

基于背景纹影波前传感技术的气动光学波前重构与校正

张天天 易仕和 朱杨柱 何霖

Reconstruction and calibration on aero-optical wavefront aberration based on background oriented schlieren based wavefront sensing

Zhang Tian-Tian Yi Shi-He Zhu Yang-Zhu He Lin

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 084201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.084201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光声内窥镜系统在人体直肠癌离体组织中的实验研究

The human colorectal cancer tissue in vitro experimental study based on photoacoustic endoscopic system

物理学报.2014, 63(8): 084204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084204>

微生物远红外波段复折射率测定及模型构建

Determination and model construction of microbes' complex refractive index in far infrared band

物理学报.2013, 62(9): 094218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094218>

微通道板的饱和效应对条纹相机动态范围的影响分析

Influence analysis of saturation effect of microchannel plate on dynamic range of streak cameras

物理学报.2012, 61(19): 194211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.194211>

圆锥边界附近激光空泡溃灭行为的研究

Investigation of the collapse of laser-induced bubble near a cone boundary

物理学报.2012, 61(17): 174210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.174210>

基于背景纹影波前传感技术的气动光学 波前重构与校正*

张天天 易仕和 朱杨柱[†] 何霖

(国防科学技术大学航天科学与工程学院, 长沙 410073)

(2014年10月9日收到; 2014年10月28日收到修改稿)

背景纹影波前传感(background oriented schlieren based wavefront sensing, BOS-WS) 是利用背景纹影技术测量光学波前二维分布的新型实验手段, 可定量测量光线通过干扰场后产生的光学畸变并给出光程差. 为了利用BOS-WS技术获得光线因气动光学效应产生的畸变信息, 并通过已知畸变信息还原原始图像, 进而探索一种新型的超声速成像制导方法, 本文通过理论分析, 验证了利用背景纹影技术测量光学波前的方法, 探索了利用已知波前信息预测畸变位移场以及利用已知位移场进行波前重构的计算方法. 通过数值模拟比较了一阶梯形积分算法和Southwell方法在波前重构上的误差大小和结果合理性, 并通过误差分析证明了Southwell方法更加精确合理. 通过蜡烛火焰上方流场畸变实验和透镜对波前的扰动实验, 创造性地探索了利用已知光学光程差还原畸变位移场及其校正畸变图像的方法, 并通过验证性实验证明了校正方法的有效性.

关键词: 气动光学, 背景纹影, 光学畸变, 波前重构**PACS:** 42.15.Fr, 42.79.Pw, 42.87.-d, 42.79.Mt**DOI:** 10.7498/aps.64.084201

1 引言

光学成像飞行器在飞行过程中流场结构的不均匀性会导致折射率场非均匀分布, 改变了光线的传输特性, 使得探测器接收到的目标图像产生模糊、抖动、偏移和能量衰减, 降低了对目标的探测、跟踪和识别能力, 影响制导精度. 这种现象被称为气动光学效应, 是制约成像制导精度的重要因素. 研究气动光学机理, 改进气动光学测试方法是成像制导技术中亟待解决的问题. 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^[1,2]. 目前测量OPD的主要方法包括Shack-Hartmann传感器、Malley探针、小孔径光束、干涉等技术, 但它们普遍存在时间和空间分辨率低、设备复杂、成本高

等问题. 背景纹影(BOS)技术是1998年由Meier^[3]提出的基于背景的纹影技术, 国际上大多用其测量流场的密度场信息. 虽然BOS作为一种纹影技术能直接得到密度梯度场, 但其得到的密度场受光线方向上的积分效应影响较大. 2006年易仕和首先改进BOS, 提出采用背景纹影波前传感(BOS-WS)技术直接进行OPD测量. 该方法能定量地全场测量流场扰动产生的光学畸变分布, 且时空分辨率高、设备简单、成本低^[4,5].

2001年, Richard和Raffel^[6]将BOS技术应用于研究两种不同直升机在飞行中桨叶顶端产生旋涡的细节; 2004年, Venkatakrisnan和Meier^[7]采用BOS技术测量了锥柱模型在 $Ma = 2.0$ 流场中的密度梯度分布并将其与该模型的理论值相比较, 两者符合得较好; Elsinga和Oudheusden^[8]系统阐述了彩色纹影及BOS等定量纹影测量方法的

* 国家自然科学基金(批准号: 11172326, 11302256)、湖南省研究生科研创新项目(批准号: CX2013B002)和国防科学技术大学优秀研究生创新项目(批准号: B130103)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zyzhhb123@139.com

装配与应用; Sreekanth等^[9]采用BOS技术对激波管中的超声速流动进行流动显示实验; 2005年, Sourgen等^[10]采用BOS和差分干涉技术对超声速轴对称流动密度的计算进行了验证分析; 2007年, Erik和Jorg^[11]对应用于三维密度场研究的BOS技术的灵敏度、精度及分辨率做了全面分析; Ramanah等^[12]实验验证了BOS方法在激波风洞中的可行性; 2010年, Abhishek和Brian^[13]介绍了利用BOS技术进行光学波前测量的理论推导, 将波前测量结果与理论计算值相对比, 验证了BOS技术应用于气动光学波前测量的可行性; 2010年, 赵玉新等^[14]首次提出了一种基于BOS原理测量超声速混合层气动光学畸变和抖动的方法; 2011年, 田立丰等^[15]创造性地开发了BOS-WS技术, 将BOS技术应用于光学波前测量, 并重构了超声速湍流边界层产生的波前畸变.

