

文章编号: 0258-7025(2002)11-1015-04

用光纤光栅的啁啾效应实现温度不敏感的位移传感

黄勇林, 童峥嵘, 项 阳, 许兆文, 开桂云, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

提要 将均匀周期光纤布拉格光栅斜向粘贴于矩形悬臂梁的侧面, 通过调节弹性梁自由端的位移, 使其产生啁啾, 利用光纤光栅的啁啾效应, 实现了温度不敏感的位移传感。由于传感量为光纤光栅的带宽, 有效地解决了温度交叉敏感问题, 在位移传感实验中获得了很好的线性响应度。

关键词 光纤光栅, 位移传感, 啁啾效应, 温度不敏感

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Temperature-insensitive Displacement Sensing Using the Chirp Effect of Fiber Bragg Grating

HUANG Yong-lin, TONG Zheng-rong, XIANG Yang,

XU Zhao-wen, KAI Gui-yun, DONG Xiao-yi

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

Abstract A fiber Bragg grating is slantingly bonded to the side of the rectangle cantilever beam, and the chirp effect of the grating would appear by adjusting the displacement of the beam's free end. The displacement sensing using the chirp effect of fiber Bragg grating under strain-gradient is demonstrated in this paper. Because the bandwidth of the grating is temperature-insensitive, the cross talk between displacement and temperature is avoided. The good linear response has been obtained.

Key words fiber Bragg grating, displacement sensing, chirp effect, temperature-insensitive

1 引 言

光纤布拉格光栅具有灵敏度高、抗电磁干扰、结构简单、体积小等优点, 因此在传感领域中引起人们的广泛关注。应用光纤光栅可实现对多种物理量的传感测量, 如压力、温度、压强、磁场、电压、电流、超声波等^[1~4]。由于光纤光栅对应变和温度都比较敏感, 在用均匀周期光纤布拉格光栅作位移传感器对位移进行测量时, 测量结果难免受到温度的影响, 如何消除被测物理量的交叉敏感, 特别是位移和温度的交叉敏感问题, 在智能结构应用中是非常重要的。

为此, 人们提出了一些解决方案^[5,6]。本文提出了一种新颖的光纤光栅位移传感方法, 将均匀周期光纤布拉格光栅斜向粘贴到矩形截面弹性梁侧面上, 通过调节弹性梁自由端的位移, 利用弹性梁在不同层面上梯度应变作用下导致均匀周期光纤布拉格光栅的啁啾效应, 成功地实现了位移的温度不敏感测量。该方法灵敏度高, 具有很高的线性响应度。

2 原 理

研究表明, 温度不变时, 光纤布拉格光栅的中心

收稿日期: 2001-07-24; 收到修改稿日期: 2001-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60077012, 69977006)资助项目。

作者简介: 黄勇林(1964—), 男, 河南人, 河南信阳师范学院物理系副教授, 现为南开大学现代光学研究所博士生, 主要从事光纤光栅传感及光通信技术方面的研究。E-mail: huangyonglin@eyou.com

反射波长变化 $\Delta\lambda$ 与其轴向应变 ϵ_{ax} 满足以下线性关系^[1]

$$\Delta\lambda/\lambda_B = (1 - p_e)\epsilon_{ax} \quad (1)$$

其中, p_e 为光纤的有效弹光系数, 它与弹光效应有关, 对二氧化硅光纤 $p_e = 0.22$ 。

如图 1 所示, 将均匀周期光纤布拉格光栅斜向粘贴到矩形截面的弹性悬臂梁的侧面上, 其轴向与弹性梁中性面的夹角为 θ 。设梁的长度为 L , 厚度为 h , 光纤光栅的中点距固定端的距离为 x_0 。当梁的自由端发生位移时, 不同层面上产生的应变以中性面为对称面, 其上产生拉应变, 其下产生压应变, 应变呈梯度分布, 此应变被传递到光纤光栅, 可引起均匀周期光纤布拉格光栅的啁啾效应, 表现为光纤光栅的反射带增宽。梁的自由端位移越大, 光纤光栅的啁啾效应越强, 反射带越宽。因此, 通过测量光纤光栅带宽的大小可获得弹性梁自由端位移的大小。

