

doi: 10.3788/gzxb20154403.0306002

面向边坡滑移的剪切位移传感装置

高潮¹, 刘邦¹, 郭永彩¹, 朱正伟²

(1 重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

(2 重庆大学 土木工程学院 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 基于光纤布喇格光栅传感监测原理, 设计了一种用于岩土滑坡监测的剪切位移传感装置. 在等强度悬臂梁上粘贴光栅构成位移传感器, 位移传感器被嵌入 $\Phi 50$ 的聚氯乙烯树脂管中, $\Phi 50$ 聚氯乙烯树脂管外套 $\Phi 70$ 聚氯乙烯树脂管, 在两管之间浇筑 1:1 的砂浆. 通过室内模拟剪切测试, 该装置对剪切位移测量为 30 mm, 初测精度为 0.5 mm, 其对 30 mm 位移传感转变成光栅波长变化量为 1 200 pm. 该装置灵敏度高、稳定性好、测量范围大、线性好、结构简单, 可用于滑坡以及野外岩土结构工程等进行长期有效的监测.

关键词: 光栅光栅; 悬臂梁; 滑坡; 剪切; 位移; 监测

中图分类号: TU454

文献标识码: A

文章编号: 1004-421(2015)03-0306002-5

Optical Fiber Bragg Grating Sensor Using Cantilever Beam of Equal Strength for Slope Sliding Displacement Monitoring

GAO Chao¹, LIU Bang¹, GUO Yong-cai¹, ZHU Zheng-wei²

(1 Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Education Ministry, College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(2 Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, College of Civil Engineering of Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: A shear displacement sensing device for monitoring rock sliding based on the principle of optical fiber Bragg grating. The displacement sensor was designed by attaching the fiber grating to equal strength cantilevers. Then the sensor was embedded inside a $\Phi 50$ polyvinyl chloride (PVC) tube. Three test models were made using $\Phi 75$ PVC tube with the $\Phi 50$ PVC tube mentioned before in it. Cement mortar was grouted into the gap between the $\Phi 50$ and $\Phi 75$ PVC tubes as ratio at 1:1. Indoor shearing tests on the models were carried out. The curve of the relationship between the sliding distance and the grating wavelength shift was also measured. Results show that the sensitivity of this sensor is 0.5 mm and the maximal sliding distance could reach 30 mm while the grating wavelength could shift up to 1200 pm, of which indicates that the sensor could be well applied into sliding displacement measurement which needs a very high sensitivity. It is proved that the features of the fiber Bragg grating (FBG) sensor we designed are more sensitive and reliable, better anti-interference ability and larger measurement range. The structure of the sensor is simple, and it also can realize remote, real-time monitoring. Thus, the sensor can be used for landslide early warning monitoring.

Key words: Fiber Bragg grating; Cantilever beam; Landslide; Displacement; Monitoring

OCIS Codes: 060.2370; 120.4640; 230.0040

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 51178488, 51478066) 资助

第一作者: 高潮 (1959-) 男, 教授, 博士, 主要研究方向为测控技术及仪器、图像获取及处理. Email: gaoc@cqu.edu.cn

通讯作者: 刘邦 (1983-) 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: 28374643@qq.com

收稿日期: 2014-09-05; 录用日期: 2014-10-21

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

每年由滑坡等边坡失稳灾害造成的损失达数十亿,严重影响了人民群众的生命财产安全^[1]. 滑坡按受力情况可分为推移式滑坡和牵引式滑坡,其滑体与滑床的相对位移是其中一个重要参数^[2]. 对于边坡内部位移监测一直是岩土工程界关注的重要课题.

