

大功率电力机车异步牵引电机的典型故障研究

张 世 聪

(中国铁道科学研究院 研究生部,北京 100081)

摘 要:通过分析相电流信号,对大功率电力机车异步牵引电机的两种典型故障——转子断条故障和定子绕组匝间短路故障进行故障诊断,建立电机故障情况下的有限元模型并进行仿真.结果表明,电机故障引起了三相电流不对称,基于故障后的三相电流,利用频谱分析法和对称分量法进行后处理运算,可以提取到明显的故障特征,能够有效的诊断转子断条故障和定子绕组匝间短路故障.实验所得结果与仿真及理论分析吻合,证明了故障模型的正确性,也验证了基于相电流信号的故障诊断方法的有效性.

关键词:大功率电力机车;异步牵引电机;故障诊断;转子断条;匝间短路

中图分类号:TM307.1; U269.6 **文献标志码:**A

Research on typical faults of asynchronous traction motor for high power electric locomotive

ZHANG Shicong

(Graduate Department, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract:Based on the study of phase current signal, two typical faults of high-power electric locomotive of asynchronous traction motor, including the fault of broken rotor bar and inter-turn short circuit of stator winding, are diagnosed, and the finite element model built under the condition of motor fault is simulated. The results show that the asymmetry of the three-phase current is caused by the motor fault. The three-phase current under fault condition is post-processed through the spectrum analysis method and the symmetrical component method, thus extracting fault features in order to diagnose the fault of broken rotor bar and inter-turn short circuit of stator winding effectively. The results from test are consistent with the simulation and theoretical analysis, which proves the correctness of the fault model and also verifies the effectiveness of the fault diagnosis method based on phase current signals.

Keywords:high power electric locomotive; asynchronous traction motor; fault diagnosis; broken rotor bar; inter-turn short circuit

牵引电机是电力机车的关键部件之一,牵引电机
由于悬挂在转向架上,故常常处于伴有灰尘、环境温

度剧烈变化的环境中,而且负载经常频繁的发生变
化,导致运行工况不断改变. 由于恶劣的工作环境及

收稿日期:2018-01-02

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2016J002-A);中国铁道科学研究院科技项目(2015YJ121)

Foundation items: Science and Technology Research and Development Program of China Railway Corporation (2016J002-A); Science and Technology Project of China Academy of Railway Sciences(2015YJ121)

第一作者:张世聪(1985—),男,吉林长春人,博士生.研究方向为载运工具运用工程.email:wizardzsc@126.com.

引用格式:张世聪. 大功率电力机车异步牵引电机的典型故障研究 [J].北京交通大学学报,2018,42(2): 122—128.
ZHANG Shicong. Research on typical faults of asynchronous traction motor for high power electric locomotive [J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(2): 122—128.(in Chinese)

特殊的结构,往往导致牵引传动系统故障,直接影响到整列车的行车安全,一旦发生不可预知的故障将可能造成重大的人员伤亡事故,产生巨大的经济损失和社会影响,因此其故障诊断成为国内外的研究热点。

牵引电机主要的故障类型包括:转子断条故障、定子绕组匝间短路故障、气隙偏心故障、端环断裂和轴承故障等。其中,转子断条故障和定子绕组匝间短路故障作为两种常见故障,故障发生率分别高达 10% 和 36%^[1-2]。这两种故障会引起电机的气隙磁场不平衡,产生的脉动转矩会引起电磁振动和噪声。另外,定子绕组匝间短路故障还会造成绕组的局部过热,若无法及时检测,会导致定子进一步的故障扩散,造成更加严重的危害。因此,国内外针对两种故障的诊断方法展开了研究工作。对于转子断条故障,目前有自适应滤波法、希尔伯特变换法、Park 矢量法及小波分析法等^[3-6]。上述诊断方法的算法均相对复杂,计算量较大。而针对定子绕组匝间短路故障,主要有电流频谱分析法、电流负序分量法、负序阻抗法及瞬时功率分解法等^[7-9]。综合考虑故障检测精度和算法复杂程度,本文作者采用算法简单的相电流频谱分析方法进行转子断条故障的诊断;使用电流负序分量法来实现对定子绕组匝间短路的故障诊断。通过搭建异步牵引电机的有限元故障模型,对异步牵引电机在转子断条故障和定子绕组匝间短路故障后的定子三相电流波形进行仿真,分析其故障特征并进行实验验证,实现了异步牵引电机的故障诊断。

