科学通报 2011 年 第 56 卷 第 19 期：1515 ~ 1521
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

基于 BOS 的气动光学波前测量技术研究及其应用

田立丰, 易仕和, 赵玉新, 何霖, 陈植

国防科技大学航天与材料工程学院, 长沙 410073
E-mail: zhaixing_nomin@sohu.com

2011-02-17 收稿, 2011-04-06 接受

摘要 平行光束在变折射率流场中传输时, 会偏离其原来的传播方向, 同时产生波前畸变. 根据 Malus定律, 若能测得平行光束透过流场后的偏折角, 就可得到波前畸变的空间梯度, 进而采用波前重构算法计算波前畸变的空间分布. 背景导向纹影技术(background oriented schlieren, BOS)的两个特性为测量波前畸变提供了有利条件: BOS 技术通过测量参考背景图像和实验背景图像之间的相对位移, 可对光束通过流场后的偏折角进行定量测量; 在纹影模式的 BOS 系统中, 只有垂直于背景图像的平行光线才能入射到相机, 便于研究平面光波透过流场后的波前畸变. 有鉴于此, 本文基于纹影模式的 BOS 系统, 构建了波前畸变的空间梯度和背景图像位移的定量关系, 并选用 Southwell 波前重构算法, 开发了一种测量气动光学波前畸变的新方法——基于 BOS 的波前测量技术(BOS-based wavefront technique, BOS-WT). 本文构建的一套 BOS-WT 系统, 其时间分辨率高达 6 ns, 时间相关分辨率最高可达 0.2 μs, 能够对波前的瞬态分布进行时间相关的定量测量, 而且设备简单、易于操作. 采用该系统, 研究了超声速混合层的气动光学性能, 测得了时间间隔 5 μs 的瞬态波前分布; 测量结果不仅再现了平面光波通过超声速混合层后波前的瞬态分布, 而且对比两个时刻的测量结果, 可观察波前随时间的演化规律.

关键词
BOS
气动光学
波前

光线在变折射率流场中会发生偏折, 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. 正是基于这一原理以及流场密度和折射率之间的 Gladstone-Dale 关系式, Meier 于 1998 年开发了 BOS 技术[1], 主要用于对可压缩流场密度分布的定量测量. BOS 系统中, 背景图像和相机分别置于流场两侧, 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, 进而分析流场的密度分布. 与传统纹影技术相比, BOS 实验装置简单, 而且能够同时测量垂直于光线传播方向的两个方向上的密度梯度信息. 自 BOS 技术诞生至今, 很多学者对其进行了深入研究和验证, 分析了其灵敏度、精度和分辨率. 研究结果表明, BOS 技术具有较高的精度[2~4], 但在测量脱体激波区域时, 还存在不足[3]; BOS 技术的灵敏度主要取决于实验装置的几何布局、相机分辨率和相机镜头的焦距[5]; BOS 技术的分辨率取决于查问区窗口大小、网格间距和图像放大倍数[2]. 与传统纹影技术类似, BOS 技术大都用于二维流场或轴对称流场[2~4,6,7]. 对于三维定常流场, BOS 技术可以从不同方向对流场进行测量, 再进行三维重构; 但是, 在测量三维非定常流动时, BOS 必须借助多个相机对流场进行同步测量, 然后进行三维重构[5]. 此外, BOS 技术还可以用自然环境作背景, 在室外进行全尺寸真实流场的测量[8~11].

BOS 技术运用的是气动光学原理, 赵玉新等人[12]就曾采用 PIV(particle image velocimetry)模式的 BOS 系统, 研究了超声速混合层的气动光学畸变和抖动, 却未能定量测量平面光波通过流场后的波前分布. 本文借助纹影模式 BOS 的气动光学原理, 构建背景

英文版见: Tian L F, Yi S H, Zhao Y X, et al. Aero-optical wavefront measurement technique based on BOS and its applications. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4583-z

图像位移和波前梯度之间的关系, 并采用 Southwell 波前重构算法, 开发了一套测量气动光学波前的新技术——BOS-WT. 该技术能够对波前的瞬态分布进行定量测量, 具有高时间分辨率、高时间相关分辨率和较高的空间分辨率等特点, 而且设备简单、易于操作. 采用BOS-WT技术, 本文研究了超声速混合层流场的气动光学特性.

