

文章编号:1004-4213(2011)11-1667-4

具有温度补偿的光纤位移传感器

崔留住, 江毅, 刘有海

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要:位移测量是结构健康检测的重要参量之一. 本文提出了一种双悬臂梁粘贴光纤光栅的位移传感器, 它将位移变化转换成两只光纤光栅的波长移动, 实现对位移量的绝对测量. 通过引入对称补偿光纤光栅的方法解决了温度与位移交叉敏感的问题. 推导了位移传感器的工作原理, 完成了相关实验, 并分析了传感器所产生误差的来源. 实验结果表明, 在量程为 20 mm 的时候, 位移灵敏度为 123 pm/mm, 温度补偿前, 温度对位移的影响是 234.9 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$; 温度补偿后, 温度对位移的影响为 17 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$. 本位移传感器量程大、线性好、准确度高, 不易受恶劣环境影响.

关键词:光纤光栅; 位移传感器; 温度补偿

中图分类号: TP212

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114011.1667

0 引言

结构健康监测在土木工程中的地位十分重要, 及时消除安全隐患能有效地减少或避免灾难的发生. 近年来, 我国桥梁(跨海大桥、城市立交桥)垮塌、隧道塌方、岩土滑坡等事故频发, 及时准确地检测土木结构中的裂缝大小变化、相对位置滑动等位移量显得更加重要. 传统的电测量方式由于其有较大的局限性, 难以实现长期、稳定、远距离的测量, 而光纤光栅传感器以其独有的优势已经得到了广泛的应用^[1].

目前, 国内外对光纤光栅位移传感器做了很多工作: 采用弯曲的弹性梁构成的位移传感器^[2-3], 把位移通过梁(弹片)的形变转换到光栅的应变, 通过解调光栅波长漂移来测量相应的位移, 缺点是量程较小, 又难于封装成适合工程应用的传感器; 何俊^[4]等设计的光纤光栅位移传感器, 采用了悬臂梁结构, 测量精确度达到了 0.08 mm; 直接拉光栅法^[5], 将光栅一端固定在固定端, 另一端连接到移动端, 通过导轨控制移动端的横向移动, 虽然其灵敏度很高, 但是量程很小(0.6 mm), 且容易把光栅拉断; 双拱形梁结构的传感器^[6], 通过分析光栅反射光谱, 测量 3 dB 带宽来解调位移, 虽然去除了温度的影响, 但是对光源稳定性和解调仪要求较高; 悬臂梁结构的传感器^[7], 采用了双光纤光栅粘贴在悬臂梁上下表面来实现温度补偿, 但是, 由于传感器尺寸较大, 楔块

在水平滑动时, 容易引起竖直方向的移动, 在相同水平位移的时候, 竖直方向的微小移动会改变悬臂梁的挠度, 使光栅波长产生变化, 降低传感器的测量准确度.

本文采用了变截面积的等强度悬臂梁结构, 传感器结构简单、成本低、易加工, 悬臂梁表面轴向应变灵敏且大小相等, 不易引起粘贴在其表面的光纤光栅产生啾啾. 双悬臂梁结构使传感器性能更加稳定: 用两只光栅反射波长的差来标定位移, 既实现了对温度的补偿, 又提高了位移灵敏度, 同时也可去除滑块的横向偏移对测量准确度的影响. 由于两只光栅分别粘贴在两个梁的下表面, 当滑块有横向偏移时, 两只光栅波长漂移方向相同, 即同时变大或者变小, 又因结构对称, 且两只光栅性能相同. 这就使得两只光栅波长变化量大小相等, 将两个光栅的反射波长做差之后就去除了滑块横向移动导致的误差.

