

# 快速谱峭度结合阶次分析滚动轴承故障诊断\*

张旭辉<sup>1,2</sup>, 张超<sup>1</sup>, 樊红卫<sup>1,2</sup>, 毛清华<sup>1,2</sup>, 杨一晴<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学机械工程学院 西安, 710054)

(2. 陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室 西安, 710054)

**摘要** 针对变速齿轮箱振动信号非平稳、强干扰及信号调制等特征,导致滚动轴承故障难以精确诊断,提出了融合快速谱峭度的滚动轴承故障包络阶次谱诊断方法。采用快速谱峭度自适应确定滤波参数,对时域信号进行带通滤波和包络以提高信噪比,将包络后时域非平稳信号重采样后转换为角域伪平稳信号,消除“频率模糊”,对角域包络信号频谱分析得到阶次包络谱,根据阶次特征对比实现滚动轴承故障诊断,完成了从 600~1 500 r/min 升速过程中齿轮箱滚动轴承外圈故障的模拟与信号分析实验。结果表明,所提出的方法故障特征阶次最大误差为 1.84%,能够有效提取变速工况下滚动轴承故障特征并判定其类型。

**关键词** 变转速; 滚动轴承; 故障诊断; 快速谱峭度; 阶次分析

**中图分类号** TH113.1; TH133.3

## 引言

滚动轴承广泛应用于各类旋转机械,其健康状况直接关系到机器的工作性能,其故障时常会引发重大安全事故,从而给用户带来巨大经济损失。据统计,滚动轴承引起的旋转机械故障约占到 30%<sup>[1]</sup>。针对滚动轴承故障诊断,国内外学者已经做了大量工作,其中针对稳态工况下滚动轴承的故障诊断方法主要有:包络谱分析<sup>[2]</sup>、经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称 EMD)<sup>[3-4]</sup>、小波变换<sup>[5-6]</sup>等。相比稳态工况,滚动轴承在启停等变转速运行阶段更容易发生故障,因此对变转速(非稳态)滚动轴承的故障诊断更加具有现实意义。齿轮箱作为机械设备主要的传动装置,运行过程中存在大量干扰因素,导致滚动轴承故障产生早期,其微弱的振动信号通常被湮没在干扰噪声中,并呈现出调制现象。如何在变转速、强干扰下对滚动轴承进行精准故障诊断是旋转机械故障诊断的研究热点之一。

常用的傅里叶变换在处理变转速振动信号时会出现“频率模糊”现象,故众多学者采用阶次分析来处理变转速问题。但是,滚动轴承出现故障时,往往伴随一定程度的信号调制现象,即冲击信号对系统固有振动信号的调制。因此,利用阶次分析对轴承进行故障诊断时,需结合包络解调方法,将故障信号

从高频信号中提取出来,从而进行滚动轴承故障的有效诊断。

栾孝驰等<sup>[7]</sup>提出了基于阶次包络谱的轴承微弱故障分析方法,通过包络分析实现了信号解调,但干扰信号未得到有效消除,导致包络阶次谱故障特征不明显。苏文胜等<sup>[8]</sup>利用 EMD 滤波方法去除高频分量的干扰,但由于 EMD 分解本身存在模态混叠的问题,导致滤波结果不理想。丁康等<sup>[9]</sup>提出 Morlet 小波结合谱峭度的滚动轴承故障诊断方法,其中,小波初始带宽选择是依据故障特征频率的 2~3 倍设定的。变转速工况下,轴承故障特征频率随转速时变,因此该方法存在初始带宽难以选择的问题。郝高岩等<sup>[10]</sup>提出了融合滤波定阶理论和阶次包络谱分析的轴承故障诊断方法,但其带通滤波中心频率及带宽选择受人工干预较大。Borghesani 等<sup>[11]</sup>结合带通滤波和时域逆采样阶次去除齿轮箱干扰信号,但该方法存在角域信号滤波带宽选取问题。