总体来说, 利用BOS测量密度梯度场技术已经比较成熟, 且可与数值结果进行比较. 但是BOS-WS技术的发展刚刚起步, 目前BOS-WS中有关波前重构的算法还没有得到充分研究, 尚未见利用重构后的波前进行预测其他条件下的位移场并将其应用于畸变图像校正的研究.

2 BOS-WS技术

图1展示了BOS成像的光路与原理.

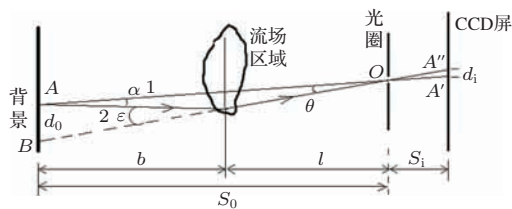


图1 BOS-WS原理示意图

Fig. 1. Sketch of BOS-WS principle.

BOS技术利用无流场干扰条件下对背景图案所拍摄的图像和有流场干扰下拍摄的背景图案进行粒子图像测速(PIV)计算, 获得畸变位移场, 并利用物理和几何关系得到OPD场, 具体如下.

已知折射角 ϵ 等于折射率梯度沿光路的积分:

$$\epsilon = \int_s \nabla n ds, \quad (1)$$

而光线的折射与光程(OPL)紧密联系, 即

$$OPL = \Phi = \int_s n ds, \quad (2)$$

式中, Φ 为光程, n 为折射率, s 为沿光路的距离.

联立方程(1), (2)可得

$$\epsilon = \int_s \nabla n ds = \nabla \int_s n ds = \nabla \Phi, \quad (3)$$

OPD定义为各点OPL与OPL在光瞳处的平均值之差:

$$OPD = \Phi - \bar{\Phi}, \quad (4)$$

故当流场及流动条件一定后, 平均OPL将为定值, 则

$$\nabla OPD = \nabla \Phi. \quad (5)$$

图1中折射角 ϵ 满足小角度条件时有

$$\epsilon = \frac{d_0}{b}, \quad (6)$$

其中, d_0 为位移场的位移量, b 为背景距离扰动场中心距离.

故可得OPD与所得位移场 d_0 之间的关系为

$$\nabla OPD = \frac{d_0}{b}. \quad (7)$$

即由BOS所得到的虚位移场与OPD的梯度成正比. 因此在得知位移场后需利用一种精度较高的积分方法来重构OPD.

3 波前重构算法

在已知

$$\begin{aligned} d_0 &= \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} = b \left(\frac{\partial OPD}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial OPD}{\partial y} \mathbf{j} \right) \\ &= b \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \mathbf{j} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

的情况下, 在得知位移场后可以通过直接积分的方法获得光程场, 再减去基于光瞳的平均OPL得到OPD场. 在BOS光学成像得到两幅背景图像(干扰前和干扰后)后, 经过PIV算法得到两幅图像之间的空间位移矩阵, 包括 x 方向位移和 y 方向位移, 因此便可得到OPL在 x 和 y 方向上的偏导数. 给定任一点的第一类边界条件(这里可采用零点信息为边界条件), 采用梯形积分算法可依次求出各点的OPL信息.

沿着 x 方向, 相邻两点之间的OPL有如下关系:

$$\begin{aligned} OPL(i, j) &= OPL(i-1, j) \\ &+ \frac{l}{2} (\phi_x(i-1, j) + \phi_x(i, j)). \end{aligned} \quad (9)$$

沿着 y 方向, 相邻两点之间的 OPL 有如下关系:

$$OPL(i, j) = OPL(i, j - 1) + \frac{l}{2}(\phi_y(i, j - 1) + \phi_y(i, j)). \quad (10)$$

3.1 一阶梯形积分算法

对角线方向上, 相邻两点之间的 OPL 有如下关系:

$$\begin{aligned} OPL(i + 1, j + 1) &= OPL(i, j) + \frac{l}{2}(\phi_x(i, j) + \phi_x(i + 1, j)) \\ &\quad + \frac{l}{2}(\phi_y(i + 1, j) + \phi_y(i + 1, j + 1)) \end{aligned} \quad (11)$$

或

$$\begin{aligned} OPL(i + 1, j + 1) &= OPL(i, j) + \frac{l}{2}(\phi_y(i, j) + \phi_y(i, j + 1)) \\ &\quad + \frac{l}{2}(\phi_x(i, j + 1) + \phi_x(i + 1, j + 1)), \end{aligned} \quad (12)$$

如图 2 所示, 在由前一网格点计算下一对角网格点时有两种积分途径.

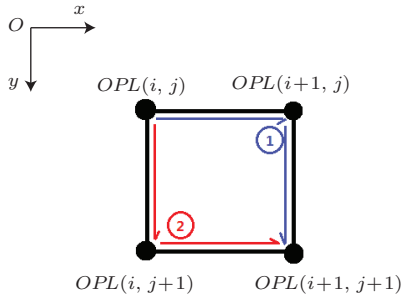


图 2 一阶积分路径示意图

Fig. 2. Schematic diagram of 1st-order integral path.

