

基于声发射特征参数的航空轴承滚道 损伤程度识别方法

佟鑫宇, 沙云东*, 栾孝驰, 赵俊豪, 张振鹏

(沈阳航空航天大学 辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136)

摘要: 针对航空轴承滚道损伤程度难识别的问题, 以声发射参数分析为基础, 结合时间到达特征指数(TAFI)、能量、计数、撞击数等特征参数以及引入无量纲参数损伤因子, 提出了一种基于声发射特征参数的航空轴承滚道损伤识别方法, 并搭建了滚动轴承故障模拟试验台进行试验, 总结了滚动轴承不同损伤程度下声发射参数的敏感程度与变化规律, 并在航空轴承故障模拟试验台进行了航空轴承损伤演化试验验证。时间到达特征指数可初步判断轴承是否有故障, 声发射信号的能量、计数、幅值与幅值的撞击数在轴承损伤程度增加时, 对轴承滚道损伤更为敏感, 损伤因子明显变化, 可以对不同损伤程度的航空轴承滚道损伤特征进行有效识别。时间到达特征指数呈现规则条状时, 可以初步判断轴承出现故障。轴承损伤程度增加时, 能量、计数与撞击数均都有所增加。幅值的撞击数随损伤程度的增加呈现集中趋势, 损伤因子数值增大。

关键词: 滚动轴承; 滚道损伤; 声发射; 特征参数; 损伤程度; 损伤因子

中图分类号: V235.13

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)09-0070-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.09.009

Aircraft Bearing Raceway Damage Identification Method Based on Acoustic Emission Characteristic Parameters

TONG Xinyu, SHA Yundong*, LUAN Xiaochi, ZHAO Junhao, ZHANG Zhenpeng

(Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for Aviation Propulsion System, Liaoning Province, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem that the damage degree of aviation bearing raceway is difficult to identify. Based on acoustic emission parameter analysis, combined with the time arrival feature index (TAFI), energy, count, impact number and other characteristic parameters, as well as the introduction of dimensionless parameter damage factors. A rolling bearing raceway damage identification method based on acoustic emission characteristic parameters was proposed. A rolling bearing fault simulation test bench was built for testing. The sensitivity degree and variation rule of acoustic emission parameters under different damage degree of rolling bearing were summarized. And the damage evolution test of bearing was verified on the bearing fault simulation test bench. The time arrival feature index can initially determine whether the bearing is faulty.

收稿日期: 2024-08-08; 修订日期: 2024-09-03

Received: 2024-08-08; Revised: 2024-09-03

基金项目: 中国航发产学研合作项目(HFZL2018CXY017)。

Fund: China Aviation Industry Cooperation Project (HFZL2018CXY017).

引文格式: 佟鑫宇, 沙云东, 栾孝驰, 等. 基于声发射特征参数的航空轴承滚道损伤程度识别方法[J]. 装备环境工程, 2024, 21(9): 70-78.

TONG Xinyu, SHA Yundong, LUAN Xiaochi, et al. Aircraft Bearing Raceway Damage Identification Method Based on Acoustic Emission Characteristic Parameters[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(9): 70-78.

*通信作者 (Corresponding author)

The energy, count, amplitude and impact number of acoustic emission signal are more sensitive to the bearing raceway damage when the bearing damage degree increases, and the damage factor changes obviously, which can effectively identify the damage characteristics of aviation bearing raceway with different damage degrees. The time arrival feature index presents a regular strip, which can initially judge the bearing failure. When the bearing damage degree increases, the energy, count and impact number all increase. The impact number of the amplitude shows a centralized trend with the increase of the damage degree, and the damage factor value increases.

KEY WORDS: rolling bearing; raceway damage; acoustic emission; characteristic parameter; damage degree; damage factor

滚动轴承是航空发动机的精密部件之一, 其性能和寿命对航空发动机的稳定运行起着关键性的作用^[1-2]。航空发动机支承传动系统的主要元件是中介轴承, 与普通滚动轴承结构相同, 由于其持续工作, 易发生失效故障, 严重影响了发动机的正常工作和飞行安全^[3]。现有航空轴承诊断方法主要有振动检测、滑油状态检测、声发射检测等^[4]。及时掌握航空轴承损伤程度, 并进行航空轴承损伤预判, 对不同损伤程度的航空轴承采取有效的维护方式具有重要的工程实际意义。

在国内, 黄涛等^[5]用 Hilbert 变换对支撑轴承的声发射信号进行了谱分析, 对比实验所得理论计算的频率和频率, 得出失效部位和失效程度。理华等^[6-7]采用双阈值分析的方法判断故障, 大大提高了检测效率。李凤英等^[8]用 Hilbert 变换包络解调对轴承的声发射信号进行了滤波处理, 得到轴承故障类型相匹配的频率特征。栾孝驰等^[9]利用特征参数有效识别了外圈故障和滚动体故障滚动轴承的不同损伤程度, 并引入故障因子参量来表征不同缺陷滚动轴承的损伤程度。在国外, 纳什德等^[10]使用声发射技术对燃气轮机故障进行了分类, 提取时间序列包络, 以增强主要特征, 消除不相关的噪声, 并使用连续小波变换生成时频特征, 用于训练深度卷积神经网络来对燃气轮机条件进行了分类, 所得模型在对不同涡轮机转速下的 2 种正常运行条件和 2 种故障条件进行分类时具有很高的准确性。穆赫森·莫塔哈里·内扎德等^[11]使用声发射对发动机测功机轴承寿命进行了实验和数据驱动测量, 利用声发射信号来捕捉发动机测功机轴承的寿命。应用不同的反馈神经网络, 给出了不同的时频特征, 并使用预测特征选择来减小特征尺寸。Mey 等^[12]提出了一种逐步整合从振动和声发射传感器获得的分类的方法, 以便结合从低频和高频范围内获取的信号的信息, 可以及早、精确和可靠地检测传动系统中的轴承损坏。张颖等^[13]通过典型故障轴承试验数据验证了撞击数和与轴承故障特征频率之间存在一定联系, 提出了利用周期性声发射累积撞击数来识别轴承故障的方法。Elasha 等^[14]采集直升机变速箱故障轴承的声发射信号, 用自适应滤波、频谱峰度、包络谱分析方法, 有效识别了轴承故障信息。David 等^[15]用基于倒谱预白化 (CPW) 故障轴承诊断方法对声发射信

