

基于改进遗传算法双重约束的 FBG 应变分布 重构研究

王 静^{1,2} 王正方¹ 隋青美^{1*} 施 斌² 冯德军³ 陈 宵¹ 苗 飞¹ 贾 磊¹ 曹玉强¹

¹ 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061
² 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093
³ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100

摘要 光纤布拉格光栅(FBG)已广泛应用于应变参数测量中,但非均匀应变易引起 FBG 光谱变形而无法进行波长检测,因此需重构沿 FBG 的应变分布。针对应变分布重构效果差且收敛速度慢的难题,在深入研究改进遗传算法的基础上,提出基于 FBG 光谱中心波长位置与反射率双重约束的应变分布重构理论,显著改善了重构的非唯一性和置信度。同时,假设应变分布为多项式形式,通过对多项式系数的重构实现应变分布的重构,大大提高了重构的速度。在此基础上开展了应变分布参数重构仿真实验,多项式系数重构误差均小于 1.5%;结合两端固定压杆调谐光纤光栅实验,验证了该应变分布重构方法的有效性、适用性和可操作性,形成了一种快速有效的应变分布重构方法。

关键词 光栅;中心波长;反射率;双重约束;应变分布重构

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0305004

Study of FBG Strain Distribution Reconstruction Based on Improved Genetic Algorithm Dual Constraint

Wang Jing^{1,2} Wang Zhengfang¹ Sui Qingmei¹ Shi Bin² Feng Dejun³
Chen Xiao¹ Miao Fei¹ Jia Lei¹ Cao Yuqiang¹

¹ School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China
² School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China
³ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract Optical fiber Bragg grating (FBG) has been widely used to detect strain. Nevertheless, uneven strain is easy to cause deformation of FBG spectrum, which will result in the invalidation of wavelength detection. Therefore, it is necessary to reconstruct the strain along FBG. In response to that traditional strain distribution reconstruction theory both have poor effect and slow convergence speed, strain distribution reconstruction theory based on FBG central wavelength and reflectivity of spectrum dual constraint is presented after deep research on improved genetic algorithm, which significantly improves the non uniqueness and the confidence of reconstruction. At the same time, assuming distribution of strain is polynomial, reconstruction of strain distribution is realized through reconstructing the coefficients of the polynomial, which has improved the speed of strain distribution reconstruction. And then strain parameters reconstruction numerical simulation experiments are comprehensively carried out, and the errors of the reconstructing polynomial coefficients are all less than 1.5%. Through tuning FBG by two ends fixed compression bar experiment, the validity, applicability and practicability of the novel reconstructing method have been verified. Consequently, a novel method of reconstructing strain distribution which is fast and efficient has been generated.

Key words gratings; central wavelength; reflectivity; dual constraint; strain distribution reconstruction

OCIS codes 050.2770; 060.2370; 060.2300; 350.2770

收稿日期: 2011-11-18; 收到修改稿日期: 2011-12-12

基金项目: 国家 973 计划(2007CB209407, 2011CB710605)资助课题。

作者简介: 王 静(1983—), 女, 博士后, 主要从事新型光纤传感器技术及其应用等方面的研究。

E-mail: wangjing329@mail.sdu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有体积小、精度高、本征无源等特点^[1~4],已被广泛应用于大型结构工程、电力和冶金等行业的关键参数检测中^[5~8],尤其在应变检测中应用的最为广泛。在应变检测中当FBG应变传感器的尺寸远小于被测物体的尺寸或者被测场的变化梯度较小时,在传感器长度范围内被测参数变化很小,可认为传感器测量的是均匀参量,此时传感器的光谱形状基本不变,可以根据布拉格光栅中心波长的漂移确定被测参数的变化情况^[9];但是当被测场变化梯度较大时,在传感器长度范围内应变分布是非均匀的,则传感器的反射光谱形状也会随之发生变化,所以仅通过测量传感器中心波长的漂移进行应变测量将会造成测量结果精度低,甚至引起测量数据失效^[10,11]。因此,需通过分析FBG的光谱来重构其轴向的非均匀应变分布情况,有效剔除啁啾效应的影响,以提高光纤光栅测量的有效性与测量精度。

