

# 基于局部均值分解和峭度图的 滚动轴承包络分析方法

张 亢<sup>1</sup>, 程军圣<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 长沙 410076;

2. 湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙 410082)

**摘 要:** 提出了基于局部均值分解(local mean decomposition, LMD)和峭度图(kurtogram)的滚动轴承包络分析方法. 该方法中, 原始滚动轴承故障振动信号通过 LMD 进行自适应的频率成分分离和初步降噪, 包络分析中带通滤波器的参数通过峭度图客观地提供, 从而提高滚动轴承包络分析的准确度. 通过对滚动轴承仿真信号以及实验信号的分析, 结果表明: 在低信噪比情况下, LMD 可以自适应分离出滚动轴承的固有振动成分, 峭度图可以自动确定包络分析中带通滤波器的参数, 与传统包络分析比较, 所提方法能更加清晰准确地提取滚动轴承的故障特征.

**关 键 词:** 故障诊断; 滚动轴承; 局部均值分解; 峭度图; 包络分析; 故障特征

**中图分类号:** V233.4<sup>+</sup>5; TN911.7; TH165.3

**文献标志码:** A

## Roller bearing envelope analysis method based on local mean decomposition and kurtogram

ZHANG Kang<sup>1</sup>, CHENG Jun-sheng<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering,

Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

2. College of Mechanical and Vehicle Engineering,

Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Roller bearing envelope analysis method based on local mean decomposition (LMD) and kurtogram was proposed. In this method, the original roller bearing fault vibration signal was decomposed into a set of frequency components and preliminary reduced noises adaptively by LMD, and the parameters of band-pass filter in envelope analysis were provided objectively by kurtogram, thus the envelope analysis accuracy for roller bearing can be enhanced. The analytical results from roller bearing simulation signals and experimental signals indicate that the natural vibration components of roller bearing can be separated by LMD adaptively and the parameters of band-pass filter in envelope analysis can be determined by kurtogram automatically in low signal-to-noise ratio. Compared with traditional envelope analysis, the proposed method can extract the fault features of roller bearing more clearly and accurately.

**Key words:** fault diagnosis; roller bearing; local mean decomposition; kurtogram; envelope analysis; fault feature

由滚动轴承局部故障引起的轴承系统固有振动,其振动信号一般呈现出调制特征<sup>[1]</sup>.要提取故障特征,需要对原始振动信号进行解调,包络分析是目前常用的方法之一<sup>[2-3]</sup>.但在实际应用时,滚动轴承振动信号载波频率的大小、调制频带的分布范围很难预知,从而难以客观准确地确定带通滤波器的中心频率和通带宽度等参数,这样可能会造成解调误差<sup>[4-5]</sup>.

谱峭度(spectral kurtosis,SK)是一种用来检测信号中是否含有非高斯成分的频域统计指标,并能提供非高斯成分频率的分布范围<sup>[6]</sup>.滚动轴承故障振动信号的故障特征成分一般表现为非高斯特征,而正常轴承振动信号和背景噪声大多表现为高斯特征<sup>[7]</sup>.因此,理论上 SK 不但可以用来反映滚动轴承的状态,而且能够为滚动轴承的包络分析,客观地提供带通滤波器所需的参数(如中心频率、通带宽度),很适合于滚动轴承的精确诊断.然而,SK 在实际计算中,存在计算效率低和对非局部平稳信号不稳定的缺点,对此,Antoni 等在 SK 的基础上提出了峭度图(kurtogram)<sup>[7-8]</sup>方法.峭度图既保留了 SK 的优点,又保证了算法高效、稳定,现已在机械故障诊断中得到了初步应用<sup>[9-13]</sup>.

实际的滚动轴承振动信号通常包含多个振动源产生的振动成分和大量的背景噪声,如果直接对原始振动信号进行峭度图分析,可能无法准确识别到包含故障特征的振动成分.局部均值分解(local mean decomposition, LMD)<sup>[14-15]</sup>是一种较新的非平稳信号分析方法,它能够自适应地将信号分解为一系列的乘积函数(product function, PF),其中每一个 PF 理论上对应了原信号中的一种频率成分.因此,如果采用 LMD 对滚动轴承振动信号进行分解,即可起到自适应分离各种振动成分和初步降噪的作用.本文综合 LMD 和峭度图的特点,提出了基于 LMD 和峭度图的滚动轴承包络分析方法,通过对滚动轴承仿真信号和实验信号的分析,验证了所提方法的有效性.

# 1 基于 LMD 和峭度图的包络分析

针对具有多分量调制特点的滚动轴承故障振动信号,可以采用 LMD 对其进行分解,得到含有固有振动成分的 PF 分量.但对于滚动轴承早期故障或是在环境噪声很强烈的情况下采集的振动信号,含有固有振动成分的 PF 分量的信噪比仍

然较低,直接进行包络分析,也很难获得清晰的故障特征.进一步采用滤波器对同时含有固有振动成分和大量噪声的 PF 分量滤波,尽可能提高信噪比是一个解决办法,关键是如何设定该滤波器的参数.

