

文章编号:1004-4213(2011)12-1878-3

# 光纤布喇格光栅沉降传感器

杜磊<sup>1</sup>, 龚元<sup>1,2</sup>, 吴宇<sup>1</sup>, 饶云江<sup>1</sup>, 赵天<sup>1</sup>

(1 电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

(2 重庆理工大学 汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室, 重庆 400050)

**摘要:**根据光纤布喇格光栅的传感原理,提出了一种基于悬臂梁及金属弹性膜片的光纤布喇格光栅沉降传感器结构,对其传感特性进行了实验研究.实验通过产生水的液位差来模拟地基沉降,分析结果显示,光纤布喇格光栅中心反射波长漂移对液位差呈现良好的线性关系,线性度高于 0.999,灵敏度可达 $-2.11 \text{ pm/mm}$ .通过改变悬臂梁厚度和有效长度,可以对传感器测量范围和灵敏度进行调整,以满足各种应用场合.综合实验结果,该传感器在桥梁、铁路地基等沉降监测方面具有重要意义.

**关键词:**液位传感器;光纤布喇格光栅;金属弹性膜片;悬臂梁

中图分类号:TP212.14

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114012.1878

## 0 引言

由于高层建筑施工、地下采矿或过度开采地下水、软土路基下沉等因素,会造成地基沉降.沉降观测对高层建筑物的安全、高铁行车安全等方面都有十分重要的意义.传统的沉降观测手段效率较低,而且受人力因素或环境因素影响较大,自动化程度和测量精度都不能满足实际需求.

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器是目前应用最为广泛的光纤传感器之一,具有易复用、可靠性好、抗电磁干扰、尺寸小、重量轻、耐腐蚀等优点,可用于测量应变、温度、压力、位移等诸多参量.其传感原理一般基于被测参量变化引起光栅周期和有效折射率的变化,从而导致光栅特征波长的变化,通过测量特征波长的移动量来测量上述参量.目前,国内外采用光纤光栅的压力或液位传感器非常多<sup>[1-6]</sup>,但专门针对沉降监测的光纤光栅传感器方面的报道较少.本文提出了一种 FBG 沉降传感器,对其传感特性进行了测试,具有良好的线性度和较高的灵敏度.通过改变传感器结构参量,可以实现不同的灵敏度和测量范围,以满足不同的应用场合.

## 1 基本原理

### 1.1 光纤布喇格光栅传感原理

光纤布喇格光栅<sup>[2-5]</sup>中光纤纤芯的折射率沿轴

向周期性变化,使前向传输的导模耦合到反向导模.根据光纤耦合模理论,光纤布喇格光栅的响应峰值波长为

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

式中: $n_{\text{eff}}$ 为光纤纤芯的有效折射率; $\Lambda$ 为光栅周期.光纤纤芯折射率和光栅周期受被测量影响发生变化时,Bragg 反射波长变化为

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

温度和应变均能引起光栅周期和纤芯折射率的变化,当 FBG 不受外力场的影响和环境温度变化 $\Delta T$ 时, $\lambda_B$ 发生漂移,其漂移量与温度变化的关系可写为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为 FBG 材料的热膨胀系数; $\xi$ 为 FBG 材料的热光系数.当环境温度恒定时,FBG 受外力场的作用, $\lambda_B$ 发生漂移,漂移量为

$$\Delta\lambda = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\epsilon \quad (4)$$

式中

$$P_e = n_{\text{eff}}^2 [P_2 - \mu(P_1 + P_2)]/2,$$

表示 FBG 材料的有效弹光系数,其中 $P_1$ 、 $P_2$ 为 FBG 材料的弹光系数; $\mu$ 为 FBG 材料的泊松比.当应变和温度同时作用在 FBG 上时,有

$$\Delta\lambda = \lambda_B[(1 - P_e)\Delta\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] \quad (5)$$

### 1.2 FBG 沉降传感器原理

FBG 沉降传感器的结构如图 1(a).传感器采用金属封装,传感部分主要由 2 个部件组成.第 1 部分

基金项目:重庆理工大学汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室开放基金资助

第一作者:杜磊(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感. Email: dorex1988@163.com

