

数字孪生技术在建筑智能化施工全过程动态管控中的应用研究

高锡华

云南建投第七建设有限公司

DOI:10.12238/btr.v8i4.4732

[摘要] 在建筑工业化与智能化转型的背景下,施工全过程的动态管控成为了提升工程质量、效率与安全的核心需求。而数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟模型的实时映射,能够实现施工过程的可视化、可预测、可调控,该技术为破解传统施工管控中信息滞后、协同不足、决策被动等难题提供了关键的路径。在本文中以建筑智能化施工为研究场景,聚焦于数字孪生技术的应用策略进行了研究。此次研究旨在为建筑企业借助数字孪生技术实现施工全过程的动态管控升级提供理论依据与实践指导。

[关键词] 数字孪生; 建筑施工; 动态管控; 智能化施工; 应用策略

中图分类号: TU7 文献标识码: A

Research on the application of digital twin technology in dynamic control of intelligent construction process in building

Xihua Gao

Yunnan Construction Investment Seventh Construction Co., LTD.

[Abstract] In the context of industrialized and intelligent transformation in construction, dynamic control throughout the entire construction process has become a core requirement for improving project quality, efficiency, and safety. Digital twin technology, by establishing real-time mapping between physical entities and virtual models, enables visualized, predictable, and controllable construction processes. This technology provides a critical solution to challenges in traditional construction management such as information delays, insufficient collaboration, and passive decision-making. Focusing on intelligent construction scenarios, this study explores application strategies for digital twin technology. The research aims to provide theoretical foundations and practical guidance for construction enterprises to achieve dynamic control upgrades across the entire construction process through digital twin technology.

[Key words] digital twin; construction; dynamic control; intelligent construction; application strategy

引言

建筑业作为国民经济的支柱产业,其施工过程的复杂性与不确定性显著的高于其他行业。当前随着超高层建筑、大型综合体等复杂工程增多,过于依赖人工巡检、纸质记录、经验决策的传统施工管控模式已难以应对多专业交叉作业、多参与方协同、多风险叠加的管控需求,该模式容易导致进度滞后、质量缺陷、安全事故等问题频发。但数字孪生技术基于物联网、大数据、人工智能、BIM 等技术融合,构建了与物理施工现场同步映射的虚拟模型,其通过实时数据交互实现了施工状态的动态感知、过程的模拟预测、问题的及时处置,推动着施工管控从“事后补救”向“事前预防”“事中调控”转型。在近些年,国家已经出台了《“十四五”建筑业发展规划》等政策,在其中明确地提出了推广数字孪生等智能技术在施工领域的应用。因此如何将数字孪生技术与施工全过程进行深度融合,且制定出科学可行的应用策略,是当前建筑企业实现智能化转型的重要课题。

1 数字孪生技术在建筑智能化施工准备动态管控中的应用

施工准备阶段是管控的基础,在该阶段数字孪生技术通过虚拟建模与模拟优化,实现施工方案、资源配置、风险预案的精准规划,能够为现场施工提供科学的指导^[1]。

1.1 虚拟模型构建

“多维度融合”的施工数字孪生底座以BIM模型为基础,可以整合建筑结构、机电安装、装饰装修等专业模型,进而形成统一的建筑信息模型。然后导入施工场地地形地貌数据、周边环境数据(如地下管线、交通线路),即可构建场地布局模型,再接入施工机械设备三维模型(如塔式起重机、混凝土泵车)、周转材料模型(如脚手架、模板),进而形成包含了“建筑—场地—设备—材料”的全要素虚拟模型。同时还可以为模型构件赋予属

性信息,如材料性能、施工工艺、质量标准、进度计划等等,使虚拟模型成为施工管控的信息载体。

1.2 施工方案模拟优化

施工单位需依托数字孪生技术开展“全场景预演”的虚拟仿真分析,即通过对复杂施工环节的数字化模拟,提前识别出方案中存在的缺陷并进行优化,以确保现场施工的安全性与高效性。对于深基坑支护、钢结构吊装、超高模板搭设、大体积混凝土浇筑等技术难度高、风险系数大的施工环节,技术团队可以以数字孪生模型为核心载体,再将施工工艺参数、设备性能指标、现场环境条件等数据整合输入模型,对不同施工方案的工序衔接逻辑、结构受力状态、施工操作难度进行全方位的仿真模拟,进而综合评估各方案的可行性与经济性。

以钢结构吊装施工为例,技术人员应先采集起重机的额定起重量、最大工作幅度、起升高度、变幅速度等性能参数,以及钢构件的重量、尺寸、重心位置、连接方式等详细数据,同时结合气象部门提供的施工期间风速、风向等环境数据,将其全部录入数字孪生平台。平台则通过动力学仿真算法模拟吊装全过程,从构件起吊、旋转、变幅到就位的每一个动作,精准地计算出不同吊装路径下的构件姿态、钢丝绳受力、起重机支腿压力,并识别构件与周边建筑、塔吊、高压线之间的碰撞风险,以及风速超标、重心偏移导致的倾覆风险。之后技术团队要根据仿真结果调整吊装的顺序,经过优化起吊角度、旋转速度、就位精度等操作参数,确定最优的吊装方案。

