

文章编号:1006-1355(2019)01-0172-05

基于LMS和Fast-Kurtogram的滚动轴承 早期故障诊断

杨晓雨, 荆双喜, 罗志鹏

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要:针对滚动轴承早期故障特征提取困难的问题,提出一种LMS(Least Mean Square, LMS)算法降噪、Fast-Kurtogram选频和共振解调技术相结合的滚动轴承故障诊断方法。首先对采集到的信号进行自适应降噪,减弱背景噪声的影响;然后利用谱峭度值对故障信号中瞬态成分敏感的特性,通过计算降噪后信号的快速峭度图,确定滤波器最优频带中心和带宽;最后进行共振包络解调提取出滚动轴承早期故障特征。通过仿真和实验验证分析,验证了该方法在滚动轴承早期故障诊断中的适用性和有效性。

关键词:振动与波;滚动轴承;故障诊断;Least Mean Square (LMS);Fast-Kurtogram;共振解调

中图分类号:TH911.7

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2019.01.033

Early Fault Diagnosis of Rolling Bearings based on LMS and Fast-Kurtogram

YANG Xiaoyu, JING Shuangxi, LUO Zhipeng

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University,
Jiaozuo 454000, Henan China)

Abstract: Due to the difficulty of early fault features extraction of rolling bearings, a new fault diagnosis method for rolling bearings based on LMS algorithm noise reduction, Fast-Kurtogram frequency selection and resonance demodulation technology is proposed. First of all, the adaptive noise reduction is used to reduce the effect of the background noise. Then, based on the characteristics of spectral kurtosis, which is sensitive to the transient components of the faulty signal, the optimal band center and bandwidth of filter can be determined by plotting the Fast-Kurtogram of the denoised signal. Finally, the resonance envelope demodulation is used to extract the early fault characteristics of the rolling bearing. The feasibility and efficiency of this proposed method for the early fault diagnosis of rolling bearing have been verified by simulation and experiments.

Keywords: vibration and wave; rolling bearing; fault diagnosis; Least Mean Square (LMS); Fast-Kurtogram; resonance demodulation

滚动轴承是机械设备中最常用,同时也是最易损坏的重要零部件之一^[1]。因其工作环境相对复杂,内圈、外圈、滚动体等任一部分发生损伤,都将会给设备的正常运转埋下安全隐患^[2]。滚动轴承的诊断方法多种多样,其中共振解调技术是应用最广的方法之一,它可以减弱背景噪声的影响,将微弱的故障

特征信息提取出来,较其它方法,具有放大性、选择性、比例性、低频性、对应性、展宽性等优点^[3]。共振解调方法的关键和瓶颈在于带通滤波过程中中心频率和带宽的选择,传统的确定方法为利用传感器谐振频率作为中心频率进行滤波,但不具有通用性^[4]。王平等^[5]提出先对原始信号进行频谱分析,然后通过计算机软件识别轴承系统的高频共振频率,从而确定带通滤波器的中心频率,朱汉明^[6]将EMD(Empirical Mode Decomposition, EMD)和共振解调相结合,对比研究了前3个以较高频率为载波中心的固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),选取其中香农熵最小的IMF代替原带通滤波后的结果;潘阳等^[7]将所有的IMF都进行了香农熵计算,选

收稿日期:2018-04-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1604140, 51775174);
河南省科技攻关资助项目(172102210021)