号进行了处理, 结果显示, 声发射信号对轴承故障诊断效果更好。沙云东等^[16]利用小波分解-峭度值指标-希尔伯特变换包络解调方法, 针对复杂传递路径下的滚动轴承进行了分析, 有效进行了故障诊断。

为了识别航空轴承滚道损伤以及损伤程度, 本文以声发射参数分析为基础, 结合时间到达特征指数 (TAFI)、能量、计数、撞击数等特征参数以及引入无量纲参数损伤因子, 提出了一种基于声发射特征参数的航空轴承滚道损伤识别方法。搭建了滚动轴承故障模拟试验台与航空轴承故障模拟试验台, 对相同转速工况下测得的不同损伤程度的滚动轴承与剥落损伤的航空轴承运用所提方法进行识别, 验证了该方法的有效性。

1 理论分析

1.1 声发射信号特征参数

声发射是在材料发生形变或结构破坏时, 释放出瞬态能量波的现象^[17]。由于声音发射信号频率高, 因此在早期识别故障方面具有一定的优势^[18]。声发射参数分析是通过统计振铃计数、能量、幅值、撞击计数等参数随滚动轴承故障类型和故障损伤程度变化的规律^[19-20]。声发射信号特征参数如图 1 所示。

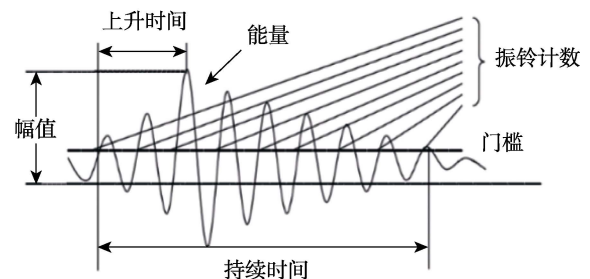


图 1 声发射信号特征参数

Fig.1 Characteristic parameter of acoustic emission signal

1.2 声发射特征信号分析方法

1) TAFI 分析法。TAFI 是基于 AE 撞击的频率、幅值及时间特征单独提取的特征参数, 描述了故障信号频率及强度等方面的信息^[21-22]。

2) 经历图分析法。在声发射信号分析^[23-24]中,

经历图分析法^[25]是声发射信号随着时间或者外部变量的变化进行分析的一种最常用、最直观的图形分析方法。

3) 分布图分析法^[26]。分布图分析法是对轴承声发射撞击计数或事件计数信号进行统计分析的方法。

1.3 无量纲参数损伤因子

为表征航空轴承滚道损伤不同损伤程度,定义一个无量纲损伤因子 ξ (幅值与有效值电压平均值的乘积),来突出特征差异,进行航空轴承滚道损伤程度区分:

$$\xi = \overline{A_{mp}} \times \overline{R_{ms}} \quad (1)$$

式中: $\overline{A_{mp}}$ 为声发射特征参数主要集中幅值,若有多个集中幅值,进行平均化处理; $\overline{R_{ms}}$ 为声发射有效值电压平均值。

1.4 航空轴承滚道损伤程度识别流程

结合声发射特征参数以及无量纲参数损伤因子对航空轴承不同损伤程度的声发射信号进行分析,具体流程如图 2 所示。

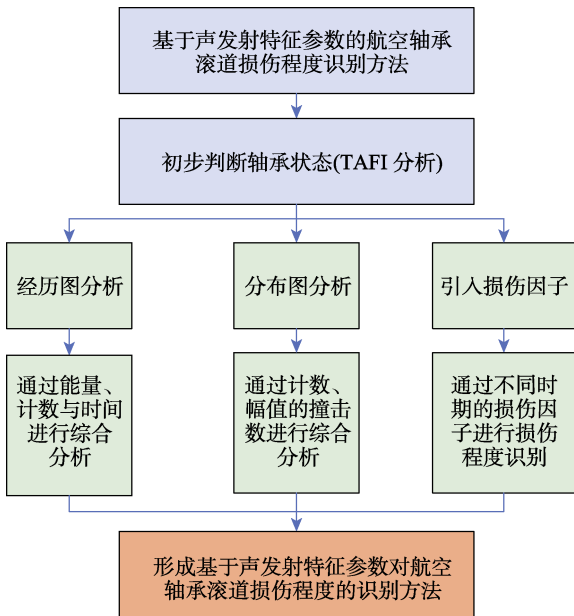


图 2 航空轴承滚道损伤程度识别流程
Fig.2 Identification process of aircraft bearing raceway damage degree

2 故障模拟试验

2.1 滚动轴承故障模拟试验

滚动轴承型号为 NJ204EM, 轴承模拟故障采用线切割加工方式, 线切割故障尺寸为 1 mm×1 mm, 如图 3、4 所示。

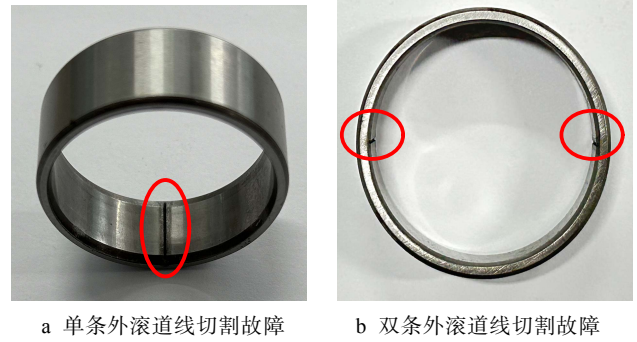


图 3 轴承外滚道线切割故障
Fig.3 Cutting fault of bearing outer raceway wire: a) cutting fault of single outer raceway; b) cutting fault of two outer raceways

