

基于机匣测点信号的航空发动机滚动轴承 故障诊断灵敏性分析

陈 果, 郝腾飞, 程小勇, 赵 斌, 王海飞
(南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

摘 要: 研究了基于机匣测点信号进行航空发动机滚动轴承故障诊断的灵敏性问题. 首先利用两个带机匣的航空发动机转子试验器进行了冲击响应试验, 比较了滚动轴承处冲击激励引起的轴承座测点响应和机匣测点响应的差别; 然后利用这两个带机匣的转子试验器进行了滚动轴承故障模拟试验, 详细对比分析了轴承座测点信号和机匣测点信号的时域波形、频谱和小波包络谱. 结果表明: 当滚动轴承和机匣的连接刚度较小时, 故障滚动轴承的振动信号传递到机匣上时会产生很大的衰减, 然而利用传统的基于小波包变换的包络解调方法仍然可以很好地诊断出外圈故障和内圈故障, 对于滚动体故障的诊断效果略差. 研究结果对于实际中基于机匣测点信号进行航空发动机滚动轴承故障诊断提供了试验依据.

关 键 词: 航空发动机; 滚动轴承; 故障诊断; 机匣测点信号; 灵敏性分析

中图分类号: V263.6

文献标志码: A

Sensitivity analysis of fault diagnosis of aero-engine rolling bearing based on vibration signal measured on casing

CHEN Guo, HAO Teng-fei, CHENG Xiao-yong,
ZHAO Bin, WANG Hai-fei

(College of Civil Aviation,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The sensitivity of fault diagnosis of aero-engine rolling bearing based on the vibration signal measured on the casing was studied. Firstly, the impulse response test was performed by two aero-engine rotor test rigs with casing. The response from both bearing housing and casing, which was caused by the impulse excitation from the location of rolling bearing, was measured and their differences were compared further. Secondly, the fault simulation test of rolling bearing was performed by these two aero-engine rotor test rigs. The time domain waveform, frequency spectrum and wavelet envelope spectrum of the signal measured on the casing were compared in detail with those of the signal measured on the bearing housing. The results show that when the coupling stiffness between rolling bearing and casing is small, there is a large attenuation of the vibration signal of faulty rolling bearing transmitted to the casing. However, by means of traditional envelope demodulation method based on wavelet transformation, the faults of outer and inner races still can be diagnosed well, but the diagnosis effect for rolling element is not as good as that for outer and inner races. The research results provide a test basis for actual fault diagnosis of aero-engine rolling bearing based on the vibration signal measured on the casing.

收稿日期: 2013-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(61179057)

作者简介: 陈果(1972—), 男, 四川武胜人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机整机振动、状态监测与故障诊断研究.

Key words: aero-engine; rolling bearing; fault diagnosis;
vibration signal measured on casing; sensitivity analysis

航空发动机滚动轴承作为航空发动机转子系统的重要支承部件,其运行状态会直接影响整台发动机的安全性、可靠性及寿命.由于滚动轴承工作在高转速、高温和变工况的恶劣环境中,目前已成为了故障多发部件.由于滚动轴承的寿命离散性很大,一般对其进行视情维修^[1],而研究滚动轴承故障诊断的方法是实现视情维修的重要基础.

针对滚动轴承故障诊断,目前的研究通常是基于轴承座测点信号^[2-4],而在基于振动分析的航空发动机故障诊断中,振动信号通常从机匣上测得.由于航空发动机的结构非常复杂,滚动轴承故障产生的激振力传递到机匣上要经过较长的路径,导致机匣测点信号与轴承座测点信号往往差别较大,因此,对于滚动轴承故障诊断,一个自然的问题是,基于机匣测点信号,采用传统的滚动轴承故障诊断方法是否可以诊断出滚动轴承的故障?如果可以,诊断的灵敏性如何?显然,搞清楚这两个问题对于滚动轴承故障诊断具有重要意义.然而,目前相关的试验研究并不多见.

有鉴于此,本文利用两个带机匣的航空发动机转子试验器(下文称航空发动机压气机转子试验器和航空发动机转子试验器)进行了基于机匣测点信号的滚动轴承故障诊断的灵敏性问题研究.首先利用这两个带机匣的转子试验器进行了冲击响应试验,研究了滚动轴承处冲击激励引起的轴承座测点响应和机匣测点响应的差别;然后利用这两个转子试验器进行了滚动轴承故障模拟试验,通过对轴承座测点信号和机匣测点信号的时域波形、频谱和小波包络谱进行详细对比分析,研究了基于机匣测点信号进行滚动轴承故障诊断的灵敏性问题.

1 两个带机匣的转子试验器介绍

1.1 航空发动机压气机转子试验器

航空发动机压气机转子试验器由哈尔滨东安发动机(集团)有限公司航空产品设计所研制,如图 1 所示.在该试验器中,电动机、增速器、转矩转速传感器和压气机依次连接,通过转接轴、膜片联轴器传递扭矩.试验器通过增速器增速后,经转矩转速传感器带动压气机旋转.压气机转子由两级轮盘、工作叶片、滚子轴承、滚动轴承以及轴承封

油螺套等组成.压气机静子由前机匣、中机匣、后机匣、整流环和工作外环等组成.其中,前机匣端的压气机转子采用滚子轴承进行支承,后机匣端的压气机转子采用滚动轴承进行支承.本文采用加工有故障的滚动轴承替换后机匣端的滚动轴承进行故障模拟试验.

