

基于 RELAX 频谱分析方法的 鼠笼式异步电动机转子故障诊断

刘振兴, 尉宇, 赵敏, 陈正澎

(武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北省武汉市 430081)

Fault Diagnosis Way Based on RELAX Spectrum Analysis in Squirrel Cage Induction Motors

LIU Zhen-xing, WEI Yu, ZHAO Min, CHEN Zheng-peng

(Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Among the methods of fault diagnosis based on the current analysis for Squirrel Cage Induction Motors (SCIM), the faults' characteristic components are often submerged by fundamental component and noises, especially for the broken rotor bars, and how to effectively eliminate the influences of the fundamental component and noises is essential for the diagnosis system. The relax algorithms is a kind of relaxant data processing algorithms for additive noises and system errors. A new approach based on relax algorithms for fault diagnosis and monitoring in SCIM is proposed. First, the current signal model of SCIM under fault condition is deduced theoretically. Aimed at the problem that the characteristic components being submerged by the fundamental one in the spectrum of the single phase current, the relax algorithms is used to extract the characteristic components for the fundamental one of power, and estimate the discrete-time spectrum parameter of particular fault from the continuous spectrum of the yawp and mixed waves, which can eliminate the effective of power and yawp and highlight the fault characteristic components. At last experimental results have demonstrated the effectiveness and advantage of the proposed technique.

KEY WORDS: squirrel cage induction motors; rotor; broken rotor bar; eccentricity; fault diagnosis; relax algorithms; spectrum analysis

摘要: 在基于电流信号分析的异步电机故障诊断方法中, 故障特征成分(尤其是断条特征)往往容易被基波分量和噪声信号中所淹没。因此, 有效地克服基波和噪声的影响是诊断过程的关键。RELAX 是一种对加性噪声以及系统误差假设可松弛的算法, 提出了一种基于该算法的鼠笼式异步电动机

转子故障监测与诊断方法。文中从理论上推导了鼠笼式异步电动机转子故障时的电流信号模型, 将 RELAX 算法应用于电源基波特征参数提取, 并从噪声和杂波的连续谱中估计出特定故障的离散谱参数, 从而达到消除电源和噪声影响、突出故障特征的目的。通过对样机实测信号进行了分析处理, 实验结果验证了 RELAX 算法的有效性和优越性。

关键词: 鼠笼式异步电动机; 转子; 断条; 偏心; 故障诊断; RELAX 算法; 频谱分析

0 引言

据不完全统计, 目前全国运行的电动机数量超过 6000 万台, 占电网用电量的 70% 以上, 是工农业生产中应用最为广泛的动力设备。全国每年烧毁电动机数量约 300 万台, 容量在 10 亿 kW 以上。每年仅电动机在烧毁过程中就耗电数亿万度, 修理费高达数 100 亿元。由于电动机故障造成停工停产损失更是难以估计。因此开发先进可靠的电动机状态监测与故障诊断系统, 具有极其广阔的应用前景。

转子断条和偏心是鼠笼式异步电动机的常见故障。诊断系统的可靠性很大程度上取决于监测量和信号处理方法的选择。监测的途径很多, 如定子电流信号监测、振动信号监测、轴电压监测、轴向漏磁监测等^[1]。定子电流监测方法因可以是非侵入式的监测而得到最为广泛的应用。

最典型的电流监测与诊断方法是对采样的单个线电流信号进行频谱分析, 根据频谱中是否存在与故障相关的特征频率成分及其大小来判定故障是否存在及故障的程度。这种方法简单易行, 硬软件开销小。但通常异步电动机额定运行时的转差率

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划项目(2003A006)。

就小, 轻载或空载时的转差率更小。转子断条的主要特征频率成分容易被强大的基波淹没, 难以准确诊断故障。为此, 需要消除基波对断条故障特征频率成分的影响。通常的滤波方法同样会影响到断条特征频率成分^[2-3]。从线电压信号中选择一个与基波电流相位相近的分量, 然后与电流信号的转换值相减, 同样可以减小基波的影响, 更好地突出故障特征, 这就是相关抵消法^[4]的基本思想, 但是完全滤除相当困难。

基于 Hilbert 模量的频谱分析方法^[5], 可以将基波成分转换成了直流信号, 在单一故障情况下能突出了故障特征。但是由于平方运算的存在, 复合故障情况下容易产生交叉项。