目前已有全球卫星定位系统(Global Positioning System, GPS)^[3]、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)^[4]、遥感技术(Remote Sensing, RS)^[5]、时域反射系统(Time Domain Reflectometry, TDR)^[6]和测斜仪^[7]等传统监测技术. 光纤传感监测技术以其独特的优点正逐渐替代传统的监测技术并产生了许多显著的成果,如光功率监测技术^[8]是直接将单光纤置入砂浆体中用于模拟监测岩层相对滑动位移,实现了对滑动初测精度 0.3mm,但最大测量范围有限仅为 3mm. 光时域反射技术(Optical Time Domain Reflectometry, OTDR)^[9]是利用钻孔将 PWRI 研制的光纤传感器埋入其中并在日本 Takisaka 岛进行滑坡实地测试,用 OTDR 仪测试光纤弯曲损耗以反映滑坡位移的变化情况. 其传感器的理论极限最小分辨率为 1 mm,最大测量范围为 40mm. 用多个传感器级联进行 9 个月测试表明该传感器可以反映当地边坡滑移大体趋势. 但其实际测试结果显示传感器的位移监测数据波动度达 2 mm 每天,且测试曲线不够连续,月波动度约为 10mm. 采用布里渊光时域反射技术(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, BOTDR)^[10]对南京钟鼓楼地区的隧道进行光纤铺设,利用 AQ8603 测试光纤的应变分布情况,得到隧道裂缝变形的最小值为 -0.082 mm,最大值为 0.142 mm. 对隧道的健康状况作出了良好的诊断作用,但未提及变形量与光纤应变的具体对应关系. 布里渊光时域分析(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)^[11]法需要双端泵浦大都以网状形式铺设光纤,具有约 0.1 mm 的空间分辨率,光纤应变测量精度高,但都处于实验室内模型研究,在实地监测中很难实现这种方法,且成本较其它方法高很多.

本课题组^[12-14]研制了一至四代复合光纤传感装置(Combined Optical Fiber Transducer, COFT),该传感装置外围包裹砂浆,能有效解决目前大多研究方法只能处于室内模拟研究而很难实现现场试验的困难,已在重庆市郊区李家沱工地进行现场实验. 一至四代复合光纤传感装置采用光时域反射技术原理,利用光纤组成蝴蝶结,当复合光纤装置受剪切作用,蝴蝶结收缩产生微弯效应,利用 OTDR 仪检测光纤损耗以测量剪切位移. 通过四组蝴蝶结的组合形式实现了对剪切方向的判定. 其初始测量精度为 2.3 mm,最大测量范围

为 26.5 mm,该装置具有成本低廉,实现方便,测量准确等优点. 但在研究中发现,仅靠光纤组成蝴蝶结形式测试剪切位移,其最大测量范围有局限性同时其线性特征不够良好. 为此,考虑引进光纤光栅到复合光纤传感装置. 通过在等强度悬臂梁上粘贴光栅并嵌入聚氯乙烯树脂(Polyvinyl Chloride, PVC)管中构成剪切位移传感器,实现对滑坡位移的高初始精度、大动态范围的测量.

1 剪切位移传感装置设计

滑坡的一般结构如图 1,监测滑坡的一个重要参数是滑体与滑床之间的相对剪切位移.

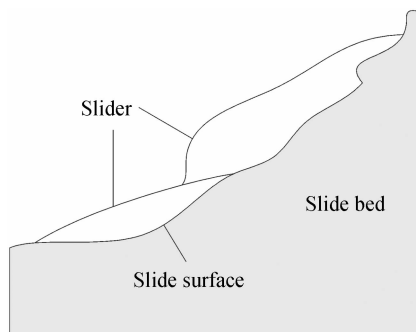


图 1 滑坡一般结构

Fig. 1 Landslide structure under normal circumstance

针对这种剪切位移的测试,设计的室内试验如图 2,其中包括利用蝴蝶结、毛细钢管、灌浆材料等,该装置能够实现对剪切位移达到较高的初始测量精度和较大的动态范围,但在试验的进一步探索中发现该装置具有动态范围的局限性,利用光纤光栅测试剪切位移能够克服这种缺点.

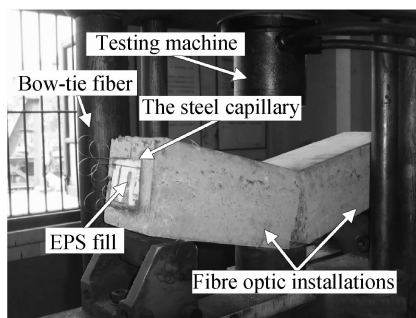


图 2 前期 COFT 试验研究

Fig. 2 The previous study on COFT

光纤光栅具有类似应变片的作用,有很高的灵敏度. 光纤光栅受到轴向应力或者温度变化影响时,光纤光栅的几何尺寸将发生变化,引起有效折射率和光栅周期常数的变化,进而改变布喇格波长^[15]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\Delta\epsilon + [\zeta + a]\Delta T \quad (1)$$

式中, P_e 为光纤光栅弹光系数, $\Delta\epsilon$ 为应变变化, ζ 为光纤材料热光系数比, a 为光纤光栅附着的基体材料的热膨胀系数, ΔT 为温度变化.

