

文章编号:1004-4213(2010)02-0266-5

乙醇喷雾场粒子尺寸和速度的数字全息测量^{*}

吕且妮,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:利用连续波激光器和高速 CCD,采用数字同轴全息系统,记录了乙醇喷雾粒子场全息图.对粒子场再现像进行聚焦像合成,自适应滤波、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.利用两次曝光记录的两个序列全息图得到粒子位移,进而求得粒子的运动速度,给出了实验结果.研究表明,该实验系统可用于内燃机喷雾场测量,且具有光路系统简单、成本低等特点.

关键词:数字全息;喷雾场;粒子尺寸测量;速度测量

中图分类号: TB877.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103902.0266

0 引言

燃油的喷射雾化是影响内燃机燃烧过程及其性能的主要因素之一,在很大程度上决定了发动机的动力性、经济性和排放特性,而燃油喷雾场粒子尺寸和速度是评价喷雾质量的重要指标.因而,对燃油机喷雾粒径、速度等其特征的研究与测量是发动机燃烧过程研究的重点课题.目前提出的基于光学原理的测量技术与方法有激光干涉粒子成像术、全息术等^[1-3].数字全息,即数字记录和数字再现,已作为一种新的度量工具应用于各种领域^[4-5].由于不需要湿处理,整个过程简单、灵活.另外,物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 物场振幅和相位的全部信息,并直接以数字描述,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、速度及粒度分布等测量^[5-10].如 L. Denis 等^[6]通过对数字同轴全息图的自相关分析提取粒子场平均粒子尺寸,并应用于水喷雾场测量.文献^[9]采用数字像面全息术测量水喷雾场粒子尺寸和速度.在粒子场数字全息测量中,大都是采用脉冲激光器和低速 CCD 记录动态喷雾场的瞬时状态得到粒子场信息.

本文拟将利用低功率连续波(Continuous Wave, CW)激光器和高速 CCD,采用数字同轴全息记录系统,数字记录动态乙醇喷雾粒子场全息图,通过对粒子场再现像的数字处理得到粒子尺寸和位置信息,实现雾场粒子尺寸和速度测量,为动态喷雾粒子场测量提供一种实验系统和测量方法.

1 粒子场全息图的数字记录和再现

图 1 为数字同轴全息粒子场记录和再现系统坐

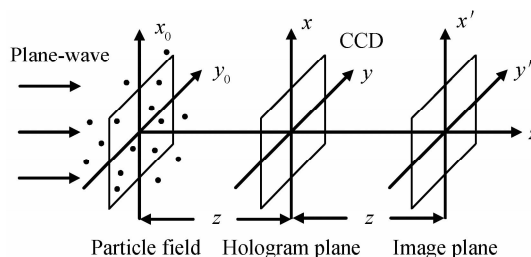


图 1 数字同轴全息系统坐标图

Fig. 1 Coordinates system of digital in-line holography

标图.设波长为 λ 的单位振幅单色平面平行光垂直入射粒子场,被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,在 CCD 靶面上干涉形成粒子场的同轴全息图,记录在 CCD 上并存储于计算机.设粒子场振幅透过率为 $[1 - o(x, y)]$,根据 Huygens-Fresnel 原理,则记录在 CCD 上的光场复振幅分布为^[11]

$$u(x, y) = [1 - o(x, y)] * h_z(x, y) \quad (1)$$

其强度分布为

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

式中, * 为卷积运算,上标 * 为复共轭, $h_z(x, y) = \frac{1}{i\lambda z} \exp i \frac{k}{2z} (x^2 + y^2)$, $k = 2\pi/\lambda$.对于粒子场,被记录物体相对于记录距离很小,式(2)中的最后一项 $|o(x, y) * h_z(x, y)|^2$ 可以忽略,则 $I(x, y)$ 可表示为

$$I(x, y) = 1 - o(x, y) * h_z(x, y) - o(x, y) * h_z^*(x, y) \quad (3)$$

^{*} 国家自然科学基金(60677034)资助

Tel: 022-27402594

Email: qienil@tju.edu.cn

收稿日期: 2009-07-08

修回日期: 2009-10-12

设波长为 λ 的单位振幅的单色平面平行光波垂直照射全息图,在距全息图 z 处的实像面上的光场复振幅分布为

$$u'(x', y') = t(x', y') * h_z(x', y') = 1 - o(x', y') - o(x', y') * h_{2z}(x', y') \quad (4)$$

