

改进 IESFOgram 的滚动轴承故障特征提取

陈鑫¹, 郭瑜¹, 伍星^{1,2}, 樊家伟¹, 林云¹

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650500; 2. 云南机电职业技术学院, 云南昆明 650203)

摘要: 针对特征优化图改进包络谱(Improved Envelope Spectrum via Feature Optimization-gram, IESFOgram)算法在轴承随机滑动的条件下不能有效揭示故障特征的问题, 提出了一种基于设置特征频率容差因子的改进 IESFOgram 算法。该方法使用循环谱相关分析提取滚动轴承故障振动分量; 基于轴承随机滑动特性设置特征频率容差, 并计算特征频率各阶次谐波频率与边带积分比值之和, 确定包含轴承故障信息最丰富的解调频带; 包络谱分析辨识轴承故障特征。仿真数据、西储大学部分数据和实验数据的结果分析表明, 所提出方法可有效解决 IESFOgram 算法在轴承随机滑动的条件下失效的缺陷。

关键词: 故障诊断; 滚动轴承; 快速谱峭度; 循环平稳; 特征包络谱

中图分类号: TH165⁺.3; TH133.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)04-0861-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.04.023

引言

滚动轴承是旋转机械中最容易损坏的基础部件之一。当滚动轴承发生故障时, 由于受到刚度非线性、摩擦力和外载荷等因素的影响, 其振动信号往往表现出非平稳特征, 如何从非平稳信号中提取故障特征信息, 在滚动轴承故障诊断中显得尤为重要。

包络分析是轴承故障诊断中广泛应用的有效方法之一, 其可从复杂信号中提取故障调制信息, 抑制干扰成分, 并准确判断故障部位和类型^[1]。如何获取合适的解调频带一直是研究的热点之一, Antoni 提出基于谱峭度自适应获取解调频带的快速谱峭度(Fast Kurtogram, FK)算法^[2], 该算法近十年来得到广泛研究和应用。然而, 在信噪比非常低或存在较强非高斯噪声的工况下, FK 算法确定的解调频带可能无法有效揭示故障特征^[3]。

近 20 年来, 循环平稳分析技术得到迅速发展, 并应用于滚动轴承故障特征提取^[4], 例如: Antoni 等研究了基于循环谱相关分析(Cyclic Spectral Correlation, CSC)^[5]的滚动轴承故障特征提取方法。但该方法无法自适应获取包含故障特征最丰富的解调频带(通常取全频带平均值)。在干扰较大场合可能导致轴承故障特征提取失败。为解决 CSC 算法无法自适应选择故障特征最丰富解调频带的问题,

Mauricio 等提出了抗干扰能力强的特征优化图改进包络谱(Improved Envelope Spectrum via Feature Optimization-gram, IESFOgram)算法^[6], 在轴承故障诊断中得到较好验证。本文在研究该算法及其在滚动轴承故障特征提取方面的应用中发现, IESFOgram 算法中未考虑滚动轴承运行时滚动体与滚道间存在 1%-2% 随机滑动的影响^[7], 可能导致该算法确定的解调频带依然不能清晰揭示故障特征。

为解决上述问题, 本文在考虑轴承随机滑动的基础上提出了一种 IESFOgram 的滚动轴承故障特征提取的改进算法, 以提高 IESFOgram 算法确定优化解调频带的鲁棒性。以仿真数据、西储大学部分轴承数据和实验数据为对象, 将所提方法与 FK 和原 IESFOgram 算法对比分析, 验证了所提方法的优势。

1 IESFOgram 算法

根据统计特征函数周期性的不同, 信号可分为一阶、二阶和高阶循环平稳信号。在齿轮箱中齿轮、轴等振动信号具有严格的周期性, 属于一阶循环平稳信号。滚动轴承运行时具有随机滑动特性^[2], 其信号属于二阶循环平稳信号。此外, 背景噪声没有明显的周期性, 属于高阶循环平稳信号。对于二阶循环平稳信号 $x(t)$, CSC 的计算式可表示为^[6]

收稿日期: 2020-02-25; **修订日期:** 2020-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675251); 云南省重大专项科技计划(202002AC080001); 云南省教育厅自然科学基金资助项目(2020Y0082)

$$\text{CSC}(\alpha, f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \text{FFT}[x(t)] \text{FFT}[x(t) + \tau]^* \right\} \quad (1)$$

式中 $\text{FFT}[\cdot]$ 表示信号 $x(t)$ 在循环周期 T 内的傅里叶变换; $[\cdot]^*$ 表示函数共轭; $E\{\cdot\}$ 表示数学期望; α 表示循环频率; f 表示频率。为抑制噪声分布不均匀的影响, 用循环谱相干函数进行归一化处理, 其计算为^[6]

$$\text{CSCoh}(\alpha, f) = \frac{\text{CSC}(\alpha, f)}{\sqrt{\text{CSC}(0, f) * \text{CSC}(0, f + \alpha)}} \quad (2)$$

