

光纤光栅应变管的设计与应用

胡志新^{1,3} 马云宾^{2*} 郇 帅³ 张 凌⁴

¹长安大学工程机械学院, 陕西 西安 710064; ²中油管道科技研究中心机械自动化研究所, 河北 廊坊 065000
³中国电子科技集团公司第四十九研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; ⁴西安交通大学航天航空学院, 陕西 西安 710049

摘要 针对滑坡深部位移监测目前存在的问题,设计光纤光栅(FBG)应变管。采用将裸 FBG 直接粘贴于应变管的方式制作 FBG 应变管,阐述了 FBG 应变测量原理和采用 FBG 应变管的滑坡深部位移计算方法。根据 FBG 应变管的性能测试,FBG 应变管的应变灵敏系数为 $0.58 \text{ pm}/10^{-6}$ 。现场实验结果显示 FBG 应变管的测量结果与测斜仪的测量结果非常吻合。

关键词 光纤光学;光纤光栅应变管;测斜仪

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.s100314

Design and Application of Fiber-Bragg-Grating Strain Tube

Hu Zhixin^{1,3} Ma Yunbin² Huan Shuai³ Zhang Ling⁴

¹ Mecho-Electronics Department, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China

² Automation Institute PetroChina Pipeline R and D Center, Langfang, Hebei 065000, China

³ The 49th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Harbin, Heilongjiang 150001, China

⁴ School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract A fiber Bragg grating (FBG) strain tube, which is fabricated by affixing bare fiber grating to a strain tube, is designed to solve existing problems in deep displacement monitoring of pipeline landslide. Strain measurement principle of fiber Bragg grating and deep displacement calculation method of landslide measured by FBG strain tube are presented. According to results of performance test, strain sensitive coefficient of a FBG strain tube is $0.58 \text{ pm}/10^{-6}$. According to field trials, measurement results of FBG strain tube are mostly agreeable with these of inclinometer.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating strain tube; inclinometer

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 350.2770

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)应变管是用于滑坡深部位移监测的一种传感器。传统的滑坡深部位移监测仪器主要包括测斜仪及应变片应变管。测斜仪藉由其在孔内移动,量测各点倾斜度,累积得到倾斜管位移量,无法实现实时监测;应变片应变管是直接应应变片粘贴于倾斜管表面,藉以测量弯曲应变计算倾

斜管变形,十分适合自动化监测系统,但由于电子信号相互干扰等问题,应变片间距受到局限,影响监测精度。针对上述问题,设计了 FBG 应变管,用于测量滑坡深部位移。FBG 应变管利用 FBG 传感系统单线多点测量及光纤传输不受电磁干扰、灵敏度高和耐腐蚀等特性^[1~4],以 FBG 传感器取代应变片,克服了应变片应变管监测点间距限制及线路过于繁

收稿日期: 2011-03-14; 收到修改稿日期: 2011-05-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60534050)资助课题。

作者简介: 胡志新(1965—),男,博士研究生,副教授,主要从事测试和光电传感等方面的研究。

E-mail: hzx1965@163.com

导师简介: 张 陵(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事机械系统非线性动力学与控制、车辆系统动力学与操纵稳定性、工程结构抗震、减震与控制震实用技术等方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: horse211@163.com

杂的缺点,提高了监测质量。本文详细介绍了 FBG 应变管的测量原理和设计方法,最终对 FBG 应变管进行现场实验。

2 结构设计

FBG 应变管的结构如图 1 所示,由 FBG 传感器和应变管两部分组成。FBG 传感器采用裸光栅,应变管选用抗拉强度 53 MPa、弹性模量 3000 MPa、外径 80 mm、内径 70 mm 的 PVC 管。裸光栅用胶黏剂固定到应变管上。在粘贴裸光栅前利用刀片在应变管刻出 FBG 的粘贴位置,其中包括中心线两端与粘贴方向平行的刻痕,以及 FBG 中心位置刻痕,其目的在于粘贴时能使 FBG 粘贴方向与待测物理量方向平行并确保中心位置。

