

基于FBG的测斜传感器设计与实现

李俊鑫^{1,2}, 强小俊¹, 郎向伟²

(1. 中国铁道科学研究院 深圳研究设计院, 广东 深圳 518057; 2. 深圳地质灾害监控工程实验室, 广东 深圳 518057)

摘要:变形监测是进行边坡灾害预警预报的重要依赖手段,为解决当前边坡深部变形监测中存在的不足,研发了一种基于光纤光栅传感技术的测斜仪器。光纤光栅测斜传感器包括刚性单元、柔性感测单元及连接销轴,柔性感测单元为布设有光纤布喇格光栅(FBG)的等强度梁结构,FBG采用在梁表面对称布置的方式以消除温度对测量的影响。边坡内部岩土体变形时,刚性单元随之在连接处发生相对偏转,由柔性感测单元中FBG波长偏移量,利用FBG中心波长与应变、角度的线性关系,得到刚性单元间的相对偏转角度,实现边坡深部变形监测。实验表明,研制的测斜传感器测量单元线性度好,倾角测量灵敏度和分辨率较高,温度造成的误差较小。

关键词:光纤布喇格光栅;测斜仪;变形监测

中图分类号: TN253; TM23; X924.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.01.013

Design and Implementation of Clinometer Based on Fiber Bragg Grating

LI Junxin^{1,2}, QIANG Xiaojun¹, LANG Xiangwei²

(1. Shenzhen Research and Design Institute, China Academy of Railway Sciences, Shenzhen 518057, China;

2. Shenzhen Engineering Laboratory for Geological Hazard Monitoring, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Deformation monitoring is an important means to predict and forewarn slope geologic disaster. To overcome the drawbacks in the current deep displacement monitoring of slopes, a novel clinometer based on fiber Bragg grating sensing technology was developed. The FBG clinometer sensor comprises a rigid unit, a flexible unit for sensing and the connecting hinge. The flexible sensing unit is an equal-strength beam structure with a fiber Bragg grating, and the FBG adopts a symmetric arrangement on the beam surface to eliminate the influence of temperature on the measurement. The rigid unit will have relative deflection at the joint when the rock and soil inside the slope are deformed. Based on the FBG wavelength offset in the flexible sensing unit and the linear relationship between the central wavelength of FBG and strain and angle, the relative deflection angle between the rigid units can be obtained, and the deep deformation monitoring of the slope can be realized. The experiment indicates that the measuring unit of the developed inclinometer has good linearity, high sensitivity and resolution, and the error caused by temperature is small.

Key words: fiber Bragg grating; clinometer; deformation monitoring

0 引言

随着我国社会经济的快速发展,基础设施建设力度不断加大,在交通、建筑、矿山、水利等部门都涉及到大量的边坡问题。近年来伴随着自然灾害的频发,边坡开挖后发生变形、造成灾害的事故频繁发生,给国家、人民造成了极大的危害和损失,使得当前工程建设和运营面临的边坡灾害问题日益突出,然而由于边坡岩土体特性复杂、岩土工程理论尚不完善,边坡工程安全问题的解决更多依赖于长期监测^[1-4]。边坡深层位移监测可以通过测量深层岩土变形来反映边坡内部活动及稳定性状况,对边坡灾

害的预测、预报及防治有重要意义。

目前工程中应用较多的深层位移监测仪器是基于微机电系统的测斜仪,包括便携式测斜仪和固定式测斜仪^[5]。便携式测斜仪操作简单,技术较成熟,但需要人工操作仪器完成测量,测试效率低^[6],尤其是在工程条件恶劣、人工测量不便的高陡边坡,难以实现有效实时监测;固定式测斜仪可以实现边坡位移的连续、自动化测量,但由于单个测斜孔内测量节点数量受限,无法准确、全面地反映岩土体的深部变形状况。

光纤布喇格光栅(FBG)作为一种新型的智能材

收稿日期:2018-04-08

基金项目:中国铁道科学研究院基金资助项目(2016YJ155)

