

研究论文

用于高浓度气液两相流的成像相关测速技术

吴学成¹, 王勤辉¹, G. Gréhan², 任宽方², 骆仲决¹, 方梦祥¹, 岑可法¹

(¹ 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; ² 鲁昂大学 CORIA 研究所, 鲁昂 76801, 法国)

摘要: 对一种基于成像的激光相关测速技术进行了理论和实验研究。利用光散射理论模拟了成像测量系统对单个颗粒的光信号响应特点, 分析了颗粒粒径和探头直径对信号及其频谱的影响, 研究了测量体在光轴方向的有效长度。针对信号特点, 研究了信号处理参数, 分析了分段相关性计算中窗口宽度对计算结果的影响及其选择依据, 并对窗函数和信号预平移等优化方法进行了研究。成功地对一脉冲喷雾爆破区高浓度流场进行了测试, 获得了不同脉冲宽度下喷雾速度变化规律和轴向径向分布, 测试结果与文献报道结果基本吻合, 表明基于成像的相关测速系统可以很好地应用于喷嘴出口附近高浓度流场的测试。

关键词: 激光相关测速; 高浓度; 气液两相流; 喷雾; 成像分析

中图分类号: TK 121

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 01-0038-08

Imaging-based correlation velocimetry and its application to dense gas-liquid flow

WU Xuecheng¹, WANG Qinhui¹, G. Gréhan², REN Kuanfang²,
LUO Zhongyang¹, FANG Mengxiang¹, CEN Kefa¹

(¹ State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

² UMR 6614/CORIA, CNRS-Université & INSA de Rouen, Rouen 76801, France)

Abstract: Theoretical and experimental studies on an imaging-based correlation velocimetry were presented. The signals received by detectors when a single particle passing through the measurement volume were calculated. The effects of particle size and detector diameter on the signal and its frequency spectrum were studied and the effective length of the measurement volume was analyzed. In data processing, the determination of the length of time window was studied and the methods using windowing functions and data pre-shift were also analyzed. Velocity measurements for the dense region of a spray near the nozzle exit by using the measurement system were successfully carried out. The spray velocity variations under different pulse injections as well as the radial and axial profiles of spray velocities were obtained. The imaging-based correlation velocimetry was proved to be a simple and effective tool for the velocity measurement of the dense gas-liquid flow very close to the nozzle exit.

Key words: laser correlation velocimetry; dense; gas-liquid two-phase flow; spray; imaging analysis

引 言

高浓度流场在能源工程领域比较多见, 但是对

于高浓度流场的测试一直以来是流场诊断领域的一大难点。多普勒方法^[1-2]和相关性方法^[3-7]是两大流场测速技术, 前者具有极高的空间和时间分辨率,

2007-03-09 收到初稿, 2007-07-30 收到修改稿。

联系人: 王勤辉。第一作者: 吴学成 (1978—), 男, 博士后。

基金项目: 国家留学基金项目。

Received date: 2007-03-09.

Corresponding author: Prof. WANG Qinhui. E-mail: qhwang@cmeec.zju.edu.cn

Foundation item: supported by China Scholarship Council.

但是它要求测量体中同时只允许出现单个颗粒，因此限制了其在高浓度流场的应用前景；后者的空间和时间分辨率相对较低，但对流场的要求较低，可以应用于部分高浓度流场。激光双焦测速技术是相关测速的经典方法，在流场测速领域应用广泛，但是光路系统复杂、成本较高，采用后向散射接收，对激光和检测器要求较高。而激光双光束测速技术光路简单、成本低，但是测量结果是光路所经历流场的平均值，若采用探针模式则会干扰流场。在对喷嘴出口附近爆破区高浓度高速度流场的研究中，Chaves 等^[8]首次采用一种激光相关测速系统 (laser correlation velocimetry, LCV) 对其速度进行了测量，该系统是对传统激光双焦点测速仪的改进，利用简单的成像系统在喷雾主流方向形成了两个直径和间距极小的测量体，当流体颗粒依次通过测量体时，检测器将会接收到一对相关信号，然后通过相关性分析来确定流体速度，它基本上不受浓度、颗粒形状等因素的限制，而且空间分辨率较高，光路系统简单，成本较低，因此，具有较大的应用潜力。

目前有关此类激光相关测速技术及其应用的报道不多^[9-10]，对该光学系统和信号特点的分析还不充分，特别是对测量体有效长度的认识还比较含糊。由于光信号的特点直接影响到信号采样及处理时参数的选择，因此，需要从理论上对前向成像系统、信号特点以及数据处理参数选择和优化方法等进行研究。本文搭建了基于成像的 LCV 实验系统，并进行了如下几方面的研究工作：从理论上研究了透明球形颗粒在成像系统中的成像规律，理论计算了颗粒穿过测量区域时探测器所检测到的信号的特点，最后对测量区域在光轴方向的有效测量长度进行了分析；利用模拟的 LCV 信号，研究了信号相关性处理的参数选择，如窗函数及其宽度、信号预处理等；在 LCV 实验系统上对一脉冲喷雾爆破区进行了测试，研究了不同脉冲宽度下测试区流场速度变化规律，以及喷雾流场轴向和径向速度分布。

