

文章编号: 0253-2239(2007)01-0015-6

带宽调制型单光纤光栅温变无补偿位移传感^{*}

郭 团 赵启大 刘丽辉 黄桂岭 薛力芳 刘 波 张伟刚 开桂云 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 报道了利用反射谱带宽调制和光强差分探测技术实现单一光纤光栅温变无补偿位移精确测量的新方法。设计了一种结构新颖的曲臂梁位移传感装置, 结合光波导理论与材料力学原理分析了光纤光栅在高斯应变作用下光栅反射谱侧向梯度展宽的成因, 理论推导了特殊结构梁在外力作用下光栅反射谱带宽/反射光强与压力之间的响应关系。光栅反射谱侧向梯度展宽的同时反射光强线性增加, 利用光强差分检测方法消除光源出光抖动的影响, 提高了位移测量精度。基于带宽调制的光纤光栅位移传感方法免受温度变化的影响, 在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内, 测量误差小于 1.2%, 实现了单光纤光栅温变无补偿位移测量。

关键词: 光纤光学; 光纤光栅; 位移传感; 光纤传感; 带宽调制

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Research on Bandwidth-Modulated and Temperature-Independent Single Fiber Bragg Grating Displacement Sensing

Guo Tuan Zhao Qida Liu Lihui Huang Guiling Xue Lifang Liu Bo
Zhang Weigang Kai Guiyun Dong Xiaoyi

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

Abstract: The temperature-independent fiber Bragg grating (FBG) displacement measurement based on optical reflection spectrum bandwidth modulation and differential optical power detection is proposed and experimentally demonstrated. A specially designed bending cantilever beam is used to induce Gauss strain distribution along the sensing FBG, resulting in Bragg wavelength shift and bandwidth modulation. Based on the theory of optical waveguide and material mechanics, the causation of reflection spectrum lateral gradient broadening of fiber Bragg grating under the Gauss strain distribution is analyzed, and the force-to-bandwidth broadening relation and force-to-optical power relation are formulized based on cantilever beam special structure with a lateral gradient broadening of FBG spectrum bandwidth and a linear increase of reflection optical power. For a temperature range of $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, the measured displacement fluctuates less than 1.2% without any temperature compensation.

Key words: fiber optics; fiber Bragg grating; displacement sensing; fiber sensing; bandwidth modulation

1 引 言

近年来, 光纤光栅作为一种新型传感器件已被广泛地加以研究^[1,2]。这种传感器不受电磁干扰、重量轻、结构紧凑, 对多种物理量敏感、并可利用波

分/空分复用技术实现单纤多点分布式传感。已有研究工作通常将单个光纤光栅视为点传感元, 而忽略了光纤光栅自身具有的栅格结构: 一个栅区长度范围的许多连接紧密、彼此关联的传感点集。光栅

^{*} 国家 973 重点基础研究发展计划 (2003CB314906)、国家自然科学基金 (60572018, 60577018)、教育部博士点基金 (20020055036)、天津市自然科学基金重点资助项目 (013800511) 和天津市科技发展计划项目 (05YFGPG04900) 资助课题。

作者简介: 郭 团 (1979-), 男, 天津人, 博士研究生, 主要从事光纤通信与光纤传感理论与应用技术的研究。

E-mail: guotuan2001@163.com

导师简介: 赵启大 (1942-), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事声光信息处理、光纤通信与光纤传感技术的研究。

E-mail: zhaoqd@nankai.edu.cn

收稿日期: 2006-03-09; 收到修改稿日期: 2006-05-29

栅区各个位置反射的波长取决于其所处位置外界场量的大小,外界场在栅区的空间分布决定了光栅反射谱的特性(谱形、波长、光强和相位等)^[3]。对于非均匀场,光纤光栅啁啾谱客观如实地反映了光栅栅区待测场的空间分布,光纤光栅啁啾化传感为研究和分析非均匀场空间剖面以及多参量的区分测量提供了科学有效的方法^[4~14]。

