

# 轴承故障声发射信号多频带共振解调方法\*

张晓涛, 唐力伟, 王平, 邓士杰

(军械工程学院火炮工程系 石家庄, 050003)

**摘要** 轴承故障声发射信号具有高频率、宽频带、多频率成分组成特性。针对轴承故障声发射信号的多频带共振解调问题, 基于故障先验知识确定滤波带宽, 利用窄带解调 Protrugram 算法迭代搜索多个可解调中心频率, 在对应的多个窄带范围内实现故障频率的解调识别。仿真和实验信号处理结果表明, 窄带包络解调方法能够找到多个可用解调窄带, 对应解调包络谱中均可清楚地识别故障频率, 且包络谱具有故障频率谱线清晰, 倍频成分衰减明显的特点。

**关键词** 声发射; 多频带解调; Protrugram 算法; 故障诊断

**中图分类号** TN911.72; TH133.33

## 引言

声发射(acoustic emission, 简称 AE)技术为轴承故障诊断提供了一种高灵敏度检测方法<sup>[1-2]</sup>。轴承故障的声发射信号具有高频率宽带特点, 且微弱故障信号噪声干扰严重, 从原始信号中提取有用信号, 解调故障频率是轴承故障声发射诊断研究的热点内容<sup>[3]</sup>。

声发射信号故障传统解调方法在宽带滤波范围内进行, 往往包含多个冲击共振频率, 解调结果中倍频幅度大, 且宽带滤波解调引入更多噪声, 强故障信号识别效果较好, 微弱故障识别效果不佳<sup>[2]</sup>。根据声发射理论, 轴承故障过程产生的声发射信号由多个频率成分组成<sup>[4]</sup>, 故障冲击共振频率是在声发射频带范围内的一系列频率成分, 声发射信号的多频率成分特性使故障特征在多个共振频率处的解调成为可能, 多频带共振解调需要限制滤波带宽, 避免一个滤波带宽中包含多个临近故障共振频率。

笔者利用窄带包络解调思想, 根据故障先验知识确定滤波带宽, 通过滤波信号包络谱峭度极大值搜索可用滤波中心频率, 从而利用多个有效窄带滤波信号解调识别故障频率, 结合仿真信号与试验数据验证了故障声发射信号多频带共振解调的有效性, 说明窄带包络解调方法能够实现故障多频带共振解调。

## 1 多频带共振解调

齿轮箱轴承常见故障为表面损伤和疲劳磨损,

运转过程中的轴承故障由于临界裂纹扩展、裂纹面闭合与磨损、碰撞摩擦等原因产生声发射信号<sup>[5]</sup>。金属材料的声发射信号是一种高频宽带信号, 常见金属材料的声发射信号频带处于 100~500 kHz 的超声范畴<sup>[6]</sup>。实际的故障过程很难产生带宽特别窄带的信号, 更是几乎不可能产生单一频率信号<sup>[7]</sup>。声发射相关理论表明, 材料在负载作用下产生的是频率和模式丰富的导波信号, 因而故障声发射信号包含一组频率成分, 由多频率成分构成<sup>[8]</sup>。

复杂的频率成分特性使故障声发射信号具有多共振频率解调特性, 并且故障冲击时域时间短, 频域能量分布宽, 将会增强窄带滤波的解调效果。故障声发射信号中的多个共振频率成分能量大小不同, 且由于系统传递特性的影响, 各个频率成分的能量差异较大, 不同故障的可解调共振频带并不完全相同, 但都处于声发射信号的频率范围内。故障信号以调制形式出现, 故障多频带共振解调要求解调带宽要窄, 窄带滤波信号中不能包含多个明显共振频率, 同时又必须涵盖故障特征频率成分。

共振特征解调技术要求滤波器中心频率(center frequency, 简称 CF)与故障共振频率相近, 并且滤波带宽(bandwidth, 简称 BW)能够包含低频故障调制成分。已知故障频率为  $f_r$  的情况下, 滤波器带宽应尽可能小一些, 避免引入过多的背景干扰噪声。理论上滤波带宽  $f_r \leq BW < 2f_r$  时, 滤波信号解调包络谱中只包含一阶故障频率谱线, 实际中由于滤波器边缘特性的影响, 带宽选择应该大一些, 比如  $3f_r < BW < 5f_r$ , 这样窄带滤

