

文章编号: 0253-2239(2005)07-875-6

## 压力与温度双参量传感优化系统的研制\*

王宏亮<sup>1</sup> 乔学光<sup>1</sup> 周 红<sup>1</sup> 尉 婷<sup>1</sup> 傅海威<sup>1,2</sup> 赵大壮<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 西安石油大学理学院, 西安 710065  
<sup>2</sup> 西安交通大学电信学院, 西安 710049)

**摘要:** 研究了一种基于管式弹性应变敏感元件的光纤光栅传感器结构。利用双光纤布拉格光栅(FBG)产生双反射峰,对压力和温度进行了同时区分测量。在压力为 0~20 MPa、温度为 20~150 °C 的范围内,布拉格反射波长对应压力与温度的变化均呈现良好的线性响应特性,响应灵敏度分别为 0.089 nm/MPa 和 0.024 nm/°C。压力与温度双参量系数矩阵的实验拟合值与理论计算值之差仅占理论计算值的 1.8%。该方法与标准测量方法比较,压力的准确度为 0.47%;温度的准确度为 0.74%。该方法还较好地削减了压力与温度交叉敏感的影响,按压力与温度测量的最大量限计算,温度对压力交叉影响的误差仅为 0.16%。

**关键词:** 导波与光纤光学; 双参量传感; 光纤布拉格光栅; 压力与温度同时区分测量

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## Development of Optimizing System of Two-Parameters for Sensing Pressure and Temperature with Dual-Fiber Bragg Grating Sensor

Wang Hongliang<sup>1</sup> Qiao Xueguang<sup>1</sup> Zhou Hong<sup>1</sup> Wei Ting<sup>1</sup> Fu Haiwei<sup>1,2</sup> Zhao Dazhuang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Sciences, Xian Shiyou University, Xian 710065  
<sup>2</sup> School of Electronic and Information Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

**Abstract:** A new structure of fiber Bragg grating (FBG) sensor based on sticking two FBGs on tubular elastic element is developed. Simultaneous measurement for the pressure and temperature has been experimented by two FBGs producing two wave spike respectively. In the range of 0~20 MPa and 20~150 °C, the FBG's Bragg wavelength change is linear to the pressure and temperature. The pressure and temperature sensitivities are 0.089 nm/MPa and 0.024 nm/°C respectively. The experimental value of coefficient matrix of the FBG's wavelength change to pressure and temperature is coincided with the theoretical value very well, and the relative error is 1.8%. Compared with the standard measurement method, and the accuracies of pressure and temperature are 0.47% and 0.74% respectively. The method can cut the error arising from the temperature cross-sensitivity in pressure, the error of which is about 0.16% as pressure and temperature are at 20 MPa and 150 °C respectively.

**Key words:** guided wave and fiber optics; two-parameter sensing; fiber Bragg grating; pressure and temperature simultaneous measurement

### 1 引 言

自从光纤布拉格光栅问世以来,利用光纤布拉格光栅进行双参量或多参量同时检测一直是该传感领域研究中的一个热点问题。随着光纤光栅传感技术的发展,人们已不断从单参量到多参量对光纤光栅的温度和应力特性进行了全面研究,获取了许多

很有价值的实验结果<sup>[1~3]</sup>。本文利用应变与温度的敏感性能的差别,同时提取这两个参量信息的理论模型,并应用光纤布拉格光栅反射波长对应变与温度双参量调谐灵敏度的矩阵态性优化的数学模型<sup>[4,5]</sup>,设计并制作了对应变和温度进行双参量同时传感测量的光纤布拉格光栅传感器系统。

\* 国家自然科学基金(60177028)和国家 863 计划(2002AA313150)资助课题。

作者简介: 王宏亮(1951~),男,陕西横山人,西安石油大学理学院,教授,主要从事光纤传感、光功能材料等方面的研究。

E-mail: whl@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2004-06-15; 收到修改稿日期: 2004-10-25

