

# 激光技术在燃油喷雾测试中应用的进展

王德忠 黄震 张连方

(上海交通大学动力机械工程系, 上海, 200030)

**摘要:** 本文系统地概述了近年来激光测雾技术的发展, 介绍了激光多普勒测速技术、粒子图像测速技术、激光散射技术、激光全息技术、激光荧光法以及激光衰减法的原理、特点和存在的一些问题, 并指出了激光测试技术在燃油喷雾研究中的应用前景。

**关键词:** 激光测试技术 燃油喷雾

## The development of laser technique applied in the field of fuel spray experiment

Wang Dezhong, Huang Zhen, Zhang Lianfang

(Dept. of Power Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University)

**Abstract:** In this paper, the development of laser measuring technique of fuel spray in recent years is reviewed. The principles, characters and problems of fuel spray of LDV (laser doppler velocimeter), PIV (particle image velocimetry), laser scattering, laser holography, laser fluorescence and laser extinction method applied in the field of fuel spray experiment are introduced. Finally, the application perspective of laser measuring technique in the fuel spray is pointed out.

**Key words:** laser measuring technique fuel spray

### 一、引言

燃油喷雾特性直接影响着内燃机的燃烧过程。为实现高效、合理的燃烧过程, 喷雾特性、燃烧室形状和气流运动要有良好的配合。因此, 深入、全面地了解柴油机燃油喷雾的物理过程具有重要的意义。传统上测量喷雾粒度分布的方法有: 浸液法<sup>[1]</sup>、跟踪法<sup>[2]</sup>、沉降法<sup>[3]</sup>、冻结法<sup>[4]</sup>、溶蜡法<sup>[5]</sup>和取样法<sup>[6]</sup>等等。测量喷雾的雾化锥角和贯穿距离的方法有高速摄影技术<sup>[7,8]</sup>。上述这些测量方法在喷雾的研究中都有各自的特点。但由于柴油机燃油喷雾是一个非常复杂的瞬态过程, 对其喷雾特性的研究十分困难, 至今这方面的研究还很不完善<sup>[9]</sup>。虽然对某些简单条件下的喷雾通过试验已建立了一些简化理论, 但对复杂条件下喷雾还缺乏认识, 其中一个主要原因是测试手段不能满足要求, 因此, 当务之急是探求和发展新的喷雾测试手段。

随着激光、微电子及计算机技术的飞速发展和广泛应用, 以激光为光源, 利用激光散射、干

涉原理,人们开发许多新的测试技术。如激光多谱勒技术、激光散射技术、激光阴影技术、激光全息技术和激光 CT 技术等等。上述这些测试技术除具有不干扰流场的优点外,还具有较高的时间和空间分辨率。实现了喷雾测量的三维性和实时性,为深入研究喷雾提供了强有力的测试手段。本文将对上述方法以及在实际应用中需解决的问题加以介绍和讨论。

## 二、激光技术在燃油喷雾测试中的应用概述

### 1. 激光多谱勒测速技术

激光多谱勒测速仪(Laser Doppler Velocimeter 简称 LDV)是测量流场速度的有力工具。其原理是,当激光照射到运动的喷雾粒子时将被运动的粒子散射,散射光和入射光的频率相比较,可求出正比于流体速度的多谱勒频移。测量频移的大小可给出粒子的运动速度。通常采取的办法是将激光源发出的激光对每一速度分量都分成两束,并聚集到包括平面波前的按高斯

