

基于Arduino融合的山体滑坡监测系统

高梓桐 胡兴杰 周宇浩 陈敬烽 牛泽昊

延安大学 物理与电子信息学院, 中国·陕西 延安 716000

摘要: 针对全球气候变化背景下山体滑坡等地质灾害频发、传统监测方式实时性不足及成本较高等问题, 设计一种基于 Arduino 平台的山体滑坡智能监测与预警系统, 系统集成位移传感器、电容式土壤湿度传感器及谐振式声发射传感器, 对山体形变、土壤含水率变化和内部破裂特征进行实时监测。采用卡尔曼滤波算法对传感器数据进行降噪处理, 并结合 D-S 证据理论实现多源信息融合与风险判定。系统通过 GSM 网络传输监测数据, 结合移动端应用和现场蜂鸣器报警装置, 实现远程与现场双重预警。测试结果表明, 该系统预警响应时间小于 3s, 预警准确率超过 95%。系统能够较为准确地识别山体异常状态, 并及时发出预警信息。

关键词: Arduino 单片机; 多传感器集成; 卡尔曼滤波; D-S 证据理论; GSM 通信; 山体滑坡预警

Arduino-Based Multi-Sensor Fusion Landslide Monitoring System

Gao Zitong, Hu Xingjie, Zhou Yuhao, Chen Jingfeng, Niu Zehao

College of Physical and Electronic Information, Yan'an University, China Shaanxi Yan'an 716000

Abstract: To address the frequent occurrence of geological disasters such as landslides under the context of global climate change, along with the insufficient real-time performance and high cost of traditional monitoring methods, an intelligent landslide monitoring and early warning system based on the Arduino platform is designed. The system integrates displacement sensors, capacitive soil moisture sensors, and resonant acoustic emission sensors to enable real-time monitoring of slope deformation, soil moisture content variations, and internal rupture characteristics. The Kalman filtering algorithm is employed for noise reduction of the sensor data, and the D-S evidence theory is incorporated to achieve multi-source information fusion and risk assessment. The system transmits monitoring data via the GSM network and combines a mobile application with an on-site buzzer alarm device to provide dual warning (remote and on-site). Test results show that the system achieves an early warning response time of less than 3 seconds and a warning accuracy exceeding 95%. The system can reliably identify abnormal slope conditions and issue timely warnings.

Keywords: Arduino microcontroller; Multi-sensor integration; Kalman filtering; Dempster-shafer evidence theory; GSM communication; Landslide early warning

0 引言

近年来, 受全球气候变化及人类工程活动影响, 山体滑坡等地质灾害发生频率有所上升, 对人民生命财产安全和区域生态环境构成严重威胁^[1]。传统监测方式主要依赖人工巡查或单点传感器, 存在实时性不足、监测范围有限及部署成本较高等问题, 难以满足复杂地质条件下的连续监测与精准预警需求^[2]。因此, 研究具有实时监测、多源感知和低成本部署特点的山体滑坡预警系统具有重要的应用价值。当前, 多传感器融合技术为突破传统监测局限提供了新路径。通过集成多设备, 同步获取多维参数, 实现对滑坡前兆的综合研判^[3]。然而, 现有系统常面临数据异构性强、噪声干扰大、决策模型泛化能力不足等问题, 导致预警准确性受限^[4]。为此, 本研究提出一种基于 Arduino 单片机的多传感器融合山体滑坡监测系统, 通过卡尔曼滤

波动态优化传感器数据, 结合 D-S 证据理论实现多源信息协同决策, 利用 GSM 技术实现低功耗远程数据传输, 并通过移动端应用提供实时可视化预警。

1 系统总体设计

本系统采用分层架构设计, 构建由感知层、处理层、通信层、存储层和数据流组成的模块化山体滑坡监测网络。各层之间相互独立又协同工作, 便于系统后续扩展、维护及功能升级。系统总体框架如图 1 所示

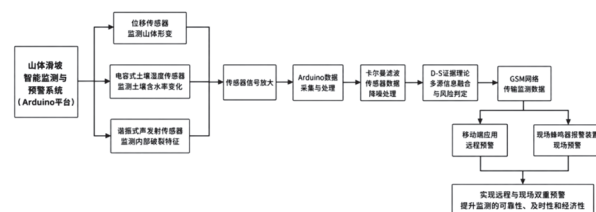


图1 山体滑坡预警器硬件流程图

感知层借助应变式位移传感器、陶瓷电容式土壤湿度传感器,以及谐振式声发射传感器,达成对山体表面形变、土壤含水率变化和声信号传达的山体内部破裂特征的多维度数据采集,用 I2C/UART 协议来传输与调制信号。