本文报道了一种新颖的曲臂梁光纤光栅位移传感装置,提出并实验验证了基于光纤光栅反射谱带宽调制原理与光强差分探测技术实现位移精确测量的新方法。利用有限元方法计算并直观地绘出光栅栅区高斯应变分布,分析了光纤光栅在高斯应变作用下反射光谱侧向梯度展宽的成因,公式化给出特殊结构梁在非均匀应变场作用下光栅反射谱带宽/反射光强与压力之间的对应关系。实验测得,在 20 mm 的位移范围内,位移测量精度 ± 0.042 mm,反射谱带宽和反射光强均与位移变化呈良好的线性关系,重复测量稳定性高。与此同时,由于温度变化(均匀分布)仅引起光栅反射谱波长漂移,对反射谱谱形和反射光强无影响,基于带宽调制的位移传感方法避免了环境温度变化对测量结果的影响,在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内,温变测量误差小于 1.2%,实现了单光纤光栅温变无补偿位移测量,此结果为光纤光栅啁啾化传感在非均匀场测量和多参量区分测量中提供了理论依据与应用范例。

2 基本原理

2.1 均匀/非均匀场光纤光栅的温度/应变响应机理

温度对光纤光栅的影响主要有两方面:一是热膨胀导致材料尺度变化,另一方面是热致折射率改变;轴向应变对光栅的影响表现在:一是使光栅栅距、光纤纤芯和包层半径变化,另一方面是通过弹光效应改变光纤的折射率。

当待测光纤光栅所处环境的温度、应变场均匀分布变化时,布拉格(Bragg)反射谱波长漂移,谱形不发生改变^[3]。波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 可表示为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda[(1-p_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T], \quad (1)$$

式中 ϵ 为应变, ΔT 为温度变化量, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅栅距, $p_e = (n_{\text{eff}}^2/2)[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$ 为光纤的有效弹光系数(p_{ij} 和 ν 分别为光纤材料的弹光张量分量和泊松比系数), α 和 ξ 分别为光纤材料的热膨胀系数和热光系数。

当待测光纤光栅所处环境的温度、应变场为非

均匀分布时,光栅反射谱在波长漂移的同时谱形将随外界场量的非均匀分布而改变^[3],称为谱形啁啾。此时光纤光栅不再仅仅视为一个可以忽略长度的点传感元,而是在栅距量级上分割为许多连接紧密、彼此关联的传感点集。栅区各个位置反射的波长取决于其所处位置外界场量大小,外界场在栅区的空间分布决定了光栅反射谱的特性(波形,波长,光强和相位等)。

光纤光栅啁啾谱客观如实地反映了光栅栅区待测场的空间分布,为研究和分析非均匀场空间剖面提供了一种直观和有效的方法。带宽检测便是一种有效分析手段。在非均匀分布的温度和应变场作用下,反射谱带宽展宽量 $\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 可由布拉格最大谐振波长 λ_{max} 与最小谐振波长 λ_{min} 之差表示,即

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\text{BW}} = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}} = & 2n_{\text{eff}}\Lambda[(1-p_e)(\epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}}) + \\ & (\alpha + \xi)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})] = \\ & 2n_{\text{eff}}\Lambda[(1-p_e)\Delta\epsilon_{\text{max}} + (\alpha + \xi)\Delta T_{\text{max}}], \quad (2) \end{aligned}$$

式中 $\Delta\epsilon_{\text{max}} = \epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}}$ 与 $\Delta T_{\text{max}} = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ 分别表示栅区最大应变差和最大温度差。(2)式表明,在非均匀温度、应变场变化不大的前提下(忽略了温度应变的交叉敏感项及高阶项),布拉格反射谱带宽展宽量可近似地认为线性正比于光栅栅区最大温度差和最大应变差。

2.2 曲臂梁力学特性与光纤光栅成谱分析

曲臂梁由弹性钢制成,按功能分为上横梁、侧弓梁和基座三部分,其结构如图 1 所示。上横梁为顶平斜条设计,用以感受端点作用力并将相应弯矩传递至侧弓梁;侧弓梁为外侧平面、内侧半圆弧设计,光纤光栅沿轴线粘贴于侧弓梁外表面,栅区中心位置平行于弓梁内侧半圆弧顶。整个曲臂梁通过基座固定于实验平台。

