

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108544

弱反射光栅滑坡监测系统的研究与应用^{*}

张晓飞^{1,2} 吕中虎^{1,2} 杨秀元^{1,2} 曾克^{1,2} 王晨辉^{1,2}

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心 保定 071051; 2. 自然资源部地质环境监测工程技术创新中心 保定 071051)

摘要: 目前,光纤传感技术在桥梁、隧道、大坝等监测领域推广应用并取得了较好的效果,而基于弱反射光栅的FBG传感技术应用还处于起步阶段。针对BORDR和FBG技术应用于地质灾害监测中的限制,在介绍弱反射光栅传感阵列监测技术原理的基础上,利用弱反射光栅传感阵列具有大容量、高精度的特点,设计了一款外定点式弱反射光栅传感光缆,并结合弱反射光栅传感阵列监测技术、物联网技术构建了基于弱反射光栅传感阵列的滑坡实时监测系统,开展了弱反射光栅传感光缆的室内实验并将弱反射光栅实时监测系统应用于滑坡监测实验中。监测系统测得158#~161#区域的连续4个弱反射光栅变形累加达到61.91 mm,表明系统能准确定位滑坡发生位移变化的位置及监测滑坡位移的大小,实现了对滑坡地质灾害体的高密度的自动化准分布式监测。

关键词: 地质灾害;弱光纤光栅传感;物联网;实时监测

中图分类号: TN29 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8060

Research and application of landslide monitoring system based on weak-reflection fiber grating sensing network

Zhang Xiaofei^{1,2} Lyu Zhonghu^{1,2} Yang Xiuyuan^{1,2} Zengke^{1,2} Wang Chenhui^{1,2}

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, China;

2. Technology Innovation Center for Geological Environment Monitoring, MNR, Baoding 071051, China)

Abstract: At present, fiber optic sensing technology is popularly used in the monitoring fields of bridges, tunnels and dams and has achieved good results, while the application of FBG sensing technology based on weak reflection grating is still in the initial stage. In view of the limitations of BORDR and FBG technologies in geological disaster monitoring, this paper introduces the principle of weak-reflection fiber grating sensor array monitoring technology and designs a kind of external fixed point weak-reflection grating sensing optical cable based on the characteristics of weak reflecting grating sensor array with large capacity and high precision. And then constructs a real-time landslide monitoring system by combining with weak-reflection grating sensor array monitoring technology and Internet of Things technology. This paper also carries out a calibration experiment of weak-reflection grating sensing optical cable and finally presents a field application experiment using the real-time landslide monitoring system. The monitoring system measured that the deformation of 4 consecutive weak reflection gratings from 158#~161# reached 61.91 mm, which indicates that the system can accurately locate the location of the landslide displacement and monitor the size of the landslide displacement, realizing the high-density automatic quasi-distributed monitoring of the landslide geological hazard body.

Keywords: geological disaster; weak-reflection fiber grating sensing; internet of things; real-time monitoring

0 引 言

随着信息技术的快速发展,光纤传感技术在人类的各个领域中得到了广泛的应用。目前,光纤传感技术在桥梁、隧道、大坝等监测领域推广应用并取得了较好的效

果^[1],而基于弱反射光栅的大容量分布式传感技术应用还处于起步阶段,大多数应用都将其等同于强光栅,或在解调领域提高其应用优势,未深入研究该技术的传感特性及应用特点。张燕君等^[2]研究了基于弱反射布拉格光栅的新型分布式温度传感网络;刘胜等^[3]研究了基于弱光纤光栅阵

收稿日期:2021-12-08

^{*} 基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1509601)、地质调查项目(DD20190639)资助

列的分布式振动探测系统;何健辉等^[4]介绍了基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统,将其应用到衡水地区地面沉降监测中;黄俊斌等^[5]系统地综述了 WFBG 阵列的制备、解调与应用进展。

BOTDR 和 FBG 是目前使用的具有典型代表的光纤传感技术^[6-7]。但是在地质灾害监测应用中,受限于传感光缆和 BOTDR 解调设备,实现自动监测的 BOTDR 监测方案成本较高;FBG 监测方案可以实现自动监测且成本较低,但是无法满足复杂、大规模监测的实际需求。基于弱反射光栅的大容量分布式传感技术,采用在线刻写技术实现了在一根光纤中高密度刻写多个同波长的弱反射光栅,极大地提高有效传感单元的密度,具有广阔的应用前景^[8]。随着光纤成缆工艺的成熟,便于设计生产地质灾害监测所需的弱反射光栅传感光缆,实现地质灾害的密集准分布式监测,进而实现分布式监测。

