

王彦文,郭林,赵峰,等. 双鼠笼电动机转子断条识别[J]. 矿业科学学报,2019,4(2):152-161. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2019.02.008  
Wang Yanwen, Guo Lin, Zhao Feng, et al. Broken bar identification of double squirrel cage motor rotor[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019,4(2):152-161. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2019.02.008

## 双鼠笼电动机转子断条识别

王彦文<sup>1</sup>,郭林<sup>1</sup>,赵峰<sup>1</sup>,杨晓洲<sup>2</sup>

1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083;

2. 抚顺煤矿电机制造有限责任公司,辽宁抚顺 113122

**摘要:**使用分层法与多回路法建立了计及趋肤效应的独立端环型双鼠笼电动机多回路模型,并利用该模型计算分析了不同断条情况下采煤机空载试车启动过程中定子电流的时频特征。使用同步提取短时傅里叶变换对启动电流进行时频分析,基于时频分析所得曲面在幅频面与时频面的投影,定义了幅频面夹角和时频面夹角,可用于电动机上、下笼断条故障识别与导条断裂数量确定。仿真实验表明,幅频面夹角可用于判别早期上笼或者下笼断条故障;时频面夹角可用于大致确定导条断裂数量。

**关键词:**趋肤效应;双鼠笼;感应电动机;分层法;多回路法;断条识别

中图分类号:TM 346

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2019)02-0152-10

## Broken bar identification of double squirrel cage motor rotor

Wang Yanwen<sup>1</sup>, Guo Lin<sup>1</sup>, Zhao Feng<sup>1</sup>, Yang Xiaozhou<sup>2</sup>

1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. Fushun Coal Mine Motor Manufacturing Ltd., Fushun Liaoning 113122, China

**Abstract:** The multi loop model of the independent end ring double squirrel cage motor with the skin effect was established by using the layered method and multiloop method in this paper. Based on the model, the time-frequency characteristics of the stator current in the starting process of the unloaded shearer uncovered in broken bars situations were investigated. The synchro extracting short-time Fourier transform was used to analyze of the time-frequency of the starting current. For broken bar identification, the amplitude-frequency angle was defined in the amplitude-frequency plane, and the time-frequency angle was defined in the time-frequency plane. The simulation results show that the amplitude-frequency angle can be used to distinguish whether the fault belongs to the upper cage or the lower cage, and the time-frequency angle can be used to roughly determine the number of broken bars.

**Key words:** skin effect; double squirrel cage; induction motor; layering method; multiloop method; broken bar identification

转子断条是鼠笼电动机的常见故障<sup>[1-2]</sup>,会减小电动机启动转矩,增长启动时间,造成电动机启动温升过高,甚至可能造成转子扫膛,直接

烧毁电动机<sup>[3-4]</sup>。对鼠笼电动机转子导条进行在线状态监测与断条故障诊断,能及时发现电动机早期异常,避免电动机严重故障,防止其影

收稿日期:2018-04-16

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2017QJ10)

作者简介:王彦文(1962—),男,河北唐山人,教授,博士生导师,主要从事电力系统微机监控、矿山电气安全、煤矿继电保护、广域同步测量技术等方面的研究工作。Tel: 13601292159, E-mail: wyw@cumt.edu.cn

响安全生产及带来的经济损失,具有重要的意义。

鼠笼电动机转子断条故障的诊断,关键在于故障特征的提取。转子断条故障特征提取对象一般为定子电流<sup>[5]</sup>、电磁转矩<sup>[6]</sup>、电磁功率<sup>[7-8]</sup>等。其中,利用电磁转矩和电磁功率提取转子断条故障特征的方法仅适用于有实际中性点的供电系统,对于三相三线制供电系统,由于没有实际的中性点,较难测取相电压、相电流。利用定子电流提取转子断条故障特征的方法,提取的故障特征一般指频率为 $(1-2s)f_1$ 的定子电流分量,其中 $s$ 为转差率, $f_1$ 为定子电流基频<sup>[9]</sup>。理论上,满载运行的电动机可利用傅里叶变换提取故障特征频率,从而判断是否断条,并可通过增加采样点数提高频谱分辨率以解决旁瓣泄漏问题。然而在实际应用中,由于低负载运行下转差率很小或者由于负载波动,以上方法较难实施。

