

文章编号 : 0253-2239(2002)11-1323-05

利用光纤光栅实现力学量二维实时感测的研究^{*}

张伟刚 王 跃 张东生 刘艳格 曾 剑 开桂云 赵启大 董孝义

(南开大学现代光学研究所,天津 300071)

摘要: 将一根光纤上写入两个不同波长的布拉格光栅,沿矩形悬臂梁的中性面与表面的交线粘贴于靠近固定端两个相邻侧面,利用光纤光栅波长绝对编码的特性,实现了应力(或应变)与位移的二维实时传感测量。理论分析和实验结果证明,通过监测粘贴于梁上的两个光纤光栅波长变化的大小和指向,能够实时感测应力、位移等力学量的大小和方向。在与梁轴垂直的方向上,获得应力实验灵敏度分别为 5.32 nm/N 和 3.21 nm/N,位移实验灵敏度分别为 0.30 nm/mm 和 0.48 nm/mm。

关键词: 光纤光栅;应力与位移传感;二维实时感测;力学传感器

中图分类号: TN247:TN253 文献标识码: A

1 引 言

光纤光栅作为一种新型、性能优良且有着巨大应用前景的光无源器件,随着其制备技术的不断发展与完善,其重要性在光传感应用领域中愈来愈突出^[1]。近年来,诸多类型的光纤光栅传感器已有报道,但其设计方法与实现技术往往侧重于对应力(或应变)位移等力学量的一维感测^[2~7]。然而,由于被测物体形状、结构的多样性及扰变因素的复杂性,在工程实际测量中特别需要对应力(或应变)与位移等力学量的二维(或平面)传感与测量,即实时感测其大小及方位。因此,利用光纤光栅对应力(或应变)位移的敏感特性,探索其二维实时感测的方法,在光传感领域是一个很有实际意义的课题。并且,开发一种简便直接、基于光纤光栅的力学量二维实时感测技术,在工程结构形变及安全监测中具有重要的经济价值和社会意义。

本文将两个不同波长的布拉格光栅写入同一根光纤的两个不同位置,并将其分别沿矩形悬臂梁的轴线粘贴于靠近固定端的两个相邻侧面。通过监测粘贴于梁上的两个光纤光栅波长变化的大小和指向,实现了应力与位移的二维实时传感测量,测量结

果证实了相应的理论分析。在与梁轴垂直的方向上,获得应力实验灵敏度分别为 5.32 nm/N 和 3.21 nm/N,位移实验灵敏度分别为 0.30 nm/mm 和 0.48 nm/mm。

2 二维感测机构与原理

图 1 为光纤光栅型应力、位移二维感测机构与原理示意图。

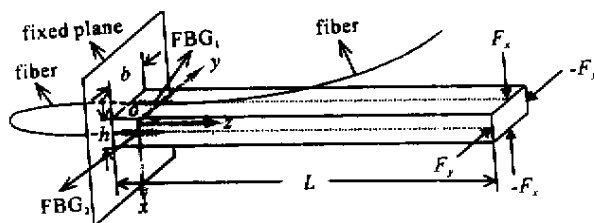


Fig.1 The schematic diagram of the fiber grating-type sensing structure and principle with two dimensions

感测机构的传感部分主要包括一个矩形悬臂梁和两个中心波长不同的光纤布拉格光栅(FBG)。矩形悬臂梁由特殊的有机材料合成,设其长、宽、厚及杨氏模量分别为 L 、 b 、 h 、 E 。设同一根光纤上的两个中心波长不同的光纤布拉格光栅分别为 FBG_1 和 FBG_2 ,其长度和中心波长分别为 l_1 、 l_2 和 λ_1 、 λ_2 。将 FBG_1 和 FBG_2 按图 1 所示分别沿悬臂梁的中性面与表面的交线粘贴于靠近固定端两个相邻的侧面,它们的中心位置与梁固定端的距离均为 δ ($\delta \ll L$)。坐标系 xoy 的选取如图所示。由自制宽带光源(BBS)发出的光先经过 3 dB 耦合器进入 FBG_1 和 FBG_2 ,然后 FBG_1 和 FBG_2 反射满足各自布拉格条

^{*} 国家自然科学基金(60077012、69977006)、国家科委 863 计划(2002AA313110)、国家博士点基金、天津市科技攻关项目(003104011)、天津市自然科学基金(013800511)资助课题。

