

基于差分进化算法的光纤布拉格光栅 横向局部应力与温度分离技术*

刘瞰东¹, 傅晓立¹, 陈静¹, 陶继平¹, 江灏^{1,2}

(1. 厦门大学信息科学与技术学院 厦门 361005;

2. 新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院 新加坡 639798)

摘要: 鉴于横向应力和温度对光纤布拉格光栅的交感耦合呈现非线性关系, 将横向局部应力与温度的交感问题转化为非线性系统参数辨识问题: 首先根据光纤布拉格光栅横向应力与温度的传感原理构造一个理论意义上的反射光谱, 然后利用理论光谱和采样光谱之间的差异度建立系统参数辨识模型, 通过差分进化算法对该优化辨识模型进行求解, 最终实现横向局部应力与温度的同时测量。实验和仿真结果表明, 本文提出的方法具有较高的辨识精度, 得到的横向应力误差绝对值一般小于 $4.0 \times 10^{-3} \text{ N}$, 温度误差绝对值一般小于 $3.0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$, 传感器对温度的灵敏度为 $11.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。该方法能够解决光纤布拉格光栅横向局部应力和温度的交叉敏感问题, 提升光纤布拉格光栅传感网络在实际工程中的传感精度。

关键词: 光纤布拉格光栅; 交叉敏感; 参数辨识; 差分进化算法

中图分类号: TN29 TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.30

Simultaneous measurement of stress and temperature of fiber Bragg grating under local transverse force using differential evolution algorithm

Liu Tundong¹, Fu Xiaoli¹, Chen Jing¹, Tao Jiping¹, Jiang Hao^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Electrical & Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: Considering that fiber Bragg grating (FBG) sensors are sensitive to both transverse stress and temperature simultaneously, which leads to the difficulty in the independent measurement of these two measurands, we transform this problem into nonlinear system parameter identification with identification parameters of temperature and stress. A theoretical reflection spectrum is first constructed based on the sensing principle of FBG transverse stress and temperature. Then a novel identification model is established based on the discrepancy between actual measured spectrum and the constructed spectrum. The differential evolution (DE) algorithm, a simple yet powerful evolutionary algorithm, is applied to solve the proposed model and obtain the appropriate values of temperature and stress simultaneously. Experiment and simulation results show that the measurement error of transverse stress is typically smaller than $4.0 \times 10^{-3} \text{ N}$ and the measurement error of temperature is smaller than $3.0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$, the temperature sensitivity of the sensor is $11.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. The result indicates that the proposed approach is effective in discriminating the cross-sensitivity of FBGs, while maintaining high measurement accuracy.

Keywords: fiber Bragg grating; cross-sensitivity; parameter identification; differential evolution algorithm

1 引言

利用光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)实现对应力和温度的测量技术近年来备受关注, 由于 FBG 对应力

和温度同时敏感而难以实现对二者的同时测量, 制约了该技术的应用和推广^[1-4]。目前 FBG 轴向应力和温度交感问题已有不少研究成果^[5-7]; 而横向应力的传感效应比轴向应力更为复杂, FBG 横向应力和温度的分离技术研究成果也相应较少。Chi 等人利用一种超结构的 FBG 提出了对温度、轴向

收稿日期: 2014-04 Received Date: 2014-04

* 基金项目: 国家自然科学基金(11201391)资助

应变和横向载荷进行同时测量的实验方法^[8]; Lin 等人 在此基础上将这种超结构 FBG 传感器与特殊的装置结合 把横向压力转换成轴向应变 从而实现对横向压力和温度的同时测量^[9]。不过这些分离技术需要使用特殊结构的 FBG 和额外的机械设备 应用推广受到一定限制。

为此 本文提出了一种基于差分进化算法(differential evolution ,DE)的 FBG 横向局部应力与温度分离技术。该技术的核心思想是将横向局部应力与温度的交感问题转化为非线性系统参数辨识问题。实现方法是: 利用一个结构简单的 FBG 测量以横向局部应力和温度为参数的采样光谱; 通过 FBG 横向应力与温度的传感原理构造一个理论反射光谱; 建立基于理论光谱和采样光谱之间差异度的辨识模型。由于该辨识模型为非线性、不可微、多约束模型, 不太适合采用经典的数值计算方法求解 故本文引入一种差分进化算法对该问题进行优化求解。实验与仿真结果表明 此方法求解非线性辨识模型的结果具有较高的辨识精度 为光纤光栅横向局部应力与温度的分离技术提供了一种有效方法。

