

时变转速工况下行星轮轴承故障诊断的 阶频谱相关分析方法

段晓辉, 陈小旺, 冯志鹏

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 行星轮轴承运动涉及自转和公转耦合, 故障振动信号复杂微弱, 给故障诊断带来严峻挑战。在时变转速工况下, 齿轮啮合振动与行星轮轴承故障振动的频率特征交叉重叠, 严重干扰行星轮轴承故障诊断。为解决该问题, 提出非平稳信号阶频谱相关分析方法, 消除振动信号的时变低频幅值包络并进行角域重采样, 使齿轮分量的阶次特征保持平稳。应用阶次域离散随机分离、消除齿轮振动分量, 保留残余的随机分量。对随机分量逆角域重采样, 恢复原始幅值包络, 并通过阶频谱相关或阶频谱相干提取行星轮轴承故障特征。该方法增强了行星轮轴承故障特征, 提高了时变转速工况下行星轮轴承故障诊断能力。通过仿真信号分析了方法原理, 通过行星轮轴承故障试验成功诊断了行星轮轴承内/外圈和滚动体局部损伤故障, 验证了方法的性能。

关键词: 故障诊断; 行星轮轴承; 非平稳; 阶频谱相关

中图分类号: TH165⁺.3; TH133.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)06-1296-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.06.018

Order-frequency spectral correlation analysis for planet bearing fault diagnosis under time-varying speed conditions

DUAN Xiaohui, CHEN Xiaowang, FENG Zhipeng

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Planet bearing kinematics involve spinning-revolution coupling, resulting in complex and weak fault vibration signals that pose a tremendous challenge to fault diagnosis. Under time-varying speed conditions, the frequency characteristics of gear mesh vibrations overlap with those of planet bearing faults, severely interfering with their fault diagnosis. To address this issue, this paper proposes an order-frequency spectral correlation analysis method for non-stationary signals. The method removes the time-varying low-frequency amplitude envelope of the vibration signal and performs angular domain resampling to stabilize the order characteristics of gear components. Discrete random separation in the order domain is applied to eliminate gear vibration while retaining residual random components. These random components are inverse angular domain resampled to restore the original amplitude envelope, and planet bearing fault features are extracted through their order-frequency spectral correlation or coherence. This method enhances planet bearing fault features and improves the diagnosis capability under time-varying speed conditions. The principle of the method is demonstrated through numerical simulation analysis. Its performance is validated experimentally by successfully diagnosing localized fault on the inner and outer race and rolling elements of planet bearings.

Keywords: fault diagnosis; planet bearing; non-stationary; order-frequency spectral correlation

行星齿轮传动具有同轴传动、结构紧凑、传动比大等优点, 在风电、车辆和航空等领域被广泛应用。其中的行星轮轴承承受扭矩负荷, 由于安装空间有限, 润滑和散热困难, 容易出现故障, 影响传动效率, 甚至导致系统停机。行星轮轴承既绕行星轮中心自转, 又随行星架绕太阳轮中心公转, 造成运动形式复杂, 振动传递路径以及故障冲击和传感器测

振方向之间的夹角时变, 导致实测行星轮轴承故障振动信号特征复杂且幅值微弱, 使得行星轮轴承故障诊断面临挑战^[1]。

当前, 学者们已在行星轮轴承故障信号建模、特征提取等方面取得了一系列研究成果。FENG 等^[2]建立了行星轮轴承故障信号模型, 考虑了行星轮轴承局部故障的调幅调频效应及时变传递路径、时变

测振夹角、载荷通过效应等因素的额外调幅效应,总结了行星轮轴承内圈、外圈及滚动体出现局部故障时的 Fourier 频谱结构特征。基于故障信号的调制特征, FENG 等^[3]提出了行星轮轴承信号幅值解调和频率解调分析方法,避免对频谱中复杂边带的结构分析。WANG 等^[4]提出了 SKRgram 算法,使用故障与正常状态下振动信号的谱峭度之比定位行星轮轴承故障激发的共振频带,成功诊断了行星轮轴承早期故障。MA 等^[5]建立了滚动体滑移信号模型,研究其对轴承故障频谱特征的影响,并通过多点最优解卷积算法提取了行星轮轴承故障特征。然而,在工程实际中,设备运行转速存在波动,工况非平稳。非平稳信号的特征频率时变,导致传统的频域特征提取方法失效。因此有必要开发时变转速工况下的行星轮轴承故障特征提取方法。

稳定工况下的滚动轴承故障信号具有二阶循环平稳性。谱相关 (spectral correlation, SC) 可以将循环平稳信号展开到谱频率和循环频率构成的二维平面上^[6-7],揭示调制特征的载波频率和调制频率信息,且具有良好的循环频率分辨率和光谱频率分辨率,不受滤波带宽的限制。谱相干 (spectral coherence, SCoh) 是 SC 的归一化版本。在非平稳工况下,轴承信号可表示为角-时间循环平稳 (angle-time cyclostationary, ATCS) 信号。ABBOUD 等^[8]提出的阶次-频率谱相关 (order-frequency SC, OFSC) 可将 ATCS 信号的载波和调制阶次表示在阶次域和和谱频率构成的二维平面。因此该方法能够用于提取时变转速工况下的行星轮轴承故障特征。

然而,行星齿轮箱实测振动信号中必然包含齿轮啮合振动分量,且齿轮分量往往是信号中的主导分量。在时变转速工况下,齿轮振动信号属于角循环平稳 (angle cyclostationary, ACS) 信号。在 OFSC 中, ATCS 信号的特征集中于对应阶次位置,而 ACS 信号的特征能量会分散到特征阶次周围。由于行星轮轴承故障特征幅值较小,分散的齿轮特征会将其淹没,导致无法被直接提取。因此在基于 OFSC 的时变行星轮轴承故障诊断中,消除来自齿轮特征的干扰十分重要。

离散随机分离 (discrete random separation, DRS) 可实现平稳工况下的齿轮信号分离^[9]。该算法利用周期性信号的自相关性,在频域构造原信号与延迟信号的频率响应函数,再通过其 Fourier 逆变换获得自适应噪声消除滤波器,通过滤波分离齿轮分量和其他非周期性分量。但 DRS 算法要求信号中周期性成分具有高平稳性,在转速范围变化较大的工况下,齿轮特征频率和信号幅值都是非平稳的,该算法无法直接被应用。

