

变转速下滚动轴承阶比峭度图法故障特征提取*

柏 林, 甄 杰, 彭 畅, 徐冠基

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆, 400044)

摘要 结合传统阶比分析和峭度图算法的优势, 利用计算阶比跟踪方法将时域非平稳信号转换为角域平稳信号, 并利用峭度指标准确表征滚动轴承振动信号中的故障瞬态冲击大小, 提出了阶比峭度图算法。仿真故障信号及实测滚动轴承外圈故障信号分析结果表明, 阶比峭度图算法能够有效识别阶比域内的最优包络解调频带参数, 显著提高了变转速工况下滚动轴承故障特征提取的准确性。

关键词 滚动轴承; 变转速; 阶比谱; 阶比峭度图

中图分类号 TH17; TP206

引 言

滚动轴承是旋转机械中应用最广泛的机械部件, 其运行状态直接影响整个机器的性能。存在局部缺陷的滚动轴承在运行时将产生包含脉冲冲击的非平稳振动信号, 如何从这些非平稳振动信号中提取故障信息成为滚动轴承故障诊断的关键^[1]。自 Pearson^[2]率先提出峭度的概念并用于衡量样本分布偏离正态分布的程度之后, 峭度统计量在概率论与数理统计领域得到了广泛研究。Dyer 等^[3]将峭度指标引入机械工程领域中, 用于衡量机械故障严重程度。由于峭度能够准确表征滚动轴承振动信号中故障瞬态冲击大小, 其相关研究在滚动轴承故障振动领域得到了充分发展。Dwyer^[4]定义了谱峭度的概念以描述信号频谱幅值峭度值。尽管平稳信号的谱峭度理论发展迅速, 而非平稳信号的谱峭度一直没有正式定义, 直到 Antoni^[5]基于 Wold-Cramér 分解理论正式定义了条件非平稳过程的谱峭度系数, 才奠定了谱峭度在非平稳信号分析中的理论基础。Antoni 提出了基于短时傅里叶变换 (short-time Fourier transform, 简称 STFT) 的谱峭度算法^[6]和基于二进有限长度单位冲激响应 (finite impulse response, 简称 FIR) 滤波器组的快速峭度图算法^[7]。由于传统谱峭度算法不能有效处理变速振动信号, 因此有必要采取手段消除转速波动的影响。阶比分析作为一种提取振动信号中与转速密切相关

成分的方法, 其核心是将时域非平稳信号通过等角度采样的方式转换为角域平稳信号, 然后对角域信号进行快速傅里叶变换获取阶比谱^[8]。

笔者将阶比分析技术嵌入到传统峭度图算法中, 提出了阶比峭度图算法, 将其成功用于分析变转速下的仿真轴承故障信号和实测轴承外圈故障信号。

1 理论介绍

1.1 谱峭度

文献[5]定义了条件型非平稳信号 $x(n)$ 的 Wold-Cramér 离散分解形式, 表示为

$$x(n) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(n, f) e^{2\pi i n f} dY(f) \quad (1)$$

其中: $X(n, f)$ 为 $x(n)$ 在频率 f 处的复包络谱; $dY(f)$ 表示正交化的谱增量。

基于四阶距累积量的谱峭度可定义为

$$SK_1 = \frac{\langle |X(n, f)|^4 \rangle}{\langle |X(n, f)|^2 \rangle} - 2 \quad (2)$$

其中: $\langle \cdot \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} N^{-1} \sum_N (\cdot)$ 为均值化算子, 由于包络信号为复信号, 故修正常数设定为 -2 。

当冲击故障信号中存在平稳高斯噪声时, 谱峭度可以定义为

$$K_{1a} = \frac{SK_1(f)}{[1 + \rho(f)]^2} \quad (3)$$

其中: $\rho(f)$ 为噪信比。

* 国家自然科学基金资助项目(51475052); 中央高校专项资金资助项目(106112016CDJZR115502)
收稿日期: 2014-06-26; 修回日期: 2014-09-01

