



University of **HUDDERSFIELD**

University of Huddersfield Repository

Chen, Zhi, Wang, T., Gu, Fengshou, Haram, Mansaf and Ball, Andrew

Gear Transmission Fault Diagnosis Based on the Bispectrum Analysis of Induction Motor Current Signatures

Original Citation

Chen, Zhi, Wang, T., Gu, Fengshou, Haram, Mansaf and Ball, Andrew (2012) Gear Transmission Fault Diagnosis Based on the Bispectrum Analysis of Induction Motor Current Signatures. *Journal of Mechanical Engineering*, 48 (21). pp. 84-90. ISSN 0577-6686

This version is available at <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/16589/>

The University Repository is a digital collection of the research output of the University, available on Open Access. Copyright and Moral Rights for the items on this site are retained by the individual author and/or other copyright owners. Users may access full items free of charge; copies of full text items generally can be reproduced, displayed or performed and given to third parties in any format or medium for personal research or study, educational or not-for-profit purposes without prior permission or charge, provided:

- The authors, title and full bibliographic details is credited in any copy;
- A hyperlink and/or URL is included for the original metadata page; and
- The content is not changed in any way.

For more information, including our policy and submission procedure, please contact the Repository Team at: E.mailbox@hud.ac.uk.

<http://eprints.hud.ac.uk/>

基于电机电流信号双谱分析的齿轮传动故障诊断

陈峙¹, 王铁¹, 谷丰收², Mansaf Haram², Andrew Ball²

(1. 太原理工大学机械工程学院车辆工程系 太原 030024;

2. 英国哈德斯菲尔德大学 哈德斯菲尔德 HD1 3DH)

摘要: 电机电流信号分析广泛应用于电机本身的监测, 但用该项技术监测与电机相连设备的研究却很少。本文提出了应用异步电机的电流信号的调制信号双谱分析方法, 实现对与电机连接的齿轮传动系统的故障监测。试验表明调制信号双谱波峰的升高可以作为检测故障的依据。齿轮的故障可通过观测相关轴的双频波峰的变化进行诊断, 与齿轮直接相连的轴产生较大的波峰增高, 而与齿轮相邻的轴产生较小的波峰增高但轴不对中的故障可以只观测与该轴相应的双频波峰增高来确定。

关键词: 齿轮传动, 异步电机电流信号, 调制信号双谱, 故障监测

中图分类号: TH132

Gear Transmission Fault Diagnosis based on the Bispectrum Analysis of Induction Motor Current Signatures

Zhi Chen¹, Tie Wang¹, Fengshou Gu², Mansaf Haram², Andrew Ball²

(1. Department of Vehicle Engineering Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024

2. University of Huddersfield, Queensgate, Huddersfield, HD1 3DH, UK)

Abstract: Motor current signal analysis has been an effective way for many years to monitor electrical machines. However, little research work has been reported in using this technique for monitoring their downstream equipment due to difficulties in extracting weak fault signals in a noisy measured current signal. This paper investigates the characteristics of electrical current signals measured from an induction motor for monitoring faults from a downstream gear transmission system by a novel modulation signal (MS) bispectrum method. Both analytic analysis and experimental study are conducted based on a motor drive system and have found that the increase of bispectral peaks can be the basis of mechanical fault diagnosis. Particularly, a fault on a gear will causes a larger increase of the bispectral peak at both the gear shaft frequency and accompany with a smaller increase in the relating shaft frequency. However, a shaft misalignment only leads to a bispectrum peak increase at the shaft bifrequency along.

Keywords: Gear Transmission, Motor current signature, Modulated signal biopspectrum, Fault diagnosis.

0. 前言

齿轮传动是各种机器设备中应用最广泛的动力和运动传递装置, 其动力性能对整个机器有重要影响, 所以对齿轮故障进行准确监测具有重要意义^[1]。当前, 基于振动的监测是这类机器的主流监测手段。但是这种方法故障报警率高、设备成本也较高且传感器

安装不便。为了克服振动监测的这些弊端, 很多研究者将电机电流信号分析作为机械故障诊断的方法, 这种方法不仅成本较低而且可以实现远距离监测, 更为有利的是信号中除了包含正常运转的信息外, 还包含了运行工况信息, 因此可以建立精确可靠的变负荷模型进行状态监测^[2]。然而, 故障信号通常非常小, 并被大量的 50Hz 的供应电源信号和随机噪声信号所掩盖, 所以需要应用有

效的信号处理方法来提取小信号。2000 年 Benbozide 应用电机电信号监测了电机自身的故障^[3]。2007 年 Nagi 等人沿伸了电机电信号分析的应用,运用传统双谱分析对电机电信号进行了分析并证明了电流信号可用来检测多级变速箱的齿轮不同破损情况^[4]。2011 年郑州大学李凌均提出了矢双谱分析方法,通过采集安装在齿轮箱上的传感器采集的数据,应用双谱分析方法提取信号特征信息,实现了对齿轮箱的智能故障诊断^[5]。近期,谷丰收等人于 2011 年提出了一种新的 MS 双谱分析方法,从电流信号中提取微弱的故障信号,并在往复式压缩机的故障诊断中验证了这种方法对不同故障的检测更为准确^[6]。