进一步地, 为有效抑制背景噪声和其他干扰成分对故障特征谱线辨识的干扰, Randall 等^[7] 提出在调制信息最丰富的频带对频率 f 进行积分, 获得循环频率 α 的一维谱函数, 以提高滚动轴承故障信号的信噪比。其计算如下^[6]

$$\text{IES}(\alpha) = \frac{1}{F_2 - F_1} \int_{F_1}^{F_2} |\text{CSCoh}(\alpha, f)| df \quad (3)$$

式中 $\text{IES}(\alpha)$ 表示改进包络谱, $|\cdot|$ 表示取绝对值, F_1 和 F_2 之差为频带宽度。

为有效确定包含故障特征信息最丰富的优化解调频带, IESFOgram 算法引入 1/3-二叉树理论构建多级频带组, 实现奈奎斯特频带的合理划分^[2], 每个频带组包括子频带个数为 2^L , 其中等级 $L=0, 1, 1.6, \dots, N-1$, 各级子频带的频带宽度为 $2^{-L-1}f$, 中心频率 $f_c = 2^{-L-2} \cdot i \cdot f$, 其中 $i=0, 1, \dots, 2^L-1$ 。为有效评价各子频带中故障信息的丰富程度, IESFOgram 算法以子频带中包含轴承故障特征频率各阶次谐波频率 $k \cdot \alpha_{\text{fault}}$ 与边带积分比值之和作为评价指标, 通常情况下, 滚动轴承各部件故障理论特征频率 α_{fault} 可通过转速和轴承参数确定, 通过选择积分值 DF 最大时所对应的解调频带, 即数值越大对应频带的信噪比越高, 获取故障特征最丰富的优化解调频带。

IESFOgram 算法对滚动轴承故障特征提取的主要步骤为:

1) 采用式(1)提取滚动轴承故障振动分量, 并应用式(2)削弱背景噪声分布不均匀对解调频带积分的影响^[6]。

2) 基于 1/3-二叉树频带划分结构沿着频率轴 f 划分频带, 获取各子频带的频带上下限 F_1 和 F_2 , 其取值分别为 $i \cdot 2^{-L-1}$ 和 $(i+1) \cdot 2^{-L-1}$, 计算各子频带中 IES , 获得循环频率 α 的一维谱函数。

3) 计算各子频带中故障特征频率各阶次谐波频率 $k \cdot \alpha_{\text{fault}}$ 与边带积分比值之和, 计算如下^[6]

$$DF(f_c, bw) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{2f_b} \left[\frac{\text{IES}_{f_c, bw}(k\alpha_{\text{fault}})}{\int_{k\alpha_{\text{fault}} - f_b}^{k\alpha_{\text{fault}} + f_b} \text{IES}_{f_c, bw}(\alpha) d\alpha - \text{IES}_{f_c, bw}(k\alpha_{\text{fault}})} \right] \quad (4)$$

式中 α_{fault} 表示理论特征频率; f_b 为积分频带宽度; DF 表示积分值; f_c 为中心频率; bw 表示子频带频带宽度。

4) 选取 DF 最大时所对应的解调频带, 获得中心频率 f_c 和子频带频带宽度 bw 。

$$OB = \arg \max \{ DF(f_c, bw) \} \quad (5)$$

式中 $\arg \max \{ \cdot \}$ 表示最大值; OB 为所选择优化解调频带。

IESFOgram 算法在滚动轴承故障特征提取上具有以下优势:

1) 通过选择包含故障信息最丰富的解调频带, 可有效抑制背景噪声和其他干扰成分对轴承故障特征提取的干扰, 以提高轴承故障信号的信噪比;

2) 对于 FK 算法而言, 较强的背景噪声和齿轮啮合冲击等振动分量对优化解调频带选取具有较大干扰, 导致获取的解调频带往往无法有效识别故障特征谱线。IESFOgram 算法基于不同振动分量间循环周期特性不同, 采用 CSC 提取具有二阶循环特性的轴承故障振动分量, 可有效抑制背景噪声与齿轮啮合冲击等振动分量对轴承故障特征提取的干扰。

2 IESFOgram 的改进

2.1 IESFOgram 算法的不足

IESFOgram 算法旨在选择各谐波阶次理论故障特征频率与边带积分比值之和最大时所对应的解调频带。然而, IESFOgram 算法未考虑轴承随机滑动对式(4)积分值的影响, 当滚动轴承特征频率理论值与实际值存在差异时, IESFOgram 算法确定优化解调频带往往无法有效揭示滚动轴承故障特征谱线, 导致轴承故障特征提取失败。