1 BOS-WT 技术

BOS 技术有两种模式: PIV 模式和纹影模式, 如图 1 所示. PIV 模式的设备配置相对较为简单, 较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[9]、爆炸[8]和射击[10]等流场. 该模式的缺点在于, CCD 相机采集背景图像时, 大多数光线具有较大的发散角, 经过了较大的流场范围, 相应地降低了BOS的空间分辨率. 相比之下, 纹影模式的配置较为复杂, 比PIV模式多了一个凸透镜和狭缝, 凸透镜和CCD相机同光轴, 狭缝置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狭缝, 因此空间分辨率较高. 从图1可以看出, 纹影模式BOS可测的流场范围不能超出凸透镜的孔径, 因此较为适用于实验室内或者风洞流场的测量.

1.1 BOS-WT 原理

纹影模式 BOS 系统中, 只有平行镜头光轴的光线才能通过狭缝成像在相机上, 这就便于我们研究平面波前通过流场后产生的波前畸变. 正是基于纹影模式 BOS 系统的这一特性, 本文根据 Malus 定律构建背景点位移和波前畸变空间梯度之间的关系, 再采用波前重构算法计算波前畸变的分布, 开发了BOS-WT 这种新的气动光学波前测量技术.

如图 2 所示, H 为背景图像和变折射率流场中心之间的距离, W 为变折射率流场的宽度; 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. 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, 图 2 中, 波前 S 与 y 轴夹角的大小等于通过该点的光线透过流场后偏折角 α_y.

在 W 远小于 $2H$ 的情况下, 根据图 2 中的几何关系可得如下关系式:

$$\begin{cases} \alpha_x = \dfrac{\Delta x}{H}, \\ \alpha_y = \dfrac{\Delta y}{H}. \end{cases} \tag{1}$$

光程(optical path length, OPL)的变化是衡量气动光学畸变的典型参数, 二维 OPL 定义为

$$OPL(x,y) = \int_{z_1}^{z_2} n(x,y,z)\mathrm{d}z. \tag{2}$$

根据 Malus 定律和图 2, OPL 的梯度可表示为

$$\begin{cases} \dfrac{\partial OPL(x,y)}{\partial x} = -\alpha_x, \\ \dfrac{\partial OPL(x,y)}{\partial y} = -\alpha_y. \end{cases} \tag{3}$$

实际应用中, 通常不会直接测量绝对的OPL, 而是测量更为重要的参数——光程差(optical path difference, OPD), OPD 定义为

$$OPD(x,y) = OPL(x,y) - \overline{OPL(x,y)}, \tag{4}$$

其中上横线表示取空间平均. 通过(1)和(3)式求解光程 $OPL(x,y)$的分布有多种方法: 梯形积分法、多项式拟合以及 Southwell 积分算法等[13].

