

文章编号: 0258-7025(2003)01-0083-05

## 免受温度影响的光纤光栅线性扭转传感器

张伟刚, 开桂云, 赵启大, 袁树忠, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要** 设计了一种新颖的组合式扭梁传感结构,利用外直径相等的实心梁与空心梁界线两侧应变分布的差异,将一定长度的光纤光栅沿与轴向呈一定角度刚性粘贴于界线的表面,通过测量界线两侧光纤光栅反射波长的差值,首次实现了免受温度影响的光纤光栅扭转传感测量。理论分析和实验结果证明,该传感装置能够自动消除扭转传感与温度的交叉敏感效应,界线两侧光纤光栅反射(或透射)波长漂移的差值对扭角、扭矩及扭力(力臂一定时)均呈线性关系,与温度变化无关。在 $\pm 40^\circ$ 扭角范围内,扭角、扭矩的传感灵敏度分别达到 $0.092 \text{ nm/degree}$ , $2.076 \text{ nm/Nm}$ 。

**关键词** 光电子学;光纤光栅;扭转传感器;扭梁;线性传感;温度不敏感

**中图分类号** TN 247;TN 253 **文献标识码** A

### Linearly Torsion Sensor of Fiber Grating with Temperature-independent

ZHANG Wei-gang, KAI Gui-yun, ZHAO Qi-da, YUAN Shu-zhong, DONG Xiao-yi

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** A novel combination-type sensing structure of the torsion beam has been designed, in which the fiber grating with a determinate length is bonded to the interface between the solid beam and air-core beam with a determinate angle along the direction of the axes of the torsion beam. Using the difference of the strain distribution at the two sides of the interface between the real-core beam and air-core beam, through measuring the reflective wavelength difference of two sides of the interface, the torsional sensing of the fiber grating with the temperature-independent has been realized. Theoretical analyses and experimental results indicate that this sensor can automatically remove the temperature cross-sensitivity in torsional sensing, the wavelength shift difference of the fiber grating in the sides of the interface is linear to the torsional angel, the torque and torsional stress with the determinate arm of force, and this relationship is not dominated by the temperature change. In the range of the torsional angle between  $-40^\circ$  and  $+40^\circ$ , the torsional angle and torque sensitivities are  $0.092 \text{ nm/degree}$ ,  $2.076 \text{ nm/Nm}$ , respectively.

**Key words** optical electronics; fiber Bragg grating; torsion sensor; torsion beam; linear sensing; temperature-independent

## 1 引言

光纤光栅作为一种新型的光无源器件,在光传感领域有着潜在、巨大的应用前景。近年来,基于不同需求的各类光纤光栅传感器的设计不断出现,其

应用领域迅速扩展<sup>[1]</sup>。利用光纤布拉格光栅(FBG)对波长绝对编码的优良特性,已经实现了对温度、应变、应力、位移、电流、频率、曲率等多种物理量的精确测量<sup>[2~7]</sup>。近年来,基于FBG的扭转传感器研究已引起了人们的兴趣。作者在文献[8]中报道了恒

收稿日期:2001-09-14;收到修改稿日期:2002-01-06

基金项目:国家自然科学基金(60077012,69977006)、国家863计划(2002AA313110)、国家博士点基金资助项目和天津市科技攻关项目(003104011)。

作者简介:张伟刚(1959—),男,黑龙江伊春市人,南开大学现代光学研究所教授,博士,主要从事光纤光栅传感器与光纤通信技术研究。E-mail:weigangzh20@eyou.com

