

基于小波变换的重叠光纤布拉格光栅信号峰值定位

李志斌, 黄启韬, 刘畅, 熊杰

上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090

摘要 峰值定位在处理光纤布拉格光栅(FBG)反射信号的过程中至关重要。针对 FBG 反射信号的特点,为了解决峰值定位过程中峰值重叠的问题,提出一种适用于 FBG 反射信号的寻峰方法。采用基于连续小波变换的脊线寻峰算法,研究了连续小波变换中小波系数与 FBG 反射信号的对应关系,将脊线寻峰算法进行了改进并运用于峰值重叠 FBG 反射信号的峰值定位。实验结果表明,改进的小波脊线寻峰算法可以有效解决 FBG 反射信号的波峰重叠问题,减小了寻峰误差,提高了峰值定位的精确度。

关键词 光纤光学; 连续小波变换; 脊线寻峰算法; 光纤布拉格光栅; 峰值定位

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100604

Wavelet Transform Based Peak Localization of Overlapped Fiber Bragg Grating Signal

Li Zhibin, Huang Qitao, Liu Chang, Xiong Jie

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

Abstract Peak localization is a critical step in processing fiber Bragg grating (FBG) reflected signal. Aiming at the feature of FBG reflected signal, we propose a peak detecting algorithm applied to FBG reflected signal to solve the peak overlapping problem in peak localization. According to the ridge peak detecting algorithm based on continuous wavelet transform, the correspondence between wavelet coefficients and FBG reflected signals is analyzed, and the ridge peak detecting algorithm is improved to find the peak of overlapped FBG reflected signal. The experimental result shows that the improved wavelet ridge peak detecting algorithm can effectively solve the peak overlapping problem of FBG reflected signal. Through this algorithm, the error of peak detecting can be reduced, and the accuracy of peak localization can be improved.

Key words fiber optics; continuous wavelet transform; ridge peak detecting algorithm; fiber Bragg gratings; peak localization

OCIS codes 060.3735; 070.6020; 120.1880

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器凭借其在严酷环境下优越的可靠性、较高的精度与灵敏度以及对电磁干扰免疫等优点,普遍应用于电力、建筑、化工等领域^[1]。FBG传感器通过检测外界环境变化引起的布拉格中心波长偏移来实现对待测环境参量的测量^[2]。在实际工程应用中,除传感器本身特性之外,FBG传感器的检测精度主要由传感系统解调能力决定。FBG传感解调系统的分辨能力是判断系统好坏的标准,而高精度的峰值定位算法是保证系统达到这一标准的关键^[3]。因此,需要寻找一种高精度的峰值定位算法使系统达到较高的峰值识别能力。常用的峰值定位算法有直接比较法、多项式拟合法及高斯曲线拟合法,其中直

收稿日期: 2017-04-11; 收到修改稿日期: 2017-05-17

基金项目: 上海市电站自动化技术重点实验室项目(13DZ2273800)

作者简介: 李志斌(1974—),男,博士,教授,主要从事全息技术、光学检测、传感技术方面的研究。

E-mail: thermal_li@163.com

接比较法对背景信息敏感,计算复杂度低,抗噪性能差,只适合寻找孤立峰值,不适用于复杂的信号寻峰^[4];多项式拟合法需要对采集数据进行多项式变换,对信号波形要求严格,随着信号波形逐渐偏离标准二次型的形状,峰值定位误差变大,寻峰自适应能力较差^[5];高斯曲线拟合法虽然具有高精度的寻峰效果,但不适用于整个信号的自动寻峰^[6]。

近年来,基于连续小波变换(CWT)的峰值定位算法已经逐渐成为峰值识别领域的研究热点,该方法不仅能降低噪声对信号峰值定位的干扰,还具有较高的峰值检测精度^[7]。Du等^[8]将连续小波变换应用于质谱数据的峰值识别,并提出了脊线寻峰算法。本文在脊线寻峰算法的基础上,选择适当的小波母函数,在给定的尺度内对具有峰值重叠的FBG反射信号进行连续小波变换,并将得到的小波系数矩阵进行奇异值分解处理,使信号峰值定位精度得到提高。

