

基于数字孪生技术的水利工程智能调度系统研究

李广杰 张建国

开封黄河河务局兰考黄河河务局 河南 开封 475300

摘要: 随着全球气候变化加剧与水资源供需矛盾日益突出,传统水利工程调度模式在应对复杂水文情势、多目标协同优化及突发应急响应等方面面临严峻挑战。数字孪生(DigitalTwin)作为融合物联网、大数据、人工智能与仿真建模等前沿技术的新一代信息物理系统,为水利工程智能化转型提供了全新路径。本文系统阐述了数字孪生技术在水利工程调度中的内涵与架构,构建了“感知—建模—仿真—决策—反馈”五位一体的智能调度系统框架;深入探讨了多源异构数据融合、高保真水动力模型耦合、多目标优化算法集成等关键技术;并以某大型流域水库群为案例,验证了该系统在提升调度精度、增强应急响应能力及实现生态-经济-安全多维协同方面的显著优势。研究表明,基于数字孪生的智能调度系统能够有效支撑水利工程从“经验驱动”向“数据+模型双驱动”范式转变,为现代水网高质量发展提供核心技术支撑。

关键词: 数字孪生;水利工程;智能调度;水动力模型;多目标优化;数据融合

引言

近年来,以物联网(IoT)、5G通信、云计算、人工智能(AI)为代表的新一代信息技术迅猛发展,推动水利行业加速向数字化、网络化、智能化方向演进。“智慧水利”已成为国家战略重点,《“十四五”水安全保障规划》明确提出要加快构建具有“预报、预警、预演、预案”(“四预”)功能的智慧水利体系。在此背景下,数字孪生技术因其具备虚实映射、实时交互、动态仿真与智能决策等核心能力,被视为实现水利工程全生命周期智能管控的关键使能技术。数字孪生最早由Grievies教授于2002年提出,其本质是在虚拟空间中构建物理实体的高保真动态镜像,并通过数据驱动实现双向闭环反馈控制。在水利工程领域,数字孪生可将物理流域、水库、闸坝、泵站等工程设施及其运行环境,在数字空间中进行全要素、全过程、全尺度的精准复现,形成“物理流域—数字流域”共生体。基于此,调度决策不再局限于局部或静态信息,而可在虚拟环境中进行多情景模拟、风险推演与方案比选,从而实现科学、高效、前瞻的智能调度。

1 数字孪生水利工程智能调度系统内涵与架构

1.1 系统内涵

基于数字孪生的水利工程智能调度系统,是以物理水利工程为对象,通过部署全域感知网络,实时采集水文、气象、工情、水质等多维数据;利用高保真水动力、水文、调度规则等模型,在数字空间构建与物理世界同步演化的虚拟映射体;在此基础上,融合人工智能算法,实现对调度方案的在线仿真、多目标优化与动态调整;最终通过指令下发与执行反馈,形成“感知—建模—仿

真—决策—反馈”的闭环智能调控机制。其核心价值在于状态全息感知、过程高保真模拟、决策智能优化与风险前瞻预控。具体而言,该系统首先通过密集布设的传感器网络和遥感手段,实现对流域水循环全过程的立体化、精细化监测,确保数字空间中的状态变量与物理世界严格同步。其次,依托高精度数值模型,系统能够动态模拟降雨-径流-调蓄-泄流的完整链条,准确再现洪水演进、水库调蓄及河道水流变化等复杂过程^[1]。在此基础上,借助人工智能技术,系统可在多约束条件下自动生成兼顾防洪安全、供水保障、生态健康与能源效益的调度方案,并支持人机协同决策。更重要的是,通过“预演”功能,系统可提前识别潜在风险,如超标洪水、工程险情或生态断流,从而支撑“预案”的科学制定与快速响应,真正实现从被动应对向主动防控的转变。

1.2 系统总体架构

本文提出“1+4+N”系统架构。其中,“1”个数字孪生底座是整个系统的基石,包含统一的时空基准、三维地理信息平台、BIM/CIM工程模型库以及水利知识图谱,为上层应用提供标准化、结构化的数据与模型服务。底座不仅承载几何信息,还融合了水文、水力学、工程运行规则等语义知识,使得虚拟模型具备物理意义与业务逻辑。在此基础上,系统构建了四大核心引擎。数据融合引擎负责整合来自卫星遥感、气象雷达、地面水文站、视频监控、无人机巡检等多源异构数据,通过时空对齐、质量控制与智能插补,形成高质量、连续一致的数据流。模型仿真引擎则集成了分布式水文模型、一二维水动力模型、水库调度模型及生态需水模型,通过耦合接口实