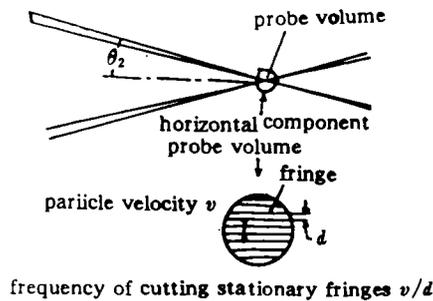


Fig. 1 Fringe analysis of LDV

和第三个方向的速度分量<sup>[11]</sup>。

利用激光测量发动机气缸内流速时必须开两个视窗。选择遇到高温、高压不变形且具有良好的光学特性的玻璃是技术关键之一。图 2 给出用 LDV 技术测定活塞上部空穴内流速的装置<sup>[12]</sup>。发光系统和接收系统要根据不同的测试对象而采取不同的方案。例如,测定发动机气缸内壁附近的速度场,可采用前向散射 LDV 技术。该技术经过近 30 年的发展,其应用范围愈来愈广。最近开发出各种各样光纤 LDV 系列,实现了 LDV 的小型化。在此基础上还开发出能够同时测量粒子尺寸和速度的相多谱勒(Phase Laser Doppler Velocimeter)技术<sup>[14]</sup>。光线穿过球形粒子的几何关系如图 3<sup>[14]</sup>所示。其原理是粒子的尺寸和散射角不同将会影响光程,即粒子尺寸会使相移发生变化,其关系式为<sup>[14]</sup>。

$$\eta = 2\alpha(\sin r - p m \sin r') \quad (3)$$

式中,  $m$  为粒子的折射率,  $p=0$  表示第一个表面的反射光线,  $p=1$  表示透射光线,  $p=2$  表示经一次反

射光分布的一个有限衍射区见图 1<sup>[10]</sup>。由于激光的相干性,这两束光在聚焦区会发生干涉,形成彼此距离很小的干涉条纹。峰到峰的条纹间距  $d$  为

$$d = \lambda / (2 \sin(\theta/2)) \quad (1)$$

当某个粒子以速度  $v$  穿过聚焦体时,其切割干涉条纹的频移为

$$f_D = 2v \sin(\theta/2) / \lambda \quad (2)$$

$f_D$  是观察到的散射光频移。这仅仅测出了与干涉条纹正交的速度分量。增加辅助光路可确定第二

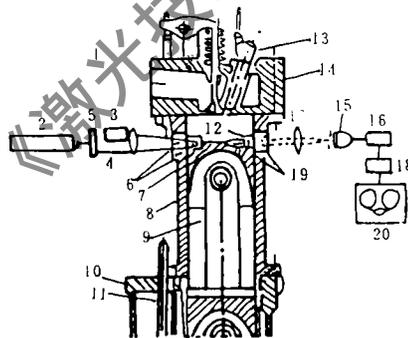


Fig. 2 Schematic diagram of engine and optics used for LDV

- 1—seeding particle 2—Ar<sup>+</sup> laser 3—shutter 4—lens 5—beam splitter 6—window 7—toroidal cavity 8—elongated cylinder liner 9—elongated connecting rod 10—cylinder 11—piston 12—slit 13—fuel injector 14—cylinder head 15—photomultiplier 16—nuser 17—lens 18—tracker 19—window 20—data recorder

射后的出射光线,其它符号见图3。(3)式表明,位相正比于粒径参数  $\alpha = \pi d/\lambda$ ,位相的变化与入射光强或散射光振幅无关,而正比于粒径。

激光多普勒测速技术的优点是测量时不干涉流场;具有较高的时间和空间分辨率;测量速度而非速度函数;能用于无法接触或传统仪器不适宜的场合。其缺点是需要空间逐点测量流场的速度分布和粒度分布,不能在瞬间对整个流场进行测量;另外,此方法不适于低速度的测量,因为速度低时频移太小<sup>[15]</sup>。

### 2. PIV (Particle Image Velocimetry) 技术

PIV 即粒子图象速度场仪从本质上看是一种图象分析技术。它可在瞬间冻结流场,给出二维速度分布。在粒子浓度很低时,称此 PIV 模式为 PTV (Particle tracking velocimetry),即粒子追踪速度场仪。当粒子浓度高到使映象图在接收区重叠时,称此 PIV 模式为 LSV (Laser speckle velocimetry),即激光散斑速度场仪。通常所讲的 PIV 是指粒子浓度很高但映象图在接收区不重叠的情况。

