

文章编号 1004-924X(2018)03-0556-09

## 高精度弓型光纤光栅微位移传感器

谭跃刚, 陈宇佳\*, 李瑞亚, 毛 健, 刘 芹  
(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为了测量控机床结构件、微加工工作台的微小变形量, 设计了一种高精度弓型光纤布拉格光栅(FBG)微位移传感器。将光纤布拉格光栅的栅区部分粘贴在弓型上下壁处, 当弓形件发生变形时, 可测出上下壁的应变值, 从而测得位移值并进行温度解耦。实验结果表明, 在量程为 1 mm 时, 传感器的灵敏度为 2.02 pm/ $\mu\text{m}$ , 线性相关系数为 0.998 3, 实验的迟滞误差为 4.08%, 重复性误差为 4.08%。在温度补偿实验中可以看出, 当温度上升 1 °C, 波长漂移量不到 1 pm。类似于弓型结构衍生出一种半弓型结构的位移传感器。两类传感器相比, 弓型传感器的温度灵敏度比半弓型传感器小 0.001 5 pm/ $\mu\text{m}$ , 温度补偿效果更好; 但半弓型传感器的线性度为 0.4%, 线性度比弓型传感器好。两种传感器均满足测量值稳定可靠、精度高、抗电磁干扰能力强, 温度不敏感等要求。

**关键词:** 光纤传感; 光纤光栅; 微位移传感器; 高精度; 温度补偿

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0556

## High-precision bow-shaped fiber Bragg grating micro-displacement sensors

TAN Yue-gang, CHEN Yu-jia\*, LI Rui-ya, MAO Jian, LIU Qin

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology,  
Wuhan 430070, China)

\* Corresponding author, E-mail: ygtan@whut.edu.cn

**Abstract:** In order to realize small deformation measurements of Numerical Control (NC) machine tool structures and micro-processing platforms, a high-precision optical fiber Bragg grating (FBG) micro-displacement-sensor based on a bow shape was designed. The grating region of the FBG was attached to the upper and lower walls of the bow. Hence, the strain value of the upper and lower walls could be measured while the bow was deformed, allowing displacement measurement and achieving temperature decoupling. Experimental results show that in the displacement range of 1 mm, the sensitivity by fitting a straight line is 2.02 pm/ $\mu\text{m}$ , the linearity is 2.92%, the linear correlation coefficient is 0.998 3, the hysteresis error of three groups is 4.08%, and the repeatability error of three groups is 4.08%. A temperature compensation test is presented in addition, showing a wavelength drift of less than 1 pm with a temperature increase of 1 °C. Furthermore, a similar half bow structure was derived and compared with the previous bow type in terms of their performance.

收稿日期: 2017-06-28; 修订日期: 2017-09-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51375358)

The comparison shows that the temperature compensation of the bow type is  $0.0015 \text{ pm}/\mu\text{m}$ , which is smaller than that of the half bow type, while the latter has a better static calibration linearity of  $0.4\%$ . It satisfies the sensor requirements of stability, higher precision, as well as strong electromagnetic interference resistance and temperature insensitivity.

**Key words:** optical fiber sensing; Fiber Bragg Grating(FBG); micro-displacement sensors; high-precision; temperature compensation

## 1 引言

近年来,各种新技术在精密加工中得到了广泛的应用,使得精密加工和精密测量技术得到了长足的发展<sup>[1]</sup>,与此同时人们也更加关注微位移的高精度测量。传统的微位移传感器,例如激光微位移传感器、干涉仪、电涡流传感器等,虽然测量精度高,但各有不足之处,例如干涉仪体积大、难安装;激光微位移传感器对工作环境要求高、价格昂贵;电涡流传感器易受电磁干扰、精度不高。而光纤光栅作为一种体积小、精度高、抗电磁干扰、可远距离传输信号的检测元件,广泛用于各种测量场合<sup>[2-5]</sup>,因此光纤光栅微位移传感器更受人们青睐。近年来,光纤光栅位移传感器在机床表面变形<sup>[6]</sup>、微动工作台<sup>[7]</sup>,以及煤矿巷道顶板离层分析<sup>[8]</sup>中起到了至关重要的作用。

光纤光栅因其优点被很多学者应用在位移测量中。2010年,杨秀峰等人<sup>[9]</sup>设计了一种基于杠杆原理的新形光纤光栅微位移传感器,其形状类似于剪刀,其灵敏度可达  $12.5 \text{ nm}/\text{mm}$ 。2011年,Youlong Yu 等人<sup>[10]</sup>提出了一种基于悬臂梁的新型FBG温度不敏感位移传感器,实验测得灵敏度为  $0.058 \text{ nm}/\text{mm}$ ,测量范围为  $0\sim 20 \text{ mm}$ 。2012年,Chuan Zhong 等人<sup>[11]</sup>提出了基于双梯形梁的光纤微位移传感器,其微位移灵敏度为  $0.25 \text{ nm}/\text{mm}$ 。2014年,Ya-nan Zhang 等人<sup>[12]</sup>设计了一种 $\Omega$ 形的光纤光栅位移传感器,其灵敏度为  $1.035 \text{ rad}/\text{mm}$ 。2015年,Shimeng CHEN 等人<sup>[13]</sup>设计了一种可用于测量位移和温度的大位移光纤位移传感器,其位移测量范围大于  $45 \text{ mm}$ ,灵敏度为  $0.036 \text{ nm}/\text{mm}$ 。2016年,Sicong Tao 等人<sup>[14]</sup>设计了一种圆弧式光纤光栅传感器,其灵敏度为  $0.567 \text{ nm}/\text{mm}$ 。2017年,郭永兴等人制作了一种滑动式光纤布拉格光栅位移传感器,其灵敏度为  $20.11 \text{ pm}/\text{mm}$ <sup>[15]</sup>。

