

文章编号: 0253-2239(2005)10-1334-5

# 气液两相流速度及粒径分布激光干涉测量方法的研究

浦兴国 浦世亮 袁镇福 岑可法

(浙江大学能源洁净利用与环境工程教育部重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 为了实现对气液两相流的粒子粒径、空间分布及其速度测量,对激光干涉气液两相流测量技术(ILIDS)进行了深入研究,该技术是一种应用于气液两相流测量的新技术,其主要优点是不干扰流场和颗粒粒径、位置测量精度高。基于该技术所开发的图像自动处理方法可以利用普通粒子成像测量技术系统拍摄气液两相流的激光散射干涉图像,并利用图像卷积定位、傅里叶变换频率分析及其图像互相关测速等图像处理手段从干涉图像中自动提取粒子的位置、直径和速度信息。为了验证该方法的测量精度,对喷嘴生成的气水两相流进行了测量实验,得到了喷嘴出口处不同区域的粒径、速度矢量的空间分布,并将测得的速度矢量与用粒子成像测量技术方法测得的结果进行对比,证明两种方法测量的平均速度差别仅为 0.38%。

**关键词:** 测量;干涉;气液两相流;测速

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## Measurement Method for Gas-Liquid Flow Size and Velocity Based on Laser Interferometry

Pu Xingguo Pu Shiliang Yuan Zhenfu Cen Kefa

(Clean Energy and Environment Engineering Key Laboratory of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** In order to obtain the droplet diameter and spatial distribution and velocity of gas-liquid flow, interferometric laser imaging droplet sizing technique (ILIDS) is studied. ILIDS is a novel planar measurement technique for droplet size and velocity vector for spray measurement that has high precision for droplet sizing and localizing. An automatic analysis method, which bases on image convolution localizing, Fourier transform and concise cross correlation algorithm, is developed for obtaining droplets' diameters and velocity of spray by using PIV setup. The method is experimentally tested on the water spray generated by an injector, and the different region of the spray is measured. The velocity field obtained by the method is calibrated by the normal particle image velocimetry (PIV) method, the result shows that the difference between velocity vector by two methods is only 0.38%.

**Key words:** measurement; interferometric; gas-liquid flow; velocimetry

## 1 引 言

激光干涉气液两相流测量技术(ILIDS)是近年出现的多相流测量前沿技术。它利用透明粒子侧向散射光干涉原理用高速数码相机拍摄两相流中颗粒的干涉图像,从中提取粒子空间位置、粒径等信息<sup>[1~3]</sup>。

从两相流干涉图像中自动提取粒子干涉条纹信息是激光干涉气液两相流测量技术(ILIDS)的难点,尤其是高浓度气液两相流,其高度重叠的干涉图像的处理方法一直是研究的重点之一<sup>[4~6]</sup>。本文将

文献[3]提出的基于卷积定位和傅里叶变换频率提取的图像处理方法,应用于重叠的干涉图像能使有效粒子信息提取率高于 90%,粒子定位及粒径计算误差小于 5%,较好地解决了这一问题。

将图像互相关算法(concise cross correlation)<sup>[6~10]</sup>用于两相流干涉图像测速,实验证明该方法具有较高精确度和实用性。该方法的优点是可以利用普通的粒子成像测量技术(Particle imaging velocimetry, PIV)硬件系统同时获得两相流的粒径分

作者简介: 浦兴国(1947~),男,高级工程师,从事热能工程控制与测试方面的研究。E-mail: puxingguo@zju.edu.cn

收稿日期: 2004-09-21; 收到修改稿日期: 2005-01-02

布及速度分布。

## 2 原 理

激光干涉气液两相流测量技术利用高干涉性片状激光束照射气液两相流,激光与粒子相遇并以折射和反射的方式发生散射,在一定的散射角用光学透镜收集并汇聚散射光成像,由于折射光与反射光之间的相位差,在成像系统的非聚焦平面上散射光会形成干涉条纹图,散射光成像光路图如图 1 所示。

