

时频特征融合的交叉项消除及其故障诊断应用*

黄伟国, 赵凯, 鞠华, 朱忠奎

(苏州大学城市轨道交通学院 苏州, 215131)

摘要 提出一种基于线性时频分布和双线性时频分布的时频特征融合策略,既消除双线性时频分析的交叉项,又保持双线性时频分析的时频聚集性。仿真信号的分析说明了该融合策略的有效性。通过融合策略在轴承外圈故障以及齿轮箱故障情况下的特征信号的时频分析,表明该策略能有效表示信号中的故障特征对时间和频率的分布情况,是一种有效的故障诊断时频特征表示方法。

关键词 轴承;齿轮箱;时频分析;融合

中图分类号 TP391

引言

旋转机械设备的故障诊断研究主要是通过对其关键部件的故障诊断展开的。关键部件的局部故障往往会导致设备零件故障部位在运行过程中存在较大的瞬时局部应力,扩展较快,对设备的运行安全具有较大的影响。局部故障诊断就是对其监测信息的处理,而其监测信息通常为非平稳信号,对非平稳信号的处理最常用的方法是时频分析^[1-3]。时频分析方法按照时频联合函数的不同可分为线性时频分析和双线性时频分析。线性时频分析包括小波分析和短时傅里叶分析,双线性时频分析中最受关注的是Cohen类时频分析。Leon Cohen^[4]回顾了联合时频分布的基本思想和方法;Z. K. Peng等^[5]总结了小波变换在机械故障诊断中的应用;Sejdić E等^[6]总结了信号时频分析中特征的地位并提供了一些特征提取的分类分析方法。线性时频分析的时频聚集性差,但无交叉项;而双线性时频分析的时频聚集性好,但出现交叉项,影响对信号特征的分析理解。李振春等^[7]概括了线性时频分析方法的特点及各种方法的发展历程;赵培洪等^[8]总结了Wigner-Ville分布(WVD)中交叉项消除方法。笔者基于线性和双线性的时频特征,提出了通过两者融合的方法,使得融合后的结果既消除了双线性时频分析的交叉项,又提高了线性时频分析的时频聚集性。通过不同信噪比的仿真信号试验证明了该方法的有效性。将基于时

频特征融合的交叉项消除方法应用与轴承外圈故障和齿轮箱故障信号中,辨识出了信号时频特征随时间和频率变化的分布情况。

1 时频分析

1.1 线性时频分析

小波变换和短时傅里叶变换都属于线性时频变换,对于信号 x ,其线性时频变换可以表达如下

$$TF_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\phi_{t,\omega}^*(\tau) d\tau = \langle x, \phi_{t,\omega} \rangle \quad (1)$$

小波变换实际上是一种线性时频分布,表示为

$$WT_x(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\phi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \langle x(t), \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) \rangle \quad (2)$$

其中: $\phi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为其母小波,经过伸缩和平移而得到。

由式(3)可知,小波变换的本质是用小波基函数 $\phi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 代替傅里叶变换中的基函数 $e^{-j2\pi ft}$ 而进行的内积运算。

小波变换通过尺度因子和时移因子的变化,使其在高频处时间分辨率高,频率分辨率低;在低频处时间分辨率低,频率分辨率高。这样就具有了“变焦”的性质,也就是自适应窗的性质。短时傅里叶变换STFT是一种时窗大小及形状都固定不变的时频局部化分析。

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50905121);江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK2010225)

收稿日期:2011-06-24;修改稿收到日期:2011-09-20

1.2 双线性时频分析

对信号 x , 其双线性时频分布表示为

$$\text{TFD}_x(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(u + \frac{1}{2}\tau\right) x^* \times \left(u - \frac{1}{2}\tau\right) \phi(\theta, \tau) e^{-j\theta u - j\tau\omega + j\theta u} du d\tau d\theta \quad (3)$$

其中: $\phi(\theta, \tau)$ 为核函数。

对于 Wigner-Ville 分布 (WVD), 核函数为 1, 信号 x 的 WVD 分布可表示为

$$\text{WV}_x(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{1}{2}\tau\right) x^* \times \left(t - \frac{1}{2}\tau\right) e^{-j\tau\omega} d\tau \quad (4)$$