E-mail: weigangzh22@sina.com

收稿日期 2001-11-05;收到修改稿日期 2002-01-24

件的光,使之再经过 3 dB 耦合器进入光谱分析仪(OSA)进行测量。宽带光源和光谱分析仪连接于 3 dB 耦合器的同侧接口,其另一测两个接口的一端与 FBG₁ 和 FBG₂ 连接,另一端插入匹配液 IMG 中。

当悬臂梁固定端受到与 xoy 平面平行的力 F 作用时, F 可分解为沿 x 轴方向的分力 F_x (或 $-F_x$) 及沿 y 轴方向的分力 F_y (或 $-F_y$)。显然,力 F_x (或 $-F_x$) 可使粘贴在悬臂梁上的 FBG₁ 栅格拉伸或压缩,同理,力 F_y (或 $-F_y$) 可使粘贴在悬臂梁上的 FBG₂ 栅格拉伸(或压缩)。这样,反映在光谱分析仪上的布拉格波长 λ_1 与 λ_2 将随 F_x (或 $-F_x$) 及 F_y (或 $-F_y$) 的变化向长波(或短波)方向漂移。这具体表现为三种情况:当悬臂梁自由端仅受到 x (或 $-x$) 方向的力的作用时,则 λ_1 漂移而 λ_2 不漂移;当悬臂梁自由端仅受到 y (或 $-y$) 方向的力的作用时, λ_2 漂移而 λ_1 不漂移;当悬臂梁自由端同时受到 x (或 $-x$) 与 y (或 $-y$) 两个方向力的作用时, λ_1 与 λ_2 同时漂移。于是,对于这种光纤布拉格光栅型传感机构,通过监测 λ_1 与 λ_2 的漂移大小和指向,即可实时感测来自悬臂梁自由端与 xoy 平面平行的二维力或位移等力学量(如振动等)的大小和方向。

为分析简便且不失一般性,假设光纤布拉格光栅的粘贴不影响悬臂梁的力学性质,忽略悬臂梁的重量对其应变的影响,当悬臂梁自由端受到与 xoy 平面平行的二维力 F 作用时,设其产生的二维挠度(位移)为 Ω 。如果 Ω 在 x 轴与 y 轴上的分量 x 和 y 均很小,则在恒温条件下,粘贴于悬臂梁上的 FBG₁ 和 FBG₂ 的中心波长的漂移 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 与力 F 在 x 轴与 y 轴上的分量 F_x 、 F_y 或位移 x 、 y 的变化关系可用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中,等式右端第一项为系数矩阵, K_1 与 K_2 分别对应于该传感装置感测 x 与 y 方向的应力灵敏度, κ_1 与 κ_2 则分别对应于该传感装置感测 x 与 y 方向的位移灵敏度。对于确定的悬臂梁,上述系数矩阵中的各项因子为定值。具体为:

$$K_1 = [6\lambda_1(1 - P_e)(L - \delta)](Ebh^2),$$

$$K_2 = [6\lambda_2(1 - P_e)(L - \delta)](Ehb^2),$$

$$\kappa_1 = [3\lambda_1 h(1 - P_e)(L - \delta)](2L^3),$$

$$\kappa_2 = [3\lambda_2 h(1 - P_e)(L - \delta)](2L^3).$$

式中 P_e 为有效弹光系数。(1)式和(2)式表明,FBG₁ 与 FBG₂ 的中心波长漂移量 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 与力 F_x 、 F_y 或位移 x 、 y 均呈线性关系,此二式是本文设计的光纤光栅型感测机构对二维力学量(应力与位移)感测的基本关系式。由此得到作用力与位移的大小分别为

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, \quad \Omega = \sqrt{x^2 + y^2},$$

其方位角分别为

$$\alpha = \arctan(F_y/F_x), \quad \beta = \arctan(y/x),$$

并且有

$$\tan\beta = [(K_2\kappa_1)(K_1\kappa_2)]\tan\alpha = (h^2/b^2)\tan\alpha.$$

显然,当横截面为正方形时,即 $h = b$ 则 $\alpha = \beta$,这时 F 与 Ω 方向一致。由此可见,利用光纤光栅波长绝对编码的特性,通过监测两个光纤布拉格光栅波长漂移的大小及指向即可实现应力与位移的二维实时感测。表 1 给出了 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 变化范围与 F 、 Ω 方位角 α 、 β 之间的关系。