根据滚动轴承故障机理,局部故障引起的滚动轴承固有振动,在信号时域波形上表现为瞬态冲击特征,另外,滚动轴承系统的其他振动,如各元件之间的摩擦、碰撞、松动等,在时域波形上一般也表现为瞬态冲击特征.在统计学角度,瞬态冲击特征的幅值分布为非高斯分布.滚动轴承振动信号中的噪声则具有随机性,其幅值分布一般近似服从高斯分布.理论上,非高斯成分的峭度要大于高斯成分的峭度,而 SK 的本质是峭度的“局部化”,即通过分析信号频谱中每一根谱线上时域数据的峭度大小,来判定信号中的瞬态冲击成分(即非高斯成分)具体属于哪些谱线.因此,SK 不但能检测信号中是否含有非高斯成分,而且能提供非高斯成分的频率分布范围,这对于识别与提取具有非高斯特征的滚动轴承固有振动成分是有利的,同时也为前述滤波器参数的设定提供了依据.

Antoni 根据 Wold-Cramer 分解对非平稳过程的谱峭度  $K_x(f)$  进行了定义<sup>[6]</sup>,即

$$K_x(f) = \frac{C_{4x}(f)}{S_{2x}^2(f)} = \frac{S_{4x}(f)}{S_{2x}^2(f)} - 2 \quad f \neq 0 \tag{1}$$

其中  $C_{4x}(f) = S_{4x} - 2S_{2x}^2(f)$ ,  $f \neq 0$  为 4 阶谱累积量,  $S_{2nx}(f)$  为  $2n$  阶瞬时矩,这样定义的谱峭度  $K_x(f)$  是某个频率下信号概率密度函数的峰值的度量.

由传感器测得的滚动轴承故障振动信号  $y(t)$  可表示为

$$y(t) = x(t) + n(t) \tag{2}$$

其中  $x(t)$  为滚动轴承故障特征信号,  $n(t)$  为独立于  $x(t)$  的高斯噪声.  $y(t)$  的谱峭度  $K_y(f)$  可表示为<sup>[7]</sup>

$$K_y(f) = \frac{K_x(f)}{[1 + \rho(f)]^2} \quad f \neq 0 \tag{3}$$

式中  $K_x(f)$  为故障特征信号  $x(t)$  的谱峭度,  $\rho(f)$  为噪信比,即  $\rho(f) = S_n(f)/S_x(f)$ ,  $S_n(f)$  和  $S_x(f)$  分别为  $n(t)$  和  $x(t)$  的功率谱密度.从式(3)可以得出在噪信比低的频率处,有  $K_y(f) \approx K_x(f)$ ,而在以背景噪声为主的频率处,  $K_y(f)$  趋近于 0.因此,如果搜索  $y(t)$  所在的频率范围,找出对应谱峭度  $K_y(f)$  最大的频带,也即找到了故

障特征信号  $x(t)$  所在的频带。

在实际计算式(1)定义的  $K_x(f)$  时,为了提高计算效率和降低对非局部平稳信号的敏感性,并不是计算每一根谱线上数据的  $K_x(f)$ ,而是计算一个频段内数据的  $K_x(f)$ ,但频段的宽度(频宽)对  $K_x(f)$  是有影响的.文献[7]综合考虑频宽和频率对  $K_x(f)$  的影响,提出了峭度图(kurtogram)的概念.峭度图描述了谱峭度随频宽和频率变化的情况,基本原理是先对信号  $y(t)$  利用不同长度  $N_w$  的窗函数进行短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT),然后计算每次 STFT 时频数据的谱峭度  $K_y(f)$ ,再将所有  $K_y(f)$  组合,即可得到窗长-频率-谱峭度的关系图  $K_y(N_w, f)$ ,即峭度图.在 STFT 中窗长  $N_w$  与频宽  $\Delta f$  有着对应的关系,即  $\Delta f = f_s/N_w$ ,其中  $f_s$  为信号的采样频率,因此,  $K_y(N_w, f)$  实际上也反映了谱峭度随频率  $f$  与频宽  $\Delta f$  变化的情况.搜索  $K_y(N_w, f)$  找出谱峭度最大时对应的窗长  $N_{w, \max}$  和频率值  $f_{o, \max}$ ,也即找到了使谱峭度最大的频率、频宽组合( $f_{o, \max}/\Delta f$ ),由此可以确定一个中心频率为  $f_c = f_{o, \max}$ 、通带宽度(即 STFT 中的频宽)为  $\Delta f$  的带通滤波器  $H(f_c, \Delta f)$ .利用  $H(f_c, \Delta f)$  对信号进行滤波,也就在最大程度上保留了信号中使谱峭度最大的频率成分.同理,如果利用峭度图分析同时含有滚动轴承固有振动成分和噪声成分的 PF 分量,再用得到的带通滤波器对该 PF 分量进行滤波,那么就可获得信噪比更高的固有振动成分,为后续准确的包络分析打下基础.本文分析中采用的是基于塔式算法的快速峭度图(fast kurtogram),具体算法可参考文献[8].

