

改进优化算法 FBG 传感网复用能力的研究

李志斌, 刘畅, 黄启韬

(上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090)

摘要:针对布拉格光栅在构成传感网络时会出现光谱重叠的问题,通过对模拟退火算法中退火因子的修改,以及在退火过程中给予合理的回温操作,改进了算法的计算效率和收敛性,并将改良后的退火算法与粒子群算法结合,可对光谱重叠中各个光栅的波长进行识别。通过对单个及多个光谱重叠的识别结果分析,验证了本算法对光谱重叠的区分具有可行性。实验结果表明:当三个光栅发生两个光谱重叠现象时,改进模拟退火的粒子群算法能够对其光栅进行识别和区分,并且能够将波长的辨识误差控制在 ± 5 pm 左右。

关键词:布拉格光栅;传感网络;光谱重叠;模拟退火算法;回温操作

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.02.020

Study on the multiplexing capacity of FBG sensor network with improved optimization algorithm

LI Zhi-bin, LIU Chang, HUANG Qi-tao

(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at the problem of spectral overlap when the Bragg grating formed the sensor network, the computational efficiency and convergence of the algorithm are improved by modifying the annealing factor in the simulated annealing algorithm and giving a reasonable tempering operation during the annealing process. The improved annealing algorithm is combined with the particle swarm algorithm to identify the wavelengths of the gratings in the spectral overlap. By analyzing the recognition results of single and multiple spectral overlaps, the feasibility of the algorithm is verified to distinguish the spectral overlap. The experimental results show that the improved simulated annealing particle swarm optimization algorithm can identify and distinguish the gratings when the three gratings occur two spectral overlap, and the identification error of the wavelength is about ± 5 pm.

Key words: Bragg gratings; sensor networks; spectral overlap; simulated annealing algorithm; tempering operation

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)是一种新型光学传感元件,利用其反射光谱波峰的中心波长偏移量与被检物理量之间的对应关系^[1-2],实现对传感参量(例如温度、湿度、应变等)的检测^[3-4]。在对多个变量进行同步检测时,需将FBG传感器组建成多路复用的

网络结构。然而当光源的带宽有限时,随着光栅的复用数量增加,会出现FBG光谱重叠的问题,影响到传感系统的解调效果^[5]。目前,Wei Wu等已使用改进遗传算法,解决了FBG传感网的波分复用问题^[6];YuBao Wang在处理波分复用采用了模拟退火的技术,实现了对FBG的波长识别^[7];Duan Liu

基金项目:上海市电站自动化技术重点实验室项目(No. 13DZ2273800)资助。

作者简介:刘畅(1993-),男,硕士研究生,主要研究光纤传感网络。E-mail:18217199204@163.com

通讯作者:李志斌(1974-),男,博士,教授,主要从事检测传感技术研究。E-mail:thermal_li@163.com

收稿日期:2017-06-12; **修订日期:**2017-07-14

等利用改进差分算法解决了 FBG 传感网络的波长串扰的缺陷^[8]。但是上述研究仅局限于 2 个 FBG 构成的传感网络,其结构相对简单,光栅光谱重叠数量相对较少。

本文在模拟退火粒子群算法基础上,对算法退火过程中的衰减函数进行修改:当温度值在高温区时,按指数方式衰减,提高计算效率;当温度值处于低温时,作适当的回火升温,避免算法陷入“局部最优”。利用改进后的算法,提高对 FBG 光谱复用的解调效率,增加了光栅光谱重叠解调数量,克服不同光栅的波长范围不能重叠的限制,为提高 FBG 传感网复用能力提供一种新思路。

2 FBG 光谱复用原理

FBG 光谱形状复用的主要依据光谱形状的信息获取传感器测量到的信息,当作用在 FBG 上外界条件(温度或应变)发生改变时,使 FBG 的反射光谱形状不变,仅仅波长发生漂移。根据形状不同实现 FBG 的光谱复用。在 FBG 光谱复用的传感网络中,光纤链路中的光栅传感器均以并联方式连接,每条链路只有一个 FBG,并且每个 FBG 的反射光谱都由光谱仪处理形成。

