

# 基于加速度传感器的倾斜监测仪设计及测量误差补偿

陆运章<sup>1,2</sup>, 卿宗胜<sup>1,2</sup>, 王冬霞<sup>3</sup>, 黄齐鸣<sup>1,2</sup>, 张佳亮<sup>1,2</sup>, 周蒙<sup>1,2</sup>, 颜秀文<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国电子科技集团公司第四十八研究所, 湖南 长沙

<sup>2</sup>中国-埃及可再生能源“一带一路”联合实验室, 湖南 长沙

<sup>3</sup>天津职业技术师范大学自动化与电气工程学院, 天津

收稿日期: 2024年4月25日; 录用日期: 2024年7月8日; 发布日期: 2024年7月16日

## 摘要

本文针对地质灾害中常见的山体滑坡问题, 提出了一种基于加速度传感器的倾斜监测仪设计方案。该监测仪采用无线通信技术, 具备低功耗特性, 能够实时获取被测点的加速度和倾斜角度数据。实验结果表明, 该监测仪在误差补偿后能够提供较高的测量精度, 满足地质灾害监测的需求。此外, 该设计方案在成本、功耗、通信距离和可靠性等方面表现出较好的综合性能, 应用前景广泛。

## 关键词

倾斜监测仪, 加速度传感器, 误差补偿

# Design and Measurement Error Compensation of Tilt Monitor Based on Acceleration Sensor

Yunzhang Lu<sup>1,2</sup>, Zongsheng Qing<sup>1,2</sup>, Dongxia Wang<sup>3</sup>, Qiming Huang<sup>1,2</sup>, Jiali Zhang<sup>1,2</sup>, Meng Zhou<sup>1,2</sup>, Xiuwen Yan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>The 48<sup>th</sup> Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Changsha Hunan

<sup>2</sup>China-Egypt Renewable Energy “Belt and Road” Joint Laboratory, Changsha Hunan

<sup>3</sup>School of Automation and Electrical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin

Received: Apr. 25<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 8<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 16<sup>th</sup>, 2024

文章引用: 陆运章, 卿宗胜, 王冬霞, 黄齐鸣, 张佳亮, 周蒙, 颜秀文. 基于加速度传感器的倾斜监测仪设计及测量误差补偿[J]. 传感器技术与应用, 2024, 12(4): 630-637. DOI: 10.12677/jsta.2024.124068

## Abstract

In this paper, a design scheme of tilt monitor based on acceleration sensor is proposed to solve the common landslide problem in geological disasters. The monitor adopts wireless communication technology with low power consumption, and can obtain the acceleration and tilt angle data of the measured point in real time. The experimental results show that the monitor can provide higher measurement accuracy after error compensation, and meet the needs of geological disaster monitoring. In addition, the design scheme shows good comprehensive performance in the aspects of cost, power consumption, communication distance and reliability, and has a wide application prospect.

## Keywords

Tilt Monitor, Acceleration Sensor, Error Compensation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

倾斜监测仪作为一种重要的结构健康监测设备, 主要用来监测边坡路基、房屋建筑、桥梁等结构体的倾斜变化情况[1]。倾斜监测仪具有分辨率高、测量角度范围大、易于集成等优点[2], 广泛应用于工程施工、危房监测、桥梁监测和地质灾害评估等领域[3]-[5]。

地质灾害中泥石流、山体滑坡是严重且常见的灾害, 应用高效的监测技术对于提前预警和防范这些灾害至关重要[6]。传统的地质灾害监测方法, 如大地形变位移测量、裂缝位移测量和宏观地质调查法, 观测误差较大, 预警信息滞后, 时效性差[7]。随着 MEMS (微电机系统)技术和通信技术的快速发展, 加速度传感器的精度、稳定性和抗干扰能力得到了显著提升。MEMS 加速度传感器因其小尺寸、低功耗和高集成度而在倾斜监测仪设计中广泛应用[8]。此外倾斜监测仪的设计越来越倾向于智能化, 包括实时数据处理、异常状态报警和远程监控功能。通过集成先进的信号处理和模式识别算法, 倾斜监测仪能够更智能地识别和响应倾斜事件[9]。本文的研究基于加速度计的倾斜监测仪, 采用低功耗设计和物联网技术, 将其固定在预埋于山体中的支架上, 通过长期监测山体的形变状态, 可以监测出山体滑坡前的一些细微变化, 并在发生滑坡时可实时上报告警信息, 能为地质灾害监测和预警提供较为可靠的数据支撑。

