

文章编号: 0258-7025(2010)03-0779-05

# 柴油喷雾场粒子尺寸和粒度分布的数字全息实验

吕且妮 赵 晨 马志彬 葛宝臻 高 岩 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 提出一种记录动态喷雾粒子场的数字全息实验系统。该系统采用数字同轴全息记录系统, 利用连续波 (CW) 激光器和高速电荷耦合器件 (CCD) 数字记录动态喷雾粒子场的全息图, 通过数字再现得到不同时刻粒子场再现像。对粒子场再现像进行自适应滤波, 聚焦像合成, 二值化, Roberts 边缘提取, Hough 变换和亚像素精度计算, 得到粒子的直径和位置信息, 给出了在不同喷油脉宽和不同测量点所记录的柴油雾场的数字全息图, 以及在喷油脉宽 8 ms 时, 三维 (3D) 粒子场空间分布、质量分数分布和沿  $x, y$  方向的索太尔平均直径 (SMD) 分布曲线。

**关键词** 数字全息; 粒子尺寸测量; 粒度分布; 图像处理; 喷雾场

中图分类号 TB877.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0779

## Digital Holography Experiment on the Measurement of Particle Size and Size Distribution of Diesel Spray

Lü Qieni Zhao Chen Ma Zhibin Ge Baozhen Gao Yan Zhang Yimo

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education,

College of Optoelectronics & Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** An experimental system of digital holography for digitally recorded dynamic spray particle field is proposed. Hologram of dynamic particle field is recorded based on digital in-line holography arrangement with continuous wave (CW) laser and a high-speed charge coupled device (CCD), and the reconstructed images with different times are reconstructed numerically. The reconstructed images of a hologram of particle field are approached by adaptive filtering, and in-focus images of particle in the volume are integrated into a plane and binarized, and the edge of particle image by Roberts is extracted, then Hough transform and sub-pixel precision computing are completed, so the size and the position of particle are obtained. Digital holograms of diesel spray under different pulse widths of the injector and different measuring locations are given, and the three-dimensional (3D) distribution of particle field, and mass distribution and distribution of Sauter mean diameter (SMD) of the spray field along  $x$ -axis and  $y$ -axis are also given when pulse width of the injector is 8 ms.

**Key words** digital holography; particles size measurement; size distribution; image processing; spray field

### 1 引 言

燃油喷雾中油滴粒子的尺寸与粒度分布特征是决定燃油雾化性能的重要参数, 因而对喷雾场的测量研究倍受关注<sup>[1~3]</sup>。激光全息法是通过粒子场全息图的再现确定粒子尺寸、速度、分布及其他参量的一种光学方法。由于这种方法能同时记录三维 (3D) 粒子场在任一时刻的振幅和相位的全部信息, 因此能真实地测量喷雾场油滴粒子的大小和油滴群的空间分布, 非常适合于动态三维粒子场的研究, 已成为粒子场测量的主要方法之一<sup>[3~6]</sup>。

随着计算机技术和电荷耦合器件 (CCD) 的发展, 数字记录并数字再现的数字全息已作为一种新的测量工具, 应用于各种领域, 如喷雾粒子场测量<sup>[7]</sup>、材料特性检测<sup>[8]</sup>等。在数字全息术中, 粒子场的全息图直接以数字方式记录在 CCD 上, 再以数字方式再现, 可同时获得 3D 粒子场的振幅和相位的全部信息, 并直接以数字形式描述, 不需要湿处理, 整个过程简单、灵活, 更便于进行定量分析、测量及实时处理, 已应用于各种粒子场的粒子尺寸、位置、速度及粒子分布等测量<sup>[7,9~14]</sup>。在粒子场全息测量

收稿日期: 2009-04-27; 收到修改稿日期: 2009-05-25

基金项目: 国家自然科学基金 (60677034) 资助项目。

作者简介: 吕且妮 (1966—), 女, 博士, 副教授, 主要从事数字全息和粒子测量等方面的研究。E-mail: qienil@tju.edu.cn

中,大都采用脉冲激光器记录动态喷雾场的瞬间状态。本文利用连续波(CW)激光器和高速 CCD,采用数字同轴全息记录系统,数字记录动态柴油喷雾粒子场的全息图,通过对再现像的数字处理,进而得到雾场粒度分布及粒径尺寸。

