

基于声发射的航空自润滑轴承磨损状态实时评估

李珊山¹, 李维², 靳岩², 陈先民¹

(1.中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065;
2.南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:航空自润滑轴承衬垫磨损导致内外圈间隙增大,引发操纵机构精度劣化,从而严重影响飞行安全。声发射状态监测具有高灵敏度、早期预警和抗干扰强等优势,可有效弥补传统检测方法难以实时反映轴承运行状态的不足。设计了自润滑轴承多轴加载的磨损试验装置及声发射传感器嵌入的分体式轴承底座,确保了声发射信号采集的保真度。研究了自润滑轴承声发射信号在时域和频域的演变规律,揭示了声发射信号的双主频特性及其能量动态演化机制,提出了基于声发射时频特征与多准则特征筛选策略的轴承磨损指数构建方法,基于磨损指数曲线实现了自润滑轴承磨损状态的实时评估。发现轴承垫层 PTFE 转移膜的动态平衡影响了声发射频率成分的能量分布;试验轴承磨合阶段与稳定磨损阶段的临界过渡区间为 9 747~10 773 转;判定试验轴承最终处于稳定磨损阶段。基于扭矩数据验证了所提磨损指数状态预测方法的准确性,进一步通过扫描电镜和能谱分析表征轴承磨损微观特征,根据最终磨损状态下 PTFE 转移膜的迁移特性及界面化学组分证明磨损阶段判定的一致性。

关 键 词:航空自润滑轴承;声发射信号;寿命评估试验台;特征演变规律;磨损指数
中图分类号:V227.6; TH133.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2025)06-1132-11

航空自润滑关节轴承作为飞行操纵系统动力传递链的核心运动副元件,其动态服役性能直接决定了系统的传动精度与可靠性。传统润滑关节轴承因油脂易挥发、污染敏感等问题难以满足现代航空装备的免维护需求^[1],而自润滑关节轴承凭借其嵌入固体润滑材料的特性,无需外部供油即可实现低摩擦、耐磨损性能,从而延长使用寿命,减少维护需求^[2]。自润滑关节轴承的磨损性能受到多种因素的影响,如材料的摩擦特性、外部载荷、运动模式及环境条件等^[3-6],其磨损行为直接影响在襟翼系统中的工作寿命,进而影响整个襟翼系统的可靠性和安全性。在长期高应力、宽温域交变^[6]及微动磨损^[7]耦合作用下,自润滑关节轴承的自润滑层易发生转移膜反复形成和剥离引起的疲劳磨损^[8-9]等现象,可能导致摩擦因数突变和运动卡滞等失效模式^[10],严重威胁飞行安全。

目前轴承磨损性能评估技术研究主要集中于滚动轴承领域,其方法体系以振动加速度信号分析为核心^[11-13]。典型代表如西安交通大学雷亚国教授团队构建的 XJTU-SY 滚动轴承加速寿命试验数据集,其中包含 3 种工况下 15 个滚动轴承的全生命周期振动信号,覆盖了丰富的失效类型和详细的记录信息,为预测与健康领域管理领域的研究提供了重要的基础数据支持^[14]。相较而言,滑动轴承尤其是自润滑关节轴承的磨损性能研究尚处于发展阶段。代菁洲等^[15]设计了滑动轴承磨损试验台,提出了一种基于稀疏相关向量迭代指数退化的预测方法,有效实现了轴承磨损状态的智能诊断与寿命预测。此外燕山大学^[16]、河南科技大学^[17]的研究团队也都展开了自润滑关节轴承摩擦磨损试验相关研究。在失效表征参量选择方面,传统方法多将扭矩信号^[6,18]、温度信号^[19]、振动信号等作为关节轴承失效判据,但其准确性有待确认^[20]。

声发射(AE)技术因具备高频检测能力,逐渐成为自润滑轴承磨损监测的新兴手段。声发射技术具

收稿日期:2025-03-25
作者简介:李珊山(1988—),高级工程师
通信作者:李维(1986—),副教授 e-mail:liwei@nuaa.edu.cn

有高灵敏度和快速响应的特点,能够比振动检测技术更早地检测到轴承故障,并且能够识别出振动分析无法发现的细微缺陷^[21]。Revilla 等^[22]提出了一种结合声发射(AE)技术的航空自润滑轴承衬垫新研究,开发了一种用于航空航天结构健康监测(SHM)系统的 AE 信号分析方法,以识别轴承损坏并提高资产管理效率。Elizarov 等^[23]研究表明声发射信号的 RMS 幅度与轴承表面的磨损程度呈正比,且高频声发射信号的增加可能表明轴承表面缺陷扩大。此外,声发射信号还可以用于识别轴承的早期磨损和润滑状态变化,从而实现故障预警^[24]。声发射技术凭借其高频检测能力和动态监测特性,已经成为自润滑轴承磨损监测的重要手段,但仍需克服信号处理和机理研究方面的挑战^[25]。同时,声发射信号的准确性也会受到安装位置、噪声干扰等因素的影响^[26]。

自润滑关节轴承磨损性能还可以通过电子显微镜(EM)技术进行检测。邱明等^[27]利用 SEM 和 EDS 对经过摩擦磨损试验后的自润滑关节轴承的自润滑层,进行了表面形貌和化学成分的表征和分析。研究发现 PTFE/PPS 短纤维织物衬垫的摩擦学性能优于长纤维织物衬垫,其磨损机理主要为轻微的黏着磨损和磨粒磨损。同时还通过稀土氧化物对 MoS₂ 基复合涂层的改性处理,优化了涂层的摩擦学性能和粘接性能,试验得出了有效抑制 MoS₂ 氧化的最佳稀土氧化物含量,改善了自润滑关节轴承的耐磨性和使用寿命^[28]。

健康指数(HI)是评估结构机构健康状态的重要指标,可用于监测和预测襟翼自润滑轴承的退化趋势以及剩余使用寿命(RUL)。Soualhi 等^[29]使用希尔伯特-黄变换将振动信号分解为内在模态函数(IMFs),并提取与轴承故障相关的频率成分来计算健康指数。Xu 等^[30]基于信号的功率谱密度(PSD)及其移动平均交叉相关性(MAC2PSD)构建健康指数,能够更早地检测出轴承退化。Duong 等^[31]利用离散小波包分解(DWPT)将振动信号分解为多个子带信号,并计算光滑的均方根值(RMS)来评估健康状态。本文基于健康指数的构建思路,通过分析传感器数据特征构建用于表征轴承磨损性能的磨损指数。

