

基于 CCF-HTLS 算法的异步电动机转子故障检测

林志芳

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 定子电流经低通滤波器处理后产生高斯有色噪声, 限制了异步电机转子故障检测算法的辨识精度。针对该问题, 提出一种抑制高斯有色噪声的异步电机故障检测技术。首先对采集到的定子电流进行预处理, 利用逆同步旋转变换剔除基波, 避免了直接检测时基波对故障辨识精度的影响。然后利用互相关函数 (CCF) 处理技术对高斯有色噪声的抑制作用, 提出基于 CCF-HTLS 算法的电机转子故障诊断技术。针对异步电机转子断条和偏心故障的识别进行试验, 结果表明 CCF-HTLS 算法可以有效抑制高斯有色噪声, 并保留故障有用信息, 显著地提高了故障检测的分辨率。

关键词: 异步电机; 故障检测; 互相关函数; HTLS; 高斯有色噪声

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)03-0109-06

Detection Method of Rotor Fault in Asynchronous Motors Based on CCF-HTLS

LIN Zhifang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In asynchronous motors, colored Gaussian noises will be produced in stator current after low-pass filter. For this reason, the precision of rotor fault detection methods was restricted. In order to solve this problem, a method for the rotor fault detection in asynchronous motors which could restrain colored Gaussian noises was proposed. Firstly, inverse rotation transform was used to pretreat the sampling stator current and eliminate the fundamental frequency, with which the estimation error of direct detection without pretreatment could be avoided. Then, considering that cross-correlation function (CCF) could restrain colored Gaussian noises, cross-correlation function Hankel total least squares (CCF-HTLS) algorithm was proposed to detect motor rotor fault. The experimental result of broken rotor bars and eccentric fault detection indicated that CCF-HTLS algorithm remarkably restrained colored Gaussian noises and accurately preserved available information of faults, significantly promoting the detection precision.

Key words: asynchronous motor; fault detection; cross-correlation function; Hankel total least squares (HTLS); colored Gaussian noise

0 引言

基于异步电动机定子电流的故障检测技术是一种典型的非侵入式检测方法, 在转子断条和偏心等故障检测中应用广泛^[1]。异步电机发生转子断条和偏心故障时, 在定子电流基波附近分别产生特征故障频率 $(1 \pm 2ks)f_1$ 和 $f_1 \pm mf_r$ (f_1 为基频; s 为转差率; f_r 为旋转频率; k 和 m 为整数, 取值为 1 的故障频率最明显)^[2-4]。基于定子电流的

异步电机故障诊断方法主要可以分为两大类。一类是建立在傅里叶变换及其相关改进的基础上的非参数化方法, 其分辨率受瑞利限的限制, 在非平稳和有限长数据背景下, 分辨率不足, 因而是一种低分辨率的谱估计方法^[5]。第二类故障检测技术是具有超高分辨率的现代谱估计方法。现代谱估计技术使用参数化模型, 能够给出比周期图谱方法高得多的频率分辨率, 在现代信号处理中占有重要地位, 也称为高分辨率方法^[6]。

应用于异步电机故障诊断的参数化功率谱估计方法包括:线性预测方法,如 Prony 算法;子空间正交分解法,如多重信号分类技术(MUSIC);空间旋转不变算法,如最小二乘-旋转不变技术(TLS-ESPRIT)。文献[7]将 Prony 方法与选带细化 Zoom 技术相结合,提出一种适合于窄带频谱分析的 Zoom-Prony 方法,通过两次使用 Prony 算法,估算出故障边频分量的参数,但 Prony 等线性预测算法对噪声敏感的固有缺点使其在低信噪比时参数辨识结果不佳,且极易产生虚假模式。文献[8-9]将 MUSIC 算法应用于异步电动机转子断条故障检测,并提供定子电流的“伪功率谱”。文献[10-11]将 MUSIC 分别与模式搜索算法(PSA)和模拟退火算法(SAA)相结合,准确地计算转子断条特征分量的参数信息,具有抑制噪声能力强、频率分辨率高等优点,但 MUSIC 法存在伪功率峰值的问题,增加了搜索计算量,因此其计算效率尚有不足。文献[12]将 ESPRIT 算法应用到电机故障诊断领域,与 SAA 结合,取得了较好的诊断结果,但利用 SAA 优化寻优的计算量同样不能令人满意。上述各种高分辨率频谱估计算法,背景噪声都是高斯白色噪声,但实际异步电动机故障中,因数据高频采样和电网波动将引入大量高频噪声,对定子电流进行低通滤波处理不可避免。高斯白色噪声经低通滤波器(LPF)处理后会转换成高斯有色噪声,必然影响算法的计算精度^[13-14]。为此,本文首先对定子电流信号预处理,剔除了基波信息,并在此基础上提出基于互相关函数(CCF)的 CCF-HTLS 算法。试验证明,所提算法可抑制高斯噪声(包括高斯有色噪声)的影响,提高了故障检测的分辨率。

