

数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用

马传浩

塔里木河流域叶尔羌河水利管理中心, 新疆 喀什 844700

[摘要]为解决传统水利工程运行管理中数据协同性差、监测预警滞后、决策效率低等问题, 结合数字孪生技术的多源数据融合、高精度建模、智能仿真特性, 可探究其在水利工程运行管理中的应用路径。通过构建包含数字底板、虚拟建模、智能应用的技术框架, 明确工程安全监测、洪水调度、全生命周期管理等核心应用场景, 并提出网络安全防护、标准化管理等保障措施。结果表明, 数字孪生技术可实现水利工程运行状态的实时映射与智能预判, 显著提升管理的精细化与智能化水平, 为智慧水利建设提供有力支撑。

[关键词]数字孪生技术; 水利工程; 运行管理; 智能监测

DOI: 10.64635/ja.2026.1134

中图分类号: TV512

文献标识码: A

Application of Digital Twin Technology in the Operation and Management of Water Conservancy Projects

Ma Chuanhao

Yarkant River Water Resources Management Center of the Tarim River Basin, Kashgar 844700, Xinjiang, China

Abstract: To address problems in the traditional operation and management of water conservancy projects, such as poor data coordination, delayed monitoring and early warning, and low decision-making efficiency, this paper explores the application pathways of digital twin technology in water conservancy project operation and management by leveraging its capabilities in multi-source data integration, high-precision modeling, and intelligent simulation. By constructing a technical framework that includes a digital base map, virtual modeling, and intelligent applications, the study identifies core application scenarios such as engineering safety monitoring, flood dispatching, and whole-life-cycle management, and proposes safeguard measures including cybersecurity protection and standardized management. The results show that digital twin technology can achieve real-time mapping and intelligent prediction of the operating status of water conservancy projects, significantly improving the level of refined and intelligent management and providing strong support for the development of smart water conservancy.

Keywords: digital twin technology; water conservancy project; operation and management; intelligent monitoring

引言

水利工程作为国家水安全保障的关键基础设施, 其运行管理水平直接关系到防洪减灾、水资源调配等核心功能的发挥。传统管理模式依赖人工巡检与离线数据分析, 存在数据孤岛突出、风险响应滞后、多部门协同效率低等短板, 难以适配复杂多变的水情与工程工况。数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟空间的双向映射, 实现数据的全周期汇聚、模型的动态迭代与决策的科学推演, 为水利工程运行管理的转型升级提供了全新解决方案。

1 数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用基础

数字孪生技术在水利工程运行管理中的落地, 需依托

多源数据融合的数字底板与高精度虚拟实体建模两大核心基础, 二者共同构成物理工程向数字空间映射的技术底座, 为后续智能应用提供数据与模型支撑^[1]。

1.1 多源异构数据融合的数字底板构建

数字底板是数字孪生水利工程的核心数据载体, 其本质是整合水利工程全生命周期的各类数据资源, 形成标准化、动态化的数据资源池。数据来源涵盖空天地一体化立体监测体系, 天基层面利用卫星遥感获取流域地形地貌、植被覆盖等宏观数据; 空基层面通过无人机倾斜摄影测量采集工程周边高精度实景影像; 地基层面依托物联网传感器网络, 实时采集大坝变形、渗流、水文水位、流量等工程运行数据; 水基层面借助无人船完成水下地形测绘, 补

充水下工程结构的监测数据。

数据采集完成后,需通过标准化治理流程消除数据异构性。针对结构化的监测数据,建立统一的分类分级标准,实现数据格式与存储规范的统一;针对非结构化的遥感影像、工程图纸等数据,采用光学字符识别、三维点云解析等技术完成矢量化转换;针对时序性的监测数据,构建数据清洗与异常值剔除算法,保障数据的准确性与完整性。最终形成的数字底板可实现水利工程地理空间信息、工程结构信息、运行状态信息的一体化存储,为虚拟建模与智能分析提供实时、可靠的数据源。

1.2 水利工程高精度虚拟实体建模

虚拟实体建模是实现物理工程数字映射的关键环节,需兼顾模型的精度与轻量化特性,满足不同运行管理场景的需求。建模过程需整合建筑信息模型、地理信息系统、倾斜摄影模型等多类模型资源,构建包含几何模型、物理模型、行为模型的多层次虚拟实体^[2]。

几何模型构建需根据工程运行管理的不同需求,划分不同精细度等级。宏观流域层面的概览管理采用低精细度模型,侧重工程与流域的空间位置关系;工程结构层面的安全管理采用中精细度模型,还原大坝、闸门等核心构筑物的内部结构;关键部件层面的故障诊断采用高精细度模型,精准刻画水轮机导水机构等设备的零部件形态。针对模型数据量大、加载效率低的问题,可采用改进二次误差测度算法与低多边形网格生成算法结合的轻量化技术,在保留工程关键几何特征的前提下,实现模型的减面优化。

物理模型与行为模型的构建则需融合水利工程的专业机理,通过嵌入水动力学、结构力学等算法,模拟工程在不同水情工况下的运行状态。例如在大坝安全分析中,物理模型可还原坝体在水压、温度等因素作用下的应力应变规律;行为模型可推演坝体变形、渗流等指标的变化趋势,为工程安全预警提供模型支撑。

