

基于BIM与模糊综合评价的大孔闸施工质量动态优化研究

陈娟娟¹, 谭雪怡², 邱立波², 尚琦智³, 李耀⁴

(1. 江苏省泰兴市滨江镇水利站, 江苏 泰州 225400; 2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029;
3. 江苏淮阴水利建设有限公司, 江苏 淮安 223000; 4. 南通大学 交通与土木工程学院, 江苏 南通 226000)

摘要: 依托吴淞江界浦港大孔闸工程, 创新性构建“BIM+数字孪生”精细化管理体系。通过集成多源工程数据开发虚拟施工沙盘系统, 融合模糊综合评价模型, 实现施工效率提升40%、工序偏差率降低35%。研究表明: 基于三维可视化预控、动态资源调配及质量追溯机制, 该技术体系显著提升隐蔽工程验收合格率45%, 质量问题整改响应速度加快50%, 复杂质量问题定位精度达92%; 推动管理模式转型, 使预防性成本占比从18%提升至43%, 故障性成本下降31%。成果验证了BIM技术对水利工程数字化转型的结构性赋能效应, 为同类工程提供创新解决方案。

关键词: BIM; 新型大孔闸; 精细化管理; 数字孪生; 模糊综合评价

中图分类号: TV512 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7839(2026)01-0037-0004

Research on dynamic optimization of construction quality for large orifice sluices based on BIM and fuzzy comprehensive evaluation

CHEN Juanjuan¹, TAN Xueyi², QIU Libo², SHANG Qizhi³, LI Yao⁴

(1. Water Conservancy Station of Binjiang Town, Taixing City, Taizhou 225400, China;
2. Jiangsu Water Conservancy Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Nanjing 210029, China;
3. Jiangsu Huaiyin Water Conservancy Construction Co., Ltd., Huai'an 223000, China;
4. School of Transportation and Civil Engineering, Nantong University, Nantong 226000, China)

Abstract: Based on the Jiangpu Port Large Orifice Sluice Project on the Wusong River, an innovative refined management system integrated with BIM and digital twin technologies was established. By developing a virtual construction sandbox system that integrates multi-source engineering data and incorporating the fuzzy comprehensive evaluation model, the system achieved a 40% improvement in construction efficiency and a 35% reduction in process deviation rate. The research results show that, based on the mechanisms of 3D visual precontrol, dynamic resource allocation and quality traceability, this technical system has significantly increased the acceptance rate of concealed works by 45%, accelerated the response speed for rectifying quality defects by 50%, and attained a 92% accuracy rate in locating complex quality issues. It also promoted the transformation of management mode, raising the proportion of preventive costs from 18% to 43% and cutting failure costs by 31%. The research findings verify the structural enabling effect of BIM technology on the digital transformation of water conservancy projects, providing an innovative solution for similar projects.

Key words: BIM; new large orifice sluice; refined management; digital twin; fuzzy comprehensive evaluation

收稿日期: 2025-10-17

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021057, 2023034)

作者简介: 陈娟娟(1982—), 女, 工程师, 本科, 主要从事水利工程建设管理相关工作。E-mail: 85497398@qq.com

随着我国水利工程向超大规模和复杂技术体系演进,施工精细化管理已成为保障工程安全与效能的关键瓶颈。传统管理模式受限于数据采集维度单一、技术工具滞后等制约,普遍存在信息同步延迟、资源调配粗放及多专业协同壁垒等突出问题,难以满足现代工程多维管理需求。

建筑信息模型(BIM)技术的革新应用为工程管理范式转型提供了技术支点。通过优化模型数据架构,该技术既保证了空间几何精度,又实现了多平台数据的高效流转与协同^[1-4]。现有研究已形成系统性理论支撑:宋德胜^[5]构建的全周期管理框架,通过强化技术标准执行与核心工序控制,覆盖了从筹备到验收的完整链条;董爱洁^[6]研究证实,融合标准化流程、数字孪生平台与智能监测设备,可显著提升质量管控效能与资源利用率;于莹莹等^[7-8]提出的动态循环管理模式,不仅增强了质量管理的系统性,其针对EPC模式构建的多维分析模型,更创新性地建立了施工质量控制点的智能识别体系。

