

## 荧光寿命分析法鉴别机油品种特征信息提取

景敏, 陈曼龙, 陈应舒, 张琦, 丁敏, 张士勇, 马祯元

(陕西理工大学机械工程学院, 陕西汉中 723001)

**摘要:** 由于机油的品种鉴别在环境监测、事故认定等领域有着重要的作用, 结合非线性最小二乘法的荧光寿命衰减曲线提取技术, 能解决不同机油混合后的分类识别问题。研究通过激光诱导荧光雷达系统, 利用时间分辨荧光实验, 采用非线性最小二乘法将荧光寿命衰减曲线按照不同指数拟合, 从相关指数及残差分布确定最佳拟合曲线。实验结果表明, 三种不同机油产品的荧光寿命衰减曲线按照不同指数衰减其拟合效果不同, 选取各自最佳拟合曲线, 按照合成规律可以拟合出不同机油的荧光平均寿命参数, 通过误差分析可信赖程度在 95% 以上。当以所有激发区域内像素点的平均荧光寿命为中心, 利用 2 倍标准差作为置信限, 统计其中两种不同机油激发区域中像素点荧光寿命值落入各自置信区间内的概率, 二者的概率分别为 87% 和 68%。通过三种不同油品的对比试验, 验证了利用荧光寿命分析法实现不同机油产品油种识别的可能性, 并可通过荧光寿命成像判断不同油种的空间分布信息。荧光寿命分析法为机油产品油种鉴别、成分分析及检测空间分布提供了一种新途径。

**关键词:** 荧光寿命; 激光诱导荧光雷达; 非线性最小二乘拟合; 油种鉴别

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.08.006

## Feature information extraction in identification of oil varieties based on fluorescence lifetime analysis method

JING Min, CHEN Man-long, CHEN Ying-shu, ZHANG Qi, DING Min, ZHANG Shi-yong, MA Zhen-yuan

(School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

**Abstract:** Identification of oil varieties play an important role in environmental monitoring, accident identification and other fields. Based on the complex composition of oil products, the fluorescence lifetime imaging technique combined with nonlinear least square method was proposed to fit the fluorescence life attenuation curve and extract mean fluorescence lifetime parameters, and thus solved the classification and identification problem of different oil mixtures. Using time-resolved fluorescence experiment in laser-induced fluorescence system, the best fitting curve was determined from the correlation index and residual distribution. Experimental results show that the fluorescence life attenuation curves of three different oil products had different fitting effect according to different exponential attenuation curves. The optimal fitting curves were selected to fit the average fluorescence life parameters of different oil products according to the synthesis method, and trustiness of the results was above 95%. Taking the average fluorescence life of all excited pixels as the center, using 2 times standard deviations as the confidence limit, the probability of pixel fluorescence lifetime value falling within their confidence intervals in two different oil excitation regions was calculated as 87% and

**基金项目:** 陕西省科技厅科学研究项目 (No. 2019JM-171); 陕西省教育厅科学研究项目 (No. 18JK0163) 资助。

**作者简介:** 景敏 (1978-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事精密测量, 荧光检测等方面的研究。

E-mail: jingmin@snut.edu.cn

**收稿日期:** 2020-12-08; **修订日期:** 2021-01-13

68%, respectively. Comparing the mixture of three different oil products, the possibility of using fluorescence life analysis to identify different oil type was verified, and the spatial distribution information of different oil types was determined by fluorescence life imaging. Fluorescence life analysis provides a new approach for oil product identification, component analysis and spatial distribution detection.