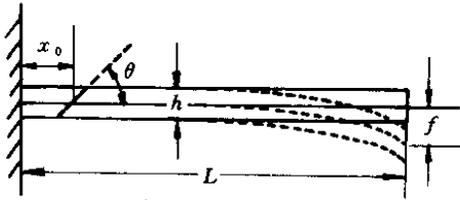


图 1 悬臂梁结构图

Fig.1 Schematic diagram of the cantilever beam

当梁的自由端发生位移 f 时, 根据材料力学原理, 沿梁轴方向距固定端 x 处的某一考察点沿 x 轴方向的应变 ϵ_x 可表示为

$$\epsilon_x = \frac{zM_x}{EI} \quad (2)$$

其中, z 为考察点距中性面的距离, E 为材料的杨氏模量, I 为惯性矩, M_x 为该点的弯矩。对于任一考察点 x 处, 作用载荷 P 与作用点到考察点的距离的乘积即为弯矩 M_x , 表达式为

$$M_x = (L - x)P \quad (3)$$

假设梁自由端的挠度不大且忽略梁自身重量, 自由端位移 f 和作用载荷 P 之间的关系为

$$f = \frac{PL^3}{3EI} \quad (4)$$

由(2)~(4)式可得考察点 x 处沿 x 轴向应变与自由端位移 f 关系为

$$\epsilon_x = \frac{3z(L - x)}{L^3}f \quad (5)$$

此应变传递到光纤光栅上, 由于光栅轴向与各层面

存在夹角, 引起光栅各部分栅格变化的应变将只是 ϵ_x 沿光栅轴向的分量。对于图 1 所示的结构, 在梁的厚度和位移比较小的情况下, 光栅各部分的轴向与所在层面的夹角可以认为是常数。对于长度为 l 的光栅, 将其分为很多小段, 每相邻两段的厚度差为 δz , 因为 $l \ll L$, 各小段受到的弯矩 M_x 可以近似地表示为作用载荷 P 与作用点到光栅中心距离的乘积, 即 $M_x = (L - x)P \approx (L - x_0)P$ 。因此, 光栅各部分的轴向应变可表示为

$$\epsilon_{ax} = \epsilon_x \cos\theta = \frac{3z \cos\theta (L - x_0)}{L^3} f \quad (6)$$

即当 f 一定时, 光纤光栅轴向应变将随 z 按梯度变化, 其导致的光栅啁啾效应是均匀的。假设每一小段的应变是相同的, 利用(1)式和(6)式, 可得相邻两小段光栅的布拉格波长差为

$$\delta\lambda = 3\lambda_B(1 - p_e)\cos\theta \frac{(L - x_0)}{L^3} f \delta z \quad (7)$$

整个光栅的带宽是各小段光栅波长变化的总和, 对上式积分, 可得到光栅带宽展宽 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与位移 f 的关系

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = \int \delta\lambda = 1.5\lambda_B l f (L - x_0) (1 - p_e) \times \sin 2\theta / L^3 = K_f f \quad (8)$$

式中 l 为光纤光栅的长度, 比例系数 K_f 为位移传感灵敏度。由上式可知, 啁啾导致的光纤光栅反射带宽与悬臂梁的自由端位移 f 成线性关系, 通过测量带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 可确定悬臂梁自由端的位移 f 的大小。

由于温度效应对弹性梁各处及光纤光栅各部分的影响是相同的, 在整个弹性梁温度一致的前提下, 温度变化只能造成光纤光栅各部分反射波长的一致移动, 即只对光纤光栅的中心反射波长有影响, 对带宽没有影响。因此, 这种位移传感方法对温度是不敏感的。