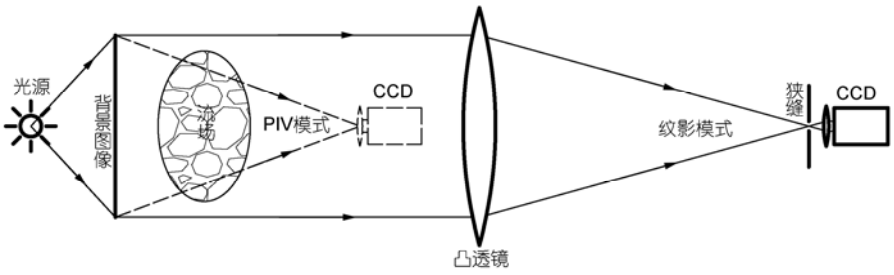


图 1 PIV 模式和纹影模式的 BOS 系统

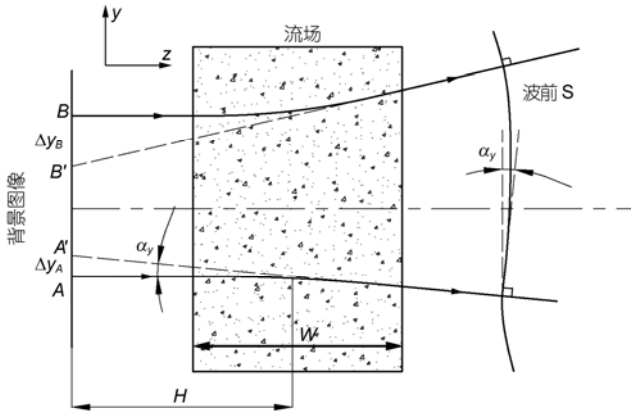


图 2　纹影模式 BOS 光路示意图

本文采用 Southwell 算法进行波前重构，该算法是一种迭代算法，对于每点的光程 $OPL(i, j)$，从如图 3 所示的其周围 4 个点进行积分，然后对求得的 4 个值取加权平均得到 $OPL(i, j)$. 从周围每个点求得的 $OPL(i, j)$表示如下:

$$OPL(i,j)=OPL(i,j-1)-\frac{h}{2H}\left[\Delta x'(i,j-1)+\Delta x'(i,j)\right], \tag{5}$$

$$OPL(i,j)=OPL(i,j+1)+\frac{h}{2H}\left[\Delta x'(i,j+1)+\Delta x'(i,j)\right], \tag{6}$$

$$OPL(i,j)=OPL(i-1,j)+\frac{l}{2H}\left[\Delta y'(i-1,j)+\Delta y'(i,j)\right], \tag{7}$$

$$OPL(i,j)=OPL(i+1,j)-\frac{l}{2H}\left[\Delta y'(i+1,j)+\Delta y'(i,j)\right]. \tag{8}$$

对以上 4 个 $OPL(i, j)$取加权平均得到

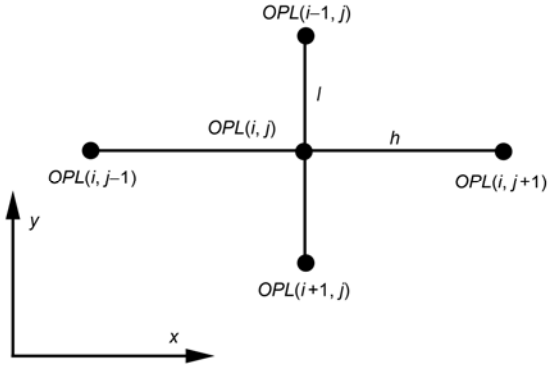


图 3　网格节点示意图

$$OPL(i,j)=\frac{\omega_{i,j-1}OPL(i,j-1)+\omega_{i,j+1}OPL(i,j+1)+\omega_{i-1,j}OPL(i-1,j)+\omega_{i+1,j}OPL(i+1,j)}{\omega_{i,j-1}+\omega_{i,j+1}+\omega_{i-1,j}+\omega_{i+1,j}}$$
$$+\frac{\left\{\begin{array}{l}-\dfrac{h}{2H}\omega_{i,j-1}\left[\Delta x'(i,j-1)+\Delta x'(i,j)\right]+\dfrac{h}{2H}\omega_{i,j+1}\left[\Delta x'(i,j+1)+\Delta x'(i,j)\right]\\ +\dfrac{l}{2H}\omega_{i-1,j}\left[\Delta y'(i-1,j)+\Delta y'(i,j)\right]-\dfrac{l}{2H}\omega_{i+1,j}\left[\Delta y'(i+1,j)+\Delta y'(i,j)\right]\end{array}\right\}}{\omega_{i,j-1}+\omega_{i,j+1}+\omega_{i-1,j}+\omega_{i+1,j}}, \tag{9}$$