目前,自润滑轴承磨损研究主要集中在摩擦特性、外部载荷和环境因素等方面,但对磨损机理、磨损状态监控的研究仍然较为薄弱。现有的研究多依

赖传统方法,缺乏高精度的监测技术,且对于高频信号在磨损预测等领域的应用仍需进一步探索和完善。本文针对航空襟翼自润滑关节轴承在复杂工况作用下的磨损状态实时评估的难题,进行了自润滑关节轴承寿命评估试验并构建襟翼自润滑关节轴承磨损指数,实现了轴承全试验周期磨损状态表征。同时,通过材料表面形貌、摩擦表面成分转移方法,判别试验磨损阶段。通过深入研究自润滑关节轴承在复杂条件下的磨损行为,能有效提高襟翼系统的整体可靠性与性能,为飞行器关键运动部件寿命预测模型构建和视情维护策略优化提供技术支撑。

1 襟翼自润滑轴承试验装置设计

1.1 自润滑轴承结构参数与载荷工况

本文以 MS14101A-12C 型襟翼自润滑向心关节轴承为试验对象开展磨损性能研究。该轴承具有优越的承载能力、高运行精度和长寿命,广泛应用于低速摆动及复合运动工况。自润滑轴承的摩擦学特性取决于内外圈接触界面的自润滑衬垫,利用 PTFE 复合材料衬垫替代传统润滑剂,显著减少摩擦损耗。PTFE 衬垫通过分子转移机制在内圈表面形成润滑膜,在循环载荷作用下自润滑层发生非线性厚度递减,进而加剧磨损并引起衬垫层剥落或粘接失效。自润滑层的渐进性磨损可能引发轴承间隙增大和摩擦副失效,进而影响轴承性能和寿命。自润滑轴承主要结构参数如图 1 所示。

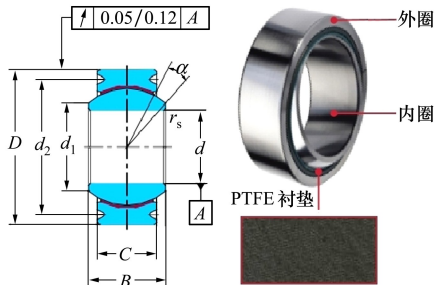


图 1 自润滑轴承结构

本试验轴承内圈采用 AMS5629 不锈钢,具有优异的横向韧性和延展性;外圈则选用 17-4PH(AMS 5643)美标航空航天级沉淀硬化钢。PTFE 织物自润滑涂层材料为复合材料,不同部件相应的材料属性如表 1 所示。

表 1 襟翼自润滑关节轴承的材料参数

部件	材料	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
内圈	不锈钢	193	0.4	7 930
外圈	沉淀硬化钢	200	0.4	7 800
衬垫	复合材料	2.43	0.4	1 270

试验模拟襟翼轴承实际服役的摆动与载荷,建立如图 2 所示的载荷谱。第一阶段设定摆动周期 10 s,摆角幅值 17.5° ,径向载荷在 3 500~5 000 N 区间内按三角波动态加载,轴向载荷同步由 100 N 线性递增至 220 N;第二阶段摆动周期仍为 10 s,摆角提升至 35° ,径向载荷谱扩展至 3 500~8 000 N,轴向载荷幅值同步增至 350 N。该载荷谱设计总时长为 20 s,在全试验周期重复加载,加载 1 次代表 1 个起落。

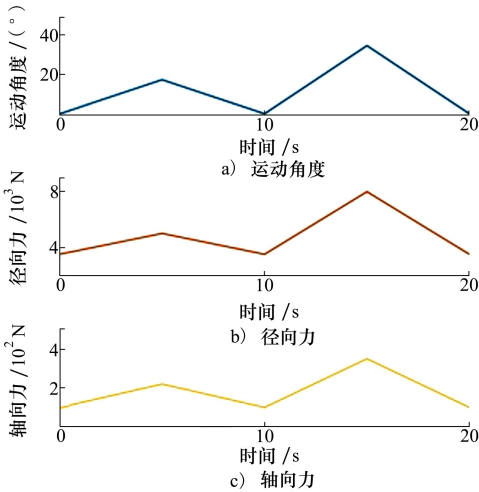


图 2 模拟轴承运行工况的试验载荷

1.2 自润滑轴承磨损试验测试系统

为有效监测自润滑轴承磨损过程特征变化,本文设计了一种面向自润滑关节轴承全生命周期磨损寿命评估的通用化试验装置。通过控制传动伺服电机和加载伺服电缸输出功率,采集轴向和径向载荷信号,自动调整工作参数,实现广泛的工况适应性和高精度测量。此装置操作简便,具有自动化、通用化和在线表征能力。襟翼自润滑关节轴承试验台功能分析框架如图 3 所示。

根据所确定试验机的总体方案,在满足动力学和运动学要求的前提下,对各组成部分进行详细计算、校核和结构优化,经过反复讨论,最终确定试验

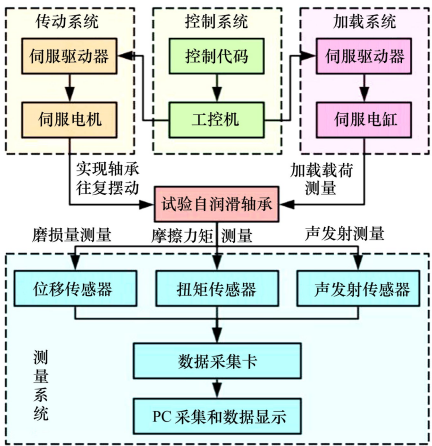


图 3 航空自润滑关节轴承试验台设计框架

机传动系统、加载机构及试验台支撑的具体结构,如图 4 所示。

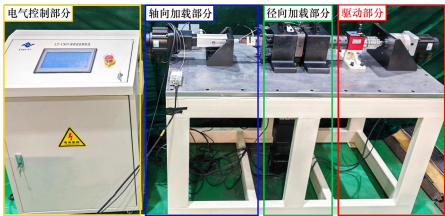


图 4 自润滑关节轴承试验机

为获得丰富有效的试验数据,试验机设计了多源传感器检测网络,包括力传感器、扭矩传感器、温度传感器、声发射传感器和位移传感器。其中,力传感器用于测量轴向和径向加载;扭矩传感器用于测量轴承运行中的驱动力矩;声发射传感器通过机械设计的手段内置于分体式轴承底座,粘贴在被试轴承外表面,用于监测轴承在运行过程中由于摩擦、磨损或裂纹扩展等产生的瞬态弹性波;温度传感器和位移传感器采用探针式测量方式插入分体式轴承底座内,获取轴承外表面的直接数据。