## 2. 倾角测量原理

倾斜监测仪一般由加速度传感器及相关数据采集、传输电路等部件等组成。其中加速度传感器用来测量被测对象的倾斜状况, 有单轴、双轴、三轴几种类型。单轴加速度传感器只含有一个敏感轴; 双轴加速度传感器中含有两个敏感轴, 且两轴互相垂直; 三轴加速度传感器中含有三个敏感轴, 它们互相正交。

对于采用三轴加速度传感器的倾斜监测仪而言, 其角度测量的示意图如图 1 所示, 它是通过倾斜监测仪内置的加速度传感器某一敏感轴上的重力分量大小来确定被测物体的倾斜状况。

如图 1 所示, 倾斜监测仪通过加速度测量倾角的基本原理是利用重力加速度与对应轴之间的三角函数关系, 按照平行四边形法则获取, 对应的倾斜角计算关系如公式(1)所示[10]。

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(g_x / \sqrt{g_y^2 + g_z^2}\right) \\ \psi = \arctan\left(g_y / \sqrt{g_x^2 + g_z^2}\right) \\ \phi = \arctan\left(\sqrt{g_x^2 + g_y^2} / g_z\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\theta$  表示水平面与加速度计 x 轴之间的夹角,  $\psi$  表示水平面与加速度计 y 轴之间的夹角,  $\phi$  表示重力矢量与 z 轴之间的夹角。当位于 x 和 y 轴的 0 g 以及 z 轴的 1 g 初始位置时, 所有计算的角度均为  $0^\circ$ 。

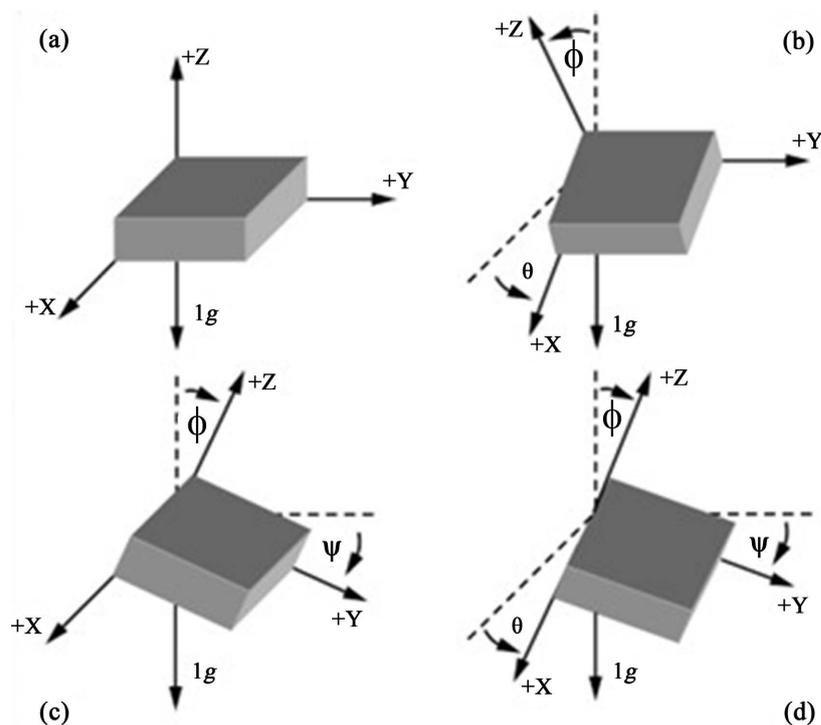


Figure 1. Schematic diagram of independent tilt detection angles in a three-axis system  
图 1. 三轴系统中独立倾斜检测的角度示意图

### 3. 系统设计

#### 3.1. 硬件设计

倾斜监测仪由箱体、光伏电池板、内置储能电池、主电路板和外置天线等构成, 产品集供电、数据采集和传输等功能于一体。系统工作框图如图 2 所示, 硬件电路按照功能分为主电路板(包括倾角数据采集、无线数据传输等)和电源电路(包括光伏充电、锂电池充放电)。主电路板采集到倾斜状态信息后, 通过数据传输模块与天线将数据通过物联网远程传输, 实现通信和报警功能。

作为倾斜监测仪的电能提供部件, 光伏电池板采用单晶硅光伏电池作为发电单元, 单晶硅光伏电池具有较高的转换效率和较大的功率输出。封装盖板材料采用聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene terephthalate, 缩写: PET), 通过层压而成, 与环氧树脂滴胶封装的光伏电池板相比, PET 层压的光伏电池板具有透光性好、耐磨耐腐蚀、抗压性能强、使用寿命长等优点。

