

基于互高阶谱 MUSIC 法的电机定子匝间短路故障特征分量提取

王洪希¹, 刘 诤², 田 伟¹

(1. 北华大学电气信息工程学院, 吉林 吉林 132021; 2. 吉林化建电气工程有限公司, 吉林 吉林 132011)

摘要: 针对电机定子绕组匝间短路时, 定子电流中干扰信号影响大, 故障信号较微弱等缺点, 研究了一种基于互高阶累积量的多重信号分类的故障特征检测方法 (Multiple Signal Classification, MUSIC)。通过 MUSIC 算法对定子电流信号进行快速分解, 形成噪声子空间和信号子空间, 确定定子匝间短路故障特征频率分量。由于互高阶累积量可以有效地抑制相关和非相关噪声, 在混合噪声条件下, 该方法仍具有很高的谱分辨率和谱估计性能。仿真和实验结果表明, 该方法在对电机定子匝间短路故障检测时, 在不需要对分析数据进行整周期采样前提下, 更准确地反映故障特征频率, 证明了此方法的有效性。

关键词: 多信号分类; 互高阶谱; 匝间短路; 故障检测

Fault feature component extraction of generator stator inter-turn short-circuit based on MUSIC method for cross-high-order spectrum

WANG Hong-xi¹, LIU Zheng², TIAN Wei¹

(1. College of Electric Information Engineering, Beihua University, Jilin 132021, China;

2. Jilin Chemical Construction Electrical Engineering LTD, Jilin 132011, China)

Abstract: When generator stator windings inter-turn short circuit occurs, the disturbing signal in stator currents is strong and the fault signal is weak, thus multiple signal classification (MUSIC) method based on cross-high-order cumulate is proposed to overcome the shortcomings. MUSIC algorithm can decompose stator current signals quickly into noise subspace and signal subspace, and the frequency component of stator inter-turn short circuit feature is obtained. Since cross-high-order cumulate can restrict the correlated and uncorrelated noise, MUSIC method still shows high spectrum resolution and strong spectral estimation ability in the condition of mixed noise. The effectiveness of the proposed method is proved in simulation experiments that it reflects the fault feature frequency accurately without full period sampling of analysis data when the stator windings inter-turn short circuit fault is detected.

Key words: MUSIC; cross-high-order-spectrum; inter-turn short-circuit; fault diagnosis

中图分类号: TM307.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0117-04

0 引言

电机是机电能量转换的核心,它在电能的生产、传输、分配以及机械装置的驱动、控制系统的执行等方面起着重要的作用。对于电机故障之中定子绕组匝间短路占其故障种类的15%,其原因是由于绕组中相邻两匝或数匝线圈之间的绝缘遭到破坏而导致短路引起的,此类故障往往会进一步发展导致相间短路或接地短路故障,是异步电机的一个主要故障类别^[1]。因此,研究定子匝间短路故障诊断技术在电机故障早期发现并及时进行维修,具有重大的理论意义和社会经济效益。

目前所采用的诊断方法中解析计算法是应用一些物理定律和数学知识求解约束条件下的方程,但由于电机内部故障时的电磁关系的复杂性,此方法的分析结果与实际情况会有较大的误差^[2-4];试验研

究法是研究发电机故障行为和校核继电保护装置的一种重要方法。但由于试验的条件要求比较苛刻,一般达不到实际电机的正常运行工况,试验难以模拟全部的故障^[5-7];而基于神经网络诊断法能有效对故障特征进行分类与识别,从而避开复杂的分析技术,但定性的或是语言的信息无法在神经网络中直接使用或嵌入,而且较难用训练好的神经网络的输入输出映射关系来解释实际意义的故障诊断规律^[8-9]。

由于定子绕组发生内部短路时,内部故障电流中存在高次谐波成分,而此成分远离基波。可通过检测定子电流中的谐波分量来进行电动机定子绕组匝间短路故障特征检测。因此,本文采用了一种基于互高阶累积量的 MUSIC 方法,用于估计电机定子匝间短路故障特征频率,诊断的基本思想是:设被检测对象全部可能发生的状态(包括正常和故障

