

天津市数字孪生水务体系顶层设计与建设实践

王立义¹, 杨 慧^{2*}

(1. 天津市水务局, 300074, 天津; 2. 天津市水利科学研究院, 300061, 天津)

摘 要: 建设数字孪生水务体系是应对风险挑战、把握时代之变、塑造发展动能的关键手段。本文针对天津市数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生工程相互交织、交叉耦合的区域特征, 围绕天津市数字孪生水务体系建设, 系统阐述其“四横两纵”总体架构的顶层设计, 及其建设进展、关键技术与实践成效。通过搭建“天空地水工”立体监测感知网, 实现水文、水资源、水利工程等多要素全域实时采集与数据共享; 以算据、算法、算力融合为核心, 搭建统一的数字孪生平台, 夯实智慧应用底座; 构建覆盖流域、水网、工程的全要素数字孪生体系, 推动数智化技术与防洪调度、水资源调配、工程运行管理等业务深度融合, 提升“2+N”水务业务智能决策水平。建设全过程同步落实网络安全防护要求, 完善标准规范体系与通信网络支撑, 形成全周期、规范化的长效保障机制。研究成果有效提升水务预报、预警、预演、预案能力与精细化管理水平, 可为各地区统筹推进数字孪生水务建设、实现水务治理数智化转型提供实践借鉴。

关键词: 数字孪生水务体系; 天空地水工; 数字孪生平台; 顶层设计; 天津市

Top-level design and construction practice of the digital twin water affairs system in Tianjin

WANG Liyi¹, YANG Hui^{2*}

(1. Tianjin Water Affairs Bureau, Tianjin 300074, China;

2. Tianjin Water Resources Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: Building a digital twin water affairs system is a key means for water affairs work to respond to risks and challenges, grasp the changes of the times, and shape development momentum. In view of the regional characteristics of Tianjin, where digital twin river basins, digital twin water networks, and digital twin projects are interwoven and cross-coupled, this paper systematically elaborated the top-level design of the “four horizontal and two vertical” overall architecture of the Tianjin digital twin water affairs system, as well as its construction progress, key technologies, and practical results. By building a multi-dimensional monitoring and sensing network of “sky-space-land-water-project”, it achieved real-time collection and data sharing of multiple elements across the entire region, including hydrology, water resources, and water conservancy projects. With the integration of data for algorithm, algorithms, and computing power as the core, a unified digital twin platform was built to consolidate the foundation for smart applications. A digital twin system covering all elements of river basins, water networks, and projects was constructed, which promoted the deep integration of digital intelligent technologies with flood control dispatch, water resources allocation, project operation and management, and

收稿日期: 2026-07-23 修回日期: 2026-08-26

作者简介: 王立义, 副局长, 教授级高级工程师, 主要从事信息化、水文、水资源等管理工作。

通信作者: 杨慧, 副院长, 教授级高级工程师, 主要从事水利信息化相关工作和研究。E-mail: yanghui0919@sina.com

other businesses, enhancing the intelligent decision-making level of “2+N” water affairs operations. Network security protection requirements were implemented synchronously throughout the construction process, and the standard and specification system and communication network support were improved, forming a full-cycle, standardized long-term guarantee mechanism. The research results effectively improve the capabilities of water affairs forecasting, early warning, simulation, and emergency preplanning, as well as the level of refined management, and can provide practical references for various regions to coordinate the advancement of digital twin water affairs construction and achieve the digital-intelligent transformation of water affairs governance.

Keywords: digital twin water affairs system; sky-space-land-water-project; digital twin platform; top-level design; Tianjin

中图分类号: TV21+TP 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)17-0066-07
DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.17.011

数字孪生水利体系建设对推动水利高质量发展、保障我国水安全具有重要意义。天津市水务局坚决贯彻党中央关于网络强国的战略部署,立足天津市水务管理现状,加快推进天津水务管理数字化、智能化转型。按照“大系统设计、分系统建设、模块化链接”总体思路,构建以数字孪生水务为重点的智慧水务框架体系,立足感知实时、数据共享,以智能模拟赋能科学决策,以业务协同提升管理效能,以安全可靠筑牢运行底线,破解传统水务管理中信息孤岛、响应滞后、决策粗放等痛点问题,赋能水务全业务精细化管理、精准化决策。

