

超声速湍流边界层气动光学效应的实验研究

丁浩林, 易仕和, 付佳, 朱杨柱, 何霖

(国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 当光线穿过超声速湍流边界层时受到湍流密度脉动的影响, 其传播方向和相位会发生变化, 使得目标图像出现模糊、偏移和抖动等现象, 给目标识别带来困难。利用基于背景导向纹影 (Background Oriented Schlieren, BOS) 原理开发的基于 BOS 的波前传感 (BOS-based Wavefront Sensor, BOS-WS) 技术获得了光波通过马赫数 $Ma=3.0$ 的超声速湍流边界层后的波前。基于波动光学原理计算出相应的点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 分布以及退化图像, 研究结果表明: 测量得到的波前结果对应的 PSF 与理想平面波前对应的 PSF 相比, 在峰值的大小、所在位置及形态上变化较大, PSF 峰值出现衰减, PSF 峰值位置出现较为明显的偏移, PSF 形态出现多峰现象, 湍流边界层内密度分布较强的空间随机性得到体现, 经此 PSF 处理后的图像出现一定程度的退化。

关键词: 气动光学; 背景纹影; 点扩散函数; 湍流边界层

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1018007

Experimental investigation of aero-optical effect due to supersonic turbulent boundary layer

Ding Haolin, Yi Shihe, Fu Jia, Zhu Yangzhu, He Lin

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: When a planar optical wavefront is made to propagate through a supersonic turbulent boundary, affected by the density fluctuation, its propagation direction and phase will change, which make target image blur, shifting, jitter et al and bring problems for target identification. By using the BOS-based Wavefront Sensing (BOS-WS) technique based on the principle of Background Oriented Schlieren (BOS), the optical wavefront propagated through a $Ma=3.0$ supersonic turbulent boundary layer was acquired. Based on the wave optics principles, the corresponding Point Spread Function (PSF) distribution and degraded image were computed. The research results show that many changes are found on the PSF peak value, peak value location and shape. The PSF peak value decreases largely, the PSF value peak position appears a significant move, the PSF shape appears multi peaks phenomenon, the spatial randomness of turbulent boundary layer density distribution is obtained, the image appears to a certain degree degradation after the PSF processing.

Key words: aero-optical; BOS; PSF; turbulent boundary layer

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-10

基金项目: 国家重大仪器研制项目(11527802); 国家自然科学基金(11172326, 11302256)

作者简介: 丁浩林(1990-), 男, 硕士生, 主要从事航天气动光学与成像制导方面的研究。Email: dinghaolin_gfkd@foxmail.com

导师简介: 易仕和(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事航天气动光学与成像制导技术等方面的研究。

Email: yishihe_gfkd@foxmail.com

0 引言

平面波前光线穿过超声速湍流边界层时,受到湍流密度脉动的影响,其平面波前出现畸变,使得目标图像出现模糊、偏移和抖动等现象,给目标识别带来困难^[1]。通过定量分析湍流对于光学系统的影响,可以采取有效的方法消除因其导致的图像畸变。Wyckham 等利用 Shack-Hartmann 传感器对高超声速湍流边界层波前畸变进行了详细地测量与分析^[2];Gordeyev 等利用 Malley 探针方法对高亚声速湍流边界层的气动光学特性进行了研究^[3];高穹等利用流场可视化手段进行密度场重构,对超声速湍流边界层气动光学效应的时间演化特性进行了研究^[4]。

由于点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 可以实现对气动光学效应中包含的抖动、偏移、模糊以及强度衰减现象的全面研究,并且可以直接作用于图像,分析气动光学效应对于图像退化的影响,近年来在气动光学研究中也得到广泛的应用。刘纯胜等对高速湍流流场光学传输效应进行了数字仿真研究,获得了不同曝光长度对应的点扩散函数结果^[5];韩志平等基于大涡模拟得出湍流瞬态密度值,计算了点扩散函数^[6]。