目前,国内外很多专家进行应变分布参数重构理论方法的研究,大多采用遗传算法、模拟退火算法、自适应退火算法、粒子群优化算法等智能算法^[12~16],且大多采用对应波长处计算光谱与目标光谱反射率差别的P范数作为目标函数^[17],同时将应变沿空间分成多个小单元^[18],以上研究在光栅本征参数重构与应变分布重构中取得了令人满意的结果,有效实现了非均匀应变的分布式测量,尤其在计算光谱与目标光谱反射峰位置较接近或重合情况下效果更佳。但在实际工程中,在光栅长度范围内应变分布基本不会产生突变,应变分布几乎都可以用三次多项式函数进行拟合,因此仅重构三次多项式

的四个系数即可实现应变分布的重构。而将沿光栅的应变分布离散化,再将每段光栅上的应变作为一个参数,重构的参数将增至几十个甚至上百个,严重降低了应变分布重构的计算速度与计算精度^[19]。

基于上述讨论与分析,本文提出了一种应变分布重构的新方法——基于FBG中心波长位置与反射率双重约束的应变分布参数重构理论及方法,采用改进的遗传算法(GA)进行应变分布系数的重构。

2 应变分布重构原理

2.1 改进遗传算法

遗传算法是目前应用较为广泛的一种优化算法,力图在自然特性的基础上模拟个体种群的适应性,并采用一定的变换规则通过搜索空间求解,并可采用初始群体近似均布产生、最优保存策略、变异与交叉概率自适应调整等一系列改进方法对遗传算法进行改进,有效提高遗传算法的局部搜索能力和后期优化速度。

在应变分布重构过程中首先采集FBG的光谱数据,并输入目标观测参数(应变分布函数的系数)范围,获得应变分布系数的初始种群。采用FBG应变传感模型进行正向计算,得出理论观测参数,对理论观测参数与目标观测参数进行比较,进而得出目标函数值,输出本代计算的最优本征参数与最优计算光谱,并执行最优保存策略。依次进行选择、交叉、变异等操作,直至总的误差范围小于一个足够小的数或者“进化”代数超出设定范围,最终取得最优的计算光谱与对应的最优应变分布系数。该过程如图1所示。

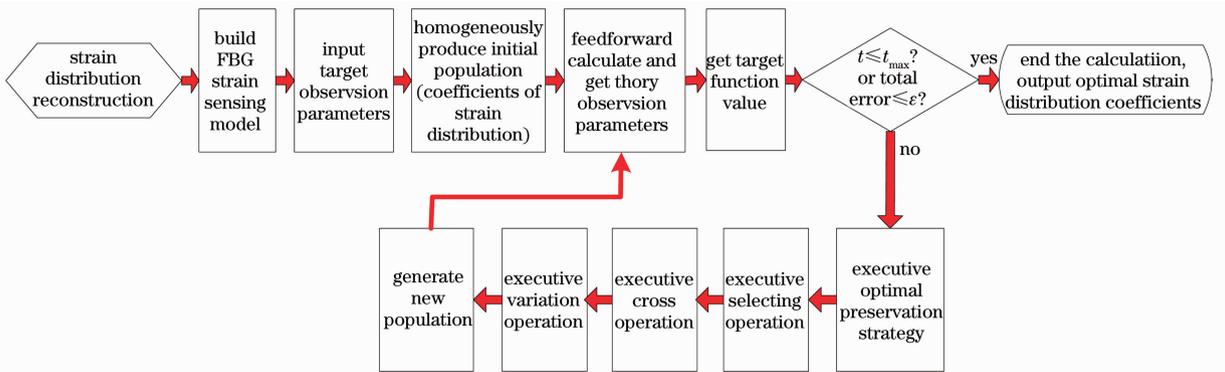


图1 FBG应变分布重构流程图

Fig. 1 Flow chart of FBG strain distribution reconstruction

由于重构参数是在给定区间范围内随机生成的,并且参数区间范围较大,致使参数重构初期部分

个体与目标值有较大的差别。若仅采用计算光谱与目标光谱反射率之差作为进化选择的唯一标准,无

法全面客观地评价重构参数的优劣,导致重构过程中无法实现对优良参数的搜索和优选,大大影响了重构效果。

2.2 基于双重约束的应变分布重构理论

提出了基于中心波长位置与反射率双重约束的应变分布重构理论,同时采用基于 FBG 光谱反射率与中心波长的差异作为目标函数,二者共同决定应变参数的“进化”过程,二者在选择中的作用通过权值来控制。该目标函数可表示为

$$E(R) = \sqrt{\sum_m [R_{\text{calc}}(\lambda_m, a, b, c, d) - R_{\text{targ}}(\lambda_m)]^2} + \omega |\lambda_{\text{calc}} - \lambda_{\text{targ}}|, \quad (1)$$