3.2 一阶 Southwell 算法

Southwell 算法^[16]是一种迭代算法, 对于任一点的光程 $OPL(i, j)$ 取其周围 4 个点, 分别进行梯形积分法求解, 然后对求得的四个值取加权平均 (图 3):

$$\begin{aligned} OPL(i, j) &= \left[\omega_{i, j-1} OPL(i, j - 1) + \omega_{i, j+1} OPL(i, j + 1) \right. \\ &\quad + \omega_{i-1, j} OPL(i - 1, j) + \omega_{i+1, j} OPL(i + 1, j) \\ &\quad + \frac{l}{2b} \omega_{i, j-1} (\Delta y(i, j - 1) + \Delta y(i, j)) \\ &\quad \left. - \frac{l}{2b} \omega_{i, j+1} (\Delta y(i, j + 1) + \Delta y(i, j)) \right] \\ &\quad \times (\omega_{i, j-1} + \omega_{i, j+1} + \omega_{i-1, j} + \omega_{i+1, j})^{-1}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 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, 这样就可以合理地表示每一点的信息.

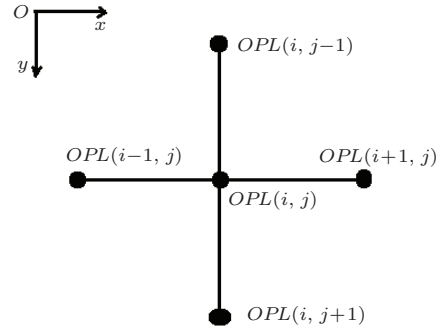


图 3 OPL 数值求解网格示意图

Fig. 3. Schematic diagram of OPL resolution mesh.

3.3 算法验证方案

通过数值模拟和实验验证方式比较了两种重构算法在重构 OPD 上的有效性和精确性. 利用 Matlab 编程模拟方法, 给定一个已知的分布函数作为真实 OPD 场; 离散该函数差值求微分则相当于得到位移场; 利用不同积分方法重构 OPD 场; 最后对比重构 OPD 场与真实场, 比较重构中产生的误差. 模拟函数取 $OPD = \sin x \cos y$ ($-\pi \leq x \leq \pi, -\pi \leq y \leq \pi$).

实验方案为利用 BOS 技术测量蜡烛火焰上方流场产生的图像畸变, 得到位移场, 然后分别利用以上两种方法重构 OPD, 将重构结果进行比较. 图 4 为实验平台布置.



图 4 BOS 实验平台

Fig. 4. Experimental platform of BOS.

4 畸变图像校正

进行 OPD 测量最终目的还是要得到原始图像, 即利用已知 OPD 进行图像还原, 使图像位置和外貌变成已知. 这在气动光学成像中非常重要. 由于气动光学效应, 飞行器导引头电荷耦合器件 (CCD) 所获得的目标图像为畸变后的图像, 无法直接分辨. 目前普遍的图像处理方式为基于已知图像的增强与降噪等技术^[17], 而在图像畸变机理未知的情况下并不能完全还原原始图像. 本文利用已知 OPD 预测图像发生的畸变信息, 并将畸变信息应用于图像还原中, 与传统图像处理具有本质的不同.

4.1 利用已知 OPD 预测位移场

在 x 和 y 方向上 OPD 与背景发生的虚位移场之间的关系分别为

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= b \frac{\partial OPD}{\partial x}, \\ \Delta y_i &= b \frac{\partial OPD}{\partial y}. \end{aligned} \quad (14)$$

由于折射角等于折射率梯度在光轴上的积分:

$$\varepsilon = \int_s \nabla n ds = \int_{\text{干扰场}} \nabla n ds + \int_{\text{空气}} \nabla n ds. \quad (15)$$

一般情况下空气折射率约等于 1, 即

$$n_{\text{air}} \approx 1, \quad \nabla n_{\text{air}} = 0. \quad (16)$$

则对于固定的干扰场:

$$\varepsilon = \int_{\text{干扰场}} \nabla n ds = \text{常数}. \quad (17)$$

由方程 (3), (5) 和 (17) 可得

$$\nabla OPD = \text{常数}. \quad (18)$$

故由方程 (14) 可知, 虚位移场与背景到扰动场之间的距离成正比, 即基于在已知某一目标距离 b 条件下重构的 OPD, 便可预测其他目标距离下的图像畸变信息. 通过对已知焦距为 2 m 的凹透镜进行 OPD 测量, 由 $b = 10$ cm 下测量的 OPD 预测 $b = 20$ cm 时的位移场, 并与真实位移场进行比较, 即可验证该预测方法的准确性.

4.2 利用畸变位移场进行图像校正

已知 OPD 预测位移场后, 设 U 为横向位移场, V 为纵向位移场, 则图像位置任意一点 (m, n) 的畸

变位移场 S 为

$$S(m, n) = U(m, n)\mathbf{i} + V(m, n)\mathbf{j}. \quad (19)$$

设该原图为 A , 畸变图为 B , 则 A 与 B 之间的图像信息关系为

$$A(m + U(m, n), n + V(m, n)) = B(m, n). \quad (20)$$

故已知 B 和 S 求 A 的方程为

$$A(m, n) = B(m - U(m, n), n - V(m, n)), \quad (21)$$

即将畸变的图像信息按照畸变方向的反方向“搬”回相应位置, 从而得到原始图像. 以打印好的“正”字为实验背景, 畸变后的图像肉眼可识别, 校正后也更容易看出区别. 分别以凹透镜和未知变形的玻璃砖作为扰动场, 比较校正后的图像与校正前的差异, 验证校正方法的有效性.

5 结果与分析

5.1 OPD 重构算法比较

图 5 展示了两种积分算法在数值模拟重构 OPD 时得到的模拟结果. 两种算法均能够基本还原原函数, 但是所得误差的大小有很大差异. 图 6 将两者的误差分布情况进行了对比, 横轴代表误差大小, 纵轴代表对应误差所占点数.