处理层以 Arduino Uno 开发板为根基,借助 C++ 编程来达成数据融合的算法,对采集到的 0-1023 量化值进行阈值判据的判别以及异常检测,如此一来,就能保证数据处理实时且准确。

通信层运用双冗余预警机制,借助 GSM 模块以及蜂鸣器模块来实现分级响应^[5]。在硬件方面,GSM 模块把 SIM 卡接口电路和 π 型电源滤波网络整合起来了,来保证信号完整,还采用了贴片式巴伦电路来优化天线匹配,驻波比控制在 1.5 以内,以此保障短信发送的成功率。通信协议运用 AT 指令集和 TinyGSM 库构建起来,借由串口中断服务程序达成波特率自适应配置^[6]。

存储层则基于 SD 卡模块完成历史数据的存储归档。各层建立起“采集——处理——预警——存储”闭环架构^[2],借助分布式节点部署构建体化监测网络,主控单元凭借动态调度算法协调多模块协同工作,极大提高系统的鲁棒性和预警可靠性。

数据流由 Arduino 首先对原始数据进行模数转换和格式统一,并利用卡尔曼滤波算法进行降噪处理。随后,系统提取位移变化量、土壤湿度增量和声发射信号强度等关

键特征,并将其输入 D-S 证据融合模型。经过多源数据融合后,系统生成对应的风险判定结果,并将监测数据、风险等级和时间信息组成数据包,发送至汇聚节点。汇聚节点接收多个监测点的数据后,经 GSM 网络上传至远程平台。平台对数据进行存储和可视化展示,并将异常信息推送至移动端。

2 系统硬件设计

2.1 控制器及外围电路

本系统以 Arduino Uno R3 为核心控制单元,其主控芯片采用 ATmega328P-PU,该芯片具有 14 个数字输入/输出引脚,其中 6 个引脚支持 PWM 输出,并配置 6 路模拟输入通道和 1 路 UART 硬件串口,可满足位移传感器、电容式土壤湿度传感器、谐振式声发射传感器及通信模块的接口需求。此外,ATmega328P-PU 具有 32 KB Flash 程序存储器、2 KB SRAM 和 1 KB EEPROM,运行频率为 16 MHz,能够完成多源监测数据的采集、初步处理及预警指令输出^[7]。系统主控模块原理图如图 2 所示。

传感器接口层包括位移传感器、土壤湿度传感器以及谐振式声发射传感器等多种高精度传感器。这些传感器运用 I²C (Inter-Integrated Circuit) 和 SPI (Serial Peripheral Interface) 这两条总线技术,跟 Arduino 主控单元来通信,保证数据采集是实时的、准确的^[8]。数据处理层运用卡尔曼滤波算法 (Kalman Filter Algorithm) 对多源传感器数据

