

双光束照明的干涉粒子成像粒子尺寸测量

吕且妮 陈婷婷 吕通 王祥 张宇佳

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 设计一种两光束相向照射,在散射角 $\theta=90^\circ$ 方向记录的干涉粒子成像测量实验系统,利用模板匹配相关方法提取粒子两点像的位置坐标,根据粒子像位置坐标,粒子掩模图的形状和大小提取出单个粒子两点像。再对每个粒子两点像进行自相关、Gaussian插值提取两点像之间距离,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。对标称值为 $45\ \mu\text{m}$ 的标准粒子进行了测量,粒径测量值为 $(46.54 \pm 0.50)\ \mu\text{m}$,相对误差3.42%。实验结果表明了该方法的可行性。

关键词 测量;干涉粒子成像;双光束照明;聚焦像;粒子尺寸测量

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1208006

Particle Sizing by Interferometric Particle Imaging with Two Lights Illumination

Lü Qieni Chen Tingting Lü Tong Wang Xiang Zhang Yujia

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract An experimental system of interferometric particle imaging with opposition of two laser-sheets illumination at scattering angle $\theta=90^\circ$ is presented. The center of particle imaged can be extracted through the template matching correlation operation between the particle focused images and the particle mask image. The focused image of each particle can then be achieved by using the center coordinate, the shape and size of the particle mask image. The spacing of the doublet image of the individual particle is evaluated by the auto-correlation method and Gaussian interpolation, and sub-pixel accuracy of the glare point separation extraction is acquired. Then particle diameter is calculated. The result is that for particle diameter $(46.54 \pm 0.50)\ \mu\text{m}$, the relative error is 3.42% for the standard particles with diameter of $45\ \mu\text{m}$. The research results show that the experimental system and algorithm presented in this paper are feasible.

Key words measurement; interferometric particle imaging; in-focus image; particle sizing; two beams illumination

OCIS codes 100.3175; 290.5850; 290.5825; 120.5820

1 引 言

在基于光散射法粒子测量中,大多是通过散射光强分布得到粒子尺寸等参数^[1-3]。基于Mie理论的干涉粒子成像(IPI)技术是一种目前备受关注的粒子测量技术,粒子散射光在离焦面上形成条纹像,在聚焦面上形成两点像,通过测量粒子散射光的干涉条纹图的条纹频率或聚焦两点像间距得到粒子尺寸大小,已用于喷雾液滴^[4-10]、气泡^[11-15]、流场^[16-18]等粒子尺寸测量。在IPI聚焦像测量系统中,对散射角 $\theta \neq 90^\circ$ 区域,物平面、成像透镜平面与CCD像面不平行,从而使成像系统放大倍率不同。而两点像之间的间距与放大率有关,由于很难得到观测区域内每一个粒子的放大率,因而影响了粒子尺寸测量精度。在散射角 $\theta=90^\circ$ 区域,对垂直偏振光入射,由于粒子 $p=0$ 阶反射光与 $p=1$ 阶折射光的光强差异较大,使两点像的亮度不同,对水平偏振光入

收稿日期: 2015-06-05; 收到修改稿日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61275019)、内燃机燃烧学国家重点实验室2011年度开放课题(K2011-10)

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

射, $p=0$ 阶反射光与 $p=1$ 阶折射光的光强相当, 但总体亮度较低^[2], 从而影响了两点像间距的提取精度。Dehaeck 等^[13]利用两相向光束照明, 在 $\theta=96^\circ$ 区域接收散射光的聚焦像, 同时测量气泡粒子尺寸和折射率。Palero 等^[18]设计一种两相向光束照明, 在 $\theta=90^\circ$ 区域记录粒子散射光的数字像面全息系统, 得到其聚焦像和离焦像, 其中一束散射光来自于经粒子后的反射光。本文设计一种基于双光束照明的干涉粒子成像测量系统, 提出一种两点像间距提取方法, 给出了对标准粒子尺寸测量结果, 这一研究成果将用于内燃机喷雾场粒子尺寸、速度及其空间分布测量。

