

文章编号:1000-8055(2014)09-2256-08

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2014.09.032

一种航空发动机滚动轴承磨损故障监测技术

王洪伟^{1,2}, 陈果¹, 陈立波², 宋科², 李爱¹

(1. 南京航空航天大学 民航/飞行学院, 南京 210016;

2. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

摘 要: 针对航空发动机滚动轴承磨损状态监测对长轴尺寸大于 $10\mu\text{m}$ 的故障敏感磨粒检测的需要, 研制了多功能油液磨粒智能检测与诊断系统, 克服了传统光谱分析对大磨粒不敏感的缺点, 以及传统铁谱分析检测步骤烦琐的不足, 可直接对流动的油液中大于 $10\mu\text{m}$ 的运动磨粒进行检测. 提出了油液运动磨粒的 7 个数字特征参数及其识别策略, 实现了磨粒的自动识别, 识别率基本上达到 99% 以上. 利用实际的航空发动机油样进行了试验验证, 并传统光谱分析进行了对比, 试验结果表明该系统较光谱分析具有更强的检测力和更优的时效性.

关键词: 航空发动机; 滚动轴承; 故障诊断; 油液监测; 磨损颗粒; 磨粒识别

中图分类号: V232.2

文献标志码: A

A fault monitoring technique for wear of aero-engine rolling bearing

WANG Hong-wei^{1,2}, CHEN Guo¹, CHEN Li-bo², SONG Ke², LI Ai¹

(1. College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: Multiple intelligent debris classifying system (MIDCS) to detect sensitive wear particles whose size are $10\mu\text{m}$ or more in long axis on the aero-engine rolling bearing for wear fault monitoring was developed. The MIDCS overcame the shortcomings, such as the insensitivity to large wear particles in the traditional spectral analysis, and cumbersome detection steps in the ferrographic analysis. The MIDCS could be used to directly detect wear particles whose size are $10\mu\text{m}$ or more in long axis in the flowing oil. Seven digital characteristic parameters and their identification were proposed for the moving wear particles in the flowing oil, implemented the auto-identification for the wear particles. The basic identification accuracy of the MIDCS is above 99%. Through the experiments on the real oil samples from aero-engines, result shows that the MIDCS is superior to the spectral analysis in terms of the ability and timeliness on detecting the wear abrasion fault of the aero-engine rolling bearing.

Key words: aero-engine; rolling bearing; fault diagnosis; oil monitoring; wear particles; wear particles identification

滚动轴承是航空发动机承力传动系统的关键部件, 由于工作条件恶劣、负荷大, 容易磨损造成发动机故障. 据统计, 某型发动机空中停车故障的

37.5% 及导致发动机提前更换的 60% 以上的原因是由发动机滚动轴承等零件的磨损类故障引起的^[1]. 一旦滚动轴承发生磨损故障, 将直接影响航

收稿日期: 2013-06-14

基金项目: 国家自然科学基金 (61179057)

作者简介: 王洪伟 (1979—), 男, 湖北咸宁人, 博士生, 主要从事航空发动机机械故障诊断与油液监控技术研究.

空发动机使用安全,甚至会造成严重飞行事故。以某型航空发动机为例,其主轴轴承失效的故障率较高,其中5号支点轴承由于设计缺陷,润滑条件恶劣,易发生疲劳失效^[2]。因滚动轴承故障原因导致的飞行事故一直在各类事故中占较大的比例^[3]。滚动轴承工作状态是否正常,对于航空发动机可靠性有着重大的影响。因此,对航空发动机滚动轴承磨损故障进行状态监测意义重大。

目前,航空发动机滚动轴承磨损故障监测方法主要有振动分析和油液监测两种。振动分析法在滚动轴承的故障诊断中已有很多实际应用^[4-6]。航空发动机上的振动传感器一般安装在机匣上,远离轴承安装位置,存在采样频率低、信号微弱、特征信号提取较难的缺点。由于航空发动机滚动轴承磨损产物直接进入发动机润滑系统,油液监测法通过对航空发动机润滑系统中的润滑油进行检测分析,相比较而言,基于油液监测法的航空发动机滚动轴承磨损故障监测更为直接,可提前预报航空发动机异常磨损故障。

