

文章编号 : 0253-2239(2002)08-0999-05

新型光纤布拉格光栅温度自动补偿传感研究*

张伟刚 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: 将光纤布拉格光栅斜向粘贴于厚度相等的等腰三角形悬臂梁的侧面,利用光纤光栅啁啾效应,通过测量带宽进行多种力学量的传感研究。理论和实验均证明,该传感装置具有温度自动补偿功能。在位移、应力等参量的传感实验中获得了很好的线性响应,位移和应力传感的灵敏度分别为 2.47 nm/mm 和 2.26 nm/N,光纤光栅实验带宽达 15.5 nm。

关键词: 光纤光栅;温度自动补偿;啁啾传感器;等强度梁

中图分类号: TN247; TN253 文献标识码: A

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)作为一种新型的、具有发展前景的传感器件已愈来愈受到重视^[1],其温度与应变的同时敏感性是实际应用中首先要解决的问题。为此,人们提出了一些解决方案^[2-8]。这些方案归纳起来主要有两类:即温度自动补偿与被动补偿。前者指温度效应在多参量测量中可自动抵消,而后者则需在多参量测量后经计算进行剥离。温度自动补偿方案因其自动抵消了温度交叉敏感效应,使传感信号获取过程简便,近年来日益受到关注。因此,研究、设计基于温度自动补偿的非温度类新型光纤光栅传感装置,进而开发具有实用价值的传感器对于发挥布拉格光栅的优良特性、实现其工程应用具有重要的意义。

本文将单布拉格光栅斜向粘接于等强度梁的侧面,设计、制作了具有温度自动补偿功能的新型光纤光栅传感装置,成功地实现了多种力学量的温度不敏感测量,其光纤光栅带宽与待测点的位移、应力(应变)等参量均具有良好的线性关系。实验上布拉格光栅的带宽变化最大值可达 15.5 nm。实验测量结果与理论分析相符。

2 原 理

如图 1 所示,设 L 、 b_0 、 h 分别为厚度相等的等

腰三角形悬臂梁的梁长、固定端宽度和厚度, θ 为二分之一顶角。考查沿梁轴方向距固定端为 x 处的上表面某一点,作用于自由端上的载荷 P 垂直梁之轴线下使其产生弯曲,当该点的挠度 $y(x)$ 不大时,根据材料力学知识,梁的应变为

$$\epsilon = \frac{h}{x^2} y(x) = \frac{6L}{Eb_0 h^2} P, \quad (1)$$

其中 E 为梁的杨氏模量。(1)式说明,若载荷 P 一定,在小挠度(微弯)条件下,以中性面为基准,厚度相同的层面上各点的应变相等,与待测点距固定端的距离 x 无关,即厚度相等的等腰三角形悬梁可视为等强度梁(或等应变梁)。

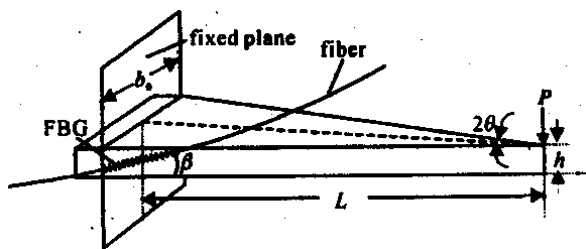


Fig. 1 The schematic diagram of the equal-strain cantilever beam

把等强度梁作为衬底材料,将长度为 l_0 、中心波长为 λ_0 的布拉格光栅斜向粘贴在靠近固定端的侧面,其轴向与梁的中性面夹角为 β 。当等强度梁向下微弯时,厚度不同的层面上产生的应变以中性面为对称面,其上产生拉应变,使布拉格光栅栅格变大,导致布拉格光栅反射波长向长波方向漂移,其下产生压应变,使布拉格光栅栅格变小,导致布拉格光栅反射波长向短波方向漂移。在不计梁之重量和光纤对梁上应变分布影响的条件下,布拉格光栅沿梁