1.2 基于 FIR 滤波器的峭度图

文献[6]提出了基于 STFT 的谱峭度算法并利用能够表征 STFT 滤波后信号复包络幅值峭度在 $(f, \Delta f)$ 平面内分布情况的峭度图来确定最优解调频带的中心频率 f_c 以及带宽 B_f , 但该算法会大大降低峭度图的运算效率并限制其在实际分析中的应用。为了提高峭度图在实际工程应用中的运算效率以及实时性, 文献[8]在快速傅里叶变换的基础上, 提出了基于二进有限长单位冲激响应滤波器组的快速峭度图算法, 具体步骤如图 1 所示。

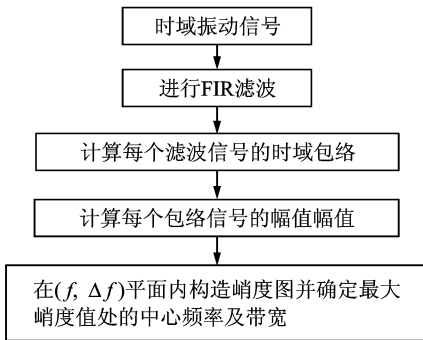


图 1 基于 FIR 滤波器的峭度图流程

Fig. 1 Flow chart of FIR filter-bank based kurtogram

1.3 计算阶比跟踪法

振动信号和转速信号在相同的时间间隔被异步采样, 然后通过数字信号处理算法用软件的形式合成同步采样振动数据, 这个过程就是计算阶比跟踪 (computed order tracking, 简称 COT) 法。与传统的阶比跟踪方法相比, COT 不仅具有更高的精度且无需特定的硬件, 更适用于旋转机械实际状态监测^[9]。COT 系统通常基于 3 个模块: 转速脉冲触发器模块、角度估算模块和信号插值模块。如图 2 所示, 具体步骤为: a. 对原始振动信号和键相信号分两路同时进行等间隔采样, 得到异步采样信号; b. 通过采集的键相脉冲序列 (通常是每转一个脉冲) 进行转速估计, 并作为振动相角的测量基准; c. 利用转速估计得到等角度采样发生的时刻序列; d. 在等角度采样发生时刻附近时间区间内异步采样振动信号并进行插值计算, 通过重采样生成同步采样信号。

2 阶比峭度图算法

笔者将阶比分析技术嵌入传统峭度图算法, 提出基于 COT 技术的阶比峭度图算法。首先计算信号经 FIR 滤波之后的各子信号包络的阶比谱, 得到在阶比域平面 $(O, \Delta O)$ 内的各滤波包络信号阶比

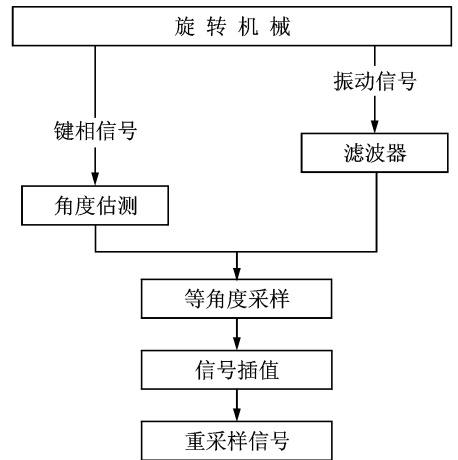


图 2 计算阶比跟踪原理

Fig. 2 Principle of COT

谱幅值的峭度分布情况。如图 3 所示, 滚动轴承时域振动信号经滤波器滤波后得到各子信号的包络 $c_k^i(n)$, 再根据转速计采集的键相脉冲转速信号 $p(t)$ 对各包络信号进行等角度 $\Delta\theta$ 的重采样。假设在相当短的时间内转轴的角加速度恒定, 则转角和时间之间的关系用线性方程表示为

$$\theta(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \quad (4)$$

其中: 待定系数 b_0, b_1, b_2 通过求解 3 个连续时刻 t_0, t_1, t_2 下的转角线性方程组(5)得到。

$$\begin{cases} \varphi_0 = b_0 + b_1 t_0 + b_2 t_0^2 \\ \varphi_1 = b_0 + b_1 t_1 + b_2 t_1^2 \\ \varphi_2 = b_0 + b_1 t_2 + b_2 t_2^2 \end{cases} \quad (5)$$

