

数字孪生技术在水利工程运维中的应用前景分析

齐 坚

河南水投资源开发管理集团有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：随着新一代信息技术与实体经济加速融合，数字孪生技术凭借虚实映射、实时交互、动态仿真的独特优势，正深刻重塑各行业的发展模式。本文分析数字孪生技术在水利工程运维中的应用前景。该技术以物联网、建模与仿真、数据处理分析及人工智能为核心支撑，通过构建物理实体的数字化映射实现虚实交互。在运维中可实现实时监测与状态评估、故障诊断与预测性维护、运行优化调度及应急协同处置，有效提升工程管理的精准性与时效性。其应用优势体现为提高运维效率、增强决策科学性、保障工程安全及降低成本，为水利工程智慧化运维提供重要技术路径，具有广阔应用前景。

关键词：数字孪生技术；水利工程运维；应用前景

引言：水利工程作为国家重要基础设施，其安全稳定运行关乎水资源调控、防洪减灾及社会经济发展。传统运维模式依赖人工巡检与经验决策，难以满足复杂工程系统的动态管理需求，存在响应滞后、风险预判不足等问题。数字孪生技术通过虚实融合、实时交互与智能分析，为水利工程运维提供了革新性解决方案，可实现全生命周期的精细化管理。围绕数字孪生技术的概念、关键技术体系，系统阐述其在实时监测、故障预警、调度优化及应急处置等运维场景的应用路径，并分析其技术优势，旨在为推动水利工程运维智能化转型提供理论与实践参考。

1 数字孪生技术概述

1.1 概念

数字孪生技术是指通过数字化手段构建物理实体的虚拟映射，实现物理世界与虚拟空间的实时交互与协同联动。它以数据为纽带，整合多维度信息，在虚拟环境中模拟物理实体的状态、行为及演化过程，形成“虚实共生”的闭环系统。该技术不仅能精准复刻实体特征，还可通过动态更新数据实现对物理实体的全生命周期管理，为分析、预测、优化及决策提供支撑，广泛应用于智能制造、智慧城市、工程建设等领域。

1.2 关键技术

1.2.1 物联网技术

物联网技术是数字孪生实现“虚实连接”的核心基础设施，通过各类传感器、射频识别（RFID）、无人机等感知设备，实时采集物理实体的运行参数、环境数据等信息。它构建了物理实体与虚拟模型之间的“数据通道”，确保虚拟空间能同步获取实体的动态状态。同时，物联网的边缘计算能力可对采集数据进行初步处理，降低传输压力，为数字孪生的实时性提供保障，是

实现虚实交互的前提。

1.2.2 建模与仿真技术

建模与仿真技术是构建数字孪生虚拟映射的核心手段，包括几何建模、物理建模、行为建模等。几何建模精准复刻实体的三维形态；物理建模基于力学、流体力学等原理，模拟实体的物理特性与运动规律；行为建模则通过算法刻画实体在不同场景下的响应机制。结合数值仿真工具，虚拟模型可动态模拟物理实体的运行过程，实现对复杂现象的可视化重现与推演，为分析与优化提供虚拟试验场。

1.2.3 数据处理与分析技术

数字孪生运行中会产生海量多源异构数据，数据处理与分析技术负责对这些数据进行清洗、融合、存储与挖掘。通过分布式计算、云计算等技术提升数据处理效率，利用时序分析、关联规则挖掘等方法提取数据中的隐藏规律，将原始数据转化为有价值的信息。该技术为虚拟模型的动态更新提供数据支撑，确保虚拟映射与物理实体的一致性，是实现数字孪生决策功能的关键。

1.2.4 人工智能技术

人工智能技术为数字孪生赋予智能分析与决策能力，通过机器学习、深度学习等算法对数据进行深度分析，实现状态预测、异常识别、自主优化等功能。例如，基于历史数据训练的预测模型可预判物理实体的性能衰减趋势；智能诊断算法能快速识别故障类型与成因。人工智能技术提升了数字孪生的自主性与适应性，使其从“被动模拟”升级为“主动决策支持”，拓展了技术的应用边界^[1]。

2 数字孪生技术在水利工程运维中的应用

2.1 实时监测与状态评估

2.1.1 传感器部署与数据采集

在水利工程运维中,传感器部署需结合工程结构特点与监测需求,形成全域感知网络。例如,在堤坝坝体布设应变传感器、渗压计监测结构应力与渗流情况;在闸门、泵站等设备安装振动、温度传感器捕捉运行状态;在库区及河道部署水文、气象传感器采集水位、流速、降雨量等环境数据。同时,利用无人机巡检、水下机器人等移动感知设备,弥补固定传感器的覆盖盲区。采集的数据涵盖工程结构安全、设备运行性能、水文环境等多维度信息,为数字孪生虚拟模型提供实时“输入源”,确保虚拟映射与物理工程的动态同步。