\* 国家自然科学基金资助项目(50775219);军队科研资助项目[2011](107)

收稿日期:2014-05-04;修回日期:2014-07-10

波后信号的解调包络中故障频率成分将不超过前 5 阶倍频成分。因此在故障多频带共振解调中,滤波带宽根据轴承故障频率选择,取故障频率的 3~5 倍,使解调包络谱中仅含有故障频率谱线及其前 3~5 倍频成分谱线,并且解调包络谱中包含过多的故障倍频成分,并不能提供额外的故障信息且会导致故障频率识别混淆<sup>[9]</sup>,窄带解调对故障特征获取是具有积极意义的。滤波带宽确定之后,多共振解调中心频率可以通过 Protrugram 算法迭代求解。

## 2 窄带解调 Protrugram 算法

Protrugram 算法思想最早由 Tomasz 与 Adam 提出用于低频的振动信号处理,是一种固定带宽滤波,迭代搜索寻找解调中心频率的方法<sup>[9-10]</sup>。通过滤波信号包络谱峭度值对滤波信号进行评价<sup>[11]</sup>,峭度极大值对应解调中心频率。

该算法基于 fft 滤波,筛选保留固定带宽 BW 的频谱值,其余置零,经过双边谱重构后做 ifft 变换得到窄带滤波信号,窄带信号包络谱基于 Hilbert 方法得到,窄带信号包络谱的计算如图 1 所示。

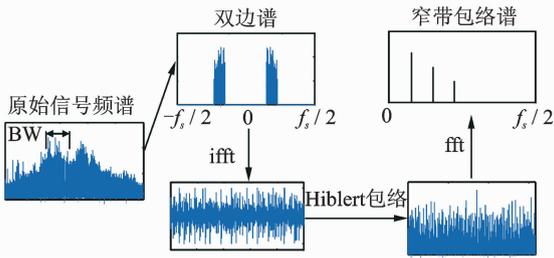


图 1 窄带包络计算示意  
Fig. 1 Narrowband envelop spectrum

解算前首先确定滤波带宽 BW,和迭代步长 step,由此可得中心频率的迭代搜索范围如式 1 所示,对应的算法原理如图 2 所示。迭代步长 step 最小为信号频域分辨率,step 最大不超过 BW,以保证迭代搜索能够覆盖整个信号频带,step 越大,算法迭代速度越快。

$$CF = [BW/2; step:(f_s - BW)/2] \quad (1)$$

轴承故障多频带共振解调时,选定算法初始参数 BW 和 step 后,利用 Protrugram 算法计算得到中心频率与窄带滤波信号包络谱峭度值的曲线,故障声发射信号的多个解调中心频率,对应着结果曲线的多个局部极大值。通过曲线的局部极大值确定有效的多个共振解调中心频率,配合 BW 获得多个

窄带滤波信号,计算包络谱进行故障诊断,多频带共振解调的故障诊断流程如图 3 所示。

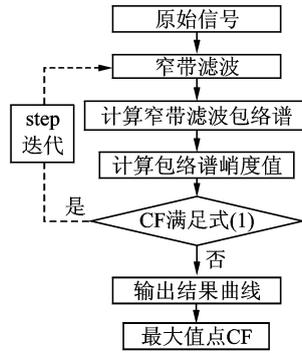


图 2 窄带解调算法流程  
Fig. 2 Flow chart of narrowband demodulation

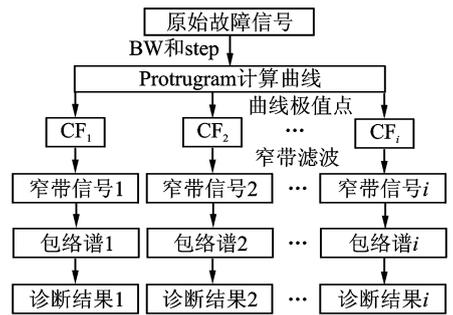


图 3 故障诊断流程图  
Fig. 3 Flow chart of fault diagnosis

## 3 仿真分析

采用仿真信号  $y(t)$  对多频带共振解调方法进行验证,设置如下:采样频率为 25 kHz,信号长度为 1 s,故障频率为 125 Hz;添加 3 个冲击共振频率  $f_1 = 4$  kHz,  $f_2 = 7$  kHz,  $f_3 = 10$  kHz;故障冲击初始幅值分别为 0.1, 0.08, 0.06;两个干扰轴频分别为  $f_4 = 35$  Hz,  $f_5 = 11$  Hz;幅值分别为 1.0 和 0.8;干扰啮频为  $f_6 = 455$  Hz,幅值为 0.3,其单位为 mV.  $y(t)$  表达式如式(2)所示