为清晰展示滚动轴承随机滑动对式(4)积分的影响, 图 1 绘制了不同解调频带对应的第 k 阶谐波幅值谱线。如图 1(a) 和 (c) 所示, 当滚动轴承故障特征频率理论值与实际值相同时, 应用原 IESFOgram 对图 1(a) 和 (c) 分别积分可知, 该算法可确定信噪比最高时所对应的解调频带。然而, 当滚动轴承具有随机滑动时所对应的故障特征谱线分布如图 1 中 (b) 和 (d) 所示, 即理论特征频率与实际特征频率存在差异, 采用原 IESFOgram 分别对图 1(b) 和 (d) 积分可知, 原 IESFOgram 算法无法获取信噪比最高时所对应的解调频带。本文通过设置如图 1(b) 和 (d) 所示的频率容差 f_{delta} 对特征频率可能出现频率范围进行积分, 可有效抑制轴承故障频率理论与实际值之间的差异对积分值 DF 的影响。

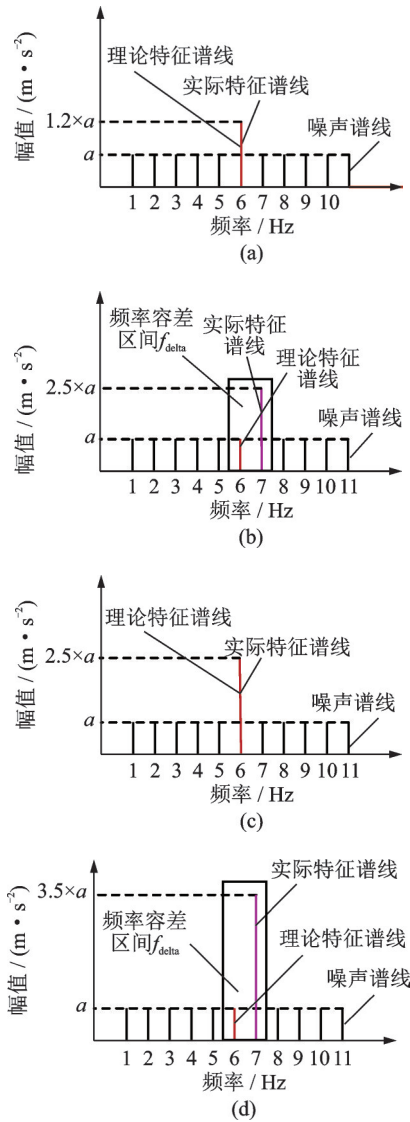


图1 不同频带下第k阶谐波特征频率谱线对比图

Fig. 1 Comparison chart of characteristic frequency spectrum lines of the kth harmonic in different frequency bands

2.2 考虑轴承滑动的IESFOgram算法

为消除理论与实际特征频率差异对IESFOgram算法选取优化解调频带的干扰,本文基于文献[7]提出的滚动轴承运行时存在1%-2%的随机滑动特性,提出设置特征频率容差 f_{δ} 对IESFOgram算法改进,以提高IESFOgram在工程应用中的鲁棒性,计算式如下

$$DF(f_c, bw) = \frac{\int_{k\alpha_{fault}-f_{\delta}}^{k\alpha_{fault}+f_{\delta}} IES_{f_c, bw}(\alpha) d\alpha}{2(f_b - f_{\delta}) \left[\int_{k\alpha_{fault}-f_b}^{k\alpha_{fault}+f_b} IES_{f_c, bw}(\alpha) d\alpha - \int_{k\alpha_{fault}-f_{\delta}}^{k\alpha_{fault}+f_{\delta}} IES_{f_c, bw}(\alpha) d\alpha \right]} \quad (6)$$

值得指出的是,式(6)表示信号在特定频带范围内的能量比,其可用于描述信号的信噪比,选择包含故障信息最丰富的解调频带。与式(4)相比,式(6)中两个积分操作旨在考虑滚动轴承随机滑动对DF

值的影响,消除滚动轴承理论与实际特征频率差异导致IESFOgram算法失效的缺点。

改进IESFOgram算法需设置三个关键参数,分别是理论特征频率 α_{fault} 、积分频带宽度 f_b 和特征频率容差 f_{δ} 。其中,滚动轴承各部件故障理论特征频率 α_{fault} 可通过转速和轴承参数确定。积分频带宽度 f_b 取决于故障特征频率是否有调制,若有频率调制, f_b 小于1倍调制频率,若没有频率调制, f_b 可取1-2倍转频。此外,滚动轴承运行时存在1%-2%的随机滑动,为有效包含实际特征频率, f_{δ} 可设置为 $0.02\alpha_{fault}$ 。

3 基于改进IESFOgram的轴承故障特征提取

为实现滚动轴承故障特征有效提取,本文提出一种基于改进IESFOgram的滚动轴承故障特征提取方法,其技术路线如图2所示。步骤包括:a.使用CSCoh提取与轴承故障相关的振动分量;b.基于1/3-二叉树频带划分结构沿频率f划分频带;c.基于改进式(6)计算各子频带的DF值;d.选择DF值最大时对应的解调频带;e.对所优选的解调频带包络分析,实现轴承故障特征提取。



