文章编号:1000-8055(2024)06-20230666-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20230666

基于磨粒分析的球轴承外圈剥落扩展特性研究

杨景来,卜嘉利,佟文伟,刘东旭,郝延龙,何 山 (中国航发沈阳发动机研究所航空发动机动力传输重点实验室,沈阳110015)

摘 要:为研究航空发动机球轴承外圈的剥落扩展特性,首先利用外圈含预制缺陷的球轴承开展零部 件实验,再选取外圈存在剥落缺陷的球轴承在发动机上开展剥落扩展研究。综合利用滑油光谱、便携式铁 谱、分析式铁谱及能谱分析技术对发动机滑油中的磨粒进行分析。结果表明:球轴承外圈的剥落扩展是渐 进性的;表面存在沿长轴方向划痕的疲劳磨粒数量及比例随外圈的剥落发展而不断增加;磨粒总量及尺寸在 剥落发展期出现明显增长,在快速扩展期急剧增加。结论:外圈的剥落首先出现在距凹坑一定距离的后方位 置,沿滚珠的滚动方向扩展;剥落扩展分为4个阶段:裂纹萌生、裂纹扩展、裂纹贯穿及剥落扩展。

关 键 词: 球轴承; 外圈剥落; 磨粒; 预制缺陷; 裂纹
 中图分类号: V233.4⁺53
 文献标志码: A

Research on peeling propagation characteristics of outer ring of ball bearings based on wear particles analysis

YANG Jinglai, BU Jiali, TONG Wenwei, LIU Dongxu, HAO Yanlong, HE Shan

(Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aero-engine,

Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: To study the peeling propagation characteristics of outer ring of aero-engine ball bearings, two experiments were carried out. The former was component experiment, which employed outer rings with prefabricated defects, the latter was aero-engine experiment, which adopted those with peeling defects. Atomic emission spectroscopy, portable ferrography, analytical ferrography and energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis were conducted to analyze the wear particles in lubricating oil. The results showed that the peeling of the outer ring was progressive. The fatigue wear particles, with scratches along major dimension, continuously increased in quantity and proportion with the peeling. The total amount and size of abrasive particles showed an obvious increase during the peeling development, and also a sharp increase during the rapid propagation. In short, the peeling first appeared at a certain distance behind pits, and then extended along the rolling direction of balls, which can be divided into four stages: cracks initiation, propagation, coalescing, and peeling propagation.

Keywords: ball bearings; peeling of outer ring; wear particles; prefabricated defects; cracks

球轴承具有低温下易于起动,工作适应范围 广,摩擦损失小等特点,经常被用于航空发动机 主轴承,支撑航空发动机转子^[1]。发动机运行时, 球轴承工作条件十分恶劣,易发生失效或损坏。 球轴承的常见失效形式包括:疲劳剥落、磨损、打 滑蹭伤、划伤等^[2],其中疲劳剥落是外圈的主要失 效形式之一,严重影响发动机安全^[3-4]。因此,研 究球轴承外圈剥落扩展特性对监控其剥落进展,

收稿日期: 2023-10-19

基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:杨景来(1989-),男,工程师,硕士,从事航空发动机磨损状态监测研究。

引用格式:杨景来,卜嘉利,佟文伟,等. 基于磨粒分析的球轴承外圈剥落扩展特性研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(6): 20230666. YANG Jinglai, BU Jiali, TONG Wenwei, et al. Research on peeling propagation characteristics of outer ring of ball bearings based on wear particles analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(6): 20230666.