一、顶层设计架构

针对流域、水网、工程相互交织、交叉耦合,信息化建设层级复杂的现实情况,天津市坚持技术赋能与管理保障双轮驱动,构建信息化基础设施、支撑能力、孪生体系、业务应用“四横”和网络安全体系、标准规范体系“两纵”的总体架构(见图1),横向由基础到应用逐级递进,实现基础设施与算力资源共建共用、数据-模型协同联动、孪生体系全域覆盖、业务应用全面赋能,解决水务建设层级不清、上下不畅、业务割裂的问题;纵向贯穿全部横向层级,通过安全体系兜底运行

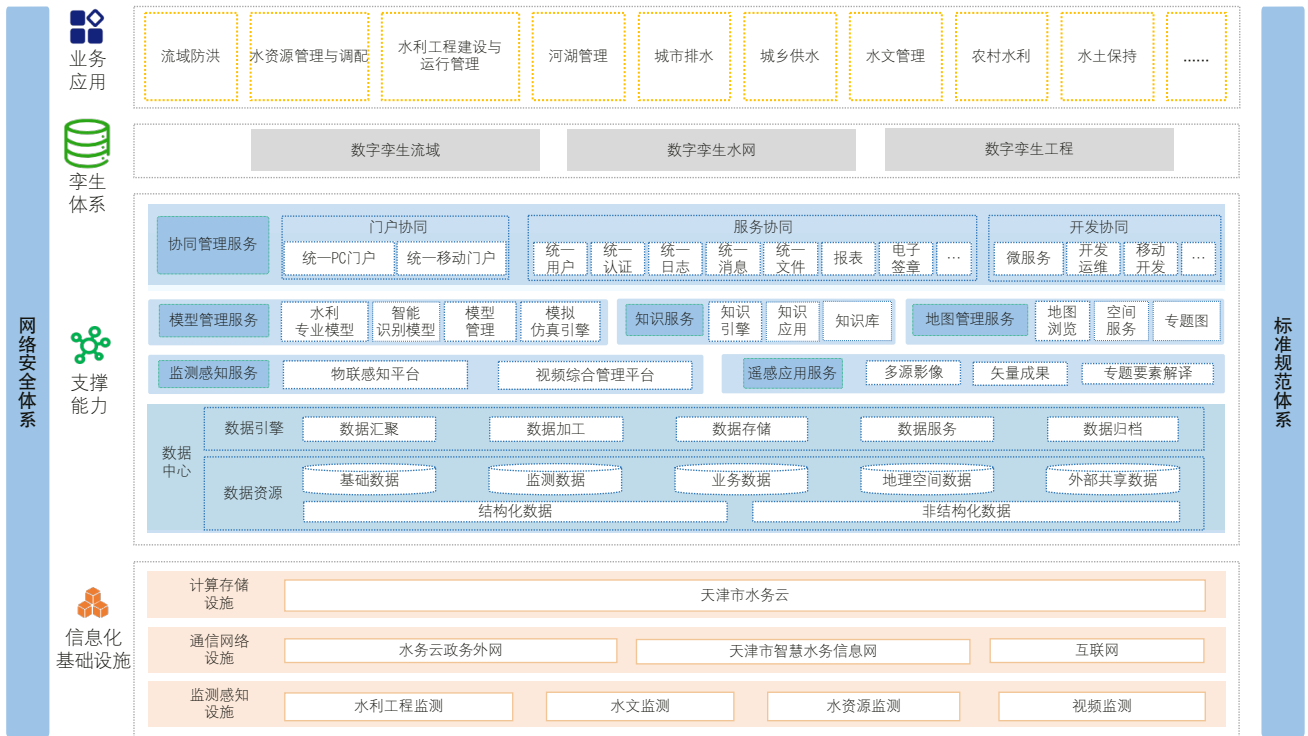


图1 天津市数字孪生水务体系总体架构

风险、标准体系统一建设规范,实现所有层级建设可管、可控、可溯源,打造兼具先进性、实用性与安全性的天津数字孪生水务体系。

1. 搭建“天空地水工”立体监测感知网

为补齐传统水利监测手段单一、点位分布不均、动态感知能力不足的短板,按照水利部监测感知体系建设的总体要求,构建天津市“天空地水工”立体监测感知网。统筹遥感卫星、无人机、测雨雷达、降雨监测设备、水文站、水位站、视频监控、工程安全监测设备等多类型感知设施,实现对涉水对象全覆盖、全空间、全要素、全天候监测感知,夯实数字孪生水务实时感知基础。

2. 打造“算据-算法-算力”融合的数字孪生平台

数字孪生平台是天津市数字孪生水务体系建设的技术核心与创新载体,可以解决传统水务数据、模型、算力相互割裂,无法支撑高精度仿真推演的技术问题。通过汇聚全市水务数据,开展数据“采集-治理-应

用-共享-更新”全链条管理,实现数据资源跨地区、跨部门、跨层级统筹管理、整合归集、共享利用。以水利专业模型为核心,强化“正向-逆向-正向”推演功能,实现数学模拟过程和物理过程“高保真”。融合百度千帆等人工智能(AI)大模型,实现水务物理流域的全要素和水务治理活动全过程的数字化映射、智慧化模拟。构建安全可靠、互联互通的通信网络体系,全面保障雨水工情、视频监控等信息高效流转、及时共享。基于天津市水务局统一云平台,形成弹性扩展、高效调度、安全稳定的算力与存储能力,为天津市数字孪生水务体系提供稳定可靠的物理环境。

