

基于小波降噪和共振解调法的异步电机故障诊断方法*

丁小健^{1,2}, 周健¹, 梁超¹, 王远航¹, 李小兵², 王春辉¹

(1. 工业和信息化部电子第五研究所, 广东 广州 510610;

2. 广东省电子信息产品可靠性技术重点实验室, 广东 广州 510610)

摘要: 针对异步电机故障时的振动信号特征, 提出了一种基于峭度、小波降噪和共振解调法相结合的异步电机故障诊断方法。通过对正常、离心开关打开不完全、定转子扫膛、后轴承损坏等 4 种状态的单相交流异步电机进行故障试验, 利用 NI CompactRIO 平台搭载振动信号采集卡, 采集电机前端盖侧面和顶端的振动信号, 进行峭度统计分析, 同时通过小波降噪和共振解调法提取振动信号的频域故障特征。试验结果表明, 提出的方法能够良好地实现异步电机故障诊断。

关键词: 异步电机; 振动信号; 小波降噪; 共振解调法; 故障诊断

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)09-0106-05

doi: 10.12177/emca.2020.095

A Fault Diagnosis Method of Asynchronous Motor Based on Wavelet De-Noising and Resonance Demodulation Analysis*

DING Xiaojian^{1,2}, ZHOU Jian¹, LIANG Chao¹, WANG Yuanhang¹, LI Xiaobing², WANG Chunhui¹

(1. CEPREI, Guangzhou 510610, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Electronic Information Products Reliability Technology, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Aiming at the vibration signal characteristics for asynchronous motor fault diagnosis, the method combining kurtosis, wavelet de-noising and resonance demodulation analysis is proposed. We consider four types of motor states including the normal state, the incomplete open state of centrifugal switch, the chamber swept state, and the rear bearing damaged state, and collect the corresponding single-phase asynchronous motor samples for tests. NI CompactRIO is used to acquire the vibration signals at the side and top of the front cover for each motor. The kurtosis statistical analysis is firstly performed, and wavelet de-noising and resonance demodulation analysis are combined to extract the frequency domain characteristics for each failure type. The tests demonstrate the effectiveness of the proposed approach in the fault diagnosis of asynchronous motors.

Key words: asynchronous motor; vibration signal; wavelet de-noising; resonance demodulation analysis; fault diagnosis

收稿日期: 2020-05-13; 收到修改稿日期: 2020-07-06

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51605095); 智能制造综合标准化项目(智能装备故障诊断和预测性维护共性技术标准研究及试验验证)

作者简介: 丁小健(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电机故障预测与健康管理的。

0 引言

异步电机的工作环境一般比较恶劣,导致电机发生故障的频率较高。电机发生故障会影响整个系统,带来巨大的经济损失,甚至危害人身安全^[1]。因此,对异步电机进行故障诊断至关重要。由于电机设备在运行时会发出有规律的振动,通过对振动信号的分析^[2],可以得到电机的各种状态信息和运行参数,从而对电机故障进行有效的判断。这种方法的缺点是振动信号容易受到现场其他设备产生的振动噪声的影响,而且电机的振动是轴承等机械振动和电磁振动的混合信号,这给基于振动信号的诊断带来了难度。

目前,基于振动信号的电机故障诊断技术得到了国内外研究者的一致重视。丁锋等^[3]通过小波降噪抑制噪声干扰,通过 Hilbert 变换解调故障特征频率,证明了小波降噪和 Hilbert 变换的组合在电机振动信号处理中的应用。杨春洁^[4]利用小波降噪与包络分析相结合的方法对机车牵引电机轴承进行故障诊断。曾军等^[5]应用自适应阈值小波降噪方法对风电机组中的振动信号进行降噪处理,利用峭度诊断有无故障,同时定位故障频段。文献[6-8]利用小波变换,选取不同的阈值获取方法对振动信号降噪,用于轴承的故障诊断。杨新华等^[9]也应用峭度指标和小波包分析相结合的算法,研究异步电机的轴承故障。常悦等^[10]基于小波降噪,进行了电机气隙偏心故障的位置和程度研究。张艳等^[11]开展了基于小波变换的双馈异步发电机滑环装置故障诊断方法研究。

