

文章编号 1004-924X(2010)11-2339-08

# 灵敏度系数可调布拉格光栅应变传感器的设计

何俊<sup>1</sup>, 周智<sup>2</sup>, 董惠娟<sup>1</sup>, 张广玉<sup>1</sup>, 欧进萍<sup>2,3</sup>

- (1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;
3. 大连理工大学 土木与水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**针对裸光纤布拉格光栅应变监测量程或精度有限的问题,提出了一种灵敏度系数可调光纤布拉格光栅应变传感器的设计方法。理论和实验研究了该方法在增大光纤布拉格光栅应变监测量程或提高精度方面的性能,并以此研制了基片表面粘贴式和 FRP 封装式两种封装结构的灵敏度系数可调应变传感器。理论分析并实验标定了传感器的灵敏度系数。最后,对传感器理论和实验灵敏度系数误差进行了分析,指出了改进的方向。实验结果表明:两种封装结构的大量程传感器的量程分别增加了 243% 和 126%,高精度传感器的精度提高至  $0.51 \mu\epsilon$  和  $0.52 \mu\epsilon$ 。传感器标定实验表明,两种封装结构的传感器都有很好的线性度和重复性,相关系数达到 0.999 以上。

**关键词:** 光纤 Bragg 光栅;高精度传感器;大量程传感器;应变传感器;灵敏度

**中图分类号:** TP212.14; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101811.2339

## Design of coefficient-adjustable FBG strain sensors

HE Jun<sup>1</sup>, ZHOU Zhi<sup>2</sup>, DONG Hui-juan<sup>1</sup>, ZHANG Guang-yu<sup>1</sup>, OU Jin-ping<sup>2,3</sup>

- (1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A design method for coefficient-adjustable FBG strain sensors was given out to deal with the problem of the limited scale or precision for a Fiber Bragg Grating(FBG) strain monitor. Theoretical and experimental researches were performed to test the characters of the sensors on long-gauge or high precision, then two kinds of high qualified FBG strain sensors(slice mode and FRG packaging mode) were developed and fabricated to validate the design. The sensitivity coefficient of each sensor was analyzed, and it was also calibrated by experiments. Finally, the errors between theoretical and experimental sensitivity coefficients were analyzed. Experimental results indicate that the ranges of the long-gauge sensors have increased by 243% and 126%, and the accuracies of the high-precision sensors have reached  $0.51 \mu\epsilon$  and  $0.52 \mu\epsilon$ , respectively. In the experiments of calibrations, both kinds of sensors show good linearity and repeatability, and the correlation coefficient is up to 0.999.

收稿日期:2009-08-05;修订日期:2010-01-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10672048)

**Key words:** Fiber Bragg Grating(FBG); high-precision sensor; long-gauge sensor; strain sensor; sensitivity

## 1 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG,下文非特殊说明,所述光纤光栅皆为光纤布拉格光栅)传感器具有耐腐蚀性好、抗电磁干扰、高精度、小尺寸等优点,特别适合实际工程粗放式施工的特点<sup>[1-3]</sup>,但目前光纤光栅的应变极限为 $3000 \mu\epsilon$ ,精度为 $1 \mu\epsilon$ ,这种量程和精度针对一些大量程的应变监测,如裂缝的监测;或者一些小应变高精度的监测仍无所适从。鉴于此,一些学者提出了光纤光栅的灵敏度系数可调(增减敏)理论和制作方法的研究,以加工出符合工程要求的传感器。灵敏度系数可调的概念就是利用一些成熟的方法对光纤光栅从封装方法、机械结构、加工工艺等方面进行改进,对光栅段的敏感度提高或降低,以达到提高量程或者提高灵敏度的要求。

