

汽车发动机润滑油清净分散性定量测定方法

肖 梅,马登辉,张 雷,黄 颖

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘 要:针对目测法测定机油清净分散性存在耗时、费力和主观偏差大的缺点,提出了一种融合扩散环宽度和沉淀环亮度信息的机油清净分散性测定方法,基于油斑晕环在 HSV 颜色空间的色度、饱和度和亮度差异特性,运用最大类间自适应地确定分割阈值,并辅以数学形态学处理去除噪声、间隙等,自动地分割出沉淀环、扩散环和油环。直径比重反映了扩散环的宽度与清净分散性的关系,灰度差比重表征了沉淀环亮度与清净分散性的关系,融合扩散环宽度和沉淀环亮度信息得到清净分散性系数,依据清净分散性系数定量判定机油清净分散性能等级。试验测试结果表明:该方法能准确地提取油斑的各晕环区域,并依据清净分散性系数值定量评定油品的清净分散性等级,目测法只能给出定性的评定结果,提出的方法避免了人工测量带来的主观判断误差影响,提高了测量结果的客观可信度水平。

关键词:汽车工程;发动机润滑油;清净分散性;信息融合;图像分割;油滴斑点试验

中图分类号:U473.6

文献标志码:A

Quantitative determination method on detergent-dispersant performance of automobile engine oil

XIAO Mei, MA Deng-hui, ZHANG Lei, HUANG Ying

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To overcome the shortages of time-consuming and large subjective bias in the manual visual method, a new determination method on detergent-dispersant performance of automobile engine oil fusing the width of diffusion ring and brightness of settling ring was proposed in this paper. Based on the differences in chromaticity, saturability and brightness of oil stain aureole in HSV color space, the maximal interclass adaptive threshold partition was used. Noise and gap were removed and the sedimentation ring, diffusion and oil ring were segmented automatically with the assist of mathematical morphology. The diameter ratio reflected the relationship between the width of diffusion ring and detergent-dispersant performance. The ratio of gray level difference reflected the relationship between the brightness of sedimentation ring and detergent-dispersant performance. The coefficient of detergent-dispersant performance could be obtained by the fusion of the width of diffusion ring and the brightness of sedimentation ring and the detergent-dispersant performance level of engine oil could be assessed quantitatively based on the coefficient. The results show that this method can be used to extract the aureole area of oil stain accurately and quantitatively assess the level of detergent-dispersant performance of engine oil.

Compared with visual method which only provides the qualitative assessment result, this method can avoid the subjective judgment errors in manual measurement and improve the objective reliability level of the measurement result. 2 tabs, 2 figs, 16 refs.

Key words: automobile engineering; automobile engine oil; detergent-dispersant performance; information fusion; image segmentation; oil spot test

0 引言

清净分散性(detergent-dispersant performance, DDP)是发动机润滑油的重要性能指标之一,机油具有良好的清净分散性时,能抑制积炭、油膜和油泥的生成,并能将生成的沉积物冲入润滑油中予以清除;反之,当机油清净分散性变差时,机油中的积碳、磨屑和杂质等增多,机油的品质下降,进而影响整车的工作性能和使用寿命。可见,良好的清净分散性,对于保障发动机的正常工作尤为重要^[1]。

按照中国标准 GB/T 7607—1987 中附录 A《内燃机油滤纸斑点试验方法》(参考件)的要求,现场快速测定机油清净分散性的具体过程为:首先,在滴定台上用滴棒将机油滴到专用滤纸上,静置数小时,形成油斑图,油斑图由颜色不同的晕环组成,油斑图因滤纸、机油质量及污染物的不同而异,一般都显示 3 个或更多的晕环,由里往外分别为沉淀环、扩散环和油环;然后,将油斑图与标准油斑图谱进行对比分析,根据沉淀环的颜色、扩散环的宽度,通过目测法可对在用机油品质作出判断,标准油斑图谱分 1~6 级,1 级清净分散性很好,6 级清净分散性最差^[2-5]。

