

数字孪生灌区内涵解析及建设思路与关键技术

蒋云钟^{1,2}, 冶运涛^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 100038, 北京; 2. 水利部数字孪生流域重点实验室, 100038, 北京)

摘要: 基于数字孪生理论, 从水网系统视角首次构建数字孪生灌区多维度认知体系, 为复杂灌区系统数字化转型提供理论支撑。通过解构工程设施链、水资源系统网与管理主体群三维耦合关系, 提出灌区水网具有层级复杂性、动态耦合性、功能复合性、区域差异性及业务协同性五大核心特性, 并从特征维度、功能维度、协同维度三重维度解析数字孪生灌区内涵。研究突破传统灌区管理范式, 以工程安全运行、水量科学调度、控制自动智能、管理协同高效、应急敏捷响应和服务主动便捷等业务目标为导向, 构建“数字化场景—智慧化模拟—精准化决策—自动化控制—定量化评估”五阶闭环优化路径, 形成以立体感知、墒情预报、动态评价、水量调度、远程控制为技术主线, 以调水优化、输水仿真、智能控制、精准配水、高効用水为关键技术的数字孪生灌区智能体框架。该框架实现了灌区水网从“经验驱动”向“数据—机理—知识”驱动的范式转变, 为数字孪生技术在复杂灌区系统中的深化应用提供可复制推广的实践范式, 对保障国家粮食安全与水资源可持续利用具有重要战略价值。

关键词: 国家水网; 智慧水利; 数字孪生水利; 数字孪生灌区; 灌区现代化

Connotation analysis, construction approach and key technologies of digital twin irrigation districts//
JIANG Yunzhong, YE Yuntao

Abstract: Based on digital twin theory, a multidimensional cognitive framework for irrigation districts is constructed for the first time from the perspective of the water network system, providing theoretical support for the digital transformation of complex irrigation systems. By deconstructing the three-dimensional coupling relationship among the engineering facility chain, water resource system network, and management entities, five core characteristics of the irrigation water network are proposed: hierarchical complexity, dynamic coupling, functional integration, regional heterogeneity, and operational synergy. The connotation of digital twin irrigation districts is further analyzed from three dimensions: characteristics, functions, and collaboration. This study breaks through the traditional management paradigm of irrigation districts and, oriented toward business objectives such as safe operation of infrastructure, scientific water dispatching, automated and intelligent control, efficient collaborative management, agile emergency response, and proactive and convenient services, establishes a five-stage closed-loop optimization path: “digital scenarios → intelligent simulation → precise decision-making → automated control → quantitative evaluation”. An intelligent agent framework for digital twin irrigation districts is developed, with core technologies including three-dimensional sensing, soil moisture forecasting, dynamic assessment, water volume scheduling, and remote control, and key functions such as water transfer optimization, water conveyance simulation, intelligent control, precise water distribution, and efficient water use. This framework realizes a paradigm shift in irrigation water network management from

收稿日期: 2025-06-23

作者简介: 蒋云钟, 副院长, 正高级工程师, 主要从事智慧水利、水文水资源研究。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3209302); 国家自然科学基金项目(52279031)。

“experience-driven” to “data-mechanism-knowledge-driven”, offering a replicable and scalable model for the application of digital twin technology in complex irrigation systems. It holds significant strategic value for ensuring national food security and the sustainable utilization of water resources.

Keywords: national water network; smart water conservancy; digital twin water conservancy; digital twin irrigation district; modernization of irrigation district

中图分类号: TV+S27+TP27 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2025)13-0024-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.13.004

一、引言

灌区作为保障国家粮食安全的核心基础设施,承载着全国70%以上的粮食产量,是维系农业命脉的“生命线”。在全球气候变化加剧、水资源供需矛盾突出的背景下,传统灌区存在灌溉用水效率偏低(全国灌溉水有效利用系数为0.58,发达国家达到0.7~0.8)、调度管理主要依赖经验等突出问题,灌区智慧化转型不仅是提升农业生产效率的关键途径,更是落实“藏粮于地、藏粮于技”战略、保障水资源可持续利用的必然选择。2023年中央一号文件明确要求“推进大中型灌区智能化改造”,“十四五”现代水网建设规划将灌区水网定位为国家水网的“毛细血管”,强调通过数字孪生等技术实现预报、预警、预演、预案“四预”功能,标志着智慧灌区建设已从技术探索升级为国家战略需求。数字孪生灌区通过构建物理灌区的虚拟映射体为灌区水量调度、工程运行、田间管理的精准化、可视化、智能化提供技术支撑,可有效赋能灌区高标准农田建设,助力国家粮食安全,并为落实智慧水利建设和发展水利新质生产力提供灌区实践。

2022年,水利部遴选49处大中型灌区开展数字孪生灌区先行先试工作,各试点灌区通过数字孪生技术实现精准化监测、智能化调度、远程化操控,灌溉数字化水平明显提升,灌溉效率显著提高。如:四川都江堰灌区通过数字孪生系统能够分钟级预判各河段来水量,2024年7月依靠洪峰预演得到的精确数据成功应对近10年最大洪峰过境;春灌期间通过精准监测上游来水,实现对渠首六大干渠配水的智能化调度和对重要控制闸门的远程化操控,实现调水配水全流程线上作业。安徽淠史杭灌区通过数字孪生系统可精确推演上游六大水库未来10日入流变化,并对分布于各区域的1200余座小型水库及20万个塘堰进行分片量化分析,实现对灌区水资源供给状态的全域动态掌握。山东位山灌区通过数字孪生系统能够精准分析土壤墒情

