

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2015.10.018

显微磨粒图像识别知识规则提取及应用*

王洪伟^{1,2} 陈果¹ 林桐¹ 汪瑾¹ 陈立波²

(1. 南京航空航天大学民航学院 江苏南京 210016; 2. 北京航空工程技术研究中心 北京 100076)

摘要: 针对新研制的多功能油液磨粒智能检测系统 MIDCS 中的磨粒图像识别问题, 引入数据挖掘方法获取了磨粒图像识别的知识规则, 实现对磨粒类别的智能识别。利用 MIDCS 系统获取实际航空发动机运行过程中由于滚动轴承磨损而产生的大量典型磨粒, 基于图像分析方法提取 16 个磨粒特征参数, 形成标准案例库; 利用 Weka 软件的决策树算法自动提取知识规则, 并对知识规则进行优化和简化; 对所提取得到的知识规则进行验证和分析。结果表明, 所提取的磨粒识别规则符合磨粒识别的统计规律, 识别规则不仅简洁, 而且具有很高的精度。基于 Weka 软件的规则提取方法大大提高了 MIDCS 系统的磨粒识别自动化和智能化水平, 对于利用 MIDCS 进行航空发动机滚动轴承疲劳磨损故障诊断, 具有重要的工程实用价值。

关键词: 故障诊断; 油液监控; 磨粒识别; 规则提取; 图像分析

中图分类号: V232.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-0150 (2015) 10-086-06

Knowledge Rules Extraction and Application of Micro Debris Image Recognition

Wang Hongwei^{1,2} Chen Guo¹ Lin Tong¹ Wang Jin¹ Chen Libo²

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China;
2. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: Aimed at the wear particle recognition problem of the new Multiple Intelligent Debris Classifying System (MIDCS), data mining method was introduced in order to obtain the knowledge rules of wear particle recognition, and the expert system theory was used to realize the intelligent recognition of debris classes. A large number of typical debris caused by rolling bearing wear in the actual aero-engine operational process was obtained by MIDCS, 16 debris characteristic parameters were extracted based on the image analysis method, and the standard case library was formed. The decision tree algorithm of the Weka software was used for automatic extraction of the knowledge rules, and the knowledge rules were optimized and simplified. The extracted knowledge rules were verified and analyzed. The results show that the rules agree well with the wear particles recognition statistical laws, the extracted rules is very brief and correct, the extraction method based on Weka software can be used in the debris class recognition of MIDCS well, and the automation and intelligent level of MIDCS debris class recognition are greatly improved. It is of significant engineering value for the aero-engine rolling bearing fatigue wear fault diagnosis by using MIDCS.

Keywords: fault diagnosis; oil monitoring; debris recognition; rule extraction; image analysis

油液中尺寸在 20 μm 以上的磨粒是反应航空发动机滚动轴承磨损的敏感信息, 而常用的油液监控技

术^[1], 例如光谱分析、铁谱分析、污染度检测等, 均难于实现油液中该档尺寸磨粒的自动检测。基于此, 王洪伟等^[2]设计开发了多功能油液磨粒智能检测与诊断系统 (Multiple Intelligent Debris Classifying System, MIDCS), MIDCS 系统的检测原理是基于图像分析和磨粒识别的方法实现对油液中大于 10 μm 以上的磨损颗粒自动检测。因此, 磨粒图像识别是该系统的技术关键。

国内外已有许多学者对磨粒识别进行了广泛研

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (61179057)。

收稿日期: 2014-11-03

作者简介: 王洪伟 (1979—), 男, 博士研究生, 从事航空发动机磨损故障诊断与油液监控研究。E-mail: mtoc@163.com.

通讯作者: 陈果 (1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为航空发动机转子动力学、状态监测与故障诊断、图像处理及模式识别等。E-mail: cgzyx@263.net.