Roshan 等通过目测法研究了清净剂和分散剂对汽车润滑油性能的影响^[3];Yin 等分析了甲醇汽油及其燃烧产物对机油的影响,通过目测油斑法测定机油的清净分散性^[4];Singh 等使用沉积板法检验不同清净分散剂对润滑油的影响,对加入不同添加剂的润滑油进行斑点试验,目测油环、扩散环以及沉积环的大小来比较清净分散剂的性能^[5]。为减少主观因素的影响,还可通过阻光度来判定机油的清净分散性,获得油斑图后通过光源箱中的光线照射油斑图的沉淀环和扩散环,再由光电传感器把透过沉淀环和扩散环的光信号变成电信号送入主机,测得油斑图沉淀环和扩散环阻光度,计算清净分散性系数^[2]。该方法需要在实验室环境下进行,操作比较复杂。董元虎等提出一种快速判定机油清净分散性的方法,利用直尺测量扩散环和油环的直径,用扩

散环和油环直径的比值作为清净分散性判定系数,比值越大,分散性能越好^[6-7]。该方法简单、易操作,可在室外现场操作,但存在以下问题:一是测量精度不高,由于实际操作中无论是扩散环还是油环,都不是标准圆形且两环质心不重合,晕环的边缘也并非连续光滑,测得的扩散环和油环直径偏差较大;二是测量过程费时、费力,为提高精度常常需要进行多次测量。Ahmed 等还通过红外光谱试验测试不同的清净分散剂对润滑油性能的影响^[8]。

近年来,图像分析处理技术被广泛应用于磨损测量、润滑油性能测定和浮油检测中^[9-15]。Canty 等提出一个润滑油粒子的视觉系统,该系统分析润滑油粒子的大小和形状,实现机械系统摩擦磨损的测量^[9];在对销-盘磨损试验中磨损盘的测量方面,孙卫强等运用 3 次样条插值拟合磨痕轮廓曲线,测量出磨损盘痕的表面积,以像素为标定单位计算出磨痕的面积,从而摒弃了称重法、测量直径法和放射线同位素法等方法^[10];王长生等提出了磨损量的数值图像测量法,先对采集到的图像进行去噪、锐化、增强等预处理,接着利用边缘检测和轮廓提取等处理获取磨痕的轮廓形状;最后根据磨痕圆环所包含的像素点数量获得磨痕圆环宽度的实际尺寸^[11];肖梅等利用钢球磨痕区域具有丰富、同方向磨痕的特点,提出了一种钢球磨痕直径测定方法,该方法通过提取磨痕纹理梯度、二值化、闭运算、去零星和填充洞等处理,自动分割出钢球的磨痕区域,根据钢球磨痕区域的面积,求取磨痕的等效直径^[12]。Wang 等提出了基于图像处理技术的润滑油空隙率测量方法,利用气体孔隙颜色和空隙间的变化关系来测定润滑油的孔隙率,该方法简单易行、且测定结果准确^[13]。此外,为检测石油泄漏后对海面的污染程度,Zhang 等应用降噪和边缘检测等图像处理技术提取了海面浮油区域的完整边界^[14]。针对雷达图像中存在的噪声,Song 等提出了一种海面油膜图像的去噪算法,利用改进回归分析算法提高去噪的效果,该方法耗时少,可消除图像噪声,保持清晰的油膜边缘^[15]。

可见,由于具有丰富的结构、颜色和纹理等信息,图像处理技术具有别的算法无法比拟的优势。然而,目前国内外研究未见将图像处理技术应用于机油清静分散性测定中,汽车机油的清静分散性能测定主要依靠目测法来测定,其测量结果存在耗时费力、主观误差大等缺点。鉴于此,本文将图像处理技术应用于汽车机油的清静分散性能测定中,从分析油斑各晕环的位置和颜色特性入手,分割出油环、扩散环和沉淀环;用扩散环直径比表征扩散环和油环的直径比值,据此判定扩散环的宽度;构建沉淀环灰度,并差量化沉淀环和背景的灰度差异;最后融合扩散环宽度和沉淀环颜色信息计算机油的清静分散性系数,并据此判定机油的清静分散性级别。