状态)组成状态空间 S , 它的可能观测量特征的取值范围全体构成特征空间 Y , 当系统处于某一状态 S 时, 系统具有确定的特征 Y , 即存在映射 $g: S \rightarrow Y$, 所以故障诊断的目的就在于根据可测量的特征向量来判断系统处于何种状态。本文互高阶累积量的 MUSIC 方法将电机定子故障信号空间 Y 分解为噪声子空间 N 和信号子空间 G , 利用噪声子空间 N 与阵列的方向矩阵 A 的列矢量正交的性质, 构造空间谱函数 $P(W)$ 并进行谱峰搜索。MUSIC 方法不但对噪声有抑制作用; 同时它不需要对分析数据进行整周期采样, 能有效地抑制频谱泄漏和栅栏效应地影响, 在低频段、短数据条件下对故障信号频率估计具有较高的分辨率。

1 基于互高阶累积量的MUSIC方法

当定子出现绕组匝间短路时, 会在定子电流中产生频率为 $f_{st} = f_1 \left[k \pm \frac{n}{p}(1-s) \right] = nf_r \pm kf_1$ (其中: f_1 为电源频率; s 为电机转差率; p 为电机极对数; $k=1,3,5,\dots$, $n=1,2,3,\dots,(2p-1)$; f_r 为转子旋转频率且 $f_r = (1-s)f_1/p$) 的故障电流信号。通过检测这些由于故障而出现的频谱分量, 可判别电机的定子故障。而在实际中电网的频率是经常波动的, 电机运行时 f_r 和 $k sf_1$ 频率在不断发生变化, 因此采用传统的频谱分析方法诊断定子匝间短路故障受到明显影响, 甚至于无法准确提取 nf_r 左右的边频分量。

因此, 人们提出的诊断方法的共同特点是想办法将匝间短路特征频率 f_{st} 从原始信号中“剥离”出来。本文提出的互高阶累积量的MUSIC法也是基于此想法。因为传统的空间谱估计方法大多是在二阶统计量基础上提出的, 而高阶累积量及对应的高阶谱具有更加丰富的信息, 且对于未知谱特性的相关和非相关噪声都有很好的抑制能力。

互高阶累积量对相关与非相关噪声具有抑制作用, 这在文献[10]和文献[11]已经得到证明。

互高阶谱的MUSIC算法中, 对信号进行奇异值分解, 将故障信号空间分成两个正交子空间, 即信号子空间和噪声子空间, 并且利用整个噪声子空间的基来估计信号的参数。这样就部分平滑了噪声的影响。对于电机定子匝间短路检测中, 电压、电流等物理量都可以看作“信号”予以变换和处理。

设检测的电流故障信号序列 $x(n)$ 和 $y(n)$ 分别为带有附加混合色噪声的复正弦信号, 即:

$$x(n) = \sum_{i=1}^q a_i \exp[j\omega_i n + \varphi_x] + \xi_x(n) + \eta_x(n) \quad (1)$$

$$y(n) = \sum_{i=1}^q \beta_i \exp[j\omega_i n + \theta_i + \varphi_y] + \xi_y(n) + \eta_y(n)$$

式中: α_i, β_i 为复数谐波信号幅值; θ_i 为信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 各谐波分量间的相位差; ω_i 为信号频率; φ_x 和 φ_y 为随机初始相位, 且在 $(-\pi, \pi)$ 区间内均匀分布; ξ_x, ξ_y, η_x 和 η_y 分别为谱密度未知的零均值色噪声, 其中 η_x 和 η_y 为互相关的非高斯噪声; ξ_x 和 ξ_y 是非相关的高斯噪声; ξ_x 和 ξ_y 与 η_x 和 η_y 相互独立。

$x(n)$ 和 $y(n)$ 的互四阶累积量为:

$$c_{xyyy}(k_1, k_2, k_3) = cum_4 \{x(n), y(n+k_1), y^*(n+k_2), y^*(n+k_3)\}$$

$$c_{xyyy}(m, 0, 0) = E \left[x(n)y(n+m)y^*(n)y^*(n) \right] = -\sum_{i=1}^q \alpha_i \beta_i^3 e^{-j\theta_i} e^{-j\omega_i m}$$

