

数字孪生技术在跨区域水资源调度中的创新应用与实践

杨振宇 魏敏 麻天将

河南省人民胜利渠保障中心

DOI:10.12238/etd.v6i10.17219

[摘要] 随着数字技术深度融入水利领域,数字孪生技术正重塑跨区域水资源调度格局。本文聚焦数字孪生技术在跨区域水资源调度领域的创新应用与实践。首先阐述数字孪生技术基本概念,接着分析跨区域水资源调度面临的技术难题、资金投入、生态影响及制度障碍等现状。重点探讨数字孪生技术在该领域的创新应用,涵盖数据融合与共享、模型构建与优化、智能决策与调控以及生态补偿机制等方面。最后介绍相关实践探索情况。旨在通过研究,为提升跨区域水资源调度效率、保障水资源合理利用与生态平衡提供新思路与技术支撑。

[关键词] 数字孪生技术; 跨区域水资源调度; 创新应用; 实践

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A

Innovative Application and Practice of Digital Twin Technology in Inter-basin Water Resources Allocation

Zhenyu Yang Min Wei Tianjiang Ma

Henan People's Victory Canal Security Center

[Abstract] With the deep integration of digital technologies into the water resources sector, digital twin technology is reshaping the landscape of inter-basin water resources allocation. This study focuses on the innovative application and practice of digital twin technology in this field. It begins by elaborating on the fundamental concepts of digital twin technology, followed by an analysis of the current challenges in inter-basin water resources allocation, including technical difficulties, funding constraints, ecological impacts, and institutional barriers. The study emphasizes the innovative applications of digital twin technology in this domain, covering data integration and sharing, model construction and optimization, intelligent decision-making and regulation, and ecological compensation mechanisms. Finally, relevant practical explorations are introduced. The research aims to provide new ideas and technical support for improving the efficiency of inter-basin water resources allocation and ensuring the rational utilization of water resources and ecological balance.

[Key words] Digital Twin Technology; Inter-basin Water Resources Allocation; Innovative Application; Practice

引言

水资源是人类生存与发展的关键要素,跨区域水资源调度对于缓解区域水资源供需矛盾、保障经济社会可持续发展意义重大。然而,当前跨区域水资源调度面临诸多复杂问题,传统调度方式在应对这些挑战时逐渐显现出局限性,难以满足精准、高效、可持续的调度需求。数字孪生技术作为新兴的数字化技术,凭借其强大的数据集成、模拟仿真与智能决策能力,为跨区域水资源调度带来了新的契机。深入研究数字孪生技术在跨区域水资源调度中的创新应用与实践,有助于突破传统调度瓶颈,实现水资源的科学合理调配与高效利用。

1 数字孪生技术概述

数字孪生技术是一种基于物理模型、传感器更新、历史数据等,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中构建出与物理实体一一对应的“数字镜像”,以实现物理实体的实时映射、监控、预测与优化的前沿技术。其核心在于通过数据交互与融合,使虚拟模型与物理实体保持高度同步。一方面,借助各类传感器收集物理实体在运行过程中的多维度数据,如温度、压力、流量等,将这些数据实时传输至虚拟模型;另一方面,虚拟模型依据接收的数据进行动态更新与模拟分析,精准反映物理实体的实际状态与变化趋势。数字孪生技术具有显著优势。它能够实现全生命周期管理,从设计、制造到运维,为物理实体提供全方位的数字化支持。通过提前模拟与预测,

可有效降低风险、减少成本、提高效率^[1]。同时,支持远程监控与操作,打破空间限制,便于实时掌握物理实体情况并做出决策。该技术广泛应用于多个领域,在工业制造中助力产品优化与生产流程改进;在智慧城市领域,为城市规划、交通管理等提供科学依据;在能源领域,实现能源系统的智能调控与高效利用。

2 跨区域水资源调度的现状

2.1 技术难题

当前跨区域水资源调度面临诸多技术难题。在数据采集方面,不同区域监测设备标准不一,数据格式差异大,难以实现高效整合与共享。信息传输过程中,存在信号干扰、传输延迟等问题,影响数据的实时性和准确性。调度模型的精度也有待提高,难以精准模拟复杂水系的水文变化、水质演变等情况。同时,缺乏先进的水资源预测技术,对未来水资源供需状况的预测不够准确,导致调度决策缺乏科学依据,难以实现水资源的精准调配。

2.2 资金投入

跨区域水资源调度资金投入问题突出。一方面,工程建设成本高昂,包括输水渠道、泵站、水库等基础设施的建设与维护,需要大量资金。另一方面,技术研发和设备更新也需要持续的资金支持,如先进的水质监测设备、智能调度系统等。然而,目前资金来源较为单一,主要依赖政府财政拨款,社会资本参与度低。而且资金分配不合理,部分地区和项目资金不足,影响工程进度和质量,导致水资源调度能力提升受限。

