

基于 Park 矢量模信号小波分解的感应电机轴承故障诊断方法

侯新国, 吴正国, 夏立, 卜乐平

(海军工程大学电气工程系, 湖北省 武汉市 430033)

BEARING FAULT DIAGNOSIS METHOD OF INDUCTION MOTOR VIA WAVELET DECOMPOSITION OF PARK'S VECTOR MODULUS SIGNAL

HOU Xin-guo, WU Zheng-guo, XIA Li, BU Le-ping

(Department of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei Province, China)

ABSTRACT: By analyzing the frequency separation characteristic of Wavelet Packet Decomposition (WPD), a general expression is given to decide the sequence of WPD sub-band at the same level from low to high frequencies. An induction motor experiment with the known faults of bearing was done. Then the RMS values of the WPD coefficients of Park's Vector Modulus signals of the three-phase current was calculated, and could be the symptom of bearing fault. The experimental and the calculated results demonstrated that the influences of the fundamental frequency current as well as the noises in current were reduced. The limitation to extract the fault characteristic frequency resulting from the fluctuation of the characteristic frequency and the variation of the load is overcome.

KEY WORDS: Induction motor; Wavelet packet decomposition(WPD); Park's vector modulus; Fault diagnosis; Bearing

摘要: 在分析小波包分频特性的基础上, 总结出小波包分解子频带按频率高低排列的通式; 对三相定子电流的 Park 矢量模信号进行小波包分解, 求相应子频带的小波包分解系数的均方根值 (RMS), 并用其表征轴承的故障特征, 以此作为轴承故障诊断的依据。研究表明, 该方法降低了基频电流及电流中噪声的影响, 克服了由于受负载变化引起故障特征频率波动使得难以准确提取故障特征频率的缺陷; 实验结果证明了该方法应用于电机轴承故障诊断的可行性。

关键词: 感应电机; 小波包分解; Park 矢量模; 故障诊断; 轴承

1 引言

感应电机轴承故障是导致电机失效的主要原

因之一, 其故障率约占电机故障的 40% 左右^[1]。对感应电机轴承故障检测一直是国内外学者感兴趣的研究课题, 其研究的方法主要是根据电机振动信号监测轴承故障, 如基于振动信号的频谱分析法^[2-4]; 时域分析法; 幅值域分析法^[5-6]以及小波分析法^[7-10]等; 由于故障特征信息直接来源于故障轴承的振动信号, 因此基于振动监测的诊断方法较为简单、可靠。然而, 在电机上安装传感器设备较为不便, 在很多场合无法适用。电机振动与电机气隙磁密的变化紧密相连, 因此在定子电流中将有反映轴承故障的特征信息, 文献[11]介绍了在电机振动信号及电流中的故障特征频率, 提出了一种基于定子电流信号的频谱分析法 (MCSA) 检测轴承故障。这种方法可做成非侵入式, 但定子电流中能够反映振动故障的谐波分量幅值较小, 容易被基频电流及电流中的噪声所淹没; 而且 Fourier 分析是一种基于“频点”的分析方法, 不适用于电机实际运行时非平稳的电流信号。因此, 基于电流信号的谱分析方法用于轴承故障检测的准确性仍有待于进一步研究。

小波变换在时域和频域都具有局部化能力, 是一种基于“频带”的时频分析方法, 特别是小波包变换, 它较好地解决了二进小波变换固有的“高频段频率分辨率低”的缺陷, 非常适合于非平稳信号的分析。本文提出了一种基于 Park 矢量模信号小波分解的感应电机轴承故障诊断方法, 有效克服了频谱分析时频率分辨率低, 故障检测准确性低的缺陷, 实验结果表明该方法取得了较为满意的结果。

2 基于小波包分解技术的轴承故障检测算法

2.1 小波包分解技术及其分频特性

在小波双尺度方程的基础上,令 w_n 满足下列递归的双尺度方程

$$\begin{cases} w_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k w_n(2t-k) \\ w_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k w_n(2t-k) \end{cases} \quad (1)$$