式中 E 为目标函数, R_{calc} 与 R_{targ} 分别为 FBG 计算光谱与目标光谱的反射率函数, λ_{calc} 与 λ_{targ} 分别为计算光谱与目标光谱的中心波长, m 为传输矩阵法中光栅的段数, ω 为权值。假设荷载沿光栅呈三次函数分布, a, b, c, d 分别代表应变分布函数的常数项、一次项、二次项与三次项系数。

(1)式的物理意义可以用图 2 的形式来表达。 D_R 表征重构光谱与目标光谱的反射率“距离”,在文中用重构光谱与目标光谱的反射率之差的平方和表示; D_λ 表征重构光谱与目标光谱的中心波长“距离”,用重构光谱与目标光谱的中心波长之差的绝对值表示。将 D_R 与 D_λ 的加权之和作为目标函数,实现了 FBG 反射率与中心波长的双重约束(增加了中心波长约束),不仅有利于改善应变分布参数的重构精度与置信度,而且有利于提高重构效率。

通过调节权值 ω 可以有效调节反射率与中心

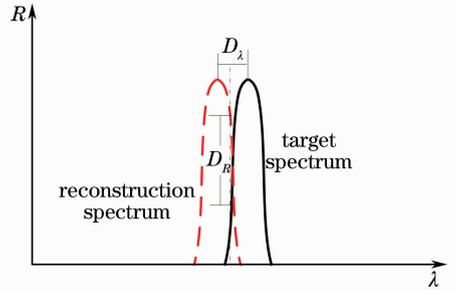


图 2 反射率与中心波长约束目标函数示意图
Fig. 2 Sketch of target function constrained by refractive index and central wavelength

波长在目标函数中的作用。当计算光谱与目标光谱的中心波长接近时可以使 ω 取较小的值,当计算光谱与目标光谱的中心波长差别较大时可以使 ω 取较大的值,进而使得在应变重构过程中更为有效地选择最优个体。

3 应变分布重构仿真实验

根据施加荷载后 FBG 的反射谱对应变的分布系数进行重构。假设光栅轴沿 z 方向,光栅起始端坐标为 0,同时令种群个数为 40,进化代数上限为 100,光栅分段数为 50,目标函数的波长调节权值 ω 为 2×10^8 ,对三次函数分布系数进行了重构。

3.1 均匀应变荷载

令应变分布的常数项 a 为 0.001,即荷载为 $1000 \mu\epsilon$ 的均匀应变时,采用三次多项式对该应变分布进行重构,仿真计算所得原始光谱与重构光谱如图 3(a)所示,施加的原始应变函数与重构的应变函数如图 3(b)所示。

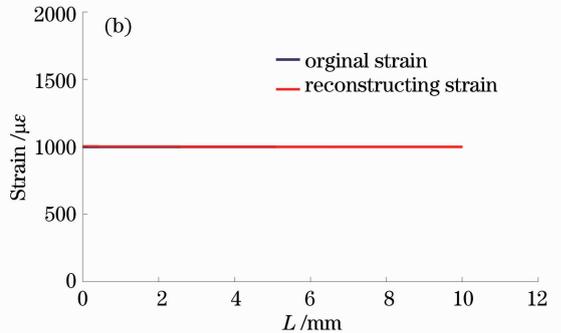
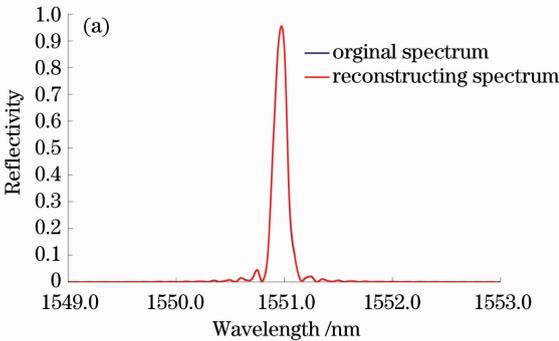


图 3 应变分布为 $1000 \mu\epsilon$ 时的重构结果。(a)光谱图;(b)应变分布

Fig. 3 Reconstructing conclusions when strain is $1000 \mu\epsilon$. (a) Spectrum; (b) strain

由图 3 可以看出,重构光谱与原始光谱吻合得很好,并且原始应变与重构应变函数也基本重合,应变最大误差为 $2.376 \mu\epsilon$,均方根误差为 $1.092 \mu\epsilon$ 。说明采用该应变分布重构方法能很好实现均匀应变荷载下应变分布的重构。

