

# 直流微电机电枢电流特性及故障多特征量研究

谢志平<sup>1,2</sup>, 伍卫<sup>1</sup>, 洪剑锋<sup>1</sup>

(1. 厦门大学 物理与机电工程学院 福建 厦门 361005; 2. 贵州师范大学 机械与电气工程学院 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 针对直流微电机生产线上故障检测环节难以自动化的问题, 提出一种基于故障多特征量的直流微电机故障诊断模型。通过分析空载和稳态下直流微电机的动态数学模型, 推导出电枢电流的时域解析式, 确定基于电枢电流的频域故障多特征量。以数台直流微电机为实验样本, 分析其电枢电流时频域特征, 对典型故障直流微电机运用定义的故障多特征量进行故障分析。实验结果表明不同故障电机的多特征量变化率明显不同, 该故障多特征量可以被用来诊断直流微电机。

**关键词:** 直流微电机; 故障诊断; 电枢电流; 多特征量; 频域分析

**DOI:** 10.15938/j.emc.2015.08.016

中图分类号: TP 307

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2015)08-0107-08

## Study on properties of armature current for micro DC motors and multiple features of fault diagnosis

XIE Zhi-ping<sup>1,2</sup>, WU Wei<sup>1</sup>, HONG Jian-feng<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Mechanical & Electrical Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** A fault diagnostic model for the micro direct-current motor (MDCM) was presented, which is used to solve the problem that MDCMs can't be automatically inspected on the production line. The method was based on multiple features of the armature current. The analytical expression for the armature current was obtained from the dynamic model of MDCM under no-load and steady-state operation conditions. The multiple features based on the armature current were confirmed. The experiments on several motors with the representative failures were studied. The time-frequency domain features of the current for the MDCM were analyzed. The fault mechanism were analyzed by using the multiple features mentioned above. The experimental results show that the relative changes of the multiple features in different fault cases are different and the multiple features can be utilized as the fault diagnostic indices.

**Keywords:** micro direct-current motors; fault diagnosis; armature current; multiple features; spectrum analysis

收稿日期: 2014-07-10

基金项目: 福建省科技厅重大项目(2014H6026); 贵州教育厅自然科学基金项目(黔教合KY字(2012)075号)

作者简介: 谢志平(1980—) 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电机故障诊断;

伍卫(1982—) 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电机故障诊断。

洪剑锋(1989—) 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子。

通讯作者: 谢志平

## 0 引言

直流微电机以体积小、重量轻、便于控制等优点被广泛应用于生产消费领域,其性能对系统性能产生重要影响,在微型精密仪器中尤为重要。为了保证产品出厂品质,生产过程必须对直流微电机进行100%检测。目前检测主要依靠人工通过观察电机运行时端电压的波形,依据积累的经验来判断电机的好坏,其工作量大,生产效率低,漏检现象严重,导致电机出厂质量不稳定。因此有必要寻找一种可靠的直流微电机在生产线上故障检测技术。

近年来,国内外学者对电机故障检测与诊断研究较多,其研究重点在大型电机及交流感应电机上<sup>[1-3]</sup>,较少有文献涉及直流微电机的故障诊断,尤其在产品生产线上故障检测。刘向群等使用基于方脉冲函数变换的参数估计法、神经网络和模糊自适应谐振网络对永磁直流电机的故障监测与诊断做了一些研究<sup>[4-5]</sup>。该方法无需电机停机和加载即可进行故障诊断,但需要测量电机电压、电流及转速等几个信号,成本较高。刘曼兰等通过对永磁直流电机的空载动、稳态电枢电流进行分析,提出了基于电流信号的故障特征参数<sup>[6-8]</sup>。但是该作者对直流电机稳定电流的特性未进行深入分析,忽略了直流电机稳定电流的正弦特性。M. A. Awadallah 利用自适应神经模糊推理系统、离散傅里叶变化和短时傅里叶变化对无刷直流电机的电流<sup>[9]</sup>和电压<sup>[10]</sup>进行分析,来诊断定子匝间短路故障。M. Hajiaghajani 通过对直流电机电枢电流分析诊断转子偏心故障<sup>[11]</sup>。但文献[9-11]只分析单一故障。Luis J. de Miguel 采用基于模糊逻辑的决策模块诊断直流电机<sup>[12]</sup>, A. Soualhi 使用改进的人工蚂蚁聚类算法对感应电机进行故障诊断<sup>[13]</sup>。但文献[12-13]所采用智能故障识别技术,在工业上实现较复杂。因此,寻求一种简便的、快速的直流微电机故障诊断方法意义重大。

本文提出一种可应用在产品生产线上的直流微电机故障诊断方法。首先对直流微电机的动态模型求解,到了电枢电流稳定状态的时域解析式,确立了基于电枢电流的频域故障多特征量。对直流微电机生产中最常见的极间阻抗差异、绕组线圈开路、磁铁回路异常和电刷极间短路四种故障运用本文所定义的故障多特征量进行故障特征提取及故障机理分析,实验结果表明该故障多特征量对直流微电机多种故障的诊断具有通用性,且只需采集一个电流参数即可得到全部多特征量参数,为构建一个简便的

