

# 激光干涉粒子成像乙醇喷雾场粒子尺寸和 粒度分布测量

吕且妮 葛宝臻 陈益亮 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** 研究了一种基于激光干涉粒子成像(IPI)技术的粒子尺寸测量方法。该方法是利用粒子散射光在成像系统离焦像面上所形成的干涉条纹图,采用小波变换和模板匹配提取条纹图像中心,利用傅里叶变换和修正 Rife 方法提取干涉条纹间距/条纹数,进而计算得到粒子尺寸大小,其测量精度可达到亚像素精度。对 $51.1\ \mu\text{m}$ 的标准粒子进行了测量,粒径测量值为 $(49.79 \pm 0.41)\ \mu\text{m}$ ,绝对误差 $1.31\ \mu\text{m}$ ,并应用于乙醇喷雾场粒子测量,给出了沿 $x$ 方向和 $y$ 方向不同测量点处的瞬时雾场粒子的粒径分布、平均粒径以及索太尔平均直径(SMD)。

**关键词** 测量;干涉粒子成像;粒子尺寸测量;粒度分布;喷雾场

**中图分类号** TN247;TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0308003

## Particle Sizing and Size Distribution Measurement of Alcohol Spray by Interferometric Particle Imaging

Lü Qieni Ge Baozhen Chen Yiliang Zhang Yimo

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

**Abstract** A method for the measurement of particle size with interferometric particle imaging (IPI) technique is studied. The interferometric pattern of the scattering light of particle is formed in the defocused image plane and the center of the fringe pattern is extracted by the wavelet transform and template matching method. The number of fringe/fringe spacing of the interferogram by Fourier transform and the modified Rife algorithm is obtained, and particle size with subpixel accuracy is calculated. The experiment is conducted for standard particles of diameter  $51.1\ \mu\text{m}$ . The particle diameter is measured of  $(49.79 \pm 0.41)\ \mu\text{m}$  with the absolute error of  $1.31\ \mu\text{m}$ . And this technique is applied to alcohol spray measuring. The particle size distribution, mean particle diameter and Sauter mean diameter (SMD) of the spray field with different measuring locations along  $x$ -axis and  $y$ -axis are also given.

**Key words** measurement; interferometric particle imaging; particle sizing; diameter distribution; spray field

**OCIS codes** 290.5825; 290.5850; 120.5820; 100.3175

## 1 引 言

在雾场分析中,雾滴粒子的尺寸与粒度分布特征是决定雾化性能的重要参数,已提出了基于不同测量原理的多种粒子尺寸与粒度分布测量技术和方法<sup>[1~6]</sup>。激光干涉粒子成像(IPI)技术是一种相对较新的粒子测量技术,它是利用粒子散射光的干涉图,通过测量干涉条纹图的条纹数或条纹频率得到粒子尺寸大小。这种基于米氏(Mie)散射理论的干

涉粒子成像测量技术是 Konig 等<sup>[7]</sup>于 1986 年首先提出的,1991 年 Hesselbacher 等<sup>[8]</sup>通过几何光学给出了粒径与条纹角间距之间的关系表达式。随后,这一技术得到了很大的发展,并赋予了这种技术很多名称,如米氏散射成像(MSI)<sup>[9]</sup>、米氏散射干涉仪(MSI)<sup>[10]</sup>、干涉粒子成像<sup>[11,12]</sup>、干涉激光成像粒子尺寸测量(ILIDS)<sup>[2,13~17]</sup>等,已用于雾场粒子尺寸和速度等参数测量<sup>[8,13~16]</sup>。本文采用半导体连续

收稿日期:2010-07-02;收到修改稿日期:2010-11-19

基金项目:国家自然科学基金(60677034)资助课题。

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(中国光学学会会员号: S040111640S)

激光器和 CCD 数字记录粒子散射光的干涉条纹图, 利用小波变换(WT)及卷积运算获取每个粒子的位置坐标, 再对每个粒子干涉条纹图进行傅里叶变换(FT)、插值计算提取干涉条纹间距, 进而计算得到粒子尺寸大小, 并应用于乙醇雾场粒子尺寸和粒度分布测量。

