

基于光纤光栅偏振特性的横向压力传感器

汪弋平 王 鸣 黄晓琴

(南京师范大学物理科学与技术学院光电技术省重点实验室, 江苏 南京 210046)

摘要 与通常的基于光谱分析的光纤布拉格光栅(FBG)传感器的原理不同,提出一种利用FBG的偏振相关损耗(PDL)特性来实现横向压力测量的新方法,从理论和实验两方面研究了FBG在横向压力作用下PDL参数的响应机制,建立了利用PDL实现横向压力传感的理论模型并进行了数值模拟。理论分析表明,FBG的PDL对横向压力的响应非常敏感,在小压力条件下比单纯的光谱分析更适合于测量横向应力。实验中在0~180 N的横向压力条件下,以PDL随波长变化曲线的质心高度和两峰值的波长间隔分别作为编码实现了解调,获得了在小压力(0~80 N)情况下0.06 dB/N和大压力(81~180 N)情况下2.5 pm/N的灵敏度,实验和理论模拟结果相符,证实了该方法的可行性。

关键词 传感器;光纤布拉格光栅;横向压力;偏振相关损耗;质心高度;光纤传感

中图分类号 TN253;TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0405004

Transverse Pressure Sensor Based on the Polarization Properties of Fiber Grating

Wang Yiping Wang Ming Huang Xiaoqin

(Opto-Electronic Technology Key Laboratory, School of Physical Science and Technology,
Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract Different from the basic sensing theory of the fiber Bragg grating (FBG) sensors based on spectral analysis, a new method utilizing the polarization dependent loss (PDL) of FBG for transversal pressure measurements is proposed. The evolution of the PDL with wavelength with respect to transversal pressure is studied theoretically and experimentally. A theoretical model for transversal pressure sensing by use of PDL is built and numerical simulation is also carried out. The theoretical analysis suggests that the PDL of FBG is more suitable for measuring transverse pressure than single spectral analysis in the low pressure region because of its greater sensitivity. Under the transverse pressure conditions of 0~180 N, the demodulation is realized by use of the centroid height and the wavelength spacing of the two peaks respectively. The resolutions of 0.06 dB/N for small pressure (0~80 N) and 2.5 pm/N for large pressure (81~180 N) are demonstrated. Good agreements between experimental results and numerical simulations verify the feasibility of the method.

Key words sensors; fiber Bragg grating; transverse pressure; polarization dependent loss; height of centroid; fiber sensing

OCIS codes 250.4745; 230.1950; 060.2370

1 引 言

近年来光纤布拉格光栅(FBG)传感器的发展非常迅速,已获得了广泛应用,其轻巧和易于复用的特点使得它非常适合理入被测材料的内部构成智能结构,一旦主体经受应力的变化,FBG的反射光谱就

会发生偏移,通过检测波长的移动就可以还原出结构内部的应变状态^[1,2]。

目前大多数FBG传感器只能检测沿光纤轴向的应力,但是在结构在线健康、智能结构损伤检测等很多领域,除了轴向应力以外,主体结构往往还受到

收稿日期:2010-11-26;收到修改稿日期:2010-12-23

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2010544)和教育部博士点基金(20103207120004)资助课题。

作者简介:汪弋平(1980—),男,博士,讲师,主要从事新型光子器件和光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: jeremy_ff@sina.com

横向压力的作用^[3-5],因此要检测出材料内部的全部应变信息就需要埋设多个 FBG 传感器,并保证其轴向与应力方向一致,显然布置这些数量庞大、方向相互垂直的光纤光栅传感器十分困难,还会使系统成本提高、结构复杂,更严重的是传感器数量过多很容易削弱主体材料,对其造成影响甚至损害,因此如何直接测量横向压力是 FBG 传感器的关键技术之一^[6,7]。