图2 本文所提方法的技术路线

Fig. 2 Technical route of the method proposed in this paper

值得指出的是,基于式(6)改进的IESFOgram算法对滚动轴承故障特征提取具有以下优势:(a)通过对原IESFOgram算法改进,有效抑制轴承随机滑动对选取解调频带的干扰,提高原IESFOgram算法的鲁棒性;(b)所提方法可选择出包含轴承故障信息最丰富的解调频带,实现滚动轴承故障特征的有效提取。

4 实验验证

4.1 仿真分析

4.1.1 数据说明

仿真分析采用的轴承内圈点蚀故障信号模型为

$$\begin{cases} x(t) = \sum_i A_i s(t - iT - \Delta t_i) + n(t) \\ s(t) = e^{Bt} \cos(2\pi f_n t) \\ A = \cos(2\pi f_A t) + randn(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中 T 表示故障冲击发生的周期, $s(t)$ 表示点蚀故障产生的冲击振荡, A_i 为第 i 次冲击幅值, 滚动轴承故障存在 1%-2% 的随机滑动^[7], T_i 表示第 i 次冲击相对于周期 T 的微小波动, 为有效模拟滚动轴承的工作环境, 模型中考虑噪声 $n(t)$ 的干扰, $randn(t)$ 表示为零均值的随机信号, f_A 表示调制频率。

仿真实验设定采样频率 $f_s = 51.2$ kHz, 轴承故障特征频率 $\alpha_{fault} = 100$ Hz, 固有频率 $f_n = 2$ kHz, 调制频率 $f_A = 10$ Hz, 故障周期 T 的微小波动 Δt 的标准差 $\sigma = 0.01T$ 。

4.1.2 特征提取

由以上参数仿真得到的时域波形如图 3 所示。

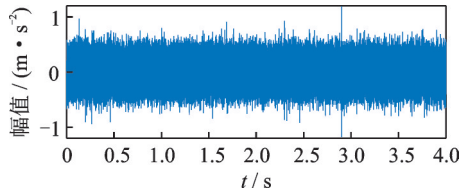


图3 仿真信号的时域波形

Fig. 3 Time domain waveform of simulation signal

首先采用 FK 算法对仿真数据进行分析, 所优选的解调频带如图 4 所示 ($f_c: 1066$ Hz, $bw: 2133$ Hz), 对应的包络分析结果如图 5 所示, 图中背景噪

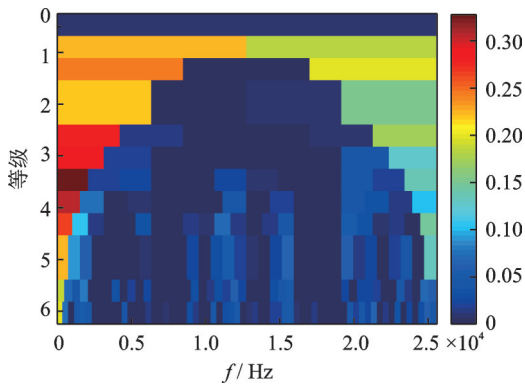


图4 谱峭度图

Fig. 4 Kurtogram

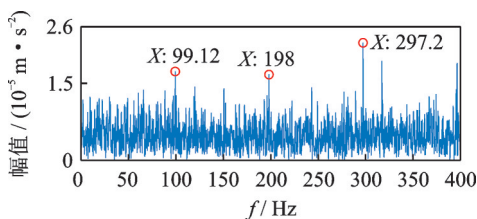


图5 FK算法获得的包络谱

Fig. 5 Envelope spectrum obtained by FK

声谱线占优, 轴承故障特征谱线识别较为困难。

其次, 采用原 IESFOgram 获得的解调频带 ($f_c: 25300$ Hz, $bw: 500$ Hz) 如图 6 所示, 对应的包络分析结果如图 7 所示, 可见轴承故障特征谱线基本淹没于其他干扰谱线, 故障特征无法有效提取。