## 2 基本理论

### 2.1 光纤布拉格光栅传感理论模型

根据光纤耦合模理论,满足光纤布拉格光栅反射条件  $\lambda_b = 2n_{\text{eff}}\Lambda$  的光能够被光纤布拉格光栅反射。实验证明,某些物理量作用于光纤布拉格光栅上会引起光栅栅距  $\Lambda$  及光栅处的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的变化,使光纤布拉格光栅反射(或透射)光中心波长  $\lambda_c$  产生一定的漂移量  $\Delta\lambda$ 。其中力学量(诸如应变  $\epsilon$ , 应力  $\sigma$ , 压力  $P$  等)通过影响光纤布拉格光栅的栅距和弹光效应而产生波长漂移为  $\Delta\lambda_1$ ,热学量(如温度  $T$ )导致光纤布拉格光栅产生热膨胀和热光效应而产生波长漂移为  $\Delta\lambda_2$ ,这样,力学量和热学量共同作用而产生波长漂移总量为

$$\Delta\lambda = K_f\Delta F + K_h\Delta H, \quad (1)$$

式中  $K_f$  是与光纤布拉格光栅传感系统的力学性质、光纤泊松比  $\mu$  和纤芯有效折射率  $n_{\text{eff}}$  有关的常数,  $k_h$  是与光纤布拉格光栅传感系统的热力学性质、纤芯的热光系数  $\xi$  和热膨胀系数  $\alpha$  有关的常数。(1) 式是假定力学量  $\Delta F$  和热学量  $\Delta H$  扰动范围不大且彼此独立的条件下光纤布拉格光栅波长传感的理论基础。力学量和热学量可通过直接方式或间接方式作用于光纤布拉格光栅,若将光纤布拉格光栅粘贴于弹性衬底材料之上,则作用于光纤布拉格光栅上的应变  $\epsilon$  与温度  $T$  可通过弹性衬底材料的形变和热膨胀间接产生,这时,(1) 式变为

$$\Delta\lambda = \lambda_0(1 - P_e)\epsilon +$$

$$\lambda_0[\alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha)]\Delta T, \quad (2)$$

式中  $P_e$  为光纤的有效弹光系数,  $\alpha_s$  为弹性衬底材料的热膨胀系数。在实际应用中,使衬底材料产生应变的外应力形式包括纵向应力(使光纤布拉格光栅沿轴向拉伸或压缩),横向应力(使光纤布拉格光栅侧向弯曲)及扭应力(使光纤布拉格光栅产生扭曲形变)。由(2) 式可看出,若基于弹性衬底材料上耦连的光纤布拉格光栅传感系统受某外场(如应力场或温度场)的作用时,只要通过光电检测仪(如光谱仪)测出光纤布拉格光栅反射(或透射)光的波长变化,即可获取外场(如应力场或温度场)变化的定量信息。

### 2.2 基于弹性衬底材料的双光纤布拉格光栅对压力温度同时传感的理论模型

传感系统实验原理图和弹性衬底应变敏感元件结构如图 1 所示,当流入管内流体(如液体或气体)对管的内壁施加各向均匀压力  $P$ ,且当  $d_0/h < 20$  时,则由广义胡克定律可推出圆柱管壁沿环向产生的应变为

$$\epsilon = \frac{d_0}{Eh}(1 - 0.5\mu)P, \quad (3)$$

式中  $d_0$  为管的设计内径,  $h$  为管的外径与内径之差,  $\mu$  为材料的泊松比,  $E$  为衬底材料的弹性模量。(3) 式即为柱形管弹性应变敏感元件将管内压力转换为沿管外环向应变分量的传感理论模型。