需要指出的是, 实际的误差分布应为不连续的点阵图, 每个误差之间没有任何关系, 故图线下方的面积没有任何意义. 图 6 能够反映误差的分布范围和集中区域. 可见一阶梯形积分方法下误差分布范围远大于 Southwell 方法, 其分布较为均匀. 若对误差与其对应点数的乘积求和, 能够反映误差的影响, 将该值用 Γ 表示, 具体计算结果列于表 1.

表 1 一阶条件下不同积分算法的误差影响因子
Table 1. Error influences between the two integral algorithms at 1 st order.

	计算方法	
	一阶梯形积分	一阶 Southwell
Γ	-0.016	2.03×10^{-4}

由表 1 可见, Southwell 方法误差的整体影响较小, 其在波前重构方面具有一定的优越性.

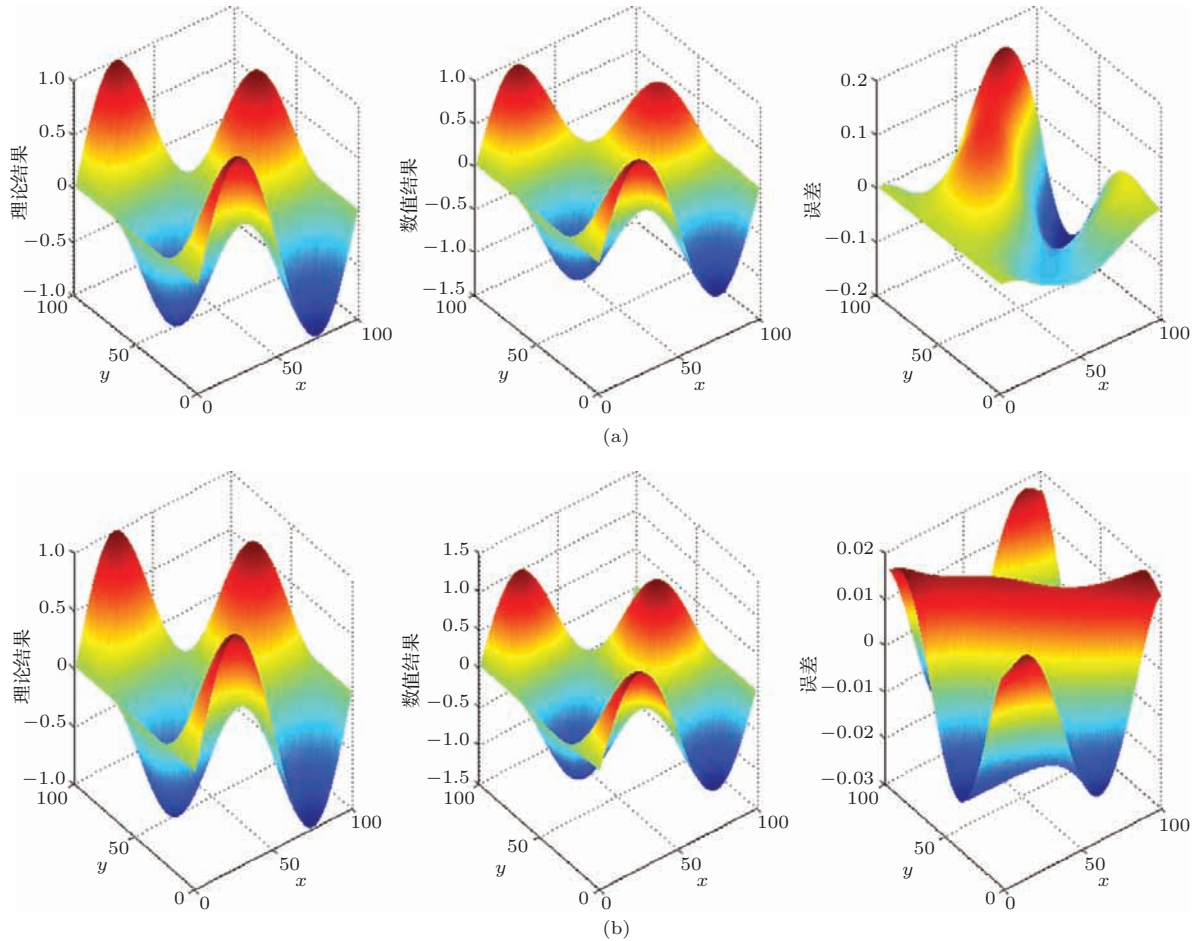


图5 算法数值模拟结果(由左至右分别为原函数、重构函数、误差) (a)一阶梯形积分数值模拟结果; (b)一阶Southwell积分数值模拟结果

Fig. 5. Numerical simulation results based on different algorithms (original function, reconstruction function, and error from left to right in every figure). (a) Simulation results using 1 st order of trapezoid integral; (b) simulation results using 1 st order of Southwell integral.

