

基于数字孪生的水工环实景三维监测体系构建与应用

范天龙

荆门天地源土地评估勘测有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i8.21627

[摘要] 水工环地质环境涵盖水文条件、工程地质、地质结构、生态环境等多元核心要素,是水利工程运维、地质灾害防控、区域生态治理的基础依托。数字孪生技术可搭建物理场景与虚拟模型的双向映射关系,实现数据联动更新与工况动态推演,为水工环监测的数字化升级提供了新的技术路径。本文结合水工环现场监测的实际痛点,依托实景三维建模、多源数据融合、实时传感感知、动态仿真推演等核心技术,搭建适配水工环复杂场景的数字孪生监测体系,梳理体系搭建思路、核心技术要点与落地应用逻辑。工程实践表明,该体系可有效整合水文动态、地质形变、工程结构、生态环境多维度监测数据,实现水工环全域状态可视化管控、隐患动态预警、演化趋势提前推演,显著提升监测精细化与智能化水平。

[关键词] 数字孪生; 水工环; 实景三维; 地质监测; 动态预警

中图分类号: TH763 **文献标识码:** A

Construction and Application of a Digital Twin–Based Three–Dimensional Monitoring System for Hydrogeological and Environmental Engineering

Tianlong Fan

Jingmen Tiandi Yuan Land Appraisal and Survey Co., Ltd

[Abstract] The hydrogeological and environmental conditions encompass diverse core elements such as hydrological conditions, engineering geology, geological structures, and ecological environments, serving as the foundational support for water conservancy project operation and maintenance, geological disaster prevention and control, and regional ecological governance. Digital twin technology can establish a bidirectional mapping relationship between physical scenes and virtual models, enabling data linkage updates and operational condition dynamic simulations, providing a new technical pathway for the digital upgrade of hydrogeological and environmental monitoring. This paper addresses the practical pain points of hydrogeological and environmental field monitoring by leveraging core technologies such as real-scene 3D modeling, multi-source data fusion, real-time sensing and perception, and dynamic simulation. It constructs a digital twin monitoring system tailored to complex hydrogeological and environmental scenarios, outlining the system development approach, key technical points, and implementation logic. Engineering practice demonstrates that this system can effectively integrate multidimensional monitoring data on hydrological dynamics, geological deformation, engineering structures, and ecological environments, achieving comprehensive visual management of hydrogeological and environmental conditions, dynamic early warning of hidden risks, and predictive simulation of evolution trends, significantly enhancing the precision and intelligence of monitoring.

[Key words] Digital twin; Hydrogeological and environmental engineering; Realistic 3D; Geological monitoring; Dynamic early warning

引言

水工环地质环境属于复合型生态地质体系,水文动态、地质形变、环境演变相互耦合影响,工况状态随时空变化持续波动,整体复杂性极强。现阶段各类水利基建、岩土开挖、生态修复工程持续推进,对原有区域地质结构、水系分布、生态格局造成

不同程度扰动。边坡微量形变、地下水位起伏、河道径流变化、地表生态破损等细微变化长期累积,极易引发边坡失稳、基坑渗漏、地面塌陷、水体污染等安全隐患,直接威胁工程运行安全与区域生态稳定。传统水工环监测技术模式存在明显短板,各类监测设备独立布设、数据单独存储,水文、地质、环境数据相互割

裂,无法形成全域联动的监测体系。同时传统监测成果以二维图表、静态数据为主,只能体现单点时段性数据变化,难以直观展现地形起伏、岩层构造、工程结构的三维空间特征,很多隐蔽性隐患无法通过静态数据及时发现。

1 水工环传统监测模式现存技术短板

1.1 监测数据碎片化,多源要素无法联动耦合

水工环监测涉及水文水质、地质形变、工程结构、生态环境多个维度,各板块独立开展,设备布设、数据采集、存储分析自成体系,缺乏统一整合与联动分析。水文监测关注水位、流量、水质常规指标,地质监测聚焦边坡位移、土体含水率、岩层形变,生态监测统计植被、水体环境参数,各类数据互不互通。单一维度数据仅反映局部状态,无法体现水工环多要素耦合演化规律^[1]。

1.2 监测场景二维固化,空间可视化能力不足

传统水工环监测结果多依赖二维图纸、报表和折线图,仅呈现单点时序变化,无法还原三维空间场景。山区河道、高陡边坡、水利构筑物空间结构复杂,隐患隐蔽性强,二维数据难以直观体现地形起伏、岩层分布、结构缺陷的具体空间位置与形态。监测数据无法与三维空间位置绑定,异常时难以快速定位实景隐患点、判断影响范围、推演演化趋势。

1.3 动态监测能力薄弱,隐患预判严重滞后

汛期暴雨、深夜强降雨、突发水文波动等高危时段存在监测空白,难以捕捉工况突变瞬间的异常数据。采集数据仅用于静态存档和事后复盘,缺乏动态推演模型,无法依托实时数据预判水文变化、地质形变趋势。该模式属被动处置,隐患发育成型、出现险情后才能发现,不满足安全防护前置预判、主动治理的核心需求^[2]。

