

# 基于倒频谱分析的电机故障检测

张雄希<sup>1,2</sup>, 刘振兴<sup>1,2</sup>

(1. 武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081;  
2. 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430081)

**摘要:** 介绍了倒频谱分析的基本原理及在电机故障检测中的应用。对于电机运行过程中所形成的耦合故障导致故障类型识别困难的问题, 提出了运用倒频谱分析与小波分解相结合的电机故障检测方法。它能将功率谱上成族的边频带谱线简化为更易于观察的单根谱线, 将两者优势相结合, 实现电机耦合故障分离和故障特征提取, 为电机复合故障诊断提供了新的途径和方法。

**关键词:** 倒频谱; 小波分解; 故障检测

## Fault detection for motor based on cepstrum analysis

ZHANG Xiong-xi<sup>1,2</sup>, LIU Zhen-xing<sup>1,2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Engineering Research Center of Metallurgical Automation and Measurement Technology, Ministry of Education, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** The principle of cepstrum analysis is introduced and a method of fault detection for motor based on cepstrum analysis is presented. For coupling fault in the process of the motor running resulting in difficult identification of fault type, cepstrum analysis combined with wavelet decomposition for motor fault detection is recommended. It can make the family of side-band spectrum in power spectrum be simplified to more easily observed single spectrums, taking advantages of the two, achieving motor coupling fault isolation and fault feature extraction, providing a new approach and methodology for complex motor fault diagnosis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.60874109).

**Key words:** cepstrum; wavelet decomposition; fault detection

中图分类号: TM343 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0145-03

## 0 引言

鼠笼式异步电机是应用最广泛的一种电气设备, 运行过程中的主要故障表现为转子断条、定子匝间短路和气隙偏心等。国内外学者对电机故障特征如何有效地提取和识别进行了大量的研究工作, 但研究对象主要集中在对转子断条、偏心、定子短路等单一故障进行诊断<sup>[1]</sup>。然而在实际生产中, 异步电机的故障往往并非单独出现, 某些故障常会诱发其他故障, 多个故障相互耦合形成复合故障, 因此对异步电动机复合故障的研究也很有必要<sup>[2]</sup>。

小波变换具有的多分辨率性质在故障信号提取方面具有突出作用, 近年来在异步电机早期故障检测领域得到较多的应用。利用小波多分辨分析特性

将故障电机信号细分到不同频段中, 在各个频段里分析处理, 消除故障特征频率附近的频率干扰因素, 有利于提取故障特征频率<sup>[3]</sup>。倒频谱分析法可将功率谱上成族的边频带谱线简化为单根谱线, 分离和提取信号中的周期成分、多成分边频, 目前在设备故障诊断中应用较为广泛<sup>[4]</sup>。

本文通过采集具有转子断条与偏心复合故障的电机三相定子电流, 综合采用小波及倒频谱分析法对两种故障特征的分离进行了探究, 通过相关实验表明该方法可以有效分离耦合故障和提取故障特征, 具有较高的应用参考价值。

## 1 倒频谱分析原理

倒频谱分析是对频谱的再次谱分析, 即对待测信号的功率谱的对数值进行傅里叶逆变换, 滤出传递函数的分量, 再用傅里叶正变换等运算, 得到输

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874109)

入信号的幅值。功率倒频谱定义如下<sup>[4-6]</sup>:

若时域信号  $x(t)$  的功率谱密度函数为  $S_x(f)$ , 工程应用中的幅值倒频谱  $C_x(\tau)$  为

$$C_x(\tau) = F^{-1}[\log S_x(f)] \quad (1)$$

式中:  $F^{-1}[\ ]$  表示傅里叶逆变换;  $\tau$  表示倒谱时间变量, 称倒频率。

在工程实际中, 源信号  $x(t)$ 、测点输出信号  $y(t)$ , 传递系统动态特性描述  $h(t)$  之间存在如式 (2) 的关系:

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (2)$$

则源信号与输出信号在频域中处理后有式 (3) 成立:

$$\log S_y(f) = \log S_x(f) + \log |H(f)|^2 \quad (3)$$

进一步处理后即可得倒频域中表达式:

$$C_y(q) = C_x(q) + C_h(q) \quad (4)$$

使得信号在倒频域中系统特性  $C_x(q)$  和信号特性  $C_h(q)$  变成相加的关系, 大大减轻了各种调制信号的影响, 能有效地提取原始信号的特征频率, 实现不同故障类型分离。当存在故障而产生某种周期性信号变化时, 倒谱图上将出现相应的单根谱线, 根据单根谱线出现的时间周期, 就可以辨识故障类型。电机故障的特征频率分量较低, 多个故障信息以调制的形式存在于监测信号中, 若采用倒频谱分析法便可有效分离混杂在噪声干扰及耦合现象中的故障成分, 从而更易判断电机故障类型。

## 2 电机故障倒频谱分析实验及结果分析

当电机同时存在偏心、断条等复合故障情况下, 可采用小波与倒频谱分析相结合的方法将电机复合故障分离开来。采用一台笼型异步电机进行偏心 and 转子断条复合故障实验, 采样频率为 10 000 Hz, 工频  $f_1 = 50$  Hz, 极对数  $p = 2$ , 转差率为  $s = 4\%$ , 对实验电机依次进行转子 1 根断条+偏心、转子 3 根断条+偏心两种复合故障情况实验。

电机故障特征频率一般较低, 先利用小波分解将检测信号频率细分到不同频段中消除干扰; 然后采用倒频谱分析方法将故障特征信号变换为单根的峰值谱线, 根据峰值谱线的时间周期, 求得故障特征频率, 并确定各故障类型。分别进行以上两种故障实验并采集单相定子电流数据, 通过小波分解及倒频谱处理后得到的幅值谱曲线如图 1 和图 2 所示。

根据电机故障诊断理论, 当转子出现断条等故障时, 定子电流中会产生频率为  $f_1 \pm 2ksf_1$  的故障特

征成分, 当转子出现偏心故障时, 定子电流中会产生频率为  $f_1 \pm mf_r$  的故障特征成分, 其中  $f_1$  为外加电压频率;  $f_r$  为转子旋转频率 ( $f_r = (1-s)f_1/p$ );  $s$  为转差率;  $k$  及  $m$  均取自然数<sup>[7]</sup>。根据本实验条件, 实验电机断条基本特征频率应为  $(50 \pm 4)$  Hz; 偏心基本特征频率应为  $(50 \pm 24)$  Hz。

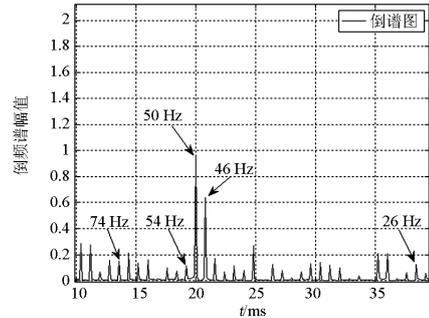


图 1 电机转子 1 根断条且偏心时故障频谱曲线

Fig.1 Rotor fault frequency spectrum curve for the case of one broken bar and eccentricity

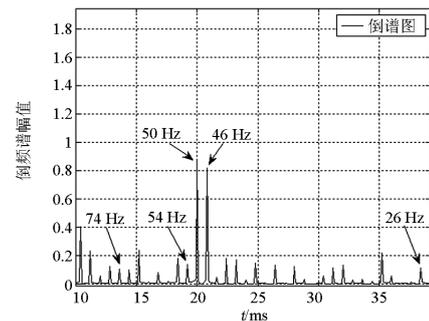


图 2 电机转子 3 根断条且偏心故障频谱曲线

Fig.2 Rotor fault frequency spectrum curve for the case of three broken bars and eccentricity

单相定子电流信号经倒频谱分析处理后, 在图 1、图 2 中倒频率  $T=20$  ms 处有单根峰值谱线出现, 其对应为电机工作频率  $f=1/T=50$  Hz。在倒频率  $T=21.7$  ms 和  $T=18.5$  ms 处有单根峰值谱线出现, 对应频率分别为  $f=1/T=46$  Hz 和 54 Hz, 即为电机断条故障基本特征频率; 同理, 在倒频率  $T=13.5$  ms 和  $T=38.4$  ms 处有单根峰值谱线出现, 对应频率分别为  $f=1/T=74$  Hz 和 26 Hz, 即为电机偏心故障基本特征频率。当断条故障和偏心故障变严重后, 两者相互影响并耦合形成复合故障。从图 1、图 2 可知, 当电机转子出现多根断条并存在偏心故障时, 在偏心故障特征频率成分周围会出现峰值点, 此乃因故障相互耦合而产生的新的频率成分。同时因断条故障程度的加深, 图 2 中电机断条故障特征频率的次

