

基于探地雷达技术的滑坡监测系统设计

焦思捷 黄子豪 白马特 仲涛 李有东 王宽仁
西京学院 机械工程学院, 中国·陕西 西安 710123

摘要: 滑坡灾害的监测是地质界普遍关注的课题之一, 针对目前滑坡监测过程中, 重视监测滑坡体外在变化, 忽略滑坡体内部演变过程的情况, 设计了基于探地雷达技术的滑坡监测系统。使之不但能监测滑坡体状况, 还能对滑坡体生长、发育过程做出评估, 并且提出了相应的实现方案。论文同时还详细地介绍了该系统核心部件-同步数据采集装置的软硬件设计过程, 实践证明具有良好的应用前景。

关键词: 探地雷达; 滑坡监测; 衰减量

Design of Landslide Monitoring System Based on Ground Penetrating Radar Technology

Sijie Jiao Zihao Huang Mate Bai Tao Zhong Youdong Li Kuanren Wang

School of Mechanical Engineering, Xijing University, Xi'an, Shaanxi, 710123, China

Abstract: The monitoring of landslide hazards is one of the topics widely concerned in the geological community. In response to the current situation in landslide monitoring where more attention is paid to the external changes of the landslide body while neglecting the internal evolution process, a landslide monitoring system based on ground-penetrating radar (GPR) technology is designed. This system not only monitors the condition of the landslide body but also assesses the growth and development process of the landslide body, and a corresponding implementation plan is proposed. This paper also introduces in detail the software and hardware design process of the core component of the system—the synchronous data acquisition device. Practice has proved that it has good application prospects.

Keywords: ground-penetrating radar; landslide monitoring; attenuation

0 前言

中国幅员辽阔, 是一个山地、丘陵大国, 引起滑坡的地质结构分布广泛, 库岸, 高边坡及山区滑坡灾害时有发生^[1]。如何提高滑坡灾害的监测、预报精度以降低社会资源损耗, 是地质界普遍关注的课题之一。国内外用于滑坡监测的方法和手段很多, 论文把它概括为物理勘探方法和基于信息技术的 3S 方法, 即遥感 (RS) 技术、地理信息系统 (GIS) 技术和全球定位系统 (GPS) 技术, 以下简称 3S 技术两种^[2]。

物理勘探方法技术成熟, 数据稳定准确, 是滑坡监测常用的方法, 但无法实现连续监测且操作复杂; 3S 方法充分利用信息技术发展的最新成果, 能实现滑坡监测的实时和连续性, 但是该技术仍存在很多需要研究和解决的具体问题。

探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 是一种利用高频电磁波探测地下物质结构的设备, 具有无损探测的特点。它能够快速、准确地获取地下目标的图像。因此, 广泛应用于工程勘察领域。

论文提出的基于探地雷达技术的滑坡监测方法, 就是应用探地雷达技术, 以滑坡体的内部地质构造变化为监测对象, 连续、实时地监测滑坡体的发育、形成过程, 可以提供滑坡灾害的中、短期预警, 为相关部门决策和采取相应措施

提供充分依据和足够的时间。

1 测量原理及系统方案设计

1.1 测量原理

所有的物质都具有一定的导电能力和极化能力, 也就是说既是导体又是电介质。物质的介电性质或者说极化能力一般用介电常数来描述。

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (1)$$

式 (1) 中, ε_0 表示真空的介电常数, $\varepsilon_0=8.85491 \times 10^{-12} F/m$ 。 ε_r 为介质的相对介电常数。它是指介质的介电常数比真空的介电常数大多少倍, 是一个无量纲的物理参数。在探地雷达的应用中, 相对介电常数是反映地下介质电性能的一个重要的参数。

电磁波在介质中的传播速度:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \quad (2)$$

在探地雷达利用电磁波进行勘探时通常认为介质的磁导率变化可以忽略, 即认为 $\mu_r=1$ 。

所以, 通常用以下公式计算电磁波在介质中的传播速度:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3)$$

