

一种选取最优解调频带新方法——Multigram^{*}

盛嘉玖¹, 陈 果², 贺志远², 刘曜宾², 王 浩³, 尉询楷³

- (1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106;
2. 南京航空航天大学 通用航空与飞行学院, 江苏 溧阳 213300;
3. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

摘 要: 针对 Fast-Kurtogram 易受非高斯噪声干扰的不足, 提出一种基于多层滑动滤波器组, 找寻最优解调频带的新方法——Multigram。首先, 借鉴 Protrugram 滑动分割频带思想, 构建多层、多滤波中心和带宽的滤波组。然后, 根据各层不同滤波中心和带宽依次进行带通滤波, 对滤波信号进行包络自相关谱分析, 在容差范围内计算谱峭度, 以选取最优解调频带。最后, 采用最优滤波中心和带宽进行带通滤波和包络谱分析。将方法应用于滚动轴承故障诊断, 基于机匣测点的模拟故障轴承试验和自然故障轴承试验结果表明: 该方法可有效选取适宜的解调频带, 相比于 Fast-Kurtogram, Protrugram, Autogram 和 Infogram, 诊断结果更具优势。

关键词: 故障诊断; 滚动轴承; Multigram; 共振解调; 最优解调频带

中图分类号: V263.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2024) 07-2305044-13

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2305044

1 引 言

滚动轴承作为旋转机械的关键支承部件, 受服役环境复杂、恶劣的影响, 故障频发, 因此早期故障诊断尤为重要^[1]。当滚动轴承出现早期局部故障, 损伤点通过其他部件时, 会激发一系列周期或准周期脉冲^[2]。因此, 周期或准周期脉冲特性是滚动轴承出现故障的重要标志^[3-4]。此外, 故障信号具有循环平稳性质^[5-6], 即统计量经线性变化后可呈现随时间按周期或多周期的变化规律。针对脉冲性和循环平稳性, 多种滚动轴承故障检测方法应运而生^[7]。

共振解调技术在故障诊断领域中应用广泛, 其原理为通过传感器获取轴承故障冲击引起的共振响应, 然后选取适宜的共振频带范围, 采用带通滤波器获得窄带信号, 通过包络解调将故障信息从复杂的调幅振动信号中分离出来, 以判断故障的损伤部位、严重程度, 其中解调频带的选取至关重要^[8]。根据滚动轴承的故障特性, 最优解调频带选取方法可被分

为两大类: 识别脉冲性最强的频带和循环平稳性最强的频带^[9]。

识别脉冲性常以谱峭度作为筛选指标进行滤波和频带划分。Antoni 和 Randall^[10]将谱峭度应用于旋转机械故障诊断领域, 提出 Kutogram, 但如何选择滤波中心和带宽成为制约该方法发展的主要因素。之后, Antoni^[11]提出 Fast-Kurtogram, 基于 1/3-二叉树结构构建有限长脉冲响应滤波器组, 仅在有限个中心频率和带宽组合下计算谱峭度, 计算效率显著提高, 得到广泛应用。但 Tian 等^[12]指出 Fast-Kurtogram 对随机噪声和非周期脉冲非常敏感, 易导致最优频带选择失效。因此, 如何使 Fast-Kurtogram 克服非高斯噪声影响, 成为后续改进方向^[13]。

识别循环平稳性多以平方包络谱为选择基础。Barszcz 等^[14]提出 Protrugram, 将 Fast-Kurtogram 中的可变带宽替换为固定带宽, 约为轴承故障频率的 3~5 倍, 通过滑动改变中心频率, 计算滤波信号的平方包络谱峭度, 寻找最优解调频带。倪清^[9]用数学推导说

* 收稿日期: 2023-05-24; 修订日期: 2023-07-16。

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-IV-004-0071); 国家自然科学基金 (52272436)。

作者简介: 盛嘉玖, 硕士生, 研究领域为航空发动机信号处理和故障诊断。

通讯作者: 陈 果, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为航空发动机整机振动分析、状态监测与故障诊断。

E-mail: cgzyx@263.net

引用格式: 盛嘉玖, 陈 果, 贺志远, 等. 一种选取最优解调频带新方法——Multigram[J]. 推进技术, 2024, 45(7): 2305044. (SHENG J J, CHEN G, HE Z Y, et al. A new method to select optimal demodulation frequency band: Multigram[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(7): 2305044.)

明了谱峭度和平方包络谱的内在关联,阐释了 Fast-Kurtogram 会被循环平稳噪声影响的根本原因,提出了优化指标和改进 Protrugram 方法。Moshrefzadeh 等^[15]结合小波分解,采用平方包络谱的无偏自相关峭度值表征循环平稳性,提出 Autogram,在滚动轴承故障诊断方面具有良好性能。Antoni^[16]采用谱负熵指标来量化重复瞬态特征,提出 Infogram,兼顾故障信号的冲击特性与循环平稳特性,提升故障周期识别精度。

本文将针对 Fast-Kurtogram 易受非高斯噪声干扰,最优频带选择失效的问题,借鉴 Protrugram 滑动分割频带思想,提出一种识别最强脉冲性的多层、多滤波中心和带宽的新方法——Multigram。仿真和两组试验结果表明:该方法可有效选取适宜的解调频带,相比于 Fast-Kurtogram, Protrugram, Autogram 和 Infogram,诊断结果更具优势。

2 Multigram 算法

Multigram 算法流程图如图 1,具体步骤如下:

步骤 1: 计算理论故障特征频率 f_{fault} , 各取其左右 10 Hz, 得到容差范围 $[f_1, f_2]$, 设置分析层数 M , 设置各层带宽向量 f_{band} 和搜索间隔向量 f_{step} , 长度均为 M , 计算第 m ($m=1, 2, \dots, M$) 层中心频率向量 f_{center}^m , 表达式为

$$f_{\text{center}}^m = f_{\text{band}}(m) + \max(f_{\text{band}}(m), f_{\text{step}}(m)):$$
$$f_{\text{step}}(m): \frac{f_s}{2} - \max(f_{\text{band}}(m), f_{\text{step}}(m)) \quad (1)$$

式中 $f_{\text{band}}(m)$ 表示 f_{band} 的第 m 层带宽, $f_{\text{step}}(m)$ 表示 f_{step} 的第 m 层搜索间隔, $\max(a, b)$ 表示取 a, b 两者最大值。将 f_{center}^m 长度记为 N_m , 第 m 层, 第 n ($n=1, 2, \dots, N_m$) 个中心频率为 $f_{\text{center}}^m(n)$ 。初始化 $m=1, n=1$, 包络自相关谱峭度矩阵 $K_{\text{urMax}}=0$ 。令 $M=10, f_{\text{band}}$ 和 f_{step} 赋值如表 1。其中, f_{band} 取值参考 Protrugram, 在轴承故障频率 3~5 倍范围内取值^[14]。带宽越宽, 搜索间隔越大; 带宽越窄, 搜索间隔越小, 以达到信号频带由密到疏逐层分解, 保证整体计算效率的目的。

f_{fault} 与预先判断的故障类型有关, 并影响 f_{band} 和 f_{step} 的取值。 f_{fault} 取值越大, 搜索间隔越稀疏, 计算效率越高; 取值越小, 搜索间隔越密集, 计算效率越低。若 f_{fault} 采用固定值, 转速一旦大幅变化, 解调带宽很有可能超出经验范围(轴承故障频率 3~5 倍^[14]), 影响检测性能。故本方法采用预设 f_{fault} 的方式, 保证适宜的解调带宽范围。

步骤 2: 将信号以中心频率 $f_{\text{center}}^m(n)$ 和带宽 $f_{\text{band}}(m)$ 进行带通滤波, 带通滤波采用 4 阶巴特沃斯带通滤波器, 后续各方法滤波均采用此型带通滤波器, 不再赘述。对滤波信号进行包络自相关谱分析, 包括: Hilbert 变换、自相关和 Fourier 变换。为避免其他调制分量的干扰, 令 $[f_1, f_2]$ 以外的包络自相关谱幅值为 0, 只

