

水利工程数字孪生基础模型构建及初步应用研究

金海龙

吉林省水利水电勘测设计研究院

DOI:10.12238/hwr.v9i10.6591

[摘要] 本文聚焦水利工程数字孪生基础模型的构建与初步应用,深入探讨其技术内涵、构建方法及实际应用场景。通过构建高精度数字孪生模型,结合多源数据融合与智能算法,实现水利工程全生命周期的数字化模拟与管理。研究结果表明,该模型可显著提升水利工程的管理效率、优化水资源配置、降低运维成本,为智慧水利建设提供有力支撑。

[关键词] 水利工程; 数字孪生; 基础模型; 应用研究; 智慧水利

中图分类号: TV5 文献标识码: A

Study on the Construction and Preliminary Application of Digital Twin Foundation Model of Hydraulic Engineering

Hailong Jin

Jilin province water conservancy and hydropower survey design & research institute

[Abstract] This paper focuses on the construction and preliminary application of digital twin basic model of hydraulic engineering, and discusses its technical connotation, construction method and practical application scenarios. Through the construction of high-precision digital twin model, combined with multi-source data fusion and intelligent algorithm, the digital simulation and management of the whole life cycle of water conservancy projects are realized. The research results show that the model can significantly improve the management efficiency of water conservancy projects, optimize the allocation of water resources, reduce the operation and maintenance costs, and provide strong support for smart water conservancy construction.

[Key words] water conservancy project; Digital twins; Basic model; Applied research; Wisdom water conservancy

引言

伴随大数据、云计算、物联网等新一代信息技术迅猛发展,水利工程领域正历经数字化转型的深刻蜕变。传统水利工程管理方法遭遇效率欠佳、决策科学性欠缺等难题,无法契合现代水利发展需求。当应对洪水等自然灾害时,传统的管理办法通常凭借经验判断和有限的的数据,很难迅速精准地做出决策,导致灾害损失扩大。新兴的数字孪生技术,借助搭建物理实体的虚拟映射,达成对物理实体全生命周期的管理与优化,为水利工程智能精细化管理提供强大技术支撑。

构建水利工程数字孪生基础模型,是要借助数字化方式完整呈现水利工程的状态与演变进程,实现对水利工程的精准模拟和实时监控。这不但能提升水利工程的管理水准与运行效能,还可为水利规划、设计、建设、运行和维护等各环节提供科学支撑。本文将对水利工程数字孪生基础模型构建方法及初步应用开展系统研究,为水利信息化发展提供理论支撑与实践指引。

1 水利工程数字孪生技术概述

1.1 数字孪生技术定义与内涵

数字孪生技术是通过物理模型、传感器更新、历史数据等要素整合而成的技术,借助构建物理实体与虚拟模型的双向映射,实现对现实世界的仿真模拟。在水利工程中,数字孪生技术会实时采集水利工程相关数据,如水位、流量、水质、结构应力等,然后将这些数据转化为虚拟模型。此虚拟模型既能实时反映水利工程的当前状态,还可对未来运行状况进行预测与模拟。通过对水库进行数字孪生建模,能模拟不同降雨情形下水库的水位变动,为防洪调度提供决策参考。

1.2 水利工程数字孪生的特点

1.2.1 全生命周期管理

全生命周期管理表示,水利工程从规划、设计、建设到运行、维护等各个阶段,数字孪生模型都能给予全方位的支持与优化。数字孪生模型可对不同规划方案给水资源利用、生态环境等方面造成的影响进行模拟,助力选出最优方案。在设计环节,借助数字孪生模型可对工程结构开展力学分析与优化设计,提高工

程的安全性与可靠性。在项目建设阶段,模型可实时监督施工进度与质量,迅速察觉并处理问题。在工程的运行与维护期间,数字孪生模型可实时监测工程运作状态,预判设备故障,拟定合理的维护计划。

1.2.2 实时交互性

凭借实时交互性,虚拟模型可实时体现物理实体的状态改变,为决策提供及时精准的数据支撑。利用传感器网络,水利工程的各种数据可实时传输到数字孪生模型里,模型依据这些数据迅速更新自身状态,一旦水库水位出现变化,传感器会把实时数据传至数字孪生模型,模型即刻更新水位信息,还模拟水位变动对水库大坝安全造成的影响,为管理人员及时提供决策依据。

2 水利工程数字孪生基础模型构建

2.1 数据采集与预处理

2.1.1 数据采集

数据采集作为构建水利工程数字孪生基础模型的首要步骤,利用传感器、监测设备以及信息系统等多种渠道,实时或者定期采集水利工程的各项特征信息,如地理位置、结构参数、运行状态等。就大型水库来说,借助部署水位、流量、水质等传感器设备,对水库的水位、流量、水质等数据进行实时采集。水位传感器可精确测定水库水位高度,流量传感器可测算流经水库大坝的水流量,水质传感器可对水中溶解氧、酸碱度、浊度等指标进行监测,运用无人机遥感技术对水库周边环境进行监测,获取地形地貌、植被覆盖等相关信息。无人机可装载高分辨率相机和多光谱传感器,针对水库周边的地形、植被等开展详细的拍摄及分析工作,给数字孪生模型提供全面地理资料。

