

文章编号: 0253-2239(2010)07-2104-04

基于光纤布拉格光栅的温度不敏感的倾斜传感器

倪 凯^{1,2} 徐海松¹ 董新永² 金永兴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 提出了一种新颖的光纤布拉格光栅(FBG)倾斜传感器设计,采用4根反射波长不同的FBG,该结构更简单和稳定,可用来测量平面内两维方向的倾斜角度,具有高灵敏性和测量精度,且无需附加的温度补偿装置即可消除环境温度的影响。初步的实验结果证实了该设计的可行性,表明此倾斜传感器的角度准确度和精度非常好,可以达到约 0.3° 的精度。需要强调的是,此倾斜传感器的性能还可进一步提高,通过增加悬垂物重量,或减小每对光纤之间的夹角来提高准确度和精度。

关键词 光纤布拉格光栅(FBG);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/AOS20103007.2104

Temperature-Independent Fiber Bragg Grating Tilt Sensor

Ni Kai^{1,2} Xu Haisong¹ Dong Xinyong² Jin Yongxing²

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 A novel fiber Bragg grating (FBG) tilt sensor with simple and stable structure is proposed to detect the magnitude as well as the direction of a two-dimensional inclination by using four FBGs with different reflective wavelengths. High angle sensitivity and measurement resolution are achieved and the temperature effect is eliminated completely without additional temperature compensation schemes. Preliminary results verified the feasibility of the proposed idea and showed that the tilt angle accuracy and resolution of the FBG tilt sensor are very good. Resolution of about 0.3° has been achieved. It is important to emphasize that the performance of the FBG tilt sensor can be further improved. The accuracy and resolution of the sensor can be easily increased by either using a heavier weight or decreasing the angle between the hanging fibers.

Key words fiber Bragg grating (FBG); fiber-optic sensors; temperature-insensitive; tilt measurement

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器已经广泛应用于温度^[1]、应变^[2~4]、压力^[5]、拉力^[6]、加速度^[7]和倾斜角度^[8~10]的测量。FBG传感器的基本原理主要基于外界待测量对于反射波长的调制,如温度和应变等。倾斜传感器(也叫角度计)用于测量一个对象相对于参考面或基准线的角偏转。它们也经常用于

航空领域(如监测飞机着陆)和土木工程(如监测塔和桥梁支架的倾斜),也可适用于斜面倾角的测量等。大多数传统的倾斜传感器是通过磁效应^[11]或电容效应^[12]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^[13]。和传统探测器相比,FBG探测器具有自参考能力和复用能力强等优点^[14]。FBG倾斜传感器

收稿日期: 2009-08-12; 收到修改稿日期: 2009-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(60807021)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光辐射测量与光谱技术等方面的研究。E-mail: chsxu@zju.edu.cn(通信联系人)

的原理^[8]是采用了带两对 FBG 的一个钟摆的结构,每一对 FBG 的反射波长差用来编码信号,所以温度的影响可以被消除。这个探测器的结构,实际上比较复杂,倾斜产生的力从钟摆到作用到 FBG 需要经过多个力学传递结构,传感器活动部分之间的摩擦、不稳定性及力传递过程中的损耗等会导致产生误差,降低传感器的测量精度。本文报道一种新型的基于 4 根 FBG 的倾斜传感器,具有更简单、更稳定的结构,并通过实验对此设计的可行性、高精度和准确度进行了验证。

2 原 理

所提出的倾斜传感器如图 1 所示,包含 4 根反射波长不同的 FBG,其上端的尾纤固定在一个与被测倾斜平面平行的圆盘的边缘,各固定点间隔均匀,下端的尾纤则共同悬挂一个具有一定重物的重物,4 根光纤的受力部分等长且包含光纤光栅。一旦发生倾斜,则 4 根光纤的受力和应变将发生改变。每一对具有相对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。

