

建筑工程智能化施工技术探讨

刘潍豪

河南神火建筑安装工程有限公司 河南 商丘 476600

摘要：在建筑业数字化转型浪潮中，智能化施工技术已成为突破传统建造模式瓶颈的核心引擎。以深圳平安金融中心项目为例，该项目通过部署智能无人驾驶塔吊实现吊装作业精准调度，结合无人机倾斜摄影技术构建厘米级精度三维实景模型，并采用集成智能顶升模架系统的轻量化造楼机，最终实现主体结构施工效率提升40%、高空作业安全事故率下降65%的突破性成果。本文从技术架构（涵盖物联网感知层、5G传输层、AI决策层）、应用场景（包括动态施工模拟、质量实时监测、资源智能调配）、实施路径（分阶段推进设备智能化改造-数据中台建设-全流程协同）三个维度，系统剖析智能化施工技术的创新价值与实践经验，揭示其通过数据驱动实现设计-施工-运维一体化，重构建筑产业链协作范式的深层逻辑。

关键词：智能化施工；数字孪生；建筑机器人；BIM协同；产业升级

1 引言

全球第四次工业革命浪潮下，建筑业正经历数字化颠覆。IDC预测，到2025年全球智能建造市场规模将超1.2万亿美元，年复合增长率18.7%，折射出行业突破效率瓶颈的迫切需求。传统建造模式“三高一低”（高能耗、高污染、高事故率、低效率）的粗放发展，难适应碳中和与高质量发展要求。中国建筑业处于转型关键期，住建部《“十四五”建筑业发展规划》提出，到2025年智能建造与新型建筑工业化协同发展体系基本建立，装配式建筑占比超30%。在此背景下，智能化施工技术正从概念验证迈向规模化应用。

2 技术革命：智能化施工的底层逻辑重构

2.1 数据驱动的建设范式转型

传统建造模式长期受制于信息孤岛、经验依赖和资源错配三大顽疾。智能化施工通过构建“BIM+物联网+AI”三位一体的数据中枢，实现了全要素数字化映射^[1]。以中建三局承建的武汉绿地中心项目为例，其建立的数字孪生平台整合了2.3万个传感器数据，将混凝土浇筑温度控制精度提升至 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，钢筋绑扎误差率从3%降至0.8%。这种基于实时数据的动态优化机制，使施工决策从“经验驱动”转向“数据驱动”。

2.2 关键技术集群的协同创新

技术体系的协同创新呈现“基础层-支撑层-应用层”的立体架构。基础层以5G专网和边缘计算为核心，上海中心大厦部署的5G专网支持200台塔吊同步作业的实时监控，通过QoS保障机制确保关键控制指令的零丢包传输。支撑层中，BIM技术向施工阶段深度渗透，北京大兴机场项目通过BIM+CFD仿真，优化了航站楼自然通风系统，

在过渡季实现60%区域的自然通风，年节能达1200万度。应用层则形成完整的建筑机器人谱系，碧桂园博智林研发的28款建筑机器人，涵盖砌筑、喷涂、地面整平等12个工种，其中砌筑机器人通过视觉定位与力控技术，实现砖块精准抓取与错缝砌筑，效率达人工4倍，且灰缝均匀度优于国家标准。

2.3 产业链协作模式的颠覆性变革

产业链协作模式正经历颠覆性变革。广联达建设的数字建筑平台，连接了12万家供应商、300万产业工人，通过智能合约技术实现设计-生产-施工-运维的全链条协同。在装配式建筑领域，该平台将构件标准化率从65%提升至92%，通过算法优化排产顺序，使项目周期缩短30%。这种变革不仅体现在效率提升，更重构了利益分配机制，设计单位通过参与运维阶段的数据服务，收入占比从传统模式的15%提升至35%，形成新的价值增长点。

3 实践突破：典型场景的技术赋能路径

3.1 无人化施工装备

智能装备的应用正在重构作业安全边界。在塔吊作业领域，智能无人驾驶塔吊通过激光雷达与视觉融合定位技术，构建出300米半径内的三维环境模型，结合力反馈控制系统实现自主避障和路径规划。南京金鹰世界项目应用的智能塔吊，在强风天气下仍保持98%的作业率，其抗风稳定系统通过实时监测风速、塔身倾斜角等参数，自动调整配重和变幅速度，较传统塔吊安全性提升3倍。地下连续墙施工则涌现出力反馈控制成槽机器人，通过六维力传感器实时感知地层阻力变化，自动调整钻进速度和泥浆压力，将成槽垂直度偏差控制在1/500以内，较人工操作提升3倍精度，在杭州地铁项目应用中，

