

文章编号: 0258-7025(2010)06-1481-04

用于二维倾斜测量的温度不敏感的光纤光栅传感器

倪 凯^{1,2} 徐海松¹ 何少灵²

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
(² 中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要 设计了一种用于二维平面内的倾斜角测量的光纤布拉格光栅(FBG)传感器,采用4根光纤布拉格光栅,可用来测量平面内二维方向的倾斜角度,且无需附加温度补偿装置即可消除环境温度的影响。实验结果表明该设计具有高灵敏性和测量精度,其倾斜角度的准确度和精度非常好,大约可以达到 0.009° 的精度。此外,该倾斜传感器的准确度和精度还可通过增加设计中的悬垂重物质量,减小每对光纤之间的夹角来提高。如果进一步缩小该设计的整体结构大小,还可消除因空气扰动引起的4个光纤布拉格光栅温度不一致而引起的误差,减小环境温度对测量结果的影响。

关键词 光纤布拉格光栅;光纤传感器;温度不敏感;倾斜度测量

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1481

Temperature-Independent Two-Dimensional Inclination Management with Fiber Bragg Grating Sensor

Ni Kai^{1,2} Xu Haisong¹ He Shaoling²

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)
(² Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract We designed a new type fiber Bragg grating (FBG) tilt sensor. It can be used to detect the magnitude as well as the direction of a two-dimensional inclination by using four FBGs, the temperature effect has been eliminated completely without additional temperature compensation schemes. The experimental results show that this sensor has high angle sensitivity and measurement resolution and the tilt angle accuracy and resolution of the FBG tilt sensor are very good. Resolution of about 0.009° has been achieved. Furthermore, the accuracy and resolution of the FBG tilt sensor can be easily increased by either using a heavier hanging weight, or decreasing the angle between a pair of hanging fibers. Furthermore, if the size of the designed structure is further decreased, the error caused by temperature difference of four FBGs due to air disturbance can be eliminated. It can reduce the environment temperature effect on metrical result.

Key words fiber Bragg gratings; fiber-optic sensors; temperature-insensitive; tilt measurement

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBGs)作为传感器已经广泛应用于温度^[1~3]、应变^[4~6]、压力^[7,8]、拉力^[9]、加速度^[10]和倾斜角度^[11~13]的测量。光纤布拉格光栅传感器的基本原理主要基于对响应于外界待测量(如

温度和应变)的光纤光栅反射波长的调制。倾斜传感器(也叫倾角计)用于测量一个对象相对于参考面或基准线的角偏转,经常应用于航空领域(如监测飞机着陆)和土木工程领域(如监测塔和桥梁支架的倾斜),也可适用于平台抬起、环状角铁指示、斜面倾角

收稿日期:2010-01-22;收到修改稿日期:2010-03-05

基金项目:国家自然科学基金(60807021)和浙江省自然科学基金(R1080087)资助课题。

作者简介:倪 凯(1977—),男,博士研究生,主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail:nk2004@cjl.u.edu.cn

导师简介:徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色与影像科学、光辐射测量与光谱技术、光电检测及控制技术方面的研究。E-mail:chsxu@zju.edu.cn(通信联系人)

的测量等。大多数传统的倾斜传感器是通过磁效应^[14]或电容效应^[15]将倾斜度转换成电信号来实现的。光学干涉量度法也可在同等的精度下用来进行倾斜度测量^[16]。与传统探测器相比,光纤光栅探测器具有与生俱来的自参考和多分复用的优点。光纤光栅倾斜传感器曾在文献[1]中报道过,其结构是利用了带两对光纤光栅的一个钟摆。用每一对光纤光栅的反射波长差编码信号,因此环境温度的影响可以被消除。这个探测器的结构比较复杂,其不稳定性或者来自于钟摆的不理想的外力传递会导致误差产生。本文提出了一种新型的基于4根光纤光栅的倾斜传感器,结构更简单、稳定,因此具有更高的测量准确度。初步的实验结果证实了此设计的可行性,测量也体现出高精度和准确度。