和作物需水,可实现亩均节水近 30 m^3 ,扩大灌溉面积10万亩(1亩= $1/15\text{ hm}^2$),春灌周期从45 d缩至40 d,配水效率提高11%。河北石津灌区通过数字孪生系统的多体系与模型实现精准调度,灌溉周期由35 d缩短至25 d,年均节水4200万 m^3 ,灌溉水有效利用系数提高0.5%,水费实收率保持100%。山西大禹渡灌区通过数字孪生系统可实时掌握灌区各类信息,构建泵站节能降耗、干支渠输配优化节水、灌溉配水优化等模型,实现精准供水,节能降耗约10%,节水约10%,生产管理减员约20%。江苏新禹河灌区通过数字孪生系统能够精准制定灌溉方案并实现户级用水计量和远程调控闸泵设施,春灌期间示范区灌溉周期缩短20%,用水效率提升超10%。宁夏秦汉渠灌区通过数字孪生系统实现引供水精准计量与水资源科学调度,年均节水超2亿 m^3 ,亩均用水量由 715 m^3 降至 510 m^3 ,灌溉水有效利用系数提升至0.54;远程操控使灌溉效率提高30%,水费降低20%。

数字孪生技术在灌区信息化建设中发挥了重要作用,然而灌区组成结构和特性复杂,涉及调水、输水、配水、用水等各个环节,水流精准调节与实时控制难度大。针对上述问题,本文从水网视角,以“内涵解析—建设思路—关键技术”为技术路线,解构数字孪生灌区理论技术,以期完善数字孪生灌区系统认知和提升技术水平提供借鉴。

二、灌区水网的组成与特点

1. 灌区水网组成

灌区水网作为人工构建的复杂水利系统,其组成可解构为工程设施链、水资源系统网、管理主体群等三大维度。各要素既独立承担特定功能,又通过物理连接、水量调配、信息交互形成有机整体,集中体现“工程设施—水资源系统—管理主体”的系统性耦合特征。

(1) 工程设施——层级分明的水利工程链

灌区工程设施按功能划分为“调水—输水—控

制—配水—用水”五大环节,形成从水源到田间的完整链条。调水工程为水源保障的“主动脉”,包括水源水库、引调水工程,承担水资源时空再分配功能。输水工程为水量输送的“骨干网络”,以总干渠、干渠、支渠为主体,构成中观输水网络。控制工程为水流调控的“神经节点”,包括节制闸、泵站等关键控制单元。配水工程为田间分水的“毛细血管”,通过斗渠、农渠分水闸实现水量精准分配。用水工程为灌溉“最后一公里”的“末梢器官”,包括滴灌带、喷灌设备等田间设施。

(2) 水资源系统——多源互补的供水网络

灌区水资源系统整合4类水源,形成“地表水为主、地下水调蓄、外调水补充、非常规水利用”的复合供水体系。地表水是通过水库、河道取水。地下水作为地表水补充,通过井电双控技术控制开采量,配合灌区排水系统防止盐碱化。外调水是跨流域调水工程,依托水资源配置模型实现外调水与本地水的优化配比,减少无效输水损耗。非常规水包括再生水、雨水等,保障农田用水安全。

(3) 管理主体——多元协同的治理体系

灌区管理涉及3类核心主体,通过制度设计与技术手段实现协同共治。灌区管理单位作为技术实施主体负责工程运行维护、水量调度方案制定,依托数字孪生平台实现24 h实时监控,减少人工巡检量。农户与用水户协会通过智能量测设备与手机App获取用水信息,参与节水奖励机制,提升用水户满意度。地方政府与水利、农业农村、生态环境等部门通过数据共享平台协同决策,农业农村部门提供作物需水数据,生态环境部门监管排水水质,形成“监测—调度—监管”闭环。

2. 灌区水网特点

灌区水网特点集中体现在层级结构、动态机制、功能定位、区域差异与业务协同的交织耦合,形成技术应用与管理创新的独特挑战。

(1) 层级复杂性——跨尺度工程体系的协同难题

灌区本质上是“水源工程—输配水网络—田间系统”的多层级耦合体。从水源端的水库、泵站,到骨干输配水网络的总干渠、干渠,再到田间尺度的斗渠、农渠、毛渠,形成“宏观水源调控—中观渠系输水—微观田间配水”三级架构。不同层级的工程规模、调控目标与管理主体差异显著,水源工程侧重多水源联合调度,骨干渠系关注水动力平衡与输水效率,田间系统则要求精准到田块的水量分配。

(2) 动态耦合性——多因素交互的实时调控挑战

水流运动与气象、作物、工程操作的动态耦合,构

成灌区最显著的实时性特征。气象因子(降雨、蒸发、风速)直接影响作物需水预测精度,如:玉米拔节期需水量较苗期增加30%;作物生育期变化(如水稻分蘖期与灌浆期的水分敏感差异)要求调度方案动态调整;闸门启闭、泵站启停等工程操作则引发渠系水动力过程的连锁反应(如水锤效应)。

(3) 功能复合性——多目标平衡的系统优化压力

灌区不仅是粮食生产的“输水通道”,更承担排水、防洪、生态等复合功能。在江淮丘陵区灌区(如淠史杭灌区),雨季需同步实现农田排水与骨干渠道防洪;西北干旱区灌区需在保障灌溉的同时,维持天然河道生态基流;黄河下游灌区则面临泥沙淤积控制与地下水回补的双重任务。这种多目标耦合需求,推动“水资源配置模型+防洪模型+生态模型”的多学科融合。

(4) 区域差异性——地理气候约束下的技术适配性

灌区特性随地理气候条件呈现显著分异特征。南方湿润区灌区以排水防涝为重点,需解决稻田退水氮磷污染问题;北方干旱区灌区以节水增效为核心,面临盐碱化防治与跨年度水量平衡难题;西北高扬程灌区受地形限制,需攻克泵站群能耗优化与设备可靠性技术;西南山区灌区则受制于复杂渠系地貌,要求水动力模型具备弯道、陡坡等特殊流态模拟能力。

(5) 业务协同性——多主体参与的治理复杂性

灌区管理涉及水利、农业农村、气象、生态环境等多部门,以及地方政府、用水户协会、新型农业经营主体等多元主体。水源调度需水利部门与气象部门实时共享数据,田间节水改造需农业农村部门与农户协同推进,生态流量调度需生态环境部门与水利工程管理单位联动。