同时采集多相电流、电压信号, 经适当的转换来突出断条故障特征, 是近年来的努力方向。基于 Park's 矢量方法^[6-8]、基于瞬时功率频谱分析的方法^[9]和基于矢量控制原理的方法^[10], 采集量较多, 硬件和软件开销较大, 尽管可以将基波转换成直流成分, 断条故障特征成分转换成频率为 $2ksf_1$, 在一定程度上突出了故障特征, 还是存在与直流成分过于接近的问题。

小波分析应用于异步电动机的故障诊断已有多篇文献^[11-12]反映, 由于该方法主要适合于时频分析, 主要用于起动等过渡过程比较有效。

RELAX 算法^[13-14]是在 CLEAN 算法^[15]基础上发展起来的一种基于非线性最小方差(NLS)准则的谱估计算法。它可通过简单的 FFT 运算来实现, 在运算速度及估计准确度上具有优势。该算法不仅计算简单并可获得较高的频率分辨率, 而且对信号模型具有较强的鲁棒性。本文采用 RELAX 频谱分析方法来实现对电源基波和噪声的有效滤除, 达到有效地突出鼠笼式异步电动机转子故障的目的。

1 信号模型

对于一台正常的异步电动机, 理论上定子相电流中只有基波分量, 当然由于电机结构上的固有不对称等因素, 会有一定的谐波成分, 但幅值很小, 可以忽略。此时的某相电流基波表达式可以写为

$$i_1 = I_{m1} \cos(\omega_1 t + j_1) \quad (1)$$

式中: I_{m1} 为基波幅值; ω_1 为电源角频率; j_1 为基波初相位。

当转子出现断条、端环断裂等故障时, 会在定子电流中产生频率为 $f_{br}(k)$ 的故障特征成分, 且

$$f_{br}(k) = (1 \pm 2ks)f_1 \quad (2)$$

其中 $k=1,2,3,\dots$ 。当电动机转子出现偏心故障时, 定子电流中会产生频率为 $f_{ecc}(m)$ 的故障特征成分, 且

$$f_{ecc}(m) = (f_1 \pm mf_r) \quad (3)$$

其中: $m=1,2,3,\dots$; f_1 为外加电压频率; f_r 为转子旋转频率, $f_r=(1-s)f_1/p$ (s 为转差率; p 为电机的极对数)。

综上所述, 可得异步电动机转子故障情况下的通用电流信号的表达式为

$$i_a(t) = I_1 \cos(\omega_1 t - j_1) + \sum_{k=1}^{N_1} I_{bpk} \cos[(1-2ks) \cdot \omega_1 t - j_{bpk}] + \sum_{k=1}^{N_1} I_{bnk} \cos[(1+2ks)\omega_1 t - j_{bnk}] + \sum_{m=1}^{N_2} I_{ecpm} \cos[(\omega_1 - m\omega_r)t - j_{ecpm}] + \sum_{m=1}^{N_2} I_{ecnm} \cos[(\omega_1 + m\omega_r)t - j_{ecnm}] + n(t) = \sum_{i=1}^{N=2(N+N_2)+1} I_i \cos(\omega_i t - j_i) + n(t) \quad (4)$$

式中: I_1 为基波电流的幅值; I_{bpk} 、 I_{bnk} 分别为断条故障对应的特征电流分量的幅值, $k=1,2,3,\dots$; I_{ecpm} 、 I_{ecnm} 分别为偏心故障对应的特征电流分量的幅值; j_1 、 j_{bpk} 、 j_{bnk} 、 j_{ecpm} 、 j_{ecnm} 依次为上述电流分量的初相位; $n(t)$ 为均值为零白噪声。

2 基于 RELAX 方法的频谱分析

RELAX 方法的含义是逐个地清除或剔除信号各个分量, 并利用迭代的方法来尽量保证每个分量估计的准确性。

根据最小化非线性方差(NLS)准则, 式(4)中正弦信号的幅度、频率和初始相位的估计值 $\{\hat{I}_i, \hat{\omega}_i, \hat{j}_i\}$ 可由最小化下式的代价函数得到

$$C(\hat{I}_i, \hat{\omega}_i, \hat{j}_i) = \|i_a - \hat{I}_i \cos t(\hat{\omega}_i t - \hat{j}_i)\|^2 \quad (5)$$