1 传感器的结构与封装

光纤光栅位移传感器如图 1. 采用两个相同的等强度悬臂梁结构, 将两只光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)分别粘贴在两个悬臂梁的同一侧面. 外界位移通过传动杆使滑块向左移动, 由于滑块两个侧面都是斜面, 这就使悬臂梁产生弯曲, 粘在悬臂梁上的光纤光栅也随之发生形变(FBG1 拉伸、FBG2 压缩). 通过解调光栅波长, 就可得到相应的位移. 由于两个悬臂梁位置较近, 处于同一环境中

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51075037)和教育部博士点基金(No. 20101101110014)资助

第一作者: 崔留住(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器的研制. Email: cuiuzhu@163.com

导师(通讯作者): 江毅(1967-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光纤传感及光电子技术等. Email: bitjy@bit.edu.cn

收稿日期: 2011-06-22; 修回日期: 2011-08-18

时,可认为粘贴在两个梁上的光栅所受温度作用相同,通过对两个光栅波长做差就可以去除温度变化对位移的影响。

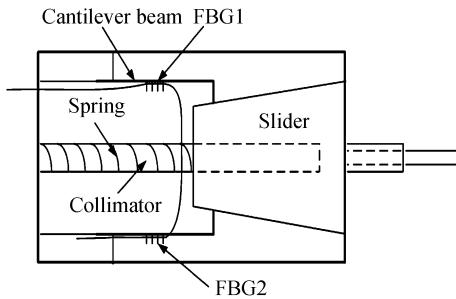


图1 位移传感器结构
Fig.1 FBG displacement sensor structure

传感器封装的关键是将光纤光栅刚性的粘贴在等强度悬臂梁上。其方法是:先将悬臂梁打磨抛光,去除表面杂质,增加摩擦力,这样有利于胶的充分粘接,增加胶的牢固度;当悬臂梁形变时光纤光栅与悬臂梁之间不会有相对滑动,最大限度地反映悬臂梁表面的应变大小。粘贴光纤光栅使用的是环氧树脂胶,由于胶在固化之后会有一定的收缩,所以在粘胶过程中要对光纤光栅施加预应力。光栅粘贴好之后组装传感器,实物如图2。

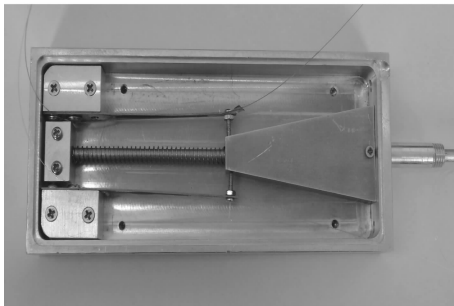


图2 传感器实物
Fig.2 The sensor picture

2 传感器工作原理

采用双光纤光栅结构的位移传感器,由于两个光栅材料相同,处于同一环境中的时候,温度变化相同,且应变大小相等方向相反,两光栅波长差变化^[4]

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = 2(1 - P_e)\epsilon \quad (1)$$

式中, P_e 为光纤的有效弹光系数; ϵ 为轴向应变。可见,波长变化只和应变相关。对于等强度悬臂梁,当力 F 作用于自由端时,等强度悬臂梁表面某一位置的应变可按式(2)计算^[8]

$$\epsilon = \frac{6(L-x)F}{EAh} \quad (2)$$

式中, ϵ 为距离固定端为 x 处的应变大小, L 为梁的长度, x 为某一位置到固定端的距离, E 为梁的材料弹性模量, A 为梁的截面积, h 为梁的厚度。

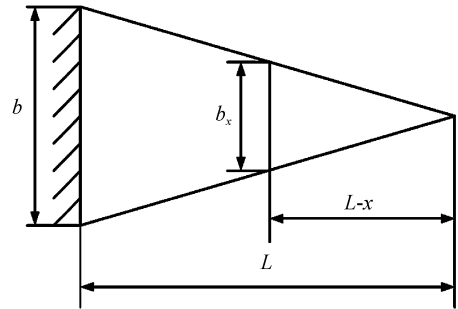


图3 悬臂梁结构
Fig.3 Cantilever beam configuration

梁的截面积为

$$A = b_x h = hb \frac{L-x}{L} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得到

$$\epsilon = \frac{6LF}{bh^2E} \quad (4)$$

可见,力 F 作用于悬臂梁自由端时,梁表面上各处的应变大小相等。悬臂梁自由端挠度^[7]

$$\omega = \frac{6L^3F}{bh^3E} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)中,得等强度悬臂梁表面应变计算公式

$$\epsilon = \frac{h}{L^2}\omega \quad (6)$$

在滑块侧面倾斜角度不大时有 $\omega = X \tan \theta$ (X 是位移, θ 是滑块侧面倾斜角度),将式(6)代入式(1),得

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = 2(1 - P_e) \frac{h \tan \theta}{L^2} X \quad (7)$$

