

基于BIM与数字孪生的市政工程精细化管控

石华军¹, 高孝舵¹, 孙奇²

(1. 济南先投城市发展投资集团有限公司, 山东 济南 251401; 2. 山东易方达建设管理集团有限公司, 山东 济南 251401)

摘要: 针对市政工程施工管理中各阶段信息割裂、数据孤岛现象严重、全生命周期成本控制困难等行业共性难题,通过构建融合建筑信息模型(BIM)与数字孪生技术的精细化管控体系,创新性地建立“5×4”全周期精细化管控矩阵模型,集成物联网、AI识别等智能技术,在济南工业北路快速路、裴家营轨道交通枢纽站等重大工程中建立“事前预控—事中调控—事后反馈”的闭环管理机制。实证研究表明:该体系使工程质量一次验收合格率提升至98.5%以上,投资成本降低15.7%,运维成本年均下降5.2%,安全生产事故率同比下降60%。研究成果构建了可复制的市政工程精细化管控范式,通过数字化手段,实现工程品质与综合效益的显著提升,为行业数字化转型提供了新的技术路径和管理方法论。

关键词: 市政工程;全生命周期管理;BIM;数字孪生;智能建造;“5×4”全周期精细化管控矩阵模型;闭环管理
中图分类号: TU99 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)06-0377-05

Refined Management and Control of Municipal Engineering Based on BIM and Digital Twin

SHI Huajun¹, GAO Xiaoduo¹, SUN Qi²

(1. Jinan Xiantou Urban Development and Investment Group Co., Ltd., Jinan 251401, China; 2. Shandong Yifangda Management Group, Co., Ltd., Jinan 251401, China)

Abstract: Aiming to address the common industry challenges in municipal engineering management, such as information fragmentation at various stages, severe data silos, and difficulties in controlling costs throughout the entire life cycle, by establishing a refined management and control system integrating building information modeling (BIM) and the digital twin technology, a “5×4” full-cycle refined control matrix model is innovatively established, and the intelligent technologies such as the Internet of Things (IoT) and AI recognition are integrated. A closed-loop management mechanism of “pre-control, in-process adjustment and post-feedback” is implemented in major projects such as the Jinan Gongye Road (N) Expressway and the Peijiaying Rail Transit Hub Station. The empirical research demonstrates that the system makes the first-inspection qualification rate for engineering quality enhanced over 98.5%, the investment costs reduced by 15.7%, the annual operation and maintenance costs decreased by 5.2%, and the safety incident rate lowered by 60% year-on-year. The research outcomes establish a replicable paradigm for refined management and control of municipal engineering, which achieves the significant improvements in engineering quality and comprehensive benefits, and provides a new technical path and management methodology for the digital transformation of the industry.

Keywords: municipal engineering; full life-cycle management; BIM; digital twin; intelligent construction; 5×4 full-cycle refined control matrix model; closed-loop management

0 引言

市政公用设施是城市高质量发展的物理基石,其建设品质直接关乎公共安全与民生福祉。随着新型城镇化战略的深入推进,市政工程呈现系统复杂性高、专业协同难、全生命周期数据贯通需求迫切等

新特征。然而,传统“分段管理、经验主导”的粗放模式,使得前期决策与后期运营脱节、施工隐患向运维阶段转移、投资屡屡超预算等问题日益突出^[1]。在此背景下,构建覆盖工程全过程的精细化、数字化管控体系,成为推动行业现代化建设的必然选择^[2]。

当前,BIM、物联网等技术在建筑领域已有初步应用,但在市政工程全周期管理中的深度整合仍显不足。特别是与数字孪生、城市信息模型(CIM)及智能建造技术的深度融合方面,仍缺乏系统性的方

收稿日期: 2025-11-13

作者简介: 石华军(1982—),男,硕士,高级工程师,从事市政工程施工管理工作。

法论与经过大规模工程验证的实践范式^[3-4]。本文聚焦解决BIM与数字孪生技术在市政工程应用中存在的“重模型轻数据、重单点轻全局”的实际问题,通过体系化整合和标准化管理,实现技术价值在工程全周期的有效释放。本文基于济南工业北路快速路、裴家营轨道交通枢纽站等重大工程实践,系统阐述以BIM技术与数字孪生技术为核心的市政工程全周期精细化管控体系,旨在为行业提供兼具理论创新深度与实践价值的解决方案。