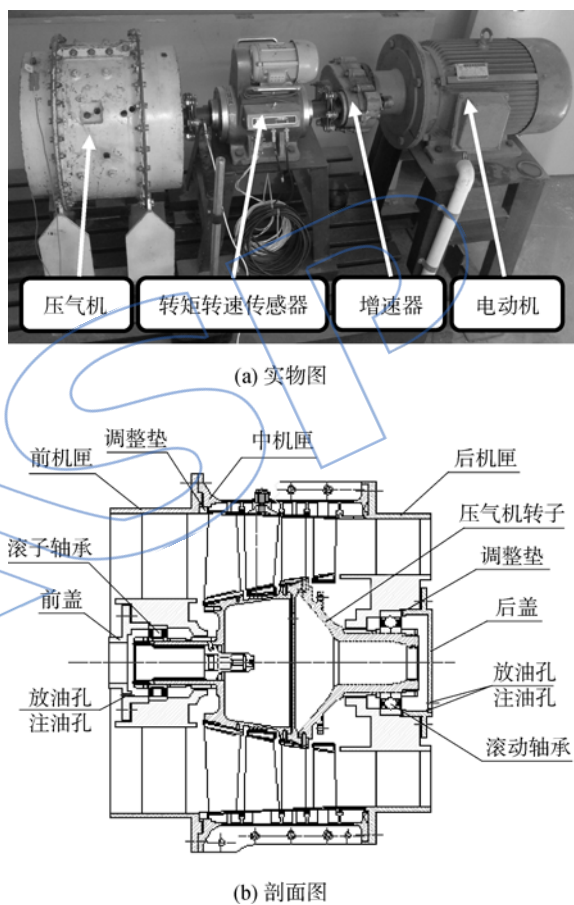


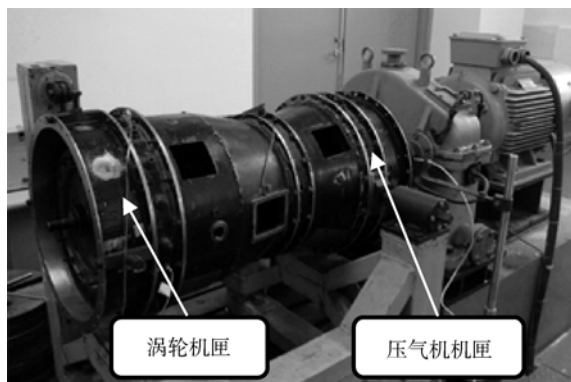
图 1 航空发动机压气机转子试验器

Fig. 1 Aero-engine compressor rotor test rig

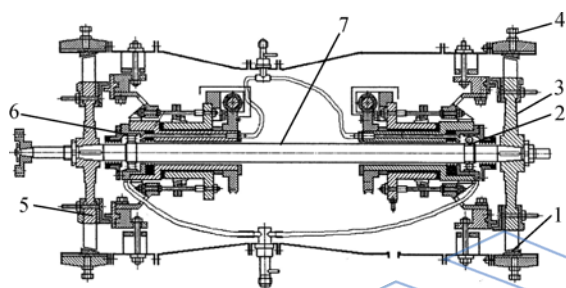
1.2 航空发动机转子试验器

航空发动机转子试验器由沈阳发动机设计研究所设计研制,如图 2 所示.该试验器在结构设计上,首先考虑在外形上与航空发动机核心机的机匣一致,尺寸缩小为原来的 1/3,内部结构作了必要简化,将核心机的支承结构简化为 0-2-0 支承结构形式,并设计了可调刚度支承结构以调整系统的动特性,多级压气机简化为单级的盘片结构,在结构上形成了转子-支承-叶盘-机匣系统.其中,涡轮端转子采用滚动轴承进行支承,压气机端转

子采用滚子轴承进行支承. 本文采用加工有故障的滚动轴承替换涡轮端的滚动轴承进行故障模拟试验.



(a) 实物图



1 碰摩环; 2 球轴承; 3 涡轮盘; 4 碰摩环点变形顶螺栓;
5 压气机轮盘; 6 滚子轴承; 7 轴

(b) 剖面图

图2 航空发动机转子试验器

Fig. 2 Aero-engine rotor test rig

2 冲击响应试验及分析

为研究滚动轴承故障冲击所引起的轴承座测点响应和机匣测点响应的差别, 分析机匣测点响应对于滚动轴承故障冲击的灵敏性, 利用第1节介绍的两个带机匣的转子试验器进行了冲击响应试验. 试验的具体方法为: 使用力锤敲击轴承座(航空发动机压气机转子试验器)或与滚动轴承内圈固定的转轴(航空发动机转子试验器), 以模拟滚动轴承故障的冲击激励, 然后分别在轴承座处和机匣处布置振动加速度传感器, 测取冲击响应. 两个试验器的具体试验方案分别如图3和图4所示.

图5为航空发动机压气机转子试验器轴承座处和机匣处的冲击响应(t 为时间, A 为振动加速度幅值, g 为重力加速度). 从图中可以看出, 轴承座处的冲击响应与机匣处的冲击响应差别不大, 机匣处的冲击响应甚至比轴承座处的冲击响应还要大一些, 其主要原因是, 在航空发动机压气机转

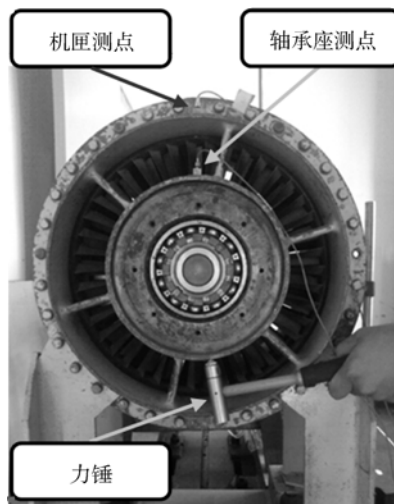


图3 航空发动机压气机转子试验器的冲击响应试验

Fig. 3 Impulse response test of aero-engine compressor rotor test rig

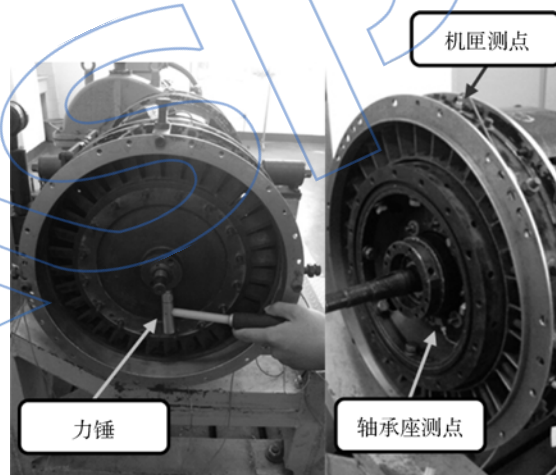


图4 航空发动机转子试验器的冲击响应试验

Fig. 4 Impulse response test of aero-engine rotor test rig

子试验器中, 滚动轴承与轴承座为过盈配合, 其连接刚度很大, 轴承座与机匣为厚支板连接, 其连接刚度也很大, 因此滚动轴承处的冲击振动能够有效地传递到机匣上. 机匣处冲击响应大于轴承座处冲击响应的原因可能是滚动轴承处的冲击引起了机匣的共振.

