

油液在线监测传感器技术

冯 伟^{1、2} 陈闽杰¹ 贺石中¹

(1. 广州机械科学研究院设备状态检测研究所 广州 510700; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640)

摘要: 油液在线监测是设备润滑磨损状态监测与实时诊断技术的重要发展方向, 而监测仪器的开发与选择是这一故障诊断技术实现准确监测应用的关键。在对当前国内外油液磨损颗粒在线监测传感器、油质在线监测传感器、油液多信息集成在线监测仪器及应用技术介绍基础上, 给予了当前油液在线监测传感器技术的相关评述, 为油液在线监测技术的研究、应用及推广提供一定帮助。

关键词: 在线监测; 润滑; 磨损; 传感器技术

中图分类号: TH117; TP212

文献标识码: A

文章编号:

Oil On-line Monitoring Sensor Technology

Feng Wei^{1、2} Chen Minjie¹ He Shizhong¹

(1. Institute of Equipment Condition Detection, Guangzhou Mechanical Engineering Research Institute CO., LTD, Guangzhou 510700, China; 2. School of Mechanical & Automobile Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Oil on-line monitoring technique is now an important development direction of the equipment lubrication and wear condition monitoring and real-time diagnosis technology, however, development and choice of monitoring instruments is the key for realizing accurate monitoring applications. At the basis of introduction of the current domestic and international oil on-line monitoring wear particle sensors, oil quality on-line monitoring sensors and integrated oil more information on-line monitoring devices and applications, the relevant comments to the current oil-line monitoring sensor technology are given, help is provided for the oil on-line technology research, application and spread.

Keywords: on-line monitoring; lubrication; wear; sensor technology

针对摩擦学系统油液监测多年来采用离线监测为主、远不能满足现代设备长周期连续监测需要问题, 设备油液在线监测技术已成为当前设备润滑磨损失效诊断技术重要发展热点和趋势之一^[1、2]。该技术通过对设备摩擦学系统实时、连续监测并及时动态地获取被监测对象的润滑磨损等信息实现设备状态监测与实时故障诊断, 保障装备安全可靠、连续作业需要。油液在线监测消除了人为不确定性因素, 取样和检测几乎同时进行, 并能及时为企业提供装备的工作状态, 因此设备油液在线监测及诊断技术研究及运用具有重要的现实意义。2011年6月, 在武汉理工大学召开的在线油液监测技术专题研讨会上, 与会的专家学者一致认为在线监测将成为油液监测技术的主要发展方向与设备运行状态监测不可或缺的组成部分, 并对今后的油液在线监测技术发展给予展望^[3]。开展在线油液监测基础理论研究、研发在线油液监测传感器、开发设备综合诊断分析系统以及多信息融合技术研究仍是今后油液监测技术领域研究的主题。对此, 结合课题相关技术研究情况, 对当前国内外先进的润滑磨损在线监测传感器技术做一评述, 从而指导其应用。

1 磨损颗粒在线监测传感器技术

磨损颗粒在线监测是采用安装在设备润滑系统上的监测传感器实时采集流经摩擦副后的油液中所含磨损颗粒量信息并提供超限报警功能的一门油液在线监测技术。针对磨损金属颗粒具有铁磁性的特点开发的磁电型磨粒在线监测传感器是比较成功的一种。它是利用油液流经传感器具有磁场的待检区域时金属颗粒所产生的扰动, 使检测区与磨粒数量相关的磁力线或磁通量发生改变, 并进行标定而检测出磨粒数量的原理进行工作的。由于润滑油中不可避免会进入一些非铁磁性颗粒以及气泡等, 正确区分磨损颗粒是这类传感器的关键技术。

