

基于改进时频谱分析方法的滚动轴承复合故障诊断

王宏超, 向国权, 郭志强, 巩晓赞, 杜文辽
(郑州轻工业学院 机电工程学院, 郑州 450002)

摘 要: 将基于循环平稳理论及 2 阶循环统计量的谱相关或谱相关密度分析方法加以改进, 提出一种时频分析方法并将其用于滚动轴承发生复合故障时调制现象循环调制频率即故障特征频率的提取。通过对滚动轴承复合故障的仿真及实际实验振动数据进行分析, 结果表明: 与同时提取出调制频率和载频的传统包络解调谱分析方法不同, 改进的谱分析方法可以只提取出调制频率, 提取的谱结构分布具有更清晰的表达效果, 从而为滚动轴承的复合故障特征提取提供一种方法。

关 键 词: 改进时频谱分析; 滚动轴承; 复合故障; 故障诊断; 时频谱分析

中图分类号: V26; TP206

文献标志码: A

Fault diagnosis of rolling bearing' compound faults based on improved time-frequency spectrum analysis method

WANG Hongchao, XIANG Guoquan, GUO Zhiqiang,
GONG Xiaoyun, DU Wenliao

(Mechanical and Electrical Engineering Institute,
Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the theory of cyclostationarity and two orders cyclic statistic for the spectrum correlation (SC) or spectrum correlation density (SCD), a time-frequency analysis method, namely improved spectrum correlation (ISC), was proposed and used in fault feature extraction of rolling bearing' compound fault. Results show that the proposed method can extract the modulated frequency only and has more intuitive advantage than the traditional envelope demodulation spectrum method because the latter extracts the modulated frequency and carrier frequency simultaneously. The feasibility and effectiveness of proposed method are verified through simulation and experiment.

Key words: improved time-frequency spectrum analysis; rolling bearing; compound faults; fault diagnosis; time-frequency spectrum analysis

旋转机械发生故障时往往呈现出一定的循环平稳特征, 基于循环平稳理论的研究方法在旋转机械的故障诊断中已经取得了一定的应用, 如循

环谱相关(spectrum correlation, SC)或谱相关密度(spectrum correlation density, SCD)等方法。文献[1]对循环平稳常见的分析方法在旋转机械

收稿日期: 2015-08-21

基金项目: 国家青年自然科学基金(51405453, 51205371); 郑州轻工业学院博士科研基金资助项目

作者简介: 王宏超(1983—), 男, 讲师, 博士, 主要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, 向国权, 郭志强, 等. 基于改进时频谱分析方法的滚动轴承复合故障诊断[J]. 航空动力学报, 2017, 32(7): 1698-1703. WANG Hongchao, XIANG Guoquan, GUO Zhiqiang, et al. Fault diagnosis of rolling bearing' compound faults based on improved time-frequency spectrum analysis method[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(7): 1698-1703.

故障诊断中应用的适用性进行了系统分析,分析结果表明在众多方法中,循环相关分析方法具有不仅能提取滚动轴承微弱的故障特征、且能对故障严重程度具有一定反映的优点。文献[2]提出一种循环平稳理论与威格纳威利时频分析方法相结合的时频分析,所述方法综合两种方法的优点:不仅有效利用了循环平稳理论,而且还利用了威格纳威利时频分析方法能有效抑制频率干涉的优点。文献[3]将循环自相关及小波分析用于滚动轴承故障信号的特征提取,并将其作为支持向量机的训练及测试输入向量取得正确率高达的90%的滚动轴承不同故障类型的分类。虽然基于谱相关或谱相关密度的分析方法在旋转机械的故障诊断中取得了一定应用,然而大多针对滚动轴承的单一故障展开研究的,基于循环平稳理论的滚动轴承复合故障诊断方法鲜有研究。既有滚动轴承复合故障诊断文献大都基于智能分类算法如隐马尔科夫、支持向量机等^[4-12],此类方法对由于计算效率的限制,难以实现滚动轴承复合故障诊断的实时性。