将求解的待定系数代入式(4), 得到时域信号重采样过程中的等角度采样时标

$$t_m = \frac{1}{2b_2} \left[\sqrt{4b_2(n\Delta\theta - b_0) + b_1^2} - b_1 \right] \quad (6)$$

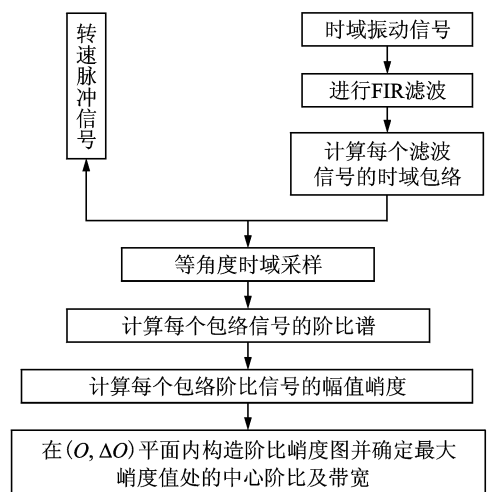


图 3 阶比峭度图流程

Fig. 3 Flow of COT-kurtogram

基于式(6)计算的等角度采样时标 t_m 对各子信号包络 $c_k^i(n)$ 进行三次样条插值,得到等角度时刻下的各子信号包络 $c_{rk}^i(n)$,随后对 $c_{rk}^i(n)$ 进行快速傅里叶变换,得到各子信号包络阶比谱 c_{rk}^i 。各包络阶比谱幅值的谱峭度系数为

$$SK_{1rk}^i = \frac{\langle |c_{rk}^i|^4 \rangle}{\langle |c_{rk}^i|^2 \rangle^2} - 2 \quad (7)$$

在阶比谱域 $(O, \Delta O)$ 平面内峭度分布如图 4 所示。基于 COT 的阶比峭度图算法通过对时域振动信号进行等角度重采样,可以有效抑制变转速下滚动轴承时域故障信号的非平稳特性,其最大谱峭度值所对应中心阶比以及阶比带宽即为解调分析所需的解调阶比带参数。

有别于文献[10]中计算各包络信号的频谱幅值峭度分布,然后再计算最优包络信号的阶比谱,笔者计算了各包络信号的阶比谱幅值峭度分布图,并在得到最优解调阶比带参数后直接反求,得到此参数对应的最优的阶比谱。这样可提高变转速下滚动轴承故障特征提取的准确性。

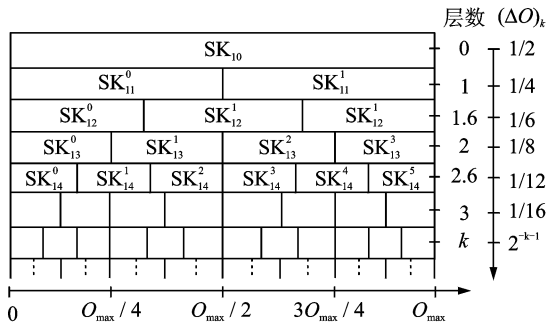


图 4 基于 FIR 滤波器的阶比峭度图

Fig. 4 The FIR filter-bank based COT-kurtogram

3 仿真实验分析

为了验证阶比峭度图算法的有效性,进行变转速下仿真实验。仿真信号的转速频率 $f(t) = 2t$ Hz, 主轴转速 $n(t) = 60f(t)$ r/min, 仿真一个阶数分别为 1 阶、2 阶和 3 阶的升速强低频干扰信号 $y(t)$, $y(t) = \sin(2\pi t^2) + 0.6\sin(4\pi t^2) + 0.3\sin(6\pi t^2)$ 。仿真一个每转内 5 阶的故障振动信号 $R(t)$, $R(t) = e^{aT_1} \sin(2\pi f_c t)$, $T_1 = \text{mod}(t, 1/f_d)$, $f_d = 5t$, 其中: $a = 300$, $f_c = 4$ kHz。仿真一个高斯白噪声干扰信号 $w(t)$, 仿真的轴承故障振动信号模型(取 $t = 9 \sim 10$ s 段)为

