

文章编号: 0258-7025(2003)01-0071-04

利用单光纤光栅实现力学量垂直感测的研究

张伟刚, 刘艳格, 王跃, 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 通过改进悬臂梁自由端结构设计, 利用光纤光栅波长绝对编码的特性, 实现了利用单光纤光栅对应力、位移进行了垂直感测。理论分析和实验结果证明, 通过监测粘贴于悬臂梁固定端附近的光纤光栅波长变化的大小和指向, 能够感测应力、位移等力学量的大小及方向。在相互垂直的方向上, 获得的应力实验灵敏度分别为 1.87 nm/N 和 3.40 nm/N, 位移实验灵敏度分别为 0.23 nm/mm 和 0.41 nm/mm。

关键词 光电子技术; 光纤光栅; 波长绝对编码; 力学传感器; 垂直感测

中图分类号 TN 247; TN 253 **文献标识码** A

Study of Sensing and Measurement for Vertically Mechanical Quantities Using Single Fiber Grating

ZHANG Wei-gang, LIU Yan-ge, WANG Yue, KAI Gui-yun, ZHAO Qi-da, DONG Xiao-yi

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

Abstract Based on the characteristic of the fiber grating wavelength absolute encoding, the vertical sensing measurements of the stress, displacement have been realized by means of the improving the structure design of the free end of the cantilever beam. The theoretical analyses and the experimental results indicate that the magnitudes and the vertical directions of the mechanical quantities, such as stress, displacement and etc. can be sensed and measured through monitoring the value and direction of the wavelength shift of the fiber grating that is bonded to the near fixed end of the cantilever beam. In the vertical directions, the experimental sensitivities of the stress are 1.87 nm/N and 3.40 nm/N, the experimental sensitivities of the displacement are 0.23 nm/mm and 0.41 nm/mm, respectively.

Key words optoelectronic technique; fiber grating; wavelength absolute encoding; mechanical sensor; vertical sensing and measuring

1 引言

随着光纤光栅制备技术的不断发展与完善, 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, 在光传感领域中日益凸显其重要性^[1]。近年来, 基于光纤光栅设计的各种传感器在诸多领域中报道颇多, 已形成较为广泛的应用研究态势^[2~8]。这些光纤光栅传感器的设计方法与实现技术, 往往侧重于参量的一维单向或双向感测。然而, 由于被

测物体形状、结构的多样性及外界扰变的复杂性, 实际测量中特别需要对应力、位移等物理参量进行二维(或平面)测量, 即实时感测其大小及方位。因此, 寻求一种简便直接、利用单光纤光栅感测平面力学量的方法并开发其实用技术, 在光传感中对充分发挥光纤光栅的作用具有重要的经济价值及社会意义。

解决这一问题的方法可从两个角度考虑: 一是

收稿日期: 2001-10-23; 收到修改稿日期: 2001-12-10

基金项目: 国家 863 计划项目(2002AA313110), 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(003104011)以及南开大学人事处科研启动基金资助项目。

作者简介: 张伟刚(1959—), 男, 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

增加传感器个数或在同一传感器中增加光纤光栅的个数,即两个光栅各对应平面中一个方向的感测;二是改进结构设计,利用单光纤光栅感测平面中的力学量。这两种方法相比较而言,前者操作简单,但增加了光纤光栅及信号解调的费用;后者仅需一个光纤光栅,费用较少,但对传感结构的设计要求较高。本文改进了悬臂梁结构设计,在自由端设计一个直角三角形刚性约束架,光纤布拉格光栅(FBG)粘贴在悬臂梁固定端附近,通过监测布拉格波长变化的大小和方向,实现了单光纤光栅对应力、位移等力学量的垂直感测。实验中垂直应力的灵敏度分别为 1.87 nm/N 和 3.40 nm/N,垂直位移灵敏度分别为 0.23 nm/mm 和 0.41 nm/mm。

2 传感装置与机理

图 1 为自由端呈直角三角形的悬臂梁结构示意图。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 , 约束架固定于梁上 A, B 之间;作用杆顶端与沿 $A'B$ 移动的滑块 C 相接,底端 D 为受力点,作用杆穿过可在横向导轨上移动的滑块,该滑块约束作用杆作横向移动,其横向移动不大于梁上 A, B 两点之间的距离。将长度为 l , 自由中心波长为 λ_0 的光纤布拉格光栅刚性粘贴靠近悬臂梁固定端 Q 的上表面,其中心位置与固定端的距离为 δ 。显然,当作用杆端点 D 受外力作用时,其运动受到约束架的限制。即:横向力 F_x 使滑块沿横向导轨移动导致作用杆产生横向位移,而作用杆顶端滑块 C 由 A' 点沿约束架向 B 点滑动,迫使悬臂梁向下弯曲,使靠近悬臂梁固定端粘贴的 FBG 受到拉伸;纵向力 F_y 使作用杆通过顶端滑块 C 推动悬臂梁向上弯曲,使 FBG 受到压缩。为分析方便起见,取沿梁轴向左为 x 轴,垂直梁轴向上为 y 轴,令 XOY 平

