

变转速轴承故障诊断的无转速阶频谱分析方法^{*}

侯俊剑¹, 焦洪涛¹, 余亮^{2,3}, 钟玉东¹, 何文斌¹

(1. 郑州轻工业大学机电工程学院 郑州, 450002)

(2. 西北工业大学民航学院 西安, 710072)

(3. 大型客机集成技术与模拟飞行全国重点实验室 上海, 200126)

摘要 针对变转速轴承进行故障诊断时, 阶频谱相关(order-frequency spectral correlation, 简称 OFSC)方法需要转速作为必要信息的问题, 提出了基于广义瞬态压缩变换(generalized transient-squeezing transform, 简称 GTST)的无转速阶频谱分析方法。首先, 通过时频变换构建振动信号包络的时频图, 利用广义瞬态压缩提高时频图的能量集中; 其次, 结合脊线提取振动信号的瞬时频率, 从而推断转速信息; 然后, 利用所得的转速信息和振动信号进行阶频谱相关和增强包络谱(enhanced envelope order spectrum, 简称 EEOS)分析; 最后, 通过仿真和实验验证了该方法的准确性和可靠性。

关键词 变转速轴承; 角度时间循环平稳; 广义瞬态压缩变换; 阶频谱相关

中图分类号 TH212; TH213.3

引言

故障诊断是设备可靠性维护的关键, 滚动轴承故障诊断技术一直是国内外研究的热点。在工业应用中, 机械系统多在变转速条件下运行, 导致轴承振动信号表现出非周期性和时变性, 传统的处理技术通常建立在信号平稳性的假设之上^[1-6], 这限制了其在识别信号时变统计特性方面的准确性。Abboud 等^[7]基于循环平稳性的概念, 提出了角-时循环平稳信号(angle-time cycle stationary, 简称 ATCS), 由角-时自相关函数(angle-time autocorrelation function, 简称 ATCF)^[8]的角度周期性来定义, 能够全面捕捉故障轴承在时间和角度 2 个维度上的振动特性。基于 ATCS 的理论, OFSC 用来表征轴承的故障特征^[9]。

在 ATCS 分析中, 需要轴承的转速信息作为必要条件。对于某些在高温高压下运行的旋转机械, 无法直接测量其转速^[10]。瞬时频率估计方法因其无需额外硬件而备受关注, 主要包括相位法、时频分布法以及 Hilbert-Huang 变换等^[11]。文献[12]提出一种基于时频分布的无键相阶次跟踪方法, 该方法利用短时傅里叶变换(short time Fourier transform, 简称 STFT)提取转轴的转速信息, 实现角度域重采样。尽管该方

法能够提供轴承转速的近似估计, 但受限于时频分辨率, 其转速估计存在偏差。为提高时频分辨率, 采用同步压缩变换(synchro squeezing transforms, 简称 SST)对时频表示进行后处理^[13]。文献[14]通过处理时频矩阵内的数据来提高时频分辨率。GTST 通过在频域中构建模型来处理信号, 在分析瞬态信号时可以提供更高的时频聚集性和准确性^[15]。

笔者在瞬时频率估计的基础上, 利用广义瞬态压缩变换的迭代和能量重排能力, 提出基于广义瞬态压缩变换的无转速阶频谱分析方法。首先, 通过 STFT 生成变速轴承信号的时频图; 其次, 利用 GTST 提升时频分辨率, 以实现精准的脊线提取; 然后, 利用估计的转速信息和振动信号进行 OFSC 分析, 并构建增强包络谱(enhanced envelope order spectrum, 简称 EESO)以增强故障特征; 最后, 仿真和实验结果表明, 所提出方法在准确性和可靠性方面优于传统瞬时频率估计方法。

1 变转速轴承故障特征提取方法

1.1 问题描述

滚动轴承的故障多由内圈、外圈及滚动元件等

^{*} 国家自然科学基金资助项目(12302270); 河南省科技攻关资助项目(242102221003); 河南省重点研发专项基金资助项目(221111240200)