1 基于成像的相关测速系统

LCV 光路系统如图 1 所示，激光经透镜汇聚成一定束腰直径的高斯光束照射颗粒流场，在另一侧布置一块成像透镜把束腰所在的颗粒流场按较高的放大倍率成像到像平面上。在像平面上沿 X_i 方

向垂直对称布置两个光纤探测器，根据成像原理其实就相当于在物平面上形成了两个虚拟的测量体，测量体的直径由探头直径和成像放大倍率决定，测量体在 Z 轴方向的有效长度 L_{mv} 与成像系统有关，而它们的间距 Δx 则由探头的间距 $\Delta x'$ 和成像放大倍率 γ 决定。当颗粒在物平面内沿 X 方向运动时，将依次经过两测量体，探测器检测到一对相关信号，若两信号的延迟时间 Δt 已知，就可以获得颗粒的运动速度 $u = \Delta x / \Delta t$ 。该装置的特点是通过成像系统可获得直径很小、间距极短的两测量体，通常为数十微米，因此空间测量精度很高；而 Δt 可以简单地通过对信号的互相关计算得到，抗干扰能力较强。

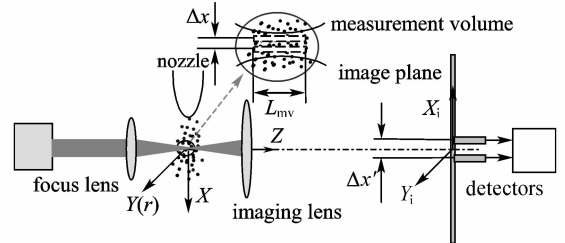


图 1 LCV 光路系统及测速原理

Fig. 1 Optical layout and measurement principle of laser correlation velocimetry

本实验系统采用的光源为 He-Ne 气体激光器，功率 $P_1 = 30 \text{ mW}$ ，波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ，光束直径 $d_1 = 1.5 \text{ mm}$ 。汇聚透镜和成像透镜焦距分别为 15 cm 和 20 mm ，成像放大倍率 γ 为 50 。像平面上多模光纤探头直径和距离分别为 1 mm 和 2 mm 。根据成像系统，物平面内形成的虚拟测量体直径和间隔分别为 $20 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}$ 。信号接收和处理系统由雪崩二极管 (APD)、带通滤波器、数字示波器、计算机及自行开发的信号处理软件组成。

2 光路系统理论分析

对高浓度流场进行测试时，测量区域中往往有很多个颗粒存在，而且颗粒的形状也不限于球形。由于理论上不能对这种情况进行模拟和计算，而且多个颗粒的情形可以不严格地简化为若干个单个颗粒结果的叠加，本文研究单个球形颗粒在该成像系统中产生的信号，具有一定的参考价值。所用的计算程序为任宽方所编的基于广义米理论 (generalized Lorenz-Mie theory, GLMT) 的成像程序^[11-14]。计算参数与所建的 LCV 实验台一致，

颗粒为相对折射率 $n=1.333$ 的液滴，假设颗粒速度 $u=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.1 光信号特点

不同粒径颗粒沿 X 轴运动时测量系统获得的信号如图 2 所示。可以看出，当颗粒经过测量体时，光信号强度降低，显示出“阴影成像”的特点；对于大的颗粒，其信号在“阴影”中心出现了光强波峰，且颗粒粒径 d_p 越大波峰越明显。对信号进行频谱分析可以发现，不同粒径颗粒产生信号的频谱分布有所不同，但频谱范围基本相同，当 $u=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，频谱范围为 $0\sim 800\text{ kHz}$ ，因此，颗粒粒径对信号频谱影响较小。但是不难发现，颗粒运动速度是信号频谱范围的重要因素，与其呈正比，信号采样频率应根据流体的速度选取相应的值，满足对信号的不失真采样。

