

船用燃气轮机油液磨粒在线监测技术综述

王开,曹云鹏,李淑英

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:在分析润滑部件磨粒形成机制的基础上,综述了电感、电容、光纤、图像和超声波5类油液磨粒传感器原理和研究进展,分析了捕捉型和流通型两类船用燃气轮机磨粒在线监测技术应用现状,指出了船用燃气轮机油液磨粒在线监测技术现存问题和发展趋势。

关键词:燃气轮机;油液磨粒;在线监测;传感器

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.04.020

[引用本文格式]王开,曹云鹏,李淑英.船用燃气轮机油液磨粒在线监测技术综述[J].热能动力工程,2023,38(4):156-162.
WANG Kai, CAO Yun-peng, LI Shu-ying. Oil debris online monitoring technology for marine gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 156-162.

Oil Debris Online Monitoring Technology for Marine Gas Turbine

WANG Kai, CAO Yun-peng, LI Shu-ying

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code:150001)

Abstract: Based on analyzing the formation mechanism of debris in lubricating parts, the principle and research prospect of five types of oil debris sensors are summarized, including inductance, capacitance, optical fiber, image and ultrasonic, the technology application status of capture and flow-through for marine gas turbine oil debris online monitoring is analyzed, and the existing problems and future development trend of marine gas turbine oil debris online monitoring technology are pointed out.

Key words: gas turbine, oil debris, online monitoring, sensor

引言

船用燃气轮机轴承、传动齿轮等部件在运行时会因润滑不足、交变加载力矩、使用时长等原因,不可避免地产生磨损,这是影响燃气轮机可靠性和使用寿命的主要原因之一。轴承、传动箱等在磨损过程中会产生磨损颗粒物,这些磨粒会以悬浮状态存在于油液中,并会随着润滑油经滑油管路从润滑部位流出。在线监测油液中磨粒大小、形貌、质量、材

质等状态信息,实时评估润滑部件的健康状态,可实现船用燃气轮机轴承、传动箱等关键润滑部件的预测性诊断,助力船用燃气轮机从事后维修模式向视情维修转变,对船用燃气轮机智能化保障具有重要意义。

传统的油液磨粒离线分析方法有很多种,包括光谱分析法、铁谱分析法、图像显示法、颗粒计数法、油品理化性质分析法、超声检测方法等^[1]。目前,现役船用燃气轮机采用磁塞分析法,即在润滑部件出口口布置金属屑信号器,吸附润滑油中的铁磁性

收稿日期:2022-03-30; 修订日期:2022-05-29

基金项目:国家科技重大专项(2017-I-0007-0008)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(2017-I-0007-0008)

作者简介:王开(1994-),男,哈尔滨工程大学硕士研究生。

通讯作者:曹云鹏(1979-),男,哈尔滨工程大学副教授。

颗粒,当达到一定量后自动报警,实现磨粒在线监测。运维人员定期将磁性柱塞取出,借助显微镜观测磁性颗粒的大小、数量、形状等特征,从而判断润滑部件的磨损状态。这种监测方法实现了磨损总量的报警,但是没有实现磨损在线监测和磨损颗粒物尺寸分级评估,一旦触发报警,就意味着润滑部件已经发生了严重磨损。同时,磁性柱塞吸附的铁磁性磨粒只占磨损颗粒的一部分,对密封零件产生的非铁磁性磨粒无法监测,不可避免地发生故障漏报情况。因此,现有船用燃气轮机油液磨粒监测手段无法满足未来船舶设备运维保障智能化需求,关键润滑部件磨损在线监测能力急需提升。

