

文章编号: 1002-2082(2008)01-0105-05

光纤 Bragg 光栅应力传感中温度交叉敏感问题研究

魏 鹏, 李丽君, 郭俊强, 初艳玲

(山东科技大学 信电学院, 山东 青岛 266510)

摘要: 针对光纤 Bragg 光栅应力传感中温度交叉敏感的问题, 设计了一种有效的无源温度补偿方法和补偿结构。通过理论模拟, 分析了 M 值不同时补偿效果曲线的变化, 从中得到了补偿效果最好时的 M 值; 得出了不同预应变情况下的温度特性曲线, 从中找出了温度特性被完全补偿时的预应变的值; 分析了温度补偿中出现过补偿和欠补偿现象的原因。通过该方法, 有效地解决了光纤 Bragg 光栅传感中的温度交叉敏感问题。温度补偿后可以满足对光纤光栅温度稳定性要求较高的光纤传感、通信等领域的需要。

关键词: 光纤 Bragg 光栅; 交叉敏感; 温度补偿

中图分类号: TN253-34

文献标志码: A

Cross sensitivity of temperature in fiber Bragg grating strain sensing

WEI Peng, LI Li-jun, GUO Jun-qiang, CHU Yan-ling

(College of Information & Electrical Engineering, Shandong

University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: An effective method of passive temperature compensation was introduced and a compensation structure was designed to address the temperature cross sensitivity in the fiber Bragg grating (FBG) strain sensing. The curves of the compensation effect were analyzed with theoretical simulation in different M values. The optimized M value for compensation effect was obtained. The temperature curves in different pre-strains were obtained, the pre-strain value, which compensates the temperature completely, was found out. The phenomena of under-compensation and over-compensation were also analyzed. The temperature cross sensitivity existing in FBG sensing was effectively resolved via this method, and such temperature compensation can meet the demand of temperature stability in fiber sensing and communication.

Key words: fiber Bragg grating; cross sensitivity; temperature compensation

引言

光纤光栅传感器作为传感器家族中年轻的一员, 以其抗电磁干扰、耐腐蚀、轻巧、灵敏度高、便于复用和组网等方面独特的优点, 在各领域得到了广泛的应用^[1-3]。近年来, 光纤 Bragg 光栅 (FBG) 传感器的研制已成为研究热点。然而, 当 FBG 用来测量

应变时, 光纤光栅所处环境温度的变化会引起 Bragg 反射波长的漂移, 很难分辨出 Bragg 波长的漂移是否是由应力的变化引起的, 这就是所谓的交叉敏感问题。因此, 要实现传感及通信系统等方面的应用就必须对光纤光栅进行温度补偿。

近年来, 交叉敏感问题的有效解决方案已成为

收稿日期: 2007-01-08; 修回日期: 2007-03-09

基金项目: 国家自然科学基金 (60672085); 山东省教育厅资助项目 (J06P14)

作者简介: 魏鹏 (1985—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: yhjx1985@163.com

国内外许多学者研究的热点问题^[4-6]。他们提出了许多解决方法,其中最具代表性的有双波长矩阵运算法、双参量矩阵运算法和温度补偿法。其中,温度补偿法是应力测量时消除温度交叉敏感的一种有效的补偿方法。FBG 的温度补偿方法分为有源方式^[7-9]和无源方式。与有源方式相比,无源方式具有成本低、体积小、使用方便等特点,因此成为改善光纤 Bragg 光栅温度特性的主要方式。本文设计了一种有效的无源温度补偿方法和补偿结构。通过理论模拟,分析了 M 值不同时补偿效果曲线的变化,得到了补偿效果最好时的 M 值;得出了不同预应变情况下的温度特性曲线,从中找出了温度特性被完全补偿时的预应变值。通过该方法,有效地解决了光纤 Bragg 光栅应变传感中的温度交叉敏感问题。