假设每个 FBG 传感器在没有受到外界因素干扰情况下,其反射回来的独立光谱记为 $g_i(\lambda)$ ($0 \leq g_i(\lambda) \leq 1; i = 1, 2, \dots, n$), 那么整个光谱复用系统的反射光谱可以表示为^[9]:

$$R(\lambda) = \sum_{i=1}^n R_i g_i(\lambda - \lambda_{Bi}) + N(\lambda), i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中, R_i ($0 \leq R_i \leq 1$) 表示每条链中 FBG 的峰值反射率; λ_{Bi} 表示为各个 FBG 的中心波长; $N(\lambda)$ 表示系统中发生的各种噪声的随机分布;此时 $R(\lambda)$ 视为原始光谱。

为了方便对光谱的计算,需要对原始光谱进行重构操作,得到重构光谱公式为:

$$R_v(\lambda, x_{Bi}) = \sum_{i=1}^n R_i g_i(\lambda - x_{Bi}), i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中, x_{Bi} 为重构光谱的中心波长。

在本研究中,假设所有的 FBG 反射谱均采用高斯函数近似表示^[10]:

$$g_i(\lambda - \lambda_{Bi}) = R_i \exp\left[-4 \cdot \ln 2 \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_{Bi}}{\Delta \lambda_B}\right)^2\right], i = 2, 3, \dots \quad (3)$$

式中, R_i 表示为第 i 个 FBG 的反射率; λ_{Bi} 表示为第

i 个 FBG 的中心波长; $\Delta \lambda_B$ 表示 FBG 的 3 dB 带宽。

若想得出两个光谱之间的差异,作计算式(1)与式(2)的方差,即^[11-12]:

$$f(x_{Bi}) = \int_0^\infty [R(\lambda) - R_v(\lambda, x_{Bi})]^2 d\lambda, i = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

通过观察式(4),当 $x_{Bi} \rightarrow \lambda_{Bi}$ 时,目标函数 $f(x_{Bi})$ 达到最小值,则构造光谱无限接近于原始光谱;此时,若能求得重构光谱中各个 x_{Bi} 的值,即可获得原始光谱中各个光栅的波长信息。因此,在目标函数为最小值作为基本计算条件下,利用优化算法求解出各个重构光谱中心波长 x_{Bi} 的值。但在实际数学计算过程中,由于 $R(\lambda)$ 中的噪声项 $N(\lambda)$ 积分后是常数项,对目标函数没有造成本质的影响,为了方便计算将噪声项进行忽略。

3 算法原理

粒子群算法主要依靠粒子的速度和粒子的位置完成搜索,其具有搜索速度快,可调参数少,结构易实现等特性,已广泛应用于各个工程中^[13]。但由于粒子速度缺少动态调整,容易陷入局部最优,导致收敛精度低。为了解决上述缺陷,本研究将一种改进模拟退火与粒子群算法相结合,既能保证计算结果的精确又能加快算法的收敛速度。具体实现步骤如下:

Step1: 随机给粒子群设置初始位置 x_0 和初始速度 v_0 , 并且设置初始温度 T_0 和粒子群数 M , 以及最大迭代步数 D 。

Step2: 将此刻位置 x_0 代入到目标函数中,计算出每个粒子的适应度 $f(x_0)$ 。根据初始位置的适应度,搜寻出初始化的个体最优解 P_i 和全局最优解 g_{best} 。

