

数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用研究

祖日旦·玉苏甫

维吾尔自治区玛纳斯河流域水利管理中心

DOI:10.12238/hwr.v9i8.6516

[摘要] 数字孪生技术作为推动产业数字化转型的关键使能技术,为水利工程运行管理提供了新的范式。本文聚焦新疆玛纳斯河,深入探讨数字孪生技术在水利工程全生命周期运行管理中的应用架构、核心功能与实施路径。通过构建融合多源感知数据的玛纳斯河全要素数字孪生体,实现流域状态实时可视化、工程运行智能仿真、风险精准预警与调度决策优化。

[关键词] 数字孪生; 水利工程; 运行管理; 智慧水利

中图分类号: TV5 **文献标识码:** A

Application Research of Digital Twin Technology in the Operation and Management of Water Conservancy Projects

Zuriadan Yusuf

Water Resources Management Center of the Manas River Basin, Uygur Autonomous Region

[Abstract] As a key enabling technology for promoting industrial digital transformation, digital twin technology provides a new paradigm for the operation and management of water conservancy projects. This paper focuses on the Manas River in Xinjiang, thoroughly exploring the application framework, core functions, and implementation pathways of digital twin technology in the full lifecycle operation and management of water conservancy projects. By constructing a comprehensive digital twin model of the Manas River that integrates multi-source sensing data, real-time visualization of basin conditions, intelligent simulation of project operations, precise risk warning, and optimized scheduling decisions are achieved.

[Key words] Digital twin; Water conservancy projects; Operation and management; Smart water conservancy

引言

玛纳斯河发源于天山依连哈比尔尕山冰川区,流域面积约1.9万平方公里,多年平均年径流量约7亿立方米,是新疆石河子垦区及周边绿洲至关重要的工农业水源和生态屏障,承担着供水、防洪、灌溉及生态补水等多重关键功能。为优化调控这一宝贵水资源,流域内已构建了以肯斯瓦特水利枢纽为核心,整合夹河子水库、磨引渠首、大泉沟水库及大型灌区渠系工程在内的综合性水利工程体系,在区域防洪减灾、农业灌溉保障、生产生活供水及水力发电等方面发挥着核心支撑作用。然而,日益加剧的气候变化影响、持续增长的用水需求以及工程设施的老化,使得玛纳斯河流域在水资源高效利用、洪水风险防控及工程安全运行方面面临严峻挑战。传统的依赖经验判断和分散信息系统的管理模式,已难以满足精细化、智能化管理的迫切需求。在此背景下,数字孪生技术——通过构建物理实体在虚拟空间的动态映射,实现物理世界与信息世界的深度交互与融合——为解决上述复杂问题提供了新的技术路径。

1 玛纳斯河流域水利工程运行管理面临的挑战

玛纳斯河水利工程作为支撑石河子垦区近300万亩农田灌溉及重要工业、城市生活用水的核心水源,其运行管理面临多重复杂挑战:首先,水文情势复杂且预报难度大,河流依赖高山冰雪融水和降水补给,受气候变化影响显著,融雪洪水过程陡涨陡落,传统模型预报精度不足,威胁水库防洪与下游安全;其次,水资源供需矛盾尖锐,农业用水占比高且效率待提升,不同季节和区域间用水竞争激烈,优化配置难度大;再次,工程设施(如水库大坝、渠系、水闸)点多线长面广,传统人工巡检和定点监测存在盲区,难以及时发现隐蔽缺陷或早期隐患;同时,需统筹防洪、供水、生态补水、发电等多重目标,涉及部门多、约束复杂,依赖经验的调度方案难以实现全局最优;此外,水情、工情、墒情、气象等信息分散于不同系统和部门,缺乏高效整合与共享机制,形成信息孤岛,严重制约协同决策效率与综合管理能力。这些挑战共同影响着工程的综合效益与安全运行。

2 数字孪生技术在水利工程运行管理中的核心价值

2.1 适配性

数字孪生(Digital Twin)是一种超越传统三维模型的综合

性技术体系,其核心在于通过虚实交互与以虚控实,在虚拟空间构建物理实体的动态、高保真映射。它深度融合物理模型、实时传感器数据、历史运行记录等多源信息,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真能力,实现对实体对象全生命周期的精准反映与交互分析。水利工程运行管理因其空间分布广(流域性)、要素构成复杂(水、工、环、社)、动态变化性强(水文过程)、运行工况多样及安全要求高等显著特征,对管理技术提出了严峻挑战。而数字孪生技术的核心能力——复杂系统建模、实时状态映射、过程模拟推演与多场景决策优化——恰恰高度契合这些需求。它能够实现对工程本体状态、库区及上下游水情、流域气象水文、调度运行工况、潜在风险隐患等关键要素的全息感知与动态呈现,并基于深度分析进行前瞻预判。通过将传统依赖经验、分散被动的管理模式,转变为基于数据驱动、智能仿真和科学优化的主动干预模式,数字孪生技术为显著提升水利工程运行管理的精细化、智能化水平和决策科学性提供了强有力的技术支撑。