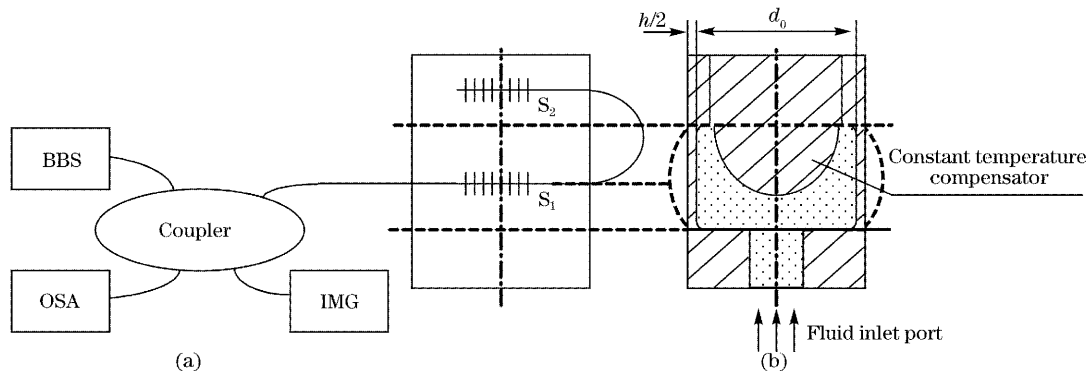


图 1 (a) 实验装置示意图, (b) 管式弹性元件结构

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the experimental setup, (b) structure of tubular-elastic element

若将两只布拉格反射波长相差较大(但不超出光源的带宽)的光纤布拉格光栅  $FBG_1$  和  $FBG_2$  串连熔接在一起并环向粘贴固化于如图 1(a) 所示的  $S_1$  和  $S_2$  位置处,其中  $S_1$  位于应变管环向应变最大处[对应于图 1(b) 所示的虚线最大位移处],  $S_2$  位于 2 cm 厚的管底外侧且靠近底部,这就构成基于弹性衬底材料的双光纤布拉格光栅对压力温度同时测量

的传感器系统。若将该传感器系统置于既有力场又有温度场的外场中,则对于  $FBG_1$  来说,既对压力敏感,同时又对温度敏感,由(2) 式得

$$\Delta\lambda_1 = \lambda_{10}(1 - P_e)\epsilon_1 +$$

$$\lambda_{10}[\alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha)]\Delta T, \quad (4)$$

实际上,  $\alpha_s \gg \alpha$ , 即衬底材料的热胀系数远大于光纤的热膨胀系数。(4) 式可简化为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_1 = & \lambda_{10}(1 - P_e)\epsilon_1 + \\ & \lambda_{10}[\xi + (1 - P_e)\alpha_s]\Delta T, \end{aligned} \quad (5)$$

将(3)式代入(5)式得

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_1 = & \frac{\lambda_{10}d_0}{Eh}(1 - 0.5\mu)(1 - P_e)\Delta P + \\ & \lambda_{10}[\xi + (1 - P_e)\alpha_s]\Delta T, \end{aligned} \quad (6)$$

对于 FBG<sub>2</sub> 来说,由于被环向粘贴于底厚为 2 cm 的应变金属圆柱管靠近管底外侧且距管底 0.5 cm 处,管内流体作用于管壁各方向的压力都不会引起底厚为 2 cm 位置处的环向应变,因而也就不会引起 FBG<sub>2</sub> 的轴向应变,则 FBG<sub>2</sub> 的应变  $\epsilon_2 = 0$ ,FBG<sub>2</sub> 只对温度量敏感。由(2)式得

$$\Delta\lambda_2 = \lambda_{20}[\xi + (1 + P_e)\alpha_s]\Delta T, \quad (7)$$

假定压力和温度与其共同引起的布拉格波长变化  $\Delta\lambda_i$  是线性的且独立无关,则(6)式和(7)式可综合写为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{P1} & K_{T1} \\ 0 & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} K_{P1} &= \frac{\lambda_{10}d_0}{Eh}(1 - 0.5\mu)(1 - P_e), \\ K_{P2} &= 0, \\ K_{T1} &= \lambda_{10}[\xi + (1 - P_e)\alpha_s], \\ K_{T2} &= \lambda_{20}[\xi + (1 - P_e)\alpha_s], \end{aligned}$$

