

基于多模型协同的数字孪生奎屯河工程安全 “分析 - 预警 - 处置”技术研究

王志勉¹, 陈小平², 李健军³, 黄润德⁴, 刘洋⁴

¹武汉长江科创科技发展有限公司, 湖北 武汉

²长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉

³新疆北方建设集团有限公司, 新疆 奎屯

⁴新疆生产建设兵团建筑工程科学技术研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年6月24日; 录用日期: 2025年7月30日; 发布日期: 2025年8月26日

摘要

在全球气候变化导致极端水文事件愈发频繁的背景下, 奎屯河作为区域内至关重要的水资源载体, 其工程安全正面临着严峻挑战。传统的工程安全管理模式已难以适应复杂工况的需求, 亟待引入新型技术手段。本研究构建了基于多模型协同的数字孪生平台, 通过有机集成水文预报模型、水动力仿真模型以及结构力学分析模型等多种专业模型, 构建了“分析 - 预警 - 处置”的全链条技术体系。该体系借助物联网传感网络(如水位计、流量计、应力计、位移计)与多源数据融合技术, 实现了对工程运行状态(水文、结构响应等)的实时感知; 通过结合深度学习算法(如CNN、LSTM)构建智能预警模型, 显著提升了安全隐患预警的精度; 并依托虚拟仿真技术, 对不同处置方案(如工程抢险、调度预案)的效果进行模拟预演, 优化处置决策。奎屯河工程的实证应用结果表明, 该技术体系使洪水预报效率提升了40%, 预警响应时间缩短至15分钟以内, 为水利工程安全管理提供了新型的数字化范式。本研究不仅为奎屯河工程的安全运行提供了坚实的技术保障, 也为同类水利工程的安全管理提供了可借鉴的经验和技术参考。

关键词

数字孪生, 多模型协同, 工程安全, 全链条管理, 奎屯河

Research on the “Analysis-Warning-Disposal” Technology of Digital Twin Kuitun River Engineering Safety Project Based on Multi-Model Collaboration

Zhimian Wang¹, Xiaoping Chen², Jianjun Li³, Runde Huang⁴, Yang Liu⁴

作者简介: 王志勉, 出生于 1990 年 4 月, 湖北仙桃人, 本科学历, 工程师, 主要从事水利工程建设与管理相关工作, Email: 1083574508@qq.com

文章引用: 王志勉, 陈小平, 李健军, 黄润德, 刘洋. 基于多模型协同的数字孪生奎屯河工程安全“分析-预警-处置”技术研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(4): 383-389. DOI: 10.12677/jwrr.2025.144041

¹Wuhan Changjiang Science and Technology Development Co., Ltd., Wuhan Hubei

²Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

³Xinjiang North Construction Group Co., Ltd., Kuitun Xinjiang

⁴Xinjiang Production and Construction Corps Construction Engineering Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: Jun. 24th, 2025; accepted: Jul. 30th, 2025; published: Aug. 26th, 2025

Abstract

In the context of the increasing frequency of extreme hydrological events caused by global climate change, the engineering safety of Kuitun River, as a vital water resource carrier in the region, is facing severe challenges. The traditional engineering safety management mode is difficult to adapt to the needs of complex working conditions, and innovative technical means need to be introduced urgently. This study has developed a digital twin platform based on multi-model collaboration, integrating various specialized models such as hydrological forecasting models, hydrodynamic simulation models, and structural mechanics analysis models to create a comprehensive technical system for “Analysis-Warning-Disposal”. This system utilizes an Internet of Things (IoT) sensor network (including water level gauges, flow meters, strain gauges, and displacement meters) and multi-source data fusion technology to achieve real-time perception of the engineering operational status (such as hydrology and structural responses). By incorporating deep learning algorithms (such as CNN and LSTM) to build intelligent warning models, the accuracy of safety hazard warnings has been significantly improved. Additionally, relying on virtual simulation technology, the effects of different disposal plans (such as emergency rescue and scheduling plans) are simulated and rehearsed to optimize decision-making in disposal. The empirical application results of the Kuitun River project show that the technical system improves the flood forecasting efficiency by 40% and shortens the early warning response time to less than 15 minutes, which provides an innovative digital paradigm for the safety management of water conservancy projects. This study not only provides a solid technical guarantee for the safe operation of the Kuitun River project, but also provides a reference experience and technical reference for the safety management of similar water conservancy projects.

