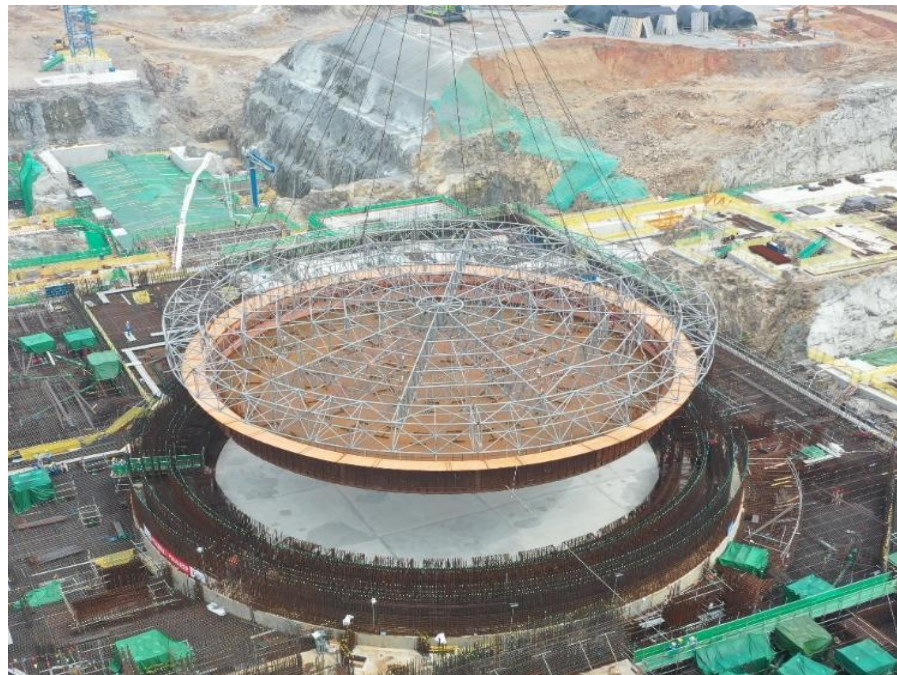
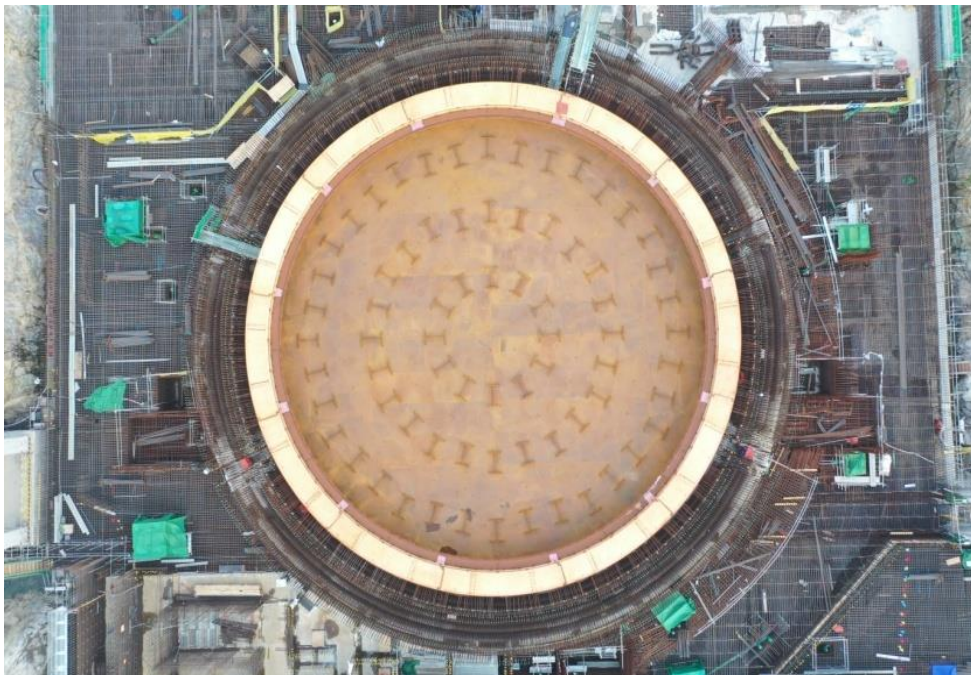


02 关键建造技术应用情况

应用3：模块化施工技术

➤ 钢衬里模块化施工技术

三澳项目安全壳钢衬里底板、筒体及穹顶均采用模块化施工工艺。钢衬里底板+截锥体提前在拼装场地拼装、焊接，然后整体吊装至筏基找平层上。可节约总工期20D，同时底板模块在预制场地作业环境好，可应用自动焊接技术，提高焊接效率和质量。

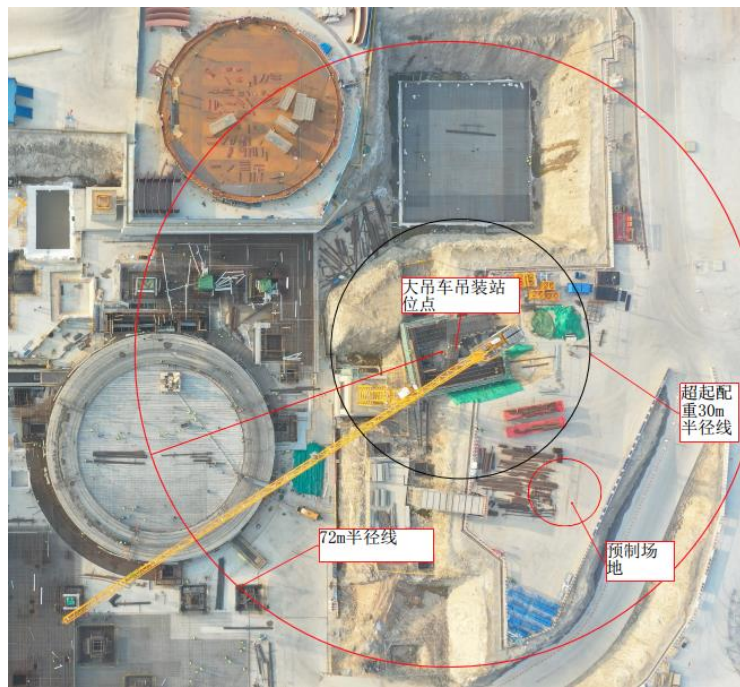
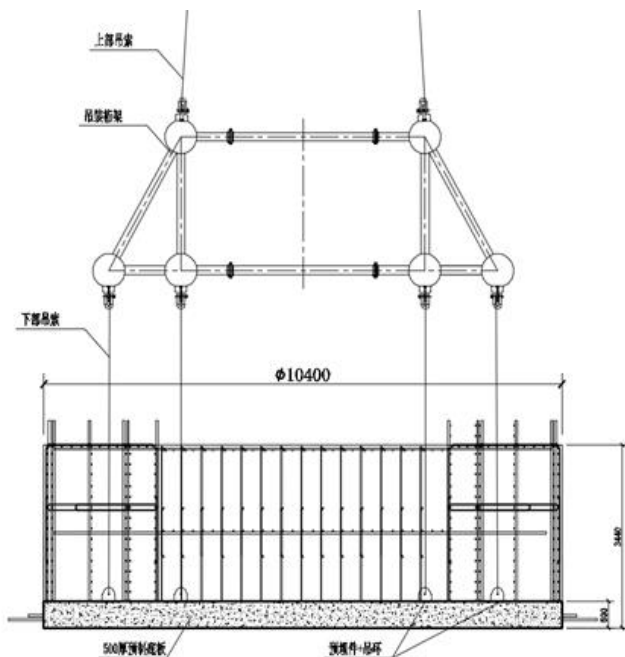


应用3：模块化施工技术

➤ 堆坑混凝土底板模块化

堆坑底板混凝土模块为圆饼形，半径5.20m，混凝土浇筑厚度为500mm，模块自重约192.78t，起吊总重量约238.26t（含桁架、吊索具、履带吊吊钩及钢丝绳组等），采用整体吊装就位。

三澳项目部和广核设计院开展专项研究工作，将2BRX厂房堆坑底板改为模块化施工工艺，即：在堆坑混凝土底板预制完成后（下部为500mm混预制钢筋混凝土，上部为底板结构钢筋），一次性整体吊装就位。**可节约内部结构主线工期约20天。**



02 关键建造技术应用情况

应用3：模块化施工技术

➤ 内部结构蒸汽发生器隔间墙体(SG模块化)