综上所述,目前的变转速滚动轴承故障诊断方法主要采用包络阶次分析方法,对齿轮箱干扰采用带通滤波处理,其主要问题是选取滤波参数时主要依赖人工设定,参数设置对信号分析结果影响较大。为解决上述问题,笔者提出快速谱峭度结合阶次分析的变速齿轮箱滚动轴承故障诊断分析方法,通过

\* 国家自然科学基金资助项目(51605380, 51974228); 陕西省重点科技创新团队资助项目(2018TD-032); 陕西省重点研发计划资助项目(2019GY-093)

收稿日期:2019-09-02; 修回日期:2019-11-04

快速谱峭度自适应确定滤波参数,结合 Hilbert 包络解调方法,对非平稳包络信号进行阶次分析,以实现滚动轴承的故障诊断。

## 1 基于快速谱峭度的包络分析

### 1.1 快速谱峭度

峭度是一个对信号瞬时特征非常敏感的时域无量纲参数指标,常用来检测滚动轴承振动信号中冲击成分的强弱。谱峭度则是用来表征信号各条谱线上峭度值的大小,以寻找信号中非平稳成分及其在频域中的位置,其计算式<sup>[12]</sup>为

$$K(f) = \frac{\langle |H(t,f)|^4 \rangle}{\{ \langle |H(t,f)|^2 \rangle \}^2} - 2 \quad (1)$$

其中: $\langle \cdot \rangle$ 为数学期望; $|\cdot|$ 为取模; $H(t,f)$ 为原始信号 $X(t)$ 在频率 $f$ 处的复包络。

要得到信号中的瞬态成分,需计算出每个频带的峭度值,从中找出最大峭度所在的频带。为显著减少谱峭度计算时间,进行快速谱峭度计算,采用1/3-二叉树滤波器组实现各子频带谱峭度的快速计算,根据色图深浅表征峭度值大小。

通过基于 FIR 滤波器构建具有相位准解析低通滤波器 $h_1(n)$ 和高通滤波器 $h_2(n)$

$$\begin{cases} h_1(n) = h_0(n)e^{j\pi n/4} = \\ \quad h_0(n)[\cos(\pi n/4) + j\sin(\pi n/4)] \\ h_2(n) = h_0(n)e^{j3\pi n/4} = \\ \quad h_0(n)[\cos(3\pi n/4) + j\sin(3\pi n/4)] \end{cases} \quad (2)$$

其中: $h_0(n)$ 为截止频率; $h_1(n)$ 为由 $h_0(n)$ 频移1/8得到带宽为 $[0, 1/4]$ 的准解析低通滤波器; $h_2(n)$ 为由 $h_0(n)$ 频移3/8得到带宽为 $[1/4, 1/2]$ 的准解析高通滤波器。

利用以上两个滤波器对原始信号 $X(t)$ 进行二段滤波,以二倍降采样和上述方式迭代滤波对原始信号进行 $M$ 级分解,每级滤波产生 $2^m$ 个子信号,最终将原始信号 $X(t)$ 分解为不同子信号 $c_m^i(n)$ ,其中: $m$ 为分解级数,取 $0, 1, \dots, M-1$ ;  $i$ 为子信号位置系数,取 $0, 1, \dots, 2^m - 1$ 。

信号分解计算式为

$$\begin{cases} c_{m+1}^{2i}(k) = h_1(n)^* c_m^i(2k) \\ c_{m+1}^{2i+1}(k) = h_2(n)^* c_m^i(2k) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $*$ 为卷积运算; $c_m^i(k)$ 为第 $m$ 级中第 $i$ 个子信号; $|c_m^i(k)|$ 为信号复包络信号,其对应的滤波器带宽为 $\Delta f = 2^{-m-1}$ ;中心频率为 $f_i = (i+1) \times 2^{-m-1}$ 。

