

# 中小型水库大坝安全监测数据异常识别与快速响应机制研究

陈微

海南锦匠工程咨询有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i2.8730

**[摘要]** 随着我国水利工程管理向着精细化、智能化方向发展,中小型水库大坝安全运行的要求也越来越高。但目前大量的中小型水库都存在监测设施覆盖度低、自动化程度不高、数据孤岛现象严重、异常识别滞后、应急响应机制不健全等问题。本文针对以上实际情况,构建出自动化监测系统的架构及关键技术,创建起监测数据异常识别和安全预警模型的构建体系,希望能给相关研究给予参考。

**[关键词]** 中小型水库; 水库大坝; 安全监测; 快速响应

## Research on Abnormal Data Recognition and Rapid Response Mechanism for Small and Medium-sized Reservoir Dam Safety Monitoring

Chen Wei

Hainan Jinjiang Engineering Consulting Co., Ltd.

**[Abstract]** With the advancement of precision and intelligent management in China's water conservancy projects, the safety requirements for small and medium-sized reservoir dams have become increasingly stringent. However, many such dams currently face challenges including inadequate monitoring coverage, low automation levels, severe data silos, delayed anomaly detection, and underdeveloped emergency response mechanisms. Addressing these issues, this study establishes an automated monitoring system framework and key technologies, while developing a comprehensive model for abnormal data recognition and safety early warning. The research aims to provide valuable insights for related studies.

**[Key words]** small and medium-sized reservoirs; reservoir dams; safety monitoring; rapid response

### 引言

水库大坝,尤其是遍布全国的中小型水库,是防洪减灾、供水灌溉、生态保障的重要基础设施,其安全运行直接关系到人民群众的生命财产安全与社会稳定<sup>[1]</sup>。然而,传统的人工巡检及简单监测方式,已难以满足现代水库安全管理对实时性、精准性的要求。近年来,传感器技术、物联网、大数据与人工智能的快速发展,为大坝安全监测的智能化转型提供了有力支撑,推动监测系统向自动化、高感知、智能化方向演进。但对大量中小型水库而言,受资金、技术及管理水平等多重因素制约,安全监测体系建设仍面临诸多困难。本文结合单位实际情况,旨在构建一套完整的中小型水库大坝安全主动防御体系。

### 1 中小型水库安全监测系统现状与问题分析

#### 1.1 监测设施缺失

雨水情、渗流、变形等关键项目自动化监测点覆盖率低,不能全面地反映大坝的状态,不符合大坝安全监测要关注水

位、降雨量、大坝位移变形、渗流等主要指标的要求。

#### 1.2 已建系统自动化程度低

大量的依靠人工读取数据,数据采集的频率及实时性不能满足要求,没有体现出利用自动化监测技术代替人工、提高效率的主要优点,各个水库单独建设,使用不同的传感器、通信协议和软件平台,造成数据格式各异,形成信息孤岛,不能达到区域化集中监控与协同分析的目的,违背了自动化监测系统应该具有的扩展性和兼容性的特点。

#### 1.3 数据分析能力不足

目前多数平台只具备数据展示及简单的越限报警功能,不能对数据的时间序列变化规律、相关性等进行深层次挖掘,不能实现早发现、准确预测的功能,不能发挥出自动监测系统强大的数据分析和决策支持作用。

#### 1.4 应急响应机制不健全

没有标准化的预警信息处理流程、明确的职责分工以及高

效协同指挥体系, 会使得预警信息发布之后不能及时得到响应, 脱离了实时监测、快速反应的自动化监测理念, 制约了中小型水库安全风险早期发现和快速处置的能力, 也限制了自动化监测技术在中小型水库中的推广应用。