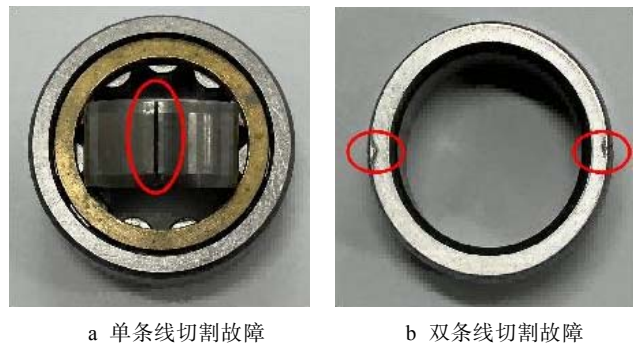


图 4 轴承内滚道线切割故障
Fig.4 Cutting fault of bearing inner raceway wire: a) cutting fault of a single inner raceway; b) cutting fault of two inner raceways

滚动轴承故障模拟试验台如图 5 所示, 主要由电机、滚动轴承座、转速轴、配重盘、滚动轴承、转速调节器、转速测量仪组成, 声发射数据采集系统为 AEwin for PC12。该试验故障轴承为单条线切割故障和双条线切割故障, 采用电机控制器对电机进行转速调节。通过 VSO 测试系统转速控制器控制转速, 轴承外圈固定, 内圈与滚动体转动。声发射传感器固定器通过磁吸的方式固定在轴承支架正上方, 传感器与轴承支架用耦合剂耦合。故障模拟试验工况信息见表 1。

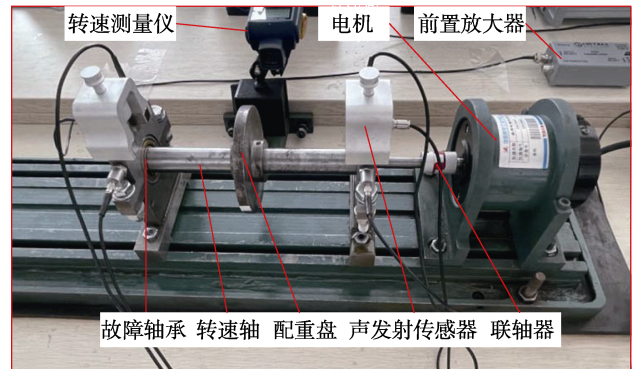


图 5 滚动轴承故障模拟试验台
Fig.5 Test bench of rolling bearing fault simulation

表 1 故障模拟试验工况信息
Tab.1 Test condition information of fault simulation

转速/(r·min ⁻¹)	故障类型	信号采集时长/s
600、720、840、960、1 080、1 200、1 320、1 440、1 560	外圈故障 1 (单条线切割故障) 外圈故障 2 (双条线切割故障) 内圈故障 1 (单条线切割故障) 内圈故障 2 (双条线切割故障)	15

2.2 航空轴承故障模拟试验

为模拟某型涡扇航空发动机主轴承的工作状态及信号复杂传递路径, 构建航空轴承真实剥落故障模拟试验台。对航空轴承外圈预制 8 mm×6 mm 剥落损伤, 损伤位置为 6 点钟方向, 进行航空轴承外圈剥落演化试验, 并在演化试验过程中不断检测轴承的损伤程度。试验台主体如图 6 所示, 声发射测点布置如图 7 所示, 航空轴承故障模拟试验工况信息见表 2。



图 6 航空轴承故障模拟试验台
Fig.6 Test bench of aviation bearing fault simulation

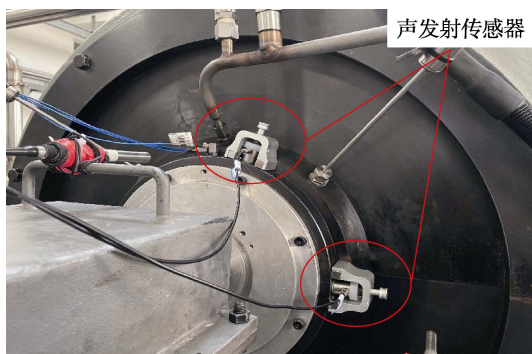


图 7 声发射传感器现场
Fig.7 Field diagram of acoustic emission sensor

表 2 航空轴承故障模拟试验工况信息
Tab.2 Test condition information of aircraft bearing fault simulation

转速/(r·min ⁻¹)	故障类型 (轴承外滚道剥落/mm)	信号采集时长/s
低压转速 3 375 高压转速为 10 270	损伤状态 1 (15×15) 损伤状态 2 (25×15) 损伤状态 3 (25×20)	15

3 方法有效性验证

3.1 滚动轴承故障模拟试验验证

3.1.1 TAFI 分析

健康滚动轴承和故障滚动轴承 TAFI 对时间经历图如图 8 所示。可以利用 TAFI 对滚动轴承是否存在故障进行初步分级, 即 TAFI 图像是否呈现规律分布。若滚动轴承存在故障, 对后续试验数据再进行处理, 提高了诊断效率。

