

Digital Twin Technology Path for Health Monitoring and Safety Intelligent Diagnosis of Dam Bodies in Water Conservancy Projects

Jianfeng Wu

Dali Prefecture Haixiao Reservoir Expansion Project Construction Administration Bureau, Dali, Yunnan, 671600, China

Abstract

Digital twin technology offers a systematic solution for the full life cycle health management and intelligent safety diagnosis of dam structures in water conservancy projects. By establishing a closed-loop system of precise mapping, real-time interaction, and dynamic iteration between physical entities and digital spaces, it enables a transformation from passive monitoring to proactive early warning and from empirical judgment to intelligent decision-making. Currently, the digitalization of water conservancy is upgrading towards intelligence and wisdom, and digital twins are evolving from single-point engineering applications to coordinated operations at the basin and water network levels. The core task is to achieve the perception of dam structure health, risk early warning, evolution prediction, and pre-planned response, while also considering efficient water resource allocation and ecological flow guarantee. This paper systematically reviews the complete technical path of digital twins supporting dam safety and smart water conservancy in accordance with the technical logic of perception - data - forecast - dispatch - control - service, providing a reference framework for engineering practice and technological research and development.

Keywords

Digital Twin; Dam Body Health Monitoring; Safety Intelligent Diagnosis; Large Model; Ecological Flow

水利工程坝体健康监测与安全智能诊断的数字孪生技术路径

吴建锋

大理州海稍水库扩建工程建设管理局, 中国·云南大理 671600

摘要

数字孪生技术为水利工程坝体全生命周期健康管理与安全智能诊断提供了系统性解决方案, 通过构建物理实体与数字空间精准映射、实时交互、动态迭代的闭环体系, 实现从被动监测向主动预警、从经验判断向智能决策的转型。当前, 水利数字化向智能化、智慧化升级, 数字孪生从单点工程应用向流域级、水网级协同演进, 核心任务是实现坝体结构健康可感知、风险可预警、演变可预演、处置可预案, 同时兼顾水资源高效配置与生态流量保障。本文按照感知—数据—预报—调度—管控—服务的逻辑, 系统梳理数字孪生支撑坝体安全与智慧水利的完整技术路径, 为工程实践与技术研发提供参考框架。

关键词

数字孪生; 坝体健康监测; 安全智能诊断; 大模型; 生态流量

1 引言

水利工程坝体作为流域防洪、供水、发电、生态调控的关键基础设施, 其结构安全与运行状态直接关系到水系统稳定。传统坝体监测依赖人工巡检、定点仪表与事后分析, 存在数据采集不连续、传输可靠性不足、多源信息融合困难、诊断滞后、调度与生态需求协同不足等问题。数字孪生以全要素感知、全数据融合、全流程仿真、全场景智能为特征, 打通物理世界与数字空间的双向映射通道, 结合大模型、物

联网、人工智能、空天地一体化监测等技术, 构建全天候、高精度、自迭代的坝体健康监测与安全智能诊断体系。

2 水利信息智能感知与传输

智能感知与可靠传输是数字孪生的数据源头, 目标是实现坝体及周边环境全天候、全覆盖、高精度数据采集, 破解偏远地区、复杂地形下的数据获取与传输难题。

2.1 低功耗物联网与坝体内部感知网络

面向坝体内部应力、应变、渗流、渗压、位移、沉降、温度等核心参数, 采用低功耗物联网 (IoT)、微机电系统 (MEMS) 与自供电传感技术, 构建分布式、高密度、长寿命的内部感知网络。传感器采用低功耗设计与休眠唤醒机

【作者简介】吴建锋 (1981-), 男, 彝族, 中国云南大理人, 本科, 高级工程师, 从事水利工程研究。

制,延长野外无供电场景下的工作周期;通过自组网协议实现节点间自动中继与数据接力,降低单点故障影响。针对坝基、坝肩、防渗体、排水廊道等关键部位,部署阵列式传感器,实现从点监测到面监测、从离散采样到连续采集的升级,支撑坝体结构状态精细化刻画。

2.2 空天地一体化外部监测技术

融合卫星遥感、北斗高精度定位、测雨雷达、无人机巡检、水下机器人、视频监控等手段,形成空天地一体化外部监测体系。北斗系统提供毫米级至厘米级坝体表面位移监测,捕捉微小形变趋势;卫星遥感实现库区大范围地形地貌、水体范围、岸坡稳定性周期性监测;雷达与无人机弥补卫星重访周期限制,完成暴雨、洪水、地震等突发事件后的快速巡检;水下机器人对坝前淤积、水下结构、消能设施进行可视化探测,消除人工巡检盲区。

2.3 偏远地区可靠组网与数据传输

针对山区、库区、边远流域等通信薄弱区域,采用LoRa、NB-IoT、卫星通信、微波传输与自组织Mesh网络结合的混合组网方案,构建高可靠、低时延、广覆盖的传输通道。卫星通信作为兜底链路,保障极端条件下数据不中断;边缘计算节点在前端完成数据初步清洗、压缩与异常识别,降低传输带宽压力;采用多链路冗余与自动切换机制,确保感知数据实时、稳定、安全上传至数字孪生平台,为后续建模、诊断与决策提供高质量原始输入。