温条件下利用 FBG 实现线性扭转传感的实验,在  $\pm 45^\circ$  扭角范围内,扭角传感灵敏度为  $0.0867 \text{ nm/degree}$ 。由于 FBG 具有对应变和温度同时敏感的特性,当环境温度扰动较大时,该传感器的扭角(或扭矩)与温度的交叉敏感效应会严重地影响其测量结果。为剥离温度产生的交叉敏感效应,作者在文献[9]中,改进了扭梁结构设计,将 FBG 粘贴在扭梁与固定端的界线附近(扭梁与固定端材料的性质不同),成功地实现了扭角(或扭矩)与温度的同时测量,在  $-40^\circ \sim +32^\circ$  扭角范围内,扭角传感灵敏度达到  $0.19 \text{ nm/degree}$ 。但该方法需事先获得光纤光栅波长的变化与扭角或扭矩的系数矩阵,消除温度对扭转传感测量结果的影响是通过解矩阵方程间接实现的。并且,由于扭梁与固定端材料的性质不同,光纤光栅在界线处的粘贴质量将影响传感器测量的灵敏度。因此,寻求一种直接消除温度影响的传感方法,在光传感测量中对提高传感器测量的灵敏度及测量精度都具有重要的实用价值。

本文设计了一种新颖的组合型扭梁传感结构,将 FBG 粘贴在外直径相等的实心梁与空心梁界线附近,通过测量界线两侧 FBG 反射(或透射)波长漂移的差值,直接消除了温度对传感器测量结果的影响,实现了免受温度影响的光纤光栅扭转传感测量。

## 2 传感结构及原理

图 1 为组合型扭梁传感结构示意图。设扭梁的总长度为  $L_0$ ,由同种材料的实心圆柱和空心圆柱组成。其中,实心梁的长度为  $L_1$ ,直径为  $d_e$ ;空心梁的长度为  $L_2$ ,内、外直径分别为  $d_n$  和  $d_e$ ,将二者的两个端面处理平滑,使其轴线一致,用特种胶将二者端面粘固。首先分析实心梁一端作为固定端、空心梁一端作为自由端的应变情况。忽略扭梁的重量对扭应变的影响,并假设 FBG 的粘贴不影响扭梁的性

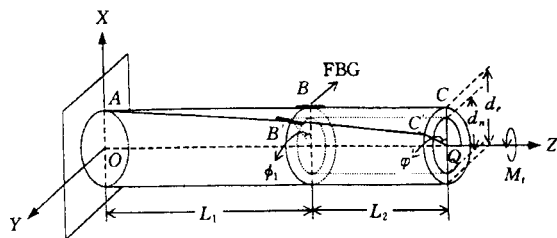


图 1 组合型扭梁传感结构示意图

Fig. 1 Sensing structure of the combination-type torsion beam

质,若在扭梁自由端 Q 施加一扭力  $P$ ,其力矩为  $M_i$ ,扭角为  $\varphi$ ,则扭梁的扭应变从自由端向固定端 O 方向传递。根据材料力学知识可知,在扭应变较小的条件下,将扭梁的扭转作为纯扭转问题处理是一种很好的近似<sup>[8,9]</sup>。若扭梁按图 1 所示选取坐标系,则沿  $z$  轴方向扭梁表面的扭应变可表示为

$$\gamma_i = \frac{d_e M_i}{2GI_i} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

式中  $G$  为扭梁的剪切模量,  $I_1$  和  $I_2$  分别为实心梁和空心梁的极惯性矩。

将原长为  $l$  的 FBG 沿与扭梁轴线呈一定角度  $\beta$  斜贴于界线表面 B 处,并使 FBG 在界线两侧的长度尽量相等。当自由端表面 C 点移动到 C' 点、界线表面 B 点移动到 B' 点时,粘贴在界线两侧的 FBG 的栅距和折射率将发生变化。由文献[6,7]可知,界线两侧 FBG 的应变关系为

$$\epsilon_i = \frac{1}{2} \gamma_i \sin 2\beta = \frac{d_e \sin 2\beta M_i}{4GI_i} \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

由(1),(2)式可知,理论上  $\gamma_i$  和  $\epsilon_i$  在区间  $[0, L_1]$  和  $(L_1, L_0)$  上呈均匀分布,在界线  $z = L_1$  处将发生跃变。而实际上,由于扭梁的弹性及实心梁与空心梁粘贴的非刚性等因素,使得 FBG 应变在界线处并非跃变的,而是在很小的过渡区间 ( $B_1 B B_2 = \delta$ ) 上呈连续、渐变式分布。由于  $I_1 > I_2$ ,且扭梁表面  $M_i$  沿轴向各处一致,所以  $\epsilon_1 < \epsilon_2$ 。FBG 的应变分布如图 2(a) 中的实线所示。其中  $B_1 B$  区间为  $[L_1 - \delta/2, L_1]$ ,  $B B_2$  区间为  $[L_1, L_1 + \delta/2]$ 。由于扭梁界线处应变的非阶跃性质,使得 FBG 存在分段啁啾,而  $\delta$  的大小则直接影响界线两侧 FBG 反射(或透射)谱的形状。