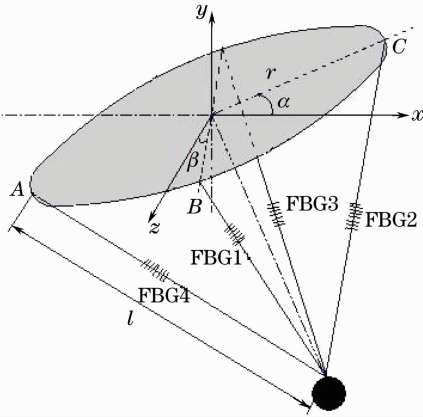


图 1 FBG 倾斜传感器结构

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed FBG tilt sensor

在没有倾斜的情况下,重物的位置通过 4 根等长光纤保持平衡,4 根光纤上的初始应变是相等的,可以表示为 ϵ_0 。应变变化分别表示为 $\Delta\epsilon_{i=1,2,3,4}$ 。此时,4 根 FBG 的反射波长表示为 $\lambda_{i=1,2,3,4}$ 。当有一个任意的二维倾斜发生时,可以将其分解为正交的两个平面内的倾斜角度。如果假设在 $x-y$ 平面(FBG2 和 4 所在的平面)的倾斜度为 α ,在 $y-z$ 平面(FBG1 和 3 所在的平面)的倾斜度为 β ,则对于重物的受力平衡方程为

$$SE(\epsilon_0 + \Delta\epsilon_1)r/l - SE(\epsilon_0 + \Delta\epsilon_3)r/l - mg \sin \beta = 0, \quad (1)$$

$$SE(\epsilon_0 + \Delta\epsilon_2)r/l - SE(\epsilon_0 + \Delta\epsilon_4)r/l - mg \sin \alpha = 0, \quad (2)$$

式中 S 表示光纤的横截面的面积, E 表示光纤材料的杨氏模量, m 表示重物的质量, g 是重力加速度, r 和 l 分别表示圆盘的半径和重物到圆盘边缘的长度,则(1)式和(2)式可分别简化为

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

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

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)式和(4)式,可得到

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

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

假设 $\Delta\lambda_i \ll \lambda_i$ 并且 $\lambda_1 \approx \lambda_3, \lambda_2 \approx \lambda_4$ 等,那么(6)式和(7)式最后可以重新表示为

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

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

(8)式和(9)式表明对于小角度的倾斜,倾斜角对应于波长差是成线性比例的。需要重点说明的是此探测器的灵敏性可以通过改变 r, l 或者 m 进行调整。并且 FBG 的受力直接来源于悬垂物,无需额外的外力转换,因而实验的误差能够尽可能的避免,达到测量的高准确性。

采用基于 FBG 的探测器的一个普遍存在的问题就是温度交叉敏感效应。因为 FBG 对应变和温度都是敏感的,所以单从波长漂移不能区分出是温度还是应变的作用。设计的这个 FBG 传感器基本克服了这个困难,通过两根 FBG 之间的波长偏移差来测量倾斜角度,温度的改变对于两根 FBG 的作用是相同的,因为它们具有相同的温度响应。因此两根 FBG 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。FBG 是将载氢的单模光纤采用相位模板法进行制备的。为了证实此设计的可行性,我们简化了装置,只用了

两根 FBG 粘接在圆盘的边缘,彼此相隔 180° 。无外力时的自由状态的 FBG 的反射波长分别为 1562.69 nm 和 1566.89 nm ,传感器被安装在一个可以旋转的支架上,FBG 的波长偏移用一台光谱仪 (OSA) 来测量。

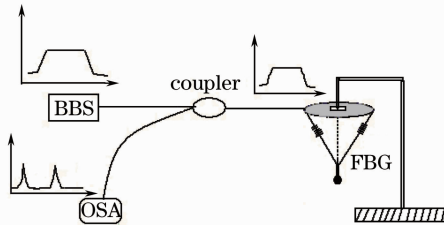


图 2 偏移测量的实验装置(BBS:宽带源)

Fig. 2 Experimental setup for tilt measurement

(BBS: broad band source)

在实验操作中,参数值如下: $m=0.1\text{ kg}$, $l=21\text{ cm}$ 和 $r=8\text{ cm}$,倾斜角从 -6° 升到 6° ,再从 6° 降到 -6° 。测量的波长差 $\Delta(\lambda_1 - \lambda_2)$ 对应于倾斜角如图 3 所示。实验结果表明了良好的线性关系,测量的和计算的倾斜角灵敏度分别是 $0.0320\text{ nm}/(^{\circ})$ 和 $0.0327\text{ nm}/(^{\circ})$,从 -6° 升到 6° ,再从 6° 降到 -6° 的两次测量误差不超过 0.011 nm 。因为光谱仪的波长精度为 0.01 nm ,约 0.3° 倾斜角精度可以被保证。

