

数字孪生水利工程关键技术应用探析

崔 婷 徐子璐

菏泽市水务集团万福供水有限公司 山东 菏泽 274000

摘 要：数字孪生技术深度融入水利工程领域，革新传统水利发展模式。数据采集与传输技术保障信息的实时性与准确性，三维建模与仿真技术构建高精度动态虚拟模型，人工智能与机器学习技术实现智能决策。这些关键技术在水利工程规划设计、建设管理及运行调度阶段发挥重要作用，显著提升工程全生命周期管理效能。尽管面临数据融合、技术集成等挑战，通过建立标准机制、加强协同创新等对策，数字孪生技术为水利工程数字化、智能化转型提供有力支撑。

关键词：数字孪生；水利工程；关键技术；应用

引言

随着科技快速发展，水利工程建设与管理迎来数字化转型浪潮。数字孪生技术凭借虚实映射、实时交互、智能预测等特性，成为推动水利工程高质量发展的关键力量。本文聚焦数字孪生水利工程关键技术，深入剖析数据采集与传输、三维建模与仿真、人工智能与机器学习等技术内涵，探讨其在水利工程各阶段的应用实践，并针对面临的挑战提出解决对策，旨在为数字孪生水利工程的广泛应用与发展提供理论参考与实践借鉴。

1 数字孪生水利工程概述

数字孪生水利工程以数字化映射和智能化仿真为核心，将物理水利设施与虚拟数字模型深度融合，通过实时数据采集、传输和分析，构建起具备全要素、全流程、全生命周期特征的虚拟镜像系统。这项技术依托物联网传感器、大数据分析、云计算、人工智能及三维建模等前沿科技，实现对水利工程从规划设计、施工建设到运行管理的全阶段精准模拟，为水利行业带来革命性变革。在规划设计阶段，数字孪生技术利用地理信息系统（GIS）与遥感影像数据，结合水文、地质、气象等多源信息，构建高度逼真的水利工程数字模型。工程师可通过该模型模拟不同设计方案下的水流形态、防洪能力及生态影响，直观评估工程可行性与效益，优化设计参数，降低设计风险与成本。施工建设过程中，数字孪生系统通过施工机械传感器、监控摄像头等设备实时采集进度、质量、安全等数据，同步更新数字模型，实现施工动态可视化。管理人员能及时掌握施工情况，预判潜在问题，调整施工计划，保障工程顺利推进。运行管理阶段，数字孪生水利工程发挥关键作用。遍布大坝、河道、泵站等设施的传感器持续采集水位、流量、水质、结构应力等数据，经边缘计算与云端分析后输入数字模

型，驱动模型实时反映物理实体状态。基于机器学习算法，系统可对设备故障、洪水灾害等风险进行智能预警，并模拟多种应对策略，为决策提供科学依据。通过数字孪生技术，水利工程管理从传统经验驱动转向数据驱动，显著提升管理效率与精准度，增强工程安全性与运行效能，推动水利行业向智慧化、精细化方向迈进。

2 数字孪生水利工程关键技术

2.1 数据采集与传输技术

在数字孪生水利工程中，数据采集与传输技术作为信息基石，构建起物理水利系统与虚拟数字模型间的桥梁。依托高精度传感器网络，涵盖水位传感器、流量传感器、水质传感器等多类型感知设备，实现对河道水位波动、水体流速变化、水质参数指标等关键数据的实时监测。利用物联网通信协议，将采集的多源异构数据通过4G/5G蜂窝网络、LoRa低功耗广域网、光纤专线等通信链路，以毫秒级响应速度稳定传输至数据中心。在传输过程中，采用边缘计算技术对原始数据进行预处理，剔除异常值并压缩冗余信息，降低数据传输量与云端计算压力。凭借多源数据融合技术，将气象数据、地形数据、水文历史数据等进行高效整合，确保传输至数字孪生平台的数据具备完整性、准确性与时效性，为后续水利工程的分析、决策与模拟奠定坚实的数据基础^[1]。

2.2 三维建模与仿真技术

三维建模与仿真技术是数字孪生水利工程实现可视化与动态模拟的核心。基于地理信息系统（GIS）、全球定位系统（GPS）与遥感（RS）技术，对水利工程所处流域地形地貌、水利设施空间布局进行高精度三维建模。运用BIM（建筑信息模型）技术，对大坝、水闸、泵站等水利建筑物进行精细化建模，完整呈现结构细节与运行参数。通过流体力学、水动力学等数值模拟算法，