$$\begin{cases} y(t) = x'(t) + x(t) \\ x(t) = \sum_i h(t - i/f) \\ h(t) = 0.1e^{-800t} \sin(2\pi f_1 t) + 0.08e^{-800t} \sin(2\pi f_2 t) + \\ \quad 0.06e^{-800t} \sin(2\pi f_3 t) \\ x'(t) = \cos(2\pi f_4 t) + 0.8\cos(2\pi f_5 t) + \\ \quad 0.3\cos(2\pi f_6 t) \end{cases} \quad (2)$$

在仿真信号中添加高斯白噪声  $n(t)$  以及冲击干扰,这样的干扰更加符合实际工况,分为两种情况

进行分析。第 1 种为低信噪比情况,  $n(t)$  的均方根为 0.05, 故障冲击信号与噪声  $n(t)$  的信噪比为 -10.13 dB; 第 2 种情况为高信噪比混有单一冲击干扰,  $n(t)$  的均方根为 0.005, 故障冲击信号与噪声  $n(t)$  的信噪比为 15.9 dB, 混入冲击信号的共振频率为 8 kHz, 初始幅值为 1。两种情况下的仿真信号及其各分量如图 4, 5 所示, 为显示效果清楚, 图 4 和图 5 中仅画出信号前 0.08 s 的波形。

与窄带滤波信号包络谱峭度值的曲线如图 6 所示。

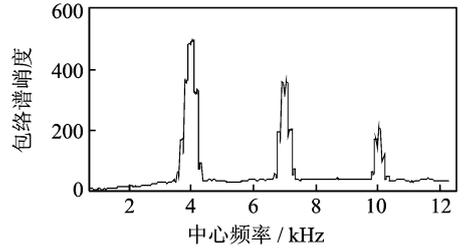
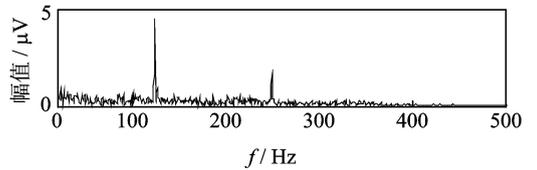


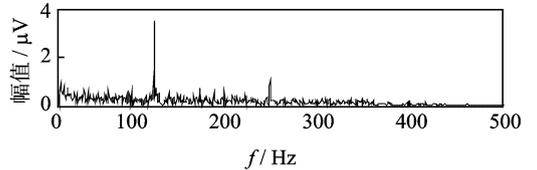
图 6 第 1 种仿真信号 Protrugram 算法结果曲线

Fig. 6 The result curve of Protrugram algorithm of first simulation signal

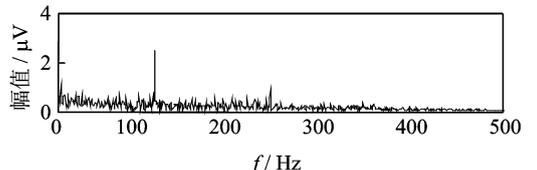
从图 6 中可以看到, 窄带包络解调方法在 4, 7, 10 kHz 附近均有局部极大值, 并且峰值大小关系与仿真信号中故障冲击初始幅值的大小关系一致, 在 3 个峰值频率处进行故障解调, 得到 3 个包络谱如图 7 所示, 从中均可以识别出清晰的故障频率。由于滤波带宽窄, 包络谱中高倍频谱线衰减迅速, 故障频率谱线清晰明显, 易于识别。



(a) 中心频率 4 kHz  
(a) Center frequency 4 kHz



(b) 中心频率 7 kHz  
(b) Center frequency 7 kHz



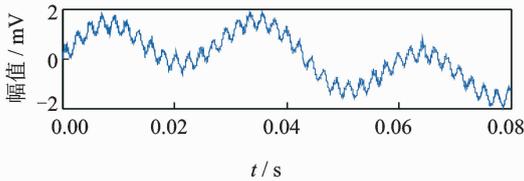
(c) 中心频率 10 kHz  
(c) Center frequency 10 kHz