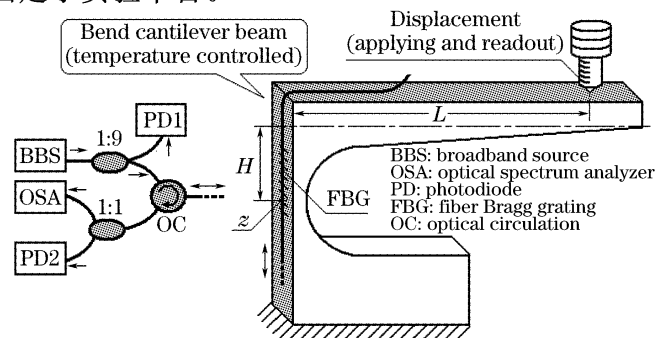


图 1 光纤光栅位移传感实验装置及曲臂梁结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber Bragg grating displacement sensing and bending cantilever beam structure

根据材料力学可知^[15],当在上横梁自由端施加垂直下压力时(上拉分析同),侧弓梁外表面产生拉应变,自由端压力 F 引起的侧弓梁考察点 z 处产生的弯矩 M 可表示为

$$M = LF, \quad (3)$$

式中 L 为压力作用点与考察点 z 所在光纤轴线之间的垂直距离。

z 点的轴向应力 $\sigma(z)$ 可表示为

$$\sigma(z) = \frac{H(z)M}{2I(z)} = \frac{H(z)L}{2I(z)}F \cong \frac{HL}{2I(z)}F, \quad (4)$$

式中 $I(z)$ 为 z 处侧弓梁截面的惯性矩,由梁的制成材料和所处位置横截面积决定。 $H(z)$ 为点 z 到上横梁中性轴的距离,由于栅区长度远小于侧弓梁高度, $H(z)$ 可近为常量 H 。

据胡克定理得,压力 F 引起的侧弓梁 z 处的应变 $\varepsilon(z)$ 可表示为

$$\varepsilon(z) = \frac{\sigma(z)}{E} = \frac{HL}{2EI(z)}F, \quad (5)$$

式中 E 为梁材料的弹性模量。

结合曲臂梁结构分析(5)式可知,在固定压力 F 作用下,由于光栅粘贴区不同位置处对应侧弓梁的截面面积不同[即惯性矩 $I(z)$ 不同],侧弓梁不同位置应变 $\varepsilon(z)$ 将由弧顶向两侧逐渐递减,带动光栅相应位置栅距伸长量以同样的趋势变化,各区域栅格反射波长不同,从而得到波长位置不同的一系列布拉格反射峰,由于各反射峰间距相对于其反射谱带宽较小,波与波之间大部分重叠,因此形成了一个整体展宽的布拉格反射谱。高斯应变分布使光强集中反射于光栅中心位置,对应的反射波长漂移最大,因此,展宽光谱呈现出外高内低、单侧递减分布状。随后的实验结果证明了上述分析,其谱形变化如图 2 所示。

压力 F 作用下光栅栅区最大应变差 $\Delta\varepsilon_{\max}$ 可表示为

$$\Delta\varepsilon_{\max} = \frac{HL}{2E} \left(\frac{1}{I_{\min}} - \frac{1}{I_{\max}} \right) F, \quad (6)$$

式中 I_{\min} 和 I_{\max} 分别为光栅中心位置与光栅两端对应的最小和最大侧弓梁截面惯性矩。

将(6)式代入(2)式,得到布拉格反射谱带宽展宽量 $\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 与压力 F 的响应关系:

$$\Delta\lambda_{\text{BW}} = n_{\text{eff}}\Delta \frac{(1-p_e)HL}{E} \left(\frac{1}{I_{\min}} - \frac{1}{I_{\max}} \right) F. \quad (7)$$