为解决时变行星轮轴承诊断中故障特征被齿轮信号掩盖的问题,本文提出非平稳信号阶频谱相关方法。主要思想是利用非平稳离散随机分离算法分离角循环平稳分量,然后使用阶频谱相关或阶频谱相干 (DRS-OFSC(oh)) 提取行星轮轴承故障特征。非平稳离散随机分离算法首先去除信号的低频幅值包络并进行角域重采样,把非平稳的时域分量转换为稳定的角域分量,再在阶次域中执行 DRS 算法,最后将残余随机信号逆重采样后恢复时变幅值包络。DRS-OFSC(oh) 方法无需提前确认最佳分析频带,且能够消除信号中的齿轮干扰分量,增强了微弱轴承故障的诊断能力。

1 阶频谱相关介绍

1.1 谱相关算法

二阶循环平稳指信号的二阶统计量具有周期性,可表示为:

$$R_x(t, \tau) = E[x(t)x(t-\tau)^*] = R_x(t+T, \tau) \quad (1)$$

式中, $R_x(t, \tau)$ 为输入信号 $x(t)$ 的瞬时自相关函数; $E(\cdot)$ 表示数学期望; τ 为时延变量; T 为循环平稳周期; 上标*表示复数共轭。轴承故障信号是典型的二阶循环平稳信号。轴承出现局部故障时,故障位置与其他部件接触产生重复性的脉冲响应信号,脉冲响应的载波为共振频率,调制频率为故障频率。

谱相关能够揭示信号中的循环平稳特征,其理论计算方法为:

$$SC(\alpha, f) = \lim_{W \rightarrow \infty} \frac{1}{W} E\{F_w[x(t)]F_w[x(t+\tau)]^*\} \quad (2)$$

式中, α 为循环频率; f 为谱频率; $F_w(\cdot)$ 为快速 Fourier 变换; W 表示 $F_w(\cdot)$ 中信号的时间长度。谱相关可表示信号中循环平稳分量在谱频率-循环频率域的能量分布,揭示其载波频率和循环平稳频率信息。当信号中某些频带的能量过于集中或过低时,为抑制能量的不均匀分布,可通过对其进行归一化处理得到谱相干函数:

$$SC_{oh}(\alpha, f) = \frac{SC(\alpha, f)}{\sqrt{SC(0, f)SC(0, f+\alpha)}} \quad (3)$$

1.2 阶频谱相关

原始谱相关不具备时变特征分析能力。在变速转速工况下,故障信号的载波频率(即共振频率)保持恒定且不随转速变化;循环调制频率(即轴承故障频率)是时变转频的整数或分数倍。这类信号被称为 ATCS 信号,即循环调制频率在角域保持稳定,载波频率在时间域内稳定。OFSC 方法能够揭示 ATCS 信号的载波频率和循环阶次信息,定义为:

$$OFSC(\alpha_\theta, f_i) = \lim_{W \rightarrow \infty} \frac{1}{\Phi(W)} E \left\{ F_W[x(t)] F_W[x(t) e^{-j\alpha_\theta \theta(t)} \dot{\theta}(t)]^* \right\} \quad (4)$$

式中, α_θ 为循环阶次; f_i 为谱频率; $\dot{\theta}(t)$ 为角速度; $\theta(t)$ 为角度; $\Phi(W)$ 为时间 W 内经过的角度范围。阶频谱相干 (order-frequency spectral coherence, OFSCoh) 计算方式与式 (3) 相同。ATCS 信号在 OFSC 中的特征出现在载波频率附近、各阶循环特征阶次处, 表现为垂直于循环阶次轴的谱线。它能够用于时变轴承故障特征提取。

行星齿轮箱振动信号的主导成分是齿轮啮合分量, 其特征幅值通常远大于行星轮轴承故障特征幅值。齿轮振动信号为多个调幅调频信号的叠加, 其载波为啮合频率及其倍频, 调制频率主要为太阳轮及行星架的转频及其倍频。非平稳工况下, 齿轮信号各阶次载波和调制频率均与转速成正比, 属于 ACS 信号。与 ATCS 信号不同, 此类信号在 OFSC 中沿循环阶次轴呈扩散状分布, 通过在中心阶次处的能量叠加形成谱线。分散分布的各阶次齿轮特征可能会淹没幅值较低的行星轮轴承故障特征, 导致基于 OFSC 的诊断方法失效。因此, 齿轮信号的干扰在行星轮轴承故障诊断中是不可忽略的。

2 非平稳信号阶频谱相关

2.1 非平稳离散随机分离

DRS 算法利用离散信号与随机信号的自相关性差异, 在频域中得到自适应噪声, 消除滤波器的频响函数, Fourier 逆变换后得到滤波器序列, 在通过滤波分离离散信号和随机信号。DRS 算法无法直接应用于非平稳信号。因此本文提出非平稳离散随机分离算法。将时变信号进行角域重采样后, 齿轮特征在角度-阶次域中是阶次平稳的, 轴承特征的载波在角度-阶次域是阶次非平稳的。利用它们的平稳性差异, 可以使用 DRS 算法将其分离。此外, 非平稳工况下信号幅值受转速和负载变化影响较大, 幅值非平稳会降低 DRS 算法的性能, 因此有必要消除工况变化引起的信号幅值包络变化。所提出的非平稳 DRS 算法总结如下:

首先, 将输入信号的齿轮成分转换为角域平稳信号。非平稳信号中由转速和负载时变引起的低频幅值包络为:

$$\begin{cases} g_f(t) = \text{FBF}[g(t), h_f(t)] \\ g(t) = [x(t) + j\text{HT}[x(t)]] \end{cases} \quad (5)$$

式中, $g(t)$ 为信号的频幅值包络; $\text{HT}(\cdot)$ 为 Hilbert 变换; $\text{FBF}(\cdot)$ 为零相位滤波; $h_f(t)$ 为低通滤波器, 其截

