

文章编号 : 0253-2239(2002)09-1070-06

用单光纤光栅实现扭转与温度的双参量传感测量^{*}

张伟刚 许兆文 杨翔鹏 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: 采用一种新颖的扭梁设计结构, 利用单光纤光栅成功地实现了扭转(扭转角或扭矩)与温度的双参量同时测量。该方法能够有效地解决扭转角与温度的交叉敏感问题, 且光纤光栅波长的变化对扭转角、扭矩及扭应力(力臂一定时)均呈线性关系。在 $-40^{\circ} \sim +32^{\circ}$ 范围内, 扭转角、扭矩和温度的传感灵敏度分别达到 $0.19 \text{ nm}/(^{\circ})$ 、 $3.29 \text{ nm}/\text{Nm}$ 和 $0.03 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 波长线性调谐范围可达 14.20 nm 。

关键词: 光纤光栅; 双参量传感; 扭梁; 扭转角; 扭矩; 扭应变

中图分类号: TN247:TN253 文献标识码: A

1 引 言

近年来, 光纤光栅作为一种新型的光无源器件, 因其抗电磁干扰、体积小、与光纤系统兼容等特性, 受到越来越多的关注^[1]。利用光纤布拉格光栅(FBG)对波长绝对编码的优良特性, 可以实现对应变、应力、位移、温度等各种物理量的精确测量^[2~9]。作者在文献[7]中报道了恒温条件下利用光纤布拉格光栅对扭转角的传感实验, 在 $\pm 45^{\circ}$ 扭转角范围内, 扭转角传感灵敏度为 $0.0867 \text{ nm}/(^{\circ})$ 。由于光纤布拉格光栅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, 扭转角(或扭矩)与温度的交叉敏感效应会严重地影响其测量结果。因此, 在传感测量实际应用中, 必须剥离温度产生的交叉敏感效应。为此, 本文采用一种新颖的扭梁设计结构, 将单个光纤布拉格光栅粘贴在扭梁与固定端的交界位置, 成功地实现了扭转角(或扭矩)与温度的同时测量。

2 基本理论

2.1 光纤布拉格光栅传感理论基础

根据耦合模理论, 满足布拉格条件 $\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 的光波能够被光纤布拉格光栅反射(或透射)。实验证明, 某些物理量作用于光纤布拉格光栅上会引起光纤光栅常数(栅距 Λ)及光栅处的有效折射率 n_{eff} 的变化, 使光纤布拉格光栅的中心反射(或透射)波

长 λ_0 产生一定的漂移量 $\Delta\lambda$ 。其中, 力学量 H (如应变 ϵ 、应力 F 、力矩 M 等)通过影响光纤布拉格光栅的栅距和弹光效应产生 $\Delta\lambda_1$; 热学量 G (如温度 T)则导致光纤布拉格光栅热膨胀和热光效应而引起波长漂移 $\Delta\lambda_2$ 。于是, 光纤布拉格光栅的 λ_0 的总量变化 $\Delta\lambda$ 可表示为

$$\Delta\lambda = K_H\Delta H + K_G\Delta G, \quad (1)$$

式中 K_H 是与光纤传感系统的力学性质、光纤泊松比和纤芯有效折射率有关的常数, K_G 是与光纤系统的热力学性质、纤芯的热光系数 ξ 及其热胀系数 α 有关的常数。(1)式是光纤布拉格光栅波长传感的理论基础, 作用于光纤布拉格光栅上的力学量 H 和热学量 G 可通过直接或间接方式产生。若将光纤布拉格光栅粘贴或埋置于弹性的衬底材料之中, 则作用于光纤布拉格光栅上的应变 ϵ 与温度 T 可通过衬底材料的形变和热膨胀间接产生。这时(1)式具体化为

$$\Delta\lambda = \lambda_0(1 - p_e)\epsilon + \lambda_0[\alpha + \xi + (1 - p_e)(\alpha_s - \alpha)]\Delta T, \quad (2)$$

式中 p_e 为光纤的有效弹光系数, α_s 为衬底材料的热胀系数。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形变)^[10, 11]。由(2)式可知, 当光纤布拉格光栅受到外场(应变场或温变场)作用时, 利用光检测仪器(如光谱仪)测量光纤布拉格光栅的反射或透射波长的变化, 即可获得相应外场(应变场或温变场)的定量信息。