2.2 预期效益

首先,该技术能有效提升防洪减灾能力。通过缩短洪水预报预见期、提高预报精度并优化水库调度决策,可最大限度减轻洪涝灾害对下游城市和灌区安全的威胁。其次,水资源配置效率将得到显著优化。数字孪生支持的科学调度与精细化管理,能够提高农业灌溉水利利用效率,缓解日益尖锐的用水矛盾,从而保障生活、生产和生态用水的安全稳定。第三,工程运行安全将获得更强有力的保障。实现对关键水利工程设施的全天候、智能化监控与诊断,推动管理模式从事后被动抢险向事前主动防控转变,大幅提升工程本质安全水平并延长其服役寿命。第四,管理决策的科学性将得到根本性提高。基于“一张图”全景数据和智能推演能力,管理者能够获得直观、量化的决策依据,减少对经验的依赖,显著增强决策的科学性、预见性和多部门协同性。最终,这将有力促进智慧水利体系建设。为玛纳斯河流域乃至新疆全区构建具备“预报、预警、预演、预案”功能的智慧水利体系奠定坚实技术基础,赋能水利治理体系和治理能力的现代化转型。

3 数字孪生技术在水利工程中的应用框架

3.1 全域感知与数据融合层

该层构建基于“空天地一体化”的立体监测网络,整合卫星遥感(监测冰川积雪覆盖、土地利用、植被指数)、无人机航拍(获取高精度地形地貌、工程外观)及地面物联网传感器(水位、流量、雨量、渗压、应力应变、视频等),实现对玛纳斯河源头冰川、库区、河道、大坝结构、重要渠系、闸门状态、灌区土壤墒情及关键断面流量的全方位、高时空分辨率感知。重点聚焦肯斯瓦特水库库区及上游冰川融雪区的动态监测。同时,建立统一的数据接入与治理平台,融合实时监测数据、历史水文资料、工程BIM模型、GIS地理空间数据、调度运行记录及社会经济数据,形成标准化的多源异构水利孪生数据库。

3.2 精准建模与多模型耦合层

该层以高精度地理信息数据(DEM, DOM, DLG)和关键水利工程(如肯斯瓦特大坝、夹河子水库、重要渠首)的精细化BIM模型为基础,构建覆盖玛纳斯河流域的三维可视化数字底板,精准表达地形地貌、水系网络、水利设施及灌区布局。核心在于将水动力模型(模拟河道、库区水流)、水文模型(模拟降雨径流)、水质模型、泥沙模型及工程结构安全分析模型等多维多尺度专业模型,与前述数字底板进行深度耦合集成,形成可计算、可分析的孪生体,实现物理流域的精准数字化映射。

3.3 智能分析与决策支持层

该层驱动孪生体动态更新,实现流域水情、工情、墒情的全景可视化展示。核心功能包括:洪水演进模拟推演,基于实时雨情与上游来水,模拟不同调度方案下洪水的时空演进过程,预测下游关键断面洪峰流量与到达时间,支撑防洪决策;水资源优化配置模拟,结合实时水情、气象预报、作物需水模型及用水需求预测,模拟评估不同配水方案下的供水保障率、灌溉效率、生态补水效果及发电效益,辅助生成最优调度计划;工程安全状态评估与预警,利用传感器数据与结构分析模型,实时评估大坝、渠系等关键工程的结构应力、变形及渗流稳定性,实现异常状态的智能诊断与分级预警。并应用机器学习与深度学习算法优化预报模型精度(如融雪径流)、识别潜在风险模式(如渠系渗漏早期特征)及提供智能调度方案推荐与情景分析。

3.4 交互控制与服务应用层

该层提供三维可视化交互平台,支持管理人员进行场景漫游、信息查询、方案模拟与结果对比分析。系统将优化生成的调度决策(如水库泄洪指令、渠系配水方案)自动转化为可执行指令,通过集成的控制系统(闸门自动控制、灌区量测水系统)或管理平台下达到执行单元。同时,提供移动端应用,便于现场人员实时查看信息、接收预警与上报情况,并向相关部门及公众提供定向的水情、预警等信息发布服务,形成决策-执行-反馈的闭环。

3.5 知识积累与持续优化层

该层旨在实现系统的自我进化。通过贯通规划设计、建设施工至运行维护全生命周期的“数字线程”,构建完整的工程数字资产档案。基于系统运行的实际数据反馈,持续对水动力、水文、结构安全等专业模型进行参数率定与模型验证,提升数字孪生体的模拟精度与可靠性。同时,将专家经验、历史调度案例及优化规则沉淀为结构化的知识库与规则库,支撑系统的智能学习能力与决策水平持续提升,确保数字孪生系统在防洪减灾、水资源优化配置、工程安全运维等核心业务中保持长效性与先进性。