$$x(t) = R(t) + y(t) + w(t) \quad (8)$$

仿真中取采样频率 $f_s = 25$ kHz, 仿真的滚动轴承时域振动信号如图 5 所示。由于受噪声干扰,瞬

态冲击成分在整个信号中并不明显。直接对原始仿真信号进行阶比跟踪得到的阶比谱如图 6 所示。图中只有仿真的强低频干扰信号 $y(t)$ 的阶比,而没有发现仿真的故障振动信号 $R(t)$ 的阶比。这说明故障振动信号非常微弱,被强低频干扰信号所淹没。

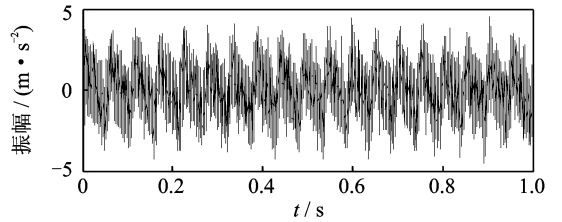


图 5 滚动轴承仿真振动信号

Fig. 5 Simulated vibration signal rolling elements bearing

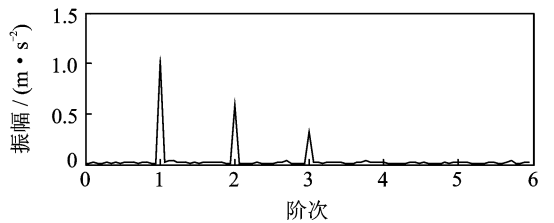


图 6 未经阶比峭度图分析的仿真信号阶比谱

Fig. 6 Order spectrum of simulated signal without COT-kurtogram analysis

依据基于 FIR 滤波器的阶比峭度图算法,计算了滚动轴承故障仿真信号的基于峭度系数 SK_1 以及 FIR 滤波器的阶比峭度图,如图 7 所示。图 7 为第 4.5 分解层上阶比谱峭度最大值 $SK_{1\max} = 96.2$ 处(图中虚线框标示处)所在中心阶比 $O_c = 8.75$, 阶比带宽为 $B_w = 1.1667$, 此参数即为最优共振解调参数。对应的阶比谱即为所求最优阶比谱,如图 8 所示。相对于图 6,图 8 所示的经过阶比峭度图分析后的仿真信号阶比谱可清晰地看到仿真的 5 阶故障特征阶比及其倍频。这说明强低频干扰被抑制甚至被去除,微弱故障特征被有效地提取出来,从而验证了阶比峭度图算法的可行性。

