

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220318-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220318

改进 TFCA 方法的滚动轴承故障 AE 信号特征提取

于 洋¹, 李 赞¹, 杨 平¹, 唐 金², 赵 鑫², 梁哲铭³

(1. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110870;

2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;

3. 中国航空工业集团有限公司 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

摘 要: 针对时频相干方法(time-frequency coherence analysis, TFCA)不能分析单通道信号的问题, 提出了一种新的时频相干方法, 通过平均估计算子实现对单通道信号分析。利用软岛全息声发射系统和旋转机械模拟平台进行了滚动轴承内圈、外圈故障声发射(acoustic emission, AE)检测, 研究了低信噪比条件下滚动轴承故障特征周期提取。将所提方法与传统时频相干、短时傅里叶变换、小波相干方法进行对比研究, 并进行实验验证。仿真和实验结果表明: 所提方法明显优于其他时频方法, 时频聚集性高、抗噪性能强, 并能准确提取轴承故障周期特征。

关 键 词: 声发射; 时频相干; 低信噪比; 滚动轴承; 单通道

中图分类号: V263.6; TH133.33

文献标志码: A

Feature extraction of AE signal for rolling bearing fault by improved TFCA method

YU Yang¹, LI Yun¹, YANG Ping¹, TANG Jin², ZHAO Xin², LIANG Zheming³

(1. School of Information Science and Engineering,

Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;

3. Shenyang Aircraft Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Limited, Shenyang 110035, China)

Abstract: In order to solve the problem of traditional time-frequency coherence analysis (TFCA) method's failure to analyze the single-channel signal, a new time-frequency coherence method was proposed. The new method can analyze the single-channel signal through the average estimation operator. The soft-land full-information acoustic emission (AE) system and the rotating machinery simulation platform were used to detect the inner ring and outer ring faults of the rolling bearing. The study focused on the extraction of fault characteristic periods of rolling bearings under conditions of low signal-to-noise ratio. The proposed method was compared with the traditional time-frequency coherence, short-time Fourier transform, wavelet coherence methods, and was verified experimentally. The simulated and

收稿日期: 2022-05-09

基金项目: 中国航空发动机集团应用创新项目(630010504); 辽宁省教育厅重点攻关项目(LZGD2019005)

作者简介: 于洋(1967—), 女, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事装备故障监测与健康管理研究。E-mail: yuy@sut.edu.cn

通信作者: 李赞(1993—), 男, 博士生, 主要从事机械装备故障诊断研究。E-mail: 1786308837@qq.com

引用格式: 于洋, 李赞, 杨平, 等. 改进 TFCA 方法的滚动轴承故障 AE 信号特征提取[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220318. YU Yang, LI Yun, YANG Ping, et al. Feature extraction of AE signal for rolling bearing fault by improved TFCA method[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220318.

experimental results showed that the proposed method is superior to other time-frequency methods. The proposed method can accurately extract the period characteristics of fault signal, and exhibit high time-frequency aggregation and strong anti-noise performance.

Keywords: acoustic emission; time-frequency coherence; low signal-to-noise ratio; rolling bearing; single channel

滚动轴承应用于航空发动机主轴、飞行器、机车、风电动机组中,也是旋转机械系统中的易损件之一^[1]。据统计,旋转机械故障中轴承占比约为 30%^[2],严重缺陷或损伤往往会导致设备的损坏,造成经济损失。因此,对滚动轴承采取有效的故障诊断十分重要。

对于滚动轴承故障检测的重点在于早期故障排查,表面损伤、疲劳损伤是旋转机械滚动轴承常见的故障,其故障信号比较微弱,噪声较大,Mba^[3]认为与振动检测技术相比较,声发射检测技术对旋转机械早期损伤更敏感。声发射(acoustic emission, AE)是指材料因内部应力超过了屈服极限,成为不可逆的塑性变形阶段快速释放出应变能而产生瞬态弹性波的一种现象^[3]。目前,声发射检测技术逐渐应用于各种加工和工业设备的状态监测中。

近年来,卢学军等^[4]学者使用振动传感器和 DN2 精密声级计采集了 3 个方向的振动信号和轴端的噪声信号,通过相干分析对变速箱进行了故障诊断。李怀俊等^[5-6]学者对正常与故障信号进行采集,并得到输入功率信号,分别进行相干分析,得出了输入能量与信号之间的响应关系。为了可以抵消测试信号噪声。杨德森等^[7]学者采用偏相干方法,通过层次分析,解决了偏相干分析中输入间因果关系和强相干分离声源问题。金媛媛^[8]学者利用偏相干法,构建了一个多输入单输出的模型进行噪声识别。但偏相干分析法必须满足线性关系,输入信号和输出信号是无延时的,因此为了更好地将相干分析进行应用。许慰玲^[9]学者采用 Morlet 小波相干分析和 Harmonic 小波相干分析,展开研究了两者小波基不同的特点和差异。任海锋等^[10]学者对每一个测点信号进行交叉小波变换,进一步得到相干谱,从中诊断出裂纹故障。孙宝源^[11]学者根据曲轴故障信号,采用小波分析进行特征提取,通过时频相干分析诊断曲轴故障。贾继德等^[12]学者采集曲轴内部 3 个方向振动信号和外部信号,每一个方向分别与外部信号进行小波相干分析,从而诊断曲轴轴承磨损故障。

通过学者的研究发现:①相干分析或时频相干分析,都需要两个不同信号相干进行故障特征研究;②使用偏相干分析,必须满足线性关系;③小波相干方法,需要选取小波基函数,其适应性差。

