

文章编号: 0258-7025(2010)02-0477-07

蚁群算法在光纤布拉格光栅横向均匀 受压反射谱分析中的应用

吴 飞 邝敏敏 赵 静 张 颖

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 受一些不易测得的参数对光纤光栅反射谱型的影响,应用光纤布拉格光栅(FBG)测量横向作用力很困难,为此提出将蚁群算法应用于 FBG 横向均匀受压反射谱型的分析。基于 FBG 横向均匀受压传感理论和蚁群算法的原理,建立了光栅横向均匀受力反射谱分析的目标函数,并构建光纤光栅横向应力实验系统进行光纤光栅横向受力实验;针对影响算法的参数进行仿真实验,根据实验结果选择合适的参数组合,然后应用蚁群算法对 FBG 横向载荷下的反射谱进行了重构。实验结果表明,蚁群算法在 FBG 横向均匀受压反射谱的分析中不仅具有精度高、稳定性好、收敛速度快等优点,而且能分析得出对 FBG 横向均匀受压反射谱中一些不易测量的主要影响参数。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;横向均匀压力;蚁群算法;反射谱型;重构

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103702.0477

Application of Ant Colony Algorithm in Analyzing of Traverse Uniform Strain Reflective Spectrum of Fiber Bragg Grating

Wu Fei Kuang Minmin Zhao Jing Zhang Ying

(College of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract When the transverse force was measured by using fiber Bragg grating (FBG), some parameters, hard to be measured, influenced severely the reflective spectral model of FBG. Therefore, ant colony algorithm was proposed in analyzing the traverse uniform strain reflective spectral model of FBG. Base on the traverse uniform strain sense theory of FBG and ants algorithm, the objective function in analyzing traverse uniform strain reflective spectrum of FBG is established, meanwhile corresponding experimental system is constructed. Aiming at the parameters combination from the experimental results, traverse loaded reflective spectrum of FBG is reconstructed using the ant colony algorithm. Experimental data showed that ant colony algorithm used in analyzing of traverse uniform strain reflective spectrum expression of FBG, had some advantages, such as high accuracy, stability and fast convergence rate. And some main parameters influenced the reflective spectrum could obtained easily.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; traverse uniform stress; ant colony algorithm; reflective spectrum; reconstruct

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)具有抗电磁干扰、响应速度快、精度高、环境耐受力强等优点,在传感器应用领域具有很好的发展潜力,随着光纤传感器的应用发展,其横向应变特性的研究逐步成为热点^[1~6]。FBG受到横向负载作用时反射峰会分裂成两部分^[1],光栅的反射谱型随着受力载荷的不同会发生变形,但是光纤光栅受到横向负载作用时反射谱型不仅与横向作

用力有关,而且摩擦系数和各偏振方向的分光系数也对反射谱型有很大的影响,而这两个参数是不易测得的,从而给光纤光栅横向受力反射谱型的识别增加了一定的困难,限制了光纤光栅的应用。近年来,一些启发式算法已经被用于解决光纤光栅谱型重构问题^[7~11]。2007年本课题组提出了遗传算法在横向均匀受压传感系统中的分析方法^[11],给出了遗传算法的优化参数组合,但寻优精度和收敛速度并没有达到

收稿日期:2009-02-23;收到修改稿日期:2009-04-20

基金项目:国家自然科学基金(60672015)和河北省自然科学基金(F2007000396)资助项目。

作者简介:吴飞(1978—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail:ysu_wf@sohu.com

理想的要求。本文基于 FBG 横向均匀受压理论进一步提出了蚁群算法分析方法,确立了与蚁群算法相对应的目标函数,并通过相关的实验表明了将蚁群算法应用于横向均匀受压光纤光栅的反射谱分析中,与之前应用遗传算法对光纤光栅的反射谱的分析结果相比,不仅具有精度高、稳定性好、收敛速度快等优点,并且能分析得出对 FBG 横向均匀受压反射谱中一些不易测量的主要影响参数。