WVD 是 Cohen 类时频分布的原型。信号某时刻的 WVD 的实质是该时刻过去某一时间的信号乘上该时刻未来某一时间的信号, 所取信号的过去时间和未来时间相等, 然后对乘积结果做傅里叶变换。

2 基于时频特征融合交叉项消除

由于小波变换和 WV 时频变换都有各自的缺点, 小波变换的时频聚集性差, WV 时频变换由于其交叉项的出现, 影响对信号特征的分析理解。为了弥补两者的缺陷, 采用基于时频特征融合的方法来解决此问题。

2.1 预处理

由于小波变换和 WV 时频变换的不同, 并且振动信号通常包含噪声, 需要在融合之前进行预处理, 采用均值滤波方法来减少噪声对结果的影响

$$\overline{\text{TFR}}(t, f) = \frac{1}{mn} \sum_{(u, f) \in S_{t,f}} \text{TFR}(t, f) \quad (5)$$

其中: $S_{t,f}$ 为原始信号时频变换后的矩阵 $\text{TFR}(t, f)$ 中 $m \times n$ 维的子区间; S 的下标 (t, f) 为子区间的中心位置; $\overline{\text{TFR}}(t, f)$ 为滤波之后的值。

由于小波变换和 WV 时频变换的不同, 为了使两者的融合在同一水平上, 必须对两者进行如下归一化处理

$$\text{TFR}'(t, f) = \frac{\overline{\text{TFR}}(t, f) - \text{TFR}_{\min}}{\text{TFR}_{\max} - \text{TFR}_{\min}} \quad (6)$$

其中: TFR_{\max} 和 TFR_{\min} 为信号时频变换后矩阵中的最大值和最小值; $\text{TFR}'(t, f)$ 为归一化的结果。

2.2 融合策略

由于 WV 时频变换中存在交叉项, 而小波变换

中无交叉项, 那么在 WV 变换时出现交叉项的时频域中, 在小波变换时其时频值一定很小; 同样, 如果某处时频域中经小波变换后得到的时频值大, 而经过 WV 变换后得到的时频值小, 则该时频区域一定是由于小波变换的分辨率低于 WV 变换而引起的。在真实成分中, WV 变换和小波变换的时频值都会很大。所采用的融合算法必须要求当两者时频值很大时, 融合之后的时频值才会大, 而一大一小或两者都小时要求融合后的时频值要小。采用的融合算法可表示为

$$z = \min(\min(x, y)(x + y), 1)$$

$$x \in \text{TFR}'_{\text{WT}}(t, f), y \in \text{TFR}'_{\text{WVD}}(t, f) \quad (7)$$

其中: $\text{TFR}'_{\text{WT}}(t, f)$ 和 $\text{TFR}'_{\text{WVD}}(t, f)$ 为小波变换和 WV 变换得到的矩阵经过预处理之后的矩阵; $\min(\cdot)$ 表示取小运算, 经过归一化处理之后 x 和 y 都在区间 $[0, 1]$ 上。

图1 表示融合结果与输入之间的关系, 情形1 中 $x \in [0, 0.5], y \in [0.7, 1]$ 。由图可知, 输出的结果 $z \in [0, 0.1]$ 。这表示该时频区域中 WV 变换的时频值大, 而小波变化的时频值小, 说明该时频域是交叉项, 而融合后的时频值很小, 表明交叉项被有效地消除了。情形2 中 $x \in [0.7, 1], y \in [0, 0.5]$, 由图可知, 输出的结果 $z \in [0, 0.1]$ 。这表示该时频区域中 WV 变换的时频值小, 而小波变化的时频值大, 说明该时频域是由于 WV 变换的时频分辨率高于小波变换而引起的, 而融合后的时频值很小, 表明采用融合方法之后有效地保持了 WV 变换的分辨率。对于图1 中最黑的部分, 表示融合之后的值很大, 此处 x 和 y 的值也很大。这表示在该时频区域中, WV 变换和小波变换后的时频值都很大, 说明该时频区域内是真实成分, 而融合之后的结果也说明了此处是真实值。

