

免受温度影响的光纤光栅位移传感器*

余有龙** 谭华耀 廖信义 锤永康 关柏鸥

(香港理工大学电机工程系, 香港)

董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘 要 将一定长度、均匀周期的光纤光栅沿轴向刚性粘贴于厚度呈阶跃分布的等腰三角状悬臂梁界线附近的表面上, 通过观测该光栅反射谱中两个峰值的间距来监测梁自由端在垂直于表面方向上的位移。实验表明该无源温漂位移线性传感装置的传感灵敏度达 $9.24 \times 10^{-2} \text{ nm/mm}$, 与理论值 $9.4 \times 10^{-2} \text{ nm/mm}$ 非常接近。

关键词 光纤光栅, 传感器, 无源补偿。

1 引 言

光纤光栅(FBG)在传感领域的应用已引起人们广泛地关注^[1-4]。它灵敏度高, 对波长绝对编码, 易于复用且网络化, 使得对大型建筑物(如水库大坝、飞机和潜艇)或长距离信号网络(如海底光缆)的实时监测成为可能。温度和应力是直接影响光纤光栅反射波长的两个主要的独立变化的物理量, 其它物理量往往借助某种装置仍以应力的形式作用于光栅^[2, 4, 5], 光纤光栅本身并不能区别温度和应力各自的贡献, 因此非温度类光纤光栅传感器大多难以摆脱温度的影响, 这显然不利于该类传感器性能的发挥。因此有必要发展免受温度影响的传感技术。

单纯用光纤通过干涉的方法对位移进行传感^[6], 还没有完全解决抑制温度和其它因素引起的相位噪声问题。我们曾用粗细均匀、矩形截面的悬臂梁对粘贴其表面轴向光纤光栅的布拉格反射波长进行调谐^[7]。该方法定标后用来检测自由端位移虽然比较灵敏, 但它也无法摆脱温度的影响, 测量过程中出现的啁啾现象还会降低传感分辨率和测量精度。后来又利用重叠在一起的双等腰三角形悬臂梁装置对力进行温漂自动补偿的传感工作^[8], 该装置同样可以用来对位移进行传感, 传感头自身的重量引起系统的零误差往往不能忽略。本文在上述基础上将梁设计成厚度呈阶跃分布的等腰三角状, 用于传感的光纤光栅沿轴向粘贴于梁表面厚度界线位置, 成功地实现了无源温漂补偿位移传感, 系统的零误差非常小, 几乎可忽略。

* 香港研究资助局资助项目, 批准号为 PolyU 5123/97E。

** 永久通讯地址: 黑龙江大学物理系, 哈尔滨 150080。

收稿日期: 1999-03-22

2 原 理

应变通过影响光纤光栅的光栅常数和弹光效应引起波长漂移, 而温度则由于热胀和热光效应使得布拉格反射波长发生变化, 两者对光纤光栅波长漂移的总贡献可表示成^[9]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon_x + (\alpha + \xi)\Delta T, \quad (1)$$

式中 ϵ_x 为轴向应变, ΔT 为温差; p_e 为有效弹光系数, α 和 ξ 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。对于均质、等厚、等腰三角状悬臂梁, 轴向应力分布均匀, 若材料的杨氏模量为 E , 自由端垂直于表面的压力为 P , 轴向应变

$$\epsilon_x = \frac{3P}{Eh^2} \cot \theta, \quad (2)$$

式中 h 为梁的厚度, θ 为二分之一顶角。若将均匀周期光纤光栅沿轴向刚性粘贴于梁的表面, 则可用于对光栅进行无啁啾线性调谐^[10]。

如果将梁设计成图1所示的厚度呈阶跃分布的等腰三角状, 界线 AB 与固定端相距 a , 与自由端 Q 距离为 b 。左、右两侧上表面共面, 两侧厚度分别为 h_l 和 h_r 。一定长度的光栅沿轴向刚性粘贴于上表面 AB 附近, 界线两侧光栅长度接近相等, 用以保证测量过程中两侧光栅反射谱峰值接近相等。



Fig. 1 Schematic diagram of the designed cantilever beam

不计光纤对梁上应力分布的影响, 各侧应力沿轴向呈均匀分布, 但彼此又有区别, 两侧光纤光栅波长漂移量分别为^[5]

$$\frac{\Delta\lambda_{Bl}}{\lambda_B} = \frac{3P(1 - P_e)}{Eh_l^2} \cot \theta + (\alpha + \xi)\Delta T(t) \quad (x < 0), \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{Br}}{\lambda_B} = \frac{3P(1 - P_e)}{Eh_r^2} \cot \theta + (\alpha + \xi)\Delta T(t) \quad (x > 0), \quad (4)$$

