

文章编号: 1674-8190(2025)01-009-09

航空滑油磨粒在线监测技术研究进展

郑山红, 武海军, 李想有志, 郑云龙
(中国人民解放军32382部队, 新乡453000)

摘要: 润滑油中的磨粒包含了航空发动机零部件磨损情况的重要信息, 因此磨粒监测是判断发动机健康状况和提供早期故障预警的有效方法, 而在线监测技术能实时提供设备的状态信息。航空滑油磨粒在线监测技术已取得了一定的进展, 然而距离满足航空发动机健康监测的现实需求还有一定差距。首先对目前的航空滑油磨粒在线监测技术进行了介绍, 包括电容法、电阻法、磁感应法、光学法和声学法5种监测技术, 论述了每种技术的监测原理、研究成果、优点和缺点, 然后分析了5种监测技术的应用现状, 最后从高灵敏度、高稳定性、高集成度和高智能化方面指出了滑油磨粒在线监测技术的未来发展趋势。

关键词: 油况监测; 磨损碎屑; 在线传感器; 航空发动机

中图分类号: V263.6

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2025.01.02

Research progress on online monitoring technology of wear particles in aviation lubricating oil

ZHENG Shan hong, WU Hai jun, LI Xiang you zhi, ZHENG Yun long
(No. 32382 of PLA, Xinxiang 453000, China)

Abstract: Due to the wear particles in lubricating oil contain important information about the wear of aircraft engine components, the wear particle monitoring is an effective method for judging the health status of aircraft engines and providing early fault warning. Online monitoring technology can provide real-time equipment status information. The online monitoring technology of aviation lubricating oil abrasive particles has made certain progress, but there is still a certain gap from meeting the practical needs of aviation engine health monitoring. The current online monitoring technologies for lubricating oil and abrasive particles is introduced, including capacitance method, resistance method, magnetic induction method, optical method and acoustic method. The monitoring principles, research results, advantages and disadvantages of each technology are discussed, the application status of the five monitoring technologies are analyzed, and the future development trend of lubricating oil and abrasive particle online monitoring technology are pointed out in the aspects of high sensitivity, stability, integration and intelligence.

Key words: oil condition monitoring; wear debris; online sensor; aircraft engine

收稿日期: 2023-11-23; 修回日期: 2024-03-16

通信作者: 郑山红(1994-), 女, 硕士, 工程师。E-mail: 603537048@qq.com

引用格式: 郑山红, 武海军, 李想有志, 等. 航空滑油磨粒在线监测技术研究进展[J]. 航空工程进展, 2025, 16(1): 9-17.

ZHENG Shan hong, WU Hai jun, LI Xiang you zhi, et al. Research progress on online monitoring technology of wear particles in aviation lubricating oil[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(1): 9-17. (in Chinese)

0 引言

航空发动机作为飞机的动力装置,长期在高温环境下进行高负荷工作,磨损故障的发生概率较高,是影响飞行安全的重要因素。润滑油作为航空发动机的“血液”,具有传递能量、减少部件之间摩擦、降低系统温度、减缓部件表面氧化、减少设备振动的作用。润滑油中的磨粒所提取的信息能反映发动机零部件的磨损情况。

润滑部件的磨损过程可分为3个阶段:磨合期、稳定磨损期和严重磨损期^[1-2]。磨损的不同阶段会产生具有不同特征信息的金属颗粒,表现出尺寸、形状和浓度的变化^[3]。当发生异常磨损时,磨粒浓度增加,颗粒尺寸通常在 $20\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间^[4]。当金属颗粒的尺寸在 $150\sim 350\ \mu\text{m}$ 范围内时,通常表示存在磨损引起的失效^[5]。根据磨损失效的原因和磨损机制,磨损类型可以分为黏着磨损、磨料磨损、疲劳磨损和腐蚀性磨损。不同类型的磨损会产生不同形式的金属颗粒,即球形颗粒、切削颗粒、片状颗粒、疲劳诱导颗粒和严重滑动引起的颗粒^[6]。磨粒的数量和尺寸可以判断磨损的程度,磨粒的成分可用于确定故障发生的位置,磨粒的形态特征可以判断发生了哪种类型的磨损,因此可以通过磨损颗粒的数量、尺寸、形态和材料来判断摩擦副的润滑状况、磨损机制和严重程度^[7]。

滑油磨屑颗粒的检测方法主要有离线检测和在线检测两种。目前主流检测方法是在实验室对从润滑系统中提取的滑油样本进行离线检测,常用的滑油磨粒检测技术有原子光谱法、铁谱法、颗粒计数法、能谱法等^[8]。尽管离线检测获取的润滑油信息全面详细,但测试程序耗时,不能提供关于发动机运行状况的实时信息,检测结果滞后。另外,滑油中的磨粒被油滤所截获,不能准确反映发动机磨损状态。如果将传感器安装在发动机润滑油管路上,就能实时监测发动机轴承、齿轮等关键部位的磨粒信息,从而能够早期检测设备磨损。早期预警可以对发动机进行主动维护,降低发生意外故障的风险。因此,在线监测发动机的健康状况对维护和延长发动机的生命周期以及最大限度地降低维护成本非常重要。

