

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0006.001

基于高阶谱的异步电机定子匝间短路 故障诊断方法研究*

籍超男, 梁 喆

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232000)

摘 要:传统的信号频谱分析方法应用在信噪比低、故障特征不明显的异步电机定子匝间短路故障诊断中, 往往会出现因为故障的频谱图差别不大而导致误判的问题, 为此提出了一种基于高阶谱的定子匝间短路故障诊断方法。高阶谱相较于传统频谱分析, 具有良好的抑噪性, 同时还保留了信号的非线性相位信息, 解决了定子匝间短路故障快速诊断的问题。通过理论联系实例分析表明: 发生定子匝间短路故障与未发生故障的电流信号“最大幅值”处双谱水平切片图完全不同, 且随着故障严重程度的增加, 其谐波分量越多, 幅值越大。由此验证了该方法可以有效地提取出信号中的非线性特征, 完成了对异步电机定子匝间短路故障的诊断, 具有良好的实际应用前景。

关键词:异步电机; 高阶谱; 故障诊断; 定子绕组

中图分类号: TM343

文献标志码: A

文章编号: 1672-058X(2020)06-0001-06

0 引 言

异步电机作为社会生产生活的核心设备, 一旦发生故障, 会造成严重危害。目前, 我国对于异步电机的故障诊断主要包括定子、转子以及轴承故障诊断。其中定子故障的发生率几乎达到了 40%, 所以, 此类故障诊断方法研究迫在眉睫。

赵慧敏等^[1]利用小波变换和支持向量机(support vector machine, SVM)进行异步电机的定子故障诊断; 吴建萍等^[2]将小波变换与小波神经网络相结合从而实现电机故障信号的提取和分析, 小波变换适用在分析匹配非平稳信号, 对有效处理故障特征有很好的时频效果, 但并不能提取到明显的特

征量, 而且利用小波变换对信号降噪需要选取合适的小波函数, 往往不能达到理想效果给后续信号处理带来困难; 夏立等^[3]从信号频谱分析的角度出发, 基于信息融合分析对感应电机的定子匝间故障检测方法提供了新思路, 但这种方法需要大量的先验知识和丰富的处理数据经验; 王丽华等^[4]利用深度学习法提取机械振动信号的特征量, 在大量的数据支撑下能够提高故障诊断的准确率, 但是深度学习方法作为近年新兴的学习算法, 为了保证算法实时性, 需要更高的并行编程技巧和更多更好的硬件支持。

本文在上述文献的基础上, 从故障定子电流频谱分析角度思考, 发现信噪比低故障特征不明显的故障诊断中, 常用的频域分析方法, 各种故障的频

收稿日期: 2019-12-24; 修回日期: 2020-03-07.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61873004); 国网公司科学技术项目(SGAHDK00DJJS1900077).

作者简介: 籍超男(1995—), 女, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 从事智能控制技术研究.

谱图差别不大,给具体诊断带来困难。因此提出一种基于高阶谱的定子匝间故障诊断方法,高阶谱能够抑制信号中含有加性有色噪声,可以提高信号分析及辨识的精度。诊断的基本思想是用高阶累积量建立 AR 模型,提取高频特征量,从理论分析和实验结果探究基于高阶谱分析技术的电机定子匝间短路故障的诊断方法。

1 基于高阶谱的故障诊断方法

1.1 高阶累积量与双谱

发生电机定子绕组故障时,在传统的诊断方法中通常将负序分量或是电流信号相移作为故障特征量,但由文献[7]可知,当电机发生转子断条故障时也会造成电流负序分量和信号相移的产生,而且会伴随着转子故障的严重程度而增加,因此提出一种通过检测定子电流信号中是否存在频率为 $f_r = f_1 \left[k \pm \frac{n}{p} (1-s) \right]$ 的谐波分量来诊断定子绕组故障情况,其中: f_1 是电源频率, S 是电机转差率, $K=1, 3, 5, \dots, n=1, 2, 3, \dots, (2p-1)$ 。