2 双光束照明的 IPI 测量原理

图 1 所示为 IPI 测量光路示意图。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。粒子直径大小与两点像间距/条纹间距有关。对于聚焦像, 根据几何光学理论(GOM), $p=0$ 阶反射光与 $p=1$ 阶折射光线之间的距离 L 为^[8-9]

$$L = \frac{d}{2} [\sin \theta_i^{(0)} + \sin \theta_i^{(2)}], \quad (1)$$

式中

$$\sin \theta_i^{(0)} = \cos \frac{\theta}{2}, \quad (2)$$

$$\sin \theta_i^{(2)} = \sin \left[\arctan \left(\frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{m}} \right) \right], \quad (3)$$

得

$$L = \frac{d}{2} \left\{ \cos \frac{\theta}{2} + \sin \left[\arctan \left(\frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{m}} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

即粒子直径 d 为

$$d = \frac{2\Delta l}{M} \left\{ \cos \frac{\theta}{2} + \sin \left[\arctan \left(\frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{m}} \right) \right] \right\}^{-1}, \quad (5)$$

式中 M 为成像系统放大倍率, $\Delta l = LM$ 为聚焦两点像之间的距离, θ 为散射角, $\theta_i^{(0)}$ 和 $\theta_i^{(2)}$ 分别为 $p=0$ 和 $p=1$ 两光线的入射角, $m = n_1/n_0$ 为相对折射率, n_1 为粒子折射率, n_0 为粒子周围介质折射率。

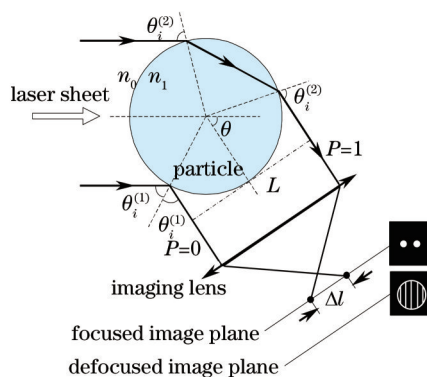


图 1 干涉粒子成像光路示意图

Fig.1 Schematic of interferometric particle imaging

由(5)式可知, 粒子直径 d 与 M 、 θ 、 m 和 Δl 有关。当 $\theta \neq 90^\circ$ 时, 不同物面上的粒子对应 M 不同。当 $\theta=90^\circ$ 时, 对垂直偏振光入射, $P=0$ 阶反射光和 $P=1$ 阶折射光强度不相等, 如图 2(a) 所示, 从而使聚焦两点像亮度不

同,这给两点像间距的提取造成困难,且当散射角在 90° 附近时,Debye理论与GOM计算的散射光强分布差异较大,如图2(b)所示。这是因为当入射角 $\theta_i=90^\circ$ 时, $p=1$ 阶的散射光剧烈减少, $I \rightarrow 0$ 。根据几何光学理论,当 $\theta=\theta_{\text{lim}}=2 \arccos(1/m)=82.79^\circ$ 时,没有光线进入到粒子内部产生高阶数的散射光,也就是说散射角 $\theta \leq 82.79^\circ$ 。Debye级数在 $P=1$ 时,散射角可以取 $\theta=180^\circ$,这是由于表面波引起的光强分布,即使当 $\theta > \theta_{\text{lim}}$ 时,Debye级数计算的一阶折射光光强依然存在。此时,由GOM计算得到的粒径测量式(5)式不再适用。