本文重点讨论 MS 双谱分析方法在微小波动的齿轮传动系统上的应用。对不同故障下的电流信号应用 MS 双谱分析方法进行分析,确定电流信号的特征,实现对齿轮传动系统的有效故障监测和诊断。文章首先概述了电流信号的基本模型和 MS 频谱特性,然后结合齿轮传动系统的动态特性提取 MS 双谱的故障诊断特征。

1. 电流信号模型

1.1 正常驱动下的电流信号

当齿轮驱动系统正常运转时(如图 1 所示),根据电源三相对称性,驱动电机的理想电磁关系,可以只考查 A 相的电流特性。如果忽略供电电源的高阶谐波和机械系统的误差,并以电源电压信号为参考,正常运转的驱动电机 A 相的电流信号可表示为^[7]:

$$i_A = \sqrt{2}I \cos(2\pi f_s t - \alpha_I) \quad (1)$$

相应地,电机定子的磁通量为:

$$\phi_A = \sqrt{2}\phi \cos(2\pi f_s t - \alpha_\phi) \quad (2)$$

由电流和磁通相互作用产生的电磁扭矩为:

$$T = 3P\phi I \sin(\alpha_I - \alpha_\phi) \quad (3)$$

式中 I 和 ϕ 分别表示电源电流和磁通量均方根幅值, α_r 和 α_ϕ 是电流和磁通量参照电源电压的相位, f_s 是电源的基频, P 是

电机的极对数。

1.2 故障条件下的电流信号

当传动系统具有诸如转子断条、转轴不对中、齿轮轮齿破损,系统就会产生附加的波动转矩,为了平衡这个转矩电机将产生一个相应的电扭矩。假设附加的转矩是个频率为 f_F 正弦波动,相应的电流波形振幅为 I_F 、相位角为 α_F , 根据方程 (3) 波动力矩可表示为:

$$\Delta T = 3P\phi I_F \sin[2\pi f_F t - (\alpha_\phi - \alpha_F)] \quad (4)$$

这个波动力矩将引起速度的相应波动。根据电机扭矩平衡方程,可得出该波动力矩引起的速度波动为:

$$\Delta \omega = -\frac{3P^2\phi I_F}{2\pi f_F J} \cos[2\pi f_F t - (\alpha_\phi - \alpha_F)] \quad (5)$$

因此波动的角位移为:

$$\Delta \alpha_F = \frac{3P^2\phi I_F}{4\pi^2 f_F^2 J} \sin[2\pi f_F t - (\alpha_\phi - \alpha_F)] \quad (6)$$

J 是转子系统的惯量,这个角变化进而引起磁通量的相位调制,方程 (2) 可表示为:

$$\phi^F_A = \sqrt{2}\phi \cos\{2\pi f_s t - \alpha_\phi - \Delta \alpha_F \sin[2\pi f_F t - (\alpha_\phi - \alpha_F)]\} \quad (7)$$

$$\text{式中: } \Delta \phi = \frac{3P^2\phi I_F}{4\pi^2 f_F^2 J}$$

方程 (7) 表明由于系统的故障,磁通波产生了非线性项,这个磁通量产生一个相应的电磁力,从而导致定子中的非线性电流信号。考虑到 $\Delta \alpha_F$ 的值极小,因此 $\cos(\Delta \alpha_F) \approx 1$ 而

$\sin(\Delta \alpha_F) \approx \Delta \alpha_F$, 磁通量方程可简化为三个分量的叠加:

$$\begin{aligned} \phi^F_A &\approx \sqrt{2}\phi \cos(2\pi f_s t - \alpha_\phi) + \sqrt{2}\phi \Delta \alpha_F \sin(2\pi f_s t - \alpha_\phi) \\ &= \sqrt{2}\phi \cos(2\pi f_s t - \alpha_\phi) \\ &\quad + \frac{\sqrt{2}}{2}\phi \Delta \phi \cos[2\pi(f_s - f_F)t - \alpha_F] \\ &\quad - \frac{\sqrt{2}}{2}\phi \Delta \phi \cos[2\pi(f_s + f_F)t - 2\alpha_\phi - \alpha_F] \end{aligned} \quad (8)$$

方程 (8) 表明磁通量不仅包含基频部分还包括环绕基频的两个边频,由异步电机的等效电路可得电机的电流表示式 (9):

$$\begin{aligned}
i_A^F &= \sqrt{2}I \cos(2\pi f_s t - \alpha_I) \\
&+ \frac{\sqrt{2}}{2} I_l \cos[2\pi(f_s - f_F)t - \alpha_l - \alpha_F - \varphi] \\
&+ \frac{\sqrt{2}}{2} I_r \cos[2\pi(f_s + f_F)t - \alpha_l - 2\alpha_\phi - \alpha_F - \varphi + \pi]
\end{aligned} \quad (9)$$