## 2 基本原理

图 1 为激光干涉粒子成像测量光路图, 激光照射球形透明粒子, 来自于粒子表面反射和经粒子后折射的散射光, 在聚焦粒子像面上形成两点像, 其中一个为反射光的聚焦像, 一个为折射光的聚焦像; 在离焦像面上形成干涉条纹图。

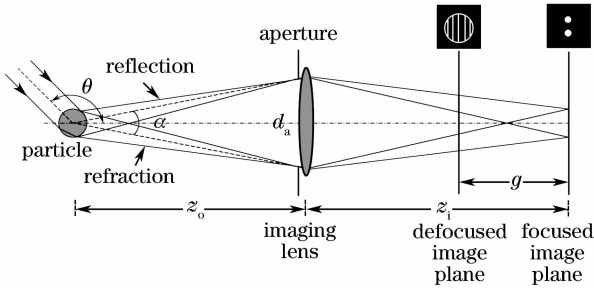


图 1 散射光干涉成像光路示意图

Fig. 1 Schematic of interferometric imaging of scattering light

散射光的光程如图 2 所示, 其中  $p$  表示散射光的阶数,  $p=0$  为反射光,  $p=1, 2, \dots$  为经粒子后的各阶折射光。图 3 为利用 Debye 理论, 对直径为  $d=100 \mu\text{m}$ , 相对折射率为  $m=1.333$  的空气中的水粒子, 在波长为  $\lambda=532 \text{ nm}$  的光源照射下计算得到的

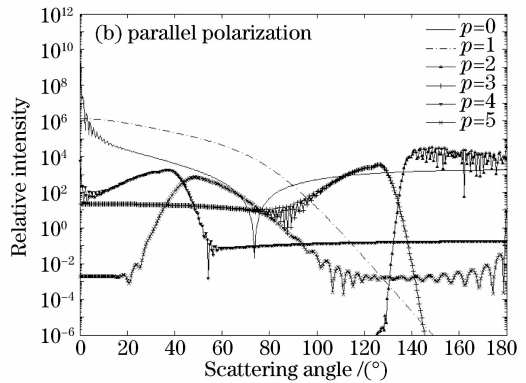
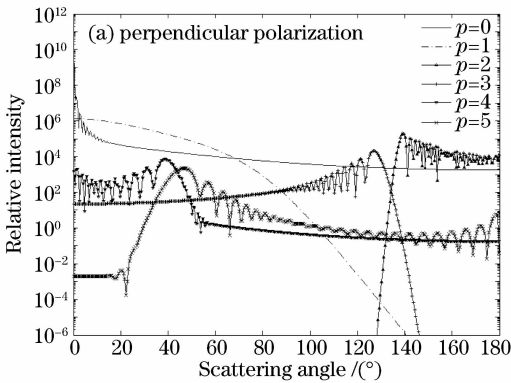


图 3 不同阶数的散射光光强分布图

Fig. 3 Scattering light intensity of the different scattering orders

## 3 粒子尺寸测量

### 3.1 干涉条纹间距/条纹数提取

由(3)式可知, 在实验系统给定的条件下, 即  $\theta$ ,

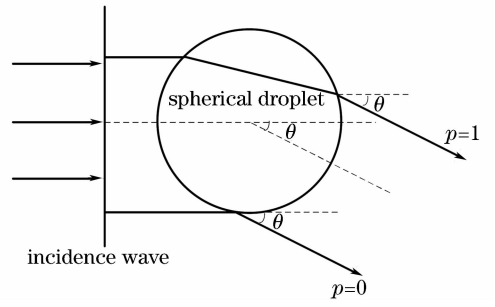


图 2 散射光的光程

Fig. 2 Light path of the scattering light

散射光强与散射角之间的关系分布图。由图 3 可见,  $p=0$  的反射光与  $p=1$  的折射光光强大于  $p>1$  的其他高阶散射光强。因此, 可以认为干涉条纹图是由  $p=0$  的反射光和  $p=1$  的折射光形成的。由图 2, 根据几何光学理论,  $p=0$  阶反射光与  $p=1$  阶折射光的相位差为<sup>[8-12]</sup>