1 剔除基频的定子电流预处理

由于基波幅值远高于故障边频幅值,直接对定子电流信号运用现代谱估计技术,如 Prony、ESPRIT 和 MUSIC 等,难以准确检测故障边频参数。因此首先要对定子电流进行预处理,剔除基波成分。具体步骤如下。

运用 Hilbert 变换可以将实信号 $x(t)$ 表示成相应的复数形式:

$$\tilde{x}(t) = x(t) + j\bar{x}(t) \quad (1)$$

其中,虚部为 $x(t)$ 的 Hilbert 变换:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

异步电机发生转子断条时,在忽略高次谐波以及其他噪声的条件下,定子电流可以表示为

$$i(t) = I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_{1,k} \cos[(\omega_1 - k\omega_b)t - \varphi_{1,k}] + I_{r,k} \cos[(\omega_1 + k\omega_b)t - \varphi_{r,k}] \} \quad (3)$$

其中: $\omega_b = 2\pi f_b$ ($f_b = 2sf_1$); I_1 、 f_1 、 φ 分别为基波幅值、频率和相位; $I_{1,k}$ 、 $\varphi_{1,k}$ 分别为故障分量 $\omega_1 - k\omega_b$ 的幅值和相位; $I_{r,k}$ 、 $\varphi_{r,k}$ 分别为故障分量 $\omega_1 + k\omega_b$ 的幅值和相位。

利用式(1)构造定子电流复数信号:

$$\tilde{i}(t) = I_1 e^{j(\omega_1 t - \varphi)} + \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_{1,k} e^{j[(\omega_1 - k\omega_b)t - \varphi_{1,k}]} + I_{r,k} e^{j[(\omega_1 + k\omega_b)t - \varphi_{r,k}] \} \quad (4)$$

对式(4)进行逆同步旋转变换,即乘以复指数序列 $e^{-jk\omega_b t}$ 使基频移至 0 Hz(即直流部分),故障边频移至低频 kf_b ,经求均值、滤除直流部分,可得:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_{1,k} e^{j(-k\omega_b t - \varphi_{1,k})} + I_{r,k} e^{j(k\omega_b t - \varphi_{r,k})} \} \quad (5)$$

由式(5)可知,通过定子电流预处理,剔除了基波成分,而转子断条故障频率由 $(1 \pm 2s)f_1$ 移至低频 $2sf_1(f_b)$ 。同理,经过上述预处理,偏心特征故障频率将由 $f_1 \pm f_r$ 移至 f_r 。

2 高斯有色噪声处理

2.1 抑制高斯有色噪声的必要性

在实际情况下,定子电流除式(3)中的基波和故障边频成分外,还会混有大量的高频噪声(包括高次谐波),一般来说可以当成高斯白色噪声处理。经过剔除基波预处理后,定子电流中的高频部分仍然存在,只是在频谱图中向左平移了 50 Hz,如图 1 所示。

为了准确计算各故障频率的参数,首先必须进行低通滤波处理,滤除高频干扰部分。经低通滤波器处理,高斯白色噪声形成高度相关的高斯有色噪声。各种旋转不变算法,包括 HTLS 算法^[15-16],其背景噪声均为高斯白色噪声,在有色噪声背景下,其参数估计性能下降。因此在利用 HTLS 进行参数估算时有必要对高斯噪声,特别是

