

# 基于ESPRIT与Duffing系统的笼型异步电动机转子断条故障检测

许伯强, 孙丽玲

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:**旋转不变信号参数估计技术(ESPRIT)应用于笼型异步电动机转子断条故障检测时,其频谱分析结果中可能出现实际并不存在的虚假频率分量,从而影响检测效果。针对该问题,采用ESPRIT对定子电流信号进行频谱分析,从而获得定子电流信号的频率分量组成,然后利用Duffing系统对ESPRIT频谱分析结果做进一步处理,以辨识并摒弃其中的虚假频率分量,从而保障笼型异步电动机转子断条故障检测的效果。仿真与实验结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:**异步电动机;转子断条故障;检测;旋转不变信号参数估计技术;Duffing系统;定子电流信号分析

**中图分类号:**TM 315

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202001026

## 0 引言

笼型异步电动机转子断条故障是指其转子导条断裂故障,该故障将导致电机定子电流信号中出现频率为 $(1\pm 2s)f_s$ ( $s$ 为转差率, $f_s$ 为供电频率)的边频分量<sup>[1]</sup>。因此,可以将该边频分量视为转子断条故障的特征,采用频谱分析技术对其加以提取并据此判断转子断条故障是否发生,即为基于电机定子电流信号分析MCSA(Motor Current Signal Analysis)的转子断条故障检测<sup>[1-5]</sup>。

就MCSA而言,决定转子断条故障检测效果的关键之一为频谱分析技术的频率分辨力。由于转子断条故障导致的边频分量在数值上远小于 $f_s$ 频率分量,且“边频” $(1\pm 2s)f_s$ 与 $f_s$ 在数值上非常接近(电机运行时 $s$ 一般很小),因此必须保证频谱分析技术具备足够高的频率分辨力,从而可靠地辨识转子断条故障特征——边频分量。

最初,MCSA采用传统的频谱分析技术——快速傅里叶变换FFT(Fast Fourier Transform)对定子电流信号进行频谱分析<sup>[1]</sup>。但是,FFT在频率分辨力方面存在缺陷:若要提高其频率分辨力,则必须延长信号的采集时间,而这将引入负荷波动、噪声等干扰导致FFT频谱分析结果的准确性受到影响,并最终影响转子断条故障检测的效果<sup>[2-9]</sup>。因此,幅度相位估计APES(Amplitude and Phase Estimation)<sup>[2]</sup>、双Hankel总体最小二乘HTLS(Hankel Total Least Squares)<sup>[3]</sup>、Taylor-Kalman<sup>[4]</sup>、动态分析<sup>[5]</sup>和旋转不变信号参数估计技术ESPRIT(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique)<sup>[6-9]</sup>

等新兴、优秀的频谱分析技术被逐步用于转子断条故障检测并取得了显著的效果。其中,ESPRIT的频率分辨力可以摆脱信号采集时长的限制,对于短时数据即可实现高频率分辨力<sup>[10-12]</sup>,具有独特的优势,因而具有广阔的应用前景。但是,ESPRIT频谱分析结果中可能出现实际并不存在的虚假频率分量,与作为转子断条故障特征的边频分量混淆,从而影响转子断条故障检测的效果<sup>[6-9]</sup>。Duffing系统擅长在强背景噪声下检测微弱信号<sup>[14-16]</sup>,这恰好符合MCSA在 $f_s$ 频率分量(强背景噪声)下检测边频分量(微弱信号)的要求,因此近年来被引入转子断条故障检测领域<sup>[13]</sup>。需要指出的是,文献[1-9]所述的转子断条故障检测是基于频谱分析而类属于频域范畴,而文献[13]中基于Duffing系统的转子断条故障检测具有时域意义,因而拓展了转子断条故障检测的思路与维度。

鉴于此,本文将ESPRIT与Duffing系统相结合以改进笼型异步电动机转子断条故障检测技术。首先,在频域范畴,采用ESPRIT对定子电流信号进行频谱分析,从而获得定子电流信号的频率分量组成;然后,在时域范畴采用Duffing系统检验上述定子电流信号的频率分量是否真实存在,以辨识并摒弃其中的虚假频率分量,从而保障笼型异步电动机转子断条故障检测的效果。