3 水利大数据处理与模型融合

数字孪生的核心价值在于多源数据深度融合与机理—数据混合驱动模型协同,解决传统模型精度不足、适应性差、计算效率低等瓶颈。

3.1 多源异构数据治理与融合

整合气象、水文、地质、工情、水质、生态、设备运行等多类型、多尺度、多时序数据,建立统一数据底板。通过数据清洗、去噪、补缺、标准化与时空对齐,消除异常值、缺失值与不一致性;采用时空数据库、分布式存储与云边端协同架构,支撑PB级数据高效存储与快速调用;构建数据血缘与质量追溯体系,保障数据可信、可管、可用,为模型训练与仿真提供高质量算据。

3.2 机理模型与AI模型耦合升级

将传统水动力模型、水文模型、坝体结构力学模型、渗流模型、水质模型等机理模型,与机器学习、深度学习、知识图谱等AI方法深度耦合。机理模型保证物理一致性与工程合理性,AI模型提升拟合精度、预测效率与泛化能力;通过迁移学习解决小样本、弱标注场景下的模型适配问题,通过联邦学习实现跨区域数据安全共享与模型协同训练。混合驱动模型可更准确模拟坝体应力场、渗流场、温度场演变规律,提升健康状态评估与风险推演可靠性。

3.3 大模型与数字孪生深度融合

水利大模型具备跨模态理解、多任务协同、知识推理与自然交互能力,成为数字孪生的“智慧大脑”。大模型统

一处理文本、数值、图像、视频、时空序列等多模态信息,实现监测数据自动解读、隐患智能识别、方案快速生成、指令自然下达;基于大模型的知识推理,整合行业规范、历史案例、专家经验形成坝体安全诊断知识图谱,实现风险成因、传播路径、影响范围的智能化分析;大模型与数字孪生实时交互,根据监测数据动态修正模型参数,实现虚拟镜像与物理实体同步迭代。

4 “四预”能力建设坝体安全主动防控闭环

以预报、预警、预演、预案为核心的“四预”能力,是数字孪生支撑坝体安全管控的核心应用层,实现从被动应对向主动防控转变。

4.1 智能预报

基于混合驱动模型与大模型,开展短期、中长期径流预报,暴雨洪水预报,库区泥沙淤积预报,以及坝体变形、渗流、裂缝发展等结构演变预报。机器学习模型挖掘历史数据与实时监测规律,提升径流预报准确率;结构健康预报结合应力、应变、振动等参数,预测未来数月至数年的状态趋势,为预防性维护提供依据。

4.2 智能预警

建立动态阈值与AI异常识别双驱动预警机制,根据坝体类型、等级、运行阶段设定分级预警指标。通过实时数据与模型计算,对位移超标、渗流异常、应力集中、裂缝扩展、洪水超警、地震影响等风险快速识别;结合空间定位与影响范围分析,实现分区域、分级别、分时段精准预警,避免漏报与误报,为应急处置预留时间窗口。

4.3 动态预演

依托数字孪生三维可视化平台,对洪水演进、泄洪调度、坝体响应、内涝扩散、污染迁移等场景进行全要素、全流程动态预演。支持多方案并行仿真,快速对比不同调度策略下的坝体安全、流域防洪、供水保障与生态影响;通过交互式操作,模拟极端洪水、强震、连续暴雨等极端情景,检验工程韧性与调度方案可行性。

4.4 科学预案

基于预报结论、预警等级与预演结果,自动生成或迭代优化调度预案、应急处置预案、工程维护预案。预案融合规则库、案例库与大模型推理能力,明确响应等级、处置步骤、责任主体、资源调配与信息发布时间;支持预案一键启动、指令自动下发、执行过程跟踪与效果闭环评估,形成“预报—预警—预演—预案”完整智能防控链条。

5 水资源配置与调度

5.1 AI驱动需水预测与供需平衡分析

融合产业、生活、生态、农业灌溉等多维度需水数据,结合气象预报、经济社会发展趋势,通过机器学习模型实现分区域、分行业、分时段精准需水预测。构建供需平衡动态分析模型,实时计算水库群可供水量、缺水规模与缺水分布,为调度提供目标依据。

5.2 多目标优化算法支撑复杂水系联合调度

针对水库群、水网、闸泵群构成的复杂水系，采用多目标优化算法，以防洪安全、供水保障、发电效益、生态流量、泥沙防控为优化目标，构建约束条件下的智能调度模型。

依托数字孪生平台的实时数据交互能力，模型可同步更新流域水情、工情、雨情、墒情、生态等全要素监测数据，实现调度方案的滚动优化与动态调整。针对梯级水库群、跨区域水网等跨区域工程体系，数字孪生平台打破上下游、左右岸、不同管理主体间的信息孤岛，实现全流域工程运行信息的实时共享与协同决策，通过水库群的错峰调度、联合蓄水、互补调节，最大化发挥流域水网的调蓄能力。每一套生成的调度方案，均可在数字孪生的虚拟空间中进行全流程仿真预演，直观呈现方案实施后流域水位流量过程、水库蓄水状态、坝体结构响应、供水保障程度、生态流量满足情况等全要素变化，提前识别方案潜在的风险与不足，实现“先仿真、后执行，先预演、后决策”的科学化调度管控。