现跨尺度、多过程的联合仿真,确保模拟结果既符合物理规律,又贴近工程实际。智能决策引擎是系统的“大脑”,它利用强化学习、多目标进化算法等先进AI方法,在复杂目标空间中搜索最优调度策略,并支持不确定性条件下的鲁棒决策。可视化交互引擎则将抽象数据与仿真结果转化为直观的三维场景、动态流程图与风险热力图,提升调度人员的情境感知与决策效率^[2]。最后,“N”类业务应用层面向具体调度场景,如流域防洪联合调度、跨区域水资源配置、生态流量保障、水电站群优化运行及突发水污染应急响应等。各应用模块可基于统一底座与核心引擎灵活组合,实现“一次建模、多场景复用”,显著提升系统适应性与扩展性。

2 关键技术研究

2.1 多源异构数据融合与实时更新

水利工程运行环境复杂,涉及的数据来源广泛、类型多样、时空尺度不一。地面站点提供高精度但稀疏的点状观测,遥感数据覆盖广但存在云层干扰与反演误差,视频图像蕴含丰富语义但难以量化。若直接将这些原始数据输入模型,不仅会引入噪声,还可能导致仿真结果失真。因此,构建一个高效、鲁棒的数据融合机制是数字孪生系统可靠运行的前提。本系统采用“边缘计算+云平台”协同架构,实现数据从采集到应用的全流程治理。在边缘侧,智能传感器与边缘网关对原始信号进行初步处理,包括异常值剔除、数据压缩与时间戳校准,有效降低传输带宽压力并提升响应速度。在云端,系统构建基于时空图神经网络(ST-GNN)的融合模型,充分利用水文变量在空间上的邻近相关性与时间上的连续演化特性,对缺失或低质量数据进行智能修复。例如,在强降雨期间,若某雨量站因故障中断,系统可依据周边站点降雨模式及雷达回波强度,动态估算该点降雨过程,确保输入模型的完整性。此外,系统建立数据版本管理与溯源机制,每一次状态更新均记录时间戳与来源,确保数字孪生体的演化轨迹可追溯、可审计,为后续模型校正与决策复盘提供依据。

2.2 高保真水动力-调度耦合模型构建

模型的保真度直接决定了数字孪生系统的预测能力与决策可靠性。传统调度模型多采用简化的水量平衡方程,忽略水流运动的时空细节,难以准确反映闸门操作对下游水位、流速及淹没范围的影响,尤其在复杂河网或城市内涝场景中误差显著。为此,本文提出“水文-水动力-调度”三级耦合建模方法,力求在物理真实性与计算效率之间取得平衡。在流域尺度,采用分布式水文模型(如SWAT或HEC-HMS)模拟降雨产流与坡面汇流过

程,输出各子流域入库流量过程线,充分考虑下垫面异质性与土地利用变化的影响。在河道与水库尺度,引入一维圣维南方程组或二维浅水方程构建水动力模型,精确刻画洪水在河道中的传播、漫滩、回水及水库调蓄过程^[3]。特别地,模型中嵌入了工程操作逻辑,如闸门启闭规则、机组出力限制、泄洪洞启用条件等,使得虚拟调度操作能够真实触发水流响应。为实现多模型协同,系统通过标准化接口(如OpenMI)或自定义中间件,实现数据在不同模型间的无缝传递与时间步长同步。例如,当水文模型输出未来24小时入库流量后,水动力模型立即启动仿真,计算各断面水位变化,并将结果反馈给调度模型,用于评估方案可行性。这种紧密耦合机制显著提升了仿真结果的工程适用性,为智能决策提供了坚实支撑。

2.3 多目标智能优化调度算法

水利工程调度本质上是一个高维、非线性、多目标、带随机扰动的动态优化问题。调度目标往往相互冲突:防洪要求水库尽量空库迎汛,而供水与发电则希望维持高水位;生态需水强调流量过程的自然性,而工程运行追求稳定可控。如何在多重约束下寻求帕累托最优解,是智能调度的核心难题。本系统采用“离线训练+在线微调”的混合策略,结合深度强化学习与多目标进化算法的优势。在离线阶段,利用历史多年水文序列与调度日志,在数字孪生仿真环境中训练深度Q网络(DQN)或近端策略优化(PPO)代理。代理通过不断试错,学习在不同水情状态下采取何种泄流策略能最大化综合奖励——该奖励函数由防洪损失、供水缺额、发电收入、生态达标率等指标加权构成。经过充分训练后,代理具备了初步的策略生成能力。进入在线调度阶段,当新水情出现时,代理基于当前状态(如实时水位、入库流量、未来72小时降雨预报)快速生成若干候选方案。随后,系统调用NSGA-II等多目标遗传算法,在代理提供的初始解附近进行精细搜索,生成完整的Pareto前沿供调度人员权衡选择。为应对降雨预报不确定性,系统还引入蒙特卡洛模拟,对同一调度方案在多种可能降雨情景下的表现进行评估,筛选出鲁棒性最强的策略。这种“AI生成+专家决策”的人机协同模式,既发挥了算法的计算优势,又保留了人类的经验判断,有效避免了纯黑箱决策的风险。