2 连续小波变换原理

连续小波变换是分析信号时频特征的重要工具之一。连续小波变换能够将信号表示为由小波基函数演变而来的各小波函数的叠加,与傅里叶变换相似。而不同于傅里叶变换,连续小波变换有利于分析信号的瞬时时变部分,能自适应地从信号中提取特征信息,并可以通过相应运算对信号进行多尺度分析^[9-10]。连续小波变换表达式为

$$f_{\text{CWT}}(a, \tau) = \langle f(t), \psi_{a,\tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt, \quad (1)$$

式中 $f_{\text{CWT}}(a, \tau)$ 为小波变换系数, $f(t)$ 为信号, $\psi_{a,\tau}(t)$ 为小波母函数, a 为尺度参数, τ 为平移参数。通过选择 a_1, a_2, \dots, a_m 这 m 个不同的尺度参数,将 $f(t)$ 进行连续小波变换,得到 $m \times n$ 阶小波系数矩阵 f_{CWT} , 其中 m 为尺度参数个数, n 为信号长度。连续小波变换本质为 $f(t)$ 与 $\psi_{a,\tau}(t)$ 的内积, f_{CWT} 中的元素 $f_{\text{CWT}}(i, j)$ 表征了不同位置与尺度下小波母函数与信号之间的相似性,其中 i 为尺度, j 为信号时间域上的点数。 f_{CWT} 的每行代表不同尺度下小波母函数与信号的相关程度,根据两者之间的关系,每行小波系数峰值与信号峰值相对位置不变。因此,对信号时域寻峰问题由连续小波变换转变为在小波域内寻找小波系数的极值问题。

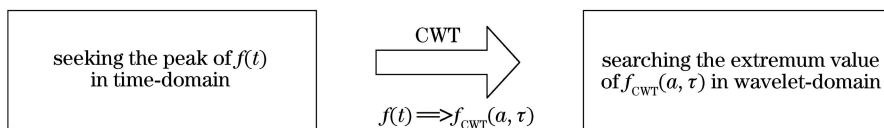


图1 CWT 峰值定位原理

Fig. 1 Peak localization principle of CWT

对信号进行连续小波变换之前,首先要选择适当的小波母函数 $\psi_{a,\tau}(t)$ 。对称性、正则性、紧支性以及信号 $f(t)$ 的相似程度是选取 $\psi_{a,\tau}(t)$ 的主要考虑因素^[11-13]。选择具有对称性的小波母函数,可以避免信号在重构过程中失真;具有紧支性与正则性的小波母函数在时-频域有较好的局部特性。另外,小波母函数的选择要求其波形与被处理信号 $f(t)$ 的波形相似,两者较高的相似度有利于信号的重构。因此,对于FBG反射信号,选择墨西哥帽函数(mexh)作为小波母函数 $\psi_{a,\tau}(t)$,该函数能满足上述要求,其表达式为

$$\psi_{a,\tau}(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\pi^{-1/4}\right) (1-x^2) \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), \quad x = \frac{t-\tau}{a}. \quad (2)$$

3 脊线寻峰算法及其改进

3.1 小波脊线理论

对信号进行连续小波变换可以得到信号在各个时间和各个尺度下的小波系数,小波系数表征了信号在时域和频域内的重要信息。小波脊线是将每一尺度下小波系数模极大值相连而形成的曲线,在其低尺度的位置通常代表信号奇异点或突变点在信号中的位置,突变点的特征通常包含了信号中的重要信息。根据小

波脊线上的信息可以反演出信号中包含的重要成分,提取信号的特征,实现对信号的重构^[14]。

3.2 脊线提取算法

在时频平面对小波脊线进行提取即在时域对信号细节特征进行分析,不同的脊线提取算法对信号的分析程度不同。常用的脊线提取算法可以分为三类,分别为基于相位信息、基于模值信息和基于图像分割的脊线提取算法^[15]。将基于模值信息的脊线提取算法应用于 FBG 反射信号寻峰。

基于模值信息的脊线提取算法的具体步骤如下:

1) 对峰值重叠的 FBG 反射信号进行连续小波变换,得到 f_{CWT} ;