双鼠笼电动机稳态运行时,电流集中于下笼,当发生上笼断条时,转子侧电流不平衡度较鼠笼完好时差别较小,造成定子故障特征频率电流幅值很低并且很有可能淹没在噪声里,难以判断是否断条。针对双鼠笼电动机断条特点,博洛尼亚大学、巴勒莫大学以及马纳尔突尼斯大学学者联合发表系列文献<sup>[10-12]</sup>,提出使用轴向及径向振动信号作为判断双鼠笼电动机是否存在断条故障的依据。其实验用电动机为斜槽小功率电动机,槽数过少,而大功率双鼠笼电动机为直槽,且槽数多。因此,文献<sup>[10-12]</sup>实验所提取的振动信号,相比于用大功率双鼠笼电动机实验所提取的振动信号特征更明显。文献<sup>[13]</sup>中使用启动过程定子电流时变频谱判断双鼠笼电动机是否存在断条,文献<sup>[14]</sup>提出使用小波变换对启动过程定子电流进行时变频谱分析,该方法比文献<sup>[13]</sup>所提方法更能突出表现双鼠笼上笼断条故障特性。以上文献所提方法均能诊断断条是否发生,然而并不能识别实际断条数目及断条严重程度。此外,短时傅里叶变换、小波变换、Wigner-Ville分布和Hilbert-Huang变换等时频分析方法也常用于电动机断条故障研究。但是,受海森伯格不确定性原理、交叉项和模态混叠的影响,这些方法在时频分析中很难同时达到较理想的时频分辨率,且不能进一步确定断条数量。

鼠笼电动机断条实验为破坏性实验,实现断条的一般方法是通过电钻打孔钻断鼠笼导条<sup>[10]</sup>。该方法对于小型电动机较易实现;而对于中大型双鼠

笼电动机很难实现对电动机的反复拆装,限制了这种破坏性实验的可行性。因此,建立双鼠笼电动机断条故障模型,成为研究大型双鼠笼电动机转子断条特征的常用方法。鼠笼电动机转子断条建模分析方法可分为场、路两种模式,主要有磁场有限元法<sup>[15]</sup>、多回路法<sup>[16-17]</sup>、综合矢量法<sup>[18]</sup>等,所建模型在单鼠笼电动机转子断条故障的稳态及暂态分析中得到了广泛的应用,而对于转子结构较复杂且受趋肤效应影响较大的双鼠笼电动机,以上模型是否适用还有待验证。

当电动机导条发生轻微断裂故障后,电动机仍可以正常使用一段时间<sup>[16]</sup>,但位于故障槽两侧槽中上笼条会按一定规律逐渐断裂,直至影响电动机启动性能,导致电动机无法启动甚至烧毁。对于中大型电动机,如果能够监测鼠笼断条及其严重程度,可在发生轻微断裂故障时提前准备备用电动机,在发生严重断条故障前及时更换故障电机,避免由于突发转子严重断条故障引起的生产停滞及相关事故,避免原电动机烧毁报废。

电动机的频繁启动,大功率电动机使用前的空载试车,为利用电动机启动信号识别转子断条故障提供了便利条件<sup>[3]</sup>。

以采煤机为例,其主要工作是重复短时运转状态,每小时启动次数可达上百次<sup>[19]</sup>;其切割部分每次运行前,均需进行空载试车。在空载试车启动过程中或利用运行中的启动时段,可对电流信号进行提取分析,进而监测导条状态、预警断条故障、判断故障严重程度。

基于上述情况,本文提出了一种计及趋肤效应影响的双鼠笼电动机转子断条仿真模型,利用该模型对上、下笼多种不同断条故障进行仿真实验,并使用同步提取短时傅里叶变换对实验结果进行分析,提出一种能够识别上、下笼断条并判断断条严重程度故障诊断方法。

## 1 计及趋肤效应的双鼠笼电动机鼠笼断条模型

受趋肤效应影响,转子导条电流自槽底到槽顶不均匀分布。电动机转速越慢,转子电流频率越大,转子电流向槽顶集中的现象越明显,电气上主要表现为槽电阻增大、槽漏感降低。计及趋肤效应的鼠笼电动机模型,可以通过分层法进行处理<sup>[20-21]</sup>。

分层法适用于任意供电电压波形、不同槽





$$M_{udij} = M_{duij}^T = \begin{cases} D_{fg}[M_r] - \begin{bmatrix} M_{rud11} & M_{rud12} & \cdots & M_{rud1q} & \cdots & M_{rud1g} \\ M_{rud21} & M_{rud22} & \cdots & M_{rud2q} & \cdots & M_{rud2g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{rudp1} & M_{rudp2} & \cdots & M_{rudpq} & \cdots & M_{rudpg} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{rudf1} & M_{rudf2} & \cdots & M_{rudfq} & \cdots & M_{rudfg} \end{bmatrix} & \begin{matrix} (i = N, j = 1 \text{ 或} \\ i = 1, j = N \text{ 或} \\ i = j - 1 \text{ 或} \\ i = j + 1) \end{matrix} \\ D_{fg}[L_r] + 2 \begin{bmatrix} M_{rud11} & M_{rud12} & \cdots & M_{rud1q} & \cdots & M_{rud1g} \\ M_{rud21} & M_{rud22} & \cdots & M_{rud2q} & \cdots & M_{rud2g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{rudp1} & M_{rudp2} & \cdots & M_{rudpq} & \cdots & M_{rudpg} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{rudf1} & M_{rudf2} & \cdots & M_{rudfq} & \cdots & M_{rudfg} \end{bmatrix} & (i = j) \\ D_{fg}[M_r] & \text{(其他)} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $D_{fg}[A]$  为元素皆为  $A$  的  $f \times g$  阶矩阵;  $M_{rudpq}$  为同槽上笼导条第  $p$  层与下笼第  $q$  层导体间漏磁互感。