作者简介:李俊鑫(1991-),男,山西忻州人,研究实习员,硕士,主要从事铁路基础设施监测技术方面的研究。

料具有灵敏度高,体积小,复用能力强,耐酸碱腐蚀及稳定性好等优点,能够在复杂环境下进行长期工作,适用于工程领域实时监测^[7],因此,作者提出研发一种可用于边坡深层位移监测的光纤光栅测斜仪器。

1 FBG 工作原理

FBG 是利用光纤纤芯(掺锗)与包层光敏性的不同,通过相关技术(如相位掩膜法、全息干涉法等)使纤芯折射率发生周期性永久变化而制成的一种特殊光纤结构^[8],当宽带光在光纤中传输经过 FBG 时,会产生模式耦合,满足布喇格(Bragg)相位匹配条件的光发生反射,其余的光则透过 FBG 继续传播^[9],根据光纤的耦合模理论,满足相位匹配条件时,FBG 的中心波长为

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

式中: n_{eff} 为光纤纤芯有效折射率; Λ 为 FBG 周期。

对式(1)微分:

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

由式(2)可知, λ_B 与 n_{eff} 和 Λ 成线性关系,光纤纤芯有效折射率和光栅周期在外部因素温度和应变的影响下会发生变化^[10]。 λ_B 对温度和应变交叉敏感,其关系可表示为

$$\Delta\lambda_B = k_\epsilon\Delta\epsilon + k_T\Delta T \quad (3)$$

式中: k_ϵ 、 k_T 分别为 FBG 的应变灵敏度系数和温度灵敏度系数; $\Delta\epsilon$ 、 ΔT 分别为应变和温度的变化量。

FBG 中心波长变化量与应变和温度均线性相关,利用解调装置检测 FBG 中心波长的变化可以反映被测物理量的应变、温度变化情况。

2 测斜传感器监测原理及设计

2.1 深层位移测量模型

深层位移监测技术是利用测斜仪测量的倾角,并通过几何关系转化得到土体水平位移,即在土体中埋入测斜管使其能够与土体发生同步协调变形,以测斜管底端不动点作为基准点,通过测斜仪逐段测量测斜管与铅垂线的夹角,利用几何关系计算测斜管轴线与铅垂线的水平偏移量,测斜管轴线在不同深度的偏移量即为该测点处土体的水平位移值,计算原理如图 1 所示。假设各测点之间的分段长度为 D ,实际中一般为 0.5 m 或 1 m,任一测段的水平偏移量计算式为

$$d_i = D \cdot \sin(\theta_1 + \dots + \theta_i) \quad (4)$$

式中 θ_i 为土体中第 i 测点处相邻两节测斜仪的相对倾斜角度。

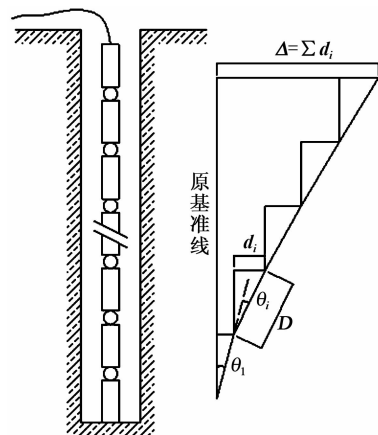


图 1 深层位移测量原理

土体中任一测量深度处的水平位移通过对该测点测量深度以下范围内各水平偏移量累加得到:

$$\Delta_n = \sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n D \cdot \sin(\theta_1 + \dots + \theta_i) \quad (5)$$

因此,可通过将深层水平位移测量转化为测段之间(见图 1 中 D)相对倾斜角度的测量,来实现土体深部变形监测,由相对倾斜角度累加得到测斜管与铅垂线之间的夹角,适用于边坡大变形的长期连续性监测。

2.2 基于 FBG 的测斜传感器设计

光纤光栅测斜传感器用于测量土体变形引起的测斜管内各测段之间的相对倾斜角度,由刚性单元、柔性感测单元及连接销轴组成,结构示意图如图 2 所示。其中两刚性单元可绕连接销轴发生偏转,在刚性单元连接位置采用柔性感测单元来测量相对倾斜角度,角度大小是利用布设在其上的 FBG 感测弯曲应变,并计算感测单元挠度,最终通过几何关系来确定。柔性感测单元基于等强度梁结构进行设计,