工程上,旋转机械结构复杂,工作条件多样性,对传感器等附件安装位置和质量有着严格限制,测点数量有限,最佳采集处只能安装一个传感器(即单通道采集信号),如何改进时频相干方法,实现单通道采集信号分析,具有一定工程意义。

基于此,根据声发射信号的特点和时频相干的优势,引进平均估计算子,改进时频相干方法并进行仿真研究,可实现对单通道采集信号分析,有效地解决传统方法中需双通道采集信号的不足。利用机械故障实验平台进行了滚动轴承外圈内圈故障的声发射检测,验证了新方法的有效性,并且在低信噪比条件下实现了准确的轴承故障声发射信号周期特征提取。

1 时频相干方法

1.1 相干函数

相干函数是在频域上描述系统输入或输出相关程度的实值函数。对于随机信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的自相关函数为

$$R_x(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (1)$$

$$R_y(\tau) = E[y(t)y(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)y(t+\tau) dt \quad (2)$$

随机信号 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的互相关函数为

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (3)$$

式(1)~式(3)中 τ 为时移,分别对式(1)~式(3)两边进行傅里叶变换,可以得到随机信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的自功率谱密度函数为 $S_x(f)$ 、 $S_y(f)$,随机信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的互功率谱密度函数为

$S_{xy}(f)$ 。

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4)$$

$$S_y(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_y(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

如果满足式(7), 则称为相干函数^[13]。

$$C_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|}{\sqrt{S_x(f) \cdot S_y(f)}} \quad (7)$$

从式(7)中可以得出 $C_{xy}(f) \leq 1$; $C_{xy}(f)$ 越大, 表明随机信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的相似程度越高, 如果通过任意线性时不变系统的结果, 则 $C_{xy}(f) \equiv 1$ 。

1.2 时频相干方法

时频相干分析(time-frequency coherence analysis, TFCA)就是相干函数和信号时频表示的基础上引申的一种分析方法, 刻画了两个随机过程不同时刻的内在联系在频域中的描述^[14-15]。运转的故障轴承会引起接触面的弹性波冲击而产生声发射信号, 此时的声发射信号呈非线性与高频特性, TFCA 方法可以有效降噪的同时, 识别 AE 信号的故障特征。

假设两个随机信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 时频分布为 $X(\tau, f)$ 、 $Y(\tau, f)$, 则两个信号之间的时频互功率谱定义为式(8)表示

$$s_{xy}(t, f) = X(t, f) \cdot Y^*(t, f) \quad (8)$$

两个随机信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 信号的时频自功率谱定义为式(9)、式(10)

$$s_x(t, f) = |X(t, f)|^2 \quad (9)$$

$$s_y(t, f) = |Y(t, f)|^2 \quad (10)$$

则两个信号的时频相干可以式(11)表示

$$c_{xy}(t, f) = \frac{|s_{xy}(t, f)|}{\sqrt{s_x(t, f) \cdot s_y(t, f)}} \quad (11)$$

短时傅里叶变换是以傅里叶变换为基础提出, 其表达式如下式^[16-17]

$$S_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h^*(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (12)$$

式中 t 和 f 表示时间和频率, $x(\tau)$ 表示待分析的信号, $h^*(\tau - t)$ 表示滑移窗函数的共轭函数。同理, 根据式(8)~式(10)的表示方法, 随机信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的短时傅里叶自功率谱定义为式(13)、式(14)

表示, 短时傅里叶互功率谱定义为式(15)表示

$$P_x(t, f) = |S_x(t, f)|^2 \quad (13)$$

$$P_y(t, f) = |S_y(t, f)|^2 \quad (14)$$

$$P_{xy}(t, f) = P_x(t, f) \cdot P_y^*(t, f) \quad (15)$$

因此, 式(13)~式(15)代入到式(11)中, 则短时傅里叶变换的时频相干表示为式(16)

$$C_{xy}(t, f) = \frac{|P_{xy}(t, f)|}{\sqrt{P_x(t, f) \cdot P_y(t, f)}} \quad (16)$$

时频相干如式(11)是对平稳信号的分析方法, 对于轴承故障检测采集的声发射信号是一种非平稳信号, 若用来分析轴承故障声发射信号会有一定误差。因此, 根据式(11)得到了短时傅里叶变换的时频相干方法, 如式(16)表示, 应用于滚动轴承故障声发射信号的周期特征提取, 对滚动轴承进行故障诊断。

1.3 时频相干方法存在的问题

通过式(11)、式(16)发现, 对于轴承故障检测应用时频相干方法需采集两组不同信号进行时频相干分析。对于工程上, 机械设备结构复杂度高, 工况多样, 对传感器等附件安装位置和质量有着严格限制, 测点数量有限, 最佳采集处只能安装一个传感器, 那么, 利用时频相干方法分析最佳位置采集的信号(即单通道采集信号)势在必行。若单通道采集的滚动轴承故障声发射信号为 $g(t)$ 表示, 令随机信号 $x(t) = g(t)$, $y(t) = g(t)$ 代入到式(8)~式(10), 则可得出

$$s_{gg}(t, f) = g(t, f) \cdot g^*(t, f) \quad (17)$$

$$s_g(t, f) = |g(t, f)|^2 \quad (18)$$

进一步, 可得出

$$|s_{gg}(t, f)| = \sqrt{s_g(t, f) \cdot s_g(t, f)} \quad (19)$$

同理, 将单通道采集的滚动轴承故障声发射信号 $g(t)$ 代入到式(13)~式(15), 则可得出

$$|P_{gg}(t, f)| = \sqrt{P_g(t, f) \cdot P_g(t, f)} \quad (20)$$

将式(19)与式(20)分别代入到式(11)与式(16), 可知 $c_{gg}(t, f)$ 和 $C_{gg}(t, f)$ 恒为常数, 因此, 利用传统时频相干方法只能分析两个不同的信号, 不能分析单通道采集信号, 在实际应用中具有局限性。如何改进传统时频相干方法实现单通道信