由于滑油中存在的磨粒会改变油的介电常

数、渗透率、电导率和光学性质等^[9],因此通过监测这些参数,可以获得磨损碎屑的含量、成分、尺寸和形态等信息。本文介绍5种航空滑油磨粒在线监测技术,包括电容法、电阻法、磁感应法、光学法以及声学法,论述每种技术的监测原理、研究成果、优点和缺点,分析5种监测技术的应用现状,最后讨论未来发展趋势。

1 磨粒在线监测技术

1.1 电容法

电容传感器不只用于油品质量监测,在磨粒检测中也被广泛应用。由于有无磨损颗粒的润滑油在电学性质方面存在差异,因此采用介电常数对磨粒进行检测^[10]。Murali等^[11]设计了一种可以检测和统计滑油中磨损颗粒的装置,该装置基于库尔特计数原理,如图1所示,微流体装置由一个入口储液器、一个出口储液器和一个微流体通道组成,一对间隙为 $40\ \mu\text{m}$ 的共面电极位于射流通道的中间。电容脉冲的大小随着颗粒尺寸的增加而增加,因此脉冲高度可以表征颗粒尺寸大小。尽管该传感器的检测下限低于 $10\ \mu\text{m}$,但是由于流量小,其实时监测的能力是有限的。

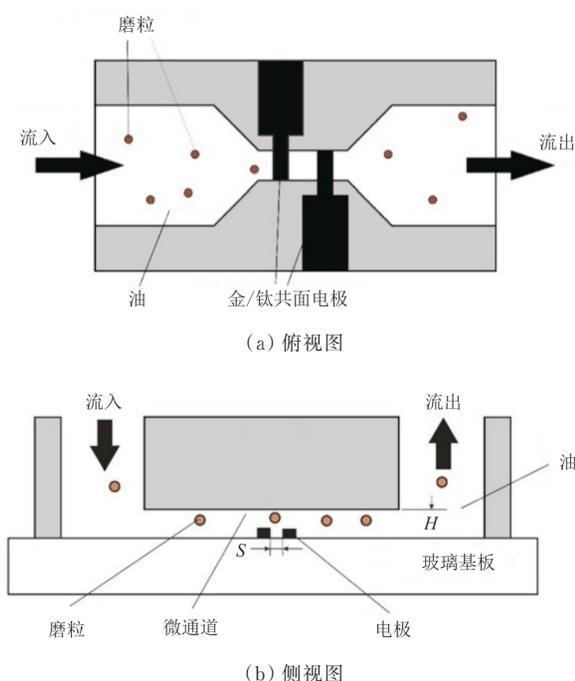


图1 带有微流体通道的电容式磨粒传感器示意图^[11]

Fig. 1 Schematic of a capacitive oil debris sensor with a microfluidic channel^[11]

Han Z 等^[12]设计了由 2 个同轴圆柱体组成的圆柱形电容传感器,将该传感器集成到航空发动机润滑系统的管道中,以监测润滑油状况的变化;Islam 等^[13]提出了一种交叉电容传感器,用于检测润滑油中的金属颗粒,该传感器有 4 个相同的对称放置的电极,通过监测交叉电容值的变化可以检测润滑油中金属碎屑的存在;Wang Y 等^[14]设计了一种原位同轴电容传感器,由同轴的曲面电极作为内芯和外芯,当润滑油从内芯和外芯中间通过时,通过监测电极之间的电容信号获得润滑油中磨粒的信息;Zhu L 等^[15]利用同轴电容传感器网络对金属磨损颗粒的形态进行评估和分类,优化了支持向量机(SVM)模型的参数,并通过实施智能优化技术提高了其检测精度;Wang C 等^[16]研究了一种高灵敏度、多通道、多模电容传感器,该传感器包括 4 个玻璃毛细管通道、平面线圈、螺线管线圈、圆柱形平行板电容器和矩形平行板电容,能够实现对各种污染物的高通量在线监测,如铁磁性颗粒、非铁磁性颗粒以及空气、水和其他物质,传感器的检测流量得到了显著提高,与初始值相比增加了 12 倍。

目前,电容传感器具有较高灵敏度,但是在实际应用中存在以下缺点:由于不同金属磨粒的介电常数非常相似,因此传感器无法区分这些金属颗粒;润滑油的一些性质,如黏度和酸值,也可能导致电容发生变化,使得识别磨粒变得困难;电容传感器受水的影响较大,水滴可能会产生大的电容脉冲,造成传感器误检。

