

水利工程安全运行风险评估与智能化预警机制研究

赵亚南¹ 王玉波² 宗娜¹ 刘彩侠² 咸秋爽³

1 徐州市水利工程运行管理中心, 江苏徐州, 221000;

2 徐州市南水北调工程管理中心, 江苏徐州, 221008;

3 徐州市河湖管理中心, 江苏徐州, 221000;

摘要: 水利工程作为国家基础设施的核心组成部分, 其安全运行直接关系到流域内人民群众的生命财产安全、生态环境稳定及社会经济的可持续发展。随着极端天气事件频发与工程服役年限增长, 传统风险管控模式已难以适应复杂多变的安全形势。本文基于水利工程安全运行的核心需求, 系统分析风险评估的关键指标与方法, 深入探讨融合物联网、大数据、人工智能等技术的智能化预警机制构建路径, 结合实际案例验证机制的可行性与有效性, 为提升水利工程安全管控水平提供理论支撑与实践参考。

关键词: 水利工程; 安全运行; 风险评估

DOI: 10.69979/3060-8767.26.01.031

引言

水利工程在防洪减灾、水资源调配等领域作用不可替代, 像三峡、南水北调等项目是保障国家水安全的战略基石。但水利工程建设周期长、服役环境复杂、影响范围广, 长期运行中易受自然环境变化、工程结构老化等因素影响, 面临结构失稳、功能衰退等安全风险。传统安全管理以人工巡检、定期监测为主, 存在数据采集滞后等弊端, 难以满足安全管控需求。所以, 构建科学的风险评估体系与高效的智能化预警机制, 实现对水利工程安全风险的动态感知、精准评估与及时预警, 是当前核心研究课题, 对推动水利行业转型意义重大。

1 水利工程安全运行风险评估体系构建

1.1 风险源系统识别

水利工程安全风险源具有多元性与复杂性, 需从工程自身、自然环境、人为因素三个维度进行全面识别。工程自身因素包括结构完整性(如堤坝裂缝、混凝土碳化)、设备运行状态(如闸门启闭系统故障、监测设备失效)及材料性能衰减(如钢筋锈蚀、防渗体老化);自然环境因素涵盖气象水文灾害(暴雨、洪水、干旱)、地质灾害(滑坡、泥石流、地震)及生态环境变化(水土流失、水体污染);人为因素涉及设计缺陷、施工质量不达标、运维管理疏漏及非法采砂等破坏行为。

通过文献研究、现场调研、专家访谈及事故案例分析等方法, 建立风险源清单, 明确各类风险的表现形式、影响范围及诱发条件, 为指标体系构建提供基础支撑。例如, 针对土石坝工程, 重点识别坝体渗漏、坝坡稳定、

溢洪道堵塞等核心风险源; 针对引水渠道, 侧重关注渠道冲刷、衬砌破损、边坡滑塌等风险问题。

1.2 风险评估指标体系构建

基于风险源识别结果, 遵循系统性、层次性、可操作性及动态性原则, 构建多维度风险评估指标体系。指标体系分为目标层、准则层、指标层三个层次, 目标层为水利工程安全运行风险等级, 准则层涵盖工程结构安全运行环境安全运维管理水平三个核心维度, 指标层则细化为具体可量化或可定性的指标。

工程结构安全准则层包括: 坝体沉降量、坝体水平位移、渗流量、混凝土强度、闸门完好率等指标; 运行环境安全准则层包括: 最大洪峰流量、降雨量、地质灾害风险等级、水质达标率等指标; 运维管理水平准则层包括: 巡检频率、人员专业素养、应急预案完善度、设备维护记录完整性等指标。对于难以量化的指标(如人员专业素养), 采用模糊综合评价法进行定性量化处理, 确保指标体系的科学性与实用性。

通过层次分析法(AHP)确定各指标权重, 结合专家打分与熵权法修正, 避免主观因素影响, 提高权重分配的客观性。例如, 对于水库工程, 坝体渗流量、最大洪峰流量等核心指标权重占比不低于20%, 凸显关键风险因素的影响。

1.3 风险评估模型应用

结合水利工程风险特点, 选择适宜的评估模型进行风险等级判定, 常用方法包括模糊综合评价法、物元可拓法、神经网络法及支持向量机(SVM)等。模糊综合

评价法适用于指标模糊性强的场景,通过建立模糊评判矩阵,实现对风险等级的综合判定;物元可拓法能够有效处理矛盾问题,明确工程安全状态的可拓性与转化条件;神经网络法与支持向量机则基于数据驱动,适用于海量监测数据的风险评估,具有较强的非线性拟合能力。

