

基于强抗噪威格纳威利分析的 滚动轴承故障诊断

王宏超^{1,2}, 杜文辽^{1,2}

(1. 郑州轻工业大学 机电工程学院, 郑州 450002;

2. 郑州轻工业学院 机电工程学院 河南省机械装备智能制造重点实验室, 郑州 450002)

摘 要: 为了解决威格纳威利谱(Wigner-Vile spectrum, WVS)时频分析方法对受强背景噪声影响下的滚动轴承冲击性故障信号特征提取难的问题,根据滚动轴承发生故障时呈现出的循环平稳特征,将基于2阶循环统计量的循环谱密度算法(cyclic spectral density, CSD)与WVS相结合,提出基于CSD的WVS分析方法,即循环谱密度威格纳威利谱(CSDWVS)时频分析方法。经仿真及实验验证,相对传统WVS分析方法,该方法能有效提取出强背景噪声影响下的滚动轴承内圈故障特征频率为51.9 Hz及外圈故障特征频率为32.1 Hz。

关 键 词: 循环平稳; 威格纳威利谱(WVS); 故障诊断; 循环谱密度(CSD); 循环谱密度威格纳威利谱(CSDWVS)

中图分类号: V214.3⁺3; TP206

文献标志码: A

Fault diagnosis of rolling bearing based on noise-resistant Wigner-Vile analysis

WANG Hongchao^{1,2}, DU Wenliao^{1,2}

(1. Mechanical and Electrical Engineering Institute,

Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Henan Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Mechanical Equipment,
Mechanical and Electrical Engineering Institute,
Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To solve the problem that the time-frequency analysis method Wigner-Vile spectrum (WVS) could not extract the fault feature effectively when the impulsion characteristic fault signal of rolling element bearing is buried by strong background noise, the cyclic spectral density Wigner-Vile spectrum (CSDWVS) time-frequency method was proposed based on the property of cyclostationarity of the bearing' fault signal by combing the cyclic spectral density (CSD) based on second order cyclostationarity statistics with the WVS. Through the verification of simulation and test, the proposed method had the much more noise-resistant advantages than traditional WV method, and it could extract the inner race fault characteristic frequency of 51.9 Hz and the outer race fault characteristic frequency of 32.1 Hz correctly.

收稿日期:2018-04-08

基金项目:河南省教育厅人才项目(17HASTIT028)

作者简介:王宏超(1983—),男,讲师,博士,研究方向为旋转机械故障诊断与信号处理。E-mail:hongchao1983@126.com

引用格式:王宏超,杜文辽.基于强抗噪威格纳威利分析的滚动轴承故障诊断[J].航空动力学报,2019,34(4):772-777. WANG Hongchao, DU Wenliao. Fault diagnosis of rolling bearing based on noise-resistant Wigner-Vile analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4): 772-777.

Key words: cyclostationarity; Wigner-Vile spectrum (WVS); fault diagnosis; cyclic spectral density (CSD); cyclic spectral density Wigner-Vile spectrum (CSDWVS)

时频分析方法是旋转机械故障诊断的常用方法之一,相对于单纯的时域或频域分析方法,时频分析方法能同时反映出旋转机械故障信号的时、频域特征。Wigner-Vile spectrum(WVS)时频分析方法是信号在时间-频率二维平面上的能量密度函数,具有很高的分辨率、能量聚集性和跟踪瞬时频率的特性,在机械故障诊断中取得广泛的应用。文献[1]将 Wigner 分布用于柴油机故障信号的特征提取,在用分形算法对提取特征向量进行故障分类;文献[2]将连续小波变换与 WVS 相结合,提出一种时频分析方法用于非平稳振动信号的时频分析;文献[3]提出一种线性调频小波 WVS 时频分析方法,有效解决了传统 WVS 分析方法的交叉干扰项^[4-6]问题。文献[7]提出一种基于 WVS 分布的脉冲干扰效果评估方法,能够对脉冲干扰效果进行有效分析;文献[8]研究了基于时频分析的 WVS 交叉干扰项的去除方法;滚动轴承作为旋转机械的典型关键部件,其发生故障时其冲击性特征相对转频及其谐波成分较为微弱时,WVS 分析方法难以对其进行有效特征提取。为解决此问题,利用滚动轴承非平稳故障信号呈现出的循环平稳特征,将传统 WVS 分析与循环平稳理论相结合,提出一种基于循环平稳的 WVS 分析方法,所述方法能有效提取强背景噪声影响下滚动轴承的冲击性时频特征。