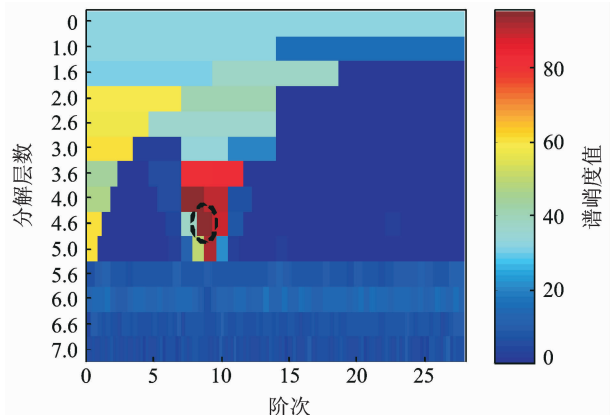


图 7 仿真信号的阶比谱峭度图

Fig. 7 COT-kurtogram of the simulated signal

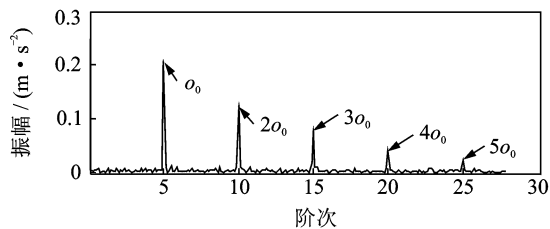


图8 阶比峭度图分析后的仿真信号阶比谱

Fig. 8 Order spectrum of simulated signal with with COT-kurtogram analysis

为了验证本算法对速度小范围波动的适应性及不同加速度情况下的适应性,笔者对另一组有波动的仿真信号进行了仿真实验。转速频率 $f(t) = (t + \cos(10t)/10)\text{Hz}$; 以与第1组仿真信号相同的方法仿真一个阶数分别为1阶、2阶、3阶的强低频干扰信号 $y(t)$, 再仿真一个每转内4阶的故障振动信号 $R(t)$, 最后仿真一个高斯白噪声干扰信号 $w(t)$ 。仿真的轴承故障振动信号模型为 $x(t) = R(t) + y(t) + w(t)$, 仿真中同样取采样频率 $f_s = 25\text{ kHz}$ 。

带有速度波动的仿真信号速度模型(18~23 s)如图9所示。仿真的滚动轴承时域振动信号(取20~21 s之间的一段)如图10所示。

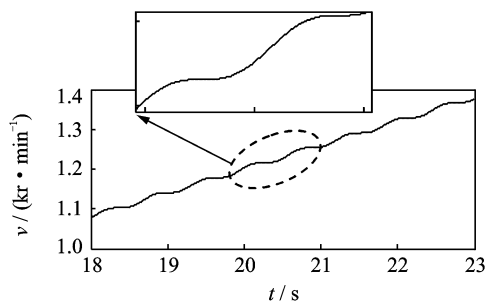


图9 有波动的仿真信号速度模型

Fig. 9 Simulated velocity model with fluctuation

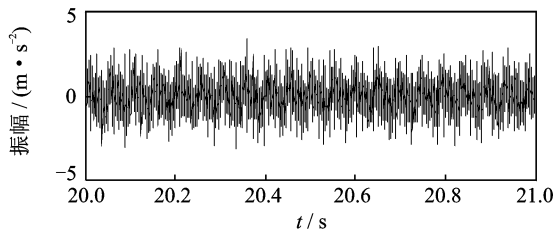


图10 滚动轴承仿真振动信号

Fig. 10 Simulated vibration signal rolling elements bearing

对仿真的滚动轴承振动信号进行阶比峭度图计算,得到仿真信号的阶比峭度图,如图11所示。在中心阶比为 $O_c = 10.56$, 阶比带宽为 $B_w = 7$, 分解层数在2层上进行最优解调得出最优阶比谱,如图12所示。可以看到仿真的4阶故障特征阶比及其倍频,验证了笔者提出的阶比峭度图算法对速度小范围波动的适应性和对不同加速度情况的适应性。

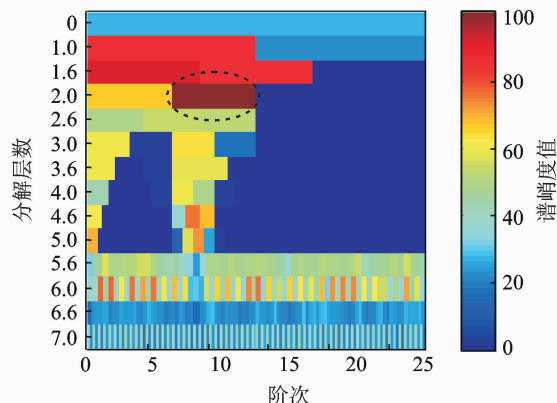


图11 仿真信号的阶比谱峭度图

Fig. 11 COT-kurtogram of the simulated signal

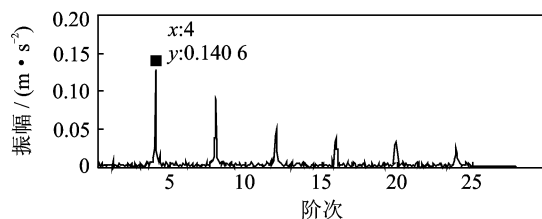


图12 仿真信号阶比谱

Fig. 12 Order spectrum of simulated signal

4 测试实验分析

为了验证阶比峭度图算法在实际滚动轴承故障特征提取中的优越性,笔者在滚动轴承振动实验平台上进行了验证。如图13所示,实验台采用直流并励电动机经半挠性联轴器直接驱动转轴,电机额定电流为2A,最大输出功率为250W。数据采集所用加速度传感器为美国CTC公司生产型号为M/WT135-1D的加速度传感器,采集点为故障轴承的支座上;转速传感器为SZGB-6型光电转速传感器。故障信号由五通道NI-USB4432采集卡采集得到。