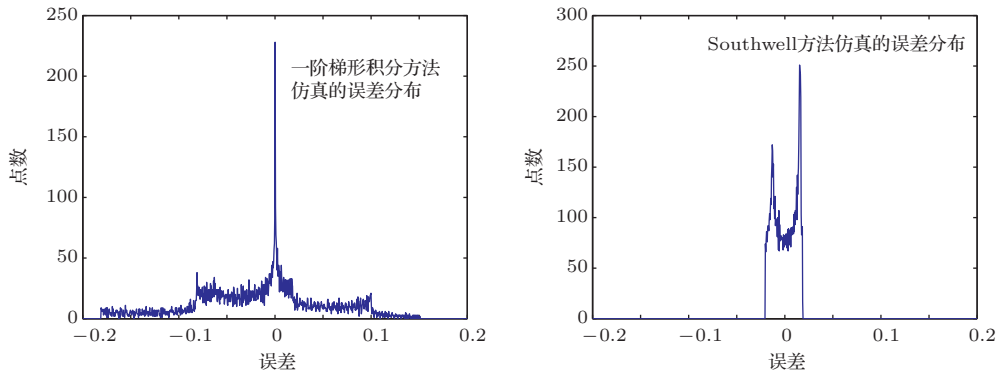


图6 两种重构算法的误差分布曲线

Fig. 6. Error distributions of the two reconstruction algorithms.

实验研究了蜡烛火焰上方流场产生的波前畸变,按照图4中的实验平台进行实验布置,得到蜡烛火焰产生的扰动位移场以及两种积分算法所得OPD重构结果如图7所示.

两种方法都展示了蜡烛火焰上方气流产生光

学畸变的基本趋势.但是可以清楚地看到,利用Southwell方法所得结果相对于一阶梯形积分算法更加平滑、更加符合客观实际.这说明Southwell方法在进行波前重构时结果更加准确.而一阶梯形积分算法中出现的斜线一样的偏折其角度约为45°,

这说明此方法本身在自前向后的迭代过程中, 上下路线结果产生的误差导致突变的产生. 这也从侧面反映了 Southwell 方法利用周围四点信息计算当地信息的科学性.

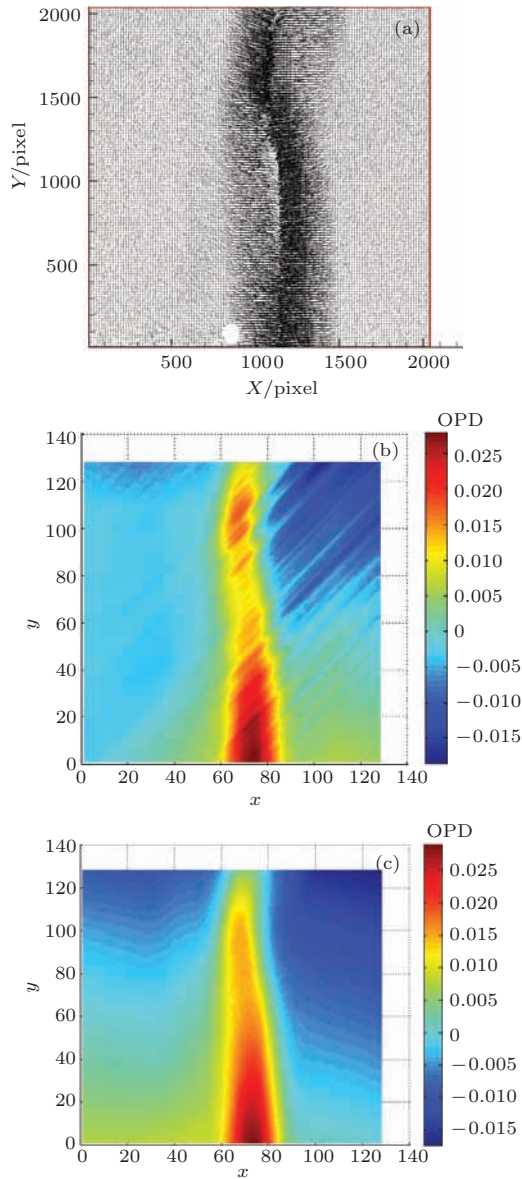


图7 蜡烛火焰上方流场 BOS 实验结果 (a) 蜡烛火焰上方流场 BOS 矢量图; (b) 一阶梯形积分 OPD 重构图; (c) Southwell 积分 OPD 重构图

Fig. 7. BOS results of the flow field above the candle flame: (a) displacement vectors based on BOS; (b) OPD reconstruction based on 1st order trapezoid integral; (c) OPD reconstruction based on Southwell integral.

5.2 利用 OPD 重构位移场

通过改变背景与透镜之间的距离获得较多的实验样本, 通过计算 OPD, 比较不同距离对所得 OPD 的影响, 然后尝试利用 OPD 还原任意距离下

的位移场, 并与实际所测位移场进行对比, 验证该方法进行图像还原的可行性, 具体结果如图 8 所示.

已知当背景距离透镜 10 cm 时, 得到畸变产生的互相关位移场如图 8 (c) 所示. 其中 X 和 Y 坐标轴上的刻度代表以 16 pixels 为步长的网格节点坐标, 即坐标轴上的一个刻度对应 16 pixels. 该部分经重构得到的 OPD 场如图 8 (d) 所示. 利用方程 (14), 取 $b = 10$ cm, 将 OPD 场进行微分求解在背景距离透镜 20 cm 时的理论位移场, 所得结果如图 9 所示.

以 $b = 20$ cm 处还原的位移场为例, 图 8 (e) 展示了实际在进行 BOS 实验时所得的 $b = 20$ cm 的位移场, 两者在轮廓以及值域范围上都显示了极大的相似性. 图 9 (b) 展示了利用 $b = 10$ cm 时测量的 OPD 还原 $b = 20$ cm 时的位移场, 预测值与实际值之间的误差, 可见除边界外, 整个区域内误差不超过 2 pixels, 这充分说明了利用 OPD 还原位移场是可行的. 该过程是还原畸变图像的重要一步, 其本身已经足够证实利用 OPD 进行图像还原的可能性.