1 基础理论

本节对所述方法的理论基础,即 WVS 理论基础及循环平稳理论分别作以简介。

1.1 WVS

对于任一信号 $s(t)$,其 WV 定义为

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

式中 $x(t)$ 表示信号 $s(t)$ 的解析信号, $x(t)$ 的共轭用 $x^*(t)$ 表示。其中

$$x(t) = s(t) + jH[s(t)] \quad (2)$$

式中 $s(t)$ 为 $z(t)$ 的实部, $H[s(t)]$ 为 $s(t)$ 的 Hilbert 变换,为 $z(t)$ 的虚部。

信号 $s(t)$ 的威格纳威利谱定义如下:

$$W_x(t, f) =$$

$$E\left[\int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau\right] = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(t, \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

式中 $E[\cdot]$ 表示均值算法, $R_x(t, \tau)$ 表示自相关算法

$$R_x(t, \tau) = E\left[x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right] \quad (4)$$

1.2 循环平稳

循环平稳是非平稳信号呈现出的一种特性,是指信号的某阶统计特征量呈现出的周期性循环特征。根据统计特征的不同,信号可分为 1 阶、2 阶及高阶循环平稳^[9-12]。循环平稳理论自提出以后,在旋转机械故障诊断中取得了广泛的应用。文献[13]利用 2 阶循环平稳理论,提出一种自相关谱峭度方法用于强噪声影响下滚动轴承故障信号最优包络解调结果频带的选取,通过实验验证了所述方法相对其他如谱峭度等方法的优势;文献[14]将循环平稳技术与盲提取技术相结合用于齿轮箱中滚动轴承的故障诊断;文献[15]提出一种基于分形成分分析的循环平稳分析方法,将其用于单通道信号采集的 1 阶及 2 阶循环平稳信号成分的分离,通过仿真验证所述方法的有效性;文献[16]将基于循环平稳理论的相关方法用于涡轮机及交流发电机中滚动轴承、滑动轴承及齿轮的故障诊断。本文的工作围绕基于 2 阶循环平稳的循环谱密度方法展开,相关理论基础如下文。

2 阶循环平稳的定义:若非平稳信号 $x(t)$ 的自相关函数周期时变时(周期为 T_0),称信号为 2 阶循环平稳信号,即

$$R_x(t, \tau) = E\left[x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right] = E\left[x\left(t + nT_0 + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t + nT_0 - \frac{\tau}{2}\right)\right] \quad (5)$$

$R_x(t, \tau)$ 可以用傅里叶级数表示如下式:

$$R_x(t, \tau) = \sum_{\alpha} R_x(\tau, \alpha) e^{j2\pi\alpha t} \quad (6)$$

式中 $\alpha = m/T_0$, 其中 $m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ 为离散循环频率; $R_x(\tau, \alpha)$ 为傅里叶系数,其计算公式如下:

$$R_x(\tau, \alpha) = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} R_x(t, \tau) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (7)$$

$R_x(\tau, \alpha)$ 被称作循环自相关(cyclic autocorrelation, CA)函数, α 为循环频率(cyclic frequency, CF)。当滚动轴承发生故障时,故障特征频率即为循环频率。

定义 CA 关于时延 τ 的 Fourier 变换为谱相关(spectral correlation, SC)或谱相关密度(spectral correlation density, SCD)函数

$$S_x(\alpha, f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau, \alpha) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (8)$$

2 CSDWVS

综合式(3)、式(6)及式(8)

$$S_x(\alpha, f) = \int_{-\infty}^{\infty} W_x(t, f) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (9)$$

对式(9)进行逆变换

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\alpha, f) e^{j2\pi\alpha t} dt \quad (10)$$

式(10)即为基于 SCD 的 WVS 的计算公式,即 SCDWVS(spectral correlation density Wigner-Vile spectrum)方法。虽然相对式(3), CSDWVS(cyclic spectral density Wigner-Vile spectrum)方法多了一步 SCD 计算步骤,但由于 SCD 只需顺序计算不同频率间的互相关,实际应用并不会加大计算量;此外,SCDWVS 方法还可以有效利用长时间序列计算 WVS 方法的时频分布。

