

## 双光程纹影在高超声速流场显示中的应用

李 明, 祝智伟, 杨彦广, 谢爱民

(中国空气动力研究与发展中心超高速所, 四川 绵阳 621000)

**摘 要:** 为了解决单光程纹影系统在高马赫数、低静压流场显示中灵敏度低的问题, 研制了国内首套最大口径为  $\Phi 900$  mm 的双光程纹影系统。与单光程纹影系统相比, 双光程纹影系统具有更高的灵敏度, 能提供更多的流场细节, 能拓宽纹影技术的应用范围。通过用 LED 四色光源代替常规的彩色刀口、增加补偿透镜、优化照相物镜和精细调节 LED 四色光源, 较好地消除了试验流场重影。通过增加入射光阑, 有效减弱了试验流场中出现的光源光斑。对单光程纹影流场图与双光程纹影流场图进行了比较。在马赫数  $Ma=10$ 、试验总压为 2.0 MPa、试验总温为 1100 K、攻角为  $0^\circ \sim 15^\circ$  试验条件下, 通过双光程纹影系统, 获得了大钝头模型清晰的试验流场图像。最后分析了双光程纹影技术的优缺点及改进方向。

**关键词:** 双光程纹影; 流场显示; 高超声速; 风洞试验

中图分类号: V11 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0211001

## Flow visualization using double-pass schlieren technique in hypersonic flow

Li Ming, Zhu Zhiwei, Yang Yanguang, Xie Aimin

(Hypervelocity Aerodynamic Institute of China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to solve low sensitivity of flow visualization using a single-pass schlieren system under the conditions of higher Mach number, low static pressure, the double-pass schlieren system with  $\Phi 900$  mm caliber of light beam of spherical mirror in China, was developed. Compared with a single-pass one, higher sensitivity was obtained, and more flow detail can be provided and the range of application of the schlieren technique can be expanded through a double-pass schlieren system. The out-of-focus flow image was eliminated by replacing colorful knife edge with the LED light source of the four-color-light, by adding the compensating lens, optimizing object lens and adjusting finely the LED light source. The flow image on the common aviation vehicle (CAV) model obtained using double-pass schlieren system was compared with that obtained using single-pass schlieren one. The incident diaphragm was added before the object lens so that a light spot was removed. The vivid flow image on the big blunt model was obtained under experimental condition of Mach number 10, total pressure 2.0 MPa, total temperature 1100 K, angle of attack from  $0^\circ$  to  $15^\circ$ . The advantage and disadvantage of a double-pass schlieren system was analyzed.

**Key words:** double-pass schlieren; flow visualization; hypersonic; wind tunnel experiment

收稿日期: 2016-06-10; 修订日期: 2016-07-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB744100)

作者简介: 李明(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要从事红外测热与流场诊断的研究。Email: liming\_sccn@163.com