3.2 线性分布应变荷载

令应变分布函数的一次项系数为 0.4,即光栅末端所受应变最大为 $4000 \mu\epsilon$ 的线性应变时,采用三次多项式对该应变分布进行重构,仿真计算所得原始光谱与重构光谱如图 4(a)所示,施加的原始应

变函数与重构应变函数如图 4(b)所示。

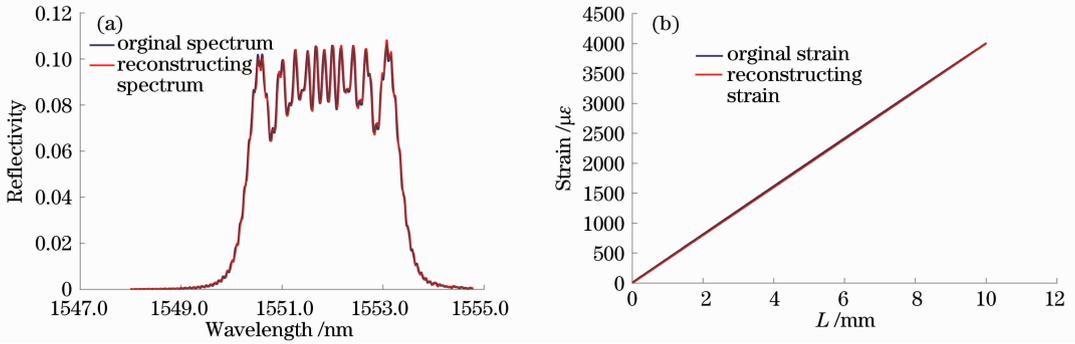


图 4 应变分布为 $0.4z$ 时的重构结果。(a)光谱图;(b)应变分布

Fig. 4 Reconstructing conclusions when strain is $0.4z$. (a) Spectrum; (b) strain

仿真实验结果表明,线性分布的应变荷载条件下重构光谱与原始光谱吻合得很好,并且原始应变与重构应变函数也基本重合,应变最大误差为 $4.641 \mu\epsilon$,均方根误差为 $2.092 \mu\epsilon$ 。说明采用该应变分布重构方法能很好地实现线性应变荷载条件下应变分布的重构。

3.3 二次函数分布应变荷载

令应变分布函数的二次项系数为 40 而其他各项系数为 0 时,光栅所受应变沿光栅轴线方向逐渐

增大,并且应变梯度也随之增大,光栅末端所受应变最大为 $4000 \mu\epsilon$ 。仍采用三次多项式对该应变分布进行重构,仿真计算所得原始光谱与重构光谱如图 5(a)所示,重构光谱与原始光谱的主峰及其他谐振峰都非常吻合。施加的原始应变与重构应变如图 5(b)所示,重构应变的最大误差为 $3.898 \mu\epsilon$,均方根误差为 $2.194 \mu\epsilon$ 。数值仿真结果显示采用该应变分布重构方法仍能实现二次函数分布应变荷载的精确重构。

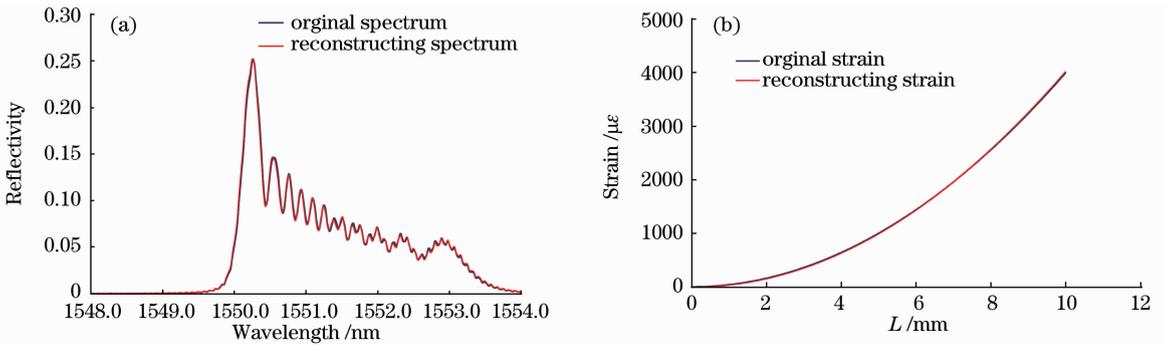


图 5 应变分布为 $40z^2$ 时的重构结果。(a)光谱图;(b)应变分布

Fig. 5 Reconstructing conclusions when strain is $40z^2$. (a) Spectrum; (b) strain

