

文章编号: 0253-2239(2008)04-0779-04

基于啁啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器

张锦龙^{1,2} 余重秀¹ 王葵如¹ 曾军英¹

(¹ 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876; ² 河南大学物理与电子学院, 河南 开封 475001)

摘要 基于双三角结构的悬臂梁, 提出了一种使用啁啾光纤光栅测定位移的方法。悬臂梁受到应力时引起刚性粘接在悬臂梁上的啁啾光栅反射谱带宽压缩, 通过测量反射谱带宽进行位移的测量。该结构克服了位移测量时温度的交叉敏感问题, 温度变化引起反射谱整体移动但不会改变带宽。测试结果表明该传感器具有较高精度、良好的线性和可重复性等优点。

关键词 光纤光学; 啁啾光纤光栅; 悬臂梁; 温度补偿

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Displacement Sensor with Temperature Compensation Based on Chirp Fiber Grating

Zhang Jinlong^{1,2} Yu Chongxiu¹ Wang Kuiru¹ Zeng Junying¹

(¹ School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)
(² School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng, Henan 475001, China)

Abstract A way to measure displacement with chirp fiber grating is proposed based on beam cantilever. When the strain is acting on the cantilever beam, the reflection spectrum of the chirp grating pasted on the cantilever beam is compressed and the displacement can be measured according to the bandwidth of the reflection spectrum. The structure resolves the cross sensitization of the temperature to the displacement measurement. The variation in temperature results in the displacement of the whole reflection spectrum but does not change the bandwidth. The test result shows that this sensor has high accuracy, well linearity and repeatability.

Key words fiber optics; chirp fiber grating; cantilever beam; temperature compensation

1 引 言

光纤光栅传感器以其成本更低, 更容易复用和容易实现多参量测量等优点而越来越受到人们关注。但其对温度与应变同时敏感, 如何补偿温度的影响测定位移一直是光纤光栅传感器应用研究领域中最为活跃的课题之一^[1,2]。迄今为止有多种基于光纤光栅的温度补偿方案, 如: 采用两个布拉格光纤光栅配合测量^[3]、采用悬臂梁调谐法^[4]、采用三角形光栅^[5]、采用长周期光栅(LPG)和普通布拉格光纤光栅配合^[6]; 采用光纤光栅的啁啾效应^[7]。但均对

光栅有特殊要求或者要求采用完全相同波长的两光栅, 这在实际应用中是较难操作的。

本文将自制普通啁啾光纤光栅粘接于特殊结构的悬臂梁上, 设计制作了能自动温度补偿的光纤光栅应力传感器, 实现了使用单光栅自动温度补偿的应力传感检测。

2 基本原理

2.1 温度自动补偿的悬臂梁调谐原理

将光纤布拉格光栅(FBG)刚性粘接于悬臂梁的

收稿日期: 2007-07-03; 收到修改稿日期: 2007-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(60677003)、北京市教委共建项目(XK100130637)和北京邮电大学博士启动资金资助课题。

作者简介: 张锦龙(1977-), 男, 河南开封人, 讲师, 博士研究生, 主要从事光纤传感、光纤通信等方面的研究。

E-mail: ZJL@henu.edu.cn

导师简介: 余重秀(1946-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、光交换、光互连及光码分多址、光纤传感、光信息处理等方面的研究。E-mail: cxyu@bupt.edu.cn

一个表面,当悬臂梁的自由端受力使其弯曲时,光纤光栅将被拉伸或压缩,从而使光纤光栅布拉格波长红移或蓝移。如采用截面为矩形而表面为等腰三角形的悬臂梁则可实现对光栅的均匀拉伸或压缩。由于是刚性粘接,光纤光栅的形变量由悬臂梁的挠度或作用力 F 决定。同时,光纤光栅的形变量还与悬臂梁材料的热胀系数和光纤光栅的热光系数有关。

梁表面任意截面的最大弯曲应力为 σ ,如 σ 为常量,则为等强度梁。取理想的等强度悬臂梁(即悬臂梁均匀等厚、截面为矩形、表面为等腰三角形)。由等强度概念有 $\epsilon = \sigma/E$ 为常数,则可视悬臂梁为纯弯曲情况,中性面不会因为弯曲而拉伸或压缩。温度不变时,布拉格光栅中心波长的变化与悬臂梁挠度满足下式^[8]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \frac{h}{L_0^2} X, \quad (1)$$

P_e 为光纤的有效弹光系数, h 为悬臂梁厚度, L_0 为悬臂梁未弯时的有效长度。从(1)式可以看出,对于刚性粘接在理想等强度悬臂梁上的光纤光栅,其波长的相对漂移量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与悬臂梁的挠度 X 成正比,通过其挠度的大小,便可确定波长的漂移量,即可由挠度 X 定标光纤光栅的调谐量。

