

数字孪生技术在水利工程设计中的应用研究

宁崇汶
新疆塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心
DOI:10.12238/hwr.v9i4.6237

[摘 要] 在全球数字化浪潮的席卷下,水利工程领域正面临着深刻变革,数字化转型已成为不可逆转的趋势。水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分,对保障水资源合理利用、防洪减灾、促进经济社会可持续发展起着关键作用。数字孪生技术作为新一代信息技术的重要代表,为解决上述水利工程传统设计痛点提供了创新思路与有效手段。基于此,本文对数字孪生技术在水利工程设计中的应用进行了研究,以供参考。

[关键词] 数字孪生技术; 水利工程设计; 应用; 研究

中图分类号: TV **文献标识码:** A

Research on the Application of Digital Twin Technology in Water Conservancy Engineering Design

Chongwen Ning

Kaidu Kongque River Water Conservancy Management Center of Tarim River Basin in Xinjiang, Korla City

[Abstract] Under the sweeping wave of global digitalization, the field of water conservancy engineering is facing profound changes, and digital transformation has become an irreversible trend. As an important part of national infrastructure construction, water conservancy projects play a crucial role in ensuring the rational utilization of water resources, preventing floods and reducing disasters, and promoting the sustainable development of the economy and society. As an important representative of the new generation of information technology, digital twin technology provides innovative ideas and effective means to solve the above-mentioned pain points in the traditional design of water conservancy projects. Based on this, this paper studies the application of digital twin technology in the design of water conservancy projects for reference.

[Key words] Digital Twin Technology; Water Conservancy Engineering Design; Application; Research

引言

“十四五”规划为智慧水利建设制定了明确目标,旨在通过先进信息技术的深度融合,实现水利工程从传统模式向数字化、智能化的全面升级。智慧水利建设涵盖水利工程规划、设计、施工、运行维护等全生命周期,强调数据驱动、精准决策与智能管控。在此背景下,水利工程数字化转型迫在眉睫,成为提升水利行业整体竞争力与服务能力的必由之路。数字孪生通过构建与物理实体相对应的虚拟模型,实时映射和模拟其状态与行为,能够为水利工程全生命周期管理提供精准、实时的决策支持,有望成为推动水利工程行业变革性发展的核心驱动力。

1 数字孪生技术体系解析

1.1 核心技术架构

1.1.1 五维模型理论框架

水利工程数字孪生技术体系构建基于物理实体、虚拟模型、

数据、服务、连接五维模型理论框架(如下图所示),形成虚实交互的闭环系统:

维度	核心要素	水利工程应用示例
物理实体	大坝、堤防、闸门等水工建筑物及流域自然环境	三峡大坝实体结构
虚拟模型	三维BIM模型、水文模型、结构力学模型等	水库调度虚拟仿真系统
数据	传感器数据、遥感影像、历史监测数据等	实时水位流量数据
服务	模拟分析、预测预警、优化决策等功能模块	洪水演进模拟服务
连接	IoT设备、5G通信、边缘计算等基础设施	传感器网络与云端的实时数据传输

1.1.2 技术栈层级划分

技术体系分为感知层、模型层、交互层三个层级,形成从数据采集到决策应用的完整链条:



1.2 感知层关键技术

感知层作为数字孪生技术体系的基础支撑,通过构建多维度的数据采集与融合体系,实现物理世界与数字模型的实时映射。在多源数据采集方面,系统采用空天地一体化监测技术,通过无人机LiDAR获取厘米级精度的地形数据,结合卫星遥感动态监测水域面积变化,同时部署水下机器人对堤坝结构缺陷进行精细化检测。在此基础上,物联网感知网络覆盖工程全要素,在水工建筑物关键部位部署压力传感器、倾角传感器、渗流监测仪等200+类智能终端,形成密度达300个/km²的立体监测网络,实现水位、流量、应力等参数的毫秒级动态采集。

1.3 模型层关键技术

模型层构建了水利工程数字孪生的核心模拟能力,通过多尺度建模与模型耦合技术实现全要素动态仿真。在多尺度建模方面,参数化BIM建模采用Revit+Civil3D协同 workflow,构建包含材料属性、设备参数等信息的精细化模型。水文动力学仿真运用MIKEFLOOD软件建立二维非恒定流模型,通过嵌套网格技术实现洪水演进模拟。结构健康监测模型基于ANSYS构建大坝有限元模型,实时计算坝体应力应变状态。模型耦合技术通过三重协同机制突破传统建模局限:BIM-GIS集成采用空间索引算法实现三维工程模型与流域DEM的无缝叠加;水文-水力-生态模型耦合基于DHIMIKE平台构建耦合接口,实现水量调度与生态流量的协同模拟;实时-预测模型联动通过数据中台实现实测数据与预测模型的动态交互,驱动预测模型迭代更新。这些技术共同构建了覆盖工程全生命周期的仿真体系,为复杂水利工程管理提供了技术支持