目前,国内外应变传感器的灵敏度系数调整多采用聚合物封装光栅方法,或是利用机械结构对光栅增减敏。Xu等1993年对裸露的光纤光栅压力传感灵敏度进行了研究,发现在70 MPa高压下,光纤光栅中心反射波长仅移动0.22 nm,其压力灵敏系数为 $-1.98 \times 10^{-6}$  MPa;2000年,一些学者应用聚合物封装的办法将光纤光栅的压力灵敏系数提高了31.7倍;2002年,一些学者采用增敏罐封装的办法设计的压力传感器在0~0.44 MPa,其压力灵敏系数为 $-62.8 \times 10^{-6}$  /MPa,比裸露的光纤光栅压力传感器的灵敏系数提高了1722倍;2005年,又有学者采用聚四氟乙烯作为基底,将光纤光栅封装在弹性模量小的弹性体材料中,应变灵敏度可以提高56倍。2002年,ZHOU等采用毛细管封装方法研制了一种光纤光栅应变传感器,其应变灵敏度系数比裸光栅提高了2.5倍,应变和温度的精度分别达到了 $1 \mu\epsilon$ 和 $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ 。2005年,ZHOU等将光纤光栅与弹簧相连接制作出了量程可以达到10 000  $\mu\epsilon$ 的光纤光栅大应变(裂缝)传感器。不过上述传感器加工均比较困难,稳定性较差,现场安装不便,不适合应用到实际工程中<sup>[4-10]</sup>。

本文提出了一种灵敏度系数可调(增减敏)的

光纤光栅应变传感器设计方法,其基本原理是通过改变光纤光栅敏感部位的尺寸,使光纤光栅感知应变与传感标距范围内的实际应变产生差异,从而可以根据该差异来改变监测量程或精度。基于这种思想,研制了两种封装结构的灵敏度系数可调(增减敏)的光纤光栅应变传感器,并实验验证了传感器的性能。

## 2 基片表面粘贴式灵敏度系数可调FBG应变传感器的工作原理及结构

基片表面粘贴式灵敏度系数可调光纤光栅应变传感器采用金属片基底,将光纤光栅固定其上,对基底进行加工,改变基底光栅处和其它部分的相对尺寸,进而改变灵敏度系数。这样封装后的传感器可采用粘贴、焊接等多种方法布设,便于现场施工。

### 2.1 工作原理

传感器的结构示意图如下图1所示:

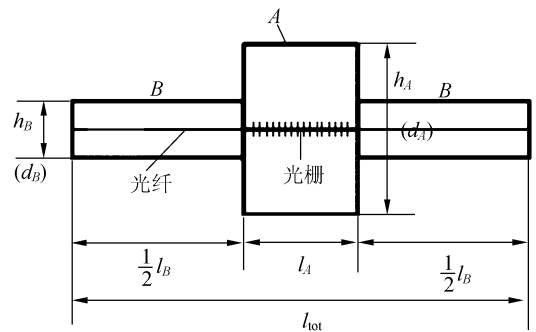


图1 基片表面粘贴式的应变传感器示意图

Fig. 1 Sketch of coefficient-adjustable FBG strain sensor with slice mode

感知元件光纤光栅粘贴在A段,当B段两端受横向载荷时,传感器总应变

$$\epsilon_{\text{sensor}} = \frac{\Delta l_{\text{tot}}}{l_{\text{tot}}} = \frac{(\Delta l_A + \Delta l_B)}{(l_A + l_B)} = \frac{\Delta l_A + \Delta l_B}{l_A + l_B}, \quad (1)$$

式(1)中 $E, S, \epsilon$ 分别为基片的弹性模量、横截面积和应变。

灵敏度可调系数为:

$$K = \frac{\epsilon_{\text{sensor}}}{\epsilon_{\text{FBG}}} = \frac{\epsilon_{\text{sensor}}}{\epsilon_A} = \frac{\frac{l_A}{l_B} + \frac{E_A S_A}{E_B S_B}}{\frac{l_A}{l_B} + 1} \quad (2)$$

令

$K_l = \frac{l_A}{l_B}, K_E = \frac{E_A}{E_B}, K_S = \frac{h_A \delta_A}{h_B \delta_B} = \frac{h_A}{h_B}, K_h = \frac{h_A}{h_B}$ , 其中  $h_A, h_B$  分别为传感器 A 段和 B 段的宽度。  $\delta_A, \delta_B$  分别为 A 段和 B 段的长度。

则

$$K = \frac{K_l + K_h}{K_l + 1} \quad (3)$$

当  $h_A < h_B$  时,  $K < 1$ , 为高精度(增敏)测量;  $h_A > h_B$  时,  $K > 1$ , 为大量程(减敏)测量。

且:  $K > 1$  时,  $K_l$  越小,  $K_h$  越大,  $K$  就越大;  $K < 1$  时,  $K_l$  越小,  $K_h$  越小,  $K$  就越小。即: 当  $l_A / l_B$  越小, 并且  $|h_A - h_B|$  越大, 灵敏度系数可调的范围就越大, 效果就越好。