1.4 实景适配性较差,无法贴合复杂工况演变规律

不同区域水工环要素受地形、气候、工程扰动影响显著,演化规律地域差异性较强,通用模型难以适配局部特殊工况。且模型缺乏动态迭代,工程施工、地形改造、生态修复等实景变化后无法同步更新,长期使用导致模型老化、数据脱节,监测研判结果与现场实际偏差持续扩大。

2 数字孪生水工环实景三维监测体系总体构建思路

2.1 实景还原建模,搭建三维孪生基础场景

以监测区域全域地形、地质结构、水利工程、生态地貌为建模主体,综合无人机航测、激光雷达扫描、卫星影像解析与现场勘测,采集全域实景数据,构建高精度三维孪生模型。建模过程中细化地形起伏、岩层分布、河道走向、边坡结构、构筑物形态等细节,精准还原各类水工环要素空间位置、几何形态与结构关联。对高危隐患区及核心水利工程点位开展精细化建模,细化隐蔽结构与微小缺陷,保证孪生模型与物理实景1:1匹配。同时建立模型动态迭代机制,根据现场施工、地形改造、生态修复等变动实时更新参数,确保模型始终贴合现场工况^[3]。

2.2 多源数据融合,构建统一数据底座

打通各类型监测设备与独立系统的数据壁垒,整合水文检测、地质形变、工程结构、生态环境、气象雨量等多源异构数据,搭建统一水工环监测数据底座。对格式杂乱、维度不同的原始数据做标准化处理,完成数据清洗、降噪、时空校准,统一数据格式、采集频次及坐标体系,实现多维度互联互通与联动分析。将所有监测数据精准挂载至三维场景对应点位,实现数据可视化、变化动态化、关联立体化,从根源上解决数据碎片化问题,为智能研判与仿真推演提供完整可靠的数据支撑。

2.3 虚实动态映射,实现全域实时监测

依托物联网实时传输与边缘计算技术,搭建物理场景与孪生模型的动态映射机制,监测数据秒级接入平台,同步驱动三维模型状态更新。水位涨跌、水质波动、边坡形变、岩层位移、植被变化等细微工况均在三维场景中直观呈现、实时同步。技术人员可远程查看全域工况,精准掌握各区域、各点位实时变化,无需反复现场踏勘。彻底解决传统监测盲区多、更新慢、可视化差的问题,实现全域无死角、全时段实时监测^[4]。

2.4 智能仿真推演,落实前置风险预警

结合实时监测时序数据与历史演化规律,搭建适配水工环场景的动态仿真推演模型,针对汛期降雨、水位暴涨、边坡蠕变、水体污染等典型工况,模拟演化趋势与风险范围。系统自主识别数据异常、工况突变、隐患发育等信号,结合三维场景空间结构,精准研判风险等级并自动触发分级预警。通过仿真推演预判险情发展节奏、覆盖范围与危害程度,为隐患治理、风险防控、应急处置预留充足时间,实现从被动处置到前置防控的转型。

3 数字孪生实景三维监测体系核心关键技术

3.1 高精度实景三维建模技术

融合无人机倾斜摄影、激光雷达扫描、地面精细化勘测三种建模方式,兼顾大范围建模效率与重点点位精度。利用无人机快速采集全域影像,搭建整体三维地形框架;依托激光雷达的穿透特性,规避植被遮挡问题,精准还原山体岩层、边坡基底、河道底部等隐蔽地形结构,补齐传统摄影建模的精度短板。针对堤坝、护岸、涵闸等核心水利设施,开展近距离精细化扫描,细化结构形变、表层破损、衔接缝隙等微小缺陷,满足精细化监测需求。同时采用轻量化处理技术,在保留模型核心精度的前提下,优化模型运行参数,保障平台长期高频次稳定运行。

3.2 多源异构数据融合处理技术

水工环监测数据类型繁杂,包含数值时序数据、影像图像数据、空间坐标数据等多类异构数据,传统技术无法直接联动分析。多源数据融合技术可对雨量、水位、结构形变、水质、植被覆盖、气象等各类原始数据进行标准化转换,剔除设备扰动、环境干扰产生的无效数据,完成数据降噪与精准校准。通过空间坐标统一匹配,将所有监测点位、数据指标精准对应至三维模型实景位置,实现点位、数据、工况一一对应。同时构建时序数据关联机制,梳理不同水工环要素的耦合变化规律,为智能研判、趋势仿真提供规整、有效的数据基础^[5]。

3.3 实时虚实同步映射技术

依托物联网传输与边缘计算技术,实现现场监测数据秒级上传、实时更新,驱动虚拟模型与物理场景时序同步、状态同步、变化同步。边坡微量位移、水位动态波动、水质指标变化等实时工况,均可在孪生模型中动态展示,无明显延迟。边缘计算节点可就地完成海量数据的预处理、筛选与分析,减少数据传输压力与延迟问题,避免数据堆积、更新滞后,保障虚实场景高度同步。同时支持多终端同步展示,可远程实时查看全域水工环动态,实现全天候可视化远程监测。

