

光纤布拉格光栅传感器交叉敏感问题的研究进展

孙诗晴, 初凤红, 卢家焱

上海电力学院电子与信息工程学院, 上海 200090

摘要 应变和温度等外界因素的变化会使光纤布拉格光栅(FBG)反射波的中心波长发生漂移。在应变传感测量中,根据中心波长的漂移量无法直接得到对应的应变变量,这种应变和温度交叉敏感的问题严重制约着FBG传感器的测量精度和应用,阻碍了传感监测技术的实用化。为了消除温度的影响,各国研究人员根据不同算法、材料、封装结构等提出了多种解决方案。根据对温度的不同处理方法,将这些解决方案分为温度分离法和温度补偿法,并分析了每种方法的优缺点。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 温度补偿; 波长漂移; 交叉敏感

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.040006

Progress in Cross Sensitivity of Fiber Bragg Grating Sensor

Sun Shiqing, Chu Fenghong, Lu Jiayan

School of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China

Abstract The changes of external factors such as temperature and strain can cause the center wavelength drift of fiber Bragg grating (FBG) reflection wave. Strain cannot be directly measured according to the center wavelength drift in strain sensing measurement. The problem of temperature and strain cross sensitivity seriously restricts the measurement precision and the application of FBG sensor, which hinders the sensing monitoring technology to be practical. Many researchers have proposed various solutions to eliminate the influence of temperature according to different algorithms, materials, packaging structures, and so on. According to the different methods of temperature processing, the solutions can be divided into temperature separation method and temperature compensation method. The advantage and disadvantage of each method are analyzed.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; temperature compensation; wavelength drift; cross sensitivity

OCIS codes 060.3735; 060.2370; 060.3738

1 引言

近年来,光纤布拉格光栅(FBG)的制作方法和理论研究都取得了很大的进展。随着制作工艺的进一步完善、制作工艺应用的不断增多,以及其在传感监测方面的突出优势,FBG越来越得到研究者们广泛的关注^[1]。

FBG传感器的应用范围极其广泛,已经成为航空航天^[2]、船舶运输^[3]、桥梁监测^[4]、石油化工^[5]、电力^[6]、医学^[7]、采矿^[8]、地质勘测^[9]以及土木工程^[10]等各个领域不可或缺的一部分。FBG传感器具有绝缘性能好、灵敏度高、耐腐蚀、重量轻、体积小、成本低、测量对象广泛,以及适于在高温、强电磁或危险环境中使用等优点,因此在各个领域都有广泛的应用。然而,由于FBG对温度和应变交叉敏感,当进行应变传感测量时,依靠中心波长的漂移无法正确反映应变的大小,所以需要FBG的温度进行分离或补偿^[11]。

收稿日期: 2016-11-01; **收到修改稿日期:** 2016-12-11

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目(15ZZ086)

作者简介: 孙诗晴(1993—),女,硕士研究生,主要从事光纤电流传感器方面的研究。E-mail: shiqing.sunny@yahoo.com

导师简介: 初凤红(1979—),女,博士,教授,硕士生导师,主要从事光纤传感技术和光纤通信技术方面的研究。

E-mail: chufenghong@siom.ac.cn

2 FBG 传感的基本原理

FBG 的结构示意图及其光谱特性如图 1 所示,其中插图 I~III 分别为入射光谱、反射光谱和透射光谱。从宽带光源发出的光波在光纤中传输时,由于布拉格光栅的作用,符合布拉格条件的光将被反射,而不符合布拉格条件的光将沿光纤继续传输。应变、温度等外界因素的变化能够使反射光谱的中心波长发生漂移^[6]。

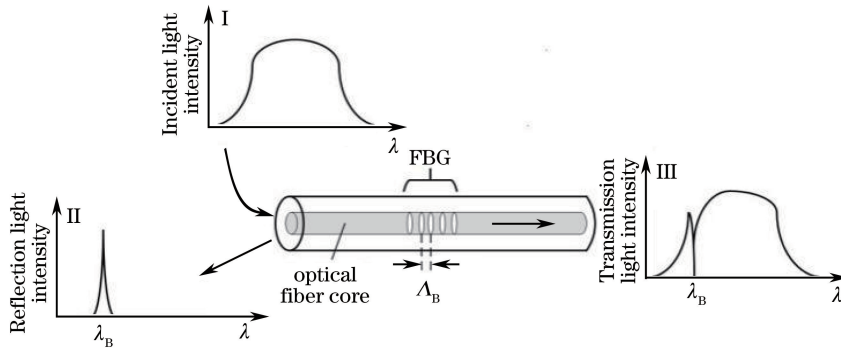


图 1 FBG 的结构及其光谱特性示意图(插图 I 为入射光谱,插图 II 为反射光谱,插图 III 为传输光谱)

Fig. 1 Diagrams of FBG structure and its characteristics of spectra (inset I is incident spectrum, inset II is reflection spectrum, and inset III is transmission spectrum)

根据耦合模理论,FBG 反射光谱的中心波长 λ_B 满足^[12]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。 n_{eff} 和 Λ 受外界因素的影响后产生的变化为 Δn_{eff} 和 $\Delta\Lambda$,导致 FBG 中心波长发生的偏移为 $\Delta\lambda_B$ 。由布拉格条件^[12]可得

$$\Delta\lambda_B = 2(\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + n_{\text{eff}}\Delta\Lambda)。 \quad (2)$$

