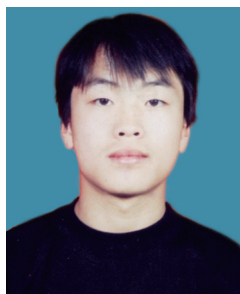


Morlet小波变换在感应电动机气隙偏心故障诊断中的应用

针对快速傅里叶变换（FFT）在分析感应电动机电流信号时存在的频谱泄漏和噪声干扰阻碍故障特征频率识别的问题，提出了一种针对感应电动机定子电流包络线的Morlet小波分析新方法，有效消除了频谱泄漏和噪声干扰的影响，分析了感应电动机在气隙偏心故障时故障频率的特征，最后通过实验及仿真结果验证了该方法的可行性和有效性。

左志文 田慕琴/太原理工大学电气与动力工程学院



左志文/硕士研究生

感应电动机具有结构简单、运行可靠、重量轻、体积小以及制造成本低等优点，被广泛应用于各个工业领域，研究如何使感应电动机正常持久地运转，对于保证相关行业顺利健康发展具有重要意义。气隙偏心是感应电动机各种故障类别中比较常见的故障之一，电动机转子的刚度不足、轴承的磨损或者安装过程中产生的误差，均会使电动机发生气隙偏心。当感应电动机发生气隙偏心故障时，不但会使气隙磁场产生畸变，从而恶化了电动机的各项性能指标，而且严重时还会导致定子与转子相摩擦，烧毁电动机。因此，通过检测感应电动机的气隙偏心故障信号，探索气隙偏心故障诊断技术，可以实现电动机故障的早期诊断，及早发现问题，避免因电动机故障造成停产等重大损失。

采用定子电流状态监测来诊断电动机是否发生气隙偏心的方法已经较为成熟并被广泛应用，但是该方法在采用快速傅里叶变换（FFT）对采集到的电流进行信号处理时，会因加窗引起频谱泄漏，而频谱泄漏会严重影响该方法的实用性和有效性，如在气隙偏心故障早

期，故障特征频率非常微弱，当工频供电时，故障特征频率会被基频频谱泄漏和噪声所湮没。由于包络检波理论能够将采集到的信号全部包络处理，进而对包络信号进行检波处理，这样就避免了原始信号的丢失。但是采用包络检波方法需要确定滤波中心频率，而且中心频率的选择对分析结果会有很大的影响。而Morlet小波变换兼具带通滤波和提取信号包络的特性，可以将噪声分解到不同的频带进行平滑，因而能够有效消除高频噪声，提高信号包络光滑度，并有利于从包络信号中找到故障特征低频频率，是非常理想的信号包络提取方法^[1]。

基于上述分析，本文提出一种基于Morlet小波分析的气隙偏心故障诊断新方法。该方法主要是利用Morlet小波变换的带通滤波功能以及其实部和虚部正交的特性来提取故障感应电动机定子电流包络线，借以消除频谱泄漏和噪声干扰的影响，然后对该包络线信号进行FFT频谱分析，根据包络线FFT频谱中是否存在特征频率 f_{sh1} 成分来判断气隙偏心故障发生与否。

感应电动机气隙偏心的基本类型

在理想的情况下，感应电动机的定、转子轴心应该在同一圆心点处，但由于设计及安装过程中的人为因素以及电动机的频繁起停、超限运行等情况，很容易造成感应电动机发生偏心故障。感应电动机的气隙偏心故障通常分为两种基本情况：第一种称作“静态偏

关键词/Keywords

感应电动机 ·
气隙偏心 ·
Morlet小波变换 ·
故障诊断 ·

心”，是指定、转子的旋转中心不同，转子将自身几何轴心作为旋转轴，即定、转子最小径向气隙位置在空间的位置固定，静态偏心一般由定、转子铁心椭圆不同心以及安装等因素造成，如图1a所示；第二种称作“动态偏心”，是指定、转子旋转中心不同，但定、转子最小径向气隙位置随着转子一起旋转，它是时间和空间的函数，动态偏心一般由转轴弯曲挠度、轴承磨损和移位、安装不同心以及机械共振等因素造成，如图1b所示。其他的偏心情况都是这两种基本类型的组合^[2]。