按照分辨率的量级,上述传感器可分为两类:一类直接拉动光纤光栅,灵敏度可高达  $12.5 \text{ nm}/\text{mm}$ ,但是易拉断,且测量范围窄;而另一类为悬臂梁、简支梁以及弹簧等结构的传感器,其分辨率很难达到微米级,灵敏度较低,在上述传感器中灵敏度最高的也只有  $0.567 \text{ nm}/\text{mm}$ ,是达不到机床变形测量要求的。本文提出了一种弓型结构的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)微位移传感器,此传感器精度高(可达到微米级)且免受温度的干扰。FBG粘贴在弓形件的上下表面,并注意粘贴长度<sup>[16]</sup>。推动弓形件的一边使弓形件的表面发生弯曲,粘贴在上下表面的FBG的波长变化量相等,但是波长漂移量相反。将两光栅的波长漂移量取差值可进行应变增敏和温度解耦。此外,在弓形件的基础上,又提出了一种半弓形件,FBG粘贴在斜侧梁上应变比值为  $1:2$  的位置上,此传感器也是一种高精度温度不敏感的FBG微位移传感器。

## 2 传感器设计原理

### 2.1 弓型微位移传感器的工作原理及结构设计

弓型FBG微位移传感器示意图如图1所示,用环氧树脂将光纤光栅粘贴在弓形件上下壁上,上表面粘贴1号FBG,下表面粘贴2号FBG,弓形件左端用螺栓固定在底座上;右端连接探针,在与底座连接的导轨上可顺利滑动。当有外力向左推动探针时弓形件的右端产生位移 $\Delta L$ ,薄壁弓形件变形,贴在弓形件上下侧的FBG也随之感知应变(1号光栅感知正应变,2号光栅感知负应变),且应变大小相等方向相反。此时,可通过解调仪解调出1号和2号光纤光栅的波长变化,将两光栅反射出的波长漂移量取差值,达到位移测量及温度补偿的目的。弓形件尺寸如图2所示。

如图2所示,当 $L$ 发生变化时(即增长 $\Delta L$ ),

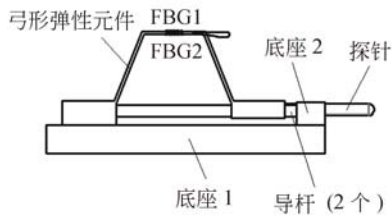


图 1 弓型 FBG 传感器示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of bow-shaped FBG sensor

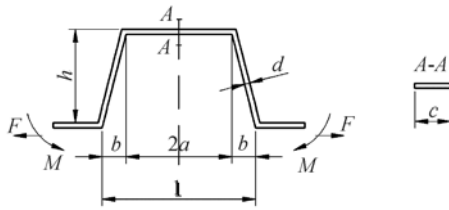


图 2 弓形件的尺寸标注图

Fig. 2 Dimension of bow-shaped component

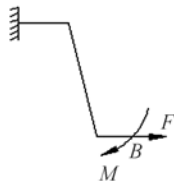


图 3 受力分析简化图

Fig. 3 Simplified drawing of force analysis

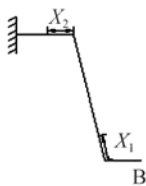


图 4 分段计算示意图

Fig. 4 Sketch map of sectional calculation

A-A 截面会产生应变,此时算出 A-A 截面的弯矩就可求出截面的应变。此弓形件为左右对称的结构,如图 3 所示,可只求解一边的结构。弓形件作为一个二次超静定结构,有力矩  $M$  和拉力  $F$  两个未知量。基本静定系在  $F=1$  单独作用时,末端  $B$  沿  $F$  方向的相对位移为  $\delta_{11}$ ,沿  $M$  方向的相对位移为  $\delta_{21}$ (见图 5);在  $M=1$  单独作用时,末端  $B$  沿  $F$  方向的相对位移为  $\delta_{12}$ ,沿  $M$  方向的相对位移为  $\delta_{22}$ (见图 6);在  $F$  和  $M$  的联合作用下,末端  $B$  沿  $F$  方向的相对位移为  $\Delta L$ ,沿  $M$  方向的相对