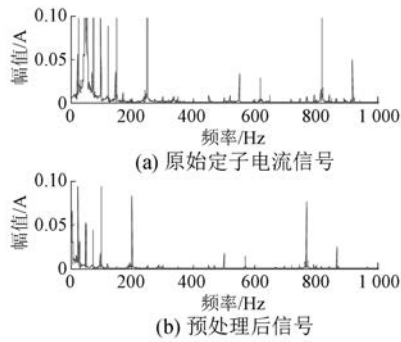


图1 频谱图

高斯有色噪声进行抑制。

2.2 互相关函数对高斯有色噪声的处理

不失一般性,理想条件下,经过预处理后的电流信号 $X(t)$ 看成 M 个模式的指数函数线性组合:

$$X(t) = \sum_{k=1}^M R_k e^{p_k t} \quad (6)$$

其中: $R_k = A_k e^{j\theta_k}$; $p_k = -\sigma_k + j2\pi f_k$; A_k 为幅值; θ_k 为相位; f_k 为频率; σ_k 为衰减因子(对于相关的定子电流而言,其衰减因子为零)。

取 2 个不同时刻的有限长采样序列,记作

$$\begin{cases} x(n) = \sum_{i=1}^M a_i e^{p_i n} (n = 0, 1, 2, \dots, N_1 - 1) \\ y(m) = \sum_{j=1}^M b_j e^{p_j m} (m = 0, 1, 2, \dots, N_2 - 1) \end{cases} \quad (7)$$

定义两有限长序列 $\{x(n)\}$ 和 $\{y(m)\}$ 的互相关函数为^[14]

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=S_1}^{S_2} x(n) y^*(n + \tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_i b_j^* e^{p_j^* \tau} \frac{1 - e^{(p_i + p_j^*)(N - \tau_{\max})}}{1 - e^{(p_i + p_j^*)}} \quad (8)$$

其中: $0 \leq \tau \leq \tau_{\max}$; $N = \min(N_1, N_2)$; $S_1 = 0$; $S_2 = N - 1 - \tau_{\max}$; S_1, S_2 的取值可保证不引入额外的极点分量。

平稳采样序列 $\{x(n)\}$ 和 $\{y(m)\}$ 受噪声污染后可表示为

$$\begin{cases} \tilde{x}(n) = \sum_{i=1}^M a_i e^{p_i n} + w(n) \\ \tilde{y}(m) = \sum_{j=1}^M b_j e^{p_j m} + v(m) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $w(n)$ 和 $v(m)$ 是互相独立的 0 均值噪声,可

以是高斯白色噪声或者高斯有色噪声。作互相关处理得:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{xy}(\tau) &= R_{xy}(\tau) + \rho(\tau) + R_{wv}(t)\rho(\tau) = \\ E[x(n)w^*(m + \tau)] &+ E[v(n)y^*(m + \tau)] \approx \\ E[x(n)]E[w^*(m + \tau)] &+ \\ E[v(n)]E[y^*(m + \tau)] &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

又因 $R_{wv}(t) = 0$, 因此可得:

$$\tilde{R}_{xy}(\tau) \approx R_{xy}(\tau) \quad (11)$$

由式(8)和式(11)可知,通过互相关函数处理,利用互相关序列 $\tilde{R}_{xy}(\tau)$ 代替待测电流信号 $\tilde{x}(n)$, $\tilde{x}(n)$ 的高斯有色噪声和白色噪声得到有效抑制,且保留了 $\tilde{x}(n)$ 的各个频率和衰减因子。

3 考虑高斯有色噪声的异步电动机转子故障检测技术

HTLS 算法^[15-16]与 ESPRIT 算法相似,同隶属于子空间旋转不变方法,具有良好的计算性能和抗噪能力。HTLS 算法避免计算信号的自相关序列,计算效率和算法简洁性方面较有优势。为了抑制高斯有色噪声的影响,提出基于 CCF-HTLS 的电机故障诊断技术。

3.1 CCF-HTLS 算法

(1) 利用互相关序列构造 Hankel 矩阵:

$$[H] = \begin{bmatrix} \tilde{R}_{xy}(0) & \tilde{R}_{xy}(1) & \dots & \tilde{R}_{xy}(P-1) \\ \tilde{R}_{xy}(1) & \tilde{R}_{xy}(2) & \dots & \tilde{R}_{xy}(P) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{R}_{xy}(H-1) & \tilde{R}_{xy}(H) & \dots & \tilde{R}_{xy}(N-1) \end{bmatrix}_{P \times M} \quad (12)$$

式中: H 为 Hankel 矩阵参数, $H > M$, 且 $P = N - H + 1$ 。

将式(11)代入式(12), $[H]$ 阵进行范德蒙德分解:

$$[H] = S R T^T \quad (13)$$

式中: S 和 T ——范德蒙德矩阵;

