

# 小波变换在薄膜表面图像信号降噪中的应用

张伟科<sup>1,2</sup>

(1.沈阳理工大学 理学院, 沈阳 110159; 2.沈阳理工大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110159)

**摘要:** **目的** 当前,以原子力显微镜为代表的扫描探针显微镜设备可以获取纳米尺度薄膜样品的表面图像,但这些图像存在不同程度的噪声,影响图像质量和信息判断。为了更准确获取这些薄膜表面状态,需要对薄膜样品表面图像数据和信息进行降噪处理。**方法** 结合 AFM 等设备成像特点以及小波变换的时频局域性特点,在介绍小波变换基本理论和噪声来源分析基础上,提出了一种多层小波分解去噪算法。传统的信号理论是建立在傅里叶变换基础上的,而傅里叶变换作为一种全局性的变化,其有一定的局限性,无法同时表述信号在时域和频域的局部性质,而这些局部特征恰恰是非平稳信号性质最关键的部分。小波变换保留了窗口傅里叶变换局部化的优点,改变了窗口傅里叶变换窗口函数大小固定的缺点。**结果** 原始图像信号的频率在 0 Hz 到 4000 Hz 都有分布。通过小波变换后,信号波形更光滑,频谱在 500 Hz 到 2000 Hz 之间分布。**结论** 将小波变换应用于薄膜表面图像信号降噪中,通过实验证明通过小波变换可以有效去除信号中的噪声部分。

**关键词:** 小波变换; 信号降噪; 频谱分析

中图分类号: TG115.22; TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)05-0229-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.05.036

## Application of Wavelet Transform in the Signal Noise Reduction of Film Surface Images

ZHANG Wei-ke<sup>1,2</sup>

(1.School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2.School of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**ABSTRACT:** **Objective** The surface images of nano-scale thin film samples can be obtained by the scanning probe microscope device represented by atomic force microscope, but these images have different degrees of noise, which affect the quality of the image and the judgment of image information. In order to obtain the surface state of the film more accurately, noise reduction of the surface image data and information of the sample is needed. **Methods** This paper proposed a multi-layer wavelet decomposition noise reduction algorithm based on the introduction of the basic theory of wavelet transform and the analysis of noise sources by combining the imaging characteristics of equipment such as AFM and the time-frequency locality characteristics of wavelet transform. Fourier transform is the basis of the traditional theory of signal, but it has some limitations as a kind of

收稿日期: 2016-03-23; 修订日期: 2016-04-27

Received: 2016-03-23; Revised: 2016-04-27

基金项目: 辽宁省科学计划计划项目 (2012217005); 辽宁省科学事业公益研究基金 (2012004002)

Fund: Supported by Liaoning Province Science Plan Project (No.2012217005) and Liaoning Province Science Public Research Fund (No.2012004002)

作者简介: 张伟科(1965—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算机视觉、智能检测与控制。

Biography: ZHANG Wei-ke(1965—), Male, Master, Lecturer, Research focus: computer vision, intelligent detection and control.

global change. Fourier transform fails to simultaneously describe the local characteristics of the time domain and the frequency domain, which are the key parts of unstable signal characteristics. The wavelet transform kept the advantage of window Fourier transforms in localization and changed its defect of fixed size. **Results** The frequency of the original image signal was distributed in the range of 0~4000 Hz. After the wavelet transform, the signal waveform was more smooth, and the frequency spectrum was distributed between 500 Hz and 2000 Hz. **Conclusion** The wavelet transform was applied to signal noise reduction of the film surface images, and the experiment proved that the noise could be effectively removed using wavelet transform.

**KEY WORDS:** wavelet transform; signal denoising; spectrum analysis

微纳米尺度科技在最近半个世纪发展迅速,世界各国对微纳米尺度的基础理论和应用研究都投入了大量的财力、物力和人力。其中,微纳米尺度下使用的功能薄膜材料研究颇受关注。这些材料的性能往往与表面形貌状态有着直接关系,因此薄膜形貌表征也成为了备受关注的研究领域。由于薄膜表面形貌变化的复杂性,目前其表面形貌表征缺乏统一标准,描述表面和界面一直是薄膜材料研究的难点。一般来说,人们描述表面往往需要一系列复杂的经验公式,如 Nowicki 就提出了用 32 个参数来表征<sup>[1]</sup>。通常来说,灰度图像可以用来定性地展示粗糙表面的凸凹起伏,图像像素点越亮,表明样品表面对应点的几何位置越高,同样,图像越黑则代表对应点几何位置越低。因此,用二维图像信号表征样品的表面形貌成为了主要方式。

随着微纳米科技的发展,以原子力显微镜为代表的扫描探针显微镜(STP)技术同样发展迅速,目前已被广泛用于从微米到原子尺度物质表面的性质表征和研究。扫描探针显微镜(STP)家族包括扫描隧道显微镜(STM)、原子力显微镜(AFM)、摩擦力显微镜(FFM)、扫描电容显微镜(SCM)、扫描近场光学显微镜(SNOM)、扫描近场超声波显微镜(SNAM)、扫描离子传导显微镜(SICM)、扫描隧道电位计(STP)等,这些探测设备都是以探针和样品表面原子间各种微弱相互作用数据作为基础表征其表面形貌。和其他光学、红外表面分析技术相比,特点和优势明显:1)具有高达原子级的分辨率,可实现单个原子或分子的分辨和操控;2)可快速实时获取样品表面的三维图像,可以观察单个原子层的局部表面结构;3)观测环境要求宽松,可在真空、大气等环境中完成,甚至可以在水或其他溶液中完成,对温度范围要求不高,制样技术低;4)对样品可基本实现无损检测;5)获取的信息丰富,除了可获取表面结构的信息,配合其他技术手段还

可获取表面势垒和能隙结构等<sup>[2]</sup>。

作为微纳米尺度研究的重要工具,以原子力显微镜为代表的扫描探针显微技术在微纳米尺度观察、表征及加工领域应用也越来越广泛。由于一些不可避免因素的影响,以原子力显微镜为代表的扫描探针显微镜获取的薄膜样品表面图像,存在不同程度的噪声,影响成像质量和科技工作者对薄膜表面信息的判断。

为了更准确获取这些薄膜表面状态,需要对薄膜样品表面图像数据和信息进行降噪处理。本文结合 AFM 等设备成像特点以及小波变换的时频局域性特点,在介绍小波变换基本理论和噪声来源分析基础上,提出了一种多层小波分解去噪算法。通过实验证明通过六层分解小波变换,可以有效去除信号中的噪声部分。

## 1 傅里叶变换

法国数学家 Fonrier 提出的傅里叶变换是信号处理中的经典技术。在传统的信号分析方法中,信号往往通过两种形式表示出来,时域形式和频域形式。通过把时间和频率看成是自变量,把信号的某一特征(例如幅值特征)作为因变量来描述信号<sup>[3]</sup>。

傅里叶变换定义为:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-j\omega x} dx \quad (1)$$

傅里叶逆变换为:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega x} d\omega \quad (2)$$

通过式(1)可以看出,傅里叶变换把信号从时间域转化到了频率域,从物理意义上讲,傅里叶变换的实质是把原始信号  $f(x)$  波形通过傅里叶变换的转换,分解成许多不同频率的正弦波的叠加和,这样就把对  $f(x)$  时域波形的研究转化为对其权系数的研究,即对傅里叶  $F(\omega)$  的研究<sup>[4]</sup>。原始信

号  $f(x)$  与它的傅里叶变换  $F(\omega)$  是同一种信号在不同空间表现出的不同形式。时域信号  $f(x)$  隐藏了信号的频谱相关信息, 只显示了时间信息, 而  $F(\omega)$  隐藏了信号的时域相关信息, 只显示出信号的频率信息。傅里叶变换确定了信号在整个时间域上的频率分布, 实现了信号从时间域到频率域的相互转化。

## 2 小波变换

传统的信号理论都是以傅里叶变换为基础。傅里叶变换的基本思想是将信号看成是由不同幅度和频率的正弦波叠加而成的一种复杂波动。而傅里叶变换作为一种全局性的变化, 有一定的局限性, 对信号性质的讨论只能在时域或者频域进行, 因此无法同时表述信号在时域和频域的局部性质, 而这些局部特征恰恰是非平稳信号性质最关键的部分。

小波变换是一种对信号进行时频局部化的处理方法, 小波窗口面积固定不变, 但是它的形状、时间窗、频率窗都可以任意改变, 由于信号周期和频率成反比关系, 小波窗口在信号高频部分表现为频率分辨率较低和较小的周期, 即时间窗很小, 时间分辨率高。窗口在低频部分表现为频率分辨率较高和较大的周期, 即时间窗很大, 时间分辨率低, 所以小波变换被誉为数字信号的显微镜<sup>[5-12]</sup>。

一个函数  $f(x)$  要想成为小波, 必须满足如下约束条件:

$$c_f = \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega \quad (3)$$

其中,  $F(\omega)$  为  $f(x)$  的傅里叶变换,  $F(\omega)$  为能量信号有限的空间。  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 0$  表明小波具有零平均的特性, 因为函数  $F(\omega)$  具备上述的性质, 所以函数  $f(x)$  是小波母函数。

从图 1 可以看出, 多分辨率分析是将信号分为高频和低频两个部分, 然后再分解低频部分, 这样一直分解下去。信号分解表达式为  $S=A_2+D_2+D_1$ 。本例只有两层分解, 如果要进行更高层次的分解, 只需要将  $A_2$  分解成低频和低频两部分。经过更高层次的分解最终可以分解出不同频率的小波基, 它们就可以构成一组带通滤波器, 完成对信号的分析。

多分辨率分析的目的, 就是构造一组具有统一形式的函数空间, 且这组函数空间要逼近  $L^2(R)$ 。在每

个空间里, 所有函数都可构成这个空间的标准正交基<sup>[13-15]</sup>。若在此类空间中对信号进行多分辨率分解, 就能够得到相互正交的时频特性, 并且空间数目是无限的, 这就能够很方便地分析信号的某些特性。

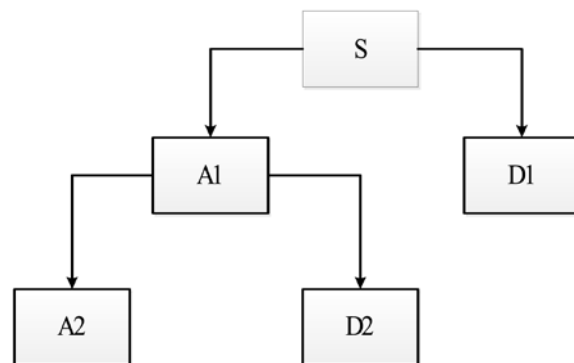


图 1 小波变换多分辨率分析

Fig.1 Wavelet transform multi-resolution analysis

## 3 薄膜样品表面图像质量影响因素分析

薄膜样品表面图像的质量主要受如下因素影响<sup>[2]</sup>。

1) 外界引起的振动、空气引起的扰动等因素。比如对于原子力显微镜(AFM), 人走动引起的地面或设备振动、声音及外界噪音引起的空气扰动、外界产生的机械振动等, 都会引起 AFM 设备针尖或者样品的细小振动, 这一振动会使针尖和样品的作用力发生变化。由于 AFM 正好是根据样品和探测针尖原子之间的相互作用力来完成成像, 样品和探测针尖的相互作用力非常微小。由这些因素产生的振动不可忽略, 极有可能对最终的成像造成较大的影响, 从而产生较大的噪声。

2) 检测设备的器件和材料带来的噪声, 主要包括器件内部的热噪声、电流引起的噪声等。

3) 检测方法引入的噪声。比如对于扫描隧道显微镜(STM)探测, 暴露在大气环境下工作时, 微悬臂或者针尖的污染, 可能给测试的图像带来不同程度的噪声。另外, 微悬臂的热振动和热漂移造成的隧道电流变化, 也可能带来不同程度的噪声。

4) 检测过程中带来的噪声。由于其成像原理不同, 扫描探针显微镜不能像光学显微镜一样可以直接观测到物体表面获取图像, 必须借助数字化集成电路处理, 形成数字图像, 这个过程必然会引入采样和量化处理, 必然会带来高频细节信息的损失。

5) 非线性因素的影响, 不仅带来图像的降质, 而且能引起图像的失真。

## 4 小波去噪步骤

一个含有噪声信号的模型可以用式(4)来表示:

$$s(i) = f(i) + \sigma e(i) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (4)$$

式中:  $f(i)$  为真实的信号;  $e(i)$  为高斯白噪声  $N(0,1)$ ;  $s(i)$  为含噪声的信号。实际采集到的信号表现出频率较低的特性, 而此时噪声信号通常表现出高频特性。因此原始采集的信号可以通过以下步骤进行小波降噪。对原始信号  $S$  进行  $N$  层小波分解, 当  $N$  取值为 3 时, 三层小波分解过程如图 2。在这个分解图中可以看出有效信号集中在低频  $cA3$  中, 噪声信号主要集中在  $cD1$ 、 $cD2$ 、 $cD3$  中, 对于这部分噪声信号可以设定门限阈值对噪声系数进行抑制, 直到消除噪声为止。然后将信号低频部分和经过阈值处理的信号高频部分进行合并, 因为此时的信号中噪声部分已经去除, 所以合并后的信号十分接近真实信号。对信号进行多层小波分解是为了消除高频噪声部分, 从含噪信号中恢复真实信号。

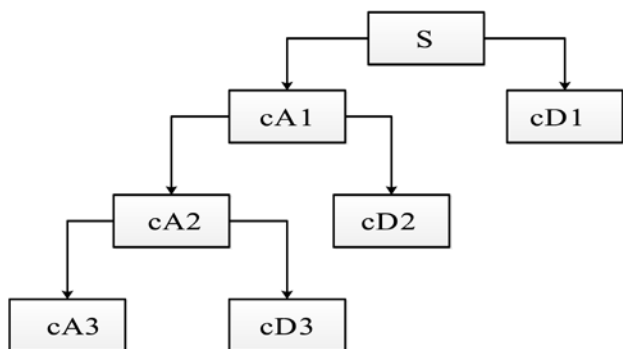


图 2 信号进行 3 层小波分解

Fig.2 3-layer wavelet decomposition of signal

薄膜表面图像信号是非平稳随机信号, 它的波形中有许多突变部分, 如果要对 TCP 信号进行分析, 首先需要对 TCP 信号进行降噪处理, 信号降噪的目的是通过消除信号中的噪声来恢复信号的原始状态。使用小波函数对信号进行降噪时, 决定降噪效果的因素有小波函数的选择和信号分解的层数。参考文献[1]中的快速小波分解算法, 本文选择  $a_0=2$ ,  $b_0=1$ , 函数  $f$  的离散小波变换为:

$$\bar{f}(m,n) = 2^{-m/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(2^{-m}t - n) dt \quad (5)$$

经过实验证明将图像信号经过 6 层小波分解可以达到良好的去噪效果。

对比图 3 与图 5, 图 4 与图 6 可知, 薄膜表面图像信号经过 6 层小波分解后可以达到良好的降噪效果, 图 4 中原始图像信号的频率在 0 Hz 到 4000 Hz 都有分布, 说明信号中夹杂大量的噪声。图 6 中信号波形更光滑, 频谱在 500 Hz 到 2000 Hz 之间分布, 说明小波变换可以有效去除信号中的噪声。

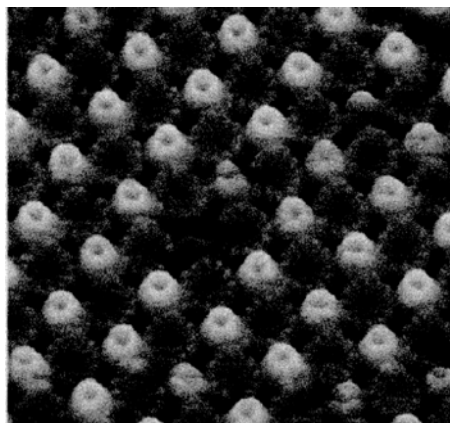
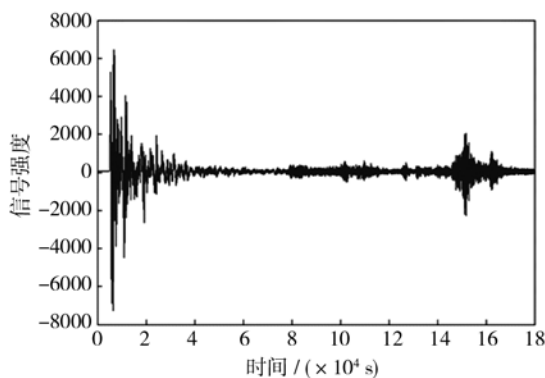
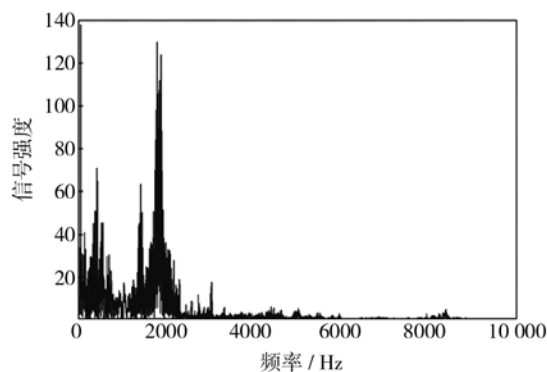