Table 1. Relation between wavelength change and azimuthal angle

the range of reflection wavelength change	the azimuthal angles α β about F Ω
$\Delta\lambda_1 > 0$ $\Delta\lambda_2 > 0$	first quadrant
$\Delta\lambda_1 < 0$ $\Delta\lambda_2 > 0$	second quadrant
$\Delta\lambda_1 < 0$ $\Delta\lambda_2 < 0$	third quadrant
$\Delta\lambda_1 > 0$ $\Delta\lambda_2 < 0$	fourth quadrant

本文感测机构的相关参量选取如下: $P_e = 0.22$, $L = 120.0$ mm, $b = 5.0$ mm, $h = 3.0$ mm, $\delta = 7$ mm, $E = 2.744 \times 10^3$ N/mm²。测得室温 20 °C 时 FBG₁ 与 FBG₂ 的中心波长分别为 $\lambda_1 = 1547.20$ nm 与 $\lambda_2 = 1555.40$ nm。于是,得到(1)式和(2)式系数矩阵的理论值如下:

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.62 \text{ nm/N} \\ 3.98 \text{ nm/N} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.36 \text{ nm/mm} \\ 0.59 \text{ nm/mm} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

考虑到悬臂梁横截面尺寸对传感灵敏度的影响,在梁长、FBG₁ 与 FBG₂ 的波长及粘贴位置一定的条件下,根据关系式 $(K_2\kappa_1)(K_1\kappa_2) = h^2/b^2$ 调整矩形横截面的宽度与厚度尺寸,可以获得适宜的应力、位移等力学量的传感灵敏度。当梁的横截面愈接近正方形时,应力、位移沿 x 轴与 y 轴方向上的传感灵敏度愈接近。

3 测量结果与实验分析

实验使用的光栅是用高掺锗光敏光纤以相位掩膜法自行研制的,测得 FBG_1 与 FBG_2 的长度分别为 $l_1 = 8 \text{ mm}$ 和 $l_2 = 10 \text{ mm}$,反射率分别为 96.5% 和 97.4%,反射带宽约为 0.27 nm 和 0.23 nm。光谱分析仪的分辨率为 0.1 nm,波长扫描平均次数 $n = 3$ 。对作用于悬臂梁自由端处平行或垂直于 x 轴的作用力和位移,可由精密测力仪与精密位移进给装置步进调节并精确测定。对作用于悬臂梁自由端处与 x 轴呈一定角度的作用力 F 和位移 Ω ,我们设计如下机构进行测定:由梁的自由端引出一细钢线并通过一小定滑轮与砝码盘相连,细钢线落在梁的自由端与 xoy 平面平行的平面之中。 F 的大小可通过增减砝码盘中的载荷精确测定,其方位角 α 可通过测量连接于梁的自由端和小定滑轮之间的细钢线方向与 x 轴之间的夹角确定; Ω 的大小可由两种方法得到:若 Ω 值比较小,可由系于细钢线底端的砝码盘的升降高度直接读出,亦可先将 β 代入(2)式、(4)式再由 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 变换得到, Ω 的方位角 β 由关系式

$$\tan\beta = [(K_2\kappa_1)(K_1\kappa_2)]\tan\alpha$$

确定。实验中,将光纤光栅传感部分置于温控室内并保持恒温 20°C 。测量前使悬臂梁自由端分别沿 x 轴与 y 轴的正向和反向微小弯曲进行“预热”,以使悬臂梁表面各处应变的传递均匀。实验中环境温度稳定,测量仪器运行良好,实验数据可靠、有效。实验中对作用力的施加采用两种方式进行。

方式一:对悬臂梁自由端分别独立施加沿 x 轴和 y 轴的正向及反向作用力 F_x (或 $-F_x$)、 F_y (或 $-F_y$)。要求力的作用点落在梁的中性面与其表面的交线上,力的作用线落在梁的自由端与 xoy 平面平行的平面之中。图 2 为悬臂梁自由端分别独立施加沿 x 轴和 y 轴的正向及反向作用力(或位移)时,由光谱分析仪记录的 FBG_1 或 FBG_2 中心波长的漂移与其自由态波长的对比反射谱。其中,图 2(a)为仅受到 x (或 $-x$) 方向上作用力的情况:当 $F_y = 0$, $F_x = 0.60 \text{ N}$ 和 $F_x = -0.66 \text{ N}$ 时,测得对应的位移值分别为 $x = 10.67 \text{ mm}$ 和 $x = -11.67 \text{ mm}$,这时 FBG_1 的中心波长 λ_1 分别向长波和短波方向漂移了约 3.2 nm 和 3.5 nm,而 FBG_2 的中心波长几乎未漂移,即 $\Delta\lambda_2 \approx 0 \text{ nm}$ 。图 2(b)为仅受到 y (或 $-y$) 方向上作用力的情况:即当 $F_x = 0$, $F_y = 0.68 \text{ N}$ 及 $F_y = -0.78 \text{ N}$ 时,测得对应位移值分别为 $y =$

