

水库大坝安全监测与运行风险动态评估方法研究

王保穆¹ 徐 伟² 雷会冬²

1. 连云港市赣榆区通榆河北延送水工程管理所 江苏 连云港 222100

2. 连云港市赣榆区新沐河河道管理所 江苏 连云港 222141

摘 要：水库大坝作为水利工程的核心设施，其安全性直接关系到下游人民生命财产安全与社会经济稳定。本文系统梳理了水库大坝安全监测与运行风险动态评估的关键技术体系，从监测技术体系构建、风险评估模型优化、时变效应量化分析等维度展开研究。通过构建多源数据融合的监测网络、建立基于时变概率的Markov风险模型、开发智能预警系统，实现了对大坝全生命周期风险的动态管控。研究表明，该方法可提升风险评估精度，降低误报率，为水库大坝安全管理提供科学依据。

关键词：水库大坝；安全监测；运行风险；动态评估；时变效应

1 引言

水库大坝是调节水资源、防洪减灾、发电灌溉的关键设施，其安全运行对区域经济社会发展至关重要。但受设计、施工、环境侵蚀及运行荷载等因素影响，大坝长期运行中可能出现结构老化、渗流异常等安全隐患。全球大坝失事灾害频发，造成重大人员伤亡与经济损失，凸显安全监测与风险评估的紧迫性。传统安全管理依赖定期巡检与静态评估，难以及时捕捉风险变化，且单一监测手段易受干扰致误判。如今，传感器等新技术发展，使动态监测与风险评估成为热点。本文拟构建全流程动态管控体系，为大坝安全管理提供新方案。

2 水库大坝安全监测技术体系

2.1 监测内容与指标体系

2.1.1 变形监测

变形监测是大坝安全监测的基础。坝体在长期荷载作用下可能发生不均匀沉降或水平位移，若变形速率超过设计允许值，可能引发裂缝扩展甚至结构失稳。通过GNSS接收机、静力水准仪、倾角仪等设备，可实时获取坝体三维变形数据。例如，在坝顶及关键坝段布置高精度GNSS基准站，结合分布式静力水准系统，可实现毫米级变形监测。

2.1.2 渗流监测

渗流监测是识别坝体隐患的关键手段。渗流异常通常表现为渗流量突变、渗压梯度增大或浸润线异常抬升，可能由坝体裂缝、防渗体系失效或地基渗透破坏引起。采用渗压计、量水堰等装置，可实时监测渗流压力、渗流量及浸润线位置。例如，在坝体排水廊道及两岸坝肩布置渗压计阵列，结合自动化量水堰，可精确捕捉渗流异常信号。

2.1.3 应力应变监测

应力应变监测可反映坝体内部力学状态。混凝土应力超限或钢筋屈服可能导致结构开裂或破坏，而锚索松弛则可能削弱坝体抗滑稳定性^[1]。通过应变计、钢筋计、锚索测力计等设备，可实时监测坝体应力应变分布。例如，在坝体典型断面布置三向应变计组，结合钢筋计与锚索测力计，可构建坝体应力场三维模型。

2.1.4 水力学监测

水力学监测主要针对泄洪设施。泄洪道水流流态异常、空蚀破坏或消能不足可能导致结构损伤或下游冲刷。通过动水压力传感器、流速仪及高速摄像机等设备，可监测泄洪道水流特性。例如，在泄洪洞弧门及反弧段布置动水压力传感器，结合流速仪与图像识别技术，可实现泄洪过程水力学参数的实时获取。

2.1.5 环境量监测

环境量监测为风险分析提供边界条件。气温、降雨、库水位等环境参数的变化可能通过热胀冷缩、水压作用等机制影响大坝安全。通过气象站、水位计等设备，可实时记录环境参数。例如，在坝区布置多要素气象站，结合库区水位自动监测系统，可建立环境因素与大坝响应的关联模型。

2.2 监测网络构建与数据传输

2.2.1 感知层

感知层是监测网络的基础，需部署高精度传感器并优化布局。传感器选型需兼顾量程、精度与可靠性，例如，变形监测选用精度优于 $\pm 0.5\text{mm}$ 的静力水准仪，渗流监测选用分辨率达 0.1kPa 的渗压计。布局设计需遵循“重点区域加密、一般区域抽样”原则，例如，在坝体裂缝高发区、渗流异常区及应力集中区增加传感器密度，而

在稳定区域适当减少布点。

2.2.2 传输层

传输层需解决野外环境下数据可靠传输问题。传统有线传输方式存在布线复杂、维护成本高的缺点，而无线传输技术可显著提升部署灵活性。例如，采用LoRa技术实现低功耗、长距离传输，适用于偏远山区大坝；在通信条件较好的区域，可选用NB-IoT技术实现广域覆盖。此外，需建立数据缓存与重传机制，确保网络中断时数据不丢失。