Keywords

Digital Twin, Multi-Model Collaboration, Engineering Safety, Full-Chain Management, Kuitun River

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

全球气候变化加剧，极端水文事件频发，暴雨、洪水等灾害的发生频率与强度持续攀升，对水利工程安全运行构成严峻挑战[1]-[4]。作为区域重要水资源供给通道，奎屯河工程设施的安全不仅关乎区域水资源供应、防洪安全及生态环境稳定，更直接影响周边地区经济发展与人民生命财产安全[5] [6]。传统工程安全管理模式在复杂多变工况下的局限性日益凸显，亟需引入先进技术手段提升管理水平。数字孪生技术融合物联网、大数据、人工智能等前沿科技，通过构建与物理实体高度映射的虚拟模型，实现对工程运行状态的实时监测、模拟仿真与预测分析，为水利工程安全管理开辟了新路径[7] [8]。其多源数据整合能力可全面感知工程运行环境与结构状态，精准仿真模型能模拟不同工况下的工程响应，智能算法则助力风险预警与处置方案优化。在数字孪生水利工程领域，欧美等

发达国家已开展诸多实践，欧盟流域数字孪生模型辅助水资源管理与防洪决策，美国大型水利工程实现运行状态实时监控与风险评估[9]。国内在政策推动下，南水北调、三峡等重大工程积极引入数字孪生理念进行数字化升级，取得一定成效。然而，现有研究仍存在明显不足。多模型协同深度广度欠缺，耦合机制不完善，影响整体仿真精度；安全分析对复杂环境与工程结构相互作用考量不足，难以评估极端工况下的安全性能；智能预警模型泛化与适应能力有限，预警精度波动大；虚拟仿真与实际处置衔接不畅，缺乏动态调整；全链条技术系统性研究少，未形成高效闭环管理体系。因此，开展多模型协同的数字孪生技术在水利工程安全管理中的研究，既有助于完善理论基础，提升数字孪生模型的仿真精度与可靠性，又能为奎屯河工程安全运行提供技术保障，提高管理智能化水平与决策科学性，为同类工程提供可复制的技术范式与实践经验，推动水利行业数字化、智能化转型发展[10]。

2. 研究方法

奎屯河水利工程是国务院确定的 172 项国家重大节水供水工程之一，也是兵团在建最大单体水利工程，总投资 40.07 亿元，2020 年 6 月开工，2025 年 6 月进入收尾阶段。工程包括将军庙水利枢纽、山区及出山口引水系统、团结干渠改建等部分，惠及七师胡杨河市等四地 70 万人口、200 万亩农田。工程地理位置如图 1。