综合式(7)和式(8),对于给定的循环频率 α , 信号 $x(t)$ 的 SCD 的计算可以通过如下方法得到。

计算信号 $x(t)$ 的相对应的两个频移信号的互功率谱密度函数,即

$$S_x(\alpha, f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{uv}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = S_{uv}(f) \quad (11)$$

式中 $u(t) = x(t) e^{-j\pi\alpha t}$; $v(t) = x(t) e^{j\pi\alpha t}$; $R_{uv}(\tau)$ 为 $u(t), v(t)$ 的互相关函数。因此,计算 $S_x(\alpha, f)$ 只需对感兴趣的循环频率集进行扫描计算即可(扫描公式用式(11),由 FFT(快速傅里叶变换)算法计算特定循环频率对应的两个频移信号 $u(t), v(t)$ 的互功率谱密度)。

与式(3)相比, CSDWVS 方法可以有效利用长时间序列对平稳噪声的均化效果;同时, CSDWVS 还可以由非零循环频率域信息获得具有循环平稳特性的信号特征。

3 仿真

采用文献[17-18]的滚动轴承数学模型,如式(12)所示

$$\begin{cases} x(t) = s(t) + n(t) = \\ \sum_i A_i h(t - iT - \tau_i) + n(t) \\ A_i = A_0 \cos(2\pi f_r t + \phi_A) + C_A \\ h(t) = e^{-Bt} \cos(2\pi f_n t + \phi_w) \end{cases} \quad (12)$$

首先模拟滚动轴承无噪声影响下即式(12)中噪声 $n(t) = 0$ 的滚动轴承内圈点蚀故障的 WVS 及 CSDWVS 分析结果,令式(12)中转频 $f_r = 12$ Hz,内圈故障通过频率 $f_i = 100$ Hz,系统固有频率 $f_n = 2$ kHz,采样频率 $f_s = 25.6$ kHz。

式(12)中 τ_i 表示第 i 次冲击相对于平均周期 T 的微小波动,其标准差取为转速的 0.5%。信号时域波形图如图 1 所示,由时域可见信号呈现出明显的调制及冲击现象。分布对时域信号进行 CSDWVS 及 WVS 分析,结果分别如图 2 及图 3 所示:在无噪声干扰情况下,两者均能有效提取出滚动轴承内圈故障特征频率的时频特征,但是 CSDWVS 具有更清晰的表达效果。

对图 1 所示的信号加入白噪声,加噪后的信号时域波形图如图 4 所示。图 5 及图 6 分别是 CSDWVS 及 WVS 的分析结果,由图 6 可以看出,在噪声影响较为严重时, WVS 已经不能有效提取出滚动轴承内圈故障的时频特征,而 CSDWVS 仍可有效提取出滚动轴承内圈故障特征频

