

水利工程数字化孪生系统的构建方法与实践探索

徐丹艳

温州市兴海水利建设有限公司 浙江 温州 325000

摘要: 水利工程数字化孪生系统是水利行业数字化转型的关键支撑。本文阐述了水利工程数字化孪生系统,介绍其依托数字化技术构建,与实际工程全生命周期映射交互,整合多源数据并借助建模仿真技术精准监测、模拟预测、辅助决策。详细说明构建方法,包括数据采集整合、模型构建、系统集成交互。还探索其在工程监测、调度、应急管理中的应用,实现水利工程智能化升级,提升运行安全性与管理效益,推动行业数字化发展。

关键词: 水利工程; 数字化孪生系统; 构建方法; 实践应用

引言

随着信息技术的飞速发展,数字化、智能化成为各行业发展的趋势。水利工程作为国家基础设施的重要组成部分,其管理面临着诸多挑战,如工程运行状态监测困难、调度决策缺乏科学依据、应急管理能力不足等。水利工程数字化孪生系统的出现,为解决这些问题提供了新的思路和方法。它通过构建与实际工程相对应的虚拟系统,实现对水利工程的全方位感知、智能化分析和科学化决策,具有重要的现实意义。

1 水利工程数字化孪生系统概述

水利工程数字化孪生系统是依托数字化技术构建的虚拟系统,它与实际水利工程物理实体在全生命周期内形成一一映射、实时交互的关系^[1]。该系统整合了来自多源的数据,涵盖地理信息、气象水文、工程结构、设备运行等众多方面。地理信息数据为工程选址、布局提供基础依据,确定工程与周边地理环境的适配性;气象水文数据影响工程的防洪、灌溉等功能设计,不同地区的气象水文特征决定了工程的规模和应对策略;工程结构数据反映工程自身的物理特性,包括建筑材料的性能、结构的稳定性等;设备运行数据则体现工程中各类设备的实时工作状态,如水泵的流量、压力,闸门的启闭情况等。借助先进的建模与仿真技术,水利工程数字化孪生系统能够对水利工程的运行状态进行精准监测、模拟预测,并为科学决策提供有力支持。在水利工程的全生命周期中,从规划设计到施工建设,再到运行维护,各个环节都会产生大量数据。在规划设计阶段,基于地形、地质、水文等数据构建的初步虚拟模型,可模拟不同设计方案下工程的运行效果,通过对比分析,选择最优方案,提高规划的科学性和合理性。施工建设阶段,实时采集的施工进度、质量检测、材料使用等数据输入虚拟系统,可构建施工过程的动态模型。通过该模型,

能及时发现施工中的偏差和问题,并采取相应措施进行调整,确保工程按计划、高质量建设。运行维护阶段,数字化孪生系统持续接收水位、流量、水质、设备状态等运行数据,不断更新虚拟模型。在监测方面,它可以实时获取工程各个部位的状态信息,如大坝的位移、应力,堤防的渗漏情况等,一旦发现异常数据,立即发出预警,以便及时进行检修和维护。在预测方面,能提前预判工程可能面临的风险,如根据气象预报和水文数据,预测洪水发生的可能性和规模,评估工程在洪水作用下的安全性,为防洪调度提供依据。在决策支持上,为管理人员提供多种可行的方案,辅助其做出科学合理的决策。

2 水利工程数字化孪生系统构建方法

2.1 数据采集与整合

数据是水利工程数字化孪生系统的基石。要全面采集水利工程全生命周期各个阶段的各类数据。在设计阶段,需要收集地形地貌、水文气象、工程结构参数等数据。地形地貌数据有助于了解工程所在区域的地形特征,为工程布局提供依据;水文气象数据对于预测水流情况、评估洪水风险等至关重要;工程结构参数则决定了工程的承载能力和稳定性。施工阶段的数据包括施工进度、质量检测、设备运行等。施工进度数据可以实时掌握工程的建设情况,确保工程按计划推进;质量检测数据能够及时发现施工过程中存在的质量问题,保证工程质量;设备运行数据有助于监控施工设备的状态,预防设备故障影响施工进度。运行阶段的数据涉及水位、流量、水质、设备状态等^[2]。水位和流量数据反映了水利工程的水资源调节情况;水质数据关系到水资源的利用和保护;设备状态数据则能及时发现设备运行中的异常,保障工程的正常运行。采集数据的方式多种多样。可以通过传感器实时获取运行数据,传感器能够精确测

