

基于 MEMS 加速度计的航道高边坡智能监测技术研究

梁崇博 赵现可 曲晓斌

中国电建集团港航建设有限公司 天津 300467

【摘要】：航道高边坡失稳是制约航道工程建设质量与运营安全的关键风险因素，传统人工巡检与定期测量模式存在监测连续性不足、响应时效性差、作业安全性低等固有局限，难以适配现代工程安全管理的精细化、智能化需求。随着物联网、微机电系统（MEMS）及数据分析技术的迭代发展，基于 MEMS 加速度计的阵列式位移测量技术凭借小型化、低功耗、高精度及强抗干扰特性，成为边坡变形实时监测的优选技术路径。本研究以航道工程为应用场景，通过传感器选型优化、监测系统架构构建、数据处理算法改良及工程实践验证，构建了一套兼具可靠性与实用性的边坡智能监测技术体系，为航道及相关基础设施领域的边坡安全防控提供了有力的技术支撑。

【关键词】：MEMS 加速度计；阵列式位移测量；航道高边坡；智能监测

DOI:10.12417/2811-0528.26.06.066

边坡地质灾害是我国常见灾害类型之一，具有突发性强、危害性大的特点。据统计，2020 年滑坡事故占整体灾害的 52% 以上，2009~2020 年间最高发生率达 86%，在航道、公路等基础设施建设中，岩质高边坡失稳问题频发，易造成工程损毁和人员伤亡，影响深远。

我国地形地质复杂，极端天气、地质活动频繁，工程活动对地质环境影响加剧，边坡地质灾害防治形势严峻。航道工程因隐蔽性强、施工复杂、地层及周边环境不确定，高边坡失稳受技术、环境、地质、气象等多因素影响，亟需可靠的实时监测预警方案。

传统边坡监测依赖人工巡检与定期测量，存在监测频率低、响应滞后、安全性差、数据连续性不足、效率低、成本高等局限，在大规模高边坡群监测中尤为突出，难以满足现代工程安全管理需求。随着物联网、传感器及数据分析技术发展，边坡智能监测成为研究热点。基于 MEMS 加速度计的阵列式位移测量技术，具备体积小、功耗低、精度高、抗干扰强等优势，可实现边坡变形实时连续高精度监测。通过多传感器阵列布设与无线传输，能构建覆盖广、响应快的智能监测网络，及时捕捉变形异常。本文针对航道高边坡监测需求，开展相关技术研究，开发集采集、传输、分析、预警于一体的自动化监测系统，通过工程应用验证可行性，为航道及相关领域边坡安全监测提供技术支撑。

1 MEMS 加速度计选型及阵列布设对监测性能的影响研究

1.1 核心器件选型与参数优化

本研究以航道高边坡变形监测为核心目标，选取 MEMS 加速度计作为核心传感元件，对比多种位移传感器的监测效

率、精度及实时性指标。通过以传感器布设间距、核心主板功耗、数据传输协议为关键变量开展试验，结果表明阵列式位移计竖向测点间距 0.5m 时，变形捕捉精度最佳，可准确识别滑动面位置；采用 STM32F1030B 微处理器与 MAX3485 通讯芯片组合，能实现数据稳定传输且控制核心主板功耗；485 通讯总线搭配 4GDTU 传输模块，可解决野外复杂环境下的数据传输中断问题。综合性能与经济性，确定监测系统核心配置为：ADXL355 加速度计+STM32F1030B 微处理器+4G 无线传输模块，阵列式位移计测点间距 0.5m。

1.2 监测系统综合性能验证

以传统人工监测和 GNSS 监测为对照，对优化后的阵列式监测系统性能测试，重点评价监测精度、稳定性及响应速度三大指标：1) 监测精度：在标准倾斜台试验中，系统倾角测量误差 $\leq \pm 0.005^\circ$ ，较传统测斜仪精度提升 30%，能够捕捉 0.1mm 级的微小位移；2) 稳定性：通过连续 30 天野外测试，系统在 $-10^\circ\text{C}\sim 45^\circ\text{C}$ 环境温度下持续运行，数据有效率达 99.2%，无明显漂移；3) 响应速度：数据采集周期可低至 5 分钟/次，应急响应时间 ≤ 10 分钟，较传统人工监测（响应时间 ≥ 2 小时）提升 100%。