3.4 三次多项式分布应变荷载

令沿光栅的应变分布为 $\epsilon(z) = 500z^3 + 10z^2 +$

$0.2z + 0.001$,仿真计算所得原始光谱与重构光谱如图 6(a)所示,原始应变与重构应变的对比曲线如

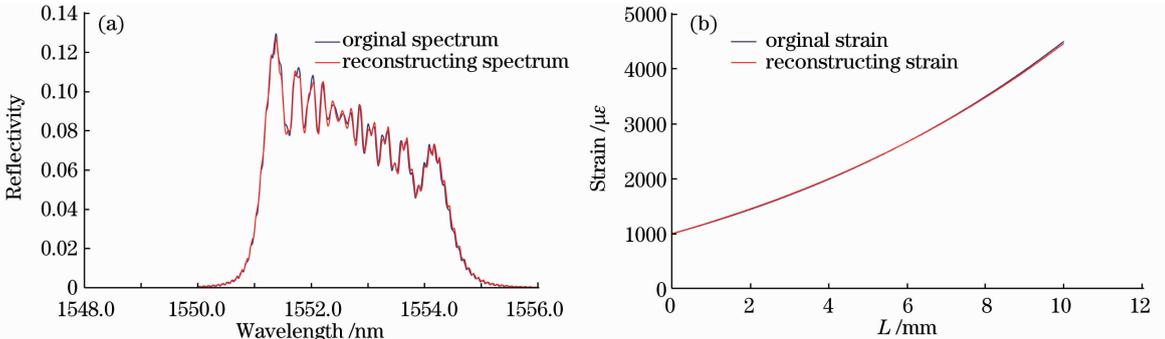


图 6 应变分布为三次函数时的重构结果。(a)光谱图;(b)应变分布

Fig. 6 Reconstructing conclusions for cubic polynomial load. (a) Spectrum; (b) strain

图 6(b)所示,重构应变的最大误差为 $6.526 \mu\epsilon$,均方根误差为 $3.241 \mu\epsilon$ 。其原始应变与重构应变的分布系数及误差分析如表 1 所示。由表 1 可以看出,应变分布系数重构的误差均小于 1.5% ,因此采用该应变重构方法可以很好地实现应变系数的重构。

表 1 原始应变与重构应变分布系数的对比

Table 1 Correlation table of primary strain distribution and reconstructing strain distribution coefficient

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Origin parameter	0.001000	0.200	10.000	500.000
Reconstruction parameter	0.001002	0.203	9.898	500.823
Error /%	0.2	1.5	1.02	0.16

对应变参数重构过程中每代的最优目标函数进行了详细的研究与分析,如图 7 所示。数值实验结果表明最优目标函数值随着进化代数的增加逐渐减小,从 0.076 降低至 0.015 。进化 24 代以后最优目标函数值变化很小,当进化至 40 代时最优目标函数值降低至 0.011 ,已经能够满足应变分布重构的要求。

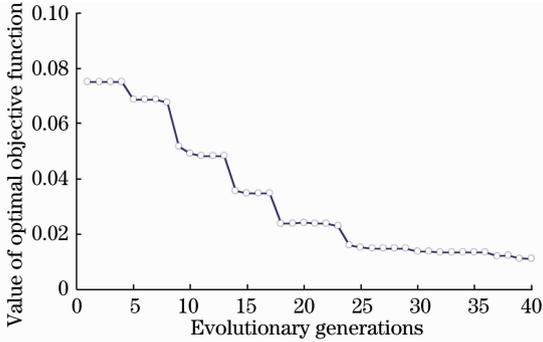


图 7 最优目标函数值的进化过程

Fig. 7 Evolutionary process of optimal target function value

3.5 不同分布形式应变重构实验对比分析

应变分布形式不同时,其应变重构误差也不同,如表 2 所示。实验结果表明,应变分布重构误差与重构系数的数量及 FBG 的啁啾程度有关。重构系数越少,误差越小,因此在误差允许范围内,拟合应变分布的多项式系数越少越好,不易采用高次多项式。同时,FBG 的啁啾程度越高,目标光谱越复杂,应变重构的误差越大。

表 2 不同分布形式应变重构的误差对比

Table 2 Correlation table of different distribution strain reconstructing errors

Strain distribution	$1000 \mu\epsilon$	$0.4z$	$40z^2$	$500z^3 + 10z^2 + 0.2z + 0.001$
Maximum error / $\mu\epsilon$	2.376	4.641	3.898	6.526
Rms error / $\mu\epsilon$	1.092	2.092	2.194	3.241

