

文章编号: 1672-9897(2009)03-0075-03

聚焦纹影显示技术在激波风洞的初步应用

徐翔¹, 谢爱民², 吕治国², 宋强², 黄洁²

(1. 西北工业大学, 西安 710072; 2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘要:为了在激波风洞试验中满足流场的密度场定量测量、三维流场显示和大视场观测, 发展了聚焦纹影显示技术。该技术具有对流场区域进行聚焦显示的特点, 获得的流场信息主要反映某个测试区域的特性。笔者对该技术的原理、系统组成、调试情况以及风洞试验结果进行了介绍。调试和试验结果表明: (1) 该系统灵敏度高, 获得的照片清晰, 使用激光光源时不受衍射和干涉噪声的干扰; (2) 该系统可以获得急剧聚焦深度小于 5mm、测试视场 (100mm) 的聚焦纹影图像, 通过改变成像平面位置可以获得不同区域的聚焦纹影图像; (3) 静态和动态聚焦纹影图像灰度变化数据将为某聚焦区域密度定量值计算奠定基础。

关键词: 聚焦纹影; 流动显示; 激波风洞; 纹影照相

中图分类号: V211.7

文献标识码: A

Application of focusing schlieren visualization system in shock tunnel experiment

XU Xiang¹, XIE Ai-min², LÜ Zhi-guo², SONG Qiang², HUANG Jie²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: To realize the quantitative measurement of flow density, 3D flow and large field flow visualization, the focusing schlieren system has been developed in the shock tunnel. The system has the characteristic of focusing on some plane, and the information gotten from the flow by the system is mainly decided by the focusing plane. The technique introduced in this paper includes the theory, the composition, the debug and the result of tunnel test. Test results show that: (1) The sensitivity of the system is high, and the image gotten by the system is clear and not disturbed by the diffraction and interference when the light source is laser; (2) The system can get the image at the condition that the sharp focus depth is less than 5mm, the measurement field diameter is about 100mm, the system can get the focusing image of different plan by changing the place of image plane; (3) Gray degree between the static and dynamic focusing schlieren image will give the important data for quantitative test of flow density.

Key words: focusing schlieren; flow visualization; shock tunnel; schlieren

0 引言

可视化风洞流场显示技术是风洞试验中获取试验数据的重要手段之一^[1], 常规的阴影仪、纹影仪、干涉仪等方法获得的流场信息反映沿整个测试光路所有流场信息的积分结果, 它们不能反映某个流场局部区域(某个流场截面)的流场信息, 致使这些方法不能对三维流及其它复杂流场进行有效地显示, 而聚焦纹影显示技术具有以下特性。

(1) 聚焦纹影显示技术的聚焦特性^[2]

在常规纹影仪中, 平行光束穿过测试流场, 在成像面上反映的是流场信息的积分效应。而聚焦纹影

系统中, 通过聚焦透镜, 系统可以对某个平面聚焦, 在像面上得到的信息主要反映该平面的密度梯度变化, 其它平面的信息以均匀背景的形式进行记录, 从而更能反映流场的细节结构。

(2) 聚焦纹影显示技术的复杂流场显示^[3-4]

对于一些复杂流场, 如高温流场因流场对流性强, 不同平面的信息相互掩盖, 很难用传统的阴影、纹影和干涉测试方法对流场结构进行清晰的描述, 而利用聚焦纹影技术的聚焦特点可以克服不同测试平面的强对流对测试区域的成像干扰。

(3) 聚焦纹影显示技术的三维流场显示及密度场定量测量^[2-4]

收稿日期: 2008-07-08; 修订日期: 2009-04-10

作者简介: 徐翔(1963-), 男, 四川成都人, 博士研究生, 研究方向: 高超声速空气动力学。

利用聚焦纹影的聚焦特性,在试验中通过改变聚焦平面就可以获得不同平面的流场信息,以此对三维流场进行显示。同时可以把该项技术和激光全息相结合^[3],再现时通过改变不同聚焦平面,这样在一次试验中就可以实现三维流场的显示。根据聚焦纹影的相关原理,对聚焦纹影照片进行处理后可以获得某一聚焦平面的密度值。