试验测试系统的核心创新点体现在原位检测系统的拓扑优化设计,如图 5 所示。为避免传统外置式检测设备易受机械振动与电磁干扰的影响,本轴承寿命试验机通过在分体式轴承底座关键区域实施精密钻孔,将微型声发射传感器、位移传感器等监测装置近距离嵌入至轴承接触区。这种近场测量构型有效缩短了信号传输路径,降低了背景噪声,显著提升了磨损特征提取灵敏度。

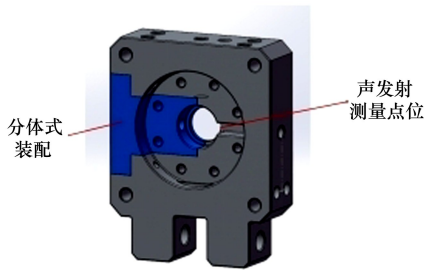


图 5 自润滑关节轴承试验机声发射传感器装配

2 自润滑轴承声发射数据特征解析

2.1 时频域声发射信号解析

声发射信号源于材料内部因塑性变形、裂纹扩展等损伤机制引发的瞬态弹性波,本质是一种能量释放现象,其传播特性与材料损伤演化具有强相关性,适用于航空自润滑轴承磨损状态检测。试验采集了 60 000 转全试验周期的声发射信号连续监测数据,每 360 转(约 2 h)截取 30 转(10 min)典型工况数据,采样频率为 1 MHz。

在幅域分析的基础上,采用快速傅里叶变换(FFT)方法对声发射信号进行频域分析,提取试验自润滑关节轴承在典型试验时期的声发射信号时域图谱和频域图谱,如图 6 所示。

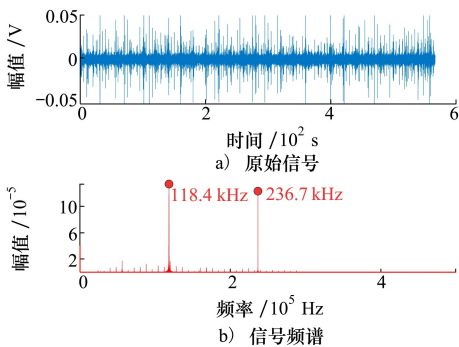


图 6 声发射检测信号时域频域分布

发现自润滑轴承磨损过程的声发射信号呈现显著的多阶段演化规律。时域维度上,信号幅值基本限定于-0.02~0.02 V 区间,其中-0.01~0.01 V 区间最为集中。初始磨合磨损阶段(0~360 转)信号表现出异常周期性(周期 120 s,对应 6 转),结合频域分析可归因于 PTFE 转移膜非稳态形成过程的宽频能量释放。同样除去试验初期,主频幅值稳定在

10^{-4} 量级,但存在动态能量竞争关系。频域特征解析表明,除磨合阶段外,能量谱在 118 439.68 Hz(取整 118 kHz)和 236 617.34 Hz(取整 236 kHz)处呈现双主频特性,二者频率比接近 2 : 1,符合非线性振动系统的倍频响应机制。

2.2 声发射频带能量演化机制探究

声发射信号的频谱分析表明,轴承磨损过程在 118 kHz 和 236 kHz 频点处存在显著能量聚集特征。为细致探究声发射信号在各频率成分中的能量分布及演变,采用多频级频带分解策略:以 25 kHz 带宽将(0~500)kHz 频域等分为 20 个子带,通过 FIR 滤波器组提取各子带时域信号,将计算均方根值(RMS)作为频域能量表征参数。主频带 118 kHz 与 236 kHz 分别呈现阶段性衰减规律:118 kHz 分量在 0~20 000 转区间维持较高能量水平(RMS 均为 $(3\sim4)\times10^{-3}$),其后发生阶跃式衰减,中后期呈现波动上升趋势,仍低于初始值;236 kHz 分量则表现出更短促的高能态维持期,经历快速衰减后呈现波动恢复特性,最终能量水平与初始值基本持平。双主频能量演化差异可能源于 PTFE 转移膜动态平衡机制,摩擦初期高强度摩擦促使转移膜快速形成,中期膜层稳定性破坏引发了能量耗散模式转变。根据多频级频带分解策略,主频带能量分布如图 7 所示。

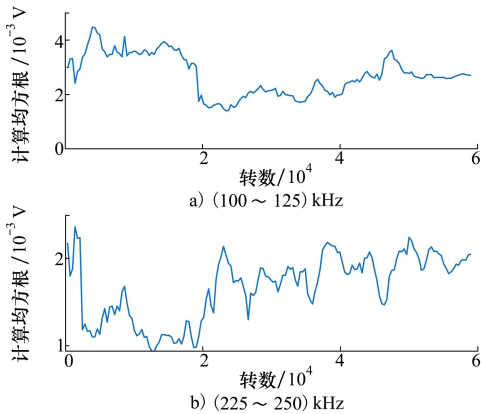


图 7 声发射信号频带能量分解

基于频域能量时频演化分析,为清晰辨识自润滑轴承磨损过程中全频段能量变化梯度特征,绘制三维谱阵图如图 8 所示。该图谱揭示出双主频能量竞争机制:118 kHz 频点在全寿命周期内主导能量分布,其能量幅值平均为 236 kHz 频点的 1.78 倍,二者能量比演变趋势与 118 kHz 频点能量演变趋势相近。特别在 20 000 转临界点处,118 kHz 频带能

量发生显著下降,同时诱发以该频率为中心的边带区域能量增强。该现象可能源于自润滑轴承的磨损阶段由磨合磨损转变为稳定磨损时,PTFE 转移膜形成,集中于基频的摩擦振动能量向相邻频带扩散。