Step3: 对所有的粒子的速度和位置进行更新,判断更新后的新解是否在解空间中,如果不满足则继续获取新解。其粒子速度与位置迭代公式:

$$v_{new} = v_{old} + c_1 r_1 (P_i^{old} - x_{old}) + c_2 r_2 (g_{best}^{old} - x_{old}) \quad (5)$$

$$x_{new} = x_{old} + v_{new} \quad (6)$$

Step4: 利用 Metropolis 标准判断是否接受更新后 x_{new} 的值, Metropolis 标准的接受概率公式为:

$$\min\left\{1, \frac{1}{1 + \exp(-\Delta f(x)/T_i)}\right\} \quad (7)$$

式中, $\Delta f = f(x_{new}) - f(x_{old})$; T_i 为当前情况下所处温度值。当 $\Delta f > 0$ 时,若式(7) $> \text{rand}[0, 1]$ 时,则接受新位置 x_{new} 作为下一次迭代的位置 x_{old} 。否则,摒弃新位置。

Step5:判断此时解是否满足终止条件,即判断求出解是否为所有解中的最优解。如果满足终止条件,跳转到 Step8;否则跳转到 Step6,进行降温操作。

Step6:对当前温度 T_i 进行降温处理。在一般采用的降温操作的函数为:

$$T_{i+1} = \gamma T_i \quad (8)$$

式中, γ 为温度衰减速率,通常选取 $0.7 \leq \gamma \leq 1.0$ 。

考虑到该降温规则中,退火效率低下^[14]。如果想提高其退火效率,需要对式(8)中 γ 温度衰减率进行修改。在整个退火过程,由于温度大部分时间处在低温阶段,在此情况下,如果选取温度值不合理,会有最优解再次跳出最优解空间的可能性^[15]。为了减少该情况出现,当温度处于低温区域时,此时迭代步数达到 k ,适当采取回温措施,改进后的快速降温公式:

$$T_{i+1} = \begin{cases} \gamma^{\sqrt{t}} T_i, & t < k \\ \gamma^{\sqrt{(t-T_k)/\mu}} T_i, & t \geq k \end{cases} \quad (9)$$

式中, μ 为回温因子; μ 与 T_{i+1} 与成反比关系 ($0 < \mu < 1$); T_k 为迭代步数为 k 时的温度值。

Step7:当温度发生一次迭代时,同时更新粒子当前的个体最优解 P_i 和全局最优解 g_{best} ,并替换式(5)中 P_i^{old} 和 g_{best}^{old} ,此时跳转到 Step3。