此处的角位移 φ 是等效电路阻抗的相位， I_r 和 I_l 是电流分量下边频和上边频均方根值，它们分别由磁通频率 $f_s - f_F$ 和 $f_s + f_F$ 变化产生的逆电压引起的电流，这种简化的电流信号模型广泛应用于电机故障诊断。通过分析边频的振幅谱可以非常准确的诊断出转子断条和转子偏心等故障，但是传统的谱分析只对振幅进行分析，而忽视了对故障诊断可能非常有用的相位影响。如方程（9）所示边频 $f_s - f_F$ 和 $f_s + f_F$ 下的相位值是完全不同的，如果忽视此差异性在故障的初始阶段由于故障信号非常微弱且被大量的随机信号干扰，必将影响故障诊断的准确性和及时性。而双谱分析在识别非线性影响的同时，能够考虑振幅的变化和相位的影响，从而抑制噪声干扰，提高故障诊断的性能。

2. 调制信号双谱分析

双谱分析具有非线性识别，相位信息保留和剔除高斯噪声的特性，常被用于探测两个相互作用波所产生的非线性二次耦合。如文中第二部分所示，故障电流信号的非线性是由电源频率分量和故障频率分量所引起，由此可见双谱分析更适用于电流信号的故障分析。本文先分析常规双谱分析的不足，然后引入调制信号（MS）双谱分析。

2.1 常规双谱分析

给定一个离散时间电流信号 $x(n)$ ，其离散傅立叶变换（DFT）为 $X(f)$ ：

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j2\pi fn} \quad (11)$$

$X(f)$ 是个复数，其幅值 $|X(f)|$ 和相位 ϕ_f 表达式为：

$$X(f) = |X(f)| e^{j\phi_f} \quad (12)$$

通过傅立叶变换，常规双谱 $B(f_1, f_2)$ 在频域内可表示为：

$$B(f_1, f_2) = E\{X(f_1)X(f_2)X^*(f_1 + f_2)\} \quad (13)$$

其中 X^* 是 X 复共轭数， $E\{\}$ 是数学期望表达式， f_1, f_2 和 $f_1 + f_2$ 是三个不同的频率。与二阶谱不同双谱的幅值既包含原始信号的幅值又包含相位。如果 f_1, f_2 和 $f_1 + f_2$ 三个频率部分是独立分量，每个频率分量的相位符合均匀随机分布规律，并分布在 $(-\pi, \pi)$ 上，应用方程（13）计算统计期望，由于随机相位的分布，其双谱将趋于零，因此应用这种方法能够显著抑制随机噪声。相反如果 f_1, f_2 和 $f_1 + f_2$ 三个频率分量相互产生非线性耦合，其相位存在特定关系，即使三个频率各自是随机的，相位也符合下式关系：

$$\phi(f_2) + \phi(f_1) = \phi(f_2 + f_1) \quad (14)$$

因此，双谱统计平均值将不会趋向于零。这种非线性耦合在双谱分析中表现为双频 $B(f_1, f_2)$ 的一个峰值。

为了度量非线性耦合的可靠度，双谱相干函数定义为：

$$b^2(f_1, f_2) = \frac{|B(f_1, f_2)|^2}{E\{|X(f_1)X(f_2)|^2\}E\{|X(f_1 + f_2)|^2\}} \quad (15)$$

双谱相干函数的幅值独立于三个分量的振幅，其幅值域为 $(0, 1)$ ，当双谱相干函数值趋向于1时， f_1, f_2 和 $f_1 + f_2$ 三个频率分量存在非线性影响，相反当值趋向于0时三个频率分量之间的耦合不确定，或者说信号中噪声过高。因此通过双谱相干函数的幅值可以确定各频率分量之间的相互影响，并能度量分量的耦合的程度。

2.2 调制信号（MS）双谱分析

方程（13）仅能反应 f_1, f_2 和 $f_1 + f_2$ 频率分量之间的谐波关系存在着非线性，忽略了 f_1, f_2 的存在也可能是由于 f_1 和 f_2 之间的非线性作用，因此它并不能充分表示如方程（9）所代表的电机电流信号的调制特性。为了改进常规双谱对电机电流信号特征的描述，可采用方程（16）描述的调制信号（MS）双谱分析[6]：

$$B_{MS}(f_1, f_2) = E\{X(f_2 + f_1)X(f_2 - f_1)X^*(f_2)X^*(f_2)\} \quad (16)$$

以幅值和相位的格式，方程（16）可表示为：

$$B_{MS}(f_1, f_2) = E \left(|X(f_2 + f_1)| |X(f_2 - f_1)| |X^*(f_2)| |X^*(f_2)| e^{j\phi_{MS}(f_1, f_2)} \right) \quad (17)$$

方程 (17) 中 MS 双谱总相位为:

$$\phi_{MS}(f_1, f_2) = \phi(f_2 + f_1) + \phi(f_2 - f_1) - \phi(f_2) - \phi(f_2) \quad (18)$$