量各种物理量,并将数据及时传输到系统中。利用无人机、卫星遥感等技术可以获取工程外观及周边环境数据,无人机可以快速对工程进行巡查,获取高分辨率的图像;卫星遥感则能从宏观角度监测工程区域的变化。此外,还可以从设计图纸、施工报告等文档中提取历史数据,这些数据对于了解工程的演变过程和历史状况具有重要意义。由于采集到的数据格式多样、来源广泛,需要进行整合处理。建立统一的数据存储与管理平台,将不同格式、不同来源的数据进行标准化、规范化处理,为后续的建模与分析提供可靠的数据支撑。将不同单位测量的水位数据进行统一换算,将图像数据进行格式转换等,确保数据在系统中能够准确、高效地使用。

2.2 模型构建

模型构建是数字化孪生系统的核心环节,主要包括物理模型、数学模型和逻辑模型。物理模型基于水利工程实际结构与布局,利用三维建模技术构建高精度虚拟模型。通过三维建模,可以直观地展示工程的外观与内部构造,让管理人员仿佛置身于实际工程之中,更清晰地了解工程的各个部分。对于水坝工程,可以构建详细的三维模型,展示大坝的坝体结构、泄洪洞、输水管道等部位,方便进行维护和管理。数学模型用于模拟水利工程的物理过程,如水流运动、结构受力等。通过建立方程描述各物理量之间的关系,实现对工程运行状态的定量分析。在水流运动模拟中,可以利用流体力学方程来描述水流的速度、压力等参数的变化,预测不同水位下水流对工程结构的影响。在结构受力分析中,通过建立力学方程,计算工程结构在不同荷载作用下的应力和变形情况,评估工程的安全性。逻辑模型则侧重于描述水利工程的业务逻辑与管理流程,如调度决策、应急处理等。它为系统智能化决策提供逻辑框架,确保系统的决策过程符合实际工程的管理要求。在调度决策逻辑模型中,需要考虑水资源的供需情况、工程的蓄水能力、下游的用水需求等因素,制定合理的调度方案。在应急处理逻辑模型中,要明确突发事件的类型、应急响应的流程、各部门的职责等,以便在突发事件发生时能够迅速、有效地进行处理。不同模型相互关联、协同工作,共同构成完整的数字化孪生模型体系。在构建过程中,需要充分考虑模型的准确性、实时性与可扩展性。准确性是模型的基础,只有准确的模型才能真实反映水利工程的实际运行情况;实时性要求模型能够及时根据新数据进行更新,保证与实际工程的同步性;可扩展性则使模型能够适应工程的变化和新需求的出现,方便进行功能的扩展和升级。

2.3 系统集成与交互

系统集成与交互是水利工程数字化孪生系统实现高效运行、发挥核心价值的关键环节。将数据采集模块、模型构建模块以及各类应用功能模块进行有机集成,构建统一的水利工程数字化孪生系统平台,是系统集成的重要目标。数据采集模块负责从实际水利工程中获取各类数据,为整个系统提供基础信息支撑;模型构建模块依据采集到的数据,构建物理模型、数学模型和逻辑模型等,对水利工程进行全面模拟;各类应用功能模块则基于模型开展监测、预测、决策等具体业务^[3]。通过数据接口与通信协议,打破不同模块之间的数据壁垒,实现各模块之间数据的顺畅流通与交互。数据接口确保数据能够准确无误地传递;通信协议则规定了数据传递的规则和格式,保障数据传输的稳定性和可靠性,使系统整体能够协同有序运行。在注重系统内部集成的同时,更要强调系统与实际水利工程的实时交互。一方面,借助传感器、物联网等技术,将实际工程运行数据实时、准确地传输至数字化孪生系统。这些数据驱动模型不断运行与更新,让虚拟模型能够紧跟物理实体的变化,始终保持同步。以水位监测为例,通过在水库、河流等部位安装水位传感器,实时采集水位数据并传输到系统中,系统依据这些数据及时更新水流模型,精准反映当前的水流状况,为后续的分析 and 决策提供准确依据。另一方面,将系统分析决策结果及时反馈至实际工程,指导工程运行管理与调度决策。系统根据模拟分析结果推荐的调度方案,可迅速应用到实际工程调度中,实现科学调度。同时,实际工程在运行过程中产生的新数据又反馈到系统中,进一步优化模型和调度方案,形成虚拟与现实的双向互动与闭环控制,不断提升水利工程数字化孪生系统的实用性和有效性。