国外比较成功的这类传感器是美国 MACOM Technologies 公司开发的 TechAlert™ 10 型 (如图

1)、加拿大 GasTops 公司开发的 MetalSCAN 磨粒传感器（如图 2）^[4]和英国 Kittiwake 开发的 FG 型在线磨粒量传感器（如图 3）^[5]。TechAlert™ 10 型磨粒传感器能提供机器不同失效阶段的磨粒尺寸分布与图像信息，并具有消除因水泡和气泡引起的误报警的筛选专利技术，其铁颗粒监测范围为 50 μm 以上，非铁颗粒为 150 μm 以上。安装时需要从润滑系统旁通连接。MetalSCAN 磨粒传感器能根据非铁磁性颗粒的信号相位与铁磁性颗粒信息相位相反的特征区分颗粒种类，并根据信号的振幅确定磨粒的尺寸，可监测金属颗粒尺寸为 100 μm 以上，非金属为 250 μm 以上，并能统计出各个尺寸范围内的颗粒数量和质量，累积数据进行趋势分析。安装时，根据油路的管径尺寸选用不同尺寸的传感器直接接在油路上。FG 型在线磨粒量传感器可监测的铁颗粒为 40 μm 以上、非铁金属颗粒为 135 μm 以上，安装时直接接入油路。目前，三种传感器已经实现了军民两用，具有高灵敏度、高可靠性和快速检测特点，能及时发现并预报机械摩擦学系统突发性磨损故障。

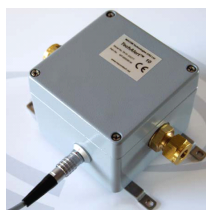


图 1 TechAlert™ 10 型磨粒传感器

Fig 1 TechAlert™ 10 debris sensor



图 2 MetalSCAN 磨粒传感器

Fig 2 MetalSCAN debris sensor

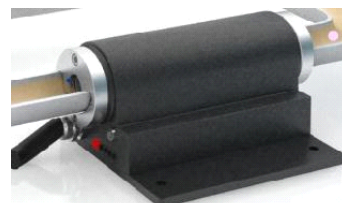


图 3 FG 型磨粒传感器

Fig 3 FG debris sensor

近年来，深圳先波科技有限公司也专注于油液在线监测传感器的研发，其开发的基于石英晶体微天平（QCM）技术的磨粒量监测传感器（如图 5）^[8]对油液中的磨损颗粒量的变化具有高的线性响应和灵敏度，目前已进入商业化应用。



图 4 图像可视铁谱传感器

Fig 4 On-line Visual Ferrograph

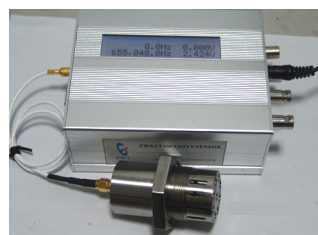


图 5 PQM-1 型颗粒传感器

Fig 5 On-line particle sensor

2 油质在线监测传感器技术

2.1 油液黏度在线监测传感器技术

黏度是衡量油品润滑能力的一个重要指标。对油品黏度监测，是判断设备润滑磨损状态、确定是否换油的重要依据。当润滑油经过被润滑的摩擦副表面时，局部的高温高压会使在用润滑油氧化，同时各种氧化产物的生成和外界污染杂质的掺入，如油泥、积碳、漆膜片、粉尘、泥沙等，也会降低润滑油的流动性，导致黏度升高。因此，实时监测设备润滑油黏度变化能及时反映在用油品质量状态及剩余寿命。

目前，基于不同的专利技术的在线黏度监测传感器均已投入市场，具有代表性的是美国 Cambridge Viscosity 公司生产的多款在线式工业用黏度传感器^[9]，如图 6 为其中一款。该在线监测传感器技术采用基于简单和稳定的电子式概念，探头内两组线圈在一个连续电磁力的作用下来回移动一个微型活塞，电路分析活塞来回移动行程的时间，从而测量油液的绝对黏度。同时，位于活塞上方的导流装置，将液体导入测量室，活塞持续运动以不断更新样品，同时机械摩擦不断擦洗测量室。一个内置的 RTD 温度测量探头，实时测量测量室的温度。其次，美国精量 MEAS 推出的一款新型油液在线监测黏度传感器如图 7 所示^[10]，该传感器利用了音叉的机械谐振，可同时测量流体的黏度，密度、介电常数和温度参数。另外，美国 TRW Conekt 公司研制的采用测量油液吸收与之接触的材料产生的剪切波能量是该液体黏度的函数原理技术开发的一款新型嵌入式油液黏度传感器，应用到