针对现有 BORDR 和 FBG 监测方案在地质灾害监测中的限制,利用弱反射光栅传感系统具有大容量、高精度的特点,本文结合弱反射光纤光栅传感阵列监测技术、物联网技术构建了基于弱反射光栅传感阵列的滑坡实时监测系统,实现了对滑坡地质灾害体的高密度、高精度和低成本的自动化准分布式监测。

1 弱反射光栅传感网络技术原理

1.1 光纤光栅传感监测技术

采用光纤光栅传感器监测外界的应力、压力或温度时,光纤光栅传感器受到拉伸或压缩以及所处温度发生变化时,其自身的栅距发生变化、周期发生变化,从而反射光的波长也相应改变,光纤光栅解调仪通过测量反射光波长的变化即可得知光纤光栅传感器所受的应变或所处的温度值。其工作原理如图 1 所示^[9]。

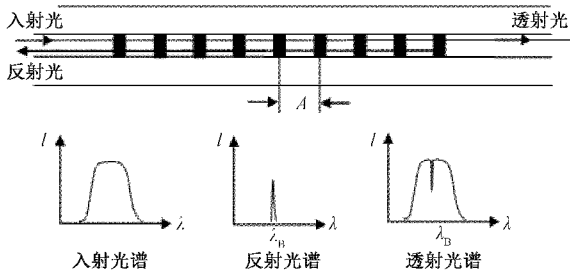


图 1 光纤光栅传感器的基本工作原理

1.2 弱反射光栅阵列传感阵列监测技术

与强反射光栅不同,采用特殊工艺刻写的弱反射光栅的反射率极低,约为 0.1% 甚至更低。在弱反射光栅传感系统中,当采用同样功率的光源的入射光经过弱反射光栅时,只有极低的一部分信号光被反射,其余的绝大部分信号光继续传输到下一个光栅,因此其复用数量显著提高,传感距离明显增大^[10]。

由于在弱反射光栅传感阵列中串接的弱反射光栅数量

巨大,且由于刻写工艺造成同一根光纤上的弱反射光栅的中心波长大致相同或为几个固定值,因此无法仅用波分复用的技术来区分各个弱反射光栅。基于 OTDR 原理,在弱反射光栅网络的解调中可以通过时间域来确定每个弱反射光栅的位置。

如图 2 所示,基于 OTDR 原理,利用激光光源向弱反射光栅阵列发送脉冲光的中心波长从 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ 时,每一个弱反射光栅相应会产生 n 个不同强度反射光脉冲,将这 n 个反射光脉冲在波长域进行排列,通过波形拟合和寻峰算法即可得到每个弱反射光栅的中心波长;同时通过记录激光光源发射脉冲光的时间和接收到每个弱反射光栅反射脉冲光的时间差,可以计算出弱反射光栅相对于光源的距离,实现空间上的定位^[11-13]。

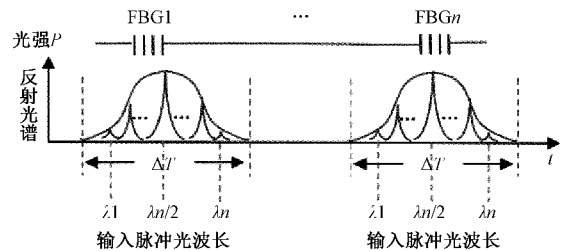


图 2 弱反射光栅传感阵列工作原理

2 弱反射光栅滑坡实时监测系统设计

2.1 系统构成

基于弱反射光栅传感阵列的滑坡监测系统利用弱反射光栅、弱反射光栅解调、物联网和数据库等技术,通过 4G 无线技术实现对监测对象的数据监测、处理和发送,采用 WEB 技术实现数据的接收、展示和发布等。如图 3 所示,监测系统主要由弱反射光栅传感光缆、弱光纤光栅解调仪、无线路由、物联网控制模块和太阳能供电系统组成^[14]。

