

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2003478

滑油磨粒在线传感技术研究进展*

王奕首^{1,3} 吴迪恒¹ 朱 凌¹ 刘 渊² 卿新林^{1,2}

(1. 厦门大学 航空航天学院 厦门 361005; 2. 中国航发湖南动力机械研究所 株洲 412000;
3. 福建省智能传感与仪器协同创新中心 厦门 361005)

摘 要:航空发动机的轴承和齿轮等区域的磨损,是造成发动机故障的重要原因。磨损产生的磨粒蕴含着有关旋转部件磨损状况的重要信息,对滑油中的磨粒进行在线监测是诊断旋转部件潜在故障的一种有效方法。首先分析了滑油磨粒的产生机理与表征研究进展,陈述了磨损特征与磨粒特征的关系及磨粒的典型特征,然后重点介绍了光学法、电磁法、声学法和能量法等发动机滑油磨粒在线监测技术,论述了各种技术方法的监测机理、技术特点、研究进展以及局限性,最后系统讨论了滑油磨粒在线监测的发展趋势和面临的挑战。

关键词:航空发动机;滑油磨粒;在线监测;传感技术

中图分类号: TH71;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460. 4020

Progress on on-line sensing technology for wear debris in lubricant

Wang Yishou^{1,3} Wu Diheng¹ Zhu Ling¹ Liu Yuan² Qing Xinlin^{1,2}

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
2. Hunan Institute of Power Machinery, AVIC, Zhuzhou 412000, China;
3. Collaborative Innovation Center of Smart Sensing and Instruments in Fujian Province, Xiamen 361005, China)

Abstract:The wear of bearings and gears in aero-engine is the main cause of engine failures. The debris generated by wear contain important information about the wear status of rotating parts, on-line sensing of wear debris in lubricant is an effective method to diagnose potential failures of rotating components. Firstly, the mechanism and characterization of wear debris are analyzed, the relationship between wear characteristics and wear particle characteristics and the typical characteristics of debris are described. Secondly, several on-line sensing technologies of wear debris in lubricant are introduced, including optical method, electromagnetic method, acoustic method and energy method. The monitoring mechanism, technical characteristics, research progress and limitations of the on-line sensing methods are investigated. Finally, the development trends and challenges of on-line sensing for lubricating wear debris are systematically discussed.

Keywords:aero-engine; wear debris; on-line monitoring; sensing technology

0 引 言

据统计,飞机因机械原因发生的重大事故中,约 40% 是由发动机故障所致,而其中由磨损引起的失效占 80% 以上^[1]。滑油系统是发动机的重要组成部分之一,滑油流经发动机的轴承和齿轮等磨损故障频发区域,除了润滑和冷却的作用外,还可以作为滚动和滑动面磨损磨粒

的运输介质。因此,滑油磨粒蕴含着反映发动机旋转部件磨损或突然失效的信息,对滑油磨粒进行在线监测,不仅能够掌握滑油系统的健康状态,而且能诊断和评价滑油流经的旋转部件的磨损状况,并进行寿命预测^[2]。

滑油系统通常位于发动机内不易观察的隐藏部位,且滑油管道分布范围广、结构复杂,给在线监测带来极大挑战。滑油中夹着的磨粒通常颗粒极小,难以通过一般监测手段测量到,而磨粒的特征(尺寸、数量、形态和成

分)又能够预警旋转部件损伤的出现与损伤程度,如果这些磨粒在初期没有被及时发现和分析,随着服役时间的增加,会导致磨损程度的加深甚至诱发二次损伤,不仅可能导致突发性破坏,而且会使维护成本增加。

据统计,当发动机旋转部件状态良好时,产生的磨粒大小在 $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$;当部件有异常情况产生时,磨粒尺寸大小将在 $20\sim 100\text{ }\mu\text{m}$;一旦磨粒大小超过 $100\text{ }\mu\text{m}$,此时部件将面临失效的危险。因此当磨粒尺寸大于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,就有必要对滑油磨粒进行监测^[3]。滑油磨粒监测可分为离线检测分析与在线监测两种方式。离线检测需要在发动机停机之后采集滑油样本至实验室中,提取滑油磨粒进行物理与化学方法分析。目前国内外用于滑油检测的离线技术主要包括光谱分析法^[5]和铁谱分析法^[6-7],尽管离线检测响应快、精度高且磨粒特征信息丰富,但是该类检测技术高度依赖于设备与检测人员的经验,无法对磨粒信息形成及时有效的反馈。在线监测或传感一般是将声、光、电、磁等类型传感器集成安装在滑油管路上,在发动机运行过程中实现实时数据采集和全流域监测。本文以航空发动机滑油磨粒监测为背景,综述滑油磨粒在线监测技术的主要研究进展,首先分析了滑油磨粒的产生机理与表征研究进展,然后重点论述了光学法、电学/磁学法、声学法和能量法等可实现发动机滑油磨粒在线监测的实现原理、主要进展及各自特点,最后讨论了滑油在线监测的发展趋势和面临的挑战。

1 磨粒产生机理与表征研究进展

航空发动机滑油中的磨粒主要是来自于发动机传动润滑旋转部件的滚动和滑动接触磨损(图 1)。旋转部件运动副的正常磨损、加速磨损和早期失效都会产生磨粒,且磨损速率、磨粒尺寸一般都不相同,磨粒包含了磨损表面、磨损类型或早期失效的宝贵信息。磨粒大小和浓度与旋转部件磨损状态关系如图 2 所示。国内外学者对发动机旋转部件摩擦运动副磨损机理进行了深入研究,认为磨损同载荷、速度、接触面硬度和粗糙度密切相关。Nikas^[8]从磨粒生成角度,将磨损机理分为磨蚀磨损(abrasive wear)、疲劳磨损(fatigue wear)和胶黏磨损(adhesive wear)。从磨粒形成角度而言,磨损的共同特征是从摩擦表面剥离固体材料,形成磨粒。发动机轴承的主导失效模式是由表面疲劳引起的剥块,主要产生 $100\sim 1\,000\text{ }\mu\text{m}$ 的大颗粒;对于磨蚀磨损和胶黏磨损,主要产生小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的磨粒^[9]。随着高速球和滚子轴承以及齿轮传动在先进发动机上的广泛应用,出现了一些具有高二次损伤的新失效模式。如主轴承疲劳形式主要是滑油中磨粒产生的二次表面损伤;当宏观损伤形成时,磨粒会突然急剧增加,而齿轮箱中磨粒生成是稳定增加。