常用的油液监测法主要包括光谱分析、铁谱分析、污染度检测、自动磨粒分析等,每种方法均有各自的特点。光谱分析^[7-8]可以检测油液中金属磨损颗粒(以下简称磨粒)的材料成分和磨粒数量(单位:个/mL),准确度高,检测速度快,但由于原理所限,无法检测油液中颗粒尺寸为 $10\mu\text{m}$ 以上(这里以长轴尺寸 a 来衡量, $a>10\mu\text{m}$)的磨粒,而滚动轴承疲劳失效产生的磨粒往往 $a>10\mu\text{m}$ 。铁谱分析^[9]可以检测分析磨粒的形貌、大小、数量,检测结果直观,其主要缺点是工作量大,精度不高,自动化程度低以及对分析人员水平依赖性大等。污染度检测只能检测油液固体颗粒污染度,不能区分金属和非金属颗粒,仅能判断当前系统的污染水平,无法准确判断航空发动机的实际磨损情况。自动磨粒分析^[10]能够对磨粒的磨损类型、数量和变化趋势做出判断,但常见的自动磨粒分析仪器只能检测油液中 $a>20\mu\text{m}$ 的磨粒,且由于采用单透射激光原理,对于油液中的石墨封严碎片、橡胶碎片等不透光的非金属颗粒容易产生误识别现象。

基于此,设计开发了一种航空发动机滚动轴承磨损故障监测系统,可自动检测油液中 $a>10\mu\text{m}$ 的磨粒。并使用实际的航空发动机油样对该系统进行了验证,表明该系统对监测航空发动机滚动轴承磨损故障十分有效。

1 磨损故障监测系统

1.1 基本原理

当航空发动机滚动轴承发生磨损故障时,磨粒将会进入润滑系统。磨损故障初期航空发动机滑油中的磨粒尺寸小、数量少,随着故障的加剧,油液中磨粒数量会不断增多,大尺寸颗粒也会越来越多。通过检测油液中磨粒的数量和尺寸,可以对航空发动机滚动轴承磨损故障进行诊断,避免危险性故障的发生。

基于该原理开发了多功能油液磨粒智能检测与诊断系统(MIDCS),通过硬件自动采集油液中的颗粒图像,再由软件自动对运动磨粒的形貌特征进行识别,得到油液中磨粒的尺寸、类型、磨粒数量等信息。MIDCS既能计算油液中固体颗粒污染度等级,又能对 $a>10\mu\text{m}$ 的颗粒进行分析判断,将颗粒识别为金属和非金属,同时对金属颗粒进一步识别为切削磨粒、严重滑动磨粒、疲劳磨粒,对非金属颗粒进一步区分为气泡、纤维、其他非金属颗粒等。油液颗粒的分析结果,可以反映出航空发动机滚动轴承工作是否正常,从而实现航空发动机润滑系统的磨损故障监测、故障趋势分析和诊断,避免了铁谱分析需要制作铁谱片并依赖人工经验进行分析的缺点。MIDCS具有检测精度高、识别效率好、自动化、无需耗材等特点,其与常见油液分析仪器对比情况见表1所示。

1.2 图像采集

油液颗粒图像采集由系统硬件部分完成。系统硬件主要包括高速摄像机、透射光源、反射光源、光路组件、精密样品池、蠕动泵、电路控制模块、工控机等,系统原理框图见图1。蠕动泵驱动取样瓶中的油液沿管路通过内部的精密样品池,当油液中的颗粒经过精密样品池时,在透射光源和反射光源共同照射下形成颗粒图像,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。

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 $480\text{mm}\times 275\text{mm}\times 275\text{mm}$ 。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。

表 1 常见油液分析仪器对比
Table 1 Comparison of common oil analysis instrument

项目	光谱分析	铁谱分析	污染度检测	自动磨粒分析	MIDCS
磨粒检测范围(长轴尺寸 a)/ μm	<10	>1	否	>20	>10
磨粒类型识别	否	是	否	是	是
检测时间/min	0.5	25~30	~3	~3	~3
自动化	是	否	是	是	是
日常耗材	有	有	无	无	无
磨损故障监测功能	是	是	否	是	是
污染度检测	否	否	是	是	是
是否易于携带	否	否	是	否	是
专家诊断功能	否	否	否	否	是