图6为航空发动机转子试验器轴承座处和机匣处的冲击响应. 从图中可以看出, 轴承座处的冲击响应与机匣处的冲击响应差别较大, 与轴承座处的冲击响应相比, 机匣处的冲击响应衰减很大, 其主要原因是, 在航空发动机转子试验器中, 滚动轴承与轴承座为过盈配合, 其连接刚度很大, 但是轴承座与机匣的连接是通过螺栓实现, 其连接刚

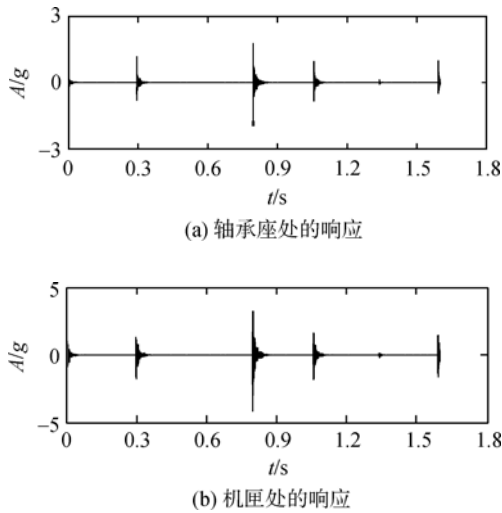


图 5 航空发动机压气机转子试验器的冲击响应
Fig. 5 Impulse response of aero-engine compressor rotor test rig

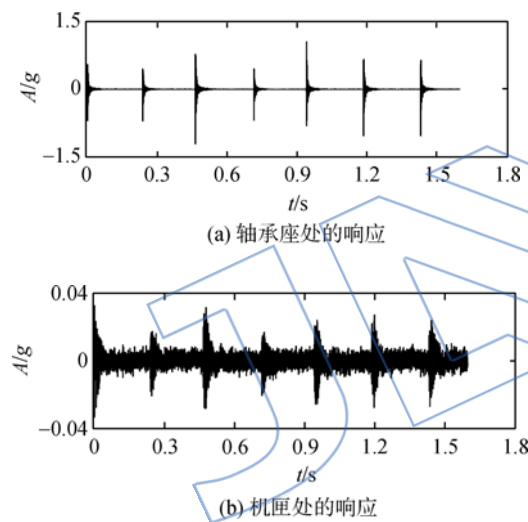


图 6 航空发动机转子试验器的冲击响应
Fig. 6 Impulse response of aero-engine rotor test rig

度较小,因此滚动轴承处的冲击振动传递到机匣处时产生了很大的衰减。

3 滚动轴承故障模拟试验

为研究基于机匣测点信号进行滚动轴承故障诊断的灵敏性,本文采用第 1 节介绍的两个带机匣的转子试验器进行了滚动轴承故障模拟试验。试验中航空发动机压气机转子试验器和航空发动机转子试验器的试验滚动轴承型号分别为 6214 和 6206 深沟滚动轴承,两种型号滚动轴承的几何尺寸和各元件的故障特征频率分别如表 1 和表 2 所示。滚动轴承故障采用电火花线切割技术在滚动轴承上加工凹槽进行模拟,加工故障后的滚动

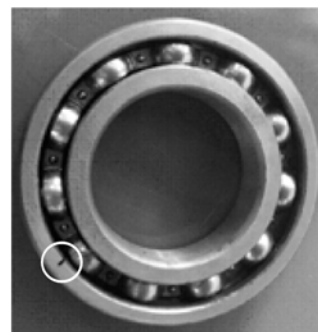
轴承分别如图 7 和图 8 所示。对于航空发动机压气机转子试验器,将含故障的试验滚动轴承替换后机匣处的滚动轴承进行试验;对于航空发动机转子试验器,将含故障的试验滚动轴承替换涡轮机匣处的滚动轴承进行试验。试验中两个转子试验器的传感器布置与上一节中冲击响应试验相同,分别如图 3 和图 4 所示,即在轴承座处和机匣处分别布置一个加速度传感器以测取轴承座处的振动信号和机匣处的振动信号。

表 1 滚动轴承的几何尺寸(单位:mm)
Table 1 Geometric dimensions of rolling bearing (unit:mm)

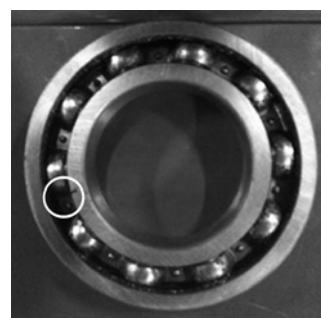
型号	内径	外径	厚度	滚动体直径	节径
6214	70	125	24	17.5	97.5
6206	30	62	16	9.5	46

表 2 滚动轴承各元件的故障特征频率(单位:Hz)
Table 2 Fault characteristic frequency of each component of rolling bearing (unit:Hz)

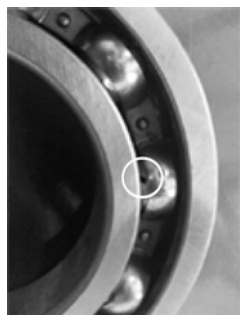
型号	外圈	内圈	滚动体
6214	4.5600	5.8974	2.6960
6206	3.5707	5.4293	2.3178



(a) 外圈故障



(b) 内圈故障



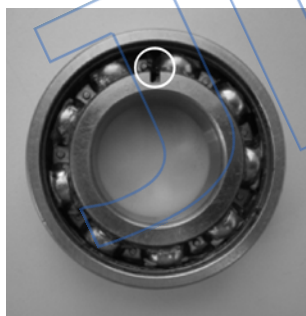
(c) 滚动体故障

图7 航空发动机压气机转子试验器中的
6214 滚动轴承故障

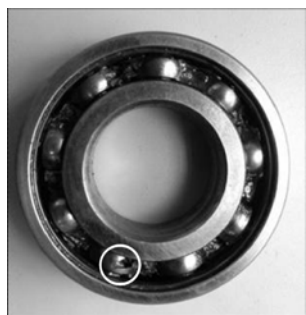
Fig.7 Faults of 6214 rolling bearing in aero-engine
compressor rotor test rig



(a) 外圈故障



(b) 内圈故障



(c) 滚动体故障

图8 航空发动机转子试验器中的 6206 滚动轴承故障
Fig.8 Faults of 6206 rolling bearing in aero-engine
rotor test rig

4 轴承座测点信号和机匣测点信号的对比分析

目前,关于滚动轴承故障诊断有很多方法,其中,包络解调方法在滚动轴承故障诊断中的有效性已经得到了普遍认可,其基本原理是通过传感器获取滚动轴承故障冲击引起的共振响应,然后通过窄带滤波器得到合适的共振频带,再通过包络解调分析将滚动轴承故障信息从复杂的调制信号中分离出来.该方法的主要缺点是窄带滤波参数(如中心频率、带宽等)的选择对分析结果的影响很大,要求选择者具有丰富的专业知识和大量的经验积累.为克服该缺点,目前,许多基于现代信号处理方法的包络解调方法被提出,首先利用相应的现代信号处理方法对信号频带进行划分,然后选择包含滚动轴承故障信息的频带进行包络解调.代表性的方法有基于小波包变换的包络解调方法^[5-10]、基于经验模式分解的包络解调方法^[11-13]、基于局部均值分解的包络解调方法^[14-16]等.