1 应变温度补偿法的结构设计及补偿原理

1.1 光纤 Bragg 光栅温度补偿的基本原理

采用对 FBG 施加应力使其产生应变的方法来消除 FBG 的温度交叉敏感。当 FBG 不受应力作用,而环境温度变化 ΔT 时,光纤光栅中心反射波长的变化为

$$\Delta\lambda_{BT}/\lambda_B = (\alpha_f + \zeta)\Delta T \quad (1)$$

式中: $\alpha_f = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T}$, 为光纤的膨胀系数; $\zeta = \frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{\Delta n_{eff}}{\Delta T}$, 为光纤的热光系数; ΔT 为周围环境温度的变化量。对普通单模石英光纤来说,热光系数 $\zeta \approx 6.17 \times 10^{-6}/C$, 热胀系数 $\alpha \approx 5 \times 10^{-7}/C$, 温度变化引起的总的波长相对变化约为 $6.67 \times 10^{-6}/C$, 其确切值与光纤的类型有关。由(1)式可知, $\Delta\lambda_{BT}$ 与 ΔT 存在线性关系。

当环境温度不变, FBG 仅受应力作用时,光纤光栅中心反射波长的变化为

$$\Delta\lambda_{BS}/\lambda_B = \{1 - (1/2)n_{eff}^2[(1-r)P_{12} - rP_{11}]\} \epsilon = (1 - P_e)\epsilon \quad (2)$$

式中: ϵ 为轴向的应变; r 为泊松比; P_{11} 和 P_{12} 为光纤的弹光系数; P_e 为 FBG 应变灵敏度系数,对于典型的单模石英光纤, $P_e = 0.22$ 。

由(1)式和(2)式可知,如果想使 λ_B 不随温度而改变,则应使温度和应变的综合效应为零,从而完成温度的补偿。也就是使得

$$\epsilon = \frac{\alpha_f + \zeta}{P_e - 1} \Delta T \quad (3)$$

由(3)式可以确定为了抵消温度变化引起的光栅反射波长的漂移而应在光纤上施加的应变,进而对光栅温度补偿的结构进行设计。

根据上述原理,可以通过改变应力来补偿温度的变化,从而抑制 Bragg 反射波长随温度的漂移。具体实现的技术途径是:对光纤光栅进行温度补偿式封装,使光纤轴向受压,产生应变。在以后的使用过程中,当温度上升时,光纤光栅则随温度升高而体积膨胀;由于热膨胀引起的弹光效应使光纤光栅的折射率和周期都增大,而光纤光栅两端高温敏感的封装材料产生的膨胀更大,热膨胀产生的应力向光栅集中,使光纤轴向受压,从而使光纤光栅随温度升高而体积缩小;此时应变引起的漂移 $\Delta\lambda_{BS}$ 的移动方向则与温度上升引起的 $\Delta\lambda_{BT}$ 的漂移方向相反,从而维持 Bragg 波长的稳定。相反,当环境温度下降时,光纤光栅体积收缩,而封装材料对光纤光栅产生轴向拉应力,使光纤光栅的体积膨胀补偿光栅的体积收缩,结果使光纤光栅的中心反射波长漂移减小^[10]。

1.2 应变温度补偿法的结构设计

用 2 种不同热膨胀系数的材料进行合理封装,可以对光纤光栅的温度特性进行有效补偿^[11-12]。在此种方法中,先将光纤拉伸,使其产生一定的预应变;随着温度的升高,光纤光栅上的应变逐渐减小,以此来补偿温度引起的波长漂移。其结构如图 1 所示。

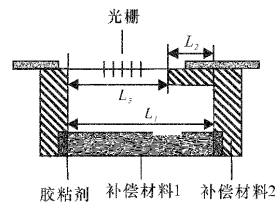


图 1 应变补偿温度封装结构

Fig. 1 Sealing structure of temperature compensation for eliminating fiber strain

在图 1 中,补偿材料 2 的热膨胀系数 α_2 应大于补偿材料 1 的热膨胀系数 α_1 。当温度升高时,补偿材料 1 和补偿材料 2 均发生膨胀,由于补偿材料 2 比补偿材料 1 的热膨胀系数大,使光栅两端固定点之间的距离减小,从而使光栅所受的应变减小,导致光纤光栅的反射波长向短波方向漂移,抵消了由于温度升高引起的光纤光栅的反射波长向长波方向的漂移。

由图1可知,温度补偿结构的关键参数为固定点之间的距离 L_3 及补偿材料1的长度 L_1 。 L_3 的长度可以根据光栅的长度决定,一般略大于光栅的长度。补偿材料2的有效长度 L_2 设计如下。

$$\Delta \varepsilon L_3 = (L_1 \alpha_1 - L_2 \alpha_2 + L_3 \alpha_3) \Delta T \quad (4)$$

$$L_1 = L_2 + L_3 \quad (5)$$

$$M = L_2 / L_1 \quad (6)$$

式中: α_1 和 α_2 分别为补偿材料1和补偿材料2的热膨胀系数。由(3),(4)和(5)式可得

$$M = \frac{L_2}{L_1} = \frac{\alpha_1(1-P_e) + \alpha_f(2-P_e) + \zeta}{\alpha_2(1-P_e) + \alpha_f(2-P_e) + \zeta} \quad (7)$$