图 7 第 1 种仿真信号窄带信号包络谱

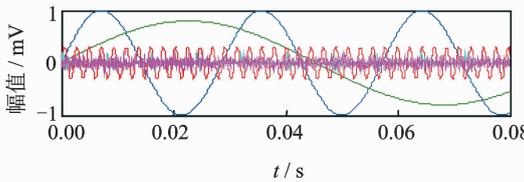
Fig. 7 Envelope spectrum of narrowband signal of first simulation signal

第 2 种情况下, 噪声能量相对于故障能量较弱, 故障信号信噪比较高, Protrugram 算法得到的中心频率与窄带滤波信号包络谱峭度值的曲线如图 8 所示。

从图 8 中可以看到窄带包络解调方法在 4, 7,



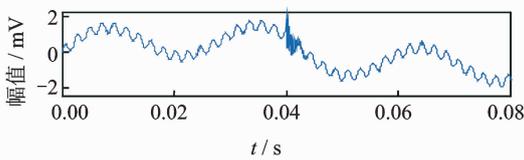
(a) 仿真信号  
(a) Simulation signal



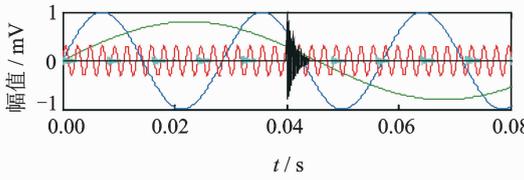
(b) 仿真信号各成分  
(b) The components of simulation signal

图 4 第 1 种情况仿真信号

Fig. 4 Simulation signal of first case



(a) 仿真信号  
(a) Simulation signal



(b) 仿真信号各成分  
(b) The components of simulation signal

图 5 第 2 种情况仿真信号

Fig. 5 Simulation signal of second case

对两种仿真信号用窄带包络解调方法寻找解调中心频率, 窄带包络解调时设置带宽 450 Hz (略大于 3 倍故障频率), 中心频率迭代步长 50 Hz。

第 1 种情况下, 噪声能量相对于故障能量强, 故障信号信噪比低, Protrugram 算法得到的中心频率

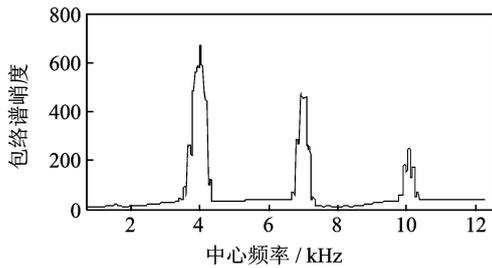


图8 第2种仿真信号 Protrugram 算法结果曲线

Fig. 8 The result curve of Protrugram algorithm of second simulation signal

10 kHz 附近均有局部极大值,对应着故障信号冲击共振频率,且故障信号初始幅值越大,对应包络谱峭度值也越大。Protrugram 算法得到的曲线在单一干扰的 8 kHz 处没有极值,说明窄带包络解调方法具有较强的抗冲击干扰能力。在 3 个峰值频率处进行故障解调,得到 3 个包络谱如图 9 所示,故障频率谱线清晰,高倍频衰减明显,可以清楚地识别故障。