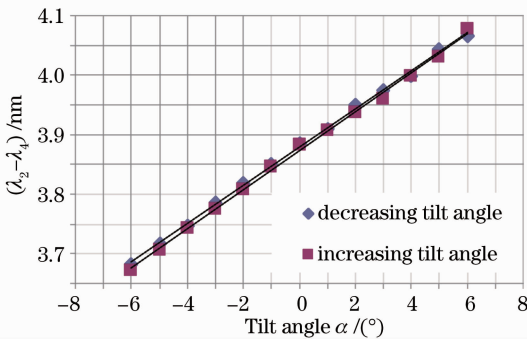


图 3 λ_2 与 λ_1 波长差与倾斜角的关系

Fig. 3 Measured wavelength separation between λ_1 and λ_2 versus tilt angle

FBG 传感器的温度系数通常为 $10\text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。消除或减少倾斜传感器的温度交叉敏感效应对于实际应用是非常重要的,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 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 。测量结果如图 4 所示,从中可看出,波长偏移差与温度变化基本没有关联。大约 $\pm 6\text{ pm}$ 的波长变化主要因为温控箱的风扇引起,风扇带动了空气流动,引起了悬垂物的轻微摆动。

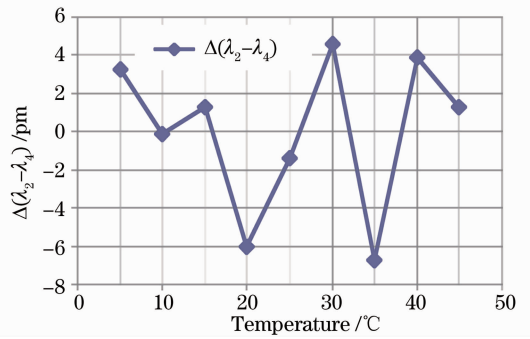


图 4 波长差与温度的关系

Fig. 4 Change in wavelength separations of the FBG tilt sensor at constant tilt angle versus temperature

4 结 论

提出了一种新型的基于 4 根 FBG 传感组件的对温度不敏感的 FBG 倾斜传感器。此倾斜传感器可用来测量二维方向的倾斜度。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。可达约 0.3° 的精度。需要强调的是,此倾斜传感器的性能可进一步提高,通过增加悬垂物重量,或减小每对光纤之间的夹角来提高准确度和精度。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 W. Jin, W. C. Michie, G. Thursby *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature: error analysis [J]. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(2): 598~609
- 3 S. W. James, M. L. Dockney, R. P. Tatam. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fiber Bragg gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(12): 1133~1134
- 4 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 5 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fiber grating high pressure sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4): 398~399
- 6 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**(12): 1340~1342
- 7 T. A. Berkoff, A. D. Kersey. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(12): 1677~1679
- 8 B. O. Guan, H. Y. Tam, S. Y. Liu. Temperature independent fiber Bragg grating tilt sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 224~226
- 9 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**(11): 2394~2396
- 10 B. Peng, Y. Zhao, Y. Zhao *et al.*. Tilt sensor with FBG

- technology and matched FBG demodulating method[J]. *IEEE Sensors J.*, 2006, **6**(1): 63~66
- 11 R. Olaru, C. Cota. Tilt sensor with magnetic liquid [J]. *Sens Actuators A*, 1997, **59**(3): 133~135
- 12 Liquid capacitive gravity based inclinometer[EB/OL]. [2009-06-10]. <http://www.riekerinc.com/Inclinometer.htm>
- 13 D. Inaudi, B. Glisic. Development of a fiber-optic interferometric inclinometer[C]. *SPIE*, 2002, **4694**: 36~42
- 14 Huang Jingtang, Huang Xuguang, Zhao Huawei. Quasi-distributed fiber Bragg grating sensor using the interrogation of arrayed waveguide grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2067~2071
- 黄景堂, 黄旭光, 赵华伟. 阵列波导光栅解调的准分布式光纤光栅传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2067~2071