

融合BIM技术的新型大孔闸工程全生命周期质量安全预警系统工程实践与研究

徐 立

江苏商贸职业学院人工智能学院, 江苏 南通

收稿日期: 2026年6月9日; 录用日期: 2026年7月1日; 发布日期: 2026年7月14日

摘 要

新型大孔闸是平原河网地区水利枢纽的核心构筑物, 承担防洪排涝、引水灌溉等多重民生保障功能。通吕运河水利枢纽大孔闸结构复杂、运行环境特殊, 传统质量安全管理存在数据碎片化、预警滞后、协同不足等短板, 同时存在工程精细化管理缺失、全过程管控体系不完善等管理痛点。本文结合该工程结题实践项目, 融合BIM技术的可视化、协同化优势, 结合现代化工程管理经验, 构建全生命周期质量安全预警系统, 整合系统架构、功能模块与核心技术, 打通工程全流程质量安全管理与数字化管理链路, 实现工程设计、施工、运维三阶段风险的实时识别、精准预警与闭环处置。实践应用表明, 该系统有效提升了工程管控效率与隐患识别能力, 降低了安全隐患发生率, 完善了水利工程全周期管理模式, 验证了可行性与实用性, 为通吕运河水利枢纽及同类大孔闸工程数字化、精细化管理提供了实践参考。

关键词

BIM技术, 通吕运河水利枢纽, 大孔闸, 全生命周期, 质量安全预警, 工程管理, 精细化管理

Practice and Research on the Full Lifecycle Quality and Safety Early Warning System of New Large Sluice Gate Engineering Integrating BIM Technology

Li Xu

School of Artificial Intelligence, Jiangsu Vocational College of Business, Nantong Jiangsu

Received: June 9, 2026; accepted: July 1, 2026; published: July 14, 2026

文章引用: 徐立. 融合 BIM 技术的新型大孔闸工程全生命周期质量安全预警系统工程实践与研究[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(4): 768-776. DOI: 10.12677/mse.2026.154075

Abstract

The new type of large sluice gate is the core structure of water conservancy hub in plain river network areas, which undertakes multiple livelihood guarantee functions such as flood control and drainage, water diversion and irrigation. The structure of the large sluice gate at the Tonglu Canal Water Control Hub is complex and the operating environment is unique. Traditional quality and safety management has shortcomings such as fragmented data, lagging early warning, and insufficient coordination. At the same time, there are management pain points such as the lack of engineering precision management and an incomplete overall control system. This article combines the visual and collaborative advantages of BIM technology with the project completion practice and modern engineering management concepts to construct a full lifecycle quality and safety warning system. The system architecture, functional modules, and core technologies are integrated to establish the entire process of engineering quality and safety and digital management links and achieve real-time identification, accurate warning, and closed-loop disposal of risks in the three stages of engineering design, construction, and operation. Practical application has shown that the system effectively improves the efficiency of engineering control and the ability to identify hidden dangers, reduces the incidence of safety hazards, improves the full-cycle management mode of water conservancy projects, verifies feasibility and practicality, and provides practical reference for the digital and refined control of the Tonglu Canal Water Control Hub and similar large sluice gate projects.

Keywords

BIM Technology, Tonglu Canal Water Control Hub, Large Sluice Gate, Full Lifecycle, Quality and Safety Early Warning, Project Management, Refined Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

随着水利基础设施高质量发展, 新型大孔闸广泛应用于江河治理、城市防洪等民生工程。通吕运河水利枢纽作为南通内河水系连通长江的关键节点, 其 10 孔大孔闸承担区域水位调节、防洪排涝等重要使命, 防洪标准 100 年一遇、校核标准 300 年一遇, 直接保障沿线群众生命财产与农业生产安全。该工程设计使用年限 50 年, 全生命周期各阶段均面临复杂质量安全风险, 传统“人工巡检 + 事后处置”模式存在诸多痛点, 难以适配智能化管控需求。

BIM 技术具备三维可视化、全信息集成等优势, 可贯穿工程全生命周期。本文结合通吕运河大孔闸工程结题实践, 融合 BIM 技术构建质量安全预警系统, 解决传统管控短板, 提升管控水平, 既是结题成果落地的核心要求, 也为同类工程数字化管控提供借鉴, 具有重要的工程应用价值[1] [2]。