作者简介:杨晓雨(1993-),男,河南省安阳市人,硕士研究生,主要研究方向为机械设备故障监测与诊断。

通信作者:荆双喜,男,博士生导师。

E-mail: jsx@hpu.edu.cn

择其中熵值最小的分量进行了分析研究。谱峭度(Spectrum Kurtosis, SK)^[8]作为一种既能反映瞬态冲击强弱,又能指示频率的指标,由Dwyer^[9]引入后,迅速发展,并应用于工程故障诊断领域,它克服了EMD分解存在模态混叠,且高频信号中往往包含噪声的问题,应用前景更加广泛。王宏超等^[10]将快速峭度算法(Fast Kurtosis, FK)应用于滚动轴承故障诊断;马新娜^[11]提出了典型谱峭图和共振解调结合的方法,从谱峭图中得到中心频率和带宽。以上方法适用于滚动轴承一般故障特征的提取,对于症状不明显,特征信号微弱,且往往被强烈的背景噪声所掩盖的滚动轴承的早期故障,效果会变得不明显^[12]。苏文胜等^[13]提出先对原信号进行EMD降噪处理,再用快速谱峭度图确定中心频率和带宽,最后进行包络解调,提取出故障特征。本文提出一种最小均方(Least Mean Square, LMS)算法自适应降噪和Fast-Kurtogram相结合的滚动轴承早期故障诊断方法,先对原信号进行自适应降噪,再结合快速峭度图进行带通滤波,最后进行包络解调,提取淹没在背景噪声中的滚动轴承早期故障特征。

1 方法介绍

1.1 最小均方(LMS)算法

LMS算法简易,与维纳滤波器相比,不需要其工作环境统计特性的相关知识,与最小递归二乘算法相比,不需要回归量的相关矩阵求逆运算,而且在某一确定性意义下具有鲁棒性,因此成为目前使用的最流行的自适应滤波算法之一^[14]。

LMS算法结构共分为FIR滤波器、比较器、自适应权值控制机制三个部分,如图1所示。

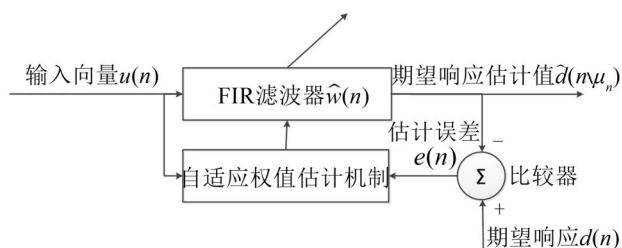


图1 LMS算法结构

其中: $u(n)$ 是输入向量, $d(n)$ 是相应的期望响应, $\hat{w}(n)$ 是未知的抽头权向量 $w(n)$ 的估计, $w(n)$ 是线性多重回归模型的解, $e(n)$ 是由期望响应 $d(n)$ 和FIR滤波器输出值之差产生的估计误差。假设FIR滤波器输出为 $y(n)$,则LMS对应的算法如下

$$y(n) = \hat{w}^H(n) u(n) \quad (1)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2)$$

$$\hat{w}(n+1) = \hat{w}(n) + \mu u(n) e^*(n) \quad (3)$$

式中:上标H表示复共轭转置,星号“*”表示复共轭, μ 表示步长因子。通过实时比较 $y(n)$ 和 $d(n)$,用 μ 来控制“增量”,从而不断更新估计的当前权向量 $\hat{w}(n)$,使滤波器的输出信号与期望输出信号之间的均方误差最小,达到对有用信号的最佳估计。

1.2 Fast-Kurtogram

Fast-Kurtogram是由频率 f 、频率分辨率 Δf 和谱峭度值组成的二维图,谱峭度值用颜色的深浅表示。它可以确定最优的带通滤波器参数,从而恢复故障信号周期性冲击的本质。

谱峭度由Dwyer提出,并由Antoni J^[15]正式定义。信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi ft} H(t, f) dX(f) \quad (4)$$

式中: $H(t, f)$ 是信号 $x(t)$ 在时间 t 、频率 f 处的复包络; $X(f)$ 为严格白噪声的谱。复包络的 $2n$ 阶矩可以表示为

$$S_{2nX}(f) = E \left\{ \left| H(t, f) dX(f) \right|^{2n} \right\} / df = E \left\{ \left| H(t, f) \right|^{2n} \right\} \cdot S_{2nX} \quad (5)$$

式中: S_{2nX} 为 $X(f)$ 的 $2n$ 阶矩; $E(\cdot)$ 表示数学期望; $n \in \mathbb{Z}$ 。 $x(t)$ 的复包络的4阶矩 $C_{4X}(f)$ 可以定义为

$$C_{4X}(f) = S_{4X}(f) - 2S_{2X}^2(f), \quad f \neq 0 \quad (6)$$

从而得到谱峭度定义为

$$K_X(f) = \frac{C_{4X}(f) - S_{4X}(f)}{S_{2X}^2(f)} - 2, \quad f \neq 0 \quad (7)$$