## 2 实验装置

### 2.1 全息图的数字记录光路系统和数字再现

图 1 为柴油喷雾粒子场的数字全息记录光路系统,ECU 为电控单元,FAI 为自由电枢喷射,激光器为最大功率 40 mW,波长  $\lambda=632.8$  nm 的 He-Ne 激光器。激光器发出的细光束经扩束准直系统后形成直径为 25 mm 的平行平面光束。平面平行光垂直入射喷雾场,被雾场粒子衍射的光波作为物光波,经过粒子场而没有被粒子衍射的光波作为参考光波,在 CCD 靶面干涉,形成雾场粒子的全息图,记录在 CCD 上,并存储于计算机中。实验所用 CCD 为 IDT 公司生产的 Motionpro HS-3 型 16 位彩色高速相机,像素尺寸为  $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ ,敏感像素数为  $1280\ \text{pixel} \times 1024\ \text{pixel}$ ,最高采集速度为 1000 frame/s。为了防止喷雾场对光学元器件及 CCD 靶面的污染和损害,将喷雾喷嘴部分放在  $400\ \text{mm} \times 400\ \text{mm} \times 450\ \text{mm}$  有机玻璃罩中,使整个雾场处在玻璃罩内。在玻璃罩两侧壁各打一孔,以便于光束通过,孔的直径约为 30 mm。同时,在 CCD 靶面前放一薄玻璃板。相干光通过玻璃板,产生干涉条纹。

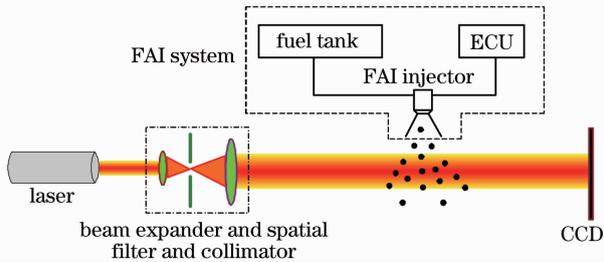


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

设粒子场振幅透射率为  $[1 - o(x, y)]$ ,则记录在 CCD 面  $(x, y)$  上的光场强度分布为<sup>[15]</sup>

$$I(x, y) = |[1 - o(x, y)] * h_z(x, y)|^2 = 1 - o(x, y) * h_z(x, y) - o(x, y) * h_z^*(x, y) + |o(x, y) * h_z(x, y)|^2, \quad (1)$$

式中  $*$  为卷积运算,上标  $*$  为复共轭, $h_z(x, y) =$

$\frac{1}{i\lambda z} \exp\left[i \frac{k}{2z}(x^2 + y^2)\right]$  为非涅耳函数, $k = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$  为记录光波波长, $o(x, y) = \begin{cases} 1 & (x^2 + y^2)^{1/2} \leq d/2 \\ 0 & (x^2 + y^2)^{1/2} > d/2 \end{cases}$ , $d$  为粒子的直径。

设波长为  $\lambda$  的单位振幅的单色平面平行光波垂直照射全息图,忽略(1)式中的最后一项  $|o(x, y) * h_z(x, y)|^2$ ,在距全息图  $z$  处的实像面  $(x', y')$  上的光场复振幅分布为

$$u'(x', y') = I(x', y') * h_z(x', y') = 1 - o(x', y') - o(x', y') * h_{2z}(x', y'), \quad (2)$$

式中  $1 * h_z(x', y') = 1$ , $h_z(x', y') * h_z(x', y') = h_{2z}(x', y')$ , $h_z^*(x', y') = h_{-z}(x', y')$ ,其强度分布为

$$I'(x', y') = |u'(x', y')|^2 = |1 - o(x', y') - o(x', y') * h_{2z}(x', y')|^2. \quad (3)$$