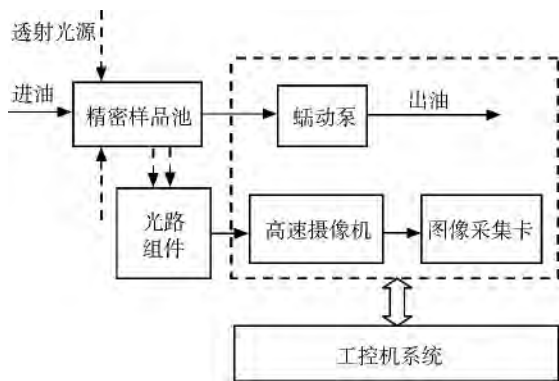


图 1 系统原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of system

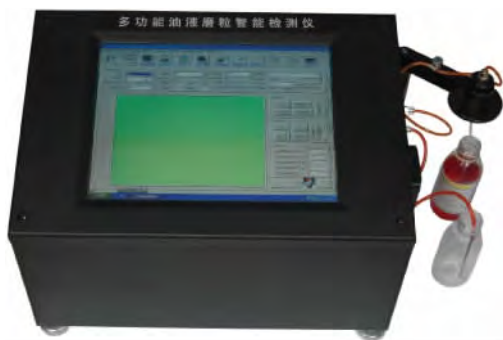


图 2 MIDCS 外观

Fig. 2 Appearance of MIDCS

为实现油液快速、自动化检测, 直接对油液中的颗粒进行检测. 专门设计了精密样品池, 其检测窗片处的厚度仅为 0.1 mm, 当油液中的颗粒通过管路流过精密样品池时, 在光源的照射下将形成颗粒图像. 由于单透射激光光源会使背景出现干涉条纹, 增加了磨粒识别的难度. 此外, 单色光源也存在容易将非金属颗粒识别成金属颗粒的误

别现象. 为提高颗粒图像识别效率, 采用了透反射双光路成像系统, 见图 3.

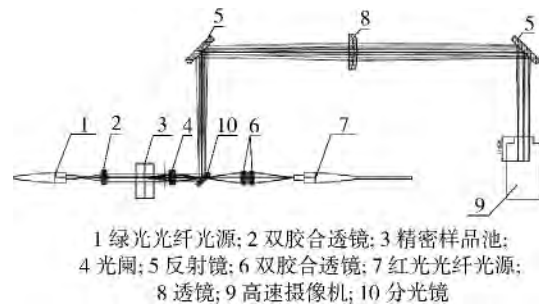


图 3 光路成像系统结构图

Fig. 3 Structure map of optical imaging system

透射光源使用波长为 515~518 nm 的绿色 light-emitting diode(LED), 反射光源使用波长为 620~623 nm 的红色 LED, 合成的背景颜色单纯, 丰富了颗粒目标表面的数字化信息. 单色激光光源与透反射双光源颗粒成像见图 4. 使用的高速摄像机为 Allied Vision Technologies GmbH 公司的 MARLIN-F033C, 每秒可采集 30 幅以上的高速动态图像.

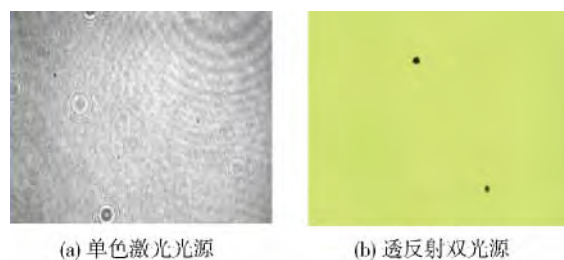


图 4 不同光源颗粒成像

Fig. 4 Image of particles in different light sources

2 运动磨粒分析与识别

2.1 识别原理

运动磨粒识别是应用形态学分析方法,对油液中的磨粒进行特征分析,并获取其尺寸、类别、磨粒数量等信息,以实现航空发动机润滑系统滚动轴承磨损故障进行检测和诊断.常见的铁谱磨粒识别一般依据 6 个主要特性,即轮廓、边缘细节、表面纹理、尺寸、颜色及厚度.铁谱磨粒识别的对像为铁谱片上的静态磨粒,磨粒图像质量较高,细节辨识度较好,但一般只适用于识别单个磨粒,无法自动计算各类磨粒数量.运动磨粒的识别与铁谱磨粒识别并不相同.运动磨粒的识别直接针对油液中的磨粒进行动态分析,可以自动判断磨粒的磨损类型、尺寸和磨粒数量,要求识别速度快、效率高.

MIDCS 首先对采集的图像进行预处理,采用二维最大熵的动态阈值分割技术,对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.对于运动磨粒特征参数而言,既要考虑磨粒的识别效率,又要考虑航空发动机油液监测的实际需求.对于 $a > 10 \mu\text{m}$ 的颗粒进行分析识别,将金属颗粒区分为切削磨粒、严重滑动磨粒、疲劳磨粒,对非金属颗粒区分为气泡、纤维、其他非金属颗粒.MIDCS 采集到的 $a > 10 \mu\text{m}$ 的 6 类典型颗粒图像见图 5 所示.