5.3 生态流量智能调度与水生态保护

将生态流量保障作为核心约束纳入调度体系，基于水生生物保护、河道基流维持、湿地生态补水等需求，动态确定下游生态流量过程。数字孪生实时监测河道流量、水位、水质与生态指标，自动调整下泄流量，确保枯水期、敏感期、繁殖期生态水量足额下泄；结合大模型优化调度策略，实现防洪、供水、发电与生态保护多目标协同，推动水资源调度向绿色低碳、生态友好转型。

6 水利工程智能管控

以坝体为核心的水利工程智能管控，是数字孪生的工程级落地场景，实现健康监测、安全诊断、设备控制一体化。

6.1 坝体健康智能监测与诊断

依托全要素感知网络与数字孪生模型，对坝体结构进行全生命周期、全方位健康监测。通过多源数据融合与特征提取，识别变形、渗流、裂缝、脱空、老化等隐患；采用异常检测、趋势分析、损伤识别算法，实现隐患早期定位与定量评估；基于知识图谱与大模型推理，开展风险等级判定、成因分析与发展趋势预测，形成“监测—分析—诊断—处置”闭环。

6.2 安全智能诊断与风险评估

构建坝体安全智能诊断体系，整合结构力学、材料老化、地质条件、水文荷载、地震影响等因素，实现多灾种、多风险耦合评估。数字孪生虚拟镜像实时映射物理状态，通过仿真计算评估坝体在不同工况下的安全储备；对重大风险进行溯源分析与等级划分，输出诊断报告与处置建议，为除险加固、调度运行、报废退役提供科学支撑。

6.3 闸泵群自动化与无人化控制

融合视频识别、图像理解、目标检测与AI控制算法，实现闸、泵、阀门、启闭机等设备的远程监控、自动调节与无人化运行。视频智能分析识别设备状态、水流形态、漂浮物、人员闯入等异常情况；数字孪生平台根据水情、调度指

令与安全约束，自动生成控制策略，下发执行指令并反馈执行结果；减少现场人工操作，提升设备响应速度与运行可靠性，降低安全事故风险。

7 综合应用与公共服务

数字孪生从工程管控向流域监管与公共服务延伸，提升河湖健康监管水平与公众涉水服务获得感。

7.1 河湖健康智能监管

依托卫星遥感、无人机、地面传感与数字孪生，构建河湖全域智能监管体系。遥感技术大范围监测乱占、乱采、乱堆、乱建等问题，实现自动发现、智能识别、精准定位与闭环督办；结合水质、水文、生态数据，开展河湖健康评价、污染溯源与生态修复效果评估，推动河湖监管从被动巡查向主动发现、精准治理转变。

7.2 城市水务精细化治理

数字孪生支撑城市供排水、防洪排涝、水环境治理一体化精细化管控。对城市供水管网、排水管网、泵站、污水处理厂、河道水系进行全要素建模，实现漏损监测、爆管预警、内涝模拟、调度优化；结合实时感知数据与AI模型，动态调整泵站运行、闸门开度与调蓄设施，提升城市水系统韧性与治理精度，保障城市水安全。

7.3 公众智慧服务与智慧灌溉

面向公众提供位置化、精准化、实时化智慧洪水预警、水情信息查询、涉水政务服务等，通过移动终端精准推送预警信息，提升公众避险与参与能力。面向农业灌区，构建智能灌溉系统，基于土壤墒情、气象预报、作物需水规律与数字孪生调度，实现按需配水、精准灌溉，提升农业用水效率，促进节水增效与粮食安全保障。

8 结论

数字孪生技术重构水利工程坝体健康监测与安全智能诊断的技术体系，通过空天地一体化智能感知、多源大数据融合、机理—AI混合模型、“四预”闭环、生态智能调度、工程智能管控与公共服务协同，实现坝体安全可感、可知、可预、可控。大模型与数字孪生深度融合进一步提升系统的理解、推理、决策与交互能力，城市水务精细化治理与生态流量智能调度成为重要发展方向。

参考文献

- [1] 李惠敏. 堤防防渗施工技术在水利工程中的应用研究[J]. 水上安全, 2025, (22): 184-186.
- [2] 杨燕. 水利工程结构健康监测与长期性能评估方法研究[J]. 淮南职业技术学院学报, 2025, 25(03): 33-35.
- [3] 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, (04): 13-15.
- [4] 赵欣. 基于物非所值的老旧病险水库退役评估方法研究[D]. 西安理工大学, 2023.
- [5] 徐世娟. 耦合人机协同与深度学习的混凝土坝巡视检查方法与评价[D]. 三峡大学, 2023.