

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171571

# Hilbert 解调制方法诊断异步电机轴承故障

宋向金<sup>1,2</sup> 王 卓<sup>1,2</sup> 胡静涛<sup>1,2</sup> 祝洪宇<sup>3</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016 2. 中国科学院大学 北京 100049  
3. 辽宁科技大学电子与信息工程学院 鞍山 114051)

**摘要** 针对电机电流信号特征分析(MCSA)方法诊断轴承外圈故障时易受到基频频谱泄露和偏心谐波以及供电系统噪声的影响,使得MCSA方法无法诊断低负载运行条件下的轴承外圈故障问题,提出一种基于Hilbert解调方法提取定子电流平方包络线的诊断方法。首先使用Hilbert变换构造定子电流解析信号,并提取定子电流解析信号的平方包络线;然后对提取的平方包络线做快速傅里叶变换(FFT)分析;最后根据FFT频谱中是否存在故障特征频率 $f_{of}$ 判断轴承是否发生故障。该方法能够将故障特征频率的检测从传统的边频带成分 $|f_1 \pm f_{of}|$ 转换为对轴承外圈故障特征频率 $f_{of}$ 的直接检测,能够有效消除基频频谱泄露和供电系统强噪声的干扰。电机在不同负载运行状态下的实验结果均验证了所提方法的有效性和稳定性。

**关键词:** 异步电机 轴承故障 Hilbert变换 定子电流

**中图分类号:** TM343

## Diagnosis of Bearing Fault in Induction Motors Using Hilbert Demodulation Approach

Song Xiangjin<sup>1,2</sup> Wang Zhuo<sup>1,2</sup> Hu Jingtao<sup>1,2</sup> Zhu Hongyu<sup>3</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences Shenyang 110016 China  
2. University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China  
3. School of Electronic and Information Engineering University of Science and Technology Liaoning Anshan 114051 China)

**Abstract** Because of the influence of the spectral leakage of the main frequency component, eccentricity harmonics and power supply noise, motor current signature analysis (MCSA) is unable to detect the bearing outer raceway fault when an induction motor (IM) operates under the light load conditions. In this paper, a bearing fault diagnosis method based on the squared envelope approach of the motor stator current using Hilbert demodulation technique was proposed. An analytical signal corresponding to the stator current signal was constructed first using Hilbert transform and then a squared envelope was obtained from the analytical signal. Second, the Fast Fourier Transform (FFT) of the squared envelope was investigated. Finally, the motor bearing failure was determined based on whether the characteristic fault frequency  $f_{of}$  could be found in the squared envelope spectrum or not. The proposed method can be used to detect the characteristic fault frequency  $f_{of}$  directly instead of detecting the sideband components around the supply frequency  $|f_1 \pm f_{of}|$  as used in traditional MCSA. Thus, the proposed approach can significantly reduce the negative influence of the spectral leakage of the main frequency component spectral and the power supply noise. The experimental results under different load conditions clearly prove the effectiveness and stability of the proposed method.

**Keywords:** Induction motor, bearing fault, Hilbert transform, stator current

国家重点研发计划项目(2016YFD0700100 2016YFD0700105)和中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-415)资助。

收稿日期 2017-11-22 改稿日期 2018-05-14

## 0 引言

异步电机因其结构简单、运行可靠及坚固耐用等优点,已广泛应用于农业、商业和工业等各个领域<sup>[1-3]</sup>。作为重要的能源转换装置,异步电机的健康、可靠运行对保证生产连续性、降低系统维护成本具有重要意义<sup>[4]</sup>。在诸多故障类型中,轴承故障是电机最易发生的故障,约占电机故障总数的 40%<sup>[1]</sup>。因此,轴承故障诊断一直是电机故障诊断领域的研究热点之一。

异步电机轴承发生故障类型按其受损区域的大小可分为局部损伤类故障和磨损类故障。当前,对异步电机轴承故障诊断普遍采用振动信号分析方法<sup>[5-7]</sup>。但是这种检测方法需要在电机上安装振动传感器,不仅增加了投资及维护工作量,而且在很多场合下安装振动传感器设备颇为不便。电机电流信号特征分析(Motor Current Signature Analysis, MCSA)方法获取信号方便,能够有效降低监控成本,并易于构成非侵入式的电机连续状态监测系统<sup>[8]</sup>。因此,基于电机定子电流信号分析的轴承故障诊断方法已成为轴承故障诊断研究的热点<sup>[1]</sup>。经典 MCSA 方法是一种基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的频域分析方法,当异步电机稳定运行时,采集单相定子电流信号,然后对定子电流信号做 FFT 频谱分析以达到对故障特征识别的目的。然而电机轴承故障引发定子电流的变化一般比较微弱,加之基频频谱泄露和偏心谐波以及供电系统强噪声的影响<sup>[4]</sup>,电机低负载运行时直接通过经典的 MCSA 故障诊断方法很难判定电机轴承是否发生故障。