还原过程中引入的误差一方面来自于算法误差, 另一方面来自于实验操作中的误差, 这些都将导致计算结果出现偏差, 但误差较小, 结果可以定性表明利用 OPD 还原位移场的可能性.

PIV 算法是将一张畸变的图片与参考图片相互比较, 并以查问区为单元, 查找两幅图中相对应的完全相同的部分, 并将它们之间的移动转换为位移, 最终形成位移场. 至此可以想象, 如果已知发生畸变后的图像和畸变的位移场, 那么理论上可以通过两者相“减”的方法构造出原始图像, 这相当于 PIV 算法的逆算法, 也是图像还原中的最后一个步骤.

5.3 利用位移场校正畸变图像

为了达到还原原始图像的目的, 必须在所得位移场的基础上处理畸变图像得到原图. 实验中背景的选择应较为直观, 即还原后容易与原图对比. 本文采用 5 号黑体打印的“正”字阵列为背景, 背景与透镜之间的距离为 20 cm, 直接成像得到畸变后的图像如图 10 (a) 所示. 图中透镜内侧的文字形状上的畸变不明显, 但是可以清楚看到内部字体小于透镜外部, 且横竖行均发生了错位 (图中线条标识), 这是由于凹透镜使图像大小和位置发生畸变导致的.

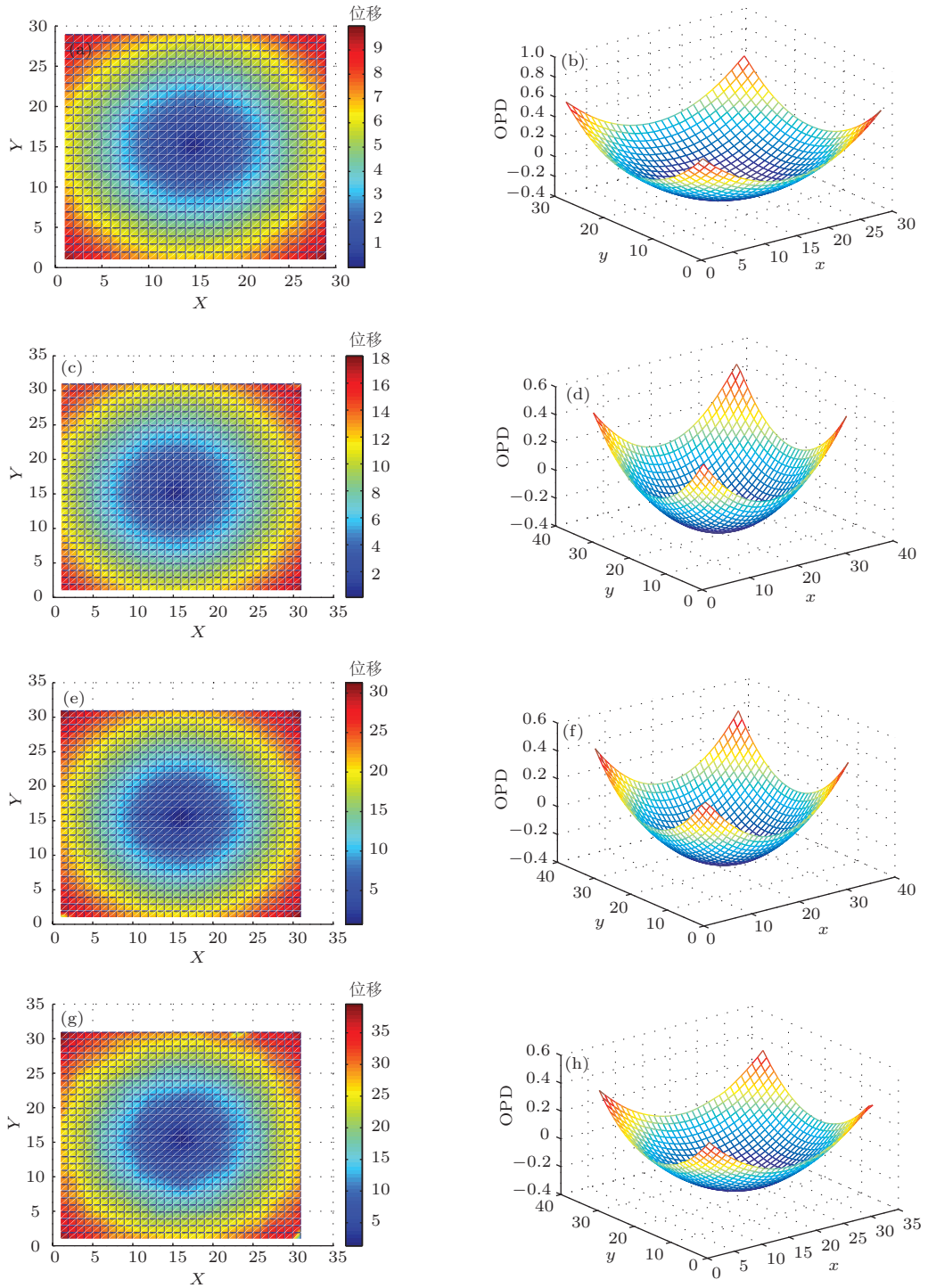


图8 不同背景到透镜距离下所得畸变位移场云图及还原的OPD场 (a) 背景距离透镜5 cm时的畸变位移场; (b) 背景距离透镜5 cm时的重构的OPD场; (c) 背景距离透镜10 cm时的畸变位移场; (d) 背景距离透镜10 cm时的重构的OPD场; (e) 背景距离透镜20 cm时的畸变位移场; (f) 背景距离透镜20 cm时的重构的OPD场; (g) 背景距离透镜30 cm时的畸变位移场; (h) 背景距离透镜30 cm时的重构的OPD场