基于小波包变换的包络解调方法的原理是,利用小波包变换的带通滤波特性,通过选择合适的小波函数对信号进行分解以得到合适的共振频带,然后,通过对该共振频带信号进行包络解调得到包含故障特征信息的低频包络信号,再进行傅里叶变换得到小波包络谱,通过在小波包络谱中观察不同元件故障特征频率的大小即可判断出滚动轴承是否发生故障.下面采用该方法对第3节试验中获取的轴承座测点信号和机匣测点信号进行对比分析.

4.1 航空发动机压气机转子试验器

4.1.1 外圈故障

采用加工有外圈故障的滚动轴承进行试验时振动信号的时域波形、频谱和小波包络谱分别如图9~图11所示.试验中压气机转速为1826 r/min,根据表2可以计算得到外圈的故障特征频率 $f_o=138.8\text{ Hz}$,图11为节点(3,7)重构信号的小波包络谱,节点(3,7)是指对信号进行小波包分解后得到的第3层的第7个节点.

从图9可以看出,机匣测点信号的振动加速度幅值大约是轴承座测点信号振动加速度幅值的2倍,表明滚动轴承外圈故障的冲击振动有效地传递到了机匣处,该结果与冲击响应试验的结果一致.从图10可以看出,与轴承座测点信号的频

谱相比,机匣测点信号的频谱中高频成分的幅值有一定程度的增加,原因可能是滚动轴承外圈故障的冲击引起了机匣的共振.从图 11 可以看出,对轴承座测点信号和机匣测点信号分别进行小波包络谱分析,均可明显地提取出外圈的故障特征频率,表明基于机匣测点信号同样可以诊断出滚动轴承的外圈故障.

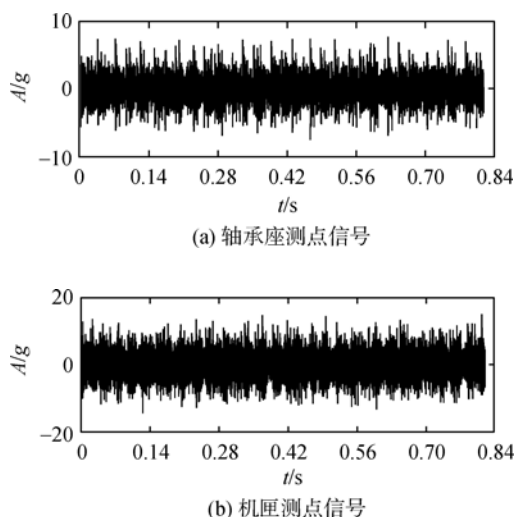


图 9 航空发动机压气机转子试验器外圈故障信号的时域波形

Fig. 9 Time domain waveform of outer race fault signal of aero-engine compressor rotor test rig

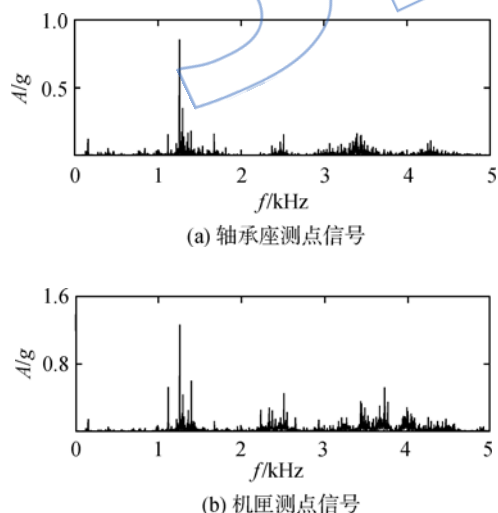


图 10 航空发动机压气机转子试验器外圈故障信号的频谱

Fig. 10 Frequency spectrum of outer race fault signal of aero-engine compressor rotor test rig

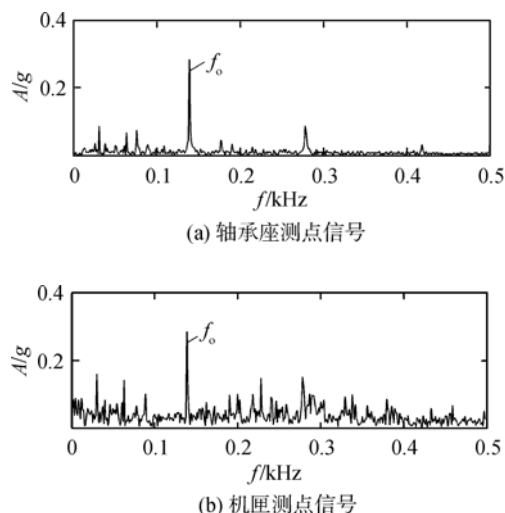


图 11 航空发动机压气机转子试验器外圈故障信号的小波包络谱

Fig. 11 Wavelet envelope spectrum of outer race fault signal of aero-engine compressor rotor test rig

4.1.2 内圈故障

采用加工有内圈故障的滚动轴承进行试验时振动信号的时域波形、频谱和小波包络谱分别如图 12~图 14 所示.试验中压气机转速为 1793 r/min,根据表 2 可以计算得到内圈的故障特征频率 $f_i=176.2$ Hz,图 14 为节点(3,7)重构信号的小波包络谱.