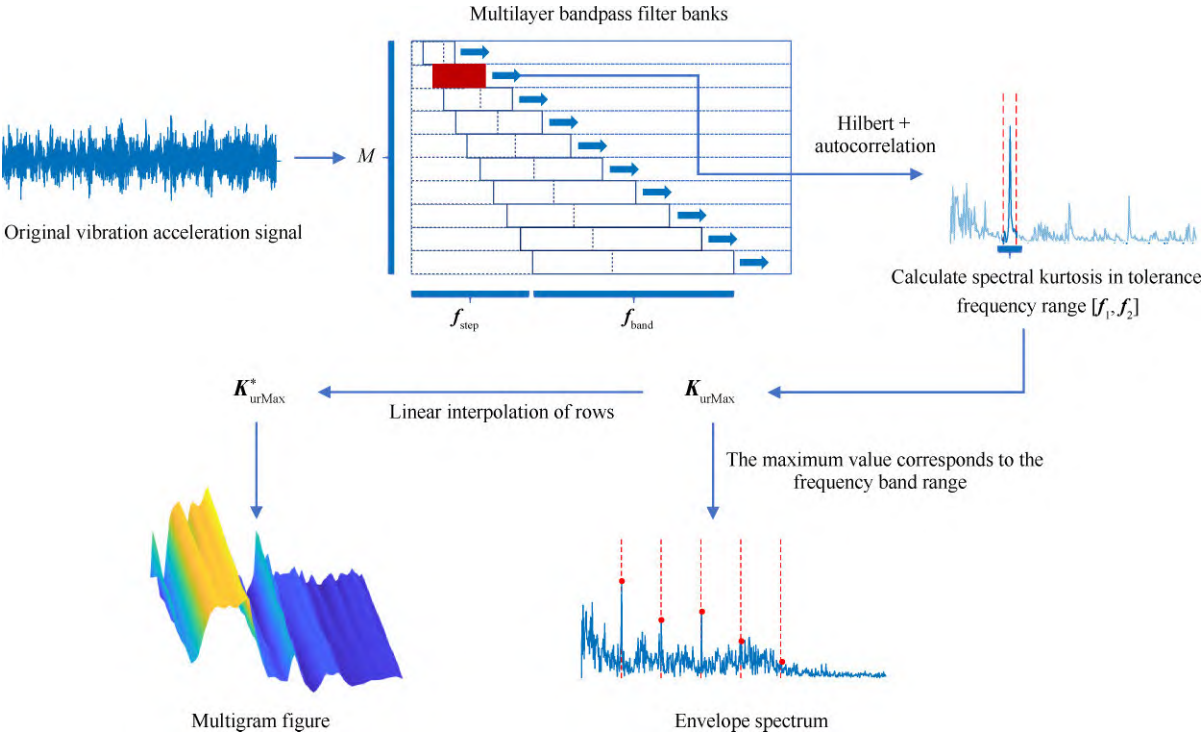


Fig. 1 Algorithm flow chart

2305044-2

Table 1 Construction of multilayer sliding filter banks

m	$f_{\text{band}}(m)/f_{\text{fault}}$	$f_{\text{step}}(m)/f_{\text{fault}}$
1	3.2	0.6
2	3.4	0.7
3	3.6	0.8
4	3.8	0.9
5	4.0	1.0
6	4.2	1.1
7	4.4	1.2
8	4.6	1.3
9	4.8	1.4
10	5.0	1.5

计算容差内谱峭度 $K_{\text{ur},n}$, 从而表征该频段故障信息丰富程度, 记 $K_{\text{urMax}}(m, n) = K_{\text{ur},n}$ 。若 $n < N_m$, 则 $n = n + 1$, 当 $n = N_m$ 时, $m = m + 1$, 直至 $m = M$ 。需要注意的是, 根据维纳-辛钦定理, 对于广义平稳随机信号, 其自相关函数与功率谱密度互为傅里叶变换对。对包络信号进行自相关后谱分析等同于对包络谱信号间接求取功率谱密度。故本方法是从包络信号的功率谱密度出发, 计算容差范围内的谱峭度, 找寻脉冲性最强频带。

步骤 3: 由于各层滤波中心个数和带宽宽度不同, 所计算得到的 $K_{\text{ur},n}$ 个数亦不同, 各层个数为 N_m , 其中 N_1 数值最大, N_{10} 数值最小。为更加直观、统一地展现不同频段故障信息丰富程度, 将 K_{urMax} 第 2 至 M 层 $K_{\text{ur},n}$ 分别线性插值成 N_1 个, 得到 K_{urMax}^* , 将其转化为三维图, 得到 Multigram 图像。

步骤 4: 由于 K_{urMax}^* 部分数值是由线性插值而来, 并非真实结果, 故仍依据 K_{urMax} 最大值确定最优解调频带对应的中心频率和带宽, 对原始信号带通滤波, 后进行包络谱分析和故障诊断。

3 仿真验证

为说明本文所提方法的有效性, 采用一组脉冲仿真信号 $x(t)$ 模拟滚动轴承外圈故障进行论述。

3.1 仿真信号

$x(t)$ 表达式为

$$x(t) = \sum_{i=1}^N g_i(t) + n_1(t) + n_2(t) \quad (2)$$
$$g_i(t) = \begin{cases} c \exp(-2\pi\xi f_n(t - \frac{i}{f_o})) \cdot \\ \sin(-2\pi f_n \sqrt{1 - \xi^2}(t - \frac{i}{f_o})), \\ t \geq \frac{i}{f_o}, \quad i \in N \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$n_2(t) = 0.5 \cdot \text{rand}(-1, 1) \quad (4)$$

式中 $c = -1$ 为归一化系数, $\xi = 0.15$ 为阻尼系数, 反映脉冲衰减快慢, $f_n = 2 \text{ kHz}$ 为轴承共振固有频率, $f_r = 50 \text{ Hz}$ 为转频, 令 $f_{\text{fault}} = f_o = 175 \text{ Hz}$ 为轴承外圈故障频率, $f_s = 25 \text{ kHz}$ 为采样频率, N 为冲击个数, 信号总时长 1 s , $n_1(t)$ 为 $\text{SNR} = -2$ 的高斯白噪声, $n_2(t)$ 为非高斯白噪声, $\text{rand}(-1, 1)$ 表示 $[-1, 1]$ 范围内均匀分布的随机数。

仿真信号时域波形如图 2(a), 频谱如图 2(b), 包络谱如图 2(c) 所示。图中红色虚线代表轴承故障特征频率或阶次及其谐波, 后文分析和图片中, f_r 代表转频, f_o , f_i 和 f_b 分别代表外圈、内圈和滚动体故障特征频率。时域波形中无明显脉冲成分; 频谱中在 2 kHz 附近有明显的共振峰, 但预设故障频率处无明显能量集中; 包络谱中预设故障频率处有微弱的能量集中, 但无明显的倍频成分, 可见故障特征淹没于噪声之中。

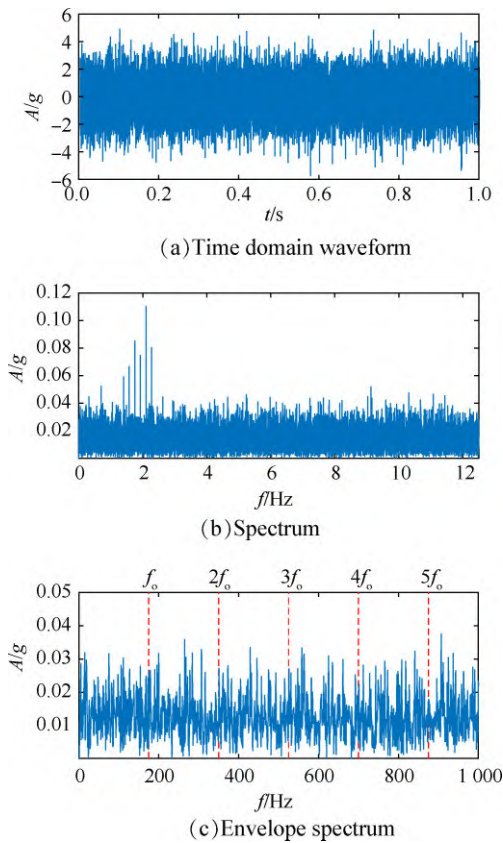


Fig. 2 Time domain waveform, spectrum and envelope spectrum of simulation signal

采用上节所述 Multigram 方法寻找仿真信号最优解调频带, Multigram 图像如图 3(a)。图中 x 轴坐标表示带通滤波器的中心频率, y 轴坐标表示带通滤波器的带宽, z 轴坐标和颜色深浅表示谱峭度的数值大小。在图中可以清晰看到在 2000 Hz 附近处的谱峭度数值显著突出, 与预设共振固有频率 f_n 相符。得到的最

