

Morlet 复小波频带优化及其在中介轴承故障诊断中的应用

艾延廷, 田博文, 田 晶, 孙志航, 王 志

(沈阳航空航天大学 辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136)

摘 要: 针对中介轴承故障信号特点,提出了一个既能反映信号中冲击成分强弱,又能突出周期性脉冲特征的新的频带优化参数——局部包络谱峰值因子,并应用其对中介轴承故障信号 Morlet 复小波共振解调频带进行优化。为验证该方法的优越性,搭建双转子实验台开展中介轴承外圈故障及内圈故障模拟实验,采用局部包络谱峰值因子频带优化的 Morlet 复小波的对采集的试验数据进行分析。以内外圈转速均为 600 r/min 的中介轴承为例,外圈故障频率的理论值为 88 Hz,利用局部包络谱峰值因子频带优化得到的外圈故障频率为 87.25 Hz。结果表明该指标能够提取出中介轴承故障频率峰值,有效地将故障信息从振动信号中分离出来,实现中介轴承故障诊断。

关 键 词: 中介轴承; Morlet 小波; 共振解调; 频带优化; 故障诊断

中图分类号: V231.92; TH133.33

文献标志码: A

Frequency band optimization of Morlet complex wavelet and its application in fault diagnosis of inter-shaft bearing

AI Yanting, TIAN Bowen, TIAN Jing, SUN Zhihang, WANG Zhi

(Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technology for Aviation

Propulsion System, Liaoning Province,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: According to the characteristics of fault signal of inter-shaft bearing, a new band optimization parameter—the peak factor of local envelope spectrum, was proposed, which can not only reflect the strength of impulse component in the signal, but also highlight the characteristics of periodic impulse. It was applied to optimize the frequency band of Morlet complex wavelet resonance demodulation of fault signal of inter-shaft bearing. In order to verify the superiority of this method, a double-rotor test-bed was built to simulate the outer ring and inner ring faults of inter-shaft bearings. The Morlet complex wavelet optimized by the local envelope spectrum peak factor band was used to analyze the collected test data. Taking the inter-shaft bearing with the inner and outer ring speeds of 600 r/min as an example, the theoretical value of the outer ring fault frequency was 88 Hz, and the outer ring fault frequency obtained by the local envelope spectrum peak factor band optimization was 87.25

收稿日期: 2019-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(11702177); 辽宁省自然科学基金(20180550650); 辽宁省教育厅项目(LN201710)

作者简介: 艾延廷(1963—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事航空发动机振动分析与故障诊断技术方面研究。

通信作者: 田晶(1987—),男,副教授、硕士生导师,博士,主要研究方向为航空发动机状态监测和故障诊断。

E-mail: tianjing@188.com

引用格式: 艾延廷,田博文,田晶,等. Morlet 复小波频带优化及其在中介轴承故障诊断中的应用[J]. 航空动力学报,2020,35(1): 153-161. AI Yanting, TIAN Bowen, TIAN Jing, et al. Frequency band optimization of Morlet complex wavelet and its application in fault diagnosis of inter-shaft bearing[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1): 153-161.

Hz. The results show that the index can extract the peak fault frequency of the inter-shaft bearing, effectively separate the fault information from the vibration signal, and realize the fault diagnosis of the inter-shaft bearing.

Key words: inter-shaft bearing; Morlet wavelet; resonance demodulation; frequency band optimization; fault diagnosis

中介轴承广泛应用于航空发动机多转子系统的轴间支承方案。不同于常规滚动轴承,中介轴承工作时内外圈同时转动,且润滑困难,导致其故障发生率较高^[1]。中介轴承一旦出现故障,将对航空发动机安全运行造成极大威胁^[2]。由于中介轴承故障源距位于机匣上的振动传感器传递路径长,使测得的振动信号中故障特征微弱,常被淹没在强的背景噪声中^[3]。因此,开展旨在提高故障诊断敏感性的研究对中介轴承故障诊断具有重要的理论及实际意义。

当轴承内外圈出现点蚀、剥落等局部损伤时,轴承运行过程中滚动体与外圈接触造成冲击,会激起轴承、轴承座、传感器等相关结构的共振,因此振动传感器会采集到丰富的冲击共振信号成分。共振解调是一种可从复杂振动信号中提取冲击信号的方法,被广泛应用于旋转机械冲击类故障特征提取^[4-6]。国内外许多学者在这方面做了大量的工作,如王平等^[7]提出自适应共振解调技术,在共振解调处理之前依靠对振动信号的频谱分析自动识别高频共振频率,然后根据被测对象的高频共振频率自适应地改变带通滤波器的中心频率。周智等^[8]提出了自适应消噪与自适应共振解调相结合的方法,首先利用集合经验模态分解(EEMD)自适应地将信号分解成多个分量,通过互相关系数方法进行自适应重构以突出故障特征信号,然后利用谱峭度自动确定带通滤波器的中心频率和带宽,最后对滤波后的信号进行能量算子解调谱分析。Shi 等^[9]利用经验模态分解(EMD)将实验信号分解,得到固有模态函数(IMF)的分量,然后计算各 IMF 分量的相关系数,通过共振解调分析各 IMF 分量的最高相关系数。

