

数字化技术在建筑施工质量控制中的应用研究

刘记长

河北元正文旅建设集团股份有限公司, 河北 沧州 061000

DOI:10.61369/ETQM.2025120033

摘 要： 建筑施工质量作为工程建设的核心环节，在项目复杂度不断提升的背景下，传统方法因效率受限、信息同步性不足及过度依赖人工经验而面临严峻挑战。为响应现代工程质量管理需求，本研究构建以数字化技术为核心的质量控制体系，集成传感采集、BIM建模与智能分析形成闭环管理路径，实现多源信息的实时感知与结构变形、材料性能及工艺参数的精准映射，并依托深度学习构建质量风险诊断与决策支持模型。工程实践表明，该体系显著提升了隐患识别准确性、响应时效与管理协同水平，为推进施工质量控制向精细化、智能化转型提供了重要支撑。

关 键 词： 数字化技术；建筑施工；质量控制；信息感知；智能诊断

Research on The Application of Digital Technology in Quality Control of Building Construction

Liu Jichang

Hebei Yuanzheng Cultural Tourism Construction Group Co., Ltd., Cangzhou, Hebei 061000

Abstract： As a core element of construction engineering, quality control faces growing challenges due to inefficiency, information gaps, and experiential dependence in traditional methods, especially as projects increase in complexity. This study proposes a digital quality control system that integrates sensors, BIM, and AI to achieve closed-loop management. The system enables real-time monitoring and precise mapping of structural deformation, material properties, and process parameters, using deep learning for risk diagnosis and decision support. Practical applications demonstrate enhanced accuracy in hazard identification, faster response, and improved coordination, advancing the shift to refined and intelligent quality management.

Keywords： digital technology; construction; quality control; information perception; intelligent diagnosis

引言

建筑施工质量控制是保障工程安全与耐久性的核心环节^[1]，随着现代建筑向超高层、大跨度及复杂结构方向发展，传统依赖人工经验的质量管理方法在时效性、精确性与可追溯性方面面临严峻挑战^[2]。在此背景下，数字化技术成为提升质量控制效能的关键路径^[3]。建筑信息模型、物联网、大数据与人工智能等技术为实现质量信息的集成管理、过程可视化与智能决策提供了全新可能^[4]。本研究旨在系统构建以数字化为核心的施工质量控制技术体系与应用方法，通过多源信息融合与智能分析，推动质量控制从经验主导向数据驱动的模式转型，为工程质量管理现代化提供理论支撑与实践依据。

一、施工质量数字化控制基础概述

（一）质量控制要素数字化映射机理

施工质量控制的核心对象包括混凝土结构、钢筋构件、围护系统等，其关键质量属性表现为强度、变形、缺陷等物理特性。以混凝土结构为例，其强度取决于配合比、浇筑工艺及养护条件；钢筋构件的质量则与材质、加工精度及连接方式密切相关；

围护系统的性能则受到材料气密性、水密性及安装精度的影响^[5]。随着建筑信息模型（BIM）技术的应用，这些实体对象及其质量属性可通过数字化手段实现精确映射。BIM技术通过构建三维参数化模型，将物理实体的几何信息与非几何信息融合表达，形成具有丰富参数信息的数字孪生模型。该模型不仅能够直观展示建筑构件的空间布局和外观特征，还能质量数据的附着、存储、管理与分析提供统一载体。通过实时更新模型中的参数信

息,施工人员可动态跟踪质量状态,提前发现潜在问题。如在混凝土浇筑过程中,模型可记录振捣时间、养护温度等数据,为质量评估提供依据。同时,几何与非几何信息的融合表达为质量控制提供了理论基础,使施工质量的数字化管理成为可能。这种精确映射关系的建立,为后续的质量数据挖掘、分析与决策支持奠定了基础。

(二) 多源异构质量数据感知与融合原理

施工现场的质量数据具有显著的多源性和异构性,涵盖了传感器监测数据、影像数据、环境数据以及人工巡检数据等多种形式。这些数据来源广泛且结构各异,传感器监测数据能够实时反映结构的变形与应力状态,影像数据则提供了施工过程的可视化记录,环境数据涉及温度、湿度等外部条件,而人工巡检数据则弥补了自动化监测的盲区。为实现对这些数据的有效整合,基于物联网的传感网络部署需遵循科学原则。传感器的选型应依据监测对象的特性,如应变片用于应力监测、位移计用于变形观测;布点优化则需结合结构的关键部位与应力分布特点,确保数据的代表性与准确性;数据通信架构则需支持高频率数据传输与低延迟响应,保障信息的实时性与完整性。多源数据的融合依赖于时间与空间基准的统一,通过时间同步算法与空间配准技术,消除数据间的时间滞后与空间偏差,实现数据在统一框架下的高效整合。这种同步与融合机制为后续的特征提取与模型分析奠定了高质量的数据基础,从而支持施工质量的精准评估与智能决策。