2 理论分析

2.1 光纤光栅横向均匀受力反射谱模型

光纤光栅横向均匀受力状况如图 1 所示。光纤直径为 D ,纤芯直径为 $2a$,光纤光栅长度为 L ,栅距为 Λ 。当沿着光纤光栅径向施加一个横向均匀作用力 F 时,光纤光栅的横向产生应变,导致波导的结构和折射率发生变化,光纤光栅将不再保持原有的特性,其反射谱及传感特性都将发生改变。

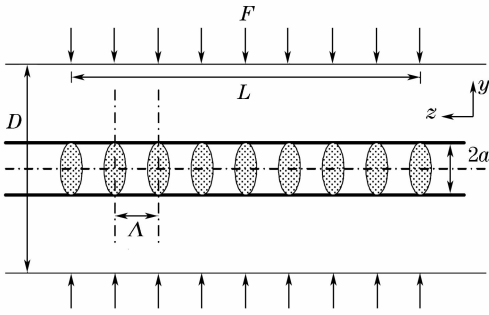


图 1 FBG 横向均匀受力结构图

Fig. 1 Structural diagram of FBG under transverse uniform force

当沿着光纤光栅径向施加作用力时,光纤横截面的受力情况如图 2 所示。

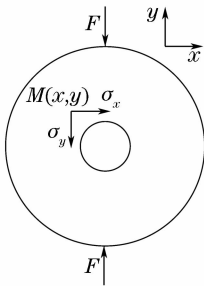


图 2 FBG 横向受力截面图

Fig. 2 Transverse cut view of FBG

由于光纤芯径 $a \ll D$,所以光纤光栅横向应力可以近似为 $(x, y) = (0, 0)$ 点处的应力。可得

$$\sigma_x = \frac{2F}{\pi LD}, \quad (1)$$

$$\sigma_y = -\frac{6F}{\pi LD}. \quad (2)$$

由于横向均匀载荷作用下的光纤光栅的轴向应变可以分为两种特殊情况:1) 平面应变(光栅轴向无应变,即 $\epsilon_z = 0$);2) 平面应力(光栅轴向自由,即 $\sigma_z = 0$)。而在一般受力条件时,若光栅轴向两端自由,由于受力接触面存在摩擦,反射谱的变化并不完全等同于平面应力情况,而是介于两种情况之间,因此可将光栅的轴向应力表示为

$$\sigma_z = \mu \nu (\sigma_x + \sigma_y), \quad (3)$$

式中 $0 \leq \mu \leq 1$ 为与摩擦系数有关的修正参数。当 $\mu = 0$ 时,属于平面应力情况;当 $\mu = 1$ 时,属于平面应变情况。由(1)~(3)式可得光纤光栅的各向应变为

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)], \quad (4)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)], \quad (5)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)], \quad (6)$$

式中 E 为光纤材料的杨氏模量, ν 为泊松系数。

根据光弹效应原理,结合(4)~(6)式可以得到光纤光栅的各向折射率变化为

$$(\Delta n_{\text{eff}})_x = -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_x + [(1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_y + \sigma_z) \}, \quad (7)$$

$$(\Delta n_{\text{eff}})_y = -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_y + [(1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_x + \sigma_z) \}, \quad (8)$$

$$(\Delta n_{\text{eff}})_z = -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_z + [(1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_x + \sigma_y) \}, \quad (9)$$

