

数字孪生技术在水资源管理中的应用研究

赵诗岳¹, 廖丹¹, 周洁²

¹湖北省恩施州水文局 湖北恩施

²湖北省荆门市水文局 湖北荆门

【摘要】数字孪生为水资源管理智能化转型提供重要技术路径。文章系统梳理数字孪生在水资源领域的技术架构与核心特征,重点分析其在流域防洪、水资源调度、智慧灌区、城乡供水、水生态治理等关键场景的应用模式与运行机制,总结实际应用成效与当前推广中的共性问题,并针对性提出优化方向与发展策略,可为智慧水利建设与水资源精细化管理提供参考。

【关键词】数字孪生; 水资源管理; 智慧水利; 流域调度; 水生态保护; 预报预警预演预案

【收稿日期】2026 年 3 月 5 日

【出刊日期】2026 年 4 月 18 日

【DOI】10.12208/j.aes.20260003

Research on the application of digital twin technology in water resources management

Shiyue Zhao¹, Dan Liao¹, Jie Zhou²

¹Hydrological Bureau of Enshi Prefecture, Hubei Province, Enshi, Hubei

²Hydrological Bureau of Jingmen City, Hubei Province, Jingmen, Hubei

【Abstract】Digital twin provides an important technological path for the intelligent transformation of water resources management. The article systematically reviews the technical architecture and core features of digital twins in the field of water resources, with a focus on analyzing their application modes and operational mechanisms in key scenarios such as watershed flood control, water resource scheduling, smart irrigation areas, urban and rural water supply, and water ecological governance. It summarizes the practical application effects and common problems in current promotion, and proposes targeted optimization directions and development strategies, which can provide reference for smart water conservancy construction and refined management of water resources.

【Keywords】Digital twin; Water resource management; Smart water conservancy; Watershed scheduling; Water ecological protection; Forecast, early warning, rehearsal and emergency plan

前言

在气候变化与社会经济快速发展的背景下,水资源时空分布不均、供需矛盾突出、水生态压力持续加大,传统管理模式已难以适配现代化需求。传统水资源管理依赖人工监测、经验决策,存在数据滞后、信息孤岛、响应迟缓、调度粗放等问题,在极端水文事件应对与精细化管控上存在明显短板。数字孪生作为物理世界与虚拟空间深度融合的新一代技术,通过全要素感知、高保真建模、实时映射与动态仿真,实现水资源系统全周期刻画与全流程优化,成为智慧水利建设的核心支撑。目前该项技术已从试点示范逐步走向规模化应用,在流域防洪、水资源调度、农业灌溉、城乡供水、水生态修复等领域形

成成熟应用模式。本文结合技术体系与实践应用,系统阐述数字孪生在水资源管理中的应用逻辑、实施效果、现实挑战与发展路径,为技术推广与治理效能提升提供理论与实践参考。

1 数字孪生水资源管理核心技术架构与特征

1.1 技术内涵与核心特征

数字孪生是以物理水资源系统为原型,构建同步映射的虚拟镜像模型,通过数据驱动实现虚实交互、仿真推演与迭代优化的技术体系。相较于传统水文模型与信息化管理手段,其核心特征体现在四个方面:一是全要素动态映射,覆盖水文气象、水利工程、用水对象、水生态环境等多维信息,实现全域运行状态可视化呈现;二是多源数据融合贯通,整

合监测、地理、社会经济与管理数据,完成时空统一与标准化处理,破除数据碎片化问题;三是多情景仿真预演,可模拟不同来水、调度、污染等情景下系统变化趋势,支持多方案比选与风险预判;四是全流程闭环迭代,依托实际运行数据持续修正模型参数,不断提升模拟精度与决策可靠性^[1]。

1.2 总体技术架构

数字孪生水资源管理系统采用四层分层架构,实现从数据采集到业务应用的全链条支撑。感知层作为数据源头,构建天空地一体化监测网络,部署水位、流量、水质、土壤墒情、工程运行、视频监控等设备,实现全域高频次数据采集,保障虚拟模型与物理实体同步更新。数据底板层负责数据汇聚与治理,对多源异构数据进行清洗、转换、关联与标准化入库,打通水利、生态、住建、农业等数据壁垒,形成统一规范的数据资源池,为模型运算提供稳定基础。模型引擎层为核心运算单元,集成水文水动力学、水资源配置、水质输移、工程调度及智能预测模型,实现多过程耦合模拟与多情景并行推演,提升复杂条件下分析与预判能力。