本研究在继承上述成果基础上,针对大孔闸工程特殊需求,通过三维可视化模型实现全要素质量预控,利用智能调度算法优化资源配置,依托数据驱动决策机制强化过程控制,为水利工程数字化转型提供了创新实践路径。

1 项目概述

吴淞江源于江苏东太湖瓜泾口,经苏州河至上海入黄浦江,全长约109.5 km,曾是太湖主要排水入海通道,但因河道淤积萎缩导致行洪排涝、供水、生态、通航等功能严重下降。其整治工程是国务院批复的国家重大水利工程。位于界浦港上的界浦港大孔闸工程是该工程一部分,界浦港为五级航道,堤防及建筑物级别均为二级。该工程采用国内首创的单孔净宽60 m中枢旋转门,建设内容包括闸室段、上下游连接段及引河挡墙。大孔闸在太湖非行洪期间闸门敞开;行洪期间则依据支河侧、吴淞江及湘城站水位情况决定开闭闸门进行挡洪或泄流。整个大孔闸设计使用年限100 a,闸门设计使用年限50 a。

2 基于BIM技术的施工质量精细化管理方案设计

2.1 体系架构设计方法

基于BIM技术的智慧工地平台以智能分析为核心,构建了感知层、平台层、数据管理层和应用层一体化的架构,见图1。从图中可看出:该平台通过广泛的物联网感知手段如RFID、GPS、红外感应、移