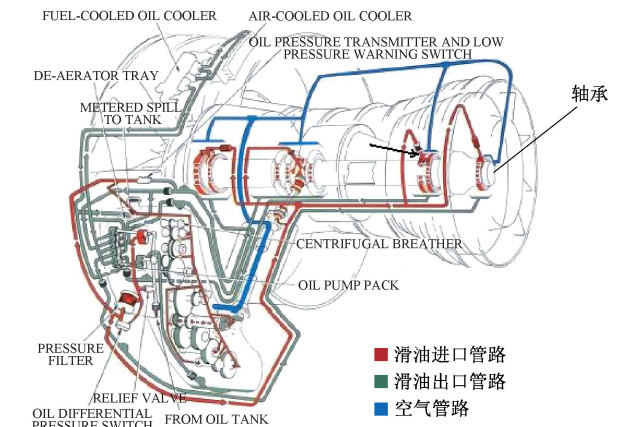


图 1 发动机滑油系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of engine oil system

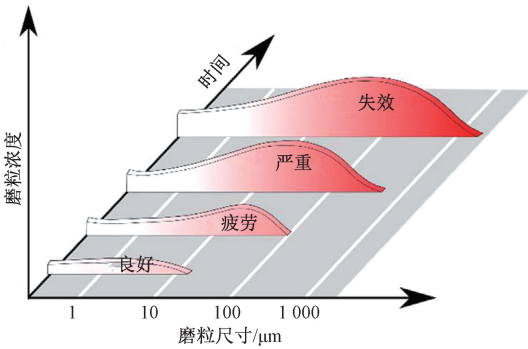


图 2 磨粒大小、浓度与旋转部件磨损状态关系^[4]

Fig. 2 Relation diagram of abrasive particle size, concentration and wear status of rotating parts^[4]

有研究表明,不同磨损行为同磨粒的 4 个特征(如磨粒浓度或数量、磨粒大小、磨粒形态、磨粒成分)密切相关^[10],如表 1 所示。Bowen^[11]和 Anderson^[12]系统化研究了磨粒尺寸和五种磨损类型(图 3)的相关性,如表 2 所示。在此基础上,结合不同磨损事件产生的颗粒数量,可制定用于发动机排故的滑油磨粒分类表。通过对发动机旋转部件磨损类型、磨损机理和磨粒特征进行关联分析,可初步建立三者的近似关系^[13],但由于这三者复杂的关系,再加上不同部件在材料和工艺上的差异,利用磨粒特征分类只能是定性确定磨损类型,如何利用磨粒特征对磨损过程进行定量诊断和评价表征仍然是一个挑战性问题^[14]。

表 1 磨损特征和磨粒特征关系^[10]

Table 1 Relationship between wear characteristics and abrasive grain characteristics^[10]

磨粒特征	磨损特征			
	严重度	速率	类型	位置
磨粒浓度/数量	✓	✓		
磨粒大小	✓	✓	✓	
磨粒形态	✓		✓	✓
磨粒成分				✓

注:✓表示相关性

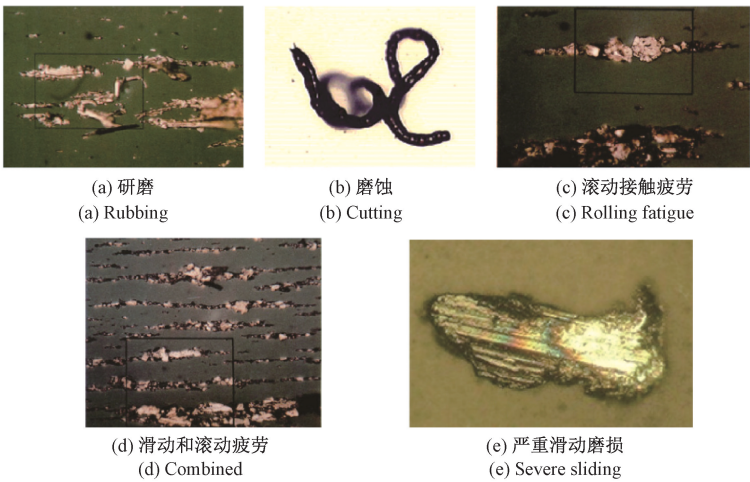


图 3 五种典型磨粒类型^[15]

Fig. 3 Five typical abrasive grain types^[15]

表 2 五种类型磨损产生的磨粒特征

Table 2 Characteristics of abrasive particles produced by five types of wear

磨损类型	磨粒特征			
	等效直径/ μm	厚度/ μm	长细比率	形态
研磨/Rubbing(正常滑动磨损)	0.5~1.5	0.15~1	3 : 1~10 : 1	极小状
磨蚀/Cutting(表面硬度差异)	25~100(长度)	2~5(宽度)	12 : 1~20 : 1	细长型
滚动接触疲劳(轴承)	10~100	1~10	10 : 1	块状/扁平
滑动和滚动疲劳(齿轮)			4 : 1~10 : 1	不规则形
严重滑动磨损	>15		10 : 1	条纹状

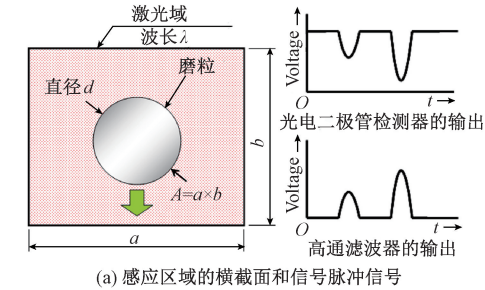
2 滑油磨粒在线监测技术

滑油磨粒在线监测不需要采取样本,而是依赖于集成于发动机滑油系统上的机载传感器,进行实时数据采集,通过特定测量原理对磨粒进行监测。从物理效应角度,这些测量原理可分为 4 大类,光学法、电学/磁学法、声学法和能量法。

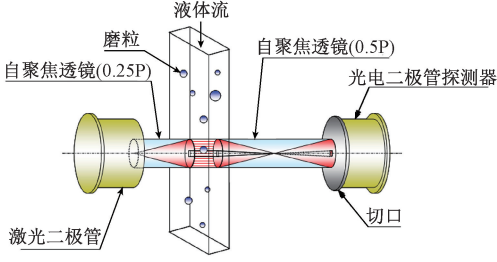
2.1 光学法

光学法主要是根据滑油的透光性受磨粒影响来实现在线监测。其中光学法可进一步分为散射法、透射法和直接成像法,一般要和图形图像分析技术紧密结合,可检磨粒参数类型较多。

散射法主要是基于光的散射和透射原理。Iwai 等^[16]提出了一种利用光散射法来监测滑油磨粒的传感器。如图 4 所示,该传感器包括一个激光二极管、两个自聚焦透镜、一个光敏二极管探测器和滑油管路。当磨粒垂直于传感区域中的激光束通过时,一部分激光束被磨粒所阻挡,然后另一端的光感二极管探测器接收反射光,输出信号的脉冲值可转换为磨粒等效圆的直径,可间接得出磨粒的尺寸大小等信息。散射法可以实时测量滑油中磨粒的大小和数量,精度高,但是这种方法的准确性易