将参数 α_1 , α_2 , α_f , P_e 和 ζ 的值代入(7)式,计算得具体的 M 值。

由(1),(2),(4),(5)和(6)式,可推得

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta) \Delta T + (1 - P_e) \cdot \frac{[\alpha_1 + \alpha_f - (\alpha_2 + \alpha_f)M] \Delta T}{1 - M} \quad (8)$$

FBG的中心波长与温度变化的关系为

$$\lambda_B = \lambda_{B1}(\alpha + \zeta)T + \lambda_{B1}(1 - P_e) \cdot \frac{[\alpha_1 + \alpha_f - (\alpha_2 + \alpha_f)M]T}{1 - M} + \lambda_{B1} \quad (9)$$

式中 λ_{B1} 为将光纤拉伸使其产生一定的预应变后的中心波长(λ_{B1} 大于光纤光栅在自然状态下的中心波长 λ_{B0})。由此可以计算出不同 M 值时的温度补偿效果曲线。

在实际的实验中,粘贴光纤光栅时需要沿轴向对其施加一定预应力,目的是使补偿作用在温度升高时也能得到满足。从保护光纤光栅的角度考虑,预应力不宜过大,为满足高温适用范围,也不宜过小。

对于这个装置,由式 $\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta) \Delta T + (1 - P_e) \Delta \varepsilon$,可推得预应变(ε_0)与最高温度范围(ΔT_{\max})的关系:

$$\varepsilon_0 \geq (\alpha + \zeta) \Delta T / (1 - P_e) = 342.05 \times 10^{-6} \quad (10)$$

将具体参数值代入此式,可推算出对于中心波长在1550 nm附近的光栅($\lambda_B = 1550$ nm);在室温(20 C)下设计结构时,为使补偿适用到60 C(即 $\Delta T_{\max} = 40$ C),设计时需加入的预应变导致的波长漂移量为

$$\Delta \lambda_{B0} = \varepsilon_0 \lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta) \Delta T / (1 - P_e) \approx 0.53 \text{ nm} \quad (11)$$

初始中心波长为

$$\lambda_{B0} = \lambda_B + \Delta \lambda_{B0} \approx 1550.53 \text{ nm} \quad (12)$$

此时,FBG的波长与温度的关系式为

$$\lambda_B = \lambda_{B0}(\alpha + \zeta)T + \lambda_{B0}(1 - P_e) \cdot \frac{[\alpha_1 + \alpha_f - (\alpha_2 + \alpha_f)M]T}{1 - M} + \lambda_{B0} \quad (13)$$

如果所施加的预应变小于上面的理论值,取 $\varepsilon_1 = 299.29 \times 10^{-6}$,则预应变导致的波长漂移量为

$$\Delta \lambda_{B1} = \varepsilon_1 \lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta) \Delta T / (1 - P_e) \approx 0.46 \text{ nm} \quad (14)$$

此时的初始中心波长为

$$\lambda_{B1} = \lambda_B + \Delta \lambda_{B1} \approx 1550.46 \text{ nm} \quad (15)$$

此时,FBG的波长与温度(当 $T < 55$ C时)的关系式为

$$\lambda_B = \lambda_{B1}(\alpha + \zeta)T + \lambda_{B1}(1 - P_e) \cdot \frac{[\alpha_1 - \alpha_f - (\alpha_2 - \alpha_f)M]T}{1 - M} + \lambda_{B1}$$

当 $T > 55$ C时

$$\lambda_B = \lambda_{B1}(\alpha + \zeta)(T - 55) + \lambda_{B1} \quad (16)$$

以上各式中的 M 均为理论值,即 $M = 0.1164$ 。

1.3 补偿材料的选取

补偿材料1应具有较低的膨胀系数,常用的有石英、殷钢(铁63.8%,镍36%,碳0.2%)、柯伐合金(镍29%,铁54%,钴17%)等;补偿材料2应具有较高的膨胀系数,有铜、铝、有机玻璃等。