其中: C 为电磁波在真空中的传播速度 ($C=3 \times 10^8 m/s$)。

式(3)表明,当测量获得电磁波速度信息后,通过换算就可以得到被测滑坡体的介电常数 ϵ_r 。从而判断出被测滑坡体是属于哪一种介质?这种介质是如何发生变化的?这种方法需要复杂的时间同步装置。当采用透射波法测量时,由于发射端和接收端异地放置,这个问题尤为突出。

另一方面,电磁波在介质中传播时,存在衰减现象。而滑坡体是由不同介电常数的介质混合而成的。因此,电磁波在被测滑坡体中传播时,也会存在衰减,对于不同介质,当电磁波穿过被测滑坡体时衰减是不一样的。表1所示为常见介质的介电常数、电磁波速度和电磁波衰减参数。

雷达波在传播时的衰减系数 α 和介电常数 ϵ_r 有着非常密切的关系。理论推导可知^[3]:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right] \quad (4)$$

式(4)中, α 称为衰减系数,在国际单位制中,衰减系数的单位是奈贝每米(Np/m),意指波传播1m后,单位振幅衰减至 e^{-1} (≈ 0.386)。

表1 常见介质的相对介电常数、电导率和衰减参数^[3]

介质	相对介电常数	电导率 (ms/m)	衰减 (db/m)
空气	1	0	0
淡水	80	0.5	0.1
干砂	3~5	0.01	0.01
饱和砂	23~30	0.1~1.0	0.03~0.3
灰岩	4~8	0.5~2.0	0.4~1
页岩	5~15	1~100	1~100
石英	5~30	1~100	1~100
黏土	5~40	2~1000	1~300
花岗岩	4~6	0.01~1	0.01~1
盐岩	5~6	0.01~1	0.01~1
冰	3~4	0.01	0.01

我们知道,探地雷达是以高频电磁波传播为基础,通过高频电磁波在介质中反射和折射等现象来实现对地下介质的探测的。表1和式(4)均表明,被测滑坡体相对介电常数 ϵ_r 和它对雷达信号在传播过程的衰减 α 有关。如果我们利用透射波法测量信号衰减量,既可以省掉复杂的时间同步装置,同样也可以得到被测滑坡体的介电常数 ϵ_r 。而且通过连续测量信号的衰减量,就可以得到被测滑坡体介电常数 ϵ_r 的变化过程(这是探地雷达无法做到的),从而推断出被测滑坡体内部地质结构变化情况,是否出现滑坡征兆,提供滑坡灾害早期预警。

为了能获得准确的有代表性的观测数据,测量其衰减量时,将发射装置和接收装置设置在已知距离的孔洞中,孔洞的设置应能覆盖整个滑坡区域,必要时可以增加孔洞数量。数据采集装置同步采集发射端和接收端的信号振幅,即可获得信号衰减量。依据衰减量大小即可推断滑坡区域内部地质结构的变化情况,异常体的空间位置、范围和埋藏深度

等信息。

1.2 系统方案设计

探地雷达在应用过程中常用的方法包括反射波法、折射波法和透射波法。折射波法目前用得较少,这里只介绍常用的反射波法和透射波法等测量方式。

1.2.1 反射波法

反射波法可分为剖面法和宽角法。

①剖面法。剖面法是最常用的探地雷达观测方式,类似于地震勘探中共偏移采集方式,即发射天线和接收天线以固定天线间距、按一定测量步距(测点距)沿测量剖面顺序移动并采集数据,从而得到整个剖面上的雷达记录。这种方式只需要发射和接收两个通道,系统设计相对简单。其优点是剖面成果不需要或只需进行简单的处理就可用于解释,能直观得到测量成果,非常适合于急需快速提供测量结果的场合。