* 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)资助课题。

E-mail: weigangzh20@eyou.com

收稿日期: 2001-06-11; 收到修改稿日期: 2001-07-30

之轴向任一点处的应变为

$$\epsilon_x = \frac{M_x \cos\theta \cos\beta}{EI} dh, \quad (2)$$

式中 dh 为布拉格光栅在 x 处的微元与梁之中性面的垂直距离, M_x 为 x 处的弯矩, $I = (1/12)b_0 h^3$ 为梁的惯性矩。研究表明 粘贴在衬底材料上的布拉格光栅 其波长变化 $\Delta\lambda$ 对应应变 ϵ_x 和温度变化 ΔT 均很敏感。即

$$\Delta\lambda = \lambda_0(1 - p_e)\epsilon_x + \lambda_0[\alpha + \xi + (1 - p_e)\alpha_s - \alpha]\Delta T, \quad (3)$$

式中 $p_e = 0.22$ 为光纤的有效弹光系数, ξ 和 α 分别为纤芯的热光系数和热胀系数, α_s 为衬底材料的热胀系数。因为布拉格光栅粘贴在梁的固定端附近 布拉格光栅上各点的挠度均很小 故满足微弯条件。根据(2)式,可假定布拉格光栅上各处产生的啁啾是呈线性梯度变化的。于是,由(3)式可求得布拉格光栅上长度微元为 $dl = dh/\sin\beta$ 的波长差为

$$d\lambda = \frac{12\lambda_0 M_x(1 - p_e)\cos\theta}{Eb_0 h^3} \cos\beta \sin\beta dl. \quad (4)$$

(4)式表明,在任意温度下,只要布拉格光栅整体的温度能够保持平衡(或准平衡),则布拉格光栅上各点栅格因温度而引起的变化就是相同的,即环境温度仅仅对布拉格光栅的反射波长有影响,其带宽则保持不变。因此,这种布拉格光栅型传感器对温度是不敏感的,具有温度自动补偿功能。

布拉格光栅整体啁啾效应是其各个微小部分对波长变化的总贡献,其反射谱的形状(带宽、强度等)反映了布拉格光栅啁啾程度的大小及均匀程度,其总效应使布拉格光栅的带宽增大。考虑到布拉格光栅的长度变化很微小,对(4)式 dl 的积分区间可取为 $[-l_0/2, l_0/2]$ 于是 布拉格光栅反射谱的带宽为

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = \int_{-l_0/2}^{l_0/2} d\lambda = \frac{6\lambda_0 l_0 M_x(1 - p_e)\cos\theta \sin 2\beta}{Eb_0 h^3}, \quad (5)$$

式中 $M_x = P(L - x)$ 为布拉格光栅上 x 处的弯矩,考虑到微弯条件 $0 \leq x \leq l_0 \cos\theta$, 当 $x \ll L$ 时 则 $M_x \approx PL$ 。而 $\cos\theta = L/\sqrt{L^2 + (b_0/2)^2}$, 于是 结合(1)式与(5)式,可得到布拉格光栅的带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 随梁之自由端的位移 Y 和应力 P 变化关系分别为

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}}(Y) \approx \frac{\lambda_0 l_0(1 - p_e)\sin 2\beta}{L\sqrt{L^2 + (b_0/2)^2}} Y = K_Y Y, \quad (6)$$

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}}(P) \approx \frac{6\lambda_0 l_0 L^2(1 - p_e)\sin 2\beta}{Eb_0 h^3 \sqrt{L^2 + (b_0/2)^2}} P = K_P P, \quad (7)$$