### 2.2 大量程光纤光栅应变传感器的结构

FBG 所允许的最大应变极限为  $3000 \mu\epsilon$ , 对于部分大量程工况, 要求应变监测量程能达到  $10\ 000 \mu\epsilon$  以上, 此时灵敏度可调系数  $K$  值为  $3 \sim 4$ 。

使用有限元软件 Ansys 对传感器的结构进行优化并对实际工程应用进行分析, 设计的基片表面粘贴式大量程光纤光栅应变传感器的灵敏度可调系数为  $K_{sl} = 3.38$ 。图 2 和 3 为基片表面粘

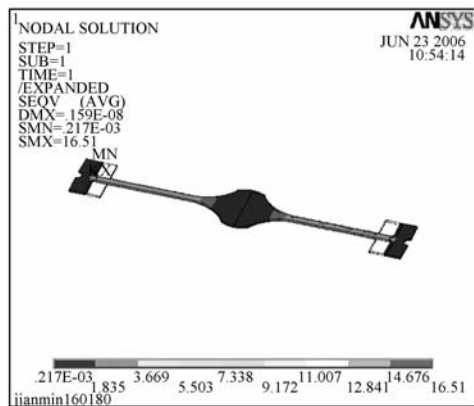


图 2 基片表面粘贴式大量程传感器的应力分析

Fig. 2 Sketch of strain analysis for long-gauge strain sensor with slice mode



图 3 基片表面粘贴式大量程传感器的实物图

Fig. 3 Photo of FBG long-gauge strain sensor with slice mode

贴式的大量程光纤光栅应变传感器的应力图和实物图。

### 2.3 高精度光纤光栅应变传感器的结构

裸光纤光栅传感器的应变分辨率为  $0.8 \mu\epsilon$ , 对于小范围高精度传感器, 能满足使用分辨率达到  $0.5 \mu\epsilon$  的需求, 此时灵敏度可调系数  $K$  值为  $0.5 \sim 0.625$ 。

根据基片表面粘贴式大量程传感器的设计方法, 设计基片表面粘贴式高精度光纤光栅应变传感器的灵敏度可调系数为  $K_{sh} = 0.58$ , 其应力分析图和实物图如图 4 和图 5 所示。

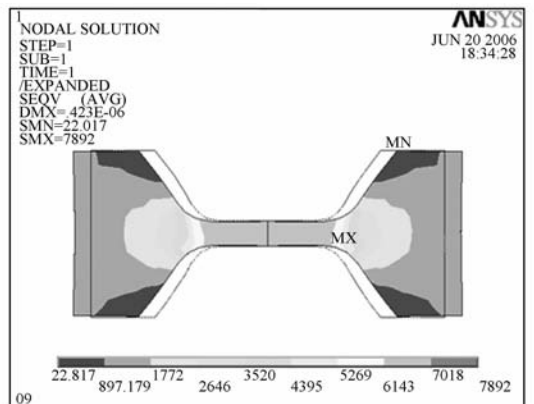


图 4 基片表面粘贴式高精度光传感器的应力分析

Fig. 4 Strain analysis for high-sensitivity sensor with slice mode



图 5 基片表面粘贴式高精度传感器的实物图

Fig. 5 Photo of FBG high-sensitivity strain sensor with slice mode

### 3 基于 FRP 封装的灵敏度系数可调光纤光栅埋入式应变传感器

纤维增强树脂(Fiberglass Reinforced Plastics, FRP)封装灵敏度系数可调的光纤光栅埋入式应变传感器是依靠玻璃纤维增强树脂与光纤光栅(GFRP-FBG)复合传感筋两端安装的金属锚头固定在基体上并与基体产生协同变形来感知其内部应变的,灵敏度系数的调整主要通过改变光栅处和其它位置的直径来进行调节。由于采用高强度耐腐蚀的 FRP 材料封装,保证了传感器工作时的可靠性,适用于实际粗放式施工的特点。

#### 3.1 工作原理

图 6 所示为 FRP 封装灵敏度系数可调的光纤光栅埋入式复合筋的通用结构,其灵敏度可调系数可表示为:

$$k = 1 + \frac{2(\beta - 1)}{\alpha + 2}, \quad (4)$$

式(4)中,  $\alpha = l_1/l_2$ ,  $\beta = A_1/A_2 = d_1^2/d_2^2$ , 其中  $d_1, d_2$  为  $l_1, l_2$  段部位的直径。