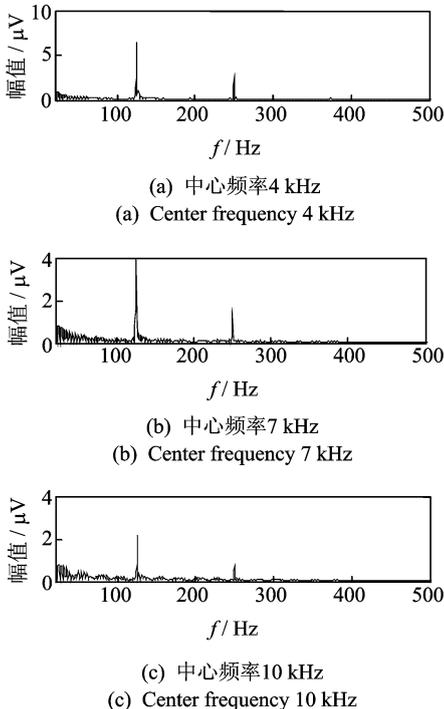


图9 第2种仿真信号窄带信号包络谱

Fig. 9 Envelope spectrum of narrowband signal of second simulation signal

## 4 试验分析

利用试验数据对窄带包络解调方法的多模态解调特性进行验证,试验齿轮箱结构及传感器安装如图 10 所示。故障轴承安装在齿轮箱中间传动轴上,

轴承型号 6206,轴承参数:滚动体个数  $Z=9$ ,滚动体直径  $d=9.5$  mm,轴承中径  $D=46.5$  mm,接触角  $\alpha=0$ 。试验中齿轮箱无负载运转,声发射传感器为声华 R15 型,全波形采集仪采样频率 1 MHz。

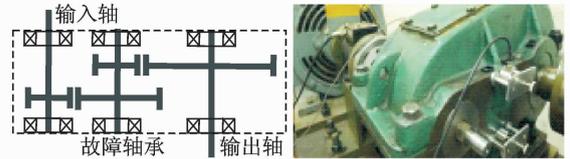


图10 齿轮箱结构及传感器布置

Fig. 10 Gearbox structure and sensor arrangement

### 4.1 轴承外圈故障分析

试验中轴承外圈预置故障为 0.5 mm 宽、1 mm 深的线切割裂纹,齿轮箱输入轴转速 1 488.92 r/min,一级减速比为 1 : 2,根据外圈故障计算公式<sup>[12]</sup>得到故障频率  $f_{\text{outer}}=44.43$  Hz,信号采集长度为 1 s,利用窄带包络解调 Protrugram 算法对故障信号进行处理,设定滤波带宽 150 Hz,迭代步长 50 Hz,运算结果如图 11 所示。

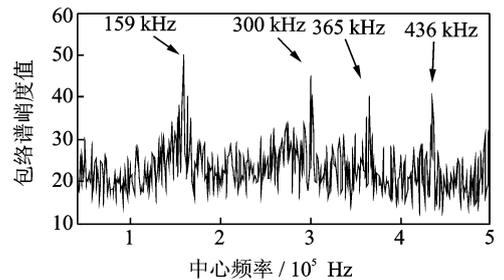


图11 外圈故障信号 Protrugram 算法结果曲线

Fig. 11 The result curve of Protrugram algorithm of bearing outer ring signal

图 11 中曲线有 4 个明显的局部尖峰极值,每个极值对应一个故障解调中心频率,对 4 个极值频率进行窄带滤波并计算包络谱,结果如图 12 所示。从图 12 的 4 张包络谱中可以看到明显的故障频率谱线以及衰减后的二倍频谱线,更高倍频成分几乎不可见,包络谱中谱线数量少,故障频率清晰,易于识别。

### 4.2 轴承内圈故障分析

试验中轴承内圈预置故障也是 0.5 mm 宽、1 mm 深的线切割裂纹,齿轮箱输入轴转速 610.18 r/min,一级减速比为 1 : 2。根据内圈故障计算公式<sup>[12]</sup>得到故障频率  $f_{\text{inner}}=27.56$  Hz,信号采集长度为 1 s,利用窄带包络解调 Protrugram 算法对故障信号进行