2) 求得 f_{CWT} 中各行的极大值,记下每个极大值在 f_{CWT} 中对应的时间(列)和尺度(行),极大值的计算公式为

$$\begin{cases} f_{\text{CWT}}(i, j) \geq f_{\text{CWT}}(i, j - 2) \\ f_{\text{CWT}}(i, j) \geq f_{\text{CWT}}(i, j - 1) \\ f_{\text{CWT}}(i, j) \geq f_{\text{CWT}}(i, j + 1) \\ f_{\text{CWT}}(i, j) \geq f_{\text{CWT}}(i, j + 2) \end{cases}; \quad (3)$$

3) 若在某一位置(列),小波系数行极大值在 3 个尺度连续,将这 3 个极大值的连线视为一条脊线;

4) 记录每条脊线的位置以及脊线上极大值点的最大尺度参数。

3.3 利用矩阵奇异值分解原理进行寻峰算法改进

上述脊线提取算法通过对小波系数矩阵的一系列处理,可以初步提取出能够表征信号特征的脊线,但当信号中噪声较强时,会产生一些局部极大值点,从而对脊线提取与峰值的定位产生干扰。另外,由于对信号进行连续小波变换时,平移参数需要遍历整个信号长度,其边缘效应会导致小波系数的起始与结束部分存在一定误差,导致产生非峰值的极大值点。因此,采用矩阵奇异值分解(SVD)原理对小波系数矩阵 f_{CWT} 进行预处理。

对矩阵进行奇异值分解有利于提取矩阵的特征值^[16]。对于秩为 r 的 $m \times n$ 阶矩阵 \mathbf{A} ,对其进行奇异值分解,可表示为

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^*, \quad (4)$$

式中 \mathbf{U} 与 \mathbf{V} 分别为 $m \times m$ 和 $n \times n$ 阶正交矩阵, $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r, 0, \dots, 0)$ 为 $m \times n$ 阶对角矩阵。 $\mathbf{\Sigma}$ 的对角元素 σ_i 为 \mathbf{A} 的奇异值,且有 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq 0$, (4)式还可写为

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^* = \sum_{i=1}^r \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^*, \quad (5)$$

式中 \mathbf{u}_i 和 \mathbf{v}_i 分别为 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 的第 i 列奇异值向量。由于奇异值按数值从大到小依次排列,因此前几个特征值对应部分最能表现矩阵 \mathbf{A} 的特征,对重构矩阵 \mathbf{A} 的作用最大。

将矩阵奇异值分解用于小波系数矩阵 f_{CWT} 的预处理,取前 3 个特征值对 f_{CWT} 进行重构得到 f'_{CWT} ,即

$$f'_{\text{CWT}} = \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1^* + \sigma_2 \mathbf{u}_2 \mathbf{v}_2^* + \sigma_3 \mathbf{u}_3 \mathbf{v}_3^*, \quad (6)$$

提取小波系数中对应信号波峰部分的有效信息,可以有效剔除其中的伪局部极大值点,并消除信号中的低频噪声。

所采用的寻峰算法流程如图 2 所示,通过采集卡得到 FBG 反射信号(有峰值重叠现象),导入 Matlab 中进行连续小波变换,得到小波系数矩阵 f_{CWT} ;对 f_{CWT} 进行奇异值分解,重构后得到能体现信号峰值信息的矩阵 f'_{CWT} ;提取矩阵 f'_{CWT} 的脊线,设置阈值,剔除能量过小或信噪比过低的脊线;找到 FBG 反射信号波峰个数与峰值位置。