近年来,很多学者采用多种信号分析方法进行电机轴承故障诊断。Y. Imaouchen 等<sup>[9]</sup>提出通过 Hilbert 变换提取电机电流信号的包络线,使用小波包分解将包络线信号自适应分解为不同频带,并将每个节点的能量当作特征值对轴承故障作进一步分析。Y. Amirat 等<sup>[10]</sup>提出将采集到的电流信号经 Hilbert 变换提取包络信号之后,通过统计分析获得包络信号的方差作为故障特征值,进而利用设定的阈值判断双馈感应发电机是否发生轴承故障。J. Zarei 等<sup>[11]</sup>根据轴承发生故障时的定子电流特征,求出三相电流的 Park 矢量模信号,并利用 FFT 频谱分析提取故障特征,通过仿真和实验验证该方法可以有效诊断电机轴承早期故障。薛征宇等<sup>[12]</sup>则提出一种基于 Park 矢量的改进聚类处理算法,该方法通过辨识电动机三相定子电流中的故障信息进行轴承故障诊断。而 S. B. Salem 等<sup>[13]</sup>运用 Hilbert 变换和 Park 变换相结合的技术提取三相定子电流的希尔伯特幅值

空间矢量信号(Hilbert Modulus Current Space Vector, HMCSV)和希尔伯特相角空间矢量信号(Hilbert Space Current Space Vector, HPCSV),并进一步使用 FFT 频谱分析提取电机偏心和轴承外圈故障特征值,最后利用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)对电机故障分类。然而,使用小波包分解对包络线信号进行分析的轴承故障诊断方法需要较大的计算量,不利于故障的在线诊断;对包络线信号进行统计分析通过人为设定阈值来判断轴承是否发生故障使得诊断方法的通用性差;而基于 Park 矢量方法的轴承故障诊断方法容易受供电电网频率波动造成三相电压不平衡等外界因素的影响。

本文提出一种基于定子电流 Hilbert 解调的异步电机轴承外圈故障无速度传感器诊断方法。该方法通过采用 Hilbert 解调求取平方包络线信号,可以克服供电电网频率波动造成的影响,而且直接对求取的平方包络线信号做 FFT 频谱分析,根据平方包络线频谱中是否存在轴承外圈故障特征频率就可以判断轴承是否发生故障,使得其计算量少且通用性强。主要思路是使用 Hilbert 变换构造定子电流解析信号,在此基础上,提取解析信号的平方包络线并做 FFT 频谱分析,同时采用齿谐波(Rotor Slot Harmonics, RSH)进行电机转速估计以求取轴承外圈故障特征频率,最后根据 FFT 频谱中是否存在轴承外圈故障特征频率以判断电机是否发生故障。该方法能够将故障特征频率的检测从传统的边频带成分转换为对轴承外圈故障特征频率的直接检测,可以有效消除基频频谱泄露和供电系统噪声的干扰,改善频谱质量,便于捕捉故障信息。

## 1 轴承故障的定子电流分析

异步电机所用轴承大部分为滚动轴承,主要由外圈、内圈、滚动体和保持架四部分组成。其中保持架将滚动体均匀隔开,使滚动体沿圆周均匀分布,以减小滚动体之间的摩擦和磨损。滚动轴承典型几何结构如图 1 所示。

轴承故障按其引起的振动特征不同可分为局部损伤类故障和磨损类故障。滚动轴承表面磨损是一个相对缓慢的发展过程,由于其受影响的面积较大,磨损类故障引起的振动表现为随机性强的无规则振动波形。而局部损伤类故障是指轴承各部件表面某一点发生点蚀、剥落及擦伤等,其引起的振动波形频率可通过公式准确计算出来。局部损伤类故障通常主要发生在轴承外圈和轴承内圈,而异步电机所

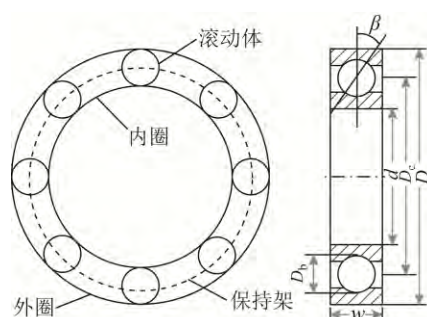


图 1 滚动轴承结构和主要参数

Fig.1 The structure of a rolling-element bearing with main parameters

用轴承属于外圈不动内圈转动，其外圈所受疲劳损伤较内圈大，所以故障一般首先发生在轴承外圈<sup>[4]</sup>。故本文主要针对轴承外圈局部损伤类故障进行研究，并采用在轴承外圈钻孔的方式对轴承外圈局部损伤类故障进行模拟<sup>[1,11]</sup>。当发生轴承外圈局部损伤的轴承在负载作用下高速运转过程中，故障点反复地与轴承的其他非故障部位碰撞而产生低频振动，称之为“通过振动”<sup>[14]</sup>。该通过振动产生的频率也称之为轴承振动故障特征频率，它可由轴承几何尺寸、损伤点发生位置（外圈）以及电机转轴转速进行确定，其对应的故障特征频率计算公式为<sup>[15]</sup>

$$f_{of} = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (1)$$

式中， $f_{of}$  为轴承外圈故障特征频率； $f_r$  为电机转子转速； $N_b$  为滚动体的数量； $D_b$  为滚动体直径； $D_c$  为轴承节径； $\beta$  为滚动体的接触角。