优解调中心频率为 1 960 Hz,带宽为 630 Hz。以该中心频率和带宽进行带通滤波,得到的滤波信号包络谱如图 3(b)。在图中可以清晰看到理论外圈故障特征频率及谐波 $f_o, 2f_o$ 处附近均有明显幅值波峰,故本文所述方法可以有效识别外圈仿真信号的共振频带,实现故障特征的有效提取。

3.2 对比分析

作为对比,采用 Fast-Kurtogram 提取该仿真信号的最优解调频带, Fast-Kurtogram 图像如图 3(c),得到最优解调中心频率为 9 375 Hz,带宽为 6 250 Hz。以该中心频率和带宽进行带通滤波,得到的滤波信号包络谱如图 3(d)。图中无任何明显外圈仿真故障特征信息。

根据文献[12]所述, Fast-Kurtogram 易受随机噪声和非周期脉冲影响,而无法有效选取最优解调频带。在仿真信号中,除添加-2 dB 的高斯白噪声外,

还添加了随机噪声,代表非高斯白噪声成分。 Multigram 通过多层滑动滤波,计算容差范围内的谱峭度,将最优解调频带定位至低频段,实现故障特征的有效提取;而 Fast-Kurtogram 受噪声影响,定位至高频段,滤波包络信号中无任何明显故障特征,这说明 Multigram 能有效克服噪声影响,降低漏诊率。此外, Multigram 图像显示低频段故障信息丰富,高频段故障信息贫乏, Fast-Kurtogram 解调出的高频滤波信号包络谱中无明显故障特征,也侧面说明 Multigram 图像的正确性。

3.3 鲁棒性分析

为进一步验证算法鲁棒性,在原始仿真信号公式(2)中加入一组正弦谐波充当杂波干扰成分,得到的新仿真信号 $x_{\text{new}}(t)$ 表达式为

$$x_{\text{new}}(t) = x(t) + 0.15 [\sin(2\pi 170t) + 0.8\sin(2\pi 340t) + 0.6\sin(2\pi 510t)] \tag{5}$$

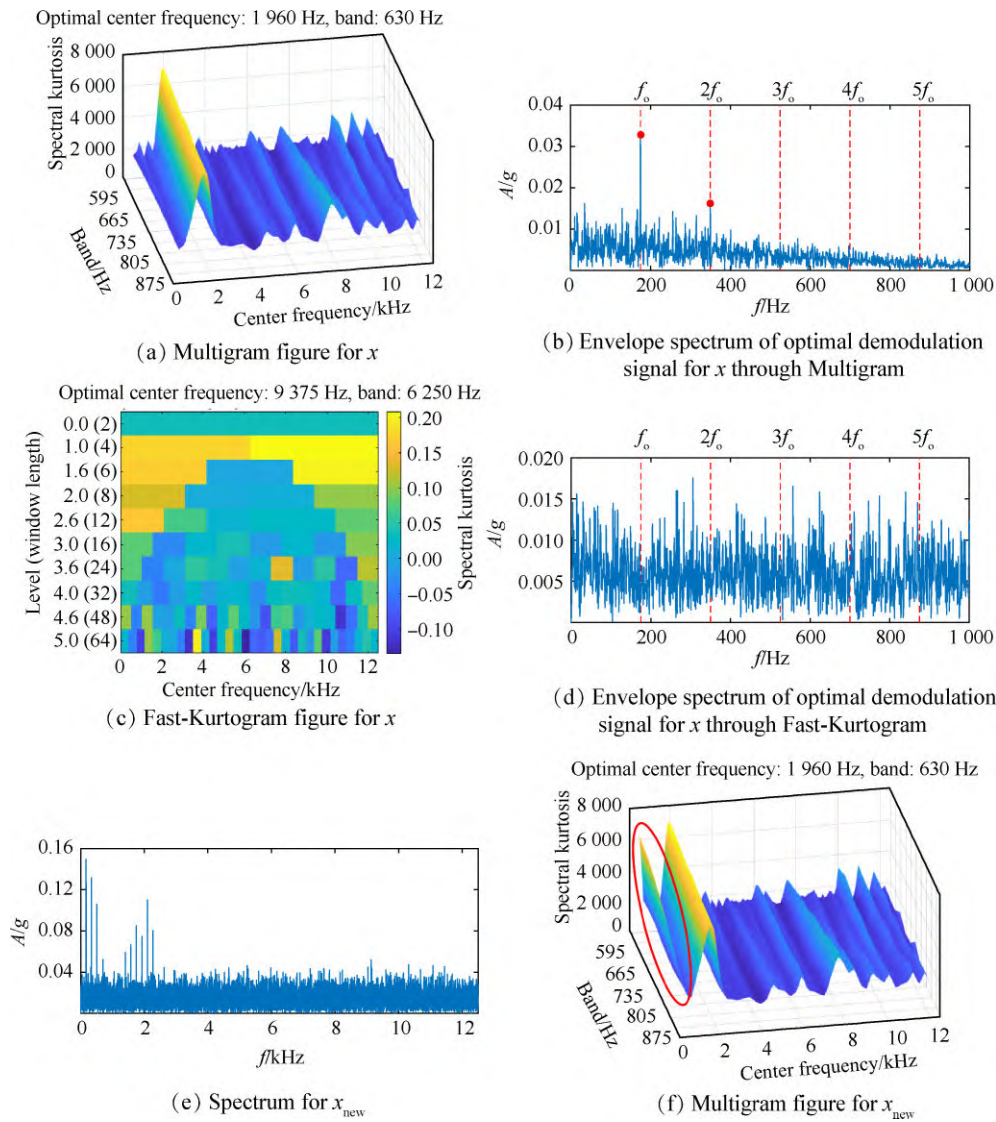


Fig. 3 Simulation signal algorithm verification results

2305044-4

加入该正弦谐波,其主要作用是在频域 170 Hz 处加入较强干扰频率,其幅值超过原始信号 2 kHz 共振峰最大值,且 170 Hz 处于预设容差范围[165,185]内, $x_{\text{new}}(t)$ 频谱如图 3(e)。采用 Multigram 以选取最优解调频带, Multigram 图像如图 3(f)。图像最左侧谱峭度出现明显上升(红圈标注),但未超过 2 kHz 处,证明当容差范围内出现频域幅值较大的干扰,该算法仍能正确找寻预设最优解调频带,将容差内的谱峭度作为搜索指标具有较强鲁棒性。但若杂波干扰性过强,低频处谱峭度超过 2 kHz 处时,该算法便无法正确找寻到预设最优解调频带,如何有效滤除杂波干扰,将会是该算法今后研究方向之一。

4 基于机匣测点的模拟故障轴承试验

为验证本文所提出方法对于实测信号的有效性 与可靠性,开展滚动轴承各部件模拟故障试验。

4.1 试验对象及平台

采用试验轴承型号为 6206,在正常轴承内、外圈滚道采用电火花线切割各加工一个宽度为 0.6 mm,深度为 1 mm 的裂缝,用以模拟外圈、内圈滚道故障所产生的冲击;滚珠切割出一个直径约 1 mm,深度约 2 mm 的凹坑,用以模拟滚珠的损伤所生的冲击,加工得到的模拟故障轴承如图 4(a),6206 轴承几何尺寸如表 2,各元件故障频率阶次如表 3。

试验采用由沈阳航空发动机设计研究所设计制造的航空发动机转子-滚动轴承-机匣试验器,该转子试验器在结构设计与发动机核心机的机匣一致,尺寸缩小三倍,试验器及测点分布如图 4(b)。该试验器主要由本体、安装台架、电机、基础平台及润滑系统组成,可以模拟轴承损坏等典型故障。

4.2 外圈故障

选取机匣上方测点的外圈故障信号,采样频率 10 240 Hz,信号长度 8 192 个点,转速 1 539 r/min,时域波形如图 5(a),频谱如图 5(b),包络谱如图 5(c)。因为轴承运转时,外圈静止不动,所以外圈故障特征相对容易检测,在频谱和包络谱中均可以看到外圈故障的倍频成分,但外圈故障基频处均无明显能量集中。