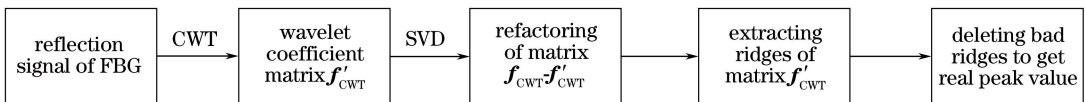


图 2 改进寻峰算法流程

Fig. 2 Process of improved peak detecting algorithm

4 实验与讨论

4.1 实验平台

实验平台如图 3 所示,放大自发辐射 (ASE) 宽带光源产生出射光,光经过 2×2 耦合器后进入 3 个串联的传感 FBG 中,经由 3 个传感 FBG 反射形成的窄带光到达 FFP-TF,同时信号发生器产生锯齿波扫描电压,FFP-TF 在扫描电压的作用下的透射中心波长在给定周期内来回扫描。外界环境温度变化使传感 FBG 中心波长由 λ_0 变为 λ' ,且 FFP-TF 扫描到此波长时,光电探测器 (PD) 检测到最大光强值^[17]。采集卡得到信号波长-能量数据,将数据上传至控制系统进行后续信号分析。ASE 宽带光源参数:最大峰值能量为 100 mW,波长范围为 600~700 nm。 2×2 耦合器参数:工作波长为 1550 nm,带宽为 ± 15 nm。光纤法布里-珀罗(F-P)可调谐滤波器参数:自由光谱范围 F_{sr} 为 97.5 nm,覆盖波段为 1520~1620 nm,每个自由光谱范围对应的调谐电压为 18 V。PD 参数:波长范围为 700~1800 nm,带宽为 17 MHz。传感 FBG 参数(3 个传感 FBG 参数相同):常温下 (25 °C) 中心波长为 1550 nm,量程为 0~100 °C。

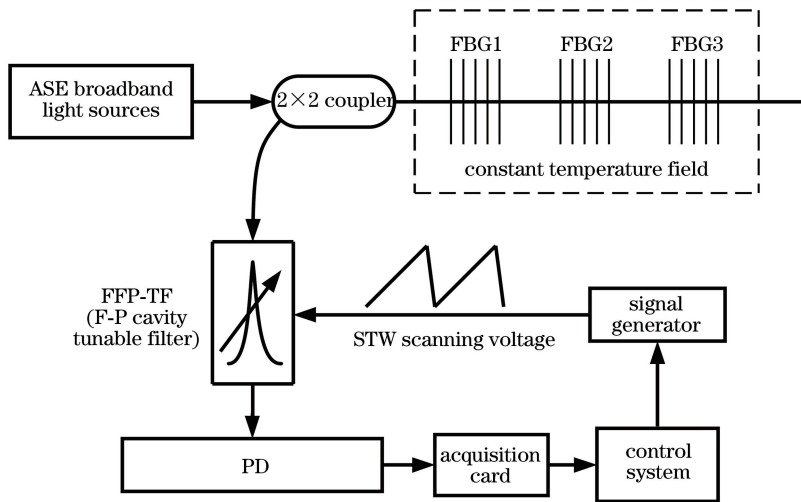


图 3 实验平台

Fig. 3 Experiment platform

4.2 寻峰实验

在上述实验平台下,将 3 个串接的传感 FBG (FBG1、FBG2、FBG3) 分别放置于温度为 10, 30, 50 °C 的恒温场中,得到产生峰值重叠现象的 FBG 反射信号波形,用采集卡采集得到波形数据。在 Matlab 平台中,使用本文提出的峰值定位算法对 FBG 的反射波长-能量信号进行峰值识别。选择波长范围为 1549~1551 nm,共计 2000 个采样点,相应的反射信号波形如图 4(a) 所示,图 4(b) 为使用本文算法获得的峰值信息。

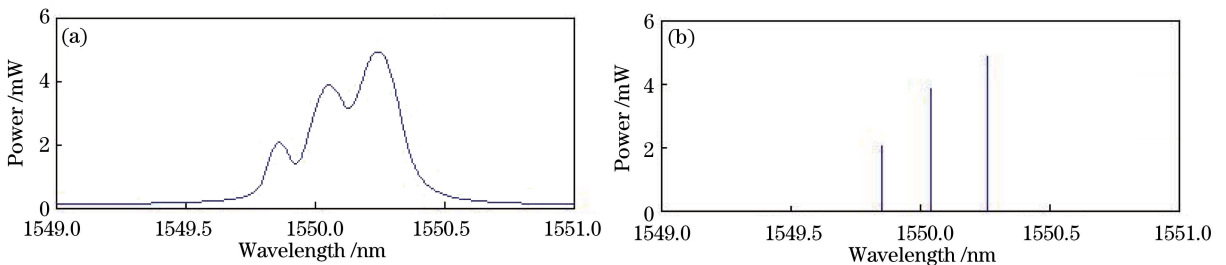


图 4 (a) FBG 反射信号波形; (b) FBG 反射信号峰值

Fig. 4 (a) Waveform of FBG reflected signal; (b) peaks of FBG reflected signal

表 1 为通过算法实测得到的峰值位置与实际峰值位置数据的比较,其中实际峰值位置为 FBG 在 10, 30, 50 °C 温度时的标定数据。将图 4 与表 1 中的数据进行对比分析,可得算法实测峰值位置与实际峰值位置误差较小(均在 ± 0.01 nm 以下),寻峰准确率较高,说明该算法能在 FBG 信号发生波峰重叠时准确找到信号波峰的位置。