究, 1989年美国的 Carborundum 公司开发出一套被称之为 FAST 的铁谱分析专家系统^[3], 该系统主要是将铁谱片上的特征磨粒, 与存储在系统光盘中的磨粒图谱的照片进行比较而得出结论。石宏等人^[4]采用改进的粒子群算法同时优化支持向量机的惩罚参数和核函数参数, 建立了自适应磨粒识别模型, 对铁谱磨粒类型进行识别。范君^[5]基于支持向量机和免疫算法, 通过免疫算法对支持向量机进行训练, 得到磨粒识别模型, 对磨损颗粒进行判别。黄安雅等^[6]利用前馈神经网络对典型磨损磨粒分析识别。然而, 基于神经网络、支持向量机等方法的识别技术, 其识别过程为不具备解释能力, 同时, 在应用过程中往往会出现模型参数选取困难等问题。专家系统是一种基于规则推理的诊断方法, 即诊断过程具有很好的解释性, 因此将其应用于磨粒识别, 将会使诊断过程变得更加简单、清晰。

但是, 利用专家系统实现磨粒自动分类, 其关键在于要从众多的磨粒特征和样本中提取出磨粒识别的规则, 且要求规则简单、可靠、易于理解。鉴于此, 本文作者利用 MIDCS 系统对实际航空发动机油样进行检测, 基于图像分析的方法提取磨粒特征, 得到大量不同类别的磨粒样本, 利用 Weka 软件实现对磨粒样本的知识规则自动提取, 并对规则进行简化和优化, 同时, 与传统的经验规则进行对比, 以充分验证规则的有效性和正确性。

1 磨粒图像特征提取

1.1 MIDCS 系统简介

多功能油液磨粒智能检测与诊断系统 (Multiple Intelligent Debris Classifying System, MIDCS) 分为硬件和软件 2 部分, 硬件部分实现油液中磨粒图像的自动采集, 软件部分则实现对运动颗粒的形貌特征进行自动识别^[1], 对于长轴尺寸大于 10 μm 的颗粒, MIDCS 通过特征识别, 将其区分为切削磨粒、严重滑动磨粒、疲劳磨粒、气泡、纤维、其他非金属颗粒。

系统硬件部分用于完成油液颗粒图像采集。如图 1 所示, 系统硬件部分主要由蠕动泵、透射光源、高速摄像机、精密样品池、反射光源、光学组件、电路控制模块、工控机模块等组成。取样瓶中的油液在蠕动泵的驱动下沿管路通过内部样品池, 样品池中的油液颗粒在透射光路和反射光路的照射下形成颗粒图像, 并通过光学转换进入高速摄像机, 由图像采集卡完成图像采集。

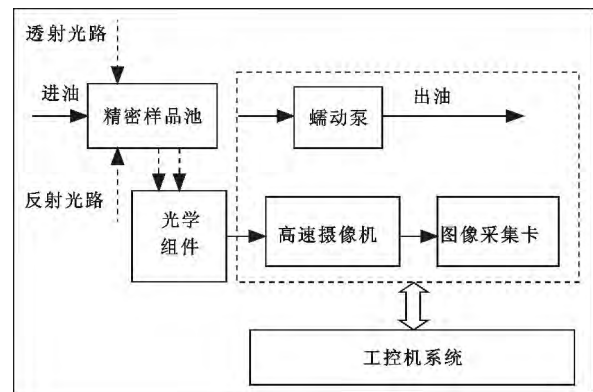


图 1 系统原理框图

Fig 1 Principle block diagram of system

考虑到便携性, 系统整体体积不宜过大, 因此硬件集成了工控机系统, 使用触摸屏操作, 无需使用外置计算机。硬件外形尺寸为 480 mm \times 275 mm \times 275 mm。系统从上至下分为 3 层, 最上面为触摸屏, 中间层主要集中了油液管路、精密样品池、光路组件和高速摄像机, 最下层为工控机系统, 仪器外观见图 2。



