

文章编号: 1001- 2486(2010) 01- 0001- 05

BOS 技术在流动测量中的应用*

何霖, 易仕和, 赵玉新, 田立丰, 程忠宇

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 背景纹影技术是新近提出的一种流动显示技术。与纹影、干涉等传统流动显示方法相比, BOS 技术不仅具有高时空分辨率, 同时还可以对流场密度梯度场进行定量测量。根据 BOS 技术的原理, 搭建了一套 BOS 系统, 采用该系统测量了蜡烛火焰上方的热对流流场, 得到了热对流流场的瞬态流动结构, 验证了 BOS 系统的性能。在此基础上, 采用 BOS 系统对超声速混合层进行了实验研究, 得到了超声速混合层的精细空间结构和密度梯度场的定量分布, 实验结果充分体现出了 BOS 技术在流动测量中的巨大优势。

关键词: BOS; 纹影; 流动显示; 密度梯度; 定量测量

中图分类号: V211 **文献标识码:** A

The Application of BOS in Flow Measurement

HE Lin, YI Shi-he, ZHAO Yu-xin, TIAN Li-feng, CHENG Zhong-yu

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Background oriented schlieren (BOS) is a new technique for flow visualization. Compared with schlieren and interferometry, BOS can measure density gradient quantitatively with high spatiotemporal resolution. Based on its principle, a BOS system is set up in this paper. Using this system, the thermal convection flow field over a candle flame is measured, and its transient flow structure is visualized. The whole process verifies the performance of the BOS system. Then, a supersonic mixing layer is studied, its fine flow structures and quantitative density gradient distribution are acquired. The results show obvious advantages of BOS in flow measurement.

Key words: BOS; schlieren; flow visualization; density gradient; quantitative measurement

在流动测量中, 基于折射率场的非接触式测量方法是一类常用的流动显示方法, 如纹影、阴影和干涉等^[1]。但纹影、阴影主要用于定性测量, 在定量测量方面存在不足; 干涉方法虽然可以实现定量测量, 但其测量结果的分辨率较低, 无法满足对精细流动结构测量的要求。Meier 于 1998 年提出的 BOS 技术弥补了上述流动显示方法的不足^[2], 该技术具有较高的时空分辨率, 能够定量测量密度梯度场, 借助重构方法可定量测量流场的密度分布。目前, BOS 技术在风洞实验和户外全尺寸流场的测量中得到了广泛的应用^[3-6]。另外, Elsinga 等人还将 BOS 技术和彩色纹影技术进行了比较^[7], 两种方法的实验结果吻合, 但 BOS 技术体现出更高的时空分辨率和测量精度; Sourgen 等人将数值模拟的结果与 BOS 的测量结果进行了比较^[8], 验证了 BOS 技术的合理性; Erik 等人对如何提高 BOS 技术的灵敏度、准确度和分辨率进行了讨论^[9]。为研究 BOS 技术在流动测量中的应用, 本文搭建了一套 BOS 系统, 通过对蜡烛火焰上方的热对流流场和超声速混合层的实验测量, 研究了 BOS 技术运用于流动测量的能力。

1 BOS 技术的基本原理

BOS 技术的原理与传统的纹影方法类似, 利用气体折射率与流场密度梯度之间的关系, 进行光学非接触式流动测量, 但 BOS 技术借助数字图像处理技术的互相关算法进行数据的后处理, 可以定量获取流场的信息。其操作方法是在所需测量的流场区域的两侧分别放置一幅背景图案和一台数码相机, 使

* 收稿日期: 2009- 06- 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672178, 10772168)

作者简介: 何霖(1982-), 男, 博士生。

用数字相机对背景图案成像。当流场没有流动时,用数字相机拍摄一幅背景图案的像,作为参考图像。流场建立后,流场中密度梯度的存在会使流场的折射率发生改变,光线通过这样的流场时会发生偏折,背景图像相对于参考图像有相对位移,位移的大小与对应流场区域的折射率梯度沿对应光路的积分结果成一定的比例关系,将此时相机拍摄的背景图案作为实验图像。图1为BOS技术原理的示意图,其中, Z_i 为像平面到相机透镜组的距离, Z_B 为背景到相机透镜组的距离, Z_D 为流场中心到背景的距离, ε 为光线的偏折角, Δy 为参考图像和实验图像上对应点之间的相对位移, $\Delta y'$ 为 Δy 在背景上的虚位移。根据光线在连续折射率场中的偏折理论可知,光线总是朝着较高折射率方向偏折,且只有垂直于光线的折射率梯度的分量是起作用的,对应的偏折角可用下式表示:

$$\varepsilon = \int_{Z_D - \Delta Z_D}^{Z_D + \Delta Z_D} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (1)$$