其中不存在的点的权重$\omega_{i,j}$为 0，其他点的权重均取1. 计算过程中，按照(9)式对整个区域计算完后，进入下一步迭代. 迭代次数可根据相邻两步之间的相对差值决定，也可人为指定，直至计算结果收敛. 值得一提的是，Southwell方法对边界条件要求不高，即使给出的边界条件和真实情况相差甚远，但只要迭代次数足够多，也可以得到很好的计算结果；若给出的边界条件比较接近真实情况，较少的迭代就可得到较好的结果，相应地节省了计算时间.

BOS-WT 借助 BOS 测量平行光束透过流场后的偏折角，因此 BOS-WT 的精度和灵敏度取决于 BOS 系统的特性. Sourgen 等人[3]和 Elsinga 等人[4]对 BOS 的精度进行了深入研究，将 BOS 实验结果和数值模拟以及差分干涉实验结果进行了对比分析. 研究结果表明，在流场的大部分区域，BOS技术的精度在2%左右[2~4]；在锥形激波和脱体激波区域，BOS的精度相对较低，大约为 7.5%. Goldhahn 等人[5]对 BOS 技术灵敏度的研究结果表明，BOS 的灵敏度很大程度上取决于镜头焦距、流场与相机以及背景之间的距离，以及成像平面可以测量的最小偏移. 光线的偏折角ε表示为

$$\varepsilon\approx(1+m/l)\cdot v_{px}\left(\frac{g-f}{g\times f}\right)\cdot\cos^2(\beta), \tag{10}$$

式中 m 为相机和流场中心之间的距离；l 是背景图像与流场中心之间的距离；v_{px} 是相机感光片上的像素偏移

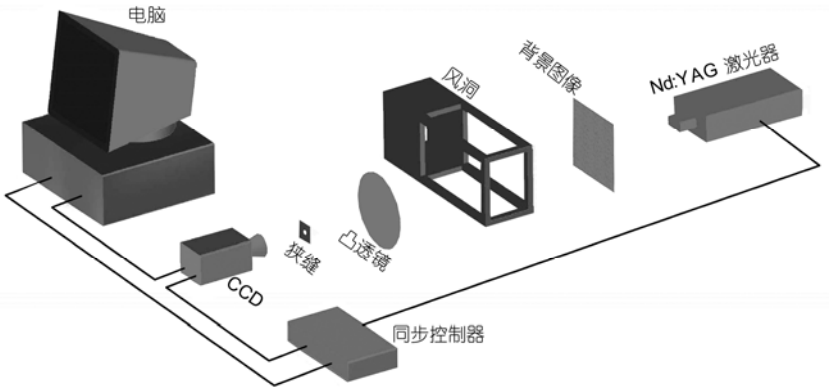


图 4 BOS-WT 系统示意图

量; g 是相机和背景图像之间的距离; f 是相机的焦距; β是背景点与镜头中心的连线与镜头光轴之间的夹角.

1.2 本文构建的 BOS-WT 系统

基于 BOS-WT 原理, 本文构建了一套 BOS-WT 系统(图 4). 该系统以双腔 Nd:YAG 激光器为光源, 其单脉冲宽度为 6 ns, 单脉冲能量最高可达 500 mJ, 波长 λ=532 nm. 采用双曝光功能的高分辨率 CCD, 相邻两次曝光的时间间隔最短可达到 0.2 μs, 分辨率为 2 k×2 k. CCD 和激光器之间通过同步控制器控制, 以确保激光照射下的背景分别成像在两幅图像中, 进而分析波前随时间的演化规律, 同步控制器精度高达 250 ps. 以上硬件参数决定了 BOS-WT 系统的性能, 其时间分辨率为 6 ns, 时间相关分辨率最高可达 0.2 μs, 空间分辨率在毫米量级.

