

智慧建造背景下建设工程数字化施工技术应用探析

王 峰

博兴县博昌街道办事处 山东 滨州 256500

摘 要：在智慧建造行业升级背景下，数字化施工成为建筑业提质增效、绿色发展的核心路径。本文界定智慧建造与数字化施工核心概念，梳理 BIM、物联网、数字孪生等核心技术体系与应用架构，结合工程实例剖析全施工周期数字化应用成效。针对技术集成不足、标准缺失、人才短缺等现存问题，提出针对性优化对策，并展望技术融合、产业规模化、绿色低碳的行业发展趋势，为工程数字化施工落地提供参考。

关键词：智慧建造背景；建设工程；数字化；施工技术；应用

引言：传统建设工程施工依赖经验管控，存在效率偏低、管控粗放、质量安全隐患多、成本损耗大等诸多问题，难以适配现代建筑工程复杂化、精细化、高质量的发展需求。随着新一代信息技术与建筑业深度融合，智慧建造与数字化施工模式快速普及。基于此，本文立足智慧建造发展视角，系统探究建设工程数字化施工技术体系、实践应用、现存短板与优化路径，助力建筑业数字化转型升级。

1 智慧建造与建设工程数字化施工核心理论及技术体系

1.1 核心概念界定

(1) 智慧建造：定义为融合新一代信息技术与先进建造工艺，具有全面感知、智能分析、自主决策和精准执行核心特征的工程建造模式；其发展内核在于数据驱动下的知识沉淀与复用，行业应用定位于提升工程质量、安全、效益及绿色发展水平。(2) 数字化施工：区别于传统施工的核心优势在于将经验依赖转为数据驱动，实现施工过程的精准预测与动态调控；其核心内涵涵盖施工要素（人、机、料、法、环）的数字化建模、施工过程的数字化映射与管理行为的数字化协同，管控目标聚焦于进度精准把控、成本精细核算、质量严格追溯与安全实时预警^[1]。(3) 工程施工数字化：构建以 BIM 模型为核心数据载体的全生命周期数据采集、流转、应用与管控逻辑，实现设计数据向施工阶段无损传递、施工过程数据动态汇聚、运维需求数据前置准备的数据闭环，支撑数据要素在规划、设计、施工到运维各阶段的持续增值与高效复用。

1.2 智慧建造下数字化施工核心技术

(1) BIM 三维建模技术：涵盖参数化族库建模、全

专业碰撞检测、基于 WBS 的四维进度模拟及 LOD300 及以上精度等级的精细化模型交付，构建设计与施工一体化数据底座。(2) 物联网与智能感知技术：依托各类传感器、RFID 标签、工地摄像头及智能穿戴设备，实现施工现场人、机、料、环等要素数据的实时采集、设备联动控制、环境参数监测及人员定位与行为管控。(3) 数字孪生与虚拟仿真技术：通过高保真映射构建施工场景数字孪生体，支持施工方案虚拟预演、复杂工况风险模拟及施工参数动态优化，实现“先模拟后实施”的精准建造。(4) 大数据与云计算技术：集成整合多源异构工程数据，构建云端协同管理平台，利用数据挖掘与机器学习算法提供进度预测、资源调配、成本分析等智能决策支撑。

1.3 数字化施工技术应用原则与架构

(1) 应用基本原则：坚持数据标准统一确保互联互通，强调多业务协同提升作业效率，注重实用性与可操作性避免过度数字化，强化网络安全与数据隐私保护，并覆盖工程全生命周期各阶段应用需求。(2) 整体应用架构：构建数据层（多源数据采集与存储）、平台层（数据中台与业务中台）、应用层（进度、质量、安全、成本等业务模块）、管控层（综合决策驾驶舱与预警中心）四层数字化施工体系架构^[2]。(3) 技术集成逻辑：以 BIM 模型为数据枢纽，通过 API 接口与数据中台实现物联网感知数据、孪生仿真数据及业务管理数据的融合贯通，形成“感知-传输-建模-分析-决策-执行”的闭环协同应用机制。

2 智慧建造背景下建设工程数字化施工技术应用与实践

2.1 施工准备阶段数字化应用

(1) 数字化图纸校核与方案优化: 基于 BIM 模型实施全专业图纸碰撞检查, 自动生成碰撞检测报告, 提前发现设计错漏碰缺问题; 结合施工组织设计, 对基坑开挖、大型构件吊装、模板支撑体系等关键施工方案进行虚拟预演, 模拟不同工况下的施工可行性, 依据模拟结果比选并优化施工方案, 从源头规避施工风险。(2) 数字化资源配置规划: 基于 BIM 模型提取各施工阶段工程量清单, 结合进度计划自动生成人工工种需求计划、材料分批进场计划及机械设备调配方案; 建立资源数据库, 实现多项目间资源统筹平衡与动态调度规划, 避免资源闲置或短缺, 提升资源配置效率。(3) 施工场地数字化布置: 利用三维场地规划软件, 在数字模型中完成办公生活区、材料堆场、加工车间、施工道路及大型机械站位等的三维可视化布置; 模拟不同施工阶段场地转换方案, 优化临时设施布局与物料运输路径, 减少二次搬运, 确保场地利用科学合理、交通组织顺畅高效。