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \left( \sin \frac{\theta}{2} + \sqrt{1 + m^2 - 2m \cos \frac{\theta}{2}} \right), \quad (1)$$

干涉条纹间距为

$$\Delta\varphi = \frac{2\lambda}{d} \left[ \cos \frac{\theta}{2} + \frac{m \sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 - 2m \cos(\theta/2) + 1}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

粒子直径为

$$d = \frac{2\lambda N}{\alpha} \left[ \cos \frac{\theta}{2} + \frac{m \sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 - 2m \cos(\theta/2) + 1}} \right]^{-1}, \quad (3)$$

式中  $\theta$  为散射角,  $\alpha$  为光学系统的收集角,  $N = \alpha/\Delta\varphi$  为条纹数。

$m, \lambda$  和  $\alpha$  给定, 粒子的直径  $d$  正比条纹数  $N$ 。通过测量  $N$  或  $\Delta\varphi$ , 可得到  $d$ 。因此, 从干涉条纹图中自动提取条纹数/条纹间距是 IPI 测量技术的关键。

基于小波匹配和傅里叶变换技术的干涉图条纹数/条纹间距的提取方法,其流程图如图4所示。对粒子场干涉条纹图和粒子掩模图像,利用 Mexican Hat 小波变换分别提取其边缘图像,对所得到的边缘图像进行二维卷积运算得到粒子的空间坐标。根据粒子的中心坐标及粒子图像形状大小(轮廓)提取出单个粒子干涉图像。再对每个粒子干涉图像进行二维傅里叶变换,利用修正 Rife 方法提取条纹频率,得到粒子干涉条纹数  $N$ /条纹角间距  $\Delta\varphi$ ,进而计算得到粒子直径和粒径分布。

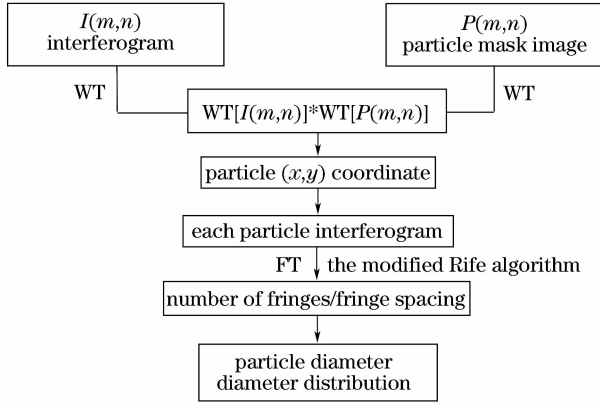


图4 粒子测量流程图

Fig. 4 Flowchart of particle measurement

### 3.2 粒子掩模图的构造

在图1中,粒子干涉条纹图的形状取决于收集系统孔径的形状,其大小  $d_i$  为

$$d_i = d_a \left| 1 - (z_i - g) \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{z_o} \right) \right|, \quad (4)$$

式中  $d_a = f/F^\#$  为成像透镜孔径大小,  $f$  为成像透镜焦距,  $F^\#$  为光圈数,  $z_o$  和  $z_i$  分别为物距和像距,  $g$  为距离聚焦像面的距离,如图1所示。

由(4)式可知,粒子干涉图像的大小  $d_i$  依赖于记录面相对于聚焦像面的位置,与粒子尺寸无关。这就意味着对同一幅干涉图像,不同直径粒子的干涉图像尺寸和形状相同,只是条纹数和条纹间距不同。根据这一特点,利用实验系统参数构造一粒子掩模图,其形状、尺寸与粒子干涉图相同。