研究表明 FBG 在横向压力作用下的表现与轴向应力完全不同,此时光纤中的应力双折射将破坏原有的相位匹配条件,导致光栅的光谱发生展宽直至分裂成两个谐振峰,而这两个谐振峰的波长差与外加压力的大小成正比,通常可以通过检测该波长差来解调横向压力,但是该方法有着难以克服的缺点,即 FBG 的横向应力灵敏度非常低,也就是说,除非是很大的压力作用,否则光谱几乎不发生变化,现有的仪器将很难精确地测量,极大地限制了它的实用性^[8,9]。

针对这一问题,本文提出利用 FBG 的偏振相关损耗(PDL)参数来实现横向压力的测量。给出了

FBG 在透射端和反射端的 PDL 的解析公式,并分别模拟了在应力双折射作用下两种 PDL 随波长的变化曲线,理论分析和数值模拟显示出 FBG 在透射端的 PDL 更适合用于横向压力传感;对外加横向压力下光栅栅区的应力分布进行了详细的分析,定量地给出了应力双折射大小的解析公式,并依此获得了 PDL 随横向压力的变化曲线,采用对该曲线质心高度的测算获得了适当的编码并实现了横向压力的解调。用简单的实验论证了该方法的可行性和实用性。

2 工作原理

PDL 定义为当输入光的偏振态在所有可能的偏振态间扫描时,通过待测器件的最大和最小输出功率的比值^[10,11]

$$f_{\text{PDL}} = 10\lg(|E_{\text{max}}|^2 / |E_{\text{min}}|^2), \quad (1)$$

式中 $|E_{\text{max}}|^2$ 和 $|E_{\text{min}}|^2$ 分别为最大和最小输出功率,对于均匀 FBG 来说,其传输系数 $T_{x,y}$ 和反射系数 $R_{x,y}$ 可应用经典的耦合模理论得到^[12]

$$T_{x,y} = \frac{i\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_{x,y}^2}}{\hat{\sigma}_{x,y} \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_{x,y}^2}L) + i\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_{x,y}^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_{x,y}^2}L)}, \quad (2)$$

$$R_{x,y} = \frac{-\kappa \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_{x,y}^2}L)}{\hat{\sigma}_{x,y} \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_{x,y}^2}L) + i\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_{x,y}^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_{x,y}^2}L)}, \quad (3)$$

式中 $\hat{\sigma} = \delta + \sigma$, $\delta = \frac{2\pi n_{\text{eff}(x,y)}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}$ 是失谐量, σ 和 κ 分别是“直流”和“交流”耦合系数, x 和 y 分别表示光栅应力双折射的两个主轴方向, L 为光栅长度。令输入光功率是一个常数,在偏振态不同的情况下,只有当入射光为线偏振光,且偏振方向沿着光栅偏振主轴时,出射光强才为极大值或极小值,根据上面 PDL 的定义,可得 FBG 在透射端和反射端的 PDL 为^[13]

$$f_{\text{PDL-t}} = 10\lg(|T_x|^2 / |T_y|^2), \quad (4)$$

$$f_{\text{PDL-r}} = 10\lg(|R_x|^2 / |R_y|^2). \quad (5)$$

图 1 给出了在应力双折射从 0.5×10^{-4} 递增到 2×10^{-4} 时光栅的反射端和透射端的光谱和相应的 PDL 变化曲线。模拟中光栅的参数选择如下:无双折射时主轴有效折射率 $n_{x0} = n_{y0} = 1.5$, 周期 $\Lambda =$

519 nm, 长度 $L = 6$ mm。从图 1(a) 和 (c) 可以看到,随着双折射的增加,光栅的反射和透射光谱均发生展宽并逐渐分裂,但在低于 1.5×10^{-4} 时两个谐振峰并不明显,几乎无法分辨,因此直接通过光谱分析难以获得横向压力的信息,对小压力情况更是如此。图 1(b) 是光栅在反射端的 PDL 曲线,呈现出混乱无序的状态,而透射端的 PDL 曲线却完全不同,如图 1(d) 所示,可以看到即使是在双折射很小的情况下,该曲线的两个主瓣始终清晰可辨,易于测量,因此光栅透射端的 PDL 更适合于压力解调。