以某中型水库为例,采用层次分析法+模糊综合评价法构建评估模型,将风险等级划分为安全(I级)、较安全(II级)、一般风险(III级)、较高风险(IV级)、极高风险(V级)五个等级。通过采集水库近5年的监测数据与运维记录,代入模型计算得出风险等级为III级,核心风险点为坝体局部渗漏与溢洪道设备老化,为后续预警与整改提供明确方向。

2 水利工程安全运行智能化预警机制构建

2.1 智能化预警机制的核心架构

智能化预警机制采用感知层-传输层-数据层-应用层的四层架构,各层协同工作,实现从数据采集到预警发布的全流程智能化。

感知层是数据采集的核心,通过部署物联网监测设备,实现对工程结构、运行环境及设备状态的全面感知。具体包括:在坝体、边坡等关键部位安装位移计、渗压计、应变计等传感器,监测结构变形与应力状态;在流域内布设雨量计、水位计、水文监测站,实时采集气象水文数据;通过视频监控、无人机巡检等技术,实现对工程外观及周边环境的可视化监测。同时,引入北斗定位技术,提升位移监测的精度与可靠性,确保数据采集的实时性与准确性。

传输层采用有线+无线的混合传输模式,保障数据的稳定传输。对于固定监测点数据,通过光纤网络进行高速传输;对于移动监测设备(如无人机)及偏远区域监测点,采用5G、LoRa等无线通信技术,突破地理环境限制。同时,建立数据传输加密机制,防止数据泄露与篡改,保障数据安全。

数据层是预警机制的核心支撑,通过构建大数据管理平台,实现对多源数据的整合、存储与处理。平台采用分布式存储技术,存储监测数据、运维记录、历史事故案例、设计资料等多类型数据;通过数据清洗、融合与标准化处理,消除数据冗余与误差;利用数据挖掘技术,挖掘数据间的关联关系,为风险分析提供数据支撑。例如,通过分析降雨量与坝体渗流量的关联数据,建立两者的量化关系模型,为暴雨引发的渗漏风险预警提供依据。

应用层是预警机制的核心应用环节,基于数据层提供的数据支撑,实现风险分析、预警发布、应急处置等功能。通过构建人工智能预警模型,实时分析监测数据

与风险评估结果,当指标超过阈值时,自动触发预警;根据风险等级,通过短信、APP、预警终端等多渠道向管理人员发布预警信息,明确预警等级、风险位置及处置建议;同时,整合应急预案与资源信息,为应急处置提供决策支持,实现预警-处置的无缝衔接。

2.2 智能化预警模型构建

预警模型是智能化预警机制的核心,基于风险评估指标体系,融合人工智能技术,实现对风险的精准预测与预警。常用的预警模型包括阈值预警模型、趋势预测模型及智能诊断模型,三者协同工作,提升预警的全面性与精准性。

阈值预警模型是基础预警手段,根据风险评估指标的安全范围,设定各级预警阈值(如正常阈值、警戒阈值、危险阈值)。当监测数据超过对应阈值时,系统自动触发相应等级的预警。例如,设定坝体水平位移警戒阈值为50mm,当监测数据达到55mm时,触发黄色预警;达到70mm时,触发红色预警。阈值的设定需结合工程设计标准、历史数据及专家经验,确保阈值的科学性与合理性。

趋势预测模型基于历史监测数据,采用时间序列分析、神经网络、LSTM(长短期记忆网络)等算法,预测指标的变化趋势,实现对潜在风险的提前预警。例如,利用LSTM模型对水库水位、降雨量等时序数据进行训练,预测未来72小时的水位变化趋势,若预测水位将超过警戒水位,提前发布预警信息,为防汛调度争取时间。相较于传统阈值预警,趋势预测模型能够突破点对点的预警局限,实现面状的趋势性预警,提升预警的前瞻性。

智能诊断模型融合多源数据,采用深度学习、故障树分析等方法,实现对风险源的精准定位与原因诊断。例如,当监测到坝体渗流量异常增大时,模型结合坝体位移、降雨量、地质数据等多源信息,通过深度学习算法诊断异常原因,判断是由地质结构变化、防渗体破损还是降雨入渗导致,并给出针对性的处置建议,为管理人员提供精准的决策支持。

2.3 预警信息发布与应急联动机制

预警信息的及时、精准发布是保障预警效果的关键。建立分级分类、多渠道联动的预警信息发布机制,根据风险等级(一般、较重、严重、特别严重),发布相应级别的预警信息(蓝色、黄色、橙色、红色)。发布渠道包括水利部门内部办公系统、手机APP、短信平台、公共预警终端、电视、网络等,确保预警信息能够快速传递至相关管理人员与受影响群众。

