

DOI: 10.11779/CJGE20240465

智能大坝研究进展与发展路径思考

刘六宴^{1,2}, 李宏恩^{1,2,3}, 高长胜^{1,2,3}, 向 衍^{*1,2,3}

(1. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘 要: 气候变化与强人类活动给水库大坝安全管理带来新的挑战, 传统安全管理理念和技术手段已难以满足新阶段水库大坝安全高质量管理需求。云计算、物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的快速发展为水库大坝安全管理行业的数字化、网络化、智能化变革提供了重要契机。智能大坝作为水库大坝安全管理行业现代化发展的重要标志, 是助力发展水利新质生产力的重要载体, 如何利用智能技术升级改造传统水库大坝建设管理体系, 有效提高建设管理效率与安全保障裕度成为行业研究的重点和难点。全面梳理了智能大坝建设的研究进展, 提出了统筹水库大坝规划设计、施工建设、蓄水运行、除险加固等全周期的智能大坝建设与改造研究思路, 建议了进一步发展智能大坝建设管理的实施路径。旨在持续提升水库大坝安全保障能力, 推动大坝安全管理通过智能大坝建设由“工程管理”向“智慧管理”转变。

关键词: 智能大坝; 全生命期; 智能改造; 工程安全; 信息技术; 人工智能

中图分类号: TV64; TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)10-2003-12

作者简介: 刘六宴(1969—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水库大坝安全管理方面的研究工作。E-mail: lyliu@nhri.cn。

Research progress and reflection on development path of smart dams

LIU Liuyan^{1,2}, LI Hongen^{1,2,3}, GAO Changsheng^{1,2,3}, XIANG Yan^{1,2,3}

(1. Dam Safety Management Center of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China)

Abstract: Climate change and strong human activities have brought new challenges to dam safety management, and traditional safety management concepts and technologies are difficult to meet the requirements of high-quality dam safety management in the new stage. The development of cloud computing, Internet of Things, big data, artificial intelligence and other new-generation information technologies provide an important opportunity for the digital, networked and intelligent transformation of dam safety management. As an important symbol of the modernization of dam safety management, smart dam is an important carrier for the development of the new quality productivity of water conservancy. How to use intelligent technology to upgrade and transform a traditional dam construction management system and effectively improve the construction management efficiency and safety guarantee margin has become the focus and difficulty of industry research. This paper comprehensively sorts out the research progress of smart dam construction, puts forward a research idea of smart dam construction and transformation, which coordinates the whole life cycle of dam planning and design, construction, impoundment and operation, and risk elimination and mitigation, and proposes the implementation path for further development of smart dam construction and management. The aim is to improve the dam safety capacity continuously and promote the transformation of the dam safety management industry from "engineering management" to "intelligent management" through the construction of smart dams.

Key words: smart dam; whole life cycle; smart retrofit; engineering safety; information technology; artificial intelligence

0 引 言

近年来, 云计算、物联网、大数据、人工智能、

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2443231); 国家重点研发计划项目(2022YFC3005403); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y722003, Y724008, Y723007) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No.U2443231), National Key Research and Development Program of China (Grant No.2022YFC3005403), and Fundamental Research Funds for Central-Level Non-profit Research Institutes (Grant Nos.Y722003, Y724008, Y723007).

收稿日期(Received): 2024-05-15 **修回日期(Revised):** 2024-09-03 **接受日期(Accepted):** 2024-11-11 **网络出版日期(Online):** 2024-11-12

*通信作者(E-mail: yxiang@nhri.cn)

© Editorial Office of Chinese Journal of Geotechnical Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

移动互联网等新一代信息技术的跨越式革新发展,为通过智能大坝建设切实提升水库管理的数字化、网络化、智能化水平,有效管控大坝运行风险与提升功能效益提供了重要契机。

智能大坝是水库大坝安全管理行业高质量与现代化发展的重要标志。利用新的智能技术升级改造传统水库大坝建设管理体系,全面提高建设管理效率与水库大坝安全保障裕度是行业学者共同关注的焦点。王忠静等^[1]较早系统阐述了智慧水利的数字赋能体系框架,钟登华等^[2-3]针对数字大坝研究现存的不足,探讨了大坝建设及运行管理过程中在数字化、智能化方面的需求,李庆斌等^[4-5]提出了基于感知-分析-控制闭环控制理念的智能建造理论。盛金保等^[6-7]、向洵等^[8]针对大坝建设运行期间存在的突出问题明确了大坝安全智慧管理的内涵,为水库大坝数字化转向智能化奠定了坚实的基础。《国家水网建设规划纲要》《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》《水利部关于加快构建现代化水库运行管理矩阵的指导意见》《关于推进水利工程建设数字孪生的指导意见》等系列文件的印发为有力推动智能大坝建设创造了良好的政策环境。

智能大坝是实现水利现代化管理的主要载体,现有智能大坝相关研究成果多针对建设期、新建大坝工程自身,如何统筹规划、设计、建设、蓄水、运行、加固、改造全生命期,兼顾水库大坝上下游、左右岸及洪水影响区的系统安全亟待研究,同时针对面广量大已建水库大坝智能改造相关理论方法与技术实践尚存在较大短板,关于智能大坝的概念内涵和功能体系尚未达成共识。本文系统研究了智能大坝的定义内涵与功能特征,全面梳理智能大坝建设关键技术和发展路径,旨在通过智能大坝加速有力提升水库大坝安全保障能力、有力支撑水利行业高质量发展和高水平安全、有力推进水利现代化建设进程。

1 智能大坝的基本特征

智能大坝是在水库大坝数字孪生与现代化水库运行管理矩阵体系框架内,通过云计算、大数据、物联网、移动互联网、人工智能等新一代信息技术和水库大坝专业知识的深度融合,利用数据-机理-知识三元驱动,以透彻感知、自主分析、自主馈控为基本运行模式(图1),实现水库大坝在规划设计、施工建设、蓄水运行、加固改造等全生命期的立体化感知、网络化传输、智能化决策及协同化管理的建设与管理运行模式。智能大坝的重要特征包括透彻感知、全面互联、深度融合、广泛共享、智能应用、范在服务,具备智能感知、智能仿真、智能诊断、智能预报、智能预警、智能调度、智能馈控、智能维护、智能处置、智能管

理等典型功能,综合现有研究成果^[2-8],智能大坝完整的功能体系涵盖感知层、分析层、决策层、应用层四个层级(图2)。

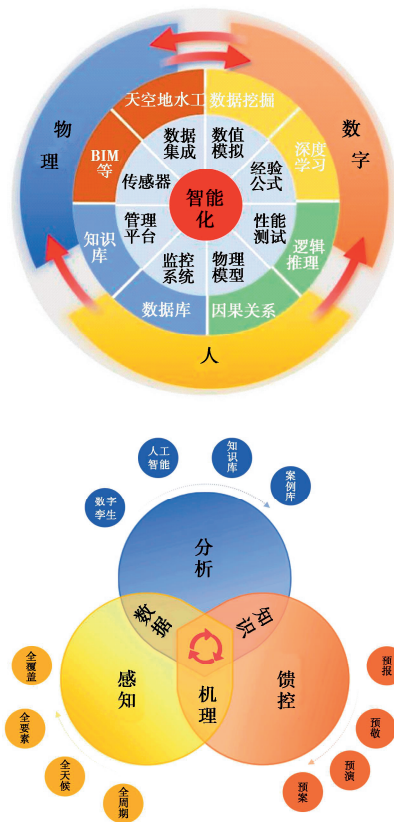


图1 智能大坝基本运行模式

Fig. 1 Basic operation mode of smart dam

2 智能大坝研究进展

2.1 智能建造

随着大坝工程建设规模与难度逐渐加大,数字化、信息化和智能化的工程建设管理需求日趋迫切^[1]。智能建造技术的引入,不仅提高了大坝建设的质量与效率,更在施工安全性、环境友好性等方面带来了显著提升。水库大坝智能建造技术的发展主要可以归结为理论、技术、方法、设备4个方面。

