

# 基于 EMD-LWT 的低浓度石油类污染物 荧光光谱去噪法

杨 哲 王玉田 潘 钊

燕山大学河北省仪器科学与技术重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 石油类污染物是造成雾霾等空气污染问题的重要原因。去噪处理的有效性是石油类污染物荧光光谱检测中的热点问题。提出一种基于经验模态分解-提升小波变换(EMD-LWT)相结合的低浓度石油类污染物荧光光谱去噪方法。经验模态分解法(EMD)可自适应地滤除微弱荧光信号中的噪声,但去噪过程中第一个本征模态函数(IMF)包含的频率范围过宽,影响了去噪准确性和有效性。引入提升小波变换(LWT)对 IMF1 实现更精细的分解,有效分离出 IMF1 的有用信息,改善信噪分离效果。将 EMD-LWT 联用方法和传统的 EMD 或 LWT 去噪法分别运用于煤油荧光光谱检测中,仿真结果表明,与只用 EMD 或 LWT 相比,EMD-LWT 相结合的光谱去噪法得到的信噪比和均方根误差均显著提高,验证了该方法的有效性和可行性。

**关键词** 光谱学;经验模态分解-提升小波变换;去噪;荧光信号;信噪比

**中图分类号** TH744.1;TN911.7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0530001

## Fluorescence Spectrum Denoising Method for Low Concentration Petroleum Pollutants Based on EMD-LWT

Yang Zhe Wang Yutian Pan Zhao

Hebei Provincial Key Laboratory of Measurement Technology and Instrument, Yanshan University,  
Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** The petroleum pollutant is an important factor causing air pollution problems such as haze. The de-noising effectiveness is the focus in petroleum pollutant detection by fluorescence spectroscopy. A fluorescence spectrum de-noising method for low concentration petroleum pollutants combining the empirical model decomposition (EMD) and the lifting wavelet transform (LWT) is proposed. The EMD method can filter the noise in weak fluorescence signal adaptively, but the first intrinsic mode function (IMF) contains a too wide frequency range, and thus the de-noising accuracy and effectiveness is reduced. LWT is introduced to realize more precise decomposition of IMF1, extract more useful information from IMF1, and improve separation effect of signal and noise. The three de-noising methods, EMD-LWT, EMD and LWT, are applied to kerosene fluorescence spectrum detection, respectively. The simulation results show that the EMD-LWT method makes the signal-to-noise ratio, root mean square error significantly improved compared with only EMD or LWT used, verifying the effectiveness and feasibility of the proposed method.

**Key words** spectroscopy; empirical model decomposition-lifting wavelet transform; de-noising; fluorescence signal; signal-to-noise ratio

**OCIS codes** 300.2530; 300.6390; 070.4790

收稿日期: 2015-09-09; 收到修改稿日期: 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61471312)、河北省自然科学基金(F2015203240, F2015203072)

作者简介: 杨 哲(1989-),女,博士研究生,主要从事光电检测与光纤传感等方面的研究。

E-mail: zheyang\_her@163.com

导师简介: 王玉田(1952-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电检测、光纤传感、环境仪器等方面的研究。

E-mail: y.t.wang@163.com

# 1 引 言

荧光分析法以其灵敏度高、选择性好、易于设计等优点成为分析化学、污染物质监测等众多领域的重要研究方法<sup>[1-4]</sup>。在荧光监测石油类污染物含量过程中,因为被测矿物油含量很低,发出的微弱荧光信号淹没在来自光电转化仪器和外界环境的噪声中<sup>[5]</sup>。所以,从检测信号中提取有用的微弱荧光信号,实现信噪分离一直是矿物油荧光光谱检测中的热点问题。如何改善消噪处理的高效性成为制约荧光法应用于矿物油浓度监测的关键问题。