式中, $t(x, y) = I(x, y)$ 为全息图的振幅透过率,其强度分布为(忽略高阶小量)

$$I'(x', y') = 1 - o(x', y') - o(x', y') * [h_{2z}(x', y') + h_{2z}^*(x', y')] \quad (5)$$

式(5)表示的物理意义为第一项相当于再现光波的直透项,第二项为粒子场的实像,第三项为距 (x', y') 平面 $2z$ 处的衍射像。

2 粒子场测量

图 2 为粒子场数字全息记录实验光路系统示意图。实验所用的激光器为最大功率为 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、针孔滤波、准直透镜后形成平面光波。CCD 为 IDT 公司生产的 Motionpro HS-3 型 16 位彩色高速相机, 像元尺寸为 $12 \times 12 \mu\text{m}^2$, 像素数 1280×1024 , 采集速度为 1000 帧/秒。喷雾场是由 FAI(Free Armature Injection) 电控喷射系统产生, 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, 连接上油箱来低压供油, 连接上电控单元 (ECU) 控制喷油定时和定量, 通过调节喷油脉宽, 从而控制喷油量^[12]。本实验中, 油箱内注入的为无水乙醇, 喷油脉宽设置为 $PW = 6 \sim 10$ ms。

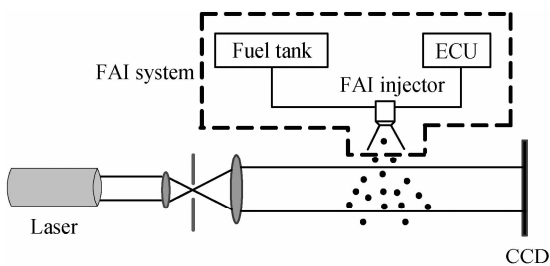


图 2 数字同轴全息实验光路系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for digital in-line holography

2.1 粒子尺寸测量

粒子尺寸测量采用文献[10]提出的一种基于 Hough 变换的数字全息粒子尺寸测量方法, 图 3 为粒子尺寸测量流程图。先对粒子场全息图进行预处理, 利用相减方法消除在数字全息图记录过程中, 激光光源、空气尘埃及记录系统中光学元件等引入的背景噪声。对相减所得到的反差全息图数字再现, 得到不同再现距离处的 2D 再现像。对 2D 再现像进行自适应滤波, 再对像面上的每一个像素, 计算其沿 z 轴方向在粒子场深度范围内的强度最大值, 得到所有粒子聚焦再现像的合成图。对合成图进行自适应滤波, 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 (x, y) 信息。