对于空心梁一端作为固定端、实心梁一端作为自由端的情况,亦可按上述方法进行应变分析,如图 2(b) 中的实线所示。由文献[9]可知,若环境温度为  $T$ ,在扭应变  $\gamma_i$  的作用下,扭梁界线两侧 FBG 反射(或透射)波长的漂移分别为

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_0} = \frac{(1 - p_e) d_e \sin 2\beta M_i}{4GI_1} + [\alpha + \xi + (1 - p_e)(\alpha_s - \alpha)] \Delta T \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_0} = \frac{(1 - p_e) d_e \sin 2\beta M_i}{4GI_2} + [\alpha + \xi + (1 - p_e)(\alpha_s - \alpha)] \Delta T \quad (4)$$

式中  $\lambda_0$  为 FBG 在温度  $T_0$  时的自由中心波长,  $p_e$  为光纤的有效弹光系数,  $\alpha$  和  $\xi$  分别为纤芯的热胀系数和热光系数,  $\alpha_s$  为扭梁的热胀系数,  $\Delta T = T - T_0$  为温度变化量。

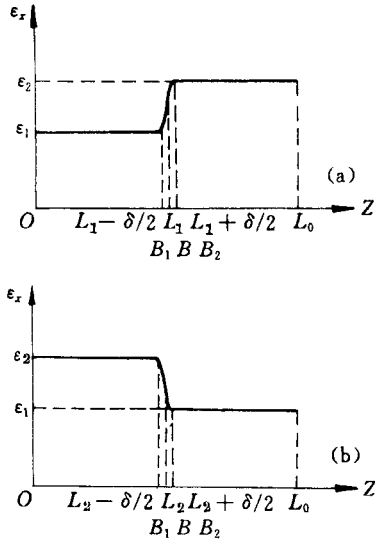


图2 组合型扭梁上FBG的应变分布示意图

Fig. 2 Distribution of the FBG strain on the combination-type torsion beam

定义界线两侧FBG反射(或透射)波长漂移的差值为 $\Delta\lambda_{21} = \Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1$ 。于是

$$\Delta\lambda_{21} = \frac{(1-p_e)\lambda_0 d_e \sin 2\beta}{4G} \left( \frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1} \right) M_t = \kappa_M M_t \quad (5)$$

令 $r_p$ 为扭梁自由端的轴心到扭力作用点的距离,则扭矩 $M_t = r_p \times P$ 。若 $r_p \perp P$ ,则(5)式可写为

$$\Delta\lambda_{21} = \frac{(1-p_e)\lambda_0 d_e r_p \sin 2\beta}{4G} \left( \frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1} \right) P = \kappa_P P \quad (6)$$

设扭梁界线表面 $B$ 点移动到 $B'$ 点时 $\overline{AB}$ 转过的角度为 $\varphi_1$ ,自由端表面 $C$ 点移动到 $C'$ 点时 $\overline{C'B'}$ 相对 $\overline{AB'}$ 转过的角度为 $\varphi_2$ 。于是,当扭梁处于平衡状态时,有下式成立

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{M_t L_1}{G I_1} + \frac{M_t L_2}{G I_2} \quad (7)$$

合并(5),(7)式,有

$$\Delta\lambda_{21} = \frac{(1-p_e)\lambda_0 d_e \sin 2\beta}{4} \left( \frac{I_1 - I_2}{I_1 L_2 + I_2 L_1} \right) \varphi = \kappa_\varphi \varphi \quad (8)$$