综合以上分析,提出了一种基于 LMD 和峭度图的包络分析法用于滚动轴承故障振动信号的分析,具体步骤如下:

- 1) 利用 LMD 对采集的滚动轴承故障振动信号进行分解,得到一系列 PF 分量;
- 2) 依据实际工况以及原信号和 PF 分量的频谱,选取含有固有振动成分的 PF 分量进行峭度图分析;
- 3) 在峭度图中找出对应谱峭度最大的频率值  $f_{o, \max}$  和窗长  $N_{w, \max}$ ,以  $f_c = f_{o, \max}$  为中心频率、 $\Delta f = f_s/N_{w, \max}$  为通带宽度设计一个有限冲击响应(FIR)带通滤波器  $H(f_c, \Delta f)$ ;
- 4) 采用  $H(f_c, \Delta f)$  对步骤(2)中的 PF 分量进行滤波,对滤波后的信号做平方包络谱来诊断滚动轴承的故障.

## 2 在滚动轴承故障诊断中的应用

### 2.1 仿真信号分析

根据文献[16]建立的滚动轴承局部故障动力学模型,构造滚动轴承内圈故障特征仿真信号  $x(t)$ ,其中设转动频率  $f_i$  为 16 Hz,采样频率  $f_s$  为 16 000 Hz,内圈故障特征频率  $f_{inner}$  为 200 Hz,故障性脉冲力激起了 1 800 kHz 和 4 000 Hz 的固有频率振动.  $x(t)$  的时域波形见图 1,其表现为周期性的冲击特征.图 2 是在  $x(t)$  中加入了高斯白噪声后的故障振动信号  $y(t)$ ,可以看出故障性的冲击成分几乎被白噪声淹没.

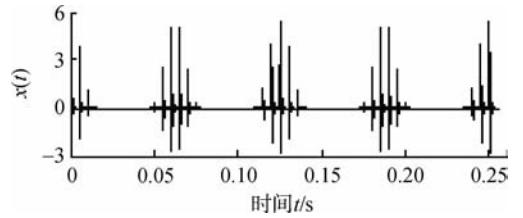


图 1 滚动轴承内圈故障特征仿真信号

Fig. 1 Simulation signal of roller bearing with inner race fault

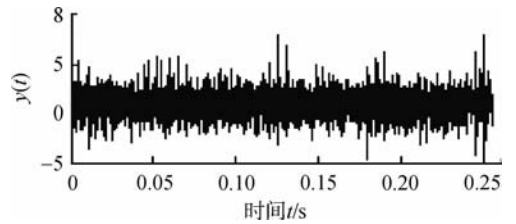


图 2 加噪后的滚动轴承内圈故障振动仿真信号

Fig. 2 Simulation signal of roller bearing with inner race fault vibration plus noise

LMD 分解  $y(t)$  共得到 8 个 PF 分量和 1 个余量,分解过程中采用自适应波形匹配延拓法<sup>[17]</sup>对信号进行延拓,避免端点效应,并采用正交性判据(orthogonality criterion, OC)<sup>[18]</sup>作为迭代终止条件,其中设定  $OC < 1.01$ ,本文后续分析也采用上述指标,不再赘述, LMD 的具体分解步骤可参考文献[14].第 1 个 PF 分量  $P_{f1}(t)$  的时域波形及其频谱分别如图 3 和图 4 所示,可以看出,  $P_{f1}(t)$  对应了  $y(t)$  中 4 000 Hz 的固有振动成分.直接对  $P_{f1}(t)$  的包络信号(由 LMD 得到)进行频谱分析的结果如图 5 所示,可以看出图 5 中的内圈故障特征频率处不存在清晰的谱线,说明  $P_{f1}(t)$  虽然包含了轴承固有振动成分,但信噪比仍然较低.

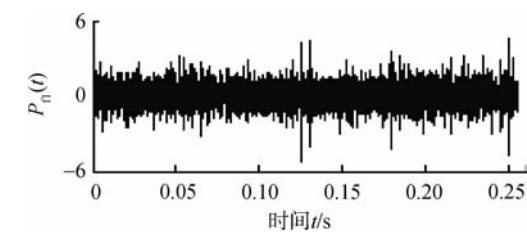


图 3 第 1 个 PF 分量的波形(内圈故障振动仿真信号)  
Fig. 3 Waveform of the first PF component  
(inner race vibration fault simulation signal)

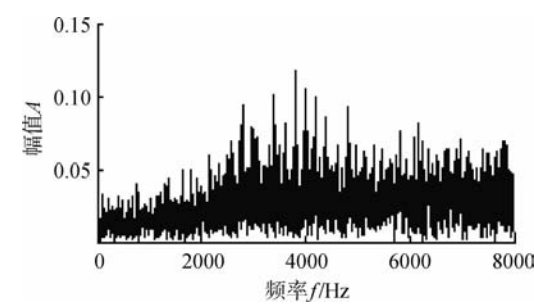


图 4 第 1 个 PF 分量的频谱(内圈故障振动仿真信号)  
Fig. 4 Frequency spectrum of the first PF component  
(inner race vibration fault simulation signal)