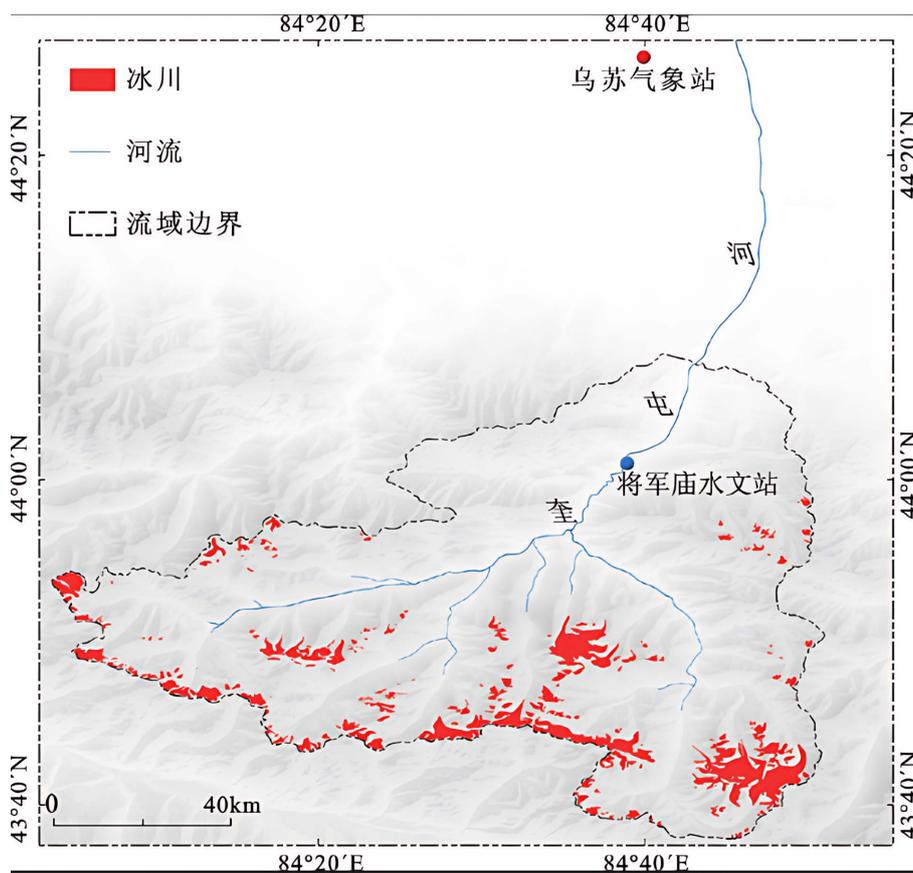


图 1. 奎屯河工程的地理位置图

2.1. 多模型协同的数字孪生模型构建

1) 奎屯河工程数据类型丰富多样，涵盖水文、气象、地质及工程结构等多方面数据。在多源数据采集环节，需针对不同数据类型精准选择传感器设备。对于水文数据，运用超声波水位计、电磁流量计实现实时监测；气象数据通过建立气象站采集降雨量、气温等参数；工程结构数据则在关键部位布设应力、位移传感器。同时，

构建统一的数据传输网络,保障数据实时、稳定传输至数据中心。在数据融合方面,建立统一的数据标准与存储管理系统,先对采集数据进行清洗、去噪、归一化等预处理,再采用融合算法整合不同来源和类型的数据,最终存储于数据仓库或数据库,为后续分析应用奠定基础。

2) 构建基于区域特性的防洪及工程安全精细化数学模型是数字孪生模型构建的关键。水文预报模型研发需充分考虑奎屯河流域地形、地貌、土壤特性,建立“降水-产流-汇流”全过程模拟模型,可选用分布式水文模型如 SWAT 模型、HEC-HMS 模型,提升预报精度与可靠性。一二维水动力模型分别用于河道洪水演进和洪泛区洪水扩散模拟,通过耦合两者,更准确呈现洪水运动规律,为防洪决策提供有力依据。基于水动力模型模拟结果,构建洪水风险评估模型,综合考量洪水淹没范围、水深、流速等因素,评估洪水对周边地区影响,确定风险等级,助力防洪规划与应急处置。

3) 融合地理信息系统(GIS)、建筑信息模型(BIM)和虚拟现实(VR)/增强现实(AR)技术,构建直观准确的三维数字化场景。利用 GIS 技术管理分析奎屯河流域地理信息,建立数字高程模型(DEM)和数字地形模型(DTM)实现地形三维展示;运用 BIM 技术对工程建筑物和结构物建模,涵盖几何形状、材料属性等丰富信息;将 GIS 模型与 BIM 模型融合,结合 VR/AR 技术,用户既能通过 VR 设备在虚拟环境漫游,又能借助 AR 技术实现虚拟与现实场景叠加,辅助工程现场决策。多模型协同的数字孪生模型工作流程图如图 2 所示。