1.4 交互层关键技术

交互层通过沉浸式交互与多端协同平台构建虚实融合的智能管控体系。沉浸式交互技术方面,基于HTCVive的VR系统实现1:1工程漫游;结合物理沙盘与全息投影技术,动态展示流域水文变化、工程运行状态等信息,支持多维度数据的立体可视化呈现。多端协同平台形成“云-边-端”三级架构,云端提供数据存储与分析服务,边缘节点实现现场数据预处理,终端设备支持移动端、PC端、大屏等多形态交互;跨平台数据同步采用实时通信协议实现多终端数据一致性,支持Web端三维可视化、移动端现场采集、大屏决策系统的协同工作;智能交互接口,开发统一数据接口规范,支持不同专业系统间的模型调用与数据交换,实现设计、施工、运维阶段的全流程协同。

1.5 技术体系创新特征

水利工程数字孪生技术体系通过四大创新特征突破传统工程管理范式。全要素数字化映射采用BIM+GIS+IoT技术融合,构建从毫米级结构细节到百公里级流域尺度的多维度模型;动态

自适应更新机制基于增量式数据更新技术,通过边缘计算节点实时采集传感器数据,结合卡尔曼滤波算法实现模型动态修正;智能决策支持系统集成XGBoost、LSTM等机器学习算法,构建设备故障预测模型;跨专业协同机制建立基于IFC标准的统一数据字典,开发专业模型协同接口;这些创新特征共同构成具有自主知识产权的水利工程数字孪生技术体系,为智慧水利建设提供了关键技术支撑。

2 数字孪生技术在水利工程设计中的应用

2.1 数字孪生技术在水利工程设计各阶段的应用

2.1.1 项目前期阶段

在水利工程项目的各个阶段,数字孪生技术都发挥着极为关键的作用。在项目建议书编制时,通过构建水利工程数字孪生模型,结合多年水文数据,能全面模拟和分析项目建设区域水资源状况,如在跨流域调水项目中,清晰呈现受水区在不同情况下的水资源供需问题,有力论证项目建设必要性。可行性研究阶段,借助传感器、物联网等技术,实时获取多源数据,经融合处理为研究提供准确数据支持,像水库建设项目中利用其获取地质数据展示地层结构,发现地质隐患。多方案比选环节,构建不同方案数字孪生模型,从技术、经济、环境等多维度模拟评估,如河道整治项目通过模拟对比各方案效果,选出投资成本低且综合效益高的最优方案。

2.1.2 设计阶段

数字孪生技术在水利工程全生命周期各阶段都发挥着至关重要的作用。在初步设计的总体设计环节,通过构建三维数字模型,结合地形、地质、水文等数据,直观展示建筑物位置和形式,优化布局方案,保障工程安全性与稳定性。在各专业设计中,水工结构设计利用数字孪生模型结合有限元分析优化结构,水力设计通过模拟水流运动优化水力性能。编制工程概算时,借助数字孪生模型准确计算工程量,避免投资偏差。招标设计阶段,利用数字孪生模型绘制详细准确的招标图纸,还能模拟不同招标方式和评标办法的效果,辅助招标决策。施工图设计阶段,通过数字孪生模型审查图纸,及时发现并解决尺寸标注错误、设计冲突等问题,减少施工返工和损失。

2.1.3 施工及后续阶段

数字孪生技术在水利工程施工配合的各个环节都发挥着重要作用。在技术交底环节,通过展示水利工程数字孪生模型,设计人员能向施工人员详细阐释设计意图与技术要求,如在某大型水电站施工技术交底中,展示水轮机相关安装信息,让施工人员更直观认识施工过程,提升施工准确性与效率。施工过程中,它可实时监控施工进度和质量,像某水库大坝施工,通过对比实际数据与模型,及时发现填筑进度和压实度问题并调整。设计变更管理时,利用数字孪生模型模拟分析变更方案,评估对工程性能和成本的影响,助力决策,如某河道治理工程依据模拟分析选出最优变更方案。竣工验收阶段,将工程实际与模型对比评估,保障工程符合设计要求,某水利工程借此发现设备安装偏差并整改。资料归档环节,建立数字化档案库,关联各类资