3.4 水工环工况智能仿真推演技术

基于水文动力学、地质力学、生态演化基础理论,结合区域工况特征搭建专属仿真推演算法模型,依托实时监测数据与历史灾害案例,模拟不同外界条件下水工环要素的演化趋势。可精准推演汛期水位上涨速率、河道汇流淹没范围、边坡形变扩张趋势、地下水渗透路径、水体污染扩散区域等关键指标,精准预判隐患发育速度与风险等级。系统自动对比实时监测数据与安全阈值,快速识别异常工况、提前发布预警信息,同时推演最优防控与处置方案。

4 数字孪生实景三维监测体系工程应用场景

4.1 水文水资源动态监测场景

依托三维孪生场景,直观展示河道、水库、沟渠、地下水系的整体空间分布,实时接入水位、流量、流速、雨量、水质等核心数据,动态呈现全域水文变化。可精准捕捉汛期水位暴涨、局部集中汇流、水质突发异常等问题,通过仿真推演预判洪水演进路径、淹没范围与污染扩散趋势。相较传统二维水文监测,该场景实现了水文数据可视化、趋势可预判、风险可量化,有效支撑汛期防汛调度、水资源合理分配、水环境常态化治理等实际工作。

4.2 地质灾害智能预警场景

针对山区边坡、河道岸坡、工程开挖边坡等高危地质区域,结合三维地质模型与实时形变检测数据,动态监测土体滑移、岩层裂隙扩张、坡脚基底掏空等隐蔽隐患。依托微量形变时序数据与降雨入渗规律,精准推演边坡失稳、塌方、滑坡概率,实现前置预警。三维场景可精准标注隐患点位、风险覆盖范围,直观展示地质结构薄弱区域,为边坡加固治理、隐患动态管控、应急处置提供精准的空间数据支撑,有效降低地质灾害突发风险。

4.3 水利工程结构安全监测场景

对堤坝、涵闸、护岸、输水管道等水利构筑物开展三维可视化监测,实时接入结构沉降、位移、形变、渗漏等监测数据,动态跟踪工程整体运行状态。可精准识别结构微小形变、局部渗漏、表层破损等人工难以发现的隐蔽缺陷,通过时序数据对比

分析,研判结构老化、损伤累积规律,提前预判工程安全隐患。相较于传统定点监测,该场景可实现工程整体工况全面把控、局部缺陷精准定位,有效保障水利工程长期稳定、安全运行。

4.4 区域生态环境监测场景

整合水域生态、地表植被、水土保持、河道修复等监测数据,在三维孪生场景中动态展示区域生态环境的时序变化。实时跟踪水体水质、植被覆盖度、水土流失程度、河道生态修复进度等核心指标,精准识别生态破损区域与退化趋势。通过长期时序数据复盘,梳理区域生态演化规律,推演生态修复方案实施成效,为区域水土治理、生态修复、水环境长效保护提供可视化、数据化的技术支撑。

5 结论

传统水工环监测模式受技术体系限制,存在数据零散、可视化效果差、动态预判能力弱、隐患处置滞后等诸多短板,无法满足现阶段精细化、智能化、前置化的监测需求。构建数字孪生实景三维监测体系,依托高精度实景建模、多源数据融合、虚实动态映射、智能仿真推演四大核心技术,可突破传统监测的技术局限,实现了水工环监测从二维静态数据分析向三维动态可视化、从事后被动处置向事前智能预判的跨越式升级。该体系可有效整合水文、地质、工程、生态多维度监测要素,精准还原现场实景工况、捕捉细微隐患变化、推演工况演化趋势,从根源上解决监测盲区多、风险研判不准、隐患预警滞后的现场难题。后续可结合不同区域的地质、水文、工程特征,持续优化建模精度与推演算法,完善多场景适配能力,进一步拓展数字孪生技术在水工环领域的应用深度。

【参考文献】

- [1]黄艳,喻杉,罗斌,等.面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索[J].水利学报,2022,53(3):253-269.
- [2]郭昊森,王昕玮,孟祥奎,等.基于AI视觉感知的北运河水工建筑数字孪生运行状态研究[J].北京水务,2026(2):100-105.
- [3]潘玉龙.引水工程施工期环境监测技术体系研究与应用进展[J].山西水利,2026(2):48-52.
- [4]邓文学.数字孪生驱动的水工隧洞TBM掘进智能调度系统研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(12):84-86.
- [5]李杰.新形势下水工环地质勘察技术及其应用[J].冶金与材料,2023,43(3):109-111.

作者简介:

范天龙(1991--),男,汉族,湖北荆门人,本科,中级职称,研究方向:实景三维结合数字孪生。