

自适应谱峭度滤波方法及其振动信号检测应用*

蔡改改, 刘海洋, 黄伟国, 朱忠奎

(苏州大学城市轨道交通学院 苏州, 215021)

摘要 谱峭度滤波方法是一种在强背景噪声下也能有效提取振动信号中瞬态成分的方法。笔者针对谱峭度滤波方法中窗宽的自适应选择问题, 提出一种自适应谱峭度滤波方法。该方法将小波相关滤波提取的振动信号特征频率作为 Morlet 小波滤波窗口中心频率, 并按最大谱峭度原则自适应选择滤波小波窗口宽度, 以确定最优带宽 Morlet 小波窗。通过强背景噪声下的瞬态成分的提取验证该方法的有效性, 并与窗口融合自适应谱峭度滤波方法进行比较。针对轴承故障振动信号检测, 应用该方法提取反映轴承故障的冲击响应成分, 说明该方法能够实现轴承故障振动特征信号的提取。

关键词 谱峭度; 瞬态成分; Morlet 小波; 相关滤波

中图分类号 TH133.3

引言

振动信号作为机械设备动力学外在表现形式, 对其分析处理是机械设备状态监测和故障诊断的有效途径。由于检测的振动信号往往包含有背景噪声, 如何从中提取反映机械设备碰撞、冲击等故障的冲击响应成分, 已成为机械设备状态监测和故障诊断的关键技术之一。

振动信号检测常用的技术有时频分析、小波分析、包络分析及经验模态分解等方法, 获得了良好的成果, 然而这些方法适用于较弱的背景噪声条件, 针对强背景噪声下信号瞬态成分的检测相对比较困难。

近年来, 谱峭度作为一种新的检测含噪信号中瞬态成分的方法, 可以较为有效地解决强背景噪声的问题^[1]。Vrabie 等^[2-3]将其解释为一个过程距离高斯性的度量, 应用到轴承故障诊断中谐波过程特征提取。Antoni 等^[4-6]将谱峭度系统地定义为能量归一化累积量, 提出了基于短时傅里叶变换的谱峭度算法, 证明其对非平稳特征的检测具有良好的能力, 并将其运用到旋转机械状态检测和故障诊断中; 随后又进一步在此基础上提出了“kurtoram”概念(谱峭度滤波)来设计带通滤波器, 提取含噪信号瞬态成分, 并且提出了快速算法。Zhang Yongxiang 等^[7]提出将遗传算法与“kurtoram”快速算法相结

合, 优化了滤波器参数, 关于滤波窗口的自适应选择问题依旧是一个难点。

在谱峭度滤波方法中, 从飞云等^[8]提出了将谱峭度与自回归 (autoregressive, 简称 AR) 模型相结合。石林锁等^[9]提出了基于维纳分布 (Wigner-Ville distribution, 简称 WVD) 的谱峭度法。虽然两种方法都具有较好的抗噪能力, 但是在计算谱峭度时, 对窗口的选择都要凭借个人的经验, 缺少自适应性。为减少对经验的依赖, 石林锁^[10]又提出了基于 Morlet 小波变换的谱峭度算法, 通过自适应构造最优滤波窗口来诊断回转机械故障。在此基础上, 郭瑜等^[11]提出了其改进算法, 克服了计算量大的不足, 然而其产生的自适应滤波窗口并没有与振动特征信号相适应(滤波窗口中心频率与振动信号特征频率相匹配, 滤波窗口能够完全包含故障特征频带)。Wang Yanxue 等^[12]提出了基于窗口融合自适应谱峭度滤波方法, 但其所确定的自适应滤波窗口在振动特征信号衰减缓慢的情况下, 无法完整地包含特征频带。

针对谱峭度滤波方法中窗口的自适应选择问题, 笔者提出一种自适应谱峭度滤波方法, 将小波相关滤波提取的振动信号特征频率作为窗口中心频率, 以 Morlet 小波为滤波窗口, 按最大谱峭度原则自适应选择滤波窗口宽度, 确定最优带宽的 Morlet 小波窗, 以保证该滤波小波窗能够很好地与振动特

* 国家自然科学基金资助项目(51375322); 西安交通大学机械制造系统国家重点实验室资助项目(skllms2011006)
收稿日期: 2012-12-03; 修回日期: 2013-03-26