分别为  $\Delta\lambda_1$  和  $\Delta\lambda_2$  对应于  $\Delta P$  和  $\Delta T$  的敏感系数,由式中的各项参量可求得其理论值,亦可通过实验测定。由于上式二阶矩阵非奇异,因此, $\Delta P$  和  $\Delta T$  就可用矩阵求逆的方法求得,实际上,只要分别测出对应的  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  的两个反射峰的漂移量  $\Delta\lambda_1$  和  $\Delta\lambda_2$ ,便可推知管内压力和温度的变化情况。

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 系统的方案设计

系统的方案设计是应用矩阵态性优化的数学模型对光纤布拉格光栅反射波长对应变与温度双参量调谐灵敏度的矩阵元素进行了优化预选,使得传感器对各参量的传感灵敏度有合适的匹配,使系统满足了两个最基本的优化条件:一是采用了两种不同的传感机理得到两类不同的传感方程,从而得到所需要的系数矩阵;二是降低了系数矩阵中各行、列间的线性相关性,并减少矩阵元素间的差别,保证矩阵有良性态性,(矩阵条件数已调整为 4)。弹性衬底应变管采用 50CrVA 弹簧钢,其弹性模量  $E = 1.95 \times 10^5$  /MPa,泊松比  $\mu = 0.32$ ,管的内径  $d_0 =$

37 mm,外内径之差  $h = 2$  mm,设计耐压  $P_{\max} = 35$  MPa。FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的自由波长分别为  $\lambda_{10} = 1547.83$  nm; $\lambda_{20} = 1553.74$  nm。它们与应变管的耦合是采用专用组合式粘接剂(353D)。粘贴时,先将胶流体中的气泡在真空室中排出,然后将粘贴件放在高温高压室内进行固化。由于这种粘接剂在高温作用的较短时间内变稀而沿光栅粘贴处流动,经固化后形成平滑均匀的粘贴,且使光栅与管无相对滑动。实验时,将整个传感部分置于温控室内,测量前,严格使管内液体和管体保持热平衡,这就使得  $S_1$  与  $S_2$  之间不会形成温度梯度。在实际应用中,考虑到管内流体温度和金属圆柱管尚未达到热平衡时, $S_1$  与  $S_2$  两位置之间会存在温度梯度,因此,采取了内置温度平衡补偿器加速管内流体和金属圆柱管组成系统的热平衡。管内压力  $P$  由液压机控制,并由标准压力表读出,其测压范围为 0~25 MPa,最小分度值为 0.1 MPa,IMG 为匹配液。由带宽为 40 nm、功率为 10 mW 的宽带光源(BBS)发出的光通过光耦合器(Coupler)入射到 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub>,由 MS9710C 型光谱仪(OSA)测出其反射(或透射)中心波长的变化,即可得知管内压力和温度。

#### 3.2 定温下双反射波长对应压力的变化

图 2 分别给出了  $T = 20.7$  °C、管内压力  $P = 12$  MPa 时对应于双光栅双反射峰的位置和压力在 0~20 MPa 范围的双反射峰之间的谱宽  $\Delta\lambda_{12}$  随压力变化的实验曲线。图 2(a)中,压力变化引起左峰  $\lambda_1$  向长波方向漂移,最大漂移量为  $\Delta\lambda_1 = 1.78$  nm,而右峰  $\lambda_2$  漂移量  $\Delta\lambda_2 = 0$ ,这一结果验证了粘贴于  $S_1$  和  $S_2$  位置处的光纤布拉格光栅与管的粘接既无相对滑动,又无压力引起对 FBG<sub>2</sub> 反射波长的漂移。图 2(b)中, $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  的双反射峰间的谱宽  $\Delta\lambda_{12}$  随压力  $P$  增大而成比例地变窄, $P = 0$  MPa 时, $\Delta\lambda_{12} = 6.18$  nm, $P = 20$  MPa 时, $\Delta\lambda_{12} = 4.39$  nm,由图可见, $\Delta\lambda_{12}$  对应于  $P$  的变化呈线性关系,由于右峰  $\lambda_2$  不随压力而变,因此左峰  $\lambda_1$  的漂移随压力变化当然也呈线性关系,这和  $\lambda_1$  的实验结果相吻合。