(1) 在理论层面,通过融合在线监测与仿真技术实现建造过程中大坝性态的实时分析和调控,成为提高大坝安全性和降低风险的有效手段,形成了基于感知-分析-控制闭环控制理念的智能建造理论^[5]。通过全面感知、数据与机理双驱动的智能决策以及闭环智能控制,为实现大坝建造过程的高效、安全和可持续发展奠定基础。

(2) 在技术层面,通过融合物联网、大数据等技术建立了智能监控系统^[4, 11],全面覆盖堆石料、混凝土等筑坝料的生产运输全过程智能化监控^[12],同时提出了材料生产、浇筑、振捣^[13]、压实、灌浆等质量

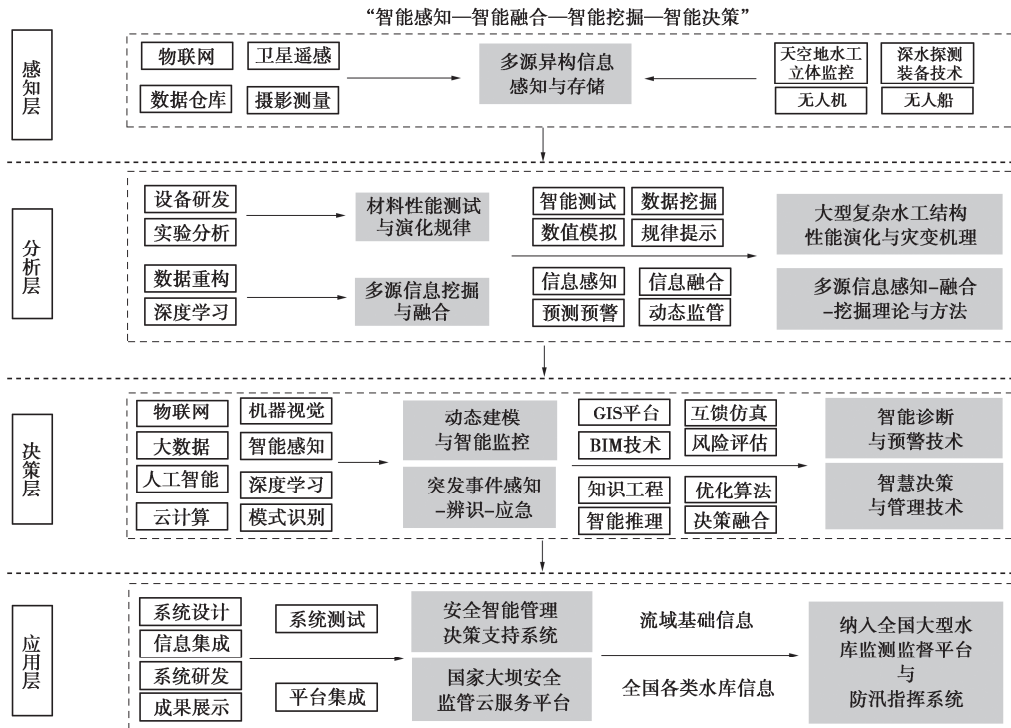


图 2 智能大坝的功能体系图

Fig. 2 Functional system of smart dam

评估系统, 精确把控生产过程, 保证施工质量; 基于数字孪生技术^[14]与 Unity 可视化展示平台, 融合 BIM 模型^[15]与 GIS 技术, 实现了对大坝施工全过程的可视化动态展示; 通过集成信息技术和工程管理理论提出了智能施工管理技术^[16], 实现施工过程的智能调度。

(3) 在方法层面, 结合智能监控系统获取的材料信息提出基于智能算法的各类筑坝材料参数反演方法, 实现了材料试验、服役环境、原观监测、现场检测等多源信息融合驱动的材料物理力学模型识别与参数综合反演^[17-20]; 研发了土石坝压实质量控制、混凝土施工质量控制、混凝土温控防裂、施工进度智能决策、现场交通调度、成本造价等智能决策模块^[3, 21], 为现场科学、高效的施工管理提供了手段。

(4) 在装备层面, 近年来发展较为成熟的智能施工机械^[22]通过配备各种传感系统、监测系统和集成智能算法的控制系统等, 完成自动定位、现场环境感知、路径规划、自动施工动作执行等任务; 研发了集成环境信息监测设备、控制参数计算的理论模型和反馈控制系统的喷雾^[23]、温控^[24]等装备系统, 实现对控制参的智能化动态控制, 并在乌东德和白鹤滩水电站智能建造过程成功应用。

综上, 大坝智能建造的研究成果已较为成熟全面, 但多针对中国西南地区新建高坝大库, 对已建坝的智能改造仍需加强关注, 考虑到国内大批已建老坝除险加固任务艰巨, 面对老坝范围广泛、规模庞大、情况

复杂等问题, 亟需加大对老坝智能改造的研究力度, 提高已建工程的智能化水平。

2.2 智能感知

水库大坝多源信息透彻智能感知是实现水库大坝数字化、网络化、智能化运行管理的重要支撑, 通过卫星遥感、人工智能等新技术, 无人机、无人船、水下机器人等新装备新技术的应用, 构建覆盖水库上下游、左右岸的“天-空-地-水-工”全天候动态监控体系, 可为实现水库运行管理信息系统数据集成, 全面提升水库工程全要素风险感知与防控能力提供重要技术支撑。

(1) 在大尺度监测技术与装备方面。综合应用卫星遥感技术^[25]可实现对库区、下游河道等区域地表环境和时空变化的大范围、长时序动态监测, 包括基于光学遥感及基于雷达卫星遥感的地表环境变化动态监测。光学卫星遥感可结合遥感影像解译、深度学习等进行智能地物分类和动态监测^[26], 为有效辨识库区、下游河道等地物环境特征, 全面监控关键要素变化情况建立基础。雷达卫星遥感通过携带合成孔径雷达 (SAR) 等传感器获取目标区域长序列变形幅度、趋势等情况^[27], 基于合成孔径雷达干涉 (InSAR) 技术^[28]在库岸边坡形变等大范围形变监测的应用可以有效弥补传统地面站点监测的不足。

(2) 在中小尺度监测技术与装备方面。新型监测技术与设备被研发应用, 包括智能感知终端、无人机、

无人船等。通过加强窄带物联网（NB-IoT）、5G 等新一代物联通信技术及智能感知、控制执行和精准计量等设备的应用，提升传统安全监测手段的自动化、智能化水平；采用无人机进行库区常态化自动化巡检，可过正射、倾斜影像技术导出重点区域的平面图^[29]及三维模型^[30]，便于后续巡查信息化标注及数据化储存；基于无人机和无人船等设备搭载高分辨率可见光、热红外等摄像头及单波速、多波束、侧扫声呐等单元，可实现裂缝、渗水、异常变形等隐患智能识别^[31]及水下地形、库区淤积等自动化测量^[32]（图 3）；采用智能图像测流技术^[33]实现重点部位水力冲刷过程的非接触式智能可视化监测。