## 1 ESPRIT在转子断条故障检测中的应用

文献[6-9]已经将ESPRIT成功应用于转子断条故障检测。关于ESPRIT的基本理论与具体步骤,请参阅文献[6-12]。

经离散采样的定子电流信号 $i(n)$ 可以表示为一组频率分量的组合,如式(1)所示。

$$i(n) = \sum_{i=1}^p A_i \cos(2\pi f_i n T_s + \phi_i) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

收稿日期:2019-01-25;修回日期:2019-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277077)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277077)

其中,  $p$  为频率分量的个数;  $A_i$ 、 $f_i$ 、 $\phi_i$  分别为第  $i$  个频率分量的幅值、频率、初相角;  $T_s$  为采样周期;  $N$  为采样点数。

文献[6-12]表明,应用 ESPRIT 可以确定  $i(n)$  的频率分量组成,包括  $p$  与  $A_i$ 、 $f_i$ 、 $\phi_i$ 。

需要注意的是,  $p$  是根据采样序列  $i(n)$  通过构造相关矩阵、特征值与奇异值分解等一系列操作而确定的,  $p$  实际上是最终的主奇异值个数的  $1/2$ , 亦即  $i(n)$  的主要频率分量个数。其中,主奇异值的判定采用中心差商法,具体请参阅文献[17]。

由于实际电机的定子电流信号的频率分量组成是非常复杂的,因此作为转子断条故障特征的边频分量未必在  $p$  个主要频率分量的范畴之内。当然,可以预先采用适当的滤波措施(如自适应滤波<sup>[1]</sup>、奇异值分解滤波<sup>[2,9]</sup>、Taylor-Kalman 滤波<sup>[4]</sup>以及常规的低通与带通滤波)简化定子电流信号的频率分量组成,从而强化边频分量。但为了可靠起见,在应用 ESPRIT 进行转子断条故障检测时,必须对  $p$  加以足够的冗余,这自然导致 ESPRIT 频谱分析结果中出现实际并不存在的虚假频率分量。

对此,通过仿真算例进行具体说明。

异步电动机发生转子断条故障后,定子电流信号可采用式(2)进行模拟。

$$i_s = A_1 \cos(2\pi f_s t + \phi_1) + A_2 \cos[2\pi(1-2s)f_s t + \phi_2] + A_3 \cos[2\pi(1+2s)f_s t + \phi_3] \quad (2)$$

根据式(2),设置  $s = 1.8\%$ 、 $f_s = 50.00$  Hz、 $A_1 = 1$  A、 $\phi_1 = 0.3142$ 、 $A_2 = 0.02$  A、 $\phi_2 = 1.0472$ 、 $A_3 = 0.02$  A、 $\phi_3 = 2.8274$ 、 $T_s = 0.0001$  s,应用 ESPRIT 对  $i_s$  进行频谱分析。

针对采样序列  $i_s(n)$ ,估计其主要频率分量的个数  $p=1$ ,具体方法请参阅文献[6-12,17]。需要指出的是,估计值  $p=1$  是正确的,因为此时边频分量的幅值  $0.02$  A 远小于  $f_s$  频率分量的幅值  $1$  A,  $i_s(n)$  的主要频率分量仅有  $f_s$  频率分量。当然,在应用 ESPRIT 进行频谱分析时,必须对  $p$  加以足够的冗余。图 1 给出了  $p=10$ 、 $p=20$  这 2 种情况下的 ESPRIT 结果(信号采集时长为  $0.3$  s)。

根据图 1 可知:在  $p=10$  的情况下,ESPRIT 结果是准确的;但在  $p=20$  的情况下,ESPRIT 结果中出现了  $50.43$  Hz 的虚假频率分量,并且其幅值  $0.0067$  A 超过了边频分量幅值  $0.02$  A 的  $30\%$ ,将对转子断条故障检测造成不利的影 响。这说明在应用 ESPRIT 进行转子断条故障检测时,由于必须对  $p$  加以足够的冗余,可能导致 ESPRIT 结果中出现实际并不存在的虚假频率分量,从而影响转子断条故障检测的效果。