为提高精度,对上述 $M$ 级分别再做三分段滤波。和上述方式类似,得到复包络信号 $c_m^i(k)$ 带入式(1)为

$$K(f_i, \Delta f_m) = \frac{\langle |c_m^i(k)|^4 \rangle}{\{ \langle |c_m^i(k)|^2 \rangle \}^2} - 2 \quad (4)$$

计算出各子信号的谱峭度,将所有峭度进行对比,得到最大谱峭度 $K_{\max}(f_i, \Delta f_m)$ 所对应的中心频率 $f_i$ 和最佳带宽 $\Delta f_m$ ,即为最优滤波中心频率及带宽,进而对原始信号 $X(t)$ 进行带通滤波,得到滤波后的时域信号 $x(t)$ 。

### 1.2 包络分析

针对滚动轴承振动信号常存在调制现象,应用 Hilbert 包络解调方法<sup>[3]</sup>,对滤波后连续时间信号 $x(t)$ 经希尔伯特变换检波除去高频分量,得到含有轴承故障分量的包络信号 $A(t)$

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \quad (5)$$

其中: $\hat{x}(t)$ 为 $x(t)$ 经过 Hilbert 变换的虚部。

## 2 滚动轴承故障特征阶次计算

阶次分析是用以去除转速对振动信号的干扰<sup>[13]</sup>,解决转速变化对信号频率调制的影响。阶次、转速、频率之间关系为

$$O = 60f/n \quad (6)$$

其中: $O$ 为阶次; $f$ 为频率; $n$ 为转速。

采用阶次分析对滤波后的包络信号 $A(t)$ 进行等角度重采样。首先,通过鉴相信号得到时间序列 $\{t\}$ ;其次,对原始信号 $X(t)$ 进行三次样条插值得到角域伪平稳信号;最后,进行常规快速傅里叶变换(fast Fourier transform,简称FFT)分析得到包络阶次谱。

由于滚动轴承大都是外圈不旋转,其各部件故障特征频率公式<sup>[14]</sup>可分别表示为

$$f_i = \frac{1}{2} f_r Z \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad (7)$$

$$f_o = \frac{1}{2} f_r Z \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad (8)$$

$$f_b = \frac{1}{2} f_r \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right] \quad (9)$$

其中: $f_i, f_o, f_b$ 分别为滚动轴承内圈、外圈、滚动体故障特征频率; $f_r$ 为轴承所在轴转频; $Z$ 为滚动体个数; $D$ 为节径; $d$ 为滚动体直径; $\alpha$ 为接触角。

通常齿轮箱轴承转速难以直接获取,本研究利用电机输出转频 $f_m$ ,结合式(6)~(9),代入齿轮箱

传动比  $i$ , 计算出  $f_m$  下的轴承故障特征阶次, 即能表征变转速工况下滚动轴承内圈、外圈、滚动体故障所对应的阶次, 其分别为

$$O_i = \frac{f_i}{f_m} = \frac{f_i}{if_r} = \frac{(D + d \cos \alpha) Z}{2iD} \quad (10)$$

$$O_o = \frac{f_o}{f_m} = \frac{f_o}{if_r} = \frac{(D - d \cos \alpha) Z}{2iD} \quad (11)$$

$$O_b = \frac{f_b}{f_m} = \frac{f_b}{if_r} = \frac{D^2 - d^2 \cos^2 \alpha}{2idD} \quad (12)$$

其中:  $O_i, O_o, O_b$  分别为滚动轴承内圈、外圈、滚动体故障特征阶次。

### 3 改进的变速滚动轴承故障诊断

针对变速滤波参数非自适应导致的故障误诊问题, 提出融合快速谱峭度的包络分析及阶次分析方法, 流程如图1所示。

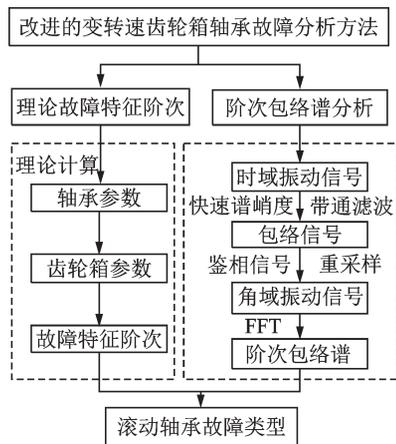


图1 改进的变速齿轮箱滚动轴承故障分析方法

Fig.1 Improved variable speed gearbox rolling bearing fault analysis method

上述提出的变速齿轮箱滚动轴承故障诊断方法主要步骤如下:

- 1) 应用快速谱峭度确定原始信号的最优滤波参数(中心频率与带宽), 对滤波后信号进行包络;
- 2) 对包络信号进行阶次分析后解调, 求得包络阶次谱;
- 3) 通过轴承故障特征阶次计算与包络阶次谱突出阶次对比, 确定故障类型。

## 4 滚动轴承故障诊断实例

### 4.1 平台设计与搭建

为验证笔者所提出快速谱峭度结合阶次分析的

变速齿轮箱滚动轴承故障诊断方法的有效性, 设计了齿轮传动系统故障诊断实验平台, 具有行星齿轮箱和二级平行轴齿轮箱两级传动, 传动链及测点分布如图2所示。为模拟齿轮箱实际运行过程中振动信号的复杂性, 选取距离电机端较远的二级平行轴齿轮箱第2级传动主动轮的滚动轴承作为实验轴承, 即图中测点1。

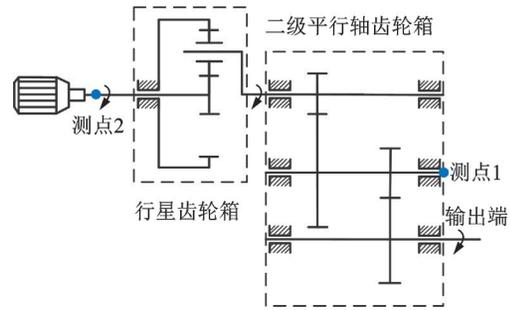


图2 实验平台原理图及测点分布

Fig.2 Experimental platform schematic and measurement point distribution

根据图2所搭建的实验平台如图3所示, 由变频交流电机、行星齿轮箱、二级平行轴齿轮箱等组成, 采用转速传感器跟踪转速, 加速度传感器测量振动信号, 通过径向加载突出信号特征, 齿轮箱参数见表1。

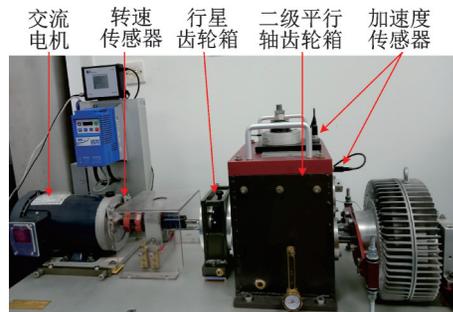


图3 故障模拟实验平台

Fig.3 Fault simulation test platform

表1 两级减速箱减速比

Tab.1 Reduction ratio of two-stage gearbox

减速箱	行星齿轮箱	平行轴齿轮箱
减速比	4.57	3.45

### 4.2 轴承故障和电机变速模拟

实验中, 采用两个加速度传感器分别采集轴承径向、轴向振动信号(图3中竖直和水平安装的两个传感器), 加速度传感器的灵敏度为 103 mV/g。采用光电传感器测量实时转速, 传感器安装在驱动电

机端(图 2 中测点 2),振动信号采样频率设计为 25.6 kHz,满足采样定律。被测轴承类型为 ER-16K,其主要参数见表 2。根据齿轮箱、轴承参数和电机转速,由式(10)~(12)计算可得轴承故障特征阶次见表 3。