2 分析与建模

2.1 FBG 横向局部应力和温度的交叉敏感分析

光纤光栅横向局部应力和温度存在交叉敏感的问题 当测量其中一个量时 不可避免地受到另外一个量的影响^[10-14]。

1) 当光纤光栅受到横向局部应力时 反射谐振峰发生分裂 并且随着横向局部作用力的增加 分裂点会从短波长向长波长方向移动; 当横向作用力增加到一定值 分裂点又从短波长处出现; 分裂点的移动范围为 FBG 的全谱带宽 移动具有周期性^[10-12]。当温度 $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 不同横向局部应力下 FBG 的反射谱如图 1(a) 所示。

2) 温度的变化能够使光谱发生整体性漂移 且反射波长变化与温度呈线性关系^[13-14]。横向局部应力为 $F = 6\text{ N}$ 时 不同温度下的 FBG 反射谱如图 1(b) 所示。

横向应力的传感效应比轴向应力更为复杂 难以直接采用轴向应力和温度的分离技术进行求解 需要寻找新的求解方法。

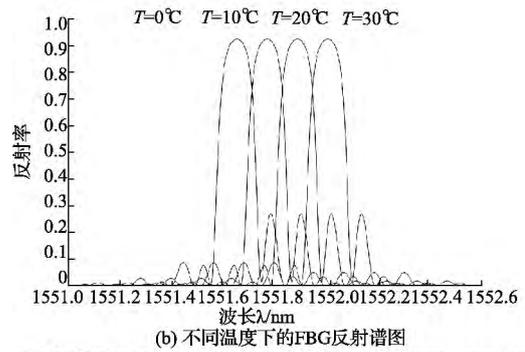
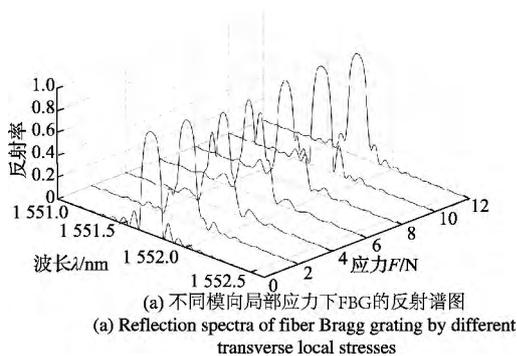


图 1 不同横向局部应力和温度下的 FBG 的反射谱图
Fig. 1 Reflection spectra for Bragg grating by different transverse local forces and in different temperatures

2.2 差异度辨识系统模型的建立

为解决横向局部应力和温度的交叉敏感问题 实现横向局部应力与温度的同时测量 本文将该问题转化为非线性参数辨识问题 其测量原理如图 2 所示。FBG 同时受到横向局部应力 F 和温度 T 的作用时 反射光谱经过 3 dB 光耦合器送入光谱分析仪等采集设备 采样得到的光谱数据 $r(\lambda)$ 送到计算机进行处理。

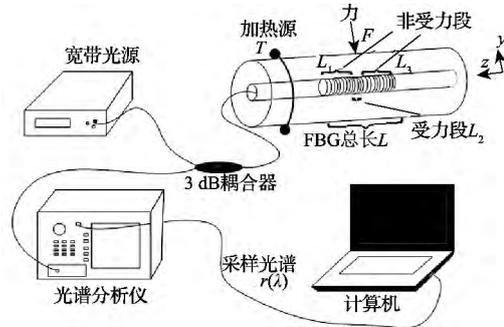


图 2 采样光谱的测量系统原理图
Fig. 2 Schematic diagram of the experiment setup

理论上 当长为 L 的光纤光栅受到图 2 的横向局部应力 F 作用时 非受力部分 L_1 和 L_3 的光栅无变化 折射率参数和原始光栅参数相同; 而受力部分 L_2 的折射率则发生了 x 和 y 2 个偏振方向的变化 最终导致这 2 个方向的反射率发生变化 其值分别为 R_x 和 R_y 。根据文献 [14], x 偏振方向的反射率为:

$$R_x = \left| \frac{B_1^* A_3 e^{j\Delta\phi} + A_1^* B_3^*}{A_1 A_3 e^{-j\Delta\phi} + B_1 B_3} \right|^2 \quad (1)$$