(2)式表明纤芯有效折射率的变化和光栅周期的变化均对中心波长的漂移量 $\Delta\lambda_B$ 产生影响。应力产生的弹光效应和温度作用下的热光效应导致纤芯有效折射率发生变化,应力作用产生的形变和温度作用产生的热膨胀效应又会影响光栅周期。当应变、温度同时变化时,无法直接测量应变和温度单一作用引起波长的漂移量,所以当 FBG 传感器用于应力测量时,需要去除温度的交叉影响^[13]。

3 温度和应变交叉敏感解决方案

根据算法、材料、结构封装等的不同,国内外研究人员提出了很多解决交叉敏感问题的方案^[14-40],根据对温度的不同处理,这些方案可以分为温度分离法和温度补偿法。温度分离法运用不同算法,可同时得到应变量和温度,该方法主要包括双波长或双参量矩阵运算法、神经网络算法和多项式拟合算法等。温度补偿法通过设计一些特殊结构或运用特殊材料来实现对温度的补偿,主要包括利用具有不同热膨胀系数的材料设计特殊结构和利用负膨胀材料、参考光纤进行补偿等方法。

3.1 温度分离法

3.1.1 双波长矩阵运算法

双波长矩阵运算法是较早使用的一种算法,该方法使用两个对温度、应变敏感度不同的 FBG,分别获得随温度、应变变化的两个布拉格中心波长的漂移量^[15]。根据温度和应变的变化量,两个 FBG 波长偏移量可表示为^[16]

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\epsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\epsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 为两个 FBG 的波长偏移量, $\Delta\epsilon$ 为应变的变化量, ΔT 为温度的变化量, $K_{\epsilon 1}$ 、 $K_{\epsilon 2}$ 为两个 FBG 波长的应变灵敏系数, K_{T1} 、 K_{T2} 为两个 FBG 波长的温度灵敏系数。Xu 等^[17]采用两个 FBG 进行实验,两个 FBG 反射光谱的中心波长 λ_B 分别为 1298 nm 和 848 nm,峰值反射率分别为 70% 和 55%,反射带宽分别为 0.9 nm 和 0.45 nm,实验原理如图 2 所示。实验中用两台光谱仪分别测得两个 FBG 中心波长的漂移量,并将其代入(3)式进行求解计算。该方案为解决温度和波长的交叉敏感问题提供了一个较好的思路,很多研究

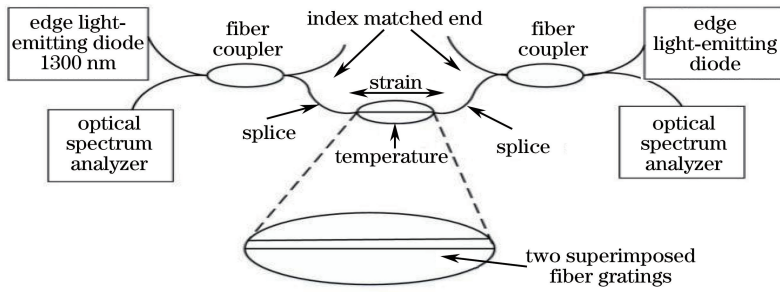


图2 采用两个 FBG 测量应力的原理图

Fig. 2 Strain measurement schematic with two FBGs

人员在该思想的基础之上进行了大量的研究,取得了较多的科研成果。但是,该方法要求两个 FBG 的波长相差必须足够大,因此需要两套光源和解调装置,价格比较昂贵。

3.1.2 双参量矩阵运算法

双参量矩阵运算法与双波长矩阵运算法类似,两者均使用波长作为参量,区别在于双参量矩阵法还采用一个对应变和温度同时敏感并且线性相关的参量(如功率),从而剔除温度的影响或实现应变和温度的同时测量。FBG 结合法布里-珀罗(F-P)腔分离温度和应变的方法如图3所示^[15]。

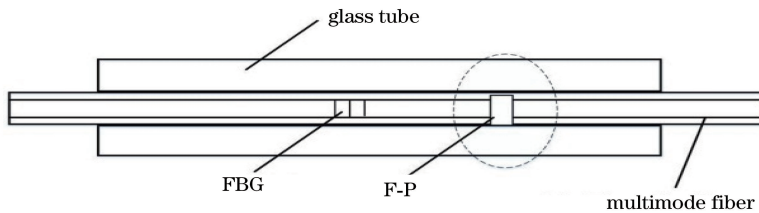


图3 FBG 结合 F-P 腔的结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of FBG combined with F-P cavity

将一个 FBG 和一段多模光纤共同放置在一个细玻璃管中,两个光纤中间为腔长为 L 的 F-P 腔。这种干涉腔为空气的结构对横向应变和热应变不敏感,将 F-P 腔对轴向应变的干涉变化作为所需的另一个参量,求解得到对应的应变和温度变化量。这种方法中 F-P 的腔体长度可控,但是结构相对较为复杂,工艺要求较高。