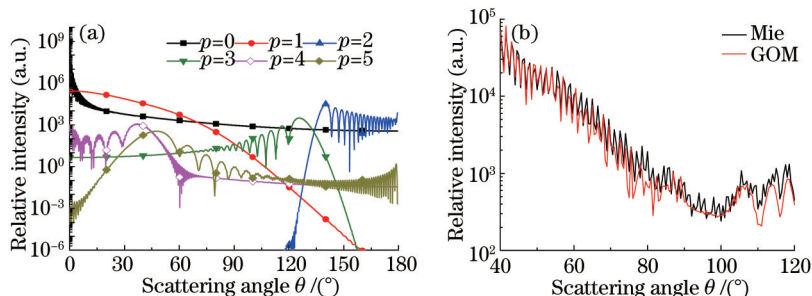


图2 (a) Debye级数计算的不同阶数的粒子散射光垂直偏振分量光强分布($p=0\sim 5$); (b) GOM和Mie理论计算的总散射光强分布,其中 $d=45 \mu\text{m}$, $\lambda=0.532 \mu\text{m}$, $m=1.333$

Fig.2 (a) Scattering light intensity of the different scattering orders for perpendicular polarization ($p=0\sim 5$); (b) calculations of the total scattering patterns using both GOM and Mie scattering, where $d=45 \mu\text{m}$, $\lambda=0.532 \mu\text{m}$, $m=1.333$

图3为双光束照明的IPI原理示意图。两强度相等的片状光束相向照射粒子场,在 $\theta=90^\circ$ 方向接收散射光,每束光在聚焦粒子像面上形成两点像,两反射光在聚焦像面上形成了亮度相同的两点像[如图6(d)所示],则粒子直径 d 为

$$d = \frac{\sqrt{2} \Delta l}{M}, \tag{6}$$

式中入射角 $\theta_i=45^\circ$ 。

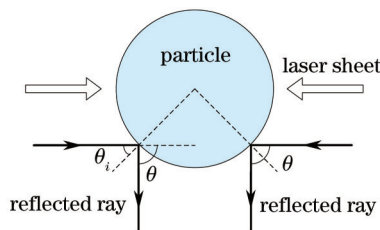


图3 双光束照明的IPI示意图
Fig.3 Schematic of IPI with two lights illumination

3 粒子尺寸测量算法

由(6)式可知,在实验系统给定的条件下,即 M 给定,粒子的直径 d 正比两点像间距 Δl 。通过测量 Δl ,可得到 d 。因此,从聚焦像中自动提取两点像间距是IPI聚焦像测量技术的关键。图4为本文提出的IPI聚焦像测量自动处理算法的流程图。对粒子聚焦像和掩模图像做相关运算(掩模图像为一像素数为 $(\Delta l + 1.5x) \times 1.5x$ 的矩孔,式中 $\Delta l = dM/(\sqrt{2} \Delta x)$ 为理论上的两点像的间距,由(6)式计算得到, x 为点像的直径, Δx 为CCD的像素尺寸),得到粒子像的空间位置坐标。根据粒子像位置坐标及掩模图像大小和形状提取出单个粒子两点像。再对每个粒子聚焦像进行自相关、Gaussian插值提取两点像之间的距离,进而计算得到粒子的直径,其测量精度可达到亚像素精度。

4 实验及结果分析

搭建图5所示的双光束照明的IPI测量实验光路系统 $M_1\sim M_3$ 为反射镜,BE为扩束准直系统。实验所用的激光器为波长 $\lambda=0.532 \mu\text{m}$,最大功率为1.5 W的垂直线偏振光半导体激光器。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 mm的片状光束,经分束镜分为强度相等的两光束相向照射