式中 h_n, g_n 为满足式(2)的正交镜像滤波器组。

$$\begin{cases} \sum_n h_n = \sqrt{2} \\ \sum_n h_{n-2k} \cdot h_{n-2l} = d_{kl} \\ g_n = (-1)^n h_{1-n} \end{cases} \quad (2)$$

则称函数集 $\{w_n(t)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 为关于尺度函数 $w_0 = j(t)$ 所确定的小波包^[12]。小波包变换是小波变换的延伸,它成功地解决了二进小波变换固有的“高频段频率分辨率低”这一时频分析上的缺陷,其将信号进行更细的频率划分(如图1所示),这为小波变换在故障诊断、图像处理及信号滤波等多项研究中发挥更重要的作用。

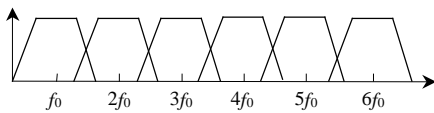


图1 信号频率划分

Fig.1 Frequency separation of signal

小波包算法是 Mallat 塔式算法的进一步扩展,其可用一组镜像滤波器实现^[12],信号的小波包分解过程如图2所示。

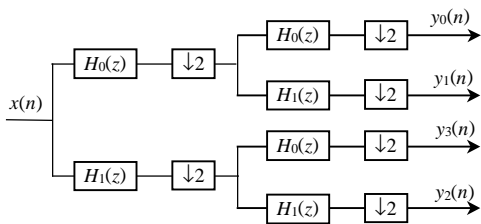


图2 信号的2层小波包分解过程

Fig.2 Decomposing process of wavelet packet at 2 scales

图中 $H_0(z)$ 为镜像低通滤波器; $H_1(z)$ 为镜像高通滤波器。信号的小波包分解将信号的频带由低到高分成不同的频带,但在应用 Matlab 小波软件包分析时,由于算法程序编制的原因,在小波包分解过程中的第二层开始就出现小波包分解节点编号交错现象(如图2所示),即在第二层(2,0)~(2,3)四个子频带的频率由低到高的顺序为(2,0), (2,1), (2,3), (2,2), 而不是(2,0)~(2,3)按编号从左至右的自然顺序。

由于节点编号交错,使得在分析过程中很难确定所关心的频带所处的节点编号位置。通过分析比较小波包分解过程及其规律,可以总结出一个通式来表示同一级所有子带编号按照频率由低到高的排列顺序。用 j 表示对信号 $f(t)$ 作第 j 层分解,可得到 $N = 2^j$ 个子频带。对这些子频带从 0 开始按自然顺序编号。设第 $j-1$ 层分解后的 2^{j-1} 个子频带已按频率由低到高的顺序排列为 $n_0, n_1, n_2, \dots, n_{2^{j-1}-1}$ (n_i 应由实际编号代替), 则第 j 层分解得到的 $N = 2^j$ 个子频带按频率由低到高的顺序排列为

$$n_0, n_1, \dots, n_{2^{j-1}-1}, (2^{j-1} + n_{2^{j-1}-1}), (2^{j-1} + n_{2^{j-1}-2}), \dots, (2^{j-1} + n_1), (2^{j-1} + n_0) \quad (3)$$

可以验证当 $j=3$ 时,其编号按频率由低到高排列的顺序可计算为: 0,1,3,2,(2²+2),(2²+3),(2²+1),(2²+0), 即 0,1,3,2,6,7,5,4。同理,可得到其他分解层的频带的排列顺序。图3为 dB1 小波函数的小波包(n 从 0 到 7)的图形,可看出,这 8 个波形的频率由低到高的顺序排列正是 $w_0, w_1, w_3, w_2, w_6, w_7, w_5, w_4$ 。

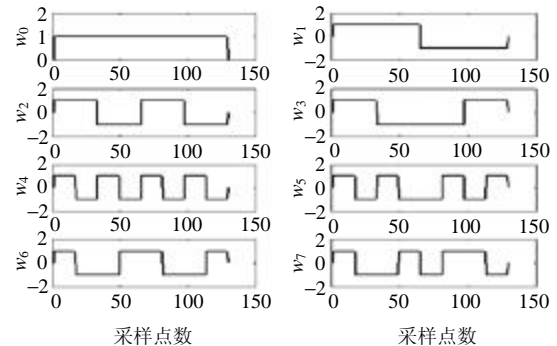


图3 dB1 小波函数的小波包 (n 从 0 到 7)