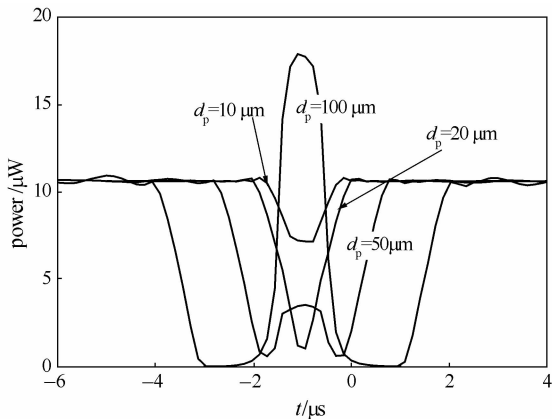


图 2 不同粒径颗粒沿 X 轴运动产生的信号
Fig. 2 Optical signals received by detector when different size particles moving along X direction

探头的尺寸对所获得的信号有较大影响。如图 3 所示，探头直径 d_0 较小时，信号细节信息丰富，基本反映了成像面的光强分布，但信号强度较弱；探头直径增大，光强明显增加，但信号趋于平滑，细节信息丢失，将不利于信号检测和处理。研究表明，探头尺寸与所测粒子像的尺寸为同一数量级时，所获信号包含颗粒产生光强变化的主要信息。

2.2 测量体有效长度

测量体的尺寸直接影响到测量方法的空间测量精度，尺寸越小测量精度越高。对于 LCV 光学系统，其测量体可简化为两个相互平行的沿光轴方向的圆柱体，每个圆柱体截面直径由光纤探头的直径和成像放大率决定，圆柱体的长度则由光学系统决定。目前有关测量体长度学者们有不同的看法，

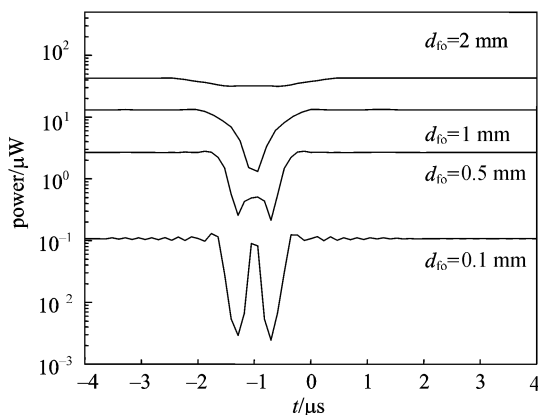


图 3 不同直径探头获得的信号比较
Fig. 3 Signals received by detectors with different diameters ($d_p=20\text{ }\mu\text{m}$)

Schugger 等^[10]认为利用大口径透镜可将其控制在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右，而 Chaves 等^[8]则认为测量体长度由激光光束所经历的整个颗粒流场的宽度所决定。

本文通过模拟计算研究测量体长度。当颗粒在物平面外经过测量区域时，物平面上也会有一定的光强分布，但此时信号的幅值比颗粒在物平面内的情形要小。若幅值小于原来的 $1/e^2$ ，可认为探头无法检测到该信号。测量体长度就是探头检测到有效信号条件下颗粒在光轴方向的运动范围。以 $20\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒为例，图 4 给出了测定光信号幅度的一个示例，可以看出，本文所用的 LCV 测量系统的测量体在光轴方向的有效长度为 10 mm 左右，远大于测量体的截面直径，说明在光轴方向的精度相对较差。进一步研究发现，大口径透镜并不能明显减小测量体长度，如图 5 所示。

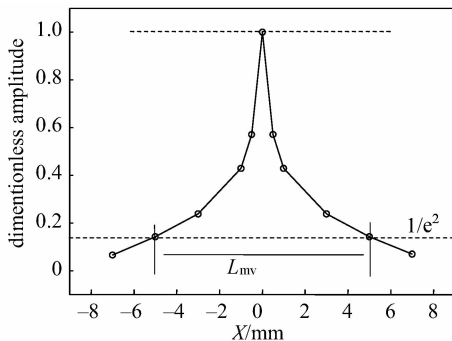


图 4 测量体有效长度判定示例
Fig. 4 Method to determine effective length of measurement volume ($d_p=20\text{ }\mu\text{m}$)

3 信号处理参数选择和优化方法

相关测速是一种经典的流体测量方法，有关相

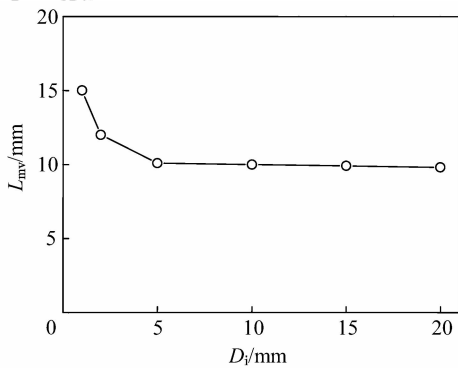


图5 透镜直径对测量体长度的影响

Fig. 5 Effect of size of imaging lens on

$$L_{mv} \quad (d_p = 20 \mu\text{m})$$

关性信号的数据处理方法已经非常成熟。但是，对于特点不同的相关信号，处理参数的选择和优化方法也不尽相同，为此，本文根据 LCV 信号的特点具体分析。处理对象为一模拟信号，由大量高斯波形的子信号依据幅度、方向和形状随机分布的原则叠加起来，并加入噪声形成。两信号的延迟时间定义成一个余弦函数，从而模拟脉冲喷雾速度先增加后减小的变化趋势。