将光栅粘贴在悬臂梁上建立光栅波长变化与悬臂梁应变或环境温度之间的传递关系。

根据等强度梁传感原理^[16],如图3,建立自由端挠度 y 和作用力 F 之间的关系为

$$y = \frac{6l^3}{Eb_0h^3}F \quad (2)$$

式中, b_0 为固定端处梁的宽度; l 为梁的长度; E 为梁的材料的弹性模量; h 为梁的厚度。

梁的应变 $\Delta\varepsilon$ 与作用力 F 之间的关系为

$$\Delta\varepsilon = \frac{6l}{Eb_0h^2}F \quad (3)$$

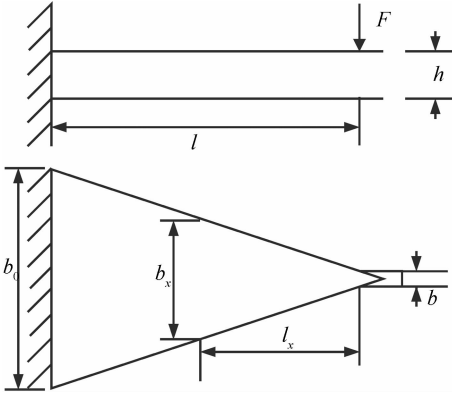


图3 等强度悬臂梁结构

Fig. 3 The structure of uniform strength beam

同时在等强度悬臂梁上下两表面中心粘贴光栅,根据材料力学,在力 F 作用下,上表面光栅受拉,下表面受压,上下两表面光栅的波长将会分别朝长短波长移动.若采用两根结构相近、温度灵敏度系数相同的光纤光栅,则其波长因作用力 F 引起的变化量 $\Delta\lambda_{B_1}$ 、 $\Delta\lambda_{B_2}$ 的绝对值相等,符号相反.根据式1,两根光栅的波长差为

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_{B_1} - \Delta\lambda_{B_2} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon(\lambda_{B_1} + \lambda_{B_2}) + [\zeta + a]\Delta T(\lambda_{B_1} - \lambda_{B_2}) \quad (4)$$

因两根光栅结构相近有 $\lambda_{B_1} \approx \lambda_{B_2}$,即

$$\Delta\lambda \approx 2(1 - P_e)\Delta\varepsilon\lambda_{B_1} \quad (5)$$

将式(5)、(3)代入式(2)得到

$$K = \frac{Eb_0h^2}{12l(1 - P_e)\lambda_{B_1}} \quad (6)$$

在式(6)中, $K = \frac{Eb_0h^2}{12l(1 - P_e)\lambda_{B_1}}$,只与梁和光栅的结构参数相关,当材料选定后,位移 y 与波长 $\Delta\lambda$ 的变化成线性关系,温度影响基本可以消除.基于此原理设计光纤光栅位移传感器。

在等强度悬臂梁上下两端面中心粘贴光栅如图4,采用两根结构相近的光栅,根据式(6)用以抵消温度的影响,将悬臂梁自由端的挠度转化成光栅的波长变化从而建立波长-位移对应关系.应用上下两根光栅的波长差值变化还可以提高悬臂梁的传感灵敏度至两倍。

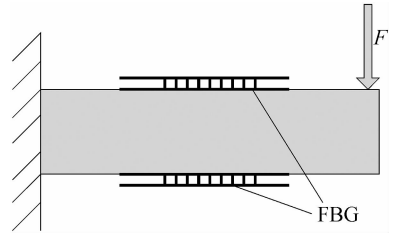


图4 光栅粘贴方式

Fig. 4 The paste method of grating

为了保证悬臂梁传感器的稳定工作,将其装进 $\Phi 50$ 的PVC管中,如图5,悬臂梁下端浇筑1:1砂浆,使悬臂梁下端紧固的与 $\Phi 50$ PVC管连接在一起. $\Phi 50$ PVC管中间部分采取软连接,上端采用铰链与PVC管连接在一起.在 $\Phi 50$ PVC管外再封装一个 $\Phi 75$ 的PVC管,中间浇裹一层1:1砂浆使其外径达到 $\Phi 75$.在测试的时候将外层PVC管去掉,整体制备成一个圆柱形剪切位移测量传感器.浇灌砂浆目的是为了在边坡稳定性测试中,可以先开挖孔洞,然后将装有悬臂梁传感器的PVC管置入其中,最后进行砂浆浇筑.这样可以使位移剪切装置与边坡紧密的连接在一起。