### 3.3 收集角 $\alpha$ 对粒子尺寸测量的影响

由(3)式可知,对一给定的  $\theta, m$  和  $\lambda$ , 条纹数  $N$  与粒子直径  $d$  的关系依赖于收集角  $\alpha$ 。收集角  $\alpha$  大小为

$$\alpha = 2\arctan\left(\frac{d_a}{2z_o}\right), \quad (5)$$

在(5)式中,对一给定的  $d_a$ , 改变  $z_o$  可改变收集角  $\alpha$  大小。图5给出了在不同收集角  $\alpha$  时,条纹数  $N$  与粒

子直径  $d$  的关系。对于同一直径  $d$  的粒子,收集角  $\alpha$  越大,条纹数  $N$  就越多;收集角  $\alpha$  越小,条纹数  $N$  越少。但小的收集角  $\alpha$  可得到宽范围的粒子直径  $d$ , 大的收集角  $\alpha$  对应于窄范围的粒子直径  $d$ , 且有高的测量精度。在实验中,为了得到高的测量精度,在满足测量范围要求的条件下,尽量采用相对较大的收集角。

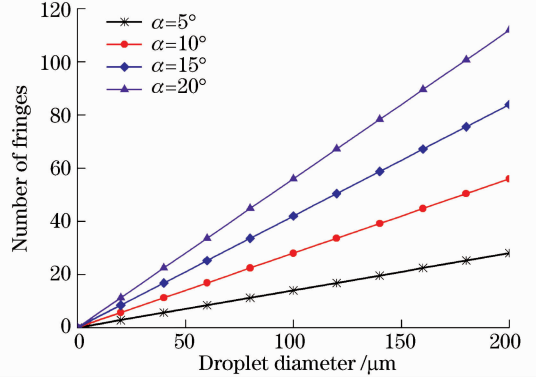


图5 收集角对粒子直径的影响,其中  $m=1.33$ ,  $\theta=90^\circ, \lambda=532 \text{ nm}$

Fig. 5 Effect of the collecting angle on droplet diameter for  $m=1.33, \theta=90^\circ$  and  $\lambda=532 \text{ nm}$

### 3.4 散射角 $\theta$ 对粒子尺寸测量的影响

(3)式可表示为

$$d = 2\lambda N\beta\alpha^{-1}, \quad (6)$$

式中

$$\beta = \left[ \cos \frac{\theta}{2} + \frac{m \sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 - 2m \cos(\theta/2) + 1}} \right]^{-1}, \quad (7)$$

在(7)式中,对于球形粒子,  $\beta$  是散射角  $\theta$  和相对折射率  $m$  的函数。当  $m$  已知时,  $\beta$  只与散射角  $\theta$  有关。图6给出了对不同  $m$ , 当  $\Delta\theta = 1^\circ$  时,  $\beta$  随  $\theta$  的不确定性曲线。由图6可知,散射角  $\theta$  变化  $1^\circ$  时,在  $30^\circ \sim 80^\circ$  散

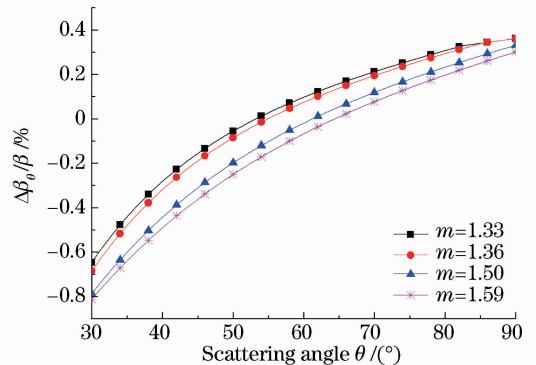


图6  $\Delta\theta=1^\circ$  时  $\beta$  的不确定性

Fig. 6 Uncertainty of the  $\beta$  for an uncertainty of  $1^\circ$  in observation angle