由式(7)知光纤光栅波长漂移量与滑块位移成线性关系。

设计的传感器量程为40 mm,为了避免位移过大时光纤光栅与胶之间产生滑动,将满量程应变设计为 $2000 \mu\epsilon$ 。悬臂梁太长会增加传感器尺寸,太短会影响弹性恢复,又考虑到量程,选取悬臂梁长度为45 mm,厚0.6 mm(实验室现有材料),由式(6)可得 $\tan \theta = 0.17$ 。把 $\tan \theta = 0.17$, $h = 0.6$ mm, $L = 45$ mm, $P_e = 0.22$, $\lambda_B = 1540$ nm代入式(7)中,得到理论上的位移灵敏度系数为118.5 pm/mm,本课题组开发的解调仪的波长测量分辨率为1 pm,那么对应的位移测量设计分辨率为8.4 μ m。

3 实验结果及分析

光纤光栅传感器的波长移动解调使用了本课题组实验室研制的光纤光栅信号解调仪FS-3000D^[9]。该仪器使用了光纤可调谐Fabry-Perot滤波器(Fiber Fabry-Perot Tunable Filter, FFP-TF)作为波长扫描器件,可同时对4通道,每通道达20只光

纤光栅进行测量. FFP-TF 也是由本实验室开发,其主要参量为:自由光谱区 $FSR = 70 \text{ nm}$,线宽 0.15 nm ,损耗 3 dB . 以之为基础开发的解调仪达到的波长测量分辨率为 1 pm .

将位移传感器固定好,从位移传感器自由状态(位移为零)开始,用游标卡尺对传感器位移大小进行标定,分别选取 3 mm 和 5 mm 为位移递增量,逐步加到传感器上,同时用实验室开发的光纤光栅解调仪对传感器的反射波长进行解调. 这样,得到两组波长和位移的关系如图 4.

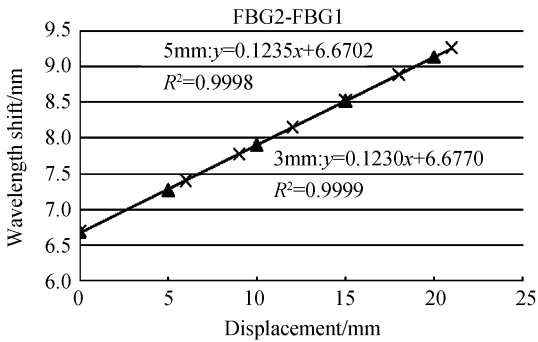


图 4 波长-位移曲线关系
Fig. 4 The curve of wavelength changed with displacement

实验测得传感器位移灵敏度为 123 pm/mm , 1 pm 的波长测量分辨率对应的位移测量分辨率为 $8.1 \text{ }\mu\text{m}$,与理论设计值 $8.4 \text{ }\mu\text{m}$ 相比,有一定误差. 引起误差的原因主要有:结构参量的测量误差;理论计算时参量取值的误差.

由于光纤光栅封装在金属基片上,温度变化时,也要受到基片热胀冷缩的影响,其波长变化与温度的关系^[10-11]可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = [(1 - P_e)(\alpha_s - \alpha) + (\alpha + \xi)]\Delta T \quad (8)$$

式中, α_s 为基片的热膨胀系数, α 为光纤热膨胀系数, ξ 为热光系数, P_e 为有效弹光系数. 对一般石英光纤, $\alpha = 0.5 \times 10^{-6}/\text{ }^\circ\text{C}$, $\xi = 7 \times 10^{-6}/\text{ }^\circ\text{C}$, $P_e = 0.22$, 而基片(悬臂梁)材料是铍青铜, $\alpha_s = 1.8 \times 10^{-5}/\text{ }^\circ\text{C}$, 光纤光栅波长 $\lambda_B = 1540 \text{ nm}$, 将上述参量代入式(8)中,可得理论上单个光栅温度灵敏度系数为 $32.57 \text{ pm}/\text{ }^\circ\text{C}$,理想的温度补偿效果(两个光栅波长做差)是 $0 \text{ pm}/\text{ }^\circ\text{C}$.