二、施工质量多维度数字化控制方法设计

(一) 基于 BIM 与点云扫描的质量偏差控制方法

在建筑施工质量控制中,基于 BIM 模型与激光扫描点云数据的对比分析已成为一项关键技术。通过在施工现场部署三维激光扫描设备,获取高精度的点云数据,并将其与设计阶段的 BIM 模型进行自动对比,从而实现施工质量的数字化管控。首先,点云数据经过预处理流程,包括去噪、滤波和平滑化操作,以去除扫描过程中产生的误差和冗余信息,提升数据质量。接着,采用迭代最近点(ICP)算法完成点云数据与 BIM 模型之间的精确配准,确保两者在空间坐标系中的一致性。为了实现高效的模型对比,引入基于几何特征的匹配算法,提取点云数据和 BIM 模型的关键几何参数,如距离、角度和面积等,构建对比特征向量。通过计算特征向量之间的欧氏距离,量化分析实际施工与设计模型之间的偏差程度。其计算公式(1)如下:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i^{cloud} - f_i^{BIM})^2} \quad (1)$$

其中, D 表示点云数据与 BIM 模型之间的综合偏差距离, f_i^{cloud} 和 f_i^{BIM} 分别表示点云数据和 BIM 模型的第 i 个几何特征值, n 为特征数量。图 1 可直观展示实际施工与设计模型之间的偏差情况。

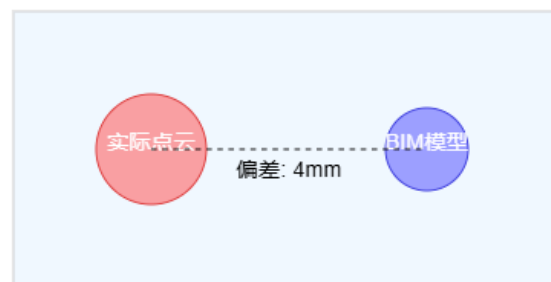


图 1 点云与 BIM 模型偏差分布示意图

该方法在主体结构的垂直度、平整度以及构件安装定位等几何质量控制方面具有显著优势。例如,在检测主体结构垂直度时,通过分析点云数据中建筑物轴线与 BIM 模型设计轴线的偏差,结合偏差统计指标(如最大偏差、均方根偏差等),快速定位垂直度超差的构件。同样,在平整度检测中,利用点云数据构建施工表面的三角网格模型,对比 BIM 模型中的理论设计表面,分析两者之间的高度差异,识别平整度不合格区域。

此外,在构件安装定位方面,通过对比点云数据与 BIM 模型中的构件位置信息,结合空间坐标变换算法,精准定位构件的安装偏差,并提供偏差修正建议。整个流程能够实现从数据采集、预处理、模型对比到质量评估的自动化与智能化,从而提升施工质量控制效率和精度,为建筑施工的数字化转型提供有力支持。

(二) 基于传感网络的施工过程实时监测方法

针对大体积混凝土浇筑、深基坑支护及高应力结构等关键工序,需建立基于多源传感网络的实时监测体系。通过在混凝土内部布设温度与应力传感器、在支护结构关键节点安装位移与应变传感器,构建高密度感知网络。数据采集频率依据施工阶段动态调整,基坑开挖期间位移监测频率不低于 1 次/h,混凝土温升阶段温度监测间隔缩短至 30min。采用 LoRa 无线传输协议与 BIM 平台集成,实现监测数据与模型对象的动态绑定。基于有限元分析设定位移预警阈值 $\Delta \leq 0.002H$ (H 为开挖深度) 和温度梯度限值 $\nabla T \leq 20^\circ\text{C}/\text{m}$,当数据超越阈值时系统自动触发分级预警,通过颜色编码机制在三维模型中实时标注异常区位,指导现场进行主动调控。这种融合物理传感与数字孪生的方法,形成了施工质量在线跟踪与闭环控制的技术路径。

(三) 基于机器视觉的工艺与缺陷智能识别方法

在施工质量控制中,基于图像与视频分析的智能识别方法正逐渐成为技术前沿。通过引入深度学习算法如卷积神经网络与 YOLO 目标检测模型,可实现施工工艺符合性与表面缺陷的自动化识别与分类。该方法首先依托大量现场图像构建样本库,涵盖钢筋绑扎间距、焊缝成型质量以及混凝土裂缝与蜂窝麻面等典型缺陷类型,并经过数据增强与标注以提升模型泛化能力。随后利用交叉熵损失函数进行端到端训练,不断优化识别精度与鲁棒性。最终部署于施工现场的边缘计算设备,实现实时视频流的在线分析与质量判定。其核心识别过程可表述为通过优化损失函数,见下式(2):

$$L = -\sum_{i=1}^C y_i \cdot \log(\hat{y}_i) \quad (2)$$

其中 C 为类别数, y_i 是真实类别独热编码的第 i 位 (0 或 1), \hat{y}_i 是模型预测第 i 类的概率。从而提升缺陷检测的准确率与效率。这一技术路径不仅显著减少人工检查的主观误差, 也为全面实现施工质量的数字化管控提供了可靠支撑。