1 故障诊断方法

1.1 转子断条故障诊断方法

笼型异步电机在正常运行情况下,其转子导条呈均匀对称分布,当给定子绕组外加三相对称电压时,定转子建立起圆形旋转磁动势,在定子绕组中产生三相对称电流。当发生断条故障后,则转子导条不再对称,定转子生成椭圆形的磁动势,在定子绕组中产生谐波电流。为具体分析故障后产生的谐波电流,以一台 p 对极笼型异步电机为例,当外加频率为 f_1 供电电源时,定子绕组产生的磁动势的基波可以表示为^[10]

$$F_1 = K_1 N_1 I_1 \sin[(\omega - p\omega_r)t - p\varphi] \quad (1)$$

$$\varphi = \theta - \omega_r t \quad (2)$$

式中: K_1 为与电机极数、定子绕组系数相关的常数; N_1 为定子绕组每相匝数; I_1 为定子电流; ω 为电源角频率; ω_r 为转子旋转的角速度; φ 为转子绕

组的相位角; θ 为初始相角。在定子绕组磁动势的作用下,转子绕组中会产生感应电动势和转子电流,进而建立起一个与定子磁动势相平衡的转子磁动势,其基波可以表示为

$$F_2 = K_2 N_2 I_2 \sin[(\omega - p\omega_r)t - p\varphi] \quad (3)$$

式中: K_2 为与电机极数、转子绕组系数相关的常数; N_2 为转子绕组匝数; I_2 为转子电流。

当发生转子断条故障时,假设有 1 根转子导条断开,则转子电流产生的磁动势被 $\sin 2\varphi$ 所调制,转子绕组磁动势的基波可以表示为

$$F_2 = K_2 N_2 I_2 \sin[(\omega - p\omega_r)t - p\varphi] \sin 2\varphi \quad (4)$$

另外,异步电机转差率表示为

$$s = (\omega - \omega_r) / \omega \quad (5)$$

根据式(2)、式(4)和式(5),且定子、转子磁动势相互平衡,则反映到定子侧磁动势的基波可以表示为

$$F_1 = F_2 = \frac{K_2 N_2 I_2}{2} \{ \cos[(3 - 2s)\omega t - (p + 2)\theta] - \cos[(1 - 2s)\omega t - (2 - p)\theta] \} \quad (6)$$

式(6)中第 1 项将在三相定子绕组中产生零序电动势,对定子绕组电流不产生影响。第 2 项磁动势分量中含有一个角频率为 $(1 - 2s)\omega$ 的分量,将在定子绕组中产生对应的电流谐波分量,可知该电流谐波的频率为 $(1 - 2s)f$, f 为电源频率。由于此分量对电源频率的调制作用,导致定子电流出现脉动,电机的转矩也随之产生一个 2 倍转差频率的脉动,其会在定子绕组中感应出一个 $(1 + 2s)f$ 频率的谐波电流。因此,通过对定子绕组的三相电流进行频谱分析,根据频率为 $(1 \pm 2s)f$ 的电流谐波分量来判断电机是否发生转子断条故障。

1.2 定子绕组匝间短路故障诊断方法

与转子断条故障类似,当发生定子绕组匝间短路故障后,电机的三相绕组不再对称,产生椭圆形气隙磁动势。若通过对称分量法将椭圆形磁动势分解为正序分量和负序分量,两者将分别在定子绕组中产生正序电流和负序电流^[11]。定子绕组匝间短路故障后的三相电流可以表示为

$$\begin{cases} i'_a = \sqrt{2} I^+ \cos(\omega t - \varphi^+) + \sqrt{2} I^- \cos(\omega t - \varphi^-) \\ i'_b = \sqrt{2} I^+ \cos(\omega t - \varphi^+ - 2\pi/3) + \sqrt{2} I^- \cos(\omega t - \varphi^- + 2\pi/3) \\ i'_c = \sqrt{2} I^+ \cos(\omega t - \varphi^+ + 2\pi/3) + \sqrt{2} I^- \cos(\omega t - \varphi^- - 2\pi/3) \end{cases} \quad (7)$$

式中: i'_a 、 i'_b 和 i'_c 分别为定子绕组匝间短路故障时的三相电流; I^+ 和 I^- 分别为正序和负序电流的

幅值; φ^+ 和 φ^- 分别为正序和负序电流的初始相位角.将三相电流经 Clarke 变换和 Park 变换到 dq 坐标系下,可得到 d、q 两轴电流为^[12]

$$\begin{cases} i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{cases} \quad (8)$$

式中: \bar{i}_d 、 \bar{i}_q 是三相电流正序分量变换到 dq 坐标系下得到的直流分量; \tilde{i}_d 、 \tilde{i}_q 是三相电流负序分量变换到 dq 坐标系下得到的交流分量,且该交流分量为 2 次谐波分量.