3. 构建覆盖“流域-水网-工程”的数字孪生水务体系

针对天津流域、水网、工程耦合度高的管控难点,开展“数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生工程”三位一体的顶层设计(见图2)。数字孪生流域以支撑流域统一规划、统一治理、统一调度、统一管理为目标,



图2 天津市“水网+流域+工程”数字孪生体系分布

实现防洪对象预报调度一体化计算;数字孪生水网立足跨流域跨区域特点,支撑水资源常规调度、应急调度、蓄水调度、补水调度、水环境调度等业务;数字孪生工程立足重点防洪工程全生命周期管理,对风险及态势进行精准识别、预警及处置,实现工程安全运行和智能调度。

4. 以数智化赋能“2+N”水务业务应用

为实现数字化技术与水务业务深度融合,解决传统水务业务依赖人工经验、预判能力不足等问题,依托数字孪生平台提供的“算据、算法、算力”赋能全业务应用。数字孪生流域支撑流域防洪、城市防涝、山洪灾害防御业务,数字孪生水网支撑水资源调配业务,数字孪生工程支撑水利工程建设管理、运行管理业务,同步推进河湖管理、城乡供水、水行政执法等全业务数字孪生场景建设,以“四预”(预报、预警、预演、预案)功能提升水务治理科学化水平。

5. 建立安全与标准双体系运行机制

针对水务重要数据量多、面广、安全防护难度大,以及系统交互复杂等情况,统筹搭建网络安全体系和标准规范体系,通过建立网络与数据安全防护机制,明确天津市数字孪生水务建设管理制度与技术规范、建设标准,规避系统运行及数据泄露风险,保障数字孪生水务体系规范、安全、稳定运行。

6. 强化组织领导统筹推动作用

为统筹全局建设、统一建设思路、压实建设体系,充分发挥高位组织领导的统领核心作用,天津市自上而下统筹推进全市数字孪生水务建设。通过搭建全市统一数字孪生平台,形成“统建共用,分建共享”工作格局,实现跨层级数据互通、跨业务协同联动。锚定国家战略,统筹谋划信息化项目及“实体工程+数字孪生”项目,实现全域统一规划、统一推进,保障全市智慧水务建设“一盘棋”。