2 原 理

新型倾斜传感器是由一个通过4根等长的刻有光栅的光纤悬挂在圆盘上的重物组成,结构如图1所示。4根光纤与圆盘的粘接点均匀分布在圆盘边缘,因此,每一对具有对称位置的光纤光栅可以感知它们所属平面的倾斜,且没有交叉敏感性。

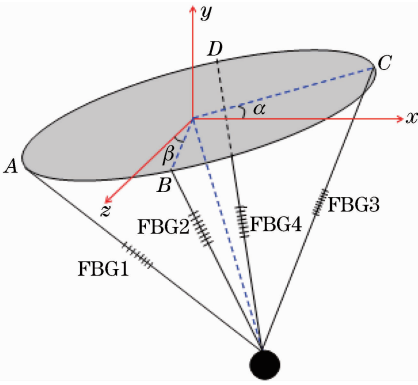


图1 光纤光栅倾斜传感器的结构图

Fig.1 Schematic diagram of the proposed FBG tilt sensor

圆盘保持水平,重物的位置通过4根等长光纤保持平衡,此时4根光纤上的预加应变是相等的。4根光纤光栅的初始应变和反射波长可以表示为 ϵ_0 和 λ_i ($i = 1, 2, 3, 4$)。相应的,一旦发生倾斜,则4根光纤的受力和应变将发生改变。如果假设一个倾斜度 α 出现在 x - y 平面,另一个倾斜度 β 出现在 y - z 平面,则重物的受力平衡方程为

$$SE(\epsilon_0 + \Delta\epsilon_3) \frac{r}{l} - SE(\epsilon_0 + \Delta\epsilon_1) \frac{r}{l} - mg \sin \alpha = 0, \quad (1)$$

$$SE(\epsilon_0 + \Delta\epsilon_4) \frac{r}{l} - SE(\epsilon_0 + \Delta\epsilon_2) \frac{r}{l} - mg \sin \beta = 0, \quad (2)$$

式中 S 为光纤的横截面面积, E 为光纤主要材质的杨氏模量, m 为重物的质量, g 为重力加速度, r 和 l 分别为圆盘的半径和重物到圆盘边缘的长度,则(1),(2)式可分别简化为

$$\Delta\epsilon_3 - \Delta\epsilon_1 = \frac{mgl}{SEr} \sin \alpha, \quad (3)$$

$$\Delta\epsilon_4 - \Delta\epsilon_2 = \frac{mgl}{SEr} \sin \beta. \quad (4)$$

写在单模熔融石英光纤上的光栅,由应变引起的波长偏移可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_i} = (1 - p_e) \Delta\epsilon_i, \quad (5)$$

式中 p_e 为光纤的光弹(性)系数。将(5)式分别代入(3),(4)式,可得到

$$\frac{\Delta\lambda_3}{\lambda_3} - \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = \frac{mgl}{SEr} (1 - p_e) \sin \alpha, \quad (6)$$

$$\frac{\Delta\lambda_4}{\lambda_4} - \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = \frac{mgl}{SEr} (1 - p_e) \sin \beta, \quad (7)$$

如果假设 $\Delta\lambda_i \ll \lambda_i$,并且 $\lambda_1 \approx \lambda_3, \lambda_2 \approx \lambda_4$,那么(6),(7)式可以重新表示为

$$\Delta(\lambda_3 - \lambda_1) = \frac{mgl}{SEr} (1 - p_e) \lambda_1 \sin \alpha, \quad (8)$$

$$\Delta(\lambda_4 - \lambda_2) = \frac{mgl}{SEr} (1 - p_e) \lambda_2 \sin \beta, \quad (9)$$

(8),(9)式表明对于小角度的倾斜,倾斜角对应于波长差是线性成比例的。需要重点说明的是此探测器的灵敏度可以通过改变 r 和 l 或者重物质量 m 的值,比较容易地进行调整。并且光纤光栅的应变通过悬垂物直接产生,无需额外的外力转换,因此实验的误差能够大大减少,达到测量的高准确性。