在旋转机械的故障诊断中,不同于单纯的时域或频域分析方法,时频分析方法可以同时提取出故障的时域及频域特征,具有时域或频域分析方法不具备的优点,文献[13]对旋转机械故障诊断中常用的时频分析方法做了系统的综述。SC或SCD方法是循环平稳理论在旋转机械故障诊断中最常用的时频分析方法,主要用于滚动轴承发生故障时调制现象的解调。本文将SC加以改进提出ISC(improving spectrum correlation,量符号记为 F_{isc})方法。此外,在ISC的基础上,将其进一步改进,提出集成ISC(integrated improving spectrum correlation, IISC,量符号记为 F_{iisc})谱分析方法,改进后的谱分析方法可以只提取出调制频率,具有更直观的谱结构分布。将ISC与集成ISC用于滚动轴承的复合故障诊断,通过仿真和实验验证了所述方法的可行性与有效性。

1 2 阶循环统计量理论

1.1 谱相关(SC)密度

自相关函数呈周期时变的非平稳信号 $x(t)$ 称为2阶循环平稳信号^[14]。

$$R_x(t, \tau) = E[x(t + \tau/2) \cdot x^*(t - \tau/2)] = E[x(t + nT_0 + \tau/2) \cdot x^*(t + nT_0 - \tau/2)] \quad (1)$$

可以用样本平均估计集总平均

$$\hat{R}_x(t, \tau) \triangleq \frac{1}{2N+1} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=-N}^N x\left(t + nT_0 + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t + nT_0 - \frac{\tau}{2}\right) \quad (2)$$

式中 $\hat{R}_x(t, \tau)$ 表示 $R_x(t, \tau)$ 的估计。由于 $R_x(t, \tau)$ 为周期函数,其 Fourier 系数可以表示为

$$R_x^\alpha(\tau) \triangleq \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} R_x(t, \tau) \exp(-j2\pi\alpha t) dt \quad (3)$$

式(3)即为循环自相关(cyclic autocorrelation, CA)函数的表达式,其中 α 为循环频率(cyclic frequency, CF),即当滚动轴承发生故障时的特征频率。

SC(量符号记为 $F_{sc,x}^\alpha$)或SCD定义为CA关于时延 τ 的 Fourier 变换

$$F_{sc,\alpha}^\alpha(f) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) \cdot j^{2\pi f\tau} d\tau \quad (4)$$

1.2 改进的谱相关(ISC)

如式(5)所示,为一调频信号:调制信号为频率为 α 的正弦信号及其谐波;被调制信号为一个频率为 f 的正弦信号

$$x(t) = \sin(2\pi ft) [1 + A_1 \sin(2\pi\alpha t) + A_2 \sin(2\pi 2\alpha t) + \cdots + A_m \sin(2\pi n\alpha t)] + n(t) \quad (5)$$

$n = 1, 2, \dots, N \quad m = 1, 2, \dots, M$

式中 $n(t)$ 表示随机白噪声。图1为式(5)所示信号的频谱图,载波信号的频率即为中心频率 f 。调制信号的频率为与中心频率间距为循环频率 α 的两个旁瓣。用滤波原理如图1所示的边带滤波器提取载波信号及调制信号:理想情况下,信号通过上述边带滤波器后只包含特定成分及少量的噪声信号,可表示为

$$x_i = x_{\Delta f}(t, f - i\alpha) \quad i = -1, 0, 1 \quad (6)$$

式中 $x_{\Delta f}(t, f)$ 代表信号 $x(t)$ 在窄频带 $\left[f - \frac{\Delta f}{2}, f + \frac{\Delta f}{2}\right]$