2.2 扭梁应变传感原理

均质、对称、各向同性、可在扭转应力作用下绕

^{*} 国家自然科学基金(60077012、69977006), 国家博士点基金和天津市科技攻关项目(003104011)资助课题。

E-mail: weigangzh20@eyou.com

收稿日期 2001-04-27; 收到修改稿日期 2001-11-14

轴线转动的直杆称之为扭梁。对于均质、对称、各向同性的圆柱形(实心或空心)扭梁,由于横截面几何形状的极对称性,在一定的扭转角范围内扭转时,若扭应变比较小,则扭梁上任意两横截面之圆周线的大小、形状和距离可近似地认为不变。根据平面假设,此类问题可用纯扭转分析方法近似处理^[2]。

图1(a)为扭梁应变分析示意图。长度为 l 的光纤布拉格光栅粘贴于扭梁与固定端 Q 的交界表面,扭梁与固定端分属两种不同材料。其中,粘贴于扭梁表面的光纤布拉格光栅长度为 $l'(l' < l)$ 。扭梁为均质、各向同性的空心圆柱,其长度、横截面的内、外直径分别为 L_0 、 d_i 和 d_e 。假设光纤布拉格光栅的粘贴不影响扭梁的力学性质,若在扭梁自由端施加一扭转应力 P ,其力矩为 M_t ,则 M_t 从自由端沿轴向传递到扭梁各处,使光纤布拉格光栅产生应变,导致光纤布拉格光栅栅距和折射率发生变化。

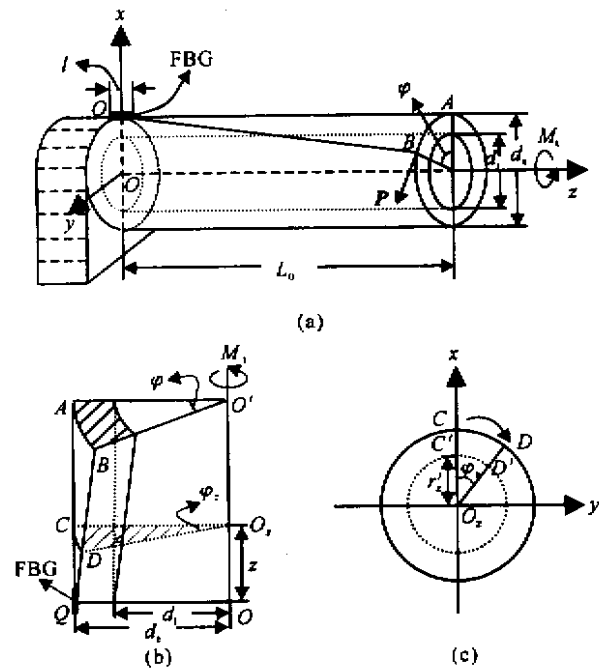


Fig.1 The strain analysis of the torsional beam. (a) The structure of the torsional beam; (b) The section plane of the torsional beam; (c) The cross-section of the torsional beam

忽略扭梁因扭矩及重量产生的横截面、轴向及弯曲之形变,考查图1(b)扭梁的扭应变。在扭矩 M_t 作用下扭梁服从胡克定律,与扭梁固定端 Q 相距为 z 的 C 点绕轴线 OO' 转至 D 点,横截面 CO_2D 扭转后仍然保持为原平面,令其相对扭转角为 φ_z 。当 $z = L_0$ 时,自由端横截面上的 A 点转至 B 点,其相对扭转角为 φ ,横截面扭转后亦保持为原平面。

于是,与固定端 Q 点相距为 z 的表面之扭应变 γ_z 及横截面 CO_2D 周边的扭应力 τ_z 分别为

$$\gamma_z = \frac{CD}{z} = \frac{d_e}{2} \frac{\varphi_z}{z} = \frac{d_e}{2} \theta, \quad (3)$$

$$\tau_z = G \cdot \gamma_z = \frac{d_e G}{2} \theta, \quad (4)$$

式中 $\theta = \varphi_z/z = \varphi/L_0$ 为比扭角, G 为扭梁的剪切模量。由(3)式和(4)式可知,平衡状态下该扭梁表面各处的扭应变和扭应力处处一致,于是,可令 $\gamma = \gamma_z$, $\tau = \tau_z$ 。

