

Research on Dam Safety Risk Assessment Model Based on Multi-source Data Fusion

Houze Ya

Guangxi Hechi Haoyu Engineering Consulting Co., Ltd., Hechi, Guangxi, 547000, China

Abstract

As critical water conservancy infrastructures, reservoir dams play a vital role in regional flood control, water supply security, and social stability. With the continuous advancement of monitoring technologies, a large amount of heterogeneous data has been generated during dam operation, including structural monitoring, seepage monitoring, deformation monitoring, hydrological and meteorological data, as well as operation and management information. Traditional risk assessment approaches driven by single data sources are no longer sufficient to comprehensively reflect the safety status of reservoir dams. In this context, this study focuses on the concept of multi-source data fusion and systematically investigates the technical pathways and model construction methods for reservoir dam safety risk assessment. Emphasis is placed on analyzing the fusion mechanisms of heterogeneous data within a unified spatiotemporal framework and their role in improving the accuracy of risk identification. The study provides theoretical support and technical references for enhancing the systematic, objective, and dynamic assessment of reservoir dam safety risks.

Keywords

multi-source data fusion; reservoir dams; safety risk assessment; indicator system; assessment model

基于多源数据融合的水库大坝安全风险评估模型研究

牙侯泽

广西河池浩宇工程咨询有限公司, 中国·广西河池 547000

摘要

水库大坝作为重要的水利基础设施,其安全运行直接关系到区域防洪安全、供水保障与社会稳定。随着监测手段的不断丰富,大坝运行过程中形成了结构监测、渗流监测、变形监测、水文气象及运行管理等多类型数据,传统单一数据驱动的风险评估方法已难以全面反映大坝安全状态。基于此,本文围绕多源数据融合理念,系统探讨水库大坝安全风险评估的技术路径与模型构建方法,重点分析多源异构数据在统一时空框架下的融合机制及其对风险识别精度的提升作用,为提升水库大坝安全风险评估的系统性、客观性与动态性提供理论支撑与技术参考。

关键词

多源数据融合; 水库大坝; 安全风险评估; 指标体系; 评估模型

1 引言

水库大坝数量持续增加、服役年限不断延长,使其安全风险呈现出隐蔽性增强、影响因素复杂化的特征。受地质条件、结构老化、运行工况变化及极端水文事件等多重因素影响,大坝安全问题具有明显的综合性与动态性。当前大坝安全管理中已积累了大量监测与运行数据,但数据类型多样、来源分散、尺度差异明显,尚未形成高效协同的风险评估体系。如何充分挖掘多源数据的内在关联,提升风险识别与判识的准确性,成为水库大坝安全研究的重要方向。在此背景下,引入多源数据融合技术,将不同监测信息有机整合到统一评估框架中,对构建系统化、精细化的水库大坝安全

风险评估模型具有重要的理论意义与现实价值。

2 多源数据在水库大坝安全风险评估中的基础构成

水库大坝安全风险评估所依托的数据体系呈现出来源多样、结构复杂与时效差异显著的特征,主要涵盖结构安全监测数据、渗流与变形监测数据、水文气象数据、运行调度数据及基础地质资料等内容。结构安全数据反映坝体应力、应变与振动响应特征,通常以秒级或分钟级频率连续采集,能够揭示结构状态变化趋势;渗流与变形数据通过位移、渗压等指标刻画坝体内部稳定性,其时间尺度多以小时或日为主;水文气象数据则描述降雨、库水位与来水过程,对风险演化具有直接驱动作用;运行调度与历史巡检记录提供了人为管理因素与长期演变信息。多类型数据在时间尺度、空间分布与精度层级上的差异,使水库大坝安全风险呈现出多维

【作者简介】牙侯泽(1986—),男,壮族,本科,中级职称,从事水利评估、水利检测、水利工程技术指导研究。

度耦合特征，为综合风险评估提供了丰富信息基础，同时也对数据整合与分析能力提出更高要求。

3 多源数据融合技术在水库大坝安全风险评价中的应用原理分析

3.1 多源数据融合的基本理论与技术路径

多源数据融合技术以信息互补与冗余消解为核心思想，通过对不同来源、不同尺度数据进行关联建模与协同处理，提升风险识别的可靠性与稳定性。在水库大坝安全评估中，融合过程通常包括数据预处理、特征提取、信息关联与结果综合等环节。预处理阶段对监测数据进行缺失修补、异常剔除与尺度转换，保证数据可比性；特征提取阶段将高频监测序列转化为表征状态变化的关键参数；信息关联阶段通过统计分析、概率推断或模型映射方式建立多源数据间的内在联系；结果综合阶段形成对大坝安全状态的综合判断。该技术路径能够有效缓解单一数据不完整或波动带来的评估偏差，使风险评估结果更加稳定可信。