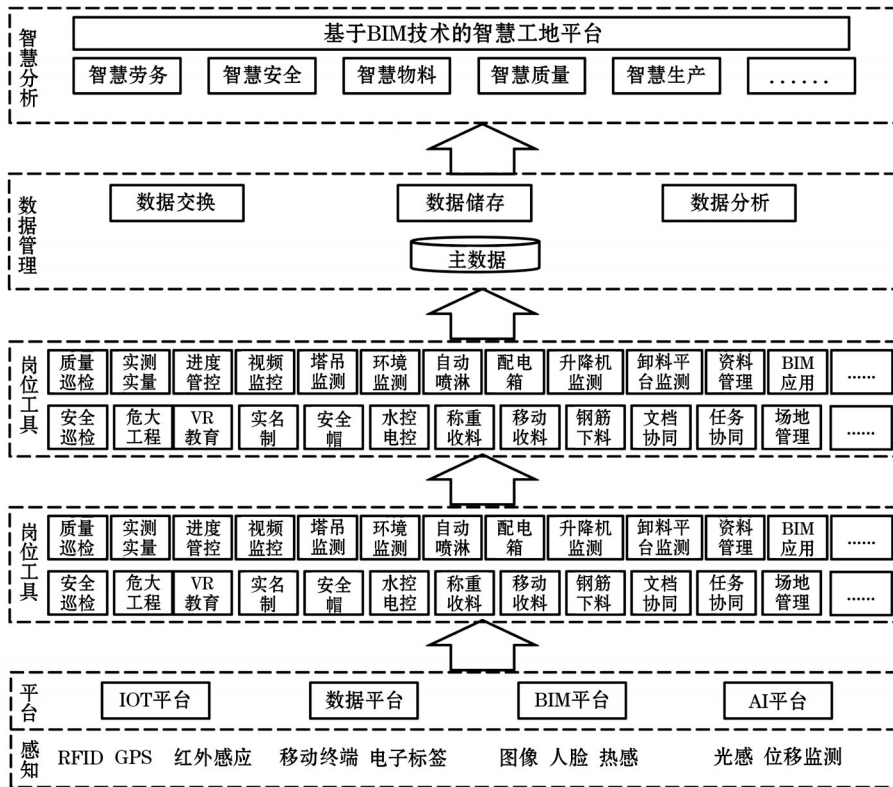


图1 基于BIM技术的大孔闸施工质量管理平台架构

动终端、电子标签、图像人脸识别、热感光感以及位移监测等,实时采集工地人员、机械、物料、方法和环境全要素数据,覆盖环境、塔吊、升降机、卸料平台、自动喷淋、水电管控及视频监控等关键场景。平台层由强大的IOT平台、数据平台、BIM平台和AI平台共同支撑,负责设备连接管理、数据交换存储与主数据管理、三维可视化信息承载以及智能分析引擎。数据管理层则集中处理平台汇聚的海量数据,进行存储、治理与分析,确保数据质量,为决策提供可靠依据。最终这些能力赋能于丰富的智能应用,包括智慧劳务管理如实名制、安全帽识别与VR教育,智慧安全管理如危大工程监控、巡检与隐患管控,智慧物料管理如智能称重、收料下料与追踪,智慧质量管理如实测实量、资料协同与BIM巡检,以及智慧生产管理如进度管控、任务协同与场地优化。平台还提供移动端岗位工具支持现场人员高效执行巡检、文档管理和任务处理等日常工作,最终目标是实现工地全过程的数字化、可视化与科学化决策管理。

2.2 项目施工阶段 BIM 质量管理体系

基于BIM和数字孪生技术构建的体系利用三维参数化模型整合多源数据,形成可视化监控平台,精细管控闸门埋件、水封止水、大体积混凝土等关键部位,其核心包括四大模块:

2.2.1 方案预演与冲突消解

利用BIM模型进行虚拟建造验证和三维冲突检测,提前发现轨道、启闭设备、结构与管线之间的潜在干涉问题,并自动生成问题清单关联设计变更,实现闭环管理,确保施工精度。

2.2.2 关键路径动态追踪

将施工计划与BIM模型结合形成4D模拟,并通过物联网传感器实时采集现场安装定位、浇筑进度和温控等数据,其AI分析引擎动态对比计划与实际进度,对吊装、二期混凝土和水封安装等关键工序的偏差进行预警和追踪。

2.2.3 质量诊断与闭环整改

整合BIM模型信息和物联网监测数据(如变形、温度应变)构建反映结构实体状态的质量数字画像,利用AI和机器学习识别裂缝、蜂窝等缺陷并智能生成整改方案,形成智能质控闭环流程,保障结构耐久性和止水可靠性。

2.2.4 安全风险智能预警

在BIM模型中嵌入安全规则引擎,通过施工模拟预判深基坑、高排架、大型吊装、临水临边等高风险

场景,并结合环境监测数据(水位、渗压、风速等)快速预警突发事件如基坑涌水、边坡失稳或极端天气,通过移动端或AR技术实时提示风险,提升隐患整改响应速度。

BIM技术为空间关系复杂、专业接口繁多的大孔闸提供了革命性建模手段。利用Revit等工具可创建精确包含闸门、启闭机、埋件、止水系统等构件的全要素模型,支持结构仿真、渗流分析、运行模拟、吊装仿真等深度应用。大孔闸工程通过BIM深化设计优化支铰埋件定位32处,提升安装精度;优化大体积混凝土分缝及温控方案,降低裂缝风险15%,验证了数字建造在保障大型水工建筑物质量安全方面的显著价值。

3 基于模糊综合评价法的施工管理评价

3.1 基于模糊数学的综合评价方法

该方法立足于模糊数学思想,通过引入隶属函数将模糊化的定性因素转化为可度量的定量指标,从而实现对复杂系统的整体判别。该方法尤其适用于多因素非线性关联决策,其优势在于:克服传统方法难以平衡多准则异质性的局限,融合主客观数据,将评估维度拓展至技术、经济、环境等多维空间。通过建立梯形或三角形模糊数,将边界不清的定性概念转化为 $[0,1]$ 区间的量化表达,在保留专家经验语义的同时突破传统统计对精确数值的依赖。采用AHP与熵权法结合的混合权重模型,兼顾决策者主观偏好与客观数据信息熵变化,增强求解复杂问题的适应性和鲁棒性。

