

头屯河数字孪生一体化平台系统构建与应用研究

刘雅祯 田雨锬 香承志

新疆维吾尔自治区头屯河流域水利管理中心

DOI:10.32629/hwr.v10i7.7079

[摘要] 数字孪生头屯河流域自2022年立项以来,以2+N业务应用建设为核心,探索构建了数字孪生建设的关键技术和应用场景构建,第一阶段主要建设了数据底板、面向流域防洪和水资源调配的三个模型及仿真引擎。以一次防洪过程演示、一次中长期水资源调配、一次日常水资源调配为例展示两项重点业务。应用结果验证了平台在提升精细化管理方面出色的表现和应用价值,分析了目前面临的优势与挑战,为类似中小流域开展数字孪生水利建设工作提供参考借鉴。

[关键词] 数字孪生; 智慧水利; 模拟仿真; 四预; 头屯河

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research on the Construction and Application of the Toutun River Digital Twin Integrated Platform System

Yazhen Liu Yukun Tian Chengzhi Xiang

Xinjiang Uygur Autonomous Region Toutun River Basin Water Resources Management Center

[Abstract] Since its project initiation in 2022, the Digital Twin Toutun River Basin project has focused on the construction of "2+N" business applications, exploring and establishing key technologies and application scenarios for digital twin development. In the first phase, the project primarily built a data foundation, three models for basin-wide flood control and water resource allocation, and a simulation engine. It demonstrates the two key business areas through examples such as a flood control process demonstration, a medium-to-long-term water resource allocation demonstration, and a routine daily water resource allocation demonstration. The application results validate the platform's outstanding performance and application value in enhancing refined management. Furthermore, this paper analyzes the current advantages and challenges, providing a valuable reference for similar small and medium-sized river basins in their digital twin water conservancy construction efforts.

[Key words] digital twin; smart water conservancy; simulation; the "Four Pres" (forecast, early warning, simulation, and pre-planned response); Toutun River

引言

随着信息技术的快速迭代与深度应用,数字孪生技术为流域综合管理开辟了全新路径并提供了先进技术支持。该技术整合物联网、大数据、云计算、人工智能等现代信息手段,实现对流域物理环境的全面感知、动态追踪与智能研判,进而提升防洪减灾、水资源合理分配等领域的决策精准度。水利部明确要求,到2025年实现重点流域“四预”功能智能化升级,构建“天空地”一体化监测感知网络与数字孪生驱动的决策支持体系^[1]。数字孪生头屯河是水利部在新疆的数字孪生流域试点项目,遵循“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”的原则,重点建设了水资源调配业务,完成了流域防洪、工程安全监测等顶层设计中部分建设内容。自2022年12月以来,新疆头屯河流域管理局先后

投入1000多万元资金开展数字孪生流域先行先试工作,取得一定阶段性成果。

1 研究背景

头屯河流域横跨乌鲁木齐市、昌吉回族自治州、新疆生产建设兵团第十二师与第六师,形成“两岸四地”的跨行政区域管理格局。头屯河流域全长约144公里,流域总面积2533km²,制材厂多年平均年径流量2.23亿m³,承担着沿线供水、灌溉、流域防洪及生态补水等核心任务。头屯河水资源时空分配不均,头屯河来水主要依靠山区冰雪融水和降水,根据制材厂水文站降水资料分析,连续最大四个月降水量均发生在5-8月,占到了全年降水量的64%。洪水类型涵盖冰川融雪洪水、暴雨洪水及混合洪水,陡涨陡落特征明显。流域原有“四预”模式严重滞后于治理需

求,水文预报依赖传统经验模型,洪水预见期不足,预演仅能实现单一静态场景模拟,预案为纸质化固定模板,传统四预模式存在监测碎片化、预报精度低、预演场景单一、预案刚性强等突出问题。在此背景下,依托数字孪生技术重构流域“四预”功能,成为破解跨区域治理困境、提升水安全保障能力的迫切需求^[2]。