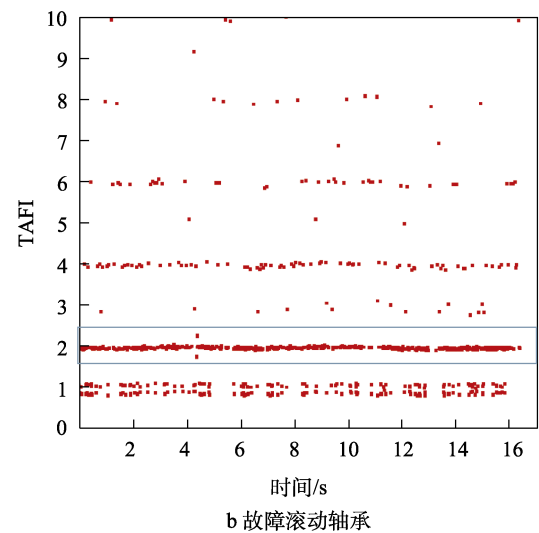
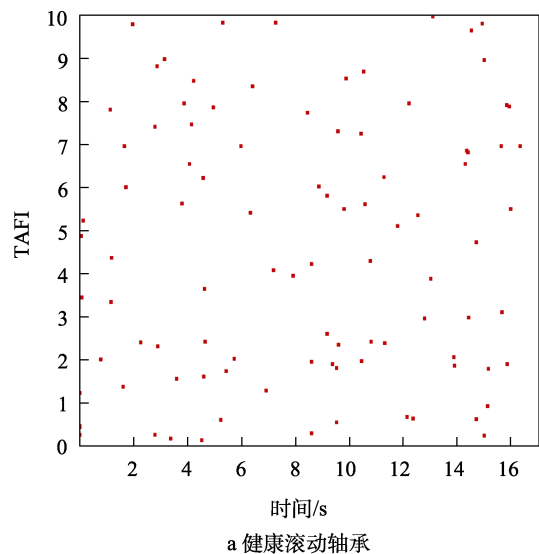


图 8 滚动轴承 TAFI 对时间经历图
Fig.8 Time history diagram of TAFI pair of rolling bearings:
a) healthy rolling bearings; b) faulty rolling bearings

3.1.2 经历图分析

不同损伤程度的滚动轴承能量对时间经历图如图 9 所示, 故障轴承能量统计如图 10 所示。滚动轴承损伤程度增加时, 外圈故障、内圈故障的能量均有所增加。在严重受损程度下, 外圈故障能量增加较为明显。由于内圈的声发射信号要经过保持架等仪器的

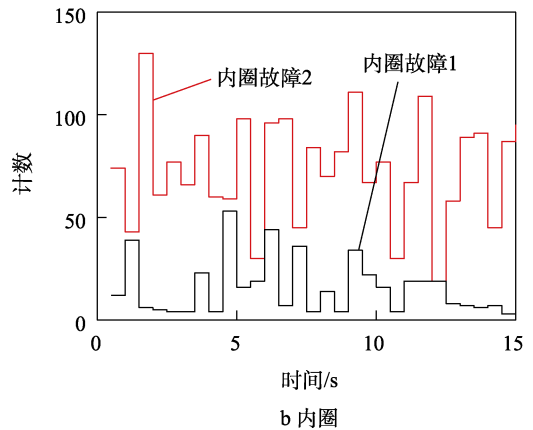
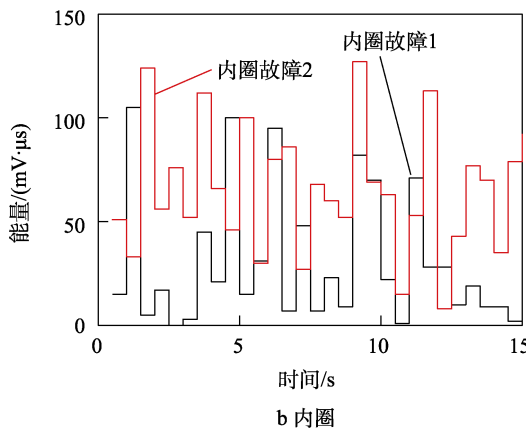
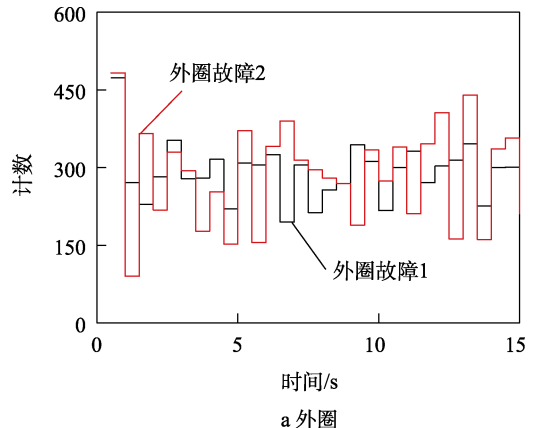
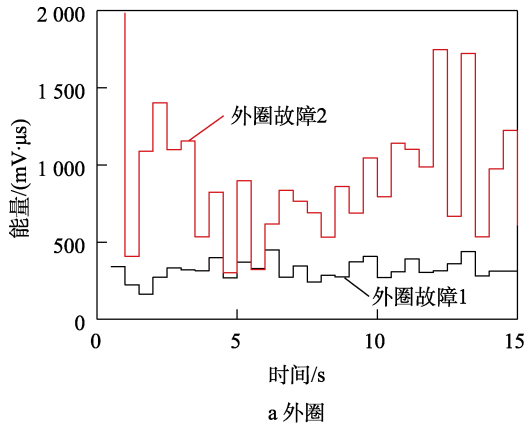


图9 故障滚动轴承能量对时间经历图
Fig.9 Energy vs. time history diagram of faulty rolling bearing: a) outer ring; b) inner ring

图11 故障滚动轴承计数对时间经历图
Fig.11 Count vs. time history diagram of faulty rolling bearing: a) outer ring; b) inner ring