直流微电机故障监测与智能诊断系统奠定了理论基础。

## 1 直流微电机电枢电流理论

### 1.1 直流微电机动态电枢电流分析

直流微电机在空载状态下的动态数学模型为<sup>[4]</sup>

$$\left. \begin{aligned} U_a &= e_a + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} \\ T &= T_0 + J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $U_a$  为电枢电压;  $e_a$  为感应电动势;  $i_a$  为电枢电流;  $R_a$  为电枢电阻;  $L_a$  为电枢电感;  $T$  为电磁转矩;  $T_0$  为空载转矩;  $J$  为转动惯量;  $\omega$  为角速度。

其中

$$e_a = C_e \Phi n, \quad (2)$$

$$T = C_T \Phi i_a. \quad (3)$$

式中:  $C_e$  为电动势常数;  $C_T$  为转矩常数;  $\Phi$  为每极磁通量;  $n$  为转速。

直流微电机主要有1对磁极组成的定子和3个绕组线圈组成的转子构成的,其结构示意图如图1(a)所示。当磁极极靴正对转子齿部时,二者之间气隙最大,磁阻亦最大,过线圈的磁通量达到最小值  $\Phi_{\min}$ 。当转子转动半个齿距时,二者之间气隙最小,磁阻亦最小,过线圈的磁通量达到最大值  $\Phi_{\max}$ 。因此,转子连续旋转时,磁通量将周期性变化<sup>[14]</sup>,如图1(b)所示。 $\Phi$  可表达为

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_m \sin \omega t. \quad (4)$$

其中<sup>[15]</sup>

$$\omega = \frac{\pi c k p n}{30}. \quad (5)$$

式中:  $\Phi_0$  为恒定磁通;  $\Phi_m$  为交变磁通幅值;  $k$  为向片数;  $p$  为极对数;  $c$  由换向片数的奇偶所决定的系数,当  $k$  为偶数时  $c=1$ ;  $k$  为奇数时  $c=2$ 。

假设电机角速度恒定( $\frac{d\omega}{dt}=0$ )及不考虑电机转矩对启动电流的影响。由式(1)~式(5)可推出直流微电机的空载电枢电流响应:

$$i_a = C_1 e^{-\frac{R_a}{L_a} t} + I_a + I_{am} \sin\left(\frac{\pi c k p n t}{30} + \varphi_a\right). \quad (6)$$

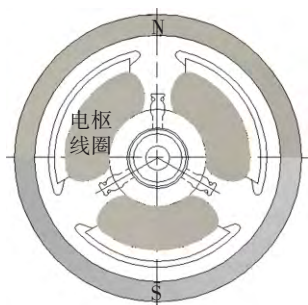
其中

$$I_a = \frac{U_a - C_e n \Phi_0}{R_a}$$

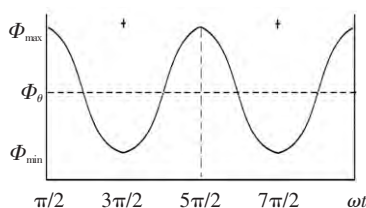
$$I_{am} = \frac{C_e n \Phi_m}{\sqrt{R_a^2 + \frac{1}{900} \pi^2 c^2 k^2 p^2 n^2 L_a^2}}$$

$$\varphi_a = \arctg \frac{-\pi ckpnL_a}{30R_a}$$

式中  $C_1$  为待定系数。由 (6) 可知, 理想状态下, 电枢电流由衰减指数分量、直流分量和正弦分量组成。



(a) 直流微电机结构示意图



(b) 磁通量变化图

图 1 直流微电机图示意

Fig. 1 Graphical representation of the MDCM

电机启动后, 衰减指数分量将很快衰减为 0。因此在电机稳定运行状态下, 电枢电流主要由直流分量和正弦分量组成。式 (6) 可变为

$$i_a = I_a + I_{am} \sin\left(\frac{\pi ckpnt}{30} + \varphi_a\right) \quad (7)$$

在电机实际运行中, 由于各种原因导致电枢电流产生很多谐波, 例如: 由生产导致的各绕组线圈的电感、电阻略有差异; 电刷换向过程中产生的电流跳变; 在高速旋转过程中电刷与整流片接触电阻无规律变化; AD 采样产生的高频干扰。本文把这些影响统一归为噪声电流  $i_n$ , 由于其影响机理复杂,  $i_n$  的值很难确定。因此在实际工况下稳定运行的电机电枢电流  $i(t)$  可表示为

$$i(t) = I_a + I_{am} \sin\left(\frac{\pi ckpnt}{30} + \varphi_a\right) + i_n \quad (8)$$