2 头屯河数字孪生一体化平台系统构建的关键技术

头屯河流域数字孪生平台聚焦数据底板、防洪及水资源调配模型与仿真引擎,攻克场景构建、渲染及防洪仿真体系难题。依托“天空地”感知、BIM+GIS高精度建模、多源数据融合AI及仿真协同决策四大技术,从数据、效果、业务层面全面提升流域防洪仿真与调度效能。具体如下:

(1)头屯河“四预”平台在数据底板建设方面。使用飞马D2000s无人机搭载D-CAM200航测模块进行流域影像数据采集制作L1级数据,并对头屯河水库及楼庄子水库进行L2级倾斜摄影航空数据采集,采用华微3号无人船对两个水库库区水下地形进行了测量,基于北斗卫星导航系统的网络RTK测量,通过PC控制GNSS测量设备和水深测量设备,实现数据采集的同步。同时,在感知设备方面,增补以物联网为基础的现代型水位计,充分运用卫星通信技术部署雨量遥测设备,完善现有雨情、水情感知能力。在模型方面,提出了将人工智能技术应用于模型训练和参数率定的思路。结合物理与数据双驱动的场次洪水预报方法,建立了耦合融雪过程的干旱地区分布式超渗产流模型,提出了适用于头屯河流域的汛前预先泄水的防洪优化调度方案,并设计了相应的搜索最佳泄水时机及泄水幅度的高效求解方法,为头屯河流域防洪汛前准备、实时调度、会商决策提供有力支撑^[3]。

(2)采用三维高保真渲染技术,以数字化场景、智慧化模拟、精准化决策为路径,为专业应用提供实时渲染和可视化呈现支撑,提供实时的交互响应、低延迟和稳定的图像质量和逼真的场景效果。基于云架构的云渲染技术,以像素流送的方式为任意终端提供高保真、高质量的三维应用服务,并实现数字孪生头屯河三维任意浏览、使得服务与应用终端相互隔离,保障数据的安全性,扩展数字孪生应用的适用场景^[4]。

(3)数字孪生头屯河业务系统核心底层算力支撑,硬件基础设施服务器及存储均采用现有成熟的国产化硬件设备,具备自主可控,性能出色,兼容性良好等特点。核心芯片均为本土研发制造,硬件核心指令可控、运行安全可靠,减少潜在信息安全隐患。计算存储资源管理基于国产化虚拟化平台,可对主流异构硬件平台计算存储资源进行统一管理,按需分配,实时监控,弹性扩展,为后续接入其它国产化硬件做好充分准备的同时,还可兼容现有已建传统硬件基础设施进行接入,平滑升级。操作系统、数据库等核心基础软件均采用国产化平台,主流计算架构100%全覆盖^[5]。业务系统关键应用深度融入国产化硬件、平台、系统、核心软件平台内,自下而上全面保障系统高度自主可控,为系统长期安全可靠运行打下良好基础。

3 数字孪生头屯河业务应用

在业务应用方面,头屯河流域优先开发了水资源调配、流域防洪、工程安全监测信息管理等平台,初步构建了“2+N”应用体系。

3.1防洪“四预”功能应用

数字孪生头屯河流域防洪“四预”应用系统,具备流域防洪预报、预警、预演、预案功能。项目利用级联开放和互联互通技术手段解决“数据孤岛”难题,整合水库、水文水位站等7类监测设备形成水利感知网,实现流域关键断面、重要河段实时感知,平台在2024年的防洪工作中发挥了关键作用。