三、数字孪生灌区内涵解析

数字孪生灌区具有特征、功能、协同等3个维度内涵,涵盖特征维度的实时交互与自优化、功能维度的全流程数字化及协同维度的闭环进化机制(见图1)。特征维度通过数据驱动实现同步仿真与虚实互动,功能维度完成从映射到预演的智能覆盖,协同维度让各环节耦合进化,共同构建智慧化灌区体系。

1. 特征维度

数字孪生灌区以同步仿真运行、虚实交互、迭代优化为特征,通过传感器实时采集数据驱动模型动态演算,构建物理灌区与数字模型的双向反馈机制,支持管理人员进行实时互动与策略调整。依托数据积累持续

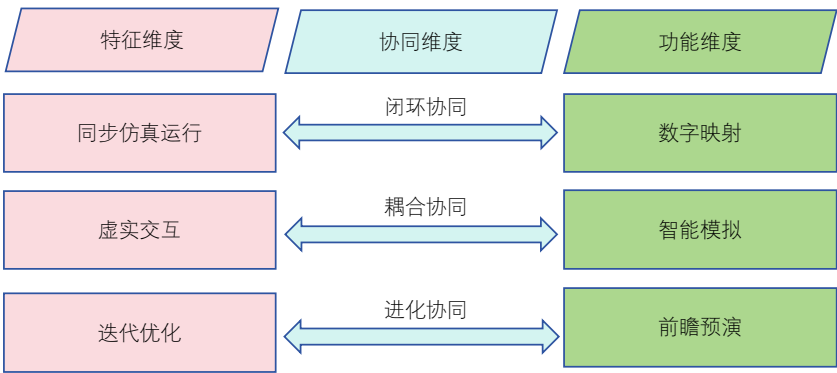


图1 数字孪生灌区三个维度内涵

优化模型精度与管理决策,实现灌区运行状态的精准映射与自适应性提升。

(1) 同步仿真运行

①实时数据驱动。通过在灌区部署的各种传感器和监测设备,实时采集灌区运行数据,如水位、流量、土壤墒情、设备运行状态等,并将这些数据及时传输到数字孪生灌区平台。数字孪生模型根据实时数据进行动态更新和调整,确保数字模型与物理灌区的运行状态保持同步,实现对灌区实时运行情况的准确反映。②模型动态演算。数字孪生灌区模型能够接收实时数据并进行动态演算,根据灌区实时运行状态和边界条件的变化,自动调整模拟参数和计算过程,实时模拟灌区的水流、泥沙、水质、作物生长等过程,实现对灌区动态变化的实时跟踪和模拟,为灌区管理部门实时决策提供有力支持。

(2) 虚实交互

①物理实体与数字模型的交互。数字孪生灌区不仅实现物理灌区到数字模型的单向映射,还建立数字模型与物理实体之间的双向反馈机制。通过数字模型分析和模拟结果,可以对物理灌区运行进行优化和调整,如根据模型预测的水位变化调整水闸的开合度,根据作物生长模拟结果调整灌溉策略等。同时,物理灌区的实际运行数据又不断反馈到数字模型中,对模型进行修正和完善,使数字模型能够更准确地反映物理灌区的实际情况。②人员与数字孪生灌区的交互。灌区管理人员可以通过人机交互界面与数字孪生灌区进行实时互动,查询灌区的各项运行信息,查看模拟结果,进行方案预演和评估等。同时,管理人员也可以根据自身经验和判断,对数字孪生灌区的模型参数、调度方案等进行调整和优化,使数字孪生灌区更好地满足灌区管理实际需求。

(3) 迭代优化

①模型优化。随着灌区运行数据的不断积累和更新,以及对灌区运行规律认识的不断深入,数字孪生灌区模型可以不断优化和改进。通过参数校准、算法改进、结构优化等方法,提高模型的精度和可靠性,使其能够更准确地模拟灌区的运行过程和响应机制,为灌区科学决策提供更有力的支持。②管理决策优化。基于数字孪生灌区的模拟结果和分析评估,灌区的管理决策可以不断迭代优化。通过对不同管理策略和调度方案的预演和评估,选择最优方案进行实施,并根据实施效果对方案进行调整和改进。同时通过对灌区运行情况的实时监测和反馈,及时发现问题并采取相应措施进行调整,实现灌区管理决策的持续优化和提升。

2. 功能维度

功能维度聚焦数字映射、智能模拟、前瞻预演,通过GIS/BIM技术构建三维数字模型,集成多源数据形成精准数字镜像;借助水力学、作物生长等模型模拟水流运动与资源配置;针对调度方案、工程改造、灾害预警开展预演,为灌区规划、调度与抗灾提供全流程智能支撑。

(1) 数字映射

①构建灌区数字模型。利用地理信息系统(GIS)、建筑信息模型(BIM)、无人机测绘等技术,对灌区的地形特征、水系分布、水利工程设施(如渠道、泵站、水闸等)、土壤类型、作物种植布局等进行精确建模,生成与现实灌区相对应的三维数字模型,实现灌区物理实体的数字化表达。②数据集成与融合。将灌区的各类数据,包括实时监测数据(水位、流量、土壤墒情、气象等数据)、历史运行数据、工程设计参数、土地利用数据等进行采集和整合,按照统一的数据标准和格式存储到数据中心,并与数字模型进行关联和绑定,形成完整的灌区数字映射数据体系。这些数据如同灌区的“基因”,决定了数字孪生灌区的精准性和真实性。

(2) 智能模拟

①灌区水流模拟。基于水文、水力学模型,对灌区的水流运动进行模拟,包括水流在渠道中的传播、分水过程、水位变化等。通过输入上游来水、降雨等边界条件,模拟不同工况下的水流分布和变化情况,分析渠道的过流能力、水流速度、水位壅高等参数,为输水调

度和工程设计提供科学依据。②作物生长模拟。结合作物生理生态模型和土壤水分平衡模型,根据灌区的土壤墒情、气象条件、作物品种、种植方式等因素,模拟作物的生长过程和需水规律。预测作物在不同灌溉条件下的生长态势、产量变化,以及可能出现的旱涝灾害对作物的影响,从而为制定精准灌溉策略提供决策支持。③水资源配置模拟。运用系统分析和优化算法,对灌区的水资源进行模拟配置。考虑水源的多元性(地表水、地下水、再生水等)、用水需求的多样性(农业灌溉、生态用水、工业用水等)以及水资源的时空分布不均等特点,建立水资源配置模型,模拟不同水资源分配方案下的供需平衡情况,评估各方案的可行性和效益,为实现水资源的合理利用和优化配置提供技术支撑。