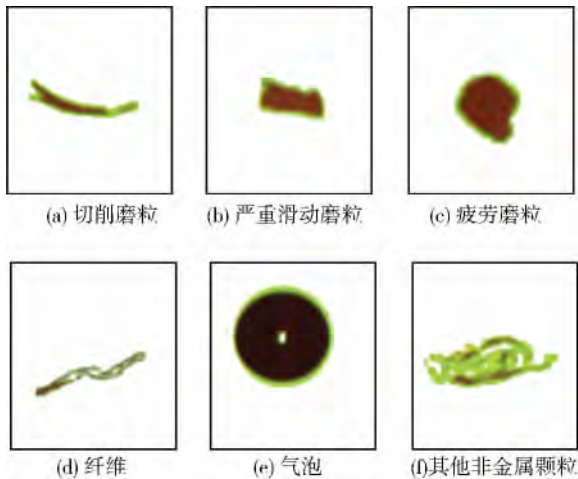


图 5 典型颗粒图像

Fig. 5 Typical image of particles

2.2 特征分析

2.2.1 磨粒参数的特征描述

目前,公开发表的磨粒识别特征参数^[11-13]已

经超过了 100 个,其中有大量的参数是重复和冗余的.因此,对运动磨粒的识别特征进行了分析,并引入了自行开发的新参数,最终确定了长短轴、孔隙率、圆度、红色面积比、二次孔隙率、绿色对比度、周短比 7 个参数,用于提取运动磨粒的分类特征.其中,长短轴、孔隙率和圆度为通用的计算方法^[14-15],红色面积比、二次孔隙率、绿色对比度、周短比的计算方法均为根据 MIDCS 产生的磨粒特点而提出的新的计算公式.

1) 长短轴

对于二值图像 $f(i, j)$, 它的 u, v 阶统计矩定义为

$$m_{u,v} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f(i, j) i^u j^v \quad (1)$$

其 $(u+v)$ 阶标准中心矩为

$$\bar{m}_{u,v} = \frac{\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f(i, j) (i - i_0)^u (j - j_0)^v \right]}{m_{00}^{(u+v)/2}} \quad (2)$$

其中 (i_0, j_0) 为颗粒图像形心位置, $u+v=2, 3, \dots$.

长短轴表明了颗粒的尺寸大小.若颗粒长轴尺寸为 a 、短轴尺寸为 b , 则其计算公式为

$$a = \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1/4} \frac{\bar{m}_{02}^{3/8}}{\bar{m}_{20}^{1/8}} \quad (3)$$

$$b = \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1/4} \frac{\bar{m}_{20}^{3/8}}{\bar{m}_{02}^{1/8}} \quad (4)$$

长短轴比为

$$R_t = \frac{a}{b} \quad (5)$$

MIDCS 采用长轴尺寸表征颗粒的尺寸大小.

2) 孔隙率

孔隙率定义了颗粒内部的孔区域面积与非孔区域面积之比,当颗粒图像二值比后,其定义为

$$E = \frac{n(0)}{n(1)} \quad (6)$$

其中 $n(0)$ 为在颗粒区域中“0”的数目; $n(1)$ 为在颗粒区域中“1”的数目.金属颗粒内部一般没有孔.

3) 圆度

圆度 R_d 体现了颗粒接近圆的程度,反映了颗粒的整体形状.颗粒越接近圆, R_d 越大,越接近 1; 反之,颗粒的形状越复杂, R_d 越小.一般气泡的圆度要比其他颗粒大,接近 1.

$$R_d = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (7)$$

其中 A 为颗粒面积; L 为颗粒周长,通过对单个颗粒在某一起点上 8 邻域搜索,统计边界轮廓的

像素数即为颗粒的边界周长。

4) 红色面积比

红色面积比 m 表示颗粒区域上所有满足连续红色分量大于绿色分量的像素点个数 n_r 与总像素点个数 n_t 之比, 要求红色像素点是连续的, 这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, 红色面积比小的为非金属颗粒。

$$m = \frac{n_r}{n_t} \quad (8)$$

5) 二次孔隙率

将所有颗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 的也均为非金属颗粒。

$$E' = \frac{n(0)'}{n(1)'} \quad (9)$$

其中 $n(0)'$ 为绿色分量大于给定值的像素点, 即

被赋值为 0 的像素点个数, $n(1)'$ 为所有像素点总个数。

6) 绿色对比度

寻找颗粒核心区域中的所有像素绿色分量最大值 G_1 与核心区域之外的所有像素绿色分量最小值 G_2 之比。绿色对比度大于 4 的为气泡, 这是区分气泡最显著的特征, 其定义为

$$K = \frac{G_1}{G_2} \quad (10)$$

7) 周短比

周短比为颗粒周长 L 与颗粒短轴尺寸 b 的比值, 其定义为

$$J = \frac{L}{b} \quad (11)$$

将 6 类颗粒每类选取 20 个, 计算每个颗粒的所有参数, 其关系图见图 6 所示, 横坐标表示颗粒类型, 1 为切削磨粒, 2 为严重滑动磨粒, 3 为疲劳磨粒, 4 为纤维, 5 为气泡, 6 为其他非金属颗粒。