图 3 给出了  $T = 20.7$  °C 时双反射峰  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  随压力变化的对应实验曲线。由图进一步看出:在定温下,左峰  $\lambda_1$  随压力  $P$  的变化呈线性关系,其线性拟合方程为: $\lambda_1 = 0.089P + 1547.83$  (nm),线性拟合度为  $R^2 = 0.9998$ ,而右峰  $\lambda_2 = \lambda_{20}$ ,于是得

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{P1} = |\lambda_1 - \lambda_{10}| = 0.089P, \\ \Delta\lambda_{P2} = |\lambda_2 - \lambda_{20}| = 0, \end{cases} \quad (9)$$

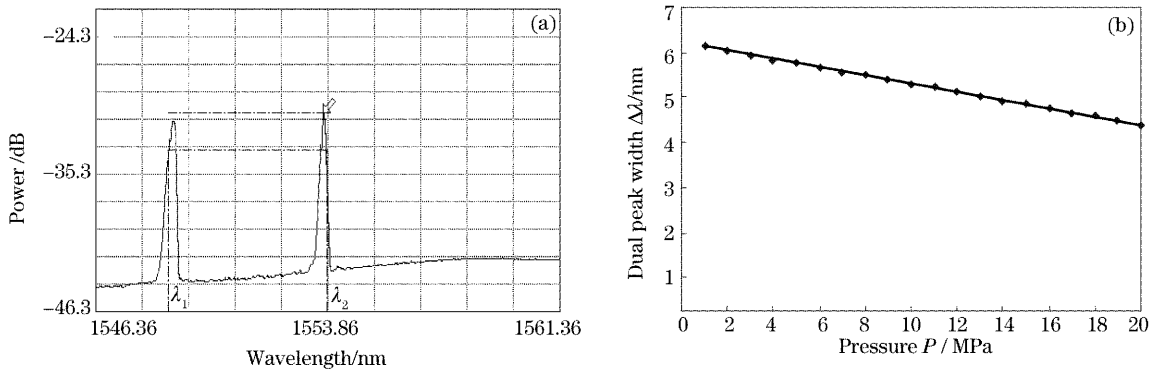


图 2 (a) 双光纤布拉格光栅反射光谱, (b) 双峰宽度随压力变化关系

Fig. 2 (a) The reflection spectrum of dual fiber Bragg grating, (b) relations of dual peak width versus measured pressure

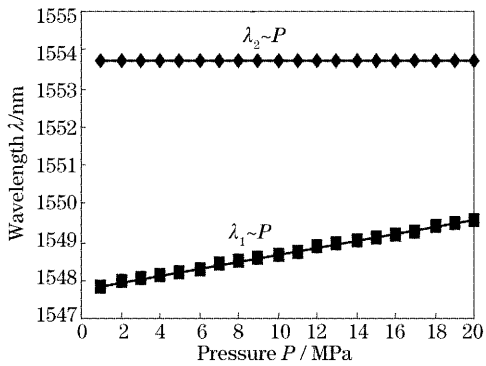


图 3 双光纤布拉格光栅反射波长随压力变化关系

Fig. 3 Relations of dual fiber Bragg wavelength shift versus measured pressure

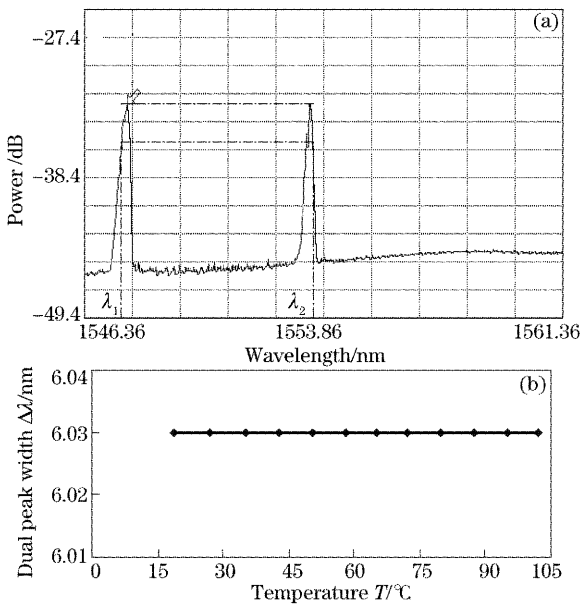


图 4 (a) 双光纤布拉格光栅反射光谱, (b) 双峰宽度随温度变化关系

Fig. 4 (a) The reflection spectrum of dual fiber Bragg grating, (b) relations of dual peak width versus measured temperature