当轴承滚珠数量为 6~12 时，轴承外圈故障特征频率可近似为<sup>[16]</sup>

$$f_{of} = 0.4 N_b f_r \quad (2)$$

R. R. Schoen 等<sup>[17]</sup>研究了轴承故障特征频率与定子电流频谱之间的关系，认为转子在轴承发生故障时将产生一个径向运动，进而产生气隙偏心，该偏心会引起定子电流的周期性变化，最终导致轴承故障特征频率会在定子电流频谱中有所体现，其关系为

$$f_{cf} = f_1 \pm n f_{of} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

式中， $f_{cf}$  为轴承外圈故障在定子电流频谱中体现的边带故障特征频率； $f_1$  为电源基波频率。

从式 (2) 中可以看出，计算轴承外圈故障特征频率需要知道电机转速，为了达到无速度传感器轴承外圈故障诊断的目的，本文采用齿谐波检测的方

法进行电机转速估计。通过对定子电流进行 FFT 频谱分析，从中检测出供电频率  $f_1$  和齿谐波频率  $f_{sh}$ ，通过  $f_r = (f_{sh} - f_1)/R$ （其中  $R$  为转子槽数）即可估计电机转速<sup>[18]</sup>。

## 2 基于 Hilbert 解调制方法的轴承外圈故障诊断

### 2.1 Hilbert 变换

Hilbert 变换是提取信号包络的主要方法之一<sup>[17]</sup>。给定一个连续的时间信号  $x(t)$ ，其 Hilbert 变换定义为<sup>[19,20]</sup>

$$\hat{x}(t) = H(x(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = x(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (4)$$

式中， $H(\cdot)$  为 Hilbert 运算符； $*$  为卷积运算符。

以信号  $x(t)$  为实部， $x(t)$  的 Hilbert 变换  $\hat{x}(t)$  为虚部，构成的复数信号定义为信号  $x(t)$  的解析信号，则

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = a(t)e^{j\varphi(t)} \quad (5)$$

解析信号  $z(t)$  的瞬时包络线  $a(t)$  定义为解析信号的幅值函数，即  $a(t) = |z(t)| = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)}$ ； $\varphi(t)$  为信号  $x(t)$  的瞬时相位， $\varphi(t) = \arctan(\hat{x}(t)/x(t))$ 。

对解析信号的瞬时包络线  $a(t)$  进行 FFT 变换，即可以得到信号  $x(t)$  的瞬时包络谱为

$$B(f) = F(a(t)) \quad (6)$$

### 2.2 基于 Hilbert 变换的定子电流信号包络线提取

假设理想异步电机工频供电，若只考虑 a 相定子电流中基波分量的作用，则 a 相定子电流可描述为

$$i_a(t) = I_1 \cos(\omega_1 t) \quad (7)$$

式中， $I_1$  为定子电流基波分量幅值； $\omega_1$  为工频电源供电角频率， $\omega_1 = 2\pi f_1$ 。

当处于稳定运行状态下的异步电机发生轴承外圈故障时，会使转子发生径向运动产生气隙偏心，进而导致电流受到周期性扰动的影响，该周期性扰动会对三相定子电流信号进行幅值调制<sup>[17]</sup>，则调制后的 a 相定子电流可表述为

$$i_{ma}(t) = i_a(t)[1 + m \cos(\omega_{of} t)] \quad (8)$$

式中， $m$  为轴承外圈故障调制系数； $\omega_{of} = 2\pi f_{of}$ 。

将式 (7) 代入式 (8) 中并采用积化和差公式可以得到

$$i_{ma}(t) = I_1 \cos(\omega_1 t) + \frac{m I_1}{2} \cos[(\omega_1 \pm \omega_{of})t] \quad (9)$$

从式(9)中可以看出轴承外圈故障电机定子电流中会感应出两个轴承外圈故障边带频率 $(\omega_1 \pm \omega_{of})$ ,对式(9)做 Hilbert 变换可得到

$$H(i_{ma}(t)) = I_1 \sin(\omega_1 t) + \frac{mI_1}{2} \sin(\omega_1 \pm \omega_{of}) \quad (10)$$