一个完整的 PIV 系统通常由成象系统和图象处理系统组成。双脉冲激光片光源和照相机

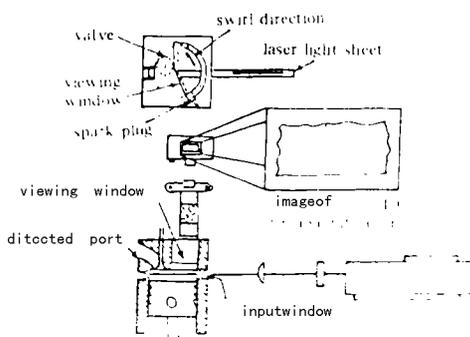


Fig. 4 Schematic diagram of engine and optics used for PIV

构成 PIV 的成象系统。片光源由脉冲激光通过柱透镜形成,用于照射动态微粒场,拍摄粒子场照片的相机垂直于片光源。图象系统主要由氩氟激光器、扩束器、空间滤波器以及计算机图象系统组成,用于完成从两次曝光的粒子图象中提取的速度场。David<sup>[16]</sup> 等人将 PIV 技术用于发动机研究的简图如图 4 所示,研究结果表明,PIV 技术和 LDV 技术测得的速度场基本一致。文献[17]和[18]也报道了应用 PTV 和 LSV 技术测量流场速度分布的研究结果。

PIV 技术的最大贡献是突破了空间单点测量的局限性,它可在同一时刻记录下整个流场的有关信息,并且可分别给出平均速度、脉动速度和应变率。

当今计算机图象处理技术的发展为 PIV 技术的发展提供了技术基础,使得 PIV 技术不但具有 LDV 单点测量的精度,而且还可以定量描述流场,它的出现无疑会加速燃油喷雾本身的研究。

### 3. 激光散射技术

该技术可分为两种:一是激光密散射 (Mie scattering) 技术。即利用来自粒子的密散射光强和粒子之间的关系来测定粒子尺寸。二是激光瑞利散射 (Rayleigh scattering) 技术。

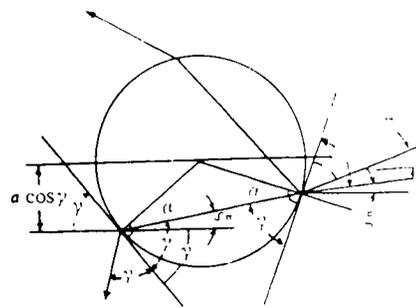


Fig. 5 Geometrical diagram of light rays scattered by sphere

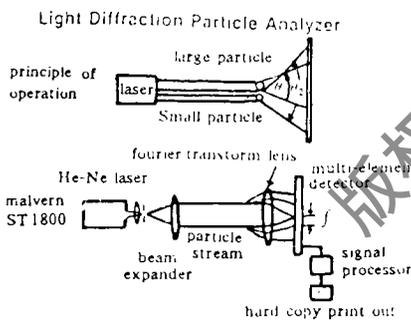


Fig. 5 Fraunhofer light diffraction particle analyzer

激光密散射技术是基于夫朗和费衍射原理的激光衍射技术。该技术的原理如图5所示。当平行的激光照射被测雾场时要产生前向散射,小粒子散射角大,而大粒子散射角小。在傅氏透镜的谱面上要产生运动粒子衍射光。不同粒径的粒子形成的衍射光强分布不同,这样可通过同心环形光电阵列探测器接收的电脉冲大小和个数计算出微粒场的粒度分布。该技术已由马尔文仪器公司商品化,如已有的马尔文仪。通常,该仪器采样时间较长,因此常用于稳态喷雾测量。

对于高浓度的喷雾粒子,可通过比较透射光和散射光图象浓度,测出柴油机喷雾的深度分布和平均粒径分布<sup>[19]</sup>。

最近研究出的激光衍射瞬变喷雾场粒径分布测量系统<sup>[20]</sup>采用了高速并行数据变换、高速并行数据传送和存储等技术,实现了在一个喷雾周期内记录柴油机瞬变雾场粒径分布随时间的变化过程,而且测量数据可由计算机直接处理,很快得出测量结果。