## 0 引言

纹影光学系统构造简单,不干扰被测流场,对光线偏折敏感,所获得的图像形象直观,在空气动力学和热力学试验中获得了广泛的应用。王殿恺针对高超声速流场波系结构复杂、激波相互作用强、激波强度差别大等特点,结合彩色滤光片设计技术和高速摄影技术,研究了斜激波相互作用产生的正规反射和马赫反射激波结构,以及斜激波与弓形激波相互作用产生的 IV 型激波干扰,得到了清晰的彩色纹影照片,展现了待测流场的复杂结构<sup>[1]</sup>。俞凯凯搭建了背景纹影(BOS)测试平台,并对设计出口  $Ma=1.9$  处于严重过膨胀下的喷管出口密度场进行了测量,获得了喷管出口区域内完整的定量密度场,实验结果与数值模拟所得的波系结构及激波强度符合得较好<sup>[2]</sup>。叶继飞提出了一种能够定量测量轴对称流场密度场的纹影测量方法,构建了典型的实验系统,并基于理论分析与数值模拟结果,对所获得的实验结果进行了对比<sup>[3]</sup>。孟晟基于传统“Z”字形纹影系统,采用标准光度法对火焰温度进行了量化,将纹影量化所得到的温度曲线和热电偶所测结果值比较,证明了标准光度法对纹影火焰量化的有效性<sup>[4]</sup>。这类单光程纹影系统(光束只通过试验流场一次,通常称为常规纹影)发展时间长,技术比较成熟。而在稀薄过渡流中,用辉光放电装置进行静压为几帕的流场显示效果好、操作方便、成本低。但当试验马赫数在 8~10、试验流场静压为几十帕到一百多帕时,采用单光程纹影技术或者辉光放电技术均不能获得理想的流场图像。为了在低压流场条件下获得更好的模型绕流纹影图像,美国喷气推进实验室在试验模型的上方、流场上游距离模型几英寸的地方,放置一电极,在模型与电极之间加上 5000 V 电压,使流场气体分子电离,可以清晰显示模型头部激波<sup>[5]</sup>。采用不同波长的光,流场纹影显示效果也不同。试验表明:在马赫数  $Ma=10$ 、流场静压  $10^4$  Pa 量级的试验条件下,红色波长的光源比黄色、绿色、蓝色几种波长的光源对低压流场纹影显示效果更好。此外,通过增大球面反射镜焦距、减小光源像剩余宽度也可提高单光程纹影成像的灵敏度,但这些措施比较有限。

为了对高超声速、高马赫数流场进行直观显示,文中在单光程纹影技术的基础上,发展了灵敏度更高的双光程纹影系统。通过 LED 彩色光源代替常规的彩色刀口,优化照相物镜、增加补偿透镜组及精细调节四色光源光,有效消除纹影成像的重影,获得了马赫数  $Ma=10$  试验条件下清晰的模型纹影绕流图像。最后分析了双光程纹影技术的优缺点。

## 1 双光程纹影系统工作原理

为了对双光程纹影系统结构与单光程纹影系统进行比较,先简述单光程纹影系统工作原理<sup>[6]</sup>。单光程纹影系统工作原理如图 1 所示,从光源 1 发出的光经过聚光镜汇聚在准直镜 2 的焦点处,焦点处的光线经过准直镜 2 变成平行光线,通过风洞窗口 3、试验模型 4 与风洞试验段 5 内的流场区,再经纹影镜 6 汇聚在其焦点位置,在纹影镜的焦点位置的刀口 7,对光源像进行切割。

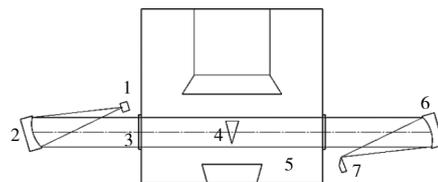


图 1 单光程纹影系统显示原理图

Fig.1 Sketch map of a single-pass schlieren system

在纹影镜的焦平面放置的刀口切割所成的像,使像在垂直方向的高减为  $h$ ,在流场没有扰动时,成像屏幕上任一点的光强是常数,此光强可以表示为:

$$I=k \cdot I_0 \cdot b \cdot h/f_2 \quad (1)$$

式中: $I$ 为光强; $k$ 为比例系数; $I_0$ 为原始光强; $b$ 为光源像在水平方向的长度; $h$ 为光源像的高度; $f_2$ 为纹影镜焦距。

由于流场的不均匀,使光线偏转了一小角度  $\varepsilon$ ,在垂直刀口方向上,扰动光源像位移了  $\Delta h$ ,角位移所产生的光源像位移为:

$$\Delta h=f_2 \tan \varepsilon_y=f_2 \cdot \varepsilon_y \quad (2)$$

光强的变化量为:

$$\Delta I=k \cdot I_0 \cdot b \cdot \Delta h/f_2 \quad (3)$$

由可压缩流场理论公式得:

$$\varepsilon_y=\int_{z_2}^{z_1} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (4)$$

由公式(1)~(4),可得到照相屏幕上光强的变化率为:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\varepsilon_y \cdot f_2}{h} = \frac{f_2}{h \cdot n} \cdot \int_{z_2}^{z_1} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (5)$$