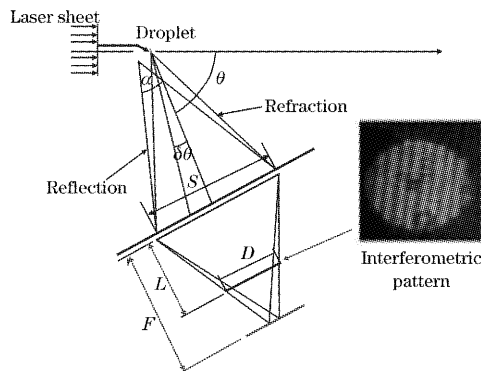


图 1 散射光成像图

Fig. 1 The scattered light imaging

由几何光学可推导得到粒径  $d$  与粒子干涉图像条纹数  $N$  之间存在以下关系式:

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

式中  $\lambda$  为激光波长,  $m$  为液相与气相之间的折射率,  $\alpha$  为收集角,  $\theta$  为散射角, 其中  $\alpha$  和  $\theta$  可以通过调整数码相机位置来调节<sup>[7,8]</sup>。

图像处理主要分为两个部分,第一部分从两相流干涉图中提取粒子的空间位置和粒径,得到两相流粒径分布,处理方法是基于图像卷积定位和傅里叶干涉条纹频率提取技术。文献[7]中对该图像处理部分的具体内容和在实验中的应用结果作了详细介绍,实际应用结果表明,本文开发的图像处理方法能自动精确提取两相流干涉条纹信息,对较高重叠度的干涉图像的有效干涉信息提取率达 92.3%,粒子定位及粒径计算的结果与人工辨读的结果差异小于 5%。

本文主要介绍图像处理的第二部分,利用图像互相关技术从两张连续拍摄的两相流干涉图像中提取两相流的流场速度矢量图。图像互相关测速技术的基本原理是在图像中分割诊断窗口,并求得诊断窗口内粒子群的平均速度,当粒子在流场中空间位

置很接近时,其速度基本一致,因此可以用粒子群的平均速度代替粒子的真实速度。图像互相关测速技术的算法有许多种,本文应用的是快速傅里叶变换相关算法,该算法通过计算两幅连续拍摄图像中相同位置处的诊断窗口内的互相关函数,得到诊断窗口内粒子群的平均位移,由于该算法的图像互相关过程用快速傅里叶算法实现,其计算速度很快,可以实现在线速度测量,这是该算法的最大优点,但是由于该算法在两幅连续图像的相同位置处开两个大小形状一致的分析窗口,并通过两个诊断窗口的互相关分析得到平均位移,因此如果在两幅图像的拍摄时间间隔  $\Delta t$  内有大量粒子进入或者离开诊断窗口,则两个诊断窗口图像的相关性将被削弱,从而导致位移计算的误差,因此粒子位移应小于诊断窗口边长的 25%,以保证诊断窗口内的大部分粒子在下一拍摄时刻仍然停留在诊断窗口内。

测速部分的图像处理主要过程可以用图 2 表示,主要分以下几个步骤:

1) 图像预处理: 利用灰度阈值将粒子图像和背景图像进行分离,并过滤大部分低灰度图像噪音,以提高图像的信噪比。

2) 图像互相关计算: 将干涉图像分割为正方形的诊断窗口,诊断窗口的大小直接影响速度测量的精确性及其可靠性,当诊断窗口太大时,基于粒子空间分布接近的粒子群速度相似性假设不能成立,当卷积区域太小时,由于区域内粒子数太少,粒子图像相似性容易被误差掩盖,且无法保证停留在诊断窗口的粒子占粒子图像的主导地位。根据以上原则,诊断窗口的大小被设定为 64 pixel  $\times$  64 pixel。将两幅连续干涉图像中对应的诊断窗口进行互相关计算,互相关计算由快速傅里叶算法  $\mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[g_1(x,y)] \times \mathcal{F}[g_2(x,y)]\}$  实现,式中  $\mathcal{F}$  为傅里叶变换,  $\mathcal{F}^{-1}$  为傅里叶逆变换,  $g_1(x,y)$  和  $g_2(x,y)$  为诊断窗口。