正因为聚焦纹影照相技术具有上述的特点,该技术发展后就在国外风洞流场显示中得到了广泛运用。

1 聚焦纹影的成像原理

1.1 常规纹影仪原理

基于光学方法(阴影、纹影和干涉方法)测量流场的原理是:光束穿过透明测试介质时光束会向密度增加的方向偏折。在纹影技术中,刀口置于测试视场和像接受屏之间,并挡住部分光束,图1为常规纹影仪的光学结构图。在像接受面上光的强度变化反映了沿刀口垂直方向的密度梯度变化,用公式表示为^[1-2]

$$\text{测量信号} \propto \int_{z_1}^{z_2} \sigma(z) \frac{\partial \rho(x, y, z)}{\partial s} dz \quad (1)$$

其中, $\sigma(z)$ 为扩展函数,与系统和测试位置有关, z_1 和 z_2 是光束沿光轴进入和离开测试流场的位置(如图2),垂直于刀口的方向为“s”, ρ 为密度值,在本文中设刀口的方向为“y”方向。



图1 传统纹影成像光路布置示意图
Fig.1 Optical diagram of conventional schlieren

在常规纹影仪中,一个点光源通过准直镜后产生平行光束,平行光束穿过测试区域,刀口置于光源的像面上,该系统的原理确定了在图中的成像面上不能分辨不同截面的流场信息,方程(1)中的扩展函数 $\sigma(z)$ 在整个 z_1 到 z_2 之间的测试区域为一恒定值,因而得到的密度梯度值变信息是沿光轴在整个测试区域的积分值,其成像面上光的强度变化描述为^[2]

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \frac{KF}{a} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (2)$$

这里的 $\Delta I = I - I_0$, 表示因为测试区域流场因密度梯度引起的像面光的强度变化, K 为格拉塞-戴尔常数, F 为图1中透镜3(或图3中聚焦透镜)的焦距, a 为未被刀口切取的光源像宽度。如果不同区域的流场信息相差很大(如喷流流场),则每个区域的信

息相互掩盖,获得的流场照片信息很难真实反映实际的流场信息。

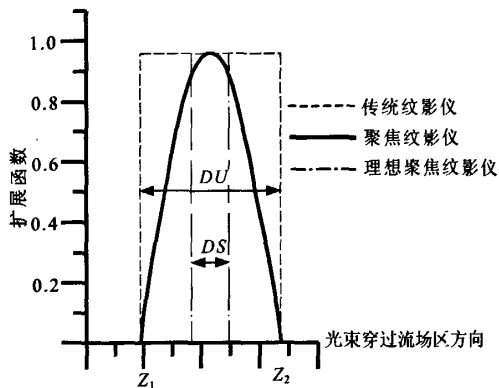


图2 纹影仪扩展函数

Fig.2 Spread function of schlieren

1.2 聚焦纹影原理

(1) 聚焦原理

R. A. Burton 在 1949 年首先提出了聚焦纹影原理^[2],到 1991 年美国 L. M. Weinstein 对这一技术进行了补充和完善后,该技术趋向成熟,并从此在国外风洞流场显示中得到了广泛的运用,并称为最有前途的流场显示方法之一^[3]。图3为典型的聚焦纹影原理图,它同常规纹影仪的共同特点是:都使用了光源和刀口;不同点是:光源可以为宽光源,非平行光束穿过测试区域,刀口为复合刀口,同时它不具有常规纹影仪的准直球面反射镜和成像球面反射镜,而代替的是使用了菲涅耳透镜、源格栅、成像透镜、刀口栅等。