谱峭度值获取的基本思路是计算每根谱线的峭度值,它适用于对瞬态冲击信号的监测。滚动轴承故障信号往往包含由故障缺陷引起的轴承固有频率振动,因此可以在故障冲击成分较丰富的高频带(共振带)得到较大的谱峭度值。

1.3 方法步骤

共振解调故障诊断的方法步骤是,首先将故障信号进行傅里叶变换,然后利用传感器自身的谐振频率进行包络分析,经过两次信号包络后,去除高频和低频的信号,最后对留下的带通信号进行傅里叶变换,得到频谱图。共振解调的关键是找到带通滤波的中心频率和带宽,共振的效果会把微小的冲击故障信息放大,从而达到滚动轴承早期故障诊断的目的。

Fast-Kurtogram可以根据谱峭度确定最优带通滤波的中心频率,提高了信噪比。LMS降噪会减弱背景噪声的影响,使得故障信号共振包络解调的效果更加明显。利用LMS降噪和Fast-Kurtogram相结合的共振解调方法进行滚动轴承早期故障诊断的步骤如图2所示。

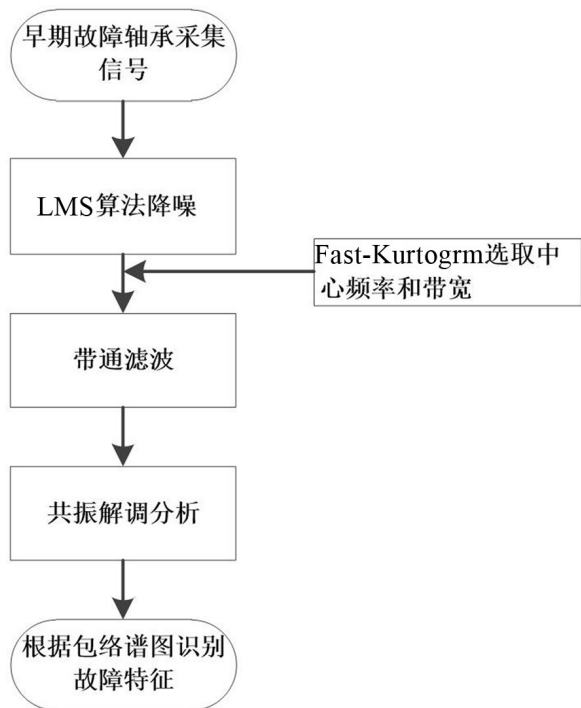


图2 技术路线图

2 仿真分析

滚动轴承内圈故障信号仿真模型可以表述如下^[16]

$$x(t) = \sum_i A_i s(t - iT - \tau_i) + n(t) \quad (8)$$

其中: A_i 为第 i 次冲击的幅值; $s(t)$ 为内圈损伤产生的某次冲击振荡; T 为冲击发生的周期; τ_i 为第 i 次冲击

相对于平均周期 T 的微小滑动; $n(t)$ 为加性的高斯白噪声。 $s(t)$ 和 A_i 可以进一步表示为

$$s(t) = e^{-Bt} \cdot \sin 2\pi f_n t \quad (9)$$

$$A_i = \cos(2\pi f_r t + \Phi_A) + c_A \quad (10)$$

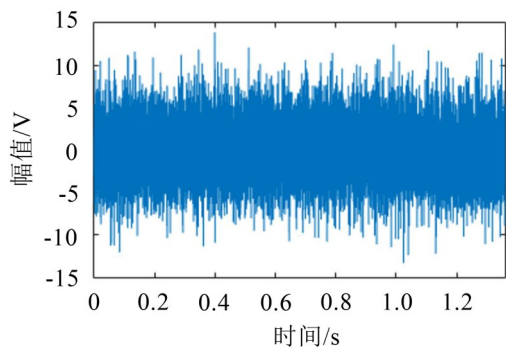
式中: B 为衰减系数; f_n 为系统的共振频率; f_r 为内圈转频; Φ_A 为相对滑动比; c_A 为任意常数。