Fig.3 Wavelet packet of dB1 wavelet function (n from 0 to 7)

2.2 基于小波包分解技术的电机轴承故障检测

轴承故障时引起转轴振动,转轴振动又引起电机气隙振动,使气隙磁通受到调制,调制的磁通又在定子绕组中感应相应的谐波电流,文献[11]介绍了定子电流谐波与振动谐波之间的关系,其表达式为

$$f_{\text{fault}} = |f_e \pm k f_v| \quad (4)$$

式中 f_e 为电源基频 (50Hz); $k=1,2,3,\dots$; f_v 为轴承故障时的振动特征频率之一,可由下式计算^[11]

$$f_o = \frac{Z}{2} f_{rm} (1 - \frac{d_{BD}}{d_{PD}} \cos a) \quad (5)$$

$$f_i = \frac{Z}{2} f_{rm} (1 + \frac{d_{BD}}{d_{PD}} \cos a) \quad (6)$$

$$f_b = \frac{d_{PD}}{d_{BD}} f_{rm} (1 - \frac{d_{BD}^2}{d_{PD}^2} \cos^2 a) \quad (7)$$

式中 f_o 为轴承外滚道故障特征频率； f_i 为内滚道故障特征频率； f_b 为轴承滚动体故障特征频率； Z 为轴承滚珠数； f_m 为电机转速； d_{BD} 为轴承滚珠直径； d_{PD} 为轴承节径； a 为接触角。

由式(4)~(7)，电流中的故障特征谐波不仅与轴承几何结构有关，而且与电机转速以及定子电流基波频率有关，特别是电流中反映振动故障的谐波分量幅值较小，易被基频电流及电流中的噪声所淹没，同时，由于电流及转速的波动，都将引起故障谐波分量在一个较小的频带内变化，因此，采用基于“频点”的 Fourier 分析，将很难提高故障特征频率检测的准确性。为此，为消除电流基波及谐波变化的影响，求三相电流的 Park 矢量模平方函数^[13]为

$$I_s(t) = |i_D + ji_Q|^2 = \frac{3}{2}(I_m^2 + I_l^2 + I_h^2) + 3I_m I_l \cos(2\pi k f_v t + b - a) + 3I_m I_h \cos(2\pi k f_v t + a - g) + 3I_h I_l \cos(4\pi k f_v t + b - g) \quad (8)$$

式中 I_m 为定子电流基频分量的最大值； I_l 为电流低边瓣分量 ($f_e - k f_v$) 的最大值； I_h 为电流高边瓣分量 ($f_e + k f_v$) 的最大值； a 为基频分量的初始相角； b 为低边瓣分量的初始相角； g 为高边瓣分量的初始相角。

在 $I_s(t)$ 的频谱中，仅含有直流分量、 $k f_v$ 及 $2 k f_v$ 特征频率分量，不含有基频分量，由于振动特征频率分量主要分布在低频段，即 $k=1$ 时的特征分量。为此，为了消除电机转速变化引起特征谐波波动的影响，本文将 Park 矢量模信号进行小波包分解 (Wavelet Packet Decomposition, 以下简称 WPD)，求小波包分解子频带所对应节点系数的 RMS 值，即

$$x_{rms}(j, n) = \sqrt{\sum_{k=1 \dots N} d_{j,n}^2(k)} \quad (9)$$

式中 j 为信号分解的层数，即小波包分解的尺度参数；节点 n 为小波分解的频率参数 (其值为： $n=0, 1, 2, \dots, 2^j-1$)； $x_{rms}(j, n)$ 为 WPD 系数任一节点 RMS 值。 N 为对应节点序列的长度，由小波包分解的层数，即尺度 j 和分析信号数据的长度 M 共同决定。

信号的小波包分解对信号进行更细致的频率划分，将不同的频率分量分解到相应的频带上，其节点系数的 RMS 值主要依赖于谐波成分的幅度及分布，反映信号的特征信息。同时，故障信号与正常信号相比，在相同的频带内信号的能量发生了较