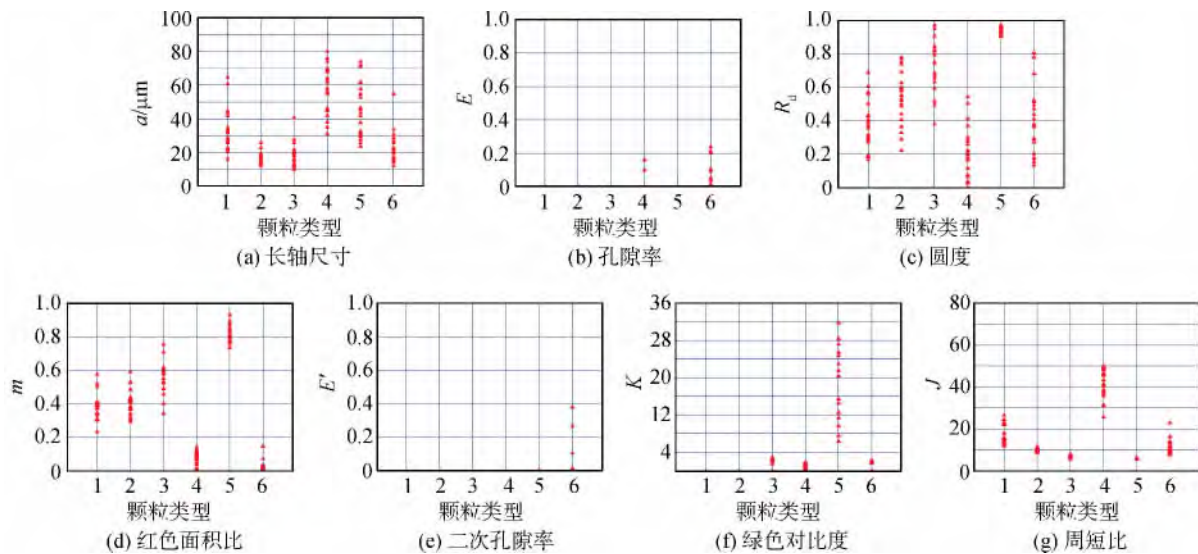


图 6 数字特征参数与 6 类颗粒的关系

Fig. 6 Relationship between digital characteristic parameters and 6 kinds of particles

2.2.2 运动磨粒识别策略

在上述研究基础上, 提出了运动磨粒的识别策略。采用最显著的数字特征参数或者组合运用识别磨粒。金属颗粒包括切削磨粒、严重滑动磨粒和疲劳磨粒, 非金属颗粒包括气泡、纤维和其他非金属颗粒。

经研究分析, 各类颗粒识别特征如下:

- 1) 金属颗粒: $m > 0.3, E = 0, E' = 0, K < 4$ 。
- 2) 非金属颗粒: $m < 0.3$ 或 $E > 0$ 或 $E' > 0$ 或 $K > 4$ 。

3) 切削磨粒: 满足金属颗粒特征, 且 $J > 12$ 。

4) 疲劳磨粒: 满足金属颗粒特征, 且 $J < 8$ 。

5) 严重滑动磨粒: 满足金属颗粒特征, 且 $8 < J < 12$ 。

6) 气泡: $m > 0.7, R_d > 0.9, K > 4$ 或 $E > 0$ 。

7) 纤维: $m < 0.3$, 且 $J > 25$ 。

8) 其他非金属颗粒: 满足非金属颗粒特征, 且剔除气泡和纤维之后余下的颗粒。

运动磨粒的识别流程见图 7 所示。在实际计算中, 先将所有颗粒按红色面积比和孔隙率分为

2 类, 满足 $m > 0.3$ 且 $E = 0$ 的颗粒为红色实心颗粒, 剩下的为绿色颗粒或有孔颗粒. 在红色实心颗粒中去掉气泡和其他非金属颗粒后按周短比分为切削磨粒、严重滑动磨粒和疲劳磨粒. 绿色颗粒或有孔颗粒由纤维、气泡和其他非金属颗粒组成. 绿色颗粒或有孔颗粒中满足 $J > 25$ 的为纤维. 气泡有 2 种, 一种为红色实心的气泡, 一种为有孔隙率的气泡, 分别从红色实心颗粒和有孔颗粒中识别.