式中比例系数 K_Y 、 K_P 分别为位移、应力的传感灵敏度。(6)式、(7)式反映了 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与 Y 和 P 均呈线性关系,这说明,只要选用均质、等厚的三角型弹性材料,按上述方法进行布拉格光栅型传感器设计,则可以实现温度自动补偿的位移、应力等多种参量的线性传感。并且,在弹性梁尺寸一定的情况下,若布拉格光栅粘贴的斜向角 $\beta = 45^\circ$,即可获得最大的传感灵敏度。

同理可分析载荷 P 垂直梁之轴线向上使其产生弯曲的情况,亦有上述结论。

3 实验及分析

实验上选用梁长 $L = 81.1$ mm、固定端宽度 $b_0 = 22.3$ mm、厚度 $h = 8.95$ mm 的等腰三角形悬臂梁。该梁由特殊的有机材料合成,其杨氏模量为 $E = 2.16 \times 10^2$ N/mm²。用于传感的布拉格光栅是用高掺锗光敏光纤以相位掩模法自行研制的,其长度 $l_0 = 15$ mm,测得反射率为 95.8%,中心波长的反射带宽为 0.35 nm。将布拉格光栅靠近梁的固定端斜向粘贴于梁之侧面,斜向角 $\beta \approx 45^\circ$ 。在室温 20 °C 时,测得其自由中心波长 $\lambda_0 = 1554.51$ nm。等强度梁的应变是通过在其自由端处施加载荷产生的。载荷的施加方法如下:首先将一坚固环沿梁之自由端垂直粘贴,然后将装有标准砝码的砝码盘悬挂于其上,实验中标准砝码的最小质量为 1 g。于是,梁之自由端的侧向应力 P 可由标准砝码校准、调控并精确测量。而梁之自由端的位移(挠度) Y 是通过间接方法确定的。其具体步骤如下:首先在距固定端距离为 x 处放置一精度为 0.01 mm、测量范围为 0 ~ 50 mm 的百分表,在一定载荷作用下测得该点的位移为 $y(x)$ 然后 根据梁之自由端的挠度与其任意点的挠度关系式 $Y = (L/x)^2 \times y(x)$,计算出 Y 值。用 ADVANTEST Q8383 光谱分析仪(OSA)对布拉格光栅的反射波长 λ_0 及带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 进行测量,其分辨率为 0.1 nm。由宽带光源(BBS)发出的光首先经 3 dB 耦合器进入布拉格光栅,然后,布拉格光栅再将反射回来的光经 3 dB 耦合器进入光谱分析仪或光电探测器进行检测,耦合器与布拉格光栅同侧的一端置于匹配液(IMG)中以消除反射光。实验中将整个装置的布拉格光栅传感部分置于温控室内,并对百分表、砝码盘等测量仪器进行水平及垂直调整。