二、建设重点与进展

经过系统谋划与全力推进,天津市立足顶层设计总体布局,坚持总体统筹、集约共建,将数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生工程作为数字孪生水利体系的重要组成一体推进,聚焦立体感知、体系构建、平台支撑与长效保障关键方向,完成关键基础设施布设、核心平台搭建与应用场景落地,全面提升洪水防御、水资源调配、工程运行管理等核心业务能力,为水务治理现代化提供坚强支撑。

1. “天空地水工”立体监测感知网初步建立

天津市已建成6部测雨雷达并组网运行,成为全国首个实现水利测雨雷达全覆盖的省级行政区,并搭建138处降水监测点、96处水文站、208处水位站、100余处视频监测点、1800余个工情和安全监测点,初步构建起天津市“天空地水工”立体监测感知网,实现对现实环境和工程运行状况、水文情势变化数据的秒级传输,为水利业务提供实时动态的数字化支撑。

2. “流域-水网-工程”数字孪生水务体系初具规模

推进数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生工程一体化建设,贯通前端感知、数据归集、模型知识应用全过程,赋能全业务应用。

①数字孪生流域建设覆盖北三河、永定河、大清河、子牙河四大河系,密云水库,以及北运河北关分洪、卢沟桥、新盖房、枣林庄、献县等流域重点枢纽。搭建了覆盖全流域的9类水利专业模型,形成了完整的“降水—产流—汇流—演进”模拟能力,通过预测上游来水过程与演进,对重点山洪沟道进行灾害预警,实现河道洪水演进、淹没分析和调度方案的正、反向推演,为防洪调度方案的制定提供科学依据。

②数字孪生工程建设覆盖18座水闸、4座泵站、5座水库、19条一级河道堤防、5个蓄滞洪区,通过为每个工程建立高精度的三维数字模型,融合工程设计、运行、监测等全生命周期数据,实现工程数字化映射。通过工程安全实时健康度评价模型,融合现场监测数据与工程结构模型,对工程的整体健康状态进行实时量化评估和预警。利用智能遥感识别模型,对工程周边环境、水体范围等进行解译分析,辅助工程日常巡检和管理。通过模拟仿真引擎的可视表达功能,模拟预演不同工况下工程的运行状态和水流动态,实现对工程的智能调度。

③数字孪生水网建成集常规调度、应急调度、蓄水调度、生态补水调度、水环境调度于一体的智能水务调度体系。制定日常引滦、南水北调等调水计划,生成从水源到水厂用户的常规调水方案;构建污染、自然灾害、工程故障3类突发事件下13种应急情景处置能力,快速生成应急调度方案;生成全市19条一级河道、104条二级河道、21座水库及4处湿地的最优蓄水方案,高效利用雨洪资源;生成7条一级河道、中心城区海河及4处湿地的生态补水调度方案,保障河道生态基流;开展中心城区海河及其支流汛期水环境调度,通过水量置换持续改善水体水质。

3.“数据共享、模拟智能、业务协同、安全可靠”的数字孪生平台初步构建

构建“数据-模型-知识”融合贯通的数字孪生平台,破解水务数据一数多源、业务系统彼此孤立、数据业务“两张皮”等突出问题,围绕数据高效融合、模型精准驱动、AI智能研判等核心功能,为数字孪生体系筑牢技术根基。

①数据中心。融合GIS、卫星遥感、无人机、5G+北斗双信道传输等前沿技术,采集64类实体、10万余个数据对象的基础数据;汇集16颗卫星资源、4000个雨水工情站点等监测数据;集成水旱灾害防御、水资源管理与调配等8类业务数据;搭建覆盖全市19条一级行洪河道、26条二级河道、13个蓄滞洪区的L2级地理空间数据,以及覆盖19条一级河道堤防、42座重点水利工程的L3级数据底板;汇集天津市气象、应急管理、自然资源等相关单位以及水利部、河北、北京、水利部海河水利委员会(以下简称海委)等外部共享数据,打造“采集—治理—应用—共享—更新”全链条、跨层级水务数据管理体系,逐步形成统筹建设、分级管理、信息共享的全市一盘棋。