收稿日期: 2024-04-30; 修回日期: 2024-10-29

部分的局部损伤引起。当轴承发生局部故障时,会产生一系列周期性或准周期性的瞬态脉冲信号^[16],其振动信号 $Z(t)$ 可以看作是背景噪声和瞬态脉冲的叠加,即

$$Z(t) = x(t) + n(t) \quad (1)$$

其中: $x(t)$ 为局部故障产生的瞬态脉冲; $n(t)$ 为其背景噪声。

变转速轴承内圈建模以共振频率为载波频率、故障频率为调制频率的一系列冲击,瞬态脉冲 $x(t)$ 表示为

$$x(t) = A(t) \sum_{i=1}^p y(t - T_i) u(t - T_i) \quad (2)$$

其中: p 为脉冲个数; $A(t)$ 为脉冲的调幅, $A(t) = 1 + \mu \cos\left(2\pi \int_0^t f(u) du\right)$; $f(u)$ 为转动频率关于时间的函数; T_i 为第 i 个脉冲发生的时间; $y(t)$ 为冲击引起的脉冲响应, $y(t) = e^{-\beta(t)} \sin[2\pi f_r t]$; β 为阻尼因子; f_r 为共振频率; $u(t)$ 为单位阶跃函数。

在变转速工况下,滚动轴承的振动信号因速度变化而变得非平稳,且故障特征频率呈现时变性,导致基于平稳性假设的分析方法不再适用。为克服这一问题,引入角-时循环平稳理论,通过 OFSC 分析,将时变的故障特征频率转化为恒定的故障特征阶,实现变转速下的轴承故障特征提取。

1.2 阶频谱相关

在变转速工况下,故障引发的冲击虽然在时间维度上不再周期性出现,但由于轴承旋转的对称性,这些冲击在角度维度上保持周期性。同时,故障引起的冲击信号会随着时间的推移逐渐衰减。因此,在时域中描述这种脉冲响应最为合适。ATCS 能够同时捕获信号在时间和角度上的特性,其定义为:若信号的 ATCF 表现出角度周期性,则该信号被认定为角度/时间循环平稳信号。

$$R_{2r}(\theta, \tau) = E\left\{x(t(\theta))x(t(\theta) - \tau)^*\right\} \quad (3)$$

其中: τ 为时延; θ 为角度; E 为期望; $*$ 表示共轭。

对 ATCS 进行双傅里叶变换,得到 OFSC,可以局部定位调制信号的角周期性和载波的频率特性。

$$S_{2r}(\alpha, f) = F_{\theta \rightarrow \alpha} \{R_{2r}(\theta, \tau)\} \quad (4)$$

其中: R_{2r} 为信号的自相关函数; α 为循环阶次; f 为频谱频率。

式(4)中,首个傅里叶变换将角度信息转换到阶

次,第 2 次是将时间信息映射到频率。轴承的故障特征阶次的计算式为

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{n}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \phi\right) \\ \alpha_o = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \phi\right) \end{cases} \quad (5)$$

其中: α_i 为轴承内圈的故障特征阶次; α_o 为轴承外圈故障特征阶次; d 为滚动体直径; D 为滚道节径; ϕ 为轴承接触角; n 为滚动体个数。

对于变转速轴承故障信号,OFSC 作为一种揭示故障特征的工具,受限于对转速信息的依赖。因此,笔者的目标是在无需额外设备的情况下,从轴承振动信号中准确估计出转速信息,并将其用于阶频谱分析,以实现变转速轴承的故障特征提取。

2 提出方法

2.1 基于时频分布的转速估计方法

基于时频分布的无键相阶次跟踪方法可以直接从振动信号的时频分布中识别出参考轴的转频信息,进而在无转速计的条件下实现信号的角度域重采样。该方法计算流程如下。

1) 对信号进行 STFT,并将其结果的幅值进行平方,得到频谱图,记为 $|X(t, f)|^2$,即

$$|X(t, f)|^2 = \left| \int_0^t x(u) h(u - t) e^{-2\pi f u} du \right|^2 \quad (6)$$

其中: h 为时域高斯窗口函数; $x(u)$ 为原信号。

2) 利用时频脊跟踪算法估计中频曲线,即

$$f_{\max}(t) = \arg \max |X(t, f)|^2 \quad (7)$$

其中: $X(t, f)$ 为原信号 STFT 的集合。

3) 转速公式为

$$\omega = 2\pi f_{\max}(t) \quad (8)$$

将 STFT 的时频表示用于瞬时频率估计,可以从振动信号中估计出转速信息。由于时频分辨率受限于海森堡不确定原理,影响脊线提取的精度,因此提高其时频分辨率可有效增加瞬时频率估计的准确性。