传统做法：反应堆厂房内部结构主平台以上三个SG隔间，为混凝土的现浇结构，传统的施工周期在2.5个月。

优化措施：通过吸收AP1000和CAP1400的施工经验技术上，前期充分的论证，将内部主平台以上三个SG隔间等结构设计成SC模块化结构。

取得效果：单个模块现场施工工期（安装+混凝土浇筑）约10d，总工期约1.5个月，与传统做法相比可缩短主线工期1个月，可提前完成设备引入、实现穹顶吊装工作。



02 关键建造技术应用情况

应用3：模块化施工技术

➤ 预制风道模块化施工

核岛厂房设计有大量尺寸狭小的通风竖井结构，采用现浇混凝土工艺施工难度大、安全风险高，且难以保证后续装修工程施工质量。

采用**预制模块+现场吊装**的方式实现预制装配式施工，模块与主体结构之间主要采用预埋的专用连接件连接。



02 关键建造技术应用情况

应用4：智能化焊接建造技术

➤ 激光跟踪MAG自动焊技术

- 三澳华龙一号项目的钢衬里重点部位规模化应用**单面焊双面成形MAG自动焊装备及工艺**；
- 自主攻关研发**智能焊接行走小车、智能跟踪算法、智能焊接工艺数据库**；
- 国内首次实现核级钢衬里安装高效智能MAG焊应用**“零”的突破，攻克了欧美“卡脖子”技术问题，达到国际先进水平。**



核工程应用项目	自动焊应用量m	拍片数量/张	一次合格率
三澳核电	1088	2608	RT: 98.09%

02 关键建造技术应用情况

应用4：智能化焊接建造技术

➤ 双钨极+热丝TIG自动焊技术

- 研发的高效TIG（双钨极+热丝）自动焊装备及工艺技术，**实现国内首创、国际领先**；
- **常规TIG自动焊焊接效率2倍以上**；
- 全面提高TIG焊的熔覆效率，确保了核工程乏燃料不锈钢水池安装关键节点顺利完成，保证焊接质量、降低人员需求。



02 关键建造技术应用情况

应用5：焊接智能化生产车间

➤ 钢结构（梁柱类）机器人智能焊接工作站

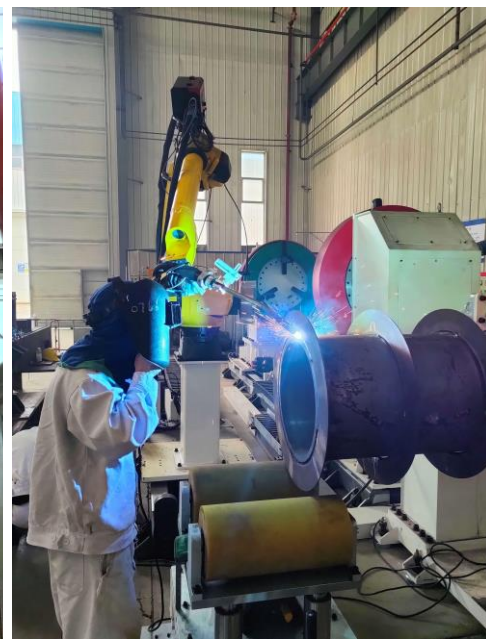
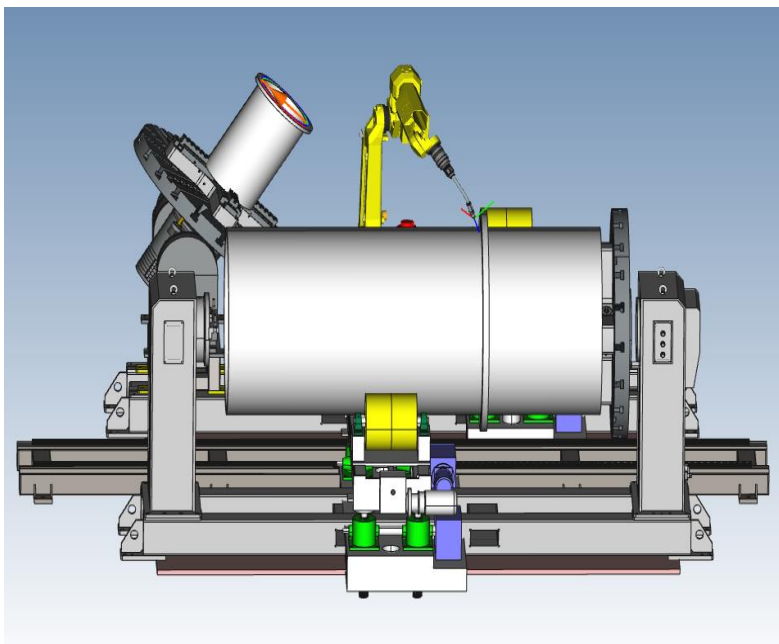
- 针对核电大量的梁柱钢结构车间加工，开展机器人智能焊接应用研究；
- 通过**控制系统+视觉技术实现多机协同、智能焊接。**



应用5：焊接智能化生产车间

➤ 核级贯穿件机器人焊接工作站

- 针对核级贯穿件手工焊接效率低问题，进行机器人工作站技术研究
- 通过**焊接机器人、自动变位工装**实现核级贯穿件加筋板、法兰板，钢筋、埋件等中小尺寸构件自动焊接。



02 关键建造技术应用情况

应用5：焊接智能化生产车间

➤ 预埋件（穿孔塞焊）焊接机器人生产线

- 应用于核电土建预埋件车间制作焊接，包括钢筋穿孔塞焊、钢筋方板栽焊等，也可根据产品特点进行其他中小尺寸构件焊接；
- 采用全自动化操作，效率是**手工焊2倍左右**。



02 关键建造技术应用情况

应用5：焊接智能化生产车间

➤ 预埋件（埋弧螺柱焊）焊接机器人生产线

- 提高锚固钢筋式预埋件制作效率；
- 该技术将螺柱焊与埋弧焊很好结合，锚固钢筋可一次焊接成型，在自动化工作站中，**实现了预埋件埋自动弧螺柱焊，预埋件加工效率至少提高了3倍以上。**

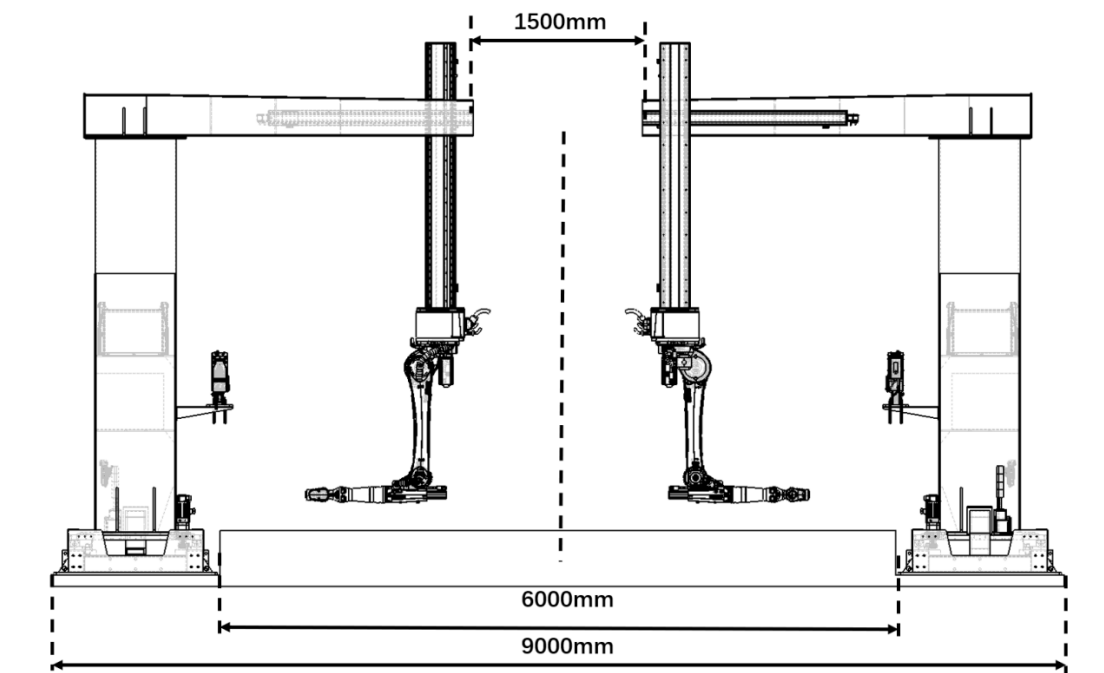
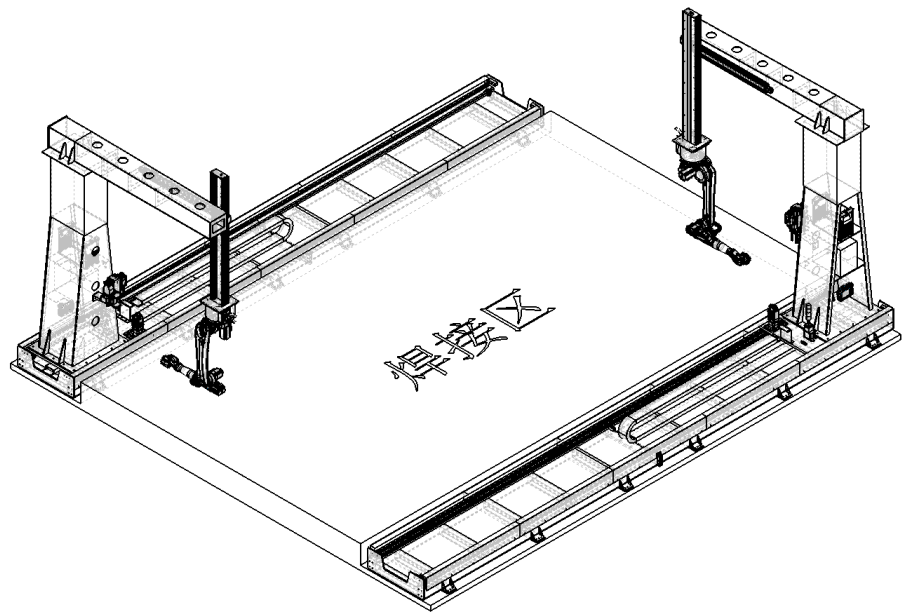