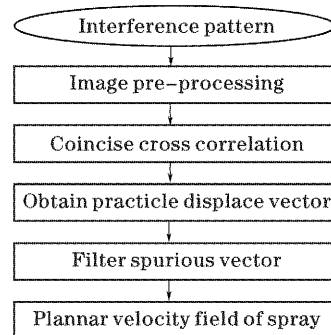


图 2 图像处理流程图

Fig. 2 Image processing steps

3) 速度矢量提取: 由于互相关计算反映了两幅干涉图像的重叠情况, 因此从互相关计算结果中提取最大值, 互相关最大值所在的坐标反映了诊断窗口内粒子群的平均位移  $\overline{\Delta s}$ , 从而获得区域平均速度矢量  $\overline{\mathbf{u}} = \overline{\Delta s} / \Delta t$ 。

4) 过滤异常速度矢量: 由于图像噪音及其由粒子进出诊断窗口造成的误差, 计算得到的速度矢量场中存在误判断速度矢量, 误判断速度矢量具有明显特征, 其矢量大小或方向与周围速度矢量具有较大差异, 将速度矢量与其相邻 8 个区域的速度矢量利用 (2) 式进行相似性计算, 并根据相似性阈值  $\sigma_1$  过滤与相邻区域速度矢量差别很大的异常速度矢量, 并利用 (3) 式根据周围区域矢量推算该区域矢量。

$$\sigma = \sum_{j=1}^8 |\overline{\mathbf{u}}_j - \mathbf{u}| / \sum_{j=1}^8 |\mathbf{u}_j| < \sigma_1, \quad (2)$$

$$\overline{\mathbf{u}} = \sum_{j=1}^8 \mathbf{u}_j / 8. \quad (3)$$

5) 根据得到的两相流矢量绘制两相流流场矢量图。

### 3 实验结果及分析

为了验证本测量技术对流场测量的准确性, 做了以下实验, 实验系统如图 3 所示, 用功率为 10 W, 波长为 532 nm 的 YAG 激光器作为激光源, 并用透镜将激光调节厚度为 2 mm 的片状激光束, 照射用液雾喷嘴生成的气水两相流, 利用两只高速数码相机(分辨力为 1024×768)同时拍摄流场中的同一区域, 设定散射角为 90°, 收集角为 4.5°, 一只数码相机记录散射光聚焦图像, 另一只记录在失焦平面上形成的散射光干涉图像。图 4 为气水两相流的一幅聚焦图像, 图 5 为同时拍摄的干涉图像。利用互相关图像测速法 (concise cross correlation) 对两组