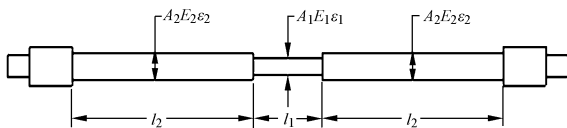


图 6 FRP 封装灵敏度系数可调的光纤光栅埋入式复合筋

Fig. 6 Sketch of coefficient-adjustable FRP-FBG bars

当  $0 < k < 1$  时,为基于 FRP 封装的高精度(增敏)光纤光栅埋入式应变传感器,用以提高感知灵敏度;当  $k > 1$  时,为基于 FRP 封装的大量程(减敏)光纤光栅埋入式应变传感器,用以测量大应变。

#### 3.2 大量程(减敏)光纤光栅埋入式应变传感器的结构

由式(4)看出,当  $\alpha$  取极小值,  $\beta$  取极大值时,  $k$  达到最大值,减敏达到最大。综合考虑传感器的加工及封装,选择减敏感知元件的尺寸确定为  $l = 114 \text{ mm}$ ,  $l_1 = 30 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 42 \text{ mm}$ ,  $d_1 = 5 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 3 \text{ mm}$ , 则:

$$k_{\text{decrease}} = 2.31.$$

图 7, 图 8 给出了 FRP 封装的大量程(减敏)光纤光栅埋入式应变传感器的封装形式。

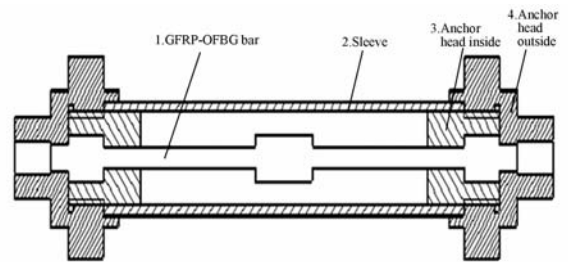


图 7 FRP 封装的大量程光纤光栅埋入式应变传感器的结构

Fig. 7 Sketch of long-gauge strain sensor packaged with FRP

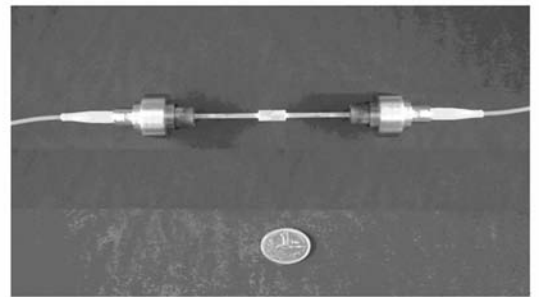


图 8 FRP 封装的大量程光纤光栅埋入式应变传感器照片

Fig. 8 Photo of long-gauge strain sensor packed with FRP

#### 3.3 高精度(增敏)光纤光栅埋入式应变传感器结构

考虑传感器的加工及封装,选择增敏感知元

件的尺寸确定为  $l=100\text{ mm}$ ,  $l_1=16\text{ mm}$ ,  $l_2=42\text{ mm}$ ,  $d_1=3\text{ mm}$ ,  $d_2=5\text{ mm}$ , 此时:

$$k_{\text{increase}}=0.462.$$

图 9,图 10 给出了 FRP 封装的高精度(增敏)光纤光栅埋入式应变传感器的封装形式。

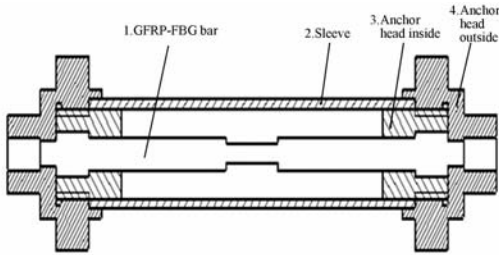


图 9 FRP 封装的高精度光纤光栅埋入式应变传感器的结构

Fig.9 Sketch of high-precision strain sensor packed with FRP

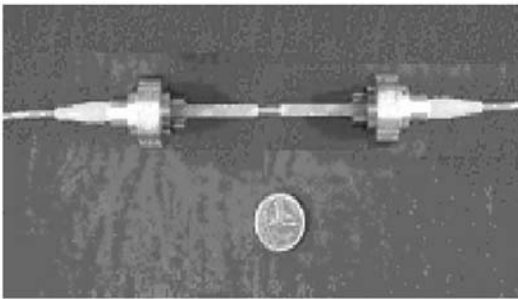


图 10 FRP 封装的高精度光纤光栅埋入式应变传感器的照片

Fig.10 Photo of high-precision strain sensor packaged with FRP

### 4 性能试验及数据分析

#### 4.1 基片表面粘贴式灵敏度系数可调的光纤光栅应变传感器的实验与分析

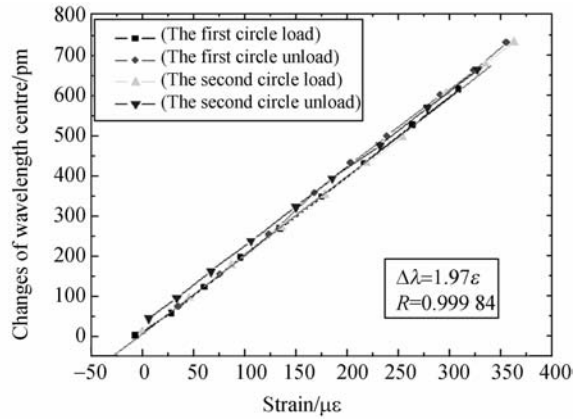
本试验在万能材料试验机(MTS)上进行,试验中所用的传感器及试验装置如图 11 所示。分别对基片粘贴式高精度传感器和基片粘贴式大量程传感器的性能试验数据进行分析,如图 12。

从图 12 中可以看出,对于高精度(增敏)传感器,灵敏度系数为  $1.97\text{ pm}/\mu\epsilon$ ,灵敏度可调系数  $K_{\text{increase}}=0.61$ ;对于大量程(减敏)传感器,灵敏度系数为  $0.35\text{ pm}/\mu\epsilon$ ,灵敏度可调系数  $K_{\text{decrease}}=3.43$ 。



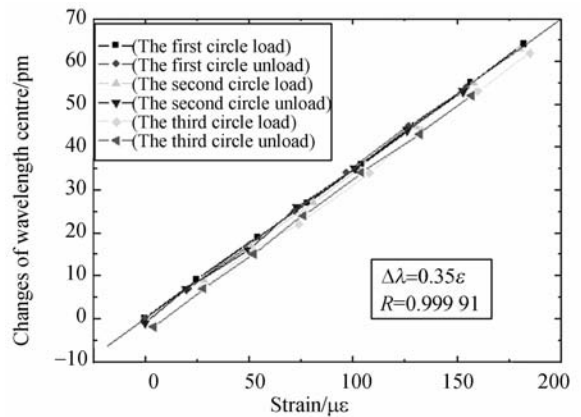
图 11 实验布置图

Fig.11 Photo of experiments



(a) 高精度(增敏)粘贴式 FBG 应变传感器

(a) High-precision strain sensor with slice mode



(b) 大量程(减敏)粘贴式 FBG 应变传感器

(b) Long-gauge strain sensor with slice mode

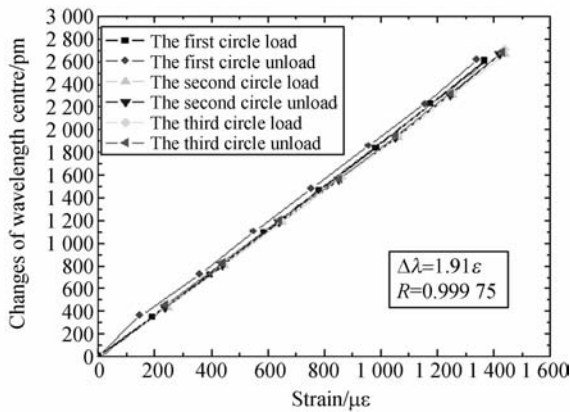
图 12 基片表面粘贴式光纤光栅应变传感器的应变传感特性

Fig.12 Sensing properties of coefficient-adjustable FBG strain sensors with slice mode