本文分析了油液磨粒形成机制,介绍了磨粒传感器研究动态,分析了船用燃气轮机在线磨粒监测技术应用进展和存在的技术问题。

1 油液磨粒形成机制

轴承、传动齿轮等润滑部件的磨损是船用燃气轮机油液中磨粒物的主要来源。润滑部件磨损过程一般分为 3 个阶段,如图 1 所示。

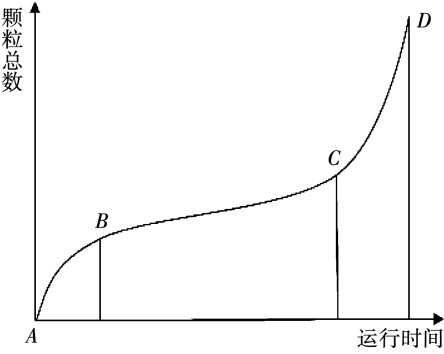


图 1 润滑部件磨损阶段与颗粒物总量定性关系

Fig. 1 Qualitative relationship between wear stage of lubricating parts and debris total amount

不同磨损阶段产生磨粒的尺寸、形状等不同,磨损类型也不同^[2-4]。其中,A-B 段表示初期磨损阶段,由于润滑部件材料的表面相对比较粗糙,表面会有很多凸出的尖刺,在这个过程中发生的磨损类型主要是颗粒磨损,磨损速率相对较高;B-C 段为稳定磨损阶段,润滑部件的磨损速度相对缓慢,磨损类型为疲劳磨损和氧化磨损;C-D 段为剧烈磨损阶段,润滑部件某些表面发生了严重的破损,磨损率急

剧上升,并且这个过程往往会伴随较大的振动与噪声,产生的磨粒尺寸相对较大。

因此,通过油液磨粒数量、大小、形态、质量、速率等信息,可实现润滑部件磨损阶段判断和磨损程度评估。

2 油液磨粒传感器技术介绍

2.1 电感式磨粒传感器技术

典型三线圈电感式磨粒传感器的工作原理如图 2 所示^[5]。磨粒从左到右依次通过励磁线圈 1、感应线圈和励磁线圈 2 时,感应线圈输出电动势的幅值与磨粒质量成正比;磨粒处于感应线圈中间位置时,感应线圈电动势输出为零;铁磁性磨粒与非铁磁性磨粒电动势信号的相位相反^[6]。感应电动势与磨粒位置的关系如图 3 所示。因此,通过感应电动势幅值和相位可识别磨粒大小和性质。结构优化设计、检测电路设计、信噪比提升是当前电感式磨粒传感器技术重点研发方向。

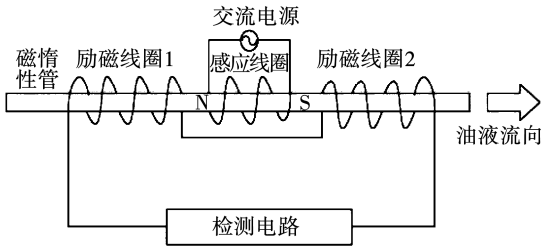


图 2 电感式磨粒传感器原理

Fig. 2 Principle of inductive debris sensor

针对轻量化的问题,Song 等人^[7]将三线圈电感式传感器电磁线圈替换为高梯度磁场,简化后的电感式传感器能够检测到 25 μm 的铁磁颗粒;Zheng 等人^[8]提出基于单个永磁环的被动式铁磁磨粒传感器设计方案,在 510 mL/min 油液流量下,可检测出 30 μm 铁磁颗粒。

针对信噪比提升问题,白晨朝等人^[9]设计了一种内置磁性纳米材料的电感式油液磨粒传感器,增大了磁场对磨粒的磁化涡流效应,铁磁性颗粒的信噪比提升 20% ~ 25%,非铁磁颗粒的信噪比提升 16% ~ 20%;史皓天等人^[10]在平面电感线圈内加入环状硅钢片,增强检测区域磁场强度,20 匝的平面电感线圈实现 55 μm 铁磨粒和 115 μm 铜磨粒的监测。