号分析具有一定意义。

2 改进时频相干方法

针对文中第 1.3 节这一问题的产生,引入平均估计算子,如式(21)表示

$$\bar{\mu}_x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (21)$$

式中 $x(n)$ 为一个随机离散时间序列, N 为序列 $x(n)$ 的长度,当随机离散时间序列长度足够长时,平均估计 $\bar{\mu}_x$ 能精确逼近真实均值 μ_x 。

根据平均估计算子的思想,引入到短时傅里叶变换的时频相干方法中,实现单通道信号分析。

随机离散时间序列 $x(n)$ 进行短时傅里叶变换,长度为 N ,将随机离散时间序列 $x(n)$ 进行加窗并傅里叶变换(FFT)运算,如式(22)表示

$$F_{xi}(k) = F[x(n) \cdot h(i-n)] \quad (22)$$

式中 $h(i-n)$ 为滑动窗, i 为当前滑动到离散时间序列 $x(n)$ 的位置, F 代表傅里叶变换, $F_{xi}(k)$ 为 $x(n)$ 加窗后的傅里叶变换。

引入平均估计算子,计算当前段 FFT 的平均值,如式(23)表示

$$\bar{F}_{xi} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n F_{xi}(k) \quad (23)$$

式中 n 为当前位置 $F_{xi}(k)$ 的长度。使当前位置 $F_{xi}(k)$ 的每一个数值都为 $\bar{F}_{xi}$,则可得出 $\bar{F}_{xi}(k)$ 。即得到改进后的短时傅里叶变换,如式(24)表示

$$\bar{S}_x(i,k) = \bar{F}_{xi}(k) \quad (24)$$

因此,引入平均估计算子的短时傅里叶时频相干即可重新定义为式(25)

$$C_x(i,k) = \frac{S_x(i,k) \cdot S_x^*(i,k)}{[\bar{S}_x(i,k)]^2 \cdot [\bar{S}_x(i,k)]^2} = \frac{|S_{xx}(i,k)|}{\sqrt{\bar{S}_x(i,k) \cdot \bar{S}_x(i,k)}} \quad (25)$$

式中 $S_x(i,k)$ 为传统短时傅里叶变换, $\bar{S}_x(i,k)$ 为引入平均估计算子的短时傅里变换,经过引入平均估计算子,解决了传统时频相干方法分析单通道采集信号时,时频相干系数恒为常数的问题,实现单通道信号分析。

3 仿真研究

仿真研究采用滚动轴承外圈故障信号为

$g(t)$,为有效模拟滚动轴承的工作环境,式(26)中加入信噪比为 -15 dB 的高斯白噪声 $n(t)$,低信噪比信号为 $G(t)$ 。

$$g(t) = 0.05 \sin(2\pi \times 1000t) e^{-2\pi \times 80t} \quad (26)$$

$$G(t) = 0.05 \sin(2\pi \times 1000t) e^{-2\pi \times 80t} + n(t) \quad (27)$$

仿真信号的采样频率为 1 MHz,采样时间为 80 ms。轴承外圈故障仿真波形如图 1 所示,外圈故障时间间隔为 31 ms。频谱如图 2 所示,由频谱图中可以得出滚动轴承外圈的故障频率为 32 Hz,并且轴承故障主要频率集中在 $0 \sim 2000$ Hz。低信噪比轴承外圈故障仿真波形如图 3 所示,频谱如图 4 所示。图 3 中轴承故障信号已被噪声所淹没,图 4 中的主要频率也是集中在 $0 \sim 2000$ Hz 之内。

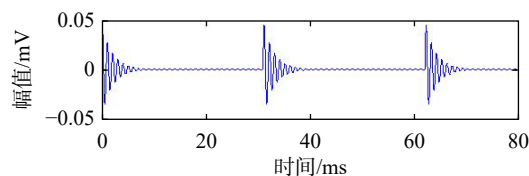


图 1 仿真轴承故障时域图

Fig. 1 Time domain diagram of simulated bearing faults

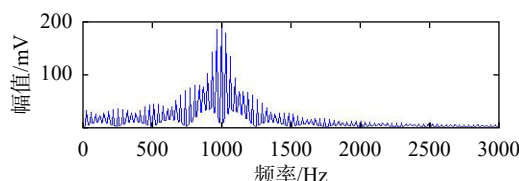


图 2 仿真轴承故障频域图

Fig. 2 Frequency domain diagram of simulated bearing faults

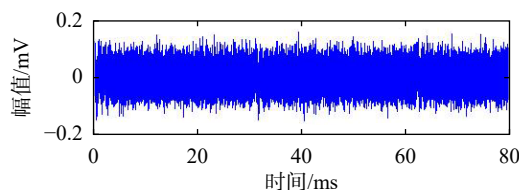


图 3 仿真轴承故障时域图(信噪比为 -15 dB)

Fig. 3 Time domain waveform of fault bearing simulation signal (signal-to-noise ratio is -15 dB)