对模型的参数进行赋值, 设置采样频率 f_s 为 12 kHz, 系统共振频率 f_n 为 2 kHz, 内圈通过频率 f_p 为 117 Hz, 滚珠相对滚道的相对滑动比 c_A 为 0.01, 转频 f_r 为 17 Hz; 加入信噪比 $\text{SNR} = -12$ 的高斯白噪声, 模拟强烈的背景噪声。分析数据长度为 16 k 个采样点, 得到如图 3 所示的仿真信号时域波形和包络谱。

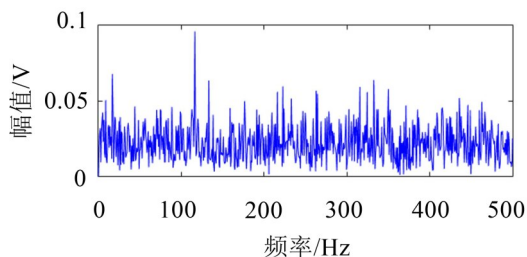
从图 3 中可以看到仿真信号表现出了高斯白噪声的特征, 故障冲击信号被淹没, 包络后信号谱图中的内圈通过故障特征信息也被噪声所掩盖。

利用自适应最小均方算法 (LMS) 进行滤波降噪, 设置滤波器阶数为 50, 步长因子 μ 为 7.290×10^{-7} 。降噪后信号的时域波形和包络谱如图 4 所示。

从图 4 中可以看到, 高斯白噪声的影响明显减弱, 低频的故障特征信息已经被提取出来。为了使故障特征信息显示更加明显, 对滤波后的信号进行单根谱线谱峭度值的计算, 确定滤波器的滤波范围为 1 800 Hz, 2 200 Hz, 中心频率为 2 000 Hz, 最后得到快速峭度图 (Fast-Kurtogram) 及带通滤波后的信号包络谱如图 5 所示。

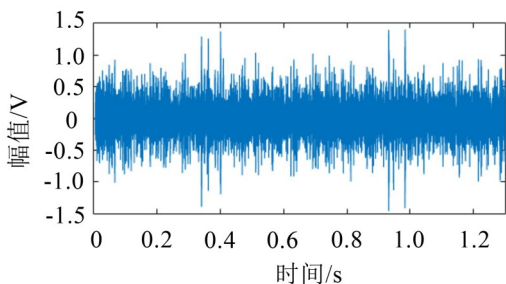


(a) 仿真信号时域波形

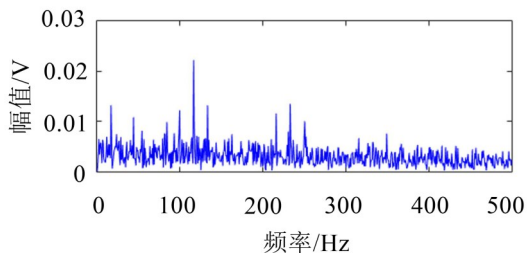


(b) 仿真信号包络谱

图3 仿真信号时域波形及其包络谱



(a) LMS 降噪后信号的时域波形



(b) LMS 降噪后信号的包络谱

图4 LMS 降噪后信号的时域波形及其包络谱

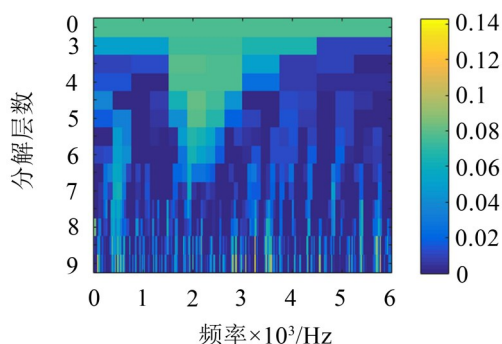
从图5中可以得到转频 $f_r=16.85$ Hz,内圈通过频率 $f_{ip}=116.5$ Hz,调制边频带 $f_{ip}+f_r=133.3$ Hz,调制边频间隔接近转频17 Hz,即转频 f_r ,由此可以判断出滚动轴承存在内圈故障。