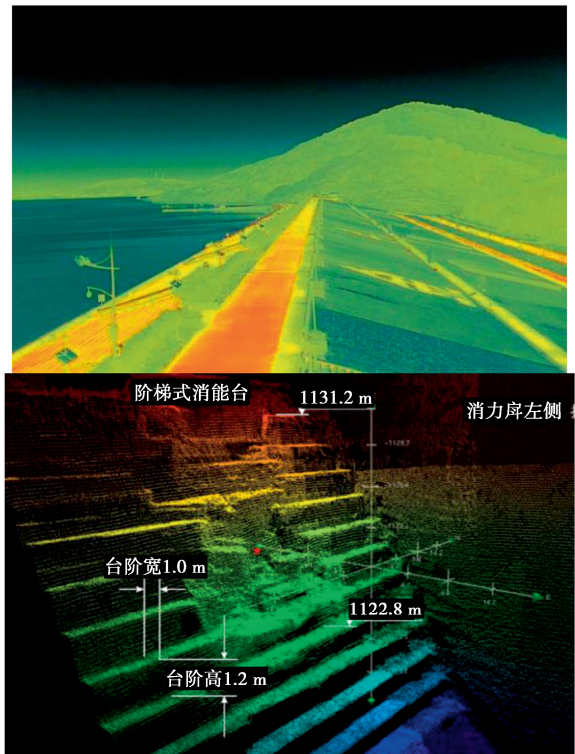


图 3 水库热红外成像及库区水下多波束测深系统
Fig. 3 Reservoir thermal infrared imaging and reservoir underwater multi-beam sounding system

（3）在深水探测技术与装备方面。爬行机器人和吸附机器人平台能够针对各类坝型开展深水渗漏检测，耐压设计达到 200 m^[34-35]，满足斜坡及垂直坝面稳定爬行、驻停、高清示踪摄像等需求，极大提高了坝面水下渗漏检测效率。针对大坝深水环境探测、修补加固等特殊需求，中国自主研发的大坝检测专用载人潜水器“禹龙号”^[36-37]（图 4）成功突破了 300 m 级深水环境大坝安全保障技术难题，重点解决了载人潜水器作业固定、水下定位、作业工具搭载、低能见度探测、安全防护、宽视野观察窗研制等技术难题。

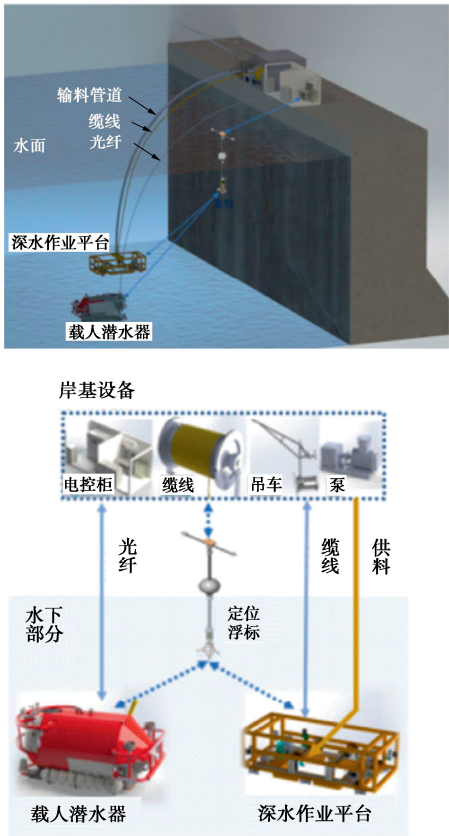


图 4 “禹龙号”载人潜水器作业系统协同工作
Fig. 4 Operating systems of the Yulong manned submersible work together

（4）在全要素数据集成与数据底板构建方面。汇集工程基础数据、“天-空-地-水-工”全天候动态监测数据（图 5）、地理空间数据、业务管理数据以及跨行业共享数据构建水库全要素信息数据底板，实现工程多源信息的透彻感知。通过建立适用于商用云计算基础设施的水利水电枢纽群水工监测信息数据中台^[7, 38]实现了全要素信息的集中化管理和统一化处理，同时基于数字孪生及 VTK 架构能够实现水工建筑物和监测设施的三维轻量化展示查询、漫游及线上交互等功能。

综上所述，目前全国范围内通过试点水库全覆盖、全要素、全天候、全周期“四全”管理的推广应用，部分水库已初步实现了工程安全性态透彻感知，但通过实践发现目前仍存在数据汇集信息化程度不高、多模态异构数据融合困难、中小型水库“四全”管理方案轻量化升级程度不够等问题，有待进一步展开研究。

2.3 智能预警

通过实时监测水位、降雨量、渗流、应力、沉降等关键物理量，及时发现工程潜在的风险和异常情况，进一步预测并预警可能发生的险情，如洪水、滑坡和结构损坏等，实现风险智能预警，为应急决策提供科

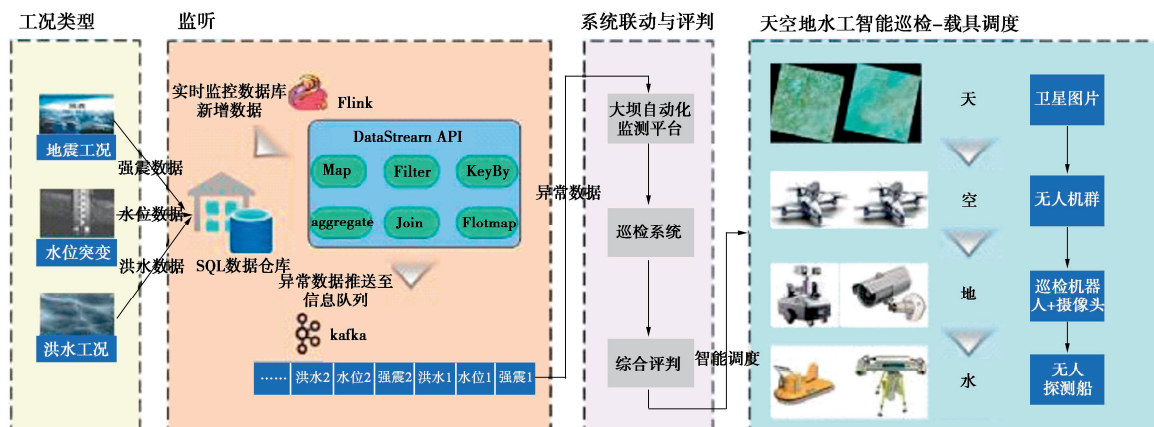


图 5 全天候动态监控联动技术研究

Fig. 5 Research on all-weather dynamic monitoring linkage technology



图 6 某工程库区及库岸边坡渲染效果图

Fig. 6 Rendering effect of a reservoir and its slope

学依据。

数字孪生技术^[14]在水库大坝工程智能预警中的突出作用日益凸显,成为全面强化水库大坝“四预”措施^[39]的重要载体,其技术核心是通过模拟仿真引擎及三维可视化技术实现物理系统向信息空间数字化模型的映射,实现水库“物理-数字”虚实融合交互。目前常用 BIM、GIS 等可视化手段开展大坝数字孪生技术研究(图 6),为提升模型构建精度及效率,已有研究提出了融合散点数据的大坝数字模型、融合力学特征的三维可视化架构、多层次可视化方法等一系列仿真技术,可为大坝突发事件预警提供实时准确的可视化支撑,提升风险全面感知的直观性,同时提供复杂场景预演条件,实现智能调度运行决策。