下面采用 Multigram 以选取最优解调频带,令 $f_{\text{fault}}=f_o=91.59$ Hz,计算得到 Multigram 图像如图 6(a),得到最优解调中心频率为 1 062.42 Hz,带宽为 402.99 Hz。以该中心频率和带宽进行带通滤波,得到的滤波信号包络谱如图 6(b)。在图中可以看到理论外圈故障特征频率及谐波 $f_o, 2f_o, 3f_o, 4f_o, 5f_o$ 处附近

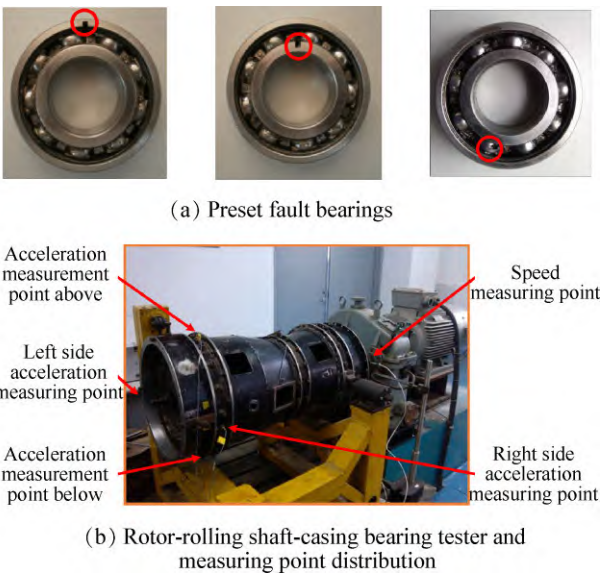


Fig. 4 Simulated fault bearing test site

Table 2 Geometric size of bearing

Parameter	Value
Inner race diameter/mm	30
Outer race diameter/mm	62
Number of balls	9
Ball diameter/mm	9.5
Pitch diameter/mm	46

Table 3 Fault frequency order of bearing components

Parameter	Value
Outer race	3.570 7
Inner race	5.429 3
Ball	2.317 8

均有明显幅值波峰,该方法可实现外圈模拟故障特征的有效提取。

为验证该方法可靠性,选取机匣上方测点的正常轴承信号,采样频率 10 240 Hz,信号长度 8 192 个点,转速 1 510 r/min,时域波形如图 7(a)。令 $f_{\text{fault}}=f_o=89.86$ Hz,计算得到 Multigram 图像如图 7(b),得到最优解调中心频率为 1 096.29 Hz,带宽为 449.30 Hz。以该中心频率和带宽阶次进行带通滤波,得到的滤波信号包络谱如图 7(c)。在图中只能提取出 $4f_i, 8f_i$ 对应成分,无明显外圈模拟故障特征信息。

4.3 内圈故障

选取机匣上方测点的内圈故障信号,采样频率 10 240 Hz,信号长度 8 192 个点,转速 1 499 r/min,时域波形如图 8(a),频谱如图 8(b),包络谱如图 8(c)。因为内圈与轴一同旋转,所以谱图中存在大量转频调制成分,内圈故障特征不易检测,仅在频谱中 $4f_i$ 附近有能量聚集,但波峰两侧有较大杂波干扰,无法

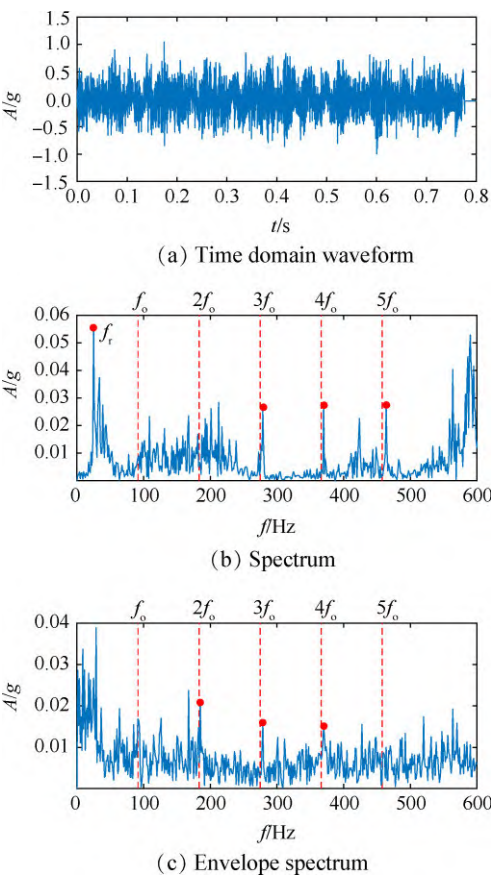


Fig. 5 Time domain waveform, spectrum and envelope spectrum of outer race preset fault signal

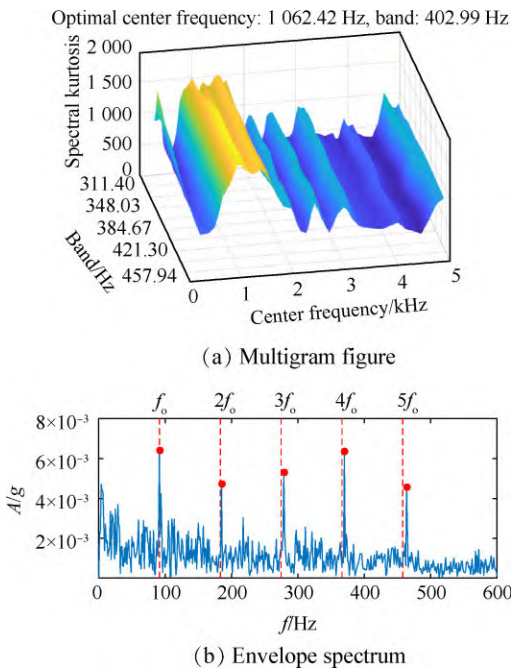


Fig. 6 Multigram demodulation results of outer race preset fault signal

确认其是否为内圈模拟故障特征频率谐波。

令 $f_{\text{fault}}=f_i=135.62\text{ Hz}$, 计算得到 Multigram 图像如图 9(a), 得到最优解调中心频率为 $1\,410.43\text{ Hz}$, 带宽

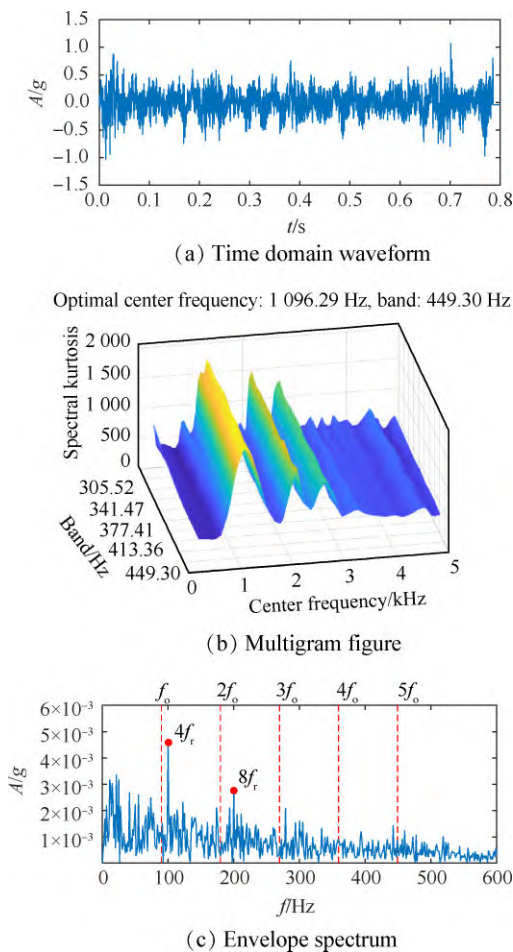


Fig. 7 $f_{\text{fault}}=f_o$, multigram demodulation results of normal signal

为 488.23 Hz 。得到的最优滤波信号包络谱如图 9 (b)。在图中可以看到理论内圈故障特征频率及谐波 $f_i, 2f_i$ 对应幅值波峰, 以及边频调制成分 $f_i-2f_r, f_i+f_r, f_i+2f_r$ 对应幅值波峰, $2f_i-f_r$ 对应幅值波峰, 该方法可实现内圈模拟故障特征的有效提取。