假设良品电机的电感、电阻和转速分别为  $R_a = R_{a0}$ ,  $L_a = L_{a0}$ ,  $n = n_0$ 。当电机发生故障时, 其电感、电阻和转速也会改变, 设其相应的变化量为  $\Delta R_a$ ,  $\Delta L_a$  和  $\Delta n$ , 则

$$\left. \begin{aligned} R_a &= R_{a0} + \Delta R_a \\ L_a &= L_{a0} + \Delta L_a \\ n &= n_0 + \Delta n \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (8), 忽略  $\varphi_a$  的变化(只关注故障电机的幅频特性), 可得

$$i_{\Delta}(t) = I_{a\Delta} + I_{am\Delta} \sin\left(\frac{\pi ckp(n_0 + \Delta n)t}{30} + \varphi_a\right) + i_n \quad (10)$$

$$I_{a\Delta} = I_{a0} + \frac{\partial I_a}{\partial R_a} \Delta R_a$$

$$I_{am\Delta} = I_{am0} + \frac{\partial I_{am}}{\partial R_a} \Delta R_a + \frac{\partial I_{am}}{\partial L_a} \Delta L_a$$

### 1.2 快速傅里叶变换(FFT)

电枢电流  $i(t)$  的 FFT 变换可表示为

$$F[i(t)] = F[i_a] + F[i_n] \quad (11)$$

将式 (10) 代入式 (11), 可得:

$$\begin{aligned} F[i_{\Delta}(t)] &= F\left[I_{a0} + \frac{\partial I_a}{\partial R_a} \Delta R_a\right] + \\ &F\left[\left(I_{am0} + \frac{\partial I_{am}}{\partial R_a} \Delta R_a + \frac{\partial I_{am}}{\partial L_a} \Delta L_a\right) \sin\left(\frac{\pi ckp(n_0 + \Delta n)t}{30} + \varphi_a\right)\right] + \\ &F[i_n] \end{aligned} \quad (12)$$

为了诊断直流微电机, 将直流分量  $P_{DC}$ 、主频点  $f_m$ 、主频点处的幅值  $P_f$  和带外频谱面积  $A$  定义为故障多特征量, 其物理意义在第 4 部分详细描述, 其中

$$P_{DC} = \left| F\left[I_{a0} + \frac{\partial I_a}{\partial R_a} \Delta R_a\right] \right| \quad (13)$$

$$f_m = \frac{ckp(n_0 + \Delta n)}{60} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P_f &= \left| F\left[\left(I_{am0} + \frac{\partial I_{am}}{\partial R_a} \Delta R_a + \frac{\partial I_{am}}{\partial L_a} \Delta L_a\right) \sin\left(\frac{\pi ckp(n_0 + \Delta n)t}{30} + \varphi_a\right)\right] \right| \end{aligned} \quad (15)$$

$$A = \left| F[i_n] \right| \quad (16)$$

## 2 实验装置及数据获取

### 2.1 实验装置

为了得到直流微电机电枢电流的时频域特征, 搭建了直流微电机的实验装置(见图 2), 其主要由空载的直流微电机、前置放大模块、低通滤波模块和 A/D 模块组成。直流微电机的详细参数见表 1。直流电机由 5V 电源驱动, 并串联了一个采样电阻  $R$  用于测量电枢电流, 采样电阻阻值  $2\Omega$ 。电枢电流经前置放大、低通滤波和 A/D 转换后, 利用 Matlab 对其采集的数字信号进行 FFT 变换, 可得到电枢电流

的幅频特性。采用低通滤波主要是为了去除换向过程中电枢电流叠加的一个高频尖峰信号。

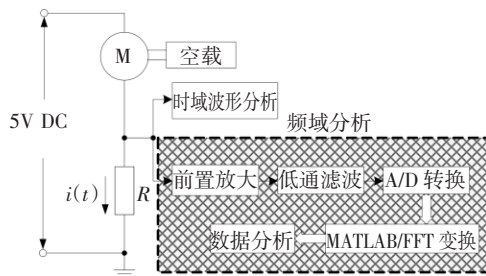


图2 实验系统框架图

Fig. 2 Overall system block diagram

表1 直流微电机的参数

Table 1 Parameters of MDCM

| 参数                  | 数值           |
|---------------------|--------------|
| 额定电压/V              | 5.0 DC       |
| 工作电压范围/V            | 1.5 ~ 9.0 DC |
| 额定转矩/N·m            | 0.001 5      |
| 空载转数(额定电压下)/(r/min) | 6 050 ± 650  |
| 空载电流/mA             | 50 max       |

## 2.2 实验设计

对厦门达真电机有限公司生产线上常出现的4种故障进行研究,选取良品电机和每种故障电机各8个为实验样本,其故障电机的详细描述见表2。实验中,为减小泄泄漏采用矩形窗对信号截断,其采样频率设定为40 960 Hz,以满足奈奎斯特采样定理要求,采样点数设置为1 024,因此频谱分辨率的分辨率为40 Hz。通过比较良品电机和故障电机的频域特征,提出故障多特征量。

表2 故障类型及故障方案描述

Table 2 Fault types and injection methods

| 故障编号 | 故障类型   | 故障方案描述                      |
|------|--------|-----------------------------|
| AS   | 极间阻抗差异 | 将良品电机的某一绕组线圈去除62匝线圈(占匝数15%) |
| WG   | 绕组线圈开路 | 将良品电机的某一绕组线圈开路              |
| MD   | 磁铁回路异常 | 磁密非正弦                       |
| S    | 电刷极间短路 | 电刷相接触                       |