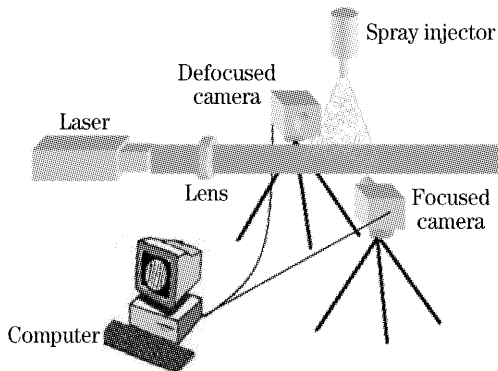


图 3 实验布置图

Fig. 3 Geometry of the experimental setup

图像进行速度计算, 图 6 为根据两相流聚焦图像获得的流场速度矢量图, 图 7 为根据两相流干涉图获得的流场速度矢量图。

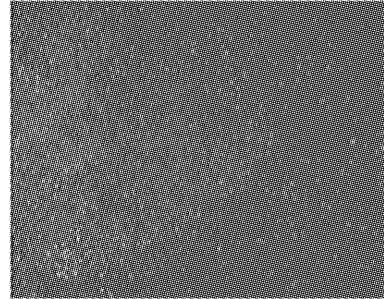


图 4 两相流散射光聚焦图像

Fig. 4 The focused image of spray

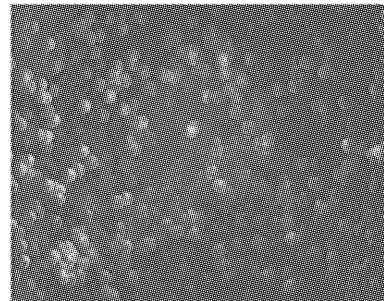


图 5 两相流散射光干涉图像

Fig. 5 The interferometric pattern of spray

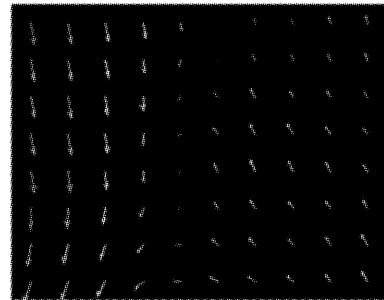


图 6 从聚焦图像获得的流场矢量图

Fig. 6 The velocity vectors from focused image

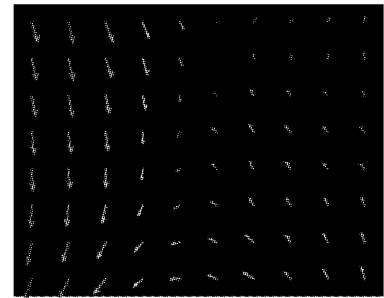


图 7 从干涉图像获得的流场矢量图

Fig. 7 The velocity vectors from interferometric pattern

由聚焦图像获得的流场速度矢量的方法就是粒子成像测量技术,该技术是一种成熟的并获得承认的两相流测速技术,因此可以用它来对实验结果进行评估。由图 6 和图 7 可见,两幅流场矢量图非常相似,计算得到两幅流场矢量图的速度矢量平均差别为 12.8%,平均速度差别仅为 0.38%。为了估算由测量系统造成的速度差异,将两只数码相机都设定为聚焦状态,同时拍摄同一区域的两相流聚焦图像,并计算得到两组速度分布,由于拍摄区域一致,且其他实验参量一致,可以通过比对两组速度矢量

分布得到由测量系统造成的流场测量误差,通过计算得到两组速度矢量的平均差异为 9.2%。因此如果将聚焦图像获得的速度分布作为测量标准(即粒子成像测量技术),并将测量系统误差扣除,利用干涉图像获得的速度误差在 5% 以下。

为了考察本速度测量技术对不同流动状态的测量情况,对两相流不同区域进行了测量,分别对喷嘴出口处正下方 15 cm 处,两相流边缘处及喷嘴正下方 30 cm 处进行了测量,并提取了测量区域的速度分布及粒径分布信息,测量结果如图 8 所示。

