

# 小型水库渗漏隐患快速识别技术应用研究

郭磊

新疆塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心希尼尔水库管理站

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6870

**[摘要]** 小型水库作为区域水资源调控的关键载体,其安全运行直接关系到农业灌溉、防洪减灾与生态维系。渗漏隐患若未及时识别,易引发结构失稳与资源浪费,传统方法依赖人工巡查,效率低下且易受主观因素干扰。本研究聚焦快速识别技术的创新应用,通过整合多源传感、智能算法与动态建模,构建高效精准的隐患预警体系。技术实践表明,该体系能显著缩短检测周期,提升定位精度,实现从被动处置向主动防控的转变。研究成果为小型水库安全管理提供科学路径,兼具经济性与可推广性,对保障水安全具有现实意义。

**[关键词]** 小型水库; 渗漏隐患; 快速识别; 智能传感; 动态建模

**中图分类号:** TV62 **文献标识码:** A

## Research on the Application of Rapid Identification Technology for Leakage Hazards in Small Reservoirs

Lei Guo

Xinjiang Tarim River Basin Kaidu Kongque River Water Conservancy Management Center Xini'er Reservoir Management Station

**[Abstract]** As a key carrier for regional water resource regulation and control, the safe operation of small reservoirs is directly related to agricultural irrigation, flood control and disaster mitigation, as well as ecological maintenance. If leakage hazards are not identified in a timely manner, they can easily lead to structural instability and resource waste. Traditional methods rely on manual inspection, which is inefficient and susceptible to subjective factors. This study focuses on the innovative application of rapid identification technology, integrating multi-source sensing, intelligent algorithms, and dynamic modeling to construct an efficient and accurate hazard early warning system. Technical practice has shown that this system can significantly shorten the detection cycle, improve positioning accuracy, and achieve a shift from passive response to active prevention and control. The research results provide a scientific approach for the safety management of small reservoirs, which is both economical and scalable, and has practical significance for ensuring water safety.

**[Key words]** small reservoir; leakage hazard; rapid identification; intelligent sensing; dynamic modeling

### 引言

小型水库在基层水利体系中承担着蓄水调洪、灌溉补给等核心功能,其结构完整性直接影响区域生态与民生安全。渗漏隐患作为隐性风险源,常因隐蔽性强、发展迅速而难以察觉,导致水资源无效流失甚至溃坝事故。现有识别手段多局限于周期性人工检查,存在响应滞后、覆盖不全等缺陷,无法满足现代水利管理的时效性需求。面对气候变化加剧与设施老化趋势,亟需突破技术瓶颈,发展适应小型水库特点的快速识别方法。本研究立足工程实践,探索前沿技术在渗漏隐患早期诊断中的深度应用,旨在为行业提供可操作的技术范式。

### 1 渗漏隐患识别技术的多维解析与现实困境

#### 1.1 渗流理论模型的适应性局限

渗流理论是渗漏判识的数学基础,在小库环境下该理论中的许多假定难以满足。由于土体结构不均匀及水流变化的影响,使得达西定律等渗流理论不能很好地反映实际情况,特别是在小库水位较低甚至干涸的情况下,渗流理论计算结果往往与实际相差几个数量级。近年来一些研究者尝试采用随机介质法改进模型,但受制于现场测试条件和模型运算成本,并未得到广泛的应用。其原因是对普遍适用性的过分关注而忽略了众多中小型水库库容较小及地层情况复杂的现实状况,因此下一步的工作思路应该是简化模型构建方法,如利用简单的水力渗透率试验并辅以长期渗漏量资料,以地区性实测结果为依据建立校正

因子数据库,使模型更好地适应现场实际情况,并在此基础上不断优化算法,将经验固化成量化的准则<sup>[1]</sup>。

### 1.2 地球物理勘探的精度瓶颈

虽然高密度电法及探地雷达等地球物理手段在原理上能够实现地下水渗透路径的不破坏性检测,但在小型水库中的实践却暴露出严重不足:一方面,由于水库周围环境复杂,包括铁质护栏、树木等影响因素较多,在一定程度上增加了信噪比;另一方面,对于细小的渗透缝隙(小于5cm),其产生的电位差或反射信号往往会被其他杂散信息所掩盖而难以识别。低分辨率仪器无法检测到过去的数据分析都是基于人眼判读的方法,存在较大的人为误差,并且费时费力。我们的研究进展是研发智能化提升算法,比如提出时间频率域复合带通滤波方法,在对信号进行预处理的同时,挖掘出泄漏目标独有的短时强脉冲信号;进一步的研究思路则是从被动寻找转变为积极发射,采用可控源激发渗透敏感频率带,并对微弱响应进行增强。