根据图1所示的几何关系及透镜组成像公式可知:

$$\Delta y = \frac{\varepsilon Z_D Z_i}{Z_B} = \frac{\varepsilon Z_i f}{Z_B - f} \quad (2)$$

借助数字图像处理技术,对实验图像和参考图像进行互相关计算,可以得到实验图像上各点相对于参考图像上对应点之间位移 Δy 的大小,利用式(2)可以计算得到 ε 的大小。对于单一组份的气体,由Gladstone-Dale公式, $n-1 = G(\lambda)\rho$,可以计算得到流场密度梯度的定量分布。

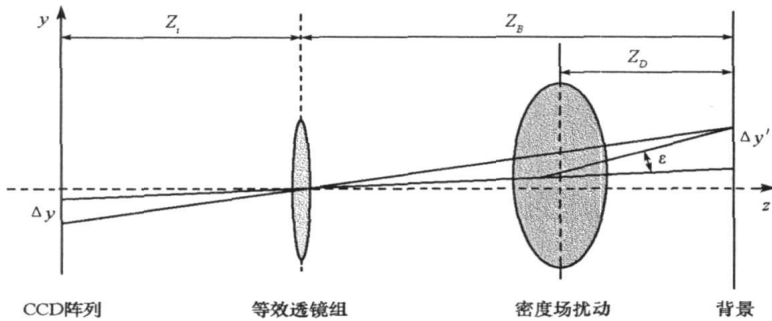


图1 BOS技术原理示意图

Fig. 1 Sketch of BOS

2 BOS系统组成

根据BOS技术的原理,搭建了一套BOS系统。系统包括一台CCD相机,其分辨率为 2048×2048 ,背景图案,照明光源,以及其他一些辅助设备。本文实验的背景图像为人工生成,其上面是一些不规则分布的点状图案,为了提高后期图像互相关计算的精度,点的密度和大小应满足在实验图像中,一个点对应一个像素的大小,而一个互相关计算的查问区内要有10至20个点。借助已经成熟的PIV系统的后处理软件,可以大大提高实验图像和参考图像互相关计算的效率。由式(1)和(2)可知,通过改变实验流场与背景图案、CCD相机之间的位置,以及相机镜头的焦距,可以实现不同空间分辨率的流动测量;另外,如果采用连续光源作为照明光源,可以得到时间平均的流动结构,而采用曝光时间为纳秒量级的激光脉冲光源,可以得到瞬态的流动结构。因此,BOS系统的分辨率可以根据实验的具体需要来调整。

3 BOS测量结果

为了验证BOS技术在实际应用中的能力,同时测试所搭建的BOS系统的性能,首先采用该系统对蜡烛火焰上方的热对流流场进行了实验研究。图2和图3分别为实验时拍摄得到的参考图像和实验图像,图片的拍摄范围为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$,空间分辨率为 $0.098\text{mm}/\text{pixel}$ 。背景图案到蜡烛的距离为 500mm ,CCD到蜡烛的距离为 500mm ,镜头的焦距为 60mm ,背景点的大小为 $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 。照明光源

采用激光光源, 激光脉冲持续时间为 6ns。对两幅图像进行互相关计算后, 得到如图 4 所示的结果。图 4(a) 为背景点的位移矢量图, 图 4(b) 为背景点的位移矢量云图。从图 4(b) 中可以清楚地看到热对流流场的瞬态精细流动结构, 通过式(1)、(2)对图 4(a) 的矢量结果进行计算, 可以同时得到流场密度梯度在 X 和 Y 两个方向上的定量分布, 这些都是纹影、阴影、干涉等方法难以达到的效果, 体现出了 BOS 技术在流动测量中的巨大优势。

