

数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用分析

廖登峰

临泉县城防管理所, 安徽 临泉 236400

[摘要]伴随数字化信息化智能化的发展,对于水利工程管理存在数据多、信息碎片化、决策困难等一系列问题而产生。数字孪生是一种集数据获取、建模模拟、智能分析为一体的先进技术,给水利工程的运行管理带来新思路,物理世界与虚拟世界的高度融合,可以做到实时监控、模拟推演、最优调控与健康管。提高管理水平和安全保障能力。文中梳理了该技术的应用优势及其在系统建设、运行优化、水资源管理措施方面进行了探索,对技术应用成效及未来前景做了分析,证明能够支撑防洪调度、水资源调配、生态环境维护等问题,为水利行业的数字化提供理论依据、实际案例参考。

[关键词]数字孪生; 水利工程; 运行管理

DOI: 10.33142/hst.v9i1.18972

中图分类号: TV675

文献标识码: A

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

LIAO Dengfeng

Linquan County Defense Management Office, Fuyang, Anhui, 236400, China

Abstract: With the development of digitalization, informatization, and intelligence, there are a series of problems in water conservancy project management, such as excessive data, fragmented information, and difficult decision-making. Digital twin is an advanced technology that integrates data acquisition, modeling and simulation, and intelligent analysis, bringing new ideas to the operation and management of water conservancy projects. The high integration of the physical world and the virtual world can achieve real-time monitoring, simulation and deduction, optimal regulation, and health management. Improve management level and security capabilities. The article summarizes the application advantages of this technology and explores its application in system construction, operation optimization, and water resource management measures. It analyzes the effectiveness and future prospects of the technology application, proving that it can support flood control scheduling, water resource allocation, ecological environment maintenance and other issues, providing theoretical basis and practical case references for the digitalization of the water conservancy industry.

Keywords: digital twin; water conservancy engineering; operation management

引言

随着气候异常变化以及水资源短缺形势恶化,水利工程建设管理的科学性和智能化程度关乎着对资源利用分配以及安全保障,传统的巡检与经验判断的方式无法满足当前复杂的水文情况以及多重目的管理需求。随着物联网技术、云技术和大数据、人工智能等科技的进步使得水利工程建设向着信息化以及智能化方向迈进,但是单纯的信息化手段依然存在着诸多弊端如信息碎片化严重、预见性较弱以及决策时滞较长等现象。数字孪生技术基于将物理世界与镜像虚拟世界的即时对应,做到同频仿真模拟以及智能化分析判断,对于全面感知水情以及合理配置水资源以及工程运营调度等方面都具有较强的参考意义,大大提

高了水利工程管理工作的效能以及安全性。本文的目的在于对数字孪生技术进行系统的分析研究探索其在水利工程中的运用价值以及应用方式还有发展方向等内容,可以更好地为水利工程建设的智慧化发展给予借鉴。

1 数字孪生技术在水利工程管理中的应用价值

数字孪生技术应用于水利工程管理中有着巨大的应用前景,其本质就是通过把真实物体和数字模型紧密结合,来达到对水利系统全生命周期的精细化管理及智能化管控。一方面,数字孪生技术可以做到及时动态的信息反馈,基于传感器监测到的水位、流量、降水强度等全方位信息,做到对水利系统的实时感知和准确研判;另一方面,数字孪生技术还能开展高精度模拟和预报,运用往期数据和物

理建模的方式对城市防汛排涝过程、水闸运行调度及区域水资源调配等问题展开合理的推演,以此增强水利工程调控决策的准确程度和时效性,另外,数字孪生技术还可实现系统控制的最优化,运用智能算法调控水利工程设备参数,在保证工程安全的前提下实现水资源的最大化利用,除此之外,数字孪生技术对于水利工程建筑物健康诊断、风险预警和生态治理也有非常大的作用,可基于实时监控及智慧计算发现存在的隐患,及时防范化解风险,从而进一步推动水资源管理水平的进步。

2 数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用

2.1 数字孪生水利系统构建

2.1.1 数据采集与实时监控

数据收集与实时监控构成数字孪生水利系统的底层架构,在河流、闸站、及其他重要设备处部署传感器进行水位、流量、降雨量、风速、水质指标、设备工作状况等相关信息实时收集,然后利用物联网和云计算技术传送到统一管理平台,保障了信息的有效性、及时性、全面性、为上层构建模型模拟与智能计算提供了有效的支持。相对之前的人工巡检方式而言数字化监控不仅能大大提高数据收集的精确度和时效性,更能对多类数据进行综合汇集,为水利工程管理人员提供全面完整的实时工程运行情况,同时通过对历史数据与当前数据的研究分析可发现发展规律、发现问题,为后期的风险预防以及突发事件处理做出指导与借鉴。

2.1.2 仿真建模与预测分析

仿真模拟与预测是数字孪生水利工程的重要过程,构建高可靠性的物理模型和虚拟运行环境,精准地模仿着水利建筑物的运行状况,一般具有较为详细的1维或者2维甚至多尺度精细的水动力学计算模型,可以对城市防汛排涝过程、水闸运行调度、水资源分配及极端气候的发生作出合理的预测。通过对过去信息的反馈和当前数据的修正,数字孪生模型实时的反应着这个水利系统的运行情况,为管理者们提供了多种不同的调度方案,以供最佳选择。预测功能也可以提前预警可能出现的一些问题,例如水位异常、结构应力超标或者洪水发展的趋势,让管理者们提前防范,减少事故发生的概率,保证工程的安全。