(a) Cross section of sensing area and signal pulse signal



(b) Diagram of the sensor

图 4 滑油磨粒光学法监测原理

Fig. 4 Monitoring principle of lubricating oil abrasive particle optical method

受到滑油品质、气泡等的影响,此外,它无法区分固体磨

粒的材料特性。

滑油的透光性会受到磨粒的影响,利用光透射法可监测滑油中的磨粒。Kwon 等^[17]提出了一种磨粒在线监测传感器,通过测量光通过滑油后的光密度衰减来定性检测磨粒,但不能提供关于磨粒大小、形状和浓度等重要信息。

直接成像是通过对实时获取的图像进行处理来获取关于磨粒的信息。Wu 等^[18]提出了一套利用直接成像法来监测滑油中磨粒尺寸大小和形状的系统,使用电磁仪器来沉积流过滑油管道的磨粒,并结合 CMOS 图像传感器来获取光照下沉积的磨粒的图像,通过图像处理可获得关于磨粒大小和形状的详细信息。Peng 等^[19]开发了一种由滑油管道和视频成像系统组成的微流体装置,可在线自动获取磨损碎片的三维信息。直接成像法可获得关于磨粒的详细信息,但需要昂贵而复杂的图像捕获和处理硬件以及耗时的模式识别算法,同时精密的成像系统对工作条件要求较为苛刻,在发动机内部这种复杂的工况下,难以实现较好的监测效果。

综上所述,光学法在监测单个磨粒的情况下具有较大优势,可适用于颗粒计数,但是当磨粒浓度较高时不能保持精度,且易受气泡和滑油质量的影响,适用于流速较低场合^[20];若要在实际工程上应用,需要对光学装置进一步小型化和集成化,以显著降低系统的重量和体积。

2.2 电学/磁学法

电学/磁学法主要是通过电磁学原理对滑油中的磨粒进行在线监测,可细分为磁感应法、电阻法、电容法和电荷法。

1) 磁感应法

磁感应法探测磨粒的基本原理如下:当铁磁性磨粒(铁磁性磨粒的相对磁导率远高于滑油的磁导率)通过感应区域时,会增强总磁场,从而增加感应线圈的电感;当非铁磁性磨粒通过感应线圈时,会产生与原磁场相反的涡流,从而导致电感减小。根据单个传感器所用线圈的个数可分为三线圈磁感应传感器,双线圈磁感应传感器和单线圈磁感应传感器。

GasTOPS 公司开发的 ODM 磨粒监测器^[21],包含有两个激励线圈,一个感应线圈。该传感器通过监测磨粒穿过感应线圈组件时而引起的对交变磁场的干扰来实现状态监测,根据设备产生的脉冲来检测铁磁性和非铁磁性磨粒,该传感器可以在直径为 0.5 inch 的管道中监测到大于 125 μm 的球形磨粒。Ding 等^[22]在此基础上设计了一种滑油磨粒监测传感系统,并提出了一种最佳确定线圈匝数的方法,该系统可根据脉冲幅度估算磨粒的大小。

Du 等^[23]设计了一种基于感应库尔特计数原理的高通量感应脉冲传感器,如图 5 所示,通过监测双层平面线

圈的电感变化来检测金属磨粒,在直径为 1.2 mm 的管道中可以检测到 50 μm 以上的颗粒。为了进一步提高磨粒监测的灵敏度,Du 等^[24]又提出将 LC 谐振法应用于感应脉冲传感器,在相同直径的管道中可监测到大于 20 μm 的铁磁性磨粒和大于 55 μm 的非铁磁性磨粒。Hong 等^[25-26]提出了一种基于径向磁场的感应式传感器,与轴向感应式传感器相比,该传感器提高了磁场均匀度,从而具有更高的检测灵敏度,能够在直径为 12 mm 的管道监测到大于 81 μm 的铁磁性磨粒。Wu 等^[27]提出了一种双线圈磁感应微流控传感器,该传感器基于互感原理,基础电感较小,不覆盖毫米大小的感应脉冲,灵敏度较高,能够在直径为 230 μm 的管道中监测到 5~10 μm 的铁磨粒。Zhu 等^[28]提出了一种带有铁氧体磁芯的双线圈感应式传感器,使得传感器内的磁通更加密集和均匀,从而有效地提高了传感器灵敏度,该传感器能够在直径为 1 和 7 mm 的流体管道中分别检测到 11 和 50 μm 黑色金属屑屑。

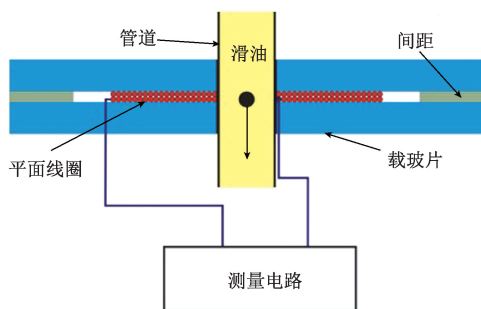


图 5 双层线圈感应传感器原理^[21]

Fig. 5 Schematic diagram of double-layer coil inductive sensor^[21]

Zhang 等^[29]提出了一种基于库尔特计数原理的微流控装置来监测滑油中的磨粒。该传感器主要由微流道及缠绕在微流道上的单线圈所构成。理论上,油中磨粒与埋入线圈之间的距离为 0,可大幅度提高检测灵敏度,该传感器在直径为 0.68 mm 的管道中可以探测到 19 μm 的铁磨粒和 40 μm 铜磨粒。Du 等^[30]设计了一种微流控感应库尔特计数装置,由一个装配在玻璃载玻片上的微型共面线圈、一个进油口、一个出油口和一个单流体通道组成,通过检测平面线圈电感的变化来实现磨粒监测,在直径为 1.2 mm 的管道中可以检测到 50 μm 以上的颗粒。Yin 等^[31]改进了一种基于平面线圈的微流道感应传感器,并研究了线圈位置对传感器磨粒监测的影响。

基于磁感应法的滑油磨粒在线监测传感器能够在监测出磨粒的基础上对铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒进行识别,检测速度快^[32]且监测精度较高,其中 ODM 磨粒传感器目前已在工程中进行应用。传感器线圈的匝数和几何