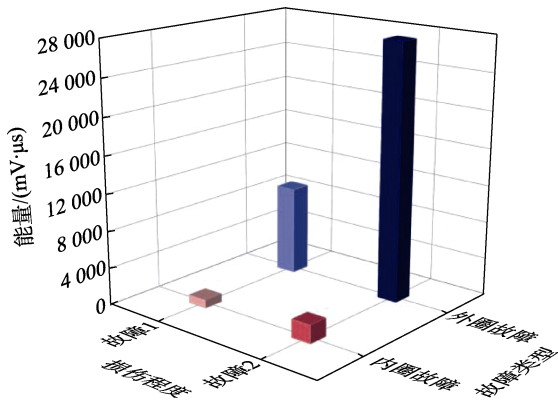


图10 故障轴承能量统计
Fig.10 Energy statistical diagram of faulty bearing

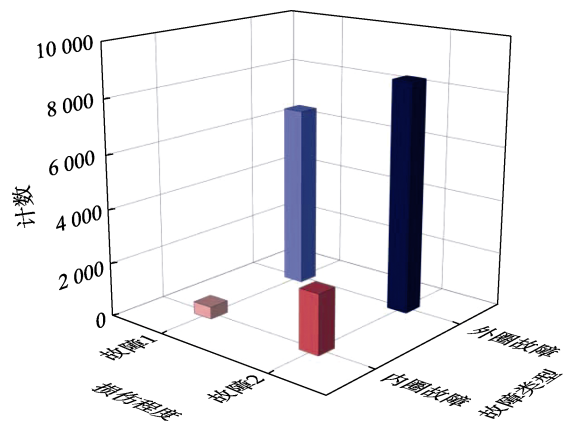


图12 故障轴承计数统计
Fig.12 Count statistical diagram of faulty bearing

传递才能到达声发射传感器，能量损失比较严重，因此能量增加不是十分明显。

不同损伤程度的滚动轴承计数对时间经历图如图11所示，故障轴承计数统计如图12所示。滚动轴承损伤程度增加时，外圈、内圈故障的计数均有所增加。由于内圈故障计数值较小，内圈故障计数增加较为明显。通过经历图分析可以看出，滚动轴承损伤程度增加时，能量与计数对于滚动轴承的损伤较为敏感，均有不同程度的增加，可以通过能量与计数来进

行滚动轴承损伤程度的识别。

3.1.3 分布图分析

不同损伤程度的滚动轴承撞击数对幅值的分布如图13所示。滚动轴承损伤程度增加时，外圈、内圈故障幅值与幅值的撞击数均有所增加。不同损伤程度的滚动轴承撞击数对计数分布图如图14所示。滚动轴承损伤程度增加时，外圈、内圈故障计数的撞

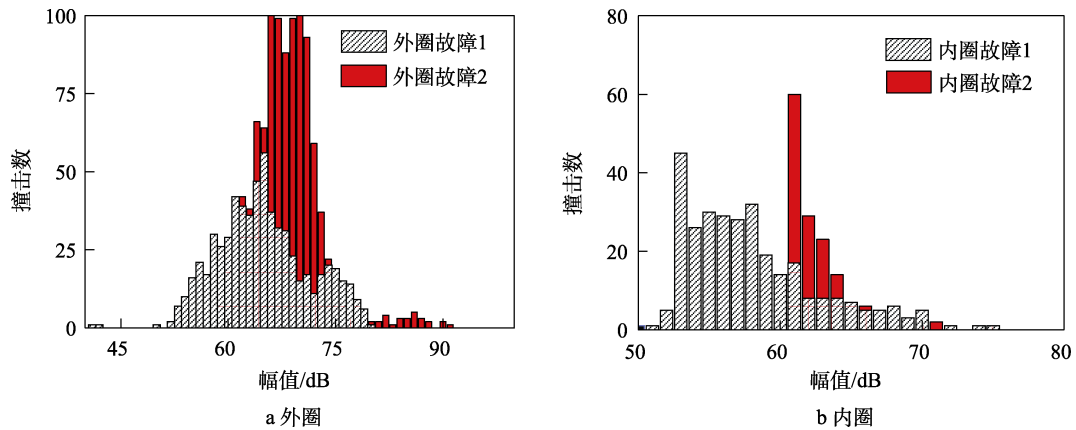


图 13 不同损伤程度滚动轴承撞击数对幅值的分布

Fig.13 Distribution diagram of impact number pair amplitude of rolling bearing with different damage degree: a) outer ring; b) inner ring

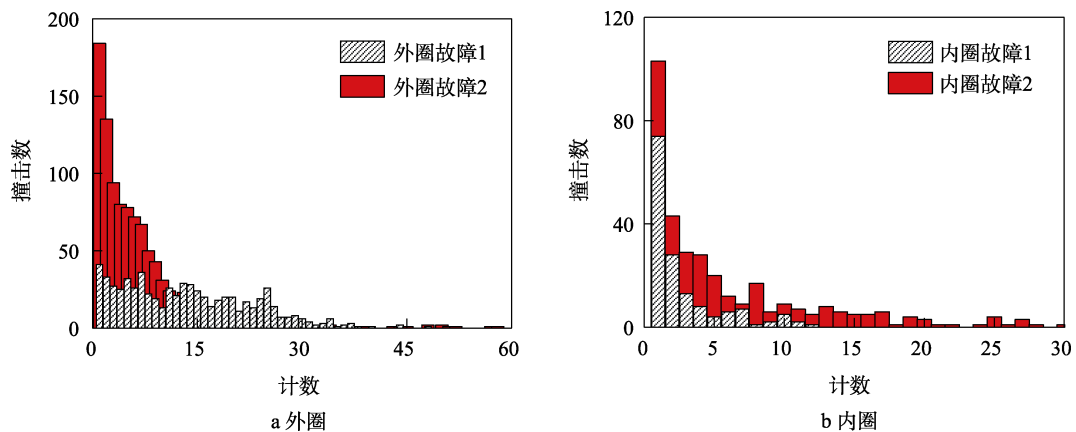


图 14 不同损伤程度滚动轴承撞击数对计数的分布

Fig.14 Distribution diagram of impact number pair count of rolling bearing with different damage degree: a) outer ring; b) inner ring