4.58 mm 和 $y = -5.21 \text{ mm}$,这时 FBG_2 的中心波长 λ_2 分别向长波和短波方向漂移了约 2.2 nm 和 2.5 nm,而 FBG_1 的中心波长 λ_1 几乎未漂移,即 $\Delta\lambda_1 \approx 0 \text{ nm}$ 。

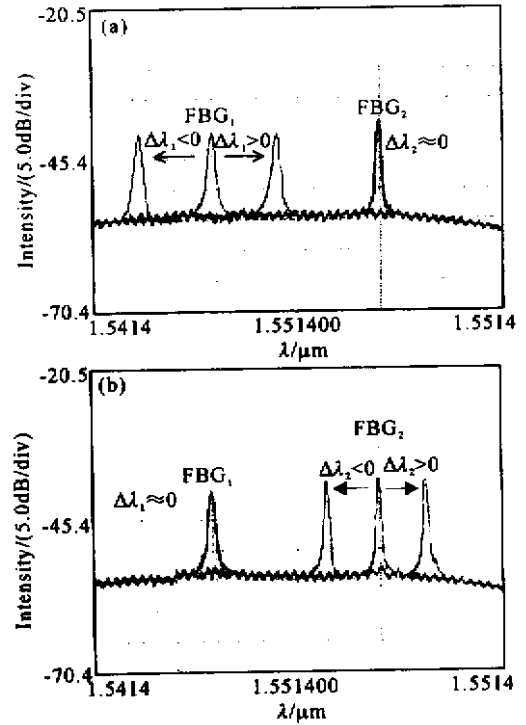


Fig. 2 The reflection spectrum of the FBG wavelength shift based on the fiber grating-type sensing structure with two dimensions when $T = 20^\circ\text{C}$. (a) $F_x = 0.60 \text{ N}$, $F_x = -0.66 \text{ N}$, $F_y = 0$; (b) $F_x = 0$, $F_y = 0.68 \text{ N}$, $F_y = -0.78 \text{ N}$

通过对悬臂梁自由端分别独立施加沿 x 轴和 y 轴的正向及反向作用力(或位移),由光谱分析仪记录 FBG_1 和 FBG_2 中心波长的漂移,经线性数值拟合即可得到(1)式和(2)式系数矩阵的实验值。经多次实验并采用多组实验数据拟合得到的实验值如下:

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.32 \text{ nm/N} \\ 3.21 \text{ nm/N} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.30 \text{ nm/mm} \\ 0.48 \text{ nm/mm} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

显然(1)式和(2)式系数矩阵中的各项实验值约为其理论值的 80%。

方式二:对悬臂梁自由端施加沿与 x 轴成一定角度 α 的作用力 F ,该力的作用点亦落在梁的中性面与其表面的交线上,力的作用线亦落在梁的自由端与 xoy 平面平行的平面之中。图 3 为悬臂梁自由端施加平行于 xoy 平面的二维作用力时,由光谱分析仪记录的 FBG_1 与 FBG_2 中心波长的漂移与其自由

态波长的对比反射谱。其中图 3(a)为 F (或 Ω) 作用的方位在第 III 象限的情况:当 $F = 1.01 \text{ N}$ 且 $\alpha \approx 230.5^\circ$ 时,对应的位移值与方位角分别为 $\Omega = 12.47 \text{ mm}$, $\beta \approx 204.5^\circ$, 这时 FBG_1 与 FBG_2 的中心波长 λ_1 和 λ_2 分别向短波方向漂移了约 3.4 nm 和 2.5 nm 。图 3(b)为 F (或 Ω) 作用的方位在第 IV 象限的情况:当 $F = 0.91 \text{ N}$ 且 $\alpha \approx 308^\circ$ 时,对应的位移值与方位角分别为 $\Omega = 11.08 \text{ mm}$, $\beta \approx 334.5^\circ$, 这时 FBG_1 的中心波长 λ_1 向长波方向漂移了约 3.0 nm , 而 FBG_2 的中心波长 λ_2 则向短波方向漂移了约 2.3 nm 。图 2 与图 3 显示的实验结果,验证了前述应力与位移二维感测机构的有关理论分析。