### 3.3 定压下双反射波长对应温度的变化

图 4 分别给出了压力  $P=1$  MPa 时对应于温度为  $20.7$  °C 时的双光栅双反射峰的位置和温度在  $20\sim 102$  °C 范围的双反射峰之间的谱宽  $\Delta\lambda_{12}$  随温度变化的实验曲线。图 4(a) 中, 温度升高时, 左峰  $\lambda_1$  与右峰  $\lambda_2$  几乎同时同幅度地向长波方向漂移, 而  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  在漂移过程中无相对位移, 即  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  两个反射峰之间的谱宽始终不随温度而变, 参见图 4(b)。

图 5 给出了压力  $P=10$  MPa 时双反射峰  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  随温度变化的对应实验曲线。由图看出: 在定压下, 左峰  $\lambda_1$  与右峰  $\lambda_2$  的漂移随温度  $T$  的变化均呈现线性关系, 其线性拟合方程分别为:  $\lambda_1 = 0.023T + 1547.18$  (nm);  $\lambda_2 = 0.024T + 1553.23$  (nm), 线性拟合度分别为:  $R_1 = 0.9998$ ;  $R_2 = 0.9997$ 。同样可得

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{T1} = |\lambda_1 - \lambda_{10}| = 0.023T, \\ \Delta\lambda_{T2} = |\lambda_2 - \lambda_{20}| = 0.024T, \end{cases} \quad (10)$$

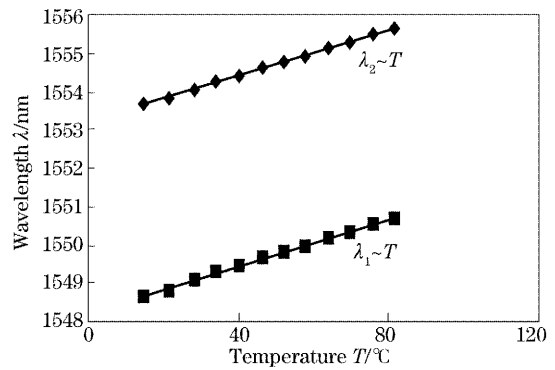


图 5 双光纤布拉格光栅反射波长随温度变化关系

Fig. 5 Relations of fiber Bragg wavelength shift versus measured temperature

综合(9)式和(10)式可得(8)式中的系数矩阵的实验拟合值为

$$\begin{bmatrix} K_{P1} & K_{T1} \\ K_{P2} & K_{T2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.089 & 0.023 \\ 0 & 0.024 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

### 3.4 压力和温度同时变化引起双反射波长的变化

图 6(a)描绘出不同压力(取五条不同压力线)对应不同温度下随 FBG<sub>1</sub> 反射波长变化趋势线,图 6(b)描绘出不同温度(取五条不同温度线)对应不同压力下随 FBG<sub>2</sub> 反射波长变化趋势线。实验结果表明,虽然压力和温度同时变化,但反射波长随温度和压力各自变化依然呈线性变化,且几乎保留了定压或定温下的灵敏特性(0.09 nm/MPa 和 0.0239 nm/°C)。