该测试方法和其它光学方法相比,具有设备简单,操作方便,数据处理迅速等优点。其缺点是不能测量过度密集的喷雾。

激光瑞利散射是属于球体尺寸接近于分子级时的密散射。由于散射光强很弱,信号很小,只能用于气体密度变化较大的场合。在测量喷雾蒸发过程的浓度及温度分布时,一般采用瑞利散射技术<sup>[21,22]</sup>,尤其对研究油气复杂的混合过程,更加会体现瑞利散射技术的优越性<sup>[23]</sup>。

#### 4. 激光全息技术

这是一项记录技术,可分为同轴全息术和离轴全息术。通过物场的物光和相干参考光一起记录到全息干板上,这两束光的干涉图即构成全息图,全息图可将被照物体的光强和位相信息同时记录下来。当用激光重新照射全息图时,记录的相干条纹将其衍射,形成和原物一样的图象。

激光全息技术最早由 Thompson 等人<sup>[24]</sup>用于大气雾场的研究,该技术经过多年的发展和完善,已被用于发动机喷雾微粒场测量,其实验系统如图6所示。国内外不少单位都开展了这方面的研究,并取得很多成果<sup>[25~29]</sup>。目前已研制出自动化的微粒场图象处理系统<sup>[29,30]</sup>,大大地提高了数据处理的速度和精度。

同轴全息术的物光和参考光由单一光束提供。当激光穿过微粒场时,将有少量的光被散射,此散射光为物光。其它穿过物场未被散射的光则作为参考光,这样两束光在全息干板上干涉构成同轴全息图。离轴全息术的物光和参考光分开,参考光将绕过物场投射到全息干板上和物光干涉,构成离轴全息图。用脉冲激光拍摄喷雾图象时,可以将其图象冻结到底片上,然后通过再现系统,将喷雾粒子场再现出来。

离轴全息术具有参考光不通过物场、参考光和物光强度比任意可调的优点,提高了物场照明光的利用率,即使颗粒对入射光的遮挡可高达50%也能拍到较好的全息象<sup>[26]</sup>。所以,对密度较大又分布不均匀,或是场深较大且又已经给定的物场,宜采用离轴全息技术。另一方面,它存在着对全息干板分辨率及设备性能要求较高、光路调整困难、数据处理复杂等不足之处。

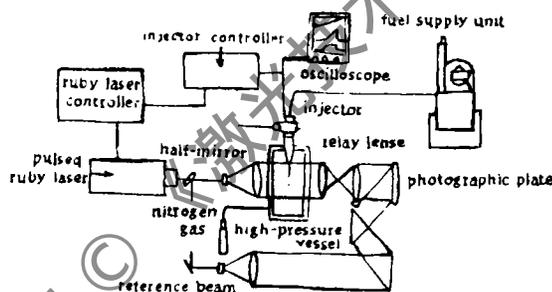


Fig. 6 Optical arrangement for holography



$$I = I_0 e^{-KQ_{ext}(\pi D^2/4)NL} \quad (8)$$

式中,  $I_0$  为入射光强,  $I$  为透过粒子场的光强,  $L$  为光透过粒子场的长度。  $Q_{ext}$  为全散射系数, 是  $\alpha$  的函数, 在可见光范围内, 若测量液滴的最小直径为  $10\mu\text{m}$ , 则  $Q_{ext}$  基本为一定值<sup>136</sup> ( $Q_{ext} \approx 2$ )。由于探测角不为零, 因而要有一校正系数  $R$ ,  $R$  是由粒径参数  $\alpha$  ( $\alpha = \pi D/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射光的波长) 和光学系统决定的, 可在试验前确定。