根据(8)式可以计算出不同组合时补偿材料2所占长度百分比:采用石英和铜组合时,铜占34.9%;采用石英和铝组合时,铝占27.3%;采用石英和有机玻璃组合时,有机玻璃占10.6%;采用柯伐合金和铜组合时,铜占50.9%;采用柯伐合金和铝组合时,铝占39.7%。

本文选用的2种材料分别为石英和有机玻璃。之所以选用这2种材料是因为它们的性能比较稳定且膨胀系数相差悬殊(2个数量级以上),易于封装结构的小型化。

2 模拟仿真及结果分析

2.1 不同 M 值的补偿结果分析

将一般参数值代入(7)式,即石英的热膨胀系数 $\alpha_1 = 5.0 \times 10^{-7} / \text{C}$,有机玻璃的热膨胀系数 $\alpha_2 = 7.3 \times 10^{-5} / \text{C}$ 和光纤光栅参数 $\alpha_f = 5.0 \times 10^{-7} / \text{C}$, $P_e = 0.22$,计算可得有机玻璃和石英长度的理论比值, $M = L_2 / L_1 = 0.1164$,其中有机玻璃占10.6%。此时,FBG的温度特性可以被完全补偿掉。

本文选取不同的 M 值, $M < 0.1164$, $M = 0.1164$, $M > 0.1164$, 将其分别代入(8)式进行计算, 并利用 MATLAB 进行模拟仿真, 得到不同 M 值时的温度补偿效果曲线。

由图2可以看出, 当 $M = 0.1164$ 时, 光纤光栅的中心波长不随温度的变化而变化, 即 FBG 的温度特性被完全补偿, 温度补偿效果最好; 当 $M < 0.1164$ 时, FBG 中心反射波长随温度的升高向长波方向漂移, 即所谓的欠补偿; 当 $M > 0.1164$ 时, FBG 中心反射波长随温度的升高向短波方向漂移, 即所谓的过补偿。

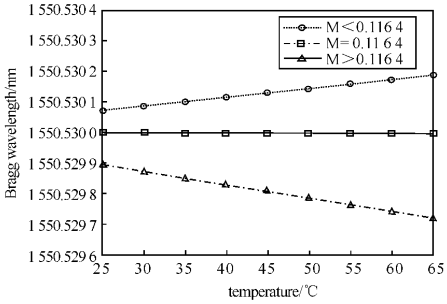


图2 不同 M 值的温度补偿曲线

Fig. 2 Variation of Bragg wavelength with temperature at different values of M

2.2 不同预应变情况下的补偿结果分析

将具体参数值代入(13)式和(16)式进行计算, 并利用 MATLAB 进行模拟仿真, 得到不同预应变情况下的温度特性曲线。

图3给出了应变不足和应变适当时的温度补偿前后的曲线。从图中可以看出, 如果所施加的预应变小于上面的理论值, 则当温度升高到 55 °C 以后, FBG 温度特性就不能完全被补偿, 即没有达到

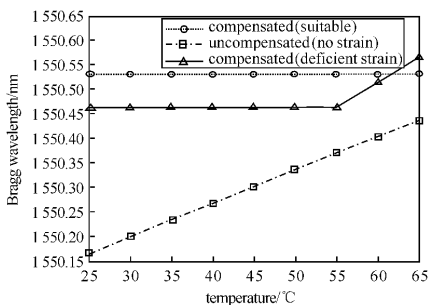


图3 不同预应变情况下的温度特性曲线

Fig. 3 Temperature characteristic curves under different prestrains

完全补偿 FBG 温度特性的目的。也就是说, 通过监测 Bragg 反射波长的变化, 就可以知道所加拉力产生的预应变是否满足实验要求。实际实验中所加的预应变应稍大于理论值。

3 结束语

FBG 温度及应变传感测量中的交叉敏感问题是 FBG 传感器实用化的“瓶颈”。随着 FBG 应用领域的进一步扩展, 根据具体的应用目的, 设计更为有效的解决方案已成为各国学者竞相研究的热点。为了解决交叉敏感问题, 本文着重进行温度补偿方法的研究, 实现了对 FBG 的无源温度补偿。通过模拟仿真, 分析了所加预应变的大小对补偿效果的影响, 讨论了光纤光栅温度补偿中出现过补偿和欠补偿现象的原因。温度补偿后基本满足了对光纤光栅温度稳定性要求较高的光纤传感、通信系统等领域的需要。

