

水库大坝运行管理中的风险识别与应对策略研究

李飞跃

绩溪县农业农村局，安徽省宣城市，245300；

摘要：针对水库大坝在长期运行过程中面临的结构安全、水力条件变化及设备运行可靠性等多方面风险问题，本文以某山区水库工程为研究对象，对大坝运行管理中的风险识别方法与应对策略进行了系统分析。通过梳理工程结构风险、水力学风险及设施设备运行风险等主要类型，构建了基于监测数据分析、安全评价模型与信息化监测系统的风险识别技术体系，并提出分级监测预警机制、规范化运维管理措施及应急调度体系等综合管理策略。研究揭示了监测数据分析与信息化管理在大坝运行风险识别中的关键作用，提出了以“监测—评估—预警—调度”为核心的风险管控思路。研究成果为提升水库大坝运行安全管理水平和完善水利工程风险防控体系提供了技术参考。

关键词：水库大坝运行管理；风险识别；安全评价模型；监测预警机制；应急调度

DOI：10.69979/3060-8767.26.04.055

引言

水库大坝是重要的水利基础设施，在防洪减灾、供水保障及生态调节等方面发挥着关键作用。然而，随着工程服役年限的增加以及极端气候事件的频发，大坝运行环境日益复杂，工程结构安全、水力条件变化及机电设备运行可靠性等问题逐渐凸显。特别是在山区中小型水库中，由于集雨面积小、汇流速度快和调度条件复杂，大坝运行风险更具突发性和不确定性^[1]。因此，如何通过科学方法识别潜在风险并建立有效的运行管理策略，成为保障水库安全运行的重要课题。基于此，本文结合某水库工程运行特点，对大坝运行风险类型进行系统分析，并通过监测数据分析、安全评价模型及信息化监测技术构建风险识别方法体系，同时提出监测预警、运维管理及应急调度等运行管理策略，以期水库大坝安全管理与风险防控提供技术参考。

1 水库大坝运行管理风险类型分析

某县地处山区，水系发达，区域内水库多为山谷型水库，集雨面积小但汇流速度快，运行环境复杂。大坝运行风险主要可划分为工程结构风险、水力学风险及设施设备运行风险三大类。工程结构风险主要表现为坝体材料性能退化、坝基渗漏及不均匀沉降，对于土石坝而言，还涉及坝坡失稳与渗透破坏风险，混凝土坝则多表现为裂缝扩展与层间抗滑稳定性降低。长期受到库水位周期性涨落与环境温度变化的交替作用，坝体内部应力状态会发生改变，导致结构损伤累积。水力学风险主要关联于泄洪能力的适应性，部分早期建设的水库泄洪设施设计标准偏低，在遭遇特大暴雨洪水时，库水位可能

迅速超过设计洪水位，导致漫坝风险增加，同时高速水流对消能防冲设施的冲刷破坏亦不容忽视^[2]。设施设备运行风险主要集中在金属结构与机电设备方面，如闸门启闭机锈蚀卡阻、备用电源启动失败或自动化控制系统信号传输中断，直接影响洪水调度指令的执行效率，这些风险因素相互交织，任何单一环节的失效都可能引发系统性安全风险。

2 大坝运行风险识别技术方法

2.1 监测数据分析法

利用自动化监测设备采集的时间序列数据是识别大坝性态异常最核心的技术手段^[3]。在实际运行中，大坝的变形、渗流等效应量受到库水位、环境温度及运行时间等环境量的综合影响，单纯观察观测值的绝对大小难以准确判断工程状态。因此，常采用多元回归分析方法构建统计模型，将复杂的物理现象简化为数学关系，以定量分离各影响因子对大坝性态变化的影响程度。通过建立效应量与环境量之间的函数关系，可以计算出理论上的“正常值”，并以此作为基准来甄别实测数据的异常波动。简化后的位移统计回归模型可表示为：

$$d = b_0 + b_1 H + b_2 T + b_3 q \quad (1)$$

式中， δ 代表大坝测点的位移估算值（mm）； b_0 为常数项； H 为水压因子，反映库水位变化产生的弹性变形； T 为温度因子，反映坝体与环境热交换引起的热胀冷缩效应； θ 为时效因子，反映坝体随时间产生的徐变或不可逆变形趋势； b_1, b_2, b_3 分别为对应的回归系数。

