

BIM技术在水利工程安全监测中的应用研究

谢作为¹ 田正² 胡恒威³

1. 中工城乡建设(湖北)有限公司 湖北 武汉 430205

2. 中工武大设计集团有限公司 湖北 武汉 430205

3. 鄂州市河道堤防保护中心 湖北 鄂州 436099

摘要: 水利工程安全监测对保障工程安全运行至关重要。本文阐述BIM技术与水利工程安全监测的核心关联,分析其适配逻辑。构建BIM技术在水利工程安全监测中的应用框架,涵盖整体思路、核心组成与运行流程。探讨具体应用路径,包括数据集成管理、要素可视化呈现等方面。提出技术、应用、实施层面的优化措施,为提升水利工程安全监测水平提供理论支撑与实践指导,推动水利工程安全监测向智能化、精细化方向发展。

关键词: BIM技术; 水利工程; 安全监测; 应用框架; 优化路径

引言: 水利工程作为基础设施建设的重要组成部分,其安全运行关乎国计民生。传统水利工程安全监测手段存在数据利用效率低、难以实现全要素动态管控等问题。BIM技术以三维数字化模型为载体,具备多维信息整合、参数化驱动等优势。将BIM技术应用于水利工程安全监测,可实现监测数据的精准集成、直观呈现与智能分析,构建全生命周期动态安全管控体系,对提升水利工程安全监测水平、保障工程安全具有重要意义。

1 BIM技术与水利工程安全监测的核心关联

1.1 BIM技术的核心特性

BIM技术以三维数字化模型为载体,构建了涵盖水利工程全生命周期的信息集成体系。其核心优势体现在多维信息整合能力上,通过将几何数据、物理属性、时间维度及成本信息等要素深度融合,形成具有逻辑关联的复合型数据模型^[1]。这种模型不仅具备直观的三维可视化特征,更支持参数化驱动的动态更新机制,使工程信息随设计变更或施工进度实时演进。在数据处理层面,BIM技术通过标准化数据接口实现多源异构信息的无缝集成,为跨专业协同提供了统一的信息交互平台。其语义化建模能力可将工程构件的物理特性、功能属性及关联关系进行结构化表达,为后续的智能分析奠定数据基础。

1.2 水利工程安全监测的核心需求

水利工程安全监测体系涵盖结构安全、环境效应及设备运行三大维度。结构安全监测聚焦于大坝、堤防等水工建筑物的变形与应力状态,需持续追踪沉降、位移、裂缝等关键参数的时空演变规律。环境效应监测涉及水文循环、水质变化及地质灾害等要素,要求对水位、流速、渗流、温度等物理量进行高精度采集与动态

分析。设备运行监测则针对闸门、泵站等机电装置,需实时掌握振动、噪声、功率等运行指标,确保设备工况处于安全阈值范围内。这些监测需求具有数据量大、维度多元、时效性强的特征,且各监测要素间存在复杂的耦合关系,传统监测手段难以实现全要素、全过程的动态管控。

1.3 BIM技术适配水利工程安全监测的核心逻辑

BIM技术与水利工程安全监测的深度融合源于技术特性与监测需求的内在契合。三维几何模型为监测点位布置提供了精准的空间参照,通过将传感器位置与模型构件进行空间绑定,可实现监测数据与工程结构的动态关联。参数化建模机制支持监测阈值的动态调整,当设计参数或环境条件发生变化时,系统可自动重新计算安全基准值,提升预警决策的科学性。多维度信息集成能力使BIM模型成为监测数据的可视化载体,通过将变形、渗流、应力等物理量映射至三维模型,可直观呈现工程安全状态的时空分布特征。语义化数据结构为智能分析提供了逻辑基础,机器学习算法可基于模型属性与监测数据的关联规则,构建结构安全预测模型,实现从被动监测向主动预警的范式转变。这种技术适配不仅提升了监测数据的利用效率,更通过模型与数据的双向驱动,构建了覆盖水利工程全生命周期的动态安全管控体系。

2 BIM技术在水利工程安全监测中的应用框架

2.1 应用框架的整体构建思路

水利工程安全监测的BIM应用框架以信息物理系统(CPS)理论为指导,通过构建虚实映射的数字化双生环境,实现物理工程与数字模型的深度交互^[2]。框架设计遵循"数据驱动、模型支撑、业务协同"的原则,将传感器网络采集的实时数据与BIM模型的空间属性深度融合,形成

覆盖工程全要素的动态监测体系。在构建过程中,注重模型轻量化与数据实时性的平衡,采用分层架构设计,确保海量监测数据的高效处理与可视化呈现。框架还融入知识图谱技术,将工程规范、监测标准等隐性知识显性化,为智能分析提供规则引擎支持,最终形成"感知-建模-分析-决策"的闭环管控机制。