2.2 广义瞬态压缩变换

广义瞬态压缩变换是通过多次迭代,将 STFT 的时频分布能量重新排列在广义瞬时频率估计处,从而得到更聚集的时频分布结果。

对于非平稳信号,其频域信号模型可表示为

$$f(\eta) = A(\eta)e^{-i\phi(\eta)} \quad (9)$$

其中: $A(\eta) > 0$, 为幅值函数; $\phi(\eta)$ 为相位函数。

信号模型的频域短时傅里叶变换定义为

$$V(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} f(\eta) H(\eta - \omega) e^{i(\eta - \omega)t} d\eta \quad (10)$$

其中: t 为时间; η 为频率; H 为时域高斯窗函数的频域表达; $\mathbb{R}$ 为实数集。

将 STFT 结果对频率进行偏微分, 得到其广义时频矩阵 B 的表达式为

$$B = \begin{bmatrix} V^1 & V^2 & \dots & V^{N-1} & V^N \\ V^2 & V^3 & \dots & V^N & V^{N+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ V^{N-1} & V^N & \dots & V^{2N-3} & V^{2N-2} \\ V^N & V^{N+1} & \dots & V^{2N-2} & V^{2N-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中: V^N 为信号在时域高斯窗函数对时间的 N 阶微分下的时频分布结果。

根据广义时频矩阵推导得到广义群延迟估计的表达式为

$$\hat{l}_N(t, \omega) = \begin{cases} t + \Im\left(\frac{-\sigma^2 V^2}{V^1}\right) & (N=1) \\ t + \Im\left(\frac{1}{|B|} \left(\sum_{k=2}^N B_k(k-1)V^{k-1} \right)\right) & (N \geq 2) \end{cases} \quad (12)$$

其中: $\Im$ 表示取函数的虚数部分; B_k 为广义时频矩阵的代数余子式; σ 为高斯窗函数的参数; N 为阶数。

通过多次压缩, 将 STFT 的时频分布能量压缩到所估计的广义瞬时频率处, 即

$$T_N^M(t, \omega) = \int_{\mathbb{R}} V(\tau, \omega) \delta(t - \hat{l}_N^M(\tau, \omega)) d\tau \quad (13)$$

其中: δ 为狄拉克函数; $\hat{l}_N^M(\tau, \omega)$ 为 N 阶广义群延迟估计算子的 M 次迭代结果。

当 $M=1$ 时, 式(13)为高阶同步压缩变换。可见, GTST 将 STFT 能量在频率上进行重排, 提高了时频能量的集中性。图 1 为 GTST 流程图。

2.3 增强包络阶次谱

为了进一步突出故障特征, 引入了 EEOS, 可凸显 OFSC 中的循环阶次, 其表达式为

$$Z_x^{\text{EEOS}}(\alpha) = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} |S_{2x}(\alpha, f)| df \quad (14)$$

其中: $S_{2x}(\alpha, f)$ 为信号的 OFSC; f_1 和 f_2 分别为 OFSC 中频率的上下界。

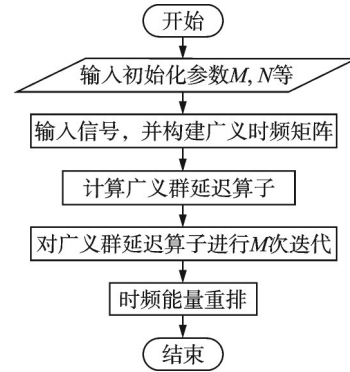


图1 GTST流程图

Fig.1 GTST flow chart

2.4 基于 GTST 的无转速阶频谱分析方法

笔者提出了基于 GTST 的无转速阶频谱分析方法, 图 2 为基于 GTST 的无转速阶频谱分析方法流程图, 具体步骤如下:

1) 确定高斯窗函数参数、压缩次数和群延迟阶数等参数, 使用 N 阶群延迟进行 M 次迭代后的广义瞬时频率估计结果, 对信号进行广义瞬态压缩变换, 实现时频脊线的能量重排;

2) 利用时频脊跟踪算法提取瞬时频率脊线, 计算得到相应的角位置信息;

