

基于变尺度标杆的短时电能质量分类法

李康瑞, 徐方维, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 短时电能质量扰动特征取决于其频率特征和持续时间, S 变换被认为是最适合于分析短时扰动的方法之一。提出了基于 S 变换的不同类型扰动标杆相似度识别不同持续时间扰动的方法。基于双线性插值的尺度变换建立同类扰动不同持续时间的标杆, 该扰动标杆涵盖了同类扰动的不同特征; 对被测扰动信号进行 S 变换, 经过尺度变换后统一为与标杆维数相同的矩阵, 依据相似度最大原则对扰动类型进行识别。该方法无需额外的分类器, 过程简单有效。仿真证明, 该方法对噪声不敏感, 能较好地解决不同持续时间的电能质量扰动信号的识别问题。

关键词: 短时扰动; 变尺度; 标杆; S 变换; 最大相似度

Abstract: The features of short duration power quality disturbance depend on its frequency character and duration, so S-transform is regarded as one of the most suitable methods to analyze short duration disturbance. A classification method for different duration power quality disturbance based on similarity of scale-transform module time-frequency matrixes by S-transform is proposed. At first, the benchmark module time-frequency matrixes of different duration disturbance based on bilinear-interplot scale-transform are constructed, which includes their feature vectors. Then, the similarity of disturbance signal's module time-frequency matrixes with scale-transform to the benchmark module time-frequency matrixes is calculated and according to the principle of maximum similarity, the disturbances are classified. The proposed method is straightforward and it needs no any classifier. Simulation results show that this recognition system is immune to noises and the classification accuracy is high.

Key words: short duration disturbance; scale-transform; benchmark; S-transform; maximum similarity

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0056-05

随着经济和科技的发展, 基于微电子、电力电子的设备在电力负荷中所占比例越来越大, 这些负荷对电能质量扰动尤其是短时扰动非常敏感, 电力系统供电质量与用户设备的电压耐受能力之间的矛盾越来越突出, 电力企业和用户对此非常关注。对各类短时电能质量扰动的准确识别和分类是改善供电质量、降低可能导致的经济损失的前提, 其中对电压凹陷 (voltage sag)、电压尖峰 (spike)、短时谐波 (harmonics) 和振荡暂态 (oscillatory transients) 等主要短时扰动的检测和分类识别是当前的研究热点^[1-3]。

现有的短时扰动分类识别方法中, 大多分特征提取、模式识别两个步骤。特征提取常用傅里叶变换、小波变换、余弦变换^[4-5]、线性调频 Z 变换^[6]、S 变换等基于信号变换的方法, 其中, 傅里叶变换适用于平稳信号^[15]; 小波变换能进行检测和分类, 但易受噪声干扰, 不适于短时谐波和间谐波^[11, 16]; 离散余弦变换能提取特征, 但对扰动类型适应性不强。现有分类方

法包括神经网络、决策树、支持向量机、模糊聚类等^[7-14], 均基于附加分类器。S 变换综合了小波和傅里叶变换的优点, 适于提取非平稳信号特征, 得到了广泛应用^[4, 15, 17-19]。无论如何提取特征, 现有方法均需加分类器对扰动分类, 因此, 如何结合各类扰动的特点, 不采用复杂的分类器, 而通过简单方法进行分类是值得研究的课题。

事实上, 有的特征为各类扰动共有, 有的特征为某类扰动所独有, 在提取特征时集合各类扰动的个性特征, 采用最适于提取短时扰动特征的 S 变换法^[17-19], 刻画能反映扰动类型的特征, 通过简单的代数运算直接进行分类, 可大大简化分类过程。

根据现有 S 变换模时频矩阵特点, 基于最大相似度原理进行扰动分类, 原理简单, 能有效进行分类^[18-19], 但不同持续时间的扰动的时频矩阵维数不同, 增加了模板数量且难以确定。因此从扰动特征出发, 提出一种时频矩阵尺度变换法。通过尺度变换, 建立各类扰动的统一标杆模板, 减少标准模板数, 基

于最大相似度原理, 仅需简单四则运算完成扰动分类。仿真证明, 尺度变换后的扰动标杆能有效反映各类扰动特征, 分类过程简单, 结果准确, 有一定理论价值和明显的工程应用价值。

1 S变换的快速实现

信号 $h(t)$ 的一维连续 S 变换定义为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

按时间间隔 T 离散化, 傅里叶变换为

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[kT] e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (2)$$

式中, $n=0, 1, \dots, N-1$ 。

令 $f \rightarrow n/NT$, $\tau \rightarrow j$, 序列 $h(kT)$ 的离散 S 变换为

$$S\left[j, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{j\frac{2\pi mj}{N}} \quad (3)$$

S 变换可由快速傅里叶变换 (fast Fourier transforms FFT) 实现快速计算。 $h(kT)$ 经 S 变换后得到一个复时频矩阵, 对矩阵中的各个元素求模可得与之对应的模时频矩阵。矩阵的列对应采样点时刻, 行对应频率值, 矩阵元素对应幅值^[11]。该矩阵中含有各类短时扰动丰富的特征信息, 其等值线图能精确反映扰动的时频分布和不同频率成分的幅值分布情况^[18-19]。本质上, 各类扰动的主要特征是频率和幅值的突变, 扰动持续时间是扰动类型识别的必要条件。各类扰动的频率和持续时间总在某范围内, 可以建立扰动持续时间和频率变化的标准模时频矩阵。

2 模时频矩阵尺度变换

各类扰动的模时频矩阵的本质是数学矩阵, 类似于数字图像处理中的像素矩阵, 因此可以利用相似度进行类型识别。而不同持续时间的扰动, 其模矩阵的维数不同, 必须进行尺度变换, 统一各类扰动模矩阵的时间和频率分辨率, 建立各类扰动的标准模板。

设经 S 变换后某时频点图像灰度值为 $A_0(x_0, y_0)$, 经尺度变换为新的点 $A_1(x_1, y_1)$, 两者间的关系为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式 (4) 中, a 和 b 为缩放尺度因子。

尺度变换后, 新图中某些点可能并不对应原图像的采用点, 因此采用双线性插值法^[20]来获得尺度缩放后不在采样点的像素的灰度值。

双线性插值原理如下。

设 $F'(x', y')$ 是图像缩放后输出的灰度值, $F(x, y)$ 是缩放过程中图像的灰度值, x, y 可能不在采样点, 而 x', y' 是与采样点对应的整数。为了计算出点 x, y 在频谱 F 中的灰度值, 需应用双线性插值如下。

设 i, j 是对 x, y 的取整。

$$\begin{aligned} F'(x', y') = & [F(i+1, j) - F(i, j)] \cdot (x-i) \\ & + [F(i, j+1) - F(i, j)] \cdot (y-j) \\ & + [F(i+1, j+1) + F(i, j) - \\ & [F(i, j+1) - F(i+1, j)] \\ & \cdot (x-i) \cdot (y-j) + F(i, j) \end{aligned} \quad (5)$$

已有的研究表明, 利用双线性插值对新的图像灰度进行赋值, 可以得到较满意的图像效果。

3 S变换标杆选取

各类短时扰动经 S 变换后的模时频矩阵有其自身特征。但由于扰动起止时刻、扰动幅值、持续时间、谐波含量、振荡衰减等特征的随机变化, 直接进行识别比较困难。对各类扰动 S 变换后的模时频矩阵元素进行尺度变换, 统一各类扰动持续时间和频率分辨率, 形成各类扰动的标准模时频矩阵, 将其定义为该类扰动的 S 变换标杆矩阵。首先统一时间分辨率, 分别选取模时频矩阵扰动发生前一周波和扰动结束后一周波的元素, 再选取扰动持续期元素进行尺度缩放为一个周波的元素; 然后统一频率分辨率, 组成各类扰动的标杆矩阵。将每类扰动的 50 个标杆矩阵求平均, 即可得各类扰动的标杆模板 (S-transform benchmark template STBT) 矩阵。

为说明方法, 下面给出电压凹陷、尖峰、振荡暂态和短时谐波的波形图, S 变换时频等值线图以及该类扰动的标杆模板。可直观地看到各类持续时间不同的短时扰动能量分布、等值线图时频尺度缩放前后的变化以及与之对应的标杆模板的近似程度。扰动等值线图中横坐标为采样点, 纵坐标为频率, 等值线的颜色对应幅值。

3.1 电压凹陷

30 个周波的电压凹陷波形如图 1(a) 所示, 其典型特征是基波幅值的降低。对其进行 S 变换, 图 1

(b)是某凹陷的时频等值线图,可以看到,在电压幅值下降和上升时刻,等值线密集;凹陷持续期,等值线相对稀疏。凹陷持续期不同,等值线稀疏部分长短不同。50个不同持续时间的凹陷经过压缩,统一成持续时间为一个周波的矩阵,并对这些矩阵求平均后的凹陷模板矩阵如图 1(c)所示。

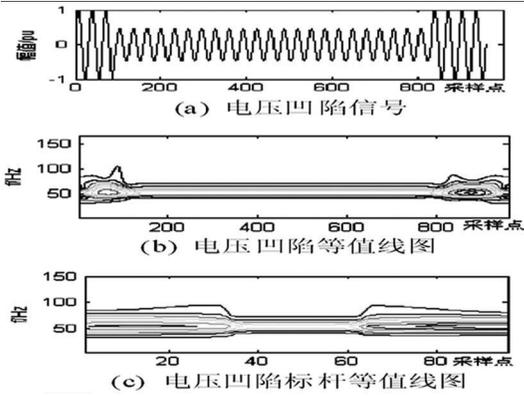


图 1 电压凹陷

3.2 电压尖峰

图 2(a)是具有一个电压尖峰电压波形。其 S 变换时频等值线图主要特征是基本幅值变化不太明显,但扰动发生时刻有较宽频带的暂态分量,持续时间短,如图 2(b)所示。对扰动发生时刻前后的点进行尺度放大,将尖峰持续期时间尺度拉伸至 1 周波,突出扰动发生时的频率暂态特征,50 个该扰动得到的标杆模板如图 2(c)所示。

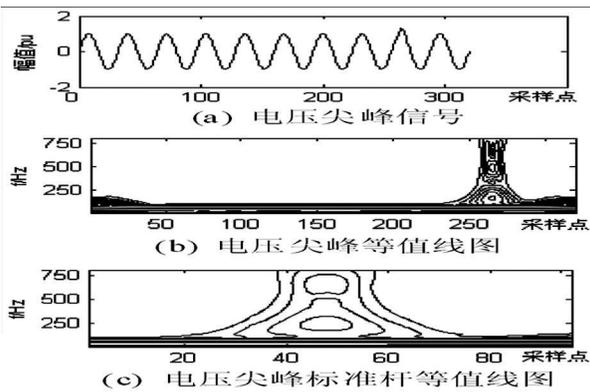


图 2 电压尖峰

3.3 振荡暂态

短时振荡电压波形如图 3(a)所示,图 3(b)是与之对应的 S 变换等值线图。可以看到,在较高频率处(500 Hz 附近及以上频率)频率变化显著,等值线密集。通过尺度压缩,统一 50 个时间尺度不同的振荡暂态扰动并建立标杆模板如图 3(c)所示。可以看到,随机振荡暂态和其模板极为相似,只是模板等值线相对稀疏。

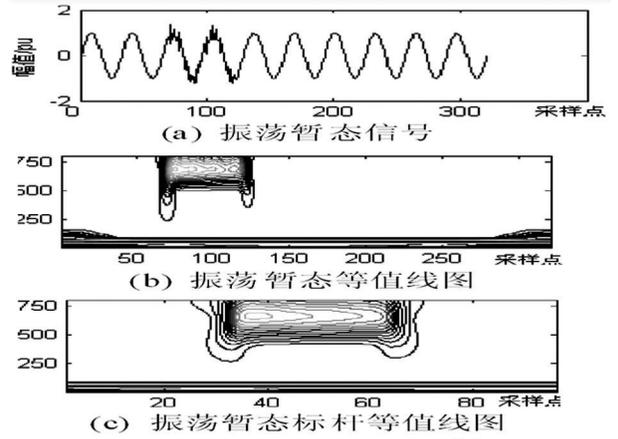


图 3 振荡暂态

3.4 短时谐波

图 4(a)是持续时间为 5 个周波的短时谐波信号,图 4(b)是其对应的 S 变换等值线图。可以看到,短时谐波特征主要体现在含有显著的基频整数倍频率分量上,在 150~400 Hz 频段有较密集的等值线分布。通过尺度压缩,统一 50 个时间尺度不同的短时谐波扰动并建立标杆模板如图 4(c)所示。

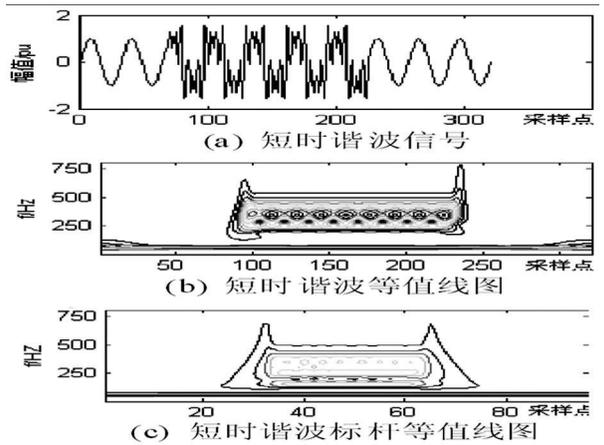


图 4 短时谐波

上述典型扰动分析可以得出:时频尺度缩放前后同类扰动等值线图相似,时频尺度缩放起到统一扰动持续时间尺度和频宽分辨率的作用;同类持续时间不同的扰动,时频尺度缩放后扰动特征趋于一致,可以建立该类扰动的标准判据;各类扰动的标杆模板彼此间差别极大,说明通过时频尺度缩放,比较测试扰动与标杆模板之间的相似度是可以实行的。

4 相似度识别

设 M_A 为某类被测样本经 S 变换和尺度缩放后的扰动特征矩阵, M_B 为标杆,两者之间相似度为

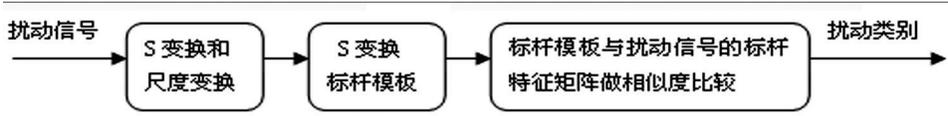


图 5 扰动信号识别流程图

表 1 各类电能质量扰动信号

扰动类型	信号模型	参数设置
电压凹陷 (-) 电压凸起 (+)	$v(t) = \{1 \pm A[u(t-t_1) - u(t-t_2)]\} \sin \omega_0 t$	$0.1 \leq A \leq 0.9$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$
单个尖峰 (+) 单个尖峰 (-)	$v(t) = \sin \omega_0 t \pm \text{sgn}(\sin \omega_0 t) \cdot \sum_{i=1}^k A_i \{u[t-(t_1+i \cdot 0.02)] - u[t-(t_1+i \cdot 0.02)]\}$	$0.1 \leq A \leq 0.4, 2 \leq k \leq 8$ sgn(·) 为符号函数
振荡暂态	$v(t) = \sin \omega_0 t + A e^{-\alpha(t-t_1)} \sin \alpha \omega_0 t \cdot [u(t-t_1) - u(t-t_2)]$	$0.1 \leq A \leq 0.8, 0 \leq \alpha \leq 15$ $5 \leq t_2 - t_1 \leq 30T$
短时谐波	$v(t) = \sin \omega_0 t + (A_3 \sin^3 \omega_0 t + A_5 \sin^5 \omega_0 t + A_7 \sin^7 \omega_0 t) \cdot [u(t-t_1) - u(t-t_2)]$	$0.02 \leq A_3, A_5, A_7 \leq 1$ $2T \leq t_2 - t_1 \leq 8T$

$$S_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W M_A(i, j) \cdot M_B(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W M_A^2(i, j) \cdot \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W M_B^2(i, j)}} \quad (5)$$

式中, H 和 W 分别为矩阵行数和列数; $M_A(i, j)$ 和 $M_B(i, j)$ 分别表示标准化扰动特征矩阵和扰动标杆第 i 行、j 列元素值。

6 类典型扰动分类过程见图 5。首先对每类扰动的 50 个随机样本进行 S 变换, 并对变换后的模时频矩阵进行尺度变换形成标杆矩阵; 将每类 50 个标杆矩阵求平均, 得到 S 变换的各类标杆模板; 将待测的扰动信号也进行 S 变换和尺度变换, 并与 6 类扰动标杆模板按相似度最大原则进行匹配, 从而实现分类。

5 仿真分析

以电压凹陷、凸起、尖峰、缺口、振荡暂态以及短时谐波 6 类扰动为分析对象, 其数学表达及参数见表 1。用 Matlab 生成扰动信号, 采样频率为 1.6 kHz, 电压基频为 50 Hz, 电压凹陷和凸起数据取 40 周波, 其余扰动数据取 10 周波。改变 6 类扰动发生时刻、持续时间、幅值以及采样长度, 其中持续时间及幅值变化参数限制在表 1 范围内。

5.1 算例一

各类扰动随机生成 200 个测试样本, 总计 1 200 个, 叠加 20 dB 噪声, 计算样本 S 变换经尺度缩放后的扰动矩阵与 6 类扰动标杆模板间的平均相似度, 结果见表 2。

从表 2 易看出, 各类测试样本都与其同类标杆间的平均相似度最大, 且同类扰动标杆只与同类被测试样本之间的平均相似度才最大, 说明该方法是可行的。

表 2 测试样本与标准模板平均相似度对比

样本	模板					
	凹陷	凸起	尖峰	缺口	暂态	谐波
凹陷	0.9774	0.9132	0.9238	0.9275	0.7342	0.6103
凸起	0.9004	0.9650	0.9422	0.9394	0.7415	0.6098
尖峰	0.9198	0.9486	0.9696	0.9689	0.7803	0.6726
缺口	0.9216	0.9442	0.9693	0.9701	0.7821	0.6779
暂态	0.7715	0.8265	0.8485	0.8471	0.9331	0.5831
谐波	0.6563	0.6950	0.7301	0.7341	0.5797	0.9248

表 3 分类识别结果

信号	噪声		
	40 dB	30 dB	20 dB
电压凹陷	100%	100%	99.4%
电压凸起	100%	100%	99.3%
电压尖峰	100%	100%	99.0%
电压缺口	100%	100%	99.1%
振荡暂态	100%	100%	99.2%
短时谐波	100%	100%	99.2%
平均数	100%	100%	99.2%

电压尖峰和缺口, 在无噪声情况下, 两类标杆相似, 只是基波幅值极性相反; 在噪声干扰情况下, 两类标准化的扰动特征矩阵图像清晰度下降, 与其标杆间的相似度随之降低, 但基波幅值的差异特征没变。因此, 表 2 中电压尖峰和缺口两类扰动平均相似度虽然接近但仍能正确分类。

5.2 算例二

被测样本叠加 40 dB、30 dB 和 20 dB 白噪声, 各类扰动在 3 种噪声下随机各取 1 000 个样本进行测试, 这些扰动的持续时间变化较大, 如电压凹陷、凸起的持续时间从 1 个周期至 30 个周期, 数据不规则性大。被测扰动识别准确率见表 3。