采用特殊结构的悬臂梁。如图1所示为粘贴有啁啾光栅的双三角形结构悬臂梁,光栅沿悬臂梁的对称轴(x 轴)粘接在梯形结构和三角形结构的连接线对称的位置。

当忽略梁的重量且梁的 x 轴自由端弯曲引起的挠度不大时(满足微弯条件),由于悬臂梁是厚度相等的等腰三角形和梯形结构,因此可视为等强度梁。则沿 x 轴向各点的应变可表示为

$$\epsilon_x = \begin{cases} \frac{6F}{h^2 E} \cdot \frac{e}{a}, & 0 < x < d \\ \frac{6F}{h^2 E} \cdot \frac{e}{b}, & d < x < e \end{cases} \quad (2)$$

e 和 a 分别为悬臂梁的长度和固定端宽度; E 为梁的杨氏模量; F 为梁自由端载荷。

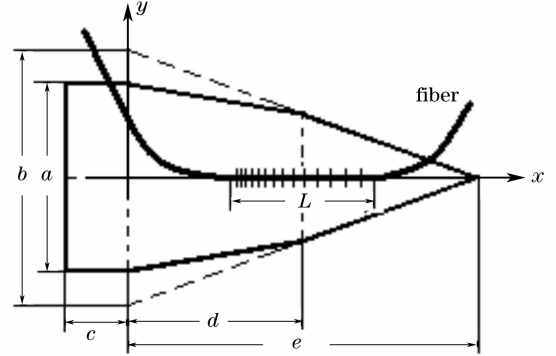


图1 双三角形悬臂梁传感器结构示意图

Fig.1 Structure of ditrignon cantilever beam sensors

由(2)式可见在悬臂梁的梯形段和等腰三角形段产生的应变是不同的,因此对粘贴在悬臂梁上的光栅两部分应变也不同。如图1所示,将啁啾光栅长波长端粘贴于悬臂梁三角形一端,短波长端粘贴于梯形端。如悬臂梁自由端受到向下的应力,光栅被拉伸,其波长红移。

如图2所示,由(2)式可知悬臂梁结构中梯形段的应变较大,则光栅短波长端 $d\lambda_1$ 比长波长端 $d\lambda_2$ 大,光栅短波长段和长波长段光谱发生重叠(图中阴影部分),导致啁啾光栅带宽 $\Delta\lambda$ 变窄。由于光栅对温度和应变交叉敏感,温度变化时同样引起光栅波长漂移。应变和温度共同作用引起的变化可表示为^[9,10]

$$\begin{cases} \frac{d\lambda_1}{\lambda_1} = \frac{hbd(1 - P_e)}{a(e-d)^3 + ebd^2(2e-d)} \cdot \Delta s + (\alpha + \xi)(t - t_0), & 0 < x < d \\ \frac{d\lambda_2}{\lambda_2} = \frac{had(1 - P_e)}{a(e-d)^3 + ebd^2(2e-d)} \cdot \Delta s + (\alpha + \xi)(t - t_0), & d < x < e \end{cases} \quad (3)$$

式中 λ_1, λ_2 是温度为 t_0 时啁啾光栅反射谱前沿和后沿的波长, α 和 ξ 分别为悬臂梁材料的热胀系数和光纤光栅的热光系数, Δs 为悬臂梁自由端的挠度, t 为当前温度。(3)式中两式相减,得

$$\frac{\lambda_1(\Delta\lambda - \Delta\lambda') + \Delta\lambda d\lambda_1}{\lambda_1\lambda_2} = \frac{hd(1 - P_e)(b - a)}{a(e-d)^3 + ebd^2(2e-d)} \cdot \Delta s, \quad (4)$$

由光栅参量特性可知 $\Delta\lambda d\lambda_1 \ll \lambda_1(\Delta\lambda - \Delta\lambda')$,忽略小项,得

$$\Delta\lambda' = \Delta\lambda - \frac{hd(1 - P_e)(b - a)\lambda_2}{a(e-d)^3 + ebd^2(2e-d)} \cdot \Delta s. \quad (5)$$