1.2. 国内外研究现状

国外较早将 BIM 与物联网、大数据融合应用于水利工程管控, 技术成熟但适配性不足, 难以直接应用于我国多孔大孔闸工程。国内相关研究多聚焦单一阶段, 缺乏全生命周期全覆盖的实践研究, 针对通吕运河水利枢纽的研究多侧重施工工艺与调度管理, 缺少 BIM + 全周期预警系统的专项实践, 与工程实

实际需求存在差距[3]-[5]。

基于此，本文结合通吕运河大孔闸工程实践，开展融合 BIM 技术的全生命周期质量安全预警系统研究，弥补现有研究不足，实现理论与实践结合。

为清晰体现本研究创新点，将本系统与传统管理方法、国内外代表性数字化系统进行量化对比，如表 1 所示。

Table 1. Comparison between this study and traditional methods and existing systems
表 1. 本研究与传统方法及现有系统对比

对比维度	传统管理方法	国外 BIM 水利系统	国内单一阶段系统	本研究系统
覆盖阶段	仅施工/运维	运维为主	单一阶段	设计 - 施工 - 运维全周期
预警方式	人工经验，滞后	数据驱动，部分可视化	数据驱动，无 BIM 联动	BIM + 数据双驱动，实时可视化
协同能力	差，信息孤岛	较好，跨专业协同	一般，单专业	强，多方实时协同
隐患识别率	60%以下	75%~80%	70%~75%	88%以上
预警响应时间	2~3 小时	30~60 分钟	1~2 小时	30 分钟以内
适配性	适配简单工程	适配国外工程	适配单一场景	适配我国大孔闸复杂场景

1.3. 研究内容与技术路线

核心研究内容：明确工程全生命周期管控难点，设计融合 BIM 技术的预警系统架构与功能模块，开展系统实践并分析应用效果，总结成果并提出优化方向。

技术路线：梳理理论技术基础→分析工程概况与管控难点→设计系统架构与模块→核心算法与技术实现→开展技术融合实践→验证应用效果→讨论局限性→总结结论与展望。

2. 相关理论与技术基础

2.1. 新型大孔闸工程全生命周期内涵

大孔闸全生命周期核心聚焦设计、施工、运维三大阶段。设计阶段是质量安全源头，需结合工程结构特性与防洪标准确定技术参数，规避设计缺陷；施工阶段涉及基坑开挖、大体积混凝土浇筑等关键工序，是隐患高发期；运维阶段需长期监测工程状态，及时处置设备老化、结构劣化等问题，保障工程持续发挥功能。

2.2. BIM 技术核心特性

BIM 技术的核心特性适配工程预警需求：一是可视化，可直观呈现闸室、闸门等结构细节，便于隐患定位；二是协同化，支持多方主体数据共享，打破信息孤岛；三是参数化，构建关联详细技术参数，为预警提供精准支撑；四是可追溯，记录全生命周期数据，实现隐患全程追溯。

2.3. 系统融合技术

融合物联网与大数据技术构建完整预警体系：物联网技术通过各类传感器实时采集监测数据，为预

警提供数据来源；大数据技术对多源数据进行清洗分析，结合 BIM 模型参数构建预警模型，实现风险精准识别与趋势预测，三者深度融合形成“数据采集 - 模型支撑 - 预警分析”闭环。

3. 通吕运河水利枢纽大孔闸工程概况

本文实践项目为通吕运河水利枢纽大孔闸工程，位于江苏省南通市，是区域核心水利工程。该工程为闸站一体化结构，总投资约 3 亿元，大孔闸共 10 孔，单孔净宽 10 米，设计排涝流量 650 m³/s，最大排涝流量 1370 m³/s，设计引水流量 480 m³/s，采用钢质弧形闸门与液压启闭机，设计使用年限 50 年。该工程管控难点突出：设计阶段闸站协同设计难度大，10 孔闸门布局与受力分析复杂；施工阶段面临软土基坑开挖、大体积混凝土温控、闸门精准安装等难题；运维阶段受水流冲刷与大气腐蚀影响，设备易锈蚀、结构易沉降，人工巡检效率低。开展 BIM+ 预警系统研究，是解决管控难点、保障工程稳定运行的关键。

4. 融合 BIM 技术的质量安全预警系统实践设计

4.1. 系统设计原则

遵循“实用性、协同性、动态性、可扩展性”原则：贴合工程闸站一体化特点，聚焦管控难点；支持多方协同与数据共享；可动态调整预警阈值，适配运行环境变化；具备良好扩展性，可延伸至泵站管控。