单幅槽段施工时间从12小时缩短至8小时。

3.2 安全预警系统

安全预警系统的进化体现了从被动响应到主动预防的转变。智慧工地平台集成AI行为识别算法,通过部署在作业面的4K摄像头,实时分析未戴安全帽、临边作业等20类违规行为。中交集团在雄安新区项目部署的智能监控系统,采用YOLOv5目标检测框架,结合时空注意力机制,日均预警安全隐患200余次,准确率达92%。结构健康监测系统则通过光纤光栅传感器网络,实现桥梁、超高层等结构的实时应力分析^[2]。港珠澳大桥安装的4000余个传感器,持续监测8年结构安全,其数据驱动的疲劳寿命评估模型,成功预测了某段沉管接头的微小变形,指导养护单位提前进行加固处理。

3.3 三维扫描技术

数字建造技术正在重塑质量管控体系。三维扫描技术以毫米级精度重构实体模型,国家速滑馆“冰丝带”项目采用Leica ScanStation P50激光扫描仪,在曲面幕墙安装阶段,通过点云模型与BIM模型的自动配准,将安装误差控制在3mm内,较传统全站仪测量效率提升5倍。无人机倾斜摄影技术实现每周次的全景建模,深圳平安金融中心项目通过大疆M300 RTK无人机搭载五镜头相机,单次飞行获取2亿个点云数据,结合ContextCapture软件生成实景三维模型,为进度管控提供动态基准,使进度偏差修正效率提升50%。

3.4 智能质检系统

智能质检系统的创新体现在检测手段的智能化升级。混凝土强度智能回弹仪集成物联网模块,通过NB-IoT网络自动上传检测数据至质检平台,万科在杭州项目应用的智能回弹仪,配备压力传感器和角度补偿算法,使检测效率提升4倍,且数据不可篡改特性满足了监管部门要求。钢结构焊接机器人配备相控阵超声检测系统,通过128阵元探头实现焊缝内部缺陷的实时识别,国家会议中心二期项目采用的IGM机器人焊接工作站,结合TOFD检测技术,将焊缝一次合格率从95%提升至99.6%,显著减少返修成本。

3.5 资源调度系统

智慧管理系统通过数字孪生技术优化资源配置效能。基于数字孪生的物料管理系统,在构件生产阶段植入RFID标签,实现全生命周期追踪。中建科工在深圳国际会展中心项目应用该系统,通过UWB定位技术实时监控构件位置,结合智能调度算法优化运输路线,减少物料浪费15%。智能排产算法则考虑天气、设备状态等200余个变量,上海建工在北外滩项目开发的排产系统,通

过强化学习模型动态调整施工序列,使塔吊利用率从65%提升至85%,吊装作业冲突率下降70%。

3.6 能耗管理系统

能耗管理系统的创新聚焦于施工阶段的节能减排。临时用电智能监控平台实时分析1200余个回路数据,通过电流波形分析技术识别异常用电模式,中建八局在西安项目应用该系统,结合分时电价策略自动调整设备运行时段,年节电达80万度^[3]。太阳能+储能一体化系统为工地提供清洁能源,碧桂园在顺德项目部署的500kW微电网,采用磷酸铁锂电池储能系统,在日照充足时段存储电能,满足夜间施工30%的用电需求,相当于每年减少二氧化碳排放400吨。

4 实施挑战:技术落地的多维障碍突破

4.1 技术融合的“最后一公里”难题

技术融合的“最后一公里”难题体现在数据互通与算法适应性层面。数据接口标准化缺失导致设备协同困难,某超高层项目采购了3家厂商的塔吊监控系统,因协议不兼容无法实现集中管理,曾发生塔吊碰撞预警信息未及时推送导致的事故。行业亟需建立类似OPC UA的统一通信协议,目前中国建筑业协会正在牵头制定《建筑机器人通信协议标准》,预计2025年完成试点应用。算法适应性不足则表现为AI模型在复杂工地环境中的性能衰减,某项目的人脸识别系统在雨天因水滴干扰导致误报率高达30%,通过引入红外补光和雨滴检测算法,将误报率降至5%以下。迁移学习框架的开发成为关键,清华大学团队提出的Domain Adaptation方法,使目标检测模型在跨工地场景下的准确率损失从30%降至10%。

