

水工程数字孪生体系架构研究

方卫华¹, 杨浩东¹, 郑福寿²

(1. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012; 2. 江苏省水旱灾害防御调度指挥中心, 江苏 南京 210029)

摘要:为建成满足实际需求的数字孪生水工程,在分析工程安全运行特点、工程安全影响因素以及状态反馈控制手段的基础上,以数据和信息流为主线,以模型算法为核心,以预报预警预演预案为输出,以控制为落脚点,结合具体水闸工程实例给出了数字孪生水闸的建设过程中的关键问题及其解决方法,为数字孪生水闸建设提供了参考。

关键词:数字孪生工程; 算法模型库; 端边云协同; 人工智能

中图分类号:TV66

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)12-0034-0005

Research on digital twin system architecture of water engineering

FANG Weihua¹, YANG Haodong¹, ZHENG Fushou²

(1. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China; 2. Flood and Drought Disaster Prevention and Control Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: To build a digital twin water project to meet the actual needs, on the basis of analyzing the characteristics of engineering safety operation, the influencing factors of engineering safety and the state feedback control means, taking data and information flow as the main line, model algorithm as the core, forecasting and early warning and preview plan as the output, and control as the foothold, the key problems in the construction of digital twin sluice and their solutions are given based on concrete sluice projects, which provides reference for the construction of digital twin sluice.

Key words: digital twin project; algorithm model base; edge-cloud collaboration; artificial intelligence

1 概 述

数字孪生是当前水工程研究的热点^[1-2]。张绿原等^[3]给出了数字孪生工程需要关注解决的重点问题和应用场景,张社荣等^[4]详细阐述了未来数字孪生水工程的重点研究方向,为提高水电工程设计施工一体化水平,弥补水利信息化短板提供技术指引;蒋亚东等^[5]探讨了数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用;饶小康等^[6]从管理角度探讨了数字孪生体的建设所涉及的宏观技术。上述研究为数字孪生水利工程提供了参考。随着数字孪生水工程

建设试点的推进,人们迫切需要获得水工程数字孪生的体系架构。

本文以水闸工程为例,在给出总体框架的基础上,以数据流为主线,以模型方法为重点,搭建数字孪生水工程体系,从而为明确水工程数字孪生建设和关键技术攻关提供参考。

2 架构搭建

2.1 整体框架

数字孪生工程是基于实体物理工程的材料结构、赋存环境、荷载条件及其信息实时感知建立的

收稿日期:2023-09-06

基金项目:江苏省水利科技项目(2021073)

作者简介:方卫华(1972—),男,正高级工程师,教授,博士,博士生导师,主要从事数字孪生和智慧水利方面的科研工作。

E-mail: 13813843565@139.com

一套包括感知、模型、通信、数据库、算法和控制的系统,通过该系统可以实现物理工程安全及运行控制特征的同步高保真展示、特征量快速精准提取、实时响应同步、运行状态精准预报、隐患特征同步识别、安全状态在线评估、运行状态等价控制、运行维护决策智能支持、人机可视化高效便捷等目的。水工程体系框架见图1,其中数字孪生工程是联系物理工程(图中以水闸为例)和人(包括系统运行管理人员和行业专家等)的桥梁和纽带。

2.2 建设步骤及模型方法

通过数据或信息流可以更清晰地展示水工程数字孪生建设的完整体系,突出关键环节,如图2所示。

为保证数字孪生工程与物理实体在结构安全度、性态响应和操作上的一致性、同步性和直观性,有必要对关键环节进行解释。

2.2.1 资料收集及数据底板建设

收集与数字孪生建设目的相关的物理工程结构材料、建设运行、水文地质和失事影响等数据信息并进行对比、校验、整理和数据库录入,作为预训练样本或反演同化初始或约束条件;同时根据可能

采取的理论方法、数学模型、数值计算和标准规范确定所需要的知识、参数和数据,结合工程可能的荷载环境、失效路径、失事后果和运行维护确定需要监测、检测和收集的物理量及其时空采样率,从而为感知、运行维护和控制系统选型、部署和运行提供依据。

