

文章编号:1006-1355(2023)02-0139-08

一种滚动轴承早期故障预警技术及试验验证

曹桂松¹, 苗慧慧¹, 王雨薇², 刘西洋², 曹 玮¹, 陈 果³

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241;

2. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016;

3. 南京航空航天大学 通用航空与飞行学院, 江苏 溧阳 213300)

摘要:针对滚动轴承运行状态在线监测,提出一种新的滚动轴承早期故障预警技术。首先,通过二进离散小波分解提取共振频带;然后,通过自相关分析抑制频带信号中的非周期性成分并进一步提升信噪比;最后,基于小波包络频谱构造一个新的特征量,通过该特征量的变化趋势来反映轴承的健康状态。将新方法应用于滚动轴承在线监测,分别对三组滚动轴承的全寿命试验数据进行分析,结果表明,提出的在线监测技术相较于传统有效值监测更为敏感,能够更早地发现滚动轴承早期微弱故障,实现故障的早期预警及定位。

关键词:故障诊断;滚动轴承;状态监测;特征提取;小波变换;自相关分析

中图分类号:TP206⁺.3;V23

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2023.02.021

An Early Fault Warning Technique and Test Verification for Rolling Bearings

CAO Guisong¹, MIAO Huihui¹, WANG Yuwei²,
LIU Xiyang², CAO Wei¹, CHEN Guo³

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China;

3. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Liyang 213300, Jiangsu, China)

Abstract: An online diagnostic monitoring technique is proposed for the condition monitoring of rolling bearings. First of all, the resonant frequency band is extracted by the binary discrete wavelet decomposition. Then, the autocorrelation analysis is performed to suppress the aperiodic components in the frequency band signal and further improve the signal-to-noise ratio. Finally, the new characteristic values are constructed based on wavelet envelope spectrum, and the health status of the bearing is reflected by the variation trend of the characteristic values. The new technique is applied to the online diagnostic monitoring. The analyses of 3 groups of rolling bearing life test are carried out respectively. The results show that the proposed online monitoring technique is more sensitive compared to traditional monitoring methods, and can diagnose weak faults and realize fault location and early fault warning. It can be used for real-time online monitoring.

Key words: fault diagnosis; rolling bearings; condition monitoring; feature extraction; wavelet transform; autocorrelation analysis

滚动轴承的健康状况决定旋转机械能否正常运行。振动监测方法是最有效的诊断方法之一^[1-2],振动信号的时域和频域分析是主要手段。在时域上体

现在有效值(均方根值),峰度,波峰因素,峭度等,频域上通过一系列信号处理的方法将轴承特有的故障特征频率提取出来从而检测轴承是否出现故障^[3]。然而,在轴承故障较为严重时,时域特征才会有明显的变化。对于轴承微弱故障并不能及时发现。在复杂的情况下振动信息容易受到外界因素的干扰,强背景噪声往往会使得频域上的故障特征淹没其中。因此,能够及时诊断出轴承微弱故障,并且实现在线监测,对于轴承状态评估具有重要意义。

收稿日期:2021-12-06

基金项目:国家科技重大专项资助项目(J2019-IV-004-0071);

中国航发商用航空发动机有限责任公司资助项目

作者简介:曹桂松(1982-),男,江西省都昌人,学士,高级工程师,专业方向为化学分析、摩擦磨损监测。

E-mail: ghelycao@163.com

滚动轴承故障诊断最有效、最常用的方法是提取其故障特征频率,实际测得的滚动轴承振动信号中通常存在其他机械部件振动分量和噪声的干扰,因此应用各种信号处理方法来提取滚动轴承的故障特征频率一直是滚动轴承故障诊断的研究重点^[4]。Yang等^[5]通过分数傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)从滚动轴承原始信号中提取故障特征,并采用随机共振增强了微弱故障特征信息,实现了强噪声工况下的故障诊断;Behzad等^[6]提出了一种基于轴承特征频率幅值的连续小波变换尺度参数调整准则,能够自适应选择最佳尺度以使轴承特征频率的振幅的比值最大化,实现了复杂传递路径下微弱故障信号的高效诊断;针对包络分析在强噪声环境下对弱故障诊断的局限性,Wang等^[7]提出通过特征算子从分帧后的轴承振动信号中提取波动特征,通过对处理每个特征帧的阈值来确定故障间隔,并将其转换为故障脉冲以增强其识别效果。

综上所述,用于滚动轴承故障诊断的方法很多,但是针对滚动轴承早期告警技术研究并不多见,须构建合适的特征量,才能够尽早发现滚动轴承的早期剥落现象,而不是等到轴承出现大面积剥落后才告警。显然,如何从振动信号中提出被大量噪声淹没下的故障特征,是实现轴承故障早期告警的关键所在。本文提出一种新颖的滚动轴承早期告警技术,利用小波变换和自相关分析方法实现强噪声背景下的滚动轴承微弱故障特征的提取,并构造出用于早期故障告警的特征量。最后用多组滚动轴承疲劳失效寿命数据验证本文方法的正确有效性。