(3) 前瞻预演

①调度方案预演。在灌区面临来水预测变化、用水需求调整、工程设施检修等情况时,利用数字孪生灌区模型对不同的调度方案进行预演。通过模拟不同方案下水在灌区内的流动过程、分配结果及工程设施运行状态等,提前评估各方案对灌区运行的影响,如是否会导致渠道水位超限、部分地区供水不足、泵站能耗增加等问题,从而选择最优调度方案,确保灌区运行的稳定性和高效性。②工程改造预演。当灌区需要进行工程改造或扩建时,如新建渠道、改造泵站、修建水库等,可在数字孪生灌区中对工程方案进行预演。模拟工程实施后的灌区运行情况,分析工程对灌区水流、泥沙、水质、灌溉效益等方面的影响,提前发现潜在问题,优化工程设计方案,减少工程投资风险,提高工程建设的科学性和合理性。③灾害预警预演。结合气象预报和洪水预报模型,对灌区可能发生的旱涝灾害进行预警预演。在灾害发生前,模拟灾害对灌区的影响程度和范围,如洪水淹没区域、干旱缺水程度等,提前制定应对措施,如调整水库蓄水、开启备用泵站、实施应急灌溉等,提高灌区的抗灾减灾能力。

3. 协同维度

协同维度通过闭环、耦合、进化机制实现多维联动。数字映射与同步仿真形成数据驱动的闭环反馈,提升模型精准度;智能模拟与虚实交互耦合,以模拟指导实体调整,以实体反馈修正模型;前瞻预演与迭代优化协同进化,预演发现问题,优化反哺预演,推动灌区管理决策持续升级。

(1) 数字映射与同步仿真运行的闭环协同

①数据驱动。实时采集灌区数据,更新数字映射,

确保模型准确反映实际状态。这些数据驱动数字孪生模型动态演算,实现与物理灌区同步仿真运行。②动态调整。数字孪生模型根据实时数据动态调整参数,维持与物理灌区的一致性。如更新水位参数、重新计算水力学参数等,保证同步仿真运行准确性。③闭环反馈。同步仿真运行发现差异,反馈给数字映射系统,修正模型参数和结构,形成闭环。如此反复,提升数字映射准确性和同步仿真可靠性,为灌区管理提供精准决策支持。

(2) 智能模拟与虚实交互的耦合协同

①模拟指导实体调整。智能模拟为物理灌区运行调整提供决策依据。如模拟发现灌溉水量不足,管理人员据此调整水闸开度或泵站运行参数,实现虚实交互。②实体反馈修正模型。物理灌区调整后的数据反馈到数字孪生平台,修正模型模拟过程。如优化作物生长模型参数,使模拟结果更贴近实际,提高智能模拟准确性。③耦合优化。智能模拟与虚实交互耦合,持续优化灌区运行管理。每次模拟和实体调整反馈,都用于优化模型和管理策略,提升灌区水资源利用效率和工程运行安全性。

(3) 前瞻预演与迭代优化的进化协同

①预演驱动优化。前瞻预演提前发现潜在问题和风险,为迭代优化提供方向。如预演发现调度方案导致渠道水位超警戒线,及时调整方案,优化调度流程,提高灌区运行安全性。②优化提升预演。迭代优化后的灌区模型和管理策略,反馈到前瞻预演环节,提升预演准确性和有效性。优化后的模型更真实地模拟灌区运行状态,为制定合理方案提供支持。③进化提升。前瞻预演与迭代优化进化协同,推动灌区管理策略和模型不断进化。预演发现新问题,优化解决方案,提升灌区管理能力和决策科学性。

四、数字孪生灌区建设思路

基于对灌区水网组成及特性的分析,以内涵解析为底层逻辑,提出数字孪生灌区建设思路(见图2):以“工程安全运行、水量科学调度、控制自动智能、管理协同高效、应急敏捷响应、服务主动便捷”为业务目标,全面提升灌区管理精细化水平。依托“数字化场景构建、智慧化模拟推演、精准化决策支持、自动化控制执行及定量化评估优化”技术路径,形成“感知—推演—决策—执行—验证”全生命周期管理体系。通过“立体感知、动态评价、墒情预报、水量调度和远程控制”等技术主