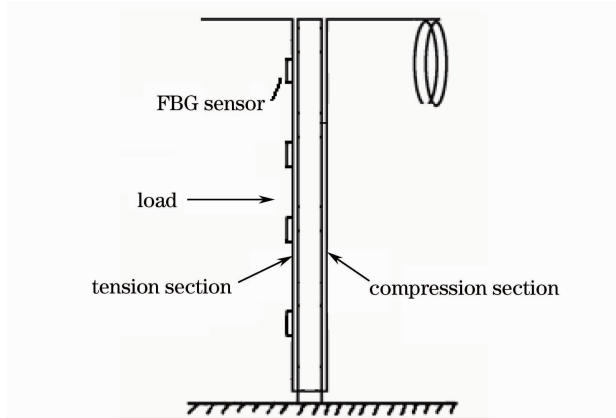


图 1 FBG 应变管结构图

Fig. 1 Structure diagram of FBG strain tube

3 测量原理

FBG 可用于应力、温度和压力等物理量的测量,其基本原理为:当一束宽带光 λ 经过 FBG 时,FBG 会将相位匹配的单色光反射回来,而其余波长的光将透射出去。被反射的波长 λ_B 满足

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 λ_B 为布拉格波长; n_{eff} 为光纤传播模式的有效折射率; Λ 为光栅栅距。

由(1)式可以看出,反射光的中心波长为 λ_B 的光信号,跟光栅栅距 Λ ,纤芯的有效折射率 n_{eff} 有关,所以当外界的被测量温度和应力引起 FBG 的折射率等参量改变时,会导致反射中心波长发生变化。

将裸 FBG 粘贴于应变管后,需要通过实验测试 FBG 应变管的性能指标,实物图如图 2 所示。将波长为 1536.4 nm 光栅轴向粘贴于应变管,应变管长度为 2 m,同时将波长为 1545.8 nm 的光栅粘贴于

另一应变管,作为补偿光栅。对应变管进行轴向拉伸,测量 FBG 的波长变化。由材料力学可知,对于轴向变形的杆件,应变和应力的对应关系为

$$\epsilon = F/(AE), \quad (2)$$

式中 F 为轴向拉力; A 为横截面积; E 为材料的弹性模量。对于实验选用应变管, $E = 3000 \text{ MPa}$, $D_o = 80 \text{ mm}$, $D_i = 70 \text{ mm}$, $A = \pi/4 (D_o^2 - D_i^2) = 0.001 \text{ m}^2$ 。

实验测得 FBG 应变管的灵敏系数为 $0.58 \text{ pm}/10^{-6}$,而裸光栅的应变灵敏系数为 $1.2 \text{ pm}/10^{-6}$,如图 3 所示。

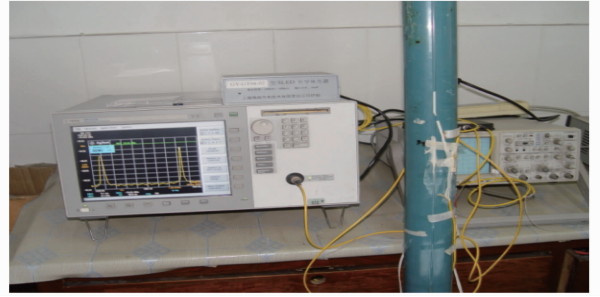


图 2 FBG 应变管性能测试

Fig. 2 Performance test of FBG strain tube

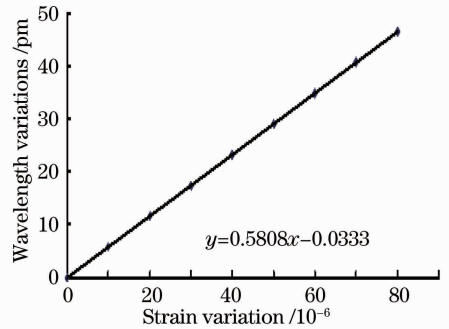


图 3 FBG 应变管的应变灵敏系数

Fig. 3 Strain sensitive coefficients of FBG strain tube

得知 FBG 应变管的应变灵敏系数后,便可以测量滑坡的深部位移了。如图 4 所示,设定 FBG 应变管是固定约束的,裸光栅的间距为 L ,称为深度增量,则一个深度增量的应变值可表示为