1 滚动轴承的在线监测方法

1.1 方法流程

对于含表面局部损伤的滚动轴承,损伤点受载时将产生突变的脉冲力并激发轴承高频的固有振动。这种“通过振动”发生的频率称为故障特征频率,损伤发生在滚动轴承内滚道、外滚道和滚动体上时,其具有不同的特征频率^[8]。本文在具体计算时频域特征量的过程中,采用db8小波基底对滚动轴承振动信号进行了5层分解,共获得了5个细节信号d1、d2、d3、d4、d5和1个近似信号a5。对这6个信号分别进行包络谱分析,通过自动计算可以得到内圈、外圈、滚动体故障所分别对应的3个无量纲特征量,最后求出6个信号中所计算的每个特征量的最大值,作为该特征量值。最终得到分别代表内圈故障、外圈故障、和滚动体故障的3个无量纲包络特征值。

具体算法流程如图1所示。首先,以db8小波作为基底进行5层小波分解,选择合适的近似信号组

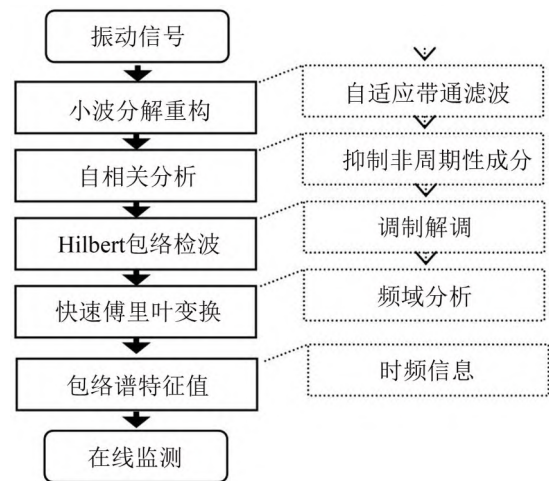


图1 在线方法流程图

合作为重构信号,实现共振频带的提取;在此基础上,对重构信号进行自相关分析以抑制非周期性噪声;最后,基于Hilbert变换对降噪后的信号进行包络检波,通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)得到包络谱。通过构造包络谱特征值来反映轴承的健康状况。

1.2 基于小波包络谱的特征值构造

基于小波变换和自相关分析构造小波包络谱特征值。滚动轴承不同故障的通过频率分量会反映在各个尺度下的包络谱中,因此可以根据各尺度下的小波包络谱自动计算各种类型故障的特征值。设 f_e 是包络频谱的分析带宽, f_d 为故障特征频率。该分析带宽通常是 $f_e > 3 \max(f_d)$,包络谱为 $W(f)$,设包络谱 $W(f)$ 谱线的数目为 N_e ,则包络谱的平均值 S_{ea} 为:

$$S_{ea} = \frac{1}{N_e} \sum_{i=0}^{N_e} W(f_i) \quad (1)$$

再令包络谱中的故障特征频率各阶倍频处的谱线平均值,设包络谱中故障频率的谱线数 n_e 。则:

$$S_{ed} = \frac{1}{n_e} \sum_{i=0}^{n_e} W(if_d) \quad (2)$$

构造一个无量纲特征量:

$$\Delta S_e = S_{ed}/S_{ea} \quad (3)$$

实际上,根据轴承转速和基本参数计算得到的特征频率与包络频谱中的特征频率往往并不一致,通常采用在理论计算的故障频率 f_d 附近小范围内寻找一个最大频谱值作为 $W(f_d)$ 。

2 试验验证

2.1 试验验证1:基于ZA-2115双列滚子轴承全寿命试验的验证

2.1.1 滚动轴承试验方法介绍

试验所用轴承故障数据来源于美国辛辛那提大

学智能维护中心(Intelligent Maintenance System, IMS)。图2为滚动轴承疲劳试验台装置及故障轴承实物图。试验所用轴承型号为Rexnord ZA-2115。

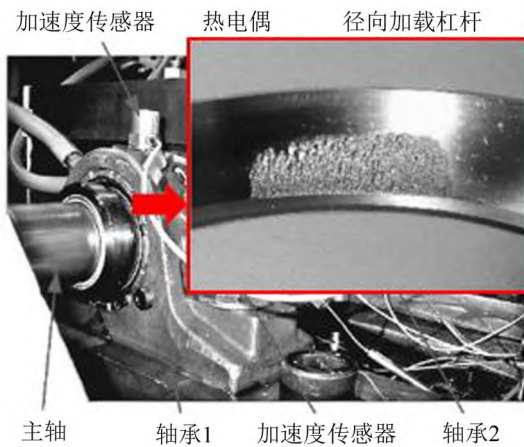


图2 滚动轴承疲劳试验台及轴承外圈故障实物图

轴承型号参数如表1所示。试验时一共四个轴承。每个轴承型号相同。试验转速为2 000 r/min, 轴承承受载荷为26.67 kN。并且轴承润滑充分。采样频率为20 480 Hz。每隔十分钟存一次数据。每个样本长度为20 480。试验中3号轴承出现外圈单点故障,通过文献[8]计算得知轴承外圈故障特征频率为236.4 Hz。