**Keywords:** fluorescence lifetime; laser-induced fluorescence; nonlinear least square fitting; oil identification

## 1 引言

机油也称之为发动机润滑油,能对发动机起到润滑减磨、辅助降温、防锈蚀及减震等的作用,其广泛应用于汽车使用领域。机油产品成分复杂,不同生产厂家添加的添加剂不同,不同发动机工作状态需要不同质量等级的机油产品,如果选择劣质或低等级质量的机油,会对发动机的使用性能及寿命造成很大的影响,严重时会造成威胁人生命健康的重大事故;另一方面,排放至环境中的废弃机油会给自然环境带来危害,甚至影响人类的健康。所以,科学合理地区分识别不同油种,为环境监测领域污染物识别及事故溯源追究有重要意义<sup>[1]</sup>。

目前,国内外研究原油品种识别的较多<sup>[2]</sup>,主要利用荧光光谱结合模式识别手段,采用激光遥感技术在海洋溢油油源辨别方面取得一定成果<sup>[3-5]</sup>。由于荧光强度受外界环境及发散角的影响,利用激光诱导原油荧光时间分辨荧光光谱技术进行原油时间分辨谱的研究<sup>[6-7]</sup>成为发展趋势。原油属于重油,由于成分单一,荧光衰减曲线通常采用单指数拟合,而机油属于轻油产品,通常荧光团成分复杂,每一种荧光团的荧光寿命都不一样,这给研究利用荧光寿命鉴别机油产品种类造成了一定困难。

本文通过利用荧光寿命成像技术分析常见的几种机油产品的荧光寿命,通过荧光强度衰减曲线结合荧光寿命时间差异,利用荧光寿命成像技术实现机油产品的种类鉴别,为机油产品鉴别提供新思路和新方法。

## 2 测量原理

当荧光物质被激光照射时,物质的分子吸收能量后由基态跃迁到激发态,由于激发态不稳定,再从激发态以辐射跃迁发出荧光的方式回到基态。由于每种物质的能级结构不一样,即使在相同的激励条件下发射的荧光特性也不同,通过对荧光特性参数的测量可以实现物质的区分。激发的峰值位置及强度可以作为判别的依据,但由于荧光强度受发散角度、外界环境及激发光源强度等的影响,利用荧光光

谱信息进行物质分类判别难以适用于现场测量。而荧光寿命是荧光光子的衰减时间,不受荧光入射角度、环境光强弱及激发光强等外界因素的干扰,将它作为荧光特性参数进行物质种类识别区分具有良好的应用前景<sup>[8-9]</sup>。

荧光寿命测量有频域法和时域法两大类。频域法虽然实现简单,但光源需要调制。时间相关单光子计数法(TCSPC)和门控探测法是时域法实现的两种主要方法<sup>[10]</sup>。其中TCSPC法虽然分辨率高,但测量时间长,成像速度慢,不适用于现场分析,而门控探测法实现简单,成像速度快适用于现场测量。本实验采用门控探测法实现荧光寿命成像测量<sup>[11]</sup>,激光诱导油品荧光效果图如图1所示。



图1 激光诱导机油荧光效果图

Fig.1 Laser induced oil fluorescence

通过在两个不同延迟时刻 $t_1$ 和 $t_2$ 开启的相同宽度的时间门内记录荧光强度信息分别为 $I_1$ 和 $I_2$ ,如图2所示,按照公式(1)求得荧光寿命。理论上,仅需设置两个时间门就可以求得荧光寿命,但在实际应用中,在条件允许情况下,采用多门控探测进行样品荧光寿命成像<sup>[12]</sup>。

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln(I(t_1)/I(t_2))} \quad (1)$$

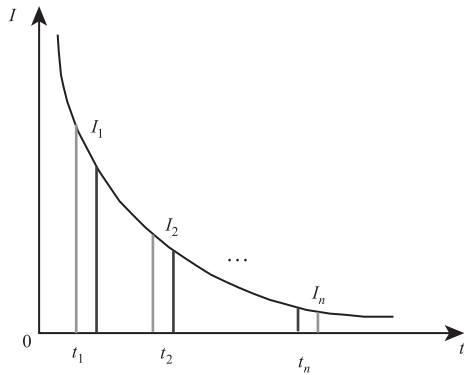


图 2 门控探测法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of gated detecting method