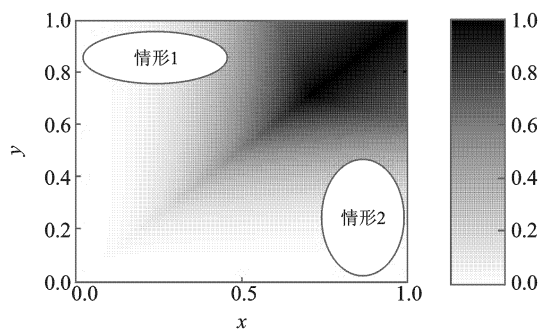


图1 融合结果示意图

2.3 应用步骤

基于时频特征的融合交叉项消除方法的应用步

骤如图2所示。对信号分别进行小波变换和WV变换,得到两个矩阵 $\mathbf{TFR}_{WT}(t, f)$ 和 $\mathbf{TFR}_{WVD}(t, f)$ 。对其进行预处理后,得到 $\mathbf{TFR}'_{WT}(t, f)$ 和 $\mathbf{TFR}'_{WVD}(t, f)$ 。采用融合算法,融合小波变换和WV变换的值,得到融合结果 \mathbf{FTFR}' ,对结果进行反归一化,即对融合之后的矩阵乘以WV时频变换矩阵的最大值,得到 \mathbf{FTFR} 。由于在采用融合算法前,分别对小波变换和WV变换结果进行了归一化处理,采用融合算法之后得到的结果也是在区间 $[0, 1]$ 上,它不能表示信号的能量大小。为了清晰地描述信号的能量随时间和频率的变化情况,需要对融合结果进行反归一化处理。反归一化的表达式为

$$\mathbf{FTFR} = \mathbf{FTFR}' \times \max \mathbf{TFR}_{WVD} \quad (8)$$

其中: \mathbf{FTFR} 为信号经过反归一化得到的结果; \mathbf{FTFR}' 为采用融合算法得到的结果; $\max \mathbf{TFR}_{WVD}$ 为信号经过WV变换得到的矩阵 $\mathbf{TFR}_{WVD}(t, f)$ 中的最大值。

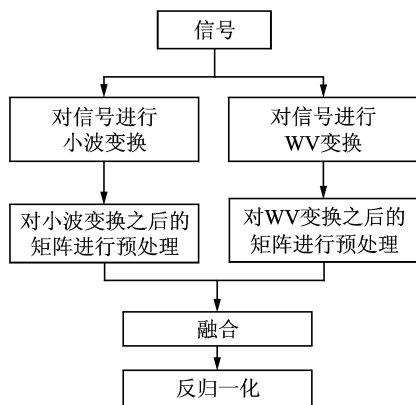


图2 应用步骤

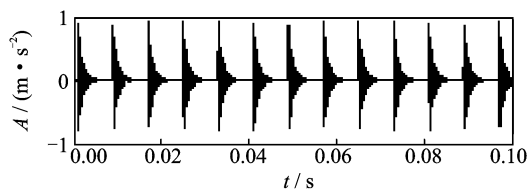
3 仿真应用研究

设 $x(t)$ 为包含多冲击响应成分的信号,其表达式为

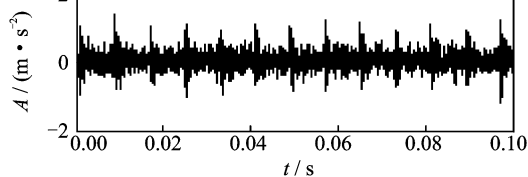
$$x(t) = \begin{cases} f(t) + A_n n(t) & t \in [\tau_0 + kT_0, \tau_0 + W_s + kT] \\ A_n n(t) & \text{其他} \end{cases}$$

其中: $f(t) = \sum \exp\left(\frac{\xi_0}{\sqrt{1-\xi_0^2}} 2\pi f(t - \tau_0 - kT_0)\right) \times \sin 2\pi f(t - \tau_0 - kT_0)$ 。

取 $f = 3\,000$ Hz, $\tau_0 = 0.001$, $t \in [0, 0.1]$ s, $T_0 = 0.008$, $n(t)$ 为白噪声, $A_n = 0.2$,用25.6 kHz采样频率对 $x(t)$ 离散化。不包含噪声与包含噪声的时域波形如图3所示。