表1 ZA-2115轴承的几何尺寸

型号	节径/mm	接触角/(°)	滚珠直径/mm	滚子数/个
ZA2115	71.5	15.17	8.4	16

2.1.2 试验结果分析

此次试验有效试验时长为163小时。分别取轴承正常运转状态下的样本和外圈故障发生后的样本进行分析与对比,如图3和图4所示。

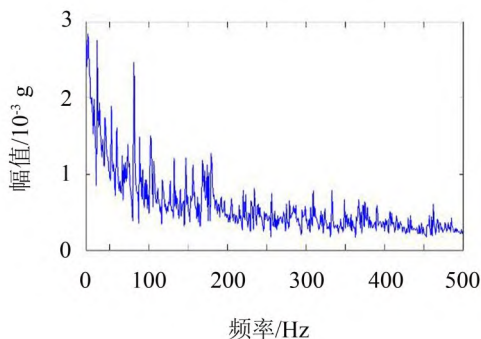


图3 轴承正常运行的小波自相关包络频谱

图4(a)为小波分解加自相关后得到的包络频谱,与图4正常数据相比,可以看到在外圈故障发生后,频谱上能够清晰地找到故障特征频率;图4(b)为对外圈故障信号进行直接包络谱计算,在频域上并不能找到故障特征频率。说明在有噪声背景干扰情

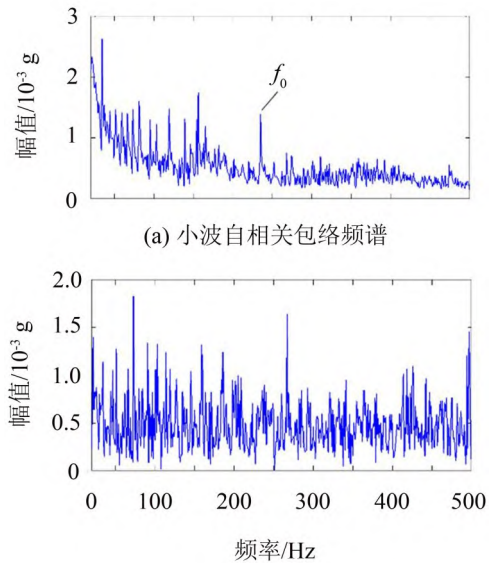


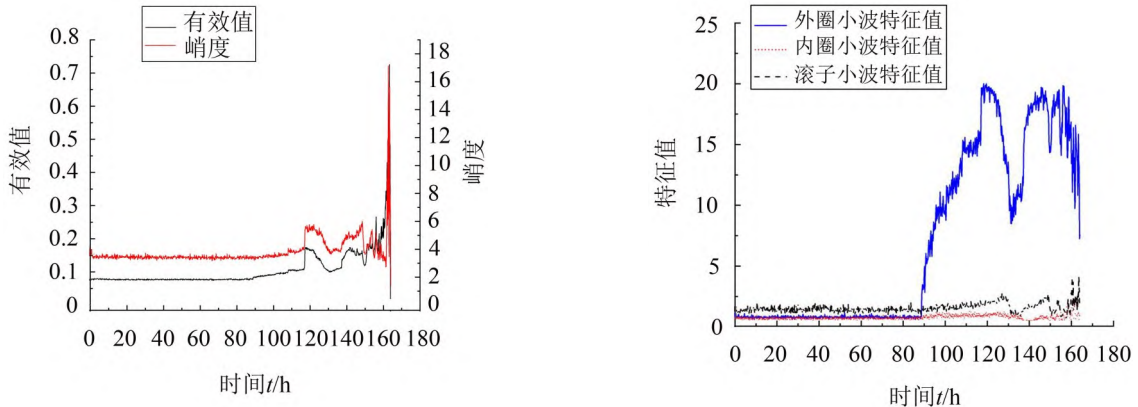
图4 轴承外圈故障振动信号

况下,小波分解加自相关方法能够很好地提取轴承故障。

在线监测技术应当对实时采集的数据进行量化处理,通过一定的特征数值来取代人为识别频谱上的故障特征频率。因此,下面将本文构造的包络谱特征值与有效值和峭度进行比较。来反映轴承全寿命运行情况下的健康变化趋势。

图5所示为试验中轴承振动有效值及峭度与轴承外圈、内圈和滚子包络特征值。

从图5(a)中可以看到有效值和峭度的变化趋势基本一致,在运行120小时左右开始出现上升,由此可以判断在这个时刻轴承运行状态异常。随后有效值和峭度快速增加直到轴承损坏停机。图5(b)为本文构造的小波包络特征值。从图中可以看出,外圈包络特征值在前90小时,数值趋于平稳,稳定在2.5左右,据此可以判断轴承稳定运行。随后,包络特征值出现突增,并且数值愈来愈大,最高达到12.5。之后虽有下降趋势,但是数值一直稳定在5之上,远超正常运行的指标。由此可以认为轴承在运行第90小时出现异常,然而有效值和峭度在120小时左右才出现明显的变化。在此时刻包络特征值已经达到了12以上。说明故障已经较为严重。同时比较了内圈,滚子和外圈的包络特征值,在整个运行阶段内圈和滚子的包络特征值一直稳定在2.5以下。虽然在轴承运行末段两者有所增加,但是此时外圈磨损故障严重,有理由认为对其有一定程度的干扰。通过对比,可以看出包络特征值对于轴承早期微弱故障比有效值和峭度更加敏感,而且能够很好地区分出故障部位。