事实上,为了减小计算量,在应用 ESPRIT 进行频谱分析时,应尽可能地压缩信号采集时长。但是,

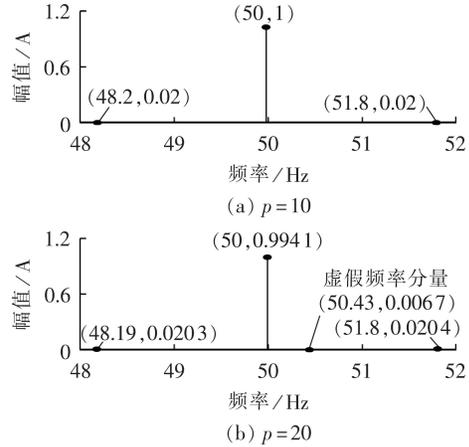


图 1 ESPRIT 频谱分析结果

Fig.1 Spectral analysis results by ESPRIT

信号采集时长被过分压缩也可能导致 ESPRIT 结果中出现虚假频率分量<sup>[6-9]</sup>。

## 2 Duffing 系统在转子断条故障检测中的应用

Duffing 系统擅长在强背景噪声下提取微弱信号<sup>[14-16]</sup>,这恰好符合 MCSA 检测转子断条故障在  $f_s$  频率分量(强背景噪声)下提取边频分量(微弱信号)的需求,因此 Duffing 系统已经被引入转子断条故障检测领域<sup>[13]</sup>。

Duffing 系统型式众多,文献[14-16]基于传统 Holmes 型式而提出了一种改进型式,如式(3)所示。

$$\ddot{x} + \alpha \dot{x} - x^3 + x^5 = A_{in} \cos(2\pi f_{in} \tau + \phi_{in}) \quad (3)$$

其中,  $x$  为 Duffing 振子;  $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$  分别为  $x$  的一阶、二阶导数;  $\alpha$  为阻尼比;  $-x^3 + x^5$  为非线性恢复力;  $A_{in}$ 、 $f_{in}$  与  $\phi_{in}$  分别为内策动力的幅值、频率与初相角;  $\tau$  为时间。

令  $y(\tau) = \dot{x}(\tau)$ 、 $t = \tau / (2\pi f_{in})$  并计及待提取的微弱信号与噪声,则对应的以  $t$  表示的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = 2\pi f_{in} y \\ \ddot{x} = 2\pi f_{in} [x^3 - x^5 - \alpha y + A_{in} \cos(2\pi f_{in} t + \phi_{in})] + \\ A_{out} \cos(2\pi f_{out} t + \phi_{out}) + n(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $A_{out} \cos(2\pi f_{out} t + \phi_{out})$  即为待提取的微弱信号(外策动力),  $A_{out}$ 、 $f_{out}$  和  $\phi_{out}$  分别为其幅值、频率和初相角;  $n(t)$  为噪声。

关于 Duffing 系统的原理,简介如下。

若固定  $\alpha$ (通常取为  $0.5$ ),并使  $A_{in}$  从  $0$  开始逐渐增加,则 Duffing 振子在相空间内的状态将依次变化为小尺度周期状态、混沌状态、大尺度周期状态。因此,当  $A_{in}$  达到某一数值时, Duffing 振子将处于由混沌状态至大尺度周期状态的“临界”,该数值即为  $A_{in}$  的混沌临界值,记为  $A_d$ 。

在应用 Duffing 系统提取微弱信号时,首先将  $A_{in}$  设置为近似等于但小于  $A_d$ ,并使  $f_{in} = f_{out}$ ,暂不考虑待

提取的微弱信号与噪声,采用四阶龙格库塔法训练Duffing系统,则Duffing系统处于混沌临界状态。然后,将待处理的时域信号输入Duffing系统。显然,如果该时域信号中含有与内策动力相同频率的信号,则总的策动力幅值为 $A_{in} + A_{out} \approx A_d + A_{out} > A_d$ (不妨令 $\phi_{in} = \phi_{out}$ ),而Duffing系统将由混沌临界状态进入大尺度周期状态;否则,Duffing系统仍将处于混沌临界状态。

前文已经说明,在应用ESPRIT进行转子断条故障检测时,其频谱分析结果中可能出现实际并不存在的虚假频率分量,从而对转子断条故障检测造成不利的影 响,参见式(2)与图1。而由Duffing系统的原理可知,Duffing系统实质上是在时域范畴判断一时域信号中是否含有某一频率分量。由此获得提示:可以尝试应用Duffing系统对ESPRIT频谱分析结果做后续处理,判断各个频率分量的真、伪,从而保障转子断条故障检测的效果。