3 实验研究

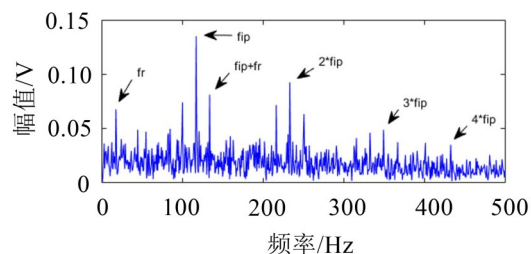
实验台为齿轮传动故障诊断综合试验台,主要包括调速驱动电机、扭矩传感器、编码器、一级行星齿轮传动、二级平行轴齿轮传动、可编程磁力制动器和数据采集系统等。振动加速信号采集于驱动电机风扇端外壳,加速传感器型号为608A11,灵敏度为100 mV/g。风扇端轴承类型为SKF6203,其内圈轻微点蚀,内圈旋转频率(即电机转频)为34 Hz,平行齿轮箱的径向载荷0 N,采样频率为12.8 kHz,分析长度为16 k,实验台实拍图和振动信号的时域波形图如图6所示。

SKF6203轴承的内圈直径为 $d=17$ mm;外圈直径 $D=40$ mm;滚动体个数为 $N=8$,直径为 $D_b=6.7564$ mm;节径 $D_0=29$ mm;压力角 $\alpha=0^\circ$ 。实际中由于电机滑差的存在,电机转频在33.5 Hz左右,则理论计算内圈通过故障频率为

$$f_{ip} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_0} \cos \alpha \right) f_r = 165.22 \text{ Hz} \quad (11)$$



(a) 快速谱峭度图

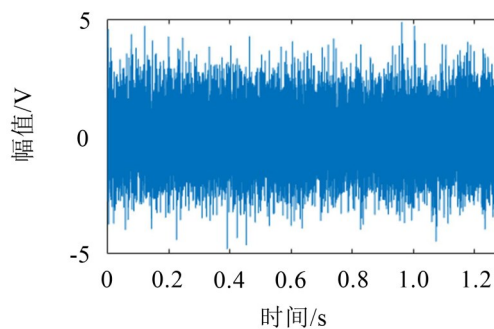


(b) 带通滤波后的包络谱

图5 快速谱峭度图及带通滤波后的信号包络谱



(a) 试验台



(b) 信号时域波形

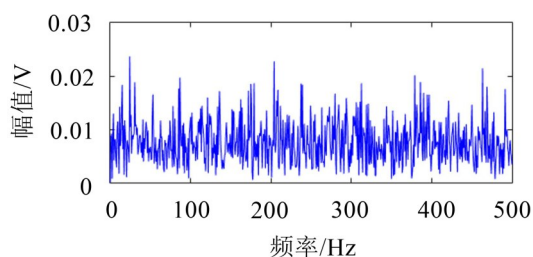
图6 试验台及其信号时域波形

利用自适应最小均方算法(LMS)进行滤波降噪,设置滤波器阶数为50,步长因子 μ 为 3.082×10^{-5} ,进行自适应滤波,得到降噪前后的信号包络谱如图7所示。

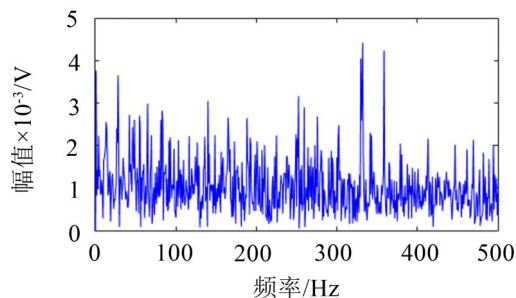
由图7可知,LMS降噪有效抑制了部分噪声的影响,但提取出的故障特征不明显。接下来对滤波后的 $x(t)$ 进行快速谱峭度值计算,得到快速峭度图(Fast-Kurtogram),选定最佳频带为(2 800 Hz,3 200 Hz),并进行带通滤波,得到快速峭度图及带通滤波后的信号包络谱如图8所示。由图8可知,内圈通过频率 f_{ip} (165.6 Hz),其2倍频 $2f_{ip}$ (331.3 Hz)与3倍频 $3f_{ip}$ (495.3 Hz)已明显存在峰值,因此可以判定轴承内圈存在早期故障。