射区域,由  $\beta$  引入的误差很小,因而  $\beta$  对粒径测量影响很小。

## 4 实验及结果

搭建图 1 所示的实验光路系统。实验所用的激光器为波长  $\lambda=532\text{ nm}$ ,最大为功率  $1.5\text{ W}$  的半导体激光器。激光器发出的细光束经扩束、针孔滤波、准直和柱面镜后压缩为厚度  $1.25\text{ mm}$  的片状光束。CCD 为 DALSA 公司生产的 DS-21-04M15 型 10 位的 CCD,像素尺寸  $7.4\text{ }\mu\text{m}\times 7.4\text{ }\mu\text{m}$ ,像素数  $2048\text{ pixel}\times 2048\text{ pixel}$ 。成像镜透为尼康 AF 50 mm  $f/1.8D$  定焦镜头。

### 4.1 标准粒子尺寸测量

实验首先对折射率为 1.59,直径为  $51.1\text{ }\mu\text{m}$  GBW(E)120046 的标准粒子进行了测量,粒子悬浮于去离子水中。根据 Debye 理论计算其单阶散射光强分布,在水中散射角  $\theta=58.5^\circ$  时,  $p=0$  与  $p=1$  阶散射光强相等,条纹可见度最好,其对应在空中  $\theta=47.5^\circ$ 。由图 6 可知,在  $45^\circ\sim 80^\circ$  散射区域,

$\Delta\beta_0/\beta < 0.4\%$ ,即由散射角  $\theta$  引入的误差小于  $0.4\%$ 。实验中设定散射角  $\theta=45^\circ$ ,  $z_0=357.88\text{ mm}$ ,收集角  $\alpha=4.45^\circ$ ,  $g=1.45\text{ mm}$ ,由(4)式计算得到的粒子掩模图为直径  $93.65\text{ pixel}$  的圆。但由于在散射角  $\theta=45^\circ$  处,粒子的干涉条纹图大小并不完全相同[如图 7(a)所示],所以构造的粒子掩模图为直径  $66\sim 106\text{ pixel}$  的圆。图 7(a)为记录的标准粒子干涉图,每个干涉图中的条纹数均相同,约为 4 条。利用图 4 所示的粒子尺寸测量方法,对粒子干涉图进行小波变换和卷积运算得到每个粒子中心坐标,提取每个粒子干涉条纹图,再对其进行傅里叶变换和修正 Rife 方法的插值计算,得到粒子干涉条纹角间距  $\Delta\varphi/\text{条纹数 } N$ 。图 7(b)~(c)给出了图 7(a)中的一个粒子条纹图及其傅里叶频谱图。计算得到的干涉图条纹数  $N=5.68$  条,条纹角间距  $\Delta\theta=114.73\text{ }\mu\text{m}$ ,利用(3)式计算得到的粒子直径  $d=49.86\text{ }\mu\text{m}$ 。对图 7(a)中的粒子进行测量,得到的粒子直径  $d=(49.79\pm 0.41)\text{ }\mu\text{m}$ ,绝对误差  $1.31\text{ }\mu\text{m}$ ,相对误差  $2.56\%$ 。

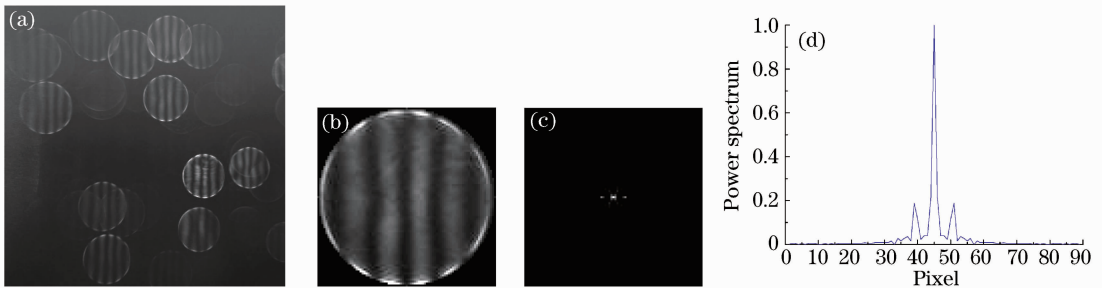


图 7 标准粒子测量结果。(a) 干涉条纹图,(b)~(d) 单个粒子的条纹图及频谱图

Fig. 7 Results of the standard particles. (a) interferometric image; (b)~(d) interferometric image and frequency spectrum of a single particle