电动机电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{P}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \gamma} \mathbf{i} \quad (10)$$

式中,  $P$  为电动机极对数;  $\mathbf{i}$  为回路电流列向量;  $\mathbf{L}$  为回路方程电感矩阵。

电动机转矩方程为

$$\left. \begin{aligned} T_e &= T_L + \frac{J d\omega_r}{P dt} \\ \omega_r &= \frac{d\gamma}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中,  $J$  为转动惯量;  $\omega_r$  转子电角速度。

式(10)和式(11)共同构成计及趋肤效应的双鼠笼电动机运动方程。

### 1.3 鼠笼断条情况下的回路方程

当发生鼠笼断条时,需对回路方程式(1)进行修正,修正方法一般为高阻态法或大回路法。假设双鼠笼电动机第  $k$  槽上笼导条断裂,两种方法具体如下:

(1) 高阻态法。将回路方程中第  $k$  槽对应的上笼各层导体电阻,同时乘以一个较大的常数,而其他参数不变,使其相对于其他槽的导体可视为开路。

(2) 大回路法。将上笼各套鼠笼对应的第  $k-1$  及  $k$  共  $2f$  个回路,更换为由第  $k-1$  及  $k+1$  号导体组成的新的  $f$  个大回路,方程总回路数减 1。回路方程的修正方法是:将电阻与电感矩阵的第  $f \times k+4$  行至第  $f \times (k+1)+3$  行共  $f$  行元素,加到对应的第  $f \times (k-1)+4$  行至第  $f \times k+3$  行共  $f$  行元素上;然后将第  $f \times k+4$  列至第  $f \times (k+1)+3$  列共  $f$  列元素,加到对应的第  $f \times (k-1)+4$  列至  $f \times k+3$  列共  $f$  列元素

上;然后,删去第  $f \times k+4$  列至第  $f \times (k+1)+3$  列共  $f$  列元素;最后,删去电压、电流及磁链列向量的第  $f \times k+4$  行至第  $f \times (k+1)+3$  行共  $f$  行元素。

高阻态法不用改变回路方程结构,仅需改变对应断条处的各层电阻值,缺点是数值计算所用步长小,计算时间长;而大回路法尽管需要改变回路方程结构,但数值计算时间要短得多。本文采用大回路法对回路方程进行修正。

## 2 同步提取短时傅里叶变换

同步提取变换 (synchro extracting transform, SET) 是受同步挤压变换 (synchro squeezing transform, SST)<sup>[23]</sup> 启发,在短时傅里叶变换 (short-time fourier transform, STFT) 的基础上,由文献[24]提出的一种后处理时频分析方法。该方法通过提取脊线上的时频系数,对由短时傅里叶变换、小波变换 (wavelet transform, WT)、S 变换等得到的时频分布进行优化。SET 具有高时频分辨率和能量聚集性,在低信噪比情况下具有较好的噪声鲁棒性,能够对弱信号进行检测。

同步提取短时傅里叶变换 (synchro extracting short-time fourier transform, SESTFT), 是一种通过使用同步提取技术优化短时傅里叶变换时频分布的方法。利用 SESTFT 对信号  $s(t)$  进行时频分析,步骤如下:

(1) 对输入信号进行短时傅里叶变换处理。信号  $s(t)$  加实偶窗函数  $g(u)$ , 进行 STFT 处理的数学表达形式为

$$STFT(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{g}(\omega - \xi) \hat{s}(\xi) e^{i\xi t} d\xi \quad (12)$$

式中,  $\hat{s}(\xi)$  和  $\hat{g}(\omega - \xi)$  分别为信号和窗函数的傅里叶变换。

(2) 计算同步提取算子(synchro extracting operator, SEO)。SET 所用同步提取算子(SEO)的主要作用是剔除发散能量的时频系数,保留时频脊线上的时频系数。该算子由改进的单位冲激函数得出:

$$SEO(\omega, t) = \begin{cases} 1, & \left| \operatorname{Re} \left[ i \frac{STFT^{s'}(\omega, t)}{STFT(\omega, t)} \right] \right| < \frac{\Delta}{2} \\ 0, & \left| \operatorname{Re} \left[ i \frac{STFT^{s'}(\omega, t)}{STFT(\omega, t)} \right] \right| \geq \frac{\Delta}{2} \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $STFT^{s'}(\omega, t)$  为原信号加窗函数  $g'(u)$  的短时傅里叶变换;  $\Delta$  可理解为短时傅里叶变换的频率分辨率;  $\operatorname{Re}[*]$  表示取实运算。