3) 对原信号的功率谱进行角度域重采样, 将瞬时功率谱转换为角频瞬时功率谱 (angle-frequency instantaneous power spectrum, 简称 AFIPS), 对 AFIPS 执行傅里叶变化, 将角度域转化为阶次域, 构建信号的 OFSC 和 EEOS, 从而对故障特征阶次进行检测。

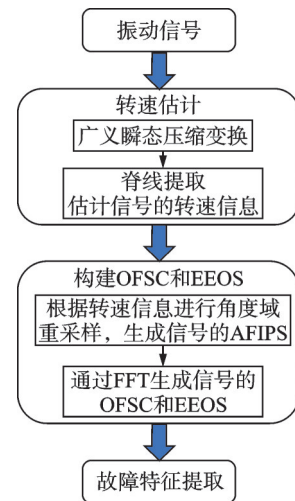


图2 基于 GTST 的无转速阶频谱分析方法流程图

Fig.2 Flowchart of the GTST-based tachometer-free order-frequency spectrum analysis method

3 仿真分析

滚动轴承的初始故障通常出现在外圈、内圈和滚动体,笔者通过仿真内圈故障信号来验证所提出方法。基于短时傅里叶的同步压缩变换(Fourier synchro squeezed transform, 简称 FSST)是对 ST-FT 的一种后处理手段,起到增强时频分辨率的作用。笔者使用的 GTST 可视为一种多次迭代的 FSST。因此,笔者将所提出方法与 FSST 的瞬时频率估计方法进行比较,并与理论转速进行对照,通过计算其 OFSC,验证所提出方法在故障特征提取方面的可行性。

以式(1)为模型,构建轴承内圈故障信号,具体仿真参数设置如下:轴的转动频率 $f_r = 40 - 15t$; $f_s = 1 \times 10^4$ Hz; $\alpha_1 = 4.3$; $\beta = 2000$;共振频率为 2000;信噪比为 0。故障轴承仿真信号如图 3 所示。

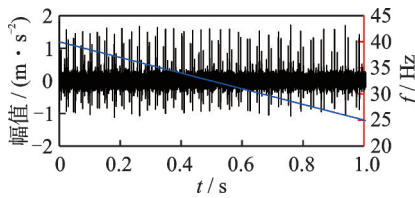
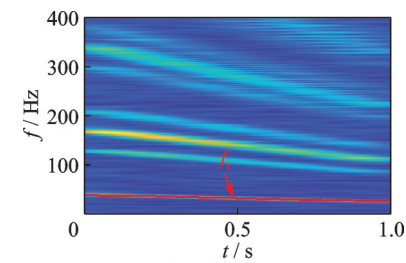


图 3 故障轴承仿真信号

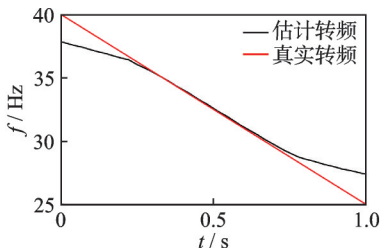
Fig.3 Simulation signal of faulty bearing

不同转速估计方法得到的转速曲线和相应的 OFSC 如图 4 所示。图 4(a)和 4(c)中,箭头所指斜线即为时频能量脊线。FSST 有较好的频率分辨率,但其时间分辨率很差。GTST 通过多次迭代,在保持较好的频率分辨率的同时,提升了时间分辨