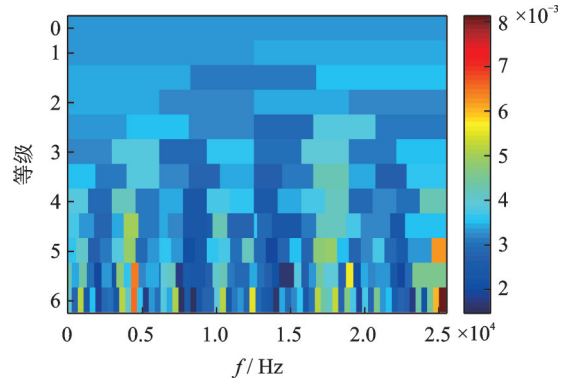


图6 原 IESFOgram 获得的能量积分图

Fig. 6 Energy integral diagram obtained by original IESFOgram

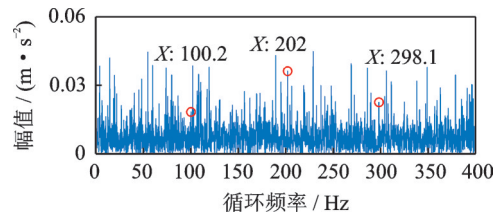


图7 原 IESFOgram 获得的包络谱

Fig. 7 Envelope spectrum obtained by original IESFOgram

最后采用本文所提方法对信号进行分析, 所获得的解调频带 ($f_c: 1700$ Hz, $bw: 500$ Hz) 如图 8 所示, 对应的包络分析结果如图 9 所示, 图中可清晰辨识 99.98 Hz 故障特征谱线及其倍频 (198.2 Hz 和 297.1 Hz), 验证了本文所提方法的有效性。仿真信号中理论特征频率 $\alpha_{fault} = 100$ Hz, 根据滚动轴承 1%-2% 滑动特性, 本实验假设最大滑动为 2%, 特征频

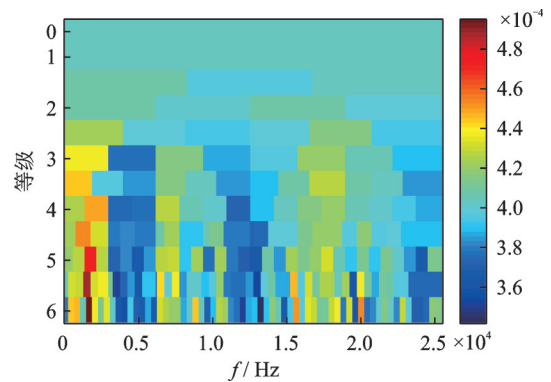


图8 改进 IESFOgram 获得的能量积分谱

Fig. 8 Energy integral spectrum obtained by improving IESFOgram

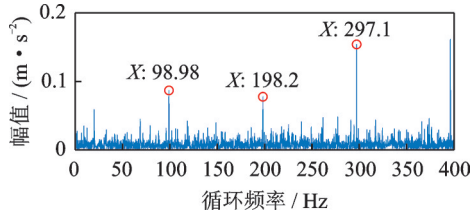


图9 改进IESFOgram获得的包络谱

Fig. 9 Envelope spectrum obtained by improving IESFOgram

率容差 f_{delta} 为 2 Hz;此外,仿真信号频率调制 $f_A=10$ Hz,设置积分频带宽度 $f_b=10$ Hz。

4.2 西储大学数据分析

4.2.1 数据说明

为验证本文所提方法的有效性,本部分采用如图10所示的美国西储大学轴承测试试验台上驱动端轴承测试数据(数据文件名为OR021@6_2)。为模拟滚动轴承外圈故障,在轴承外圈上用线切割方法加工一宽度约为0.53 mm,深度约为0.28 mm的小槽,故障轴承型号为SKF6205深沟球轴承,滚子直径 $d=7.94$ mm,节圆直径 $D=39.04$ mm,滚子数目 $n=9$,接触角 $\beta=0$ 。该实验驱动电机输入转速为1750 r/min,采样频率为48 kHz,其轴承外圈理论特征频率 α_{fault} 计算如下

$$\alpha_{\text{fault}} = \frac{n}{2} (1 - \frac{d}{D} \cos\beta) f_r \quad (8)$$

式中 f_r 表示转频。由上述参数计算可得外圈故障特征频率为104.3 Hz,转频为29.17 Hz。

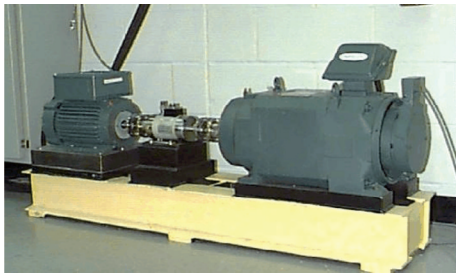


图10 轴承测试试验台

Fig. 10 Test bench for bearing testing

4.2.2 特征提取

信号时域波形如图11所示,首先使用FK算法对信号进行分析,所获得的解调频带(f_c : 9750 Hz, bw : 1500 Hz)如图12所示,对应的包络分析结果如图13所示,图中与轴承故障相关谱线并不占优,其他谱线干扰其谱线的辨识。

其次采用原IESFOgram选择优化解调频带(f_c : 10312 Hz, bw : 328 Hz)如图14所示,对应的包络分析结果如图15所示。图中轴承故障特征谱线基本淹没于背景噪声,无法有效识别轴承故障谱线。