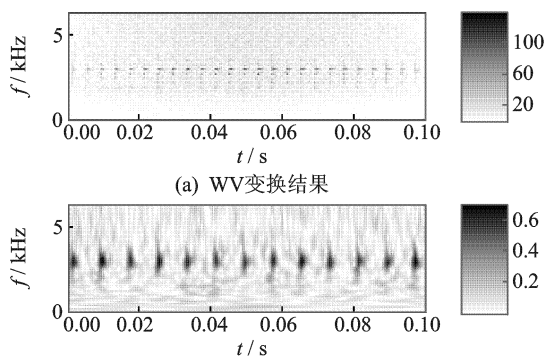
(a) 不含噪声的时域信号



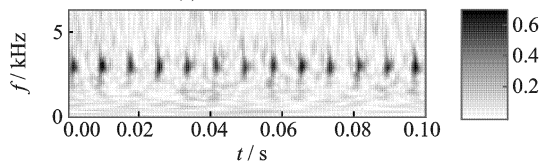
(b) 加噪声的时域信号

图3 仿真信号的时域波形

为了减小噪声对分析结果的影响,分别对小波变换和WV时频变换的结果运用均值滤波,结果如图4所示,表明均值滤波方法能够降低噪声的影响。



(a) WV变换结果



(b) 小波变换结果

图4 仿真信号的时频表示

采用基于时频分析的融合交叉项消除方法得到的结果见图5。由图5可知,融合后的结果有效地消除了WV变换的交叉项,并提高了小波变换的时频分辨率。为了更直观地展示融合方法的有效性,把小波变换和WV变换以及融合后得到的结果分别投影到时间轴和频率轴上,得到的结果如图6所示。由图6(a)和图6(e)可以看出,融合之后的结果消除了WV变换的交叉项;图6(c)和图6(e)表明融合后的结果提高了小波变换的分辨率;由图6(f)可以看出信号的冲击频率。

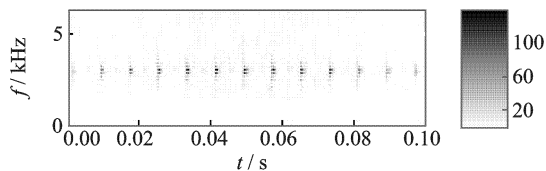


图5 仿真信号融合效果图

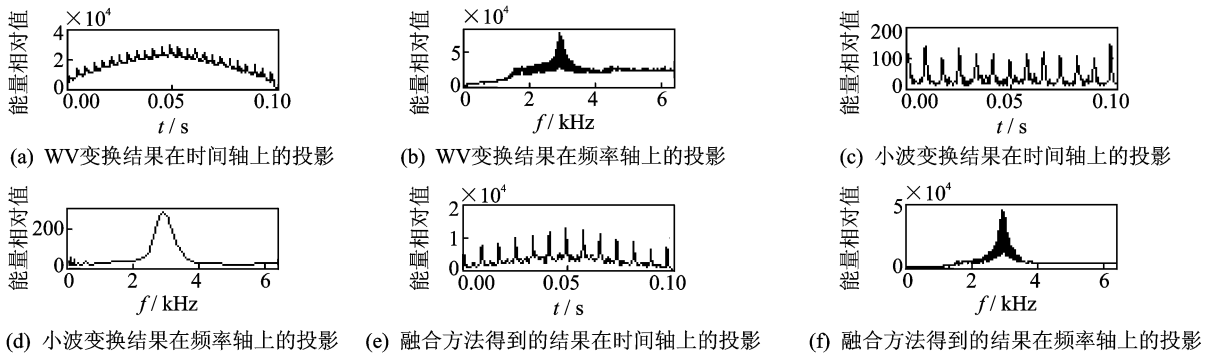


图6 仿真信号采用不同方法分别在时间、频率轴上的投影

当噪声系数 A_n 的值高到一定的限值时,信噪比太低,不能有效地描述信号能量随时间和频率的变化情况。图7表示在不同噪声水平下的融合结果,图7(a)是信号在 A_n 为0.4时的融合结果,从中能够判断出3 kHz处还有能量聚集。图7(b)是信号在 A_n 为0.6时的融合结果,所得结果由于噪声的影响已经不能描述信号特征的变化情况。