电机在正常运行情况下,三相电流只存在正序分量,经坐标变换至 dq 坐标系下转变为直流分量,而定子绕组匝间短路故障导致三相电流产生了负序分量,此分量经过坐标变换至 dq 坐标系下可以得到 2 次负序谐波分量.因此,通过求解定子电流的 2 次谐波分量,便可得到其负序电流分量,可用于诊断电机定子绕组是否发生匝间短路故障.

2 牵引电机故障模型及仿真分析

2.1 牵引电机故障模型

通过 Maxwell 软件仿照 HXD1 牵引电机建立二维有限元模型,见图 1.在上述电机模型的基础上,建立了转子断条故障和定子绕组匝间短路故障两种故障模型,研究了两种故障对三相电流的影响.本文所采用的电机为应用于大功率电力机车牵引系统的笼型异步电机,其主要参数如表 1 所示.

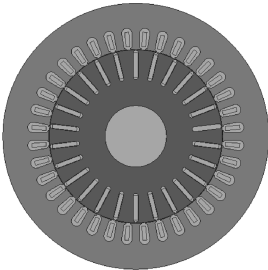


图 1 电机二维有限元模型

Fig.1 Two-dimensional finite element model of the asynchronous motor

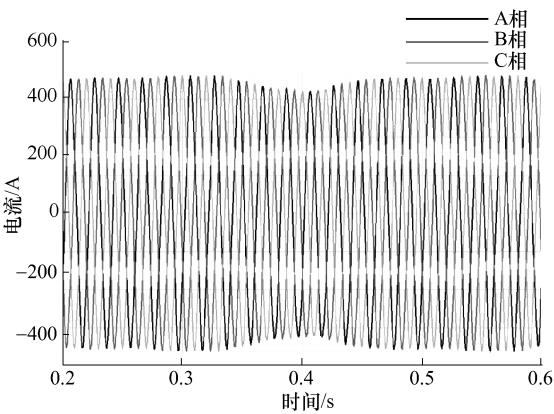
表 1 笼型异步电机主要参数

Tab.1 Key parameters of the cage asynchronous motor

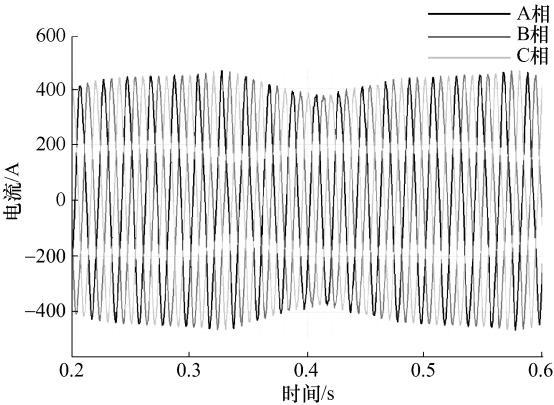
参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	1 224	极对数	2
额定电压/V	1 375	额定电流/A	584
额定转速/(r/min)	1 726	工作频率/Hz	0~117

2.2 转子断条故障

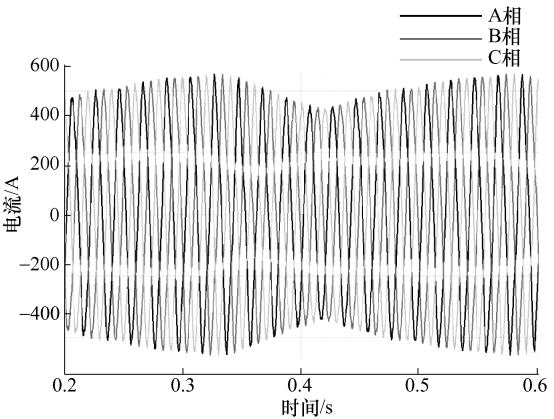
模拟笼型异步电机的转子断条故障,仿真得到三相定子电流波形,如图 2 所示.