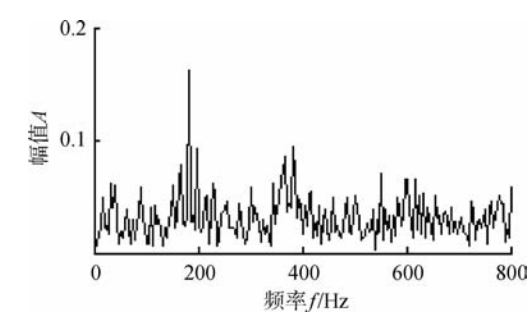


图 5 第 1 个 PF 分量的包络信号的频谱  
(内圈故障振动仿真信号)  
Fig. 5 Envelope spectrum of the first PF component  
(inner race vibration fault simulation signal)

按本文所提方法,进一步对  $P_{f1}(t)$  进行快速峭度图分析,结果如图 6 所示,图中横坐标为频率  $f$ ,纵坐标为窗长  $N_w$  以 2 为底的对数值. 根据色条,可以知道  $f=4000\text{ Hz}$ ,  $\log_2 N_w=4$ ,也即  $N_w=16$  时谱峭度最大,据此设计一个中心频率  $f_c=4000\text{ Hz}$ ,通带宽度  $\Delta f=f_s/N_w=1000\text{ Hz}$  的 30 阶 FIR 带通滤波器  $H(f_c, \Delta f)$ ,并采用  $H(f_c, \Delta f)$  对  $P_{f1}(t)$  进行滤波,滤波后的信号  $s(t)$  如图 7 所示,与  $P_{f1}(t)$  比较,  $s(t)$  的冲击特征得到了加强. 图 8 为  $s(t)$  的平方包络谱,在图 8 中存在着 1 倍、2 倍转动频率  $f_i, 2f_i$  和 1 倍、2 倍内圈故障特

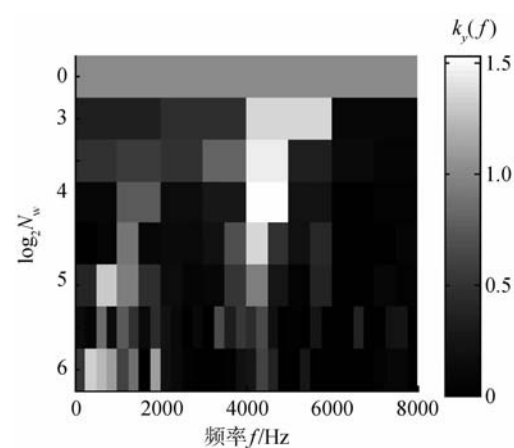


图 6 第 1 个 PF 分量的快速峭度图  
(内圈故障振动仿真信号)  
Fig. 6 Fast kurtogram of the first PF component  
(inner race vibration fault simulation signal)

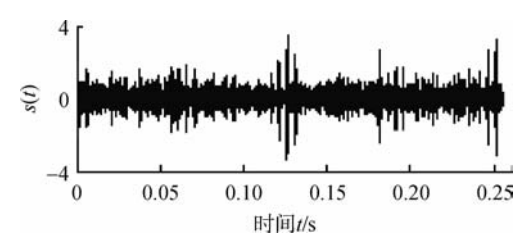


图 7 第 1 个 PF 分量滤波后的波形  
(内圈故障振动仿真信号)  
Fig. 7 Waveform of the first PF component after  
filtering (inner race vibration fault  
simulation signal)

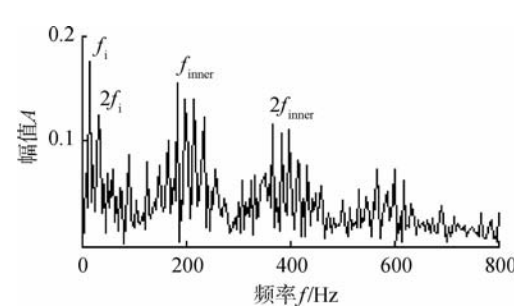


图 8 第 1 个 PF 分量滤波后的平方包络谱  
(内圈故障振动仿真信号)  
Fig. 8 Square envelope spectrum of the first PF  
component after filtering (inner race  
vibration fault simulation signal)

征频率  $f_{inner}, 2f_{inner}$ , 并且在  $f_{inner}, 2f_{inner}$  两边存在以  $f_i$  为间隔的调制边频带,这符合内圈故障特征. 同样根据文献[16]的动力学模型,构造滚动轴承外圈故障特征仿真信号,其中设外圈故障特征频率  $f_{outer}$  为  $100\text{ Hz}$ ,故障性脉冲力激起了  $1800$

Hz 和 4 000 Hz 的固有频率振动,信号采样频率为 16 000 Hz,加入白噪声后的外圈故障振动仿真信号  $y(t)$  如图 9 所示.