由表 3 可知, 采用所提出的方法, 在信噪比为 40 dB 和 30 dB 噪声水平下识别正确率为 100%; 在 20

dB 噪声水平下达 99% 以上, 分类结果较理想。出现极少数误判主要是强噪声情况下, 扰动特征被相对弱化。如电压凹陷下降幅度为 0.1 pu, 信噪比为 20 dB 的环境下, 噪声最大幅度为 0.1 pu。因此, 对扰动信号进行滤波处理, 减小噪声对扰动特征的干扰, 可以进一步提高分类识别的准确度。

6 结 论

(1) 通过尺度缩放, 同类持续时间不同的扰动可建立统一的标杆模板, 该模板涵盖了对应扰动类别的标准特征, 具有统一的时间尺度和频率分辨率, 解决了扰动持续时间不同需建立不同模板的问题, 减少了标准样本数据量。

(2) 用最大相似度原理, 被测扰动与标杆模板间的相似程度仅需通过简单代数运算就可获得, 不需要复杂的分类器, 简化了分类过程。

(3) 仿真证明, 所提出的方法具有较高的识别精度和抗噪能力, 有明显的工程应用价值。

(4) 如何选取最佳变换尺度, 进一步提高识别精度尚需进一步研究。

参考文献

[1] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(一)——电能质量一般概念[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 1—4.

[2] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5—13.

[3] Gargoom A. M., Ertugrul N., Soong W. L. A Comparative Study on Effective Signal Processing Tools for Optimum Feature Selection in Automatic Power Quality Events Clustering[C]. Industry Applications Conference 2005, (1): 52—58.

[4] 刘安定, 肖先勇, 邓武军. 短时电能质量扰动检测的一种新方法[J]. 继电器, 2005, 33(8): 27—30.

[5] 刘安定, 肖先勇, 邓武军. 基于离散余弦变换和小波变换的电能质量扰动信号检测方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 70—74.

[6] 王楠, 肖先勇, 曾颂崎, 等. 基于插值线性调频 Z 变换的谐波分析方法[J]. 电网技术, 2007, 31(18): 43—47.

[7] Mamun Bin Ibne Reaz, Florence Choong. Expert System for Power Quality Disturbance Classifier[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1979—1988.

[8] Weinong Tong, Xuelei Song. Detection and Classification

of Power Quality Disturbances Based on Wavelet Packet Decomposition and Support Vector Machines[C]. The 8th International Conference on Signal Processing 2006, (4): 16—20.

[9] H. K. Sin, H. W. Ngan. Automatic Power Quality Recognition System Using Wavelet Analysis[C]. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies 2004, (1): 311—316.

[10] Chen S. Feature Selection for Identification and Classification of Power Quality Disturbances[C]. 2005 IEEE International Conference on Power Engineering Society General Meeting 2005(3): 301—306.

[11] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰, 等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 24(4): 51—56.

[12] I. W. C. Lee, P. K. Dash. S-transform-based Intelligent System for Classification of Power Quality Disturbance signals[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2003, 50(4): 800—805.

[13] K. Vivek, M. Gopal, B. K. Panigrahi. Knowledge Discovery in Power Quality Data Using Support Vector Machine and S-transform[C]. Proceedings of the Third International Conference on Information Technology: New Generations 2006(16): 251—258.

[14] Fengzhan Zhao, Rengang Yang. Power Quality Disturbance Recognition Using S-transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 944—950.

[15] 赵凤展, 杨仁刚. 时频分析方法在电能质量扰动检测与识别中的应用[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(5): 33—37.

[16] M. V. Chilukuri, P. K. Dash. Multiresolution S-transform-based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 323—330.

[17] 刘守亮, 肖先勇. Daubechies 复小波的生成及其在短时电能质量扰动检测中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 106—110.

[18] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换时频等值线图与幅值包络线的短时电能质量扰动检测与分类[J]. 继电器, 2005, 33(22): 49—52.

[19] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换模时频矩阵相似度的短时电能质量扰动分类[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 67—71.

[20] 许录平. 数字图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

(收稿日期: 2009—11—25)