### 4.2 乙醇喷雾场粒子尺寸测量

利用该实验系统测量乙醇雾场粒子尺寸和粒径分布,  $m=1.36$ 。对于乙醇雾场,利用 Debye 理论对直径  $d$  为  $40, 80, 120$  和  $160\text{ }\mu\text{m}$  粒子计算了其散射光强分布,其反射光和一阶折射光光强相等时所对应的散射角  $\theta$  分别为  $71.66^\circ, 70.18^\circ, 69.66^\circ$  和  $69.25^\circ$ 。由图 6 可知,在  $60^\circ\sim 80^\circ$  散射区域  $\Delta\beta_0/\beta \approx 0.2\%$ ,即由散射角  $\theta$  引入的误差约为  $0.2\%$ 。因此,实验设定的散射角  $\theta=70^\circ$ ,成像系统放大率  $M=0.1258$ ,收集角  $\alpha=3.56^\circ$ 。分别对喷嘴出口正下方  $y=90, 115, 140, 165, 190\text{ mm}$ ,以及在喷嘴出口正下方  $y=140\text{ mm}$ ,距离中轴  $x=\pm 25, \pm 50$  和  $\pm 75\text{ mm}$ ,共 11 个测量点处进行了测量,如图 8(a)所示。 $y$  轴方向的点依次标记为  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, x$

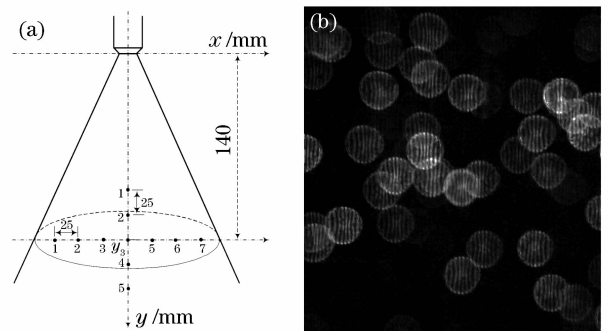


图 8 (a) 喷雾场测量点位置,(b)  $x_1$  位置处的干涉条纹图

Fig. 8 (a) Location of the measurement point, (b) interferometric image at  $x_1$

轴方向的点依次标记为  $x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_7$ 。图 8 (b)给出了距离中轴  $x_1 = -75 \text{ mm}$ 处记录的乙醇雾场粒子干涉图。同样采用图 4 所示的粒子尺寸测量方法,对所记录的干涉图进行小波变换、卷积运算、二维傅里叶变换和修正 Rife 方法的插值计算得到

每个粒子干涉条纹角间距  $\Delta\varphi$ /条纹数  $N$ ,利用(3)式计算得到每个粒子直径,进而计算得到每个测量区域的索太尔平均直径(SMD,  $D_{\text{SMD}}$ )和平均直径  $D_{\text{mean}}$ ,测量结果显示如图 9 所示。