导师(通讯作者):龚元(1981-),副教授,主要研究方向为光纤传感. Email: ofsgon@gmail.com

收稿日期:2011-06-01;修回日期:2011-08-26

为沉降量传递装置,液面和膜片之间的液位差产生的压力作用在金属膜片上,产生压强  $P$ ,膜片受力作用发生变形,推动顶针将压力传递给悬臂梁.第2部分由悬臂梁及粘接在其表面的FBG所组成.悬臂梁有效长度  $L$  可通过改变外壳的形状来进行调整,从而调节灵敏度.悬臂梁发生微小形变,此形变作用在FBG上使其产生轴向应变,FBG的反射中心波长从而发生漂移.悬臂梁发生变形时挠度很小,因此液位差与FBG的反射中心波长漂移在测量范围内表现为线性特性.传感器装配时,顶针首先要给悬臂梁一个预压力,以防止悬臂梁与顶针存在游离状态.

悬臂梁为三角形等强度梁,三角形尖端处夹角为  $20^\circ$ .使用的材料为精密弹性合金.FBG粘贴在三角形尖端靠近顶针的部位,方向与三角形梁的中心线方向一致.

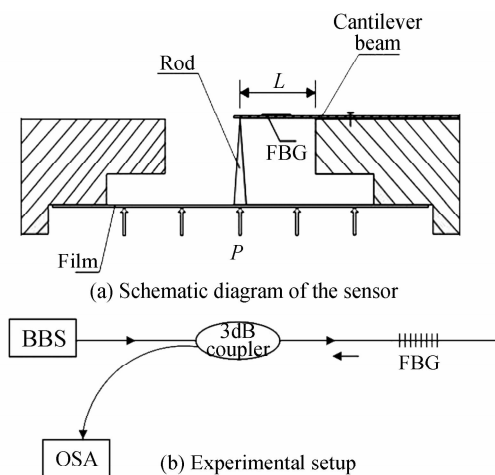


图1 传感器结构及实验装置

Fig.1 Schematic diagram of the sensor and Experimental setup

实验装置示意图如图2(b).光源发出的光,经过3 dB耦合器入射到FBG中,FBG反射回的光再经过3 dB耦合器传到光谱仪,从而检测FBG反射中心波长的漂移量.传感器底部经过金属弯管及塑料管与一量筒联接,此量筒量程为250 mL、精度为5 mL,用于对液位高度进行调整及监测.实验时通过向量筒内加水放水来达到改变液位差的目的,从而对传感器性能进行测试.

在实际工程应用中,通过设立一个水位基准,基准处地基不发生沉降,使用管道把传感器与基准连通,通过测量传感器与基准间水位差,可换算出传感器处的地基沉降量.

## 2 实验结果

图2为悬臂梁厚度为0.30 mm,梁长分别为15 mm、20 mm,对应FBG中心波长随液位差变化的响应曲线,其灵敏度和线性度分别为 $-1.48 \text{ pm/mm}$ ,  $R^2 =$

$0.99959$ ;  $-0.94 \text{ pm/mm}$ ,  $R^2 = 0.99968$ .

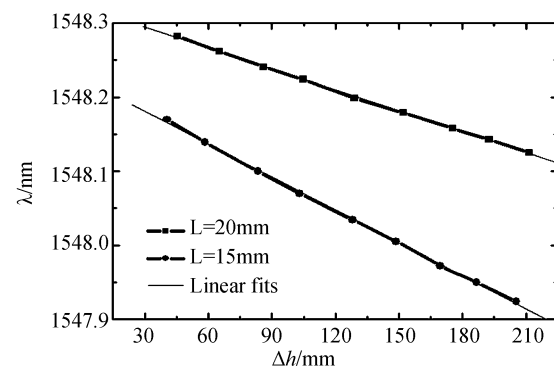


图2 梁厚0.30mm响应曲线

Fig.2 Sensitivity of the beam with thickness of 0.30 mm

图3是悬臂梁厚度为0.30 mm、梁长为20 mm的沉降传感器重复性特性,实验曲线灵敏度统计平均值为 $-0.93 \pm 0.02 \text{ pm/mm}$ .