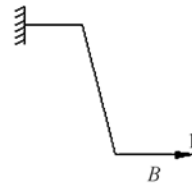


图 5 在  $F=1$  单独作用时受力图

Fig. 5 Force diagram with  $F=1$

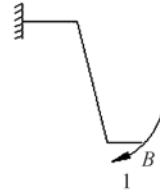


图 6 在  $M=1$  单独作用时受力图

Fig. 6 Force diagram of with  $M=1$

位移为 0(见图 3)。正则方程如下:

$$\delta_{11} F + \delta_{12} M = \Delta L, \quad (1)$$

$$\delta_{21} F + \delta_{22} M = 0. \quad (2)$$

利用莫尔定理计算上述方程的 4 个系数(见图 4),得到:

$$\delta_{11} = \int_l \frac{\overline{M}_1 \overline{M}_1}{EI} dx = \frac{h^2}{EI} \left( \frac{1}{3} \sqrt{b^2 + h^2} + a \right), \quad (3)$$

$$\delta_{22} = \int_l \frac{\overline{M}_2 \overline{M}_2}{EI} dx = \frac{h^2}{EI} (\sqrt{b^2 + h^2} + a), \quad (4)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \int_l \frac{\overline{M}_1 \overline{M}_2}{EI} dx = -\frac{h}{EI} \left( \frac{1}{2} \sqrt{b^2 + h^2} + a \right), \quad (5)$$

其中  $I = \frac{cd^2}{12}$ ,  $I$  为惯性矩。

再根据式(1)和式(2)解出力矩  $M$  和拉力  $F$ :

$$F = \frac{Ecd^2}{2h^2} \cdot \frac{\sqrt{b^2 + h^2} + a}{(b^2 + h^2) + 4a \sqrt{b^2 + h^2}} \cdot \Delta L, \quad (6)$$

$$M = \frac{Ecd^2}{4h} \cdot \frac{\sqrt{b^2 + h^2} + 2a}{(b^2 + h^2) + 4a \sqrt{b^2 + h^2}} \cdot \Delta L. \quad (7)$$

根据材料力学可得出, A-A 截面的弯矩为:

$$M = x_1 h - x_2 = \frac{Ecd^2}{4h} \cdot \frac{\sqrt{b^2 + h^2}}{(b^2 + h^2) + 4a \sqrt{b^2 + h^2}} \cdot \Delta L. \quad (8)$$

A-A 截面的应变为:

$$\epsilon = \frac{M}{E \cdot \frac{cd^2}{6}} = \frac{3d}{2h} \cdot \frac{1}{\sqrt{b^2 + h^2 + 4a}} \cdot \Delta L \quad (9)$$

此时可以看出 A-A 截面所产生的应变跟位移呈线性关系。由光纤光栅性质可知:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon + (\alpha_n + \alpha_A)T \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} \\ \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 - P_e) \frac{3d}{2h} \cdot \frac{1}{\sqrt{b^2 + h^2 + 4a}} & (\alpha_n + \alpha_A) \\ -(1 - P_e) \frac{3d}{2h} \cdot \frac{1}{\sqrt{b^2 + h^2 + 4a}} & (\alpha_n + \alpha_A) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta L \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (11)$$

由于两个光纤光栅所处环境相同,对温度解耦求得:

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = 2(1 - P_e) \frac{3d}{2h} \cdot \frac{1}{\sqrt{b^2 + h^2 + 4a}} \cdot \Delta L \quad (12)$$

在式(12)中,温度解耦之后,光纤光栅的反射波长漂移量仅与弓形件的应变有关,所以讨论弓形件的应变与尺寸的关系就可得出波长漂移量与尺寸的关系。由式(9)可知,应变的大小主要由尺寸  $d$  和  $h$  决定。当传感器所测位移量为 1 mm 时,  $d$ - $h$ - $\epsilon$  的关系如图 7 所示。

由图 7 可以看出,当传感器所测位移量为定值时,尺寸  $h$  值越小,  $d$  值越大,弓形件的应变越大,此时传感器的灵敏度也就越高。因该传感器用来测量机床变形的微位移,为了在使用时使传感器既有一定的抗振作用,又满足零敏感的要求,传感器的外观尺寸要尽量小。根据图 4 分析

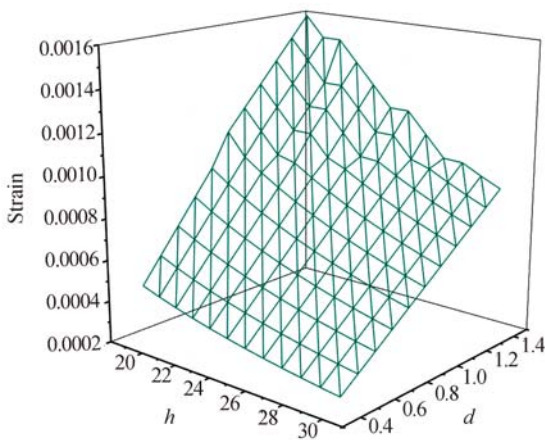


图 7 方型光纤光栅传感器尺寸与应变关系的三维图  
Fig. 7 Relationship between size and strain of bow-shaped FBG sensor

其中  $\Delta\lambda_B = 1550 \text{ nm}$ ,  $P_e = 0.22$ 。

所以当有外力推动探针时弓形件的右端产生位移  $\Delta L$ ,1 号光栅感知正应变,2 号光栅感知负应变,根据式(10)可知,光纤光栅的反射波长漂移量跟光栅所受的应变和灵敏度有关。最终可得出:

得到如下尺寸:  $a = 11.4 \text{ mm}$ ,  $b = 10 \text{ mm}$ ,  $h = 25 \text{ mm}$ ,  $d = 1 \text{ mm}$ ,  $c = 10 \text{ mm}$ 。将这些数值代入式(12)可得出传感器灵敏度的理论值为  $2 \text{ pm}/\mu\text{m}$ ,而实验所用解调仪的分辨力为  $1 \text{ pm}$ ,所以此弓型微位移传感器分辨力的理论值为  $1 \mu\text{m}$ 。

