

安徽省小型水库安全状态与数字孪生建设探讨

王铭铭^{1,3}, 张皖博^{2,3}, 刘斌斌^{2,3}

(1.安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院,230094,合肥;2.安徽水科数智信息技术有限公司,230094,合肥;
3.安徽省水科学与智慧水利重点实验室,230088,合肥)

摘要:小型水库受筑坝工艺、材料、运维及除险等综合因素影响,库坝安全运行状态难以准确预测预警,是制约其安全运行管理能力提升的重要因素。为探索小型水库安全运行状态高精度预测方法和构建符合小型水库特点的数字孪生工程技术路径,本文以安徽省小型水库为例,分析不同坝型的具体特点,结合水库大坝安全监测指标,剖析了土石坝与混凝土坝水库安全运行的主要动态与静态影响因子,探索了大坝安全风险状态预测预警技术路线。基于传统安全监测模型技术,分析了统计学模型、确定性模型和监测混合模型的功能及应用限制条件,提出数理驱动的小型水库大坝安全监测预警指标分析方法,构建了预警“产生—发布—处置”的多级协同处理预警体系。此外,以“工程安全”为核心,本文提出了小型水库数字孪生建设技术方案,并按照预报、预警、预演、预案技术路径,结合应用实例,探讨了小型水库大坝安全监测预警及数字孪生应用成果,以期小型水库安全运行管理能力提升提供重要技术支撑。

关键词:小型水库;大坝安全监测;预测预警;数字孪生;工程安全;模型;影响因子

Exploration of safety status and digital twin construction of small reservoirs in Anhui Province

WANG Mingming^{1,3}, ZHANG Wanbo^{2,3}, LIU Binbin^{2,3}

(1. Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Hefei 230094, China; 2. Anhui Water Science and Technology Digital Intelligence Information Technology Co., Ltd., Hefei 230094, China; 3. Anhui Provincial Key Laboratory of Water Science and Smart Water Conservancy, Hefei 230088, China)

Abstract: Due to the comprehensive factors such as dam construction technologies, materials, operation and maintenance, and risk mitigation, it is difficult to achieve the accurate prediction and early warning of the safe operation status of small reservoir dams, which thus becomes an important factor restricting the improvement of their safe operation and management capacity. To explore high-accuracy prediction methods for the safe operation status of small reservoirs and construct a technical path for digital twin projects in line with the characteristics of small reservoirs, this study analyzes the specific characteristics of different dam types by taking small reservoirs in Anhui as an example. Meanwhile, it combines the safety monitoring indicators of reservoir dams, conducts in-depth analysis of the main dynamic and static influencing factors of the safe operation of earth-rockfill dam and concrete dam reservoirs, and explores the technical route for the prediction and early warning of the safety risk status of dams. Based on traditional safety monitoring model technologies, it analyzes the functions and application constraints of statistical models, deterministic models and hybrid monitoring models, and proposes

收稿日期:2025-06-23 修回日期:2025-10-25

作者简介:王铭铭,高级工程师,主要从事水利信息化研究。E-mail: 390983211@qq.com

基金项目:水利技术示范项目(SF-202414);安徽省水利厅科研及技术咨询项目(SLKJ202501-07)。

a mathematical-driven analysis method for the safety monitoring and early warning indicators of small reservoir dams, constructing a multi-level collaborative early warning system for the generation, release and disposal of early warnings. Additionally, with “project safety” as the core, this paper puts forward a technical scheme for the digital twin construction of small reservoirs. In accordance with the technical path of forecast, early-warning, rehearsal, and contingency planning, the application results of dam safety monitoring, early warning and digital twin for small reservoirs are discussed by combining application cases to provide important technical support for improving the safe operation and management capacity of small reservoirs.