参数会影响监测精度,在设计制造时要进行参数化分析。该方法在实际工程应用中要做好电磁屏蔽,防止发动机内的电磁干扰对传感器内的磁场产生影响,同时可通过经验模态分解^[33]、滤波^[34]和小波变换^[35]等技术来提高监测结果的信噪比。

2) 电阻法

滑油中存在金属磨粒时,由于电导率的不同,可通过电阻法测量滑油中磨粒的电阻来对实现在线监测^[36],如图6所示,该传感器包括有永磁体和电极棒,当传感器安置于滑油管道时,永磁体会将铁磁性磨粒吸到电极棒表面,通过测量电极棒的电阻可检测滑油中铁磁性磨粒的含量。该电阻传感器结构简单,易于测量,但是电极棒的电阻可能会受到滑油温度的影响,造成测量误差,且该传感器只能监测铁磁性磨粒。Zeng等^[37]在基于库尔特计数原理的微流道感应传感器的基础上,提出检测感应式传感器的等效电阻变化来实现非铁磁性磨粒的监测,在直径为300 μm 的微通道内的检测极限为48 μm ,相比于常规感应法具有更高的检测精度。

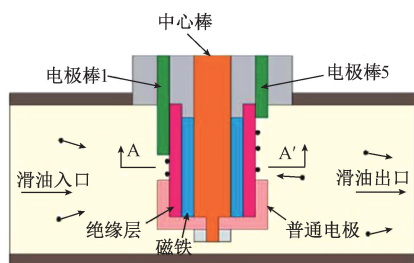


图6 电阻传感器示意图^[37]

Fig.6 Schematic diagram of resistance sensor^[37]

3) 电容法

基于电容传感的滑油磨粒在线监测主要分为电容库尔特计数法^[38]、集成于滑油管道的电容传感法^[39-41]和电容阵列成像法^[42]。当磨粒通过传感器时,由于磨粒与滑油之间介电常数的不同会导致电容的突变,根据脉冲信号可以判断磨粒的大小等信息。

基于库尔特计数原理的电容传感器示意图如图7所示,该传感器能监测到的磨粒大小的范围为10~40 μm ,敏感度高,但效率低,未能监测大颗粒磨粒。为了克服检测吞吐量低的问题,Jagtiani^[43]设计并测试了一种利用并行检测通道实现微粒子高吞吐量监测的新型电容库尔特计数器。

集成于滑油管道的电容传感器可以在不改变滑油流量的情况下实现在线监测。何永勃等^[39]设计了一种弧状极板式电容传感器,并采用交流电桥式电容检测滑油中的磨粒,能够在直径为20 mm的传感器内监测到大于100 μm 的磨粒。王奕首团队^[40,44-45]提出了一种同轴电容传感器,如图8所示,其中内芯和外芯构成传感器的两

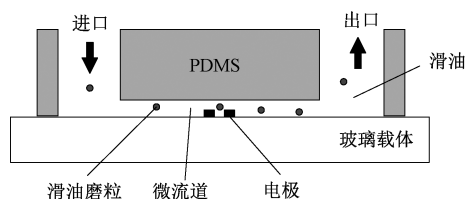
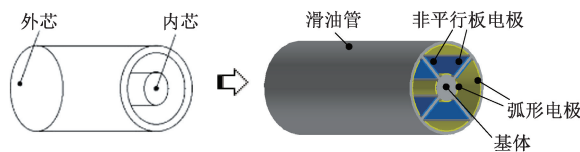


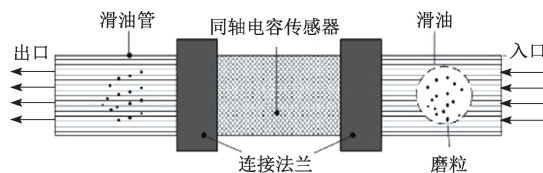
图7 电容库尔特计数器示意图

Fig.7 Capacitance coulter counter schematic diagram

极,通过识别两极间的电容的变化来监测磨粒的存在。集成于滑油管道的电容传感器检测限相比电容库尔特计数器较大,但敏感度较低,主要取决于滑油流道的大小。因此,王奕首等^[46]提出了基于同轴电容传感网络的磨粒探测方法,利用不同电极对将滑油流道再细分若干探测子空间,同时每个探测子空间,利用不同电极对构成差动式电容传感器,从而提高磨粒探测的灵敏度。



(a) 同轴传感器模型
(a) Coaxial sensor model



(b) 同轴电容传感器与滑油管道集成方案
(b) Coaxial capacitance sensor and oil pipeline integration scheme

图8 集成于滑油管道的同轴电容传感器示意图^[43]

Fig.8 Schematic diagram of a coaxial capacitive sensor integrated in a lubricating oil pipeline^[43]

Sun等^[42]提出了一种电容阵列传感器和一种超启发式偏微分方程(PDE)反演方法,结合自适应细胞遗传算法(SA-CGA)和形态学算法,用于检测多种微小金属磨粒。该方法的测量结果可通过电容阵列反演成像直观呈现,在直径为9 mm的传感器内能够对大于200 μm 的磨粒进行成像,而且可以同时检测多个磨粒,但不能检测较小的磨粒。

电容磨粒传感器不仅能够同时监测铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒,而且可以监测滑油中的气泡和水滴,且监测精度较高。但该方法受环境的影响较大,后续的研究可从环境补偿方向进行发展,或者结合消除气泡的工艺措施来提高监测结果的可靠性。

4) 电荷法

用于滑油磨粒检测的电荷法一般也称为静电法,主要是利用静电感应原理,润滑油中的带电磨粒经过探测

金属电极时产生感应电荷,并通过采集电路检测感应电荷变化实现滑油磨粒的在线监测。国外较早开展了滑油磨粒静电监测技术在军机上应用探索研究,左洪福团队^[47-50]在国内率先开展了静电法理论建模和试验验证研究,取得了可喜成果。静电法的优势在于对早期磨损产生的微细颗粒较敏感,而且能探测非金属颗粒,不足在于滑油流速、管道厚度以及气泡等因素对监测灵敏度具有重要影响。

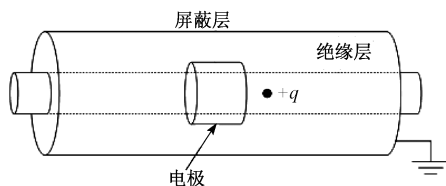


图9 静电传感器物理结构

Fig. 9 Physical structure of electrostatic sensor

综上所述,电磁法是各种监测方法中最简易直接的方法,精度较高,但要注意考虑外部环境的电磁干扰。同时可考虑结合不同类型的传感器进行在线监测,从而进一步提高监测精度和识别精度。

