

滑坡灾害临滑声发射监测仪设计

王庆波¹, 程金星¹, 温伟伟¹, 王磊², 郑承银¹

(1. 第二炮兵装备研究院, 北京, 100085; 2. 成都理工大学, 成都, 610059)

摘要: 本文针对目前滑坡灾害临滑预警设备中存在的科学技术问题, 开展了基于声发射技术的滑坡灾害监测仪的功能设计、技术方案设计等, 为相关监测设备的开发提供一定的参考和借鉴。

关键词: 滑坡; 声发射; 监测仪

0 引言

地质灾害的监测是地质灾害防治的一个重要环节。根据滑坡临滑前往往会因岩体破裂产生一定强度的声波(包括超声波、次声波等)的特点, 研制开发基于声波监测技术的滑坡灾害临滑自动预警系统, 实现滑坡灾害临滑的自动预警。通过对近年来我国数十起重大滑坡灾害临滑预警和应急抢险经验与教训的分析总结, 本文针对目前滑坡灾害临滑预警设备中存在的科学技术问题, 开展滑坡灾害临滑信息识别与探测方面的研究。

目前, 国内外滑坡监测技术方法已经发展到较高水平。由过去的人工用皮尺地表量测等简易监测, 发展到仪器仪表监测, 现正逐步发展为自动化、高精度的遥测系统。其监测内容丰富, 监测方法多, 监测仪器多种多样。它们分别从不同侧面反映了崩塌滑坡的动态信息, 以及与崩塌滑坡变形息息相关的其它信息。随着电子技术与计算机技术的发展, 监测方法及所采用的仪器设备将不断得到发展与完善, 监测内容亦更加丰富。

在监测仪器方面类型较多, 大致分为测位移、测倾斜、测应力和测环境因素 4 大类。测位移类仪器包括多点位移计、伸长计、收敛计、短基线、下沉仪、水平位错仪、增量式位移计、三向测缝计及附壁计等。测倾斜类仪器主要有: 钻孔倾斜仪(活动式与固定式)、Sinco 盘式倾斜测量仪、T 字型倾斜仪、杆式倾斜仪及倒垂线 5 种。目前国内使用的钻孔倾斜仪国内产品以美国 Sinco 公司产品居多, 国内产品以航天部产的为主。T 字型、杆式倾斜仪及倒垂线多由监测单位自行设计安装调试。测应力仪器主要有: 压应力计和锚索锚杆测力计等。测环境因素仪器主要有: 雨量计、地下水位自记仪、孔隙水压计、河水流量测仪、温度记录仪及地震仪等。

监测仪器也正在向精度高、性能佳、适应范围广、监测内容丰富、自动化程度高的方向发展。近年来, 随着电子摄像激光技术及计算机技术的发展, 各种先进的高精度的电子经纬仪、激光测距仪相继问世, 为滑坡的监测提供了有效的新手段。

由于崩滑体类型较多, 其特征各异, 变形机理和所处的变形阶段不同, 监测的技术方法也不尽相同。故进行现有各种监测方法的应用范围、功能及适用条件分析很有必要。

我国学者自 20 世纪 80 年代开展了地质灾害预警研究, 铁路系统研制过一种 STH-1 型山体滑坡预警器, 用于观测土石坝、堤防、山体边坡、建筑物基坑等土体内部的水平变化的大小、方向和速率。在泥石流预警仪器研制中开发了接触式泥石流报警器, 地声报警器, 超声波泥位报警仪等, 还开发了 WEB 泥石流视频预警监测系统, 可以通过 INTERNET 快速地获得远程实地的泥石流灾害监视信息, 并发出泥石流到来的预警报。这些设备仪器均不能自动预警, 需要专业技术人员不间断、24 小时观测, 人为因素影响大。就目前而言, 缺少一种能真正准确、自动预警的滑坡灾害临滑预警仪器设备。