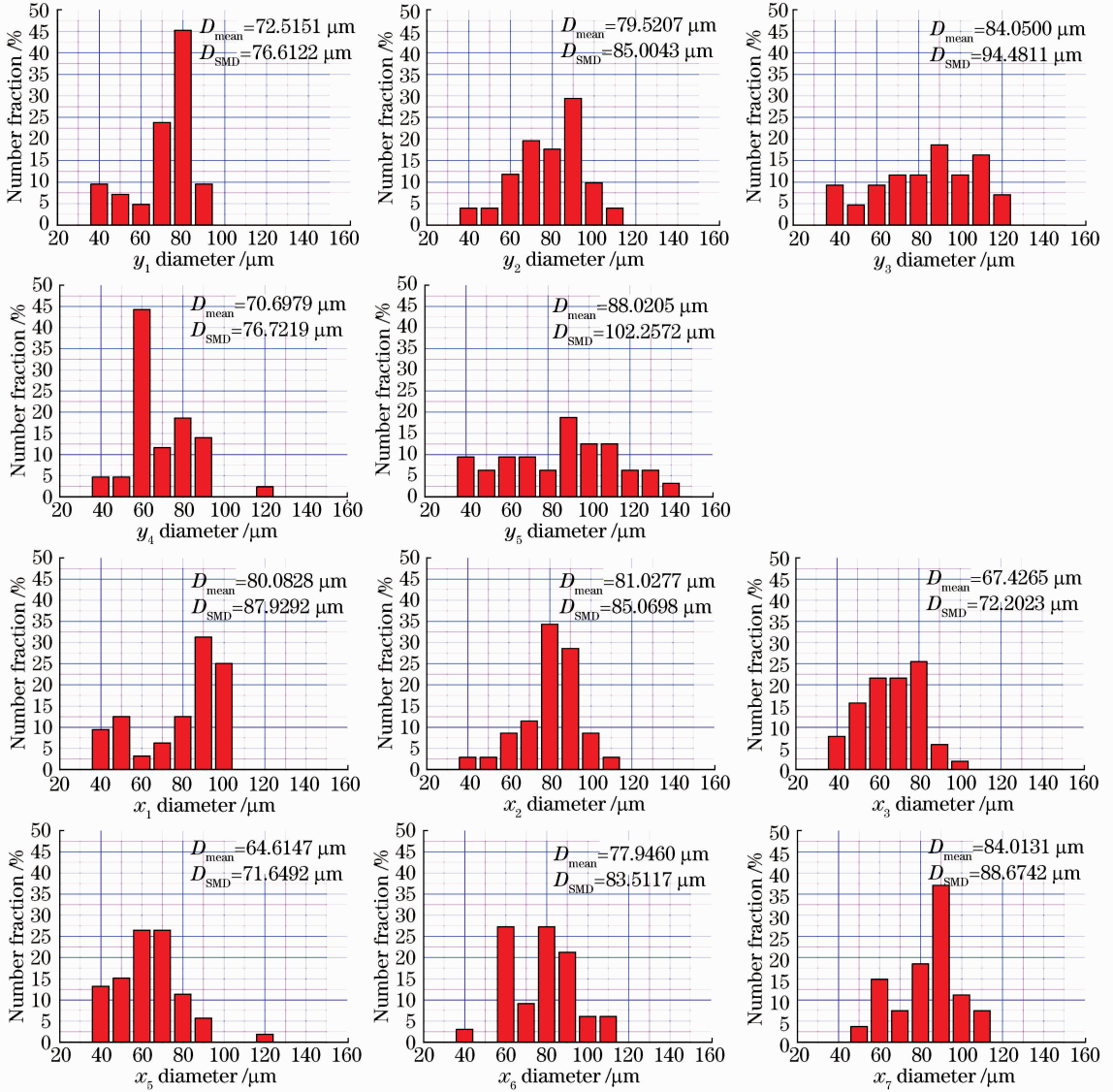


图 9 各测量点处的粒径分布、平均粒径和 SMD

Fig. 9 Particle size distribution, mean particle diameter and SMD in every measurement point

## 5 结 论

从理论和实验上研究了基于激光干涉粒子成像技术的粒子尺寸测量方法,利用小波变换和卷积运算得到每个粒子位置坐标,利用傅里叶变换和修正 Rife 方法提取干涉条纹间距/条纹数,对  $51.1 \mu\text{m}$  的标准粒子测量的不确定性为  $\pm 0.41 \mu\text{m}$ ,绝对误差  $1.31 \mu\text{m}$ ,并应用于乙醇雾场粒子尺寸和粒度分布测量,给出了不同测量点处的粒径分布、平均粒径和