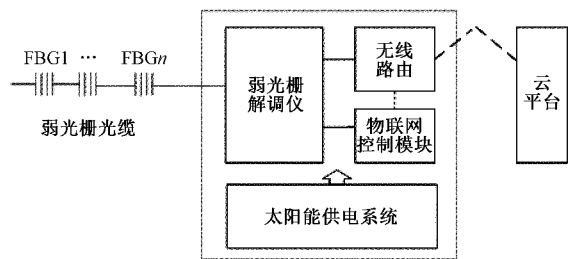


图 3 监测系统框图

其中,采用扫频率光源和 OTDR 原理研制的弱反射光栅解调仪是整个监测系统的核心,主要由高速扫描激光器、半导体光放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)模块、光纤掺铒放大器(erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA)、光环形器、光电探测器、数据采集卡、现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)模块、上位机软件模块构成,其结构如图 4 所示。

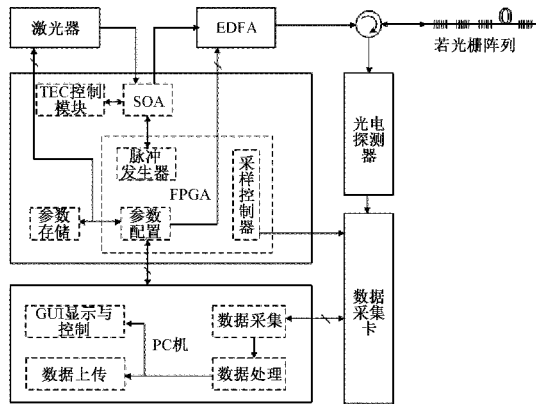


图4 弱反射光栅解调仪结构

弱反射光栅解调仪采用高速扫描激光器产生波长周期性变化的窄带光,窄带光经过 SOA 放大,同时被脉冲发生器模块输出的脉冲信号调制,输出波长周期性变化的脉冲激励光。波长周期性变化的扫描脉冲激励光输入到弱反射光栅传感阵列,弱反射光栅的反射光脉冲经过光环形器进入光电转换模块转化为模拟电信号,模拟信号经过高速数据采集后通过网口发送给嵌入式工业平板微处理器;嵌入式工业平板微处理器通过 RS232 将配置信息下发到 FPGA 模块,通过网口采集 FPGA 模块发送的数据,再采用 OTDR 原理通过波形拟合、寻峰算法提取每个弱发射光栅的中心波长,进一步通过计算获取弱反射光栅传感光缆上的应变信息^[11-13]。

由于弱光栅传感阵列对不同波长的光脉冲,其反射回来的光脉冲的光功率不同,离 FBG 中心波长值越近的光脉冲产生的反射光的功率越强,离 FBG 中心波长值越远的光脉冲产生的反射光的功率越弱。

由于弱光栅传感阵列中各个光栅的中心波长大致相同,因此无法根据中心波长来确定光栅的位置。在采用的光栅反射率为 0.1% 光栅复用数量达到数千个的情况下,设同一根光纤上相邻两个弱光栅的距离为 d ,光纤的有效折射率为 n_{eff} ,光在真空中的传输速度为 c ,则两个相邻弱光栅反射脉冲光到达光电转换模块的时间差为 ΔT ,则 ΔT 可以表示为式(1):

$$\Delta T = \frac{2 \times d \times n_{eff}}{c} \quad (1)$$

基于 OTDR 原理,通过反射光脉冲时序上的位置,推算反射光脉冲属于弱光栅传感阵列中哪一个光栅,实现对光栅位置的定位。FPGA 模块和上位机软件是实现解调的核心,其中 FPGA 模块主要有 3 个功能:从上位机接收参数,并进行参数的配置;控制 SOA 驱动模块(脉冲发生器)产生脉冲驱动信号;控制数据采集卡的工作时序。上位机软件主要接收存储 FPGA 采集的光谱数据,对光谱数据进行重组、拼接、平滑滤波、高斯拟合后,实时计算出 FBG 的波长,并显示相关的波形。