2 BOS-WT 技术在超声速混合层流场中的应用

超声速混合层是超燃冲压发动机[14]、气动光学[15]以及高能激光武器[16]等众多领域的研究重点, 尤其对于超声速红外末制导武器来说, 了解超声速混合层的气动光学特性对于改善其光学性能、提高制导精度起到至关重要的作用. 本文中, 超声速混合层风洞采用吸气式运行方式, 总压 P_0=1 atm, 总温 $T_0\approx$300 K. 上层气流马赫数 Ma=2.6, 下层气流马赫数 Ma=3.6, 如图 5 所示. 本文采用 BOS-WT 技术研究超声速混合层的气动光学效应, 将背景图像和 CCD 相机分别置于超声速混合层风洞实验段的两侧, 风洞实验段中心与背景图像之间的距离 H=440 mm. 没有流场的情况下, 拍摄参考背景图像, 有流场的情况下拍摄时间间隔为 5 μs 的实验背景图像. 将实验背景图像和参考背景图像进行互相关运算, 得到背景图像位移场.

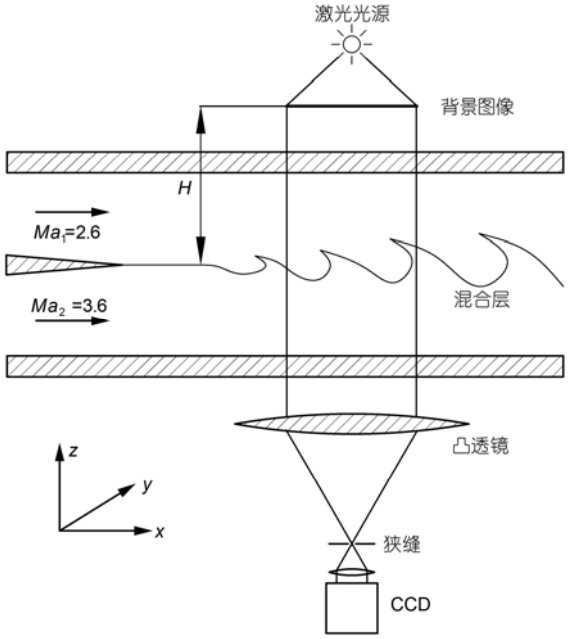


图 5 超声速混合层 BOS-WT 实验装置示意图

受超声速混合层的影响, CCD 透过流场观察到的背景图像与参考图像之间存在相对位移. 采用现在比较成熟的 PIV 算法, 对实验图像和参考图像进行互相关运算, 即可得到背景图像的位移场, 如图 6 所示. 其中(a)是参考图像, (b)是受到流场扰动后的背景图像, (c)是二者之间的相对位移.