### 2.2 半弓型微位移传感器的工作原理及结构设计

已知上述弓型结构的理论计算,则可衍生出半弓型 FBG 微位移传感器,如图 8 所示。该传感器外侧表面粘贴 1 号 FBG,内侧表面粘贴 2 号 FBG,当有外力推动探针时半弓形件的右端产生位移  $\Delta L$ ,且半弓形件发生变形,粘贴在半弓型内

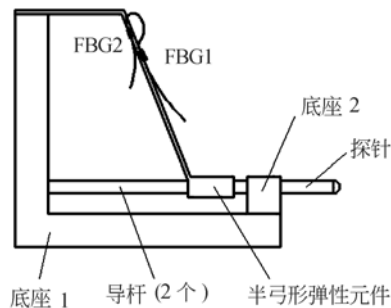


图 8 半弓型 FBG 传感器示意图  
Fig. 8 Diagrammatic sketch of FBG sensor with half bow-shaped elastic component

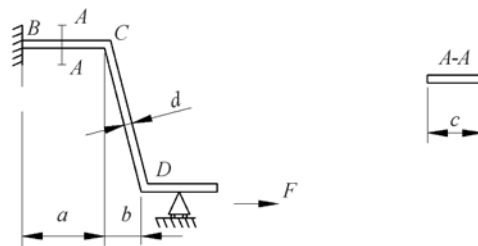


图 9 半弓形件的尺寸标注图  
Fig. 9 Dimension of half bow-shaped component

外侧的 FBG 随之感知应变(1 号光栅感知正应变,2 号光栅感知负应变),应变大小为 1:2。此半弓形件的尺寸如图 9 所示。

当 $(a+b)$ 的长度发生变化时(即增长 $\Delta L$ ),CD 段的任意截面会产生应变,此时算出 CD 截面的弯矩就可求出截面的应变。半弓形结构为三次超静定结构,与弓形件结构的计算方法类似,在这里不再赘述。

最终可得出:

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} \\ \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5(1-P_e)\psi & (\alpha_n + \alpha_\Lambda) \\ -(1-P_e)\psi & (\alpha_n + \alpha_\Lambda) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta L \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (13)$$

由于两个光纤光栅所处环境相同,对温度解耦求得:

$$2 \frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = 2(1-P_e)\psi \cdot \Delta L, \quad (14)$$

其中 $\psi$ 为求解出的系数值,其大小与半弓形件的尺寸有关。尺寸的分析方法与弓形件相同,经分析得尺寸如下: $a=22.8$  mm, $b=20$  mm, $h=50$  mm, $d=1$  mm, $c=10$  mm, $\psi=1.28 \times 10^{-6}$ ,且 1 号光栅贴在离 C 点 20 mm 的位置上,2 号光栅贴在离 C 点 10 mm 的位置上。

### 2.3 对比两类传感器应变-位移关系的理论值与仿真值

弓形件和半弓形件的边界条件均为一端固定,另一端受力。按 0.1 mm 为步长,1 mm 为量程,按照上述章节计算出弓形件上下表面和半弓形件内外壁应变的理论值,并由 ANSYS workbench 静力学分析得出其应变的仿真值。图 10 和图 11 为两个传感器的理论与仿真的应变-位移关系图。

由式(9)可得出弓形件上表面中点应变与位移的理论比值 $k_1 = 8.27 \times 10^{-3}$  mm/mm<sup>2</sup>,下表面中点应变与位移的理论比值 $k_2 = -8.27 \times 10^{-3}$  mm/mm<sup>2</sup>;半弓形件的斜侧外壁应变与位移的理论比值 $k_1 = 4.13 \times 10^{-3}$  mm/mm<sup>2</sup>,斜侧内壁应变与位移的理论比值 $k_2 = -8.27 \times 10^{-3}$  mm/mm<sup>2</sup>。

由 ANSYS workbench 静力学分析可得:弓形件上方中点应变与位移的仿真比值 $k_1 = 8.11 \times 10^{-3}$  mm/mm<sup>2</sup>,下方中点应变与位移的仿真比值