令 $c_{xyyy}(m) = c_{xyyy}(m, 0, 0)$, 则其对应的 $h \times h$ 维扩阶互四阶累积量矩阵:

$$C_{xyyy} = \begin{bmatrix} c_{xyyy}(0) & c_{xyyy}(-1) & \dots & c_{xyyy}(-h+1) \\ c_{xyyy}(1) & c_{xyyy}(0) & \dots & c_{xyyy}(-h+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{xyyy}(h-1) & c_{xyyy}(h-2) & \dots & c_{xyyy}(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

可得: $C_{xyyy} = FE^{j\theta}PF^H$

式中: $F_i = [1 \ e^{j\theta_1} \ e^{j\theta_2} \ \dots \ e^{j(q-1)\theta_q}]^T$; $F = [F_1 F_2 \dots F_q]$

为 $h \times q$ 维复数矩阵; $E^{j\theta} = \text{diag} [e^{-j\theta_1} \ e^{-j\theta_2} \ \dots \ e^{-j\theta_q}]$

$P = \text{diag} [-\alpha_1 \beta_1^3 \ -\alpha_2 \beta_2^3 \ \dots \ -\alpha_q \beta_q^3]$ (q 为 C_{xyyy} 的秩)。

可见 C_{xyyy} 是非共轭对称矩阵, 它的奇异值分解 (SVD) 式为:

$$C_{xyyy} = U \Sigma V^H \quad (3)$$

其中: U 和 V 分别为矩阵 C_{xyyy} 的左、右奇异矢量;

$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_i)$, 其中 $\sigma_i (i=1, 2, \dots, n)$ 所有非零奇异值, 按 σ_i 以递减次序排列 (即 $\sigma_{i+1} \leq \sigma_i$)。

将 V 分块成 $V=[V_1, V_2]$, 其中 V_1 是 V 中前 q 个奇异矢量所构成, V_2 是 V 中后 $(h-q)$ 个奇异矢量所构成; 同理将左奇异矢量矩阵 U 分块成 $U=[U_1 \ U_2]$ 。

则式 (3) 可写为: $C_{xyyy} = [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^H \\ V_2^H \end{bmatrix}$

则: $C_{xyyy} = U_1 \Sigma V_1^H, C_{xyyy} V_2 = 0, C_{xyyy} U_2 = 0$ 由于 F 中含有谐波信号的频率, 所以称 F 为信号空间, V_2 为噪声空间。

而矩阵 C_{xyyy} 中 q 个正弦谐波分量 $e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}, \dots, e^{j\omega_q}$ 均是以空间 v_2 中任一噪声奇异矢量中的元素为系数所构成的特征方程为:

$$v_i(0) + v_i(1)z^{-1} + \dots + v_i(h-1)z^{-(h-1)} = 0$$

$i=q+1, \dots, h$ 的根。式 (3) 的 $(h-q)$ 个特征方程的根有且仅有 q 个, 它们是 $e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}, \dots, e^{j\omega_q}$ 。

在估计故障信号谐波频率时, 当采用 $h \gg q$ 的扩阶方程时, 虽然大大提高了谐波频率估计的精度及分辨率, 但同时却因此产生了 $(h-q)$ 个增根。由于根是与谱峰相对应的。因此这些增根就不可避免地会产生伪峰^[9], 这就是伪峰产生的原因。现有的各种现代谱估计算法, 尽管采用了许多行之有效的伪峰抑制技术, 但由于它们并不能剔除这些增根, 所以均不同程度地存在着伪峰现象。由此可计算伪谱:

$$S(f) = \frac{1}{|A^H L|^2}$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} \sum_{i=q+1}^h v_i(0) & \sum_{i=q+1}^h v_i(1) & \dots & \sum_{i=q+1}^h v_i(h-1) \end{bmatrix}^T$$

$$L = \begin{bmatrix} 1 & e^{2\pi f} & \dots & e^{2\pi(p-1)f} \end{bmatrix}^T$$

选择使 $S(f)$ 取得最大值的 q 个频率作为正弦谐波频率的估计。这就是互高阶谱 MUSIC 方法对于故障信号参数估计。

2 仿真与实验验证

仿真模型选用一台4极、2.2 kW的笼型异步电动机, 电机的主要参数: 额定功率2.2 kW; 额定电压380 V; 额定电流5.0 A; $s = 0.04$, 定子匝数为86, 采样频率为1 000 Hz。故障检测方案如图1。由于系统检测中有时仅能得到单一的正弦信号观测序列, 这时可根据实际情况采用参考信号法(如锁定放大器、双通道隔离放大器法和时间延迟法^[12]), 均可将原信号等效地用式(1)表达, 在实际的应用中很容易实现。