即为

$$H(i_{ma}(t)) = I_1 \sin(\omega_1 t) [1 + m \cos(\omega_{of} t)] \quad (11)$$

以  $i_{ma}(t)$  为实部,  $i_{ma}(t)$  的 Hilbert 变换(式(11))为虚部,可以构造如式(12)的解析信号  $z_{ma}(t)$ ,并表示为指数形式为

$$z_{ma}(t) = [1 + m \cos(\omega_{of} t)] I_1 e^{j\omega_1 t} \quad (12)$$

进而可以求得解析信号  $z_{ma}(t)$  的瞬时包络线  $a_{ma}(t)$  为

$$a_{ma}(t) = I_1 |1 + m \cos(\omega_{of} t)| \quad (13)$$

对比式(9)和式(13)可以看出,在采用 Hilbert 变换提取瞬时包络线  $a_{ma}(t)$  的过程中,可以将检测的特征频率从传统的边频带成分  $|f_1 \pm f_{of}|$  转换为直接对轴承外圈故障特征频率  $f_{of}$  进行检测,可以有

效消除基频频谱泄露的影响,便于捕捉故障信息。为进一步改善频谱分析质量,可构造平方包络信号  $A_{ma}(t) = I_1^2 |1 + m \cos(\omega_{of} t)|^2$ ,使用平方包络信号  $A_{ma}(t)$  代替  $a_{ma}(t)$  做 FFT 频谱分析,根据平方包络谱中是否存在轴承外圈故障特征频率  $f_{of}$  以判断轴承外圈是否发生故障。

### 2.3 基于 Hilbert 解调制方法的轴承外圈故障诊断原理框图

根据前述分析,本文提出一种基于 Hilbert 解调制分析的轴承外圈故障诊断方法,主要由数据采集、故障电机定子电流解调、频谱分析、轴承外圈故障特征频率计算和故障识别诊断五部分组成。主要原理是:首先,采用 Hilbert 变换对采集到的定子电流信号进行解调分析,构造解析信号  $z_{ma}(t)$  并求取平方包络线  $A_{ma}(t)$ ,然后对平方包络线  $A_{ma}(t)$  做 FFT 频谱分析;同时通过齿谐波检测的方法估计电机转速,进而完成轴承外圈故障特征频率  $f_{of}$  的计算;最后将  $f_{of}$  与已经得到的平方包络谱做比较分析,根据平方包络谱中是否存在故障特征频率  $f_{of}$  判断轴承外圈故障发生与否。其原理框图如图 2 所示。

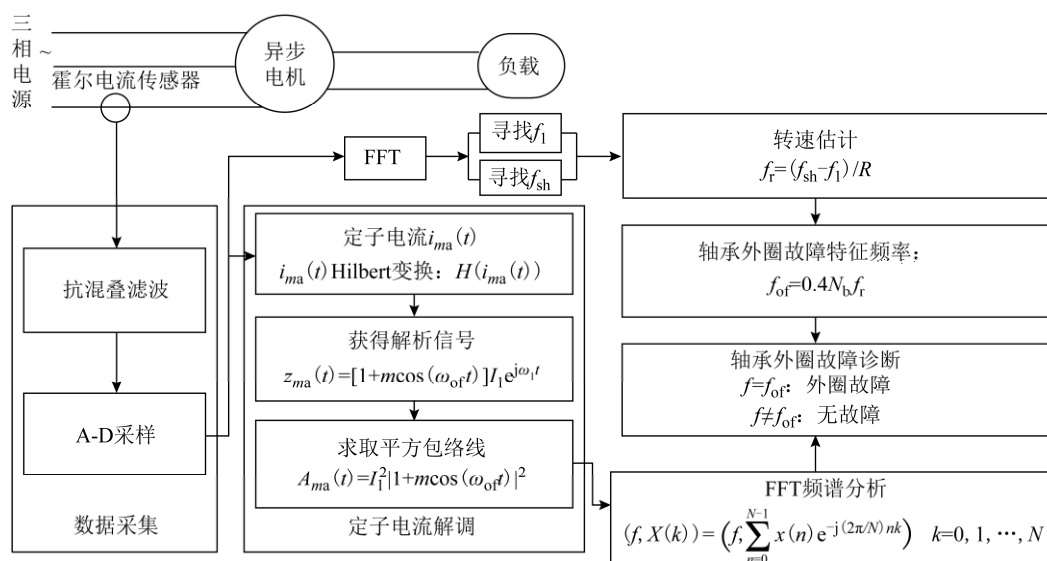


图 2 轴承外圈故障诊断方法原理框图

Fig.2 Schematic diagram of the proposed method for bearing outer raceway fault detection

## 3 实验及结果分析

### 3.1 实验装置及数据采集

本实验装置由电源系统、电机拖动系统和数据采集系统三部分组成。电源系统为 50 Hz 工频电源;电机拖动系统由实验电机和 Z2-42 直流发电机构成,实验电机拖动直流发电机,通过调节直流发电机励

磁电压来改变实验电机转速;数据采集系统由 JLB-21 型电流互感器、自制调理电路、NI 数据采集卡构成。实验电机为两台额定功率 3 kW、额定电压 380 V、额定电流 6.8 A 的 Y100L2-4 三相异步电机,其中一台无故障电机作为实验参照,另外一台电机带有轴承外圈故障,用于算法验证。电机数据采集实验台和实验用外圈故障轴承如图 3 所示。