考查图1(c)距圆心 O_2 为任意距离 r'_z 的 C 点,扭转后 C 点移至 D' 点,则该点扭应变 $\gamma'_z = r'_z \theta$,扭应力为 $\tau'_z = G r'_z \theta$ 。于是,空心扭梁的扭矩 M_t 大小为

$$M_t = \int_{d_i/2}^{d_e/2} \tau'_z r'_z 2\pi r'_z dr'_z = 2\pi G \theta \int_{d_i/2}^{d_e/2} r'^3 dr'_z = I_p G \theta, \quad (5)$$

$I_p = \pi(d_e^4 - d_i^4)/32$ 为空心扭梁横截面的极惯性矩。

图2为扭梁应变传感原理示意图。在光纤布拉格光栅粘贴的扭梁表面处取一矩形 $ABCD$,假设光纤布拉格光栅沿与扭梁轴向(\overline{AD} 方向)呈一定角度 β 刚性粘贴于 \overline{AC} 处。在扭矩 M_t 的作用下, \overline{AD} 、 \overline{BC} 和 \overline{AC} 分别移至 $\overline{AD'}$ 、 $\overline{BC'}$ 和 $\overline{AC'}$, $\angle DAC = \beta$, $\angle CAC' = \alpha$ 。过 C 点作 $\overline{AC'}$ 之垂线交 \overline{AC} 于 E 点,若扭梁的扭应变 γ 很小,则光纤布拉格光栅的角位移 α 亦很小,有 $\overline{AC} \approx \overline{AE}$, $\angle ECC' \approx \beta$, $\overline{CC'} = \overline{BC} \tan \gamma \approx \overline{BC} \times \gamma$ 。当 $\overline{AC'} > \overline{AC}$ 时,光纤布拉格光栅被拉伸 $\Delta l' > 0$ 。于是,由 $\overline{AC} = \overline{BC}/\cos \beta$ 、 $\overline{EC'} = \overline{CC'} \sin \beta$ 可得光纤布拉格光栅的应变为

$$\varepsilon = \frac{\Delta l'}{l'} = \frac{\overline{EC'}}{\overline{AC}} \approx \frac{1}{2} \gamma \sin 2\beta. \quad (6)$$

对于光纤布拉格光栅被压缩的情况($\Delta l' < 0$),其分析与此类似。综合(2)式~(6)式,得到光纤布

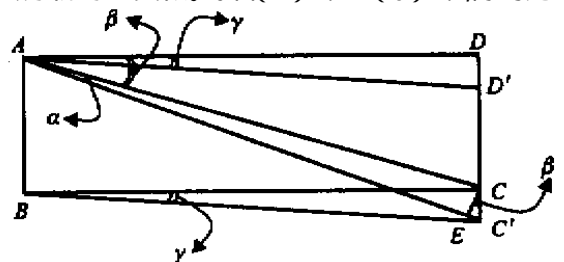


Fig.2 The principle schematic of the torsional beam strain sensing

拉格光栅粘贴于扭梁部分的扭转角、扭矩、温度与波长变化的关系分别为

$$\Delta\lambda(\varphi, T) = \frac{\lambda_0 d_e (1 - p_e) \sin 2\beta}{4L_0} \varphi + \lambda_0 [\alpha + \xi + (1 - p_e)(\alpha_s - \alpha)] \Delta T = K_\varphi \varphi + K_T \Delta T, \quad (7)$$

$$\Delta\lambda(M_1, T) = \frac{\lambda_0 d_e (1 - p_e) \sin 2\beta}{4GI_p} M_1 + \lambda_0 [\alpha + \xi + (1 - p_e)(\alpha_s - \alpha)] \Delta T = K_{M_1} M_1 + K_T \Delta T. \quad (8)$$