若对式(5)关于 $\{I_i, \omega_i, j_i\}$ 求最小, 即可获得估计值 $\{\hat{I}_i, \hat{\omega}_i, \hat{j}_i\}$ 。

具体说明基于 RELAX 方法频谱分析的方法步骤:

(1) 将信号进行白化处理, 即将其归一化为均值为零、方差为 1 的白化信号, 令 $k=1$ 。

(2) 将信号变换到频域, 得 $I_a(\omega)$ 。

$$I_a(\omega) = \sum_{i=1}^N I_i' d(\omega - \omega_i) \quad (6)$$

(3) 确定最大的谱峰对应的频率位置, 可得

$$\hat{\omega}_k = \arg \max_{\omega} \{I_a(\omega)\} \quad (7)$$

(4) 以 \hat{w}_k 为中心构造窄带滤波器 $h_k(w)$, 对 $I_a(w)$ 进行滤波, 得 $I'_k(w)$, 由此得

$$\hat{I}_i = (\sqrt{\frac{\pi}{2}})^{-1} \int |I'_k(w)|^2 dw \quad (8)$$

(5) 在 \hat{w}_k 的邻域 $W_k = [\hat{w}_k - dw, \hat{w}_k + dw]$ 、 \hat{I}_k 的邻域 $U_k = [\hat{I}_k - dI, \hat{I}_k + dI]$ 和 f_k 的搜索域 $V_k = [-\pi, \pi]$ 作最小代价函数估计

$$\{\hat{I}_i, \hat{w}_i, \hat{f}_i\} = Q_k = \arg \min_{\hat{I}_k \in U_k, \hat{w}_k \in W_k, \hat{f}_k \in V_k} \|C(\hat{I}_k, \hat{w}_k, \hat{f}_k)\|$$

对 f_k 的搜索可利用同相最大原理搜索方法, 先在 $[0, -\pi]$ 之间任取一值 j_1 计算 Q_k , 然后计算 $j_1 + \pi$ 的 Q_k , 取两者的较大的区间作为 f_k 的搜索区间。

(6) 构造信号 \hat{i}_k , 并从原信号中清除 \hat{i}_k

$$\hat{i}_k(t) = \hat{I}_k \cos(\hat{w}_k t - \hat{f}_k) \quad (9)$$

$$i'_a(t) = i_a(t) - \hat{i}_k(t) \quad (10)$$

(7) 若满足退出条件, 则退出。否则 $k = k + 1$, $i_a(t) = i'_a(t)$, 转到 (1)。

原信号进行白化处理, 使其一阶和二阶矩标准化。令 $i_a(t)$ 为原实验数据, 则使其白化的步骤如下

$$\tilde{i}_a(t) = i_a(t) - E[i_a(t)] \quad (11)$$

$$v(t) = E[\tilde{i}_a(t)\tilde{i}_a(t)^T]^{-1/2} \tilde{i}_a(t) \quad (12)$$

退出条件的阈值可选择为残余信号的能量与总能量之比。即当残余信号的能量小于总能量的百分之几时, 退出分离。这里选择分离的信号幅值与基波信号的幅值之对数比作为退出条件的阈值。

3 实验验证

实验电机为湖北电机厂新出厂的 Y100L1-4 型鼠笼式异步电动机, 1 台 2.2kW 的直流发电机作为其负载, 依次进行了正常+偏心、转子 1 根断条+偏心、2 根断条+偏心、3 根断条+偏心 4 种情况下的实验。电动机运转速度均为 1440r/min, 电流信号采样率为 10000Hz。该电机的主要技术数据见表 1。

表 1 实验电机的主要技术数据
Tab. 1 Specifications of the laboratorial machine

额定功率/kW	额定电压/V	额定电流/A	额定转速/(r/min)	定/转子槽数	定子绕组型式
2.2	380	5.0	1440	36/32	单层交叉

对 4 种情况下采集的 A 相电流分别进行频谱分析和经 RELAX 算法滤除基波及其他杂波以后的频谱分析。RELAX 算法阈值的选取可为 $I'_k / I'_1 > h$, h 的取值可由实验和运行经验数据获取。本实验选取 $h = 0.005$, 已经足够精确提取与基波相比分贝数 -30dB 以上的故障特征成分。一般情况下, 取