(a) 试验中轴承振动有效值及峭度 (b) 轴承外圈、内圈和滚子包络特征值
图5 传统特征值对比与轴承外圈、内圈和滚子包络特征值

2.2 试验验证2:HRB 6206滚动轴承全寿命加速疲劳试验

2.2.1 滚动轴承疲劳加速试验介绍

试验平台改装自杭州轴承试验中心研制的ABLT-1A轴承强化试验机,如图6所示。试验头置于试验头座中,试验轴承安装在试验头里,同时安装四个试验轴承。本次试验在回油路中安装了在线油液传感器,能够在线收集油液中磁性颗粒的数量和相对质量。

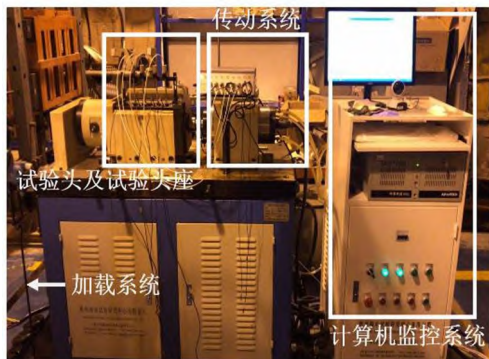


图6 ABLT-1A 试验机及加载示意图

试验所用轴承为HRB6206深沟球轴承,试验恒定转速为11 500 r/min,试验时每个轴承承受径向载荷6.25 kN。#1与#2两个轴承的采样频率分别为32 kHz和50 kHz,分别每隔0.1和0.05小时存一次样

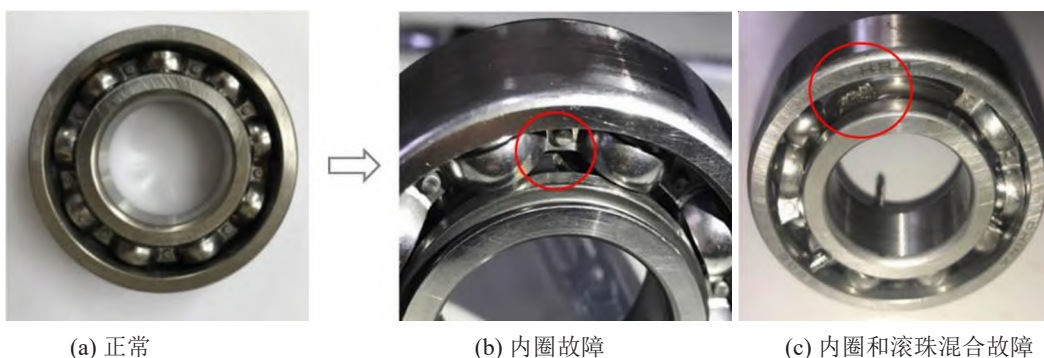
本,经过30和40小时的运转,两轴承试验因有效值过大而停止。最终#1轴承发生了内圈故障,#2轴承发生了内圈与滚珠混合故障,分别如图7(b)和图7(c)所示。实验轴承的主要参数如表2所示。

表2 HRB 6206深沟球轴承的主要参数/

内径/ mm	外径/ mm	厚度/ mm	滚珠直 径/mm	节径/ mm	滚珠 数/个	接触 角/(°)
30	62	16	9.5	46	9	0

2.2.2 6206#1试验结果分析

试验得到的6206#1轴承寿命有效值和峭度如图8(a)所示。从有效值和峭度的趋势来看,轴承约在第25小时内开始发生明显故障,随后故障情况缓慢持续恶化,其退化起始点较为模糊。图8(b)为内圈、外圈和滚珠的小波包络特征值趋势图。从图中的内圈包络特征值来看,轴承在第21小时开始出现明显故障,出现了特征值的剧烈上升,且之后一直保持较为剧烈的波动状态,观察结果较有效值和峭度更为清晰。外圈包络特征值在后期发生了轻微上升表明其开始发生退化,而滚珠包络特征未出现变化。数据分析结果与试验结果相吻合,可以看出包络特征值相比有效值和峭度,对于轴承早期微弱故障显得更加敏感。



(a) 正常 (b) 内圈故障 (c) 内圈和滚珠混合故障
图7 HRB 6206滚动轴承试验前后外观对比

2.2.3 6206#2 试验结果分析

试验得到的 6206#2 轴承寿命有效值和峭度如图 9(a)所示。从有效值和峭度的趋势来看,轴承发生明显异常状况时间在 30 小时,随后故障情况持续恶化。图 9(b)为内圈、外圈和滚珠的小波包络特征值趋势图。从内圈包络特征值来看,平稳运行到 15 小时左右,明显出现异常现象。在 30 小时,特征值剧烈增加;而滚珠包络特征值在运行 2 小时后出现剧烈变化。并且在 15 小时之后数值出现上下波动随后下降。这可能是因为在此时出现了多滚珠故障。而式(3)中故障特征值计算为单点故障计算,多滚珠故障冲击会影响滚珠包络特征值,从而产生波动。外圈包络特征值无明显变化情况。数据分析结果与试验结果相吻合。因此包络特征值相比有效值和峭度,对于轴承早期微弱故障更加敏感,能够做到及时给出诊断信息。

