超音速喷流 DPIV 瞬时速度场实验测量

代 钦 魏润杰 黄 湛 申功[illegible]
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

摘 要: 介绍了采用数字式互相关粒子图像测速系统(DPIV)在测量超音速喷流实验中的应用;实验给出了设计马赫数 $Ma = 1.5$ 的小型拉瓦尔喷管在不同总压和反压比条件下,喷流速度场、流线、涡量分布等定量信息. 实验结果显示出流场中激波前后流体速度,涡量分布的明显变化,波系的结构和不同于一维管流的流动特性.

关 键 词: 互相关; 超音速射流; 激波; 数字式粒子图像测速
中图分类号: V 211.7
文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2001)06-0666-04

超音速喷流流动在一定总压和反压比的条件下,出口附近会产生激波,膨胀波,同时在自由边界上经反射后,流场中形成较为复杂的波系,对这种流动尚缺乏有效的定量测试手段. 近年来随着 PIV(Particle Image Velocimetry)技术的发展和逐步完善,已经具备了进行超音速流动全场定量测量的技术条件,并有一些研究成果,但目前利用 PIV 设备完成超音速喷流流动测量的相关报道尚不多见,如有 M. B. Alkislar 等用 3D-PIV 设备测量矩形喷口 Ma 为 1.69 的超音速流动,该研究侧重于垂直于喷流流动方向上各截面的三维速度分布[1];S. Bernero 等用 PIV,LIF 方法测量逆向流场中喷流流动的系列研究工作[2,3];C. Ross 等对有激波存在的超音速流场的 PIV 测量[4]. 本文介绍了采用本实验室自行研制的数字式 PIV 系统对超音速喷流流动的测量,实验给出速度矢量分布等流场信息,实验初步表明采用本实验系统,测量具有激波、膨胀波超音速流场 PIV 方法的可行性.

1 实验装置

1.1 PIV系统

PIV 系统组成见图 1.

1) 光源. 两台相同采用调 Q 技术的 Nd:YAG 脉冲激光器. 输出谱线倍频后为 532 nm,单脉冲最大激光输出能量为 200 mJ,脉冲重复频率为 10 Hz,脉冲宽度为 6 ns; 两台激光器在外部触发信号的控制下,以 1μs～40 ms 的间隔(视具体研究的流动速度而定)先后发出激光脉冲,持续以 10 Hz 的频率工作,形成双脉冲工作模式,同时两束激光需经过合束器完全重合;

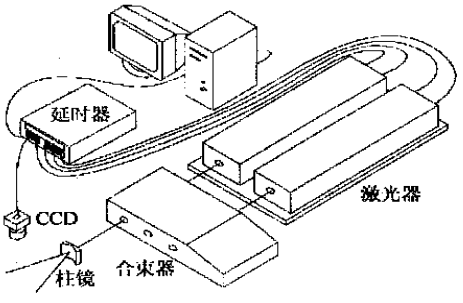


图 1 PIV 系统的组成示意

2) 图像采集系统. 选用 MEGAPLUS 型跨帧 CCD 相机,空间分辨率为 1 008(H) ×1 018(V) 像素,在双通道双曝光工作模式下,图像采集速率可达 30 帧/s,双曝光图像间隔为 1μs～1 ms 可调,能够满足超音速流动粒子图像间互相关的要求;图像采集卡支持双通道工作模式,图像传输速率为 40 MHz/s;

3) 同步控制器. 由 DG535 型延时器等输出 5 路延时信号,作为两台激光器的氙灯和 Q 开关,以及 CCD 相机曝光的外部触发控制信号,两台激光器以 1μs - 40 ms 的间隔先后发出激光脉冲,持续以 10 Hz 的频率工作,并与 CCD 的双曝光时刻同步;

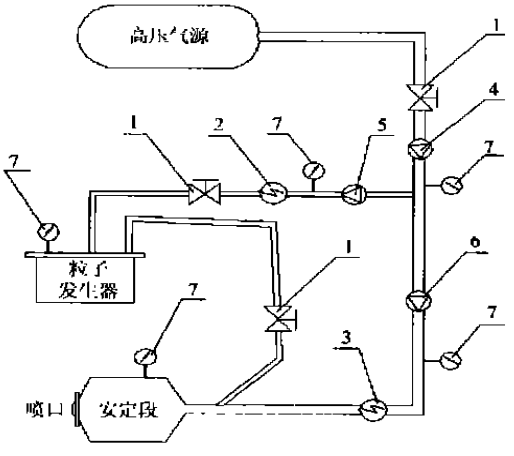
4) PIV 实验数据处理软件. 本 PIV 设备采用在 WindowsNT 操作系统下自行开发的数据处理程序,以互相关分析为主,兼有自相关分析功能,采

收稿日期: 2000-04-12
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(CNSF19393100-01-03)
作者简介: 代 钦(1967 -),男(蒙古族),内蒙古锡林郭勒人,博士后,100083,北京.