$h = 0.05$ 左右即可。

为了减少噪声对检测的影响, 本实验采用高采样率与中值滤波相结合的方法。其具体方法为:

(1) 对长度为 N 的采样数据进行中值滤波, 滤波器的长度为 M 。

(2) 将长度为 N 的采样数据进行 1/2 抽取, $N' = N/2$; 同时将滤波器的长度减小为 $M = M - L$ 。

(3) 满足退出条件即退出, 否则转到 (1)。

由于对故障的检测只需在 $[0, 100\text{Hz}]$ 内分析。故当抽取后信号数据长度 N' 大于 200 即可。因此退出条件可选择为 N' 大于 200 的某值。一维中值滤波器定义为

$$\text{med}[x(i)] = \begin{cases} x^{k+1} & n = 2k + 1 \\ \frac{1}{2}(x^k + x^{k+1}) & n = 2k \end{cases} \quad (13)$$

中值滤波器 (med) 的初始长度可选择为 $M = 27$, $L = 2$; 即 M 分别等于 27, 25, 23, ..., 5。

实验结果如图 1~4 所示, 其中各图的子图(a)为直接频谱分析的结果, 子图(b)为剔除基波和杂波后频谱分析结果。由于基波过于强大, 各子图(a)的纵坐标使用对数坐标, 以基波为基准, 分贝数为单位; 后者由于有效滤除了基波, 纵坐标直接可用

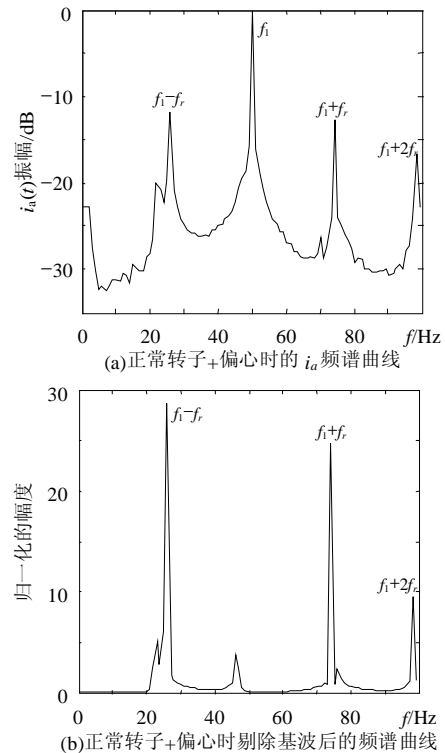
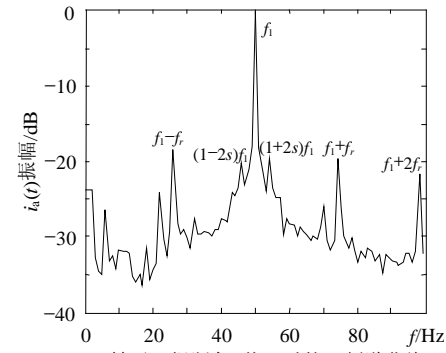
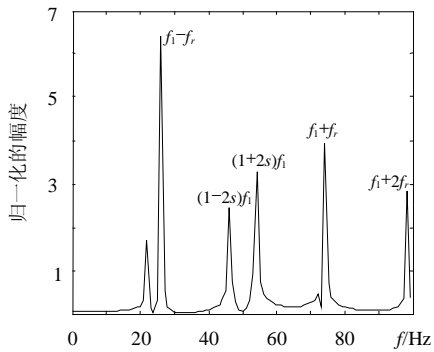


图 1 正常转子+偏心时基波被剔除前后的频谱曲线
Fig. 1 Spectrum of phase current for the case of normal bar and eccentricity before and after the fundamental component being filtered