2.2.2 算法模型库构建

数字孪生工程算法模型包括安全监控、运行维护、除险加固、应急响应等方面的预报、预警、诊断、仿真、控制、展示等算法和模型。为叙述方便,将建模类别分成工程安全分析与可靠度评估、预测预警与后果推演、人机交互以及可靠高效控制4种类别。根据各类模型特点分别采用结构数据、非结构数据、半结构数据或混合数据驱动模型,模型必须与工程结构材料以及其时空演化特征相匹配,算法必须符合实际情况相应的物理规律,在迭代过程中保证守恒性、收敛性、鲁棒性和泛化性。

2.2.3 理论和方法成熟性判别

根据逻辑分析严密程度、对物理水工程实际的描述能力、假设的合理性和已推广应用情况判别建模理论是否成熟。若建模理论成熟,则根据方法与

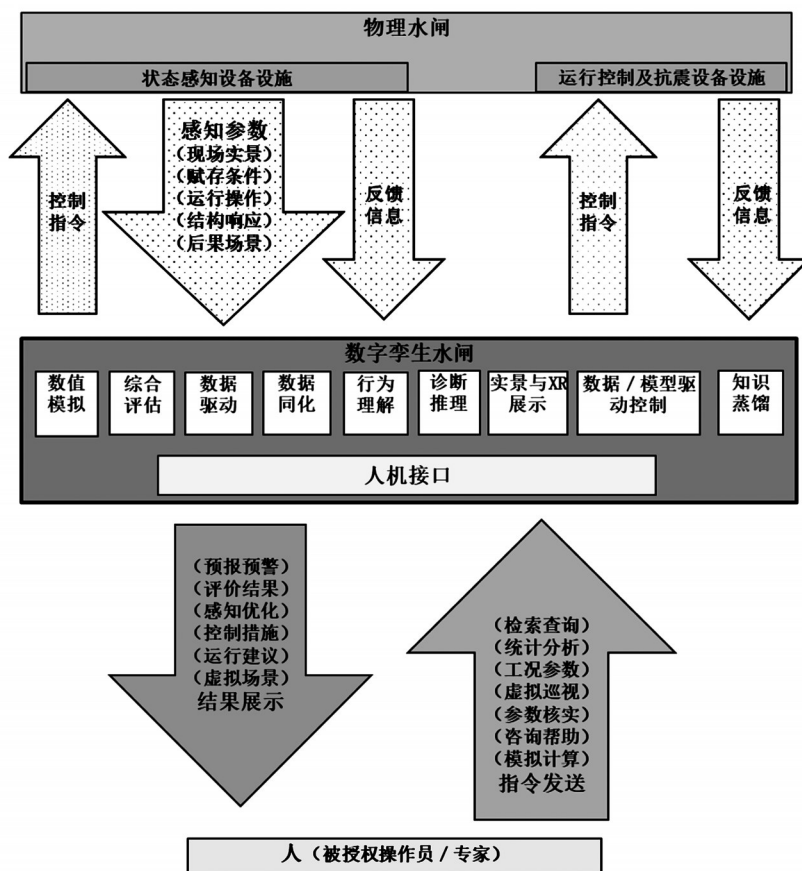


图1 数字孪生水工程体系架构

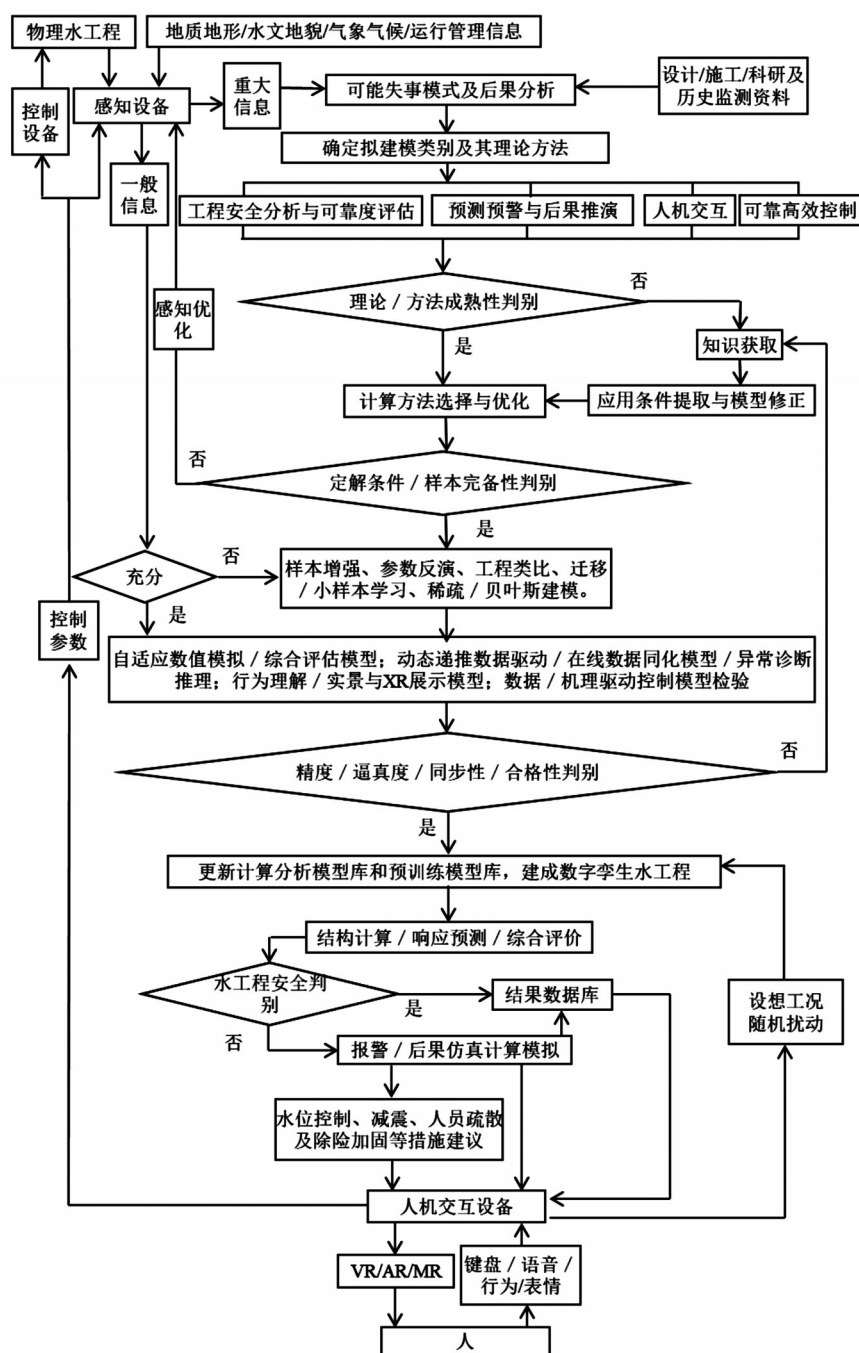


图2 数字孪生水工程数据(信息)流

模型对具体水工程的针对性、匹配性结合推荐算法和专家经验,初步选择相应的算法,通过实际计算结果从计算精确度、收敛稳定性和鲁棒性等方面确定相应的理论方法,并根据相应的理论方法构建相应的数值模型和深度学习预处理模型。

2.2.4 计算方法选择与确定

根据工程地质、结构材料、运行维护和风险评估选择适合具体工程实际的计算方法,保证计算结果与实际情况一致。为提高计算精度和保证响应