止频率 f 取转频和负载主频率的最大值 $f = \max(f_{\text{torque}}, f_{\text{speed}})$ 。

通过下式消除输入信号的时变幅值波动:

$$x'(t) = \frac{x(t)}{g_f(t)} \quad (6)$$

对信号进行角域重采样:

$$x'(\varphi) = x'[\varphi(t)] \quad (7)$$

信号 $x'(\varphi)$ 中的齿轮成分在角度-阶次域是平稳的。

接下来, 对此信号执行 DRS 算法。DRS 中自适应噪声消除滤波器的阶次域频响函数为:

$$H(o) = \frac{\sum_{k=1}^K X_{k,M}^d(o) [X_{k,M}(o)]^*}{\sum_{k=1}^K X_{k,M}^d(o) [X_{k,M}^d(o)]^*} \quad (8)$$

$$X_{k,M}(o) = F_M[x(\varphi + kL)w_L(\varphi)] \quad (9)$$

$$X_{k,M}^d(o) = F_M[x(\varphi + kL - L - \tau)w_L(\varphi)] \quad (10)$$

式中, $F_M(\cdot)$ 为长度为 M 的 Fourier 变换; τ 为时延长度; $w_L(\varphi)$ 为长度为 L 的窗函数。通常 $M \geq L$, 若 $M > L$, 则需在 Fourier 变换前补零。

窗函数长度 L 、时延因子 τ 和窗函数类型是 DRS 算法的主要参数。窗函数长度决定了可分离低频成分的频率分辨率, L 越长可分离细节越多, 但是 L 过长会使式 (8) 中的 K 值过小, 导致算法效果不稳定, 通常 L 取确定性分量中最小频率的 10~20 倍。时延因子 τ 应大于信号中的随机成分的相关长度, 但是过大则会降低确定性信号的相关系数, 影响滤波器的幅频特性。因此实际滤波器参数应根据信号的频率特征进行确定。窗函数类型决定了滤波器的局部幅频特性。本文中取 $M=L$, 窗函数类型为 Hanning 窗。

对频响函数 $H(o)$ 进行 Fourier 逆变换, 得到滤波器序列, 然后对角域信号进行零相位滤波, 并保留滤波残余信号:

$$h(\varphi) = \text{IF}_M[H(o)] \quad (11)$$

$$x'_r(\varphi) = x'(\varphi) - \text{FBF}[x'(\varphi), h(\varphi)] \quad (12)$$

式中, $\text{IF}_M(\cdot)$ 表示长度为 M 的 Fourier 逆变换。零相位滤波后信号中各频率/阶次成分的相位与原角域信号相位一致, 因此可通过二者相减直接获得残余信号。

最后, 对得到的信号进行逆角域重采样, 并恢复低频幅值包络:

$$x_r(t) = x'_r[t(\varphi)]g_f(t) \quad (13)$$

式中, $x_r(t)$ 为去除齿轮分量的非平稳随机分量。

2.2 故障特征提取流程

为解决时变工况下齿轮信号对行星轮轴承特征的干扰问题, 增强行星轮轴承故障特征提取能力, 本

文提出非平稳信号阶频谱相关分析方法。其思想是通过非平稳 DRS 算法分离时变信号中的齿轮信号以消除其干扰特征,再根据随机信号的 OFSC 或 OFSCoh 提取时变故障特征。主要流程如图 1 所示,主要步骤总结如下:

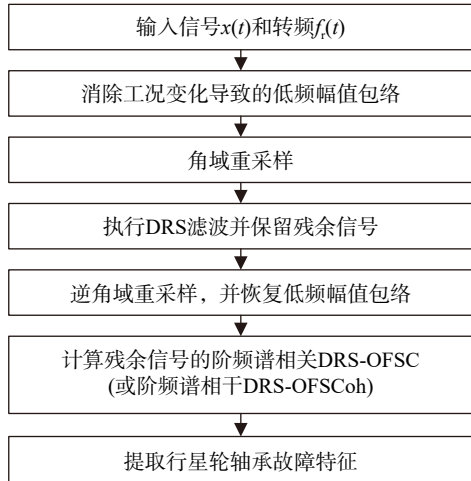


图1 基于非平稳信号阶频谱相关的行星轮轴承故障诊断
Fig.1 Planet bearing fault diagnosis via the OFSC of non-stationary signal

(1) 将信号转换为角域平稳信号。根据式(5)计算输入信号的低频幅值包络,通过式(6)消除由于工况变化导致的时变幅值效应;再对信号进行角域重采样,得到角域信号 $x'(\varphi)$,其齿轮成分的特征阶次和幅值在角度-阶次域是稳定的,满足 DRS 算法要求;

(2) 分离信号中的齿轮特征分量。根据式(8)~(10)计算 DRS 滤波器频响函数 $H(\omega)$,进行 Fourier 逆变换后得到角域滤波器 $h(\varphi)$,对信号 $x'(\varphi)$ 滤波后保留残余成分 $x'_r(\varphi)$;

(3) 恢复时域随机信号。按照式(11)和(12)对信号进行角域逆重采样并恢复低频幅值包络,得到时域随机信号 $x_r(t)$;

(4) 计算残余信号的阶频谱相关 DRS-OFSC 或阶频谱相干 DRS-OFSCoh。若信号中的相关系数在各个频带分布不均匀,应使用谱相干进行分析,其余情况使用二者均可;

(5) 根据 DRS-OFSC(oh) 提取行星轮轴承故障特征,完成故障诊断。

3 仿真分析

本节通过仿真信号分析验证所提出方法的原理有效性。在非平稳工况下,行星轮轴承冲击故障信号可表示为冲击间隔随转速时变的冲击响应序列。考虑内圈故障状态,冲击响应信号受行星架转频的幅值调制。齿轮的振动信号主要为各阶次啮合振