两侧光栅的布拉格波长差

$$\Delta\lambda_{Brl} = \Delta\lambda_{Br} - \Delta\lambda_{Bl} = \frac{3P(1 - P_e)}{E} \left(\frac{1}{h_r^2} - \frac{1}{h_l^2} \right) \lambda_B \cot \theta, \quad (5)$$

轴向向右作为 x 轴正向, 它与界线交点作为原点 O 。梁上考察点处挠度为 $\omega(x)$, 宽度为 $f(x)$, 所在截面惯性矩 $I = \frac{f(x)h_i^3}{12}$ ($x > 0$ 时 $i = r$, $x < 0$ 时 $i = l$), 则梁弯曲的微分方程为

$$\frac{d^2\omega(x)}{dx^2} = \frac{P(b - x)}{EI}. \quad (6)$$

对于界线左侧梁, 考虑边界条件

$$\omega(-a) = 0, \quad \left. \frac{d\omega(x)}{dx} \right|_{x=-a} = 0,$$

结合 $\cot \theta = \frac{b-x}{f(x)/2}$, (6) 式的解为

$$\omega(x) = \frac{3P}{Eh_l^3} (a + x)^2 \cot \theta. \quad (7)$$

而对于右侧, 边界条件则为

$$\omega(0_-) = \omega(0_+), \quad \frac{d\omega(x)}{dx} \Big|_{x=0_-} = \frac{d\omega(x)}{dx} \Big|_{x=0_+},$$

(6) 式的解为

$$\omega(x) = \frac{3P}{E} \left(\frac{x^2}{h_r^3} + \frac{2ax}{h_l^3} + \frac{a^2}{h_l^3} \right) \cot \theta. \tag{8}$$

$x = b$ 时, 从(8) 式求出 P 后代入(5) 式得

$$\Delta\lambda_{Br1} = \frac{(1 - P_c)(1/h_r^2 - 1/h_l^2)\lambda_B}{b^2/h_r^3 + 2ab/h_l^3 + a^2/h_l^3} \omega(b). \tag{9}$$

显然任意时刻 $\Delta\lambda_{Br1}$ 与 $\omega(b)$ 成正比, 而与环境温度无关, 这样定标后该装置便可用来线性地检测自由端在竖直方向上的位移。

3 实验结果

采用图2所示的实验装置, 分辨率为0.1 nm 的光谱仪(OSA)测得带宽为73 nm 的发光二极管 LED 的峰值波长为1525.20 nm, 峰值功率为1.05 nW。所用光纤光栅的长度为10 mm, 反射率为95%, 18°C时自由状态下光栅布拉格波长为1548.25 nm, 带宽为0.46 nm, 它被等长度地固定在距悬臂梁固定端30.0 mm 的界线附近。有机玻璃制成的上述设计的梁, $b = 82.5$ mm, $h_l = 1.8$ mm, $h_r = 1.2$ mm, $C = 12.0$ mm, 待测位移由微驱动器提供。

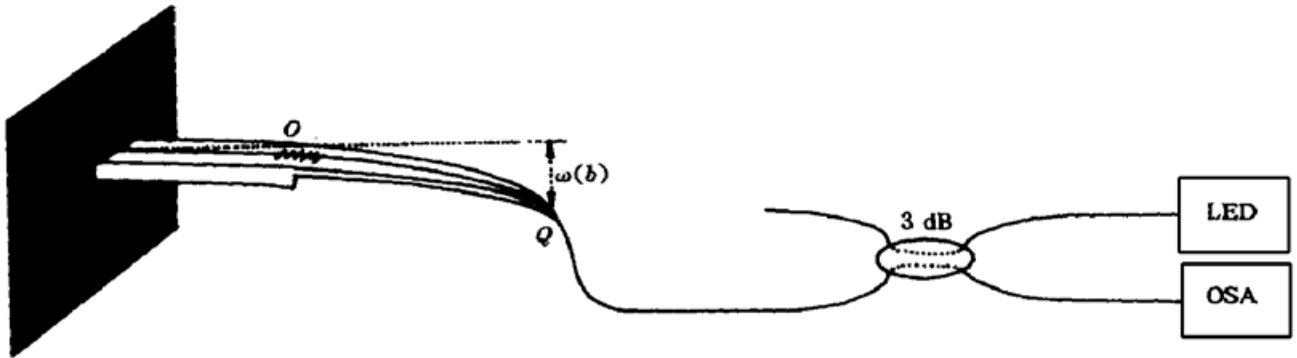


Fig. 2 Experimental set-up for FBG displacement sensor temperature-induced wavelength-shift passive compensation