式中 p_{11}, p_{12} 为光纤材料的弹光系数。

由(7)~(9)式可知,因为 $\sigma_x \neq \sigma_y$,导致均匀横向受压的光纤光栅 x 方向的折射率变化量与 y 方向的折射率变化量不相等,所以光纤光栅产生双折射现象,反射谱分裂成为具有两个中心波长的反射谱,且两个中心波长的变化不等。由光纤光栅中心波长变化表达式 $\Delta \lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}} \Lambda + 2n_{\text{eff}} \Delta \Lambda$ 可得,在横向均匀作用下,光纤光栅两个偏振方向的中心波长变化关系式为

$$\Delta \lambda_{Bx} = \left[\frac{(\Delta n_{\text{eff}})_x}{n_{\text{eff}}} + \epsilon_x \right] \lambda_{B0}, \quad (10)$$

$$\Delta \lambda_{By} = \left[\frac{(\Delta n_{\text{eff}})_y}{n_{\text{eff}}} + \epsilon_y \right] \lambda_{B0}, \quad (11)$$

式中 n_{eff} 为光纤光栅初始有效折射率; λ_{B0} 为光纤光栅初始中心波长。

显然,在横向均匀作用力条件下,两个偏振方向的中心波长改变的大小与相应偏振方向的折射率变化成正比,而且还与轴向应力(应变)有很大关系。

假设无外界作用力的 FBG 的反射光谱表示为 $R(\lambda, \lambda_B)$, 均匀横向受压的光纤光栅反射谱为 $R(\lambda, \lambda_{Br}, \lambda_{By})$ 。设 x 偏振方向输入分量占输入总光强的比值为 η , 则 y 偏振方向输入分量占总光强的比值为 $1 - \eta$, 可以得到横向均匀受压的光纤光栅反射谱表达式为

$$R(\lambda, \lambda_{Br}, \lambda_{By}) = \eta R_x(\lambda, \lambda_{Br}) + (1 - \eta) R_y(\lambda, \lambda_{By}), \quad (12)$$

式中 λ_{Br} 和 λ_{By} 分别为 x 方向反射谱和 y 方向反射谱的中心波长, 可表示为

$$\lambda_{Br} = \lambda_B + \Delta\lambda_{Br}, \quad (13)$$

$$\lambda_{By} = \lambda_B + \Delta\lambda_{By}. \quad (14)$$

2.2 蚁群算法模型

对于多元函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的寻优问题, 蚂蚁在多维的空间区域中寻优。首先将这 n 个变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的定义域分别划分为 m_1, m_2, \dots, m_n 个子区间, 将 x_p 的 m_p 个子区间 ($p \in 1, 2, \dots, n$) 分别与其他 $n - 1$ 个变量的各个子区间组合可以得到

$\prod_{i=1}^n m_i$ 个 n 维空间区域 (令 $N = \prod_{i=1}^n m_i$), 第 i 个 n 维空间可以表示为 Space_i ; 然后根据要寻优的各个参数的定义域所决定的 n 维空间的大小, 决定蚁群的数量 M 。搜索开始时, 将 M 个蚂蚁随机放置在 N 个区间内作为单蚁进行搜索的起点, 蚂蚁 k 的初始位置分布为 x_k , x_k 为计算机在空间 Space_i 内产生的随机数。确定完 M 个蚂蚁的位置后, 初始化各个区间的信息素, 一般设置为常数。

搜索开始后, 蚂蚁根据一定的转移规则进行运动, 设计的运动规则分为两个部分, 即局部搜索和全局搜索。

局部搜索是指蚂蚁在规定次数内, 随机在各自的领域内搜索目标函数以取得函数的最佳值。当 M 只蚂蚁完成指定次数后, 得到 M 个局部搜索的最佳值。

全局搜索是根据每只蚂蚁得到的局部最佳值确定蚂蚁的运动方向。比较各个局部最佳值可以得到全局最佳值, 每只蚂蚁都朝着全局最佳值的区间移动, 其第 k 只蚂蚁从区域 i 转移到区域 j 的转移概率可表示为

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in \text{allow}_k} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)} & j \in \text{allow}_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (15)$$

式中 η_{ij} 为启发信息; τ_{ij} 为区域 i 到区域 j 的信息素强度; allow_k 为蚂蚁 k 下一步允许选择的区域 (已选择过的区域不能选)。