本文对光纤光栅进行无源的温度补偿, 有些方面还有待于进一步研究, 如补偿后 FBG 反射波长的长期稳定性有待于进一步提高。另外在进行实验时, 胶粘剂的选择以及胶的涂覆部位、多少、凝固的时间等都会对实验结果产生影响。

参考文献:

- [1] NELLEN P M, BRONNIMANN R, SENNHAYSER U. Applications of distributed fiber Bragg grating sensors in civil engineering [J]. SPIE, 1995, 2507:14-24.
- [2] 姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002,13(4):420-430.
JIANG De-sheng, HE Wei. The application survey of fiber Bragg grating sensor [J]. Journal of Photoelectronics · Laser, 2002,13(4):420-430. (in Chinese)
- [3] RAO Y J. Recent progress in applications of in-fiber Bragg grating sensors [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999,31(2):297-324.
- [4] 张戎社, 宁辰校, 周荣芳. 基于光纤光栅的振动参数监测及信号处理系统[J]. 河北科技大学学报, 2005, 26(2):142-145.
ZHANG Xu-she, NING Chen-xiao, ZHOU Rong-fang. Fiber Bragg grating vibrating sensors and its signal processing system [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2005,26(2):142-145. (in Chinese)
- [5] 禹大宽, 乔学光, 贾振安, 等. 一种测量温度和流速的光

纤光栅传感器[J]. 应用光学,2006,27(3):228-231.

YU Da-kuan, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, et al. Fiber Bragg grating sensor for detecting temperature and flow-velocity [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3):228-231. (in Chinese)

- [6] 黄锐, 蔡海文, 瞿荣辉, 等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 232-235.

HUANG Rui, CAI Hai-wen, QU Rong-hui, et al. Fiber Bragg grating sensor for detecting temperature and strain simultaneously [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(2):232-235. (in Chinese)

- [7] 唐仁杰. 光纤光栅的温度补偿技术[J]. 光纤通信技术, 1997, 10(5):32-35.

TANG Ren-jie. The temperature compensation technique of fiber grating [J]. Fiber Communication Technique, 1997, 10(5): 32-35. (in Chinese)

- [8] 李志全, 许明妍, 汤敬, 等. 光纤光栅传感系统信号解调技术的研究[J]. 应用光学, 2005, 26(4):36-41. LI Zhi-quan, XU Ming-yan, TANG Jing, et al.

Study on techniques of signal demodulation in fiber Bragg grating sensing system [J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(4):36-41. (in Chinese)

- [9] YUAN L. Temperature-compensating device with central-wavelength tuning for optical fiber gratings [J]. Optical Engineering, 2001, 40(5):698-702.

- [10] XU M G, DONG L, REEKIE L, et al. Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in tapered optical fiber [J]. Electronics Letters, 1995, 31(10):823-825.

- [11] YOFFE G W, KRUG P A, OUEUETTE F. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings [J]. Applied Optics, 1995, 34 (30): 6859-6861.

- [12] 刘永红, 阮迎澜, 江山, 等. 温度不敏感光栅[J]. 中国激光, 1997, 24(10): 895-898.

LIU Yong-hong, RUAN Ying-lan, JIANG Shan, et al. An unsensitive grating to temperature [J]. Chinese Journal of Lasers, 1997, 24(10):895-898. (in Chinese)

(上接第 104 页)

Study on temperature and axial strain's sensitivity of optical fiber grating sensors [J]. Study on Optical Communications, 2003(106): 46-48. (in Chinese)

- [13] 李志全, 王莉, 黄丽娟, 等. 基于长周期光纤光栅的折射率与浓度传感方案的研究 [J]. 应用光学, 2004, 25(4):48-50.

LI Zhi-quan, WANG Li, HUANG Li-juan, et al. Study on refractive index and concentration sensor

based on long-period fiber grating [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(4):48-50. (in Chinese)

- [14] 陈建军, 张伟刚, 涂勤昌, 等. 温度不敏感光纤光栅压强传感器 [J]. 应用光学, 2007, 28(1):77-81.

CHEN Jian-jun, ZHANG Wei-gang, TU Qin-chang, et al. Fiber Bragg grating pressure sensor insensitive to temperature [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(1): 77-81. (in Chinese)