3.1 窗口宽度选择

由于所测的喷雾是非稳态，需对其采样信号进行分段相关性计算以获得喷雾速度随时间的变化规律。分段相关性计算中窗口宽度 T_w 是一个重要参数。不同窗口宽度下对模拟信号的计算结果如图 6 所示。信号总长度 $100 \mu\text{s}$ ，噪声强度 0.2，信号主频为 500 kHz 和 150 kHz 两种，采样总点数 8192，采样频率 $f_s = 81.92 \text{ MHz}$ （相应采样间隔 $\delta = 12.2 \text{ ns}$ ），最大延迟 $1.2 \mu\text{s}$ ，测量体间距 2 mm，相关系数阈值 $R_{\min} = 0.6$ 。图中 r_u 代表有效数据率，即相关系数大于 R_{\min} 的数据占总数据的比率； ϵ 代表误差，即计算结果与实际的偏差。随着 T_w 的增加，误差 ϵ 先快速降低后缓慢增加， r_u 则反之。根据相关性计算原理， T_w 至少不能小于信号最大延迟时间 Δt 的 2 倍，实际计算中应选择更大一些为宜，模拟结果也表明了这一点。但是，信号延迟时间不是选择窗口宽度的唯一参数，信号的频谱也是需要考

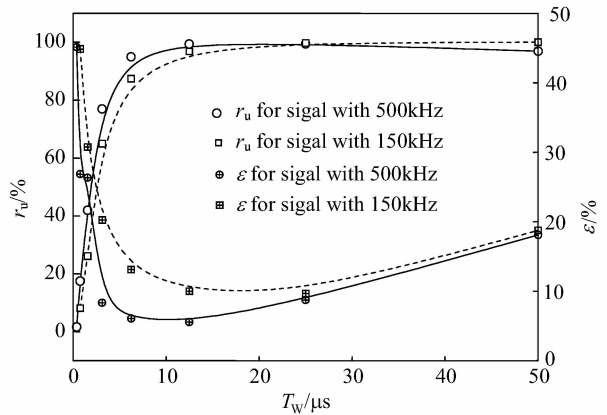


图6 窗口宽度对计算结果的影响

Fig. 6 Errors and data validation rates by using different length of windows

中应保证有若干个基元信号，才能很好地进行相关性处理。

3.2 优化方法分析

信号的相关性计算一般都是基于快速傅里叶变换 (FFT) 算法。由于进行分段相关性计算时每段信号长度较短，因此会引起功率谱溢出现象，影响计算结果的精确度。这种情况一般可以用窗函数 (汉宁窗、海明窗、Warlett 窗和高斯窗等) 进行优化。本文使用不同的窗函数对模拟信号进行了处理，结果表明窗函数降低了计算误差。信号预平移的方法也能优化计算结果，信号预平移是先对信号进行全相关计算，获得平均延迟，把其中的一个信号按照平均延迟相对于另一信号进行预平移，然后进行分段相关性计算。计算结果表明，通过信号预平移后，平均误差从 6.37% 下降到 5.60%，有效地提高了计算准确度。其他一些优化方法，如插值拟合等，也能一定程度地降低计算误差，由于是常用的方法，本文不作详细介绍。

4 喷雾测试实验结果及分析

对一实际脉冲喷雾速度进行了实验测量。喷嘴出口直径 $d_n = 200 \mu\text{m}$ ，喷雾压力为 0.25 MPa，喷雾由脉冲发生器进行触发和控制，脉冲宽度和间隔可调。喷嘴固定在小型的三维位移控制台上以便精确控制位置。为研究方便，定义一个三维的坐标系。原点为喷嘴出口平面的中心（注意与图 1 所示有所区别），激光的投射方向为 Z 轴方向，喷雾的射流方向为 X 轴方向，Y（或 r）方向为喷雾的径向方向。喷嘴产生的最大理想喷雾速度，可通过

Bernoulli 定理进行估算, 在本实验工况下最大理想速度为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (可作为参考)。需要提到的是, LCV 所获得的速度是喷雾在射流方向上的轴向速度分量, 因此, 一般情况下应低于理想速度。