处理,设定滤波带宽 100 Hz,迭代步长50 Hz,运算结果如图 13 所示。

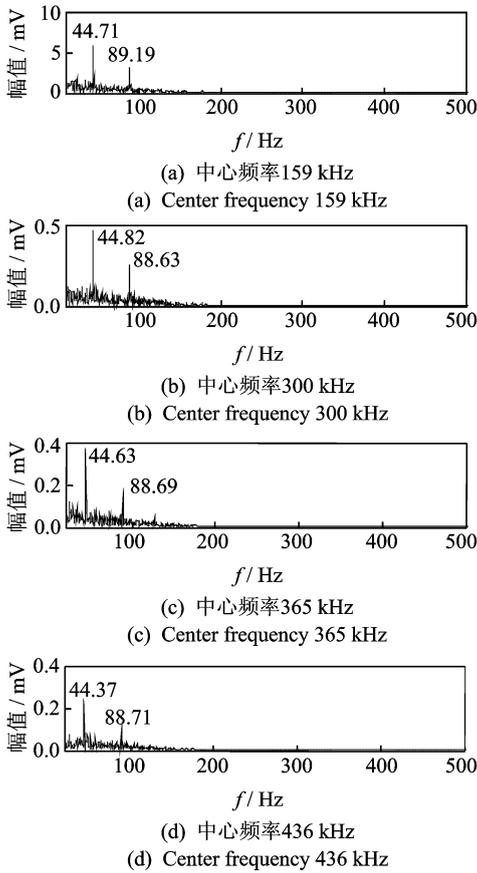


图 12 外圈故障信号多频带解调包络谱

Fig. 12 Multi-band demodulation envelope spectrum of bearing outer ring signal

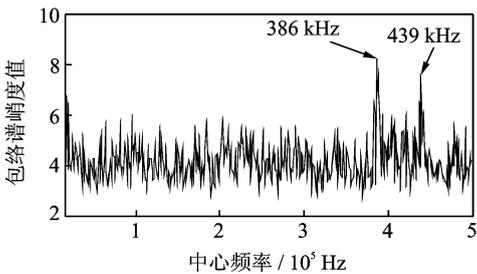


图 13 Protrugram 算法结果曲线

Fig. 13 The result curve of Protrugram algorithm

内圈故障信号相对较弱,图 13 中有两个比较明显的局部尖峰极值,对两个极值对应的中心频率进行窄带滤波并计算包络谱,结果见图 14。从图 14 的两张包络谱中能看到明显的故障频率谱线及衰减后的二倍频谱线,故障频率可以清楚识别。

### 4.3 结果分析

由轴承内、外圈预置故障信号处理结果可知,在

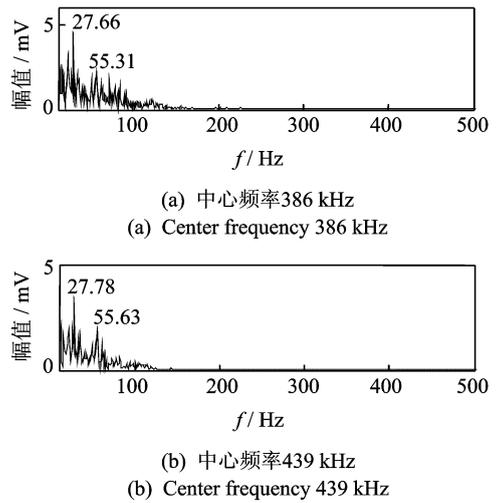


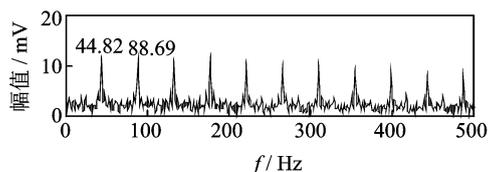
图 14 内圈故障信号多频带解调包络谱

Fig. 14 Multi-band demodulation envelope spectrum of bearing inner ring signal

故障声发射信号频带范围内,能够找到多个可用的故障频率解调频带,外圈故障信号冲击明显,有 4 个较明显的解调中心频率,内圈故障冲击相对微弱,有两个较明显的解调中心频率。

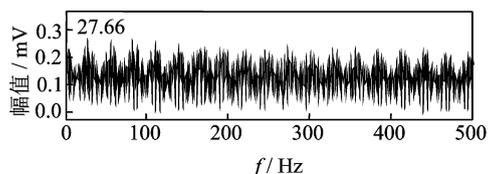
轴承故障声发射信号是一个复杂成分的宽频带信号,文中方法能搜索识别的中心频率间隔理论最小值为滤波带宽;当多个可用解调中心频率的间距小于解调滤波带宽时,文中方法无法将其区分,一般来讲,间隔如此小的多个共振解调频率完全可以作为一个解调窄带来处理。

