

航空发动机滑油系统健康管理技术分析

Analysis of Health Management for Aero Engine Lubrication System

李洋洋 / 中国航空发动机研究院

滑油系统作为重要子系统，为航空发动机的传动部件提供充足、温度适宜且洁净的润滑油，保证发动机安全运转。滑油系统一旦发生故障，可能造成发动机内部结构损坏，导致空中停车危及飞行安全，造成无法挽回的损失。因此，滑油系统的健康管理技术对于保障飞行安全具有重要意义。

航空发动机滑油系统经常在高速、强摩擦以及强振动的恶劣环境中工作，异常工况条件极易引发故障。滑油系统健康管理技术能够完成滑油系统的状态监视、故障诊断及趋势预测，提高发动机的使用效率，实现发动机从定期维护向视情维修的转变，最终降低发动机使用过程中的维护成本。健康管理技术主要包括基于模型或者基于数据的方法，而航空发动机滑油系统模型影响因素较多，难以构建精确的数学模型。因此，滑油系统健康管理技术研究更加侧重于数据驱动的方法，具体技术流程如下：通过滑油系统监测参数提炼其正常/异常特征，为后续状态监测、故障诊断方法和趋势预测技术提供数据输入；滑油系统故障特征参数类型具有多元性，根据不同类型的监测参数选择适当的故障诊断方法，实现故障诊断定位；如果监测参数未发现异常，基于趋势预测方法，预测失效时间，为发动机维护提供建议。

多元信息监测

滑油系统监测参数具有阶段性、多维性、时变性和动态性等特点，状态表征参数种类多、指标多，主要包括滑油品质参数、系统的性能参

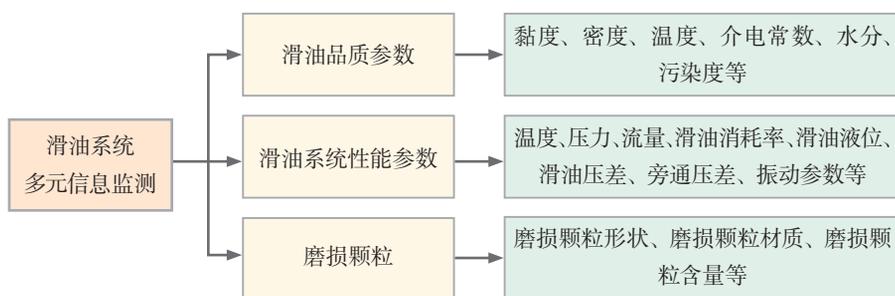


图1 滑油系统多元信息类型

数和磨损故障产生的磨粒情况。以工程实际中获取的监测参数为依据，分析发动机的传动润滑的工作状态，实现发动机的状态监测、故障诊断和趋势预测，更大程度上实现发动机的视情维修，如图1所示。

滑油品质参数

航空发动机及大型机械装备在高速运转状态下，由于零部件之间的接触、摩擦，加之高温、高剪切的作用，滑油本身会发生氧化，抗氧化剂、抗磨剂会发生降解。除了滑油本身的变化，外界的污染物同样会使滑油品质性能退化，严重影响滑油的润滑效果，润滑效果的降低是发动机磨损故障的重要根源。其中黏度衡量其耐磨、减磨的作用，密度、介电常数、水分、污染度等参数能够表征污染物的多少，温度的变化直接影响黏度和密度等其他监测参数，因此通过监测滑油品质

参数，为发动机换油提供技术支持，降低油品劣化造成的发动机传动系统故障，从而降低维护成本^[1]。

滑油系统性能参数

在工程应用中，针对航空发动机滑油系统的状态监测，主要依赖布置其中的传感器。滑油系统性能参数主要包括滑油供油压力、滑油供油温度、滑油压差、中轴承腔回油温度、后轴承腔回油温度、滑油总回油温度、滑油后轴承腔腔压、滑油消耗率、滑油液位、滑油屑末等。依据历史典型故障模式分析和故障模式影响及危害性分析（FMECA）等方法，通过性能参数异常监测，实现滑油系统工作状态的监控，判断是否存在滑油泵故障、阀门故障、漏油等故障。滑油过热、滑油压力低等故障模式是飞行员格外关注的信号，在飞机座舱中以第二关注等级信号实现滑油系统预警，提升发动机