1 全周期精细化管控体系构建

1.1 理论内涵与框架设计

全周期精细化管控理念源于系统工程论与全生命周期管理理论,其核心在于将复杂的工程视为动态演进的有机整体,通过跨阶段、多专业的协同,实现工程目标、资源配置与过程控制的系统性最优^[5]。该理论实现了从“单一成本控制”到“全维价值创造”、从“静态物理资产管理”到“动态数字资产运营”的范式转变^[6],为市政工程管理模式的创新奠定了理论基础。

基于上述理论,本文构建了创新性的“5×4”全周期精细化管控矩阵模型(见表1)。该模型以项目全生命周期的5个核心阶段为纵向时序主线,以4大关键控制要素为横向逻辑维度,形成立体化管控架构。该框架的创新性在于突破了传统管理的阶段壁垒,实现了技术、经济、管理、环境4大要素的有机融合与协同优化。

表1 “5×4”全周期精细化管控矩阵模型				
阶段/要素	技术	经济	管理	环境
决策阶段	技术可行性分析	投资估算	组织模式确定	环评
设计阶段	BIM协同与优化	限额设计	标准化 管理	绿色设计
施工阶段	智能建造	动态成本控制	智慧工地 管理	绿色施工
结算阶段	模型与工程量 校验	结算审核	资料数字 化归档	—
运维阶段	数字孪生与 预测性维护	LCC分析	应急指挥	低碳运维

1.2 创新特性

本体系在济南重大工程中的成功应用,验证了其在实际工程环境中的可行性和有效性,为类似项目提供了可复制的实施路径。其创新性主要体现在3个方面。

1.2.1 方法论层面

“5×4”全周期精细化管控矩阵模型,打破了传统

分段管理的壁垒,实现了各阶段管理活动的系统化整合与无缝衔接,为市政工程全周期管理提供了全新的方法论指导。

1.2.2 技术实现层面

该模型建立了以BIM为数据载体、以数字孪生为核心的数据流转机制,通过双中台架构,实现了物理实体与数字空间的全程映射与双向互动,为精细化管控提供了精准的数据支撑和决策依据。

1.2.3 体系架构层面

该模型采用微服务架构和开放API接口,确保了与CIM平台的良好兼容性和未来扩展性,为智慧城市背景下市政设施的数字化管理提供了可持续发展的技术路径。

2 关键技术体系与集成应用

2.1 BIM技术:全周期数据骨架

BIM技术已从三维可视化工具演进为贯穿市政工程全周期的“数据骨架”,实现了从设计到运维的全过程数据贯通^[7-8]。在设计阶段,BIM技术通过协同设计平台,实现多专业模型整合。在该体系中,BIM技术应用实现了从“几何模型”向“合规检查、工程量自动算量、施工方案模拟”等多维功能的转变。以裴家营轨道交通枢纽站项目为例,通过BIM技术应用,项目团队识别并解决了37处关键专业冲突,节约成本约480万元^[9]。在施工阶段,BIM与时间(4D)、成本(5D)信息深度融合,实现施工过程“先试后建”和动态优化。在运维阶段,BIM模型与物联网数据融合,形成“数字孪生体”,为预测性维护提供支持。传统模式与采用BIM技术的应用对比分析(见表2)。

表2 BIM技术应用对比表			
应用阶段	传统方式	BIM技术应用	成效
设计阶段	二维图纸	多维信息模型	设计错误减少40%以上
施工阶段	手工进度计划	4D/5D模拟	施工效率提升20%~30%
运维阶段	静态档案	数字孪生体	运维成本降低15%~20%

2.2 智能建造:重塑施工范式

智能建造是推动工程施工从劳动密集型向技术密集型转变的核心引擎。在济南工业北路快速路路面施工项目中,由智能摊铺机与压路机构成的机群协同系统,实现了摊铺厚度与压实度的毫米级精准控制,平整度合格率高达98%。在裴家营轨道交通枢纽站深基坑作业中,项目团队布设高密度传感器网络,构建“监测—预警—处置—反馈”的动态管控

闭环,实现了对重大风险源的实时监控与智能预警^[10]。AI视觉识别技术的应用,实现了从“人防”到“技防”的智能化转型,有效提升了安全管理水平^[11]。

2.3 数字孪生驱动的智慧运维

基于数字孪生技术,本文构建了“感知层、网络层、平台层、应用层”4层架构的运维平台^[12]。通过对设备运行数据的深度学习和智能分析,本文建立了设备健康预测模型,实现了从“故障修”到“预防修”的转变。以济南工业北路快速路综合管廊的通风系统为例,预测性维护策略使得设备非计划停机时间减少70%。全生命周期成本(LCC)管控在决策和设计阶段的应用,使得项目全周期成本得到有效控制,年均运维成本降低6%^[13]。