若粒子的尺寸在空间分布不均匀, 则(8)式可写成如下形式:

$$I = I_0 e^{-\int_0^X \int_0^\infty RQ_{ext} \pi r^2 N(r) dr dX} \quad (9)$$

由于  $R$  和  $Q_{ext}$  均为常数, 因此(9)式的离散形式为:

$$\ln(I_0/I) = \pi R Q_{ext} \sum r_i^2 N_i \Delta X \quad (10)$$

$\ln(I_0/I)$  是从各方向测量出来的光强衰减量, 再通过相应的图象重建算法<sup>137</sup> 可求出喷雾粒子场的线性衰减系数  $\mu(x, y)$ 。比较(5)式和(10)式可以证明, 应用激光衰减法可以求出单位体积粒子的总截面积沿某一截面半径方向的相对分布 [ $r^2 N(r)$ ]。

(1) 激光阴影法 根据透射光衰减原理, Kamimoto<sup>138</sup> 等人提出的剥洋葱模型可以通过分析阴影照片计算出轴对称情况下喷雾的 SMD。

文献[39]进一步应用激光和计算机图象处理技术, 测出喷雾阴影照片的光强透过率分布, 再结合由广安公式计算的 Sauter 平均直径, 可求出燃油喷雾浓度分布。实验系统简图如图 9 所示。

激光阴影法测量燃油喷雾具有分辨率高、不干扰流场、简便实用、信息量大、对激光光源相干性的要求不像全息技术那样高等特点。

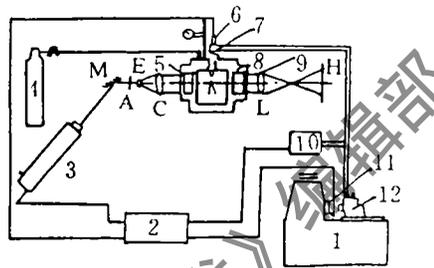


Fig. 9 Optical arrangement for shadow photography

(2) 激光 CT 法 CT (Computed Tomography)

是指计算机层析, 通过 Radon 变换可以实现从多个角度的二维投影数据重建三维燃油喷雾图象。按上述激光衰减原理和相应的算法可以求出燃油喷雾的相对浓度, 在某种情况下也可求出燃油喷雾的 SMD。从某种程度上讲, 激光阴影法是激光 CT 法的一个特例。

1981 年, A. J. Yule<sup>140</sup> 等人首次将激光密散射和层析技术结合研究喷雾的浓度和粒度分布, 并成功地测量了航空发动机双流喷嘴轴对称喷雾的油滴尺寸分布和喷雾的体元 (Involume elements) 浓度。

K. Kawamura<sup>141</sup> 等人采用 He-Ne 激光器作光源, 用光电二极管作探测器, 测量喷雾粒子对光的衰减, 并给出了三维连续喷雾内部构造的图象。接着 K. Kawamura<sup>138</sup> 等人用  $1\mu\text{s}$  的高速电子快门电视象机作探测器, 在 72 个方向上探测瞬变喷雾对入射激光的衰减信号, 重建出喷雾轴向 74 个断面的喷雾图象。为实现在多方向上测量喷雾对入射光的衰减量, 可采用旋转喷嘴的方法。Hiroyasu<sup>142</sup> 等人即采用此方法从 64 个方向测量衰减量, 对冲突式喷雾的物理过程进行解析, 成功地得到了燃油喷雾从 0.2ms 到 1.6ms 各个时刻的三维图象及浓度分布。图 10 示出了部分试验结果。

试验中, 先对激光进行扩束、准直, 将得到的平行光照射喷雾, 然后将透射光会聚, 用摄像机探测衰减信号。由于理论上要求只探测透射光信号, 所以要在光学系统的后焦点处加一光阑, 以滤掉杂散光。

由于CT技术要求快速、准确地采集喷雾的透射光信号,并且要得到许多角度(理论上讲应连续变化)的投影数据,这样无疑增加了试验的工作量和难度。另外,由于数据量很大,要快速、准确地重建三维喷雾图象还要采用合理的算法。