②模型平台。新建和集成6类适用于天津市平原河网的水文、水动力模型,5类适用于闸泵站群的联合调度、工程安全分析模型,5类遥感AI识别模型。基于微服务架构、组件化以及工作流等技术,建设统一的模型管理平台,实现模型注册、发布、调用、计算、调参及可视化全流程管理。通过弹性资源调度,支持多任务并行或顺序处理,保障汛期及应急情况下的模型快速优先计算,支撑业务模型快速搭建,提升模型计算效率和准确率。

③知识平台。收集整理3000余条天津市水利相关名词解释,6000余份技术标准、法律法规、书籍,构建省级水利专业领域知识图谱。基于百亿级参数的大模型知识引擎,构建具备因果推理能力的“水务决策大脑”,实现“会分解水利任务,可调用水利专业模型,可展示推演结果”。

④通信传输与算力基础设施。应用5G专线、北斗等先进技术,基本打通“感知终端—工程现地—直属单位/区水务局—市水务局”视频全链路,实现水务局至所有直属单位百兆互联、至基层单位网络全覆盖,畅通网络通信“最后一公里”。打通市水务局至水利部、海委、其他相关单位的网络链路,保障雨水工情及视频信息的及时传递。充分利用天津市政务

云资源,打造“政务云+本地水务云”数字孪生水利算力格局,初步建成1万核基础算力、PB级存储以及420 TFLOPS高性能算力。

4.长效化保障体系初具规模

①网络安全体系。按照“统筹规划、集约高效、安全可控、按需服务”的原则,建立健全网络安全管理体系、技术体系、运营体系和保障体系,共建密码科技国家工程研究中心天津基地,建立全局共用的密码资源池,实现商用密码应用接口统一规划、密钥保障统一管理。完成了数据分级管理和数据保护工作,整体满足网络安全等级保护三级安全防护要求,为天津市数字孪生水务建设提供强有力的安全保障。

②标准规范体系。为保障数字孪生水务建设的统一性、规范性和兼容性,坚持标准先行,编制《天津市智慧水务专项规划》《天津市水务局智慧水务建设实施方案(2023年至2025年)》等,建立《天津市水务信息化建设与运维管理办法》《天津市水务数据资源管理办法》《天津市数字孪生建设工作要求》等管理制度体系,构建贯穿用户和应用、数据资源和支撑能力、空间数据资源、基础设施及感知体系、应用实施全技术环节等的一系列标准规范体系,保障数字孪生水务建设在技术和制度双重规约下有条不紊推进。

三、关键技术研究及支撑

聚焦数字孪生水务建设过程中数据-模型融合协同、仿真智能推演、系统安全运行等核心问题,提炼形成关键技术,为天津市数字孪生水务体系落地与稳定运行提供支撑。

1.“数据-模型-知识”耦合贯通技术

依托遥感、物联感知等多源监测技术,构建水务数据全链条管理体系,实现数据采集—治理—应用—共享—更新的闭环管控。依据水利部相关标准,构建适配区域特色的水务时空数据模型,实现异构水务数据的空间配准、时序对齐与结构化融合,为模型计算与智能推演提供标准化数据底座。

自研及集成适配本地特点的水文水动力模型、工程有限元分析模型、闸泵群联合调度模型与人工智能识别模型,通过模型接口标准化、算法封装与资源池化技术,实现模型资源一次构建、全域复用、动态调用,实现多模型联动并行演算,提升水务场景仿真推演的通用性与计算效率。

搭建水利结构化知识引擎与大模型知识引擎,通

过水利规范、法规与专业知识的结构化入库与图谱重构,形成水利专业知识库。依托知识检索、语义推理、场景适配等智能算法,实现专业模型仿真结果与大模型知识推理的深度耦合,支撑工程安全预警、安全处置预案智能生成、综合决策等应用。

2. 智能驱动的工程安全正反向推演决策技术

针对闸泵联合调度与工程安全分析相互割裂、仿真分析效率低、决策高度依赖经验短板,提出水利工程安全正反算耦合算法,融合工程结构力学机理与水动力调度过程,实现工程应力应变、运行工况与水情参数的动态联动计算,突破安全监测与闸泵联合调度异步分析的技术瓶颈,实现工程安全状态实时计算、调度工况动态反馈的一体化推演能力。同时构建闸泵工程联合调度模型,融合结构安全阈值、运行经济指标等多维评价指标,结合AI驱动的多目标智能优化方法,实现复杂工况下仿真分析时间缩短至分钟级,提升极端水情下防洪调度的应急响应速度。