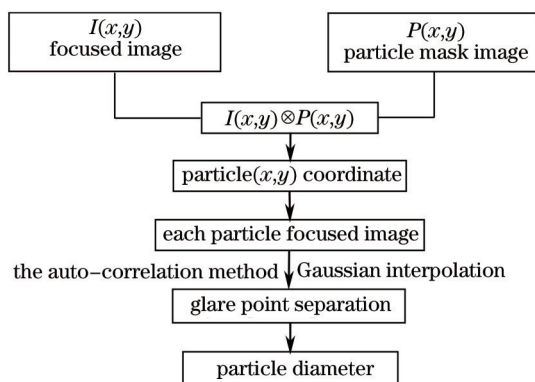


图 4 粒子测量流程图

Fig.4 Flowchart of particle measurement

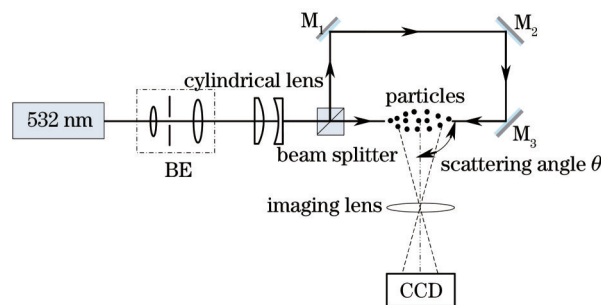


图 5 双光束照明的 IPI 实验光路系统示意图

Fig.5 Schematic of IPI experimental system with two lights illumination

粒子场。CCD 为 DALSA 公司生产的 DS-21-04M15 型 10 位的 CCD, 像素尺寸 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$, 像素数为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。成像镜头为尼康 AF 50 mm f/1.8D 定焦镜头。图 6 为记录的单个粒子条纹图和聚焦像。图 6(a)和图 6(d)为双光束照射时, 粒子条纹图和聚焦像。由于干涉发生在同阶的散射光之间, 即两条 0 阶反射光之间, 两点像亮度基本相同, 对应的条纹图对比度最好。图 6(b)、(c)、(e)、(f)为单光束照射时所记录的粒子条纹图和聚焦像。由于 0 阶反射光与 1(或 3)阶折射光的散射光强在 $\theta=90^\circ$ 处不相等, 使图 6(e)和图 6(f)中的两点像亮度和大小不同, 对应的条纹图对比度相对较低。

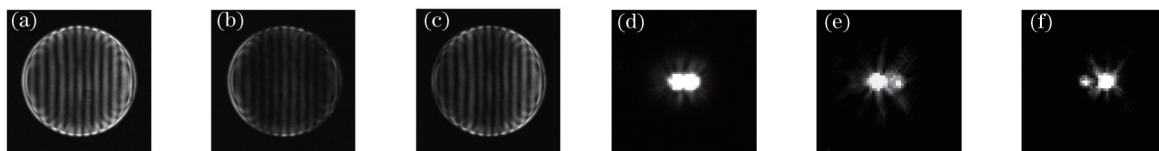


图 6 单个粒子条纹图和聚焦像: (a)、(d)双光束照射, (b)、(c)、(e)、(f)单光束照射

Fig.6 Interferometric image and focused image of a single particle of (a) and (d) two beams illumination and of (b), (c), (e) and (f) a single beam illumination

图 7(a)为记录的聚焦像, 实验所用粒子为直径 $45 \mu\text{m}$ GBW(E)120045 的标准粒子, 折射率 $n_1=1.59$ 。实验时将其悬浮于去离子水中, 设定散射角 $\theta=90^\circ$, 实验测得 $M=1.04$ 。利用图 4 所示的粒子尺寸测量方法, 对聚焦像做相关运算得到每个粒子像位置坐标。图 7(b)为匹配相关结果, 图 7(c)为粒子定位结果, 红色“*”表示提取的粒子位置坐标。从图 7(c)可以看出, 几乎提取到所有粒子像的位置, 粒子识别率很高。对每个粒子聚焦像进行自相关运算和 Gaussian 插值, 得到两点像之间的距离 Δl 。图 7(d)和图 7(e)给出了一个粒子聚焦像及其自相关分布, 零级峰与正/负一级峰之间的距离即为两点像间距, 通过 Gaussian 插值得到两点像间距为 4.89 pixel, 利用(6)式计算得到其粒子直径 $d=45.5 \mu\text{m}$ 。对图 7(c)中的所有聚焦像进行处理, 共提取出 69 个粒子, 粒径分布如图 8 所示, 再对图 8 进行高斯拟合, 如蓝线所示, 得到的峰值粒径如表 1 所示。实验结果表明了该测量方法的可行性。