(1) 在雨水情监测预报“三道防线”构建方面。“三道防线”以流域为单元,由气象卫星和测雨雷达、雨量站、水文站组成的雨水情监测预报体系^[40-41]。随着数字孪生技术的推广应用,在数字孪生场景中接入并叠加展示雨量和洪水预报成果的功能不断得到完善,例如,基于并行计算技术构建洪水实时预报预警模型^[42],调用数字仿真模型实现库区水量动态模拟并进行实时展示^[43],通过联合调用仿真模型库实现洪涝预报并为调度决策提供支撑^[44]。

(2) 在智能诊断模型与动态预警体系构建方面。融合工程全生命期内“天-空-地-水-工”全天候智能监控系统汇集的全要素信息,充分挖掘工程设计-建设-运行期信息特征并实现全生命期数据互馈,基于数字孪生平台形成了大数据环境下大坝安全性态的数据-机理双驱动智能融合及诊断方法与模型(图 7),实时监控库区建筑物运行性态及监测设备运行性能,建立多维度、多层次安全诊断预警指标体系及安全诊断预警指标阈值拟定方法体系^[45-46]。结合数字孪生 VTK 架构,通过对比预设预警参数与实施数据自动触发报警,实现大坝安全性态线上交互分析和三维展示功能。

(3) 在仿真预演与系统研发方面。预演作为预报、预警、预演、预案“四预”的关键部分,基于预演目标等约束条件,通过构建全过程、多情景模拟仿真预演体系对预报场景进行前瞻预演^[47],同时具备正反向推演功能,为调度方案优选(图 8)、应急预案制定提供科学依据。数字孪生技术在流域防汛中已得到成熟应用,基于 GPU Shader 等可视化技术及水动力学模型等洪水演进模拟结果构建流域三维数字化场景,相关研究成果已在长江^[48]、黄河^[49]、珠江^[50-51]、淮河^[42]等流域应用。同时,结合数值模拟及智能算法^[52],发展了考虑洪水不确定性^[53]的水库防洪调度预演模型。

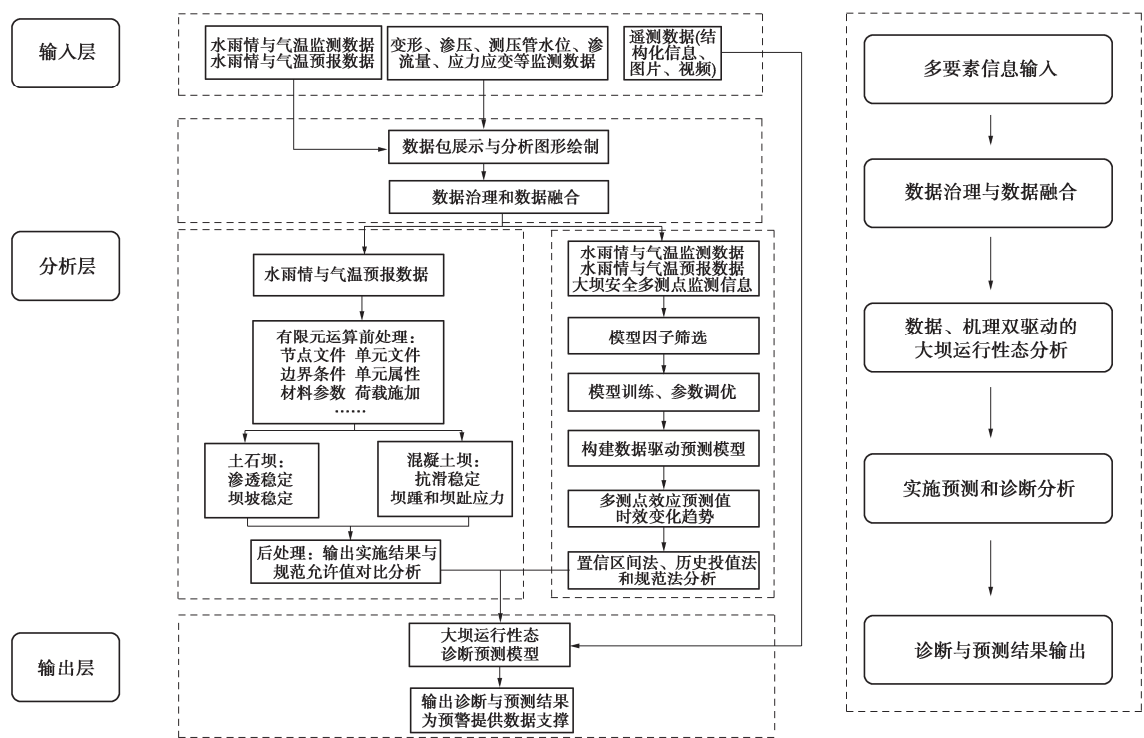


图 7 大坝安全状态诊断流程图

Fig. 7 Flowchart of dam safety state diagnosis



图 8 应急处置材料储备调度系统

Fig. 8 Emergency disposal material reserve scheduling system

(4) 在应急预案迭代优化方面。数字化应急预案可为快速应急抢险调度提供决策支持,通过结构化、模块化应急预案基础要素,如组织机构、预警与预防机制等,融合水库防洪调度方案^[54]等对风险人口及社会经济热力图分析成果模拟仿真,快速生成匹配当前情景的应急指令群,作为进一步动态模拟和迭代优化的基础,实现应急预案的数字化、矢量化、结构化处理。利用云平台一体化存储分析管理体系,与物联网进行数据连接,对业务流程、预警机制、调度原则、防汛预案、响应措施等进行梳理入库和程序化管理。

综上所述,面向数字孪生的大坝“四预”措施通过技术创新及推广应用已取得了显著进步,但仍存在与水库实际管理结合度不高、仿真模拟效率低等问题,亟需通过智能大坝建设推进水库“四预”措施,提高水库应对突发事件的能力。

2.4 智能监管

智能大坝建设通过融合新一代信息化技术及专业知识实现大坝安全性态的透彻感知、自主分析及自主反馈控及大坝全生命期智能监控,通过建设大坝智能监管平台集成实时监测、预警预报、智能决策及信息共享等功能,为应对突发事件大坝风险智能防控提供技术支撑。目前,中国在大坝安全风险防范意识、责任制度落实、现行安全标准与实际风险匹配程度、法规技术标准体系、监管信息化水平等方面仍存在短板。随着智能大坝建设的发展,基于新一代信息技术的国家大坝智能监管平台建设也取得了一系列成果,包括智能监管模式、动态监管方法与技术、信息共享与多维协同监管云服务架构等方面。

(1) 在智能监管模式方面。针对大坝监管信息异构性强的问题,建立了信息分类标准及模型实现监管信息的标准化管理。建立全国水库大坝安全信息采集上报与共享体系,实现数据共享、分析、应用和水库大坝安全管理的规范化、精细化、智能化,初步构建了以“法规制度为依据、监管机制为保障、监管体制为支撑、监管措施为抓手”的智能监管模式与机制,建立了管理评估标准及分级预警指标体系、大坝安全技术手册质量智能评估方法及系统等^[55-56]。

(2) 在动态智能监管方法与技术方面。在大坝安全智能监管模式框架下,基于监管异构信息标准化成果,采用关联、聚类等方法挖掘识别大坝安全监管

潜在风险^[57]并实现量化分析,为提出针对性监管措施提供依据,建立适用于不同阶段、不同风险等级的大坝智能动态监管方法。针对大坝变形^[58]、渗流^[59]等关键安全指标建立动态预测模型,提出大坝安全预警指标拟定与动态预警方法,研发全坝型大坝安全异常预警自适应模型,初步构建水库大坝安全监测智能预警体系。