综上所述,小波降噪、包络解调以及峭度分析在电机故障诊断中取得了相当多的研究成果,通过振动信号分析,对故障进行细化研究,诊断出轴承故障位置、偏心故障程度等,但这些研究多是针对轴承故障、偏心故障等单一故障,涉及轴承故障、定转子故障等多类故障的综合诊断研究尚少。本文针对异步电机整机,首先计算振动信号峭度,同时通过自适应小波降噪,实现振动信号的降噪,利用共振解调法进一步提高频谱分析的准确度,提取故障特征频率对应幅值,综合峭度值和特征幅值,通过对比分析故障电机与正常电机确定故障类型。

1 异步电机典型故障

电机集电气与机械部件于一体,故障原因复杂,种类繁多,征兆呈多样性,既有机电故障的一般特性,又有电气部件、磁场等故障特性。大量的故障结果分析显示,在总故障中:轴承类故障占 42%,绕组类占 40%,绝缘类故障占 5%^[12]。

根据电机的故障统计,本文主要针对轴承故障、定转子相擦故障、离心开关打开不完全故障 3 类常见故障进行研究。离心开关发生故障时,电机在交变脉动磁场作用下不会转动,并会由于电磁力矩作用而嗡嗡作响;定转子扫膛故障,伴有振动和响声,电流增大并摆动;轴承故障大多是由于滚动体和滚道长期受交变接触应力作用,产生磨损,从而引起异常振动。

电机运行时,转子在定子内腔旋转,由于定、转子磁场的相互作用,定子机座将受到一个旋转力波的作用,从而发生周期性的变形并产生振动。当电机发生故障,引起定转子之间的位置和间隙发生变化,定子电磁振动的特征是振动频率为电源频率的 2 倍,转子不平衡的振动特征是振动频率和转速频率相等,轴承故障除了轴承本身的故障频率,也会出现与旋转频率相同的振动频率。

2 振动信号处理方法

2.1 小波降噪

采集的电机振动信号往往是多种信号的混合和叠加,除了电机本身的振动外,还有地面振动等低频率噪声,以及电机自振调制故障特征频率的高频振动,因此传统滤波器降噪技术往往损失有效信号,效果较差。

小波降噪是基于小波分析的去噪声方法,是小波分析的重要应用之一。将信号进行小波分解,信号的噪声影响会体现在变换后的小波系数上。根据电机振动信号的特点,噪声主要集中在幅值较小的系数中,有效信号集中在幅值较大的系数中,因此采取一种统计的方法设置合适的门限值,利用门限值对小波系数进行处理过滤,再通过小波逆变换即可恢复原始信号的有用部分。具体步骤如下。

(1) 对原始含噪信号进行去趋势项等预处理,然后选择小波和分解层次,进行分解计算。信

号 $f(t)$ 的小波变换为

$$W_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

式中: a 为尺度参数; b 为位置参数; t 为时间; ψ^* 为共轭小波基。根据电机振动信号的特征, 一般选择 db 小波。

(2) 对于分解后的小波系数 w , 选择自适应阈值函数对部分系数进行过滤处理:

$$\eta = \begin{cases} f(w, \lambda), & |w| > \lambda \\ 0, & |w| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

自适应阈值的选择有多种, 如无偏风险估计原理阈值、启发式阈值、广义阈值、极大极小原理选择阈值等^[13], 也可以构造不同类型的阈值函数^[5, 14]:

$$f(w, \lambda) = \text{sgn}(w) \left\{ |w| - \frac{2\lambda}{1 + \exp[\alpha(w^2 - \lambda^2)]} \right\} \quad (3)$$

$$f(w, \lambda) = \text{sgn}(w) [|w| - \alpha \sqrt{2 \log n}] \quad (4)$$

(3) 根据处理后的系数, 进行小波重构。

2.2 共振解调法

共振解调法是轴承、齿轮等旋转机械故障诊断中的常用分析方法, 是应用最广的分析高频冲击的一种频域分析方法。当电机发生扫膛、轴承损坏等故障时, 同时接触表面材料发生形变产生脉冲波, 接触过后, 由于脉冲信号的衰减自激振动, 频率远高于冲击脉冲。利用振动波形包络法将故障信号检波解调可以有效提高信噪比, 实现低频冲击脉冲的提取, 提取过程如图 1 所示。最后对过滤后的信号进行快速傅里叶变换 (FFT) 处理, 提取振动特征频率, 分析故障类型。