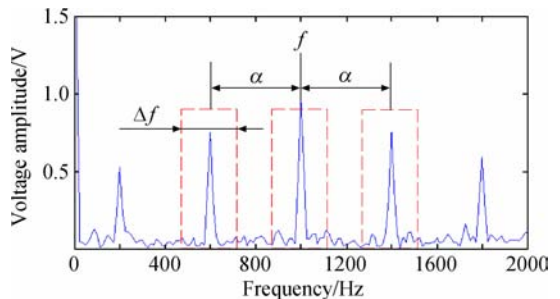


图 1 边带滤波器示意图

Fig. 1 Schematic of the band-pass filter

$f + \frac{\Delta f}{2}$ 滤波后的信号。滤波器的输出可以用来计算 3 种谱成分的关系以用来作为反映调制现象的一种指标。SC 或者 SCD 作为常用的指标定义为

$$X_{\frac{1}{\Delta f}}(t, f) \triangleq \int_{t-\frac{1}{2\Delta f}}^{t+\frac{1}{2\Delta f}} \exp(-j2\pi ft) dt \quad (7)$$

式中 $X_{\frac{1}{\Delta f}}(t, f)$ 代表信号 $x(t)$ 在窄频带 $\left[f - \frac{\Delta f}{2}, f + \frac{\Delta f}{2}\right]$ 滤波后信号的复包络

$$X_{\frac{1}{\Delta f}}(t, f) \triangleq \int_{t-\frac{1}{2\Delta f}}^{t+\frac{1}{2\Delta f}} \exp(-j2\pi ft) dt \quad (8)$$

可以理解为一个时域方窗内的短时 Fourier 变换。

$X_{\frac{1}{\Delta f}}(t, f)$ 和 $X_{\Delta f}(t, f)$ 的关系可以表示为

$$X_{\Delta f}(t, f) = X_{\frac{1}{\Delta f}}(t, f) \exp(j2\pi ft) \quad (9)$$

同式(1)、式(2)SC 可以用循环周期的时间平均来替换式(7)

$$F_{sc, x \Delta f}^a(t, f) = \frac{1}{\Delta f} x_{\Delta f} \left(t, f + \frac{\alpha}{2} \right) \cdot x_{\Delta f}^* \left(t, f - \frac{\alpha}{2} \right) \exp(-j2\pi \alpha t) \quad (10)$$

据此, SC 可以表示为如下:

$$F_{sc, x}^a(t, f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T \Delta f} \int_T x_{\Delta f} \left(t, f + \frac{\alpha}{2} \right) \cdot x_{\Delta f}^* \left(t, f - \frac{\alpha}{2} \right) \exp(-j2\pi \alpha t) dt \quad (11)$$

根据边带滤波器(图 1)及式(11), $x_{\Delta f}(t, f + \alpha)$ 与 $x_{\Delta f}(t, f)$ 之间谱相关密度可以表示为如下:

$$F_{sc, x}^a \left(f + \frac{\alpha}{2} \right) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T \Delta f} \int_T x_{\Delta f}(t, f) \cdot x_{\Delta f}^*(t, f + \alpha) \exp(-j2\pi \alpha t) dt \quad (12)$$

类推, $x_{\Delta f}(t, f + \alpha)$ 与 $x_{\Delta f}(t, f)$ 之间的谱相关密度可以表示为

$$F_{sc, x}^a \left(f - \frac{\alpha}{2} \right) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T \Delta f} \int_T x_{\Delta f}(t, f) \cdot x_{\Delta f}^*(t, f - \alpha) \exp(j2\pi \alpha t) dt \quad (13)$$

此处 f 成为两种滤波成分的中心频率是由于式(12)、式(13)的频移造成的。

为了检查间距为循环频率 α 三种谱成分的关系, 这里将式(12)、式(13)相乘, 对于一个特定的 Δf , 关于参数 f 和 α 的方程成为改进的谱相关分布, 可表示为

$$F_{isc, \Delta f}^{psc}(f, \alpha) = F_{sc, x}^a \left(f + \frac{\alpha}{2} \right) F_{sc, x}^a \left(f - \frac{\alpha}{2} \right)^* \quad (14)$$