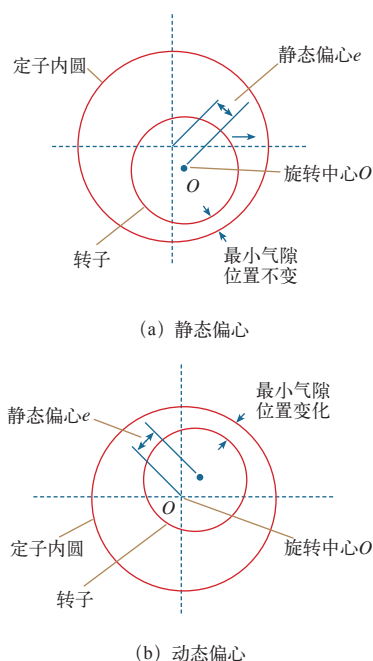


图1 基本气隙偏心类型

感应电动机气隙偏心故障的特征频率

由于气隙发生偏心会导致气隙磁导在沿圆周方向上出现不均匀，从而在定子绕组中感应出谐波分量，通过在定子电流频谱上产生的特定特征频率来体现故障的发生，这些特征频率表示为^[3]

$$f_{ec} = f_1 \left\{ (R \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right\} \quad (1)$$

式中， f_{ec} 为气隙偏心的特征频率； f_1 为电源频率； R 为转子槽数； s 为转差率； p 为电动机极对数； n_{ws} 为奇整数（1,3,5,...）； n_d 为偏心级数，“0”为静态偏心，“1”为动态偏心。

式（1）在转子槽数较多时会使相应气隙偏心

的特征频率较大，从而不利于特征频率的检测。而在实际应用中，有一特征频率对于偏心故障的检测十分有效，特别是适用于低频段的信号检测，表达式为

$$F = |f_1 \pm m f_r| \quad (2)$$

式中， f_r 为旋转频率， $f_r = f_1(1-s)/p$ ； m 为正整数。

在确定了故障电动机气隙偏心的特征频率后，现在主要的问题就是如何有效地提取和识别该频率。通常的做法是对采集到的定子电流信号滤波处理后，直接采用FFT对电流信号进行处理，但是由于FFT的研究范围是在整个时间域和频率域内，当应用计算机对采集到的信号进行处理时，不会对无限长的信号进行测量和运算，通常是取有限的时间片段进行分析，即从信号中截取一个时间段，然后将该时间段进行周期延拓处理，从而得到虚拟的无限长信号，之后再对信号进行FFT和相关分析，这就是通常所说的对信号加窗。但是加窗会引起频谱泄漏，特别是在气隙偏心故障早期，由于故障特征频率非常微弱，进而影响对故障特征频率的检测。因此，需要寻找一种新的信号处理方法来避免FFT的不足，而用Morlet小波包络检波的方法正好弥补了这种不足。

Morlet小波在检测气隙偏心故障频率中的应用

Morlet小波最初应用在地震信号的分析中，是由法国地球物理学家J. Morlet提出的，表达式为

$$h(t) = (e^{jw_0 t} - e^{-\frac{w_0^2}{2}}) e^{-\frac{t^2}{2\sigma}} \quad \sigma > 0 \quad (3)$$

其Fourier变换为

$$\hat{h}(w) = \sqrt{2\pi\sigma} \left[e^{-(w-w_0)^2/2\sigma} - e^{-\frac{w_0^2}{2}} e^{-\frac{w^2}{2\sigma}} \right] \quad (4)$$

式中，当 $w=0$ 、 $\sigma \gg 1$ 时， $\hat{h}(0) \approx 0$ ，即 $\int_R h(t) dt \approx 0$ 。

由式（3）可知， $h(t)$ 中有正弦函数，所以 $h(t)$ 具有振荡性。此外，

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{h}(w)|^2 dw = \int_{-\infty}^{+\infty} |h(t)|^2 dt < +\infty, \quad h(t) \in L^2(R).$$

综上所述， $h(t) = (e^{jw_0 t} - e^{-\frac{w_0^2}{2}}) e^{-\frac{t^2}{2\sigma}}$ ，

$w_0 \geq 5$ 、 $\sigma \geq 1$ 是一个允许小波。当 $w_0 \geq 5$ 时， $e^{-\frac{w_0^2}{2}} \approx 0$ ，因为式（3）中第二项可忽略，故当 $w_0 \geq 5$ 时，Morlet小波可近似表示为

$$h(t) = e^{jw_0 t} e^{-\frac{t^2}{2\sigma}} \quad w_0 \geq 5, \sigma \geq 1 \quad (5)$$