1 发动机润滑油清静分散性测定方法

分析油斑晕环的位置和颜色特性,油斑晕环的位置特性:沉积环位于油斑图的中心,是机油中粗颗粒杂质沉积的地方;扩散环在沉积环的外围,是悬浮在油内的细颗粒杂质向外扩散留下的痕迹;晕环的最外围是油环。油斑晕环的颜色特性:扩散环呈淡黄色,与扩散环相比,油环区更亮。从分析油斑晕环的位置和颜色特性入手,本文提出了一种融合扩散环宽度和沉淀环颜色信息的清静分散性测定方法,在 HSV 空间的 H 和 S 分量中分割油环和扩散环,

在 V 分量中检测沉淀环,根据扩散环宽度和沉淀环的颜色特性,计算机油的清静分散性系数,并据此判定机油的清静分散性级别。其中, H 、 S 和 V 分别表示色调(H ,Hue) 分量、饱和度(S ,Saturation) 分量和亮度(V ,Value) 分量。

融合扩散环宽度和颜色信息的汽车机油清静分散性测定方法,具体包括以下步骤:

步骤 1:油斑彩色图像采集。

照相机采集油斑的彩色图像,假定油斑的彩色图像为 f ,其大小为 $M \times N$, $(R(x,y),G(x,y),B(x,y))$ 分别表示像素 (x,y) 的 R 、 G 和 B 分量值, R 、 G 和 B 分别为油斑彩色图像 f 的红色(R ,Red) 分量、绿色(G ,Green) 分量和蓝色(B ,Blue) 分量; $1 \leq x \leq M, 1 \leq y \leq N, x$ 和 y 均为整数。油斑 1 的彩色图像 f 如图 1(a) 所示。

步骤 2:将油斑彩色图像转换至 HSV 颜色空间。

将油斑图像转换至 HSV 颜色空间,记为油斑 HSV 图。其计算式为

$$H = \arccos \left\{ \frac{[(R - G) + (R - B)]/2}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\} \tag{1}$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} [\min(R, G, B)] \tag{2}$$