## 4.2 基于 FRP 封装的灵敏度系数可调光纤光栅埋入式应变传感器的实验与分析

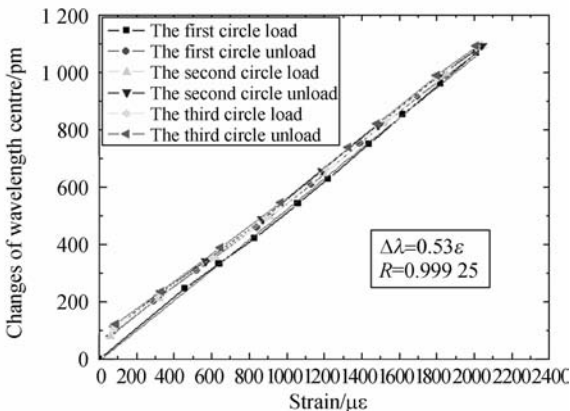
本试验是在 MTS 上进行的, 实验中分别对高精度和大量程埋入式 FBG 应变传感器的性能试验进行 3 个循环, 间隔 100 N 加载, 引伸计标距为 50 mm。分别对高精度和大量程埋入式 FBG 应变传感器的性能试验数据进行分析, 如图 13 所示。

从图 13 可以看出, FRP 封装高精度和大量程埋入式 FBG 应变传感器有很好的线性度, 相关系数达到 0.999 以上。试验测得高精度(增敏)埋入式 FBG 应变传感器的灵敏度可调系数  $k_{\text{increase}} = 0.63$ , 大量程(减敏)埋入式 FBG 应变传感器的灵敏度可调系数  $k_{\text{decrease}} = 2.26$ 。



(a) 高精度(增敏)埋入式 FBG 应变传感器

(a) High-precision sensor with cylinder mode



(b) 大量程(减敏)埋入式 FBG 应变传感器

(b) Long-gauge sensor with cylinder mode

图 13 基于 FRP 封装的光纤光栅应变传感器的应变传感特性

Fig. 13 Sensing properties of coefficient-adjustable FBG strain sensors with cylinder mode

## 4.3 理论值与试验值的对比

从前面的试验数据和结果可以得到以上 4 种光纤光栅传感器的灵敏度可调系数的理论值和实验值, 通过比较可得它们的误差系数, 如表 1 所示。从表中可以看出基片粘贴式灵敏度系数可调应变传感器理论值和实验值误差很小, 其原因主要是基片材料为钢材, 光栅与基体的协同变形性好, 应变传递准确, 误差小。此外, FRP 封装高精度传感器偏差较大, 其原因在于试验传感器尺寸较小, 所用引伸计标距有限; 此外, GFRP-FBG 复合传感筋的加工误差, 结构封装存在的间隙等, 都会导致试验曲线有一个整体的偏移。但从线性度和重复性来看, 这些偏差是可以通过改进试验手段和提高加工装配精度来弥补的, 进一步的分析、试验有望解决这类问题。

表 1 4 种光纤光栅传感器的灵敏度可调系数的理论值与实验值的关系

Tab. 1 Relationship between theoretical values and practical values

传感器类型	理论值	试验值	误差系数
基片粘贴式大量程传感器	3.38	3.43	1.48%
基片粘贴式高精度传感器	0.58	0.61	5.26%
FRP 封装的大量程传感器	2.31	2.26	2.16%
FRP 封装的高精度传感器	0.46	0.63	37%

## 5 结论

为简单有效地满足实际工程中对裂缝等大应变工况或某些高精度监测工况的要求, 本文提出了一种新型的灵敏度系数可调的应变传感器的设计方法。基于这种方法, 采用了 2 种封装形式, 加工了 4 种灵敏度系数可调的光纤光栅应变传感器。在理论分析的基础上, 对 4 种传感器分别做了应变传感特性的试验, 并对结果进行了分析。分析表明, 4 种传感器都有很好的线性度和重复

性,相关系数达到 0.999 以上。理论和实验结果都表明了这种设计方法的可行性,因此此类灵敏

度系数可调的光纤光栅应变传感器可以在实际工程应用推广。

## 参考文献:

- [1] 郭明金,姜德生,袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. 光学精密工程. 2007,15(3):226-230.
- GUO M Y, JIANG D S, YUAN H C. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(3):226-230. (in chinese)
- [2] 郭玉彬,葛璜. 光纤 Bragg 光栅的研究[J]. 光学精密工程,1999,7(1):32-39.
- GUO Y B, GE J. Fabrication of fiber Bragg grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(1):32-39. (in chinese)
- [3] 唐炜,史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. 光学精密工程,2002,10(1):79-83.
- TANG W, SHI Y K. Study on applications of fiber Bragg grating sensing technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(1):79-83. (in Chinese)
- [4] HE J, ZHOU Z, DONG H J, *et al.*. Study on coefficient-adjustable FBG strain sensor packaged with FRP [J]. *Pacific Science Review*, 2008,10(2):187-190.
- [5] ZHOU Z, ZHAO X F. Study on FBG sensor's steel capillary encapsulating technique and sensing properties [J]. *Chinese journal of lasers*, 2002,29