实际运行中的电机受到电网频率波动和电机自身不对称性的影响,其故障特征频率 f_r 并不明显,有时会被其他噪声因素影响而产生误判。

想要准确分析这种非高斯非线性信号,高阶统计量和高阶谱是最有利的工具,不仅可以起到抑制噪声的目的,还可以通过分析三阶统计量以及其多维傅里叶变换双谱提取出更多有用的信息。

设 $x(n)$ 为 K 阶平稳随机过程且均值为 0,定义其 K 阶累积量为随机变量 $\{x(n), x(n+m), \dots, x(n+m_{k-1})\}$ 的 K 阶联合累积量,即

$$C_{kx}(m_1, m_2, \dots, m_k) = \text{cum}[x(n), x(n+m), \dots, x(n+m_{k-1})] \quad (1)$$

则 K 阶谱定义为 K 阶累积量的 $k-1$ 维离散 Fourier 变换,由式(1)可得:

$$S_{kx}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{k-1}) = \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{m_{k-1}=-\infty}^{\infty} [C_{kx}(m_1, m_2, \dots, m_{k-1}) e^{-j(m_1\omega_1 + \dots + m_{k-1}\omega_{k-1})}] \quad (2)$$

当 $k=2$ 时,称为二阶谱,即常说的功率谱;当

$k=3$ 时,称为三阶谱,也称双谱。在高阶谱中,最简便且最有应用价值的就是双谱分析方法,其可以很好应用在机械故障诊断领域。双谱的表达式为

$$S_{3x}(\omega_1, \omega_2) = \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} [C_{3x}(m_1, m_2) \times e^{-j(m_1\omega_1 + m_2\omega_2)}] \quad (3)$$

由于累积量的对称性,可以得到:

$$S_{3x}(\omega_1, \omega_2) = S_{3x}(-\omega_1 - \omega_2, \omega_1) = S_{3x}(\omega_2, \omega_1) = S_{3x}(\omega_1, -\omega_1 - \omega_2)$$

因此双谱具有对称性,对称区间共有 12 个,可对其中一个区域做双谱估计,得到双谱分析的结果。

双谱估计通常有两种方法,分别为非参数方法和参数化方法。非参数化方法分为直接法和间接法,详细步骤见文献[6]。参数化方法基于 AR, MA, ARMA 模型,相较于非参数化方法有着精度较高的优势。因此本文采用参数化方法建立 AR 模型进行双谱估计并做切片分析。

1.2 双谱切片

双谱切片的定义是三阶矩切片的一维傅立叶变换,对于 0 均值平稳信号 $x\{n\}$ 来说,三阶矩与三阶累积量相等,所以由式(1)得到三阶矩:

$$C_{3x}(m_1, m_2, m_3) = \text{cum}[x(n), x(n+m_1), x(n+m_2)] \quad (4)$$

由文献[9]可知,当冻结三阶矩中一个频率 m_2 时,即当 $m_2=C$ 时,式(4)可改写为

$$C_{3x}(m_1, m_2) = C(m_1, m_2) |_{m_2=C} = \text{cum}\{x(n), x(n+m_1), x(n+C)\} \quad (5)$$

对式(5)做傅立叶变换,得到:

$$S_x(\omega_1) = \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} C_x(m_1) e^{-j\omega_1 m_1} \quad (6)$$