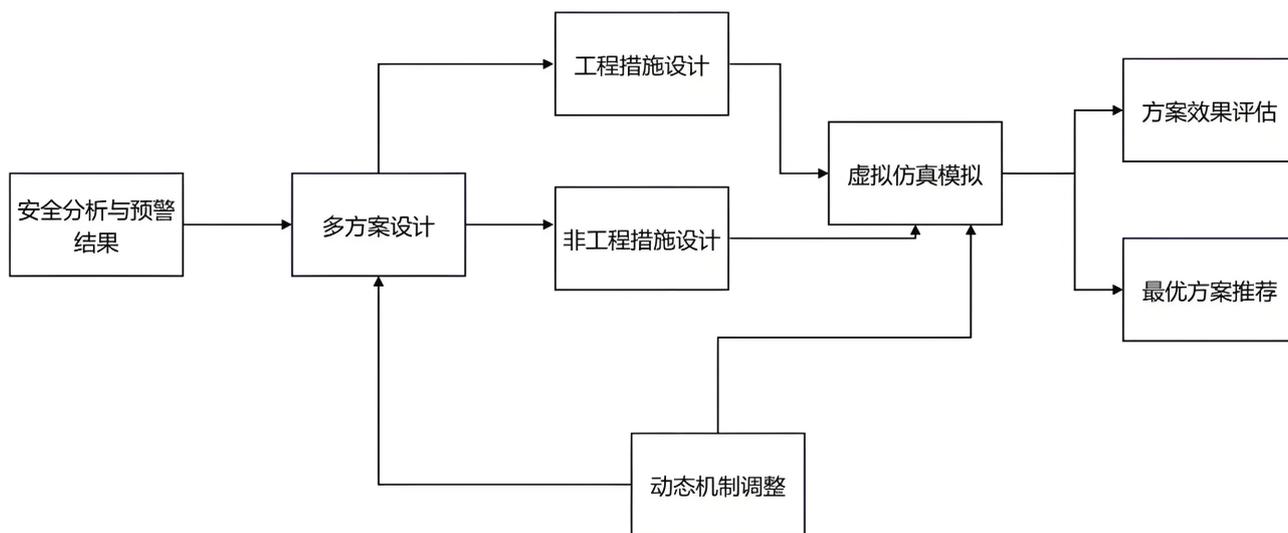


图 2. 多模型协同的数字孪生模型工作流程图

4) 水文-水动力模型耦合技术

建立严格的输入/输出数据格式规范,通过轻量级 API 实现模型间高效调用。模型封装为独立服务,水文模型输出的流量、水位边界条件通过 API 实时推送至水动力模型,实现自动化交互。水文模型(1 小时步长)的输出需降尺度匹配水动力模型(1 分钟步长)。采用三次样条插值保持水文过程线的连续性与质量守恒(如流量积分一致性)。确保时间边界平滑过渡,避免数值震荡。基于的物联网(IoT)技术,集成实时传感器数据(如河道水位、雨量站)对模型输入进行动态校准。采用集合卡尔曼滤波等数据同化算法,融合观测值与模型预测值,量化并修正输入不确定性(如降雨空间分布误差)。通过闭环反馈机制,实时优化水文模型参数,显著降低耦合系统的累计误差。

2.2. 工程安全分析技术研究

基于构建的数字孪生模型,开展多物理场耦合作用下的工程结构安全分析。温度场分析聚焦大体积混凝土结构,研究温度变化引发的温度应力及裂缝问题,通过建立温度场模型模拟混凝土浇筑和运行过程温度变化,

为温控措施提供依据。渗流场分析探究水在工程结构和地基中的渗流规律，评估其对结构稳定性影响，建立模型预测渗流破坏现象并提出防治措施。应力场分析结合温度场和渗流场结果，考虑多种荷载共同作用，计算结构应力分布与变形，评估安全性和可靠性。最后建立多物理场耦合模型，实现各物理场相互作用与耦合计算，更精准模拟工程结构实际受力状态与安全性能，为工程各阶段提供科学依据。

利用大数据分析和机器学习技术，对工程运行历史数据和实时监测数据深度挖掘，建立工程安全状态评估指标体系和评估模型。首先运用数据聚类、关联规则挖掘等方法提取反映工程安全状态的关键特征参数；基于特征参数和工程实际需求构建科学合理的评估指标体系，确保指标具有代表性、可测性和独立性；采用神经网络、随机森林、支持向量机等机器学习算法构建评估模型，并利用历史数据训练优化，提升预测精度和泛化能力；最终利用模型对实时监测数据定量评估工程安全状态，并基于历史数据和当前结果预测安全状态发展趋势，为安全管理决策提供支持。

2.3. 安全预警技术研究

研究基于多参数融合的智能预警算法，结合工程安全分析结果和实时监测数据建立安全预警模型。综合水文、气象、工程结构等多方面监测参数，运用数据融合技术整合形成综合预警指标，克服单一参数预警局限性。采用卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)、长短期记忆网络(LSTM)等深度学习算法构建智能预警模型，利用其强大的非线性拟合和特征提取能力挖掘潜在安全隐患模式。利用历史监测数据和安全事件记录训练优化预警模型，通过调整参数结构、采用交叉验证等方法提升预警精度和泛化能力，确保模型可靠。