复小波共振解调可以看作是利用不同参数的滤波器对采集的信号进行滤波,从中找到能够体现故障信息的滤波信号^[10-12]。复小波中心频率和带宽的选择在共振解调中非常关键。通过观察不同参数、工况、故障类型滤波信号频谱来确定共振解调效果显然不现实,一般要引入一个参数来判断。如张龙等^[13]提出的包络谱峰值因子应用于

复平移 Morlet 复小波共振解调的频带优化。刘清清等^[14]利用峭度值筛选故障敏感分量,最后对故障敏感分量进行频谱分析提取故障特征频率。Bozchalooi 等^[15]提出平滑度优化新指标,并应用于滚动轴承故障诊断。针对现有频带优化方法不适用于中介轴承故障诊断问题,本文提出了以局部包络谱峰值因子为评价指标的频带优化方法,并通过故障试验数据分析验证该方法的有效性 & 优越性。

1 Morlet 复小波共振解调

Morlet 小波是由法国地理科学家 Morlet 在分析地震波的局部性时提出的。Morlet 复小波 $\psi(t)$ 的定义为

$$\psi(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}} \exp(-\sigma^2 t^2) \exp(i2\pi f_0 t) \tag{1}$$

式中 t 为采样时间,中心频率 f_0 决定小波振荡快慢,参数 σ 决定小波衰减速度。

由于 Morlet 小波的形状与冲击信号较为相似,因此它在机械系统冲击信号检测当中应用十分广泛。从时域表达式可以看出,Morlet 小波由实部和虚部两部分组成,实部为偶函数,虚部为奇函数,其数学表达式分别为

$$\psi_r(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}} \exp(-\sigma^2 t^2) \cos(2\pi f_0 t) \tag{2}$$

$$\psi_i(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}} \exp(-\sigma^2 t^2) \sin(2\pi f_0 t) \tag{3}$$

时域实部波形是一个呈指数衰减的余弦波,如图 1 所示。

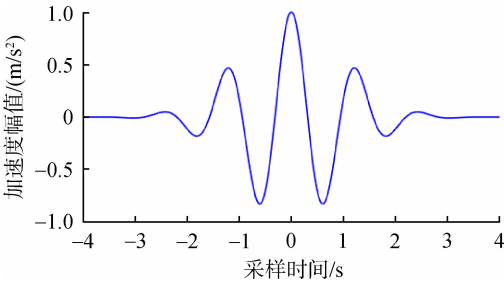


图 1 Morlet 小波时域波形

Fig. 1 Morlet wavelet waveform in time domain

Morlet 小波的傅里叶变换频域形式为:

$$\psi(f) = \exp\left[-\frac{\pi^2}{\sigma^2}(f-f_0)^2\right] \quad (4)$$

式中 $\psi(f)$ 是实函数, 在频域中, σ 控制小波窗口宽度, f_0 控制窗口中心位置。

如图 2 所示, Morlet 小波在频域具有高斯窗函数的形状, 因此, Morlet 小波可以看作一个具有可变中心频率和带宽的滤波器, 小波变换的时频分辨率随着这两个参数而变化^[16-17]。

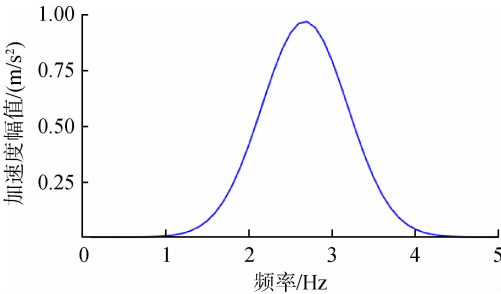


图 2 Morlet 小波频域波形

Fig. 2 Morlet wavelet waveform in frequency domain

利用 Morlet 小波共振解调步骤如下: 首先根据转子转频及传感器分辨率确定小波中心频率参数 f_0 及带宽参数 σ 范围, 然后将两个参数离散化, 根据每组 (f_0, σ) 构造不同的 Morlet 小波, 并对待分析信号进行包络分析。利用不同的小波参数求出各组 Morlet 小波评价指标, 根据评价指标确定最优参数组合, 并对原始信号进行包络分析, 根据包络信号频谱分布确定故障特征提取效果^[18]。

2 基于 Morlet 复小波中介轴承故障特征提取

2.1 基于 Morlet 复小波的故障特征提取方法

包络谱峰值因子 (crest factor of envelope spectrum, 记为 E_c) 是由张龙等^[13] 在滚动轴承故障分析时提出的物理量, 作为共振解调滤波信号的评价指标, 能够有效地描述轴承振动信号中的循环冲击类特征。

其数学定义如下:

$$E_c = \frac{e_{\max}}{e_{\text{rms}}} \quad (5)$$

式中 E_c 为包络谱峰值因子, $e_{\max}$ 、 e_{rms} 分别定义为包络谱 e 在一定范围内的最大值及有效值。

基于 Morlet 复小波的故障特征提取流程如下:

1) 通过传感器采集轴承座上的振动加速度

信号。

2) 根据实验工作状态及轴承类型决定 Morlet 复小波滤波器的参数搜索范围并离散化, 构造出多组参数组合。

3) 利用不同的参数组合构造 Morlet 复小波滤波器, 并对步骤 1) 采集的加速度信号进行滤波。

4) 求出各组滤波信号包络谱峰值因子 E_c , 最大 E_c 对应的参数组合即为最优的复小波滤波参数。

5) 利用步骤 4) 构造的滤波器对原始信号进行滤波, 并对获得的包络信号进行傅里叶变换。对频谱图进行分析, 判断故障特征提取效果。

2.2 中介轴承故障特征提取

为满足实验分析要求, 搭建了中介轴承故障模拟实验台, 如图 3 所示。实验台主要由电动机、滚动轴承、中介轴承、配重盘及轴构成, 用来模拟中介轴承运行状态。传感器选择加速度传感器, 分别布置在中介轴承台座上的 X、Y、Z 三个方向, 如图 4 所示。选择型号为 NU202M 的中介轴承, 轴承参数如表 1 所示。利用电火花加工了外圈、内圈缺陷, 模拟两种类型轴承故障, 如图 5 所示。轴承内外圈旋转方向相反。

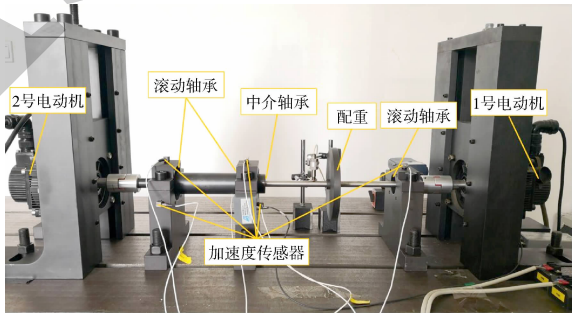


图 3 中介轴承故障模拟试验台

Fig. 3 Fault simulation test bench for inter-shaft bearing

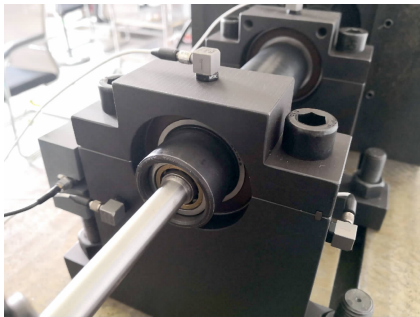


图 4 传感器位置图

Fig. 4 Sensor position map

表 1 NU202M 轴承参数
Table 1 Parameters of NU202M bearing

参数	数值
内圈直径/mm	15
外圈直径/mm	35
节圆直径/mm	20
接触角/(°)	0
滚子数目	11
滚动体直径/mm	5



图 5 带局部故障的中介轴承
Fig. 5 Inter-shaft bearing with local failure

本小节中介轴承实际转速保持不变,而内外圈转速变化,且轴承内外圈旋转方向相反。传感器采集分辨率设置为 16 384 Hz,采样时间为 30 s,每组实验皆保持两种轴承实际转速为 1 200 r/min (即转频为 20 Hz)下采集。

1) 滚动轴承故障特征

图 6 所示为滚动轴承外圈故障特征共振解调包络谱, F_o 和 F_i 分别为外圈转频和内圈转频, f_o 和 f_i 分别为外圈和内圈的故障频率。由转速及轴承参数可计算出外圈故障的理论特征频率为 88 Hz。由图 6 可知故障频率的峰值为 87.25 Hz,其左右边带分别为 77.22 Hz 和 97.31 Hz,在误差允许范围内,故障频率峰值与边带的差值为 10

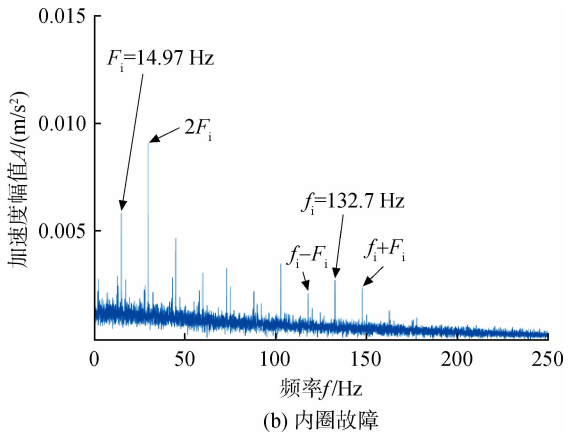
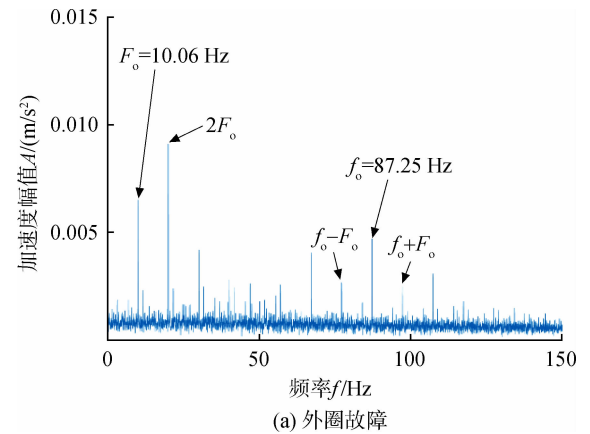
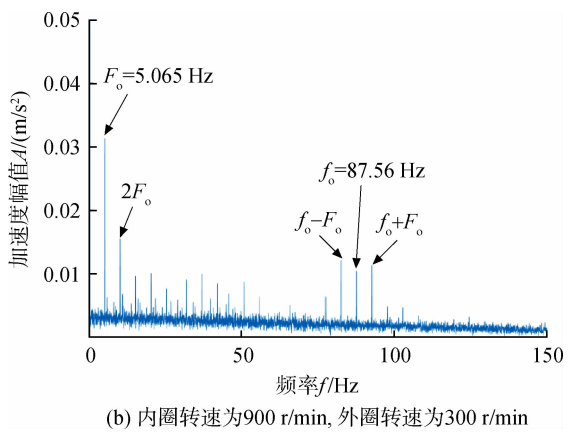
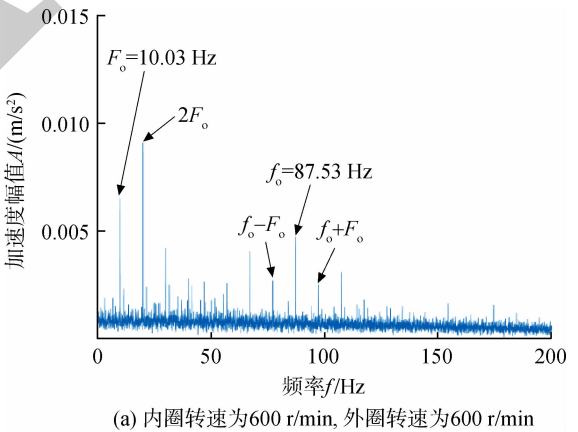