2024年7月,头屯河流域上游山区连续多日降雨,多个站点24小时内降雨量超过20mm。基于融雪-降雨耦合模型自动制作来水预报方案,预报楼庄子入库峰值为124.77立方米每秒;水文局实测为142m³/s,预报与实际情况基本相符。由于楼庄子水库刚建成,剩余库容为5596万m³,平台给出的方案是可利用蓄洪策略,进行洪水资源化利用,结论与专家研判一致。为了展示极端情况下洪水应对过程,技术人员模拟两座水库到达汛限水位时,上游发生一场50年一遇洪水情形,来检验模型可靠性,针对上述假定情况,平台自动生成了常规、梯级等不同泄洪预案。同时平台推荐梯级联调方案。通过模拟直观看到,楼庄子水库水位随来水增加逐步抬升;经过平台计算,楼庄子出库需保持在125立方米每秒流量以下。3h后,楼庄子上泄洪水到达头屯河水库。头屯河水库最大出库流量应保持在120m³/s以下,通过方案预演,确保了大坝安全及下游安全。针对本次汛情,头屯河流域水利管理中心启动洪水防御IV级应急预案响应,要求各站加强气象水文、大坝安全监测预报,严格执行领导带班和24小时值班值守制度,确保信息传送及时、畅通。

数字孪生防洪业务“四预”应用,通过构建来水预报、防洪调度模型和实时监测体系,结合模拟仿真引擎,实现了对雨水情态势和水利工程运行过程的实时感知和动态监测,提前预测了洪水潜在风险,在本次防洪调度工作中,为流域防洪提供了有力的决策支持。平台自上线运行后,已成功预报了流域内多次小洪水过程,成功应对了历史第四大洪水,保障了头屯河水库下游32万亩农作物及人民群众生命财产安全。

3.2灌溉高峰期水资源调配应用

头屯河流域主要承担乌鲁木齐,兵团第十二师和昌吉市的生活、生态及工农业生产供水任务。由于流域水资源总量少,用水需求大,供需矛盾极为突出。水资源调配业务应用构建了水资源中长期和短期调配模型,以“充分利用地表水,优化配置水库水”为目标,开展头屯河水资源调配工作。

以一次中长期水资源调配为例,2025年是平水偏枯年,根据中长期来水预报结果,头屯河流域年预报来水总量为1.87亿立方米,主要分布在5到8月,2025年全年需水达到2.1亿立方米,供需矛盾较为突出。

告警预警面板可展示当天水库水情情况,根据12月1日16:30界面显示,楼庄子水库当前库水位为1371.16米,远低于正常蓄水位1394.5米。从供水总览可看出,河西灌区农业用水量已

经接近用水计划,在后续调配过程中需要及时调整用水需求,确保水资源合理分配。河东灌区农业用水保持在计划用水范围内。

2025年头屯河流域来水时空分布不均匀,仅靠来水不能有效保障各种用水需求。通过对两库联合调度模拟,充分应用水库调蓄作用,以丰补缺,合理分配用水总量。根据来水预报信息,平台制作了三种水资源调配方案,分别是楼庄子单库调度,供水缺额均衡分布和供水缺额集中分布方案。按照“四水四定”原则和头屯河水实际使用情况,2025年平台推荐供水缺额均衡分布方案,充分应用两个水库调蓄作用,使得供水量最大、供水缺额及弃水量最小。

在日常水资源调配中,平台研发了以拓扑图为核心的全过程调度流程,展示了流域上下游、左右岸供水结构与状态信息,可掌握水资源分配情况及动态变化,各个节点真实反映了实时供水状态及供水总量,有水流动画的区间代表正在供水,没有动画的区间表示停水,结合模型库实现水资源的精准调配。