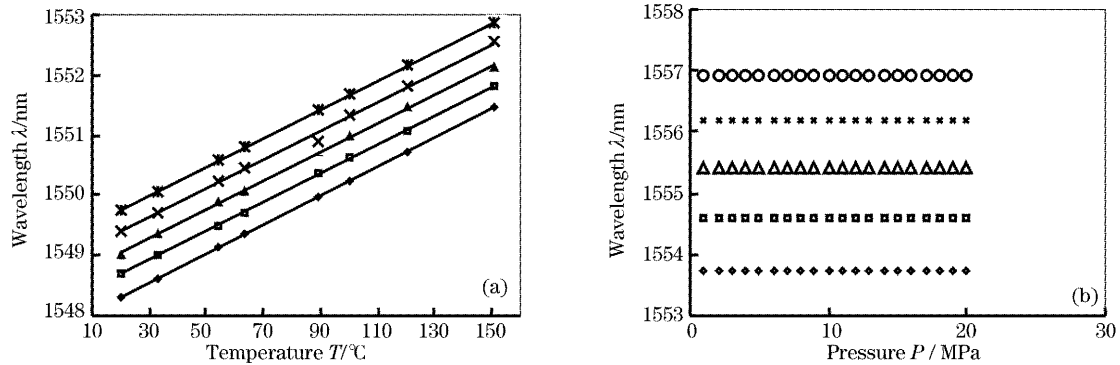


图 6 (a) FBG<sub>1</sub> 反射波长随温度和压力同时变化的关系, (b) FBG<sub>2</sub> 反射波长随压力和温度同时变化的关系

Fig. 6 The relation between the wavelength and (a) temperature with different pressure, (b) pressure with different temperature

### 3.5 误差分析与计算

根据相关参量,可推算(8)式中的系数矩阵的理论值。其中光纤的有效弹光系数  $P_e = 0.22$ ,石英玻璃的热胀系数  $\alpha = 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,热光系数  $\xi = 6.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,衬底材料的热胀系数  $\alpha_s = 11.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,杨氏模量  $E = 1.95 \times 10^5/\text{MPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.32$ ,由于  $S_2$  的位置处于底厚为 2 cm 的外侧,内压力不会引起 FBG<sub>2</sub> 的应变,因此,可认为  $\Delta\lambda_2$  不受压力的影响,即  $K_{P2} = 0$ ,根据上述参量计算得到(8)式系数矩阵的理论值为

$$\begin{bmatrix} K_{P1} & K_{T1} \\ K_{P2} & K_{T2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0895 & 0.0242 \\ 0 & 0.0243 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

以上计算并未考虑石英光纤的掺杂影响,但实际上掺杂引起参量随波长的变化是很小的,换言之,对于不同波长的光纤光栅,其应变与温度的灵敏度系数极为相似,所得双参量模型的系数矩阵中各元素间差别主要起因于不同的光纤光栅布拉格波长。

对比(11)式和(12)式可知,系数矩阵的实验拟合值与理论计算值符合得很好。二者之差仅占理论计算值的 1.8%。与标准压力表和标准温度计的测量结果比较,压力的准确度为 0.47%;温度的准确度为 0.74%。实际上,这是(8)式中的系数矩阵态性得到优化的结果。

另一方面,若考虑压力与温度交叉敏感的影响,

图 6(b)进一步说明了管内压力不会引起 FBG<sub>2</sub> 反射波长发生漂移,只有温度量引起 FBG<sub>2</sub> 反射波长的漂移且呈线性变化。其灵敏度仍为 0.024 nm/°C。

以上三种实验结果表明,布拉格反射波带宽在实验过程中始终未发生变化,波谱也未发生变形,更未发生啁啾现象。这就证明了光纤光栅与弹性衬底的粘贴接近刚性粘贴,非刚性粘贴的影响完全可以忽略。

则光纤光栅布拉格方程可表示为

$$\lambda_B(P, T) = n(P, T)\Lambda(P, T), \quad n = 2n_{\text{eff}} \quad (13)$$

将(13)式进行泰勒展开,在压力  $\Delta P$  和温度  $\Delta T$  扰动不大的情况下,可忽略展开式的高阶项后变为:

$$\Delta\lambda_{Bi}(P, T) = K_{P1}\Delta P + K_{T1}\Delta T + K_{PT1}\Delta P\Delta T, \quad (14)$$