令 r_p 为扭转应力作用点距支点的距离, 则扭矩大小为 $M_1 = |r_p \times P|$ 。若 $r_p \perp P$ 则 $M_1 = r_p P$ (8) 式可表示为

$$\Delta\lambda(P, T) = \frac{\lambda_0 d_e r_p (1 - p_e) \sin 2\beta}{4GI_p} P + \lambda_0 [\alpha + \xi + (1 - p_e)(\alpha_s - \alpha)] \Delta T = K_P P + K_T \Delta T. \quad (9)$$

式中比例系数 K_φ 、 K_{M_1} 、 K_P 和 K_T 分别为扭转角 φ 、扭矩 M_1 、扭转应力 P 及温度 T 的传感系数。(7) 式 ~ (9) 式是扭梁转动传感的基本关系式, 它们反映了 $\Delta\lambda$ 与 φ 、 M_1 、 P (力臂 r_p 给定) 及 ΔT 均呈线性关系。通过对弹性梁的扭转实验发现, 若扭梁的扭应变最大值 $\gamma_m < 5\%$, 则(7)式 ~ (9)式能够很好地描述扭转传感的实验规律; 一旦 $\gamma_m > 5\%$, 则 K_φ 与 K_{M_1} 不能近似为常数。考虑到 γ 与 $d_e/2$ 和 L_0 有关, 若选择半径较大、梁长较长的扭梁, 在一定扭转角范围内, 可使其扭应变满足小于 5% 的要求。

由于扭梁和固定端分属不同材料, 热膨胀系数差别较大, 故光纤布拉格光栅粘贴在扭梁与固定端两部分的反射波长 λ_1 、 λ_2 的变化 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 遵循不同的规律, 传感系数 K_φ (或 K_{M_1} 、 K_P) 与 K_T 相互独立, 其值不同。根据(7)式和(8)式, 光纤布拉格光栅两部分的中心波长反射 (或透射) 变化可分别表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1(\varphi, T) \\ \Delta\lambda_2(\varphi, T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11\varphi} & K_{12T} \\ K_{21\varphi} & K_{22T} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1(M_1, T) \\ \Delta\lambda_2(M_1, T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11M_1} & K_{12T} \\ K_{21M_1} & K_{22T} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} M_1 \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (11)$$

(10) 式和(11) 式有解的条件是

$$\frac{K_{11\varphi}}{K_{21\varphi}} \neq \frac{K_{11T}}{K_{21T}}, \quad \frac{K_{11M_1}}{K_{21M_1}} \neq \frac{K_{11T}}{K_{21T}}.$$

这说明, 只要选用的扭梁与固定端材料性质不同, 通过调节扭转角 φ 或选择适当的力臂 r_p , 调节扭转应力 P , 可以实现光纤布拉格光栅反射 (或透射) 波长的线性传感以及扭转角、扭矩和温度的同时测量。

3 实验及结果分析

实验结构如图 3 所示。实验用扭梁是由特殊的

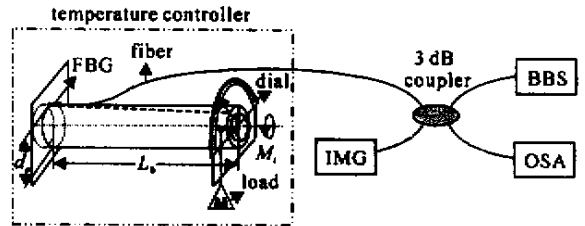


Fig. 3 The experimental structure of the torsional beam sensing

有机材料合成的空心圆棒, 其长 $L_0 = 11.00$ cm、外直径 $d_e = 1.52$ cm, 内直径 $d_i = 0.68$ cm。固定扭梁的材料为铁, 其厚、高分别为 2 cm 和 3 cm。用于传感的光纤布拉格光栅是用高掺锗光敏光纤以相位掩膜法自行研制的, 其长度 $l \approx 10$ mm, 反射率为 97.2% , 3 dB 带宽约为 0.31 nm。在室温 20°C 时, 将光纤布拉格光栅用特种胶平整地粘贴在扭梁与固定端的交界处, 测得未受扭矩作用时的自由中心波长 $\lambda_0 = 1555.75$ nm。扭转角的测量由精密扭转机构中的刻度盘读出。该刻度盘为半圆形, 可测范围为 $\pm 90^\circ$, 最小刻度值为 0.5° , 其平面中心与扭梁轴垂直相交并固定在支架上。读数指针为一极细金属丝 (前端为箭状) 将其沿扭梁截面半径方向并垂直于扭梁轴固定于梁之自由端表面。当扭梁扭转时, 带动读数指针可从刻度盘上读出扭转角值。扭矩的测量则由精密力矩仪校准、调控, 标准砝码的最小质量为 1 g。ADVANTEST Q8383 光谱分析仪 (OSA) 的分辨率为 0.1 nm, 用于测定光纤布拉格光栅反射波中心波长 λ_0 及带宽 $\Delta\lambda$, 波长扫描平均次数为 5 。3 dB 耦合器一方面将宽带光源 BBS 发出的光耦合进入光纤布拉格光栅, 另一方面将光纤布拉格光栅反射回来的光耦合进入光谱分析仪以便观察; 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, 测量之前, 将扭梁沿正、反向小角度旋转“预热”, 以使扭应变传递均匀。