图 3 降噪前的薄膜表面图像

Fig.3 The image of film surface before noise reduction



a 波形



b 频谱

图 4 降噪前图像信号波形与频谱

Fig.4 The waveform and frequency spectrum of the film surface image signal before noise reduction

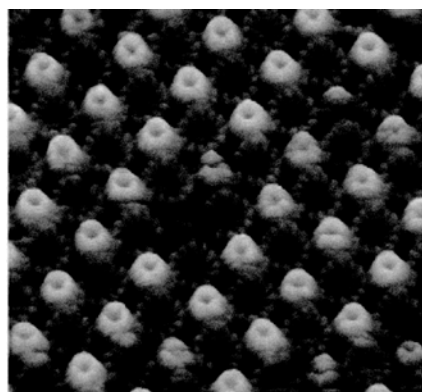


图 5 降噪后的薄膜表面图像

Fig.5 The image of film surface after noise reduction

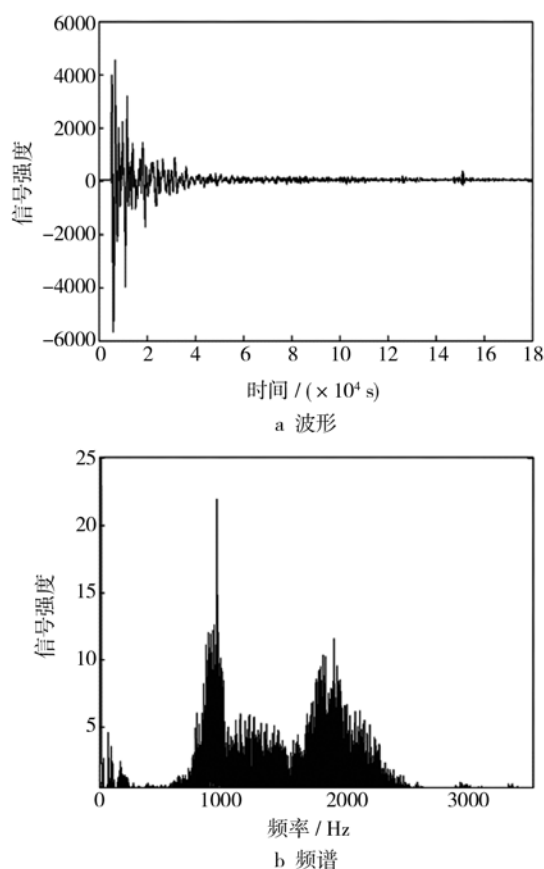


图 6 小波降噪后薄膜表面图像信号波形与频谱

Fig.6 Waveform and spectrum of the film surface image signal after wavelet denoising

## 5 结论

对薄膜表面图像信号进行有效降噪, 可以去除夹杂在有效信号的噪声部分, 提高图像信号畸变点检测的精度。小波变换作为分析振动信号的有效方法, 被广泛应用在信号分析中。本文通过对图像信号进行 6 层小波分解, 有效去除了夹杂在信号中的