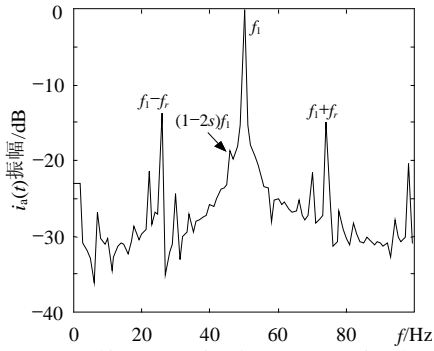
(a) 转子 1 根断条+偏心时的 i_a 频谱曲线



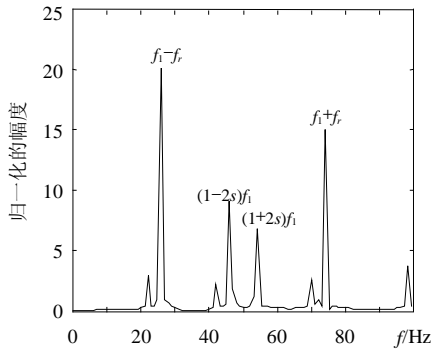
(b) 转子 1 根断条+偏心的剔除基波后的频谱曲线

图 2 转子 1 根断条+偏心时基波被剔除前后的频谱曲线

Fig. 2 Spectrum of phase current for the case of one broken bar and eccentricity before and after the fundamental component being filtered



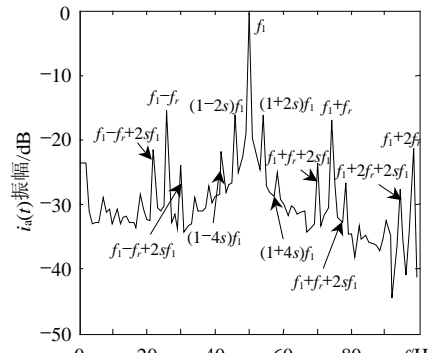
(a) 转子 2 根断条+偏心时的 i_a 频谱曲线



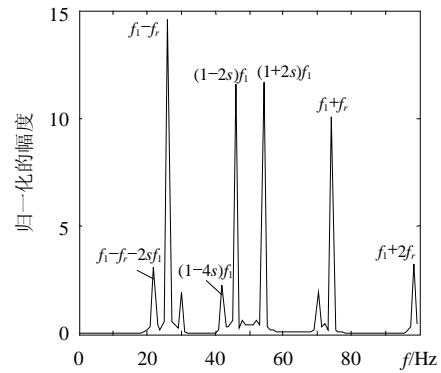
(b) 转子 2 根断条+偏心的剔除基波后的频谱曲线

图 3 转子 2 根断条+偏心时基波被剔除前后的频谱曲线

Fig. 3 Spectrum of phase current for the case of two broken bars and eccentricity before and after the fundamental component being filtered



(a) 转子 3 根断条+偏心时的 i_a 频谱曲线



(b) 转子 3 根断条+偏心的剔除基波后的频谱曲线

图 4 转子 3 根断条+偏心时基波被剔除前后的频谱曲线

Fig. 4 Spectrum of phase current for the case of three broken bars and eccentricity before and after the fundamental component being filtered

功率谱密度表示。

比较各图的子图(a)和(b), 剔除基波和其他杂波以后, 故障特征被明显突出, 尤其是断条故障特征, 即使故障断条程度较轻, 如 1 根断条, 故障特征也相当明显, 非常适合于早期发现异常。

同时可以看出, 随着断条数量的增加, 断条特征成分的功率谱密度呈增长趋势, 与实际情况完全吻合。该算法还可以直接算出各故障分量的具体参数(为节省篇幅, 计算结果从略), 为人工智能诊断(如神经网络)提供了有力的依据。

一般对复合故障的讨论建立在叠加原理之上, 即假设了一种故障的特征不影响另一种故障的特征。对于故障程度较轻的情形是合适的。这也与状态监测发现早期故障的初衷相符合。但是当故障程度较严重时, 各种故障之间的相互影响不可避免。当出现 1 根断条时, 相互干扰不太严重, 但是当存在 2 根以上断条时, 偏心与断条相互影响越来越严重。从图 4 可以看出, 在频率为 $f_1 + mf_r$ 的成分周围出现了频率为 $f_1 + mf_r \pm 2ksf_1$ 的成分。