对式(2)所示的仿真信号和图1(b)所示的ESPRIT频谱分析结果应用Duffing系统做进一步处理。

对ESPRIT频谱分析结果中的48.19 Hz频率分量应用Duffing系统。图2(a)为未输入时域仿真信号情况下Duffing系统在混沌临界状态下的相图( $f_{in} = 48.19$  Hz,  $A_d = 0.7230$ ),图2(b)为输入时域仿真信号情况下的相图。

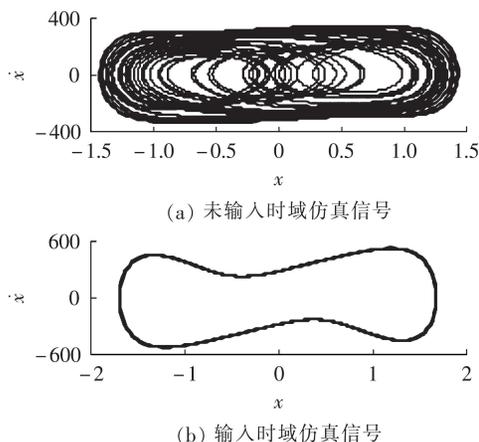


图2 48.19 Hz频率分量的Duffing系统结果

Fig.2 Results of Duffing system for 48.19 Hz component

由图2可知,在输入时域仿真信号后,Duffing系统由混沌临界状态进入了大尺度周期状态。这说明,该时域仿真信号中含有48.19 Hz分量,即ESPRIT频谱分析结果中的48.19 Hz频率分量是真实存在的。这一分析结果与实际情况吻合,参见式(2)和图1(b)。

类似地,对ESPRIT频谱分析结果中的51.80 Hz频率分量应用Duffing系统,结果表明该频率分量是真实存在的,这一分析结果与实际情况吻合。

对ESPRIT频谱分析结果中的50.43 Hz频率分

量应用Duffing系统。图3(a)为未输入时域仿真信号情况下Duffing系统在混沌临界状态下的相图( $f_{in} = 50.43$  Hz,  $A_d = 0.7216$ ),图3(b)则为输入时域仿真信号情况下的相图。

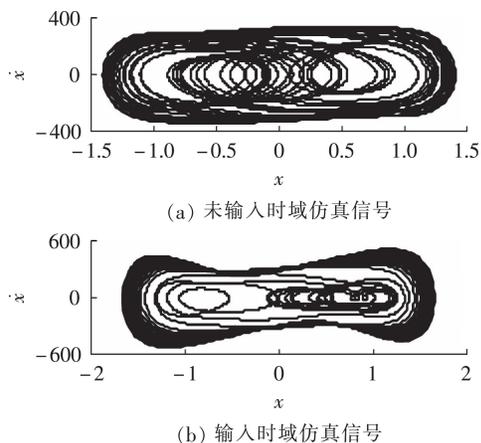


图3 50.43 Hz频率分量的Duffing系统结果

Fig.3 Results of Duffing system for 50.43 Hz component

由图3可知,在输入时域仿真信号后,Duffing系统仍然处于混沌临界状态。这就说明,该时域仿真信号中不含50.43 Hz分量,即ESPRIT频谱分析结果中的50.43 Hz频率分量是虚假的。这一分析结果与实际情况吻合,参见式(2)、图1(b)。

以上仿真结果表明,在进行转子断条故障检测时,将ESPRIT与Duffing系统相结合,应用Duffing系统对ESPRIT频谱分析结果做后续处理,可以识别各个频率分量的真、伪,从而保障转子断条故障检测的效果。

### 3 基于ESPRIT与Duffing系统的转子断条故障检测

#### 3.1 基本流程

基于ESPRIT与Duffing系统的转子断条故障检测,基本流程如下。

(1)采集一相定子电流瞬时信号(采样频率为10 kHz),记为 $i_s$ 。

注意:为了便于应用Duffing系统,应对 $i_s$ 做归一化处理,即将 $i_s$ 除以其瞬时最大值,使其数值介于-1与1之间;另外,还需对 $i_s$ 进行低通与带通、自适应、奇异值等滤波处理以尽量突出作为转子断条故障特征的边频分量,具体请参阅文献[1-2,9]。