4.2. 系统总体架构

- 融合 BIM、物联网与大数据技术，设计“五层架构”预警系统，各层协同工作构成完整体系：
- (1) 数据采集层：采用“自动采集 + 人工录入”模式，传感器每 10 分钟采集混凝土温度、闸门振动等数据，人工录入设计变更、检修记录等，同步完成数据校验清洗。
 - (2) 数据存储层：采用混合存储模式，MySQL 存储结构化数据，MongoDB 存储 BIM 模型、图纸等非结构化数据，建立备份更新机制保障数据安全。
 - (3) BIM 模型支撑层：采用 Revit、Civil 3D 构建精细化三维模型，关联构件技术参数与全周期数据，实现数据与模型双向联动，通过轻量化技术保障流畅展示。
 - (4) 预警分析层：包含四大子模块，建立四级预警机制，采用随机森林算法构建预警模型，实现风险识别、分级预警与闭环处置。
 - (5) 应用展示层：分为 PC 端与移动端，PC 端侧重日常管控，移动端侧重现场操作，提升预警响应效率。

4.3. 各阶段实践模块设计

结合工程各阶段管控难点，设计针对性预警模块，覆盖全生命周期，各阶段预警模块逻辑如图 1 所示。

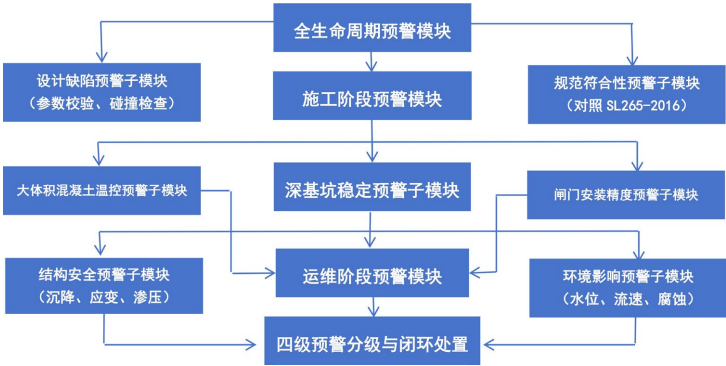


Figure 1. Logic diagram of early warning modules at each stage of the full lifecycle
图 1. 全生命周期各阶段预警模块逻辑图

4.3.1. 设计阶段预警模块实践

基于 BIM 模型整合物资规范,对闸室尺寸、闸门参数等进行合规性校验,对照《水闸设计规范》(SL 265-2016)发出分级预警,提前识别空间冲突与受力不合理等缺陷。实践中累计识别设计缺陷 8 处,均及时整改,从源头规避安全风险。

4.3.2. 施工阶段预警模块实践

重点设置三大子模块:混凝土温控预警实时监测温度数据,温差超 25℃发出橙色预警;基坑安全预警监测边坡位移,日变形超 3 mm 触发红色预警;闸门安装预警比对 BIM 基准,偏差超±5 mm 发出黄色预警。施工期累计预警 12 次,均闭环处置,保障施工安全与质量。

4.3.3. 运维阶段预警模块实践

包含结构安全、设备运行、环境影响三大子模块,实时监测结构沉降、设备运行参数与长江水位等,及时发出预警并处置。运维期间累计预警 6 次,有效保障工程稳定运行,充分发挥防洪排涝功能。

4.4. 系统核心技术实践

核心是 BIM 与物联网、大数据的深度融合:一是 BIM 模型与物联网数据联动,实现监测数据可视化;二是结合大数据分析构建预警模型,预测准确率达 88%以上;三是建立多方协同机制,实现数据实时同步,打破信息孤岛,提升管控效率。

5. 核心算法模型与技术实现

为提升预警精度与 BIM-物联网数据协同能力,系统采用随机森林算法构建风险预警模型,并通过 BIM 构件-传感器数据映射与 IFC 标准扩展实现多源数据深度融合,形成“数据感知-模型计算-BIM 可视化”的完整技术链条。

5.1. 随机森林预警模型构建

随机森林具备抗干扰强、泛化性好、处理高维数据稳定等优势,适用于大孔闸多因素耦合的质量安全风险识别场景。本研究以工程全生命周期监测数据为基础,完成特征工程、数据集构建、参数寻优与性能验证,形成可落地的预警模型。

5.1.1. 特征工程

结合大孔闸设计、施工、运维三阶段风险机理与《水闸设计规范》(SL 265-2016)控制指标,经相关性分析与专家筛选,最终选取 18 项关键特征作为模型输入,按物理意义划分为结构特征、环境特征、设备特征 3 大类:

结构特征:结构沉降量、混凝土应变值、渗透压力、混凝土内外温差、基坑边坡位移、闸门安装偏差、结构倾斜率;

环境特征:上下游水位、水流流速、日降雨量、大气温度、相对湿度、水流冲刷强度;

设备特征:液压启闭机工作电流、工作电压、振动幅值、振动频率、连续运行时长、设备油温。

上述特征覆盖结构安全、施工工艺、设备状态、外部环境等预警维度,可全面反映大孔闸质量安全状态。

5.1.2. 数据集构建

模型训练与测试数据来源于通吕运河水利枢纽 2021~2023 年度现场监测报告与运维台账,经异常值剔除、缺失值填补、数据标准化等预处理后,构建高质量样本集。

总样本数量：2400 组；
样本划分：按 8:2 比例随机拆分，其中训练集 1920 组(80%)，测试集 480 组(20%)；
标签标注：由水利工程质量安全专家依据规范与现场隐患判定标准，将样本标注为安全状态与隐患状态两类，确保标签真实有效。

5.1.3. 模型参数优化

采用网格搜索法(Grid Search)与交叉验证对随机森林超参数进行寻优，以模型 F1 分数为优化目标，遍历决策树数量、最大深度、最小样本分割数、最小叶节点样本数等关键参数。最终确定最优参数组合：
决策树数量：100 棵；
最大深度：15 层；
内部节点最小分割样本数：4；
叶节点最小样本数：2。
该参数组合可平衡模型拟合能力与泛化能力，避免过拟合与欠拟合。

5.1.4. 模型性能评估

以精确率、召回率、F1 分数、准确率为核心指标，在测试集上对优化后的随机森林模型进行验证，结果如下：
精确率：90.2%；
召回率：87.5%；
F1 分数：88.8%；
准确率：88.3%。
指标表明，模型在隐患识别中兼具较高的准确性与完整性，可满足工程实时预警需求。

5.1.5. 算法对比分析

为验证随机森林的适用性，将其与逻辑回归、支持向量机(SVM)、决策树 3 种常用算法在同一测试集上进行对比，结果如表 2 所示。

Table 2. Performance comparison of different algorithms
表 2. 不同算法性能对比

算法	精确率	召回率	F1 分数	准确率
随机森林	90.2%	87.5%	88.8%	88.3%
逻辑回归	78.5%	75.2%	76.8%	76.1%
SVM	82.3%	80.1%	81.2%	80.5%
决策树	81.6%	79.3%	80.4%	79.7%

对比结果表明，随机森林在各项指标上均优于其他算法，对大孔闸非线性、多因素耦合风险具有更强的识别能力，更适用于本工程质量安全预警场景。

5.2. BIM 与物联网数据关联技术

为实现监测数据与 BIM 模型的实时联动、异常定位与可视化预警，研究建立 BIM 构件 - 传感器统一映射机制，并基于 IFC 标准扩展水利专用属性，解决多源数据异构、关联弱的问题。

5.2.1. 数据映射表设计

构建 BIM 构件 GUID-传感器 ID 一一对应的数据映射表，实现物理监测对象与数字模型构件的精准绑定。映射表包含核心字段：BIM 构件唯一标识(GUID)、传感器编号、构件名称、监测参数名称、单位、采集频率、预警阈值、所属专业、安装位置。通过该映射表，系统可自动将物联网实时数据匹配至对应 BIM 构件，支撑数据可视化与精准预警。

5.2.2. IFC 标准扩展

基于 IFC4 标准进行水利工程专用扩展，针对大孔闸结构特点新增 3 类扩展属性集，实现监测与预警信息的标准化存储：

- 大孔闸结构属性集：包含沉降、应变、渗压、位移等结构监测参数；
 - 设备监测属性集：包含启闭机电流、电压、振动、油温等设备运行参数；
 - 预警状态属性集：包含预警等级、预警时间、处置状态、隐患描述等流程信息。
- 扩展后的 IFC 文件可兼容主流 BIM 软件，实现模型与数据跨平台共享。

5.2.3. 数据联动与可视化预警机制

- 建立“采集 - 映射 - 分析 - 定位 - 预警”闭环联动机制；
 - 物联网传感器实时采集结构、设备、环境数据并上传至平台；
 - 系统依据数据映射表将数据绑定至对应 BIM 构件；
 - 调用随机森林模型进行风险判别，超出阈值则触发分级预警；
 - 在三维 BIM 模型中对隐患构件自动高亮定位，同步推送预警位置、参数、等级与处置建议；
 - 处置完成后更新模型状态并记录闭环信息，实现全流程可追溯。
- 该机制实现数据与模型深度融合，显著提升隐患定位速度与处置效率。