与文献[12]的实验结果相比,基于 FBG 光谱中心波长位置与反射率双重约束的应变分布重构结果在收敛速度与重构精度方面都有显著的提高。文献[12]中采用了混沌遗传算法对不同的应变分布进行了重构,收敛代数为 500 代,线性应变分布重构的最大误差为 $6.099 \mu\epsilon$,均方根误差为 $2.785 \mu\epsilon$,均大于本文的 $4.641 \mu\epsilon$ 与 $2.092 \mu\epsilon$ 。

4 压杆调谐实验

为了研究非均匀应变分布参数重构效果,并验证仿真实验结果,研制了两端固定压杆调谐光纤光栅实验装置,如图 8 所示。其中压杆为一截面为矩形的扁平弹性杆,为日本住友有机玻璃材料,其长度为 20 cm ,厚度为 1.5 mm ,宽度为 5 mm 。可将光栅贴在压杆的上表面或下表面,将压杆一端固定,另一端固定在移动平台上,步进电机推动平台沿平行导轨移动,弹性压杆会弯成类似高斯脉冲的形状。

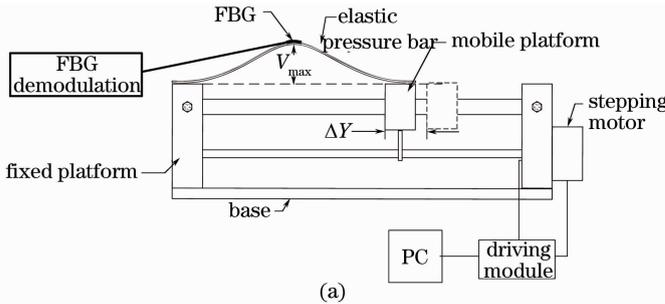


图 8 FBG 压杆调谐装置。(a)调谐实验示意图;(b)调谐装置实物图

Fig. 8 Compression bar tuning FBG equipment. (a) Tuning experiment; (b) tuning equipment

沿压杆下表面的应变分布可以表示为

$$\epsilon = d \frac{d^2 \eta(y)}{dy^2} = d \frac{1}{\pi} \sqrt{\Delta Y(Y - \Delta Y)} \left(\frac{2\pi}{Y - \Delta Y} \right)^2 \cos \frac{2\pi y}{Y - \Delta Y} \quad (2)$$

光纤光栅波长调谐量的具体表达式为

$$\delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)d \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\Delta Y(Y - \Delta Y)} \left(\frac{2\pi}{Y - \Delta Y} \right)^2 \cos \frac{2\pi y}{Y - \Delta Y}. \quad (3)$$

(2),(3)式中 $p_e = 0.22$, $\eta(y)$ 为沿杆任意位置 y 处的挠度, d 为压杆厚度的 $1/2$, ΔY 为移动平台的位移量, Y 为弹性杆的长度^[20]。

从图 9 可以看出弹性压杆的中点处应变最大, 当光纤光栅粘贴在弹性杆的下表面中间位置时, 光纤光栅处于压应变调谐状态。将光栅粘贴在压杆下表面中点处进行非均匀应变调谐实验。

该光栅的中心波长为 1560.711 nm, 反射率为 0.931, 3 dB 带宽为 0.160 nm, 并且其栅区长度为

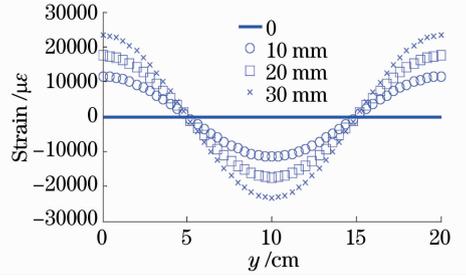


图 9 沿弹性压杆下表面的应变分布

Fig. 9 Strain distribution under compressed bar

10.0 mm。

调谐 5 mm 与 20 mm 时, 分别对该光栅的光谱与应变分布进行了重构, 所得实际测量光谱与重构光谱的对比图及理论计算原始应变与重构应变的对比结果分别如图 10 与图 11 所示。