用快速傅里叶变换(FFT)和直接互相关运算两种粒子图像判读运算模式,便于对两种运算方式的结果进行分析对比,具有对整幅图像或某一局部区域划分进行不同空间分辨力判读分析的能力;运算速度快,精度高,有多种后处理功能.

1.2　超音速喷流装置

实验是在北京航空航天大学流体力学研究所的小型超音速喷流装置上进行的. 气路如图 2 所示,超音速喷管和安定段通过管道与作为高压气源的储气罐相连接,罐内气体由大型空气压缩机提供;安定段与储气罐间由两个调压阀控制气体的压强,以满足不同实验条件的要求,调压阀 6 下游有电磁阀 3 用于控制喷流的开始和关闭. 主气流管路调压阀 4,6 之间引出一支路,为粒子发生器提供高压气流,这一过程由调压阀 5 和电磁阀 2 控制,由粒子发生器产生的示踪粒子经另一支路在安定段之前注入主管路;在调压阀 6 和电磁阀 3 之间,以及安定段上均有压力表,用于观察实验过程中压力的变化情况. 电磁阀的开启和关闭由手动控制.



1 —截止阀;2,3 —电磁阀;4,5,6 —调压阀;7 —压力表

图 2　超音速喷流的实验气路布置

1.3　示踪粒子和粒子发生器

PIV 实验中示踪粒子的特性决定了实验结果的可靠性,对示踪粒子的基本要求是:①对流体良好的跟随性;②几何形状均匀、对光线有良好的散射性;③粒子在流体中分布均匀、浓度适当,以获得连续稳定的时间空间信息;④粒子无毒,无腐蚀,化学性质稳定. 对于跨超音速气体流动的 PIV 实验测量,其内部高温、高压并存,在激波、膨胀波等大速度梯度的流动区域,对示踪粒子的要求更为苛刻,需要粒径 < 1μm,并用高压注入流场. 目前通常使用的固体粉末粒子,粒径、比重大,在流场中分布不均匀;高温加热产生的油雾粒子密度稀疏,不能满足高速流动测量对粒子浓度的要求,而且压力低,难以注入具有较高压力的流场中.

在本次实验中采用了自行设计的粒子发生器,发生器内部以超音速喷嘴高压气流冲击油料形成雾化的示踪粒子,有足够的压力注入实验流场;经过测试该种粒子的形状均为球状,注入流场后分布均匀,对光线有良好的散射性,粒径小(平均粒径约 0.6μm 量级),能够满足跟随性的要求,在粒子发生器内同时使用多个超音速喷嘴的情况下,能产生足够浓度和流量的粒子,保证在超音速条件下实验段内持续保持必要和足够的粒子浓度.

2　实验过程

2.1　实验的布局

喷流装置是轴对称的拉瓦尔喷管,设计 $Ma = 1.5$,出口直径为 13.8 mm,面积比 A/A^* 为1.176. 在实验过程中拍摄的是喷口处的流动,观测范围为 1.4 cm ×1.8 cm,流动方向自右至左.

实验中使用的 Nd:YAG 激光器的激光光斑直径约为 5～6 mm,经凹面柱透镜扩束后在实验段形成的片光厚度较大,需要在扩束后用一对凸面柱透镜进行准直,如图 3 所示. 准直后的片光厚度在 1 mm,经过喷口下方的平面镜反射,在垂直方向照射喷口中心处与流动方向平行的截面,实验中 CCD 摄像头固定在与喷口相同的高度,拍摄喷流竖直断面上的流动. 由于喷口直径仅为 13.8 mm,为使该尺度(1.4 cm ×1.8 cm)的流场观测区域完全充满 CCD 相机的画面,在 CCD 相机 $f = 50$ mm定焦镜头前加装了近拍镜头.

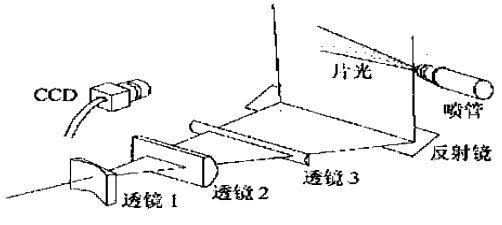


图 3　喷流实验的布局

2.2　实验过程和实验条件

实验开始前,将标有刻度的校准板置于观测区域,用 CCD 相机拍摄下来,用于标定 CCD 的像素与实际测量范围的换算关系. 由于气源空气压缩机汽缸中的压缩机油蒸发后,在储气罐中冷凝形成细小的颗粒,随气流输入实验段后会与示踪粒子混合,而对它的物理特性尚不了解,可能会对实验结果造成影响,因此高压气源须经过除油除

水处理,使在实验段内的示踪粒子全部由粒子发生器提供,以保证粒子有相同的物理特性. 实验分别测量了在安定段内压强0.3MPa和0.28MPa(绝对气压)两种工况下的流动情况,环境静压为标准大气压.