从图 12 可以看出,机匣测点信号的振动加速度幅值大约是轴承座测点信号振动加速度幅值的

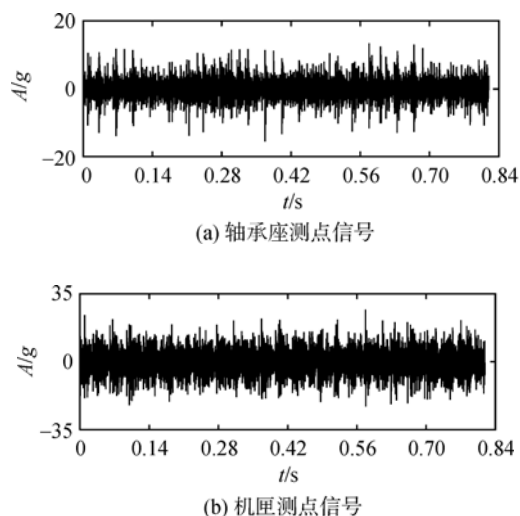


图 12 航空发动机压气机转子试验器内圈故障信号的时域波形

Fig. 12 Time domain waveform of inner race fault signal of aero-engine compressor rotor test rig

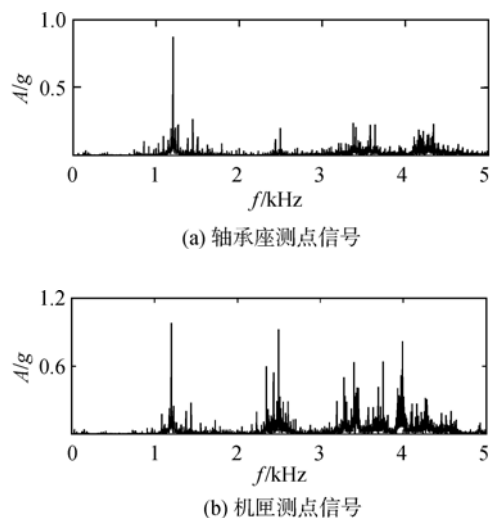


图13 航空发动机压气机转子试验器内圈故障信号的频谱

Fig. 13 Frequency spectrum of inner race fault signal of aero-engine compressor rotor test rig

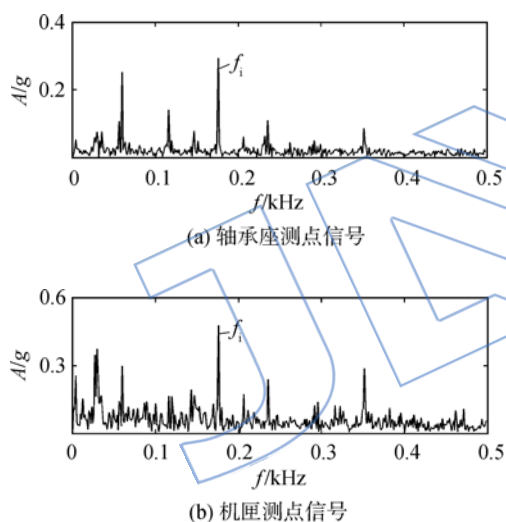


图14 航空发动机压气机转子试验器内圈故障信号的小波包络谱

Fig. 14 Wavelet envelope spectrum of inner race fault signal of aero-engine compressor rotor test rig

2 倍,表明滚动轴承内圈故障的冲击振动有效地传递到了机匣处,该结果与冲击响应试验的结果一致.从图 13 可以看出,与轴承座测点信号的频谱相比,机匣测点信号的频谱中高频成分的幅值明显增加,原因可能是滚动轴承内圈故障的冲击引起了机匣的共振.从图 14 可以看出,对轴承座测点信号和机匣测点信号分别进行小波包络谱分析,均可明显地提取出内圈的故障特征频率,表明基于机匣测点信号同样可以诊断出滚动轴承的内

圈故障.

4.1.3 滚动体故障

采用加工有滚动体故障的滚动轴承进行试验时振动信号的时域波形、频谱和小波包络谱分别如图 15~图 17 所示.试验中压气机转速为 1828 r/min,根据表 2 可以计算得到滚动体的故障特征频率 $f_b=82.1$ Hz.需要指出的是, f_b 是根据滚动体在自转一周的过程中故障点只撞击外圈或内圈计算得到的,如果滚动体在自转一周的过程中故障点同时撞击外圈和内圈,则其故障特征频率将为 $2f_b$.图 17 为点节(3,7)重构信号的小波包络谱.

从图 15 可以看出,机匣测点信号的振动加速度幅值大约是轴承座测点信号振动加速度幅值的 2 倍多,表明滚动轴承滚动体故障的冲击振动有效地传递到了机匣处,该结果与冲击响应试验的结果一致.从图 16 可以看出,与轴承座测点信号的频谱相比,机匣测点信号的频谱中高频成分的幅值明显增加,原因可能是滚动轴承滚动体故障

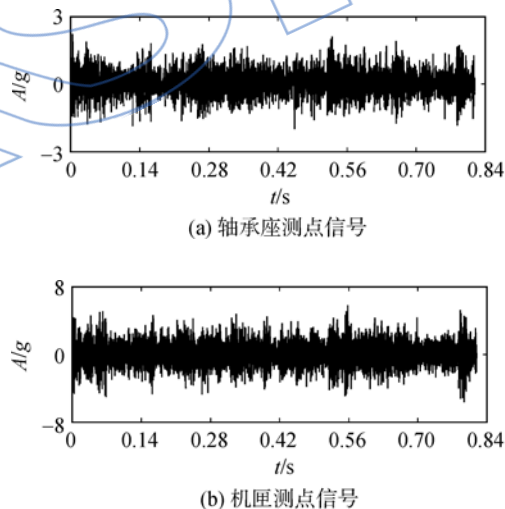
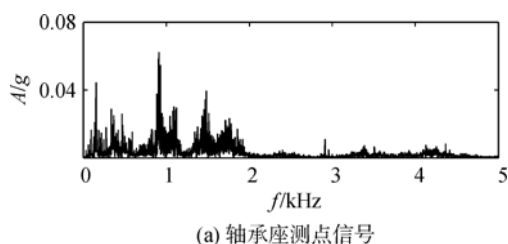


图15 航空发动机压气机转子试验器滚动体故障信号的时域波形

Fig. 15 Time domain waveform of rolling element fault signal of aero-engine compressor rotor test rig



(a) 轴承座测点信号

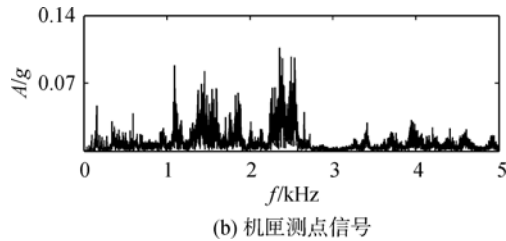


图 16 航空发动机压气机转子试验器滚动体故障信号的频谱

Fig. 16 Frequency spectrum of rolling element fault signal of aero-engine compressor rotor test rig