图 7 所示分别为两个时刻的实验背景图像与参考图像之间的相对位移场, 该位移场同时包含背景



图 6　位移场计算示意图

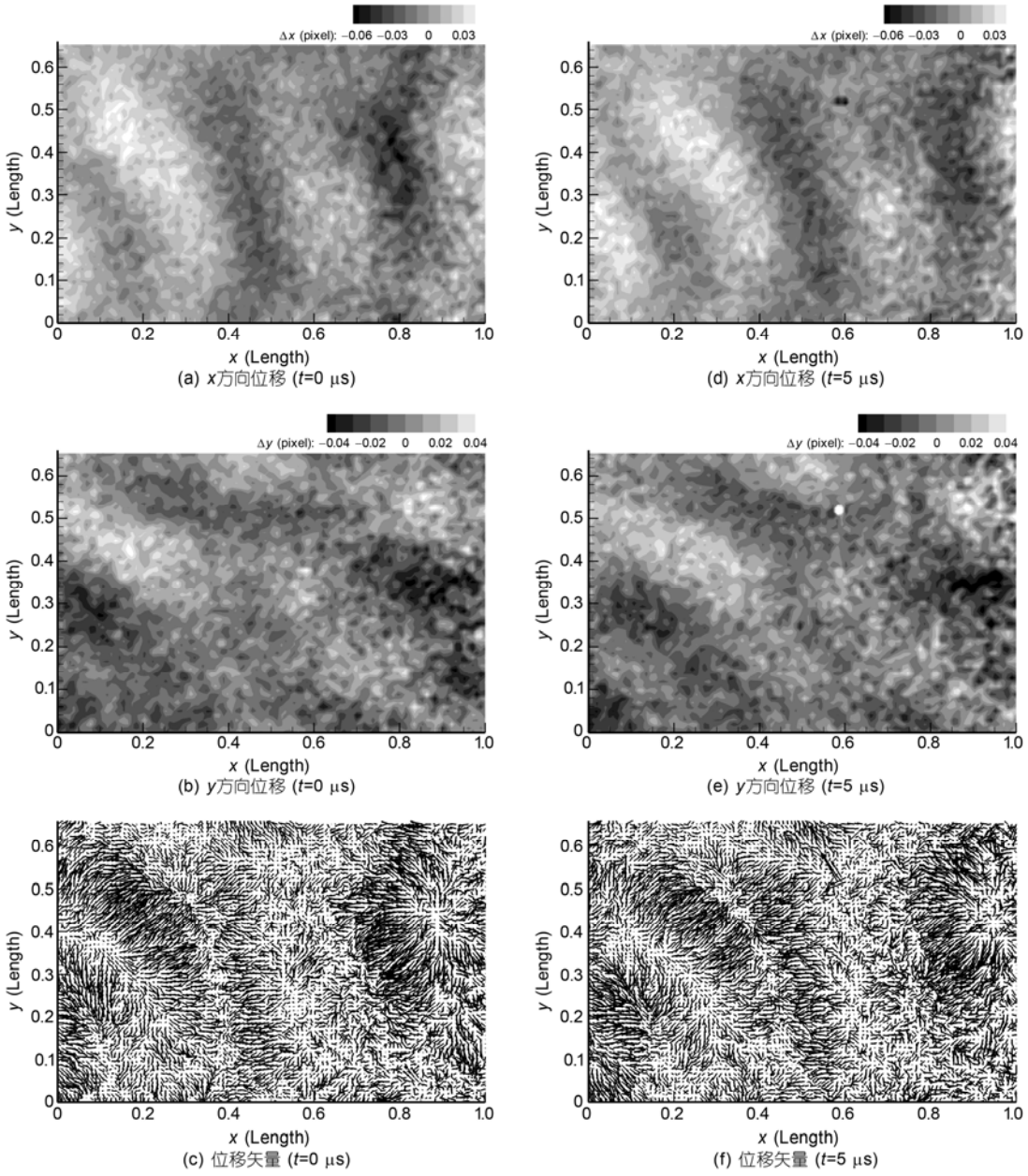


图 7　背景图像位移场

图像在 x, y 方向上的相对位移, 这是该方法区别于传统纹影方法的显著特征. 互相关运算中, 查问区尺寸为 0.48 mm × 0.48 mm, 即该位移场的空间分辨率. 图中坐标均用 x 方向的流场长度(Length)归一化处理, 位移单位为 pixel. 其中, 图 7(a)~(c)分别为 t=0 μs 时刻 x, y 方向位移云图和位移矢量图, 图 7(d)~(f)分别为 5 μs 后 x, y 方向位移云图和位移矢量图. 从图 7(a)和(d)中能够看到与超声速混合层展向结构类似的周期性条带结构[17], 这是混合层中大尺度涡结构的卷起造成的; 图 7(b)和(e)则没有明显的规律性可循. 比较 5 μs 前后的位移场可以发现, 位移场整体上表现为向下游的平移, 而整体分布的变化相对较小.