利用  $o^2(x', y') = |o(x', y')|^2 = o(x', y')$ ,忽略高阶小量项,则(3)式可表示为

$$I'(x', y') = 1 - o(x', y') - o(x', y') * [h_{2z}(x', y') + h_{2z}^*(x', y')], \quad (4)$$

式中  $[1 - o(x', y')]$  代表粒子场实像,第三项为距  $(x', y')$  平面  $2z$  处的衍射像。

### 2.2 喷雾装置

实验采用的喷雾场是由图 2 所示的 FAI 电控喷射系统产生的<sup>[16]</sup>,它是将电喷系统中的“油泵-调压器-喷油器”三件合成为一个“FAI 喷油器”,可完成对燃油的加压和脉冲喷射,其喷嘴为外开轴针式环形伞喷嘴,喷孔环外径为 3.8 mm,几何锥角为  $23^\circ$ ,升程为 0.1~0.3 mm。只需连接上油箱来低压供油,再连接上 ECU 控制喷油定时和定量,通过调节驱动脉宽从而准确控制喷油量,可以实现最高 140 次/s 以上的喷射。FAI 喷油器能以  $3 \times 10^6$  Pa 以上的压力喷射燃油,从而获得细微的燃油雾化效果。在一定范围内,每次喷油量与脉宽成正比。

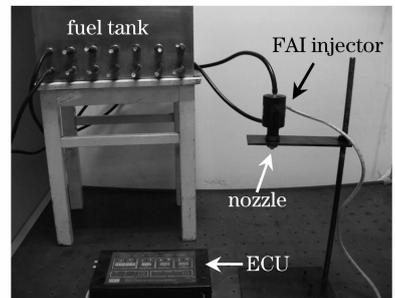


图 2 FAI 喷射系统照片

Fig. 2 Photograph of FAI injection system

在实验中通过改变喷油脉宽来改变喷油量,使场内粒子密度增加,但不改变粒径大小和粒子运动速度。实验中脉宽设置为  $w_p=6\sim 10$  ms。图 3 为在脉宽  $w_p=8$  ms 时,利用 MotionproHS-3 照相机拍摄的一次柴油喷雾空间发展过程照片,每幅图的时间间隔为 1 ms。

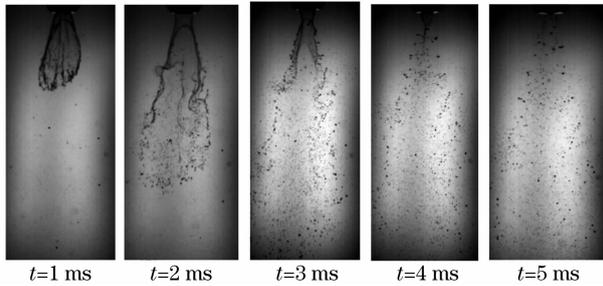


图 3 脉宽  $w_p=8$  ms 时拍摄的柴油喷雾过程中的一个周期

Fig. 3 Snapshot of a period of diesel spray under  $w_p=8$  ms

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 喷雾场的数字全息图

由图 3 可知,燃油喷射过程包括燃油的雾化、蒸发以及与周围空气混合等复杂的物理过程。对不同喷油脉宽,粒径大小和粒子运动速度相同,改变喷油量仅增加粒子场中的粒子密度。图 4 为喷雾场的记录示意图,实验过程中分别对不同脉宽、距喷嘴不同

距离以及距中心轴线不同半径等工况条件下的雾场粒径分布情况进行了研究。图 4 所示的水平和竖直方向的 7 个点为选取的测量点,沿水平和竖直方向的这 7 个点分别以点 4 为中心点对称分布,在  $x$  轴方向的点依次标记为  $x_1, x_2, \dots, x_7$ , 在  $y$  轴方向的点依次标记为  $y_1, y_2, \dots, y_7$ 。利用图 1 所示的实验系统,对喷油脉宽 6, 7, 8, 9, 10 ms 分别记录这 13 个点位置处的数字全息图,喷嘴中心所在的竖直平面距 CCD 靶面的距离  $z_1=320$  mm。在每一测量情况下,以 1000 frame/s 的速度连续采集 50 幅图像,每幅图像曝光时间  $\Delta t=20 \mu s$ , 共获取图像数据文件 3250 个。图 5(a)~(f) 分别为不同脉宽、不同位置处记录的 6 幅柴油喷雾场全息图,可以清楚地看到干涉条纹。