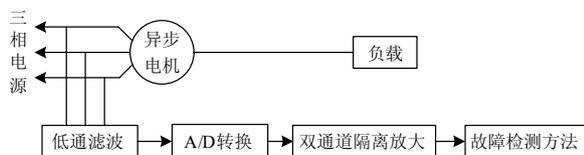


图1 实验接线图

Fig.1 Experimental system scheme

实验中分别对电机正常运行时, 以及匝间短路分别为2.3%, 5.8%, 23.3%时, 进行定子匝间短路

故障分析。

图2是电机正常运行时的频谱图, 可以看出在 $f=50$ Hz 时谱峰最大, 而在有 2.3%匝间短路时, 3次谐波的谱峰变化较大(图3), 图4匝间短路故障继续增大, 这时变化最大的是5次谐波, 它的谱峰发生突变, 从表4可知增加了7.32 dB, 但由于定子匝间短路可以引起电机内部磁场的变化, 使转子电流发生变化, 还会引起转子的偏心, 因此在图4中基波出现偏心故障特征频率。伴随着短路匝数的加重, 在图5中可以看出有7次谐波的出现。这与通过计算得到的定子匝间短路其故障频率在 (150 ± 12) Hz, (250 ± 12) Hz 计算结果相符, 从表4中可以看出三次和五次谐波的波动(分别增加了6.24 dB、14.9 dB), 同时出现了7次谐波。随着短路故障的增加短路电流中谐波变化非常明显(幅值增加), 于是通过检测故障电流中的谐波分量的变化, 尤其是3次、5次和7次, 并与历史数据比较即可对电机的状态作出有效的诊断。而且从表1至表3中看出随着匝间短路故障的加重, MUSIC方法的谱估计仍具有良好的稳定性和抗干扰性。仿真频谱图中基波幅值随着匝间短路故障的加重, 有一定的波动, 这可能是由于实验时三相运行情况不完全对称造成的, 也可能是由于电机长久运行造成的偏心引起的, 但不影响实验结果与理论的一致性。

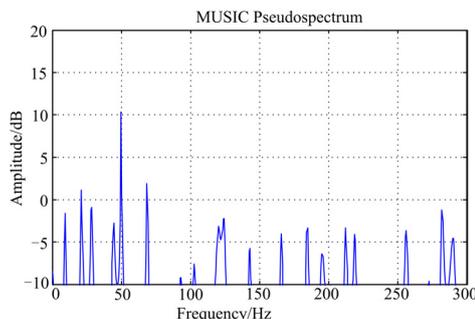


图2 电机正常时定子电流频谱图 (A相)
Fig.2 Power spectrum of stator circuit (A-phase)

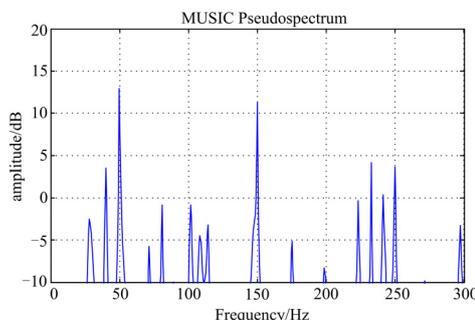


图3 电机定子A相匝间短路电流频谱图 (2.3%)
Fig.3 Power spectrum of stator A-phase winding inter-turn short circuit (2.3%)

表 1 匝间短路功率谱 (2.3%)

Tab.1 Power spectrum of inter-turn (2.3%)

0.041 7	0.042 1	0.042 5	0.042 2	0.042 7	0.043 1	0.043 2
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