假设压力沿 y 轴方向,如图 2 所示,一旦压力施加以后,应力不均匀的分布将导致光纤光栅产生双折射效应,即产生两个正交的偏振模式,偏振方向分别对应于快轴(y 轴)和慢轴(x 轴),其折射率改变的大小分别为^[14]

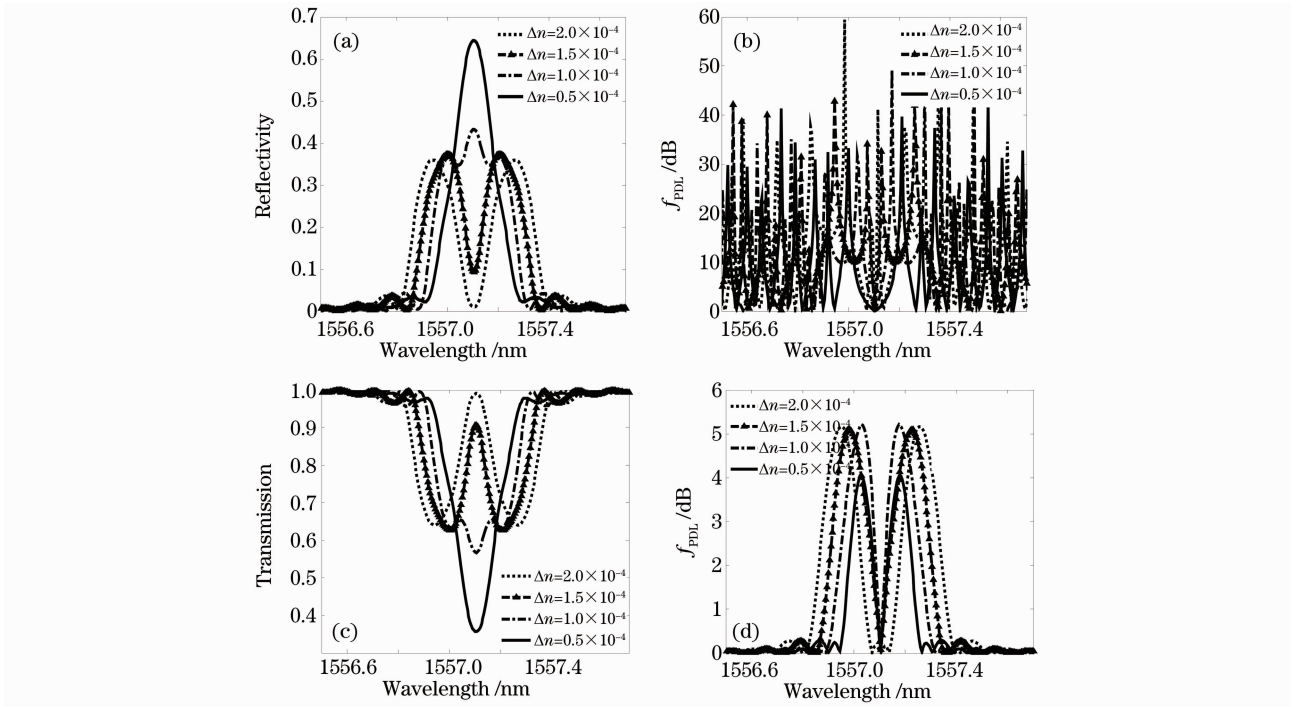


图1 FBG在不同双折射条件下的反射光谱(a),反射端的PDL曲线(b),透射光谱(c)和透射端的PDL曲线(d)

Fig. 1 FBG response for different values of birefringence. (a) reflected spectra, (b) PDL evolution of the reflected light, (c) transmitted spectra and (d) PDL evolution of the transmitted light

$$(\Delta n_{\text{eff}})_x = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12})\sigma_x + [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}](\sigma_x + \sigma_z) \}, \quad (6)$$

$$(\Delta n_{\text{eff}})_y = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12})\sigma_y + [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}](\sigma_x + \sigma_z) \}, \quad (7)$$