Step8:输出粒子群中最优解,结束算法。

算法的流程图如图1所示。

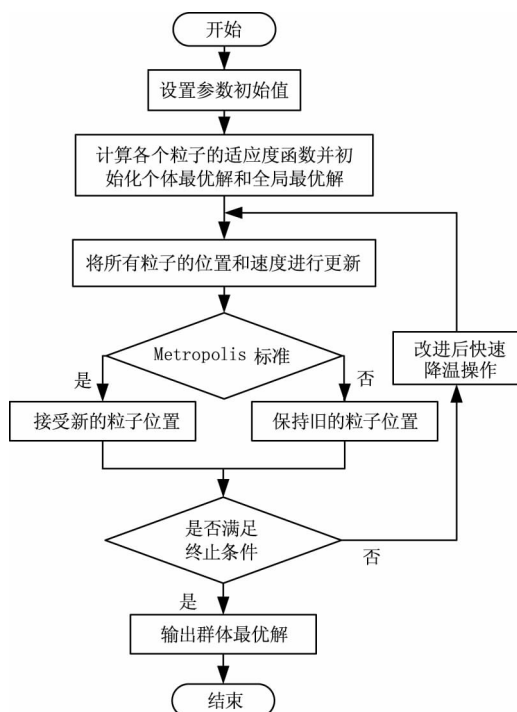


图1 程序流程图

Fig.1 The procedure flow chart

4 数值仿真

本次数值结果都是在给定的假设条件下,通过 Matlab 软件仿真得出。此时仿真分别对单个光谱重叠和多个光谱重叠进行仿真分析。

4.1 单个光谱重叠仿真结果

在单个光谱重叠仿真中,假设光纤传感系统中 3 个 FBG 的中心波长分别取 $\lambda_{B1} = 1527.2 \text{ nm}$, $\lambda_{B2} = 1527.6 \text{ nm}$, $\lambda_{B3} = 1528.0 \text{ nm}$ 。此时,3 个 FBG 的反射率分别假设为 $R_1 = 1, R_2 = 0.8, R_3 = 0.5$ 。为了使仿真能够理论上实现一个 FBG 的光谱与另外一个 FBG 的光谱由部分重叠到完全重叠的过程,需要将每次仿真的 FBG₁ 的中心波长 λ_{B1} 增加 0.2 nm ,直至增加到 1528.2 nm 。在此过程中,固定 λ_{B2} 和 λ_{B3} 的中心波长值,保证 FBG₁ 的光谱与 FBG₂ 或 FBG₃ 的光谱能够两两重叠。

在此次仿真中,将改进模拟退火粒子群算法与基本粒子群算法的仿真结果比较。在两种算法仿真计算的过程中,二者选择相同的参数值。本次仿真选取的参数分别为:初始温度 $T_0 = 100$;粒子个数 $M = 60$;学习因子 $c_1 = 2.05$;学习因子 $c_2 = 2.05$;迭代最大步数 $L = 600$ 。根据上述 FBG₁ 的中心波长改变方式,将两种算法进行 6 次运算,得出各个 FBG 的中心波长的仿真结果见表 1 和表 2。

表1 利用改进算法仿真出中心波长值

Tab.1 The improved algorithm simulate the center wavelength value

Num	λ_{B1} / nm	λ_{B2} / nm	λ_{B3} / nm
1	1527.1952	1527.6048	1527.9950
2	1527.3985	1527.6034	1528.0045
3	1527.5950	1527.6051	1527.9995
4	1527.7955	1527.6023	1528.0022
5	1527.9957	1527.6031	1528.0042
6	1528.1987	1527.5995	1528.0019

表2 基本粒子群法仿真出中心波长值

Tab.2 The particle swarm method simulates the central wavelength value

Num	λ_{B1} / nm	λ_{B2} / nm	λ_{B3} / nm
1	1527.1818	1527.6392	1527.9790
2	1527.3795	1527.6328	1528.0181
3	1527.5748	1527.6269	1528.0197
4	1527.7679	1527.6222	1528.0165
5	1527.9795	1527.6297	1528.0195
6	1528.2138	1527.5851	1527.9784

根据表1、表2中仿真结果可得,当FBG₁的光谱与FBG₂和FBG₃的光谱发生部分重叠和完全重叠时,改进模拟退火粒子群算法和基本粒子群算法都能识别出重叠的中心波长。但是两个算法的识别精度有所区别,基本粒子群算法的总体误差为 ± 40 pm以内,而改进模拟退火的粒子群算法的最大误差为5.1 pm,最小误差为2.3 pm,其误差总体控制在 ± 5 pm左右,其仿真出的结果明显优于基本粒子群算法。

4.2 多个光谱重叠仿真结果

为了实现多个光谱的重叠仿真,选取4个FBG的光谱进行仿真分析。此时假设,4个FBG的反射率分别取 $R_1 = 1, R_2 = 0.8, R_3 = 0.6, R_4 = 0.4$; FBG的中心波长分别取 $\lambda_{B1} = 1532.0$ nm, $\lambda_{B2} = 1532.4$ nm, $\lambda_{B3} = 1532.7$ nm, $\lambda_{B4} = 1533.0$ nm。改变FBG波长的假设值,实现FBG的多个光谱发生重叠,本仿真分为如下2种情况:

1) 3个光谱重叠: $\lambda_{B1} = 1532.7$ nm, $\lambda_{B2} = 1532.7$ nm, $\lambda_{B3} = 1532.7$ nm, $\lambda_{B4} = 1533.0$ nm