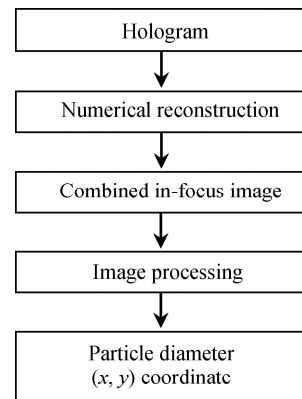
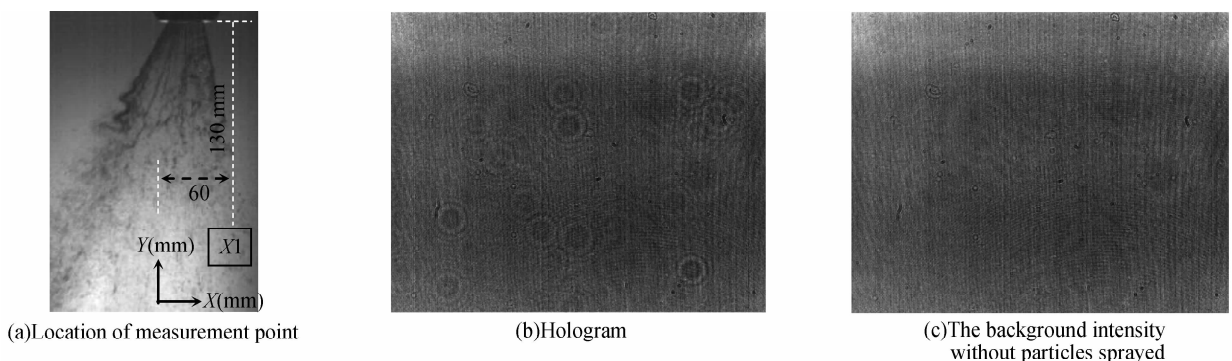


图 3 粒子测量流程图

Fig. 3 Flowchart of particle measurement

图 4 给出了在 $y = 130$ mm, $x = 60$ mm 测量点 X1 位置处的测量结果。图 4(a) 为测量点位置, y 轴距 CCD 靶面的距离 $z_1 = 320$ mm, 粒子场深度约为 200 mm, 取其为 200 mm, CCD 靶面大小为 15.4×12.3 mm², 因此, 粒子场的大小为 $15.4 \times 12.3 \times 200$ mm³; (b) 为喷油脉宽 $PW = 8$ ms, 在 X1 处记录的喷雾场数字全息图; (c) 为喷雾前记录的背景强度图; (d) 为 (b) 与 (c) 相减后得到的反差全息图; (e) 为利用式(4)卷积再现得到的数字再现像, 再现距离 $z = 320$ mm; 改变再现距离可得到不同再现像面上的再现像, 对 2D 再现像进行滤波, 聚焦像的合