实验获得的典型的信号如图 7 所示, 采样频率 10 MHz, 脉冲宽度 4 ms, 测点位置为 (2.11 mm, 0, 0)。实验中发现绝大部分信号都在头部区域有不连续区域存在, 如图 7 (a) 中的 A 框所示。Leick 等^[15]给出的没有经过滤波的单个高速喷雾原始信号也显示了类似的情况, 这种现象可能与喷雾的开始段浓度太高或者没有颗粒群等有关。信号的频谱如图 7 (b) 所示, 可以看出, 信号主频为 170 kHz 左右, 所对应的信号周期约为 $6 \mu\text{s}$, 因此对信号做分段相关性计算时, 窗口宽度 T_w 应大于 $20 \mu\text{s}$, 另外, 若根据最低喷雾速度 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 计算, 最大信号延迟时间为 $13 \mu\text{s}$, 因此 T_w 应在

$40 \sim 70 \mu\text{s}$ 之间选择比较合适。综合以上两个因素, T_w 可取为 $51.2 \mu\text{s}$ 。对 LCV 信号的初步计算, 进一步说明了使用窗函数、对信号进行预先平移以及应用插值拟合等数据处理辅助手段可以优化计算结果。

与模拟的 LCV 信号相比, 实际 LCV 信号的相关性会受到光强的不稳定性、喷雾的扰动性等因素的影响, 所以在同一工况下, 对单一脉冲信号进行计算有时候往往得不到很好的速度变化结果, 此时, 需要对多个脉冲信号进行处理, 然后统计平均求得喷雾速度随时间的变化规律^[10]。图 8 中给出了一个典型的例子, 单次脉冲数据不足以体现喷雾的速度变化规律, 但是 5 次喷雾的结果综合起来, 基本上可比较完整地给出喷雾速度从逐渐升高然后经历一个相对平稳的高速段最后下降的变化趋势。

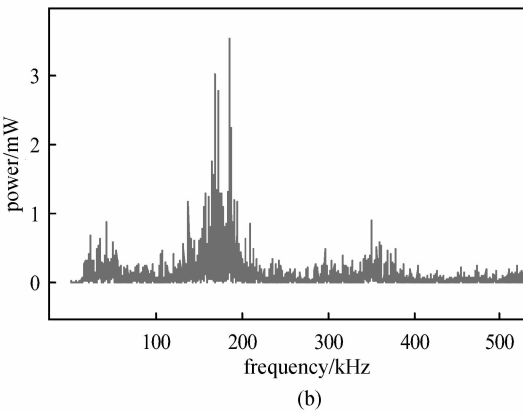
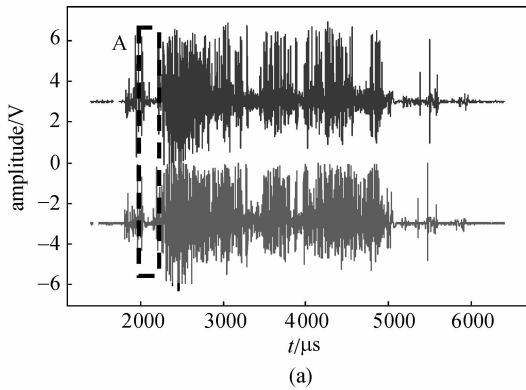


图 7 LCV 原始信号 (a)(为了显示方便, 两个信号分别进行了 3V 的上下平移) 及其频谱分析 (b)

Fig. 7 Typical LCV signals (a)(for clarity, two signals have been offset vertically by $\pm 3 \text{ V}$) and frequency spectrum (b)
($f_s = 10 \text{ MHz}$, $T_{inj} = 4 \text{ ms}$)

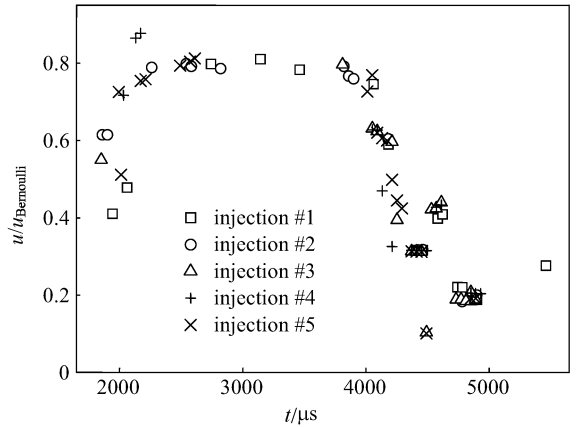


图 8 相同工况不同脉冲喷雾速度随时间的变化

Fig. 8 Spray velocity evolutions for different injections under the same working condition

($u_{Bernoulli} = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $T_{inj} = 3.2 \text{ ms}$,
 $f_s = 10 \text{ MHz}$, $\delta = 0.1 \mu\text{s}$, $T_w = 51.2 \mu\text{s}$,
Hanning window, $R_{min} = 0.6$)