式中上标 psc 表示谱相关内积。

ISC 谱图可以通过取调制密度分布的绝对值, 并将其表示在关于 f 和 α 的二维平面上得到, 它表示了载频 f 和调制频率 α 的关系。

1.3 集成改进谱相关

综上所述可知, ISC 是关于载频 f 和调制频率 α 的函数。在旋转机械实际故障诊断中, 往往忽略载频而只关注调制频率; 只需提取出调制频率即可。基于此, 集成 ISC 分布被提出, 其公式可表示为如下:

$$F_{isc, f_1}^{f_2}(\alpha, \Delta f) = \int_{f_1}^{f_2} F_{isc, \Delta f}(f, \alpha) df \quad (15)$$

2 仿 真

用式(16)所示的滚动轴承单一故障数学模型模^[45]拟滚动轴承的内、外圈故障。图 2(a)为滚动轴承外圈故障, 图 2(b)为滚动轴承内圈故障, 图 2(c)为随机噪声, 图 2(d)为图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)所示信号的合成信号, 用于模拟滚动轴承内外圈复合故障信号。设定采样频率 $f_s = 16384$ Hz, 转频 $f_r = 12$ Hz, 外圈故障通过频率 $f_o = 57$ Hz, 内圈故障通过频率 $f_i = 103$ Hz, τ_i 为滚动体相对于滚道的微小随机滑动, 假定其服从正态分布, 标准差为转速的 0.5%。

$$\begin{cases} x(t) = s(t) + n(t) = \sum_i A_i h(t - iT - \tau_i) + n(t) \\ A_i = A_0 \cos(2\pi f_r t + \phi_A) + C_A \\ h(t) = \exp(-Bt) \cos(2\pi f_n t + \phi_w) \end{cases} \quad (16)$$

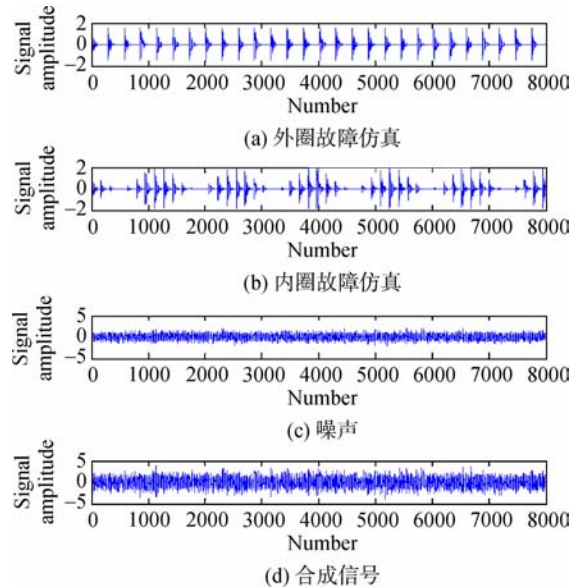


图 2 滚动轴承复合故障仿真

Fig. 2 Compound fault simulation of rolling bearing

图 2(d)所示信号相对应的包络解调谱如图 3 所示,从中虽然可以提取出滚动轴承外圈故障特征频率的基频,但不能提取出其谐频;此外无法得到滚动轴承内圈故障的任何信息。

图 2(d)所示信号相对应的 SC,ISC 及 IISC 时频图分别如图 4(a)、图 4(b)及图 5 所示:从中

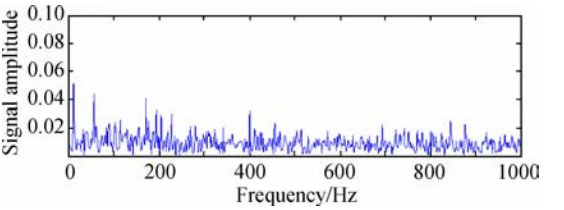


图 3 图 2(d)所示信号的包络解调谱
Fig. 3 Envelope demodulation spectrum of the signal shown in Fig. 2(d)