表 2 滚动轴承结构参数

Tab.2 Structural parameters of rolling bearing

滚珠 个数	滚珠 直径/mm	节圆 半径/mm	接触 角/(°)
9	7.94	38.51	0

表 3 滚动轴承故障特征

Tab.3 Fault characteristic of rolling bearing

轴承零部件	外圈	内圈	滚动体
故障特征阶次	0.226 4	0.344 4	0.144 8

在滚动轴承的外圈设置故障,故障尺寸为 3 mm×2 mm×0.5 mm,如图 4 所示。为模拟机床在加工零件过程中首先粗加工、再到精加工整个实际过程,实验通过交流电机变频控制实现变转速运行,从电机控制端得到转速曲线,如图 5 所示。



图 4 滚动轴承外圈故障  
Fig.4 Rolling bearing  
outer ring failure

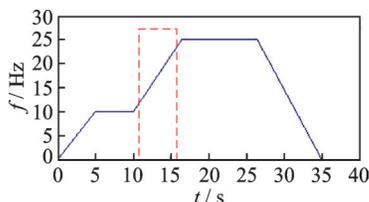


图 5 电机转速曲线  
Fig.5 Motor speed graph

### 4.3 信号分析与误差评定

选取所测信号中 11~16 s 间 5 s 加速阶段的数据进行分析,完成本研究方法与不经滤波的阶次包络谱分析的对比。时域振动信号如图 6 所示,振幅随转速不断增大,表现出较强的非平稳性。电机转

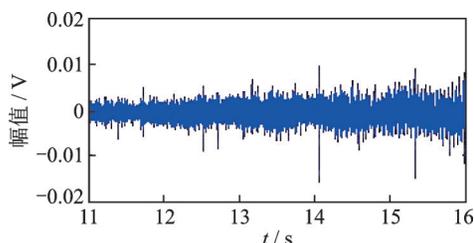


图 6 振动信号时域图  
Fig.6 Vibration signal time domain diagram

速脉冲如图 7 所示,加速工况下,鉴相信号频率随时间增加而增加。

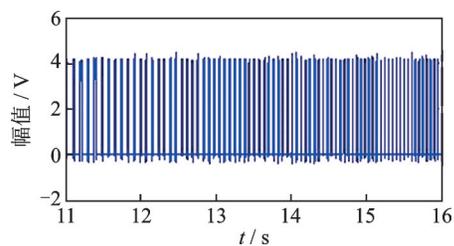


图 7 电机转速脉冲信号  
Fig.7 Motor speed pulse signal

图 8 为 11~16 s 信号进行常规 FFT 的频谱图,从图中可以看出频谱范围较宽,由局部频谱放大图中可看到存在较强频率混叠及噪声干扰,无法用来判定轴承外圈是否发生故障。

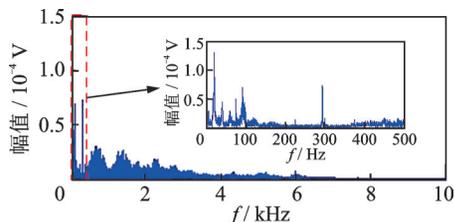


图 8 振动信号 FFT 频谱图  
Fig.8 Vibration signal FFT spectrum

图 9 为对原始信号不经滤波直接进行包络阶次分析的结果,图中突出阶次较复杂,虽然能找到 0.226 4 阶次及其 2 倍阶次,但故障阶次峰值不占优,不能准确判断轴承外圈是否故障。

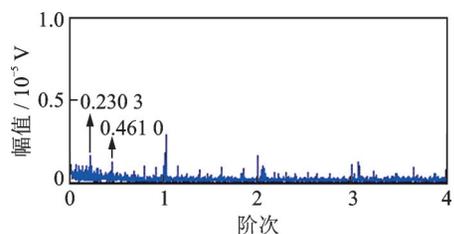


图 9 未滤波的滚动轴承外圈故障阶次包络谱  
Fig.9 Unfiltered rolling bearing outer ring fault order envelope spectrum