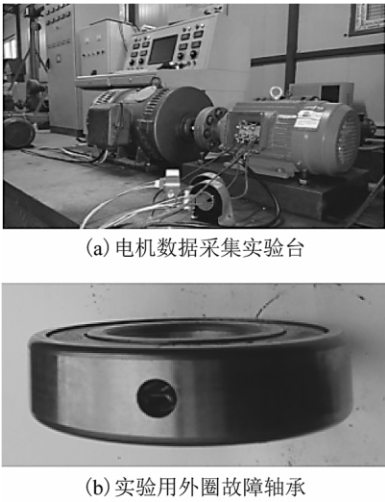


图 3 电机数据采集实验台和实验用外圈故障轴承示意图

Fig.3 The Schematic diagram of motor date acquisition test bench and experimental outer ring fault bearing

表 1 电机边带故障特征频率理论计算值

Tab.1 Theoretical fault sideband components of the healthy and faulty IM

电机类型	负载 (%)	基波频率估计值 $f_1/\text{Hz}$	齿谐波估计值 $f_{sh}/\text{Hz}$	转速估计值 $f_r/\text{Hz}$	轴承外圈故障特征频率 ( $f_{of}=3.6f_r$ )/Hz	边带故障特征频率 $ f_1-f_{of} , f_1+f_{of}/\text{Hz}$
无故障电机	68	50.07	821.30	24.10	—	—
	20	50.02	841.50	24.73	89.03	39.01, 139.05
轴承外圈故障电机	26	50.07	839.00	24.65	88.74	38.67, 138.81
	51	50.02	828.00	24.31	87.52	37.50, 137.54
	68	50.07	821.10	24.09	86.72	36.65, 136.79
	86	50.07	813.70	23.86	85.90	35.83, 135.97

图 4 分别为无故障电机和轴承外圈故障电机在 68% 额定负载时定子电流 FFT 频谱分析 (0~150 Hz)。从图 4a 中可以看到偏心谐波分量  $f_1\pm f_r$ ，这是由于电机内部存在的固有偏心引起的。比较图 4a 与图 4b 可以看出，当轴承发生外圈故障时，电机偏心加剧，由于基频频谱泄露和偏心谐波以及供电系统噪声的影响，边带故障特征频率  $|f_1-f_{of}|$  已经无法看清，而  $f_1+f_{of}$  还可以识别。但是，从图 5 可以看出，随着负载的降低， $f_1+f_{of}$  幅值也随之逐渐减小，加之由于基频频谱泄露和偏心谐波以及供电系统噪声的影响，谱线  $f_1+f_{of}$  也无法分辨，这时采用 MCSA 方法不能有效诊断轴承外圈故障。同时从图 5 中可以看出，所需检测的轴承外圈故障特征频率的幅值较小，为了避免与供电系统噪声信号发生混淆，通过多次采集定子电流信号进行反复分析研究，可以发现这些轴承外圈故障特征分量具有稳定出现且随着电机负载的变化而变化的特性，然而根据统计特性可知

实验过程中，通过设定不同的直流发电机励磁电压使异步电机在不同负载状态下运行。首先采集轴承外圈故障电机定子电流数据，然后对无故障电机进行数据采集。对轴承外圈故障电机进行数据采集时，随机调整直流发电机励磁电压，使电机在 20%、26%、51%、68% 和 86% 额定负载时稳定运行。最后得到采样频率为 25 kHz、采样时间为 25 s 的待分析信号，并在 Matlab R2013b 环境下对测得的数据进行离线频谱分析。

3.2 异步电机定子电流 FFT 频谱分析

为验证所提方法的有效性，本文对实验故障电机在五种不同的负载条件下采集定子电流数据进行分析。表 1 为电机测试状态下相应的齿谐波转速估计值、轴承外圈故障振动频率理论计算值以及相应的边带故障特征频率理论计算值。