2.2 施工过程核心环节数字化管控

(1) 进度数字化管控: 将施工进度计划与 BIM 模型挂接形成 4D-BIM 进度模型, 实现施工进度可视化模拟与动态展示; 现场通过移动端或物联网设备实时采集实际进度数据, 与计划进度自动比对分析, 对滞后工序自动触发预警, 辅助管理人员制定纠偏方案并动态调整后续计划。(2) 质量数字化管控: 采用数字化测量设备 (如三维激光扫描仪、智能靠尺等) 采集构件位置、尺寸、平整度等质量参数, 与 BIM 模型进行自动比对校验; 建立工序质量线上验收流程, 验收记录与检验检测报告线上归档, 形成质量档案; 对质量问题关联责任人与整改措施, 实现质量缺陷全过程溯源追踪与闭环处置^[3]。(3) 安全数字化管控: 部署塔吊防碰撞、基坑位移监测、高支模变形监测、临边防护感应等智能传感系统, 实现高危作业区域实时监测预警; 建立安全隐患排查治理闭环流程, 现场巡查发现问题即时拍照上传、自动派单整改、验收确认销项, 实现安全隐患排查、上报、整改、验收的全流程数字化闭环管理。(4) 成本数字化管控: 将工程量清单与 BIM 模型关联, 自动统计各施工段、各工序的材料用量并精准核算实际消耗; 动态采集材料进场验收数据与施工领用消耗数据, 自动计算损耗率并与定额对比, 实现材料用量与施工损耗的实时动态统计; 通过成本管理平台实时归集人工、材料、机械费用, 与预算成本自动对比分析偏差, 及时发现超支风险并追溯原因, 支撑成本动态纠偏决策。

2.3 竣工与运维衔接阶段数字化应用

(1) 数字化竣工验收: 基于竣工 BIM 模型开展可

视化验收, 将现场实测数据与模型信息比对核验, 确保工程实体与数字模型一致; 验收过程中的设备参数、隐蔽工程记录、测试报告等数据化成果集中整理、线上审阅, 提升竣工验收的规范性与可追溯性。(2) 工程数字资产归档: 汇总施工全周期产生的 BIM 模型、图纸变更、施工记录、检验检测报告、影像资料等数字化成果, 按标准分类编码后统一归档, 形成涵盖几何信息、技术参数、施工过程资料于一体的 LOD500 精细化竣工模型与完整数字资产包。(3) 运维阶段数据衔接: 将竣工 BIM 模型及设备材料台账、隐蔽工程信息、维保手册等数字化成果移交运维管理平台, 为后期设施运维、设备检修、空间改造及应急管理提供准确的数据支撑, 实现建设阶段向运维阶段的信息无损传递与持续服务^[4]。

2.4 工程应用案例分析

(1) 案例项目概况: 某大型城市综合体项目, 总建筑面积约 26 万平方米, 包含超高层塔楼与大型商业裙房, 具有结构复杂、机电系统密集、施工场地狭窄、工期紧张等特点; 项目施工前已建立 BIM 实施标准, 配备数字化管理平台与物联网基础设施, 具备较为完善的数字化施工应用基础条件。(2) 核心数字化技术落地方案: 施工准备阶段完成全专业 BIM 模型整合与碰撞检测, 优化解决管线碰撞问题 230 余处; 施工过程中基于 4D-BIM 进行进度动态管控, 采用物联网设备监测塔吊运行、基坑变形等关键安全指标, 利用数字化验收系统完成工序质量线上检查与整改闭环管理; 竣工阶段交付 LOD500 精度竣工 BIM 模型及完整施工数字资产包, 实现全过程施工数据的可追溯、可复用。(3) 应用成效分析: 相比同类型传统施工项目, 进度偏差率由平均 15% 压缩至 5% 以内, 设计变更及返工签证量减少约 35%; 质量验收一次合格率提升至 98.5%, 质量问题平均整改时间缩短约 40%; 安全风险识别效率提升约 50%, 实现项目实施期间重大安全事故零发生; 材料损耗率较定额损耗降低约 2 个百分点, 综合成本节约率达 3.2%, 数字化施工技术综合应用成效显著。