经验模态分解法(EMD)是一种针对非线性非平稳信号的自适应分解方法<sup>[6-7]</sup>,在图像处理、机械设备故障诊断等工程领域已有广泛的应用<sup>[8-9]</sup>。经验模态分解法应用于光谱去噪已有一些研究<sup>[10-12]</sup>。EMD基于信号的原始信息放大信号局部特征,可在微弱的信号中自适应地提取有用信号,使信噪分离,实现对微弱信号的分析检测。所以该方法适用于痕量石油类污染物的微弱荧光光谱检测。EMD用瞬时频率将信号分解成有限个不同尺度特征的序列——本征模态函数(IMF)。原始信息被分解成由高频到低频排列的 IMF1、IMF2、…、IMF<sub>n</sub> 和残差项  $\epsilon$ 。但代表信号最高频率的 IMF1 往往含有的频率范围较宽,致使分解不够精细,信噪分离不够准确。基于此,研究引入提升小波变换(LWT)进一步分解 IMF1,实现更精确的信噪分离,提高去噪准确性。

被誉为第二代小波变换的提升小波变换具有传统小波变换的多分辨率特征,其突出优点是在时域进行变换、结构简单且运算速度快。Daubechies 已经证明,所有能够使用 Mallat 算法实现的小波变换都可以用提升算法来实现<sup>[13]</sup>。运用提升小波变换对 IMF1 进行分解,既能够更精准地分离出有用信号,又避免了延长以去噪为主要目的的光谱预处理时间。

## 2 经验模态分解方法和提升小波分解方法

### 2.1 经验模态分解算法

EMD 分解的实质是基于信号的局部特征,放大局部关键信息,突出信号的原始特征信息。任何复杂的原始信号都可以经过 EMD 逐层筛选后得到有限个本征模态函数 IMF1、IMF2、…、IMF<sub>n</sub>,依次代表信号由高频到低频的分量,从中可提取代表有用信息分量,去除代表噪声干扰的分量,实现去除噪声的目的。EMD 分解的关键是获得 IMF,而 IMF 需满足两个条件:1)信号极值点和零点的数量差值不大于一个;2)局部最大值的包络线和最小值的包络线均值在任意时刻都为零。获得 IMF 的过程如下:

1) 找出信号  $x(t)$  的局部极大值点和极小值点,并构造对应极大值和极小值的包络线,分别称之为上包络线  $u(t)$  和下包络线  $v(t)$ ;

2) 根据

$$m(t) = [u(t) + v(t)] / 2, \quad (1)$$

得出上下包络线的均值  $m(t)$ ;

3) 根据

$$h(t) = x(t) - m(t), \quad (2)$$

得出  $x(t)$  与  $m(t)$  的差值  $h(t)$ ;

4) 重复步骤 1)~3),直至  $h(t)$  满足终止条件,即两个相邻筛出分量的标准差不小于某预定值。筛分出的 IMF1 分量记为  $c_1(t)$ ,剔除信号  $x(t)$  中这一分量,记为

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t); \quad (3)$$

5) 重复步骤 1)~4),直到  $r_i(t)$  中的极值数目小于 2 为止。最终信号  $x(t)$  记为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t), \quad (4)$$

式中  $r_n(t)$  为代表信号平稳趋势的分量。

由以上步骤可知,整个分解过程就是将  $x(t)$  用高频到低频的分量 IMF1、IMF2、…、IMF<sub>n</sub> 和  $r_n(t)$  来表示,最终通过 IMF 的不同组合实现对信号的不同处理。由于分解出的 IMF1 包含较宽的频率范围,信噪分离不精细,提出用提升小波算法对其进行二次分解。

## 2.2 提升小波变换算法

提升小波变换算法较传统小波变换的主要优点是在时域进行、变换结构简单且运算速度快。提升算法的正向小波变换和逆向小波变换表示如图 1 所示。提升方法将传统小波变换过程分为 3 个阶段：分解、预测和更新，低频分量用 LP 表示，高频分量用 BP 表示。