1.2 电阻法

电阻检测方法利用不同物质之间导电性的差异来识别磨损颗粒。当润滑油中存在磨损颗粒时,它们会产生导电通路,从而改变润滑油的电阻。电阻式传感器具有检测多种磨损颗粒类型的能力,Sun J 等^[17]设计了一种电阻式磨粒传感器,如图 2 所示,传感器包括环形永磁体、杯状电极和棒形导体。当传感器浸入润滑油中时,在传感区域的磨损碎屑将被磁铁吸附到导体和电极之间。当磨粒积累到一定数量,使得棒形导体和杯状电极之间的电阻低于预定阈值,导体与电极串联,并且可以在输出端处检测到电压。导体和电极之间的间隔越大,产生电信号所需的金属颗粒就越多。因此,可以通过测量电极棒的电阻来检查滑油被

金属碎屑污染的程度。然而,该传感器只能吸引铁磁性磨粒,对有色金属和非金属碎屑没有作用。

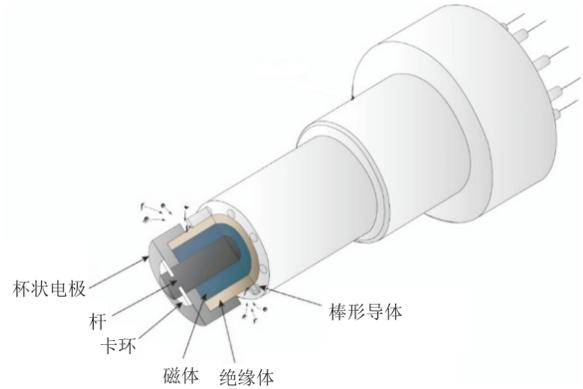


图 2 电阻式磨粒传感器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a resistive wear debris sensor

Song Y 等^[18]研究了一种基于微流体的电阻脉冲传感器用于监测磨损颗粒,该传感器通过观察磨粒经过指定感测区域时产生的电阻脉冲来检测粒子,并通过差分放大技术提高传感器的信噪比;Santilli^[19]通过测量流体磨损率的方式来监测磨损颗粒,当快速运动的粒子与传感器表面的金属膜碰撞时,金属膜会逐渐受到侵蚀,从而导致电阻升高。监测电阻的变化可以识别磨损颗粒,史皓天等^[20]基于微流体设计了一种可检测电阻—电感参数的磨粒传感器,采用电感参数实现金属磨粒属性的区分,并通过检测线圈等效电阻的方式提高了对非铁磁性金属磨粒的检测能力。

1.3 磁感应法

磁感应法的基本原理为利用金属颗粒通过 LC (电感、电容) 振荡循环的扰动来确定磨粒的尺寸、数量和材料成分。金属颗粒在交变电磁场中运动会产生涡流,从而产生额外的电磁磁场^[21]。对于铁磁性材料,会产生与外部磁场相同极性的磁场^[22],磁场的磁通密度是原始磁场的几倍。对于顺磁性材料,会产生与施加的磁场相同方向的磁场,然而由于磁导率较小,产生的磁场较弱,其扰动可以忽略。相反,对于非铁磁性材料,会产生与所施加的磁场相反的磁场,在一定程度上会中和初级磁场。一般来说,初级磁场强度的变化与金属颗粒的等效尺寸、质量和材料有关^[23]。

近年来,已开发了许多磁感应传感器来检测润滑剂中的铁质和非铁质碎屑。具有代表性的有

由 GasTOPS 开发的 Metalscan 传感器^[24], 传感器外形如图 3 所示。传感器由围绕内孔的 3 个线圈组成, 其中 2 个线圈产生磁场, 第 3 个线圈检测并干扰磁场。根据扰动的类型和大小, 控制单元确定磨粒类型和磨粒尺寸。Metalscan 传感器具有在线、全液流的特点, 能检测的磨粒最低尺寸为 125 μm , 目前已用于飞机发动机状态监测。



图 3 不同型号的 Metalscan 传感器^[24]
Fig. 3 Different models of Metalscan sensors^[24]

目前研究者提出了不同的结构和更复杂的传感器模型来提高灵敏度。Han L 等^[25]分析了几种电感传感器, 发现对称线圈设计降低了噪声效应。因此, 对称磁场设计和对称多管设计在感应方法中逐渐变得普遍, 通过对并联感应线圈收集的信号进行采样, Du L 等^[26-27]提出的传感器能够以 21 mL/min 的油流量检测 75~150 μm 的磨损颗粒, 并且设计了一种微流体装置将磨粒限制在靠近平面线圈表面的最敏感区域, 可以测量到最小 50 μm 的颗粒。为了在不牺牲灵敏度的情况下提高流速, Du L 等^[28]又设计了一种具有多通道的新型磨粒传感器, 可以检测到 32 μm 以上的铁磁性磨粒; Zhu X 等^[29]提出了一种由 2 个平面线圈、2 个铁氧体磁芯和 1 个矩形通道组成的传感器, 增加了检测区域的磁通密度, 能够以 750 mL/min 的高流量检测 50 μm 的磨损碎屑。

