

基于数字孪生技术的三维可视化水利安全监测系统

常志飞 马文雅

北京中水科工程集团有限公司 北京 100038

摘要：为解决传统水利监测数据孤立、时效滞后等问题，本文设计基于数字孪生的三维可视化水利安全监测系统。分析传统监测局限与数字孪生技术优势，构建水利工程实体分类体系与多尺度孪生建模流程，优化模型精度验证与动态更新机制。系统采用“感知-传输-数据-应用”四层架构，开发数据采集融合、三维可视化交互、安全监测预警核心功能。通过多源数据融合与机器学习算法实现安全状态精准评估，结合三维引擎完成监测数据场景化呈现与异常溯源。实践表明，系统数据处理延迟 ≤ 5 秒，预警准确率高，为水利安全管理提供高效技术支持。

关键词：数字孪生技术；三维可视化；水利安全监测系统；开发与实现

引言：水利工程安全事关民生与经济发展，传统监测依赖分散传感器与人工巡检，存在数据关联性差、决策支撑弱等瓶颈，难以适应精细化管理需求。数字孪生技术通过虚实映射实现工程全生命周期管控，为水利监测升级提供新路径。三维可视化技术则能将抽象数据转化为直观场景，提升数据可读性。本文聚焦两者融合应用，构建水利安全监测系统，旨在突破传统监测局限，实现数据全链路治理、模型精准映射与安全状态实时预警，为水利工程安全保障提供智能化解决方案，具有重要理论与实践意义。

1 数字孪生与水利安全监测的融合应用概述

1.1 传统水利监测的局限性分析

传统水利监测以分散式数据采集为核心，存在显著短板。数据维度上，多依赖单点传感器获取孤立参数，难以形成水利工程全生命周期的立体感知，数据关联性与完整性不足。监测时效方面，部分区域依赖人工巡检，数据更新滞后，无法实时捕捉工程微小形变或水文参数突变。决策支撑上，数据多以表格、曲线呈现，缺乏直观场景化表达，导致监测数据与工程实际脱节，难以快速为安全决策提供精准依据，无法满足精细化管理需求。

1.2 数字孪生技术的核心原理

数字孪生技术通过构建物理实体的数字化镜像，实现虚实实时映射与协同交互。其核心是建立“数据-模型-服务”闭环体系，依托多源数据采集构建包含几何、物理、行为特征的高精度虚拟模型，通过数据链路实现虚实状态同步，利用仿真算法动态推演工程运行状态。该技术打破数据孤岛，将分散监测信息整合为统一数字化载体，使水利工程运行状态可感、可测、可预，提供从数据采集到分析决策的全流程支撑。

1.3 三维可视化技术支持

三维可视化技术是两者融合的关键呈现载体，通过计算机图形学将抽象数据转化为直观三维场景。其核心能力体现在场景构建与实时渲染：基于高精度地理信息与工程数据，构建包含地形、构筑物、水文环境的三维虚拟场景；借助渲染引擎实现场景流畅漫游、缩放与细节展示，将水位、应力等监测参数与三维模型精准绑定并可视化叠加。这一技术提升了数据可读性，让工程安全状态一目了然，为监测人员提供沉浸式决策辅助环境^[1]。

2 水利工程数字孪生建模方法

2.1 水利工程实体对象抽象与分类

实体对象抽象与分类以“精准映射、按需关联”为核心，构建全要素数字化体系。按结构功能将实体分为核心工程结构（大坝、水闸等承载主体）、附属设施（监测设备、启闭系统等辅助组件）、水文地质环境（水体、岸坡等周边要素）三大类。抽象时剥离冗余属性，聚焦几何形态、材料参数等安全监测核心信息，建立标准化属性词典。采用层级化逻辑细分，如将大坝拆解为坝体、坝基等子对象，确保数字对象既保留实体完整性，又满足模型分层构建与数据关联需求。

2.2 多尺度数字孪生模型构建流程

模型构建遵循“数据融合-分层建模-关联集成”流程，实现全维度覆盖。数据准备阶段整合设计图纸、勘察报告、实时监测数据等多源资料，经坐标统一、清洗形成标准化数据库。按“宏观-中观-微观”分层建模：宏观聚焦区域水利系统，构建地形地貌与水系模型；中观还原单个工程的整体结构与布局；微观精细化呈现关键部位的纹理、构造及监测点。融合BIM技术建几何模型，结合有限元理论建物理模型，依托时序数据建行为模型，最终通过数据接口集成多尺度模型，实现“全局-