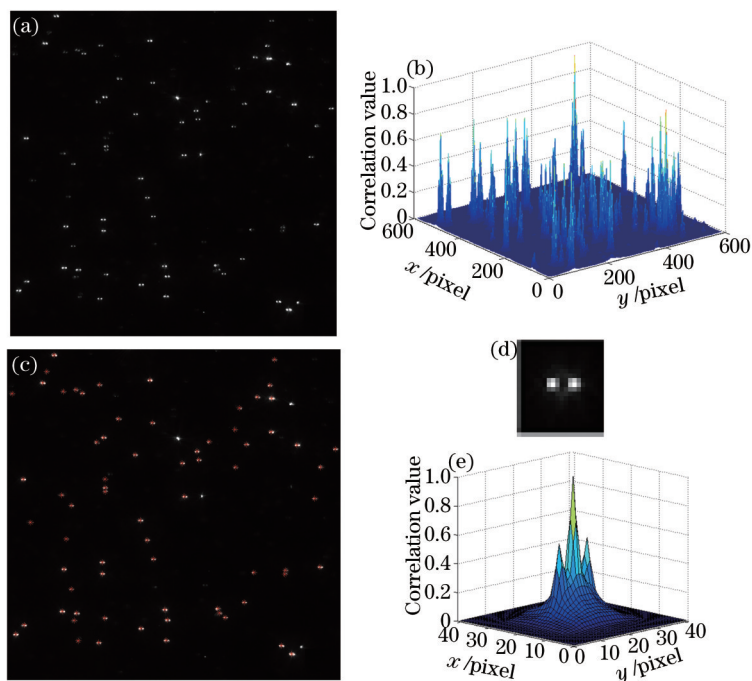


图7 粒子尺寸测量结果。(a) 聚焦像;(b) 匹配相关结果;(c) 两点像定位结果;(d) 图(a)中标识粒子放大图;(e) 图(d)自相关结果

Fig.7 Results of particle size measurement. (a) Focused image of particles; (b) matching correlation results;

(c) results of the center detecting; (d) doublet image of a particle in (a); (e) distribution of auto-correlation value result of (d)

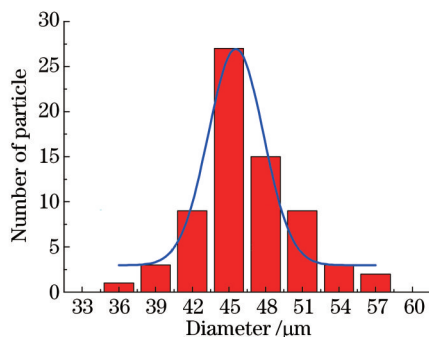


图8 粒径分布及峰值粒径

Fig.8 Particle size distribution and peak particle diameter

表1 标称粒径与测量粒径比较

Table 1 Comparison of nominal diameter and measured value

Parameter	Value	
Nominal diameter / μm	44.7 (peak particle size)	45 (mean particle size)
Measured diameter / μm	45.56 ± 0.54	46.54 ± 0.50
Absolute error / μm	0.86	1.54
Relative error /%	1.92	3.42

5 结 论

本文对 IPI 聚焦像测量方法进行了研究,设计了一种双光束照明的 IPI 测量实验光路系统,利用模版匹配相关方法提取粒子两点像的位置坐标,利用自相关和 Gaussian 插值提取两点像之间距离,对标称直径为 $45 \mu\text{m}$ 的标准粒子进行了测量,粒径测量值为 $(46.54 \pm 0.50) \mu\text{m}$,绝对误差为 $1.54 \mu\text{m}$,相对误差为 3.42% 。研究表明,该算法不仅可以提取两点像之间距离,且可以获得粒子像位置坐标,其测量精度可达到亚像素精度。该实验系统具有两点像亮度相同,且成像系统放大倍率不变等特点,可实现喷雾场粒子尺寸测量。由于利用两反射光,该光路系统可用于不透明粒子场测量。