Fig. 8. Aberration contours and reconstructed OPD field at different distances between background and lens: (a) aberration contours in the case of 5 cm distance between background and lens; (b) OPD field in the case of 5 cm distance between background and lens; (c) aberration contours in the case of 10 cm distance between background and lens; (d) OPD field in the case of 10 cm distance between background and lens; (e) aberration contours in the case of 20 cm distance between background and lens; (f) OPD field in the case of 20 cm distance between background and lens; (g) aberration contours in the case of 30 cm distance between background and lens; (h) OPD field in the case of 30 cm distance between background and lens.

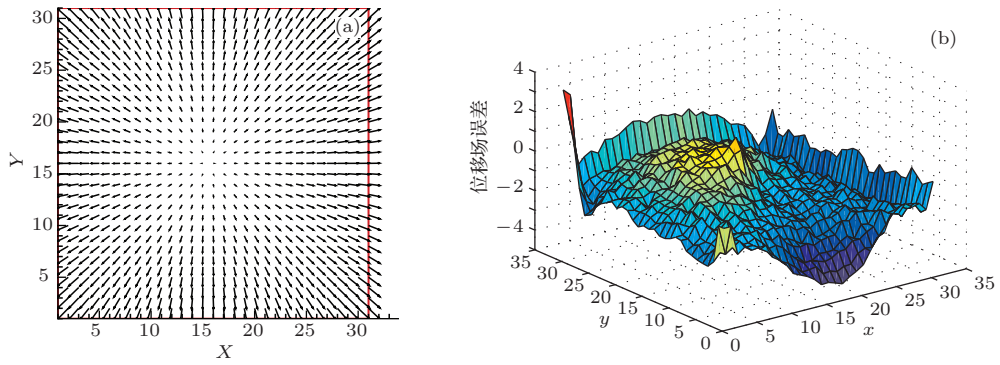


图9 利用 $b = 10$ cm 时的 OPD 场还原 $b = 20$ cm 下的位移场 (a) 预测得到的 $b = 20$ cm 时的位移场矢量图; (b) $b = 20$ cm 实际位移场与预测值之间误差

Fig. 9. Restoring the displacements at $b = 20$ cm by using OPD result at $b = 10$ cm: (a) restored displacements at $b = 20$ cm; (b) differences between the actual and restored results at $b = 20$ cm.

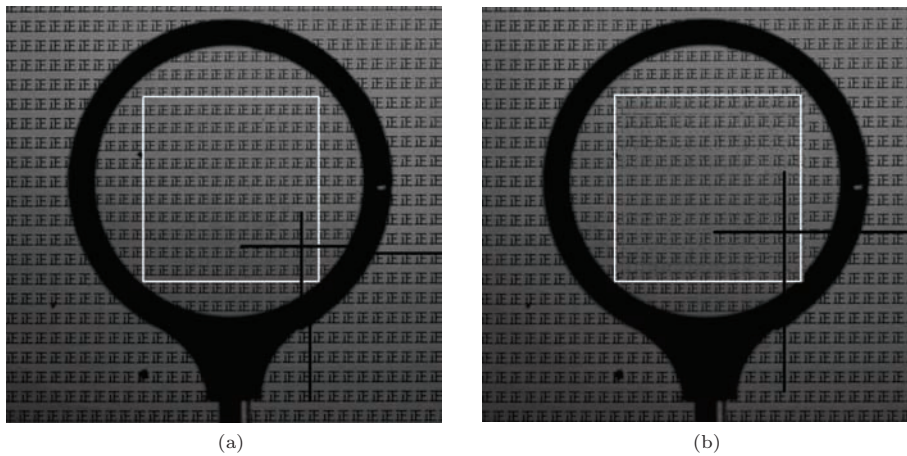


图10 利用位移场还原畸变的图像(白色框内为校正区) (a) 畸变图像; (b) 校正图像

Fig. 10. Restoring the distorted image by using displacements (the white-edged square inner to be calibrated): (a) distorted image; (b) restored image.

经过方程(21)的处理, 利用 Matlab 编程处理图10(a), 即利用图9(a)所示的位移场校正畸变图像, 结果如图10(b)所示. 结果显示, 在透镜内, 校正后的图像中“正”字字体的大小与透镜外基本相同, 在位置上, 校正后的行与列均与透镜外侧保持一致(图中线条标识). 这充分说明利用位移场还原畸变图像是完全可行的, 且还原效果较好.

6 结 论

利用 BOS 进行光学波前的重构, 首先需要使用一套比较可靠和精确的计算方法. 本文通过编程进行数值仿真, 发现一阶梯形积分算法和 Southwell 方法均可还原出较为正确的原始图像. 通过数值仿真的误差分析以及实验测量蜡烛火焰上方流场产生的光学畸变信息, 验证了一阶 Southwell 方法在进行波前重构上更加精确、更加可靠.