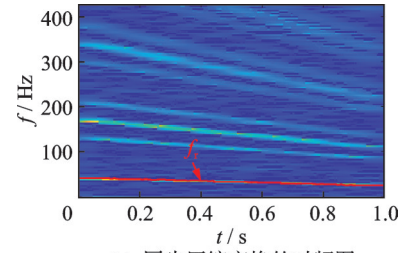
(a) 广义瞬态压缩时频图

(a) Time frequency diagram of GTST



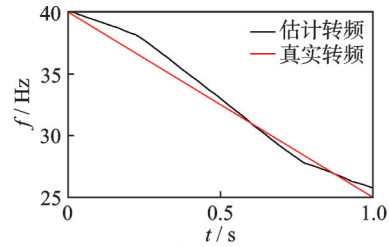
(b) GTST估计转速和理论转速

(b) GTST estimated rotational speed and theoretical speed



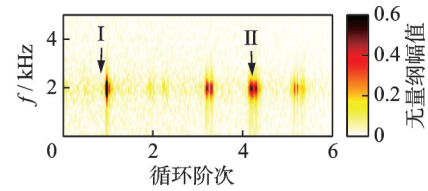
(c) 同步压缩变换的时频图

(c) Time frequency diagram of FSST



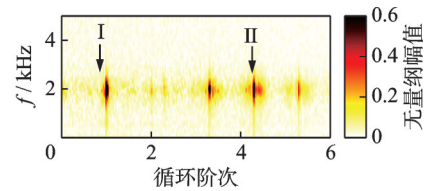
(d) FSST估计转速和理论转速

(d) FSST estimated rotational speed and theoretical speed



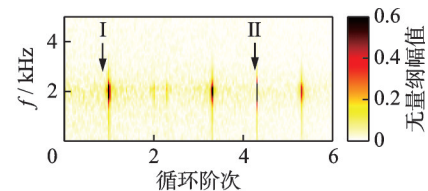
(e) 基于FSST估计转速方法的OFSC

(e) OFSC based on FSST speed estimation method



(f) 基于GTST估计转速方法的OFSC

(f) OFSC based on GTST speed estimation method



(g) 基于理论转速的OFSC

(g) The OFSC obtained from the Theoretical speed

I为轴承转速阶次; II为轴承故障特征阶次

图 4 不同转速估计方法得到的转速曲线和相应的 OFSC

Fig.4 The corresponding speed curve and OFSC are obtained by different speed estimation methods

率。通过与理论值的比较,进一步验证了 GTST 在提取精度上的优势。在时频图的开始和结束的一段时间内,其提取出的脊线有较大误差,这主要是因为时频分析的边缘效应导致谱图出现误差,从而使提取出的脊线产生误差。如图 4(e)所示,基于 FSST 的 OFSC 因为转速估计误差导致其故障特征阶次附近能量相对分散,且故障特征阶与真实值相比有一定的偏移。如图 4(f)所示,基于 GTST 的 OFSC 在

能量集中性方面优于 FSST 方法,且其与理论转速的 OFSC(图 4(g))更为一致。

表 1 为不同估计方法所提脊线计算出的阶次值。GTST 估计转速计算阶次与理论阶次更加接近,验证了所提出方法可以准确提取轴转速,有效揭示轴承故障特征阶次。

表 1 不同估计方法所提脊线计算出的阶次值
Tab.1 Order values calculated from ridge extracted by different estimation methods

估计方法	阶次值
理论阶次	4.30
GTST 估计转速计算阶次	4.29
FSST 估计转速计算阶次	4.18

4 实验验证

实验使用加拿大渥太华大学提供的故障轴承数据集^[17]。在 SpectraQuest 机械故障模拟器(MFS-PK5M)上开展实验。实验台架布置如图 5 所示。电机驱动轴由交流变频器控制,可提供轴承实际工作中的变转速工况。在轴两端支撑处各安装了一个 ER16K 滚珠轴承,左侧为正常轴承,右侧为实验轴承,分别代表不同状态的轴承。在轴承座配备了加速度传感器(ICP 加速度计,型号 623C01)来获取振动信号,并装配了增量编码器(EPC 型号 775)实时跟踪轴的转速。根据轴承参数和式(5),计算得到轴承内圈的故障特征阶为 5.43。实验轴承参数如表 2 所示。

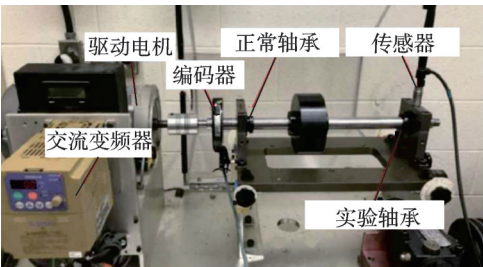


图 5 实验台架布置
Fig.5 Experimental bench layout

表 2 实验轴承参数
Tab.2 Parameters of the experimental bearing

轴承 型号	节圆 直径/mm	滚动体直 径/mm	滚动体 数目	故障 特征阶
ER16K	38.52	7.94	9	5.43

实验所用轴承为内圈故障轴承,其转速为 13~25.7 Hz,采样频率为 200 kHz,采样时间为 10 s,截取 2 s 的数据作为分析信号,轴承信号时域波形如图 6 所示。