2 数字孪生在水资源管理中的核心应用场景

2.1 流域防洪减灾

流域防洪是数字孪生的核心应用场景,以预报、预警、预演、预案一体化为目标,转变传统被动抢险模式。系统实时汇聚气象降雨、河道水情、水库工情、地形地貌等数据,通过模型动态模拟洪水演进过程,精准确定淹没范围、风险等级与影响区域,自动生成分级预警信息,大幅缩短响应时间。依托虚拟仿真平台,可对水库泄洪、闸站调度、蓄滞洪区运用等方案进行预演对比,优选安全高效的执行路径,结合人口与设施分布制定转移路线与处置方案,提升流域防洪协同处置能力,实现从事后处置向事前预防、从经验调度向智能调度转变。

2.2 水资源优化调度

针对水资源时空分布不均、多用户供需冲突等问题,数字孪生实现动态化精准调度。系统整合水库蓄水、河道来水、灌区与城乡用水、生态流量管控等数据,构建多目标优化调度模型,统筹生活、生产、生态用水需求,自动生成日常调度与应急调配方案。在跨流域调水、水库群联合运行中,可根据来水波动与用水变化实时调整方案,远程控制闸泵设施,提升水资源调配效率。针对干旱缺水、汛期调蓄

等特殊情景,通过多情景推演提前制定储备方案,有效缓解供需矛盾,实现水资源高效配置与综合效益最大化。

2.3 智慧灌区管理

农业用水是水资源消耗的主要领域,数字孪生推动灌区灌溉向精细化转型。系统全面监测渠系运行、土壤墒情、作物需水与气象条件,结合作物生长规律制定精准灌溉计划,实现分区域、分时段、分作物配水。通过远程闸门控制与智能计量,减少输水渗漏与人为浪费,提升输水效率与用水公平性^[2]。

2.4 城乡供水安全保障

城乡供水关乎民生保障,数字孪生构建水源、水厂、管网、用户全链条智慧管控体系。实时监测水源水质、制水工艺、管网压力流量与漏损点位,对水质异常、压力突变、管网破损等问题自动预警,快速定位故障并推送处置信息,缩短抢修时间。通过模拟不同工况下供水运行状态,优化水厂调度与压力调控,降低管网漏损率,保障供水连续性。整合用户用水数据实现供需平衡分析,支撑高峰期与应急状态下供水调配,提升城乡供水安全与服务水平。

2.5 水生态保护与修复

在水生态治理领域,数字孪生实现动态监管、精准溯源与科学修复。系统整合水质、水文、入河排污、生态断面等数据,模拟污染物输移扩散规律,精准识别污染源与污染路径,为执法监管提供依据。针对河湖生态脆弱区,模拟生态流量保障、水系连通、湿地修复等方案效果,优选治理路径并量化修复成效。对水域岸线与生态空间开展可视化监管,及时发现违规占用与破坏行为,实现常态化智能管控,推动水生态环境持续改善^[3]。

3 应用成效与实践价值

3.1 提升决策科学性与时效性

数字孪生实现数据快速汇聚与模型高效运算,大幅压缩传统人工分析与方案编制时长,决策模式由经验主导转向数据驱动。通过多情景预演规避单一方案风险,提升防洪调度、水资源配置、生态治理等决策的合理性,预警预判提前量显著增加,为应急处置预留充足时间,有效降低各类水事风险。

3.2 提高水资源利用与节水水平

在精准调度与智能配水支撑下,农业灌溉与城乡供水中的无效耗水明显减少,输水损失与管网漏损得到有效控制,水资源配置更趋均衡。全流程计

量与精细化管理推动用水方式由粗放转向集约, 在保障生产生活需求的同时, 提升区域水资源承载能力, 缓解供需矛盾。

3.3 降低运维成本与管理负担

自动化感知采集与远程智能操控减少人工巡查、现场值守与数据汇总工作量, 降低人力与时间成本。智能预警与故障定位提升运维处置效率, 减少调度失误与处置延迟造成的资源浪费, 推动运维管理向轻量化、高效化转型^[4]。

3.4 推动管理模式系统性升级

数字孪生打破部门与场景间的数据壁垒和业务分割, 实现监测、模拟、决策、执行、评估全流程闭环管理, 构建一体化管控体系。全要素可视化呈现提升管理直观性, 推动传统分散、静态、事后管理, 向协同、动态、事前预防模式转变, 为智慧水利建设奠定基础。