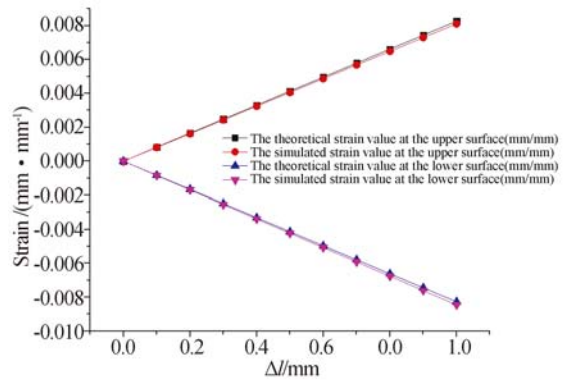


图 10 弓形件应变-位移关系图

Fig. 10 Strain-displacement diagram of bow-shaped component

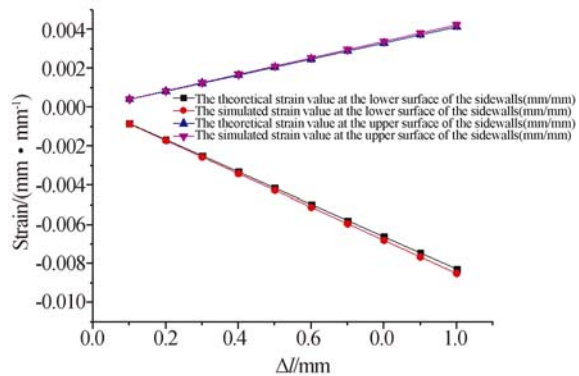


图 11 半弓形件应变-位移关系图

Fig. 11 Strain-displacement diagram of half bow-shaped component

$k_2 = -8.45 \times 10^{-3}$  mm/mm<sup>2</sup>;半弓形件的斜侧外壁应变与位移的仿真比值 $k_1 = 4.24 \times 10^{-3}$  mm/mm<sup>2</sup>,斜侧内壁应变与位移的仿真比值 $k_2 = -8.50 \times 10^{-3}$  mm/mm<sup>2</sup>。

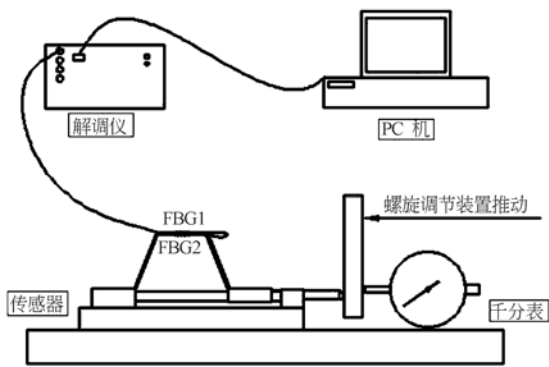
综上所述,位移-应变关系的理论计算值略小于位移-应变关系的仿真值,误差都不超过 3%。

## 3 静态标定实验

### 3.1 弓型 FBG 微位移传感器的静态标定实验

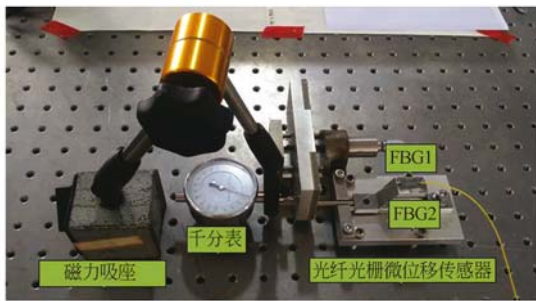
图 12 为弓型 FBG 微位移传感器静态标定实验图。该实验系统由解调仪、PC 机、传感器、螺旋调节装置(可以调节微小位移)和千分表 5 部分组成。

首先,如图 12(b)所示,弓型 FBG 微位移传感器和千分表(分辨率为 1 μm、量程为 1 mm)分别安装在实验台上,FBG 连接解调仪,解调仪连



(a) 实验系统示意图

(a) Diagrammatic sketch of experiment system



(b) 实验台实物图

(b) Physical drawing of experiment table

图 12 弓型 FBG 传感器静态标定实验图

Fig. 12 Static calibration experiment of bow-shaped FBG sensor

接 PC 机。然后,将螺旋调节装置选取适当的距离(可同时推动传感器的探针和千分表的探针为宜)安装在实验台上,微调螺旋调节装置带动硬质挡板,硬质挡板再推动弓型 FBG 微位移传感器和千分表的探针,千分表的示数即为弓型 FBG 微位移传感器所感知的位移量,解调仪可解调出 FBG 的反射波长漂移量。最后,将千分表和弓型 FBG 微位移传感器的位置调零,开始试验。以 50 pm 的位移量作为步长来调节移位装置的螺距,记录 FBG 的中心波长值,当调节螺旋调节装置时,所对应的千分表示数为 1 mm 时,做回程试验。按上述方法循环 3 次,所得数据经过处理后如图 13 所示。

在 1 mm 的量程内,由实验可得出弓型传感器的 1 号 FBG 与 2 号 FBG 的三组波长漂移值,之后将 1 号 FBG 和 2 号 FBG 的波长漂移量求取差值,可实现增敏解耦。图 13 为 1 号 FBG 和 2

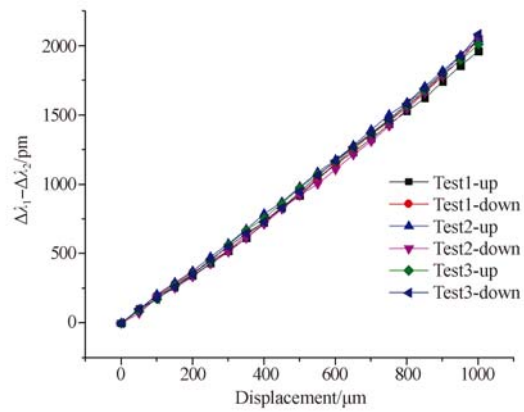


图 13 弓型 FBG 波长漂移量差值与位移的关系图  
Fig. 13 Relation between displacement and difference of wavelength shift of bow-shaped FBG sensor