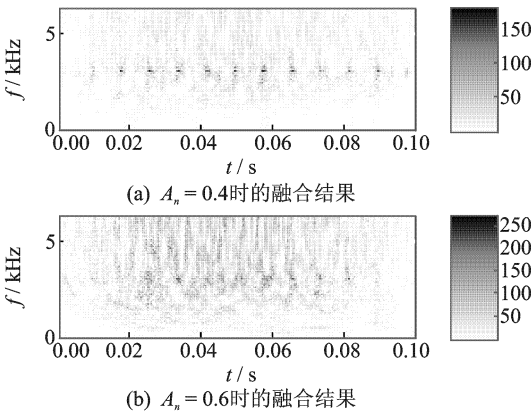


图7 仿真信号在不同噪声水平时的融合效果

4 故障诊断应用

4.1 在轴承外圈故障检测中的应用

在轴承外圈存在局部故障时,由于滚动体通过外圈而使得轴承的振动中具有冲击响应振动,冲击响应信号为非平稳信号,故可采用基于时频分析的融合交叉项消除方法来确定振动响应信号的能量随时间和频率变化的分布情况。试验对象为某减速机轴端的圆锥滚子轴承,轴承型号为33207,利用线切割在轴承外圈设置了0.6 mm的贯通裂痕故障。轴承结构参数如下:滚动体个数 $Z = 17$;滚动体直径 $d = 9$ mm;接触角 $\alpha = 12^\circ$;轴承节径 $D = 55$ mm;采样频率为10 kHz。

图8为轴承外圈严重故障对应的时域波形。图9(a)表示信号经过WV变换得到的结果,从图中可以看出,WV变换存在严重的交叉项,影响对信号特征的分析理解;图9(b)表示信号经过小波变换得到的结果,从图中可看出,由于小波变换的时频分辨率低,导致其不能很好地描述信号能量随时间和频率的变化情况。图10是采用基于时频分析的融合交叉项消除方法得到的结果,由图10可看出,融合

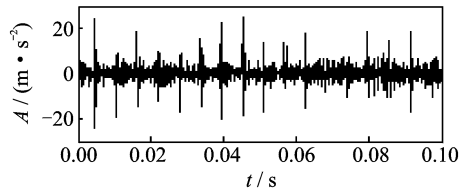


图8 轴承振动信号

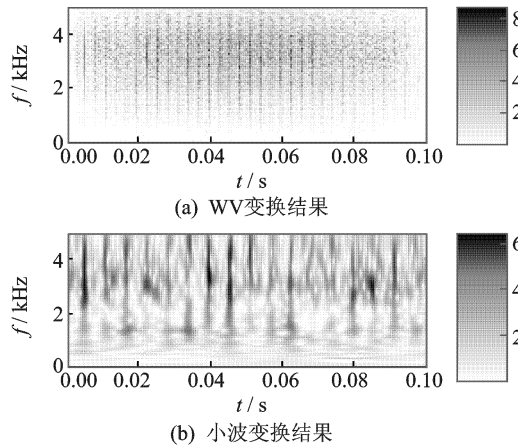


图9 轴承振动信号的时频表示

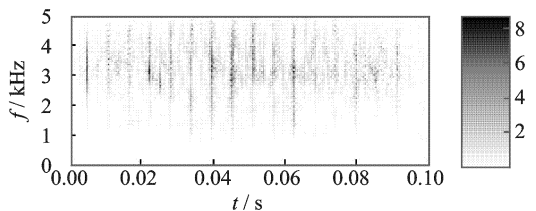


图10 轴承振动信号融合效果图

后的结果有很好的时频聚集性,同时对交叉项的抑制效果很明显。为了更直观地展示融合方法的有效性,把小波变换和 WV 变换以及融合后得到的结果分别投影到时间轴和频率轴上,得到的结果如图 11 所示。从图 11(a),(c),(e)中可以看出,融合之后的结果有效地消除了交叉项;而图 11(f)可以看出信号中的主要频率成分。