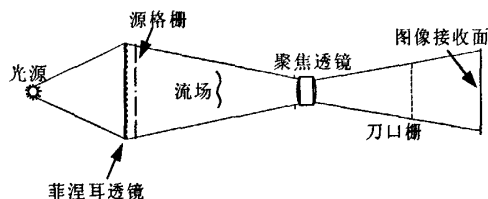


图3 聚焦纹影光路图

Fig.3 Optical diagram of focusing schlieren

众所周知,当普通照相机在景深比较小的状态时对目标聚焦,则该目标比较清晰,而目标前后的图像比较模糊。聚焦纹影系统中使用了聚焦透镜,可以对测试区域某个平面进行聚焦,该聚焦厚度“ Δz ”即聚焦透镜的景深称之为急剧聚焦深度 DS,成像面上的信息主要反映的是该聚焦厚度区域中的流场信息,其它平面的信息则以均匀的背景反映在成像面上。同普通照相一样,非聚焦平面的信息也会对成像有一定影响,该非聚焦平面称之为非急剧聚焦平面 DU。聚焦纹影系统在整个测试区域的扩展函数不是一个恒

定值,而是一个渐进函数,在急剧聚焦面上处于最大值,在远离急剧聚焦平面的非急剧聚焦面上逐渐变小。如果聚焦纹影的聚焦特性越明显,则该扩展函数越陡峭,相应地,急剧聚焦深度 DS 也越小(见图2)。

(2) 光路布置

在聚焦纹影系统光路中(如图4),激光光源(或其它宽光源)经扩束镜、柔光屏后,穿过非涅耳透镜及相靠的源格栅,再照射到测试区。聚焦透镜对测试区聚焦成像在后面的一个接收平面上,同时聚焦透镜把源格栅成像在图中放置刀口栅的位置,照相机对成像面的图像进行记录。

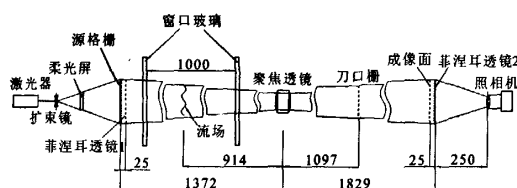


图4 0.6m激波风洞聚焦纹影光路布置图

Fig.4 Optical diagram of focusing schlieren in the 0.6m shock tunnel

从图中可以看出,该照相系统使用了复合刀口,取代了常规纹影仪的单一刀口;测试视场的大小主要取决于非涅耳透镜和源格栅的直径,以及测试目标和成像透镜的位置关系。因为大直径的非涅耳透镜和源格栅可以方便地进行加工,所以聚焦纹影系统的测试视场可以很大。

2 聚焦纹影系统的设计

尽管聚焦纹影系统适合大视场流场显示、密度场定量测量,三维流场显示等,但这些特点不能在某一特定的聚焦纹影系统都可以满足。如大视场聚焦纹影系统的急剧聚焦深度大,不适合进行三维流场显示。本文建立的聚焦纹影系统是以密度场定量测量为目的,但其定量测量的详细分析和试验结果将在以后的文章中进行论述。

(1) 非涅耳透镜

将奇数波带或偶数波带挡住的特殊光阑称为非涅耳波带片,有条形和方形波带片。由于它的聚光作用类似一个普通的透镜,而且在成像方面它也类似于普通透镜,所以又称为非涅耳透镜,但它可作为一个类似光栅的衍射屏来使用,使光源均匀地照射到测试区。

在加工中先用铜制作模具,然后对塑料片进行加压等工序制作而成。

(2) 源格栅

它是由一系列明暗相间的条纹组成,加工时直接在光学玻璃上刻线后染色,对条纹间距精度及条纹直线度要求都很高。采用的明暗条纹尺寸分别为2mm和6mm,其直径与非涅耳透镜的尺寸一样为300mm,其实物图如图5所示。



图5 源格栅实物图

Fig.5 Picture of source grid

(3) 刀口栅

采用照相的方法把源格栅按一定比例缩小制成负片,并复制在光学玻璃上来获得,对源格栅缩小复制时的锐度及清晰度要求都很高。比例的大小由聚焦透镜及相互的位置确定。我们采用的源格栅和刀口栅的尺寸比例约为10/1。

(4) 聚焦透镜

聚焦透镜满足普通透镜的成像公式,同时要求该透镜组消除色差、球差等像差。根据透镜成像公式可以确定各光学元件的安放位置及测试区的聚焦位置。根据测试流场及窗口的距离,以及考虑系统的景深因素,设计的聚焦透镜焦距为440mm,成像口径为 $\Phi 100\text{mm}$ 。