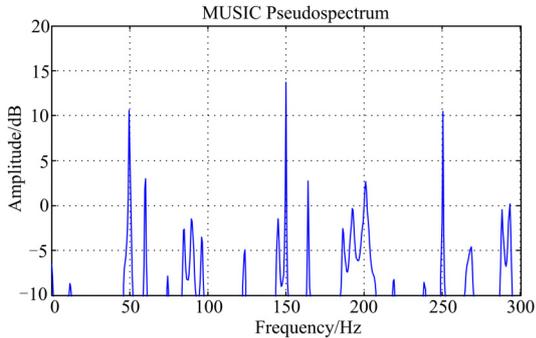


图 4 电机定子 A 相匝间短路电流频谱图 (5.8%)

Fig.4 Power spectrum of stator A-phase winding inter-turn short circuit (5.8%)

表 2 匝间短路功率谱 (5.8%)

Tab.2 Power spectrum of inter-turn (5.8%)

0.042 2	0.042 5	0.042 0	0.042 6	0.043 0	0.028	0.044 6
---------	---------	---------	---------	---------	-------	---------

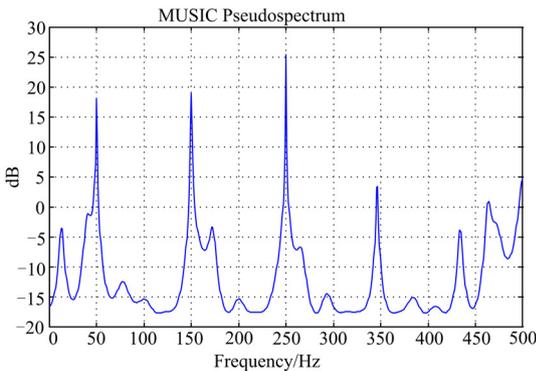


图 5 电机定子 A 相匝间短路电流频谱图 (23.3%)

Fig.5 Power spectrum of stator A-phase winding inter-turn short circuit (23.3%)

表 3 匝间短路功率谱 (23.3%)

Tab.3 Power spectrum of inter-turn (23.3%)

0.042 2	0.042 0	0.041 5	0.041 5	0.042 1	0.042 8	0.042 3
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

表 4 故障后谐波的幅值变化

Tab.4 Changes of harmonic after the inter-turn short circuit fault (dB)

电机状态	3 次谐波	5 次谐波	7 次谐波
2 匝短路 (2.3%)	11.67	4.57	
5 匝短路 (5.8%)	14.32	11.89	
20 匝短路 (23.3%)	20.56	26.79	4.64

3 结论

利用互高阶累积量的 MUSIC 方法, 对匝间短

路故障信号空间进行分解, 并在仿真环境下分析电机定子单相电流频谱。通过实验结果与理论比较, 定子绕组匝间短路时, 定子电流的第 3, 5, 7 次谐波显著增加, 其中第 5 次谐波增加较多, 故可通过检测定子电流中的谐波分量来进行电动机定子绕组匝间短路故障检测。同时证实了该方法对电机定子匝间短路的检测具有一定的准确度, 而且随着匝间短路故障的加重此方法的分辨率和谱估计具有一定的稳定性, 实际应用有待于实践的检验和完善。

参考文献

- [1] 沈标正. 电机故障诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [2] 王旭红, 陈艳, 彭建春. 在线检测电机定子绕组匝间短路故障的新方法[J]. 高电压技术, 2003, 29 (1): 28-30.
WANG Xu-hong, CHEN Yan, PENG Jian-chun. A new method for on-line detecting inter-turn short circuit in stator winding of AC machine[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (1): 28-30.
- [3] 张健文, 姚奇, 朱宁辉, 等. 异步电动机定子绕组的故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2007, 33 (6): 114-117.
ZHANG Jian-wen, YAO Qi, ZHU Ning-hui, et al. Method for diagnosing the stator winding faults in squired cage induction motor[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (6): 114-117.
- [4] Tallam R M, Sang Bin Lee, Stone G C, et al. A survey of methods for detection of stator-related faults in induction machines[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 2007, 42 (4): 920-933.
- [5] 刘振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于 Hilbert 模量频谱分析的异步电动机转子故障在线检测与诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (7): 158-161.
LIU Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. 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.
- [6] 许伯强, 李和明, 孙丽玲, 等. 异步电动机定子绕组匝间短路故障检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (7): 177-182.
XU Bo-qiang, LI He-ming, SUN Li-ling, et al. Detection of stator winding inter-turn short circuit in induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (7): 177-182.
- [7] 王祥珩. 发电机内部短路分析研究最新进展[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (11): 10-12.
WANG Xiang-heng. New development of research on internal short in generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (11): 10-12.