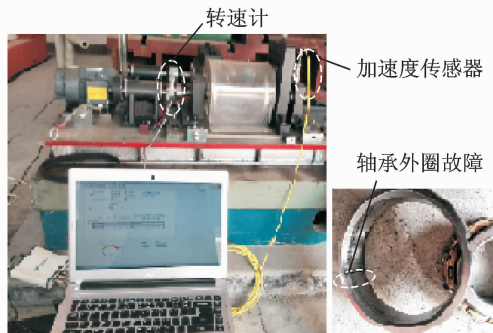


图13 滚动轴承振动实验台

Fig. 13 Rolling bearing vibration test rig

故障轴承型号为HRB圆柱滚子轴承N205M,滚子个数为 $Z = 13$, 滚子直径为 $d = 7.5\text{ mm}$, 轴承节径为 $D = 39.5\text{ mm}$, 轴承接触角 $\alpha = 0^\circ$ 。外圈故

障特征阶比为

$$o_o = \frac{1}{2}Z(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha) = 5.266$$

内圈故障特征阶比为

$$I_o = \frac{1}{2}Z(1 + \frac{d}{D}\cos\alpha) = 7.734$$

滚动体故障特征阶比为

$$R_o = \frac{D}{2d}(1 - (\frac{d}{D})^2\cos^2\alpha) = 2.538$$

保持架故障特征阶比为

$$C_o = \frac{1}{2}(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha) = 0.405$$

设置采样率为 20 kHz,选取实验过程中主轴转速从 750 r/min 加速到 1 050 r/min 的一段信号进行分析。图 14 为实测时域振动信号。图 15 为对应的主轴转速曲线。

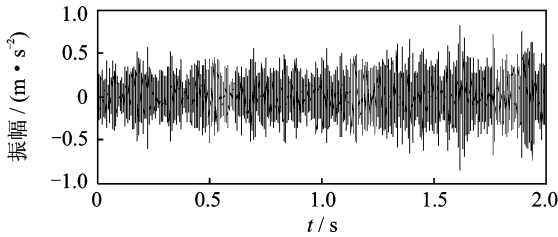


图 14 实测滚动轴承外圈故障振动信号

Fig. 14 Tested rolling bearing outrace fault vibration signal

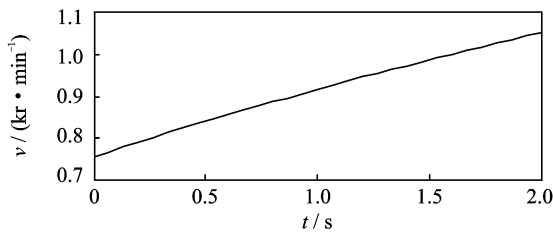


图 15 转速信号

Fig. 15 Speed profile

对测试振动信号不进行阶比峭度图分析,只进行阶比跟踪得到的阶比谱,如图 16 所示。从图中找不到任何需要的轴承外圈故障特征阶比信息。

为了验证阶比峭度图算法的准确性,对信号根据图 1 流程进行传统峭度图分析,得到的峭度图如图 17 所示。可见,最优化解调频带出现在第 2.5 分解层上,解调中心频率为 $f_c = 9\ 166.7$ Hz,带宽为 $b_w = 1\ 666.7$ Hz(图中虚线框标示处)。

在最优解调频带处提取实测信号的优化包络时域信号进行等角度重采样,对应的阶比谱如图 18 所示。对实测振动信号进行阶比峭度图分析,得到的阶比峭度图如图 19 所示。可以看到,第 5 分解层上最大峭度 $SK_{1,max} = 188.1$ 处最优的解调中心阶比为 $O_c = 27.56$,阶比带宽为 $B_w = 0.875$ (图中虚线框标示处)。在最优解调阶比带处提取实测信号的优化