Wang 等^[18]对上述方法进行改进,将基于隔膜的非本征型 F-P 腔(DEFPI)与 FBG 结合,实现了压力和温度的同时测量,且测量精度较高。DEFPI 主要测量压力的变化,腔体上留有气孔,可以减缓腔体内空气发生热膨胀而引起的误差;FBG 用于测量温度的变化。

3.1.3 反向传播(BP)神经网络算法

BP 神经网络是一种正向输入计算、误差反向传播的学习网络,需要预先输入一些数据对网络进行训练以确定网络的各个参数,通过不断的训练和学习,逐层修正连接权值,直到连接权值误差降至可以接受的范围,网络学习训练过程随之结束。

樊晓宇^[19]设计的 BP 神经网络系统结构如图4所示。参考光纤 FBG 1 检测温度信号,传感光纤 FBG 2 检测温度和应变的混合信号。在实际测量时,传感数据不可避免地会受到噪声等影响,直接依靠参考光纤对温度的参照得到应变量会使输出结果不准确。BP 神经网络能自适应地发现传感信息的内在特性和规律,具有较好地恢复失真和畸变数据的能力。检测信号经耦合器进入光/电转换器件后转换为电压信号,用训练完成的 BP 神经网络对输入数据进行计算,可以使整个网络的输出达到更高的精度要求。结果显示,网络输出对应的应变信号误差小于 1×10^{-9} ,有效抑制了温度对应变信号的非线性影响。虽然该方法根据训练学习的程度可以达到很高的精度,但是也存在一些问题,例如 BP 神经网络在训练时不能保证其一定收敛,并且容易出现局部极小值问题,所以需要改进和优化。

3.2 温度补偿法

3.2.1 特殊结构温度补偿法

采用热膨胀系数不同的材料设计的特殊结构可以补偿 FBG 的温度特性^[20-21]。魏鹏等^[22]设计的温度补

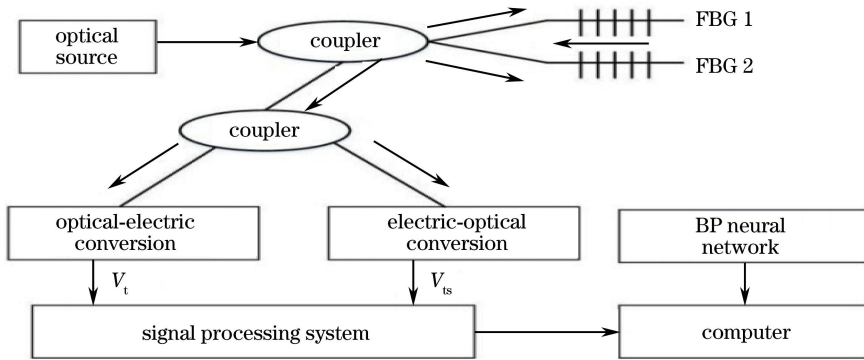


图 4 BP 神经网络系统结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of BP neural network system

补偿结构的封装如图 5 所示。补偿材料 1 为石英, 补偿材料 2 为有机玻璃, 两种材料的热膨胀系数不同。对 FBG 进行预拉伸, 使其产生一定的应变, 并将其固定在材料 2 上, 材料 1 与材料 2 之间用粘胶剂固定。有机玻璃的热膨胀系数比石英大, 温度升高时有机玻璃发生的膨胀更大。当 FBG 两端固定点之间的距离减小时, FBG 的应力会减小, 布拉格波长朝短波方向漂移。原本温度升高时引起的 FBG 向长波方向的漂移正好与布拉格波长朝短波方向的漂移抵消。此方法简单且容易实现, 但是整个结构的长期稳定性还需要进一步提高。在温度补偿结构的制作过程中, 粘胶剂的选择和涂覆部位的变化等都会对补偿效果产生影响。

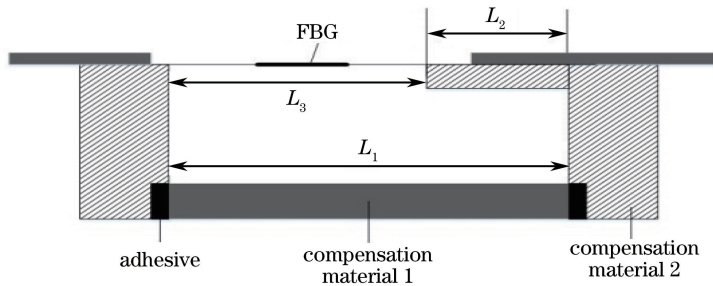


图 5 采用不同热膨胀系数材料设计的温度补偿结构的封装示意图

Fig. 5 Encapsulation diagram of temperature compensation structure consisting of materials with different thermal expansion coefficients

俞钢等^[23]设计了一种剪刀型温度补偿结构, 这种结构无需给 FBG 施加预应力, 其结构示意图如图 6 所示。这种结构的支架形似剪刀, FBG 通过环氧树脂黏合在剪刀型支架的左侧, 金属丝固定在支架的右侧, 上端用螺杆 1 固定, 下端用环氧树脂黏合, 可根据需要调节金属丝的长度。剪刀型支架的右下端与基座黏合, 不可自由伸缩, 左下端基座上开有缺口, 可保证 FBG 自由伸缩。