(a) 1 根断条故障



(b) 2 根断条故障



(c) 3 根断条故障

图 2 笼型异步电机转子断条故障的相电流波形

Fig.2 Phase currents of cage asynchronous motor with broken rotor bar faults

从三相电流波形可以看出,当异步电机发生转子断条故障后,三相定子电流不再对称,其中存在明显的谐波分量,而且随着转子断条数量的增加,谐波分量的幅值也在增大.根据转子断条故障后的电流波形,通过快速傅里叶变换(FFT)分析可以得到相电流的频谱图,如图 3 所示.

从图 2 及图 3 可以看出,在电机正常运行时,三相电流对称,随着转子断条故障的增加,三相电流开始出现畸变,且随着故障程度的加剧,不对称度越来越

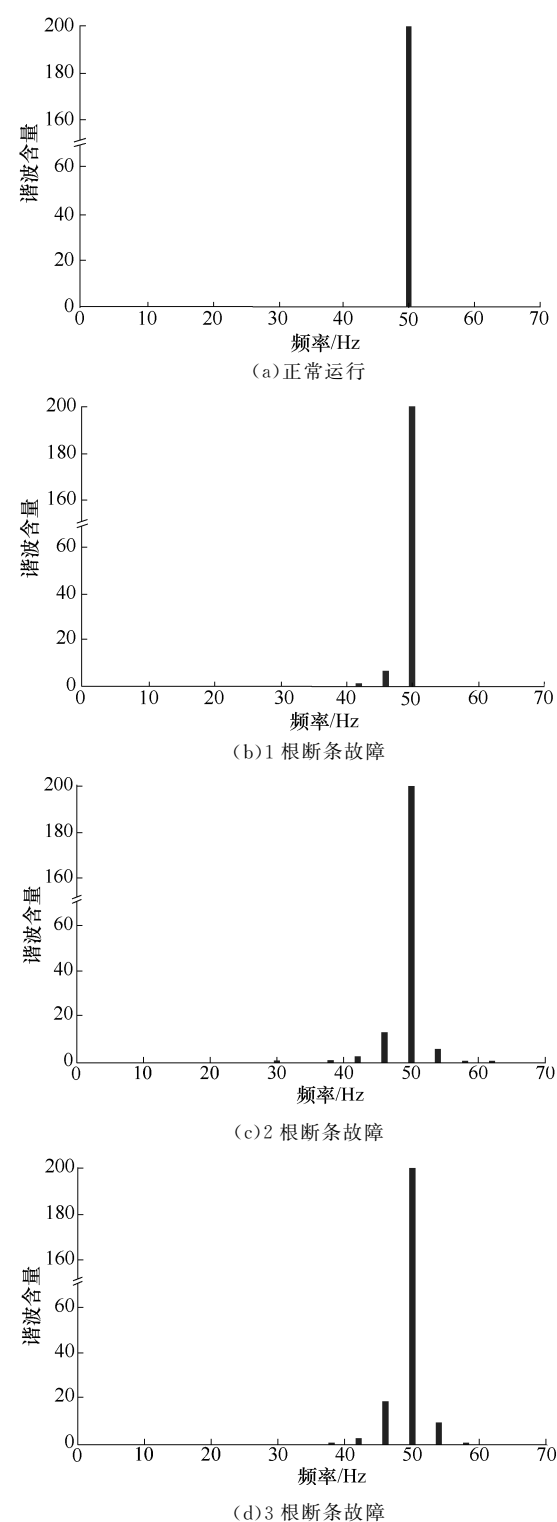


图 3 正常运行及转子断条故障后相电流频谱

Fig.3 Frequency spectrogram of phase current under normal and broken rotor bar fault condition

越明显.通过 FFT 进行频域分析,只有电机在发生转子断条故障后,在定子电流中产生故障特征频率为 $(1 \pm 2s)f$ 的边频分量,并且随着断条数量的增加,边频分量的幅值逐渐增加.因此,通过检测边频分量,便可实现对转子断条的故障诊断.