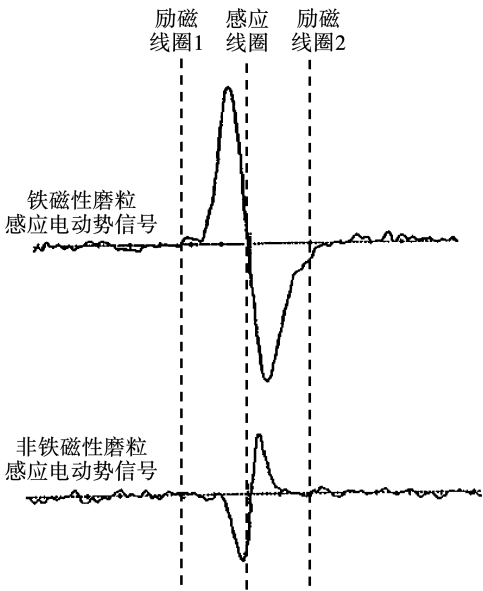


图 3 感应电动势与磨粒位置的关系

Fig. 3 Relationship between induced electromotive force and the position of debris

在磨粒特征提取方面,牛泽等人^[11]针对三线圈电感式磨粒传感器,提出相干解调模型特征提取方法,在直径 8 mm、流速为 0.35 ~ 6.00 m/s 条件下,实现 187 μm 铁磁性磨粒和 578 μm 非铁磁性磨粒的检测。

针对高通量传感器检测精度低的问题,白文斌等人^[12]设计了基于 FPGA 的电感式金属磨粒检测系统,可在油液流量为 5 ~ 10 L/min 的工况下实现 500 μm 铁磨粒及 1 000 μm 铜磨粒的检测精度。

2.2 电容式磨粒传感器技术

磨粒与润滑油之间的介电常数不同,当油液中出现磨粒时,会导致电容特性发生突变。因此,根据电容变化产生的脉冲信号,可实现油液中磨粒尺寸的检测。

图 4 为圆柱筒电容式磨粒传感器原理图。实心铜柱和外壁圆筒分别作为电容式油液磨粒传感器的两极,电容值的变化反映了油液污染程度^[13]。目前,电容式磨粒传感器技术有电容库尔特计数法、集成于滑油管道的电容传感器法和电容阵列成像法。

磨粒经过电容式传感器引起电容变化非常小,电容微弱特征提取是电容式磨粒传感器研究的焦点。何永勃等人^[14]设计了弧状极板式电容传感器,采用交流电桥式电容检测电路,解决电容传感器微

弱信号采集问题。韩志斌等人^[15]改进同轴电容传感器,使电容值与油液磨粒量呈线性关系,回归系数高于 0.927 9,可实现 0 ~ 0.4 g 范围磨粒的检测。王奕首等人^[16]设计了同轴圆柱电容传感器,电容值与磨粒量的线性回归系数提升到 0.979 7。马闻博等人^[17]利用阵列电容实现层析成像,36 mm 内径传感器可以检测 3 ~ 8 mm 金属颗粒。

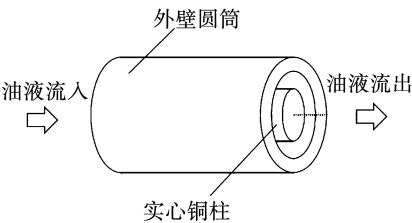


图 4 电容式磨粒传感器原理图

Fig. 4 Schematic diagram of capacitive debris sensor

电容式磨粒传感器具备铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒监测能力,可分辨润滑油中的气泡和水滴。但是,电容式磨粒传感器受环境的影响较大,需要进行一定的环境补偿。

2.3 光纤式磨粒传感器技术

光纤式油液磨粒传感器的工作原理如图 5 所示^[18]。在图 5 中,左侧光源产生一定通量的光,通过透镜和光导纤维入射到污染油液,油液中悬浮的磨粒改变了润滑油的光学特性,没有被磨粒吸收和散射的光经过透镜进行会聚。右侧第 2 根光纤将这些重新会聚的光导入到光电接收管的光敏表面上。基于朗伯比尔定律,通过光纤传感器光强度变化与磨粒尺寸、材质的映射关系,实现油液磨粒在线监测。