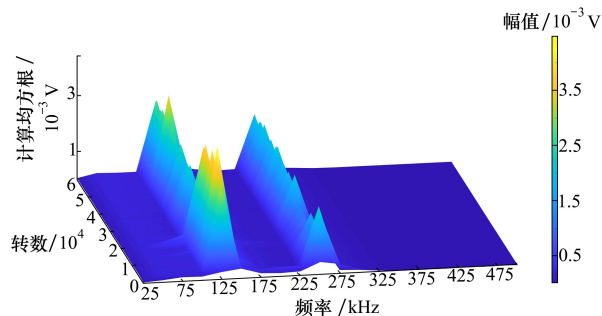


图 8 声发射信号频带能量分布

2.3 声发射主频演化规律细究

观察声发射信号频谱,可以发现在不同的时间段,2 个主频率的幅值存在一定的浮动,为深入探究主频率幅值调制规律,采用二次傅里叶分析方法对一次傅里叶变换结果进行二次解析。二次 FFT (second FFT) 是对第一次 FFT 分析结果的某种特征参数(如幅值)随时间变化的序列进行的第二次傅里叶变换,其主要目的是捕捉信号中幅值调制的低频成分。二次 FFT 能够帮助区分稳态与瞬态特征,当信号的幅值随时间稳定时,二次 FFT 频谱中不会出现显著峰值;而当幅值周期性波动时,二次 FFT 则会显示对应调制频率的峰值。分析流程如下:

1) 原始信号分段:将原始时间信号分割为多段,每段信号长度为 T ,分段间隔为 Δt 。原始信号分段间隔 Δt 决定了二次采样频率 $F_{s_2} = 1/\Delta t$ 。同时,为避免二次 FFT 中出现混叠,二次采样频率需满足大于等于预期幅值调制最高频率 f_{mod} 的 2 倍,即 $2f_{\text{mod}} \leq F_{s_2}$ 。

2) 首次 FFT 分析:对每段信号进行 FFT,提取主频率的幅值。

3) 构建幅值时间序列:将各段信号主频率的幅值按时间顺序排列,形成一个幅值随时间变化的序列。

4) 二次 FFT 分析:对幅值时间序列进行 FFT,分析其周期性(即低频调制频率)。

根据上述二次 FFT 分析流程及实际工况,选取每个文件中第 10~19 转的数据,共计 200 s,按 1 s 的间隔进行分割。计算每段信号在 118 kHz 和

236 kHz 处的傅里叶变换频率峰值二次 FFT 变换结果。典型声发射信号的主频幅值二次 FFT 变换时频域分布如图 9 所示。

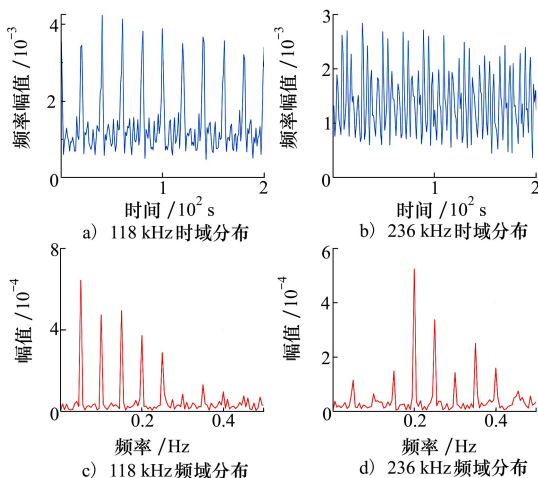


图 9 典型主频幅值二次 FFT 变换时频域分布

基于二次 FFT 的时域解析表明,自润滑轴承声发射信号中 118 kHz 与 236 kHz 主频幅值呈现差异化的动态响应特性。在时域维度上,两主频信号均表现出与 20 s 加载周期严格同步的周期性波动,但其演化规律存在显著分异:118 kHz 分量在磨合期后维持稳定幅值水平 (10^{-3} 量级);236 kHz 的主频率幅值范围与 118 kHz 的主频率相同,但变化趋势较 118 kHz 更复杂多变。频域特征演化进一步揭示了磨损机制的阶段性转变。两主频率幅值的峰值频率基本为 0.05 Hz 的倍频,符合周期性信号频率的特点,但不同时期的峰值幅值有较明显的差异。118 kHz 主频能量峰值出现在 0.05 Hz 处,能量在低频处较为集中。而 236 kHz 主频能量开始集中于中高频处,试验中后期表现出能量转移现象,频率能量呈现从高频向低频转移的趋势。

3 基于磨损指数的轴承退化状态表征

3.1 基于高维时频特征的磨损指数构建方法

本文基于健康指数的构建思路^[32],提出了一种利用高维时、频域特征构建磨损指数的方法。该方法通过多准则特征筛选策略,优选出对轴承磨损性能具有敏感性的特征,并将这些敏感特征的加权平均值作为轴承磨损性能的磨损指数。该磨损指数更关注自润滑轴承在磨损过程中的性能演变,避免了

传统 HI 对于损伤数据的依赖。具体过程如下:

1) 平滑:针对原始特征序列的波动噪声问题,采用线性整流技术(LRT)进行趋势平滑处理。LRT 应用于第 k 个特征指标,即从第 i 次观测中提取的 $I_{Fk}(i)$,平滑后的特征指标表达式为

$$I_{sFk}(i) = \max(I_{Fk}(i), I_{Fk}(i-1) + r_i) \quad (1)$$

式中: $I_{Fk}(i)$ 是从第 i 个观测值中提取的第 k 个特征指标; r_i 表示 $I_{Fk}(i)$ 的退化率,具体为

$$r_i = \frac{I_{Fk}(i+w) - I_{Fk}(i)}{w} \quad (2)$$

2) 归一化:对平滑后的特征 $I_{sFk}(i)$ 在 $[0,1]$ 范围内进行归一化映射,归一化特征表示为 $f_k = \{I_{NFk}(i)\} (i = 1, 2, \dots, S, k = 1, 2, \dots, 24)$, 计算公式如(3)式所示。

$$I_{NFk}(i) = \frac{I_{sFk}(i) - \min(I_{sFk}(i))}{\max(I_{sFk}(i)) - \min(I_{sFk}(i))} \quad (3)$$

式中: $\max(I_{sFk})$ 和 $\min(I_{sFk})$ 分别表示整个轴承寿命第 i 次观测的特征 $I_{sFk}(i)$ 的最大值和最小值。

3) 选择:故障敏感特征采用多准则特征筛选策略进行优选,考虑故障特征的相关性、趋势性和单调性。按此设计了一种特征选择流程,以协调多个特征的不一致性,具体过程如下:

步骤1 基于 Spearman 秩相关系数计算均方根 RMS 与每个特征之间的相关性。Spearman 秩相关系数基于秩次的非参数统计,无需假定数据遵循特定的分布,即可评估 2 个变量之间的单调关系。相关系数的取值范围介于 $-1 \sim 1$ 之间,绝对值越接近 1 代表相关性越高,保留相关系数高于 0.8 的特征。特征 f_k 和 RMS 之间的 Spearman 秩相关系数计算为

$$\text{Cor}(f_k) = \frac{\text{cov}(R_{\text{MS}}, f_k)}{\sqrt{D(R_{\text{MS}})D(f_k)}} \quad (4)$$

式中: $\text{cov}(R_{\text{MS}}, f_k)$ 是 RMS 与 f_k 中评估的特征之间的协方差; $D(\cdot)$ 表示方差。

步骤2 基于 Spearman 秩相关系数计算特征的退化趋势与试验时间之间的趋势性。计算剩余特征随时间变化的趋势性,并按趋势性降序排列,保留在趋势性方面表现较好的特征。计算归一化特征 f_k 与时间 $t = \{t_i\} (i = 1, 2, \dots, S)$ 之间的相关系数,表示为

$$\text{Tre}(f_k, t) = \frac{\text{cov}(r_{f_k}, r_t)}{\sqrt{D(r_{f_k})D(r_t)}} \quad (5)$$

式中: r_{f_k} 和 r_t 分别为特征序列和时间的秩次。如果

HI 与时间有强线性相关,则 $\text{Tre}(\cdot)$ 接近 1,有利于准确预测。

步骤3 基于 Kendall Tau 系数评估特征单调性。Kendall Tau 系数常用于评估 2 个变量之间秩次关系,如果其接近 ± 1 ,则表明 2 个特征之间存在强正/负单调关系;如果其接近 0,则表明 2 个特征之间没有明显的单调关系。计算剩余特征的 Kendall Tau 系数,合适的磨损指数应表现出随单调性增加或减少的趋势,确保退化过程不可逆特性, Kendall Tau 系数计算公式为

$$\tau(f_k) = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i < j} \text{sign}(f_k[j] - f_k[i]) \cdot \text{sign}(t[j] - t[i]) \quad (6)$$

式中: n 为样本数量; sign 为符号函数; $\tau(\cdot)$ 的取值范围是 $0 \sim 1$,较大的值意味着单调性表现更好。

3.2 轴承声发射时频特征的磨损指数计算

根据多准则特征筛选策略,生成磨损指数曲线。首先,基于 Spearman 秩相关系数筛选出 9 个与均方根值 RMS 强相关特征,平均相关系数为 0.96;其次,基于 Spearman 秩相关系数进一步优选 8 个具有显著时间趋势性的特征;再次,采用 Kendall Tau 单调性指标锁定 6 个关键敏感特征,包括谱负熵 SNE、均方根 RMS、谱能量 SE 等;最后,通过多准则特征筛选策略优选保留特征 $I_{sFj}(i) (j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, S)$,并将其平均值用作实际 I_w ,即

$$I_w(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I_{sFj}(i) \quad (7)$$

归一化的关键敏感特征如图 10a)所示,优选出的谱负熵(SNE)、平均绝对值(AM)和谱能量(SE) 3 个关键特征表征不同物理过程;SNE 反映界面非线性动力学行为的复杂度演化,其值升高预示微裂纹分形维数增加;AM 与 RMS 都直接表征能量释放强度,与磨损深度呈强线性相关;SE 则量化频域能量分布集中度,其阶段性下降反映损伤引发的能量扩散效应。全部所提取用于表征声发射信号的时、频域特征如表 2 所示。

如图 10b)所示,磨损指标 I_w 曲线呈现非单调退化特性:在 10 000 转达到峰值后,经历缓降阶段,在 30 000 转后回升至平稳态。这种演化规律表明:①峰值阶段对应 PTFE 转移膜最优覆盖状态,此时界面处于混合润滑机制;②缓降阶段反映转移膜局部剥落引发的微凸体接触增加;③后期 I_w 回升则源于磨损碎片的第三体润滑效应重新建立动态平衡。

全寿命周期内 I_w 曲线未出现传统理论预期的指数骤增阶段,进一步将结合 SEM 形貌分析,证实试验终止时轴承仍处于稳定磨损期。

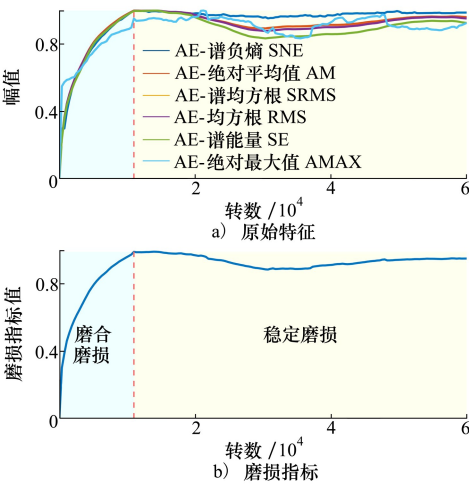


图 10 声发射信号 I_w 曲线

表 2 声发射信号时频域特征

时域	频域
绝对最大值(AMAX)	谱峰值(SP)
绝对最小值(AMIN)	谱均值(SM)
峰-峰值(PP)	谱能量(SE)
绝对平均值(AM)	谱均方根(SRMS)
均方根(RMS)	谱峰度(SK)
峰度(K)	谱负熵(SNE)
负熵(NE)	谱重力频率(SGF)
峰值指标(PF)	平均平方频率(MSF)
脉冲指标(IF)	根均方频率(RMSF)
裕度指标(CF)	方差频率(VF)
形状指标(SF)	标准差频率(SDF)

进一步通过同步分析扭矩信号构建辅助磨损指数($I_{w,torque}$),以验证声发射磨损指数($I_{w,AE}$)的可靠性。同样通过多准则特征筛选策略,构建基于扭矩数据的磨损指数曲线。 $I_{w,torque}$ 曲线优选出的归一化关键敏感特征如图 11a) 所示,等权 $I_{w,torque}$ 曲线如图 11b) 所示。扭矩信号构建的 $I_{w,torque}$ 曲线演化特征与 $I_{w,AE}$ 曲线呈现显著相关性,证实 $I_{w,AE}$ 曲线的准确性。 $I_{w,AE}$ 在 10 800 转处出现阶段性下降的趋势, $I_{w,torque}$ 在 9 720 转处呈现相似退化特征,证实试验轴