其中 $I_1 = \pi d_e^4 / 32$ ,  $I_2 = \pi (d_e^4 - d_n^4) / 32$ ,比例系数 $\kappa_M$ ,  $\kappa_P$ 和 $\kappa_\varphi$ 分别为扭矩、扭力和扭角的传感灵敏度。(5),(6)及(8)式是本文设计的光纤光栅扭转传感的基本关系式,它们反映了 $\Delta\lambda_{21}$ 与 $M_t$ ,  $P$ (力臂 $r_p$ 给定)和 $\varphi$ 均呈线性关系。由于构成扭梁的实心梁与空心梁均属同种材料,其热膨胀系数一致,故粘贴于界线两侧的FBG因温度变化使其反射(或透射)波

长的漂移量是相等的,即 $\Delta\lambda_1(\Delta T) = \Delta\lambda_2(\Delta T)$ ,从而导致 $\Delta\lambda_{21}$ 整体飘移而其值保持不变。这说明 $\delta$ 的存在只影响界线两侧的FBG反射(或透射)谱,而 $\Delta\lambda_{21}$ 的值则不受其制约。因此,本文设计的组合式扭梁结构能够自动消除扭角、扭矩和扭力(力臂 $r_p$ 给定)与温度的交叉敏感效应,即传感测量结果是不受温度影响的。

注意到 $\kappa_\varphi$ 与扭梁界线两端的长度 $L_1, L_2$ 及内外直径 $d_n, d_e$ 有关,而 $\kappa_M, \kappa_P$ 则与 $L_1, L_2$ 无关。模拟计算表明,在扭梁总长一定的条件下,空心梁越短,内直径愈接近外直径,则 $\kappa_\varphi$ 值愈大;反之则愈小。然而,空心梁太短不利于光纤光栅的粘贴与保护,而内直径与外直径太接近易使扭梁扭转产生弯曲形变。因此,在传感器实际设计中,需综合考虑上述因素以便获得合适的传感灵敏度。

### 3 实验及分析

实验上扭梁由高弹性棒构成,该棒由特殊的有机材料合成。其中,实心棒长 $L_1 = 8.0$  cm,直径 $d_e = 1.5$  cm;空心棒长 $L_2 = 3.0$  cm,内直径 $d_n = 1.15$  cm。用于传感的FBG是用高掺锗光敏光纤以相位掩膜法自行研制的,其长度 $l = 1.5$  cm,测得其反射率为99.3%,反射带宽约为0.3 nm。在室温20℃时,将FBG用特种胶沿与扭梁轴线呈 $\beta \approx 10^\circ$ 斜贴于界线的表面,界线两侧FBG的长度基本相等,测得未受扭矩作用时的自由中心波长 $\lambda_0 = 1551.28$  nm。扭矩及扭角的测量机构详见文献[9]。ADVANTEST Q8383光谱分析仪OSA(Optical Spectrum Analyzer)的分辨率为0.1 nm,用于测定FBG反射波中心波长及带宽。3 dB耦合器一方面将宽带光源BBS(Broadband Source)发出的光耦合进入FBG,另一方面将FBG反射回来的光耦合进入OSA以便观察;IMG为匹配液。

实验中将整个扭梁光纤光栅传感部分置于温控室内,测量前扭梁向正、反向小角度旋转“预热”,以使扭应变传递均匀。实验结构如图3所示。

实验中观察到,当扭梁受到扭矩 $M_t$ 作用时,FBG反射谱中出现两个反射峰值。虽然两峰值位置随扭角 $\varphi$ 的变化而移动,但二者移动的速度不同。分析表明,两峰值位置对应于界线两侧的FBG波长 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ ,二者间距 $\Delta\lambda_{21}$ 随 $M_t$ (或 $\varphi$ )的变化而线性移动。当扭梁自由端的扭角 $\varphi > 0$ 时,扭矩 $M_t$ 使界线两侧FBG的栅距变大,波长漂移差值 $\Delta\lambda_{21} > 0$ ,  $\Delta\lambda_{21}$