将图 7 所示的测量结果代入(1)和(3)式, 再采用 Southwell 算法进行波前重构, 即得到平面光波通过超声速混合层后的瞬态波前分布, 如图 8 所示. 从图中可以看出, OPD 曲面整体变化不是很明显, 主要表现为局部的增大或减小, 此变化主要表现在 x 方向, y 方向的变化相对较小. OPD 曲面在 x 方向上隐约呈现出一定的周期性, 且和背景图像位移场的周期性相对应; y 方向上的分布没有明显规律可循. 观察所有 5 μs 前后的波前分布可以发现, 波前主要表现为向下游的平移, 变形相对较小.

对于 BOS-WT 这样一项新开发的波前测量技术, 为检验它的有效性和精度, 本文将其测量结果与采用 NPLS-WT 技术[18]的测量结果进行了比较分析. NPLS-WT 技术能够测量一维平行光通过流场后的波前分布, 具有高时空分辨率和能够避免环境干扰等特点. 采用 NPLS-WT 技术研究了平面光波通过图 5 所示流场后的光学波前畸变, 如图 9 所示. 其中, 图 9(a)和(b)分别为间隔 5 μs 的超声速混合层密度场, 图 9(c)和(d)分别为平面光波通过图 9(a)和(b)所示流场后的光学波前畸变. 比较图 8 和图 9 可以发现, 虽然 BOS-WT 和 NPLS-WT 技术测量的是同一流场区域不同时刻的波前畸变, 两种方法测得的 OPD 处于同一量级, 而且相差不大. 导致二者存在差异的主要原因是, BOS-WT 不可避免地受到环境因素的影响.

3 结论

基于纹影模式 BOS 技术的气动光学原理, 本文通过构建背景图像位移和气动光学波前梯度的关系, 开发了一套测量气动光学波前的新技术——BOS-WT. 该技术能够对波前分布进行瞬态定量测量, 其时间分辨率为 6 ns, 时间相关分辨率最高可达 0.2 μs, 并