R ——对角阵。

矩阵 S 和 T 都满足平移不变特性,即满足:

$$\begin{aligned} S_{\downarrow} Z &= S^{\uparrow} \\ T_{\downarrow} Z &= T^{\uparrow} \end{aligned} \quad (14)$$

其中: $\downarrow$ 和 $\uparrow$ 分别表示对箭头前面的矩阵进行最尾行和最首行删除运算; 矩阵 $Z = \text{diag}[z_1, z_2, \dots, z_n]$ 。

对 $[H]$ 矩阵进行奇异值分解:

$$[H] = U\Sigma V^H = [\hat{U} \ U_0] \begin{bmatrix} \hat{\Sigma} & \\ & \Sigma_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V} \\ V_0 \end{bmatrix}^H \quad (15)$$

其中: U 和 V 为正交矩阵; Σ 为对角阵,其主对角元素 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_h$ 为矩阵 $[H]$ 的奇异值,且按降序排列; $\hat{U}$ 和 U_0 分别对应信号子空间和噪声子空间。

(2) 对于不含噪声的理想数据,矩阵 $\hat{U}$ 表示成矩阵 S 和一个非奇异的正方矩阵 Q 的乘积:

$$\hat{U} = SQ \quad (16)$$

则有:

$$\hat{U}^\dagger = S^\dagger Q, \hat{U}_\downarrow = S_\downarrow Q \quad (17)$$

结合式(14)、式(17)可得:

$$\hat{U}^\dagger = \hat{U}_\downarrow Q^{-1} Z Q = \hat{U}_\downarrow \tilde{Z} \quad (18)$$

其中:矩阵 $\tilde{Z} = Q^{-1} Z Q$,与矩阵 Z 有着相同的特征值。

在噪声背景下,式(18)不严格成立。利用总体最小二乘法即考虑 $\hat{U}^\dagger$ 、 $\hat{U}_\downarrow$ 分别存在误差矩阵 E_1 、 E_2 ,因而式(18)可写成:

$$\hat{U}^\dagger + E_1 = (\hat{U}_\downarrow + E_2) \tilde{Z} \quad (19)$$

对 $[\hat{U}_\downarrow \hat{U}^\dagger]$ 进行奇异值分解可得:

$$[\hat{U}_\downarrow \hat{U}^\dagger] = Y \Gamma W^H \quad (20)$$

对右奇异矩阵划分可得:

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \quad (21)$$

则 $\tilde{Z}$ 可由式(22)给出:

$$\tilde{Z} = -W_{11} W_{22}^{-1} \quad (22)$$

(3) 衰减因子和频率的求解。求解 $\tilde{Z}$ 的特征值 $z_i (i = 1, 2, \dots, M)$,同时利用式(23)求解衰减因子和频率:

$$\begin{cases} \sigma_i = \ln |z_i| / \Delta t \\ f_i = \arctan[\operatorname{Im}(z_i) / \operatorname{Re}(z_i) / 2\pi \Delta t] \end{cases} \quad (23)$$

(4) 幅值和相位的求解。用矩阵形式表示式(6)指数模型:

$$X = ZR \quad (24)$$

$$\text{其中: } Z = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1} \end{bmatrix};$$

$$X = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T; R = [R_1, R_2, \dots, R_M]。$$

利用最小二乘解可得:

$$R = (Z^T Z)^{-1} Z^T X \quad (25)$$

幅值和相位的解为

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan[\operatorname{Im}(b_i) / \operatorname{Re}(b_i) / 2\pi \Delta t] \end{cases} \quad (26)$$

3.2 算法步骤

考虑有色噪声的CCF-HTLS算法的电机转子故障检测步骤如图2所示。简要说明如下:

(1) 对采集到的定子电流进行预处理;

(2) 经低通滤波器滤除高频干扰部分,按照式(8)进行互相关函数处理;