三、工程应用验证与效果分析

(一) 工程概况与数字化控制体系部署

为验证数字化质量控制体系的实际效能, 本研究选取某城市核心区域两栋超高层住宅项目作为实证对象。该项目总建筑面积达 5.86 万 m^2 , 建筑高度最高为 99.8m, 地处软土地基区域, 地质条件复杂且地下水位较高, 其质量控制的核心难点集中于地基稳定性保障、超高结构施工精度控制以及混凝土超高程泵送作业。针对这些挑战, 项目构建并部署了一套完整的数字化质量控制体系。该体系整合了测量放线机器人、智能传感器网络等硬件设备, 依托 BIM 协同平台与有限元分析软件构成核心软件层, 通过高速无线网络实现现场数据与云端管理系统的实时交互。体系深度融合传统三级质量管理架构, 将数字化模型与工序管理流程无缝集成, 利用统一的数据标准替代传统纸质文档流转, 实现了从深化设计、施工模拟到现场验收的全过程数字化管控。

(二) 质量控制效果验证与分析

在工程实践验证中, 数字化质量控制方法展现出显著的应用成效, 数据对比突出数字化技术的实际成效, 见图 2。项目通过植入传感器与 BIM 协同平台, 成功预警一次混凝土养护过程中温湿度异常, 及时调整养护方案, 避免强度损失; 基于三维激光扫描技术精准检测出幕墙单元安装偏差达 4mm, 指导现场调整后完全满足设计要求的 3mm 限差。全过程质量数据集成分析表明, 数字化技术的应用使质量检查效率提升约 40%, 问题早期发现率提高

35%, 返工率降低 22%, 质量验收一次通过率达到 98.5%, 主体结构垂直度偏差控制在 $H/3000$ 以内, 混凝土强度达标率达 98.6%。量化结果验证了数字化方法在提升质量控制精确性、运行效率与经济效益方面的综合价值。

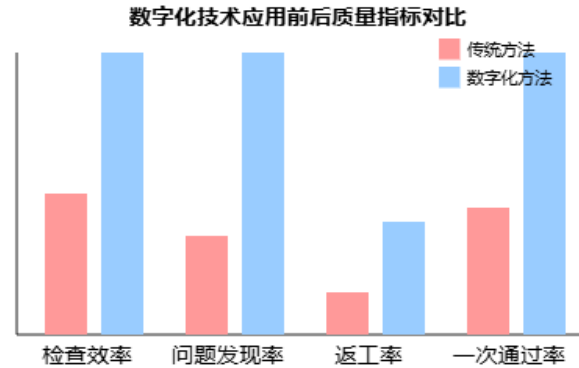


图 2 数字化技术应用前后关键质量指标对比 (单位: %)

四、结语

本文系统阐述了数字化技术在建筑施工质量控制中的核心应用价值, 通过构建集信息感知、数字映射与智能诊断于一体的技术体系, 实现了质量控制从传统依赖经验向数据驱动的范式转变。该体系创新性地融合 BIM、物联网与机器学习等方法, 在工程实践中显著提升了质量隐患识别的准确性与管控效率, 验证了其在超高层建筑与复杂地质条件下的适用性。然而, 当前推广仍面临初始投入较高、跨领域人才短缺及数据安全等挑战。未来研究可进一步探索 5G 与区块链技术在实时数据传输与可信追溯中的融合应用, 并深化人工智能在质量预测性控制方面的模型优化与决策机制创新, 以推动建筑施工质量控制向更高水平的智能化与系统化方向发展。

参考文献

- [1] 冯宗堉. 高层住宅建筑施工中的关键技术与质量控制研究 [J]. 住宅与房地产, 2025(5): 117-119.
- [2] 宋广周. BIM 技术在现代建筑施工质量管理中的应用探究 [J]. 住宅与房地产, 2025(11): 56-58.
- [3] 张晋. 数字化技术在建筑工程施工质量控制中的应用 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (02): 81-83.
- [4] 樊燕杰. 智能技术在建筑施工质量控制中的应用策略 [J]. 现代装饰, 2025, 613(14): 55-57.
- [5] 李文雁, 侯延辉. 无损检测技术在建筑工程施工质量控制中的应用 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025(13): 190-192.