采用基于光纤光栅的探测器的一个普遍的问题就是热干扰。因为光纤光栅对应变和温度是同样敏感的,而本文设计的光纤光栅传感器克服了这个问题。通过两根对称的光纤光栅的波长偏移差来编译倾斜角度,因为它们具有相同的热敏感性,环境温度的改变对于两根光纤光栅是同向的,具有相等量值。因此两根光纤光栅的波长偏移差是不受温度影响的。

3 实验结果和讨论

倾斜测量的实验结构示意图如图2所示。采用相位模板法将光纤光栅写入载氢的单模光纤。无外力时自由状态的光纤光栅的反射波长分别为1536.66(λ_1),1540.75(λ_2),1544.35(λ_3)和1559.68

(λ_1) nm, 光纤光栅倾斜传感器被安装在一个可以旋转的支架上, 4 根光纤光栅的波长偏移用一台解调仪来测量。

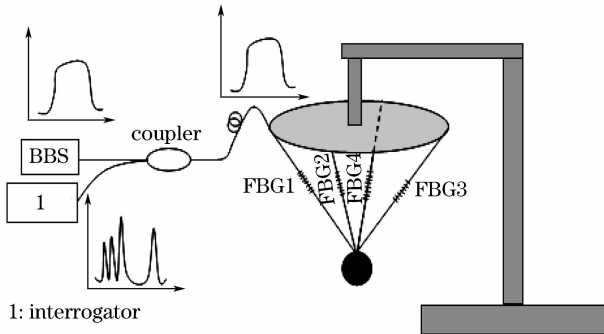


图2 倾斜测量的实验原理图

Fig. 2 Experimental setup for tilt measurement

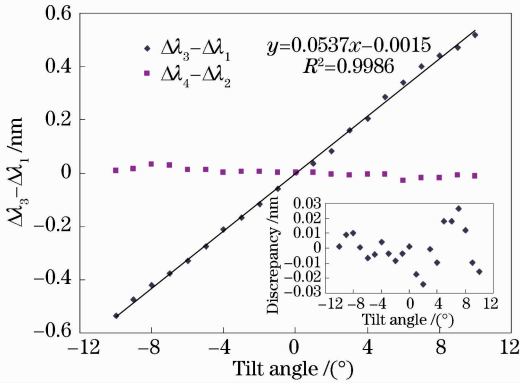


图3 测量的 λ_1 和 λ_3 之间的波长差与 $x-y$ 平面内的倾斜角 α 的关系图(内插图显示了测量值与计算值在不同倾斜角位置的误差)

Fig. 3 Measured wavelength separation between λ_1 and λ_3 versus tilt angle α in $x-y$ plane. The inset shows the discrepancy in the wavelength separation between the measured and calculated data from the linear fitting equation

实验中所采用的参数为： $m=0.1$ kg, $l=21$ cm 和 $r=8$ cm, $y-z$ 平面内的倾斜度 β 保持 0, 出现在 $x-y$ 平面内的倾斜度 α 在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 范围内变化, 测量的波长差 $\Delta\lambda_3 - \Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_4 - \Delta\lambda_2$ 与倾斜角的关系如图 3 所示。同样的, $x-y$ 平面内的倾斜度 α 保持 0, 出现在 $y-z$ 平面内的倾斜度 β 在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 范围内变化, 测量的波长差 $\Delta\lambda_3 - \Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_4 - \Delta\lambda_2$ 与倾斜角的关系如图 4 所示。实验结果表明波长差与倾斜角之间具有良好的线性关系, 测量和计算的倾斜角灵敏度分别为 0.0537 和 0.0509 nm/°。测量值与线性方程的计算值之间的偏差小于 0.015 nm。因为解调仪的波长分辨率为 0.5 pm, 可以保证大约 0.009° 的倾斜角精度。