这种剪刀型温度补偿结构与采用两种不同热膨胀系数材料的温度补偿结构的原理基本类似, 只不过剪

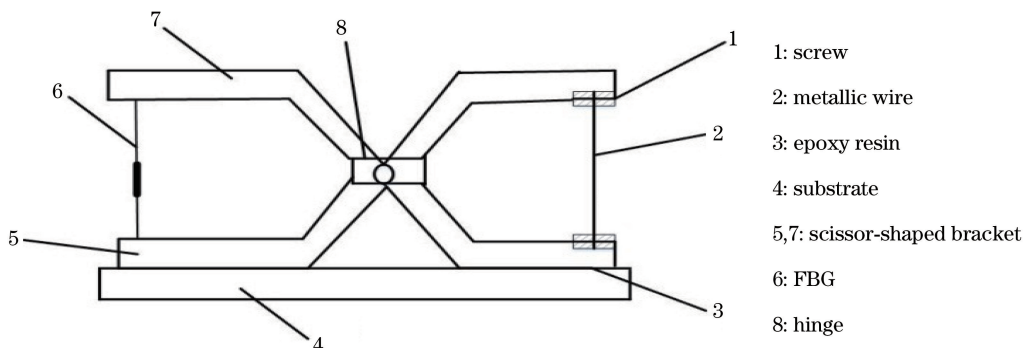


图 6 剪刀型温度补偿结构封装示意图

Fig. 6 Encapsulation diagram of scissor-shaped temperature compensation structure

刀型结构不用考虑多种材料的热膨胀系数,只需要金属丝的热膨胀系数比 FBG 的大即可。当温度升高时,金属丝伸长量大于 FBG,通过剪刀型支架正好补偿 FBG 的温度漂移。实验表明在 $-30\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,温度灵敏度为 $0.001\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,为未经补偿时的 $1/10$,补偿效果明显。在结构设计方面,FBG 应变量的变化与支架材料无关,只与金属丝有关,并且 FBG 始终保持悬空,在受拉伸时内部应力均匀,不会产生啁啾现象。这种结构虽然设计简单,但是容易松动,长久使用不易达到最初的设计效果,长期使用的可靠性比较差。

除了以上介绍的几种方法之外,还有八角型结构^[14]、悬臂梁结构^[24-25]等,这些结构用一部分应力抵消由温度引起的波长漂移,能够很好地实现温度的补偿,但是这些封装结构都存在长期可靠性差的问题,布拉格波长仍然会发生漂移。因此,Weidman 等^[26-27]开始寻求使用负膨胀材料进行封装的方法。

3.2.2 负膨胀材料温度补偿法

由(1)、(2)式可知,温度变化时 FBG 反射波中心波长的漂移量满足

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2\Delta \left(\frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}}\alpha_f \right), \quad (4)$$

式中 α_f 为 FBG 的热膨胀系数, $\alpha_f = \Delta^{-1} d\Delta/dT$ 。为了抑制温度的交叉敏感,引入轴向应力 $\epsilon(T)$,经补偿后的 FBG 的总热膨胀系数为

$$\alpha = \alpha_f + \alpha_c, \quad (5)$$

式中 α_c 为 FBG 的轴向热膨胀应变系数, $\alpha_c = d\epsilon/dT$ 。温度补偿后的 FBG 反射波的中心波长与温度的变化关系满足^[27]

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = \left(\frac{\partial \lambda_B}{\partial T} \right)_{\epsilon} + \left(\frac{\partial \lambda_B}{\partial \epsilon} \right)_T \alpha_c, \quad (6)$$

式中

$$\left(\frac{\partial \lambda_B}{\partial \epsilon} \right)_T = 2n_{\text{eff}}\Delta k, \quad 0 < k < 1. \quad (7)$$

将(4)、(5)、(7)式代入(6)式可得

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2\Delta \left\{ \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}} [k\alpha + (1-k)\alpha_f] \right\}. \quad (8)$$

由(8)式可以得到,若 α 为负值,则 $d\lambda_B/dT$ 的数值减小,当 $\alpha = \{ -(1-k)\alpha_f - [dn_{\text{eff}}/(n_{\text{eff}}dT)] \}/k$ 时,有

$$d\lambda_B/dT = 0. \quad (9)$$

为满足(9)式的要求,选择具有负膨胀系数的材料与 FBG 结合而成特殊结构,并选择合适的材料尺寸,从而使 FBG 反射光谱的中心波长不受温度的影响。Iwashima 等^[27]通过实验验证了未经补偿时 FBG 的温度灵敏度为 $0.01\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,设计结构进行温度补偿后,FBG 的温度灵敏度达到 $0.0013\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。

王艳等^[28]采用具有负膨胀系数的陶瓷材料(ZrW_2O_8)设计温度补偿结构,如图 7 所示。将负膨胀材料与环氧胶混合均匀制成块状,再将被拉伸的 FBG 的两端粘贴在固定点陶瓷块上。此结构简单灵活,取得了一定的补偿效果,经过补偿后,温度系数从 $0.01087\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 降为 $0.00598\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。

杜彦良等^[29]采用 β -锂霞石微晶玻璃作为负膨胀材料设计了温度自补偿结构,其封装图如图 8 所示。材料 1 为 β -锂霞石微晶玻璃,材料 2、3 均为铬钢管。材料 2 起传递应变的作用;材料 3 不仅能够承受外界施加的应变,而且能保护内部器件。用树脂胶将 FBG 整体紧密地粘贴在负膨胀材料上,使其完全感受应变和温

