

# 感应电机轴承故障的定子电流方法分析

李运红<sup>1</sup>, 张湧涛<sup>2</sup>

(1. 河北理工大学 机械工程学院, 河北 唐山 063009; 2. 河北理工大学 计算机与自动控制学院, 河北 唐山 063009)

**摘 要:** 定子电流信号分析法是一种非侵入式的电机轴承故障检测方法, 相对轴承振动信号分析法, 定子电流信号更易提取, 方法更加简捷、实用。通过对轴承常见表面损伤类故障造成的转子轴径向运动的分析, 得出了新的定子电流谐波表达式。经过试验验证, 证明了通过定子电流检测感应电机轴承故障的可行性和有效性。

**关键词:** 电机轴承; 故障检测; 定子电流

**中图分类号:** TH133.33; TP39 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-0794(2009)04-0204-03

## Analysis of Stator Current Method for Bearing Faults in Induction Motors

LI Yun-hong<sup>1</sup>, ZHANG Yong-tao<sup>2</sup>

(1. Mechanical Engineering College Hebei Polytechnic University Tangshan 063009, China)

(2. Computer and Automation Control College Hebei Polytechnic University Tangshan 063009, China)

**Abstract:** Stator current signature analysis is a non-intrusive approach to inspect bearing faults in induction motors. Relative to the vibration signature analysis method, stator current signature is relative readily measured for motor protection. So the simple and convenient more. Through the analysis of the radial movement resulting from damaged bearing, a new expression for additional frequencies in the current has been made. The feasibility and adaptability are proved by a verification experiment.

**Key words:** motor bearing; fault detection; stator current

### 0 引言

感应电机由于其结构简单、可靠性高、实用性强而被广泛应用于工业生产中。而轴承在感应电机的可靠性中扮演了非常重要的角色, 感应电机很多故障的出现都与轴承故障有关, 其故障发生率约为40%。作为感应电机主要支承形式的滚动轴承, 其故障诊断的方法有多种。振动监测是检测电机轴承故障的可靠方法, 由于对关键信号的直接测量以及振动传感器的安放, 使振动数据同时包含了故障信号和突变故障特征。在电机上安装传感器有时不太现实, 尤其是那些大量使用电机的设备。文献[2]提出了利用定子电流监测法检测电机轴承故障的方法, 定子电流信号监测方法采用非侵入性传感器采集电机定子电流信号, 再对电流信号作频谱分析, 来识别电机轴承故障。

### 1 电机轴承典型故障及其特征频率

滚动轴承在运行过程中出现的故障可分为表面损伤类故障和磨损类故障。在正常使用情况下, 滚动轴承工作表面磨损经历时间较长, 是一种渐变性故障, 而由于发生点蚀、剥落和擦伤等故障而造成的表面损伤类故障是监测分析的对象。滚动轴承主要由外圈、内圈、滚动体和保持架(使滚动体均匀分布)组成。滚动轴承是电机转子与定子间的连接部件, 电机转子轴的回转, 使滚动体在内、外圈之间滚动。其故障主要表现为: 外圈故障、内圈故障和滚动体故障等。

当轴承出现不同类型的故障时, 将产生不同周期性冲击, 这些冲击的频率即为滚动轴承的故障特征频率。

轴承外圈故障特征频率

$$f = \frac{z}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (1)$$

轴承内圈故障特征频率

$$f = \frac{z}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (2)$$

轴承滚动体故障特征频率

$$f = \frac{D}{d} \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha \right) \quad (3)$$

式中  $z$ ——轴承滚动体数;

$f$ ——电机转速;

$d$ ——轴承滚动体直径;

$D$ ——轴承节径;

$\alpha$ ——接触角。

### 2 定子电流特征频率分析

当轴承的外圈、内圈或滚动体表面出现缺损时, 随着电机轴的旋转, 缺损将和轴承其他零件产生接触, 使轴心产生径向运动, 电机定子和转子之间的气隙长度发生变化, 从而导致磁场的变化, 产生感应电压使定子电流发生变化。