料与数字孪生模型,便于存储、查询和调用,提高资料管理效率与便捷性。

2.2在流域综合治理规划中的应用

2.2.1洪水演进动态模拟

在流域综合治理规划中,洪水演进动态模拟极为关键。其技术实现主要依托于GIS构建高精度地形模型,以此为基础,将水文模型(如HEC-RAS)与数字孪生体进行深度集成。通过GIS强大的地理空间分析能力,能精确呈现流域地形地貌,为洪水演进模拟提供精准的基础数据。而HEC-RAS水文模型可对水流运动进行科学模拟,数字孪生体则实现了对现实流域的实时映射与动态交互。三者融合,可精准预测洪水的淹没范围、水深变化及演进路径等关键信息,为防洪减灾决策提供有力支撑,如长江流域数字孪生工程借助该技术实现洪水淹没范围预测误差 $\leq 5\%$,极大提升了防洪调度的科学性与有效性。

2.2.2生态调度智能决策

在生态调度智能决策方面,构建鱼类产卵场数字孪生模型并耦合水温、流速等实时数据是核心技术路径。通过构建高度仿真的鱼类产卵场数字孪生模型,能够精准还原产卵场的复杂生态环境。同时,实时采集并耦合水温、流速等关键环境数据,这些数据如同模型的“生命体征”,随时间动态变化。鱼类的繁殖对水温、流速等条件极为敏感,通过这种耦合,模型可以模拟不同环境条件下鱼类产卵的适宜性,进而为生态调度提供智能决策依据。以珠江流域为例,通过此技术路径,使中华鲟产卵量提升25%。这一技术不仅保护了鱼类的繁殖,还维护了整个流域生态系统的平衡,为实现水利工程与生态保护的协调发展提供了有力手段。

2.3在水利枢纽工程设计中的应用

在水利枢纽工程设计领域,无人机倾斜摄影与离散事件仿真(DEVS)技术的应用,为工程施工带来了高效且精准的模拟与管理手段。无人机倾斜摄影技术能从多个角度对施工场景进行拍摄,获取高分辨率影像数据,构建出逼真的施工场景数字孪生模型。该模型全方位呈现施工现场,包括地形地貌、建筑结构布局以及施工设备分布等信息,让管理人员可实时掌握施工全貌。离散事件仿真(DEVS)则专注于模拟混凝土浇筑流程。它将浇筑过程分解为多个离散事件,如混凝土搅拌、运输、泵送及浇筑振捣等环节,通过建立数学模型,对各环节的时间、资源消耗和相互关系进行精确模拟。例如在白鹤滩水电站施工中,运用这两项

技术,可提前预判施工流程中的潜在问题,优化施工方案,使施工效率大幅提升18%,有力保障了水利枢纽工程的顺利推进。

2.4在智慧灌区精准设计中的应用

灌溉系统动态调控模型借助先进技术实现精准灌溉,其技术架构依托于对土壤模型和作物模型的深度理解与整合。通过IoT设备实时采集土壤墒情、气象数据等信息,输入到模型中。模型依据土壤的水分平衡原理以及作物在不同生长阶段的需水规律,进行实时模拟与运算。例如,在内蒙古河套灌区,该模型能够根据实时数据动态调整灌溉水量和时间,实现节水22%,灌溉均匀度达95%,极大提升了水资源利用效率。

渠道工程智能设计采用前沿技术提升设计水平。一方面,基于数字孪生的渠道糙率反演算法,通过对渠道水流状态的实时监测和分析,精准反演渠道糙率,为优化渠道设计提供关键数据。另一方面,利用遗传算法对渠道横断面进行优化设计,综合考虑水流条件、工程量、耐久性等因素,寻找最优设计方案。与传统设计需3个月相比,运用该技术仅需20天,大大缩短设计周期,且设计成果更科学合理,有力推动了智慧灌区渠道工程建设的高效与精准。

3 结论

数字孪生技术通过虚实交互、动态模拟和智能决策,正在重塑水利工程设计的方法论体系。尽管面临技术集成与数据安全等挑战,但其在提升工程效益、保障水资源可持续利用方面的潜力不可替代。未来需进一步加强跨学科协同创新,推动数字孪生技术在水利领域的规模化应用。

[参考文献]

- [1]张晓艳.基于数字孪生技术的智慧水利应用研究[J].中国战略新兴产业,2025,(03):56-58.
- [2]王展帆.数字孪生技术在水利工程项目中的应用[J].中国新技术新产品,2025,(02):107-109.
- [3]郎启庄,郎啟香,高宽.数字孪生技术赋能水利工程建设管理路径探索[J].水利建设与管理,2025,45(01):68-73.
- [4]冯海军.数字孪生技术与智慧水利建设探究[J].科技与创新,2024,(24):95-97+101.

作者简介:

宁崇汶(1990--),男,汉族,河北沧州人,中级(工程师),文章方向:水利工程运行水利工程信息化。