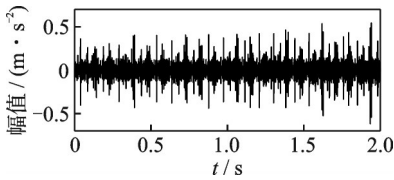


图 6 轴承信号时域波形
Fig.6 Bearing signal time domain waveform

GTST 的参数选择与仿真保持一致,基于 FSST 和 GTST 的时频曲线和其估计转速曲线如图 7 所示。时频图中的红线为时频能量脊线,对比图 7(a)和图 7(c)可以看出,GTST 的时频图在保持良好频率分辨率的同时,具有更优的时间分辨率,脊

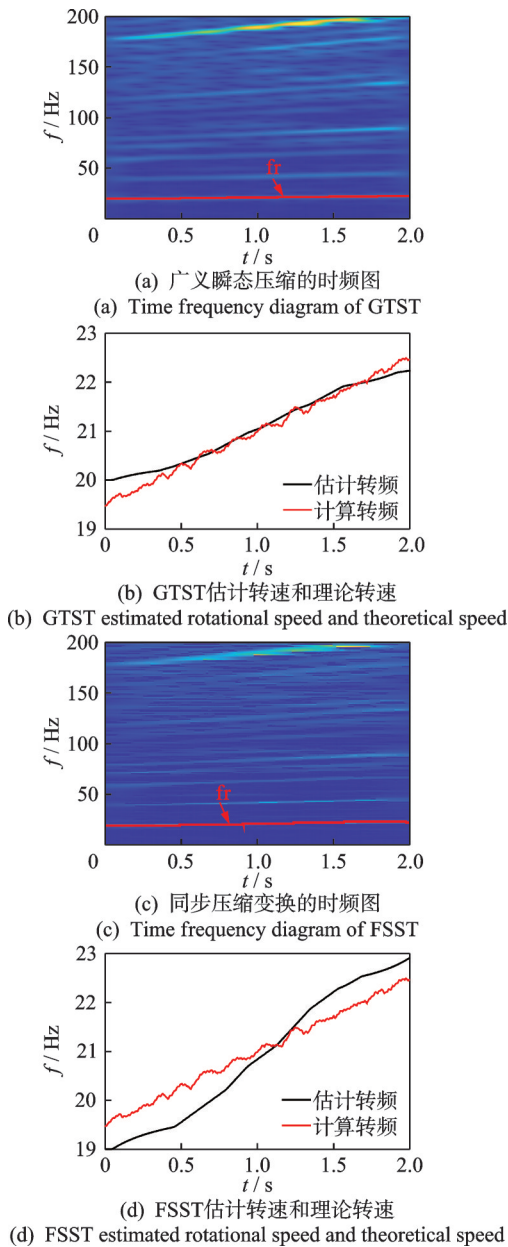


图 7 基于 FSST 和 GTST 的时频曲线和其估计转速曲线
Fig.7 Time-frequency representation and estimated speed curve based on FSST and GTST

线更为平滑。FSST 由于时间分辨率较差,导致其瞬时频率脊线出现波动。对比图 7(b)和图 7(d)可知,由 FSST 估计的转速与计算转速之间存在较大误差,而 GTST 估计的瞬时频率与计算转速趋势一致,误差波动微小。

3 种方法下 OFSC 和 EEOS 分析结果如图 8 所示。对比图 8(a)、(c)、(e)可以看出,3 种方法得到的 OFSC 在理论故障特征阶次 5 附近都有明显峰值,特别是基于 GTST 的估计转速和编码器计算转速的 OFSC 高度一致且能量集中,而基于 FSST 的 OFSC 由于转速估计误差,导致其故障特征阶次附近能量分散,干扰较多。图 8(b)、(d)、(f)的 EEOS 进一步说明所提出方法在故障特征提取上的可行性。

表 3 为实验信号不同时频方法阶次分析结果。各种方法计算出的阶次值与理论阶次值越接近,说明故障特征提取效果越好。由表 3 可知,计算转速和 GTST 估计转速的计算阶次值与理论阶次值一致,而 FSST 估计转速计算阶次值与理论阶次值有