数及幅值比图 1 要强, 由此还可判断电机故障严重程度。

### 3 结论

通过理论及实验结果分析可知, 经过倒频谱分析后的故障信号的特征频率由许多单根的谱线组成, 更易于识别故障类型。将其与小波分解相结合后对故障电机单相定子电流进行处理, 可发挥各自的优势, 有效分离耦合故障和提取故障特征。该方法为电机复合故障诊断研究开辟了新的思路。

### 参考文献

- [1] 刘振兴, 尹项根, 张哲. 鼠笼式异步电动机转子故障在线监测与诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(1): 30-33.  
LIU Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe. On-line rotor fault monitoring and diagnosis for squirrel cage induction motors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(1): 30-33.
- [2] 崔玲丽, 高立新, 张建宇. 基于 EMD 的复合故障诊断方法[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(9): 1055-1060.  
CUI Ling-li, GAO Li-xing, ZHANG Jian-yu. Composite fault diagnosis method based on empirical mode decomposition[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(9): 1055-1060.
- [3] 葛哲学, 沙威. 小波分析理论与 Matlab R2007 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.  
GE Zhe-xue, SHA Wei. Wavelet analysis theory and matlab R2007 to achieve[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [4] 李晓虎, 贾民平, 许飞云. 频谱分析法在齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23 (3): 168-170.  
LI Xiao-hu, JIA Min-ping, XU Fei-yun. Spectrum analysis and its application to gearbox fault diagnosis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2003, 23(3): 168-170.
- [5] 汤武初, 杨彦利, 仇大俐. 倒频谱在压缩机故障诊断中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2006 (2): 71-73.  
TANG Wu-chu, YANG Yan-li, KANG Da-li. The application of cepstrum in compressor fault diagnosis[J]. Noise and Vibration Control, 2006 (2): 71-73.
- [6] 王铁, 张国忠, 侯荣涛. 基于倒谱和小波变换的驱动桥故障特征提取[J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(8).  
WANG Tie, ZHANG Guo-zhong, HOU Rong-tao. Drive-shaft's trouble character collection based on cepstrum and wavelets[J]. Computer Measurement & Control, 2003, 11 (8).
- [7] 沈标正. 电机故障诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.  
SHEN Biao-zheng. Fault diagnosis technology for motor [M]. Beijing: China Machine Press, 1996.
- 收稿日期: 2010-11-07; 修回日期: 2010-01-25  
作者简介:  
张雄希(1975-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事设备故障诊断与信号处理方面的工作; E-mail: zxx417@sohu.com  
刘振兴(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事电机状态监测、电气传动、电力系统继电保护等方面工作。
- (上接第 144 页 continued from page 144)
- CAI Liang-wei, ZHANG Jun-ren. The application of neural network in the short term forecast of hybrid power systems[J]. Journal of Shenzhen University: Science & Engineering, 1998(1).
- [8] 张志刚, 沈毅, 王宪杰. 人工神经网络的混合电力补偿控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2008(3).  
ZHANG Zhi-gang, SHEN Yi, WANG Xian-jie. Design of controller based on neural networks in hybrid power compensation[J]. Electric Machines and Control, 2008(3).
- [9] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
YE Hang-ye. Wind turbine control technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [10] Zahran M, Dmowski A, Kras B. PV battery wind-turbine public-grid hybrid power supply for telecom-equipment, system management and control[C]. //Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000. (IECEC) 35th Intersociety. 2000: 1252-1260.
- 收稿日期: 2009-11-24; 修回日期: 2010-02-11  
作者简介:  
李继方(1971-), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力电子与智能信息处理; E-mail: ljf538@163.com  
高明远(1965-), 男, 副教授, 主要从事电气自动化方向的教学和科研工作;  
陈杰(1967-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统继电保护及自动化的研发及工程工作。