其相应的Fourier变换为

$$\hat{h}(w) = \sqrt{2\pi\sigma} \left[e^{-(w-w_0)^2/2\sigma} \right] \quad \sigma \geq 1 \quad (6)$$

且 $\hat{h}(0) \approx 0$ ，因此，式（5）近似满足允许小波的条件，可以称之为“一个允许小波”。之后本文所涉及的Morlet小波均按式（5）所定义的形式来应用^[4]。

1. Morlet小波对电流信号的包络提取

通过分析式（5）和式（6）可知，在时域中，中心频率 w_0 控制着Morlet小波的时域振荡频率； σ 为带宽参数，控制着小波的形状，也决定了波形振荡衰减的快慢程度，所以在时域时可以将Morlet小波称作“一个振荡衰减信号”。在频域中，Morlet小波是一个实函数，中心频率 w_0 决定了其带通位置，带宽参数 σ 确定了窗口的宽度。选择合适的 w_0 与 σ 就能够改变小波的形状，从而优化滤波性能，进而可以有效地去除信号中的噪声。因此Morlet小波变换具有良好的时频局部化特性，利用其进行特征信号的检测，并将噪声按不同频率通道进行平滑，可以降低噪声的影响。本文将Morlet小波应用在故障特征信号的包络提取中，是为了给检测故障特征频率提供一个更可行有效的方法^[5]。

从式（5）可知，Morlet小波的实部为

$$\text{Re}[h(t)] = e^{-\frac{t^2}{2\sigma}} \cos w_0 t \quad (7)$$

虚部为

$$\text{Im}[h(t)] = e^{-\frac{t^2}{2\sigma}} \sin w_0 t \quad (8)$$

比较式（7）与式（8）可知，Morlet小波的实部与虚部幅值相等，相位相差 90° 。根据包络检波技术的理论可知，如果两个信号的幅值相同，相位相差 90° ，那么能够利用解调的方法提取出其幅

值分量。所以按照这个原理可以得到Morlet小波的信号包络，即

$$E(t) = \sqrt{\text{Re}[h(t)]^2 + \text{Im}[h(t)]^2} \quad (9)$$

式中，实部 $\text{Re}[h(t)]$ 和虚部 $\text{Im}[h(t)]$ 都可以在时域中直接按照小波的卷积公式计算得出。

如果忽略感应电动机在制造过程中产生结构不对称的情况，那么对于理想的正常感应电动机，定子三相基波电流中只有基波电流成分，可以将三相定子电流分别表示为

$$\begin{aligned} i_A &= I \cos(\omega_1 t - \varphi_1) \\ i_B &= I \cos(\omega_1 t - \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}) \\ i_C &= I \cos(\omega_1 t - \varphi_1 + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (10)$$

式中， I 为基波电流的幅值； ω_1 为外加电源的角频率； φ_1 为基波电流的初相位。

当感应电动机发生气隙偏心故障时，定子三相电流会受到周期性扰动，而且定子电流的幅值和相位也会进行调制。由于在偏心故障特征成分中，对于式（2）来讲， $m=1$ 时，对应的故障特征频率幅值最大，表现最明显，同时也最容易被识别，因此为了使推导的表达式既能反映故障特征的频率特征，又能使推导的过程简洁清楚，现在要将问题简化，只考虑发生气隙偏心故障时定子电流的幅值调制和扰动基波分量的影响，当 $m=1$ 时，依据式（10）可设定此时感应电动机的a相电流 $i_{af}(t)$ 为

$$\begin{aligned} i_{af}(t) &= I \cos(\omega_1 t - \varphi_1) + I_{f1} \cos[(\omega_1 - \omega_r)t - \varphi_{f1}] + \\ &I_{f2} \cos[(\omega_1 + \omega_r)t - \varphi_{f2}] \end{aligned} \quad (11)$$

式中， I_{f1} 、 I_{f2} 为偏心故障时对应的两个电流分量的幅值； φ_{f1} 、 φ_{f2} 为电流分量的初相位； ω_r 为转子旋转角速度，大小为 $2\pi f_r$ 。

由式（11）可知，感应电动机气隙偏心的故障特征频率应该包含在与 ω_r 有关的定子电流信息中，包络解调的目的就是从测量的信号 $i_{af}(t)$ 中提取出这些特征频率，在此基础上诊断识别气隙偏心故障^[6]。