如方程 (14) 中描述, 如果 f_1 和 f_2 之间存在耦合, 它们的相位应该满足关系:

$$\begin{aligned} \phi(f_2 + f_1) &= \phi(f_2) + \phi(f_1) \\ \phi(f_2 - f_1) &= \phi(f_2) - \phi(f_1) \end{aligned} \quad (19)$$

将方程 (19) 代入到方程 (18) 中总相位将趋于零, 其幅值成为四个分量幅值的乘积, 且其值最大, 通过 MS 双谱计算的多次平均, 一个双谱峰值将在频率 (f_1, f_2) 上出现。这样方程 (16) 将调制振幅信号的 $(f_1 + f_2)$ 和 $(f_1 - f_2)$ 两个分量复合为一个度量, 它不仅简化了复杂的 MS 的频谱, 而且能更好地理解确定信号源。这也就是说如果 $(f_1 + f_2)$ 和 $(f_1 - f_2)$ 来源于 f_1 和 f_2 的非线性影响, 那么 MS 双谱波峰将在 (f_1, f_2) 上出现, 这样对 MS 的表述将更为准确。与此相反, 如果 f_1 和 f_2 无非线性作用, 回者它们是随机噪声, 其 MS 双谱的相位随时间变化, 最终平均结果为零, 由此 MS 双谱具有很好的抑制噪声作用。

可将方程 (9) 的电流信号的 MS 双谱相位表示为:

$$\phi_{MS}(f_s, f_F) = 2\alpha_\phi + 2\alpha_F + 2\varphi + \pi \quad (20)$$

方程 (20) 表示 MS 双谱的相位只与边频分量有关即与故障角位置和电机设计参数有关, 但与基频相位无关, 也就是说 MS 双谱调制信号独立于转子的角位移和信号采集起点, 这使得 MS 双谱的计算可采用任何时刻采集的数据。与常规双谱分析一样, 为度量非线性耦合的可靠度, MS 双谱相干函数可通过方程 (21) 求得:

$$b_{MS}^2(f_1, f_2) = \frac{|B_{MS}(f_1, f_2)|^2}{E \left(|X(f_2)X(f_2)X^*(f_2)X^*(f_2)|^2 \right) E \left(|X(f_2 + f_1)X(f_2 - f_1)|^2 \right)} \quad (21)$$

2.3 MS 双谱对调制过程的辨识

为了验证 MS 双谱分析对微小调制过程的辨识性能, 对式 (22) 所构造的模拟信号进行 MS 双谱分析并与常规双谱和功率谱的

结果进行比较。由式 (22) 可知该模拟信号包含一个 50Hz 的载波分量, 1 个 24Hz 大幅值的调制分量, 1 个 15Hz 小幅值的调制分量, 1 个 10Hz 的干扰分量, 此外, 该信号也含有不可避免的随机噪声分量 N, 当其统计特性为标准正态分布时, 取 0.005 为其幅值, 相应于大幅值调制分量的信噪比为 -15dB, 而相应于小幅值调制分量的信噪比仅为 -21dB, 以此可体现 MS 双谱的抑制噪声特性。

$$\begin{aligned} i^F &= \cos(2\pi 50t) \\ &+ 0.004 \cos[2\pi(50 - 24)t] \\ &+ 0.004 \cos[2\pi(50 + 24)t] \\ &+ 0.002 \cos[2\pi(50 - 15)t] \\ &+ 0.002 \cos[2\pi(50 + 15)t] \\ &+ 0.01 \cos(2\pi 10t) \\ &+ 0.005N \end{aligned} \quad (22)$$

图 1 (a) 为该信号在时域上的波形, 由于所引入的调制分量和噪声都很小, 该信号主要表现为 50Hz 的正弦波, 很难观察到调制过程的作用。但是从图 1 (b) 所示的功率谱, 可以分离出式 (22) 的各个分量。它将所引入的大幅值调制分量表示为在 (50 ± 24) Hz 的边频分量对, 小幅值调制分量表示为在 (50 ± 15) Hz 的边频分量对。然而, 进一步观察可发现, 含有噪声信号的功率谱存在很高的本底噪声, 使得其边带峰值明显高过无噪声信号的峰值, 产生较大的调制估计误差。