(1) 气隙长度变化

当感应电机轴承正常时, 电机气隙可以被看作是均匀的, 为定值  $g_0$ 。

当轴承外圈出现缺损, 而滚动体与缺损却没有接触时, 轴心正好居中, 这时, 如果忽略定、转子开槽的影响, 电机的气隙长度为  $g_0$ 。随着电机的旋转, 滚动体会和缺损部位发生接触, 这将使转子轴产生微小的径向运动如图1所示, 气隙长度近似为

式中  $g_o(1 - e_o \cos \theta)$   
 $e_o$  —— 轴承外圈缺损时的相对偏心率;  
 $\theta$  —— 定子上某点与定子参考轴之间的夹角。

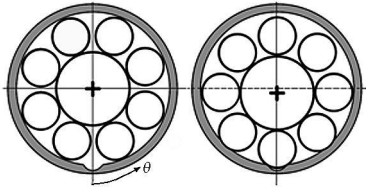


图 1 轴承外圈缺损

为了更准确地研究轴承发生故障时气隙长度的变化情况,可以像文献 [3]那样引入单位脉冲函数  $\delta(t)$ 来构造滚动轴承元件表面有单个损伤点的理论模型。

当轴承外圈出现缺损时,电机的气隙长度可表示为

$$g_o(\theta, t) = g_o \left[ 1 - e_o \cos(\theta) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(t - \frac{k}{f}\right) \right] \tag{4}$$

同样,轴承内圈缺损时,电机气隙长度

$$g_i(\theta, t) = g_o \left[ 1 - e_i \cos(\theta + \omega_r t) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(t - \frac{k}{f}\right) \right] \tag{5}$$

式中  $\omega_r$  —— 电机轴的角频率;  
 $e_i$  —— 轴承内圈缺损时的相对偏心率。

滚动体出现缺损时,电机气隙长度

$$g_b(\theta, t) = g_o \left[ 1 - e_b \cos(\theta + \omega_{cage} t) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(t - \frac{k}{f}\right) \right] \tag{6}$$

式中  $\omega_{cage}$  —— 保持架旋转角频率;  
 $e_b$  —— 轴承滚动体缺损时的相对偏心率。

综上,可概括出轴承出现故障时,感应电机气隙长度

$$g(\theta, t) = g_o \left[ 1 - e \cos[\theta + \psi(t)] \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(t - \frac{k}{f}\right) \right] \tag{7}$$

式中  $f$  —— 由式 (1)、式 (2)、式 (3)确定的轴承故障特征频率。

$$\psi(t) = \begin{cases} 0 & \text{外圈缺损} \\ \omega_r t & \text{内圈缺损} \\ \omega_{cage} t & \text{滚动体缺损} \end{cases} \tag{8}$$

(2)气隙磁导

轴承发生故障时,气隙磁导

$$\Lambda(\theta, t) = \frac{\mu / g_o}{\left[ 1 - e \cos[\theta + \psi(t)] \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(t - \frac{k}{f}\right) \right]} \tag{9}$$

式中  $\mu$  —— 气隙的磁导率。

由于  $|x| < 1$  时,  $\frac{1}{1-x} \approx 1+x$  而  $|e| < 1$ , 同时,  $\delta$  函数可展为傅里叶级数形式

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(t - \frac{k}{f}\right) = f + 2f \sum_{k=1}^{+\infty} \cos(2\pi k f t) \tag{10}$$

因此,气隙磁导

$$\Lambda(\theta, t) \approx \frac{\mu}{g_o} \left\{ 1 + e f \cos[\theta + \psi(t)] + e f \sum_{k=1}^{+\infty} \cos[\theta + \psi(t) \pm k \omega_c t] \right\} \tag{11}$$