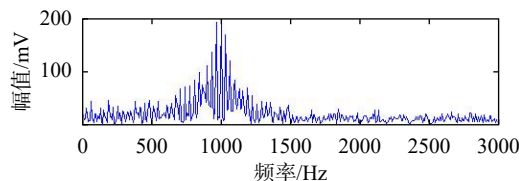


图 4 仿真轴承故障频域图(信噪比为 -15 dB)

Fig. 4 Frequency domain waveform of fault bearing simulation signal (signal-to-noise ratio is -15 dB)

3.1 传统时频相干分析

传统时频相干方法,是以两个信号相干对故障特征进行研究,仿真中分别取式(26)轴承外圈故障信号,式(27)低信噪比轴承外圈故障信号,两者进行时频相干如图 5 所示,在频率 0~2 000 Hz 范围内,轴承故障周期特征不明显,辨识度低,这是由于受到低信噪比-15 dB 的影响,无法将轴承外圈故障信号中的故障周期进行提取。由此可见,实际工程应用中,两个通道所采集的信号噪声强弱程度无法提前预知,会对故障周期特征提取造成影响。

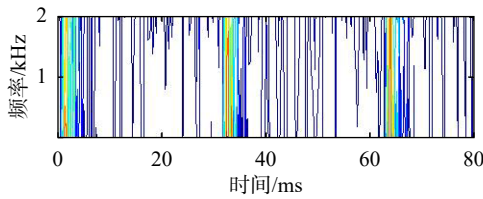


图 5 传统时频相干方法

Fig. 5 Traditional time-frequency coherent method

3.2 本文方法分析

改进的时频相干方法,由传统时频相干需双通道进行分析改进为单通道信号分析。式(26)无噪声的轴承外圈故障信号时频相干分布,如图 6 所示。式(27)低信噪比轴承外圈故障信号时频相干分布,如图 7 所示。由图 6、图 7 可知,轴承外圈故障周期明显,主要集中在 0~2 000 Hz 范围内,与频谱图中的主要频率段相对应。图 7 中含有少量噪声,与图 5 传统时频相干方法对比,图 7 辨识度较高,可准确提取轴承故障周期。轴承外圈故

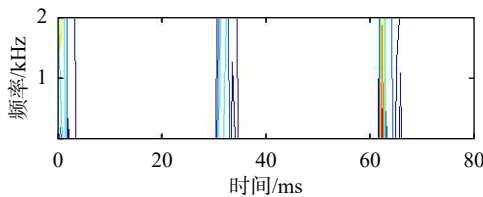


图 6 本文方法(无噪)

Fig. 6 New method (no noise)

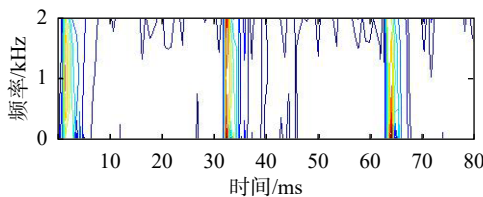


图 7 本文方法(信噪比为-15 dB)

Fig. 7 New method (signal-to-noise ratio is -15 dB)

障仿真周期时间间隔为 31 ms,滚动轴承的故障频率为 32 Hz。

3.3 不同时频方法分析

低信噪比情况下,轴承故障的短时傅里叶时频分布如图 8 所示,与图 7 相比,图 8 虽可以看出轴承故障呈周期性,但由于时频聚集性弱,噪声干扰大,无法准确得出轴承故障时间间隔。小波相干分析中同样使用式(26)与式(27)两种信号,小波相干时频分布如图 9 所示。与图 7 相比,图 9 中呈现轴承故障周期性,但受两个时间序列和小波基函数的影响较大,轴承故障时间间隔不能准确提取。

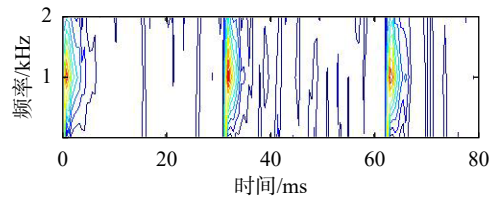


图 8 短时傅里叶变换

Fig. 8 Short-time Fourier transform

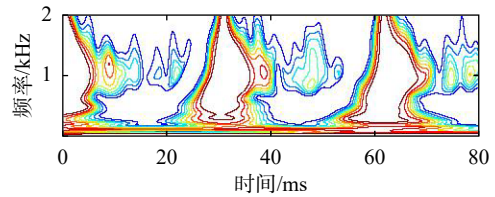


图 9 小波相干方法

Fig. 9 Wavelet coherence method

为了系统地比较以上几种时频方法的时频聚集度,表 1 定量给出了各种时频方法的 3 阶 Rényi 熵, Rényi 熵值越小代表时频聚集度越高;相反 Rényi 熵值越大,代表时频聚集度越低^[18]。

表 1 时频聚集度表

Table 1 Time-frequency aggregation table

不同方法	Rényi 熵值
传统时频相干方法	1.01
本文方法	0.94
短时傅里叶变换	2.10
小波相干	0.93

通过表 1,可以看出本文方法的时频聚集度有比较大的提高。其中小波相干方法的 Rényi 熵值略低于本文方法,且还处于同一数量级,说明这两种方法具有相近的聚集度。从以上小节的分析中,改进的时频相干方法具有时频聚集度高,