设计了2个不同的实验。第一个实验,为了验证直流电机电枢电流解析式(8)的正确性,观察了电机

电枢电流的时域波形;第二个实验,为提取直流微电机故障多特征量,采集了直流微电机的频谱特征。

## 3 电枢电流时域特征

图3为直流微电机的电枢电流时域波形(图中数据未除前置放大倍数)。由图3(a)可知稳定的直流微电机电枢电流时间响应由直流分量和正弦分量构成。良品电机电枢电流波形是规则平滑的正弦波,且各个正弦波的周期基本一致,而生产工艺导致的各个电枢线圈参数略有不同造成其正弦分量的峰-峰值稍有差异。图3(b)~(e)为直流微电机几种典型故障电枢电流时域波形图,从图中可以看出,不同的故障导致了正弦分量有较大的畸变。图3(b)为极间阻抗差异电机电枢电流波形图,极间阻抗差异是指电机电枢线圈之间的阻值和电感出现偏差,各电枢线圈阻值和电感不同导致电枢电流不同周期正弦幅值发生明显变化。图3(c)为绕组线圈开路电机电枢电流波形图,绕组线圈开路是指电机绕组中有某一组线圈出现断线,当这组断线线圈单独成为支路时,其电枢电阻增大2倍左右,因此其电枢电流波形表现为二大波一小波。图3(d)为磁铁回路异常电机电枢电流波形图,磁铁回路异常是指电机磁铁充磁异常,其电枢电流波形畸变严重,其正弦周期发生变化。图3(e)为电机内部短路,其电枢电流为恒定值,波形呈直线。

由图3可知,电枢电流可以很好地反映电机的工作状态,故障电机的电枢稳态电流波形与良品电机存在明显差异,现企业采用此方法进行人工质量分检。但是基于电枢电流时域特征的故障诊断在硬件和软件上较难实现,因此下文对电枢电流信号进行频谱分析。

## 4 故障特征量及故障机理分析

### 4.1 良品电机电枢电流频域特征

直流微电机的频谱数据未除以前置放大倍数。由图4可知,在频点0 Hz处有一个直流分量,在频点640 Hz处有一个峰值,表明电枢电流的主要能量集中在直流分量与正弦分量的频点上,而与良品电机的能量主要集中在直流分量和正弦分量结论一致。正弦分量的频率与电机转速成正比,由式(5)知, $f = ckpn/60$ ,而良品电机转速5 400 ~ 6 700 r/min(表1),则 $f$ 的范围为[540, 670],频点640 Hz在 $f$ 的范围之内,因此将幅值最大处的频率(0 Hz除外)定义为主频点 $f_m$ , 0 Hz和 $f_m$ 处的幅值分别定义为直流分量 $P_{DC}$ 和主频点幅值 $P_f$ 。