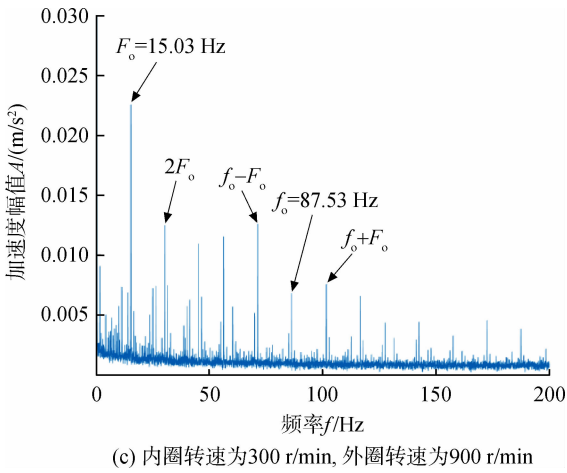
图 6 滚动轴承故障特征共振解调包络谱
Fig. 6 Envelope spectrum of resonance demodulation for rolling bearing fault characteristics

Hz,与转频相同,因此滚动轴承外圈故障特征被有效地提取出来。

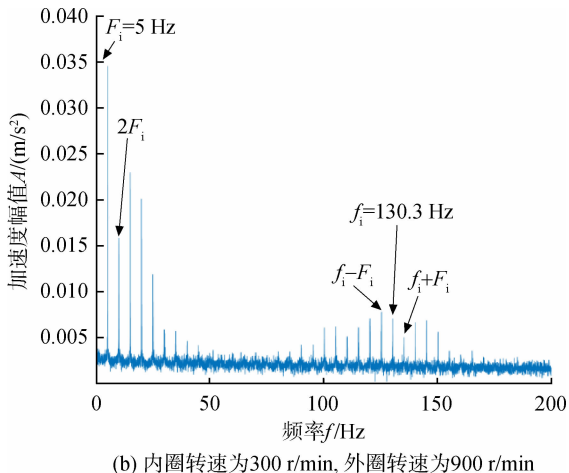
2) 中介轴承故障特征

图 7 所示为不同转速下中介轴承外圈故障共振解调包络谱。由图 7(a)可知,当内外圈转速相同时,滤波效果较好。观察图 7(b)、图 7(c),尽管故障频率能被提取出来,但效果明显不好,尤其在图 7(c)中,外圈转速加快时故障特征频率已经低于附近边带调制频率,甚至低于多倍边带。





(c) 内圈转速为300 r/min, 外圈转速为900 r/min

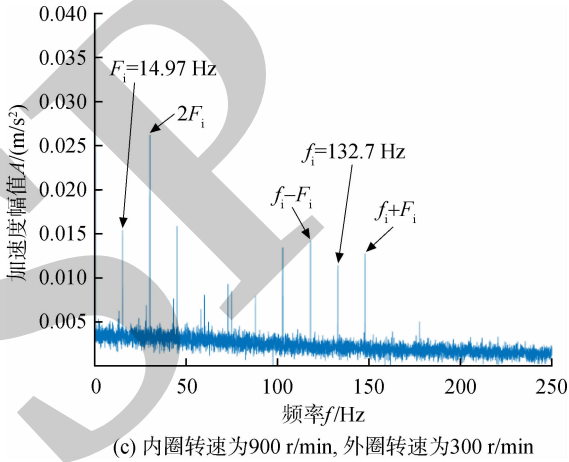


(b) 内圈转速为300 r/min, 外圈转速为900 r/min

图 7 不同转速下中介轴承外圈故障特征共振解调包络谱
Fig. 7 Envelope spectrum of resonance demodulation for fault characteristic of outer ring of inter-shaft bearing at different rotational speed