征信号相适应。通过含噪仿真信号实验,证明方法的有效性,并与窗口融合自适应谱峭度滤波方法比较。进一步针对轴承故障振动特征信号检测,提取反映轴承故障的冲击响应成分。

1 基于谱峭度的自适应滤波

1.1 谱峭度定义

谱峭度^[4]实质是检测每一根谱线上的峭度,发现信号中隐藏的非平稳成分,并指出它们所在的频率。

非平稳情况下,可定义 $Y(t)$ 为信号 $X(t)$ 通过线性时变系统 $h(t,s)$ 的激励响应,即

$$Y(t) = \int_{-\infty}^t h(t, t-\tau) X(\tau) d\tau \quad (1)$$

频域表达式为

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi ft} H(t, f) dX(f) \quad (2)$$

其中: $H(t, f)$ 为时变冲击响应 $h(t, s)$ 的傅里叶变换,可解释为 $Y(t)$ 在频率 f 处的复包络; $dX(f)$ 为关于 $X(t)$ 的谱过程。

在实际的机械振动中, $H(t, f)$ 是随机的,可表示为 $H(t, f, \bar{\omega})$, $\bar{\omega}$ 为滤波器时变性的随机变量。

信号 $Y(t)$ 的四阶谱累积量定义为

$$C_{4Y}(f) = S_{4Y}(f) - 2S_{2Y}^2(f) \quad (f \neq 0) \quad (3)$$

其中: $S_{2nY}(t, f)$ 为 $2n$ 阶谱瞬时矩,是复包络能量的度量,可定义为

$$S_{2nY}(t, f) \triangleq \frac{E\{|H(t, f)dX(f)|^{2n}|\bar{\omega}\}}{df} = \frac{|H(t, f)|^{2n} S_{2nX}}{\quad} \quad (4)$$

于是,谱峭度定义为能量归一化累积量

$$K_Y(f) \triangleq \frac{C_{4Y}(f)}{S_{2Y}^2(f)} = \frac{S_{4Y}(f)}{S_{2Y}^2(f)} - 2 = \frac{\langle H^4(t, f) \rangle}{\langle H^2(t, f) \rangle^2} - 2 \quad (f \neq 0) \quad (5)$$

其中:符号 $\langle \cdot \rangle$ 表示数学期望。

1.2 谱峭度对含噪信号中瞬态成分的检测原理

含有背景噪声的振动信号可表示为

$$Y(t) = X(t) + N(t) \quad (6)$$

其中: $X(t)$ 为瞬态成分; $N(t)$ 为背景噪声。

谱峭度可解释为:理想滤波器组的输出在频率 f 处计算得到的峭度值,测得信号 $Y(t)$ 谱峭度可表示为

$$K_Y(f) = \frac{K_X(f)}{[1 + \rho(f)]^2} \quad (7)$$

其中: $K_X(f)$ 为瞬态成分 $X(t)$ 的谱峭度; $\rho(f) = \frac{S_N(f)}{S_X(f)}$ 为噪信比, $S_N(f)$ 和 $S_X(f)$ 分别为噪声和瞬态成分的功率谱密度。

由式(7)可知,在信噪比很高的频率处, $K_Y(f) \approx K_X(f)$,而在信噪比很低的频率处, $K_Y(f)$ 趋于零值。所以在不同局部频带运用谱峭度,通过逐步细查整个频域,找出信号中的瞬态成分。

1.3 滤波窗口中心频率的确定

小波相关滤波是通过将特征波形库中的小波原子在时域上的平移,计算每个小波原子与被测信号的相关系数,并以最大相关系数为原则,实现被测对象的模态参数识别,其实现步骤如下:

- 1) 根据信号波形特点,选定小波类型;
- 2) 建立小波原子库 Ψ ;
- 3) 在整个时间历程上,计算每一时刻 τ 处信号 $X(t)$ 与小波原子 $\psi_r(t)$ 的相关系数 k_r ;
- 4) 在多维矩阵 k_r 中寻找 τ 时刻的最大值 $k(\tau)$,即

$$k(\tau) = \max_{\substack{f \in F \\ \zeta \in Z}} k_r^\tau = k\{\bar{f}, \bar{\zeta}, \tau\} \quad (8)$$

其中: k_r^τ 表示 τ 时刻 k_r 的子集; $\bar{f}, \bar{\zeta}$ 分别为 τ 时刻最大相关系数所对应的小波原子频率和阻尼比;