保障发动机运行安全具有重大意义。

目前国内外学者对球轴承外圈剥落机理进行 了深入研究。李青等[4]利用扫描电镜对发生剥落 的球轴承外圈滚道进行分析,指出碳化物偏析及 氧化铝污染颗粒是导致外圈剥落的主要原因; Miller 等^[5] 认为起始于亚表层的疲劳裂纹存在于 应力集中区域,而起始于近表层的疲劳裂纹与接 触表面粗糙度、污染物颗粒有关; John 等⁶⁰研究 了正常工况下,轴承表面材料的表面和次表面由 于高接触应力而产生裂纹的情况: Tunca 等⁷⁷在 研究微裂纹起源理论的基础上,认为微裂纹产生 于材料表面并向内部扩展。轴承外圈的失效形貌 携带着与失效因素有关的证据,而当轴承严重损 坏时,与外圈剥落扩展有关的一些证据则可能丢失^[8]。 为研究球轴承外圈的剥落扩展特性,监控外圈剥 落故障,国内外学者研究了发动机运行时振动⁹⁹、 滑油[10-11] 等参数的变化规律。陈果等[12] 利用数 值积分方式得到故障激励下的整机振动响应,并 进一步分析了外圈剥落的故障特征; Barbini 等^[13] 采用相位编辑法,自动提取滚动轴承的故障特征, Barbini 等^[14] 在航空发动机轴承故障诊断中使用 了该方法。王洪伟等[15]为监控滚动轴承的磨损 状态,研制了新型磨粒分析设备。球轴承外圈剥 落故障具有偶发性的特征,轴承实验或航空发动 机实验或使用时,外圈剥落故障是小概率事件, 因此采用振动或滑油监测手段,不易得出外圈剥 落扩展时相关参数的变化规律。

与正常球轴承外圈相比,带有预制缺陷或已 发生剥落的轴承外圈更容易出现剥落扩展。目 前对含缺陷外圈的研究主要集中在振动监测及 仿真方面。Epps^[16]最早提出外圈滚道存在缺陷 时会出现双脉冲现象;Kogan等^[17]建立了外圈 滚道存在剥落缺陷的非线性多体动力学模型, 研究了局部缺陷的演化规律;Kulkarni等^[18]通过 建立动态模型,预测球轴承在外圈滚道含局部 缺陷时的振动特性,并通过实验验证了其模型。 振动信号一般通过安装在发动机上的传感器获 得,易受飞机和发动机整体振动的影响,同时利 用振动信号难以判断外圈剥落区的尺寸。与振 动监测相比,滑油中携带着外圈剥落所产生的 磨粒,可通过分析磨粒的变化规律研究外圈的 剥落扩展特性。

本文先利用外圈含预制凹坑的球轴承开展零 部件实验,摸索外圈剥落的扩展规律,再选取含 剥落缺陷的外圈在发动机上开展球轴承外圈剥落 扩展研究,以轴承失效为实验完成标准。发动机 实验中,综合采用光谱分析技术^[19]、便携式铁谱 技术、铁谱分析技术^[20]及能谱分析技术定期对滑 油中的磨粒进行分析,研究外圈剥落过程中的磨 粒变化规律,利用扫描电镜观察外圈失效后的微 观形貌,分析外圈剥落机理,研究球轴承外圈的 剥落扩展特性。为工程实践中监控发动机球轴承 外圈剥落故障提供参考。

1 实验设备和方法

1.1 实验设备

轴承实验 0.5h 初次取样, 后续取样间隔为 1h。综合采用滑油光谱分析仪、便携式铁谱分析 仪、分析式铁谱仪及能谱分析仪检测滑油中不同 尺寸范围的磨粒,设备参数为:①Spectroil M 型滑 油光谱仪,主要检测滑油中粒径尺寸小于10 µm 的磨粒元素含量,可同时检测 Fe、Al、Cr、Ag、Cu、 Ni、Ti、V、Mo 等 24 种元素: ②WPA 型便携式铁 谱分析仪,利用高梯度强磁场使铁磁性磨粒沉积 在内置谱片上,通过计算磨粒覆盖面积分析滑油 中铁磁性磨粒浓度(index of particle coverage area, IPCA),结果判断容易,对技术人员经验依赖性弱; ③T2FM 蓟管型分析式铁谱仪, 直观分析 800 μm 以下铁磁性磨粒的数量、大小、形貌、颜色等信 息,并可对较大尺寸的弱磁性和非磁性磨粒进行 分析; ④Sigma 500 扫描电子显微镜及 X-Max^N型 EDS 能谱分析仪, 主要用于分析铁谱片上典型磨 粒的成分,观察外圈剥落区微观形貌。