1 功能设计

滑坡体临滑监测的主要目的是: 具体了解和掌握滑坡体临滑的演变过程, 及时捕捉滑坡灾害的特征信息, 为滑坡体临滑的正确分析评价、预测预报及治理工程等提供可靠资料和科学依据。同时, 监测结果也

是检验滑坡分析评价及滑坡治理工程效果的尺度。因而，监测既是滑坡体临滑调查、研究和防治工程的重要组成部分，又是滑坡地质灾害预测预报信息获取的一种有效手段。

对一个具体的危岩、滑坡而言，如何针对其特征，如地形地貌、变形机理及地质环境等，选择合适的监测技术和方法，确定理想的监测方案，正确地布置监测点，则是一个值得不断探索的课题。在选择方案时，应通过各种方案的比较，使监测工作做到既经济安全，又实用可靠，避免单方面追求高精度、自动化、多参数而脱离工程实际的监测方案。在选择监测技术方法时，尽量做到宁可少而精，勿要大而全，以适合我国国情。

本监测仪具备以下功能：

(1) 声波的信息采集。利用滑坡体临滑时岩石断裂和摩擦产生的声波信息进行滑坡监测，可以及时得到滑坡体临滑前期的先兆信息。

(2) 声波信号的模拟和数字处理。本系统主要由信号采集部分和数据处理部分两个部分组成。信号采集将滑坡体临滑时岩石断裂和摩擦产生的声波信号采集并传输，数据处理部分对采集的信号进行谱分析及有效信号提取，从而为滑坡声波特性以及分辨奠定基础。

(3) 滑坡声波特性研究。对正在变形的典型滑坡的声波特性进行采集与探测，分析总结滑坡体临滑不同变形阶段的声波信号的特性与规律。

(4) 滑坡体临滑声波波形的预警。针对滑坡实例中所采集到的各类型滑坡实例的声波信息，建立滑坡临滑声波波形的预警模型，为滑坡灾害临滑自动预警设备的完善提供技术保证。

能为岩石破碎实验、滑坡体临滑声发射研究等提供有效的监测数据。通过监测可掌握崩塌、滑坡的变形特征及规律,预测预报崩滑体的边界条件、规模、滑动方向、失稳方式、发生时间及危害性,及时采取防灾措施,尽量避免和减轻灾害损失。

2 技术方案设计

滑坡体临滑声发射监测系统主要由传感器及信号预处理模块、监测主机和滑坡灾害监测分析软件构成。传感器及信号预处理模块主要由高灵敏度声发射传感器、前置放大电路和传感器极化电压电路等组成，完成滑坡体临滑时岩石断裂和摩擦产生的声发射信息的采集和信号的预处理；监测主机对经过预处理的信号进行进一步处理，如隔直、匹配、滤波、放大、差分转换、模数转换等，其组成和相互关系如图 1 所示；上位机通过 RS232 接口对处理后的数据进行储存、显示，以备分析、研究和预报等。

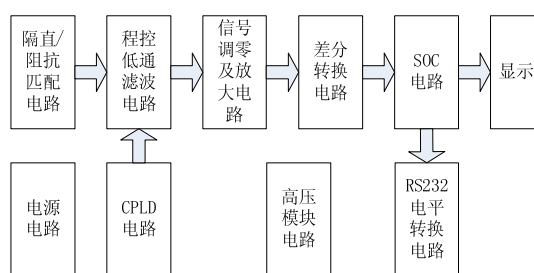


图 1 监测主机组成框图

为了满足山体滑坡临滑时岩土材料变形破裂过程中产生的声发射信号的频率和强度测量要求，传感器选取丹麦 B&K 公司的压力场声发射传感器，型号为 4193 型，能采集的信号频率范围为 0.07 Hz-20 kHz，灵敏度为 12.5mV/Pa；该传感器的典型电容为 15pF。该声发射传感器采集的信号，经过适配器和前置放大器信号预处理后，其小信号的频率响应曲线如图 2 所示。由图 2 可知，在-3dB 处，低频段截止频率为 0.7 Hz 左右（小于 1Hz），同时高频段在-3dB 处，截止频率大于 20kHz，满足 1Hz ~20kHz 的频段要求。