5) 以最大相关系数为原则,寻找最大 $k(\tau)$ 下所对应的小波原子的频率参数 \bar{f}_{op} ,而此频率即可作为滤波窗口中心频率。

1.4 基于 Morlet 小波的自适应谱峭度滤波方法

对振动信号进行带通滤波,提取瞬态成分的关键在于中心频率及带宽的选择。考虑到 Morlet 小波具有较好的“盒形”频谱,文中以 Morlet 小波为滤波窗口,并将小波相关滤波提取的振动信号特征频率作为 Morlet 小波窗中心频率,这样改变小波窗宽度可获得一组同一中心频率不同带宽的滤波器组。通过计算滤波器组的输出在频率 f_m (窗口中心频率)处峭度值,并以最大谱峭度为原则,自适应选择滤波窗口宽度,确定最优带宽 Morlet 小波窗,步骤如下。

1) 构建带通滤波器组。Morlet 小波表达式为

$$\psi(t) = e^{\frac{-\kappa}{\sqrt{1-\zeta^2}} [2\pi f_m(t-\tau)]^2} e^{-j2\pi f_m(t-\tau)} \quad (9)$$

$$\Psi(f) = e^{-\left[\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{(2f_m)^2}\right] (f-f_m)^2} \quad (10)$$

其中: ζ 为阻尼比; f_m 为中心频率; τ 为时间参数;

$\Psi(f)$ 为 $\psi(t)$ 的傅里叶变换。

令 $f_m = \bar{f}_{op}$, $\zeta = \zeta_i \in [0, 1)$, 可获得同一中心频率、不同带宽的滤波器组, 而且阻尼比 ζ 越大, 带宽越宽, 反之亦然。Morlet 小波滤波器组可表示为

$$\Psi(f, \zeta_i) = e^{-\left[\frac{\sqrt{1-\zeta_i^2}}{\zeta_i} \frac{(f-\bar{f}_{op})^2}{(2\bar{f}_{op})^2}\right]} \quad (11)$$

其中: $\zeta_i \in [0, 1)$ 。

2) 谱峭度计算。将原始信号的 FFT 与滤波器组矩阵的每一行相乘, 然后对结果进行 IFFT 运算得到小波系数, 即

$$\omega(\zeta_i, \bar{f}_{op}, \tau) = F^{-1}\{Y(f)\Psi(f, \zeta_i)\} \quad (12)$$

将小波系数与其复共轭做乘积得到滤波后信号的时域平方包络

$$|H(t, f)|^2 = |\omega(\zeta_i, \bar{f}_{op}, \tau)|^2 \quad (13)$$

其中: $Y(f)$ 为信号 $Y(t)$ 的傅里叶变换; $|H(t, f)|^2$ 为滤波后信号时域平方包络。

因此谱峭度的计算可改为

$$K_Y(\zeta_i, \bar{f}_{op}) = \frac{[\omega^4(\zeta_i, \bar{f}_{op}, \tau)]}{[\omega^2(\zeta_i, \bar{f}_{op}, \tau)]^2} - 2 \quad (f \neq 0) \quad (14)$$

3) 最优带宽 Morlet 小波滤波窗。不同的阻尼比对应不同的带宽, 而从一系列的带宽中获得最优带宽才是根本目的。所以通过计算不同带宽滤波信号的谱峭度值, 寻找最大谱峭度值所对应的阻尼比, 即

$$K_{Y_{\max}}(\zeta_{op}, \bar{f}_{op}) = \max K_Y(\zeta_i, \bar{f}_{op}) \quad (15)$$

而阻尼比 ζ_{op} 所对应的带宽即为最优带宽。将频率 $f_m = \bar{f}_{op}$, 阻尼比 $\zeta = \zeta_{op}$ 带入式 (11), 便得到最优带宽 Morlet 小波滤波窗 $\Psi(\zeta_{op}, f)$ 。