实验中观察到驱动器偏离平衡位置时, 光纤光栅反射谱出现两个峰, 虽然各峰位置随 $\omega(b)$ 增加而线性移动, 但两者移动的速度不同, 以至两者间距随偏离程度的增加而线性增

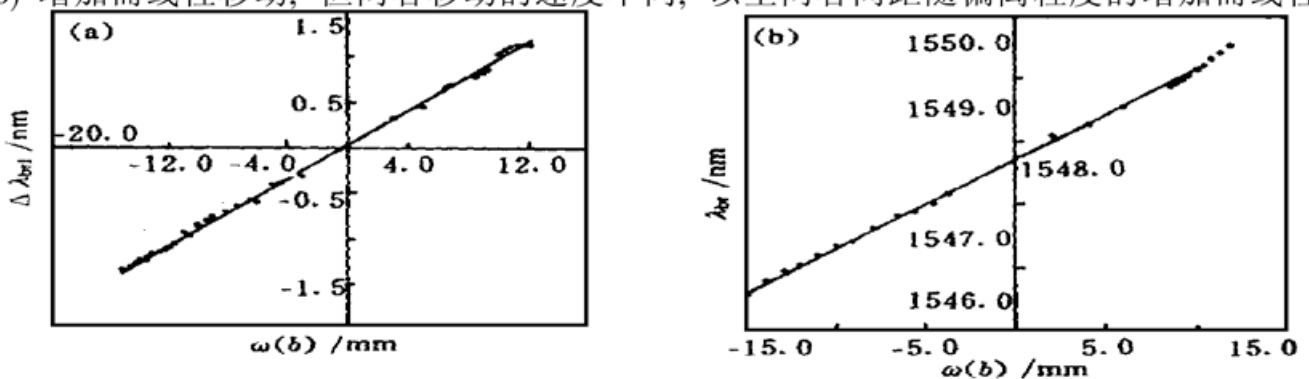


Fig. 3 (a) Relationship between the difference of both side wavelength-shifts and the measured displacement. dot line: experimental plot; solid line: theoretical plot, (b) Experimental plot of λ_{Br} vs $\omega(b)$

大。分析表明两峰位置对应两侧光栅的布拉格波长,若规定使光纤光栅拉伸的位移为正,图3(a)便是 $\Delta\lambda_{Br1}$ 随位移变化关系的实验曲线。曲线斜率对应该传感器的灵敏度为 9.24×10^{-2} , 这与从(9)式得到的理论值 $9.4 \times 10^{-2} \text{ nm/mm}$ 非常接近,少许差别是由于未考虑梁本身的重量所致。虚线在纵轴上的截距值为 3.27×10^{-2} ,它是系统的零误差,可见几乎近于零。

尽管恒温下观察一侧光栅的波长漂移时,漂移量与所测位移呈严格的线性关系,如图3(b)所示,但环境温度变化时(用电炉加热周围空气),这种关系立即被打破,而无论环境温度怎么变化, $\Delta\lambda_{Br1}$ 与位移均呈图3(a)所示的严格的线性关系。

图4是 $\alpha(b) = 10.00 \text{ mm}$ 时不同温度下光栅的反射谱,各谱具有相同的峰间距,这证实了该装置具有温漂自动补偿功能。裸纤对温度的灵敏度为 $12.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}^{[5]}$,图中温度变化幅度为 35°C ,所引起的波长漂移量的相对值为 3.0 nm ,可见将光纤光栅刚性地粘贴于梁上可对温度增敏。

为便于分辨两峰间相对位置,将波长为 1548.16 nm 、带宽为 0.52 nm 的另一光纤光栅以同样方式粘贴在相同设计的另一梁上,并有意识地使得界线左右两侧的光栅长度不等,分别为 4 mm 和 6 mm ,这样反射谱中较高的峰对应右边光栅的反射谱,而另一个峰对应的是左侧光栅的反射谱。实验中观察到当光纤光栅被拉伸 [$\alpha(b) > 0$] 时,较高的峰位于右侧,反之位于左侧,如图5所示。

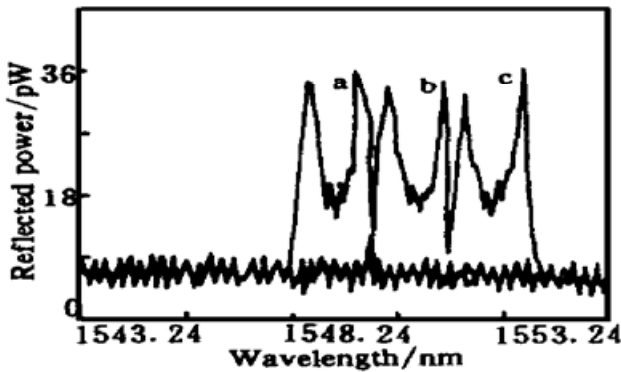


Fig.4 Reflected spectra of the sensing FBG for different temperature. a: $T = 0^\circ\text{C}$; b: $T = 18^\circ\text{C}$; c: $T = 35^\circ\text{C}$