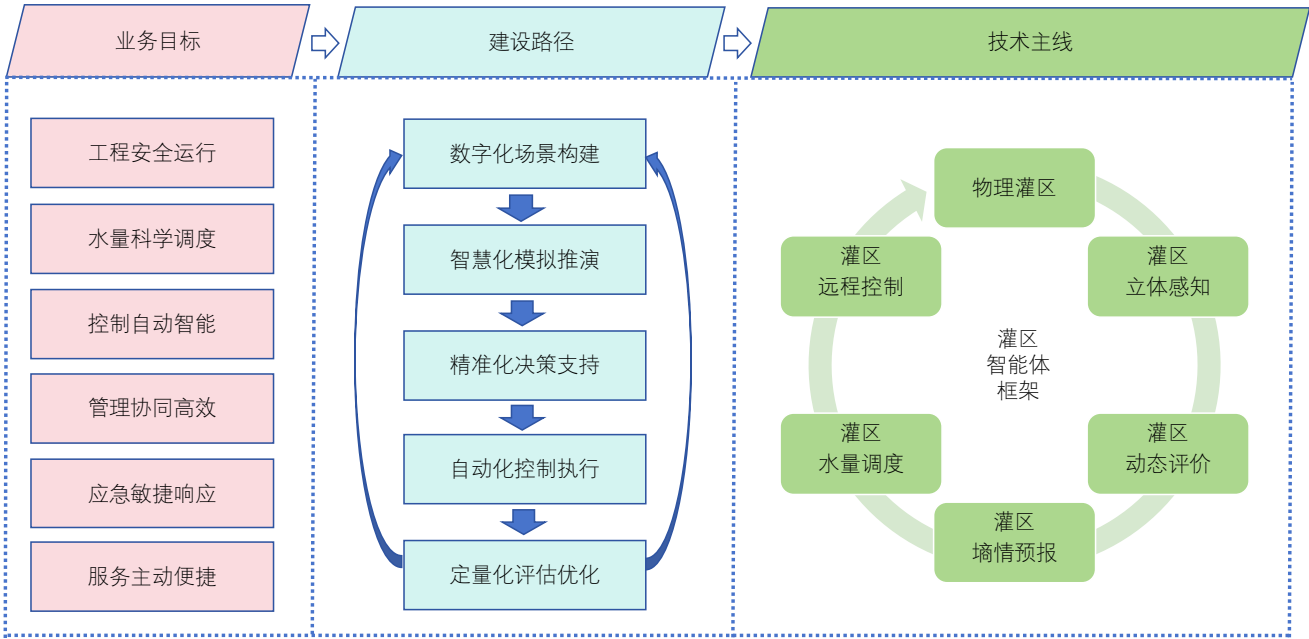


图2 数字孪生灌区建设思路

线,构建灌区智能体框架,实现灌区水资源的高效利用、工程设施的智能调控及管理服务的便捷响应,推动灌区从传统经验管理向数据驱动的现代化管理模式转型,为农业可持续发展和水资源优化配置提供坚实支撑。

1. 业务目标

灌区业务目标为保障工程安全运行、水量科学调度、控制自动智能、管理协同高效、应急敏捷响应及服务主动便捷。

①工程安全运行。实时监测灌区工程设施的水位、流量等关键指标,借助传感器和模型精准掌握设施运行状态,提前发现并处理隐患。模拟不同工况下的水流分布,优化调度方案,降低渗漏、冲刷等风险,确保工程始终处于安全状态,为灌区管理提供坚实保障。

②水量科学调度。基于数字孪生水资源配置模型和水力模拟技术,综合考虑水源和用水需求等因素,制定优化调度方案。整合多类水源,依托模型实现优化配比,减少输水损耗。结合实时监测和气象预报,动态调整方案,提高水资源利用效率,满足灌区用水需求。

③控制自动智能。利用智能控制系统,实现对灌区工程设施的远程自动化控制和智能调节。在工程设施上安装自动化控制设备和传感器,实时监测并远程操控关键参数。结合数字孪生模型模拟预测和优化算法,以灌区实时状态和用水需求自动生成最优控制指令,精准分配水流,精确控制灌溉。

④管理协同高效。建设数据共享平台,打破部门

信息壁垒,实现多部门信息共享与业务协同。各部门可实时获取灌区数据,为协同决策提供支持。利用数字孪生灌区的智能分析与决策系统,深度挖掘分析运行数据,为管理决策提供科学依据,优化流程与协同机制,提升灌区管理效率。

⑤应急敏捷响应。构建完善的应急响应机制,运用数字孪生技术模拟预测灾害,提前制定预案并优化应急调度与抢修方案。灾害发生时迅速启动预案,实时调整应对措施,与相关部门密切协作,快速响应并有效处置灾害,最大限度降低损失,保障灌区安全稳定运行。

⑥服务主动便捷。运用智能量测设备、手机App等技术手段,为用水户提供实时用水信息服务。用水户可便捷查询用水量、水费等信息,在线办理用水申请、报修等业务。灌区管理部门及时处理用户请求,提供精准用水建议,建立节水奖励机制,激励用户节水,提升服务质量和用水户满意度。

2. 建设路径

以内涵解析为基础,以业务目标为导向,严格遵循“数字化场景—智慧化模拟—精准化决策—自动化控制—定量化评估”逻辑框架,建设数字孪生灌区。数字化场景提供“全息透视”能力,智慧化模拟赋予“预见未来”的洞察力,精准化决策输出“科学可行”的策略,自动化控制达成“毫秒级响应”的执行,定量化评估形成“持续优化”的闭环,五者共同构建“感知—推演—决策—执行—验证”完整的生命周期管理体系,推动灌

区实现从经验管理向数据驱动管理的范式跃迁。

(1) 数字化场景——构建灌区时空数字底座

以“全要素感知+多维度建模”为核心,通过天空地一体化监测网络(卫星遥感、无人机航测、物联网传感器)动态采集气象、土壤墒情、作物需水、渠系水位等数据,构建灌区三维时空数据库。一是空间数字化,实现渠系、闸站、农田等高精度BIM/GIS模型融合,形成“数字孪生渠网”;二是过程数字化,实现灌溉周期内水源调度、输配水流程的动态映射,支持历史与实时数据回溯分析;三是对象数字化,实现农田地块级作物类型、生长阶段、需水定额的标签化管理,奠定精准灌溉基础。

(2) 智慧化模拟——驱动灌区运行高精度推演

基于机理模型与AI算法的双引擎,实现灌区水循环过程的智能仿真。一是构建水文水动力学耦合模型,模拟“降雨—产流—输水—入田”的全链条水流运动;二是增强AI预测,引入机器学习或深度学习预测短期需水量,结合气象预报优化中长期调度边界条件;三是多情景预演,进行干旱、暴雨等极端场景下的风险模拟,输出渠道承压能力、退水路径等关键参数。

(3) 精准化决策——生成可执行调度方案

以“供需平衡+效益最优”为原则,构建决策支持系统。一是方案智能生成,依据作物需水规律、水源可用量、电价峰谷等约束条件,自动生成渠系轮灌方案与闸门开度组合;二是方案预演验证,在数字沙盘中模拟方案执行效果,可视化展示水流演进过程与农田受水均匀度;三是多目标优化,平衡节水(减少输配水漏损)、增产(按需供水)、节能(泵站启停优化)等目标,提供帕累托最优解集供管理者抉择。

