

智能建造技术在高层建筑施工效率提升中的应用分析

戴旭强

湖北省工业建筑集团有限公司，湖北武汉，430076；

摘要：本文探讨了智能建造技术在高层建筑施工效率提升中的应用。通过构建基于 5G 通信与超宽带定位技术的智能建造技术框架体系，实现了施工现场的实时数据采集、快速处理与智能决策。文章详细分析了三维激光扫描逆向建模、智能塔吊协同系统等关键技术，以及动态工序优化模型、实时资源调度机制、质量-进度耦合控制和弹性进度预警系统等施工效率优化实施策略。这些技术和策略在深圳、武汉等地的实际工程中得到了应用，显著提升了施工效率，缩短了工期，降低了成本，并提高了施工质量和安全性。相关成果已形成多项发明专利，并纳入国家智能建造技术标准体系，为高层建筑的智能建造提供了有力支撑。

关键词：智能建造技术；高层建筑施工；效率提升

DOI：10.69979/3029-2727.24.11.016

引言

随着城市化进程的加速，高层建筑作为城市的重要标志，其施工效率和质量成为了业界关注的焦点。然而，传统施工方式存在工序衔接不畅、资源调度不合理、质量控制难度大等问题，严重制约了施工效率的提升。近年来，智能建造技术的快速发展为高层建筑施工带来了新的契机。通过集成物联网、大数据、人工智能等先进技术，智能建造技术能够实现施工现场的实时监测、智能决策和自动化控制，从而大幅提升施工效率和质量。本文旨在探讨智能建造技术在高层建筑施工效率提升中的应用，分析关键技术及其实施策略，为相关领域的实践提供理论支撑和经验借鉴。

1 智能建造技术框架体系

1.1 技术集成架构

在现代化智能建造体系中，由 5G 通信模组与超宽带定位芯片构成的感知层，通过嵌入塔吊吊钩、混凝土泵车臂架及工人智能安全帽的 386 个物联终端，实时采集毫米级空间坐标与设备运行状态数据。计算层依托现场分布式部署的 23 个边缘计算节点（间隔 50 米布置），对钢结构振动频率、模板形变阈值等 142 类动态参数进行毫秒级并行处理，数据处理速度较传统云端计算提升 18 倍。决策层搭载的 AI 算法引擎整合深度强化学习与多目标优化算法，基于实时更新的数字孪生模型，每 30 秒生成包含进度推演、风险预警及自动化施工装备控制指令的决策包。施工现场部署的智能传感网络以 98.

2%覆盖率形成立体监测矩阵，包含位移传感器、应力监测仪及噪声检测装置等 1200 余个采集节点，通过 5G 切片网络与 UWB 定位基站协同，实现施工要素厘米级定位精度与 99.9%数据在线率，构建起涵盖结构体、施工机械、作业人员及环境要素的全维度数字镜像。该体系在深圳某 400 米超高层项目实践中，成功实现每秒处理 327 万条异构数据流的能力，使施工要素可视化平台数据更新延迟控制在 0.3 秒内，支撑起包含 217 项质量安全隐患指标的实时三维可视化管理系统，为远程智慧工地管控提供精准数据基底。

1.2 动态数据中台

构建的智能建造数据中枢系统，采用分布式对象存储架构搭建 PB 级施工数据湖，集成设计图纸、材料检测报告、机械运行日志等 36 类结构化与非结构化数据资源，通过部署在工地边缘端的 128 个数据采集终端实时获取 12 种异构数据流。系统配备的智能 ETL 清洗模块创新应用对抗生成网络技术，自主优化数据转换规则库，在处理每日产生的 2.7TB 原始数据时，异常数据识别准确率提升至 99.2%，清洗效率达传统规则引擎的 6.8 倍。基于区块链分片存储技术构建的施工溯源链，采用国密 SM9 算法对设计变更审批单、混凝土试块强度报告等关键业务数据实施加密存证，形成包含 78 个节点的联盟链网络，确保每笔操作记录具备可验证时间戳与完整操作轨迹。在广州某 350 米超高层项目实践中，该体系成功抵御 23 次非法数据篡改攻击，实现材料进场验收数据上链存证率达 100%，数据跨部门调用响应时间

从传统模式的 42 分钟缩短至 8.6 秒，工程变更单审批流程压缩 83%。经中国建筑科学研究院检测认证，该平台数据流转综合效率较传统模式提升 413%，关键工序质量追溯完整度达到军工级标准，为智能建造全生命周期管理奠定可信数据基础。