(2)对 $i_s$ 做ESPRIT分析,确定其 $p$ 个主要频率分量的频率 $f_i$ 、幅值 $A_i$ 、初相角 $\phi_i$ ( $i=1,2,\dots,p$ )。

ESPRIT的基本理论与具体步骤请参阅文献[6-12], $p$ 的估计方法请参阅文献[17]。

(3)根据ESPRIT频谱分析结果,针对 $p$ 个主要频率分量应用Duffing系统逐一判定其真、伪。这里以第 $i$ 个频率分量(其频率为 $f_i$ ,幅值为 $A_i$ ,初相角为

$\phi_i$ )为例做具体说明。

a. 根据式(4), 暂不考虑外策动力与噪声(即暂不输入 $i_s$ ), 令 $f_{in}=f_i$ 、 $\phi_{in}=\phi_i$ , 使 $A_m$ 从0开始逐渐增加, 按照 $i_s$ 的采样频率生成内策动力信号, 采用四阶龙格库塔法训练Duffing系统, 并绘制、分析其Lyapunov指数随 $A_m$ 的变化曲线, 据此确定混沌临界值 $A_d$ 。这是因为: 当Lyapunov指数大于0时, Duffing系统处于混沌状态; 当Lyapunov指数小于0时, Duffing系统处于周期状态。所以, 通过分析上述Lyapunov指数的变化曲线, 即可确定混沌临界值 $A_d$ , 具体请参阅文献[16]。

b. 根据式(4), 考虑外策动力与噪声(亦即输入 $i_s$ ), 令 $f_{in}=f_i$ 、 $\phi_{in}=\phi_i$ , 使 $A_m \approx A_d$ , 按照 $i_s$ 的采样频率生成内策动力信号, 采用四阶龙格库塔法训练Duffing系统, 并绘制、分析其相图, 由此判断Duffing系统的状态, 进而判断第 $i$ 个频率分量的真、伪: 若Duffing系统处于大尺度周期状态, 则第 $i$ 个频率分量是真实存在的; 若Duffing系统处于混沌状态, 则第 $i$ 个频率分量是虚假的。

(4)在ESPRIT频谱分析结果中剔除虚假频率分量, 进而执行转子断条故障检测, 具体请参阅文献[2,6-7,9]。

### 3.2 实验结果

基于ESPRIT与Duffing系统进行转子断条故障检测实验。实验电机为1台Y100L-2型、3 kW、380 V三相笼型异步电动机, 其转子存在1根断裂导条(距端环10 mm处钻断导条), 参见附录中的图A1。

令实验电机在额定电压下半载运行, 此时转差率 $s \approx 1.8\%$ , 实验结果如表1(表中 $A_i$ 为归一化值)与图4所示。

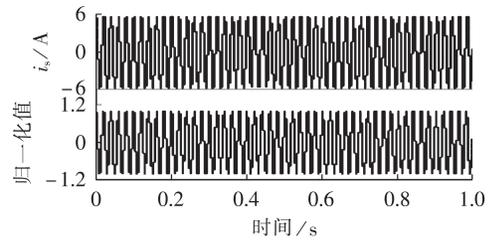
对图4(b)、表1中ESPRIT频谱的50.04 Hz频率分量应用Duffing系统, 结果如图5所示。图5(a)为未输入定子a相电流信号时Duffing系统在混沌临界状态下的相图( $f_{in}=50.04$  Hz、 $A_d=0.7399$ ), 图5(b)为输入定子a相电流信号后Duffing系统的相图。

由图5可知, 在输入定子a相电流信号后, Duffing系统由混沌临界状态进入了大尺度周期状态。

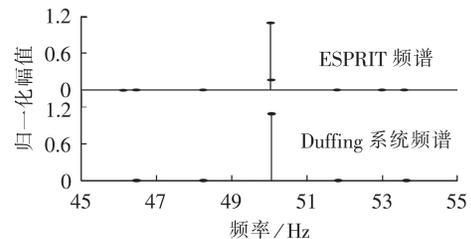
表1 ESPRIT频谱分析结果和Duffing系统结果

Table 1 Spectral analysis results by ESPRIT and analytical results of Duffing system