该式中的第三项为压力温度交叉影响对光纤布拉格光栅反射波长漂移的贡献。其中  $K_{PT1}$  为压力温度交叉敏感系数,将实验结果分别代入(14)式求得  $K_{PT1} = 9.7 \times 10^{-7} \text{ nm}/(\text{MPa} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $K_{PT2} = 0$ ,从而得到(14)式的一个二元联立方程。

为了估算出压力-温度同时作用于光纤布拉格光栅时交叉项影响所带来的系统误差大小,可利用式:

$$\lambda_i + \delta\lambda_i = [K + \delta K][F + \delta F] + S,$$

式中  $S$  表示交叉敏感项:

$$S = \begin{vmatrix} K_{PT1} \\ K_{PT2} \end{vmatrix} (P + \delta P)(T + \delta T); \quad F = \begin{vmatrix} P \\ T \end{vmatrix}$$

推出交叉敏感引入的误差

$$\left| \frac{\delta P}{P} \right| \approx \frac{|K_{T1}K_{PT2} - K_{T2}K_{PT1}|}{|K_{T1}K_{P2} - K_{P1}K_{T2}|} T, \quad (15)$$

$$\left| \frac{\delta T}{T} \right| \approx \frac{|K_{P1}K_{PT2} - K_{P2}K_{PT1}|}{|K_{T1}K_{P2} - K_{P1}K_{T2}|} T, \quad (16)$$

将  $K_{P1}$ 、 $K_{T1}$ 、 $K_{PT1}$  的实验值和  $\Delta P$  与  $\Delta T$  的测量范围内的最大值 150 °C 和 20 MPa 分别代入(15)式和(16)式后求得

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = 0, \quad \left| \frac{\Delta P}{P} \right| = 0.0016.$$

结果正说明了利用 FBG<sub>2</sub> 只对温度敏感而对内压力不敏感的特性, 削减了温度对压力交叉敏感的影响, 剥离了压力对温度的交叉敏感, 虽然压力相对误差正比于温度, 但使  $K_{PT1}$  变得更小, 使交叉项的影响甚微, 因而使得本双参量传感系统更具有实用价值。

## 4 结 论

通过设计与制作一种新颖的基于管式应变弹性敏感元件的光纤布拉格光栅传感器, 利用双光栅实现了压力与温度的双参量同时区分测量, 该传感器不但具有双参量传感、双参量测量、削减温度对压力交叉敏感的影响、剥离压力对温度的交叉敏感、灵敏度较高、复用性好等特点, 而且光纤布拉格光栅的波长对应于压力和温度同时变化呈现良好的线性关系, 无弹性滞后和弹性后效。利用该技术可以有效地监测类似于与管内连通容器中的液体或气体的压力和温度。通过特殊设计的结构还可用于检测输油或输气管道的流量(通过检测压差)、流速等。因此, 该传感器系

统具有很好的实用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Huang Yonglin, Li Jie, Kai Guiyun *et al.*. Temperature compensation for Fiber Bragg Gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 677~679 (in Chinese)  
黄勇林, 李 杰, 开桂云 等. 光纤光栅的温度补偿[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 677~679
- 2 Zhao Yong, Liao Yanbiao. Research on the laser fiber-optic pressure measurement technique for offshore oil exploration [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(10): 955~958 (in Chinese)  
赵 勇, 廖延彪. 激光光纤压力检测技术在海洋石油勘探中的应用研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10): 955~958
- 3 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of transverse load and temperature using a single long-period fiber grating element[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1116~1120 (in Chinese)  
饶云江, 王义平, 冉曾令 等. 单个长周期光纤光栅实现横向负载和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1116~1120
- 4 Hui Mei, Wang Dongsheng, Deng Nianmao *et al.*. The solution of best sampling manner in phase-shifting interferometers based on matrix condition number[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 477~480 (in Chinese)  
惠 梅, 王东生, 邓年茂 等. 用矩阵条件数求解相移最佳采样方式[J]. *光子学报*, 2003, **32**(4): 477~480
- 5 Li Qingyang, Yi Dayi, Wang Nengchao. *Numerical Value Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 161~228 (in Chinese)  
李庆扬, 易大义, 王能超. *数值分析* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 161~228