式中: $A_i = \cosh(S_i L_i) - j \frac{\Delta\hat{\sigma}_i}{S_i} \sinh(S_i L_i)$ $B_i = -j \cdot \frac{k}{S_i} \sinh(S_i L_i)$ $S_i = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}_i^2}$ A_i^* 和 B_i^* 分别是 A_i 和 B_i 的共轭, $\hat{\sigma}_i$ 是第 i 段光纤光栅的直流自耦合系数 ($i = 1, 2$),

3) k 为交流耦合系数, L_2 为光纤光栅受力段长度, L_1 和 L_3 为非受力段长度, $\Delta\phi = 2\Delta\hat{\sigma}_{2x}L_2$, $\Delta\hat{\sigma}_{2x} = \frac{2n_{eff}\pi}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}$
 $\approx \frac{2(\Delta n_{eff})_x \pi}{\lambda}$, Λ 和 n_{eff} 分别为光纤光栅周期和有效折射率, $(\Delta n_{eff})_x$ 为 x 偏振方向的有效折射率的变化。当光纤光栅横向局部受力时, 由于 $L_2 \ll L$, 可以将受力段光纤光栅的横向受力情况看作是平面应变情况, 则该段光纤光栅各个方向的应力为:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{2F}{\pi L_2 D} \\ \sigma_y = \frac{-6F}{\pi L_2 D} \\ \sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) = \frac{-4\nu F}{\pi L_2 D} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_x , σ_y 和 σ_z 分别为受力段 x 、 y 和 z 方向的应力, F 为光纤光栅横向局部应力, D 为光纤光栅的直径长度, ν 为泊松系数。

由光弹效应可计算出该段光纤光栅在 x 偏振方向的折射率变化为:

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

式中: E 为光纤光栅的弹性模量, p_{11} 和 p_{12} 为光纤光栅的光弹系数。

由式(2)和式(3)可得:

$$(\Delta n_{eff})_x = -\frac{n_{eff}^3 F}{2\pi L_2 D E} \{ (p_{11} + 2p_{12}) - [1 - \nu]p_{12} - \nu p_{11} [3 + 2\nu] \} \quad (4)$$

因此, x 偏振方向折射率变化 $(\Delta n_{eff})_x$ 和该段光纤光栅所受应力 F 的大小呈线性关系。 y 偏振方向反射率 R_y 同理可得。

温度对光纤光栅的作用主要体现在光纤热膨胀效应和光纤热光效应上, 通过对中心布拉格波长 λ_{B0} 的影响, 改变了直流自耦合系数, 由文献[14]和[15]可以推导出 FBG 的直流自耦合系数如式(5)所示, 该系数最终引起反射光谱整体性漂移。

$$\hat{\sigma}_i = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{B0}(1 + K_T T)} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{eff} \quad (5)$$

式中: K_T 为光纤光栅的相对温度灵敏度系数, n_{eff} 为光纤光栅有效折射率, Δn_{eff} 为光纤光栅的折射率变化, λ_{B0} 为光纤光栅初始中心波长。

通过上述分析, 可以计算得到理论意义的光谱函数 $r_\nu(\lambda, F, T)$ 。本文利用这个理论光谱去逼近采样光谱 $r(\lambda)$, 如图3所示。用一个差异度函数 $Diff(F, T)$ 去衡量理论光谱与采样光谱的差异程度:

$$Diff(F, T) = \int_0^\infty |r_\nu(\lambda, F, T) - r(\lambda)| d\lambda \quad (6)$$

可以看出, 式(6)是一个二元多峰函数, 当且仅当 F

与 T 值和实际值无限接近时取得最小值。由此本文最终建立的差异度辨识系统的模型为:

$$\begin{aligned} \text{Min: } Diff(F, T) &= \int_0^\infty |r_\nu(\lambda, F, T) - r(\lambda)| d\lambda \\ \text{s. t. } &F_{\min} < F < F_{\max} \\ &T_{\min} < T < T_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $[F_{\min}, F_{\max}]$ 和 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 分别是横向应力和温度的测量范围。

