

智能建造技术在核电土建施工中的应用与发展趋势

彭新亮

中国核工业华兴建设有限公司 江苏 南京 210019

摘要：在“双碳”战略背景下，核电高质量发展对工程建设质效提出了更为严苛的要求。核电土建施工具有结构精度毫米级管控、全周期安全刚性约束、多工序深度协同、全链条质量可追溯的核心特性，智能建造通过数字化建模、自动化装备、信息化管控、智能化监测等核心技术，破解传统建造模式痛点，实现施工全流程精准管控与效能提升，通过多维度优化路径推动核电建造模式转型升级，为核电工程安全高效建设与行业可持续发展提供坚实支撑。

关键词：核电土建；智能建造；数字化管控；施工优化

引言：“双碳”目标下，核电作为基荷清洁能源的核心载体，其高质量发展成为我国能源结构绿色转型的重要战略支撑。核电土建工程是核电机组长期安全稳定运行的基础屏障，具有精度要求极高、安全管控复杂、工序协同难度大、质量标准刚性的行业特性，传统建造模式已难以适配新时代核电建设的发展需求，智能建造作为新型建造方式，依托数字化技术赋能，为破解核电土建施工痛点、提升工程建设质效提供了全新路径。

1 核电土建智能建造技术应用的重要性

核电土建智能建造技术以数字化为核心，重构传统建造流程，通过三维扫描与 AI 算法实现施工误差毫米级校准，提升结构精度。传感器网络实时采集温湿度、混凝土强度等参数，结合大数据分析动态调整施工参数，保障质量稳定；自动化控制系统联动各类施工设备，实现物料精准投放与工序无缝衔接，减少人工误差。智能巡检系统搭载高清设备快速识别施工隐患，配合无人机航测优化基坑开挖与边坡支护方案，全面提升工程安全性与建造效率，推动核电土建向高精度、高可靠性方向演进^[1]。

2 核电土建施工的核心特性与建造要求

2.1 核电土建施工的结构精度要求

核电土建施工的结构精度要求贯穿设计、制造、安装全流程，直接影响工程安全与长期运行稳定性。需通过高精度测量技术将构件尺寸偏差严格控制在毫米级，保障结构整体协调性与力学性能；三维激光扫描与 BIM 技术实现施工过程可视化监控，实时校准位置偏差与形状误差；模块化预制构件需严格匹配设计参数，减少现场调整误差，提升安装效率。智能监测系统持续追踪结构应力分布与变形趋势，预警潜在风险，保障施工

安全；高精度要求推动材料科学与制造工艺创新，如优化混凝土配合比精准度、提升钢筋加工精度等。通过全过程质量控制体系，确保各环节衔接无缝，避免累积误差，最终实现结构安全耐久、功能可靠的目标，为核电设施高效运行奠定坚实基础。

2.2 核电土建施工的安全管控核心

核电土建施工安全管控以风险防控为核心，构建多维度防护网络。通过高精度风险评估模型，识别施工全周期潜在风险，如结构失稳、设备故障等，实现源头管控；采用物联网技术实时采集作业数据，如人员定位、设备状态，动态调整施工策略以规避突发风险；强化人员安全素养培育，通过模拟演练与技能考核提升应急处置能力。设备全生命周期管理系统追踪机械运行参数，预警异常磨损或性能衰减，保障设备可靠运行；数字化安全平台整合多源数据，实现风险可视化分析与智能预警，提升决策响应速度。安全文化融入日常管理，通过常态化安全教育与行为规范引导，形成全员参与的安全生态，最终实现施工全流程安全可控，为核电工程高质量建设提供坚实安全屏障^[2]。

2.3 核电土建施工的工序协同逻辑

核电土建施工工序协同逻辑强调多环节无缝衔接与动态平衡，通过 BIM 技术构建三维施工模型，实现各工序空间与时间维度的精准匹配。模块化预制构件的标准化生产与现场装配，减少现场湿作业依赖，提升施工效率与质量稳定性；智能调度系统实时追踪各工序进度与资源需求，动态调整人力、设备、材料配置，避免资源闲置或短缺。工序间信息共享平台打通设计、施工、监测数据壁垒，实现关键参数实时同步与误差修正；通过工序逻辑优化，如地基处理与主体结构施工的并行推