02 关键建造技术应用情况

应用5：焊接智能化生产车间

➤ 不锈钢自动焊焊接机器人工作站

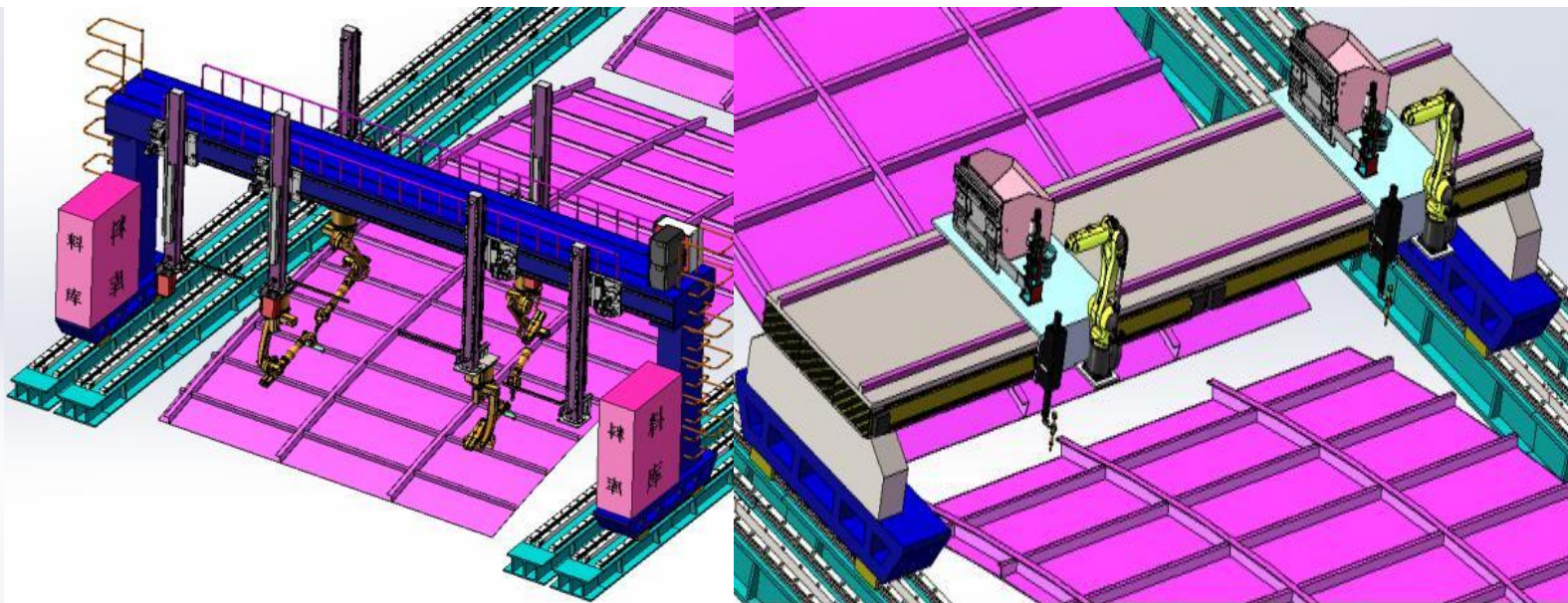
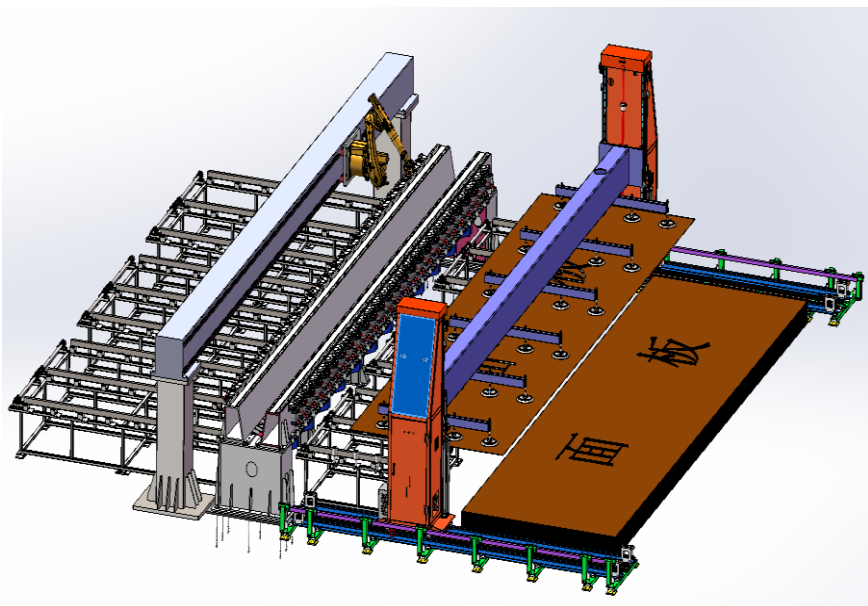
- 不锈钢自动焊焊接机器人工作站采用双钨极/单钨极TIG自动焊技术的自动切换应用；
- 主要用于不锈钢模块化等产品的车间制作焊接，工作站能够完成不锈钢工件的机器人焊接，**焊接过程中可对焊缝实时跟踪，保证焊接的连续性及焊接质量。**



应用5：焊接智能化生产车间

➤ 钢衬里焊接生产线

- 钢衬里焊接生产线包括激光-MAG复合焊工作站、胎模角钢焊接工作站、焊钉焊接工作站三大部分组成；
- 主要应用于核电钢衬里车间制作焊接。



02 关键建造技术应用情况

应用5：焊接智能化生产车间

➤ 便携式焊接机器人

- 便携式焊接机器人具有体积小、重量轻等特点；
- 该机器人包括移动式底座、机械手臂、焊接电源（可配等离子切割电源），通过编程可实现不同部位、不同轨迹的焊接、切割焊接作业；
- 该机器人主要用于核电现场钢衬里贯穿件的开洞、焊接。



应用6：高温环境下C60石灰石粉高性能混凝土施工技术

K2K3项目核岛安全壳与APC壳混凝土强度等级为C60，厚度为1300mm~1800mm，混凝土一次浇筑最大量超过1100m³。



在缺乏粉煤灰等掺合料的情况下，选择当地材料石灰石粉配置**C60高性能混凝土**，其力学、热工、耐久性等技术指标完全满足核电混凝土设计要求，并首次在海外核电站核岛工程中应用。



通过**复合型外加剂和石灰石粉的应用研究**，解决了资源匮乏地区高强度大体积混凝土施工质量保证与经济性的平衡，为后续海外核电站混凝土施工提供了思路。



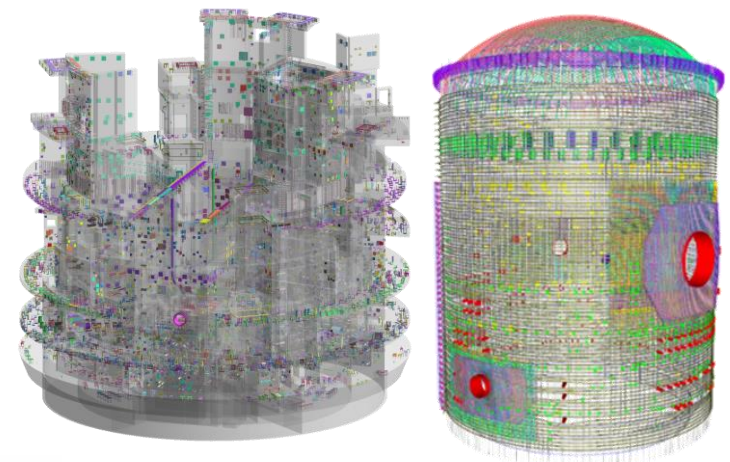
通过优化配合比设计，**有限元温度应力分析、大体积动态养护等技术控制措施**，解决了巴基斯坦当地平均气温超过35℃的条件下混凝土施工养护难题。