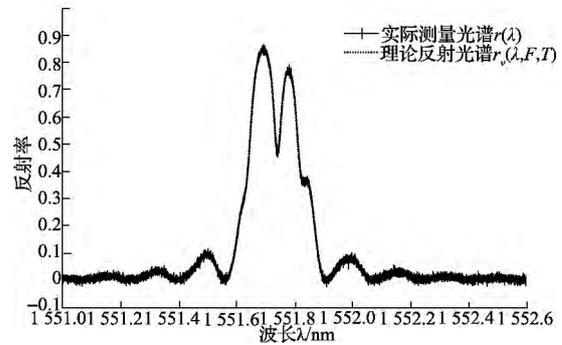


图3 横向局部应力 $F = 6 \text{ N}$ 温度 $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的理论光谱图和对应的采样光谱图

Fig. 3 Actual measured spectrum and theoretical reflection spectrum under the condition of $F = 6 \text{ N}$ and $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

3 差分进化算法求解

本文所建立的差异度辨识模型是一个不可导的离散优化模型, 不适合采用常规的优化方法进行求解。差分进化算法是一种基于实数编码的全局优化算法, 相比于采用二进制编码的传统进化算法如遗传算法等, 具有收敛速度快, 控制变量少, 便于大空间搜索以及更容易理解和编程实现等优点, 易于处理不可导的离散优化模型^[16-19]。以下是差分进化算法的详细步骤。

设 $X_{i, \rho}$ ($i = 1, 2, \dots, NP$) 表示种群中的个体 (即1组候选解), NP 为种群数量。每个个体 $X_{i, \rho} = (x_{i, 1, \rho}, x_{i, 2, \rho})$ 是一个二维的向量, 其中 $x_{i, 1, \rho}$ 和 $x_{i, 2, \rho}$ 分别用于表示横向应力和温度。

1) 初始化种群

在整个搜索空间内, 对种群中的个体 $X_{i, \rho}$ ($i = 1, 2, \dots, NP$) 通过以下的式(8)进行初始化, 即:

$$x_{i, j, \rho} = x_j^l + \text{rand}[0, 1] \cdot (x_j^u - x_j^l) \quad (8)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, NP$, x_j^l 和 x_j^u 分别表示第 j 个分量的取值的上下界, $\text{rand}[0, 1]$ 是0到1之间的随机数。

2) 差分变异

从以上的种群 $X_{i, \rho}$ 中随机地选择3个互不相同的个体, 即 $X_{r1, \rho}$, $X_{r2, \rho}$ 和 $X_{r3, \rho}$, 其中, $r1, r2$ 和 $r3$ 是种群当中互异的3个值, 即 $r1 \neq r2 \neq r3$ 且 $r1, r2, r3 \in [1, NP]$ 。整个变异过程主要是随机选择两个不同的个体向量, 将这2个向量做差

后乘以缩放比例因子 K 再和第 3 个种群的随机个体向量进行合成, 最终形成了变异向量 $V_{i,G+1}$ 即:

$$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + K(X_{r2,G} - X_{r3,G}) \quad (9)$$

其中缩放比例因子 $K \in (0, 2)$, 本文取 $K = 0.8$, 且 $i \neq r1 \neq r2 \neq r3$ 。

3) 概率交叉

根据式 (10) 将以上变异生成的变异个体 $V_{i,G+1}$ 与最初种群的个体 $X_{i,G}$ 进行交叉操作以增加新种群的多样性, 即:

$$u_{ij,G+1} = \begin{cases} v_{ij,G+1} & \text{if } (\text{rand}(i) \leq CR) \quad j = \text{rnbr}(j) \\ x_{ij,G} & \text{if } (\text{rand}(i) > CR) \quad , i \neq \text{rnbr}(j) \end{cases}$$

$$j = 1, 2 \quad (10)$$

式中: CR 是交叉概率, 且有 $CR \in [0, 1]$; $\text{rand}(i)$ 是 $[0, 1]$ 上的均因随机数; $\text{rnbr}(j)$ 是 $[1, 2]$ 之间的随机数。

4) 贪婪选择

差分进化算法的选择操作主要用贪婪算法的思想对上面的原始种群和通过变异和交叉所产生的新的种群进行一对一的比较, 产生第 3 个种群, 然后将该新种群作为新一代的种群。具体做法: 将上面的实验向量 $U_{i,G+1} = (u_{i,1,G+1}, u_{i,2,G+1})$ 和 $X_{i,G}$ 分别代入目标函数 $f(X)$ 即以上的差异度函数中, 根据式 (11) 来产生下一代种群:

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} U_{i,G+1} & \text{if } (U_{i,G+1}) < f(X_{i,G}) \\ X_{i,G} & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: G 是种群进化的代数。如果结果满足算法预先设定的终止条件, 那么算法停止, 否则转向步骤 2)。通过不断地迭代使得差异度函数值最小, 这样最终就可以得到横向局部应力和温度的最优值。

4 实验及仿真结果

4.1 平均误差实验和方差实验

为了验证本文算法的有效性, 采用图 2 的装置进行实验。其中, 照射在 FBG 上的宽带 LED 光源的脉冲半高

宽度 (FWHM) 和功率分别为 50 nm 和 30 μW ; 光谱分析仪 (OSA) 的采样范围为 1.6 nm, 采样点的个数为 16 000; 所用的 FBG 的脉冲半高宽度 (FWHM) 为 0.2 nm。

差分进化算法的参数设置如下: 初始种群个数 $NP = 30$, 变异概率 $K = 0.8$, 交叉概率 $CR = 0.9$ 。算法的迭代次数为 50 代。平均误差实验采用了 2 种设计方案, 方案 1 是固定应力值即 $F = 6.0 \text{ N}$, 然后温度从 0°C 变化到 18.0°C , 间隔为 2.0°C 。考虑到实际应用中, FBG 所受的横向应力和温度都会发生变化, 所以方案 2 设计如下: 使应力值从 18.0 N 下降到 0 N 的同时, 让温度值从 0°C 上升到 18.0°C , 应力和温度的间隔都是 2.0 。2 种方案都是将应力和温度分成 10 个组合, 然后进行 10 组实验, 每组实验重复 20 次求其误差平均值。方案 1 的实验结果表 1 所示。可以看出, 通过计算得到的应力和温度分别和实际应力和温度值非常接近。其中, 应力的误差的绝对值均小于 0.004 N , 温度的误差的绝对值都小于 0.003°C 。为了说明算法的稳定性, 方案 1 还分别计算了 FBG 横向应力和温度的方差。从表 1 可以看出, 对于 10 组数据, 不管是横向局部应力还是温度, 其方差都是很小的。其中, 横向局部应力的方差均不大于 $0.000\ 004 \text{ N}^2$, 而温度的方差都小于 $0.000\ 002^\circ\text{C}^2$ 。可见, 差分进化算法在横向应力与温度交感问题的处理上具有比较高的辨识精度。图 4 是通过方案 2 得到的实验结果, 从图中可以看出, 理论计算得到的 FBG 横向应力和温度值分别和实际的应力和温度值非常接近, 应力的误差的绝对值最大为 $0.003\ 429 \text{ N}$, 温度的误差的绝对值最大为 $0.002\ 419^\circ\text{C}$ 。这充分说明本文方案的辨识精度是比较高的。由于本文提出的方案具有较高的辨识精度并且对横向应力和温度的分离无需使用特殊结构的 FBG 和额外机械设备, 因此该方案在大型工程结构健康监测中将具有重要的实际应用价值。

表 1 应力和温度的实际值、计算数据平均值及其误差和方差

Table 1 Theoretical values, average sampling data, errors and variances of stress and temperature

No	实际值		计算值		平均误差		方差	
	应力/N	温度/ $^\circ\text{C}$	应力平均值/N	温度平均值/ $^\circ\text{C}$	应力误差/ 10^{-3}N	温度误差/ 10^{-3}C	应力方差/ 10^{-3}N	温度方差/ 10^{-3}C
1	6.0	0	6.001 357 4	0.001 253 9	1.357 4	1.253 9	0.003 19	0.000 78
2	6.0	2.0	5.997 921 6	1.999 398 2	- 2.078 4	-0.601 8	0.000 32	0.000 17
3	6.0	4.0	5.996 475 3	4.001 655 9	- 3.524 7	-1.655 9	0.000 05	0.000 06
4	6.0	6.0	6.000 405 7	5.999 119 3	0.405 7	-0.880 7	0.001 90	0.000 54
5	6.0	8.0	5.997 481 8	8.000 005 9	-2.518 2	0.005 9	0.000 18	0.001 20
6	6.0	10.0	6.000 456 3	9.999 968 9	0.456 3	-0.031 1	0.000 13	0.000 06
7	6.0	12.0	5.996 943 3	12.002 453 9	- 3.056 7	2.453 9	0.002 41	0.000 92
8	6.0	14.0	5.999 059 7	13.998 488 2	- 0.940 3	-1.511 8	0.000 10	0.000 04
9	6.0	16.0	6.002 908 6	15.997 436 1	2.908 6	-2.563 9	0.000 27	0.000 20
10	6.0	18.0	6.003 239 0	18.001 625 8	0.239 0	1.625 8	0.000 34	0.000 07