2.1.2 数据预处理

采集的数据常存在噪声、缺失值之类的问题,要进行预处理以保障数据的准确、完整和一致,数据预处理包括数据清洗、校验和转换等操作,数据清洗的主要目的是剔除数据里的噪声和异常值,对于水位传感器采集的数据,可能会因传感器故障或者外界干扰产生异常高值或低值,需要运用数据清洗算法去除这些异常值。数据校验旨在验证数据的准确性与合理性,查看流量数据是否契合水流运动的物理规律。数据转换是将数据转换为适合模型处理的形式,把不同单位的水位数据统一转换为米制单位。完成清洗、去噪、归一化等预处理步骤后,数据可为后续模型构建提供高质量的数据支撑。

2.2 模型构建方法

2.2.1 物理建模

物理建模根据水利工程的物理特性,创建能够反映工程实际运行情况的物理模型。搭建水库物理模型时,需要考虑水库几何形状、水流运动规律、泥沙输移等因素。通过建立水动力学方程,对水库中水流的流动过程进行模拟,包括水流的流速、流向、水位变化等信息。物理模型可直观展现水利工程的物理过程,不过针对复杂的水利工程系统,仅靠物理方式无法精准描述全部物理现象。

2.2.2 智能算法建模

智能算法建模是将机器学习、深度学习等人工智能技术相结合,对水利工程数据开展挖掘和分析工作,创建具有自学习和优化能力的智能模型。运用神经网络算法对水利工程历史数据开展学习,构建水位预测模型。神经网络可凭借大量历史数据来进行训练,自主探寻水位变化的规律,由此预测未来的水位。智能算法建模具备强大的自适应与学习能力,可应对复杂的非线性问题,只是训练需要大量数据,而且模型可解释性较差。

2.2.3 多种建模方法相结合

实际运用中,通常会采用将多种建模方法组合的形式,提升模型的准确性与可靠性。构建水库数字孪生模型时,可以将物理建模方法与数学建模方法相结合,构建反映水库水位变化、流量分配等物理过程的物理-数学混合模型。借助物理模型可准确把握水库物理过程,数学模型可对物理过程开展精准计算与分析。运用智能算法对历史数据开展分析,调整优化模型参数,提升模型预测精准度。利用神经网络算法对物理-数学混合模型参数加以优化,让模型能更精准地模拟水库运行过程。

2.3 模型验证与优化

2.3.1 模型验证

验证模型是保障水利工程数字孪生基础模型有效性的核心步骤,将实际监测数据与模型模拟结果进行对比,确认模型是否准确可靠。开展验证工作时,要着重留意模型预测误差、稳定性等指标。就水位预测模型而言,可把模型预测的水位值和实际监测的水位值作对比,算出预测误差。倘若预测误差处于允许的范围,表明模型精准度较高。需要对模型稳定性进行验证,也就是看模型在不同的初始条件和边界条件下,模型在不同初始条件和边界条件下能否得出稳定结果。

2.3.2 模型优化

模型优化是按照验证结果,改善和优化模型的过程,优化途径包含对模型参数的调整、模型结构的改进以及新算法和技术的引入等。若发现模型对洪水演进过程的预测存在误差,可通过增加监测点、优化水动力学算法等方法,提高模型预测的精准度。增加监测点可提供更多实际数据,以校正模型参数。通过优化水动力学算法,可更精确地模拟水流运动过程。还可引入新的算法与技术,如机器学习算法中的集成学习算法,对多个模型的预测结果进行组合,增强模型整体性能。

3 水利工程数字孪生基础模型的应用

3.1 在水利工程建设中的应用

3.1.1 工程进度实时监控和模拟分析

水利工程建设期间,数字孪生基础模型可达成对工程进度的实时监控和模拟剖析,借助构建工程三维数据底板。借助BIM(建筑信息模型)技术整合设计参数、施工进度等数据,达成工程建设的虚拟仿真。管理人员借助数字孪生平台,能够随时查看工程的三维模型,知晓工程的实际建设情形。针对水库工程,借助搭建数字孪生模型,达成了对工程建设全生命周期的管理,在工程施工阶段,模型能对不同施工方案下工程进度与成本的变化进行模拟。借助输入不同施工参数,像施工队伍数量、施工

设备型号这类,模型就能预测工程的完工时间和成本,从而为决策提供科学依据。管理人员可依据模型的模拟结果,选出最优施工方案,科学规划施工进度与资源,增强工程建设的效率与质量。