噪声, 在降噪后的波形和频谱图中都可以看出小波变换降噪效果明显。

## 参考文献

- [1] 汪渊, 白宣羽, 徐可为. 基于小波变换 Cu-W 薄膜表面形貌表征与硬度值分散性评价[J]. 物理学报, 2004, 7(53):2281—2286.  
WANG Yuan, BAI Xuan-yu, XU Ke-wei. Morphological Characterization and Nanoindentation Hardness Scatter Evaluation for Cu-W Thin Films Based on Wavelet Transform[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 7 (53):2281—2286.
- [2] 何光宏. 原子力显微术及其图像增强研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
HE Guang-hong. Atomic Force Microscopy and Its Image Enhancement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [3] 王宏禹, 邱天爽, 陈喆. 非平稳随机信号分析与处理[M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 2008.  
WANG Hong-yu, QIU Tian-shuang, CHEN Zhe. Non Stationary Random Signal Analysis and Processing[M]. Second Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [4] 解培中, 陆音. 周期信号傅里叶变换的讨论[J]. 科技信息, 2011(1): 12—13.  
XIE Pei-zhong, LU Yin. The Discussion of Fourier Transform of Periodic Signals[J]. Science and Technology Information, 2011(1):12—13.
- [5] ZHAO Yang-qin. Multi-level Denoising and Enhancement Method Based on Wavelet Transform For mine Monitoring[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23:163—166.
- [6] 段锦升, 熊晓燕. 小波变换在弱信号检测中的应用研究[J]. 机械工程与自动化, 2007(5):96—97.  
DUAN Jin-sheng, XIONG Xiao-yan. Research on the Application of Wavelet Transform in Weak Signal Detection[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2007 (5):96—97.
- [7] 林春丽, 黄轶, 王克成. 小波变换与傅立叶变换在信号消噪中的对比研究[J]. 兰州工业高等专科学校学报, 2005, 12(4):29—31.  
LIN Chun-li, HUANG Yi, WANG Ke-cheng. Wavelet Transform and Fourier Transform in Signal Denoise in Contrast[J]. Journal of Lanzhou Industrial College School, 2005, 12(4):29—31.
- [8] 李东明, 王典洪, 严军, 等. 基于小波与分数傅里叶变换的图像水印算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(8):15—18.  
LI Dong-ming, WANG Dian-hong, YAN Jun, et al. Image Watermarking Algorithm Based on Wavelet and Fractional Fourier Transform[J]. Computer Engineering, 2008, 34(8):15—18.
- [9] 张晗博, 殷奕, 殷奎喜. 基于小波变换的非平稳信号分析与处理[J]. 南京师范大学学报, 2014(1):63—69.

- ZHANG Han-bo, YIN Yi, YIN Kui-xi. Non-stationary Signals Analysis and Processing Based on Wavelet Transform[J]. Journal of Nanjing Normal University, 2014(1):63—69.
- [10] 叶婷. 小波变换在 EEG 噪声滤除中的应用[J]. 信息通信, 2011(3):15—16.
- YE Ting. Application of Wavelet Transform in EEG Signal De-noising[J]. Information & Communications, 2011 (3):15—16.
- [11] 张常年, 赵红怡. 图像压缩中 Shannon 正交小波变换的快速算法[J]. 北方工业大学学报, 2001, 13(3):37—40.
- ZHANG Chang-nian, ZHAO Hong-yi. Image Compression Using Fast Algorithm of Shannon Orthogonal Wavelet Transform[J]. Journal of North China University of Technology, 2001, 13(3):37—40.
- [12] 李莹. 小波变换在医学图像处理上的应用[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(7):1279—1281.
- LI Ying. Application of Wavelet Transform in Medical Image[J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27 (7):1279—1281.
- [13] 代海波, 单锐, 王换鹏. 基于改进阈值函数的小波去噪算法研究[J]. 噪声与振动控制, 2012, 12: 189—193.
- DAI Hai-bo, SHAN Rui, WANG Huan-peng. Study on Wavelet Denoising Algorithm Based on Improved Threshold Function and Maximal Overlap Discrete Wavelet Packet Transform[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 12:189—193.
- [14] 徐飞. 基于小波变换的爆破振动信号分析方法及应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- XU Fei. Study on Analysis Methods and Applications of Blast Vibration Signals Based on the Wavelet Analysis [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2011.
- [15] 张德丰. 基于小波的信号突变点检测算法研究[J]. 计算机工程与科学, 2007, 29(12):98—100.
- ZHANG De-feng. Research on the Wavelet-Based Algorithms for Signal Singularity Detection[J]. Computer Engineering and Science, 2007, 29(12):98—100.