3. 分类分级与动态协同的全栈安全防护技术

基于敏感数据资产盘点、智能定级与目录梳理,搭建数据分类分级系统,依托水务行业规范,自动扫描涉水数据资产并智能分类定级,形成全域水务资产目录,为实施差异化管控策略提供“数据底图”。构建静态+动态全场景数据脱敏技术体系,内置多维度脱敏算法与自定义转换规则,可实现字段遮蔽、隐私替换等脱敏处理。同时部署应用数据安全防护系统,通过SQL注入检测、视图频次拦截、限制误删改行数等主动防护算法,深度接管客户端连接进程,实现精确到查询选择列的访问控制与误操作拦截,有效抵御高并发场景下的非法穿透与恶意篡改风险。

四、实践成效

天津市数字孪生水务体系有效提升水务业务“四预”全链条智能决策能力,在海河“25·7”区域性大洪水应对、水资源调度等重点工作中发挥关键支撑作用。

1. 流域防洪效能显著提升

2025年7月下旬,天津市出现潮白河、北运河、沟河三河洪水叠加,天津市数字孪生水务体系通过滚动模拟预演不同工况洪水预报方案60余个,形成最优调度方案,成功避免启用黄庄洼蓄滞洪区。同一时期,蓟州山区杨庄水库短时入库洪峰流量超50年一遇,运用洪水预报调度模型,优化洪水下泄量级及时空分布,充分发挥水库拦洪削峰作用,最终削峰率达36%,拦洪率超四成,保障京津冀防洪安全的同时,避免了

对下游城镇造成较大淹没影响。

2. 水资源调配精细化水平持续增强

2025年上半年,丹江口水库来水极度偏枯,南水北调中线工程总干渠藻类异常。基于多目标水资源调配模型,生成13种引江水源断供场景下的应急供水调度方案,为应急供水提供全面技术保障。日常工作中,模拟预演水资源调度、水资源优化配置方案30余个,为引滦、南水北调联合调度提供技术支撑。汛末开展雨洪资源利用模拟推演,优化存、泄时机,实现全市地表蓄水超多年均值,为全市冬春农业用水增加了水源保障。

3. 城市内涝防控能力持续强化

2025年8月,面对降雨排沥与海河水环境保护的矛盾,利用中心城区水质水量联合调度模型和水资源调度“四预”系统紧急推演3套生态补水方案,及时调整调度措施,24h内恢复海河水环境,中心城区海河核心段水质达到地表水Ⅱ类标准,为历史最好水平。

4. 水利工程安全运行保障能力持续夯实

2025年7月下旬在潮白新河、杨庄水库等的行洪过程中,通过工程安全分析模型对水库大坝、潮白新河堤防在不同工况、不同调度方案下的安全状态进行分析,为防洪调度提供支撑。日常工作中,通过动态监测,实时掌握工程状况并进行安全评估,运用新质生产力提升工程管理能力。

5. 河湖管理规范化水平稳步提高

在河湖管理方面,为天津市各级河长、河长办、河系管理中心搭建河湖问题监管及处理的信息化平台,形成“人防+技防”的智能监管体系,提升河湖问题监管水平和治理效率。

五、展望

下一步,将从以下方面深化研究成果并推进成果转化应用。一是提升监测感知能力。进一步构建全覆盖、全空间、全要素、全天候的监测感知网络,提升监测感知的精准性、同步性、及时性。二是升级数据赋能和技术支撑能力。持续做好数据资源更新完善和共享应用,提升专业模型精度和覆盖范围,加强大模型等新技术的创新应用。三是持续拓展业务应用场景。进一步完善数字孪生水务体系在工程、流域、水网的覆盖范围,推进城市排水等应用场景建设,为天津市基本建成社会主义现代化大都市取得决定性进展提供坚实水安全保障。