2.1.3 系统集成与可视化管

系统集成与可视化管是数字孪生水利工程的核心应用模块,将实时感知的数据、仿真计算的结果以及历史运行的信息集成在一个统一管控平台上,完成对水利设施全方位的监视和智慧式的管。系统管理人员可以通过图表的方式查看实时监控到河道水位变化、流速和流量、水闸开关状态、泵站运行工况以及水工构筑物的状态等信息,

还可以自动生成警报提示以及调度指令,达到联动协调的目的;系统的集成,提升了信息处理速度,而且通过对多种来源的数据进行融合以及动态化呈现,支持了运行调度方案的选择以及可行性分析。而可视化的管理还能对未来可能发生的运行状况进行模拟,帮助管理者进行长远的安排、应急措施的制定等,在常规的运作中以及突发的情况下都能发挥作用。

2.2 数字孪生赋能水利运行管理

2.2.1 水闸与泵站运行优化

在水闸与泵站调度优化方面,数字孪生技术基于实时雨情、水情监测数据、历史运行资料及气象预报信息,对闸门启闭时序、泵站启停方案及排涝能力进行动态分析与优化决策。通过构建城市排水系统与河道水位联动的数字模型,能够模拟不同降雨情景下的排涝过程与水位变化趋势,为管理人员提供多方案比选依据,使其在保障城市防汛安全的前提下实现排水效率最大化。系统还可根据上游来水、区域降雨强度及管网运行状态进行实时预测,动态调整水闸开度与泵站运行工况,避免因人工经验判断滞后或偏差造成内涝风险。通过数字孪生的精细化调控,城市防汛排涝及水闸运行更加科学、精准和安全,有效提升整体调度的可靠性与响应效率。

2.2.2 防洪调度与应急管理

数字孪生技术应用于防汛指挥调度及应急管理上有着至关重要的意义,在数字世界用仿真模型模拟洪水过程、恶劣气象情况以及下游灾害等,可以对可能发生的风险进行预警预测。管理者可以依据模型结果迅速做出调度指令、及时调节水闸启闭方案并且可以做到跨区域联合调度等工作,提高了应急反应能力和正确率。数字孪生模型可以进行实时监控并进行预警预报,使防汛指挥调度不再是凭经验进行决策而是在科学分析及风险评价基础之上做出准确判断来采取相应的防洪举措。

2.2.3 水资源调配与供水管理

在水资源调度及供水保障方面,数字孪生可以实现对各流域、各用水主体的实时分析,调整水资源分配计划,保障用水安全及效益最大化,其通过仿真模拟不同的调配策略从而使得在满足生态流量及合理开发利用水资源的情况下最大程度地提高供水效率,并能及时响应特大干旱及用水紧张的问题。并且可通过数字孪生将长期规划同实时信息相结合,实现对水资源调度的合理化调整,给水行业管理人员予以智慧决策建议。

2.2.4 水工结构健康监测与预警

水工程结构安全监控预警是数字孪生的一个典型应

用场景,通过监控大坝、闸门等重要建筑物运行情况并与虚拟环境中的模型相结合来分析得到结构问题及隐患,在此基础上根据监控数据以及模型推演形成预警提示,用于指导维修、维护、应急处理工作。数字孪生的应用使得水工建筑物的监控管理水平更加精细准确及时,避免突发事件的风险,保障水利工程的安全稳定运转。

2.2.5 水环境与生态管理

数字孪生也可应用于水环境和生态保护管理方面,基于对水质变化、生态流量及生物栖息环境进行仿真模拟,提供相关的生态规划建议,使得水利工程运行与生态环境相协调;该平台可以预估工程运行给水质、水生生态以及湿地生态环境带来的影响,为工程开展的生态调度以及保护措施提供决策依据。既保证了水资源的合理利用又实现了与生态环境的和谐共存,是构建智慧水利的重要技术支持。

3 数字孪生技术应用机制、效果与发展趋势

3.1 数字孪生应用机制

数字孪生在水利工程建设应用原理主要是以数据赋能,模型仿真与智慧决策相结合的形式。一是基于数据驱动,数字孪生水利工程建设是以全面的信息采集为基础,通过传感器、遥感、历史观测记录等方式监测水位、流速、降水量和结构状况等重要信息指标,获得完整的信息链,对水利工程运行给予及时而准确的支持。二是虚拟建模及仿真为核心的应用过程,数字孪生可以利用一维、二维或者多尺度高精度建模对水利基础设施进行动态还原,在不同情况下对其运行状态进行仿真模拟,以预测防汛排涝过程、水资源变化趋势以及水资源变动走向,考察各运行计划合理性^[1]。三是数字孪生模式注重水利工程建设层次体系的建设,即单元级、系统级、流域级数字孪生,从而做到对于单体水利项目乃至整个流域系统进行全覆盖管理以及协调控制,不仅可以对常规情况进行智慧化处理,还可以针对紧急情况提供应急响应和决策建议,使得管理者可以运用更加高效便捷的手段解决复杂繁琐的问题。数字孪生应用方法最后通过数据分析、数学建模和智能计算相融合的方式形成了对水利工程全生命周期闭环式管理的方法论,助力水利工程安全、高效的持久运转。

