

光纤传感技术在山体滑坡的应用

刘 邦¹, 刘京诚¹, 朱正伟^{2,3}

(1. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

3. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要:因边坡不稳定造成的山体滑坡一直是自然界较大的灾害,数十年来人们不断在寻求如何更好地监测滑坡的前期信息,并建立了一些常用监测方法,但其各有优缺点。随着光纤传感技术的发展,利用光纤来进行监测具有很多传统方法无法比拟的优点,该文阐述了光纤传感的基本原理,分析了光纤功率损耗、光时域反射(OTDR)、布里渊光时域射(BOTDR)、光纤光栅(FBG)及其衍生技术,提出了一种全新的、基于光时域反射技术的复合光纤装置及监测方法,它能实现高初始精度、大量程和滑坡运动方向的判定。

关键词:滑坡; 光纤传感; 监测; 复合光纤装置

中图分类号: TN253

文献标识码: A

Application of Optical Fiber Sensing Technology to Landslides

LIU Bang¹, LIU Jingcheng¹, ZHU Zhengwei^{2,3}

(1. College of Electro-optic Engineering of Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Civil Engineering of Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. Key Lab. of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area(Chongqing University),

Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: The mountain landslide has been the disaster which makes great harm in the nature. People have been looking for better monitoring of the preceding information to the landslide. A number of commonly used monitoring methods have been developed, but they have both advantages and disadvantages. With the development of optical fiber sensing technology, it is found that monitoring optical fiber has many advantages comparing with traditional methods. In this paper, the basic principal of optical fiber sensing technology is described; and technologies of optical power consumption, Optic Time Domain Reflectometry (OTDR), Brillouin Optic Time Domain Reflectometer (BOTDR) and Fiber Bragg Grating (FBG) are analyzed. A new composite optical fiber testing device based on optical fiber monitoring method is proposed. The device based on optical time domain reflectometry can achieve high initial accuracy, large range and direction of the judge.

Key words: landslide; optical fiber sensing; monitoring; composite optical fiber device

0 引言

我国是世界上地质灾害最严重的国家之一,每年由滑坡等边坡失稳灾害造成的损失数百亿,严重影响了人民群众的生命财产安全。实践证明,建立有效的监测网络、及时预测与防护成为抵御灾害,减轻损失的重要途径。

在现有基于地面的边坡稳定监测方法中,地质雷达、地震勘探法、大地精密测量法、数字化近景摄

影测量法、放射性测量法、声发射技术等地球物理方法都有一个共同缺点:监测的连续性、实时性和遥测性难以保证。测斜仪是一种测定钻孔位移和倾斜的原位监测仪器,在国外从上世纪60年代就应用至今,其最大的优势是测量准确,但价格贵,如国外测斜仪售价达\$8 000/台,其导管只能使用一次,售价达\$20~30/m,难以大量推广使用。时域反射测试仪(TDR)是一种运用电磁波可远程监测的技术,其

收稿日期:2011-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50808187, 51178488),重庆市建设科技基金资助项目(城科学第(2009)71号)

作者简介:刘京诚(1983-),男,四川省南充市人,硕士生,主要从事测试计量技术与仪器的研究。E-mail: 28374643@qq.com; zqiao999@126.com

原理是向同轴电缆发射脉冲信号,当电缆产生变形时会产生反射信号,经过对反射信号的分析就可确定形变的程度和位置。它用于滑坡时将同轴电缆埋进钻孔中,当电缆产生剪切时,通过分析反射信号可较准确地实现空间定位和确定滑坡运动距离。该方法具有价格低,遥测性好,安全性高等特点,但以同轴电缆被剪切为前提,若未产生剪切,则很难采集反射信号,还易被电磁干扰,国外材料性较好的同轴电缆高达 \$13.5/\text{m}\$,因此也难以推广^[1-2]。一种新的测量技术——光纤传感技术逐渐应用于滑坡等地质灾害的监测中。与传统测量方法相比,光纤传感技术表现出独特的优点和卓越的性能,这种技术成为近年来在滑坡研究中的热点^[3-4]。