应用笔者所提出的方法,对所采集的轴承振动信号进行分解,选择的最大分解级数  $M$  为 5,截止频率  $h_0(n)$  根据 FIR 滤波器的频率归一化设计,一般取 0.4。将  $M$  和  $h_0(n)$  代入式(2)~(4),可计算得出各子信号的谱峭度,如图 10 所示。将所有峭度对比,得到最大谱峭度  $K_{\max}(f_i, \Delta f_m)$  所对应的中心频率  $f_i$  为 4.2 kHz 和最佳带宽  $\Delta f_m$  为 400 Hz。

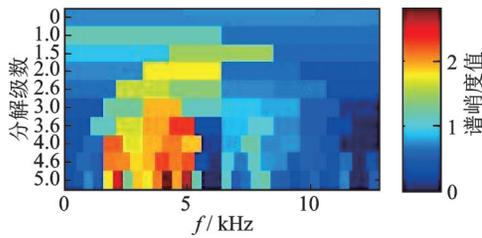


图 10 快速谱峭度图

Fig.10 Fast kurtogram spectrum

根据快速谱峭度所计算出的  $f_i$  和  $\Delta f_m$  对原始信号进行滤波,通过式(5)得到包络信号后,进行阶次频谱分析得到如图 11 所示包络阶次谱图。由图可以明显看出 0.224 6 阶次及其  $n$  倍阶次,与轴承外圈的理论故障特征阶次相符,二者误差见表 4,阶次最大误差仅为 1.84%。由此可判定轴承外圈出现故障,验证了本研究所提方法的有效性。

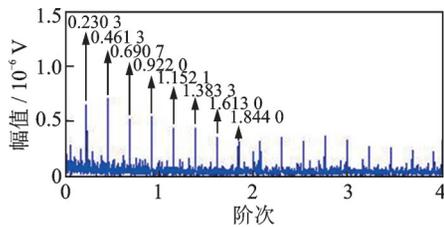


图 11 滚动轴承外圈故障阶次包络谱

Fig.11 Order envelope spectrum of rolling bearing outer fault

表 4 实验误差分析表

Tab.4 Experimental error analysis table

阶次	理论阶次	实际阶次	误差值/%
1	0.226 4	0.230 3	1.72
2	0.452 8	0.461 0	1.81
3	0.679 2	0.690 7	1.69
4	0.905 6	0.922 0	1.81
5	1.132 0	1.152 1	1.78
6	1.358 4	1.383 3	1.84
7	1.584 8	1.613 0	1.78
8	1.811 2	1.844 0	1.81

## 5 结 论

1) 采用快速谱峭度自适应地确定带通滤波器滤波中心频率与带宽参数,避免了依靠人工经验设定的不足。

2) 变速工况下,采用阶次分析对振动信号进行角域重采样,解决了直接频谱分析出现“频率模糊”的问题。

3) 融合快速谱峭度与包络阶次分析可以快速

精确地诊断轴承故障,相比直接包络阶次分析,能够准确锁定故障部位。

## 参 考 文 献

[1] 张西宁,雷威,李兵.主分量分析和隐马尔科夫模型结合的轴承监测诊断方法[J].西安交通大学学报,2017,51(6):1-7,109.  
ZHANG Xining, LEI Wei, LI Bing. Bearing fault detection and diagnosis method based on principal component analysis and hidden markov model[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(6): 1-7, 109. (in Chinese)

[2] 陈祥龙,冯辅周,张兵志,等.基于平方包络谱相关峭度的最优共振解调诊断滚动轴承故障[J].机械工程学报,2018,54(21):90-100.  
CHEN Xianglong, FENG Fuzhou, ZHANG Bingzhi, et al. Rolling bearing fault diagnosis with optimal resonant frequency band demodulation based on squared envelope spectral correlated kurtosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 90-100. (in Chinese)

[3] 孙伟,李新民,金小强,等.应用EMD和倒包络谱分析的故障提取方法[J].振动、测试与诊断,2018,38(5):1057-1062.  
SUN Wei, LI Xinmin, JIN Xiaoqiang, et al. Feature extraction method based on EMD and envelope cepstrum [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5):1057-1062. (in Chinese)

[4] XIONG Q, XU Y H, PENG Y Q, et al. Low-speed rolling bearing fault diagnosis based on EMD denoising and parameter estimate with alpha stable distribution [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2017, 31(4): 1587- 1601.