3 实践案例与成效剖析

3.1 济南工业北路快速路工程:全周期协同典范

作为山东省高质量发展的标杆项目,济南工业北路快速路工程集成了城市快速路、高架桥、综合管廊等设施,涉及数十家参建单位。该项目集快速路、高架桥、综合管廊于一体,通过实施全周期精细化管控,在3个方面取得重大突破。

3.1.1 技术协同方面

依托统一的BIM平台,项目深度融合沥青摊铺、预制装配、智慧交通、管网布设、海绵城市等多专业设计与施工信息。特别是在管廊设计中,通过预留标准化接口与廊道空间,项目实现了技术方案的有机整合,为后续运营维护提供了便利。

3.1.2 空间协同方面

基于全周期BIM模型,项目团队统筹规划地上、地面、地下空间。通过精细化设计,空间利用率提升40%,工期缩短22%。通过创新地改造利用桥下“灰色空间”,同时增设休闲绿地和公交站台,城市空间利用效率得到显著提升。

3.1.3 效益协同方面

通过全生命周期成本(LCC)分析和绿色建造技术应用,项目全周期成本降低15.7%,碳减排量达到2.1万t,实现了经济效益与环境效益的双赢^[14]。

济南工业北路快速路项目智能建造中心运用BIM技术,对预制箱梁加工进行全过程监测(见图1)。

3.2 裴家营轨道交通枢纽站智能建造实践:地铁的精细化样本

裴家营轨道交通枢纽站项目面临深度近20 m的

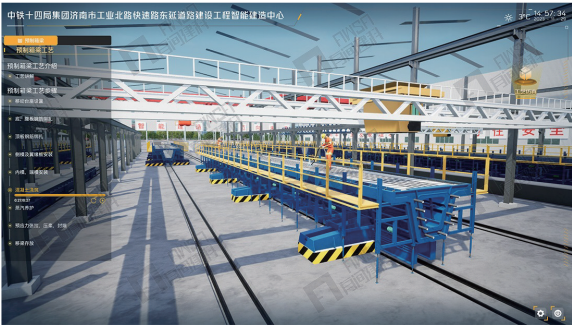


图1 济南工业北路快速路项目智能建造中心系统监测
预制箱梁加工过程图

基坑施工与复杂的地质挑战,通过深度应用“BIM+物联网”技术体系,实现精细化管控的重大突破。

3.2.1 风险预控方面

通过应用“BIM+物联网”技术,项目团队对深基坑进行全天候自动化监测,建立了完整的风险预警和应急处置机制,确保施工全过程安全、可控。

3.2.2 工艺优化方面

针对巨型钢筋笼吊装,项目团队利用BIM技术进行全过程模拟和方案优化,实现一次性吊装成功,吊装效率提高35%,风险显著降低。

3.2.3 智慧管理方面

项目引入AI视频识别系统,进行24 h智能巡检,实现了安全质量管理的智能化和自动化,质量缺陷率降至2%以下,整体施工效率提升约50%。

济南裴家营轨道交通枢纽站效果图如图2所示。

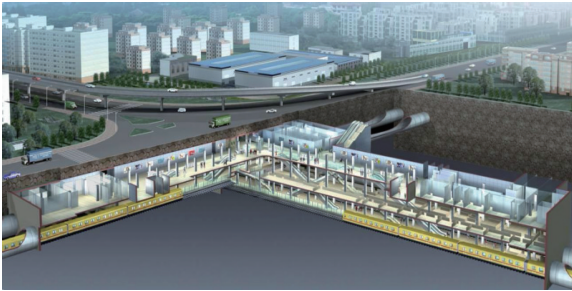


图2 裴家营轨道交通枢纽站效果图

3.3 实践启示与经验总结

通过案例分析,本文总结出以下重要经验。

3.3.1 数据标准统一是基础

在项目初期,必须建立统一的数据交付标准,否则会导致后期数据整合成本显著增加。建议在项目启动阶段即制定《BIM与数字孪生数据交付规程》,明确数据格式、分类体系与接口规范,确保信息在决策、设计、施工与运维阶段无损传递。同时,应建立统一的数据字典与编码规则,为后续的数据分析与知识挖掘奠定基础。

3.3.2 技术管理协同是关键

先进的技术需要配套的管理流程变更,否则技术效能将大幅下降。在实施中,应同步推进组织架构优化与岗位职责重构,建立与数字化管控相适应的考核激励机制,确保技术与管理的同步演进。例如,建立基于BIM模型和实时数据的扁平化协同决策机制,将预警信息直接推送给现场指挥与相关责任人,并规定响应时限。