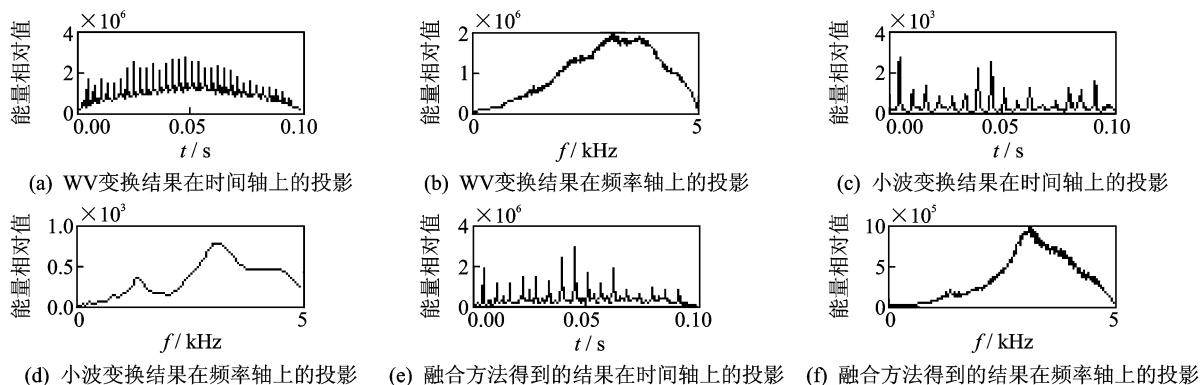


图 11 轴承振动信号采用不同方法分别在时间、频率轴上的投影

交叉项消除方法。试验对象为 LC5T81 型变速箱,它有 5 个前进档和 1 个倒档。笔者以三档齿轮为研究对象,主要测取三档齿轮严重故障(三档齿轮断裂)的齿轮振动加速度信号,齿轮箱三档齿轮的啮合频率为 500 Hz,采样频率 $f_s = 3$ kHz。

图 12 为齿轮振动加速度信号的时域波形。图 13(a)表示信号经过 WV 变换得到结果,可以看出,信号在 500 Hz 处有能量聚集,但在 500 Hz 以下的地方由于有交叉项的存在,影响对信号特征的分析;图 13(b)为信号经过小波变换得到的结果,由于其时频聚集性差,所得到的结果很难清晰地描述信号能量随时间和频率的变化情况。图 14 为融合后的结果,由于原始信号中包含了很大的噪声,导致融合后的结果不能完全消除交叉项,但对其有了很大的抑制作用。为了更直观地展示融合方法的有效性,将小波变换和 WV 变换以及融合后得到的结果分别投影到时间轴上和频率轴上,得到的结果如图 15 所示。从图 15(a),(b),(c)中可以看出,融合之后的结果有效地消除了交叉项;而从图 15(f)可以看出信号中的啮合频率以及冲击频率。

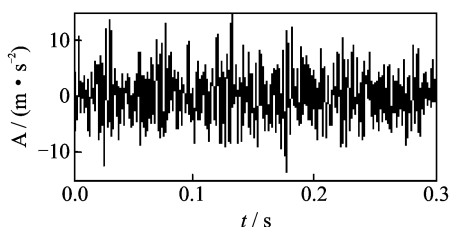


图 12 齿轮振动信号

4.2 在齿轮故障特征检测中的应用

当齿轮箱正常运转时,由于齿轮每次啮合时存在冲击,导致振动信号中存在啮合频率。当齿轮箱存在故障时,除了啮合频率之外还存在由于故障而导致的冲击频率。为了描述振动信号中能量随时间和频率的变化情况,可以采用基于时频分析的融合