随着光栅反射谱的展宽,反射光强将随之增加。光栅反射光强增加量 ΔP 与带宽变化 $\Delta\lambda_w$ 之间的对应关系可表示为

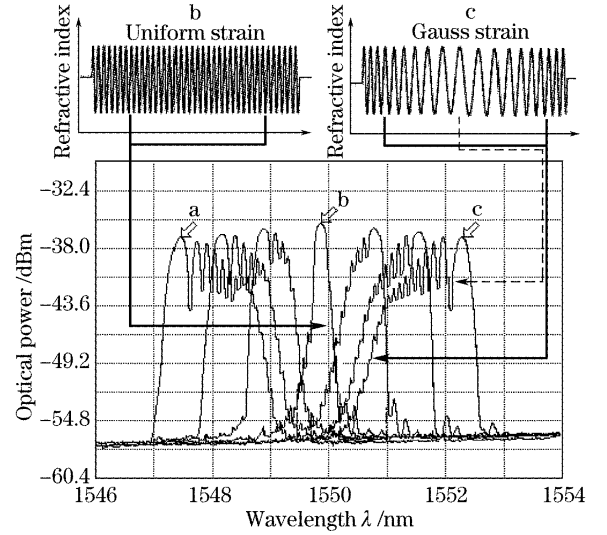


图 2 光纤光栅位移响应系列实验光谱,其中 a、b、c 分别对应位移为 -7.5 mm、 0 mm 和 7.5 mm(温度恒定 18 °C,箭头标识出 b、c 反射谱谱形和与之对应的栅格位置)

Fig. 2 Experimental reflection spectra of fiber Bragg grating at displacement of -7.5 mm (a), 0 mm (b), and 7.5 mm (c) (temperature fixed at 18 °C), the arrow linking the reflection spectra with related grating positions of (b) and (c)

$$\Delta P = k\alpha_{\text{loss}}^2 RP_{\text{BBS}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda_{\text{BW}}, \quad (8)$$

其中 k 和 α_{loss} 分别为器件连接的光强耦合系数和光纤弯曲损耗; R 和 $\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 分别为光栅反射率和反射带宽变化量; $P_{\text{BBS}}(\lambda)$ 为宽带光源的输出谱密度,对增益平坦光源, $P_{\text{BBS}}(\lambda) \approx P_{\text{BBS}}$ 。

将(7)式代入(8)式,则光强-压力响应关系为

$$\Delta P = k\alpha_{\text{loss}}^2 RP_{\text{BBS}} n_{\text{eff}}\Delta \frac{(1-p_e)HL}{E} \left(\frac{1}{I_{\min}} - \frac{1}{I_{\max}} \right) F, \quad (9)$$

(7) 式和(9) 式表明,光栅反射谱带宽和反射光强随压力变化呈线性关系,与温度变化无关。

利用有限元方法(FEA)分析曲臂梁在外力作用下纵向剖面力学参量的二维分布,得到在横梁端点压力 F 作用下,曲臂梁纵向剖面应力 σ 分布(等高线)和上横梁微位移 D 趋势(箭头)示意图(图 3 右侧),其中边界条件设定曲臂梁基座固定。进一步计算得到侧弓梁外表面光栅粘贴区轴向应变 $\varepsilon(z)$ 分布曲线,如图 3 左侧所示。曲线 $\varepsilon(z)$ 显示内圆弧结构侧弓梁在上横梁压力作用下,弓梁外平面呈现出一种边沿对称且线性递减的近高斯应变分布,在不同位移(5 mm, 5.5 mm 和 6 mm)作用下,栅区应变曲线形状相同,曲线间隔正比于所施加的压力。

对于空间均匀分布的温度场变化而言,由同一材料制成曲臂梁各个位置的热膨胀系数相同,且光

栅区基底表面平整,温度变化引起的栅区各位置栅格应变相同。因此,温度变化仅导致布拉格反射谱波长漂移,而反射谱谱形不变。实验结果符合上述分析,如图 4 所示。其中,粘贴于钢梁衬底的光纤