当悬臂梁材料和结构参量以及光栅材料和结构参量确定的情况下,啁啾光栅带宽会随着应力的增

加而减小,(5)式中不含 t ,即温度的影响被补偿。因此采用该传感器可实现温度补偿的位移传感。

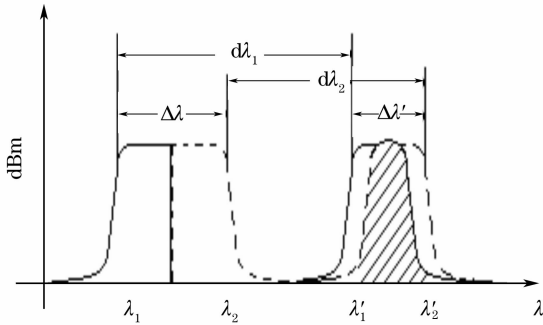


图 2 啁啾光栅反射谱移动示意图

Fig. 2 Reflection spectrum shift of chirp fiber grating

2.2 系统结构

光纤光栅传感系统实验结构如图 3 所示。发光二极管(LED)发出的宽带光谱经过光环行器入射到粘贴在悬臂梁上的啁啾光栅,经光栅反射后的窄带光谱再次经过光环行器进入光谱分析仪(OSA)。由(2)式分析知经光谱分析仪测定光栅反射谱带宽可实现位移的测量。为防止图中 4 位置端面反射产生的干扰,常规方法是将尾纤浸入匹配液中,但此方法对匹配液折射率要求较高。本实验装置采用将尾纤弯成直径小于 2 cm 的圈(直径不能再减小,否则光纤可能会折断),使光通过光纤圈时耦合进包层散射出去;即便端面反射回微弱的光,当再次经过光纤圈时也会再次耦合进包层。实验证明该方法简单可靠。

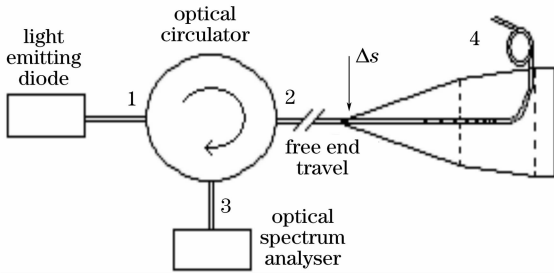


图 3 光纤光栅传感系统结构图

Fig. 3 Structure of fiber grating sensors

3 实验结果与分析

实验中所用的啁啾光栅为本实验室自制,将 G655 光纤剥去包层后在 20 MPa 的高压氢气中载氢 15 天增加光敏性,然后采用相位掩模板法刻制光栅。传感光栅长度为 12 cm,中心波长为 1551.52 nm (30 ℃),带宽为 0.6 nm。实验中发光二极管采用光纤通信中常用光源。光谱仪型号为 AQ6370。悬臂梁采用厚度为 5 mm 的有机玻璃制作,其制作参量 $a=12\text{ cm}, b=18\text{ cm}, c=3\text{ cm}, d=12\text{ cm}, e=24\text{ cm}$ 。实验过程中将悬臂梁固定端紧压在光学平台上,自

由端用固定在光具座上的螺旋测微器的杆推动,使悬臂梁弯曲,悬臂梁自由端的位移由螺旋测微器读出。螺旋测微器测量精度为 0.02 mm。

图 4 显示位移分别为 4 mm 和 6 mm 时的光谱图,带宽分别为 0.4032 nm 和 0.3030 nm。多次测量结果表明,在 0~6 mm 位移变化范围内,随着位移增加,啁啾光栅反射谱变窄,反射谱带宽与位移呈良好的线性关系。图 5 给出了一组光栅传感器反射谱带宽随位移变化情况及其线性拟合曲线。

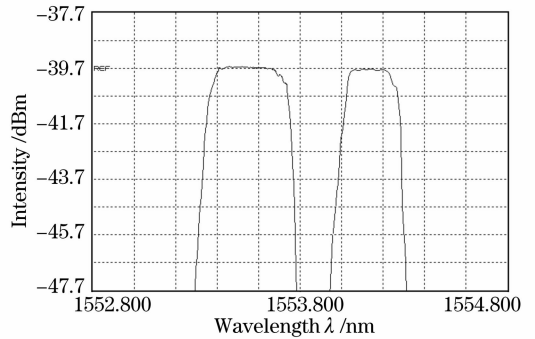


图 4 位移分别为 4 mm 和 6 mm 时的光谱图

Fig. 4 Spectrum with displacement 4 mm and 6 mm

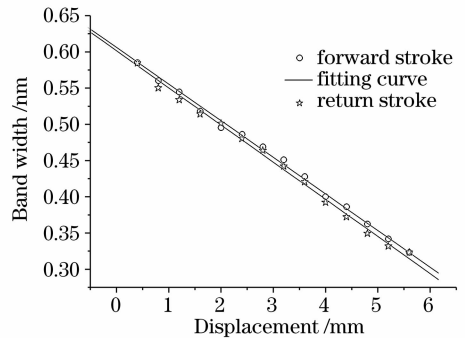


图 5 反射谱带宽随位移变化曲线

Fig. 5 Bandwidth of reflection spectrum versus the shift of displacement

由于螺旋测微器回程差和悬臂梁迟滞效应的影响,正程和回程所测值稍有不同。图 5 拟合方程分别为:

$$\text{正程: } Y = -0.05056x + 0.60611 \text{ (nm);}$$

线性拟合度 $R = -0.99832$, 位移传感的灵敏度 $K = 0.05056\text{ nm/mm}$ 。

$$\text{回程: } Y = -0.05026x + 0.60152 \text{ (nm);}$$

线性拟合度 $R = -0.99789$, 位移传感的灵敏度 $K = 0.05126\text{ nm/mm}$ 。

图 6 显示在 3 mm 位移时温度变化引起的波长间距变化:

数据证明,温度对啁啾光栅的中心波长有影响,但对带宽的影响很小,该结构可实现温度自动补偿

的位移测量,与理论分析一致。

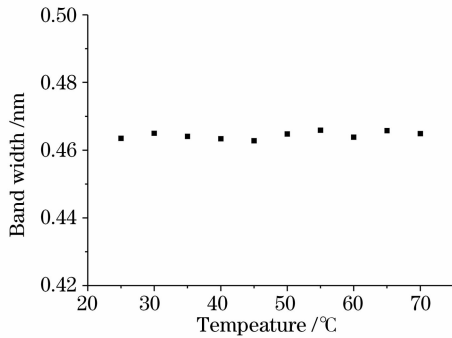


图 6 温度对带宽影响实验曲线

Fig. 6 Bandwidth of reflection spectrum versus temperature

4 结 论

设计实现了一种新型的基于啁啾光栅的温度自动补偿的位移传感器。分析了双三角形结构悬臂梁调谐啁啾光栅并同时实现温度补偿的原理,通过测定啁啾光栅反射谱带宽,实现了温度自动补偿的位移测定并给予实验证明。位移传感的灵敏度实验值为 0.05 nm/mm(调整悬臂梁结构参量可改变系统灵敏度)。该传感系统结构精巧、简单,易集成,易于复用,可有效对微位移等参量实现大范围的准分布式测量,有望广泛应用于桥梁、建筑等光传感领域。

参 考 文 献

1 Rao Yunjiang, Luo Xiaodong, Ran Zengling. A 100 km fiber Bragg grating sensor system based on swept laser and optical amplification[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(5): 680~683
 饶云江, 罗小东, 冉曾令. 基于扫描激光器和光放大的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 680~683

2 Wang Yiping, Li Anmin, Yun Bin Feng *et al.*. Fiber Bragg grating sensor system based on virtual instrument and tunable laser technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1132~1135
 汪弋平, 李安民, 恽斌峰等. 基于虚拟仪器和可调谐激光技术的光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1132~1135
 3 Hu Zhixin, Zhu Jun, Zhang Ling. A new type of fiber grating pressure sensing system with high accuracy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 709~711
 胡志新, 朱 军, 张 陵. 新型高准确度光纤光栅压力传感系统[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 709~711
 4 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Zhao Qida *et al.*. Novel sensing device of fiber Bragg grating with temperature active compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 999~1002
 张伟刚, 开桂云, 赵启大等. 新型光纤布拉格光栅温度自动补偿传感研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 999~1002
 5 Zhang Dongsheng, Kai Guiyun, Cao Ye *et al.*. A novel fiber grating sensing and demodulating system with temperature compensation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **25**(3): 307~311
 张东生, 开桂云, 曹 晔等. 具有温度补偿功能的光纤光栅传感解调系统[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 307~311
 6 Wang Muguang, Wei Huai, Tong Zhi *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 867~869
 王目光, 魏 淮, 童 治等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 867~869
 7 Huang Yonglin, Tong Zhengrong, Xiang Yang *et al.*. Temperature-insensitive displacement sensing using the chirp effect of fiber Bragg grating [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 1015~1018
 黄永林, 童峥嵘, 项 阳等. 用光纤光栅的啁啾效应实现温度不敏感的位移测量[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11): 1015~1018
 8 Hu Jiayan, Jiang Shan. Study on encapsulating technique and strain sensing characteristic of FBG temperature sensor[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(3): 311~313
 胡家艳, 江 山. 光纤光栅传感器的应力补偿及温度增敏封装[J]. *光电子激光*, 2006, **17**(3): 311~313
 9 W. W. Morey. Recent advances in fiber grating sensors for utility industry applications[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2594**: 90~98
 10 Yu Youlong, Tam Hwaya, Liu Shunye *et al.*. Temperature-independent fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **20**(4): 538~542
 余有龙, 谭华耀, 廖信义等. 免受温度影响的光纤光栅位移传感器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(4): 538~542