(a) Location of measurement point

(b) Hologram

(c) The background intensity without particles sprayed

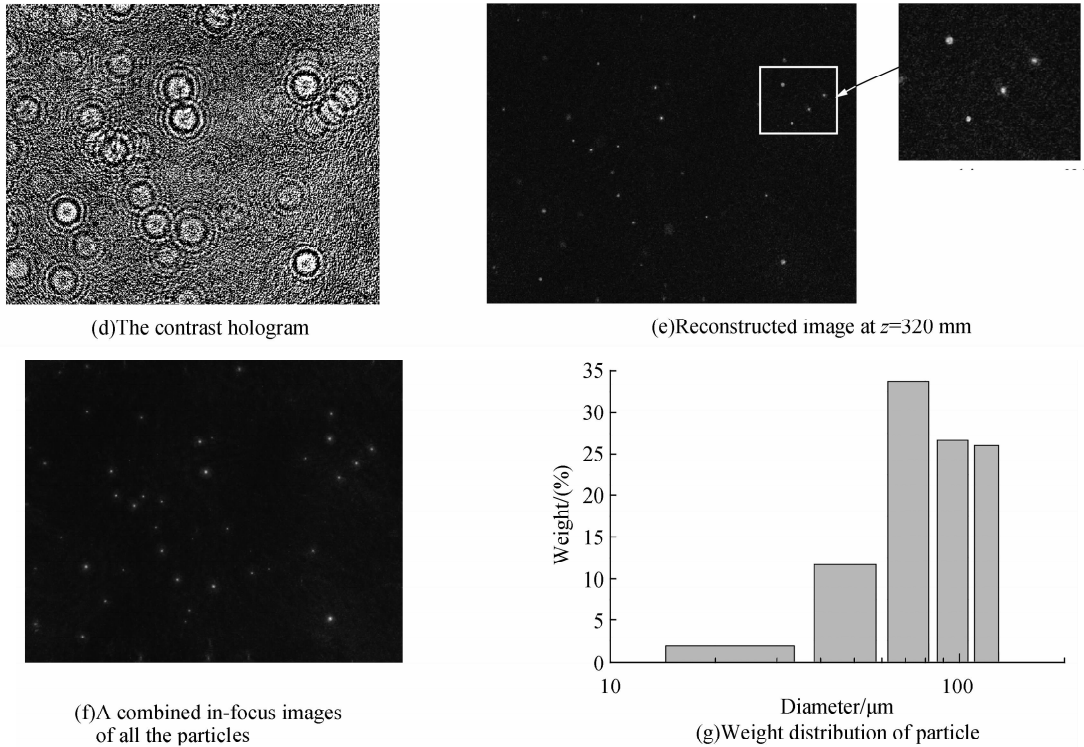


图4 粒子尺寸测量结果

Fig. 4 Results of particle size measurement

成,如图4(f),粒子场深度范围为 $z=220\sim 420$ mm.在图4(f)中,所有粒子均为聚焦粒子.对图4(f)进行自适应滤波,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,其重量分布 $\text{weight}\% = n_i d_i^3 / \sum n_i d_i^3$,其中 d_i 为粒子直径, n_i 为该直径处的粒子数,如图4(g),横坐标为对数坐标.粒子分布在 $24\sim 120\ \mu\text{m}$ 之间,重量分布峰值所对应的粒径为 $72\ \mu\text{m}$.

2.2 粒子速度测量

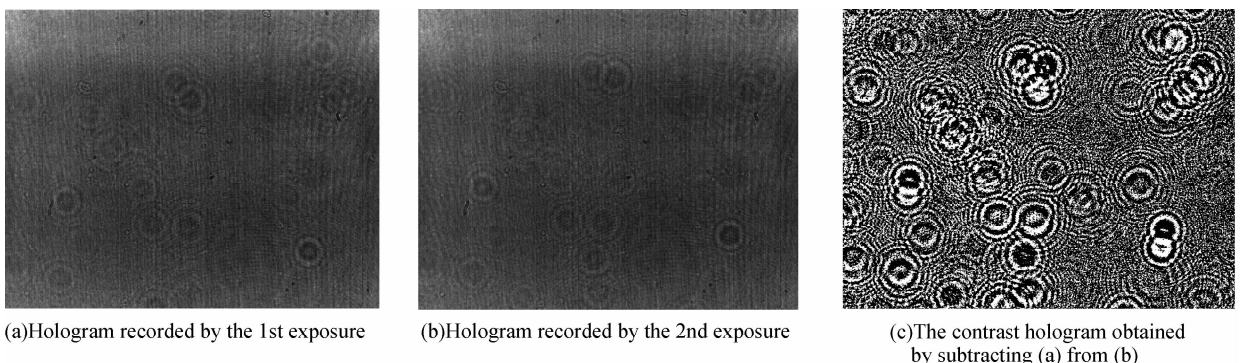
粒子的速度测量是利用粒子跟踪测速技术,其原理是通过两次曝光记录不同时刻的粒子场全息图,通过对全息图再现像的处理得到粒子位移,其速度大小为

$$v = \Delta s / \Delta t \quad (6)$$

式中, Δs 为粒子位移, Δt 为记录时间间隔.