图 8 所示为不同转速下中介轴承内圈故障特征共振解调包络谱。根据中介轴承故障频率计算公式^[2]可知, 转频为 20 Hz 时, 中介轴承内圈特征故障频率为 132 Hz。以图 8(a) 为例, 10.03 Hz 处峰值为转频, 根据 134.1 Hz 峰值及其附近有 10 Hz 左右边带, 可以推断出 134.1 Hz 处峰值即为内圈故障冲击信号。相比外圈故障特征提取, 内圈故障特征提取更加困难。尽管特征频率处有峰值, 但与转速相互调制产生边带峰值更大。

由图 8 中三种不同内圈故障包络频谱图可知, 尽管故障特征能被提取出来, 但效果都不令人满意, 尤其外圈转速越大时产生的振动也越大, 导致内圈故障特征信号在被传感器收集之前更加衰弱, 影响了共振解调的滤波效果。与外圈故障特征提取类似, 在不同转速下, 以包络谱峰值因子为评价指标的 Morlet 复小波共振解调方法都不能有效的将中介轴承故障特征提取出来。



(c) 内圈转速为900 r/min, 外圈转速为300 r/min

图 8 不同转速下中介轴承内圈故障特征共振解调包络谱

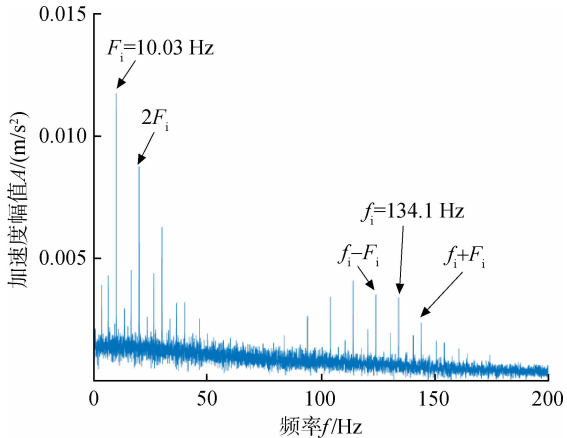
Fig. 8 Envelope spectrum of resonance demodulation for fault characteristic of inner ring of inter-shaft bearing at different rotational speed

3 Morlet 复小波滤波效果指标优化

3.1 中介轴承故障特征分析

与普通滚动轴承相比, 中介轴承故障特征信号不仅路径更为复杂, 而且传递时还要经过同样在旋转的滚动轴承。这样中介轴承的故障特征信号会被极大减弱, 且进一步增加了与滚动轴承产生的调制信号, 即有时会产生故障频率峰值较低而边带幅值较高的情况, 进而影响中介轴承故障特征提取的效果。

以包络谱峰值因子作为评价指标衡量 Morlet 复小波共振解调效果时, 取值范围为 $[F_r, f_s/2]$, 其中 F_r 和 f_s 分别表示轴承的转频和采样频率。即下限为二倍转频, 防止转频及其二倍转频振动幅值超过故障频率幅值时影响包络谱峰值因子, 以至于影响最佳滤波参数组合的选取。上限选择为



(a) 内圈转速为600 r/min, 外圈转速为600 r/min

采样频率的 1/2 以防发生频率混叠。在提取滚动轴承振动故障信息时,由于滚动轴承传递路径较简单且路径上无其他运动部件,在包络谱全范围内故障频率是除转速及其倍频外最大的峰值。但是此评价指标并不适用于中介轴承。

如图 9 所示,中介轴承结构更加复杂,传递路径更长,路径上还有更多的激振源,导致振动信号的峰值分布规律与滚动轴承相比并不完全一样。中介轴承在运转时,传递路径上的高压转子一直在受迫振动。

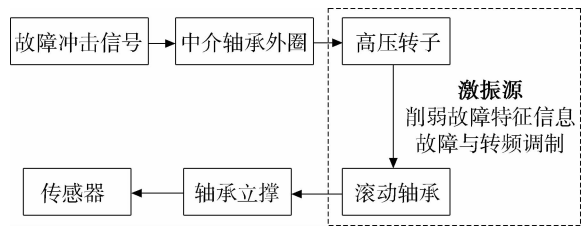


图 9 中介轴承故障特征传递图

Fig. 9 Fault characteristic transfer diagram of inter-shaft bearing

3.2 局部包络谱峰值因子 Morlet 复小波的建立

本文提出了以包络谱峰值因子为评价参数的改进方法-局部包络谱峰值因子,通过以故障特征频率峰值为分子,故障特征频率及其附近的频带的有效值为分母,两者组合作为局部包络谱峰值因子取值范围。局部包络谱峰值因子定义及新方法取值范围如下:

$$E_c = \frac{e_{\max}}{e_{\text{rms}}} \tag{6}$$

式中 $e_{\max}$ 为共振解调包络谱上故障特征频率的峰值(单位:Hz)。由于装配及转速偏差,中介轴承在实际运行中故障特征频率会与理论计算有一定偏差,但一般不会超过 2 Hz,因此 $e_{\max}$ 取值为 $[f-2, f+2]$ 范围内的最大值。 e_{rms} 为共振解调包络谱上故障特征频率附近范围内的有效值,取值范围 $[f-B, F+B]$,其中 f 为轴承故障频率, B 为中介轴承内外圈故障频率差值的 1/2。整体上来讲,新的取值方法就是判断轴承故障特征频率峰值与故障特征频率附近的有效值之比,既考虑了轴承故障冲击信号的大小,又考虑了附近频带的能量大小。

