

数字孪生技术在水利工程管理中的应用前景分析

王 可

河南省前坪水库灌区工程有限公司 河南 洛阳 471000

摘 要：数字孪生技术通过融合建模仿真、物联网等技术，构建物理实体的数字化映射，在水利工程施工管理中展现显著价值。其可支撑工程全生命周期管理，优化规划设计与施工运维；助力洪水调度与水资源配置，提升应急响应效率；强化水质监测与污染防控，降低风险成本。随着与5G、区块链等技术融合，该技术将推动水利管理向智能化、协同化升级，为工程决策提供数据驱动支持，在提升管理效能、降低成本等方面前景广阔。

关键词：数字孪生技术；水利工程施工管理；应用前景

引言

水利工程施工管理涉及复杂系统与多环节协同，传统模式面临数据割裂、决策滞后等挑战。数字孪生技术以实时映射、动态仿真为核心，为破解这些难题提供新路径。本文先概述该技术的技术构成与优势，再具体分析其在工程全生命周期管理、洪水调度、水质防控等方面的应用，进而探讨其在提升决策水平、强化跨区域协同等方面的前景，旨在为水利工程施工管理的智能化发展提供参考。

1 数字孪生技术概述

数字孪生技术，作为当下前沿且极具变革性的科技领域，正深刻影响着诸多行业的发展进程。从本质而言，它是对物理实体或过程的数字化映射，通过构建高度逼真的虚拟模型，与现实世界中的对应物形成实时、精准的交互与同步。在技术构成上，数字孪生融合了建模仿真、物联网、云计算、大数据等多种先进技术。建模仿真为其核心，通过对物理实体的全方位数字化建模，精准还原其结构、行为与性能特征，为后续的模拟分析奠定基础。物联网技术则负责实时采集物理实体运行过程中的各类数据，从设备的关键参数到环境的细微变化，为数字孪生模型提供源源不断的信息输入，确保虚拟模型与现实实体的状态高度一致。云计算强大的计算与存储能力，支撑着海量数据的处理与存储，保障数字孪生系统高效稳定运行。大数据技术从海量数据中挖掘有价值信息，助力优化决策、预测趋势。在实际应用中，数字孪生技术优势显著。以复杂系统的运行维护为例，通过数字孪生模型，能够在虚拟环境中提前模拟系统可能出现的故障场景，分析故障原因与影响范围，进而制定针对性的维护策略，极大提升系统的可靠性与稳定性，降低维护成本与停机时间。在产品设计研发环节，数字孪生允许设计师在虚拟空间中对产品进行多轮

测试与优化，快速验证设计思路，减少物理原型制作次数，缩短产品上市周期。随着技术的不断演进，数字孪生正朝着更精细化、智能化方向发展。未来，其将深度融入更多行业，为各领域带来前所未有的创新机遇与发展动力，助力构建更加高效、智能、精准的未来世界。

2 数字孪生技术在水利工程施工管理中的具体应用

2.1 工程全生命周期管理

在水利工程从规划设计到退役的全生命周期里，数字孪生技术宛如一位全方位的智慧伙伴。规划设计阶段，借助该技术构建高精度虚拟模型，涵盖工程空间结构，模拟不同工况运行状态，通过模拟环境因素与水流条件优化工程布局 and 结构参数。如某大型水利枢纽规划，数字孪生模型模拟不同坝型稳定性，但因未充分纳入区域地质活动长期数据，对坝体抗裂性能仿真与实际监测有偏差。建设施工阶段，数字孪生模型与现场施工紧密相连。物联网设备实时采集施工进度、材料使用、设备运行等数据并反馈至模型，模型实时呈现施工状态，发现问题及时预警并提供调整建议。如某灌区渠道混凝土浇筑，传感器监测参数，模型评估浇筑质量，但因传感器布设密度不足，对局部温差应力模拟精度受限，未提前发现裂缝隐患^[1]。工程投入运营后，数字孪生持续发挥关键作用。它对工程设施进行24小时实时监测，分析运行数据，预测潜在故障，提前安排维护，延长设施使用寿命，降低运维成本，实现水利工程全生命周期的精细化、智能化管理。

2.2 洪水与水资源调度

面对复杂多变的洪水与水资源调配问题，数字孪生技术为水利工程施工管理提供强大决策支持。在洪水防御方面，数字孪生系统整合流域多源数据，构建精准洪水演进模型。实时监测雨情、水情，强降雨或有洪水迹象时迅速模拟。如某流域洪水预演，系统可模拟洪水在河道