1.3 资源配置规划

项目管理团队基于施工进度计划与数字孪生模型,需要制定“动态匹配”的资源调度计划,务必实现人员、设备、材料等资源的精准配置与高效利用。该模型需要计划部门将施工总进度计划分解为月、周、日级进度目标,同时将进度节点与数字孪生模型中的构件施工任务相关联,且明确各施工阶段的核心任务与时间要求。技术团队则依托于数字孪生模型分析不同施工阶段的资源需求,再结合历史同类工程的资源消耗定额,构建起资源需求预测模型,以此精准地测算人员数量、设备型号及数量、材料用量等需求指标^[2]。首先在人员配置方面,模型根据钢筋加工量、混凝土浇筑量、模板安装量等工程量,可以结合不同工种的人工定额(如钢筋工日均加工钢筋8吨、木工日均支模20平方米),计算出各施工阶段所需钢筋工、木工、混凝土工、架子工等工种的班组数量与人员配置,同时考虑到人员技能等级、出勤情况等因素,自动地优化班组搭配,以确保人员技能与施工任务相匹配。其次在设备配置方面,该模型能够根据混凝土浇筑强度预测混凝土泵车、搅拌车的数量及时段安排,并根据钢结构吊装需求确定塔式起重机、汽车起重机的型号与布置位置。最后是材料配置方面,根据施工进度与构件工程量模型能够计算钢筋、混凝土、模板等主要材料的需求量,然后结合材料采购周期、运输时间,即可制定采购计划与库存管理计划。

2 数字孪生技术在建筑智能化现场施工动态管控中的应用

在现场施工阶段这一管控核心当中,数字孪生技术通过实时数据交互、动态模拟预测、协同决策调控,可以实现对进度、质量、安全、资源的全方位动态管控。

2.1 进度动态管控

对于进度的动态管控,需要项目管理团队构建“实时映射—偏差预警—优化调整”的闭环体系,即依托数字孪生技术实现施工进度的精准管控。其中在数据采集环节,施工单位需通过物联网技术搭建多维度的数据采集网络,将采集到的进度数据经由5G通信技术实时传输至数字孪生平台,平台则驱动虚拟模型与物理施工现场进行同步更新,最终便实现了施工进度的可视化映射。同时系统后台还会自动地将实际进度数据与预设的进度计划进行比对分析,当某一工序实际进度滞后计划3天以上或提前2天以上时,平台就会立即通过声光报警、手机APP推送等方式向项目管理人员发出预警信息。此时人工智能算法也会同步深度地分析进度偏差原因^[3]。

2.2 质量安全管控

施工单位应建立“实时监测—风险识别—协同处置”的智能管控机制,旨在借助数字孪生技术实现质量与安全的全方位管控。就质量管控方面而言,质量检测团队需配置激光扫描仪、钢筋位置检测仪、回弹仪等智能检测设备,定期对施工质量进行检测。先使用激光扫描仪对混凝土柱、梁的平整度与垂直度进行扫描,且生成三维点云数据,再使用钢筋位置检测仪检测楼板、墙体中钢筋的保护层厚度与间距,接着使用回弹仪检测混凝土构件的表面硬度,进而推算混凝土的强度。检测数据则通过无线传输模块实时地上传至数字孪生平台,平台会将实际检测数据与虚拟模型中预设的质量标准(如混凝土强度C30、钢筋保护层厚度15mm)进行自动地比对。若检测数据超标系统就会立即在虚拟模型上精准地标记问题位置,并推送质量缺陷预警信息至质量工程师与施工班组长,同时关联“返工整改—复检—验收”的处理流程,明确整改的责任人与完成时限。对于安全管控来说,安全管理团队需部署多维度安全监测设备,既要在深基坑周边布设位移传感器与倾角传感器,用于实时地监测边坡水平位移与倾斜角度;又要在高支模架体的立杆、横杆节点安装应力传感器,以此监测立杆轴力与横杆挠度变化;更需在施工现场出入口、高空作业区等危险区域安装智能视频监控,借助计算机视觉技术自动地识别出未佩戴安全帽、未系安全带、违规攀爬、材料乱堆乱放等不安全行为。

2.3 资源动态调度

基于数字孪生技术,管理团队能够实现“需求感知—智能匹配—实时调控”的高效管理模式,进而提升了资源的利用效率^[4]。首先是资源状态感知环节,需通过物联网设备实时地采集各类资源数据。即为施工人员配备内置定位芯片的智能安全帽,用于实时掌握人员的位置分布、出勤情况及所属班组,同时在施工机械设备上安装工况传感器,以此采集设备的运行状态、利用率、故障信息及维护记录,以及在钢筋、混凝土等主要材料的料仓安装智能料位传感器,进而监测材料的库存量与消耗速度。上