2. Morlet小波的包络检波

将式（5）与式（11）做卷积并简化后可得

$$W_{af}(t) = I \cos(\omega_1 t - \varphi_1) + jI \sin(\omega_1 t - \varphi_1) +$$

$$\begin{aligned}
 I_{f1} & \left\{ e^{-\frac{[\omega_0 - (\omega_1 - \omega_r)]^2}{2}} \right\} \cos [(\omega_1 - \omega_r)t - \varphi_{f1}] + \\
 jI_{f1} & \left\{ e^{-\frac{[\omega_0 - (\omega_1 - \omega_r)]^2}{2}} \right\} \sin [(\omega_1 - \omega_r)t - \varphi_{f1}] + \\
 I_{f2} & \left\{ e^{-\frac{[\omega_0 - (\omega_1 + \omega_r)]^2}{2}} \right\} \cos [(\omega_1 + \omega_r)t - \varphi_{f2}] + \\
 jI_{f2} & \left\{ e^{-\frac{[\omega_0 - (\omega_1 + \omega_r)]^2}{2}} \right\} \sin [(\omega_1 + \omega_r)t - \varphi_{f2}]
 \end{aligned} \quad (12)$$

将式(12)的实部与虚部进行二次方合成,即可获得故障电流信号 $i_{af}(t)$ 的包络线。

经过计算可知,包络线中含有直流、 f_r 和 $2f_r$ 等分量,因此,在提取故障电流的包络线过程中,将基频分量转化成直流分量,从而消除了基频频谱泄漏对故障特征成分的影响,而气隙偏心故障特征频率 $F = |f_1 \pm mf_r|$ 在包络频谱中,故障特征频率变为 f_r 和 $2f_r$ 。由于 $2f_r$ 的幅值要大于 f_r 的幅值,所以选择 $2f_r$ 作为故障特征频率,该频率可以直接反映感应电动机气隙偏心故障,并且其幅值随着故障的严重程度增大而增大,因此可以将它作为气隙偏心故障的特征频率^[7]。

实验及结果分析

图2为故障诊断功能框图。

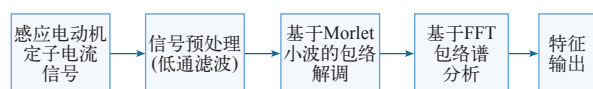


图2 故障诊断功能框图

实验选用一台7.5 kW三相感应电动机, $Z_1 = 36$ 槽, $Z_2 = 32$ 槽,将电动机的两个端盖对称加工成偏心,通过调整端盖偏离转轴轴心的不同位置来改变偏心程度。实验分别在正常、25%和50%静态偏心情况下进行,测出感应电动机相应的转速,并算出转差率 s ,再根据电动机的实际参数算出待检测的特征频率。定子电流通过电流互感器取出,实验过程中,数据采样时间为10 s、采样频率为4 kHz。利用Matlab对测得的数据作离线分析,得到了下表所示的电动机转子静态偏心实验结果。

表 电动机转子静态偏心实验结果

转子状态	转速/(r/min)	定子电流/A	对应的转差率(%)
没有故障	1 478	8.8	0.014 7
25%静态偏心	1 483	8.8	0.011 3
50%静态偏心	1 486	8.7	0.009 3