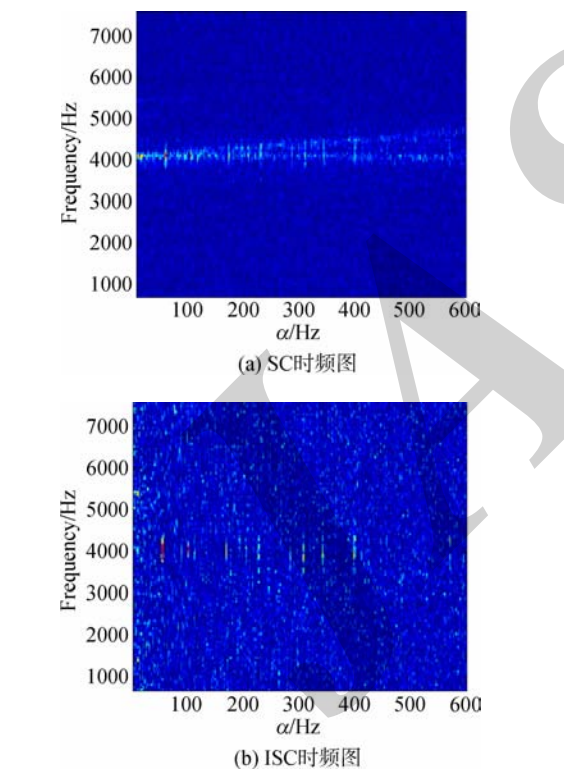


图 4 图 2(d)所示信号的两时频分析结果
Fig. 4 Results of two time-frequency analysis of the signal shown in Fig. 2(d)

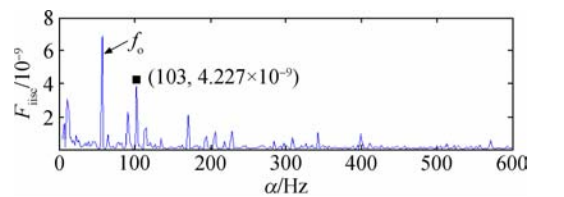


图 5 图 2(d)所示信号的 IISC 谱
Fig. 5 IISC spectrum of the signal shown in Fig. 2(d)

可以看出强噪声影响下信号的 ISC 及 IISC 时频分析方法能更好地提取其故障特征。

3 试 验

以 UN205 滚动轴承为实验轴承进行实验。试件相关参数如表 1 所示。实验台照片如图 6 所示。实验过程中,轴承内圈随主轴旋转,外圈固定。通过线切割加工轴承内圈外圈及滚动体故障,故障如图 7 所示。根据表 1 相关参数及式(17)~式(19)滚动轴承故障特征频率计算公式得到试件的外圈、内圈及滚动体故障特征频率分别为 $f_o=64.41\text{ Hz}$, $f_i=95.38\text{ Hz}$, $f_b=5.38\text{ Hz}$ 。

表 1 试件轴承相关参数					
Table 1 Parameters of the bearing specimen					
Type	Ball number	Ball diameter/mm	Pitch diameter/mm	Contact angle/(°)	Motor speed/(r/min)
NU205	12	7.5	39	0	800



图 6 实验台照片
Fig. 6 Photo of experiment rig

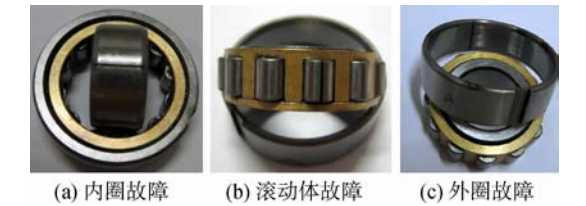


图 7 试件故障
Fig. 7 Faults of the specimen

$$f_o = \frac{Z}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) f_r \quad (17)$$

$$f_i = \frac{Z}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right) f_r \quad (18)$$

$$f_b = \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d \cos \beta}{D} \right)^2 \right] f_r \quad (19)$$