抗干扰能力性强,在低信噪比情况下能有效提取轴承故障周期特征。

4 实验验证

4.1 实验数据采集

轴承局部损伤模式主要包括磨损、裂纹、疲劳剥落。滚动轴承产生损伤时,结合声发射检测机理可知,损伤部位会与轴承其他部分相互摩擦、碰撞,产生周期性的高频弹性波,可利用时频分析方法提取周期信息进行滚动轴承故障诊断。

为了进一步验证所提方法的有效性。将本文方法应用到圆柱滚子轴承故障的诊断中,利用旋转机械故障模拟平台和软岛声发射检测系统进行了实验验证。实验过程中电动机的转速保持为 600 r/min。实验中采用 R15 声发射传感器,传感器安装到更换端轴承座上方并垂直于传动轴,旋转机械平台如图 10 所示,采样频率为 3 MHz。

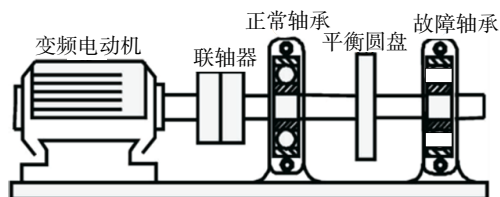


图 10 实验平台

Fig. 10 Experimental platform

实验中轴承外圈与轴承支座固定,内圈随电动机主轴旋转,无载荷,采用 C2 游隙组,可减小振动和噪声。声发射采集仪如图 11(a)所示。测试圆柱滚子轴承的型号为 UN205EM,外圈内圈可拆,并利用线切割技术对轴承的外圈内滚道和内圈外滚道进行各 1 处长方形槽损伤预置,故障尺寸为 15 mm(长)×0.1 mm(宽)×0.1 mm(深),轴承故障照片如图 11(b)、图 11(c)所示。

圆柱滚子轴承的尺寸参数为节径为 39 mm、外径为 52 mm、内径为 25 mm、滚动体直径为 7.493 mm、滚动体数量为 13 个,由转速及轴承参数可计算出外圈故障的理论特征频率^[19-21]为 52.52 Hz,内圈的故障频率为 77.49 Hz。

4.2 圆柱滚子轴承外圈故障分析

为有效还原现场轴承的工作环境,采集的声发射信号中加入信噪比为-15 dB 的高斯白噪声,波形如图 12(a)所示。由图 12(a)可知,圆柱滚子轴承故障的声发射信号已被噪声完全覆盖,最大幅值为 8.8 mV。图 12(b)为圆柱滚子轴承外圈故



(a) DS5-8A 声发射采集仪



(b) 外圈内滚道故障



(c) 内圈外滚道故障

图 11 采集仪与测试圆柱滚子轴承

Fig. 11 Acquisition instrument and testing cylindrical roller bearings

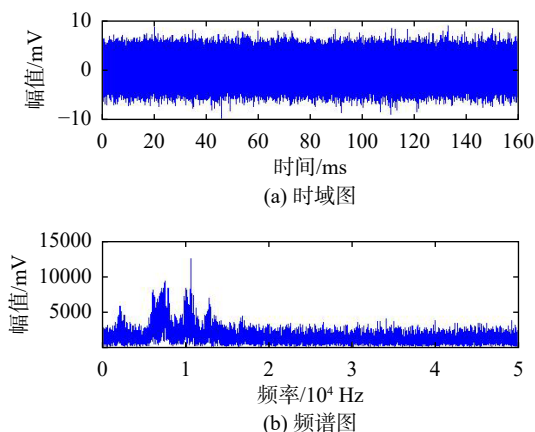


图 12 圆柱滚子轴承外圈故障时域图和频谱图

Fig. 12 Time domain diagram and spectrum of outer ring of cylindrical roller bearing

障的频谱图,频谱图中可观察出主要频率集中在 5~15 kHz,并且已分析不出轴承故障频率。由此可见,需要进一步分析圆柱滚子轴承外圈故障的声发射信号。

圆柱滚子轴承外圈故障声发射信号采用本文方法进行分析,得到时频分布如图 13(a)所示。由图 13(a)可知,轴承外圈故障的声发射周期特征明显,干扰噪声小,主要体现在 5~15 kHz 范围内,与图 12(b)主要频率段范围一致,提取周期时间间隔为 $T_0=19.17$ ms,即外圈故障频率为 $f_0=52.16$ Hz。

接下来,应用传统时频相干方法和短时傅里叶变换进行分析,得到时频分布如图 13(b)、图 13(c)所示。由图 13(b)可知,圆柱滚子轴承外圈

故障的声发射周期不明显, 干扰噪声较大, 传统相干方法由实验采集的轴承故障声发射信号与加入低信噪比-15 dB 的高斯白噪声信号进行相干, 受低信噪比信号影响较大, 所以轴承故障周期特征不能准确提取。由图 13(c)可知, 在 5~15 kHz 范围内, 虽有声发射故障周期特征出现, 但时频聚集性弱, 未能明显提取故障周期。因此, 本文方法(图 13(a))与传统时频相干方法(图 13(b))、短时傅里叶变换(图 13(c))相比, 处理结果更佳, 时频聚集性好, 抗噪声能力强, 在低信噪比情况下能准确提取故障周期。