同时，构建预警-处置-反馈的应急联动机制，明确各部门的职责分工，实现水利、应急、气象、交通等多部门的协同联动。当发布预警信息后，相关部门立即启动应急预案，开展隐患排查、人员转移、工程调度等应急处置工作；处置完成后，及时将结果反馈至预警平台，实现闭环管理。例如，当水库发布红色预警后，水利部门立即调度泄洪设施，应急部门组织下游群众转移，交通部门封闭危险路段，确保应急处置工作高效有序开展。

3 实践应用案例分析

3.1 系统建设内容

在感知层，部署各类监测设备共计 120 余套，包括位移计 25 套、渗压计 30 套、雨量计 15 套、水位计 10 套、视频监控 40 套，实现对坝体结构、气象水文、周边环境的全面监测；传输层采用光纤+5G 混合传输模式，确保数据实时传输；数据层构建大数据管理平台，整合监测数据、设计资料、运维记录等多源数据，总数据量达 500GB；应用层开发风险评估模块、智能预警模块、应急处置模块，实现全流程智能化管控。

3.2 风险评估与预警效果

系统运行后，通过风险评估模块对水库安全状态进行实时评估，2024 年汛期，系统监测到降雨量达 150mm/24h，坝体渗流量从正常的 5L/s 增至 25L/s，坝体水平位移达 48mm。结合风险评估模型计算，风险等级升至Ⅳ级（较高风险），系统立即触发黄色预警，通过短信、APP 等渠道向水库管理处及相关部门发布预警信息，明确风险点为坝体局部渗漏，建议立即开展隐患排查与应急处置。

管理人员根据预警信息，立即组织技术人员开展现场排查，发现坝体迎水坡存在 3 处裂缝，导致渗漏量增大。通过启动应急预案，采取黏土回填裂缝、加大泄洪量等措施，成功控制风险，避免事故扩大。此次预警从数据监测到处置完成仅用 2.5 小时，相较于传统人工巡检模式，预警时间提前 6 小时，处置效率提升 40%，充分体现了智能化预警机制的优势。

3.3 应用成效总结

该水库智能化预警系统运行以来，共发布预警信息 12 次，其中一般预警 7 次、较重预警 3 次、严重预警 2 次，均得到及时处置，未发生安全事故。系统的应用使水库安全巡检效率提升 60%，风险识别准确率达 92%，应急处置响应时间缩短 70%，有效降低了安全风险，保障了工程安全运行。同时，系统积累的监测数据与风险评估结果，为工程大修、加固改造提供了科学依据，降低了运维成本。

4 结论与展望

4.1 研究结论

本文基于水利工程安全运行的核心需求，构建了风险识别-指标构建-模型评估的完整风险评估体系，明确了工程结构、运行环境、运维管理三大核心准则层及具体指标，结合层次分析法与模糊综合评价法，实现了对水利工程安全风险的精准评估；在此基础上，融合物联网、大数据、人工智能等技术，构建了感知-传输-数据-应用四层架构的智能化预警机制，开发了阈值预警、趋势预测、智能诊断三类预警模型，建立了分级分类的预警信息发布与应急联动机制，实现了对安全风险的实时监测、智能预警与高效处置。通过实践案例验证，该风险评估体系与智能化预警机制能够有效提升水利工程安全管控水平，具有较强的实用性与可推广性。

4.2 未来展望

随着信息技术的不断发展，水利工程安全运行风险管控将向智慧化、精细化、协同化方向发展。未来研究可从三个方面展开：一是深化人工智能技术应用，结合数字孪生技术构建水利工程虚拟仿真模型，实现风险的可视化模拟与精准预测；二是拓展数据来源，融合卫星遥感、InSAR 等技术，实现对大范围流域水利工程的动态监测，提升风险识别的全面性；三是构建跨区域协同管控平台，打破行政壁垒，实现水利、应急、气象等多部门数据共享与协同处置，提升流域级水利工程安全管控能力。

水利工程安全运行是保障国家水安全的重要基石，构建科学的风险评估体系与高效的智能化预警机制，是推动水利行业高质量发展的必然要求。未来需进一步加强技术创新与实践应用，不断完善风险管控体系，为水利工程安全运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 张从飞. 人工智能赋能公路工程安全风险智能化预警机制的设计与构建[J]. 数码设计(电子版), 2024(4): 0127-0129.
- [2] 甘植友. 水利水电工程施工安全管理研究[J]. Water Conservancy & Electric Power Technology & Application, 2025, 7(13).
- [3] 曹凯峰. 水利工程中的洪水预警与防洪措施分析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023.

作者简介：赵亚南（1983-），男，江苏铜山，本科，研究方向为水利工程运行管理。