由 (15) 式可知转移概率 P_{ij}^k 与 $\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta$ 成正比。 α 和 β 为两个参数, 分别反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息和启发信息在路径选择中的重要性。当 $\alpha = 0$ 时, 算法就是传统的贪心算法; 而当 $\beta = 0$ 时, 就是纯粹的正反馈算法。经过 n 个时刻, 蚂蚁完成一次循环, 计算此时的转移概率, 然后对信息素进行更新, 其更新规则可以表示为

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + S \cdot \exp(-I/Q), \quad (16)$$

式中 $\rho \in (0, 1)$ 为信息素的残留系数; $S > 0$ 为局部最佳值的影响因子, S 值的大小决定了单次循环中局部搜索的最佳值对全局最佳值的影响, S 值取得太小, 局部最佳值对信息素的更新作用降低, 导致算法的收敛变慢, S 值取得太大又会导致算法过早地收敛, 容易陷入局部最佳值的误区, 所以 S 值的取值应根据具体应用而定; Q 值为目标函数缩放因子, 对于目标函数值变化量较大的函数应将 Q 值设置较大, 以缓和目标函数的剧烈变动, 使得信息素的变化限制在一定的区间内。对于目标函数值变化量较小的函数, 应设置 Q 值较小, 以加强局部最佳值对信息素变化的作用。

当完成若干次全局搜索之后, 考察各区间的转移概率, 以概率最高的区间作为下一次搜索的新区间, 这样反复多次, 蚂蚁寻优的空间不断变小, 直至满足要求为止。具体算法步骤如下:

步骤 1: 根据具体精度要求设置最大循环次数 NC 和蚂蚁数量 M ;

步骤 2: 根据要求将定义域区间分别组合得到 N 个 n 维空间, 同时随机放置蚂蚁, 确定各个蚂蚁的初始位置, 并且适当设置全局搜索的次数 NA , NA 值设置过大, 则运行次数和时间增加, 设置较小, 容易陷入局部最佳值区间;

步骤 3: 根据上次循环更新的信息素, 计算各区间蚂蚁的转移概率;

步骤 4: 对各区间的蚂蚁进行局部搜索, 寻取局部最佳值;

步骤 5: 根据 (16) 式和得到的各个局部最佳值进行信息素的更新;

步骤 6: 判断全局搜索次数是否已经完成, 若未完成返回步骤 3, 若完成全局搜索次数, 则判断各区间的转移概率, 获得该次的最佳值的区间;

步骤 7: 判断 NC 是否满足最大循环次数, 若未

完成,将该次的最佳值区间返回至步骤 2,若完成,则得到最佳值。

以上是多元函数寻优蚁群算法的具体步骤。

3 实验分析

3.1 横向均匀受力实验

实验系统的结构如图 3 所示。宽带光源采用 ASE100 光源(波长范围为 1528~1610 nm,输出功率 13.5 dBm),光谱分析仪(OSA)为 EXFO 公司的 IQS-5250B-Optical Spectrum Analyzer(最小分辨率为 0.002 nm)。ASE 发出的光经过光纤隔离器(isolator)和光纤环形器(circulator)进入光纤光栅横向均匀受力装置,反射回来的光经过偏振控制器(PC)和 3 dB 耦合器分别接入光谱分析仪和计算机。横向均匀受力的装置图如图 4 所示。采用的光纤光栅参数为:室温下中心波长为 1551.574 nm,光栅长度为 10 mm,带宽约为 0.14 nm,最大反射率为 0.96。图 4(a)显示光栅横向均匀受力装置,该装置由两个表面光滑的铁块和光栅构成,受力光栅粘贴在铁块中部,为了保证光栅受力均匀,分别在受力光栅的两侧粘贴两根光纤,铁块的两端有两个柱型凹槽,其目的是用于注入胶后固定光栅,以保持光栅受力不会发生弯曲,铁块的表面还留有两个螺孔,用于固定两铁块有效的结合,防止受力时铁块发生错位,导致光栅折断。实验装置如图 4(b)所示。将光栅横向受力装置固定于表面平滑的实验台上,横向均匀力由一个磁力装置给出,调整磁力的大小就可以调整横向的作用力。实验过程中保持室内温度基本不变,调节磁力装置,使得光纤光栅横向受力由小到大增加,注意加力一定要均匀、缓慢。因为轻微的振动都可能导致光栅发生弯曲,引起轴向产生啁啾。

