

# 基于光纤光栅的深部位移传感探头研究

姚飞<sup>1</sup>,胡肖潇<sup>1</sup>,曾丽珍<sup>2\*</sup>,肖丹谊<sup>1</sup>

(1.中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西 桂林 541004;2.桂林电子科技大学 研究生院,广西 桂林 541004)

**摘要:**针对测斜仪价格昂贵、需要供电的问题,介绍了一种光栅应变片的设计方法。通过计算得到应变片的设计参数,研究开发了基于光栅应变片的深部位移传感探头,完成了实验。直埋实验和模拟实验表明:该器件满足实时监控要求,最大量程为 $\pm 8^\circ$ ,对应中心波长变化量为0~30pm,可实现高边坡岩土体内部变化情况长期在线监测和安全预警。

**关键词:**光纤光栅;深部位移;山体滑坡

**中图分类号:**S851;TN929.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)05-0009-04

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.05.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on deep displacement sensing probe based on fiber grating

YAO Fei<sup>1</sup>, HU Xiaoxiao<sup>1</sup>, ZENG Lizhen<sup>2\*</sup>, XIAO Danyi<sup>1</sup>

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Graduate School of Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of high price and power supply of inclinometer, a design method of grating strain gauge is introduced. The design parameters of strain gauge are obtained by calculating. A deep displacement sensor based on grating strain gauge is developed and the experiment is completed. Direct burial and simulation experiment show that the device meets the real-time monitoring requirements, the maximum range is  $\pm 8^\circ$  and the corresponding central wavelength change is 0~30pm, which can realize long-term online monitoring and safety early warning of the internal changes of high slope rock and soil.

**Key words:** fiber Bragg grating; deep displacement; landslide

### 0 引言

边坡监测在居民生活和交通等领域都具有重要意义。测斜仪是监测边坡内部位移的常用仪器,由于测斜仪探头价格昂贵,应用时一般是在测试位置打孔埋置测斜管,监测人员定期将测斜仪放入测斜管内,记录不同深度的倾斜量。这种监测方法无法进行实时在线监测,同时由于现场需要通电,某些环境下使用受限。光纤传感器具有体积小、灵敏度高和抗干扰能力强等优点,也被应用于边坡深部位移监测。自从

1978年加拿大通信研究中心的K.O.Hill等人<sup>[1]</sup>制作出世界上第一根光纤布喇格光栅(FBG)以来,由于其许多独特的优点,人们致力于将其应用于各种物理量的测试<sup>[2-4]</sup>。本文采用FBG作为传感器,开发一种基于FBG的深部位移传感探头,测试端无需供电,可以用于边坡实时监测。

### 1 深部位移传感探头原理

光栅深部位移传感探头原理如图1所示。测试原理为:首先在测试边坡不同深度埋置多个传感探头,然后通过FBG解调仪测试每个探头变化的倾斜角度,根据公式计算出边坡不同深度的水平位移,从而描绘边坡内部位移变化情况<sup>[5]</sup>。

在边坡测试点不同深度埋置多个传感探头,探头之间通过连接杆相连,当发生坡体内部位移时,可以测得各深度探头的倾斜角度,如图1(b)所示。以探头

收稿日期:2019-03-26。

**作者简介:**姚飞(1984-),男,安徽淮北人,硕士,工程师,主要从事光检测和光传感技术研究及光缆故障监测和光纤围栏等应用开发的相关工作,主持参与市级和省部级项目近10项,完成专利15项。

\*通信作者:曾丽珍(E-mail: 617350535@qq.com)。



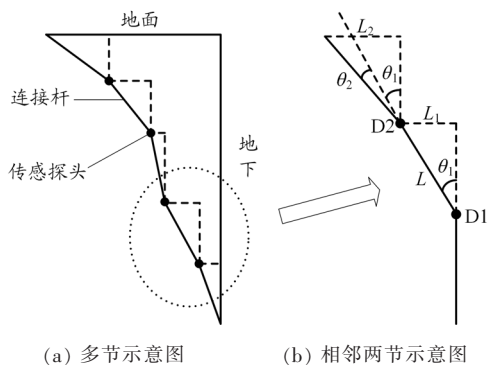


图1 测试原理

D1 和 D2 为例,测得 D1 和 D2 发生的倾斜角度  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ,探头的连接杆长度为  $L$ 。对于探头 D1,连接杆顶端发生的水平位移的大小  $L_1=L \times \sin \theta_1$ ;对于 D2,由于本方案测试的倾斜角度是探头上下连接杆之间的变化,其倾斜是在 D1 的基础上产生的,其发生的水平位移为  $L_2=L \times \sin (\theta_1+\theta_2)$ 。当埋置多个探头时,将所有传感探头的水平位移量和深度绘制出一条曲线,可以反映边坡该处测试点内部的位移情况,定期监测可获得时间与累计位移的关系。