(3) 在智能监管平台建设方面。围绕管理监督、安全预警、应急决策3个环节,构建水库大坝安全信息共享与多维协同监管云服务架构,包括智能监管、智能预警及智能决策系统。智能监管系统可实现跨管理层级的监管进度查询,智能预警系统可实现全坝型自适应预警模型的统一调用,智能决策系统实现突发事件全过程的动态跟踪^[60]等,建立了国家大坝安全监管云服务平台,显著提升了中国水库大坝安全运行管理、监督管理及应急管理智能化水平。

3 智能大坝建设管理亟待解决的关键问题

智能大坝是蕴含新一代大坝发展理念的大坝发展形态,具有典型高科技、高效能、高质量的基本特征,是当前发展水利新质生产力的重要载体。通过乌东德、白鹤滩^[61]、糯扎渡^[62]等高坝大库的工程实施在大坝智能建造方面积累了较为丰富实践经验,但相较智慧城市、智能电网、智能交通、智能医疗等领域的快速发展,智能大坝建设进展相对滞后,仍需在政产学研用合力推进下,完善政策支持,厘清技术体系,加快软硬件自主创新研发与孪生驱动,降低应用门槛,推进学术研究与集成攻关,构建行业领域标准体系。智能大坝建设管理亟待解决的关键问题包括以下4个方面:

(1) 统筹全生命期的智能大坝建设理念方法与技术体系亟待构建。智能大坝是蕴含新一代大坝发展理念的大坝发展形态,对于统筹水库大坝规划、设计、建设、蓄水、运行、加固、改造等全生命期建设运行安全保障的智能建设尚处在探索理论的阶段,特别是针对面广量大已建水库大坝智能改造理论方法与技术方面缺少实践经验,统筹全生命期的智能大坝建设理念方法与技术体系亟待构建。

(2) 围绕智能大坝建设的核心关键技术亟需开展多学科多技术联合科技攻关。如何通过理论、方法、技术创新,将传统坝工技术与现代信息技术手段充分融合,实现全面感知水库大坝全天候、全要素、全周期多源信息,并通过数据融合实现大坝安全智能诊断与智慧管理仍需进一步深入研究。

(3) 智能大坝建设管理全链条关键仪器装备亟待自主研发。为实现“智能感知—智能融合—智能挖掘—智能诊断—智能决策”的全链条智能大坝建设目标,获取足量数据信息是大坝智能化的基础,可靠的仪器装备是透彻感知的关键。如何通过全链条关键仪器装备研发,进一步提升水库大坝信息感知、性能仿真、智能诊断、智能维护等全覆盖业务领域智能化水平有待深入研究,智能大坝关键技术与装备亟待自主攻关研发。

(4) 全面支撑智能大坝建设管理的技术标准体系亟待加速建立。标准化是推动国家行业统筹智能大坝建设布局的重要支撑,是引导智能大坝规模化应用和技术产业生态集群建设的关键基础,科学、合理、可行的智能大坝建设和管理技术标准体系亟待建立。

4 智能大坝的发展路径思考

为加速推进传统坝工技术与新一代信息技术充分融合,实现“安全大坝、数字大坝、智慧大坝、高效大坝、绿色大坝、韧性大坝”目标,聚焦强化智能感知融合、智能挖掘诊断、智能决策处置全链条智能大坝关键技术研究,提出以下建议思考。

4.1 推进水库大坝智能设计水平提升

(1) 研发大坝三维协同智能设计平台

发展国产三维可视化图形设计软件,研究高效高精度的三维可视化技术,开发设计可视化仿真方法;开发集成地质、水文、水工、施工等多专业的三维协同设计软件平台,开发高效直观的人机交互界面,实现协作设计和决策的便捷性;基于智能设计平台,进一步研发支撑全生命周期多源信息数字化集成交付的BIM模型构建技术体系。

(2) 研发智能监(检)测技术装备

研制高精度低功耗的一体化智能传感器,研发集成无线传感器网络技术,建立大坝综合监测数据传感网络体系,开发智能预测与预警系统,研发基于人工智能的大坝安全自动评价决策技术;充分采用卫星遥感、物联网、北斗PNT、5G等新技术以及高清视频、无人机(船)、地面(水下)机器人、智能传感器、智能测控终端等新装备构建“天空地”一体化监测网;融合三维可视化技术,采用智能优化算法,实现智能监测优化设计;研发环境自适应感知、故障智诊断、监测数据智能处理、工程隐患智识别、自行发布预报预警等新型智能安全监测仪器。

(3) 推动筑坝材料科技创新

研发适用于广泛环境条件的高耐久、高强度、优良抗渗性和抗裂性的新型混凝土材料和其它筑坝材料。利用现代纳米和生物技术手段,改善传统建筑材

料的力学性能和耐久性。促进材料科学、环境科学、信息技术等多学科交叉,建立和完善新型材料性能评估和检测体系。

4.2 推进水库大坝智能建设关键技术研发

(1) 完善大坝智能建造理论体系

构建集“多维度信息感知、多目标智能决策、多要素实时控制”为一体的智能控制系统,通过智能控制系统精准监控质量、动态控制成本、准确识别机理、正确评估指标、快速智能决策、高效调控性态、及时预警风险,实现设计、施工、运行全过程的施工要素、材料性能、结构性态、风险演化等因素的综合智能调控,为解决大坝建造过程中结构服役状态调控、全生命周期安全性能评估、风险预测预警难题,实现“高质、高效、安全、绿色”的智能建设目标提供理论基础。

(2) 推进新建坝智能建造技术创新

推进无人化、少人化施工技术的研发与应用,充分运用智能机器人、自动化设备及智能控制系统等技术装备提升施工现场的智能化、自动化水平;开展大坝施工全过程、多尺度、多维度、海量多源异构信息精细感知技术开发,加快物联网、人工智能与绿色施工技术的融合;构建大坝建设多源信息感知体系,对大坝感知网络进行个性化定制,实现大坝建造过程信息感知的精准性与实时性。通过构建新建坝智能建造技术体系,确保施工现场安全、质量、进度有保障。

(3) 推进已建大坝智能化升级改造

研发新型加固材料,创新加固技术,优化改造方案,通过智能化改造,开展已建坝智能传感监测体系建设,推动传统已建坝信息化、数字化提档升级;利用大数据、云计算、人工智能等技术,提升大坝运行管理智能化水平,增强已建坝应对极端天气等突发事件应急处置能力。

(4) 建立大坝建设可视化仿真平台

构建大坝施工仿真模型的智能更新、施工方案的智能优化与反馈控制等技术更新仿真平台,实现对大坝建设进度和质量的动态控制,解决由大坝建设过程中的随机性和不确定性造成的施工进度和质量控制难度大等问题。

4.3 推进水库大坝智能运维技术和智慧管理平台研发

(1) 建立大坝运维期智能化预测算法

基于大数据分析机器学习等智能算法,开发基于大量监测数据的深度分析模型,实现复杂外荷载作用下水库大坝力学响应与灾变过程快速仿真;开发基于物理模型和历史数据的大坝老化与寿命预测模型,构建大坝渗流与裂缝发展预测模型,对潜在安全隐患进行早期识别。

(2) 发展智能化预测预警模拟方法

开发基于物理模型和数据驱动模型的预测工具,结合大坝的历史监测数据和实时数据,对大坝的运行状态进行智能预测;利用模拟结果进行水库大坝风险评估,分析可能的损害模式和失效机制。