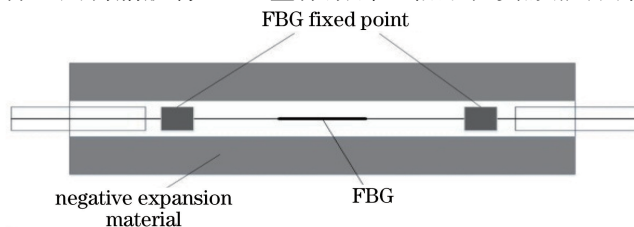


图 7 采用陶瓷材料的温度补偿结构的封装示意图

Fig. 7 Encapsulation diagram of temperature compensation structure consisting of ceramic material

度的变化。为实现对 FBG 的温度补偿,要求负膨胀材料热收缩产生的波长漂移 $\Delta\lambda_\epsilon$ 刚好可以抵消温度变化造成的波长漂移 $\Delta\lambda_T$, 即

$$\Delta\lambda_T = -\Delta\lambda_\epsilon. \quad (10)$$

当温度升高时,材料 1 热收缩而材料 2 热膨胀,所以应考虑材料 1、2 之间的物理约束力的作用。设计适当的结构,使材料 1 的收缩量等于材料 2 的伸长量,这样温度变化时材料 1 才能正确感应温度和应力的变化引起的自由伸缩。计算得到的负膨胀材料的热膨胀系数需达到 $-9.0 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。比较目前主要的负膨胀材料,并去除液态等不适用和工艺较为复杂的材料^[30],综合考虑,认为 β -锂霞石微晶玻璃最符合对负膨胀材料的要求。实验验证了此结构的温度敏感性为裸光纤的 1/10,温度敏感度由 $11.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 降至 $1.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,并且同时达到了应变增敏的效果。

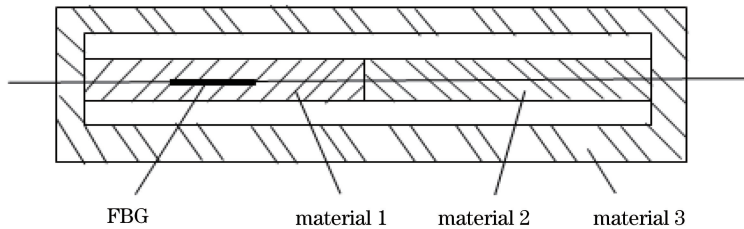


图 8 温度自补偿结构封装示意图

Fig. 8 Encapsulation diagram of temperature self-compensation structure

3.2.3 参考光纤法

3.2.3.1 Monel-Terfenol-D 合金温度补偿

Mora 等^[31]设计了用参考 FBG 结合合金材料来实现温度补偿的电流传感器,其结构示意图如图 9 所示。将具有相同中心波长的 FBG 1 和 FBG 2 分别粘贴在 Monel 合金和 Terfenol-D 合金上,两种合金具有相近的热膨胀系数,因此两个 FBG 感受外界环境温度变化产生的中心波长的漂移量基本相同。当合金周围的磁场发生变化时,由于 Monel 合金无磁性,粘贴在它上面的 FBG 1 不受周围磁场的影响,其中心波长不发生漂移,而 Terfenol-D 合金受周围磁场的影响,使 FBG 2 的中心波长产生向短波或者向长波方向的漂移,由 FBG 1 的参考量便可以测出 FBG 2 所受应力的大小。

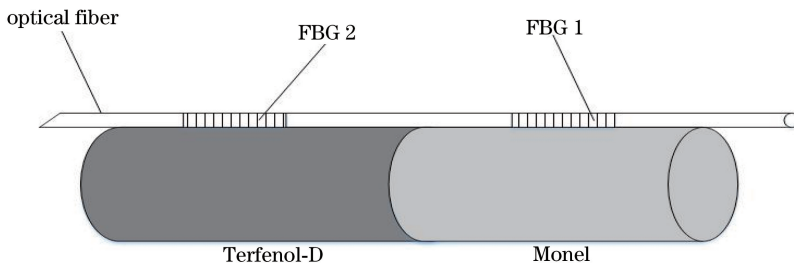


图 9 Monel-Terfenol-D 合金温度补偿结构示意图

Fig. 9 Diagram of Monel-Terfenol-D alloy temperature compensation structure

该方法在测量电流和磁场方面具有较强的实用性,研究人员在此基础上进行改进,取得了较好的结果。García-Miquel 等^[32]把 4 个 FBG 用于磁激励器,实现了压力和温度的同时测量,并设计其中一个 FBG 作为压力放大系统,提高了压力测量灵敏度。

3.2.3.2 偏置电流温度补偿

Zhao 等^[33]根据磁场的叠加设计了一种偏置电流温度补偿结构,如图 10 所示。设置两个相同的磁路系统,磁路上缠绕 3 个绕组。在绕组 1、2 上施加偏置直流电流 (DC),在绕组 3 上施加被测电流。偏置电流在两个磁路中分别产生与被测电流形成的磁场强度相同、磁场方向相反的偏置磁场 H_0 和 $-H_0$,将两个具有相同中心波长的 FBG 1 和 FBG 2 分别固定在两个磁路中的超磁致伸缩材料 (GMM) 棒上。