仿真结果如图3~图5所示。

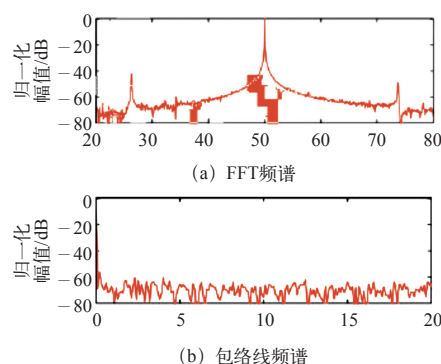


图3 电动机无故障时的定子电流FFT频谱和包络线频谱

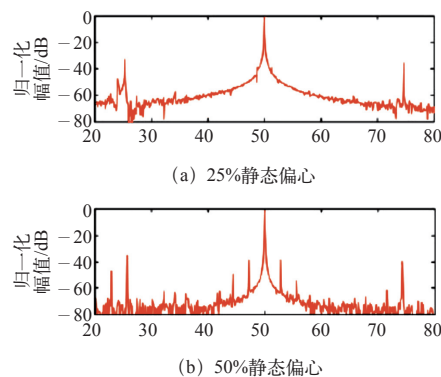


图4 故障电动机定子电流FFT频谱

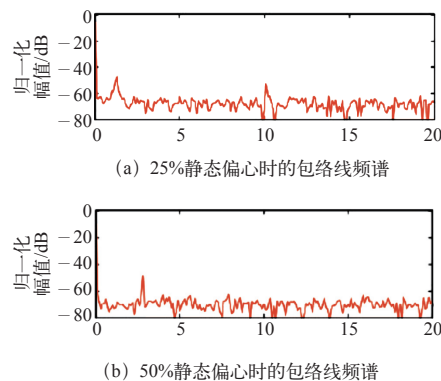


图5 故障电动机定子电流包络线频谱

由图4可知,在电动机发生偏心故障早期(25%静态偏心)时,故障特征频率已经完全被基频频谱泄漏所湮没,因此采用FFT方法已经无法诊断出电动机的偏心故障。由图5可知,由于在提

取包络线过程中基频成分转化成了直流分量,因此包络线频谱中的偏心故障特征频率不受基频频谱泄漏现象的影响,而且随着偏心程度的增加,故障特征频率逐渐增大,这与理论分析的结果一致。从图5a中还可以看出,即使在电动机故障早期,采用该方法仍然能较好地识别出故障特征频率,从而体现出新算法对比定子电流直接作FFT分析时具有明显的优势。

结束语

本文针对传统的FFT在提取故障特征频率中存在频谱泄漏和噪声所湮没的问题,提出了一种基于Morlet小波解调分析的新方法,利用Morlet小波的特性对定子电流信号进行变换,并采用包络理论将基波分量变成直流分量,同时将故障特征分量变成 $2f$ 频率分量,然后根据FFT频谱中是否存在频率特征成分来判断是否发生气隙偏心,最后通过实验及仿真验证了该方法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] Kadambe S, Boudreaux G-Bartels. Application of the wavelet transform for pitch detection of speech

signals [J]. IEEE Transactions on IT, 1992, 38 (2): 917-924.

- [2] 宁玉泉. 大型三相异步电机气隙偏心的在线监测和故障诊断 [J]. 大电机技术, 1999 (6): 20-24.
- [3] 张雄希, 刘振兴. 共振解调与小波降噪在电机故障诊断中的应用 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14 (6): 66-70.
- [4] 张绪省, 朱贻盛, 成晓熊, 等. 信号包络提取方法——从希尔伯特变换到小波变换 [J]. 电子科学学刊, 1991, 19 (1): 120-123.
- [5] 孙立军, 吕志香, 刘海丽, 等. 基于DSO-2100的异步电机转子偏心故障检测与诊断 [J]. 电机与控制学报, 2005, 9 (6): 537-540.
- [6] 刘振兴, 张哲, 尹项根. 异步电动机的状态监测与故障诊断技术综述 [J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2001, 24 (3): 285-287.
- [7] 张家凡, 易启伟, 李季. 复解析小波变换与振动信号包络解调分析 [J]. 振动与冲击, 2010, 29 (9): 93-96.

(收稿日期: 2015-02-10) **EA**

信息动态

大全集团成功入选工信部2015年互联网与工业融合创新试点企业名单

近日,在国家工信部公布的2015年互联网与工业融合创新试点企业名单中,大全集团榜上有名,成为2015年工信部遴选确定的100家互联网与工业融合创新试点企业之一。

按照《信息化和工业化深度融合专项行动计划(2013-2018年)》(工信部信〔2013〕317号)(以下简称《专项行动计划》)工作部署,2014年,工信部遴选和支持了23家互联网与工业融合创新试点企业开展试点工作,形成了大规模个性化定制、线上到线下(O2O)以及制造服务化转型等新模式。2015年,工信部继续组织互联网与工业融合创新试点遴选工作,经过地方政府、央企集团和行业协会等的推荐申报、专家评审等环节,遴选确定100家企业作为互联网与工业融合创新试点企业,并确定了各企业

的融合创新试点方向和项目。大全集团有限公司的“基于大数据的电气行业智能制造与决策服务云平台”项目,明确创新方向为“支撑智能绿色的生产运营创新”。

大全集团顺应“互联网+”的发展趋势,以信息化与工业化深度融合为主线,重点发展新一代信息技术,推进智能制造和绿色制造。公司与同方云计算技术股份有限公司合作,建设基于大数据的电气行业智能制造与决策服务云平台,实现设备接入标准化、业务支撑标准化以及高性能的设备数据存储和分析能力,为面向电气行业的业主、厂商以及其他相关单位提供服务。目前“互联网+”和制造融合推动产业升级的成果已经在大全集团初显,前景将更为可观,对行业企业转型升级极具示范作用。