- 1 Bu Yichuan, Zhao Yongkai, Chen Zhengyan, *et al.*. Research on real-time aerosol particle shape identification based on scattered light detection[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0413003.
卜一川, 赵永凯, 陈正岩, 等. 基于光散射的实时气溶胶粒子形状识别技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0413003.
- 2 Sun Han, Grazia Lamanna, Bernhard Weigand. Measurement technique and verification of accuracy for particle sizing by low angle elastic light scattering[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308004.
孙 晗, Grazia Lamanna, Bernhard Weigand. 小角弹性光散射粒径测量技术与准确性验证[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308004.
- 3 Ni Zhibo, Dong Fengzhong, Yang Yang, *et al.*. Study on measurement of flue gas velocity and particulate concentration by optical method [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108002.
倪志波, 董凤忠, 杨 阳, 等. 烟气流速及颗粒物浓度的光学测量方法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108002.
- 4 Y Hardalupas, S Sahu, A M K P Taylor, *et al.*. Simultaneous planar measurement of droplet velocity and size with gas phase velocities in a spray by combined ILIDS and PIV techniques[J]. Exp Fluids, 2010, 49(2): 417-434.
- 5 C Lacour, D Durox, S Ducruix, *et al.*. Interaction of a polydisperse spray with vortices[J]. Exp Fluids, 2011, 51(2): 295-311.
- 6 A V Bilsky, Yu A Lozhkin, D M Markovich. Interferometric technique for measurement of droplet diameter[J]. Thermophys Aeromech, 2011, 18(1): 1-12.
- 7 Lü Qieni, Ge Baozhen, Chen Yiliang, *et al.*. Particle sizing and size distribution measurement of alcohol spray by interferometric particle imaging[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0308003.
吕且妮, 葛宝臻, 陈益亮, 等. 激光干涉粒子成像乙醇喷雾场粒子尺寸和粒度分布测量[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0308003.
- 8 Y Zama, M Kawahashi, H Hirahara. Simultaneous measurement method of size and 3D velocity components of droplets in a spray field illuminated with a thin laser-light sheet[J]. Meas Sci & Technol, 2005, 16(10): 1977-1986.
- 9 Y Zama, M Kawahashi, H Hirahara. Simultaneous measurement of droplet size and three-components of velocity in spray[J]. Opt Rev, 2004, 11(6): 358-364.
- 10 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.
- 11 G Lacagnina, S Grizzi, M Falchi, *et al.*. Simultaneous size and velocity measurements of cavitating microbubbles using interferometric laser imaging[J]. Exp Fluids, 2011, 50(4): 1153-1167.
- 12 S Dehaeck, J P A J van Beeck. Multifrequency interferometric particle imaging for gas bubble sizing[J]. Exp Fluids, 2008, 45(5): 823-831.
- 13 S Dehaeck, J P A J van Beeck, M L Riethmuller. Extended glare point velocimetry and sizing for bubbly flows[J]. Exp Fluids, 2005, 39(2): 407-419.
- 14 H Shen, S Saengkaew, G Grehan, *et al.*. Interferometric out-of-focus imaging for the 3D tracking of spherical bubbles in a cylindrical channel[J]. Opt Commun, 2014, 320: 156-161.
- 15 H Shen, S Coetmellec, M Brunel, *et al.*. Simultaneous 3D location and size measurement of spherical bubbles using cylindrical interferometric out-of-focus imaging[J]. J Quant Spectrosc Radiat Transf, 2013, 131: 153-159.
- 16 M Maeda, T Kawaguchi, 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.
- 17 N Damaschke, H Nobach, C Tropea. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics[J]. Exp Fluids, 2002, 32(2): 143-152.
- 18 V Palero, J Lobera, M P Arroyo. Digital image plane holography (DIPH) for two-phase flow diagnostics in multiple planes[J]. Exp Fluids, 2005, 39(2): 397-406.

栏目编辑: 何卓铭