2.1.2 数据传输与处理

采集的海量水利数据通过混合传输网络实现高效流转,依托5G/6G技术保障实时性数据的低延迟传输,借助光纤网络处理大容量历史数据,边缘节点对部分关键数据(如闸门异常振动)进行预处理以快速响应。数据处理环节通过分布式计算框架清洗噪声数据、融合多源异构信息(如将结构数据与水文数据关联),并利用时间序列数据库存储动态监测数据。处理后的数据一方面用于更新数字孪生模型参数,另一方面为后续状态评估提供标准化数据集,确保分析结果的准确性与时效性。

2.1.3 状态评估与可视化展示

基于处理后的实时数据,数字孪生模型通过多维度评估算法对水利工程状态进行动态研判:结构层面,结合有限元分析评估堤坝、渠道的完整性与承载能力;设备层面,通过性能参数比对判断闸门、水泵的健康度;系统层面,综合水文数据评估防洪、供水功能的稳定性。评估结果通过三维可视化平台直观呈现,如用不同颜色标注坝体应力异常区域、动态模拟水流速变化趋势,支持运维人员通过虚拟漫游查看工程细节。

2.2 故障诊断与预测性维护

2.2.1 故障诊断模型构建

故障诊断模型以数字孪生虚拟映射为基础,整合水利工程历史故障数据与实时监测信息,构建多维度诊断框架。通过机器学习算法(如随机森林、神经网络)训练模型,将设备振动频率、结构应力变化、渗流量异常等特征参数与典型故障(如闸门卡阻、坝体裂缝、泵站电机过载)关联。同时,融入水利工程专属物理规则(如流体力学对管道磨损的影响),提升模型对复杂场景的适配性。模型可在虚拟空间模拟故障发生过程,反向推导成因,实现从“数据异常识别”到“故障根因定位”的精准诊断,为快速修复提供依据。

2.2.2 故障预测与预警

基于数字孪生模型的时序分析能力,结合设备运行趋势数据与环境变量(如水位波动、水质腐蚀度),构建故障预测模型。通过LSTM等深度学习算法捕捉参数变化规律,预判潜在故障的发生时间与影响程度,例如预测闸门启闭机构的磨损寿命、预警堤坝在持续降雨下的渗流风险。当预测值超出安全阈值时,系统自动触发多级预警:向运维人员推送文字告警,在三维可视化平台高亮标注风险区域,并同步推送历史相似案例的处置方案,为提前干预争取时间。

2.2.3 预测性维护决策支持

数字孪生技术为维护决策提供虚实结合的评估场景,在虚拟空间模拟不同维护方案的实施效果。例如,针对泵站电机轴承磨损,模拟提前更换与故障后抢修两种方案的成本、工期及对供水的影响,通过量化对比(如维护成本降低30%、停机时间缩短50%)辅助决策。系统还可结合工程运行计划(如灌溉高峰期、防洪调度期),智能规划维护窗口期,生成包含备件需求、人员调度的详细方案,实现“按需维护”“精准维护”,减少盲目运维造成的资源浪费。

2.3 运行优化与调度决策

2.3.1 水资源调配优化

数字孪生技术通过构建全域水资源虚拟模型,整合流域内水库、渠道、泵站等水利设施的实时数据(如蓄水量、输水能力)与用水需求(农业灌溉、工业用水、城市供水),实现水资源动态调配。利用智能算法模拟不同调配方案下的水流过程,评估输水损耗、供需平衡及生态影响,例如在灌溉期优化渠道闸门开度,减少沿程蒸发与渗漏损失;在枯水期动态调整水库放水节奏,优先保障生活用水。虚拟模型可量化各方案的效益(如灌溉保证率提升15%),为调度人员提供最优调配策略,实现水资源高效利用。

2.3.2 防洪调度优化

基于数字孪生的洪水演进模拟能力,结合气象预报数据(降雨量、洪峰流量)与工程实时状态(堤坝防洪标准、水库库容),构建防洪调度模型。在虚拟空间推演不同洪水情景下的淹没范围、水位涨幅,模拟闸门启闭、水库泄洪等调度措施的效果,例如通过预泄洪调节水库水位,降低洪峰压力;通过分洪区调度分流超额洪水。模型可动态输出调度方案的风险指数(如堤防漫溢概率)与减灾效益,辅助决策者在“保工程安全”与“减下游损失”间找到最优平衡,提升防洪响应的精准性。