选用相同正常轴承信号, 令 $f_{\text{fault}}=f_i=136.64\text{ Hz}$, 计算得到 Multigram 图像如图 10(a), 得到最优解调中心频率为 819.82 Hz , 带宽为 655.85 Hz , 得到的最优滤波信号包络谱如图 10(b)。在图中无明显内圈模拟故障特征信息。

4.4 滚动体故障

选取机匣上方测点的滚动体故障信号, 采样频率 $10\,240\text{ Hz}$, 信号长度 $8\,192$ 个点, 转速 $1\,525\text{ r/min}$, 时域波形如图 11(a), 频谱如图 11(b), 包络谱如图 11 (c), 图中均无明显滚动体模拟故障特征。

若滚动体产生缺陷, 缺陷往往会与滚道内、外壁相继接触, 因此 $2f_b$ 更常作为滚动体的故障特征。令 $f_{\text{fault}}=2f_b=117.82\text{ Hz}$, 确定容差阶次范围 $[f_1, f_2]$, 计算得到 Multigram 图像如图 12(a), 得到最优解调中心频率

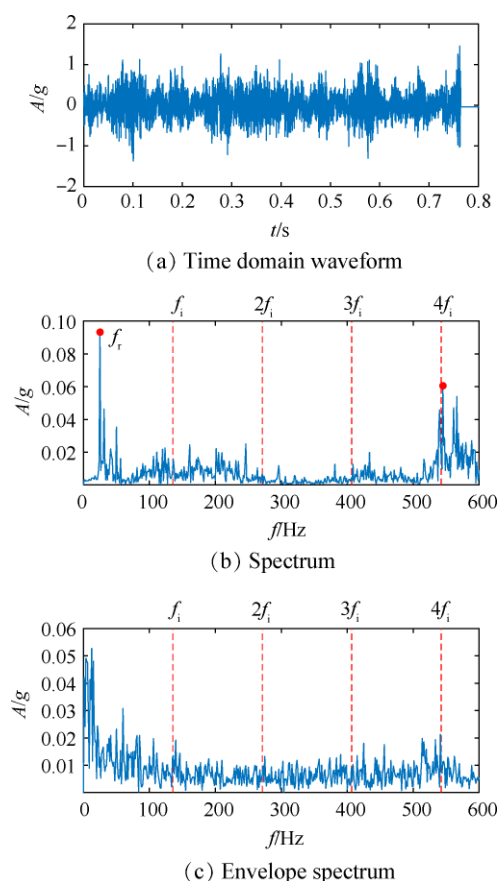


Fig. 8 Time domain waveform, spectrum and envelope spectrum of inner race preset fault signal

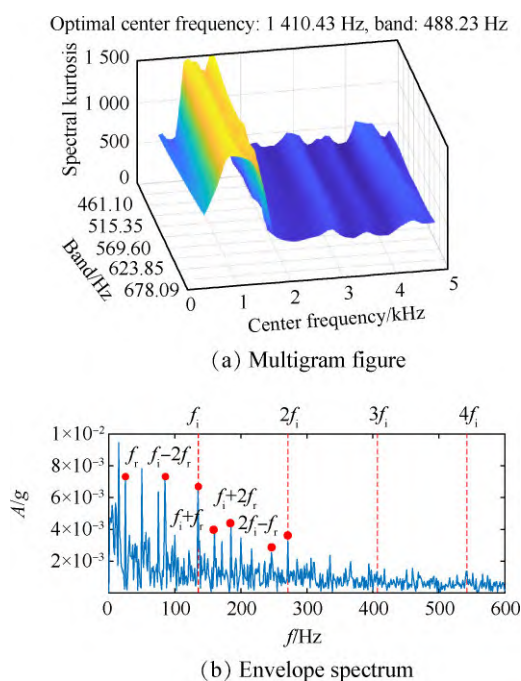


Fig. 9 Multigram demodulation results of inner race preset fault signal

871.84 Hz, 带宽为 377.01 Hz, 得到的最优滤波信号包络谱如图 12(b)。在图中可以看到理论滚动体故障

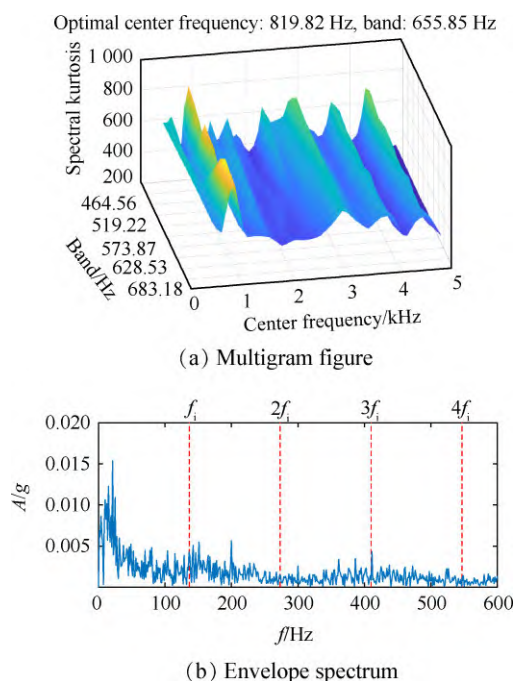


Fig. 10 $f_{\text{fault}}=f_i$, multigram demodulation results of normal signal

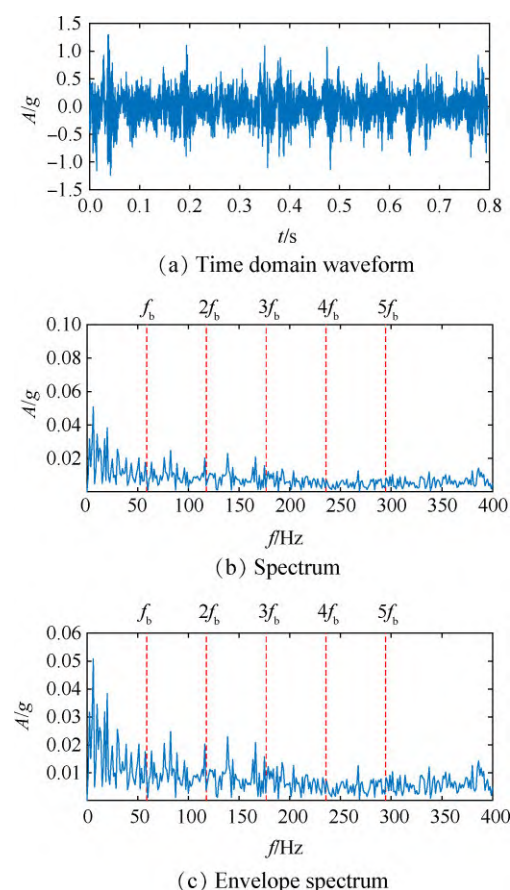


Fig. 11 Time domain waveform, spectrum and envelope spectrum of ball preset fault signal

特征频率 $2f_b, 3f_b$ 对应幅值波峰, 该方法可实现滚动体模拟故障特征的有效提取。

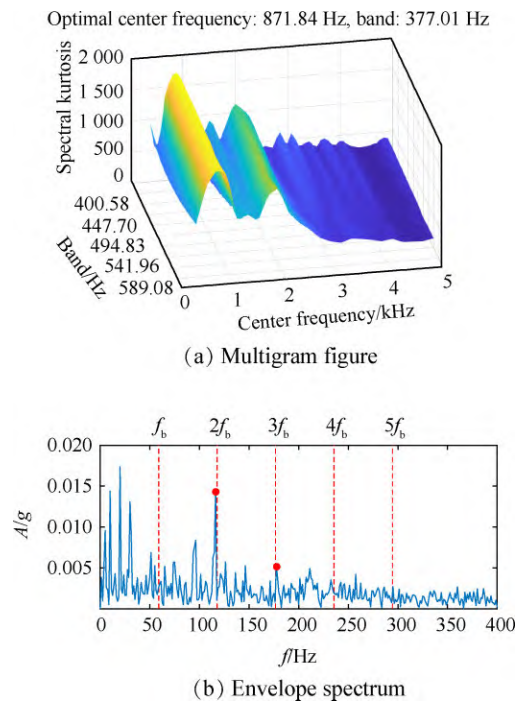


Fig. 12 Multigram demodulation results of ball preset fault signal

选用相同正常轴承信号,令 $f_{\text{fault}}=2f_b=116.66\text{ Hz}$,计算得到 Multigram 图像如图 13(a),得到最优解调中心频率为 $1\,516.58\text{ Hz}$,带宽为 559.97 Hz ,得到的最优滤波信号包络谱如图 13(b)。在图中只能提取出 $4f_r$, $8f_r$, $12f_r$ 对应幅值波峰,无明显滚动体模拟故障特征信息。