4.1 不同脉冲宽度下喷雾速度场

图 9 给出了不同脉冲宽度 (T_{inj}) 下喷雾中心的速度变化, 测点布置在喷嘴出口中心向下 2.11 mm 处。结果表明, 在不同的脉冲宽度下, 喷雾的速度变化规律基本一致, 即先是时间很短的速度快速上升过程, 然后经历一个平稳的高速区, 最后以相对较慢的速度下降, 这与高压脉冲喷嘴的喷雾速度变化规律一致^[16-17]。随着脉冲宽度的增加, 高速区也相应拉长, 3 个工况下, 高速部分的速度绝对值都比较接近, 为理想速度的 80% 左右, 说明喷雾过程中的摩擦和雾化等因素将部分势能转化为

了内能，另外，由于 LCV 测量体长度大于所测喷雾宽度，所得速度为测量体内所有颗粒速度的某种加权平均值。

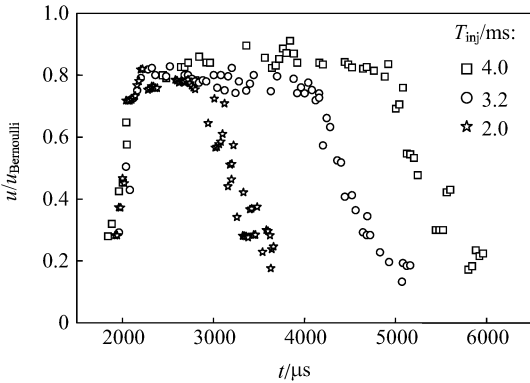


图 9 不同脉冲宽度下喷雾速度变化
Fig. 9 Spray velocity evolutions with different pulse widths T_{inj}

4.2 喷雾速度轴向分布规律

图 10 为沿喷嘴的中心线各处喷雾的喷雾速度变化规律，脉冲宽度为 2 ms。结果表明，随着测量区域的下移，信号和速度变化曲线都越来越滞后，这是因为喷雾从喷嘴出口运动到越远的地方所需的时间就越长。喷雾的初始段特点是速度加速，随着测量区域的下移，喷雾到达测量区域的总时间加长，因此所检测到的喷雾初始速度也开始升高。在 $X=1$ mm 处，喷雾初始速度仅 0.17 左右（以 Bernoulli 理想速度 $u_{Bernoulli}$ 为基准），在 $X=3$ mm 处，初始速度上升至 0.4 左右，而到 $X=5$ mm 处，已经检测不到速度上升段，而直接进入了高速段，初始速度约为 0.7。

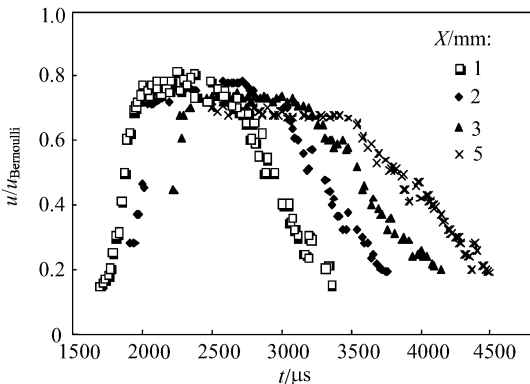


图 10 不同轴向位置处喷雾速度变化
Fig. 10 Spray velocity evolutions at different X positions ($T_{inj}=2.0$ ms)

不同时刻喷雾沿轴向的瞬时速度分布如图 11 所示。可以看出，在示波器触发后 2 ms (t) 时，

由于喷雾刚开始，示波器只检测到距喷嘴出口较近的测点的信号 (X 为 1、2 mm)。随着时间的推移，喷雾开始运动到离喷嘴出口较远的测点，在 $t=2.5$ ms 时，各测点的喷雾速度都比较高。随后，距喷嘴出口较近测试点的速度开始持续下降，而较远测试点的速度仍旧比较高，如 t 为 3、3.5 ms 所示曲线。最后，较远测试点的喷雾速度也开始下降 ($t=4$ ms)，最后都降为零。

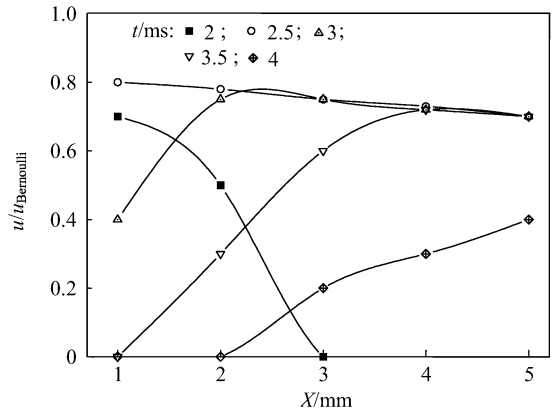


图 11 喷雾轴向速度分布
Fig. 11 Spray velocity axial distribution as function of time ($T_{inj}=2.0$ ms)

