基于瞬时频率估计阶比法的电机振动信号分析

姚一初

（上海奉贤发展集团，上海 201499）

摘要：电机转轴是电机中至关重要的精密零部件，运用信号分析的方法，可对电机转轴进行预估评价。为提高电机转轴的安全性，降低事故率，利用瞬时频率估计法与阶比法计算分析电机的振动信号，并进行电机实际缺陷情况下的验证试验。结果表明，基于瞬时频率估计阶比法能对信号进行有效降噪处理，准确地预测故障缺陷的具体位置。

关键词：瞬时频率；阶比法；电机；振动信号

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.020

中图分类号：TG115　**文献标识码：**A　**文章编号：**1674-6457 (2016)04-0100-05

Analysis of Motor Vibration Signal Based on Instantaneous Frequency Estimation

YAO Yi-chu

(Shanghai Fengxian Development Group, Shanghai 201499, China)

ABSTRACT: The motor rotating shaft is a very important part of the motor. It can be estimated and evaluated by using the method of signal analysis. In order to improve the safety of the motor shaft and reduce the accident rate, the vibration signal of the motor was calculated by the method of instantaneous frequency estimation and the order ratio method. The results show that the method based on instantaneous frequency estimation could effectively reduce the noise and accurately predict the specific location of the fault.

KEY WORDS: instantaneous frequency; order ratio method; motor; vibration signal

电机转轴是电机中至关重要的精密零部件，运用信号分析的方法，可对电机转轴进行预估评价，提高电机转轴的安全性，降低事故率。电机的主要故障主要来自于转子故障、轴承故障、定转子间绕组断路故障，其中转子和轴承的故障主要取决于材料的性能和精密加工的工艺。电机在运行过程中会受到工作条件下压力和温度的影响，物料和环境中的化学成分的腐蚀，电压波动的影响以及各种机械因素的影响[1—3]，容易发生故障。通常在运行过程中，电机在故障前会发生不规则的噪声和振动，特别是振动信号中含着大量的工作状态的信息。通过分析电机振动的特征频率，可以诊断电机的运行状况。

提取振动信号和信号处理的方法主要有傅里叶变换法、小波变换法、经验模式分解法等[4—7]，其中已有集成经验模态分解法得到了广泛的应用。振动信号有很强的非线性，电机在工作中的振动信号通过传统的基于时域统计参数的特征提取法有一定的局限性。特征频率的非线性不仅是非线性的，而且是时变的，一个频率不仅可能对应一种故障，也可以能对应多种的故障。电机的频发故障主要来自于内部的机械零件，国内对电机振动信号的分析仍不够精确，现在基本还是维修人员去现场排除式的维

收稿日期：2016-06-01

作者简介：姚一初（1963—），男，上海人，机械工程师，主要研究方向为机械设备管理、维护、检修、技术改造。

修，效率较低，而国外的检测系统的成本较高，且没有国内相统一的标准[8—10]。

本文主要利用瞬时频率估计的阶比分析方法对电机的振动信号进行比较分析，并利用电机的振动数据验证瞬时频率估计阶比方法的有效性。

1　基于瞬时频率估计的阶比法

1.1　瞬时频率的求取

采用局域均值分解法对信号分解。分解函数为 $x(t)=\sin(2\pi\int_{-\infty}^{t}\exp a\tau\mathrm{d}\tau)+0.4\sin(20\pi\int_{-\infty}^{t}\exp a\tau\mathrm{d}\tau)$，分解过程通过上述方法逐渐去除信号中的高频信号。计算流程图如图 1 所示。