测量之前,首先将等强度梁自由端上、下小挠度“预热”,以其应变传递均匀,然后,在保持等强度

梁空载平衡的条件下,对光纤光谱仪及百分表的读数进行调零,进而,顺序增减砝码盘中的砝码,使载荷从小到大,再逐步减小到原来的空载状态。注意,

每次增减载荷时,应使测量系统尽量处于平衡状态。实验中环境温度稳定,测量装置运行良好,测量的多组数据可靠、有效。实验结构如图 2 所示。

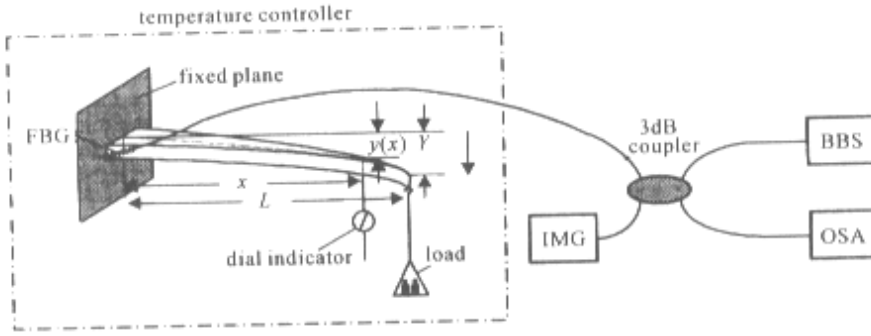


Fig.2 The experimental structure of the equal-intensity cantilever sensing

图 3 是室温为 20 °C 时光谱分析仪记录到的几组典型的布拉格光栅反射谱与其自由态发射谱的对比图。由图 3 可见,布拉格光栅的最大带宽可达 15.5 nm,且具有三个明显的特征。一是布拉格光栅反射谱的带宽几乎是以中心波长 $\lambda_0 = 1554.51 \text{ nm}$ 为对称的, λ_0 的漂移很小 ($\Delta\lambda_0 \approx 0.1 \text{ nm}$),在光谱分析仪测量精度范围之内。这说明,斜向粘贴在梁侧面的布拉格光栅,其中点非常靠近梁的中性面。二是该反射谱中间区域的平坦度良好,两边具有近似一致的较高反射峰。在 15.5 nm 范围内,不平坦度小于等于 0.5 dB,优于文献 [3, 6~8] 给出的反射谱,与文献 [8] 相比,不平坦度降低了约 65%。经分析可知,这是由于等强度梁的同一层面各点的应变相同,由此产生的啁啾比较均匀,故反射谱中间区间的平坦度良好。三是该反射峰的两边各有一个较高的反射峰,且峰值相近,这种现象是由于布拉格光栅上的应变梯度在边缘上变化不均匀造成的,这也与布拉格光栅的成栅质量、粘贴程度及梁的均质程度有关。经分析,认为两个边峰的强度差异,主要是由于所用宽带光源的光谱在接近 1560 nm 及以上时呈

一定下降趋势所造成的。若宽带光源的光谱平坦化程度进一步提高,则二边峰的强度将趋于相同。

当室温为 20 °C,等强度梁之自由端位移 Y 按图 2 所示的正向变化时, $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与 p 和 Y 的实验曲线如图 4 所示。其中,百分表距梁之固定端距离 $x_1 = 6.1 \text{ mm}$ 。实验拟合表明 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与 Y 和 p 均成明显线性关系,线性拟合度分别达到 $R^2 = 0.9978$ 和 $R^2 = 0.9976$,其拟合方程分别为

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = 2.47 Y \text{ (nm)}, \quad \Delta\lambda_{\text{chirp}} = 2.26 P \text{ (nm)}.$$

实验用光谱分析仪的波长分辨率为 0.1 nm,测得位移和应力传感的灵敏度实验值分别为

$$K_Y = 2.47 \text{ nm/mm}, \quad K_P = 2.26 \text{ nm/N}.$$

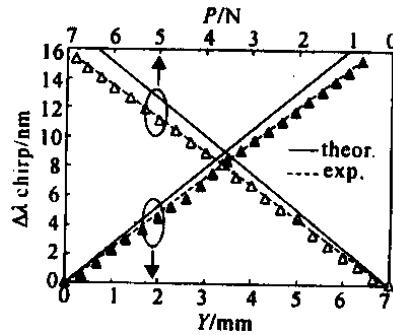


Fig.4 Experimental relationship between $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ and Y, P when $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

将有关布拉格光栅与等强度悬臂梁之参量代入(6)式、(7)式,可求得位移和应力传感的灵敏度理论值分别为

$$K_Y = 2.74 \text{ nm/mm}, \quad K_P = 2.54 \text{ nm/N}.$$

由此可知,位移和应力传感的灵敏度实验值与理论值很接近,约为 90%。二者的差异主要来自两个方面:一是布拉格光栅粘贴的非刚性及对等强度梁中性面的非对称性。非对称粘贴使布拉格光栅的中心