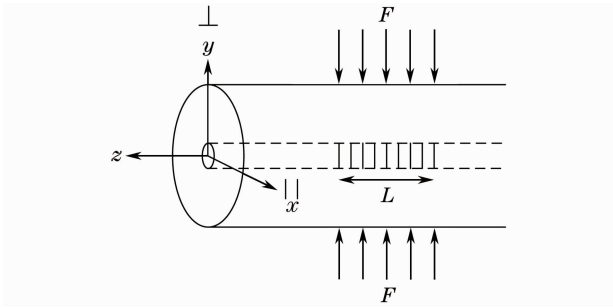


图2 FBG横向压力受力示意图

Fig. 2 View of the FBG subjected to a transverse pressure

式中 $p_{11}=0.113$ 和 $p_{12}=0.252$ 是弹光系数, $E=74$ GPa是杨氏模量, $\nu=0.17$ 是泊松比, σ_x 、 σ_y 和 σ_z 分别是3个方向的应力分量。由于光栅的长度远大于它的直径,所以这是一个典型的二维横向应变情况(即平面应力和平面应变)^[15],此时光纤纤芯处沿 x 和 y 方向的应力分量 σ_x 和 σ_y 由弹性理论可得

$$\sigma_x = F/(\pi lb), \quad \sigma_y = -3F/(\pi lb), \quad (8)$$

式中 F 为横向压力, l 为受力光纤的长度, b 为光纤

的半径。实验装置中光纤受压部分的两端不固定,并且支撑面都是抛光的铝板,因此可看成平面应力情况($\sigma_z = 0$),再依据胡克定理,可以得出应变的大小 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 和应力的关系为

$$\epsilon_x = (\sigma_x - \nu\sigma_y)/E, \quad \epsilon_y = (\sigma_y - \nu\sigma_x)/E, \quad (9)$$

$$\epsilon_z = [-\nu(\sigma_x + \sigma_y)]/E,$$

而两个谐振峰之间的间距 $\Delta\lambda_{y,x}$ 可表示为^[16]

$$\Delta\lambda_{y,x} = \frac{\lambda_B n_0^2}{2} (p_{11} - p_{12})(\epsilon_x - \epsilon_y), \quad (10)$$

利用(8)~(10)式很容易得到该谐振峰的间距与横向压力大小成正比,表示为

$$\Delta\lambda_{y,x} = \Delta\lambda_y - \Delta\lambda_x = 2n_0^2 \lambda_B \frac{1+\nu}{\pi lb E} (p_{11} - p_{12}) F. \quad (11)$$

图3(a)给出了在不同横向压力作用下FBG的反射光谱图形,从图中可以清楚地看到当压力较小时,光栅的反射光谱几乎没有变化,随着压力的增加才逐渐发生展宽,直到出现较大的压力时才能够清晰地分辨出两个峰值。需要特别注意的是,

图 3(a)中的光谱实际上是两种偏振模式光谱的叠加,由于光栅旁瓣的影响,直接利用光谱仪或其他光栅传感解调仪测量出的波长差实际上并非(11)式中的 $\Delta\lambda_{y-x}$,存在相当大的误差,因此利用光谱分析精确地测量横向压力十分困难。图 3(b)则显示了在同样的压力条件下,FBG 透射端的 PDL 响应曲线始终清晰可辨,对横向压力的响应十分灵敏,包含了比光谱图更多的横向压力信息,更适合于测量横向压力。

对于利用 FBG 透射端的 PDL 实现横向压力测量的具体实施,提出了在中小压力情况下,利用该 PDL 曲线的质心高度作为解调编码,而在大压力情况下,采用 PDL 两个峰值之间的波长差作为编码的解调方法,PDL 的质心高度可以表示为

$$C = \frac{\sum \lambda_i f_{\text{PDL}}(\lambda_i)}{\sum \lambda_i}. \quad (12)$$