为使传感装置能够控制反射波长的增加与减小,实验时将光纤光栅沿与扭梁轴向成一定角度($\beta \approx 8^\circ$)粘贴。当相对扭转角 $\varphi > 0$ 时,扭矩 M_t 使光纤布拉格光栅栅距变大 $\Delta\lambda > 0$,波长增加;反之,当 $\varphi < 0$ 时, M_t 使光纤布拉格光栅栅距变小 $\Delta\lambda < 0$,波长减小。于是,通过扭矩 M (或扭转应力 P),使扭梁沿顺时针或逆时针旋转改变相对扭转角 φ ,可以实

现光纤光栅沿中心波长增加与减少双方向传感。根据相关参量计算可知,在 $\pm 40^\circ$ 扭转角范围内,扭梁的扭应变、光纤布拉格光栅的角位移 γ_m 与 α_m 之最大值均小于5%,由前述分析可知,该实验结果可以用(10)式、(11)式进行分析、拟合。

图4给出了 $T = 20^\circ\text{C}$ 时,对应于不同扭转角 φ (或扭矩 M_t)的六个典型光纤布拉格光栅反射谱。

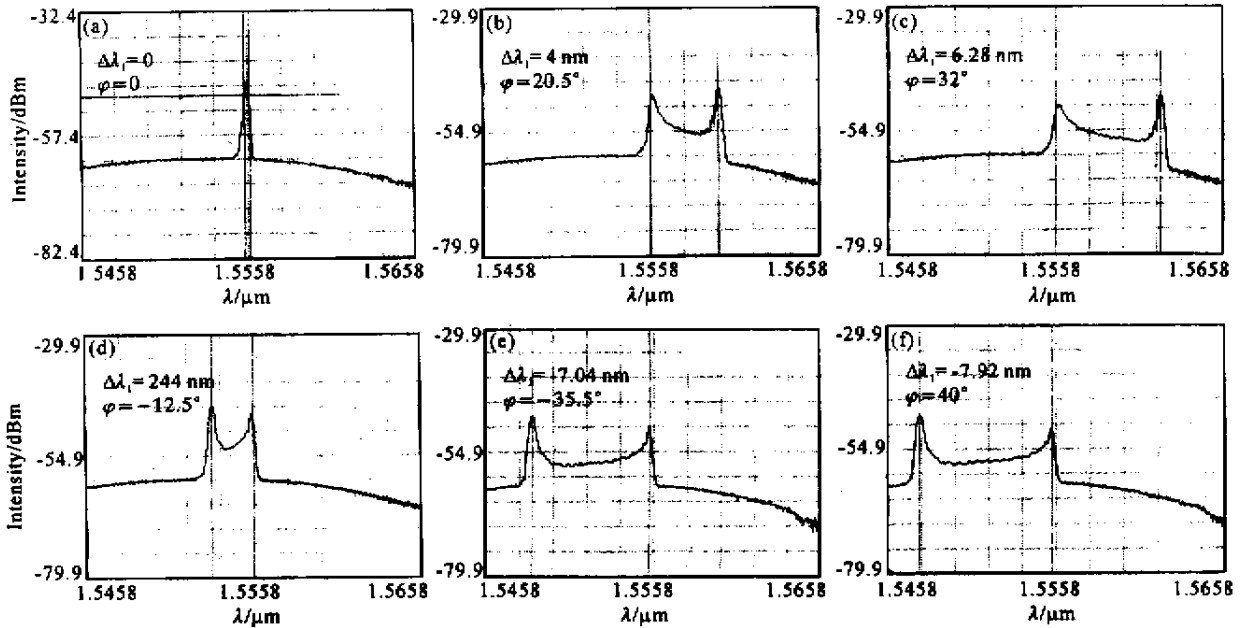


Fig.4 The comparing reflection spectrum of the Bragg fiber-grating between torsion and free