## 2 深部位移探头设计

### 2.1 传感探头结构设计

本文设计的 FBG 深部位移传感探头如图 2 所示。探头上下两部分由中间的轴承连接,外部通过防水处理将传感部分密封,通信光纤在连接杆内部,避免了地下水侵蚀。传感探头最外层是厚度为 2mm、内径为 60mm 橡胶管,整体密封,保证顶部可以向各个方向摆动,内部包含上连接杆、上滑块、上固定杆、轴承、下固定杆、下滑块、下连接杆和传感器。探头垂直埋置在待测坡体内,当发生坡体内部位移时,上连接杆带动上

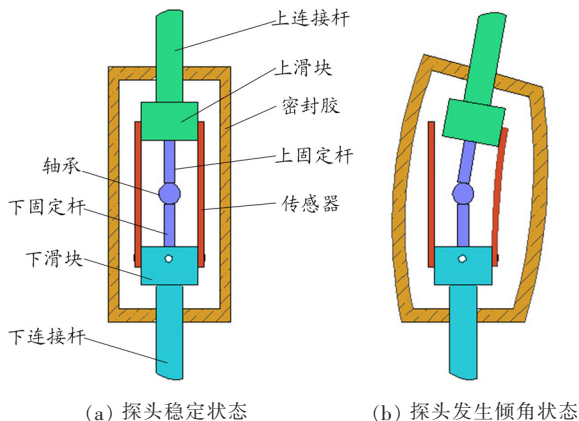


图2 传感探头结构

滑块发生倾斜,上滑块挤压 FBG 传感器发生形变,通过测试 FBG 中心波长变化量可以计算出上滑块发生的倾斜情况,从而确认该位置发生的位移大小。

探头内部结构如图 3 所示,每个方向有 1 个 FBG 传感器(由基板和 FBG 组成),传感探头可测量 4 个方向的倾角。传感探头内部的 4 个 FBG 传感器首尾相连构成 FBG 串,通过光纤引出后,一端连接解调设备,另一端连接其它传感探头(也可以悬空)。探头上下可连接不锈钢管,通过选择不同中心波长的 FBG,可以将多个传感探头直接串接。基板为 1mm 厚的不锈钢片,FBG 通过密封胶(112FR)固定在基板上。上、下滑块是边长 40mm 的铝合金正方体,上滑块可以向各个方向摆动,从而带动基板发生形变;上滑块在 2 个相邻基板间摆动某角度时,2 个基板都发生形变,计算合成角度和合成型变量,从而实现角度识别。下滑块主要起到固定作用,轴承下部和 FBG 传感器固定在下滑块。上、下滑块由轴承连接,当上滑块发生角度变化时引起轴承弯曲,上、下滑块之间产生相对摆动,此时上滑块挤压 FBG 传感器的顶部,使其发生形变,即产生了悬梁臂基板的挠度。