3 实验结果及分析

实验装置如图 2 所示。悬臂梁由有机材料制成, 截面为矩形, 长度 L 为 70 mm, 厚度 h 为 5 mm。本实验中所用的光纤光栅为均匀周期布拉格光栅, 长度 l 为 12 mm, 自由状态下的布拉格波长 $\lambda_0 = 1554.0$ nm, 反射谱 3 dB 带宽为 0.353 nm, 反射率为 98%。粘贴后的光栅中心距梁的固定端的距离 x_0 为 11 mm, 光栅的轴向与梁长的夹角 θ 为 20° , 悬臂梁自由端的位移 f 由精密微驱动步进器调节。由

自制的宽带光源(BBS)发出的光经 3 dB 耦合器到达光纤光栅,被反射回来的光再经 3 dB 耦合器,最后由光谱分析仪(OSA)测量分析。与光纤光栅同侧的 3 dB 耦合器一端置于匹配液 IMG 之中以消除反射光。在室温为 20℃时,得到了不同位移下的光纤光栅反射谱,见图 3。从图中可以看出光纤光栅的反射谱带宽几乎以中心波长 $\lambda_0 = 1554.0 \text{ nm}$ 为对称, λ_0 的微小漂移与光纤光栅的粘贴程度及梁的均质程度有关。反射谱的两边各有一个较高的反射峰,且峰值相近,这种现象是由于光栅上的应变梯度不均匀而造成的。两个边峰的强度有一定的差异,

我们认为这主要是由于所用的宽带光源的光谱沿长波方向呈一定下降趋势产生的。若宽带光源的光谱平坦化程度得到进一步提高,则两边的峰值强度将趋于相同。

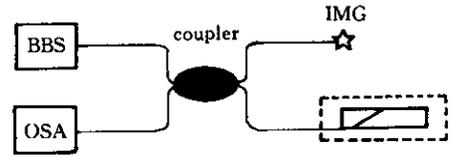


图 2 光纤光栅位移的实验测试装置

Fig.2 Experimental setup for fiber Bragg grating displacement

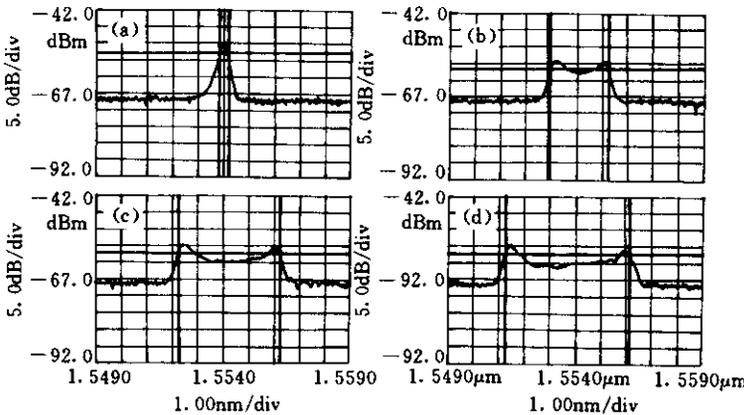


图 3 不同位移下光纤光栅的反射谱

Fig.3 Reflection spectra of fiber Bragg grating under different displacement

- (a) $f = 0 \text{ mm}$; (b) $f = 1.50 \text{ mm}$;
- (c) $f = 2.75 \text{ mm}$; (d) $f = 3.50 \text{ mm}$

室温(20℃)时,悬臂梁自由端位移在 0 ~ 3.5 mm 范围内,实验得到的光纤光栅带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与位移 f 的变化关系如图 4 所示。实验拟合表明,两者之间呈很好的线性关系,线性拟合度为 $R^2 = 0.9992$,其拟合方程为 $\Delta\lambda_{\text{chirp}} = 1.564 f \text{ (nm)}$,位移传感的灵敏度的实验值为 $K_f = 1.564 \text{ nm/mm}$,基于实验所用光谱分析仪精确到 0.001 nm,位移的测量精度