因此，利用 LCV 获得的脉冲喷雾轴向速度分布较好地显示了喷雾的发展过程。

4.3 喷雾速度径向分布规律

以脉冲宽度为 2.0 ms 的喷雾工况为例，图 12 给出了距喷嘴出口 2 mm 处不同径向位置 (r 为 0、300、600 μm) 的喷雾速度变化。结果表明，不同径向位置处喷雾的速度变化规律相似，即速度上升段、高速段和下降段。但是随着测量区域从喷雾中心向外侧移动，喷雾速度总体呈下降趋势，喷雾的长度变短。由于在射流过程中，外围液体受到气体的冲击比中心要剧烈，因此更多的能量转化为径向扰动动能和内能，喷雾的轴向速度自然就下降了。

图 13 给出了喷雾速度的瞬时径向分布代表性的曲线。 $t=2.2$ ms 代表了脉冲喷雾的发展阶段，喷雾还没有达到最大速度，直径较小，仅为 400 μm ，速度分布较陡峭；当 $t=2.5$ ms 时，喷雾中心的速度达到了最大值，为 0.8 左右，喷雾直径达到 800 μm ，速度分布比较平缓；当 $t=3.2$ ms 时，喷雾直径变小，总体速度下降。总体上，喷雾的瞬时径向分布以喷雾中心线为对称轴呈高斯或正态分布，陈白欣等^[18]利用 LDV 系统对喷嘴下游（非爆

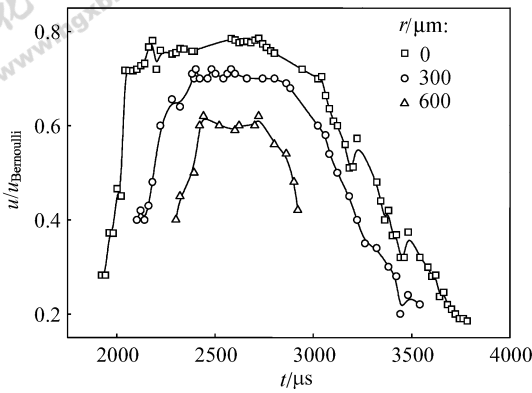


图 12 不同径向位置喷雾速度变化
Fig. 12 Spray velocity evolutions at different radial positions
($X=2\text{ mm}$, $T_{inj}=2\text{ ms}$)

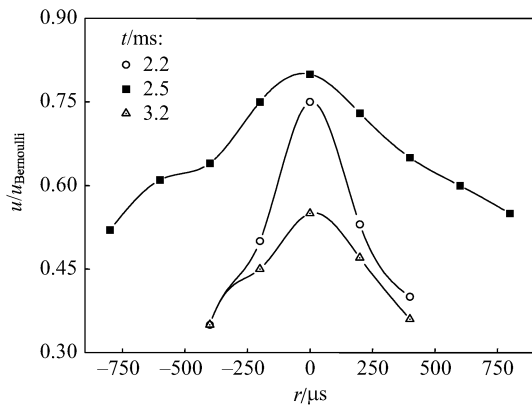


图 13 不同时刻喷雾速度径向分布
Fig. 13 Spray velocity radial distribution as function of time
($X=2\text{ mm}$, $T_{inj}=2\text{ ms}$)

破区)的喷雾速度场进行了测试,指出喷雾速度沿径向呈正态分布,最大值处于轴线位置,这与本文的结论基本一致,另外,连续喷雾也有类似的结论^[19]。

5 结 论

本文对一种用于高浓度气液两相流的成像相关测速技术进行了研究。用光散射理论模拟计算了颗粒穿过测量区域时探测器所检测到信号的特点,对测量区域在光轴方向的有效测量长度进行了分析,利用模拟的LCV信号研究了信号相关性处理的参数选择和优化方法,对一脉冲喷雾爆破区进行了测试,结论如下。

(1) 信号的频谱范围受粒径影响较小,与颗粒的运动速度成正比;探头尺寸对信号影响较大,为

获得颗粒产生信号的主要信息,探头尺寸与所测粒子像的尺寸为同一数量级;典型参数下测量体长度约为10 mm,远大于其截面尺寸,与成像透镜直径关系较小,表明在光轴方向的测量空间精度较差。