浇筑16.4万立方的混凝土，外观质量良好，未出现有害裂缝，施工技术经济、实用与可靠。节约直接施工成本约666万元，解决了高温与资源匮乏地区混凝土配置与施工难题。

02 关键建造技术应用情况

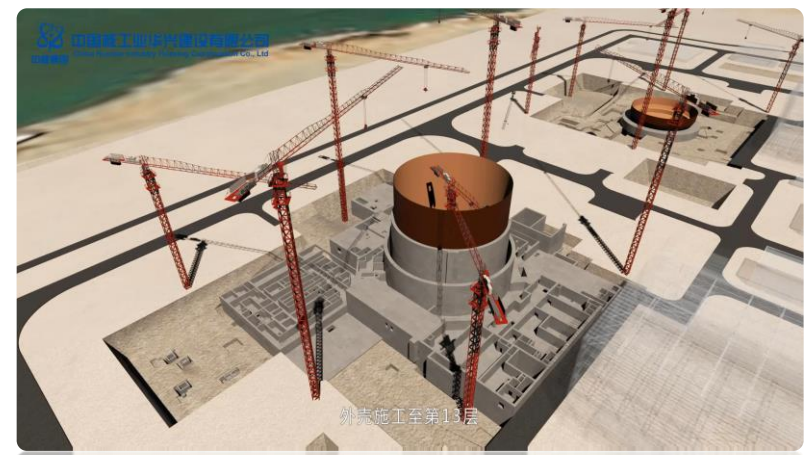
应用7: BIM技术

① 可视化、数据基础类应用：材料、半成品、工程量，进度方案模拟，交底等一系列常规应用

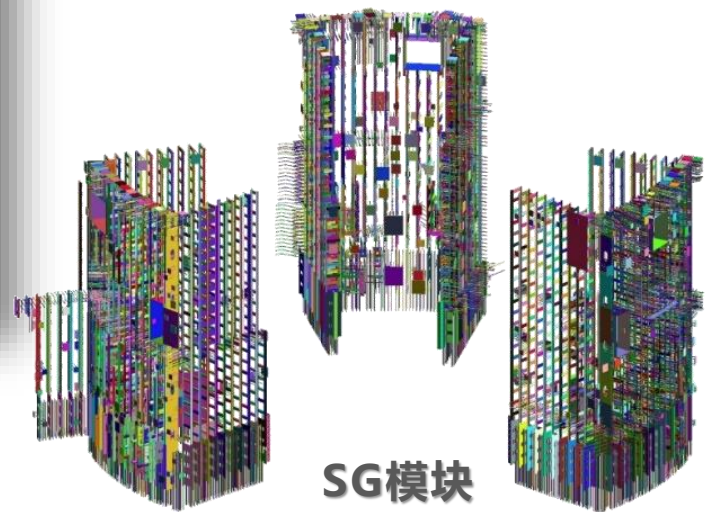
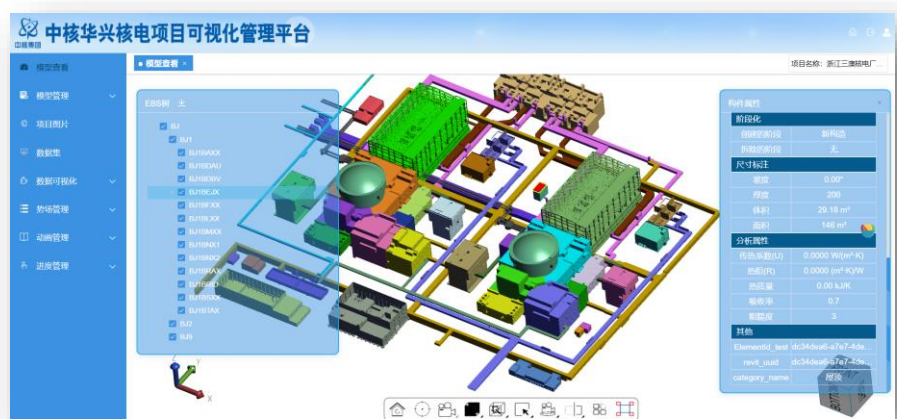


内部结构

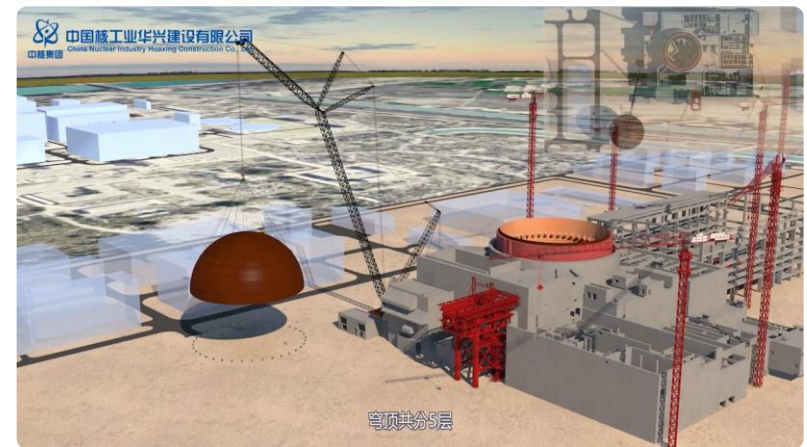
内安全壳



陆丰核电前期施工组织策划



SG模块



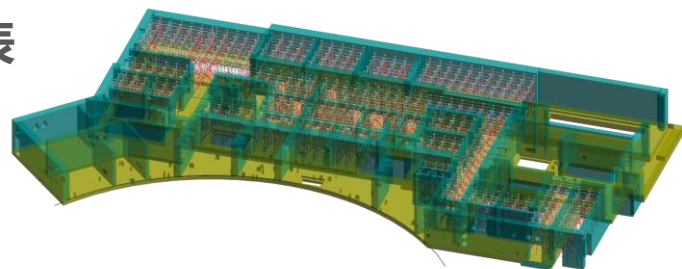
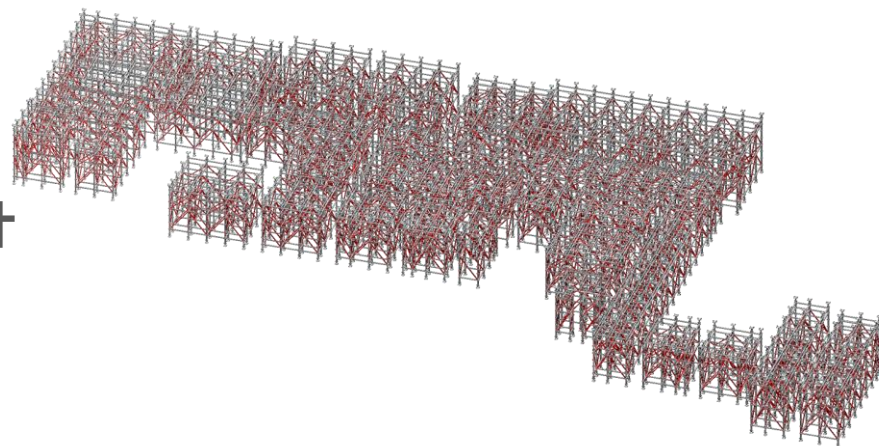
C5前期施工组织策划