1.2 实验方法

为验证利用含剥落缺陷外圈研究其剥落扩 展特性的可行性,先利用轴承实验器开展预制 缺陷外圈剥落实验。轴承剥落形貌如图1所示, 外圈剥落区首先出现在预制凹坑的后方,并在 后续运行中持续扩展,最终覆盖预制的凹坑缺



(a) 第一次分解

(b) 最终分解

图 1 轴承剥落形貌 Fig. 1 Bearing peeling morphology

陷,证明球轴承外圈滚道剥落在一定时间内是 渐进性的,因此利用存在剥落缺陷的外圈在发 动机实验中研究球轴承外圈滚道的剥落扩展特 性是可行的。

本实验以某航空发动机为平台,存在剥落缺陷的球轴承外圈滚道为研究对象,分析其剥落过程中的滑油磨粒变化规律,研究外圈滚道的剥落扩展特性。外圈初始剥落形貌如图2所示,外圈材料为Cr4Mo4V。润滑油采用4050高温合成润滑油,供油方式为端面侧喷。



图 2 外圈初始剥落形貌 Fig. 2 Initial peeling morphology of outer ring

2 实验结果

2.1 光谱结果

轴承失效前, 滑油中 Fe、Ti、Al、Cr、Cu及Ag 元素含量变化趋势如图 3 所示。实验初次滑油 (0.5 h)中 Fe 元素含量偏高, 后续变化趋势与其他 元素相似; 其他元素的含量先缓慢增加, 后快速 增加, 在轴承失效的前一次实验中(29.5 h)出现了 急剧增长。轴承失效时, 发动机金属屑报警, 回 油温度突增, 失效后(29.8 h)滑油中主要金属元素 含量剧增, 见表 1。

2.2 便携式铁谱结果

滑油 IPCA 值(*I*_{pca})按式(1)计算,表示便携式 铁谱仪内置谱片上铁磁性磨粒沉积面积与谱片总 面积的比值,是无量纲数,同时为便于判断磨粒 变化趋势,将其比值扩大 10 000 倍。

$$I_{\rm pca} = \frac{C}{wh} \times 10\,000\tag{1}$$

式中 C 为分割后的目标像素数; w 为铁谱图片长 方向的像素数; h 为铁谱图片宽方向的像素数。

便携式铁谱分析结果如图 4 所示,其总体变 化趋势与滑油中 Fe 元素含量变化趋势相似。



图 3 光谱分析结果 Fig. 3 Spectral analysis results

20230666-3

	表1	滑油中主要金属元素质量分数
Table 1	Main m	etal element mass fraction in lubricating oil
	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	

儿系	灰重 万 致 10		
Fe	143.75	-	
Ti	57.49		
Al	8.83		
Cr	10.86		
Cu	4.86		
Ag	10.56		





IPCA 值先逐渐降低; 9.5 h 后出现了首次增长, 但 快速回落; 16.5 h 后再次出现明显增长, 且后续虽 有波动, 但整体仍是快速增长趋势。

2.3 分析式铁谱结果

实验过程接取的所有滑油样品均进行铁谱分 析,文中选取4次具有代表性的分析结果,图5为 放大100倍所观察到的铁谱图像。实验0.5h后





滑油中以小尺寸疲劳磨粒为主,偶见大尺寸疲劳 磨粒^[21];实验10.5h后滑油中磨粒数量开始显著 增加;16.5h后磨粒数量出现急剧增加,同时大尺 寸磨粒数量明显增多;20.5h后,滑油中大尺寸磨 粒数量持续快速增长,直至轴承失效。