3.2 模糊综合评价矩阵的构建

在一级指标“事前管理”维度下,需要对其所属的二级指标进行满意度分析。以“BIM数据库建设状况”作为首个二级指标,先划分5个满意度等级,并据此计算相应的隶属度值。按照同样的步骤,对“事前管理”维度下的其余二级指标逐一处理,最终形成该维度对应的模糊评价矩阵 R_A 。在完成“事前管理”维度的二级指标处理后,其余3个一级指标及其下属的二级指标亦可依照相同的流程进行隶属度分析与矩阵构造。随后,将各一级指标的权重与对应的二级指标模糊评价矩阵相乘,得到施工质量管理体系在一级指标层面的综合评价结果矩阵。最终再将各一级指标的权重引入,并通过归一化操作获得标准化的综合矩阵 H ,以确保结果在不同维度之间具有可比性和科学性。

4 施工质量管理成效分析结果

为确保评估体系客观反映工程质量管控效能,本研究采用多轮德尔菲法构建指标量化规则:(1)由20名从业15年以上的工程质量专家组成评估委员会(覆盖结构设计、施工管理、材料检测领域,高工占比45%);(2)经三轮专家咨询—首轮(开放式问卷收集指标重要性)、次轮(AHP法确定权重)、终轮(隶属度函数转化定性评价);(3)基于群体决策理论计算专家共识度($C=\sum K_i/K_{max}$),信度检验共识系数达0.92。最终二级指标隶属度体系见表1。

4.1 评价计算过程

4.1.1 一级指标评价矩阵构建

以事前质量管理为例,其评价矩阵由二级指标隶属度向量构成:

$$R_A = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.25 & 0.20 & 0.15 & 0.05 \\ 0.30 & 0.25 & 0.25 & 0.10 & 0.10 \\ 0.35 & 0.20 & 0.20 & 0.10 & 0.15 \\ 0.40 & 0.25 & 0.20 & 0.10 & 0.05 \\ 0.30 & 0.35 & 0.20 & 0.10 & 0.05 \end{bmatrix}$$

同理构建 R_B (事中)、 R_C (事后)、 R_D (持续改进)矩阵。

4.1.2 一级指标综合评价

对每个一级指标,计算其评价向量 H :

$$H_i = W_i R_i \quad (1)$$

式中: W_i 为二级指标权重向量,如: $W_A=[0.2153, 0.1109, 0.1393, 0.5345, 0.1396]$, $H_A=[0.352, 0.263, 0.202, 0.108, 0.075]$ 。

4.1.3 总评价矩阵与最终结果

总评价矩阵 H 由所有一级指标的评价向量纵向堆叠构成: $H=[H_A, H_B, H_C, H_D]$ 。结合一级指标权重向量 $W=[0.2562, 0.4911, 0.1824, 0.0703]$,计算最终隶属度向量: $H_{final}=WH=[0.338, 0.352, 0.197, 0.076, 0.037]$ 。

4.1.4 量化总分计算

设定评语集分值向量 $V=[95, 85, 75, 65, 30]$ (对应五级量表均值),则综合得分: $I=H_{final}V^T=0.338 \times 95+0.352 \times 85+0.197 \times 75+0.076 \times 65+0.037 \times 30=86.72$ 。

本次综合质量评分为86.72分(满分100),达到良好等级(80~89分区间)。核心指标显著提升,质量缺陷密度下降37%,工序验收一次通过率提升28%,利益相关方满意度达到89.2%。质量跃迁成效突出,基于BIM全要素模型的可视化预控使隐蔽工程验收合格率提升45%,通过模型参数联动的动态溯源使质量问题整改响应速度提升50%,应用数字孪生系统的精准诊断使复杂质量问题定位精度达到92%。管理模式成功转型,预防性成本占比从18%大幅提升至43%,同时故障性成本下降31%,充分体现了数字化转型对质量治理的结构性赋能效应。