磁感应传感器能够在不受气泡和水滴干扰的情况下获得关于磨损碎屑的大小、浓度和材料的信息。与其他已报道的原理相比, 磁感应传感器不仅可以检测几何参数, 还可以区分铁磁性和非铁磁性磨粒, 具有广泛的应用前景。然而, 这种传感器存在一些缺点: 首先, 磁感应式磨屑传感器的精度与线圈的缠绕形式、颗粒产生的磁通强度、信号转换器和信号处理有关; 其次, 当感应区中同时存在 2 个或多个磨损颗粒时, 2 个磨粒之间的距离越小, 它们之间的磁场耦合效应就越显著, 传感器的输出误差就越大^[30]; 最后, 与图像传感器相比,

这种传感器不能反映金属颗粒的形状。

1.4 光学法

润滑油的透光性受到润滑油中磨损颗粒的影响, 因此可以通过测量透光性来检测磨损碎屑。基于光学法的磨粒传感器主要有两种, 一种是利用光散射和遮光原理开发的光电传感器, 另一种是拍摄磨损颗粒的图片的成像传感器。

光被固体颗粒散射后, 一方面, 入射光束的能量被颗粒部分散射, 从而从均匀的照明光束中去除, 导致光强度衰减。这种现象被称为遮光, 光强的下降与颗粒的投影面积相关, 从而可能判断固体颗粒的大小和浓度。另一方面, 固体颗粒散射的光可以在特定角度收集, 也就是光散射^[31]。由于光散射, 探测器测量到的光能增加, 这与遮光法相反, 从传感器得到的电压信号与散射光的强度成正比。由于可以准确地检测亚微米级的磨损颗粒, 遮光和光散射法已经在污染度分析等离线检测中被普遍采用。利用这两种原理设计的在线传感器也具有高灵敏度, 能够识别 5 μm 以上的磨损颗粒^[32]。Krogse 等^[33]设计了一种基于遮光原理的润滑油系统磨损颗粒分布的传感器模型; Hondat 等^[34]提出了一种基于光散射法原理的传感器来监测滑油磨粒。但这种类型的传感器仍有一些共同的局限性, 润滑油的透明度下降会导致接收到的光信号强度随着透射率的降低而逐渐衰减, 无法区分磨粒和气泡; 当流速较快或污染度高时, 传感器可能会将多个重叠的小磨粒识别为较大的磨粒; 悬浮在油中的磨粒的投影面积是不确定的, 导致磨粒尺寸出现误差。

成像传感器能够获得磨粒的尺寸、数量、材料和形态信息, 特别是形态特征只能从磨粒图像中获得, 可以为识别磨损形式和找到磨损原因提供有价值的信息^[35]。成像法通常由光源、流量控制器和 CCD 照相机组成。光源用来照亮流量控制器的观察窗, 照相机用来高速捕捉磨损颗粒的图像, 然后这些图像被传输到计算软件进行处理, 以得到磨损颗粒的尺寸、数量和形状信息。Hamilton 等^[36]设计了一种磨损颗粒图像系统, 用于检测磨损颗粒的大小和形状; Peng Y 等^[37]开发了一种用于磨损颗粒检测的微流体系统, 该系统包括微通道和光学 CMOS 传感器, 能够熟练捕捉不同尺寸和形状的颗粒, 同时提供全面的三维特征; Li B

等^[38]设计了一种在线可视化铁谱传感器,采用反射光源进行暗场成像,通过调整嵌入式显微镜可以检测到最低 $7\ \mu\text{m}$ 的磨粒。然而,该方法在实际应用中还有许多问题需要解决。首先,由于氧化和杂质污染,润滑油在使用后会变得不透明,使得难以拍摄清晰的图像,从而导致磨粒的计数和尺寸错误;其次,由于滑油中的磨粒是高速移动的,因此需要高性能硬件和高效的图像处理算法来区分磨损碎屑。

1.5 声学法

超声波遇到滑油中的磨粒时会发生散射和反射,通过测量超声波信号可以检测滑油中的磨粒。典型的散射法中超声波传感器由两个相对放置的超声换能器组成,一个作为发射器,另一个作为接收器^[39]。声束从发射器发送到流体,当碎片颗粒通过声束时,散射入射声波,并导致到达接收器的波的振幅减小。虽然发射器—接收器测量配置可以检测所有固体碎屑,但无法将机器运行过程中产生的气泡与磨粒区分。