了汽车发动机油在线监测。

在国内，深圳先波科技有限公司也开发了两款工业级的油液在线监测检测传感器，一种是基于 QCM 敏感器件的润滑油黏度的在线测量传感器 FWS-2 型（如图 8）。当被测油液与探头敏感器件接触时，通过测量压电超声敏感器件的参数变化，来感知液体黏度的变化。另一款是基于超声波振动技术开发的 FWS-3 型在线黏度传感器（如图 9）^[11]，该传感器技术达到国际先进水平，测试精度高，长期稳定，无运动部件，无维护。



图 6 SPC/L311 黏度传感器 图 7 FPS 黏度传感器 图 8 FWS-2 型黏度传感器 图 9 FWS-3 型黏度传感器
Fig 6 SPC/L311 viscosity sensor Fig 7 FPS viscosity sensor Fig 8 FWS-2 viscosity sensor Fig 9 FWS-3 viscosity sensor

2.2 油液水分在线监测传感器技术

水分是指油品中水含量的多少。润滑油中的水分会促使油品乳化、氧化，降低油品黏度和油膜强度，增加油泥，加速有机酸对金属的腐蚀，使润滑、绝缘等效果变差。实验表明，随着含水量逐渐增加，润滑油的抗磨性逐渐下降，当含水量超过 0.4% 达到 1% 甚至更高的时候，抗磨性急剧下降，润滑油的润滑性丧失^[12]。因此，实时监测滑油中的含水率，能提前预测设备故障的发生。

国内外开发的油液在线水分监测传感器技术主要采用电学方法，其原理就是利用油液的电学性能如介电常数能反映油品污染状况，而水分污染对油的电学性能参数又特别敏感这一特性实现。传感器采用的电学方法主要分为电容法和电阻法。电容法将油液及其中的污染物作为一个特别构造的电容器电介质，水分等存在及数量引起介电常数变化，从而改变这个电容器的电容量。传感器通过对电容量变化大小的检测实现对油液中水分的状态监测。Kittiwake 公司开发的在线水分传感器（如图 10）^[13]、美国迪沃森公司开发的 EASZ-1 型在线水份监测传感器（如图 11）^[14]、Lubrigard 公司开发的油质在线监测传感器（如图 12）^[4]，国内先波科技开发的 FWD-1 在线监测润滑油含水率的传感器（如图 13）^[15]以及西安交通大学润滑理论与轴承研究开发的润滑油液微量水分传感器探头，都通过测量油液中的介电常数来反映油液含水率的变化。国外先进的传感器应用都具有选择性，量程范围可以根据客户需要设定选择，如 EASZ-1 型在线水分监测就分 0-1wt%、0-3wt%、0-10wt%、0-25wt% 等系列，并可以通过标准信号输出实现远程监控。



图 10 Kittiwake 水分传感器 图 11 EASZ-1 水份传感器 图 12 Lubrigard 油质传感器

Fig 10 Moisture sensor of Kittiwake Fig 11 EASZ-1 moisture sensor Fig 12 Oil quality sensor of Lubrigard

电阻式在线监测传感器主要是通过测量油液的电阻率来实现对水分及其它污染物的监测。油液电阻率的大小与其中的水分、磨粒等其它污染质含量有关，在一定条件下测出油液电阻率的变化，便可分析出润滑油品质的变化程度。如 OCEI-A 型油液污染状态快速分析仪器就是可用于在线监测的电阻型仪器。先波科技研发的一款在线油液水分监测传感器（图 14）也是采用测量油质电阻抗变化实现的。