在每一个激光脉冲激发样品后,设置一个时间门和采样窗口,同时选通探测器获得一部分荧光信息,等到下一个激光脉冲到来时,在上一个延时的基础上,再延时一个时间门,这样通过连续多次延时采集,经过多个采样窗口,就可以得到真实的荧光衰减曲线。实验中采集到的光强度信息  $i(t)$  实际为激光诱导荧光衰减函数  $f(t)$  与仪器的响应函数  $r(t)$  的卷积。

$$i(t) = f(t) \otimes r(t) \quad (2)$$

只要测出系统响应函数  $r(t)$ ,用实际采集到的激光诱导荧光信号  $i(t)$  对  $r(t)$  解卷积,就可到荧光的衰减函数  $f(t)$ 。

荧光寿命衰减可以看作是各荧光组分寿命衰减的贡献和<sup>[13]</sup>,故可用下式表示:

$$F(t) = F_1 e^{-t/\tau_1} + F_2 e^{-t/\tau_2} + \dots + F_n e^{-t/\tau_n} \quad (3)$$

其中,  $F$  为各荧光组分的初始荧光强度;  $\tau$  为各荧光组分的荧光寿命。

对于复杂荧光体系,假设其有  $m$  个荧光组分,则其荧光平均寿命为:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^m A_i Z_i^2}{\sum_{i=1}^m A_i Z_i} \quad (4)$$

其中,  $\tau_i$  为拟合所得各荧光组分的荧光寿命;  $A_i$  分别为各荧光组分的相对浓度。根据各种油的荧光衰减曲线,按照多指数衰减规律,拟合相对浓度与荧光寿命,得到待求油品平均荧光寿命特征参数。

### 3 方法

#### 3.1 实验装置

时间分辨荧光实验装置如图 3 所示。激发光源为 Nd:YAG 脉冲激光器三倍频输出的 355 nm 激光,激光频率为 10 Hz,单脉冲能量为 50 mJ,脉冲宽

度小于 7 ns。待测油样放置在石英比色皿中,激光经过三倍频输出后通过平面镜及凹透镜,凹透镜的作用是扩束,使得激光束能够均匀照射在样品上诱发荧光。分光镜后放置吸收盒,吸收激光杂光,吸收盒旁放光电二极管(PD)接收激光信号,同时触发增强型光电耦合器件(ICCD)采集荧光信号。

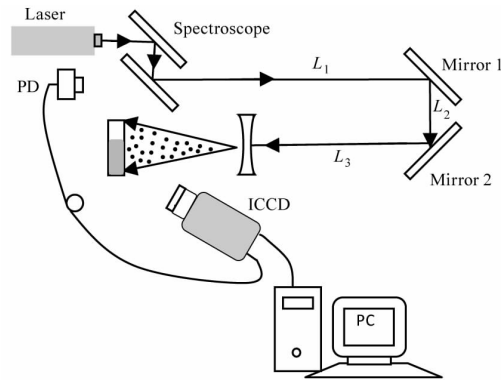


图 3 激光诱导荧光寿命成像系统图

Fig. 3 Laser induced fluorescence lifetime imaging system

#### 3.2 实验材料与方法

利用 Princeton Instrument 公司的 PI-MAX3 型 ICCD,由于机油产品对于 355 nm 激发波长其主要荧光峰区间在 400 ~ 500 nm 之间<sup>[14]</sup>,故在 ICCD 前加装带通滤光片,  $L_1$ ,  $L_2$  和  $L_3$  是为了保证同步触发设计的延时光路。

针对市面上常见的几种机油产品,选取国产长城 300 捷豹润滑油 SG MA 15W-40 及 Yamalube 摩托车机油和昆仑摩托车齿轮油,采用门控探测法,通过精准控制门开启及延时时间,就可以得到不同油样的离散荧光信号。