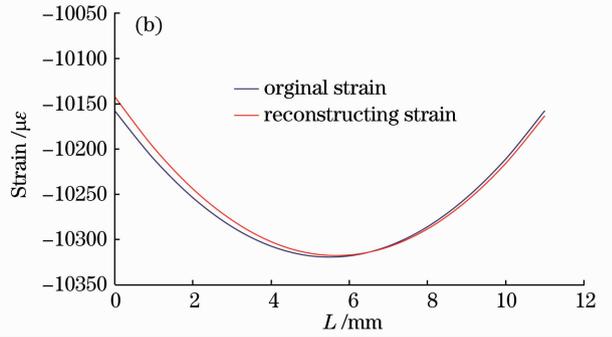
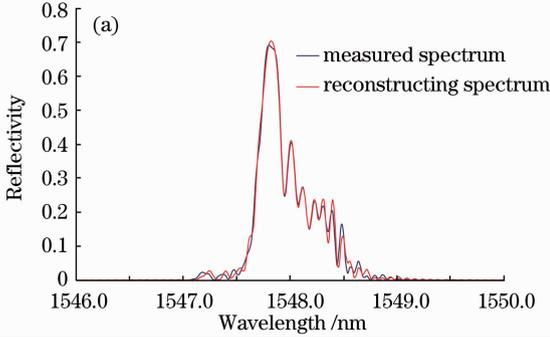


图 10 调谐 5 mm 时应变重构结果, (a) 光谱图; (b) 应变分布

Fig. 10 Strain reconstruction conclusions when tuning 5 mm. (a) Spectrum; (b) strain

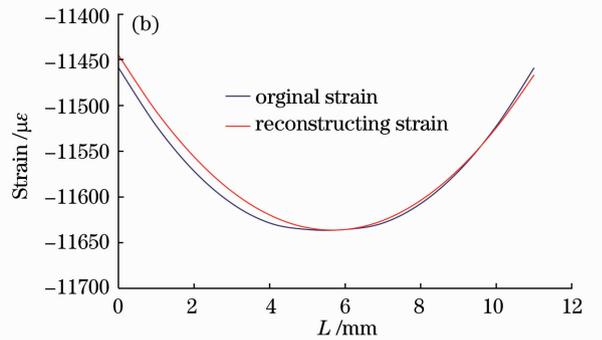
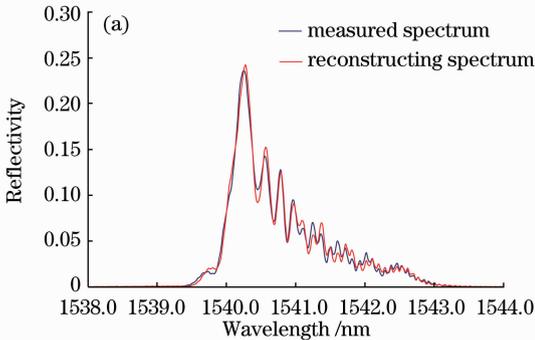


图 11 调谐 20 mm 时应变重构结果。(a) 光谱图; (b) 应变分布

Fig. 11 Strain reconstruction conclusions when tuning 20 mm. (a) Spectrum; (b) strain

通过对图 10 与图 11 中实测光谱与重构光谱的分析可以看出, 随着压应变绝对数值的增大及沿光栅应变差的增大, 光栅反射光谱的中心波长逐渐减小, 并且 3 dB 带宽逐渐增大, 同时反射率逐渐降低。由图 10(b) 与图 11 (b) 可以看出, 在光栅的起始端重构的应变值较大, 而在光栅末端重构的应变值较小, 这是由光栅粘贴位置误差引起的。

5 结 论

在研究应变分布重构理论的基础上, 提出了基于 FBG 光谱反射率与中心波长双重约束的应变分布重构方法, 采用改进的遗传算法对应变分布系数进行重构, 并通过调节权值控制二者在选择中作用, 显著改善了重构的非唯一性和置信度。采用该方法对均匀应变、线性分布应变、二次函数分布应变及三