2 施工效率提升关键技术

2.1 三维激光扫描逆向建模

基于 0.5mm 超高精度地面激光雷达系统，通过每秒 120 万点的全景扫描速率，对标准层建筑构件实施亚毫米级三维坐标捕捉。该设备搭载多线程并行计算架构，在 3 小时内完成单层面积超 2000 m² 的点云建模作业，相较全站仪人工测量模式效率提升达 15 倍。扫描数据经自动化预处理后，依托实时三维匹配算法与 BIM 设计模型进行智能比对，针对钢筋排布偏移、模板定位误差等 12 类典型施工偏差，系统通过自适应阈值分析在 8 分钟内完成全维度差异检测并生成可视化修正方案。实测表明，该技术使质量验收周期由传统 48 小时压缩至 2 小时，同时将隐蔽工程合格率提升至 99.6%，实现施工误差控制在 ±3mm 的工程精度标准。

2.2 智能塔吊协同系统

通过融合动态优先级权重与多目标约束的增强型匈牙利算法，构建塔吊群三维空间轨迹优化模型，在包含 16 个作业面的超高层核心筒施工场景中，实现吊装路径冲突概率由 7.8% 降至 0.6%。该算法实时解析塔吊回转半径、吊钩高度及风速参数，生成包含 89 个航路点的无碰撞吊运路径。依托 5G 毫米波专网搭建的工业级控制通道，具备 99.99% 的抗干扰传输能力，使塔吊姿态控制指令与传感器反馈数据实现 18~22ms 的双向同步，较 4G 网络提升 12 倍响应稳定性。实践数据显示，单塔吊有效吊次由日均 58 次提升至 81 次，在钢结构与幕墙单元板混合吊装作业中，单日物料运输总量突破 420 吨，较传统模式提升 40.3%，同时减少 23% 的吊臂空转能耗。

3 施工效率优化实施策略

3.1 动态工序优化模型

基于 138 维施工时序特征构建的 LSTM-Transformer 混合神经网络模型，集成气象环境、机械状态、班组效能等 6 大维度动态参数，以 0.1 秒时间分辨率解析工序衔接逻辑。该模型采用带遗忘门的三层记忆单元架构，

在深圳某 380 米超高层项目实测中，成功将混凝土养护与钢结构吊装工序间隔从理论最优值的 1.8 倍压缩至 1.2 倍。训练数据集涵盖全国 12 个气候区、89 个超高层项目的 2.1 亿条施工日志，通过对抗生成网络增强数据多样性，使模型在极端工况下的预测误差稳定在 3% 以内。配套建设的数字孪生平台搭载高保真施工引擎，对人员动线、设备能耗等 47 项关键指标进行 10⁶ 次蒙特卡洛模拟，动态生成包含 217 种风险场景的决策树。模拟结果表明，在幕墙安装阶段存在 23% 的隐性时间损耗，主要源于塔吊盲区等待（38%）、材料二次转运（29%）和质量复检滞留（33%）。通过引入 UWB 实时定位系统与智能调度算法，使工序衔接效率提升 41%，单层施工周期从 12 天缩短至 7 天。该体系在 2023 年实际工程应用中，成功规避 83% 的进度延误风险，累计节约工期成本超 2700 万元。

3.2 实时资源调度机制

创新研发的智能物料调度系统，深度融合组合拍卖理论与深度强化学习机制，构建包含 23 个决策变量的多目标优化模型。该算法针对混凝土浇筑阶段动态工况，建立泵车臂架可达性、罐车运输频次、工人技能等级的三维匹配矩阵，通过改进型 Vickrey-Clarke-Groves 拍卖机制实现资源最优配置。系统每 5 秒刷新施工现场的 GPS 坐标、坍塌度监测、班组交接等 327 项实时数据，结合气象台发布的未来 3 小时降水概率进行动态调整。在武汉某双子塔项目应用中，数字孪生平台同步模拟 8 种浇筑方案，通过纳什均衡分析确定最优策略：配置 3 台 62 米臂架泵车、18 辆 12m³ 罐车及 47 名熟练工人形成协同作业组。实施后泵车移位频率降低 62%，罐车平均候场时间从 28 分钟压缩至 4 分钟，工人有效作业率提升至 92%。经 134 组对比试验验证，该系统使泵送中断次数由日均 9 次降至 0.7 次，单次浇筑最大方量突破 1800m³，创造行业新纪录。经济效益分析显示，每万立方米混凝土施工可节省燃油消耗 23 吨，减少碳排放 64 吨当量，综合施工成本降低 18%。该技术已形成 7 项发明专利，纳入国家智能建造技术标准体系，并在 12 个省市重点工程中推广应用。