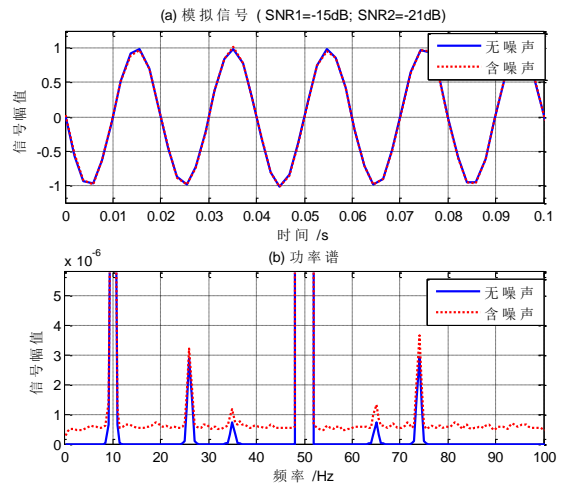


图 1 模拟信号及其功率谱

图 2 (a) 和 (c) 为该信号的 MS 双谱分析结果, MS 双谱幅值在 (15,50)Hz 和

(24,50)Hz 处的两个峰可清晰地表明信号含有调制分量。同时,这两个峰也被 MS 双谱相干函数的相关峰进一步确认。与此同时,其它如(40,50)Hz 处 MS 双谱的峰对应着非常小的相干函数,其表明这些峰不是通过调制作用形成,而是由数值计算近似造成,可由相干函数对其剔除。这点表明 MS 双谱是一种对 MS 非常简洁明了的表示,相比之下,功率谱中的边带分布较为复杂,尤其是当调制分量密集时,边带的辨识更为困难。

进一步观察图 2(a)可知,MS 双谱的本底噪声接近为零,这表明了 MS 双谱的良好抑噪特性,由此可知它也应能对其峰值给出较为准确的估计,通过比较 MS 双谱的峰值与无噪声下功率谱上的边带峰值可知两个调制分量的估计误差分别为 5.32% 和 5.61%。而功率谱对这两个调制分量估计误差分别为 26.3%和 62.4%,其明显高于 MS 双谱的估计误差。由此表明 MS 双谱可以对调制分量给出更为准确的估计,从而得到更为准确故障诊断。

图 2(b)和(d)为该模拟信号的常规双谱分析结果,在整个双频域上,只能在(50,50)Hz 处观察到一个峰,显然,该峰难以与所关心的调制分量产生关联。同时,常规双谱相干函数的所有值接近零值,意味着(50,50)Hz 的峰也不是 50Hz 分量的非线性耦合,而是由数值计算近似造成。由此可见,常规双谱分析确实不适于分析具有调制分量的电流信号。

3. 齿轮传动系统故障诊断

为了进一步验证 MS 双谱分析的有效性,对实测的电流信号进行了 MS 双谱分析,探讨不同机械故障双谱分析结果的特性,从而确定故障诊断的特征。

3.1 试验系统和故障设置

齿轮传动性能测试试验台如图 3 所示,试验台由三相电机作为动力源,传动部分是二级齿轮传动箱及作为负载的直流发电机三部分组成。表 1 中列出了齿轮传动系统的主要技术参数。由表可知该系统传动功率和传动结构与众多实用机械相接近,其测试结果应具有代表性。

试验台上布置了速度、扭矩、电流、电压和加速度传感器,电流和电压传感器安装在距离试验台大约 3 米处的控制柜内,进行远距离信号检测。电流传感器是基于霍尔效应的测量原理,其灵敏度是 5A/V,频率范围是 0—1000Hz,结合 $\pm 10V$,16 位,100KHz 数采系统,可实现对该供电电源在变频,变负荷的瞬时电流进行有效测量。

在试验台上对四类常见的故障进行了测试,第一类是在齿轮传动第一级输入轴上的齿轮(齿轮箱内部)某一轮齿破损 25%;第二类是在传动第一级中间轴上齿轮(齿轮箱内部)某一轮齿破损 25%;设计这两种故障试验是为了验证所提出的 MS 双谱分析方法能诊断齿轮箱内部的故障,这类故障都导致产生额外转矩和速度的波动,而且波动频率都不相同。第三类在交流异步电机输出轴与齿轮箱输入轴之间的轴不对中,由图 1 所示此故障是增加垫片 1 的厚度导致转子轴的角度偏差,从而引起动力电源的波动。第四类故障是齿轮箱输出轴和直流电机的转轴之间的轴不对中,由图 3 所示故障是改变垫片 2 的厚度可改变两轴的对中度,引起传动力矩和电流的额外波动。