参考文献:

- [1] 天津:下功夫深化智慧城市建设 部署14项重点任务[J].未来城市设计与运营,2026(2):5.
- [2] 李国英.推动水利高质量发展 保障我国水安全 为确保基本实现社会主义现代化取得决定性进展作出水利贡献[J].中国水利,2026(1):1-9.
- [3] 蔡阳.数字孪生水利建设进展与发展思考[J].水利信息化,2025(1):1-7+20.
- [4] 钱峰,夏润亮.数字孪生水利赋能水利新质生产力发展框架研究[J].中国水利,2024(8):6-10+5.
- [5] 蔡阳.数字孪生水利建设中应把握的重点和难点[J].水利信息化,2023(3):1-7.
- [6] 朱思宇,杨红卫,尹桂平,等.基于数字孪生的智慧水利框架体系研究[J].水利水电工程学报,2023(3):68-74.
- [7] 水利部.关于大力推进智慧水利建设的指导意见[A].2022.
- [8] 连彬,魏忠诚,赵继军.智慧水利关键技术与应用研究综述[J].水利信息化,2021(5):6-18+31.
- [9] 蔡阳,成建国,曾焱,等.大力推进智慧水利建设[J].水利发展研究,2021,21(9):32-36.
- [10] 钱峰,成建国,夏润亮,等.数字孪生水利“天空地水工”一体化监测感知体系构建与应用初探[J].中国水利,2024(24):39-47.
- [11] 徐健,赵保成,李国忠,等.基于数字孪生的水利工程标准化管理平台研究与应用[J].水电能源科学,2026,44(5):237-241.
- [12] 谢明霞.数字孪生水利内涵及应用场景研究[J].人民长江,2024,55(2):245-251+264.
- [13] 张诗媛,邓鹏.基于数字孪生的水闸工程安全运行管理系统设计与实现[J].水电能源科学,2024,42(3):123-127.
- [14] 司林波,萧欣茹.数字孪生何以破解黄河流域数字化治理的“碎片化”困境:基于整体性治理的运行框架[J].学习论坛,2024(1):58-66.
- [15] 牛广利,胡雨新,胡蕾,等.工程安全综合评价模型研究及数字孪生应用[J].人民长江,2024,55(4):239-243+261.
- [16] 李国英.加快建设数字孪生流域提升国家水安全保障能力[N].光明日报,2022-08-10(4).
- [17] 蔡阳.以数字孪生流域建设为核心 构建具有“四预”功能智慧水利体系[J].中国水利,2022(20):2-6+60.
- [18] 冶运涛,蒋云钟,梁犁丽,等.数字孪生流域:未来流域治理管理的新基建新范式[J].水科学进展,2022,33(5):683-704.
- [19] 詹全忠,陈真玄,张潮,等.《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》解析[J].水利信息化,2022(4):1-5.
- [20] 谢文君,李家欢,李鑫雨,等.《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》解析[J].水利信息化,2022(4):6-12.
- [21] 贺挺,夏润亮,宋利祥,等.数字孪生水利专业模型平台构建思路与实践[J].人民黄河,2025,47(11):144-148+162.
- [22] 祝宾皓,夏润亮,李涛,等.数字孪生黄河知识平台建设初探[J].人民黄河,2025,47(8):32-38.
- [23] 钱峰,成建国,夏润亮,等.水利大模型的建设思路、构建框架与应用场景初探[J].中国水利,2024(9):9-19.
- [24] 冯钧,朱跃龙,王云峰,等.面向数字孪生流域的知识平台构建关键技术[J].人民长江,2023,54(3):229-235.
- [25] 丁楠,郭建勇,褚子润.水利数字孪生平台运维管理标准化规范与安全体系[J].中国品牌与防伪,2025(8):175-176.
- [26] 蔡卫国.智慧水务标准规范体系研究与设计[J].大众标准化,2023(17):22-24.
- [27] 冶运涛,蒋云钟,曹引,等.以数字孪生水利为核心的智慧水利标准体系研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(4):1-16.

责任编辑 刘磊宁