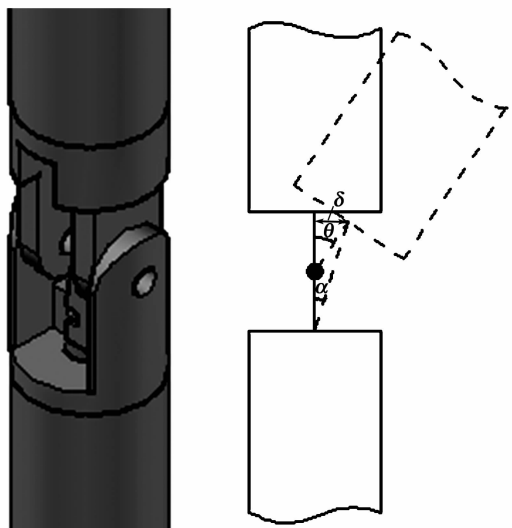


图 2 测斜传感器结构示意图

等强度梁结构简单便于制作,较小荷载即可引起较大应变,有利于提高传感器的精度和分辨率^[11]。当刚性单元发生相对倾斜角度 θ 时,感测单元等强度梁转角为 α ,由几何关系可知 $\theta=2\alpha$,因此,传感器对变形具有放大作用。

由倾斜角正弦函数关系可得

$$\sin \theta = \frac{\delta}{l/2} \quad (6)$$

式中: l 为等强度梁长度; δ 为等强度梁自由端挠度。

δ 采用等强度悬臂梁模型计算,假设梁固定端宽为 b_0 ,厚为 h ,等强度梁自由端作用一集中力 F ,弹性模量为 E ,表面任一点的弯曲应变大小均相等,则有

$$\epsilon = \frac{6Fl}{Eb_0h^2} \quad (7)$$

等强度梁自由端挠度:

$$\delta = \int \frac{M(x)}{EI} \cdot \frac{\partial M(x)}{\partial F} dx = \frac{6Fl^3}{Eb_0h^3} \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(6)可得

$$\sin \theta = \frac{2l}{h} \epsilon \quad (9)$$

等强度梁发生弯曲时的应变通过对称布设在梁上、下表面中心位置处的FBG测得,梁表面各点应变均相等,避免了FBG粘贴位置难以精确导致的测量误差,同时防止FBG在工作过程中由于梁表面应力分布不均匀而引起的啁啾现象^[12]。影响感测单元FBG波长发生偏移的因素包括弯曲应变、轴向应变和温度变化,2个FBG的波长偏移可分别表示为

$$\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_{M^+} + \Delta\lambda_N + \Delta\lambda_T \quad (10)$$

$$\Delta\lambda_2 = \Delta\lambda_{M^-} + \Delta\lambda_N + \Delta\lambda_T \quad (11)$$

式中 $\Delta\lambda_{M^+}$ 、 $\Delta\lambda_{M^-}$ 、 $\Delta\lambda_N$ 、 $\Delta\lambda_T$ 分别为上、下表面弯曲应变、轴向应变和温度影响引起的波长变化, $\Delta\lambda_{M^+}$ 、 $\Delta\lambda_{M^-}$ 大小相等、方向相反,传感器倾斜角仅与弯曲应变相关,由式(10)、(11)消除轴向应变及温度影响:

$$\epsilon = \frac{1}{k_\epsilon} \cdot \frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}{2} \quad (12)$$

由此既实现了传感器的温度自补偿,且测试得到2倍的波长变化量使结果更精确。传感器倾斜角与FBG中心波长的关系为

$$\sin \theta = \frac{l}{k_\epsilon h} \cdot (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2) \quad (13)$$

由于角度较小的情况下 $\theta \approx \sin \theta$,因此,在感测单元参数 l 、 h 确定后,倾斜角与FBG波长偏移量可近似线性表示,实际应用中可通过标定实验确定其