通过实验测量光线穿过流场产生的光程差 (Optical Path Difference, OPD) 即得到图像畸变的具体信息。2010 年,易仕和等直接利用 BOS (Background Oriented Schlieren) 测量得到的图像位移而非密度场重构得到二维气动光学波前,于 2011 年发明了基于 BOS 的波前传感 (BOS-based Wavefront Sensor, BOS-WS) 技术,并利用该技术对超声速混合层的气动光学波前进行测量^[7]。BOS-WS 技术与 Shack-Hartmann 波前传感器、干涉法一样,都可以实现二维气动光学波前测量,但相对而言,BOS-WS 技术原理简单、配置简约、成本低廉,是一种新型光学测量手段。通过改进互相关算法、合理配置背景随机点阵可以实现毫米级的空间分辨率。与此同时,通过选择行间传输 CCD 和脉冲激光光源可以实现纳秒级的时间分辨率,以保证拍摄得到的结果满足流场冻结假设,实现气动光学效应的瞬态测量,为分析超声速湍流边界层的气动光学效应提供可能。

1 BOS-WS 技术与点扩散函数计算

1.1 BOS-WS 技术^[8]

光线在变折射率流场中传播会发生偏折,导致透过流场观察到的目标偏离其真实位置,偏移量的大小和流场的折射率分布密切相关。在 BOS 系统中,背景图像和相机分别置于变折射率流场两侧,在有、无流场时采集背景图像,分别作为实验图像和参考图像,然后采用互相关算法测量背景图像上随机点的位移。BOS 技术有两种模式:PIV 模式和纹影模式。如图 1 所示,PIV 模式的配置相对简单,较为适用于户外全尺寸模型或真实流场的测量,如直升机螺旋桨周围流场、爆炸和射击等流场。相比之下,纹影模式配置较为复杂,比 PIV 模式多了一个凸透镜和光阑,凸透镜和 CCD 相机同光轴,光阑位于凸透镜的焦点位置。与 PIV 模式不同的是,纹影模式 BOS 系统中只有平行于凸透镜光轴的光线才能透过光阑,因此空间分辨率较高。

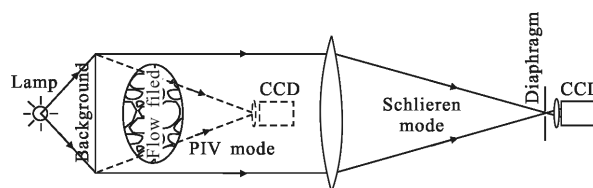


图 1 BOS 系统两种模式的示意图:PIV 模式和纹影模式

Fig.1 Schematic diagram of two BOS setup model: PIV mode and schlieren mode

如图 2 所示, H 为背景图像和变折射率场中心之间的距离, W 为变折射率场的宽度; α_y 为自 A 点发出的光通过流场后的偏折角; Δy_A 和 Δy_B 分别为背景图像上 A 点和 B 点的虚拟偏移距离; S 为平行光波通过流场后的波前方向。根据 Malus 定律,垂直于波面的光线经过任意次折射和反射,从系统出射后,光线出射的波面必定与出射光线垂直。因此,波前方向 S 与 y 轴夹角的大小等于通过该点的光线透过流场后的偏折角 α_y 。

在 $\frac{1}{2}W \cdot H$ 的情况下,根据图 2 中的几何关系可得:

$$\begin{cases} \alpha_x = \frac{\Delta x}{H} \\ \alpha_y = \frac{\Delta y}{H} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \text{OPL}(x,y)}{\partial x} = -\alpha_x \\ \frac{\partial \text{OPL}(x,y)}{\partial y} = -\alpha_y \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{OPD}(x,y) = \overline{\text{OPL}(x,y)} - \text{OPL}(x,y) \quad (3)$$

通过联立公式(1)、(2),可以利用适当的积分方法获取 OPL(x,y)的分布。

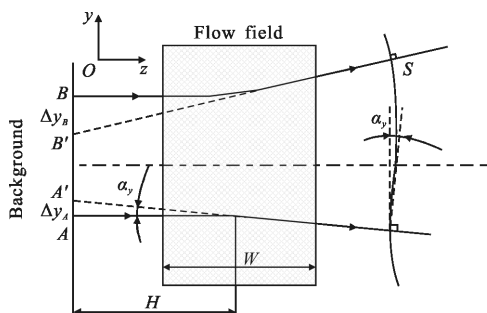


图 2 BOS-WS 系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of BOS-WS system

