

# 水利工程运行中数字化管理技术应用探讨

艾尔肯·艾合麦提 古丽阿依姆·莫敏

新疆维吾尔自治区塔里木河流域叶尔羌河水利管理中心

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6679

**[摘要]** 随着信息技术的飞速发展,数字化管理技术已成为推动水利工程运行管理现代化转型的核心驱动力。本文系统探讨了以数字孪生技术为核心的数字化管理技术在水利工程运行中的应用、关键技术与实践,通过构建“天空地水工”一体化监测感知体系与数字孪生平台,水利工程运行正从传统的“经验驱动”模式转向“数据驱动与模型支撑”的智能决策模式,显著提升了洪水预见期、水资源调配精度和工程安全风险管控能力。本文结合一些实际案例,深入剖析了数字化管理在流域防洪、水资源优化配置及工程全生命周期管理中的具体应用与成效,并针对当前面临的数据集成、模型精度与人才支撑等挑战,提出了相应的对策与未来展望。

**[关键词]** 水利工程; 数字化管理; 数字孪生; 智能运维; 水资源调度

**中图分类号:** TV5 **文献标识码:** A

## Discussion on the Application of Digital Management Technology in the Operation of Water Conservancy Projects

Aierken Aihemaiti Guliyayimu Momin

Yarkand River Water Conservancy Management Center, Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashgar

**[Abstract]** With the rapid development of information technology, digital management technology has become the core driving force for promoting the modernization transformation of water conservancy project operation and management. This paper systematically explores the application, key technologies and practices of digital management technology centered on digital twin technology in the operation of water conservancy projects. By constructing an integrated monitoring and perception system of "space-air-ground-water-engineering" and a digital twin platform, the operation of water conservancy projects is shifting from the traditional "experience-driven" mode to an intelligent decision-making mode featuring "data-driven and model-supported", which has significantly improved the flood forecast lead time, the precision of water resources allocation, and the capability of engineering safety risk management and control. Combining with practical cases, this paper conducts an in-depth analysis of the specific applications and effects of digital management in basin flood control, optimal allocation of water resources and the whole-life-cycle management of projects. In view of the current challenges such as data integration, model accuracy and talent support, corresponding countermeasures and future prospects are put forward.

**[Key words]** Water conservancy projects; Digital management; Digital twin; Intelligent operation and maintenance; Water resources scheduling

### 引言

水利工程作为国家基础设施的重要组成部分,承载着防洪减灾、水资源调配、农业灌溉和生态保护等多重使命。传统的工程运行管理高度依赖人工巡检与经验判断,在面对极端天气频发、水资源需求日益复杂及工程设施老化等多重挑战时,其反应滞后、决策粗放、效率低下的局限性日益凸显。在全球数字

化转型浪潮与中国推进“新基建”、“数字中国”战略的宏观背景下,将大数据、物联网、人工智能、数字孪生等前沿技术深度融合于水利工程运行管理,已成为提升行业治理能力、发展水利新质生产力的必然选择。近年来,从国家部委到地方水行政主管部门,均高度重视水利数字化建设。水利部系统谋划推进数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生水利工程三位一体的数字孪

生水利体系建设，旨在强化预报、预警、预演、预案的“四预”功能。本研究旨在系统性梳理当前水利工程数字化管理的关键技术架构，分析其在核心业务场景中的落地模式与实效，并辩证探讨其发展过程中的制约因素，以期为我国水利工程运行的智能化升级提供理论参考与实践借鉴。

### 1 水利工程数字化管理的核心：数字孪生技术体系

数字孪生被认为是实现水利工程物理世界与信息世界深度融合的关键使能技术。它并非简单的三维可视化，而是通过在虚拟空间构建与物理实体高度吻合、实时联动、动态演化的数字镜像，实现对实体工程的监测、模拟、诊断、预测和优化控制<sup>[1]</sup>。

#### 1.1 技术内涵与架构

一个完整的数字孪生水利体系包含感知层、数据层、模型层、应用层以及贯穿始终的标准与安全体系。其核心目标是达成“精准映射、虚实交互、智能决策”。浙江省提出的“1136”总体框架具有代表性，即通过建设1张覆盖全域的水利感知网、1个统一的省级数字孪生基础平台，联动流域、水网、工程3大孪生体系，最终支撑防洪调度、水资源管理等6类智能业务应用，实现了全省范围的“规划一张图、建设一盘棋”。

#### 1.2 立体化监测感知网络建设

全面、精准、实时的数据是数字孪生的“血液”。当前，构建“天空地水工”一体化的立体监测感知网是技术前沿。具体而言：

“天”：指利用卫星遥感、北斗导航等技术，进行大范围的地表水体、旱情、工程变形等宏观监测与数据稳定传输。

“空”：指通过无人机、雷达等进行灵活机动的巡查，填补监测盲区，尤其在险情勘察和河湖管理中作用显著。

“地”与“水”：指在地面和水下广泛部署视频监控、水位计、流量计、渗压计等传感设备，形成高密度监测网络。例如，浙江省的雨量站平均密度已达每6.2平方公里1个，基本实现“镇镇有水位、村村有雨量”，为山洪预警从30分钟缩短至15分钟提供了可能。