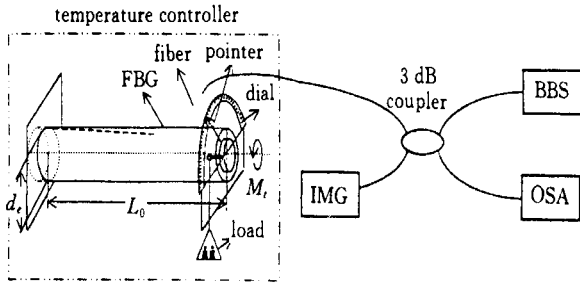


图 3 组合型扭梁 FBG 传感实验结构示意图  
Fig. 3 FBG sensing experiment structure of the combination-type torsional beam

产生“红移”；反之，当  $\varphi < 0$  时， $M_t$  使界线两侧 FBG 的栅距变小， $\Delta\lambda_{21} < 0$ ， $\Delta\lambda_{21}$  产生“蓝移”。于是，通过扭矩  $M_t$  (或扭力  $P$ )，使扭梁沿顺时针或逆时针方向改变扭角  $\varphi$ ，可以实现界线两侧的 FBG 波长差值  $\Delta\lambda_{21}$  向“红移”与“蓝移”双方向传感。

当扭梁处于自由状态时，FBG 有单一主峰；当扭矩(或扭角)分别沿正向和反向变化时，FBG 由原来单一主峰变为两个主峰，形成带下凹锐沿的连续反射谱，二峰值强度有所下降并略有差异，值峰间距随扭矩(或扭角)的增大而线性增大。FBG 反射谱出现下凹沿，其原因在于扭梁界线两侧并非完全刚性粘接，致使粘贴该处的 FBG 应变是非阶跃而呈连续变化，从而造成两个峰之间存在一定的光反射分布。造成二峰值强度不等的原因则主要是界线两侧的 FBG 长度不完全相等，峰值较高者对应界线一侧稍长的 FBG，而峰值较低者则对应界线一侧稍短的 FBG。此外，亦不排除 FBG 的不同位置在成栅过程中因光照强度分布不均导致折射率调制深度不均等因素。

实验中扭梁的扭应变最大值  $\gamma_m < 5\%$ ，根据文献[9]可以肯定，(5)、(6)及(8)式能够很好地描述扭转传感的实验规律。图 4 为室温 20℃ 时  $\Delta\lambda_{21}$  随  $M_t$  和  $\varphi$  变化关系的实验曲线。图 4 显示  $\Delta\lambda_{21}$  与  $M_t$  和  $\varphi$  均呈线性关系，二直线拟合方程分别为  $\Delta\lambda_{21} = 2.076M_t$  (nm)， $\Delta\lambda_{21} = 0.092\varphi$ ，其线性拟合度分别为 0.997 和 0.998。于是，扭矩和扭角传感灵敏度的实验值分别为  $\kappa_M = 2.076 \text{ nm/Nm}$ ， $\kappa_\varphi = 0.092 \text{ nm/degree}$ 。

根据相关参数，可推测扭矩和扭角传感灵敏度的理论值。其中，光纤的有效光弹系数  $p_e = 0.22$ ，扭梁的杨氏模量  $E_1 = 2.16 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ，泊松比  $\mu_1 = 0.5$ ，剪切模量  $G_1 = E_1/[2(1+\mu_1)] = 0.72 \times 10^8$

$\text{N/m}^2$ 。于是，得到的理论值分别为  $\kappa_M = 2.289 \text{ nm/Nm}$ ， $\kappa_\varphi = 0.101 \text{ nm/degree}$ 。实验值与之相比很接近，其差别主要是由界面粘接的非刚性及扭梁重量等因素所致。

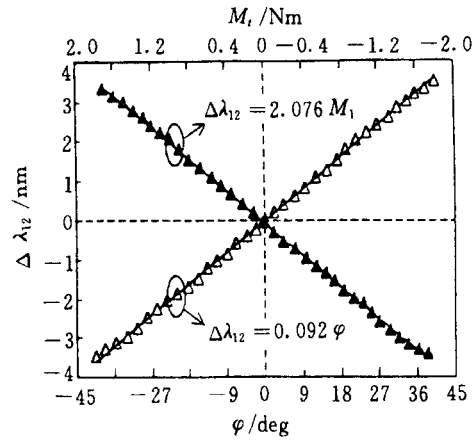


图 4 20℃ 时  $\Delta\lambda_{21}$  随  $M_t$  和  $\varphi$  变化关系的实验曲线  
Fig. 4 Experimental plots between  $M_t$ , and  $\varphi$  when  $T = 20^\circ\text{C}$