(3) 通过同步提取算子(SEO)优化 STFT 的时频分布,实现同步提取短时傅里叶变换(SESTFT),其数学表示为

$$SESTFT(\omega, t) = STFT(\omega, t) SEO(\omega, t) \quad (14)$$

### 3 仿真实验

仿真实验对象为采煤机切割用 YBCS2-400a 型双鼠笼电动机。

电动机主要参数:额定电压 660 V(角接),额定功率 400 kW,额定转差 0.013,功率因数 0.80,效率 92.5%,极对数 2,有效气隙长度  $2.22 \times 10^{-3}$  m,定转子互感  $7.42 \times 10^{-5}$  H;定子侧槽数 60,相电阻  $2.97 \times 10^{-2}$   $\Omega$ ,相自感  $2.22 \times 10^{-2}$  H,相间互感  $-1.11 \times 10^{-2}$  H;转子侧槽数 50,回路自感  $6.38 \times 10^{-6}$  H,回路互感  $-1.35 \times 10^{-7}$  H,短距系数 0.08,笼条长 0.49 m,上端环电阻  $4.00 \times 10^{-6}$   $\Omega$ ,上端环漏感  $2.26 \times 10^{-8}$  H,下端环电阻  $5.78 \times 10^{-7}$   $\Omega$ ,下端环漏感  $1.74 \times 10^{-8}$  H,上笼分为 4 层,上笼导条电阻率为  $1.24 \times 10^{-7}$   $\Omega \cdot \text{m}$ ,下笼分为 4 层,下笼导条电

阻率  $3.14 \times 10^{-8}$   $\Omega \cdot \text{m}$ 。

YBCS2-400a 电动机转子槽型如图 2 所示。

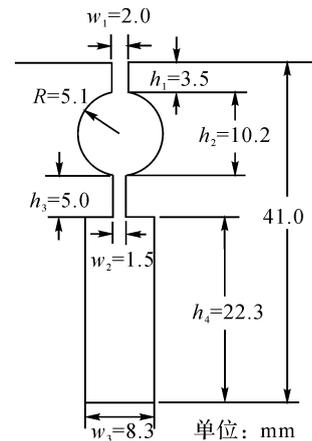


图 2 YBCS2-400a 电动机转子槽型

Fig. 2 Slot pattern of motor YBCS2-400a

本文利用电动机参数计算程序<sup>[25-26]</sup>计算电动机参数,将参数输入大回路法修正的多回路模型,在 matlab 平台使用四阶龙哥-库塔法进行数值计算仿真,最后选取模型输出中的 a 相定子电流为研究对象,利用短时傅里叶变换进行分析。实验目标为发现断条、区分上下笼断条、判断连续断条严重程度。

#### 3.1 双鼠笼电动机断条识别

电动机转子及其后传动系统等转动惯量为  $13.1 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。使用 SESTFT 分析采煤机切割部分空载试车启动过程中定子 a 相电流,时频曲线在时频面的投影图如图 3 所示。其中,图 3(a)为转子完好时的时频面,图 3(b)为上笼 1 根导条断裂时的时频面。对比两幅图可发现,图 3(b)比图 3(a)多了两条脊线,两条脊线连成 V 字形。可见,通过启动电流时频分析,可识别轻微断条故障(1 根导条断裂)。

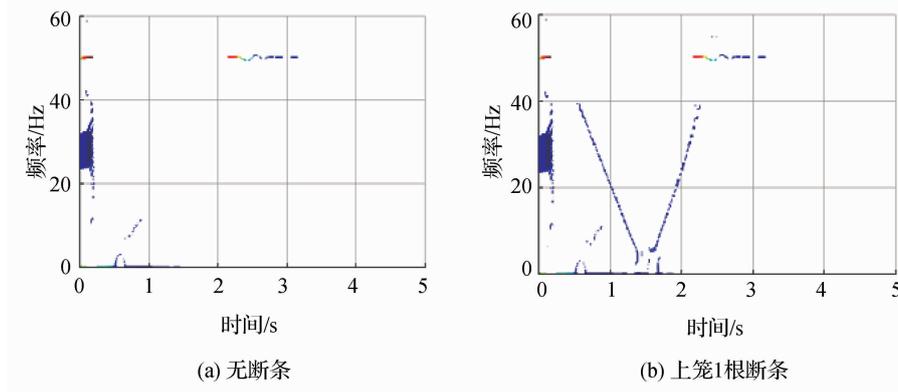


图 3 启动电流时频分析的时频面投影

Fig. 3 The projection of time frequency analysis of starting current in time frequency plane