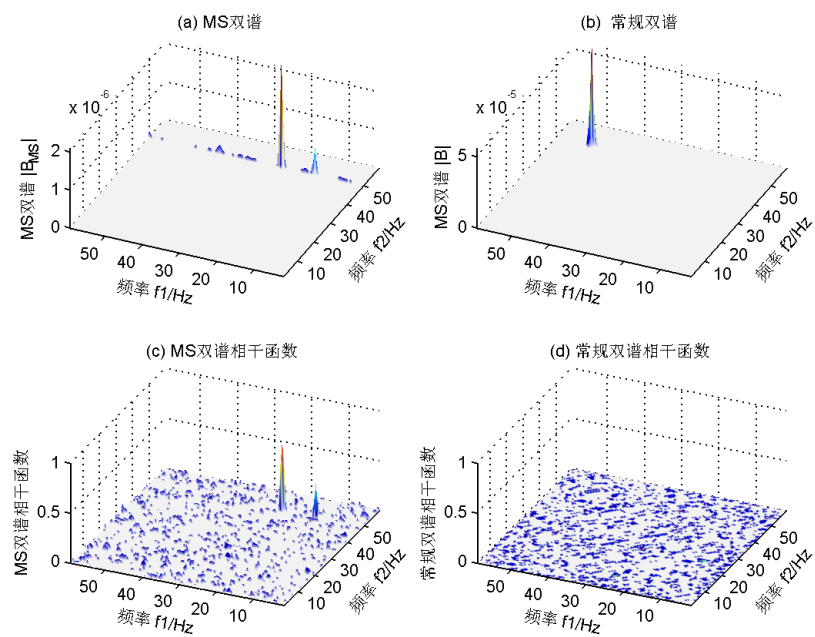


图 2 模拟信号的 MS 双谱和常规双谱

| | | | | |
|------|----------------------------------|-------------|-----------|-------------|
| 交流驱动 | 11kW, 1470r/min | | | |
| 齿轮 | 二级齿轮传动 | | | |
| 传动箱 | 齿数 | Z1/Z2=58/47 | | Z3/Z4=13/59 |
| | 啮合 | 1.45 | | 1.45 |
| | 重叠 | 2.89 | | 1.289 |
| | 螺旋 | 27 | | 13 |
| | 速度 | Fr1=24.5 | Fr2=30.23 | Fr3=6.66 |
| 直流负载 | 功率: 85kW, 转速: 1750rpm; 460V/200A | | | |

表 1 齿轮传动系统技术参数

表 2 齿轮传动系统的故障特征

| 齿轮标号 | 故障描述 | 故障程度 |
|------|----------------|--------|
| 齿轮07 | 第一级输入轴齿轮轮齿破损 | 齿宽的25% |
| 齿轮10 | 第一级齿轮中间轴齿轮轮齿破损 | 齿宽的25% |
| 齿轮12 | 输入轴轴不对中 | 0.49mm |
| 齿轮12 | 输出轴轴不对中 | 0.42mm |

在此四类故障试验前，每类试验都需先测试一组无故障条件下基准值，然后引入不同的故障进行故障试验。为验证 MS 双谱分析对每类故障诊断的特性，本试验共使用了三对齿轮，根据齿轮厂家提供的时间顺序（如表 2 所示）对每个齿轮进行编号。

为了满足同时采集振动和瞬时角速度的带宽和准确性，在数据采集时采集频率定为 100kHz，每通道数据集为 1600k 点，相当于一个 16 秒的数据长度。MS 双谱计算时，使用一个数据帧大小约 100 k 点离散傅里叶变换，这个长度可以达到 27 次平均，有效的抑制掉噪声。同时数据帧涵盖 50Hz 信号的 50 个整周期，对此信号频率下的谱泄漏有显著的抑制效果，从而提高了小边带频率分量提取的精度。

3. 2 基于 MS 双谱分析的故障诊断

图 4 表示齿轮 10 无故障的基准 MS 双谱和齿轮破损的 MS 双谱分析结果。由于 MS 双谱计算时 50Hz 的幅值进行了归一化，MS 双谱的幅值仅为边带的乘积，所以其单位为电流单位的平方（A²）。齿轮无故障的基准 MS 双谱分析结果如图 4（a1），在双频率（24.5，50）和（30.2，50）处出现了两个明显的双频波峰，这两处分别与齿轮箱输入轴和中间轴关联。对应这两个振动频率，图 4（a2）中齿轮无故障的基准 MS 双谱的双谱相干函数幅值为 1，表明这两个分量信号的信噪比较高，因此确认了双谱的峰是由于电源和转轴之间的非线性影响的结果。此外，大部分双谱的双谱相干函数都小于 1，说明信号中仅有小部分量存在非线性耦合。尤其是轴 3 在双频率（6.6，50）Hz 处没有出现波

峰,说明其耦合效应较弱,分析时无法提取。

然而比较双频率(24.5, 50)Hz 和(30.2, 50) Hz 处的两个波峰,(30.2, 50) Hz 处的峰值比(24.2, 50) Hz 处的大,这表明第二根轴的波动比第一根轴的波动大。由于做试验时系统经精确调整,波动可能是由于制造误差引起的。假设小齿轮和大齿轮是在相同质量监控条件下制造的,在(30.2, 50) Hz 处较大的峰值,是由转速较高引起的,这与高速引起高波动的动力学原理一致。通过以

上分析,MS 双谱分析可以获得对齿轮传动运行状态进行评估可靠和有效的信息,因此可以作为齿轮传动的故障诊断依据。

图4(b1)为小齿轮轮齿出现25%破损时的MS 双谱,与图4(a1)相对比,相对应两个波峰明显升高,特别是(24.5, 50) Hz 处的波峰升高尤为显著,通过该变化可以判断出故障出现在第一级齿轮传动链。由于轴1处的波峰相对升高较大,进而可以确定轴1发生了故障。