2.3.3 发电运行优化

数字孪生技术为水电站运行提供精细化能效管理工

具,虚拟模型实时同步水轮机工况(流量、转速、出力)、水库水位、来水预测等数据,通过优化算法计算最优运行参数。例如,结合短期来水预报调整水轮机导叶开度,使机组在高效区运行;根据电网负荷需求与电价波动,动态制定发电计划,在满足调峰需求的同时提高发电量。虚拟模型可模拟不同来水情景下的发电收益,提前预警弃水风险,帮助运维人员制定应对策略,实现“节水增发”与经济效益最大化。

2.4 应急管理 with 协同处置

2.4.1 应急预案模拟与优化

数字孪生技术为水利工程应急预案提供虚拟演练平台,通过构建高保真虚拟场景,模拟溃坝、管涌、超标洪水等突发险情。基于历史案例与实时环境数据,在虚拟空间推演不同应急方案的实施过程,如抢险物资调度路径、人员疏散路线、临时截流措施的效果。通过量化分析各方案的响应时间、资源消耗及减灾效率(如某方案可减少30%淹没面积),识别预案中的薄弱环节(如物资储备点布局不合理),进而优化流程设计。

2.4.2 应急响应与协同处置

在突发险情发生时,数字孪生技术通过虚实交互中枢实现多主体协同处置。虚拟模型实时融合现场监测数据(如溃口流速、水位变化)与无人机航拍画面,生成动态险情地图,直观展示风险扩散趋势。通过云端平台打通水利、应急、气象、交通等部门的数据壁垒,实现信息共享与指令同步:调度中心可在虚拟场景中标记抢险重点区域,向现场团队推送实时导航;物资保障部门根据虚拟推演预判需求,提前调配沙袋、水泵等资源^[2]。

3 数字孪生技术在水利工程运维中的应用优势

3.1 提高运维效率

数字孪生技术通过虚实融合的自动化管理模式,大幅提升水利工程运维效率。传统人工巡检需耗费大量人力遍历堤坝、渠道等广阔区域,而数字孪生依托全域感知网络实时采集数据,虚拟模型自动生成状态报告,减少80%以上的人工巡查工作量。同时,故障诊断与预测性维护功能缩短了故障排查时间,例如通过虚拟模型定位闸门故障点,可将维修准备时间从传统的24小时压缩至4小时内。

3.2 增强决策科学性

数字孪生技术为水利工程运维决策提供数据驱动的量化依据,改变传统依赖经验的决策模式。通过虚拟模

型模拟不同调度方案、维护策略的实施效果,可量化评估各方案的收益与风险,例如在防洪调度中精确计算泄洪量与下游淹没损失的关系。同时,多维度数据融合(如结构安全数据与水文数据)帮助决策者全面掌握工程状态,避免单一指标导致的决策偏差。

3.3 保障工程安全可靠运行

数字孪生技术通过全时段、高精度的监测与预警机制,筑牢水利工程安全防线。虚拟模型实时映射工程状态,可捕捉传统方法难以察觉的细微异常,如坝体微小位移、管道腐蚀初期的流量变化,实现安全隐患的早期识别。针对极端天气、地质灾害等突发情况,虚拟推演功能可预判工程承受能力,提前采取加固措施,例如在台风来临前通过模拟优化堤坝临时防护方案。

3.4 降低运维成本

数字孪生技术通过精细化管理与资源优化配置,实现水利工程运维成本的大幅降低。预测性维护模式避免了传统“定期大修”导致的过度维护,例如根据水泵运行趋势数据制定维修计划,可减少30%以上的备件更换与人工成本。水资源调度优化降低了输水损耗,结合虚拟模型调整渠道闸门开度,使农业灌溉用水效率提升15%-20%。同时,虚拟演练替代部分实体演练,减少抢险物资的损耗与场地占用成本,而跨部门协同机制则降低了信息沟通与资源调配的冗余支出,综合运维成本可降低20%-40%^[3]。

结束语

数字孪生技术为水利工程运维带来了全新的思路与方法,在实时监测、故障预测、运行优化及应急管理等多方面展现出巨大潜力,能有效提升运维效率、增强决策科学性、保障工程安全并降低成本。尽管目前该技术在水利工程中的应用尚处于发展阶段,面临数据融合、模型精度等挑战,但随着物联网、人工智能等技术的不断进步,其应用将愈发成熟。

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(01):187-191.
- [2]卢建华,刘晓琳,张玉炳,等.基于数字孪生的水库大坝安全管理云服务平台研发与应用[J].水利水电快报,2022,43(01):181-186.
- [3]张绿原,胡露露,沈启航,等.水利工程数字孪生技术研究与探索[J].中国农村水利水电,2021(11):158-162.