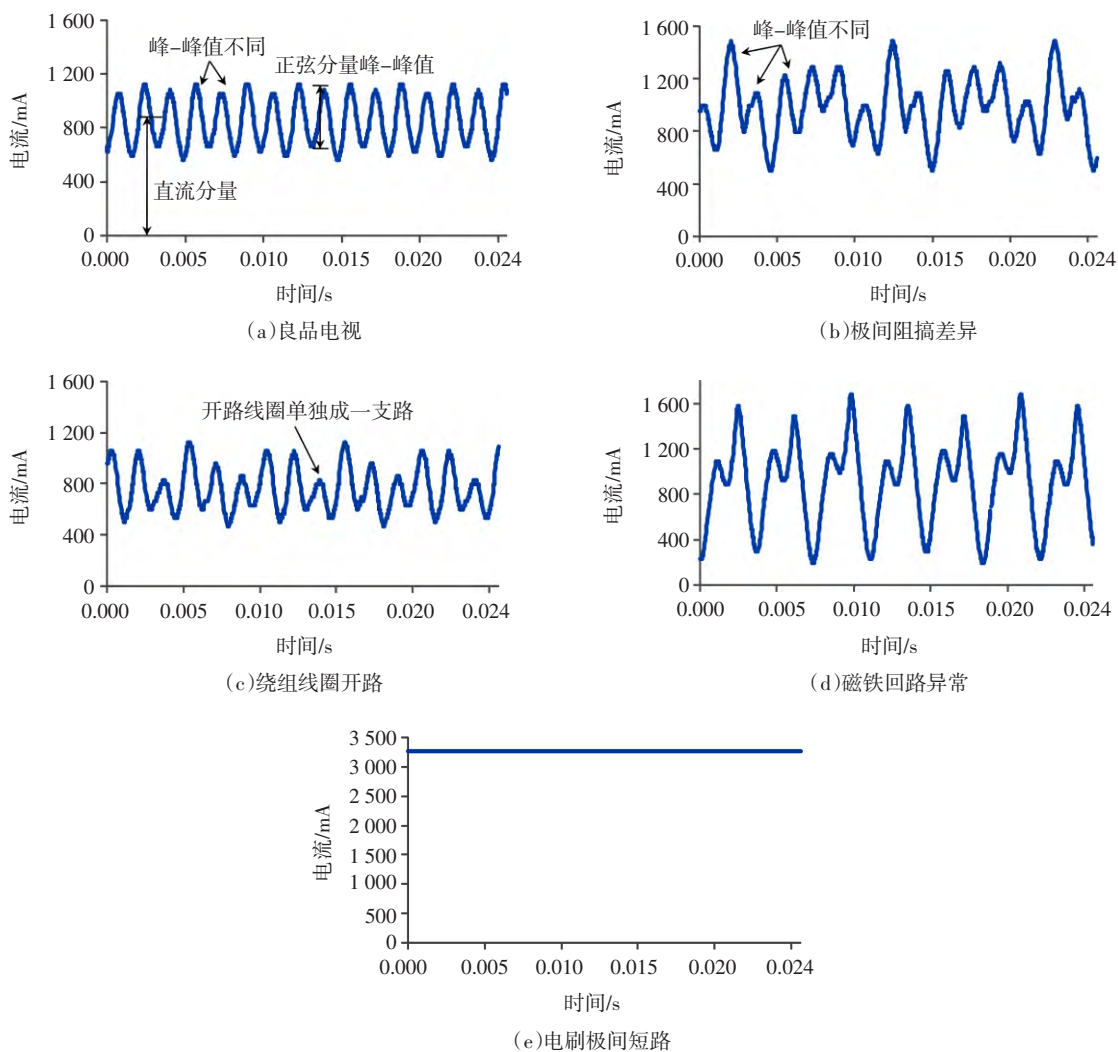


图 3 直流微机电枢电流的波形图

Fig. 3 Waveform of armature current for the MDCM

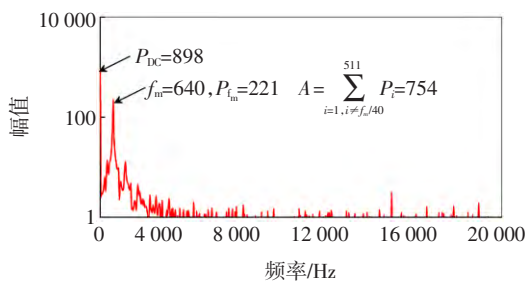


图 4 良品电机的频谱曲线

Fig. 4 Amplitude spectrum curve of the healthy MDCM

对于一个良品直流微电机而言,电枢电流的正弦分量能量基本上集中在主频点上。但图 4 显示还有能量分布在其他频点上,其可能的原因: 1) 电机的各绕组线圈并非是完全平衡的,各组线圈的电感、电阻略有差异; 2) 电刷过渡过程产生的电流跳变; 3) 在高速旋转过程中电刷与整流片接触电阻无规律变化; 4) 其他信号干扰。

通过对直流微机电枢电流的频谱数据统计分析,将直流分量  $P_{DC}$ 、主频点  $f_m$ 、主频点处的幅值  $P_f$  和带外频谱面积  $A$  确定为直流微电机故障诊断的多特征量,具体如下描述。

1)  $P_{DC}$  0 Hz 频点处的幅值,其反映电机电枢电流直流分量是否偏离正常值,对开路和短路的故障电机反映敏感。

2)  $f_m$  幅值最大处的频点(除 0 Hz),其反映电机转速是否正常。

3)  $P_f$  主频点  $f_m$  处的幅值,其反应电机电枢电流正弦分量幅值是否正常,良品电机电枢电流正弦分量的能量主要集中在此处。

4)  $A$   $A = \sum_{i=1, i \neq f_m/40}^k P_i$ ,即除了主频点  $f_m$  以外各点频谱幅值之和,其中  $P_i$  为每一频点对应的频谱幅值  $k$  为样本数。该参数表明电机电枢电流能量在频点  $f_m$  以外的分布情况,故障电机由于正弦分量会

发生较大的畸变,因此  $A$  值一般都比良品电机大。

对 8 个不同良品电机编号设为 OK1 ~ OK8。表 3 为 8 个不同良品电机的故障多特征量值,其中  $P_{DC}$ 、 $P_f$  和  $A$  波动稍大,由于直流微电机是一个比较复杂的对象,它的故障多特征量值具有一定的分散性和随机性。

表 3 良品电机电枢电流多特征量值

Table 3 Multiple features of armature current for the healthy MDCM

| 样品号 | $P_{DC}$ | $f_m$ /Hz | $P_f$ | $A$ |
|-----|----------|-----------|-------|-----|
| OK1 | 898      | 640       | 221   | 754 |
| OK2 | 987      | 600       | 190   | 837 |
| OK3 | 816      | 640       | 169   | 807 |
| OK4 | 786      | 640       | 167   | 802 |
| OK5 | 815      | 600       | 169   | 632 |
| OK6 | 813      | 640       | 195   | 879 |
| OK7 | 825      | 640       | 200   | 767 |
| OK8 | 822      | 640       | 230   | 752 |
| 均值  | 845      | 630       | 193   | 779 |