Morlet 小波滤波器有中心频率 f_0 和带宽 σ 两个参数需要确定,滤波器带宽 σ 如果太小的话,不能包括足够的故障特征频率信息。若 σ 太大,虽然可以包括更多故障特征频率的谐波成分,但

也会引入更多噪声干扰。本文取 $\sigma = F \pm 2 \text{ Hz}$ 。确定带宽后,中心频率 f_0 需要满足以下条件^[11]。

1) 根据小波可容许性条件,Morlet 小波频谱应满足

$$\Psi(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \tag{7}$$

当 $f_0/\sigma > 3.5$ 时, $\Psi(0) = 4.2147 \times 10^{-8}$,近似满足上式。

2) 根据采样定理,小波滤波器的高通截止频率应小于采样频率的一半,即

$$f_0 + \frac{\beta}{2} < \frac{f_s}{2} \tag{8}$$

3) 为减少谐波影响,小波滤波器的低通截止频率应满足

$$f_0 - \frac{\beta}{2} \geq N \times f_r \tag{9}$$

其中 β 为滤波器带宽参数, N 为正整数,本文取 $N=30$ 。

4) 采集轴承故障加速度信号时,采样频率(f_s)通常设置较高以保证充分采样,而轴承共振频段应位于传感器线性范围之内,所以 f_0 不宜接近 Nyquist 频率,可取如下:

$$f_0 < 0.8 \times \frac{f_s}{2} \tag{10}$$

针对中介轴承故障特征提取的 Morlet 复小波共振解调新方法流程图如图 10 所示。

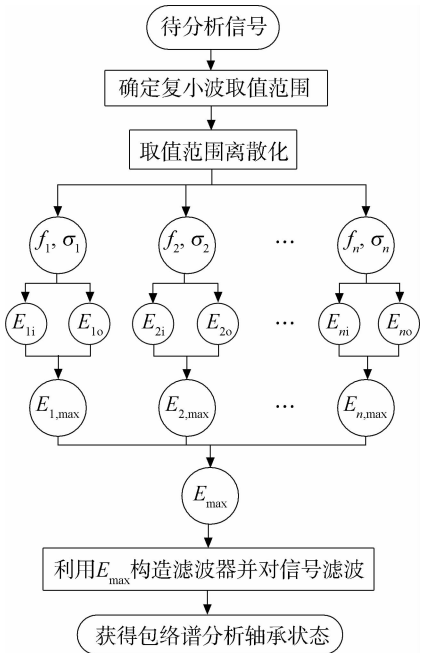


图 10 基于局部包络谱峰值因子的共振解调流程图
Fig. 10 Resonance demodulation flow chart based on peak factor of local envelope spectrum

步骤如下:

- 1) 根据中介轴承类型及实际工况确定 Morlet 复小波参数取值范围;
- 2) 将取值范围离散化,构造多组 Morlet 复小波,并对待分析信号进行滤波,确定每组中心频率 f_n 及带宽 σ_n ;
- 3) 计算出每组滤波信号内外圈故障特征频率的局部包络谱峰值因子 E_{ni} 和 E_{no} , 然后得到 $E_{n,max}$;
- 4) 从步骤 3) 计算的局部包络谱峰值因子中选择最大者 E_{max} , 其对应的参数组合即为分析中介轴承故障的最优 Morlet 复小波共振解调参数组合。
- 5) 利用最优参数组合 Morlet 复小波对待分析信号进行滤波,通过包络信号频谱图,判断滤波效果并分析中介轴承状态。

3.3 改进 Morlet 复小波的中介轴承特征提取

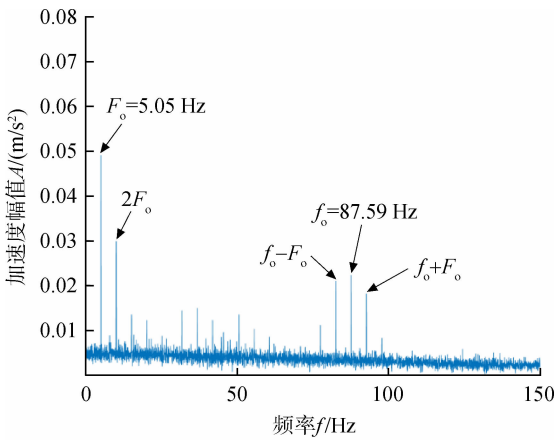
为了验证该方法的有效性及其优越性,本节采用了与文中第 2.2 节同样的中介轴承内外圈故障实验数据。通过保证中介轴承实际转速不变而改变模拟高低压转子转速的方式分析共振解调效果。

1) 外圈故障特征提取分析

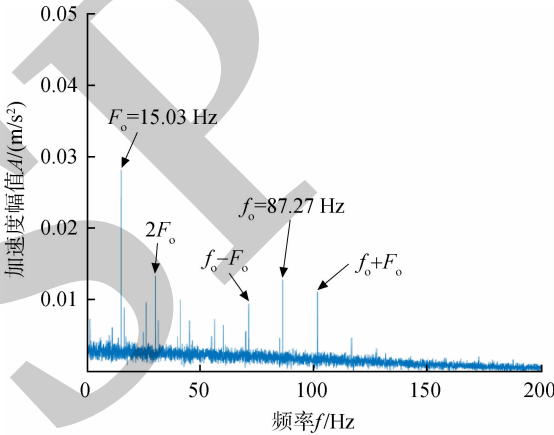
图 11 所示为利用新方法处理外圈故障中介轴承实验信号,所得到的不同转速下外圈故障包络谱。由图 11 可见,故障频率都能够有效地被提取出来,且峰值都是附近范围的最大值,没有被边带的峰值超过。