用计算机图象系统采集图象时要对图象空间量化,而且在获得多个角度投影数据时也不可能是连续的,所以在重建图象时需要进行一些插值运算。一般情况下采用线性插值或紧邻插值,为精确起见,也可采用 sinc 函数进行插值。在选择滤波函数时最好能结合喷雾浓度变化的特点,否则会影响结果分析。比如  $R-L$  滤波函数<sup>[43]</sup>形式简单、实用,用它重建图象轮廓清楚。缺点是有 Gibb's 现象,表现为明显的振荡响应。用  $S-L$  滤波函数<sup>[44]</sup>重建图象时,振荡响应较小。对含有噪声的投影数据,它的重建质量也较  $R-L$  滤波函数情况为好,但在低频段不及  $R-L$  滤波函数的重建质量高。

总之,应用激光CT技术测量燃油喷雾是一项较新的测试技术,在实现燃油喷雾内部构造可视化、测量燃油喷雾浓度分布方面有其独到之处。但由于燃油喷雾的复杂性,使得这一技术在燃油喷雾测试这一领域仍有许多工作有待深入,特别是在重建三维喷雾图象的算法上还需要进一步探讨,不能只采用传统方法而不考虑喷雾本身特性。因此,将激光CT技术正确应用于喷雾测量,还有许多工作诸如合理选择内插函数、滤波函数以及提高处理速度等方面需要深入研究。

3. 未来的研究方向展望 目前,节约能源和控制污染愈来愈受到关注,深入研究喷雾机理、阐明燃烧现象来解决这一问题当务之急。当今的测试技术发展主要方向由定性测量转移到定量测量,由点、线测量转移到面和三维测量。

在光源方面,今后可采用  $\gamma$  射线或超声波,以解决在高密区和实际发动机上测量的难题。也可考虑在喷雾中加一些磁性物质用核磁共振的方法对实际发动机喷雾场进行测量,当然,这要解决许多技术难题。

随着激光、微电子等技术的不断发展和完善,可以相信,激光测试技术在喷雾的研究领域将会得到愈来愈广泛的应用。

#### 参 考 文 献

- 1 Hiroyasu H, Kadota T. Bull JSME, 1978; 19(135): 1064~1066
- 2 高 观译. 内燃机测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1982; 25~35
- 3 Tanasawa Y, Hiroyasu H. On drop size analyzer for liquid sprays by sedimentation. Technology Reports of the Tohoku University, 1962; 27(1): 67~89
- 4 Karasawa T, Kurabayashi T, Kaeriyama H. J of Fuel Society of Japan, 1983; 62(679): 900~912
- 5 Tanasawa Y, Hiroyasu H. Tran JSME, 1960; 26(162): 224~232
- 6 林其钊, 颜富纯, 高希彦. 内燃机工程, 1987; 8(3): 48~55

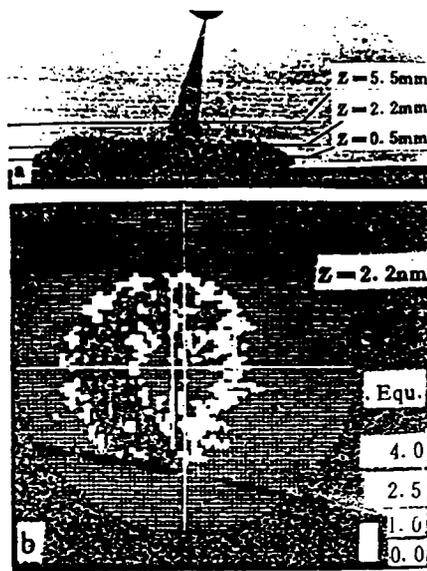


Fig. 10 (a) Shadow photograph of an impinging spray  
(b) Contour map of equivalence ratio in a section parallel to the wall at  $Z=2.2\text{mm}$