(2) 窗口宽度的选择应同时考虑两个因素:相关型号的最大延迟时间和信号主频。对于LCV信号,窗函数、信号预平移、插值拟合等数据处理优化方法能有效提高计算准确度。

(3) 利用LCV测量系统成功地对一脉冲喷雾爆破区的流场进行了测试,获得了合理的脉冲喷雾速度变化和轴向、径向分布规律。

References

- [1] Durst F, Zarè M. Laser Doppler measurements in two-phase flows//Buchhave P. Proceedings of the LDA-Symposium. Copenhagen: Technical University of Denmark, 1975: 403-429
- [2] DANTECDYNAMICS. Laser Doppler anemometry: introduction to principles and applications [R/OL]. [1999]. <http://www.dantecdynamics.com/Download/slideshow/LDA/lda.zip>
- [3] Beversdorff M, Forster W, Schodl R, Jentink H W. In-flight laser anemometry for aerodynamic investigations on an aircraft. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, 27 (6): 571-586
- [4] Brummund U, Scheel F. Characterization of a supersonic flowfield using different laser based techniques//Adrian R J. Proc. 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Berlin: Springer, 2002
- [5] Ferguson T V, Mcglynn R D. Supersonic turbine nozzle flow measurements [C/OL]. [2000]. <http://www.engineeringatboeing.com/dataresources/NozzleFlowMeasurements.pdf>
- [6] Ottavy X, Trebinjac I, Vouillarmet A. Treatment of L2F anemometer measurement volume distortions created by curved windows for turbomachinery applications. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9 (9): 1511-1521
- [7] Sivo J M, Acosta A J, Brennen C E, Caughey T K, Ferguson T V, Lee G A. Laser velocity measurements in the leakage annulus of a whirling shrouded centrifugal pump//Huang T T, Otugen M V. 1994 Laser Anemometry: Advances & Applications. New York: ASME, 1994
- [8] Chaves H, Knapp M, Kubitzek A, Obermeier F. High speed flow measurements within an injection nozzle. *Proc. of SPIE*, 1993, 2052: 265-272
- [9] Chaves H, Obermeier F. Correlation between light

- absorption signals of cavitating nozzle flow within and outside of the hole of a transparent diesel injection nozzle// Yule Andrew J. *Liquid Atomization and Spray Systems*. Bremen: ILASS Europe, 1998: 224-229
- [10] Schugger C, Renz U. Influence of spray velocity and structure on the air entrainment in the primary breakup zone of high pressure diesel sprays//Wong Victor W. *Design, Application, Performance and Emissions of Modern Internal Combustion Engine Systems and Components*. New York: ASME, 2002
- [11] Ren K F, Lebrun D, Ozkul C, Kleitz A, Gouesbet G, Grehan G. On the measurements of particles by imaging methods: theoretical and experimental aspects//Durst F, Domnick J. *4th International Congress of Optical Particle Sizing*. Nurnberg: Nurnberg Messe GmbH, 1995: 97-106
- [12] Ren K F, Lebrun D, Ozkul C, Kleitz A, Gouesbet G, Grehan G. On the measurements of particles by imaging methods: theoretical and experimental aspects. *Part. Syst. Charact.*, 1996, **13** (2): 156-164
- [13] Girasole T, Ren K F, Lebrun D, Belaid S, Gouesbet G, Grehan G. Particle imaging: GLMT simulation. *J. Visualization*, 2000, **3** (2): 195-202
- [14] Gouesbet G, Maheu B, Grehan G. Light scattering from a sphere arbitrarily located in a Gaussian beam, using a Bromwich formulation. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5** (9): 1427-1443
- [15] Leick P, Bittlinger G, Tropea C. Velocity measurements in the primary-breakup region of diesel sprays at elevated back-pressures//Saito A. *Proc. FISITA World Automotive Congress*. Melbourne: Society of Automotive Engineers, 2004: 353-382
- [16] Chaves H, Kirmse C, Obermeier F. Velocity measurements of dense diesel fuel sprays in dense air. *Atomization and Sprays*, 2004, **14** (6): 589-609
- [17] Kirmse C, Chaves H, Obermeier F. Spray velocity measurements of a common rail injection system at high gas density by correlation velocimetry//Azzopardi Barry J. *19th Annual Meeting of the Institute for Liquid Atomization and Spray System (Europe)*. Nottingham: University of Nottingham, 2004: 260-265
- [18] Chen Baixin (陈白欣), Li Hongwei (李宏伟), Teng Xuchong (滕叙充), Wang Rongsheng (王荣生). LDV measurement of drop velocity in transient-periodic sprays. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering (内燃机工程)*, 1992, **13** (3): 44-50, 66
- [19] Gu Shanjian (顾善建), Fan Quanlin (范全林). Influence of downstream distance on spray characteristics of effervescent atomizers. *J. Combustion Science and Technology (燃烧科学与技术)*, 1996, **2** (4): 365-371