$$V = \frac{1}{3} (R + G + B) \tag{3}$$

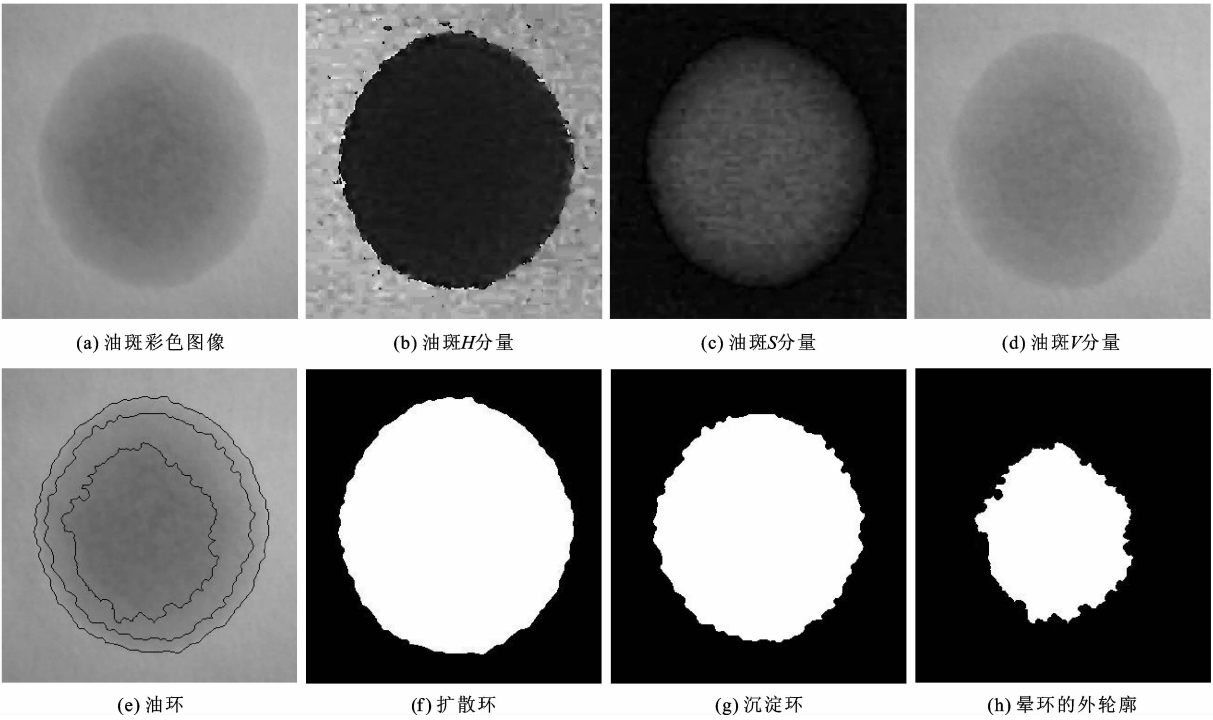


图 1 清静分散性测定法检测过程
Fig. 1 Detection process for DDP

步骤3:油环和扩散环检测。

油斑 H 分量如图 1(b) 所示,与油斑晕环相比,背景区具有显著的色调差异,背景指油斑晕环以外的白色滤纸区可用于分割出油环区域,具体如下:

油环初图的分割过程计算式为

$$I(x, y) = \begin{cases} 1, & H(x, y) \leq T_H \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: I 为油环初图,为 0 和 1 的二值图, $I(x, y) = 1$ 表示像素 (x, y) 为可能的油环区; T_H 为 H 分量的阈值,本文采用最大类间法确定。

油斑 S 分量如图 1(c) 所示,与油斑晕环相比,扩散环具有较显著的饱和度差异。

用 J 表示扩散环初图,基于自适应阈值的扩散环分割计算式为

$$J(x, y) = \begin{cases} 1, & S(x, y) \geq T_S \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: J 为扩散环初图,其取值为 0 和 1, $J(x, y) = 1$ 表示像素 (x, y) 为可能的扩散环区域; T_S 为 S 分量的阈值,本文采用最大类间法确定。

步骤4:油环和扩散环后处理

提取的油环初图和扩散环初图存在噪声点、间隙、毛刺和孔洞等,需要对其进行后处理。后处理具体如下所述。

首先,去除小区域块。 I 和 J 存在很多小的噪声区域,需要去除这些小的噪声区域,提取出真实的扩散环。具体包括:① 采用 4- 连通标记待处理的二值图 I 和 J ; ② 统计 I 和 J 中各连通区域的像素数; ③ 去除像素数较少的连通区域块。

其次,形态学闭运算。对油环初图和扩散环初图,进行数学形态学闭运算以消除小的孔隙。

$$p = I \circ b_1 = (I \oplus b_1) \ominus b_1 \quad (6)$$

$$q = J \circ b_2 = (J \oplus b_2) \ominus b_2 \quad (7)$$

式中: p 、 q 分别为油环图和扩散环图; b_1 、 b_2 为球形结构元素; \circ 表示形态学闭运算; \oplus 表示膨胀运算; \ominus 表示腐蚀运算。

再次,填“空洞”。油环和扩散环图中还有一些被白色区域包围的黑色“孔洞”,将其值直接置为 1。

最后,位置滤波。利用晕环位置形状特性,对油环图 p 和扩散环图 q 进行位置、形状滤波:若检测的油斑晕环的质心位于图像近中心区域,且其形状接近圆形,则认为检测的晕环正确;否则认为未检测出正确的晕环。对油斑 1 进行试验,检测的油环图 p 和扩散环图 q 分别如图 1(e)、(f) 所示。

步骤5:沉淀环检测。

油斑 V 分量图如图 1(d) 所示,沉淀环位于扩散环的内部,因而只针对扩散环区域进行分割,提取沉淀环 O 。

$$O(x, y) = \begin{cases} 1, & q(x, y) = 1 \text{ 且 } V(x, y) \geq T_V \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: T_V 为 V 分量的自适应阈值,本文采用最大类间法确定。