4.2 产业生态的协同创新困境

产业生态的协同创新面临供应链响应滞后与人才结构断层双重挑战。智能装备定制周期长达6-8个月,难以匹配项目进度需求,某装配式项目因智能生产线调试延误,导致构件供应中断3周,直接损失超500万元。解决路径在于构建“研发-制造-应用”联合体,中建集团联合三一重工、广联达等企业成立智能建造创新中心,将装备研发周期缩短至3个月。人才缺口方面,既懂建筑又懂IT的复合型人才缺口达80%,某施工企业招聘的AI工程师因缺乏现场经验,开发的混凝土裂缝识别算法在复杂光照条件下准确率不足60%。高校正在调整人才培养方案,同济大学开设的智能建造专业,采用“双导师制”,学生需完成2个实际工程项目的数据分析任务方可毕业,首批毕业生就业率达100%。

4.3 制度体系的适应性变革

制度体系的适应性变革涉及标准规范更新与责任界

定机制创新。现有200余项建筑标准中,仅15%涉及智能化技术,某智能升降平台因缺乏验收标准,无法通过安监部门审查,导致项目停工2个月。住建部正在修订《建筑施工安全检查标准》,新增智能装备专章,明确传感器精度、数据存储周期等30项技术指标。责任界定模糊则表现为智能装备事故的法律主体责任难以确定,某塔吊碰撞事故中,设备商、软件商、施工单位互相推诿,最终通过仲裁划分责任比例。建立产品责任保险制度成为破局关键,平安保险推出的"智能建造装备责任险",将设备故障、算法错误等纳入保障范围,单台设备年保费约5000元,可覆盖200万元赔偿额度。

5 未来展望:技术演进与产业变革

5.1 技术融合的深度突破

技术融合的深度突破将推动建造方式根本性变革。元宇宙建造技术通过VR/AR实现远程协同设计,微软HoloLens 2已在多个项目应用,设计师可佩戴设备进入虚拟工地,实时调整构件尺寸并验证施工可行性,使设计评审效率提升60%。自主建造系统则向群体智能方向发展,波士顿动力Spot机器狗与建筑机器人协同作业,在复杂地形中完成测量、搬运等任务^[4]。日本清水建设研发的砌筑机器人集群,通过分布式控制算法实现异形结构施工,在东京某艺术中心项目中,成功完成双曲面墙体的自动化砌筑,误差控制在2mm以内。

5.2 产业形态的范式转移

产业形态的范式转移表现为服务化转型与平台化竞争并存。建筑企业从"交钥匙工程"转向"全生命周期服务",中建科技推出的"数字管家"服务,涵盖设计优化、运维监测等12项增值服务,在雄安新区某项目中中年增收800万元。平台化竞争则催生建筑产业互联网,阿里云建设的平台已连接2000余家企业,通过算法匹配设计资源与施工能力,在杭州某商业综合体项目中,将设计周期从3个月缩短至6周,设计费降低30%。

5.3 可持续发展目标实现

可持续发展目标的实现依赖技术创新与模式创新的双重驱动。零碳工地建设方面,中建集团在雄安项目试点"光伏+储能+氢能"微电网,屋顶光伏装机容量达2MW,结合质子交换膜电解水制氢系统,实现施工用电的自给自足,预计年减排二氧化碳1.2万吨。循环经济领域,碧桂园研发的建筑垃圾再生系统,将混凝土碎块通过破碎、筛分、强化等工序转化为再生骨料,在顺德项目中的应用显示,再生骨料制备的C30混凝土强度达标率100%,且每立方米成本降低80元。

结语

智能化施工技术正在重塑建筑业的DNA。从武汉绿地中心的数字孪生平台到碧桂园的建筑机器人军团,从雄安新区的智慧工地到港珠澳大桥的结构健康监测,技术革新已从单点突破转向系统重构。面对技术融合、产业协同、制度创新的三重挑战,唯有构建"政府引导-企业主导-科研支撑-金融助力"的创新生态,才能推动建筑业实现质量变革、效率变革、动力变革的全面跃升。当5G基站覆盖每个工地,当AI算法渗透每道工序,当数字孪生映射每栋建筑,一个更安全、更高效、更绿色的智能建造时代正在到来。

参考文献

- [1]李新建.智能化施工技术——建筑工程行业变革的关键推动力[J].楼市,2025,(04):39-41.
- [2]徐文玉.智能化施工技术在现代建筑工程中的创新应用[J].中国建筑装饰装修,2025,(09):76-78.
- [3]朱振雨.智能化技术在建筑工程绿色施工中的应用[J].工程与建设,2025,39(02):401-403.
- [4]苏云晨.浅析智能化技术在建筑工程施工中的应用[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(四).广西昊霖市政工程有限公司,2024:192-194.