- (12):1089-1092. (in Chinese)
- [6] ZHOU Z, LAN C G, OU J P. New kind of FBG-based crack (large strain) sensor[J]. *SPIE*, 2005, 6167:14-15.
- [7] KERROUCHE A, BOYLE W J O, SUN T, *et al.*. Enhanced FBG sensor-based system performance assessment for monitoring strain along a prestressed CFRP rod in structural monitoring [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2009,151(2):127-132.
- [8] LI W Y, CHENG CC, LO Y L. Investigation of strain transmission of surface-bonded FBGs used as strain sensors [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2009,149(2):201-207.
- [9] KARALEKAS D, CUGNONI J, BOTSIS J. Monitoring of process induced strains in a single fibre composite using FBG sensor: a methodological study [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008,39(7):1118-1127.
- [10] 沈小燕,林玉池,赵美蓉. 应用光学低相干反射测量术实现光纤光栅分布式复杂应变测量[J]. 光学精密工程,2010,18(1):1-8.
- SHEN X Y, LIN Y CH, ZHAO M R. Measurement of distributed non-uniform strains by fiber bragg grating sensing with OLCR technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(1):1-8. (in chinese)

## 作者简介:



何俊(1981—),博士研究生,2004年于哈尔滨工业大学获学士学位,主要从事光纤光栅传感和解调技术、基于布里渊散射(BOTDR)和基于拉曼散射(ROTDR)的分布式传感和解调技术、光纤传感的现场应用技术等方面的研究。E-mail:hejun-hit@126.com

## 导师简介:



张广玉(1962—),博士,1984年、1995年于哈尔滨工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事光机电一体化技术、航天地面模拟与测试技术、超声波应用技术和特种材料加工技术等主面的研究。E-mail:zgyqx@hit.edu.cn



董惠娟(1968—),河北武邑人,博士,副教授,硕士生导师,1990年、1999年于哈尔滨工业大学分别获得学士、博士学位,2003年~2005年于英国伦敦城市大学完成博士后,主要从事光纤传感技术、功率超声技术、机电一体化技术等方面的研究。



周智(1973—),湖南道县人,副教授,硕士生导师,1996年于中南工业大学获工学学士学位,2003年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事力学、智能材料、传感器、结构损伤和健康监测等方面的研究。E-mail: adpber@126.com



欧进萍(1959—),湖南宁远人,博士,教授,博士生导师,中国工程院院士,1978年毕业于湘潭大学水电系,1987年于哈尔滨工业大学获工学博士学位,主要从事结构地震损伤与动力可靠性、结构振动控制、重大工程结构健康监测和海洋平台结构安全保障技术等方面的研究。

## ● 下期预告

# 月基观测地球等离子体层极紫外辐射特性

何飞<sup>1,2</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 张效信<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 国家气象局 空间天气监测与预警中心, 北京 100081)

研究了地球等离子体层极紫外辐射特性,结果表明从月球上探测时,地球等离子体层顶位于  $5.5 R_E$  以内,等离子体层结构的典型尺度量级为  $0.1 R_E$ ,  $He^+$   $30.4 \text{ nm}$  辐射强度为  $0.02 \sim 11.4 \text{ Rayleigh}$ 。研究了月球轨道运动特性和月球表面环境特性,结果显示在一个月球公转周期内,总观测时间约为 12 个地球日,极紫外观测仪器对地指向的纬度最大偏移约为  $7^\circ$ ,经度最大偏移约为  $6^\circ$ 。对月面的极紫外辐射分析表明,太阳峰年月面散射的极紫外辐射强度约为  $2.0 \text{ Rayleigh}$ ,与地球等离子体层辐射量级相当。根据 SELENE 数据,研究了极紫外观测仪器所在的 5 个拟着陆区的地貌特征,结果显示月面散射的极紫外辐射不会进入观测仪器,其中虹湾区的地形最为理想。根据 Apollo-12 和 Apollo-15 太阳风数据分析了月面质子和电子通量,在太阳峰年,一年内两者的总流量均为约  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。根据 Apollo-12 局地观测,在一个月球周期内,月面温度变化为  $80 \sim 390 \text{ K}$ 。得到的结果为月基极紫外观测仪器设计提供了重要依据。