线性系数。

3 实验及结果分析

3.1 标定测试实验

采用电动位移台对传感器进行标定测试(见图3),实验测试系统包括隔振平台、电动位移台、光纤测斜传感器、光纤光栅解调仪。将传感器其中一端刚性单元固定,另一端利用电动位移台施加位移使其相对于固定刚性单元发生偏转,通过控制电动位移台步行距离改变倾斜角度,每次角度变化 1° ,变形后用光纤光栅解调仪测试传感器FBG波长,由此得到测斜传感器角度与FBG波长变化量之间的关系,拟合得到的关系表达式即为传感器的标定公式。重复进行多次实验,结果表明,光纤测斜传感器重复性良好,其中一组中心波长变化与倾斜角度的实验结果如图4所示。

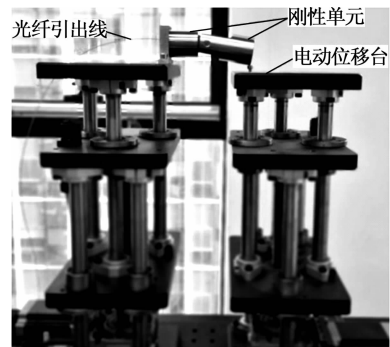


图3 标定测试实验

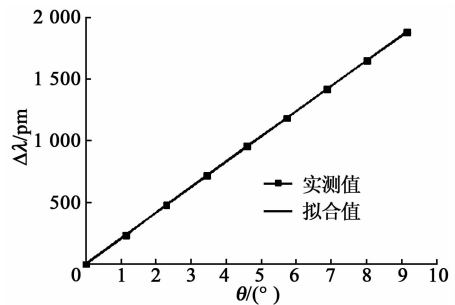


图4 传感器标定拟合直线

由图4可知,光纤光栅测斜传感器具有良好的线性度,拟合的倾斜角与波长变化的关系为 $\Delta\lambda = 205.48\theta + 6.96$,线性相关系数达到0.999,因此测斜传感器的灵敏度为 $205.48 \text{ pm}/(^{\circ})$,由于光纤光栅解调仪的分辨率为 1 pm ,传感器的角度分辨率为 0.005° 。

3.2 温度补偿测试实验

为验证传感器的温度补偿效果,对其进行温度响应测试,将处于自由状态下的光纤测斜传感器置于恒温水箱中,通过水浴加热从 $20\sim 60^{\circ}\text{C}$,每间隔 5°C 温度稳定时采集FBG中心波长。理想状态下,

传感器处于恒温水浴中时 FBG 波长仅受温度变化影响,温度变化量相同,则布置在传感器中的两 FBG 波长偏移量也一致。实验测试的传感器中 FBG 波长随温度升高的变化曲线如图 5 所示。

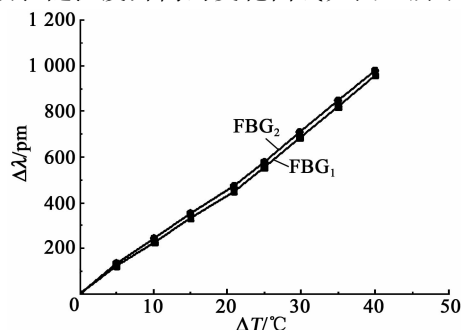


图 5 FBG 温度变化与波长关系

由图 5 可见,传感器中两 FBG 的中心波长随温度变化发生的偏移量基本一致,温度补偿误差在 $-8 \sim +8$ pm 内,由于实验使用的光栅解调仪波长稳定性为 5 pm,该误差在很大程度上受光栅解调仪影响。传感器 FBG 的波长变化范围为 $-2\,000 \sim +2\,000$ pm,因此,温度影响造成的最大倾角误差为 0.4%,温度补偿效果较好。