2.2 弱反射光栅传感光缆设计

在工程实践中,可以充分利用强光栅的技术及工程经验,对弱反射光栅进行封装、设计和安装。

针对滑坡地质灾害监测需求,采用间距 2 m 的弱反射光栅设计生产了外定点式弱反射光栅传感光缆。如图 5 所示,外定点式弱反射光栅传感光缆由内向外依次由刻有多个弱反射光栅传感单元的弱反射光栅光纤、螺旋铠、编织层、外护套组成,弱反射光栅光纤处于自由活动状态;接着通过环切去除外护套露出螺旋铠和光纤,采用点胶方式将保护壳、螺旋铠与光纤芯固化,构成受力节点^[15-16]。

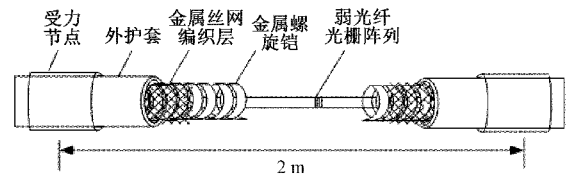


图5 弱反射光栅传感光缆结构

在使用时,需确保受力节点和监测体充分耦合,利用护套和螺旋铠将应力/应变传递给两节点之间的弱反射光栅传感单元,通过弱反射光栅的中心波长变化可得出弱反射光栅的应变变化,再结合节点间距即可计算出节点之间产生的位移变化。

2.3 弱反射光栅监测系统的优势

弱反射光栅监测系统由于使用的光栅反射率大幅降低,其复用性能、传感方式、解调技术都发生颠覆性变化,具体如下。

- 1)弱反射光栅监测系统采用 TDM+WDM 复用方式,单根光纤上可复用的光纤光栅传感器数量可达数千个,非常适合大规模、网络化测量。
- 2)传统 FBG 制作过程中要剥离涂敷层进行光栅刻写,刻写完成后重新涂敷。弱光栅阵列采用拉丝塔在线刻写,抗拉强度和原光纤一样,各 FBG 之间没有熔接点,不仅降低损耗,而且极大提高了系统的可靠性和长期稳定性。
- 3)在点式传感的基础上,通过对弱光栅阵列进行定点成缆后,可实现准分布式/分布式感测,兼具传统 FBG 灵敏度高、响应速度快的特点和分布式光纤传感的长距离、不间断监测的特点,实现准分布式的宏观细观同步网络监测。

3 弱反射光栅传感光缆室内实验

为了确定弱反射光栅传感光缆的性能,对传感光缆进行了标定试验。如图 6 所示,将弱反射光栅光缆的 2 个节点分别固定在应变试验台上,不断移动固定夹具位置,使两节点间光缆产生轴向拉伸,再用弱反射光栅解调仪测量光缆的应变值,拉伸过程每次拉伸 2 mm,最大拉伸 36 mm;待将光缆拉伸至仪器测量的最大值后放置 1 天后,再移动固定夹具,减小两节点间光缆的拉伸位移,回弹过程每次缩放 2 mm,直至光缆呈松弛状态。实验结果如图 7 所示。