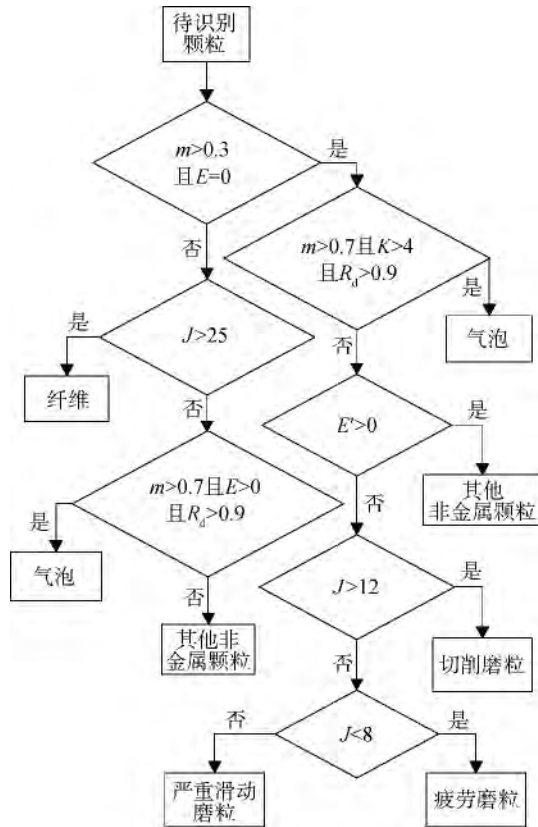


图 7 运动磨粒识别流程

Fig. 7 Identification process of moving wear particles

3 试验验证

3.1 数字特征参数识别验证

依据本文提取的数字特征参数, 按照本文提出的识别流程, 进行了典型颗粒的识别试验, 分别选取了 771 个切削磨粒, 824 个严重滑动磨粒, 1658 个疲劳磨粒, 420 个气泡, 105 个纤维, 1873 个非金属颗粒, 得到了其识别率, 如表 2 所示. 从表中可以看出, 本文方法得到了很高的识别率, 基本上达到了 99% 以上. 因此可见, 本文所提出的数字特征参数和识别流程对于 MIDCS 具有很高的精度, 满足了工程使用目标.

表 2 颗粒识别结果

Table 2 Result of particles identification

颗粒类型	试验颗粒数量	识别颗粒数量	识别率/%
切削磨粒	771	764	99.1
严重滑动磨粒	824	817	99.2
疲劳磨粒	1658	1651	99.6
气泡	420	404	96.2
纤维	105	104	99.0
非金属颗粒	1873	1842	98.3

3.2 航空发动机磨损趋势验证

某型航空发动机的光谱分析的 Cu 质量浓度界限为 $5.5 \mu\text{g/mL}$, MIDCS 磨粒检测的磨粒数量界限为 3000 个/mL. 利用光谱分析对该型航空发动机进行检测, 某台航空发动机工作到 1284 h 时, 滑油光谱分析发现 Cu 质量浓度偏高, 达到 $5.2 \mu\text{g/mL}$, Fe 质量浓度正常. 经检查滑油滤、磁塞和金属屑信号器油滤, 发现大量金属屑.

使用 MIDCS 对航空发动机工作时间从 1057~1284 h 之间的 15 个滑油样进行了磨粒分析, 光谱和 MIDCS 分析数据见表 3.

表 3 光谱和 MIDCS 分析数据

Table 3 Data of spectral and MIDCS analysis

序号	航空发动机 工作时间/h	光谱分析的 Cu 浓度质量/ ($\mu\text{g/mL}$)	$a > 10 \mu\text{m}$ 的 磨粒数量/ (个/mL)
1	1057	1.1	1378
2	1088	1.0	1643
3	1113	1.2	3022
4	1136	1.0	1829
5	1150	1.1	1033
6	1168	1.5	1617
7	1185	1.3	1590
8	1202	1.4	1855
9	1221	2.0	3022
10	1235	2.4	4506
11	1241	2.4	5911
12	1255	2.4	5142
13	1276	4.3	6733
14	1280	3.7	4970
15	1284	5.2	36847

可以发现,从航空发动机工作至 1 221 h 时开始,油液中磨粒数量开始明显增长,与光谱分析结果相符.油液中 $a > 10 \mu\text{m}$ 的磨粒数量和光谱分析的 Cu 质量浓度随工作时间的变化见图 8. 特别是工作至 1 284 h 时,磨粒数量急剧增长近 10 倍,而光谱分析的 Cu 质量浓度增长不大,表明油液中大尺寸的磨粒较多.该发动机磨损情况严重,故障趋势十分明显.