2.3 声学法

当滑油中的磨粒通过超声波场时,由于散射或反射的作用,超声波会减弱。通过测量超声波信号的衰减量可以得到关于磨粒尺寸、形态和材质等信息^[51],主要可分为散射法和反射法。

基于散射法的传感器采用两个超声换能器并相对放置在油管壁上,一个用于发射,另一个用于接收,通过超声波振幅在接收换能器中的衰减来表明磨损碎片的大小和数量^[52]。但是该方法无法区分气泡和磨粒,因为气泡造成的声学衰减与磨粒相似。

基于反射法的超声技术可以也应用于监测滑油磨粒^[53],如图10所示,该传感器包括超声换能器、换能器位置调节单元、入口单元和传感器壳体。通过超声换能器产生超声脉冲,当脉冲波遇到磨粒时会产生脉冲回波,根据回波的幅度可以估计磨粒大小,同时根据回波的特征也可区分磨粒和气泡^[54]。但超声回波会随着滑油温度的变化而变化,增加了磨粒识别的难度,且磨粒尺寸估计标准的建立也存在一定的难度。Li等^[55]开发了一套集成有感应式传感器和超声脉冲传感器的滑油磨粒监测系统,系统采用流槽结构,保证所有磨粒通过声聚焦区,从而可以准确地测量和计数。该系统不仅可以区分铁磁性和非铁磁性金属磨粒,还可以区分金属和介电材料磨粒。

综上所述,基于声学法的传感器响应快,分辨率高,被广泛用于滑油磨粒在线监测,但缺点是易受外界环境

影响且在安装、频率和振动方面存在一些应用限制。

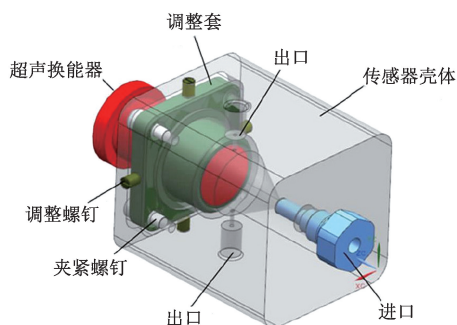


图10 超声传感器结构^[53]

Fig. 10 Ultrasonic sensor structure^[53]

2.4 能量法

能量法主要是利用滑油中磨粒对压力、机械谐振等能量形式的间接影响来监测磨粒浓度和成分。

Brown等^[56]提出了一种基于过滤器压力差的磨粒监测系统,如图11所示,该传感系统包括两个相同的过滤器(其中一个为测试过滤器,另一个为参考过滤器)以及3个压力传感器,分别测量两个过滤器两边的压力差,再进行比较可得到滑油中大颗粒磨粒的浓度。该方法可以消除流速、滑油品质、温度等变化造成的影响,但局限性是只能提供磨粒浓度的定性信息。

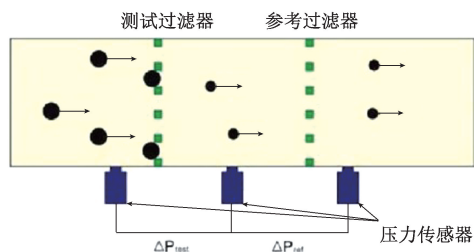


图11 基于过滤器压力差的磨粒监测系统^[36]

Fig. 11 Debris monitoring system based on filter pressure difference^[36]

基于机械谐振的滑油磨粒监测系统是利用测量前后的振动频率变化来实现对磨粒的监测^[57]。该系统包括有由软磁材料制成的悬臂梁,和嵌入悬臂梁的一个电磁线圈。对线圈施加交流电,悬臂梁被磁化并以其共振频率振动,当有磨粒通过时,金属磨粒被悬臂梁吸收,从而引起共振频率的变化。根据频率的变化可推算出吸附在悬臂梁表面的磨粒的质量,但无法得到有关磨粒大小和形状等信息,且振动频率受滑油性能和外界环境的影响较大。

综上所述,基于能量法的滑油磨粒监测技术可以有效地监测滑油中磨粒的浓度等定量化信息,且能够对磨粒进行收集。但不足之处是不能提取关于磨粒大小和形

状等信息。

上述监测技术都可单独用于滑油磨粒在线监测。综合考虑上述典型的磨粒监测方法的监测范围、优势和劣势,进行对比。如表 3 所示。目前,基于光学法的 OLVF 监测仪已用于航空、船舶等领域^[58],后续可根据磨粒图像建立磨损预测模型^[59];磁感应传感器的典型代表是加拿大 GasTOPS 公司的 ODM 传感器和美国 EATON 公司的 QDM 传感器,该类传感器在工程应用上已较为成熟,但是监测精度不高;两层平面线圈式磁感应传感器、单线圈式磁感应传感器、电阻式微流道传感器和微电容式流道传感器都是基于库尔特计数原理的微流道传感器,监测精度高,但由于其检测限低,在工程上应用的可能性不

高;磁吸附式电阻传感器只能监测铁磁性磨粒且精度低,难以在工程中应用;集成于滑油管道的电容传感器结构简单,目前已开始应用于工程实践中,可在此基础上提高监测精度;电容阵列式传感器和光学磨粒形态式都能对磨粒进行直接成像,但对于设备和算法的要求较高,还需进一步进行优化;磨粒静电传感器目前已用于实际工程中,该传感器适用于监测滑油系统的早期磨损阶段;基于超声回波法的磨粒监测传感器能够有效区分固体磨粒和气泡,但由于受环境因素影响较大,目前仅应用于实验室监测;压力式传感器能够在磨粒收集的基础上进行监测,可适用于对精度要求不高的场合;机械谐振式传感器由于其结构复杂性,很难应用于工程实践中。