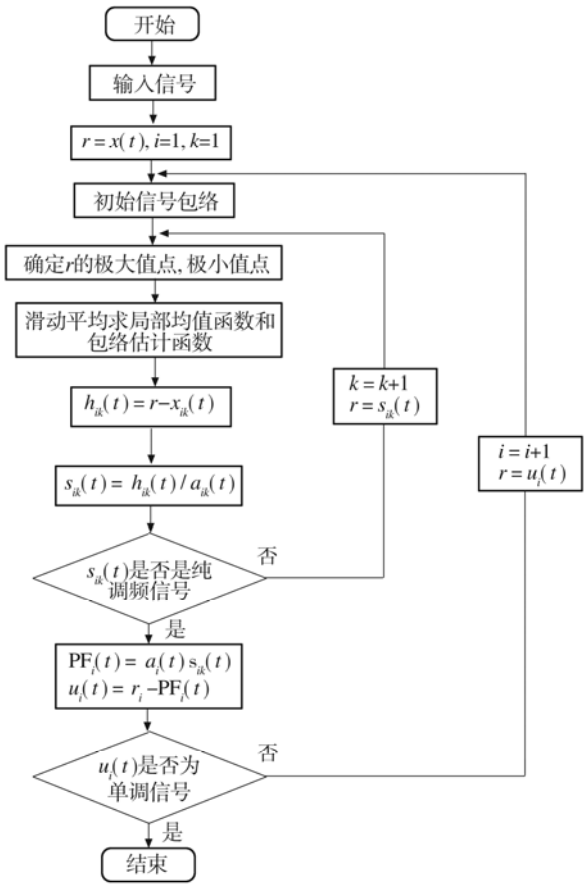

图 1　瞬时频率计算流程

Fig. 1 Flow chart of instantaneous frequency calculation

通过分解得到的每个分量都是调频调幅的信号，PF 分量的瞬时频率为 $\omega(t)=\dfrac{\mathrm{d}\psi(t)}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}\arccos(s(t))}{\mathrm{d}t}$，通过直接法求得的振动信号调制瞬时频率具有局部性，所得到的频谱具有模糊性，因此需对各个 PF 的分量进行分析。

电机的振动信号模拟为：$x(t)=x_1(t)+x_2(t)=[1+0.3\cos(2\pi 5t)]\cdot\cos[2\pi 100t+1.5\sin(2\pi 10t)]+0.7\sin(2\pi 30t)$，$t\in[0.1]$。通过分解可以得到 P1 和 P1 两个个分量。图 2 为仿真信号的分解。由图 2 可以看出，调制频率与初始信号的特征基本相同，P2 属于正弦信号，无调制现象。

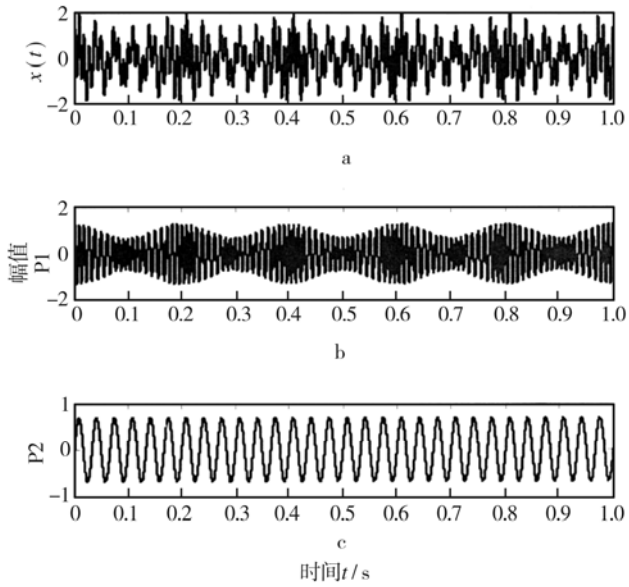

图 2　仿真信号的分解

Fig. 2 Simulation signal decomposition

1.2　改进的局域均值分解方法

对含有随机噪声的振动信号进行小波降噪分解，降噪后的信号如图 3 所示。图 4 为降噪后的分解。由图 4 可以看出，降噪后，PF1 的幅值和频率都与时间的变化密切，PF2 只有信号频率与时间发生变化，幅值不变，始终为 1。PF3 的分量幅值和频率都没有明显的变化，属于正弦信号图形。通过图 4 也可以看出，降噪之后的分解结果明显易于识别，各个分量更能准确的表达其分量的特征。