2.2 应用框架的核心组成部分

应用框架由数据采集层、模型构建层、分析处理层与应用展示层四部分构成。数据采集层整合多类型传感器数据,通过标准化协议转换实现异构数据的统一接入,并采用边缘计算技术进行初步筛选与压缩。模型构建层基于IFC标准创建水利工程三维模型,将监测点位与模型构件进行空间绑定,同时构建包含材料属性、设计参数等元数据的属性模型。分析处理层搭载空间分析引擎与机器学习模块,前者支持变形趋势分析、渗流路径模拟等几何计算,后者通过训练历史数据构建安全预警模型,实现异常状态的智能识别。应用展示层采用WebGL技术实现轻量化三维可视化,开发多终端适配的监测界面,支持监测数据的动态标注与历史回溯,并集成应急预案库提供决策支持。

2.3 应用框架的运行流程

系统运行始于传感器网络的数据采集,原始数据经预处理后传输至BIM平台进行时空对齐。模型引擎根据监测点位坐标自动匹配对应构件,将物理量数据写入模型属性集,完成虚实状态同步。分析模块定期触发安全评估任务,空间分析子模块计算结构变形速率、渗流压力梯度等关键指标,机器学习子模块则通过对比实时数据与训练模型输出风险概率。当监测值超出预设阈值时,系统自动激活预警流程,通过颜色编码在三维模型上标识风险区域,同时推送预警信息至相关人员终端。决策支持模块根据风险等级调取对应处置方案,指导现场人员开展巡查加固或应急抢险,并将处置结果反馈至模型形成闭环管理。整个流程通过工作流引擎驱动,确保各环节按预设逻辑有序执行,实现监测业务的标准化与自动化。

3 BIM 技术在水利工程安全监测中的具体应用路径

3.1 监测数据的集成与管理路径

水利工程安全监测数据具有多源异构特性,涵盖位移、渗流、应力、温度等数十种物理量,采集频率从秒级到小时级不等^[3]。BIM技术通过构建统一数据模型实现全要素集成,基于IFC标准扩展监测数据字段,将传感器编号、空间坐标、采集时间、物理量数值等元数据与BIM模型构件建立双向映射关系。采用分布式混合存储架

构,高频时序数据存储于时序数据库以保障写入性能,低频结构化数据存储于关系型数据库以支持复杂查询,通过数据中间件实现跨库联合分析。为解决数据质量问题,开发智能清洗算法,利用滑动窗口统计剔除离群值,采用卡尔曼滤波对噪声数据进行平滑处理,并建立数据版本控制机制记录变更历史。针对大型工程海量数据场景,设计分层缓存策略,将热点数据驻留内存,温数据存储于固态硬盘,冷数据归档至分布式存储系统,实现查询性能与存储成本的平衡。

3.2 监测要素的可视化呈现路径

三维可视化呈现依托BIM模型的空间定位能力,将抽象监测数据转化为直观图形表达。研发基于WebGL的轻量化渲染引擎,通过实例化渲染、视锥剔除等技术优化,支持千万级构件模型的流畅加载与交互操作。针对不同监测要素特性,开发多样化可视化方法:变形数据采用构件位移动画与变形网格叠加展示,渗流数据通过流线轨迹模拟与粒子系统呈现,应力数据利用色谱分级与矢量箭头标注。为增强分析深度,集成空间查询功能,用户可点击任意构件获取历史监测曲线,或框选区域生成统计报表与趋势分析图。时间轴控件支持监测数据的时间维度回放,可动态观察工程安全状态随施工进度或水文周期的变化规律。针对移动端应用场景,开发基于AR技术的现场可视化方案,巡查人员通过手持设备扫描实体工程,即可在真实场景中叠加显示监测数据与预警信息。

3.3 监测过程的协同管控路径

协同管控体系以BIM模型为信息枢纽,构建覆盖设计、施工、运维全生命周期的监测业务流。通过工作流引擎定义标准化任务模板,将传感器安装、数据采集、异常上报、处置反馈等业务环节转化为可执行流程节点,并关联相应责任人与完成时限。权限管理系统基于RBAC模型实现精细化控制,不同角色用户拥有差异化的模型操作权限与数据访问范围,确保敏感操作的可追溯性。开发移动巡查应用,现场人员通过GPS定位自动关联附近监测点位,填写巡查记录时可直接调用模型构件属性信息,发现问题可拍摄照片并标注位置后提交工单。冲突检测机制自动比对监测数据与设计参数,当变形量超过预留沉降值或渗流压力突破防渗标准时,系统触发设计复核流程,推动结构、地质、水文等专业协同开展安全性评估,并生成包含加固方案与资源需求的处置建议书。