为 $0.64 \mu\text{m}$ 。将有关光纤光栅与悬臂梁的参数代入(8)式,可求得位移传感灵敏度的理论值为 2.01 nm/mm 。位移传感灵敏度的实验值与理论值之间的差异主要来自两方面:一是由于光栅粘贴不理想,光纤光栅与悬臂梁之间是非刚性连接,悬臂梁自由端的位移引起的应变不能完全作用于光纤光栅上。二是光栅粘贴具有非对称性,使其中心不能完全与梁的中性面相交。所以,提高光栅粘贴质量或优化实验设计可以获得更高的位移传感灵敏度。同时,由(8)式可以看出,使光纤光栅与悬臂梁中性面的夹角 θ 为 45° 可获得最大的传感灵敏度。本实验中由于受到悬臂梁厚度的限制, θ 角为 20° 。在对较大的物体进行位移传感测量时,可以使 θ 角取 45° ,以获得最大的传感灵敏度。另外,由于本实验中悬臂梁长度较短,限制了位移测量范围,如果增加悬臂梁的长度,可实现更大范围的位移测量。

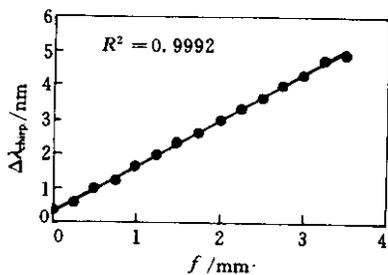


图 4 光纤光栅带宽与位移的关系

Fig.4 Relationship between the bandwidth of fiber grating and the displacement

在不同的位移下分别测量光栅带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 随温

度 T 的变化,实验结果如图 5 所示。结果发现,在实验所测得范围内($0 \sim 65^\circ\text{C}$),由光谱仪观测不到光栅带宽的变化,从而证实了位移传感对温度不敏感的理论预测。

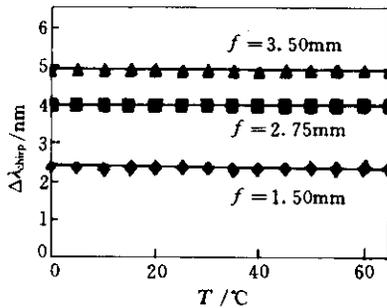


图 5 光纤光栅带宽随温度的变化

Fig.5 Responds of bandwidths of the fiber grating to temperature

4 结 论

本文提出了一种新颖的、温度不敏感的光纤光栅位移传感方法,将均匀周期光纤布拉格光栅斜粘在矩形截面梁的侧面上,利用弹性梁弯曲时在不同层面上产生的梯度应变,实现了光纤光栅的位移传

感,并通过理论分析和实验证实了该方法的可行性与优越性。该传感方法可靠性好、线性响应度高,传感头体积小、重量轻、操作方便。稍加改造,此装置还可以作为传感元件,对力、电、磁等物理量进行精密传感。因此,在光传感领域具有实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn. Fiber optic Bragg grating sensors [C]. *SPIE*, 1989, **1169**: 98 ~ 107
- 2 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Partrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15** (8): 1442 ~ 1463
- 3 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Zhang Ying *et al.*. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fibre Bragg grating [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36** (6): 564 ~ 566
- 4 N. E. Fisher, D. J. Webb, C. N. Pannell *et al.*. Probe for measuring ultrasonic fields using short in-fiber Bragg gratings [C]. *SPIE*, 1998, **3555**: 451 ~ 456
- 5 Y. L. Yu, H. Y. Tan, W. H. Chung *et al.*. Fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of displacement and temperature [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25** (16): 1141 ~ 1143
- 6 Yu Youlong, Tan Huayao, Liao Xinyi *et al.*. Temperature-independent fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20** (4): 538 ~ 542 (in Chinese)