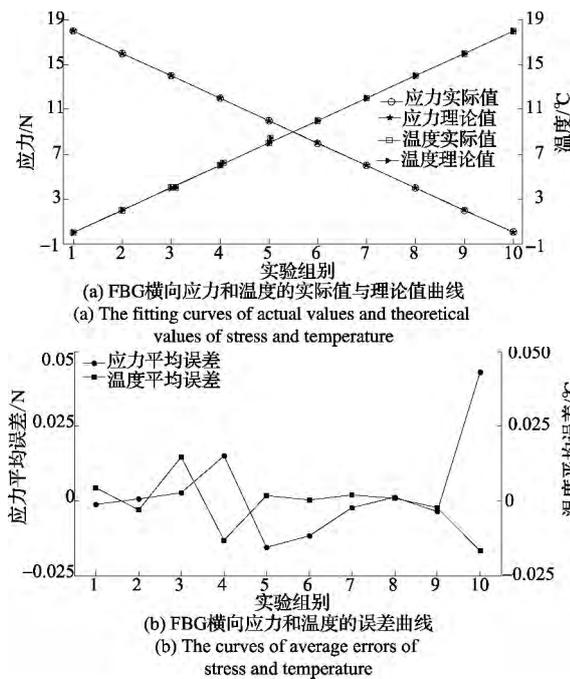


图4 实验结果

Fig. 4 Results of the experiment

4.2 温度灵敏度实验

为了进一步验证本文方法的优越性,本文进行了温度灵敏度实验。实验过程中,保持FBG横向受力不变,即设置应力 $F = 6.0\text{ N}$, 而让FBG所受温度从 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在温度上升的过程中记录FBG反射谱的中心波长,温度每上升 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 记录一次,其中初始中心波长为 1551.555 nm 。图5是温度和FBG反射谱的中心波长之间的关系曲线,由图5可以得到FBG的温度灵敏度系数为 $11.7\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,这一精度与采用其他的应力和温度分离方法相比具有比较高的精度,如表2所示。从表2中可以看出,其他几种现有方案温度灵敏度比利用本文的方案所得的温度灵敏度高2倍以上,总之,本文所用的方法具有比较高的辨识精度。

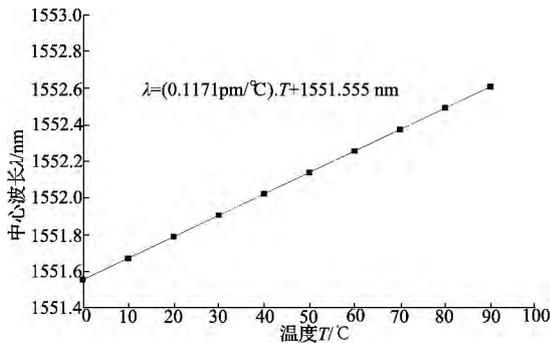


图5 FBG中心波长随着温度变化曲线图

Fig. 5 Curve of center wavelength vs. temperature

表2 不同应力和温度分离方法的温度灵敏度比较
Table 2 Temperature sensitivities of different methods for the simultaneous measurement of strain and temperature of FBG

应力和温度分离方法	温度灵敏度($\text{pm}/^{\circ}\text{C}$)
本文的方法	11.7
光纤光栅表面部分镀镍的钢悬臂梁法 ^[20]	26.1
长周期光纤光栅内切干涉仪法 ^[21]	650
双光纤组合法 ^[22]	134.6
利用微锥光纤光栅(micro-tapered)方法 ^[23]	49.6

4.3 抗噪声仿真实验

为了测试差分进化算法在求解本文优化问题中的抗噪声能力,本实验在不同的噪声环境下测试本文方法的抗干扰能力。具体地,本文通过计算机仿真手段在光谱数据中加入 20 dB 到 100 dB 的9组高斯白噪声,仿真实验平台为 MATLAB。该仿真实验的差分进化参数设置与先前实验相同。每组实验重复10次,求平均值,然后分别求解FBG横向应力和温度的平均均方根(RMS)值,将这些值绘制成图,实验结果如图6所示。