3 水利工程数字化孪生系统实践探索

3.1 在水利工程监测中的应用

利用水利工程数字化孪生系统,可实现对工程运行状态的全方位实时监测。通过在物理工程上部署大量传感器,将采集到的水位、流量、位移、应力等数据实时传输至数字化孪生系统。系统基于构建的模型对数据进行实时分析,能够及时发现工程运行中的异常情况,如结构损伤、渗漏等,并发出预警信息。对于水坝工程,在大坝的不同部位安装位移传感器和应力传感器,实时监测大坝的位移和应力变化。当位移或应力超过设定的阈值时,系统会立即发出预警,提醒管理人员及时进行检查和处理。系统还可以对渗漏情况进行监测,通过在水坝内部和周边布置水位传感器和流量传感器,检测渗

漏的水位和流量变化,及时发现渗漏隐患。系统还可对工程未来运行状态进行预测模拟,提前预判可能出现的风险,为工程维护与管理提供科学依据。通过对水流模型的模拟分析,预测不同水位下工程的受力情况,评估工程安全性。如果预测到在某个水位下,大坝的某些部位应力过大,可能存在安全隐患,管理人员可以提前采取加固措施,如增加支撑结构、进行灌浆处理等,避免事故的发生。

3.2 在水利工程调度中的应用

水利工程数字化孪生系统为工程调度提供智能化决策支持。系统整合气象、水文等多源信息,结合水流、水质等模型,模拟不同调度方案下工程的运行效果,如水库蓄水、放水对下游河道水位、水质的影响等。在制定水库调度方案时,系统可以考虑降雨预报、上游来水情况、下游用水需求等因素,模拟不同蓄水和放水方案下水库的水位变化、下游河道的水位变化以及水质变化情况。通过对比分析不同方案的优劣,系统推荐最优调度方案,并可实时调整方案以适应不断变化的外界条件^[4]。在调度过程中,系统实时监测工程运行状态,确保调度决策的安全性与可行性。在放水过程中,系统实时监测下游河道的水位和流速,如果发现水位上涨过快或流速过大,可能会对下游堤岸造成威胁,系统会及时调整放水方案,减少放水量或改变放水时间,保障下游地区的安全。系统还可以根据水质监测数据,合理调整调度方案,改善下游水质,提高水资源利用效益。

3.3 在水利工程应急管理中的应用

面对水利工程可能出现的突发事件,如洪水、地震、设备故障等,数字化孪生系统发挥重要作用。系统提前构建各类应急场景模型,模拟突发事件发生时工程的响应过程与影响范围。针对洪水突发事件,系统可以构建洪水演进模型,模拟不同洪水流量和水位下,洪水对水利工程及周边地区的影响范围和程度。通过模拟分析,可以确定需要疏散的人员区域、可能被淹没的设施等,为应急指挥提供重要参考。当实际突发事件发生

时,系统迅速启动应急响应模式,实时采集事件相关信息,结合模型分析评估事件严重程度与发展趋势,为应急指挥提供决策依据。在地震发生后,系统立即采集工程的震动数据、结构损伤数据等,结合结构受力模型分析工程的受损情况,评估工程的安全性。根据洪水演进模型和人员疏散模型,制定科学合理的人员疏散路线和抢险物资调配方案,提高应急管理的效率和效果,降低突发事件造成的损失^[5]。水利工程数字化孪生系统的构建与实践探索,为水利工程管理带来了新的理念与方法。通过数据采集与整合、模型构建、系统集成与交互等关键技术,实现水利工程在监测、调度、应急管理等多方面的智能化升级,提升水利工程的运行安全性、管理效率与水资源利用效益,推动水利工程行业向数字化、智能化方向发展。

结语

水利工程数字化孪生系统的构建与实践探索,是水利行业适应时代发展需求的必然选择。通过构建完善的数字化孪生系统,实现了水利工程全生命周期的智能化管理,提高了工程的运行安全性和管理效率,优化了水资源的利用效益。在未来,随着技术的不断进步,水利工程数字化孪生系统将不断完善和发展,为水利行业的可持续发展提供更加强有力的支撑,推动水利事业迈向新的高度。

参考文献

- [1]龙娇.基于多源技术的水利工程数字孪生模型构建研究[J].智能城市,2026,12(2):145-148.
- [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]周占伟.模型管理平台在数字孪生水利工程建设中的应用[J].治淮,2026(3):21-23.
- [4]高玉生,王国岗,赵文超,陈亚鹏,衣雪峰.水利工程勘测全过程数字孪生技术研究[J].中国水利,2025(19):3-13.
- [5]丁晓云.水利工程中数字孪生技术的构建与实施路径研究[J].现代工程科技,2025,4(15):133-136.