$$\epsilon_i = (\lambda_i + \lambda_{i+1})/2, \quad (3)$$

一个深度增量的伸长量(以 mm 为单位) Δl_i 为

$$\Delta l_i = L\epsilon_i, \quad (4)$$

由此,便可计算出一个深度增量的横向位移值 D_i ,进而计算出总位移值 D

$$D_i = L \sqrt{\epsilon_i^2 + 2\epsilon_i}, \quad D = \sum D_i, \quad (5)$$

式中 λ_i 和 λ_{i+1} 分别代表 i 和 $i+1$ 位置的应变值。利用(5)式,通过计算机处理,可绘出位移随深度变

化曲线和变化量曲线,确定各孔有无滑带面,若存在滑带,进一步确定滑带的位置和滑带的层数,计算出滑动方向。

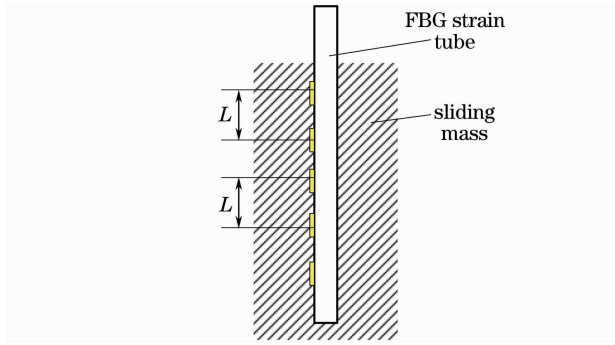


图4 FBG应变管的测量原理

Fig. 4 Measurement principle of FBG strain tube

4 现场实验及数据分析

某滑坡位于四川省境内,滑坡区长 1200 m,平均宽 650 m,厚 30~50 m,坡度 30°左右,局部较陡,滑坡体积约 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$,属特大型滑坡。将 FBG 应变管安装在此处,进行了现场实验。

FBG 应变管的安装首先需要进行钻孔和取样,取样的目的是为查清滑坡上滑体、滑带和滑床的物理力学性质,为定量分析滑坡稳定性提供数据。钻

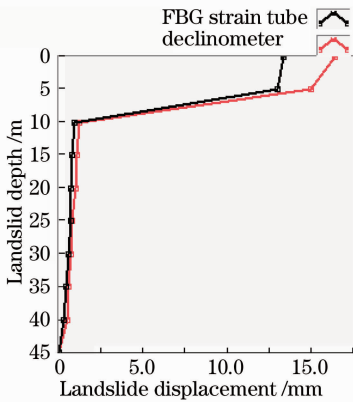


图5 FBG应变管与测斜仪测量结果对比

Fig. 5 Comparison of results measured by FBG strain tube and declinometer

孔需钻至基岩以下 5 m,以保证 FBG 应变管一端固定。FBG 应变管内部设有导槽,可同时使用测斜仪。

自 2008 年 1 月 25 日 FBG 应变管安装完成后,每个月采集数据一次。5 月 25 日及时采集了“五·一二”汶川地震后 FBG 应变管数据,同时也采用测斜仪进行了测量。图 5 给出了两种测量方法的结果。

分析可知,FBG 应变管与测斜仪的数据能较好吻合。地震前,滑坡的深部位移较小,FBG 应变管测量出的深部位移仅在误差范围内。地震发生后,滑坡发生了较大位移,FBG 应变管测量的数据略小于测斜仪。

5 结 论

设计了一种用于滑坡深部位移监测的 FBG 应变管。通过性能测试,FBG 应变管的应变灵敏度系数小于裸光栅的应变灵敏度系数,但完全可以用于滑坡深部位移测量。通过现场实验,FBG 应变管成功监测到地震导致的滑坡位移,与测斜仪的测量结果非常吻合。FBG 应变管用于滑坡监测,易于实现监测数据的实时自动采集分析及远程发布,有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- Zhao Yong. Optical Fiber Gratings and Sensing Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 4~28
赵 勇. 光纤光栅及其传感技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 4~28
- Hu Zhixin, Zhu Jun, Zhang Ling. A new type of fiber grating pressure sensing system with high accuracy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 719~711
胡志新,朱 军,张 陵. 新型高准确度光纤光栅压力传感系统[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 709~711
- Hu Zhixin, Zhu Jun, Zhang Ling *et al.*. A method to eliminating the stress delay from fiber grating pressure sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1329~1332
胡志新,朱 军,张 陵 等. 光纤光栅压力传感器中应力迟滞的消除方法[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1329~1332
- Ma Yunbin, Hu Zhixin, Yang Jing *et al.*. Oil pipeline security monitoring system based on fiber Bragg grating sensor[J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(3): 505~509
马云宾,胡志新,杨 晶 等. 基于光纤光栅的输油管道安全监测系统[J]. *应用光学*, 2009, **30**(3): 505~509