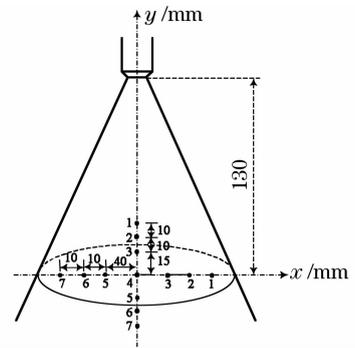


图 4 喷雾场记录点位置图

Fig. 4 Diagram of recording point of spray

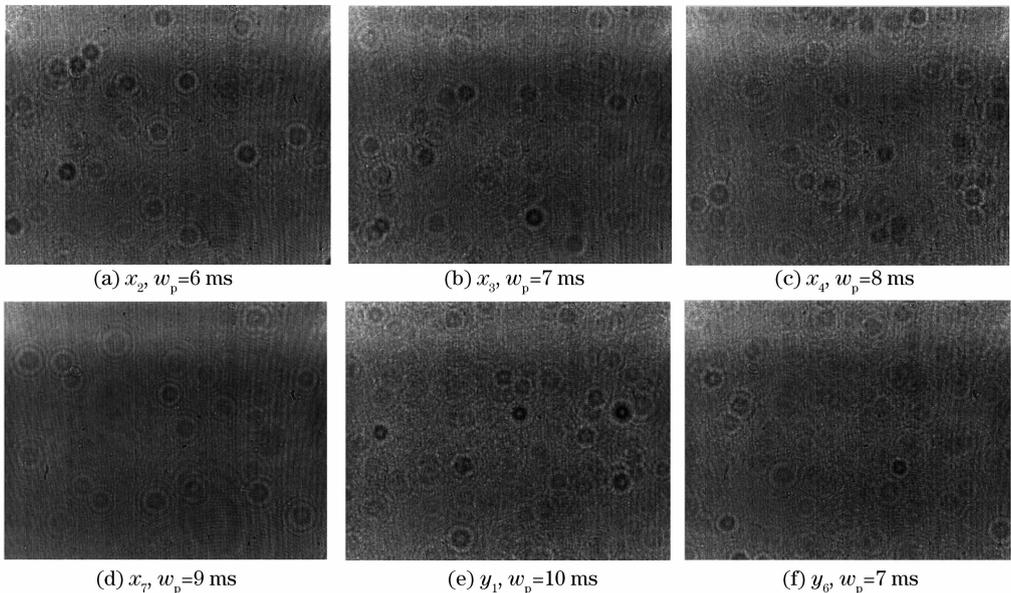


图 5 不同脉宽不同位置处记录的柴油喷雾场的数字全息图

Fig. 5 Digital holograms of diesel spray with different pulse widths of the injector and different measuring locations

