

doi: 10.3788/gzxb20174608.0812003

一种用于滑坡监测的复合光纤装置

高潮¹, 刘邦¹, 郭永彩¹, 朱正伟², 刘鹏², 郑勇², 刘虹霖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: 针对滑坡体深部位移这一重要指标, 基于光时域反射技术, 设计了一种蝴蝶结形式的复合光纤装置用于监测深部剪切位移。该传感装置由方形聚氯乙烯树脂管、毛细钢管、光纤、砂浆组合而成。首先在 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ (厚 2.0 mm) 的聚氯乙烯树脂方管四周开挖导槽, 将 $\Phi 1 \times 500\text{ mm}$ 毛细钢管放置在导槽中。然后用光纤穿入毛细钢管, 光纤一端固定, 另一端绕制成蝴蝶结形式。最后在聚氯乙烯树脂管外围浇筑 $\Phi 110\text{ mm}$ 的砂浆, 制作成圆柱式复合光纤装置。室内边坡模型剪切测试台测试结果表明: 该装置对深部剪切位移初测准确度为 1 mm , 最大测量范围为 40 mm 。分析表明该复合光纤装置具有灵敏度高、测量范围大、结构简单易于安装等优点, 可以用于滑坡以及野外岩土结构工程等进行现场原位监测。

关键词: 光时域反射; 滑坡; 复合光纤装置; 剪切; 位移; 监测

中图分类号: TU454

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0812003-7

A Composite Optical Fiber Transducer for Landslide Monitoring

GAO Chao¹, LIU Bang¹, GUO Yong-cai¹, ZHU Zheng-wei²,
LIU Peng², ZHENG yong², LIU Hong-lin²

(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: Aimed at the important indicator of deep displacement in landslide body, based on the optical time domain reflection technique, a composite optical fiber transducer was designed to monitor the deep shear displacement. The transducer is composed of square PVC pipe, capillary pipe, optical fiber and mortar. Firstly, the surrounding of $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ (2.0 mm thick) PVC tube was grooved, and the $\Phi 1 \times 500\text{ mm}$ steel capillary was placed in the guide groove. Then the fiber was used to penetrate capillary tube. One end of the optical fiber was fixed, and the other end was wound into a bow form. At last, the mortar with diameter of 110 mm was poured outside PVC, so that a cylindrical composite optical fiber transducer was fabricated. The slope model shear test experiment shows the transducer detection accuracy is 1 mm and the maximum measurement range of fiber grating is 40 mm . Study shows that the composite optical fiber transducer has the advantages of high sensitivity, wide measuring range and convenient installation, and can be used for in-situ landslide monitoring and geotechnical engineering structure monitoring effectively.

Key words: Optical time domain reflectometry; Landslide; Composite optical fiber transducer; Shear; Displacement; Monitoring

OCIS Codes: 120.4880; 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, 博导, 主要研究方向为测控技术及仪器、图像获取及处理。Email:

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: 2016-12-16; 录用日期: 2017-03-20

0 引言

我国是世界上地质灾害十分严重的国家之一,仅滑坡每年造成的财产损失就达数亿之多^[1].目前已有许多先进技术用于滑坡监测,如全球卫星定位系统^[2]、地理信息系统^[3]、遥感技术^[4]等.这些监测技术在滑坡体地表形态形变监测中取得了重要的成就,但是地表信息极容易受到自然界各种活动的干扰,如雨水冲刷、人畜活动等.时域反射系统^[5]和测斜仪^[6]能够测量滑坡的内部形变但其测量范围有限并且实时性较差.光纤传感监测技术以其独特的优点产生了许多显著的成果,如光功率监测技术^[7]、光时域反射技术(Optical Time Domain Reflection, OTDR)^[8]、布里渊光时域反射技术^[9]、布里渊光时域分析^[10]等.这些监测技术在滑坡重要状态参量——内部形变位移^[11]监测方面已经取得了巨大的成功,但是难以同时满足准确判别滑动方向、初始准确度高、测量行程大及价格便宜等优点^[12].因此需要研究一种定位好、准确度高、量程大、价格低的光纤监测手段用于滑坡内部形变位移——剪切位移的监测.