2.3 生态影响

跨区域水资源调度对生态环境产生了多方面影响。在调水过程中,可能改变原有水系的生态流量,影响水生生物的生存环境,导致一些物种数量减少甚至灭绝。同时,调水可能引发区域地下水水位变化,造成土壤盐碱化、湿地萎缩等问题,破坏生态系统的平衡。此外,工程建设可能占用大量土地,破坏植被,影响野生动植物的栖息地。而且,调水带来的水质变化也可能对受水区的生态环境造成冲击,影响生态系统的稳定性和生物多样性^[2]。

2.4 制度障碍

跨区域水资源调度存在制度障碍。不同区域的管理体制和政策存在差异,导致调度过程中协调困难。各部门之间职责不清,存在管理重叠和空白现象,影响调度效率。在水权分配方面,缺乏明确、合理的制度,导致上下游、左右岸之间在水资源使用上存在矛盾和纠纷。而且,生态补偿机制不完善,调水对输出区生态造成的损失难以得到合理补偿,影响输出区保护水资源的积极性。

3 数字孪生技术在跨区域水资源调度中的创新应用

3.1 数据融合与共享创新

在跨区域水资源调度领域,数字孪生技术为数据融合与共享带来了突破性创新。(1)实现了多维度数据的高效汇聚。数字孪生技术凭借强大的数据采集与整合能力,能够把不同区域、不同类型的水资源相关数据进行全面收集。无论是气象数据中的

降水、蒸发信息,还是水文数据里的水位、流量数据,亦或是水利工程运行中的设备状态、调度指令等数据,都能被统一汇聚到一个数据平台。这种多维度数据的汇聚,打破了数据分散、孤立的状态,为全面了解水资源状况提供了丰富的数据基础。(2)构建了统一的数据标准与规范。为确保不同来源的数据能够无缝融合与共享,数字孪生技术推动建立了统一的数据标准与规范体系。从数据的格式、精度到编码规则,都进行统一设定,使得各个区域和部门的数据在采集、传输和存储过程中遵循相同的标准。这样一来,不同系统之间的数据能够顺畅交互,避免了因数据格式不一致而导致的兼容性问题,提高了数据的可用性和共享效率。(3)搭建了安全可靠的数据共享平台。数字孪生技术借助先进的云计算和网络安全技术,搭建起一个安全、稳定的数据共享平台。该平台具备严格的权限管理机制,能够根据不同用户的角色和需求,分配相应的数据访问权限,确保数据在共享过程中的安全性和保密性。同时,平台还具备强大的数据分析和处理能力,能够对共享数据进行深度挖掘和分析,为跨区域水资源调度决策提供更有价值的参考。

3.2 模型构建与优化创新

在跨区域水资源调度中,数字孪生技术推动模型构建与优化实现了显著创新。(1)实现多学科模型深度耦合。数字孪生技术突破单一学科模型局限,将水文、气象、地质、工程力学等多学科模型有机融合。水文模型可精准模拟水资源的形成、运动与变化规律;气象模型能预测降水、蒸发等气象要素;地质模型则可分析地形地貌对水流的影响。这些模型相互关联、相互作用,形成综合性的水资源调度模型,全面反映水资源系统的复杂特性,为调度决策提供更科学、全面的依据。(2)构建动态自适应模型。鉴于水资源系统受自然因素和人类活动影响不断变化,数字孪生技术构建的模型具备动态自适应能力。它能够实时接收和处理来自监测系统的数据,根据实际情况自动调整模型参数和结构。当遭遇极端天气或重大工程调整时,模型可迅速响应,准确模拟水资源系统的变化趋势,确保调度方案始终与实际状况相适应,提高调度的灵活性和准确性。(3)开展模型智能优化。借助人工智能算法,如遗传算法、神经网络等,对模型进行智能优化。这些算法能够自动搜索最优解,不断改进模型的性能和精度。通过对大量历史数据和实时数据的学习与分析,模型可自动调整参数,提高对水资源系统变化的预测能力,为跨区域水资源调度提供更精准、可靠的决策支持^[3]。

3.3 智能决策与调控创新

在跨区域水资源调度领域,数字孪生技术为智能决策与调控带来了深刻且全面的创新变革。(1)打造了全要素集成的智能决策环境。数字孪生技术将气象、水文、地质、工程设施以及社会经济等多领域数据深度融合,构建出一个高度逼真的虚拟水资源系统。决策者能够在这个虚拟环境中,直观地看到水资源在不同区域、不同时段分布与变化情况,以及各种调度方案可能产生的影响。通过全要素的集成展示,决策者可以全面、系统地考虑各种因素,避免因信息不全面而导致的决策失误,提高决