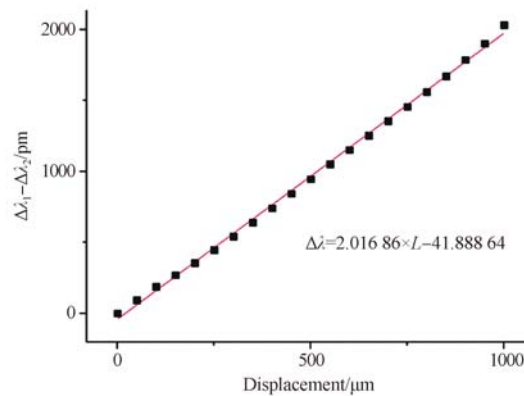


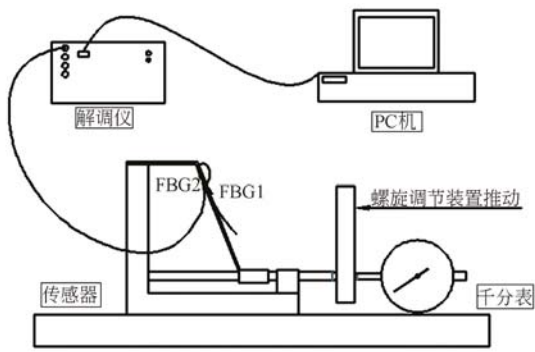
图 14 波长漂移量差值与位移的线性拟合曲线  
Fig. 14 Linear fitting curve of difference of wavelength shift with displacement

号 FBG 的波长漂移量差值与位移的关系图,将图 13 中的 6 组数据求取平均值,并采用最小二乘法对数据进行直线拟合,结果如图 14 所示。实验结果表明,在量程为 1 mm 时,由拟合直线可知传感器的灵敏度为 2.02 pm/μm,线性度为 2.92%,线性相关系数为 0.998 3,且三组实验的迟滞误差为 4.08%,重复性误差为 4.08%。

### 3.2 半弓型 FBG 微位移传感器的静态标定实验

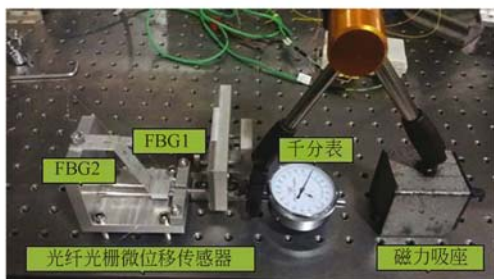
半弓型 FBG 微位移传感器的静态标定实验台的安装及实验操作步骤与弓型 FBG 微位移传感器的类似,如图 15 所示。同理,按照弓型微位移传感器的实验步骤循环 3 次,所得数据经过处理后如图 16 所示。

在 1 mm 的量程内,由实验可得出半弓型传感器的 1 号 FBG 与 2 号 FBG 的三组波长漂移



(a) 实验系统示意图

(a) Diagrammatic sketch of experiment system



(b) 实验台实物图

(b) Physical drawing of experiment table

图 15 半弓型 FBG 传感器静态标定实验图

Fig. 15 Static calibration experiment of FBG sensor based on half bow-shaped component

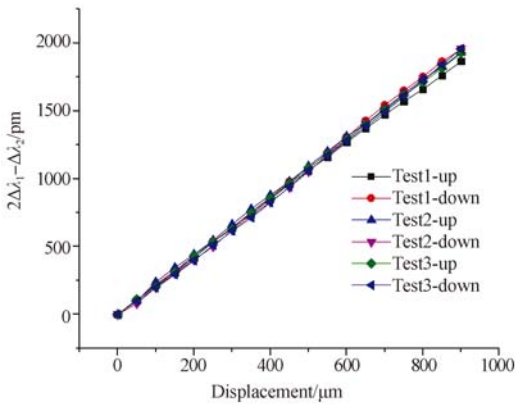


图 16 半弓型 FBG 波长漂移量差值与位移的关系图

Fig. 16 Relation between displacement and difference of wavelength shift of half bow-shaped FBG sensor

值,之后将 1 号 FBG 和 2 号 FBG 的波长漂移量求取差值,实现增敏解耦。图 16 为 1 号 FBG 和 2 号 FBG 波长漂移量差值与位移的关系图,将图 16 中的 6 组数据求取平均值,并采用最小二乘法

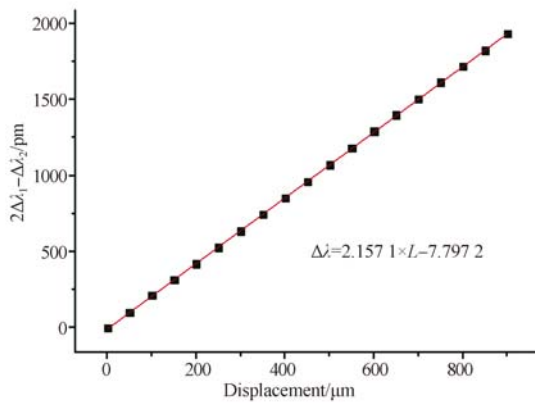


图 17 半弓型 FBG 波长漂移量差值与位移的线性拟合曲线

Fig. 17 Linear fitting curve of difference of wavelength shift with displacement for half bow-shaped FBG sensor

对数据进行直线拟合,结果如图 17 所示。实验结果表明,在量程为 1 mm 时,由拟合直线可知传感器的灵敏度为 2.157 1 pm/μm,线性度为 0.40%,线性相关系数为 0.999 96,且三组实验的迟滞误差为 3.78%,重复性误差为 5.33%。