作为倾斜监测仪的储能部件, 采用 2 节 18,650 锂离子电池并联, 额定电压 3.7 V, 电池容量达到 7000 mAh。光伏电池板在有阳光照射的条件下可为锂电池充电, 可实现倾斜监测仪的自供电, 减少维护成本,

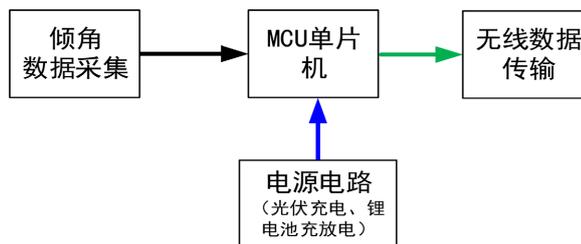


Figure 2. System working principle diagram  
图 2. 系统工作原理框图

满足长期工作需求。

倾斜监测仪内部的加速度传感器，采用 ADXL 的数字 MEMS 加速度传感器，该加速度传感器是一种三轴(xyz)倾角传感器，具有四种测量模式，可用于优化传感器的性能，以满足不同的应用和需求。该加速度传感器具有高度集成的专用芯片包括用于信号处理的混合信号 ASIC，以及一个灵活的数字接口，减少了对外部 ADC 的需求，降低了尺寸、功耗和设计复杂性。此外，该加速度传感器在正常使用时的电流消耗仅为 1~2 mA。在倾斜监测仪休眠模式下，典型的休眠电流仅为 3  $\mu$ A。倾斜监测仪可以通过光伏电池板结合储能电池实现长期稳定工作，十分适用于边坡、结构健康监测等长期静态监测应用场景。

倾斜监测仪的数据传输模块采用移远 NB-IoT (Narrow Band Internet of Things, 窄带物联网)专用芯片，芯片支持移动、电信等多种通信网络，发射功耗低，峰值电流约 200 mA，平均电流为 35 mA。采用覆盖率高的 NB-IoT 移动通信网络进行数据通信，与 LoRa (Long Range, 长距离无线通信技术)通信方式相比，无需自建站，可以有效降低监测成本，且具有较高的数据传输可靠性和稳定性。

倾斜监测仪的箱体采用铝合金材料，箱体连接处使用密封垫密封，用于防水。外置的接插件采用密封圈和防水胶密封，设计产品的防水性能等级为 IP67，可应用于户外环境。

### 3.2. 软件设计

在倾斜监测仪的软件设计方面，合理的工作流程设置对于整个系统的功能实现至关重要。倾斜监测仪的工作流程为：设备上电后，首先进行硬件初始化和 GPS 定位，确保获取到准确的地理位置信息。随后，设备进入数据获取阶段，持续监测并记录倾斜角度。在正常工作模式下，倾斜监测仪设备会根据程序预设的时间规划周期性地唤醒，采集数据，并在设定的时间点进行数据上报至云平台，上报数据包括设备编号、记录时间、x 轴和 y 轴的倾斜角度等设备状态信息。设备设置有角度和加速度阈值触发功能，如果监测到设备当前的角度或加速度超过预设的阈值，将触发报警，进入告警模式，通过通信模块实时将告警信息和相关数据上报至云平台。系统主程序流程图见图 3。

为了提高倾斜监测仪的预警效果，确保其能够准确、及时地反映结构物的倾斜状况，需要配合使用专门的云平台软件，其主要功能包括：数据接收与处理、远程参数配置和实时预警机制。云平台软件通过与倾斜监测仪的组合，提高了监测数据的准确性和实时性，增强了预警系统的响应能力。

## 4. 实验验证

该倾斜监测仪在户外条件下运行了 7 个月，经过实测，该设备完好。如图 4 所示，云平台显示数据按设置的周期定时上报，监测数据正常，电池电量一直保持在 100%。通过倾斜模拟现场滑坡故障，该设备平均报警响应时间为 28 秒(含唤醒启动、联网、显示等整个预警流程)，设备的功耗、响应时间、通信距离及可靠性等多个方面均达到了地质灾害监测中对山体滑坡倾斜监测的需求。