击数均有所增加, 外圈故障计数的撞击数增加较为明显。

3.1.4 损伤因子分析

滚动轴承损伤因子统计见表 3。当滚动轴承损伤程度增加时, 声发射信号的幅值与有效电压值明显增加, 损伤因子明显增加, 外圈故障损伤因子由 0.454 增长至 1.298, 内圈故障损伤因子由 0.345 增长至 0.942。由于内圈信号需要传递到滚动体, 再从滚动体传至外圈最后到轴承支座, 在传递过程中信号有损耗, 因此内圈故障的损伤因子比外圈略小。通过无量纲参数损伤因子可以对滚动轴承损伤程度进行识别, 判断滚动轴承的损伤程度。

表 3 故障滚动轴承损伤因子统计

Tab.3 Statistical table of damage factors of faulty bearings

故障类型	A_{mp}	R_{ms}	ξ
外圈故障 1	64.8	0.007	0.454
外圈故障 2	68.3	0.019	1.298
内圈故障 1	57.5	0.006	0.345
内圈故障 2	62.8	0.015	0.942

3.2 航空轴承故障模拟试验验证

在航空轴承真实剥落故障模拟试验台进行航空轴承外圈剥落损伤试验, 并采集低压转速为 3 375 r/min、高压转速为 10 270 r/min 时航空轴承滚道损伤状态的声发射信号。损伤程度随时间变化不断扩展, 损伤状态 1、2、3 的剥落损伤状态分别为 15 mm×15 mm、25 mm×15 mm、25 mm×20 mm。

3.2.1 经历图分析

对 3 类不同损伤程度的航空轴承进行经历图分析, 能量对时间的经历图如图 15 所示, 计数对时间的经历图如图 16 所示。损伤状态 2 时, 能量相较于损伤状态 1 增加 1×10^6 mV/μs, 损伤状态 3 时, 能量相较于损伤状态 2 增加 1×10^6 mV/μs; 损伤状态 2 时, 计数相较于损伤状态 1 增加 250 000, 损伤状态 3 时, 能量相较于损伤状态 2 增加 100 000 mV/μs。可以看出, 能量与计数增加较为明显, 因此声发射信号的能量与计数对时间的经历图可以对航空轴承滚道的损伤程度进行有效识别。

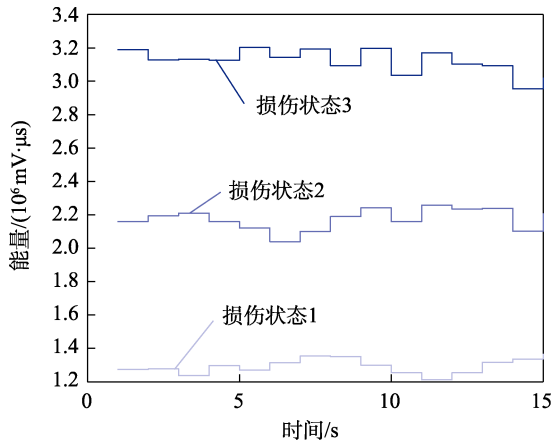


图 15 故障轴承能量统计

Fig.15 Energy statistical diagram of faulty bearing

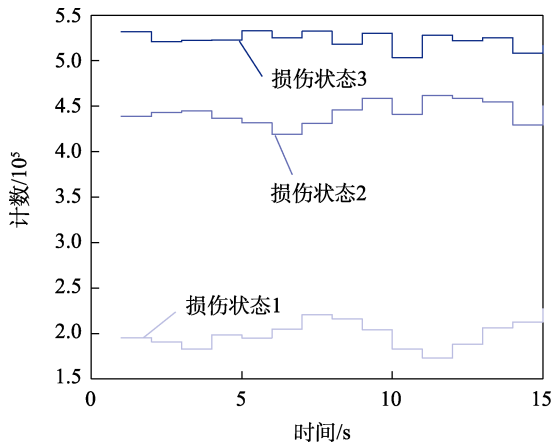


图 16 故障轴承计数统计

Fig.16 Count statistical diagram of faulty bearing

3.2.2 分布图分析

对 3 类不同损伤程度的航空轴承进行分布图分析,如图 17 所示。航空轴承剥落损伤的程度增加时,声发射信号的幅值明显增加,损伤状态 1、2、3 时的幅值分别为 83、87、92 dB。声发射信号幅值的撞击数越来越集中,损伤状态 1、2、3 时,幅值的撞击数分别为 244、332、349,随损伤程度增加而增加。可以看出,声发射信号的幅值与幅值的撞击数对航空轴承滚道损伤程度具有一定的敏感性,通过声发射信号的幅值与幅值的撞击数对航空轴承滚道损伤程度具有一定识别效果。

3.1.4 损伤因子分析

航空轴承损伤因子见表 4。当航空轴承损伤程度增加时,损伤因子明显增加,航空轴承滚道损伤程度由 15 mm×15 mm 扩展至 25 mm×20 mm,损伤因子由 17.574 增长至 50.747,损伤因子随航空轴承损伤程度有明显增加。因此,可以通过无量纲参数损伤因子可以对航空轴承滚道的损伤程度进行识别,判断航空轴承损伤程度。损伤因子与对应航空轴承滚道的剥落损伤如图 18 所示。