- 1) 分解。将输入信号  $s_i$  按奇偶性分为  $s_{i-1}$  和  $d_{i-1}$  两个较小的子集， $d_{i-1}$  为奇数序列， $s_{i-1}$  为偶数序列；
- 2) 预测。用偶数序列  $s_{i-1}$  的预测值  $P(s_{i-1})$  去预测奇数序列  $d_{i-1}$ ，预测后

$$d_{i-1} = d_{i-1} - P(s_{i-1}), \quad (5)$$

重复上述分解和预测过程，原信号集  $s_i$  经  $n$  步以后可表示为  $\{s_n, d_n, \dots, s_1, d_1\}$ ；

- 3) 更新。用小波子集  $d_{i-1}$  更新  $s_{i-1}$ ，提升值用  $U(d_{i-1})$  表示，得到

$$s_{i-1} = s_{i-1} + U(d_{i-1}). \quad (6)$$

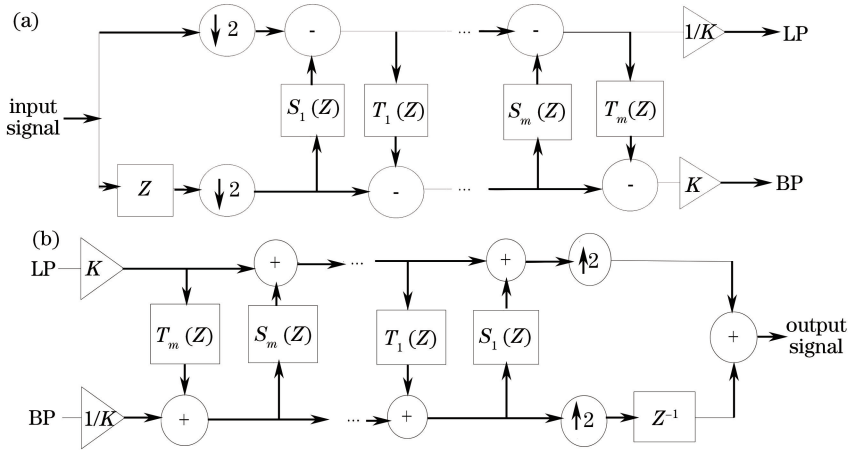


图 1 提升算法的分解和重构。(a) 正向小波分解变换；(b) 逆向小波重构变换

Fig. 1 Decomposition and reconstruction transforms with the lifting scheme. (a) Decomposition transform of forward wavelet; (b) reconstruction transform of inverse wavelet

提升小波算法相比传统小波变换的简单之处在于提升小波的逆变换是正变换的映射，加减运算相交换即可实现。只要提升小波正向变换一经建立，逆变换也随即确定。如图 1(b)所示，提升小波逆向变换同样包括三个步骤，即更新、预测和分解。合并步骤即插值奇序列和偶序列的向量。整个变换过程无需二进伸缩和平移条件，完全摆脱了傅里叶变换，而且实现原位运算，运算量较传统小波变换减少了一半。其步骤如下：

- 1) 对含噪声信号  $x(n)$  做提升算法的离散小波变换，用提升方案构造小波分解和重构滤波器，得到提升变换系数  $W_{T_x}(j, k)$ ；

- 2) 对变换系数  $W_{T_x}(j, k)$  用固定阈值

$$\tau = \sigma \sqrt{2 \ln N}, \quad (7)$$

则噪声估计标准差为

$$\sigma = \frac{1}{0.67 \text{Med}(|d(n)|)}, \quad (8)$$

用软阈值函数进行处理，得到估计提升小波系数；

- 3) 对经阈值处理后的  $W_{T_x}(j, k)$  做提升算法离散小波逆变换，重构得到消噪后的原始信号估计值  $\hat{x}(n)$ 。

## 2.3 实验仪器系统结构

系统选用激发光在 200~700 nm 光谱范围的脉冲氙灯作为激发光源。实验仪器的系统结构如图 2 所示。

脉冲氙灯发出的激发光经滤波器滤光后，在步进电机的带动下，光栅将光线衍射成为波长连续的单色光，从而满足了煤油的激发光光谱特性。样品池中的煤油被入射的单色光激发，发出荧光。荧光耦合后进入光电检测器，单色仪将这一荧光变为单一频率荧光，由光电倍增管(PMT)检测输出电流信号。