3 超音速喷流实验结果

图4～图9分别给出了在安定段内压强为0.3MPa,0.28MPa(绝对气压)时喷流速度矢量场、等速度线,流线的PIV测量结果. 从图4,图6(图中流动均为自右至左)看出在入射斜激波上游速度方向均为水平,而在激波下游,速度方向内折,流动向中心汇聚,在穿越相交形成的斜激波后速度方向重新恢复水平;图5等速度线明显反映出喷流流动的波系结构,图中看出右侧喷口附近的锥型超音速流动区域,入射斜激波在流动中轴线相遇正常相交,波后速度降低,由于在该实验工况下,激波前后速度梯度不大,没有形成强烈的剪切运动,因此没有给出该工况涡量的运算结果. 当安定段气压降低,反压相对升高时,激波强度增加,入射斜激波不能正常相交,图8显示在锥型中部形成类似于正激波的马赫盘,以及马赫盘下游的

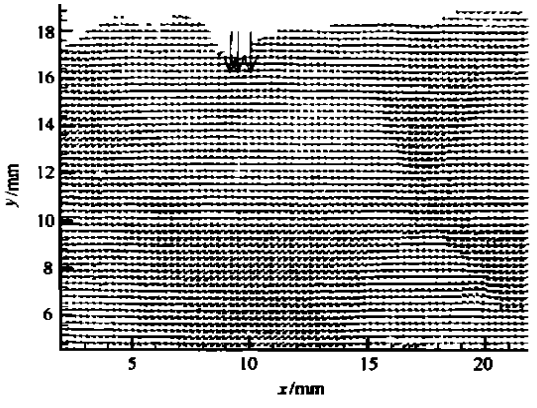


图4 速度矢量分布(安定段0.3MPa)

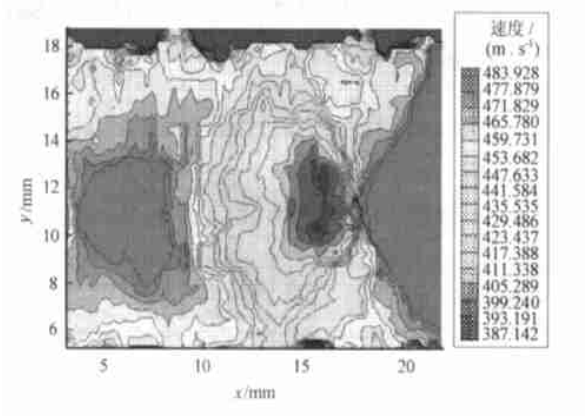


图5 等速度线(安定段0.3MPa)

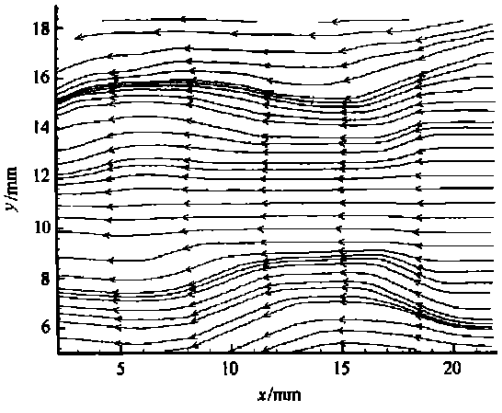


图6 瞬时流线(安定段0.3MPa)

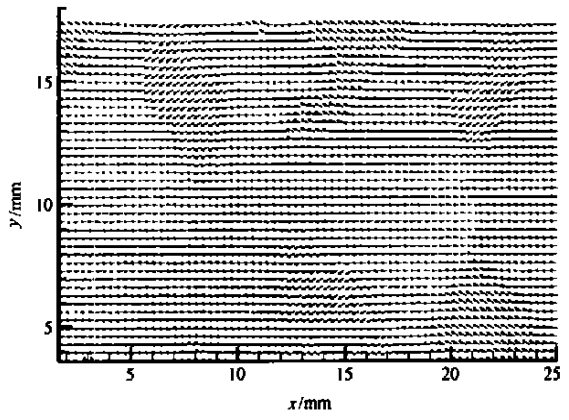


图7 速度矢量分布(安定段0.28MPa)