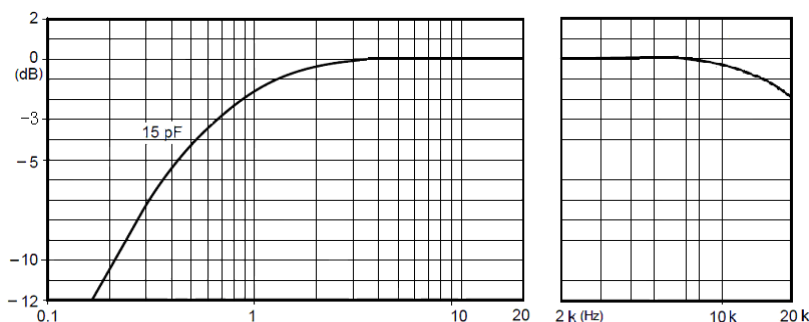


图2 传感器频率响应曲线

滑坡体临滑产生的声发射频率集中在次声和普通声波范围内，且低频成分较多^[3]，因此将滤波电路设置成低通滤波。程控低通滤波电路主要采用工作模式、中心频率和品质因素可编程控制的开关电容滤波器 MAX263 来完成。

利用开关电容滤波器 MAX263 完成滤波器设计，首先需要选择其工作模式。根据 MAX263 数据手册，它有四种工作模式可选。为支持更高的时钟频率，选用工作模式 1。工作模式 1 中有低通、高通、带通和带阻四种滤波输出。根据滑坡临滑产生的声发射特点，选用工作模式 1 中的低通滤波（LP）输出。其次根据设计要求，选择相应的中心频率 f_0 和品质因素 Q 。中心频率 f_0 由 F4~F0 五个引脚设定，并由 f_{clk}/f_0 比值计算得到。本设计中设定 F4~F0 为 10000B（二进制值），根据 MAX263 数据手册可知 f_{clk}/f_0 比值为 150.8。品质因素 Q 由 Q6~Q0 七个引脚设定，在 MAX263 工作于模式 1 时，Q6~Q0 设定为 1000000B（二进制值），根据 MAX263 数据手册， Q 值为 1，低通输出时，不会有太大的过冲。

选定了滤波器的工作模式，设定了 f_{clk}/f_0 比值和 Q 值后，只要改变 MAX263 的输入时钟 f_{clk} ，就能改变其中心频率 f_0 ，从而改变滤波器的截止频率 f_c (-3dB)，得到所需要的频率段的信号。这样在进行不同滑坡体监测时，可以根据其临滑时的声发射特征频率，选用相应的频率段进行监测。设计中采用了二阶低通滤波电路，其截止频率 f_c 与中心频率 f_0 的关系式为：

$$f_c = f_0 \times \sqrt{\left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right) + \sqrt{\left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right)^2 + 1}}$$

截止频率 f_c 与中心频率 f_0 的具体对应关系如表 1 所示。

表1 滤波器输入时钟 f_{clk} 、中心频率 f_0 与截止频率 f_c 的对应关系

输入时钟 f_{clk} (Hz)	中心频率 f_0 (Hz)	截止频率 f_c (Hz)
1k	6.6	8.4
2k	13.3	16.9
4k	26.5	33.7
8k	53.1	67.5
16k	106.1	135.0
32k	212.2	269.9
64k	424.4	539.8
128k	848.8	1.08k
256k	1.70k	2.16k
1.024M	6.79k	8.64k
2.048M	13.58k	17.28k

程控低通滤波器 MAX263 的时钟由 CPLD 电路提供。CPLD 电路可以同时提供多路高质量的时钟，满足程控低通滤波器的不同截止频率设定要求。

SoC 电路以 Silicon Labs 公司的高速微控制器 C8051F060 为核心。C8051F060 内部自带采样率达 1Mps 的 16 位逐次逼近寄存器型 ADC，可直接用于信号的模数转换，而不需要外加 ADC^[6]。