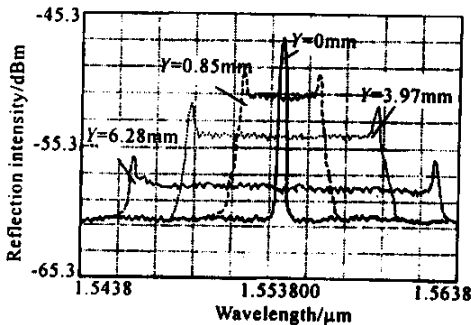


Fig.3 The reflective spectra of FBG with $Y = 0, 0.85 \text{ nm}, 3.92 \text{ nm}$ and 6.28 nm , respectively

不能完全与梁的中性面相交,我们采用提高布拉格光栅长度测定精度及调整梁之固定端位置等方法改善布拉格光栅粘贴的对称性,获得了较为明显的成效。非刚性粘贴会导致布拉格光栅上的应变达不到理想的线性梯度分布,我们通过选择特种粘贴剂改善并提高了布拉格光栅的粘贴质量。二是测量方法还须进一步改进。如在实际测量中,可选取两个(或以上)不同位置 x_1 与 x_2 用两个百分表同时测量,将测得的挠度 $y(x_1)$ 和 $y(x_2)$ 与计算的 Y_1 和 Y_2 进行平均以代替用单点挠度 $y(x)$ 计算的 Y 值,如此则可以提高 Y 的计算精度。对载荷的测量亦可根据不同要求采用不同精度的应力计。

对不同的载荷作用及位移,实验测量 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 随温度 T 的变化如图 5 所示。结果表明,在 $0 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度变化范围内,布拉格光栅的中心波长及其带宽的变化量约为 0.1 nm ,与实验测量时光谱仪的分辨率相当。图 5 给出的几组典型的数据记录,验证了本文设计的新型传感装置对温度不敏感、具有温度自动补偿功能的理论预测。

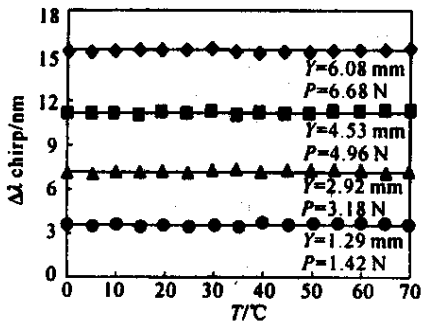


Fig. 5 Experimental response of bandwidth $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ and temperature T

实验表明,当室温 20°C 、等强度梁之自由端位移 Y 按图 2 所示的反向变化时,有关 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与 P 、 Y 和 T 实验曲线的变化关系与上述图 3~图 5 基本一致。这相当于布拉格光栅粘贴的斜向角 $\beta = 180^\circ - 45^\circ$ 的情形。即当斜向角 $\beta = 45^\circ$ 时,本文设计的等强度梁双向传感的性质是相同的。若斜向角 $\beta \neq 45^\circ$ 或 $\beta \neq 180^\circ - 45^\circ$ 时,则其双向传感的性质不相同,即传感的灵敏度将发生变化。根据这一特性,可根据实际需要设计诸如灵敏度等不同性质的传感器。再者,通过 Y 和 P 的测量,也可进行其他参量(如曲率)的测量。根据微弯假设,布拉格光栅上各点的曲率可认为近似相等。由曲率关系 $\Gamma = M_x / (IE)$ 并结合(5)式,即可推知布拉格光栅的带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与梁的曲率 Γ 亦呈线性关系。于是,在测得 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与 Y 和

P 实验曲线的同时,亦可由公式 $\Gamma \approx PL / (IE)$ 变换得到 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与 Γ 的实验曲线。