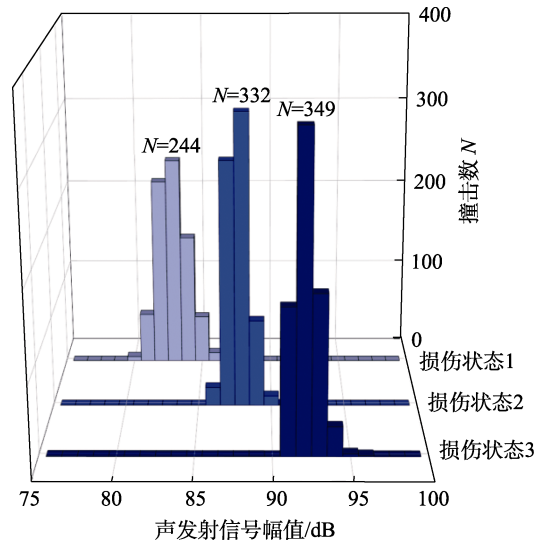


图 17 不同损伤程度滚动轴承撞击数对幅值的分布
Fig.17 Distribution diagram of impact number pair amplitude of rolling bearing with different damage degree

表 4 故障航空轴承损伤因子统计

Tab.4 Statistical table of damage factors of faulty bearings

故障类型	A_{mp}	R_{ms}	ξ
外圈故障 1	82.9	0.212	17.574
外圈故障 2	87.7	0.387	33.940
内圈故障 3	92.1	0.551	50.747

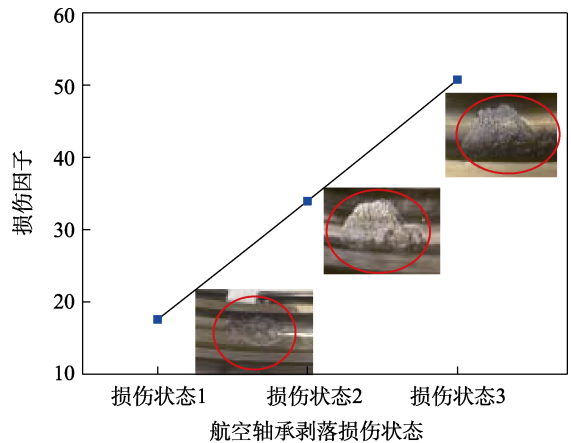


图 18 损伤因子与对应航空轴承滚道的剥落损伤
Fig.18 Damage factor and spalling damage of corresponding aircraft bearing raceway

4 结论

1) 时间到达特征指数 TAFI 可以对轴承进行初步分析,判断轴承状态,减少数据量。TAFI 图像呈现规则条状,初步判断滚动轴承为故障状态。航空轴承剥落损伤状态由 15 mm×15 mm 扩展到 25 mm×20 mm 过程中,能量总计增加约 2×10^6 mV/μs,计数总计增加约 350 000,幅值的撞击数由 244 增加至 349。损伤程度增加时,声发射信号的能量、计数、

幅值与幅值的撞击数对航空轴承滚道损伤较为敏感, 能量、计数与撞击数均都有所增加, 复制的撞击数随损伤程度的增加呈现集中趋势。

2) 引入无量纲参数损伤因子来表征不同损伤程度的轴承故障, 损伤程度增加时, 损伤因子明显增加, 航空轴承滚道损伤程度由 15 mm×15 mm 扩展至 25 mm×20 mm, 损伤因子由 17.574 增长至 50.747。因此, 可用损伤因子来表征航空轴承滚道损伤程度, 弥补了特征参数故障损伤程度识别的不足, 实现了航空轴承滚道剥落损伤程度的识别。损伤程度增加时, 损伤因子明显增加, 可用损伤因子来表征航空轴承滚道损伤程度, 弥补了特征参数故障损伤程度识别的不足, 实现了航空轴承滚道剥落损伤程度的识别。

3) 航空轴承故障模拟试验台由电主轴驱动, 轴承润滑方式由试验润滑系统单独提供, 径向载荷与轴向载荷直接施加在轴承外圈, 运行平稳可靠, 可以实现多种航空轴承故障复现。

参考文献:

- [1] 向苹, 胡宸, 郑金华, 等. 高载荷下的航空发动机滚动轴承损伤原因[J]. 理化检验-物理分册, 2023, 59(4): 38-42.
XIANG P, HU C, ZHENG J H, et al. Causes of Aero-Engine Rolling Bearing Damage under High Load[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A (Physical Testing)), 2023, 59(4): 38-42.
- [2] 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.
SU W S, WANG F T, ZHANG Z X, 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.
- [3] 张贤达. 现代信号处理技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 217-218.
ZHANG X D. Modern Signal Processing Technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 217-218.
- [4] 刘朋, 王黎钦, 张传伟, 等. 航空发动机主轴轴承状态监测研究现状与发展趋势[J]. 航空动力学报, 2022, 37(2): 330-343.
LIU P, WANG L Q, ZHANG C W, et al. Research Status and Development Trend of Condition Monitoring on Main-Shaft Bearings Used in Aircraft Engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(2): 330-343.
- [5] 黄涛, 张辉. AE 技术对滚动轴承故障诊断的研究[J]. 石油化工高等学校学报, 1996, 9(1): 49-52.
HUANG T, ZHANG H. A Study on Acoustic Emission on Rolling Element Bearing Fault Diagnosis[J]. Journal of Petrochemical Universities, 1996, 9(1): 49-52.
- [6] 理华, 徐春广, 肖定国, 等. 滚动轴承声发射检测技术[J]. 轴承, 2002(7): 24-26.
LI H, XU C G, XIAO D G, et al. Sound Emission Check Technique for Rolling Bearing[J]. Bearing, 2002(7): 24-26.
- [7] 理华, 徐春广, 肖定国, 等. 小波包原理在滚动轴承声发射检测技术中的应用[J]. 机械, 2002, 29(4): 11-12.
LI H, XU C G, XIAO D G, et al. Application of Wavelet Packet Decomposition on Diagnosing Rolling Bearing Fault by AE Method[J]. Machinery, 2002, 29(4): 11-12.
- [8] 李凤英, 沈玉娣, 熊军. 滚动轴承故障的声发射检测技术[J]. 无损检测, 2005, 27(11): 583-586.
LI F Y, SHEN Y D, XIONG J. Acoustic Emission Technique for Fault Diagnosis of Rolling Bearing[J]. Nondestructive Testing Technology, 2005, 27(11): 583-586.
- [9] 栾孝驰, 沙云东, 李壮, 等. 基于声发射多参数融合的滚动轴承典型故障损伤程度识别方法[J]. 航空动力学报, 2024, 39(8): 20220512.
LUAN X C, SHA Y D, LI Z, et al. Damage Extent Identification Method of Typical Rolling Bearing Faults Based on Acoustic Emission Multi-Parameter Fusion[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(8): 20220512.
- [10] NASHED M S, RENNO J, MOHAMED M S, et al. Gas Turbine Failure Classification Using Acoustic Emissions with Wavelet Analysis and Deep Learning[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 232: 120684.
- [11] MOTAHARI-NEZHAD M, MOHAMMAD JAFARI S. Experimental and Data Driven Measurement of Engine Dynamometer Bearing Lifespan Using Acoustic Emission[J]. Applied Acoustics, 2023, 210: 109460.
- [12] MEY O, SCHNEIDER A, ENGE-ROSENBLATT O, et al. Condition Monitoring of Drive Trains by Data Fusion of Acoustic Emission and Vibration Sensors[J]. Processes, 2021, 9(7): 1108.
- [13] 张颖, 苏宪章, 刘占生. 基于周期性声发射撞击计数的滚动轴承故障诊断[J]. 轴承, 2011(6): 38-41.
ZHANG Y, SU X Z, LIU Z S. Fault Diagnosis of Rolling Bearings Based on Cyclical Impact Count of Acoustic Emission[J]. Bearing, 2011(6): 38-41.
- [14] ELASHA F, GREAVES M, MBA D. Planetary Bearing Defect Detection in a Commercial Helicopter Main Gearbox with Vibration and Acoustic Emission[J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17(5): 1192-1212.
- [15] IBARRA-ZARATE D, TAMAYO-PAZOS O, VALLEJO-GUEVARA A. Bearing Fault Diagnosis in Rotating Machinery Based on Cepstrum Pre-Whitening of Vibration and Acoustic Emission[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(9): 4155-4168.
- [16] 沙云东, 陈兴武, 栾孝驰, 等. 基于小波包分解-峭度值指标-希尔伯特包络解调融合方法处理声发射信号的滚动轴承故障诊断[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21): 9315-9323.
SHA Y D, CHEN X W, LUAN X C, et al. Fault Diagnosis of Rolling Bearing Based on Acoustic Emission Signal Analysis by WPD-KI-HED Combination Method[J]. Sci-

- ence Technology and Engineering, 2023, 23(21): 9315-9323.
- [17] 张强. 基于振动和声发射信号参数的滚动轴承故障试验研究[J]. 滨州学院学报, 2019, 35(2): 5-9.
ZHANG Q. Experimental Study of Rolling Bearing Defects Basted on Parameters of Vibration and Acoustic Emission[J]. Journal of Binzhou University, 2019, 35(2): 5-9.
- [18] 袁俊, 沈功田, 吴占稳, 等. 轴承故障诊断中的声发射检测技术[J]. 无损检测, 2011, 33(4): 5-11.
YUAN J, SHEN G T, WU Z W, et al. Acoustic Emission Testing Technology in Diagnosis of Bearing Failure[J]. Nondestructive Testing Technologing, 2011, 33(4): 5-11.
- [19] 于洋, 李东彪, 杨平. 基于参数分析的滚动轴承故障声发射特征提取[J]. 无损检测, 2018, 40(1): 6-10.
YU Y, LI D B, YANG P. Feature Extraction of Acoustic Emission of Rolling Bearing Fault Based on Parameter Analysis[J]. Nondestructive Testing Technologing, 2018, 40(1): 6-10.
- [20] 刘凯利. 基于参数分析法的车轴裂纹声发射特征提取研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
LIU K L. Study on Acoustic Emission Feature Extraction of Axle Cracks Based on Parameter Analysis Method[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017.
- [21] 徐世明. 基于 HMM-SVM 的轴承声发射信号故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
XU S M. Research on Bearing Acoustic Emission Signal Fault Diagnosis Method Based on HMM-SVM[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [22] ELFORJANI M, MBA D. Accelerated Natural Fault Diagnosis in Slow Speed Bearings with Acoustic Emission[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(1): 112-127.
- [23] BECK P, LARK R J, HOLFORD K M. Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission in Concrete Specimens Failed in Four-Point Bending[J]. Key Engineering Materials, 2003, 245/246: 443-450.
- [24] LAKTYUSHIN A N, SMILOVENKO O O, LAKTYUSHINA T V. Dynamics of a Rotor in Film Lubrication Bearings[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2003, 76(5): 1131-1138.
- [25] 张志强, 李国禄, 王海斗, 等. 基于声发射技术的接触疲劳失效检测应用与研究[J]. 无损检测, 2012, 34(1): 66-72.
ZHANG Z Q, LI G L, WANG H D, et al. Application and Research of Contact Fatigue Failure Detection Based on Acoustic Emission Technique[J]. Nondestructive Testing Technologing, 2012, 34(1): 66-72.
- [26] 佟鑫宇, 沙云东, 栾孝驰, 等. 基于声发射参数综合分析的滚动轴承典型故障识别方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2023, 36(6): 35-41.
TONG X Y, SHA Y D, LUAN X C, et al. Identification of Typical Rolling Bearing Faults Based on Acoustic Emission Parameters[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2023, 36(6): 35-41.