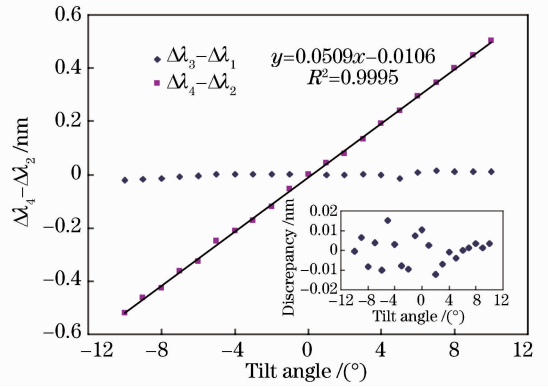


图4 测量的 λ_2 和 λ_4 之间的波长差与 $y-z$ 平面内的倾斜角 β 的关系图(内插图显示了测量值与计算值在不同倾斜角位置的误差)

Fig. 4 Measured wavelength separation between λ_2 and λ_4 versus tilt angle β in $y-z$ plane. The inset shows the discrepancy in the wavelength separation between the measured and calculated data from the linear fitting equation

光纤光栅传感器的标准温度系数为 10 pm/°C。对于消除或减少倾斜传感器的热效应是非常重要的, 通过将此光纤光栅倾斜传感器放在一个温控箱里检测温度对其性能的影响。温控箱的温度从 5°C 升高到 45°C , 在此温度变化范围内, 测量了 4 根光纤光栅的波长偏移, 测量结果如图 5 所示。从中可看出, 波长偏移与温度变化是呈线性比例的。两对光纤光栅的波长偏移差与温度变化的关系如图 6 所示, 两者之间没有必然联系, 说明该探测器是不受温度影响的。大约 ± 10 pm 的波长变化主要是因为温控箱的风扇带动了空气流动, 引起了重物的轻微摆动, 造成了数值的小范围波动。在测量中, 由于 4 个光纤光栅的空间位置不一致, 空间的空气扰动引起的温度和振动会造成 4 个光纤光栅温度不一致, 引起误差。可通过进一步缩小该设计的结构大小来消除影响。因为通常情况下, 写入光纤的光栅长度在 $10 \sim 25$ mm 之间, 因此该模型整体结构大小可达到 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 甚至更小, 如此小的空间范围, 因为空气扰动引起的温度和振动对于测量的影响可忽略不计。

4 结 论

提出了一种新型的光纤光栅倾斜传感器, 其以 4 根光纤光栅作为传感元件, 能够不受环境温度的影响, 可用来测量平面内二维方向的倾斜度。初步的实验结果表明此倾斜传感器的角度准确度和精度非常好。大约可以达到 0.009° 的精度。需要重点强