(3)气隙磁通密度

假设感应电机极对数为  $p$  只考虑基波磁动势的情况下,故障轴承气隙磁通密度

$$B_{\omega t}(\theta, t) = B_0 \cos(p\theta - \omega_s t + \varphi) + B_1 \sum_{k=0}^{+\infty} \cos[(p \pm 1)\theta \pm k \omega_c t - k \omega_s t + \varphi] \tag{12}$$

由式 (12)可见,电机轴承发生故障时,气隙磁场中不仅存在基波,还有其他高次谐波。这些谐波的频率含量

$$f_{cc} = \frac{1}{2\pi} \left[ \pm \frac{d\psi(t)}{dt} \pm d\omega_c - \omega_s \right] \tag{13}$$

(4)定子电流

由于谐波磁通密度为单位面积上所通过的谐波磁通  $\phi(\theta, t)$ 的大小,综合考虑电机的线圈、几何形状,定子的每一相都会产生谐波磁通。在定子电压的作用下,磁通随着时间的变化而变化,于是在定子电流中感应出相应的电流谐波,其关系如下

$$V_m(t) = R I_m(t) + \frac{d\phi_m(t)}{dt} \tag{14}$$

假设定子中每相磁通的频率含量与式 (13)所确定的气隙磁场的频率含量是相同的,从而可以得出定子电流

$$I_m(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} I_k \cos[\pm \psi(t) \pm k \omega_c t - \omega_s t + \varphi_m] \tag{15}$$

由于电机轴承故障而导致的转子径向运动使定子电流中感应出了谐波频率。对应于 3 种不同的轴承故障类型,综合式 (8)、式 (15),可得电机轴承故障造成的电流谐波的特征频率表达式为

$$\text{外圈缺损} \quad f_{cc \text{ or}} = f \pm k f \tag{16}$$

$$\text{内圈缺损} \quad f_{cc \text{ ir}} = f \pm f \pm k f \tag{17}$$

$$\text{滚动体缺损} \quad f_{cc \text{ ball}} = f \pm f_{cage} \pm k f \tag{18}$$

3 应用实例

(1)方案实施

以上系统设计的方案在实验室利用 DRDAQ—USB 型集成式 USB 接口数据采集仪、电流传感器、计算机等设备,在 DRV I 快速可重组虚拟仪器平台下,通过对电机滚动轴承不同类型故障的诊断得以验证。

数据采集仪提供 8 通道的模拟信号输入, 2 通道的模拟信号输出, 12 Bit 分辨率, 最高 400 kHz 采样频率。电机采用 Y132M—4 型感应电动机, 该电机同步转速为 1 500 r/min ( $f=25$  Hz)。电机轴承型号为 6308—2RS 滚动体数目  $z=8$  滚动体直径  $d=25$  mm, 节径  $D=65$  mm, 接触角  $\alpha=0^\circ$ 。

本实验准备了 4 个同型号的轴承,分别采集正常、外圈故障、内圈故障以及滚动体故障的定子电流。

根据式 (2)可算出轴承内圈缺损时的振动特征频率  $f_i=138\text{ Hz}$  将其代入式 (17),可获得轴承内圈缺损时定子电流特征频率,如表 1 所示。

表 1 定子电流频谱值

特征频率 $f_{\text{ecc ir}}/\text{Hz}$	276 $2f_i$	275 $5f_s+f_i$	301 $f_s-f_i+2f_i$	325 $7f_s-f_i$
无故障时定子 电流频谱 /dB	-37	-32.2	-40.7	-28.6
内圈缺损定子 电流频谱 /dB	-31.7	-27	-34.5	-23.7

图 2 为无故障时定子电流频谱图,图 3 为内圈有缺损时定子电流频谱图。根据图 2 与图 3 的对比分析以及表 1 中的数据,可以看出,感应电机轴承内圈出现缺损时,将会引起表 1 所计算的特征频率分量的增加。因此,监测由式 (16)、式 (17)、式 (18) 计算出的电机定子电流特征频率分量的变化,便可对电机轴承故障进行识别和诊断。