动,可表示为多个调幅调频信号的叠加。通过下式生成行星轮轴承故障仿真信号:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(t) = x_g(t) + x_b(t) + n(t) \\ x_b(t) = D(t) \sum_{k=0}^{+\infty} e^{-\beta(t-t_k)} \sin[2\pi f_n(t-t_k)] h(t-t_k) \\ t_k = \sum_{l=0}^k \frac{1+\varepsilon_l}{f_{ib}(t_l)} \\ x_g(t) = \sum_{r=1}^R C_r(t) a_r(t) \cos\left[2\pi \int r f_m(t) dt + b_r(t) + \varphi_r\right] \\ b_r(t) = \sum_{p=1}^P B_{rp} \cos\left[2\pi \int p f_r(t) dt + \phi_{rp}\right] \\ a_r(t) = 1 + \sum_{q=1}^Q A_{rq} \cos\left[2\pi \int q f_r(t) dt + \gamma_{rq}\right] \end{array} \right. \quad (14)$$

式中, $x_b(t)$ 表示轴承故障; $x_g(t)$ 表示齿轮啮合分量; β 为阻尼系数; f_n 为共振频率; $h(t)$ 为单位阶跃函数; t_k 为第 k 次冲击发生的时刻; $f_{ib}(t)$ 为轴承故障频率; ε_l 为轴承滑差率,取 $\pm 2\%$ 内的随机数; $D(t)$ 为轴承信号的时变调幅函数; $f_m(t)$ 为齿轮啮合频率; $f_r(t)$ 为轴转频, $a_r(t)$ 、 $b_r(t)$ 分别为啮合调幅函数和调频函数; $C_r(t)$ 为时变幅值函数; A_{rq} 、 B_{rp} 分别为各个阶次的调幅强度和调频强度; R 、 P 、 Q 分别为相应项的最大阶次; φ 、 ϕ 与 γ 为初始相位,取 $[-\pi, \pi]$ 范围内的随机数; $n(t)$ 为高斯白噪声。将齿轮信号 $x_g(t)$ 视为一种有色噪声,则仿真信号最终信噪比为 -20 dB。时间 t 采样频率为 100 kHz,时长为 10 s。仿真参数取值见表1,其中啮合信号不同阶次下幅值函数 $C_r(t)$ 的幅值系数随啮合阶次 r 指数降低。

表1 仿真信号参数

Tab. 1 Simulation signal parameters

| 变量符号 | 取值 | 变量符号 | 取值 |
|----------|--------------------|-------------|-------------------------------------------------------------|
| β | 10000 | f_n | 20 kHz |
| R | 350 | $f_r(t)$ | $5 + 1.5t$ |
| P | 5 | $f_m(t)$ | $13f_r(t)$ |
| Q | 5 | $f_{ib}(t)$ | $1.2f_r(t)$ |
| A_{rq} | 2×0.9^q | $C_r(t)$ | $0.97^r \times 0.1f_r(t)$ |
| B_{rp} | 0.6×0.9^p | $D(t)$ | $2f_r(t) \cdot \{1 + 0.5 \cos[2\pi \cdot \int f_r(t) dt]\}$ |

仿真信号波形和转速如图2所示,转速在 10 s内从 5 Hz升至 20 Hz,啮合频率范围为 $65 \sim 260$ Hz。信号中共振频率 20 kHz所涉及的啮合阶次范围为 $77 \sim 307$ 阶。这两个阶次对应的啮合信号幅值分别为一阶啮合信号的 9.6×10^{-2} 倍和 10^{-4} 倍。为说明所提出方法的有效性,将其与基于谱峭度的包络阶次谱、原始阶频谱相关进行对比分析。

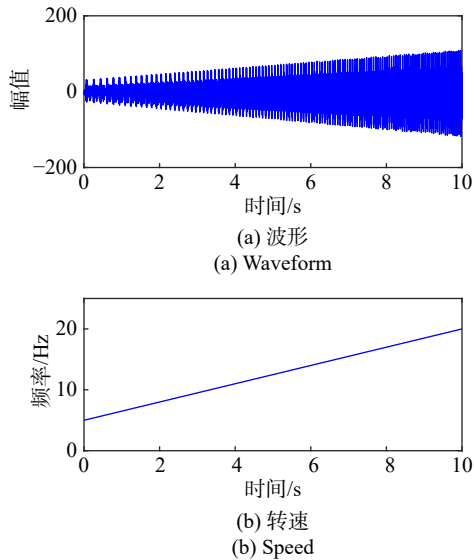


图 2 仿真信号

Fig. 2 Simulated signal

传统的轴承诊断方法通过对共振频带进行带通滤波提高信噪比,增强轴承故障特征。时变转速下,在基于谱峭度的包络阶次谱分析中,首先通过谱峭度确定最佳分析频带,对该频带滤波后计算幅值包络,再将幅值包络信号角域重采样后进行 Fourier 变换,获得包络阶次谱。通过上述步骤可将齿轮旋转和轴承故障的调制特征展示在阶次域中,不存在两类特征互相干扰。如图 3 所示,谱峭度显示最佳分析频带为 [25, 50] kHz,对应的包络阶次谱中主要特征为齿轮旋转阶次及其倍数,未发现有效的轴承故障阶次特征。诊断失败的原因是轴承的冲击响应特征幅值较低,

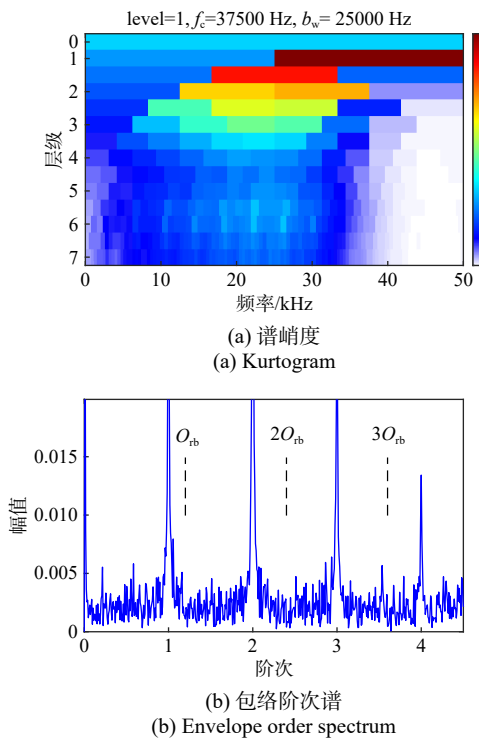


图 3 基于谱峭度的仿真信号分析结果

Fig. 3 Result of the simulated signal based on kurtogram

故障冲击信号未提升所在频带的峭度指标,无法正确判断共振频带,因此无法提取行星轮轴承故障特征。

原始信号 OFSC 如图 4 所示,可见前 4 阶齿轮旋转阶次 (1~4) O_r 处存在清晰的谱线,且周围出现从中心向两侧扩散的齿轮特征。在 20 kHz 附近未发现明显的行星轮轴承故障特征,原因是载波频率 20 kHz、循环阶次 1.2 阶及其倍数区域存在连续分布的齿轮调制特征,虽然 77~307 阶齿轮啮合信号特征幅值较低,但足以掩盖幅值更低的行星轮轴承故障特征,导致行星轮轴承诊断失败。

