

## CL4 多小波预处理方法及其在发电机故障检测中的应用

唐惠玲

(广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州 510090)

**摘要:** 在介绍 CL4 多小波理论的基础上, 分析了基于 CL4 多小波变换的发电机故障检测方法, 通过仿真, 分别对基于不同预处理方法的 CL4 多小波和 GHM 多小波在发电机故障检测中的应用效果进行比较。仿真结果显示: 选择合适的预处理方法, 利用 CL4 多小波, 对发电机故障进行检测, 可获得比 GHM 多小波更好的检测效果, 研究还表明: 预处理方法是影响多小波检测效果的关键因素。

**关键词:** CL4 多小波; 故障检测; 发电机; 预处理

## Pre-processing methods of CL4 multiwavelet and their applications in generator fault detection

TANG Hui-ling

(School of Physics &amp; Opto-electronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

**Abstract:** On the basis of the presentation on basic theory of CL4 multiwavelet, the method of detecting the generator fault based on CL4 multiwavelet transform is discussed first in this paper. The detecting effect of the generator fault with CL4 multiwavelet and GHM multiwavelet based on different pre-processing methods is analyzed and compared after a great deal of simulation work. The results indicate that the detecting effect of the generator fault with CL4 multiwavelet based on proper pre-processing methods is better than that with GHM multiwavelet, and the choice of pre-processing methods is a key factor of the detecting effect.

**Key words:** CL4 multiwavelet; fault detection; generator; pre-processing

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)20-0043-04

## 0 引言

多小波分析是一种基于小波理论发展起来的新理论, 多小波是基于多个小波函数经过伸缩平移而成, 对应有多个尺度函数, 它同时具有对称性、正交性、短支撑性、高级消失矩等特性。但它在信号处理时, 不能对采样数据直接进行分解和重构, 在分解前需要进行数据预处理, 然后对预处理过的数据进行分解, 对重构后数据要进行后处理才能得到重构数据<sup>[1]</sup>。

近年来, 许多对称、正交多小波被构造出来<sup>[2, 3]</sup>, 多小波的理论研究也取得了一些突破, 为多小波的实际应用奠定了基础。尽管多小波理论研究取得了不少实质性的结果, 但将它们应用于信号处理还有很多问题待解决, 如: 大多数构造的多尺度函数不满足低通特性; 如何将一维信号转换为多小波需要的向量输入流。对此常用的办法是对初始采样信号进行适当的预滤波处理<sup>[4]</sup>, 可是现有的预滤波器破坏

了多小波的正交性和对称性。于是基于低通特性, Lebrun 和 Vellerli 提出了多小波的平衡改进方法。

目前, 国内外诸多学者正对多小波常用的预处理方法进行深入研究。本文拟在介绍 CL4 多小波基本理论的基础上, 总结前人的研究成果, 并探讨多小波的不同预处理方法, 分析基于 CL4 多小波的发电机故障检测方法, 最后通过仿真, 对 CL4 多小波和 GHM 多小波在发电机故障检测中的应用效果进行对比。

## 1 CL4 多小波基本理论

多小波的多尺度函数  $\phi(t)$  和多小波函数  $\psi(t)$  满足以下二尺度矩阵方程<sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} \phi(t) = \sum_{k=0}^L H_k \phi(2t-k) \\ \psi(t) = \sum_{k=0}^L G_k \phi(2t-k) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $0 \leq k \leq L$ ,  $H_k$  和  $G_k$  为  $r \times r$  维系数矩阵;  $L$  为多小波滤波器长度;  $r$  为多小波维数。根据多小

基金项目: 广东工业大学青年科学基金资助项目 (052012)

波的多分辨率分析, 有如下快速多小波分解与重构公式<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} c_{j-1,k} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} H_n c_{j,2k+n} \\ d_{j-1,k} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} G_n c_{j,2k+n} \end{cases} \quad (2)$$

$$c_{j,n} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} (H_k^* c_{j-1,2k+n} + G_k^* d_{j-1,2k+n}) \quad (3)$$

式中:  $c_{j,k} = (c_{1,j,k}, \dots, c_{r,j,k})^T$  为多小波分解和重构的低频系数;  $d_{j,k} = (d_{1,j,k}, \dots, d_{r,j,k})^T$  为多小波分解和重构的高频系数;  $H_k^*$  与  $G_k^*$  分别为  $H_k$  和  $G_k$  复共轭矩阵。

根据 Daubechies 系列小波的定义方式, 把位于区间  $[0, 3]$  上的 CL 多小波称为 CL4 多小波, 它的滤波器长度为 4, 其滤波器系数矩阵<sup>[3]</sup>为

$$\begin{cases} H_0 = \begin{bmatrix} 10 - 3\sqrt{10} & 5\sqrt{6} - 2\sqrt{15} \\ 5\sqrt{6} - 3\sqrt{15} & 5 - 3\sqrt{10} \end{bmatrix} / 80 \\ H_1 = \begin{bmatrix} 30 + 3\sqrt{10} & 5\sqrt{6} - 2\sqrt{15} \\ -5\sqrt{6} - 5\sqrt{15} & 15 - 3\sqrt{10} \end{bmatrix} / 80 \\ H_2 = SH_1S, H_3 = SH_0S \\ G_0 = \begin{bmatrix} 5\sqrt{6} - 2\sqrt{15} & -10 + 3\sqrt{10} \\ -5 + 3\sqrt{10} & 5\sqrt{6} - 3\sqrt{15} \end{bmatrix} / 80 \\ G_1 = \begin{bmatrix} -5\sqrt{6} + 2\sqrt{15} & 30 + 3\sqrt{10} \\ 15 - 3\sqrt{10} & 5\sqrt{6} + 7\sqrt{15} \end{bmatrix} / 80 \\ G_2 = SG_1S, G_3 = SG_0S \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $H_0$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$  为低通滤波器系数矩阵;  $G_0$ 、 $G_1$ 、 $G_2$  和  $G_3$  为高通滤波器系数矩阵; 下标 0, 1, 2, 3 表示系数矩阵的次序;  $S = \text{diag}[1, -1]$ 。

CL4 多小波的尺度函数和小波函数均具有紧支撑性, 使其具有良好的局域性; 两个尺度函数分别与两个小波函数对称和反对称, 保证其具有线性相位; CL 多小波是正交的, 使其变换后保证能量守恒; CL4 多小波具有三阶逼近阶, 使其具有良好的逼近性能, GHM 多小波与 CL4 多小波相似, 滤波器长度均为 4, 但其逼近阶为二阶。

## 2 常见的预处理方法

多小波与传统小波不同, 多小波实际上是一个多输入多输出系统, 在处理信号前, 一般需要先矢

量化初始数据, 使进入塔式算法的输入变成与多小波维数相同的数据。在信号的重构时, 需要把数据合成与原维数相同的数据。

多小波的预处理方法主要分为两类: 即采用预滤波法<sup>[5]</sup>和平衡多小波法<sup>[6]</sup>, 其主要任务是把原始数据分解为  $r$  维数据, 并保持或改善多小波滤波器的性能。

### 2.1 预滤波法

对于预滤波方法的研究主要集中在对 GHM 多小波的研究上<sup>[4]</sup>, 主要有奇/偶法、deriv. 法、Haar 滤波器法、MOD-Haar 法、GHM.init 法等各种预处理方法, 不同的预处理方法对多小波滤波器的响应产生不同的影响, 也对信号处理的效果产生一定影响, 其中, GHM.init 方法对 GHM 多小波滤波器响应改善效果最佳<sup>[4, 5, 7]</sup>。

### 2.2 平衡多小波法

预滤波法给多小波的应用带来方便, 也带来一些新问题, 若预滤波法不是正交变换, 离散多小波变换 (DMWT) 的正交性将丢失; 若预滤波不是对称的, 则会损失 DMWT 的线性相位; 若预滤波有多个非零系数, 则会增加基函数的支撑长度。

多小波滤波这个多输入多输出系统, 在处理信号前, 需要先矢量化初始数据 (通常是一维信号), 使进入 Mallat 塔式算法的输入变成  $r$  维数据; 同时, 在信号重构时需要把  $r$  维数据合成原始维数据。矢量化初始数据简单的方法是分解这个一维信号为它的多相元, 这一系统可以被看作是一个多通道时间变量滤波带。然而, 由于尺度函数向量的各分量的谱行为存在着某些差异, 这个低通多滤波带也许会有不平衡通道, 因而增加了向量量化的复杂性。在此情况下, 矢量化的多相方法产生粗细分辨系数的混合, 当仅用粗分辨系数重构信号时, 将产生强烈的振荡, 这种现象称为不平衡现象。因此期望某一类光滑信号只使用粗糙解系数就能被很好地复制, 即期望这些信号被低通支流特征化而被高通支流取代。1998 年, Lebrun J 和 Vetterli M 提出了平衡多小波的概念, 它可避免预滤波。

平衡多小波的基本思想是构造一个低通合成算子  $L$ , 其中  $L$  由低通滤波器  $h_k$  组成, 以同样方式可定义由高通滤波器  $g_k$  组成的高通合成算子  $H$ 。当  $L^T$  保持向量  $u_1 = [\wedge \ 1 \ 1 \ 1 \ \wedge]^T$ , 即  $L^T u_1 = u_1$  时, 称正交多小波系统是平衡的。对于目前大多数多小波, 并不满足这一要求。构造平衡多小波是消除多小波的不平衡现象的方法之一。期望  $[1 \ 1]^T$  是  $H(0)$  对应特征值 1 的右特征向量, 一般的方法

是设计一个酉矩阵  $U$  使得  $U^T H U \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。设

$H(\omega)$  和  $G(\omega)$  是不平衡正交多小波所对应的多滤波带频率响应, 定义:

$$H'(\omega) = U^T H(\omega) U$$

, 则对

$$G'(\omega) = U^T G(\omega) U$$

应于新多滤波带频率响应的多小波是平衡的,  $H'$  与  $H$  有相同的光滑性和逼近性, 新的多小波仍是平衡的。

可见经过平衡变换, 使原有的低高通滤波器既满足了向量的多通道特性, 又尽可能保持多小波的正交性、对称性和短支撑性不被破坏。

### 3 CL4 多小波在发电机故障检测中的应用

对发电机故障检测和诊断, 是分解和处理发电机运行中产生的各种电磁、机械等物理信号, 实时地判别其状态, 以期在故障初期或故障时发出警报。发电机在正常运行时发出的电磁信号较为平稳, 一旦出现故障, 其电压、电流波形将发生突变。利用多小波对发电机故障检测和诊断, 就是运用多小波的多分辨率分析对故障信号进行检测或诊断, 在信号出现突变点处, 其多小波变换后的系数具有模极大值, 则由多小波变换的模极大值点确定故障发生的时刻; 而且多小波每一层的分解高频系数不只一组。为进一步分析提供更丰富的信息, 所以可以通过对每层多组高频系数的综合和处理以达到更好地检测和诊断。需注意, 在多小波的实际应用中, 原始信号的预处理是关键问题。

下面通过 EMTF 软件和 Matlab 软件来实现对发电机故障信号的仿真分析, 找出最适合于发电机故障检测的多小波及其预处理方法。

### 4 定子故障检测仿真

采用 EMTF 仿真发电机定子绕组 A、C 两相短路时的电压波形, 作为原始信号, 如图 1 所示。图 2 为频率正常 (50Hz) 时, 分别用 DB4 小波、基于 GHM.init 预处理方法的 GHM 多小波、Haar 预处理方法的 CL4 多小波和平衡预处理方法的 CL4 多小波, 对 A、C 两相故障电压信号进行处理的结果。图 3 为频率为 48 Hz 时, 分别用 DB4 小波、基于 GHM.init 预处理方法的 GHM 多小波、Haar 预处理方法的 CL4 多小波和基于平衡预处理方法的 CL4 多小波, 对 A、C 两相故障电压信号进行处理的结果。图 4 为频率为 46 Hz 时, 分别用 DB4 小波、基于 GHM.init 预处理方法的 GHM 多小波、Haar 预处

理方法的 CL4 多小波和基于平衡预处理方法的 CL4 多小波, 对 A、C 两相故障电压信号进行处理的结果。

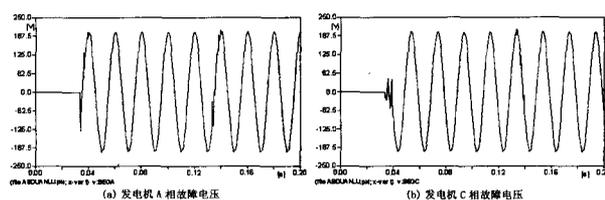


图 1 发电机绕组 A、C 两相短路电压信号

Fig.1 Two-phase short-circuit voltage signals of A and C phases of generator

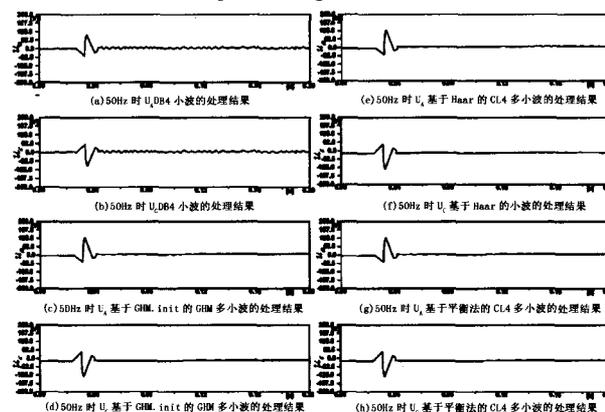


图 2 50 Hz 时的 A、C 两相短路电压信号的小波及多小波检测波形

Fig.2 Detecting curves of two-phase short-circuit voltage signals of A and C phases based on wavelet and multiwavelet transforms when system fundamental frequency is 50 Hz

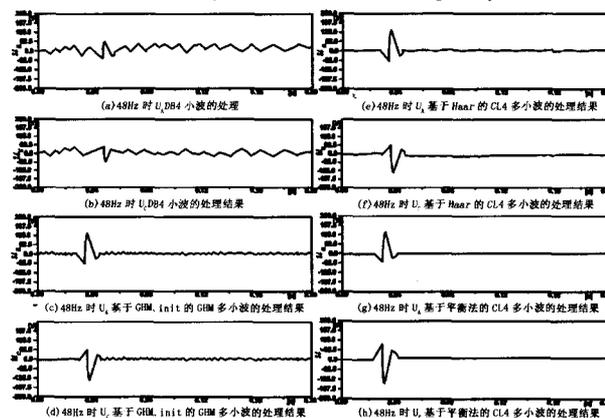


图 3 48 Hz 时的 A、C 两相短路电压信号的小波及多小波检测波形

Fig.3 Detecting curves of two-phase short-circuit voltage signals of A and C phase based on wavelet and multiwavelet transforms when system fundamental frequency is 48 Hz

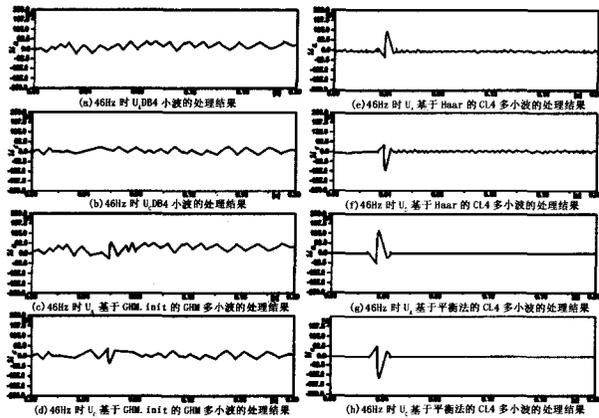


图4 46 Hz 时的 A、C 两相短路电压信号的小波及多小波检测波形

Fig.4 Detecting curves of two-phase short-circuit voltage signals of A and C phase based on wavelet and multiwavelet transforms when system fundamental frequency is 46 Hz

由图 2、图 3 和图 4 的仿真结果可以进一步得到基于不同预处理方法的多小波对故障信号检测效果, 如表 1。

表 1 故障电压的小波及多小波分析检测结果

Tab.1 Detecting results of fault voltage signals based on wavelet and multiwavelet

绕组	原始信号	采用小波	预处理方法	模极大值幅度/V	模极大值位置/s
A相	50Hz时A相故障电压信号	DB4小波	无	125	0.04
		GHM多小波	GHM.init方法	128	0.032
		CL4多小波	Haar法	130	0.032
		CL4多小波	平衡方法	130	0.032
	48Hz时A相故障电压信号	DB4小波	无	62.5	0.05
		GHM多小波	GHM.init方法	126	0.04
		CL4多小波	Haar法	128	0.036
		CL4多小波	平衡方法	130	0.032
		DB4小波	无	无法确定	无法确定
46Hz时A相故障电压信号	GHM多小波	GHM.init方法	62	0.06	
	CL4多小波	Haar法	125	0.04	
	CL4多小波	平衡方法	130	0.032	
C相	50Hz时C相故障电压信号	DB4小波	无	125	0.04
		GHM多小波	GHM.init方法	128	0.032
		CL4多小波	Haar法	129	0.032
		CL4多小波	平衡方法	130	0.032
	48Hz时C相故障电压信号	DB4小波	无	65	0.05
		GHM多小波	GHM.init方法	128	0.04
		CL4多小波	Haar法	129	0.036
	46Hz时C相故障电压信号	CL4多小波	平衡方法	130	0.032
		DB4小波	无	无法确定	无法确定
GHM多小波		GHM.init方法	60	0.06	
46Hz时C相故障电压信号	CL4多小波	Haar法	125	0.04	
	CL4多小波	平衡方法	130	0.032	

由表 1, 并结合图 2、图 3 和图 4 可以看出: (1) 当频率正常 (50 Hz) 时, 基于预处理的多小波变换的模极大值幅度比传统 DB4 小波变换的模极大值幅度大, 而且前者的模极大值点的位置更准确地反映故障发生的时刻 (故障发生在 0.032 s); 基于多小波变换的波形更明显地显示故障信号的突变幅度

和时间。(2) 当频率偏移时 (48 Hz), 基于 DB4 小波变换的模极大值幅度明显下降, 而且不尖锐, 即不利于检测, 模极大值点的位置也出现较大偏差, 不能准确地反映故障发生的时刻。(3) 当频率偏移至 46 Hz 时, DB4 小波的模极大值出现无法确定现象; 而基于 GHM.init 预处理方法的 GHM 多小波变换的模极大值幅度也有明显下降, 位置也有明显偏差; 同时基于 Haar 预处理方法的 CL4 多小波变换的模极大值幅度也略有下降; 位置也略有偏差。但是基于平衡预处理方法的 CL4 多小波变换的模极大值幅度和模极大值点的位置基本没有受任何的影响。(4) 在故障信号检测中, 希望模极大值幅度越大越好, 模极大值点的位置偏离故障发生时刻越小越好, 表 1 显示当频率不正常时, 基于平衡预处理方法的 CL4 多小波的模极大值幅度最大, 模极大值点的位置没有偏离故障发生时刻, 也即: 如果选择合适的预处理方法, 基于平衡预处理方法的 CL4 多小波的故障检测效果最佳, 其效果优于基于 GHM.init 预处理方法的 GHM 多小波和其它方法。

## 5 结束语

文中尝试把多小波应用于发电机故障信号的分析检测, 仿真结果表明采用合适的预处理方法的多小波对发电机故障进行检测的效果优于传统小波; 而且基于平衡预处理方法的 CL4 多小波对发电机故障信号的检测效果更优于基于 GHM.init 预处理方法的 GHM 多小波, 更适合于发电机故障信号检测。

## 参考文献

- [1] 费佩燕, 郭宝龙. 单小波去噪方法在多小波去噪中的应用研究[J]. 信号处理, 2004, 20(6): 658-661. FEI Pei-yan, GUO Bao-long. A Study on Multiwavelet Image Denoising Based on Methods of Singlewavelet Image Denoising[J]. Signal Processing, 2004, 20(6): 658-661.
- [2] JIANG Qing-tang. IEEE Trans on Signal Processing[J]. 1998, 46(12): 3292-3302.
- [3] Chui C K, Lian J A. A Study of Orthonormal Multi-wavelets[J]. Appl Numeric Math, 1996, 20(3): 273-298.
- [4] Xia X G, Geronimo J S, Hardin D P, et al. Design of Prefilters for Discrete Multiwavelet Transforms[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1996, 44(1): 25-35.
- [5] Strela V, Holler P N, Strang G, et al. The Application of Multi-wavelet Filter Banks to Image Processing[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(4): 548-563.

(下转第 59 页 continued on page 59)

动智能处理系统, 并利用曲线拟合方法实现了电表底码数值的最优近似计算, 整个处理过程完全由各个 Agent 实体自动智能实现, 无需用户参与。较之传统的处理方法, 本文介绍的方法具有更大的客观性、灵活性, 且其计算结果完全能够满足实际电量结算工作的需要。此外, 该方法对于电能计量装置故障(如失压、断相等)的处理也具有良好的适用性。

### 参考文献

- [1] 孟碧波, 曾伟民. 建设适应电力市场的电能计费结算系统[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(2): 63-66.  
MENG Bi-bo, ZENG Wei-min. Building Energy Billing and Settlement System for Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(2): 63-66.
- [2] 董昕, 杨林, 王继勋. 电能量采集及计费自动化系统设计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(7): 55-57.  
DONG Xin, YANG Lin, WANG Ji-xun. Design and Research on Energy Acquisition and Billing Automatic System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(7): 55-57.
- [3] 盛戈皞, 涂光瑜, 罗毅, 等. 基于多 Agent 的二级电压控制系统[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 20-25.  
SHENG Ge-hao, TU Guang-yu, LUO Yi, et al. Study on MAS-Based Secondary Voltage Control System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5): 20-25.
- [4] 杨旭升, 盛万兴, 王孙安. 多 Agent 电网运行决策支持系统体系结构研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 45-49.  
YANG Xu-sheng, SHENG Wan-xing, WANG Sun-an. Study on Multi-Agent Architecture Based Decision Support System for Power System Operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(18): 45-49.
- [5] 束洪春, 唐岚, 董俊. 多 Agent 技术在电力系统中的应用展望[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 27-30.  
SHU Hong-chun, TANG Lan, DONG Jun. A Survey on Application of Multi-agent System in Power System[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 27-30.
- [6] 李晓露, 石东源, 丁振华, 等. EMS 的 MAS 体系结构研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(11): 36-40.  
LI Xiao-lu, SHI Dong-yuan, DING Zhen-hua, et al. Study on MAS Architecture of EMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(11): 36-40.
- [7] 刘红进, 袁斌, 戴宏伟, 等. 多代理系统及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(19): 45-52.  
LIU Hong-jin, YUAN Bin, DAI Hong-wei, et al. Multi Agent System and Its Application in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 45-52.
- [8] 郭进, 石俊杰. 《电力系统电能累计量传输配套标准》在电能量计量系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 17-19.
- [9] 颜庆津. 数值分析(修订版)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.

收稿日期: 2007-08-21

作者简介:

畅广辉(1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为人工智能技术在电力系统中的应用、电力系统调度与控制、电力市场; E-mail: cguanghui2006@126.com

刘涤尘(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气工程与自动监控;

熊浩(1979-), 男, 博士研究生, 从事人工智能、数据挖掘在电力系统中的应用, 以及高电压与绝缘监测、电磁兼容。

Processing, 1998, 45(8): 970-987.

收稿日期: 2007-02-03;

修回日期: 2007-08-09

作者简介:

唐惠玲(1975-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究工业监控和故障诊断。E-mail: huiguit@163.com

(上接第 46 页 continued from page 46)

- [6] Lebrun J, Vetterli M. Balanced Multiwavelet Theory and Design[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(4): 1119-1124.
- [7] Hardin D P, Roach D W. Multiwavelet Pre-filters-1: Orthogonal Pre-filters Preserving Approximation Order  $p \leq 2$ [J]. IEEE Trans on Circuits and Digital Signal