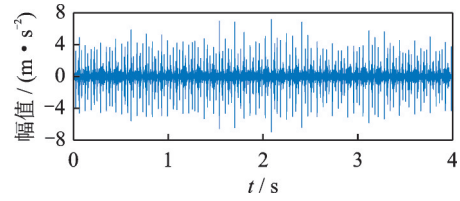


图11 轴承故障的时域波形

Fig. 11 Time domain waveform of bearing failure

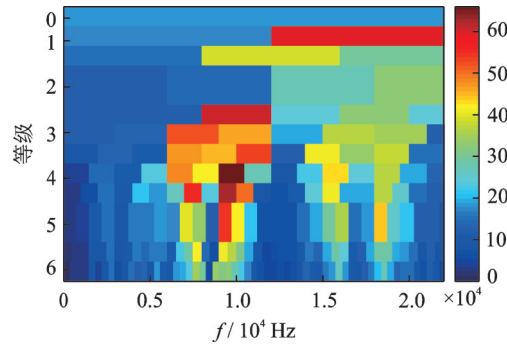


图12 谱峭度图

Fig. 12 Kurtogram

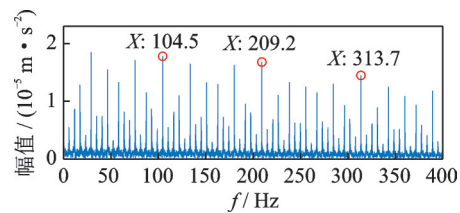


图13 谱峭度获得的包络谱

Fig. 13 Envelope spectrum of rolling bearing outer-race fault by FK

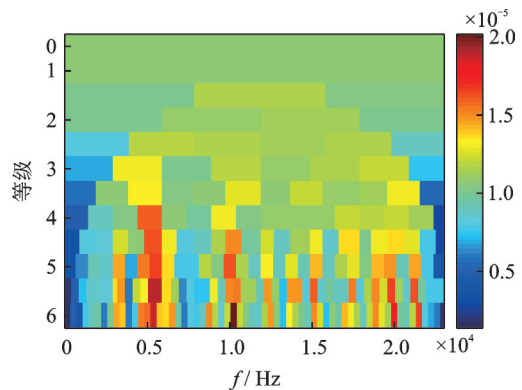


图14 原IESFOgram算法获得的能量积分谱

Fig. 14 Energy integral diagram obtained by original IESFOgram

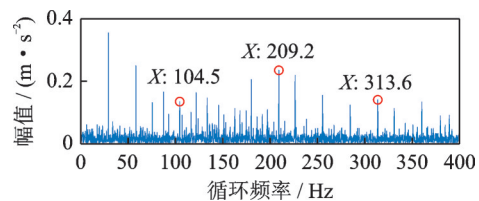


图15 原IESFOgram算法获得的包络谱

Fig. 15 Envelope spectrum obtained by original IESFOgram

最后采用本文所提方法进行分析,所选择的解调频带(f_c : 19687 Hz, bw : 328 Hz)如图16所示,对应的包络分析结果如图17所示。图中频率为104.6 Hz特征谱线可清晰辨识(理论特征频率为104.3 Hz,两者误差为0.19%),验证了理论与实际特征频率差异可能误导DF指标(公式(4))解调频带的选择,导致原IESFOgram算法失效。实验中理论特征频率 $\alpha_{\text{fault}}=104.3$ Hz,根据轴承1%-2%滑动特性,假设轴承滑动为2%,特征频率容差 f_{delta} 设置为2.1 Hz,轴承外圈没有调制频率,积分频带宽度 f_i 设为转频29.17 Hz。

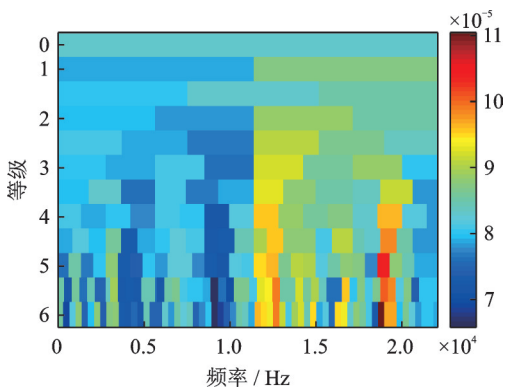


图16 改进IESFOgram算法得到的能量积分谱

Fig. 16 Energy integral spectrum obtained by improving IESFOgram

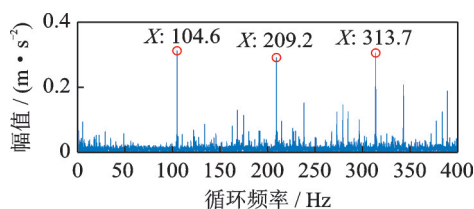


图17 改进IESFOgram算法得到的包络谱

Fig. 17 Envelope spectrum obtained by improving IESFOgram

4.3 轴承数据分析

4.3.1 数据说明

为进一步验证本文所提方法的有效性,研究中以图18所示的QPZZ-II型轴承测试平台进行验证。采用N205EM型号的圆柱滚子轴承为研究对象,为模拟轴承外圈故障,在滚动轴承外圈上用线切割方法加工一宽度约为1 mm,深度约为0.5 mm的小槽,如图19所示,滚子直径 $d=7.94$ mm,节圆直径 $D=38.5$ mm,滚子数目 $n=12$,接触角 $\beta=0$ 。该实验驱动电机输入转速为590 r/min,采样频率 $f_s=25.6$ kHz。由式(8)计算可知,轴承外圈故障理论特征频率 $\alpha_{\text{fault}}=46.8$ Hz。