式(6)可看作是双谱切片的表达式,按照表达式,双谱切片方式有对角切片、水平切片和竖直切片等,对于不同信号需要具体分析。

双谱切片是对双谱算法的简化,它既能弥补双谱计算量大、精度不高的缺点,又能保留双谱定量描述非线性相位信息的特性。

2 实验验证及数据分析

以一台小功率电机为研究对象,进行故障诊断

试验,其基本参数如表 1。

表 1 电机基本参数

Table 1 Basic parameters of motor

项目类别	数值	项目类别	数值
额定电压	380 V	额定功率	100 W
额定电流	1.1 A	额定转速	1 420 r/min
极对数	2	接线方式	Y

设置采样频率 5 kHz,采样点为 1 024。试验接线图和实物图如图 1,2 所示。为模拟匝间短路故障,如图 3 所示在定子三相绕组引出一些附加抽头。

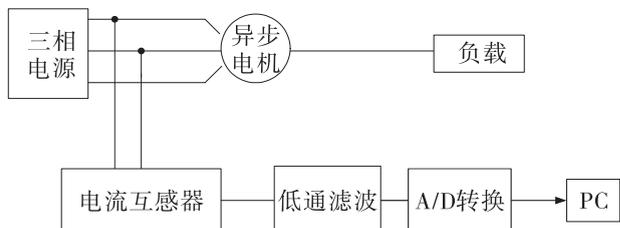


图 1 实验接线图

Fig. 1 Experimental wiring diagram

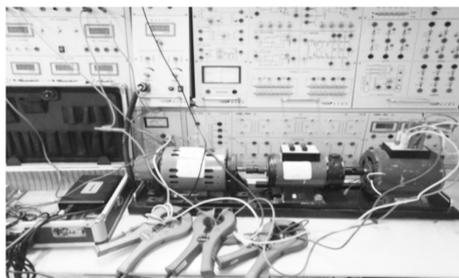


图 2 电机接线实物图

Fig. 2 Physical diagram of motor wiring

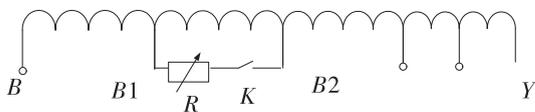
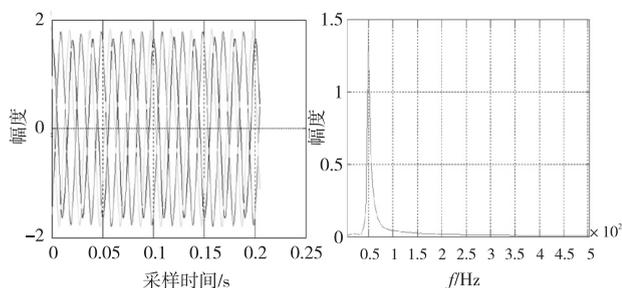


图 3 定子绕组改装示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stator winding modification

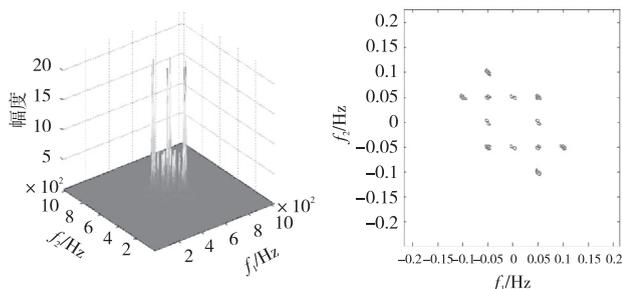
在附加抽头之间添加一个可变电阻,这里使用的是 30Ω 陶瓷可调电阻,主要作用是通过调节电阻防止短路电流过大烧坏电机。

实验中分别在电机正常时和发生匝间短路故障 7%, 13.3%, 20.26% 时对电机定子电流进行频谱分析。图 4 是异步电机正常时采集的定子电流信号及 B 相电流的 FFT 频谱图,并对其做出基于 AR 模型的双谱估计三维图及双谱平面图。