结果显示,弱反射光栅传感光缆的波长值与应变值在

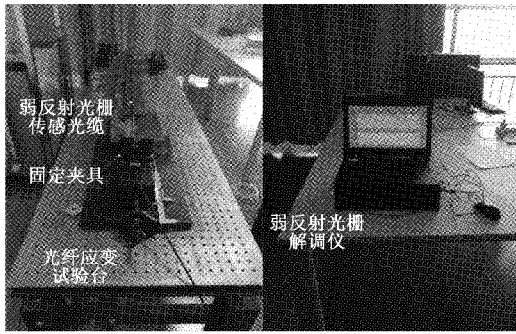


图 6 弱反射光栅传感光缆标定实验

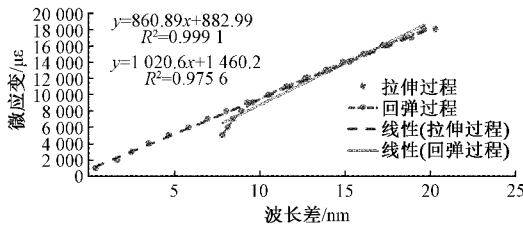


图 7 弱反射光栅传感光缆标定曲线

拉伸过程呈现明显的线性关系, $R^2 = 0.9991$, 测得的波长应变系数为 $860.89 \mu\epsilon/\text{nm}$ 。

4 野外应用实验

4.1 滑坡介绍

石龙门滑坡位于重庆市万州区大周镇五土村 1 组长江左岸。滑坡区地形起伏大, 滑体为粉质粘土夹碎、块石土层, 滑坡平面形态呈“矩形”, 纵长 $295 \sim 350 \text{ m}$, 横宽 $350 \sim 450 \text{ m}$, 厚度 $10 \sim 26.2 \text{ m}$, 面积 $12.4 \times 104 \text{ m}^2$, 体积 $223.6 \times 104 \text{ m}^3$, 为沿基覆面滑动的大型土质滑坡。2003 年 6 月, 三峡工程首次蓄水至坝前水位 135 m , 斜坡出现变形, 主要表现为地表横向拉裂及民房出现拉裂缝。近几年, 滑坡中部由于县道维修扩建, 民房修建, 在形成的高切坡处出现垮塌, 特别是在库水位波动期 ($145 \sim 175 \text{ m}$) 期间, 变形加剧。滑坡右中部多处民房、院坝出现拉张裂缝, 基本上垂直滑体滑移方向展布, 裂缝延伸长 $3 \sim 20 \text{ m}$ 不等, 宽 $0.5 \sim 3 \text{ cm}$, 局部地段下错 5 cm 。

4.2 传感光缆布设

弱反射光栅光缆布设采用挖沟埋设的方式, 使用夹具和钢钉将光缆受力节点与滑坡体固定, 固定深度为 15 cm , 光纤埋入滑坡表面 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 深处, 按图 8 所示布设成分布式传感网络, 并在布设时使传感光缆受到一定的预应力 (图中实线部分); 为了能对光缆的应变进行温度修正, 有部分光缆布设在滑坡体相对稳定的区域 (施工了抗滑桩), 使光缆仅受温度影响而不产生拉伸应变 (图中虚线部分)。

4.3 监测数据分析

监测系统从 2020 年 11 月 29 日布设后稳定运行, 以 11 月 29 日的数据作为初始数据, 至 2021 年 9 月 13 日近一



图 8 光缆布设示意图

年时间的监测数据, 遍历传感光缆上的弱反射光栅的波长变化, 按 2 m 间距计算, 换算成位移变化绘制曲线如图 9 所示。

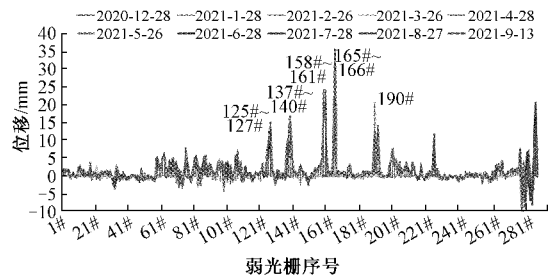


图 9 弱反射传感光缆应变曲线

从图 9 可以看出, $125 \# \sim 127 \#$ 、 $137 \# \sim 140 \#$ 、 $158 \# \sim 161 \#$ 、 $165 \# \sim 166 \#$ 、 $190 \#$ 弱反射光栅发生了非常明显的拉伸变形, 各变形区域累积位移变化值如表 1 所示。

表 1 变形区域累积位移变化值

变形区域	125#~137#~158#~165#~189#~				
	127#	140#	161#	166#	191#
累积位移/mm	32.95	42.27	61.91	44.09	12.58

从图 9 和表 1 可以得出, $166 \#$ 弱反射光栅变形最大, 达到 35 mm , $158 \# \sim 161 \#$ 区域的连续 4 个弱反射光栅变形累加达到 61.91 mm ; 结合弱反射光栅序号和布设位置, 可以准确定位滑坡发生位移变化的位置, 如图 10 中圆形区域。这与布设在同一区域的 GNSS 监测设备监测的数据比较吻合 (如图 11 所示)。

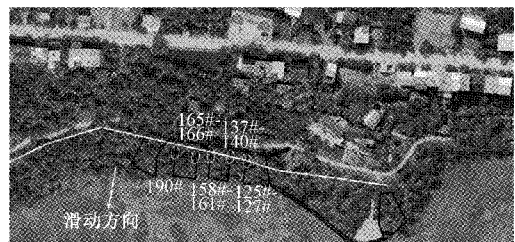


图 10 弱反射传感光缆位置图

图11为同一区域布设的GNSS监测设备从2020年11月29日~2021年9月13日的监测曲线,从监测曲线中可以看出,GNSS监测到滑坡体产生了70 mm的水平位移和20 mm的垂直位移。