## 2 自动监测系统架构和关键技术设计

### 2.1 系统总体架构设计

系统总体架构要符合扁平化、高集成的思路, 从而减少系统的复杂性, 提高可靠性, 并适应中小型水库运维水平。感知层由布置在大坝各个关键处的智能传感器构成, 包括位移、渗流、水位、雨量等所有的监测设备, 是数据采集的重要部分, 对应自动化监测系统的感知层功能; 网络层利用有线或者无线的方式把采集的数据汇聚到平台上, 起着数据传输的主要作用, 属于系统结构中的传输层; 平台层完成对数据的集中接入、储存、处理和分析, 是系统的核心枢纽, 属于系统结构中的采集层和应用层的关键组成部分; 应用层给管理人员提供可视化的监控、预警发布、报表报告等功能界面, 使监测数据得以落地使用。根据物联网 M2M 技术建立起来的系统架构可以很好地达到设备与平台之间智能交互的目的, 如图 1 所示。



图 1 中小型水库大坝安全监测系统总体架构图

#### 2.2.1 数据采集模块

负责使用 GNSS 接收机、渗压计、测斜仪、雨量计、水位计等各种传感器实时获得的数据, 属于自动化监测系统中感知层的核心功能。模块需要有各种通信接口、协议以及边缘计算的能力, 在边缘上对数据做初步的滤波、异常值剔除等工作, 减少无效数据传输量, 降低云端处理压力, 符合混合模式下边缘计算+云端存储的理念。

#### 2.2.2 数据传输与存储模块

根据现场环境距离、遮挡、供电条件来确定最适宜的通信方式, 即 4G/5G、LoRa、NB-IoT 或者光纤, 其中 LoRa 适合于远距离、恶劣环境下无线通信, 适应山区中小型水库的现场情况。通信协议应该使用成熟的、可靠的已有的标准, 比如 TCP/IP、MQTT 等, 符合水利行业的标准, 保证互联互通。数据的储存要使用稳定的数据库系统 MySQL、时序数据库等, 并且考虑到云端和边缘端协同存储方式, 在现场设置 RTU 保存一年以上的历史数据, 在云端做同步备份, 保证数据的安全性和高效地访问, 符合水利行业的数据保密与可追溯的要求。

#### 2.2.3 数据处理与分析模块

属于自动化监测系统所用的层功能。模块包含数据清洗、计算、统计分析、模型运算等功能, 对监测数据做深入挖掘。除自动处理之外, 在数据出现异常的时候有明确的由人工介入的流程, 保留原数据供审查使用, 兼顾智能化和实用性, 适合于中小型水库运维人员技术水平。

### 2.2.4 应用与展示模块

从用户交互界面来说, 应该采取 web 和移动端相结合的方式, 给用户实时提供数据看板、历史曲线、报警信息、报表报告、远程控制如闸门等功能, 界面要有好的直观。创建出可以自动产生监测数据报告的系统, 用 Excel 报表和 PDF 图表的形式来输出, 并且有利于运维人员快速地查询、分析数据, 提高工作效率。

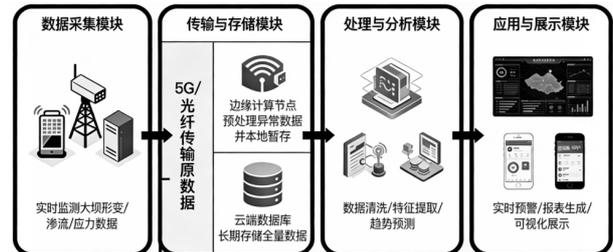


图 2 系统核心功能模块详细设计

### 2.3 通信与供电系统设计

#### 2.3.1 通信设计

用有线和无线混合组网的方式, 既考虑了稳定性又考虑到了经济性。坝区内部传感器与采集网关之间用 RS485、LoRa 等短距离通信, LoRa 技术可以在免授权频段内工作, 具有抗干扰、低功耗的特点, 适合坝区分散传感器的组网; 网关至中心平台主要通过公网或者专网光纤来保证远距离数据传输的安全性。通信协议栈使用 TCP/IP, 应用层按照水利行业有关的标准来实现互联互通和数据传输的安全。