表 1 峰值位置数据
Table 1 Results of peak positions

No.	Measured peak /nm	True peak /nm	Error of position /nm	Error of temperature /°C
1	1549.856	1549.859	-0.003	-0.127
2	1550.043	1550.049	-0.006	-0.254
3	1550.260	1550.252	0.008	0.338

4.3 算法对比

选取 mexh 函数作为小波母函数,尺度参数依次取 1 至 32(间隔为 1),对 FBG 反射信号进行连续小波变换,应用原始脊线提取算法(不对小波系数矩阵进行处理)与改进后的算法(对小波系数矩阵进行奇异值分解)提取小波脊线,得到各个尺度下信号的极值(连线即为脊线),并将得到的各极值在波长-尺度平面内描点,如图 5 所示。原始脊线提取算法受噪声干扰较严重,在高频区分辨率较差,不能有效分辨信号的峰值信息,并且易受局部伪极大值的影响,无法准确地提取出脊线,难以达到精确的峰值定位,如图 5(a)所示。

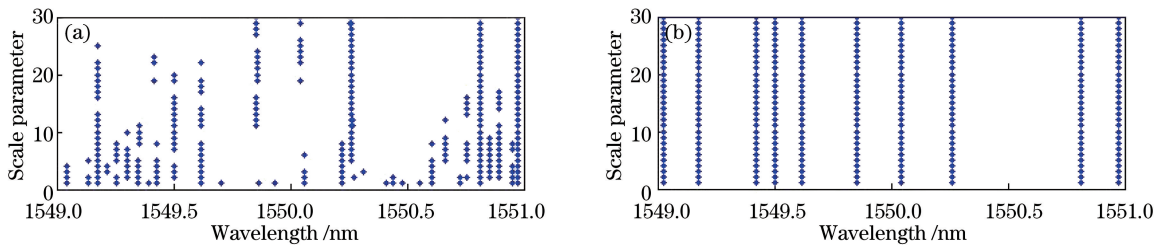


图 5 (a)原始算法提取的脊线;(b)改进算法提取的脊线

Fig. 5 (a) Ridges extracted by original algorithm; (b) ridges extracted by improved algorithm

改进算法有效地降低了噪声干扰影响,小波脊线在不同尺度的连续性较好,且频域集中性较高,这种基于矩阵奇异值分解的算法能有效地提取出不同频域(尺度)下连续、集中的小波脊线,如图 5(b)所示。虽然除 3 条表征信号峰值的脊线外,还存在 7 条由伪极大值形成的脊线,但在原信号中,这 7 个位置对应的信号幅值、能量过小,并不能表征峰值位置,因此将这 7 条脊线剔除,剩下的 3 个位置即为信号峰值位置,如图 4(b)所示。由此可见,本文所述改进算法不仅能够有效减小信号中噪声造成的干扰,还提高了小波脊线在频域的聚集性,所提取的脊线能准确表征信号的峰值信息。

5 结 论

提出了一种基于连续小波变换的峰值定位方法,通过对小波系数矩阵的奇异值分解对小波脊线提取算法进行改进,实现了对重叠 FBG 反射信号的峰值定位,解决了信号峰值重叠情况下的寻峰问题。实验表明,采用奇异值分解的脊线提取算法可以有效提高小波脊线的聚集性,降低信号中噪声产生的干扰。该方法寻峰准确度较高,峰值误差在 ± 0.01 nm 以内,对应的温度测量误差在 ± 0.5 °C 以内,同时具备了在信号波峰重叠情况下较强的重峰分辨能力。

