基于数字孪生的建筑工程施工全流程可视化管理

曹 靖

天保建设集团有限公司 河北 保定 072750

摘要：在建筑产业数字化转型的浪潮中，传统施工管理面临信息断层、进度失控、风险难预判等痛点，亟需通过技术革新实现管理升级。本文聚焦数字孪生技术在建筑工程施工全流程可视化管理中的应用，探讨其技术原理与实施框架。研究基于施工进度、质量、安全及资源管理的实际需求，构建了包含数据采集融合、模型构建更新、可视化展示交互的总体框架，并提出精准建模、完善数据传输、优化展示平台、强化动态管理及建立协同机制等对策。研究表明，数字孪生技术通过虚实映射与动态仿真，可实现施工全流程的可视化监控与智能决策，为提升建筑工程管理效率、保障施工质量与安全提供了创新路径。

关键词：基于数字孪生；建筑工程施工；全流程可视化；管理

引言：随着建筑工程规模扩大与工艺复杂化，传统施工管理模式在进度把控、质量监管、安全预警等方面面临挑战。数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟映射模型，整合多源数据实现全流程动态仿真，为解决施工管理信息不对称、协同效率低等问题提供了新方案。当前，建筑工程施工管理亟需借助数字化手段实现从粗放式到精细化的转型，而数字孪生技术凭借其可视化、智能化与实时交互特性，能够精准映射施工过程中的人、机、料、法、环等要素，推动管理模式向动态预测与智能决策升级。

1 数字孪生技术概述

1.1 数字孪生概念与原理

数字孪生是一种通过构建物理实体的虚拟数字化模型，实现对实体全生命周期动态映射的技术。其核心原理是利用传感器、物联网、大数据等技术采集实体数据，通过建模工具构建三维虚拟模型，并借助数据融合与仿真算法，使虚拟模型与物理实体实时交互、同步更新。该技术通过“物理实体-虚拟模型-数据交互”的闭环体系，实现对实体状态的精准模拟、预测与优化。例如，在建筑工程中，数字孪生模型可整合设计图纸、施工进度、材料性能等数据，实时反映建筑实体的建造过程与运行状态，为决策提供可视化依据。

1.2 数字孪生在建筑工程中的应用价值

在建筑工程领域，数字孪生技术具有显著的应用价值。一方面，它通过可视化建模打破传统管理中的信息孤岛，使设计、施工、运维各阶段数据在虚拟模型中集成，提升协同效率；另一方面，借助实时数据驱动的动态仿真，可提前预判施工风险（如结构应力超限、进度延误），实现问题的主动防控。此外，数字孪生还能优

化资源配置，通过模拟材料调度、机械排班等场景，降低施工成本。据行业实践，应用数字孪生技术可使施工进度管理效率提升30%以上，质量缺陷率降低20%，为建筑工程向智能化、精细化管理转型提供关键支撑^[1]。

2 建筑工程施工全流程可视化管理需求分析

2.1 施工进度管理需求

建筑工程施工周期长、环节多，传统进度管理依赖人工汇报与静态图表，易出现信息滞后、偏差大等问题。可视化管理需求迫切，需通过BIM模型、物联网传感器与进度管理软件结合，实时追踪各工序进度。在复杂项目中，可视化界面可直观展示各施工区域的进度状态，如颜色标记进度超前、正常、滞后区域，管理者能快速定位延误节点。同时，系统需具备动态模拟功能，根据实际进度数据预测后续工期，提前发现潜在工期风险，以便及时调整施工计划，保障项目按时交付，提升整体施工效率与企业信誉。

2.2 施工质量管理需求

施工质量是建筑工程的核心，传统管理方式难以全面把控施工细节。可视化管理要求利用高清摄像、AI图像识别技术，对施工过程进行实时监测。例如，在混凝土浇筑环节，通过摄像头捕捉浇筑过程，AI分析浇筑厚度、平整度是否达标，及时发现蜂窝、麻面等质量缺陷。同时，建立质量问题数据库，将可视化检测到的问题进行分类、标注并关联施工部位，方便质量管理人员快速查询与追溯。此外，可视化系统还需提供质量数据统计分析功能，生成质量趋势报告，为质量改进提供数据支撑，确保工程质量符合标准规范。

2.3 施工安全管理需求

施工现场环境复杂，安全隐患多，传统安全管理存

在监管盲区。可视化管理需借助智能穿戴设备、视频监控与定位技术，实现对人员、设备、环境的全方位监控。为工人配备智能安全帽，实时监测其生命体征、行动轨迹，当工人进入危险区域或出现异常情况时，系统立即报警。通过视频监控结合AI行为分析，识别工人未佩戴防护装备、违规操作等不安全行为，及时发出预警。同时，可视化展示施工现场的危险源分布，如深基坑、高空作业区域等，提醒管理人员重点巡查，提前采取防范措施，降低安全事故发生概率，保障施工人员生命安全。