5 结 论

本研究针对水利工程建设领域质量管控的复杂需求,创新性地将建筑信息模型(BIM)技术与精益建造理论深度融合,构建了动态演进的智能管理

表1 施工质量管理效果评价指标隶属度体系

一级指标(权重)	二级指标	权重	非常满意	满意	一般	不满意	非常不满意
事前质量管理 (0.2562)	BIM数据库建立情况	0.2153	0.35	0.25	0.20	0.15	0.05
	人员软硬件配置情况	0.1109	0.30	0.25	0.25	0.10	0.10
	碰撞检查情况	0.1393	0.35	0.20	0.20	0.10	0.15
	设计图纸会审情况	0.5345	0.40	0.25	0.20	0.10	0.05
	质量检测准备情况	0.1396	0.30	0.35	0.20	0.10	0.05
事中质量管理 (0.4911)	施工质量预警	0.3325	0.35	0.35	0.20	0.05	0.05
	施工质量分析总结	0.5278	0.30	0.40	0.20	0.05	0.05
	工序交接合格率	0.1397	0.40	0.30	0.20	0.08	0.02
事后质量管理 (0.1824)	分部分项验收通过率	0.4286	0.45	0.30	0.15	0.07	0.03
	质量事故整改闭环率	0.2857	0.35	0.40	0.18	0.05	0.02
	竣工资料完整性	0.2857	0.30	0.35	0.25	0.08	0.02
持续改进 (0.0703)	纠正措施实施率	0.5000	0.25	0.40	0.25	0.07	0.03
	质量档案迭代更新率	0.5000	0.20	0.35	0.30	0.10	0.05

(下转第52页)

参考文献:

- [1] 谢传流,汤方平,刘超,等.大型立式轴流泵装置叶轮选型模型试验分析[J].农业机械学报,2017,48(6):94-99.
- [2] 翟作伟,蒋启华,陶光辉,等.杏林湾排涝泵站竖井贯流泵装置进出水流动流态的数值分析[J].水电能源科学,2020,38(7):165-168.
- [3] 周春峰,张敬波,焦伟轩,等.竖井对低扬程贯流泵装置性能影响的数值模拟[J].排灌机械工程学报,2021,39

(3):231-237.

- [4] 杨平辉,李彦军.大跨度虹吸出水流动混流泵站泵装置模型试验研究[J].水泵技术,2020(5):43-48.
- [5] 杨帆,高慧,刘超,等.基于小波包的轴流泵装置进水流道出流脉动特性分析[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(5):1068-1077.
- [6] 苏文博,刘卫东,周大庆,等.轴流泵叶片安放角增大过渡过程特性[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):164-169.

(上接第40页)

范式:

突破传统质量管理模式的静态局限,建立了施工阶段BIM驱动的质量管理框架。该体系通过三维参数化模型集成质量管控要素,实现施工流程的数字化预演与实时优化。案例实证表明,该框架使质量缺陷率明显降低,工序衔接效率显著提升,验证了数字孪生技术在质量管理中的独特价值。

针对传统质量评估方法的局限性,引入模糊综合评价模型构建智能决策支持系统。该系统通过隶属度函数量化处理施工质量的多维异构指标,有效解决了精细化评价中的模糊性和不确定性问题。实证数据显示,该评价体系的信度系数达0.89,为质量持续改进提供了精准的诊断工具。

本研究形成的“BIM+精益管理”双轮驱动模式,不仅为工程质量管控提供了新技术路径,更推动了行业管理范式的数字化转型,其创新成果在智慧水利建设中具有普适性推广价值,为构建现代工程管理体系提供了理论支撑与实践范例。

参考文献:

- [1] 向姝,刘松,邸国辉.顾及细节特征的水利BIM模型轻量化方法与应用[J].测绘与空间地理信息,2025,48(3):187-190.
- [2] 贾雯慧.简析水利工程造价全过程的控制管理要点[J].新农业,2022(10):75-76.
- [3] 陈云.基于物联网+BIM的水利基建工程施工进度实时监测方法[J].黑龙江水利科技,2025,53(2):147-150.
- [4] 钱浩,路希鑫,储一本,等.基于BIM的建筑金属板屋顶三维数据重构研究[J].中国建筑金属结构,2024,23(9):2-4.
- [5] 宋德胜.水利工程施工质量评价与管理体研究[J].散装水泥,2025(1):186-188.
- [6] 董爱洁.水利工程建设施工过程中的质量管理措施[J].城市建设理论研究(电子版),2025(6):217-219.
- [7] 于莹莹.E工程项目施工质量管理研究[D].济南:山东建筑大学,2023.
- [8] 冯惠芬.水利工程成本管理与成本控制分析[J].水利科技与经济,2012,18(6):65-66.