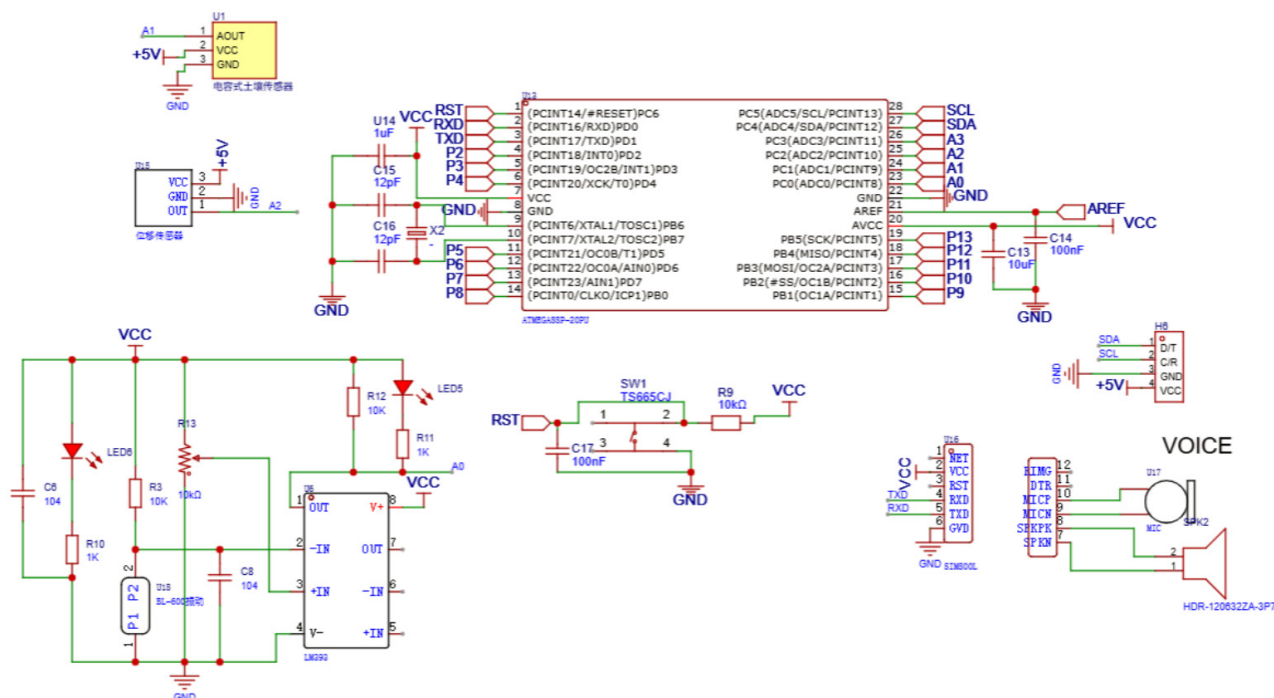


图2 单片机外围电路图

加以融合处理，如此一来，单一传感器的测量误差就大幅降低了，系统的可信度也提高了。

2.2 电源电路

通过多种电压来驱动不同规格的传感器和逻辑芯片，为满足主控模块、传感器及通信模块对不同工作电压的需求，系统采用分级稳压供电方案。外部电源通过 DC1 接口接入，输入电压为直流 12 V。电源首先经过自恢复保险丝 F2 和串联二极管 D2，分别用于限制异常过电流和防止电源反接。经过保护后的 12 V 电源构成系统输入母线。在稳压环节，LM1117T-5.0 线性稳压芯片将 12 V 输入电压转换为 +5 V，为 Arduino 主控模块及适配 5 V 电压的外围器件供电。在此基础上，LM1117T-3.3 进一步将 +5 V 转换为 +3.3 V，为低电压传感器及通信模块提供稳定电源。电源电路如图 3 所示。

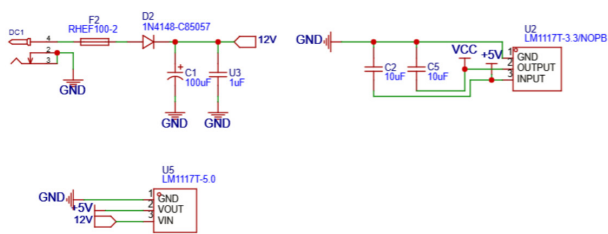


图3 电源电路

3 软件系统设计

系统软件采用 Arduino 兼容的 C/C++ 语言编写，并按照模块化思想进行设计。程序主要包括系统初始化、传感器数据采集、数据有效性校验、卡尔曼滤波、特征提取、D-S 证据融合、风险等级判定、数据传输及报警控制等功能模块。

软件编写的主体思路是首先将系统按功能模块化进行划分，然后根据各个模块要实现的功能编写相应程序。软件设计流程图，如图 4 所示。

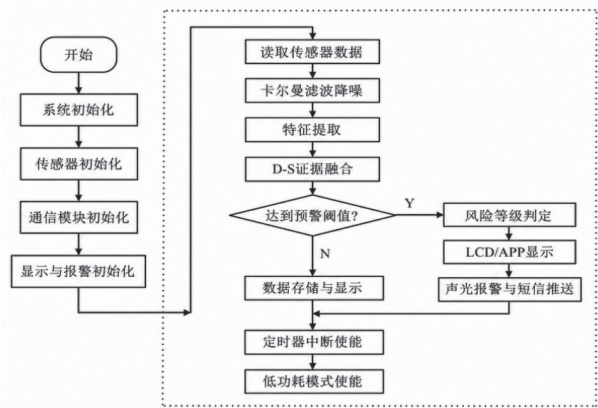


图4 山体滑坡报警流程图

其中，虚线框内为主流程图。系统开始工作后，首先

将各功能初始化，系统初始化完成后，程序进入循环监测状态，按照设定的采样周期读取位移、土壤湿度和声发射传感器数据。为减小环境干扰和传感器波动对监测结果的影响，系统采用卡尔曼滤波算法对原始数据进行降噪处理，并提取位移变化量、土壤含水率变化及声发射信号强度等关键特征。随后，利用 D-S 证据理论对多源监测信息进行融合，计算各风险状态的综合支持度，并判断融合结果是否达到预警阈值。若未达到阈值，系统将监测数据存储并进行常规显示；若达到阈值，则进一步判定风险等级，通过 LCD 和移动端应用显示异常信息，同时启动声光报警并发送短信提醒。完成数据处理后，系统启用定时器中断并进入低功耗模式，待下一采样周期到达后重新唤醒，持续执行数据采集、风险分析和预警控制，实现对山体状态的实时监测。