2.4 施工资源管理需求

施工资源包括人力、材料、设备等，合理调配资源是保障施工顺利进行的关键。可视化管理需求在于建立资源管理平台，整合资源信息并动态展示。利用RFID技术对材料进行标识，实时追踪材料的进场、存储、使用情况，避免材料浪费与短缺。通过设备传感器采集设备运行数据，可视化展示设备位置、运行状态、维护周期等信息，便于合理安排设备调度与维护，提高设备利用率。同时，可视化呈现人力资源分布与工作量情况，根据施工进度需求及时调整人员配置，优化资源分配，降低施工成本，提升项目经济效益。

3 基于数字孪生的建筑工程施工全流程可视化管理框架构建

3.1 总体框架设计

基于数字孪生的建筑工程施工全流程可视化管理总体框架，需以建筑信息模型（BIM）为核心基础，结合物联网（IoT）、大数据、人工智能等技术，构建“感知-分析-决策-执行”闭环体系。底层通过传感器、摄像头等设备采集施工现场各类数据，传输至数据处理层进行清洗、融合与存储；模型构建层依据数据动态更新数字孪生模型，使其精准映射物理实体；可视化展示层利用三维图形、虚拟现实等技术呈现施工全过程；决策支持层借助数据分析与AI算法，为管理者提供进度优化、风险预警等决策建议；执行反馈层则将决策指令传递至施工现场，形成动态循环。各层级相互协作，实现对施工全流程的高效、精准管理。

3.2 数据采集与融合技术

数据采集与融合是框架运行的关键。在采集方面，采用多源异构数据采集技术，如通过物联网传感器采集施工设备运行参数、环境温湿度等物理数据，利用BIM模型获取设计与施工信息，借助视频监控采集图像数据。在融合阶段，运用ETL（Extract-Transform-Load）技术对采集数据进行抽取、转换和加载，统一数据格式与标

准；结合时空对齐算法，将不同时间、空间维度的数据进行整合，消除数据冲突与冗余。通过建立数据仓库与数据湖，实现结构化、半结构化和非结构化数据的统一管理，为数字孪生模型构建与可视化分析提供准确、全面的数据支撑^[2]。

3.3 模型构建与更新技术

模型构建以BIM模型为初始框架，结合施工进度与现场实际情况，利用参数化建模技术细化各构件与施工工序。采用轻量化处理技术，减少模型数据量，提升系统运行效率。模型更新方面，基于实时采集的数据，通过自动化脚本与算法实现模型动态修正。例如，当施工进度发生变化时，自动更新模型中的工序时间节点；设备出现故障时，同步更新设备模型状态。同时，运用版本控制技术，记录模型的历史变更，便于追溯与对比分析。通过持续迭代更新，确保数字孪生模型始终与施工现场物理实体保持高度一致，为可视化管理提供精准的模型基础。

3.4 可视化展示与交互技术

可视化展示采用三维可视化、虚拟现实（VR）、增强现实（AR）等技术，将数字孪生模型以直观、沉浸式的方式呈现。在三维可视化界面中，通过不同颜色、纹理区分施工区域与构件状态；利用VR技术，让管理者身临其境地查看施工现场全貌；借助AR技术，将虚拟信息叠加到现实场景，辅助现场施工与检查。交互技术支持多终端操作，如PC端、移动端、智能大屏等，管理者可通过触摸、手势、语音等方式，实现对模型的缩放、旋转、剖切，查询施工进度、质量、安全等详细信息，还能进行施工方案模拟与决策推演，增强管理的灵活性与高效性，提升用户体验与管理效果。

4 基于数字孪生的建筑工程施工全流程可视化管理对策

4.1 构建精准数字孪生模型

构建精准数字孪生模型是实现可视化管理的基础。首先，在项目规划阶段，需基于BIM技术创建精细化三维模型，精确录入建筑构件的尺寸、材质、性能参数等信息，确保模型与设计方案高度契合。施工过程中，结合激光扫描、无人机倾斜摄影等技术，获取施工现场的高精度点云数据，对模型进行实时修正与补充。例如，在钢结构安装环节，利用全站仪测量实际构件位置与角度，将数据反馈至数字孪生模型，动态调整模型状态。同时，建立模型校验机制，定期组织设计、施工、监理等多方对模型进行核查，消除因施工变更、数据误差导致的模型偏差。此外，引入机器学习算法，对历史施工