“工”：则特指附着在水利工程建筑物本身的安全监测传感器，用于感知坝体、闸门、堤防的结构性态。

这种多维感知体系，如同为水利工程装上了敏锐的“神经末梢”，确保了数字世界能够持续、真实地反映物理世界的细微变化。

### 2 数字化管理技术在水利工程运行中的主要应用场景

数字化管理技术已深度渗透至水利工程运行的各大核心业务领域，从防洪减灾到水资源精细管理，再到工程本体安全，其价值正通过一系列成功的实战案例得到验证<sup>[2]</sup>。

#### 2.1 流域防洪与水库联合智能调度

水旱灾害防御是水利工程运行管理的核心任务之一，数字化管理技术通过“预报-预警-预演-预案”全链条赋能，大幅提升灾害防御的精准性与主动性。在监测感知环节，通过“天空地水工”一体化监测网络，实现“云中雨-落地雨-河中水”全链条

实时监测，为洪水预报提供精准数据支撑；在预报环节，基于大数据与人工智能技术构建洪水预报模型，结合实时监测数据与气象预报信息，滚动更新洪水预报结果，延长预见期、提升准确率。“十四五”以来，我国大江大河洪水预见期从3天延长至10天，主要江河关键期洪水预报准确率达90%。

在防洪领域，数字化管理的价值在于将洪水应对从“被动响应”转向“主动防御”。其核心是通过集成的专业水文水动力模型，在数字空间对降雨—产流—汇流—演进的全过程进行快速模拟与预演。

例如，在2024年汛期调水调沙过程中，数字孪生系统为精准控制水库水位、流量提供了决策支持，累计排沙达1.97亿吨，高效地维持了水库库容并调控了下游河床。国家层面，通过数字化建设，全国大江大河的洪水预见期已从平均3天普遍延长至7-10天，为防御特大洪水赢得了战略主动。

表1 传统调度模式与数字化智能调度模式对比

对比维度	传统经验调度模式	数字化智能调度模式
决策依据	历史经验、有限监测数据、会商研判	实时全景数据、多模型耦合模拟推演
响应速度	较慢，信息传递链条长	极快，平台内一键生成方案
预案生成	有限，难以应对复杂多变情景	可生成并比选海量方案，选出全局最优
预见能力	短期，不确定性高	中长期，预见期大幅延长
典型成效	依赖决策者个人能力	2025年遭水洪水联合削峰6500m <sup>3</sup> /s

#### 2.2 水资源的优化配置与精细化管控

在水资源日益紧缺的背景下，数字化技术为实现“空间均衡”和“精准滴灌”提供了可能。其核心是构建数字孪生水网，对“水源—输水—用水”全链条进行模拟与优化。数字化管理技术为水资源优化调度提供了高效支撑，通过精准感知、智能分析与动态调度，实现水资源的科学配置与高效利用，破解水资源供需矛盾<sup>[3]</sup>。在跨区域调水工程中，数字孪生技术实现调水全流程的实时监控与智能调度。以南水北调中线工程为例，通过构建数字孪生系统，集成上万个摄像头与监测点，实现沿线各分水口门供水数据的实时监控与远程调度，调度人员可突破空间限制，实时应对各类突发情况，保障工程安全、供水安全与水质安全，支撑一泓清水永续北上。在水资源极为珍贵的新疆，数字化技术是实现“节水优先”和“空间均衡”的利器。在流域尺度，数字孪生塔河项目在开都-孔雀河流域实现了水资源管理与调配、水旱灾害防御等“四预”应用，提高了水量调度精度。在灌区尺度，精河县大河沿子灌区的实践堪称典范。该灌区通过“渠道改管道”大幅减少输水损耗，并依托数字孪生平台，构建了从水源到田间的智能管控网络。农民通过手机即可远程灌溉，系统根据需水预报模型和实时墒情数据，实现“小流量高频次”的智能化滴灌。这一模式使灌区年节水超过2000万立方米，相当于新增一座

中型水库,同时每亩综合成本降低约30元,实现了节水与增效的双赢。额尔齐斯河流域灌区也通过信息化平台,实现了对水闸、渠道的远程监控与水量精准调度,让每一滴水都发挥最大效益。