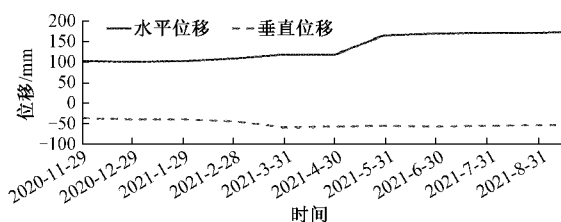


图11 GNSS监测曲线

5 结 论

本文在介绍弱反射光栅传感阵列监测技术原理的基础上,设计了一款外定点式弱反射光栅传感光缆,并结合弱反射光栅传感阵列监测技术、物联网技术构建了基于弱反射光栅传感阵列的滑坡实时监测系统;开展了弱反射光栅传感光缆的室内标定试验,得出传感光缆拉伸过程线性度好,最大拉伸可达1.8%以上,并可依据节点间距计算出拉伸位移;将弱反射光栅实时监测系统应用于重庆市万州区大周镇石龙门滑坡监测实验中,通过监测数据可以准确定位滑坡发生位移变化的位置和计算出位移的大小,实现了对滑坡地质灾害体的自动化准分布式监测。

参考文献

- [1] 柴敬,张丁丁,李毅. 光纤传感技术在岩土与地质工程中的应用研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3):28-37.
- [2] 张燕君,谢晓鹏,毕卫红. 基于弱光栅的高速高复用分布式温度传感网络[J]. 中国激光, 2013, 40(4):141-146.
- [3] 刘胜,韩新颖,熊玉川,等. 基于弱光纤光栅阵列的分布式振动探测系统[J]. 中国激光, 2017, 44(2):307-312.
- [4] 何健辉,张进才,陈勇,等. 基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1):146-153.
- [5] 黄俊斌,丁朋,唐劲松. 弱反射光纤光栅阵列制备、解调与应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17):54-71.
- [6] 李永倩,赵丽娟,杨志,等. 基于BOTDR的海缆3D立体监测系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5):1029-1036.
- [7] 宋世德,张作才,王晓娜. 光纤布拉格光栅水下钢筋腐

蚀传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7):1002-1008.

- [8] 马洒洒,王彬,李川,等. 基于FBG应变传感器的隧道安全实时监测算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2):304-311.
- [9] 包琨超. 全同弱反射光纤光栅传感网络解调技术与系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.
- [10] 孙世政,廖超,李洁,等. 基于光纤布拉格光栅的二维力传感器设计及实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2):1-9.
- [11] 张满亮,孙琪真,王梓,等. 基于全同弱反射光栅光纤的分布式传感研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8):93-98.
- [12] 张彩霞,张震伟,郑万福,等. 超弱反射光栅准分布式光纤传感系统研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4):153-157.
- [13] 罗志会,蔡德所,文泓桥,等. 一种超弱光纤光栅阵列的定位方法[J]. 光学学报, 2015, 35(12):107-111.
- [14] ZHANG X F, LV ZH H, MENG X W, et al. Application of optical fiber sensing real-time monitoring technology using in ripley landslide [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3334(1220):199-204.
- [15] 罗志会,王舟. 基于OTDR的螺旋型分布式光纤传感器的研究[J]. 光通信研究, 2011, (1):59-61.
- [16] 罗志会,汪叶梦,张宇,等. 一种外定点式超弱光纤光栅应变光缆及其使用方法:CN201910955424.6[P]. 2020-02-11.

作者简介

张晓飞, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为地质仪器和地质环境监测系统研发。

E-mail: z_afei@163.com

吕中虎, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为地质仪器研发与应用。

E-mail: lvzhonghu2004@163.com

杨秀元, 正高级工程师, 主要研究方向为地质灾害调查评价与监测预警。

E-mail: yangxiuyuan@mail.cgs.gov.cn

曾克, 工程师, 主要研究方向为水工环技术方法及仪器研究。

E-mail: 59906017@qq.com

王晨辉, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为地质灾害监测预警技术与装备研发。

E-mail: 522297135@qq.com