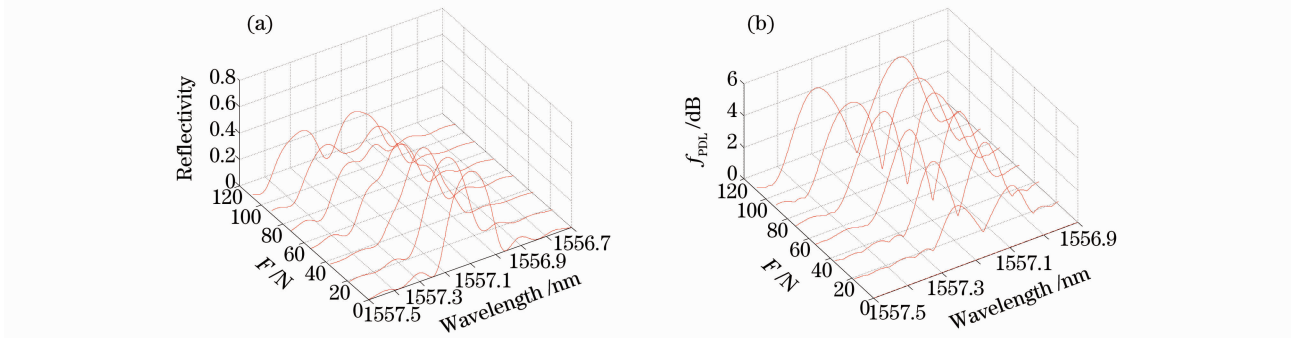


图 3 横向压力作用下 FBG 的反射光谱(a)和透射端的 PDL 曲线(b)

Fig. 3 FBG response for a variety of transverse applied loads. (a) reflected spectral and (b) PDL evolution of the transmitted light