将窄带解调方法的处理结果与宽带滤波谱峭度方法处理结果进行对比,内、外圈故障的谱峭度方法处理结果如图 15 所示。谱峭度方法在外圈故障处理中选择的滤波中心频率为 250 kHz,滤波带宽 166.7 kHz,内圈故障处理中选择的中心频率为 234.375 kHz,滤波带宽为 31.25 kHz。对比解调后的包络谱可以发现,外圈故障能够明显识别,但滤波带宽大,涵盖了很多冲击共振频率,包络谱中倍频成分多且衰减缓慢,内圈故障滤波带宽同样较大,且由于故障冲击微弱,宽带滤波引入了较多背景干扰噪声。因此解调包络谱在故障频率处峰值谱线受干扰严重,不够明显,故障特征频率识别困难。与谱峭度方法相比,文中方法的优势在于根据故障频率选取滤波带宽,找到多个可用的解调中心频率,解调包络谱中谱线数量有限,高倍频衰减明显,在干扰成分多的情况下能够有效抑制噪声的引入,有利于故障频率谱线的识别。



(a) 外圈故障处理结果

(a) The processing result of outer ring fault



(b) 内圈故障处理结果

(b) The processing result of inner ring fault

图15 谱峭度方法包络谱

Fig. 15 Envelope spectrum of spectral kurtosis method

## 5 结论

1) 轴承故障声发射信号具有多频带共振解调特性,窄带包络解调 Protrugram 算法能够搜索多个可用解调中心频率,且各解调包络谱中故障频率谱线清晰,倍频成分衰减明显。

2) 内、外圈故障实验信号处理结果表明,不同故障对应的多个解调中心频率不完全相同,但解调中心频率都处于声发射信号的宽频带范围内。

## 参 考 文 献

- [1] Gu Dongsik, Kim J, An Youngsu, et al. Detection of faults in gearboxes using acoustic emission signal[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(5):1279-1286.
- [2] Mba D, Raj R B, Rao K N. Development of acoustic emission technology for condition monitoring and diagnosis of rotating machines, bearings, pumps, gearboxes, engines and rotating structures[J]. The Shock and Vibration Digest, 2006, 38(1):3-16.
- [3] Eftekharnjad B, Carrasco M R, Charnley B, et al. The application of spectral kurtosis on acoustic emission and vibrations from a defective bearing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6):266-284.
- [4] 焦敬品,何存富,吴斌. 基于模态分析和小波变换的声发射源定位新算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(5):482-485.
- Jiao Jingpin, He Cunfu, Wu Bin. A new acoustic emission source location technique based on wavelet

transform and mode analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(5):482-485. (in Chinese)

- [5] 邓艾东,赵力,包永强. 基于模糊熵的转子碰摩声发射信号的识别[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3):71-75.
- Deng Aidong, Zhao Li, Bao Yongqiang. Recognition of rub-impact acoustic emission signal based on fuzzy entropy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3):71-75. (in Chinese)
- [6] Gong Z, Nyborg E O, Oommen G. Acoustic emission monitoring of steel railroad bridges [J]. Materials Evaluation, 1992, 50(6):883-887.
- [7] Chang Hong, Han Enhou, Wang Jianqiu. Analysis of modal acoustic emission signals of LY12CZ aluminum alloy at anodic and cathodic polarization[J]. NDT&E International, 2006, 39(7):8-12.
- [8] Jiao Jingpin, He Cunfu, Wu Bin. Application of wavelet transform on modal acoustic emission source location in thin plates with one sensor[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81(3):427-431.
- [9] Ho D, Randall R B. Optimization of bearing diagnostics techniques using simulated and actual bearing fault signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(5):763-788.
- [10] Barszcz T, Jabłoński A. A novel method for the optimal band selection for vibration signal demodulation and comparison with the Kurtogram[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6):431-451.
- [11] Jabłoński A. Development of algorithms of generating an envelope spectrum of a vibration signal in the frequency domain for rolling element bearing fault detection[D]. Poland; Master Thesis AGH University of Science and Technology, 2008.
- [12] 李辉,郑海起,唐力伟. 基于改进双树复小波变换的轴承多故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1):53-59.
- Li Hui, Zheng Haiqi, Tang Liwei. Bearing multi-faults diagnosis based on improved dual-tree complex wavelet transform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1):53-59. (in Chinese)



**第一作者简介:** 张晓涛,男,1987年5月生,博士研究生。主要研究方向为机械系统性能检测与故障诊断。曾发表《基于SVD与Fast Kurtogram算法的滚动轴承声发射故障诊断》(《振动与冲击》2014年第33卷第10期)等论文。  
E-mail: headic@163.com