其中图4(a)为未扭转,图4(b)~图4(c)为正向扭转,图4(d)~图4(f)为反向扭转。实验发现,在光纤布拉格光栅不被破坏的前提下,反向扭转范围(使光纤布拉格光栅压缩)可超过正向扭转范围(使光纤布拉格光栅拉伸),本实验允许的扭转角范围为 $\varphi = -40^\circ \sim +32^\circ$ 。由图4可见, φ 或 M_t 分别沿正向和反向变化时,光纤布拉格光栅变为啁啾光栅(CFG),反射谱边缘有两个反射峰(对应于 λ_1 与 λ_2),它们的峰值反射率均低于光纤布拉格光栅自由态下 λ_0 的峰值反射率。其中,对应于 λ_2 的反射峰与 λ_0 基本重合,其漂移量约为0.1 nm,而对应于 λ_1 的反射峰则沿长波或短波方向漂移。 λ_1 与 λ_2 之间形成下凹状连续反射谱,这是由于固定端并非完全刚性,当扭梁转动时,粘贴在该处的光纤布拉格光栅应变是非阶跃而呈连续变化,造成两个峰之间存在一定的光反射分布。两个峰值反射率不一致,最大的差值约为2.5 dB,这主要是粘贴在扭梁与固定端两部分的光纤布拉格光栅长度不完全相等所致。由于反射

谱的下凹状分布对边缘反射峰的位置无影响,故只要分别检测对应于 λ_1 与 λ_2 两个反射峰的漂移 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$,即可推知扭转角(或扭矩)及外界温度的变化状态。在 $\varphi = -40^\circ \sim +32^\circ$ 范围内, λ_1 向短波和长波方向分别漂移了约-7.92 nm和6.28 nm,双向漂移量 $\Delta\lambda_1 \approx 14.20$ nm,而 $\Delta\lambda_2 \approx 0$ 。在此条件下,可以认为粘贴于固定端上的光纤布拉格光栅反射波长变化不受扭矩的影响,其中心反射波长 λ_2 不改变。

图5给出了 $T = 20^\circ\text{C}$ 下扭转角 φ (或扭矩 M_t)变化时,对应于 λ_1 与 λ_2 两个反射峰漂移的实验曲线。由图可见, λ_1 与 φ 、 M_t 均呈明显线性关系,二直线拟合方程分别为 $\lambda = 0.19\varphi + 1555.80$ nm, $\lambda_1 = 3.29M_t + 1555.80$ nm,其线性拟合度分别达到0.9979和0.9976。上述方程又可写为

$$\Delta\lambda_1 = |\lambda_1 - \lambda_0| = 0.19\varphi,$$

$$\Delta\lambda_1 = |\lambda_1 - \lambda_0| = 3.29M_t,$$

而 $\Delta\lambda_2 \approx 0$ 。于是,得 $K_{11\varphi} = 0.19$ nm/($^\circ$), $K_{21\varphi} = 0$,
 $K_{11M_t} = 3.29$ nm/Nm, $K_{21M_t} = 0$ 。

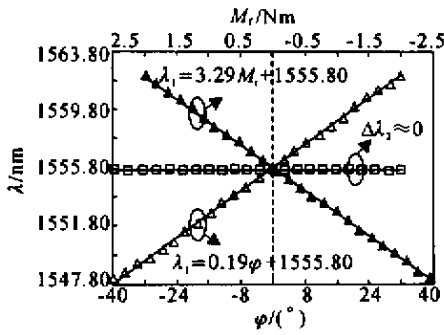


Fig.5 Experimental plots between λ_1, λ_2 and φ when $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$