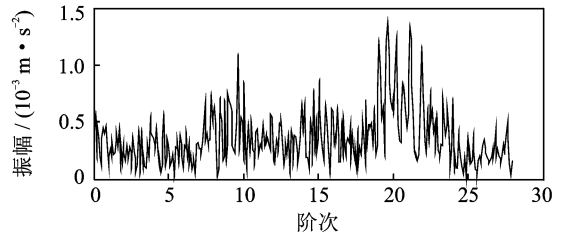


图 16 实测振动信号阶比谱

Fig. 16 Order spectrum of the test signal without COT-kurtogram

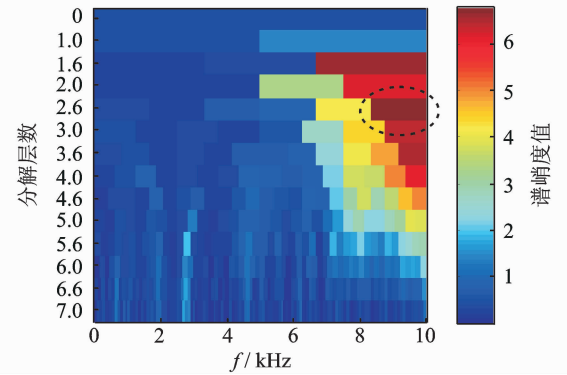


图 17 实测信号的谱峭度图

Fig. 17 Kurtogram of practical signal

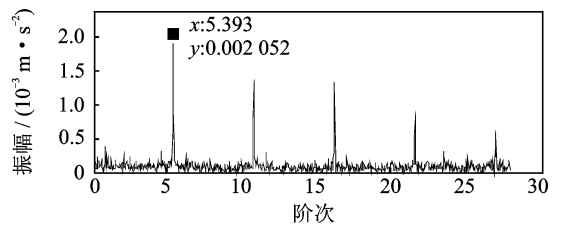


图 18 实测振动信号传统谱峭度阶比谱

Fig. 18 Order spectrum of practical signal with traditional kurtogram

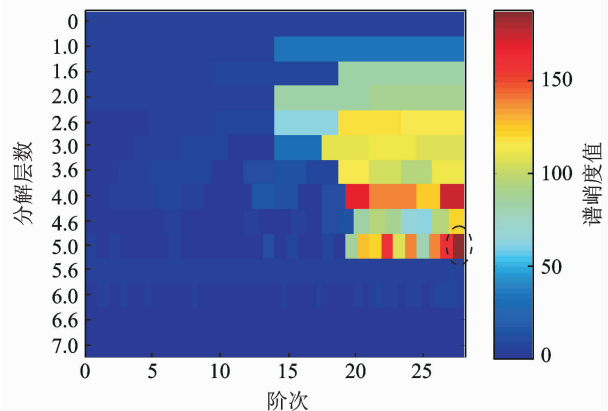


图 19 实测信号的阶比峭度图

Fig. 19 COT-kurtogram of the test data

包络时域信号进行阶比等角度重采样,计算阶比谱如图 20 所示。

相对于图 16,从图 20 可以看到滚动轴承外圈故障特征阶比及其倍阶成分,与滚动轴承外圈故障

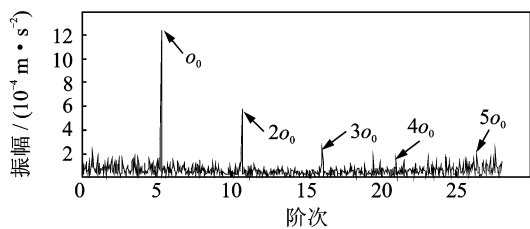


图20 实测振动信号阶比峭度阶比谱

Fig. 20 Order spectrum of the test signal with COT-kurtogram

的理论特征阶比及其倍频非常接近。表1为传统峭度图算法实测阶比(简称为传统实测)、阶比峭度图算法实测阶比(简称为阶比实测)与理论阶比值的对比及相对误差。一般滚动体和内外圈之间存在1~2%转频的滑动^[11],传动误差和阶比分辨率也可能导致实测故障频率和理论故障频率存在一定误差。据此可判断滚动轴承外圈存在故障,且从表中得出阶比峭度图算法比传统峭度图算法的阶比准确性更高,进而证明了笔者提出的阶比峭度图算法在滚动轴承实际故障特征提取方面具有明显优势。