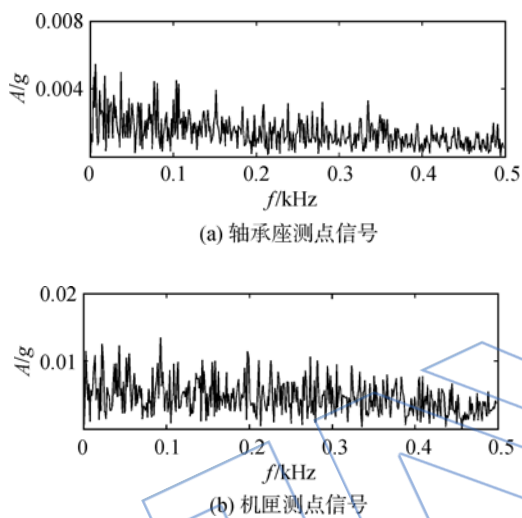


图 17 航空发动机压气机转子试验器滚动体故障信号的小波包络谱

Fig. 17 Wavelet envelope spectrum of rolling element fault signal of aero-engine compressor rotor test rig

的冲击引起了机匣的共振. 从图 17 可以看出, 对轴承座测点信号和机匣测点信号分别进行小波包络谱分析, 均不能明显地提取出滚动体的故障特征频率, 原因可能是滚动体故障的冲击振动比较微弱, 其故障特征频率很容易被其他频率成分所掩盖, 因此根据轴承座测点信号和机匣测点信号的小波包络谱均难以有效地诊断出滚动体故障.

4.2 航空发动机转子试验器

4.2.1 外圈故障

采用加工有外圈故障的滚动轴承进行试验时振动信号的时域波形、频谱和小波包络谱分别如图 18~图 20 所示. 试验中转速为 1820 r/min, 根据表 2 可以计算得到外圈的故障特征频率 $f_o = 108.3$ Hz. 图 20 为节点 (3, 1) 重构信号的小波包

络谱.

从图 18 可以看出, 机匣测点信号的振动加速度幅值不到轴承座测点信号振动加速度幅值的 1/5, 表明滚动轴承外圈故障的冲击振动传递到机匣上时已经被极大地衰减了, 该结果与冲击响应试验的结果一致. 从图 19 可以看出, 与轴承座测点信号的频谱相比, 机匣测点信号的频谱中高频成分的幅值明显减小. 从图 20 可以看出, 对轴承座测点信号和机匣测点信号分别进行小波包络谱分析, 均可明显地提取出外圈的故障特征频率, 表明基于机匣测点信号同样可以诊断出滚动轴承的外圈故障.

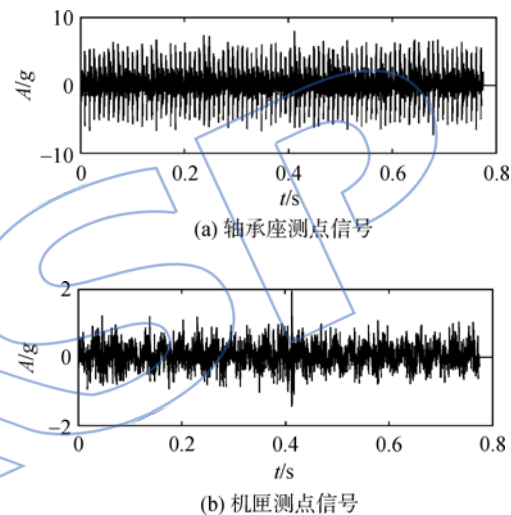


图 18 航空发动机转子试验器外圈故障信号的时域波形

Fig. 18 Time domain waveform of outer race fault signal of aero-engine rotor test rig

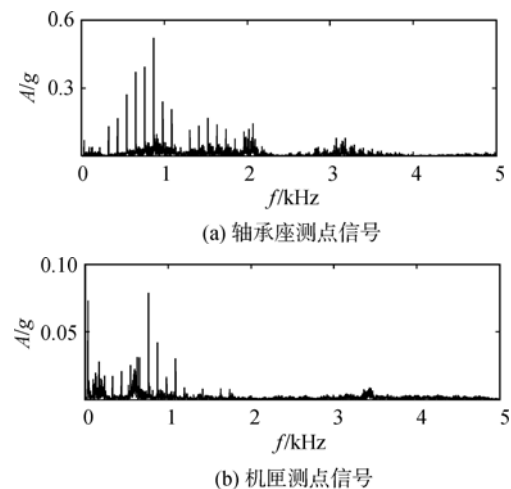


图 19 航空发动机转子试验器外圈故障信号的频谱

Fig. 19 Frequency spectrum of outer race fault signal of aero-engine rotor test rig

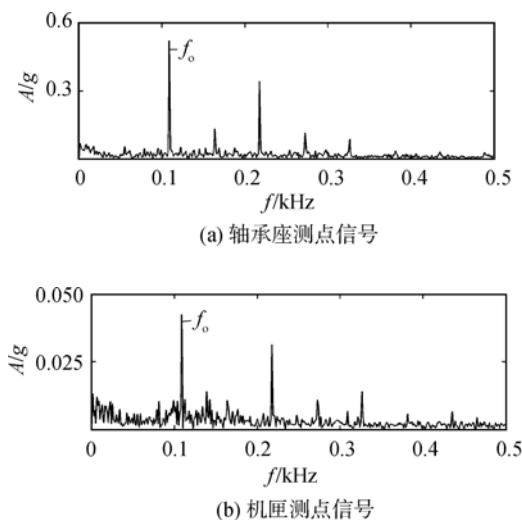


图20 航空发动机转子试验器外圈故障信号的小波包络谱

Fig. 20 Wavelet envelope spectrum of outer race fault signal of aero-engine rotor test rig

4.2.2 内圈故障

采用加工有内圈故障的滚动轴承进行试验时振动信号的时域波形、频谱和小波包络谱分别如图21~图23所示. 试验中转子转速为1827 r/min, 根据表2可以计算得到内圈的故障特征频率 $f_i = 165.3$ Hz. 图23为节点(3,7)重构信号的小波包络谱.