基于反射法的超声波传感器能解决上述问题,通过向润滑油发射一系列大振幅超声波脉冲,穿过声场的粒子会散射声波并产生脉冲回波,颗粒大小可以根据回波的幅度来确定^[40]。由于气泡具有负反射系数,而固体颗粒在油中具有正反射系数,气泡反射反向入射的声脉冲,固体颗粒反射非反向入射的脉冲,因此可以通过测量反射声学回波的极性 or 相位角进行区分^[41]。虽然这种方法可以区分气泡和固体颗粒,但有一个主要缺点,焦点区域的声场具有不均匀的声强分布,声强度在焦点区域达到最大值,在焦点区域外降至零,这将导致磨粒尺寸和浓度的测量存在较大误差。此外,超声波传感器对所有固体颗粒都有相似的声反射系数,无法区分金属碎屑和非金属碎屑。

Du L 等^[42]设计了一种磨损碎屑传感器,该传感器集成了电感脉冲传感器和超声波脉冲传感器,集成传感器的示意图如图 4 所示。由于超声波传感器的聚焦声场具有不均匀的声强分布,因此使用了一种独特的构造使所有碎片颗粒通过焦点区域,从而最大限度地减少由于流体管道中不均匀声场造成的碎片尺寸误差。由于超声波传感器无法区分磨粒是否为铁磁性颗粒,因此使用在玻

璃管上缠绕的平面线圈制成的感应脉冲传感器,用来检测铁磁性和非铁磁性磨粒。

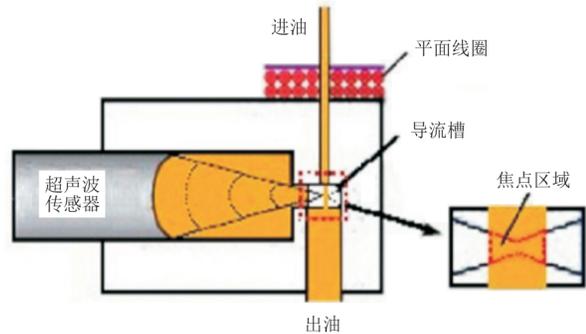


图 4 具有导流槽结构的感应式超声波磨粒传感器示意图^[42]

Fig. 4 Schematic of the inductive-ultrasonic integrated wear debris sensor with a flow recess structure^[42]

通过仿真和实验方法, Xu C 等^[43]提出了量子行为粒子群优化(QPSO)技术,以提高匹配追踪(MP)算法提取反射超声信号波形特征的效率和有效性,该方法提高了超声波信号的信噪比,有助于提取其波形特征从而区分磨损颗粒和气泡; Weser 等^[44]提出了一种通过分析反射的超声信号来表征高浓度悬浮液中颗粒的方法,这种方法提供了一种直接和非侵入性的方式来监测高浓度的悬浮液; Appleby 等^[45]使用超声和电容传感器结合的方法监测磨粒和滑油性能,通过分析散射的超声波信号可以检测到尺寸为 $44.5\ \mu\text{m}$ 的磨粒,还可以通过分析超声波信号振幅和传输时间的变化来评估润滑油黏度的变化。

由于超声换能器发射的纵波穿透能力强,具有处理全油流的能力,并且磨损颗粒和气泡可以通过分析反射脉冲回波来区分^[43]。然而,超声波传感技术尚未广泛在实际中应用,其中一个主要问题是超声波传感器的准确性受滑油品质的影响,脉冲回波幅度会随着滑油黏度的变化产生相应的波动,导致检测的磨粒尺寸出现误差^[46]。

2 应用现状分析

飞机发动机滑油磨粒监测主要是获取磨损颗粒的数量、尺寸、形态和材料等信息。本文介绍 5 种在线监测技术的研究进展,针对监测技术能够识别的磨粒特征信息、优势和劣势的分析如表 1 所示。

表 1 磨粒监测技术比较
Table 1 Comparison of wear debris monitoring technologies

监测技术	磨粒特征信息	优势	劣势
电容法	数量和尺寸	灵敏度高	不能检测非金属磨粒,易受滑油品质的影响
电阻法	数量	结构简单	只能检测铁磁性磨粒
磁感应法	数量、尺寸和材料	流量高,能够区分铁磁性和非铁磁性磨粒	灵敏度较低,无法区分非金属磨粒,可将多个重叠磨粒识别为大磨粒
光散射法和遮光法	数量和尺寸	灵敏度高	无法区分磨粒和气泡,受透明度影响,流量低,可将多个重叠磨粒识别为大磨粒
图像法	数量、尺寸、形态和材料	灵敏度高,能区分磨粒和气泡	流量低,系统复杂,受透明度影响
超声法	数量和尺寸	能区分磨粒和气泡	无法区分金属和非金属磨粒,声场不均匀,易受滑油品质的影响