02 关键建造技术应用情况

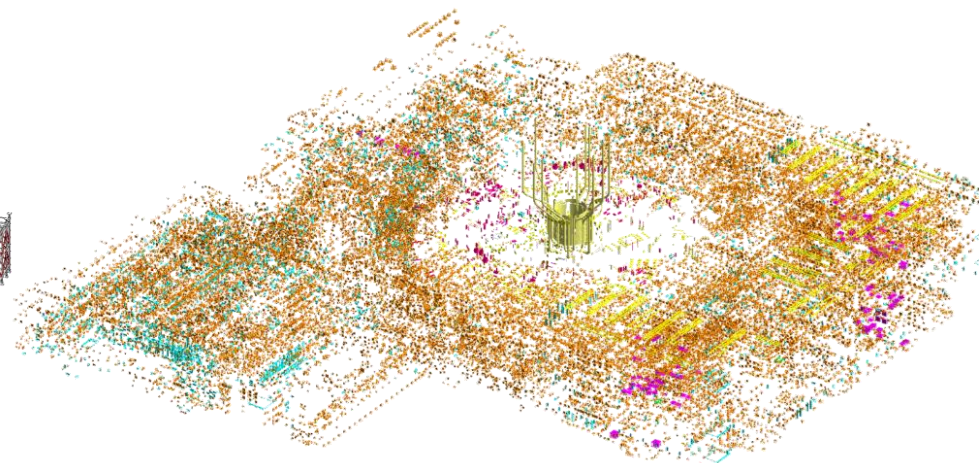
应用7：BIM技术

② 业务支持应用：

- 埋件自动建模与转换设计
- 模架自动布置
- 施工分段及构件清单
- 钢筋快速翻样与出图导表
- 钢结构的深化设计



模架体系自动布置



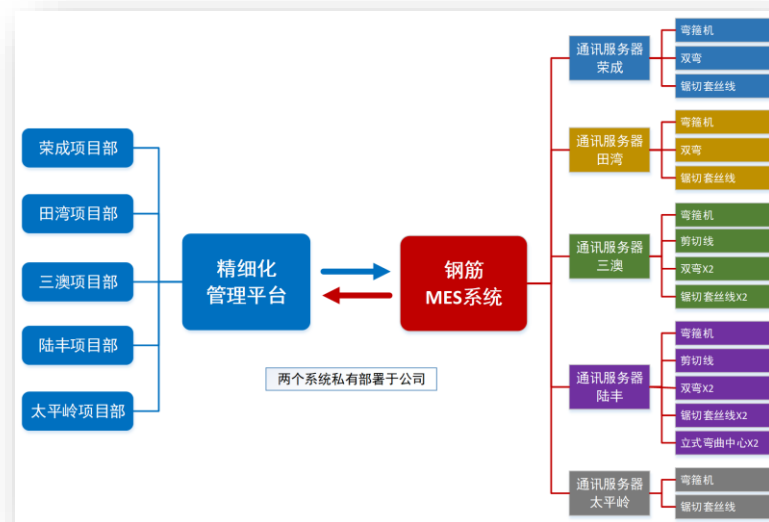
三澳核电厂
华龙一号到图预埋件模型

02 关键建造技术应用情况

应用7: BIM技术

③ 与先进技术装备融合应用:

- 钢筋自动化生产
- 预埋件定位自动验收



钢筋生产自动化生产

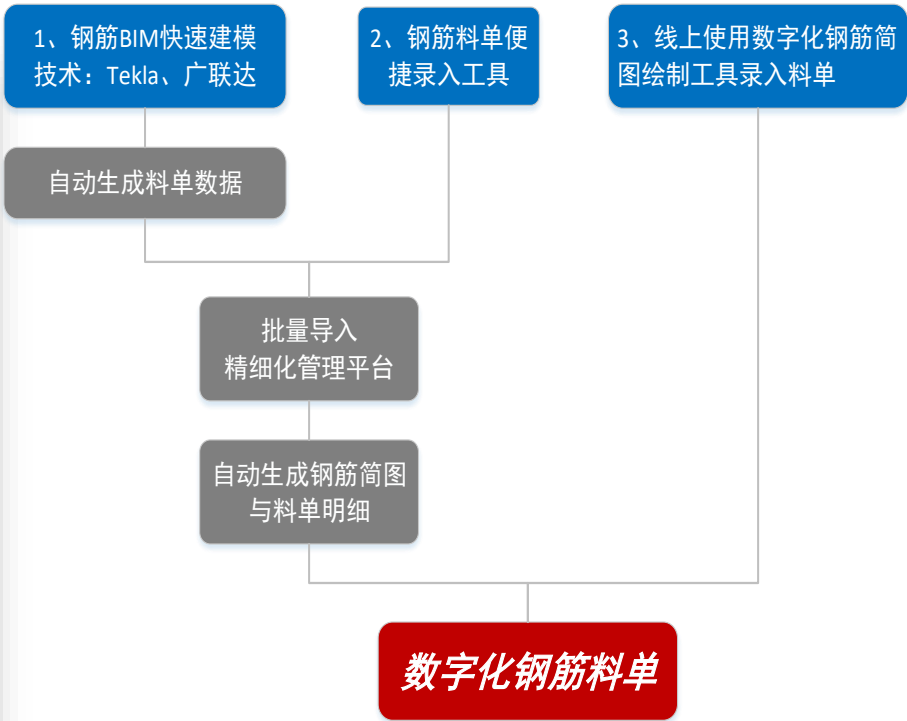
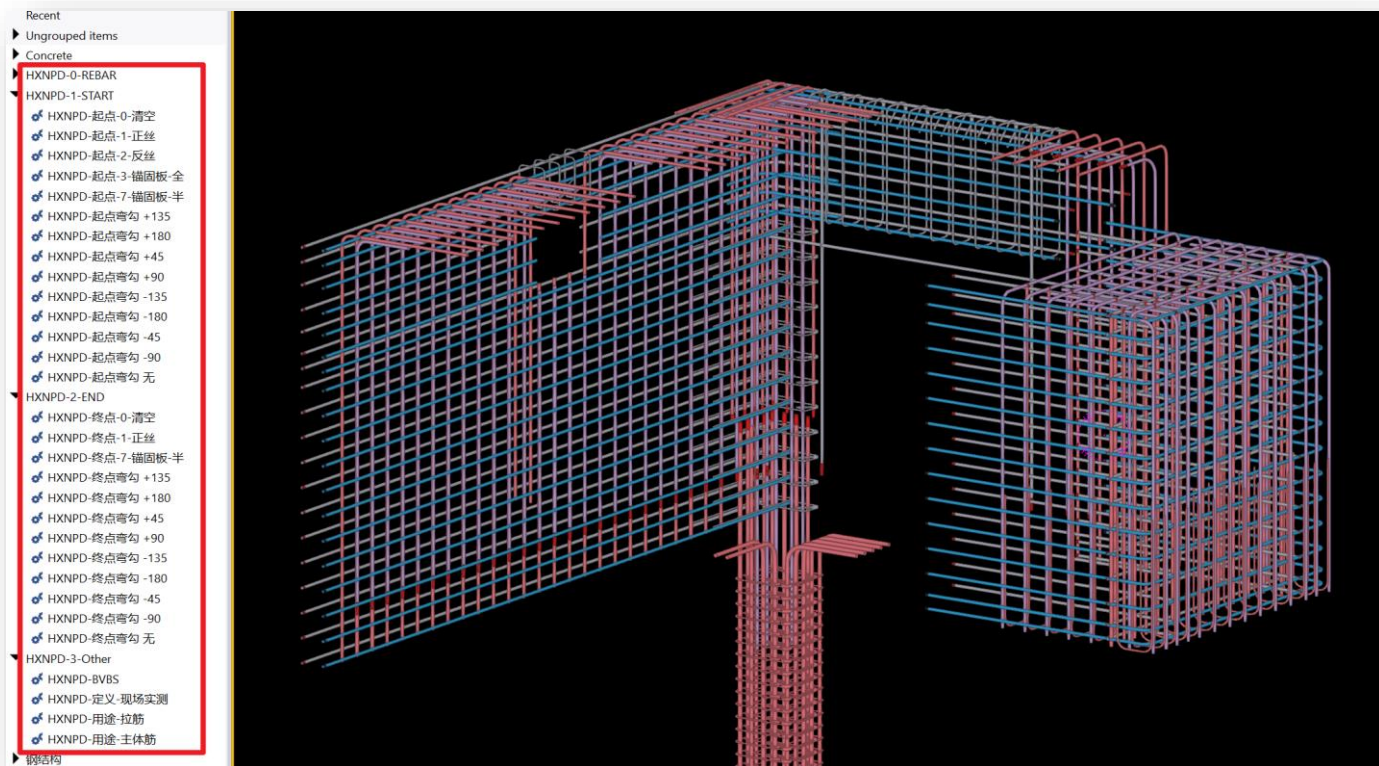