$i$	ESPRIT频谱分析结果			Duffing系统结果
	$f_i$ / Hz	$A_i$	$\phi_i$	
1	46.12	0.0097	2.8954	虚假
2	46.46	0.0110	3.0924	真实
3	48.24	0.0057	2.6419	真实
4	50.04	1.0923	-0.7229	真实
5	50.05	0.1775	2.7787	虚假
6	51.82	0.0107	2.5350	真实
7	53.01	0.0084	1.9218	虚假
8	53.61	0.0076	1.8430	真实



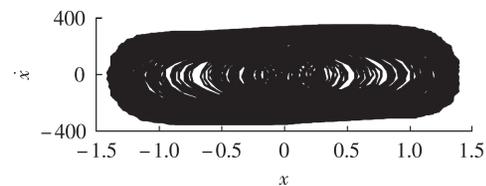
(a) 定子a相电流及其归一化值



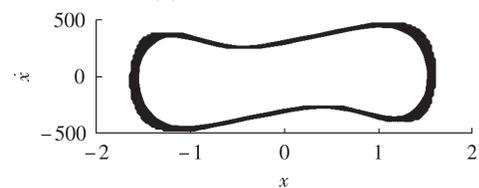
(b)  $p=10$ 时的ESPRIT频谱及其Duffing系统频谱

图4 实验结果

Fig.4 Experimental results



(a) 未输入定子a相电流信号



(b) 输入定子a相电流信号

图5 50.04 Hz频率分量的Duffing系统结果

Fig.5 Results of Duffing system for 50.04 Hz component 这就说明, 定子a相电流信号中含有50.04 Hz分量, 亦即ESPRIT频谱分析结果中的50.04 Hz频率分量是真实存在的。实际上, 该频率分量就是定子a相电流信号中的 $f_s$ 频率分量。

对图4(b)、表1中ESPRIT频谱的48.24 Hz频率分量应用Duffing系统, 结果如图6所示。图6(a)为未输入定子a相电流信号时Duffing系统在混沌临界状态下的相图( $f_{in}=48.24$  Hz、 $A_d=0.7396$ ), 图6(b)为输入定子a相电流信号后Duffing系统的相图。

由图6可以看出, 在输入定子a相电流信号后, Duffing系统由混沌临界状态进入了大尺度周期状态。这就说明, 定子a相电流信号中含有48.24 Hz分量, 即ESPRIT频谱分析结果中的48.24 Hz频率分量是真实存在的。实际上, 该频率分量就是定子a相电流信号中作为转子断条故障特征的(1-2 s)  $f_s$ 频率分量。

类似地, 对ESPRIT频谱分析结果中的51.82 Hz

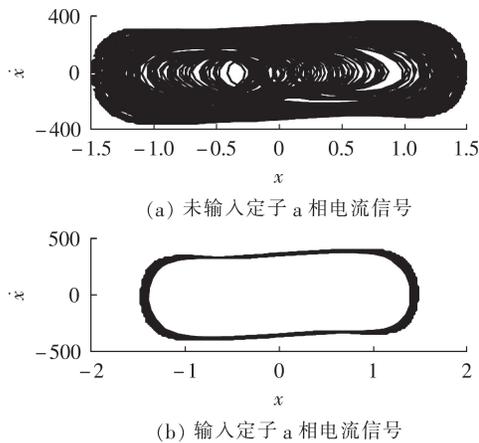


图 6 48.24 Hz 频率分量的 Duffing 系统结果

Fig.6 Results of Duffing system for 48.24 Hz component

频率分量应用 Duffing 系统,结果表明该频率分量是真实存在的,实际上就是定子 a 相电流信号中作为转子断条故障特征的  $(1+2s)f_s$  频率分量。

采用类似方法可确定 ESPRIT 频谱分析结果中的 46.46、53.61 Hz 频率分量是真实存在的,二者实际上是定子 a 相电流信号中的  $(1\pm 4s)f_s$  频率分量。

对图 4(b)、表 1 中 ESPRIT 频谱的 46.12 Hz 频率分量应用 Duffing 系统,结果如图 7 所示。图 7(a)为未输入定子 a 相电流信号时 Duffing 系统在混沌临界状态下的相图 ( $f_{in} = 46.12$  Hz、 $A_d = 0.743$ ),图 7(b)为输入定子 a 相电流信号后 Duffing 系统的相图。