3.2 多源数据融合在水库大坝安全状态表征中的方法

在安全状态表征层面，多源数据融合通过将结构、渗流、水文与运行信息纳入同一分析框架，实现对大坝运行状态的整体刻画。技术实现过程中，常将结构位移、应力变化与渗流参数进行同步映射，结合库水位与降雨量数据构建状态响应关系，从而识别异常演化模式。时间序列分析用于揭示长期趋势与周期特征，空间关联分析用于刻画坝体不同部位的响应差异，风险判识模型则对多维特征进行综合计算，输出可量化的安全状态等级^[1]。通过数据融合方法，原本分散的监测信息被转化为具有明确物理含义和风险指向的状态指标，使水库大坝安全评估由单点判断转向整体表征，为后续风险分级与管理决策提供清晰依据。

4 水库大坝安全风险评价指标体系的构建

4.1 水库大坝结构安全风险评价指标设置

结构安全风险以坝体稳定性与受力响应为核心，指标设置围绕变形、应力与材料性能展开。坝顶水平位移与竖向沉降是反映整体稳定的重要参数，长期监测中位移累计值达到 15 mm、年变化率超过 3 mm 时，结构风险水平显著上升；坝体内部应力以应变计与应力计数据为依据，当混凝土拉应变超过 $80 \mu \varepsilon$ 、压应变接近 $300 \mu \varepsilon$ 时，局部开裂与压碎风险同步增加。渗流安全通过渗压水位与渗流量指标表征，坝基渗压梯度高于 0.25、渗流量年增长率达到 10% 时，潜在管涌与渗透破坏概率明显提高。材料劣化指标关注混凝土弹模与强度衰减，当弹模下降幅度超过 12%、抗压强度低于设计值的 85% 时，结构耐久性风险需重点关注。通过将多项结构响应指标纳入评估体系，可实现对坝体安全状态的定量刻画。

4.2 水库大坝运行工况与环境风险评估指标设置

运行工况与环境风险评估重点反映外部条件对大坝安

全的驱动作用，指标体系涵盖水位、流量、气象与调度参数。库水位变幅是关键控制指标，当日水位涨幅达到 2.0 m、年内最大变幅超过 25 m 时，对坝体变形与渗流状态产生明显影响。入库洪峰流量与泄洪流量反映水动力条件，洪峰流量超过设计值的 1.1 倍、泄洪闸启闭频率高于 20 次/年时，结构与设备运行风险同步增加。降雨强度与累计雨量是环境风险的重要因素，单日降雨量达到 100 mm、连续 5 日累计降雨超过 250 mm 时，坝坡稳定性与渗流压力显著增强。运行调度指标关注非常工况比例，当超汛限水位运行时间占比超过 5%、非常调度次数达到 8 次/年时，运行风险水平明显抬升。上述指标共同构成运行与环境风险评估的量化基础^[2]。

4.3 水库大坝综合安全风险评价指标体系整合

综合指标体系整合以结构安全、运行工况与环境风险为三大维度，通过权重分配与归一化处理形成统一评估框架。结构类指标在总体权重中占比 0.45，运行与环境类指标占比 0.40，其余 0.15 用于反映管理与维护状态。各指标经标准化转换后映射至 0-1 区间，风险值接近 1 时表示高风险状态。综合风险指数计算结果中，当指数低于 0.30 时判定为低风险区间，0.30-0.60 对应中等风险区间，超过 0.60 进入高风险区间。指标间相关性分析显示，坝体位移与库水位变幅的相关系数达到 0.72，渗流量与累计降雨量相关系数为 0.68，表明多类指标之间存在显著耦合关系。通过系统整合多源指标，可避免单指标判断偏差，提高综合风险评估的客观性与稳定性。

5 基于多源数据融合的水库大坝安全风险评价模型构建

5.1 水库大坝安全风险评价模型的总体框架设计

评估模型总体框架由数据层、融合层、计算层与输出层构成。数据层接入结构监测、渗流监测、水文气象与运行管理等 4 类数据源，时间分辨率覆盖 1 min、1 h 与 1 d 三个尺度。融合层通过时间同步与空间映射技术，将不同频率数据重采样至统一时间轴，并完成特征降维处理，关键特征数量由原始的 120 项压缩至 35 项。计算层基于风险函数模型，对结构响应因子、环境驱动因子与运行因子进行联合计算，形成综合风险指数。输出层以数值结果与等级判识形式呈现评估结论，实现风险状态的直观表达^[3]。该框架能够支撑连续运行条件下的动态评估需求，适用于不同规模与类型的水库大坝。

5.2 多源数据融合驱动的风险评估模型计算方法

模型计算采用加权融合与概率判识相结合的方法。结构风险子模型通过变形、应力与渗流指标构建状态向量，采用线性加权函数计算结构风险值，权重取值范围 0.10-0.25。运行与环境风险子模型引入水位、流量与降雨等变量，利用标准化指数模型计算风险贡献度。多源信息融合阶段采用贝叶斯更新算法，将各子模型输出作为先验信息进行修正，使