对提取的沉淀环仍需要执行后处理,其处理过程同步骤 4。油斑 1 的沉淀环 O 如图 1(g) 所示。油斑晕环的外轮廓如图 1(h) 所示。

步骤6:油品清净分散性判定。

机油清净分散性判定依据:扩散环较宽且沉淀环的颜色很亮,其清净分散性好;若扩散环变窄且沉淀环颜色加深,则清净分散性变差。基于此,本文清净分散性判定方法选定扩散环直径比和沉淀环灰度差作为判定指标,扩散环直径比表征扩散环的宽度,沉淀环灰度差表征沉淀环的黑度。扩散环直径比 K 定义为扩散环和油环直径的比值,比值越大说明清净分散性越好,当扩散环完全消失只剩油环时, $K = 0$,此时机油的清净分散性完全消失。沉淀环灰度差 A 定义为背景和沉淀环灰度均值的差,沉淀环灰度差 A 越大说明沉淀环的颜色越黑,清净分散性越差,反之亦然。

扩散环直径比 K 还可由扩散环面积和油环面积之比的平方根表示,亦等于扩散环像素数和油环像素数之比。用 D_k 和 D_y 分别表示扩散环和油环的直径, S_k 和 S_y 分别表示扩散环和油环的面积, N_k 和 N_y 分别表示扩散环像素数和油环像素数,则扩散环直径比 K 表示为

$$K = \frac{D_k}{D_y} = \sqrt{\frac{S_k}{S_y}} = \sqrt{\frac{N_k}{N_y}} \quad (9)$$

用 E_k 表示直径比重,1 级机油的直径比重为 1,6 级机油的直径比重为 0,当扩散环小于等于沉淀环时,扩散环消失,直径比重为 0,中间各级扩散环直径比重和扩散环直径比呈线性变化,则直径比重 E_k 和扩散环直径比 K 的关系式为

$$E_k = \begin{cases} 1 & K \geq \delta \\ \frac{K-d}{\delta-d} & d < K < \delta \\ 0 & K \leq d \end{cases} \quad (10)$$

式中: δ 为 1 级机油的扩散环直径比阈值,通常通过试验或经验获得; d 为沉淀环直径比,等于沉淀环像素数和油环像素数比值的平方根。

沉淀环灰度差 A 为背景和沉淀环的灰度均值的差,背景指油斑晕环以外的区域,为白色的滤纸区,其平均的灰度值较亮且相对稳定,机油清净分散性随着沉淀环灰度差 A 值的增大而变差。沉淀环灰度差 A 为

$$A = H_b - H_c$$

(11)

式中: H_b 、 H_c 分别为背景和沉淀环的灰度均值。

灰度差比重 E_a 表示机油级别和沉淀环灰度差的量化关系:根据韦伯定律,当前景和背景亮度差异大于一定值时,前景可以被观测到^[16]。据此,当沉淀环和背景的灰度差异大于 σ 时,人眼视网膜上的视觉细胞刚好能分辨出沉淀环,当沉淀环和背景差异小于 σ 时,认为无明显的沉淀环,油品几乎接近为新油,此时 $E_a = 1$;当沉淀环灰度值低于 ξ 时,表示沉淀环呈极黑,机油清净性为 6 级, $E_a = 0$;中间各级灰度差比重和沉淀环灰度差呈线性变化,则灰度差比重和沉淀环灰度差的关系式为

$$E_a = \begin{cases} 1 & A \leq \sigma \\ \frac{H_b - \xi - A}{H_b - \xi - \sigma} & \sigma < A < H_b - \xi \\ 0 & A \geq H_b - \xi \end{cases}$$

(12)

用 C 表示清净分散性系数,用于表征机油的级别, C 值越大,则清净分散性越好。清净分散性系数综合考虑了直径比重和灰度差比重,计算式为

$$C = \alpha E_k + \beta E_a$$

(13)