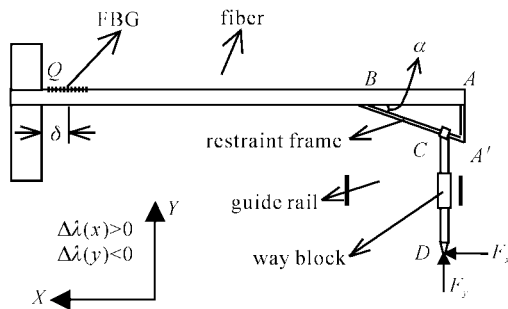


图 1 自由端呈直角三角形的悬臂梁传感结构示意图
Fig. 1 Sensing structure of the cantilever beam with the right-angled triangle free end

面为水平面,规定 C 与 A' 点重合时为坐标系的原点。

假设图 1 所示结构的直角三角形约束架为刚性的,与梁轴的夹角 $\angle ABA' = \alpha$, A, A', B, C, D, Q 各点处于同一平面,于是可忽略悬臂梁的重量对其应变的影响。假设 FBG 的粘贴不影响梁的性质,若在作用杆端点 D 施加沿 X 轴或 Y 轴方向的力 F_x 和 F_y ,在悬臂梁自由端挠度(位移) y 不大的条件下,根据材料力学知识,距固定端 δ 处沿梁轴向的应变为^[9]

$$\delta = \frac{6(L-\delta)}{Eb^3} F_y = \frac{3(L-\delta)h}{2L^3} y \quad (1)$$

在恒温条件下,粘贴于悬臂梁上 FBG 中心波长的变化可表示为^[9]

$$\Delta\lambda = \frac{6\lambda_0(1-p_e)(L-\delta)}{Eb^3} F_y = \frac{3\lambda_0(1-p_e)(L-\delta)h}{2L^3} y \quad (2)$$

P_e 为有效弹光系数。由图 1 可知,对自由端呈三角形的悬臂梁,其约束条件为 $y = x \tan(\alpha)$ 。于是,由约束条件及(2)式,FBG 中心波长随作用杆 D 端所受的力与坐标位移的变化可用如下矩阵表示

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda(F_\xi) \\ \Delta\lambda(\xi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K(F_\xi) \\ K(\xi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_\xi \\ \xi \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,等式右端第一项为系数矩阵, $\xi = x, y$ 分别代表 X 方向和 Y 方向的位移, $K(F_\xi)$ 与 $K(\xi)$ 分别表示该传感装置对应力和位移在横向与纵向上的传感灵敏度,对于确定的弹性梁,其各项因子分别为

$$K(F_x) = [6\lambda_0(1-p_e)(L_e-\delta)\tan(\alpha)]/(Eb^3h^2)$$

$$K(F_y) = [6\lambda_0(1-p_e)(L_e-\delta)]/(Eb^3h^2)$$

$$K(x) = [3\lambda_0h(1-p_e)(L_e-\delta)\tan(\alpha)]/(2L_e^3)$$

$$K(y) = [3\lambda_0h(1-p_e)(L_e-\delta)h]/(2L_e^3)$$

L_e 为有效梁长, $L_e \leq L$, 且 $|L-L_e|$ 与 $\Delta L = |\overline{AB} - y/\tan\alpha|$ 的量级相当,而 $|\Delta L/(L-L_e)| \sim 10^{-2}$ 。分析表明,这种近似对灵敏度 $K(F_\xi)$ 产生的误差为某一定值(与传感结构参数的选取有关),而对 $K(\xi)$ 产生的误差则与 L_e^{-3} 成正比。实验中,这种近似对 $K(F_\xi)$ 及 $K(\xi)$ 产生的误差为 10% ~ 20%。在 $QA \gg AB$ 及 y 不大的条件下, L_e 与 L 相当。于是,可近似认为 $K(F_\xi)$ 与 $K(\xi)$ 为定值。即采用这种直角三角形自由端约束架,在一定的 x 或 y 范围内,FBG 中心波长的漂移量 $\Delta\lambda$ 与作用杆所受的垂直外力 F_x, F_y 和垂直位移 x, y 呈准线性关系。(3)式是本文设计的利用单光纤光栅对力学量(应力与位移)进