大的变化，其相应频带节点的 WPD 系数的 RMS 值将会明显改变。因此，可将频带节点的 WPD 系数的 RMS 值作为表征电机轴承故障的特征指标。

根据前述小波包的分频特性，计算出与故障特征分量相对应的 WPD 频带节点以及节点 WPD 系数的 RMS 值，将其与轴承正常时 WPD 系数的 RMS 值相比较，即可对轴承故障实现准确检测。

3 实验及结果分析

3.1 实验系统的建立

实验系统采用如图 4 所示的故障诊断方案。电机选用 Y132M-4 型感应电动机，其同步转速为 1500r/min(25Hz)，电动机带动交流发电机及负载；电机轴承型号为 6308-2RS，滚珠数目 $Z=8$ ，滚珠直径 $d_{BD}=15\text{mm}$ ，节径 $d_{PD}=65\text{mm}$ ，接触角 $a=0^\circ$ 。

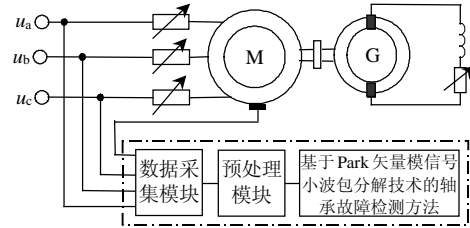


图 4 实验测试方案图

Fig.4 The experiment scheme of detecting faults

振动加速度传感器采用 PCB 公司生产的 M603C01 型传感器，其灵敏度为 100mV/g，按垂直径向安装于电机轴承座盖上，以检测电机轴承的径向振动。低通滤波器截止频率为 200Hz；数据采集频率为 5kHz。

3.2 实验结果及分析

根据以上实验方案，实验时先将三个正常的同型号轴承在不同负载条件下进行实验，实测轴承正常时数据以作对比分析用。然后在三个轴承上分别对轴承外滚道、内滚道以及滚珠设置故障，可按式(5)~式(8)分别计算轴承故障的特征频率。本文介绍以外滚道为例，在外滚道内侧线切割一条深 5mm，宽 0.5mm 的线槽，模拟外滚道故障。实验时同时采集三相电流及振动信号，电机转速为 1444r/min (24Hz)，轴承外滚道故障时在 Park 矢量模中的特征频率为

$$f_{\text{fault}} = f_o = 73.8\text{Hz} \text{ 与 } f_{\text{fault}} = 2f_o = 147.6\text{Hz} (k=1)$$

由以上计算可知，轴承故障特征频率较低，位于低频段。根据上述算法分析，实验结果及分析如下：

图 5(a)、(b)分别为电机在轴承正常与故障情况

下运行时电机径向振动加速度频谱图。图 5(a)中除了电机转频 f_m 外,没有出现轴承故障时振动特征频率 $f_0=73.8\text{Hz}$;当轴承外滚道故障时,其振动谱中有故障特征频率 f_0 。结果表明,利用振动信号分析轴承故障结果可靠,具有一定的优势,这也是振动分析方法能成功应用于实际的主要原因,但其最大缺点是安装传感器设备较为不便,在很多场合无法适用,这也促使研究更为便捷的方法。

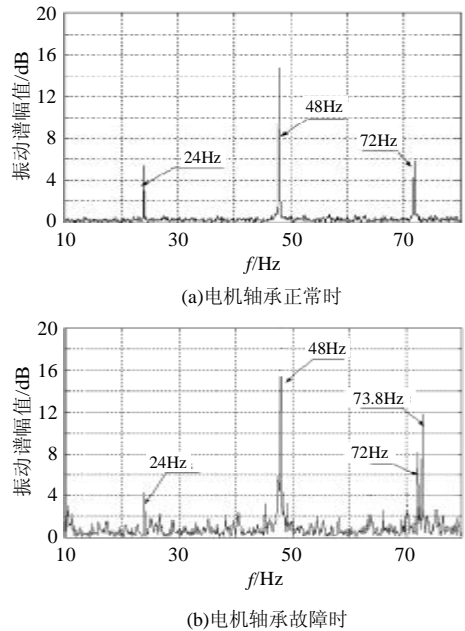


图 5 电机径向振动频谱图
Fig.5 Radial vibration frequency spectrum characteristic of motor

图 6(a)、(b)分别为电机轴承正常和故障时, A 相电流频谱图,从图中可看出,故障发生后,在图 6(b)中没有出现由式(4)计算得到的故障特征频率分量 23.8Hz 和 $123.8\text{Hz}(k=1)$,其主要原因是由于电流中反映故障的谐波分量 f_0 的幅值较小,被基频电流及电流中噪声淹没,同时受负载及供电品质的影响以及频谱分析方法频率分辨率低的局限性,因此得不到反映轴承故障的特征频率。