进,缩短工期并降低交叉作业风险。最终形成“计划-执行-监控-调整”的闭环协同机制,确保施工全流程高效、有序、可控,为核电工程安全优质建设提供坚实支撑。

2.4 核电土建施工的质量管控要点

核电土建施工质量管控要点聚焦全流程精准控制与可追溯性。材料选型严格遵循高强度、耐久性标准,通过多批次抽检与实验室验证确保性能稳定,如混凝土配合比优化、钢筋抗腐蚀处理。施工过程采用实时监测技术,如混凝土振捣密度追踪、钢筋间距激光扫描,动态调整工艺参数以消除误差;质量检测体系整合无损检测与破坏性试验,如超声波探伤、抗压强度测试,全面评估结构质量。数字化质量平台记录各环节数据,实现质量问题的精准定位与责任追溯;通过工艺标准化与操作规范化,减少人为因素导致的质量波动;最终形成“源头控制-过程监控-结果验证”的闭环管理体系,确保工程结构安全可靠、性能达标,为核电设施长期稳定运行提供坚实质量保障。

3 智能建造技术在核电土建中的核心应用

3.1 数字化建模技术的施工应用

数字化建模技术在核电土建施工中实现三维空间精准表达与动态模拟,通过 BIM 平台整合建筑、结构、设备等多专业数据,构建高精度数字孪生模型。该模型支持施工全流程可视化推演,提前识别设计冲突与施工难点,如管线碰撞、结构接口错位等,优化施工方案;实时更新模型参数,动态反映施工进度与状态变化,辅助决策调整。结合虚拟现实技术,实现施工场景沉浸式模拟,提升操作人员空间认知与技能熟练度;模型数据贯穿设计、施工、运维全周期,支持质量追溯与性能评估,推动核电土建施工向智能化、精细化方向升级^[3]。

3.2 自动化施工装备的现场应用

自动化施工装备在核电土建现场实现精准作业与高效协同,如智能混凝土搅拌站通过精确配比与自动输送,保障混凝土性能稳定。自动化钢筋加工设备采用数控技术完成弯曲、切割、焊接一体化操作,提升加工精度与效率;智能模板安装机器人通过激光定位与机械臂协同,实现模板快速精准定位,减少人工调整误差。无人驾驶运输车依托路径规划算法与传感器融合,完成材料运输与设备转运,降低人员劳动强度;实时监控追踪装备运行状态,预警设备故障或操作异常,保障施工安全,为核电土建工程高效推进提供坚实技术支撑。

3.3 信息化管控系统的全流程应用

信息化管控系统在核电土建全流程中实现数据贯通与智能决策。通过物联网传感器实时采集施工参数,如温度、湿度、设备状态,动态调整施工策略以适应环境变化;集成 BIM 模型与施工进度数据,实现三维可视化监控,精准追踪各工序状态与误差。智能算法分析历史数据,预测潜在风险并提前预警,如结构变形、材料性能衰减;资源管理系统优化人力、设备、材料配置,减少浪费并提升利用效率。数据追溯平台记录全流程操作日志,支持质量问题的精准定位与责任追溯,形成“数据采集-分析-决策-执行”的闭环管理体系。

3.4 智能化监测技术的实时应用

智能化监测技术通过高精度传感器网络实现施工全周期实时数据采集,动态追踪结构应力分布、温度梯度、位移变化等关键参数。结合边缘计算与云计算平台,对海量数据进行快速处理与智能分析,识别潜在风险并生成预警信息;实时监测数据与 BIM 模型深度融合,实现三维可视化展示,直观反映结构状态与施工进度。通过机器学习算法持续优化监测模型,提升风险识别精准度与响应速度;支持多参数关联分析,如混凝土养护温度与强度发展的关联性研究,指导工艺参数动态调整,构建“数据采集-智能分析-实时预警-决策支持”的闭环监测体系,保障施工安全与质量可控。此外,其集成物联网、无线组网等技术,对接核工程受限空间作业安全管理流程,探索提升作业安全的路径,既解决相关安全管理难题,也为核工程数字化转型夯实基础^[4]。

3.5 国内外典型核电项目智能建造实践对比

全球核电智能建造呈现三代技术并行格局,国内外项目实践各有优劣。国内 AP1000 路线的三门、海阳项目推行模块化建造,借助 BIM 预拼装减少交叉作业,但因专用 BIM 构件库缺失出现接口错位;华龙一号福清、防城港项目搭建数字孪生平台,实现施工实时监测,福清 5 号项目通过智能装备将核岛施工精度提升至 $\pm 2\text{mm}$,工期提前 2 个月。国际上,芬兰 Olkiluoto 3 EPR 项目因传统模式致工期延误、造价超支,后期靠数字化管控完成建设;台山核电 EPR 项目用 BIM 解决设计冲突,但受系统集成限制影响效能。总体而言,国内在智能装备本土化应用更具优势,国际项目在标准化体系建设上更具参考价值。