在该课题组前期的研究中^[13-15],制作了一至四代复合光纤传感装置(Composite Optical Fiber Transducer, COFT),有针对性地解决了一些目前光纤监测技术中存在的问题.该装置以光时域反射技术为基础结合空间梁架构,实现了分布式、实时远程监测滑坡深层剪切位移.第一、二代复合光纤装置主要为探索试验,装置由毛细钢管和单光纤以及基材板组成,抗折试验表明第二代复合光纤装置对剪切位移的初始测量准确度与最大测量范围分别是 5 mm 和 12 mm^[13].第三代复合光纤装置引入 EPS 材料,抗折试验表明其初始测量准确度与最大测量范围分别是 2.3 mm 和 26.5 mm^[14].第四代复合光纤装置将光纤制作成蝴蝶结形式,双剪试验表明其初始测量准确度和最大测量范围分别是 1 mm 和 21 mm^[15].在研究中发现,初始测量准确度提高了,但是最大测量范围却降低了.为此,本文提出采用 PVC 方管替代之前使用 EPS 材料作为基材设计新型复合光纤装置进行研究,并且利用三根光纤分阶段监测的方式以增大其测量范围,同时设计制作了直剪模型测试台作剪切试验以达到更好的模拟滑坡深部形变的效果.

1 复合光纤装置设计原理

当某一波长的激光入射到光纤中进行传播时,由于受到外界扰动,光纤产生弯曲由直光纤变为曲率半径为 R 的光纤时,并且其曲率半径小于临界值 R_c 时($R \leq R_c$),其后向散射光的强度将会发生衰减.后向散射光的强弱变化可以由光时域反射仪(OTDR)测出.对于阶跃单模光纤,设后向散射光损耗为 α ,则通过光传输理论分析可得^[16]

$$\begin{cases} \alpha = A_c R^{-1/2} \exp(-UR) \\ U = 0.705 \frac{\Delta^{2/3}}{\lambda} \left(2.748 - 0.996 \frac{\lambda}{\lambda_{cf}} \right)^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中, λ 为中心波长

$$A_c = 30 \Delta^{1/4} \lambda^{-1/2} \left(\frac{\lambda_{cf}}{\lambda} \right)^{1/2} \quad (2)$$

由式(1)可知,光纤弯曲损耗 α 随曲率半径的减小而增大.因此可以设计合理的调制机构使得光纤的曲率半径随着外界被测参量的变化而变化.通过 OTDR 仪器测量光纤后向散射光损耗的变化,进而反推出外界被测参量的变化.

COFT 边坡监测技术正是利用光纤这一特性,设计蝴蝶结作为调制机构,如图 1 所示,当装有蝴蝶结的毛细钢管运动时,蝴蝶结尺寸变小,使得蝴蝶结曲率半径 R 减小,进而产生微弯损耗,并为 OTDR 所捕获.

COFT 完整结构如图 1 所示,COFT 由一根光纤穿过 1#、2#、3#、4# 毛细钢管,四根 500 mm 长毛细钢管附着在开挖导槽的方形中空 $40 \times 40 \times 500 \text{ mm}^3$ PVC 管上.毛细钢管的一端 50 mm 长部分通过 502 胶水牢固粘贴在基材板上进行锚固,同时在这端毛细钢管口注入 502 胶水以使光纤和毛细钢管锚固在一起.毛细钢管的其余部分用透明胶布捆绑使得毛细钢管和 PVC 管紧密结合并可以自由弯曲,即形成自由端.在毛细钢管的位于监测体外部分将光纤绕制成蝴蝶结形状,在蝴蝶结端部安装光纤夹以固定蝴蝶结初始尺寸的大小,同时允许光纤在光纤夹中能够自由滑动.在 PVC 管外部浇筑 $\phi 110$ 的砂浆体构成圆柱体式 COFT.该 COFT 具有感知毛细钢管任意点的剪切位移的特点,在实际监测中只要浇筑的砂浆体强度适宜、刚度合适,