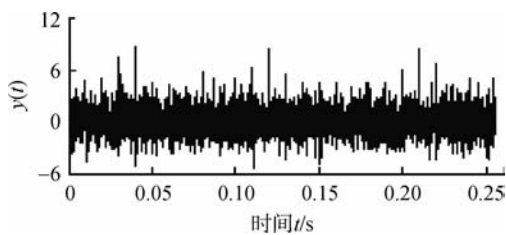


图 9  加噪后的滚动轴承外圈故障振动仿真信号  
Fig. 9  Simulation signal of roller bearing with outer race vibration fault plus noise

采用基于 LMD 和峭度图的包络分析法对  $y(t)$  进行分析,首先利用 LMD 对  $y(t)$  进行分解,分解得到的第 1 个 PF 分量  $P_{f1}(t)$  如图 10 所示,经分析  $P_{f1}(t)$  对应着 4 000 Hz 的固有振动成分.进一步对  $P_{f1}(t)$  进行快速峭度图分析,结果如图 11 所示,图中  $f=4\,000\text{ Hz}$ ,  $\log_2 N_w=3.5$ ,也即  $N_w=11$  时谱峭度最大,据此设计中心频率  $f_c=$

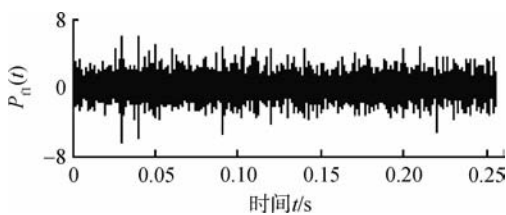


图 10  第 1 个 PF 分量的波形(外圈故障振动仿真信号)  
Fig. 10  Waveform of the first PF component (outer race vibration fault simulation signal)

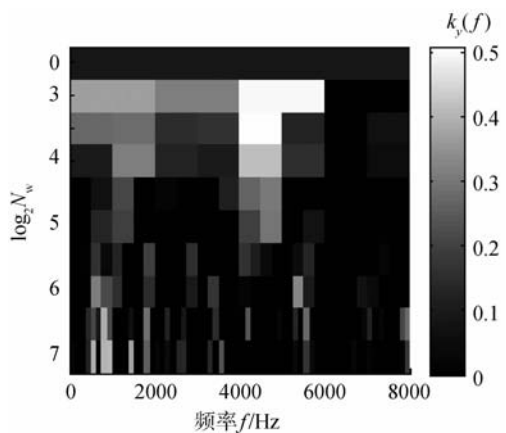


图 11  第 1 个 PF 分量的快速峭度图  
(外圈故障振动仿真信号)  
Fig. 11  Fast kurtogram of the first PF component (outer race vibration fault simulation signal)

4 000 Hz,通带宽度  $\Delta f=1\,414\text{ Hz}$  的 20 阶 FIR 滤波器,对  $P_{f1}(t)$  进行滤波后的信号  $s(t)$  如图 12 所示,可以看出  $s(t)$  较  $P_{f1}(t)$  冲击特征得到了明显加强.在图 13 所示  $s(t)$  的平方包络谱中,外圈故障特征频率  $f_{\text{outer}}$  及其倍频处存在清晰的谱线,符合外圈故障特征.

## 2.2  实验信号分析

在图 14 所示的旋转机械故障实验台上进行滚动轴承故障实验.实验用轴承型号为 SKF6311,通

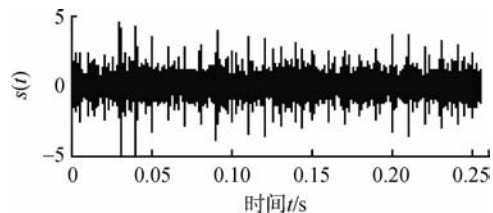


图 12  第 1 个 PF 分量滤波后的波形  
(外圈故障振动仿真信号)  
Fig. 12  Waveform of the first PF component after filtering (outer race vibration fault simulation signal)

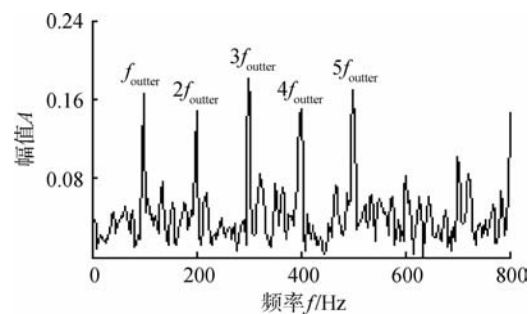


图 13  第 1 个 PF 分量滤波后的平方包络谱  
(外圈故障振动仿真信号)  
Fig. 13  Square envelope spectrum of the first PF component after filtering (outer race vibration fault simulation signal)