2) 内圈故障特征提取分析

由新方法滤波得到的内圈故障包络谱如图 12 所示。图 12 中几处峰值 f_i 可以轻易地判断为



(b) 内圈转速为 900 r/min, 外圈转速为 300 r/min

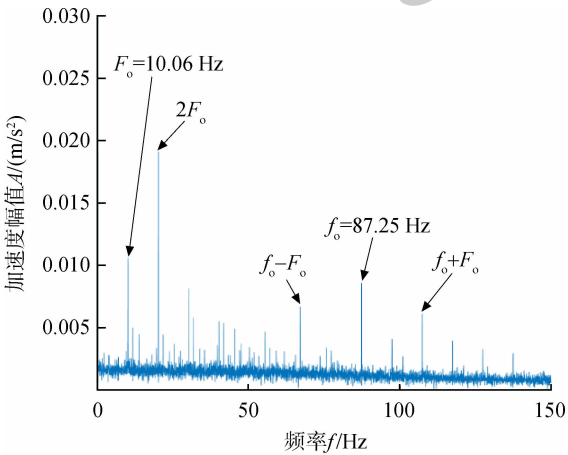


(c) 内圈转速为 300 r/min, 外圈转速为 900 r/min

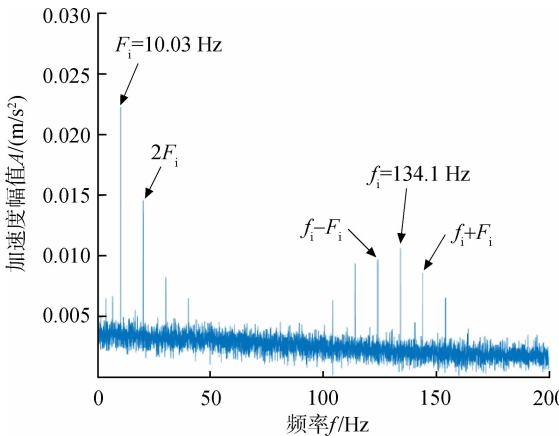
图 11 不同转速下中介轴承外圈故障包络谱

Fig. 11 Fault envelope spectrum of outer ring of inter-shaft bearing at different rotational speeds

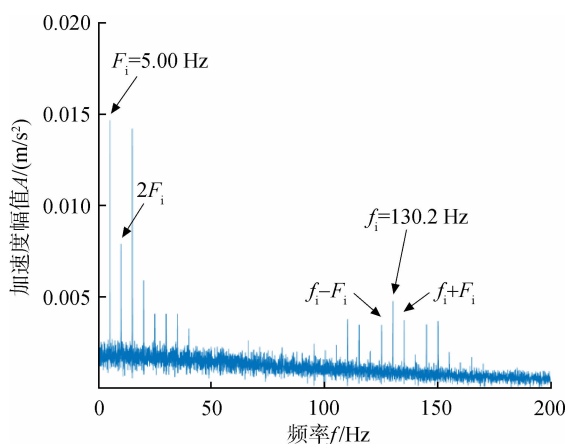
内圈故障特征频率,因而新方法的有效性得到了验证。



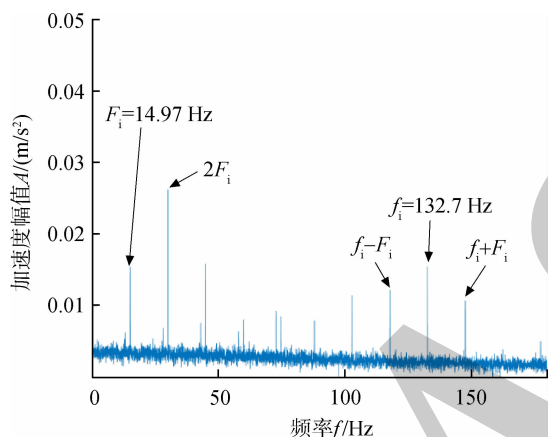
(a) 内圈转速为 600 r/min, 外圈转速为 600 r/min



(a) 内圈转速为 600 r/min, 外圈转速为 600 r/min



(b) 内圈转速为900 r/min, 外圈转速为300 r/min



(c) 内圈转速为900 r/min, 外圈转速为300 r/min

图12 不同转速下中介轴承内圈故障包络谱

Fig. 12 Fault envelope spectrum of inner ring of inter-shaft bearing at different rotational speeds

4 结 论

本文针对中介轴承故障诊断和 Morlet 复小波频带优化方法展开研究,得到结论如下:

1) 在包络谱峰值因子的基础上提出局部包络谱峰值因子作为频带优化指标,通过对试验数据分析并与包络谱峰值因子频带优化方法进行对比,表明该指标能够有效地提取出中介轴承故障频率峰值,且验证了基于局部包络谱峰值因子的复小波共振解调方法在用于中介轴承内圈、外圈故障特征提取时的有效性及优越性。