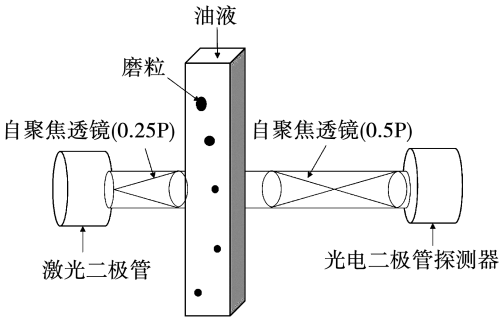


图 5 光纤式磨粒传感器原理图

Fig. 5 Schematic diagram of optical fiber debris sensor

殷勇辉等人^[19]设计了光纤式传感探头原型,提出正交光路的检测方法,初步试验数据表明,该传感器可以反映出油液的污染水平。梁洁^[20]设计了一种反射式光纤油液污染度检测传感器,实现了对不同等级污染度的油液检测。唐语^[21]研究了一种基于光学低相干成像理论的润滑油磨粒在线检测技术,用扫频光源对透明窗内的油液进行成像,通过图像识别方法实现油液磨粒在线监测。光纤式磨粒传感器本身局限性比较多,容易受到油路中气泡和油品等因素的影响,磨粒质量分数较高时精确度低,且不适用于高流速工况,无法区分铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒^[22]。

2.4 图像法磨粒传感器技术

随着光学技术和人工智能技术的发展,视频图像识别技术被应用于油液磨粒分析,为传统离线式铁谱分析技术向在线式可视化铁谱(Online Visual Ferrograph,OLVF)分析方向转变提供了技术支撑。

铁谱图像处理是 OLVF 的核心关键技术。Cao 等人^[23-24]研究了 OLVF 磨粒图像与磨粒质量分数的变化规律,提出多尺度关系因子磨损评估算法,在柴油机实验台上完成功能测试。Li 等人^[25]提出一种全视场的 OLVF 磨粒探测器,采用反射光显微成像系统获取磨粒铁谱图,在 7.2 倍光学放大倍率下得到了约 2 μm 的光学分辨率。Feng 等人^[26]针对目前 OLVF 磨损图像反射铁谱表面颜色分布和气泡干扰问题,提出基于轻量残差卷积神经网络的反射铁谱图特征提取方法,为 OLVF 提供了一种图像分割方法。

目前,在线式可视化铁谱技术是磨粒形态特征在线监测的重要研究方向,OLVF 尚在样机试验阶段,安装复杂,信息处理环境要求较高,技术成熟度还有待进一步提升。

2.5 超声波磨粒传感器技术

超声波磨粒传感器基于背散射原理,通过采集油路中超声波声散射信号,实现磨粒大小和形状的检测。超声波磨粒传感器结构如图 6 所示^[27]。

军械工程学院对超声波磨粒传感器开展了深入研究,设计了一种聚焦式高温水浸超声换能器,消除了油液温度对超声换能器输出的影响^[27]。后续开发了基于超声波的油液磨粒在线监测系统,试验结

果表明,超声波能够对磨粒浓度高达 14 000 个/mL 的油液进行检测,磨粒检测尺寸范围为 45 ~ 220 μm ^[28]。

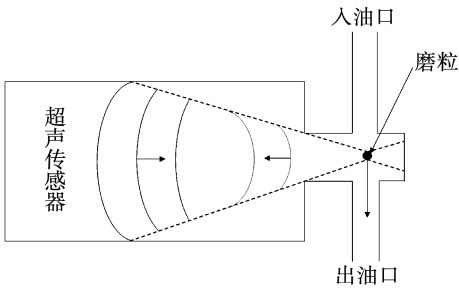


图 6 超声波磨粒传感器结构
Fig.6 Ultrasonic debris sensor structure

由于超声波存在能量耗散、脉冲回波幅度波动等技术难题,导致超声波式磨粒传感器研究处于停滞状态。

3 应用现状分析

磨粒在线监测是船用燃气轮机轴承和传动齿轮的重要诊断手段。在工程应用上,将磨粒在线监测技术分为捕捉型和流通型。

3.1 捕捉型磨粒在线监测技术

捕捉型方案源于磁塞法,采用强磁体从油液中吸附铁磁性磨粒,利用铁磁性磨粒导电特性或电磁感应等原理实现磨粒大小、质量的测量。由于颗粒物被“捕捉”保存,有利于根据颗粒物形态分析磨损失效机理。