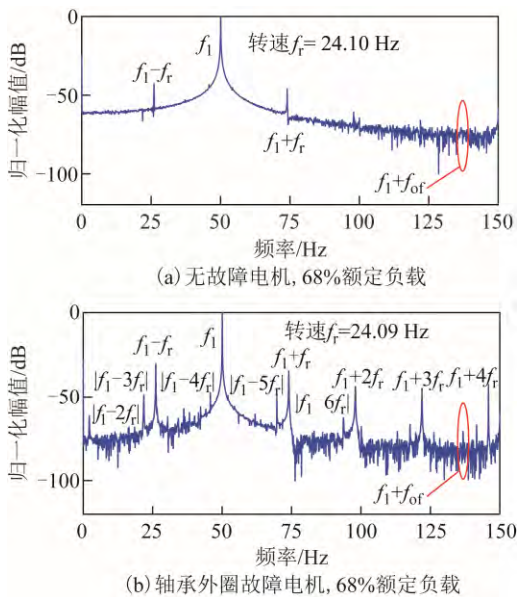


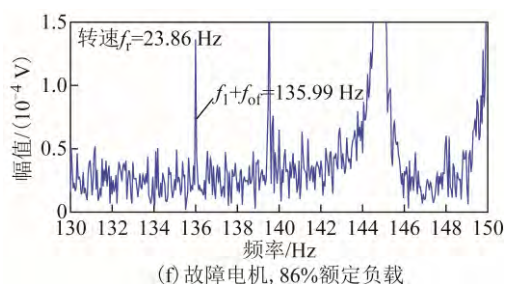
图 4 定子电流 FFT 频谱分析

Fig.4 The FFT spectrums of stator current signals



噪声信号是具有随机特性的,从而保证了所检测的频率就是轴承外圈故障特征频率。

图 5 分别为无故障电机在 68%额定负载以及轴承外圈故障电机分别在 20%、26%、51%、68%和 86%额定负载运行时的定子电流 FFT 频谱分析(130~150 Hz)。通过比较分析,可以看出基频频谱泄露和偏心谐波以及供电系统噪声对 MCSA 方法诊断轴承外圈故障的影响。当电机在 68%和 86%额定负载运行时, $f_1+f_{of}$  谱线清晰可见,随着负载的下降,



(f) 故障电机, 86%额定负载

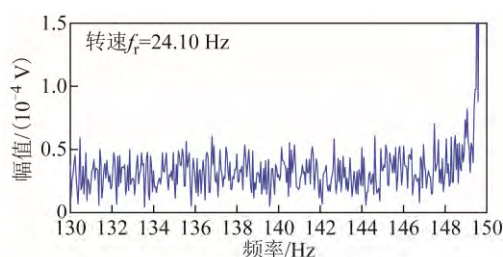
图 5 不同负载时定子电流信号 FFT 频谱分析

Fig.5 The FFT spectrums of the stator current signals for IM under different load conditions

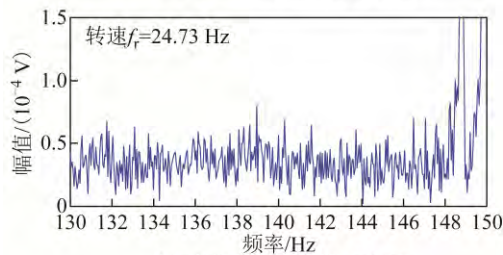
谱线  $f_1+f_{of}$  的幅值也随之下降。由于基频频谱泄露和偏心谐波以及噪声的影响,在 26%额定负载时,谱线  $f_1+f_{of}$  已经看不清楚;而在 20%额定负载时,谱线  $f_1+f_{of}$  已经完全被淹没。可以看出,当电机在 20%和 26%额定负载运行时,采用 MCSA 方法不能有效诊断轴承外圈故障。

### 3.3 异步电机 Hilbert 解调制平方包络线信号 FFT 频谱分析

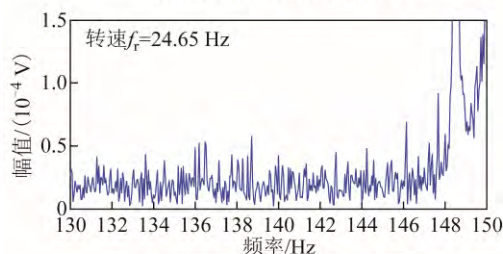
图 6 分别为无故障电机在 68%额定负载以及轴承外圈故障电机分别在 20%、26%、51%、68%和 86%额定负载运行时的定子电流 Hilbert 解调制平方包络线信号 FFT 频谱分析(80~100 Hz)。由图 6 可以看出,本文所提方法能够将检测的故障特征频率从传统的边频带成分  $|f_1 \pm f_{of}|$  转换为直接对轴承外圈故障特征频率  $f_{of}$  进行检测,而且在不同负载状态下,采用本文所提方法均能清晰的识别轴承外圈故障特征频率  $f_{of}$ ,能够有效消除基频频谱泄露和供电系统噪声的干扰,从而验证了所提方法对不同负载情况下轴承外圈故障都能做出有效诊断,性能较为稳定。