目前来看,积分方法主要有梯形积分算法、多项式拟合法、Southwell 算法等,其中,精度最高的算法为 Southwell 算法^[9]。图 3 所示为 Southwell 算法的积

$$\text{OPL}(i,j) = \frac{\omega_{i,j-1}\text{OPL}(i,j-1) + \omega_{i,j+1}\text{OPL}(i,j+1) + \omega_{i-1,j}\text{OPL}(i-1,j) + \omega_{i+1,j}\text{OPL}(i+1,j)}{\omega_{i,j-1} + \omega_{i,j+1} + \omega_{i-1,j} + \omega_{i+1,j}} + \left[\begin{aligned} & -\frac{h}{2H}\omega_{i,j-1}[\Delta x'(i,j-1) + \Delta x'(i,j)] + \frac{h}{2H}\omega_{i,j+1}[\Delta x'(i,j+1) + \Delta x'(i,j)] \\ & -\frac{l}{2H}\omega_{i-1,j}[\Delta y'(i-1,j) + \Delta y'(i,j)] - \frac{l}{2H}\omega_{i+1,j}[\Delta y'(i+1,j) + \Delta y'(i,j)] \end{aligned} \right] \quad (6)$$

式中:ω 表示各点的权重,考虑到边界的特殊性,则存在的点对应权重为 1,不存在的点对应权重为 0,这样就可以合理得到表示每一点的信息。

2 点扩散函数计算

文中所用实验装置的光路示意图如图 4 所示,z 轴为主光轴方向,在背景点阵上建立物平面坐标系 xOy,坐标单位为 mm;在 CCD 相机成像面上建立像平面坐标系 x'O'y',坐标单位为 pixel。

通常,点扩散函数定义为一个光学系统对理想点光源的反应。但是基于此种思路计算的点扩散函数仅可以表征强度分布,会使得光程差信息丢失,即不同的波前分布可能对应着相同(或者相似)的 PSF。利用 BOS-WS 技术测量的 OPD 结果,可以得到整

分网格图。

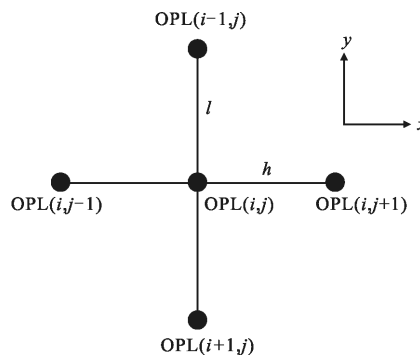


图 3 Southwell 算法积分网格示意图

Fig.3 Schematic diagram of Southwell algorithm integral grid

图 3 中,h 为 x 方向的网格间距,l 为 y 方向的网格间距。沿 x 方向,相邻两点的 OPL 有如下关系式:

$$\text{OPL}(i,j) = \text{OPL}(i,j-1) - \frac{h}{2H} [\Delta x'(i,j-1) + \Delta x'(i,j)] \quad (4)$$

沿 y 方向,相邻两点的 OPL 有如下关系式:

$$\text{OPL}(i,j) = \text{OPL}(i-1,j) + \frac{l}{2H} [\Delta y'(i-1,j) + \Delta y'(i,j)] \quad (5)$$

从图 3 所示的周围四个点,由公式(4)、(5)进行积分,对求得的四个值加权平均得到 OPL(i,j):

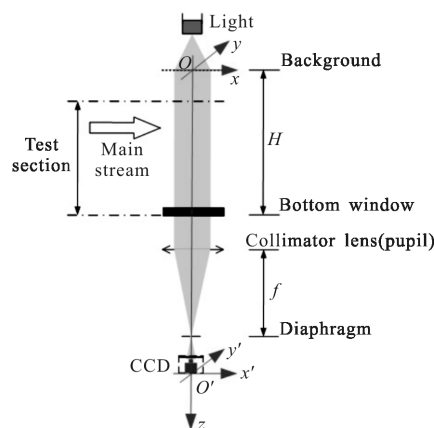


图 4 气动光学波前测量装置光路示意图

Fig.4 Schematic diagram of the optical path of aero-optical wavefront measurement device