3.3.3 人才结构优化是保障

缺乏工程业务与数字技术复合型人才是该体系落地的主要瓶颈。建议企业通过“内培外引”相结合的方式,构建覆盖BIM建模师、数据分析师、系统运维工程师等的复合型团队,并设立专项培训基金,开展常态化、场景化的技能培训,提升全员数字化素养与应用能力。可与高校、科研机构合作,开展“订单式”人才培养,同时,鼓励现有员工跨界学习,并获取相关资质认证。

这些经验为后续项目的成功实施提供了更为全面和宝贵的参考,有助于行业在数字化转型中少走弯路。

4 成果成效与行业价值

4.1 量化成效分析

该体系被应用于多项重大市政工程,并取得了显著的成效,具体表现在以下4个方面。

4.1.1 工程品质方面

通过前置化的设计优化、过程化的智能监控与标准化的工艺管理,工程质量一次验收合格率从行业的平均约93%,提升并稳定在98.5%的高位水平。具体而言,在设计阶段,通过BIM技术进行碰撞检查与管线综合优化,平均每个项目可发现并解决35处以上设计冲突;在施工阶段,借助4D/5D与BIM技术进行施工模拟与方案优化,有效避免了约80%的返工情况;在竣工验收阶段,基于统一数据标准的数字化交付,使得验收效率提升约40%。工程质量的提升,不仅减少了后期维修加固的费用,还带来了显著的社会效益和用户满意度提升。

4.1.2 投资控制方面

凭借限额设计、过程结算、LCC管控和智能化成本监测,项目成本超支率从普遍的8%左右显著降低至2.3%。通过建立基于BIM技术的5D成本数据库,项目实现了工程量自动统计与造价实时核算,预算编制时间缩短50%以上;同时,通过数字孪生平台对

运维成本的精准预测,项目在全生命周期内的成本可控性得到显著提升。投资控制能力的增强,提升了公共资金的使用效益,为更多民生工程的启动创造了条件。

4.1.3 安全管理方面

依托物联网监测、AI识别和闭环管理等主动防控手段,施工现场安全事故发生率同比下降60%。通过在施工现场部设智能传感器与视频监控系统,项目构建了“监测—预警—处置—反馈”的全流程安全管理闭环。以裴家营轨道交通枢纽站项目为例,其AI视频识别系统自动识别并预警安全隐患达1200余次,有效避免了多起可能的安全事故。安全状态的改善,不仅保障了作业人员的生命安全,还减少了因事故导致的工期延误和经济损失。

4.1.4 运维效益方面

基于预测性维护策略和智慧运维平台的精准决策,设施年均运维成本呈现5.2%的稳定降幅。依托数字孪生技术建立的设备健康预测模型,使设备维护从“定期检修”转变为“按需维护”,设备使用寿命平均延长15%,故障响应时间缩短60%以上。运维阶段的精细化管控,延长了设施的使用寿命,保障了市政服务的可靠性与连续性,增强了城市韧性。

4.2 技术投入与成效效益分析

该体系的实施需要系统的资源投入,主要包括以下3个方面:其一,软硬件和平台开发投入,约占项目总投资的1.5%~2.0%;其二,人员培训与流程优化成本;其三,数据标准化与维护费用。从全生命周期角度看,这些投入在项目运营3—5年通过效益回收,投资回报率显著。以济南工业北路快速路项目为例,其智能化投入在运营第四年即通过节约的运维成本和避免的返工费用完全收回。

进一步分析表明,该体系的投入效益比随项目规模的扩大而显著提升。在大型枢纽类项目中,由于系统复杂度高、参与方众多,体系所实现的协调效益与风险控制价值更为突出。此外,随着技术模块的标准化与平台复用率的提高,后续项目的边际投入呈递减趋势,体现出良好的规模经济性。对于政府投资主体而言,虽然前期投入有所增加,但由全生命周期成本节约、公共安全水平提升及城市运营效率提高带来的综合效益远高于初始投入。因此,从长远和发展角度看,推动该体系的广泛应用,具有显著的经济合理性和战略必要性。

4.3 行业推广价值

该文的核心价值在于,将传统碎片化的管理模式转变为系统化的全周期管控,通过数字化手段,实现工程各阶段的有机衔接和数据贯通。它为解决长期困扰市政工程的“信息孤岛”和“管理断点”问题提供了切实可行的方案。相较于传统管理模式,该体系在3个方面展现出显著优势:其一,它通过建立统一的数据标准和协同平台,打破了各参与方之间的信息壁垒,实现了项目全过程的数据共享与业务协同;其二,它通过智能传感、BIM和数字孪生等技术的综合应用,构建了从物理世界到数字空间的完整映射,为精细化管理提供了强大的技术支撑;其三,它通过建立科学的评价体系和反馈机制,形成了持续优化的管理闭环,推动项目管理水平不断提升。该体系不仅适用于新建项目,还可经过适应性改造,用于对既有市政设施的数字化改造与运维提升,应用前景广阔^[15]。