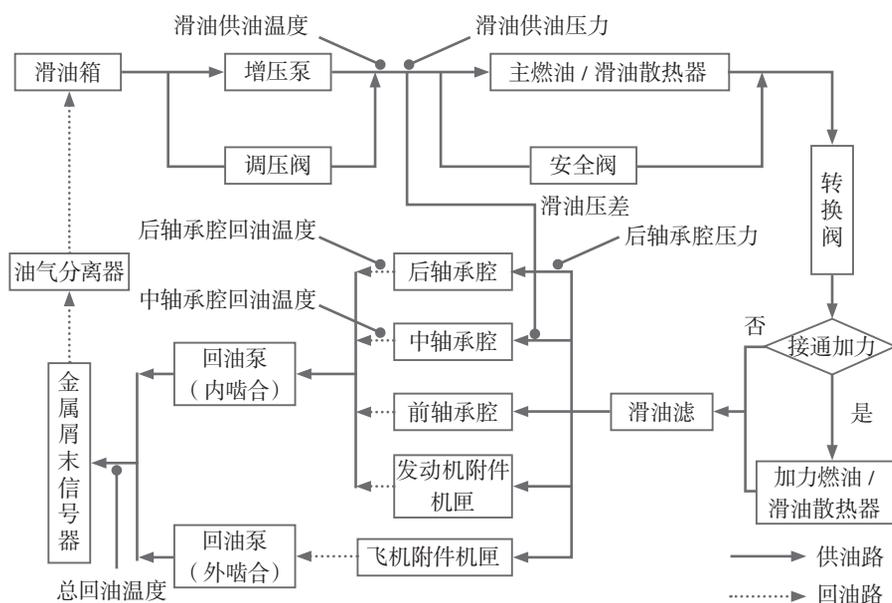


图2 发动机滑油系统结构组成及参数测试位置

的运行安全性。图2所示为发动机滑油系统结构组成及参数测试位置。

磨损颗粒情况

滑油系统中携带的磨损颗粒是发动机磨损状态判别和磨损故障诊断的重要依据，主要的监测手段包括金属屑末传感器和磁塞。金属屑末传感器在线监测磨损颗粒的等效质量，实现发动机机载在线监控，磁塞可以吸附滑油中的铁磁性磨损颗粒，定期进行离线分析。磨损颗粒本身的特征反映了部件实际的磨损机理，表现形式主要分为正常磨损、磨料磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、黏着磨损、冲蚀磨损、微动磨损。对不同形式的磨损（见图3），磨损颗粒的尺寸和形状存在差异，据此可以确定设备的磨损类型^[2]。传动系统不同部件的材质不一致，导致磨损颗粒材质的不同，通过分析磨损颗粒的颜色，可以实现故障诊断定位，降低排故时间，提高发动机的维修性^[3]。

智能监测及诊断方法

滑油系统品质参数多用来进行异常检测，评估润滑油性能，在早期实现故障探测和机理溯源，是缓解早期设备恶化的第一线防御。由于滑油品质参数多元化、多样性以及关联性强的特点，首先运用免疫算法去噪、平滑去噪、小波去噪、主成分分

析（PCA）等方法进行数据预处理，完成噪声去除和数据降维，优选对故障表现明显的参数，然后基于支持向量机、随机森林、BP神经网络、长短期记忆网络（LSTM）等方法，完成滑油油液的综合状态评估。

滑油系统性能参数除了实现传动润滑系统监测外，还可以实现故障诊断定位。油品参数与性能参数的数据形式相似，因此油品参数的处理方法，性能参数同样适用，获取的特征数据通过贝叶斯网络、D-S证据理论、故障树、模糊推理系统、隐马尔可夫模型等智能诊断方法进行故障诊断定位。

典型失效磨粒的分析和识别是设备磨损状态及诊断的重要技术手段，科研人员通过磨粒卷积神经网络等图像识别技术提取滑油磨粒表面的特征信息，包括但不限于磨粒面积、磨粒长径比、平均尺寸、主轴长度、等效直径等参数，通过典型磨粒参数表征方法，基于神经网络、随机森林等方法构建具有自学