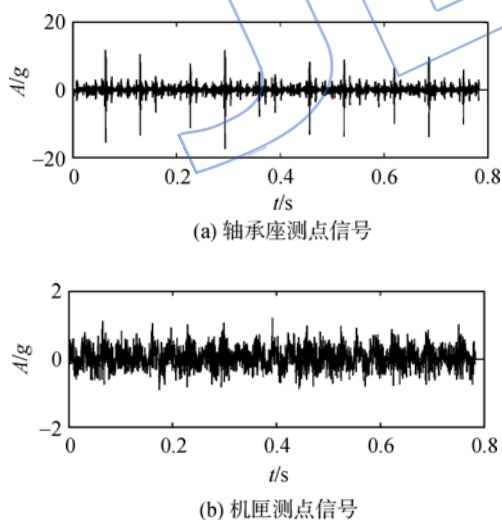


图21 航空发动机转子试验器内圈故障信号的时域波形

Fig. 21 Time domain waveform of inner race fault signal of aero-engine rotor test rig

从图21可以看出, 机匣测点信号的振动加速度幅值不到轴承座测点信号振动加速度幅值的1/10, 表明滚动轴承内圈故障的冲击振动传递到

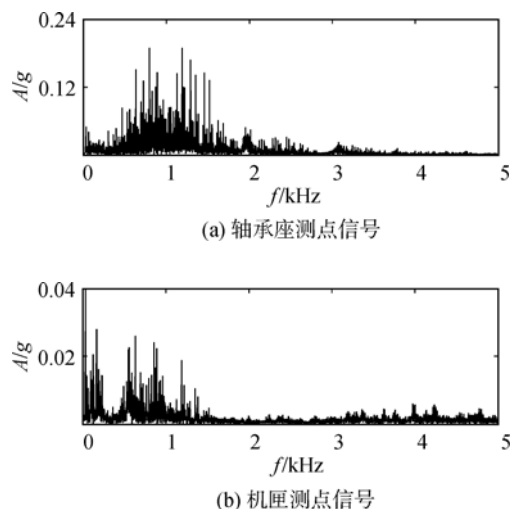


图22 航空发动机转子试验器内圈故障信号的频谱

Fig. 22 Frequency spectrum of inner race fault signal of aero-engine rotor test rig

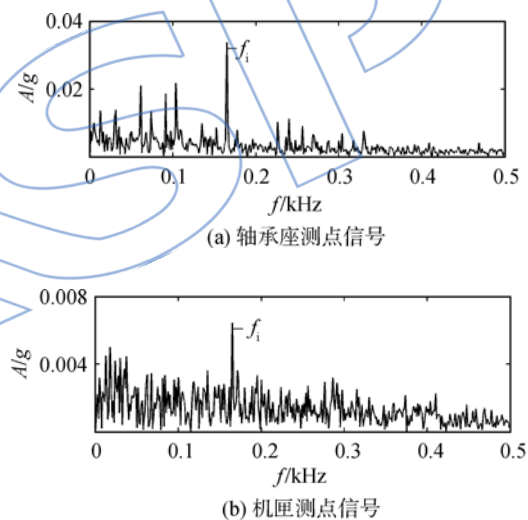


图23 航空发动机转子试验器内圈故障信号的小波包络谱

Fig. 23 Wavelet envelope spectrum of inner race fault signal of aero-engine rotor test rig

机匣上时已经被极大地衰减了, 该结果与冲击响应试验的结果一致. 从图23可以看出, 对轴承座测点信号和机匣测点信号分别进行小波包络谱分析, 均可明显地提取出内圈的故障特征频率, 表明基于机匣测点信号同样可以诊断出滚动轴承的内圈故障.

4.2.3 滚动体故障

采用加工有滚动体故障的滚动轴承进行试验时振动信号的时域波形、频谱和小波包络谱分别如图24~图26所示. 试验中转子转速为1768 r/min, 根据表2可以计算得到滚动体的故障特征

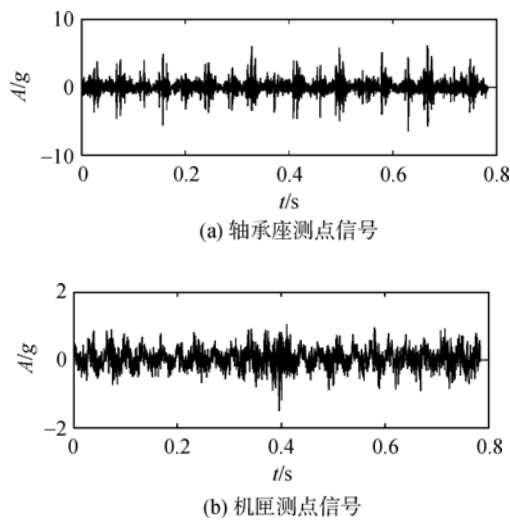


图 24 航空发动机转子试验器滚动体故障信号的时域波形

Fig. 24 Time domain waveform of rolling element fault signal of aero-engine rotor test rig

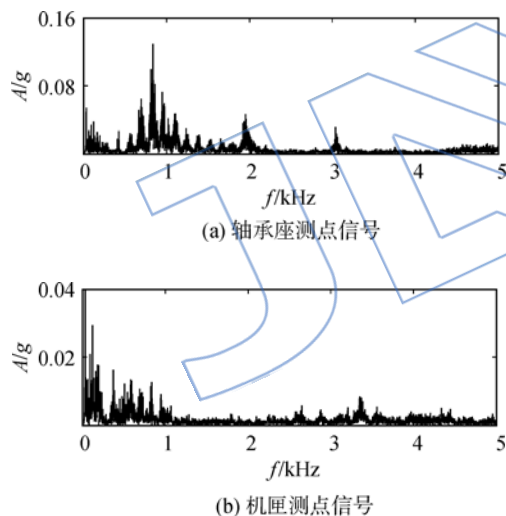
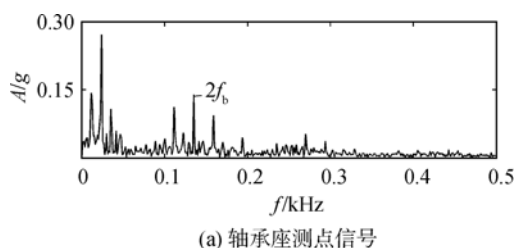
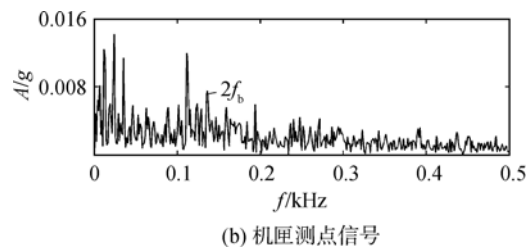


图 25 航空发动机转子试验器滚动体故障信号的频谱
Fig. 25 Frequency spectrum of rolling element fault signal of aero-engine rotor test rig



(a) 轴承座测点信号



(b) 机匣测点信号

图 26 航空发动机转子试验器滚动体故障信号的小波包络谱

Fig. 26 Wavelet envelope spectrum of rolling element fault signal of aero-engine rotor test rig

频率 $f_b = 68.3 \text{ Hz}$. 如果滚动体在自转一周的过程中故障点同时撞击外圈和内圈, 则其故障特征频率将为 $2f_b$. 图 26 为节点 (3, 1) 重构信号的小波包络谱.