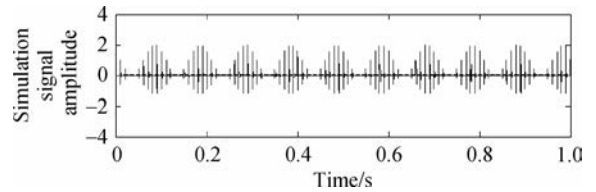


图1 无噪声滚动轴承内圈故障仿真信号

Fig. 1 Time-domain waveform of rolling bearing simulation signal without noise

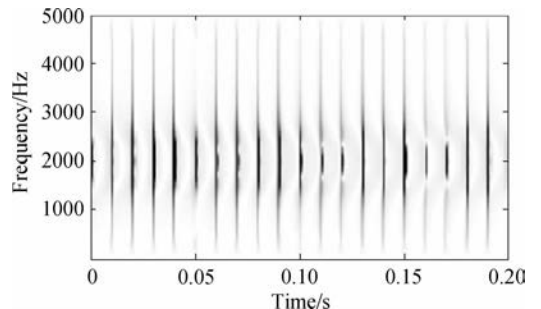


图2 图1所示信号的 CSDWVS 分析结果

Fig. 2 CSDWVS analysis result of the signal shown in Fig. 1

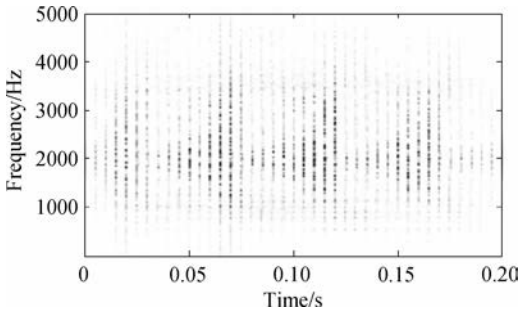


图 3 图 1 所示信号的 WVS 分析结果

Fig. 3 WVS analysis result of the signal shown in Fig. 1

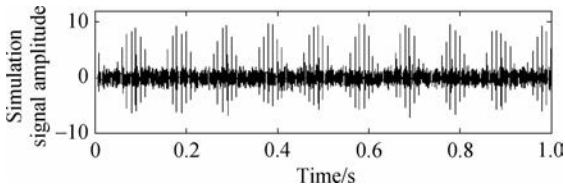


图 4 噪声干扰下的滚动轴承内圈故障仿真信号
Fig. 4 Time-domain waveform of rolling bearing simulation signal with noise

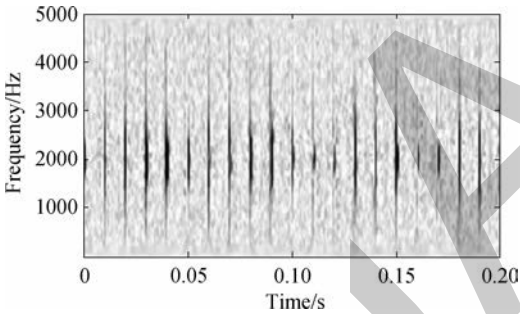


图 5 图 4 所示信号的 CSDWVS 分析结果

Fig. 5 CSDWVS analysis result of the signal shown in Fig. 4

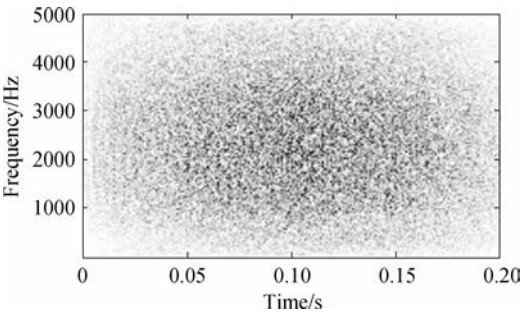


图 6 图 4 所示信号的 WVS 分析结果

Fig. 6 WVS analysis result of the signal shown in Fig. 4

4 实验

用图 7 所示的实验台进行滚动轴承内、外圈故障实验。用电火花技术分别加工滚动轴承内、外圈点蚀故障。轴承型号为 GB203, 节径 $D = 28.5 \text{ mm}$, 滚动体直径 $d = 6.747 \text{ mm}$, 滚动体数目 $z = 7$, 接触角 $\alpha = 0^\circ$ 故障特征频率计算公式如表 1 所示, 设置信号采样频率 $f_s = 25.6 \text{ kHz}$, 表中 n 为转速。

滚动轴承内圈故障的时域波形图如图 8 所示。滚动轴承内圈故障信号的 CSDWVS 分析结果如图 9 所示, 滚动轴承内圈故障的时频特征基本被有效提取出来, 而图 10 所示的 WVS 分析结果无法有效提取内圈故障特征频率; 说明在滚动轴承转频及其谐波成分等干扰下, WVS 已经无法有效提取出滚动轴承内圈故障实验信号的特征频率。

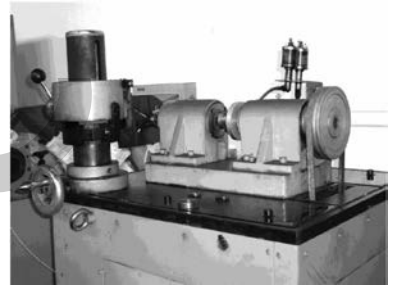


图 7 实验台实景图

Fig. 7 Photo of test rig

表 1 轴承理论故障特征频率

Table 1 Theory fault characteristic frequency of bearing

特征频率	计算公式	计算结果
内圈旋转频率	$f_r = \frac{n}{60}$	12
滚动体通过频率	$f_{bp} = \left\{ \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right] \right\} f_r$	47.8
内圈通过频率	$f_{ip} = \frac{Z}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_r$	51.9
外圈通过频率	$f_{op} = \frac{Z}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_r$	32.1
保持架旋转频率	$f_{cp} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_r$	4.6