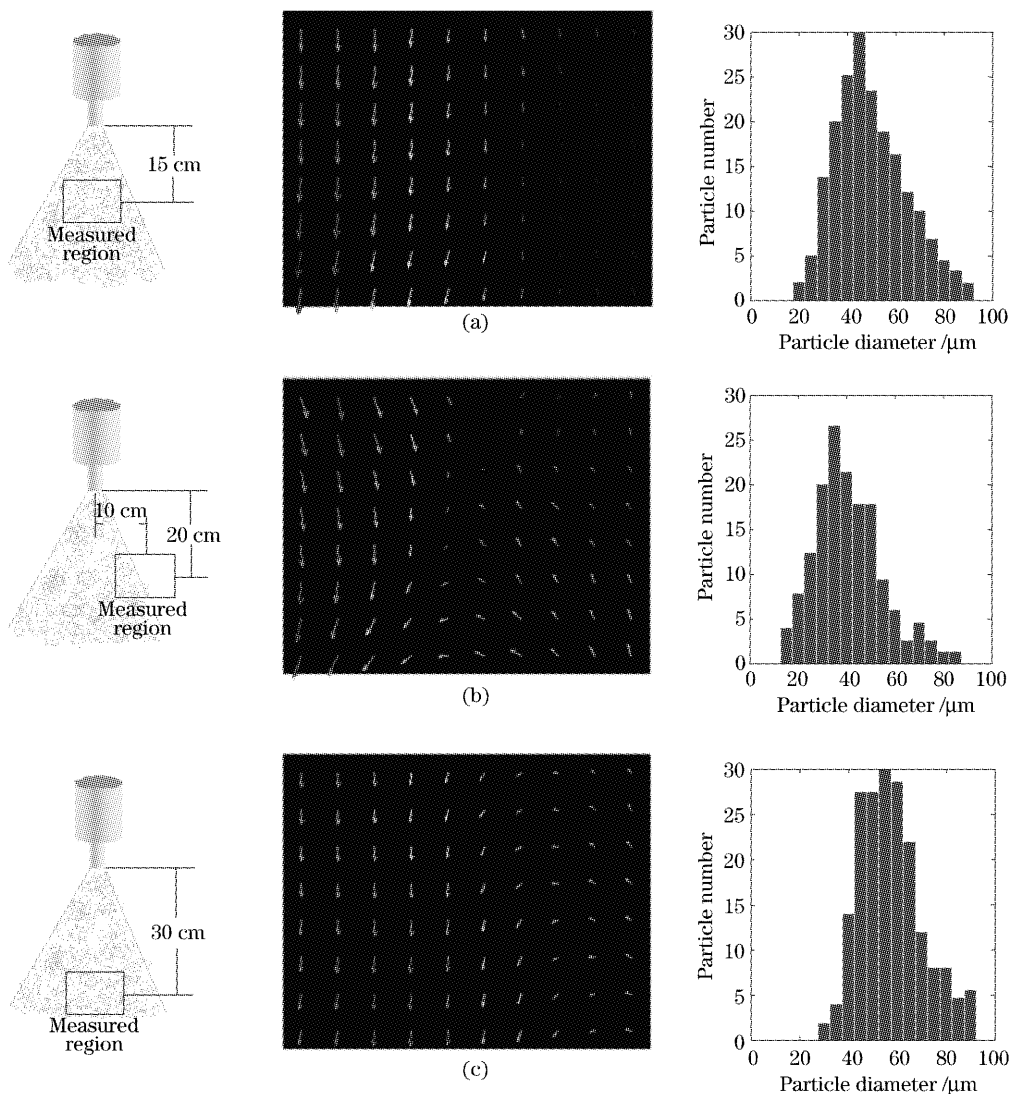


图 8 两相流不同区域的速度及粒径分布测量结果

Fig. 8 The velocity and diameters distributions of different region

由图 8(a)可见在喷嘴出口处平均流速为 1.2 m/s,平均粒径为 51.5  $\mu\text{m}$ ,速度矢量的方向比较一致。

由图 8(b)可见在两相流边缘处平均流速为

0.8 m/s,速度矢量分布图显示在该区域流场存在旋流状态,平均粒径为 42.3  $\mu\text{m}$ ,小于图 8(a)中的平均粒径,其原因是小粒子被卷吸作用参与旋流,而粒径较大的粒子由于重力作用保持向下的运动方向。