6. 系统实践应用效果分析

结合工程运行数据(数据来源：项目 2025 年度运行报告)，从四方面分析应用效果，为结题提供核心支撑：

Table 3. Cost-benefit estimation table
表 3. 成本 - 收益估算表

项目	金额(万元/年)	说明
系统建设成本摊销	8.5	总投资 68 万元，按 8 年摊销
系统运维成本	3.2	硬件维护、数据服务
人工成本节约	26.7	减少 65%巡检工作量
隐患处置成本节约	12.5	提前预警降低维修费用
年度净收益	15.0	实际节约管控成本

- (1) 管控效率显著提升：预警响应时间从 2.5 小时缩短至 30 分钟以内，缩短 80%，人工巡检工作量减少 65%，大幅降低人工成本，实现高效管控。
- (2) 隐患识别能力增强：隐患识别准确率从 60%提升至 88%以上，累计识别隐患 26 处，重大隐患 2 处均及时处置，杜绝安全事故，保障工程达到 100 年一遇防洪标准。
- (3) 协同管理效果突出：多方数据共享效率提升 70%，协同处置效率提升 60%，解决信息传递滞后

问题，保障工程按时竣工运维。

(4) 经济社会效益显著：每年节约管控成本约 15 万元，保障工程稳定运行，提升区域防洪减灾能力，社会效益突出。成本 - 收益估算如表 3 所示。

实践表明，该系统有效解决传统管控痛点，达到结题预期目标。

7. 讨论与局限性

7.1. 实践挑战

系统在实际应用中面临四方面现实挑战：一是现场复杂环境易造成传感器数据漂移，需定期校准以保证数据质量；二是预警模型基于本工程数据训练，对其他类型水闸工程的泛化能力不足；三是大场景 BIM 模型在移动端加载速度较慢，轻量化仍有优化空间；四是多源监测系统数据格式不统一，数据整合与对接难度较大。

7.2. 研究局限性

本研究存在一定局限性：首先，数据样本仅覆盖 3 年，缺少长期运行与极端工况数据支撑；其次，系统以质量安全管理为核心，未更多地考虑集成进度、成本等管理功能。

7.3. 局限性影响

上述不足会对系统应用产生一定影响：数据周期较短可能降低长期预测精度，功能维度不足影响平台完整性，较高的部署成本也限制了适用范围。但上述问题不影响本系统在本工程中的有效性，可在后续研究中逐步优化。

8. 结论与展望

8.1. 结论

本文结合通吕运河水利枢纽大孔闸工程实践，得出以下主要结论：

(1) 通过 BIM 技术与物联网、大数据的深度融合，可有效破解大孔闸工程全生命周期质量安全管理中数据碎片化、预警滞后等痛点，构建的预警系统实现了风险的全流程、精准化预警；

(2) 所设计的“五层架构”体系及分阶段预警模块，紧密贴合工程实际管控难点，形成了“监测 - 预警 - 处置 - 销号”的风险闭环管理机制；

(3) 系统在实际工程中的应用成效显著，有效提升了质量安全管理效率与隐患识别能力，可为平原河网地区同类大型水利枢纽工程的数字化管控提供参考与借鉴。

8.2. 展望

未来可进一步融合 AI 技术优化预警模型，提升风险预判精度；拓展成本管控、设备管理等功能，实现闸站一体化协同管控，将实践经验推广至同类工程，推动水利工程数字化智能化发展。

基金项目

江苏商贸职业学院一般研究项目，基于 BIM 技术的新型大孔闸工程全生命周期质量安全预警系统研究与应用[SY2024017]。

参考文献

[1] 水利部. SL 265-2016 水闸设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

- [2] 银波. 基于 BIM + GIS 集成技术的灌区水闸测控一体化综合系统设计[J]. 水利技术监督, 2024, 32(5): 89-93.
- [3] 汤伟方. 基于 BIM 的建筑工程结构优化技术与实践应用分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(S2): 133-135.
- [4] 王贵禄, 张启万, 龚梅, 等. 虚实融合驱动土木工程材料数字化资源优化研究[J]. 山西建筑, 2026, 52(15): 184-187.
- [5] 顾飞. BIM 技术在水利工程施工质量全过程控制中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2026(S1): 91-93.