### 2.2 光栅传感部件设计

由于光纤光栅通过固定基板的变化来感知外界的形变情况,基板为一个悬梁臂结构,如图 4 所示。

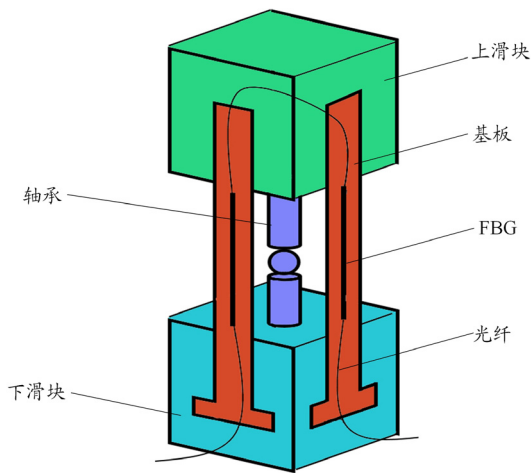


图3 传感探头内部结构示意图

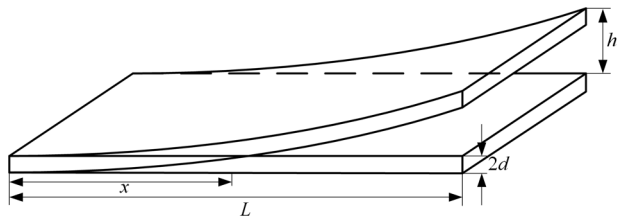


图4 基板示意图

由光栅特性可知,光栅的中心波长的变化与其轴向变化的大小相关,满足公式:

$$\Delta\lambda=(1-p)\cdot\varepsilon\cdot\lambda \quad (1)$$

其中, $\lambda$ 是未发生形变时的中心波长, $\varepsilon$ 是FBG沿轴向发生的形变, $p$ 是弹光系数(约为0.22)。为了得到悬梁臂的变化与光栅波长变化之间的关系,只要找出悬梁臂顶端挠度 $h$ 变化导致的轴向形变 $\varepsilon$ 即可。悬梁臂发生形变时,基板长度 $L$ 方向的形变满足以下公式:

$$\varepsilon=Md/(EI) \quad (2)$$

其中, $M$ 为弯矩, $E$ 为杨氏模量, $I$ 为惯性矩, $d$ 为臂厚的一半。将 $M=(L-x)F$ 、 $F=3hEI/(L^3)$ 代入到式(2)得到: $\varepsilon=(L-x)\cdot 3dhEI/(EIL^3)=(L-x)\cdot 3dh/(L^3)$ 。

因此,将 $\varepsilon$ 代入到式(1)中,可以得到FBG中心波长变化的关系为:

$$\Delta\lambda=(1-p)(L-x)\cdot 3dh\lambda/(L^3) \quad (3)$$

从式(3)可以看出,在知道悬梁臂挠度时,可以不用知道材料的特性,FBG中心波长变化只与臂长 $L$ 、FBG固定位置 $x$ 、初始波长 $\lambda$ 和挠度 $h$ 几个参量相关。另外,以上计算以FBG完全贴合于基板(悬梁臂)为前提,因此在具体计算时需要在公式中加入传递系数 $\eta$ ,最终公式为:

$$\Delta\lambda=\eta\cdot(1-p)(L-x)\cdot 3dh\lambda/(L^3) \quad (4)$$

从式(4)可知,设计探头尺寸时需要考虑以下几方面的参数:

①基板长度 $L$ 和厚度 $2d$ 的大小,这2个参数主要由轴承大小、安装孔尺寸等参数决定。

②自由端挠度 $h$ 。该值的大小反映了单个传感器的量程,现有常用测斜仪的测试范围一般为 $\pm 8^\circ$ ,因此本文设计最大形变量程为 $\pm 8^\circ$ 。在实际试验中,可以在埋置探头之前,固定挠度变化量,测试该挠度下对应的FBG波长变化值,形成挠度 $h$ 与FBG波长间的对应关系,确定传递系数 $\eta$ 。

③FBG固定位置 $x$ 。 $x$ 值与FBG的灵敏度相关。根据整个探头的设计尺寸,本文最终选择的不锈钢基板长度为 $L=100\text{mm}$ 、厚度 $2d=1\text{mm}$ ,为了增加FBG灵敏度同时考虑安装和熔接方便,光栅安装位置与基板固定端距离 $x=60\text{mm}$ 。