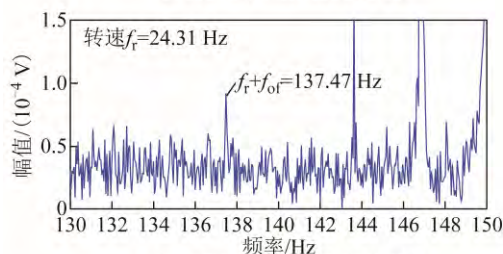
(a) 无故障电机, 68%额定负载



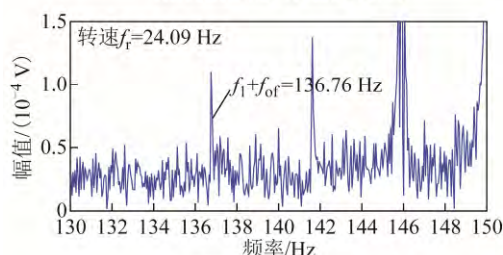
(b) 故障电机, 20%额定负载



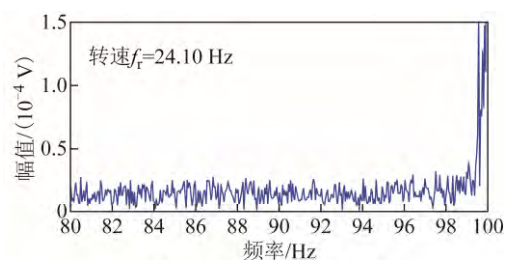
(c) 故障电机, 26%额定负载



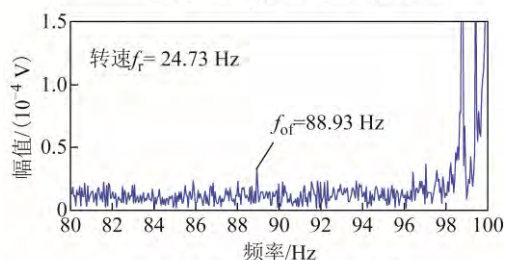
(d) 故障电机, 51%额定负载



(e) 故障电机, 68%额定负载



(a) 无故障电机, 68%额定负载



(b) 故障电机, 20%额定负载

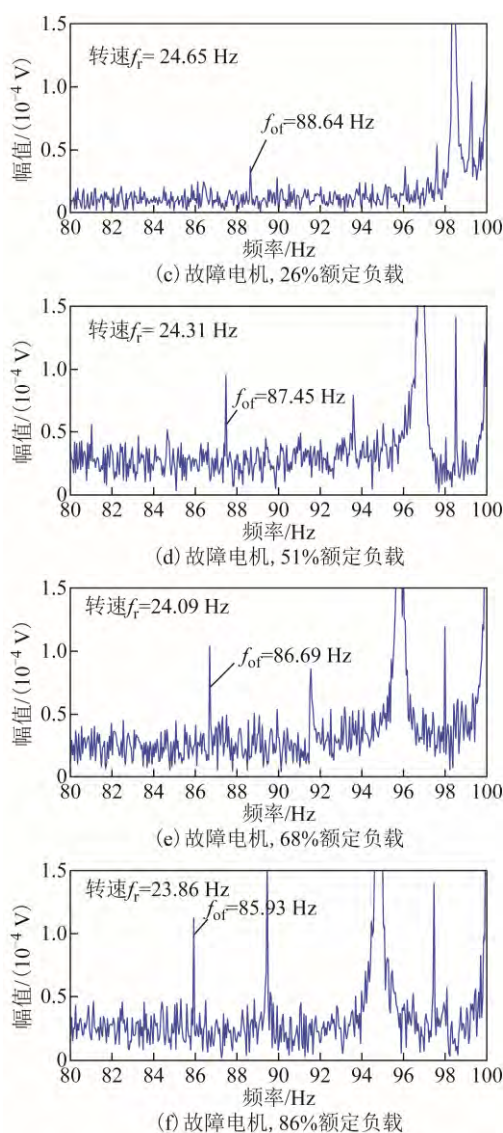


图 6 不同负载时定子电流平方包络线信号 FFT 频谱分析  
Fig.6 The FFT spectrums of squared envelope signals of the stator current for the IM under different load conditions

#### 4 结论

电机轴承外圈故障会引起定子电流频谱中产生相应的谐波频率,然而,由于基频频谱泄露和偏心谐波以及供电系统噪声的影响,基于电机电流信号特征分析的电机故障诊断方法无法诊断低负载运行条件下的异步电机轴承外圈故障。本文提出一种基于定子电流 Hilbert 解调制分析的异步电机轴承外圈故障诊断方法。该方法首先采用 Hilbert 变换构造定子电流的解析信号,并求取解析信号的平方包络线作 FFT 频谱分析,根据 FFT 频谱中是否存在轴承外圈故障特征频率以判断异步电机轴承是否发生故障。该方法能够将检测故障特征频率从传统的边频

带成分转换为直接对轴承外圈故障特征频率进行检测,能够有效消除基频频谱泄露和供电系统噪声干扰的影响,具有改善频谱分析质量、便于捕捉故障信息的优点。最后通过故障电机不同负载运行条件下的实验分析,验证了所提方法的有效性和稳定性。