综上,两类传感器通过实验数据分析而得出的灵敏度均大于理论计算出的灵敏度,误差来源为光纤光栅在粘贴过程中光栅与变形件之间存在着胶层,所以实际测量时变形件的厚度默认包括胶层的厚度,当变形件的厚度增加时,灵敏度也随之增大。

#### 4 温度补偿实验

如图 18 所示,首先按照实物图将两个 FBG 微位移传感器和热电偶一起放入温控箱中,将 FBG 通过跳线连接解调仪,解调仪和热电偶连接 PC 机。通过解调系统得出光纤光栅的反射波长漂移量,通过热电偶系统得出保温一定时间后两个传感器附近的温度值。温度从 25 °C 升到 65 °C,每 10 °C 为一个梯度,每次保温 30 min,记录热电偶显示的温度和波长漂移量。两类传感器的实验结果如图 19 和图 20 所示。

图 19 是弓型 FBG 传感器的 1 号光栅和 2 号光栅的波长漂移量以及两组波长漂移量的差值。由此可以看出,随着温度的升高,1 号光纤光栅的波长漂移量和 2 号光纤光栅的反射波长漂移量的

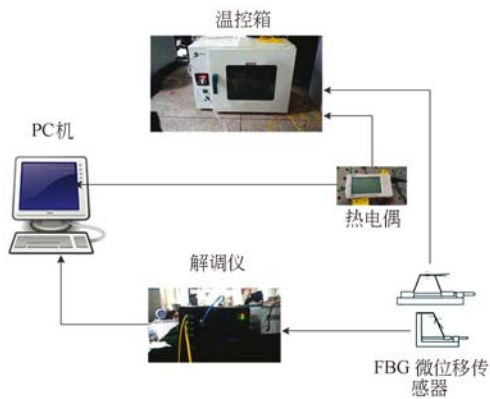


图 18 微位移传感器温度补偿实验实物图

Fig. 18 Temperature compensation experiment of micro displacement sensor

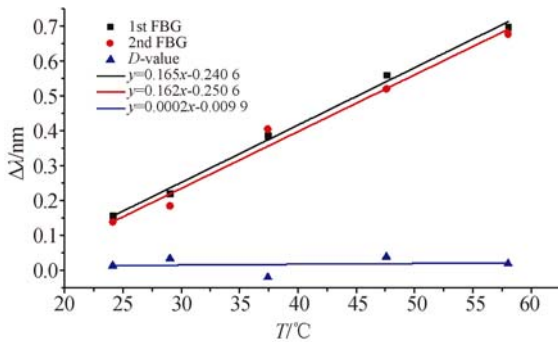


图 19 弓型传感器温度补偿实验

Fig. 19 Temperature compensation experiments of bow-shaped FBG sensor

增长趋势相同,1号光栅和2号光栅的温度灵敏度分别为 0.016 5 nm/°C,0.016 2 nm/°C。差分之后传感器的温度灵敏度为 0.000 2 nm/°C,与未做温度补偿之前的温度灵敏度相比,灵敏度明显降低,数据显示温度每上升 1 °C,波长漂移量不到 1 pm,由此说明传感器结构合理,可以进行有效的温度补偿。

图 20 的是半弓型 FBG 传感器的 1 号光栅和 2 号光栅的波长漂移量以及两组波长漂移量的差值。由此可以看出,随着温度的升高,1 号光纤光栅的反射波长漂移量和 2 号光纤光栅的反射波长漂移量的增长趋势大致呈 1 : 2 的速度增长,1 号光栅和 2 号光栅的温度灵敏度分别为 0.015 9 nm/°C,0.030 1 nm/°C。差分之后传感器的温度灵敏度为 0.0017 nm/°C,与未做温度补偿之前的温度灵敏度相比,灵敏度明显降低,数据显示温度每上升 1 °C,波长漂移量不到 2 pm,由此说明传感器结构合理,可

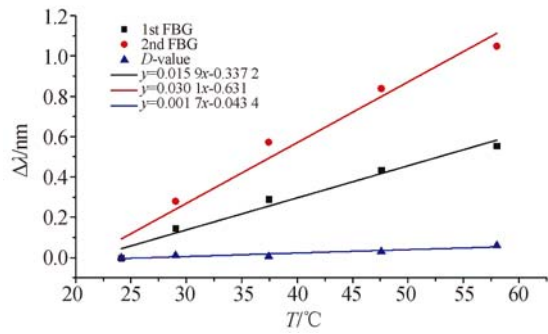


图 20 半弓型传感器温度补偿实验

Fig. 20 Temperature compensation experiments of half bow-shaped FBG sensor

以实现有效的温度补偿,但补偿效果没有弓型好。

### 5 结 论

本文介绍了一种弓型 FBG 微位移传感器,以及其衍生出的半弓型 FBG 微位移传感器。标定实验结果表明,弓型 FBG 微位移传感器在量程为 1 mm 时,传感器的灵敏度为 2.02 pm/μm,线性度为 2.92%,线性相关系数为 0.998 3,迟滞误差为 4.08%,重复性误差为 4.08%。在温度补偿实验中可以看出,温度补偿后传感器的温度灵敏度为 0.000 2 nm/°C。而半弓型微位移传感器在量程为 1 mm 时,由拟合直线可知传感器的灵敏度为 2.157 1 pm/μm,线性度为 0.40%,线性相关系数为 0.999 96,且三组实验的迟滞误差为 3.78%,重复性误差为 5.33%。温度补偿实验结果表明,温度补偿后传感器的温度灵敏度为 0.001 7 nm/°C。综上所述,两类 FBG 微位移传感器均能满足测量值稳定可靠、精度高、抗电磁干扰能力强、温度不敏感等要求。