为进一步研究外圈剥落过程中磨粒的表面形 貌等特征,在500倍下观察图5中的磨粒,典型磨 粒见图6。结果显示:滑油中磨粒均以片状疲劳 磨粒^[21]为主,并伴有少量的球形颗粒^[22];疲劳磨 粒随主轴承剥落的发展,尺寸逐渐变大,表面变 得粗糙并存在沿磨粒长轴方向的划痕。



(a) 0.5 h

(b) 10.5 h





(c) 16.5 h

(d) 20.5 h

图 6 铁谱分析结果(×500) Fig. 6 Ferrography analysis results (×500)

2.4 能谱结果

0.5h滑油磨粒能谱分析结果见表 2。疲劳磨 粒的主要金属元素成分为 Fe、Cr、Mo、V,判断 为 Cr4Mo4V。

表 2 0.5 h 能谱分析结果 le 2 Fnergy spectrum analysis results at 0.5 h

Energy	specii um	anary 515	results	at v.	51

麻蛤	质量分数/%					
窟型.	Fe	Cr	Ni	Мо	Ti	V
1	余	4.0		4.3		0.9
2	余	3.9		4.2		1.0

10.5h 滑油磨粒能谱分析结果见表 3。片状 疲劳磨粒(包括表面光滑和表面存在划痕的疲劳 磨粒)和球形磨粒的主要金属元素成分为 Fe、Cr、 Mo、V, 判断其为 Cr4Mo4V, 其中少量疲劳磨粒表 面黏附有 Ag 元素。个别疲劳磨粒的主要金属元

	表 3 10.5 h 能谱分析结果		
Table 3	Energy spectrum analysis results at 10.5 h		
	不 早 // W /= -		

际天业台						
窟栏	Fe	Cr	Mo	V	Ag	
1	余	4.1	4.3	0.9		
2	余	4.5	4.0	0.8		
3	余	3.9	4.4	1.1		
4	余	4.4	4.2	0.7	2.5	
5	1.8				余	

素成分为 Ag, 判断为 Ag 涂层材料。16.5h和20.5h所取滑油样品中的磨粒均以片状疲劳为主, 形貌特征与10.5h滑油磨粒相似, 判断其成分相同, 均为 Cr4Mo4V。

2.5 外圈剥落形貌

实验完成后, 球轴承外圈剥落情况如图 7 所 示。图 7(a)为外圈剥落区宏观形貌, 与实验前的 初始剥落区相比, 其剥落面积明显增大; 图 7(b) 为剥落区内疲劳剥落坑的微形貌, 为表面接触疲 劳剥落特征; 图 7(c)为图 7(b)剥落坑边缘在更大 倍数下的观察结果, 在剥落坑边缘存在微小裂纹, 且微小裂纹处存在已经形成的球形颗粒 1 和即将 形成的球形颗粒 2。





图 7 外圈剥落形貌 Fig. 7 Peeling morphology of outer ring

3 分析与讨论

3.1 磨粒变化规律分析

综合滑油光谱、便携式铁谱、分析式铁谱及 能谱结果,本次实验中磨粒的变化分为4个阶段:

1)稳定期:0~9.5h。滑油中各金属元素含量与IPCA值在较低水平波动,磨粒以小尺寸(小

于 20 μm)疲劳磨粒为主,偶见个别大尺寸疲劳磨 粒。稳定期,轴承外圈剥落扩展程度较小或基本 不发生剥落。

2)缓慢增长期:10.5~15.5h。滑油中各金属 元素含量开始出现增加,其中Fe、Ti元素含量尤 为显著,Al、Cr元素次之;IPCA值则呈先降低,后 增加的趋势;疲劳磨粒类型以滚动疲劳磨粒为主, 并伴有大量小尺寸磨粒及少量球形磨粒。10.5h 滑油铁谱分析结果显示,大部分滚动疲劳磨粒具 有光滑的表面和随机曲折的轮廓,部分磨粒表面 还存在沿长轴的划痕,其成分为Cr4Mo4V。后续 实验中磨粒总量虽有波动,但滚动疲劳磨粒类型 均以前述两种为主。缓慢增长期,外圈剥落区缓 慢扩展,同时轴承座(材料为TC4)与外圈的接触 处发生磨损。