数据进行分析,预测施工过程中可能出现的问题,提前优化模型,使数字孪生模型能够精准反映施工现场实际情况,为可视化管理提供可靠依据。

4.2 完善数据采集与传输体系

数据采集与传输的准确性和实时性直接影响可视化管理效果。在数据采集方面,需根据施工管理需求,合理部署物联网传感器。在混凝土养护区域安装温湿度传感器,实时监测养护环境;在起重设备上安装压力、角度传感器,采集设备运行参数。同时,规范数据采集频率与精度,对于关键施工环节,如大体积混凝土浇筑,需提高数据采集频率,确保数据能够及时反映施工状态。在数据传输方面,采用5G、Wi-Fi 6等高速通信技术,搭建施工现场专用网络,减少数据传输延迟与丢包率。建立数据加密与安全传输机制,对采集的敏感数据进行加密处理,防止数据泄露与篡改。此外,构建数据采集与传输监控系统,实时监测传感器工作状态、网络连接情况,一旦出现故障,立即报警并启动备用方案,保障数据采集与传输体系稳定运行,为可视化管理提供持续、可靠的数据支持。

4.3 优化可视化展示平台

可视化展示平台是管理者获取施工信息的重要窗口,需从功能与用户体验两方面进行优化。在功能层面,丰富平台展示内容,除了展示施工进度、质量、安全等基础信息外,还应提供施工工艺模拟、成本分析、资源调配等可视化模块。在用户体验方面,优化平台界面设计,采用简洁、直观的布局,方便管理者快速定位所需信息。支持多终端自适应显示,无论是PC端、移动端还是智能大屏,都能保证良好的展示效果。同时,引入智能搜索与筛选功能,管理者可通过关键词、条件筛选快速查找特定施工区域、构件的相关信息。此外,定期收集用户反馈,根据管理者的使用习惯和需求,对平台功能进行迭代升级,提升可视化展示平台的实用性与易用性,提高管理效率。

4.4 强化动态管理与智能决策

强化动态管理与智能决策能够提升施工管理的科学性与前瞻性。利用数字孪生模型与实时采集的数据,建立施工过程动态监测系统,对施工进度、质量、安全等指标进行实时跟踪与分析。当发现进度滞后时,系统自

动分析影响因素,并基于历史数据与算法模型,生成多种进度调整方案,供管理者选择。在质量与安全管理方面,运用AI图像识别、数据分析等技术,自动识别质量缺陷与安全隐患,并结合知识库给出相应的处理建议。此外,建立智能决策评估机制,对决策方案的实施效果进行跟踪与反馈,通过机器学习不断优化决策模型,使动态管理与智能决策更加精准、高效,降低施工风险,保障项目顺利推进。

4.5 建立协同管理机制

建筑工程施工涉及多方参与主体,建立协同管理机制是实现全流程可视化管理的关键。首先,明确各参与方在可视化管理中的职责与权限,制定统一的管理标准与流程。建设单位负责统筹协调,施工单位负责数据采集与现场执行,监理单位负责监督与审核,各方在可视化管理平台上实现信息共享与协同作业。定期组织多方联席会议,通过可视化展示平台汇报施工进展、分析存在问题,共同制定解决方案。此外,建立激励与考核机制,将可视化管理成效纳入各方考核指标,对积极参与、表现突出的单位和个人给予奖励,对未履行职责的进行处罚,调动各方参与协同管理的积极性,打破信息孤岛,提升建筑工程施工全流程可视化管理的整体效能^[1]。

结束语

基于数字孪生的建筑工程施工全流程可视化管理,通过精准模型构建、高效数据采集传输、智能决策与协同管理,打破传统管理壁垒,实现施工过程的透明化与精细化。它不仅提升了项目管理效率、保障工程质量安全,更为建筑行业数字化转型注入强劲动力。未来,随着技术的不断革新,该管理模式将进一步深度融合人工智能、物联网等前沿技术,持续拓展应用边界,推动建筑工程管理迈向智能化、智慧化新高度,为行业高质量发展开辟更广阔的空间。

参考文献

- [1]刘子圣.基于数字孪生的钢结构施工过程智能质量管理方法研究[J].北京:北京工业大学,2022.124-125
- [2]姜佩奇.基于BIM的水电工程设计施工一体化管理模式和方法研究[J].天津:天津大学,2021.156-157
- [3]白文燕.融合数字孪生与混合现实的震损建筑加固可视化指导方法研究[J].北京:北京工业大学,2022.198-199