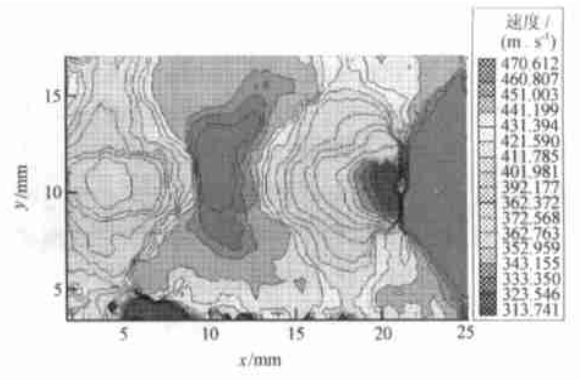


图8 等速度线(安定段0.28MPa)

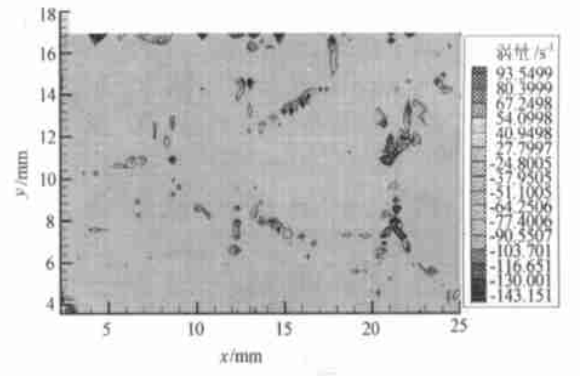


图9 涡量分布(安定段0.28MPa)

较低速流动区,入射斜激波与相交后斜激波在三合点处与马赫盘相交,在两种工况下测得锥型区域内最大流速因当地音速的不同而略有差别,分别为为 486.38 m/s 和 485.81 m/s.将实验结果和相同条件下完全气体一维等熵管流的理论结果进行对比,发现虽然两者的流场和波系的图案相似,但在反压相对较高时,各压力区的流速、入射反射激波的偏转角都有一定差别,如图 7 速度矢量分布所示,流体运动中存在较大的垂直速度分量,初步分析是由于实验过程中示踪粒子由主气流侧壁注入,使主气流产生周向的速度分量,喷口处形成有环量的喷流,则在 PIV 观测平面存在三维运动,同时管道中存在诸如摩擦等实际效应所引起;由图 9 可以看出在激波前后位置由于速度剪切作用存在较强涡量.此外,由等速度线图 8 中看出,波系的边缘还不很规则,除了改进运算方法提高对波系的识别力外,可能引起这种现象的其他原因值得进一步研究.

4　结束语

实验结果初步表明,采用跨帧 CCD 相机的 PIV 系统适合于对超音速流动现象的测量,能够反映流场中激波、膨胀波的复杂流动区域附近各流动参量的定量结果,这是传统实验手段无法实现的.另外,在图像运算过程中,跨越激波位置的判读区域内图 4～图 6 的分析结果是激波前后速度的平均值,和真实速度有一定误差,判读区域越小,造成的误差也越小,因此在激波位置判读区域的选取、网格划分和相应的运算方法都有待进一步研究和完善.

参　考　文　献

[1] Alkislar M B, Lourenceo L, Krothapalli A. 3-D PIV measurements of a supersonic jet[A]. Proc of the 3rd International Workshop on PIV'99[C]. CA, Santa Barbara, US: Univ of California Santa Barbara, 1999.

[2] Bernero S, Fiedler H E. Simultaneous PIV and LIF experiments on a round jet in counterflow[A]. Proc 1st Int Symp on Turbulence and Shear Flow Phenomena[C]. CA, Santa Barbara, US: Univ of California Santa Barbara, 1999.

[3] Bernero S, Fiedler H E. Experimental investigations of a jet in counterflow[A]. 7th European Turbulence Conference (ETGF) Saint Jean Cap Ferrat[C]. France, European Mechanics Society, 1998. 35～38.

[4] Ross C, Lourenceo L, Krothapalli A. PIV measurements in a shock-containing supersonic flow[R]. AIAA paper 94-0047, 1994.

Experimental Study of Supersonic Jet Flow Using DPIV

DAI Qin　WEI Run-jie　HUANG Zhan　SHEN Gong-xin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

Abstract: Experimental study of supersonic jet flow using digital PIV system with frame straddle CCD camera is introduced in the paper. The diameter and Mach number of the Laval nozzle exit are 13.8mm and 1.5 respectively, the vector field and wave patterns of the jet flow in different pressure ratio of the stagnation pressure with the surrounding static pressure were observed. The results show the different of flow speed and other parameter of flow field before and after the shock wave. The generation of particles and seeding method are also simply described in the paper.

Key words: cross-correlation; supersonic jets; shock waves; digital particle image velocimetry