### 4 结果与分析

#### 4.1 不同机油荧光衰减谱分析

由于荧光图像的每一个像素点都相当于是一个时间通道,可以记录一组离散的激光诱导荧光信号。实验中,任取一个像素点的连续图像上对应的灰度值,得到荧光随时间变化曲线,从荧光最大值处截取变化曲线,就可以得到荧光衰减曲线。通过对不同的衰减曲线进行指数拟合得到相应的指数衰减函数,从而确定荧光寿命。而检验拟合合理性的依据是根据拟合后相关指数  $R^2$  和残余误差分布情况。根据非线性最小二乘分析,合理的拟合结果应使残余误差在零值附近呈现随机分布。相关指数  $R^2$  作为拟合结果质量好坏的指标,越接近于 1,拟合效果就越好。

针对长城润滑油、Yamalube 摩托车机油及昆仑摩托车齿轮油利用图 3 所示系统,由 ICCD 获得荧光寿命成像,由于每一个单一像素可看作一个时间通道,能够记录一组离散的激光诱导荧光信号。图 3 所示系统在连续脉冲激光照射下,采用时间分辨测量方法,利用连续激光脉冲同步触发 ICCD 以 0.2 ns 的时间延迟启动,以固定曝光时间采集激光诱导荧光信号。通过使用连续激光不断激发油品产生激光诱导荧光信号,同时不断改变激光脉冲触发 ICCD 拍摄图片的启动延迟时间,就能够依次得到激光诱导荧光信号各个时间段的强度信息。

将 ICCD 采集到的各个时间段的强度信息拼接起来,就能够得到完整的离散激光诱导荧光信号数据,再将像素点时间通道内的离散激光诱导荧光信号数据拟合,就可以获取激光诱导荧光随时间变化规律曲线。为方便比较,同取 80 × 100 像素激发区域,且多次实验,取区域内所有像素点荧光强度平均值进行平滑处理,将平滑后的曲线由激光诱导荧光强度最大值处截取,得到荧光衰减曲线。利用荧光衰减曲线,分别按照单指数衰减函数、双指数衰减函数、三指数衰减函数以及四指数衰减函数进行拟合,得到不同的相关指数  $R^2$  及残差,见表 1。

表 1 三种油不同衰减函数相关指数分析

Tab. 1 Correlation index analysis of different attenuation function about three kinds of oils

样品名称	单指数	双指数	三指数	四指数
长城润滑油	0.7369	0.9552	0.7355	0.8956
Yamalube 机油	0.8180	0.9630	0.8180	0.9056
昆仑摩托车齿轮油	0.9428	0.9428	0.9428	0.9428

从表 1 可以看出长城润滑油 SG300 捷豹油的分别按照单指数、双指数、三指数、四指数函数衰减的相关指数分别为 0.7369、0.9552、0.7355、0.8956。其中按照双指数函数衰减其相关指数最接近于 1,拟合效果最好。在研究区域内,所有平均荧光强度按照不同衰减函数进行拟合,其荧光衰减曲线及残差分布如图 4 所示,可见,按照双指数函数拟合效果较好,按照双指数函数拟合时不同时间序列残差分布在零值附近且呈随机分布,故此种油按照双指数函数拟合较好。表明长城润滑油并非一个单一荧光寿命体系,其含有多个荧光寿命体系,是由于每种油品中添加剂不同造

成的,而荧光寿命衰减曲线是多个荧光寿命体系对荧光寿命衰减的共同影响的结果。将最佳拟合结果按照公式 4 整理为表 2,其中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  为拟合所得各荧光组分的荧光寿命,  $A_i$  为各荧光组分相对浓度。可以得到长城润滑油荧光平均寿命为 44.1720 ns。

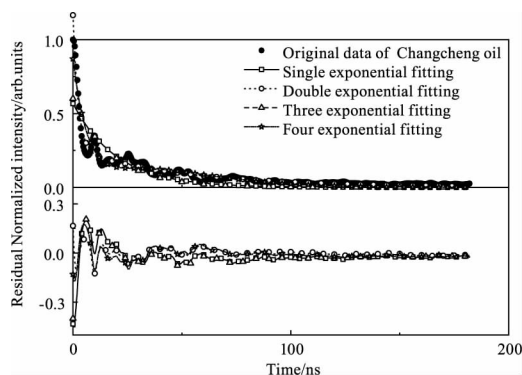


图 4 长城润滑油按不同指数衰减拟合及残差分布图

Fig. 4 Decay curve fitting according to different exponential and residuals distribution of Changcheng oil