(3) 对所得的互相关序列 $\tilde{R}_{xy}(\tau)$ 与HTLS结合,从而估算频率和幅值等参数。

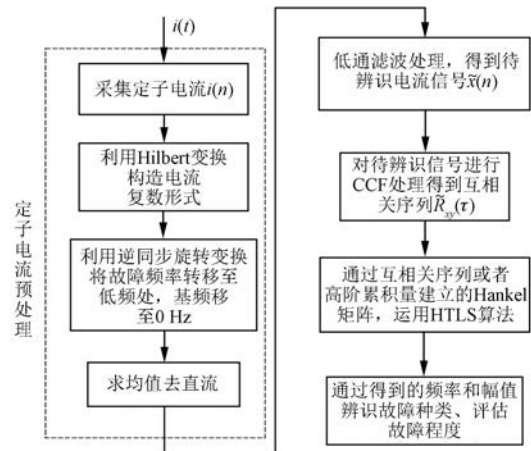


图2 CCF-HTLS算法

4 试验结果

试验异步电机主要参数如表1所示。

表1 试验电机额定参数

型号	电压/V	电流/A	转速/(r·min ⁻¹)	功率/kW
Y100L1-4	380	5.0	1 440	2.3

采集异步电机额定运行时定子电流,采样频率10 000 Hz,采样时长0.6 s,试验共设置3种故障情况。为了便于描述,1根断条和偏心故障记作故障1;2根断条和偏心故障记作故障2;3根断条和偏心故障记作故障3。

图3~图5所示为分别在3种故障情况下对待辨识电流信号运用HTLS和CCF-HTLS时的计

算频谱图。表 2 所示为相应的计算结果。

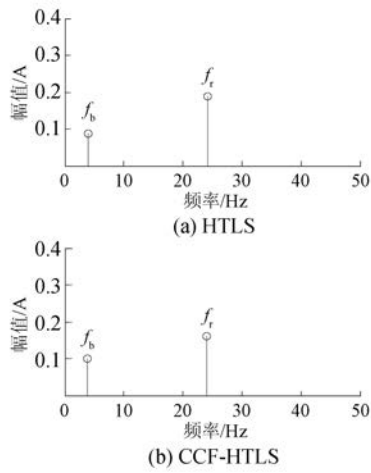


图 3 故障 1 时频谱图

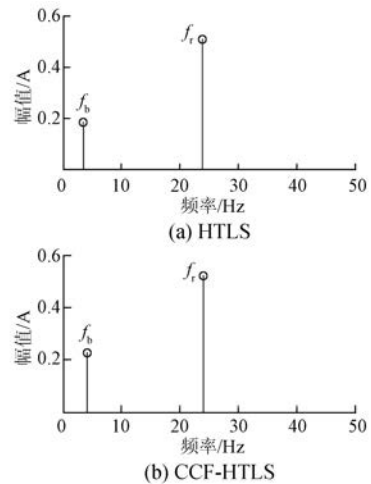


图 4 故障 2 时频谱图

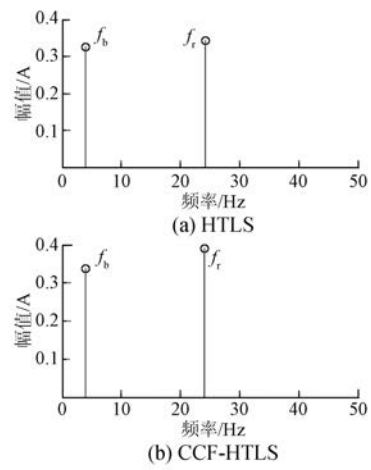


图 5 故障 3 时频谱图

表 2 算法计算结果

故障情况	f_b/Hz	f_b 幅值/A	f_r/Hz	f_r 幅值/A
HTLS	1	3.955 0	0.087 6	24.242 3
	2	3.465 1	0.185 5	23.824 0
	3	3.905 3	0.324 3	24.126 1
CCF-HTLS	1	3.853 7	0.099 6	24.016 4
	2	4.048 1	0.225 5	24.008 7
	3	4.017 2	0.337 6	23.994 2

图 3~图 5 表明,对定子电流进行预处理,使基频移至 0 Hz,易被剔除,而转子断条和偏心的故障频率移至低频 f_b 、 f_r 处。在此基础上运用 HTLS 和 CCF-HTLS 可以有效地检测出低频故障频率的各个参数。理论上,额定负载时,转差率 $s=0.04$,转子断条低频特征故障频率为 4 Hz ($f_b=2sf_1$),偏心故障低频特征故障频率为 24 Hz (f_r)。从频谱图可以看出,利用 HTLS、CCF-HTLS 可以在 0.6 s 数据长度内获得很高的频率分辨率,可以有效地检测出异步电机不同数量的转子断条和偏心故障。故障频率的幅值明显,表明算法具有较好的鲁棒性,同时很好地避免 MUSIC 等算法易产生虚假模式的缺点。