由公式(5)知道,纹影法中光强的变化率反映了流场中折射率的变化。

公式(2)~(5)中, $\varepsilon$ 为光线偏折角; $n$ 为气体折射率; $x$ 为垂直于光传播方向的坐标; $y$ 为垂直于光传播方向的坐标; $z$ 为沿光传播方向的坐标。

与采用单次平行光通过试验流场的单光程纹影系统相比,双光程纹影系统采用单球面反射镜,利用发散光通过试验流场,如图 2 所示。从光源 1 发出的光束,经过聚光镜 2 会聚,再经补偿透镜 3、分光镜 4、平面反射镜 5、风洞窗口玻璃 6、试验模型 7 周围流场区域,照射在球面反射镜 8 上,再经球面反射镜 8 反射,第二次通过流场试验。在风洞试验段 10 内,试验模型 7 在高超声速试验气流 9 的作用下,试验模型 7 周围产生激波,当光线通过该流场区域时,将发生不同程度的偏转。从试验流场返回的光束,经分光镜 4,被刀口 11 切割,通过成像物镜 12 成像。由于光束受到两次扰动,光线的偏折角加倍,灵敏度比单光程纹影系统更高,即:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{2\varepsilon_y R}{h} = \frac{4\varepsilon_y f_2}{h} \quad (6)$$

式中: $R$ 为球面反射镜半径( $R=2f_2$ )。公式(6)与公式(5)相比,可见双光程纹影系统的灵敏度比单光程纹影系统提高了 4 倍<sup>[7]</sup>。

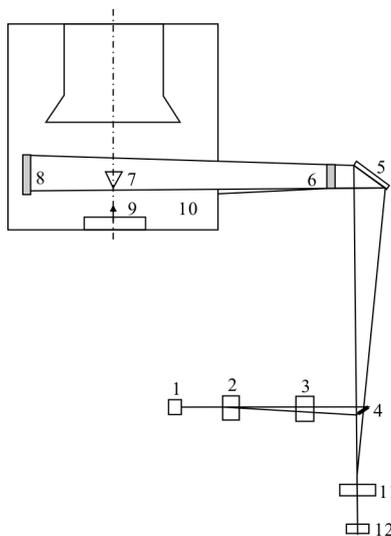


图 2 双光程纹影系统工作原理图

Fig.2 Sketch map of a double-pass schlieren system

## 2 试验设备和测试仪器

### 2.1 高超声速低密度风洞

试验分两期进行,前期验证试验在小型高超声速低密度风洞开展,后期应用试验在大型高超声速低密度风洞中进行。小型高超声速低密度风洞是一座连续式跨流域风洞,模拟高度为 30~94 km,其工作介质为氮气,试验马赫数有  $Ma=5\sim 10$ 、 $Ma=12$ 、 $Ma=16$  及  $Ma=24$ ,最高前室气流总温为 1650K。大型高超声速低密度风洞模拟高度为 60~100 km,前室总温在 1100~3100K 范围内可调。试验介质为空气,试验马赫数有  $Ma=10$ 、 $Ma=12$ 、 $Ma=16$  及  $Ma=20$ 。

### 2.2 球面反射镜

球面反射镜通光口径为  $\Phi 900$  mm,相对口径为 1/10。具有左右、上下(俯仰)的调节能力,可显示的流场区域约为  $\Phi 836$  mm。为了确保光束来回两次通过同一点,球面反射镜应尽量靠近流场<sup>[7]</sup>,为此将球面反射镜放置于风洞试验段内,通过一定方式与风洞试验段底部连接,并通过减震装置和镜面保护罩,来减少振动和保护镜面。为了显示试验模型头部和尾部,该球面反射镜可沿平行导轨移动。

### 2.3 LED 彩色光源

在试验初期,采用 532 nm 波长的激光作为光源。但在高超声速流场显示时,为了提高流场显示灵敏度,刀口切割光源像较大(即  $h$  较小),在流场图像中容易产生许多衍射环。用 LED 彩色光源更换激光光源,可以减少激光的衍射效应,同时克服因分光镜分光导致光能的减弱。LED 彩色光源采用红色、绿色、黄色、蓝色四种波长的光,每组光源用光纤耦合方式输出,发散角度小于  $8^\circ$ ,每种颜色对应的光纤直径小于 0.8 mm,光纤出口处功率大于 2 W。