3.2 应用效果评估

数字孪生技术运用于水利工程运行管理取得了非常可观的效果,体现在运行能力提高、管理决策改进和安全水平加强三方面。在运行能力上,采用数字孪生进行实时监控及仿真实验等可以使得水利工程的调度更合理节约,减少水资源、电能的浪费,而且可以缩短人工检查与决策

的时间周期,加快反应速度。在管理决策改进上,利用数字孪生可以进行各种场景模拟以及风险预测,有助于管理人员作出关于防汛排涝调度、供水安排及区域水资源统筹安排等的最佳方案。而且数字孪生还可以进行跨地区、跨流域的合作管理,使管理决策更为合理有效^[2]。在安全水平上,运用数字孪生进行结构检测以及风险预警能够让管理者对隐患做到早发现、早处理,避免意外事故发生。此外,数字孪生可以模拟水质变化情况以及生态状况,以便辅助管理者制定出保护方案,在保证水利工程正常运行的同时兼顾到环境方面的维护,两者相互结合协调统一。综上所述,数字孪生技术的应用,既提高了水利工程的运行效率,又改善了管理科学程度和安全保障等级,是当前水利工程管理走向信息化、智能化的有效技术支持手段。

3.3 应用面临的挑战

虽然数字孪生技术应用到水利工程项目运行管理中有着很好的应用潜力,但是在应用过程中还面临着多重难关。一是信息收集标准化难题阻碍着各平台之间的相互连通问题,在不同的工程和部门中的信息收集方式、时间间隔、准确度不一样,使得信息的整合与统管变得困难。二是系统的融合及技术适应难题也是应用的一大难点,目前的数字孪生系统不仅要有与物理模型、模拟算法、管理系统等相互适配的能力,而且还要保证其实时性、可靠性等,这都是对技术框架的设计提出的要求^[3]。三是人才能力储备问题,限制着数字孪生应用技术的扩大范围,水利工程项目管理者及技术人员对数字孪生物理解程度及实操水平参差不齐,无法保障其充分发挥作用。四是运行维护费用高,水利工程中需要精准的信息感知设备如高精传感仪器、大量的存储空间、强大的运算力,这些都是需要较大的花费成本,在经济上是不利可取的。五是对数字孪生技术标准、相关的法律条文及信息安全问题,有关保护好个人隐私、系统的安全保障还有就是区域间的协调工作等都对水利工程中数字孪生的应用提出了挑战。

3.4 发展对策与未来趋势

针对于目前数字孪生水利所面临的问题,应当从技术层面、管理制度以及人才储备三方面提出相应的解决措施,在技术层面上,应当加强采集端以及标准化建设,搭建统一的数据接口以及信息系统,增强虚拟环境下的模型精确程度以及模拟效果,同时优化算法以及系统架构,实现智能化管理实时高效的目标;在管理制度上建立跨部门协作、全流程管理规则,保证数字孪生技术在防汛调度、水资源利用、生态维护等方面的应用落地,并强化政策扶持力度以及制定相关技术标准,为系统的运行提供制度依据;最

后的人才储备要通过专项培训以及技术交流来提高相关管理者以及工作人员对数字孪生技术的应用理解程度,使相关人员熟悉相关数据分析、模型仿真以及智能决策等相关工具的应用,以实现水利更优智的管理维护。未来对于数字孪生的相关研究重点将会放在多元数据整合与处理、高精度仿真建模、智能化分析研判、生态融合管理系统以及自主化系统运行等方面,数字孪生技术的进步也将进一步使得水利工程建设运行更加地合理有效安全,为其智慧化转型提供强有力的技术保障。

4 结语

数字孪生技术对于水利工程的运营管理有非常重要的应用前景,在物理空间和数字空间充分关联的基础上,既提高了水利工程工作效率以及管理决策水平,又保障了水利工程的安全稳定运行以及生态环境保护。文章对应用价值、应用框架、运营管理赋能策略和应用方式及其成效

进行了探讨,说明了数字孪生可以应用于水资源利用、防汛调度、建筑物安全监控以及生态环保方面,实现了智能化和数字化的运营管理模式,为其发展提供了参考案例。随着数字孪生技术不断完善和相关制度健全,它在未来高效、安全、绿色水利工程管理发展中将会起到更加重要的作用。

[参考文献]

- [1]卓君.数字孪生技术在水利工程运行管理中运用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(21):195-197.
- [2]林运东,张龙,刘勇.数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J].黑龙江水利科技,2025,53(3):168-170.
- [3]孙伟.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用[J].山西水利,2023(5):51-53.

作者简介:廖登峰(1981.8—),男,阜阳市临泉县,汉族,大专学历,临泉县城防管理所工程师,从事水利工作。