

智慧水利背景下大坝安全监测与应急响应一体化研究

汪洋蓉

大唐四川川北电力开发有限公司 四川 广元 628000

摘要: 随着全球气候变化加剧和极端天气事件频发,水库大坝作为国家关键基础设施,其安全运行面临前所未有的挑战。传统的大坝安全监测体系存在数据孤岛、响应滞后、智能化程度低等问题,难以满足现代水利工程对风险预警与快速处置的需求。在“智慧水利”国家战略推进背景下,构建集感知、分析、预警、决策与响应于一体的智能大坝安全管理体系成为必然趋势。本文系统梳理了智慧水利的核心内涵及其对大坝安全管理提出的新要求,深入剖析当前大坝安全监测与应急响应体系存在的主要问题,提出“监测—评估—预警—响应”四位一体的一体化框架,并从多源异构数据融合、智能算法模型、数字孪生平台、应急联动机制等关键技术路径展开探讨。最后,结合工程案例,验证了该一体化体系在提升大坝风险防控能力、优化应急资源配置、缩短响应时间等方面的显著成效。研究成果可为我国大坝安全治理体系现代化提供理论支撑与实践参考。

关键词: 智慧水利; 大坝安全; 安全监测; 应急响应; 一体化; 数字孪生; 人工智能

引言

大坝作为国家水安全核心设施,在防洪、供水、灌溉、发电及生态调节中发挥不可替代作用。截至2024年,我国已建9.5万余座水库,大型水库近800座,数量居世界首位。然而,大坝失事后果极具灾难性,如1975年河南“75·8”板桥水库溃坝致数万人死亡,教训深刻。当前,全球气候变暖加剧极端天气,大坝运行环境复杂化;部分老坝存在老化、病险问题,安全风险累积。传统“人工巡检+定点监测+经验判断”模式已难以满足高精度、实时性、智能化需求。2021年水利部《“十四五”智慧水利建设规划》明确构建智能感知体系,推动水利工程数字化转型。智慧水利依托物联网、大数据、AI、数字孪生等技术,实现水要素全面感知与智能协同治理。本文聚焦智慧水利背景下大坝安全治理新范式,研究监测与应急响应一体化理论、技术及实施策略,提升全生命周期安全管理水平,保障国家水安全。

1 智慧水利对大坝安全管理的新要求

智慧水利并非简单地将信息技术叠加于传统水利业务,而是通过数据驱动、模型支撑、智能决策重构水利治理逻辑。其对大坝安全管理提出以下核心要求:

1.1 全要素感知

要求实现对大坝本体(坝体、坝基、泄洪设施等)、库区环境(水位、雨量、泥沙、地震)、下游影响区(人口、交通、重要设施)等全要素的立体化、高频次、高精度感知。通过布设GNSS、渗压计、倾斜仪、视频监控、无人机、InSAR卫星等多源传感器,构建

“空—天—地—水”一体化监测网络。

1.2 实时动态评估

传统安全评估多依赖定期人工检查和月度/季度数据分析,存在明显滞后性^[1]。智慧水利要求基于实时流数据,利用机器学习、深度学习等算法,对大坝结构健康状态进行动态评估,识别微小异常,实现“早发现、早预警”。

1.3 智能预警与风险推演

需建立多级预警机制,结合气象预报、洪水演进模型、溃坝模拟等,对潜在风险进行时空推演,预测灾害影响范围与程度,为应急决策提供科学依据。

1.4 协同应急响应

打破部门壁垒,实现水利、应急、气象、交通、公安等多部门信息共享与指令联动,形成“监测—预警—调度—疏散—救援”闭环响应链条,提升应急处置效率。

1.5 全生命周期管理

从设计、施工、运行到退役,建立大坝数字档案,实现历史数据可追溯、运行状态可回溯、未来风险可预测,支撑科学养护与除险加固决策。

2 当前大坝安全监测与应急响应体系的主要问题

尽管我国大坝安全监测技术已有长足进步,但在与应急响应的衔接上仍存在明显短板:

2.1 数据孤岛现象严重

监测数据分散于不同系统(如安全监测系统、水文自动测报系统、视频监控系统等),格式不统一、接口不开放,难以实现跨平台融合分析。应急管理部门往往无

法及时获取关键监测数据。

2.2 预警阈值静态化

多数大坝仍采用固定阈值（如位移 > 10mm）触发预警，未考虑工况变化（如高水位、强降雨、地震）对结构响应的影响，导致误报率高或漏报风险大。

2.3 应急响应机制割裂

监测单位负责数据采集与初步分析，应急管理部门负责预案启动与资源调度，两者缺乏有效协同机制。从发现异常到启动应急响应，流程繁琐、耗时较长。

2.4 缺乏情景推演能力

现有系统多聚焦于“是否超限”，缺乏对“如果继续恶化会怎样”的推演能力。无法回答“溃坝可能性多大？”“洪水几小时到达下游某镇？”等关键问题。

2.5 人员依赖性强

异常识别、风险判断高度依赖专家经验，自动化、智能化水平不足，难以应对海量数据与突发复杂场景。

3 大坝安全监测与应急响应一体化框架设计

针对上述问题，亟需构建一个以数据贯通、智能驱动、流程闭环为核心特征的一体化框架，实现从“被动响应”到“主动防御”的根本转变。

3.1 框架总体架构

本文提出“监测—评估—预警—响应”四位一体的一体化框架。该框架以多源感知为基础，以数字平台为中枢，以智能算法为引擎，以协同机制为保障。在感知层，通过布设多样化传感器实现全要素实时采集；在传输层，依托5G、水利专网等高速通道确保数据低延时回传；在平台层，构建统一的大坝安全数字孪生平台，集成数据中台、模型中台与AI中台，支撑上层应用；在应用层，涵盖智能监测评估、动态预警、情景推演、指挥调度四大核心功能；在保障层，则通过标准规范、安全体系与运维机制确保系统长效运行。整个架构强调纵向贯通、横向协同，形成一个有机整体。

3.2 核心功能模块

一体化框架的有效运行依赖于若干关键功能模块的深度集成。一是多源异构数据融合中心，它通过建立统一的数据模型与接口标准，将来自不同系统的原始数据进行清洗、对齐、融合，形成结构化、时空一致的“一张图”数据底板，为后续分析提供高质量输入。二是大坝健康状态智能评估模型，该模型融合物理机理与数据驱动方法，不仅能识别单点异常，更能揭示多测点间的关联异常，实现对结构整体性能的综合评判^[2]。三是动态阈值预警机制，它摒弃固定阈值，转而根据实时工况自适应调整预警边界，显著提升预警的准确性与灵敏度。

四是数字孪生应急推演系统，通过在虚拟空间中高保真复现大坝及其环境，支持对不同险情场景下的灾害演化过程进行可视化模拟，为预案制定与演练提供科学依据。五是应急联动指挥平台，它打通与国家及地方应急指挥系统的对接，实现告警信息自动推送、应急预案智能匹配、应急资源一键调度，确保响应行动高效有序。

4 关键技术路径

实现上述一体化框架，需突破若干关键技术瓶颈。

4.1 多源数据融合与边缘计算

面对海量、高频、异构的监测数据，单纯依赖中心云平台处理将面临带宽压力与响应延迟问题。因此，应在坝区部署边缘计算节点，在数据源头进行初步处理，如噪声滤除、数据压缩、异常初筛等，仅将关键特征或告警事件上传至中心平台。这不仅减轻了网络负载，也提升了本地响应速度。同时，为解决跨坝群数据共享中的隐私顾虑，可引入联邦学习技术，在不交换原始数据的前提下，协同训练全局模型，实现知识迁移与风险共治。

4.2 基于深度学习的异常检测

传统阈值法难以应对复杂、隐蔽的复合型隐患。深度学习为此提供了新思路。通过构建自编码器或图神经网络模型，系统可学习正常工况下多测点数据之间的内在关联模式。当实际输入数据显著偏离该模式时，即判定为异常^[3]。这种方法不依赖预设阈值，能够自动发现未知类型的异常行为，尤其适用于识别缓慢发展的渗漏通道或内部结构损伤等早期征兆。

4.3 数字孪生建模与仿真

数字孪生是实现虚实互动的核心载体。利用BIM技术构建大坝精细三维模型，结合GIS整合流域地理信息，并通过IoT实时注入监测数据，形成一个动态演化的数字映像。在此基础上，集成水文、水动力、结构力学等专业模型，可对洪水演进、溃坝过程、抢险效果等进行高精度仿真。管理者可在虚拟环境中反复推演不同处置方案，优化决策，极大提升应急准备的科学性与实战性。

4.4 智能应急决策支持

在应急状态下，时间就是生命。智能决策支持系统通过强化学习等AI技术，以“最小化人员伤亡与经济损失”为目标，自动搜索最优应急策略组合，如最佳泄洪流量、最短疏散路径、最优物资投放点等。同时，结合自然语言处理技术，系统可自动生成应急简报、语音播报指令，甚至支持语音交互调度，大幅降低操作复杂度，提升指挥效率。