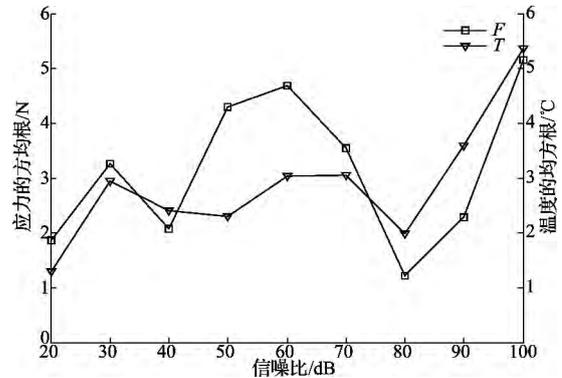


图6 不同噪声环境下的应力和温度的平均均方误差图(RMS)

Fig. 6 RMS of stress and temperature under different noise environment

从图6的实验结果可以看出,不管是应力还是温度,在噪声从 20 dB 变化到 100 dB 的过程中,其RMS值都是比较小的。其中,在噪声最大的 100 dB 时,应力的测量RMS值为 0.0054 N ,温度的测量RMS值为 $0.0052\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。RMS值越小表明数据越集中,本文的FBG应力和温度的测量RMS值都很小,说明实验数据很集中,进而表明在不同的白噪声下数据的波动性很小,最终可以得出结论:本文所提出的方法具有较强的抗干扰能力。

5 结 论

本文对光纤光栅横向局部受力时应力和温度的交叉敏感分离技术问题进行研究,建立了光纤光栅的理论光谱和采样光谱之间的差异度辨识模型,通过差分进化算法对该模型进行求解并得到了辨识参数即横向应力和温度。实验和仿真结果表明:用差分进化算法对光纤光栅横向局部应力和温度的交叉敏感问题进行求解具有较高的辨识精度,得出的横向应力和温度的误差满足实际工程要求,所以该算法能够很好地解决 FBG 横向局部受力时应力和温度的交叉敏感问题,具有较高的参考价值。

参考文献

- [1] 肖元强,李得利,李川,等.一种差动式光纤 Bragg 光栅 渗压、温度双参量传感器[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2251-2256.
XIAO Y Q, LI D L, LI CH, et al. Differential FBG sensor for simultaneous dual-measurement of pressure and temperature [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2251-2256.
- [2] 吴俊,陈伟民,章鹏.金属直接连接的布拉格光纤光栅 应变测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2709-2713.
WU J, CHEN W M, ZHANG P. Strain sensing method based on directly metallized bonding FBG to substrate [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(12): 2709-2713.
- [3] MOKHTAR M R, SUN T, GRATAN K T V. Bragg grating packages with nonuniform dimensions for strain and temperature sensing [J]. Sensors Journal, IEEE, 2012, 12(1): 139-144.
- [4] LIU W L, LI W Z, YAO J P, et al. Real-time interrogation of a linearly chirped fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2011, 23(18): 1340-1342.
- [5] FRAZAO O, AMARAL L M N, BAPTISTA J M, et al. Strain and temperature discrimination using modal interferometry in Bragg fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(12): 1616-1618.
- [6] LEE S M, SAINI S S, JEONG M Y. Simultaneous measurement of refractive index, temperature, and strain using etched-core fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(19): 1431-1433.
- [7] 王俊杰,刘波,张丰涛,等.基于温度补偿方法去敏的新型光纤光栅压力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2342-2346.
WANG J J, LIU B, ZHANG F T, et al. New-style optical fiber bragg grating pressure sensor with temperature compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2342-2346.
- [8] CHI H, TAO X M, YANG D X, et al. Simultaneous measurement of axial strain, temperature, and transverse load by a superstructure fiber grating [J]. Optics Letters, 2001, 26(24): 1949-1951.
- [9] LIN C M, LIU Y C, LIU W F, et al. High-sensitivity simultaneous pressure and temperature sensor using a superstructure fiber grating [J]. Sensors Journal, IEEE, 2006, 6(3): 691-696.
- [10] LAI M, KARALEKAS D, BOTSIS J. On the effects of the lateral strains on the fiber Bragg grating response [J]. Sensors, 2013, 13(2): 2631-2644.
- [11] BOTERO J F, CAUSADO-BUELVAS J D, TORRES P. Spectral properties of locally pressed fiber Bragg gratings written in polarization maintaining fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(9): 1291-1297.
- [12] 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.
CAI L L, YIN W W, WU F. Study of fiber Bragg grating characteristics under local transverse force [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(12): 7737-7746.
- [13] 王文华,师文庆,熊正焯,等.光纤布喇格光栅应力双 折射的研究 [J]. 压电与声光, 2010, 32(2): 191-194.
WANG W H, SHI W Q, XIONG ZH H, et al. Study on stress birefringence of fiber Bragg grating [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(2): 191-194.
- [14] WU F, ZHAO J, LIU B, et al. Study on local temperature characteristics of fiber Bragg gratings [J]. Optoelectronics Letters, 2010, 6(2): 99-102.
- [15] HUANG H M, YUAN S F. Study on the spectral response of fiber Bragg grating sensor under non-uniform strain distribution in structural health monitoring [J]. Optoelectronics Letters, 2011, 7(2): 109-112.
- [16] 陈希祥,邱静,刘冠军.基于混合二进制粒子群-遗传 算法的测试优化选择研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(8): 1674-1680.
CHEN X X, QIU J, LIU G J. Optimal test selection based on hybrid BPSO and GA [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(8): 1674-1680.
- [17] 吴沛锋,高立群,邹德旋.修正的差分进化算法在系统 可靠性中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1158-1164.
WU P F, GAO L Q, ZOU D X. Application of modified