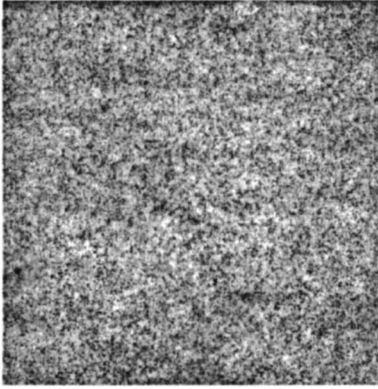


图 2 参考图像

Fig. 2 Reference image

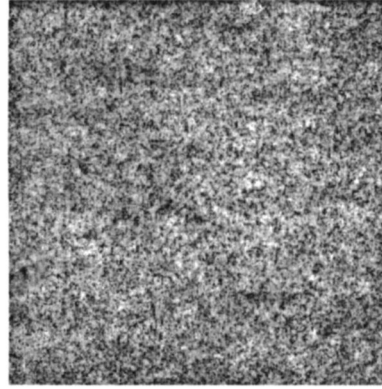
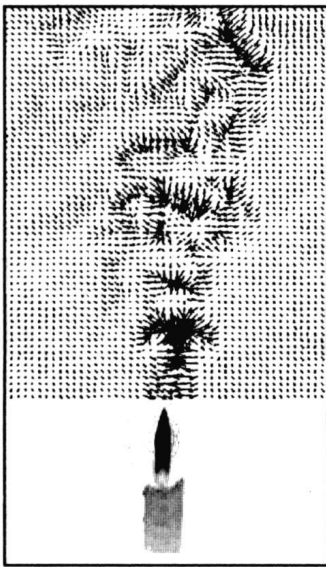
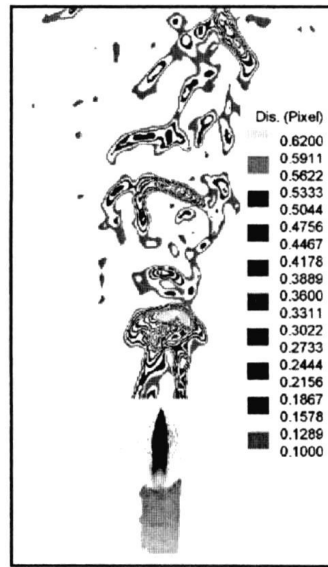


图 3 实验图像

Fig. 3 Experiment image



(a) 位移矢量图



(b) 位移云图

图 4 蜡烛火焰上方热对流流场的 BOS 实验结果

Fig. 4 BOS results of the thermal convection flow over a candle flame

在完成蜡烛火焰热对流流场测量的基础上, 采用该 BOS 系统对超声速混合层进行了实验研究, 图 5 为超声速混合层风洞的实物照片。所测量的超声速混合层对流马赫数为 $M_c = 0.2$, 低速层的流场马赫数为 2.1, 高速层的流场马赫数为 3.6。背景同样采用单脉冲持续时间为 6ns 的激光脉冲光源照明; 实验中, 背景距离混合层风洞对称面距离为 26.7mm, CCD 相机距离风洞对称面距离为 50mm, 镜头焦距为 60mm。图 6 为超声速混合层 BOS 测量结果, 拍摄范围为 $250\text{mm} \times 50\text{mm}$, (a) ~ (d) 分别为位移矢量图, 位移云图, X 方向位移云图和 Y 方向位移云图。根据混合层流动的特点, 在 Y 方向上流场具有较大的密度梯度, 而在 X 方向上密度梯度较小, 对比图 6(c)、(d) 正好反映这一特点。图 7 为超声速混合层的纹影图像, 刀口上下切割, 反映的是混合层在 Y 方向的密度梯度, 正好与图 6(d) 的结果相对应。比较图 6(d) 和图 7 可以看出, 在混合层的开始阶段, 流动为层流, 混合层的厚度较薄, 密度梯度较大; 沿着流动方