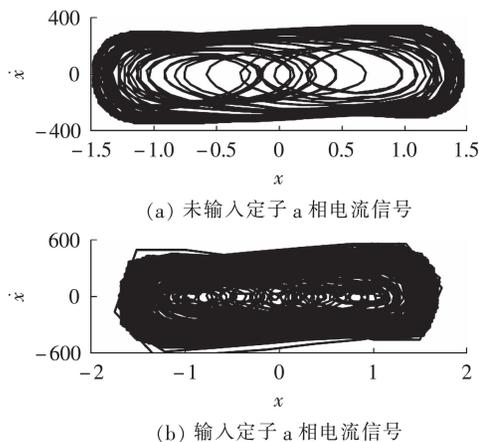


图 7 46.12 Hz 频率分量的 Duffing 系统结果

Fig.7 Results of Duffing system for 46.12 Hz component

由图 7 可以看出,在输入定子 a 相电流信号后, Duffing 系统仍然处于混沌临界状态。这就说明,定子 a 相电流信号中不含 46.12 Hz 分量,即 ESPRIT 频谱分析结果中的 46.12 Hz 频率分量是虚假的。

采用类似方法可以确定 ESPRIT 频谱分析结果中的 50.05、53.01 Hz 频率分量是虚假的。

经过 Duffing 系统分析,可得到剔除虚假频率分量后的 ESPRIT 频谱,如图 4(b)下图所示。与图 4(b)上图对比可知,经 Duffing 系统分析而剔除虚假频率

分量后,ESPRIT 频谱更加纯净,因而便于进行转子断条故障检测。在图 4(b)下图中,转子断条故障特征  $(1\pm 2s)f_s$  频率分量是清晰可辨的,由此可以判定存在转子断条故障,这与实际情况是吻合的。

#### 4 结语

本文利用 ESPRIT 与 Duffing 系统对笼型异步电动机转子断条故障检测方法进行改进,在频域范畴采用 ESPRIT 对定子电流信号进行频谱分析获得定子电流信号的频率分量组成;然后在时域范畴采用 Duffing 系统对上述定子电流信号频率分量进行检验,以辨识并摒弃其中的虚假频率分量,从而保障笼型异步电动机转子断条故障检测的效果。仿真与实验结果验证了该方法的有效性。

该方法虽然针对 MCSA 而提出,但可推广至基于瞬时无功、有功功率信号频谱分析的笼型异步电动机转子断条故障检测方法<sup>[18-20]</sup>。

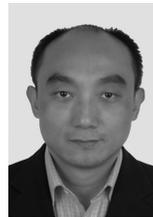
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [1] 许伯强,李和明,孙丽玲,等. 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,2004,24(5):115-119.  
XU Boqiang, LI Heming, SUN Liling, et al. A novel detection method for broken rotor bars in induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 115-119.
- [2] 许伯强,李金卜. 基于奇异值分解滤波与 APES 算法的异步电动机转子故障检测[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):165-169.  
XU Boqiang, LI Jinbo. Rotor fault detection based on SVD filtering and APES algorithm for asynchronous motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 165-169.
- [3] 王臻,李承,陈旭,等. 短时数据下利用双 HTLS 参数估计的异步电机转子断条故障诊断[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):182-186.  
WANG Zhen, LI Cheng, CHEN Xu, et al. Broken rotor bar diagnosis by double HTLS parameter estimation based on short-time data of induction motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 182-186.
- [4] TRUJILLO-GUAJARDO L A, RODRIGUEZ-MALDONADO J, MOONEM M A, et al. A multiresolution Taylor-Kalman approach for broken rotor bar detection in cage induction motors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(6): 1317-1328.
- [5] ANTONINO-DAVUI J A, QUIJANO-LÓPEZ A, RUBBILOLO M, et al. Advanced analysis of motor currents for the diagnosis of the rotor condition in electric motors operating in mining facilities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3934-3942.
- [6] XU Boqiang, SUN Liling, XU Lie, 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): 654-660.
- [7] 许伯强,孙丽玲,李和明. 基于高频率分辨力谱估计技术与优化算法的异步电动机转子故障检测新方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(3):140-147.  
XU Boqiang, SUN Liling, LI Heming. A detection method for rotor fault in induction motors based on high frequency reso-