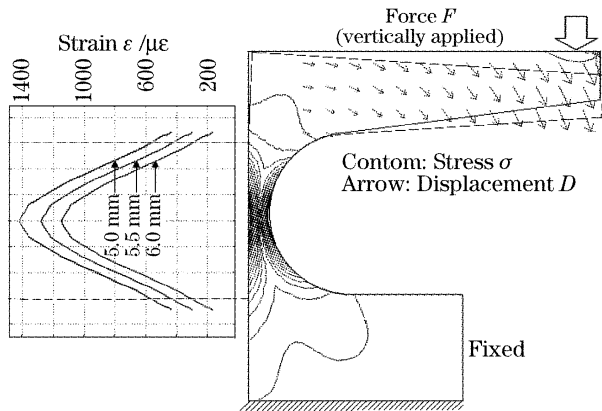


图 3 曲臂梁受力有限元分析:纵向剖面应力 σ 分布(等高线),上横梁微位移 D (箭头),上横梁不同位移(5 mm, 5.5 mm 和 6 mm)作用下侧弓梁外表面栅区轴向应变分布(图左)

Fig. 3 Stress/displacement profile of bending cantilever beam under vertically applied force: longitudinal section stress distribution (contour), micro displacement of the upper beam (arrow) and the corresponding strain magnitude distribution along the outside surface of arc beam at the upper beam displacements of 5 mm, 5.5 mm and 6 mm

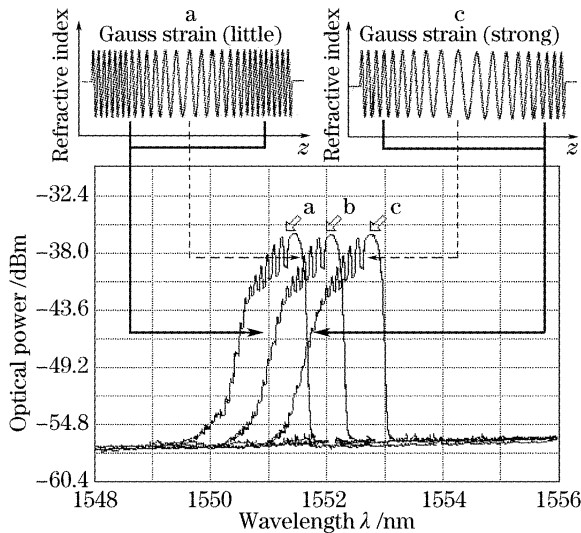


图 4 光纤光栅温度响应系列实验光谱,其中(a)、(b)、(c)分别对应温度为 20 °C、40 °C 和 60 °C (位移恒定 5 mm, 箭头标识出 a、c 反射谱谱形和与之对应的栅格位置)

Fig. 4 Experimental reflection spectra of fiber Bragg grating at temperature of 20 °C (a), 40 °C (b) and 60 °C (c) (displacement fixed at 5 mm), the arrow linking the reflection spectra with related grating positions of (a) and (c)

光栅的波长温度响应系数为裸光纤光栅的 3 倍。

3 实验结果与讨论

光纤光栅位移传感实验装置如图 1 所示。传感光纤光栅利用相位掩模侧面辐照技术通过准分子激光紫外写入掺锗单模光纤得到,其室温自由状态下反射谱中心波长为 1549.39 nm,半峰宽度 0.2 nm。实验用宽带光源(BBS)中心波长为 1550 nm,有效带宽 40 nm(C 波段); 1×2 型耦合器分光比分别为 1:9 和 1:1,光环形器(OC)工作窗口 1530 ~ 1570 nm;分辨力为 0.01 nm 的光谱分析仪(OSA)监测反射谱形;两个光强探测器(PD)分别用于探测光源输出光强(10%)和光栅反射光强(50%)。实验中使用步进电机精确控制曲臂梁横梁位移。

为了同时得到曲臂梁侧弓臂在拉伸和压缩过程中光栅反射谱形的变化规律,曲臂梁横梁在测量初始时处于下压状态,其侧臂外表面对应为拉应变,相应布拉格反射谱在高波段位置展宽[如图 2(c)所示]。随着横梁的上升回复,布拉格反射谱波长向短波方向漂移的同时带宽收缩,当曲臂梁横梁回复到水平位置时,布拉格反射谱波长居中,带宽回复至非展宽态[如图 2(b)所示]。随后曲臂梁横梁上翘,侧弓臂外表面由拉伸态过渡到压缩态,布拉格反射谱波长低漂的同时谱形对称展宽[如图 2(a)所示]。整个位移过程(从 +10 mm 到 -10 mm),反射谱呈现出波长由高到低,谱形对称展宽的变化规律。考虑到光纤光栅在非均匀应变作用下反射谱漂移的同时谱形将随之有规律的展宽,通常记录的半峰值功率带宽(即 3 dB 带宽)将无法覆盖整个展宽谱形;与此同时,由于反射谱展宽过程中其一侧呈现多次峰状,反射谱功率高位处谱宽随位移变化呈阶跃增加,而对应的功率低位处反射谱两侧谱线变化较为平滑,谱宽随位移连续变化,因此,实验中以 10 dB 阈值反射谱带宽为记录数据以消除上述问题。