从图 4 可以看到,在横向压力较小时,光栅透射端 PDL 的质心高度持续增大,而当压力较大的时候,该高度几乎不再变化,但是 PDL 的两个峰值对

应的波长间距则逐渐加大,因此采用了对不同压力情况下测量不同参数的方法。

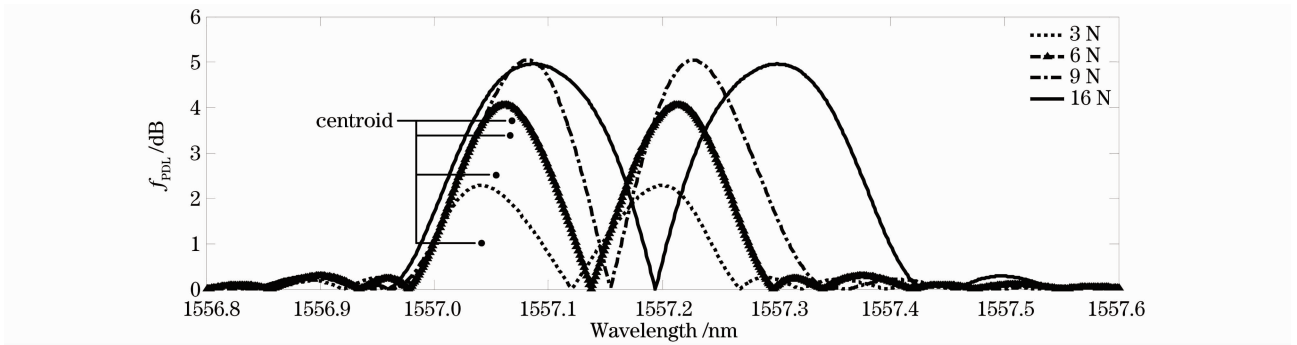


图 4 横向压力作用下 PDL 曲线质心高度的变化

Fig. 4 Variation of the centroids of PDL with respect to transversal pressure

3 实验结果及讨论

实验装置如图 5 所示,可调谐激光光源(TLS, Agilent 81949A)直接输入 PDL 测量分析仪(Thorlabs PAX5700)进行测量,结果通过 USB 接口输出并进行分析计算。实验中采用的 FBG 中心波长在 1557.1 nm,长度为 6 mm。机械压力装置包含两块 18 mm 宽且预先经过抛光的铝板,一根光纤与 FBG 平行放置以保证受力平衡。实验采用数字测力计直接对上层铝板施压,施力的过程要尽量保证垂直以避免剪切力的产生(极易使光栅发生断

裂),压力的大小从 0 N 到 180 N 以 20 N 为间距逐次增加。实验结果如图 6 所示,随着压力的增加,PDL 的质心高度逐渐增大,但当压力足够大以后,该质心高度在达到最大值 3 dB 以后几乎为一常数,需要指出的是,由于铝板宽度为 18 mm,所以实际光纤受力的长度也为 18 mm,是光栅长度的 3 倍(包括数值模拟的光栅),而横向压力的双折射效应与光纤受力长度成反比,又由于起平衡作用的光纤分担了一半的压力,因此 2 节数值模拟的效果应该缩小 6 倍。图 6 中的实线即为 PDL 质心高度随横

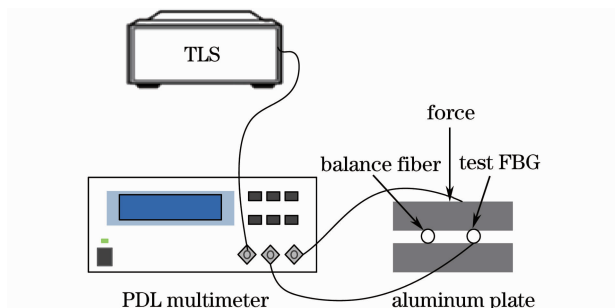


图5 测量横向压力的实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of the proposed transversal force measurement method

向压力变化的模拟结果,可以看出实验结果与其相符。而对于PDL两个峰之间的波长间距而言,在

压力较小的时候几乎不变,而在超过 80 N 以后,该波长间距随压力的增大而单调地增加,实验和理论结果相吻合。因此对于较小压力的情况,可以利用测算其 PDL 曲线的质心高度来解调横向压力,而对于较大压力而言,则采用测量 PDL 两个峰之间的波长间距来实现解调更为合适。最终在小压力情况下获得了 PDL 的质心高度为 0.06 dB/N 的灵敏度,而在压力较大时,其 PDL 两个峰之间的间距对压力的灵敏度约为 2.5 pm/N,该灵敏度可以通过减小光纤受压长度来进一步提高。实验的误差来源主要有以下几点:1)实验中激光光源的输出功率存在一定的抖动;2)光纤本身及光纤接头会引入一定的 PDL 大小;3)实验装置中横向剪切力的产生难以避免。