4.3.2 特征提取

采集轴承振动信号如图20所示。首先使用



图18 QPZZ-II轴承测试平台

Fig. 18 QPZZ-II bearing test platform



图19 轴承外圈故障

Fig. 19 Bearing with outer-race fault

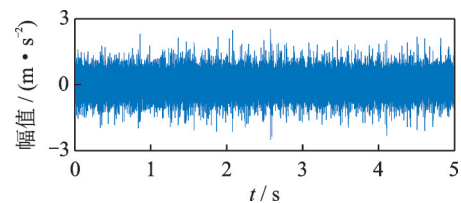


图20 时域波形

Fig. 20 Time domain waveform of bearing failure

FK算法对该信号进行分析,获得解调频带(f_c : 12533 Hz, bw : 533 Hz)如图21所示,对应的包络分析结果如图22所示,图中除故障特征谱线外,还存在较多较高干扰谱线,无法有效提取轴承故障特征。

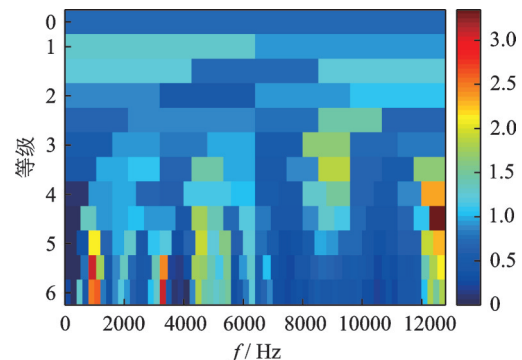


图21 谱峭度图

Fig. 21 Kurtogram

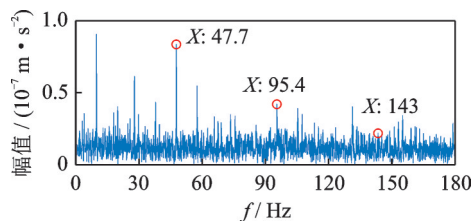


图 22 谱峭度算法获得的包络谱

Fig. 22 Envelope spectrum of rolling bearing outer-race fault by FK

随后采用原 IESFOgram 算法分析,获得的解调频带(f_c : 4000 Hz, bw : 850 Hz)如图 23 所示,对应的包络分析结果如图 24 所示,图中故障特征谱线基本淹没于背景噪声,无法有效识别其故障特征谱线。

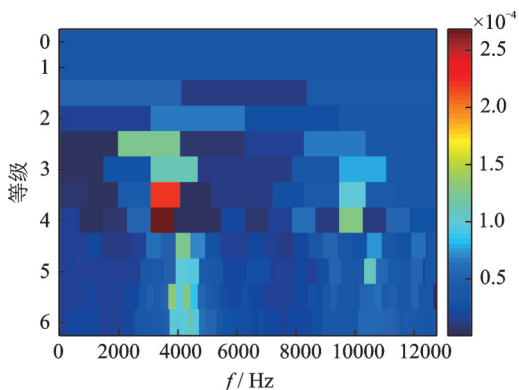


图 23 原 IESFOgram 算法获得的能量积分谱

Fig. 23 Energy integral diagram obtained by original IESFOgram

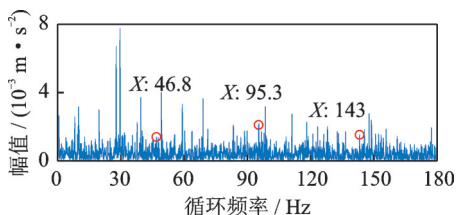


图 24 原 IESFOgram 算法获得的包络谱

Fig. 24 Envelope spectrum obtained by original IESFOgram

最后采用改进 IESFOgram 算法对数据进行分析,获得的解调频带(f_c : 8750 Hz, bw : 300 Hz)如图 25 所示,进而对优选频带进行包络分析,如图 26 所示,图中可清晰辨识 47.7 Hz 故障特征谱线及其倍频,进一步验证了所提方法的有效性和优势。实验中理论特征频率 α_{fault} =46.8 Hz,假设轴承滑动为 2%,特征频率容差 f_{delta} 设置为 0.94 Hz;积分频带宽度 f_b 设为转频 9.8 Hz。