式中: α 为直径比重权重系数; β 为灰度差比重权重系数。

依据各级之间的线性关系,本文方法的机油清净性判定准则如表 1 所示,第 1 列为机油级别,共 6 级;第 2 列为分级判定依据;第 3 列为本文方法的机油清净分散性判定依据。

2 试验测试

油斑图的采集过程为:从下到上依次放置光源、滤纸和图像采集器,油斑样本背光环境下拍摄,油斑图样采集时尽量使油斑晕环中心与拍摄中心重合。为了验证本文算法的有效性,在 Intel CPU 2.0 GHz, 1 GB 的内存平台下,利用 Matlab 对多个油斑进行仿真试验。本文算法涉及的参数取值为:均取 5×5 的球形结构元素, $\alpha = 0.4$, $\beta = 0.6$, $\delta = 0.95$, $\sigma = 16$ 和 $\xi = 40$ 。

下页图 2 所示为 4 个油斑的检测结果,图 2(a)~图 2(d)为油斑 1~4 的彩色图像;可以看出,油斑晕

表 1 机油清净性判定准则

Tab. 1 Judgment criteria on DDP for automobile engine oil			
机油级别	油斑形态	清净分散性系数 C	鉴别
1	核心区 and 扩散环光亮无色或颜色很浅,无明显沉淀环	$C = 1$	接近新油
2	沉淀环和扩散环界限分明,扩散环很宽,油环明亮	$0.75 \leq C < 1.00$	良好
3	沉淀环暗黑,扩散环较宽,油环明亮	$0.50 \leq C < 0.75$	一般
4	沉淀环深黑,扩散环开始缩小,油环浅黄	$0.25 \leq C < 0.50$	下降
5	沉淀环深黑,甚至呈油泥状,扩散环狭窄,油环扩大且呈黄色	$0 < C < 0.25$	很差
6	只剩极黑的沉淀环和棕黄色油环,扩散环完全消失	$C = 0$	报废

环都不是标准的圆形,且外轮廓线也不光滑连续,呈轻微锯齿状,这是因为滤纸本身呈类颗粒状所致。图 2(e)~图 2(h)为本文方法检测的油斑 1~4 的晕环外轮廓图,其中油斑 2 和油斑 4 的扩散环较宽,油斑 1 和油斑 3 的扩散环较窄。4 个油斑的晕环外轮廓图表明,本文算法准确地检测出了油斑各晕环,分割效果好。

表 2 为 4 个油斑清净分散性级别判定结果。从表 2 可知,根据清净分散性系数 C ,油斑 4 的清净分散性最优,油斑 3 最差,油斑 2 和油斑 4 的扩散环直径比很接近;若单凭扩散环直径比^[6-7],油斑 2 和油斑 4 几乎具有一样的清净分散性,但油斑 2 的沉淀

表 2 4 个油斑的清净分散性级别判定结果及对比分析

Tab. 2 Determination results and comparative analysis of DDP for four oil spots				
类 别	油斑 1	油斑 2	油斑 3	油斑 4
沉淀环灰度均值 H_c	109	135	144	149
背景灰度均值 H_b	159	168	192	171
沉淀环灰度差 A	50	33	48	22
扩散环像素数 N_k	41 634	53 942	32 665	43 279
油环像素数 N_y	52 909	64 642	59 877	51 971
扩散环直径比 K	0.887	0.913	0.739	0.913
沉淀环直径比 d	0.647	0.416	0.430	0.348
直径比重 E_k	0.792 1	0.930 7	0.594 2	0.938 5
沉淀环灰度差比重 E_a	0.669 9	0.848 2	0.764 7	0.947 8
清净分散性系数 C	0.718 78	0.881 20	0.696 50	0.944 08
机油清净分散性级别	3	2	3	2
人工测定结果	3	2	3	2