预埋件定位自动验收

02 关键建造技术应用情况

应用8：钢筋自动化加工技术

实现钢筋BIM模型数据与业务系统、生产线对接应用，率先在核电建设行业完成钢筋自动化生产的系统性、规模化部署应用。

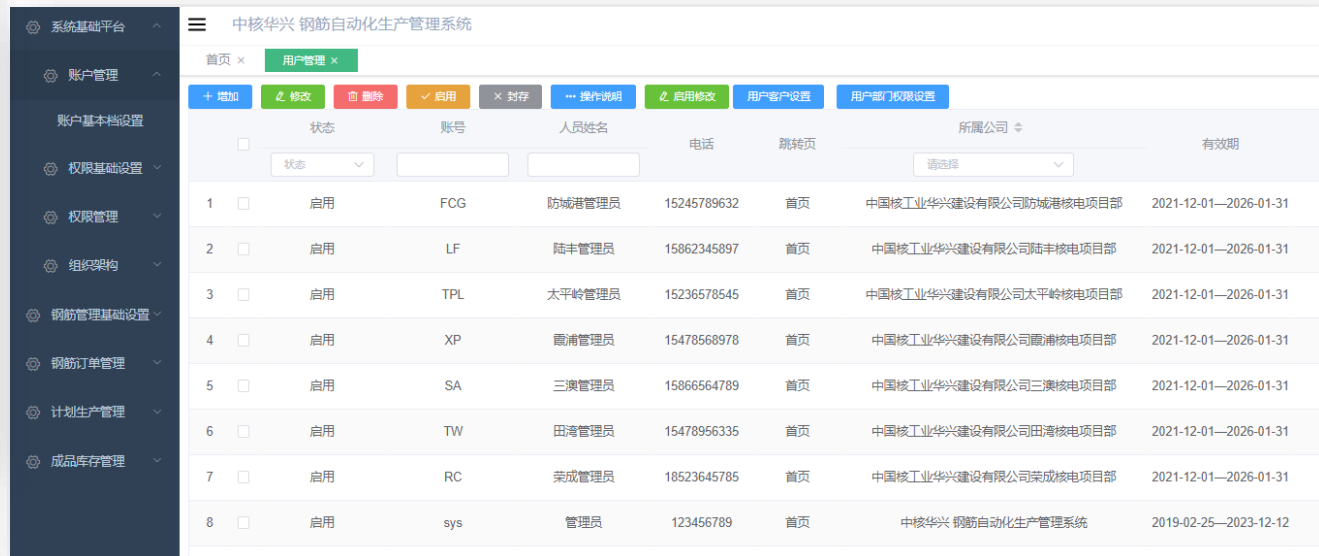
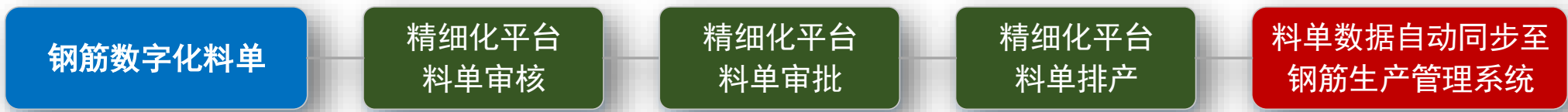


2项发明专利、1项软著支撑 **钢筋料单数字化**

02 关键建造技术应用情况

应用8：钢筋自动化加工技术

2个系统平台支撑的**业务流程信息化，数据流转自动化**，即精细化管理平台、钢筋生产管理系统



02 关键建造技术应用情况

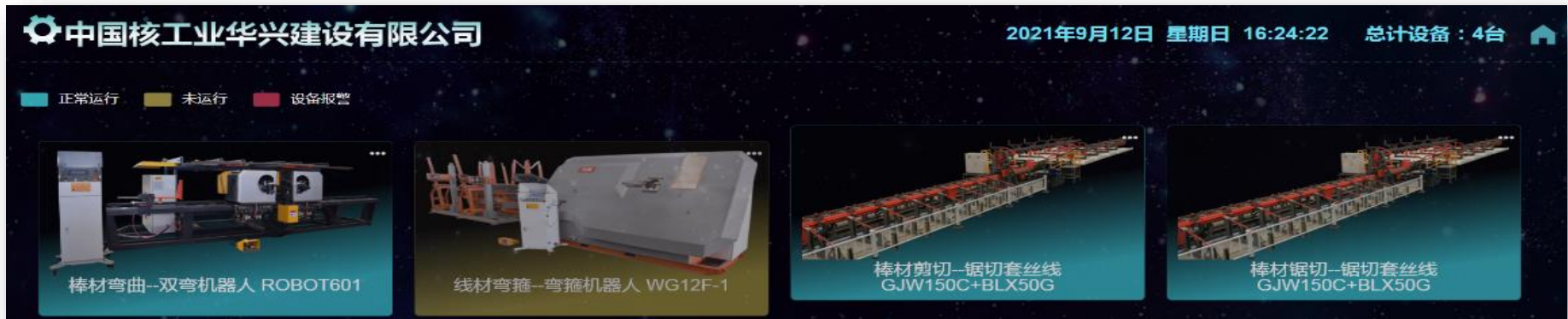
应用8：钢筋自动化加工技术

钢筋生产管理系统
将任务自动分配至生产线

作业人员输入
任务号提取任务数据

生产线完成自动化加工

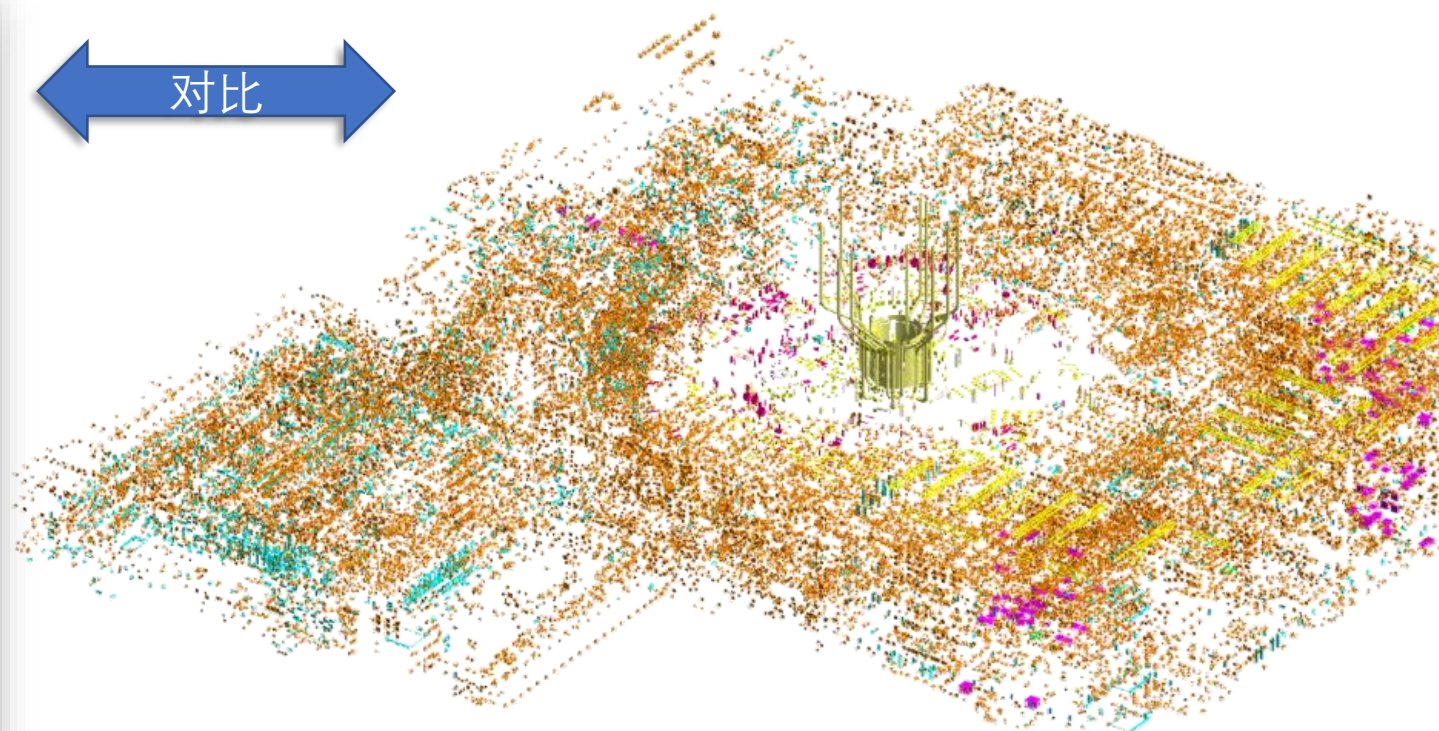
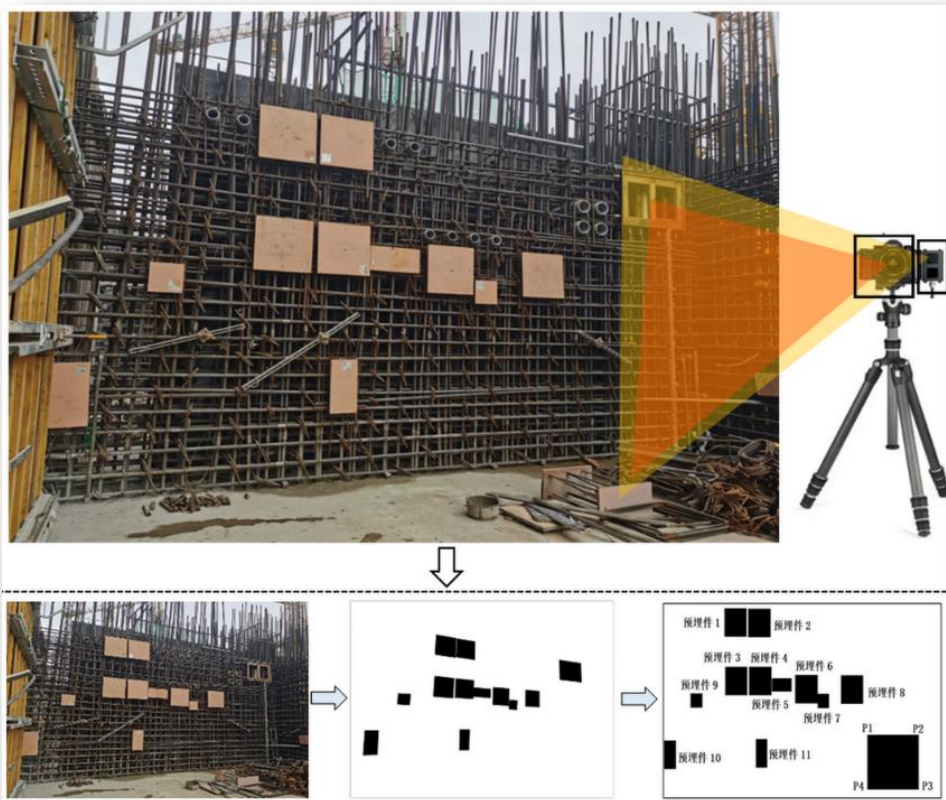
回传实际加工数据至钢筋
生产管理系统，并定时同
步至精细化管理平台