由图 8(c)可见在喷嘴出口正下方 30 cm 处平均流速为 1.1 m/s, 流场主要区域的速度方向正下方, 在边缘处也存在少量旋流, 平均粒径为 56.7  $\mu\text{m}$ , 大于图 8(a) 中的平均粒径, 这是因为随着两相流离开喷嘴的距离增加, 小粒子由于参与旋流偏离中心区域, 大粒子却由于重力作用保持向下的运动方向。

实验结果证明, 在不同区域所获得的流场速度矢量图较全面真实地反映出两相流的流动状态, 从图中可看到两相流边界处存在漩流状态, 粒径分布图反映颗粒粒径在流场中不同区域中的不同分布, 由于重力影响, 流场漩流处的平均粒径明显小于流场中央处。

## 4 结 论

激光干涉气液两相流测量方法具有不干扰流场, 粒径测量精度高, 测量区域较大等优点。激光干涉气液两相流测量方法可以利用粒子成像测量技术硬件系统实现, 本文在此基础上开发了相应的图像处理技术, 可以同时获得两相流流场的粒径分布及速度分布等参量, 而粒子成像测量技术只能获得两相流流场的速度分布参量, 本技术与粒子成像测量技术硬件要求相同但可获得更多的参量。

实验证明本技术对于流场的速度测量具有较高的可靠性, 将粒子成像测量技术测量结果作为评价标准, 并扣除系统误差, 本技术的速度测量误差小于 5%, 且计算速度快, 从分辨率为  $1024 \times 768$  的干涉图像中提取速度矢量所需的时间仅为 15 s。对气水两相流喷雾场各个区域的测量结果发现, 本技术可以直观地反映两相流流场的流动规律及粒径在不同区域的分布规律。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Linsen, Xie Jianfeng, Lu Zhiwei *et al.*. Fabrication of a diffractive image lithographic system for optical storage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 392~395 (in Chinese)  
陈林森, 解剑峰, 陆志伟 等. 具有存储功能的衍射图像光刻系统的研制[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 392~395
- 2 Su Mingxu, Ren Kuanfang, Grehan G *et al.*. The affect of light multiple scattering on particle sizing by using light extinction method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 696~699 (in Chinese)  
苏明旭, 任宽芳, Grehan G 等. 光复散射对消光法粒径测量的影响复散射模型与数值模拟[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 696~699
- 3 M. Golombok, V. Morina, C. Mounaim-Rousselle. Droplet diameter and the interference fringes between reflected and refracted light[J]. *Appl. Phys.*, 1998, **31**(18): 59~62
- 4 Masanobu Maeda, Tatsuya Kawaguchi, Koichi Hishida. Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11**: 13~18
- 5 Tatsuya Kawaguchi, Yukihiro Akasaka, Masanobu Maeda. Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, **13**: 308~316
- 6 N. Damaschke, H. Nobach, C. Tropea. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics[J]. *Experiments in Fluids*, 2002, **32**(2): 143~152
- 7 Pu Shiliang, Pu Xingguo, Yuan Zhenfu *et al.*. An automatic image processing method for the interferometric laser image droplet sizing (ILIDS) technique[J]. *Proc. CSEE*, 2004, **24**(2): 201~205 (in Chinese)  
浦世亮, 浦兴国, 袁镇福 等. 激光干涉气液两相流测量图像自动辨读方法的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, **24**(2): 201~205
- 8 Pu Xingguo, Pu Shiliang, Yuan Zhenfu *et al.*. A research on the interferometric laser imaging droplet velocimetry technique[J]. *Proc. CSEE*, 2004, **24**(11): 237~240 (in Chinese)  
浦兴国, 浦世亮, 袁镇福 等. 激光干涉气液两相流颗粒速矢量测量的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, **24**(11): 237~240
- 9 Francisco Pereira, Morteza Gharib. Defocusing digital particle image velocimetry and the three-dimensional characterization of two-phase flows[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, **13**: 683~694
- 10 D. P. Hart. PIV error correction experiments in fluids[J]. *Experiments in Fluids*, 2000, **29**(1): 13~22