行垂直感测的基本关系式。于是,利用光纤光栅波长绝对编码的特性,在规定 FBG 波长变化指向与作用力或位移一一对应的前提下,通过监测其波长漂移的大小与指向,即可实现应力、位移的垂直感测。

悬臂梁的参数选取如下: $p_e = 0.22, L = 100.0$ mm, $b = 8.0$ mm, $h = 2.8$ mm, $l = 15$ mm, $\delta = 5$ mm, $E = 2.744 \times 10^3$ N/mm², $\alpha = 30^\circ$ 。测得室温 20℃ 时 FBG 的中心波长 $\lambda_0 = 1547.20$ nm。于是,得到(3)式系数矩阵的理论值如下

$$\begin{bmatrix} K(F_x) \\ K(F_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.31 \text{ nm/N} \\ 3.99 \text{ nm/N} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} K(x) \\ K(y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.28 \text{ nm/mm} \\ 0.48 \text{ nm/mm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

约束架的形状对力学量的垂直感测至关重要,这是由于约束架的引入使两个同类力学参量(如位移 x 和 y) 必须满足给定的约束条件。事实上,悬臂梁自由端约束架具有多种形状,三角形只是其中的一种。若选取半径为 r 的圆弧,其约束条件则为 $x = \sqrt{y(2r - y)}$,这时 $\Delta\lambda$ 与 F_x 和 x 呈非线性关系。由此可见,选择线性约束条件(如上述三角形约束架),即可实现力学量的垂直、线性感测。并且,通过改变悬臂梁自由端约束架的结构设计,可以获得适宜的应力、位移或其他力学量的传感灵敏度。

3 实验及数据分析

实验使用的 FBG 是用高掺锗光敏光纤以相位掩膜法自行研制的,测得其反射率为 97.4%,反射带宽约为 0.3 nm。用于测定 FBG 反射波长 λ 的光谱仪 OSA(Optical Spectrum Analyzer)分辨率为 0.1 nm,测量精度为 0.01 nm,波长扫描平均次数 AVG=3;自制宽带光源 BBS(Broadband Source)发出的光先经过 3 dB 耦合器进入 FBG,然后 FBG 反射满足布拉格条件的光,使之再经过 3 dB 耦合器进入 OSA 进行测量,IMG 为匹配液。作用杆端处的作用力和位移分别由精密测力仪与精密位移进给装置步进调节并精确测定,前者测量精度为 10^{-2} g,后者测量精度为 10^{-2} mm。实验中将光纤光栅传感部分置于温控室内保持恒温,测量前使滑块和作用杆沿正向和反向微小移动进行“预热”,以使悬臂梁应变传递均匀。

实验中观察到,当作用杆在 Y 方向锁定时,对其端点 D 施加沿 X 方向的作用力或位移,FBG 中心波长随悬臂梁的弯曲向长波方向漂移,这时 $\Delta\lambda > 0$;

而当作用杆在 X 方向锁定时,对其端点 D 施加沿 Y 方向的作用力或位移,FBG 中心波长随悬臂梁的弯曲向短波方向漂移,即 $\Delta\lambda < 0$ 。图 2 为室温 20℃ 时作用杆分别在相互垂直的力作用下,由 OSA 记录的 FBG 中心波长与其最大“红移”和“蓝移”的对比反射谱,其中(a)为 λ 处于自由态位置,(b)为 λ 最大“红移量”(5.16 nm)的位置,(c)为 λ 最大“蓝移量”(4.50 nm)的位置。图 3 为室温 20℃ 时 FBG 中心波长漂移 $\Delta\lambda$ 与应力 F_x, F_y 及位移 x, y 的实验关系曲线。

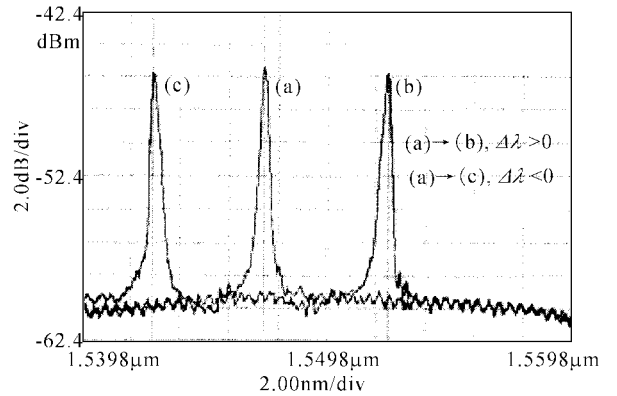


图 2 室温 20℃ 时 FBG 波长漂移的对比反射谱
Fig. 2 Contrast reflection spectrum of the FBG wavelength shift when $T = 20^\circ\text{C}$