4) 信号瞬态成分提取。将 Morlet 小波窗 $\Psi(\zeta_{op}, f)$ 作为滤波器对信号滤波, 提取瞬态成分。

2 仿真信号分析

设 $y(t)$ 为包含多冲击响应成分的信号, 其表达式为

$$y(t) = x(t) + n(t) = q(t) \sum_k h(t - kT_0) + n(t) \quad (16)$$

其中

$$q(t) = 1 + 0.6 \cos[2\pi f_n(t - \tau_n)] \quad (17)$$

$$h(t) = \begin{cases} e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} 2\pi f_0(t-\tau_0)} \cos 2\pi f_0(t - \tau_0) & (t \geq \tau_0 + kT_0) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

其中: $n(t)$ 为高斯白噪声。

信噪比 $\text{SNR} = -5.939$ dB, 时间 $t \in [0, 1]$ s, $\tau_n = \tau_0 = 0.1$ s, $T_0 = 0.2$ s, $f_n = 0.85$ Hz, $f_0 = 200$ Hz, 用 $f_s = 2$ kHz 采样频率对信号 $y(t)$ 离散化。图 1(a) 和图 1(b) 分别为无背景噪声和有背景噪声的信号 $y(t)$ 时域波形。从图 1(a) 可看出, 信号 $y(t)$ 呈单边衰减, 所以采用同样拥有单边衰减特性的 Laplace 小波对其含噪信号作相关滤波^[13-14], 如图 1(c), (d) 所示。经 Laplace 小波相关滤波后, 最大相关系数所对应的频率 $\bar{f}_{op} = 201$ Hz, 这与仿真信号特征频率基本一致。

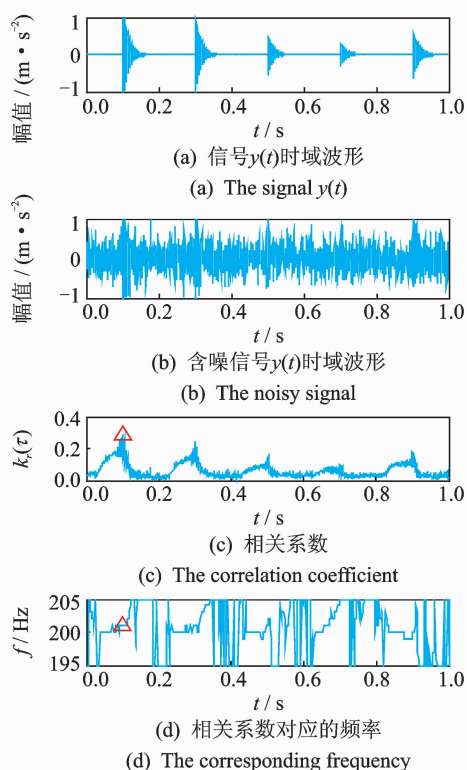


图1 信号 $y(t)$ 时域波形及 Laplace 小波相关滤波
Fig. 1 The simulation signal and results of Laplace wavelet correlation filtering

图 2(a) 为基于 Morlet 小波的自适应谱峭度, 从中可看出, 最大谱峭度 $\text{SK}_{\max} = -1.991$ 下的阻尼比 $\zeta = 0.0266$; 图 2(b) 为基于窗口融合的自适应谱峭度图。图 3 为基于 Morlet 小波的自适应谱峭度滤波及基于窗口融合的自适应谱峭度滤波, 其中图 3(a), (b) 分别为在信号频域中最优带宽 Morlet 小波窗和最优融合窗口 (箭头所示), 不难发现最优带宽 Morlet 小波窗能够很好包含特征频带, 而采用窗口融合自适应谱峭度滤波得到最优融合窗口并没有能够完全包含特征频带; 图 3(c~f) 分别给出了两种方法对含噪仿真信号的滤波结果及其所对应的误差, 从两种方法的滤波结果及误差中可看出, 最优带

宽 Morlet 小波窗能够很好地提取信号瞬态成分,说明文中提出的自适应谱峭度滤波方法的有效性。

3 应用实例

滚动轴承外圈故障的振动信号呈现单边衰减特性,故仍可利用 Laplace 小波相关滤波法寻找窗口中心频率,然后以最大谱峭度原则自适应选择最优带宽 Morlet 小波窗,提取反映轴承外圈故障的冲击响应成分。