2 数字孪生技术在水利工程运行管理中的核心应用场景

基于数字底板与虚拟实体模型,数字孪生技术可在水利工程运行管理的多个核心场景中发挥作用,实现从被动响应式管理向主动预防式管理的转变,提升管理决策的科学性与时效性。

2.1 工程安全智能监测与预警

工程安全是水利工程运行管理的首要任务,数字孪生技术通过构建“监测-仿真-预警”的闭环体系,实现安全风险的精准识别与提前处置^[3]。在数据采集阶段,依托部

署在大坝、闸门等关键部位的传感器,实时采集变形、渗流压力、应力应变等监测数据,并将数据同步至数字底板,驱动虚拟实体模型的动态更新。

在智能分析阶段,构建工程安全专业模型体系,包括监测数据拟合模型、安全指标预测模型与风险等级判别模型。监测数据拟合模型通过解析环境量与效应量的关联,分离水压、温度、时效等因素对工程结构的影响;安全指标预测模型基于长序列监测数据,采用机器学习算法推演关键指标的变化趋势;风险等级判别模型结合规范阈值、设计标准与历史案例,划定工程运行的安全、警戒、危险等级。

在预警处置阶段,当监测数据超出预设阈值或预测指标趋近警戒值时,系统自动触发预警信号,并通过虚拟仿真模拟风险发展趋势,为运维人员提供可视化的风险场景。同时,结合知识库中的应急预案,智能推荐处置措施,实现从“被动抢修”到“主动防控”的转变。例如在江垭皂市水库工程中,基于数字孪生的安全监测系统实现了大坝变形、渗流的实时预警,有效提升了工程的安全运行水平。

2.2 洪水演进模拟与防洪调度优化

防洪调度是水利工程的核心功能之一,数字孪生技术通过构建高精度洪水演进模型,为防洪决策提供科学、精准的仿真支撑,最大化降低洪水灾害损失。

洪水演进模型采用一维-二维耦合架构。一维河网模型基于圣维南方程组,采用有限差分法与有限体积法混合离散,模拟大尺度、多支流河道内洪水的传播速度、水位变化、洪峰演进过程,断面间距设置为100~200m,流域整体一维模拟1天洪水过程耗时仅0.7s;二维城镇淹没模型基于平面二维浅水方程,结合地貌地物、城镇建筑、堤防岸线等基础数据,实现重点城镇沿江低洼区域的水深分布、淹没范围、淹没时长的精细化推演,1天洪水过程耗时20s,满足应急调度的时效性要求;一二维耦合模型通过互相提供边界条件、临界水深法干湿判断、内插断法溃堤流量模拟等关键技术,实现河道洪水与洪泛区洪水的同步仿真,精准还原溃堤、漫滩等复杂水流运动过程。

洪水调度优化过程中,数字孪生系统实时接入流域内雨情、水情、工情数据,包括降雨量、水位、流量、水库库容、闸门开度等,驱动洪水演进模型动态运算。通过设置不同调度方案,如调整水库泄洪流量、闸门开启时序、分蓄洪区启用顺序等,对比分析各方案下的下游河道水位变化、淹没范围、受灾人口与经济损失,筛选最优调度方案^[4]。例如在澧水流域洪水调度中,数字孪生系统模拟了3种泄洪方案,最终推荐的优化方案使下游城镇淹没面积

减少 23%，受灾人口减少 18%，为防洪决策提供了科学依据。同时，系统以三维可视化形式直观展示洪水演进过程，支持决策者实时调整调度参数，实现“预演-优化-决策”的动态循环。

2.3 水利工程全生命周期协同管理

水利工程运行管理涉及勘察、设计、施工、运维等多个阶段，参与主体包括建设单位、运维单位、监管部门等，传统管理模式存在数据传递不畅、协同效率低等问题。数字孪生技术通过构建全生命周期的数字档案管理体系，打破不同阶段、不同部门之间的数据壁垒，实现工程管理的协同化与一体化。

在数据归档阶段，建立涵盖工程勘察报告、设计图纸、施工记录、运维数据的全要素档案库，采用区块链技术保障档案数据的不可篡改与可追溯。在协同管理阶段，依托数字孪生平台，不同部门可共享工程的实时运行数据与虚拟仿真结果，实现勘察设计方案的动态优化、施工质量的远程监管、运维计划的科学制定。例如在胶东调水工程中，数字孪生档案管理体系整合了多水源联合调度、多工况切换等业务数据，为跨区域水资源调配提供了数据支撑，显著提升了工程的运行效率。

3 数字孪生水利工程运行管理的关键保障措施

数字孪生技术在水利工程运行管理中的稳定应用，需依托完善的保障体系，涵盖网络安全防护、标准化管理、人才队伍建设等多个维度，为技术落地提供全方位支撑。

3.1 构建多层级网络安全防护体系

数字孪生水利工程涉及海量敏感数据与关键工控系统，网络安全是技术应用的前提与底线。需构建涵盖网络边界、数据安全、工控系统的纵深防御体系。在网络边界防护层面，实施严格的安全域划分，将生产控制区与管理信息区进行物理隔离，部署防火墙、入侵检测系统等设备，实现网络访问权限的最小化管控。