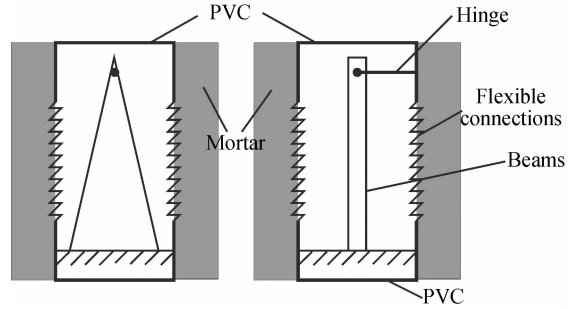


图5 光栅剪切位移检测装置

Fig. 5 The grating monitoring transducer of shear displacement

当剪切位移传感装置的上下部分受到剪切作用时,由于中间采用软连接,软连接带的砂浆层将会产生破裂,进而传感装置的上下部分产生相对位移.因悬臂梁的上下端连接的部位不同,将随剪切位移而产生挠度,悬臂梁的挠度直接影响粘贴在两表面的光栅的中心波长变化.进一步利用光栅解调仪可以实现对剪切位移的检测。

2 实验结果与分析

实验选用北京长飞优创通信技术有限公司生产的反射中心波长为1532 nm的光纤光栅,其反射率为86.5%,3 dB半高宽度为0.2 nm.用AB胶将光纤光栅按图3固定在悬臂梁上下表面,上表面光栅反射中心波长往长波长方向移动,下表面反射中心波长往短波长方向移动.悬臂梁采用不锈钢制成,长为300 mm、下底为50 mm、上底为5 mm,厚为1 mm,未制成三角形是为了在铰链的时候方便链接到两斜边的交汇中心.按照图4将悬臂梁置入 $\Phi 50$ 的PVC管中,PVC管外浇

筑 1 : 1 的砂浆。光栅解调仪采用武汉欧迪电子有限公司生产的 C 波段解调仪,其测量范围从 1 500 到 1 600 nm。实验测量原理如图 6。

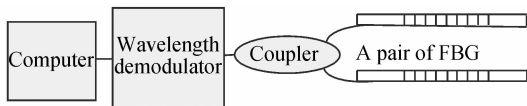


图 6 光栅传感器测量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of grating sensor

将制备好的剪切位移传感装置装入室内剪切模拟滑移体模型中,剪切位移试验台的结构如图 7。利用液压千斤顶对模型施加推力,使其上下部产生相对滑移。同时用两只百分表记录左右滑移量以取平均值。试验时,以 0.5 mm 的位移值为步长,记录千斤顶油压值、百分表读数、两根光栅的反射中心波长值。

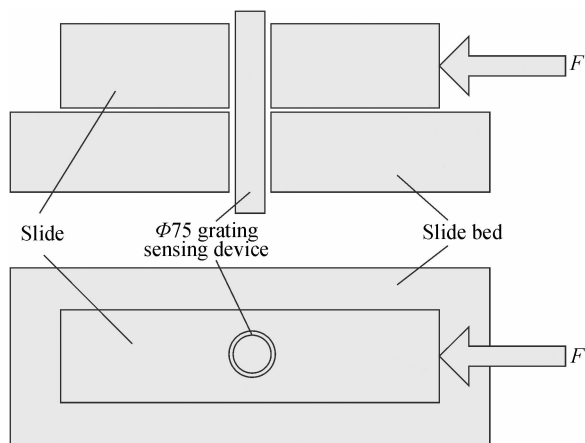


图 7 剪切位移试验台

Fig. 7 The test-bed of shear displacement

试验中,由于解调仪的分辨率为 0.001 nm,其重复性为 0.002 nm,因此可以认为波长变化大于 0.002 nm 则可以分辨出最小位移量。当滑动位移增加至 0.5 mm 时,单根光纤的波长变化为 0.002 nm,此时不能明显从光谱仪上读出数据,而两根光栅波长变化差为 0.004 nm 则可以很好地从光谱仪上分辨出,因此可以认为此时剪切传感器与滑块内孔完全接触,开始对位移产生感应。随后,位移每增加 0.05 mm,波长变化量约为 0.002 nm。当位移增至 30 mm 时,传感器的波长不再增加开始有下降趋势,表明传感器已经达到最大量程,此时传感器受限于滑孔的大小已经不能产生自由移动。