4.2 故障电机频域特征及故障机理分析

极间阻抗差异是由于生产工艺譬如绕线匝数变化、绕线机张紧力变化和极靴材料的缺陷,还有漆膜划伤或擦伤导致的匝间短路而造成 3 个电枢线圈的电阻和电感有差异,导致电枢电流正弦幅值发生明显变化。将 8 个良品电机的某一绕组线圈去除 62 匝线圈(占该绕组线圈匝数的 15%)。按照表 2 的故障类型编号,分别对 8 个不同极间阻抗差异的故障电机设为 AS1 ~ AS8。8 个极间阻抗差异故障电机的故障多特征量值和样品号为 AS1 的故障电机的电枢电流频谱曲线图见表 4 和图 5。与良品电机相比,图 5 中的直流分量大于良品电机的,其带外频谱面积大于良品电机的。

表 4 极间阻抗差异电机电枢电流多特征量

Table 4 Multiple features of armature current for AS motor

| 样品号 | $P_{DC}$ | $f_m$ /Hz | $P_f$ | $A$   |
|-----|----------|-----------|-------|-------|
| AS1 | 985      | 600       | 215   | 1 302 |
| AS2 | 734      | 600       | 131   | 1 266 |
| AS3 | 1305     | 560       | 212   | 1 364 |
| AS4 | 867      | 600       | 191   | 1 199 |
| AS5 | 974      | 600       | 228   | 1 391 |
| AS6 | 1 025    | 560       | 173   | 1 132 |
| AS7 | 832      | 560       | 165   | 1 293 |
| AS8 | 997      | 560       | 206   | 1 478 |
| 均值  | 965      | 580       | 190   | 1 303 |

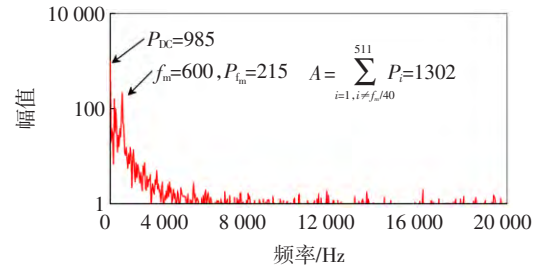


图 5 极间阻抗差异电机的频谱曲线

Fig. 5 Amplitude spectrum curve of the MDCM for AS

绕组线圈开路故障是微电机的常见生产故障之一,断线部位大多是电枢线圈与换向片焊接处。将 8 个不同的良品电机的绕组线圈中一组破坏为开路。按照表 2 的故障类型编号,分别对 8 个绕组线圈开路的故障电机设为 WG1 ~ WG8。8 个绕组线圈开路故障电机的故障多特征量值和样品号为 WG1 的故障电机的电枢电流频谱曲线图见表 5 和图 6。

表 5 绕组线圈开路电机电枢电流多特征量

Table 5 The multiple features of armature current for WG motor

| 样品号 | $P_{DC}$ | $f_m$ /Hz | $P_f$ | $A$   |
|-----|----------|-----------|-------|-------|
| WG1 | 757      | 600       | 203   | 776   |
| WG2 | 675      | 600       | 154   | 813   |
| WG3 | 556      | 560       | 153   | 848   |
| WG4 | 639      | 600       | 148   | 781   |
| WG5 | 736      | 600       | 188   | 1 014 |
| WG6 | 516      | 600       | 219   | 912   |
| WG7 | 688      | 560       | 202   | 876   |
| WG8 | 711      | 600       | 228   | 803   |
| 均值  | 660      | 590       | 187   | 853   |

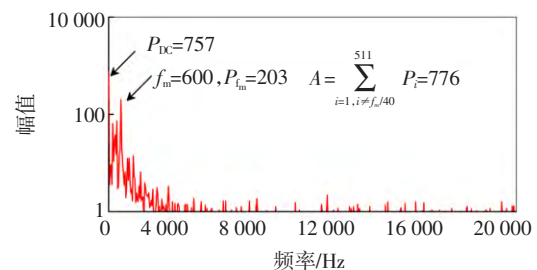


图 6 绕组线圈开路电机的频谱曲线

Fig. 6 Amplitude spectrum curve of the MDCM for WG

从图 6 可知,绕组线圈开路电机的直流分量小于良品电机的,而其主频点也在良品电机主频点范围之内,主频点幅值  $P_f$  与良品电机的主频点幅值相近。当电枢绕组中的一个线圈开路,则其并联支路数减少一条,仅剩一条支路,其电枢电阻必然增大,