根据本文所述算法,在电机轴承正常与故障情况下,分别求相应三相电流的 Park 矢量模信号(图 7 为轴承故障时的 Park 矢量模信号波形),并对其预处理,其最高截止频率为 250Hz 。对 Park 矢量模信号进行 4 层小波包分解,可得到 $(0,15.625)\text{Hz}$, $(15.625,31.25)\text{Hz}$, \cdots , $(234.375,250)\text{Hz}$ 16 个频带,由式(3)可知,包含故障特征频率($f_0=73.8\text{Hz}$ 与 $2f_0=147.6\text{Hz}$)的子频带所对应的小波包分解节点为(4,6)和(4,13)的子频带,其节点 WPD 系数的均方根值(RMS)按式(9)求得(如表 1),表 1 中数据表

明,轴承故障时,对于 6 号节点与 13 号节点的小波包分解系数,其 RMS 值分别是轴承正常时的 4.64 倍和 4.62 倍;同理,将 Park 矢量模信号进行 5 层小波包分解,可得到包含故障特征频率的子频带所对应的小波包分解节点为(5,13)和(5,27),其 RMS 值比轴承正常时都有显著增加,如表 2。

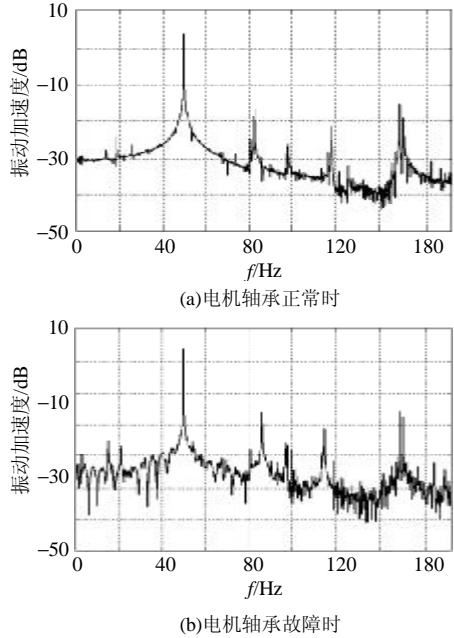


图 6 A 相电流频谱图
Fig.6 The frequency spectrum of A phase current

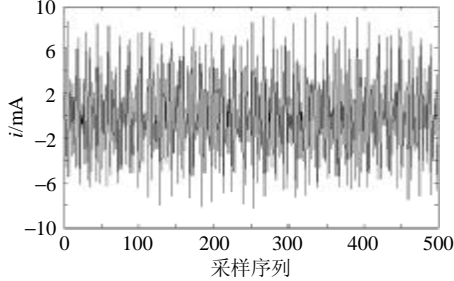


图 7 三相电流 Park 矢量模信号波形
Fig.7 Waveform of three-phase currents' Park vector modulus signal

表 1 小波包分解系数的 RMS 值 ($f_{rm}=24\text{Hz}, j=4$)
Tab.1 RMS values of WPD coefficients ($f_{rm}=24\text{Hz}, j=4$)

$j=4$	RMS 值		倍值
	轴承正常	轴承故障	
节点 6	2.5968	12.0487	4.64
节点 13	3.9429	18.2165	4.62

表 2 小波包分解系数的 RMS 值 ($f_{rm}=24\text{Hz}, j=5$)
Tab.2 RMS values of WPD coefficients ($f_{rm}=24\text{Hz}, j=5$)