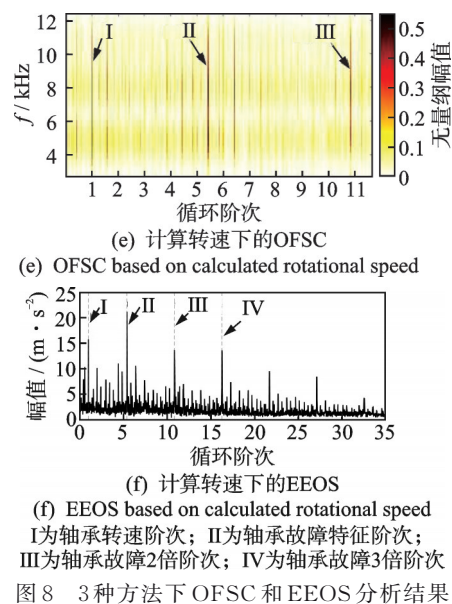
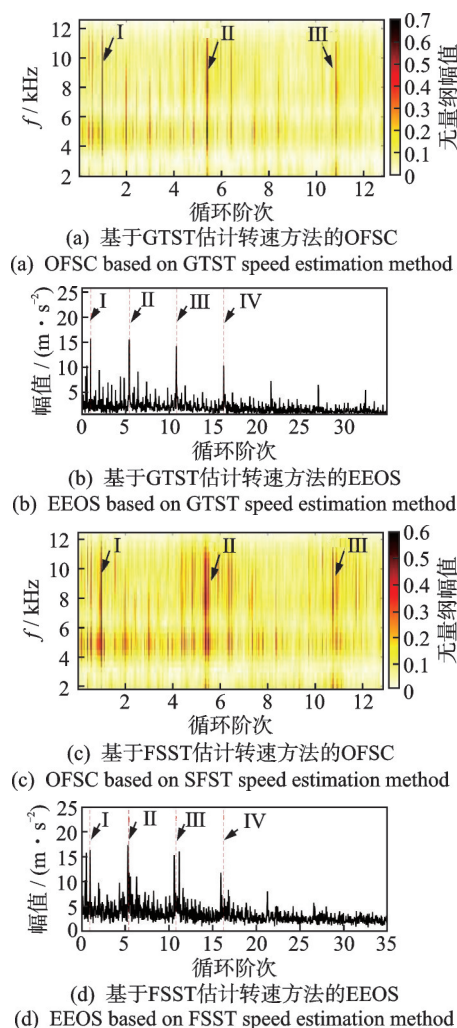


图 8 3 种方法下 OFSC 和 EEOS 分析结果

一定差异。

可见,所提出方法优于基于 FSST 估计转速方法,且诊断结果的准确性可与编码器计算转速相媲美。实验结果和仿真结果一致,证明了笔者所提出方法的有效性。

表 3 实验信号不同时频方法阶次分析结果

Tab.3 Order analysis results of experimental signals using various time-frequency methods

估计方法	阶次值
理论阶次	5.43
计算转速的阶次	5.43
GTST 估计转速计算阶次	5.43
FSST 估计转速计算阶次	5.50

5 结束语

针对 OFSC 方法在轴承故障诊断中依赖转速信号的问题,提出一种基于 GTST 的无转速阶频谱分析方法。该方法利用 GTST 的迭代特性和能量重排能力,提高了时频图的时频分辨率,进而准确提取脊线信息,实现对转速的准确估计。使用估计的转速信息结合振动信号进行 OFSC 分析,并构建 EESO 对故障特征进行增强,实现了无转速信息下的变转速轴承故障诊断,通过实验验证了笔者所提出方法的有效性。在仿真和实验中与基于 FSST 的估计转速和编码器的计算转速所得结果进行了对比,分析该方法诊断效果的准确性,实现了无转速信息下的变转速轴承的故障诊断。