结合实时采集的水文数据，在数字孪生平台中对水流运动、洪水演进、水资源调配过程进行动态仿真。利用虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术，构建沉浸式交互场景，使水利工作者能够从多角度观察水利工程运行状态，模拟不同工况下的工程响应。该技术不仅能直观展现水利系统的运行过程，还可通过参数调整进行方案比选，为水利工程优化设计、运行调度与风险防控提供科学依据。

2.3 人工智能与机器学习技术

人工智能与机器学习技术为数字孪生水利工程赋予智能决策能力。通过深度学习算法，对海量历史水文数据、工程运行数据进行挖掘分析，建立高精度的水文预测模型，实现对水位、流量等要素的短中长期精准预报。利用强化学习技术，结合水利工程运行目标与约束条件，自动优化水资源调度策略，在防洪、灌溉、供水等多目标间寻求最佳平衡点。机器学习算法可对传感器数据进行实时异常检测，通过模式识别及时发现设备故障、水质突变等异常情况，并进行智能预警。基于自然语言处理技术，可自动分析水利工程相关的文本资料、研究报告，提取关键信息辅助决策。人工智能与机器学习技术的应用，使数字孪生水利工程能够从数据中学习规律、预测趋势，实现智能化运行管理，提升水利工程的安全性及运行效率。

3 数字孪生水利工程关键技术的具体应用分析

3.1 水利工程规划设计阶段的应用

（1）在水利工程规划设计阶段，数字孪生技术通过构建高精度三维地理信息模型，将地形地貌、地质结构、水文数据等复杂要素进行集成可视化呈现。基于地理信息系统（GIS）与计算机辅助设计（CAD）技术的融合，能够对工程选址区域进行多维度分析，精准评估地形起伏、土壤条件对工程建设的影响，为工程布局提供科学依据。（2）利用数字孪生模型开展多方案模拟推演，通过输入不同的工程参数与边界条件，如坝体高度、渠道坡度、防洪标准等，可直观展现各设计方案的水流形态、蓄洪能力、施工难度等效果。基于模拟结果的量化分析，设计师能够快速对比不同方案的优劣，优化工程结构设计，降低设计失误风险。（3）数字孪生技术还可结合流体力学、结构力学等仿真算法，对水利工程建成后的运行状态进行预演。通过模拟极端工况下的水流冲击、结构应力变化等情况，提前发现潜在的安全隐患与性能短板，为工程设计方案的调整与完善提供数据支撑，提升工程设计的科学性与可靠性。

3.2 水利工程建设管理阶段的应用

（1）在水利工程建设管理过程中，数字孪生技术构建的虚拟工程模型可与施工现场的实际进度实时关联。通过物联网设备采集施工机械运行数据、建筑材料消耗数据、人员作业信息等，同步映射至数字孪生模型，实现对工程建设进度的动态监控与可视化管理。管理人员可直观掌握各施工区域的实际进展，及时发现进度滞后环节并采取应对措施。（2）利用数字孪生模型对施工工艺进行模拟验证，针对复杂施工环节，如大坝混凝土浇筑的温度控制、深基坑支护的力学稳定性等，通过仿真分析优化施工工艺参数与流程。结合BIM（建筑信息模型）技术，对工程建设中的管线碰撞、空间冲突等问题进行提前预判，避免施工过程中的返工与浪费，提高施工效率与质量。（3）数字孪生技术可整合工程建设过程中的各类监测数据，包括沉降位移、应力应变、渗流监测等信息，构建实时监测预警系统。当监测数据超出阈值时，系统自动发出预警，并通过数字孪生模型直观展示隐患位置与影响范围，辅助管理人员快速制定应急处理方案，保障工程建设安全有序推进^[2]。

3.3 水利工程运行调度阶段的应用

（1）在水利工程运行调度阶段，数字孪生技术构建的动态仿真模型能够实时反映工程设施的运行状态。通过接入水位、流量、水质、设备工况等实时监测数据，在虚拟模型中精准复现工程实际运行场景，为调度决策提供直观的可视化界面。管理人员可快速掌握工程整体运行态势，及时发现异常情况。（2）基于数字孪生模型开展多目标优化调度，综合考虑防洪、供水、发电、生态等多方面需求，通过智能算法模拟不同调度方案下的水资源分配、水位变化、能源产出等效果。对比分析各方案的效益指标，生成最优调度策略，实现水资源的科学调配与工程设施的高效运行。（3）数字孪生技术可对极端事件进行模拟推演，如特大洪水、超强台风等灾害场景。通过预设灾害参数，在虚拟环境中模拟灾害发展过程及对水利工程的影响，评估工程的抗灾能力与薄弱环节。基于模拟结果精准研判风险形势制定应急预案，提前科学合理部署抢险资源，提高水利工程应对突发事件能力，保障区域水安全与社会稳定。