制定科学合理的预警分级标准和预警发布机制。根据工程重要性、潜在风险严重程度和影响，将预警分为一般、较重、严重和特别严重四个级别，并明确每个级别的判定标准，涵盖监测参数阈值、变化速率等指标。针对不同级别预警制定响应措施，包括应急处置方案、人员疏散计划、物资调配等内容，保障预警发布后能迅速有效行动，降低风险损失。明确各级别预警责任主体和职责分工，建立考核机制，提升预警工作效率和质量。建立完善的预警发布机制，确定信息发布渠道、方式和范围，通过短信、邮件、电话、专用预警平台等多渠道传递预警信息，确保信息广泛覆盖和及时到达。基于数字孪生技术智能巡检系统如图3所示。

2.4. 安全处置决策支持技术研究

基于数字孪生模型的虚拟仿真功能，对不同安全处置方案进行模拟分析。根据工程安全分析和预警结果，设计包含工程措施(如加固、抢险)和非工程措施(如应急调度、人员转移)的多种处置方案；利用数字孪生模型对方案进行虚拟仿真，模拟实施过程和效果，如工程结构受力变化、洪水演进改变、风险区域变动等；依据虚拟仿真结果，从工程安全性提升程度、风险降低幅度、经济效益等方面评估方案效果，对比分析为决策者提供最优方案建议；建立动态调整机制，根据实际情况变化和虚拟仿真结果实时优化处置方案，适应复杂工程安全形势，提高处置有效性和针对性。

建立应急决策支持系统，整合工程基础信息、实时监测数据、预警信息、专家知识库等资源。设计系统架构，包括数据层、支撑层、应用层和表现层，分别负责数据存储管理、提供支撑服务、实现决策功能和提供交互界面。整合各类数据资源，建立统一数据管理平台，保障数据一致性和可用性。开发信息查询、数据分析、方案生成、决策建议等功能模块，满足应急处置信息查询、分析和决策需求。设计友好人机交互界面，采用简洁明了的布局和多种数据可视化方式，提升系统易用性和操作性，辅助决策者直观了解工程安全状况和处置方案效果。具体技术方案如图4。