(a) 原始信号

(b) 幅度-频率曲线图



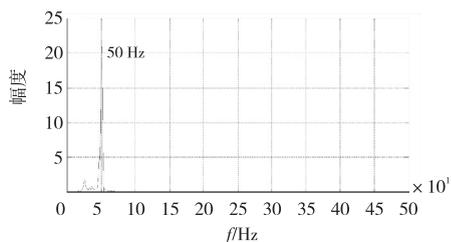
(c) 双谱估计三维图

(d) 双谱估计平面图

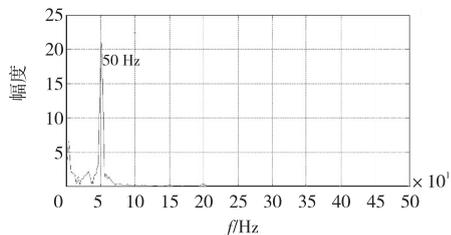
图 4 正常电机定子 B 相电流信号

Fig. 4 Stator B-phase current signal of normal motor

可以看出当实际异步电机正常工作时,在图 4(b)中, $f=50$ Hz 处具有最高谱峰,使用双谱对角切片和“最大幅值准则”水平切片方法对信号进行分析。



(a) 对角切片



(b) “最大幅值”处水平切片

图 5 正常电机 B 相电流双谱切片图

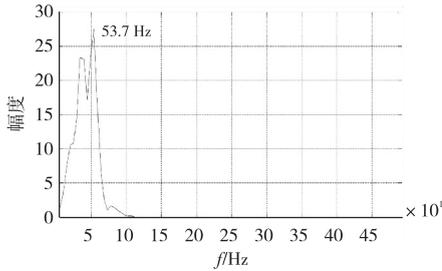
Fig. 5 Double-spectrum slicing of normal motor

B-phase current

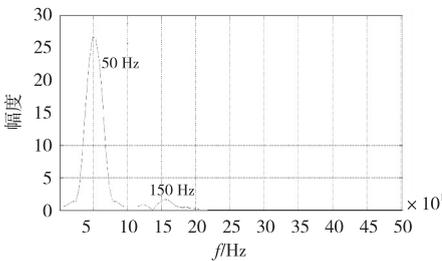
明显,两种切片方法都能观测到电流信号 50 Hz 处基波频率,但“最大幅值”处水平切片包含了直流成分,因此为了使得切片结果更加清晰,在验证高

阶谱的双谱切片方法可以适用于电机的匝间短路故障诊断中,去除了直流分量较大的点。

对发生 B 相匝间短路故障 7%、13.3%、20.26% 时的电机定子电流做如图 6—图 8 所示的双谱估计切片图。



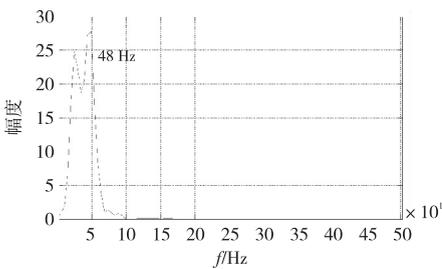
(a) 对角切片



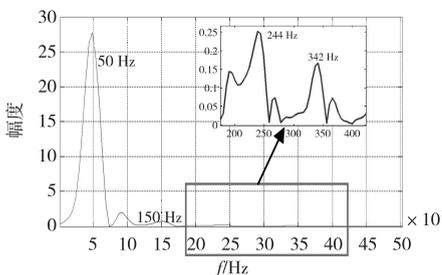
(b) “最大幅值”处水平切片

图 6 电机 B 相匝间短路双谱估计切片图(7%)

Fig. 6 B-phase inter-turn short circuit bispectral estimation slice diagram of motor (7%)



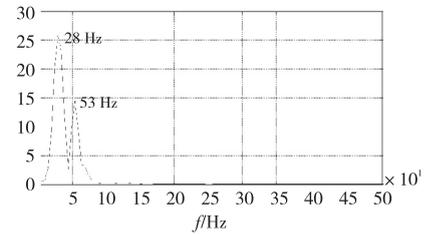
(a) 对角切片



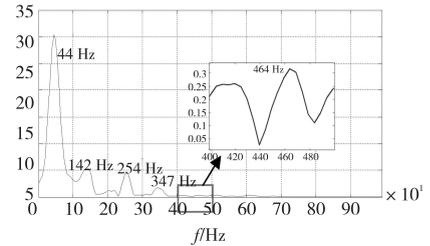
(b) “最大幅值”处水平切片

图 7 电机 B 相匝间短路双谱估计切片图(13.3%)