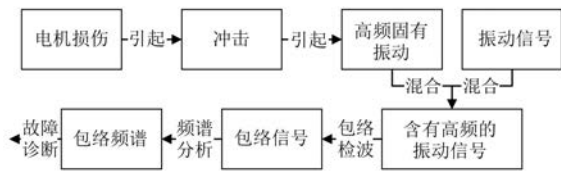


图 1 共振解调法示意图

其中, 包络信号通过对振动信号进行 Hilbert 变换计算获得^[15]。

设有实信号 $x(t)$, 其 Hilbert 变换为 $\hat{x}(t)$, 即:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

于是得到 $x(t)$ 的解析信号: $g(t) = x(t) + j\hat{x}(t)$, $A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)}$ 即信号 $x(t)$ 的包络。

3 单相异步电机故障诊断验证

3.1 异步电机振动信号采集

电机测试系统基于 NI Compact RIO 平台, 搭载通用振动信号采集卡, 可以采集电机运行中的振动信号, 示意图如图 2 所示。

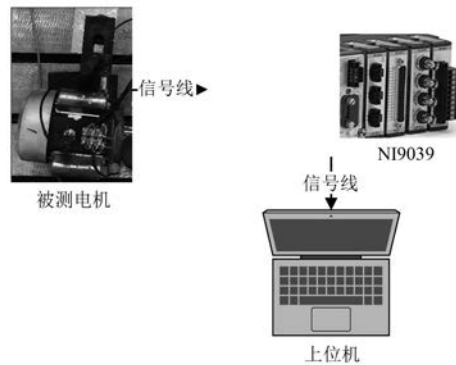


图 2 电机信号采集示意图

图 3 所示为 3 台故障电机和 1 台正常电机。故障电机离心开关打开不完全故障、定转子扫膛故障及后轴承损坏故障。



图 3 被测电机

电机在接入 50 Hz、220 V 交流电后, 空载运行, 转速为 1 440 r/min, 振动加速度信号采样率为 10.24 kHz, 分别在电机的前端盖侧面和前端盖顶端布置传感器。

3.2 振动信号分析

首先进行峭度计算。峭度值能够更好地反映出故障振动所产生的大幅值脉冲信号。4 台电机峭度计算及对比分析如图 4 所示。

通过峭度分析, 电机发生轴承故障时, 峭度值有明显变化, 比正常电机及其他故障类电机

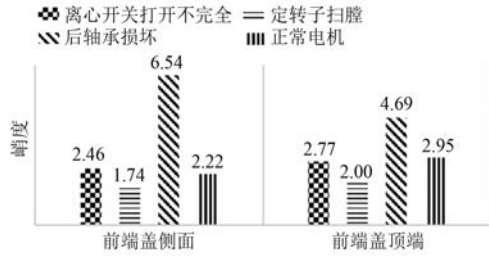


图4 4台电机峭度分析对比

更大。

进一步进行频谱分析。对4台电机前端盖振动信号进行小波降噪分析,选取 db3 小波进行3层分解,选择 $\sqrt{2\log n}$ 作为广义阈值,对降噪后的信号进行包络分析,如图5所示。