2.3 定子绕组匝间短路故障

异步电机发生定子绕组匝间短路故障后,会在短路匝产生短路电流,但由于此短路电流对相电流影响较小,且本文采用基于相电流的故障诊断方法,在建立故障模型时可忽略短路电流的影响.因此,可以通过减少定子绕组相应的匝数来模拟匝间短路故障,据此完成简化故障模型的搭建,仿真得到不同匝间短路故障的定子三相电流波形,如图 4 所示.

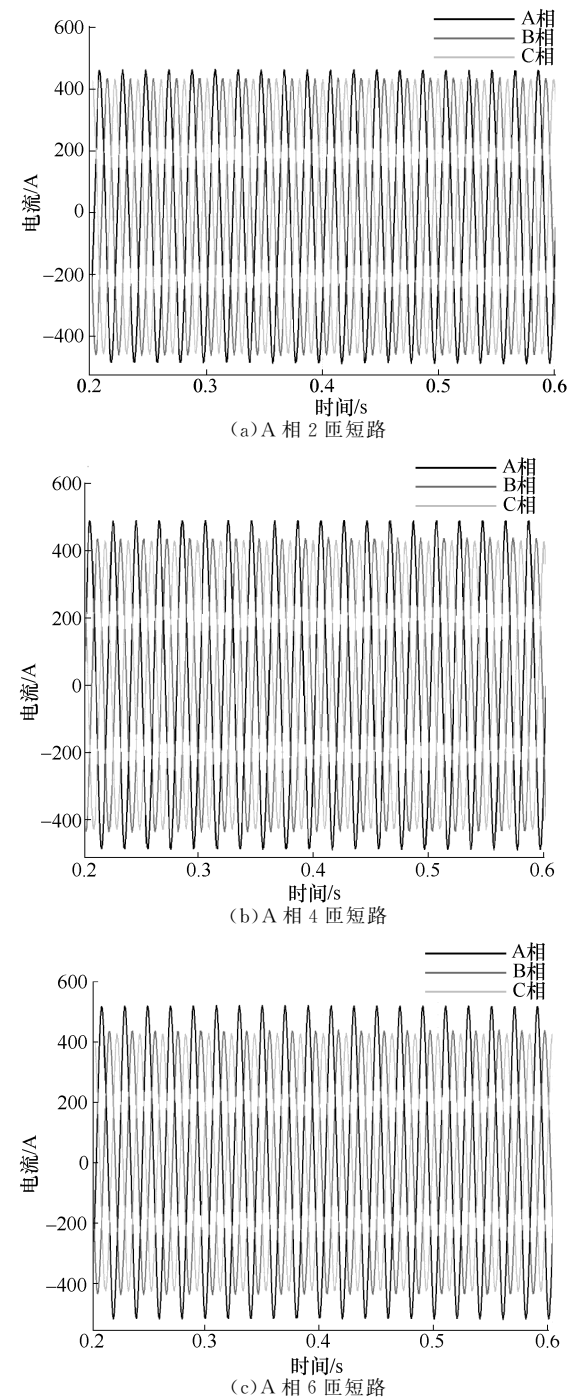


图 4 定子绕组匝间短路故障相电流波形

Fig.4 Phase currents under the fault of inter-turn short circuit of stator winding

从图 4 中可以看出,由于匝间短路会使短路故障所在相的阻抗减小,导致该相电流增大,且随着短路匝数增多,短路相的相电流也随之增大.

通过 dq 解耦的方法,分别提取电机正常运行和定子绕组匝间短路故障后三相电流的负序电流分量,如图 5 所示.