在数据安全防护层面，按照数据分类分级标准，对核心数据采用国产密码算法进行加密存储与传输，对敏感数据实施脱敏处理，防止数据泄露。在工控系统安全层面，针对水利工程闸门控制、机组调度等关键工控环节，部署工业防火墙与主机加固系统，采用白名单机制限制程序运行，阻断非法入侵路径。同时，构建网络安全态势感知平台，实现对网络攻击、数据异常等风险的实时监测与预警。

3.2 推进数字孪生技术标准化与规范化

标准化是数字孪生技术规模化应用的关键，需从数据、模型、管理三个维度建立统一的技术规范。在数据规

范方面，制定水利工程数字孪生数据采集、存储、共享的标准，明确不同类型数据的格式要求与接口协议，实现跨工程、跨流域的数据互通。在模型规范方面，统一虚拟实体建模的精度标准与轻量化准则，制定水利专业模型的封装与集成规范，保障不同模型之间的兼容性与复用性^[5]。

在管理规范方面，建立数字孪生水利工程建设流程与验收标准，明确建设单位、运维单位的职责边界，将数字孪生技术应用纳入水利工程运行管理的考核体系，推动技术应用的常态化与规范化。

3.3 加强复合型人才培养

数字孪生技术的应用需要兼具水利工程专业知识与信息技术能力的复合型人才。一方面，需加强对现有水利工程管理人员的技术培训，普及数字孪生、大数据、人工智能等前沿技术知识，提升其数字化管理能力；另一方面，需推动水利行业与高校、科研机构的合作，开设交叉学科专业，培养既懂水利工程机理又掌握信息技术的专业人才。同时，可组建流域级数字孪生技术服务团队，为基层水利工程管理单位提供技术支持与指导，解决技术落地过程中的人才短板问题。

4 应用成效与未来展望

4.1 应用成效

数字孪生技术在汉江流域、江垭皂市水库等工程中的应用实践表明，该技术可有效提升水利工程运行管理的智能化水平。在工程安全管理方面，实现了从定期巡检到实时监测的转变，风险预警响应时间缩短 60% 以上；在洪水调度方面，通过智能仿真优化调度方案，下游河道防洪压力显著降低；在全生命周期管理方面，打破了数据孤岛，多部门协同效率提升 50%。同时，数字孪生技术的应用降低了人工巡检成本，减少了因决策失误导致的工程风险，为水利工程的安全高效运行提供了有力保障。

4.2 未来展望

未来，数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用将朝着更深层次、更广范围发展。在技术融合层面，需加强与人工智能、边缘计算等技术的结合，推动虚拟模型的自主迭代与决策方案的智能生成；在应用范围层面，将从单一工程向流域级水网延伸，实现多工程联合调度与水资源优化配置；在技术创新层面，需突破高精度建模、大规模仿真等关键技术瓶颈，提升模型的计算效率与预测精度。随着技术的不断成熟与应用持续深化，数字孪生技术将成为智慧水利建设的核心驱动力，为国家水安全保障提供坚实的技术支撑。

5 结语

数字孪生技术通过构建物理工程与虚拟空间的双向映射,为水利工程运行管理提供了全新的技术路径。多源数据融合的数字底板与高精度虚拟实体建模是技术应用的基础,工程安全智能监测、洪水调度优化、全生命周期协同管理是核心应用场景,而网络安全防护、标准化管理与人才队伍建设则是技术落地的重要保障。工程实践表明,数字孪生技术可显著提升水利工程运行管理的精细化与智能化水平,有效解决传统管理模式的痛点问题。未来,随着技术的不断创新与完善,数字孪生技术将在智慧水利建设中发挥更加重要的作用,为水利工程运行管理的转型升级提供持续动力。

[参考文献]

[1]孙少楠,董国玉,焦红波,李博宇.水利工程中数字孪生虚拟实体轻量化研究[J].中国农村水利水电,2025(1):168-174.

[2]仇志峰,赵爱国,任萌萌,李星玥.原则、规范与路径:数字孪生水利工程项目档案管理体系的构建[J].档案管理,2025(2):80-83,87.

[3]裴丽娜,王泉伟,刘建磊,杨楠,贾聿颀,葛星,罗丹.基于数字孪生技术的数字水利工程勘察平台关键技术研究[J].工程地质学报,2025,33(6):2312-2324.

[4]唐文坚,申邵洪,杨恒玲,元媛,牛广利.数字孪生水利工程关键技术及其应用实践——以江垭皂市工程为例[J].长江科学院院报,2024,41(8):172-179.

[5]徐波,王昕.数字孪生水利工程网络安全风险分析和保障体系[J].人民长江,2023,54(11):242-250.

作者简介:马传浩(2000.04—),毕业院校:安阳工学院,所学专业:电子信息工程,当前就职单位名称:塔里木河流域叶尔羌河水利管理中心,职称级别:助理工程师。