成像制导中利用 BOS 原理测量光学波前, 其最终目标也是要获取原始图像的信息. 通过分析 OPD 与位移场之间的定量关系, 实现了利用已知 OPD 还原位移场, 且发现不同的背景与扰动场之间距离并不影响 OPD 分布, 这说明在预实验中已知距离下获得的 OPD 可以用于预测任意距离下图像产生的畸变位移场. 由于固定相位物小角度下产生的折射角分布是一定的, 形成的位移场矢量大小与背景到扰动场的距离呈正比, 因此可以实现在不得到 OPD 的情况下利用已知预实验位移场预测其他距离条件下的位移场. 通过透镜实验, 本文验证了该推论.

畸变位移场对应了原始图像成像时各个像素点发生的位移. 通过将畸变后的图像信息按照畸变位移方向的反方向移动相应距离, 则得到的图像即为校正后的原始图像.

BOS-WS技术可以采用脉冲激光器照亮背景图像,通过线间传输的双曝光CCD采集瞬态图像,对有无流场干扰的图像进行处理可以得到瞬态流场引起的波前畸变,在已知波前畸变的前提下能够实现瞬态流场的失真图像进行校正。

参考文献

- [1] Zhu Y Z, Yi S H, Chen Z, Ge Y, Wang X H, Fu J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084219 (in Chinese) [朱杨柱, 易仕和, 陈植, 葛勇, 王小虎, 付佳 2013 物理学报 **62** 084219]
- [2] Gan C J, Li L, Ma H D, Xiong H L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 184701 (in Chinese) [甘才俊, 李焱, 马汉东, 熊红亮 2013 物理学报 **62** 184701]
- [3] Meier G E A 1998 *Proceedings of the 8th International Symposium Flow Visualization Sorrento, Italy, September 1, 1998* p1
- [4] Tian L F 2011 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [田立丰 2011 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [5] Zhao Y X 2008 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [赵玉新 2008 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [6] Richard H, Raffel M 2001 *Meas. Sci. Technol.* **12** 1576
- [7] Venkatakeishnan L, Meier G E A 2004 *Exp. Fluids* **37** 237
- [8] Elsinga G E, Oudheusden B W 2004 *Exp. Fluids* **36** 309
- [9] Sreekanth R, David J M, Thomas R, Peter A J 2004 *AIAA Australian Aerospace Student Conference 2004* Sydney, Australia, December 12, 2004 p1
- [10] Sourgen F, Haertig J, George A 2005 *AIAA Paper* 2005-6036
- [11] Erik G, Jorg S 2007 *Exp. Fluids* **43** 241
- [12] Ramanah D, Raghunath S, Mee D J 2007 *Shock Waves* **17** 65
- [13] Abhishek B, Brian T 2010 *AIAA Paper* 2010-4842
- [14] Zhao Y X, Yi S H, Tian L F, He L, Cheng Z Y 2010 *Sci. China Ser. G* **53** 81
- [15] Tian L F, Yi S H, Zhao Y X, He L, Chen Z 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 2320
- [16] Southwell W H 1980 *J. Opt. Soc. Am.* **70** 998
- [17] Zhang T X, Hong H Y, Zhang X Y 2014 *Aero-optical Effect Correction: Principles, Methods and Applications* (Hefei: University of Chinese Science and Technology Press) (in Chinese) [张天序, 洪汉玉, 张新宇 2014 气动光学效应校正——原理、方法与应用 (合肥: 中国科学技术大学出版社)]

Reconstruction and calibration on aero-optical wavefront aberration based on background oriented schlieren based wavefront sensing*

Zhang Tian-Tian Yi Shi-He Zhu Yang-Zhu[†] He Lin

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

(Received 9 October 2014; revised manuscript received 28 October 2014)

Abstract

Background oriented schlieren based wavefront sensing (BOS-WS) is a new experimental technique for measuring the two-dimensional distribution of optical wavefronts and the optical path differences (OPDs) induced by the flow-field density variations. Background oriented schlieren (BOS) is traditionally used to test the flow-field density distribution, which restricts the obtaining of useful information since the obtained density information is integrated over the optical path. The OPD is very important for predicting the optical distortion when light travels through the flow field and it is tested by BOS-WS. In order to obtain the optical distortion generated by aero-optic effect, and restore the original image from the distortion known information so as to explore a new kind of supersonic imaging guidance method, theory analysis, numerical simulation and experimental methods are used based on BOS-WS. Through theoretical analysis, the wavefront measurement method based on BOS is verified and the calculation methods of using wavefront information known to predict distortion displacement field and using known displacement field to reconstruct wavefront are explored. By numerical simulation, the error sizes and the result rationalities of one stepped integral algorithm and Southwell method on the wavefront reconstruction are compared, and through the error analysis it is proved that the Southwell method is more accurate and reasonable. By a wavefront aberration experiment carried out in the flow field above the candle flame and a lens perturbation experiment, the methods of using OPD known to reconstruct distorted displacement field and correcting image distortion by the field are creatively explored. The verification experiments show the effectiveness of the correction method.

Keywords: aero-optics, background oriented schlieren, optical aberration, wavefront calibration

PACS: 42.15.Fr, 42.79.Pw, 42.87.-d, 42.79.Mt

DOI: [10.7498/aps.64.084201](https://doi.org/10.7498/aps.64.084201)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11172326, 11302256), the Hunan Provincial Innovation Foundation For Postgraduate, China (Grant No. CX2013B002), and the Innovation Fund for Standout Graduate Students of National University of Defense Technology, China (Grant No. B130103).

[†] Corresponding author. E-mail: zyzhh123@139.com