differential evolution algorithm in system reliability [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1158-1164.

- [18] 李明,石为人. 基于差分进化的多目标异构传感器网络节点部署机制[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1896-1903.
LI M, SHI W R. Optimal multi-objective sensor deployment scheme based on differential evolution algorithm in heterogeneous sensor networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 1896-1903.
- [19] DAS S, SUGANTHAN P N. Differential evolution: a survey of the state-of-the-art[J]. Transactions on Evolutionary Computation, IEEE, 2011, 15(1): 4-31.
- [20] LI Y L, YAN F, PENG X L, et al. Simultaneous measurement of the temperature and force using a steel cantilever soldered with a partially nickel coated in-fibre Bragg grating [J]. Optics Communications, 2012, 285(21): 4275-4279.
- [21] KANG J, DONG X Y, ZHAO C L, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature with a long-period fiber grating inscribed Sagnac interferometer [J]. Optics Communications, 2011, 284(8): 2145-2148.
- [22] 鱼瑛,余震虹,赵玲君等. 光纤 Bragg 光栅温度与应力的测量分析[J]. 量子电子学报, 2010, 27(5): 632-636.
YU Y, YU ZH H, ZHAO L J, et al. Measurement analysis of temperature and stress based on fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2010, 27(5): 632-636.
- [23] YOON M S, PARK S, HAN Y G. Simultaneous measurement of strain and temperature by using a micro-tapered fiber grating. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1156-1160.

作者简介



刘墩东, 2003 年于中国科学技术大学获得博士学位, 现为厦门大学教授、博士生导师, 主要研究方向为光纤传感网络、光纤光栅复用以及光突发交换技术等。

E-mail: ltd@xmu.edu.cn

Liu Tundong received his Ph. D. degree in 2003 from University of Science and Technology of China; now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Xiamen University. His research interests include fiber optic sensor networks, optical burst-switched network.



傅晓立, 2012 年于中国农业大学获得学士学位, 现为厦门大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感网络分析与优化。

E-mail: fuxiaoli_19861016@163.com

Fu Xiaoli received his bachelor degree from China Agricultural University in 2012. Now, he is a master student in Xiamen University, majoring in analysis and optimization of fiber grating sensing network.



江灏(通讯作者), 2013 年于厦门大学获得博士学位, 现为新加坡南洋理工大学博士后, 主要研究方向: 光纤传感网络优化, 进化计算等。

E-mail: jiangh@ntu.edu.sg

Jiang Hao (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2013 from Xiamen University; Now, he is a post-doctor in Nanyang Technological University, Singapore. His research interests include optimization of fiber sensor network and evolutionary computation.