从图 24 可以看出, 机匣测点信号的振动加速度幅值约为轴承座测点信号振动加速度幅值的 $1/5$, 表明滚动轴承滚动体故障的冲击振动传递到机匣上时已经被极大地衰减了, 该结果与冲击响应试验的结果一致. 从图 25 可以看出, 在轴承座测点信号的频谱中, 在 2 kHz 和 3 kHz 左右有两个明显的共振峰, 而在机匣测点信号的频谱中, 这两个共振峰却不再明显. 从图 26 可以看出, 对轴承座测点信号和机匣测点信号分别进行小波包络谱分析, 均可提取出滚动体的故障特征频率 $2f_b$, 表明基于机匣测点信号同样可以诊断出滚动轴承的滚动体故障.

5 结 论

目前, 在基于振动分析的滚动轴承故障诊断研究中, 使用的振动信号通常从轴承座处测得, 而在基于振动分析的航空发动机故障诊断中, 振动信号一般从机匣处测得, 为此, 本文研究了基于机匣测点信号进行航空发动机滚动轴承故障诊断的灵敏性问题. 首先利用两个带机匣的航空发动机转子试验器进行了冲击响应试验, 比较了滚动轴承处冲击激励引起的轴承座测点响应和机匣测点响应的差别; 然后利用这两个带机匣的转子试验器进行了滚动轴承故障模拟试验, 详细对比分析了轴承座测点信号和机匣测点信号的时域波形、频谱和小波包络谱. 结果表明, 当滚动轴承和机匣的连接刚度较小时, 故障滚动轴承的振动信号传递到机匣上时会产生很大的衰减, 然而利用传统的基于小波包变换的包络解调方法仍然可以很好

地诊断出外圈故障和内圈故障,对于滚动体故障的诊断效果略差.本文研究结果对于实际中基于机匣测点信号进行航空发动机滚动轴承故障诊断提供了试验依据.

参考文献:

- [1] 梅宏斌.滚动轴承振动监测与诊断[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [2] 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)
- [3] 张进,冯志鹏,褚福磊.滚动轴承故障特征的时间-小波能量谱提取方法[J].机械工程学报,2011,47(17):44-49.
ZHANG Jin, FENG Zhipeng, CHU Fulei. Extraction of rolling bearing fault feature based on time-wavelet energy spectrum[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(17): 44-49. (in Chinese)
- [4] 徐亚军,于德介,孙云嵩,等.滚动轴承故障诊断的阶比多尺度形态学解调方法[J].振动工程学报,2013,26(2):252-259.
XU Yajun, YU Dejie, SUN Yunsong, et al. Roller bearing fault diagnosis using order multi-scale morphology demodulation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(2): 252-259. (in Chinese)
- [5] 陈果.滚动轴承早期故障的特征提取与智能诊断[J].航空学报,2009,30(2):362-367.
CHEN Guo. Feature extraction and intelligent diagnosis for ball bearing early faults[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(2): 362-367. (in Chinese)
- [6] 唐贵基,蔡伟.应用小波包和包络分析的滚动轴承故障诊断[J].振动、测试与诊断,2009,29(2):201-205.
TANG Guiji, CAI Wei. Rolling bearing fault diagnosis by using wavelet packet and envelope analysis[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2009, 29(2): 201-205. (in Chinese)
- [7] 段晨东,郭研.基于提升小波包变换的滚动轴承包络分析诊断方法[J].农业机械学报,2008,39(5):192-196.
DUAN Chendong, GUO Yan. An envelope analysis approach for ball bearing based on lifting wavelet packet transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 192-196. (in Chinese)
- [8] 袁静,何正嘉,菅艳阳.基于提升多小波的机电设备复合故障分离和提取[J].机械工程学报,2010,46(1):79-86.
YUAN Jing, HE Zhengjia, ZI Yanyang. Separation and extraction of electromechanical equipment compound faults using lifting multiwavelets[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(1): 79-86. (in Chinese)
- [9] GAO Lixin, YANG Zijing, CAI Ligang, et al. Roller bearing fault diagnosis based on nonlinear redundant lifting wavelet packet analysis[J]. Sensors, 2011, 11(1): 260-277.
- [10] CHEN Jinglong, ZI Yanyang, HE Zhengjia, et al. Compound faults detection of rotating machinery using improved adaptive redundant lifting multiwavelet[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(1): 36-54.
- [11] 高强,杜小山,范虹,等.滚动轴承故障的EMD诊断方法研究[J].振动工程学报,2007,20(1):15-18.
GAO Qiang, DU Xiaoshan, FAN Hong, et al. An empirical mode decomposition based method for rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(1): 15-18. (in Chinese)
- [12] 康海英,栾军英,郑海起,等.基于阶次跟踪和经验模态分解的滚动轴承包络解调分析[J].机械工程学报,2007,43(8):119-122.
KANG Haiying, LUAN Junying, ZHENG Haiqi, et al. Envelope demodulation analysis of bearing based on order tracking and empirical mode decomposition[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 119-122. (in Chinese)
- [13] CHENG Junsheng, YU Dejie, YANG Yu. The application of energy operator demodulation approach based on EMD in machinery fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(2): 668-677.
- [14] 陈保家,何正嘉,陈雪峰,等.机车故障诊断的局域均值分解解调方法[J].西安交通大学学报,2010,44(5):40-44.
CHEN Baojia, HE Zhengjia, CHEN Xuefeng, et al. Locomotive fault diagnosis based on local mean decomposition demodulating approach[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(5): 40-44. (in Chinese)
- [15] CHENG Junsheng, YANG Yi, YANG Yu. A rotating machinery fault diagnosis method based on local mean decomposition[J]. Digital Signal Processing, 2012, 22(2): 356-366.
- [16] 杨宇,王欢欢,程军圣,等.基于LMD的包络谱特征值在滚动轴承故障诊断中的应用[J].航空动力学报,2012,27(5):1153-1158.
YANG Yu, WANG Huanhuan, CHENG Junsheng, et al. Application of envelope spectrum characteristics based on LMD to roller bearing fault diagnosis[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 1153-1158. (in Chinese)