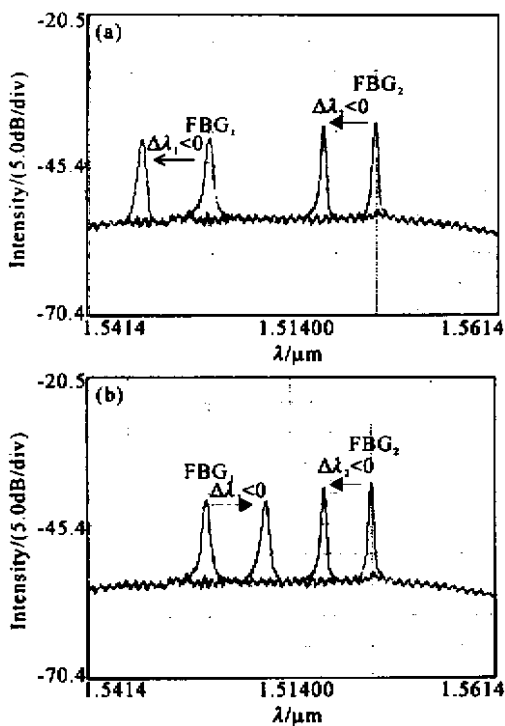


Fig.3 The reflection spectrum of the FBG wavelength shift based on the fiber grating-type sensing structure with two dimensions when $T = 20^\circ\text{C}$. (a) $F_x < 0$ and $F_y < 0$; (b) $F_x > 0$ and $F_y < 0$

为了检验(5)式和(6)式的实用性,对平行于 xoy 平面且沿各个方位作用于悬臂梁自由端的力 F 引起的两个布拉格波长的变化 $\Delta\lambda_1$ 与 $\Delta\lambda_2$ 进行了实验测量,获得了多组实验数据。图 4 为 $\alpha \approx 45^\circ$ 时具有代表性的 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 与作用力 F 及位移 Ω 的实验关系曲线。其中图 4(a)为 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 与作用力 F 值的实验关系曲线,图 4(b)为 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 与位移 Ω 值的实验关系曲线,其中 $\beta \approx 21.5^\circ$ 。

图 4 显示的实验结果表明, FBG_1 与 FBG_2 的中心波长漂移量 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 与作用力 F 或位移 Ω 的

均呈线性关系。这些实验点的拟合方程分别为 $\Delta\lambda_1 = 3.76F (\text{nm/N})$ 与 $\Delta\lambda_2 = 2.27F (\text{nm/N})$ 与 $\Delta\lambda_1 = 0.28\Omega (\text{nm/mm})$ 与 $\Delta\lambda_2 = 0.17\Omega (\text{nm/mm})$, 其线性拟合度均不小于 0.996。由方位角 α 、 β 均为定值可知, $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 与力 F_x 、 F_y 或位移 x 、 y 亦呈线性关系。将方位角 $\alpha \approx 45^\circ$ 和 $\beta \approx 21.5^\circ$ 纳入到这些拟合方程之中,亦可得到(1)式和(2)式系数矩阵的实验值。我们将这些实验值与对悬臂梁自由端分别独立施加沿 x 轴和 y 轴的正向及反向作用力的实验值进行了对比,发现前者略低于后者,其偏差不超过 5%。对于 F 作用的方位在其他象限的情况 ($90^\circ < \alpha < 360^\circ$), 其测量方法同上,实验结果亦与之类似。

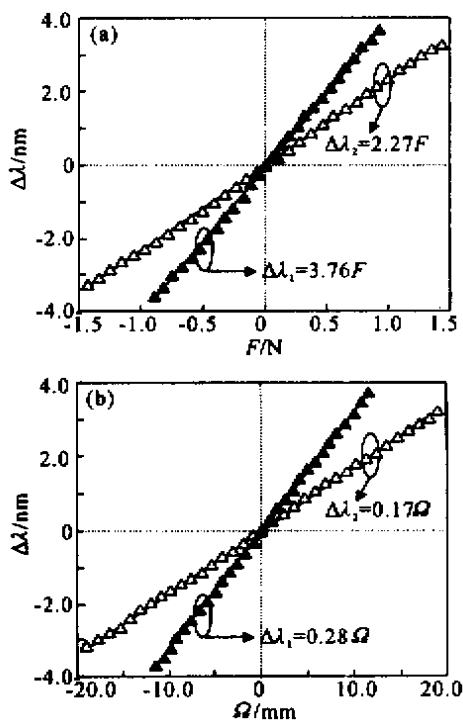


Fig.4 The reflection spectrum of the FBG wavelength shift based on the fiber grating-type sensing structure with two dimensions when $T = 20^\circ\text{C}$. (a) The relationship between $\Delta\lambda_1$ or $\Delta\lambda_2$ and F when $\alpha \approx 45^\circ$; (b) The relationship between $\Delta\lambda_1$ or $\Delta\lambda_2$ and Ω when $\beta \approx 21.5^\circ$