图 2 仪器外观

Fig 2 Appearance of instrumentation

1.2 典型磨粒

MIDCS 首先采用最大熵的动态阈值分割技术, 对预处理后的图像上的颗粒目标进行分离和处理, 以方便对单个磨粒进行识别。对于长轴尺寸在 10 μm 以上的颗粒进行特征分析与辨识, 将其区分为切削磨粒、严重滑动磨粒、疲劳磨粒、气泡、纤维、其他非金属颗粒 6 类。MIDCS 采集到的长轴尺寸大于 10 μm 的 6 类典型颗粒图像如图 3 所示。

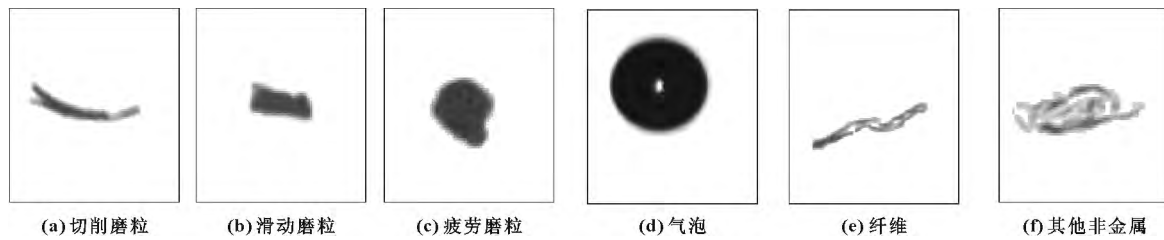


图 3 典型磨粒图像

Fig 3 Typical images of wear particles

1.3 磨粒特征分析

目前,公开发表的磨粒识别特征参数^[7-9]已经超过了 100 个,其中有大量的参数是重复和冗余的。为此,本文作者对运动磨粒的识别特征进行了分析,选择了如表 1 所示的 16 个特征^[2],分别是 7 个矩特征、

圆度、长短轴比、孔隙率、周短比、凹度、红区比、绿红比、绿色对比度、二次孔隙率。其中,根据 MIDCS 的磨粒特点而提出的新特征为红区比、二次孔隙率、绿红比、绿色对比度、周短比。用于磨粒识别的 16 个特征和磨粒类别的定义如表 1 和表 2 所示。

表 1 用于磨粒识别的 16 个特征

Table 1 16 Characteristics for wear particles recognition

特征编号	att-1-att7	att-8	att-9	att-10	att-11	att-12	att-13	att-14	att-15	att-16
特征名	矩特征 1-7	圆度	长短轴比	孔隙率	周短比	凹度	红区比	绿红比	绿色对比度	二次孔隙率

表 2 磨粒类别定义

Table 2 Category definition of wear particles

类别编号	1	2	3	4	6	7
类别名	切削磨粒	滑动磨粒	疲劳磨粒	气泡	纤维	非金属

5 个新特征的计算公式为:

(1) 红色面积比

红色面积比 m 是区分金属和非金属颗粒的重要指标,一般红色面积比大的为金属颗粒,红色面积小的为非金属颗粒,其定义为

$$m = \frac{n_{\text{红}}}{n_{\text{总}}} \quad (1)$$

式中: $n_{\text{红}}$ 是满足连续红色分量大于绿色分量的像素点个数; $n_{\text{总}}$ 是总像素个数。

(2) 二次孔隙率

将所有磨粒内部绿色分量大于给定值的像素点重新定义为空洞,赋值为 0,用于区分红绿颜色分布不均匀的非金属,凡是二次孔隙率大于 0 的均为非金属颗粒。

$$E' = \frac{n(0)'}{n(1)} \quad (2)$$

式中: $n(0)'$ 是绿色分量大于给定值的像素点被赋值

为 0 的像素点的个数; $n(1)$ 是像素点总个数。

(3) 绿红比

绿红比 L 定义为磨粒内部所有像素点的绿色分量 G 平均值与红色分量 R 平均值的比值。一般金属颗粒的绿红比较小,非金属颗粒的绿红比较大。

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (3)$$

(4) 绿色对比度

绿色对比度是区分气泡的显著特征,若绿色对比度大于 4,则可确定颗粒为气泡,其定义为

$$K = \frac{G_1}{G_2} \quad (4)$$

式中: G_1 是磨粒核心区域中的所有像素绿色分量最大值, G_2 是核心区域之外的所有像素绿色分量最小值。

(5) 周短比

周短比为磨粒周长 P 与磨粒短轴 b 的比值,其定义为

$$J = \frac{P}{b} \quad (5)$$

2 基于 Weka 软件的磨粒识别规则提取

Weka 是新西兰 Waikato 大学开发的全面的数据挖掘系统^[10],它提供了多种数据挖掘方法,可以对

任意数据集进行数据预处理以及算法性能评估等。Weka 是由 Java 语言实现的开放性平台, 具有很好的扩展性和兼容性, 为开发者提供了一个通用的数据挖掘开发平台。本文作者利用 Weka 软件进行磨粒识别规则提取研究。

依据提取的磨粒 16 个特征, 利用 MIDCS 系统对实际航空发动机油样进行检测分析, 得到了 2 404 个不同类型的标准磨粒, 每个磨粒通过 MIDCS 系统图像处理方法得到 16 个特征, 特征的名称和类别编号见表 1 和表 2。

采用 Weka 软件的 J4.8 算法, 该算法是 C4.5 学习器的 Weka 实现, J4.8 算法实际上实现了一个被称为 C4.5 的修正版 8 的较新的且略有改进的版本。其中置信度设为 $C=0.25$, 覆盖实例数目 $M=2$, 即在 Weka 软件中的分类器表示为: weka.classifiers.trees.J48 -C0.25 -M2。

图 4、5 示出了 2 404 个样本在 C4.5 算法下生成的决策树结果, 表 3 给出了基于 Weka 软件得到的磨粒识别特征。从表 3 可以看出, 仅用决策树中提取的 6 条规则 4 个属性就表达了 2 404 个磨粒数据中所蕴含的识别规律, 有效地实现了对数据冗余特征的压缩和信息浓缩。表 4 给出了利用所提取的规则, 对 2 404 个 6 类磨粒的识别结果。

```

att_13 <= 0.0984
|   att_9 <= 0.1522: 6 (28.0/1.0)
|   att_9 > 0.1522: 7 (895.0)
att_13 > 0.0984
|   att_11 <= 8.4901
|   |   att_15 <= 3.1714: 3 (457.0)
|   |   att_15 > 3.1714: 4 (95.0)
|   |   att_11 > 8.4901
|   |   |   att_11 <= 11.4952: 2 (485.0/2.0)
|   |   |   att_11 > 11.4952: 1 (444.0/5.0)

Number of Leaves : 6

Size of the tree : 11
    
```