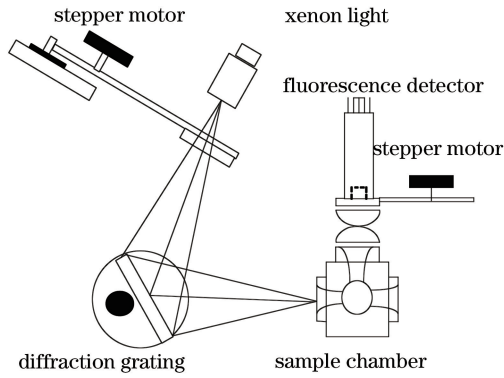


图 2 煤油荧光检测系统

Fig. 2 Kerosene fluorescence detection system

### 3 实验与结果分析

取煤油 0.05 g 加入少量配制的 0.1 mol/L 十二烷基硫酸钠 (SDS) 表面活性剂溶液中, 定容后作为实验样品。

使用波长为 250~400 nm 的激发光, 分别照射配制的煤油 SDS 胶束溶液样品。图 3 所示为煤油的原始荧光光谱。

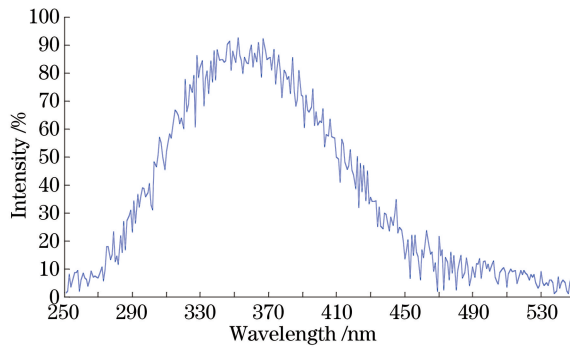


图 3 煤油原始荧光光谱

Fig. 3 Original fluorescence spectrum of kerosene

为了验证提出的经验模态-提升小波变换 (EMD-LWT) 联用法的有效性, 在所用荧光检测系统光谱分辨率为 0.5 nm 的情况下, EMD-LWT 联用法分别与只用 EMD 和 LWT 的方法对比去噪效果。原始荧光光谱经 EMD 变换去噪后的重构光谱如图 4 所示。原始荧光光谱经 LWT 变换去噪后的重构光谱如图 5 所示。用经验模态分解后得到的高低阶分量如图 6 所示。对 EMD 分解后包含高频信息分量的 IMF1 进行二次分