(5) 照相装置

为了满足空间分辨率的要求,采用高分辨率大幅($\Phi 100\text{mm}$)底片作为像的接受介质。

3 验证试验及应用

3.1 原理性验证试验

首先在实验室完成了聚焦纹影系统的安装和调试,并获得了点燃蜡烛的动态照片(光源为白炽光源),图6为两个不同截面区域的蜡烛火焰流场的聚焦纹影照片。从照片上可以看出气流的微小扰动都会引起强烈的明暗变化,从不同位置的蜡烛可以看出聚焦特性明显,即不在聚焦位置的蜡烛气流基本上作为均匀背景反映在成像面上,从而证明该系统的聚焦特征明显,原理性实验是成功的。

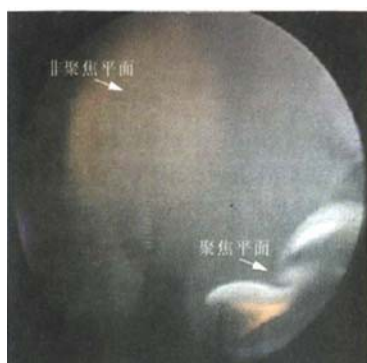


图6 位于不同区域的两支点燃蜡烛流场的聚焦纹影图像
Fig.6 Focusing schlieren image of two candles burning at different plane

3.2 在激波风洞中应用研究

在中国空气动力研究与发展中心超高速所的2m激波风洞和0.6m激波风洞中进行了聚焦纹影系统的初步应用。在2m激波风洞中,为了观察弓形激波,对模型的头部中心平面进行聚焦。该风洞的两观察窗的距离为3m,源格栅和聚焦透镜的距离为5m,根据相关公式^[2]可计算出该聚焦纹影系统的急剧聚焦深度DS约11mm,非急剧聚焦深度DU为56mm。在0.6m激波风洞中,源格栅和聚焦透镜的距离为3m,急剧聚焦深度DS约4.6mm,非急剧聚焦深度DU为50mm。采用的激光光源脉宽为10ns,脉冲能量约20mJ。

(1) 试验条件

在2m激波风洞试验中采用的模型为球头半径7.5mm的锥体,流场马赫数为9.3,迎角为 10° ,自由流密度为 $6.05 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ 。0.6m激波风洞中试验模型为带凹凸台阶的锥模型,迎角为 0° ,自由流密度为 0.1816 kg/m^3 ,自由流马赫数为6.386。

(2) 试验结果

图7是在2m激波风洞中获得的锥体绕流聚焦纹影图像,聚焦面位于模型中心。该图像清晰反映了锥体绕流的弓形激波和边界层,从而说明系统具有很高的灵敏度。尽管使用了激光光源,并进行了宽光源转换,但图像中并未出现常规纹影使用激光光源时不可避免的衍射和干涉条纹,说明聚焦纹影的宽光源特征明显。

图8为0.6m激波风洞中获得的带凸台阶锥模型聚焦纹影图像(聚焦面位于模型中心),该图像的流场结构清晰,其边界层的特征明显。

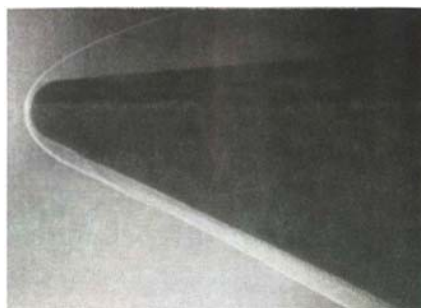


图7 在2m激波风洞上获得的聚焦纹影图像
Fig.7 Focusing schlieren image in the 2m shock tunnel

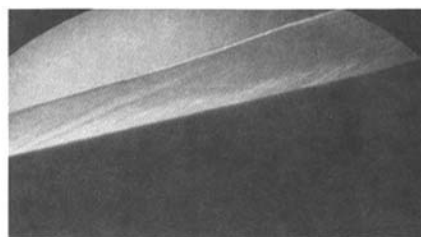


图8 在0.6m激波风洞上获得的某模型聚焦纹影图像
Fig.8 Focusing schlieren image of convexity model in the 0.6m shock tunnel