在某水库的实际应用中，管理人员选取大坝最大断

面的坝顶水平位移作为分析对象。通过导入近5年的历史监测数据进行模型训练，得到的复相关系数达到0.982，剩余标准差仅为0.45 mm，验证了模型的有效性。在监测过程中，若某一时刻实测库水位为168.55 m，模型计算出的理论位移值为14.28 mm，而现场传感器实测值为14.65 mm，两者差值0.37 mm在允许误差范围内，表明大坝处于弹性工作状态。反之，如果时效分量系数 b_3 在连续多个分析周期内呈现单调增长，或者实测值与计算值的残差序列持续偏离3倍标准差 (3σ)，则提示坝体可能存在内部损伤累积或基础滑移风险，需立即启动针对性的结构复核与现场勘查。

表1 大坝安全综合评价指标体系权重分配示例表

一级指标	二级指标	权重系数	评分依据
工程结构	坝体变形	0.285	监测数据收敛性及裂缝开合度
	坝坡稳定	0.215	抗滑稳定安全系数计算值
渗流安全	渗流量	0.185	实测流量与设计值比对
	渗透坡降	0.125	测压管水位反算的逸出坡降
金属结构	闸门启闭	0.115	启闭力测试及锈蚀程度
运行管理	规章制度	0.075	操作规程执行及巡查记录完整性

如表1所示，通过确立各层级指标的权重系数，可以量化不同风险源对整体安全的影响程度。例如，工程结构与渗流安全在评价体系中占据主导地位，权重总和超过0.8，这与实体工程安全直接决定大坝生存状态的逻辑相符。通过模糊矩阵运算，将各底层指标的隶属度向量与权重向量合成，最终得出一个处于0至100之间的安全评分或“安全、较安全、不安全”的等级结论。这种评价模型能够屏蔽单一数据波动带来的误判，为大坝安全鉴定与除险加固决策提供科学依据。

2.3 信息化监测系统

现代化的风险识别离不开高密度、高精度的信息化监测系统支撑^[5]。在水库大坝升级改造中，部署了集数据自动采集、无线传输、云端存储与智能分析于一体的监测平台。前端感知层包括植入坝体的振弦式渗压计、布设于坝顶及坝坡的GNSS表面位移监测站、量水堰处的磁致伸缩液计以及雨量筒等传感器。这些设备以设定频率（如汛期每15 min一次，非汛期每4 h一次）自动采集数据，并通过LoRa或4G/5G网络将数据包发送至管理中心服务器。

系统平台具备强大的数据可视化与预处理功能，能够自动剔除因电磁干扰或设备故障产生的粗差数据。系统集成地理信息系统(GIS)与建筑信息模型(BIM)，将各监测点的实时数据映射到大坝的三维数字孪生模型上，管理人员可直观查看坝体内部浸润线的动态变化

2.2 安全评价模型

单一测点的监测数据分析难以全面反映大坝系统的整体安全状况，因此需要构建多层次、多指标的综合安全评价模型^[4]。该模型通常基于层次分析法(AHP)与模糊综合评价理论，将影响大坝安全的结构完整性、渗流安全性、金属结构可靠性以及运行管理规范性等因素分解为具体的底层指标。在评价过程中，结合定量的监测数据（如渗流量是否超标、位移量是否收敛）与定性的现场巡视检查结果（如坝面是否有新增裂缝、排水孔是否堵塞），对各项指标进行标准化赋分。见表1。

过程。例如，当库水位从134.55 m快速上升至142.80 m时，系统能够实时生成渗流压力分布云图，并通过比对历史同期数据，自动识别出渗流滞后时间是否异常。此外，系统还融合了视频监控模块，利用AI图像识别技术对坝顶、坝脚等重点区域进行全天候监控，能够自动识别人员违规入侵、坝坡滑塌或漂浮物堆积等异常情况，实现由传统人工巡查向智能化监测的转变，极大提升了风险识别的时效性与覆盖面。

3 风险应对与运行管理策略

3.1 监测预警机制

建立分级分类的监测预警机制是实现风险主动防控的关键。预警阈值的设定需依据大坝设计文件、历史监测极值及相关规范要求，通常设置为黄色（关注）、橙色（警告）、红色（紧急）三个等级。例如，针对渗流量指标，当实测值达到历史最大值的1.05倍时触发黄色预警，提示加强观测；达到1.15倍时触发橙色预警，需分析原因；达到设计允许值或出现浑浊渗水时触发红色预警，必须立即采取工程措施。预警信号生成后，系统会自动通过短信、APP推送及声光报警器向值班人员及行政责任人发送警报信息。为避免传感器故障导致的误报，机制中应包含数据置信度校验流程，结合多测点数据关联性进行逻辑判断。例如，若某单一测点位移突变但周边测点及环境量无明显变化，则判定为设备故障概率较大。预警机制还应与气象预报数据联动，当预测