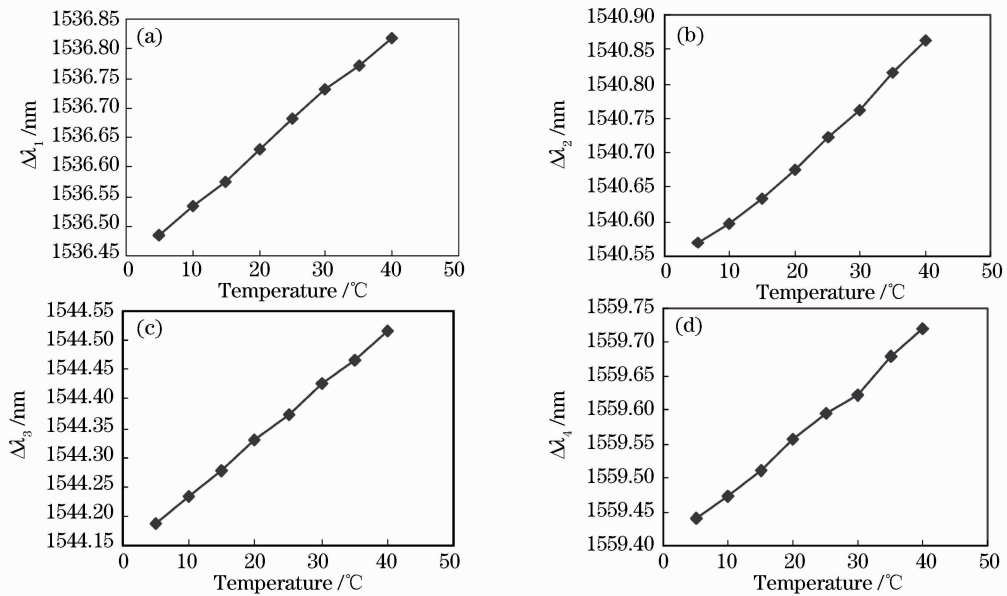


图 5 4 个 FBG 的波长偏移差与温度变化的关系图

Fig. 5 Wavelength shift of the four FBGs versus temperature

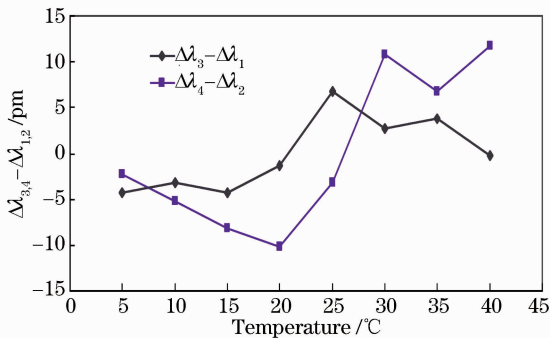


图 6 倾斜角不变时两对光纤光栅的波长偏移差与温度变化的关系图

Fig. 6 Change in wavelength separations of the FBG tilt sensor at constant tilt angle versus temperature

调的是,此倾斜传感器的准确度和精度可通过增加重物质量,减小每对光纤之间的夹角来达到。还可通过进一步缩小该设计的结构大小来减小因为空气扰动引起的光纤光栅温度不一致对于测量的影响。

参 考 文 献

- Li Kuo, Zhou Zhen'an, Liu Aichun *et al.*. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor at high temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1):249~251
李 阔,周振安,刘爱春 等. 一种高温下高灵敏光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1):249~251
- Li Hongqiang, Yu Xiaogang, Miao Changyun *et al.*. Research of intelligent clothing for body temperature monitoring based on distributed optical fiber Bragg grating sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1):208~212
李鸿强,于晓刚,苗长云 等. 光纤布拉格光栅人体测温的关键问题研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1):208~212
- Cao Bin, Ou Pan, Jia Ming *et al.*. An innovative temperature-compensate package for fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12):1959~1961

- 曹 彬,欧 攀,贾 明 等. 一种新型光纤光栅温度补偿装置 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12):1959~1961
- W. Jin, W. C. Michie, G. Thursby *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature: error analysis [J]. *Opt. Eng.*, 1997, **36**:598~609
- S. W. James, M. L. Dockney, R. P. Tatam. Simultaneous independent temperature and strain measurement using infiber Bragg grating sensors [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**:1133~1134
- A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**:1442~1463
- Yang Huayong, Cheng Yusheng, Hu Yongming *et al.*. Pressure sensing characteristics of panda fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1):157~162
杨华勇,程玉胜,胡永明 等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1):157~162
- M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fiber grating high pressure sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**:398~399
- W. Zhang, X. Dong, Q. Zhao *et al.*. FBG-type sensor for simultaneous measurement of force (or displacement) and temperature based on bilateral cantilever beam [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**:1340~1342
- T. A. Berkoff, A. D. Kersey. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**:1677~1679
- B.-O. Guan, H.-Y. Tam, S.-Y. Liu. Temperature independent fiber Bragg grating tilt sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**:224~226
- X. Dong, C. Zhan, K. Hu *et al.*. Temperature-insensitive tilt sensor with strain-chirped fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**:2394~2396
- B. Peng, Y. Zhao, Y. Zhao *et al.*. Tilt sensor with FBG technology and matched FBG demodulating method [J]. *IEEE Sensors J.*, 2006, **6**:63~66
- R. Olaru, C. Cotae. Tilt sensor with magnetic liquid [J]. *Sens. Actuators A*, 1997, **59**:133~135
- Liquid capacitive gravity based inclinometer, <http://www.riekerinc.com/Inclinometer.htm>
- D. Inaudi, B. Glisic. Development of a fiber-optic interferometric inclinometer [C]. *SPIE*, 2002, **4694**:36~42