同理,由表 1 可见, Yamalube 机油按照四种衰减函数进行拟合,相关指数分别为 0.8180、0.9630、0.8180、0.9056,可见按照双指数函数拟合效果较好。在研究区域内,所有平均荧光强度按照不同衰减函数进行拟合,其荧光衰减曲线如图 5 所示。从拟合效果及残差分布图可知,按照双指数函数拟合时不同时间序列残差分布在零值附近且随机分布。表明 Yamalube 机油也并不是一个单一荧光寿命体系,其含有多个荧光寿命体系,由公式 4 拟合出最佳结果见表 3,其平均荧光寿命为 59.2518 ns。可见,与长城润滑油比较, Yamalube 机油由于荧光团成分不一样,其荧光衰减曲线不同,即使二者均按照双指数衰减函数拟合,荧光平均寿命也不同。

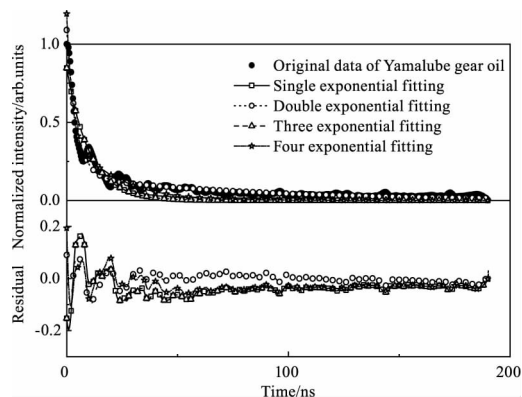


图 5 Yamalube 机油按不同指数衰减拟合及残差分布图

Fig. 5 Decay curve fitting according to different exponential and residuals distribution of Yamalube gear oil

表 2 长城润滑油荧光衰减曲线拟合后参数及 95% 置信概率下区间

Tab. 2 Fluorescence decay curve parameters and 95% confidence interval of Changcheng oil after fitting

拟合方式	参数	$A_1$	$t_1/\text{ns}$	$A_2$	$\tau_2/\text{ns}$	$\bar{\tau}/\text{ns}$
双指数	数值	0.2548	51.1617	0.9106	2.3952	44.1720
	区间	0.2455 ~ 0.2641	48.9424 ~ 53.3810	0.8834 ~ 0.9378	2.2689 ~ 2.5214	

表 3 Yamalube 机油荧光衰减曲线拟合后参数及 95% 置信概率下区间

Tab. 3 Fluorescence decay curve parameters and 95% confidence interval of Yamalube oil after fitting

拟合方式	参数	$A_1$	$t_1/\text{ns}$	$A_2$	$\tau_2/\text{ns}$	$\bar{\tau}/\text{ns}$
双指数	数值	0.1553	77.8622	0.9349	4.3887	59.2518
	区间	0.1472 ~ 0.1635	72.9239 ~ 82.8006	0.9151 ~ 0.9547	4.2196 ~ 4.5577	

而昆仑摩托车齿轮油由表 1 可知,按照单指数、双指数、三指数及四指数等不同衰减函数进行拟合,其相关指数均为 0.9428,故按照单指数衰减曲线拟合效果较好。从按不同指数衰减的衰减曲线及残差分布图图 6 可知,对于此种油,按照单指数函数拟合不同时间序列残差分布在零值附近且呈随机分布,此种油按照单指数函数衰减效果较好,可认为该油的荧光信号强度主要由一个荧光团起主要作用。其拟合后的最佳参数见表 4,其荧光平均寿命为 14.1053 ns。可见,不同润滑油受激后产生荧光效果不同,其荧光衰减曲线不同,可以按照荧光平均寿命区分油的种类。