复合故障信号的时域图及相应的包络解调谱如图 8(a)、图 8(b)所示。由图 8(b)所示包络解调结果仅仅可以得到内圈故障特征基本频率。无法得到外圈及滚动体故障的任何故障特征信息。

图 9(a)、图 9(b)分别是滚动轴承复合故障实验信号相对应的两种时频分析结果：后者相对于

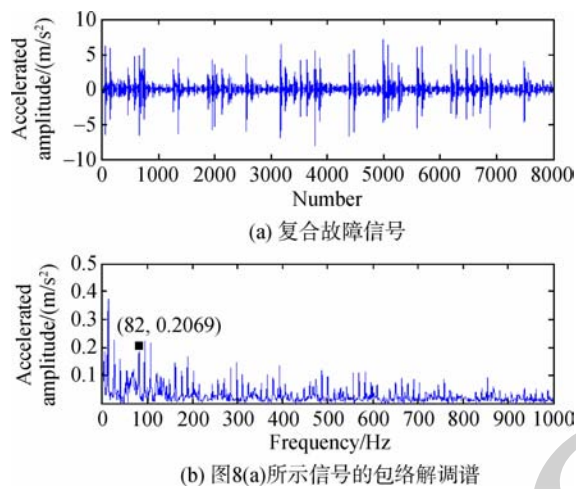


图 8 复合故障实际实验信号
Fig. 8 Experiment signal of compound faults

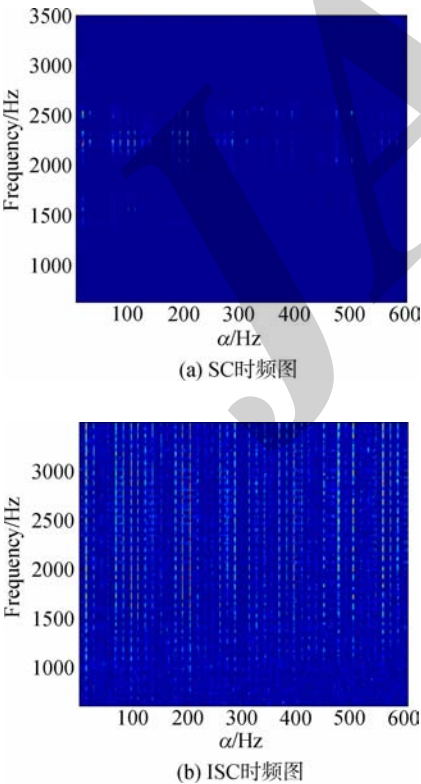


图 9 滚动轴承复合故障实验信号的两种时频分析结果
Fig. 9 Results of two time-frequency analysis of the compound fault experiment signal of rolling bearing

前者明显具有更高的时频分辨率,说明了改进后的时频分析方法即 ISC 方法具有更强的抗噪能力。为更直观地表达故障特征提取结果,图 10 为滚动轴承复合故障实验信号的 IISC 谱,图中滚动轴承的 3 种故障特征频率及其谐频成分被大致提取出来(滚动体相对于滚道的随机滑动造成了实际提取故障特征频率与理论计算特征频率的误差),再次证明了所述方法在滚动轴承复合故障诊断中的可行性与有效性。

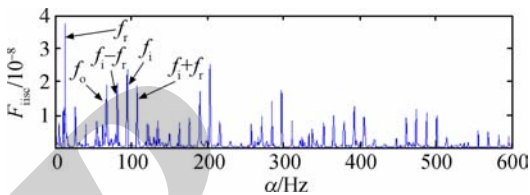


图 10 滚动轴承复合故障实验信号的 IISC 谱
Fig. 10 IISC spectrum of the compound fault experiment signal of rolling bearing