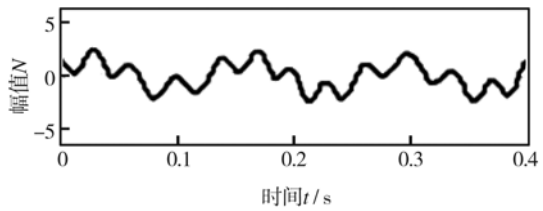

图 3　降噪后的振动信号

Fig. 3 Vibration signal after noise reduction

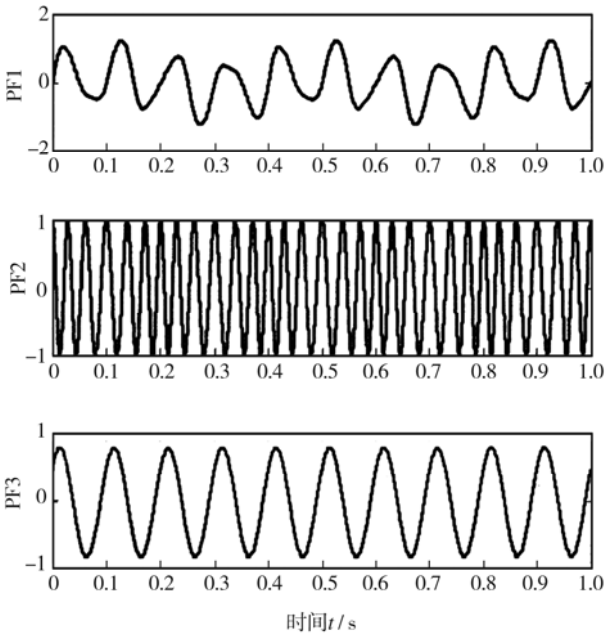

图 4 降噪后的信号分解

Fig. 4 Decomposition of noise reduction

1.3 阶比分析法

基于傅里叶变换的传统信号分析方法无法准确的处理非线性不平稳信号，在电机运行过程中的变速、摩擦、摇摆等现象都是导致不平稳的因素。而这些非平稳因素产生的信号是振动信号分析的重要分析点。

阶比分析法是将相同时间间隔采样替换成恒定转角速度的变化量为采样间隔。阶比是相对于参考轴的转速的倍数。电机中运行中，电机转轴的转速的不恒定的，获取转轴的转速是阶比分析的重中之中。通常采用硬件阶比跟踪和理论计算阶比跟踪的方法，传统的方法硬件设备较多，成本较高，现场也不方便安装，在实际应用和推广上受到了限制。

采用公式 $x(T_n)=x(t_i)+\dfrac{x(t_{i+1})-x(t_i)}{t_{i+1}-t_i}(T_n-t_i)$，$t_i\le T_n\le t_{i+1}$ 进行等角度增量采样。其中幅值谱为 $A(l)=\dfrac{2}{N}|X(l)|$，功率谱为 $A(l)=\dfrac{4}{N^2}|X(l)|^2$，阶比序列则为 $X(l)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\frac{n}{N}}$。

通过上述分析，将电机的非平稳振动信号转换为角域的平稳信号。基于瞬时频率估计阶比法的分析过程为：振动信号→LMD 分解得到单分量信号→利用直接法求取单分量的瞬时频率→基于瞬时频率对振动信号进行等角度重采样→得到角度域平稳信号。

当电机转轴发生故障，会出现周期性的信号开闭现象。假设仿真信号为 $x(t)=\sin(2\pi\int_{-\infty}^{t}\exp a\tau\mathrm{d}\tau)+0.4\sin(20\pi\int_{-\infty}^{t}\exp a\tau\mathrm{d}\tau)$，其中 α 为 0.9，频率为 1000 Hz，阶比分析的范围为 20。利用阶比分析法对仿真信号进行阶比分析，图 5 为阶比幅值谱图。由图 5 可知，1 阶和 10 阶的幅值较为突出，其他阶比幅值接近为零。从上述公式也可以知道，未处理前的信号只有 1 阶和 10 阶的信号，且为正弦信号。经过处理之后的信号比较准确的反映了阶比谱图，能够较好的提取原始信号的特点。

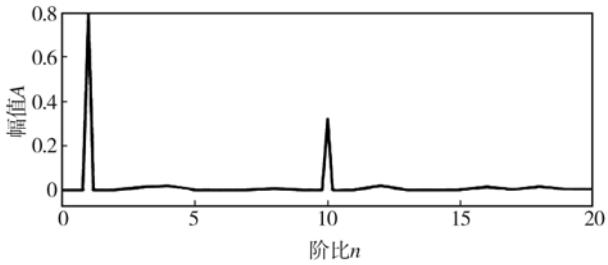

图 5 阶比幅值谱图

Fig. 5 Order specific amplitude spectra

2 电机振动信号分析

在电机转轴上制造了 6 mm，深 10 mm 的故障，轴承转速为 1800 r/min。试验轴承转轴频率为 f_d，内圈缺陷特征频率为 4.8639f_d，外圈缺陷特征频率为 3.0553f_d，轴承公转频率为 0.37815f_d。采集运行中轴承中的振动数据。实时振动曲线如图 6 所示。