3)快速增长期:16.5~20.5h。滑油中各金属 元素含量进一步地增加;IPCA峰值增大,18.5、 19.5h降低与更换滑油滤器有关;疲劳磨粒类型 以表面存在沿长轴方向划痕的滚动疲劳磨粒为主, 并伴有大量小尺寸磨粒及少量球形磨粒。快速增 长期,外圈剥落区扩展加快,轴承座与外圈接触 处的磨损加剧。

4) 急剧增长期: 21.5~29.8 h。滑油中各金属 元素含量与 IPCA 值急剧增长,并维持在较高的 水平;疲劳磨粒均是表面存在沿长轴方向划痕的 滚动疲劳磨粒,同时伴有大量小尺寸磨粒及少量 球形磨粒。急剧增长期,外圈剥落区急剧扩展, 磨损状态极不稳定。

3.2 球轴承外圈剥落机理分析

预制缺陷外圈剥落结果显示,外圈剥落首先 发生在预制凹坑缺陷后方。实验现象分析:外圈 滚道上的预制凹坑有储油能力,当滚珠进入凹坑 区域时,储存在凹坑内的滑油被压缩,形成压力 油膜,对滚珠具有一定支撑作用,故外圈剥落没 有首先出现在预制凹坑区域;凹坑的存在破坏了 滚珠与滚道间润滑油膜的连续性,滚珠进入预制 凹坑后方时需重新建立润滑油膜,期间滚珠与滚 道间摩擦力增大,滚道疲劳寿命降低,继而在凹 坑后方一定距离首先发生疲劳剥落。

文中发动机球轴承内圈旋转,外圈固定,滚珠 在内圈拖动下沿外圈滚道滚动,可知外圈滚道表 面所受摩擦力的方向与滚珠的滚动方向一致。外 圈滚道所受摩擦力与径向力的合力与滚珠的滚动 方向成一夹角,如图 8 所示,对滚道表面裂纹的萌



Fig. 8 Schematic diagram of force on raceway

生具有促进作用。

结合滑油磨粒的变化规律及外圈剥落形貌, 认为发动机球轴承外圈剥落机理^[23]如图9所示, 主要分为4个阶段:①裂纹萌生,凹坑缺陷后方外 圈滚道受到的摩擦力增大,裂纹在与滚道表面呈 一定夹角方向萌生,如图 9(a)。②裂纹扩展,萌 生的裂纹到达一定深度后,平行于滚道表面的正 应力会阻止裂纹向内部扩展,使裂纹到达一定深 度后改变方向,沿平行于滚道表面的方向扩展, 如图 9(b)所示。③裂纹贯穿,平行于滚道表面的 裂纹扩展一定长度后和其他裂纹贯穿,使裂纹与 滚道表面间的材料以片状磨粒的形式剥离,如 图 9(c)。④剥落扩展,外圈滚道发生剥落后表面 粗糙度增加,滚珠与滚道间的摩擦力进一步增大, 摩擦力使滚道上的最大剪应力趋于表面,增加了 裂纹萌生的可能性,同时摩擦力所引起的拉应力 加速裂纹扩展、断裂;同时,滚道表面粗糙度的增 加使滚珠产生少量滑动现象,这与疲劳磨粒表面 存在划痕相吻合,显著降低滚道的接触疲劳磨损 寿命;在上述因素的综合作用下,球轴承外圈滚 道表面的剥落区不断扩展,如图 9(d),直至最终 失效。





3.3 分析式铁谱监控标准讨论

与文献 [16-18] 相比,本文在研究含缺陷球轴 承剥落方面,可利用磨粒的变化规律分析轴承的 剥落过程,为后续工程应用中监控发动机的健康 状态提供参考。本研究表明磨粒的变化规律与球 轴承外圈的剥落扩展存在较强的对应关系,同时 分析式铁谱技术可通过磨粒的形貌、数量、大小 等信息判断外圈的磨损状态。建议发动机使用过 程中,当滑油光谱或便携式铁谱结果明显增长时 进行铁谱分析,并根据铁谱分析结果将发动机球 轴承外圈的磨损状态分别纳入正常、告警、异常 及停用状态。铁谱监控标准可参考图 10(注:100 倍下铁谱图像),并按以下情况采取相应措施:

 1)大尺寸疲劳磨粒和小尺寸磨粒数量首次 出现快速增长时,纳入告警状态,同时缩短取样 间隔;

2)大尺寸疲劳磨粒和小尺寸磨粒数量进一步增加,且部分大尺寸疲劳磨粒表面存在沿长轴方向的划痕时,纳入异常状态,同时对典型磨粒进行能谱分析,初步确认外圈的磨损状态;

3)大尺寸疲劳磨粒和小尺寸磨粒数量急剧 增加,存在沿长轴方向划痕的大尺寸疲劳磨粒数 量明显增多,且尺寸也明显增长时,列入停用状态,同时对典型磨粒进行能谱分析,并结合其他 监控参数全面评估球轴承外圈的磨损状态。



图 10 铁谱监控标准(×100) Fig. 10 Standard practice for analytical ferrography (×100)

3.4 某发动机球轴承外圈剥落实例

某发动机运行过程中,滑油光谱 Fe 元素含量 超标,铁谱分析结果如图 11(a)、图 11(b)所示,存 在大量大尺寸疲劳磨粒和一定数量的球形磨粒, 其中部分疲劳磨粒表面存在沿长轴方向的划痕。 参考图 10,其磨粒总量及大尺寸磨粒数量已超过 "异常"状态。能谱分析显示该发动机滑油中的球 形磨粒及大尺寸疲劳磨粒均为 Cr4Mo4V。分解 检查发现球轴承外圈滚道发生了大面积的浅层剥 落,如图 11(c)所示,且在剥落区边缘存在与滚道



Fig. 11 Example of outing ring peeling

表面呈一定夹角的裂纹,见图 11(d)。实例中的 发动机滑油磨粒形貌特征与本文所述基本一致, 且外圈剥落形貌及裂纹萌生方式与本文所述的球 轴承外圈剥落机理基本一致。

4 结 论

 1)发动机球轴承外圈剥落过程中磨粒的变 化主要分为4个阶段:稳定期、缓慢增长期、快速 增长期及急剧增长期。滚动疲劳磨粒表面特征与 外圈剥落进程紧密相关:剥落初期,表现为表面 光滑的疲劳磨粒;剥落发展期,出现表面存在长 轴方向划痕的疲劳磨粒;剥落快速扩展期,表面 存在划痕的疲劳磨粒数量及尺寸急剧增长。

2)航空发动机球轴承外圈剥落扩展特性:剥落区首先出现在距凹坑缺陷一定距离的后方位置,并沿滚珠的滚动方向扩展,主要分为4个阶段:裂纹萌生、裂纹扩展、裂纹贯穿及剥落扩展。外圈的剥落发展呈渐进性,在剥落快速扩展期,磨损状态极其不稳定。