等区域的演进路径、流速等,但因支流突发性汇流数据接入延迟,对洪水峰值到达时间预测与实际有1-2小时偏差。不过仍能提前预测关键信息,为防洪指挥部门争取决策时间,据此科学制定防洪调度方案,合理调控水库泄洪量、启用分洪区时机,减轻灾害损失。在水资源调度上,该系统综合考虑工农业、居民生活、生态用水等多元需求。实时监测各区域需水变化及水资源存量,用优化算法制定调配方案。如某流域旱季调度,依用水优先级与需求精准调配水库水资源,但因部分农业灌区用水计量数据上传不及时,影响调度方案动态调整精度。最终可动态调整水资源分配,提高利用效率,实现科学、高效、可持续调配^[2]。

2.3 水质监测与污染防治

在水质监测与污染防治领域,数字孪生技术展现出卓越的应用价值。通过在水体中广泛部署各类水质传感器,实时采集酸碱度、溶解氧、化学需氧量、重金属含量等关键水质指标数据。这些数据被实时传输至数字孪生模型,模型对其进行整合、分析与可视化呈现,让管理人员能直观掌握水体实时水质状况。某湖泊流域的数字孪生系统曾因部分传感器老化,导致溶解氧数据异常波动,模型虽及时发出预警,但初期误判为突发性污染。数字孪生模型能够模拟污染物在水体中的扩散路径与影响范围。当发生突发污染事件,如工业废水泄漏、化学品运输事故等,输入污染物种类、泄漏量、泄漏位置等信息,模型迅速模拟污染物在水流作用下的扩散轨迹,预测不同时段、不同区域的污染程度。某河道发生化学品泄漏时,模型模拟的污染扩散范围与实际监测相比,因未充分考虑河床沉积物吸附特性,导致对近岸污染程度的预估偏低。根据模拟结果,制定针对性的污染防治与应急处置方案。比如确定最佳的截污、治污位置与措施,调度相关设备进行水质净化处理,及时阻断污染扩散,保护水体生态环境与用水安全。长期来看,数字孪生系统还能对水质变化趋势进行分析预测,为流域水环境综合治理提供数据支撑与决策依据。

2.4 应急管理 with 风险预警

应急管理与风险预警关乎水利工程安全及周边区域人民生命财产安全,数字孪生技术在此发挥着不可替代的作用。数字孪生系统深度挖掘分析水利工程设施运行、环境、历史事故等多源信息,构建完善风险评估模型,精准识别大坝结构隐患、设备故障、极端天气引发的洪水等各类风险。某水库大坝的数字孪生系统因未充分纳入近五年坝基渗透监测的非结构化数据,对局部渗漏风险预警灵敏度不足。针对不同风险,系统设定相应

预警阈值与级别,数据触阈值即发出预警信号并多渠道通知管理人员。系统利用模拟仿真技术,针对预警事件迅速生成应急处置预案,如预测大坝渗漏时,会模拟渗漏态势,提供抢险物资调配等详细策略。某次演练发现,模型对复杂地质条件下渗漏路径的模拟与实际勘察有差异,影响部分抢险措施有效性^[3]。在应急处置过程中,数字孪生系统持续跟踪现场情况,实时反馈处置效果,为调整应急方案提供依据,助力快速、高效解决突发应急事件,最大程度降低风险损失,保障水利工程安全稳定运行与周边区域社会经济平稳发展。

3 数字孪生技术在水利工程管理中的应用前景

3.1 智能化决策水平提升

(1) 依托数字孪生技术构建的动态仿真模型,能对水利工程运行中的海量数据进行实时分析与深度挖掘,把分散的水文、地质、工程结构等信息转化为有决策价值的知识图谱,让决策依据从经验驱动迈向数据驱动。通过模拟不同调度方案下的水流、负荷及生态响应,精准量化效益,为管理者提供优劣对比,避免决策主观性与盲目性。(2) 随着人工智能算法与数字孪生的深度融合,模型可自主学习历史决策案例与工程运行规律,形成具备预测能力的智能决策辅助系统^[4]。例如在遭遇极端天气时,系统能在分钟级时间内完成数十种应急调度方案的模拟推演,自动筛选出兼顾防洪安全、灌溉需求与生态保护的最优策略,并同步生成执行步骤与资源调配清单,大幅提升决策效率与精准度。(3) 通过构建工程全要素的数字镜像,可实现决策效果的可视化预演,将抽象的决策方案转化为直观的动态场景。管理人员能在虚拟环境中观察不同决策对水位变化、工程结构应力、周边水环境的影响过程,提前发现潜在矛盾与风险点,对决策方案进行迭代优化,确保最终执行的策略具备更强的适应性与容错性。