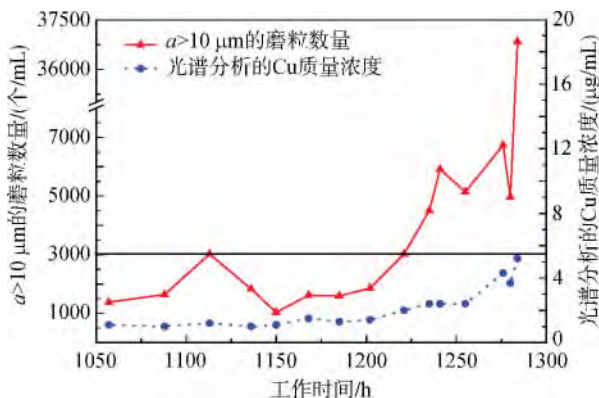


图 8 $a > 10 \mu\text{m}$ 的磨粒数量和光谱分析的 Cu 质量浓度变化

Fig. 8 Variation of quantities of wear particles of $a > 10 \mu\text{m}$ and Cu mass concentration of spectral

油液中 a 为 $10 \sim 15 \mu\text{m}$, $15 \sim 20 \mu\text{m}$, $20 \sim 25 \mu\text{m}$ 范围内以及 a 大于 $25 \mu\text{m}$ 的磨粒数量变化情况见图 9,油液中的磨粒以 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 尺寸段的为主,且在该发动机磨损过程中, $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 尺寸段的磨粒增长速度最快.图 10 为切削磨粒、严重滑动磨粒、疲劳磨粒的磨粒数量随航空发动机工作时间变化情况,可以看出,在 $1057 \sim 1239 \text{h}$ 之

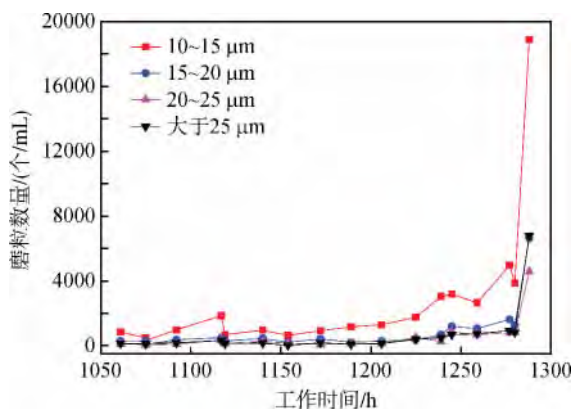


图 9 不同尺寸的磨粒数量变化

Fig. 9 Variation of quantities of wear particles with different dimensions

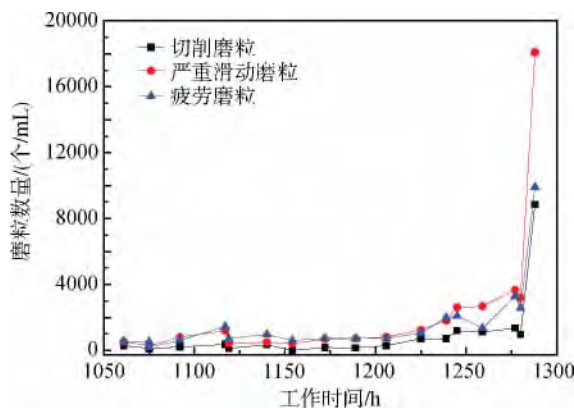
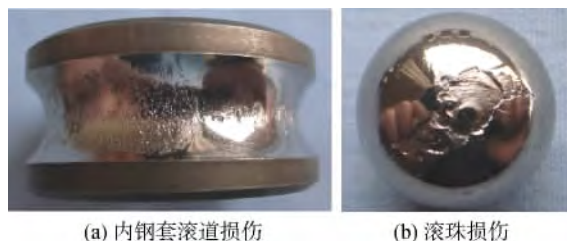


图 10 不同类型的磨粒数量变化

Fig. 10 Variation of quantities of wear particles with different types

间,油液中疲劳磨粒较多;从 $1239 \sim 1284 \text{h}$,油液中严重滑动磨粒较多,表明此次故障前期失效类型主要以疲劳剥落为主,后期故障趋于严重,以磨损为主.

该发动机经分解检查,发现后附件传动机匣轴承滚珠疲劳剥落、保持架严重磨损,内钢套滚道上整圈大面积剥落,见图 11. 检查结果验证了 MIDCS 分析的正确性.



(a) 内钢套滚道损伤 (b) 滚珠损伤

图 11 滚动轴承严重磨损

Fig. 11 Serious wear of rolling bearing

从图 8 中可以明显看出,与传统光谱分析相比, MIDCS 比光谱分析提前预警了 50 h. MIDCS 对 $a > 10 \mu\text{m}$ 的异常磨粒检测力更强,而滚动轴承早期疲劳剥落将产生 $a > 10 \mu\text{m}$ 的异常磨粒,因此, MIDCS 对于监测航空发动机滚动轴承疲劳磨损故障更具优势.