个出瞳面上的波相差 $w(x,y)=\frac{2\pi}{\lambda}OPD(x,y)$, 对于孔径区域为 Σ 准直透镜而言, 其光瞳函数可定义为:

$$A(x,y)=\begin{cases} a(x,y)e^{j\frac{2\pi}{\lambda}w(x,y)} & (x,y) \in \Sigma \\ 0 & (x,y) \notin \Sigma \end{cases} \quad (7)$$

式中: $a(x,y)$ 为波面振幅分布; $e^{j\frac{2\pi}{\lambda}w(x,y)}$ 为波面相位分布。

采用纹影模式工作的 BOS-WS 系统, 只有平行光轴的光线才能通过光阑, 满足远场近似条件, 瞳函数为 $A(x,y)$ 的波面在像面上形成的振幅分布为:

$$U(x',y')=\iint A(x,y)\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f'}(xx'+yy')\right]dxdy \quad (8)$$

从上式可知像面的振幅分布为瞳函数的傅里叶变换。因光强正比于振幅平方, 所以

$$PSF(x',y')=|U(x',y')|^2=U(x',y')\times U^*(x',y') \quad (9)$$

式中: (x',y') 定义为像平面坐标^[10]。

3 实验结果与分析

3.1 实验装置

文中实验是在国防科学技术大学 KD-03 超声速风洞中完成的, 该风洞是一座吸气式直连超声速风洞。实验来流马赫数 $Ma=3.0$ 、总温 $T_0=300\text{ K}$ 、总压 $P_0=0.1\text{ MPa}$ 。

基于 BOS-WS 的基本原理构建了一套 BOS-WS 波前测试系统, 如图 5 所示, 该系统以脉冲 Nd:YAG

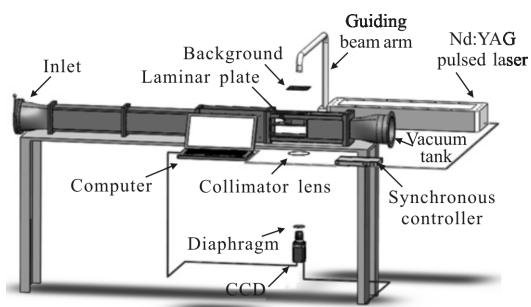


图 5 超声速湍流边界层气动光学波前测量装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of the measurement device for the aero-optical wavefront of the supersonic turbulent boundary layer

激光器为光源, 其脉冲宽度为 6 ns, 脉冲最高能量可达 500 mJ, 波长 $\lambda=532\text{ nm}$ 。采用高分辨率行间传输 CCD, 其分辨率可达 2 000 pixel \times 2 000 pixel, CCD 与

激光器之间通过同步控制器控制, 同步控制器精度高达 250 ps, 以确保激光照射背景时 CCD 同步实现曝光, 以上硬件参数决定了 BOS-WS 系统的性能, 其时间分辨率为 6 ns, 空间分辨率在毫米级。层流平板的使用可以避免实验段上壁面湍流边界层对于光线传输的影响, 与此同时, 层流的气动光学效应影响基本可以忽略不计, 从而保证测得波前结果仅为下壁面湍流边界层的气动光学效应造成的。

3.2 实验结果分析

在进行气动光学实验之前, 利用该课题组自主开发的基于纳米示踪粒子的平面激光散射 (Nano-tracerbased Planar Laser Scattering, NPLS) 技术^[8]对待测超声速边界层进行拍摄, 拍摄得到的待测边界层瞬态流场结构图如图 6 所示。像素分辨率为 91 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 时间分辨率为 6 ns。