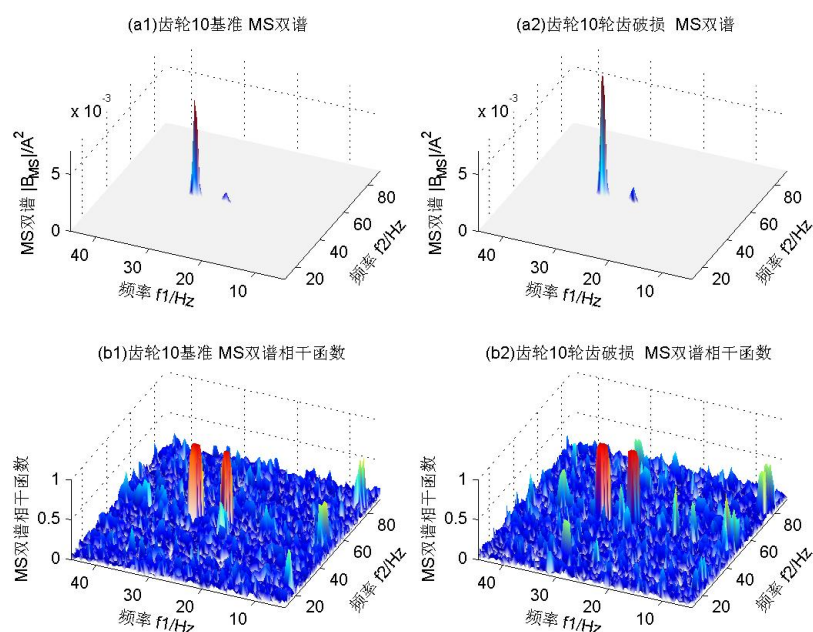


图2 齿轮10基准MS双谱和输入轴齿轮轮齿破损MS双谱

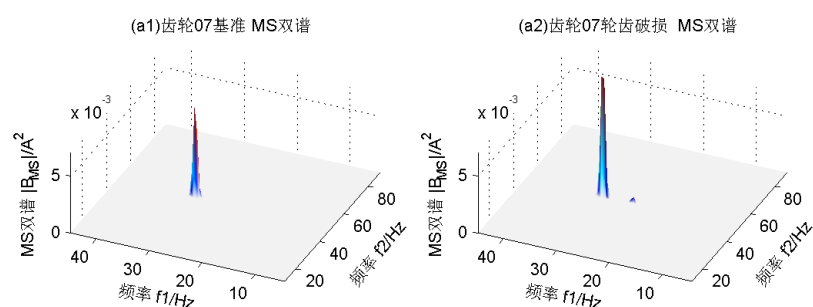


图3 齿轮07基准MS双谱和中间轴齿轮轮齿破损下调制MS双谱

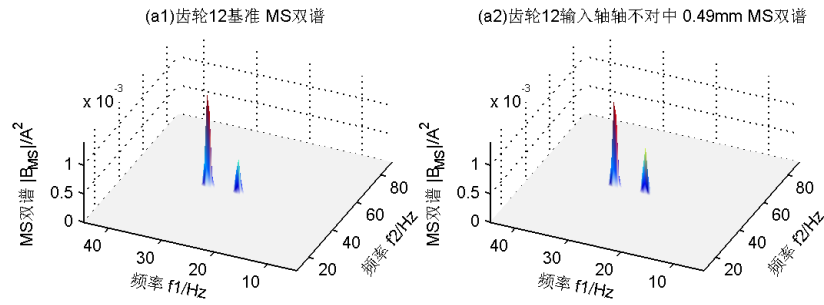


图4 齿轮12基准MS双谱和输入轴不对中的MS双谱

图5表示齿轮07的MS双谱分析结果。由于制造误差的不同，图5(a1)中在双频率(30.2, 50)Hz处与图4(a1)齿轮10比较，齿轮07无故障的基准MS双谱峰较小，此外在双频(24.5, 50)Hz处波峰消失，表明齿轮07制造误差较小。

然而比较齿轮07无故障波峰和故障波峰，齿轮轮齿出现25%破损引起双谱波峰在(30.2, 50)Hz显著升高，但是在双频(24.5, 50)Hz处只有略微升高，这说明故障位于中间轴齿轮可能性大，由此进一步验证了电源电流信号MS双谱分析能够确定故障源位置。

图6表示齿轮12的MS双谱分析结果。同理，由于不同的制造误差，与图4齿轮10和图5齿轮07对比，该齿轮MS双谱基准波峰略有升高，但是在双频率(24.5, 50)Hz处波峰升高显著，说明输入轴齿轮的制造误差较大。

对比无故障MS双谱的波峰和有故障MS双谱的波峰，由于轴不对中的原因，在双频率(24.5, 50)Hz处波峰升高显著，而在双频率(30.2, 50)Hz处几乎无变化。这表明