最早的在线监测方法是磁塞传感器,可以根据磨损颗粒的体积进行实时报警,然而无法提供单个磨粒的尺寸和材料信息。因此,不能准确地检测机械故障并对故障进行早期预警。

对于具有微通道的电容式传感器,可以检测和统计金属磨粒,然而不具有区分含铁碎屑和非铁碎屑的能力。由于流量有限且容易受滑油品质的影响,电容传感器仍在实验室中进行测试。由 Vickers Tedeco 公司生产的电阻传感器 ECD,可直接安装在油路中,能检测到润滑油中的铁磁性磨粒的数量,但对非铁磁性磨粒没有反应,因此通常和其他类型的传感器结合使用。

磁感应传感器可以输出反映磨损颗粒大小、数量和材料的信号。在过去的几十年里,磁感应传感器发展的最多,Vickers Tedeco 公司的 QDM 和 GasTOPS 公司的 Metalscan 都已广泛应用于实际的在线监测中。为了满足机械设备对传感器的要求,传感器管道的直径也在逐渐增大。Yi Junren 等^[47]分析了传感器检测精度与管径的比值 S ,发现 S 越小传感器的灵敏度就越高。目前,灵敏度和流量已经有了很大的提高,如何在提高传感器灵敏度的同时确保高流量仍有待探索。如果能够进一步提高灵敏度和流量,这种方法可能会成为最佳方法。

超声波传感器能区分磨损颗粒和气泡,具有高灵敏度和高流量,但磨粒位置、滑油黏度和温度都会影响超声波传感器的检测效果。由于超声波传感器的声场不均匀,磨粒经过不同位置反射的回波信号不同,影响磨粒尺寸的判断,因此在应用

中,必须提高声场的均匀性。同时信号容易受到外部干扰的影响,因此有必要进一步研究抗干扰和去噪技术。

光学磨粒传感器中,光散射法和遮光法可以测量润滑油中磨粒的尺寸和数量,灵敏度高,能检测到异常磨损产生的小尺度磨粒,但是不能区分金属和非金属;基于成像方法的传感器可以获得全面详细的磨粒信息,特别是从磨损碎片图像中提取形态属性,能更深入地描述碎片颗粒,反映磨损机理,但对设备和算法的要求较高,这应该是未来研究的重要方向。基于光散射法的美国 ART 公司生产的 IOOCP 和基于图像法的美国 Foxbro 公司生产的 OLVF 已应用于航空领域。但是光学传感器易受到滑油品质的影响,当滑油透明度下降时会影响传感器对磨粒的识别;滑油流速过快时,磨粒数容易被低估,因此需要进一步优化传感器结构和算法来提高检测能力。

3 发展趋势

航空润滑油磨粒在线监测技术已经取得了一定的进展,然而距离满足航空发动机健康监测的现实需求,还有一定差距,磨粒在线监测技术应朝着高灵敏度、高稳定性、高集成度和高智能化的方向发展。

1) 高灵敏度。在正常工作条件下,大多数磨损碎屑的尺寸小于 $20\ \mu\text{m}$,随着磨损情况变得严重, $20\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间的磨粒急剧增多。大多数传感器不足以满足高灵敏度的需求,目前磨粒在线传感器能够在实验室中检测 $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 的磨损碎

片,但由于环境干扰,在真实的工作环境中表现不佳。研究者可以优化结构设计,如使用微流体或多通道^[16,28],或者优化算法模型^[15,43]提高传感器的灵敏度。

2) 高稳定性。传感器在恶劣环境中保持良好的工作状态非常重要,这是在线监测的主要问题。传感器易受到环境中电噪声、振动和温度等因素的干扰^[46],对传感器的分辨率和系统的稳定性影响较大,因此如何降低环境因素干扰、提高传感器稳定性也是当前研究的主要方向之一。

3) 高集成度。各种类型的监测技术都有其优势和劣势,目前的研究主要集中在单一传感器的应用上。由于工作原理的局限性,几乎没有传感器能同时获得磨粒的尺寸、数量、形态以及材料信息。由于发动机复杂的工作情况,有限的特征参数不足以准确判断发动机的磨损状况,只有进行多参数、多维的分析,才能更好地确定发动机的性能状况。多种监测技术的集成能够优势互补,提高收集磨粒信息的能力^[20,45]。

4) 高智能化。在线监测技术不断朝着自动集成数据分析和诊断的趋势发展,实现传感器的智能化^[9]。传感器通过采集数据、处理数据和分析数据,能够实现校准、自诊断,将形成的最终数据通过无线设备传输出来,还能极大程度地解决发动机内部布线困难的问题。