图 6 为 $\varphi = -15^\circ$ ($M_1 = 0.9\text{ Nm}$) 时, 温度 T 与对应于 λ_1 与 λ_2 两个反射峰漂移的实验曲线。对图 6 中的数据拟合, 可得 $K_{12T} = 0.09\text{ nm}/^\circ\text{C}$, $K_{22T} = 0.03\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。于是 (10) 式、(11) 式系数矩阵的实验值分别为

$$\begin{bmatrix} K_{11\varphi} & K_{12T} \\ K_{21\varphi} & K_{22T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.19 & 0.09 \\ 0 & 0.03 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} K_{11M_1} & K_{12T} \\ K_{21M_1} & K_{22T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.29 & 0.09 \\ 0 & 0.03 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

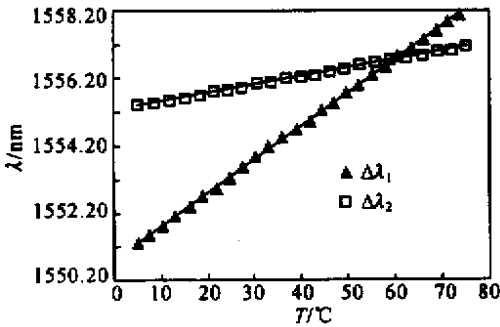


Fig.6 Experimental plots between λ_1, λ_2 and T when $\varphi = -15^\circ$ ($M_1 = 0.9\text{ Nm}$)

根据相关参量, 可推算 (10) 式、(11) 式系数矩阵的理论值。其中, 光纤的有效弹光系数 $p_s = 0.22$, 石英玻璃的热胀系数 $\alpha = 0.5 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 热光系数 $\xi = 6.8 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 扭梁的热胀系数 $\alpha_{s1} = 7.35 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 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 $G_1 = E_1[\chi(1 + \mu_1)] = 0.72 \times 10^8\text{ N/m}^2$ 。铁的热胀系数 $\alpha_{s2} = 1.18 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 杨氏模量 $E_2 = 193.053 \times 10^9\text{ N/m}^2$, 泊松比 $\mu_2 = 0.29$, 剪切模量 $G_2 = E_2[\chi(1 + \mu_2)] = 75.012 \times 10^9\text{ N/m}^2$ 。由于材料的非完全刚性, 当扭梁转动时, 固定端两侧光纤布拉格光栅的应变并非是跃变的, 而是呈连续变化, 致使粘贴于固定端面的光纤布拉

格光栅产生的应变随与连接面距离的增大而迅速衰减至最小, 形成下凹状连续反射谱。因 $G_2 \gg G_1$, 与固定端相比扭梁的扭转形变非常微小, 可认为 $\Delta\lambda_2$ 不受扭矩的影响, 即 $K_{21\varphi} = K_{21M_1} = 0$ 。根据上述参量计算得到 (10) 式、(11) 式系数矩阵的理论值分别为

$$\begin{bmatrix} K_{11\varphi} & K_{12T} \\ K_{21\varphi} & K_{22T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.21 & 0.10 \\ 0 & 0.03 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} K_{11M_1} & K_{12T} \\ K_{21M_1} & K_{22T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.51 & 0.10 \\ 0 & 0.03 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

对比 (12) 式 ~ (15) 式可知, 系数矩阵的实验拟合值与理论计算值符合得很好, 二者之比约为 94%。由 (10) 式、(11) 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量, 获得适合的灵敏度, 其测量范围应以不破坏光纤光栅并使扭梁保持弹性恢复为原则。实验表明, 选择适当的圆柱形材料、精工制作扭梁及尽量刚性粘贴光纤光栅以期实现扭转角 (扭矩或扭应力) 和温度的双参量线性传感并同时测量是可行的。而选用较长的光纤布拉格光栅 (如 15 mm 左右) 以及使粘贴在扭梁与固定端两部分的光纤布拉格光栅长度尽量相等, 有利于提高传感检测精度。并且, 经过特殊设计的机构, 图 3 所示的传感机构可望用于实时监测诸如流体流速、流量以及建筑、工程机械中结构构件的剪切模量、强度、刚度与稳定性等。