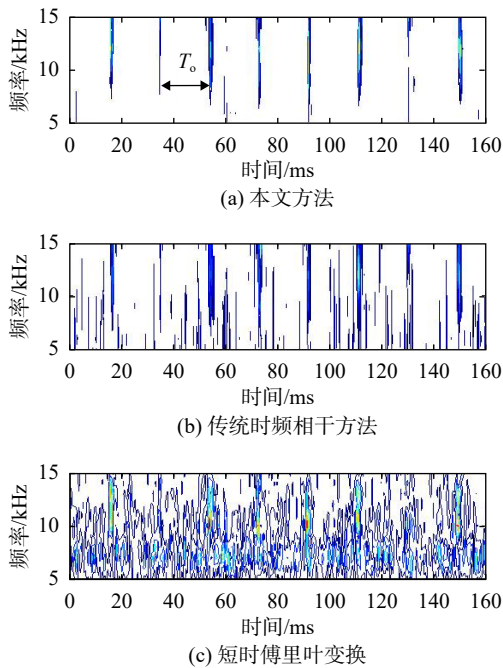


图 13 圆柱滚子轴承外圈故障时频分布图

Fig. 13 Time-frequency distribution diagram of outer ring faults in cylindrical roller bearing

4.3 圆柱滚子轴承内圈故障分析

同样, 采集圆柱滚子轴承内圈故障声发射信号中加入信噪比-15 dB 的高斯白噪声, 波形如图 14(a)所示, 最大幅值为 7.5 mV。频谱如图 14(b)所示, 由图 14(b)可知, 主要能量集中在 0~20 kHz 范围内。圆柱滚子轴承内圈故障采用传统时频相干方法、短时傅里叶变换和本文方法进行分析, 得到时频分布如图 15(a)、图 15(b)、图 15(c)所示。

由图 15(a)、图 15(b)可知, 传统时频相干方法和短时傅里叶变换处理的结果不能准确提取内圈故障周期特征, 时频聚集性不强, 抗干扰性弱。由图 15(c)可知, 在 0~20 kHz 范围内, 轴承内圈故障冲击随轴转动, 声发射信号呈周期性出现,

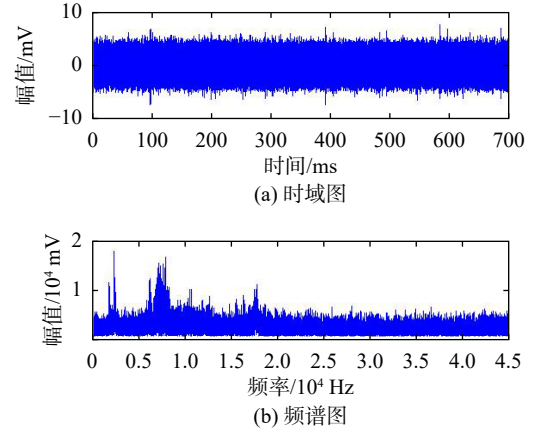


图 14 圆柱滚子轴承内圈故障时域图和频谱图

Fig. 14 Time domain diagram and spectrum of inner ring of cylindrical roller bearing

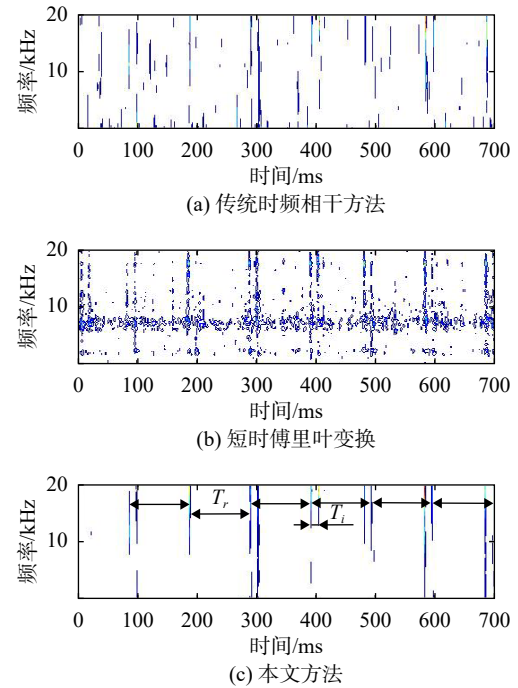


图 15 圆柱滚子轴承内圈故障时频分布图

Fig. 15 Time-frequency distribution diagram of inner ring faults in cylindrical roller bearing

内圈故障周期取决于转频。与传统时频相干方法、短时傅里叶变换相比, 本文方法能有效提取轴承故障周期特征, 周期时间间隔为 $T_r=12.81$ ms, 故障频率为 $f_f=78.06$ Hz, 转频为 $f_r=10$ Hz。因此, 通过引入平均估计算子的短时傅里叶时频相干方法可准确提取低信噪比声发射信号周期特征, 本文所提出方法明显优于传统时频相干方法与短时傅里叶变换方法。

4.4 900、1 200 r/min 恒定工况下分析

接下来, 对转速(R)为 900、1 200 r/min 的恒

定工况进行验证,采集圆柱滚子轴承内、外圈故障声发射信号中加入信噪比-15 dB 的高斯白噪声。在 900 r/min 和 1 200 r/min 工况下,圆柱滚子轴承外圈故障时域图和时频分布图分别如图 16、图 17 所示;在 900 r/min 和 1 200 r/min 工况下,圆柱滚子轴承内圈故障时域图和时频分布图分别如图 18、图 19 所示。由图 16(b)、图 17(b)可知,本文方法可提取出外圈故障周期特征;由图 18(b)、图 19(b)可知,本文方法可提取出内圈故障周期特征。在转速为 600、900、1 200 r/min 的恒定工况下,本文方法可提取出外圈、内圈故障周期特征。