(4) 自动化控制——实现泵闸一体智能执行

通过“边缘计算+集中管控”架构打通决策到执行的闭环。一是智能闸群联动,依据调度指令自动调节闸门开度,结合流量反馈实时修正;二是泵站自适应运行,变频水泵按需调整扬程流量,实现“定压变量”供水,降低能耗;三是安全闭环控制,渠系水位超限自动告警并触发保护动作(如紧急关闸),规避溃渠风险。

(5) 定量化评估——构建多维效能评价体系

通过建立水资源利用效率、工程运行效益、生态环境影响等评估模型,实现全流程量化分析。一是计算灌溉水有效利用系数、单方水粮食产量等指标,评估节水成效;二是对比泵站能耗、闸门响应时间与设计标准,量化设备运行效率;三是监测地下水水位、土壤含盐量变化,测算生态影响程度;四是采用均方误差等方

法对比决策模拟与执行数据,形成优化反馈机制,支撑数字孪生灌区管理策略持续迭代升级。

3. 技术主线

在现代化灌区管理中,构建一套完整的技术链,涵盖灌区立体感知、动态评价、墒情预报、水量调度和远程控制等环节,对于提升灌区管理效率和水资源利用效率以及保障农业生产稳定性具有至关重要的作用。

(1) 灌区立体感知——构建灌区全要素监测网络

灌区立体感知是整个管理链的前端基础环节。通过在灌区内合理布置各类监测设备和技术手段,全面、实时地获取灌区的各种信息。如:在渠道、水库等关键节点安装水位计、流量传感器,实时监测水位变化和水流速度;在田间设置土壤墒情传感器,定时采集土壤湿度数据,精准把握土壤水分状况;利用卫星遥感和无人机航拍技术,定期获取灌区的宏观图像信息,包括作物种植分布、生长态势等。这些多维度、全方位的感知手段相互补充,形成一个立体感知网络,其就像灌区的“神经末梢”,将各类关键数据第一时间传递回来。这些数据不仅是后续动态评价和墒情预报的基础,而且能帮助管理人员快速定位灌区内的异常情况,如渠道漏水点、田间干旱区域等,为及时采取措施提供依据。

(2) 灌区动态评价——数据驱动的灌区健康诊断

基于立体感知收集到的丰富数据开展动态评价工作。运用专门的评价模型和指标体系可对灌区的水资源状况、工程运行情况、作物生长态势等进行实时评估。例如:通过水位、流量数据与历史同期水平和设计标准的对比分析,判断供水工程运行是否正常、水资源供应是否充足;结合土壤墒情和作物生长阶段,评估田间灌溉是否合理、是否存在过度灌溉或灌溉不足的情况。动态评价还能综合考虑气象因素、水质状况等多方面要素,给出灌区整体运行状态的全面画像。评价结果以直观的图表、报告等形式呈现给管理人员,使其能够迅速了解灌区的优势与不足之处,为后续决策制定提供精准依据,确保各项管理措施都能有的放矢。

(3) 灌区墒情预报——精准预测作物需水规律

墒情预报是精准灌溉的关键前提。借助先进气象预报数据和土壤水分模拟模型,对未来一段时间内灌区土壤墒情进行预测。输入当地降雨预报、气温变化、风速等气象信息以及土壤类型、作物根系特性等基础参数,模型可以模拟出土壤水分在土壤剖面中的运移过程,预测不同深度土壤的湿度变化趋势。通过定期更新预报结果,提前知晓田间土壤水分的盈亏情况,明确哪

些区域即将面临干旱风险,哪些区域可能因降雨过多而出现土壤过湿问题,可为制定科学合理的灌溉计划提供有力支持,能够实现灌溉用水的提前规划和精准分配,提高灌溉水的利用效率,同时避免因干旱或过湿对作物生长造成不良影响,保障农作物健康生长。

(4) 灌区水量调度——多目标优化的水资源调配

水量调度是灌区管理的核心环节,直接关系到水资源的合理配置和高效利用。依据动态评价结果和墒情预报信息,结合灌区的水源状况、作物需水规律以及工程设施的输水能力等多方面因素,制定精细的水量调度方案。在水源充足的情况下,按照作物的优先级和需水量,合理分配水量到各个灌溉片区;当水源紧张时,通过优化调度模型,采取轮灌、限额供水等措施,确保有限的水资源能够得到最有效的利用,优先保障关键生长期作物的用水需求;同时,充分考虑生态需水要求,预留必要的生态流量,维持灌区内的生态平衡。水量调度过程中,实时监测各渠道、闸门的水流情况,根据实际情况及时调整调度指令,保证调度方案的顺利执行,使每一滴水都能发挥最大效益。

(5) 灌区远程控制——工程智能执行与闭环反馈

远程控制极大提升了灌区管理的便利性和灵活性,是实现灌区现代化管理的重要标志。借助先进的通信技术和自动化控制系统,管理人员可以通过网络远程操控灌区内的各类工程设施,在控制中心就能实时查看各闸门、泵站的运行状态,根据水量调度方案远程发送指令,精准调节闸门开合度,控制泵站启停,实现对水流的精准分配和输送。尤其是在应对紧急情况时,如突发洪涝灾害需要快速泄洪,或者发现渠道某处出现异常需要紧急截断水流时,远程控制能够迅速作出反应,及时调整设施运行状态,最大限度减少灾害损失。远程控制能够打破传统管理中时间和空间的限制,减少人工现场操作的工作量和安全风险,提高灌区管理的响应速度和运行效率,真正实现灌区的智能化、自动化管理。

五、数字孪生灌区建设关键技术

制约数字孪生灌区效能发挥的主要技术难题是:①多目标动态协同优化与快速应急响应。主要挑战包括多目标动态耦合机制不完善导致不同水文条件下目标权重调整困难;应急调度响应程度不足,难以快速生成突发事件的优化方案;大规模水库群联合调度时,模型求解效率与精度难以平衡。②复杂工况下水力瞬变精准控制与抗干扰调节。主要挑战包括瞬变流控制精