时间,根据计算复杂度选择相匹配的算力,算力采用端边云协同以及任务卸载机制完成。为保证孪生的同步性要求,计算可采用云计算、并行和集群计算完成,同时结合NPU、GPU等硬件以及前端采用轻量化深度学习模型专用神经芯片、FPGA以及嵌入式系统,对于深度学习模型配置tinyML及TensorFlow Lite,在Arduino和超低功耗微控制器上部署模型。

方法选择及确定是根据上一步所确定的模型

种类寻找相匹配的自适应鲁棒自动求解方法,包括偏微分方程组的守恒格式、非参数和半参数模型的建立和估计。其中偏微分方程组的求解方法包括等价形式和数值离散方法,等价形式包括变分形式、积分形式、相场形式和近场动力学形式;数值离散方法包括方程离散和网格选择,方程离散包括差分法、加权残值法、区域分解法、配点法、移动最小二乘法;网格选择根据模拟精度和匹配性选择有限元法、边界元法、无限元法或有限体积法,或进行组合与改进,组合包括多种网格组合的子结构法和区域分解法,改进包括多重网格法、分层基法、BPX法,同时选用等几何分析法用于减少边界离散误差,选用依赖度低的物质点法用于减少对网格的依赖性,对应力集中部位采用无网格法离散;离散网格初期根据竣工资料和实测数据完成,离散网格后期根据感知系统测量的水工程结构实际尺寸和材料分区采用动态自适应自动生成。