图 4 C4.5 决策树算法生成的结果

Fig 4 The result of the decision tree algorithm C4.5

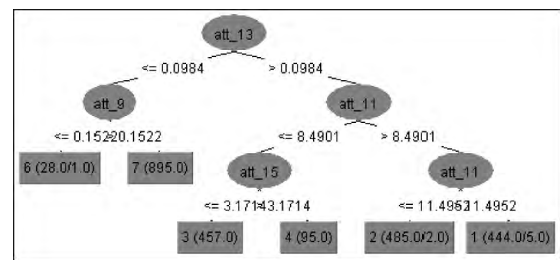


图 5 C4.5 决策树算法生成的决策树

Fig 5 The decision tree generated by the decision tree algorithm

表 3 基于 Weka 软件的规则提取结果

Table 3 The extraction rule results based on Weka software

规则	条件	结论
规则 1	红区比 $m > 0.0984$, 且周短比 $J > 11.4952$	切削磨粒
规则 2	红区比 $m > 0.0984$, 且周短比 $8.4901 < J \leq 11.4952$	滑动磨粒
规则 3	红区比 $m > 0.0984$, 且周短比 $J \leq 8.4901$, 且绿色对比度 $K \leq 3.1714$	疲劳磨粒
规则 4	红区比 $m > 0.0984$, 且周短比 $J \leq 8.4901$, 且绿色对比度 $K > 3.1714$	气泡
规则 5	红区比 $m \leq 0.0984$, 且周短比 $J \leq 0.1522$	纤维
规则 6	红区比 $m \leq 0.0984$, 且周短比 $J > 0.1522$	非金属

表 4 基于 Weka 软件提取的规则对样本测试结果

Table 4 The testing results on the sample based on Weka software extracted rules

磨粒类型	试验磨粒数量	识别数量	识别率
切削磨粒	439	437	99.5%
严重滑动磨粒	485	482	99.4%
疲劳磨粒	458	456	99.6%
气泡	95	95	100.0%
纤维	27	25	92.6%
非金属颗粒	900	895	99.5%
合计	2 404	2 390	99.4%

从表 3 所表示的规则可以看出每条规则解释了每种磨粒的识别方法, 具体的规则解释为:

(1) 规则 1 解释: 由于切削磨粒较细长, 显然磨粒周长 P 与磨粒短轴 b 比值 (周短比) 应该很大, 同时, 由于切削磨粒为金属磨粒, 磨粒在显微镜红光照射下反射很大, 因此表面显示为红色, 因此磨粒红区比较大。因此仅此 2 个特征即可实现对该类磨粒的有效识别。从表 4 可以看出, 该规则对切削磨粒的识别率达到 99.5%。

(2) 规则 2 解释: 由于滑动磨粒也较细长, 但是没有切削磨粒细长, 因此周短比较切削磨粒要小

些,同时,由于滑动磨粒为金属磨粒,磨粒在显微镜红光照射下反射很大,因此表面显示为红色,因此磨粒红区比应该较大。因此根据此 2 个特征,即可实现对该类磨粒的有效识别。从表 4 可以看出,该规则对滑动磨粒的识别率达到 99.4%。

(3) 规则 3 解释: 由于疲劳磨粒形态较圆,因此磨粒周短比很小,同时,由于疲劳磨粒为金属磨粒,磨粒在显微镜红光照射下反射很大,因此表面显示为红色,因此磨粒红区比应该较大。从表 4 可以看出,该规则对疲劳磨粒的识别率达到 99.6%。

(4) 规则 4 解释: 由于气泡形态很圆,因此磨粒周长 P 与磨粒短轴 b 比值(周短比)较小,同时,由于气泡在显微镜的颜色特点是中间区域较绿,外部区域较红,因此磨粒红区比应该较大,而绿色对比度应很大。显然绿色对比度是识别气泡的关键特征。从表 4 可以看出,该规则对气泡的识别率达到 100%。

(5) 规则 5 和规则 6 解释: 由于纤维和非金属

在显微镜下反光较弱,因此磨粒区域上红区比应该较小。同时纤维和非金属相比,纤维更为细长,因此纤维的长短轴比更小。从表 4 可以看出,该规则对纤维识别率达到 92.6%,对非金属磨粒的识别率达到 99.5%。

表 5 示出了文献 [2] 用人工的方法总结出的 MIDCS 磨粒识别规则。对比表 3 和表 5,可以看出,对于切削磨粒,都得出了红区比大,同时周短比较大的规律;对于滑动磨粒,都得出了红区比大,同时周短比较大的规律;对于疲劳磨粒,都得出了红区比大、周短比小,同时绿色对比度小的规律;对于气泡,都得出了红区比大,同时绿色对比度大的规律;对于纤维,都得出了红区比小的规律;对于非金属,都得出了红区比小的规律。但是,对比表 3 和表 5,可以看出,基于 Weka 软件自动得到的磨粒识别规则更加简洁、更加易于解释、更加自动化。

