

# 小波变换和数学形态学在电力扰动信号消噪中的应用

王丽霞, 何正友, 赵静, 张海平  
(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 基于小波变换和数学形态学的信号消噪方法都已被充分证明是行之有效的, 但两种方法应用于电力扰动信号这一特殊对象的消噪是否能够适应良好, 根据不同的信号和精度要求如何选择不同的消噪方法, 成为一个很重要的问题。基于此, 建立了重构因子用以评价算法对信号的重构能力, 并对几种典型电力扰动信号进行了分析, 通过计算其重构因子, 讨论了两种算法对不同信号的适应性。通过仿真分析, 得出对于无暂态脉冲或高频振荡扰动的信号, 两种方法都是有效的, 可根据计算速度和精度的不同要求予以选择; 对于含暂态脉冲和振荡扰动的信号, 基于小波变换的消噪效果明显优于基于数学形态学的消噪方法。

**关键词:** 小波变换; 数学形态学; 重构因子; 适应性分析

## Wavelet transform and mathematical morphology's application in power disturbance signal denosing

WANG Li-xia, HE Zheng-you, ZHAO Jing, ZHANG Hai-ping  
(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Denoising based on wavelet transform and mathematical morphology have been proven to be effective, but whether they can work well when used in power disturbance signal denoising and how to choose the algorithm according to different signals and different accuracy requirements becomes a very important issue. Remodeling factor was established for evaluating the ability of algorithm in reconstructing signal. Through analyzing the simulation results of several typical power disturbance signals, it calculates the remodeling factor then discusses the adaptability of different denoising algorithms used in different signals' denoising. The result of the computer simulation indicates that for the signals without pulse or high frequency oscillation, disturbance both methods are effective, which should be chosen according to the evaluating speed and the different accuracy requirements. For the signal with pulse or high frequency oscillation disturbance, the denoising based on wavelet transform is obviously better than the denoising based on mathematical morphology.

Project Supported by National Science Foundation of China (50407009); Excellent Youth Found of Sichuan Province (No.06ZQ026-012); New Century Excellent Talents of Education Ministry (NCET-06-0799).

**Key words:** wavelet transform; mathematical morphology; remodeling factor; adaptive analysis

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)24-0030-06

## 0 引言

在进行信号处理时, 采集到的信号往往叠加有噪声, 为了精确地反映被采集信号量的特征, 必须对其进行去噪处理。消噪的方法有很多, 如 gabor 滤波, 维纳滤波, 卡尔曼滤波, 粒子滤波, 中值法滤波, 均值法滤波, 自适应滤波等。任何滤波器都有一定的优点和缺点, 因此对于特定场合应用很难说出哪类滤波器最合适。滤波器设计就是考虑如何滤除某种类型的噪声。实际上, 滤波器的性能完全取

决于应用场合。常用的对噪声滤波效果的评测一般采用客观评测与主观评测并用的办法。目前的客观评测方法主要采取误差评测方法, 即通过计算滤波后的结果信号与原始无噪声信号的误差来进行近似衡量噪声滤波的效果。在主客观上, 可采用主观观察图像来进行辅助评价。

对于电力扰动信号, 一些传统的算法如基于维纳滤波方法在滤去高频噪声的同时, 也滤去了一些有用的高频扰动信息, 在某些需要保留高频信息量以便进行更深层处理的场合, 显然是不适用的。基于小波变换的非线性去噪算法是一种同时能观测到信号的概貌和细节的算法, 可以设定相应的参数, 使得需要的信息得以保留, 因此得到了广泛的应用。数学形态学是基于积分几何和随机集论的一门学

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50407009); 四川省杰出青年基金项目 (No. 06ZQ026-012); 教育部优秀新世纪人才支持计划项目 (NCET-06-0799)

科, 最早应用于图像处理。基于数学形态学的形态滤波由于其计算速度快、实时性强的优点, 应用于信号消噪也取得了较好的效果。这两种方法应用于电力扰动信号消噪效果如何, 成为本文讨论的问题。

## 1 基于小波变换和数学形态学的信号消噪原理

### 1.1 基于小波变换的信号消噪

基于小波变换的消噪算法<sup>[1]</sup>可分为以下几类, 按小波变换的种类可分为: 连续小波变换消噪、离散小波变换消噪及小波包变换消噪。根据不同的信噪分离筛选标准可分为: 模极大值法<sup>[2]</sup>, Donoho 阈值法<sup>[3,10]</sup>, 能量阈值法<sup>[4]</sup>等。所有方法中, 以 Donoho 阈值法效果最为突出, 应用范围最为广泛。现将算法步骤描述如下:

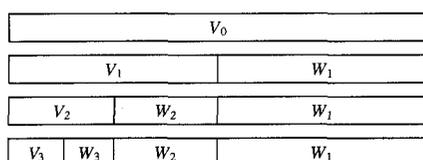


图1 Mallat 算法

Fig.1 Mallat algorithm

1) 选定分解层数  $N$ , 利用 Mallat 算法对信号进行分解, 计算全局和细节的小波系数。

2) 计算相应的阈值, 对细节系数进行阈值处理。

3) 将所有处理过的小波系数进行重构, 恢复出有效的信号。

影响阈值法消噪效果的因素有以下四个: 阈值施加的方式, 阈值的估计, 小波基的选取以及分解层数的选取。阈值施加的方式有硬阈值, 软阈值以及改进的阈值, 软阈值能够取得较好的效果, 应用较为广泛。常见的阈值的估计<sup>[1]</sup>方法有以下几种, 固定阈值, Rigrsure 阈值, 启发式阈值, 极大极小阈值, 对于不同类型的信号和不同的消噪要求, 可根据具体情况选用不同的阈值。小波基的选取要从其重构能力考量, 文献[5]指出, 要选取具有线形相位的能保证信号重构稳定不失真的小波基, 并指出, B 系列小波应用于电力信号消噪具有更好的效果。一般情况下, 小波分解的层数越高, 信号和噪声被更充分地分离并进行分别处理, 获得的降噪效果也更加明显, 但是越高层次的小波分解, 必然带来更大的计算量, 因此分解层数一般要在降噪效果和计算量间做一个权衡, 分解的层数应该选的比较适中。

### 1.2 基于数学形态学的信号消噪

数学形态学<sup>[6,7]</sup>最早是在 1964 年, 由 J.Serra 在其博士论文中提出的, 最初多用于指纹识别与图像处理领域<sup>[8]</sup>, 后因其优秀的信号处理能力, 又被引入到电力系统领域<sup>[9]</sup>, 用于电力系统的信号去噪、奇异点检测等, 下面首先给出数学形态学的基本定义。

数学形态学最基本的运算为腐蚀与膨胀。定义  $f(n)$  是定义在定义域  $D[f] \in E$  的一维信号,  $g(n)$  是定义在定义域  $D[g] \in E$  的结构元素, 则有:

$$\text{膨胀: } (f \oplus g)(n) = \max\{f(n-m) + g(m)\}$$

$$m=0, \dots, M-1, n=0, \dots, N+M-2 \quad (1)$$

$$\text{腐蚀: } (f \ominus g)(n) = \min\{f(m+n) - g(m)\}$$

$$m=0, 1, \dots, M-1, n=0, \dots, N-M-1 \quad (2)$$

由 2 种最基本的算子结合衍生出的复杂运算如下所示:

$$\text{开运算: } f \circ g = (f \ominus g) \oplus g \quad (3)$$

$$\text{闭运算: } f \bullet g = (f \oplus g) \ominus g \quad (4)$$

$$\text{形态开闭运算: } OC(f) = f \circ g \bullet g \quad (5)$$

$$\text{形态闭开运算: } CO(f) = f \bullet g \circ g \quad (6)$$

有数学形态学运算构成的滤波器称为形态滤波器。影响形态滤波器滤波效果的有以下因素: 形态滤波的算法, 结构元素的形状, 以及结构元素的长度。

形态开闭运算和形态闭开运算可以消除尖峰, 填补缝隙, 可以用于去噪。但是由于形态开闭运算使信号的平均值变大, 而形态闭开运算使信号的平均值变小, 实际滤波器的应用, 一般都是以形态开一闭、形态闭一开运算的组合形式出现<sup>[11]</sup>。由于采用相同结构元素的形态滤波器, 存在严重的统计倚现象, 所以采用开运算和闭运算选用不同结构元素的广义形态滤波器<sup>[14]</sup>可有效地提高噪声的抑制能力。

定义: 设  $f(n)$  为一输入离散信号, 两个结构元素分别为  $g_1, g_2$ , 且  $g_1 \subseteq g_2$ ; 则广义开一闭(GOC)与广义闭一开(GCO)滤波器分别定义为:

$$GOC(f(n)) = (f \circ g_1 \bullet g_2)(n) \quad (7)$$

$$GCO(f(n)) = (f \bullet g_1 \circ g_2)(n) \quad (8)$$

形态滤波器的性能不仅取决于形态变换的类型, 而且还取决于结构元素的形状和长度<sup>[11]</sup>。经过大量的仿真证明, 对于电力信号中常见的白噪声, 选用比较平滑变化的半圆形结构元素, 能够起到很好的噪声抑制作用<sup>[12]</sup>。对结构元素长度的选取也有

一定的要求,若结构元素长度过小,则不能起到很好的去噪效果,若结构元素的长度过大,有会破坏信号的结构,使信号的特征被破坏。文献[13]指出采用长度为信号周期长度的 1/50~1/20 的结构元素是比较适合的。

## 2 消噪效果评价和重构因子

评价一个消噪算法的好坏应从两个方面考虑:一是算法的计算速度和实时性,二是消噪效果的好坏。而这两者往往是相互矛盾的,需要在时效和准确中取一个折中。从计算的原理来看,一般情况下数学形态学的计算量明显小于小波变换,下面从计算的准确性来比较两者。

在电力系统中,噪声往往都是均值为零的白噪声,消噪就是在原始信号中,去除这些白噪声而不改变信号的特征。除了使用观察消噪后图像的主观方法外,还应建立一个反映消噪后的信号和不加噪的预设信号的相似程度来的因子,用以客观地对消噪效果做出评测。

在传统的评测中,往往采用信噪比来评价消噪效果的好坏,实际上,对消噪效果的评判,不仅仅要考虑信号整体的偏差,还应考虑信号局部的偏差大小。

定义整体偏差的评价指标如下:

$$e_1 = \sqrt{(s - s1)^2 / N} \quad (9)$$

其中:  $s$  为不加噪声的信号;  $s1$  为消噪以后的信号。

定义局部偏差为:

$$e_2 = \max |s - s1| / \sqrt{\|s - s_N\|} / N \quad (10)$$

$s_N$  为加噪的待分析信号。

$$\|x\| = \sum_1^N x^2$$

重构因子定义为:  $E = \gamma_1 e_1 + \gamma_2 e_2$  (11)

$\gamma_1, \gamma_2$  分别为整体偏差和局部偏差的加权系数,分别称为整体偏差因子和极值偏差因子且:  $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ 。可以根据对整体偏差和局部偏差的不同要求调整  $\gamma_1, \gamma_2$  的大小。

根据定义可知,重构因子越大,表明消噪后的信号和预设信号之间的偏差越大,消噪效果越差。

## 3 仿真分析

对小波变换消噪和数学形态学消噪均采用已被

证明的效果较好的算法。具体参数如下所示:

小波消噪法采取经典的阈值消噪法;阈值施加方式采取软阈值消噪;阈值的选取采取利用 Stein 的无偏估计求出的 Rigrsure 阈值,并估计信号的方差,以两者相乘作为阈值;小波基的选择选取消噪效果较好的 B 系列小波 'db4'。

数学形态学去噪采用广义滤波器;结构元素的形状采用对白噪声有较好滤除效果的半圆结构元素;结构元素的长度一般选取整个周期采样点的 1/50 到 1/20。

重构因子的计算取整体偏差和局部偏差的系数均为 0.5。

施加的噪声均为方差为 0.1 的高斯白噪声。

### 3.1 两种基本信号

#### a. Block 信号

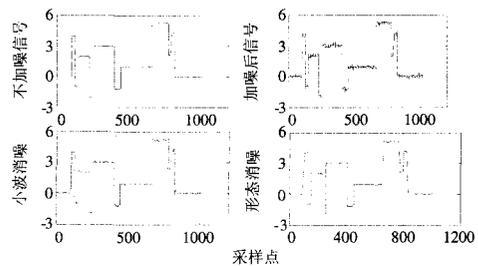


图 2 Block 信号消噪

Fig.2 Block signal

表 1 Block 信号消噪重构因子计算表

Tab.1 Remodeling factor calculation for the denosing of block signal

消噪方法	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$E$
未消噪	0.103 920	$\infty$	$\infty$
形态消噪	0.042 304	0.085 096	0.063 70
小波消噪	0.068 037	0.156 87	0.112 46

图 2 为 Block 信号的数学形态学和小波变换消噪结果。数学形态广义滤波器的结构元素为长度为 5 点和 7 点的半圆形结构元素,小波变换消噪的分解层数取 7 层,从图像观察,数学形态学的消噪结果波形明显比小波消噪的结果平滑。计算两种方法结果的重构因子,如表 1 所示,分解层数 7 层的小波消噪,无论是整体偏差或局部偏差因子,性能远远不及数学形态消噪;而 7 层的小波消噪计算量远远大于上述参数的形态消噪。由此可得,对于 Block 信号,使用形态消噪比较合理。

#### b. 正弦信号

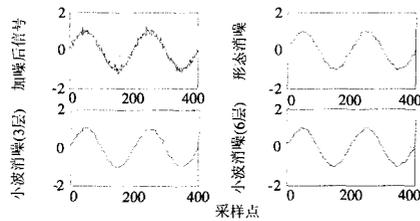


图3 正弦信号消噪

Fig.3 Sine signal

表2 正弦波信号消噪重构因子计算表

Tab.2 Remodeling factor calculation for the denosing of sine signal

消噪方法	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$E$
未消噪	0.099 696	$\infty$	$\infty$
形态消噪	0.045 045	0.089 501	0.067 273
小波消噪 3 层	0.044 461	0.091 26	0.067 86
小波消噪 6 层	0.034 205	0.083 804	0.059 005

考察两种方法对电力系统中最常出现的正弦波的消噪效果。经过大量仿真, 得出以下规律, 对于正弦信号, 利用形态滤波所得的消噪效果, 与经三层小波分解变换消噪的效果接近, 而若要进一步使得消噪效果明显, 获得更加平滑的波形, 可以增加小波分解的层数, 获得更加精确的结果, 仿真表明, 六层的小波分解消噪效果已经达到比较精确的程度, 若要增加分解层数, 增加的计算量大, 消噪效果提升不明显。

### 3.2 电力扰动信号

#### a. 谐波扰动

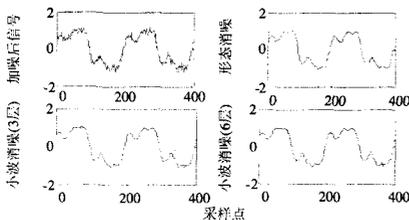


图4 含谐波信号消噪

Fig.4 Signal with harmonic

表3 含谐波的信号消噪重构因子计算表

Tab.3 Remodeling factor calculation for the denosing of signal with harmonic

消噪方法	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$E$
未消噪	0.101 45	$\infty$	$\infty$
形态消噪	0.064 475	0.156 67	0.110 57
小波消噪 3 层	0.047 794	0.120 45	0.084 123
小波消噪 6 层	0.044 908	0.107 45	0.076 179

图4 为含三次谐波和五次谐波的信号, 信号的

表达式为:

$$s = \sin \alpha t + 0.33 \times \sin(3\alpha t + \pi/3) + 0.2 \times \sin(5\alpha t + \pi/6) \quad (12)$$

如图4和表3所示, 对于含了3, 5次谐波扰动的信号, 形态消噪能够降低噪声分量, 但消噪性能不及三层小波分解。同正弦信号, 对含谐波扰动的电力扰动信号, 如果增加小波变换的分解层数, 也能够获得更好的消噪结果。

#### b. 电压暂变扰动

图5为对发生电压中断, 暂升、暂降扰动时, 对信号分别做三层的小波变换阈值消噪和数学形态学广义滤波消噪(结构元素为5点和7点)。电压暂变的时刻为第140点到280点, 电压暂变的范围分别为0.0pu(中断), 1.8pu(暂升), 0.4pu(暂降)。

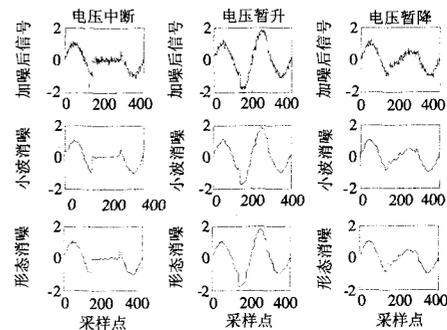


图5 电压暂变扰动信号消噪

Fig.5 Variable voltage signal

表4 电压暂变扰动信号消噪重构因子计算表

Tab.4 Remodeling factor calculation for the denosing of

Variable voltage signal				
扰动类型	消噪方法	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$E$
电压中断	未消噪	0.100 67	$\infty$	$\infty$
	小波消噪	0.046 177	0.130 78	0.088 478
	形态消噪	0.043 894	0.089 593	0.066 186
电压暂升	未消噪	0.100 46	$\infty$	$\infty$
	小波消噪	0.050 372	0.112 39	0.079 233
	形态消噪	0.050 031	0.108 43	0.076 454
电压暂降	未消噪	0.102 89	$\infty$	$\infty$
	小波消噪	0.047 686	0.141 76	0.094 724
	形态消噪	0.050 232	0.107 99	0.072 478

由图像分析, 小波变换和形态滤波都能够有效地消除噪声, 且从视觉上观察, 两种方法没有很大差别。由对正弦信号的分析可知, 采用上述参数的小波消噪和形态滤波, 获得的效果相差不多, 那么对于暂变信号中的正弦部分, 两者的消噪效果近似。由对Block信号的分析可知, 对此类信号, 无论是全局偏差还是极值偏差, 形态滤波的效果都要好一些, 那么, 可以推理, 在有突变点的信号中, 形态

滤波的极值偏差可能要小一些,对电压中断,中断部分的消噪效果形态滤波可能要好一些。计算重构因子,如表4所示,上述参数的消噪方法,形态滤波极值偏差因子要小一些,对中断形态滤波的全局偏差也小一些,证明了上述推断。由以上分析,两种方法对电压暂变扰动信号的消噪都有效且效果相差不多。

c. 暂态脉冲扰动

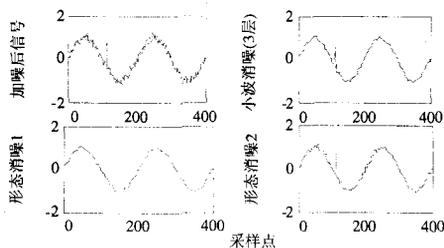


图6 暂态脉冲扰动信号消噪

Fig.6 Signal with impulse

表5 暂态脉冲扰动信号消噪重构因子计算表

Tab.5 Remodeling factor calculation for the denosing of signal with impulse

消噪方法	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$E$
未消噪	0.107 00	$\infty$	$\infty$
小波消噪	0.055 442	0.116 43	0.085 934
形态消噪1	0.081 131	0.442 30	0.261 72
形态消噪2	0.085 382	0.390 59	0.237 99

在电能质量检测中,经常会出现暂态脉冲或暂态振荡扰动。在对图象消噪时,经常把暂态脉冲作为噪声,予以消除。但在电能质量检测中,需要保留扰动点。图6表示一个宽度为三个采样点的暂态脉冲扰动信号,由图像观察,小波消噪能够保留扰动点,而采用结构元素长度为5点7点广义形态滤波器将暂态脉冲当作噪声消去,明显改变了信号的特征,给进一步的扰动检测定位带来困难。究其原因,是因为所使用的形态滤波的结构元素长度(5点和7点)超过了暂态脉冲的宽度,若要有效地保留扰动点,必须使结构元素的长度小于脉冲宽度。若将广义滤波器的形态结构元素长度取为2点和3点,如图6所示,保留了扰动点,但从图中可观察到过短的结构元素长度使消噪后的波形极为不平滑,说明形态滤波器没有很好地起到消除噪声的效果。对形态滤波消噪,保留扰动点和有效消噪构成了矛盾,有时很难取得一个较好的折中办法。

d. 暂态振荡扰动

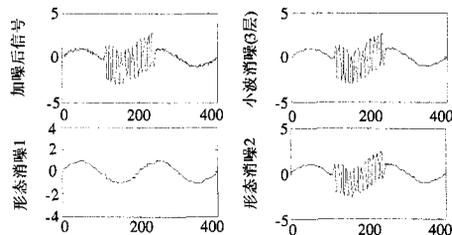


图7 暂态振荡扰动信号消噪1

Fig.7 Signal with vibration 1

表6 暂态振荡扰动信号消噪重构因子计算表

Tab.6 Remodeling factor calculation for the denosing of signal with vibration

消噪方法	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$E$
未消噪	0.097 382	$\infty$	$\infty$
小波消噪	0.055 442	0.116 43	0.085 934
形态消噪1	0.796 48	0.130 45	0.463 47
形态消噪2	0.714 97	0.137 08	0.426 03

由含暂态脉冲扰动信号的分析可知,采用形态滤波消噪,当结构元素的长度大于脉冲宽度时,脉冲会被湮没,同样对于高频脉冲振荡,当振荡波形半个周期的宽度小于结构元素的宽度时,形态滤波同样会改变信号的特征。

如图7所示,存在频率为20倍基频的暂态振荡扰动,使用5点7点的广义滤波器结构元素长度大于振荡半周长度5点,因此振荡被当作噪声消除,减短结构元素的长度,可以避免振荡被湮没,但同样存在消噪效果降低的矛盾。并且,对于再高频率的振荡,如50倍基频的振荡,即使采用结构元素极短的形态消噪(2点3点),也不能保留振荡的特征,如图8所示。若将结构元素长度减小到极限1点,则失去了去噪的作用,因此,对于含高频振荡的信号,不宜采用形态滤波器消噪。

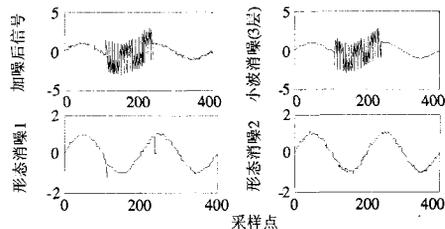


图8 暂态振荡扰动信号消噪2

Fig.8 Signal with vibration 2

4 结论

(1) 数学形态学和小波变换应用于消噪有一

定适应性,可用重构因子来评价其消噪性能。

(2) 对于 Block 信号,使用数学形态学的消噪效果和计算速度都远远优于小波变换消噪。

(3) 对于无脉冲和高频振荡等暂态扰动的信号的消噪,使用数学形态和小波变换都是有效的,可根据需要的精度、速度等加以选择。

(4) 对于有暂态脉冲和振荡扰动的信号,单纯使用上述的形态滤波有可能使扰动点湮没。形态滤波不宜用于此类信号的消噪。必须采用另外的方法与之相结合来改善此类缺陷。

### 参考文献

- [1] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [2] 顾建农, 张志宏, 吴正国, 等. 基于小波变换模极大值恢复的信号消噪方法[J]. 海军工程大学学报, 2001, 13(2): 25-32.
- GU Jian-nong, ZHANG Zhi-hong, WU Zheng-guo, et al. Signal Denoising Method Based on Wavelet Transform Modulus Maxima Recovery[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(2): 25-32.
- [3] 戴士杰, 吴晓龙, 李慨, 等. 小波变换信号消噪技术研究[J]. 河北工业大学学报, 2003, 32(1): 34-38.
- DAI Shi-jie, WU Xiao-long, LI Kai, et al. Research on the Signal Denoising Technology with Wavelet Transform[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2003, 32(1): 34-38.
- [4] 庞绍芳, 张代英, 陈跃宁. 基于小波包分析的能量阈值消噪[J]. 辽宁大学学报自然科学版. 2004, 31(2): 51-56.
- PANG Shao-fang, ZHANG Dai-ying, CHEN Yue-ning. Image Denoising Based on Energy Threshold Wavelet Packet Transform[J]. Journal of Liaoning University, 2004, 31(2): 51-56.
- [5] 何正友, 钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J]. 电力系统自动化设备, 2003, 25(10): 45-48.
- HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. Mother Wavelet Option Method in the Transient Signal Analysis of Electric Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 25(10): 45-48.
- [6] Serra J. Morphological Filtering: an Overview. [J]. Signal Processing. 1994, 38(1): 3-11.
- [7] Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology[J]. New York: Academic, 1982, 12-58.
- [8] 崔屹. 图象处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 唐常青, 吕宏伯, 黄铮, 等. 数学形态学方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [10] 任震, 石志强. 小波分析及其在电力系统中的应用: (三) 工程应用技术 [J]. 电力系统自动化, 1997, 12(3): 9-12.
- REN Zhen, SHI Zhi-qiang. Wavelet Analysis and Its Application in Electric Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 12(3): 9-12.
- [11] 岳蔚, 刘沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 13-17.
- YUE Wei, LIU Pei. Detection of Power Quality Disturbance Based on Mathematical Morphology(MM) Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 13-17.
- [12] 李庚银, 罗艳, 周明, 等. 基于数学形态学和网格分形的电能质量扰动检测及定位[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 25-30.
- LI Geng-yin, LUO Yan, ZHOU Ming, et al. Power Quality Disturbance Detection and Location Based on Mathematical Morphology and Grille Fractal[J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(3): 25-30.
- [13] 孙圣和, 赵春晖. 一种噪声污染的心电信号形态滤波方法[J]. 仪器仪表学报 1998, 19(1): 76-78.
- SUN Sheng-he, ZHAO Chun-hui. A Method of Flitering for Electrocardiogram Singnal Pulluted by Noise[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1998, 19(1): 76-78.
- [14] 赵春晖. 数字形态滤波器理论及其算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998.

收稿日期: 2008-02-29

作者简介:

王丽霞(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为数字信号处理及信息理论在电力系统中的应用; E-mail: 330532597@qq.com

何正友(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代信息论在电力系统故障分析中的应用、配电网综合自动化等方面的研究工作;

赵静(1982-), 女, 博士研究生, 研究方向为数字信号处理及信息理论在电力系统中的应用。