对于正常轴承信号的滤波包络谱,图 7(c)和图

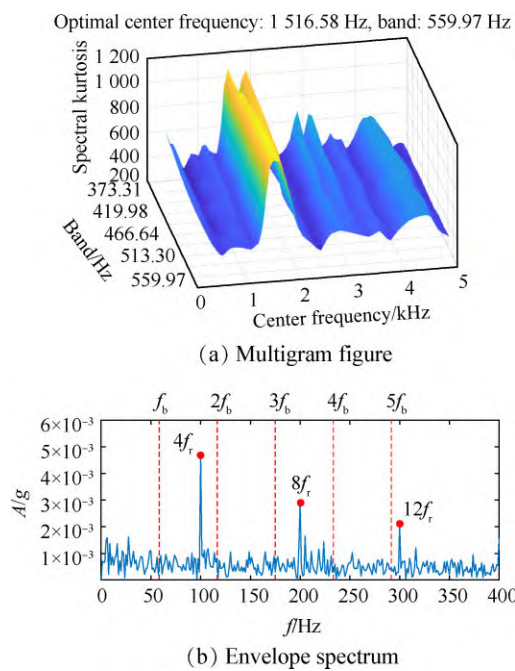


Fig. 13 $f_{\text{fault}}=2f_b$, multigram demodulation results of normal signal

13(b)中出现 $4f_r$ 及其倍频成分,而图 10(b)中并未出现,其原因在于 $4f_r$ 或其两侧较大幅值谱线处于 f_o 和 $2f_b$ 的容差范围内,而不在 f_r 的容差范围内。当转频倍频落入容差范围内时,Multigram 等同于对转频进行最优共振解调,可以通过计算转频及识别倍频的方式来判断。而图 7(c)和图 13(b)解调结果的差异在于容差范围不同,使得筛选出来的谱峭度最大值不同。

5 基于机匣测点的自然故障轴承试验

上节试验验证了所提方法可区分正常于不同类型的故障轴承,探讨了转速倍频对滤波效果的影响。本节将采用早期内圈剥落故障的轴承代替电火花切割的人为加工模拟故障轴承,模拟真实环境下的轴承故障,并进行多种经典共振解调方法滤波效果的比较,进一步测试所提方法的有效性。

5.1 疲劳加速试验

本试验采用 ABLT-1A 轴承疲劳强化试验机来加工滚动轴承故障,由电传系统、试验头与试验头座、试验机由润滑系统、液压加载系统、电气控制系统、计算机监控系统组成。如图 14(a)所示。经过 91 h 的疲劳加速试验,最终得到内圈有初始剥落的故障轴承,如图 14(b)所示。

5.2 信号分析

选取机匣上方测点的内圈自然故障信号,采样频率 $10\,240\text{ Hz}$,信号长度 $10\,240$ 个点,转速 986 r/min ,时



(a) ABLT-1A bearing fatigue strengthening testing machine



(b) Bearing fatigue strengthening test results

Fig. 14 Natural fault bearing test site

域波形如图15(a),频谱如图15(b),包络谱如图15(c)。频谱中可以看到微弱的内圈故障特征 f_i ,包络谱中可以看到 $f_i, 4f_i$ 对应幅值波峰,以及边频调制成分 f_i-2f_r, f_i+2f_r 和 $4f_i-2f_r, 4f_i+2f_r$ 对应幅值波峰,但幅值均低于 f_r 和 $2f_r$ 对应成分。

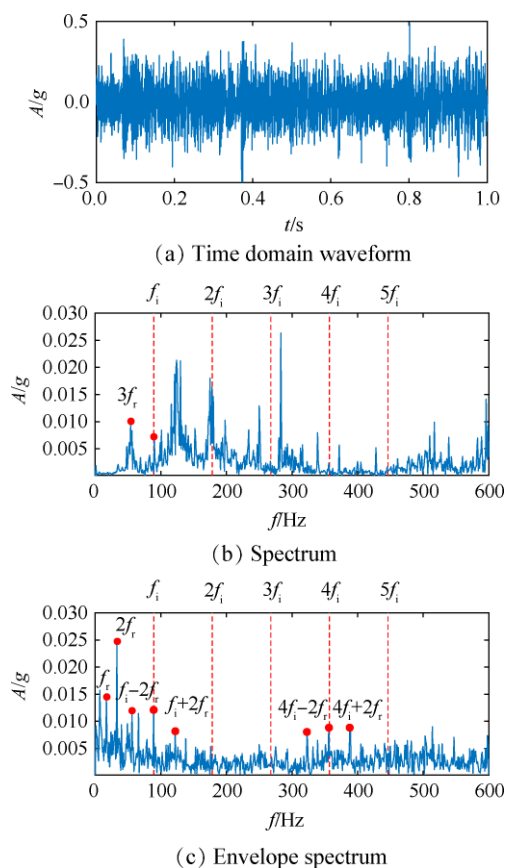
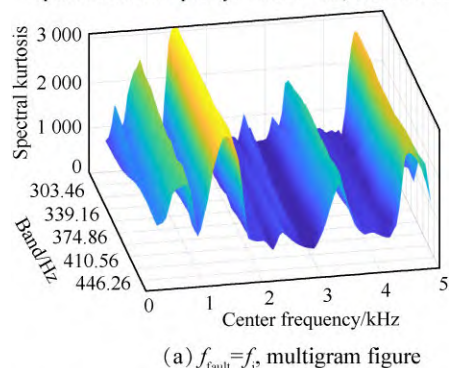


Fig. 15 Time domain waveform, spectrum and envelope spectrum of inner race natural spalling fault signal

实际检测中,无法提前预知是否存在故障以及故障类型,需分别设置 f_{fault} 为 f_i, f_o 和 $2f_b$ 。首先令 $f_{\text{fault}}=f_i=89.25$ Hz,确定容差阶次范围 $[f_1, f_2]$,计算得到Multigram图像如图16(a),得到最优解调中心频率为1 463.73 Hz,带宽为285.61 Hz。以该中心频率和带

Optimal center frequency: 1 463.73 Hz, band: 285.61 Hz



(a) $f_{\text{fault}}=f_i$, multigram figure

宽进行带通滤波,得到的滤波信号包络谱如图16(b)。在图中可以看到明显的理论内圈故障特征频率 f_i 对应的幅值波峰,幅值大于 $f_r, 2f_r$ 对应成分,以及边频调制成分 f_i-2f_r, f_i+2f_r 对应幅值波峰,可实现内圈自然剥落故障特征的有效提取。

令 $f_{\text{fault}}=f_o=58.70$ Hz和 $f_{\text{fault}}=2f_b=76.23$ Hz,得到的Multigram和滤波信号包络谱分别如图16(c)~(f)。在图16(d)和图16(f)中,可以看到杂波和转速倍频 $5f_r$ 接近 f_o 和 $2f_b$,但存在一定频率上的偏差,幅值均低于转频,并不突出,无明显倍频成分,且和上节正常轴承滤波信号解调结果不符。综上所述,可以诊断检测轴承为内圈故障。

5.3 对比分析

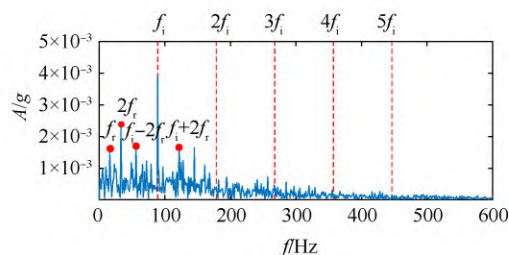
为进一步说明Multigram算法的优越性,下面将对对比分析Multigram与Fast-Kurtogram, Protrugram, Autogram和Infogram四种经典共振解调算法解调效果。