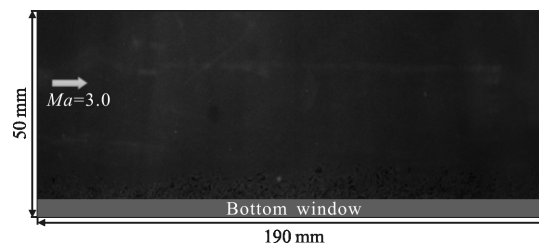


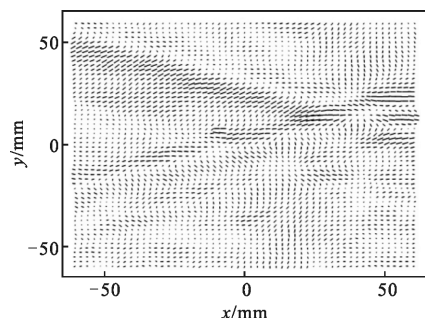
图 6 NPLS 技术拍摄的待测边界层瞬态流场结构图

Fig.6 Transient flow field structure of the boundary layer shot by NPLS

首先从主流区域可以看出, 除少数大粒子外, 整个主流区域比较均匀。对于底部窗口附近, 可以看到从上游到下游边界层形态未发生明显变化, 边界层内部达到一种平衡状态, 主要由于风洞壁面的边界层在上游的喷管段内已经自然转换为湍流流动, 所以在实验段内的湍流边界层已经得到充分发展。

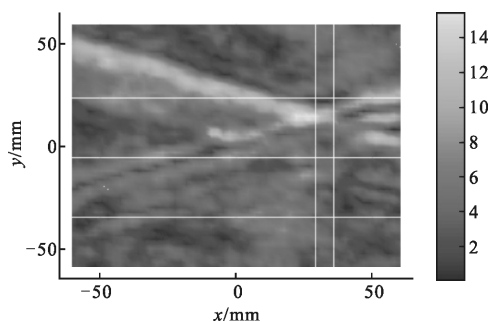
通过 BOS-WS 技术获得的气动光学畸变场如图 7 所示。光线在穿过流场后发生了偏折, 整体偏移量在 $0.038\lambda\sim 49.9\lambda$ 。图 7 的两幅图中在相同位置分别有两道交叉线, 偏移比较明显, 主要由于风洞连接处产生的马赫波向后发展, 并在观察区域内交叉, 马赫波导致密度发生较大的变化, 从而引起折射率变化, 故光线在此处的偏移量相对较大。与此同时, 由于两个马赫波的强度存在差异, 所以导致的气动光学畸变量也存在差异。在马赫波作用之外的区域可以更好地体现湍流边界层对于光线传输的影响, 从图 7(a)可以看出, 该部分对应的矢量方向体现了充

分发展湍流边界层内密度分布的随机性, 相对均匀的畸变云图分布体现了充分发展的湍流边界层内部拟序结构分布相对均匀。



(a) 气动光学畸变矢量场

(a) Vector field of aero-optical distortion



(b) 气动光学总畸变云图

(b) Image of the total aero-optical distortion

图 7 超声速湍流边界层引起的气动光学畸变分布图

Fig.7 Distribution of the aero-optical distortion induced by the supersonic turbulent boundary layer

如图 8 所示, 采用Southwell 算法重构了平面光波穿过湍流边界层后的畸变波前。由于文中观测的

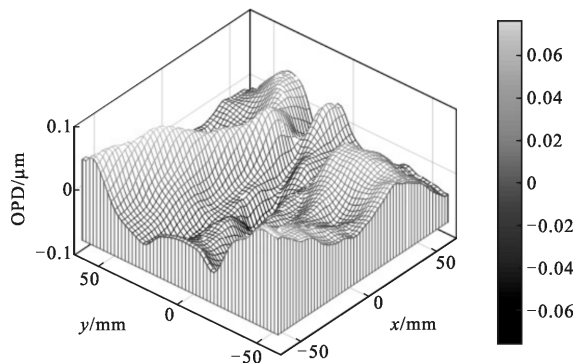
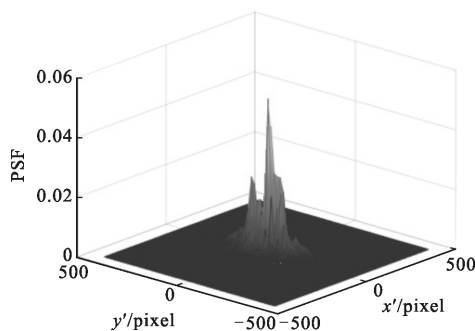