3)在本文研究的基础上,讨论了监测发动机 球轴承外圈剥落的分析式铁谱监控标准,并根据 铁谱分析结果将发动机球轴承外圈的磨损状态分 别纳入正常、告警、异常及停用。

 4)本文关于球轴承外圈剥落特性的研究结 论在某航空发动机球轴承外圈剥落实例中得到了 进一步的验证。

- [1] 刘振侠, 江平. 航空发动机机械系统设计[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [2] WANG Liqin, LI Yunfeng. Boundary for aviation bearing accelerated life test based on quasi-dynamic analysis[J]. Tribology International, 2017, 116: 414-421.
- [3] 彭朝林、谢小鹏,陈祯. 润滑因素与滚动轴承失效的关系研究[J]. 润滑与密封, 2015, 40(8): 26-30.
 PENG Chaolin, XIE Xiaopeng, CHEN Zhen. Research on relationship between lubrication factors and failure mechanism of rolling bearing[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(8): 26-30. (in Chinese)
- [4] 李青,杨纯辉,佟文伟,等.航空发动机球轴承外圈剥落机 理分析[J].航空发动机, 2020, 46(5): 10-13.
 LI Qing, YANG Chunhui, TONG Wenwei, et al. Spalling mechanism analysis on outer ring of aeroengine ball bearing[J]. Aeroengine, 2020, 46(5): 10-13. (in Chinese)
- [5] MILLER G R, KEER L, CHENG H S. On the mechanics of fatigue crack growth due to contact loading[J]. Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences, 1985, 397: 197-209.
- [6] JOHN G, DARLENE E, SHELTON C. Accurate assessment of partical counts in liquids[J]. Lubrication Engineering, 1995, 51(3): 205-208.
- [7] TUNCA N, LAUFER E E. Wear mechanisms and finite element crack propagation analysis of high speed roller bearings[J]. Wear, 1987, 118(1): 77-97.
- [8] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.滚动轴 承损伤和失效术语、特征及原因:GB/T 24611—2020[S].北 京:中国标准出版社,2020:3-6.
- [9] LEI Yaguo, LIN Jing, HE Zhengjia, et al. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1/2): 108-126.
- [10] FLANAGAN I M, JORDAN J R, WHITTINGTON H W. Weardebris detection and analysis techniques for lubricant-based condition monitoring[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1988, 21(11): 1011-1016.
- [11] WANG Siyuan, YANG Dingxin, HU H. Evaluation for bearing wear states based on online oil multi-parameters monitoring[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1111.1-1111.22.
- [12] 陈果, 贺志远, 尉询楷, 等. 基于整机的中介轴承外圈剥落 故障振动分析[J]. 航空动力学报, 2020, 35(3): 658-672.
 CHEN Guo, HE Zhiyuan, YU Xunkai, et al. Vibration analysis of peeling fault of intermediate bearing outer ring based on whole aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(3): 658-672. (in Chinese)
- [13] BARBINI L, OMPUSUNGGU A P, HILLIS A J, et al. Phase editing as a signal pre-processing step for automated bearing fault detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 91: 407-421.
- [14] BARBINI L, ELTABACH M, HILLIS A J, et al. Amplitude-cyclic frequency decomposition of vibration signals for bearing fault diagnosis based on phase editing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 103: 76-88.
- [15] 王洪伟, 陈果, 陈立波, 等. 一种航空发动机滚动轴承磨损 故障监测技术[J]. 航空动力学报, 2014, 29(9): 2256-2263.
 WANG Hongwei, CHEN Guo, CHEN Libo, et al. A fault monitoring technique for wear of aero-engine rolling bearing[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(9): 2256-2263. (in Chinese)

[16] EPPS I. An investigation into vibrations excited by discrete faults

in rolling element bearings[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1991, 20(4): 901-908.

- [17] KOGAN G, BORTMAN J, KLEIN R. A new model for spallrolling-element interaction[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 87(1): 219-236.
- [18] KULKARNI P G, SAHASRABUDHE A D. A dynamic model of ball bearing for simulating localized defects on outer race using cubic Hermite spline[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(9): 3433-3442.
- [19] XU Guangju, ZHAO Yang, LI Mingdi, et al. Effects of the lubricating oil and diesel mixture combustion on the oxidation and mi-

crophysical properties of particulate matter[J]. Energy Reports, 2020, 6: 308-314.

- [20] BOWEN R, SCOTT D, SEIFERT W, et al. Ferrography[J]. Tribology International, 1976, 9(3): 109-115.
- [21] 安德森 D P. 磨粒图谱(修订版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [22] SCOTT D, MILLS G H. Spherical debris—its occurrence, formation and significance in rolling contact fatigue[J]. Wear, 1973, 24(2): 235-242.
- [23] SUH N P. The delamination theory of wear[J]. Wear, 1973, 25(1): 111-124.

(编辑:张 雪)