双鼠笼电动机的鼠笼断条故障多为上笼连续断条,尽管下笼断条情况很少,但也不能排除由于制造缺陷等引起的下笼断条发生。

定义图3(a)中V字斜线“\”为1号线,斜线“/”为2号线。时频分析结果曲线在幅频面的投

影如图4所示。为便于分析,仅截取10~35 Hz数据。定义幅频面中2号线到1号线间的夹角 $\varphi$ 为幅频面夹角,其中图4(a)为下笼1根导条断裂情况下的幅频图,图4(b)(c)(d)分别为上笼1根、连续4根、连续6根导条断裂情况下的幅频图。

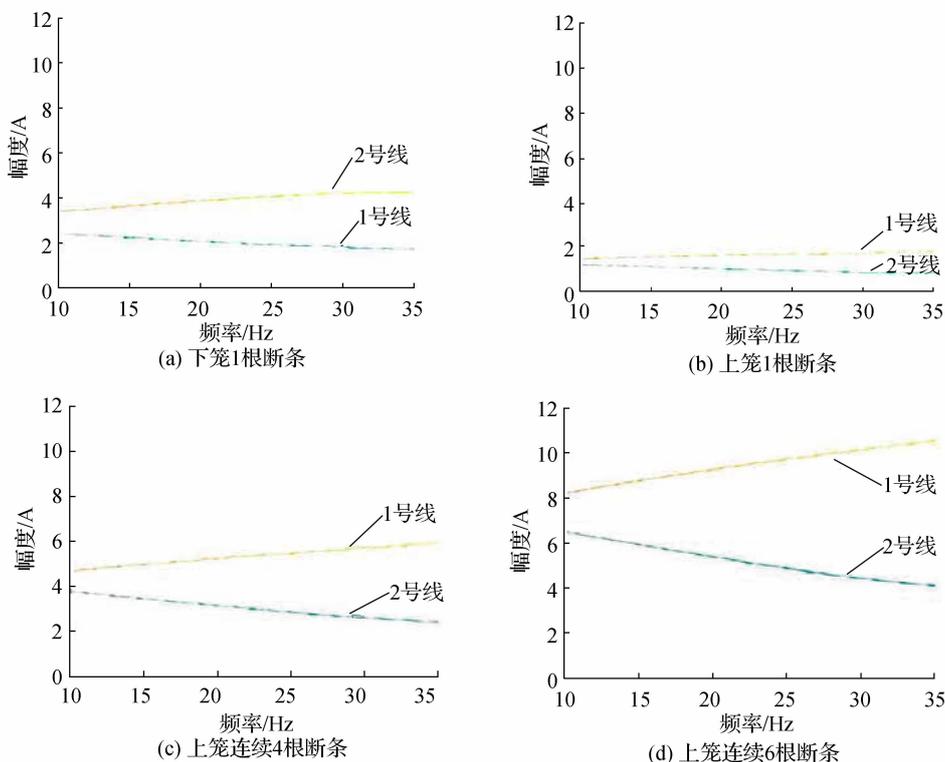


图4 不同断条情况下启动电流时频分析之幅频面投影

Fig. 4 The projection of time frequency analysis of starting current in amplitude frequency plane under different broken bar conditions

实验电动机极数为4,共有50个转子槽,则一极内有12.5个槽,半极内有6.25个槽。由图4可知,对于双鼠笼电动机,仅下笼断条时, $\varphi$ 为负值;仅上笼断条时, $\varphi$ 为正值,且半极内连续断条数目越多 $\varphi$ 越大。

实际上,图4中的1、2号线并非直线,而是由很多点构成的窄平面。为获得严格意义上的 $\varphi$ 值,需对两窄平面进行处理。在不同断条情况下,1、2号线在15~25 Hz范围内,各自的幅值与频率基本呈线性关系。对该频率范围内1、2号线各频率上幅值方向的点求平均值,并对所得的点进行最小二乘一阶曲线拟合,得到对应的1、2号线段。定义 $\varphi$ 为2号线段沿横轴负方向延长线到1号线段沿横轴负方向延长线的夹角,则不同断条情况下的 $\varphi$ 值见表1。

表1中数据表明,当双鼠笼电动机发生下笼断条故障时, $\varphi$ 为负值;发生上笼断条故障时, $\varphi$ 为正值;双鼠笼电动机发生早期断条故障,由1根上笼