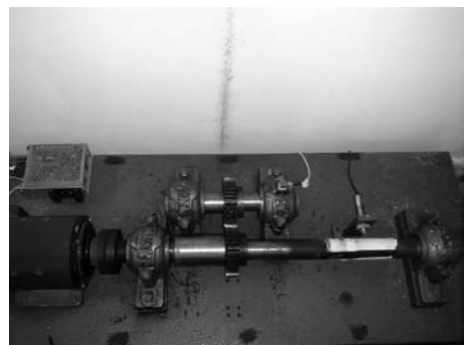


图 14  旋转机械故障实验台  
Fig. 14  Rotating machinery fault test rig

过激光切割在内圈或外圈上开槽来设置故障,槽宽为 0.15 cm,槽深为 0.13 cm,通过垂直和水平放置的加速度传感器测取振动加速度信号,采集设备为比利时鲁文测试与系统(Leuven Measurement and System, LMS)公司的 40 通道振动和噪声数据采集系统. 图 15 是测得的内圈有局部故障的滚动轴承振动加速度信号  $a(t)$ ,实验时轴转动频率  $f_i$  为 15 Hz,采样频率为 4 096 Hz,经计算内圈故障特征频率  $f_{inner}$  为 74.3 Hz. 通过图 16 所示的  $a(t)$  的频谱可以知道  $a(t)$  中主要存在着[400, 550] Hz, [1 600, 2 000] Hz 的频率成分以及噪声成分,直接从频谱很难判断滚动轴承的状态.

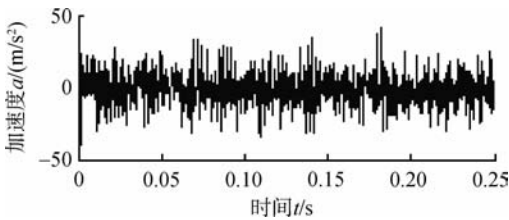


图 15 滚动轴承内圈故障的实验信号  
Fig. 15 Roller bearing experiment signal with inner race vibration fault

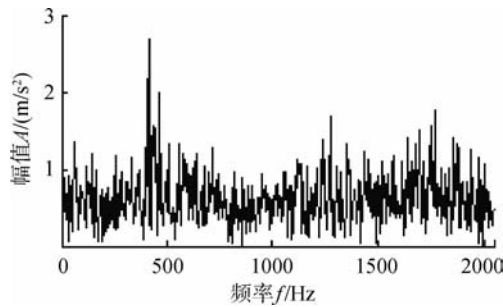


图 16 滚动轴承内圈故障实验信号的频谱  
Fig. 16 Spectrum of roller bearing experiment signal with inner race vibration fault

采用基于 LMD 和峭度图的包络分析法对  $a(t)$  进行分析,首先利用 LMD 对  $a(t)$  进行分解,其中前两个 PF 分量  $P_{f1}(t)$  和  $P_{f2}(t)$  的时域波形如图 17 所示. 经分析,  $P_{f1}(t)$  和  $P_{f2}(t)$  分别对应了原信号中[1 600, 2 000] Hz 和 [400, 550] Hz 的频率成分,其中  $P_{f2}(t)$  是与实验台中齿轮啮合振动有关的成分,  $P_{f1}(t)$  为含有实验轴承固有振动成分的 PF 分量. 图 18 是  $P_{f1}(t)$  的包络信号(由 LMD 得到)的频谱,图 19 是对  $P_{f1}(t)$  直接进行平方包络分析的结果,两图中内圈故障特征频率处均无清晰谱线,说明  $P_{f1}(t)$  的信噪比仍然较低.

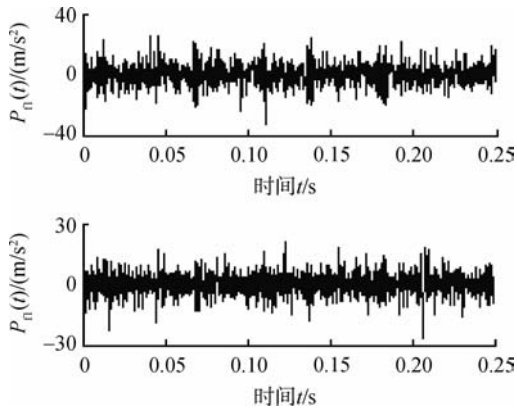


图 17 前两个 PF 分量的时域波形  
(内圈故障振动实验信号)  
Fig. 17 Time domain waveform of the first two PF components (inner race vibration fault experiment signal)

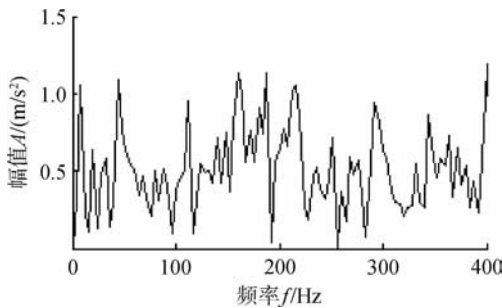


图 18 第 1 个 PF 分量的包络信号的频谱  
(内圈故障振动实验信号)  
Fig. 18 Envelope spectrum of the first PF component (inner race vibration fault experiment signal)

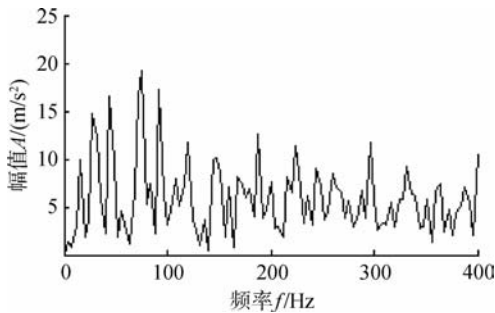


图 19 第 1 个 PF 分量的平方包络谱  
(内圈故障振动实验信号)  
Fig. 19 Square envelope spectrum of the first PF component (inner race vibration fault experiment signal)