度不足导致系统失稳,多扰动源(自然因素与人为操作)协同调控困难,长距离明渠大滞后特性下控制参数整定滞后。③多过程耦合的精准调控与空间变异管理。主要挑战包括水-肥-热多过程耦合建模精度不足,大型灌区空间变异特征难以准确表达,多源异构数据处理导致决策实时性不足。

围绕上述技术难题,提出调水优化、输水仿真、智能控制、精准配水、高效用水等全链条数字孪生灌区能力提升关键技术体系(见图3)。

1. 调水优化技术

面向灌区水资源常规、应急调度两大业务需求,需提供水资源常规调度模型构建、流域年径流预报及可供水量预测、流域用水单元需水预测、水库群多目标联合调度方面的技术支撑;构建水资源应急调度模型,为工程破坏/水污染/特殊干旱应急事件影响范围和程度分析、工程破坏/水污染/特殊干旱应急调度方案制定等提供技术支撑。①建立满足多时空尺度水系统模拟的模型构建技术,解决水资源常规、应急调度涉及的模拟模型在网络概化、支撑模型以及驱动数据层面存在的较大差异,实现一次建模即可满足常规、应急模拟需求。②建立水资源多目标调度模型及高效求解技术,提出基于多规则协同的水库群多目标全年统一调度模型及高效求解方法,将模型从分阶段、单目标拓展至全年统一、多目标,实现速度、精度及帕累托解质量3个层面的提升。③建立水资源应急补偿供水调度技术,推求水库群应急补偿理论供水判别式,支撑单库、梯级水库群的应急补偿供水调度方案制定。模拟模型对象覆盖河道、水库、汇水区、用水单元、闸泵等各种实体类型,不同模型对象的模拟方法涵盖水文模型、水动力学模型、水库规则模型、闸泵规则调度模型等;优化调

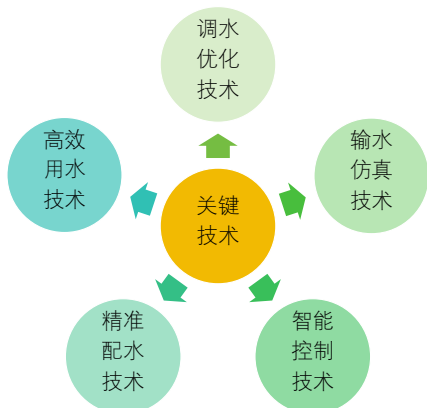


图3 数字孪生灌区能力提升关键技术体系

度模型目标涵盖供水、发电、航运、生态、防洪等方面,求解算法包括差分进化算法、逐步优化算法等类型。

2. 输水仿真技术

针对长距离输水工程复杂水力学和水力控制难题,以安全、高效、稳定输水为研究目标,需对长距离输水系统的运行特性和控制方法进行系统深入的研究。①建立复杂长距离输水系统水力仿真与控制理论方法;提出基于图论的复杂管网、渠网的非恒定流数值模拟方法和水力参数辨识理论;揭示渠道扰动波的叠加相消规律,创建控制参数的时域-频域联合在线整定技术。②提出长距离管道输水系统成套水力控制新技术,包括分段低压输水新技术,揭示其共振原理,提出输水单元水流振荡方程及防共振设计方法,降低管道承压70%~90%;设计适应水击控制的多喷孔套筒调流阀和压力自适应空气阀调压室,减小管道水击压力20%~30%;提出长距离有压管道复杂工况下的成套水力优化控制技术。③提出长距离明渠输水系统“前馈-反馈-解耦”集散控制技术,包括利用扰动波叠加相消机理“改进前馈+水位流量串级反馈+解耦”的闸门群集散控制技术,实现“粗调”“细调”与“协调”作用的有机衔接,提高明渠输水控制系统的响应速度,解决长距离明渠输水大滞后问题。④提出长距离输水系统冰害防治与冰期运行控制技术,包括适应气候及冰情复杂变化的冰期自适应控制技术、冰期与非冰期输水模式转换的变闸前水位控制技术,使冰期与非冰期输水模式转换时间缩短,冰期输水能力提高。

3. 智能控制技术

从水利工程各专业数据融合、业务系统互联互通需求出发,在满足计算机监控需求基础上,需开发水利水电工程智能测控一体化平台,为水情预报、水资源调度、工程安全、设备状态监测等各业务应用提供开发集成工具,以及数据采集、管理、访问等运行环境。基于平台,各业务系统可实现接口服务、运行环境、安全防护、数据管控“四统一”,共同形成智慧水利工程一体化解决方案。作为大数据平台,对结构化、非结构化数据进行统一管理和分析,支持数据库在线扩充;作为开发平台,提供丰富的图形、数据库、通信、运算等开发工具,可组态各类专业应用系统。设计丰富的应用、界面和数据库开发支撑功能,提供面向多业务的集成工具,开发环境和算法编辑工具;支持非结构化数据和数据库在线升级,并为第三方应用业务系统提供统一、透明的访问接口;具备通用的智能分析、预警功能,提供丰富的人工智能分析算法和可编辑

逻辑分析工具;采用全冗余分布的高可靠性设计。

4. 精准配水技术

针对灌区精准配水科技问题,需构建灌区水动力学统一表征式的“有限体积法+AI”物理模型,实现灌区供水过程、用水过程及调控建筑物的交互仿真;开发灌区用水多过程协同优化决策方法。研发高时间、高空间的灌区需耗水信息监测、诊断及短中长期需水预测技术;研制堰高可调的流量信息、新型渠道水位、适价农田土壤墒情监测设备及田间物联网通用协议接入模块,建立覆盖骨干渠系和田间的灌区配水量测网络;建立灌区智慧配水决策平台,进行灌区水资源的监测、预警和调控决策。针对南北方自流(自压)、提水灌区的不同特征,系统集成配水优化、管网调控、泵站节能、农田智能灌溉决策、终端用水管理等技术,制定南方自流灌区水位受限条件下渠系轮灌制度、北方自压灌区水锤防护管网安全输配系统、南方提水灌区群集用水多目标决策、北方引黄提水灌区泵站群集优化节能和水沙调控等各类灌区高效用水调控技术方案。