承在 9 747~10 773 转区间处于磨合阶段向稳定磨损阶段过渡的临界状态。

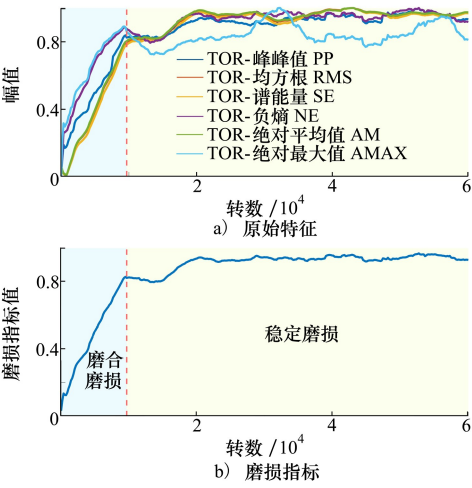


图 11 扭矩信号 I_w 曲线

4 摩擦界面微观表征与成分转移

4.1 表面形貌演化及 PTFE 转移膜动态特性

本文通过线切割技术将自润滑关节轴承外圈分解为 6 个特征区域(样品 1~6),如图 12 所示。结合扫描电镜(SEM)与能谱分析(EDS),从微观角度判断本次试验轴承在试验结束时的磨损状态。

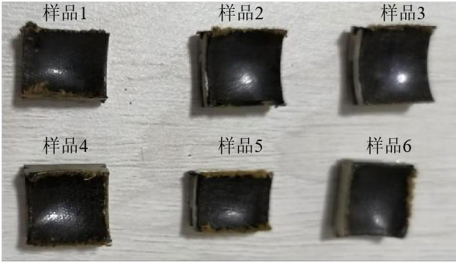


图 12 试验自润滑轴承切割样品

自润滑关节轴承的磨损过程一般会经历 3 个阶段:磨合磨损期、稳定磨损期和急剧磨损期。对 6 组样品外圈衬垫表面进行扫描电镜(SEM)界面形貌表征,如图 13 所示。磨损后的衬垫表面已经形成了 PTFE 转移膜,磨痕范围内的 PTFE 纤维已经大面积的变形并粘连在一起。同时,在自润滑衬垫表面可以看出清晰的磨屑与剥落现象,证明在本次试验中主要发生的是磨粒磨损和黏着磨损。衬垫表面磨损损伤总体并不严重,并且 PTFE 转移膜处于不断生成和剥落的过程。因此,试验自润滑轴承处于稳定

磨损阶段。

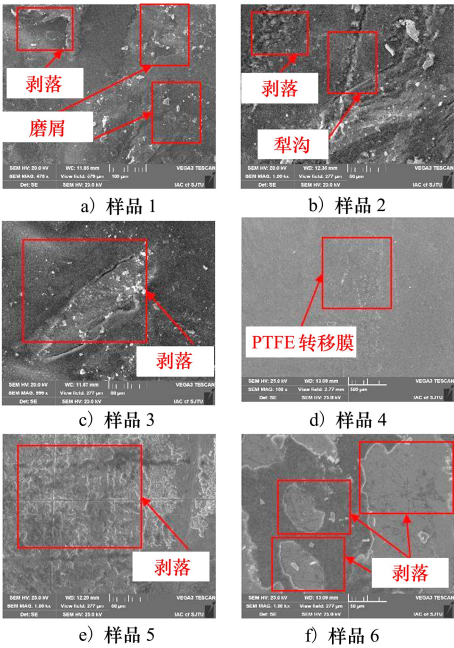


图 13 试验轴承切割样品 SEM 图像

4.2 界面化学组分迁移规律

从 6 个试验样品中选取典型样品 1 和样品 3 进行能谱分析,判断其中衬垫相关元素的种类和含量,以此来定量判断不同部位的磨损程度。其中具体元素含量见表 3。

根据 EDS 能谱分析结果,样品 1 与样品 3 的磨损界面化学组分呈现一定差异,揭示了自润滑轴承在试验过程中,不同位置的磨损形式存在差异。样品 1 磨损表面以 F 元素和 C 元素为主导元素,其原子比 $x_F/x_C=1.08$ 与纯 PTFE 理论值($x_F/x_C=2.0$)存在显著偏离,表明 PTFE 分子链在摩擦过程中发生断键重组,形成含碳富集层。Fe 与 Cr 的低含量特征($w_{Fe}+w_{Cr}<2.1\%$)证实处于黏着磨损初期,内圈金属基体尚未发生大规模物质转移,界面接触应力通过 PTFE 转移膜有效缓冲。相较之下,样品 3 的 F 元素质量分数骤降至 $(2.72\pm0.11)\%$ (降幅 93.8%), O 元素占比升至 $(10.04\pm0.18)\%$, C 元素占比升至 $(65.67\pm0.33)\%$,同时 Fe 和 Cr 质量分数显著升高($w_{Fe}+w_{Cr}=6.75\%$), Cl 元素质量分数从 $(0.21\pm0.03)\%$ 增至 $(0.35\pm0.04)\%$ 。这种元素迁移规律表明:

1) PTFE 转移膜持续损伤并发生了氧化反应使得 O 元素增多,外圈 17-4PH 钢中的 Cr 元素通过磨

屑迁移至界面;

2) C 元素异常富集可能源于 PTFE 热分解产物的沉积;

3) 磨损过程中可能发生化学反应生成含氯腐蚀产物,加速了界面材料的脆性剥落。

表 3 试验样品成分分布

元素	样品 1		样品 3	
	质量分数/%	标准差	质量分数/%	标准差
C	40.35	0.33	65.67	0.33
O	5.93	0.11	10.04	0.18
F	43.52	0.27	2.72	0.11
Al	0.42	0.03	1.24	0.05
Na	0	0	0.42	0.05
Si	3.95	0.05	5.6	0.08
S	2.6	0.04	2.42	0.06
Cl	0.21	0.03	0.35	0.04
K	0.09	0.03	0.14	0.04
Ca	0.26	0.03	0.26	0.04
Cr	0.61	0.04	4.59	0.1
Fe	1.47	0.05	2.16	0.09
Ni	0.37	0.05	3.36	0.11
Zr	0.24	0.19	0	0
Mg	0	0	0.15	0.04
P	0	0	0.46	0.05
Cu	0	0	0.43	0.09