3.2 跨区域协同管理强化

(1) 数字孪生技术打破了水利工程管理中地理空间与信息孤岛的限制,通过构建覆盖全域的统一虚拟协同平台,实现不同区域、不同层级工程数据的实时共享与动态交互。各管理单元可基于同一套数字模型开展工作,上游水库的水位调度数据、下游灌区的用水需求信息、跨流域的水文监测数据能在虚拟空间中实现无缝衔接,消除信息传递的滞后性与偏差。(2) 借助数字孪生的同步仿真能力,跨区域的联合调度可在虚拟环境中完成预演与协同优化。进行跨流域水资源调配时,参与方可共同查看传输路径、损耗及效益,提建议并验证,形成共识调度方案,避免因信息不对称导致的协同低效问

题。(3)通过数字孪生平台构建的动态协同机制,可实现跨区域应急资源的智能化调配。当某一区域发生工程险情时,系统能基于虚拟模型快速定位周边可调用的抢险设备、物资储备及技术力量,模拟不同调配路线的时效性与可行性,自动生成资源调度最优路径,并同步推送至各协同单位,形成高效联动的应急响应网络。

3.3 成本与风险降低

(1)数字孪生技术通过全生命周期的虚拟模拟与优化,显著降低工程建设与运维阶段的资源消耗。工程设计阶段,可借助虚拟测试验证不同结构方案的材料强度与耐久性,精确算出最优建材用量,防止过度设计浪费材料;运维阶段,基于设备运行数据做预测性维护,能提前发现故障隐患、制定检修计划,减少突发停机损失及应急抢修成本^[5]。(2)借助数字孪生的仿真推演能力,可将工程运行中的潜在风险在虚拟空间中提前暴露并量化评估,从而采取预防性措施降低实际损失。例如通过模拟大坝在长期水流冲刷下的结构劣化过程,计算不同维护周期对应的风险概率与成本投入,找到风险与成本的平衡点,制定经济高效的维护策略,避免因风险失控引发的大规模修复费用。(3)数字孪生技术推动的精细化管理模式,能实现资源配置的动态优化,进一步压缩冗余成本。通过实时监测灌区的土壤墒情、作物需水规律,结合气象预测数据,模型可精准计算各片区的最优灌溉水量与时间,避免水资源的过度投放;同时基于设备运行效率的动态分析,合理安排机组启停与负荷分配,降低能源消耗,从多维度实现成本的集约化管控。

3.4 与新兴技术融合拓展应用边界

(1)数字孪生与5G技术的融合,可实现工程监测数据的超高速传输与低延迟交互,为远程实时控制提供技术支撑。借助5G网络的大带宽特性,能将高清视频监控、三维模型实时渲染等大容量数据快速传输至管理终端,管理人员可在远程对虚拟模型进行沉浸式操作,同步控制现场闸门、泵站等设备的运行状态,拓展远程运维的应用场景。(2)当数字孪生与区块链技术结合,可

构建工程数据的可信共享与溯源体系。工程建设过程中的材料质量数据、施工验收记录、设备运行参数等关键信息,通过区块链的分布式记账与不可篡改特性存储于数字孪生系统,既保障数据在跨主体协作中的真实性,又能实现全生命周期数据的可追溯,为工程质量责任认定与资产价值评估提供可靠依据。(3)数字孪生与数字孪生体的交互融合,将催生更复杂的系统级应用。例如将水利工程数字孪生模型与流域生态数字孪生、城市供水数字孪生进行互联,构建多维度协同的虚拟生态系统,模拟水利工程调度对流域生态链、城市水循环的连锁影响,实现从单一工程管理向流域综合治理的应用拓展,为跨领域协同决策提供全新技术路径。

结语

综上所述,数字孪生技术为水利工程管理带来了革命性变革。从工程全生命周期的精细化管控,到洪水调度、水质防控的精准化决策,再到应急管理的高效化响应,其应用已展现出显著成效。未来,随着与新兴技术的深度融合,该技术将进一步提升水利管理的智能化与协同化水平,有效降低成本与风险,为水利工程的可持续发展注入强劲动力,推动水利行业迈向更高效、安全的发展新阶段。

参考文献

- [1]檀焰春,杨丁杰.水利管理中数字孪生技术的应用现状与前景[J].治淮,2024(11):59-60.
- [2]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.
- [3]彭金波.浅谈数字孪生技术在水利工程运行管理中的现状分析与前景展望[J].城市建设理论研究(电子版),2022(33):166-168.
- [4]林运东,张龙,刘勇.数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J].黑龙江水利科技,2025,53(3):168-170.
- [5]王佳浩,管亚雯.数字孪生技术在水利工程中的应用[J].科学与信息化,2025(10):61-63.