英国 GILL 公司开发的 4212 型磨粒传感器包括两部分:永磁铁完成铁磁性磨粒的捕捉;位于顶端的电感线圈根据电磁感应原理,具备铁磁性磨粒大小、质量的连续监测功能。磨粒传感器如图 7 所示。

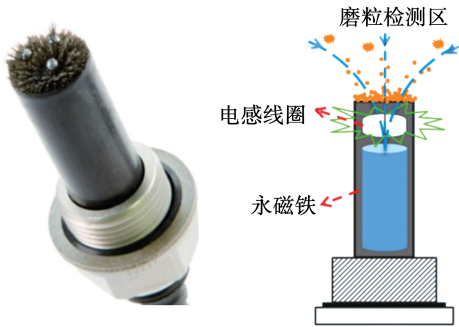


图 7 GILL 公司的 4212 型磨粒传感器
Fig.7 Gill 4212 oil debris sensor

Cao 等人^[29] 利用 GILL 公司 4212 型传感器完成轴承磨损监测试验,证实该传感器在保留金属屑信号器磨粒捕捉功能的基础上,具备磨粒在线监测功能,实现了轴承磨损状态预测。美国伊顿公司的 QDM 系列磨粒传感器采用了三相涡流分离技术,实现了油液、空气和磨粒的分离,为油液气泡分离提供技术参考,应用于 GE90 涡扇发动机,在最大转速下的磨粒捕获效率达到了 90%。三相涡流分离技术如图 8 所示。

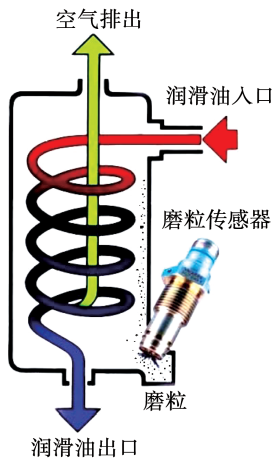


图 8 三相涡流分离技术
Fig. 8 Three phase vortex separator

北京长城航空测控技术研究所研制的 Cxm-dd-1 型磨粒传感器,利用吸附铁磁性磨粒造成传感器探头电极短路的累加次数作为磨粒增量,是一种捕捉型磨粒计数器。在船舶动力单元完成了应用测试,当润滑油泵发生刨轴故障时,油液磨粒增量变化剧烈,表明该传感器能够反映润滑设备故障状态^[30]。

3.2 流通型磨粒在线监测技术

对于流通型方案,在线磨粒监测可视为磨粒计数过程。

加拿大 GasTOPS 公司生产的 MetalSCAN 系列产品采用图 2 所示的三线圈电感检测原理,目前已经批量列装 GE、三菱、西门子、Rolls Royce 等公司多个型号燃气轮机。以 LM2500 船用燃气轮机为例, MetalSCAN 油液磨粒传感器分别布置在 4 个轴承润滑油出口和传动齿轮箱的润滑油出口,实现油液中铁磁性与非铁磁性磨粒的检测。LM2500 燃气轮机磨粒监测系统如图 9 所示。目前, MetalSCAN 在

LM2500 燃气轮机上累计了 7×10^8 h 的运行数据。利用统计模型,得到 5 个润滑部位磨粒监测报警阈值,实现了轴承剥落、传动箱磨损、密封失效等故障的提前预测。LM2500 燃气轮机磨粒监测报警阈值如表 1 所示^[31]。

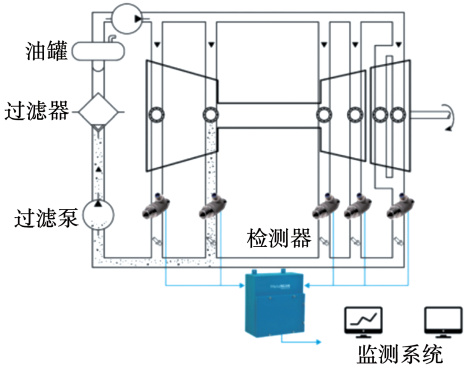


图 9 LM2500 燃气轮机磨粒监测系统示意图
Fig. 9 Debris monitoring system for LM2500 gas turbine

表 1 LM2500 燃气轮机磨粒监测报警阈值
Tab. 1 Debris monitoring alarm threshold values
for LM2500 gas turbine