1 光纤传感监测技术原理

光纤传感技术是通过光纤内传输光某些参数(如强度、相位、频率、偏振态、模式分布等)变化的测量,实现对环境参数(温度、压力、加速度、电压、电流、位移、振动、应变等)的测量。光纤传感器的优点主要有抗电磁干扰,耐腐蚀,灵敏度高,响应快,质量轻,体积小,外形可变,传输带宽大及可复用,长距离和实现分布式测量等。具备分布式测量这一独特优点的光纤传感技术已广泛应用于工程测量领域,我国在 2004 年就将分布式光纤传感技术应用于滑坡监测,并取得了一定的成果^[5-6]。

在土木工程领域中光纤监测技术主要利用被测量引起光纤的功率损耗、反射光损耗、反射光频移等变化来实现对地质参数的监测。这些技术已有成熟的产品,即光功率计、光时域反射仪、光时域反射测试仪(OTDR)、布里渊散射光时域反射测量计、布里渊散射光时域反射测量计(BOTDR)、运用布喇格光纤光栅传感器(FBG)与它们的演化设备等。

2 现有光纤监测技术的发展

自从 A. mendez 等^[7]在 1989 年首先将光纤传感技术应用于混凝土监测以来,一些发达国家如美国、日本、加拿大、瑞士和法国等也竞相展开深入的研究,许多新的应用领域相继拓展^[8-10]。其研究方向已涉及桥梁、建筑、水利工程与崩塌滑坡岩土灾害等。光纤监测技术以其独特的优点正逐步走向成熟。

2.1 光功率损耗及其技术

在光纤功率损耗方面的研究,唐天国等^[11]提出

将光纤滑动传感检测应用于高边坡滑动监测的典型布置方式。结果表明,光纤监测十分敏感,损耗值为 30~50 dB,滑动监测光纤的动态范围为 3.0~3.5 mm。试验具有简单、直观、易操作、初始精度高等优点,但都存在点式监测的不足,这是因为利用功率计来测量光在光纤中传输时的损耗是整个光纤通道的损耗总和而不是具体某点的损耗,而滑坡研究需分布式测量以求得大范围的监测信息,故寻求能实现分布式测量的方式成为主要研究点。研究者的目标指向了 OTDR、BOTDR、BOTDA、FBG 等监测设备。

2.2 OTDR 监测技术

在光时域反射技术方面的研究,周策等^[12]提出了一种用弹膜片和微弯调制机构进行压力传感,用 OTDR 技术进行岩体推力测量的分布式光纤压力传感方法。通过钻孔埋设在四川省内宜高速公路的王家崖高边坡中进行测试,表明该方法具有测量精度 $\leq \pm 5\%$ 、分辨率 $\leq \pm 1\%$ 、安装方位误差 $\leq \pm 5^\circ$,但精度与分辨率还不是很理想。丁勇等^[13]设计了一种专门用于监测边坡表面变形的光纤传感网络,通过对室内模型进行的加载实验表明,该网络对悬挂重物而引起的表面变形很敏感,且能精确分析发生异常的区域和应变大小,但没有给出可行的埋设方法。Aulakh 等^[14]则利用光纤微弯损耗原理及 OTDR 技术在印度滑坡高发地点 Mansa Devi Temple 进行现场实验,取得了良好效果,其主要原理是在不同的等高面布设光纤网络,通过对网络的微弯损耗监测从而得出滑坡体的立体应力趋势,但却未能给出具体滑坡方向。由此可见,随着 OTDR 仪器技术的不断发展,利用 OTDR 来监测地质情况的初始测量精度与准确度也日益提高,在各个领域取得了长足进步;但在应用于滑坡中,不仅需要较高的初始精度且需要较大的动态范围,而且滑坡受地理条件等制约可能需更大的动态测量范围及滑坡的方向性判定。这种技术原理简单、成本低,若能在这项监测技术上找到突破口,将有益于技术的推广使用。

2.3 BOTDR 监测技术

隋海波等^[15]设计出一套基于 BOTDR 的分布式边坡监测系统,即将传感光纤按一定方式布设在坡体内并相互联结构成远程分布式监测,经试验验证能准确地反映边坡变形情况。Bao-Jun Wang 等^[16]将光纤编织成网格状用于沙土的室内模拟滑坡实验,试验力加载至 300 kN, BOTDR 测得微应