图 8 平面波前穿过超声速湍流边界层后的 OPD 分布

Fig.8 OPD distribution of plane wavefront through the supersonic turbulent boundary layer

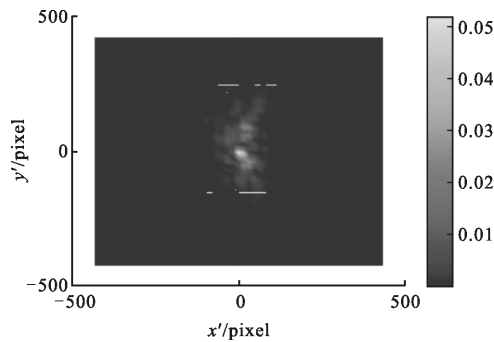
风洞实验段底部的湍流边界层已经充分发展, 所以 OPD 分布沿着 x 轴方向(流向)变化相对较小。由于马赫波的发展呈现从实验段侧壁向流场中部靠拢, 并且强度随着流动的发展不断减弱, 所以流场上游中部的 OPD 相对较小, 两波交叉点处 OPD 变大。斯特列尔比(Strehl Ration, SR)作为衡量光线强度衰减的指标应用广泛, 其定义为经过扰动流场后的光强与没有扰动流场时的光强之比。整个观测区域流场引起的光程差均方根值 $OPD_{rms}=0.056\lambda$, 基于大孔径近似原理得到对应的 $SR=0.8837$ 。

利用测量得到的波前结果和理想化的平面波前结果, 分别计算得到如图 9、10 所示的 PSF 分布图。基于瞬态湍流边界层引起的畸变 OPD 计算得到的 PSF 相对于利用平面波前计算得到的 PSF 而言, 峰值上衰减明显, 图像退化形式主要表现为模糊, 峰值所在的坐标位置也发生了变化, 图像退化形式主要表现为偏移。与此同时, PSF 存在多峰现象, 体现出湍流边界层密度分布的随机性。



(a) 立体图

(a) Three dimensional graph

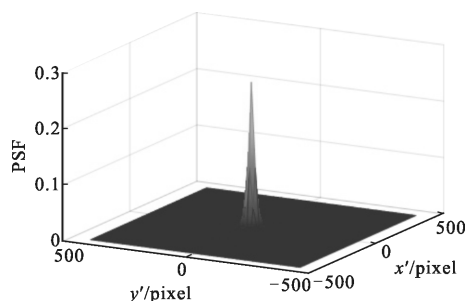


(b) 平面图

(b) Two dimensional graph

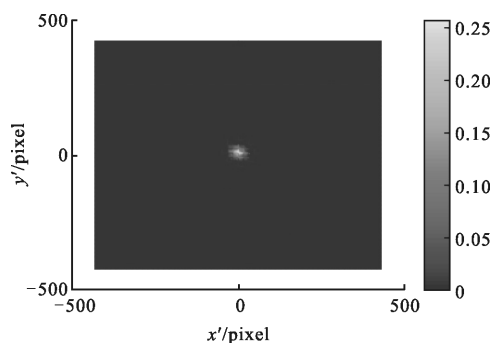
图 9 利用湍流边界层引起的畸变波前计算得到的 PSF

Fig.9 PSF calculated by using the distorted wavefront caused by the supersonic turbulent boundary layer