2) 4个光谱重叠: $\lambda_{B1} = 1533.0$ nm, $\lambda_{B2} = 1533.0$ nm, $\lambda_{B3} = 1533.0$ nm, $\lambda_{B4} = 1533.0$ nm

针对上述2种情况依次进行仿真。由于光谱重叠的个数发生改变需要将算法的初始参数进行修改,本次仿真只采用改进模拟退火粒子群算法。其中,当3个光谱重叠设置粒子群数为600,当4个光谱重叠设置粒子群数为900;并且两个情况的退火初温设为200,最大迭代步数为5000。仿真出2种情况的光谱叠加的中心波长误差结果见表3。

表3 FBG中心波长误差值

Tab. 3 The FBG center wavelength error value

Num	$ \delta_{B1} /\text{pm}$	$ \delta_{B2} /\text{pm}$	$ \delta_{B3} /\text{pm}$	$ \delta_{B4} /\text{pm}$
1	10.5	8.1	6.2	7.1
2	4.8	9.0	3.1	5.2

根据表3中的数据结果,当多个光谱发生重叠时,改进模拟退火的粒子群算法仍然能够识别出各个FBG的反射光谱的中心波长,并且能够计算出的最大误差为10.5 pm,识别误差可以控制在11 pm以内。但是与单个光谱的重叠仿真相比较,随着光谱重叠的数目增加时,相应的算法中的粒子群数和搜寻次数也需要增加,影响到算法的计算时长,降低了算法的计算效率。并且随着重叠的波长数目增加,其识别出的波长精度也相应的

降低。

5 实验与分析

5.1 实验平台

本次实验平台的结构图如图2所示,ASE宽带光源产生光信号,经过耦合器后进入每条链路中的FBG传感器中,经由FBG反射形成的窄带光传输到光谱仪,最终在光谱仪上形成反射光谱。其中光源使用的是Fiberer公司的C波段ASE宽带光源,其光源特性稳定和光谱范围宽,其主要参数为:最大光功率为100 mW,波长范围600~1700 nm。光谱仪为日本安立光谱分析仪MS9740A,最大输入光功率+23 dBm,波长测试范围为600~1750 nm,波长精度为 ± 20 pm。实验中使用的光纤为上海启鹏工程材料科技有限公司提供,每根光纤只含有一个FBG传感器,其光纤类型为SMF-28,3 dB带宽为0.22 nm,峰值反射率均达到99%,温度量程为 $-40 \sim +120$ °C,对应波长变化幅度约为1.6 nm。

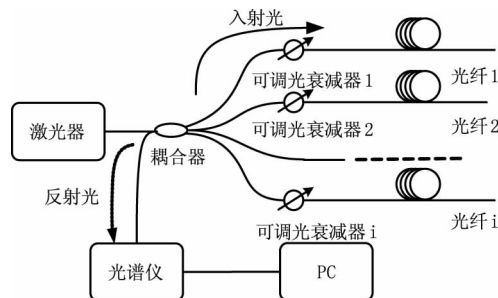


图2 实验平台结构示意图

Fig. 2 Experimental platform structure diagram

5.2 结果分析

依托上述的实验平台,验证所提方法的可行性,需要对三个FBG的光谱波形由分离到重叠的进行光谱分析。在实验开始前,使用光谱仪对每个FBG的光谱进行记录,以便构成式(3)的重构光谱。此时,测得三个FBG的波长分别为:1549.75 nm、1549.95 nm、1550.12 nm;记录每个FBG的光谱如图4所示。此时调节相应的衰减器,将 R_i 的值设约为0.8,1,0.9,在室温(24.6 °C)下,测得三个FBG的合成光谱如图3所示。