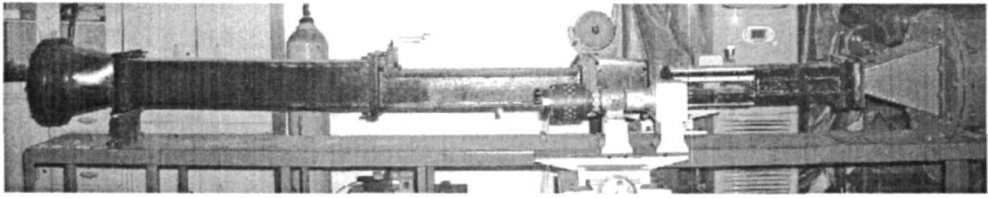
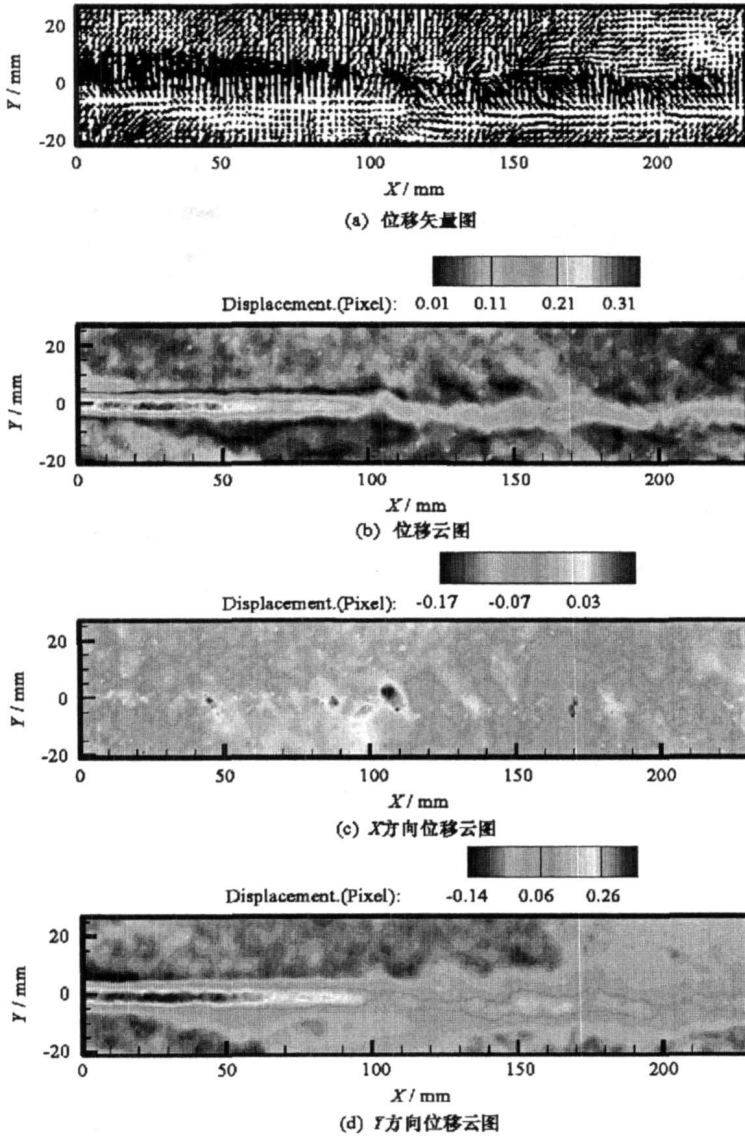


图5 超声速混合层风洞

Fig. 5 Supersonic mixing layer wind tunnel

图6 $M_c = 0.2$ 超声速混合层 BOS 测量结果Fig. 6 BOS results of supersonic mixing layer of $M_c = 0.2$

向,混合层的厚度逐渐增加,其密度梯度也逐渐减小,BOS 测量的结果与纹影图像吻合。图8为超声速混合层的NPLS图像,NPLS图像反映的是流场中纳米示踪粒子的浓度分布,考虑到纳米示踪粒子良好的流动跟随性,浓度场与流场的密度场是相对应的,所以NPLS图像也可以反映流场的密度场分布。NPLS图像中灰度高的区域对应的粒子数浓度高,说明该区域的流场密度高,而灰度低的区域对应的粒子数浓度低,该区域的流场密度低。在图8中,随着混合层向下游运动,K-H涡卷起,对应的流场区域出现灰度沿X方向的明暗交替变化,反映流场的密度以及密度梯度沿X方向交替变化,对比图6(c)可以看到,