2 阵列式智能监测系统设计与数据处理技术研究

2.1 监测系统架构设计

阵列式位移计监测系统采用“现场处理层-中间传输层-移动监控层”三层架构：1) 现场处理层：由 MEMS 加速度计和 MEMS 处理器组成，负责收集重力加速度信息，完成原始数据采集；2) 中间传输层：含 4GDTU 和数据传送装置（合称采集器），数据采集器按预设逻辑采集监控数据，4GDTU 模块实现现场与移动端数据通讯；3) 移动监控层：由上位机接

收端和云平台服务器构成,云平台负责通讯连接、数据传送及储存,上位机软件具备数据采集、图像输出、数据分析等功能,数据经解算后清晰展示并自动存储,便于后续调用分析。

2.2 阵列传感器布设方案

典型航道护岸监测内容如下表所示:

表1 护岸监测内容

监测内容	监测点数量	备注
地表水平位移、竖直位移	3	使用阵列位移计:平台处设计孔深 3m,测点步距 100m;
深层水平位移	3	使用阵列位移计:孔深 3m,深层测点间距 0.5m;

2.3 监测数据处理

2.3.1 数据采集

阵列式位移计由 N 个等长的监测单元串联而成。、监测单元内的 MEMS 加速度计检测自身重力场的变化,计算监测单元倾角。监测单元的长度为 L 已知,便可得到单个监测单元的变化量 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 。坐标原点可以设置在地底的远端静默段或者靠近地面出口处的近端静默段。每个测点的位移量以前一个测点为基准点进行计算,每个测点的位移量以前一个测点为基准点进行计算,则监测单元三个方向的位移为:

$$X_i = L \sin \theta_i$$

$$Y_i = L \sin \Psi_i$$

$$Z_i = L \cos \Phi_i$$

其中: i 是监测单元的编号,每个监测单元的位移量进行累加,就能得到整个阵列式位移计的 3D 姿态。对每个测点 (X, Y) 坐标进行累加,就能够绘制 X-Y 投影图;同理可绘制 X-Z 和 Y-Z 投影图。

2.3.2 数据处理方法

航道护岸土体自动化监测数据易受电磁场干扰、电压不稳等因素影响产生误差。其产生原因如下表所示:

表2 变形值和误差的类别及原因

数据类别	类别	原因
变形值	趋势性变化	内部未达到稳定状态或向某一方位产生位移
	周期性变化	温度、气候、风力作用、阳光辐射

监测误差	特殊性变化	等周期性影响 人为加固、地震等外力强制作用
	粗差	人为观测误差或仪器不稳定引起的
	偶然误差	监测仪器精度或外部环境引起的
	系统误差	仪器对环境的不适应或监测原理、方法的不完善引起的

本文采用小波分析。它能够在不同时间尺度上用不同的频率分辨率来分析信号,较为准确地掌握数据的特征。

(1) 小波分析的形式

对于任意实数对 (a, b), 其中参数 a 必须为非零实数,称如下形式的函数:

$$\Psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$$

由小波母函数 $\Psi(x)$ 生成的依赖于参数 (a, b) 的连续小波函数,简称小波。其中, a 为缩放因子; b 为平移因子。

信号 $f(x)$ 的离散小波变换定义为:

$$W_f(2^i, 2^i k) = 2^{-i/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Psi(2^{-i} x - k) dx$$

其逆变换(重构信号)为:

$$f(t) = C \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} W_f(2^i, 2^i k) \Psi_{(2^i, 2^i k)}$$

2.4 预警阈值建立

2.4.1 阈值确定方法

本文采用多指标联合预警方式,包括改进切线角模型、位移加速度及降雨等指标,公式如下:

$$T_i = \frac{S_i}{\bar{v}}$$

式中: T_i — i 时刻位移经无量纲化处理后的纵坐标值;

S_i — i 时刻的累计位移;

\bar{v} —结构在变化前等速变形阶段时的位移速率。

在无量纲化处理后便可以计算改进切线角的数值,公式如下:

$$\alpha_i = \arctan \frac{T_i - T_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

式中： α_i —改进切线角；

T_i 、 T_{i-1} —位移经无量纲化处理后的纵坐标值；

t_i 、 t_{i-1} —相应的监测时刻。

3 工程应用及成效分析

3.1 工程应用概述

依托工程航道全线有 A 型、B1 型、B2 型、C1 型、C2 型、C3 型 6 种护岸结构型式，其中 A 型和 C（1、2、3）型临水面采用钢板桩防漏土，B（1、2）型采用水泥搅拌桩防漏土。