②宽角法。宽角法又有两种工作方式:一种方式是一个天线在某点固定不动(不论发射或接收天线),另一天线按等间隔沿测线移动并采集数据,得到的记录相当于地震勘探中共炮点记录(CSP);另一种方式是以地面某点为中心点,发射天线和接收天线对称分置于中心点两侧,按一定间隔沿测线向两侧顺序移动并采集数据,得到的记录类似于地震勘探中共中心点记录(CMP),当地下界面水平时类似于共深度点记录(CDP)。

反射波法目前存在的问题是探测距离不够远,这是因为电磁波在往返过程中都会有衰减所致。

1.2.2 透射波法

透射波法主要测量穿透测量对象的直达波到达时间进而计算出雷达波速度,通过穿透测量对象的雷达波速度差异判断测量对象的质量。因此透射波法要求发射和接收天线分立位于测量对象的两侧。由于只解释和计算最早到达的直达波,波形识别和计算相对简单。透射波法主要用于工程中墙体、柱体、桥墩、桩的质量检测以及井中雷达测量。透射波法也可采用层析成像的观测方式工作,从而获得更精细的孔间介质速度成像^[3]。

1.2.3 系统方案实现

综上所述,在基于探地雷达技术的滑坡体的监测过程中,要提高监测距离,透射波法应该是一种不错的选择,其组成框图如图1所示。

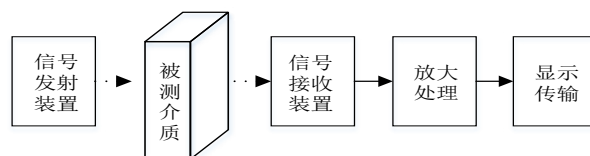


图1 滑坡监测系统组成框图

在滑坡监测系统组成框图中,各组成单元完成的主要功能如下:

信号发射装置: 发射一个固定频率、固定振幅的电磁波, 其频率一般在 10~100MHz。

信号接收装置: 接收、放大信号发射装置发射的并穿过被测滑坡体的电磁波, 从中解调出有用的幅度信息。

放大处理: 对解调出的有用信息进行滤波、放大、采集和存储, 再通过后期处理软件的分析, 就可以得出被测滑坡体地质结构的变化情况。

显示、传输: 显示判断结果, 并上传相关部门, 提供决策依据。

实际应用中具体做法是: 测量滑坡体对电磁波信号的衰减量时, 将发射装置和接收装置设置在已知距离的孔洞中, 孔洞的设置应能覆盖整个滑坡区域, 必要时可以增加孔洞数量。数据采集装置同步采集发射端和接收端的信号振幅, 通过运算即可获得信号衰减量, 依据衰减量大小即可推断出滑坡区域内部地质结构的变化, 异常体的空间位置、范围和埋藏深度等信息。

2 同步数据采集装置软硬件设计

探地雷达技术已经日臻成熟, 应用该项技术监测滑坡时, 关键是衰减量测量, 而衰减量测量的关键是如何获得发射机端和接收端信号的幅值, 完成此功能的装置称其为同步数据采集装置, 基于篇幅限制, 这里重点讨论同步数据采集装置的软硬件设计过程。

2.1 硬件设计

论文围绕 STM32F3xx 单片机设计同步采集装置。STM32F3xx 系列单片机是意法半导体基于内置 DSP 和 FPU 的 ARM Cortex-M4 内核的高性能微控制器的产品型号。强大的浮点运算能力和极高的 DSP 速度, 非常适合对采集数据的预处理应用; 内置 16 位 Σ - Δ A/D 转换器, 无需采样保持, 具有出色的线性度优势, 非常适合高精度数据采集应用场合。同步数据采集装置硬件组成框图如图 2 所示^[4]。

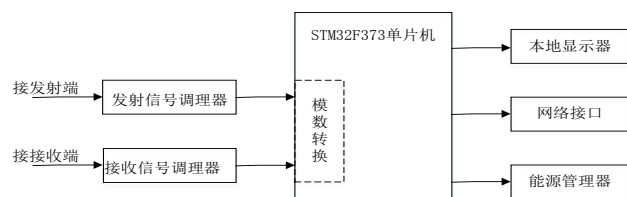


图 2 同步采集装置硬件组成框图

其中, 各主要单元完成功能如下:

发射信号调理器: 完成衰减和滤波功能。发射端信号一般比较强, 根据单片机输入模拟信号的幅值要求, 将该信号进行适当衰减、滤波后, 送片内 A/D 转换器。

接收信号调理器: 完成滤波和放大功能。接收端的信号一般比较弱, 而且夹杂干扰信号, 需要放大有用信号, 滤除杂波信号后, 送片内 A/D 转换器。

网络接口: 本设计配置网络接口, 可将采集到的数据

通过网络接口上传给上位机, 以便进行更深入的分析, 获得更多的有关滑坡体生长、发育过程的信息。

能源管理器: 系统长期连续工作在野外, 节约能耗是一个关键问题, 为此设置采样工作间歇时间。工作时激活系统, 不工作时系统处于休眠状态以降低功耗^[4]。

2.2 软件设计

同步数据采集装置主要作用是完成发射端和接收端的数据采集、数据预处理、本地显示及数据上传功能。其软件部分包括系统初始化, 同步数据采集, 数据预处理、报警显示等功能单元。

上电后, 先对 A/D 转换器、通信接口及显示装置进行初始化。初始化完成后, 进行数据采集, 采集到的数据首先进行预处理, 预处理过程包括时域滤波和快速 FFT, 从频域比较发送端和接收端信号的振幅变化, 得到信号的衰减量。系统在工作过程中, 需要设置衰减值的

上限和下限。超过上限, 说明滑坡体内部结构变化比较大, 需要报警; 低于这个下限值, 说明滑坡体内部结构比较平稳, 而处于上下限之间的话, 需要密切关注。具体流程图如图 3 所示^[5]。

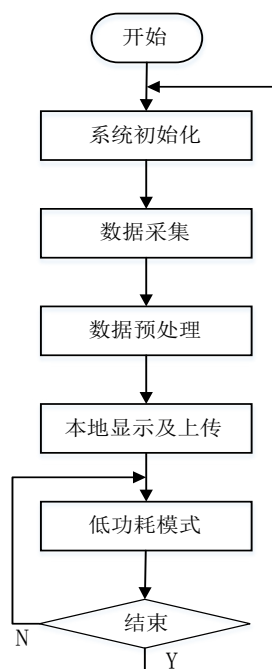


图 3 同步采集装置软件流程图

3 结论

论文提出的基于探地雷达技术的山体滑坡监测方案, 把探地雷达技术应用于滑坡监测过程中。该系统不但实现了实时监测滑坡体的发育、生成过程, 同时还能获得滑坡体内异常构造的空间位置、范围和埋藏深度等信息。这样, 为相关部门决策和采取相应措施提供充分依据和足够的时间。随着物联网技术和电子技术的不断迅猛发展, 该方法无疑具有

很好的发展前景。

参考文献:

[1] 李明翰,王宽仁,朱强,等.滑坡监测方法分析与比较[J].科技新时代,2022(1):92-93.

[2] 陈铁军,陈华方,胡扬超.基于CC2480的山体滑坡检测系统[J].计算机工程与设计,2010,31(20):4512-4515.

[3] 曾昭发,刘四新,王者江,等.探地雷达方法原理及应用[M].北京:科学出版社,2006.

[4] 曹炯清.基于IEEE 802.15.4无线传感器网络的山体滑坡检测系

统[J].电脑知识与技术,2009,5(8):1817-1819.

[5] 王文鑫,姚璐,胥钧.基于MEMS加速度传感器MPU-6050的滑坡检测系统设计[J].煤炭与化工,2021,44(2):156-160.

作者简介:焦思捷(2001-),男,中国陕西铜川人,从事电气工程及其自动化研究。

基金项目:陕西省大学生创新创业计划项目,“基于探地雷达的滑坡地质灾害预警系统关键技术研究”(项目编号:S202312715037)。