周围土体发生变形时,砂浆体也将变形,并和周围土体保持一致.当砂浆体在剪切力 F 作用下时,在剪切处 PVC 管将发生变形,由于毛细钢管的一端锚固在 PVC 管上,毛细钢管另一端将产生回缩,从而带动光纤使蝴蝶结收缩.使用 OTDR 仪器测试蝴蝶结微弯损耗即可测量剪切位移的大小.

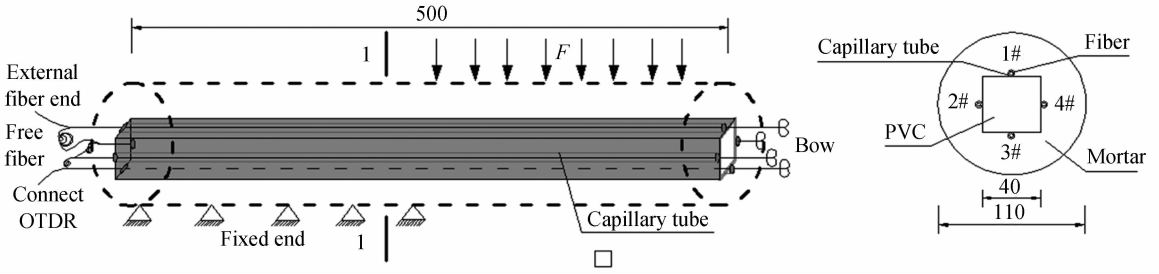


图 1 COFT 灌浆体工作示意图(悬臂结构)

Fig. 1 COFT sketch map of grouting body (cantilever structure)

2 实验结果与分析

实验选用武汉长飞光纤光缆有限公司生产的单模光纤(G652.B,直径 $241\mu\text{m}$). OTDR 选用 41 所研制的 AV6418. 光纤熔接机选用 41 所生产的 AV6471. 百分表选用成都工具量具厂生产的 $0\sim 50\text{ mm}$ 规格. 液压千斤顶选用 10KN 手动式. 在前期的试验中发现 2#、4# 毛细钢管的运动轨迹几乎一样,因此在本实验中选择 1#、2#、3# 毛细钢管作为研究对象. 实验中先将毛细钢管一端锚固 PVC 方管导槽中,其余部分通过透明胶布困绑在 PVC 方管上,再将 PVC 方管放入 $\Phi 110$ 的 PVC 管中,在两管之间浇筑 1:5 的砂浆,养护 3 天制作成圆柱式 COFT. 待养护时间到以后再将光纤穿入毛细钢管,在毛细钢管的自由端将光纤绕制成蝴蝶结形式,在两蝴蝶结中间用熔接机连接不少于 60 m 的自由光纤. 将制备好的 COFT 装入室内直剪模型测试台中,试验结构及剪切前后的毛细钢管和蝴蝶结状态如图 2 所示. 剪切前毛细钢管处于直线状态,随着剪切位移的增大,1#、2#、3# 毛细钢管依次增大移动位移. 蝴蝶结收缩量呈现 $1\# > 2\# > 3\#$.

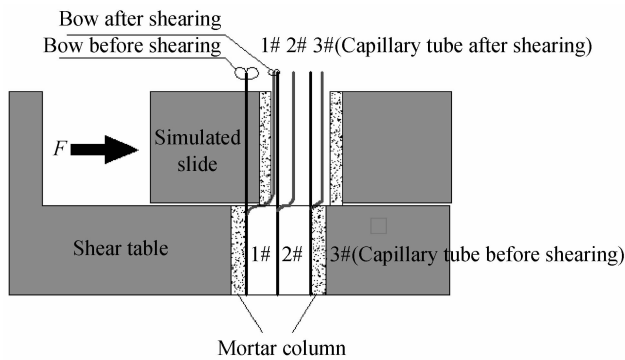


图 2 COFT 灌浆体直剪试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of direct shear test of COFT grout

为便于和曾经研发的复合光纤装置做试验对比,试验试件构成如表 1 所示.