局部-细节”无缝衔接，支撑调度决策与安全监测。

2.3 模型精度优化与验证方法

模型精度通过“构建优化-双重验证-闭环管控”保障。优化采用“参数校准-网格细化-误差修正”路径：几何模型用激光扫描数据比对修正尺寸，物理模型结合现场试验调整力学参数，行为模型借机器学习优化数据拟合度。验证分静态（比对几何尺寸、物理参数）与动态（同步比对仿真结果与实时监测数据，计算位移等指标偏差率）。制定差异化标准，对坝体应力等关键场景设高精度阈值，对区域地形等适当放宽。若偏差超限，启动参数重校准与模型重构，形成管控闭环。

2.4 孪生模型动态更新机制

动态更新以“数据驱动、高效响应”为原则，构建“感知-处理-更新-追溯”机制。更新数据源自实时监测、工程维护、环境变化等信息，经边缘计算节点预处理后筛选有效数据。更新分定时与事件触发。采用增量更新技术仅更新变化部件与参数，结合数据压缩减少传输负荷。建立更新日志，记录时间、内容、触发原因等信息，实现版本追溯。通过动态更新确保模型与实体实时同步，为安全监测提供精准支撑^[2]。

3 系统需求分析与总体架构设计

3.1 功能需求与非功能需求

功能需求围绕水利安全管理全流程构建，核心包含多源数据接入功能，支持不同类型监测设备的协议适配与实时数据采集；数字孪生模型管理功能，实现模型的加载、更新与版本追溯；安全监测分析功能，具备指标实时计算、状态评估与异常识别能力；三维可视化展示功能，提供场景交互、数据叠加与细节查询服务；预警推送功能，支持多级告警触发与多渠道信息送达。非功能需求聚焦系统稳定性与实用性，性能上需满足百级设备并发接入，数据处理延迟控制在5秒内；可靠性要求关键模块冗余备份，数据丢失率低于0.01%；安全性需通过权限分级、数据加密实现全链路防护；兼容性适配主流操作系统与数据库，具备可扩展性以应对工程升级需求。

3.2 系统总体架构设计

系统采用四层架构实现协同管控，感知层作为数据采集终端，部署应力计、水位计等设备及边缘计算节点，完成参数采集与初步预处理；传输层构建“无线+有线”混合网络，通过MQTT、HTTP协议传输数据，结合加密认证保障传输安全；数据层依托分布式数据库与数据中台，实现数据存储、清洗、标准化处理，为上层提供统一数据服务；应用层基于三维引擎搭建可视化平台，集成模型管理、监测分析、预警推送等模块，实现

监测数据与孪生场景的融合展示，支撑安全管理决策^[3]。

4 系统核心功能开发与实现

4.1 多源监测数据采集与融合处理

多源监测数据采集与融合处理是系统运行基础，需构建“采集-传输-处理-融合”全链路体系保障数据质量。（1）数据采集方面，明确核心数据类型，含工程结构（应力、位移等）、水文动力（水位、流量等）、环境影响及设备运行参数。按“全域覆盖、重点加密”部署终端，在大坝等核心部位设高精度传感器，库区沿线装水文设备，周边区域布气象地质终端，终端需具备抗潮湿、振动、电磁干扰能力。（2）传输安全上，采用“无线+有线+卫星”混合链路，实时性数据用MQTT协议，批量历史数据借HTTP/HTTPS异步传输，偏远区域通过卫星与LoRa补传。以AES算法全程加密数据，凭设备唯一标识与密钥实现双向认证，搭配分级访问权限，杜绝非法接入。（3）数据处理阶段，用 3σ 与格拉布斯准则识别异常，通过线性插值与卡尔曼滤波补全缺失数据，按唯一标识剔除重复记录。制定统一标准，将非结构化数据转为结构化格式，完成坐标校准与量纲归一化，构建标准数据元词典。（4）数据融合采用“数据-特征-决策”三级架构：数据层以加权平均法融合同一指标多源数据降误差；特征层提取时域、频域特征，经主成分与因子分析降维融合；决策层结合安全评估需求，用模糊综合评价与贝叶斯推理融合特征数据，完成安全状态判断，为预警提供精准支撑。