Keywords: small reservoir; dam safety monitoring; prediction and early warning; digital twin; project safety; model; influencing factor

中图分类号: TV62 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2026)02-0060-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.02.008

一、引言

小型水库是广大居民生活、灌溉及生产经营用水的主要来源,是国家“兴水利、除水害”的重要利器,也是解决水资源时间分布不均的关键基础设施。我国现有水库约9.5万座,其中小型水库占比95%以上,呈现数量多、分布广的特点,基层水库管理人员技术力量与能力相对不足又增加了水库运行管理的安全隐患。我国小型水库多建设于20世纪50—70年代,受当时水文地质勘察、大坝渗流与边坡稳定分析等方面复杂技术条件限制,部分水库建设时已存在一些未知风险,且多数水库缺少详细资料,进一步增加了大坝安全状态分析预警的技术难度。当前亟须开展相关技术研究,解决复杂工况条件下的小型水库大坝安全预测预警难题。

现阶段小型水库安全运行风险查找主要依靠人工巡查、设备巡检等方式。随着国家推动开展小型水库安全感知设施建设,一批重点小型水库安全自动监测站和集中监测平台建成,安徽省基本实现了水库安全监测数据自动采集、存储及应用,很大程度提升了水库的安全管理水平,也为开展安全监测数据智能分析提供了条件。渗流压力、变形等大坝安全监测数据分析专业性较强,大中型水库安全监测体系建设相对完善,一般由专业机构每年进行数据整编与分析,且少部分大型水库已构建了安全监测模型,实现了安全提示预警;但小型水库开展安全监测的数据积累还不够丰富,加之受小型水库管理人员专业技术水平限制,在安全监测数据分析方面长期存在不足,目前水库安全监测数据无法直接转化为基层水库管理人员辨识风险的依据,难以服务于小型水库安全调控决策,因此开展小型水库大坝安全状态预测预警研究十分必要。

数字孪生水利体系建设是推动水利高质量发展的六条实施路径之一,是水利现代化发展的重要标志。开展小型水库数字孪生建设,通过透彻感知、大模型、分析预警等技术构建虚实交互的孪生体,实现水库在数字场中同步运行及智能模拟,并通过开展破坏性实验和前瞻性预报预警,为应对安全隐患提供决策支撑。现阶段,数字孪生水库以大中型水库为主,重点开展防洪预报、预警、预演、预案“四预”能力提升建设。部分地区开展了小型水库数字孪生试点建设,但建设内容与标准尚不统一,部分水库以三维场景展示和洪水预报预演为主,未综合考虑上下游、左右岸的全要素信息和工程安全动态预测预警等功能,难以达到水库精细化管理和现代化水库运行管理矩阵建设的要求。因此,亟须面向小型水库管理特点,以工程安全、防洪调度、水库管理等多目标需求为牵引,开展小型水库数字孪生建设技术路径探索。

二、小型水库的定义及主要坝型

水库一般按蓄水容量(库容)的大小分成大、中、小3种类型,其中总库容在10万 m^3 以上、1000万 m^3 以下为小型水库。小型水库又分为两级,总库容在100万 m^3 以上、1000万 m^3 以下的为小(1)型水库,总库容在10万 m^3 以上、100万 m^3 以下为小(2)型水库。按照大坝类型划分,小型水库主要分为土石坝、砌石坝、混凝土坝,其中土石坝水库占比90%以上。截至2024年年底,安徽省5239座小型水库按坝型分,土石坝有4953座,砌石与混凝土坝有255座,其他坝型有31座,分别占94.54%、4.87%、0.59%。

三、小型水库大坝的安全影响因子

不同坝型的小型水库大坝安全影响因子各有差

异,且根据不同水库坝体实际工况和施工条件,适用的感知设施类别亦有不同。除常规雨情、水位监测外,一般坝型为土石坝的水库主要开展坝体、坝基渗透压力、渗流量、表面变形等影响因子监测;坝型为砌石坝或混凝土坝的水库主要开展表面变形、裂缝、环境量、扬压力等影响因子监测。