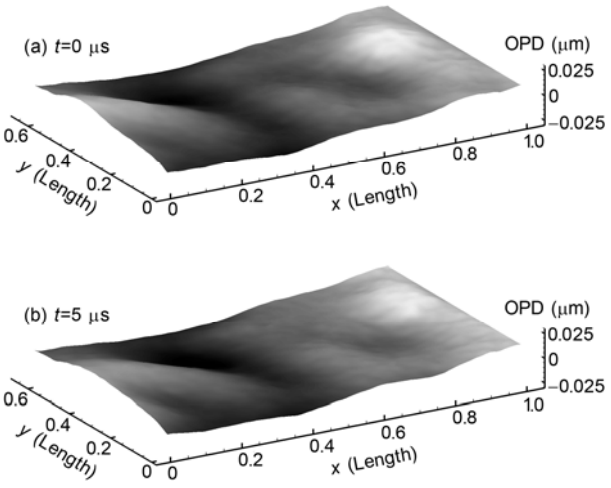


图 8 平面光波通过超声速混合层后的波前分布

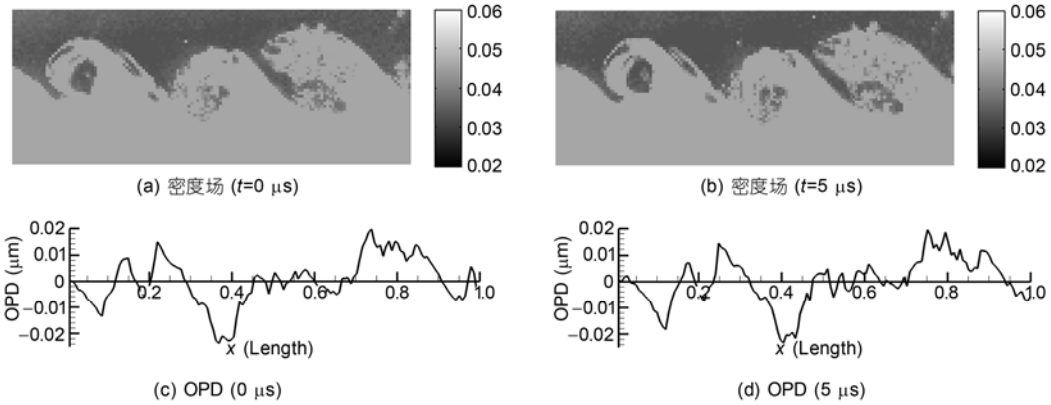


图 9 基于 NPLS-WT 技术测得的超声速混合层波前分布

且实验装置简单, 容易操作. 采用 BOS-WT 技术, 本文研究了超声速混合层引起的波前畸变, 测量得到了平面光波通过超声速混合层后的波前分布. 结果不仅展现了波前的空间分布, 比较间隔 5 μs 的测量结果, 发现波前的变化主要表现为向下游的平移, 而变形相对较小.

参考文献

1 Meier G E A. New optical tools for fluid mechanics. In: Proceedings of 8th International Symposium on Flow Visualization, Sorrento, Italy, 1998
2 Sourgen F, Haertig J, George A, et al. Validation of CFD density field in supersonic axisymmetric flow using BOS and differential interferometry. AIAA Paper, 2005, 2005–6036
3 Sourgen F, Haertig J, Rey C. Comparison between background oriented schlieren measurements (BOS) and numerical simulations. AIAA Paper, 2004, 2004–2602
4 Elsinga G E, Van Oudheusden B W, Scarano F, et al. Assessment and application of quantitative schlieren methods: Calibrated color schlieren and background oriented schlieren. Exp Fluids, 2004, 36: 309–325
5 Goldhahn E, Seume J. The background oriented schlieren technique: Sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field. Exp Fluids, 2007, 43: 241–249
6 Venkatakrishnan L, Meier G E A. Density measurements using the background oriented schlieren technique. Exp Fluids, 2004, 37: 237–247
7 Meier G E A. Computerized background-oriented schlieren. Exp Fluids, 2002, 33: 181–187
8 Sommersel O K, Bjerketvedt D, Christensen S O, et al. Application of background oriented schlieren for quantitative measurements of shock waves from explosions. Shock Waves, 2008, 18: 291–297
9 Raffel M, Richard H, Meier G E A. On the applicability of background oriented optical tomography for large scale aerodynamic investigations. Exp Fluids, 2000, 28: 477–481
10 Hargather M J, Settles G S. Natural-background-oriented schlieren imaging. Exp Fluids, 2010, 48: 59–68
11 Kindler K, Goldhahn E, Leopold F, et al. Recent developments in background oriented schlieren methods for rotor blade tip vortex measurements. Exp Fluids, 2007, 43: 233–240
12 赵玉新, 易仕和, 田立丰, 等. 超声速混合层气动光学畸变与抖动——BOS 测量技术及其应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40: 33–46
13 Southwell W H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements. J Opt Soc Am, 1980, 70: 998–1006
14 Wakamatsu Y, Kanda T, Yatsuyanagi N. Preliminary consideration of hypersonic test vehicle for scramjet engine test. ISTS 2000-g-24, 2000
15 Chew L. Coherent structures effects on shear layer optics. AIAA Paper, 1990, 90-0185
16 易仕和, 侯中喜, 赵玉新. 超声速自由漩涡气动窗口及其光学质量研究. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 2005
17 易仕和, 何霖, 赵玉新, 等. 基于 NPLS 技术的超声速混合层流动控制实验研究. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39: 1640–1645
18 易仕和, 田立丰, 赵玉新, 等. 基于 NPLS 技术的气动光学畸变测量方法与应用. 科学通报, 2010, 55: 2283–2288