进一步对  $P_{f1}(t)$  进行快速峭度图分析,结果如图 20 所示,图中  $f=1792$  Hz,  $\log_2 N_w=3.5$ , 也即  $N_w=11$  时谱峭度最大,据此设计中心频率  $f_c=1792$  Hz、通带宽度  $\Delta f=372$  Hz 的 15 阶 FIR

滤波器  $H(f_c, \Delta f)$ . 采用  $H(f_c, \Delta f)$  对  $P_{fi}(t)$  进行滤波后的信号  $s(t)$  如图 21 所示, 相较于  $P_{fi}(t)$ ,  $s(t)$  存在比较明显的冲击特征.  $s(t)$  的平方包络谱如图 22 所示, 可以看出包络谱中存在着 1 倍、2

倍、3 倍转动频率  $f_i, 2f_i, 3f_i$  和 1 倍、2 倍、3 倍内圈故障特征频率  $f_{inner}, 2f_{inner}, 3f_{inner}$ , 可以判断滚动轴承内圈发生了局部故障, 与实际相符, 说明了所提方法的有效性, 也说明了所提方法较直接包络分析法的效果更好.

为了说明 LMD 起到的频率成分分离以及降噪作用, 对  $x(t)$  直接进行快速峭度图分析, 结果如图 23 所示, 图中  $f=640\text{ Hz}$ ,  $\log_2 N_w=4.5$ , 也即  $N_w=23$  时谱峭度最大, 据此设计中心频率  $f_c=640\text{ Hz}$ 、通带宽度  $\Delta f=178\text{ Hz}$  的 FIR 滤波器  $H(f_c, \Delta f)$  对  $x(t)$  进行滤波. 滤波后的信号的平方包络谱如图 24 所示. 可以看出, 在平方包络谱的内圈故障特征频率处无清晰谱线, 与实际不符. 原因是  $x(t)$  中除滚动轴承固有振动成分外, 还含有其他振动成分及干扰成分, 而这些成分没有经过 LMD 的初步分离, 从而导致峭度图无法准确定位到由故障导致的滚动轴承固有振动成分所造成的.

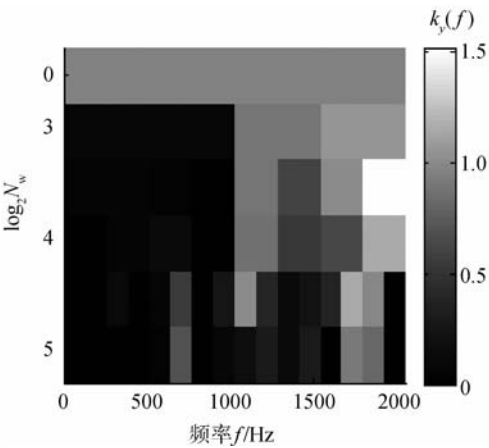


图 20 第 1 个 PF 分量的快速峭度图  
(内圈故障振动实验信号)

Fig. 20 Fast kurtogram of the first PF component  
(inner race vibration fault experiment signal)

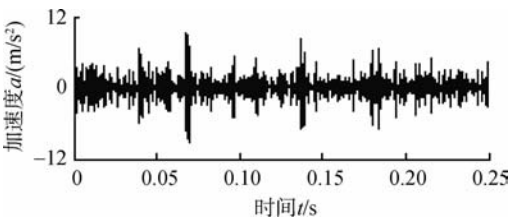


图 21 第 1 个 PF 分量滤波后的时域波形  
(内圈故障振动实验信号)

Fig. 21 Time domain waveform of the first PF  
component after filtering (inner race  
vibration fault experiment signal)

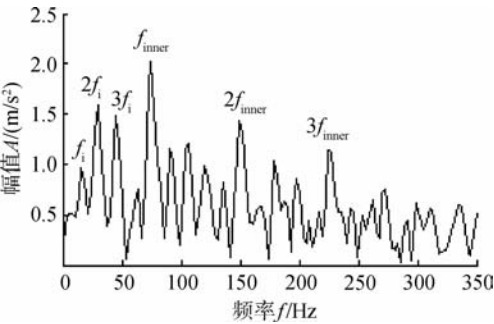


图 22 第 1 个 PF 分量滤波后的平方包络谱  
(内圈故障振动实验信号)

Fig. 22 Square envelope spectrum of the first PF  
component after filtering (inner race vibration  
fault experiment signal)

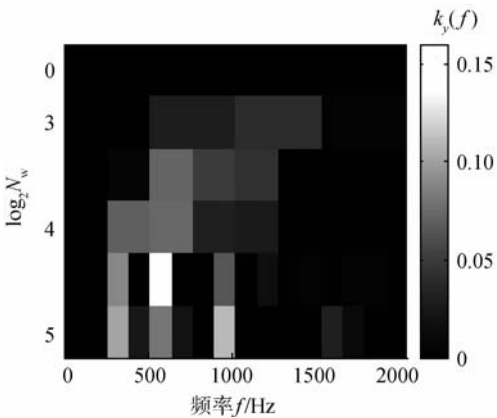


图 23 滚动轴承内圈故障实验信号的快速峭度图

Fig. 23 Fast kurtogram of roller bearing  
experimental signal with  
inner race vibration fault