在 $Y=0\text{mm}$ 这条直线的中段位置上,存在交替变化的密度梯度结构;随着流动向下游发展,混合层进入湍流阶段, K-H 涡破碎,在 X 方向上密度梯度交替变化的结构消失,对应于图 6(c) 的后段,之前交替变化的密度梯度结构也消失了,说明 BOS 结果与 NPLS 结果一致。通过对纹影、NPLS 和 BOS 结果的对比分析可以看出, BOS 结果真实可信,在实现密度梯度场定量测量的同时,具有高时空分辨率,可以捕获流动的精细结构。

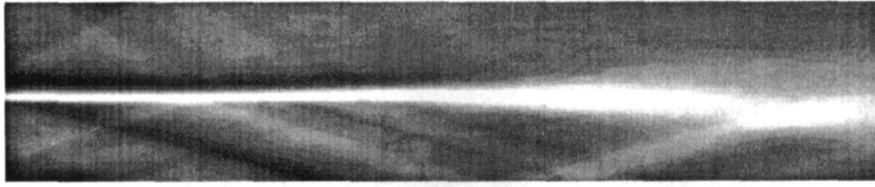


图 7 $M_c = 0.2$ 超声速混合层纹影图像

Fig. 7 Schlieren image of supersonic mixing layer of $M_c = 0.2$



图 8 $M_c = 0.2$ 超声速混合层 NPLS 图像

Fig. 8 NPLS image of supersonic mixing layer of $M_c = 0.2$

4 结论

BOS 技术是一种高时空分辨率流动显示技术,可以定量测量流场的密度梯度分布。本文搭建了一套 BOS 系统,测量了蜡烛火焰上方的热对流流场和超声速混合层流动,实验结果充分体现出了 BOS 技术的特点:(1) 定量测量;(2) 分辨率可调;(3) 可以同时测量 X 和 Y 方向的密度梯度分布;(4) 高测量精度。此外,从 BOS 技术的原理可知, BOS 技术无需其他光学设备,不仅可以用于实验室测量,还可以进行户外实验研究; BOS 系统组成简单,操作方便,易于实现,在流动测量中具有巨大的优势和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 范洁川,等. 近代流动显示技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [2] Meier G. New Optical Tools for Fluid Mechanics [C]//Proc 8th Int Symp Flow Visualization, Sorrento, Italy, September, 1998.
- [3] Richard H, Raffel M, Rein M, et al. Demonstration of the Applicability of a Background Oriented Schlieren (BOS) Method [C]//Proceedings 10th International Symposium on Applied Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July, 2000.
- [4] Ramanah D, Raghunath S, Mee D J, et al. Background Oriented Schlieren for Flow Visualisation in Hypersonic Impulse Facilities [J]. Shock Waves, 2007, 17: 65- 70.
- [5] Gaurav V, Damon R H, Julio S. Non-Intrusive Measurement of a Density Field Using the Background Oriented Schlieren (BOS) Method [C]//Fourth Australian Conference on Laser Diagnostic in Fluid Mechanics and Combustion, University of Adelaide, Adelaide, December, 2005.
- [6] Sreekanth R, David J M, Thomas R, et al. Visualization of Supersonic Flows in Shock Tunnels, Using the Background Oriented Schlieren Technique [C]//Paper 10 AIAA Australian Aerospace Student Conference 2004, University of Sydney, December 2004.
- [7] Elsinga G E, Oudheusden B W, Scarano F, et al. Assessment and Application of Quantitative Schlieren Methods: Alibrated Color Schlieren and Background Oriented Schlieren [J]. Exp Fluids, 2004, 36(2): 309- 325.
- [8] Sourgen F, Haertig J, Rey C. Comparison Between Background Oriented Schlieren Measurements and Numerical Simulations [C]//24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, Portland, OR, 2004.
- [9] Erik G, Jorg S. The Background Oriented Schlieren Technique: Sensitivity, Accuracy, Resolution and Application to a Three-dimensional Density Field [J]. Exp Fluids, 2007, 43: 241- 249.