2.2.5 定解条件/样本完备性判别

当样本不足时可采用迁移学习、样本生成/样本增强或小样本学习技术,分析问题求解模型的定解条件和样本是否满足求解要求,若满足,则建立情景再现模型、安全分析模型、预测预警模型和人机交互模型的自适应多尺度数值模型、动态递推自适应数据驱动模型、混合驱动数据同化模型、信息融合预警预测模型和虚拟动态三维显示模型;否则,样本数量不足或位置不合理时先通过感知系统增强感知,当感知系统所获结果仍然不能满足定解条件需要时,则对样本进行增强处理,处理方法包括:通过生成对抗网络、变分方法和扩散模型进行样本生成或样本增强;通过数据同化、分形克里格协同插值计算样本填充。若上述2种增加样本的方法仍不能满足求解或参数估计要求,则采用零样本学习适应无样本情况,采用小样本学习适应少样本情况;采用稀疏建模或贝叶斯建模进行数据驱动建模;采用仿生算法、抗差估计、同伦方法和正则化方法进行参数反演;采用迁移学习、知识蒸馏、模型裁剪等适应不同工况和模型应用场景的变化。

依据处理后的问题解决模型建立自适应混合驱动多尺度数值模型和动态递推自适应数据驱动模型,自适应混合驱动多尺度数值模型依据误差界要求自动调整离散节点和计算步长,动态递推自适应数据驱动模型依据采样速率、数据误差和泛化能力自动调整时空窗口和模型类型。

2.2.6 预处理模型建立及模型检验

所构建的数字孪生工程与实测响应必须满足相应的要求,结构化实测数据、数值模拟计算结果以及预测值之间的相对最大误差应满足:工程及基础温度1%、水工程及基础变形2%、工程及基础渗流压力3%、工程及基础应力5%;水工程隐患细部构造超高分辨率图像清晰度不小于4 K;实时生成全彩高质量全息图1 080 p分辨率;实景现实外观表现一致;多种感知手段获取信息协调;非结构数据的可视化满足可理解性、直观性、形象性和易鉴别性的专家评审要求;通过云计算和并行计算加快计算速度和人机交互效率,通过任务加卸载优化调度算法协调后台运行,采用提前规划、预先计算存储以提高系统响应速度,使得结构化信息响应滞后时间0.1 s,非结构化信息响应滞后时间0.1 s。

2.2.7 模型库更新

数字孪生要求模型库不仅涵盖当前工程及赋存环境、工程结构控制以及运行维护的现时状态,而且还要考虑上述工况和状态的可能变化,特别是根据工程风险选择配置相应的模型,如对于高风险水工程,应在模型库配置时候配置更多的考虑极端情况的模型,同时跟踪国际最新研究成果,实时更新模型库,使得新模型结构与生产安全分析及可靠度评估更及时更准确、预测预警与后果推演更快速更精准、人机交互以及高可靠性控制更可靠、更直观、更快捷。

模型库存储的模型包括:数值计算的网格/节点已经完成优化,只需输入需要计算的荷载条件/边界条件/截止时间即可完成计算;对于数据驱动/同化等模型已经完成预训练,只需进行精细化训练/迁移学习/或直接喂入输入样本即可得到所需输出。依据分析结果可进行水工程安全预警,判断水工程是否安全,若水工程安全,则将水工程安全状态信息存入成果库,通过人机交互设备将水工程结构状态、响应状态和现场场景根据需求和设置可视化定量展示、实景展示和XR展示;否则需要通过正演计算和灾害链分析得到危险后果的估计结果,依据危险后果的级别和严重程度进行水工程安全预警,并将后果根据需要进行XR展示。其中正演计算和灾害链分析就是采用溃坝洪水分析、洪水淹没分析和损失评估一体化序贯分析。

2.3 端边云协同架构

数字孪生工程建设是一个大型系统工程,涉及算据、算法、算力之间的相互支撑和协调,为确保系

统运行流畅并达到对工程安全及时准确的预报预警、对可能的状况和调度控制方案做到预演并给出针对性的预案,一旦出现情况能及时响应并给出针对性的建议,从而更好地辅助决策甚至智能决策,需采用端-边-云协同架构。