表 5 文献 [2] 用人工的方法得到的磨粒识别规则

Table 5 Particles identification rules by artificial method from literature [2]

规则	条件	结论
规则 1	红区比 $m > 0.3$, 且孔隙率 $E = 0$, 且二次孔隙率 $E' = 0$, 且绿色对比度 $K < 4$, 且周短比 $J > 12$	切削磨粒
规则 2	红区比 $m > 0.3$, 且孔隙率 $E = 0$, 且二次孔隙率 $E' = 0$, 且绿色对比度 $K < 4$, 且周短比 $8 < J < 12$	滑动磨粒
规则 3	红区比 $m > 0.3$, 且孔隙率 $E = 0$, 且二次孔隙率 $E' = 0$, 且绿色对比度 $K < 4$, 且周短比 $J < 8$	疲劳磨粒
规则 4	红区比 $m > 0.7$, 且圆度 $R > 0.9$, 且绿色对比度 $K > 4$	气泡
规则 5	孔隙率 $E > 0$	气泡
规则 6	红区比 $m < 0.3$, 且周短比 $J > 25$	纤维
规则 7	红区比 $m < 0.3$	非金属
规则 8	孔隙率 $E > 0$	非金属
规则 9	二次孔隙率 $E' > 0$	非金属
规则 10	绿色对比度 $K > 4$	非金属

由此可见,利用 Weka 软件的 J4.8 算法提取的规则具有很高的精度,反映了实际磨粒参数识别的统计规律。由于整个磨粒识别规则提取过程是自动完成,因此,本文作者提出的方法为有效地提升 MIDCS 系统的智能化和自动化水平具有重要意义。

3 结论

(1) 利用所开发的多功能油液磨粒智能检测系统 MIDCS,获取了实际航空发动机滚动轴承磨损颗粒,并利用图像处理方法提取了 16 个特征参数,得到了切削磨粒、严重滑动磨粒、疲劳磨粒、气泡、纤

维、其他非金属颗粒 6 类磨粒的特征磨粒样本集。

(2) 利用 Weka 软件的 C4.5 算法对特征磨粒样本集进行了规则提取,获取了识别磨粒的专家知识规则,并对规则进行了分析,并与人工提取的规则进行了比较。结果表明,本文作者提取出的磨粒识别规则反应了实际磨粒识别的统计规律,具有很高的识别精度。由于基于 Weka 软件的规则获取方法无需人工干预可以自动得到高精度的磨粒识别规则,因此对于提高 MIDCS 系统的诊断自动化和智能化程度具有重要意义。