4 结束语

本文综述了基于电容法、电阻法、磁感应法、光学法和声学法的航空滑油磨粒在线监测技术,主要包括每种监测技术的监测原理、研究成果、优点和缺点,分析了5种监测技术的应用现状,讨论了滑油磨粒在线监测技术的未来发展趋势应为高灵敏度、高稳定性、高集成度、高智能化,旨在为今后的研究提供有价值的信息,促进航空滑油磨粒在线监测技术的研究与应用。

参考文献

- [1] 彭峰,王立勇,吴健鹏,等. 油液磨粒在线监测技术发展现状与趋势[J]. 设备管理与维修, 2016(增刊2): 26-28.
PENG Feng, WANG Liyong, WU Jianpeng, et al. Development status and trend of online monitoring technology for oil abrasive particles[J]. Equipment Management and Maintenance, 2016(s2): 26-28. (in Chinese)
- [2] CAO W, DONG G, XIE Y, et al. Prediction of wear trend of engines via on-line wear debris monitoring[J]. Tribology International, 2018, 120: 510-519.
- [3] WANG, J, MAW M M, YU X, et al. Applications and perspectives on microfluidic technologies in ships and marine engineering: a review [J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2017, 21: 39-45.
- [4] ZHANG Y, HONG J, SHI H, et al. Magnetic plug sensor with bridge nonlinear correction circuit for oil condition monitoring of marine machinery [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(12): 1883-1891.
- [5] LI W, BAI C, WANG C, et al. Design and research of inductive oil pollutant detection sensor based on high gradient magnetic field structure[J]. Micromachines, 2021, 12(6): 638-645.
- [6] ZAMORANO M, AVILA D, MARICHAL G N, et al. Data preprocessing for vibration analysis: application in indirect monitoring of ship centrifuge lube oil separation systems [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(9): 1199-1203.
- [7] 王奕首,吴迪恒,朱凌,等. 滑油磨粒在线传感技术研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3): 73-83.
WANG Yishou, WU Diheng, ZHU Ling, et al. Progress on on-line sensing technology for wear debris in lubricant [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3): 73-83. (in Chinese)
- [8] YAN R, GAO R X. Complexity as a measure for machine health evaluation [J]. IEEE Transactions on Instrument Measurement, 2004, 53: 1327-1334.
- [9] 周俊丽,李光斌. 基于工业互联网的设备油液在线监测信息化系统开发[J]. 机床与液压, 2020, 48(17): 140-145.
ZHOU Junli, LI Guangbin. Development of online oil monitoring information system of equipment based on industrial Internet [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(17): 140-145. (in Chinese)
- [10] 吴迪恒,刘渊,林霆威,等. 基于电容传感的滑油磨粒监测技术研究进展[J]. 测控技术, 2021, 40(5): 14-20.
WU Diheng, LIU Yuan, LIN Tingwei, et al. Progress of lubricant oil particle monitoring technology based on capacitance sensing [J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(5): 14-20. (in Chinese)
- [11] MURALI S, XIA X, JAGTIANI A V, et al. Capacitive coulter counting: detection of metal wear particles in lubricant using a microfluidic device [J]. Smart Material Structure, 2009, 18(3): 37001-37005.
- [12] HAN Z, WANG Y, QING X. Characteristics study of in-situ capacitive sensor for monitoring lubrication oil debris