试验过程还得到了 6206#2 轴承的润滑油液磨损数据如图 10 所示。图 10(a)为油液铁磁性颗粒数量变化趋势,10(b)为铁磁性颗粒质量变化趋势。从油液信息可以分析出在运行 1 小时前后,出现铁磁性颗粒,而此时对应的滚珠包络特征值出现异常,据此可推断滚珠上发生了微弱剥落。而在 15 小时和

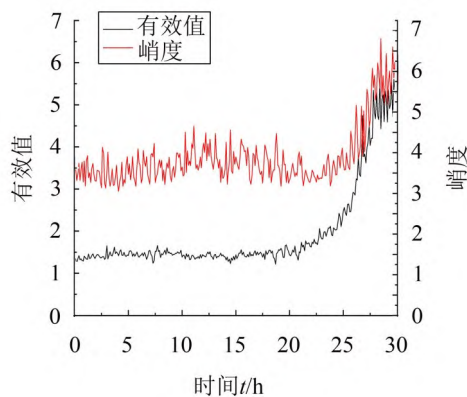
22 小时前后又出现了颗粒掉落,并且此时颗粒质量较大,对应的内圈特征值出现异常,可以推断内圈剥落故障形成,而在此后尤其在 30 小时后,油液中出现大量的颗粒,由此轴承进入磨损阶段,大量的颗粒不断掉落。而此刻有效值和峭度才出现明显的变化。因此油液数据变化趋势证明包络特征值对于轴承的早期微弱故障有着很好的诊断能力,并且可以用于大量数据,长时间运行的机械设备,实现在线监测。

2.3 试验验证 3: BMD 6009 滚动轴承全寿命加速疲劳试验

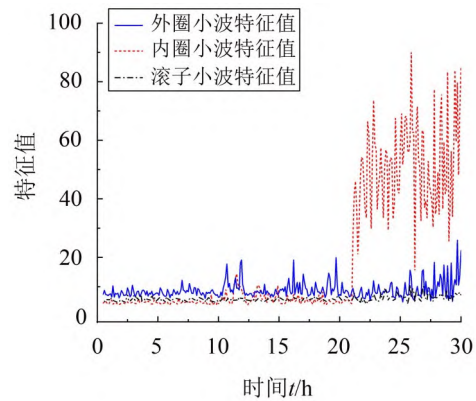
2.3.1 滚动轴承疲劳加速试验介绍

与 HRB 6206 系列相同,本试验同样采用 ABLT-1A 型滚动轴承加速度疲劳试验器,试验的四个工位所采用的轴承均为 BMD 6206 深沟球轴承,其基本参数如表 3 所示。试验恒定转速为 12 000 r/min,试验径向载荷为 5.1 kN,轴向载荷为 1.2 kN。经过约 75 小时的运转,试验因振动值超标而停止。

图 11 为 4 号位试件的磨损形貌图像。从图中可以发现,在内圈外滚道,有两处剥落。剥落面积一处较大,一处较小,距离较近。此外,磁堵吸附的颗粒并不多,表明磨损程度较低。