3 智慧建造背景下建设工程数字化施工技术应用现存问题与优化对策

3.1 技术应用层面现存问题

(1) 技术集成度不足: BIM、物联网、数字孪生、大数据等各类数字化技术多处于独立应用状态, 各系统间数据接口不统一、通信协议不兼容, 导致数据互通性差, 形成信息孤岛, 难以发挥技术协同联动的综合效能。(2) 模型应用深度不够: BIM 技术在实际应用中多停留在建模与可视化展示层面, 尚未充分延伸至施工

全过程动态管控、进度智能预警、成本自动分析、方案自主优化等深度应用场景,决策支持能力未得到有效释放。(3)数字化设备适配性低:施工现场智能感知设备(如高精度传感器、智能安全帽、无人机巡检系统等)部署覆盖面不足,软硬件接口不匹配,设备在复杂施工环境下的稳定性、耐久性与精度尚不能满足全天候作业需求,影响数据采集质量与系统运行可靠性。

3.2 管理与人才层面现存问题

(1)行业标准体系不完善:当前数字化施工相关标准规范建设滞后,在 BIM 交付标准、物联网数据格式、数字化验收流程与评定方法等方面缺乏统一的国家级或行业级标准,导致各参与方执行尺度不一、成果互认困难。(2)项目管理模式滞后:传统“条块分割”式项目管理机制难以适应数字化施工所要求的跨专业协同、数据共享与实时决策需求,组织流程僵化、权责划分模糊,制约数字化技术效能的充分发挥。(3)专业人才缺口较大:既具备丰富工程施工管理经验又掌握 BIM 建模、数据分析、智能设备应用等数字化技术能力的复合型人才严重短缺,人才供给与行业发展需求之间结构性矛盾突出。

3.3 智慧建造下数字化施工技术应用优化对策

(1)强化技术集成创新:搭建一体化数字化施工协同管理平台,统一数据接口规范与通信协议,打通 BIM、物联网、数字孪生、大数据等各技术系统间的数据壁垒,实现全要素数据融合、全过程业务协同与全场景智能联动。(2)完善行业标准与管理体系:加快制定并推广统一的数据采集与交换标准、BIM 模型交付与精度标准、数字化施工应用流程与验收规范;建立健全与数字化施工相适应的项目管理制度与跨部门协同管控机制,明确各参建方职责分工与协作流程。(3)构建复合型人才培养体系:推动高校增设智能建造相关专业课程,强化校企合作开展定向培养与实训实践;面向企业在岗人员开展数字化技能专项培训与继续教育;加大行业紧缺人才引进力度,形成多层次、多渠道的人才供给格局^[5]。(4)深化全周期数字化落地:推动数字化技术应用从施工准备、过程管控到竣工运维的全链条覆盖,

将数字化手段贯穿进度、质量、安全、成本等各管理维度,实现从“点状应用”向“全程贯通”的深度转变。

3.4 数字化施工技术未来发展趋势

(1)技术融合趋势:数字孪生、人工智能、边缘计算等前沿技术与施工管理深度融合,推动施工管控从“感知-响应”向“认知-决策-执行”自主智能管控方向演进,实现施工过程的自我优化与智能调节。(2)产业化趋势:数字化施工技术体系将向标准化、模块化、规模化方向发展,形成可复制推广的成套解决方案与产品体系,全面适配智慧建造在不同工程类型、不同建设场景下的全域应用需求。(3)绿色低碳趋势:数字化技术深度赋能绿色施工管理,通过精准调度降低大型机械能耗、优化材料利用减少建筑废弃、智能监控控制施工排放,助力工程建设领域节能降耗与“双碳”目标实现。

结束语

综上所述,数字化施工是智慧建造落地的核心支撑,可有效破解传统施工管控难题,全面提升工程建设质量、安全、效率与经济效益。当前行业数字化应用仍存在技术、管理、人才层面的多重短板。未来需持续推进技术集成创新、标准体系完善、人才队伍建设,深化全周期数字化应用,推动工程施工从经验驱动转向数据智能驱动,助力建筑业高质量、绿色化、智能化长效发展。

参考文献

- [1] 叶浩文,王要武.我国智能建造与建筑工业化融合发展关键技术体系研究[J].建筑经济,2023,44(01):95-102.
- [2] 李璐璐.智能化技术在建设项目全过程数字化施工管理中的应用研究[J].建筑经济,2024,45(11):20-26.
- [3] 谭旺,仝美娜,赵欣,等.基于 BIM 的全过程智能建造数字化技术研发及综合应用[J].中国勘察设计,2024,13(04):74-77.
- [4] 郭祥,董光炎,解亚龙.大型枢纽工程智慧建造与数字化施工技术应用实践[J].中国铁路,2023,9(05):72-79.
- [5] 刘玉涛,何骏炜,崔朝赞.超高层建筑智慧建造数字化施工体系构建与应用[J].工程管理学报,2025,39(02):102-107.