表 3 典型磨粒监测传感器比较
Table 3 Comparison of typical wear particle monitoring sensors

监测方法分类		监测范围	优势	劣势
光学式	磨粒形态式	5~160 μm	监测磨粒形状与材料	效率低下,系统复杂,受透明度影响
	三线圈式	100~3 360 μm	高效区分铁磁性与非铁磁性磨粒	敏感度低,对团簇状磨粒区分度低
磁感应式	两层平面线圈	20~1 200 μm	区分黑色有色磨粒与单个磨粒	效率较低
	单线圈式	19~680 μm	监测灵敏度高	检测限低,效率低
电阻式	磁吸附式	NA	结构简单,可清理铁磁性磨粒	只能监测铁磁性磨粒
	微流道式	48~300 μm	监测精度高	只能监测非铁磁性磨粒
	微流道式	10~40 μm	高敏感度	效率较低下,无法监测大尺寸磨粒
电容式	集成于管道式	NA	高效,可集成于滑油管道	敏感度较低,感应面积大
	电容阵列式	>200 μm	电容反演成像直接呈现结果	不能监测较小的磨粒
电荷式	静电感应式	NA	对细微颗粒敏感	灵敏度受环境影响较大
超声式	超声磨粒式	170~1 000 μm	可区分固体磨粒与气泡	结构复杂,无法区分金属与非金属
	超声与感应脉冲结合	50~310 μm	区分金属、非金属固体磨粒与气泡	效率较低,流动结构复杂
能量式	压力式	NA	消除环境的影响	只能定性识别,无法监测单个磨粒
	机械谐振式	NA	可监测磨粒质量	稳定性差

3 滑油磨粒在线监测的发展趋势和挑战

3.1 发展趋势

从滑油监测国内外研究现状看,主要发展趋势可概括为如下 5 点。

1) 对于基于电磁法的全流域磨粒监测,侧重于从结构设计(如微流道、多通道^[60])、电或磁激励源(线圈形状和位置)^[61]设计和优化来改进电场或磁场的探测空间均匀度,从而提高磨粒尺寸监测的灵敏度和磨粒计数的可靠度。

2) 从非浸入式监测向浸入式探测发展,从管路整体式检测到管路内微或多流道的局部监测发展,以实现单个磨粒探测或提高监测灵敏度^[46];多种测量原理和方法的综合应用,利用优势互补的多场耦合传感来提高磨粒形态探测能力^[62]。

3) 从简单的原始信号特征提取向利用图形图像分析技术、统计分析和人工智能技术提取或重构更为精细磨

粒信息方向发展^[54],并建立基于数据和物理模型混合驱动的磨损预测模型^[63],提高监测信号信噪比和磨损部件寿命预测的准确性^[62]。

4) 从滑油磨粒非介入被动式监测向主动介入式监测方向发展,现有大部分监测方法主要是基于滑油磨粒与电场、磁场或电磁场相互作用,即通过调控外部物理场相关参数来实现磨粒监测,未来应考虑通过滑油和磨粒的主动控制来进一步提高磨粒监测的效率和可靠性。

5) 从滑油磨粒监测向滑油磨粒探测和收集分析一体化方向发展,现有滑油磨粒收集仅仅是利用磁堵或滤网获取,无法对实时或周期性分析采集到的磨粒具体信息,未来应考虑采用多物理场综合效应、先进材料、信号处理技术实现磨粒监测和收集分析一体化^[64-65]。

3.2 面临挑战

滑油磨粒在线监测过程涉及的外界影响因素较多,再加上传感器设计和布置的复杂性,要实现滑油磨粒在线全流域的实时监测,并进一步提高滑油磨粒在线监测方法的可靠性和灵敏度,未来需要解决的问题集中在如

下4方面。

1) 如何解决环境因素波动对磨粒监测的影响。滑油管道内润滑油的温度、流速和管道的振动等因素,都可能对传感器的监测结果造成影响,可能产生误报,也可能产生较大环境噪声,降低信噪比。如何发展或构建高可靠性的环境补偿方法或技术,滤除环境因素对监测结果的影响,这将是未来主要解决的问题。

2) 如何解决不同特性的磨粒与气泡识别问题。滑油在高温高流速环境下易产生气泡,据主机所工程师反映,滑油中气泡存在是导致传感器虚报的主要原因,如果将滑油磨粒和气泡进行识别,是急需解决的问题。此外,滑油管道中存在金属磨粒(铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒)、非金属磨粒,这些磨粒材料特性也显著影响监测结果。

3) 如何实现磨粒高分辨与宽尺度识别。目前国内外滑油磨粒监测方法中对磨粒的监测分辨率不高,且尺度识别范围有限。一般而言,要实现磨粒高分辨率识别,就要求磨粒流经通道尽可能地小,这就限制了磨粒宽尺度识别能力。因此,如何解决滑油磨粒高分辨率和宽尺度识别的相互矛盾,需要发展颠覆性的监测原理或创新性的解决策略。

4) 如何将监测结果与发动机损伤状况判断有机结合,实现旋转部件的寿命预测,最终实现视情维护。滑油磨粒监测的最终目的是对发动机机械零部件的磨损状况进行识别判断,提前预示飞机故障,保证飞机飞行时的安全可靠,提高维修效率。因此需要根据传感器的检查结果,判断旋转部件的磨损位置及磨损的严重程度,并结合智能算法或机器学习等给出定性定量的分析结果。

4 结 论

滑油磨粒在线监测具有实时监测反馈的优势,可以为发动机状态监测和故障诊断提供重要信息和技术支持,获得了工业界和学术界的广泛关注,取得了重要进展。本文较为全面综述了基于光学法、电学/磁学法、声学法和能量法的滑油磨粒在线监测研究进展,讨论分析了滑油磨粒实时在线监测的发展趋势和面临的挑战,旨在为今后滑油磨粒监测传感器的技术发展和工程应用提供有价值的信息和研究方向。

参考文献

[1] 孙衍山, 杨昊, 佟海滨, 等. 航空发动机滑油磨粒在线监测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7):1561-1569.
SUN Y S, YANG H, TONG H B, et al. Review of on-line detection for wear particles in lubricating oil of aviation engine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7):1561-1569.

[2] WAKIRU J M, PINTELON L, MUCHIRI P N, et al. A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 118: 108-132.

[3] DU L, ZHU X L, HAN Y, et al. High throughput wear debris detection in lubricants using a resonance frequency division multiplexed sensor[J]. Tribology Letters, 2013, 51(3):453-460.

[4] ZHU X L, ZHONG C, ZHE J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring- A review [J]. Tribology International, 2017, 109: 473-484.

[5] GUAN L, FENG X L, XIONG G, et al. Application of dielectric spectroscopy for engine lubricating oil degradation monitoring [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2011, 168(1):22-29.

[6] MATSUMOTO K, TOKUNAGA T, KAWABATA M. Engine seizure monitoring system using wear debris analysis and particle measurement[R]. SAE Technical Paper, 2016.

[7] LIU T G, LIU S J, YANG Z Y. A method to monitor non-ferrous debris in ferrographic analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2010, 224(2):203-208.

[8] NIKAS G K. A state-of-the-art review on the effects of particulate contamination and related topics in machine-element contacts [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2010, 224(5):453-479.