针对倾斜监测仪的测量精度也进行了测试。在实验室环境下，将倾斜监测仪固定在分度台上，实验

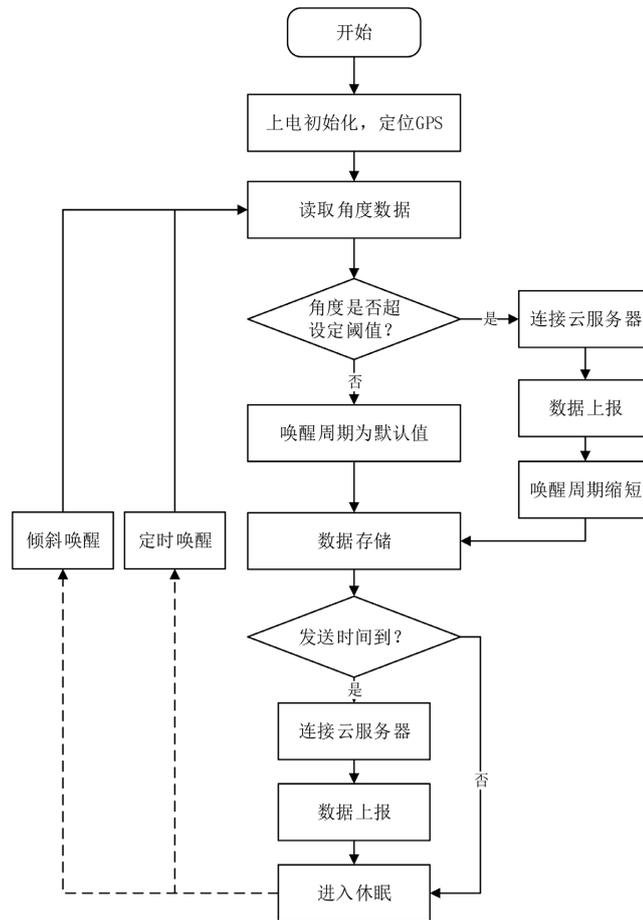


Figure 3. Main program flow control diagram  
图 3. 主程序流程控制图



Figure 4. Tilt monitoring instrument data curve running outdoors for 7 months  
图 4. 倾斜监测仪在户外运行 7 个月的数据曲线

选取 x 轴方向设置多个角度进行测试, 设置的倾斜角度范围为 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ , 测量的倾斜角数据如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 在环境温度较为稳定的室内, 经去极值平均滤波后, 在不同角度下, 倾斜监测仪测量的倾角值均与分度台设置的倾角值基本一致, 最大示值误差为  $0.103^{\circ}$ , 平均示值误差为  $0.031^{\circ}$ , 相对精度平均值为  $0.46\%$ , 表明倾斜监测仪能够满足边坡地灾监测场景的在线监测精度要求(通常为  $0.1^{\circ}$ )。

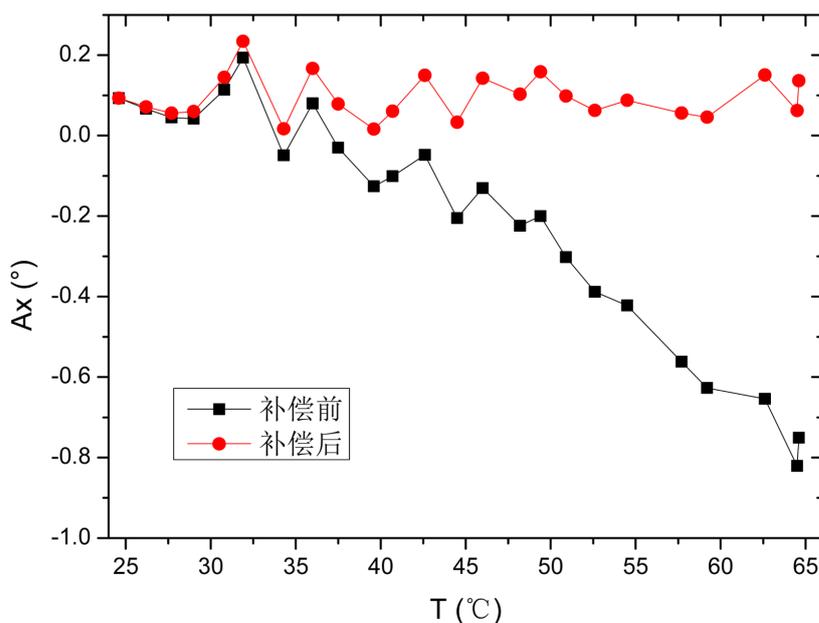
由于倾斜监测仪主要用于户外场景, 不同季节下环境温度变化较大, 内置的加速度传感器输出值受温度影响较大, 需对其测量值进行温度补偿, 以减小测量误差。为进行试验验证, 采用高低温箱设置不同温度对倾斜监测仪进行测试, 设置温度区间为  $25^{\circ}\text{C}\sim 65^{\circ}\text{C}$ 。倾斜监测仪输出的 x 轴与 y 轴角度值(分别为  $A_x$  和  $A_y$ )与温度的曲线如图 4 所示。