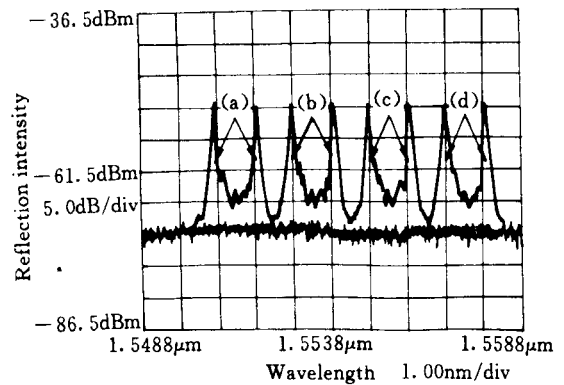


图 5 扭角(或  $M_t = 0.53 \text{ Nm}$ )时不同温度下几组典型的 FBG 的反射谱

Fig. 5 Reflection spectrum of the Bragg fiber-grating with different  $T$  when  $\varphi = 12^\circ$  ( $M_t = 0.53 \text{ Nm}$ )

图 5 为扭角  $\varphi = 12^\circ$  (或  $M_t = 0.53 \text{ Nm}$ ) 时不同温度下几组典型的 FBG 的反射谱。其中(a)~(d)分别对应于温度  $T = 0^\circ\text{C}$ ， $20^\circ\text{C}$ ， $40^\circ\text{C}$  和  $60^\circ\text{C}$ 。实验中 OSA 显示：每个谱的两峰间距约为 1.1 nm，期间  $\Delta\lambda_{21}$  的变化幅度在 0.1 nm 左右，这与实验测量时光谱分析仪的分辨率相当。

图 6 为温度在  $0^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$  区间变化时，扭角(或扭矩)分别为  $\varphi = 12^\circ$ ， $20^\circ$  和  $30^\circ$  (或  $M_t = 0.53 \text{ Nm}$ ， $0.88 \text{ Nm}$  和  $1.33 \text{ Nm}$ ) 时，FBG 的两个反射峰差值  $\Delta\lambda_{21}$  的实验结果。其中的直线是根据(5)式和(8)式

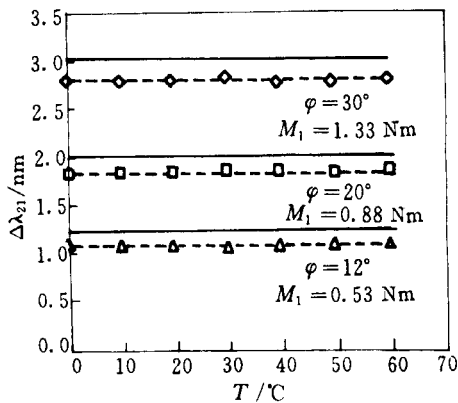


图6 扭角(或扭矩)一定时,FBG 两个反射峰差值  $\Delta\lambda_{21}$  随  $T$  温度的关系变化曲线

Fig. 6 Function of FBG two peaks difference  $\Delta\lambda_{21}$  and temperature  $T$  when torsional angle or torque is constant

计算的理论值,虚线为实验点的拟合值,图中标定的  $\varphi$  与  $M_i$  数值为实测值。由图 6 可见,  $\Delta\lambda_{21} = 0$ 。这验证了本文设计的新型传感器能够自动消除扭转传感与温度的交叉敏感效应,其测量结果不受温度影响的理论预测。