2.5. 应用验证与优化完善

为确保本研究系统在奎屯河工程中的可靠性与实效性，本研究在工程现场部署阶段即开展了系统性的应用

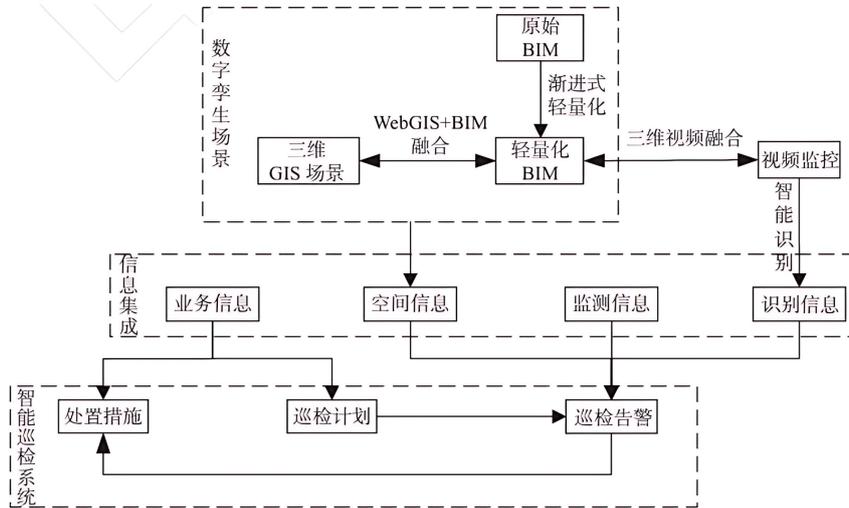


图 3. 基于数字孪生智能巡检系统



图 4. 奎屯河工程的技术方案及操作界面

验证与持续的优化完善工作。首先，根据 2.1 节数据采集方案，在工程关键位置(如将军庙水利枢纽坝体、重要引水隧洞段、团结干渠关键节点)完成传感器设备的布设与调试，构建覆盖水文、结构响应等关键参数的实时感知网络。其次，在系统试运行期间，选取典型历史洪水事件(如 2023 年 7 月及 2024 年 5 月事件)及工程运行关键工况，将数字孪生平台的多模型协同仿真结果(如洪水演进过程、关键结构部位应力应变分布)与实际监测数据进行对比分析。结果表明：水文-水动力耦合模型预报精度显著提升，Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)达 0.90 左右(见表 1)。最后，针对极端工况模拟中发现的微小偏差(如特定降雨模式下汇流速度的轻微滞后)情况，对水文模型(如 SWAT/HEC-HMS)的关键参数(如产汇流参数)进行了率定优化。同时，细化了水文模型与水动力模型之间的数据交换协议和降尺度插值算法，进一步提升了耦合模型的鲁棒性和在极端条件下的仿真精度。众所周知，应用验证与优化是一个持续的过程。在本研究建立了长效的反馈机制中，将实际工程运行数据、新出现的风险模式以及管理需求变化持续纳入系统的训练、验证和优化闭环。通过奎屯河工程的实证应用，不仅使该技术体

系满足了工程当前的安全管理需求，更为后续在其他类似水利工程推广引用提供借鉴。

表 1. 洪水预报精度对比

事件日期	实测洪峰(m ³ /s)	预报洪峰(m ³ /s)	误差(%)	NSE
2023-07-12	1200	1152	-4.0%	0.89
2024-05-08	950	932	-1.9%	0.91

3. 结语

本研究成功构建了基于多模型协同的数字孪生奎屯河工程安全“分析-预警-处置”技术体系，通过水文预报模型、水动力仿真模型与结构力学分析模型的深度耦合，形成了全链条闭环管理机制。结果表明，该体系可以显著提升工程安全管理效能。该预警体系虽有显著效果但仍存在以下局限性：例如，多模型协同机制在极端未预见工况下的仿真精度有待验证。当前耦合依赖历史数据训练，可能无法完全适应气候变化引发的极端水文变异；跨学科模型接口标准化不足。水文模型与水动力模型间的数据传递协议尚未完全统一，可能引入边界条件误差。物联网传感器的故障或异常可能导致实时感知中断，影响预警连续性。基于上述局限，未来研究将聚焦：1) 从当前运行期延伸至规划、设计、施工及退役阶段，构建“BIM+GIS+监测数据”的工程健康档案。2) 开发传感器故障自诊断算法，结合生成对抗网络(GAN)模拟缺失数据，确保极端工况下的系统鲁棒性。3) 建立水利工程模型互操作协议，统一数据接口规范，增强多模型协同的泛化能力。同时，通过全生命周期延伸和模型标准化，为水利工程提供低碳、智能、高韧性的安全管理解决方案，推动行业高质量转型。

基金项目

新疆生产建设兵团第七师奎屯河引水工程建设管理局，项目名称：新疆奎屯河引水工程数字孪生奎屯河引水工程关键技术研究项目。

参考文献

- [1] LI, S. P., CHENG, W. Y., LIU, Z. Q., et al. Key technologies and applications of digital twin hydraulic engineering. Digital Twin, 2025, 2(1): 2486862.
- [2] 高英, 高尽辉, 尚银磊, 等. 数字孪生南水北调中线工程建设思路[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1080-1088.
- [3] 郑芳, 李芳然, 甘义群, 等. 极端气候事件对洞庭湖水文连通性变化的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 67-79.
- [4] 马强, 王浩雯, 张珂健, 等. 基于“23·7”特大洪水的永定河系数字孪生流域防洪模型构建[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 75-82.
- [5] 曹振锋. 新疆奎屯河引水工程建设安全质量问题分析[J]. 云南水力发电, 2023, 39(4): 256-259.
- [6] 郭振, 张海欧. 数字孪生技术在智慧水利建设中的作用[J]. 水土保持, 2023, 11(4): 29-34.
- [7] 刘思微, 田莹, 徐永兵, 等. 数字孪生泵站三维智能巡检的研究与应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 788-797.
- [8] 李喆, 叶松, 杨星玥, 等. 数字孪生驱动的南水北调中线水源工程水质平台设计与开发[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3): 174-180.
- [9] 申振, 姜爽, 聂麟童. 数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J]. 东北水利水电, 2022, 40(8): 62-65.
- [10] TAO, F., ZHAN, H., LIU, A., et al. Digital twin in industry: State-of-the-art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2873186>