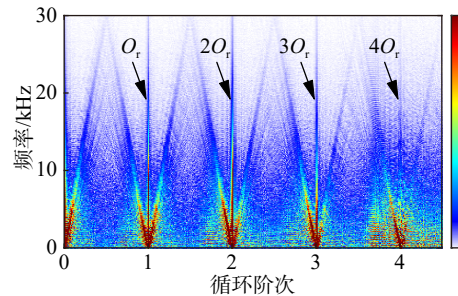


图 4 仿真信号 OFSC

Fig. 4 The OFSC of the simulated signal

在所提出方法中取 DRS 算法窗长 $L=12500$, $\tau=30000$ 。得到的 DRS-OFSC 如图 5 所示。其中齿轮旋转特征 (1~4) O_r 及其周围的分散特征幅值显著降低,且在谱频率 20 kHz 附近出现明显的前 3 阶轴承故障特征 (1~3) O_{rb} ,及其被齿轮旋转特征 O_r 调制得到的组合阶次特征 (1~3) $O_{rb} \pm O_r$ 。说明所提出的分析方法成功分离了信号中的齿轮干扰成分,使得行星轮轴承故障特征在残余随机信号的阶频谱相关中凸显出来。

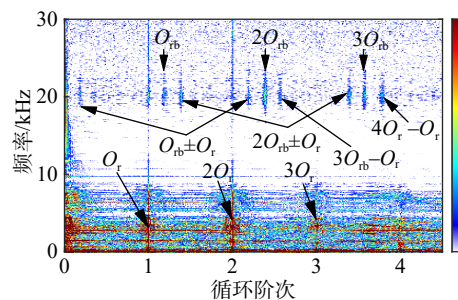


图 5 仿真信号 DRS-OFSC

Fig. 5 The DRS-OFSC of the simulated signal

上述结果表明,当行星轮轴承故障冲击较弱时,谱峭度难以正确判断共振响应所在的频带,导致共振解调分析方法失效。原始的阶频谱相关方法虽然无需提前确定共振解调分析频带,但是存在齿轮分散分布特征淹没轴承故障特征的现象。所提出的 DRS-OFSC 通过消除齿轮干扰成分有效解决了该问题,不仅免于判断最佳分析频带,还提升了微弱行星轮轴承故障特征的提取能力。

4 试验验证

4.1 试验说明

本节通过行星齿轮箱行星轮轴承故障试验验证所提出方法的实际性能。如图 6 所示, 传动试验台由驱动电机、NGW21 行星齿轮箱、转速扭矩传感器、磁粉制动器组成。被测试行星齿轮箱参数如表 2 所示。NJ304 行星轮轴承的几何参数如表 3 所示。分别在轴承内圈、外圈和一个滚动体表面加工局部损伤, 模拟 3 种故障类型。如图 7 所示, 内圈故障为宽 2 mm、深 0.1 mm 的局部损伤; 滚动体故障为宽 2.5 mm、深 0.1 mm 的局部损伤; 外圈故障为宽 1 mm、深 1 mm 的局部损伤。以太阳轮轴输入转速为参考频率, 行星轮轴承故障特征阶次如表 4 所示。试验中电机输入转速随时间变化, 输出端负载固定为 20 N·m。加速度传感器安装在被试行星齿轮箱顶部, 采样频率为 102.4 kHz。

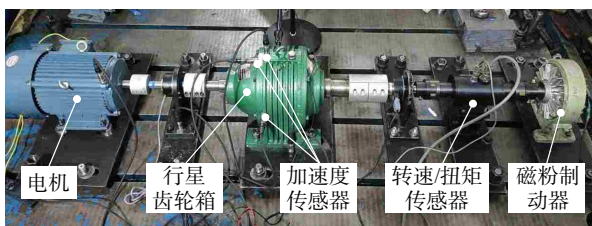


图 6 行星齿轮箱传动试验台
Fig. 6 Planetary gearbox transmission test rig

表 2 行星齿轮箱参数

| 齿轮 | 齿数 |
|---------|-------|
| 太阳轮 | 13 |
| 行星轮(数量) | 38(3) |
| 齿圈 | 92 |

表 3 行星轮轴承结构参数

| 轴承型号 | 滚动体直径/mm | 节圆直径/mm | 滚动体个数 | 接触角/(°) |
|-------|----------|---------|-------|---------|
| NJ304 | 9 | 36 | 10 | 0 |

4.2 内圈故障特征提取

行星轮轴承内圈故障信号及其时变转速如图 8 所示。输入转速在 10 s 内从大约 8 Hz 升至 20 Hz, 啮合频率变化范围约为 91~228 Hz。行星轮轴承内圈故障阶次 $O_i=1.8734$ 。