1. 土石坝的安全影响因子

土石坝安全影响因子主要涉及坝体与坝基渗流、变形、动物巢穴等,次生影响因子主要涉及大坝坝型、筑坝材料、施工工艺、坝基地形地质、水库水位、害堤动物等。因小型土石坝水库建设时一般就地取材,且早期建设时受检测等方面技术条件限制,过程中大坝填筑土质检查和渗透试验并不完善,导致不同土石坝水库大坝材料工况差异性较大。山区小型水库筑坝材料含砂、含石量较多,渗透系数较大;丘陵区小型水库筑坝材料多为均质土,渗透系数相对较小。当前大多数小型水库存在建设期筑坝材料检测、坝基地形等过程资料存档与管理不完善的情况,各种影响因子难以定量或定性分析,因此土石坝主要分析影响因子为直接监测的渗流、变形等。

2. 砌石坝、混凝土坝的安全影响因子

砌石坝、混凝土坝安全影响因子包括水压因子、温度因子、时效因子、降雨因子等。其中水压因子主要涉及上下游水位差,大坝渗流场与之关系密切,此外渗流一般滞后于库水位变化,且水位变化幅度、变化时间等对大坝渗流影响不同,因此开展水压因子分析时需要综合考虑水位变化量、趋势、时间等因素影响。温度因子主要涉及基岩、坝体混凝土的温度,也受季节、气温、日

照等因素影响,开展温度因子分析时需综合考虑天气因素、基岩与坝体混凝土温度等。时效因子主要涉及基岩的徐变、塑性形变、基岩地质构造的压缩及坝体裂缝引起的不可逆位移以及自身体积变形,一般正常运行的大坝,时效位移变化规律为初期变化急剧,后期渐趋稳定。降雨因子直接影响坝体、坝基的渗流,且与降雨量、雨型、入渗条件、地形、地质条件等关系甚密,需综合考虑。

四、小型水库大坝的安全预测预警

小型水库大坝安全预测预警在汇集各类影响因子静态或动态数据的基础上,通过构建大坝安全预测模型,实现对各类影响因子的研判分析,并动态确定预警指标,进而实现预警触发及发布。通过对单个小型水库大坝机理研究,开展大坝形态分析,构建水库大坝在数字领域的孪生体,结合安全监测预测预警,开展大坝安全预演,实现数字孪生的深化应用。小型水库大坝安全预测预警技术路线如图1所示。

1. 影响因子信息汇聚

小型水库影响因子分为动态影响因子与静态影响因子。动态影响因子主要涉及雨量、水位、环境量等,可通过埋设感知仪器,实时监测因子变化情况,数据一般可通过MCU(微控制单元)边缘设备实现水库本地数据汇集,数据再通过互联网或卫星信道传输至监测平台,实现监测数据的统一采集汇聚,为水库群集中数据动态分析与预测提供了基础条件。静态影响因子主要包括水库坝型、筑坝材料、结构特点等各类基础信息,可通过建立基础信息管理模块,实现数据的动态更新。