述这些资源数据会实时地传输至数字孪生平台,平台将对数据进行清洗、分析,再动态地更新资源数据库,并结合施工进度计划来预测资源供需变化趋势。此外数字孪生平台通过虚拟模型得以可视化展示出资源分布与流动情况,如塔式起重机的工作范围覆盖区域、材料运输车辆的实时位置与行驶路线,能够辅助管理人员直观地掌握资源动态,帮助其优化调度方案。

2.4 多参与方协同管理

建设单位牵头可以搭建统一平台、权限管控、实时交互的协同工作环境,此举旨在依托数字孪生平台打破各参与方的信息壁垒。具体来说,数字孪生平台需整合建设单位、施工单位、监理单位、设计单位及分包商等所有项目参与方,随后根据各参与方的职责与权限需求,为其设置差异化的平台操作权限。通常施工单位可查看实时施工进度、资源状态,且具有上传质量检测数据、施工日志及问题整改报告的权力;监理单位则可在线审核施工方案、查看质量安全检测报告,以及签发监理通知、暂停令等指令;而设计单位可基于现场施工数据优化设计方案,接收并响应设计变更申请,还需解答施工中的技术疑问;对于建设单位,其可实时地监控项目整体进展,职责为协调解决各参与方之间的争议问题。

3 数字孪生技术在建筑智能化验收交付动态管控中的应用

验收交付阶段为施工管控的收尾环节,在此数字孪生技术通过数据整合、虚拟验收、资产移交,可以实现工程验收的高效化与交付的数字化。

3.1 验收数据整合

在整合验收数据时,离不开全周期溯源的验收数据库。若基于此数字孪生平台建立验收数据库,便能自动地归集施工全过程的质量安全数据、检测报告、验收记录,且将其与虚拟模型构件一一关联,进而形成构件级的验收档案。举个例子,在混凝土梁构件模型上可查询到浇筑时间、混凝土强度检测报告、钢筋隐蔽工程验收记录、裂缝监测数据等全生命周期信息。同时利用区块链技术对验收关键数据进行存证,就能确保数据不可篡改、可追溯,解决了传统验收中纸质资料丢失、数据造假等问题。

3.2 虚拟验收

虚拟验收的关键为可视化核查,一般对于地下管线、设备内部结构、隐蔽工程等难以现场核查的部位,可以借助数字孪生模

型进行虚拟验收^[5]。具体的操作如下:验收人员在虚拟模型中漫游查看,应放大查看构件细节、调取相关检测数据,再比对设计要求与实际施工情况。之后利用AR技术将虚拟模型与物理实体叠加,进而实现虚实对照验收。比如通过AR眼镜查看墙体内部管线走向是否与设计一致,然后比对钢结构节点连接质量是否符合标准。

3.3 资产数字化移交

若验收合格的数字孪生模型与建筑设备管理系统(BMS)、智能运维平台进行对接,同步移交包含了设备参数、运行数据、维护手册、验收记录的数字化资产模型。业主方便可基于该模型实现建筑运营阶段的设备管理、能耗监控、维护调度等智能化运维工作。例如在空调设备上标注型号、安装位置、维护周期、供应商信息,当设备出现故障时,智能运维平台就可通过数字孪生模型定位设备位置、调取维护记录,以此辅助运维人员进行处置。

4 结语

数字孪生技术为建筑智能化施工全过程动态管控提供了全新的技术范式,其经由构建物理与虚拟的实时映射,实现了施工过程的可视化、可预测、可调控。而本文基于建筑施工管控现状与数字孪生技术,从施工准备、现场施工、验收交付三大阶段提出了系统的具体应用。

参考文献

- [1]崔健,董海龙.智能化施工技术在建筑幕墙安装中的应用[J].中国厨卫,2025,24(05):78-80.
- [2]赵建华,杨禹钦,周家正,等.数字化与智能化技术在建筑施工中的应用与展望[J].信息系统工程,2025,(06):55-58.
- [3]张旭哲,原鹏举,胡莎,等.数字孪生技术在智慧大坝中的应用现状及趋势[J].水电能源科学,2025,43(02):168-171.
- [4]汪学榕,李伟,王佳峰.数字孪生技术在建筑施工过程中的进度管控与风险预警研究[J].文学与人生,2022,(35):52-54.
- [5]黄都,李文平,范彦斌,等.数字孪生技术在高速公路智能化施工中的应用研究[J].软件导刊,2025,24(06):113-119.

作者简介:

高锡华(1986—),男,汉族,云南牟定人,高级工程师,研究方向:建设智能化建造技术。