5. 高效用水技术

科学应对现代灌溉技术规模化应用中中大尺度农田空间变异影响和不同生态区技术模式差异等问题,现代化灌溉水肥精准调控对高效用水技术研究提出了新课题,需要通过关键技术突破、配套设备创新和应用模式提升,实现施肥灌溉的精准、低耗和多功能调控目标。在喷灌方面,提出进行变量灌溉管理的空间变异阈值,建成国内第一台具有变量灌溉功能的圆形喷灌机,揭示作物变量灌溉水分管理原理和调控机制,研发多功能系列喷头,建立综合考虑产量和水氮淋失的大型喷灌机作物水肥精量调控管理模式,解决农田土壤空间变异影响下喷灌水肥精量控制和变量管理的难题。在滴灌方面,探明不同生态区典型作物对滴灌均匀系数的动态响应机制,阐明适当降低均匀系数及低压运行的可行性,研制低压、耐热、薄壁和双流道迷宫式等系列滴灌带以及高精度施肥、加气和调热装置,建立东北玉米和华北温室蔬菜的滴灌水肥热调控模式,实现滴灌系统低压运行和多功能调控目标。提出基于分布式水文模型和遥感数据的节水灌溉技术地区适应性评价方法,定量评价节水灌溉对区域尺度农田水分生产率的影响,为节水灌溉区域发展决策提供依据。

六、展 望

随着全球气候变化加剧以及水资源供需矛盾日益

突出,灌区智慧化转型成为现代化灌区发展的必然趋势。当前,数字孪生灌区建设面临诸多挑战,从技术层面来看,如何进一步提高数据的准确性和实时性,优化模型算法,强化人工智能模型应用,构建灌区大模型,以实现更加精准的模拟和预测,是需要持续研究和解决的问题。同时,在不同区域、不同类型的灌区中,如何根据其独特的地理气候条件和管理需求,进行技术适配和定制化开发,也是未来需要重点关注的方向。此外,数字孪生灌区建设还涉及多部门的协同合作以及相关标准规范的制定和完善,需要政府、科研机构、企业等各方的共同努力。通过技术创新和实践探索,数字孪生灌区将在保障国家粮食安全、促进水资源可持续利用及推动农业现代化等方面发挥越来越重要的作用,为实现我国灌区高质量发展提供坚实的技术支撑。

致谢:水利部黄河水利委员会信息中心正高级工程师寇怀忠对本文提出了具体指导和修改建议,特此感谢。

参考文献:

- [1] 刘云波.灌区现代化发展实施路径与保障措施[J].中国水利,2024(19):7-11.
- [2] 高占义.我国灌区建设及管理技术发展成就与展望[J].水利学报,2019,50(1):88-96.
- [3] 水利部办公厅关于公布第一批深化农业水价综合改革推进现代化灌区建设试点的通知[J].中华人民共和国水利部公报,2023(2):52.
- [4] 邓铭江,陶汪海,王全九,等.西北现代生态灌区建设理论与技术保障体系构建[J].农业机械学报,2022,53(8):1-13.
- [5] 韩振中,冯保清,田雨,等.我国灌溉用水效率提升潜力与实现路径[J].中国水利,2025(11):28-33.
- [6] 王雅婧.踔厉奋发新征程|大国粮仓背后的水利力量[EB/OL].(2025-01-13)[2025-06-23]<http://www.cncid.org/cncid/gpdt/webinfo/2025/01/1734432591268482.htm>.
- [7] 汤超.降水较常年少5成情况下,安徽动用这项“国之重器”[EB/OL].(2025-05-25)[2025-06-23]<https://news.qq.com/rain/a/20250525A06X3M00>.
- [8] 王腾飞,李万超等.数字赋能科学治水——山东聊城位山灌区探索现代化治水新路径[EB/OL].(2025-03-14)[2025-06-23]<https://www.farmer.com.cn/2025/03/14/99981171.html>.
- [9] 李丽颖.科技赋能农田灌溉[EB/OL].(2025-03-26)[2025-06-23]<https://caas.cn/xwzx/mtxw/774234a710c048b89550126675302d41.htm>.
- [10] 王鹏翔.建设管用实用好用的数字孪生灌区[N].中国水利报,2023-10-25(1).
- [11] 江苏省水利厅.南京六合:“数字春灌”绘就农业丰收新画卷[EB/OL].(2025-03-06)[2025-06-23]<https://mp.weixin.qq.com/s/S3rUeswTYNiy3H9GhWx5Og>.
- [12] 孟砚岷.千年古渠润塞上“四水四定”守粮仓[EB/OL].(2025-06-13)[2025-06-23]http://www.chinawater.com.cn/df/nx/202506/t20250613_1065532.html.
- [13] 戴玮,李益农,章少辉,等.智慧灌区建设发展思考[J].中国水利,2018(7):48-49.
- [14] 史良胜,查元源,胡小龙,等.智慧灌区的架构、理论和方法之初探[J].水利学报,2020,51(10):1212-1222.
- [15] 谢崇宝,白静,郑世宗,等.数字孪生灌区建设核心要义与关键技术探讨[J].中国农村水利水电,2024(11):179-184+195.
- [16] 王建华,赵红莉,冶运涛.智能水网工程:驱动中国水治理现代化的引擎[J].水利学报,2018,49(9):1148-1157.
- [17] 蒋云钟.以“四大变革”深入推进数字孪生流域建设[J].中国水利,2023(20):2+1.
- [18] 蒋云钟,冶运涛,王浩.智慧流域及其应用前景[J].系统工程理论与实践,2011,31(6):1174-1181.
- [19] 蒋云钟,冶运涛,赵红莉,等.智慧水利解析[J].水利学报,2021,52(11):1355-1368.
- [20] 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.
- [21] 冶运涛,蒋云钟,曹引,等.智慧水利理论体系与数字孪生流域虚拟模型研究成果述要[J].中国水利,2024(5):41-51.
- [22] 冶运涛,蒋云钟,寇怀忠,等.数字孪生流域的基础模型、演化路径与评判准则[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(4):27-38+46.
- [23] 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 田灵燕