表 1 试件参量

Table 1 Specimen parameters

Sample number	Specimen size/mm	Device material	Device section size/mm	Mortar ratio	Curing time/day
No. 1	$500 \times \Phi 110$	PVC	40×40	1:5	3
No. 2	$500 \times \Phi 110$	EPS	40×40	1:5	3

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,以约 1.0 mm 的位移值为步长,记录千斤顶油压值、百分表读数、OTDR 的光纤损耗值.最后得到 PVC 和 EPS 两种基材的光纤损耗值和滑体剪切位移关系曲线如图 3 所示.

从图 3 中可知:

1)在图 3(a)中,1#、2#、3# 蝴蝶结的损耗趋势线基本保持一致.其原因是由于 EPS 是实心泡沫材质,能够一定程度上均匀传递剪力.损耗 9 dB 时终止,测量范围 $0\sim 25\text{ mm}$;

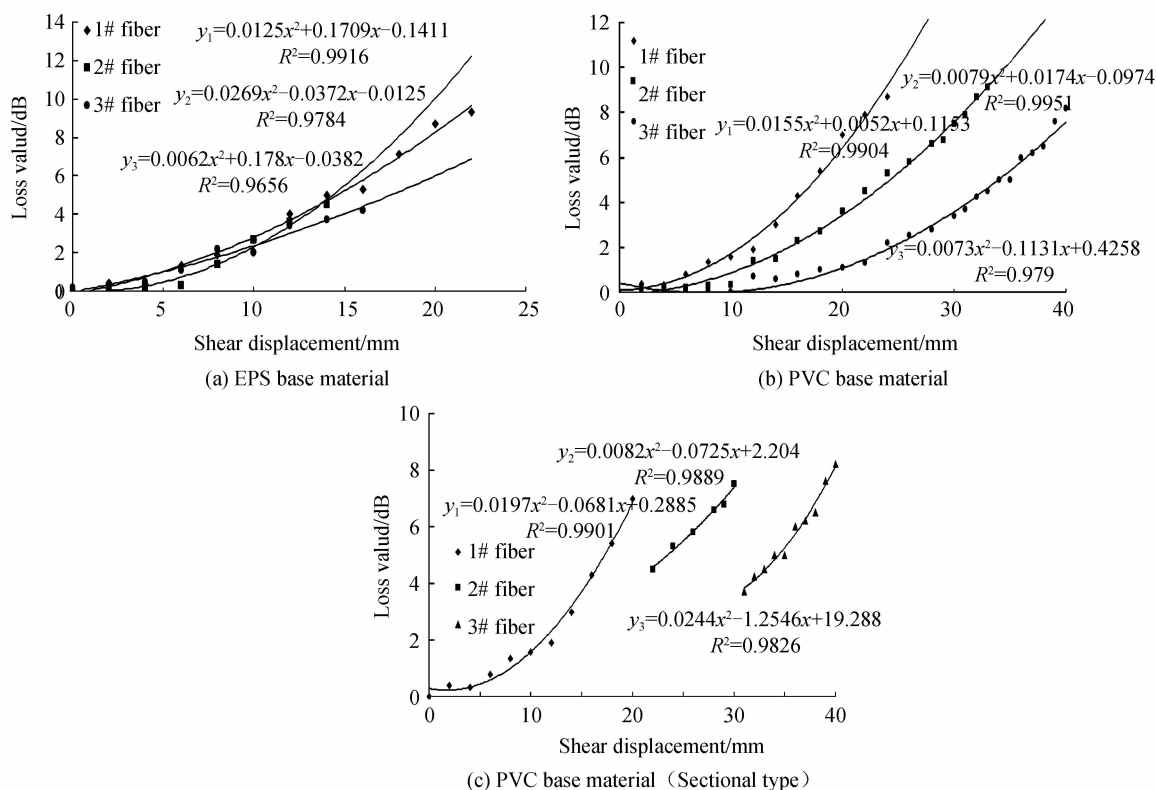


图 3 PVC 和 EPS 基材 COFT 光纤损耗值和剪切位移关系曲线

Fig. 3 Curves of COFT fiber loss and shear displacement of PVC and EPS substrates

2)在图 3(b)中, 1# 蝴蝶结测量范围为 0~25 mm; 2# 蝴蝶结测量 0~10 mm 时, 损耗值很小, 测量 20~30 mm 变化明显; 3# 蝴蝶结测量 0~20 mm 时, 损耗值很小, 测量 30~40 mm 变化明显. 