传感器位置	预警限值/mg	故障限值/mg
压气机前支点	30	340
高压涡轮前支点	20	220
高压涡轮后支点	30	310
动力涡轮支点	150	1500
传动齿轮箱	50	500

与 MetalSCAN 类似的国外产品,如英国 Parker 公司 Kittiwake FG 在线磨粒传感器、美国海神公司的 Trident 传感器等均在船舶领域得到应用。

国内北京长城航空测控技术研究所、广州机械科学研究院有限公司、湖南挚新科技发展有限公司、深圳市亚泰光电技术有限公司等在流通型磨粒在线检测设备研发上取得进展,部分产品在船舶领域得到应用^[32]。

4 结 论

本文对油液磨粒监测技术进行了调研分析,分析了电感式、电容式、光纤、图像、超声波等磨粒传感器技术研发现状及其在船用燃气轮机上的应用进展,提出应重点关注以下技术问题和发展趋势:

(1) 对于捕捉型磨粒在线监测技术,润滑油粘

度、流速、阻力损失等因素直接影响传感器对铁磁磨粒的捕捉和吸附保持。因此,研究管路优化布置,提升传感器磨粒捕获能力,是增强捕捉型磨粒分辨率的研究方向。对于流通型磨粒在线监测传感器,由于传感器对磨粒尺寸识别能力随着传感器通流管径的增大而降低。因此,目前燃气轮机上大多采用旁路安装方式进行磨粒在线监测。旁路油样可视为连续取样结果,并不能完全反映主管路油样磨粒分布规律。因此,主油路磨粒高分辨率监测技术是未来重点研究方向。

(2) 船用燃气轮机滑油管路复杂,油液不可避免地含有空气,不仅加速滑油变质,也影响散热。油液中的气泡是导致各类磨粒传感器误报的主因之一,如何消除油液中的气泡是各类油液磨粒在线监测技术面临的共性问题。

(3) 各类磨粒传感器均有自身的优势和不足。当前磨粒监测研究主要以单一传感器研究和应用为主,存在一定的局限性^[33]。针对流通型磨粒传感器在线监测结果无法验证问题,建议研究流通型与捕捉型串联组合方案,在实现铁磁性磨粒监测结果相互校验的同时,利用捕捉型磨粒传感器保存磨粒样本,为润滑部件磨损总量分析提供样本支持;建议电感式、电容式等传感器与图像法融合,以弥补磨粒形貌辨识缺陷,实现磨粒尺寸、形貌、质量等综合特征获取。因此,磨粒传感器集成与磨粒特征融合是提升磨粒在线监测能力的重要研究方向。