变化是由输入轴齿轮的波动引起，与所设置的故障相吻合，所以MS双谱分析可以区分齿轮传动系统的故障类别。

以上讨论的故障均发生在距离交流电机较近且速度较高的部件。图7是在距离交流电机较远处，低速转轴轴不对中的MS双谱分析结果。因为相应于轴1和轴2的MS双谱波峰几乎不变，图7采用了双谱的放大表示，以观察相应于轴3的波峰变化。比较MS双谱，图7(a1)和(a2)在双频率(6.6, 50)Hz处均存在一个较小的波峰，但是，图7(a2)所示的波峰较大，表明了故障存在。进而通过观察图7(b2)的双谱相干函数可知，(6.6, 50)Hz的幅值接近1，从而得以确认图7(a2)所示波峰的存在，证实了输出轴不对中产生的波动，由此证明电机信号的MS双谱可以检测远离电机低速部件的故障。

通过以上的分析，所提出的MS双谱分析方法可以检测和区分不同的故障类型。双频波峰增高说明故障的存在，双频波峰的相对分布特点可给出区分故障原因的信息。

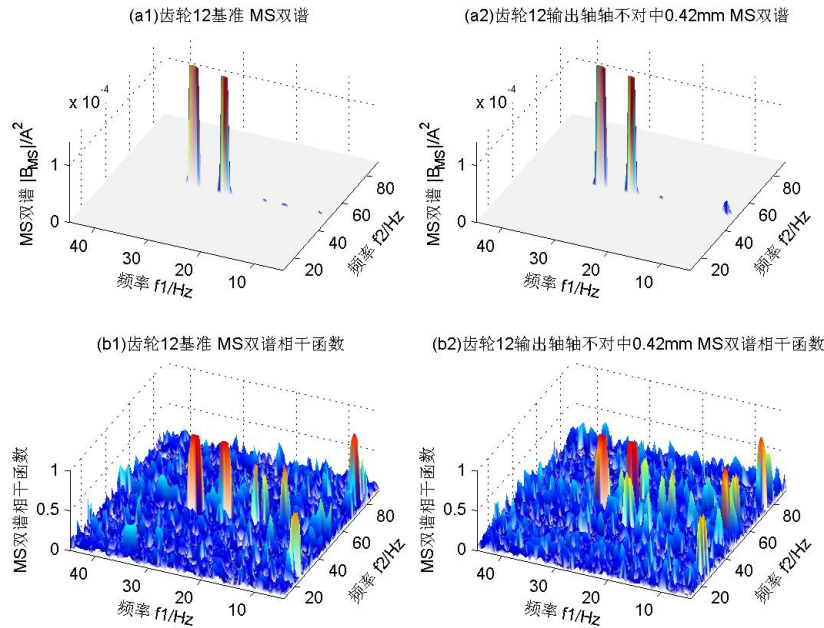


图5 齿轮12基准MS双谱和输出轴不对中的MS双谱

4. 结论

文章简述了电机电流信号的特性以及齿轮传动系统的故障影响。由于机械故障引起的载荷和速度的波动将导致电源电流信号微小调制, MS双谱分析具有噪声消减、非线性影响检测和相位信息保持的特性, 可以提高检测弱小信号的性能。

试验表明MS双谱波峰的升高可以作为检测故障的依据。齿轮的故障可通过观测相关轴的双频波峰的变化进行诊断, 与齿轮直接相连的轴产生较大的波峰增高, 而与齿轮相邻的轴产生较小的波峰增高, 但轴不对中的故障可以只观测与该轴相应的双频波峰增高来确定。

参考文献

- [1] 韩捷, 巩晓赟, 陈宏. 全矢谱技术在齿轮故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报. 2010, 8(1): 81-85.
- [2] Benbozid, M. H. A review of induction motor signature analysis as a medium for fault detection[J]. IEEE transactions on industrialelectronics. 2000, 47(5): 984-987.
- [3] Al-Arbi, S., Gu, F., Guan, L., Ball,

- A. and Naid, A. 2009. Gearbox Fault Diagnosis based on Vibration Signals Measured Remotely[J]. Key Engineering Materials. 2009. 413(41): 175-180.
- [4] Nagi Rgeai, M. Helical gearbox fault Detection using motor Current signature Analysis. Thesis of doctor of philosophy, University of Manchester[M]. 2007
- [5] 李凌均, 韩杰, 李朋勇, 雷文平, 董辛. 基于矢双谱的智能故障诊断方法[J]. 机械工程学报. 2011, 47(11): 64-67.
- [6] Gu, F. Shao, Y. Hu, N. Naid, A. and Ball A.D. Electrical motor current signal analysis using a modified bispectrum for fault diagnosis of downstream mechanical equipment[J]. 2011. 25(1): 360-376.
- [7] Bellini, A, Filippetti, F, Franceschini G, Tassoni, C, and Kliman, G.B. Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. 37(5): 1248-1255.
6. Obaid, R. R, Habetler, T. G, Tallam, R. M. Detecting load unbalance and shaft

misalignment using stator current in
inverter-driven induction motors, IEEE
int. Elec. Mach. and Drives Conf., 2003.
pp1454-1458.