4 结语

本文提出了一种LMS和Fast-Kurtogram相结合的共振解调方法,并将其应用于滚动轴承早期故障的诊断。仿真分析和实验验证表明,该方法既能抑制噪声,还能对微弱的故障特征信号进行放大并提取,非常适用于滚动轴承早期故障的诊断。实际应用中滚动轴承的早期故障不只内圈故障一种,本文通过内圈故障的仿真和实验提取分析为例,说明了该方法的有效性。

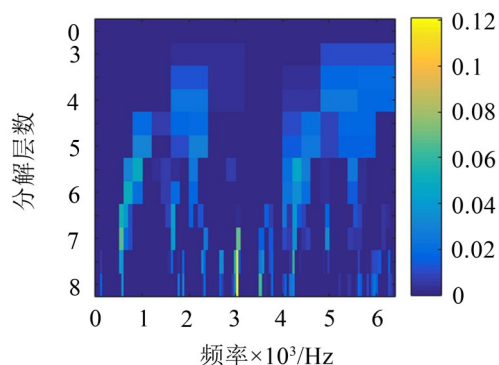


(a) LMS 降噪前信号包络谱

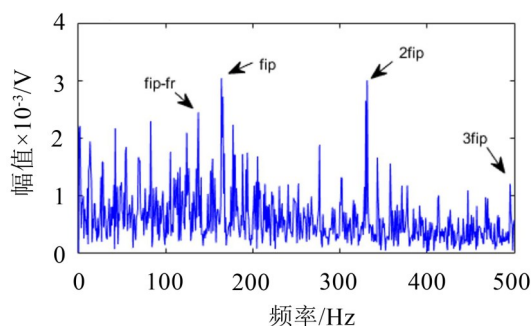


(b) LMS 降噪后信号包络谱

图7 LMS 降噪前后的信号包络谱



(a) 快速谱峭度图



(b) 带通滤波后的包络谱

图8 快速谱峭度图及带通滤波后的信号包络谱

参考文献:

- [1] 荆双喜,李新华,朱昆鸣,等.基于最大相关峭度解卷积的滚动轴承早期故障诊断[J].**河南理工大学学报**,2018,36(1):81-85.
- [2] 姜战伟,郑近德,潘海洋,等.基于改进多尺度熵与VPMCD的滚动轴承故障诊断[J].**噪声与振动控制**,2017,37(3):156-161.
- [3] 刘建春,胡俊锋,熊国良,等.基于谱峭度和Teager能量算子的轴承故障特征增强[J].**噪声与振动控制**,2018,38(1):182-187.
- [4] 韩清凯,于晓光.基于振动分析的现代机械故障诊断原理及应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [5] 王梦奇,马增强,王建东.基于局部均值分解和共振解调的滚动轴承故障诊断[J].**济南大学学报**,2018,32(1):13-19.
- [6] 朱汉明.基于EMD和共振解调的滚动轴承故障诊断方法研究[D].上海:上海师范大学,2011.
- [7] 潘阳,陈安华,蒋玲莉,等.基于自适应共振解调技术的滚动轴承故障诊断[J].**机械科学与技术**,2015,34(2):238-241.
- [8] 李宏坤,杨蕊,任远杰,等.利用粒子滤波与谱峭度的滚动轴承故障诊断[J].**机械工程学报**,2017,56(3):63-72.
- [9] DWYER R F. Detection of non-gaussian signals by frequency domain kurtosis estimation[C]. International Conference On Acoustics, Speech, and ignal Processing, Boston,1983: 607-610.
- [10] 王宏超,陈进,董广明,等.基于快速kurtogram算法的共振解调方法在滚动轴承故障特征提取中的应用[J].**振动与冲击**,2013,32(1):35-37.
- [11] 马新娜,杨绍普.典型谱峭图在共振解调方法中的应用[J].**振动、测试与诊断**,2015,35(6):1140-1144.
- [12] 唐贵基,刘尚坤.基于VMD和谱峭度的滚动轴承早期故障诊断方法[J].**中国测试**,2017,43(9):112-117.
- [13] 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.
- [14] 西蒙·赫金.自适应滤波器原理[M].北京:电子工业出版社,2016.
- [15] ANTONI J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterizing non-stationary signals[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2006, 20(1): 282-307.
- [16] 毕果.基于循环平稳的滚动轴承及齿轮微弱故障特征提取应用研究[D].上海:上海交通大学,2007.