3.1.2 施工过程问题及时发现和解决

数字孪生模型能够助力管理人员迅速发现并解决施工过程中的各类问题,传感器能实时收集工程质量、安全等方面的数据,还会把这些数据传至数字孪生模型。依靠对数据的分析,能够迅速察觉施工中的质量问题,诸如混凝土强度不符合标准、结构尺寸存在偏差等,还有安全隐患,像高处作业没系安全带、临时支撑不稳固等。管理人员可按照模型的预警信息,采取举措加以整改,防止事故发生,保证工程施工顺利开展。

3.2 在水资源管理中的应用

在水资源管理中,借助数字孪生基础模型,可达成水资源的优化配置和高效利用,对不同水资源调度方案下的水流运动、水质变化等过程开展模拟分析,评估方案是否可行和有效。在对某流域水资源实施管理时,搭建数字孪生模型,模拟不同灌溉方案下的水资源分配情形。模型把作物种类、生育阶段、土壤湿度等因素纳入考量,按照作物需水规律和土壤保水能力,优化了灌溉方案。借助合理的灌溉规划,增强了农业用水效率,减少水资源的无谓消耗,该模型把生态用水需求纳入考量,保证了河流、湖泊等生态系统有足够的基本水量,维持了生态环境的稳定性。

3.3 在灾害防控与应急响应中的应用

3.3.1 灾害模拟和预测

在灾害防控及应急响应领域,数字孪生基础模型可对灾害进行模拟和预测,提升灾害防控及应急响应能力。借助构建洪水演进、泥石流等灾害模拟模型,并结合实时监测数据,预估灾害发生的时间、地点与影响范围。以黄河流域为实例,借助大规模部署传感器,实时获取水文、气象、地质等数据,搭建起覆盖黄河全流域的数字孪生模型。该模型具备模拟黄河洪水、泥沙运动这类复杂过程的能力。在一场洪水事件里,模型凭借实时监测到的降雨数据和水文数据,预先算出了洪水的演进路径与影响范围,将预测结果迅速传达给政府部门及相关单位,为政府决策给出科学依据,助力政府提前开展人员疏散、物资调配等工作,从而有效降低人员伤亡和财产损失。

3.3.2 应急响应信息支持

数字孪生模型还可为应急响应给予及时且准确的信息助力,当灾害发生之际,模型可即时展示灾害的发展状况和波及范围,为应急救援人员提供导航和决策依据。地震灾害发生以后,数字孪生模型可模拟地震对水利工程造成的影响,诸如大坝稳定性状况、渠道损坏状况等,应急救援人员可按照模型模拟结果,规划合理的救援方案,优先对严重受损的水利工程展开抢修,维护

灾区供水安全。

3.4 在工程运维与管理中的应用

3.4.1 对工程设施开展实时监测与预测性维护

针对工程运维与管理,凭借数字孪生基础模型可达成对工程设施的实时监测以及预测性维护,构建设备健康评估模型、故障预测模型等运维模型,结合实时监测数据,对设备运行状态及潜在风险进行评估,提前开展维护及更换工作,防止意外停机。以某大型水闸的运维管理为例,依靠构建数字孪生模型,实时监控闸门的运行状态和结构安全。模型融合历史数据与实时监测数据,剖析闸门的振动、应力等参数,对闸门潜在故障和使用寿命进行预测。一旦模型预测出闸门有出现结构疲劳问题的可能性,运维人员可提前规划加固方案,对闸门开展加固工作,防止重大安全事故出现。利用预测性维护,可对设备的维护时间进行合理安排,降低设备的停机时长,增强设备的利用效能。

3.4.2 运维决策支持

数字孪生模型也能够为工程运维管理给予决策支持,制定设备维护计划时,模型可按照设备运行状况、历史故障数据这类信息,推荐最合适的维护时间与维护方法。针对一台频繁出故障的水泵,模型可按照其运行时间和故障频率,建议当水泵运行一定小时数后实施全面检修。同时提供检修具体项目及建议,运维管理人员可依照模型的建议,制订合理维护计划,增强设备可靠性与运行效率。

4 结语

本文系统研究了水利工程数字孪生基础模型的构建与初步应用。通过整合多源数据与智能算法,模型实现了水利工程全生命周期的数字化模拟与管理。研究显示,该模型能提升管理效率、优化水资源配置、降低运维成本。在工程建设、水资源管理、灾害防控及运维管理等领域,模型均展现出显著优势。未来,随着技术不断进步,水利工程数字孪生模型将更完善,为智慧水利建设提供更强有力的支撑。

[参考文献]

- [1]孙一玮.浅谈数字孪生模型对水利基础工程设施的运行维护辅助[J].陕西水利,2024,(10):126-129.
- [2]唐海华,黄瑶,张振东,等.面向数字孪生的水利专业模型构建关键技术[J].人民长江,2024,55(03):1-5+20.
- [3]冶运涛,蒋云钟,寇怀忠,等.数字孪生流域的基础模型、演化路径与评判准则[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(04):27-38+46.

作者简介:

金海龙(1988--),男,汉族,吉林省吉林市人,本科,高级工程师,研究方向:数字孪生水利工程。