Fig. 7 Bispectral estimation of short circuit between B-phase turns of electric machine (13.3%)



(a) 对角切片



(b) “最大幅值”处水平切片

图 8 电机 B 相匝间短路双谱估计切片图(20.26%)

Fig. 8 Bispectral estimation of short circuit between B-phase turns of electric machine (20.26%)

由图 6 可知,在发生 7% 定子匝间短路时,对角切片图没有特别明显的谐波分量,而“最大幅值”处切片图不仅存在 50 Hz 左右的谱峰,同时在 150 Hz 附近也出现了低于主频的谱峰。再观察 13.3% 定子匝间短路,“最大幅值”处双谱切片图中又出现非常明显的两个波峰位于 244 Hz 和 342 Hz 左右,这与通过理论计算所得的故障特征频率 250 ± 23.675 Hz, 350 ± 23.675 Hz 是一致的。并且通过切片图可以看出发生故障时,接近 100 Hz 处出现了谐波成分,这是因为定子匝间故障会引起电机磁场变化,伴随着电机的不断运转而造成了电机转子发生气隙偏心,从而产生一些转子偏心特征频率。继续观测发生 20.26% 匝间短路故障,250 Hz 处谱峰值发生明显增加,与此同时,350 Hz 和 450 Hz 处也出现了峰值较小的谱峰。尽管伴随着故障的加重,基波幅值也发生一些波动,但通过前面的理论分析可知,这是由于电机自身构造和三相供电不平衡造成的,相较于其他谐波谱峰的增加,基波幅值的增加并不会影响最终的诊断结果。总结以上分析结果,双谱切片(尤其是“最大幅值”处水平切片)应用于分析定子电流信号,可以有效地诊断出异步电机是否发生定

子匝间短路故障。

3 结 论

高阶谱相较于传统频谱分析,具有良好的抑噪性,同时还保留了信号的非线性相位信息,被广泛用于非线性非高斯信号的处理中。本文利用基于AR模型的双谱切片方法,在实验中采集实际的故障电机定子电流信号,作出电机发生定子匝间短路故障相电流的两种双谱切片图,对比理论分析结果与频谱分析结果可知,发生定子匝间短路故障与未发生故障的电流信号“最大幅值”处双谱水平切片图完全不同,且随着故障严重程度的增加,其谐波分量越多,幅值越大。由此,验证了该方法可以有效地提取出信号中的非线性特征,完成了对异步电机定子匝间短路故障的诊断,具有良好的实际应用前景。

参考文献(References):

- [1] 赵慧敏,房才华,邓武. 基于智能优化方法的SVM电机故障诊断模型研究[J]. 大连交通大学学报, 2016, 37(1):92—96
ZHAO H M, FANG C H, DENG W. Research on SVM Motor Fault Diagnosis Model Based on Intelligent Optimization Method [J]. Journal of Dalian Jiaotong University (Natural Science Edition), 2016, 37(1):92—96 (in Chinese)
- [2] 吴建萍,姜斌,刘建慰. 基于小波包信息熵和小波神经网络的异步电机故障诊断[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(5):223—238
WU J P, JIANG B, LIU J W. An Induction Motor Fault Detection Method [J]. Journal of Shandong University (Engineering Edition), 2017, 47(5):223—238 (in Chinese)
- [3] 夏立,费奇. 基于信息融合分析的感应电机故障检测方法[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(3):291—295
XIA L, FEI Q. Fault Detection Method of Induction

Motor Based on Information Fusion Analysis [J]. Journal of Motor and Control, 2006, 10(3):291—295 (in Chinese)