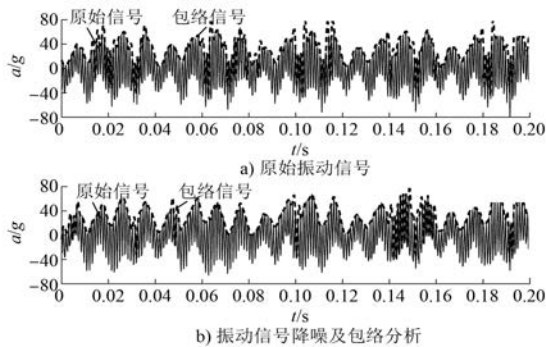


图5 电机前端盖振动信号降噪及包络分析

根据电机电磁振动、轴承振动的频率特征,选取5倍旋转频率以及6倍电源频率以下的频率区间作为特征信号分析的区间,取350 Hz以下频率段,如图6所示。

由图6可知,电机振动在旋转频率24 Hz、三倍频72 Hz、五倍频120 Hz和电频率50 Hz、二倍频100 Hz附近特征较为明显。

电机前端盖侧面和前端盖顶端振动加速度主要特征点如表1所示。4台电机100 Hz处幅值分析对比如图7所示。

由表1及图7可知,在2倍电频率点也就是100 Hz附近,故障电机均表现为幅值异常,达正常电机的2倍以上,因此3台故障样机均表现为电磁噪声,可明确诊断出电机异常。

由表1及图4可知,在出现电磁振动情况下,峭度超过正常值2倍时,诊断出轴承损坏故障。

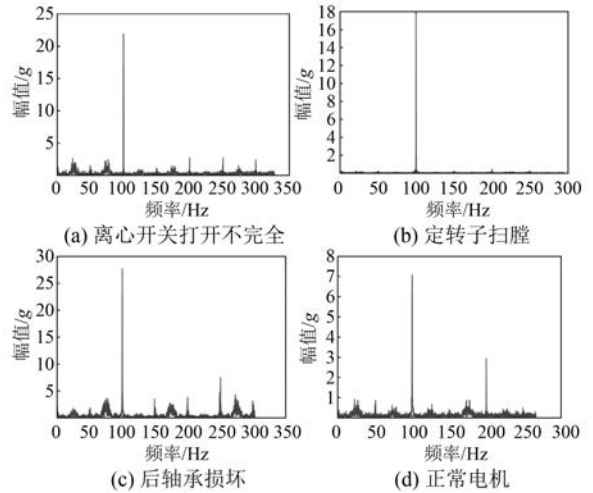


图6 电机前端盖振动信号频谱图

表1 电机振动加速度主要特征点

电机	前端盖侧面		前端盖顶端	
	频率/Hz	幅值/g	频率/Hz	幅值/g
离心开关打开不完全故障	23.28	2.65	23.28	3.36
	50.00	1.50	49.67	1.77
	76.89	2.41	76.89	2.03
	100.00	21.93	100.00	10.26
	123.11	0.99	123.11	0.67
定转子扫膛故障	22.35	0.16	26.47	0.19
	45.88	0.10	49.41	0.30
	72.65	0.11	74.26	0.16
	100.15	17.66	100.15	10.78
	125.00	0.11	122.50	0.20
后轴承损坏故障	24.55	1.72	22.12	1.25
	50.76	1.81	50.76	2.20
	75.61	3.69	78.03	2.54
	100.00	27.69	100.00	25.01
	128.79	0.86	118.18	0.75
正常电机	22.67	0.92	22.67	2.16
	50.80	0.87	50.80	2.55
	73.20	0.62	73.20	2.43
	100.00	7.09	100.00	3.78
	126.67	0.66	123.87	0.33