- 7 Nishida K. Characterization of combustion processes in prechamber and main chamber of indirect injection diesel engine by high-speed photography. SAE Paper 861181(1986)
- 8 Joe R, Jone B. Photographic and performance studies of diesel combustion with a rapid compression machine. SAE Paper 740948(1974)
- 9 史绍熙, 苏万华. 内燃机学报, 1990; 8(2): 95~104
- 10 Trolinger J D, Bentley H T, Lennert A E *et al.* Application of electro-optical techniques in diesel engine research. SAE Paper 740125(1974)
- 11 Farmer W M. Appl Opt, 1970; 9(4): 73~77
- 12 Murakami A, Arai M, Hiroyasu H. Swirl measurements and modeling indirect injection diesel engines. SAE Paper 880385(1988)
- 13 Mizutani Y, Kodama H, Miyasaka K. Combustion & Flame, 1982; (44): 85~95
- 14 Bachalo W D, Houser M J. Opt Engng, 1984; 23(5): 583~590
- 15 Chigier N. Combustion & Flame, 1983; (51): 127~139
- 16 Reuss D L, Adrian R J, Landreth C C *et al.* Instantaneous planar measurements of velocity and large-scale vorticity and strain rate in an engine using particle-image velocimetry. SAE Paper 890616(1989)
- 17 Shack D H, Reynolds W C. Application of particle tracking velocimetry to the cyclic variability of the pre-combustion flow field in a motored axisymmetric engine. SAE Paper 910475(1991)
- 18 Christopher J D P, Halliwell N A. Appl Opt, 1984; 23: 1128~1129
- 19 Shimizu I, Emori Y, Yang W *et al.* Combustion & Flame, 1985; 59(1): 69~71
- 20 孙其超, 史绍熙, 王仕康. 内燃机学报, 1993; 11(3): 95~102
- 21 Hauman J. Experiments in Fluids, 1987; (5): 230~234
- 22 Hauman J. Opt Lett, 1984; 9(11): 487~489
- 23 Zhao F Q, Kadota T, Takemoto T. Fuel vapor concentration fluctuation measurements close to the spark plug in a motored spark ignition engine via laser rayleigh scattering. SAE Paper 911232(1991)
- 24 Parrent G B, Thompson B J. Opt Acta, 1964; (11): 183~193
- 25 Minami T. Analysis of fuel spray characteristics and combustion phenomena under high pressure fuel injection. SAE Paper 900438(1990)
- 26 朱竹林, 黄公瑜, 王朋. 光学学报, 1988; (3): 235~241
- 27 Witherow W K. Opt Engng, 1979; 18(3): 249~255
- 28 何万祥, 李志雄, 马士宁. 内燃机学报, 1984; 2(3): 215~230
- 29 黄震, 张连方, 李渤仲 *et al.* 上海交通大学学报, 1991; 25(6): 61~69
- 30 童澄教, 肖波, 顾宏中. 上海交通大学学报, 1992; 26(1): 15~20
- 31 Melton L A. Appl Opt, 1983; 21(14): 2224~2227
- 32 Senda J, Fukami Y, Tanabe Y *et al.* Visualization of evaporative diesel spray impinging upon wall surface by exciplex fluorescence method. SAE Paper 920578(1992)
- 33 Shimizu R, Matumoto S, Furuno S *et al.* Measurement of air-fuel mixture distribution in a gasoline engine using LIEF technique. SAE Paper 922356(1992)
- 34 Hulst Van D. Light scattering by small particles. John & Sons Inc, 1957
- 35 Gumprecht R O, Sliepcevich C M. J Phys Chem, 1953; 57: 90~95
- 36 Kawamura K, Saito A, Tanasawa Y. Trans JSME, 1987; 36: 33~38
- 37 荆仁杰, 叶秀清, 徐胜荣 *et al.* 编. 数字图象处理. 北京: 科技出版社, 1988
- 38 Kamimoto T, Ahn S K, Chang Y J *et al.* Measurement of droplet diameter and fuel concentration in a non-evaporating diesel spray by means of an image analysis of shadow photographs. SAE Paper 840276(1984)
- 39 黄震, 张连方, 李渤仲 *et al.* 内燃机工程, 1991; 12(4): 58~63
- 40 Yule A J. A laser tomographic investigation of liquid fuel sprays. 18th Symposium on Combustion, 1981; 1531~1540
- 41 Kawamura K, Saito A, Tanasawa Y. Trans JSME, 1987; (27): 48~54

版权所有 © 《激光技术》编辑部