断条向连续半极上笼断条(本例中连续断条数小于等于6)发展时, $\varphi$ 值逐渐增大,可通过 $\varphi$ 值的大小确定连续断条数目,从而判断早期断条严重程度;当发生严重断条故障,连续断条数大于半极数(本例中连续断条数大于6)时,仅通过 $\varphi$ 值的大小已无法确定断条数目。

表1 不同断条情况下 $\varphi$ 值

Tab. 1 The values of  $\varphi$  under different broken bar conditions

断条类型	下笼		上笼连续				
断条数/根	1	1	3	6	9	12	25
$\varphi/(^\circ)$	-4.33	1.79	6.20	11.50	12.09	7.96	2.94

### 3.2 上笼连续与非连续断条数判别

由前文分析可知,连续断条数小于半极数时,可通过 $\varphi$ 值的大小判断电动机的断条故障严重程度。然而,当连续断条数超过半极或发生非连续断条故障时,无法通过该方法识别断条数目。

图 5 为连续 3、6、12、25 根导条断裂情况下,启动电流时频分析结果曲线在时频面投影图,频率范围为 10~35 Hz,时间范围为 0.5~3.5 s。由图 5 可知,连续断条数越多,1 号线与 2 号线之间的夹角越大。在 15~25 Hz 范围内对 1、2 号线在时频面投影各频率对应的时间点进行平均,并对平均后所得的点进行最小二乘一阶曲线拟合,得到对应的 1、2 号线段。2 号线段沿纵轴负方向延长线与 1 号

线段沿纵轴负方向延长线的夹角  $\theta$ ,即为时频夹角。

在同等工况条件下(包括电源、负载等外部条件),双鼠笼电动机发生上笼断条故障后会引启动转矩降低,由此将延长启动时间。连续断条数目越小,启动时间越短, $\theta$  角越小。为防止因  $\theta$  角过小可能造成的舍入误差,本文对时间轴放大 10 倍,所得对应夹角为  $\theta'$ 。

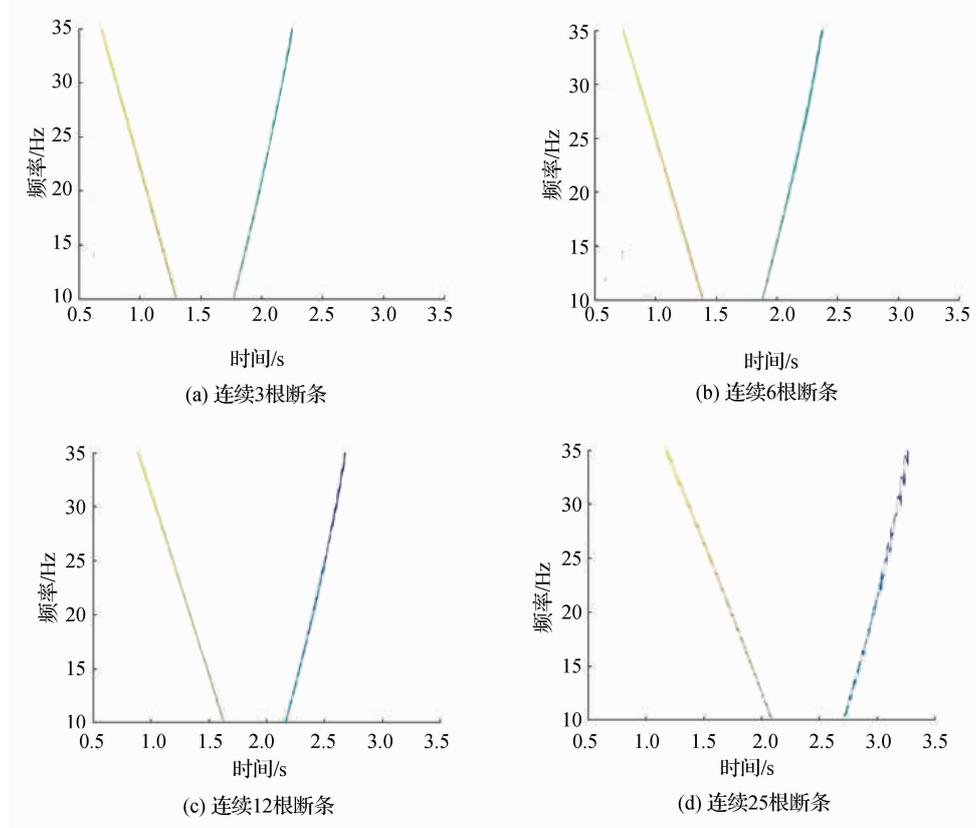


图 5 不同断条情况下启动电流时频分析之时频面投影

Fig. 5 The projection of time frequency analysis of starting current in time frequency plane under different broken bar conditions