5 结 论

本文通过搭建航空自润滑关节轴承磨损试验台,获得了 MS14101A-12C 型轴承在模拟真实服役工况下的磨损状态检测数据。在此基础上,探究该轴承在磨损过程中的磨损特征演变规律,并构建磨损指数实时表征磨损状态。最后对磨损后轴承的微观形貌和组成成分进行分析,判别轴承最终磨损状态。根据上述研究内容,得出以下结论:

1) 自润滑轴承在磨损过程中,声发射信号能量演化与轴承磨损过程紧密相关。118 kHz 和 236 kHz 主频表现出不同的能量竞争规律,不同磨损阶段的频带能量分布演化呈现频带能量重分布现象。二次傅里叶分析显示主频幅值的调制特性,与试验工况高度应和。

2) 基于多准则特征筛选策略所构建的声发射信号磨损指数,筛选并融合了谱负熵、平均绝对值和谱能量等与 RMS 演化趋势高度一致的关键特征。磨损指数准确地反映出试验轴承在试验结束时仍处

于稳定磨损阶段,证明了声发射信号以及该磨损状态评估方法用于自润滑轴承状态检测的可行性。

3) 基于声发射磨损指数和扭矩磨损指数的转折期,确定磨合磨损期到稳定磨损期的时间节点为 9 747~10 773 转。

4) 根据 SEM 和 EDS 分析,发现 PTFE 转移膜处于不断生成和剥落的状态,且元素迁移规律揭示了不同磨损位置的差异,进一步证实了试验轴承处于稳定磨损期。

参考文献:

[1] 陈彬,徐俊,张剑,等. 某航空电机脂润滑轴承失效分析与改进措施[J]. 润滑与密封, 2022, 47(12): 192-196
CHEN Bin, XU Jun, ZHANG Jian, et al. Failure analysis and improvement measures of grease-lubricated bearing used in aero-motor[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(12): 192-196 (in Chinese)

[2] 杨明明,张招柱,袁军亚,等. 自润滑纤维织物复合材料及其在关节轴承中的应用研究现状与展望[J]. 摩擦学学报, 2024, 44(3): 396-420
YANG Mingming, ZHANG Zhaozhu, YUAN Junya, et al. Research status and prospect of self-lubricating fabric composites and their applications in self-lubricating spherical plain bearings[J]. Tribology, 2024, 44(3): 396-420 (in Chinese)

[3] 李迎春,邱明,苗艳伟. PTFE/芳纶纤维编织衬垫自润滑关节轴承的黏接性能及摩擦学性能[J]. 中国机械工程, 2016, 27(2): 222-229
LI Yingchun, QIU Ming, MIAO Yanwei. Bonding behavior and tribological property for self-lubricating spherical plain bearings with PTFE/Kevlar woven liners[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(2): 222-229 (in Chinese)

[4] 杨育林,房兴明,吴峰. 自润滑关节轴承磨损性能研究[J]. 轴承, 2015(12): 38-41
YANG Yulin, FANG Xingming, WU Feng. Research on wear performance of self-lubricating spherical plain bearings[J]. Bearing, 2015(12): 38-41 (in Chinese)

[5] 卢建军. 自润滑向心关节轴承失效机理及寿命评估方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017: 3-8
LU Jianjun. Study on failure mechanisms and life estimation methods of self-lubricating radial spherical plain bearings[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017: 3-8 (in Chinese)

[6] YU C G, CHEN W H, LIANG B, et al. Study on the tribological properties of a self-lubricating spherical plain bearing at a cryogenic and wide temperature range[J]. Scientia Sinica Technologica, 2020, 50(6): 775-785

[7] 杨景来,邢春生,佟文伟,等. 基于磨粒分析的球轴承及转子组件转动微动磨损特性研究[J/OL]. (2024-12-12)[2025-03-02]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240584>
YANG Jinglai, XING Chunsheng, TONG Wenwei, et al. Research on rotational fretting wear characteristic of ball bearings and rotor assemblies based on wear particles analysis[J/OL]. (2024-12-12)[2025-03-02]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240584> (in Chinese)

[8] 董炳武,邓四二,张文虎. 自润滑关节轴承衬垫磨损机理研究[J]. 智能制造, 2020(8): 50-53
DONG Bingwu, DENG Sier, ZHANG Wenhui. Study on wear mechanism of self-lubricating spherical plain bearing liners[J]. Intelligent Manufacturing, 2020(8): 50-53 (in Chinese)

[9] ZHAO S, ZHANG H, QI X, et al. Wear mechanism of TC4 titanium alloy with TiN coating against self-lubricating fabric[J]. Coatings, 2023, 13(7): 1209

[10] 胡仁松. 刚柔球面接触副关节轴承的磨损失效机理研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015: 2-5
HU Rensong. Study on wear failure mechanism of rigid-flexible spherical plain bearings[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2015: 2-5 (in Chinese)

[11] TANG G, WANG X, HE Y. A novel method of fault diagnosis for rolling bearing based on dual tree complex wavelet packet transform and improved multiscale permutation entropy[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(1): 5432648

[12] YE M, YAN X, JIA M. Rolling bearing fault diagnosis based on VMD-MPE and PSO-SVM[J]. Entropy, 2021, 23(6): 762

[13] HALMOS F, WARTZACK S, BARTZ M. Investigation of failure mechanisms in oil-lubricated rolling bearings under small oscillating movements: experimental results, analysis and comparison with theoretical models[J]. Lubricants, 2024, 12(8): 271

[14] 雷亚国,韩天宇,王彪,等. XJTU-SY 滚动轴承加速寿命试验数据集解读[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 1-6