图 13 FWD-1 水分传感器

Fig 13 FWD-1 moisture sensor



图 14 FWD-2 水分传感器

Fig 14 FWD-2 moisture sensor

2.3 油液污染度在线监测传感器技术

机械设备润滑和液压系统中油液污染的程度可用油液污染度定量表示。油液污染度是指单位体积油液中固体颗粒污染物的含量，而固体颗粒，如磨损颗粒、氧化物、粉尘等，是油液中最主要、危害最大的污染物，是引起摩擦副表面磨损、刮伤、机件卡阻等故障的主要原因。常用的方法有称重法、计数法和半定量法等。目前自动颗粒计数器在油液污染分析中应用广泛，其原理分为遮光型、光散型和电阻型等。而遮光型颗粒计数器是目前应用最广泛的一种，其方法是使一定体积的样品，流过仪器传感器，用光遮挡法（也称光阻法）检测出大于某粒径的颗粒数量，然后计算并显示出大于该粒径的颗粒数或浓度。一次取样可同时测量、判别几种粒径。美国 ICM 公司生产的在线式颗粒计数器（图 15）和德国 ARGO 公司生产的 OPCOM 在线式污染度监测装置（图 16）^[16]均采用工业界认同的遮光技术。国内，天津罗根科技有限公司自主开发的 KZ-1、2 系列在线式颗粒计数器（图 15）亦采用光阻法（遮光式）原理，内置 GB/T14039-2002（ISO4406: 1999）、NAS1638 等颗粒污染度等级标准，并可根据用户要求内置所需标准，准确度为 ± 0.5 个污染度等级。



图 15 ICM 在线颗粒计数器

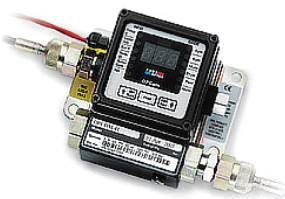


图 16 OPCOM 污染度监测装置



图 17 KZ-1 在线颗粒计数器

Fig 15 ICM on-line particle counter Fig 16 OPCOM pollution monitoring devices Fig 17 KZ-1 on-line particle counter

3 油液集成在线监测技术

为了获取更多的关于设备润滑磨损信息，提高设备油液在线故障监测的准确度，油液在线监测传感器技术向着集成化发展。这也是针对机械摩擦学系统在油液综合诊断信息中参数间表现出多种关联和互补特性发展起来的。集成传感器通过获取设备磨损颗粒、油品理化、污染度等信息，监测系统自动实现设备运行工况的综合分析与故障诊断。目前，油液分析的各种在线监测方法也越来越多，性能也逐步稳定。这些仪器也逐渐集成化，能快速地同时测定多项在用润滑油的理化指标。如美国洛克希德马丁公司开发的 LaserNet Fines 自动磨损颗粒分析仪（图 18）^[17]采用基于激光图像处理技术将磨粒形貌识别与颗粒计数两种常用的油液监测技术集成。Kittiwake 开发出 ANALEXrs 传感器套件组（图 19）^[5]，用来监测润滑油品状态，控制污染，测试及分析磨损颗粒。