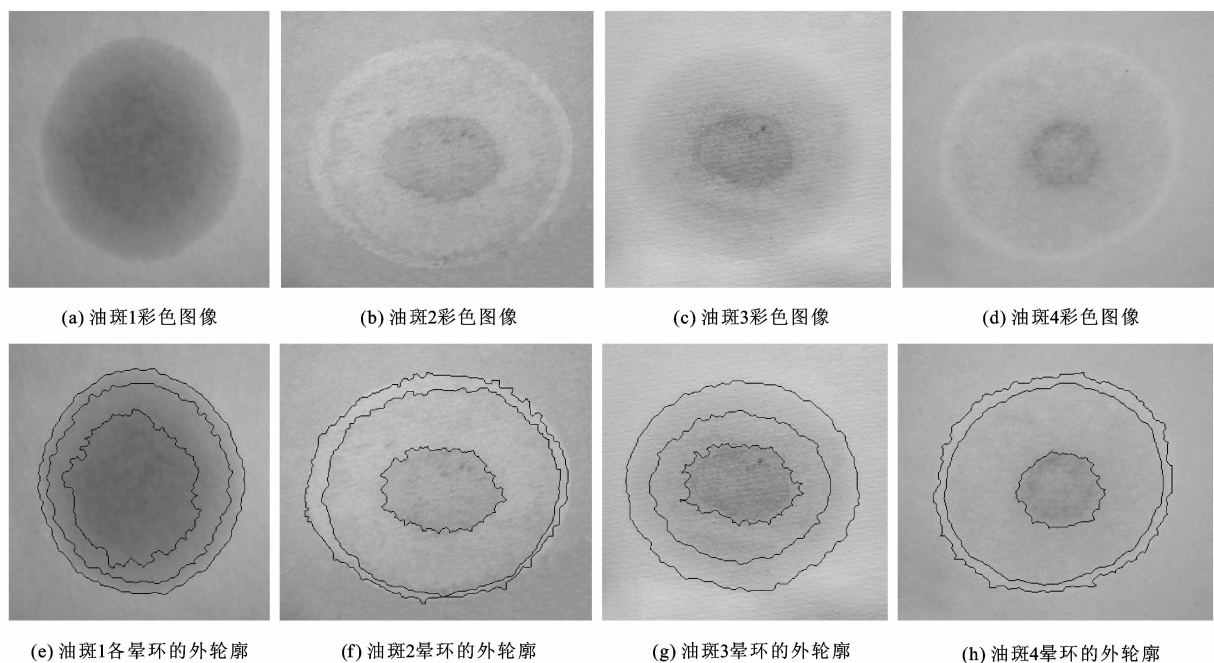


图 2 4 个油斑晕环的检测结果

Fig. 2 Detection results of four oil spot

环要深于油斑 4;融合扩散环直径比和沉淀环黑度信息后,油斑 2 和油斑 4 的清净分散性系数 C 分别为 0.881 2 和 0.944 08,尽管同属于级别 2,但油斑 4 的清净分散性优于油斑 2。当然,沉淀环的颜色与背景有关,油斑 3 和油斑 4 的沉淀环灰度值接近,但背景差异值较大,使得油斑 3 的沉淀环灰度差比重比油斑 4 的沉淀环灰度差比重小。

按照国标目测法,15 名有经验的人员对 4 个油斑样本的清净分散性等级进行了测定,其结果如表 2 所示。与现行的目测法相比,本文方法判定的清净分散性等级与其相符;且本文方法给出油样的清净分散性系数 C 值,可对机油的清净分散性做对比分析。

3 结 语

(1)通过清净分散性系数 C 定量测定油品的清净分散性,不仅可以为油品自动定级,还可以对同级别机油的清净分散性进行对比分析。

(2)便于进一步分析机油清净分散性的影响因素。根据直径比重和沉淀环灰度差比重,可分析机油清净分散性的影响因素。

(3)避免了人工测量带来的主观判断误差的影响,提高了测量结果的客观可信度水平。一方面通过面积计算等效直径,避免了人工测量过程中寻找等效直径带来的主观判断误差;另一方面融合了扩

散环直径和沉淀环颜色的多源信息,因而可提高测量结果的客观可信度水平。

(4)可用于随时监控机油品质,也可用于油品研制阶段的性能分析,采集的油斑图像可长期保存。

(5)算法所涉及的参数对机油清净分散性能的判定结果有一定的影响,建立自适应阈值的确定机制是下一步工作的重点。

参考文献:

References:

- [1] 凌永成. 汽车运行材料[M]. 2 版. 北京:北京大学出版社,2013.
LING Yong-cheng. Required materials in the use of vehicles[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University Press, 2013. (in Chinese)
- [2] 齐 峰. 汽车检测技术实务[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
QI Feng. Practice application of vehicle detection technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2009. (in Chinese)
- [3] Roshan R, Priest M, Neville A, et al. A boundary lubrication friction model sensitive to detailed engine oil formulation in an automotive Cam/Follower interface [J]. Journal of Tribology, 2011, 133(4): 1-9.
- [4] Yin X L, Jia W, Yu W, et al. The effect of methanol gasoline to engine oil [C]//ICEICE. International Conference on Electric Information and Control En-

- gineering. Wuhan: IEEE, 2011: 5481-5484.
- [5] Singh A K, Singh R K. A search for ecofriendly detergent/dispersant additives for vegetable-oil based lubricants[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2012, 15(4): 399-409.
- [6] 董元虎, 尹兴林, 邱梦璇, 等. CNG/汽油两用燃料发动机油清净分散性试验研究[J]. 润滑与密封, 2006, 31(7): 129-131.
- DONG Yuan-hu, YIN Xing-lin, Qiu Meng-xuan, et al. Experimental study on detergent dispersant of CNG or gasoline convertible fuel engine oil[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(7): 129-131. (in Chinese)
- [7] 董元虎, 王 娇, 王 稳, 等. 甲醇汽油对汽油机油清净分散性影响的试验研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(3): 153-155.
- DONG Yuan-hu, WANG Jiao, WANG Wen, et al. Experimental study of the effect of methanol gasoline on detergent dispersant performance of engine oil[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(3): 153-155. (in Chinese)
- [8] Ahmed N S, Nasser A M, Kamal R S. Influence of some compounds as antioxidants and detergents/dispersants for lube oil[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2011, 32(7): 1067-1074.
- [9] Canty T M X. In-line monitoring of particulate, color, and water content in lubricating oils to facilitate predictive maintenance, reduce wear, and provide real time alarming[J]. Journal of ASTM International, 2011, 8(10): 107-119.
- [10] 孙卫强, 刘佐民. 基于图像处理的磨痕快速测量方法研究[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2007, 29(5): 1-3.
- SUN Wei-qiang, LIU Zuo-ming. Wear scar measurement method based on image processing[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information and Management Engineering, 2007, 29(5): 1-3. (in Chinese)
- [11] 王长生, 袁 峰. 摩擦磨损试验磨痕检测新方法的研究[J]. 机械工程师, 2009(12): 121-123.
- WANG Chang-sheng, YUAN Feng. New wear scar testing method in friction and wear test[J]. Mechanical Engineer, 2009(12): 121-123. (in Chinese)
- [12] 肖 梅, 张 雷, 韩 光, 等. 基于磨痕检测的润滑油抗磨性能测定方法[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3): 73-78.
- XIAO Mei, ZHANG Lei, HAN Guang, et al. Anti-wear property measuring method of lubricant based on wear scar detection[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(3): 73-78. (in Chinese)
- [13] Wang J W, An Q. A proposed measurement method for void fraction in lubricant oil based on the image processing technique[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(2): 1-4.
- [14] Zhang Y Z, Li H J, Wu D. Edge extraction of marine oil spill in SAR images[C]//CESCE. International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering. Wuhan: IEEE, 2010: 439-442.
- [15] Song H J, Ren P, Liu W F. Oil film denoising method based on jump regression analysis[C]//CISP. 2012 5th International Congress on Image and Signal Processing, Chongqing: IEEE, 2012: 326-329.
- [16] 宋建军, 侯志强, 余旺盛. 基于人类视觉模型的各向异性扩散滤波方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(3): 321-328.
- SONG Jian-jun, HOU Zhi-qiang, YU Wang-sheng. Anisotropic diffusion image smoothing method based on human visual model[J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(3): 321-328. (in Chinese)