#### 3.2 喷雾场粒子尺寸和粒度分布测量

图 6(a)为喷油脉宽  $w_p=8$  ms,  $x_3$  位置处记录

的喷雾场数字全息图。图 6(b)是在进行喷雾之前记录的背景强度图。图 6(c)为图 6(a)与图 6(b)相

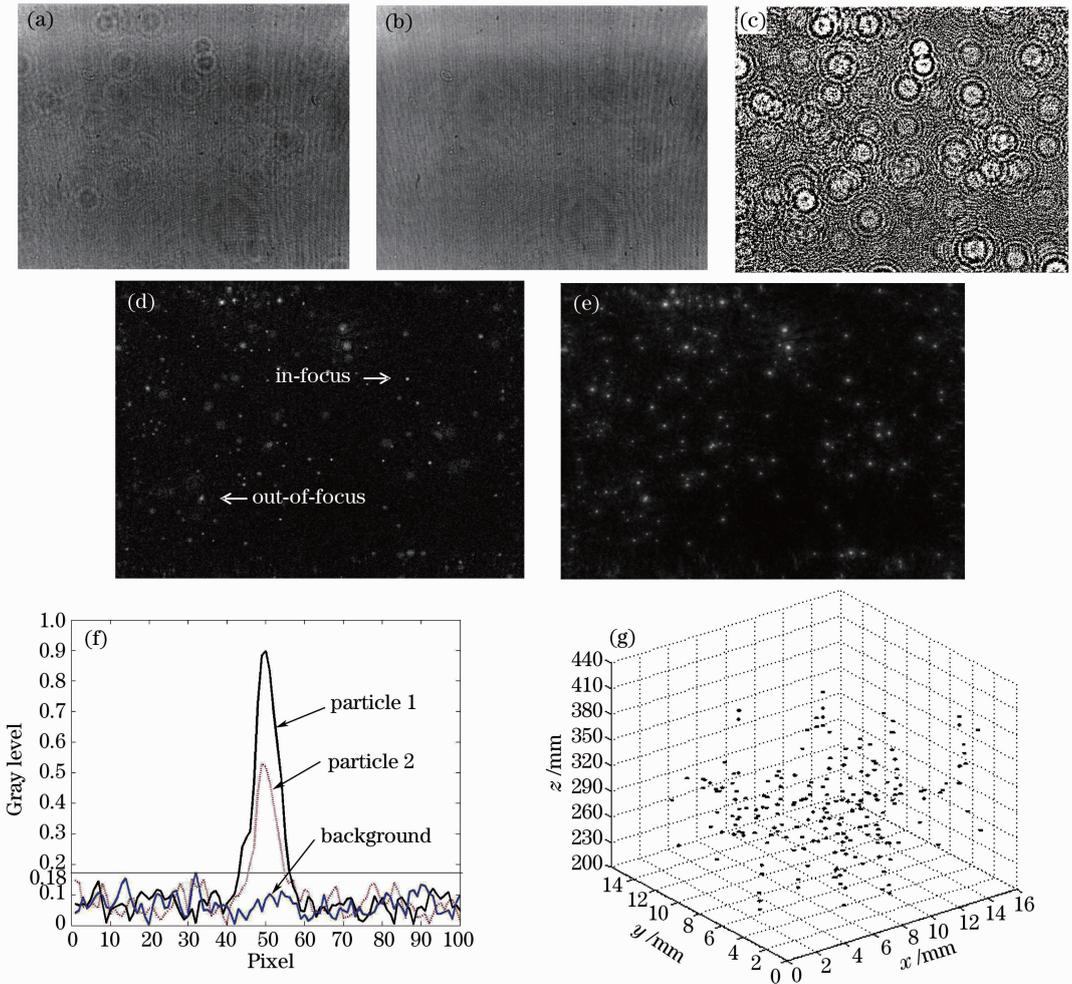


图 6 (a) 全息图; (b) 粒子在喷之前的背景强度分布图; (c) 反差全息图; (d) 数字再现像, 再现距离  $z=290$  mm;

(e) 全部粒子聚焦的合成图; (f) 粒子场灰度分布; (g) 三维粒子场空间分布图

Fig. 6 (a) Hologram; (b) background intensity without particles sprayed; (c) contrast hologram; (d) numerical reconstruction image at  $z=290$  mm; (e) combined in-focus images of all the particle; (f) gray distribution of particle field; (g) 3D spatial distribution of particle field