#### 参考文献

- [1] Leite V C M N, Da Silva J G B, Veloso G F C, et al. Detection of localized bearing faults in induction machines by spectral kurtosis and envelope analysis of stator current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1855-1865.
- [2] 曹朋朋, 张兴, 杨淑英, 等. 异步电机基于 MRAC 的转子时间常数在线辨识算法的统一描述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 62-70.
- [3] Cao Pengpeng, Zhang Xing, Yang Shuying, et al. Unified description of MRAC-based online rotor time constant identification algorithm for induction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 62-70.
- [4] 刘璐, 杜旭东, 王晓年. 考虑磁饱和的感应电机 MTPA 转矩控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 42-50.
- [5] Liu Lu, Du Xudong, Wang Xiaonian. MTPA torque control of induction motor considering magnetic saturation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 42-50.
- [6] Li Dezhi, Wang W, Ismail F. A spectrum synch technique for induction motor health condition monitoring[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1348-1355.
- [7] Maruthi G S, Hegde V. Application of MEMS Accelerometer for detection and diagnosis of multiple faults in the roller element bearings of three phase induction motor[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(1): 145-152.
- [8] He Wangpeng, Zi Yanyang, Chen Binqiang, et al. Automatic fault feature extraction of mechanical anomaly on induction motor bearing using ensemble super-wavelet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 54-55: 457-480.
- [9] 潘作为, 梁双印, 李惊涛, 等. 基于复数小波多尺度包络分析的风机滚动轴承故障特征提取[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4147-4152.

- Pan Zuowei, Liang Shuangyin, Li Jingtao, et al. Application of the complex wavelet analysis in fault feature extraction of blower rolling bearing[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4147-4152.
- [8] 杨明, 董传洋, 徐殿国. 基于电机驱动系统的齿轮故障诊断方法综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 58-63.
- Yang Ming, Dong Chuanyang, Xu Dianguo. Review of gear fault diagnosis methods based on motor drive system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 58-63.
- [9] Imaouchen Y, Alkama R, Thomas M. Bearing fault detection using motor current signal analysis based on wavelet packet decomposition and Hilbert envelope[C]// AVE2014-4th Colloque Analyse Vibratoire Experimentale/ Experimental Vibration Analysis, Blois, France, 2014: 1-5.
- [10] Amirat Y, Choqueuse V, Benbouzid M, et al. Hilbert transform-based bearing failure detection in DFIG-Based wind turbines[J]. International Review of Electrical Engineering, 2011, 6(3): 1249-1256.
- [11] Zarei J, Poshtan J. An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection[J]. Tribology International, 2009, 42(2): 213-219.
- [12] 薛征宇, 邱赤东, 王宁, 等. 基于 Park 矢量的电动机轴承故障检测方法[J]. 轴承, 2012(4): 50-55.
- Xue Zhengyu, Qiu Chidong, Wang Ning, et al. Detection method for faults of motor bearings based on Park's vector[J]. Bearing, 2012(4): 50-55.
- [13] Salem S B, Bacha K, Chaari A. Support vector machine based decision for mechanical fault condition monitoring in induction motor using an advanced Hilbert-Park transform[J]. ISA Transactions, 2012, 51(5): 566-572.
- [14] 杨江天, 赵明元, 张志强, 等. 基于定子电流小波包分析的牵引电机轴承故障诊断 [J]. 铁道学报, 2013(2): 32-36.
- Yang Jiangtian, Zhao Mingyuan, Zhang Zhiqiang, et al. Traction motor bearing fault detection via wavelet packet analysis of stator currents[J]. Journal of the China Railway Society, 2013(2): 32-36.
- [15] Li B, Chow M Y, Tipsuwan Y, et al. Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(5): 1060-1069.
- [16] Schiltz R L. Forcing frequency identification of rolling element bearings[J]. Sound and Vibration, 1990, 24(5): 16-19.
- [17] Schoen R R, Habetler T G, Karmran F, et al. Motor bearing damage detection using stator current monitoring[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(6): 1274-1279.
- [18] 车香芝, 胡静涛, 郭前进. 基于齿谐波检测的无速度传感器感应电机的转速估计[C]//2008 中国仪器仪表与测控技术报告大会, 湘潭, 湖南, 2008: 414-417.
- Che Xiangzhi, Hu Jingtao, Guo Qianjin. An slot harmonics detection-based approach to speed estimation in a sensorless induction motor[C]//2018 China Instrumentation and Measurement Control Technology Conference, Xiangtan, Hunan, 2008: 414-417.
- [19] 喻敏, 王斌, 陈绪轩, 等. 同步挤压小波变换在电力系统低频振荡模态参数提取中的应用[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 14-20.
- Yu Min, Wang Bin, Chen Xuxuan, et al. Application of synchrosqueezed wavelet transform for extraction of the oscillatory parameters of low frequency oscillation in power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 14-20.
- [20] 朱永利, 贾亚飞, 王刘旺, 等. 基于改进变分模态分解和 Hilbert 变换的变压器局部放电信号特征提取及分类[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 221-235.
- Zhu Yongli, Jia Yafei, Wang Liuwang, et al. Feature extraction and classification on partial discharge signals of power transformers based on improved variational mode decomposition and Hilbert transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 221-235.

#### 作者简介

宋向金 女, 1989 年生, 博士, 研究方向为电机状态监测与故障诊断。

E-mail: songxiangjin@sia.cn

胡静涛 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为设备远程监测与故障诊断。

E-mail: hujingtao@sia.cn (通信作者)

(编辑 于玲玲)