图9为0.6m激波风洞中获得的带凹台阶锥模型底部流场的聚焦纹影图像,聚焦面距离模型中心剖面16mm。从该图像可以看出,流场中的涡结构清晰。根据有、无流场条件的图像灰度数值,通过图像处理的方法容易获得某一聚焦面上灰度变化大小,为密度值定量分析奠定了基础^[4]。



图9 在0.6m激波风洞上获得的某模型聚焦纹影图像
Fig.9 Focusing schlieren image of convexity model in the 0.6m wind tunnel

4 结论和下一步工作设想

(1)在中国空气动力研究与发展中心超高速所的激波风洞中首次应用聚焦纹影系统获得了聚焦纹影照片,从该照片可以清晰地看出流场的结构变化、模型表面的边界层和涡结构特征;

(2)应用聚焦纹影的聚焦特性并结合相关理论,可以获得流场的密度定量值;

(3)用聚焦纹影系统的光学元件易加工特点,可以建立测试视场更大(大于 $\Phi 1\text{m}$)的流场显示系统;

(4)下一步研究目标:把聚焦纹影技术和全息技术相结合,以期望在一次试验中可以获得不同截面的聚焦纹影照片,实现脉冲流场的三维流场显示。

致谢:

在该技术的方案论证中张志成、曾学军、柳森等同志提出了建设性的建议;在试验过程中得到了王庆歆、姜华、王娣、廖强等同志的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 范洁川等. 流动显示与测量[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [2] WEINSTEIN Leonard M. An improved large-field focusing schlieren system[R]. AIAA-91-0567, 1991.
- [3] DOGGETT Glen P and CHOKANI N. A large-field laser holographic focusing schlieren system[R]. AIAA 92-3936, 1992.
- [4] COOK S Prize and CHOKANI Ndaona. Quantitative results from the focusing schlieren technique[R]. AIAA-93-0630, 1993.

(上接第 74 页)

- [6] TSUBOI T, HOZUMI T, HAYATA K, et al. Study of diesel spray combustion in air containing burnt gas using a shock tube [J]. Combust Sci. Technol, 2005, 177, 513-537.
- [7] CADMAN P. Shock tube combustion of liquid hydrocarbon sprays of toluene[J]. Phys. Chem. Chem. Phys, 2001, 3: 4301-4309.
- [8] HANSON R K, SEITZMAN J M, PAUL PH. Planar laser-fluorescence imaging of combustion gases[J]. Appl Phys, B, 1990, 50(6): 441-454.
- [9] FRANK J H, KALT P A M, BILGER R W. Measurements of conditional velocities in turbulent premixed flames by simultaneous OH PLIF and PIV[J]. Combustion and Flame, 1999, 116: 220-232.
- [10] DONBAR J M, DRISCOLL J F, CARTER C D. Reaction zone structure in turbulent non-premixed jet flames from CH-OH PLIF images[J]. Combustion and Flame, 2000, 122: 1-19.
- [11] JEFFREY M D, MARK R G, THOMAS A J, et al. OH planar laser-induced fluorescence imaging in a hydrocarbon-fueled scramjet combustion[C]// Proceedings of the combustion Institute, 2000, 28: 679-687.
- [12] KAMEL M R, MORRIS C I, STOUKLOV I G, et al. PLIF imaging of hypersonic reactive flow around blunt bodies[C]// Twenty-sixth symposium on combustion, The combustion institute, 1996: 2909-2915.
- [13] TRANTER R S, GIRI B R, KIEFER J H. Shock tube/time of mass flight mass spectrometer for high temperature kinetic studies [J]. Review of Scientific Instrumentation, 2000, 78: 034101.
- [14] TIMMLER J, ROTH P. Measurements of high temperature evaporation rates of solid and liquid aerosol particles[J]. Int. J Heat Mass Transfer, 1989, 82: 1887-1985.
- [15] 左克罗, 霍夫曼. 气体动力学[M]. 北京:国防工业出版社, 1984.