(4) 随着磨粒在线监测技术的工程实施,将积累大量的监测数据,利用大数据、深度学习等人工智能技术挖掘磨粒数据与润滑部件磨损程度的映射关系^[34],建立轴承、传动箱等关键润滑部件故障预测模型,是未来燃气轮机磨粒在线监测技术的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 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 & Signal Processing, 2019, 118(3): 108–132.
- [2] HONG Wei, CAI Wen-jian, WANG Shao-ping, et al. Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: a review [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(5): 867–882.
- [3] 刘森, 于庆杰, 范红伟, 等. 航空发动机主轴承内圈引导面磨损原因分析及改进[J]. 轴承, 2019(11): 51–53.
- [4] LIU Sen, YU Qing-jie, FAN Hong-wei, et al. Cause analysis and improvement on wear of inner ring guiding surface of aero-engine spindle bearings [J]. Bearing, 2019(11): 51–53.
- [5] 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.
- [6] WANG Yi-shou, WU Di-heng, 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.
- [7] 苏连成, 崔雪. 电感式磨粒在线监测传感器结构参数优化[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(1): 51–69.
- [8] SU Lian-cheng, CUI Xue. Optimization of structural parameters of inductive abrasive online monitoring sensor [J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45(1): 51–69.
- [9] 陈浩, 王立勇, 陈涛. 电感式磨粒监测传感器线圈参数分析与优化[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(2): 12–14, 18.
- [10] CHEN Hao, WANG Li-yong, CHEN Tao. Analysis and optimization of coil parameters of inductive abrasive monitoring sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(2): 12–14, 18.
- [11] SONG Feng, TAN Jun, WEN Yang-fan, et al. A ferromagnetic wear particle sensor based on a rotational symmetry high-gradient magnetostatic field [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1–9.
- [12] ZHENG Yuan, SONG Feng, TAN Jun, et al. A passive ferro-particle sensor of lube-oil based on single permanent magnetic ring [J]. IEEE Sensors, 2022, 22(9): 8565–8573.
- [13] 白晨朝, 张洪朋, 曾霖, 等. 应用磁性纳米材料的电感式油液金属磨粒检测传感器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 1960–1967.
- [14] BAI Chen-zhao, ZHANG Hong-ming, ZENG Lin, et al. Inductive oil detecting sensor based on magnetic nanomaterial [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(9): 1960–1967.
- [15] 史皓天, 张洪朋, 王文琪, 等. 高精度磨粒检测传感器的设计及研究[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 2043–2052.
- [16] SHI Hao-tian, ZHANG Hong-peng, WANG Wen-qi, et al. Design and research of high-sensitivity wear debris detection sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(9): 2043–2052.
- [17] 牛泽, 李凯, 白文斌, 等. 电感式油液磨粒传感器系统设计[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 126–135.
- [18] NIU Ze, LI Kai, BAI Wen-bin, et al. Design of inductive sensor system for wear particles in oil [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 126–135.
- [19] 白文斌, 李凯. 三线圈电感式油液金属磨粒检测系统[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 78–85.
- [20] BAI Wen-bin, LI Kai. Three coil inductive oil metal abrasive particle detection system [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(1): 78–85.
- [21] 肖建伟, 杨定新, 胡政, 等. 基于介电常数测量的新型在线油液监测传感器[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(4): 102–104.
- [22] XIAO Jian-wei, YANG Ding-xin, HU Zheng, et al. A new capaci-