把位移传感器放入温控箱中,在 $(20 \sim 50) \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,以 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 为间隔,用光纤光栅解调仪监测,分别测量两只光栅的波长-温度曲线关系,结果如图 5.

由图 5 可见,温度补偿之前,两只光纤光栅在粘贴到铍青铜材质的悬臂梁上后,其温度系数分别是 $29.6 \text{ pm}/\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $27.5 \text{ pm}/\text{ }^\circ\text{C}$. 若用单个光纤光栅作为位移传感器,其对应的位移-温度系数分别是

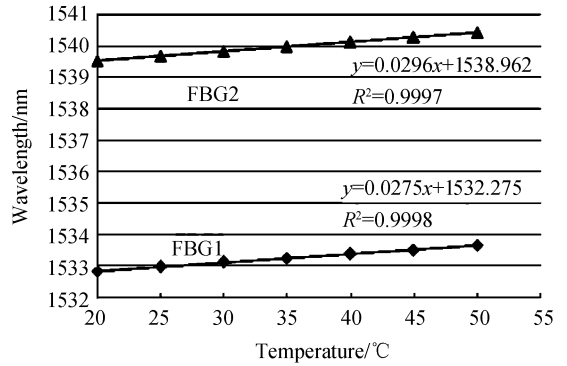


图 5 单个光纤光栅波长-温度关系
Fig. 5 Wavelength and temperature relations of single FBG

239.76 $\mu\text{m}/\text{ }^\circ\text{C}$ 和 222.75 $\mu\text{m}/\text{ }^\circ\text{C}$. 可见,用单只光纤光栅作位移传感器受温度影响很大. 两只光栅温度系数有一定差别的原因是两只光栅源自不同的厂家,所使用的光纤不同的缘故. 温度补偿之后的波长-温度关系如图 6,温度灵敏度为 $2.1 \text{ pm}/\text{ }^\circ\text{C}$,对应的位移-温度系数是 $17.01 \text{ }\mu\text{m}/\text{ }^\circ\text{C}$,不到补偿之前的十分之一,起到了温度补偿的作用,但是效果不理想. 主要原因为:两个光纤光栅热膨胀系数不完全相同;粘贴光纤光栅用的胶量多少,粘贴长度也不完全相同,当温度变化时导致悬臂梁金属基底对光纤光栅应变大小的不同.

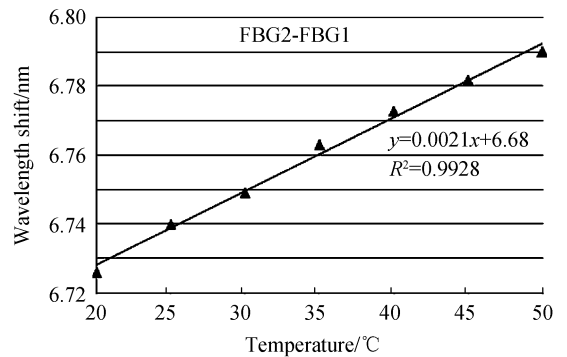


图 6 补偿后的波长-温度曲线关系
Fig. 6 Relationship between wavelength and temperature after compensation

4 结论

本文研究了一种光纤光栅位移传感器,提出了解决温度、应变交叉敏感的方法,并搭建了传感系统,实验结果表明了该方案的可行性. 在量程为 20 mm 时,位移测量准确度能达到 $8.1 \text{ }\mu\text{m}$,温度补偿之前,温度灵敏度为 $29 \text{ pm}/\text{ }^\circ\text{C}$,相应位移-温度系数 $234.9 \text{ }\mu\text{m}/\text{ }^\circ\text{C}$;进行温度补偿后,温度灵敏度为 $2.1 \text{ pm}/\text{ }^\circ\text{C}$,相应位移-温度系数为 $17.01 \text{ }\mu\text{m}/\text{ }^\circ\text{C}$.