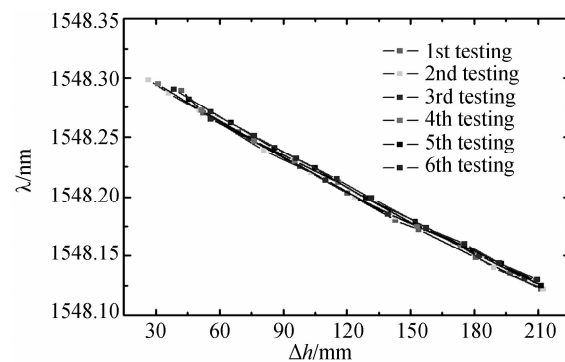


图3 沉降传感器的重复性测试结果

Fig.3 Repeatability characteristics of the sensor

图4中给出了悬臂梁厚度、梁长不变,温度进行补偿条件下,传感器测量稳定性实验结果.保持液位差恒定进行实验,持续时间为435 min.液位测量平均值为158.4 mm,测量均方差约为1.4 mm.实验结果表明,该传感器具有较好的稳定性.

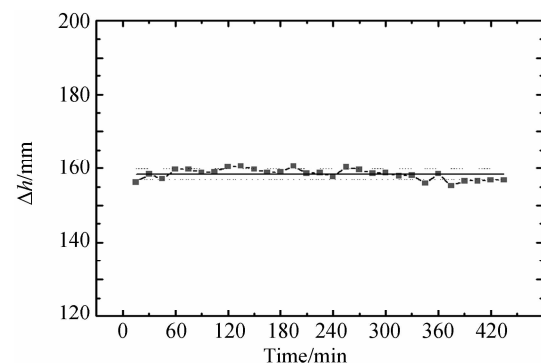


图4 光纤沉降传感器的稳定性

Fig.4 Stability of the optical fiber settlement sensor

为了测试悬臂梁厚度和梁长对传感器特性的影响,我们用0.15 mm厚的悬臂梁替换0.3 mm厚的悬臂梁进行实验.图5所示给出了悬臂梁厚度为0.15 mm,梁长分别为15 mm、20 mm,对应FBG中心波长随液位差变化的响应曲线,其灵敏度和线性

度分别为 $-2.11 \text{ pm/mm}$ ,  $R^2=0.99928$ ;  $-1.10 \text{ pm/mm}$ ,  $R^2=0.99929$ .

通过与图2的结果进行比较,可发现梁的长度相同时,梁的厚度越薄灵敏度越高,因为越薄的梁越容易产生形变,转化为FBG中心波长的漂移量也越大.

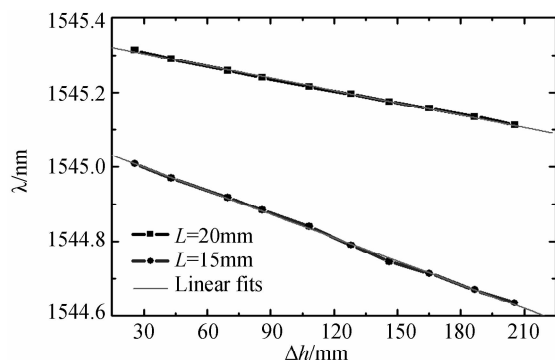


图5 梁厚0.15 mm的灵敏度实验结果

Fig. 5 Sensitivity of the beam with thickness of 0.15 mm

### 3 结论

提出了一种基于悬臂梁及金属弹性膜片的光纤布喇格光栅沉降传感器.实验结果表明,该结构对沉降测量有良好的线性特性、重复性和稳定性,选择合适的梁结构,灵敏度可达 $-2.11 \text{ pm/mm}$ .通过改变梁的厚度或长度可灵活改变传感测量范围和测量精度.综上所述,该传感器在桥梁、铁路地基等沉降监测方面具有重要意义.