$j=5$	RMS 值		倍值
	轴承正常	轴承故障	
节点 13	3.6183	13.1075	3.62
节点 27	1.6208	7.2159	4.45

改变电机负载，转速为 1478 r/min (24.63Hz)，在 Park 矢量模中的特征频率为

$$f_{\text{fault}}=f_o=75.8\text{Hz} \text{ 与 } f_{\text{fault}}=2f_o=151.6\text{Hz} (k=1)$$

由于小波的时、频紧支撑的限制，小波分解的频带划分会产生频率混叠^[14]，特别是特征频率接近子频带的上、下限频率时，将在相邻子频带中同时存在。由上述算法可知，在小波包分解的第4层，其所在子频带对应的小波包分解节点为(4,6)、(4,7)和(4,13)、(4,15)。在小波包分解的第5层，其所在子频带对应的小波包分解节点为(5,13)、(5,15)和(5,26)、(5,30)。实验结果如表3、表4。

表3 小波包分解系数的 RMS 值 ($f_{rm}=24.63\text{Hz}$)

Tab.3 RMS values of WPD coefficients ($f_{rm}=24.63\text{Hz}, j=4$)

$j=4$	RMS 值		倍值
	轴承正常	轴承故障	
节点 6	4.5843	21.8334	4.76
节点 7	0.5873	2.5324	4.31
节点 13	0.8294	4.7707	5.75
节点 15	0.2056	0.9787	4.76

表4 小波包分解系数的 RMS 值 ($f_{rm}=24.63\text{Hz}$)

Tab.4 RMS values of WPD coefficients ($f_{rm}=24.63\text{Hz}, j=4$)

$j=5$	RMS 值		倍值
	轴承正常	轴承故障	
节点 13	0.5622	2.5114	4.47
节点 15	0.6705	3.0797	4.59
节点 26	0.6848	4.9331	7.20
节点 30	0.2134	0.9908	4.64

由此可见，根据小波包的频特性，利用包含故障特征频率的小波包分解节点子频带的 RMS 值表征轴承的故障特征，以此作为故障诊断的判据，特征更为明显，有利于故障的可靠识别。对于轴承内滚动故障及轴承滚珠故障，实验表明，采用本文所述算法，都有上述类似的结论。

从上述试验及分析的结果看，采用基于 Park 矢量模信号的小波包分解技术，确实能有效提取轴承的故障特征，克服了由于受负载变化引起特征频率波动的影响，使得诊断结果更为准确可靠。值得注意的是，轴承故障振动特征频率不仅与电机转速和电源频率有关，而且与轴承的几何尺寸有关，实际应用中是难以精确计算出故障特征频率的。文献[11]中论证了定子电流谐波与振动谐波之间存在一种线性关系，并将大多数电动机轴承故障振动频率简化为式(10)表示

$$f_i = 0.4 \times Z \times f_{rm}; f_o = 0.6 \times Z \times f_{rm} \quad (10)$$

式中参数同式(5)~式(7)，其中 $Z=6\sim12$ 。这种粗略确

定振动故障特征频率无疑是有好处的，但是在这种情况下，如果用基于“频点”的频谱分析就很难得出较为准确的结果，而本文介绍的方法不仅克服了基波信号的影响，也克服了这种粗略简化的不足。

4 结论

基于定子电流的轴承故障检测可做成非侵入式而受到广泛关注，但是检测电流中的故障特征频率比检测振动信号中的故障特征频率更加困难，而且这方面很少有研究成果及文献予以参考。本文在分析小波包分频特性的基础上，总结出小波包子频带按频率高低排列的通式；对电流 Park 矢量模信号进行小波包分解，求相应子频带的小波包分解系数的 RMS 值，并将其作为轴承的故障特征，以此作为诊断轴承故障的依据。研究表明，该方法降低了基频电流及电流中噪声的影响，克服了由于受负载变化引起故障特征频率波动使得难以准确提取故障特征频率的缺陷；实验结果证明了该方法诊断电机轴承故障的可行性。