导条连续断裂情况下,断条数与  $\theta$ 、 $\theta'$  的对应关系见表 2。由表 2 中数据可知,随着导条连续断裂数目的增加, $\theta$  及  $\theta'$  的值逐渐增大。连续断裂数目与  $\theta$ 、 $\theta'$  数值呈正相关关系。

表 2 导条连续断裂情况下  $\theta$  与  $\theta'$  值  
Tab.2 The value of  $\theta$  and  $\theta'$  under continuous broken bar conditions

断条类型	下笼							上笼连续断条						
	1	1	3	6	9	12	25	1	1	3	6	9	12	25
断条数/根	1	1	3	6	9	12	25	1	1	3	6	9	12	25
$\theta/(\circ)$	2.63	2.76	2.82	2.98	3.17	3.37	4.14	2.63	2.76	2.82	2.98	3.17	3.37	4.14
$\theta'/(^\circ)$	25.84	27.07	27.69	29.18	30.92	32.79	39.73	25.84	27.07	27.69	29.18	30.92	32.79	39.73

电动机断条故障除连续断条外,还可能在与断条相对应的其他极出现后续断条。不连续断条可能降低断条造成的转子电流不平衡性,从而削弱可提取的故障特征,使得判断断条数目及严重程度变得困难。

共计 9 根导条不同断裂情况下,断条类型和位置与  $\varphi$ 、 $\theta$  及  $\theta'$  的对应关系见表 3。其中,前 4 行为不连续断条情况下的实验结果,第 5 行为连续断条情形下的实验结果。对比表中数据可知,断条数目一定、不同不连续断条情况下, $\varphi$  值变化较大,不能使用  $\varphi$  值确定断条数量;连续断条及不同不连续断条情况下, $\theta$  或  $\theta'$  角变化不大,可以通过  $\theta$  或  $\theta'$  值大致确定断条数量。

表3 上笼9根不同情况断条下 $\varphi$ 、 $\theta$ 、 $\theta'$ 值  
Tab.3 The values of  $\varphi$ ,  $\theta$  and  $\theta'$  with 9 different broken bar conditions

断条类型及数量								$\varphi/(\circ)$	$\theta/(\circ)$	$\theta'/(\circ)$
第1极		第2极		第3极		第4极				
数量	槽号	数量	槽号	数量	槽号	数量	槽号			
6	1—6	3	13—15	—	—	—	—	12.09	3.17	30.92
6	1—6	2	13—14	1	26	—	—	12.09	3.17	30.92
6	1—6	1	13	1	26	1	39	10.63	3.13	30.53
5	1—5	—	—	4	26—29	—	—	4.55	3.10	30.29
9	1—9	—	—	—	—	—	—	12.09	3.17	30.92

## 4 结论

本文针对独立端环型双鼠笼电动机结构特点,使用分层法和多回路法建立了计及趋肤效应的双鼠笼电动机多回路模型。利用该模型模拟了不同断条情况下采煤机空载试车启动过程,并使用同步提取短时傅里叶变换对启动电流进行了时频分析。得出以下结论:

(1) 幅频面夹角可判别早期上笼或者下笼断条故障。当幅频面夹角为负值时,双鼠笼电动机发生下笼断条故障;当幅频面夹角为正值时,双鼠笼电动机发生上笼断条故障。

(2) 时频面夹角可大致确定断条数量。对于某双鼠笼电动机发生断条故障,其断条数量和时频面夹角数值呈正相关关系。

(3) 本研究适用于不需要准确识别转子导条断裂数量而仅评估断条故障严重程度情况。本研究仅发现了幅频面夹角和时频面夹角与双鼠笼电动机转子断条故障之间存在一定相关性这一现象,其电气原理还有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 韩天,尹忠俊,杨邵伟. 电机转子断条故障诊断方法探讨[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(1): 93-98.  
Han Tian, Yin Zhongjun, Yang Shaowei. Discussion of diagnostic methods for broken rotor bar of induction motor[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2009, 21(1): 93-98.
- [2] 刘红. 双鼠笼异步电机笼条断裂分析与预防措施[J]. 贵州电力技术, 2012, 15(6): 60-61.  
Liu Hong. Fracture analysis and preventive measures of double squirrel-cage asynchronous motor cage bar[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2012, 15(6): 60-61.
- [3] 陈邦文. 双鼠笼型高压电动机转子笼条断裂分析与处理[J]. 安徽电力, 2011, 29(2): 39-41.  
Chen Bangwen. Cracking problem analysis and treatment of motor rotor squirrel-cage bars in double squirrel-cage high voltage motor[J]. Anhui Electric Power, 2011, 29(2): 39-41.
- [4] 陈庆祥. 双鼠笼电机外笼损坏的原因分析与局部处理[J]. 电机技术, 1997(3): 50-51.  
Chen Qingxiang. Cause analysis and local treatment of damage to outer cage of double squirrel cage motor[J]. Electrical Machinery Technology, 1997(3): 50-51.
- [5] Bellini A, Filippetti F, Franceschini G, et al. On-field experience with online diagnosis of large induction motors cage failures using MCSA[J]. Industry Applications IEEE Transactions, 2002, 38(4): 1045-1053.
- [6] 牛发亮,黄进,杨家强. 基于电磁转矩小波变换的感应电机转子断条故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 122-127.  
Niu Faliang, Huang Jin, Yang Jiaqiang. Broken rotor bars fault diagnosis of induction machines based on wavelet transformation of electromagnetic torque [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 122-127.
- [7] 刘振兴,尹项根,张哲,等. 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, et al. 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.
- [8] 阳同光,桂卫华. 基于瞬时无功功率感应电机转子断条故障诊断研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(9): 112-116.  
Yang Tongguang, Gui Weihua. Fault diagnosis of broken bar in induction motor based on instantaneous reactive power[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(9): 112-116.
- [9] 张龙照,邱阿瑞. 用频谱分析方法检测异步电机转