4 传统核电土建建造模式的痛点与智能建造优化路径

4.1 传统核电土建建造模式的核心痛点与挑战

通过国内外典型核电项目实践对比,可明确传统核电土建建造模式存在系统性痛点,成为制约工程效率与

质量的核心瓶颈。在技术层面,异构系统接口不统一形成数据孤岛,核电专用 BIM 构件库缺失, AI 模型在复杂工况下风险识别精度不足。在管理层面, EPC 模式下多方协同壁垒突出,设计变更传递不畅;国内核电智能建造及数字孪生交付标准滞后,技术成果难以复用。在安全与合规层面,智能建造系统存在数据泄露、被攻击风险,工业互联网安全防护压力大;涉核核心软硬件部分依赖进口,不符合自主可控战略,涉核数据本地化及国产化替代需求迫切。

4.2 技术适配性的优化升级

技术适配性优化升级聚焦解决上述技术层面痛点,推动智能建造技术与核电土建场景深度融合。采用统一标准接口协议,实现 BIM、物联网、AI 算法等异构系统的无缝对接,打破数据壁垒;加快构建核电专用 BIM 构件库,整合核岛、常规岛各类结构与设备构件,实现建模标准化与快速化;利用海量历史施工数据训练核电专用 AI 模型,提升结构应力预测、设备故障诊断的精度与泛化能力。同时升级硬件设备以适配高精度作业要求,推动智能建造技术从“可用”向“好用”转变^[5]。

4.3 施工全流程的协同优化

施工全流程协同优化重点破解管理层面的多方协同难题。依托统一 BIM 协同平台,整合设计、施工、监理、设备供应商等各方数据,实现设计变更实时同步与施工进度可视化追踪,减少信息不对称导致的返工;利用 AI 算法优化工序逻辑与进度计划,合理安排地基处理与主体结构施工的并行作业,缩短工期并降低交叉作业风险;构建智能调度系统,实时整合人力、设备、材料信息,实现资源动态配置与高效利用,形成闭环协同体系。

4.4 安全质量管控的效能提升

安全质量管控效能提升兼顾安全合规与质量保障双重目标。通过高精度传感器网络实时采集关键数据,结合 AI 算法提前识别潜在风险,推动管控模式从“被动响应”向“主动预防”转变;构建数字化安全质量平台,实现质量问题的精准定位、责任追溯与闭环整改;强化工业互联网安全防护体系建设,采用国产化加密技术保

障涉核数据安全;加快推进核心软硬件国产化替代,满足国家信息安全与自主可控战略要求。

4.5 技术应用体系的完善和优化

技术应用体系完善优化旨在构建标准化、系统化的核电智能建造生态。加快制定《核电工程智能建造实施指南》、《核电数字孪生交付标准》等行业规范,统一技术要求与数据格式,促进技术成果复用与推广;构建覆盖设计、施工、监测全流程的统一技术平台,集成施工模拟、质量监测、资源调度等功能模块,提升系统协同效率。持续迭代智能算法与硬件设备,重点推动“工厂预制+现场装配+机器人安装”一体化建造模式升级,扩大模块化预制范围,提高机器人在高危、高精度工序的应用比例,推动核电智能建造从“单点突破”向“系统集成”转变。

结束语:智能建造技术与核电土建施工的深度融合,是核电工程建设提质增效、安全管控升级的必然趋势。通过数字化建模、自动化作业、全流程信息化管控与智能化监测的系统应用,可全面破解核电土建施工的核心痛点,实现建造模式从传统粗放型向智能精细化的系统性转型。持续推进技术适配优化、全流程协同升级与管控体系完善,将进一步释放智能建造的技术价值,为核电行业高质量发展与“双碳”战略落地筑牢坚实根基。

参考文献

- [1] 秦雨培. 智能建造在建筑施工技术中的应用及其发展趋势 [J]. 工程建设与设计, 2025(8):76-78.
- [2] 王璐. 智能建造在建筑施工技术中的应用及其发展趋势 [J]. 四川水泥, 2024(10):22-24.
- [3] 侯朝, 郝丁默, 杨阳, 刘占省. 智能建造及智慧工地管理系统在施工中的应用 [J]. 建筑技术, 2025, 56(1):27-30.
- [4] 朱溢镭, 黄丽华, 樊娟. 智能建造技术在工程建造中的典型应用研究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(10):151-155.
- [5] 徐生基. 智能化技术在建筑幕墙施工中的应用与发展趋势 [J]. 时代报告, 2023(35):0127-0128.