2.4 虚实交互与闭环反馈机制

数字孪生的价值不仅在于“镜像”,更在于“控制”。一个真正的闭环系统必须能够将虚拟空间的决策转化为物理世界的行动,并通过反馈持续优化自身性能。本系统通过与现有SCADA(数据采集与监视控制系统)深度集成,实现了调度指令的自动下发与执行状态的实时回

传。例如，当智能决策引擎确定某水库需开启3号泄洪闸至50%开度时，指令经安全校验后自动发送至现场PLC控制器，闸门随即动作。与此同时，安装在闸门处的位移传感器与下游水位计将实际开度与水位变化实时上传至数字孪生平台。若实际响应与仿真预测存在显著偏差——如因泥沙淤积导致泄流能力下降，或因设备老化造成影响延迟——系统将自动触发模型自校正机制^[4]。具体而言，采用扩展卡尔曼滤波（EKF）或粒子滤波等数据同化方法，将观测数据与模型预测进行融合，动态调整关键参数（如河道糙率、水库泄流系数），使虚拟模型逐步逼近真实系统。这一“执行—反馈—学习—优化”的闭环过程，使得数字孪生体具备持续进化的能力，其预测精度与决策质量将随运行时间不断累积而提升，真正实现从“静态映射”到“动态共生”的跃迁。

3 挑战与展望

3.1 挑战

尽管数字孪生在水利工程调度中展现出巨大潜力，但仍面临若干深层次挑战。首先是模型精度与计算效率的矛盾。高保真水动力模型虽能准确反映物理过程，但计算耗时较长，难以满足分钟级实时调度需求。未来需探索降阶模型（ROM）、物理信息神经网络（PINN）及GPU并行加速等技术，在保证关键过程精度的同时大幅提升仿真速度。其次是数据安全和隐私保护问题。水利数据涉及国计民生，部分敏感信息不宜公开共享。如何在保障数据主权的前提下实现跨部门协同，需引入联邦学习、区块链存证等隐私计算技术。再次是标准体系缺失。目前各地区、各单位在数据格式、模型接口、评价指标等方面缺乏统一规范，导致系统互操作性差、重复建设严重。亟需水利主管部门牵头制定数字孪生水利工程建设技术导则与数据交换标准。最后是人机协同机制的深化。当前AI决策仍存在“黑箱”特性，调度人员对其信任度有限。未来应加强可解释人工智能（XAI）研究，将专家经验以规则、约束或先验知识的形式融入算法，构建“人

在回路”的透明化决策流程。

3.2 展望

展望未来，随着6G通信、量子计算、具身智能等颠覆性技术的发展，数字孪生水利工程将向“全息感知、全要素互联、全周期智能”方向演进。物理流域将实现“可知、可感、可控”，数字流域则做到“可算、可推、可优”，最终构建起一个自我感知、自我诊断、自我优化的智慧水网生态系统，为国家水安全战略提供坚实支撑。

4 结语

本文系统研究了基于数字孪生技术的水利工程智能调度系统。研究表明，数字孪生通过构建物理-虚拟双向映射，为水利工程调度提供了全新的技术范式，有效解决了传统调度模式在动态响应、多目标协同与风险预控方面的不足。所提出的“感知—建模—仿真—决策—反馈”五位一体架构，融合多源数据融合、高保真耦合模型、多目标智能优化等关键技术，形成了完整的智能调度技术链条。未来，应进一步加强跨学科融合、标准体系建设与工程实践验证，推动数字孪生技术在更广范围、更深层次赋能现代水利高质量发展。

参考文献

- [1]宋金伟.数字孪生技术在大型水利工程供水调度中的应用[J].水科学与工程技术,2025,(04):13-15.
- [2]邱敏健.数字孪生驱动的水利枢纽水资源调度决策支持系统[C]//江西省工程师联合会.第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(一).珠江水文水资源勘测中心,2025:662-665.
- [3]孟庆庆,王军良,薄伟伟,等.基于云河地球平台的数字孪生小浪底水利枢纽工程防汛调度系统建设[J].水利信息化,2024,(02):80-86.
- [4]王之龙.基于数字孪生水利的水资源管理平台建设关键技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(35):208-210.