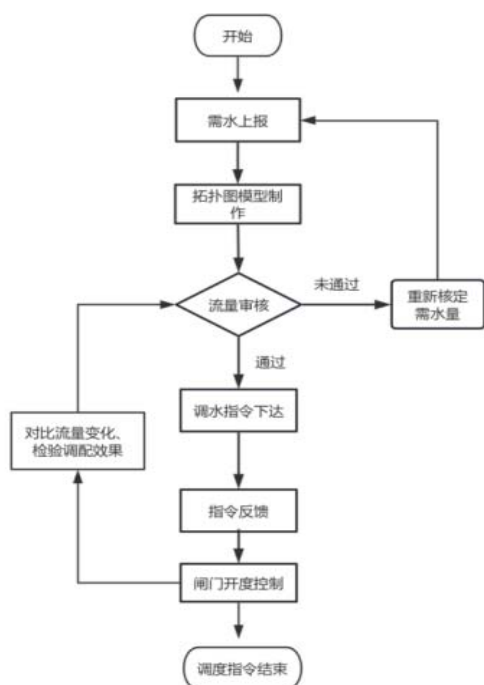


图1 日常调度流程演示

通过智能化、精准化和高效化的水资源调配管理方案,打破了水资源调度配置业务壁垒,实现“供需分析—调蓄计划—调度指令—用量控制”全流程、数字化服务。头屯河流域水资源调配业务应用,按照节水、蓄水、调水、增水总体要求,实现年计划、月调整、旬控制、日监管;严格控制农业用水总量和定额管理,推动用水方式由粗放向节约集约转变,最大程度保障生活用水、确保生态用水、统筹工业和农业用水。

4 结论

本研究以头屯河流域水利工程为对象,构建了基于数字孪

生的头屯河“四预”一体化平台系统,探索头屯河数字孪生建设的相关关键技术和应用场景构建。以头屯河流域水资源管理为具体应用场景,围绕水利部“预报、预警、预演、预案”的“四预”功能建设要求,总结了数字孪生技术在中西部地区水利工程管理设施中的适配性研究与技术实践,验证了该技术在提升中小流域智慧化管理水平方面的有效性与可行性。主要研究结论如下:

(1) 实证表明,数字孪生系统显著增强了“四预”功能实现的系统性与实效性。其在预报精度、预警时效、情景预演与预案优化等方面表现出传统管理方式难以比拟的优势,为中小流域水利工程管理提供了直观、科学的决策支持工具。

(2) 数字孪生技术应聚焦需求导向,根据流域特性需求和流域内水利工程实际情况开发需求模块,避免技术堆砌,确保应用设计贴合流域实际水文与管理场景。要坚持循序渐进,安全可控分阶段推进监测网络升级、平台建设与功能落地,注重数据安全与系统稳定,确保应用方案务实可行,节约成本。

(3) 本研究识别了当前数字孪生技术在中小流域推广中面临的三大挑战:开发成本高、数据孪生复杂性高以及对硬件性能依赖强,并指出需从技术、数据与机制三个层面协同推进以实现规模化应用。同时,本研究仍存在一定局限性:受试点范围与建设周期所限,样本数量相对有限,不同地域、类型水库的适用性尚需进一步验证,系统在极端工况下的仿真可靠性及长期运维的经济性也有待持续观测与评估。

总之,数字孪生技术为中小型水库的现代化管理提供了重要路径。随着关键技术的持续突破与建设模式的不断优化,其必将在更广泛的水利设施中发挥核心作用,推动“智慧水利”建设迈向新阶段。

【参考文献】

- [1]徐健,赵保成,魏思奇.数字孪生流域可视化技术研究与实践[J].水利水电快报,2023,44(8):127-130.
- [2]冯思伟,颜军,刘璐铭.无人机倾斜摄影精细化模型构建及应用[J].测绘与空间地理信息,2024,47(6):48-50,54.
- [3]黄志兴,冯大蔚,马媛.数字孪生太浦河防洪及供水“四预”业务应用设计与实现[J].水利信息化,2023(4):1-6.
- [4]侯毅,华陆韬,王文杰.数字孪生流域三维数据底板建设及应用[J].人民长江,2024,55(5):234-240.
- [5]唐文坚,申邵洪,杨恒玲.数字孪生水利工程关键技术及其应用实践—以江垭皂市工程为例[J].长江科学院院报,2024,41(8):172-179.

作者简介:

刘雅祯(1994--),女,汉族,安徽望江县人,本科,工程师,研究方向为河湖长制、水行政执法、智慧水利。