2.3.1 端

(1)工程状态感知端

根据工程安全风险,针对中高风险建筑物及其影响区域,采用传统点线监测、检测传感器以及新型雷达、多光谱、视频图像、红外微光的先进感知手段,通过协调监测与检测,人工巡查与自动化巡查,固定与移动,点线面体之间各类空、天、地上、地下、水上、水下的各类传感器实现工程安全工作运行状态以及失事演化过程的全面、实时、动态和连续感知。

(2)人机交互端

人机交互子系统包括键盘、拾声器/麦克风、摄像机、触摸屏、显示器、屏幕和投影仪。人机交互系统是一个分布式分散系统,其部署包括控制室机房内、水工程廊道及坝面坝顶、溃坝下游影响区、有人驾驶飞机或船舶以及手持式移动终端。

(3)对外接口端

对外接口包括知识采集、指令接收以及信息上传等接口端,其中包括收集外界最新相关知识和工程案例、最新当地和上游气象水文信息等。

(4)闸门控制端

通过进出库水量控制从而控制水工程水位及其变化速率,实现水工程调度通常是通过闸门实现的。闸门控制端包括启闭机、卷扬机等闸门控制设备设施。上述控制指令通过工程安全约束和最优化调度实现。

(5)减震控制端

包括阻尼、减震、摩擦、隔震、导流等主动半主动减震设备设施。

(6)报警疏散设备设施控制端

通过配置高音喇叭、蜂鸣器等声光报警设备设施,同时包括疏散路线指示、夜间应急电源、应急通信和应急线路照明等终端。

2.3.2 边缘计算

为适应水工程恶劣现场环境,尤其降低通信成本和低带宽要求,实现在线快速计算、识别、优化调度等功能,采用迁移学习、轻量化神经网络或裁剪结构、联邦计算技术,通过嵌入式系统、FPGA、智能芯片等边缘计算实现现地快速提供计算结果。

(1)工程安全状态感知

随着遥感,包括雷达、多光谱、视频图像、红外微光的先进感知手段的不断应用,如何优化调度各类传感器,或实现图像畸变校正、倾斜校正、幅面校正、拱形校正、图像拼接、尺寸标定、图形描绘、裂缝抽取、计算宽度、长度/直方图/DXF输出等功能都需要边缘计算的支持。

(2)人机交互端

人机交互不仅包括键盘、麦克风/拾音器、视频探头及相机的控制和干扰信号的除去,同时也包括机器读取人的行为如手势、眼球、表情、肢体行为的理解。

(3)对外接口端

对外知识的爬取、摘要提取、文本和图像转换、数据过滤、防干扰入侵等都需要边缘计算才能更好降低信息延迟。

(4)闸门控制端

闸门控制,特别是自适应控制、控制状态监视、闸门工作状态实时诊断和隐患发现这些工作,都可依据边缘计算提高效率。

(5)减震控制端

目前控制模型比较多,从一开始的比例积分控制到滑模控制、自适应控制、模糊控制、变结构同步控制、鲁棒控制、分布式控制等,水闸工作时要面临地震激励、闸门启闭、流激振动、机械诱导振动、船舶碰擦和交通车辆激振等外界因素,因此优化阻尼器、隔振器等,做到及时规避共振、减少有害振动,都离不开边缘计算的支持。

2.3.3 云计算及云存储

通过分析发现,数字孪生水闸这类涉及感知控制一体化大型系统,要想达到预期目标必须借助大数据分析、多数据融合、大规模数值仿真、多尺度处理等技术,系统运行过程中系统自身运行状态,包括针对系统、工程和人员状态的感知,内存、通信接口、电源等任务和资源分配必须借助并行计算、云计算、集群计算等方式解决,而目前云计算和云存储等则是解决上述问题的主流手段。

3 工程实例

某水闸共12孔,每孔净宽6 m,为大(2)型水闸,闸室为钢筋混凝土结构,总宽87.2 m,闸门分上下扉,上扉门为钢筋混凝土梁板结构直升门,下扉门为平板直升式定轮钢闸门,使用12台2×10 t弧门卷

(下转第43页)

参考文献:

- [1] 杨洪涛,周建中,胡肇伟.抽水蓄能机组非电气量保护控制逻辑优化[J].水电站机电技术,2017,40(4):32-35,38.
- [2] 电力行业水电站自动化标准化技术委员会.抽水蓄能机组非电气量保护系统技术导则:DL/T 2396—2021[S].