4 结 论

提出基于循环统计量 SC 分析方法的改进分析方法即 ISC,经验证改进方法具有更强的抗噪能力;基于滚动轴承故障特征提取时忽略载频而只需提取调制频率的特点,将 ISC 方法进一步改进提出集成 ISC(IISC)谱分析方法。IISC 只提取出滚动轴承发生故障时的调制频率,频谱分析结果的谱线具有更直观更清晰的分析结构。所述的改进的时频及谱分析方法用于滚动轴承的复合故障诊断,通过仿真和实验验证了所述方法的可行性与有效性。

参考文献:

[1] 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.

[2] DONG G M, CHEN J. Noise resistant time frequency analysis and application in fault diagnosis of rolling element bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33(2): 212-236.

[3] KANKAR P K, SHARMA S C, HARSHA S P. Fault diagnosis of rolling bearing using cyclic autocorrelation and wavelet transform[J]. Neurocomputing, 2013, 110(8): 9-17.

[4] PURUSHOTHAM V, NARAYANAN S, PRASAD S S A N. Multi-fault diagnosis of rolling bearing elements using wavelet analysis and Hidden Markov model based fault recognition[J]. NDT and E International, 2005, 38(8): 654-664.

[5] ABBASION S, RAFSANJANI A, FARSHIDIANFAR A, et al. Rolling element bearings multi-fault classification based on wavelet denoising and support vector mahine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(7): 2933-2945.

[6] LEI Y G, HE Z J, ZI Y Y. Application of a novel hybrid intelligent method to compound fault diagnosis of locomotive roller bearings[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2008, 130(3): 034501. 1-034501. 6.

[7] ŽVOKELJ M, ZUPAN S, PREBIL I. Multivariate and multiscal monitoring of large-size low-speed bearings using ensemble mode decomposition method combined with principal component analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(1): 1049-1067.

[8] LI Z X, YAN X P, TIAN Z, et al. Blind vibration component separation and nonlinear feature extraction applied to the nonstationary vibration signals for gearbox multi-fault diagnosis[J]. Measurement, 2013, 46(1): 259-271.

[9] 陈果. 滚动轴承表明损伤故障智能诊断新方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(1): 44-49.

CHEN Guo. New intelligent diagnosis method for ball bearing faults due to surface damage[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(1): 44-49. (in Chinese)

[10] 陈果. 滚动轴承早期故障的特征提取与智能诊断[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 362-367.

CHEN Guo. Feature extraction and intelligent diagnosis for ball bearing early faults[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinca, 2009, 30(2): 362-367. (in Chinese)

[11] 王波, 刘树林, 蒋超, 等. 基于量子遗传算法优化 RVM 的滚动轴承智能故障诊断[J]. 振动与冲击, 2015, 34(17): 207-212.

WANG Bo, LIU Shulin, JIANG Chao, et al. Rolling bearings' intelligent fault diagnosis based on RVM optimized with quantum genetic algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(17): 207-212. (in Chinese)

[12] 谢三毛. 基于时变自回归模型与神经网络的滚动轴承故障智能诊断[J]. 轴承, 2014(10): 43-46.

XIE Sanmao. Fault intelligent diagnosis for rolling bearing based on time varying autoregressive model and neural network[J]. Bearing, 2014(10): 43-46. (in Chinese)

[13] FENG Z P, LIANG M, CHU F L. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(1): 165-205.

[14] 毕果, 陈进, 周福昌, 等. 调幅信号谱相关密度分析中白噪声影响的研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 75-78.

BI Guo, CHEN Jin, ZHOU Fuchang, et al. Influence of the noise on spectral correlation density analysis of am signal[J]. Journal of vibration and shock, 2006, 25(2): 75-78. (in Chinese)

[15] ANTONI J, BONNARDOT F, RAAD A, et al. Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(6): 1285-1314.

(编辑:王碧琚)