变可达 $7\,500\ \mu\epsilon$, 并得到了在水平面上不同点的分布式微应变云图, 这在一定程度上很好地展示了滑坡过程中应变状态; 测量范围增大了, 但却只能得出滑坡的变化概况。黄春林等^[17]利用光纤拉伸与压缩所产生的布里渊频方向不同进而研究了将 BOTDR 用于滑坡方向的监测。综上所述, BOTDR 在初始测量精度方面延续甚至突破了 OTDR 的高精度测量, 并已有能应用于滑坡方向性判定的研究, 但在这些研究中其动态范围测量仍没有提高, 而这点对于滑坡监测很重要。布里渊频移很小, 这要求激光器具有极高的稳定性和极窄的可调线宽, 使得该设备既复杂又昂贵, 不适宜推广。

2.4 运用 FBG 传感器的波长调制技术

随着 FBG 传感器在各个领域中的应用, FBG 监测技术也逐渐成为滑坡测量的关注重点。Chuan Li 等^[18]利用金属槽封装形式的 FBG 组成十字型分布在隧道易产生滑坡的地方, 在雨季降雨量很大时, 边坡应力增加, 测出微应变达 $500\ \mu\epsilon$, 而旱季到来时微应变慢慢消失。许多研究者倾向于将 FBG 与 BOTDR 联合使用^[19], 利用 FBG 的良好特性监测边坡的应力变化情况, 利用 BOTDR 监测位移与定位。史燕新等^[20]在巫山残联滑坡中利用 BOTDR 获取整个滑坡体的概要信息, 在滑坡体变形的关键部位安装 FBG 传感器, 通过实验获得了滑坡体较完整的应变信息。由 FBG 传感器组成的光纤传感技术系统主要应用于较大的岩体变形监测, 其测量的初始精度和动态范围均有很大提高, 与 BOTDR 组合从

理论上能形成高初试精度, 大动态范围的测量及方向性判定的研究。这是一种较全面的检测组合, 但在具体应用中仍无人提出一种可行的实用的办法。由于滑坡监测需大面积监测, 而 FBG 传感器属于点式或准分布式测量, 数量要求甚多, 其价格不菲, 市场售价约几百元一个, 且与之配套的检测系统价格也较贵。

2.5 光纤衍生技术

边坡等岩体滑坡是一个较复杂的过程, 不同地点、不同地质具体情况可能都不同, 因此需因地制宜。许多研究者对光纤监测技术进行改良或革新。柴敬等^[21]设计出蛇形光纤传感器主要解决松软岩土体滑移的测量问题。李仁禄等^[22]分析了一种比 BOTDR 精度更高、测量范围更大的布里渊光时域分析技术 (BOTDA), 介绍了国内外学者在这方面的新的理论和实验研究方法, 并预测了未来的发展方向; 但需在光纤两端都使用激光器, 使用在滑坡监测中会很不便。“8”字型光纤^[23]的应用增加测量范围。

从总体来讲, 这些技术变化所要达到的目的或是有针对性的设计, 或是为了弥补以前技术的不足, 从这些研究中可发现它们的独特优势, 但并没有形成一种对滑坡进行较综合性监测的方法。因此相对于滑坡测量的复杂性、特殊性来说, 则需设计一种能灵活改变设置从而实现对大多数地质条件相适应的一种监测设备。同时也要考虑易于推广使用。表 1 给出了上述技术的区别。

表 1 几种监测技术的特点

技术	主要组成	优点	缺点
光功率损耗	光功率计、激光器、光纤、光纤的敏感载体。	操作简单、直观, 实施方便, 测量范围大。	易受激光器稳定性影响。只能实现点式监测。
OTDR	OTDR 仪、光纤、光纤的敏感载体。	实现分布式测量, 初始精度高, 测量范围大, 使用方便, 价格适中。	没有实现方向性的判定。
BOTDR	BOTDR 仪、光纤、光纤的敏感载体。	实现分布式测量, 初始精度高, 定位分辨率高。	价格昂贵, 测量范围较小。
波长调制	FBG 传感器、光纤、光纤的敏感载体、波长检测系统。	准分布式测量, 初始精度高, 测量范围大。	价格昂贵, 实现定位需要和其他设备相配套。
衍生技术	对应的监测系统, 光纤、光纤的敏感载体。	实现某些方面的性能提高。	未能实现完整的监测系统。