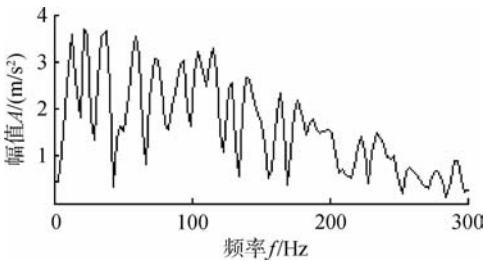


图 24 滚动轴承内圈故障实验信号滤波后的平方包络谱

Fig. 24 Square envelope spectrum of  
roller bearing experiment signal with  
inner race vibration fault

### 3 结 论

本文根据滚动轴承的故障机理,提出了基于LMD和峭度图的包络分析法,分析了滚动轴承故障仿真信号和实验信号,得出了以下结论:

1) 所提方法特别适合于分析周期性冲击特征叠加白噪声这一类信号。

2) 利用LMD可以将滚动轴承故障振动信号的各种频率成分予以分离,从而突出固有振动成分。

3) 传统包络分析中带通滤波器参数的选择具有主观性,导致解调误差,通过峭度图分析可以自动、客观地确定用于滤出故障性冲击成分的带通滤波器的最佳参数,克服了传统包络分析的不足。

4) 所提方法可以有效地提取滚动轴承故障振动信号的故障特征,为滚动轴承的包络分析提供了新的有效途径。

5) 所提方法中的主要步骤:LMD分离频率成分和峭度图提取滤波器参数,都是自适应的,主观干预小,有利于方法集成到实际的故障状态监测系统。

### 参考文献:

- [1] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断[M]. 北京:机械工业出版社,1996.
- [2] McFadden P D, Smith J D. Vibration monitoring of rolling element bearings by the high frequency resonance technique: a review[J]. Tribology International, 1984, 17(1): 3-10.
- [3] Nikolaou N G, Antoniadis I A. Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings using complex shifted Morlet wavelet[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2002, 16(4): 677-694.
- [4] 何岭松,李巍华. 用 Morlet 小波进行包络检波分析[J]. 振动工程学报, 2002, 15(1): 119-121.  
HE Lingsong, LI Weihua. Morlet wavelet and its application in enveloping[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(1): 119-121. (in Chinese)
- [5] 程军圣,于德介,杨宇. 基于 EMD 的能量算子解调方法及其在机械故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2004, 40(8): 115-118.  
CHENG Junsheng, YU Dejie, YANG Yu. Energy operator demodulating approach based on EMD and its application in mechanical fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8): 115-118. (in Chinese)
- [6] Antoni J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 282-307.
- [7] Antoni J, Randall R B. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating ma-

- chines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 308-331.
- [8] Antoni J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(1): 108-124.
- [9] Sawalhi N, Randall R B. The application of spectral kurtosis to bearing diagnosis[C] // Proceedings of Acoustics. Gold Coast, Australia: Australian Acoustical Society, 2004: 393-398.
- [10] Sawalhi N, Randall R B, Endo H. The enhancement of fault detection and diagnosis in rolling element bearings using minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(6): 2616-2633.
- [11] Combet F, Gelman L. Optimal filtering of gear signals for early damage detection based on the spectral kurtosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(3): 652-668.
- [12] Barszcz T, Randall R B. Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1352-1365.
- [13] ZHANG Yongxiang, Randall R B. Rolling element bearing fault diagnosis based on the combination of genetic algorithms and fast kurtogram[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(5): 1509-1517.
- [14] Smith J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005, 2(5): 443-454.
- [15] 杨宇,王欢欢,程军圣,等. 基于 LMD 的包络谱特征值在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 1153-1158.  
YANG Yu, WANG Huanhuan, CHENG Junsheng, et al. Application of envelope spectrum characteristics based on LMD to roller bearing fault diagnosis[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 1153-1158. (in Chinese)
- [16] 张中民,卢文祥,杨叔子,等. 滚动轴承故障振动模型及其应用研究[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(3): 50-53.  
ZHANG Zhongmin, LU Wenxiang, YANG Shuzi, et al. A model for the vibration produced by local faults in roller bearing and its application[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1997, 25(3): 50-53. (in Chinese)
- [17] 张亢,程军圣,杨宇. 基于自适应波形匹配延拓的局部均值分解端点效应处理方法[J]. 中国机械工程, 2010, 21(4): 457-462.  
ZHANG Kang, CHENG Junsheng, YANG Yu. Processing method for end effects of local mean decomposition based on self-adaptive waveform matching extending[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(4): 457-462. (in Chinese)
- [18] 张亢,程军圣,杨宇. 局部均值分解方法中乘积函数判据问题研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 84-88.  
ZHANG Kang, CHENG Junsheng, YANG Yu. Research on the product function criterion in local mean decomposition method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 84-88. (in Chinese)