

数字化监测技术在中小型水库除险加固工程中的应用研究

梁恒钊¹ 李树森²

1. 湖南耀铭人力资源管理服务有限公司 湖南省 怀化市 419100

2. 山东省潍坊市峡山区王家庄街道办事处 山东省 潍坊市 262105

【摘要】：中小型水库是防洪减灾、水资源调配体系的骨干，但是存在着超期服役、监测设施缺乏等安全隐患。本文对数字化监测技术在中小型水库除险加固工程中应用情况做了系统的整理，建立了“感知、传输、平台、应用”四个层次的技术架构，并对 GNSS 高精度变形监测、物联网多源传感协同、分布式光纤渗流监测以及数字孪生预警等关键技术的原理和工程适用性进行了详细的分析。经过研究发现，数字化监测技术可以有效地提高安全监测的实时性、智能化程度，在数据深度融合、预警模型泛化能力、长效运维机制等各方面还存在着需要进一步研究的问题。本文提出建立全链条闭环监测体系的优化策略，给同类型工程安全监测和智慧化管理提供理论依据和技术参考。

【关键词】：中小型水库；除险加固；数字化监测；物联网；数字孪生；安全预警

1 引言

我国现有的注册登记水库有 9.8 万座以上，其中小型水库占到 95% 以上，主要分布在农村地区，是区域防洪安全、供水保障和生态平衡的重要基础设施^[1]。但是由于早期建设标准低、运行时间长、管护投入少等原因，许多中小型水库存在着严重的工程老化、病险隐患问题。水利部明确要求，必须加快水库大坝安全监测设施的数智化改造，实现对工程性态的实时精准掌握^[2]。

传统人工巡检和定期观测方式由于监测频次少、精度低、响应慢，已经不能满足现代水库安全要求了。近些年来，由于北斗/GNSS、物联网、分布式光纤传感以及数字孪生等数字化技术趋于成熟，水库安全监测也由原来的“被动应对”转变为现在的“主动感知”。但是目前的研究大多集中于单个技术的应用或者大型水库工程，缺少针对中小型水库特点的系统性、集成化的技术路径研究。本文试图创建一个适合于中小型水库的数字化监测技术架构，从技术应用及案例出发，评价它的效果，给出改进意见，从而给我国中小型水库本质安全水平的提升给予决策支撑。

2 数字化监测技术体系框架

中小型水库数字化监测不是传感器简单的堆砌，是多学科交叉、软硬件耦合的复杂系统工程。其技术体系可以清晰地分为四个层次，逻辑架构及数据流向如下图所示。

图1 中小型水库数字化监测技术体系架构

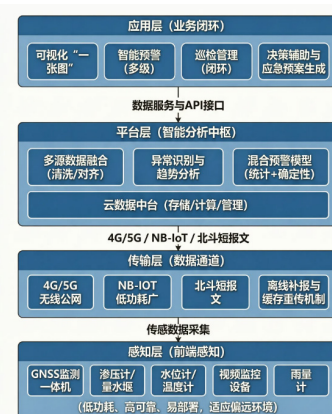


图1为感知层，是整个体系的基础，需要选择低功耗、高可靠、易部署的设备。传输层需要具备数据自动补报和离线缓存的功能，在网络出现异常的时候保证监测序列的连续性。平台层就是体系的大脑，对数据进行标准化治理和智能分析。应用层把数据分析的结果变成直观的决策信息，从而达到云、管、端多位一体闭环管理的目的。

3 数字化监测关键技术与应用

3.1 GNSS高精度变形监测技术

大坝变形属于评价结构安全的主要指标。利用北斗/GNSS监测技术可以达到坝体位移自动、高频的采集。工程实践表明，用PPK（动态后处理）技术，GNSS系统水平位移监测精度可以达到 $\pm 2 \sim 3$ 毫米，垂直精度可以达到 ± 5 毫米^[3]。对于中小型水库来说，普适型GNSS方案成本控制在可接受范围之内，仍然可以达到亚厘米或者毫米级的精度，给大坝稳定性评价提



供可靠的依据。

3.2 物联网与多源传感协同监测技术

物联网技术把水位、渗压、位移、雨量等众多传感器连入同一个平台，创建起一个多维的协同监测网。NB-IoT 窄带物联网由于低功耗、广覆盖等特点，在偏远地区中小型水库中有着很高的应用价值。以浙江新昌县小型水库数字化平台为例，它把几百个位移、渗流测点纳入其中，每天产生的分析数据达到上百万条，从而达成对县域水库的全面、无盲区监控^[4]。一体化联动机技术可以在某一指标出现预警的时候，自动唤醒周边的相关传感器进入到高频协同监测的状态，从而提高预警的准

确性以及可靠性。

3.3 分布式光纤渗流监测技术

渗流属于土石坝最危险的安全隐患之一。分布式光纤声波传感（DAS）和温度传感（DTS）技术，用光纤做连续传感器，可以实现米级分辨率的全域动态监测。该技术冲破了传统渗流监测点位分散的束缚，可以经由观测温度场和振动场的异常改变，准确找出渗流途径以及可能存在的管涌通道。从表 1 可以看出，分布式光纤技术相比传统的监测方法在监测连续性、空间分辨率以及预警及时性上都有明显的优势。