[5] 祝小彦,王永杰,张钰淇,等.基于自适应最优 Morlet 小波的滚动轴承故障诊断[J].振动、测试与诊断,2018,38(5):1021-1029.  
ZHU Xiaoyan, WANG Yongjie, ZHANG Yuqi, et al. Method of incipient fault diagnosis of bearing based on adaptive optimal morlet wavelet [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 1021-1029. (in Chinese)

[6] 林桐,陈果,滕春禹,等.基于机匣振动信号的滚动轴承故障协同诊断技术[J].航空动力学报,2018,33(10):2376-2384.  
LIN Tong, CHEN Guo, TENG Chunyu, et al. Roll-

- ing bearing collaborative fault diagnosis technology for casing vibration signal[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(10):2376-2384.(in Chinese)
- [7] 栾孝驰,沙云东. 某型涡扇发动机中介轴承微弱故障特征信号提取技术[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(13):167-174.
- LUAN Xiaochi, SHA Yundong. Technology to extract weak fault characteristic signal of intermediate bearing of some turbofan engine [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(13):167-174.(in Chinese)
- [8] 苏文胜,王奉涛,张志新,等. EMD降噪和谱峭度法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3):18-21, 201.
- SU Wensheng, WANG Fengtao, ZHANG Zhixin, et al. Application of EMD denoising and spectral kurtosis in early fault diagnosis of rolling element bearings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3):18-21, 201.(in Chinese)
- [9] 丁康,黄志东,林慧斌. 一种谱峭度和Morlet小波的滚动轴承微弱故障诊断方法[J]. 振动工程学报, 2014, 27(1):128-135.
- DING Kang, HUANG Zhizhong, LIN Huibin. A weak fault diagnosis method for rolling element bearings based on Morlet wavelet and spectral kurtosis [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(1):128-135.(in Chinese)
- [10] 郝高岩,刘永强,廖英英. 一种基于改进阶次包络谱的滚动轴承故障诊断算法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(15):144-148.
- HAO Gaoyan, LIU Yongqiang, LIAO Yingying. A rolling bearing fault diagnosis algorithm based on improved order envelope spectrum [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(15):144-148.(in Chinese)
- [11] BORGHESANI 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 Signal Processing, 2013, 38(1):23-35.
- [12] DWYER R. Detection of non-Gaussian signals by frequency domain Kurtosis estimation [C] //IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Boston, MA:IEEE,1983:607-610.
- [13] 陈向民,于德介,李蓉. 基于阶次解调谱的变速齿轮箱复合故障诊断方法[J]. 振动工程学报, 2013, 26(6):951-959.
- CHEN Xiangmin, YU Dejie, LI Rong. A compound faults diagnosis method for variational-speed gearbox based on order tracking demodulation spectrum [J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(6):951-959.(in Chinese)
- [14] 柏林,甄杰,彭畅,等. 变转速下滚动轴承阶比峭度图法故障特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(4):653-658.
- BO Lin, ZHEN Jie, PENG Chang, et al. COT-kurtogram based fault features extraction for rolling element bearing under varying speed [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(4):653-658. (in Chinese)



**第一作者简介:**张旭辉,男,1972年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为设备运行状态监测与故障诊断。曾发表《A tri-stable piezoelectric vibration energy harvester for composite shape beam: nonlinear modeling and analysis》(《Sensors》2020, Vol.20, No.5)等论文。  
E-mail: zhangxh@xust.edu.cn