### 3 实验研究

#### 3.1 模拟实验

为验证传感探头的测试能力,我们在实验室中模拟坡体发生变化时的情况,人为制造形变量,将探头向每个测试方向弯曲最大角度 $8^\circ$ ,保持数秒,测试弯

曲发生后的FBG波长变化数据(由于模拟试验在室内进行,时间很短,可以忽略温度波动的影响),得到试验结果如图5所示。可以看出,当发生 $8^\circ$ 形变时,光栅中心波长变化约30pm,重复测试多次结果稳定。本部分实验参数为: $L=100\text{mm}$ , $d=0.5\text{mm}$ , $p=0.22$ , $x=60\text{mm}$ , $\lambda=1550\text{nm}$ ,人为控制形变角度为 $8^\circ$ 。以半径 $L=100\text{mm}$ ,发生 $8^\circ$ 偏移时,计算得到FBG基板挠度 $h\approx L\cdot(\sin 8^\circ)=1.392\text{mm}$ ,将已知量代入到式(4)中,可得 $\Delta\lambda=100.98\eta(\text{pm})$ 。由实验可知,在发生 $8^\circ$ 弯曲时, $\Delta\lambda=30\text{pm}$ 。因此,这样可求出FBG的传递系数 $\eta\approx 0.3$ ,再将 $p=0.22$ 一起代入到式(4)中,可得本方法设计的探头FBG波长变化量 $\Delta\lambda$ 与基板挠度 $h$ 之间的计算公式:

$$\Delta\lambda=0.702(L-x)\cdot dh\lambda/(L^3) \quad (5)$$

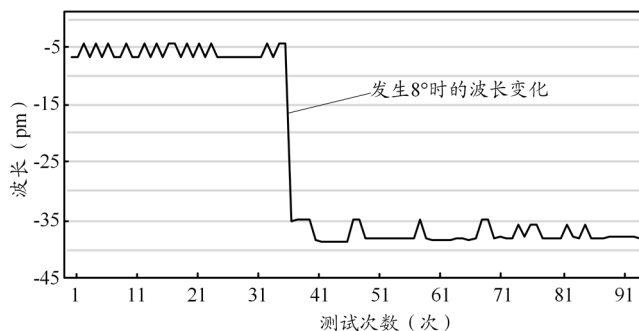


图5 发生 $8^\circ$ 形变时FBG波长变化

#### 3.2 现场实验

为了验证设计的传感探头现场测试能力,实验选择高6m、长80m红黏土边坡,传感探头上下分别固定一节2m长的不锈钢管。在边坡顶部偏下1m处垂直钻孔4m,孔径为100mm,将固定好的探头和不锈钢管直接埋置在测试孔内,再将土回填、浇水,压实孔洞。然后通过光缆将探头与测试机房连接。

在机房放置了自主开发的FBG解调仪,其实物图如图6所示。解调仪可以对8路FBG信号解调,并将测试数据上传到电脑中保存,供后续分析。实验将传感探头埋置在边坡内部90天,每天自动采集4次数据(分别是0点、6点、12点和18点),得到每个方位在不同时段的变化情况,某一方向上的波长变化情况如图7所示,其它方向与该方向变化情况类似。

截取试验中第70~85天的FBG波长变化数据如图8所示。可以看出测试波长一直在 $\pm 10\text{pm}$ 范围内来回波动,大多数情况波动为正向,偶尔也有负向的波长变化情况,且这种情况在每个方向上都有。试验期间曾多次到现场观察监测坡体状态,并询问坡体管理