分析其原因是由于 PVC 基材刚度很大且中空, 1# 光纤前端受到剪力, 最早发生损耗变化; 剪力让前端 PVC 变形到一定程度, 此时 2# 光纤受到剪力, 蝴蝶结收缩发生损耗变化; 最后是后端 3# 光纤受到剪力, 蝴蝶结收缩发生损耗变化;

3)图 3(c)是根据图 3(b)进行截断并重新拟合曲线方程;

4)对比图 3(a)、(b)、(c), PVC 基材 COFT 能够测量的滑体最大剪切位移为 40 mm, 比 EPS 优良. 利用 PVC 基材 COFT 装置的 3 个蝴蝶结, 可以分为三段函数表示光纤损耗值 α 和剪切位移 x 值关系, 即

$$\alpha = \begin{cases} 0.0197x^2 - 0.0681x + 0.2885 & 0 \leq x \leq 20 \\ 0.0082x^2 - 0.0725x + 2.204 & 20 \leq x \leq 30 \\ 0.0244x^2 - 1.2546x + 19.288 & 30 \leq x \leq 40 \end{cases} \quad (3)$$

PVC 基材 COFT 装置剪切试验实景图如图 4 所示. 试验后的剪切凹痕和每根钢管的剪切位移量与理论分析和实测数据相互印证. 在实际应用中需要测试光纤蝴蝶结的损耗反算剪切位移的大小. 由式(3)可知 1# 蝴蝶结损耗为 0~7 dB 时, 位移小于 20 mm; 2# 蝴蝶结损耗为 4.2~7.5 dB 时, 位移大于 20 mm 小于 30 mm; 3# 蝴蝶结损耗为 4.0~8.5 dB 时, 位移大于 30 mm 小于 40 mm. 为验证重复性, 试验一共制备了 EPS 基材和 PVC 基材各 3 组试件, 取 PVC 基材 3 次试验得到数据如表 2.