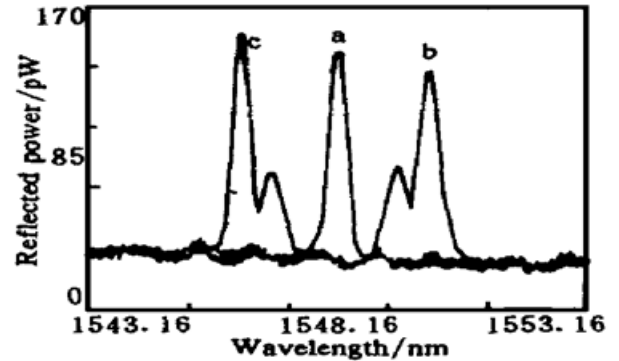


Fig.5 Reflected spectra of the sensing FBG for different $\alpha(b)$. a: $\alpha(b) = 0$; b: $\alpha(b) > 0$; c: $\alpha(b) < 0$

该装置的传感分辨率主要取决于光纤光栅的带宽、光纤光栅粘贴的质量以及光谱仪的分辨率,当然还与界线两侧光纤光栅的长度有关,因为它关系到反射谱中两峰值的相对高低。如果光谱仪的分辨率足够高,选用较窄带宽的光纤光栅,将之尽量等长度的刚性地粘贴于界线两侧,将有利于提高该装置的传感灵敏度。若上述装置的光纤光栅充当环形腔光纤激光器的端镜,观察双波长间距用以判断位移将可极大地提高传感分辨率。

结 论 利用厚度呈阶跃分布的等腰三角形悬臂梁界线两侧应力分布的差异,将一定长度的光纤光栅沿轴向刚性粘贴于界线附近进行位移传感时成功地实现了温漂自动补偿。系统的传感灵敏度高达 $9.24 \times 10^{-2} \text{ nm/mm}$,接近理论值 $9.4 \times 10^{-2} \text{ nm/mm}$ 。受此启发若梁的厚度设计成台阶状分布,将较长的高反射率的光纤光栅沿轴向粘贴于该区域,则调节自由端挠度的大小可以非常方便地将原来单一周期的光纤光栅调节成梳状光栅,且峰值间距连续可调。该项技术极有推广价值并有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Volanthen M, Geiger H, Cole M J *et al.*. Measurement of arbitrary strain profiles within fiber gratings. *Electron. Lett.*, 1996, **23**(11) ·1028~ 1029
- [2] Xu M G, Geiger H, Dakin J P. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(2) ·128~ 129
- [3] Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9) ·692~ 694
- [4] 江 毅, 陈伟民, 杨礼成等. 光纤光栅用于应变/温度传感初探. 传感技术学报, 1997, **3**(3) ·43~ 47
- [5] 余有龙, 关柏鸥, 董孝义等. 光纤光栅力传感器的无源温漂补偿技术. 光学学报, 2000, **20**(3) ·400~ 404
- [6] 李 力, 王春华, 黄肇明. 全光纤低相干光纤位移传感技术. 光学学报, 1997, **17**(9) ·1265~ 1269
- [7] 余有龙, 刘志国, 董孝义等. 基于悬臂梁的光纤光栅线性调谐. 光学学报, 1999, **19**(5) ·621~ 625
- [8] Yu Y, Tam H, Liu Z *et al.*. Passive temperature compensation technique for fiber Bragg grating displacement sensor. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(25) ·2224~ 2226
- [9] Ball G A, Morey W W. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6) ·420~ 422
- [10] 余有龙, 刘志国, 董孝义等. 基于悬臂梁的光纤光栅无啁啾线性调谐. 光学学报, 1999, **19**(7) ·873~ 876

Temperature-Independent Fiber Bragg Grating Displacement Sensor

Yu Youlong Tam Hwaya Liu Shunye Chung Wenghong Guan Baiou
(Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

Dong Xiaoyi

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

(Received 22 March 1999)

Abstract A novel technique for fiber Bragg grating displacement sensor temperature-induced wavelength-shift passive compensation is introduced. With a step thickness isosceles triangle shape cantilever beam, a fiber grating glued on the surface along the beam axis across the thickness border is employed to sense the free end displacement. The experimental sensitivity of 9.24×10^{-2} nm/mm is obtained, which agrees with the theoretical value 9.4×10^{-2} nm/mm very well.

Key words fiber Bragg grating, sensor, passive compensation.