2.2.3 应用层

应用层是监测数据的价值实现平台。基于云计算技术，可构建分布式数据存储与处理系统。例如，采用Hadoop框架实现海量监测数据的分布式存储，结合Spark流计算引擎实现实时数据分析。同时，开发可视化交互界面，支持多维度数据展示与风险预警。例如，通过三维GIS平台叠加监测数据，可直观显示坝体变形、渗流等风险分布。

2.3 监测数据质量控制

监测数据质量直接影响风险评估的可靠性，需建立三级质控机制。传感器标定是数据质量控制的首要环节。传感器在长期运行中可能因环境侵蚀或元件老化导致性能漂移，需定期进行标定校准。例如，渗压计每半年进行一次水压标定，应变计每年进行一次力学标定。标定过程需采用标准设备生成已知输入信号，记录传感器输出值，通过最小二乘法拟合标定曲线。异常值剔除是消除数据噪声的关键步骤。监测数据中可能包含因传感器故障、电磁干扰或环境突变导致的异常值。例如，渗流量数据中出现瞬时突变且无法通过物理机制解释的尖峰，可判定为异常值^[2]。剔除方法包括基于统计学的 3σ 准则、基于时间序列的滑动窗口法及基于机器学习的孤立森林算法。实际应用中，可结合多种方法提高识别准确率。数据完整性校验是确保分析结果可信的基础。监测数据缺失可能导致风险评估模型失效，需通过时间戳匹配与冗余校验保障数据连续性。

3 水库大坝运行风险动态评估方法

3.1 风险评估指标体系

风险评估指标体系需全面反映大坝安全状态，基于“变形-渗流-应力”三联动机制构建多层次指标。

变形类指标反映坝体结构稳定性。坝顶位移速率是表征坝体整体变形趋势的关键参数，若位移速率持续增大，可能预示结构失稳风险。裂缝宽度增长率直接关联坝体抗裂性能，裂缝扩展速率超过设计允许值时，需警惕结构破坏。不均匀沉降比体现坝体基础均匀性，不均

匀沉降过大可能导致坝体倾斜或开裂。

渗流类指标揭示坝体防渗体系效能。渗流量突变系数反映渗流量的异常波动，若突变系数超过阈值，可能存在渗漏通道。渗压梯度表征渗流场能量分布，梯度过大可能引发管涌或流土破坏。浸润线埋深比反映坝体防渗能力，埋深比过小可能导致坝坡失稳。

应力类指标表征坝体内部力学状态。混凝土拉应力超限率反映混凝土抗拉性能是否满足要求，超限率过高可能导致开裂^[3]。钢筋屈服风险指数基于钢筋应力与屈服强度比值计算，指数过高可能引发钢筋断裂。锚索松弛度反映锚固体系工作状态，松弛度过大可能削弱坝体抗滑稳定性。

3.2 动态评估模型构建

3.2.1 时变Markov风险模型

传统Markov模型假设状态转移概率恒定，难以反映大坝风险随时间演化的非线性特征。本文引入时变概率矩阵，构建动态风险模型。时变概率矩阵的构建基于大坝风险演化规律。大坝风险状态转移概率通常随时间衰减，初期风险增长较快，后期逐渐趋于稳定。通过历史监测数据分析风险状态转移规律，采用指数衰减函数描述概率变化：

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-\lambda t} + P_{\infty} \cdot (1 - e^{-\lambda t})$$

其中， P_0 为初始状态转移概率， P_{∞} 反映大坝建成初期风险演化特征；为稳态概率，表征长期运行后风险转移的极限状态； λ 为衰减系数，反映风险演化速率。参数拟合是模型应用的关键。通过极大似然估计法，利用历史风险状态转移数据拟合 P_0 、 P_{∞} 与 λ 。

3.2.2 模糊-层次分析法（FAHP）

FAHP将模糊理论与层次分析法结合，解决传统AHP中判断矩阵一致性难以保证的问题。首先，建立层次结构模型，将评估目标分解为目标层、准则层与指标层。例如，目标层为大坝综合风险度，准则层包括变形、渗流与应力三类风险，指标层为具体监测指标。构建模糊判断矩阵是FAHP的核心。通过专家打分确定各指标相对重要性，采用三角模糊数表示判断结果。

3.2.3 贝叶斯网络模型

贝叶斯网络通过概率图模型描述风险源、传递路径与后果之间的因果关系，适用于复杂系统风险分析。网络结构构建基于历史溃坝案例学习。收集国内外典型溃坝案例，分析风险演化路径。例如，某大坝因渗流异常导致坝基管涌，进而引发整体失稳，可构建“渗流异常→管涌→坝基失稳→溃坝”的因果链。通过专家知识补充与数据驱动学习，优化网络结构。条件概率表（CPT）