3 基于 OTDR 技术的复合光纤装置

上述研究成果主要侧重于初始测量精度的提

高, 而研究滑坡体内部滑移方向的判断的文献相对较少, 同时具有大量程、实时的文献仍不多; 但高初

始精度、大的测量范围与方向的判断是综合研究山体滑坡所必需具备的特点。为此,综合价格、适用性、可行性等因素,笔者提出一种复合光纤装置设计以期能在这3个方面有所突破。

3.1 复合光纤装置原理

装置示意图如图1所示。4块基材板通过扣头与扣眼相接,每块基材板表面上都嵌入有1~2根毛细钢管,但钢管的中间部分是断开的,钢管里穿有光纤,这样有利于形成微弯损耗。复合装置还可由多个联结成平面状或立体状,这样增加使用灵活性,更适应大面积、大范围的监测。

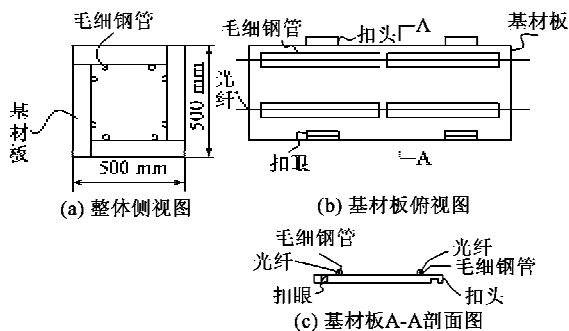


图1 复合光纤装置示意图

其工作原理为:在被监测体中钻孔置入如图2所示中的复合光纤装置,利用光纤作为传感器,采集复合光纤装置周边的力学、位移等信息。光脉冲在光纤中传输,其信号被主机接收处理。当有外加荷载作用在复合光纤装置上,会引起光纤变形,从而使其反射波形发生变化,产生损耗。对于光纤而言,由于瑞利散射和非涅尔反射的存在会出现背向散射和功率损耗,通过对背向散射光和光纤输出光功率大小的测量,获得光纤上各点的特征。一旦光纤有微小的扰动,首先会在钢管断开处产生微弯损耗,这便获取了高初始精度。由于各个基材面上光纤的损耗不同,结合光纤的排列方式或编号规则可确定运动方向;同时由于增加了钢管的保护作用,使光纤易于铺设,且在产生微弯损耗时不易断裂,增大了其测量行程。



图2 复合光纤装置实物图

3.2 复合光纤装置的工程应用

复合光纤装置的基材板材性无特殊要求,通过扣头、扣眼连接而构成具有多受力承载面的立体形状,如圆柱体或多面体,并通过基材板的连接延伸长度。在基材板上设置有传感器,可以是温度、湿度、压力、位移、应变、密度等传感器中的至少一种;在基材板上还可设置超声探头、声听器、水听器等传感探头,它们通过导线与主机连接,也可通过光电转换成光信号通过光纤传送,这样可以综合运用测得的具体地质条件结合光纤所监测的滑坡状态信息对具体的滑坡情况作综合分析,从而形成完整的监测体系。

在实际工程应用中,上述具有多个受力承载面复合光纤装置的中空部分灌装填充材料(其强度和弹性模量根据需要确定),其外围包裹灌浆材料。对可能滑坡的地段进行钻孔布点,孔径为 $\varnothing 90$ mm、 $\varnothing 110$ mm或 $\varnothing 130$ mm,深度需穿过易滑坡地质层。将复合光纤装置埋进钻孔内,再向孔中灌入砂浆。装置的长度可根据实际情况连接更长,装置间的光纤只需将对应编号的熔接在一起即可,3个钻孔点为一组。多组联合利用光纤多路复用器,只需一台OTDR仪就可进行远程连续监测。记录下对应编号光纤的损耗随时间的变化关系,根据前述分析可得出该点的滑移量、滑移方向。再综合各个钻孔点的测量结果就可得出滑坡体的立体网络分布。从而起到更好的监测作用。

3.3 复合光纤装置试验

由于复合光纤装置在埋入被测边坡时受到滑坡力作用,装置随即发生断裂,从而产生相对位移,复合光纤装置在初期主要发生弯折,因此进行了室内抗折试验。OTDR仪选用美国Textronix公司TFP2A型测量光纤损耗,压力机为YES-30kN,光纤为单模,型号为G.652,购于武汉长飞光纤光缆有限公司,光纤熔接机为电子科技集团第41研究所生产的AV6491E型。复合光纤装置基材为膨胀性聚酯乙烯(EPS),外部包裹C40的混凝土。实验中光波长为1310 nm。