B1（B2）型护岸为钻孔灌注桩结构，钻孔灌注排桩桩径 $\Phi 1.0\text{m}$ 、间距 1.1m，桩顶用混凝土帽梁连接，桩背水面采用桩径 $\Phi 0.6\text{m}$ 、间距 0.45m 的水泥搅拌桩防漏土。该类型护岸虽有承载力高、稳定性好等优点，但灌注桩施工工序繁琐，易产生缩颈、坍孔等缺陷，水泥搅拌桩施工依赖人工，监测存在数据滞后性。因此，选取左岸桩号 K9+255~9+764 区间 K9+260、K9+290、K9+330 三个断面进行监测，监测深度约 3m，竖向每 0.5m 一个测点。

阵列式位移计采用基于 MEMS 加速度计的 SAA 阵列式位移测量系统，可获得准连续变形信息；2）数据传输主机设备：通过有线或无线方式采集传感器数据，经串口连接 GPRS 模块远程传输至上位机数据库，可接收上位机指令进行参数及工作状态设定；3）供电系统：采用太阳能供电方式，配备 75W 太阳能电池板和 1000Ah 蓄电池。

3.2 应用成效分析

航道护岸边坡自动化监测系统稳定运行 60 天，展现出以

下特点：1）稳定性：采用先进传感器技术，测量精度高，数据准确稳定；抗干扰能力强，配备专用避雷元器件，采用无线通信技术减少干扰；具备全天候工作能力，确保监测不间断；2）长期运行能力：太阳能供电系统可无外接电源长时间稳定运行，降低运营成本；实现数据自动化、智能化监控采集，提高效率并减少人为影响；可保存监测数据形成数据库；预留通信接口，具备良好可扩展性和兼容性。

阵列式传感器护岸水土流失自动化监测技术的应用成效显著：1）24 小时不间断自动化监测，无需人工干预；2）通过传感器实时监测土体位移数据，避免人为因素影响；3）减少人员进入施工区域的频次；4）数据自动采集、处理和分析；5）实时监测分析土体位移数。

4 总结

本研究立足航道高边坡安全监测的实际需求，将 MEMS 加速度计技术与阵列式位移测量技术有机融合，成功构建了集数据采集、传输、分析与预警于一体的智能监测技术体系。研究通过系统的核心器件选型优化，确定适配的 MEMS 加速度计为核心传感元件，优化传感器阵列布设参数，保障边坡变形监测的精准性；通过构建三层监测系统架构，引入小波分析数据去噪技术与多指标联合预警机制，显著提升了监测数据的可靠性与预警决策的科学性。工程实践验证表明，该监测系统有效克服了传统监测方法的固有限制，在边坡变形捕捉的及时性与准确性方面表现突出，为航道高边坡及同类基础设施的安全防控提供了高效、可靠的技术方案，具有重要的工程应用价值与推广前景。

参考文献：

- [1] 许强. 滑坡的变形破坏行为与内在机理[J]. 工程地质学报, 2012, 20(02): 145-151.
- [2] Cannon, S.H., Boldt, E.M., Laber, J.L. et al. Rainfall intensity - duration thresholds for post-fire debris-flow emergency-response planning [J]. Nat Hazards, 2011, 59(1): 209-236.
- [3] 邱冬炜, 祝思君, 等. 利用阵列式位移传感系统进行地质灾害深部位移动态监测与分析[J]. 测绘通报, 2018(03): 122-125+129.
- [4] 卞晓卫, 蒋剑, 余德平, 等. 超长管路水管式沉降仪在阿尔塔什水利枢纽工程中的应用研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(S1): 147-150.
- [5] T. Abdoun, V. Bennett, L. Danisch, M. Barendse. Real-time construction monitoring with a wireless shape-acceleration array system [M]. GeoCongress 2008: PP533-540.
- [6] 许强, 曾裕平, 钱江澎, 王承俊, 何成江. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据[J]. 地质通报, 2009, 28(04): 501-505.
- [7] Bennett, V., T. Abdoun, L. Danisch, T. Shantz, and D. Jang. "Unstable Slope Monitoring with a Wireless Shape-Acceleration Array System," ASCE Conf. Proc. 307, 38, 2007.
- [8] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社. 1999.