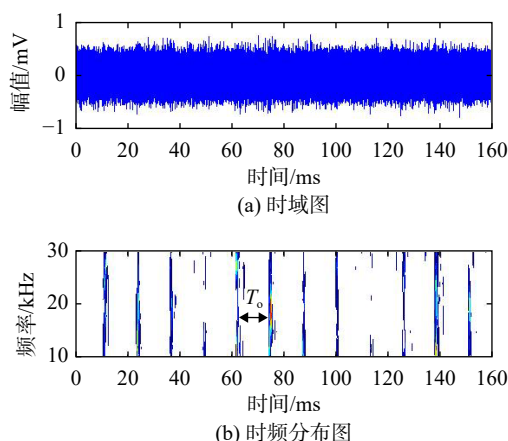


图 16 圆柱滚子轴承外圈故障时域图和本文方法时频分布图
($R=900$ r/min)

Fig. 16 Time domain diagram and time-frequency distribution diagram of outer ring faults in cylindrical roller bearing
($R=900$ r/min)

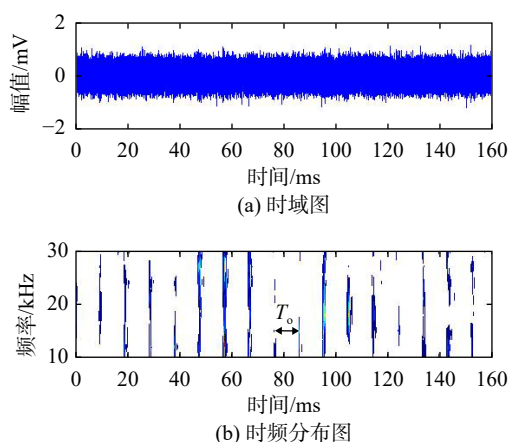


图 17 圆柱滚子轴承外圈故障时域图和本文方法时频分布图
($R=1\,200$ r/min)

Fig. 17 Time domain diagram and time-frequency distribution diagram of outer ring faults in cylindrical roller bearing
($R=1\,200$ r/min)

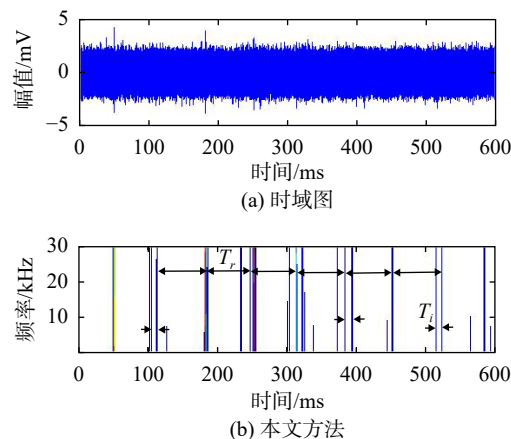


图 18 圆柱滚子轴承内圈故障时域图和时频分布图
($R=900$ r/min)

Fig. 18 Time domain diagram and time-frequency distribution diagram of inner ring faults in cylindrical roller bearing
($R=900$ r/min)

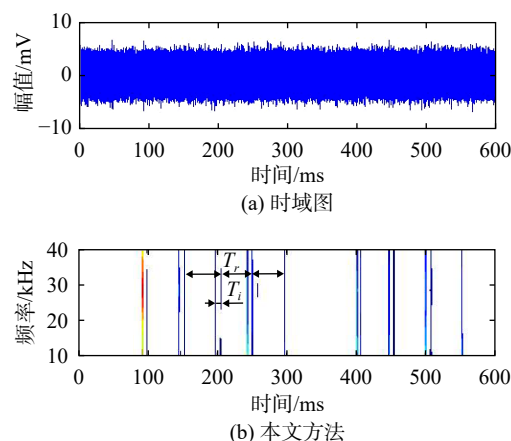


图 19 圆柱滚子轴承内圈故障时域图和时频分布图
($R=1\,200$ r/min)

Fig. 19 Time domain diagram and time-frequency distribution diagram of inner ring faults in cylindrical roller bearing
($R=1\,200$ r/min)

5 结 论

1) 针对传统 TFCA 方法不能分析单个通道采集信号的不足,本文引入平均估计算子,改进传统 TFCA 方法,推导了改进 TFCA 方法的原理及过程,解决传统 TFCA 方法分析单通道信号恒为常数的局限,从中可实现对单通道采集信号分析。

2) 为了验证本文方法有效性,将该方法与传统时频相干、短时傅里叶变换和小波相干方法进行了对比研究。仿真结果表明,本文所提方法能实现对单通道信号分析、时频聚集性高、抗噪能

力强, 验证了本文方法的有效性。

3) 本文方法应用于低信噪比滚动轴承故障声发射信号周期特征提取中, 改进 TFCA 方法适合分析非线性与高频特性的信号, 结合声发射信号特点, 解决了低信噪比下轴承故障声发射信号中周期特征难提取问题。实验结果表明, 在低信噪比情况下, 与其他时频方法相比, 本文方法可以有效分析滚动轴承外圈、内圈故障, 提取周期特征准确。

参考文献:

- [1] 田晶, 王英杰, 刘丽丽, 等. 基于 Birge-Massart 阈值降噪与 EEMD 及谱峭度的滚动轴承故障特征提取[J]. 航空动力学报, 2019, 34(6): 1399-1408.
TIAN Jing, WANG Yingjie, LIU Lili, et al. Fault feature extraction of rolling bearing using Birge-Massart threshold denoising with EEMD and spectral kurtosis[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1399-1408. (in Chinese)
- [2] 王大海, 伍星, 柳小勤. 基于位置补偿系数距离估计的滚动轴承特征损伤敏感性评估算法研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(1): 65-72.
WANG Zhihai, WU Xing, LIU Xiaoqin. Damage sensitivity evaluation algorithm for rolling bearing features based on PCCDET[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(1): 65-72. (in Chinese)
- [3] MBA D. Applicability of acoustic emissions to monitoring the mechanical integrity of bolted structures in low speed rotating machinery: case study[J]. NDT & E International, 2002, 35(5): 293-300.
- [4] 卢学军, 魏智. 变速箱噪声的频谱分析与故障诊断[J]. 振动与冲击, 1999, 18(2): 75-78.
LU Xuejun, WEI Zhi. Spectral analysis and diagnosis of gearbox noise[J]. Journal of Vibration and Shock, 1999, 18(2): 75-78. (in Chinese)
- [5] 李怀俊, 刘越琪, 谢小鹏. 齿轮箱振动与输入能量信号的频域相干分析与关系识别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 175-182.
LI Huaijun, LIU Yueqi, XIE Xiaopeng. Frequency domain coherence analysis and relationship recognition between gearbox vibration and input energy signal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 175-182. (in Chinese)
- [6] 李怀俊, 彭育强. 齿轮传动系统故障诊断方法研究综述[J]. 自动化仪表, 2015, 36(10): 17-20.
LI Huaijun, PENG Yuqiang. Research summary of the default diagnosis approach for gear transmission system[J]. Process Automation Instrumentation, 2015, 36(10): 17-20. (in Chinese)
- [7] 杨德森, 韩闯, 时胜国, 等. 基于倒谱和偏相干分析的噪声源分离方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(1): 16-24.
YANG Desen, HAN Chuang, SHI Shengguo, et al. Separation of noise sources based on the cepstrum and partial coherence theory[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(1): 16-24. (in Chinese)
- [8] 金媛媛. 基于偏相干分析方法的舰船齿轮箱振动噪声源识别[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(18): 121-123.
JIN Yuanyuan. Identification of vibration and noise sources of marine gearbox based on partial coherence analysis[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(18): 121-123. (in Chinese)
- [9] 许慰玲. 基于小波变换的时变相干分析及其应用[D]. 汕头: 汕头大学, 2005.
XU Weiling. Time-varying coherence analysis based on wavelet transform and its application[D]. Shantou: Shantou University, 2005. (in Chinese)
- [10] 任海峰, 潘宏侠. 多振动信号的时频相干多分形特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(6): 1114-1121.
REN Haifeng, PAN Hongxia. Time-frequency coherent multifractal feature extraction of multi-vibration signals[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1114-1121. (in Chinese)
- [11] 孙宝源. 基于振动信号的曲轴故障诊断与研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
SUN Baoyuan. Fault diagnosis and research of crankshaft based on vibration signal[D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)
- [12] 贾继德, 吴春志, 张玲玲, 等. 基于时频相干分析的曲轴主轴承磨损故障诊断研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 114-120.
JIA Jide, WU Chunzhi, ZHANG Lingling, et al. Wear fault diagnosis for crankshaft main bearing based on time-frequency coherence analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 114-120. (in Chinese)
- [13] SUN Qian, YAN Wangji, REN Weixin. Analytical investigation into error propagation of power spectral density transmissibility (PSDT) based on coherence function[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 514: 116429.
- [14] 赵俊龙, 王奉涛, 李宏坤, 等. 局域波时频相干方法及其工程应用[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 624-628.
ZHAO Junlong, WANG Fengtao, LI Hongkun, et al. Local wave time-frequency coherence method and its engineering application[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(4): 624-628. (in Chinese)
- [15] 贾继德, 陈剑, 汪时武. 基于 Morlet 小波相干分析的汽车声源识别[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 194-196.
JIA Jide, CHEN Jian, WANG Shiwu. Identification of vehicle pass-by noise sources based on wavelet coherence[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 194-196. (in Chinese)
- [16] 李婷, 付德义, 薛扬. 基于 AE 与 STFT 的变桨轴承裂纹诊断研究[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(2): 299-303.
LI Ting, FU Deyi, XUE Yang. Research on crack diagnosis of pitch bearing based on AE and STFT [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(2): 299-303. (in Chinese)
- [17] 刘湘楠, 赵学智, 上官文斌. 强背景噪声振动信号中滚动轴承故障冲击特征提取[J]. 振动工程学报, 2021, 34(1): 202-210.
LIU Xiangnan, ZHAO Xuezhi, SHANGGUAN Wenbin. The impact features extraction of rolling bearing under strong background noise[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(1): 202-210. (in Chinese)
- [18] AVIYENTE S, WILLIAMS W J. Minimum entropy time-frequency distributions[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(1): 37-40.
- [19] 邓四二, 张言伟, 王恒迪, 等. 基于 HVD 降噪和多频段频谱叠加的圆柱滚子轴承故障诊断[J]. 振动与冲击, 2018, 37(11): 136-144.
DENG Sier, ZHANG Yanwei, WANG Hengdi, et al. Roller bearings' fault diagnosis based on HVD denoising and multi-band spectra superposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11): 136-144. (in Chinese)

- [20] 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. (in Chinese)
- [21] 栾孝驰, 沙云东, 柳贡民, 等. 基于 WPD-KVI-Hilbert 变换相结合的滚动轴承早期故障特征精准识别[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 356-367.
LUAN Xiaochi, SHA Yundong, LIU Gongmin, et al. Accurate identification for early fault features of rolling bearings based on WPD-KVI-hilbert transform[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 356-367. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)