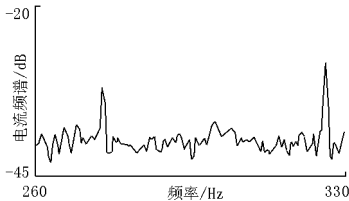


图 2 轴承正常时定子电流频谱

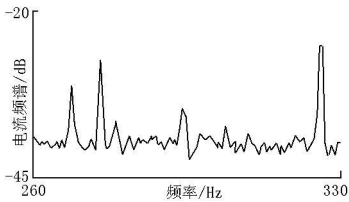


图 3 内圈缺损时定子电流频谱

(2) 仿真验证

不同工况下得到的电机定子电流信号,经 3 层小波包分解,提取 8 个频率成分的特征信号,计算其频带能量,并经过归一化处理,得到 12 组 8 维向量作为输入向量。

网络的输出模式由电机轴承的 4 种故障状态来决定,采用如下形式来表示输出:

- 正常: (1, 0, 0, 0);
- 内圈故障: (0, 1, 0, 0);
- 外圈故障: (0, 0, 1, 0);
- 滚动体故障: (0, 0, 0, 1)。

Eman 网络的输入层神经元数量与能量特征向量相同,为 8 个;而输出向量的维数为 4,则输出神经元的个数就为 4。综合考虑网络的性能和速度,将隐含层神经元的个数设计为 13 个。

根据所得样本数据对网络进行训练,以确定网

络的结构(中间层的传递函数和神经元数目)和参数(神经元之间的连接权值和阈值)。训练次数 500,训练目标 0.01。

训练结果如图 4 所示,经过 141 次训练后,网络误差达到要求,并且网络的训练误差曲线比较平滑。

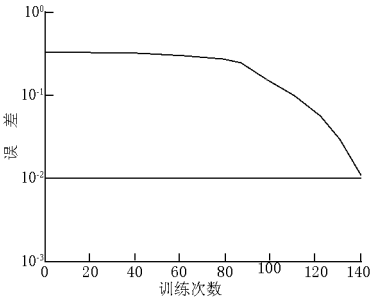


图 4 网络训练误差变化曲线

每种工况选择一个检验样本组成网络的测试输入数据,利用测试数据对网络仿真,仿真结果为

Y =  
0.9184 0.1424 0.0429 0.0588  
0.0387 0.9584 0.0361 0.0004  
0.0066 0.0737 0.9676 0.0443  
0.0076 0.0004 0.0166 0.9807

可以看出,通过小波包与 Eman 神经网络准确识别出了滚动轴承的所有故障类型。

4 结语

通过对故障轴承转子轴的径向运动引起的电机气隙磁场变化的分析,获得了电机轴承不同故障的定子电流特征频率表达式,获得了感应电机轴承故障检测方法一定子电流信号分析法。通过对电机定子电流的小波包分解,利用 Eman 神经网络进行故障的模式识别,可有效识别电机滚动轴承的所有故障类型。

参考文献:

[1]H. Çakır, A. Çakır. Rotor bar fault diagnosis in three phase induction motors by monitoring fluctuations of motor current zero crossing instants[J]. Electric Power Systems Research, 2007 (77): 385—392.  
[2]Schoen R R, Habetler T G, Kamran F, et al. Motor bearing damage detection using stator current monitoring[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1995, 31(6): 1274—1279.  
[3]海宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断[M]. 北京:机械工业出版社, 1996.  
[4]Martin B,Édt Pierre Granjon, Bertrand Raison, and Gilles Rostaing. Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring[J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2004(1): 383—388.  
[5]康敬东. 电机轴承故障的电流识别法分析[J]. 轴承, 2004(8): 33—35.

作者简介:李运红(1971—),河北唐山人,实验师,1996年毕业于河北理工学院自动化仪表专业,现在读硕士研究生,河北理工大学机械工程实验中心任教,电话:0315—2592456,电子信箱:liyuhongyan@163.com.

收稿日期:2008—11—18