如其他电磁参数未发生改变, 仅有电枢电阻  $R_a$  增大, 必然使电枢电流减小。其实验与理论分析相符。

磁铁回路异常是由磁极不对称引起的, 如定子永磁体生产过程中充磁电流过大或过小和永磁体材料的缺陷而导致磁密非正弦分布; 齿槽效应以及极弧系数的选取不同, 也会导致气隙磁密非正弦分布。磁铁回路异常故障会使微电机性能出现很明显的下降, 电流增大, 严重的会不能驱动负载。由于实验条件限制, 8 个磁铁回路异常故障电机来源于厦门达真电机有限公司生产线上的故障电机。按照表 2 的故障类型编号, 分别对 8 个磁铁回路异常的故障电机设为 MD1 ~ MD8。8 个磁铁回路异常故障电机的故障多特征量值和样品号为 MD2 的故障电机的电枢电流频谱曲线图见表 6 和图 7。图 7 表明磁铁回路异常的直流分量和主频点幅值大于良品电机, 而且主频点小于良品电机, 在低频能量集中较多, 说明电枢电流畸变严重。

表 6 磁铁回路异常电机电枢电流频域多特征量

Table 6 Multiple features of armature current for MD motor

| 样品号 | $P_{DC}$ | $f_m / \text{Hz}$ | $P_f$ | $A$   |
|-----|----------|-------------------|-------|-------|
| MD1 | 1 033    | 280               | 358   | 1 018 |
| MD2 | 913      | 280               | 407   | 1 182 |
| MD3 | 966      | 280               | 374   | 1 226 |
| MD4 | 1 096    | 280               | 409   | 1 254 |
| MD5 | 1 123    | 280               | 355   | 1 637 |
| MD6 | 1 052    | 280               | 387   | 1 329 |
| MD7 | 1 030    | 280               | 384   | 1 388 |
| MD8 | 948      | 280               | 410   | 876   |
| 均值  | 1 020    | 280               | 386   | 1 251 |

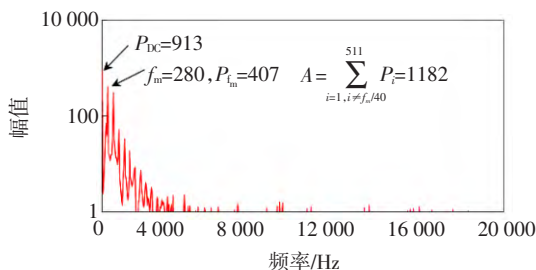


图 7 磁铁回路异常电机的频谱曲线

Fig. 7 Amplitude spectrum curve of the MDCM for MD

直流微电机的电刷极间短路是指电机的正极和负极短接, 在生产线上由于两电刷相接触或换向器相接(焊锡掉入换向器间隙)而导致电机短路。将 8 个不同良品电机的电刷相接触作为短路故障电机。8 个短路电机的  $P_{DC}$  值均为 3 267, 其他多特量均为 0

(省略短路电机电枢电流频域多特征量表)。图 8 表明直流微电机短路时, 其能量全部集中于直流分量, 其他特征量均为 0。

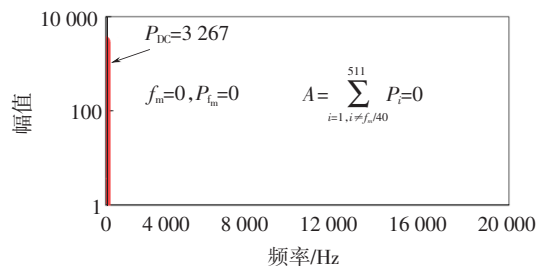


图 8 短路电机的频谱曲线

Fig. 8 Amplitude spectrum curve of the MDCM for S

### 4.3 多特征量变化率

不同故障的多特征量值差别较大, 为了解不同故障电机多特征量之间的相互关联度, 因此, 定义变化率  $\varepsilon_i$  为

$$\varepsilon_i = \frac{\bar{m}_i - m_{hi}}{m_{hi}} \quad i = P_{DC}, f_m, P_f, A \quad (17)$$

式中:  $\bar{m}_i$  表示每种故障电机第  $i$  个多特征量均值;  $m_{hi}$  表示良品电机第  $i$  个多特征量均值, 每种故障电机多特征量的变化率见表 7 和图 9。

表 7 故障电机多特征量变化率

Table 7 Relative changes of multiple features for the faulty motor

| 故障编号 | $\varepsilon_{P_{DC}}$ | $\varepsilon_{f_m}$ | $\varepsilon_{P_f}$ | $\varepsilon_A$ |
|------|------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| AS   | 0.142 0                | -0.079 4            | -0.015 5            | 0.672 7         |
| WG   | -0.218 9               | -0.063 5            | -0.031 1            | 0.095 0         |
| MD   | 0.207 1                | -0.555 6            | 1.000 0             | 0.605 9         |
| S    | 2.866 3                | -1.000 0            | -1.000 0            | -1.000 0        |

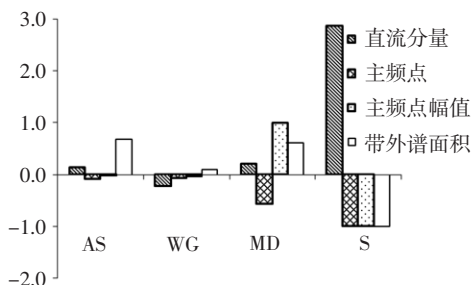


图 9 故障电机多特征量变化率

Fig. 9 Relative changes of multiple features for the faulty motor

从表 7 和图 9 可知, 不同故障电机的  $P_{DC}$ ,  $f_m$ ,  $P_f$  和  $A$  多特征量变化率明显不同。故障 AS 由于 3 个电枢线圈阻值和电感不一致, 它的  $\varepsilon_A$  变化大些, 其