02 关键建造技术应用情况

应用9：工程物项安装的智能质量检测技术

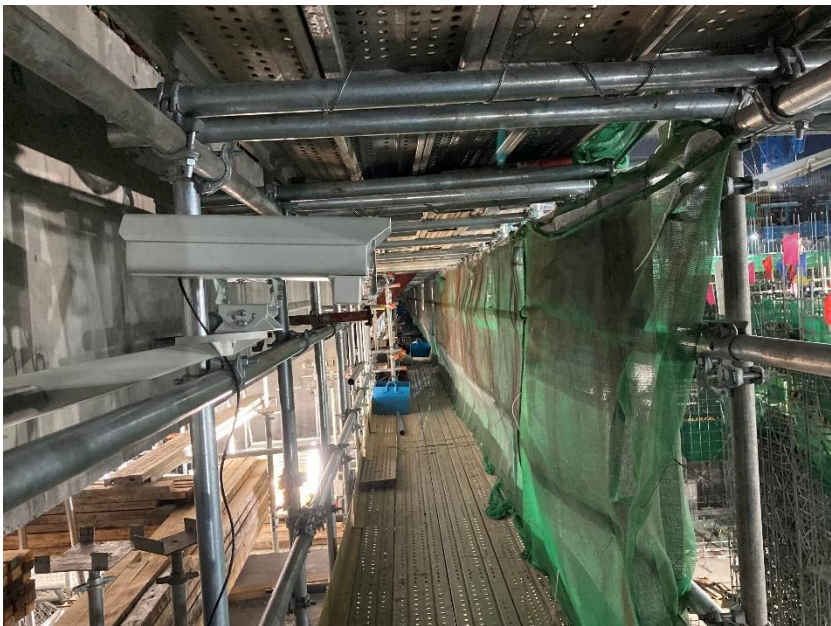
利用在线相机和面阵激光快速捕捉图像中的构件，实现施工实物位置数字化。对预埋物项（预埋件、套管、洞口）的外形尺寸与变形实现精准测量，最后通过数据的自动处理、借助信息化手段，对比物项实际位置和BIM模型参数，实现实时、在线、快速验收。



02 关键建造技术应用情况

➤ 应用10：模板支撑体系在线安全监测技术

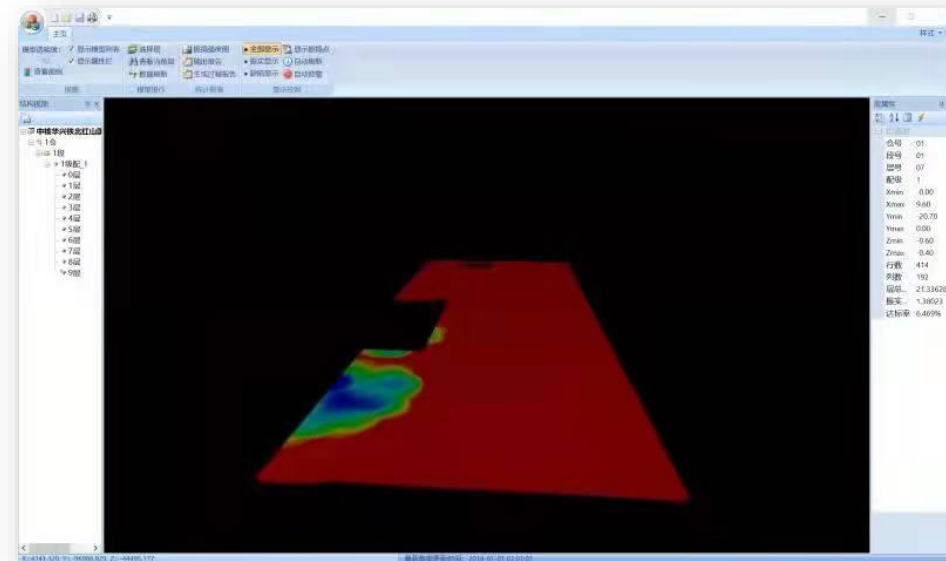
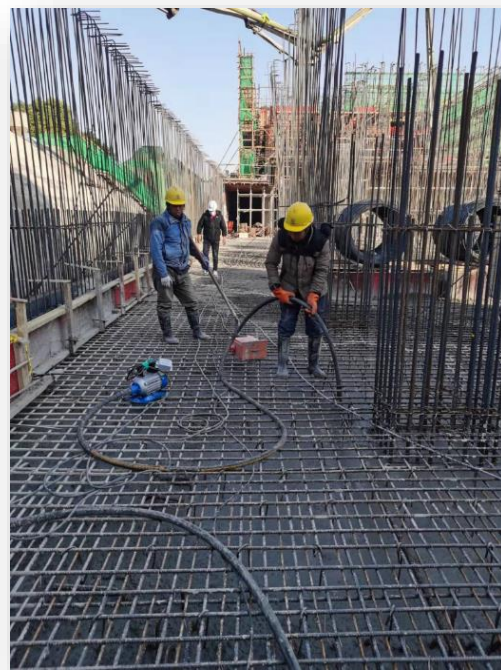
该项技术已成功应用于太平岭核电站常规岛汽轮机运转平台梁（梁高7.95m），基于光学图像测量技术，对模板支撑体系进行非接触式变形的实时测量，实现多个计算区域同步计算的现场测量软硬件系统，满足对模板支撑体系中不同杆件的失效模式下的实时、高精度变形测量要求。



02 关键建造技术应用情况

应用11：混凝土智能振捣技术

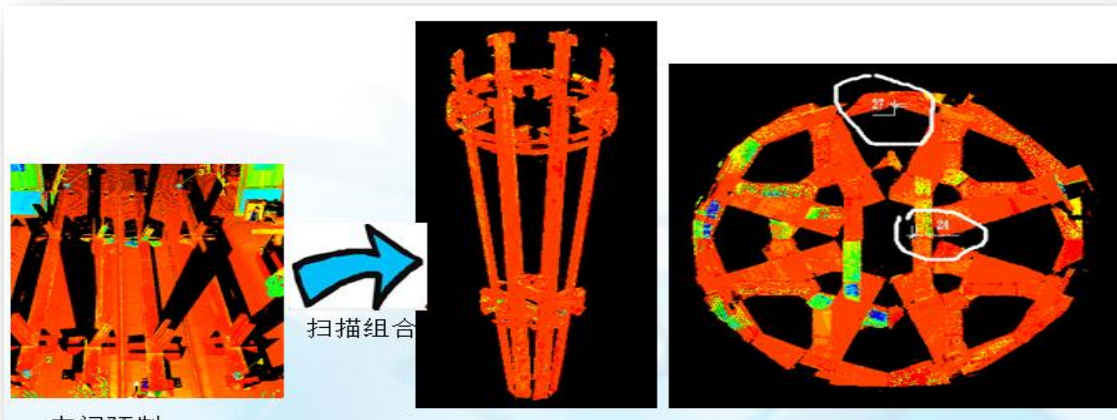
基于人体工学的可穿戴人工振捣作业的设备，通过施工姿态判定、握点位置推算、握点至棒头长度获取，**可监测振捣棒棒头实时位置、工作状态、倾角及振捣深度的**，并结合动态实体BIM模型和振捣密实性评价模型，分析实时混凝土浇筑体3D可视化质量效果，**实现了三维可视化振捣效果显示及振捣工艺信息管理。**