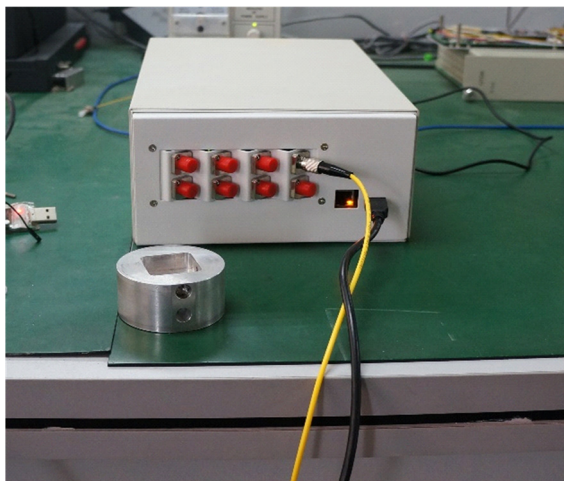


图6 FBG解调仪实物图

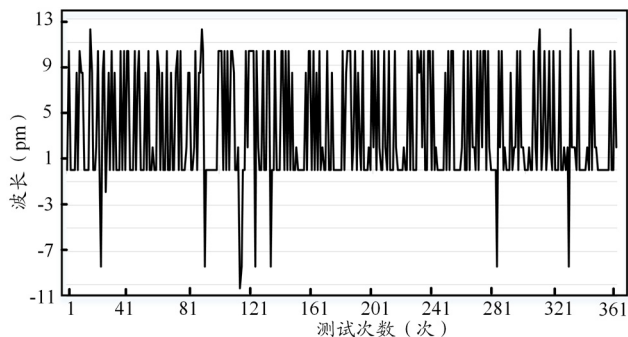


图7 某方向埋置90天FBG波长变化情况

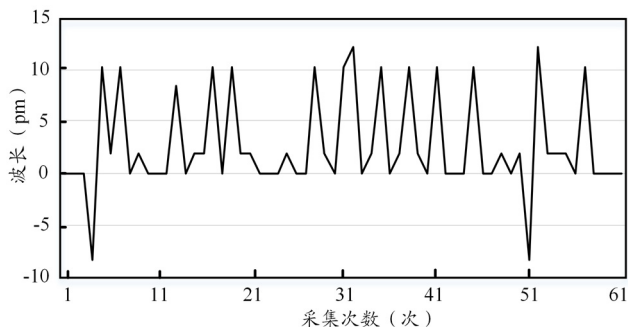


图8 第70~85天的FBG波长变化

部门,得知该坡体在监测期内未发生明显位移。根据FBG特性<sup>[6]</sup>和所购FBG生产参数,中心波长在1550nm附近的FBG,其波长随温度变化系数约为10pm/℃。本实验设置的采集时间为每天的不同时段,测试的90天内,埋置位置坡体并没有发生形变,且FBG各个方向波长均有增大和减小的波动。如果坡体发生形变,形变方向应该是沿坡体向下,受坡体影响,探头中的4

个FBG波长变化应该只会单方向增大或减小,且最多只有2个方向发生单向变化。但是,测试结果是4个方向都发生波动,且波动并不是单向的。因此,该波动可以认为是FBG传感器在2~3m地下受地下温度波动的影响<sup>[7]</sup>,产生波长±10pm波动。经过3个月左右的连续测试,可以看出该传感器直埋后可以持续工作,未发现性能劣化的现象,能根据设置频率完成实时监测。

#### 4 结束语

本文研制了基于光纤光栅的深部位移传感探头,进行了模拟实验和现场实验,得到以下结论:

①在发生最大形变8°时,FBG中心波长变化约为30pm,从而得到本文设计传感探头传递系数 $\eta=0.3$ ,对基板(悬梁臂结构)产生了减敏作用,主要原因有2个:一是采用密封胶(112FR)后FBG与基板粘合度不高,二是FBG之间的连接光纤熔接需要预留足够的长度,导致FBG位置没有靠近基板的固定端。因此,后续改进需要采用粘合度更强的固定胶水,同时将FBG尽量靠近基板固定端安装,以提高其灵敏度。

②现场90天实验中,直埋探头未见性能劣化情况,具有良好的稳定性,可以达到实时监控目的,实时反映监测边坡的内部形变,避免漏报。另外,对于实际应用还需要进一步加强封装密封性,提高探头在地下直埋长时间使用的可靠性。由于本次实验持续时间不长,未考虑温度波动的影响,如果加入温度校准光栅,可以更准确地显示测试结果。

#### 参考文献:

- [1] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photo-sensitivity in optical fiber Waveguides[J]. Appl. Phys. Lett., 1978, 32(15): 647-649.
- [2] MURUKESHAN V M, CHAN P Y, ONG L S, et al. Cure monitoring of smart composites using Fiber Bragg Grating based embedded sensors[J]. Sensors and Actuators, 2000, 79: 153-161.
- [3] 张洪波,余志强,谢伟,等.基于无源光网络的高速公路边坡裂缝监测系统[J].光通信技术,2016,40(3):20-22.
- [4] 张一帆,何浩,董毅,等.新型光时域反射计在无源光网络中的应用[J].光通信技术,2009,33(4):25-28.
- [5] 彭纪超,王松林,张运勋,等.钻孔测斜仪在滑坡变形监测中的应用研究[J].西安科技大学学报,2014,34(4):440-444.
- [6] 夏秀兰,童峥嵘,盛秋琴,等.光纤光栅应变传感器的研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2002,35(4):473-476.
- [7] 吴志伟,宋汉周.浅层地温场中热对流数值模拟[J].岩土力学,2010,31(4):1303-1308.