当待测电流产生 H 的磁场强度时,两个磁路中分别产生 $-H_0 + H$ 和 $H_0 + H$ 的磁场强度。当待测电流为 0 (即 $H=0$) 时,FBG 1 和 FBG 2 的波长漂移 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 的方向和大小是相等的。当待测电流不为 0

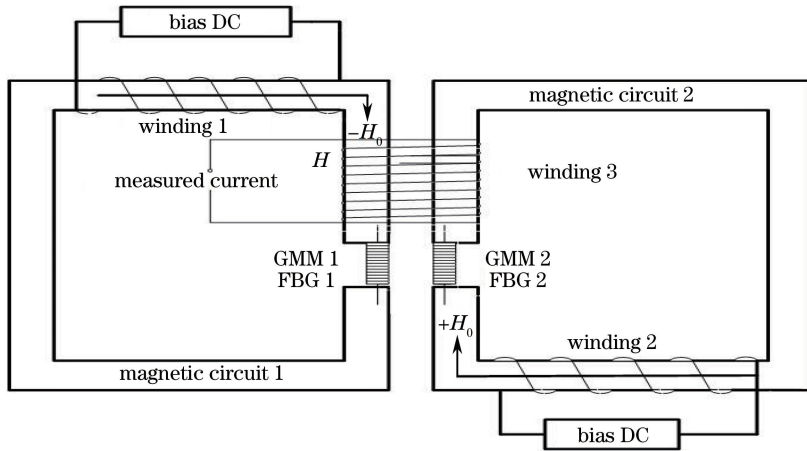


图 10 偏置电流温度补偿结构示意图

Fig. 10 Diagram of bias current temperature compensation structure

时,需同时考虑温度和应变的影响。当 FBG 1 感受到的应变减小,则反射波的中心波长向短波方向漂移; FBG 2 正好相反,当 FBG 2 感受到应变增加,则反射波的中心波长向长波方向漂移。温度变化对两个 FBG 的影响反映在同时增加或者减小相同的应变,所以波长差值不变。这种 GMM-FBG 电流传感器可以补偿温度的影响,并依靠波长的差值来实现电流的测量。

3.2.3.3 表面式温度补偿

王为等^[34]根据对船舶系统的健康监测问题设计了一种表面式应变传感器结构,并且实现了温度的参考测量,如图 11 所示。

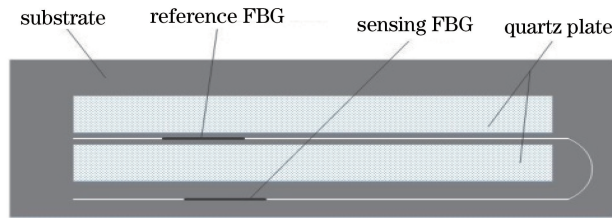


图 11 表面式应变传感结构示意图

Fig. 11 Diagram of surface strain sensing structure

将传感 FBG 粘贴在聚酰亚胺薄膜衬底上,聚酰亚胺具有耐化学腐蚀、抗电磁干扰、机械性能好、较好的应变传递能力和热传导能力、易与金属材质接触等特点,使传感 FBG 能同时感受温度和应变的变化。实验选取厚度为 0.3 mm 的石英片,中间刻一个深为 0.15 mm 的凹槽。为了实现温度的参考测量,将作为温度补偿的参考 FBG 放置在刻槽的石英薄片中,其两端固定在槽内,光栅部位不黏合且保持自由状态,将石英薄片未放置光栅的一侧固定在衬底上。石英薄片与 FBG 的热膨胀系数相同,所以参考 FBG 能够较为准确地感受温度的变化。同时,石英材质较硬且固定侧远离参考 FBG,很难传递应变,而且参考 FBG 又处于自由状态,因此更加确保参考 FBG 不受应变的影响。基于表面式应变传感结构的传感器尺寸较小,便于粘贴在实际结构表面,具有很好的实用价值。

此外,很多其他方法,包括磁致伸缩调制型温度补偿方法^[35]、将温度和应变进行分离的二元回归算法^[36]、用超结构的 FBG 实现应变温度的同时测量^[37]、通过电子反馈控制电路补偿温度的影响^[38]、采用两个不同包层直径 FBG 的熔接法^[39],以及基于最小二乘法的 Matlab 4 阶多项式拟合法^[40]等,均能实现对应变的测量和对温度的补偿。

4 结束语

温度和应变对 FBG 的交叉影响严重阻碍传感器的实用化。分类介绍了几种典型的温度和应变交叉敏

感的解决方法。温度分离法结构更为简单,且不易蠕变,精度较高,但是不可避免的在动态测量中会因温度滞后造成测量误差;温度补偿法的设计结构相对复杂,实用性好,但是在长期稳定性方面仍然存在不足。随着FBG在各个应用领域的进一步扩展,根据具体的情况需要设计更为经济有效的解决方案是FBG传感器实现实用化和大规模生产的重要前提。随着理论的发展和实践创新,相信造价更低、精度更高、性能更优越的FBG封装结构及温度补偿技术会不断涌现出来,FBG传感监测技术也会被更好地应用于工程中。