- lution spectrum estimation technique and optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 140-147.
- [8] YONG H K, YOUNG W Y, HWANG D H, et al. High resolution parameter estimation method to identify broken rotor bar faults in induction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 27(3): 654-660.
- [9] 孙丽玲, 王续, 许伯强. 基于SVD滤波技术与快速四阶累增量ESPRIT算法的异步电动机转子断条故障检测新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 147-156.  
SUN Liling, WANG Xu, XU Boqiang. A detection method for broken rotor bar fault in induction motors based on SVD and SFOC-ESPRIT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 147-156.
- [10] ROY R, KAILATH T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(7): 984-995.
- [11] ROY R, KAILATH T. Performance analysis of the total least squares ESPRIT algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1991, 39(5): 1122-1135.
- [12] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 138-146.
- [13] 许伯强, 王志远. 基于Duffing系统和扩展Prony算法的异步电动机转子断条故障检测[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 187-191, 197.  
XU Boqiang, WANG Zhiyuan. Detection of broken rotor bar fault of asynchronous motor based on Duffing system and extended Prony algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 187-191, 197.
- [14] 王永生, 姜文志, 赵建军, 等. 一种Duffing弱信号检测新方法及其仿真研究[J]. 物理学报, 2008, 57(4): 2053-2059.  
WANG Yongsheng, JIANG Wenzhi, ZHAO Jianjun, et al. A new method of weak signal detection using Duffing oscillator and its simulation research[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(4): 2053-2059.
- [15] 范剑, 赵文礼, 王万强. 基于Duffing振子的微弱周期信号混沌检测性能研究[J]. 物理学报, 2013, 62(18): 54-59.  
FAN Jian, ZHAO Wenli, WANG Wanqiang. Study on the weak sinusoidal signal detection property using Duffing chaos system[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(18): 54-59.
- [16] 王晓东, 杨绍普, 赵志宏. 基于改进型Duffing振子的微弱信号检测研究[J]. 动力学与控制学报, 2016, 14(3): 283-288.  
WANG Xiaodong, YANG Shaopu, ZHAO Zhihong. Research of weak signal detection based on the improved Duffing oscillator[J]. Journal of Dynamics and Control, 2016, 14(3): 283-288.
- [17] 曾作钦. 基于奇异值分解的信号处理方法及其在机械故障诊断中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
ZENG Zuoqin. Signal processing method based on singular value decomposition and its application to mechanical fault diagnosis [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [18] 王臻, 李承, 许允之, 等.  $\alpha$ - $\beta$ 坐标系下瞬时无功功率的笼型感应电机转子故障诊断[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 179-186.  
WANG Zhen, LI Cheng, XU Yunzhi, et al. Rotor fault diagnosis of squirrel cage asynchronous motor based on instantaneous reactive power in  $\alpha$ - $\beta$  coordinates [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 179-186.
- [19] DRIF M, HEONYOUNG K, JONGWAN K, et al. Active and reactive power spectra-based detection and separation of rotor faults and low-frequency load torque oscillations [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2702-2710.
- [20] 许伯强, 孙丽玲. 基于MIRPSA的感应电动机转子断条数目诊断判据[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 132-136.  
XU Boqiang, SUN Liling. A MIRPSA-based criterion to quantify broken rotor bars in induction motors [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 132-136.

#### 作者简介:



许伯强

许伯强(1972—),男,河北保定人,教授,博士,主要研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断(E-mail: x bq\_ncepu@126.com);

孙丽玲(1972—),女,河北邢台人,副教授,博士,主要研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断(E-mail: sll\_ncepu@126.com)。

(编辑 任思思)

## Detection based on ESPRIT and Duffing system for broken rotor bar fault in cage induction motors

XU Boqiang, SUN Liling

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** When ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique) is used in the detection of BRBF (Broken Rotor Bar Fault) in cage induction motors, its spectrum analysis results may include some false frequency components that do not exist actually, thus affecting the detection effect. Aiming at this problem, the spectrum analysis of stator current signal is carried out by ESPRIT to obtain the frequency components of stator current signal, the false frequency components of which are then identified by Duffing system and eliminated to ensure that the detection of BRBF is effective. The simulative and experimental results validate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** induction motor; broken rotor bar fault; detection; ESPRIT; Duffing system; MCSA

附录



(a) 电机与直流测功机



(b) 断条转子

**图 A1 实验电机**

**Fig. A1 Test motor**