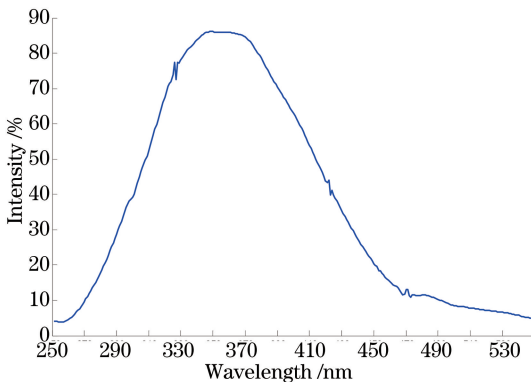


图 4 EMD 去噪后的煤油荧光信号光谱

Fig. 4 Spectrum of kerosene fluorescence signal denoised by EMD

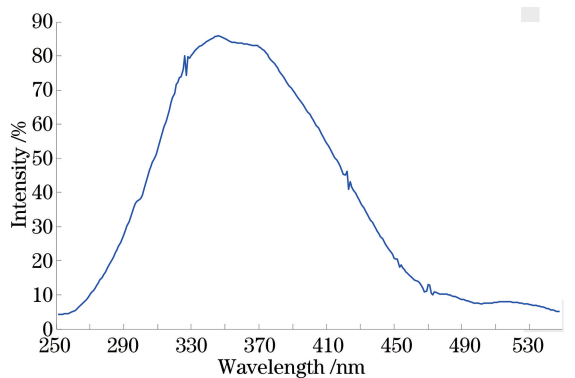


图 5 LWT 去噪后的煤油荧光信号光谱

Fig. 5 Spectrum of kerosene fluorescence signal denoised by LWT

解,EMD-LWT 联用后荧光光谱信号如图 7 所示。采用 LWT 对高频分量 IMF1 进行二次分解后得到的高频分量如图 8 所示。

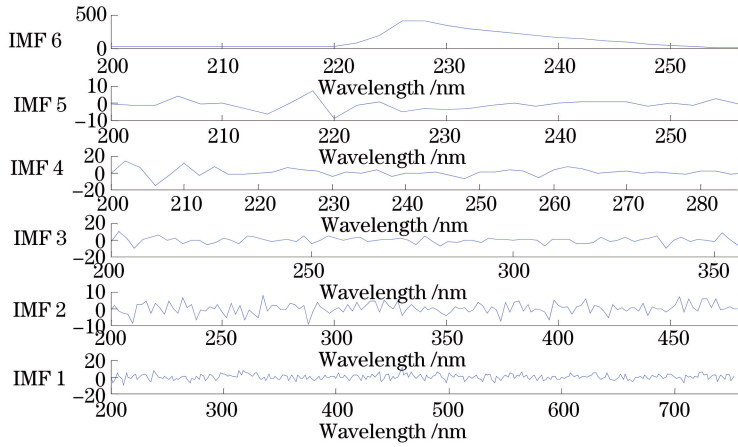


图 6 经验模态方法分解过程

Fig. 6 Decomposition process of EMD method

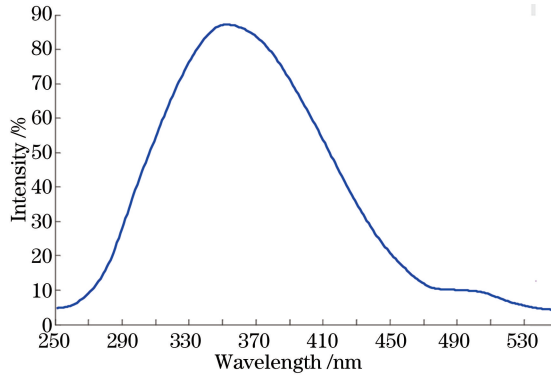


图 7 EMD-LWT 联用去噪后的煤油荧光光谱

Fig. 7 Spectrum of kerosene fluorescence signal denoised by EMD-LWT

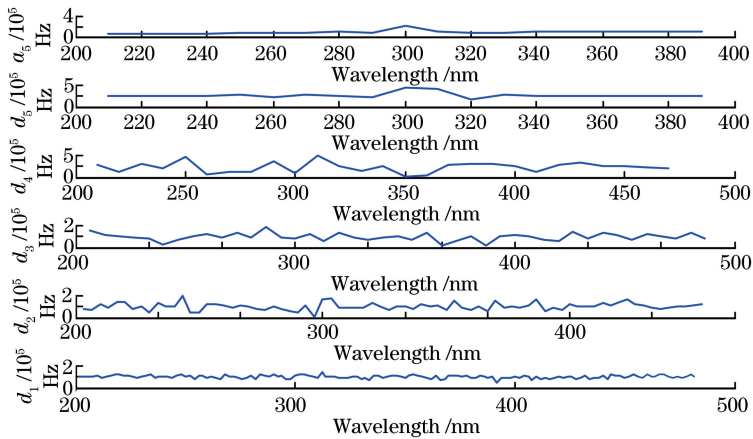


图 8 LWT 分解高频分量 IMF1

Fig. 8 High-frequency component IMF1 decomposed via LWT

## 4 分析与讨论

煤油原始荧光光谱经过经验模态进行第一次分解后,再使用提升小波变换的一系列预测、更新步骤对本征模态函数 IMF1 进行二次分解。经过两次分解后实现对煤油含噪荧光光谱更精确地去噪。由表 1 可以看

出评价去噪效果的信噪比(SNR)、重构均方根误差(MSE)和波形相似度(NCC)都有所提高。

表1 三种不同去噪方法的效果对比  
Table 1 De-noising effect of three methods

De-noising method	Index after de-noising		
	RMSE	SNR	NCC
EMD-LWT	0.00856	70.434	0.99975
EMD	0.01292	68.759	0.99846
LWT	0.01046	69.133	0.99912