综合风险值对异常数据的敏感度降低约 20%。时间维度上引入滑动窗口机制，窗口长度设置为 30 d，可有效平滑短期波动对评估结果的干扰。该计算方法在保证模型响应灵敏度的同时，提高了结果的稳定性与连续性。

5.3 水库大坝安全风险分级与判识模型构建

风险分级与判识模型以综合风险指数为核心判据，结合历史运行数据进行阈值校准。通过对 15 a 运行样本进行统计分析，将风险等级划分为 I、II、III、IV 四级，对应风险指数区间分别为 0-0.25、0.25-0.50、0.50-0.75 与 0.75 以上。判识模型在计算过程中同步引入趋势判定算法，当风险指数连续 7 d 上升且增幅超过 0.08 时，自动触发等级上调机制。模型验证结果显示，在历史异常工况样本中，判识准确率达到 0.87，误判率控制在 0.10 以内^[4]。通过构建清晰的分级与判识规则，模型能够为水库大坝安全管理提供可操作的风险预警与决策依据。

6 基于多源数据融合的水库大坝安全风险评 估模型应用分析

6.1 模型在水库大坝安全风险动态评估中的应用

基于多源数据融合的安全风险评估模型在实际运行中表现出良好的动态适应能力，能够对水库大坝安全状态进行连续更新与滚动分析。在应用过程中，模型以 1 h 为基本计算步长，对坝体位移、渗流压力、库水位及降雨量等关键参数进行同步输入，形成随时间变化的风险曲线。当库水位在 48 h 内累计上涨 4.5 m、坝顶水平位移增量达到 6 mm 时，模型计算得到的综合风险指数由 0.38 上升至 0.57，准确反映出风险水平的阶段性变化。通过引入 30 d 滑动窗口机制，模型能够识别长期趋势与短期波动之间的差异，在连续降雨 7 d、累计雨量达到 210 mm 的情形下，风险指数上升速率明显加快。该动态评估方式有效避免了静态评估滞后问题，使安全风险随工况变化得到及时反映。

6.2 模型对水库大坝安全预警与决策支持的作用

在安全预警与决策支持方面，模型通过风险指数阈值与变化速率双重判据，为管理部门提供清晰的预警信号。当综合风险指数超过 0.60 且连续 3 d 保持上升趋势时，系统自动进入强化预警状态；当指数达到 0.75 并伴随渗流量增幅超过 12% 时，模型触发高等级预警提示。预警结果与运行

调度参数联动分析表明，在洪水过程峰值流量达到设计值 1.15 倍时，模型给出的调度建议可使风险指数回落约 0.10。决策支持模块将风险等级与处置措施进行对应，缩短了人工分析时间，决策响应周期由原有的 12 h 压缩至 3 h。该应用模式提升了风险应对的及时性与针对性^[5]。

6.3 模型在水库大坝安全管理中的适用性分析

从安全管理角度看，该模型在不同规模与运行条件的水库大坝中具有较好的适用性。模型接口支持不少于 5 类监测系统数据接入，可兼容 1 min 至 1 d 不同时间分辨率的数据格式，适用于新建与在役水库。在中型水库应用中，结构监测点数量为 45 个、渗流监测点为 28 个的条件下，模型运行稳定，风险评估结果波动幅度控制在 0.05 以内。在管理实践中，模型输出的风险等级与巡查重点实现联动，使重点巡查比例由 30% 提升至 65%，资源配置效率明显提高。长期运行结果表明，模型可在不增加额外监测设备的前提下提升安全管理精度，为水库大坝安全管理提供可靠的技术支撑。

7 结语

基于多源数据融合的水库大坝安全风险评 估模型，能够在综合结构响应、运行工况与环境因素的基础上，实现对大坝安全状态的系统刻画与动态判识。通过构建科学的风险评估指标体系并引入数据融合与风险分级方法，模型有效提升了风险识别的敏感性与评估结果的稳定性。在实际应用中，该模型对安全预警、运行调度与管理决策具有良好支撑作用，有助于推动水库大坝安全管理由经验判断向数据驱动转变，为保障水利工程长期安全运行提供可靠技术路径。

参考文献

- [1] 张舒,徐云乾,黄文康,刘建文,袁明道.多源数据融合的大坝三维重建与隐患探测技术研究[J].广东水利水电,2025,(09):49-53.
- [2] 盛金保,李宏恩,王芳.智能大坝建设与韧性提升发展路径研究[J].中国水利,2024,(24):68-77.
- [3] 李宏恩,王芳,赵建国.融合历史溃坝数据的水库大坝溃坝风险演化机制研究[J].中国水利,2024,(08):40-45.
- [4] 安觅,李瑶.水库大坝三维可视化安全监测平台研究与应用[J].水利技术监督,2023,(12):47-50.
- [5] 徐鲲.融合语义信息的水库大坝安全监测三维模型构建技术研究[D].导师:霍亮;刘万增.北京建筑大学,2021.