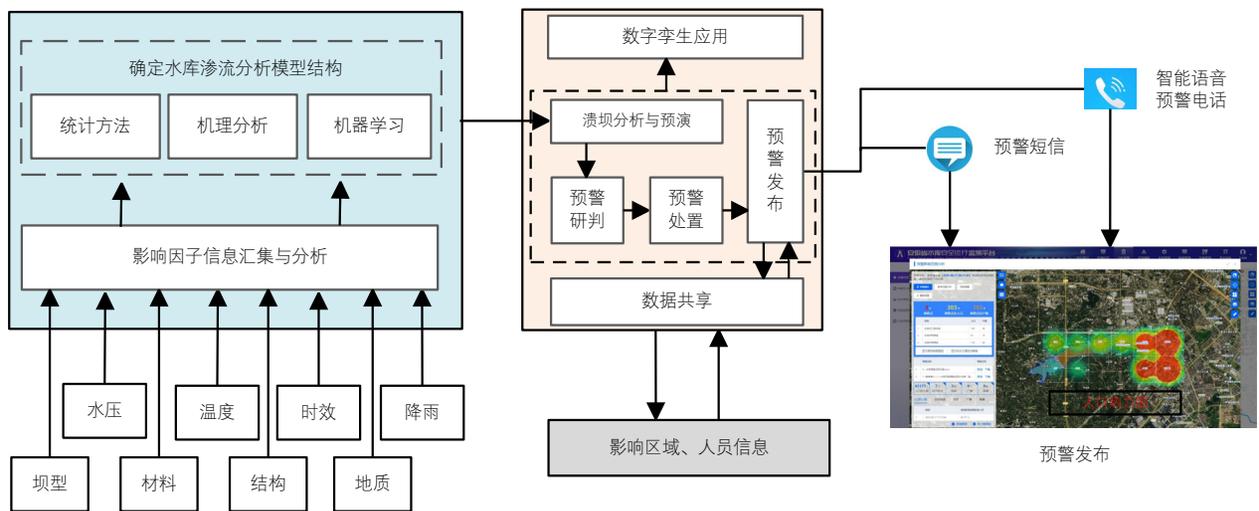


图1 小型水库大坝安全预测预警技术路线

2. 水库大坝安全预测模型

小型水库坝体结构相对复杂,通过数学模型完整定量表达大坝整体结构并开展运行状态预测难度大。目前,国内外对大坝安全预测预警模型的研究主要围绕可分析、可监测的效应量,一般分为统计学模型、确定性模型与监测混合模型。

(1) 统计学模型

统计学模型是仅以数学关系表达的方法,围绕已取得的小型水库雨量、水位、渗透压力、渗流量、变形量等监测数据,结合历史监测数据,采用聚类分析、神经网络、机器学习等统计分析算法,分析各自变量与因变量的作用关系,并找出相互作用关系的数学表达算法,最终实现水库安全监测数据的预测预警。

统计学模型从原理上规避了水库大坝复杂工况影响,具有适用性好的特点。但统计学模型依靠长序列历史数据支撑,且模型精度易受历史监测数据准确性影响,需要通过数据治理算法对样本数据进行严格的筛查与清洗。

(2) 确定性模型

确定性模型围绕已建大坝的坝基、坝体、岸坡等结构设计资料及筑坝材料等复杂影响因子,利用有限元等技术方法,开展确定性力学关系模型建设,结合历史实测数据优化模型参数,分析环境量与水压、温度、时效、降雨等因子监测数值的因果关系,实现大坝安全稳定性的定量分析。

确定性模型高度依赖大坝设计相关资料,适用于筑坝资料及历次除险加固资料留存完整的水库。小型水库大坝资料留存时常不完整,且筑坝材料及施工工艺标准性相对较差,影响确定性模型精度。当然,可考虑通过钻孔取芯对筑坝材料进行后期检测试验,弥补资料缺少的问题,但检测覆盖面和检测部位的代表性对模型精度影响较大。

(3) 监测混合模型

监测混合模型是确定性模型与统计学模型耦合的综合模型,通过先建立大坝确定性力学关系模型,再构建数学关系表达的统计学模型,进而根据自变量与因变量实测值分析求解回归系数,最终实现确定性模型与统计学模型耦合,建立定量表达监测效应量与环境量间关系的数学模型,实现大坝安全预测预警。

监测混合模型通过确定性模型与统计学模型耦合,可有效提升模型精度,但同时也继承了两个模型的缺点,对长序列监测数据及完整大坝设计相关资料同时依赖,很大程度上影响了模型的适用性。