未来 24 h 降雨量超过 100.5 mm 时, 系统自动提升预警级别, 提前预置抢险力量, 实现从“事后报警”向“事前预警”的跨越。

3.2 运维管理措施

规范化的运维管理是降低人为风险、延长工程寿命的基础。日常巡查应严格执行“五落实”原则, 涵盖坝顶、上下游坝坡、溢洪道、输水涵管及管理设施等部位, 特别是在暴雨后、高水位运行期及地震后, 需增加特种巡查频次。针对金属结构设备, 需制定全生命周期的维护计划, 包括定期对闸门止水橡胶进行更换、对启闭机钢丝绳进行润滑保养(如每年枯水期至少进行 2 次全面注油)、对备用柴油发电机组进行空载与带载试运行(每月不少于 1 次, 每次运行时长不低于 30 min), 确保在断电工况下设备能随时投入使用。对于大坝坝体, 应定期清除坝坡杂草与溢洪道内的漂浮物, 保持排水棱体与

排水沟畅通, 防止排水不畅导致浸润线抬高。此外, 应建立完善的技术档案管理制度, 将历年的监测数据、维修记录、巡查日志等纸质资料数字化归档, 形成可追溯的工程运行档案。通过标准化的操作规程约束管理人员行为, 避免因误操作导致的运行事故, 确保各项工程设施始终处于良好技术状态。

3.3 应急调度体系

科学的应急调度体系是应对超标准洪水及突发工程险情的最后一道防线。水库运行管理需依据经批复的汛期调度运用计划, 动态调整水库运行水位。在汛期, 严格限制汛限水位, 预留足够的防洪库容。当遭遇突发暴雨或上游来水激增时, 需启动应急调度预案, 遵循“安全第一、统筹兼顾”的原则, 在保证大坝主体安全的前提下, 尽可能减小下游淹没损失。见表 2。

表 2 水库大坝应急调度决策逻辑表

库水位区间	调度工况描述	闸门操作策略	调度目标
汛限水位以下	正常蓄水/供水	关闭溢洪道闸门, 通过输水管调节	蓄水保供, 维持生态流量
汛限~防洪高水位	常规防洪调度	按入库流量与下游安全泄量开启闸门	削峰错峰, 控制下泄流量
防洪高水位~校核位	非常规防洪调度	逐步全开工作闸门, 启用非常溢洪道	确保护坝安全, 防止漫顶
超校核水位	抢险调度	全开所有泄水设施, 发布下游撤离警报	尽最大能力泄洪, 防止大坝发生溃坝风险

如表 2 所示, 应急调度需建立在精准的水雨情测报基础上。当库水位接近防洪高水位(如 156.80 m)且入库流量持续增加时, 应明确闸门开启孔数、开启顺序及开启高度等调度指令, 避免因开启速度过快造成下游河道水位陡涨。同时, 建立与上下游水库及地方防指的联动机制, 信息共享, 协同调度。在遭遇可能导致溃坝的极端险情时, 应立即启动下游群众转移方案, 并通过广播、短信等渠道发布紧急避险通知, 最大程度保障人民生命财产安全。

4 结语

研究表明, 水库大坝运行风险具有结构性、多源性及动态变化等特点, 需要通过多层次技术手段进行系统识别与综合管控。通过对工程结构风险、水力学风险及设施设备运行风险的分析, 可明确大坝运行过程中主要风险来源。基于监测数据分析、安全评价模型及信息化监测系统构建的风险识别体系, 能够实现对大坝性态变化的动态监测与综合评估。同时, 通过建立分级监测预警机制、规范化运维管理措施及科学的应急调度体系, 可有效提高大坝运行管理的主动防控能力。研究结果表明, 将监测分析、风险评价与运行管理措施相结合, 是

提升水库大坝安全运行水平的重要途径。未来应进一步加强信息化监测技术应用与多源数据综合分析研究, 不断完善大坝运行风险管理体系。

参考文献

- [1] 刘辉军. 水电站大坝在线监测管理平台的应用研究[J]. 中国信息界, 2025, (12): 18-20.
- [2] 谭柏贤. 智能化监测技术在水库大坝安全防护中的应用研究[J]. 水上安全, 2025, (23): 122-124.
- [3] 朱伟达. 鸡心石水库雨水情测报和大坝安全监测系统建设研究[J]. 山西水利科技, 2025, (04): 34-37+45.
- [4] 谢敏, 程东, 刘田玉, 等. 现代化水库运行管理矩阵防洪“四预”措施建设[J]. 人民黄河, 2025, 47(12): 158-163.
- [5] 苏植生. 马岭水库安全运行评价及管理策略[J]. 云南水力发电, 2024, 40(11): 169-173.

作者简介: 李飞跃(1997.04-), 男, 汉族, 籍贯: 安徽绩溪, 学历: 本科, 职称: 助理工程师, 研究方向: 水库运行管理或农村规模水厂建设。