- [4] 王丽华,谢阳阳,张永宏,等. 采用深度学习的异步电机故障诊断方法[J]. 西安交通大学学报, 2017, 10(10):128—134
WANG L H, XIE Y Y, ZHANG Y H, et al. Fault Diagnosis Method of Asynchronous Motor Based on Deep Learning [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 10(10):128—134 (in Chinese)
- [5] 赵子炜,艾红. 高阶谱在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 煤矿机械, 2015, 7(7):303—305
ZHAO Z W, AI H. The Application of High-order Spectrum in the Fault Diagnosis of Rolling Bearing [J]. Coal Mine Machinery, 2015, 7(7):303—305 (in Chinese)
- [6] 杨浩. 高阶谱在风力发电机故障诊断中的应用研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018
YANG H. Application of High-order Spectrum in Fault Diagnosis of Wind-Driven Generator [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018 (in Chinese)
- [7] 李和明,孙丽玲,许伯强,等. 异步电动机定子绕组匝间短路故障检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21):74—79
LI H M, SUN L L, XU B Q, et al. A New Method for Detecting Turn-to-turn Short Circuit Fault of Stator Winding of Asynchronous Motor [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2008, 28(21):74—79 (in Chinese)
- [8] 段向阳,王永生,苏永生. 切片双谱分析在离心泵诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(5):581—584
DUAN X Y, WANG Y S, SU Y S. Application of Slice Bispectrum Analysis in the Diagnosis of Centrifugal Pump [J]. Vibration, Test and Diagnosis, 2010, 30(5):581—584 (in Chinese)
- [9] 于雅生. 基于双谱切片的纹理图像识别研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2011
YU Y S. Research on Texture Image Recognition Based

- on Bispectral Slicing [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011 (in Chinese)
- [10] 杨军. 基于高阶统计量的表面肌电信号模式识别研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009
- YANG J. Research on Pattern Recognition of Surface EMG Signals Based on High-order Statistics [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009 (in Chinese)
- [11] 李威. 基于电流特征分析的感应电动机故障诊断方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2017
- LI W. Fault Diagnosis Method of Induction Motor Based on Current Characteristic Analysis [D]. Guangzhou: Institutes Of Technology Of South China, 2017 (in Chinese)

Study on Diagnosis Method of Stator Inter-turn Short Circuit of Asynchronous Motor Based on High Order Spectrum

JI Chao-nan, LIANG Zhe

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232000, China)

Abstract: The traditional signal spectrum analysis method is applied to the diagnosis of stator inter-turn short circuit fault with low signal-to-noise ratio and with no obvious fault characteristics, which often leads to the problem of misjudgment. Therefore, a stator inter-turn short circuit fault diagnosis method based on high-order spectrum is proposed. Compared with the traditional spectrum analysis, the high-order spectrum has good noise suppression and preserves the nonlinear phase information of the signal, which solves the problem of fast diagnosis of stator inter-turn short circuit fault. Through the theoretical analysis based on examples, it is shown that the bispectrum horizontal slice diagram at the "maximum amplitude" of the current signal with and without stator inter-turn short circuit fault is completely different from it at the "maximum amplitude" of the current signal without fault. With the increasing of the degree of the fault, there are more harmonic weights and more amplitude values. Therefore, it is proved that the method can effectively extract the nonlinear characteristics of the signal, complete the diagnosis of the stator inter-turn short-circuit fault of the asynchronous motor and has good application prospect.

Key words: asynchronous motor; high-order spectrum; fault diagnosis; stator winding

责任编辑: 李翠薇

引用本文/Cite this paper:

籍超男, 梁 喆. 基于高阶谱的异步电机定子匝间短路故障诊断方法研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2020, 37(6): 1—6

JI C N, LIANG Z. Study on Diagnosis Method of Stator Inter-turn Short Circuit of Asynchronous Motor Based on High Order Spectrum[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(6): 1—6