图5(a)、(b)分别为喷油脉宽 $\text{PW}=8$ ms,在图

4(a)中X1处连续记录的2幅序列数字全息图,图5(a)与(b)相减所得到的反差全息图,如图5(c),这一过程可以消除背景噪声.利用式(4)对图5(c)进行卷积再现,再现像如图5(d),再现距离 $z=320$ mm.对图5(d)采用与图4(f)同样处理方法,自适应滤波、二值化、Roberts算子边缘提取,以及对边缘图像进行Hough变换和亚像素精度计算,即可得到每个粒子的圆心(质心)坐标 (x, y) ,图5(e)为粒子轨迹图,图中的“+”代表粒子的质心位置 (x, y) ,其位移 $\Delta s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 \Delta x^2 + (y_2 - y_1)^2 \Delta y^2}$, $\Delta x = \Delta y = 12\ \mu\text{m}$ 为再现像像面上的像素尺寸,图5(f)、(g)分别为沿X轴和Y轴方向的粒子位移 Δs_x 和 Δs_y 与粒子直径之间的关系图,利用式(6)可求得该粒子的运动速度.测量区域给出了19个粒子的运动轨迹,最大速度为 2.046 m/s,最小速度为 0.240 m/s.



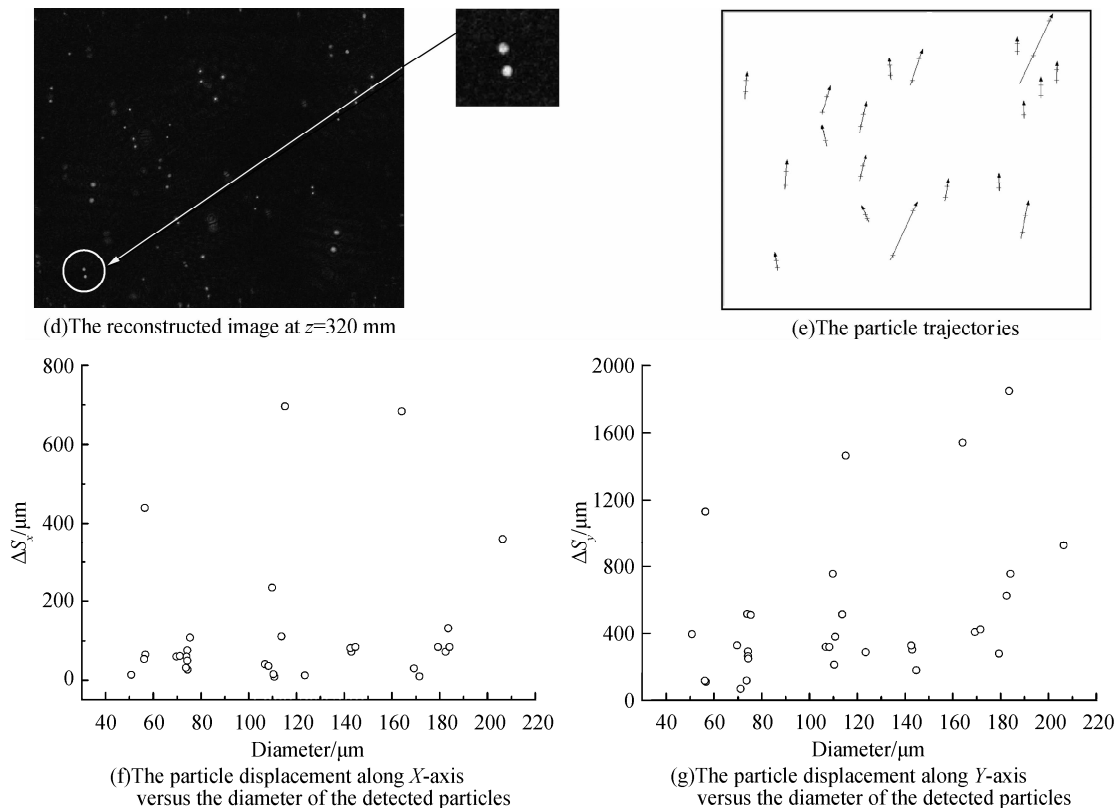


图5 速度测量结果

Fig. 5 Results of velocity measurement

3 结论

本文采用数字同轴全息系统,利用低功率 CW 激光器和高速 CCD,数字记录乙醇喷雾粒子场全息图,数字再现得到不同时刻粒子场再现像,通过对再现像数字处理得到粒子的直径和位置信息.利用两(多)次曝光,记录粒子场序列全息图,对所记录的粒子场时间序列全息图进行处理,得到粒子场时间序列位置,即粒子运动轨迹,进而得到粒子的运动速度,给出了在喷油脉宽 $PW=8$ ms 时,乙醇雾场重量分布、 X 轴和 Y 轴方向雾滴粒子的位移.研究结果证明了数字全息在内燃机喷雾场测量的可行性.