表1 实测阶比与理论阶比对比

Tab. 1 Comparison of measured order and theoretical order

方法	倍频				
	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶
理论	5.266	10.532	15.798	21.064	26.33
阶比实测	5.357	10.71	16.07	20.96	26.32
阶比误差/%	1.7	1.7	1.7	0.5	0.04
传统实测	5.393	10.82	16.21	21.6	27.04
传统误差/%	2.4	2.7	2.6	2.6	2.7

5 结束语

融合计算阶比跟踪技术与峭度图方法,提出了适用于变转速下滚动轴承故障特征提取的阶比峭度图算法。该方法在阶比域平面内堆砌峭度图,进而确定最优解调阶比带参数及最优阶比谱。针对变转速下轴承故障振动信号的特征提取问题,该方法实现了直接在阶比域内的峭度图计算,相对于传统频域内峭度图计算,显著提高了峭度图计算的准确性。仿真及实测滚动轴承外圈故障信号分析结果均验证了该方法能够有效地将变速工况下的微弱轴承故障特征从低频干扰和强背景噪声中准确提取出来,具有良好的工程应用前景。

参 考 文 献

[1] 汤宝平,蒋永华,张祥春. 基于形态奇异值分解和经验模态分解的滚动轴承特征提取方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 37-42.

Tang Baoping, Jiang Yonghua, Zhang Xiangchun. Feature extraction method of rolling bearing fault based on singular value decomposition-morphology filter and empirical mode decomposition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(5): 37-42. (in Chinese)

- [2] Pearson K. Das fehlergesetz und seine verallgemeinerungen durch fechner und pearson[J]. A Rejoinder Biometrika, 1905, 4: 169-212.
- [3] Dyer D, Stewart R M. Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis[J]. ASME Transactions Journal of Mechanical Design, 1977, 100: 229-235.
- [4] Dwyer R F. Detection of non-Gaussian signals by frequency domain kurtosis estimation[C] // Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Boston; [s. n.], 1983: 607-610.
- [5] Antoni J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterizing nonstationary signals[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2006, 20: 282-307.
- [6] 苏文胜. 滚动轴承振动信号处理及特征提取方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
- [7] Antoni J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21: 108-124.
- [8] 徐冠基,柏林,刘小峰,等. 基于阶比分析的风力发电机噪声音调判定[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 451-454.
- Xu Guanji, Bo Lin, Liu Xiaofeng, et al. Determination of the tonality of wind turbines acoustic noise based on order analysis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4): 451-454. (in Chinese)
- [9] 刘亭伟,郭瑜. 基于谱峭度的滚动轴承故障包络阶比跟踪分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(17): 149-153.
- Liu Tingwei, Guo Yu. Envelope order tracking analysis for rolling element bearing faults based on spectral kurtosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(17): 149-153. (in Chinese)
- [10] 郭瑜,秦树人,梁玉前. 时频分析阶比跟踪技术[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2002, 25(5): 17-20.
- Guo Yu, Qin Shuren, Liang Yuqian. Order tracking method based on time-frequency analysis[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(5): 17-20. (in Chinese)
- [11] Sawalhi N, Randall R B. Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults part I. the combined gear bearing dynamic model and the simulation of localized bearing faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(8): 1924-1951.



第一作者简介:柏林,男,1972年11月生,教授、博士生导师。主要研究方向为虚拟仪器与信号处理。曾发表《Measurement system for wind turbines noises assessment based on LabVIEW》(《Measurement》2011, Vol. 44, No. 2)等论文。
E-mail: bolin0001@aliyun.com

通信作者简介:甄杰,男,1989年5月生,硕士生。主要研究方向为机电一体化。
E-mail: happyzyj.love@163.com