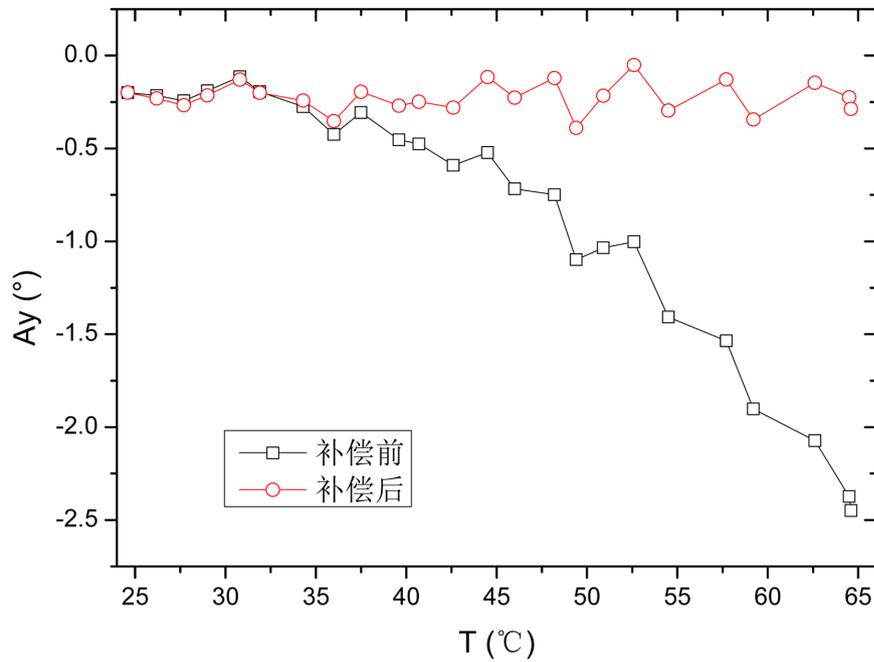
由图 5 可看出, 倾斜监测仪位置保持不动, 在温度补偿前, 测量的 x 轴与 y 轴角度值随着环境温度的升高逐渐降低, 环境温度的变化产生了较大的测量误差, x 轴角度值从  $0.1^{\circ}$  变化到  $-0.8^{\circ}$ , y 轴角度值从  $-0.1^{\circ}$  变化到  $-2.5^{\circ}$ 。通过二项式拟合, 温度补偿后的角度值  $A_x$  和  $A_y$  见表 2。根据表 2 可知, 经过温度补偿后, 倾斜监测仪测量的角度值对温度依赖性大幅降低, 补偿后的角度值  $A_x$  和  $A_y$ , 其测量误差均低于  $\pm 0.1^{\circ}$ 。

**Table 1.** Angles and error values measured by tilt monitoring instrument

**表 1.** 倾斜监测仪测量的倾角值与误差值

| 设置倾角值/ $^{\circ}$ | 测量倾角值/ $^{\circ}$ | 示值误差值/ $^{\circ}$ | 相对精度/% |
|-------------------|-------------------|-------------------|--------|
| 0                 | 0.025             | 0.025             | /      |
| 3                 | 2.988             | 0.012             | 0.40   |
| 6                 | 5.962             | 0.038             | 0.63   |
| 10                | 9.974             | 0.026             | 0.26   |
| 20                | 20.001            | 0.001             | 0.01   |
| -3                | -3.014            | 0.014             | 0.47   |
| -6                | -6.049            | 0.049             | 0.82   |
| -10               | -10.103           | 0.103             | 1.03   |
| -20               | -19.991           | 0.009             | 0.05   |





**Figure 5.** The variation curves of the x-axis and y-axis angle values of the tilt monitor before and after temperature compensation