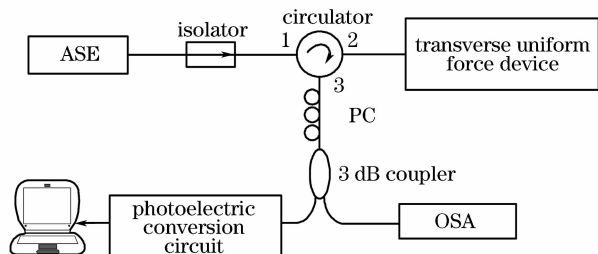


图 3 系统结构图

Fig. 3 Structure of system

调节磁力装置使得光纤光栅横向受力由小到大增加,每隔 5 N 测量一次,通过电阻应变片测量磁力装置的横向载荷作为光纤光栅横向作用力的参考,并记录此时的光谱,直到横向载荷为 100 N 时停止,

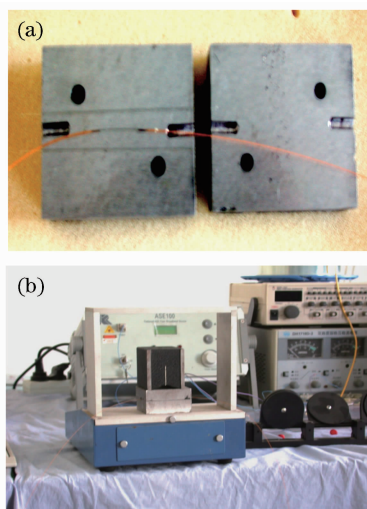


图 4 光纤光栅横向均匀受力实验装置图

(a) 受力装置; (b) 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of FBG under transverse uniform strain. (a) force device; (b) experimental setup graph

一共测量 21 组数据。实验时先不接入偏振控制器,每得到一个横向均匀受力的实验光谱图,在光纤环形器的 3 端口接入偏振控制器,调节偏振控制器,同时观察光谱分析仪显示的光谱图,当光谱仪显示为单谐振峰光谱时,通过光电转换电路记录光功率 p_{i1} ,继续调节偏振控制器,当光谱仪显示另一个谐振峰时,记录此时光功率 p_{i2} ,并计算 x 偏振方向的分光比。

3.2 蚁群算法寻优

由横向均匀受压的光纤光栅反射谱表达式 $R(\lambda, \lambda_{Br}, \lambda_{By})$ 的推导过程中[(1)~(12)式]可以发现,光纤光栅横向均匀受力时光纤光栅的反射谱主要由以下 3 个参数决定:横向均匀载荷 F , 光纤受力接触面摩擦引起的修正参数 μ 和 x 方向输入分量占输入总光强的比值 η , 因此利用蚁群算法对光纤光栅反射谱的分析就是关于这 3 个变量的寻优问题。那么横向均匀受压的光纤光栅反射谱的表达式可以改写为: $R(\lambda, F, \mu, \eta)$, 可以建立光栅横向均匀受力反射谱分析的目标函数

$$M_h(F, \mu, \eta) = \int_{\lambda_S}^{\lambda_E} [R(\lambda, F, \mu, \eta) - R'(\lambda, F', \mu', \eta')]^2 d\lambda, \quad (17)$$