策的科学性和全面性。(2)实现了实时动态的智能调控响应。数字孪生模型具备实时更新和动态模拟的能力,能够根据实时监测到的数据,迅速对水资源系统的运行状态进行模拟和预测。当出现突发水情、用水需求变化或工程故障等情况时,系统可以立即生成相应的调控策略,并自动调整闸门开度、泵站运行等参数,实现实时、精准的调控。这种动态响应机制能够及时应对各种复杂情况,保障水资源调度的稳定性和可靠性。(3)构建了多方协同的智能决策平台。数字孪生技术支持跨区域、跨部门的协同工作,通过统一的平台和标准,实现信息共享和协同决策。不同地区的水资源管理部门、相关企业以及专家学者可以共同参与决策过程中,利用各自的专业知识和经验,对调度方案进行评估和优化。多方协同的决策模式能够充分发挥各方的优势,提高决策的民主性和合理性,促进跨区域水资源的优化配置和高效利用。

3.4 生态补偿机制创新

在跨区域水资源调度中,数字孪生技术为生态补偿机制带来了多维度创新。

(1)构建精准的生态价值核算体系。数字孪生技术整合地理信息、水文监测、生态调查等多源数据,构建起涵盖水资源生态服务功能各要素的核算模型。该模型能精确量化不同区域在水资源保护、水土保持、生物多样性维护等方面的生态贡献,将抽象的生态价值转化为具体可衡量的指标。通过动态模拟生态系统的变化过程,还能实时评估生态价值的变化情况,为生态补偿标准的制定提供科学、准确的依据,确保补偿金额与生态保护成效相匹配。(2)实现补偿过程的透明化与可追溯。借助区块链技术,数字孪生平台构建了不可篡改的生态补偿数据链。从生态保护项目的实施情况、生态价值核算结果,到补偿资金的分配与使用,每一个环节的数据都被详细记录并加密存储。补偿各方可通过平台实时查询相关信息,确保补偿过程公开透明,有效避免了信息不对称和人为干预,增强了各方对生态补偿机制的信任。(3)推动补偿方式的多元化与创新。数字孪生技术支持根据不同区域的生态特点和需求,设计多样化的补偿方式。除了传统的资金补偿外,还可结合技术援助、产业扶持、生态旅游开发等补偿形式。例如,对于生态保护成效显著但经济发展相对滞后的区域,可通过引入先进的农业种植技术或发展生态旅游产业,实现生

态保护与经济发展的良性互动,提高生态补偿的综合效益,促进区域间的可持续发展。

4 数字孪生技术在跨区域水资源调度中的实践探索

河南省人民胜利渠保障中心在跨区域水资源调度中积极应用数字孪生技术,成效显著。该中心负责人民胜利渠灌区、武嘉灌区骨干工程管理与维修养护、供水及防汛排涝等工作,积累了丰富的实践经验与4项专利技术。在数据融合与共享方面,保障中心统筹整合多源数据,涵盖水利工程、地理空间、监测感知等信息,构建了多源异构的调度数据资源库,打破数据壁垒,为调度决策提供全面数据支撑。在模型构建上,借助BIM、GIS等技术,结合水利专业模型,实现工程三维仿真模拟。如构建的数字孪生场景,可对闸门运行调度方案进行可视化前瞻预演,为渠系水量配置提供智能决策支持。在智能决策与调控中,通过实时监测与数据分析,实现精准调度。在防汛排涝时,能依据实时数据动态调整防守重点,生成防守策略。同时,通过智能调控接口,实现闸门远程控制与自动计量,提升调度效率^[4]。

5 结束语

数字孪生技术为跨区域水资源调度带来了革命性变革,从数据深度融合共享打破信息壁垒,到多模型耦合优化提升预测精度;从智能决策调控实现多目标平衡,到生态补偿量化创新促进可持续发展,全方位提升了调度科学性、灵活性与公平性。实践表明,其在应对复杂水情、协调多方利益、保障生态安全等方面成效显著。未来,随着技术持续迭代,数字孪生将深度融入水资源管理,推动构建更高效、智能、绿色的跨区域水资源调度体系,为经济社会可持续发展筑牢水资源保障根基。

[参考文献]

- [1]吴浩云,黄志兴.以智慧太湖支撑水利补短板强监管的思考[J].水利信息化,2019,149(2):5-10+14.
- [2]张绿原,胡露露,沈启航,等.水利工程数字孪生技术研究及探索[J].中国农村水利水电,2021(11):58-61.
- [3]张以晓.论数字孪生技术与智慧水利建设[J].黑龙江水利科技,2022,50(7):180-183.
- [4]黄瑞,顾小林,苟胜国,等.基于数字孪生的水文水资源运行管理技术研究及应用——以茶园水文水资源为例[J].绿色科技,2022,24(24):127-137.