对于离心开关打开不完全和定转子扫膛故

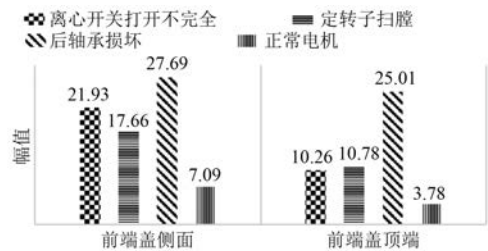


图7 4台电机100 Hz附近处幅值分析对比

障,进一步比较在 24 Hz 和 50 Hz 频率处的幅值,如图 8 所示。由图 8 可见,这两类故障电机在 24 Hz 和 50 Hz 处幅值有较明显的差别。

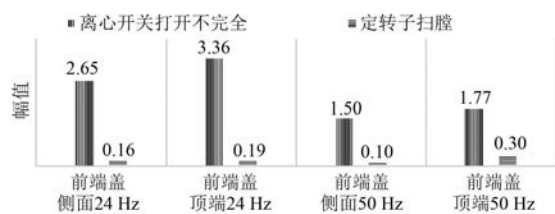


图 8 两类故障电机 24、50 Hz 处幅值分析对比

根据以上频谱分析和峭度统计分析,可以得出 4 台故障样机的故障特征如表 2 所示。

表 2 4 台电机故障特征

电机	故障特征
离心开关打开不完全故障	100 Hz 处幅值较高,24 Hz 和 50 Hz 附近幅值高
定转子扫膛故障	峭度较小,100 Hz 处幅值较高,且 24 Hz 和 50 Hz 附近幅值低
后轴承损坏故障	100 Hz 附近幅值高,峭度达正常电机峭度 2 倍以上
正常电机	100 Hz 附近幅值最低

4 结 语

异步电机振动信号一般表现为信号混杂、噪声强烈,有的故障信号特征会淹没在噪声中,有的故障难以通过一种信号处理方法提取特征以与其他故障进行区分。本文利用自适应小波降噪的方法,降低背景噪声并尽可能不丢失有用信号,提高了异步电机振动信号处理的准确度;将峭度值作为诊断指标,考虑轴承、扫膛等冲击类故障的信号特征;共振解调法的应用进一步凸显出信号中的故障特征频率;100 Hz 等故障特征频率的选取是基于电机机械、电磁等振动的频率特征。

本文针对异步电机离心开关打开不完全、定转子扫膛、后轴承损坏 3 类典型故障,结合 1 台正常状态电机开展试验,采集电机前端盖侧面和前端盖顶端的振动信号,进行峭度统计分析,同时通过小波降噪和共振解调法提取振动信号的频域故障特征。试验结果验证了基于振动信号进行电机故障诊断的可行性。后期通过电机试验数据的积累,可以实现更加精确、智能的诊断。

【参考文献】

- [1] 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.
- [2] 李舜酩,郭海东,李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报,2013,34(8): 1907.
- [3] 丁锋,秦峰伟. 小波降噪及 Hilbert 变换在电机轴承故障诊断中的应用[J]. 电机与控制学报,2017,21(6): 89.
- [4] 杨春洁. 基于小波去噪的机车牵引电机轴承故障诊断仿真研究[J]. 中国设备工程,2019(13): 117.
- [5] 曾军,陈艳峰,杨苹,等. 基于小波变换和峭度的风力发电机组轴承故障诊断[J]. 广东电力,2019,32(1): 46.
- [6] 仇满意. 基于经验小波变换的火炮电机系统故障诊断研究[D]. 西安:西安工业大学,2019.
- [7] CUI H, QIAO Y, YIN Y, et al. An investigation of rolling bearing early diagnosis based on high-frequency characteristics and self-adaptive wavelet denoising [J]. Neurocomputing,2016,216: 649.
- [8] LIU Z, HE Z, GUO W, et al. A hybrid fault diagnosis method based on second generation wavelet de-noising and local mean decomposition for rotating machinery [J]. ISA Transactions,2016,61: 211.
- [9] 杨新华,来帅,张丽娟. 基于小波分析的电机故障诊断研究[J]. 电气自动化,2010,31(3): 67.
- [10] 常悦,徐正国. 基于振动信号分析的感应电机气隙偏心故障诊断[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版),2015,15(2): 135.
- [11] 张艳,马宏忠,陈涛涛,等. 基于振动信号的双馈异步电机滑环装置故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(4): 57.
- [12] NANDI S, TOLIYAT H A, LI X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors: a review[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(4): 719.
- [13] 张玲玲,肖静. 基于 MATLAB 的机械故障诊断技术案例教程[M]. 北京:高等教育出版社,2016: 137-139.
- [14] 田慕玲. 基于小波分析的异步电机故障诊断[D]. 太原:太原理工大学,2006.
- [15] BACHA K, SALEM S B, CHAARI A. An improved combination of Hilbert and Park transforms for fault detection and identification in three-phase induction motors[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2012,43(1): 1006.