5.3.1 Fast-Kurtogram

对原始信号采用Fast-Kurtogram选取最优解调频带,分解层数设置为5,得到的Fast-Kurtogram图像如图17(a),中心频率为1 280.00 Hz,带宽为2 560.00 Hz。以该中心频率和带宽进行带通滤波,得到的滤波信号包络谱如图17(b)。在图中可以看到 $f_i, 4f_i$ 对应幅值波峰,以及边频调制成分 f_i-2f_r, f_i+2f_r 和 $4f_i-2f_r, 4f_i+2f_r$ 对应幅值波峰。受噪声影响,Fast-Kurtogram得到的最优解调频带相当于一个低通滤波器,滤除信号高频成分,频带范围过宽,得到的滤波信号包络谱与图15(c)类似,只是整体幅值有所下降,杂波成分为未得到有效滤除,故障特征识别度未得到显著提升。

5.3.2 Protrugram

对原始信号使用Protrugram选取最优解调频带,初始带宽需根据经验在轴承故障频率3~5倍范围内设置,本文设置为285.61 Hz,与Multigram得到的最优带宽相同,搜索间隔阶次分别设置为1 Hz, 10 Hz, 100 Hz,运行电脑CPU为i5-9600K,计算时间为10次



(b) $f_{\text{fault}}=f_i$, envelope spectrum

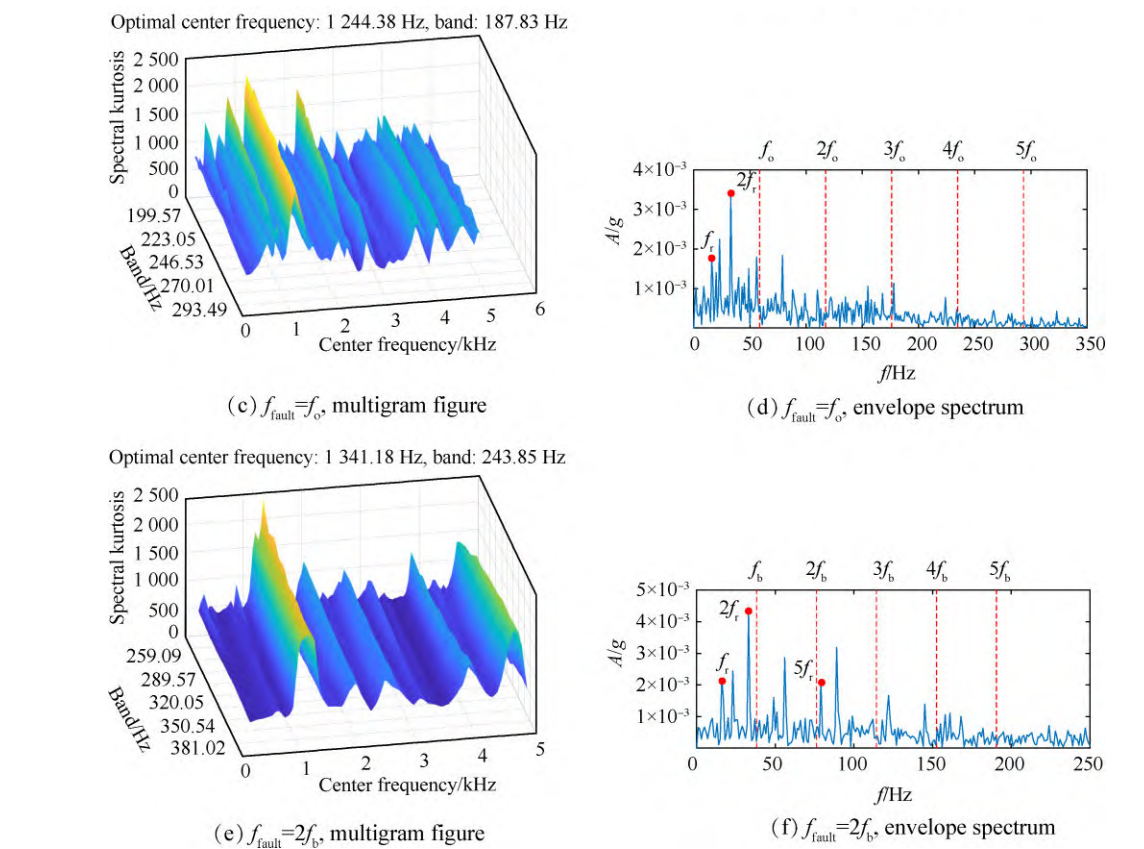


Fig. 16 Different type of f_{fault} , multigram demodulation results of inner race natural spalling fault signal

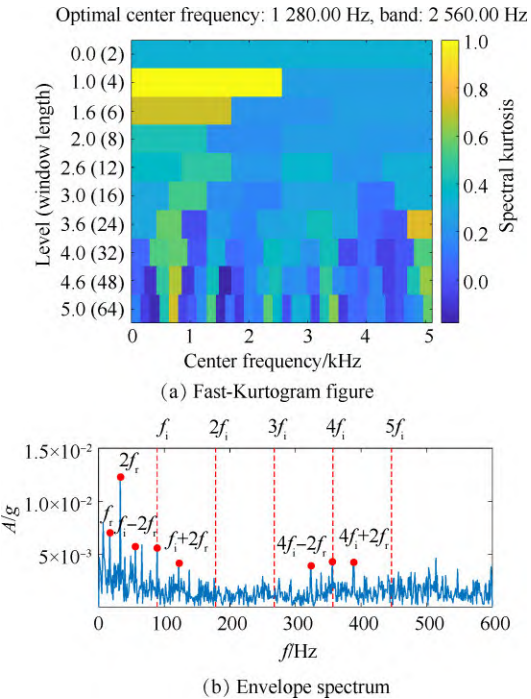


Fig. 17 Fast-Kurtogram demodulation results

计算时长的均值,对比结果如表 4。由表可知,Multi-gram 运行时间为 10.35 s,与搜索间隔为 100 Hz 的 Protrugram 运行时间相近。Multigram 虽在 Protrugram 的基础上增加了多层滑动滤波期组,但由于 f_{band} 和 f_{step} 由

密到疏的搭配,并非按照固定较小的搜索间隔进行滤波,保证了整体的计算效率。

得到的搜索间隔为 1 Hz 的 Protrugram 曲线如图 18(a),最优中心频率为 371.61 Hz。以该中心频率和带宽进行带通滤波,得到的滤波信号包络谱如图 18(b)。在图中可以看到 f_i , $4f_i$ 对应幅值波峰,以及边频调制成分 f_i+2f_i , $4f_i-2f_i$, $4f_i+2f_i$ 对应幅值波峰,但两者幅值均低于 $2f_i$ 对应成分。

5.3.3 Autogram

对原始信号采用 Autogram 选取最优解调频带,分解层数设置为 5,得到的 Autogram 图像如图 19(a),中心频率为 3 440.00 Hz,带宽为 160.00 Hz。以该中心频率和带宽进行带通滤波,得到的滤波信号包络谱如图 19(b)。在图中可以看到 f_i 对应幅值波峰,以及边频调制成分 f_i-f_i 对应幅值波峰。该频带受噪声影响较为严重,特征频率谱线两侧有大量杂波干扰,故障特征识别度并未得到显著提升。

5.3.4 Infogram

对原始信号采用 Infogram 选取最优解调频带,分解层数设置为 5,脉冲特性权重和循环平稳特征权重各为 0.5,得到的 Infogram 图像如图 20(a),中心频率为 640.00 Hz,带宽为 426.67 Hz。以该中心频率和带

Table 4 Multigram vs. Protrugram

Method	Band/Hz	Search interval /Hz	Optimal center frequency /Hz	Time/s
Multigram		—	1 463.73	10.35
Protrugram	285.61	1	371.61	79.15
		10	375.61	8.01
		100	385.61	0.89