4 应用面临的主要挑战

4.1 数据感知与融合存在短板

中小流域与偏远地区监测站点密度不足, 存在监测盲区, 部分设备采集频率与稳定性难以满足实时映射需求。多源数据时空标准不统一, 缺失、异常、重复问题影响模型精度, 跨部门数据共享机制不健全, 水利、生态、农业等数据互通不畅, 形成数据壁垒制约系统效能^[5]。

4.2 模型耦合与仿真精度不足

水资源系统涉及多物理场、多过程耦合, 复杂下垫面与极端情景下模型适配性较差, 多模型集成难度较大。部分区域基础地理与水文地质资料精度有限, 模型参数率定依赖经验, 自进化与泛化能力较弱, 突发情景仿真偏差较大, 难以完全满足实战要求。

4.3 算力支撑与基层适配性薄弱

高保真仿真与大规模推演对算力要求较高, 基层硬件设施与算力资源不足, 系统运行速度与响应时效难以保障。云边协同机制不完善, 实时调度场景存在传输延迟与算力分配不均问题, 影响指令执行效率, 基层推广存在成本与技术门槛。

4.4 标准体系与人才保障不健全

数字孪生水利建设在数据接口、模型规范、评价体系、网络安全等方面缺乏统一标准, 不同系统兼容性差, 难以互联互通。复合型人才短缺, 兼具水利专业与信息技术、建模能力的人才不足, 系统建设、运维与优化能力受限, 影响技术长效落地^[6]。

5 优化路径与未来发展方向

5.1 完善全域感知与数据融合体系

加密监测站点布局, 补齐偏远区域与中小流域监测短板, 选用高稳定性智能终端, 提升数据采集连续性与准确性。

5.2 推进模型集成优化与智能升级

推动机理模型与数据驱动模型融合, 提升复杂场景仿真精度, 研发轻量化模型适配基层算力条件。完善模型参数库与自校准机制, 依托实时数据动态优化参数, 提高极端情景模拟能力, 构建标准化模型组件库, 提升模型复用性。

5.3 构建云边协同算力支撑体系

采用云端集中算力与边缘节点协同部署模式, 云端支撑大规模仿真推演, 边缘节点保障实时监测与指令执行, 降低基层硬件投入。

5.4 健全标准体系与人才保障机制

加快数据、模型、应用、安全等行业标准制定, 推动跨区域、跨系统互联互通。加强校企合作与行业培训, 培养水利与信息复合型人才, 完善运维服务机制, 保障系统稳定高效运行。

5.5 深化业务融合与场景创新

以业务需求为核心, 深化防洪、调度、供水、生态、灌区等场景融合应用, 打造实战化功能模块。结合人工智能、物联网等技术拓展应用边界, 推进智慧监管、远程运维、公众服务创新, 实现技术与业务深度融合^[7]。

6 结语

数字孪生技术为水资源管理现代化提供了关键支撑, 有效破解传统管理模式痛点, 在决策效率、资源利用、运维成本、管理模式等方面实现显著提升, 应用价值广泛认可。当前技术推广仍面临数据、模型、算力、标准、人才等多重挑战, 需以需求为牵引, 完善感知、数据、模型、应用全链条体系, 强化技术适配与业务融合, 健全配套保障机制。未来随着技术日趋成熟, 数字孪生将全面融入水资源管理全流程, 实现精准监测、智能决策与高效调度, 持续提升水资源治理能力, 为水安全保障、水生态改善和可持续利用提供坚实支撑, 助力智慧水利与生态文明建设^[8]。

参考文献

- [1] 陈程. 数字孪生技术在水文水资源监测中的应用与发展

- 研究[J].水上安全,2025,(23):25-27.
- [2] 梁雪容,关森炜,覃禹铖.数字技术在水资源监测管理中的应用[J].中国资源综合利用,2025,43(11):73-75.
- [3] 刘庆彪.基于数字孪生技术的水资源高效利用研究[J].水上安全,2024,(02):70-72.
- [4] 郭峰.数字孪生技术在空管通信光缆资源管理中的应用与研究[J].中国宽带,2023,19(12):154-156.
- [5] 吕娜.数字技术在高校人力资源管理中的应用策略研究[J].广东经济,2025,(16):62-64.
- [6] 孔明.数字技术在新时代人力资源管理中的应用[J].大众投资指南,2025,(10):154-156.
- [7] 马北玲,敖瞳,朱康福,等.数字技术赋能半导体制造业水资源绿色管理的理论模式与实践探索[J].资源科学,2023,45(12):2311-2321..
- [8] 王敏.数字技术在新时代人力资源管理中的应用——评《人力资源服务与数字化转型》[J].科技管理研究,2021,41(15):241.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS