

文章编号: 1671-251X(2009)06-0031-05

改进型小波包算法在变频调速系统 故障诊断中的应用*

朱高中¹, 冯高明²

(1. 渭南师范学院物理与电子工程系, 陕西 渭南 714000; 2. 河南理工大学, 河南 焦作 454001)

摘要: 在目前交-交变频调速系统故障诊断方法的研究基础上, 文章提出了一种采用改进的小波包算法对交-交变频调速系统进行故障诊断的方法。文章在分析了标准的小波包算法原理及缺点的基础上, 阐述了改进的小波包算法原理, 并详细介绍了采用改进的小波包算法提取变频器故障信号特征量的方法。仿真结果表明: 改进的小波包算法的计算量和占用的存储空间较标准的小波包算法少; 与常规的诊断方法相比, 基于改进型小波包算法的变频调速系统故障诊断方法具有准确度高、诊断速度快等优点。

关键词: 交-交变频调速系统; 故障诊断; 小波包算法; 特征量

中图分类号: TM921.51; TP277 **文献标识码:** A

Application of Improved Wavelet Packet Algorithm in Fault Diagnosis of
Frequency conversion Speed regulation System

ZHU Gao-zhong¹, FENG Gao ming²

(1. Dept. of Physics and Electronic Engineering of Weinan Teachers University, Weinan 714000, China.
2. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454001, China)

收稿日期: 2009-01-12

* 基金项目: 陕西渭南师范学院研究生专项基金(09YKZ017)

作者简介: 朱高中(1980-), 男, 硕士, 渭南师范学院物理与电子工程系教师, 2008年毕业于河南理工大学电气工程与自动化学院, 研究方向为信号处理、小波分析及电能质量控制。Tel: 0913-2133982; E-mail: zhugaozhong188@163.com

500 ms, 然后将 O 值复位为 FALSE。

图 5 中“三”、“四”的功能分别与“一”、“二”的功能相同。

SEL 为选择运算符, 实现二选一功能。以图 5 中“五”的 24 号 SEL 运算符为例, 当 O 为 TRUE 时, 其输出等于 WI_1204 的值; 当 O 为 FALSE 时, 其输出等于 WI_1204 上方的输入端的值, 这里已将其输出端引至该输入端, 目的是记录 XV_1222 打开后 500 ms 时的称重值供 26 号减法 SUB 逻辑运算符进行运算。

图 5 中“五”表示当 XV_1222 打开时(27 号 SEL), 作 1 次累积运算: 将 XV_1222 打开后 500 ms 时的称重值减去 XV_1223 打开后 500 ms 时的称重值, 所得的重量差再加进 WIQ_1204 中。从而成功消除了干煤粉输送罐罐重对煤粉重量累积的影响。

4 结语

本文介绍的干煤粉输送工艺中消除罐重对煤粉累积量影响的具体组态方法在兖矿鲁南化肥厂水煤浆气化及煤化工国家工程研究中心的试验装置中的干煤粉输送单元中的应用证明, 该方法运算准确、实时、可靠, 完全达到了工艺要求。

参考文献:

- [1] 陆秉权, 何世葆, 张淑芬. 煤粉输送管道的参数优化[J]. 水泥工程, 2005(4).
- [2] 张新, 张广军, 齐玫. 煤矿快速定量自动装车站称重传感器的设计与应用[J]. 工矿自动化, 2007(6).
- [3] 朱子健. 基于先进数据处理技术的智能称重传感器研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.

Abstract: On the basis of research of current fault diagnosis method of AC-AC frequency-conversion speed regulation system, the paper proposed a fault diagnosis method of AC-AC frequency-conversion speed regulation system with improved wavelet packet algorithm. It expounded principle of improved wavelet packet algorithm on the basis of analyzing principle and disadvantages of standard wavelet packet algorithm and introduced the method using the improved wavelet packet algorithm to pick up characteristic quantity of fault signal of frequency converter in details. The simulation result showed that amount of calculation and appropriate storage space of the improved wavelet packet algorithm are less than that of the standard wavelet packet algorithm. Compared with current fault diagnosis method, the fault diagnosis method of frequency conversion speed regulation system based on the improved wavelet packet algorithm has advantages of high accuracy, fast diagnosis speed, etc.

Key words: AC-AC frequency conversion speed regulation system, fault diagnosis, wavelet packet algorithm, characteristic quantity

0 引言

随着电力电子技术和微电子技术的迅猛发展,作为交流电动机主要调速方式的变频调速技术也在不断发展。大型、复杂的交-交变频调速系统往往需要较完善的电气和机械方面的故障诊断措施。机械故障诊断方面,基于振动检测的故障诊断占据主导地位,并且取得了较好的效果。当变频调速系统有故障时,故障对系统各频率成分的抑制和增强作用会发生变化,通常,它会对某些频率成分起抑制作用,而对另外一些频率成分起增强作用,其输出与正常系统相比,相同频带内信号的能量会发生很大的变化,即某些频带内信号的能量减少,另外一些频带内信号的能量增加,因此,在某个频率成分信号的能量中包含着丰富的故障信息,某些或者某几种频率成分能量的改变即代表1种故障情况。本文在当前的变频调速系统故障检测方法与诊断手段的研究基础上,提出了一种改进的小波包算法,不仅克服了小波分析在高频段频率分辨率的缺陷,同时也避免了小波包计算量大、不利于实时信号处理的缺点。试验证明,该算法可有效地提取变频调速系统故障信号的特征量。

1 小波包算法

在多分辨分析中, $L^2(R) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j$ 表明多分辨分析是按照不同的尺度因子 j 将 Hilbert 空间 $L^2(R)$ 分解为所有子空间 $W_j (j \in \mathbb{Z})$ 的正交和, 其中 W_j 为小波函数 $\Psi(t)$ 的小波子空间。进一步对小波子空间 W_j 按照二进制分式细分, 以达到提高频率分辨率的目的。将尺度子空间 V_j 和小波子空间 W_j 用一个新的子空间 U_j^n 统一起来表征小波分析中的

$V_{j+1} = V_j \oplus W_j$ 可用 U_j^n 的分解统一为

$$U_{j+1}^0 = U_j^0 \oplus U_j^0 \quad (1)$$

定义子空间 U_j^n 为函数 $u_n(t)$ 的闭包空间, 而 U_j^{2n} 为函数 $u_{2n}(t)$ 的闭包空间, 并令 $u_n(t)$ 满足下面的双尺度方程:

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) u_n(2t - k) \\ u_{2n}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) u_n(2t - k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $g(k) = (-1)h(1 - k)$ 。

由式(2)构造的序列 $\{u_n(t)\}$ 称为由基函数 $\Psi(x) = u_0(t)$ 确定的正交小波包。

设 $g_j^n(t) \in U_j^n, g_j^n(t)$ 可表示为

$$g_j^n(t) = \sum_l d_l^{j+1, n} u_n(2^j t - l) \quad (3)$$

小波包分解算法: 由 $\{d_k^{j+1, n}\}$ 求 $\{d_k^{j+2n}\}$ 与 $\{d_k^{j+2n+1}\}$:

$$\begin{cases} d_l^{j+2n} = \sum_k h_{k-2l} d_k^{j+1, n} \\ d_l^{j+2n+1} = \sum_k g_{k-2l} d_k^{j+1, n} \end{cases} \quad (4)$$

小波包系数重构公式: 由 $\{d_l^{j+2n}\}$ 求 $\{d_l^{j+2n+1}\}$ 与 $\{d_l^{j+1, n}\}$:

$$d_l^{j+2n} = \sum_k (h_{l-2k} d_k^{j+1, n} + g_{l-2k} d_k^{j+2n+1}) \quad (5)$$

假定进行 M 层小波包分解, C^M 有 N_0 个数据 (取 $N_0 = 2^q$, q 为整数), 每个数据占据存储单元个数为 C , 计算机每执行 1 次乘法运算的时间为 T_0 , $\{h_n(n)\}$ 和 $\{g_n(n)\}$ 分别有 A_0 个数据。由于通常情况下, 1 次乘法运算的时间远远大于 1 次加法运算的时间, 因此, 可只考虑乘法运算的时间。依次计算各层小波包系数 d_j^k (其中: $j = 1, 2, 3, \dots, M; k = 0, 1, 2, 3, \dots, 2^j - 1$), 则运算时间为 t_M , 数据结果存储单元个数为 Q_M 。其中:

$$t_M = 2A_0 N_0 T_0 \left(\frac{1}{2} \times 2^0 + \frac{1}{2^2} \times 2^1 + \dots + \frac{1}{2^{M-j}} \times 2^{M-j-1} + \dots + \frac{1}{2^M} \times 2^{M-1} \right) \\ = MA_0 N_0 T_0 \quad (6)$$

$$Q_M = 2CN_0 \left(\frac{1}{2} \times 2^0 + \frac{1}{2^2} \times 2^1 + \dots + \frac{1}{2^{M-j}} \times 2^{M-j-1} + \dots + \frac{1}{2^M} \times 2^{M-1} \right) \\ = MCN_0 \quad (7)$$

2 改进的小波包算法

由上述分析可知, 传统的小波包分解算法能方便地实现分解和重建。但是, 在信号分析时并非都需要信号的重建, 比如在进行信号特征提取时, 往往只需要信号的分解。小波包分解虽克服了小波分析在高频段频率分辨率低的缺陷, 但小波包分解结果是所有频带的信号特征, 缺乏频带的选择性, 运算时间比较长, 分析结果占用存储单元个数比较多, 不利于实时信号处理。由于运算量与分解层次成正比例, 并非所有的频带都需要关注, 通常只需要关注某些频带下的信号特征, 有些频带的信息并不重要。系数二分法仅仅在每个小波包子空间上进行算法的改进, 但计算时间和分解结果数据存储空间较完全小波包分解均减少一半, 但同样不具有频带的选择性, 计算量仍比较大。因此, 本文提出了一种选择性算法, 并与系数二分法结合, 称为改进的小波包算法。

2.1 改进的小波包算法分析

信号从 $j+1$ 尺度到 j 尺度的分解公式为

$$\begin{cases} d_l^{j+2n} = a_{j, 2n} \sum_k (h_{2k+1-2l} d_{2k}^{j+1, n} + h_{2k-2l} d_{2k+1}^{j+1, n}) \\ d_l^{j+2n+1} = b_{j, 2n+1} \sum_k (g_{2k+1-2l} d_{2k}^{j+1, n} + g_{2k-2l} d_{2k+1}^{j+1, n}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $a_{j, 2n}$ 、 $b_{j, 2n+1}$ 为选择因子。

$$a_{j, 2n} = \begin{cases} 1, & U_j^{2n} \text{ 子空间需要关注} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$b_{j, 2n+1} = \begin{cases} 1, & U_j^{2n+1} \text{ 子空间需要关注} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

容易看出, 当 $0 < j < M-1$ 时, $a_{j, 2n} = 1$ 且 $b_{j, 2n+1} = 1$, 即此时的算法为系数二分法。因此, 可以认为, 系数二分法是改进小波包算法的特殊形式, 在信号的小波包分解中, 改进的小波包算法更加灵活, 具有选择性。不过它只能用于信号的分解, 不能用于

信号的重建。

2.2 改进的小波包算法的复杂度

假定相关的参数和完全小波包分解算法一样, 运算时间为 t'_M , 数据结果占用的存储单元个数为 Q'_M , 则:

$$t'_M = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} A_0 N_0 T_0 [(a_{M, 0} + b_{M, 1}) + \frac{1}{2^1} (a_{M-1, 0} + b_{M-1, 1} + a_{M-1, 2} + b_{M-1, 3}) + \dots + \frac{1}{2^{M-j}} (a_{M-j, 0} + b_{M-j, 1} + \dots + a_{M-j, 2^{j+1}-1} + b_{M-j, 2^{j+1}}) + \dots + \frac{1}{2^{M-1}} (a_{1, 0} + b_{1, 2} + \dots + a_{1, 2^{M-1}} + b_{1, 2^M})] \quad (9)$$

$$Q'_M = \frac{1}{2} N_0 C_0 [(a_{M, 0} + b_{M, 1}) + \frac{1}{2^1} (a_{M-1, 0} + b_{M-1, 1} + a_{M-1, 2} + b_{M-1, 3}) + \dots + \frac{1}{2^{M-j}} (a_{M-j, 0} + b_{M-j, 1} + \dots + a_{M-j, 2^{j+1}-1} + b_{M-j, 2^{j+1}}) + \dots + \frac{1}{2^{M-1}} (a_{1, 0} + b_{1, 2} + \dots + a_{1, 2^{M-1}} + b_{1, 2^M})] \quad (10)$$

3 基于改进的小波包算法的信号特征提取方法

基于改进的小波包算法的信号特征提取原理可总结如下:

(1) 首先对采样信号进行 j 层小波包分解, 分别提取第 j 层从低频到高频的所有频率成份的信号特征。以 3 层小波包分解为例, 其分解结构如图 1 所示。

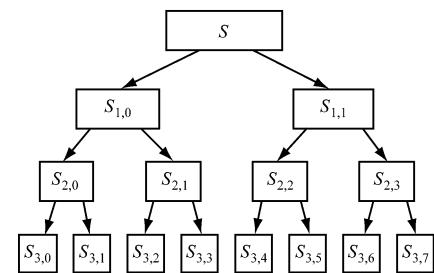


图 1 3 层小波包分解结构图

图 1 中, $S_{i,j}$ 表示第 i 层的第 j 个节点, 其中 $i=0, 1, 2, 3; j=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 。每个节点代表 1 点的信号特征,

(2) 求各频带信号的总能量。由于输入信号是一个随机信号, 输出信号也是一个随机信号。以 3 层小波分解为例, 设 $S_{3,j}$ ($j=0, 1, \dots, 7$) 对应的能量为 $E_{3,j}$ ($j=0, 1, \dots, 7$), 则有:

$$E_{3,j} = \int |S_{3,j}(t)| dt = \sum_{k=1}^n |d_{j,k}|^2 \quad (11)$$

式中: $d_{j,k}$ ($j = 0, 1, \dots, 7; k = 1, 2, \dots, n$) 表示 $S_{3,j}$ 的小波系数。

(3) 构造特征向量。变频器故障时会对各频带内的信号能量产生影响。因此, 以能量为元数可以构造一个特征向量。特征向量 T 构造如下影响: $T = [E_{30} \ E_{31} \ E_{32} \ E_{33} \ E_{34} \ E_{35} \ E_{36} \ E_{37}]$, 当能量较大时, 可对特征向量进行归一化处理。令:

$$E = \sqrt{\sum_{j=0}^7 |E_{3j}|^2}$$

则 $T' = [E_{30}/E \ E_{31}/E \ \dots \ E_{37}/E]$, 为归一化的特征向量。

(4) 根据系统正常和故障发生时所提取的特征向量, 计算绝对误差和相对误差。

绝对误差 ε^a 为

$$\varepsilon^a = |E'_{jm} - E_{jm}| \quad (12)$$

相对误差 e_j^m 为

$$e_j^m = \frac{|E'_{jm} - E_{jm}|}{E_{jm}} \times 100\% \quad (13)$$

式中: E_{jm} 、 E'_{jm} 分别为正常和故障状态下相对应节点的特征向量; $j = 1, 2, \dots, M$ (M 表示分解层数); $m = 0, 1, \dots, 2^{M-1}$ 。

当系统发生故障时, 可根据计算的各个节点的故障特征向量的结果与正常特征向量进行比较分析, 从而进行故障定位。

4 实验及仿真

基于上述理论分析, 笔者在实验室对变频器进行故障分析。交-交变频调速系统工作原理如图 2 所示, 电动机采用三相交流异步电动机, 功率为 2.2 kW, 电压为 380 V, 在不改变励磁调节电路与导通角的前提下, 变频调速系统正常运行时, 人为地将 1 个桥臂上的晶闸管断开, 用虚拟仪器采集数据, 采用 Matlab 工具箱分析数据。

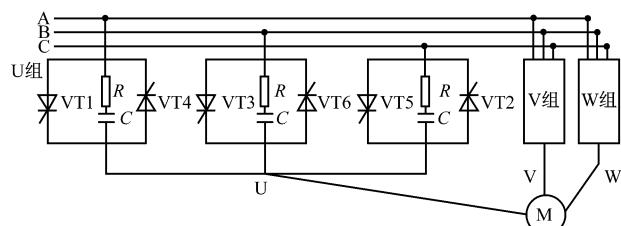


图 2 交-交变频调速系统工作原理图

变频调速系统采用基于双变量原理的三分频三分压控制方式。系统故障时, 力矩电动机空载运

行, 信号的采样频率 $f = 1000$ Hz, 采样点数 $N = 1024$ 。正常状态和故障状态下 W、V 相输出电流波形及对应频谱如图 3 所示。图 3 中, W_{T5} 表示 W 相第五个晶闸管断路故障; V_{T3} 表示 V 相第三个晶闸管断路故障; $V_{T3} W_{T5}$ 表示 2 个晶闸管同时断路, 以此类推。由于系统同时发生多个故障的机率很小, 在提取故障特征信号时, 假设 1 个故障不能引起其它故障的发生。

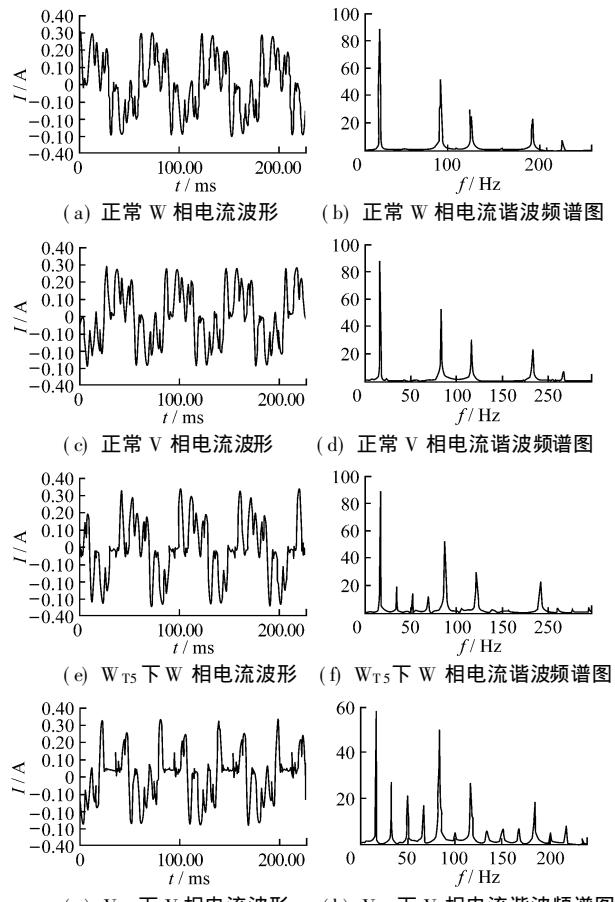


图 3 正常状态和故障状态下 W、V 相输出电流波形及对应频谱图

从故障电流信号的傅立叶分析可知, 变频器正常运行时, 其电流谐波主要以 1 次、5 次、7 次、13 次谐波为主, 其中 5 次、7 次谐波含量比较大; 当变频器发生故障时, 基波含量明显减少, 且偶数次谐波增加, 谐波频率一般在 2~19 次谐波之间。在信号采样时, 取采样频率 $f_s = 1000$ Hz, 分析 1024 个采样点, 因此, 在利用小波变换分析采样信号时, 根据故障信号的特性及故障状态下的电流谐波次数可知, 采用子空间的小波能量进行分析即可。选取“db4”小波, 分解层数 $L = 4$, 表 1 和表 2 分别为正常状态和故障状态下 W、V 相电流基于改进的小波包算法的信号特征提取能量变化参数表。

表1 正常状态和故障状态下W相能量变化参数表

	E_{11}	E_{21}	E_{30}	E_{31}	E_{32}
正常	0.605	3.467	16.040	7.930	0.863
故障	0.569	3.017	17.250	8.466	0.712
ε_j^m	-0.030	-0.450	1.210	0.536	-0.150
e_j^m	5.950	12.980	7.540	6.750	17.490
	E_{33}	E_{40}	E_{41}	E_{42}	E_{43}
正常	2.673	15.280	0.707	2.218	5.700
故障	2.297	15.520	1.706	2.451	6.030
ε_j^m	-0.380	0.240	0.999	0.233	0.320
e_j^m	14.060	15.700	141.100	10.500	5.620

表2 正常状态和故障状态下V相能量变化参数表

	E_{11}	E_{21}	E_{30}	E_{31}	E_{32}
正常	0.613	3.415	15.690	7.960	0.840
故障	0.614	3.078	9.810	7.820	0.647
ε_j^m	0.001	-0.340	-5.880	-0.140	-0.190
e_j^m	0.164	9.868	37.470	1.750	22.970
	E_{33}	E_{40}	E_{41}	E_{42}	E_{43}
正常	2.570	14.940	0.742	2.197	5.750
故障	2.430	7.195	2.611	1.473	6.320
ε_j^m	-0.140	7.744	1.869	-0.724	0.570
e_j^m	5.520	51.830	251.800	32.950	9.910

从表1和表2可以看出,当变频器发生故障时,变频器输出电流大部分的谐波在低频段,且基频的含量极大地减少, E_{40} 、 E_{41} 、 E_{42} 子空间频带能量将会发生很大的变化。W相、V相在 E_{40} 子空间频带能量的变化分别为15.7%、51.83%;在 E_{41} 子空间频带能量的变化分别为141.1%、251.8%,在 E_{42} 子空间频带能量的变化分别为10.5%、32.95%。这些子空间频带能量的变化如此之大,据此可以判断变频器发生了故障。采用简易故障判别法分析时,取变化明显的频带能量进行分析,即取 E_{21} 、 E_{40} 、 E_{41} 、 E_{42} 进行计算。从以上分析可知,改进的小波包算法能更好地判断变频器故障特征信号。

通过取不同的分解层数,传统分解法和改进的小波包算法的计算量和数据结果需要存储的空间都会发生改变。表3为信号采样频率不变的情况下,取不同的分解层数,2种算法在单位时间内判断故障的准确率(取30组数据进行判断)。

从表3可以看出,取不同的分解层数时,同一种算法在单位时间内故障判断的效果不一样,分解层数与计算量之间存在矛盾:分解层数增加,计算量也

表3 传统分解法与改进的小波包算法比较表

算法	分解层数(单位时间内故障准确率/%)						
	2	3	4	5	6	7	
传统分解法	35.0	63.0	81.4	91.0	89.0	80.0	
改进的小波包算法	34.8	65.3	86.0	98.7	94.0	97.0	

增加,从而信号处理的实时性较差;分解层数减少,计算量减少,但频带没有细分,频带能量变化程度不大,故障判断准确率低。其次,2种算法在同一个分解层数上效果也不一样:分解层数低时,2种算法运算量都低,效果差别不明显,单位时间内故障判别准确率低;分解层数高时,改进的小波包算法的效果明显优于传统分解法。因此,在进行实时信号处理时,根据信号的特性、选择合适的分解层数、采用改进的小波包算法才能得到满意的效果。

5 结语

本文通过分析变频调速系统中变频器故障输出电流的特点,提出了一种改进的小波包算法,克服了小波分析在高频段频率分辨率低的缺陷,同时也避免了小波包计算量大、不利于实时信号处理的缺点。本文还分析了取不同分解层数时,传统分解法与改进的小波包算法对故障特征量提取的影响。试验证明,通过选择合适的分解层数,基于改进的小波包算法的故障检测方法能得到满意的效果。

参考文献:

- [1] MALLAT S, HWANG W L. Singularity Detection and Processing with Wavelet [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1992, 38(2): 617~643.
- [3] XU Yair sun, WEAVER J B, HEALY D M, et al. Wavelet Transform Domain Filters: A Spatially Selective Noise Filter Ration Technique [J]. IEEE Trans. Image Processing, 1994, 3(6): 747~758.
- [4] DONOHOD L. Denoising by Soft Threshold [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1995, 41(3): 613~627.
- [5] CHANG S G, YU Bin, VETTERLI M. Adaptive Wavelet Threshold for Image Denoising and Compression [J]. IEEE Trans. Image Processing, 2000, 9(9): 1532~1546.
- [6] REN Zhen, HE Jiarjun. Compression and Reconstruction Faults for Fault Signals of Electric Machines Based on Wavelet Packets [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 25~29.