(下转第 132 页 continued on page 132)

ZHONG Qing. Review on application and development of modern control technologies in HVDC systems[J]. Relay, 2006, 34(9): 80-86.

[3] 王久玲. 南方电网的实践与展望[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(1): 1-4.

WANG Jiu-ling. The practice and prospect of China southern power grid[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(1): 1-4.

[4] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 122-136.

ZHAO Wan-jun. HVDC transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 122-136.

[5] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 138-183.

DAI Xi-jie. Introduction of DC transmission[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990: 138-183.

[6] 陈亦平. 南方电网连锁故障风险分析及防御措施研究[J]. 南方电网技术研究, 2010, 4(3), 8-11.

CHEN Yi-ping. The risk analysis and defensive measures research of cascading failures in China southern power grid[J]. Southern Power System Technology Research, 2010, 4(3): 8-11.

[7] 杨雄平. 南方电网直流闭锁故障时受端系统电压稳定问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 40-43.

YANG Xiong-ping. Voltage stability analysis of receiving-end system in China south power grid under the DC block faults[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 40-43.

[8] 廖民传. 交直流混合系统受端电网暂态电压稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10):1-4.

LIAO Min-chuan. Transient voltage stability of received power grid in AC/DC hybrid power system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10):1-4.

收稿日期: 2010-07-20; 修回日期: 2010-10-20

作者简介:

赵 军 (1980-), 男, 工程师, 从事高压直流输电管理工作;

曹 森 (1974-), 男, 高级工程师, 从事高压直流输电软件设计; E-mail: senc@xjgc.com

刘 涛 (1978-), 男, 工程师, 从事高压直流输电软件设计。

(上接第 120 页 continued from page 120)

[8] 屠黎明, 胡敏强, 肖仕武, 等. 发电机定子绕组内部故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (17) : 47-52.

TU Ling-ming, HU Min-qiang, XIAO Shi-wu, et al. Research methods of the generator with internal armature winding fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (17) : 47-52.

[9] Young-Jun Kim, Jang-Mok Kim, Byeong-Yeol Yoon, et al. Detection of shorted-turns in the rotor winding of cylindrical synchronous generators using discrete wavelet transform[C]. //Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC`06. Twenty-First Annual IEEE. 2006.

[10] 王树勋. 高阶统计量在系统理论中的应用[J]. 自动化学报, 1994, 20 (6) : 710-717.

WANG Shu-xun. Application of high-order statistics in system theory[J]. Acta Automatic Sinica, 1994, 20 (6) : 710-717.

[11] 石要武, 戴逸松, 宫文斌. 色噪声背景下正弦参量估计的互谱矩和SVD方法[J]. 电子科学学刊, 1995, 17 (1) : 13-19.

SHI Yao-wu, DAI Yi-song, GONG Wen-bin. Parameter estimation of sinusoidal embedded in colored noise via cross spectrum matrix and SVD method[J]. Journal of Electronics, 1995, 17 (1) : 13-19.

[12] 石要武, 戴逸松, 宫文斌. 有色噪声背景下正弦信号频率估计的互谱Pisarenko和MUSIC[J]. 电子学报, 1996, 24 (10) : 46-50.

SHI Yao-wu, DAI Yi-song, GONG Wen-bin. Pisarenko and MUSIC method of cross spectrum for sinusoidal parameter estimation on color noise background[J]. Acta Electronics Sinica, 1996, 24 (10) : 46-50.

收稿日期: 2009-12-09; 修回日期: 2010-02-06

作者简介:

王洪希 (1971-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子及电机控制、电机状态监测及故障诊断; E-mail: wang_hongxi71@163.com

刘 诤 (1971-), 男, 学士, 工程师, 从事电气自动化专业工作;

田 伟 (1971-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统自动化和电能质量控制。