图 18 LaserNet Fines 自动磨损颗粒分析仪



图 19 ANALEXrs 传感器套件组

Fig 18 Automatic wear particle analyzer of LaserNet Fines

Fig 19 Sensor package group of ANALEXrs

在国内，从事油液在线监测集成技术的主要有武汉元琅能源科技公司、武汉理工大学可靠性研究所和广州机械科学研究院设备状态检测研究所等单位。武汉理工大学可靠性研究所与长江航道局合作开发了 8000 方自航耙吸式挖泥船主要动力设备远程故障诊断系统，实现了对大功率柴油机的黏度、水分和磨损量三个指标的测量和液压系统污染度一个指标的测量。广州机械科学研究院设备状态检测研究所开发的船舶柴油机油液在线监测系统集成了磨损、黏度、水分及温度等参数的状态监测，并可根据机械设备使用不同润滑油特性实现多参数集成。集成硬件设计将油液在线检测与数据分析显示分开，设计成上位机和下位机两个部分，中间通过网络实现数据通讯。下位机（图 20 左）独立实现对机械设备润滑系统的油液检测和数据采集，控制及显示终端系统安装在上位机（图 20 右）上，接收从下位机传来的采样数据，并实时显示、数据存储、趋势分析及报警诊断等功能。

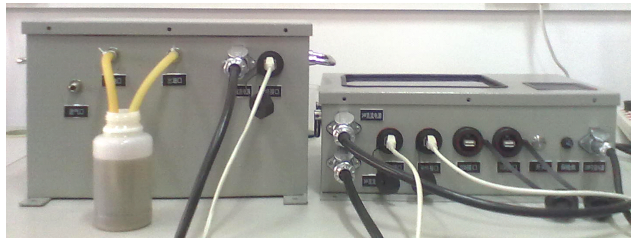


图 20 集成式油液在线监测仪

Fig 20 Oil on-line monitoring integrated device

4 油液在线监测传感器技术评述

油液在线监测传感器及监测系统许多国内外研究机构对此作了大量的研究和探索。但是由于各种机械设备的润滑磨损故障表征不同，被监测的摩擦学系统特性要求各异，油液故障特征信号检测手段复杂、信息量大、表征的油质信息多以及状态监测各种层次的区别等等，都使得油液在线监测传感器技术研发困难以及出现多种方法。根据上述介绍的传感器和已经开发未介绍的传感器收集油液特征信息的原理，就有磁性法、光学法、电学法、声学法^[8]、X 射线法^[2]以及集成化法等。目前，许多在线油液监测传感器技术还处于试验和试用阶段，并不能完全满足设备油液状态监测与诊断的实际需要，带给企业的直接经济效益较慢，在线监测成功案例也不多，导致工程推广与使用难的尴尬局面。

另一方面，从油液在线监测传感器技术本身的难度考虑，尤其以机械摩擦副磨损监测为主要，如果单纯从在线监测判别有无故障并预警是能做到的，但所存在的误报率、特征信息精确检测（如数据修正、温度补偿等）、故障机理评判、磨损状态及其与故障相关性等，现行传感器似乎并未给出一个确切的定量描述。从目前在线磨粒图像判别磨损机理分析技术上看，LaserNet Fines 只能针对大于 $20\mu\text{m}$ 能进行严重滑动磨粒、切削磨粒、疲劳磨粒、纤维等颗粒的自动识别，但机器开始发生异常磨损的磨粒尺寸是在 $10\mu\text{m}$ 就开始的，但不是说磨损颗粒在这个尺寸就一定出现磨损故障，它需要一个累积的过程；同时，对机器磨损故障讲，小颗粒的在线监测同样重要，油液中的微米级小颗粒具有时间的发展趋势特性，它们大量的产生对油品氧化物、油泥、漆膜等产生催化效应，进而引发非一般性磨损故障，如油路过滤网堵塞、液压阀件卡阻等，而这些信息对磨损故障机理评价似乎并不具有价值，但它确实又引发摩擦学故障。因此，油液磨损在线监测传感器技术仍是一个亟待开发的研究点。

5 结束语

多年来油液监测工程实践证实，油液监测技术已成为设备摩擦学系统状态监测与故障诊断的重要手段，该技术是从润滑剂或工作介质这一信息载体实施诊断的方法与技术系统，并涉及主动预知维修系统。国外开展的大量油液在线监测也是对早期在用油品性能的变化和摩擦构件磨损状况能实时提供故障诊断分析，及早发现并预报突发性故障，避免重大事故的发生。在这一点上，油液在线

监测技术代表了设备润滑磨损故障诊断技术的前沿。

参考文献:

- [1] Schalcosky David C, Byington Carl S. Advances in real time oil analysis[J/OL]. Practicing Oil Analysis Magazine, <http://www.machinerylubrication.com/Read/138/real-time-oil-analysis>, 2000-11-01
- [2] 杨其明, 严新平, 贺石中. 油液监测分析现场实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社. 2006: 143.
- [3] 严新平, 张月雷, 毛军红. 在线油液监测技术现状与展望[J]. 润滑与密封, 2011, 36(10):1-3,7.
- [4] Sabrin Gebarin. On-line and In-line Wear Debris Detectors: What's Out There? [J/OL]. Practicing Oil Analysis Magazine, <http://www.machinerylubrication.com/Read/521/in-line-wear-debris-detectors>, 2003-09-01.
- [5] Jack Poley, The History of Oil Analysis [J/OL]. Practicing Oil Analysis Magazine, <http://www.machinerylubrication.com/Read/1113/history-of-oil-analysis>, 2007-11-01.
- [6] Wu Tongha, Mao Junhong, Wang Jingtao, et al. A New On-line Visual Ferrograph[J]. Tribology Transactions, 2009, 53: 623-631.
- [7] 殷勇辉, 严新平, 萧汉梁等. 磨粒监测电感式传感器设计[J]. 传感器技术, 2005, 22(7):36-38,41.
- [8] 张超, 张峰. 一种新型在线监测润滑油粘度和磨损颗粒量的传感器[J]. 润滑与密封, 2006, (12):130-131,78.
- [9] Curt Felix, Rob Kasameyer. Real-Time Viscosity Tracks Oil Condition[EB/OL]. <http://www.cambridgeviscosity.com/articles>, 2006-04-01
- [10] 在线油污染度传感器 FPS2800B12C4[EB/OL]. <http://www.1000iot.com/html/2011-07/3759.html>, 2011-07-20
- [11] 张峰. 交通部救助打捞局打捞船安装在线油液监测传感器[EB/OL]. <http://www.szxianbo.com/App.asp?classid=26&id=11>, 2011-3-1
- [12] 王国庆. 润滑油液检测技术现状与发展[J]. 润滑油, 2004, 10(5): 41-43.
- [13] On-Line Moisture Sensor[EB/OL]. http://www.kittiwake.com/moisture_sensor.htm, 2006-06-01
- [14] Water in Oil Monitors[EB/OL]. http://www.eesiflo.com/products/easz1_01.html, 2006-10-01
- [15] 张峰, 赵晓, 贺嘉聪. 新型电化学阻抗谱在线润滑油含水率监测传感器测试[J]. 润滑与密封, 2011, 36 (5):116-118,121
- [16] OPCOm 小型在线式污染度监测装置[EB/OL]. http://www.mt-hydraulics.com/product_type.asp?product_type=流体污染检测&page=2, 2011-09-01
- [17] David Filicky, Lockheed Martin Thomas Sebok, Lockheed Martin Malte Lukas. LaserNet Fines-A New Tool for the Oil Analysis Toolbox [J/OL]. Practicing Oil Analysis Magazine, <http://www.machinerylubrication.com/Read/383/lasernet-fines-oil-analysis>, 2002-5-1.
- [18] Kerem Durdag. Viscosity Monitoring With a Solid-state Embedded Probe [J/OL]. Practicing Oil Analysis Magazine, <http://www.machinerylubrication.com/Read/1083/viscosity-monitoring-probe>, 2007-09-01.

支撑项目与作者介绍:

基金项目: 广州机械科学研究院有限公司博士后基金项目 (17300008), 广东省部产学研结合项目 (2011B090400488), 广州市黄埔区科技计划项目 (17150001)

作者简介: 冯伟(1976—), 男, 在站博士后, 研究方向: 摩擦学原理与应用, 设备故障诊断方法. E-mail: fengw@whut.edu.cn;