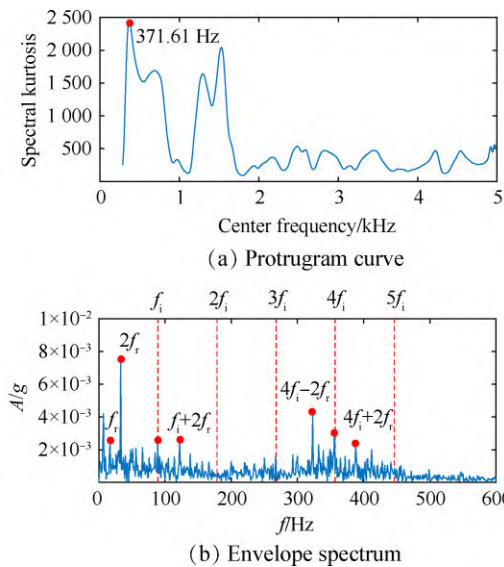


Fig. 18 Protrugram demodulation results

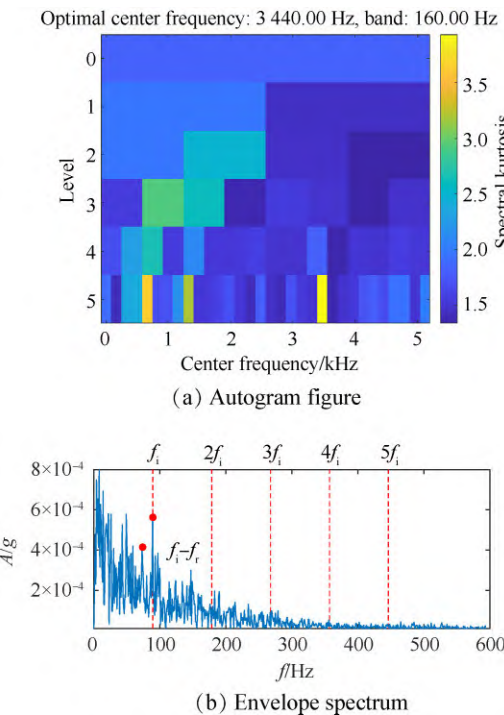


Fig. 19 Autogram demodulation results

宽进行带通滤波,得到的滤波信号包络谱如图 20 (b)。在图中可以看到 f_i 对应幅值波峰,以及边频调制成分 f_i+2f_i 对应幅值波峰。该频带解调结果与 Multigram 结果类似,但故障特征频率幅值低于 $2f_i$,两侧边频调制成分较少。

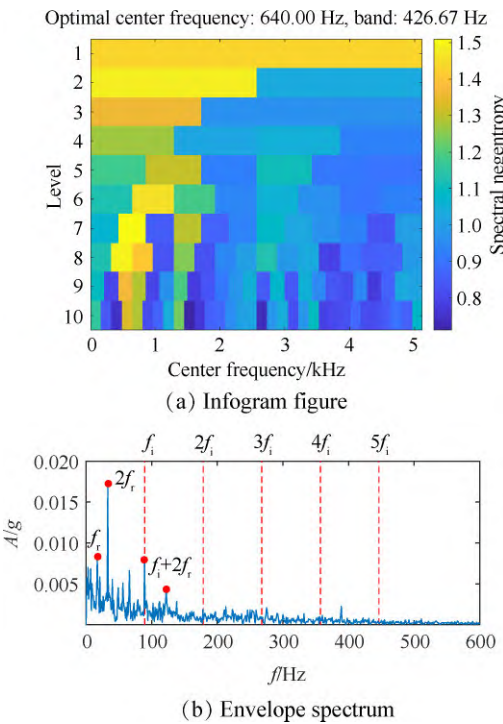


Fig. 20 Infogram demodulation results

综上所述,针对该内圈自然故障信号, Multigram 采用多层滑动滤波器组,避免了 Protrugram 需根据人为经验设置滤波带宽的问题,也使得滤波频段的选择更加灵活,筛选效果优于 Fast-Kurtogram, Autogram 和 Infogram 需在固定频段下提取共振频带的方法;采用由密到疏的搜索间隔和带宽组合,保证了整体的运算效率;将容差范围内的谱峭度作为搜索指标,能克服噪声和杂波干扰,凸显故障基频,相比于四种经典共振解调算法, Multigram 诊断结果更具优势。

6 结 论

本文针对 Fast-Kurtogram 易受非高斯噪声干扰的不足,提出一种基于多层滑动滤波器组,找寻最优解调频带的新方法——Multigram。仿真和两组试验结果表明:

- (1) Multigram 能克服非高斯噪声干扰,实现故障特征的有效提取,具有较强鲁棒性。
- (2) Multigram 适用于滚动轴承各部件的故障检测,能有效识别共振频带,实现滚动轴承故障的准确

判别,可靠性高。

(3)相较于Fast-Kurtogram、Protrugram、Autogram和Infogram,Multigram提取出的自然故障基频成分特征更加显著,可用于实际滚动轴承早期故障诊断,具有较高工程应用价值和实际推广前景。

致谢:感谢国家科技重大专项和国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [2] LUO H G, QIU H, GHANIME G, et al. Synthesized synchronous sampling technique for differential bearing damage detection[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132: 072501.
- [3] 沙云东, 赵宇, 栾孝驰, 等. 基于多参数信息融合筛选的滚动轴承振动信号特征提取与表征方法[J]. *推进技术*, 2023, 44(7): 2205050. (SHA Y D, ZHAO Y, LUAN X C, et al. Feature extraction and characterization of rolling bearing vibration signal based on multi parameter information fusion and screening[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(7): 2205050.)
- [4] 陈果. 滚动轴承表面损伤故障智能诊断新方法[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(1): 44-49.
- [5] 赵兴. 基于角度域循环平稳分析的滚动轴承故障诊断方法研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
- [6] SMITH W A, BORGHESEANI P, NI Q, et al. Optimal demodulation-band selection for envelope-based diagnostics: a comparative study of traditional and novel tools[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 134(1): 106303.
- [7] RANDALL R B, ANTONI J. Rolling element bearing diagnostics—a tutorial[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(2): 485-520.
- [8] 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.
- [9] 倪清. 基于最优解调频带选择的滚动轴承故障诊断方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [10] ANTONI J, RANDALL R B. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(2): 308-331.
- [11] ANTONI J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(1): 108-124.
- [12] TIAN X G, GU J X, REHAB I, et al. A robust detector for rolling element bearing condition monitoring based on the modulation signal bispectrum and its performance evaluation against the kurtogram[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 100(1): 167-187.
- [13] WANG L, LIU Z W, CAI H R, et al. Subband averaging kurtogram with dual-tree complex wavelet packet transform for rotating machinery fault diagnosis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 142: 106755.
- [14] BARSZCZ T, JABŁOŃSKI A. A novel method for the optimal band selection for vibration signal demodulation and comparison with the kurtogram[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(1): 431-451.
- [15] 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(15): 294-318.
- [16] ANTONI J. The Infogram: entropic evidence of the signature of repetitive transients[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2016, 74(1): 73-94.

(编辑:梅瑛)

A new method to select optimal demodulation frequency band: Multigram

SHENG Jiajiu¹, CHEN Guo², HE Zhiyuan², LIU Yaobin², WANG Hao³, WEI Xunkai³

- (1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Liyang 213300, China;
3. Beijing Aeronautical Engineering Technical Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to solve the problem that Fast-Kurtogram was susceptible to non-Gaussian noise, a new method called Multigram based on multilayer sliding filter banks was proposed to find the optimal demodulation frequency band. Firstly, using the idea of Protrugram sliding band segmentation, a filter group of multi-layer, multi-filtering center and band was constructed. Then, according to the different filtering centers and band of each layer, the bandpass filtering was carried out successively. The envelope, autocorrelation, and spectrum analysis were carried out for the filtered signal. After that the spectral kurtosis was calculated within the tolerance range to select the optimal demodulation frequency band. Finally, the optimal filtering center and band were used for bandpass filtering and envelope spectrum analysis. The proposed method was applied to the fault diagnosis of rolling bearings. The results of the simulated fault bearing test and the natural fault bearing test based on the measuring points of the casing show that the proposed method can effectively select the appropriate demodulation frequency band, and the diagnosis results are more superior than those of Fast-Kurtogram, Protrugram, Autogram and Infogram.

Key words: Fault diagnosis; Rolling bearings; Multigram; Resonance demodulation; Optimal demodulation frequency band

Received: 2023-05-24; **Revised:** 2023-07-16.

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2305044

Foundation items: National Science and Technology Major Project of China(J2019-IV-004-0071); National Natural Science Foundation of China(52272436).

Corresponding author: CHEN Guo, E-mail: cgzyx@263.net

2305044-13