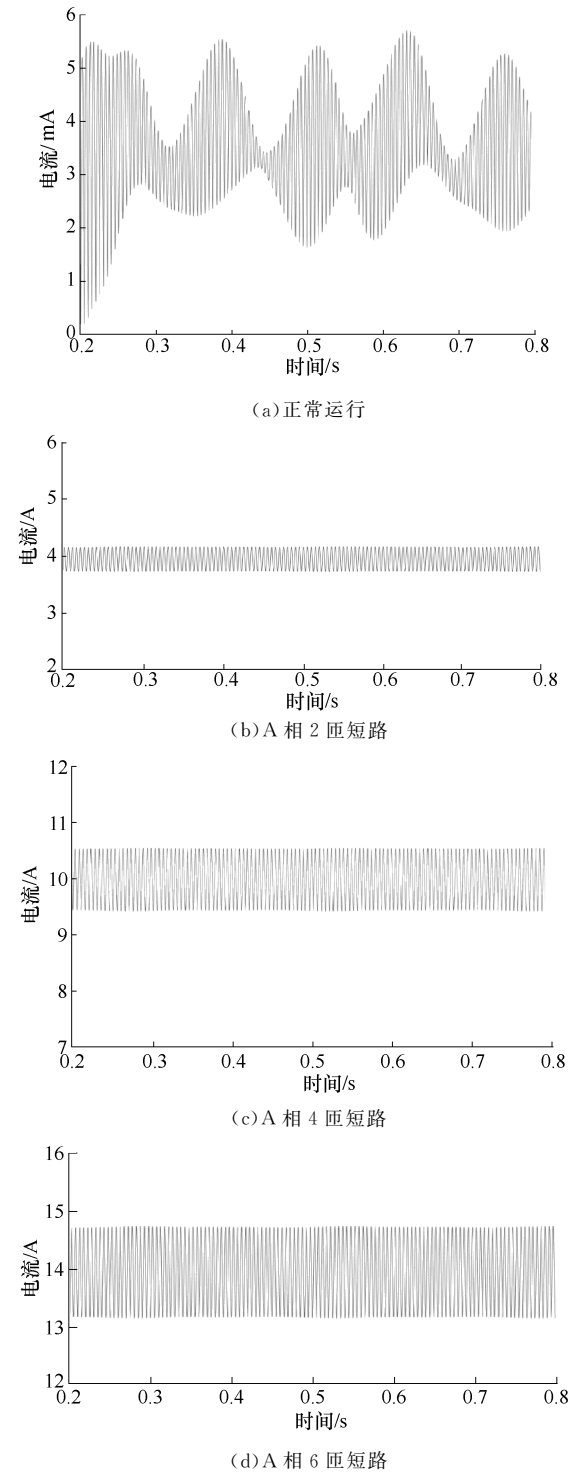


图 5 定子绕组匝间短路故障后负序电流波形

Fig.5 Negative sequence currents under the fault of inter-turn short circuit of stator winding

由图 5 可知,电机正常运行时的负序电流分量几乎为零,而当电机发生定子绕组匝间短路故障后,三相电流产生了较大的负序电流分量.对于单相绕组的匝间短路故障,随着短路匝数的增多,负序电流分量成比例增大.因此,通过计算求解三相电流的负序电流分量,可有效判断电机是否发生定子绕组匝间短路故障.

3 实验验证

为验证系统方案及软件算法,搭建小型三相异步电动机实验台进行实验.根据系统方案设计,需要采集电机的定子电流,因为实验条件有限,故采用 AC220 V 输入,通过 Boost 整流电路转换为 600 V 高压,再通过全桥逆变转换为 AC380 V,频率 50 Hz 的电压,对电机进行供电,电机的实际转速采用转速计获取,实验装置见图 6.

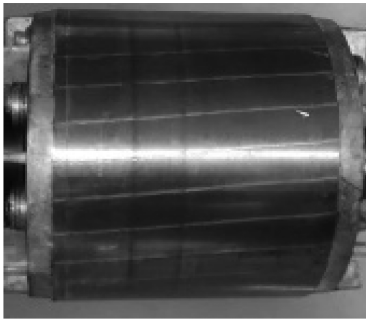


图 6 三相异步电机实验台

Fig.6 Test lanch for three phase asynchronous motor

实验采用的三相异步电机型号为 Y160M-4,其额定电压为 380 V,额定功率为 11 kW,额定转速为 1 440 r/min,极对数为 4,负载为磁粉制动器.将实验电机的转子从电机上拆卸下来,人为制造转子断条故障,如图 7 所示.对上述故障的三相电流数据进行采集及分析,结果如图 8 所示.