在整个实验的过程中,将FBG₂和FBG₃置入室温水(24.6 °C);FBG₁置入初始温度为25 °C的恒温箱中。通过对恒温箱温度的改变,使FBG₁的反射谱的形状不发生改变,仅仅使其中心波长产生偏移。在升温过程中,每当升温5 °C时,记录一次合成光谱,总共记录10次。在记录合成光谱时,设置光谱仪的谱宽为5 nm,测量的精

度为 0.5 nm/div。

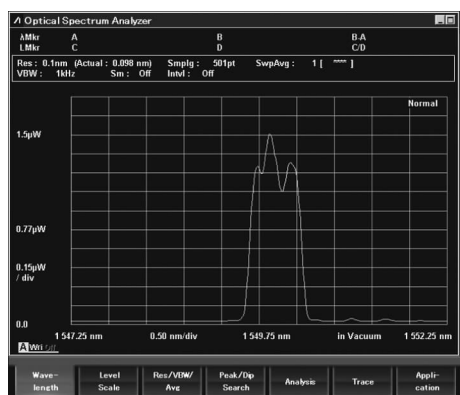


图3 3个FBG合成光谱图

Fig.3 Three FBG synthesis spectra

在采用改进模拟退火的粒子群算法对光谱数据进行计算过程中,取初始温度为100,粒子数为200,最大迭代步数为1000,在对每个温度下的FBG波长识别计算20次,并取其计算结果的平均值作为每个温度下三个FBG的波长值,图4为不同温度下3个光栅的解调结果。根据计算结果,在整个光谱由分离到重叠过程中,其解调后波长误差变化波动幅度不大,其中最大误差为4.8 pm,最小误差为1.2 pm,计算出三个FBG波长误差的平均标准差为: $\sigma_1 = 3.6$ pm, $\sigma_2 = 2.8$ pm, $\sigma_3 = 3.8$ pm。将得出的波长值进一步转化为相应的温度值,其转换后温度误差在0.5℃以内。考虑到光谱仪的精度为0.01 nm,其对应的测量温度为1℃,因此本次实验结果是可以接受的。

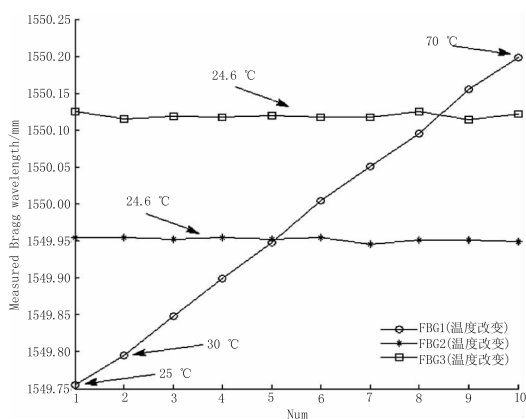


图4 不同温度下3个光栅的解调结果

Fig.4 Demodulation results of three gratings at different temperatures

6 结束语

本研究实现对模糊退火粒子群算法的改进,并将其应用于FBG的光谱复用的问题上,实现对FBG

光谱重叠的波长解析。通过对算法进行仿真,验证其可行性和精准性。在对单个光谱重叠仿真试验中,将改进的模糊退火粒子群算法与基本粒子群算法的结果进行比较,证明改进后的模糊退火粒子群算法精度明显优于基本粒子群算法。在对多个光谱重叠仿真试验中,改进后的模糊退火—粒子群算法能够对各个FBG的中心波长的计算误差控制在 ± 10 pm左右,但是随着重叠FBG数目增加,使得算法的计算误差有所增加。通过实验显示,利用本研究的算法,能够在三个FBG光谱重叠的情况下,识别出各个光栅的波长,实验的结果与理论基本相吻合。

参考文献:

- [1] Ricchiuti A L, Barrera D, Nonaka K, et al. Temperature gradient sensor based on a long-fiber Bragg grating and time-frequency analysis [J]. Optics Letters, 2014, 39 (19): 5729–31.
- [2] Liang R, Jia Z G, Ho M S C, et al. Application of fiber Bragg grating based strain sensor in pipeline vortex-induced vibration measurement [J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(9): 1714–1720.
- [3] LIU Chuntong, LI Hongcai, ZHAO Bin, et al. Research on application of fiber Bragg grating in large scale equipments' strain detection [J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (10): 1091–1094. (in Chinese)
刘春桐, 李洪才, 赵兵, 等. 大型装备应变检测中光纤Bragg光栅的应用研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (10): 1091–1094.
- [4] WEI Yahui, ZHANG Minjuan, LI Xiao. Fiber temperature sensor based on bent loss [J]. Laser & Infrared, 2014, 44 (5): 549–553. (in Chinese)
魏亚辉, 张敏娟, 李晓. 基于弯曲损耗的光纤环路温度传感器 [J]. 激光与红外, 2014, 44(5): 549–553.
- [5] WANG Guina, ZENG Jie, MU Hao, et al. Optimization of fiber Bragg grating sensor network [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(1): 66–69. (in Chinese)
王桂娜, 曾捷, 穆昊, 等. 光纤光栅传感网络的优化研究 [J]. 激光与红外, 2015, 45(1): 66–69.
- [6] Wu W, Liu X. The application of improved genetic algorithm in fiber bragg grating (FBG) sensor network [C]// International Conference on Genetic and Evolutionary Computing. IEEE, 2008: 3–6.
- [7] Wang Y B, Fan X Y, Zhang L L, et al. The application of

- genetic and simulated annealing algorithm in FBG sensor network[C]//International Conference on Wireless Communications, NETWORKING and Mobile Computing. IEEE,2008:1-4.
- [8] Liu D, Tang K, Yang Z, et al. A fiber bragg grating sensor network using an improved differential evolution algorithm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(19): 1385-1387.
- [9] KANG Shouqiang, JU Hongbin, YANG Guangxue, et al. Demodulation technique of FBG multiplexed sensing based on wave length division multiplexing and spectral shape multiplexing[J]. Journal of optoelectronics · Laser, 2009, (4): 45-48. (in Chinese)
康守强, 巨红兵, 杨广学, 等. 波分复用加光栅光谱形状复用的 FBG 传感解调技术[J]. 光电子 · 激光, 2009, (4): 45-48.
- [10] Li Y, Xie Y, Yao G. Comparison of Peak Searching Algorithms for Wavelength Demodulation in Fiber Bragg Grating Sensors[J]. ICIECS, 2010: 1-4.
- [11] Xu M G, Geiger H, Dakin J P. Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(3): 391-396.
- [12] ZHAO Xuezheng, LI Pingchuan. Tabu search algorithm used to enhance the multiplexing capacity of FBG sensing system[J]. Journal of optoelectronics · Laser, 2011, (6): 849-852. (in Chinese)
赵学增, 李平川. 利用禁忌搜索算法提高 FBG 传感系统复用能力的研究[J]. 光电子 · 激光, 2011, (6): 849-852.
- [13] YU Yin, LI Yongshen, YU Xiaochun. Application of particle swarm optimization in the engineering optimization design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 226-231. (in Chinese)
于颖, 李永生, 於孝春. 粒子群算法在工程优化设计中的应用[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 226-231.
- [14] CHEN Huagen, LI Jiaxiao, WU Jianshen, et al. Study on simulated-annealing MT-gravity joint inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 663-670. (in Chinese)
陈华根, 李嘉斌, 吴健生, 等. MT-重力模拟退火联合反演研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 663-670.
- [15] WU Yile, HE Qin. WSN path optimization algorithm based on improved genetic simulated annealing algorithm[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(10): 2959-2962. (in Chinese)
吴意乐, 何庆. 基于改进遗传模拟退火算法的 WSN 路径优化算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(10): 2959-2962.