图 11~图 13 是滚动轴承外圈故障信号的分析结果。图 11 是滚动轴承外圈故障信号的时域波形图。图 12 及图 13 分别是所述方法及 WVS

率(图 5), 说明了 CSDWVS 相对于 WVS 方法具有强的抗噪性。

的分析结果。对比图 12 及图 13, 虽然两者都能提取出滚动轴承外圈故障特征频率, 但图 12 具有更好地时频聚集性。

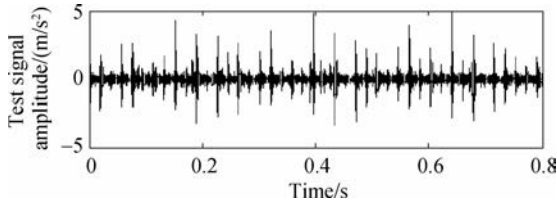


图 8 滚动轴承内圈故障时域图

Fig. 8 Time-domain waveform of rolling bearing signal with inner race fault

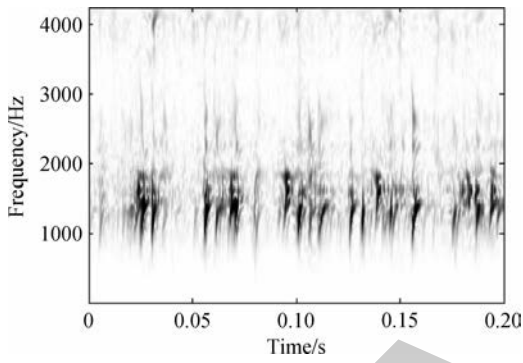


图 9 图 8 所示信号的 CSDWVS 分析结果

Fig. 9 CSDWVS analysis result of the signal shown in Fig. 8

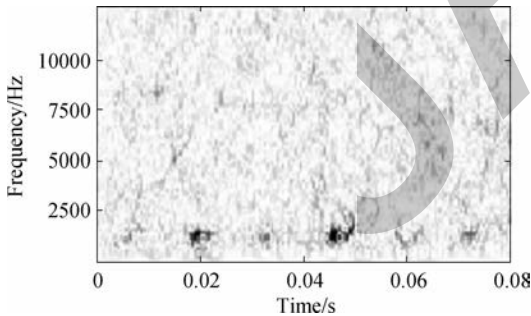


图 10 图 8 所示信号的 WVS 分析结果

Fig. 10 WVS analysis result of the signal shown in Fig. 8

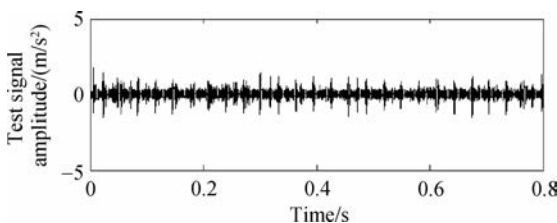


图 11 滚动轴承外圈故障时域图

Fig. 11 Time-domain waveform of rolling bearing signal with outer race fault

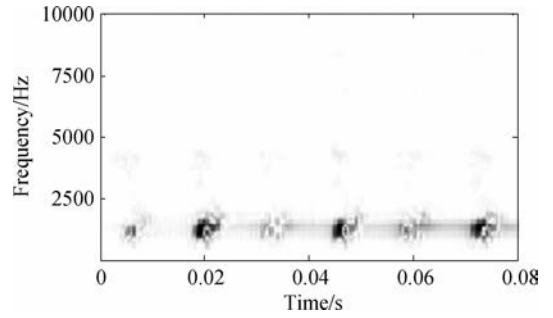


图 12 图 11 所示信号的 CSDWVS 分析结果

Fig. 12 CSDWVS analysis result of the signal shown in Fig. 11

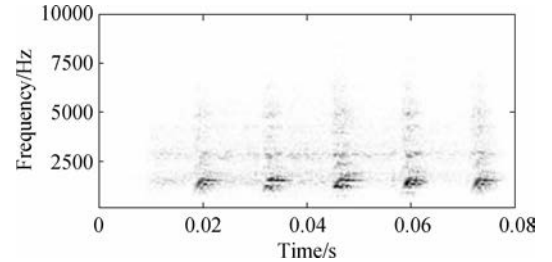


图 13 图 11 所示信号的 WVS 分析结果

Fig. 13 WVS analysis result of the signal shown in Fig. 11

5 结论

利用 2 阶循环平稳与传统 WVS 分析之间的关系, 提出基于 2 阶循环平稳的 WVS 分析方法。通过仿真及实验证明, 所述方法相对于 WVS 分析方法具有更强的抗噪性及良好的时频聚集性, 更能有效地反映滚动轴承故障信号的时频特征。