4 系统实现与测试

表 1 给出了系统从硬件、软件、预警、通信、数据传输等方面进行测试的结果。

表1 基于多传感器融合的山体滑坡监测系统性能参数对比分析

	关键技术/算法	性能参数	单一传感器		多传感器融合 (MSF)	
			数值	单位	数值	单位
硬件层	位移传感器	位移测量误差	1.80	mm	1.1	mm
	土壤湿度传感器 (SMS)	标准差 (SD)	2.60	%VWC	1.45	%VWC
	谐振式声发射传感器	信号检测阈值	83.0	dB	94.0	dB
软件层	卡尔曼滤波(KF)	平均响应时间(ART)	—		4.3	秒
	自适应加权融合算法(AWFA)				2.1	秒
预警功能	异常检测算法(ADA)	预警准确率(WAR)	—		92.6	%
	动态阈值(DT)	土壤湿度预警阈值			80	mV
预警通讯层	规则引擎与状态机	平均预警响应时间	4.30	2.65	s	s
	多级预警	误报率	7.8	%	3.1	%
数据传输	GSM模块 (GSM)	数据上传成功率	—		98.2	%
	手机APP				97.4	%

根据表 1 的对比数据，多传感器融合（MSF）系统在山体滑坡监测的多个关键性能指标上优于单一传感器系统：硬件层面，惯性测量单元的位移测量误差从 1.80 mm 降至 1.1 mm，土壤湿度标准差由 2.60 %VWC 缩减至 1.45 %VWC，测量精度与稳定性大幅提升；软件层面，自适应

加权融合算法的平均响应时间仅 2.1 秒,比卡尔曼滤波快一半以上;预警功能方面,融合后的平均预警响应时间从 4.30 秒缩短至 2.65 秒,误报率由 7.8% 大幅降低至 3.1%,预警准确率达到 92.6%;数据传输上,GSM 与手机 APP 的上传成功率分别高达 98.2% 和 97.4%。

5 结语

本文基于 Arduino 平台成功开发了一套低成本、高可靠性的多传感器融合山体滑坡实时监测系统。系统集成了一位移传感器、电容式土壤湿度传感器和谐振式声发射传感器,能够同步采集岩土体水平位移、土壤含水率及内部破裂特征等多维参数。通过卡尔曼滤波算法有效降低传感器噪声,并结合 D-S 证据理论实现多源信息融合与风险等级判定,系统预警准确率达到 92.6%,误报率从单一传感器的 7.8% 降至 3.1%,满足复杂地质环境下实时监测与及时预警的工程需求,具有良好的推广价值。

参考文献:

[1] 朱淳,龚逸非,宋盛渊等. 滑坡多源监测技术及预警模型研究进展与展望[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(6):

1373-1389.

[2] 李枫林. 基于多传感器信息融合的滑坡监测预警研究[D]. 中国计量大学, 2022.

[3] 龙耀,王霄,杨靖等. 基于 NB-IoT 技术的滑坡监测系统研究[J]. 智能计算机与应用, 2019, 9(6): 221-224.

[4] 贾成君. 基于多传感器的山体滑坡数据采集装置的设计与实现[D]. 西南交通大学, 2020.

[5] 陈荣鹏,樊静. 基于无线惯性传感器网络的山体滑坡实时监测系统[J]. 电子技术与软件工程, 2019(22): 45-46.

[6] 王健,盛庆元. 基于 WSN 与 MEMS 器件的山体滑坡监测系统设计[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(21): 138-142.

[7] 孙晶莹,李绍民,吕明帅等. 基于 TC264 单片机的山体滑坡预警系统设计[J]. 山西电子技术, 2023(5): 4-6, 21.

[8] 杨鹏程,茆学谦,刘畅等. 一种山体滑坡监测装置的原型系统设计[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(28): 42-44.

基金项目: 本文受延安大学 2024 大学生创新创业项目资助,“多角度监测,双保险预警”——山体滑坡监测器,编号: D2024013。