3.4 监测信息的传递与共享路径

信息共享平台采用微服务架构设计,通过RESTfulAPI

实现与气象、水文、地质等外部系统的数据对接。制定标准化数据交换协议,明确监测数据传输的字段格式、更新频率及安全认证机制,确保不同厂商设备数据的无障碍接入。知识管理模块构建监测规范库与案例库,将工程经验转化为结构化推理规则,新项目可快速调用相似工程监测方案与阈值设置参数。为满足不同层级用户需求,设计分级信息推送机制,现场人员接收实时预警信息与简易处置指引,管理人员查看统计报表与趋势分析图表,决策层获取综合安全评估报告与风险演化预测。区块链技术应用与关键数据存证,将监测记录、处置过程等核心信息上链存储,确保数据不可篡改且可追溯,为工程安全责任认定提供技术支撑。针对跨国或跨区域工程,开发多语言支持与数据加密传输功能,保障国际合作场景下的信息安全与合规性。

4 BIM技术在水利工程安全监测中应用的优化路径

4.1 技术层面的优化措施

针对水利工程监测场景的特殊性,BIM技术需在数据融合与智能分析方向深化突破。开发多源异构数据融合引擎,通过语义映射技术实现地质雷达、光纤传感等新型监测设备数据与BIM模型的自动关联,解决传统接口适配效率低下问题。引入数字孪生技术构建高保真虚拟模型,集成流体动力学与结构力学仿真模块,使模型具备预测性分析能力,可模拟极端工况下工程安全状态演变过程。在数据处理环节,部署边缘计算节点实现监测数据就地预处理,通过轻量化算法提取特征值后再传输至云端,降低网络传输压力的同时提升响应速度。研发基于知识图谱的智能诊断系统,将工程规范、事故案例等知识转化为结构化推理规则,辅助识别复合型安全隐患。

4.2 应用层面的优化措施

应用优化需聚焦监测业务全流程的数字化重构。构建动态监测阈值管理体系,结合工程生命周期阶段特征与环境变量,通过机器学习模型动态调整预警基准值,避免固定阈值导致的误报漏报。开发可视化决策支持系统,将监测数据、模型分析结果与应急预案库深度集成,当风险等级突破阈值时,系统自动生成包含处置流

程、资源调配等要素的决策方案。建立监测数据质量追溯机制,利用区块链技术记录数据采集、传输、分析各环节操作日志,确保监测结论的可信度。针对大型水利工程跨区域管理需求,设计分布式BIM模型架构,支持多地服务器协同运算与模型版本同步,保障大规模监测场景下的系统稳定性。

4.3 实施层面的优化措施

实施优化需破解技术落地过程中的组织协同难题。制定水利工程BIM监测数据标准,统一构件编码规则、属性定义及交换格式,消除不同参与方的数据壁垒。建立分层培训体系,针对管理人员开发监测数据解读课程,面向技术人员设计BIM建模与二次开发培训,提升团队整体数字化素养。构建开放型技术生态,鼓励传感器厂商、软件开发商基于统一平台开发插件式应用模块,通过应用市场模式丰富功能供给。在项目实施阶段推行"模型先行"策略,要求施工方在实体工程建设前完成BIM模型交付,并嵌入监测点位布置方案,通过虚拟建造验证监测系统的可实施性。建立持续优化机制,定期收集用户反馈调整系统功能,将新监测技术、新分析方法通过模块化方式集成至现有平台,保持系统的技术先进性。

结束语

BIM技术在水利工程安全监测中的应用,有效解决了传统监测手段的诸多难题。通过构建完善的应用框架与具体应用路径,实现了监测数据的高效集成、直观呈现、协同管控与信息共享。技术、应用、实施层面的优化措施,进一步提升了系统的性能与实用性。随着相关技术的不断发展,BIM技术将在水利工程安全监测领域发挥更大作用,为水利工程的长期安全稳定运行提供坚实保障,推动水利工程安全监测迈向新高度。

参考文献

- [1]李广丰.BIM技术在水利工程安全监测中的应用研究[J].水上安全,2025(4):13-15.
- [2]孙昊阳,舒强.三维激光扫描与BIM的集成技术在水利工程变形监测中的应用[J].治淮,2025(3):28-30.
- [3]吴海龙.数字化技术在水利工程施工组织设计可视化与优化中的应用[J].科学技术创新,2026(3):169-172.