4 数字孪生技术在水利工程中的核心应用场景

4.1 防洪抗旱智能调度

(1) 实时洪水风险预警。数字孪生体实时接入上游冰川融雪监测数据、库区及河道水位流量数据、气象雷达降雨预报数据。通过耦合的水文水动力模型,快速模拟不同强度降雨或融雪情景下,洪水在玛纳斯河干流及主要支流的演进过程,精准预测肯

斯瓦特等关键水库的入库洪峰、水库水位变化及下游石河子等重要城镇防洪断面的洪峰流量和到达时间。系统可自动生成淹没范围图、风险等级图,并提前发布预警信息。

(2) 水库联合优化调度。在洪水来临前,系统基于预测洪水和水库当前蓄水状态,模拟不同预泄方案对降低下游洪峰、保障水库自身安全的效果,推荐最优预泄策略。在干旱期,则模拟不同补水方案对保障下游灌溉和生活供水、维持河道生态基流的效果,优化水资源分配。例如,针对玛纳斯河春季融雪型洪水与夏季农业用水高峰的矛盾,系统可精细计算肯斯瓦特水库的蓄泄时机,在保障防洪安全前提下最大限度蓄水兴利。

4.2 水资源精细化配置与灌区智慧管理

(1) “四水四定”智能管控。将玛纳斯河流域水资源开发利用上限、用水效率控制指标、水功能区纳污限值、河湖生态流量保障目标(“四水四定”)融入数字孪生体。系统实时监控区域、行业、主要取水口的实际用水量、效率指标和出水水质,并与管控目标进行对比分析预警。

(2) 灌区供需精准匹配。集成土壤墒情监测、作物种植结构、作物需水模型(ETO)、气象预报信息。系统可预测未来短期内(如未来3-7天)不同灌区的作物需水量,结合渠首引水能力、渠道输水效率、水库可用水量等信息,生成精细到支渠/斗渠口、分时段配水计划。通过闸门远程自动控制或指令下发,实现“按需配水”,减少输配水损失,提高灌溉水利用效率。

4.3 水利工程全生命周期安全监控

(1) 关键工程健康诊断。对肯斯瓦特重力坝、夹河子水库土石坝等核心建筑物,布设全面的传感器网络(渗压、变形、应力应变、温度等)。数字孪生体实时接收并可视化展示监测数据,与结构安全分析模型耦合,评估大坝在当前工况下的稳定性、渗流安全性。利用AI算法识别监测数据的异常模式(如变形速率突变、渗流量异常增大),实现早期风险预警和精准定位。

(2) 渠系安全智能巡检。结合无人机定期巡查获取的高清影像和视频,利用计算机视觉技术自动识别渠道衬砌破损、淤积、渗漏点、非法侵占等隐患。将识别结果精准定位到数字孪生体

的三维渠系模型上,辅助制定精准维修保养计划;模拟极端工况(如超标准洪水、强震)下工程结构的响应,评估其安全裕度,为工程除险加固或运行方式调整提供依据。

4.4 河湖生态保护与修复评估

基于数字孪生体实时监测和模拟下游关键生态断面的流量过程,对比生态流量保障目标,监督生态泄放执行情况,评估保障效果;耦合水质模型,模拟分析点源、面源污染排放对玛纳斯河干流及主要支流水质的影响;结合遥感反演的植被覆盖、水域面积等生态指标变化,辅助评估河流生态修复措施(如生态补水、岸线治理)的实施效果,为后续生态修复规划提供数据支撑。

5 结束语

推动数字孪生技术在玛纳斯河的深化应用,需要坚持“需求牵引、应用至上”原则,加强顶层设计与规划引领,破除数据壁垒,加大关键技术攻关与模型本地化研究力度,探索多元化投入机制,并着力培养跨学科复合型人才队伍。玛纳斯河数字孪生建设的实践,不仅将惠及本流域的水安全与生态安全,更将为新疆乃至整个西北干旱区内陆河流域的智慧水利建设提供可复制、可推广的宝贵经验,为落实国家“江河战略”、推进新阶段水利高质量发展提供强有力的科技支撑,最终实现水资源可持续利用与区域经济社会和谐发展的战略目标。

[参考文献]

[1] 牛广利,李天旸,杨恒玲.数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用[J].长江科学院院报,2023,40(3):181-185.

[2] 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.

[3] 朱李伟,沈国政,储伟杰.数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用关键要素探究[J].中国科技期刊数据库工业A.2023,(8).0028-0031.

作者简介:

祖日旦·玉苏甫(1997--),女,维吾尔族,新疆昌吉州呼图壁县人,本科,专业技术12级职称,研究方向为水利信息化。