振动信号是在轴承故障试验台上采集的,见图 4。轴承型号为 NJ208 圆柱滚子轴承,利用线切割在轴承外圈设置 0.2 mm 贯通裂纹故障,用来模拟轴承外圈故障,其机构参数为:滚动体个数 $Z=14$,滚动体直径 $d=11$ mm,接触角 $\alpha=0^\circ$,轴承节径 $D=60.5$ mm,轴的转速为 1 496 r/min($f_r=24.9$ Hz),采样频率为 25.6 kHz。由此可计算出轴承外圈故障的特征频率为 142.8Hz。图 5 为轴承外圈轻微故障信号时域波形及其频谱,从图 5(a)可看出冲击响应成分基本淹没于噪声中,且频谱图中的振荡频率也不明显,如图 5(b)所示。

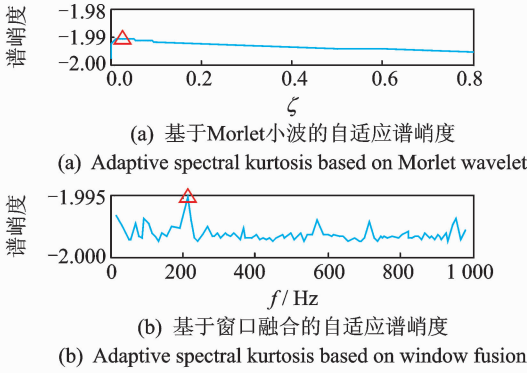


图 2 谱峭度
Fig. 2 Spectral kurtosis

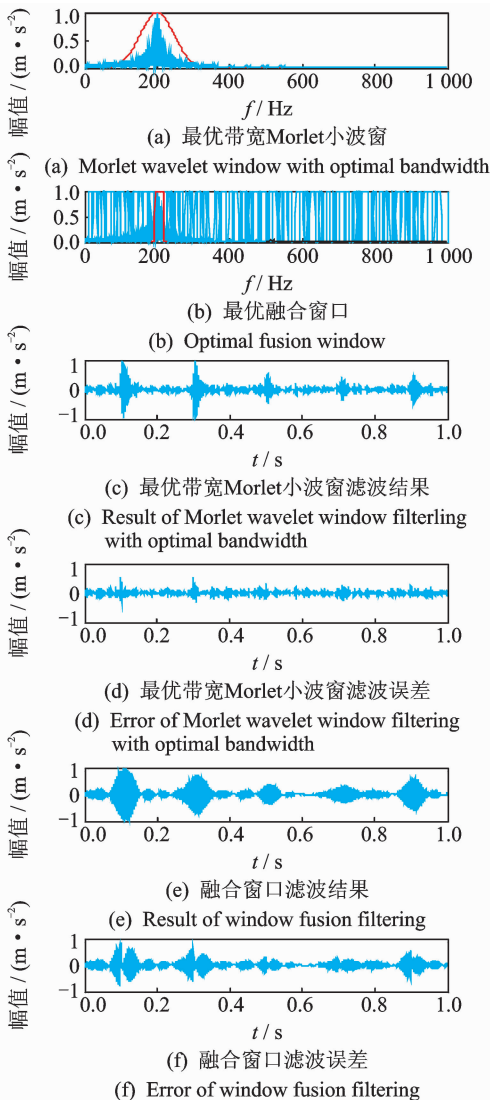


图 3 基于 Morlet 小波的自适应谱峭度滤波及基于窗口融合的自适应谱峭度滤波
Fig. 3 Adaptive spectral kurtosis filtering based on Morlet wavelet and window fusion