试验如图3所示,在试验中以0.5 mm为步长,加载点竖向位移为26 mm,试验过程中复合光纤装置在试验力为4.3 kN时发生断裂,当加载点竖向位移达到1 mm时,损耗较明显,约0.05 dB。结果如图4所示。从图4可看出,加载点竖向位移在5 mm内上下表面光纤的损耗基本相当,在5 mm后

上表面光纤损耗逐渐增多,这是由于上表面的光纤弯曲半径比下表面小而形成。当损耗达到 9.20 dB 时饱和。

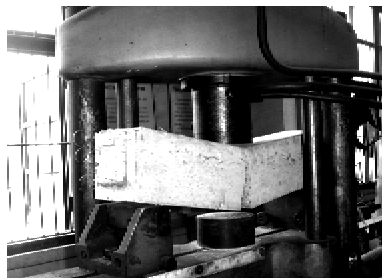


图3 复合光纤装置的抗折试验

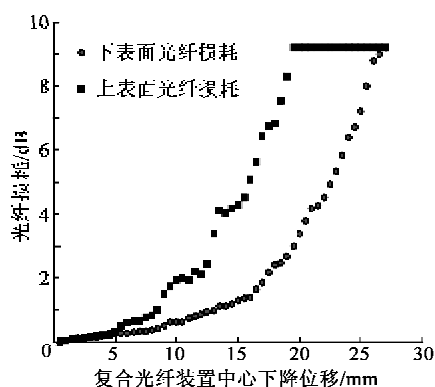


图4 抗折试验光纤损耗变化

由图3、4可见,在模拟试验中可对滑动的初始位移在1~20 mm范围内进行良好的监测。损耗值动态范围为0~9 dB。当滑动位移达到5 mm时还可根据光纤的编号确定滑移力的方向。通过数据拟合公式可以为复合光纤装置现场试验提供参考。

4 结束语

利用光纤传感技术来监测山体滑坡具有许多优点,但目前存在高初始精度与大量程不能同时实现、滑坡的方向判断也不能确定、价格贵等缺点,因而始终没有形成一种较完备的监测体系。寻求即合理、准确又经济的设计方式势在必行。笔者提出了一种能用于实地监测且具有高初始精度、大动态范围及能用于方向判断的复合光纤装置,在实验室取得了初步成果,并且成功申请了相关专利^[23],以期能对光纤传感技术在滑坡监测中的应用有所促进

参考文献:

- [1] 朱正伟,刘东燕,袁侨英,等.光电技术在边坡稳定监测中的应用[J].压电与声光,2009,31(1):112-114.
ZHU Zhengwei, LIU Dongyan, YUAN Qiaoying, et al. Application of electro-optic technology to the slope stability monitoring[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2009, 31(1):112-114.
- [2] 翟峰,陈学军,余成波.智能光纤传感器应用于轻轨轨道安全自动监测初探[J].重庆工学院学报,2005(5):35-37.
- [3] ZHU Z W, LIU D Y, YUAN Q Y, et al. A novel distributed optic fiber transducer for landslides monitoring[J]. Opt. Laser Eng, 2011, 49:1013-1024.
- [4] 胡庆,王敏琦.桥梁工程结构健康监测应用研究[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2006,18(3):353-365.
- [5] 代志勇,袁勇,刘永智.基于光纤应力传感的山体滑坡监测系统研究[J].光学与光电技术,2004,2(3):32-36.
DAI Zhiyong, YUAN Yong, LIU Yongzhi. Fiber optic strain sensor based on landslide monitoring system[J]. Optics Optoelectronic Technology, 2004, 2(3):32-36.
- [6] 施斌,丁勇,徐洪钊,等.分布式光纤应变测量技术在滑坡早期预警中的应用[J].工程地质学报,2004,12(增刊1):1004-9565.
SHI Bin, DING Yong, XU Hongzhong, et al. An application of distributed optic fiber strain measurement to early-warning of landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(suppl. 1):1004-9665.
- [7] MENDEZ A. Application of embedded optical fiber sensors in reinforced concrete buildings and structures[J]. SPIE, 1989, 1170(8):60-67.
- [8] KRUSCHWITZ B, CLAUS R O, MUROHY A. Optical fiber sensors for the quantitative measurement of strain in concrete structure proceeding of ASCE[J]. San Antonio, 1992, 547(9):1157-1162.
- [9] KIHARA M, HIRAMATS M K, SHIMA M. Distributed optical fiber strain sensor for detecting river embankment collapse[J]. IEICE Trans Elect, 2002, E85-C(2):952-959.
- [10] BROWN A W, COLPITTS B G, BROWN K. Distributed sensor based on dark-pulse Brillouin scattering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(7):1501-1503.
- [11] 唐天国,朱以文,蔡德所,等.光纤岩层滑动传感监测原理及试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,33(7):52-56.
TANG Tianguo, ZHU Yiwen, CAI Desuo, et al. Experimental research and rock sliding monitoring of optical fiber sensing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 33(7):52-56.
- [12] 周策,陈文俊,汤国起. BHT- II 型滑坡崩塌岩体推力