如图 9 所示, 谱峭度显示 [42.4, 45.6] kHz 为最佳分析频带, 对应的包络阶次谱中未发现有效的内圈

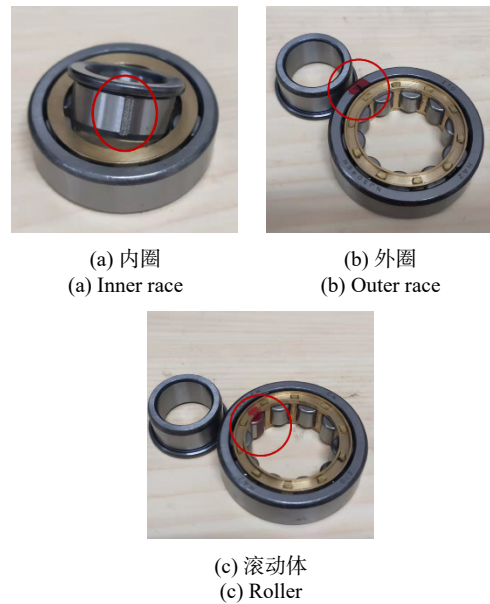


图 7 行星轮轴承故障件

Fig. 7 Planet bearing fault components

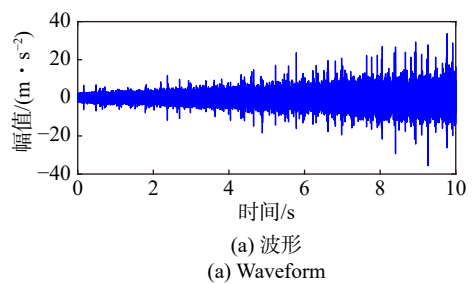
表 4 行星轮轴承故障特征阶次

Tab. 4 Fault characteristic orders of the planet bearing

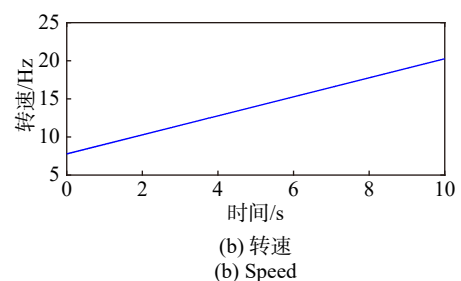
| 特征名称 | 符号 | 阶次 |
|------------|-------------|---------|
| 太阳轮旋转 | $O_s^{(f)}$ | 1 |
| 行星架旋转 | O_c | 0.1238 |
| 啮合阶次 | O_m | 11.3905 |
| 行星轮轴承保持架旋转 | O_{cg} | 0.2997 |
| 行星轮轴承外圈旋转 | $O_o^{(f)}$ | 0.1873 |
| 行星轮轴承内圈故障 | O_i | 1.8734 |
| 行星轮轴承外圈故障 | O_o | 1.1241 |
| 行星轮轴承滚动体故障 | O_b | 0.5620 |

故障阶次特征。

由于不同频带的能量差异过大, 为便于观察现象, 使用谱相干进行另外两种方法的对比分析。原



(a) 波形
(a) Waveform



(b) 转速
(b) Speed

图 8 内圈故障信号

Fig. 8 Inner race fault signal

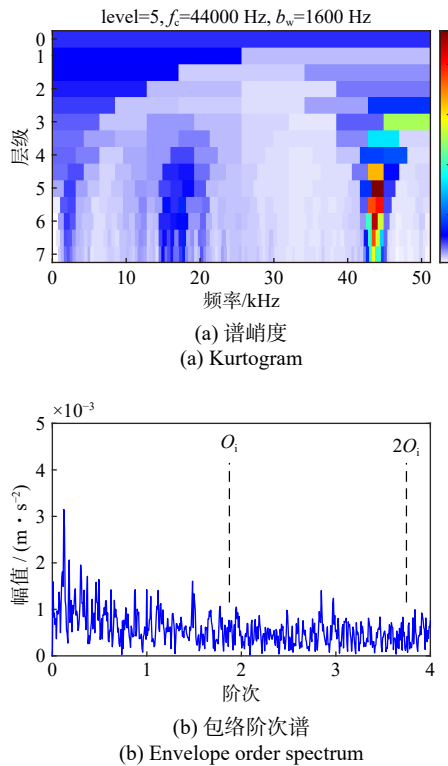


图9 内圈故障信号的谱峭度分析结果

Fig. 9 Result of the inner race fault signal via kurtogram

始信号的 OFSCoh 及所提出方法得到的 DRS-OFSCoh 分别如图 10 和 11 所示。由于 OFSCoh 中未发现明显的故障特征，而 DRS-OFSCoh 中在 [15, 30] kHz 范围内出现故障特征，因此主要对比展示此频带内的特征。该频带范围涉及第 65~329 阶啮合频率。展示的阶次范围为 0~4 阶，覆盖前 2 阶行星轮轴承内圈故障阶次。OFSCoh 中主要特征为 1~3 阶太阳轮旋转特征 $(1\sim3)O_s^{(r)}$ 。齿轮的高阶啮合振动调制特征在太阳轮旋转阶次处集中形成清晰的竖线，远离中心阶次分散分布的特征幅值表现为背景噪声。行星轮轴承故障特征被完全淹没在齿轮特征和背景噪声中。DRS-OFSCoh 中，除太阳轮旋转特征阶次 $(1, 2)O_s^{(r)}$ 外，还出现了行星轮轴承内圈前 2 阶故障特征谱线 $(1\sim2)O_i$ ，显示行星轮轴承内圈存在损伤。

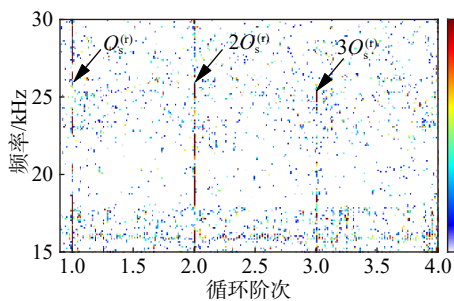


图10 内圈故障信号 OFSCoh

Fig. 10 OFSCoh of the inner race fault signal

内圈数据对比分析结果显示，基于谱峭度的包络阶次谱和原始谱相干未发现故障特征，所提出的

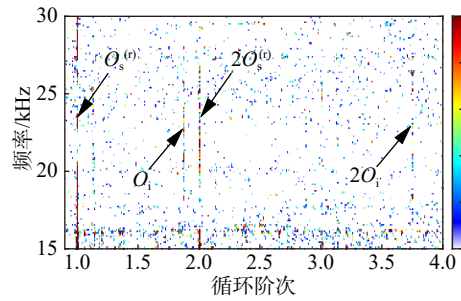


图11 内圈故障信号 DRS-OFSCoh

Fig. 11 DRS-OFSCoh of the inner race fault signal

方法成功提取了行星轮轴承内圈故障特征。

4.3 外圈故障特征提取

行星轮轴承外圈故障信号及其时变转速如图 12 所示。输入转速在 10 s 内从大约 8 Hz 升至 20 Hz，啮合频率变化范围约为 91~228 Hz。行星轮轴承外圈故障阶次 $O_o=1.1241$ 。