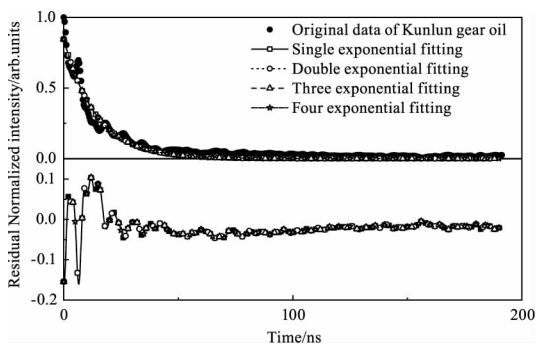


图 6 昆仑齿轮油按不同指数衰减拟合及残差分布图

Fig. 6 Decay curve fitting according to different exponential and residuals distribution of Kunlun gear oil

表 4 昆仑齿轮油荧光衰减曲线拟合后参数及 95% 置信概率下区间

Tab. 4 Fluorescence decay curve parameters and 95% confidence interval of Kunlun gear oil after fitting

拟合方式	参数	$A_1$	$\tau_1/\text{ns}$	$\bar{\tau}/\text{ns}$
单指数	数值	0.8456	14.1053	14.1053
	区间	0.8296 ~ 0.8617	13.7237 ~ 14.4868	

曲线方程拟合的好坏直接影响荧光平均寿命结果,根据拟合检验的标准,对确定的曲线方程拟合结果进行拟合优度检验,相关指数  $R^2$  越接近于 1,拟合效果好。针对  $N$  次测量,还可以利用  $F$  检验对建立的回归方程进行显著性检验,从  $F$  统计量的定义可知,如果  $F$  值越大,说明自变量造成的因变量的变化大于随机因素对因变量造成的影响, $F$  统计量越显著,回归方程的拟合优度也越高。

对不同油种样品进行研究,对荧光寿命衰减图像上每一点进行分析,每一像素点随时间变化的荧光强度衰减曲线均按照不同油样相应的最佳相关指数拟合,其荧光寿命平均值和标准差及  $F$  统计量见表 5。

表 5 三种润滑油平均荧光寿命方差分析

Tab. 5 Variance analysis of mean fluorescence life of three lubricants

样品名称	拟合方式	平均相关指数	回归平方和	残差平方和	残余标准差	统计量 $F$
长城润滑油	双指数	0.9329	1.2786	0.0014	0.0378	894
Yamalube 机油	双指数	0.9441	3.1239	0.0018	0.0419	1781
昆仑齿轮油	单指数	0.9455	5.1105	0.0019	0.0435	2697

取显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 可查  $F$  分布表,  $F_{0.05}(4, \infty) = 2.37$ ,  $F_{0.05}(2, \infty) = 2.99$ 。表 5 中计算的  $F$  统计量均大于查表值, 拟合函数显著。对于所考察的三种润滑油, 用各自的拟合函数进行回归分析, 可信程度在 95% 以上。

#### 4.2 利用荧光平均寿命进行识别结果分析

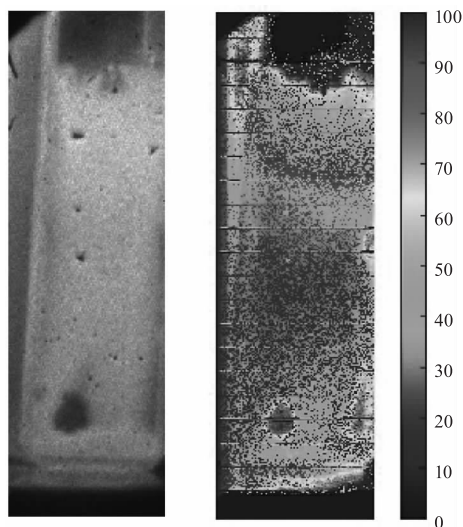
将长城润滑油和昆仑齿轮油两种机油分别涂抹在石英比色皿的向光面上, 利用上述方法对两种机油的平均荧光寿命进行计算。利用多指数衰减函数拟合荧光衰减曲线, 按照上述方法对激发区域中所有像素点进行拟合, 利用公式 4 计算每个点的平均荧光寿命, 最后对激发区域中所有点的平均荧光寿命取平均值。计算激发区域内所有点平均荧光寿命的平均值及其标准差, 并按照 95% 的置信概率取置信区间, 计算所有激发区域中像素点的平均荧光寿命值落在该区间内的比例, 具体计算参数如表 6 所示。