- 子故障[J]. 电工技术学报,1987(4):48-52.
- Zhang Longzhao, Qiu Arui. Detection of the rotor faults in induction motors by spectrum analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1987(4):48-52.
- [10] Grilli Y, Tommaso A O D, Filippetti F, et al. Investigation of motor current signature and vibration analysis for diagnosing rotor broken bars in double cage induction motors [C]. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. IEEE, 2012; 1360-1365.
- [11] Grilli Y, Tommaso A O D, Miceli R, et al. Vibration signature analysis for rotor broken bar diagnosis in double cage induction motor drives [C]. Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. IEEE, 2013; 1814-1820.
- [12] Grilli Y, Tommaso A O D, Miceli R, et al. Diagnosis of mechanical unbalance for double cage induction motor load in time-varying conditions based on motor vibration signature analysis [C]. International Conference on Renewable Energy Research and Applications. IEEE, 2014; 1157-1162.
- [13] 邱阿瑞. 用起动电流的时变频谱诊断鼠笼异步电机转子故障[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(4): 267-273.
- Qiu Arui. Diagnosis of rotor fault in squirrel-cage induction motors using time-varying frequency spectrum of starting stator current [J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(4): 267-273.
- [14] Antonino-Daviu J, Riera-Guasp M, Pons-Llinares J, et al. Detection of broken outer-cage bars for double-cage induction motors under the startup transient [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(5): 1539-1548.
- [15] 谢颖, 李伟力, 李守法. 异步电动机转子断条故障演化及相关因素分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 41-48.
- Xie Ying, Li Weili, Li Shoufa. Fault evolution of broken bars in induction motors and correlative factors analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(3): 41-48.
- [16] 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; 527-544.
- [17] 马宏忠, 胡虔生, 黄允凯, 等. 感应电机转子断条根数影响分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(5): 573-576.
- Ma Hongzhong, Hu Yusheng, Huang Yunkai, et al. Impact of the number of broken rotor bars of induction motors [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2003, 31(5): 573-576.
- [18] 王榕生, 吴汉光, 黄灿水, 等. 多断条笼型转子感应电动机导条电流分布[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(4): 59-65.
- Wang Rongsheng, Wu Hanguang, Huang Canshui, et al. Distribution of bar current on squirrel cage induction motor with multi-broken rotor bars [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(4): 59-65.
- [19] 雅科文柯 B A. 防爆异步电动机[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983; 86.
- [20] 贺益康. 交流电计算机仿真[M]. 北京: 科学出版社, 1990; 190-200.
- [21] 陈立人. 深槽异步电动机考虑电流集肤效应时动态特性的数值计算[J]. 上海交通大学学报, 1985, 19(4): 4-17, 123.
- Chen Liren. Digital calculation of dynamic characteristics of deep-slotted induction motor in consideration of its skin effects [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1985, 19(4): 4-17, 123.
- [22] 苟军善. 异步电动机双笼转子结构及导条电阻的选取[J]. 防爆电机, 2008, 43(5): 4-5.
- Gou Junshan. Selection on structure of double-cage rotor and bar resistance of induction motor [J]. Explosion-proof Electric Machine, 2008, 43(5): 4-5.
- [23] 黄忠来, 张建中. 同步挤压 S 变换[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(5): 643-650.
- Huang Zhonglai, Zhang Jianzhong. Synchro squeezing S-transform [J]. Scientia Sinica: Informationis, 2016, 46(5): 643-650.
- [24] Yu Gang, Yu Mingjin, Xu Chuanyan. Synchro extracting transform [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8042-8054.
- [25] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017; 35-54.

(责任编辑:陈贵仁)