#### 2.3.2 供电设计

需要设置独立可靠的专用电源, 不能由于断电而使测点数据丢失。对于市电可及的地方, 采用市电、UPS、蓄电池三者保证的方式, 保证市电中断的情况下设备能正常使用; 对于没有市电的监测站, 应该使用太阳能光伏板和蓄电池作为新能源供电方式, 配以智能充放电控制器, 保证连续阴雨天气下正常工作, 布置柴油发电机作为最后的备用电源, 提高供电可靠性, 适合中小型水库的现场供电条件。

### 3 监测数据异常识别与安全预警模型构建

#### 3.1 数据预处理与特征选择

首先要对原始监测数据进行清洗, 剔除缺失值、明显的错误以及噪声, 去除无效数据来保证模型的准确性, 为精准异常识别打下基础。随后进行特征工程, 除了直接用各个测点的观测值之外, 还可以构造出衍生特征, 比如变化速率、加速度、相邻测点差值和库水位或者降雨量的相关系数等, 坝体位移、渗流量的数据同库水位、降雨量之间有明显的联系, 所以建立这样的衍生特征可以提高异常识别的准确性。

#### 3.2 基于统计方法的预警模型

对于历史数据序列可以采用统计规律来建立预警模型, 此法简单明了、运维费用较低, 适合于中小型水库。用移动平均法、指数平滑法等对数据进行正常的变化趋势线拟合, 并求出其置信区间±3 倍的标准差<sup>[4]</sup>。当实时数据一直超过置信区间的范围时候产生预警, 即自动化监测系统的基础预警功能, 在实时数据波动明显且稳定的小型水电站中应用效果较好, 可以作为一级预警阈值, 为之后深入分析做好准备, 考虑实用性与经济性, 适合于中小型水电站的运行管理。

#### 3.3 基于机器学习的智能预警模型

### 3.3.1 孤立森林

一种无监督的高效的异常检测算法。采用随机切分的方式把特征空间分为孤立的数据点,异常点由于其和正常点的特征差异很大,一般可以较快地被隔离出来。该算法适合于高维度的数据,不需要对数据的分布做出假定,正好可以利用大量的监测数据来迅速发现异常模式,并且运算速度快,适配中小型水库平台计算资源,可以用于快速检测位移、渗流等数据的异常波动。

### 3.3.2 时序预测模型

使用 LSTM、CNN-LSTM 等深度学习模型来学习监测数据如位移、渗压和驱动因子水位、温度、时间之间的复杂时序依赖关系,并计算出未来一段时间内数据的预测值。将预测值和实际观测值进行对比,如果残差大于设定阈值,则认为是异常,可以有效地发现缓慢发展起来的异常隐患比如坝体缓慢变形、渗流通道逐渐形成,弥补了统计方法的不足。

### 3.3.3 集成与优化

可以使用模型集成的方法,把孤立森林的异常评分和时序预测模型的残差结合起来,综合评判异常程度来提高预警的准确性、鲁棒性。模型要不断用新的数据重新训练,以适应大坝状态缓慢变化的趋势,与自动化监测系统的数据存储功能配合起来使用,可以利用历史监测数据不断地改进模型,提高异常识别的稳定性。

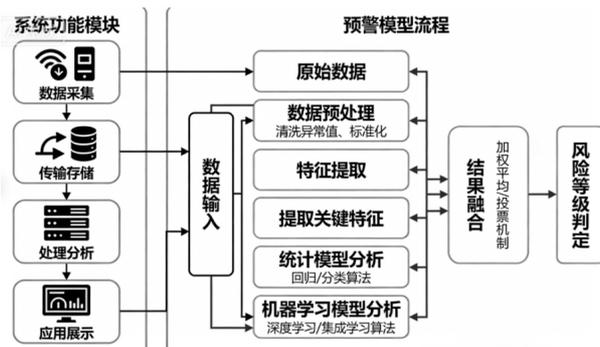


图3 安全预警模型构建与运行流程图

## 4 快速响应机制设计

### 4.1 应急预案与分级响应流程

首先要制定详细的应急预案,根据小型水库的风险等级来确定各种异常情况的处理程序<sup>[5]</sup>。预案的核心就是建立分级响应机制,按照预警模型输出的一般异常、严重异常、危急异常等几种情况以及专家判断,把事件分成不同的等级 I 级、II 级、III 级,达到分级预警、分级处理的目的,提高响应效率,防止资源浪费。