参考文献:

- [1] 刘昱, 张俊红, 毕凤荣, 等. 基于 Wigner 分布和分形维数的柴油机故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(2): 240-245.
- LIU Yu, ZHANG Junhong, BI Fengrong, et al. Study on fault diagnosis of diesel valve trains based on Wigner distribution and fractal dimension[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2016, 36(2): 240-245. (in Chinese)
- [2] XU C, WANG C, LIU W. Nonstationary vibration signal-analysis using wavelet-based time-frequency filter and Wigner-Vile distribution[J]. Journal of Vibration and Acoustics Transactions, 2016, 138(5): 2-9.
- [3] CHEN G, CHEN J, DONG G M. Chirplet Wigner-Vile distribution for time-frequency representation and its application[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 41(1/2): 1-13.
- [4] 程发斌, 汤宝平, 钟佑明. 利用 ASTFT 谱有效抑制 WVD

- 交叉项的方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(10): 2299-2302.
- CHENG Fabin, TANG Baoping, ZHONG Youming. A method to suppress cross-terms of wigner-vile distribution using ASTFT[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2008, 30(10): 2299-2302. (in Chinese)
- [5] CHEN J. Time frequency-based blind source separation technique for elimination of cross-terms in wigner distribution[J]. Electronics Letters, 2003, 39(5): 475-477.
- [6] AUGER F, FLANDRIN P. Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(5): 1068-1089.
- [7] 杨杰, 徐静影, 职如昕, 等. 基于魏格纳-威尔分布的干扰效果评估方法[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(7): 759-765.
- YANG Jie, XU Jingying, ZHI Ruxin, et al. A new method for performance evaluation of pulsed interference based on Wigner-Ville distribution[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(7): 759-765. (in Chinese)
- [8] 赵中华, 王文延. 基于时频分析的去除魏格纳交叉干扰项的方法[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(6): 81-85.
- ZHAO Zhonghua, WANG Wenyan. Simulation of method to eliminate cross-term in wigner distribution based on matching pursuits in time-frequency domain[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(6): 81-85. (in Chinese)
- [9] ABBOUD D, ANTONI J, ELTABACH M, et al. Deterministic-random separation in nonstationary regime[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 362(3): 305-326.
- [10] MCFADDEN P D, SMITH J D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing[J]. Journal of Sound and Vibration, 1984, 96(1): 69-82.
- [11] ANTONI J, RANDALL R B. A stochastic model for simulation and diagnostics of rolling element bearings with localized faults[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2003, 125(3): 282-289.
- [12] ANTONI J. Cyclic spectral analysis of rolling-element bearing signals: facts and fictions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304(3/4/5): 497-529.
- [13] MOSHREFZADEH A, FASANA A. The autogram: an effective approach for selecting the optimal demodulation band in rolling element bearings diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 105(5): 294-318.
- [14] ELIA G D, COCCONCELLI M, MUCCHI E, et al. Combining blind separation and cyclostationary techniques for monitoring distributed wear in gearbox rolling bearings[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 231(6): 1113-1128.
- [15] ZAKARIA F A, MAIZ S, EL-BADAOUI M, et al. First- and second-order cyclostationary signal separation using morphological component analysis[J]. Digital Signal Processing, 2016, 58(3): 134-144.
- [16] KEBABSA T, OUELA N, ANTONI J, et al. Experimental study of a turbo-alternator in industrial environment using cyclostationarity analysis[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1/2/3/4): 537-552.
- [17] ANTONI J, BONNARDOT F, RAAD A, et al. Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2004, 18(6): 1285-1314.
- [18] RANDALL R B, ANTONI J, CHOBSAARD S. The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(5): 945-962.

(编辑: 王碧珺)