5 结 语

本研究通过理论创新与实践验证相结合,构建了一套完整的市政工程全周期精细化管控体系。该体系以“5×4”全周期精细化管控矩阵模型为方法论核心,以BIM技术与数字孪生技术为双轮驱动,融合智能建造与智慧运维,形成了贯穿项目始终的数字化管控模式。本研究提出以BIM技术与数字孪生技术为核心的市政工程全周期精细化管控体系,通过系统化的理论创新和技术集成,实证了其在提升工程品质、控制全周期成本、保障运营安全等方面的显著价值。这一创新实践,不仅实现了工程技术与管理模式的深度融合,还为构建绿色、智能、高效的市政基础设施体系提供了技术支撑和管理保障。它是推动市政工程建设管理从传统经验型向现代数字化、智能化转型的一次有益探索与成功实践。

然而,该体系在实施过程中仍面临3大挑战。一是组织协同壁垒。传统模式导致各部门之间权责割裂,跨部门、跨阶段协同阻力巨大。这需从高层推动组织变革与流程再造,建立有利于数字化协同的组织环境与文化。二是数据贯通难题。各参建单位采用的数据标准不统一,阻碍了全周期信息的无损传递与价值挖掘。因此,亟须在行业层面加快建

立统一的数据标准与交换协议。三是人才与投入瓶颈。既懂工程又懂数字技术的复合型人才匮乏,需要政府、企业、高校形成合力,共同构建数字化人才的培养与吸引机制。

展望未来,随着数字孪生、人工智能等技术的发展,市政工程管控将呈现4大趋势:一是决策智能化,AI将深度参与方案生成与风险评估;二是感知泛在化,智能传感器将实现设施全域互联;三是平台生态化,基于CIM的开放平台,将打通全链条业务协同;四是运维低碳化,智慧能源管理将推动市政设施向近零碳运维转型。未来的市政工程不仅是物理实体,还是高度智能化和自适应的城市生命体的有机组合部分。下一步,研究将围绕CIM平台深度融合、AI大模型在工程风险预测中的应用等方向持续攻关,通过技术创新与管理模式的协同迭代,为我国市政工程行业的高质量发展注入持久动力。

参考文献:

- [1] 刘建国,张红宇.基于全生命周期的市政工程项目精细化管理模式研究[J].土木工程与管理学报,2022,39(4):1-8.
- [2] GB/T 51459—2023 建设项目全生命周期成本管理规范[S].
- [3] 王磊,李静.数字孪生技术在智慧市政设施运维中的应用路径与挑战[J].城市规划,2023,47(3):45-52.
- [4] 吴刚,王宏,李涛.智能建造理论与技术体系框架研究[J].土木工程学报,2022,55(10):1-18.
- [5] 建标[2023]15号 智能建造技术导则(试行)[S].
- [6] 张强,刘颖.面向高质量发展的城市基础设施韧性评价体系构建与研究展望[J].城市发展研究,2024,31(1):87-94.
- [7] GB/T 51235—2017 建筑信息模型施工应用标准[S].
- [8] 张建平,李丁,林佳瑞.BIM在工程施工中的应用现状与发展趋势[J].土木工程与管理学报,2018,35(2):1-7.
- [9] 马智亮,魏振华.基于BIM的市政工程施工进度—成本协同管理研究[J].施工技术,2021,50(6):1-6.
- [10] 陈湘生,徐东升,陈曦.地铁站深基坑工程智能监测与预警系统研究[J].岩石力学与工程学报,2021,38(增刊2):3567-3576.
- [11] 张建荣,王强,刘晓东.基于深度学习的施工现场不安全行为识别方法[J].中国安全科学学报,2020,30(4):145-151.
- [12] 李清泉,李必军,陈静.数字孪生城市:概念、技术与应用[J].测绘学报,2020,49(12):1527-1537.
- [13] 刘占省,刘子圣,孙佳琦.数字孪生驱动的智慧工地管理体系架构与关键技术[J].土木工程学报,2021,54(8):88-98.
- [14] 袁烽,胡雨晨,林波荣.智能建造与建筑工业化协同发展技术路径研究[J].建筑学报,2022(3):22-29.
- [15] 杜明芳,王涛.面向城市信息模型(CIM)的市政设施数字孪生方法研究[J].城市发展研究,2022,29(5):76-83.