表 6 不同润滑油平均荧光寿命参数表

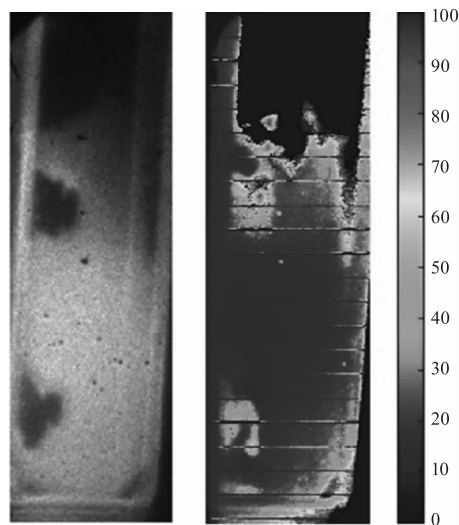
Tab. 6 Mean fluorescence life parameters of different oil

样品油名称	拟合方式	平均荧光寿命/ns	标准差	比例
长城润滑油	双指数	34.1339	11.4329	87%
昆仑齿轮油	单指数	16.4873	3.2925	68%

为了研究荧光寿命分析法在描述不同润滑油二维空间分布上的可行性, 按照上述方法, 用多指数衰减方法得到两种机油的荧光寿命分布图, 采用伪彩色图表示实验研究的两种润滑油的荧光寿命分布图谱, 比较油膜原图与荧光寿命图如图 7 所示。可见, 对于多组分化合物可以利用平均荧光寿命作为特征参数进行油种识别。



(a) 长城润滑油油膜原图及荧光寿命图谱



(b) 昆仑齿轮油油膜原图及荧光寿命图谱

图 7 润滑油油膜原图及荧光寿命图

Fig. 7 Oil film and fluorescence lifetime map

以所有激发区域内像素点的平均荧光寿命为中心, 利用 2 倍标准差作为置信限, 统计两种不同机油激发区域中像素点荧光寿命值落入各自置信区间内的概率, 两者的概率分别为 87% 和 68%, 见表 6。结果表明, 利用多指数衰减函数拟合的方法计算平均荧光寿命可行且有效, 利用荧光寿命图谱不仅可以显示荧光寿命参数, 还可以描述荧光物质的二维空间分布。

## 5 结论

在激光诱导油品产生荧光的实验中, 利用时间分辨荧光方法结合荧光寿命成像技术, 将荧光寿命曲线按照不同指数衰减函数拟合, 利用非线性最小二乘的方法, 根据相关指数及残差分布找寻最优指数拟合函数。实验表明, 可利用多指数衰减函数拟合的方法计算平均荧光寿命, 该方法有效, 通过误差分析, 可信程度在 95% 以上。

荧光寿命参数反映的是荧光光子的衰减时间, 它不易受测量过程中环境光强弱、激发光强弱及角度等外界因素的影响, 作为荧光信号的本征参量, 具有很好的稳定性及测量精度。利用荧光寿命衰减曲线, 通过多指数函数拟合的方法提取的荧光平均寿命信息不仅可以作为物质识别的依据, 还可以利用荧光寿命参数反映荧光团的二维分布, 利于微量混合油种鉴别、成分分析及分布情况监测, 不仅适用于质量检测领域还可以结合激光雷达技术用于环境遥感监测。