- LEI Yaguo, HAN Tianyu, WANG Biao, et al. XJTU-SY rolling element bearing accelerated life test datasets: a tutorial[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(16): 1-6 (in Chinese)
- [15] 代菁洲, 田凌, 韩天霖. 滑动轴承磨损智能诊断与寿命预测方法研究[J]. *清华大学学报*, 2024, 64(12): 2092-2104
- DAI Jingzhou, TIAN Ling, HAN Tianlin. Research on intelligent diagnostic and prognostic method for sliding bearing wear[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2024, 64(12): 2092-2104 (in Chinese)
- [16] 包倩倩, 赵楠楠, 杨育林, 等. 多功能摩擦磨损试验机系统设计[J]. *轴承*, 2018(8): 60-65
- BAO Qianqian, ZHAO Nannan, YANG Yulin, et al. System design of multifunctional friction and wear tester[J]. *Bearing*, 2018(8): 60-65 (in Chinese)
- [17] 卢建军, 邱明, 李迎春. 自润滑向心关节轴承加速寿命试验及寿命分析[J]. *机械传动*, 2016, 40(10): 105-109
- LU Jianjun, QIU Ming, LI Yingchun. Accelerated life test and life analysis of self-lubricating radial spherical plain bearing[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2016, 40(10): 105-109 (in Chinese)
- [18] 张志强. 铜嵌石墨型关节轴承摩擦性能研究及动态摩擦系数预测[D]. 郑州: 郑州大学, 2022: 12-13
- ZHANG Zhiqiang. Research on friction performance and prediction of dynamic friction coefficient of copper-graphite embedded spherical plain bearing[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022: 12-13 (in Chinese)
- [19] THUAN N D, DONG T P, NGUYEN H T, et al. Efficient bearing fault diagnosis with neural network search and parameter quantization based on vibration and temperature[J]. *Engineering Research Express*, 2023, 5(2): 25044
- [20] 魏澳博, 马国政, 李国禄, 等. 自润滑关节轴承磨损寿命研究方法现状与展望[J]. *表面技术*, 2023, 52(4): 31-46
- WEI Aobo, MA Guozheng, LI Guolu, et al. Status and prospect of research methods on wear life of self-lubricating spherical plain bearing[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(4): 31-46 (in Chinese)
- [21] DUAN Z, WU T, GUO S, et al. Development and trend of condition monitoring and fault diagnosis of multi-sensors information fusion for rolling bearings: a review[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96: 803-819
- [22] REVILL P, CLARKE A, PULLIN R, et al. Acoustic emission monitoring of wear in aerospace self-lubricating bearing liner materials[J]. *Wear*, 2021, 486: 204102
- [23] ELIZAROV S V, BARAT V A, TERENCEV D A, et al. Acoustic emission monitoring of industrial facilities under static and cyclic loading[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(8): 1228
- [24] ISLAM A I. Monitoring wear in sliding surfaces by using acoustic emission signals[D]. Greensboro: North Carolina Agricultural and Technical State University, 2013
- [25] 蒋亚迪, 卢绪祥, 陈向民, 等. 基于声发射技术的滑动轴承润滑状态诊断研究进展[J]. *汕头大学学报*, 2019, 34(3): 73-80
- JIANG Yadi, LU Xuxiang, CHEN Xiangmin, et al. Progress in the study on lubrication condition diagnosis of journal bearing based on acoustic emission technology[J]. *Journal of Shantou University*, 2019, 34(3): 73-80 (in Chinese)
- [26] KON T, MANO H, IWAI H, et al. Effect of acoustic emission sensor location on the detection of grinding wheel deterioration in cylindrical grinding[J]. *Lubricants*, 2024, 12(3): 100
- [27] 邱明, 周占生, 周大威, 等. 聚四氟乙烯/聚苯硫醚织物自润滑关节轴承的摩擦学性能[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(5): 547-553
- QIU Ming, ZHOU Zhansheng, ZHOU Dawei, et al. Tribological properties of self-lubricating spherical plain bearings with PTFE/PPS fabric liners[J]. *Tribology*, 2018, 38(5): 547-553 (in Chinese)
- [28] 邱明, 张瑞, 李迎春, 等. 稀土氧化物改性 MoS_2 基复合涂层的制备及其摩擦学特性研究[J]. *中国稀土学报*, 2018, 36(2): 221-228
- QIU Ming, ZHANG Rui, LI Yingchun, et al. Preparation and tribological properties of MoS_2 based composite coatings modified by rare earth oxide[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2018, 36(2): 221-228 (in Chinese)
- [29] SOUALHI A, MEDJAH K, ZERHOUNI N. Bearing health monitoring based on hilbert-huang transform, support vector machine, and regression[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2014, 64(1): 52-62
- [30] XU L, PENNACCHI P, CHATTERTON S. A new method for the estimation of bearing health state and remaining useful life based on the moving average cross-correlation of power spectral density[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 139: 106617
- [31] DUONG B P, KHAN S A, SHON D, et al. A reliable health indicator for fault prognosis of bearings[J]. *Sensors*, 2018, 18

(11): 3740

- [32] GUO W, LI X, WAN X. A novel approach to bearing prognostics based on impulse-driven measures, improved morphological filter and practical health indicator construction[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 238: 109451

Real-time evaluation of wear condition in aviation self-lubricating bearings based on acoustic emission

LI Shanshan¹, LI Wei², JIN Yan², CHEN Xianmin¹

- (1.National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China;)
(2.College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Wear of the self-lubricating liner in aviation spherical plain bearings leads to increased clearance between the inner and outer rings, causing precision degradation of the control mechanism, thereby seriously threatening flight safety. Acoustic emission (AE)-based condition monitoring possesses many advantages such as high sensitivity, early-warning capability, and strong anti-interference performance, which can effectively address the limitation of traditional inspection methods in their inability to real-time characterize bearing operational states. First, a wear test setup with multiaxial loading capability for self-lubricating bearings and a split-type bearing base integrated with embedded AE sensors were designed, ensuring the fidelity of AE signal acquisition. Then, the evolutionary laws of AE signals from self-lubricating bearings in both time and frequency domains were studied, revealing the dual dominant frequency characteristics of AE signals and their dynamic energy evolution mechanism. A method for constructing bearing wear index based on acoustic emission time-frequency features and the multi-criteria feature selection strategy was proposed, enabling real-time assessment of the wear condition of self-lubricating bearings via wear index curves. It was found that the dynamic equilibrium of the PTFE transfer film in the bearing liner influences the energy distribution of AE frequency components. The critical transition interval for the test bearings between the running-in phase and stable wear phase was identified as 9 747 to 10 773 revolutions; and it was determined that the test bearings ultimately remained in the stable wear phase. Finally, the accuracy of the proposed wear index-based condition prediction method was validated using torque data. Furthermore, the micro-wear characteristics of the bearings were characterized through scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS). The migration behavior of the PTFE transfer film and the interfacial chemical composition under the final wear state demonstrated the consistency of the wear phase determination.

Keywords: aviation self-lubricating bearing; acoustic emission signal; life assessment test rig; feature evolution law; wear index

引用格式:李珊山, 李维, 靳岩, 等. 基于声发射的航空自润滑轴承磨损状态实时评估[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(6): 1132-1142

LI Shanshan, LI Wei, JIN Yan, et al. Real-time evaluation of wear condition in aviation self-lubricating bearings based on acoustic emission[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(6): 1132-1142 (in Chinese)