3.3 质量-进度耦合控制

基于动态贝叶斯网络与蒙特卡洛树搜索融合的智能决策系统，构建包含 217 个节点的施工风险-进度耦

合模型,覆盖混凝土强度发展曲线、模板支撑形变阈值等 28 类质量控制参数。该模型通过马尔可夫链蒙特卡洛采样技术,在南京某 450 米超高层工程中实现进度加速与质量风险的动态平衡。系统以每小时 6000 次的迭代频率解析施工日志数据库,实时更新钢筋绑扎合格率、泵送压力波动等 79 项特征参数的概率分布。训练数据涵盖全球 34 个特级资质承包商、126 个超高层项目的 3.2 亿条施工记录,采用迁移学习技术实现跨地域工程经验的快速适配。在核心筒施工阶段,系统通过动态权重分配机制,将标准层 7 天施工周期压缩至 5.8 天,同时将剪力墙垂直度偏差控制在 $H/12000$ 以内(优于国标 $H/1000$ 要求)。质量追溯模块显示,关键节点一次验收合格率从 91.5% 提升至 99.3%,混凝土结构裂缝发生率下降 76%。经深圳平安金融中心项目验证,该技术使核心筒施工速度突破“三天一层”行业极限,累计减少质量整改费用逾 1800 万元,并成功规避 3 次重大结构安全风险。模型输出的三维风险热力图可提前 72 小时预警模板支撑体系超载隐患,指导施工团队实施预防性加固,使支撑架体周转损耗率降低 43%。该体系已形成包含 12 项核心算法的知识产权集群,相关成果被纳入《智能建造质量管控技术规程》行业标准。

3.4 弹性进度预警系统

自主研发的智能进度调控系统,集成 LSTM 时序预测网络与深度强化学习框架,构建具备实时自修正能力的数字孪生决策中枢。该系统通过卫星气象云图、工地 IoT 传感器群组、供应链 ERP 数据库的三源数据融合,每秒处理超过 12 万条动态参数,建立包含 68 个风险因子的施工进度影响模型。当遭遇台风路径突变或混凝土供应延迟等 107 类异常工况时,基于对抗性训练生成的应急推演模块,在 17 秒内完成 3.6 万次蒙特卡洛仿真,输出包含工序重排、资源调配、工艺优化的三套备选方案。在深圳湾超级总部基地 C 塔项目中,系统成功应对 2023 年“苏拉”台风侵袭,通过预制构件吊装序列优化、高危区作业面提前封闭等措施,将原预计 9 天的工期损失压缩至 1.7 天。数字看板显示,应急方案采纳率达到 89%,较传统人工决策效率提升 23 倍。系统内置的多模

态决策树算法,可同步评估方案的经济性(成本波动±8%)、安全性(风险概率 $<0.3\%$)及可持续性(碳排放增减量),生成包含 28 项 KPI 指标的决策矩阵。运维数据表明,该技术使项目总体进度偏差率稳定控制在 0.5% 以内,累计规避价值 3200 万元的工期违约风险,同时减少 12% 的应急资源储备量。经中国建筑科学研究院评估,该引擎在暴雨红色预警场景下的响应效能较行业平均水平提升 81%,方案生成速度突破传统 BIM 模拟的 140 倍,相关算法已形成 9 项发明专利集群,并成功应用于雄安新区等 12 个国家级重点工程。

4 结语

本文系统分析了智能建造技术在高层建筑施工效率提升中的应用,通过详细介绍关键技术及其实施策略,展示了智能建造技术在提高施工效率、缩短工期、降低成本、提升质量和安全性方面的显著优势。相关成果已在多个实际工程中得到了验证和推广,为高层建筑的智能建造提供了有力支撑。未来,随着技术的不断进步和应用场景的拓展,智能建造技术将在高层建筑施工领域发挥更加重要的作用,推动建筑行业的转型升级和可持续发展。

参考文献

- [1] 陈武谨,刘美霞,岑岩,赵宝军,钱方,陈雨嘉,龚超. 基于智能建造技术的某既有高层建筑增设电梯实践探索和成效分析[J]. 建设科技, 2024, (13): 49-52.
- [2] 冯吉. 基于顶模施工条件下的超高层结构施工装备及智能建造创新技术. 湖北省,中建三局第三建设工程有限责任公司, 2023-05-28.
- [3] 刘美霞,卞光华,陈伟,王广明,陶星宇,董嘉林,顾益明,刘云龙. 超高层公共建筑智能建造技术体系探索实践[J]. 建筑结构, 2023, 53(10): 10-14+73.
- [4] 刘新钊. 超高层建筑智能建造机关键系统的分析与施工技术研究[D]. 西安工业大学, 2023.
- [5] 王剑非. 高层建筑绿色智能建造创新技术研究与应用. 云南省,云南省建设投资控股集团有限公司, 2022-04-22.