## 5 结 论

针对经验模态分解方法过程中本征模态函数 IMF1 包含频率范围过宽,使分解不够精细,不能准确去噪的问题,提出了运用基于提升方案的第二代小波变换对 IMF1 进行进一步分解变换并提取有用信号的方法。将 EMD-LWT 方法用于煤油荧光光谱去噪中,并与单独运用 EMD 和 LWT 的去噪方法相比较。实验表明,由 EMD-LWT 联用法去噪后所得信号的信噪比、重构均方根误差和波形相似度均有所提高,验证了该方法去噪的有效性。

## 参 考 文 献

- Chen J, Li B Q, Cui Y Q, *et al.*. A fast and effective method of quantitative analysis of VB<sub>1</sub>, VB<sub>2</sub> and VB<sub>6</sub> in B-vitamins complex tablets based on three-dimensional fluorescence spectra[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2015, 41: 122-128.
- Fan Y C, Li Y, Cai H X, *et al.*. Three-dimensional fluorescence characteristics of white chrysanthemum flowers[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2014, 130: 411-415.
- Owen D M, Williamson D J, Boelen L, *et al.*. Quantitative analysis of three-dimensional fluorescence localization microscopy data[J]. Biophysical Journal, 2013, 105(2): L05-L07.
- Wu Zhenzhen, Yao Peng, Su Rongguo, *et al.*. Algae chemotaxonomy technology by fluorescence based on alternating trilinear decomposition analysis[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0515003.  
吴珍珍, 姚 鹏, 苏荣国, 等. 基于交替三线性分解的浮游藻荧光识别分析技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0515003.
- Wang Shutao, Li Meimei, Li Pan, *et al.*. Signal processing method based on empirical mode decomposition in the SO<sub>2</sub> concentration monitoring[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 0228002.  
王书涛, 李梅梅, 李 盼, 等. 基于经验模态分解的 SO<sub>2</sub> 浓度检测信号处理方法[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 0228002.
- Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society London A, 1998, 454: 903-995.
- Wu Wenfeng, Chen Xiaohu, Su Xunjia. Blind source separation of single-channel mechanical signal based on empirical mode decomposition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 12-16.  
毋文峰, 陈小虎, 苏勋家. 基于经验模式分解的单通道机械信号盲分离[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 12-16.
- Zheng Suzhen, Cao Yiping. Five steps of unequal step online three-dimensional inspection based on two-dimensional empirical mode decomposition[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208004.  
郑素珍, 曹益平. 基于二维经验模态分解的五步非等步在线三维检测[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208004.
- Yang Yu, Yu Dejie, Cheng Junsheng. Rolling bearing fault diagnosis based on EMD and neural network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(9): 85-88.  
杨 宇, 于德介, 程军胜. 基于 EMD 与神经网络的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2005, 24(1): 85-88.
- Han Qingyang, Sun Qiang, Wang Xiaodong, *et al.*. Application of CEEMDAN in Raman spectroscopy denoising[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 113003.  
韩庆阳, 孙 强, 王晓东, 等. CEEMDAN 去噪在拉曼光谱中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 113003.
- Cui Bingbo, Chen Xiyuan, Song Rui. Application of EMD threshold filtering for fiber optical gyro drift signal de-noising [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0207001.

- 崔冰波, 陈熙源, 宋 锐. EMD 阈值滤波在光纤陀螺漂移信号去噪中的应用[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0207001.
- 12 Wang Huanxue, Liu Jianguo, Zhang Tianshu, *et al.*. An empirical mode decomposition algorithm based on cross validation and its application to lidar return signal de-noising[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1014001.
- 王欢雪, 刘建国, 张天舒, 等. 一种基于交叉证认和经验模态分解的滤波算法及其在激光雷达回波信号降噪处理中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1014001.
- 13 飞思科技. 小波分析理论与 Matlab 7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 3.