图 5 给出了从 -10 mm 到 +10 mm 的位移测量范围内布拉格反射谱波长和带宽随位移变化的数值计算曲线与实验测量数据。图 6 给出了 PD2 探测得到的光栅反射光强测量数据。图 7 给出了在 -10 °C 到 80 °C 的温变过程中光栅反射光强在横梁位移恒定为 5 mm, 2.5 mm 和水平状态的实验测量数据。实验数据表明:位移变化在引起布拉格反射谱漂移的同时谱形对称展宽;谱宽曲线与光强曲线一致性好,线性度高于 99.7%;温度变化在引起布拉格反射谱波长漂移的过程中反射谱带宽和反射光

强恒定。

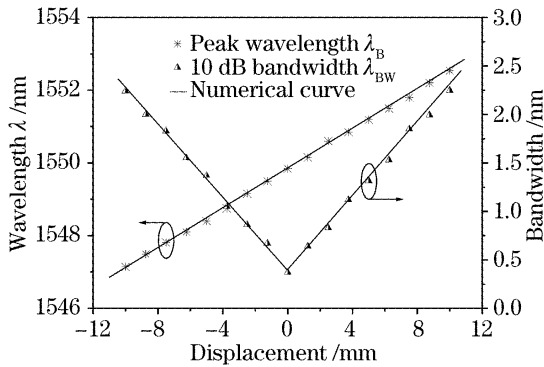


图 5 光纤光栅反射谱峰值波长 λ_B 和 λ_{BW} 带宽的位移响应曲线

Fig. 5 Peak wavelength λ_B and bandwidth λ_{BW} of FBG reflection spectra versus displacement

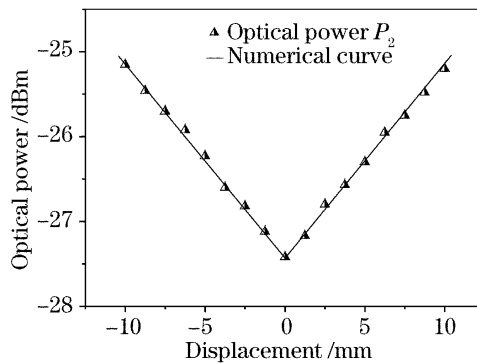


图 6 光纤光栅反射光强 P_T 的位移响应曲线

Fig. 6 FBG reflection optical power P_T versus displacement

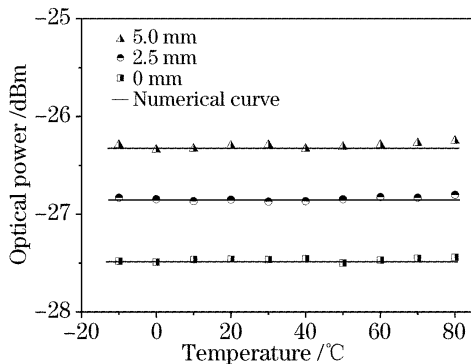


图 7 光纤光栅反射光强 P_T 的温度响应曲线

Fig. 7 FBG reflection optical power P_T versus temperature

定义光强差分函数 $F(P_1, P_2)$ 用以消除光源输出抖动误差以及光栅反射谱漂移过程中光源不同波段波形起伏引入的非平坦误差,其表达式为

$$F(P_1, P_2) = \frac{P_2 - \mu P_1}{P_2 + \mu P_1}, \quad (8)$$

其中 P_1 为光源输出光强, P_2 为光栅反射光强, μ 为光强匹配因子(试验中取值 4.4×10^{-4})。实验测得在 20 mm 的位移测量范围内,位移测量精度为