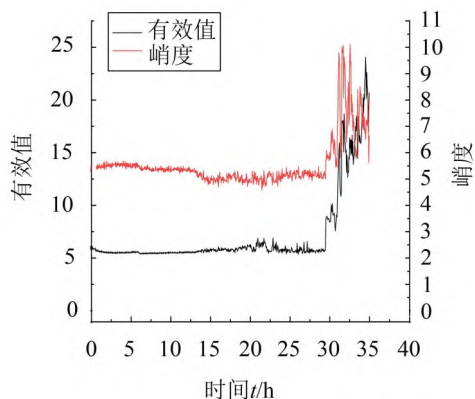


(a) 试验中轴承振动有效值及峭度

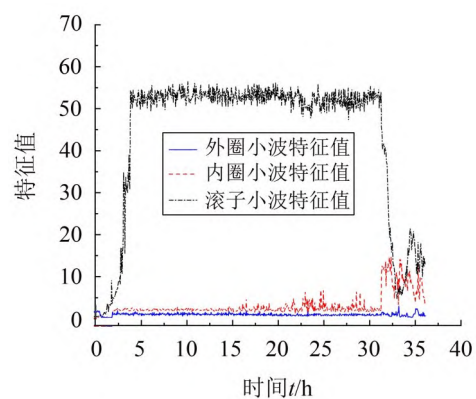


(b) 轴承外圈、内圈和滚子包络特征值

图 8 传统特征值对比与轴承外圈、内圈和滚子包络特征值



(a) 试验中轴承振动有效值及峭度



(b) 轴承外圈、内圈和滚子包络特征值

图 9 传统特征值对比与轴承外圈、内圈和滚子包络特征值

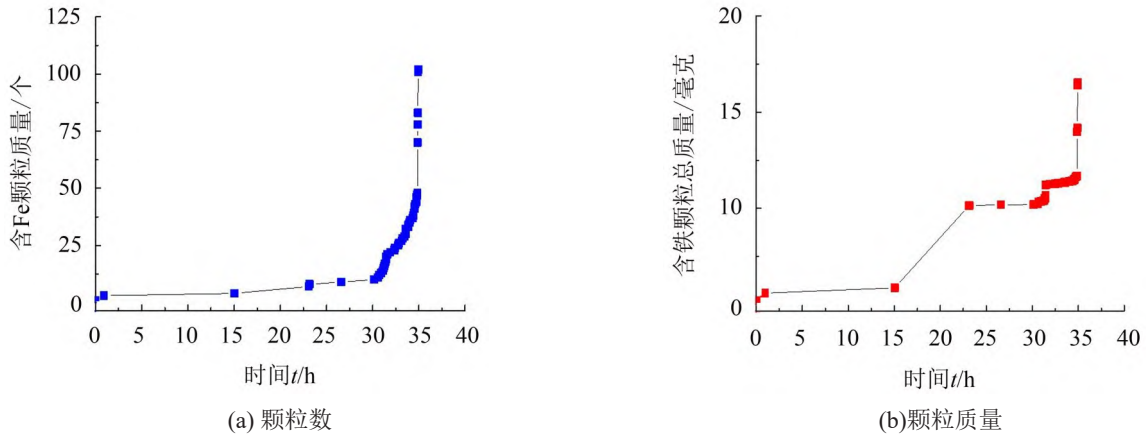
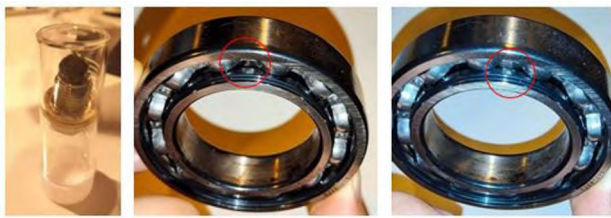


图 10 试验轴承铁磁性颗粒变化趋势图

表 3 BMD 6009 深沟球轴承的主要参数

内径/mm	外径/mm	厚度/mm	滚珠直径/mm	节径/mm	滚珠数/个	接触角/(°)
45	75	16	8.7	60	12	0



(a) 磁堵 (b) 试件剥落1 (c) 试件剥落2
图 11 磁堵及磨损试件

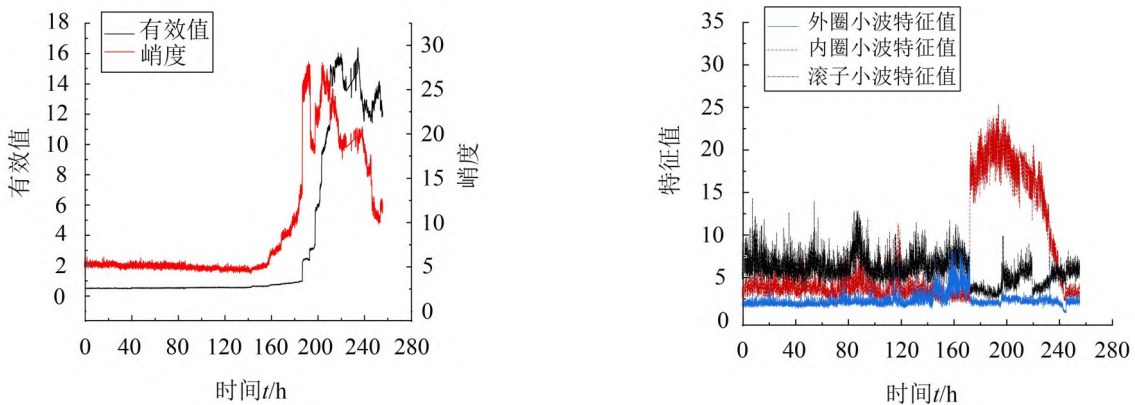
2.3.2 试验结果分析

试验得到的BMD 6009轴承寿命有效值和峭度如图12(a)所示。从有效值和峭度的趋势来看,轴承约在第175小时开始逐渐发生故障,其退化起始点较为模糊。图12(b)为内圈、外圈和滚珠的小波包络特征值趋势图。从图中的内圈包络特征值来看,轴承在第175小时开始出现内圈故障,表现为特征值的剧烈上升,观察结果较有效值和峭度更为清晰。数据分析结果与试验结果相吻合,可以看出包络特征值相比有效值和峭度,对于轴承早期微弱故障更加敏感。

试验过程还得到了BMD 6009轴承润滑油液磨粒数据如图13所示,分别展示了油液铁磁性颗粒数量变化趋势和铁磁性颗粒质量变化趋势。铁磁性颗粒从约第176小时后开始产生,证明轴承出现颗粒型掉落,此趋势与特征值相似。在此后油液中出现大量的颗粒,由此轴承进入磨损阶段。通过油液数据与特征值变化趋势分析对比,证明包络特征值对于轴承的早期微弱故障有着很好的诊断能力,并且可以用于大量数据,长时间运行的机械设备,实现在线监测。

3 与传统方法对比

为了对比验证本文所述方法的有效性,选择目前轴承故障诊断领域常用的基于谱峭度的冲击特征分离法^[9],与本文所提方法进行对比。谱峭度(Spectral Kurtosis, SK)是一种高阶统计量,能够从强噪声信号中确立冲击成分在频域中的位置并进行提取,其具体原理如文献[10]所述。本文对ZA-2115双列滚子轴承及HRB 6206滚动轴承两组数据进行谱