(a) 立体图

(b) Three dimensional graph



(b) 平面图

(b) Two dimensional graph

图 10 利用平面波前计算得到的 PSF

Fig.10 PSF calculated by using the plane wavefront

PSF 的计算实际上构建了气动光学效应与图像校正之间的桥梁,基于获得的 PSF,通过对图 11(a)进行快速傅里叶变换处理,得到了如图 12(a)所示的



(a) 原始图

(b) 图像边缘轮廓

(a) Original diagram

(b) Image edge contour

图 11 目标基准图像

Fig.11 Target reference images

退化图像,图 12(a)出现了较为明显的模糊和偏移,由于所获取的气动光学波前中引入了马赫波的影响,所以文中获得的图像退化程度比单纯湍流边界层气动光学效应导致的要严重一些。通过运用 Canny 边缘检测器对原始图像和退化图像进行边缘检测处理,分别获得如图 11(b)、图 12(b)所示的边缘

轮廓图,图像的外部轮廓和内部细节都出现不同程度的丢失。



(a) 退化图像

(b) 图像边缘轮廓

(a) Degraded image

(b) Image edge contour

图 12 气动光学畸变退化图像

Fig.12 Aero-optical distortion degraded images

4 结论

利用 BOS-WS 技术进行波前测量具有测试空间范围大(几厘米~数十厘米范围),测量时间分辨率高(6 ns 的单帧时间分辨率)的特点。文中实现了利用 BOS-WS 技术对 $Ma=3.0$ 的超声速湍流边界层气动光学波前的可靠测量,并基于该测量结果实现了利用 BOS 技术获取穿过超声速湍流边界层的光学波前对应的点扩散函数。研究表明:测量得到的波前结果对应的 PSF 与理想平面波前对应的 PSF 相比,在峰值的大小、所在位置及形态上变化较大,PSF 峰值出现衰减,PSF 峰值位置出现较为明显的偏移,PSF 形态出现多峰现象,充分发展的湍流边界层较强的空间随机性得到体现,基于该 PSF 处理的目标图像出现一定程度的退化。

参考文献:

[1] Zhang Tianxu, Hong Hanyu, Zhang Xinyu. Aero-optical Effect Correction: Principles, Methods and Applications [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press. 2014: 28-30. (in Chinese)
张天序,洪汉玉,张新宇. 气动光学效应校正-原理、方法与应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2014: 28-30.

[2] Wyckham C M, Zaidi S H, Miles R B, et al. Characterization of optical wavefront distortions due to a boundary layer at hypersonic speeds [C]//34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2003, 4308: 23-26.

[3] Gordeyev Stanislav, Jumper Eric J. Aero-optical characteristic of compressible, subsonic turbulent boundary layers [C]//34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2003: 23-26.

- [4] Gao Qiong, Yi Shihe, Jiang Zongfu, et al. Temporal evolution of the optical path difference of the supersonic turbulent boundary layer [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22: 014202.
- [5] Liu Chunsheng, Zhang Tianxu, Yin Xingliang. Aero-optical transmission effects through the high-speed turbulent flow field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34 (6): 681–686. (in Chinese)
刘纯胜, 张天序, 殷兴良. 高速湍流流场气动光学传输效应研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(6): 681–686.
- [6] Han Zhiping, Yin Xingliang. Numerical simulation of turbulent flows effect on optical images in supersonic missiles [J]. *System Engineering and Electronics*, 2002, 24(11): 78–83. (in Chinese)
韩志平, 殷兴良. 湍流对超音速导弹光学图像的影响数值仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(11): 78–83.
- [7] Zhao Yuxin, Yi Shihe, Tian Lifeng, et al. An experimental study of aero-optical aberration and dithering of supersonic mixing layer via BOS [J]. *Science China: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2010, 53(1): 81–94.
- [8] Yi Shihe, Chen Zhi, Zhu Yangzhu, et al. Progress on experimental techniques and studies of hypersonic/supersonic flows [J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2015, 36 (1): 98–119. (in Chinese)
易仕和, 陈植, 朱杨柱, 等. (高)超声速流动试验技术及研究进展[J]. 航空学报, 2015, 36(1): 98–119.
- [9] Bichal A, Thurow B S. On the application of background oriented schlieren for wavefrontsensing [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(1): 015001.
- [10] Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics (Vol. 2) [M]. Beijing: Peking University Press, 1984: 129. (in Chinese)
赵凯华, 钟锡华. 光学(下册)[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984: 129.