图 3 显示 FBG 中心波长漂移 $\Delta\lambda$ 与应力 F_y, F_x 和位移 x, y 呈现良好的线性关系,这些直线的拟合方程分别为 $\Delta\lambda(F_x) = 1.87F_x$ (nm/N), $\Delta\lambda(F_y) = 3.40F_y$ (nm/N), $\Delta\lambda(x) = 0.23x$ (nm/mm), $\Delta\lambda(y) = 0.41y$ (nm/mm),其线性拟合度不小于 0.995。于是,得到(3)式系数矩阵的实验值如下

$$\begin{bmatrix} K(F_x) \\ K(F_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.87 \text{ nm/N} \\ 3.40 \text{ nm/N} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} K(x) \\ K(y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.23 \text{ nm/mm} \\ 0.41 \text{ nm/mm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(6)式和(7)式是实验中对应力 F_y, F_x 和位移 x, y 测量的灵敏度。经分析可知,对于(3)式系数矩阵,其实验值为理论值的 80%左右,这与前述理论分析所给出的误差范围基本一致。引起误差的主要因素有:三角约束架的引入及微小形变,作用杆、滑块、导轨之间吻合的程度及 FBG 与梁之间粘贴的刚性程度等。其中,约束架的设计对 X 方向感测的影响尤为重要。

本文设计的光纤光栅感测机构,与单 FBG 一维力学参量的感测机构相比,由于将单 FBG 波长变化

的两个指向与相互垂直的力学参量方向一一对应, 因而对垂直的任一方向而言, FBG 波长调谐范围将减少一半, 即力学参量的感测范围相对要小一些。因悬臂梁自由端引进的约束架增加的系统误差, 可

通过对约束架的优化设计使之弱化以达到实际测量的要求。这种改进型悬臂梁结构, 若应用于实际力学量的感测, 其结构设计、稳定性及测量范围有待进一步提高与完善。

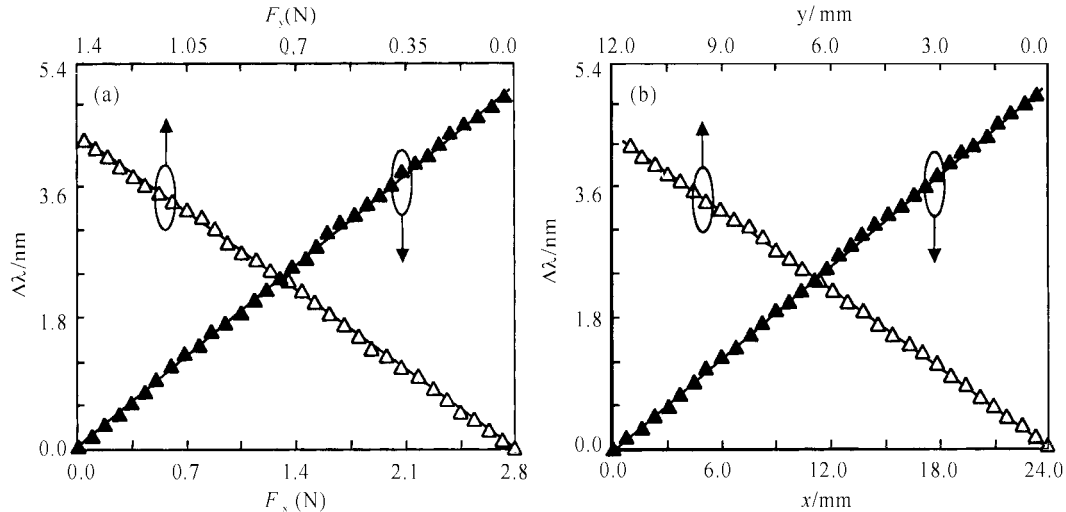


图3 室温 20°C 时 $\Delta\lambda$ 与 F_x, F_y 及 x, y 的实验关系曲线

(a) $\Delta\lambda$ 与 F_x, F_y 的实验关系曲线; (b) $\Delta\lambda$ 与 x, y 的实验关系曲线

Fig. 3 Experimental plots between $\Delta\lambda$ and F_x, F_y , and x, y when $T = 20^\circ\text{C}$

(a) the relationship between $\Delta\lambda$ and F_x or F_y ; (b) the relationship between $\Delta\lambda$ and x or y

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 M. Song, B. Lee, S. B. Lee *et al.*. Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11):790~792
- 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 W. C. Du, X. M. Tao, H. Y. Tam. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1):105~107
- 7 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**(20):1686~1688
- 8 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
- 9 Weigang Zhang, Xiaoyi Dong, Qida Zhao *et al.*. FBG-type sensor for simultaneous measurement of force (or displacement) and temperatures based on bilateral cantilever beam [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12):1340~1342