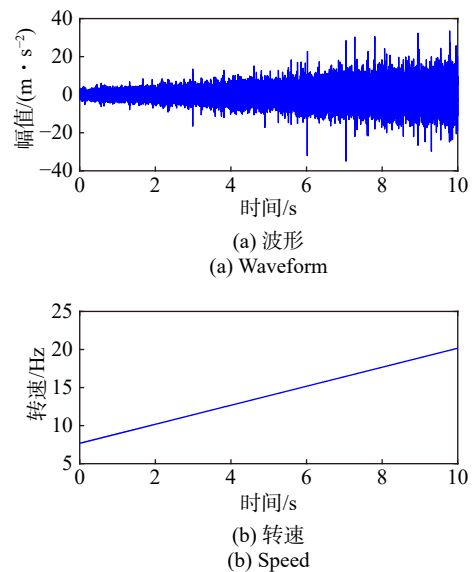


图12 外圈故障信号

Fig. 12 Outer race fault signal

谱峭度方法的分析结果如图 13 所示，最佳分析频带 [43200, 44800] Hz 对应的包络阶次谱中未出现有效的外圈故障特征。谱相干分析中展示的谱频率范围与内圈故障范围相同，循环阶次范围为 [0.9, 3.6] 阶，覆盖前 3 阶行星轮外圈故障特征。原始信号的 OFSCoh 及所提出方法得到的 DRS-OFSCoh 分别如图 14 和 15 所示。原始信号 OFSCoh 中可见前 3 阶太阳轮旋转特征 $(1\sim3)O_s^{(r)}$ ，未发现有效的外圈故障特征。与之相对，DRS-OFSCoh 中出现了前 3 阶太阳轮旋转特征 $(1\sim3)O_s^{(r)}$ 和前 3 阶行星轮轴承外圈故障特征 $(1\sim3)O_o$ 。由于时变传递路径的调幅效应，还出现了外圈故障特征阶次与行星架旋转阶次的组合阶次 $2O_o - O_c$ 和 $3O_o - 2O_c$ 。以上特征显示行星轮轴承外

圈出现异常, 与试验设置相符。

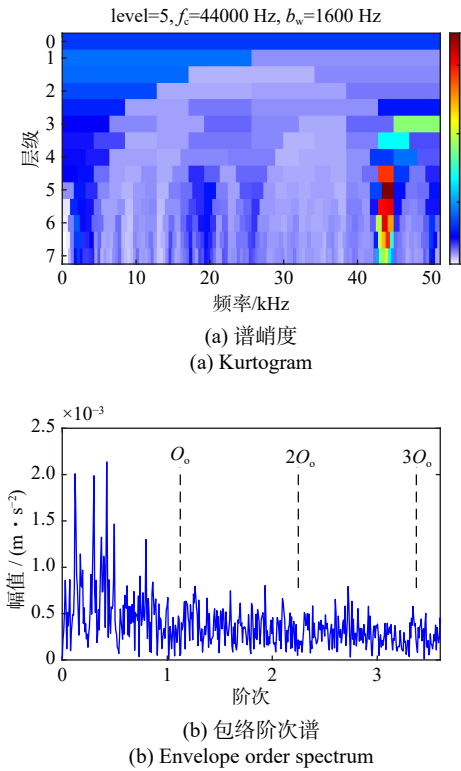


图 13 外圈故障信号的谱峭度分析结果

Fig. 13 Result of the outer race fault signal via kurtogram

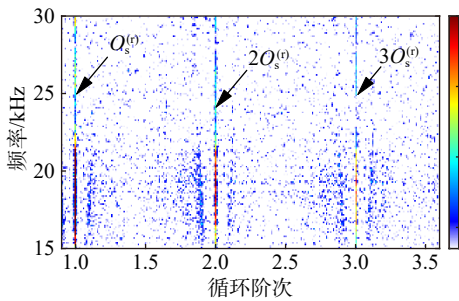


图 14 外圈故障信号 OFSCoh

Fig. 14 OFSCoh of the outer race fault signal

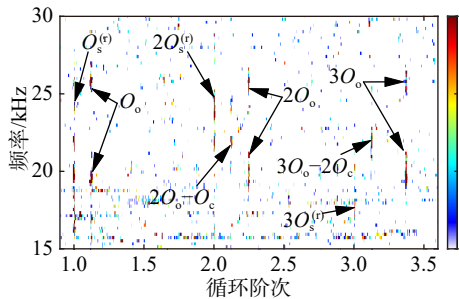


图 15 外圈故障信号 DRS-OFSCoh

Fig. 15 DRS-OFSCoh of the outer race fault signal

4.4 滚动体故障特征提取

行星轮轴承滚动体故障信号及其时变转速如图 16 所示, 输入转速在 10 s 内从大约 8 Hz 升至 20 Hz, 啮合频率变化范围约为 [91, 228] Hz。行星轮轴承滚

动体故障阶次 $O_b=0.5620$ 。

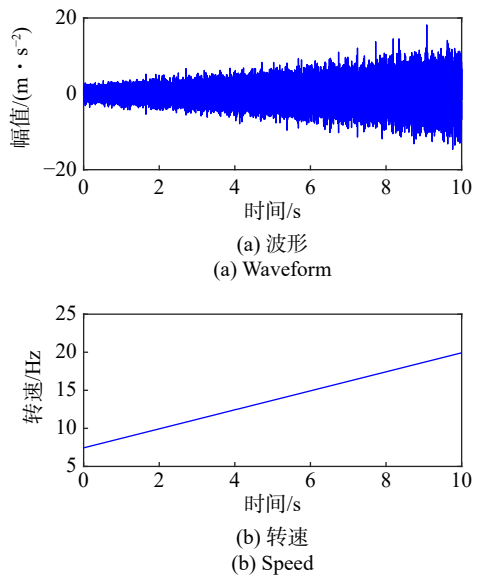


图 16 滚动体故障信号

Fig. 16 Roller fault signal

对比分析结果如图 17~19 所示。基于谱峭度的包络阶次谱中未出现有效的外圈故障特征。谱相干分析中展示的谱频率范围与内圈故障情况相同, 循环阶次范围为 [0.4, 2.5] 阶, 覆盖前 4 阶行星轮轴承滚动体故障特征。图 18 中, 原始信号 OFSCoh 中仅出现了前 2 阶太阳轮旋转特征 (1~2) $O_s^{(1)}$, 未出现有效的轴承故障特征。图 19 的 DRS-OFSCoh 中, 除齿轮特征外, 出现了前 4 阶行星轮轴承滚动体故障特征