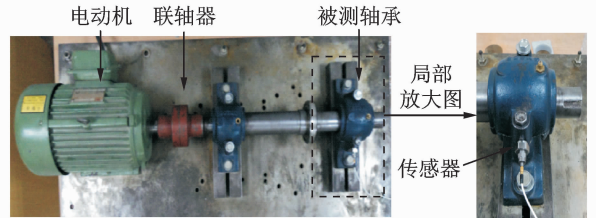


图 4 轴承故障试验台
Fig. 4 Test rig of bearing fault

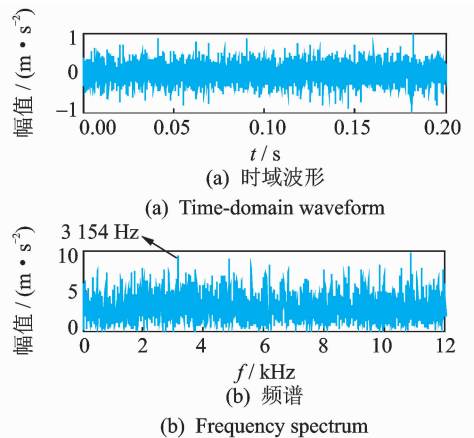


图 5 振动信号时域波形及其频谱
Fig. 5 Measured vibration signal and its frequency spectrum

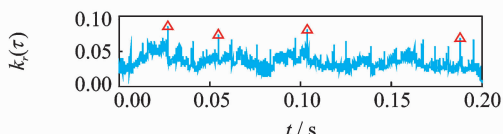
用 Laplace 小波对对图 5(a)信号进行相关滤波,结果见图 6(a)。预置频率范围 $f=\{2\ 954:1:3\ 354\}$ Hz,该集合是由图 5(b)中的振动信号频谱决定的,因为频谱图中 3 154 Hz 的频率成分幅值最

大,且考虑到轴承外圈故障特征频率为 142.8 Hz,所以频率范围选在 3 154 Hz 左右,步长为 1,跨度为 400(大于 142.8)。表 1 给出了图 6(a)中 4 个峰值处的 Laplace 小波原子相关参数。表中序号 1,4 所对应的频率 \bar{f} 分别为 2 594 和 3 354 Hz,是预置频率范围 2 954~3 354 Hz 的上下限,故舍去。最后以最大相关系数原则,选取序号 3 中的频率 $\bar{f}_{op} = 3 022$ Hz 作为最佳匹配频率,即为 Morlet 小波窗的中心频率 f_m 。图 6(b)给出了在确定中心频率后最大谱峭度下 Morlet 小波阻尼比 ($SK_{max} = -1.998 7, \zeta_{op} = 0.131 1$),由此确定的 Morlet 小波窗 $\Psi(f_m, \zeta_{op})$ 即为最优带宽滤波窗口,见图 6(c)。

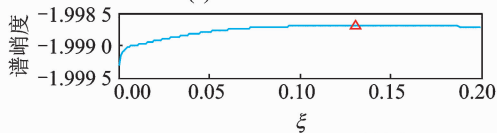
表 1 图 6(a)中 4 个峰值对应的参数

Tab. 1 Characteristics of four peak values in Fig. 6(a)

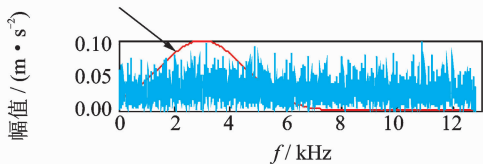
$k_r(\tau)$ 峰值序列号	τ/s	$k_r(\tau)$	$\bar{f}(\tau)/\text{Hz}$
1	0.027 5	0.085 5	2 954
2	0.553 5	0.073 0	2 986
3	0.104 5	0.079 5	3 022
4	0.188 6	0.069 0	3 354



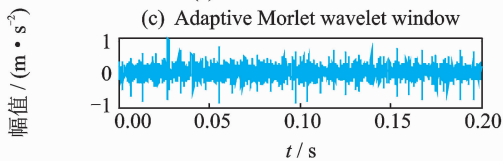
(a) 相关系数
(a) Correlation coefficient



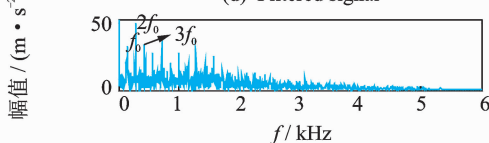
(b) 不同阻尼比下谱峭度
(b) Spectral kurtosis under various damping ratio



(c) 自适应 Morlet 小波窗
(c) Adaptive Morlet wavelet window



(d) 滤波信号
(d) Filtered signal



(e) 滤波信号包络谱
(e) Envelop spectrum of filtered signal

图 6 自适应谱峭度滤波

Fig. 6 Adaptive spectral kurtosis filtering

图 6(d)给出了振动信号经最优带宽 Morlet 小波窗的滤波结果,从中可较清晰地看出信号的冲击响应成分,说明文中提出的一种自适应谱峭度滤波方法有效提取了反映轴承外圈故障时的冲击响应成分。图 6(e)是对图 6(d)中信号经 Hilbert 变换后的包络谱,其中 $f_0 = 145$ Hz,较为精确地诊断出了外圈故障特征频率(理论值 $f_0 = 142.8$ Hz),进一步说明方法的有效性。