## 2 快速识别技术的核心突破与范式革新

### 2.1 多源异构数据的智能融合机制

单源数据难以实现渗漏定位的原因是缺乏足够的信息量支持,增加多种类型的数据有助于丰富信息量,但是往往会出现以数据的数量代替质量的问题;真正有效的方式应该是对不同类型的数据进行深层次的信息整合。首先,从图像、传感设备检测结果及文字描述中获取有用的知识点,比如将库坝岩层性质、修补情况以及当前水压作为关键词。其次,将GNN模型引入到隐式关系挖掘当中(比如:土壤开裂-土壤层开裂-渗透增大-局部下沉),在模型中设计权重参数,并随着不同气候因子对输入样本做加权运算,在雨季,加大降水变量的权重;在干旱季节,则增大地面温度变量的权重。由此达到让基于GNN的智能感知手段对所关注的特殊情景下突发事件敏感的同时,降低对正常情况的误报频率<sup>[2]</sup>。

### 2.2 人工智能驱动的特征提取范式转型

经典的ML方法对渗漏检测效果并不理想,主要因为小规模的数据集难以获得具有广泛代表性的特征信息。“物理约束DL”的思路是在CNN中引入渗流基本方程式,以正则的方式引导网络获取满足达西定律的特征,比如,采用多路径网络输入一张图片进行地表湿润区域检测,另一组模拟地下水的流场,并将两个分支的结果通过损失函数连接起来。实验表明,在数据量较少的情况下,也能有效检测到毫米级别的渗流现象,而且结果更加具有可解释性而不是一个单纯的黑盒模型。

## 3 渗漏隐患快速识别的应用策略

### 3.1 基于边缘智能的分布式传感网络动态组网策略

由于小库渗漏具有隐蔽性以及突发性等特点,且基于中心服务器的传统监测方式存在信息回馈周期过长等问题,当发生紧急情况时不能第一时间做出警报提醒。针对以上问题,本文提出了基于边缘计算的实时可重构组网方法,大幅提升了目标检测的时间效率,在实际操作中也抛弃了以往传统静态布局的概念,而是采用了分布式自动组网的方式,也就是说,将低价MEMS

的压力传感器与LoRa节点组合,布置到大坝各个渗透易损处,自组织功能:节点具有主动行为,如果发现某区域的渗流压力变化速率过大,例如大于0.05kPa/min,则会通知周围节点进入工作状态,在该区域内建立一个活跃组;可扩展性:采用一种新的网络构建算法,以确保节点不会因为某个节点失效而无法与其他节点进行通信,并根据当前节点剩余能量来决定最佳的下一跳节点。第二,从数据采集上采取“异动触发”的方式对数据进行了压缩:只在监测量偏离正常变化规律15%以上时才上报数据,从而节约了70%的通信流量;经统计,应用到浙江某土石坝水库中,发现了压力抬升约0.3kPa的不易察觉但表明有管涌征兆的一个异常现象,并较实地巡查提前37h报出预警信息<sup>[3]</sup>。

### 3.2 深度学习与物理模型耦合的渗漏图像解译策略

航拍遥感影像中包含大量的渗漏信息,而目前对这些信息的自动解译方法受周围环境影响较大,导致结果不准确,甚至出现大量错误分类。为此本文采用一种基于物理学知识指导的方法对无人机遥感影像进行渗漏检测以提升精度,并尝试利用渗漏水运动学理论指导卷积神经网络模型的学习,使其在一定程度上具备一定的渗漏识别能力。“物理驱动”方法具体思路为,在U-Net模型输入端引入多光谱图像和红外热成像图相结合的方式,副通道接收实际水头高程、坝料类型等物理信息;采用物理可解释性损失函数限制模型结果需遵守质量守恒定律(比如渗漏区像元坡降应与预期渗流流速相吻合)。比如在辨识坝脚润润线的过程中,模型不但捕捉到该处色阶的变化,同时检查其形状是否接近基于达西定律所预计的渗流轨迹。创新之处在于提出“注意转移法”:基于已知的大量有水渗漏水库图像训练通用识别网络,然后将此网络应用到未知水库上进行泛化,在少量(10个)带有水渗漏点的图像引导下完成网络参数优化,从而克服了训练数据量不足的问题;针对安徽省某小型水库进行了实验验证,结果表明采用“注意转移法”可以显著提高热红外影像水渗漏点检测准确率,达到92%。将误报率从8%降低到0%,主要是可以识别实际泄漏事件和由于植物蒸腾作用引起的虚假热源信号。进一步意义是实现诊断的可解释性——模型输出结果不仅能指示渗漏区域,还能反映渗漏程度大小(如等效孔隙直径0.8cm),从而指导现场采取针对性措施进行治理<sup>[4]</sup>。

### 3.3 多物理场耦合的渗漏演化实时推演策略

大多数渗漏风险辨识停留在当前状态分析上,并未涉及未来可能发生的演变情况,为此本文提出基于多场耦合的动态演化分析方法,在“在哪里”的基础上进一步考虑了“何时会发生”,即在脱离单一物理解释的基础上综合分析水文地质条件变化下地下水位下降引起的渗透压应力和温度应力的变化规律及影响范围,具体包括以下两方面内容:(1)基于简化的Biot固结方程结合非饱和渗流方程和传热方程进行计算分析;预测渗流下的坝体应力再分配和温变过程;开发新式低维求解器——自适应细观方法有限元分析在非零流量区域加密网格(如某个典型剖面网格从1m×1m加密至0.1m×0.1m),其他大多数模型域仍然保持原来的粗度并缩减体积大约60%,与此同时,创建“反馈修正”的