式中 $R(\lambda, F, \mu, \eta)$ 为理论反射率表达式; $R'(\lambda, F', \mu', \eta')$ 为实验测得的反射率。

(17)式的目的就是利用理论值与实际测得值进行比较,当目标函数为最大值时,则得到了实际测得

值的最佳理论接近值。在计算时,由于实验谱包含噪声较多,而且反射谱的特征信息主要集中在其全谱范围内,所以(17)式中的积分范围 λ_s 和 λ_E 应适当地选取在全谱带宽 $\Delta\lambda\pm 0.2$ nm处,这也有利于提高算法的准确性和收敛速度。

由于设计的算法中含有多个参量,如:蚂蚁数 M ,寻优代数 NC ,全局搜索次数 NA ,局部搜索次数 N 和残留系数 ρ ,这些参数的设置对算法的影响很大。对实验谱型进行寻优之前,为了确定算法中各参数的最佳取值,分别对这些参数设计了仿真实验,分别计算每次仿真实验的寻优值的平均值和标准

差,以这两个值作为算法的优劣判断标准,由此来确定各参数的取值。

为了保证算法寻优的效果,针对算法中各参数进行了大量的仿真实验,即在光纤光栅横向受力为10 N时,用不同的参数组合分别实验所得的光谱进行寻优100次,计算寻优得到的作用力的平均值 \bar{F} ,作用力寻优结果的标准差 δ_F ,寻优得到的 x 偏振方向的分光比的平均值 $\bar{\eta}$,分光比寻优结果的标准差 δ_η ,并根据寻优结果与参考值的接近程度和标准差来选择相对合理的参数组合。表1列举了部分参数组合的寻优结果。

表1 各参数组合寻优结果

Table 1 Optimization results of parameter group

M	NC	NA	N	ρ	\bar{F}	$\delta_F/10^{-4}$	$\bar{\eta}$	$\delta_\eta/10^{-4}$
20	5	4	5	0.7	9.8054	0.13	0.58594	0.13
20	4	4	6	0.6	9.8572	0.11	0.56308	0.12
30	6	5	4	0.5	9.9339	0.06	0.57184	0.06
30	4	4	5	0.6	9.8984	0.10	0.58322	0.09
40	4	3	5	0.6	9.9002	0.09	0.56841	0.10
40	5	4	6	0.7	9.9416	0.04	0.57014	0.05
50	5	4	4	0.6	9.9457	0.05	0.57168	0.06
50	4	3	5	0.7	9.9305	0.07	0.57112	0.08
60	4	3	5	0.6	9.9424	0.06	0.58001	0.06
60	3	2	4	0.7	9.8512	0.11	0.56017	0.10

表2 蚁群算法寻优结果

Table 2 Optimization results of the ant colony algorithm

Real transverse force /N	Optimization transverse force /N	η (Experimental data)	η' (Result of optimization)	Friction coefficient μ
0	0	0.56176	0.54091	—
5	5.2542	0.57086	0.58614	0.32005
10	9.9305	0.57081	0.57112	0.34123
15	15.2104	0.57076	0.57006	0.33254
20	19.2584	0.55947	0.55651	0.31002
25	24.4352	0.57192	0.59673	0.35021
30	30.2564	0.56138	0.55020	0.31082
35	35.0244	0.56025	0.56489	0.32001
40	39.8521	0.55897	0.56007	0.31582
45	45.2361	0.56381	0.59015	0.35214
50	49.2561	0.57121	0.58208	0.34025
55	56.0243	0.57018	0.57008	0.33221
60	60.2584	0.57003	0.57933	0.33568
65	64.8527	0.55895	0.56094	0.31025
70	70.6531	0.56034	0.55907	0.32586
75	75.2528	0.56986	0.57864	0.33569
80	81.2105	0.57136	0.58647	0.34012
85	84.7524	0.56325	0.55863	0.32887
90	90.1253	0.56677	0.58618	0.35003
95	95.0256	0.56993	0.56912	0.32618
100	100.3358	0.56367	0.57137	0.33564