次多项式分布形式的应变进行了重构,仿真实验结果表明应变分布系数重构的误差小于1.5%。通过自行设计的两端固定压杆调谐光纤光栅装置进行非均匀应变调谐,采用实测的FBG反射光谱进行沿光栅的应变分布重构,通过对比压杆下表面中点处的理论应变与重构应变,验证了该应变分布重构方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 Fan Fan, Zhao Jianlin, Wen Xixin *et al.*. Sensitivity analysis on strain sensor based on Fabry-Perot interferometer with intensity interrogation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1525~1531
樊 帆, 赵建林, 文喜星等. 强度解调型光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的应变传感灵敏度分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1525~1531
- 2 Wang Yiping, Wang Ming, Huang Xiaoqin. Transverse pressure sensor based on the polarization properties of fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0405004
汪弋平, 王 鸣, 黄晓琴. 基于光纤光栅偏振特性的横向压力传感器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0405004
- 3 Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei *et al.*. Study of optical-fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 686~691
王 静, 冯德军, 隋青美等. 基于拉杆结构的光纤光栅渗压传感器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 686~691
- 4 Agostino Iadicicco, Andrea Cusano, Stefania Campopiano *et al.*. Thinned fiber Bragg gratings as refractive index sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, **5**(6): 1288~1295
- 5 Y. M. Gebremichael, W. Li, B. T. Meggitt *et al.*. A field deployable, multiplexed Bragg grating sensor system used in an extensive highway bridge monitoring evaluation tests[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, **5**(3): 510~519
- 6 Mousumi Majumder, Tarun Kumar Gangopadhyay, Ashim Kumar Chakraborty *et al.*. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-present status and applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, **147**(1): 150~164
- 7 A. Kerrouche, W. J. O. Boyle, T. Sun *et al.*. Strain measurement using embedded fiber Bragg grating sensors inside an anchored carbon fiber polymer reinforcement pre-stressing rod for structural monitoring [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, **9**(11): 1456~1461
- 8 Meng Ling, Jia Lei, Jiang Mingshun *et al.*. On-line temperature monitoring systems for aluminum reduction based on fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, **24**(2): 204~208
孟 玲, 贾 磊, 姜明顺等. 基于光纤光栅的铝电解槽温度在线检测系统[J]. *传感技术学报*, 2011, **24**(2): 204~208
- 9 Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiqian. Theoretical analysis of fiber Bragg grating characterization by applying transverse force[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 472~476

- 吴 飞, 李立新, 李志全. 均匀光纤布拉格光栅横向受力特性的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 472~476
- 10 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 11 Yun Binfeng, Wang Yiping, Li Anmin *et al.*. Simulated annealing evolutionary algorithm for the fiber Bragg grating distributed strain sensor [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2005, **16**(12): 2425~2430
- 12 Zhang Rongxiang, Zheng Shijie, Xia Yanjun. The reconstruction of the of non-uniform strain profile by using chaos genetic algorithm[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(8): 1058~1062
- 张荣祥, 郑世杰, 夏彦君. 基于混沌遗传算法的非均匀应变分布重构研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(8): 1058~1062
- 13 Mu Kejun, Zhou Xiaojun, Ren Guorong *et al.*. Reconstruction of parameters of fiber gratings from time-delay characteristics using the genetic algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 688~693
- 穆柯军, 周晓军, 任国荣等. 用遗传算法从时延特性重构光纤光栅参数[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 688~693
- 14 P. Dong, J. Azan a, A. G. Kirk. Synthesis of fiber Bragg grating parameters from reflectivity by means of a simulated annealing algorithm [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(46): 303~308
- 15 C. Z. Shi, N. Zeng, M. Zhang *et al.*. Adaptive simulated annealing algorithm for the fiber Bragg grating distributed strain sensing[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**: 167~173
- 16 Wei Fuya, Liu Hongwu, Fu Chunlin. Reconstruction of fiber grating parameters from reflectivity using quantum particle swarm optimization algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 153~158
- 韦芙芽, 刘洪武, 付春林. 基于量子粒子群优化算法的光纤光栅参数重构[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 153~158
- 17 Federico Casagrande, Paola Crespi, Anna Maria Grassi *et al.*. From the reflected spectrum to the properties of a fiber Bragg grating: a genetic algorithm approach with application to distributed strain sensing [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(25): 5238~5244
- 18 Chen Zhemin, Chen Jun, Shu Ruijun. Simulation and reconstruction for nonuniform strain profile of fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, **19**(6): 2439~2444
陈哲敏, 陈 军, 舒睿俊. Bragg 光纤光栅传感器内不均匀应力分布的模拟和重构 [J]. *传感技术学报*, 2006, **19**(6): 2439~2444
- 19 Yun Binfeng, Lü Changgui, Wang Zhuyuan *et al.*. Numerical analysis of fiber Bragg grating under inhomogeneous strain fields [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(2): 151~154
恽斌峰, 吕昌贵, 王著元等. 非均匀应变场中布拉格光纤光栅的数值分析[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(2): 151~154
- 20 Luo Yaogang, Gao Lingxia, Liu Guili. *Theory of Materials Mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2004
- 罗跃纲, 高凌霞, 刘贵立. *材料力学*[M]. 北京: 科学出版社, 2004