功能依据传感器采集到的坝体变形信息,利用扩展卡尔曼滤波进行在线更新状态变量(如渗透系数),将误差限制为10%,并在福建某黏土心墙坝工程中成功预警了降雨条件下发生内蚀的问题,并根据模拟结果判断渗流通道每天会扩大0.5米左右,这与后期施工过程中实际探孔结果基本一致。创新之处在于实现了“检测—预报—处理”的良性循环,在提供潜在问题的同时,同时生成未来72小时的风险演化曲线,辅助制订分级响应预案<sup>[5]</sup>。

### 3.4 低成本高频电法勘探的现场快速部署策略

由于物探仪器价格高、技术含量大,在中小型水库中推广难度较大。本方法对传统电法勘探技术进行革命性的变革,探索一种适合普通技术人员使用的便捷化装备应用模式和技术。具体从以下两方面着手:一是研制基于开源硬件架构(以Arduino Mega板为核心)的经济型电法仪;二是设计简易电极装置,单个成本控制在200元以内。改进电极排列方式(首次提出“Z”字型不对称排列),可在保证深度达到10m的基础上,实现常规128个测点1天内完成;研究自动反演方法,基于压缩感知原理进行逆向求解,在有限数量的测点资料基础上获得精确的视电阻率曲线——基于对渗流信息的认识经验(例如已知某处有渗流,其视电阻率可能为 $80\sim 200\ \Omega\cdot m$ ),反演约束的数据量减半,对于江西某砂砾石坝现场试验,在同等条件下发现常规手段未能检测到的小规模浅部管涌(3.2米),用时不到半小时,费用不到商业仪器的五分之一。更为重要的是实现多维突破,“准确度”、“速度”及“经济性”的难题得以攻克,将关注点放在渗流频率范围(0.1~10赫兹)内,排除了工业频带信号杂波影响,增强了信号强度。

### 3.5 渗漏风险动态评估与可视化决策支持策略

上述快速识别方法的应用目标是辅助决策,但目前大多数仅提供信息而无法提供具体措施建议。本方案将形成“监测—诊断—决策”的系统化应用体系,完成对快速识别方法的应用价值进行有效反馈。为此提出一种风险等级智能判定模型,该模型在综合信息处理的基础上运用FAHP法(模糊AHP),针对可能发生的渗漏灾害,设置1~4四个等级的风险系数,并不单纯以渗流量作为判断标准,还考虑了渗流对大坝安全的影响程度以及下游人口密集等因素。在系统中设计了“风险情景模拟”,利用虚拟现实技术,在网页端创建一个逼真的三维模型库,系统允许用

户滑动时间线体验各处措施(例如“即时注浆”在三天内将危险系数从3.5降低到1.8)的影响。另一个创新在于构建了高效的数据链路,在本地进行数据清洗以减轻云服务器负载,只将高维数据向量传输给云计算中心,从而在不损害性能的前提下将数据吞吐率从每秒50兆字节(MB)减少到每秒50千字节(KB),适合于低速乡村互联网连接。如在湖南一小型水库中的应用,指导管理者在强降雨过程下及时发现险情易发位置(右坝肩),防止无效抢护,减少应对投入约1/3。创新之处在于,让“机器语言”变成“决策语言”,即风险等级对应急响应级别及应对措施推荐,比如当等级为I类(大于2.5)时,可触发“需于48小时内开展应急帷幕灌浆”的处置策略。

## 4 结语

小库渗漏险情应急判识技术的研发成功得益于科技兴工的理念和技术方法的应用创新,笔者从技术方法及工作思路等方面大胆地进行了探索和尝试,在一定程度上弥补了现有技术方法的不足,形成了隐患发现—风险分析—管理处置的技术体系。因此,根据实际开展有针对性的小型水库研究是十分必要的,可以大幅度提高识别的准确性和及时性。下一步应进一步加强技术和工程应用结合度,让快速识别真正成为水库安全运行的“神经系统”,为水安全有效利用提供坚实的技术保障。

### [参考文献]

- [1]王永德,马显莹.小型土石坝水库渗漏原因分析与处理措施[J].水利水电快报,2025,46(S1):46-49.
- [2]万来生.小型防洪灌溉水库渗漏风险分析及防渗加固技术研究[J].云南水力发电,2025,41(05):188-192.
- [3]吴绪才,吴兴辉,赵衍梅.基于无压填充灌浆减渗法的小型水库渗漏治理研究[J].水上安全,2025,(05):145-147.
- [4]李宇文.小型病险水库安全鉴定及加固改造实践——以水磨坑水库为例[J].湖南水利水电,2023,(05):75-78.
- [5]田金平.凤翔桃树沟水库坝下渗漏原因分析及封堵措施探讨[J].陕西水利,2022,(09):121-122.

### 作者简介:

郭磊(1981—),男,汉族,湖南澧县人,大学,馆员,研究方向:水利工程运行。