参考文献

- 【1】陈果,李爱.航空器检测与诊断技术导论[M].北京:航空工业出版社,2012.
- 【2】王洪伟,陈果,陈立波,等.一种航空发动机滚动轴承磨损故障检测技术[J].航空动力学报,2014,29(9):2256-2263.
Wang Hongwei, Chen Guo, Chen Libo, et al. A fault monitoring technique for wear of aero-engine rolling bearing [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(9): 2256-2263.
- 【3】FAST automated analytical system product specification [M]. The Carborundum Company, 2005.
- 【4】石宏,张帅,李昂.基于自适应支持向量机的磨粒识别技术研究[J].计算机技术,2012,32(12):8543-8552.
Shi Hong, Zhang Shuai, Li Ang. Research on wear particle recognition based on self-adapting support vector machine [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 32(12): 8543-8552.
- 【5】范君.磨粒图谱识别系统研究[D].杭州:浙江大学机械与能源工程学院,2007.
- 【6】黄安雅,陈兆能,朱继梅.人工神经网络在铁谱技术磨粒识别技术中的应用[J].传动技术,1997(1):42-46.
Huang Anya, Chen Zhaoneng, Zhu Jimei. The application of artificial neural networks to wear debris recognition in ferrography technology [J]. Drive System Technique, 1997(1): 42-46.
- 【7】徐金龙,易如娟.基于自动磨粒分析技术的直升机在用发动机油界限值的研究[J].润滑与密封,2012,37(2):110-113.
Xu Jinlong, Yi Rujuan. Study on the limits for change of engine oil used in helicopter with Lasernet Fines [J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(2): 110-113.
- 【8】袁成清,严新平,彭中笑.磨粒的三维表面特征描述[J].摩擦学学报,2007,27(3):294-296.
Yuan Chengqing, Yan Xinping, Peng Zhongxiao. Three-dimensional surface characterization of wear debris [J]. Tribology, 2007, 27(3): 294-296.
- 【9】殷勇辉.基于磨粒颜色特征的识别方法研究[J].润滑与密封,2006,31(6):112-114.
Yin Yonghui. Research on wear debris color recognition with factor analysis [J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(6): 112-114.
- 【10】葛科宇,陈果.基于 Weka 平台知识获取的航空发动机磨损故障专家系统[J].机械科学与技术,2011,30(11):1955-1959.
Ge Keyu, Chen Guo. Knowledge acquisition of aero-engine wear fault diagnosis expert system based on Weka platform [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(11): 1955-1959.

(上接第79页)

参考文献

- 【1】郭峰,费逸伟,姚婷,等.某型航空发动机润滑油性能结构热衰变机理研究[J].润滑与密封,2015,40(8):
Guo Feng, Fei Yiwei, Yao Ting, et al. Thermal degradation mechanism of performance and structure of an aviation lubricating oil [J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(8):
- 【2】张占纲,陈立波,宋兰琪,等.某型航空润滑油中抗氧化剂的衰减研究[J].润滑与密封,2014,39(8):112-114.
Zhang Zhongang, Chen Libo, Song Lanqi, et al. Study on degradation of antioxidant additive in an aviation lubricating oil [J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(8): 112-114.
- 【3】陈立波,郭绍辉.酯类合成油的热氧化及其状态监控技术研究进展[J].合成润滑材料,2001,28(2):19-24.
Chen Libo, Guo Shaohui. The development of research on thermal oxidation and condition monitoring of ester lubricants [J]. Synthetic Lubricants, 2001, 28(2): 19-24.
- 【4】崔敬估,李延秋.PAO和酯类油在合成润滑剂中的应用[J].润滑油,2004,19(1):7-12.
Cui Jinggu, Li Yanqiu. PAO-esters and their applications in lubricating oils [J]. Lubricating Oil, 2004, 19(1): 7-12.
- 【5】费逸伟,郭峰,姚婷,等.聚 α -烯烃航空润滑基础油中N-苯基- α -萘胺的氧化动力学研究[J].润滑与密封,2015,40(9):
Fei Yiwei, Guo Feng, Yao Ting, et al. Thermal-oxidative kinetics of antioxidant N-phenyl- α -naphthylamine in poly- α -olefins base oil [J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(9):
- 【6】Sharma B K, Stipanovic A J. Development of a new oxidation stability test method for lubricating oils using high-pressure differential scanning calorimetry [J]. Thermochemical Acta, 2003, 402: 1-18.
- 【7】姚俊兵.利用差示扫描量热法评价润滑油的高温抗氧化性能[J].润滑与密封,2000,25(2):23-38.
Yao Junbing. Evaluation of high temperature antioxidation performances for lubricants by differential scanning calorimetry (DSC) [J]. Lubrication Engineering, 2000, 25(2): 23-38.
- 【8】Nosrat M. Kinetic and thermodynamic study of activated carbon from pistachio shell by thermogravimetric method [J]. Materials Science and Engineering, 2011, 1(6): 887-891.