4 结论

鉴于常规电流频谱分析方法存在难以有效突

出早期故障特征的问题, 本文提出了一种基于 RELAX 方法的鼠笼式异步电动机转子故障监测与诊断新方法。该方法在建立鼠笼式异步电动机转子故障的电流信号模型的基础上, 将 RELAX 算法应用于对可分解为电源和特定故障的特征参数进行提取, 从噪声和杂波的连续谱中估计出电源和特定故障的离散谱参数。完整的谱参数既可用于有效剔除基波成分、突显故障特征, 也可以用于将来进一步量化故障程度。为了有效消除噪声影响, 本文结合使用了中值滤波方法。对样机实验数据的处理结果表明剔除基波和杂波之后的频谱曲线, 可以非常有效地突出故障特征, 为鼠笼式异步电动机早期故障诊断提供了一条新的途径。

参考文献

- [1] 刘振兴, 张哲, 尹项根. 异步电动机的状态监测与故障诊断技术综述[J]. 武汉科技大学学报, 2001, 24(3): 285-289.
Liu Zhenxing, Zhang Zhe, Yin Xianggen. A summary of on-line condition monitoring and fault diagnostics for 3-phase induction motors[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2001, 24(3): 285-289(in Chinese).
- [2] 姜建国. 故障诊断学及其在电工中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [3] Hachemi El, Benbouzid M. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(5): 984-993.
- [4] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [5] 刘振兴, 尹项根, 张哲. 基于 Hilbert 模量频谱分析的异步电动机转子故障在线监测与诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 158-161.
Liu Zhenxing, Yin Xianggen, Zhang Zhe. On-line monitoring and diagnosis way based on spectrum analysis of hilbert modulus in induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 158-161(in Chinese).
- [6] Cardoso A J M, Saraiva E S. Computer aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors by park's vector approach[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1993, 29(5): 897-901.
- [7] 侯新国, 吴正国, 夏立. 基于 Park 矢量模平方函数的异步电动机转子故障检测方法研究[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 asynchronous motors based on the square of the Park's Vector modulus[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 137-140(in Chinese).
- [8] Cruz S M A, Cardoso M A J. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended Parks vector approach [J]. Electric Machines and Power Systems, 2000, 28(5): 289-299.
- [9] 刘振兴, 尹项根, 张哲. 基于瞬时功率信号频谱分析的鼠笼式异步电动机转子故障在线诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 148-152.
Liu Zhenxing, Yin Xianggen, Zhang Zhe. On-line rotor fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 148-152(in Chinese).
- [10] 刘振兴, 尹项根, 张哲. 基于矢量控制思想的鼠笼式异步电动机故障在线监测与诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 116-121.
Liu Zhenxing, Yin Xianggen, Zhang Zhe. On-line monitoring and diagnosis way of three-phase squirrel-cage induction motors based on vector control concept[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 116-121(in Chinese).
- [11] 许伯强, 李和明, 孙丽玲, 等. 小波分析应用于笼型异步电动机转子断条在线检测初探[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 24-28.
Xu Boqiang, Li Heming, Sun Liling, et al. The application of wavelet analysis to detect rotor bar breaking fault of squirrel cage asynchronous motor on line[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 24-28(in Chinese).
- [12] 曹志彤, 何国光, 陈宏平, 等. 电机故障特征值的倍频小波分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 113-116.
Cao Zhitong, He Guoguang, Chen Hongping, et al. Multiple bandwidth wavelet analysis for fault diagnosis eigenvalue in squirrel-cage induction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 113-116(in Chinese).
- [13] Li Jian, Stoica P. Efficient mixed pectrum estimation with applications to target feature extraction[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1996, 36(2): 281-295.
- [14] Li Jian, Stoica P, Zheng D. Angle and waveform estimation in the presence of colored noise via RELAX[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, 1997, 33(3): 1077-1087.
- [15] Jenho T, Bernard D. Reduction fo sidelobe and speck le artifacts in microwave imaging: the CL EAN Technique[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1988, 36(4): 543-556.

收稿日期: 2006-08-27。

作者简介:

刘振兴(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备故障诊断、信号处理和电气传动, zhenxingliu@wust.edu.cn;

尉宇(1972—), 男, 副教授, 研究方向为信号处理及其应用;

赵敏(1978—), 男, 助教, 研究方向为嵌入式系统及其应用;

陈正澎(1983—), 男, 硕士生, 研究方向为嵌入式系统及其应用。

(责任编辑 云爱霞)