结论 本文采用新颖的扭梁设计结构, 利用单光纤光栅实现了一种基于圆柱形扭梁的扭转 (扭转角、扭矩或扭应力) 与温度的双参量同时测量。该方法具有可双向传感、双参量测量、剥离交叉敏感、灵敏度较高及复用性好等特点, 且光纤光栅波长的变化对扭转角、扭矩及扭转应力 (力臂给定) 均呈线性关系。利用该技术可以有效地监测和调控待测材料的扭转角、扭矩或扭转应力, 通过分析传感直线的斜率可以精确地测定弹性梁的扭转应变。若将该方法应用于光纤光栅传感领域, 可望实现多种物理量的同时测量与监控, 因此, 本项工作具有实际应用价值。

参 考 文 献

[1] Rao Y J. In-fibre Bragg grating sensors. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, (4) 355 ~ 375
 [2] Gupta S, Mizunami T, Yamao T et al.. Fiber Bragg grating cryogenic temperature sensors. *Appl. Opt.*, 1996, (35) 5202 ~ 5205

- [3] LeBlanc M , Huang S Y , Ohn M *et al.* . Distributed strain measurement based on a fiber Bragg grating and its reflection spectrum analysis. *Opt. Lett.* , 1996 , **21**(17) : 1405 ~ 1407
- [4] Song M , Lee B , Lee S B *et al.* . Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings. *Opt. Lett.* , 1997 , **22**(11) : 790 ~ 792
- [5] Cavaleiro P M , Araujo F M , Lobo Ribeiro A B. Metal-coated fiber Bragg grating sensor for electric current metering. *Electron. Lett.* , 1998 , **34**(11) : 1133 ~ 1135
- [6] Du W C , Tao X M , Tam H Y. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *IEEE Photon. Technol. Lett.* , 1999 , **11**(1) : 105 ~ 107
- [7] Zhang W G , Dong X Y , Feng D J *et al.* . Linear fibre-grating-type sensing tuned by applying torsion stress. *Electron. Lett.* , 2000 , **36**(20) : 1686 ~ 1688
- [8] Bjerkan L. Application of fiber-optic Bragg grating sensors in monitoring environmental loads of overhead power transmission lines. *Appl. Opt.* , 2000 , **39**(4) : 554 ~ 560
- [9] Yu Y L , Tam H Y , Chung W H *et al.* . Fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of displacement and temperature. *Opt. Lett.* , 2000 , **25**(16) : 1141 ~ 1143
- [10] Zhang W G , Zhao Q D , Kai G Y *et al.* . Wavelength tunable principle and technological progress of fiber Bragg grating based on elastic beam. *Semiconductor Optoelectronics*(半导体光电) , 2001 , **22**(5) : 299 ~ 303 (in Chinese)
- [11] Zhang W G , Zhao Q D , Kai G Y *et al.* . New-type torsion sensor of fiber grating. *Acta Photonica Sinica*(光子学报) , 2001 , **30**(10) : 1237 ~ 1239 (in Chinese)
- [12] Timashenko S , Gere J. *Material Mechanics*(材料力学) . Translated by Hu Renli. Beijing : Science Press , 1978. 95 ~ 102 (in Chinese)

Sensing Measurement of Two Parameters for Torsion and Temperature Using Single Fiber Grating

Zhang Weigang Xu Zhaowen Yang Xiangpeng Kai Guiyun

Zhao Qida Yuan Shuzhong Dong Xiaoyi

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

(Received 27 April 2001 ; revised 14 November 2001)

Abstract : Adopting a new design structure and using a single fiber Bragg grating , simultaneous measurement of two parameters for the torsion (torque or torsional stress) and the temperature have been realized. The new method can solve the temperature cross-sensitivity in torsional angle and torque sensing , and the Bragg wavelength change is linear to the torsional angle , the torque and torsional stress with the determinate arm of force. In the range of the torsional angle between -40° and $+32^{\circ}$, the torsional angle , torque and temperature sensitivities are $0.19 \text{ nm}/(^{\circ})$, $3.29 \text{ nm}/\text{Nm}$ and $0.03 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, respectively. The wavelength range of linear tuning is up to 14.20 nm .

Key words : fiber Bragg grating ; two parameters sensing ; torsion beam ; torsional angle ; torque ; torsional strain