由(5),(6),(8)式可知,传感灵敏度与扭梁的长度、内外直径及材料的性质有关,故可通过优化相关参数,获得合适的灵敏度,其测量范围(包括温度变化范围)应以不破坏光纤光栅并使扭梁保持弹性恢复为原则。而传感分辨率主要取决于 FBG 的带宽、粘贴质量及 OSA 的分辨率,也与界线两侧 FBG 的长度有关。

基于悬臂梁和简支梁的免受温度影响的光纤光栅传感已有文献报道<sup>[10~14]</sup>。这些方法的技术特点是:一种方式将 FBG 沿悬臂梁<sup>[10,11]</sup>(包括双侧悬臂梁<sup>[12]</sup>)轴向粘贴于厚度呈某种分布的交界面附近的表面,使 FBG 在交界面两侧形成两个区域的 FBG1 和 FBG2;另一种方式将 FBG 在悬臂梁<sup>[13]</sup>固定端附近的侧面或简支梁<sup>[14]</sup>中部的侧面沿梁轴方向呈一定角度斜向粘贴,使 FBG 的应变沿梁厚度方向呈某种梯度分布。这两种方式的传感机制在于:前者是利用 FBG 在交界面的两侧应变不同而温度一致的特性,通过测量 FBG1 和 FBG2 的反射(或透射)布拉格波长差值实现免受温度影响的光纤光栅波长位移传感;后者则是利用 FBG 的应变沿梁厚度方向呈某种梯度分布产生的啁啾效应实现免受温度影响的光纤光栅带宽传感。本文的方法与前者类似,但采用的弹性梁为新颖的组合式扭梁,感测的物理量与以往不同,为扭角、扭矩和扭应力,且结构与实

现方式较以往复杂。

## 参 考 文 献

- 1 Y. J. Rao. In-fibre Bragg grating sensors [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**(4):355~375
- 2 S. Gupta, T. Mizunami, T. Yamao *et al.*. Fiber Bragg grating cryogenic temperature sensors [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(25):5202~5205
- 3 M. LeBlanc, S. Y. Huang, M. Ohn *et al.*. Distributed strain measurement based on a fiber Bragg grating and its reflection spectrum analysis [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17):1405~1407
- 4 Zhang Weigang, Dong Xinyong, Zhao Chunliu *et al.*. Study of deflection and stress sensing using grating chirp effect in bilateral cantilever beam [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(11):1309~1312 (in Chinese)
- 5 P. M. Cavaleiro, F. M. Araujo, A. B. Lobo Ribeiro. Metal-coated fiber Bragg grating sensor for electric current metering [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(11):1133~1135
- 6 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Feng Dejun *et al.*. Experimental analyses of fiber Bragg grating resonance sensing [J]. *Journal of Transduction Technology* (传感技术学报), 2000, **13**(4):246~250 (in Chinese)
- 7 M. J. Grander, W. N. MacPherson, R. McBride *et al.*. Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(20):1686~1688
- 8 W. G. Zhang, X. Y. Dong, D. J. Feng *et al.*. Linear fibre-grating-type sensing tuned by applying torsion stress [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(2):120~121
- 9 Zhang Weigang, Xu Zhaowen, Yang Xianpeng *et al.*. Sensing measurement of two parameters for torsion and temperature using single fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9):1070~1075 (in Chinese)
- 10 Y. L. Yu, H. Y. Tam, W. H. Chung *et al.*. Fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of displacement and temperature [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(16):1141~1143
- 11 Yu Youlong, Guan Bai'ou, Dong Xiaoyi *et al.*. Passive temperature induced wavelength-shift compensating technique for fiber Bragg grating force sensing [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(3):400~404 (in Chinese)
- 12 Zhang Weigang, Huang Yonglin, Xiang Yang. Temperature-independent stress and displacement bidirectional sensing tuned by applying bilateral cantilever beam [J]. *Chinese Physical Letters*, 2002, **19**(1):76~78
- 13 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Zhao Qida *et al.*. Novel sensor device of fiber Bragg grating with temperature active compensation [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8):999~1003 (in Chinese)
- 14 Dong Xinyong, Zhao Chunliu, Ning Ding *et al.*. Temperature-independent bend sensor using chirp effect of fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(4):425~428 (in Chinese)