- [J]. *Sensors*, 2017, 17: 2851-2859.
- [13] 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): 25005.
- [14] WANG Y, LIN T, WU D, et al. A new in situ coaxial capacitive sensor network for debris monitoring of lubricating oil[J]. *Sensors*, 2022, 22(5): 1777-1786.
- [15] ZHU L, XIAO X, WU D, et al. Qualitative classification of lubricating oil wear particle morphology based on coaxial capacitive sensing network and SVM[J]. *Sensors*, 2022, 22(17): 6653-6660.
- [16] WANG C, ZHENG Y, ZHANG H, et al. An oil multipollutant detection sensor with high sensitivity and high throughput[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 6003611.
- [17] SUN J, WANG L, LI J, et al. Online oil debris monitoring of rotating machinery: a detailed review of more than three decades [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 149: 107341.
- [18] SONG Y, ZHANG H, CHON C H, et al. Nanoparticle detection by microfluidic resistive pulse sensor with a submicron sensing gate and dual detecting channels—two stage differential amplifier[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 155(2): 930-936.
- [19] SANTILLI R. The fulmer method of monitoring fluid abrasivity as an indication of fluid condition and machine health [C]// *COMADEM 89 International*. US: IEEE, 1989: 55-67.
- [20] 史皓天, 张洪朋, 谢雨财, 等. 一种基于微流体制备的电阻—电感式磨粒传感器[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(20): 2468-2475.
- SHI Haotian, ZHANG Hongpeng, XIE Yucai, et al. A resistance-inductance debris sensor based on microfluidic fabrication[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(20): 2468-2475. (in Chinese)
- [21] JIA R, MA B, ZHENG C, et al. Magnetic properties of ferromagnetic particles under alternating magnetic fields: focus on particle detection sensor applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4144-4152.
- [22] 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.
- [23] 王志娟, 赵军红, 丁桂甫. 新型三线圈式滑油磨粒在线监测传感器[J]. *纳米技术与精密工程*, 2015, 13(2): 154-159.
- WANG Zhijuan, ZHAO Junhong, DING Guifu. A novel online oil debris monitoring sensor with three coils[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015, 13(2): 154-159. (in Chinese)
- [24] MILLER J L, KITALJEVICH D. In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment [C]// *2000 IEEE Aerospace Conference*. US: IEEE, 2000: 49-56.
- [25] HAN L, HONG W, WANG S. The key points of inductive wear debris sensor [C]// *International Conference on Fluid Power and Mechatronics*. US: IEEE, 2011: 809-815.
- [26] DU L, JIANG Z. Parallel sensing of metallic wear debris in lubricants using undersampling data processing [J]. *Tribology International*, 2012, 53: 28-34.
- [27] DU L, JIANG Z, 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.
- [28] DU L, ZHU X, 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 & Technology*, 2013, 24(7): 75106.
- [29] ZHU X, ZHONG C, JIANG Z. A high sensitivity wear debris sensor using ferrite cores for online oil condition monitoring [J]. *Measurement Science & Technology*, 2017, 28(7): 75102.
- [30] JIA R, MA B, ZHENG C, et al. Magnetic properties of ferromagnetic particles under alternating magnetic fields: focus on particle detection sensor applications [J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4144-4152.
- [31] 孙佳毅. 基于磁性吸附与 CMOS 成像的高通量磨粒图像传感器的设计、实现和分析 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
- SUN Jiayi. Design, implementation, and analysis of a high-throughput wear debris image sensor based on magnetic deposition and CMOS imaging [D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)
- [32] WU T, PENG Y, WU H, 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.
- [33] KROGSE K, HENNEBERG M, ERIKSEN R. Model of a light extinction sensor for assessing wear particle distribution in a lubricated oil system [J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4091-4098.
- [34] HONDAT I Y, 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.
- [35] RAADNUI S. Wear particle analysis—utilization of quantitative computer image analysis: a review [J]. *Tribology International*, 2005, 38(10): 871-878.
- [36] HAMILTON A, CLEARY A, QUAIL F. Development

- of a novel wear detection system for wind turbine gearboxes [J]. *IEEE Sensors*, 2014, 14: 465-473.
- [37] PENG Y, WU T, 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*, 2007, 231: 965-974.
- [38] LI B, XI Y, FENG S, et al. A direct reflection OLVF debris detector based on dark-field imaging [J]. *Measurement Science & Technology*, 2018, 29(6): 65104.
- [39] APPLEBY M P. *Wear debris detection and oil analysis using ultrasonic and capacitance measurements* [D]. Akron: University of Akron, 2010.
- [40] 吕纯, 张培林, 张云强, 等. 基于超声传感器的油液磨粒在线检测研究现状 [J]. *液压气动与密封*, 2015, 35(8): 24-27.
LYU Chun, ZHANG Peilin, ZHANG Yunqiang, et al. Current situation of the research on wear debris on-line detection based on ultrasonic sensor [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2015, 35(8): 24-27. (in Chinese)
- [41] 张永祥, 明廷锋, 朴甲哲. 超声磨粒监测传感器设计研究 [J]. *海军工程大学学报*, 2002(4): 28-31.
ZHANG Yongxiang, MING Tingfeng, PIAO Jiazhe. Investigation on transducer design for ultrasonic wear debris monitoring [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2002 (4): 28-31. (in Chinese)
- [42] DU L, JIANG Z. An integrated ultrasonic-inductive pulse sensor for wear debris detection [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22: 25003.
- [43] XU C, ZHANG P, WANG H, et al. Ultrasonic echo wave-shape features extraction based on QPSO-matching pursuit for online wear debris discrimination [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, 60/61: 301-315.
- [44] WESER R, WÖCKEL S, HEMPEL U, et al. Particle characterization in highly concentrated suspensions by ultrasound scattering method [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 202: 30-36.
- [45] APPLEBY M, CHOY F K. Oil debris and viscosity monitoring using ultrasonic and capacitance/inductance measurements [J]. *Lubrication Science*, 2013, 25(8): 507-524.
- [46] XU C, ZHANG P, REN G, et al. Discriminating debris particle in lubricant by ultrasonic waveshape features [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2015, 67(3): 202-209.
- [47] YI Junren, WEI Li, GUO Fengzhao, et al. Inductive debris sensor using one energizing coil with multiple sensing coils for sensitivity improvement and high throughput [J]. *Tribology International*, 2018, 128: 96-103.

(编辑:丛艳娟)