表1 传统渗流监测与分布式光纤监测技术效能对比

比较维度	传统监测方法	分布式光纤监测技术
监测模式	点式、离散	分布式、连续
空间分辨率	米级至十米级（取决于孔距）	米级（可达亚米级）
响应速度	小时级/天级	实时（毫秒级采样）
信息维度	单点水位/压力	温度、振动、应变多参量
工程适用性	适用于均质坝	特别适用于土石坝、堤防

3.4 数字孪生与智能预警技术

数字孪生技术就是创建出一个和物理水库同步变化的虚拟模型，从而达到“一图尽览、一网统管”的目的。根据实测数据反演和率定参数，可以对大坝在各种工况下应力-渗流场进行仿真。安徽城西水库等工程已经就全域感知、数据中台、智能应用开展了数字孪生的创建^[5]。从预警角度来讲，把统计模型同确定性模型融合起来，创建起混合监测预警模型之后，可以较好地缩减误报率和漏报率。配合多级协同预警体系，可以实现预警信息的生成、发布和处置全流程闭环管理，把传统的被动等待变为主动干预。

4 典型案例与讨论

湖北省东宝区小型水库安全监测提升项目属于本技术体系的应用范例。本项目对 15 座小（1）型水库进行智能化改造，设置视频监测站 31 个、渗流压力监测点 87 个、GNSS 监测点 76 个。所有的数据都通过物联网实时传送到省级统一管理平台。项目建成以后，预警信息准确率大于 95%，防汛响应时间小于 30 分钟^[6]。

尽管成效显著，但实践也暴露出若干共性问题，值得深入讨论：

（一）数据孤岛和融合分析的瓶颈。不同的厂商设备所用的数据格式和通信协议不同，造成系统之间的互通成本高。更重要的是，目前多源数据融合利用率低，水位、变形、渗流、

气象等数据大多孤立地进行分析，没有发挥多维信息互补的优势。未来要着力于在省级层面统一数据标准，研发面向中小型水库的轻量化数据融合算法。

（二）预警模型的泛化能力差。现有的预警模型大多以大型水库或者某一种坝型的数据为基础来建立，其参数和阈值未必适合于坝体结构多样、地质条件复杂的中小型水库。盲目套用会造成漏报或者误报。因此发展出一种结合了物理机制（机理驱动）和数据适应性（数据驱动）的混合模型来提高预警的准确性就显得十分必要。

（三）缺少长效的运维机制。数字化系统重建设、轻管理的现象比较普遍。先进设备如果缺少定期的保养、校准和软件更新，那么它的性能就会随着时间的推移而迅速下降。应创建起政府引领、社会参与、建管并重的运维模式，创建起稳定的经费保证和技术创新体系，保证监测系统“建得起、用得好、长受益”。

5 结论与展望

本文对中小型水库除险加固工程中数字化监测技术的应用进行了系统的分析。研究表明，建立以 GNSS 变形监测、物联网传感网络、分布式光纤渗流监测、数字孪生预警为技术核心的集成化技术体系，可以有效地提高水库安全监测的实时性、准确性、智能化程度，是实现水库安全管理由被动应对向主动感知转变的有效技术途径。GNSS 技术给宏观形变提供高精度基



准，物联网技术把多要素结合起来进行感知，分布式光纤技术填补了渗流监测的空白，数字孪生平台给海量数据赋予了业务价值，四者互相配合，一起形成起现代化的水库安全屏障。

随着“天空地水工”一体化感知体系的建立以及人工智能技术的深入融合，数字化监测技术会朝着更高精度、更强智能、

更低廉成本的方向不断前进。后续的研究与应用应该更加关注轻量化、高可靠性的监测设备的研发，智能预警算法的开发也要有更强的泛化能力。另外还要加快建立适合中小型水库特点的监测数据标准和预警阈值体系，使数字化监测由“示范性应用”向“制度化运行”稳步迈进。

参考文献

- [1] 水利部. 小型水库建设管理办法[Z]. 2026.
- [2] 水利部. 水利部安排部署2026年水库安全度汛工作[EB/OL]. 2026.
- [3] 齐智勇, 毛延翩, 方荣新, 等. 水库峡谷区北斗/GNSS变形监测方法对比分析与精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2025, 45(3): 239-243.
- [4] 徐云乾, 袁明道, 罗永锐, 等. 小型水库智能化管护装备体系构建与发展路径研究[J]. 中国水利, 2026(4).
- [5] 王铭铭, 张皖博, 刘斌斌. 安徽省小型水库安全状态与数字孪生建设探讨[J]. 中国水利, 2026(2): 60-65.
- [6] 东宝区小型水库安全监测能力提升试点项目实施方案[R]. 湖北省水利厅, 2025.
- [7] 基于一体化联动机技术的中小型水库安全监测预警研究[J]. 广东土木与建筑, 2024(8).
- [8] 张美新, 等. 基于多源数据融合的水库大坝安全监测与预警模型研究[J]. 水利学报, 2026, 57(1): 88-97.

作者简介：梁恒钊（1989—）男，汉族，本科，研究方向为水利工程。