4 结 论

1) 设计了多功能油液磨粒智能检测与诊断系统,该系统具有自动化、多功能、集成化的优点.既能计算油液中固体颗粒污染度等级,又能对 $a > 10 \mu\text{m}$ 的颗粒进行分析判断,将颗粒识别为金属和非金属,同时对金属颗粒进一步识别为切削磨粒、严重滑动磨粒、疲劳磨粒,对非金属颗粒进一

步区分为气泡、纤维、其他非金属颗粒。

2) 提出了油液中运动磨粒的7个数字特征参数及其识别流程,完成了切削磨粒、严重滑动磨粒、疲劳磨粒、气泡、纤维、其他非金属颗粒6类颗粒的识别,经过试验验证,基本上达到了99%以上的识别率。

3) 利用MIDCS对某型航空发动机滚动轴承磨损趋势进行了分析,并与光谱分析结果进行了对比验证,结果表明:与传统光谱分析相比,MIDCS提前预警了50h,MIDCS对 $a > 10 \mu\text{m}$ 的异常磨粒检测力更强,而滚动轴承早期疲劳剥落将产生 $a > 10 \mu\text{m}$ 的异常磨粒,因此,MIDCS对于监测航空发动机滚动轴承疲劳磨损故障更具优势。

参考文献:

- [1] 姜旭峰,费逸伟,李华强,等.航空发动机滑油综合监测技术研究[J].润滑与密封,2005,30(2):110-112.
JIANG Xufeng, FEI Yiwei, LI Huaqiang, et al. Study on the lubricant oil integrative analysis technique for aero-engine failure diagnoses[J]. Lubrication Engineering, 2005, 30(2):110-112. (in Chinese)
- [2] 陈立波,宋兰琪,陈果.航空发动机滑油综合监控中的磨损故障融合诊断研究[J].航空动力学报,2009,24(1):169-175.
CHEN Libo, SONG Lanqi, CHEN Guo. Study on fusion diagnosis techniques of wear faults in synthesized monitoring of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1):169-175. (in Chinese)
- [3] 韩磊,程礼,苗学问.基于小波分析的航空发动机轴承故障诊断[J].轴承,2008(10):30-34.
HAN Lei, CHENG Li, MIAO Xuewen. Fault diagnosis of aero-engine main shaft bearings based on wavelet analysis[J]. Bearing, 2008(10):30-34. (in Chinese)
- [4] 陈果.滚动轴承早期故障的特征提取与智能诊断[J].航空学报,2009,30(2):362-367.
CHEN Guo. Feature extraction and intelligent diagnosis for ball bearing early faults[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(2):362-367. (in Chinese)
- [5] 王晓冬,何正嘉,瞿艳阳.滚动轴承故障诊断的多小波谱峭度方法[J].西安交通大学学报,2010,44(3):77-81.
WANG Xiaodong, HE Zhengjia, QU Yanyang. Spectral kurtosis of multiwavelet for fault diagnosis of rolling bearing[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2010, 44(3):77-81. (in Chinese)
- [6] 程军圣,于德介,杨宇.基于EMD和SVM的滚动轴承故障诊断方法[J].航空动力学报,2006,21(3):575-580.
CHENG Junsheng, YU Dejie, YANG Yu. Fault diagnosis of roller bearings based on EMD and SVM[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3):575-580. (in Chinese)
- [7] 杨虞微,陈果.光谱油样分析监测技术中的神经网络预测方法[J].光谱学与光谱分析,2005,25(8):1339-1343.
YANG Yuwei, CHEN Guo. Artificial neural network forecasting method in monitoring technique by spectrometric oil analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(8):1339-1343. (in Chinese)
- [8] 李爱,陈果.基于SVM的航空发动机油样光谱诊断界限值制定[J].航空动力学报,2011,26(4):771-778.
LI Ai, CHEN Guo. Establishment of the threshold of oil spectrum analysis in the aircraft engine based on SVM[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4):771-778. (in Chinese)
- [9] Macián V, Payri R, Tormos B, et al. Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in diesel engine fuel injection systems[J]. Wear, 2006, 260(4/5):562-566.
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] 吴振锋,左洪福,杨忠.磨损微粒显微形态学特征量化描述体系[J].交通运输工程学报,2001,1(1):115-119.
WU Zhenfeng, ZUO Hongfu, YANG Zhong. The quantification character parameter system of debris micrography[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(1):115-119. (in Chinese)
- [14] 吴振锋.基于磨粒分析和信息融合的发动机磨损故障诊断技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2002.
WU Zhenfeng. The research of engine wear faults diagnosis based on debris analysis and data fusion[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)
- [15] 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.