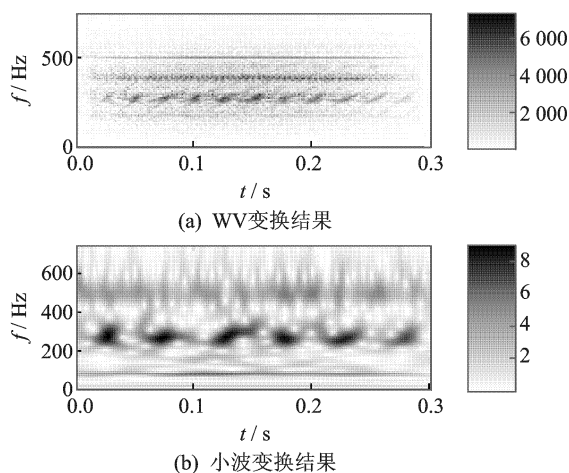


图 13 齿轮振动信号的时频表示

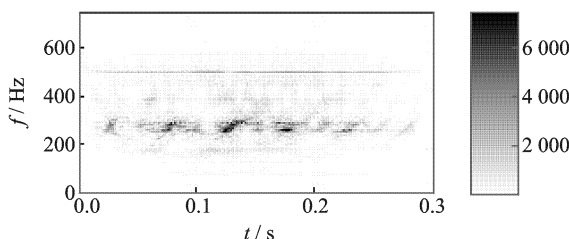


图 14 齿轮振动信号融合效果图

5 结束语

在线性时频分析和双线性时频分析的基础上,提出了基于时频分析融合交叉项消除方法。通过

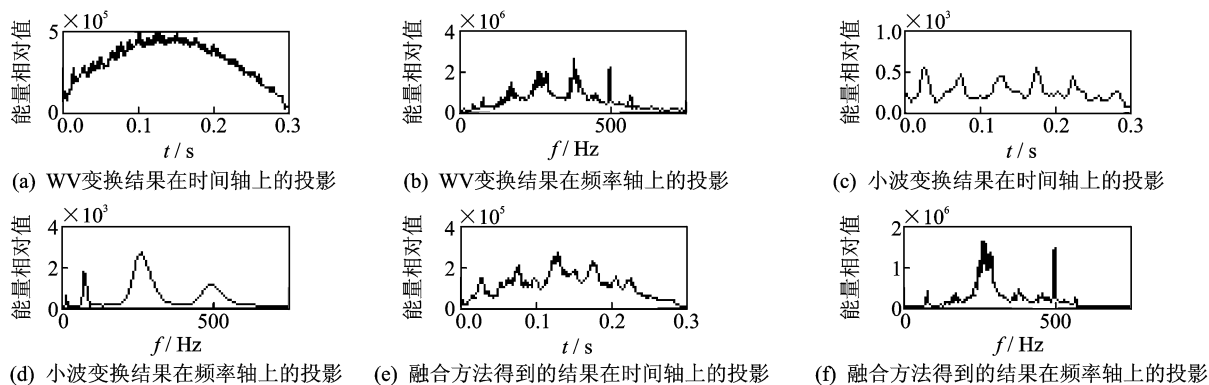


图15 齿轮振动信号采用不同方法分别在时间、频率轴上的投影

仿真信号的应用研究,说明该方法在保持双线性时频分析的时频分辨率的同时很好地抑制了交叉项。在轴承故障信号和齿轮箱故障信号中的应用,证明了基于时频特征融合的交叉项消除方法能够有效描述信号能量对时间和频率的分布情况,为故障诊断提供了有效的时频特征表示方法。

参 考 文 献

- [1] L. 科恩. 时-频分析:理论与应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998: 1-267.
- [2] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998: 1-446.
- [3] 马世伟. 非平稳信号的参数自适应时频表示及其应用的研究[D]. 上海:上海大学, 2000.
- [4] Leon C. Time-frequency distributions-a review [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(7): 941-981.
- [5] Peng Zhike, Chu Fulei. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18: 199-221.
- [6] Sejdić E, Djurović I, Jiang J. Time-frequency feature representation using energy concentration: an overview of recent advances [J]. Digital Signal Processing, 2009, 19: 153-183.
- [7] 李振春, 刁瑞, 韩文功, 等. 线性时频分析方法综述 [J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(4): 239-247.

Li Zhenchun, Diao Rui, Han Wengong, et al. Review on linear time-frequency analysis methods [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2010, 33(4): 239-247. (in Chinese)

- [8] 赵培洪, 平殿发, 邓兵, 等. 魏格纳-维尔分布交叉项抑制方法综述[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(1): 23-29.

Zhao Peihong, Ping Dianfa, Deng Bing, et al. Review of cross-terms suppression methods in Wigner-Ville distribution [J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(1): 23-29. (in Chinese)



第一作者简介:黄伟国,男,1981年10月生,博士、讲师。主要研究方向为数字信号处理及机械故障诊断。曾发表《Fault feature extracting for rotating machinery vibration based on blind deconvolution and spectral kurtosis》(《Journal of Theoretical and Applied Information Technology》2012, Vol. 43, No. 2)等论文。

E-mail:wghuang@suda.edu.cn

通信作者简介:鞠华,女,1973年1月生,博士、讲师。主要研究方向为车辆动力学、可靠性及机械CAD/CAM。

E-mail:juhua@suda.edu.cn