SMD。这种非接触测量方法不仅可得到粒子的尺寸大小,还可获得粒子的位置信息,并具有测量精度高等特点,结合两相流场粒子成像测速技术(PTV/PIV),可实现雾场粒子尺寸速度的同时测量,为雾场粒子测量提供一种新的测量方法。

## 参 考 文 献

1 V. Palero, M. P. Arroyo, J. Soria. Digital holography for micro-droplet diagnostics [J]. *Exp. Fluids*, 2007, **43**(2):185~

- 2 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
- 3 C. F. Hess, D. L'Esperance. Droplet imaging velocimeter and sizer: a two-dimensional technique to measure droplet size [J]. *Exp. Fluids*, 2009, **47**(1):171~182
- 4 Xia Hui, Chen Zhiqian, Li Fushi *et al.*. Influence of wall-drag effect on particle sizing in low-coherence dynamic light scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8):2257~2261  
夏 辉,陈智全,李富石 等. 拖曳效应对低相干动态光散射测量粒径的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8):2257~2261
- 5 Lü Qieni, Zhao Chen, Ma Zhibin *et al.*. Digital holography experiment on the measurement of particle size and size distribution of diesel spray [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **30**(3): 779~783  
吕且妮,赵 晨,马志彬 等. 柴油喷雾场粒子尺寸和粒度分布的数字全息实验[J]. *中国激光*, 2010, **30**(3):779~783
- 6 Lü Qieni, Gao Yan, Ge Baozhen *et al.*. Digital holographic particle sizing with Hough transform [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4):940~944  
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
- 7 G. König, K. Anders, A. Frohn. A new light-scattering technique to measurement the diameter of periodically generated moving droplets [J]. *J. Aerosol. Sci.*, 1986, **17**(2):157~167
- 8 K. H. Hesselbacher, K. Anders, A. Frohn. Experimental investigation of Gaussian beam effects on the accuracy of a droplet sizing method [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(33):4930~4935
- 9 A. Graßmann, F. Peters. Size measurement of very small spherical particles by Mie scattering imaging (MSI) [J]. *Par. Part. Syst. Charact.*, 2004, **21**(5):370~389
- 10 M. R. Christine, P. Olivier. Droplet sizing by Mie scattering interferometry in a spark ignition engine [J]. *Par. Part. Syst. Charact.*, 1999, **16**(4):160~168
- 11 N. Damaschke, H. Nobach, T. I. Nonn *et al.*. Multi-dimensional particle sizing technique [J]. *Exp. Fluids*, 2005, **39**(2):336~350
- 12 N. Semidetnov, C. Tropea. Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**(1):112~118
- 13 A. R. Glover, S. M. Skippon, R. D. Boyle. Interferometric laser imaging for droplet sizing; a method for dropletsize measurement on sparse spray systems [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(36):8409~8421
- 14 N. Fujisawa, A. Hosokawa, S. Tomimatsu. Simultaneous measurement of droplet size and velocity field by an interferometric imaging technique in spray combustion [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**(8):1341~1349
- 15 Pu Xingguo, Pu Shiliang, Yuan Zhenfu *et al.*. Measurement method for gas-liquid flow size and velocity based on laser interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10):1334~1338  
浦兴国,浦世亮,袁镇福 等. 气液两相流速度及粒径分布激光干涉测量方法的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10):1334~1338
- 16 M. Maeda, Y. Akasaka, T. Kawaguchi. Improvements of the interferometric technique for simultaneous measurement of the droplet size and velocity vector field and its application to a transient spray [J]. *Exp. Fluids*, 2002, **33**(1):125~134
- 17 S. Dehaeck, J. P. A. J. van Beeck. Multifrequency interferometric particle imaging for gas bubble sizing [J]. *Exp. Fluids*, 2008, **45**(5):823~831