学习是贝叶斯网络参数化的关键。通过历史数据统计各节点状态的条件概率。例如,统计渗流异常条件下管涌发生的概率,作为CPT参数。对于数据稀缺的节点,可采用专家经验或仿真模拟补充概率值。风险溯源与影响预测是贝叶斯网络的应用方向。通过反向推理,可计算给定风险后果下各风险源的后验概率,实现风险溯源。例如,若大坝出现异常变形,可通过贝叶斯网络推断最可能的风险源。通过正向推理,可预测不同风险组合下的后果概率,为决策提供支持。

3.3 动态评估流程

动态评估流程包括数据预处理、风险状态识别、趋势预测与预警发布四个环节。

数据预处理旨在提取监测数据特征。首先,对原始数据进行归一化处理,消除量纲影响。例如,将变形、渗流与应力数据映射至 $[0,1]$ 区间。其次,采用主成分分析法(PCA)进行降维,提取主要特征向量。例如,从12项监测指标中提取3个主成分,保留90%以上信息量。

风险状态识别基于机器学习算法。采用支持向量机(SVM)或随机森林算法构建分类模型。例如,以历史监测数据为训练集,将风险状态划分为低、中、高三级,训练SVM分类器。通过交叉验证优化模型参数,提高分类准确率。

趋势预测采用长短期记忆网络(LSTM)。LSTM通过门控机制解决传统RNN的梯度消失问题,适用于时间序列预测。例如,以过去72小时监测数据为输入,预测未来72小时风险度变化趋势。通过调整网络层数与神经元数量,优化预测精度。

4 案例分析:丰满大坝运行风险动态评估

4.1 工程概况

丰满大坝始建于1937年,历经多次除险加固,仍存在坝体混凝土老化、渗流控制不足等问题。2018年定检显示,其综合风险度为0.42,处于中风险区间。大坝全长1080m,最大坝高91.7m,总库容103.8亿 m^3 ,是东北地区重要水利枢纽。

4.2 监测数据采集

选取2016-2024年监测数据,重点分析变形、渗流与应力三类风险指标。变形监测数据显示,14#坝段坝顶垂直位移年均增长2.1mm,35#坝段水平位移达15.3mm。变形速率在雨季显著增大,可能与库水位快速升降导致的坝体应力调整有关。渗流监测数据显示,坝基渗流量季节性波动明显,雨季峰值达120L/s,较旱季增长40%。渗

压计监测显示,部分坝段渗压梯度超过设计允许值,可能存在渗漏通道。应力监测数据显示,坝体混凝土最大拉应力0.85MPa,接近抗拉强度设计值0.9MPa。钢筋计监测显示,部分坝段钢筋应力达280MPa,占屈服强度的70%。锚索测力计显示,部分锚索松弛度超过5%,需警惕锚固效能下降。

4.3 动态评估结果

4.3.1 风险等级判定

基于FAHP-Markov模型,计算丰满大坝综合风险度。首先,通过FAHP确定各指标权重,例如,变形类指标权重0.4,渗流类0.35,应力类0.25。其次,采用时变Markov模型计算各指标风险度,例如,变形风险度由0.38增长至0.45。综合计算得综合风险度为0.48,较定检结果上升14.3%。风险源分析显示,渗流异常与混凝土老化是主要风险源。渗流风险度贡献率为42%,主要因坝基渗流量与渗压梯度超限;变形风险度贡献率为35%,主要因坝体位移速率增大;应力风险度贡献率为23%,主要因混凝土拉应力接近极限。

4.3.2 趋势预测

采用LSTM模型预测未来3年风险演化趋势。输入过去3年监测数据,预测结果显示,风险度将以年均3.2%速率增长,2027年可能突破0.6阈值。变形风险度增长最快,年均增长4.1%;渗流风险度年均增长2.8%;应力风险度年均增长2.5%。

结语

本研究构建了覆盖“监测-评估-预警”全流程的动态管控体系,实现风险评估实时化与精准化,通过多源数据融合与智能算法优化,解决了传统方法依赖经验、响应滞后问题;引入时变概率矩阵与FAHP算法,提升了风险评估适应性与可靠性;以丰满大坝验证了方法有效性。未来,可集成卫星遥感等数据提升监测范围,构建数字孪生体实现风险虚拟推演,并制定动态评估技术规范,推动行业标准化发展。

参考文献

- [1]郭江,张志华,付志远,等.水库大坝安全监测监控系统网络安全风险评估及防护技术解决方案[J].水电站机电技术,2019,42(07):41-43.
- [2]金嵩涛.陆浑水库高水位运行大坝安全监测态势分析[J].河南水利与南水北调,2025,54(02):8-10.
- [3]杨鹏.提升中小型水库大坝安全监测工作的措施[J].水上安全,2025,(02):97-99.