(3) 健全安全运维智慧管理平台

基于水库大坝安全现有集成管理平台,建设“天空地”智能监测数据融合与治理模块,开发基于大数据及机器学习的监测数据异常识别技术、多源多模态监测数据融合治理模型,开展大坝安全运行性态智能快速评估系统研发,综合经验模型、规则推导、指标监控等方法,建立大坝安全分级分类评估系统。

4.4 推进智能大坝建设管理技术标准体系构建

以建设智能大坝为总目标,针对构建具有空间基础信息、安全监测信息、服役环境信息全方位透彻感知和智能识别能力,大力提升数字赋能水平,提升隐患识别、智能诊断、预测预警能力为核心,系统梳理水库大坝建设与安全管理相关技术标准,构建能够有效支撑智能大坝建设管理现代化水库运行管理法规制度技术标准体系。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 刘六晏与向衍共同设计研究内容与框架;向衍提供研究指导与资源支持;刘六晏、李宏恩、高长胜共同完成文献调研、数据收集与整理;刘六晏主导论文撰写;所有作者参与论文的审阅与修改,并对最终稿件内容达成一致。LIU Liuyan and XIANG Yan designed the research content and framework; XIANG Yan provided research supervision and resources support; LIU Liuyan, LI Hongen, and GAO Changsheng conducted literature research, data collection, and analysis collaboratively; LIU Liuyan led the writing of the manuscript. All authors participated in the review and revision of the paper and agreed on the content of the final version.

参考文献:

- [1] 王忠静,王光谦,王建华,等. 基于水联网及智慧水利提高水资源效能[J]. 水利水电技术, 2013, 44(1): 1-6. (WANG Zhongjing, WANG Guangqian, WANG Jianhua, et al. Developing the Internet of water to prompt water utilization efficiency[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(1): 1-6. (in Chinese))
- [2] 钟登华,王飞,吴斌平,等. 从数字大坝到智慧大坝[J]. 水力发电学报, 2015, 34(10): 1-13. (ZHONG Denghua, WANG Fei, WU Binping, et al. From digital dam toward

- smart dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, **34**(10): 1-13. (in Chinese))
- [3] 钟登华, 时梦楠, 崔 博, 等. 大坝智能建设研究进展[J]. 水利学报, 2019, **50**(1): 38-52, 61. (ZHONG Denghua, SHI Mengnan, CUI Bo, et al. Research progress of the intelligent construction of dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(1): 38-52, 61. (in Chinese))
- [4] 李庆斌, 林 鹏. 论智能大坝[J]. 水力发电学报, 2014, **33**(1): 139-146. (LI Qingbin, LIN Peng. Demonstration on intelligent dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, **33**(1): 139-146. (in Chinese))
- [5] 李庆斌, 马 睿, 胡 昱, 等. 大坝智能建造理论[J]. 水力发电学报, 2022, **41**(1): 1-13. (LI Qingbin, MA Rui, HU Yu, et al. Theory of intelligent dam construction[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, **41**(1): 1-13. (in Chinese))
- [6] 盛金保, 向 衍, 杨德玮, 等. 水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(7): 1351-1366. (SHENG Jinbao, XIANG Yan, YANG Dewei, et al. Key technologies and applications of safety diagnosis and smart management of reservoir dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(7): 1351-1366. (in Chinese))
- [7] 盛金保, 张士辰, 彭雪辉, 等. 中国水库大坝管理信息化建设与应用的现状和应用[C]// 中国水利学会 2016 学术年会论文集, 成都, 2016: 453-463. (SHENG Jinbao, ZHANG Shichen, PENG Xuehui, et al. Present situation and application of information construction and application of reservoir dam management in China[C]// Proceedings of 2016 Annual Symposium of Chinese Hydraulic Engineering Society, Chengdu, 2016: 453-463. (in Chinese))
- [8] 向 衍, 盛金保, 刘成栋. 水库大坝安全智慧管理的内涵与应用前景[J]. 中国水利, 2018(20): 34-38. (XIANG Yan, SHENG Jinbao, LIU Chengdong. Intention of intelligent safety management for reservoir dams and future applications[J]. China Water Resources, 2018(20): 34-38. (in Chinese))
- [9] ZHANG M. Research on the application of intelligent construction site in construction site management[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, **768**(6): 062005.
- [10] 钟桂良, 徐建江, 乔 雨, 等. 混凝土振捣质量智能监控关键技术研究与应用[J]. 水利水电技术, 2020, **51**(增刊 2): 422-426. (ZHONG Guiliang, XU Jianjiang, QIAO Yu, et al. Study and application of key technology for intelligent monitoring and control of concrete vibration quality[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, **51**(S2): 422-426. (in Chinese))
- [11] 陶丛丛, 胡 波, 马文锋. 碾压式土石坝施工质量实时监控系统设计[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, **3**(6): 40-43, 16. (TAO Congcong, HU Bo, MA Wenfeng. The design for real-time monitoring system of rolled earthrock fill dam construction quality[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2017, **3**(6): 40-43, 16. (in Chinese))
- [12] 王 峰, 周宜红, 赵春菊, 等. 基于混合粒子群算法的特高拱坝不同材料热学参数反演分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, **61**(7): 747-755. (WANG Feng, ZHOU Yihong, ZHAO Chunju, et al. Thermal parameter inversion for various materials of super high arch dams based on the hybrid particle swarm optimization method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, **61**(7): 747-755. (in Chinese))
- [13] 刘东海, 王爱国, 柳育刚, 等. 基于碾轮振动性态分析的土石坝压实质量实时监测与评估[J]. 水利学报, 2014, **45**(2): 163-170. (LIU Donghai, WANG Aiguo, LIU Yugang, et al. Real-time monitoring and assessment of compaction quality for earth-rock dam basing on roller vibration behavior analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(2): 163-170. (in Chinese))
- [14] 陶 飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, **24**(1): 1-18. (TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, **24**(1): 1-18. (in Chinese))
- [15] 晁 阳, 牛志伟, 齐慧君. 基于 WebGL 的 BIM 模型可视化研究[J]. 水电能源科学, 2020, **38**(9): 79-82. (CHAO Yang, NIU Zhiwei, QI Huijun. Research on visualization of BIM model based on WebGL[J]. Water Resources and Power, 2020, **38**(9): 79-82. (in Chinese))
- [16] 胡 晶, 陈祖煜, 王玉杰, 等. 基于区块链的水利工程施工管理平台架构[J]. 水力发电学报, 2020, **39**(11): 40-48. (HU Jing, CHEN Zuyu, WANG Yujie, et al. Architecture of construction management platform for hydraulic engineering based on block chain[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, **39**(11): 40-48. (in Chinese))
- [17] 王 峰, 周宜红, 赵春菊, 等. 基于混合粒子群算法的特高拱坝不同材料热学参数反演分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, **61**(7): 747-755. (WANG Feng, ZHOU Yihong, ZHAO Chunju, et al. Thermal parameter inversion