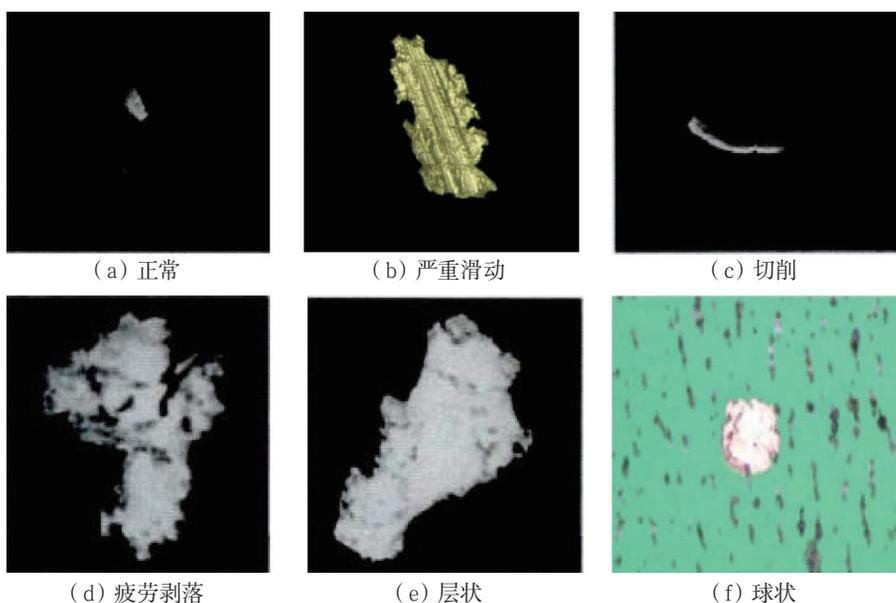


图3 典型磨损颗粒类型

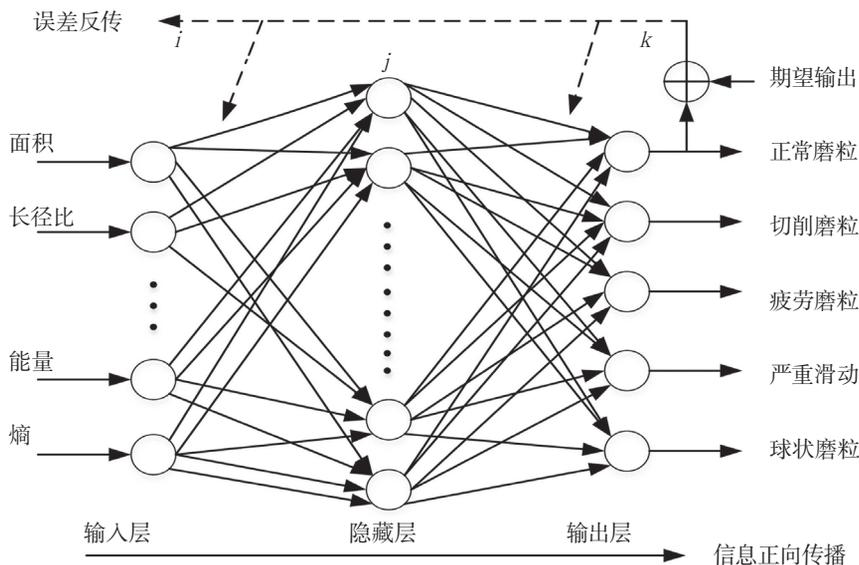


图4 基于磨粒形貌的神经网络模型

习能力的磨粒类型辨识模型，如图4所示，形成磨粒产生机理与磨粒特征的映射关系，为故障诊断定位提供支撑^[4]。滑油系统中各个摩擦副的材质存在差异，通过构建典型材质颜色库，利用K-means聚类方法和基于欧氏距离的最小距离分类法实现磨粒颜色自动识别，可以进一步判断出磨损或故障发生的部位，实现故障诊断定位。

故障趋势预测技术

对于未检测出异常的设备，通过监测参数了解其状态走势具有十分重要的意义。常用的趋势预测方法包括可靠性模型——失效模型、高斯(Gaussian)分布、维纳(Wiener)随机过程模型、伽马(Gamma)随机过程模型等；机器学习方法——支持向量回归模型、LSTM神经网络、门控循环单元(GRU)神经网络、自回归积分滑动平均模型(ARIMA)时间序列预测法等。趋势预测通常需要利用大量历史数据，基于可靠性模型或者神经网络构建趋势预测模型，通过对滑油品质参

数、磨损参数等进行训练，预测部件何时失效或者性能降级到不可接受的状态，提前进行维护保养^[5]。

技术展望

滑油系统状态监测、故障诊断、趋势预测算法设计中存在很多技术问题需要优化和解决，主要包括以下几点。

一是传动润滑系统测点较少，不能精确监测故障的发生。在航空发动机传动润滑系统中，机载测点很少，很难准确地监测整个滑油系统的故障，只能通过定期的检测和维护，增加了维护成本，亟须通过测试性技术，基于安全性、可靠性、经济性实现传感器的优化配置，提高系统的故障可检测性。

二是单一参数状态监测准确率。目前发动机针对单一的参数进行监测，而滑油参数指标较为多元化，不同指标表征的系统状态不一致，导致状态监测准确率低，无法正确评估发动机状态，未来综合多参数，实现综合状态评估，提高状态监测准确率。

三是故障特征表现微弱，导致无法实现精确故障诊断定位。轴承、齿轮等部件发生故障后，振动信号表现更为明显，通过性能参数无法准确判断，滑油离线分析存在周期性，且机载屑末传感器无法进行诊断定位，导致无法第一时间判断故障部位，可以通过振动参数、屑末传感器信号实现融合诊断，确定故障位置。

结束语

滑油系统的监测、诊断、预测技术是航空发动机健康管理技术中重要的组成部分，提升滑油系统的健康管理能力，将有利于降低发动机使用过程中的维修成本，提高发动机使用效率，促进发动机从定期维护向视情维修转变。

航空动力

(李洋洋，中国航空发动机研究院，工程师，主要从事航空发动机健康管理研究)

参考文献

- [1] 王霞. 基于机器学习的滑油参数异常识别与理化性能评估研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [2] 柏宇. 基于油液分析的航空发动机磨损故障诊断方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- [3] 孔祥兴, 邵涛. 基于颜色特征提取的磨粒材质识别[J]. 润滑与密封, 2020, 45(5): 79-85.
- [4] 左洪福. 航空发动机磨损故障诊断系统研究[J]. 民航经济与技术, 1995, (6): 31-34.
- [5] LIU L, WANG S, LIU D, et al. Entropy-based sensor selection for condition monitoring and prognostics of aircraft engine[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(9-10): 2092-2096.