[9] 杨立, 尉树楷, 刘芳. 航空发动机预测与健康管理的[M]. 国防工业出版社, 2014.
YANG L, WEI X K, LIU F. Aeroengine Prognostics and Health Management [M]. National Defense Industry Press, 2014.

[10] HONG W, CAI W J, WANG S P, et al. Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: A review [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(5):867-882.

[11] BOWEN E R, WESTCOTT V C. Wear particle atlas [R]. Burlington:Foxboro/Trans-Sonics. 1976. N00156-74-C-1682.

[12] ANDERSON D P. Wear particle atlas. revised [R]. FOXBORO ANALYTICAL BURLINGTON MA, 1982.

[13] KUMAR M, MUKHERJEE P S, MISRA N M. Advancement and current status of wear debris analysis for machine condition monitoring: A review [J].

- Industrial Lubrication and Tribology, 2013.
- [14] WU T H, WU H K, DU Y, et al. Progress and trend of sensor technology for on-line oil monitoring[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56 (12): 2914-2926.
- [15] FITCH B. Anatomy of wear debris [J]. Machinery Lubrication, 2013, 10.
- [16] IWAI Y, HONDA T, MIYAJIMA T, et al. Quantitative estimation of wear amounts by real time measurement of wear debris in lubricating oil [J]. Tribology International, 2010, 43(1-2):388-394.
- [17] KWON O K, KONG H S, HAN H G, et al. On-line measurement of contaminant level in lubricating oil; U. S. Patent 6,151,108[P]. 2000-11-21.
- [18] WU T H, WANG J Q, WU J Y, et al. Wear characterization by an on-line ferrograph image [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2011, 225(1):23-34.
- [19] PENG Y P, WU T H, WANG S, et al. A microfluidic device for three-dimensional wear debris imaging in online condition monitoring [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(8):965-974.
- [20] WU J, WU T, WANG W, et al. Improvement on on-line ferrograph image identification [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1):1-6.
- [21] DUPUIS R. Application of oil debris monitoring for wind turbine gearbox prognostics and health management [C]. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2010: 10-16.
- [22] DING Y, WANG Y. A design of oil debris monitoring and sensing system [C]. 2015 IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SiPS). Hangzhou: IEEE, 2015: 1-6.
- [23] DU L, ZHE J. A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring [J]. Tribology International, 2011, 44(2):175-179.
- [24] DU L, ZHU X L, HAN Y, et al. Improving sensitivity of an inductive pulse sensor for detection of metallic wear debris in lubricants using parallel LC resonance method [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(7):075106.
- [25] HONG W, WANG S P, TOMOVIC M M, et al. Radial inductive debris detection sensor and performance analysis [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(12):125103.
- [26] HONG W, WANG S P, TOMOVIC M M, et al. A new debris sensor based on dual excitation sources for online debris monitoring [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(9):095101.
- [27] WU Y, ZHANG H P, ZENG L, et al. Determination of metal particles in oil using a microfluidic chip-based inductive sensor [J]. Instrumentation Science & Technology, 2016, 44(3):259-269.
- [28] ZHU X L, ZHONG C, ZHE J. A high sensitivity wear debris sensor using ferrite cores for online oil condition monitoring [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(7):075102.
- [29] ZHANG H, HUANG W, JIN J, et al. Debris detection in hydraulic oil using a microfluidic inductive pulse device [C]. ASME 2012 Third International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer. Atlanta: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2012: 51-57.
- [30] DU L, ZHE J, CARLETTA J, et al. Real-time monitoring of wear debris in lubrication oil using a microfluidic inductive Coulter counting device [J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2010, 9(6):1241-1245.
- [31] YIN Y, LIU Z J, ZHENG J, et al. The Effects of Position on the Wear Debris Detection with Planar Inductor [J]. Sensors, 2019, 19(22):4961.
- [32] ZHANG X, ZHANG H, SUN Y. et al. Research on the output characteristics of microfluidic inductive sensor [J]. Journal of Nanomaterials, 2014(15):1-7.
- [33] LI C, LIANG M. Extraction of oil debris signature using integral enhanced empirical mode decomposition and correlated reconstruction [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(8):085701.
- [34] HONG W, WANG S P, LIU H K, et al. A hybrid method based on Band Pass Filter and Correlation Algorithm to improve debris sensor capacity [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82: 1-12.
- [35] LI C, LIANG M. Enhancement of oil debris sensor capability by reliable debris signature extraction via wavelet domain target and interference signal tracking [J]. Measurement, 2013, 46(4):1442-1453.
- [36] DU L, ZHE J. On-line wear debris detection in lubricating oil for condition based health monitoring of rotary machinery [J]. Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical Engineering), 2011, 4(1):1-9.
- [37] ZENG L, ZHANG H P, WANG Q, et al. Monitoring of