此外,我们对等长、等厚的同种材料制成的弹性梁,采用上述方式粘贴布拉格光栅,经理论分析与实验对比发现,对于等截面的简支梁和悬臂梁弯曲,梁上同一层面各点的应变不同,易产生啁啾,等截面的简支梁由于梁的中心部位具有最大的挠度,在布拉格光栅用于大尺度啁啾传感时,微弯条件很难保证,这时,布拉格光栅反射谱中间区域的平坦程度变差, $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与 Y 和 P 的线性度亦不高。本文利用等强度悬臂梁设计的布拉格光栅型传感装置,不但反射谱中间区域的平坦度良好,而且其带宽可调范围相对较大,这对于设计新型实用、高灵敏度、宽测量范围及低测量误差的光纤布拉格光栅温度补偿传感器具有一定的指导意义。因此,对涉及到光纤光栅用于大尺度啁啾传感的领域,如建筑、机械结构构件的模量、强度、刚度及稳定性的静态检测与实时监测中,这种设计方法具有一定的参考意义。

结论 本文设计并实现了一种新型光纤布拉格光栅温度自动补偿线性传感装置。理论分析和实验证明,该传感装置具有温度自动补偿、可双向传感、带宽变化范围大、灵敏度较高、线性度佳、复用性好等特点。在位移和应力传感实验中,获得了位移和应力传感的灵敏度分别为 2.47 nm/mm 、 2.26 nm/N ,布拉格光栅实验带宽达 15.5 nm 。利用该技术可以设计新型实用的布拉格光栅温度自动补偿传感器,并可有效地对结构构件的位移、应力(应变)及曲率等参量进行静态检测与实时监控。由于该传感器的设计基于光纤光栅,故易集成于光纤网络系统之中,并且,利用波分、时分及空分等复用技术,还可望实现大范围、长距离、准分布式传感检测。因此,该传感器在光传感领域具有实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] Rao Y J. In-fibre Bragg grating sensors. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, (4) 355 ~ 375
- [2] Du W C, Tao X M, Tam H Y. Fiber grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, 11(1): 105 ~ 107
- [3] 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
- [4] Guan B O, Yan H Y, Tao X M *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement using a single fiber

- Bragg grating. *Electron. Lett.*, 2000, **26**(12):1018 ~ 1019
- [5] Jung Jaehoon, Park Namkyoo, Lee Byounggho. Simultaneous measurement of strain and temperature by use a single fiber Bragg grating written in an erbium:ytterbium-doped fiber. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(7):1118 ~ 1120
- [6] Yu Youlong, Tam Hwaya, Liu Shunyee *et al.*. Temperature-independent fiber Bragg grating displacement sensor. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2000, **20**(4): 538 ~ 542 (in Chinese)
- [7] Dong Sinyong, Zhao Chunliu, Ning Ding *et al.*. Temperature-independent bend sensor using chirp effect of fiber Bragg grating. *Acta Photonica Sinica*(光子学报), 2001, **30**(4):425 ~ 428 (in Chinese)
- [8] Zhang Weigang, Dong Xinyong, Zhao Chunliu *et al.*. Study of deflection and stress sensing using fiber grating chirp effect in bilateral cantilever beam. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2001, **21**(11):1309 ~ 1312 (in Chinese)

Novel Sensing Device of Fiber Bragg Grating with Temperature Active Compensation

Zhang Weigang Kai Guiyun Zhao Qida Yuan Shuzhong Dong Xiaoyi

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

(Received 11 June 2001 ; revised 30 July 2001)

Abstract : A fiber Bragg grating (FBG) is bonded to the side of the isosceles triangle cantilever beam with a determinate angle along the beam axis. Using the effect of FBG's chirp, the sensing of many parameters about dynamics has been studied through measuring the FBG's bandwidth. It is demonstrated in theory and experiment that this sensor can be automatically perform compensation for the FBG's wavelength shift induced by temperature. In the experiments of displacement and stress, a good linear response has been obtained, the sensitivities of displacement and stress are 2.47 nm/mm and 2.26 nm/N, respectively, and the FBG's bandwidth can be changed to 15.5 nm.

Key words : fiber Bragg grating ; temperature active compensation ; chirped sensor ; equal-intensity beam