参 考 文 献

- [1] Chen Zhijun, Bai Jian, Wu Zutang, *et al.* Optimization and comparison of the peak-detection algorithms for the reflection spectrum of fiber Bragg grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(11): 1112001.
陈志军, 白剑, 吴祖堂, 等. 光纤布拉格光栅反射谱寻峰算法优化及比较[J]. 光子学报, 2015, 44(11): 1112001.
- [2] Xu Changming. Research of fiber grating sensor demodulation system based on tunable F-P filter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
徐常明. 基于可调谐 F-P 滤波器的光纤光栅传感解调系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [3] Hu Zhengwen, Pang Chengxin, Cheng Fengyu. Research on the application of Gaussian-LM algorithm in FBG reflection spectrum search peak[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 013001.
胡正文, 庞成鑫, 程冯宇. LM 算法在 FBG 反射光谱寻峰中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1):

- 013001.
- [4] Chen Yong, Yang Kai, Liu Huanlin. A self-adaptive peak detection algorithm to process multi-peak fiber Bragg grating sensing signal[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805008.
陈勇, 杨凯, 刘焕淋. 多峰光纤布拉格光栅传感信号的自适应寻峰处理[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805008.
- [5] Yu Youlong, Wang Xuewei, Wang Hao. Analysis of peak-detection algorithms in fiber Bragg grating by different sampling methods[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(11): 1274-1278.
余有龙, 王雪微, 王浩. 不同采样方式下光纤布拉格光栅反射谱寻峰算法的分析[J]. 光子学报, 2012, 41(11): 1274-1278.
- [6] Zhu Haohan, Qin Haikun, Zhang Min, *et al.* Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(6): 893-897.
朱浩瀚, 秦海琨, 张敏, 等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 893-897.
- [7] Chen Pengfei, Tian Di, Qiao Shujun, *et al.* An automatic peak detection method for LIBS spectrum based on continuous wavelet transform[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1969-1972.
陈鹏飞, 田地, 乔淑君, 等. 一种基于连续小波变换的 LIBS 光谱自动寻峰方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1969-1972.
- [8] Du P, Kibbe W A, Lin S M. Improved peak detection in mass spectrum by incorporating continuous wavelet transform-based pattern matching[J]. Bioinformatics, 2006, 22(17): 2059-2065.
- [9] Liu Nian. Feature recognition of mass spectrometry data based on continuous wavelet transform[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2016.
刘念. 基于连续小波变换的质谱数据特征识别[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2016.
- [10] Farkov Y A, Rodionov E A. On biorthogonal discrete wavelet bases[J]. International Journal of Wavelets Multiresolution & Information Processing, 2015, 13(1): 1550002.
- [11] Chen Zexin. The selection of wavelet base in malfunction diagnosis[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(2): 172-175.
陈泽鑫. 小波基函数在故障诊断中的最佳选择[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(2): 172-175.
- [12] Li Yu, Wang Shengwei, Lin Zhaopei. Basis selection for the analyzing of overlapping chromatographic peaks in wavelets domain[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2014, 40(6): 752-757.
李钰, 王圣伟, 林兆培. 小波域色谱重叠峰分析的基函数选择[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2014, 40(6): 752-757.
- [13] Xu Jianxiong, Zhao Youqun, Liu Yingjie. Wavelet basis selection for denoising experimental data of steering wheel angle[J]. Mechanical Science and Technology, 2013, 32(6): 809-813.
许健雄, 赵又群, 刘英杰. 汽车方向盘转角试验数据去噪的小波基选择[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(6): 809-813.
- [14] Jiang Yonghua, Tang Baoping, Chen Fafa. Wavelet ridge extraction method based on optimal reassigned wavelet scalogram[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 62-67.
蒋永华, 汤宝平, 陈法法. 应用最优重分配小波尺度谱的小波脊线提取[J]. 振动·测试与诊断, 2012, 32(1): 62-67.
- [15] Chen Yungu. Wavelet ridge-extraction algorithms and applications[D]. Guiyang: Guizhou University, 2010.
陈蕴谷. 小波脊线提取算法及应用研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2010.
- [16] Qiao H L. New SVD based initialization strategy for non-negative matrix factorization[J]. Pattern Recognition Letters, 2015, 63: 71-77.
- [17] Jiang Desheng, Fan Dian, Mei Jiachun. Multiplexing/Demultiplexing technology based on fiber Bragg grating sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(4): 14-19.
姜德生, 范典, 梅加纯. 基于 FBG 传感器的分复用技术[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 14-19.