3. 水库大坝安全预警

(1) 预警指标分析

小型水库大坝安全预警指标由变形、渗透压力、渗流量等监测指标体现。一般在模型初始阶段,采用大坝安全监测指标的设计阈值作为技术告警阈值,若水库无设计阈值,则可基于小型水库大坝特点及监测数据进行综合评价,分析确定初始告警阈值。在模型应用过程中,不断积累监测资料,利用机器学习的方法进一步拟定监测指标。主要方法为:通过监测量的数学模型并考虑一定的置信区间所构成的数学表达式来确定,根据数学模型代入可能的最不利因变量组合并计入误差因素推求极限值,以极限值作为监测指标;通过符合稳定及强度条件的临界安全度或可靠度来反算出监测量的允许值作为监测指标。当利用监测指标对监测量进行检查发现测值异常时,须进行多个监测物理量的综合分析评价以确定物理原因、结构异常程度,并做出总体安全评价。

(2) 预警产生

基于建立的大坝安全监测模型,结合小型水库各影响因子最新监测数据,通过调用模型接口软件,开展大坝监测分析指标预测,并依据动态预警阈值,实现大坝安全运行状态研判与预警。为保障模型精度,开发系统软件对模型研判过程进行跟踪,构建模型参数管理模块,支持适时调整模型参数及改变数据,增加研判过程的人工干预能力,进而提升预警的可靠性。

(3) 预警对象确定

小型水库预警对象包括水库管理人员及预警影响区的社会公众。管理人员一般较为明确,主要包括小型水库行政、技术、巡查责任人及水库相关运维人员,一般通过数据整编的方式录入系统,每年定期更新即可。预警影响区社会公众主要为水库大坝下游居住或从事各种活动的社会群体,根据水库空间关联关系,系统自动匹配水库关联流域边界及水库下游调查评价结果,进而根据预警影响范围匹配预警发布对象,实现精确定向预警。

(4) 预警发布

针对预警对象,构建预警产生、发布、处置的多级协调处理机制,根据预警类别与等级,分类制定预警处置流程和确定预警处置关联人员,根据预警处置流程,各级系统用户在此模块下进行预警管理操作,形成预警流程管理体系,实现水库安全预警“产生—发布—处置”全流程管理。考虑到小型水库数量多的特点,应建立明确的省、市、县、乡镇、水库管理单位分级预警处置职责分工,构建多级联动的预警处置高效率协同管理机

制,根据不同预警等级,自动匹配预警处置流程中各个环节的处置单位或人员,自动推送预警处置消息。

五、基于大坝安全预测预警的小型水库数字孪生技术

1. 小型水库数字孪生建设技术路线

小型水库流域面积较小、汇流时间短,溢洪道一般无闸控制,依靠输水涵洞进行洪水预泄,在持续强降雨条件下洪水预报与调度能力有限。此外,小型水库筑坝及运行管理方面存在短板,溃坝比例远高于大中型水库,数字孪生小型水库建设应聚焦大坝安全预测预警。

开展基于大坝安全预测预警的数字孪生小型水库建设,首先需完成物理水库大坝的数字化映射,利用设计图纸、三维测量等手段,构建数字场中的大坝孪生体;其次,接入水库大坝安全、雨量、水位、视频等时空数据,集成雨量预报数据,形成大坝安全监测模型所需的数据基础;最后,将上述数据底板与大坝安全预测预警模型融合,实现安全监测数据预测及分析研判,对大坝运行形态进行智能模拟和前瞻预演。

智能模拟与前瞻预演核心在于水利专业模型构建,除大坝安全监测模型外,进一步构建一维、二维水动力模型和溃坝模型,进而实现溃坝分析与溃坝预演。开展水库预案集成,整编水库大坝现场险情、下游灾情情况、抢险路线等数据,形成系统可识别和应用的结构化数据,并进行可视化展示,构建立体可视化的水库数字场景。根据水库溃坝预演结果,通过将水库重点影响区域人员分布、抢险救援队、物资仓库、安置点等进行关联,实现基于水利一张图的信息查询与统计,为应急决策提供辅助支撑。

2. 小型水库数字孪生应用案例

上源水库是位于安徽省绩溪县的小(1)型水库,地处皖南山区腹地,属新安江流域。水库大坝为混凝土砌石拱坝,最大坝高26.3 m,库容425万 m^3 ,坝下散布村落、良田,且下游高程落差大,属于“头顶一盆水”水库。水库上游有3条入库河流,集雨面积达81 km^2 ,具有集雨面积大、洪水汇水快、防洪任务较重等特点,水库的安全运行直接影响下游人员生命财产安全。