参考文献

- [1] IEEE Motor reliability working group Report on large motor reliability survey of industrial and commercial installations[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1985, 21(4): 853-872.
- [2] 姜建国, 史家燕. 故障诊断学及其在电工中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [3] 史进渊, 杨宇, 孙庆, 等. 大型汽轮发电机故障特征规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 44-51.
Shi Jinyuan, Yang Yu, Sun Qing *et al.* Study on fault characteristics law for large capacity turbogenerators[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 44-51.
- [4] 邱家俊. 交流电机电磁力激发的非线性振动[J]. 中国电机工程学报, 1989, 9(2): 49-57.
Qiu Jiajun. The nonlinear oscillations in an alternating current machine excited by electromagnetic forces[J]. Proceedings of the CSEE, 1989, 9(2): 49-57.
- [5] 黄晓光, 王永泓, 翁史烈. 基于 BP 算法的电站燃气轮机故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 72-74.
Huang Xiaoguang, Wang YongHong, Weng Shilie. Gas turbine fault diagnosis based on the BP algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 72-74.
- [6] 丁艳军, 王培红, 吕震中. 生产过程早期故障检测与诊断的一种新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 61-65.
Ding Yanjun, Wang Peihong, Lü Zhenzhong. A novel method of early fault detection and diagnosis for technical process [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 61-65.
- [7] 任震, 黄群古, 黄雯莹. 基于实值小波变换的发电机故障检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 58-64.

(下转第 157 页 continued on page 157)

- [11] Wu Xin, Pong M H, Qian Z M. Reduction of EMI by electric field method[C]. PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 1999: 845-849.
- [12] Sauerlaender G, Duerbaum T, Tolle T. Common mode noise generated by magnetic components- experimental test set-up and measurement results[C]. PESC Record -IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2000: 911-915.
- [13] 和军平, 姜建国, 陈为. 离线式 PWM 变换器电磁干扰传播通道模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 23(6): 91-95.
He Junping, Jiang Jianguo, Chen Wei. Study on the model of the EMI coupling paths of an off-line PWM converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 23(6): 91-95.
- [14] Song Qu, Chen Dan. Mixed-mode EMI noise and its implications for filter design in offline switching power supplies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(4): 502-507.
-
- 收稿日期: 2005-01-10。
作者简介:
和军平 (1971-), 男, 博士, 博士后, 从事电力电子装置电磁兼容方面的研究;
陈为 (1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子功率变换及高频磁技术等;
姜建国 (1938-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电机检测与故障诊断和电力电子装置电磁兼容方面的研究。
-

(上接第 119 页 continued from page 119)

- Ren Zhen, Huang Qungu, Huang Wenying. New ways of fault detection in generators based on real wavelet transforms [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 58-64.
- [8] Zhongming Y, Wu B, Sadeghian A R. Signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition[C]. 16th Annu. IEEE Applied Power Electronics Conf. Expos., 2001, 2: 1022-1029.
- [9] 陈长征, 栗青, 刘一芳, 等. 汽轮发电机组故障智能诊断方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 121-124.
Chen Changzheng, Liqing, Liu Yifang *et al.* Intelligent fault diagnosis method for turbo-generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 121-124.
- [10] 管霖, 吴国沛, 黄雯莹, 等. 小波变换在电力设备故障诊断中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 46-54.
Guan Lin, Wu Guopei, Huang Wenying *et al.* Study on the application of wavelet transform in fault diagnosis of electric devices [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 46-54.
- [11] Schoen R R, Habetler T G, Kamran F *et al.* Motor bearing damage detection using stator current monitoring[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1995, 31(6): 1274-1279.
- [12] 吴正国, 夏立, 尹为民, 现代信号处理技术——高阶谱、时频分析与小波变换[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [13] 侯新国, 吴正国, 夏立. 基于 Park 矢量模平方函数的异步电机转子故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 137-140.
Hou Xinguo, Wu Zhengguo, Xia Li. A method for detecting rotor faults in induction motors based on the square of the park's vector modulus[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 137-140.
- [14] 冉启文, 小波变换与分数傅里叶变换理论及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
-
- 收稿日期: 2005-01-04。
作者简介:
侯新国 (1972-), 男, 博士研究生, 研究方向为信号的检测与处理; 电气设备的故障诊断;
吴正国 (1943-), 男, 教授、博士生导师, 研究方向为数字信号处理、电能质量分析与控制、电能变换等;
夏立 (1964-), 男, 教授, 研究方向为电力系统及其自动化。