为了更好地比较算法的优劣,定义故障频率偏移指标:

$$\varepsilon = \frac{|\tilde{f}_b - f_b| + |\tilde{f}_r - f_r|}{2} \tag{27}$$

式中: $\tilde{f}_b$ 、 $\tilde{f}_r$ ——转子断条和偏心低频特征故障频率实际估算结果。

各算法在不同故障时的故障频率偏移结果如表 3 所示。

表 3 故障频率偏移指标对比

故障类型	HTLS	CCF-HTLS
故障 1	0.143 7	0.081 4
故障 2	0.355 4	0.028 4
故障 3	0.110 4	0.011 5

由表 3 可知,HTLS 的故障频率偏移在 0.4 Hz 以下,CCF-HTLS 的故障频率偏移在 0.1 Hz 以下,表明互相关处理可以有效地抑制高斯有色噪声,有效地提高了算法的分辨率。

5 结 语

异步电机定子电流中的高斯白色噪声经低通滤波后会产生高斯有色噪声,限制转子故障检测算法的辨识精度。为此提出基于 CCF-HTLS 算法的异步电机转子故障检测算法。理论和试验共同表明:

(1) 通过对定子电流进行预处理,剔除了基频部分对辨识精度的影响,为后续低频故障频率的检测做准备。

(2) 增加高斯有色噪声抑制的环节,是提高算法频率分辨能力的关键。

(3) 互相关函数处理可以显著抑制高斯噪声(包括高斯有色噪声),从而提高参数辨识的精度。对预处理后的数据分别运用 HTLS 和 CCF-HTLS 均可有效检测异步电机转子断条故障和转子偏心故障,且具有比传统基于周期图谱(如傅里叶变换)更高的分辨率。从频率分辨率来看,CCF-HTLS 增加了抑制高斯有色噪声的环节,因而检测效果优于 HTLS,在 0.6 s 短数据下,CCF-HTLS 特征故障频率偏移小于 0.1 Hz。

【参考文献】

- [1] 赵妍,李志民,李天云.一种基于谱峭度的异步电机故障诊断方法[J].电工技术学报,2014,29(5): 189.
- [2] 贾朱植,杨理践,祝洪宇,等.基于瞬时频率分析的笼型电机转子断条故障诊断[J].电机与控制应用,2017,44(8): 74.
- [3] 许伯强,朱明飞.基于 ESPRIT 和扩展 Prony 算法的异步电机转子断条故障检测方法[J].电机与控制应用,2016,43(5): 59.
- [4] 张雄希,刘振兴.基于倒频谱分析的电机故障检测[J].电力系统保护与控制,2010,38(20): 145.
- [5] 高勋章.基于高阶统计量的雷达目标高分辨成像研究[D].长沙:国防科学技术大学,2004.
- [6] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [7] 方芳,杨士元,侯新国,等.Zoom-Prony 方法及其在转子断条故障严重程度定量估算中的应用[J].电工技术学报,2009,24(10): 176.
- [8] ARTURO G P, RENE R T, EDUARDO C Y, et al. The application of high-resolution spectral analysis for identifying multiple combined faults in induction motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 2002.
- [9] 方芳,杨士元,侯新国.基于改进多信号分类法的异步电机转子故障特征分量的提取[J].中国电机工程学报,2007,27(30): 72.
- [10] 许伯强,孙丽玲,李和明.基于多重信号分类与模式搜索算法的笼型异步电动机转子断条故障检测新方法[J].中国电机工程学报,2012,32(9): 93.
- [11] 孙丽玲,许伯强,李志远.基于 MUSIC 与 SAA 的笼型异步电动机转子断条故障检测[J].电工技术学报,2012,27(12): 205.
- [12] XU B Q, SUN L L, XU L, et al. An ESPRIT-SAA-based detection method for broken rotor bar fault in induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(3): 654.
- [13] 胡楠,李兴源,李宽,等.基于四阶混合平均累计量的矩阵束算法在低频振荡在线辨识中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(7): 53.
- [14] 胡楠,李兴源,李宽,等.基于 CCF-TLS-ESPRIT 算法的低频振荡在线辨识[J].物理学报,2014,63(6): 068401.
- [15] PAPADOPOULOS C K, NIKIAS C L. Parameter estimation of exponentially damped sinusoids using higher order statistics [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1990, 38(8): 1424.
- [16] 张科.基于广域测量系统低频振荡模态分析研究[D].武汉:华中科技大学,2011.

收稿日期: 2018-10-11