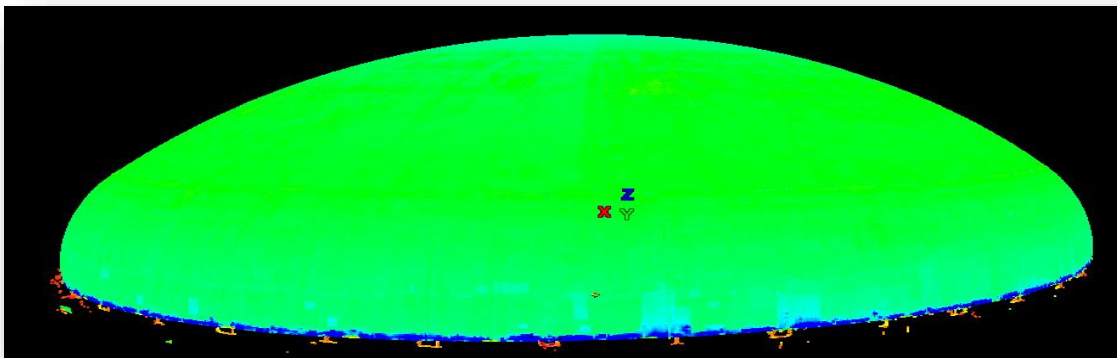
02 关键建造技术应用情况

应用12：三维扫描技术

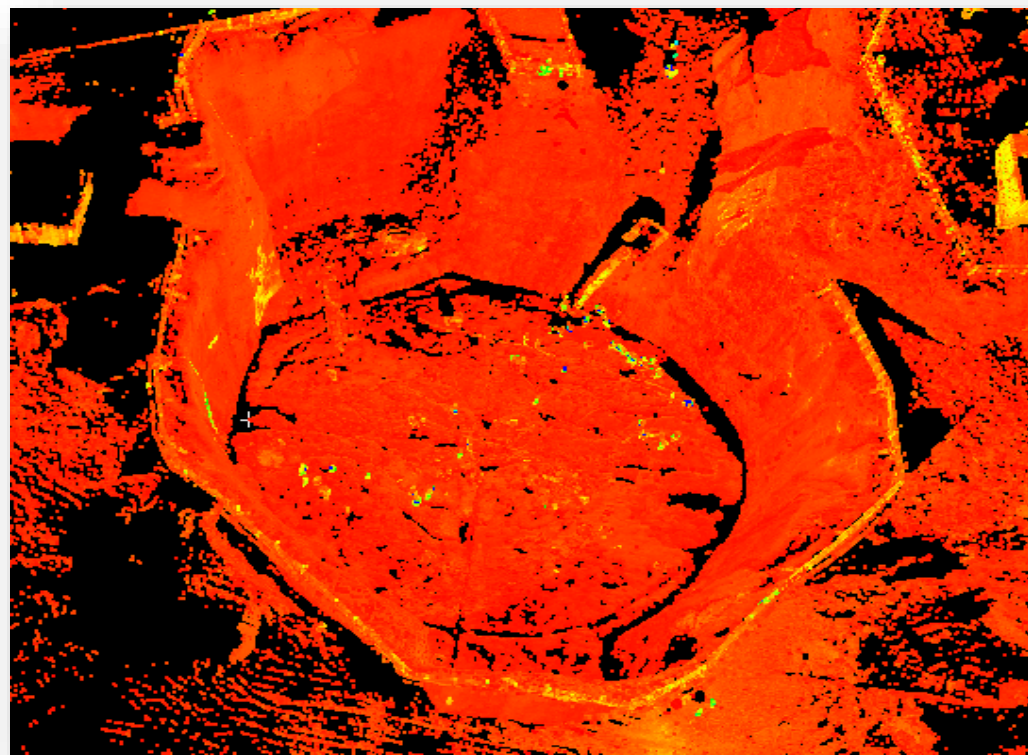
1) 虚拟拼装就位：构件预制后，通过扫描，虚拟组合，得出接头偏差



2) 穹顶吊装前后变形测量分析



3) 基坑三维扫描：基坑验收、开挖量计算、回填量计算



02 关键建造技术应用情况

应用13：其他关键建造技术

1

弧形密闭带垫板不锈钢水池施工技术

采用**折线包边成框定弧施工工艺**、**直线包边成框定弧施工工艺**、**弧形墙覆面铺贴工艺**保障了的焊接质量和水池结构尺寸满足要求。

2

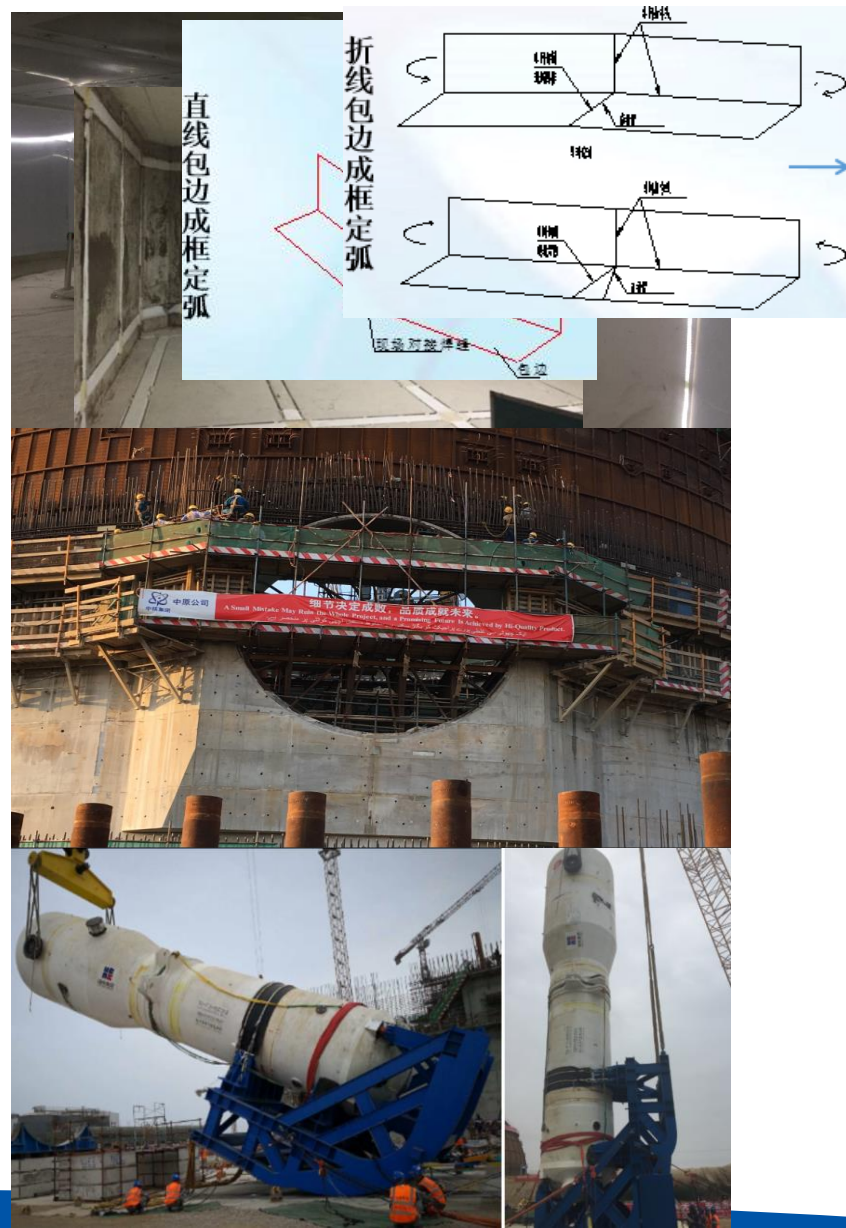
安全壳设备闸门施工技术

改变了以往核电站设备闸门上部结构施工，制约安全壳及下部厂房施工问题，并降低了人员作业平台搭设高度5m。解决了设备闸门区域平台设置与模板施工的难题，有效提高了施工效率，**约节省工期30天**。

3

E型支架设计技术

自主设计、制作产权，主要用于蒸汽发生器和压力容器的吊装前翻身。**相对传统采用原设计翻转支架方法，工期缩短了约15天时间**





03 关键建造技术后续部署



01

数字化建造

① BIM技术深化应用

- 埋件自动建模与转换设计
- 施工分段及构件清单
- 钢筋快速翻样与出图导表
- 钢筋自动化生产
- 预埋件定位自动验收
- 3D打印辅助现场沙盘推演等

② 集约化技术管理平台：

- 焊接大数据平台开发与应用
- 技术管理工作线上流程
- 核电建造知识库集成

- ① 大型结构模块的设计施工优化
 - 堆坑结构模块模块化施工
 - SG隔间模块化施工
 - 大型不锈钢水池模块化施工
- ② 钢筋笼/部品化施工
 - 地坑钢筋笼模块化施工
 - 厂房墙板结构钢筋笼部品化施工
- ③ 预制管廊/廊道装配式施工
 - 装配式预制廊道
 - 预制管沟/风道模块化施工
- ④ 基于模块化建造的重型装备应用
 - 基于模块化建造的场地布置研究
 - 核电重型塔吊选型及布置研究

03 关键建造技术后续部署



03

智能化建造

- ① 钢结构工程智能化
- ② 混凝土结构工程智能化
- ③ 安全监测/质量检测智能化：
 - 工程物项安装的智能质量检测技术
 - 模板支撑体系在线安全监测技术
 - 钢筋丝头质量在线检测技术
 - 核电工程受限空间智能监控系统
 - 核电大型钢结构吊装智能监测系统

谢谢

THANK YOU