2) 基于包络谱峰值因子的复小波共振解调方法不适用于中介轴承故障诊断,是因为与滚动轴承路径相比,中介轴承内外圈同时转动时,外圈模拟高压转子相当于激振源,故障冲击传递时与外圈转频信息相互调制,有时会产生超过故障振动冲击的调制振动信号。

参考文献:

- [1] 廖明夫,马振国,邓巍.某型航空发动机中介轴承外环故障振动分析[J].航空动力学报,2011,26(11):2422-2426.
LIAO Mingfu, MA Zhenguo, DENG Wei. Vibration analysis on turbofan engine intershaft bearing with outer race defect[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2422-2426. (in Chinese)
- [2] 廖明夫,马振国,刘永泉,等.航空发动机中介轴承的故障特征与诊断方法[J].航空动力学报,2013,28(12):2752-2758.
LIAO Mingfu, MA Zhenguo, LIU Yongquan, et al. Fault characteristics and diagnosis method of intershaft bearing in aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12): 2752-2758. (in Chinese)
- [3] 田晶,艾延廷,赵明,等.基于声发射信号信息距的滚动轴承故障诊断[J].航空动力学报,2017,32(1):148-154.
TIAN Jing, AI Yanting, ZHAO Ming, et al. Fault diagnosis for rolling element bearings based on information exergy distance of acoustic emission signal[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 148-154. (in Chinese)
- [4] 周凤星,程耕国,梁巍.共振解调和小波分析在机械故障诊断中的应用[J].系统工程与电子技术,2005,27(6):1128-1131.
ZHOU Fengxing, CHENG Gengguo, LIANG Wei. Wavelet analysis and resonance demodulation for diagnosing the mechanical fault[J]. Systems Engineering and Electronic, 2005, 27(6): 1128-1131. (in Chinese)
- [5] 丁芳,高立新,崔玲丽,等.共振解调技术在设备故障诊断中的应用[J].机械设计与制造,2007(11):178-179.
DING Fang, GAO Lixin, CUI Lingli, et al. Application of resonance demodulation technology in equipment's fault diagnosis[J]. Mechanical design and manufacturing, 2007(11): 178-179. (in Chinese)
- [6] 邓四二,王勇,王恒迪.基于IHT共振解调技术的滚动轴承故障诊断方法[J].航空动力学报,2012,27(1):69-74.
DENG Sier, WANG Yong, WANG Hengdi. Resonance demodulation technique based on IHT for rolling bearings fault diagnosis[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1): 69-74. (in Chinese)
- [7] 王平,廖明夫.滚动轴承故障诊断的自适应共振解调技术[J].航空动力学报,2005,20(4):606-612.
WANG Ping, LIAO Mingfu. Adaptive demodulated resonance technique for the rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 606-612. (in Chinese)
- [8] 周智,朱永生,张优云,等.基于EEMD和共振解调的滚动轴承自适应故障诊断[J].振动与冲击,2013,32(2):76-80.
ZHOU Zhi, ZHU Yongsheng, ZHANG Youyun, et al. Adaptive fault diagnosis of rolling bearings based on EEMD and demodulated resonance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(2): 76-80. (in Chinese)
- [9] SHI J, WU X, PAN N, et al. Vibration signal analysis of

bearing based on EMD and resonance demodulation[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 556-562: 1286-1289.

[10] 刘华. 基于复小波的共振解调在滚动轴承故障诊断中的应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.

LIU Hua. Research on the fault diagnosis application of the resonance demodulation based on the complex wavelet [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese)

[11] GRYLLIAS K C, ANTONIADIS I. A peak energy criterion (p. e.) for the selection of resonance bands in complex shifted morlet wavelet (CSMw) based demodulation of defective rolling element bearings vibration response[J]. *International Journal of Wavelets Multiresolution and Information Processing*, 2009, 7(4): 387-410.

[12] HUANG V S J, HSIEH C T, HUANG C L. Application of Morlet wavelets to supervise power system disturbances [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, 14(1): 235-243.

[13] 张龙, 熊国良, 黄文艺. 复小波共振解调频带优化方法和新指标[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(3): 95-103.

ZHANG Long, XIONG Guoliang, HUANG Wenyi. New procedure and index for the parameter optimization of complex wavelet based resonance demodulation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(3): 95-103. (in Chinese)

[14] 刘清清, 杨江天, 尹子栋. 基于双树复小波分解的风机齿轮箱故障诊断[J]. *北京交通大学学报*, 2018, 42(4): 125-129.

LIU Qingqing, YANG Jiangtian, YIN Zidong. Fault diagnosis of wind turbine gearbox using dual-tree complex wavelet decomposition[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2018, 42(4): 125-129. (in Chinese)

[15] BOZCHALOOI I S, LIANG M. A smoothness index-guided approach to wavelet parameter selection in signal de-noising and fault detection[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 308(1/2): 246-267.

[16] HE W, JIANG Z N, FENG K. Bearing fault detection based on optimal wavelet filter and sparse code shrinkage [J]. *Measurement*, 2009, 42(7): 1092-1102.

[17] NIKOLAOU N G, ANTONIADIS I A. Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings using complex shifted morlet wavelets [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2002, 16(4): 677-694.

[18] SU W, WANG F, ZHU H, et al. Rolling element bearing faults diagnosis based on optimal morlet wavelet filter and autocorrelation enhancement [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(5): 1458-1472.

(编辑: 张 雪)