- for various materials of super high arch dams based on the hybrid particle swarm optimization method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, **61**(7): 747-755. (in Chinese))
- [18] WU Z Y, CHEN J K. Pressure-dependent variability in shear strength of a blasting-quarried granite rockfill material[J]. Soils and Foundations, 2019, **59**(6): 2299-2310.
- [19] FAN X F, WU Z Y, LIU L J, et al. Analysis of sluice foundation seepage using monitoring data and numerical simulation[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, **2019**(1): 2850916.
- [20] WU Z Y, LI J R, BIAN K, et al. Reliability analysis of slope with cross-correlated spatially variable soil properties using AFOSM[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, **80**(19): 675.
- [21] 刘耀儒, 侯少康, 程立, 等. 水利工程智能建造进展及关键技术[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, **53**(10): 1-20. (LIU Yaoru, HOU Shaokang, CHENG Li, et al. Advances and key technologies of intelligent construction of hydraulic engineering[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, **53**(10): 1-20. (in Chinese))
- [22] 张庆龙, 刘天云, 李庆斌, 等. 基于闭环反馈控制和 RTK-GPS 的自动碾压系统[J]. 水力发电学报, 2018, **37**(5): 151-160. (ZHANG Qinglong, LIU Tianyun, LI Qingbin, et al. Automatic rolling system based on closed-loop feedback control and RTK-GPS[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, **37**(5): 151-160. (in Chinese))
- [23] 杨宁, 刘毅, 乔雨, 等. 大体积混凝土仓面智能喷雾控制模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, **61**(7): 724-729. (YANG Ning, LIU Yi, QIAO Yu, et al. Intelligent spray control for the concrete curing of mass concrete bins[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, **61**(7): 724-729. (in Chinese))
- [24] 林鹏, 李庆斌, 周绍武, 等. 大体积混凝土通水冷却智能温度控制方法与系统[J]. 水利学报, 2013, **44**(8): 950-957. (LIN Peng, LI Qingbin, ZHOU Shaowu, et al. Intelligent cooling control method and system for mass concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(8): 950-957. (in Chinese))
- [25] 李子阳, 戴济群, 黄对, 等. 水利工程卫星遥感监测技术应用与展望[J]. 水科学进展, 2023, **34**(5): 798-811. (LI Ziyang, DAI Jiqun, HUANG Dui, et al. Application and prospects of satellite remote sensing monitoring technology in water conservancy projects[J]. Advances in Water Science, 2023, **34**(5): 798-811. (in Chinese))
- [26] 刘畅, 唐海蓉, 计璐艳, 等. 长时间序列 1984 年—2020 年密云水库水面信息遥感监测与分析[J]. 遥感学报, 2023, **27**(2): 335-350. (LIU Chang, TANG Hairong, JI Luyan, et al. Spatial-temporal water area monitoring of the Miyun Reservoir using remote sensing imagery from 1984 to 2020[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, **27**(2): 335-350. (in Chinese))
- [27] 王腾, PERISSIN D, ROCCA F, 等. 基于时间序列 SAR 影像分析方法的三峡大坝稳定性监测[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(1): 110-123. (WANG Teng, PERISSIN D, ROCCA F, et al. Stability monitoring of Three Gorges Dam based on time series SAR image analysis method[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, **41**(1): 110-123. (in Chinese))
- [28] 肖儒雅, 何秀凤. 时序 InSAR 水库大坝形变监测应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, **44**(9): 1334-1341. (XIAO Ruya, HE Xiufeng. Deformation monitoring of reservoirs and dams using time-series InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, **44**(9): 1334-1341. (in Chinese))
- [29] 庞治国, 雷添杰, 曲伟, 等. 基于无人机载激光雷达的库区高精度 DEM 生成[J]. 电子测量技术, 2018, **41**(9): 80-83. (PANG Zhiguo, LEI Tianjie, QU Wei, et al. High precision DEM generation in the reservoir area based on UAV airborne LiDAR[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, **41**(9): 80-83. (in Chinese))
- [30] 王永生, 卢小平, 朱慧, 等. 无人机实景三维建模在水利 BIM 中的应用[J]. 测绘通报, 2018(3): 126-129. (WANG Yongsheng, LU Xiaoping, ZHU Hui, et al. Practical application of real 3D-modeling in hydraulic BIM by UAV[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(3): 126-129. (in Chinese))
- [31] 余宏明, 栗志斌, 邸同宇, 等. 基于无人机影像的滑坡地质灾害解译与稳定性评价: 以秭归县盐关滑坡为例[J]. 科学技术与工程, 2019, **19**(32): 84-92. (YU Hongming, LI Zhibin, DI Tongyu, et al. Unmanned aerial vehicle images-based landslide geohazards interpretation and stability analysis: an illustrative example of yanguan landslide[J]. Science Technology and Engineering, 2019, **19**(32): 84-92. (in Chinese))
- [32] 梁冲. 基于机载 LiDAR 与无人船多波束的水陆一体化测量技术研究[J]. 水利技术监督, 2022, **30**(6): 70-74. (LIANG Chong. Research of water land integrated measurement technology based on airborne LiDAR and

- unmanned ship multi beam[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2022, **30**(6): 70-74. (in Chinese))
- [33] 张 振, 徐 枫, 王 鑫, 等. 河流水面成像测速研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2015, **36**(7): 1441-1450. (ZHANG Zhen, XU Feng, WANG Xin, et al. Research progress on river surface imaging velocimetry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, **36**(7): 1441-1450. (in Chinese))
- [34] 谭界雄, 田金章, 王秘学. 水下机器人技术现状及在水利行业的应用前景[J]. 中国水利, 2018(12): 33-36. (TAN Jiexiong, TIAN Jinzhang, WANG Mixue. Future application of underwater robots in water sector and its technology status[J]. China Water Resources, 2018(12): 33-36. (in Chinese))
- [35] LIU X D, CHEN R, XUE Z F, et al. Design and optimization of a novel swirling sucker for underwater wall-climbing robots[C]// 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Munich, IEEE, 2018.
- [36] XIANG Y, SHEN G Z, CHENG Z F, et al. Study on sound wave scattering effects of different markers placed on dam face in deepwater reservoir[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, **2019**(1): 5281458.
- [37] 蔡跃波, 向 衍, 盛金保, 等. 重大水利工程大坝深水检测及突发事件监测预警与应急处置研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(3): 441-458. (CAI Yuebo, XIANG Yan, SHENG Jinbao, et al. Deep-water detection, monitoring, early warning and treatment of emergencies of major water conservancy projects: a review[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(3): 441-458. (in Chinese))
- [38] 牛广利, 李端有, 李天旸, 等. 基于云平台的大坝安全监测数据管理及分析系统研发与应用[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(6): 161-165. (NIU Guangli, LI Duanyou, LI Tianyang, et al. Management and analysis system for dam safety monitoring data based on cloud platform: development and application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(6): 161-165. (in Chinese))
- [39] 刘志雨. 提升数字孪生流域建设“四预”能力[J]. 中国水利, 2022(20): 11-13. (LIU Zhiyu. Capacity building for forecast, early-warning, rehearsal and plan in digital twin basin construction[J]. China Water Resources, 2022(20): 11-13. (in Chinese))
- [40] 马栋和, 冯右骞. 基于气象要素驱动的流域水旱灾害智慧“四预”系统研究及应用探析[J]. 中国水利, 2024(5): 52-57. (MA Donghe, FENG Youcan. Research and application exploration of a basin flood and drought disaster intelligent “four pres” system driven by meteorological elements[J]. China Water Resources, 2024(5): 52-57. (in Chinese))
- [41] 林祚顶, 刘志雨. 加快构建雨水情监测预报“三道防线”工作思路[J]. 中国水利, 2023(12): 5-10. (LIN Zuoding, LIU Zhiyu. Accelerating construction of “three lines of flood defense” through rainfall monitoring and forecasting and reflections[J]. China Water Resources, 2023(12): 5-10. (in Chinese))
- [42] 刘昌军, 吕 娟, 任明磊, 等. 数字孪生淮河流域智慧防洪体系研究与实践[J]. 中国防汛抗旱, 2022, **32**(1): 47-53. (LIU Changjun, LYU Juan, REN Minglei, et al. Research and application of digital twin intelligent flood prevention system in Huaihe River Basin[J]. China Flood & Drought Management, 2022, **32**(1): 47-53. (in Chinese))
- [43] 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. (GU Weiwei, CAI Tiande, XIE Donghui, et al. Application of the “four pres” for flood control of digital twin Zhougongzhai-Jiaokou cascade reservoirs[J]. China Water Resources, 2023(11): 56-59. (in Chinese))
- [44] 黄 艳, 喻 杉, 罗 斌, 等. 面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索[J]. 水利学报, 2022, **53**(3): 253-269. (HUANG Yan, YU Shan, LUO Bin, et al. Development of the digital twin Changjiang River with the pilot system of joint and intelligent regulation of water projects for flood management[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, **53**(3): 253-269. (in Chinese))
- [45] LIN C N, LI T C, ZHAO L H, et al. Reinforcement effects and safety monitoring index for high steep slopes: a case study in China[J]. Engineering Geology, 2020, **279**: 105861.
- [46] WU Z Y, CHEN J K. Pressure-dependent variability in shear strength of a blasting-quarried granite rockfill material[J]. Soils and Foundations, 2019, **59**(6): 2299-2310.
- [47] 赵兰兰, 朱 冰, 孔祥意, 等. 并联库群优化调度模型在黄河中游防洪预演中的应用研究[C]//2023(第十一届)中国水利信息化技术论坛论文集, 武汉, 2023. (ZHAO Lanlan, ZHU Bing, KONG Xiangyi, et al. Application research of parallel reservoir group optimal operation model in flood control rehearsal for the middle reaches of the yellow river[C]// Proceedings of the 11th China Water Conservancy Informatization Technology Forum, Wuhan, 2023. (in Chinese))
- [48] 黄 艳. 数字孪生长江建设关键技术与试点初探[J]. 中国防汛抗旱, 2022, **32**(2): 16-26. (HUANG Yan. Study on key technology and pilot of digital twin Yangtze River