结果表明,电机发生转子断条故障时,定子电流频谱图中可在 $(1 \pm 2s)f$ 处观察到明显的峰值,且与仿真计算出来的特征频率较相近(见图 3),较好地验



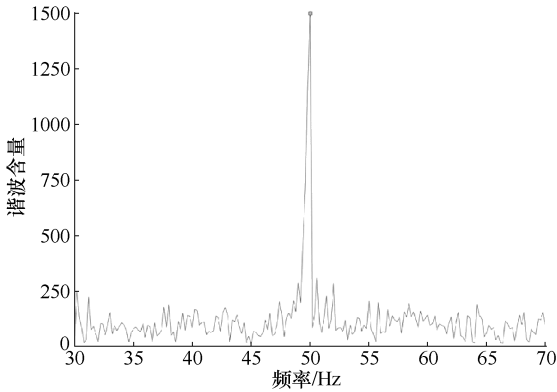
(a) 正常电机转子



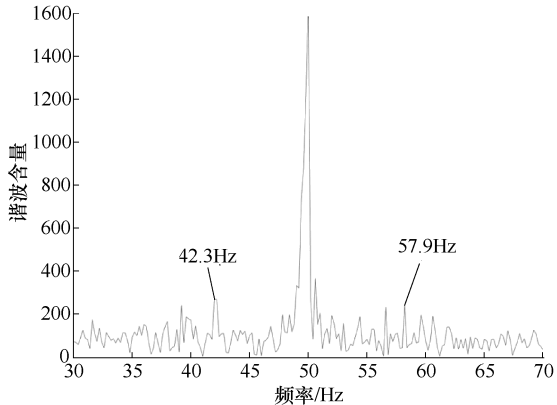
(b)断条故障转子

图 7 异步电机转子断条故障

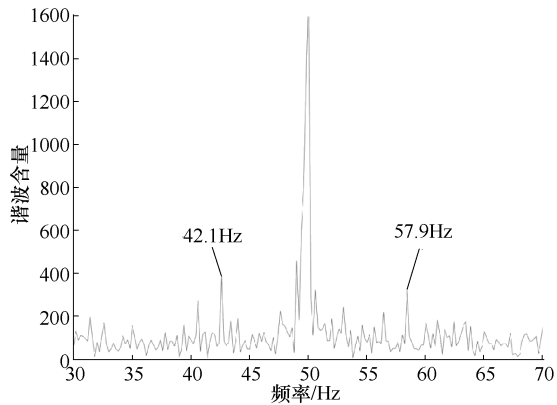
Fig.7 Asynchronous motor with broken rotor bar faults



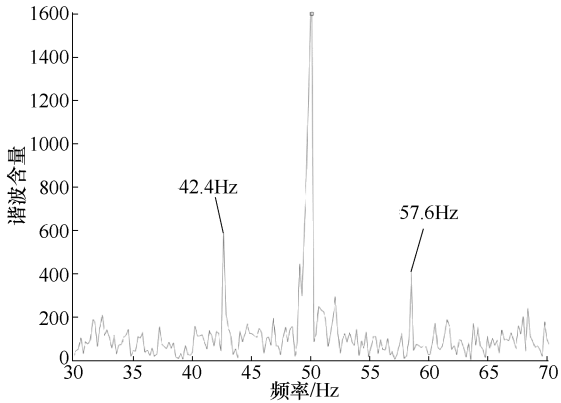
(a)正常运行



(b)1 根断条故障



(c)2 根断条故障



(d)3 根断条故障

图 8 实验时正常运行及转子断条故障后相电流频谱

Fig.8 Current frequency spectrogram of phase current under normal and broken rotor bar fault condition

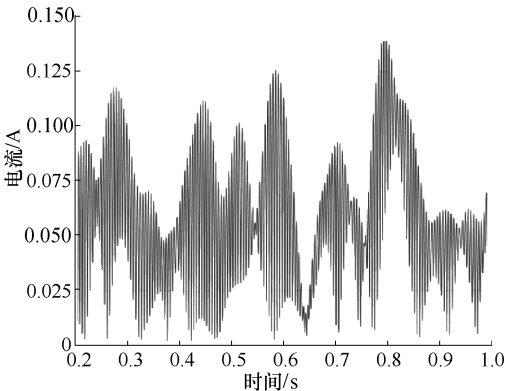
证了转子断条故障模型的有效性和可行性.

人为制造定子绕组匝间短路故障,见图 9.实验结果如图 10 所示,当电机发生定子绕组短路时,匝间短路故障引起定子电流变化,且随故障程度增加,负序电流故障特征分量越为明显,从而验证了定子绕组匝间短路故障模型的有效性和可行性.



图 9 异步电机定子绕组匝间短路

Fig.9 Inter-turn short circuit of stator winding



(a)正常运行