减后得到的反差全息图。粒子场深度约为 200 mm, 取其为 200 mm, CCD 靶面大小为  $15.4 \text{ mm} \times 12.3 \text{ mm}$ , 因此粒子场的大小为  $15.4 \text{ mm} \times 12.3 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。图 6(d) 为利用(2)式得到的数字再现像, 再现距离  $z=290$  mm。在图 6(d) 中, 既有聚焦粒子, 又有离焦粒子, 聚焦粒子为有清晰轮廓的明亮亮斑, 粒子聚焦时它所覆盖区域的像素强度值为此像素在粒子场深度范围内的最大值。对再现像先进行自适应滤波, 再对像面上的每一个像素在所取粒子场深度范围内, 即  $z=220 \sim 420$  mm, 取其沿  $z$  轴方向在粒子场深度范围内的强度最大值, 可得到所有粒子聚焦再现像的合成图, 如图 6(e) 所示。其强度分布可表示为<sup>[14]</sup>

$$I_{\text{com}}(x, y) = \max_z I(x, y, z). \quad (5)$$

在图 6(e) 中, 所有粒子均为聚焦粒子, 其灰度

分布如图 6(f) 所示。没有粒子的区域灰度很低, 强度变化趋于平稳, 聚焦粒子灰度总是高于背景灰度, 由灰度分布图设定二值化阈值  $T=0.18$ 。对图 6(e) 进行二值化, Roberts 边缘提取, 以及对边缘图像进行 Hough 变换和亚像素精度计算, 得到粒子直径和位置信息, 图 6(g) 为三维粒子场空间分布图, 图中黑色的小圆点表示粒子,  $z$  轴为深度方向, 其索太尔平均直径(SMD)为  $86.43 \mu\text{m}$ , 质量分数分布为

$$w = \frac{n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^3} \times 100\%, \quad (6)$$

式中  $d_i$  为粒子直径,  $n_i$  为该直径处的粒子数。图 7(a) 为质量分数分布柱状图, 其横坐标为对数坐标, 图 7(b) 为  $w_p = 8 \text{ ms}$ , 沿  $x, y$  轴方向测量的 SMD 变化曲线。

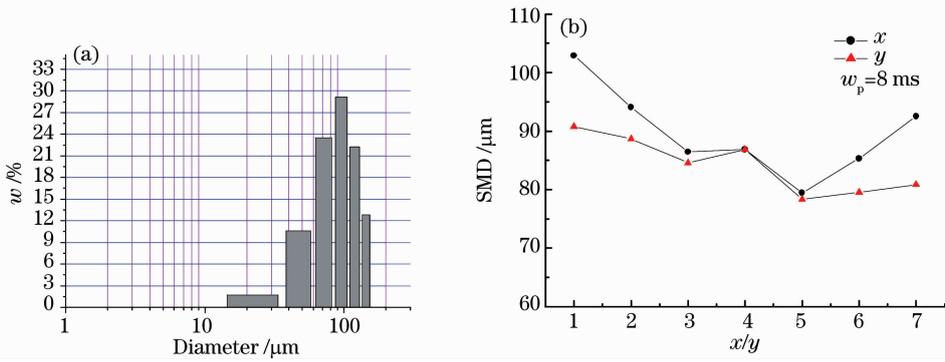


图 7 (a) 粒子质量分数分布图; (b) SMD 分布曲线

Fig. 7 (a) Mass fraction distribution of particle; (b) distribution of SMD of the spray field along  $x$ -axis and  $y$ -axis

由图 7(b)可见,粒子的 SMD 沿  $x$  轴的分布为中心  $x_4$  位置处较大,  $x_3, x_5$  位置处较小,  $x_1, x_7$  处较大,  $x_2, x_6$  靠近边缘, SMD 较  $x_3, x_5$  大, 较  $x_1, x_7$  小。沿  $y$  轴的分布为在  $y_1$  处, 喷雾没有完全破碎, 粒子较为集中, SMD 最大, 随着距喷嘴距离的增加, 从  $y_2 \rightarrow y_3$ , SMD 逐渐减小, 在  $y_4$  处, 由于粒子的粘性聚合, SMD 增大,  $y_5, y_6$  处继续发生破碎, SMD 减小,  $y_7$  处发生二次聚合, SMD 有所增加。

