

# 经验模态分解在单相自适应重合闸中的应用

兰华<sup>1</sup>, 艾涛<sup>1</sup>, 李扬<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 东北电力大学信息工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 为了识别输电线路单相接地瞬时性和永久性故障, 利用经验模态分解将电压暂态信号分解为若干个固有模态函数, 选取代表信号较高频部分的前四层固有模态函数进行归一化, 作为最小二乘支持向量机的输入特征量。大量 EMTP 仿真和 Matlab 计算表明该方法能很好地区分瞬时性故障和永久性故障, 表明该方法具有更好的识别准确率。与 BP 神经网络进行了比较, 证明了经验模态分解和最小二乘支持向量机应用于单相自适应重合闸中具有更快的识别速度。

**关键词:** 经验模态分解; 最小二乘支持向量机; 单相自适应重合闸; 瞬时性故障; 永久性故障

## Application of EMD on single-pole adaptive reclosure of transmission

LAN Hua<sup>1</sup>, AI Tao<sup>1</sup>, LI Yang<sup>2</sup>

(1. Electric Engineering Institute, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Information Engineering Institute, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** For distinguishing the transient faults and permanent faults on EHV transmission lines, voltage transient signals are decomposed into a number of intrinsic mode functions by using empirical mode decomposition, then the normalized first four IMFs which represent the high frequency (HF) parts of signals as the characteristic values of LS-SVM are used in this paper. A lot of simulation results of EMTP and Matlab calculation show that the method can distinguish the transient faults and permanent faults accurately and shows that the methods has better recognition accuracy. On the basis of the simulation results the method is compared with BP neural network and faster recognition of applying EMD and LS-SVM to single phase adaptive auto-reclosure is proved.

**Key words:** EMD; LS-SVM; single-pole adaptive reclosure; transient faults; permanent faults

中图分类号: TM762 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0035-05

## 0 引言

重合闸是保证电力系统连续可靠供电的重要措施, 为了在瞬时故障消除后使线路重新投入运行, 我国架空输电线路已经普遍应用自适应重合闸技术。运行经验表明, 超高压输电线路故障中, 70%以上是单相接地短路, 而单相故障中, 约有 80%为瞬时性故障<sup>[1]</sup>。自动重合闸提高了供电的可靠性以及电力系统并列运行的稳定性。近年来, 单相自适应重合闸的理论和方法日趋成熟, 为其实用化奠定了理论基础。其中典型的有利用瞬时性故障单相跳开后断开相恢复电压高于线路互感电压的电压判据方法<sup>[2]</sup>、智能识别方法<sup>[3-5]</sup>、电压谐波分析<sup>[6]</sup>、小波及小波包分析<sup>[7-9]</sup>的自适应重合闸方法。

本文首先根据文献[10]提出的一、二次电弧数学模型, 利用 EMTP/ATP 的 MODEL 模块建立故障点电弧模型, 在瞬时性故障时通过电弧电阻接地,

实现瞬时性故障时故障点电阻的非线性特性, 较好地模拟了瞬时性故障时电弧燃烧-熄灭-重燃的反复变化过程。利用经验模态分解 (EMD) 法提取故障后故障相母线电压暂态信号, 然后将分解出的前四层固有模态函数 (intrinsic mode function, IMF), 进行归一化后作为最小二乘支持向量机的输入特征量, 用于瞬时性故障与永久性故障的判别中, 取得了良好的效果, 能提高重合闸成功率。

## 1 单相接地故障特征分析

### 1.1 单相瞬时性故障时的故障相电压特性<sup>[11-12]</sup>

以 A 相故障为例, 当发生瞬时性故障后, 线路故障相两端断开。随着短路点电弧的逐渐熄灭, 输电线路转入两相运行状态, 如图 1 所示。

图 1 中,  $C_m$  为线路相间电容;  $C_0$  为线路对地电容;  $L_1, L_2, L_m, L_n$  为并联电抗器参数。健

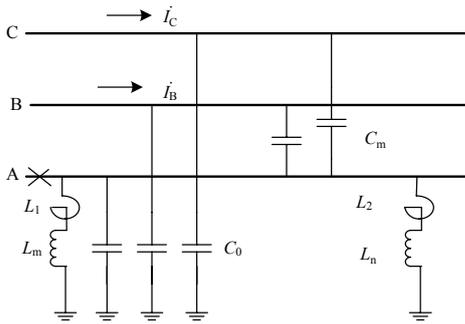


图1 输电线路两相运行的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of transmission line of two-phase operation

全相与故障相之间存在电磁与静电耦合联系，使故障相仍保持一定的电压，其工频分量为电磁耦合电压  $\dot{U}_{xL}$  与电容耦合电压  $\dot{U}_y$  的矢量和。 $\dot{U}_{xL}$ 、 $\dot{U}_y$  分别为：

$$\dot{U}_{xL} = (\dot{I}_B + \dot{I}_C) Z_m L \quad (1)$$

$$\dot{U}_y = (\dot{U}_B + \dot{U}_C) \frac{jX_0}{jX_m + 2jX_0} \quad (2)$$

式中： $Z_m$  为输电线路单位长度互感； $L$  为线路全长； $X_0$ 、 $X_m$  分别为相对地阻抗和相间容性阻抗；

$\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  为健全相（B、C 相）电压； $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$  为健全相电流。可见，电磁耦合电压的大小与线路长度成正比，而电容耦合电压则由线路参数和并联补偿度决定，与运行方式无关。用 T 型等效电路模拟线路分布参数可得到瞬时性故障时线路断开相电压的表达式为

$$\dot{U}_{AM} = \dot{U}_y + \dot{U}_{xL} / 2 \quad (3)$$

式中： $L$  为故障点距线路首端的距离。

### 1.2 单相永久性故障时的故障相电压特性<sup>[11-12]</sup>

在永久性故障情况下，故障点始终存在，线路对地电容可靠放电，电容耦合电压可以忽略。

$$\dot{U}_{AM} = (\dot{I}_B + \dot{I}_C) Z_m L \quad (4)$$

发生瞬时性故障时存在电容耦合电压，而发生永久性故障时不存在该电压，电压判据就是基于故障相熄弧后恢复电压的这一特性来区分瞬时性和永久性故障。但在长线重负荷时容易误判，缩短了可靠判定区<sup>[12]</sup>。对于具有并联电抗器补偿的线路，其断开相恢复电压呈现拍频现象，这将使断开相电压幅值不能始终满足电压判据，给电压判据的正确判定带来了一定困难<sup>[13]</sup>。

## 2 特征量的提取

### 2.1 经验模态分解原理

EMD 信号分解方法是 1998 年 Huang 提出来的<sup>[14]</sup>。它是根据信号自身的时间尺度，对非线性及非平稳信号进行一系列表征分解，获得固有模态函数（IMF），使得各个 IMF 是窄带信号。IMF 分量要满足两个条件：（1）信号数据序列的极值点数目与过零点数目相等或最多相差一个；（2）信号数据序列上下包络线关于时间轴局部对称，而且 EMD 分解基于下面的假设：①信号至少有两个极值，一个极大值和一个极小值；②信号特征时间尺度是由极值间的时间间隔确定的；③如果信号中缺乏极值点，但存在缺陷点，可通过微分、分解、再积分的方法得 IMF。IMF 分量可根据信号的极大值和极小值使用三次样条插值来实现。方法如下<sup>[15-16]</sup>：

（1）确定信号  $s(t)$  的所有极大值点和极小值点，根据这些极值点分别用 3 次样条函数拟合原数据序列的上、下包络线，取其均值  $m_1$ ，将原数据序列  $s(t)$  减去  $m_1$  可得到一个新数据序列  $h_1$ 。通常  $h_1$  不是一个平稳数据序列，因此重复以上过程  $n$  次，当满足 IMF 条件时就得到第一个 IMF 分量  $c_1$ ，它表示信号数据中的最高频成分。

（2） $s(t)$  减去  $c_1$  得到一个去掉最高频成分的新数据序列，重复步骤（1），得到一系列  $c_i$  和最后一个不可分解的序列  $r$ ， $r$  代表  $s(t)$  的均值或趋势项。直到  $r$  比预定值小或  $r$  变成单调函数时，这样，原始数据序列  $s(t)$  可表示为  $n$  个固有模态分量和 1 个余量的和，即

$$s(t) = \sum_n^1 c_i + r \quad (5)$$

在判断所得到的信号是否已满足 IMF 条件时，可以使用公式(6)<sup>[15]</sup>：

$$s_D = \sum_0^T \left| \frac{h_{(k-1)}(t) - h_{(k)}(t)}{h_{(k-1)}^2(t)} \right|^2 \quad (6)$$

式中： $h_{(k-1)}(t)$  是  $k-1$  次筛选后的剩余信号； $h_{(k)}(t)$  是  $k$  次筛选后的剩余信号； $s_D$  的值常取 0.2~0.3。信号经 EMD 分解后，可得到一系列平稳的时域信号。分解得到的 IMF 模式分量代表了原始信号中包含的不同时间尺度的特征信号，每个 IMF 分量可认为是单频率信号或者近似窄带信号，分别反映由高频到低频的振动模态，余量  $r$  中则包含频率最低的成分。

## 2.2 基于经验模态分解的特征量的提取

从研究范畴来说自适应重合闸属于模式识别领域。对电力系统故障进行模式识别时其输入特征量的选取是一个关键问题, 特征量过多会影响网络的收敛速度, 过少会影响精确度。本文考虑的系统三相对称, 为简化仿真训练过程, 只考虑 A 相发生单相接地故障。由于永久性故障时线路端电压中的暂态谐波主要来源于电力系统中的储能元件, 其衰减速度相对较快; 而瞬时性故障时, 由于电弧电压的影响线路电压中各次谐波分量中的奇次谐波分量衰减较慢, 致使在故障断开相的端电压中含有较高比例的奇次谐波分量。因此瞬时性故障暂态电压信号比永久性故障时要复杂得多, 并且主要集中在高频部分。经验模态分解出固有模态函数反映故障相暂态电压由高频到低频的振动模式。

设仿真采样间隔为  $\Delta T$ , 则第  $i$  层固有模态函数数据序列的能量为

$$S_i = \sum_{k=0}^N U_i^2(k\Delta T)\Delta T \quad (7)$$

式中:  $N$  为采样个数。

经验模态分解后的所有固有模态函数数据序列的能量之和为

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^{N1} \sum_{k=0}^N U_i^2(kT)T \quad (8)$$

式中:  $n$  为经验模态分解出的固有模态函数层数。

每个固有模态函数数据序列的能量占总能量的百分比为

$$\eta_i = \frac{S_i}{S} \quad (9)$$

对大量样本进行计算可以得出前四层固有模态函数数据序列能量所占百分比均在 90% 以上。所以前四层固有模态函数对原始信号的贡献率占绝大部分, 因此选取前四层固有模态函数进行归一化后作为特征量。

## 3 最小二乘支持向量机算法

最小二乘支持向量机 (Least Squares Support Vector Machines, LS-SVM) 是支持向量机的一种改进<sup>[17-18]</sup>, 它是将传统支持向量机中的不等式约束改为等式约束, 且将误差平方和 (Sum Squares Error) 损失函数作为训练集的经验损失, 这样就把解二次规划问题转化为求解线性方程组问题, 提高求解问题的速度和收敛精度。其具体算法如下:

对于给定的训练数据集

$s = ((x_1, y_1), \dots, (x_k, y_k)) \in R^n \times R$ , 利用高维特征空间的线性函数

$$f(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (10)$$

来拟合样本集。其中:  $\varphi(x)$  为从输入空间到高维特征空间的非线性映射;  $w$  为特征空间权系数向量,  $b$  为偏置。根据结构风险最小化原理, LS-SVM 法回归问题可以表示为如下约束优化问题:

$$\min \frac{1}{2} w^T w + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^k e_i^2 \quad (11)$$

$$\text{s.t. } e_i = y_i - (w^T \varphi(x_i) + b), \quad i = 1, \dots, k$$

引入拉格朗日函数, 将式 (8) 的优化问题变换到对偶空间。

$$L = w^T w + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^k e_i^2 - \sum_{i=1}^k a_i (e_i + w^T \varphi(x_i) + b - y_i) \quad (12)$$

式中:  $a_i$  为拉格朗日乘子;  $\gamma$  为常数, 根据 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^k a_i \varphi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^k a_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial e_i} = 0 \rightarrow a_i = \gamma e_i, i = 1, \dots, k \\ \frac{\partial L}{\partial a_i} = 0 \rightarrow y_i - (w^T \varphi(x_i) + b) = 0, i = 1, \dots, k \end{cases} \quad (13)$$

消去  $w$  和  $e_i$  解得:

$$\begin{pmatrix} 0 & \vec{1}^T \\ \vec{1} & \Omega + \gamma^{-1} I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b \\ \mathbf{a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{y} \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中:  $\vec{1} = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_k]^T$ ;  $\Omega_{ij} = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) = K(x_i, x_j)$ ,  $K(x_i, x_j)$  为定义的核函数;  $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_k]^T$ 。

利用最小二乘法求解式 (6) 表示的线性方程组, 从而解出  $\mathbf{a}$  和  $b$ , 最后得到 LS-SVM 回归函数为:

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^k a_i K(x_i, x_j) + b \quad (15)$$

## 4 单相自适应重合闸步骤及仿真

### 4.1 单相接地故障类型识别

最小二乘支持向量机在识别问题上通常只考虑

两类, 输出为 0 表示该样本属于一类, 输出为 1 表示该样本属于另一类。单相接地故障分为瞬时性故障和永久性故障, 刚好对应两种输出。这里选择瞬时性故障输出为 0, 永久性故障输出为 1。则基于 EMD 和 LS-SVM 的输电线路单相自适应重合闸步骤如下:

(1) 利用 EMTP 对各种情况下单相接地故障进行仿真, 采样取得线路首故障相端电压暂态信号。

(2) 对采样的信号序列进行 EMD 分解。

(3) 将分解出的前四层固有模态函数进行归一化后作为最小二乘支持向量机的输入特征量。

(4) 选取一部分作为训练样本, 输入最小二乘向量机进行训练。选取剩下部分作为检验样本, 输入已经训练好的最小二乘向量机进行识别。

#### 4.2 仿真分析

本文利用 EMTP/ATP 对一 500 kV 系统进行仿真。线路模型如图 2 所示。

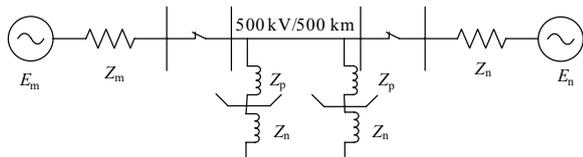


图 2 仿真模型

Fig.2 Simulation model

线路选择分布参数模型, 参数如下:  $R_1=0.00758 \Omega/\text{km}$ ;  $R_0=0.15421 \Omega/\text{km}$ ;  $L_1=0.2635 \Omega/\text{km}$ ;  $L_0=0.8306 \Omega/\text{km}$ ;  $C_1=0.01397 \mu\text{F}/\text{km}$ ;  $C_0=0.009296 \mu\text{F}/\text{km}$ ;  $Z_{m0}=0.86+j52 \Omega$ ;  $Z_{m1}=0.8+j10.89 \Omega$ ;  $Z_{n0}=5.69+j14.18 \Omega$ ;  $Z_{n1}=3.15+j8.15 \Omega$ 。

设线路 A 相在 0.1 s 时发生接地故障, 0.15 s 时线路两侧断路器跳开。为反映各种因素对判别结果的影响, 本文对不同故障地点、金属性接地及经过渡电阻  $R_g$  ( $R_g=20 \Omega$ ) 接地的瞬时性故障和永久性故障进行了仿真, 通过 EMD 分解和归一化处理得到最小二乘支持向量机所需的训练样本数据和检验样本数据。经过调试最小二乘支持向量机参数  $\gamma=20$ 。表 1 列出了部分检验样本及结果。

表 2 给出了识别线路发生瞬时性故障和永久性故障时本文所用方法和 BP 神经网络所用时间的比较结果。

由表 1 可以看出, 因为最小二乘支持向量机进行分类识别时, 只输出 0 和 1 代表两类样本, 所以识别结果没有误差, 更能准确区分瞬时性故障和永久性故障, 输出精度明显高于 BP 神经网络, 从表 2 可以看出最小二乘支持向量机所用时间明显比 BP 神经网络少, 这样可以不错过最佳重合闸时间。

表 1 部分检验样本及结果

Tab.1 Partial testing samples and outputs

过渡电阻 / $\Omega$	故障位置	故障类型	实际输出		
			本文方法	BP 神经网络	理想输出
0	线路全长	瞬时	0	-0.137 5	0
	10%	永久	1	0.716 7	1
	线路全长	瞬时	0	0.073 1	0
	60%	永久	1	0.930 3	1
	线路全长	瞬时	0	-0.042 42	0
	90%	永久	1	1.048 4	1
20	线路全长	瞬时	0	-0.135 6	0
	10%	永久	1	1.037 3	1
	线路全长	瞬时	0	0.106 1	0
	60%	永久	1	0.884 8	1
	线路全长	瞬时	0	-0.271 0	0
	90%	永久	1	1.207 0	1

表 2 识别故障类型所需时间的比较

Tab.2 Comparison of time for distinguishing fault types

识别方法	采集时间/s	识别时间/s	总计时间/s
本文方法	0.4	0.012 65	0.412 65
BP 神经网络	0.4	0.235 0	0.635 0

## 5 结论

对于带有并联电抗器的高压输电线路, 并联电抗器的存在将显著降低断开相恢复电压, 使电压判据应用受到限制。本文将经验模态分解和最小二乘支持向量机应用于单相自适应重合闸中, 并与 BP 神经网络进行比较。仿真计算验证了该方法能快速、准确有效地识别瞬时性故障与永久性故障, 在一定程度上克服了高压输电线路中自适应重合闸判据应用的缺点, 在单相自适应重合闸中应用具有一定的优越性。

## 参考文献

[1] 刘浩芳, 王增平, 徐岩, 等. 带并联电抗器的超 /特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据[J]. 电网技术, 2006, 30 (18): 29-34.  
LIU Hao-fang, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. Criterion for determining fault nature in adaptive single-phase reclosing[J]. Power System Technology, 2006, 30 (18): 29-34.

[2] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时和永久故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18 (2): 23-32.  
GE Yao-zhong. Method of distinguishing between instant and permanent faults during automatic single-phase

- reclosing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18 (2): 23-32.
- [3] 房鑫炎, 阙波. 人工神经网络在自适应重合闸瞬时与永久故障判别中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11 (3): 80-86.  
FANG Xin-yan, QUE Bo. The application of ANN in the distinction of transient and permanent faults during adaptive autoreclosure[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11 (3): 80-86.
- [4] 聂宏展, 董爽, 李天云, 等. 基于模糊神经网络的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2005, 29 (10): 76-79.  
NIE Hong-zhan, DONG Shuang, LI Tian-yun, et al. Single phase adaptive auto-reclosure based on fuzzy neural network[J]. Power System Technology, 2005, 29 (10): 76-79.
- [5] 杨伟, 彭丽, 张俊芳, 等. 基于模糊神经网络的自适应单相自动重合闸[J]. 继电器, 2005, 33 (15): 66-70.  
YANG Wei, PENG Li, ZHANG Jun-fang, et al. Adaptive autoreclosure of single phase based on ANN[J]. Relay, 2005, 33 (15): 66-70.
- [6] 李斌, 李永丽, 曾治安, 等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2002, 26 (10): 53-57.  
LI Bin, LI Yong-li, ZENG Zhi-an, et al. Study on single-pole adaptive reclosure based on analysis of voltage harmonic signal[J]. Power System Technology, 2002, 26 (10): 53-57.
- [7] 成敬周, 张举. 基于电弧复小波检测的单相自适应重合闸[J]. 继电器, 2005, 33 (7): 21-25.  
CHENG Jing-zhou, ZHANG Ju. Study of single phase adaptive reclosure based on arc detection by complex wavelet algorithm[J]. Relay, 2005, 33 (7): 21-25.
- [8] 蔡超豪. 基于小波包变换的自适应重合闸[J]. 继电器, 1999, 27 (2): 21-23.  
CAI Chao-hao. Adaptive single-phase reclosing based on wavelet[J]. Relay, 1999, 27 (2): 21-23.
- [9] 程玲, 徐玉琴, 宋秭霖. 基于电弧小波谱能量分析的输电线路单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2007, 31 (24): 81-85.  
CHENG Ling, XU Yu-qin, SONG Zi-lin. Single-pole adaptive reclosure of transmission line based on arc models and wavelet spectrum energy analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31 (24): 81-85.
- [10] John S A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved techniques for modeling fault arcs on faulted EHV transmission systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141 (2): 148-154.
- [11] 聂宏展, 董爽, 李天云, 等. 基于模糊神经网络的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2005, 29 (10): 75-79.  
NIE Hong-zhan, DONG Shuang, LI Tian-yun, et al. Single-phase adaptive auto-reclosure based on fuzzy neural network[J]. Power System Technology, 2005, 29 (10): 75-79.
- [12] 唐蕾, 陈维荣. 神经网络在电力系统自适应单相重合闸中的应用[J]. 继电器, 2003, 31 (8): 26-29.  
TANG Lei, CHEN Wei-rong. Neural network's application in adaptive single-phase reclosing of electric power system[J]. Relay, 2003, 31 (8): 26-29.
- [13] 李斌, 李永丽, 盛鸥, 等. 带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (5): 52-56.  
LI Bin, LI Yong-li, SHENG Kun, et al. The study on single-pole adaptive reclosure of EHV transmission lines with the shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (5): 52-56.
- [14] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[C]. //Proc R Soc. London: 1998.903-995.
- [15] 李天云, 王飞, 祝磊, 等. 基于固有模态能量熵的配电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2008, 32, 增刊: 128-132.  
LI Tian-yun, WANG Fei, ZHU Lei, et al. A new method of distribution network single-phase ground fault line selection based on the intrinsic mode energy entropy[J]. Power System Technology, 2008, 32(S): 128-132.
- [16] 陈忠, 郑时雄. EMD 信号分析方法边缘效应的分析[J]. 数据采集与处理, 2003, 18 (1): 114-118.  
CHEN Zhong, ZHENG Shi-xiong. Analysis on end effects of EMD method[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, 18 (1): 114-118.
- [17] Vapnik V N, Golowich S E, Smola A J. Support vector method for function approximation, regression estimation and signal processing[J]. Adv Neural Information Processing Systems, 1996, 281-287.
- [18] 张全明, 刘会金. 最小二乘支持向量机在电能质量扰动分类中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 106-110.  
ZHANG Quan-ming, LIU Hui-jin. Application of LS-SVM in classification of power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1): 106-110.

收稿日期: 2009-07-01; 修回日期: 2009-09-25

作者简介:

兰华(1956-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事电工理论、信号处理研究;

艾涛(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自适应重合闸; E-mail: atjianke@163.com

李扬(1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备故障诊断, 人工智能及其应用。