- construction[J]. China Flood & Drought Management, 2022, **32**(2): 16-26. (in Chinese))
- [49] 李文学, 寇怀忠. 关于建设数字孪生黄河的思考[J]. 中国防汛抗旱, 2022, **32**(2): 27-31. (LI Wenxue, KOU Huaizhong. Thoughts on the construction of digital twin Yellow River in the new stage[J]. China Flood & Drought Management, 2022, **32**(2): 27-31. (in Chinese))
- [50] 甘郝新, 吴皓楠. 数字孪生珠江流域建设初探[J]. 中国防汛抗旱, 2022, **32**(2): 36-39. (GAN Haoxin, WU Haonan. Study on the construction of the digital twin Pearl River Basin[J]. China Flood & Drought Management, 2022, **32**(2): 36-39. (in Chinese))
- [51] 范光伟, 王高丹, 侯贵兵, 等. 数字孪生珠江防洪“四预”先行先试建设思路[J]. 中国防汛抗旱, 2022, **32**(7): 24-29. (FAN Guangwei, WANG Gaodan, HOU Guibing, et al. The early and pilot construction exploration of flood management with four functions of FEDE within digital twin Pearl River[J]. China Flood & Drought Management, 2022, **32**(7): 24-29. (in Chinese))
- [52] 刘成堃, 马 瑞, 邱 鑫, 等. 基于 3D GIS 的水库群联合调度多尺度模拟仿真研究[J]. 人民长江, 2021, **52**(2): 212-216. (LIU Chengkun, MA Rui, QIU Xin, et al. Multi-scale simulation on joint operation of reservoir groups for flood control based on 3D GIS[J]. Yangtze River, 2021, **52**(2): 212-216. (in Chinese))
- [53] 郭爱军, 杨 笛, 王义民, 等. 设计洪水不确定性下的水库防洪风险调度[J]. 工程科学与技术, 2023, **55**(2): 222-231. (GUO Aijun, YANG Di, WANG Yimin, et al. Reservoir risk operation for flood control under design flood uncertainty[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, **55**(2): 222-231. (in Chinese))
- [54] 张晓琦, 刘 攀, 陈 进, 等. 基于条件风险价值理论的水库群防洪库容协同作用[J]. 水科学进展, 2022, **33**(2): 298-305. (ZHANG Xiaoqi, LIU Pan, CHEN Jin, et al. Research on the synergistic effect of multi-reservoir flood control capacity by considering the conditional value-at-risk[J]. Advances in Water Science, 2022, **33**(2): 298-305. (in Chinese))
- [55] 朱沁夏, 张士辰, 杨正华. 水库大坝安全管理预警标准研究[J]. 中国水利, 2020(16): 23-25. (ZHU Qinxia, ZHANG Shichen, YANG Zhenghua. Research on early warning standard of reservoir dam safety management system[J]. China Water Resources, 2020(16): 23-25. (in Chinese))
- [56] 葛从兵, 严吉峰, 陈 剑. 水库安全管理文档质量评估系统设计与实现[J]. 软件导刊, 2022, **21**(5): 130-134. (GE Congbing, YAN Jihao, CHEN Jian. Design and implementation of quality evaluation system for reservoir safety management documents[J]. Software Guide, 2022, **21**(5): 130-134. (in Chinese))
- [57] 刘 帅, 盛金保, 王昭升, 等. 基于模糊神经网络的水电施工安全隐患评价[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 105-111. (LIU Shuai, SHENG Jinbao, WANG Zhaosheng, et al. Evaluation method for hidden safety dangers of hydropower construction based on fuzzy neural network[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(1): 105-111. (in Chinese))
- [58] XU G Y, JING Z X, MAO Y C, et al. A dam deformation prediction model based on ARIMA-LSTM[C]// 2020 IEEE Sixth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService), Oxford, IEEE, 2020.
- [59] 何 露, 王士军, 谷艳昌, 等. 土石坝渗压水位极值预测[J]. 水利水运工程学报, 2021(4): 29-35. (HE Lu, WANG Shijun, GU Yanchang, et al. Prediction of seepage water level extremum of earth rock dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(4): 29-35. (in Chinese))
- [60] 陈 剑, 毛才传, 严吉峰, 等. 水库 GIS 智能巡检系统研究与应用[J]. 水利信息化, 2020(4): 37-41, 59. (CHEN Jian, MAO Caichuan, YAN Jihao, et al. Research and application of GIS intelligent patrol system for reservoir[J]. Water Resources Informatization, 2020(4): 37-41, 59. (in Chinese))
- [61] 樊启祥, 张超然, 陈文斌, 等. 乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术[J]. 水力发电学报, 2019, **38**(2): 22-35. (FAN Qixiang, ZHANG Chaoran, CHEN Wenbin, et al. Key technologies of intelligent construction of Wudongde and Baihetan super high arch dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, **38**(2): 22-35. (in Chinese))
- [62] 马洪琪, 钟登华, 张宗亮, 等. 重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其工程应用[J]. 中国工程科学, 2011, **13**(12): 20-27, 2. (MA Hongqi, ZHONG Denghua, ZHANG Zongliang, et al. Key technologies of real-time construction control for major hydraulic and hydroelectric projects[J]. Engineering Sciences, 2011, **13**(12): 20-27, 2. (in Chinese))