实验发现,当力 F 的作用点偏离梁的中性面与其表面的交线,但其作用线仍保持在梁的自由端与 xoy 平面平行的平面之中时,其测量结果与未偏离时的测量结果相比会产生一定的偏差。经分析我们认为:该偏差的主要原因在于悬臂梁自由端受到平面力 F 作用时, F 分解的两个正交分力使梁产生了一定程度的扭曲,这可通过对梁的优化设计(如选择横截面为正方形的梁做悬臂梁等)使扭曲弱化;次要原因包括光栅与梁粘贴的刚性程度及小滑轮的质量及与细钢线之间的摩擦等,这些问题可通过如下方

式解决。选择强力粘合剂以提高其粘贴质量,尽量减小滑轮质量及其与细钢线之间的摩擦等。

在实际应用时,以 FBG_1 与 FBG_2 的波长差具有较大的范围为宜。如此,可防止在较大作用力 F 及位移 Ω 的作用下可能产生的传感信号串扰,但同时亦应考虑宽带光源输出的波长范围,使传感光栅波长总体变化范围不超过这个范围。此外,采用文献[8]的方法,将 FBG_1 或 FBG_2 的一部分粘贴在固定端的衬底材料上,亦可对温度进行补偿,有关方面的工作正在进之中。

结论 本文将一根光纤上写入两个不同波长的布拉格光栅,沿矩形悬臂梁的中性面与表面的交线粘贴于靠近固定端两个相邻侧面,利用光纤光栅波长绝对编码的特性,实现了恒温条件下应力与位移的二维实时传感测量。在相互垂直的方向上,获得应力实验灵敏度分别为 5.32 nm/N 和 3.21 nm/N ,位移实验灵敏度分别为 0.30 nm/mm 和 0.48 nm/mm 。理论分析和实验结果表明,该传感器具有线性度佳、二维实时传感、检测方向可调、复用性良好等特点。通过优化悬臂梁的几何参量,可灵活设计力学参量的二维传感灵敏度。因此,该感测机构在结构体表面形变与内部应变分布的检测中具有实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] Rao Y J. In-fibre Bragg grating sensors. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**(4): 355 ~ 375
- [2] Liu Z G, Zhang Y B, Kai G Y *et al.*. A new method for fiber-grating linear tuning. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(12): 1731 ~ 1734 (in Chinese)
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Guan B O, Tam H Y, Tao X M *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6): 675 ~ 677
- [6] Zhang W G, Kai G Y, Feng D J *et al.*. Experimental analyses of fiber Bragg grating resonance sensing. *J. Transduction Technology* (传感技术学报), 2000, **13**(4): 246 ~ 250 (in Chinese)
- [7] 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
- [8] Zhang W G, Xu Z W, Kai G Y *et al.*. Sensing measurement of two parameters for torsion and temperature using single fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9): 1070 ~ 1075 (in Chinese)

Real Time Sensing and Measurement for Two Dimensional Dynamics Quantities Using Fiber Grating

Zhang Weigang Wang Yue Zhang Dongsheng Liu Yan'ge Zeng Jian
Kai Guiyun Zhao Qida Dong Xiaoyi

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

(Received 5 November 2001; revised 24 January 2002)

Abstract: The two fiber gratings with two different wavelengths in a single mode fiber are bonded to the two neighboring side faces near the fixed end along the axial direction of a cantilever beam. Using the characteristics of fiber grating encoding, we have realized the measurement of the two dimensions for the stress or the displacement. The theoretical analyses and the experimental results indicate that the magnitudes and the directions of the stress, displacement and other mechanical quantities can be sensed and measured in real time through monitoring the value and direction of the wavelength shift of the two fiber gratings that are bonded to the near fixed end of the cantilever beam. In the vertical directions of the cantilever beam axis, the experimental sensitivities of the stress are 5.32 nm/N and 3.21 nm/N , the experimental sensitivities of the displacement are 0.30 nm/mm and 0.48 nm/mm , respectively.

Key words: fiber grating; stress and displacement sensing; real time sensing and measurement of two dimensions; dynamical sensor