由图 8 可以看出在初始阶段,波长变化随位移缓慢增加,在约 0.5 mm 时,波长开始变化,此时如图 9 所示压力值为 0.8 Mpa,考虑传感装置与滑块孔洞之间存在间隙,必须增加液压千斤顶的压力使两者完全接触压紧后传感器才会产生感应。当位移到达 3 mm 后,压力达到最大值 1.4 Mpa,表明光纤传感装置破裂产生剪切位移,波长与位移呈近似线性关系。以 3 到

30 mm 阶段作线性分析,其相关系数 $R^2 = 0.9862$ 。随后压力值逐渐减小趋于恒定值 0.9 Mpa,表明传感装置破裂后阻力逐渐减小趋于恒定。加载位移至 35 mm 时,传感装置上下部分已近乎完全被剪切错位。

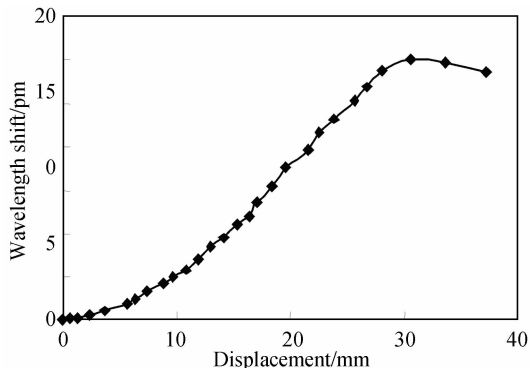


图 8 波长随位移变化曲线

Fig. 8 The curve between wavelength and displacement

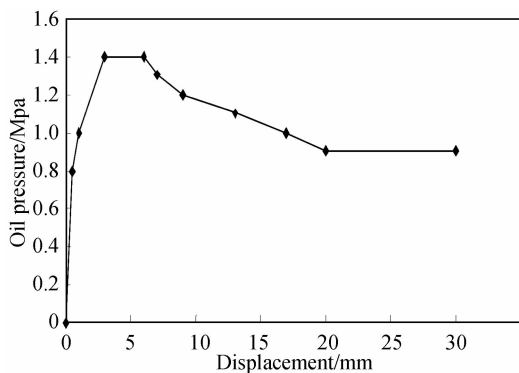


图 9 油压随位移的变化曲线

Fig. 9 The curve between oil pressure and displacement

试验前、试验后的场景如图 10。

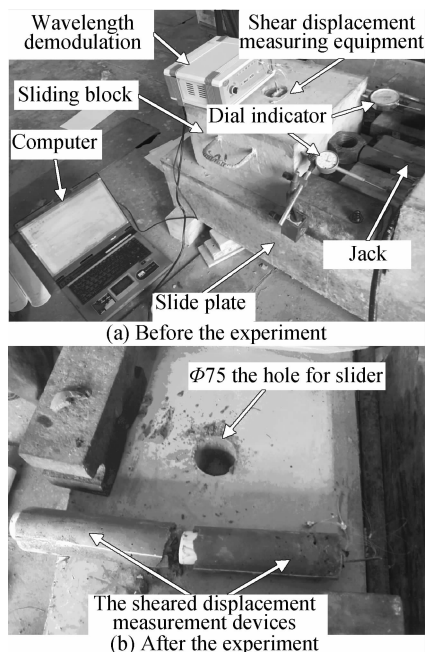


图 10 试验前后的效果

Fig. 10 The effect before and after test

表1将本次试验的效果与其它监测方法相比较,包括初始精度、最大滑移距离、动态范围和线性关系。

可见本次试验具有高的初始精度、较大的最大滑移距离测量、高的动态范围和线性特征

表1 本实验与其它监测方法的比较

Table 1 Comparison of the present test and other test

Test method	Initial accuracy		Max slip distance		Dynamic range /mm	Linear
	magnitude/mm	correlation quantity	magnitude/mm	correlation quantity		
TDR ^[6]	5.0	0.005/ ρ	25.4	0.123/ ρ	0-20.4	Yes
Single fiber ^[8]	0.3	0.5/dB	3.60	54/dB	0-3.3	No
Our previous study ^[12]	2.3	0.11/dB	26.5	9.1/dB	0-23.2	No
Our method	0.5	4.0/pm	30	1 200/pm	0-29.5	Yes