参考文献

[1] SUN Man. Health monitoring of engineering structures using fiber bragg grating sensing technology[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005: 1-14.

- 孙曼. 光纤 Bragg 光栅传感技术用于工程结构安全监测的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2005: 1-14.
- [2] FALCIAI R, TRONO C. Curved elastic beam with opposed fiber-Bragg gratings for measurement of large displacements with temperature compensation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, **5**(6): 1310-1314.
- [3] TANG Li, DING Li-hua, TANG Zi-feng. Study of new optical fiber bragg grating sensor for displacement [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009(s1): 182-183.
唐俐, 丁利华, 汤紫峰. 一种基于光纤光栅新型位移传感器的研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2009(s1): 182-183.
- [4] HE Jun, DONG Hui-juan, ZHOU Zhi, *et al.* A kind of new displacement sensor based on FBG for engineering[J]. *Journal of Harbin University of Science And Technology*, 2010, **15**(5): 61-64.
何俊, 董慧娟, 周智, 等. 一种适合工程应用的新型光纤光栅位移传感器[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2010, **15**(5): 61-64.
- [5] LIU Bo, NIU Wen-cheng, YANG Ye-fei, *et al.* Exactitude displacement measurement based on fiber bragg grating sensors [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2005, **3**(1): 53-55.
刘波, 牛文成, 杨亦飞, 等. 基于光纤布喇格光栅传感器的精密位移测量[J]. *纳米技术与精密工程*, 2005, **3**(1): 53-55.
- [6] ZHAO Yong, ZHAO Hua-wei, ZHANG Xin-yuan. A novel double-arched-beam-based fiber bragg grating sensor for displacement measurement [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(15): 1296-1298.
- [7] FU Dong, LI Hong-wei, LENG Zhi-peng, *et al.* Research and design of self-compensation fbg-based displacement sensor for structural health monitoring [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2009(6): 1-2.
傅栋, 李宏伟, 冷志鹏, 等. 结构健康监测的自补偿光纤光栅位移计的研究[J]. *低温建造技术*, 2009(6): 1-2.
- [8] WANG Qiong, YAN Nan. Design and study of fiber sensor based on cantilever beam of uniform strength[J]. *Control & Automation*, 2010, **26**(2): 107-108.
王琼, 严南. 基于等强度悬臂梁的光纤传感器设计研究[J]. *微计算机信息*, 2010, **26**(2): 107-108.
- [9] 江毅. 高级光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] ZHAN Ya-ge, CAI Hai-wen, GENG Jian-xin, *et al.* Study on aluminum groove encapsulating technique and sensing characteristics of FBG sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 952-955.
詹亚歌, 蔡海文, 耿建新, 等. 铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 952-955.
- [11] YU Xiu-juan, YU You-long, ZHANG Min, *et al.* Study on the strain and temperature densing characteristics of FBG packaged by the copper slice [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1325-1328.
于秀娟, 余有龙, 张敏, 等. 铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1325-1328.

A Fiber Optic Displacement Sensor with Temperature Compensation

CUI Liu-zhu, JIANG Yi, LIU You-hai

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Displacement measurement is one of the most important parameters to be monitored. A Fiber Bragg Grating (FBG) displacement sensor based on double cantilever beams is developed, in which the displacement is changed to wavelength shifts of two FBGs. The influence resulted from temperature to displacement measurement is reduced by the differential of the two wavelengths, since they have the same wavelength shifts when they are in the same environment. The operation principle based on FBG theory is deduced, and the reasons of measurement error are analyzed. Experimental results show that the displacement sensitivity is 123 pm/mm in the range of 0~20 mm, and the temperature cross-sensitivity is 17 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ after temperature compensation. With the particular advantage, this FBG displacement sensor may find tremendous applications in engineering.

Key words: Fiber Bragg Grating(FBG); Displacement sensor; Temperature compensation