- tance sensor for online oil-monitoring based on dielectric constant measurement [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(4): 102 – 104.
- [14] 何永勃, 徐 斌. 基于电容传感器的飞机润滑油磨粒检测系统设计[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(10): 112 – 115.
HE Yong-bo, XU Bin. Design of aircraft lubricating oil abrasive particle detection system based on capacitive sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(10): 112 – 115.
- [15] HAN Zhi-bin, WANG Yi-shou, QING Xin-lin. Characteristics study of in-situ capacitive sensor for monitoring lubrication oil debris [J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 44 – 49.
- [16] WANG Yi-shou, HAN Zhi-bin, GAO Tian, et al. In-situ capacitive sensor for monitoring debris of lubricant oil [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2018, 70(7): 1310 – 1319.
- [17] 马闻博, 孙衍山, 曾周末. 滑油磨粒大小的电容层析成像分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(12): 1984 – 1990.
MA Wen-bo, SUN Yan-shan, ZENG Zhou-mo. Analysis of different size wear debris in oil by electrical capacitance tomography [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(12): 1984 – 1990.
- [18] SUN Jia-yi, WANG Li-ming, LI Jian-feng, 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.
- [19] 殷勇辉, 严新平, 萧汉梁. 光纤油液污染监测传感器设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2006(11): 3 – 4.
YIN Yong-hui, YAN Xin-ping, XIAO Han-liang. Development on optical-fiber transducer in oil contamination monitoring [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006(11): 3 – 4.
- [20] 梁 洁. 油液污染度反射式光纤检测技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
LIANG Jie. Research on reflective optical fiber detection technology of oil contamination degree [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
- [21] 唐 语. 基于光学低相干的滑油磨粒在线检测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
TANG Yu. Research on on-line detection technology of wear particles in oil based on optical low coherence [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [22] 胡泽民, 施洪生, 亢 凯, 等. 基于光学法的油液磨粒在线监测系统[J]. *电子技术应用*, 2018, 44(8): 52 – 55.
HU Ze-min, SHI Hong-sheng, KANG Kai, et al. Design of oil abrasive on-line monitoring system based on optical method [J]. *Application of Electronic Technique*, 2018, 44(8): 52 – 55.
- [23] CAO Wei, DONG Guang-neng, XIE You-bai, et al. Prediction of wear trend of engines via on-line wear debris monitoring [J]. *Tribology International*, 2018, 120(4): 510 – 519.
- [24] CAO Wei, ZHANG Han, WANG Ning, et al. The gearbox wears state monitoring and evaluation based on on-line wear debris features [J]. *Wear*, 2019, 426 – 427: 1719 – 1728.
- [25] LI Bo, WU Wei, ZHOU Mi, et al. A full field-of-view online visual ferrograph debris detector based on reflected light microscopic imaging [J]. *IEEE Sensors*, 2021, 21(15): 16584 – 16597.
- [26] FENG Song, ZENG Qing-hua, FAN Bin, et al. Wear debris segmentation of reflection ferrograms using lightweight residual U-Net [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1 – 11.
- [27] 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]. *摩擦学报*, 2015, 35(1): 90 – 95.
XU Chao, ZHANG Pei-lin, REN Guo-quan, et al. Output characteristic of a novel online ultrasonic wear debris sensor [J]. *Tribology*, 2015, 35(1): 90 – 95.
- [28] 徐 超, 张连武, 马振书, 等. 新型超声磨粒传感器检测能力实验研究[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(1): 21 – 25.
XU Chao, ZHANG Lian-wu, MA Zheng-shu, et al. Experimental research on detecting ability of novel online ultrasonic wear debris sensor [J]. *Lubrication Engineering*, 2016, 41(1): 21 – 25.
- [29] CAO Yun-peng, LIU Rui, DU Jian-wei, et al. Gas turbine bearing wear monitoring method based on magnetic plug inductance sensor [C]//Oslo, Norway: ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2018.
- [30] 余 婷, 张 建, 程小亮, 等. 船舶动力与传动装置润滑油状态监测[J]. *测控技术*, 2022, 41(11): 102 – 106.
SHE Ting, ZHANG Jian, CHENG Xiao-liang, et al. Lubricating oil condition monitoring for marine power and transmission device [J]. *Measurement and Control Technology*, 2022, 41(11): 102 – 106.
- [31] KITAJEVIĆ D, VELDHUIZE G J V. Advanced oil debris monitoring for pipeline mechanical drive gas turbine [C]//Munich, Germany: ASME Turbo Expo 2000: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2000.
- [32] 黎秋莹, 贺石中, 李秋秋, 等. 基于油液监测的大型船舶艏管异常磨损故障分析[J]. *润滑与密封*, 2021, 46(5): 137 – 141.
LI Qiu-ying, HE Shi-zhong, LI Qiu-qiu, et al. Abnormal wear failure analysis of large ship's stern tube based on oil monitoring [J]. *Lubrication Engineering*, 2021, 46(5): 137 – 141.
- [33] 庞新宇, 闫宗庆. 机械设备智能化油液分析技术研究现状[J]. *液压与气动*, 2020(9): 56 – 66.
PANG Xin-yu, YAN Zong-qing. Research status of intelligent oil analysis technology for mechanical equipment [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2020(9): 56 – 66.
- [34] 姜旭峰, 宗 营, 阮少军. 基于滑油监测信息的轴承试验磨损故障预警方法研究[J]. *机床与液压*, 2020, 48(22): 186 – 191.
JIANG Xu-feng, ZONG Ying, RUAN Shao-jun. Research on wear failure warning method based on oil monitoring information in bearing test [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(22): 186 – 191.