(a) 试验中轴承振动有效值及峭度 (b) 轴承外圈、内圈和滚子包络特征值

图 12 传统特征值对比与轴承外圈、内圈和滚子包络特征值

峭度分析,计算在不同窗长下的谱峭度值。以ZA-2115轴承数据第160个小时的振动数据为例,从三维谱峭度图中得到最大频带的中心频率 $f_c=5\ 120\ \text{Hz}$ 及对应窗长后,设计对应的带通滤波器,得到滤波后的信号,并进行包络解调,得到图14所示包络。

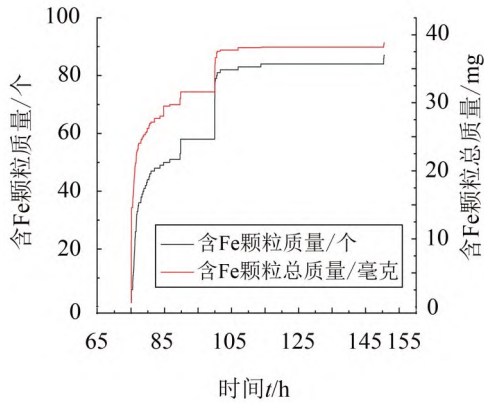


图13 试验轴承铁磁性颗粒变化趋势图

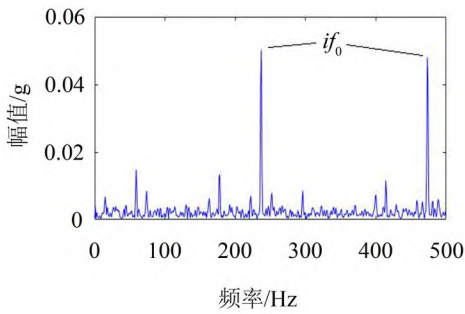
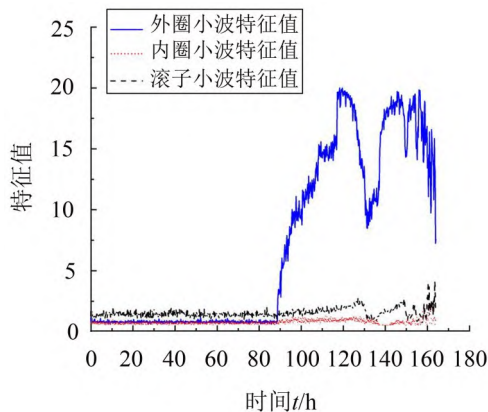


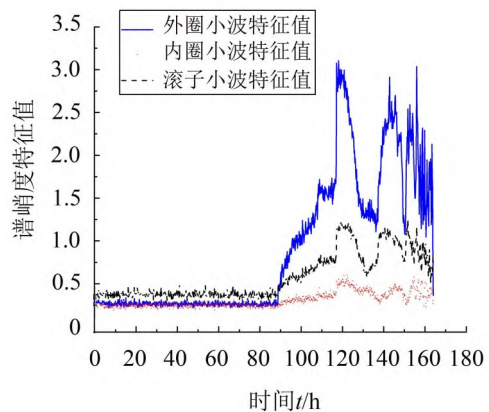
图14 经谱峭度滤波后的ZA-2115轴承外圈故障包络频谱

从图15中可以看出,在外圈故障特征频率 $f_o=236.4\ \text{Hz}$ 及其倍频处具有较高能量,证明谱峭度滤波法能够对轴承故障进行定位识别。

与本文所述方法相同,在得到包络谱后,依旧选择包络谱中的故障特征频率各阶倍频处的谱线峰值与包络谱平均值的比值作为特征值,得到基于谱峭度法的两组轴承外圈、内圈和滚子包络特征值全寿命演化趋势,如图15所示。



(a) 小波特征值



(b) 谱峭度特征值

图15 基于小波与谱峭度的ZA-2115双列滚子轴承外圈、内圈和滚子包络特征

从图15中可以看出,基于小波包络频谱与基于峭度图的带通滤波法都能够将对应故障频率下的轴承瞬态冲击特征信号分离开来。但是,不同于小波法对故障分离的清晰利落,基于谱峭度法不同部位包络特征演化趋势较为相似,尤其在约第90小时轴承发生退化以后,内圈与滚子谱峭度特征值皆出现了与外圈相似的上升趋势,但实际中轴承内圈与滚子并未发生明显故障。结果证明谱峭度法并没有完全清晰分离三种故障特征,导致其在不同故障频带出现了一定的混叠现象。

从图16中基于HRB 6206轴承的对比同样可以看出,小波方法能够清晰完整地分离故障特征,基于谱峭度法的外圈与滚子谱峭度特征值在后半部分出现了一定程度的混叠。另外,与小波特征值不同的是,基于谱峭度的包络特征具有较大的波动性,内圈故障特征的上升趋势与小波相比更不明显。综上,本文提出的基于小波与自相关分析的方法在判定故障类别,实现滚动轴承早期预警方面具有明显的优越性。

4 结语

本文提出了一种滚动轴承早期故障告警方法,利用小波变换和自相关分析方法实现滚动轴承微弱故障特征的提取,并构造出用于早期故障告警的特征量。通过美国辛辛那提试验机构提供的轴承数据和对ABLT-1A型轴承加速疲劳试验机的试验结果进行分析,同时结合油液数据分析,证明了本文所提方法具有如下优越性:

- (1) 本文所采用的方法得到的监测结果,比有效值及峭度等传统监测更加敏感,能够更早、更清晰地对故障进行预警。其中辛辛那提数据及轴承加速疲劳数据在采用本方法后,其故障预警时间相较传统方法分别提前了30小时和4小时,与总寿命相比分别提前了18.4%及13.3%;

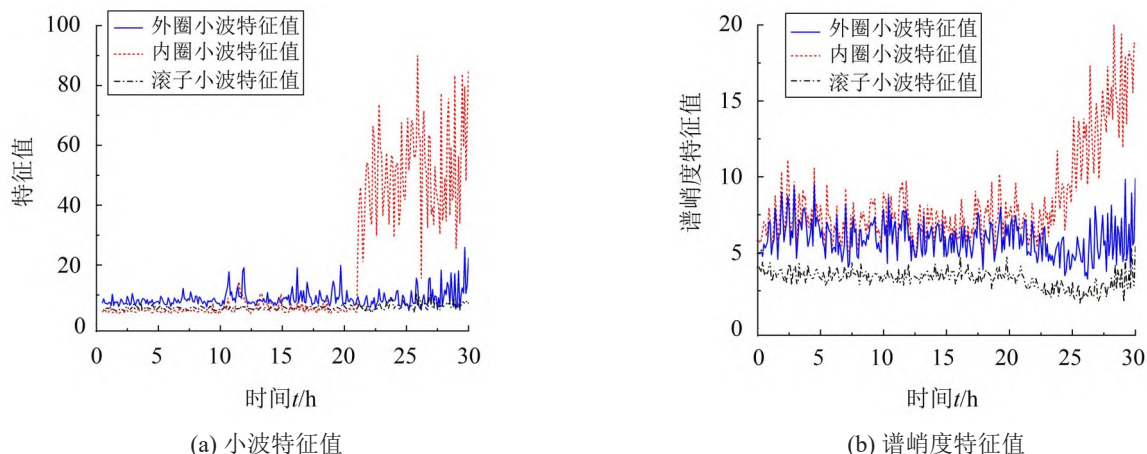


图 16 基于小波与谱峭度的 HRB 6206 滚动轴承外圈、内圈和滚子包络特征

(2) 本文所采用的诊断方法,能够根据不同类型故障包络谱的演化特点,清晰定位故障产生的部位,理论分析结果与试验结果十分吻合,且较谱峭度等经典方法更为清晰准确。

综上,本文新方法能够实现滚动轴承早期微弱故障告警,对于有效地实施滚动轴承状态监测、故障诊断和健康管理具有重要意义。

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,1995.
- [2] RANDALL R B, ANTONI J. Rolling element bearing diagnostics—A tutorial[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(2): 485-520.
- [3] WILLIAMS T, RIBADENEIRA X, BILLINGTON S, et al. Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2001, 15(5): 979-993.
- [4] RAI A, UPADHYAY S H. A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings[J]. *Tribology International*, 2016: 289-306.
- [5] WU C, SHAN Z, LIU H, et al. Extraction and enhancement of unknown bearing fault feature in the strong noise under variable speed condition[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(10): 105021.
- [6] BEHZAD M, KIAKOJOURI A, ARGHAND HA, et al. Inaccessible rolling bearing diagnosis using a novel criterion for morlet wavelet optimization[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2021: 1077546321989503.
- [7] WANG G X, ZHAO B K, XIANG L, et al. Information interval spectrum: A novel methodology for rolling-element bearing diagnosis[J]. *Measurement*, 2021(10): 109899.
- [8] 陈果,李爱. 航空器检测与诊断技术导论[M]. 北京:航空工业出版社,2012.
- [9] ANTONI J. The spectral kurtosis: A useful tool for characterizing nonstationary signals[J]. *Mechanical Science and Signal Processing*, 2006, 20(2): 282-307.
- [10] ANTONI J, RANDALL R B. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines[J]. *Mechanical Science and Signal Processing*, 2006, 20(2): 308-331.
- [11] (上接第 131 页)
- [12] 张则荣,李鹏飞,韩桐桐,等. 基于应变模态的风机塔筒法兰螺栓断裂损伤监测研究[J]. *机电工程*, 2021, 38(10): 1348-1354.
- [13] 陈凯. 风电塔法兰螺栓松动对结构振动影响数值分析[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2019.
- [14] 刘永超,郭德瑞,李帅,等. 风电机组高强度螺栓的失效形式分析[J]. *太阳能*, 2021(1): 44-50.
- [15] 周思雨,胡挺,余毫,等. 1.5 MW 某型现代风机塔筒强度的有限元分析[J]. *电力科学与工程*, 2021, 37(1): 62-71.
- [16] 朱少辉. 风力发电机组塔筒振动频率的计算[J]. *机械管理开发*, 2016, 31(11): 1-2.
- [17] ZERBST U, VORMWALD M, PIPPAN R, et al. About the fatigue crack propagation threshold of metals as a design criteria review[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016, 153: 190-243.
- [18] LACALLE R, CICERO S, ALVAREZ J A, et al. On the analysis of the causes of cracking in a wind tower[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(7): 1698-1710.
- [19] BENEDETTI M, FONTANARI V, ZONTA D. Structural health monitoring of wind towers: remote damage detection using strain sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(5): 055009.