4 结束语

针对目前边坡深部变形监测技术中的不足,提出了一种基于光纤光栅传感技术的测斜仪器。所研发的光纤测斜传感器包括刚性单元、布设有 FBG 的柔性感测单元及连接销轴,采用在梁表面对称布置 FBG 的方式进行温度补偿。当边坡发生变形时,刚性单元随之在连接销轴处发生相应偏转,并由柔性感测单元中 FBG 波长偏移量,根据 FBG 中心波长与应变、角度的线性关系,得到刚性单元间的相对倾斜角度并通过几何关系计算位移,即可实现对土体的深层位移监测。该传感器具有较高的灵敏度,实验测试结果表明,倾角测量灵敏度达到 $205.48 \text{ pm}/(^{\circ})$,分辨率为 0.005° ,温度引起的倾角误差在 0.4% 以内。

参考文献:

[1] 程建军,柳墩利,廖小平,等.路堑边坡开挖变形监测试验与坡体稳定性评估分析[J].铁道学报,2011,33(5):85-90.
CHENG Jianjun, LIU Dunli, LIAO Xiaoping, et al. Study on deformation monitoring test of cutting slope and its stability evaluation[J]. Journal of The China Railway Society, 2011, 33(5): 85-90.

[2] 殷建华,崔鹏,裴华富,等.基于光纤传感技术的边坡监测系统的应用[J].兰州大学学报(自然科学版),2011,47(8):290-292.
YIN Jianhua, CUI Peng, PEI Huaifu. Application of land-

slides monitoring systems based on optical fiber sensing technique[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2011, 47(8): 290-292.

[3] 栾婷婷,谢振华,张雪东.露天矿山高陡边坡稳定性分析及滑坡预警技术[J].中国安全生产科学技术,2013,9(4):11-16.
LUAN Tingting, XIE Zhenhua, ZHANG Xuedong. Stability analysis and landslide early warning technology for high and steep slope of open-pit mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(4): 11-16.

[4] 杨光华,钟志辉,张玉成,等.滑坡灾害的机制与力学特性分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):4009-4017.
YANG Guanghua, ZHONG Zhihui, ZHANG Yucheng, et al. Analysis of mechanism and mechanical characteristics of landslide disaster[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 4009-4017.

[5] 王凯,张伟毅,马飞,等.滑坡深部变形监测方法与应用探讨[J].地下空间与工程学报,2015,11(1):204-209.
WANG Kai, ZHANG Weiwei, MA Fei, et al. Monitoring methods of landslide deep deformation and discussion on their application[J]. Chinese Journal of Underground space and engineering, 2015, 11(1): 204-209.

[6] 刘斌,黄肖迪,徐剑.基于光纤布喇格光栅的测斜技术实验研究[J].压电与声光,2017,39(5):763-766.
LIU Bin, HUANG Xiaodi, XU Jian. Experimental study on incline-measurement technology based on fiber Bragg grating[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(5): 763-766.

[7] 徐玉胜.光纤传感技术在高铁基础设施安全监测中的应用[J].铁道建筑,2016,56(9):143-147.
XU Yusheng. Application of optical fiber sensing technology in safety monitoring for high speed railway infrastructure[J]. Railway Engineering, 2016, 56(9): 143-147.

[8] 孙丽.光纤光栅传感技术与工程应用研究[D].大连:大连理工大学,2006.

[9] 李川.光纤光栅:原理、技术与传感应用[M].北京:科学出版社,2005.

[10] 胡辽林,张卫超.基于参考光栅的光纤光栅应变测量温度补偿[J].实验室研究与探索,2014,33(11):39-41.
HU Liaolin, ZHANG Weichao. Temperature compensation of FBG strain measurement based on reference FBG[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2014, 33(11): 39-41.

[11] 马国明,李成榕,全江涛,等.架空输电线路覆冰监测光纤光栅拉力倾角传感器的研制[J].中国电机工程学报,2010,30(34):132-138.
MA Guoming, LI Chengrong, QUAN Jiangtao, et al. Development of fiber Bragg grating tension & tilt sensor for icing-monitoring of overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 132-138.

[12] 杨洪磊,梁仕斌,李川,等.基于 FBG 的电力塔杆倾角传感器研究[J].传感器与微系统,2013,32(11):21-24.
YANG Honglei, LIANG Shibin, LI Chuan, et al. Research of electric power tower tilt angle sensor based on FBG[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(11): 21-24.