将振动信号进行分解，获得 PF 分量特征频率。无故障和缺陷情况下的各个分量的瞬时频率如图 7 所示。

通过转化成角度变化增量采样来进行阶比分析，消除了转频变化的影响，电机轴承的振动的缺陷信号主要集中在谐波频率和缺陷特征频率。基于改进的瞬时频率估计阶比法可以将非稳态的信号分解成各个单个分量，并将分量信号进行降噪处理。试验中的高频为缺陷频率的谐波频率，低频就是缺陷特征频率。将缺陷情况下的振动分解信号进行阶比分析，图 8 为缺陷情况下的阶比分析图。由图 8 可以看出，在阶比为 3 的位置，有明显的振幅。表明对应的是轴承外圈上的裂纹缺陷，与实验设置的情况

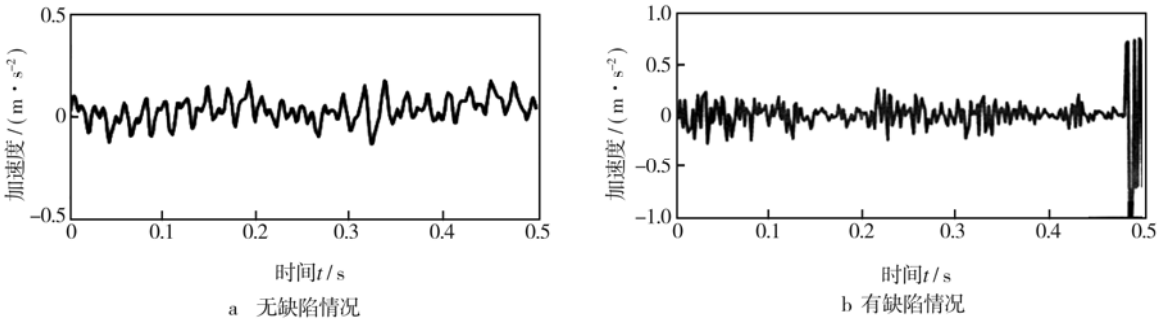

图 6　无缺陷和有缺陷情况下的振动信号曲线
Fig.6 Vibration curve without and with defect

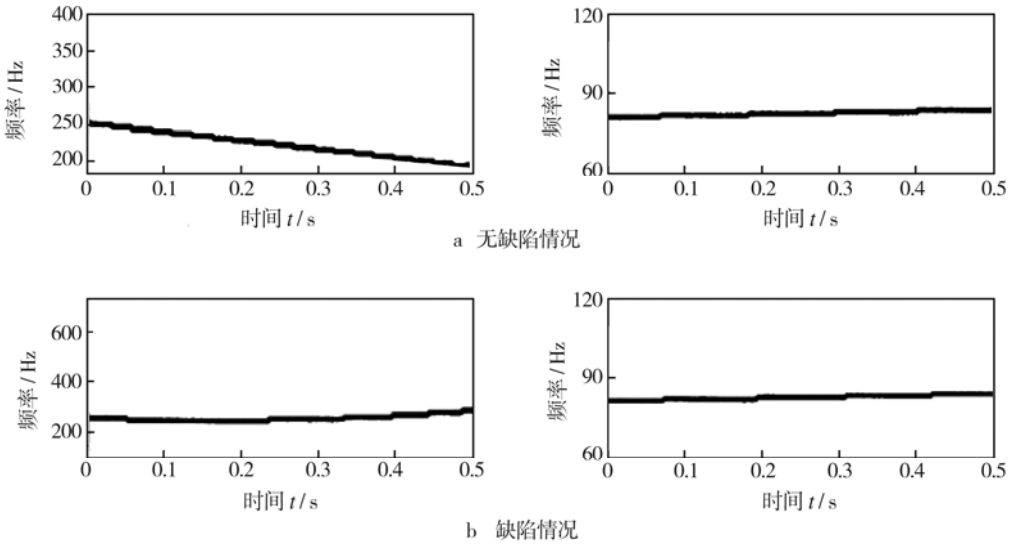

图 7　无缺陷和有缺陷情况下各个分量的瞬时频率
Fig.7 Instantaneous frequency of each component without and with defect