#### 4.1.1 III 级响应(一般异常)

系统自动把提示信息发给运维人员,现场人员加强巡查,观察数据的趋势,利用自动化监测系统实时监控的功能,对数据的变化进行跟踪,在异常消失之后停止响应,在异常变重的时候提高响应级别。

#### 4.1.2 II 级响应(严重异常)

自动触发报警并通知水库管理人员和技术专家,启动专项检查与分析,可以增加人工监测的频率,进行简易的应急处理,使用无人机巡检的技术手段来快速找出异常的原因,给后面的操作留下依据。

#### 4.1.3 I 级响应(危急异常)

立即向上级主管部门和应急指挥机构报告,启动最高的应急程序,应急指挥中心接管指挥权,调集一切可以调用的资源迅速实施泄洪、疏散等果断行动,尽量减少灾害造成的损失。

### 4.2 应急组织架构

决定应急管理的组织结构,并且规定总指挥、技术负责人、通讯联络员、现场处置组长等岗位以及相应的职责,以防出现职责不清而造成响应滞后。根据中小型水库的管理规模来合理配置人员,保证各方面的配合协调。同时保证应急所需要的各类人力、设备、物资、交通、通信等资源都得以落实并得到保障,定时对各种应急抢险的装备如无人机、监测仪器、抢险工具等进行检查维修保养,以备急需时可以正常工作。

### 4.3 演练与持续改进

经常组织各种形式的应急演练,模拟监测预警、决策处置等各个环节的过程,检验流程是否通畅,预案的有效性,提高运维人员应对突发事件的应急能力。每一次演练或者真实的事件响应之后,都应该做复盘总结工作,找出存在的问题,对预警阈值、响应流程、应急预案进行修改,结合自动化监测系统数据分析的功能来总结异常识别与处置的经验,实现机制的持续改进,提高中小型水库大坝安全风险处理的能力。

## 5 结论

本文根据中小型水库大坝安全管理实际存在的问题,对已有自动化监测技术的研究成果进行整理参考,从整体上构建了包含监测系统建设、数据异常智能识别和快速响应的综合方案。经过采用分层、开放的自动化系统架构,将统计与机器学习相结合的预警模型融入其中,并且配合设计出分级分类的应急响应流程,可以明显地提高水库安全风险的感知、预警、决策以及处置的能力,解决中小型水库监测设施不全、自动化程度低、异常识别迟缓、应急响应不力等问题。

研究发现,本方案符合中小型水库资金、技术、运维现状,成本低、技术适用性好、运维简单,能充分发挥自动化监测技术的作用,给水库管理单位日常运维和应急决策提供行之有效的技术及方法。未来中小水库安全管理会趋向更智能、更精准、更高效的方面发展,本文提出的方法也不断得到完善,给保证水库大坝长期安全赋予了强有力的科技支撑。

### [参考文献]

- [1]孙燕飞. 水库大坝安全监测中自动化监测系统运用研究[J]. 水上安全, 2025(17): 150-152.
  - [2]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(2): 97-99.
  - [3]李明. 水库安全中水库大坝安全监测自动化技术分析[J]. 水上安全, 2024(22): 28-30.
  - [4]钟智勇.GNSS 自动监测系统在松子坑水库大坝安全监测中的应用分析[J]. 地下水, 2024, 46(6): 280-283.
  - [5]宿玉扬,赵磊,曾靖莹,等.水电站大坝集群运行数据标准化监督管理模式研究[J].技术与市场, 2025, 32(11): 179-185.
- 作者简介: 陈微, 1991年9月5日, 男, 海南省文昌市, 汉族, 大专, 助理工程师(水工建筑), 研究方向: 水利工程管理。