### 2.4 刀口

光源的四色光在球面反射镜的焦面处形成相应的彩色光源像。采用两组水平刀口和垂直刀口分别切割相应的光源像。每个刀口的切割都可独立调节,水平刀口与垂直刀口不共面。

### 2.5 试验模型与试验条件

选用了两种外形的试验模型。前期验证试验模型为通用航空飞行器(CAV)模型。CAV 模型由某种环氧树脂材料加工而成,模型长为 200 mm,翼展宽

为 52.6 mm, 高为 35.2 mm。试验条件为: 马赫数  $Ma=7$ 、静压  $P=179\text{ Pa}$ 、攻角  $\alpha=12^\circ$ 。后期应用试验模型为大钝头模型, 模型长 150.0 mm, 最大截面直径 151.0 mm。试验条件为: 马赫数  $Ma=10$ 、静压  $P=47\text{ Pa}$ 、攻角  $\alpha=0^\circ\sim 15^\circ$ 。

### 3 讨论与试验结果

为了解决成像重影问题, 通过改进照相物镜的设计, 使球面反射镜形成的像远离成像平面, 而让试验扰动区的像成像于成像平面, 来减弱纹影成像的重影。同时, 在光路中增加补偿透镜组, 使球面反射镜焦距产生微小的变化, 实现光路的重叠, 来消除重影。

为了消除成像视场出现的光斑问题, 如图 3(a) 右上角处的光斑, 在照相物镜前加入一入射光阑, 去除部分杂散光斑; 同时, 调节彩色光源光和分光镜, 使光源光斑从视场右上角移动到视场中央, 直至光源光斑聚焦成小点, 掩盖在模型背景中, 如图 3(b) 所示。图 3(c) 为通过单光程纹影系统获得的模型绕流图像, 可以看出通过双光程纹影系统获得的模型流场图像图 3(b) 能展示更多的流场细节: 靠近模型壁

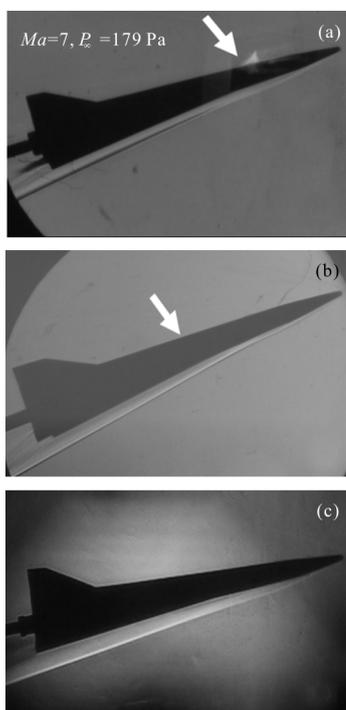


图 3 单光程与双光程流场图比较

Fig.3 Comparison between a single-pass and a double-pass flow image

面边界层内气流温度高, 气流密度低; 从模型头部到尾部的激波层内, 壁面附近的气流膨胀, 形成了低密度区, 通过模型壁面附近较暗的颜色区显示出这些低密度区, 而图 3(c) 激波层内的颜色几乎一致。

由于双光程纹影系统采用发散光, 离视场中心越远, 通过该系统获得的激波图像变得越厚。为了解决激波变厚问题, 参考文献[8]给出了两种方法: 一是移动双光程纹影系统或者试验设备, 使激波出现在视场中央; 二是在小型试验设备上使用或者观察小的视场。实际上, 由于风洞试验现场的光学系统比较笨重及试验设备大小与型号安装好后, 很少搬动和更改。同时光源、聚光镜、补偿透镜、分光镜、刀口、成像物镜具有多个自由度, 调试比较困难, 调试过程可能影响纹影成像结果, 如图 3(a) 与图 3(b) 中激波的区别。通过精细调节和多次调节, 获得了比较理想的大钝头模型流场图像, 如图 4 所示。如果采用单光程纹影系统, 在如此高的马赫数流场及低的流场静压条件下, 是难以得到试验流场图像的。