参 考 文 献

- [1] RANDALL R B, ANTONI J. Rolling element bearing diagnostics: a tutorial[J]. *Mechanical Systems and System Processing*, 2011, 25(2): 485-520.
- [2] ANTONI J, RANDALL R B. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines[J]. *Mechanical Systems and System Processing*, 2006, 20(2): 308-331.
- [3] 何清波, 李天奇, 彭志科. 旋转机械故障诊断中的振动信号模型综述[J]. *振动、测试与诊断*, 2024, 44(4): 629-639.
HE Qingbo, LI Tianqi, PENG Zhike. Vibration signal models in rotating machinery fault diagnosis: a review [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2024, 44(4): 629-639. (in Chinese)
- [4] 康伟, 朱永生, 闫柯, 等. 基于CSES和MED的滚动轴承微弱故障特征提取[J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(4): 660-666.
KANG Wei, ZHU Yongsheng, YAN Ke, et al. Weak fault feature extraction of rolling bearings based on CSES and MED[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(4): 660-666. (in Chinese)
- [5] BORGHESEANI P, RICCI R, CHATTERTON S, et al. A new procedure for using envelope analysis for rolling element bearing diagnostics in variable operating conditions[J]. *Mechanical Systems and System Processing*, 2013, 38(1): 23-35.
- [6] 陈春俊, 周林春, 杨露. 基于平均自相关和优化VMD的轴箱轴承故障诊断[J]. *振动、测试与诊断*, 2023, 43(2): 231-239.
CHEN Chunjun, ZHOU Linchun, YANG Lu. Axle box bearing fault diagnosis based on average autocorrelation and optimized VMD[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(2): 231-239. (in Chinese)
- [7] ABOUD D, ANTONI J E M. Angle/time cycle stationarity for the analysis of rolling element bearing vibrations[J]. *Measurement*, 2015, 75: 29-39.
- [8] ANTONI J B F, RAAD A. Cyclostationary modelling of rotating machine vibration signals[J]. *Mechanical Systems and System Processing*, 2004, 18(6): 1285-1314.
- [9] ABOUD D, ANTONI J. Order-frequency analysis of machine signals[J]. *Mechanical Systems and System Processing*, 2017, 87: 229-258.
- [10] COMBET F, GELMAN L. An automated methodology for performing time synchronous averaging of a gearbox signal without speed sensor[J]. *Mechanical Systems and System Processing*, 2007, 21(6): 2590-2606.
- [11] 李辉, 郑海起, 唐力伟. 瞬时频率估计的齿轮箱升降速信号阶次跟踪[J]. *振动、测试与诊断*, 2007, 37(2): 125-128.
LI Hui, ZHENG Haiqi, TANG Liwei. Instantaneous frequency estimation of gearbox speed signal order tracking[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2007, 37(2): 125-128. (in Chinese)
- [12] SU Y F, GAO Y S, CHEN X F, et al. A tachless angle-time cycle stationary analysis method for bearing fault diagnosis[C]//2022 IEEE 31st International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Anchorage, AK, USA: IEEE, 2022: 1180-1185.
- [13] HUA Z H, SHI J J, LUO Y, et al. Iterative matching synchrosqueezing transform and application to rotating machinery fault diagnosis under nonstationary conditions[J]. *Measurement*, 2021, 173: 108592.
- [14] 蒋逸心, 周俊, 伍星, 等. 时频短时集中变换方法在变工况轴承脊线提取中的应用[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(13): 106-114.
JIANG Yixin, ZHOU Jun, WU Xing, et al. Application of time-frequency-short-time concentrated transformation method in bearing ridge extraction under variable working conditions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(13): 106-114. (in Chinese)
- [15] BAO W J, LI F C, CHEN Z H, et al. Generalized transient-squeezing transform: algorithm and applications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-10.
- [16] BORGHESEANI P, SMITH W, ANTONI J, et al. Bearing signal models and their effect on bearing diagnostics[J]. *Mechanical Systems and System Processing*, 2022, 174: 109077.
- [17] HUAN H, NATALIE B. Bearing vibration data collected under time-varying rotational speed conditions [J]. *Data in Brief*, 2018, 21: 1745-1749.



第一作者简介:侯俊剑,男,1982年1月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为振动噪声控制、声源辨识和声学故障诊断等。曾发表《利用3维声场空间特征诊断轴承故障》(《振动、测试与诊断》2021年第41卷第5期)等论文。
E-mail:houjunjian@zzuli.edu.cn

通信作者简介:余亮,男,1984年9月生,博士、教授。主要研究方向为声学阵列测量和智能信号处理、流-声-固耦合分析与控制、气动声学、航空发动机短舱声学设计、测试和控制等。
E-mail:liang.yu@nwpu.edu.cn