4 结束语

针对谱峭度滤波方法中窗宽的自适应选择问题,以及为实现信号瞬态成分的提取,提出了一种自适应谱峭度滤波方法。该方法通过小波相关滤波提取的信号频率作为窗口中心频率,根据最大谱峭度原则,自适应选择最优带宽 Morlet 小波窗。

将提出的自适应谱峭度滤波方法用于含噪仿真信号瞬态成分的提取,同时与窗口融合自适应谱峭度滤波方法比较,验证了该方法对强背景噪声下瞬态成分提取的有效性。进一步应用于轴承故障振动特征信号的检测,滤波结果及其包络谱说明该方法有效提取了信号中反映轴承故障的冲击响应成分,实现了轴承故障振动特征信号的检测。

参 考 文 献

- [1] Dwyer R. Detection of non-Gaussian signals by frequency domain kurtosis estimation[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Boston: IEEE International Conference on ICASSP, 1983: 607-610.
- [2] Vrabie V, Granjon P, Serviere C. Spectral kurtosis: from definition to application[C]// Proceedings of the 6th IEEE International Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. Italy: IEEE International Workshop on EURASIP, 2003: 8-11.
- [3] Vrabie V, Granjon P. Harmonic component characterization using spectral kurtosis[C]// 12th European Signal Processing Conference. Austria: European Signal Processing Conference, 2004: 7-10.
- [4] Antoni J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 282-307.
- [5] Antoni J, Randall R B. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 308-331.

- [6] Antoni J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(1): 108-124.
- [7] 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.
- [8] 从飞云, 陈进, 董广明. 基于谱峭度和 AR 模型的滚动轴承故障诊断[J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(4): 538-541.
Cong Feiyun, Chen Jin, Dong Guangming. Spectral kurtosis and AR model based method for fault diagnosis of rolling bearings[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(4): 538-541. (in Chinese)
- [9] 石林锁, 张亚洲, 米文鹏. 基于 WVD 的谱峭度法在轴承故障诊断中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(1): 27-31.
Shi Linsuo, Zhang Yazhou, Mi Wenpeng. Application of Wigner-ville-distribution-based spectral kurtosis algorithm to fault diagnosis of rolling bearing[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(1): 27-31. (in Chinese)
- [10] 石林锁. 滚动轴承故障检测的改进包络分析法[J]. *轴承*, 2006(2): 36-39.
Shi Linsuo. Rolling bearing fault detection using improved envelope analysis[J]. *Bearing*, 2006(2): 36-39. (in Chinese)
- [11] 郭瑜, 郑文华, 高艳, 等. 基于谱峭度的滚动轴承包络分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(4): 517-521.
Guo Yu, Zheng Wenhua, Gao Yan, et al. Envelope analysis of rolling bearings based on spectral kurtosis[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(4): 517-521. (in Chinese)
- [12] Wang Yanxue, Liang Ming. An adaptive SK technique and its application for fault detection of rolling element bearings[J]. *Mechanical System and Signal Processing*, 2011, 25(5): 1750-1764.
- [13] 何正嘉, 訾艳阳. Laplace 小波及其工程应用[J]. *工程数学学报*, 2001, 18(5): 87-92.
He Zhengjia, Zi Yanyang. Laplace wavelet and its engineering application[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2001, 18(5): 87-92. (in Chinese)
- [14] 王诗彬, 朱忠奎, 王安柱. 基于瞬态冲击响应参数辨识的轴承故障特征检测[J]. *振动工程学报*, 2010, 23(4): 445-449.
Wang Shibin, Zhu Zhongkui, Wang Anzhu. Bearing fault feature detection based on parameter identification of transient impulse response[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2010, 23(4): 445-449. (in Chinese)



第一作者简介:蔡改改,女,1986年10月生,博士、讲师。主要研究方向为机械设备健康监测与故障诊断、运行可靠性评估。曾发表《Sparsity-enabled signal decomposition using tunable Q-factor wavelet transform for fault feature extraction of gearbox》(《Mechanical Systems and Signal Processing》2013, Vol. 41, No. 1)等论文。

E-mail: ggcai@suda.edu.cn

通信作者简介:黄伟国,男,1981年10月生,博士、副教授。主要研究方向为设备状态监测与故障诊断、智能信息处理。

E-mail: wg Huang@suda.edu.cn