- 监测系统的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(suppl. 1): 68-72.
- ZHOU Ce, CHEN Wenjun, TANG Guoqi. Application of BHT-II type monitoring system for rock body thrust force[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(suppl. 1): 68-72.
- [13] 丁勇, 施斌, 崔何亮. 光纤传感网络在边坡稳定监测中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 338-342.
- DING Yong, SHI Bin, CUI Heliang. A fiber optic sensing net applied in slope monitoring based on Brillouin scattering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 338-342.
- [14] AULAKH, NAVNEET, KALER R S. Landslide monitoring[J]. Photonics Spectra, 2008, 8(3): 64-66.
- [15] 隋海波, 施斌, 张丹, 等. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 9(增刊 2): 3725-3731.
- SUI Haibo, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Study on distributed optical fiber sensor-based monitoring for slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 9(suppl. 2): 3725-3731.
- [16] WANG Baojun, LI Ke, SHI Bin, et al. Test on application of distributed fiber optic sensing technique into soil slope monitoring[J]. Landslides, 2009, 6(12): 61-68.
- [17] 黄春林, 李永倩, 杨志, 等. BOTDR 技术在山体滑坡监测中的应用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 12(6): 124-127.
- HUANG Chunlin, LI Yongqian, YANG Zhi, et al. Application research of BOTDR technology on landslide monitoring[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 12(6): 124-127.
- [18] LI Chuan, ZHAO Yonggui, LIU Hao, et al. Monitoring second lining of tunnel with mounted fiber Bragg grating strain sensors[J]. Automation in Construction, 2008, 5(7): 641-644.
- [19] 李焕强, 孙红月, 刘永莉, 等. 光纤传感技术在边坡模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1704-1708.
- LI Huanqiang, SUN Hongyue, LIU Yongli, et al. Application of optical fiber sensing technology to slope model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1704-1708.
- [20] 史彦新, 张青, 孟宪玮. 分布式光纤传感技术在滑坡监测中的应用[J]. 吉林大学学报, 2008, 9(5): 821-824.
- SHI Yanxin, ZHANG Qing, MENG Xianwei. The application of distributed optical fiber sensing technology in landslide monitoring[J]. Journal of Jilin University, 2008, 9(5): 1704-1708.
- [21] 柴敬, 魏世明, 常心坦, 等. 岩梁变形监测的分布式光纤传感技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 12(23): 4068-4071.
- CHAI Jing, WEI Shiming, CHANG Xintan, et al. Distributed optical fiber sensor for monitoring rock deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 12(23): 4068-4071.
- [22] 李仁禄, 郭锦锦, 杨远洪. 基于布里渊散射的分布式光纤传感技术的研究及进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 10(增刊 5): 30-36.
- LI Renlu, GUO Jinjin, YANG Yuanhong. The research and development of distributed optical fiber sensing technology based on Brillouin scattering[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 10(suppl. 5): 30-36.
- [23] 杨福先. 基于 OTDR 的分布式光纤微弯测试系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007, 6: 30-32.
- [24] 朱正伟, 刘东燕, 袁侨英, 等. 基于复合光纤装置的多参数检测仪: 中国, CN200710078298. 8[P]. 2007-08-22.