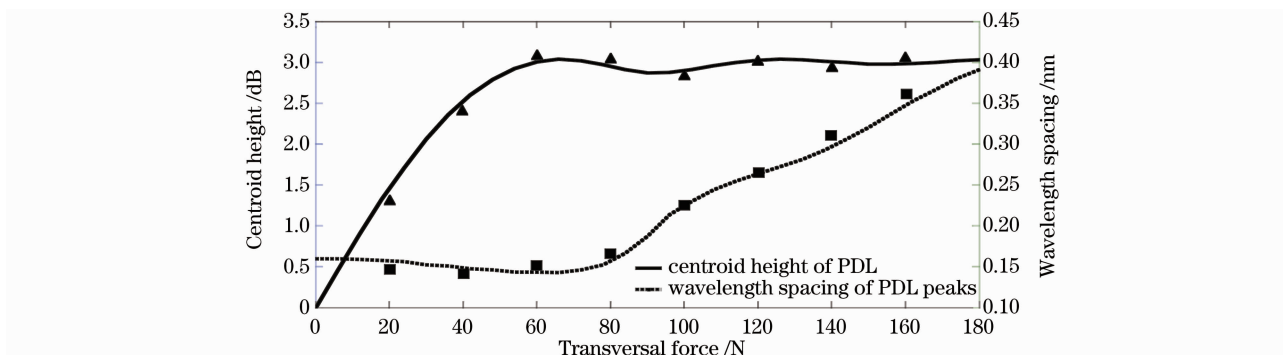


图6 PDL 的质心高度及两个峰值之间的波长间距的理论模拟和实验结果

Fig. 6 Experimental result and simulated evolutions of the centroid height and wavelength spacing of PDL

4 结 论

给出了利用 FBG 透射端的 PDL 参数来实现横向压力测量的理论模型并进行了数值模拟,设计在了小压力(0~80 N)情况下测算 PDL 质心高度而在较大压力(81~180 N)作用下采用 PDL 两个峰之间的波长间距来实现横向压力解调的方法。实验在 0~180 N 的横向压力下的测量结果与理论预测相吻合,进一步证实了该理论模型的正确性及该测量方法的可行性,为测量 FBG 的横向压力提供了一种有效的新方法。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kerdey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 2 K. O. Hill, G. Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 3 E. Udd, W. L. Schulz, J. M. Seim *et al.*. Transversely loaded fiber optic grating strain sensors for aerospace applications[C]. *SPIE*, 2000, **3994**: 96~104
- 4 E. Udd. Review of multi-parameter fiber grating sensors[C]. *SPIE*, 2007, **6770**: 677002
- 5 T. Mawatari, D. Nelson. A multi-parameter Bragg grating fiber optic sensor and triaxial strain measurement[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2008, **17**(3): 035033
- 6 Lan Yuwen, Liu Bo, Luo Jianhua. Pressure sensor based on distributed-Bragg-reflector fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica* 2009, **29**(3): 629~631
兰玉文, 刘波, 罗建花. 基于分布布拉格反射光纤激光器的压力传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 629~631
- 7 Li Zhizhong, Yang Huayong, Cheng Yusheng *et al.*. Pressure sensing characteristics of panda fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 157~162
李智忠, 杨华勇, 程玉胜等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 157~162
- 8 C. M. Lawrence, D. V. Nelson. Measurement of transversal strains with fiber gratings[C]. *SPIE*, 1997, **3042**: 218~223
- 9 R. B. Wagreich, W. A. Atia, H. Singh *et al.*. Effects of diametric force on fiber Bragg gratings fabricated in low birefringent fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32** (13): 1223~1224
- 10 S. Bette, C. Caucheteur, M. Wuilpart *et al.*. Theoretical and experimental study of differential group delay and polarization dependent loss of Bragg gratings written in birefringent fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(2): 331~337
- 11 Feng Kui, Zhu Yong, Su Yang *et al.*. Analysis of magnetic field sensor with phase-shifted grating based on the polarization properties[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 763~768
冯奎, 朱勇, 苏洋等. 基于偏振特性的相移光栅磁场传感方法分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 763~768
- 12 T. Erdoga. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*,

- 1997, **15**(8): 1277~1294
- 13 Ge Tingwu, Lu Dan, Xu Kun *et al.*. Theoretical analysis of polarization dependent loss induced by fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1024~1028
葛廷武, 陆丹, 徐坤等. 光栅致双折射引起偏振相关损耗的理论分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1024~1028
- 14 R. Gafsi, M. A. Elsherif. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2000, **6**(3): 299~323
- 15 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Xu Lei *et al.*. Study on transversal strain on fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1508~1512
涂勤昌, 张伟刚, 孙磊等. 光纤布拉格光栅横向应变特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1508~1512
- 16 J. Zhao, X. Zhang, Y. Huang *et al.*. Experimental analysis of birefringence effects on fiber Bragg gratings induced by lateral compression[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1-6): 203~207