图 4 PVC 基材 COFT 剪切试验图

Fig. 4 PVC substrate COFT shear test diagram

表 2 COFT 试验数据
Table 2 COFT test data

Test segment	PVC test piece 1			PVC test piece 2			PVC test piece 3		
	Loss value	Dial indicator	Theoretical displacement	Loss value	Dial indicator	Theoretical displacement	Loss value	Dial indicator	Theoretical displacement
1# bow data	0.22	1.03	1.15	0.24	1.01	1.75	0.23	1.07	1.54
	0.26	2.05	2.27	0.28	2.00	2.62	0.30	2.03	2.92
	0.42	4.08	4.13	0.40	4.02	3.96	0.46	4.05	4.45
	0.78	6.01	6.32	0.70	6.05	5.91	0.88	6.03	6.77
	1.17	8.06	7.94	1.23	8.07	8.15	1.35	8.01	8.56
	1.78	10.03	9.89	1.56	10.04	9.24	1.95	10.00	10.37
	2.49	12.02	11.74	2.62	12.08	12.04	2.56	12.05	11.90
	3.56	14.06	14.33	3.83	14.05	14.54	3.78	14.02	14.45
	4.24	16.07	15.29	4.58	16.05	15.88	4.95	16.03	16.49
	5.62	18.07	17.57	5.83	18.01	17.88	5.99	18.05	18.12
6.95	20.00	19.49	6.80	20.04	19.29	7.13	20.02	19.74	
2# bow data	4.35	22.03	21.18	4.42	22.05	21.43	4.25	22.06	20.81
	5.10	24.05	23.72	5.27	24.03	24.25	5.16	24.02	23.90
	5.83	26.04	25.90	5.94	26.05	26.21	5.74	26.07	25.65
	6.24	28.05	27.03	6.36	28.02	27.36	6.48	28.01	27.67
	7.55	30.02	30.32	7.62	30.07	30.49	7.34	30.03	29.83
3# bow data	4.12	32.04	31.97	4.05	32.03	31.74	3.95	32.01	31.40
	4.91	34.07	34.18	4.81	34.01	33.93	4.63	34.03	33.47
	5.84	36.05	36.18	5.63	36.06	35.77	5.57	36.09	35.65
	6.91	38.04	38.10	6.82	38.08	37.95	6.71	38.03	37.77
	8.27	40.12	40.17	8.39	40.05	41.68	8.02	40.06	39.82

表 2 中 COFT 损耗值为 OTDR 测得的各蝴蝶结后向散射光损耗. 试验加载以百分表读数为准约 2 mm 为步长. 理论位移是根据式(3)通过损耗求得的剪切位移. 三次试验损耗最大误差出现在位移 16 mm 处为 0.71 dB, 相对误差为 7.9%FS. 损耗当量误差出现在 10 mm 处, 为 21.9%. 理论位移与百分表位移最大误差出现在 40 mm 处为 1.63 mm, 相对误差为 4.1%FS. 位移当量误差出现在 1 mm 处, 为 75%. 综合以上试验和分析可得本文设计的装置初始测量准确度为 1 mm, 最大测量范围为 40 mm, 重复性误差为 7.9%FS, 准确度误差为 4.1%FS.

3 讨论

COFT 装置是用于在滑坡深部监测的, 该装置需要具备较高的初始测量准确度、较大测量行程、实时性及价格较低等优点. 为此, 将本文方法与其他基于钻孔的监测方法进行对比, 如表 3 所示.

表 3 几种监测方法的比较
Table 3 Comparison of the present test and other test

Test method	Initial accuracy/mm	Max slip distance/mm	Real time	Price(USD/m)	Direction of motion
TDR ^[5]	2.5~5	13~25	yes	13.5	no
Single fiber ^[7]	0.3	3	yes	0.03	no
The forth COFT ^[15]	1	21	yes	0.5	yes
Our method	1	40	yes	0.5	yes

从表 3 可以看出:

- 1) 在这些基于钻孔的监测方法中, 本文方法的初始测量准确度为 1 mm, 尽管高于单光纤, 但远低于 TDR;
- 2) 本文方法的最大测量行程大于 40 mm, 与其他方法相比是最大的测量行程;
- 3) 实时性方面, 四种方法都可实现实时性监测;

4) 价格方面, 本文方法的辅材价格仅 MYM0.5/m, 仅高于单光纤, 但远低于 TDR 的价格。

5) 判断滑坡运动方向方面, 只有本文方法和第四代 COFT 能判断运动方向。

因此, 综合初始测量准确度、行程、实时性、价格和判断运动方向等因素, COFT 在滑坡监测方面上优势较为明显, 野外实用性较强。

4 结论

本文提出采用 PVC 方管替代前期 EPS 材料作为基材设计复合光纤装置进行研究, 同时运用分段测量使得三个蝴蝶结处于依次连续工作状态, 以增大其测量范围. 并设计制作了直剪模型测试台以达到更好的模拟滑坡监测的效果, 结果表明:

1) PVC 方管基材 COFT 相比于 EPS 基材 COFT, 测量范围更大, 性能更好, 最小测量位移为 1 mm, 最大测量位移 40 mm;

2) 基于 PVC 方管基材 COFT, 在直剪切试验中通过三段式函数测量位移, 并制作不同试件重复试验得到位移测量准确度误差为 4.1%FS, 损耗测量重复性误差为 7.9%FS;

3) 本文方法同时具有分布式测量、价格低廉且安装方便等优点, 具体表现为可以感知任意滑移面的剪切位移; 光纤和 PVC 管作为材料价格低; 圆柱式封装利于现场钻孔. 因此在滑坡监测等工程现场应用中具有较强的可行性。

基于 PVC 方管的新型复合光纤装置的研究提供了一种探索思路. 离实际产品化应用于现场监测仍然有许多问题需要进一步研究, 例如如何保护光纤不被折断, 进一步提高该装置初始测量准确度以及重复性和准确度等等。

参考文献

- [1] LIU Bang, LIU Jing-cheng, ZHU Zheng-wei. Application of optical fiber sensing technology to landslides [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2012, **34**(1): 27-32.
刘邦, 刘京诚, 朱正伟. 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] JIBSON R, ILARP E, MICHAEL A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps[J]. *Engineering Geology*, 2000, **58**: 271-289.
- [3] MATORI A, MOKHTAR M, CAHYONO B, *et al.* Close-range photogrammetric data for landslide monitoring on slope area, in: 2012 IEEE Colloquium on Ilumanities, Science & Engineering Research, Kota Kinabalu, 3-4 December 2012, Sabah, Malaysia, 398-402, 2012.
- [4] 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.
- [5] DENNIS N, OOI C, WONG V. Estimating movement of shallow slope failures using time domain reflectometry, in: proc. TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA, 17-20 September, Paper ID 41, 16pp., available at: <https://engineering.purdue.edu/TDR/Papers> (last access: 2 January 2009), 2006.
- [6] SARGAND S, SARGENT L, FARRINGTON S. Inclinator-Time Domain Reflectometry Comparative Study: Final Report, Ohio Research Institute for Transportation and Environment, Ohio Department of Transportation, Ohio, 1-4, 2004.
- [7] 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.
- [8] HIGUCHI K, FUJISAWA K, ASAI K, *et al.* Application of new landslide monitoring technique using optical fiber sensor at Takisaka Landslide, Japan, in: 1st North American Landslide Conference, 3-10 June 2007, Vail, Colorado, 1074-1083, 2007.
- [9] 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, 王镭, 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.
- [10] ZHU Hong-hu, SHI Bin, ZHANG Jie, *et al.* Distributed fiber optic monitoring and stability analysis of a model slope under surcharge loading[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, **11**(4): 979-989.
- [11] 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, **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, **34**(10): 3018-3027.
- [12] GAO Chao, LIU Bang, GUO Yong-cai, *et al.* Study on optical fiber bragg grating sensor using cantilever beam of qual strength for slope sliding dsplacement monitoring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0306002.
- 高潮,刘邦,郭永彩,等. 面向边坡滑移的剪切位移传感装置[J]. 光子学报. 2015, **44**(3): 0306002.
- [13] 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.
- [14] ZHU Zheng-wei, YUAN Qiao-ying, Liu Dong-yan, *et al.* A third-generation optical fibre transducer for landslide monitoring[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2014, **13**(4): 939-946.
- [15] 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*, 2014, **5**(19): 2079-2088.
- [16] LUO Zhi-hui, CHEN Chi. Study and application of broad dynamic range distributed optical fiber sensor[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, **21**(6): 851-855.
- 罗志会,陈池. 大量程分布式光纤传感器的研究与应用[J]. 光电子激光, 2010, **21**(6): 851-855.