依据本文所述技术在上源水库开展了数字孪生试点应用,包括大坝影响因子确定、数据测量调查、水利专业模型构建及数字孪生平台开发4个方面。

(1) 大坝影响因子确定

通过分析整编水库大坝设计、建设、除险加固及

安全鉴定等水库关键资料,结合水库坝型及坝区、上下游基本情况,明确影响因子,主要包括降雨量、水位、水温气温、大坝变形等。为准确掌握各类影响因子变化情况,建立水库感知采集体系,通过新建或共享的方式,接入气象部门短临及中长期降雨预报数据,完成上游集雨范围内8处雨量监测站数据和1处水库水位监测数据实时采集、存储及应用,实现空中雨、落地雨及库水位的实时监测。新建了大坝表面变形、视频监控、水温气温监测设施,数据统一接入水库数字孪生平台,为工程安全预警提供监测数据支撑。

(2) 数据测量调查

通过无人机搭载激光雷达设备,开展上游集雨范围地形测量,采用无人船搭载单/多波束设备,开展入库河道断面及水库库容测量,形成集雨范围内河道断面及库容曲线测量分析成果,为开展洪水预报奠定数据基础。此外,同步完成了水库下游影响区地形测量及影响区地物信息调查,包括影响村落、房屋高程、居民数量、道路分布及高程等信息,为水库洪水及溃坝预演预案提供支撑。

(3) 水利专业模型构建

基于上游实测降雨、气象短临预报降雨等资料,构建新安江洪水预报模型,实现对洪水入库过程及库水位的预报,动态分析库水位影响因子变化情况。基于水库库水位、环境量、表面变形等历史监测数据,采用数理统计分析方法,针对环境量与变形监测指标构建预警模型。库水位预报成果同步接入安全预警模型,进而实现对表面变形等数值预测,为提前研判大坝安全运行风险提供支撑。利用下游地形测量成果,开展二维水动力模型构建,并根据洪水预报结果和水库泄流曲线,动态开展洪水淹没分析。同步结合下游影响区的调查信息,动态分析水库泄洪或溃坝的下游实际影响区域及对应的人员、房屋、道路等信息,为构建针对性预警预案提供支撑。

(4) 数字孪生平台开发

采用B/S架构,耦合已建洪水预报、安全预警及二维水动力模型开发具有预报、预警、预演、预案功能的小型水库数字孪生管理平台,实现水库大坝的动态感知、精准预测及前瞻预演,为水库大坝安全运行管理提供科学决策支撑平台。

六、小结

本文结合安徽省小型水库实际,剖析了土石坝和

砌石坝、混凝土坝的动态、静态影响因子,探讨了统计模型、确定性模型、监测混合模型的构建方法和大坝安全监测预测预警技术路线,实现“指标分析—预警产生—对象确定—预警发布”全流程预警系统化管理。针对小型水库数字孪生建设,提出了以大坝安全预测预警为核心的数字孪生建设技术路径。结合现代化水库运行管理矩阵建设需求,需要持续完善大坝安全预测模型,推动小型水库管理向智慧化、精细化迈进。

参考文献:

- [1] 杨启贵,王秘学.我国水库大坝安全挑战与运维思考[J].中国水利,2024(5):6-10.
- [2] 牛广利,胡雨新,胡蕾,等.工程安全综合评价模型研究及数字孪生应用[J].人民长江,2024,55(4):239-243+261.
- [3] 屠立峰,包腾飞,李月娇,等.基于分形插值的ARIMA大坝预警模型[J].三峡大学学报(自然科学版),2015,37(1):29-32.
- [4] 刘正坤,杜煜,童林.基于机器学习的大坝安全分析和预测预警[J].中国防汛抗旱,2024,34(S1):47-50.
- [5] 李秀文,王建,赵向波,等.大坝安全监测系统研究应用及智慧化提升[J].中国防汛抗旱,2022,32(12):53-57.
- [6] 孙长安.面向“四预”赋能和多目标管控的数字孪生小浪底建设实践研究[J].水利发展研究,2025,25(6):1-5+77.
- [7] 张昊,李者,李光,等.基于GIS的小型土石坝浸润线快速估算模型探讨研究[J].水利规划与设计,2024(11):119-123.
- [8] 李艳艳,张志诚.基于改进的偏最小二乘法的防渗帷幕防渗预测模型研究[J].水电能源科学,2013,31(11):86-88+253.
- [9] 王瑞婕,包腾飞,李扬涛,等.基于多因子融合和Stacking集成学习的大坝变形组合预测模型[J].水利学报,2023,54(4):497-506.
- [10] 李慧滢,杨鸽,杨磊,等.数字孪生水库关键技术研究与应用[J].中国水利,2023(3):66-68.
- [11] 梅传贵,余丽华,倪凯军,等.基于数字孪生的周公宅水库防洪“四预”系统构建与应用[J].水利信息化,2023(1):23-28+32.
- [12] 顾巍巍,蔡天德,谢东辉,等.数字孪生周公宅—皎口梯级水库防洪“四预”应用[J].中国水利,2023(11):56-59.
- [13] 张奇伟,王雪峰,李玉龙.基于数字孪生的陈蔡水库管控一体数字化平台建设研究[J].中国水利,2023(11):52-55.
- [14] 黄艳,任骁军,李安强,等.数字孪生三峡建设总体框架及应用效益[J].中国水利,2023(19):17-22+9.
- [15] 李秋香,谷艳昌,庞琼,等.北大港水库数字孪生建设方案与要点探讨[J].水利信息化,2023(5):31-35+40.
- [16] 程习华.数字孪生响洪甸水库工程建设探索[J].治淮,2024(1):27-28+48.
- [17] 靖争,秦赫,林莉,等.数字孪生丹江口工程水质安全“四预”平台研发及应用[J].水利信息化,2024(1):6-12+18.
- [18] 任明磊,赵丽平,陈智洋,等.面向防洪“四预”的数字孪生流域水利专业模型研发与实践应用——以数字孪生飞云江流域为例[J].中国水利,2024(5):58-64.
- [19] 张勇,宋倍,强君,等.数字孪生奴尔水利枢纽工程建设构想[J].水利信息化,2024(3):8-12+17.
- [20] 李飞.维护南水北调中线水源工程“三个安全”实践与思考[J].中国水利,2024(20):15-20.
- [21] 付建军.丹江口水库现代化运行管理矩阵构建实践[J].中国水利,2024(20):25-33+44.
- [22] 王亚东,张雨新.复杂水库群联合调度模型研究及优化处理[J].水利发展研究,2025,25(7):60-67.
- [23] 肖仲凯,宋世柱,王吉,等.数字孪生凌塘水库建设关键技术研究与实践[J].水利水电快报,2025,46(5):123-131.
- [24] 夏军,骆文广,余敦先,等.流域模拟器在数字流域建设及水电预报调度能力提升中的应用与展望[J].水利水电技术(中英文),2025,56(7):1-12.
- [25] 董家领,彭强,吴裴煜,等.水库大坝安全研判系统的设计与实现[J].水利信息化,2025(1):60-64.
- [26] 袁小松,许小华,王小笑,等.基于改进3-Sigma混合模型的水库大坝监测数据智能分析与预警技术研究[J].江西水利科技,2024,50(5):343-348.
- [27] 谭界雄,李星.新时期丹江口水库大坝安全管理与对策建议[J].中国水利,2024(20):21-24+20.
- [28] 张大伟.土石坝漫顶溃决过程模拟[J].中国防汛抗旱,2022,32(1):80-83.

责任编辑 杨文杰