## 参考文献:

- [1] Jing Min, Hua Dengxin, Yue Jing. Stimulation of fluorescence lidar for detecting oil slick[J]. ACTA Phys. Sin, 2016, (7): 88 - 94. (in Chinese)  
景敏, 华灯鑫, 乐静. 荧光激光雷达技术探测水面油污系统仿真研究[J]. 物理学报, 2016, (7): 88 - 94.
- [2] Han Xiaoshuang, Liu Deqing, Luan Xiaoning, et al. Discrimination of crude oil samples using laser-induced time-resolved fluorescence spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, (2): 445 - 448. (in Chinese)  
韩晓爽, 刘德庆, 栾晓宁, 等. 基于激光诱导时间分辨荧光的原油识别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, (2): 445 - 448.
- [3] Wang Yutian, Liu Tingting, Liu Lingfei, et al. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in water based on three dimensional fluorescence spectroscopy combined with wavelet compression and APTLD[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, (4): 1171 - 1177. (in Chinese)  
王玉田, 刘婷婷, 刘凌妃, 等. 基于三维荧光光谱结合小波压缩与 APTLD 对水中多环芳烃测定[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, (4): 1171 - 1177.
- [4] Shen Zhenmin, Shang Weidong, Wang Bingjie, et al. Lidar with high scattering ratio suppression for underwater detection[J]. ACTA Photonica Sinica, 2020, 49(6): 92 - 99. (in Chinese)  
沈振民, 尚卫东, 王冰洁, 等. 高散射抑制比激光雷达水下探测技术探析[J]. 光子学报, 2020, 49(6): 92 - 99.
- [5] Li Bingxuan, Zhou Bing, He Xuan, et al. Status and prospects of target classification methods based on hyperspectral images[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(3): 259 - 265. (in Chinese)  
李秉璇, 周冰, 贺宣, 等. 针对高光谱图像的目标分类方法现状与展望[J]. 激光与红外, 2020, 50(3): 259 - 265.
- [6] Liu Deqing, Luan Xiaoning, Han Xiaoshuang, et al. Characterization of time-resolved laser-induced fluorescence from crude oil samples[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, (6): 1582 - 1586. (in Chinese)  
刘德庆, 栾晓宁, 韩晓爽, 等. 原油样品激光诱导荧光的时间分辨光谱特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, (6): 1582 - 1586.
- [7] Liu Xiongbo, Lin Danying, Wu Qianqian, et al. Recent progress of fluorescence lifetime imaging microscopy technology and its application[J]. ACTA Phys. Sin, 2018, (17): 27 - 40. (in Chinese)  
刘雄波, 林丹樱, 吴茜茜, 等. 荧光寿命显微成像技术及应用的最新研究进展[J]. 物理学报, 2018, (17): 27 - 40.
- [8] Liu Xiaohua, Chen Saiying, Zhang Yinchao, et al. Rapid recognition of common machine oils based on laser induced fluorescence[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, (8): 2148 - 2151. (in Chinese)  
刘晓华, 陈思颖, 张寅超, 等. 基于激光诱导荧光的常见机油快速识别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, (8): 2148 - 2151.
- [9] Liu Deqing, Luan Xiaoning, Guo Jinjia, et al. A new approach of oil spill detection using time-resolved LIF combined with parallel factors analysis for laser remote sensing[J]. Sensors, 2016, (16): 1347.
- [10] Marina P, Haas K T, Stoppa D, et al. Fast and simple spectral FLIM for biochemical and medical imaging[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 22352 - 23511.
- [11] Jing Min, Jing Le, Hua Dengxin, et al. Laser speckle jitter correction in plant fluorescence lifetime extraction[J]. Measurement, 2019, (133): 33 - 40.
- [12] Wan W, Hua D, Le J, et al. Study of laser-induced chlorophyll fluorescence lifetime measurement and its correction[J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2015, (60): 64 - 70.
- [13] Li Day-Wei, Yu Hongqi, Chen Yu. Fast bi-exponential fluorescence lifetime imaging analysis methods[J]. Optics Letters, 2015, 40(3): 336 - 339.
- [14] Mu Taotao, Chen Siying, Zhang Yinchao, et al. Motor oil classification based on time-resolved fluorescence[J]. PLOS ONE, 2014, 9(7): e100555.