4 数字孪生水利工程关键技术应用面临的挑战与对策

4.1 面临的挑战

4.1.1 数据融合与共享难题

数字孪生水利工程涉及气象水文、地形地貌、工程结构等多源异构数据，这些数据在格式、精度和更新频率上存在显著差异。不同传感器采集的实时监测数据与历史模型数据缺乏统一映射规则，导致数据孤岛现象普

遍存在。时空尺度的不匹配使得数据融合过程中出现信息损耗,如高分辨率地形数据与低频次水文数据难以有效耦合。数据加密与隐私保护需求进一步加剧了共享难度,水利工程运行产生的关键数据在跨部门传输时,因缺乏安全可信的融合机制,难以实现高效协同利用。

4.1.2 技术集成与应用复杂性

数字孪生技术体系涵盖物联网、大数据、人工智能等多领域技术,其深度集成面临技术架构不兼容问题。物联网设备采集的海量实时数据对存储和处理能力提出极高要求,传统数据中心难以满足高并发计算需求。三维建模与仿真技术在水利工程复杂场景下存在精度瓶颈,例如河道演变过程的动态模拟难以精确反映水流与河床的交互作用。数字孪生系统的实时性与稳定性要求苛刻,多技术融合过程中任何环节的性能波动,都会导致系统整体功能失效^[3]。

4.1.3 人才短缺与认知不足

数字孪生水利工程要求从业人员兼具水利专业知识与数字技术能力,但当前复合人才培养体系尚未完善。现有水利行业技术人员对新兴数字技术掌握程度有限,难以将BIM建模、机器学习等工具应用于工程实践。信息技术人才缺乏水利工程专业背景,在系统开发过程中难以准确把握业务需求。行业内对数字孪生技术的认知存在偏差,部分人员将其简单等同于可视化展示,未能充分认识到其在工程全生命周期管理中的预测、决策支持价值,限制了技术的深度应用。

4.2 对策

4.2.1 建立统一的数据标准和共享机制

构建涵盖数据采集、存储、传输全流程的标准化体系,定义统一的数据格式与接口规范,实现多源异构数据的无缝对接。开发基于区块链的数据共享平台,利用分布式账本技术保障数据安全可信传输,通过智能合约自动执行数据访问权限管理。建立时空数据融合模型,运用时空插值算法与数据重构技术,消除不同数据在时间和空间维度上的差异,实现水利工程全要素数据的精准映射与深度融合。

4.2.2 加强技术研发与协同创新

聚焦数字孪生核心技术瓶颈,开展跨学科联合攻关,研发适用于水利工程场景的高性能计算架构与轻量化建模算法。采用边缘计算与云计算相结合的混合架构,将实时性要求高的数据处理前置到边缘节点,降低数据传输压力。开发基于深度学习的智能仿真模型,通过历史数据训练优化模型参数,提高复杂水动力过程的模拟精度。建立技术集成验证平台,对物联网、大数据等技术进行协同测试,确保系统整体性能的稳定性与可靠性。

4.2.3 加大人才培养和技术推广力度

开展针对性的技术培训与实践活动,通过案例教学与项目实操提升水利从业人员的数字技术应用能力。组建跨领域专家团队,在项目实施过程中进行技术指导,促进水利专业知识与数字技术的深度融合。搭建数字孪生技术应用示范平台,通过典型工程案例展示技术应用效果,直观呈现数字孪生在防洪调度、工程运维等场景的实际价值,引导行业加深对技术的理解与认同,推动数字孪生技术在水利工程领域的广泛应用^[4]。

结语

综上所述,数字孪生技术在水利工程中的应用为行业发展带来新契机。其关键技术在各阶段的应用显著提升了水利工程规划设计科学性、建设管理精准性和运行调度智能性。然而,数据融合共享、技术集成应用等难题仍制约其发展。未来需持续完善数据标准和共享机制,深化技术研发与协同创新,强化专业人才培养,推动数字孪生水利工程技术不断突破,助力水利行业向更高水平的智能化迈进。

参考文献

- [1]白子祥.数字孪生水利工程关键技术及其应用实践[J].数字化用户,2025(18):118-120.
- [2]唐文坚,申邵洪,杨恒玲,等.数字孪生水利工程关键技术及其应用实践[J].长江科学院院报,2024,41(8):172-179.
- [3]黄一彬,马洪羽.数字孪生技术在水利工程中的应用[J].水电站机电技术,2023,46(6):85-86.
- [4]崔雷.数字孪生技术在现代化水利工程中的应用[J].科技与创新,2023(22):143-145,148.