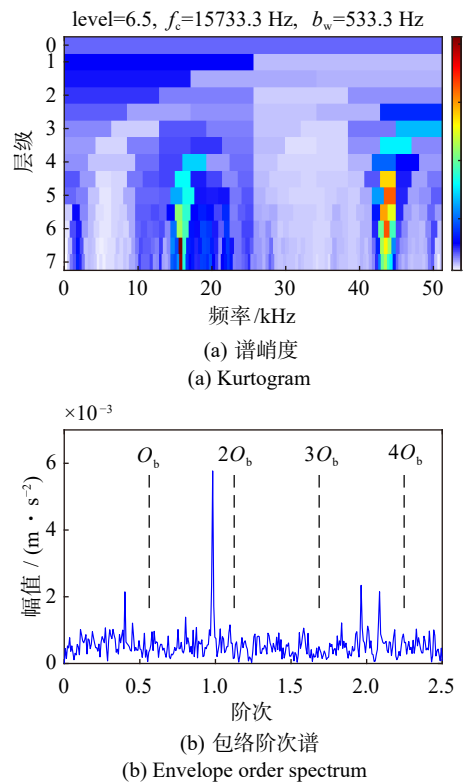


图 17 滚动体故障信号的谱峭度分析结果

Fig. 17 Result of the roller fault signal via kurtogram

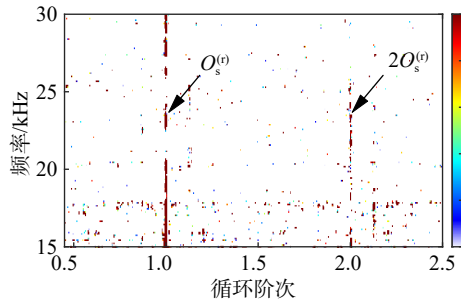


图 18 滚动体故障信号 OFSCoh

Fig. 18 OFSCoh of the roller fault signal

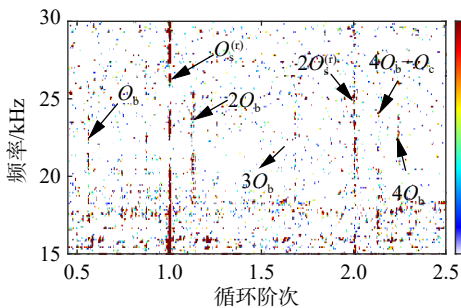


图 19 滚动体故障信号 DRS-OFSCoh

Fig. 19 DRS-OFSCoh of the roller fault signal

(1~4) O_b 及其与行星架旋转特征的组合阶次 $4O_b - O_c$ 。这些特征说明行星轮轴承滚动体存在故障,结论与试验设置相符。

3组行星轮轴承故障信号对比分析均表明,当行星轮轴承故障特征较弱时,基于谱峭度的传统解调分析方法难以正确反映轴承故障冲击所在的频带;谱相关/干分析中,时变转速下的齿轮信号特征在“谱频率-循环阶次平面”呈非集中、扩散状分布,对幅值较小的轴承故障特征提取造成了干扰;所提出的非平稳信号阶频谱相关方法有效削弱了信号中的齿轮干扰特征,且该方法可以全面展示各谱频率的调制情况,无需提前确定共振频率或最佳分析频带,避免了最佳分析频带判断困难的问题,增强了变转速行星轮轴承故障特征提取的能力。

5 结 论

本文针对时变转速工况下齿轮振动掩盖行星轮轴承故障特征、影响行星轮轴承故障诊断的问题,提出了非平稳信号阶频谱相关分析方法。非平稳工况下轴承故障信号表现为角时间循环平稳,齿轮振动信号表现为角循环平稳。利用这一差异,将齿轮时域信号转换为平稳的角域信号,使用角域 DRS 算

法分离齿轮振动分量,增强了残余信号中轴承分量的相对幅值。通过残余的阶频谱相关或阶频谱相干分析,实现了时变转速工况下的行星轮轴承故障特征提取和诊断。仿真分析和行星轮轴承故障试验的结果表明,该方法显著增强了行星轮轴承故障特征,并成功诊断内外圈和滚动体局部故障。

参考文献:

- [1] WANG T Y, HAN Q K, CHU F L, et al. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox: a review[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 126: 662-685.
- [2] FENG Z P, MA H Q, ZUO M J. Vibration signal models for fault diagnosis of planet bearings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 370: 372-393.
- [3] FENG Z P, MA H Q, ZUO M J. Amplitude and frequency demodulation analysis for fault diagnosis of planet bearings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 382: 395-412.
- [4] WANG T Y, HAN Q K, CHU F L, et al. A new SKRgram based demodulation technique for planet bearing fault detection[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 385: 330-3499.
- [5] MA H Q, FENG Z P. Planet bearing fault diagnosis using multi-point optimal minimum entropy deconvolution adjusted[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 449: 235-273.
- [6] 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.
- [7] ANTONI J, XIN G, HAMZAOUI N. Fast computation of the spectral correlation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 92: 248-277.
- [8] ABBOUD D, ANTONI J. Order-frequency analysis of machine signals[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 87: 229-258.
- [9] ANTONI J, RANDALL R B. Unsupervised noise cancellation for vibration signals: Part II—a novel frequency-domain algorithm[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004, 18(1): 103-117.

第一作者:段晓辉(1996—),男,博士研究生。

E-mail: duan-xiaohui@qq.com

通信作者:冯志鹏(1973—),男,博士,教授。

E-mail: fengzp@ustb.edu.cn