#### 参考文献

- [1] WANG Hong-liang, QIAO Xue-guang, FU Hai-wei, et al. Studies on pressure sensing characteristics of a compounding fiber grating sensor[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(3):259-262.  
王宏亮, 乔学光, 傅海威, 等. 一种补偿式光纤光栅传感器压力特性研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(3):259-262.
- [2] ZHANG Jin, SHEN Ren-sheng, WANG Ben-yu, et al. Fiber bragg grating sensor based on thin-wall strain canister[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008, **8**:1-2.  
张金, 申人升, 王本宇, 等. 新型应变筒式光纤 Bragg 光栅压力

- 传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2008, **8**:1-2.
- [3] CAO Yie, LIU Bo, LIU Li-hui, et al. Temperature insensitive fiber grating stress sensor[J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2005, **18**(1):177-181.  
曹晔, 刘波, 刘丽辉, 等. 对温度不敏感的光纤光栅压力传感器[J]. *传感技术学报*, 2005, **18**(1):177-181.
- [4] WANG Jun-jie, LIU Bo, ZHANG Feng-tao, et al. New-style optical fiber bragg grating pressure sensor with temperature compensation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(11):2342-2346.  
王俊杰, 刘波, 张丰涛, 等. 基于温度补偿方法去敏的新型光纤光栅压力传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(11):2342-2346.
- [5] WANG Hong-liang, WU Hua-chun, FENG De-quan, et al. Research on FBG sensors applied in measuring liquid level[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(12):1573-1575.  
王宏亮, 邬华春, 冯德全, 等. 光纤光栅液位传感器的研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(12):1573-1575.
- [6] QIAO Xue-guang, CHEN Yi, JIA Zheng-an. Study on simultaneous discriminating measurement of temperature and pressure based on dual FBG[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(1):12-14.  
乔学光, 陈懿, 贾振安, 等. 基于双光纤光栅温度压力同时区分测量的研究[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(1):12-14.
- [7] LIU Qin-peng, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, et al. FBG sensor for stress based on double cantilever beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9).  
刘钦朋, 乔学光, 贾振安, 等. 双悬臂梁光纤 Bragg 光栅应力传感器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9).
- [8] WU Yong-hong, QU Wen-jun, SHAO Chang-jiang, et al. Theoretical modeling and experimental study on fbg water level sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7).  
吴永红, 屈文俊, 邵长江, 等. 光纤光栅水位传感器的理论模拟与实验研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7).
- [9] Luo Jian-hua, Kai Gui-yun, Liu Bo, et al. The design and realization of spoke fbg pressure sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1).  
罗建花, 开桂云, 刘波, 等. 轮辐式光纤光栅压力传感器的设计与实现[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1).
- [10] CHU Xiao-hui, ZHANG Min, ZHOU Hong-pu, et al. Design and experiment of fiber bragg grating pressure sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11).  
褚晓慧, 张敏, 周宏朴, 等. 一种光纤布喇格光栅压力传感器的设计及实验[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11).

## Fiber Bragg Grating Settlement Sensors

DU Lei<sup>1</sup>, GONG Yuan<sup>1,2</sup>, WU Yu<sup>1</sup>, RAO Yun-jiang<sup>1</sup>, ZHAO Tian<sup>1</sup>

(1 Key Lab of Optical Fiber Sensing & Communications (Ministry of Education)  
University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

(2 Key Laboratory of Manufacture and Test Techniques for Automobile Parts (Ministry of Education),  
Chongqing University of Technology, Chongqing, 400050, China)

**Abstract:** According to the fiber Bragg gratings optical sensing principle, a novel structure of fiber Bragg settlement sensors are developed, based on a cantilever beam and a metal diaphragm. The sensing characteristics are investigated. In the experiment, water level differences to are used simulate foundation settlement. The experimental results indicate that sensitivity of  $-2.11 \text{ pm/mm}$  and good linearity of higher than 0.999 can be obtained. By changing the thickness and the effective length of cantilever beam, the measurement range and sensitivity of the sensor can be optimized to meet various applications. From the results, it is known that the sensor will play an important role in bridges, railways and other foundation settlement monitoring.

**Key words:** Settlement sensor; Fiber Bragg Grating (FBG); Metal diaphragm; Cantilever beam