对比两种结构,半弓型 FBG 传感器的线性度较好,而弓型 FBG 传感器的灵敏度与实际计算更加相符且温度补偿效果更好。与弓形件相比,半弓形件结构更为简单,干扰因素少,所以实验的线性度较好。弓形件上下壁位置的应变差别不大,更容易选择粘贴位置;而半弓形件 FBG 粘贴位置周围的应变变化较大,FBG 粘贴位置稍有偏差,半弓型 FBG 传感器的灵敏度就会有所改变,这是造成半弓型 FBG 传感器的灵敏度与理论计算的符合度、以及温度补偿效果都稍逊色于弓型 FBG 传感器的主要原因。

## 参考文献:

- [1] 董红磊. 精密加工与精密测量技术的发展[J]. 宇航计测技术, 2008, 28(6): 21-22, 26.  
DONG H L. Development of the precision finishing and measurement technique[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2008, 28(6): 21-22, 26. (in Chinese)
- [2] OTHONOS A, KALLI K, KOHNKE G E. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing[J]. *Physics Today*, 2000, 53(5): 61-62.
- [3] RAO Y J. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1999, 31(4): 297-324.
- [4] 赛耀樟, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于光纤光栅阵列和 MVDR 算法的声发射定位[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3012-3107.  
SAI Y ZH, JIANG M SH, SUI Q M, *et al.*. Acoustic emission location based on FBG array and MVDR algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3012-3107. (in Chinese)
- [5] 赵斌, 仲志成, 林君, 等. 基于光纤光栅传感地层应力的监测方法与实验[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 346-353.  
ZHAO B, ZHONG ZH CH, LIN J, *et al.*. Monitoring method and experiment for stratum stress based on fiber Bragg grating sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 346-353. (in Chinese)
- [6] HOREJŠ O, MAREŠ M, NOVOTNY L. Advanced modelling of thermally induced displacements and its implementation into standard CNC controller of horizontal milling center[J]. *Procedia CIRP*, 2012, 4: 67-72.
- [7] 韦宣, 乐静, 申阿维, 等. 用于微动工作台的光纤位移传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(1): 115-117.  
WEI X, YUE J, SHEN A W, *et al.*. Design of optical fiber displacement sensor for micromotion worktable[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(1): 115-117. (in Chinese)
- [8] ZHAO ZH G, ZHANG Y J, LI CH, *et al.*. Monitoring of coal mine roadway roof separation based on fiber Bragg grating displacement sensors[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 74: 128-132.
- [9] 杨秀峰, 于汇, 王鹏, 等. 基于杠杆原理的新型光纤光栅微位移传感器[J]. 光电子·激光, 2010, 21(8): 1156-1158.  
YANG X F, YU H, WANG P, *et al.*. A novel micrometric displacement fiber grating sensor based on the principle of lever[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(8): 1156-1158. (in Chinese)
- [10] SHEN CH Y, ZHONG CH. Novel temperature-insensitive fiber Bragg grating sensor for displacement measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 170(1-2): 51-54.
- [11] ZHONG CH, SHEN CH Y, CHU J L, *et al.*. A displacement sensor based on a temperature-insensitive double trapezoidal structure with fiber Bragg grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5): 1280-1283.
- [12] ZHANG Y N, ZHAO Y, WANG Q. Improved design of slow light interferometer and its application in FBG displacement sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 214: 168-174.
- [13] CHEN SH M, LIU Y, LIU X X, *et al.*. Self-compensating displacement sensor based on hydraulic structured transducer and fiber Bragg grating[J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(4): 351-356.
- [14] TAO S C, DONG X P, LAI B W. Temperature-insensitive fiber Bragg grating displacement sensor based on a thin-wall ring[J]. *Optics Communications*, 2016, 372: 44-48.
- [15] 郭永兴, 熊丽, 孔建益, 等. 滑动式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 50-58.  
GUO Y X, XIONG L, KONG J Y, *et al.*. Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 50-58. (in Chinese)
- [16] 李天梁, 谭跃刚, 张翔, 等. 受弯件上粘贴型光纤布拉格光栅的应变传递规律[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1254-1264.  
LI T L, TAN Y G, ZHANG X, *et al.*. Strain transfer factors of pasted FBG on bending part surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1254-1264. (in Chinese)

## 作者简介:



谭跃刚(1959—),男,教授,博士生导师,1983年、1989年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,2005年于武汉理工大学获得博士学位,主要从事机器人及其控制,控制理论与应用、机械装备动态监测技术与应用等方面的研究。E-mail: ygtan@whut.edu.cn

## 通讯作者:



陈宇佳(1992—),女,湖北十堰人,硕士研究生,2011年于湖北汽车工业学院获得学士学位,主要从事光纤光栅传感技术以及机床变形测量的研究。E-mail: 2319146336@qq.com