经过大量的计算和分析,根据表 1 统计的结果,针对谱型分析问题的应用条件和实际要求,综合考虑算法的精度、稳定性和收敛速度等性能指标,作出合理的参数选择,本次算法参数选择为:蚂蚁数 50,寻优代数 4,残留系数 0.7,全局次数 3,局部次数 5。根据设定的参数对光纤光栅横向均匀受力实验所得的反射谱分别寻优,平均寻优时间小于 1 s(主频 2.21 GHz,内存 1 Gb),得到的结果如表 2 所示。

分析表 2 的数据可知,蚁群算法不仅对作用在

光纤光栅上的作用力的寻优结果十分接近应变片测量的值,使得误差控制在很小的范围内,约为 0.3%~1%。而且能分析得出对 FBG 横向均匀受压反射谱中一些不易测量的特征信息,如寻优得到 x 方向输入分量占输入总光强的比值 η' 约为 0.57,与实验所测得的 x 方向分光比 η 非常接近,误差约为 0.5%。寻优结果还得到光纤受力接触面摩擦引起的修正参数 μ 的取值为 0.33 左右,根据寻优结果仿真得到的反射光谱与实验采得的光谱的对比如图 5 所示。

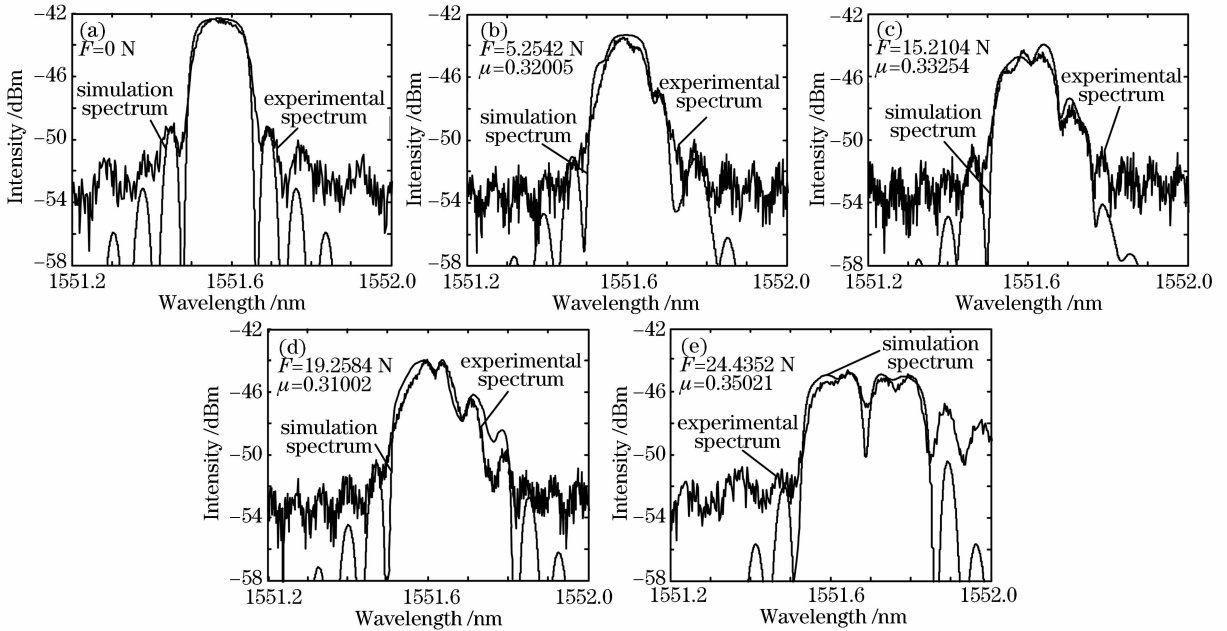


图 5 寻优仿真结果与实验谱对比

Fig. 5 Comparisons between optimizing results and experimental spectra

由上述实验和仿真结果可见,应用蚁群算法进行光栅反射谱特征信息的提取和分析具有精度高、稳定性好、收敛速度快等优点,而且能分析不易测量的数据(如参数 μ 和 η)。但是,通过比较图 5 中的曲线表明,实验曲线和仿真曲线仍存在一定的误差,所以可通过改进目标函数、选择适当的参数和积分范围 λ_S 和 λ_E 来提高算法的精度。