本文分别采用仿真信号、西储大学部分数据和实验数据为分析对象,对比 FK 算法(图 5, 13 和 22)、原 IESFOgram 算法(图 7, 15 和 24)和改进 IESFO-

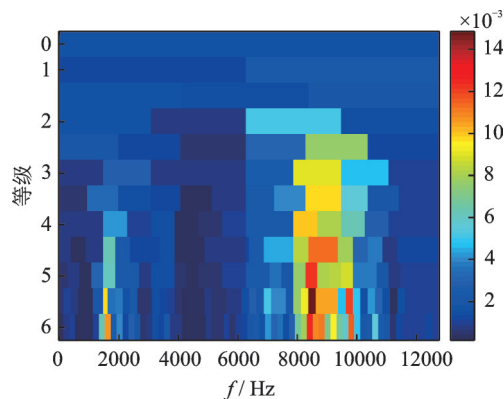


图 25 改进 IESFOgram 算法得到的能量积分谱

Fig. 25 Energy integral spectrum obtained by improving IESFOgram

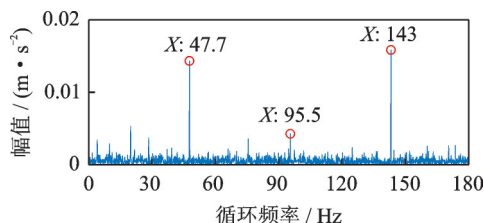


图 26 改进 IESFOgram 算法得到的包络谱

Fig. 26 Envelope spectrum obtained by improving IESFOgram

gram 算法(图 9, 17 和 26),验证了改进 IESFOgram 算法通过设置频率容差 f_{delta} 对原 IESFOgram 算法改进的有效性,消除了滚动轴承随机滑动对原 IESFOgram 算法选取优化解调频带的干扰,提高 IESFOgram 算法的鲁棒性,实现滚动轴承故障特征的有效提取。

5 结 论

本文考虑滚动轴承随机滑动对 IESFOgram 算法获取解调频带参数的干扰,提出了一种设置特征频率容差对 IESFOgram 的改进算法,以提高 IESFOgram 算法的鲁棒性。通过选择优化解调频带并进行包络分析,实现滚动轴承故障特征的有效提取。以仿真数据、西储大学数据和实验数据验证了论文所作改进的优势。

参考文献:

[1] 郭 瑜,郑华文,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 Huawen, Gao Yan, et al. Envelope analysis of rolling bearing based on spectral kurtosis[J]. Vibration, Test and Diagnosis, 2011, 31(4): 517-521.

- [2] Antoni J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(1):108-124.
- [3] 代士超, 郭 瑜, 伍 星, 等. 基于子频带谱峭度平均的快速谱峭度图算法改进[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(7):98-102.
Dai Shichao, Guo Yu, Wu Xing, et al. Improvement of fast spectral kurtosis map algorithm based on sub-band spectral kurtosis average[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(7): 98-102.
- [4] 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.
- [5] Antoni J, Xin G, Hamzaoui N. Fast computation of the spectral correlation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 92:248-277.
- [6] Mauricio A, Randall R B, Smith W, et al. Vibration based condition monitoring of planetary gearboxes operating under speed varying operating conditions based on cyclo-non-stationary analysis[C]. *International Conference on Rotor Dynamics*, Springer, Cham, 2018: 265-279.
- [7] Randall R B, Antoni J. Rolling element bearing diagnostics-a tutorial[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(2):485-520.

Feature extraction of faulty rolling element bearing based on improved IESFOgram

CHEN Xin¹, GUO Yu¹, WU Xing^{1,2}, FAN Jia-wei¹, LIN Yun¹

(1.Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2.Yunnan Vocational College of Mechanical and Electrical Technology, Kunming 650203, China)

Abstract: In order to solve the problem that fault feature cannot be effectively revealed by the Improved Envelope Spectrum via Feature Optimization-gram (IESFOgram) algorithm under the condition of the random slip of the REB. The improved version of the IESFOgram algorithm is proposed based on setting the characteristic frequency tolerance. The spectral correlation analysis tool is employed to extract the bearing fault components by the second-order cyclostationarity characteristic. Characteristic frequency tolerance is determined by the bearing random slip, and a suitable sub-band with abundant fault information is selected by the maximum value of sum of each order harmonic frequency of the characteristic frequency to the sideband integration ratio. The fault lines of faulty bearing can be effectively identified by the envelope spectrum analysis. The analysis results of simulation data, open data from Western Reserve University and experimental data show that the proposed scheme in this study can effectively solve the drawback of IESFOgram algorithm under the random slip of the REB condition.

Key words: fault diagnosis; rolling element bearing; fast kurtogram; cyclostationary; IESFOgram

作者简介: 陈 鑫(1995-),男,电话:15025640575;E-mail: 15025640575@163.com

通讯作者: 郭 瑜(1971-),男,教授,电话:15911509207;E-mail: kmgary@163.com