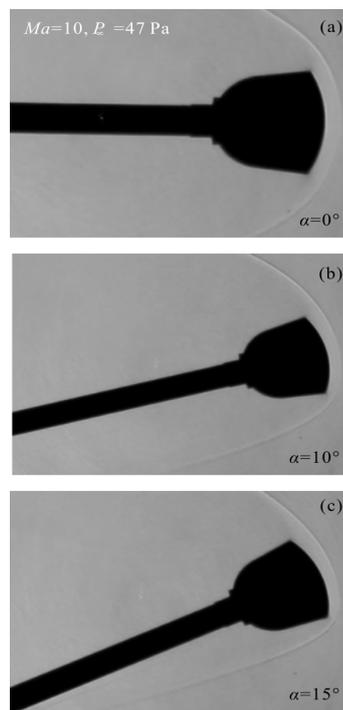


图 4 不同攻角条件下获得的大钝头纹影图

Fig.4 Schlieren image on the big blunt model at different angle of attack

### 4 结论

(1) 利用双光程纹影系统获得的 CAV 模型流场

图,清晰地显示出激波层内不同气流密度区域,而单光程纹影流场很难获得这些流场细节。

(2)在马赫数  $Ma=10$ 、静压  $P_\infty$  为 47 Pa、不同攻角试验条件下,通过双光程纹影系统,获得了大钝头模型清晰的流场结构图;采用单光程纹影系统,不能获得理想的试验流场图像。

(3)双光程纹影技术特别适合高超声速、高马赫数、低压试验流场显示,灵敏度高,能提供较多的流场细节,但调试复杂,调试过程对试验结果影响较大,可以将光源、聚光镜、补偿透镜、分光镜与刀口、成像物镜集成在相互垂直的导轨上,降低调试的难度。另外,参考文献[8]提出将球面反射镜改为抛物镜,从而将发散光变换成平行光的方法也值得借鉴。

#### 参考文献:

- [1] Wang Diankai, Hong Yanji, Li Qian, et al. Color schlieren for hypersonic shock wave structures[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1710–1714. (in Chinese)  
王殿恺, 洪延姬, 李倩, 等. 高超声速波系结构的彩色纹影显示技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1710–1714.
- [2] Yu Kaikai, Xu Jinglei, Tang Lan, et al. Density measurements of nozzle under over-expanded condition using background oriented schlieren technique [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(6): 832–838. (in Chinese)  
俞凯凯, 徐惊雷, 唐兰, 等. 基于 BOS 的过膨胀喷管出口密度测量[J]. 推进技术, 2015, 36(6): 832–838.
- [3] Ye Jifei, Hong Yanji. Quantitative measurement of density by color schlieren based on axial symmetry field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3335–3338. (in Chinese)  
叶继飞, 洪延姬. 轴对称流场的彩色纹影密度场定量测量[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3335–3338.
- [4] Meng Sheng, Yang Zangjian, Wang Mingxiao. Application of quantitative schlieren method in flame temperature measurement [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(4): 65–69. (in Chinese)  
孟晟, 杨臧健, 王明晓. 纹影量化在火焰温度测量中的应用[J]. 实验流体力学, 2015, 29(4): 65–69.
- [5] Lukaszewicz J. Hypersonic Experimental Method [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2006: 481–482. (in Chinese)  
J 卢卡西维茨. 高超音速实验方法 [M]. 国防工业出版社, 2006: 481–482.
- [6] Yang Zuqing. Flow Visualization Technique [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2002: 105–131. (in Chinese)  
杨祖清. 流动显示技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 105–131.
- [7] Li Guichun. Aero-Optics [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2006: 411–415. (in Chinese)  
李桂春. 气动光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 411–415.
- [8] Gottlieb J. Evaluation of a double-pass schlieren system[G]. Suffield Memorandum, 1968: 54–67.