- non-ferrous wear debris in hydraulic oil by detecting the equivalent resistance of inductive sensors [J]. *Micromachines*, 2018, 9(3):117.
- [38] MURALI S, XIA X G, JAGTIANI A V, et al. Capacitive Coulter counting: detection of metal wear particles in lubricant using a microfluidic device [J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(3):037001.
- [39] 何永勃, 徐斌. 基于电容传感器的飞机滑油磨粒检测系统设计[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(10):112-115.
- HE Y B, XU B. Design of aircraft lubricating oil abrasive particles detection system based on capacitive sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(10):112-115.
- [40] HAN Z B, WANG Y S, QING X L. Characteristics study of in-situ capacitive sensor for monitoring lubrication oil debris[J]. *Sensors*, 17(12):2851.
- [41] ISLAM T, YOUSUF M, NAUMAN M. A highly precise cross-capacitive sensor for metal debris detection in insulating oil [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(2):025005.
- [42] SUN Y S, JIA L C, ZENG Z M. Hyper-heuristic capacitance array method for multi-metal wear debris detection[J]. *Sensors*, 2019, 19(3):515.
- [43] JAGTIANI A V. Novel multiplexed coulter counters for high throughput parallel analysis of microparticles [D]. University of Akron, 2011.
- [44] WANG Y S, HAN Z B, GAO T, et al. In-situ capacitive sensor for monitoring debris of lubricant oil [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2018.
- [45] 韩志斌, 王奕首, 孙虎, 等. 用于滑油中碎屑在线监测的电容传感器设计与实现[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(6):102-107, 113.
- HAN ZH B, WANG Y S, SUN H, et al. Design and implement of in-situ capacitive sensor for monitoring debris in the lubricant Oil[J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(6):102-107, 113.
- [46] 王奕首, 吴迪恒, 卿新林, 等. 同轴电容传感器及发动机滑油磨粒在线监测与诊断方法: 201910282282. 1[P]. 2019. 5. 15
- WANG Y SH, WU D H, QING X L, et al. Coaxial capacitive sensor and a method for online monitoring and diagnosis of engine oil debris: 201910282282. 1[P]. 2019. 5. 15
- [47] CHEN Z X, ZUO H F, ZHAN Z J, et al. Method for oil-line debris electrostatic monitoring of bearing steel sliding friction pairs [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(5):1096-1104.
- [48] 冒慧杰, 左洪福, 殷逸冰, 等. 静电传感器对滑油系统磨粒电量测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(1):40-47.
- MAO H J, ZUO H F, YIN Y B, et al. Study on measurement method of Debris' change using the electrostatic sensor in the oil system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(1):40-47.
- [49] MAO H J, ZUO H F, WANG H. Electrostatic sensor application for on-line monitoring of wind turbine gearboxes[J]. *Sensors*, 2018, 18(10):3574.
- [50] 陈志雄, 王继文, 左洪福. 滑油系统静电监测模型研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(8):147-153.
- CHEN ZH X, WANG J W, ZUO H F. Research on electrostatic monitoring model of oil system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(8):147-153.
- [51] WOCKEL S, HEMPEL U, WESER R, et al. Particle characterization in highly concentrated suspensions by ultrasound scattering method[J]. *Sensors & Actuators*, 2012, 47(10):582-585.
- [52] APPLEBY M P. Wear debris detection and oil analysis using ultrasonic and capacitance measurements [D]. University of Akron, 2010.
- [53] 徐超, 张培林, 任国全, 等. 新型超声磨粒传感器输出特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(1):90-95.
- XU CH, ZHANG P L, REN G Q, et al. Output characteristic of a novel online ultrasonic wear debris sensor[J]. *Tribology*, 2015, 35(1):90-95.
- [54] XU CH, ZHANG P L, WANG H G, et al. Ultrasonic echo waveshape features extraction based on QPSO-matching pursuit for online wear debris discrimination[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 60:301-315.
- [55] LI D, JIANG Z. An integrated ultrasonic - inductive pulse sensor for wear debris detection [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 22(2):025003.
- [56] BROWN N K, FRIEDERSDORF F J. Systems and methods to detect particulate debris in a fluid: U. S. Patent 8,474,305[P]. 2013-7-2.
- [57] MASTRO S A, OVERBY J K. System for measurement of metallic debris in fluid: U. S. Patent 7,068,027[P]. 2006-6-27.
- [58] ZHANG Y L, MAO J H, XIE Y B. Engine wear monitoring with OLVF [J]. *Tribology Transactions*, 2011, 54(2):201-207.
- [59] WU T H, PENG Y P, WU H K, et al. Full-life dynamic

- identification of wear state based on on-line wear debris image features [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 42(1-2):404-414.
- [60] DU L, ZHE J. Parallel sensing of metallic wear debris in lubricants using undersampling data processing [J]. *Tribology International*, 2012, 53:28-34.
- [61] MARKOVA L V. Diagnostics of the wear of tribological assemblies using an inductive wear debris counter [J]. *Journal of Friction and Wear*, 2018, 39(4):265-273.
- [62] APPLEBY M, CHOY F K, DU L, et al. Oil debris and viscosity monitoring using ultrasonic and capacitance/ inductance measurements [J]. *Lubrication Science*, 2013, 25(8):507-524.
- [63] CAO W, DONG G N, XIE Y B, et al. Prediction of wear trend of engines via on-line wear debris monitoring [J]. *Tribology International*, 2018, 120:510-519.
- [64] 王奕首, 王庚, 卿新林, 等. 多功能滑油磨粒收集薄膜及发动机磨损状态的诊断方法: 201910300916[P]. 2019. 10. 25.
- WANG Y SH, WANG G, QING X L, et al. Multifunctional Oil Debris Collection Film and Diagnosis Method for Engine Wear Condition: 201910300916[P]. 2019. 10. 25.
- [65] GAO T, HAN Z B, WU D H, et al. In situ collection and analysis of oil debris based on multi-physical field synthesis effect [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2020, 43(4):339-345.

作者简介



王奕首, 1998 年于大连理工大学获得学士学位, 2009 年于大连理工大学获得博士学位, 现为厦门大学副教授, 主要研究方向为滑油磨粒监测、飞行器健康管理。

E-mail: wangys@xmu.edu.cn

Wang Yishou received his B. Sc. degree in 2002 from Dalian University of Technology, received his Ph. D. degree in 2009 from Dalian University of Technology, now he is an associate professor in Xiamen University. His main research interests include wear particle monitoring and flight vehicle health management.



吴迪恒, 2018 年于南京农业大学获得学士学位, 现为厦门大学硕士研究生, 主要研究方向为电容传感。

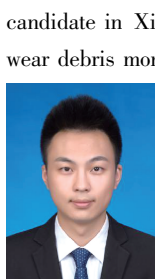
E-mail: 35120181152309@stu.xmu.edu.cn



Wu Diheng received his B. Sc. degree in 2018 from Nanjing Agricultural University, now he is a M. Sc. candidate in Xiamen University. His main research interest is capacitive sensing.

凌, 2020 年于吉林大学获得学士学位, 现为厦门大学硕士研究生, 主要研究方向为滑油磨粒监测。

E-mail: 34720201151384@stu.xmu.edu.cn



Zhu Ling received his B. Sc. degree in 2020 from Jilin University, now he is a M. Sc. candidate in Xiamen University. His main research interest is wear debris monitoring.

刘渊, 分别在 2013 年和 2016 年于南京航空航天大学分别获得学士学位和硕士学位, 现为中国航发湖南动力机械研究所工程师, 主要研究方向为发动机故障诊断和先进传感技术。

E-mail: 491787027@qq.com

Liu Yuan received his B. S. and M. S. both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2013 and 2016. And now he is an engineer in Hunan Institute of power machinery, AVIC. His main research interests include engine fault diagnosis and advanced sensing technology.



卿新林 (通信作者), 1990 年于天津大学获得硕士学位, 1993 年于清华大学获得博士学位, 现为厦门大学教授, 主要研究方向为飞行器健康管理, 先进传感技术。

E-mail: xinlinqing@xmu.edu.cn

Qing Xinlin (Corresponding author) received his M. Sc. degree in 1990 from Tianjin University, received his Ph. D. degree in 1993 from Tsinghua University, now he is Professor in Xiamen University. His main research interests include flight vehicle health management and advanced sensing technology.