参 考 文 献

- [1] Li Guoli, Li Zhiqian. Research of the temperature compensation for strain sensing measurement of fiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2005, 42(4): 25-28.
李国利,李志全. 光纤光栅应变传感测量中的温度补偿问题[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(4): 25-28.
- [2] Liu Tiegeng, Wang Shuang, Jiang Junfeng, *et al.* Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1681-1692.
刘铁根,王双,江俊峰,等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [3] Liang Wenbin, Lin Yuchi, Zhao Meirong, *et al.* Applications of fiber Bragg grating in ship structural monitoring[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(6): 682-685.
梁文彬,林玉池,赵美蓉,等. 光纤光栅在船舶结构状态检测中的应用[J]. *激光与红外*, 2012, 42(6): 682-685.
- [4] Li X X, Ren W X, Bi K M. FBG force-testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2015, 223: 105-113.
- [5] Cao Jin, Xu Gang, Dai Yutang, *et al.* Compressor status detection based on optical fiber sensors[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(1): 29-32.
曹靳,徐刚,代玉堂,等. 基于光纤传感器的压缩机状态监测[J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(1): 29-32.
- [6] Jia Junhu. The model research and experimental analysis on GMM-FBG AC current sensing system[D]. Hebei: Yanshan University, 2014: 15-46.
贾军虎. GMM-FBG交流电流传感系统的模型研究及实验分析[D]. 河北:燕山大学, 2014: 15-46.
- [7] Qi Shitao, Tang Liming, Liu Tiebing, *et al.* The experimental study of ultrasound sensor based on fiber gratings[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2006, 25(4): 410-414.
戚仕涛,汤黎明,刘铁兵,等. 基于光纤光栅的超声传感器实验研究[J]. *北京生物医学工程*, 2006, 25(4): 410-414.
- [8] Zhang Guihua, Zhang Dingding, Li Yi, *et al.* Parameters optimization and strain transfer of FBG sensor for mining model[J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(7): 32-35.
张桂花,张丁丁,李毅,等. 采矿模型的FBG传感器参数优化与应变传递[J]. *光通信技术*, 2016, 40(7): 32-35.
- [9] Sun Jian. Application research of fiber grating displacement sensor in slope monitoring[J]. *Industry and Mine Automation*, 2014, 40(2): 95-98.
孙健. 光纤光栅位移传感器在边坡监测中的应用研究[J]. *工矿自动化*, 2014, 40(2): 95-98.
- [10] Dong Xingfa, Huang Yonglin, Lang Kewei, *et al.* Temperature compensation in vibration sensor with fiber gratings [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, 25(5): 404-407.
董兴法,黄勇林,郎科伟,等. 光纤光栅型振动传感器中的温度补偿研究[J]. *半导体光电*, 2004, 25(5): 404-407.
- [11] Wu Chuanfu, Liu Youxin. Solutions of temperature compensation of fiber grating strain sensors[J]. *Infrared*, 2006, 27(4): 11-14.
吴传福,刘有信. 光纤光栅应变传感器温度补偿解决方案[J]. *红外*, 2006, 27(4): 11-14.
- [12] Gao Longji. Research on a new optical current transducer based on fiber Bragg grating[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2007: 17-21.
高龙集. 基于光纤Bragg光栅的光学电流互感器的研究[D]. 吉林:东北电力大学, 2007: 17-21.
- [13] Guo Zixue, Yan Weiping, Du Guotong, *et al.* Temperature compensation for fiber Bragg gratings[J]. *Optoelectronic Technology*, 2006, 26(1): 49-52.
郭子学,闫卫平,杜国同,等. 光纤Bragg光栅温度补偿方法的研究[J]. *光电子技术*, 2006, 26(1): 49-52.
- [14] Sante R D, Bastianini F. Temperature-compensated fibre Bragg grating-based sensor with variable sensitivity[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2015, 75: 5-9.
- [15] Zhou Guopeng. Research on FBG sensor package technology and temperature/strain separation method[D]. Nanjing:

- Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005: 43-49.
- 周国鹏. 光纤布拉格光栅传感器封装与应变/温度分离技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005: 43-49.
- [16] Zhang Ying. The basic research on cross sensitivity of Fiber Bragg grating sensor[D]. Jilin: Jilin University, 2005: 40-44.
张 鹰. 光纤布拉格光栅传感器交叉敏感问题基础研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2005: 40-44.
- [17] Xu M G, Archambault J L, Reekie L, *et al.* Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors[J]. Electronics Letters, 1994, 30(13): 1085-1087.
- [18] Wang W, Jiang X, Yu Q. Temperature self-compensation fiber-optic pressure sensor based on fiber Bragg grating and Fabry-Perot interference multiplexing[J]. Optics Communications, 2012, 285(16): 3466-3470.
- [19] Fan Xiaoyu. Study of FBG strain sensor temperature compensation system[J]. Optical Communication Technology, 2012, 36(6): 7-9.
樊晓宇. 光纤光栅应变传感器温度补偿系统研究[J]. 光通信技术, 2012, 36(6): 7-9.
- [20] Li J, Sun B. Theory analysis of novel fiber Bragg grating temperature compensated method based on thermal stress[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2015, 27(2): 024115.
- [21] Huang Shan, Zhao Huafeng, Yu Tao, *et al.* Bridge structure for FBG temperature compensation[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(6): 439-453.
黄 山, 赵华凤, 俞 涛, 等. 光纤光栅温度补偿桥式结构[J]. 半导体光电, 2003, 24(6): 439-453.
- [22] Wei Peng, Li Lijun, Guo Junqiang, *et al.* Cross sensitivity of temperature in fiber Bragg grating strain sensing[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 105-109.
魏 鹏, 李丽君, 郭俊强, 等. 光纤 Bragg 光栅应力传感中温度交叉敏感问题研究[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 105-109.
- [23] Yu Gang, He Sailing. A new package technique for fiber gratings[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(3): 291-293.
俞 钢, 何赛灵. 一种新型的光纤光栅封装装置[J]. 光子学报, 2004, 33(3): 291-293.
- [24] Khan M M, Panwar N, Dhawan R. Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2014, 205: 79-85.
- [25] Yu Youlong, Guang Boou, Dong Xiaoyi, *et al.* Passive temperature induced wavelength-shift compensating technique for fiber Bragg grating force sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(3): 400-404.
余有龙, 关柏鸥, 董孝义, 等. 光纤光栅力传感器的无源温漂补偿技术[J]. 光学学报, 2000, 20(3): 400-404.
- [26] Weidman D L, Beall G H, Chyung K C, *et al.* A novel negative expansion substrate material for athermalizing fiber Bragg gratings[C]. 22nd European Conference on Optical Communication, 1996: 5664586.
- [27] Iwashima T, Inoue A, Shifgematsu M, *et al.* Temperature compensation technique for fiber Bragg gratings using liquid crystalline polymer tubes[J]. Electronics Letters, 1997, 33(5): 417-419.
- [28] Wang Yan, Yan Weiping, Zhang Yushu, *et al.* Research of optical fiber Bragg grating temperature compensation based on negative thermal expansion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 10-25.
王 艳, 闫卫平, 张玉书, 等. 基于负膨胀材料的光纤 Bragg 光栅温度补偿研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 10-25.
- [29] Du Yanliang, Liu Chenxi, Li Jianzhi. Investigation into new optical-fiber-grating strain sensors based on temperature compensation[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2008, 6(1): 19-22.
杜彦良, 刘晨曦, 李剑芝. 具有温度自补偿功能新型光纤光栅应变传感器的研究[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(1): 19-22.
- [30] Tan Qiangqiang, Zhang Zhongtai, Fang Keming. Developments of negative thermal expansion materials in complex oxides[J]. Functional Materials, 2003, 34(4): 353-356.
谭强强, 张中太, 方克明. 复合氧化物负热膨胀材料研究进展[J]. 功能材料, 2003, 34(4): 353-356.
- [31] Mora J, Diez A, Cruz J L, *et al.* A magnetostrictive sensor interrogated by fiber gratings for DC-current and temperature discrimination[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 12(12): 1680-1682.
- [32] García-Miquel H, Barrera D, Amat R, *et al.* Magnetic actuator based on giant magnetostrictive material Terfenol-D with strain and temperature monitoring using FBG optical sensor[J]. Measurement, 2016, 80: 201-206.
- [33] Zhao H, Sun F F, Yang Y Q, *et al.* A novel temperature-compensated method for FBG-GMM current sensor[J]. Photonics Technology, 2013, 308: 64-69.

- [34] Wang Wei, Lin Yuchi. Research on surface FBG sensors with temperature compensation[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(3): 362-365.
王 为, 林玉池. 表面式温度补偿型光纤光栅传感器研究[J]. 光电器件, 2009, 30(3): 362-365.
- [35] Yi Benshun, Hu Ruimin, Zhu Zibi, *et al.* Temperature compensation techniques for fibre Bragg gratings tuned by magnetostrictive transducers[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(12): 1685-1688.
易本顺, 胡瑞敏, 朱子碧, 等. 磁致伸缩调制型光纤 Bragg 光栅的温度补偿方法[J]. 中国激光, 2002, 29(12): 1685-1688.
- [36] Wang Wenzhen, Liu Yueming. Research on temperature cross sensitivity compensation technology of FBG strain sensor [J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 2(29): 51-56.
王雯珍, 刘月明. FBG 应变传感器温度交叉敏感补偿技术研究[J]. 光电技术应用, 2014, 2(29): 51-56.
- [37] Guan B O, Tam H Y, Tao X M, *et al.* Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(6): 675-677.
- [38] Dias J A S, Ferreira E C, Leite R L. Electronic technique for temperature compensation of fibre Bragg gratings sensors [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2008, 62(1): 72-76.
- [39] James S W, Dockney M L. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors[J]. Electronics Letters, 1996, 32(12): 1133-1134.
- [40] Ma Tianbing, Zhao Yaojun, Zhang Hui, *et al.* Research of temperature compensation of optical fiber current sensor based on Matlab[J]. Industry and Mine Automation, 2009, 35(9): 62-64.
马天兵, 赵耀军, 张 辉, 等. 基于 Matlab 的光纤电流传感器温度补偿研究[J]. 工矿自动化, 2009, 35(9): 62-64.