3 结论

提出了一种基于等强度悬臂梁的光纤光栅剪切位移测量装置。在悬臂梁上下表面粘贴光栅以抵消温度的影响。采用外围包裹砂浆的方式模拟了滑坡剪切时的位移测量。其初测精度为0.5 mm,最大位移测量为30 mm,最大波长变化为1 200 pm。通过试验表明该装置具有较高的初始测量精度、较大的动态测量范围和良好的线性特征,可用于野外边坡的滑动位移监测。

参考文献

- [1] LIU Bang, LIU Jing-cheng, ZHU Zheng-wei. Application of optical fiber sensing technology to landslides [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2012, **34**(1): 27-32.
刘邦,朱正伟,刘京诚. 光纤传感技术在山体滑坡的应用[J]. 压电与声光, 2012, **34**(1): 27-32.
- [2] YONG Rui, HU Xin-li, TANG Hui-ming, et al. Model testing and numerical simulation study of evolutionary process of thrust load caused landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **10**, **34**(10): 3018-3027.
雍睿,胡新丽,唐辉明,等. 推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2013, **10**, **34**(10): 3018-3027.
- [3] JIBSON R W, ILARP E L, MICHAEL J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps [J]. *Engineering Geology*, 2000, **58**: 271-289.
- [4] MATOR, A N, MOKHTAR M R M, CAHYONO B K, et al. Close-range photogrammetric data for landslide monitoring on slope area [C]. 2012 IEEE Colloquium on Ilumanities, Science & Engineering Research, 2012-11-03.
- [5] TANG Xin-jian, TAO Hong-jiu, ZHANG Guang, et al. Analysis of landslide surveying and monitoring by means of remote sensing images [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, **21**(2): 2515-2520.
唐新建,陶洪久,章光,等. 利用遥感图像对滑坡进行调查和监测分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(2): 2515-2520.
- [6] DENNIS N D, OOI C W, WONG V H. Estimating movement of shallow slope failures using time domain reflectometry [EB/OL]. Proceeding of TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA. [2009-07-02]. <https://engineering.purdue.edu/TDR/Papers>.
- [7] SARGAND S M, SARGENT L, FARRINGTON S P. Inclinometer-time domain reflectometry comparative study: final report [C]. Ohio Research Institute for Transportation and

Environment. 2004-04-01.

- [8] TANG Tian-guo, ZHU Yi-wen, CAI De-suo, 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.
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.
- [9] HIGUCHI K, FUJISAWA K, ASAI K, et al. Application of new landslide monitoring technique using optical fiber sensor at Takisaka Landslide [C]. 1st North American Landslide Conference. 2007-06-03.
- [10] SHI Bin, XU Xue-jun, WANG Di, et al. Study on BOTDR-based Distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(15): 2622-2688.
施斌,徐学军,王镛,等. 隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(15): 2622-2688.
- [11] ZENI L. Optical fiber distributed sensors: a tool for in-situ structural and environmental monitoring [EB/OL]. IWL 2009, Rainfall Induced Landslides, 8-10 giugno 2009, Napoli, [2013-11-13]. <http://www.corista.eu/Docs/opticalfiber.pdf>.
- [12] ZHU Zheng-wei, LIU Dong-yan, YUAN Qiao-ying, et al. A novel distributed optic fiber transducer for landslides monitoring [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, **49**: 1019-1024.
- [13] ZHU Zheng-wei, LIU Dong-yan, YUAN Qiao-ying, et al. Application of electro-optic technology to the slope stability monitoring [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2009, **31**(1): 112-118.
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): 112-118.
- [14] ZHU Zheng-wei, YUAN Qiao-ying, LIU, Dong-yan, et al. New improvement of the combined optical fiber transducer for landslide monitoring [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, **5**(19). 2079-2088.
- [15] HU Jia-yan, JIANG Shan. Study on encapsulating technique and strain sensing characteristic of FBG temperature sensor [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, **17**(3): 311-313.
胡家艳,江山. 光纤光栅传感器的应力补偿及温度增敏封装 [J]. 光电子激光, 2006, **17**(3): 311-313.
- [16] WANG Qiong, YAN Nan. Design and study of fiber sensor based on cantilever beam of uniform strength [J]. *Microcomputer Information*, 2010, **26**(2): 107-108.
王琼,严南. 基于等强度悬臂梁的光纤传感器设计研究 [J]. 微计算机信息, 2010, **26**(2): 107-108.