**图 5.** 倾斜监测仪在温度补偿前后的 x 轴与 y 轴角度值变化曲线

**Table 2.** Comparison of angle values of the tilt monitor before and after temperature compensation

**表 2.** 倾斜监测仪在温度补偿前后的角度值对比

| T (°C) | Ax (°) | Ay (°) | 补偿后 Ax (°) | 补偿后 Ay (°) |
|--------|--------|--------|------------|------------|
| 24.6   | 0.093  | -0.199 | 0.093      | -0.199     |
| 26.2   | 0.067  | -0.215 | 0.071263   | -0.2313    |
| 27.7   | 0.045  | -0.243 | 0.055623   | -0.2668    |
| 29     | 0.042  | -0.19  | 0.059987   | -0.21422   |
| 30.8   | 0.114  | -0.114 | 0.145019   | -0.12946   |
| 31.9   | 0.194  | -0.195 | 0.234606   | -0.19977   |
| 34.3   | -0.049 | -0.275 | 0.016792   | -0.2424    |
| 36     | 0.08   | -0.424 | 0.167176   | -0.35327   |
| 37.5   | -0.03  | -0.307 | 0.078486   | -0.1946    |
| 39.6   | -0.126 | -0.453 | 0.016162   | -0.26961   |
| 40.7   | -0.101 | -0.475 | 0.060592   | -0.24854   |
| 42.6   | -0.048 | -0.591 | 0.150051   | -0.28061   |
| 44.5   | -0.205 | -0.522 | 0.033181   | -0.11561   |
| 46     | -0.13  | -0.717 | 0.142456   | -0.22629   |
| 48.2   | -0.224 | -0.749 | 0.102864   | -0.121     |
| 49.4   | -0.2   | -1.099 | 0.158616   | -0.38929   |
| 50.9   | -0.302 | -1.035 | 0.098365   | -0.21638   |

续表

|      |        |        |          |          |
|------|--------|--------|----------|----------|
| 52.6 | -0.388 | -1.002 | 0.062446 | -0.05085 |
| 54.5 | -0.422 | -1.407 | 0.087898 | -0.29628 |
| 57.7 | -0.562 | -1.536 | 0.056324 | -0.12925 |
| 59.2 | -0.627 | -1.902 | 0.045733 | -0.34469 |
| 62.6 | -0.654 | -2.073 | 0.150532 | -0.14655 |
| 64.5 | -0.821 | -2.374 | 0.062304 | -0.22443 |
| 64.6 | -0.751 | -2.449 | 0.136552 | -0.28735 |

## 5. 结束语

针对地质灾害,特别是山体滑坡的倾斜状态监测,本文以无线通信和低功耗作为主要设计考量,基于三轴加速度传感器开发了一种倾斜监测仪。实验结果表明,该倾斜监测仪在功耗、响应时间、通信距离及可靠性等方面均达到了地质灾害监测中对山体滑坡倾斜监测的需求,在测量精度方面,在 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 倾斜角度范围内,倾斜监测仪的平均示值误差为 $0.031^{\circ}$ 。在 $25^{\circ}\text{C}\sim 65^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,经过误差补偿后,该监测仪仍能提供高精度的测量结果,测量误差均低于 $\pm 0.1^{\circ}$ ,满足地质灾害在线监测的精度要求,为成本敏感的地质灾害监测场合提供了一种低成本解决方案,应用前景广泛。

## 参考文献

- [1] 江的丽,匡绍君,汤忠国,等. 电子倾角仪在高大建筑物变形监测中的应用[J]. 工程勘察, 1995(1): 57-59+63.
- [2] 舒恺,郭高鹏,张洁,等. 基于惯性传感器的电力线路杆塔倾斜监测装置设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 18-23.
- [3] 文香稳,潘明华,朱国力. 倾角仪特性研究及其测量误差补偿[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(3): 84-86.
- [4] 李冰,韩彦东. 一种基于 MEMS 倾角测量仪的设计与验证[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(2): 75-79.
- [5] 刘伟,李杰,刘一鸣. MEMS 数字倾角仪的标定补偿方法研究[J]. 传感技术学报, 2016, 29(6): 892-896.
- [6] 樊锐,高树华,王丹. 基于 SCA103T 与 ATmega8A 数字倾角仪的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2015(1): 27-30.
- [7] 王振兴,贺长水,高明杰,等. 基于零位标定与温域补偿的精密倾角仪设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2015(6): 103-106.
- [8] 刘宇,鞠文斌,刘羽熙. MEMS 加速度传感器计量检测技术的研究进展[J]. 计测技术, 2010, 30(4): 5-8.
- [9] 乔美英,许城宽,汤夏夏,等. DA-LM 算法在 MEMS 加速度传感器误差校正中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(2): 223-231.
- [10] 张波. 基于 MEMS 传感器的大量程高精度倾角仪设计[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2018.