± 0.042 mm, 在 -10 °C ~ 80 °C 的温度变化范围内,温变所致测量误差小于 1.2%。探测光强与位移变化呈良好的线性关系,重复测量稳定性好。通过改变光栅粘贴处侧弓梁厚度,选择横梁位移测量点位置,位移测量范围和精度可调整。

4 结 论

理论分析了光纤光栅对非均匀温度/应变场的响应机理,设计了一种结构新颖的曲臂梁光纤光栅位移传感装置,推导了基于特殊结构梁外力作用下光栅反射谱带宽-压力响应关系,实验验证了基于光纤光栅反射谱带宽调制光强探测的位移测量新方法。使用 PD 探测器取代光谱分析仪,利用光强差分探测技术解决光源抖动对测量结果的影响。理论分析并实验验证带宽调制方法对环境温变变化的不敏感性,实现了单光纤光栅温变无补偿位移传感。通过优化曲臂梁结构参量,选取弹性应变大、回复性好、热性能稳定的制梁材料,改善光栅粘贴质量,提高粘贴材料的机-热稳定性以及优化光栅栅区粘贴位置等方法,曲臂梁位移传感器的测量精度和稳定性可进一步提高,具有很好的实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 Kenneth O. Hill, Gerald Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 2 Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 3 M. LeBlanc, S. Y. Huang, M. 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 Youlong Yu, Hwayaw Tam, Wenghong Chung *et al.*. Fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of displacement and temperature[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(16): 1141~1143
- 5 S. Huang, M. M. Ohn, M. LeBlanc *et al.*. Continuous arbitrary strain profile measurements with fiber Bragg gratings [J]. *Smart Mater. Struct.*, 1998, **7**(2): 248~256
- 6 S. Huang, M. LeBlanc, M. M. Ohn *et al.*. Bragg intragrating structural sensing[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22): 5003~5009
- 7 Yinnian Zhu, Ping Shum, Chao Lu *et al.*. Temperature insensitive measurements of static displacements using a fiber Bragg grating[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(16): 1918~1924
- 8 Weigang Zhang, Xiaoyi Dong, Qida Zhao *et al.*. FBG-type sensor for simultaneous measurement of force (or displacement) and temperature based on bilateral cantilever beam [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12): 1340~1342
- 9 Tuan Guo, Qida Zhao, Qingying Dou *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating liquid-level sensor based on bending cantilever beam[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2400~2402

- 10 Guan Baiou, H. Y. Tam, S. L. Ho *et al.*. Study on strain/temperature two parameters sensing with a single fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **28**(4): 372~374 (in Chinese)
关柏鸥, H. Y. Tam, S. L. Ho 等. 单光纤光栅温度应变双参量传感研究[J]. *中国激光*, 2001, **28**(4): 372~374
- 11 Dong Xinyong, Guan Baiou, Zhang Ying *et al.*. Simultaneous displacement and temperature measurement using one fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **28**(7): 621~624 (in Chinese)
董新永, 关柏鸥, 张颖等. 单个光纤光栅实现对位移和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2001, **28**(7): 621~624
- 12 Guo Tuan, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and pressure using a single fiber Bragg grating based on reflected wave's broadened bandwidth [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1401~1405 (in Chinese)
郭 团, 乔学光, 贾振安等. 单光纤光栅波谱展宽温度压力同时区分测量[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1401~1405
- 13 Wang Hongliang, Qiao Xueguang, Zhou Hong *et al.*. Development of optimizing system of two parameters for sensing pressure and temperature with dual-fiber Bragg grating sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 875~880 (in Chinese)
王宏亮, 乔学光, 周红等. 压力与温度双参量传感优化系统的研制[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 875~880
- 14 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Chen Jianjun *et al.*. A novel high sensitivity chirp tuning device of fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1153~1156 (in Chinese)
涂勤昌, 张伟刚, 陈建军等. 一种新颖的高灵敏度光纤光栅带宽调谐机构[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1153~1156
- 15 J. Hannah, M. J. Hillier. *Applied Mechanics* [M]. 3rd ed. London: Pearson Education Limited, 1995. 310~312