参考文献

- [1] FUJISAWA N, HOSOKAWA A, TOMIMATSU S. Simultaneous measurement of drop size and velocity field by an interferometric imaging technique in spray combustion[J]. *Meas Sci Technol*, 2003, **14**(8): 1341-1349.
- [2] MA Z H, MERKUS H G, SCARLETT B. Particle-size analysis by laser diffraction with a complementary metal-oxide semiconductor pixel array[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(25): 4547-5556.
- [3] MULLER J, KEBBEL V, JUPTNER W. Characterization of spatial particle distributions in a spray-forming process using digital holography[J]. *Meas Sci Technol*, 2004, **15**(4): 706-710.
- [4] JIA Fang, FENG Zhong-yao, ZHOU Li-bin, et al. Three-dimensional surface shape measurement of big objects by pre-imaging digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2239-2240.
- [5] KIM S, LEE S J. effect of particle number density in in-line digital holographic particle velocimetry[J]. *Exp Fluids*, 2008, **44**(4): 623-631.
- [6] DENIS L, FOURNIER C, FOURNEL T. Direct extraction of the mean particle size from a digital hologram[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(5): 944-952.
- [7] SHENG J, MALKIEL E, KATZ J. Digital holographic microscope for measuring three-dimensional particle distributions and motions[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(16): 3893-3901.
- [8] CAO L J, PEN G, JONG J D, et al. Hybrid digital holographic imaging system for three-dimensional dense particle field measurement[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(45): 4501-4507.
- [9] PALERO V, ARROYO M P, SORIA J. Digital holography for micro-droplet diagnostics[J]. *Exp Fluids*, 2007, **43**(2): 185-192.
- [10] LÜ Qie-ni, GAO Yan, GE Bao-zhen, et al. Digital holographic particle sizing with Hough transform[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, **36**(4): 940-944.
- [11] 吕且妮, 高岩, 葛宝臻, 等. 基于 Hough 变换的数字全息粒子尺寸测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 940-944.
- [12] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics[M]. 2nd ed. New York: The McGraw-Hill Companies Inc, 1996.
- [13] YANG Yan-xiang, LIU Wen-chang, XI Da-guang. FAI

technique applied to 4-stroke motorcycles [J]. *Motocycle Technology*, 2003(10):25-28.

杨延相,刘文昌,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.

Simultaneous Measurement of Size and Velocity of Alcohol Spray with Digital Holography

LÜ Qie-ni, GE Bao-zhen, GAO Yan, ZHANG Yi-mo

(Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, College of Optoelectronics & Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With CW (continuous wave) laser and a high-speed CCD, hologram of alcohol spray is recorded based on digital in-line holography arrangement. The reconstruction images of a hologram of the particle field are handled the way that in-focus images of the particles in the volume are integrated into a plane and binarized and the edge of the particle images is extracted by Roberts, then Hough transform and sub-pixel precision computing completed, and the size and position of the particles are obtained. The displacement of the particle is extracted by two sequences of the hologram recorded by two exposures and the velocity of the particle is obtained, and the experimental results are given. The research results show that the proposed experimental system is applied to measuring internal combustion engine spray field, which is simple in optical structure and low in cost.

Key words: Digital holography; Spray; Particles sizing; Velocity measurement



LÜ Qie-ni was born in 1966. In 2003, she graduated from College of Optoelectronics & Precision Instrument Engineering, Tianjin University with the Ph. D. degree in optical engineering. Now she works as an associate professor, and her research interests focus on optical information processing, digital holography, particle measurement, etc.