4.2 三维可视化引擎与交互功能开发

以“精准映射、直观交互”为目标，开发三维可视化系统，实现监测数据与虚拟场景的深度融合。（1）可视化引擎选型与定制。结合水利场景特点选型主流三维引擎，基于工程需求进行二次开发，优化引擎对大规模地形、复杂构筑物模型的加载与渲染性能，扩展水利专业数据接口，支持BIM模型、GIS数据及实时监测数据的无缝接入，提升引擎在水体流动、结构形变等动态效果上的仿真精度。（2）水利场景实时渲染实现。构建“宏观-中观-微观”多尺度三维场景，整合高精度地理信息、工程设计图纸与BIM模型数据，还原地形地貌、构筑物结构、水文环境等细节特征。采用LOD技术（细节层次模型）优化渲染效率，根据视角距离动态调整模型精度，结合光照模拟、材质贴图与粒子效果，实现水体反光、闸门启闭等动态场景的真实呈现，确保场景渲染帧率稳定在30fps以上。（3）多维度交互功能设计。开发基础交互功能，支持场景缩放、平移、旋转与自由漫游，实现不同尺度场景的无缝切换。设计数据关联交互功能，

点击三维模型可实时调取对应部位的监测数据、设备参数与历史记录,支持监测数据以数值、曲线、热力图等形式叠加展示。新增场景标注功能,允许用户对重点区域、异常部位进行标记与备注,支持标注信息的保存与共享,提升协作效率。(4)可视化效果优化策略。从硬件与软件两方面优化效果,硬件层面支持GPU加速与多线程渲染,提升数据处理与画面输出效率;软件层面采用数据压缩技术减少模型与纹理数据量,通过帧同步技术避免画面卡顿与撕裂。建立可视化效果评价标准,结合用户反馈调整色彩搭配、数据展示方式,确保监测信息清晰直观,降低视觉疲劳。

4.3 水利安全监测与预警模块开发

监测与预警模块是系统核心应用,通过构建“指标监测-状态评估-异常预警”技术体系,实现水利安全的主动防控。(1)安全监测指标体系构建。依据水利工程设计规范与安全管理标准,构建多层次指标体系,涵盖结构安全指标、水文安全指标与环境影响指标。结构安全指标包括坝体应力、位移、渗漏量等;水文安全指标包含水位、流量、流速等;环境影响指标涉及降雨量、气温、地质振动等。明确各指标的阈值范围、监测频率与精度要求,为监测评估提供依据。(2)实时监测与状态评估算法。开发实时数据处理模块,对采集的多源数据进行实时解析与计算,运用滑动窗口算法实现监测指标的动态更新。构建安全状态评估模型,结合工程结构力学特性与历史数据,采用机器学习算法建立指标与安全状态的关联关系,实现安全等级的自动判定,等级分为正常、关注、预警、危险四级,为后续预警提供精准依据。(3)多级预警机制设计与实现。建立“分级预警、多渠道推送”机制,根据安全等级触发对应预警,关注

级通过系统弹窗提示,预警级叠加声光报警,危险级立即向管理人员手机推送短信与APP通知。设计预警信息追溯功能,自动关联预警触发的指标数据、模型仿真结果与历史记录,明确预警原因与影响范围,为应急处置提供技术支撑。(4)异常情况可视化溯源。将异常数据与三维模型精准绑定,通过高亮、闪烁等特效标记异常部位,支持从异常指标反向追溯至对应监测点、传感器及原始数据。提供异常发展趋势可视化功能,基于历史数据与预测算法,以动态曲线、场景模拟等形式展示异常变化过程,辅助管理人员判断风险等级与处置优先级^[4]。

结束语:本文围绕数字孪生技术在水利安全监测中的应用展开研究,完成实体建模、系统架构设计及核心功能开发,构建了“数据-模型-服务”一体化监测体系。系统解决了传统监测数据融合难、状态感知不直观等问题,实现了从数据采集到预警溯源的全流程管控。但系统在极端环境下的稳定性仍需检验,未来可结合5G与人工智能技术,优化模型预测精度与远程控制能力。

参考文献

- [1]徐瑞,叶芳毅.基于数字孪生技术的三维可视化水利安全监测系统[J].水利水电快报,2022,43(1):87-91.
- [2]张建伟,李毅男,张龔,刘兰勤,张多新,王子健.基于数字孪生的水库大坝安全监测:关键技术与应用[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(3):1-9.
- [3]贺鹏,宋学雨.基于传感器与数字孪生技术的水利工程实时监测与智能决策系统研究[J].计算机应用文摘,2025,41(14):60-62.
- [4]李亚楠,李黎,袁涛,张秋胜.基于数字孪生的智慧水闸监测数据可视化及预警分析[J].数字技术与应用,2025,43(1):85-87.