声发射传感器的灵敏度为 12.5mV/Pa，如果需要监测到声压为 0.002~0.02Pa（人们日常谈话的声压）的声发射信号，则需要 ADC 能检测 0.025mV 以上的信号，C8051F060 内部 ADC 可用的参考电压，可以由外部基准源或温度稳定性好的内部带隙电压基准发生器提供，内部带隙电压基准发生器基准电压为 1.25V，根

据 ADC 的转换公式 $0.025 \text{ mV} / 1.25\text{V} = 1/50\ 000 > 1/2^{16}$ 可知, 16 位的 ADC 满足检测声压为 0.002~0.02Pa 的声发射信号的要求。

滑坡体临滑产生的声发射频率集中在次声和普通声波范围内(低于 20 kHz), 且低频成分较多^[3], 根据奈奎斯特采样定理可知, 该 ADC (采样率为 1Msps) 完全能满足该声发射信号的模数转换要求。

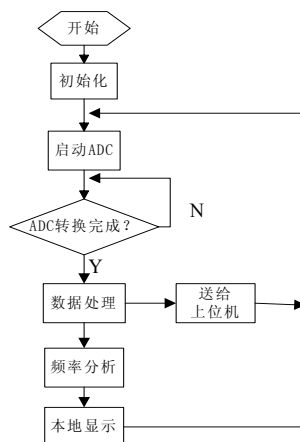


图 3 监测主机软件流程

另外, 利用具有 I²C 接口的实时时钟/日历器件 PCF8563 实现系统声发射信号的时间记录。利用高压模块电路为声发射传感器提供 200V 直流极化电压, 极化电压对电流要求较低, 设计中采用了 5V 至 1000V (1mA) 的升压模块来完成。系统使用了多种电源, 为保证模拟电源和数字电源的相互隔离, 互不干扰, 确保各部分电路可靠运行, 设计了多组电源: 模拟±5V、数字+5V、模拟 3.3V 和数字 3.3V 电压。

滑坡地质灾害监测系统软件由两部分组成: 监测主机软件和上位机软件。

监测主机软件的软件流程如图 3 所示。首先初始化系统工作状态, 包括看门狗设置, 系统时钟设置, ADC 初始化 (ADC 工作模式, 转换时钟, 启动方式, 跟踪方式等), SoC 微控制器 C8051F060 的端口初始化, 滤波器初始化 (工作模式选择, 中心频率设置, 品质因素设置等), 以及初始化接口参数等。接着启动模数转换器, 等待转换完成, 采集并进行数字滤波等处理; 最后将采集的数据进行格式转换, 加入实时时间和 CRC 循环校验码, 通过串口发送到上位机进行存储、显示, 以便分析、研究和预警。

滑坡地质灾害监测系统上位机软件包括监测信息处理、人机交互接口与数据库管理三部分。监测信息处理包括存储、显示。人机交互接口将接收的数据以实时动态图形显示, 以便更直观地分析被监测滑坡体临滑时产生的声发射信息。数据库管理将所有记录的数据进行归类, 备查。

3 结束语

该监测设备的研制可通过监测可掌握滑坡、崩塌的变形特征及规律, 预测预报滑坡体临滑的边界条件、规模、滑动方向、失稳方式、发生时间及危害性, 及时采取防灾措施, 尽量避免和减轻滑坡灾害损失。

参考文献:

- [1] 周本刚, 张裕明, 中国西南地区地震滑坡的基本特征, 西北地震学报, 1994.01
- [2] 黄润秋, 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制, 岩石力学与工程学报, 2007.03
- [3] 杨文东, 降雨型滑坡特征及其稳定分析研究, 武汉理工大学博士学位论文, 2006
- [4] 樊晓一, 地震与非地震诱发滑坡的运动特征对比研究, 岩土力学, 2010.S2
- [5] 李远耀, 三峡库区渐进式库岸滑坡的预测预报研究, 中国地质大学博士学位论文, 2010