### 2.3 工程安全运维与全生命周期管理

数字化管理将工程运维从“事后检修”推向“预测性维护”。基于BIM(建筑信息模型)和物联网的深度融合,可以实现对工程结构健康状况的持续评估。乌鲁瓦提水利枢纽作为新疆的先行者,其现代化运行管理矩阵平台有机融合了数字孪生一期成果与标准化管理,覆盖了“监测预警、工程运维、调度控制、应急管理、保障支撑”五大业务目标。该平台打破了以往各业务系统相互独立的数据壁垒,实现了信息集中、流程贯通与协同指挥。例如,巡查人员发现隐患可通过移动端“随手拍”上传,系统自动生成任务工单,实现闭环管理;调度决策可综合安全、防洪、供水、发电等多目标进行协同预演。这标志着水库管理从分散的“条块化”向一体化的“矩阵式”协同范式演进,全面提升运行管理的系统化、精准化与现代化水平<sup>[4]</sup>。

表2 数字孪生水利的关键技术体系与应用价值

技术层次	核心构成	主要功能	应用价值体现
感知层	“天空地水工”一体化传感网	全域、全要素、全天候数据采集	浙江山洪预警响应时间缩短50%
数据与模型层	水利专业模型(水文、水动力等)、AI算法、BIM	洪水演进模拟、调度方案推演、工程结构分析	洪水模拟从40分钟缩至5分钟
应用层	智能业务平台(防洪、水资源、运维)	“四预”功能、优化调度、预测性维护	支撑跨区域精准引水7540万方
交互层	可视化大屏、移动APP、AR/MR设备	虚实交互、沉浸式培训、现场辅助作业	提升培训效率,减少90%人工统计

## 3 面临的挑战与未来展望

尽管水利工程数字化管理取得了显著进展,但从试点示范走向全面深度融合,仍面临一系列亟待解决的挑战。

### 3.1 当前存在的主要挑战

首先,技术适配性与模型精度挑战突出。新疆独特的冰川融雪水文过程、复杂的水盐运动规律等,使得许多成熟于内地的模型“水土不服”,需要长期的本土化数据积累与模型研发。其次,数据根基有待夯实。部分偏远地区监测站点覆盖不足、历史资料缺失,数据质量与连续性有待提升,制约了模型训练的精度与AI应用的深度。再次,建设与运维的可持续性问题。数字化系统初期投入大,后期需要持续的更新、维护和升级,对地方财政和技术支撑能力是考验。最后,复合型人才短缺。既精通水利业务又掌握数字技术的“数字水利员”严重不足,成为制约技术应用效果的关键因素。

### 3.2 未来发展趋势与对策建议

展望未来,水利工程数字化管理将向更智能化、普惠化、绿色化的方向演进。为应对挑战,提出以下建议:

3.2.1 强化顶层设计与标准体系:在国家层面进一步完善数字孪生水利的标准规范体系,尤其注重数据采集、接口、语义的标准化,为数据互联互通奠定基础。

3.2.2 推动模型开源与知识共享:鼓励科研院所、企业共建水利模型算法库,通过开源协作和知识共享,加速核心模型的迭代优化与国产化进程。

3.2.3 创新建设与运维模式:探索“建管一体”的可持续模式,在项目建设期即考虑远期运维需求。建立健全平台持续迭代更新、传感器定期校准维护的长效机制。

3.2.4 加大复合型人才培养力度:水利院校应优化课程设置,加强信息技术教学。行业内部应开展系统性、分层次的数字化技能培训,并建立相应的激励考核机制,激发从业人员学习和应用新技术的动力。

## 4 结论

水利工程运行的数字化管理转型,是一场以数据为关键要素、以数字孪生为核心技术的深刻变革。它通过构建虚拟与现实同步交互的智慧水利系统,不仅极大地提升了防洪抗旱的预见性和主动性,实现了水资源跨时空的精准调配,也重塑了工程安全运维的管理范式。未来,随着物联网、人工智能、5G等技术的进一步成熟与成本下降,水利工程的数字化管理必将从重点工程走向普惠应用,从单点智能迈向系统智慧,最终构建起一个更安全、更高效、更绿色的现代化水治理体系,为经济社会的高质量发展和国家水安全保障提供坚实的数字化支撑。

### [参考文献]

- [1]张瑞涛,宋亚路,夏琼.水利工程运行管理数字化改革实践与探索[J].水电站机电技术,2022,45(08):140-142.
- [2]连亦健,毛瑞喜.数字化管理在水利工程运行中的应用[J].河南水利与南水北调,2022,51(03):76-77.
- [3]涂扬举.水电企业智慧化运行与管理[M].中国水利水电出版社,2021.10.185.
- [4]曹建斌.数字化管理在水利工程运行中的构建思路[J].江西水利科技,2021,47(05):367-371.

### 作者简介:

艾尔肯·艾合麦提(1988—),男,维吾尔族,新疆巴楚县人,大学本科,文章方向:水利工程。

古丽阿依姆·莫敏(1992—),女,维吾尔族,新疆疏附县人,大学本科。文章方向:水利工程。