北京:国家能源局,2021.

- [3] 司红建,段德荣,魏力.沙河抽水蓄能电站非电气量保护的优化[J].水力发电,2007,33(9):76-77,79.
- [4] 杨洪涛,周建中,散齐国,等.抽水蓄能电站非电气量保护故障原因分析及完善对策[J].水电能源科学,2016,40(4):154-157,206.

(上接第38页)

扬式启闭机联动启闭。针对水闸运行环境、安全风险和运行维护,设置的感知内容和项目包括动静一体化位移监测^[7]、启闭力检测^[8]等结构响应以及运行水位、风速风向以及闸门控制要素等感知子系统,为实现闸门自动控制配置了闸门自动控制系统^[9-10]。

内置模型方面根据水闸结构材料建立了数值模型,并采用模型修正、网格优化和数据同化等技术保证数值模型及其响应与真实水闸的一致性、同步性和显示逼真度,模型经调试检验合格并内置服务器之中并采用实时优化技术实现对模型和参数的滚动优化。

基于GIS+BIM构建水闸三维模型^[11],并依据闸门开闭控制信息及多场耦合结果建立动态可视化模型,实现动静力安全的数字孪生水闸展示,其中后端可采用Spring框架,前端可基于JavaScript开发,三维场景展示基于WebGL第三方库Three.js 3D引擎库。

在可视化和人机交互方面,不过分强调细节但突出结构整体安全、安全风险和演化和人机交互定量安全度量,根据实时监测信息实现故障树枝剪、故障信息入库。

为缓解中心计算带来的计算与通信压力,在数据采集地增加边缘计算设计以完成简单的数据滤波及预处理,中心计算平台处理多场耦合等大型计算。上述模型和系统采用端边云架构,平台采用B/S总体构架,数据库采用SQL Server。

4 结 语

为使数字孪生工程建设达到提高管理水平的目的,必须系统梳理信息流线,明确建设目标。由于水利工程运行环境、结构状态和运行目标的动

态性和特殊性,必须建成适合水利工程的模型库,通过人工智能和自适应方法提升方法运用的针对性效果。根据水工程的共性特征,给出了数字孪生工程整体架构和关键技术,明确了各阶段的关键算法和模型,并结合实际工程建设的关键环节进行讨论。

参考文献:

- [1] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等.南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):46-55.
- [2] 郭旭宁,李云玲,唱彤,等.“荆楚安澜”现代水网建设思路与实施路径[J].水资源保护,2023,39(3):1-7.
- [3] 张绿原,胡露骞,沈启航,等.水利工程数字孪生技术与探索[J].中国农村水利水电,2021(11):58-62.
- [4] 张社荣,姜佩奇,吴正桥.水电工程设计施工一体化精益建造技术研究进展——数字孪生应用模式探索[J].水力发电学报,2021,40(1):1-12.
- [5] 蒋亚东,石焱文.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用[J].科技通报,2019,35(11):5-9.
- [6] 饶小康,马瑞,张力,等.基于GIS+BIM+IoT数字孪生的堤防工程安全管理平台研究[J].中国农村水利水电,2022(1):1-7.
- [7] 方卫华,胡丰,孙勇,等.基于机器视觉的水闸动静一体化位移监测系统[J].江苏水利,2022(9):49-53,64.
- [8] 邵园园,房晓玲,吴皓明.秦淮新河节制闸闸门启闭力的检测与分析[J].江苏水利,2015(3):34-35.
- [9] 王贤龙,吴庞,王鹏,等.多传感信息融合的闸门状态监测系统研究[J].水运工程,2022(1):157-164.
- [10] 戴冰清,茅泽育.基于流固耦合的平板闸门动水关闭过程数值模拟[J].人民长江,2021,52(8):214-221.
- [11] 陈翠,安觅,董家贤,等.基于BIM的水闸数字孪生平台设计与应用研究[J].水利技术监督,2022(3):43-46.