4 结 论

通过分析光纤光栅横向均匀受压传感理论及蚁群算法的原理和数学模型,提出了一种对光纤光栅横向均匀受压传感系统的蚁群算法分析方法,建立了相关的数学模型和系统的目标函数。同时大量的仿真和实验数据表明,蚁群算法对 FBG 横向均匀受压反射谱的特征信息的提取很有效,该方法不仅对作用在光纤光栅上的作用力的寻优结果十分接近应变片测量的值,而且能分析得出对 FBG 横向均匀受

压反射谱中一些不易测量的特征信息,如光纤受力接触面摩擦引起的修正参数 μ 的取值为 0.33 左右和 x 方向输入分量占输入总光强的比值 η 约为 0.57,实现了光纤光栅横向均匀受压传感系统的高精度测量。

参 考 文 献

- 1 Rachid Gafsi, Mahmoud A. El-Sherif. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings [J]. *Optical Fiber Technology*, 2001, **6**:299~323
- 2 Cai Lulu, Yin Wenwen, Wu Fei. Study of fiber Bragg grating characteristics under local transverse force [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(12):7737~7746
蔡璐璐,尹闻闻,吴飞. 均匀光纤 Bragg 光栅局部横向受力特性研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(12):7737~7746
- 3 Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiquan. 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
- 4 Wentao Zhang, Lihui Liu, Fang Li *et al.*. Fiber Bragg grating pressure sensor with enhanced sensitivity [J]. *Chin. Opt.*

- Lett.*, 2007, **5**(9):507~508
- 5 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Studying on fiber Bragg grating strain sensing [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(5):68~69
傅海威, 乔学光, 贾振安等. 光纤 Bragg 光栅应变传感研究[J]. 激光杂志, 2004, **25**(5):68~69
- 6 Zhou Zhi, Pai Wei, Luo Bin *et al.*. A fast simulation method for sampled fiber Bragg gratings with periodic index distribution [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12):2266~2269
周 志, 潘 炜, 罗 斌等. 折射率周期分布取样光纤 Bragg 光栅的快速分析方法[J]. 光子学报, 2007, **36**(12):2266~2269
- 7 Lü Bo, Gong Taorong, Xu Ou *et al.*. Performance optimization of linear chirped gratings using genetic algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8):1434~1440
吕 博, 龚桃荣, 许 鸥等. 利用遗传算法优化线性啁啾光栅性能[J]. 光学学报, 2008, **28**(8):1434~1440
- 8 Gao Zhipeng, Yu Zhenhong, Xing Lihua. A novel method for reconstructing strongly reflecting fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):991~996
高志鹏, 余震虹, 邢丽华. 一种重构强反射光纤布拉格光栅的新方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(7):991~996
- 9 Zhang Rongxiang, Zheng Shijie, Xia Yanjun *et al.*. Application of support vector regression for reconstruction of non-uniform strain profile along the fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8):1513~1517
张荣祥, 郑世杰, 夏彦君等. 支持向量回归算法在光纤光栅非均匀应变重构中的应用[J]. 光学学报, 2008, **28**(8):1513~1517
- 10 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
- 11 Teng Fengcheng, Yin Wenwen, Wu Fei *et al.*. Analysis of a FBG sensing system with transverse uniform press by using genetic algorithm [J]. *Optoelectronics Letters*, 2008, **4**(2):121~125