## 4 结 论

利用连续波激光器和高速 CCD, 采用数字同轴全息记录系统, 实验上对数字记录动态柴油喷雾粒子场进行了研究。通过对粒子场再现像处理得到粒子的直径和位置信息, 给出了在不同喷油脉宽和不同测量点所记录的数字全息图, 以及在喷油脉宽为 8 ms 时,  $x_3$  位置处三维粒子场空间分布、质量分数分布, 以及沿  $x, y$  轴的索太尔平均直径的分布曲线图。研究表明, 该实验系统是可行的, 并可用于粒子场速度测量, 具有光路系统简单等特点, 为动态雾场粒子测量提供一种新的实验系统和测量方法。

## 参 考 文 献

- 1 M. Maeda, T. Kawguchi, K. Hishida. Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11** (12): L13~L18
- 2 Ge Baozhen, Wei Yongjie, Lü Qieni. Inversion of particle size distribution with improved conjugate gradient algorithm [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(5): 054302
- 3 A. R. Jones, M. Sarjeant, C. R. Davis *et al.*. Application of in-line holography to drop size measurement in dense fuel sprays [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(3): 328~330
- 4 O. Feldmann, E. F. Mayinger, P. Gebhard. Evaluation of pulsed laser holograms of flashing sprays by digital image processing and holographic particle image velocimetry [J]. *Nucl. Eng. Des.*, 1998, **184**(2): 239~252

- 5 Huang Yindi. A study on atomization mechanism of diesel fuel and spray characteristics by using laser holograph [J]. *J. Nanjing Forestry University*, 1997, **21**(4): 21~25
- 6 黄银娣. 应用激光全息术对柴油雾化机理和喷雾特性的研究 [J]. *南京林业大学学报*, 1997, **21**(4): 21~25
- 7 He Yongling, Xi Daguang, Liu Ning. High-speed multi-frame laser holography system for diesel spray diagnosis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, **19**(1): 87~90
- 8 何勇灵, 郗大光, 刘宁. 一种用于研究柴油喷雾的高速多幅激光全息拍摄系统 [J]. *农业工程学报*, 2003, **19**(1): 87~90
- 9 J. Muller, V. Kebbel, W. Juptner. Characterization of spatial particle distributions in a spray-forming process using digital holography [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**(4): 706~710
- 10 Xu Ying, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. Determination of the Poisson's ratio of material by digital holographic interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 787~790
- 11 徐莹, 赵建林, 范琦等. 利用数字全息干涉术测定材料的泊松比 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 787~790
- 12 L. Denis, C. Fournier, T. Fournel. Direct extraction of the mean particle size from a digital hologram [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(5): 944~952
- 13 J. Sheng, E. Malkiel, J. Katz. Digital holographic microscope for measuring three-dimensional particle distributions and motions [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(16): 3893~3901
- 14 Baozhen Ge, Qieni Lü, Yimo Zhang. Particle digital in-line holography with spherical wave recording [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9): 517~519
- 15 S. Kim, S. J. Lee. Effect of particle number density in in-line digital holographic particle velocimetry [J]. *Exp. Fluids*, 2008, **44**(4): 623~631
- 16 L. J. Cao, G. Pen, J. D. Jong *et al.*. Hybrid digital holographic imaging system for three-dimensional dense particle field measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(45): 4501~4507
- 17 Lü Qieni, Gao Yan, Ge Baozhen *et al.*. Digital holographic particle sizing with Hough transform [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 940~944
- 18 吕且妮, 高岩, 葛宝臻等. 基于霍夫变换的数字全息粒子尺寸测量 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 940~944
- 19 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. 2ed. New York: The McGraw-Hill Companies Inc., 1996
- 20 Yang Yanxiang, Liu Changwen, Xi Daguang. FAI technique applied to 4-stroke motorcycles [J]. *Motorcycle Technology*, 2003, (10): 25~28
- 21 杨延相, 刘昌文, 郗大光. 应用于四冲程摩托车的 FAI 技术 [J]. *摩托车技术*, 2003, (10): 25~28