4.5 区块链赋能数据可信共享

在多部门协同场景下，数据的真实性与可追溯性至

关重要。区块链技术以其去中心化、不可篡改的特性，可被用于记录关键监测数据的采集时间、来源设备、操作日志等信息^[4]。一旦发生争议或事故调查，这些链上记录可作为权威证据，有效解决数据篡改、责任不清等问题，增强各方对共享数据的信任度，为跨部门协作奠定制度基础。

5 工程应用案例：某大型水库一体化系统实践

5.1 工程概况

某大型水库位于长江流域，总库容15亿立方米，大坝为混凝土重力坝，坝高120米。其下游30公里范围内分布有县级市及重要工业园区，安全责任重大。为提升风险防控能力，该水库于2023年启动智慧大坝安全一体化系统建设。

5.2 系统建设内容

项目在原有监测基础上，新增GNSS位移监测站12个、分布式光纤渗流监测系统覆盖关键坝段，并部署30路具备AI识别能力的高清视频摄像头。同时，构建了大坝安全数字孪生平台，不仅整合内部监测数据，还接入了区域气象雷达、水文站网、地质灾害监测点等外部信息源。平台内嵌了5类智能评估模型和8种典型应急推演场景，并与省级应急管理厅指挥系统实现API级对接，确保信息实时互通。

5.3 应用成效

在2024年汛期一次持续强降雨过程中（72小时累计降雨达300毫米），该系统展现出卓越的实战能力。系统首先通过渗压计发现坝踵区域渗压异常升高，同时视频AI识别出局部渗水迹象；LSTM时序模型随即预测未来24小时内渗流量将突破警戒线，自动将大坝健康状态由“正常”下调为“关注”；平台据此动态提升预警等级至黄色，并同步推送告警至水库管理单位及市县应急管理部门；数字孪生系统进一步推演显示，若降雨持续，48小时后可能发生管涌，洪水波约2小时可达下游镇区；指挥平台立即自动启动Ⅲ级应急响应，调度附近抢险队伍、通知转移高风险区群众、并开启备用泄洪道进行预泄。得益于这一系列快速、精准、协同的行动，险情在萌芽阶段得到有效控制，未造成人员伤亡，直接经济损失较传统模式降低约80%。该案例充分验证了一体化体系在提升大坝本质安全水平方面的巨大潜力。

6 挑战与展望

尽管一体化体系展现出广阔前景，其全面推广仍面临多重挑战。当前，行业尚缺乏统一的数据接口、模型评价与系统集成标准，导致不同厂商系统难以互联互通；现有智能模型多针对特定坝型或工况定制，泛化能力不足，难以大规模复制；高度联网的系统也带来了新的网络安全风险，需构建纵深防御体系；此外，既精通水利工程又掌握人工智能技术的复合型人才严重短缺，制约了技术创新与落地应用。面向未来，应着力推进国家级大坝安全智能云平台建设，实现跨流域风险联防联控；发展可解释人工智能（XAI）技术，提升模型决策的透明度与可信度；探索“平急结合”机制，将日常监测数据用于常态化应急能力评估；同时，加快相关立法进程，明确数据权属、共享义务与应急响应中的法律责任，为体系长效运行提供制度保障。

7 结语

在智慧水利战略引领下，大坝安全监测与应急响应一体化已成为提升国家水安全保障能力的关键路径。本文提出的“监测—评估—预警—响应”一体化框架，通过多源数据融合、智能算法赋能、数字孪生支撑与应急机制创新，有效破解了传统体系中的割裂与滞后问题。工程实践表明，该体系能够显著提升大坝风险早期识别能力、预警精准度与应急处置效率。未来需进一步完善技术标准、强化模型泛化、筑牢安全防线，推动大坝安全管理从“信息化”迈向“智能化”新阶段，为构建韧性水利基础设施体系提供坚实支撑。

参考文献

- [1]周武东.智慧水利背景下水库大坝安全监测数据挖掘与预警模型构建[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(四).墨江哈尼族自治县通镇农业农村发展服务中心,2025:222-226.
- [2]徐效哈.水利工程大坝的安全监测技术实践分析[J].工程建设与设计,2025,(18):88-90.
- [3]李亚峰.智能监测技术在水利大坝安全预警系统中的应用与创新研究[J].中国水运,2025,(10):40-42.
- [4]赵鹏亮,李鑫.水利工程大坝安全监测技术研究与应用[C]//江西省工程师联合会.第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(四).黄河万家寨水利枢纽有限公司,2025:653-656.