他多特征量也不同程度的发生改变,但相对不明显。故障 WG 由于某一线圈开路,电枢电阻增大,电枢电流减小,它的  $\varepsilon_{P_{DC}}$  变化较大,其他多特征量变化率不明显。故障 MD 由于充磁异常,频点漂移,波形畸变严重,它的  $\varepsilon_{f_m}$  和  $\varepsilon_{P_f}$  变化大,大于故障 AS 和 WG 的  $\varepsilon_A$  变化较大,但小于故障 AS 的,其他多特量的变化率相比较小。故障 S 由于短路,其电枢电流只有直流分量,其他多特量值为 0,它的  $\varepsilon_{P_{DC}}$  在 4 种故障里变化最大,其他的变化率为 100%。因此,通过比较故障电机和良品电机的多特征量即可诊断电机的故障。

## 5 结 论

直流微电机在空载和稳定运行状态下,其电枢电流只存在直流分量和正弦分量。不同故障直流微电机的电枢电流在正弦分量发生不同畸变。直流微电机电枢电流的频谱中包含了  $P_{DC}$ 、 $f_m$ 、 $P_f$  和 A 故障多特征量,而不同故障电机的多特征量变化率明显不同,通过比较故障电机与良品电机的多特征量阈值,即可判断电机的故障类型。

### 参 考 文 献:

- [1] GRITLI Y, ZARRI L, FILIPPETTI F, CAPOLINO G A. Advanced diagnosis of electrical faults in wound-rotor Induction machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 4012-4024.
- [2] 朱景伟,刁亮,任宝珠. 具有冗余特性的永磁容错电机短路故障分析与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 80-86.  
ZHU Jingwei, DIAO Liang, REN Baozhu. Analysis and control of short-circuit fault in a fault-tolerant permanent magnet motor drive with redundancy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 80-86.
- [3] GILBERT H B F, ZHANG X N, VILATHGAMUWA D M. A sensor fault detection and isolation method in interior permanent-magnet synchronous motor drives based on an extended kalman filter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3485-3495.
- [4] LIU X Q, ZHANG H Y, LIU J, et al. Fault detection and diagnosis of permanent-magnet DC motor based on parameter estimation and neural network [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(5): 1021-1030.
- [5] 杨静,刘向群,张洪钺. 基于参数估计和 Fuzzy ARTMAP 的直流电动机故障诊断[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(3): 284-288.  
YANG Jing, LIU Xiangqun, ZHANG Hongyue. Fault diagnosis of DC motor based on parameter estimation and fuzzy ARTMAP [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(3): 284-288.
- [6] 刘曼兰,于海芳,崔淑梅. 一种永磁直流电机故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 42-48.  
LIU Manlan, YU Haifang, CUI Shumei. An universal approach to diagnose the failures of permanent-magnetic DC motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 42-48.
- [7] 刘曼兰,呼向东,崔淑梅. 永磁直流电机故障诊断中电流信号分析与处理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(6): 836-838, 844.  
LIU Manlan, HU Xiangdong, CUI Shumei. Current signal analysis and process used in fault diagnosis of permanent-magnetic DC motor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(6): 836-838, 844.
- [8] 刘曼兰,崔淑梅. 永磁直流电机绕组脱焊故障在线诊断与分析[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(4): 430-434.  
LIU Manlan, CUI Shumei. Online diagnosis and analysis on failure of loose weld coils to permanent-magnetic DC motors [J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(4): 430-434.
- [9] AWADALLAH M A, MORCOS M M. Adaptive-fuzzy-based stator-winding fault diagnosis of PM brushless DC motor drive by monitoring supply current [J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(12): 46-49.
- [10] AWADALLAH M A, MORCOS M M. Diagnosis of stator short circuits in brushless DC motors by monitoring phase voltages [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(1): 246-247.
- [11] HAJIAGHAJANI M, TOLIJAT H A, PANAHI I M S. Advanced fault diagnosis of a DC motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 60-65.
- [12] DEMIGUEL L J, BLAZQUEZ L F. Fuzzy logic-based decision-making for fault diagnosis in a DC motor [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2005, 18(4): 423-450.
- [13] SOUALHI A, CLERC G, RAZIK H. Detection and diagnosis of faults in induction motor using an improved artificial ant clustering technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 4053-4062.
- [14] 陈峻峰. 永磁电机: 下册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [15] 黄进,黄建华. 基于小波分析的直流电机转矩-转速特性测试 [J]. 中小型电机, 2001, 28(2): 49-53.  
HUANG Jin, HUANG Jianhua. Measurement of DC motor torque-speed characteristic based on wavelet analysis [J]. S&M Electric Machines, 2001, 28(2): 49-53.

(编辑: 刘素菊)