相吻合，说明阶比分析能够准确明了地预示缺陷的具体位置情况。

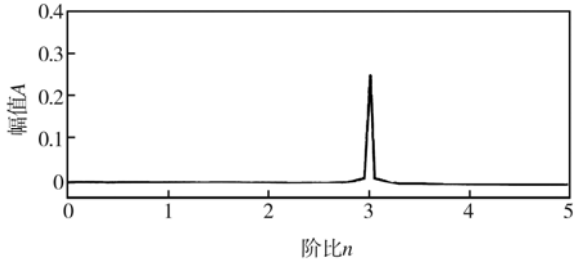

图 8　缺陷情况下的阶比分析
Fig. 8 Order ratio analysis of the defect

3　结论

1) 利用瞬时频率法进行信号分解，能将各个分量进行独立显示其信号的主要特征，能够有效的去除掺杂噪声，提高信号分解的准确性，分解后能保留更多的原始信号的特征，能够提高分解的计算效率。

2) 在瞬时频率评估的基础上加入阶比计算，对轴承的信号计算分析与实验数据进行对比分析，表明该方法能够准确有效地预示缺陷的具体位置情况。

参考文献：

[1]　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—1915.
LI Shun-ming, GUO Hai-dong, LI Dian-rong. Review of Vibration Signal Processing Methods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1907—1915.

[2]　曹书峰, 朱忠奎, 黄伟国, 等. 基于时频融合的转速估计及轴承故障特征提取研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(18):174.
CAO Shu-feng, ZHU Zhong-kui, HUANG Wei-guo, et al. Speed Estimation Based on Time-frequency Fusion and Its

Application in Feature Extraction of Bearing Fault[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(18):174.

[3] 陈志新. 脉冲噪声环境中基于 FLOWVD 的机械设备故障时频监测方法[J]. 振动与冲击, 2013,10:20.
CHEN Zhi-xin. Time-frequency Monitoring on Machinery in Impulsive Noise Environment Based on Fractional Lower Order Wigner-Ville Distribution[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 10: 20.

[4] 程军圣, 史美丽, 杨宇. 基于 LMD 与神经网络的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8)：141.
CHENG Jun-sheng, SHI Mei-li, YANG Yu. Roller Bearing Fault Diagnosis Method Based on LMD and Neural Network[J]. Journal of Vibration And Shock, 2010, 29(8)：141.

[5] 任达千, 杨世锡, 吴昭同, 等. 信号瞬时频率直接计算法与 Hilbert 变换及 Teager 能量法比较[J]. 机械工程学报, 2013, 49(9)：42.
REN Daqian,YANG Shixi,WU Zhaotong,et al. Comparison of Instantaneous Frequency Directed Computing Method and Hilbert Transform and Teager Energy Method.[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9)：42.

[6] 姜宏伟, 袁朝辉, 邱雷. 运用小波变换的飞机管路振动信号降噪方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2012, 32(5)：827.
JIANG Hong-wei, YUAN Zhao-hui, QIU Lei. Aircraft Pipeline Vibration Signal Denoising Method Using Wavelet Transform[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2012, 32(5)：827.

[7] 朱明哲, 姬红兵, 林琳, 等. 基于方向性 S 变换的多分量 FM 信号瞬时频率估计[J]. 系统工程与电子技术, 201 3, 35(1)：29.
ZHU Ming-zhe, JI Hong-bing, LIN Lin, et al. Instantaneous Frequency Estimation of Multicomponent FM Signals Based on Directional S Transform[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(1)：29.

[8] 张明杰,曾祥东. HXN3 型机车牵引电机故障诊断技术研究[J]. 中国新技术新产品,2016(2):44—45.
ZHANG Ming- jie, ZENG Xiang-dong. Research on Fault Diagnosis Technology of Traction Motor for HXN3 Locomotive[J]. New Technology & New Products of China, 2016(2):44—45.

[9] 柳磊, 王鹏, 乔炜, 等. 电厂辅机轴承振动故障诊断分析[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(12): 43—46.
LIU Lei, WANG Peng, QIAO Wei. Analysis of Power Plant Auxiliary Equipment's Bearings in Vibration Test[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015,31(12): 43—46.

[10] 赵慧敏, 房才华, 邓武, 等. 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 Hui-min, FANG Cai-hua, DENG Wu, et al. Research on Motor Fault Diagnosis Model for Support Vector Machine Based on Intelligent Optimization Methods[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2016, 37(1): 92—96.