

大幅面气动光学波前畸变场测量与重构

赵 涛¹ 张征宇^{1,2} 王水亮¹ 朱 龙¹

(¹西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010)
(²中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘要 各类高速飞行器所装备的光电成像探测与侦察系统、光电跟踪瞄准系统、定向能攻击武器和光通讯系统, 都需要开展气动光学波前畸变场测量与校正技术研究。为此, 提出大幅面气动光学波前畸变场测量与重构方法, 将光束偏折位移场测量值转化为光束从摄影中心出发穿过扰流区到人工点的光程差, 并研究了 Zernike 多项式阶数与波前畸变重构精度的关系。2 m 超声速风洞中某跨大气层飞行器模型实验结果表明: 该方法可以定量测量波前畸变场, 测得机头与机翼的斜激波所致的波前畸变结构正确。该方法光路简单、无需使用价格昂贵的相干光源, 为气动光学效应的测试及校正技术的研究提供了新途径。

关键词 测量; 气动光学; 波前畸变; 波前重构; Zernike 多项式

中图分类号 TH7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1012003

Measurement and Reconstruction for Large Aero-Optics Wavefront Distortion Field

Zhao Tao¹ Zhang Zhengyu^{1,2} Wang Shuiliang¹ Zhu Long¹

(¹Information Engineering College, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)
(²China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract Measurement and calibration of aero-optics effects are necessary for all kinds of optical systems onboard high-speed aircraft, such as detection systems of photoelectric imaging, directed energy systems and optical communication system, etc. Therefore, a method of measurement and reconstruction for wavefront distortion field is presented, which gets the optical path difference (OPD) through measuring deviation displacement field induced by the beam from center of camera to a mark point passing through flow field, and the relationship between the order of Zernike polynomial and reconstruction precision is also investigated. The experiments of a trans-aerosphere vehicle model in 2 m supersonic wind tunnel testing have demonstrated that the proposed method can be used to measure large wavefront distortion field, and structures of wavefront distortion generated by oblique shock waves of the vehicle's head and wing are correct. The optical devices of this method are simple, and no expensive coherent source is needed. It is a new way to measure and calibrate aero-optics effects.

Key words measurement; aero-optics; wavefront distortion; wavefront reconstruction; Zernike polynomial

OCIS codes 120.5050; 120.6650; 120.5710; 120.6780

1 引 言

飞行器绕流中的复杂流动现象(如流动分离与旋涡、激波、剪切层等)和绕流温度与组分的时变现象, 导致绕流对光的折射率在时间和空间上发生变

化, 从而改变光束在绕流中的传输特性, 称之为气动光学效应^[1-4]。各类高速飞行器所装备的光电成像探测与侦察系统、光电跟踪瞄准系统、定向能攻击武器和光通讯系统, 都需要开展相应的气动光学效应

收稿日期: 2013-04-28; **收到修改稿日期**: 2013-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(51075385)

作者简介: 赵 涛(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事智能检测方面的研究。E-mail: xiaozhao2010@163.com

导师简介: 张征宇(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学测量及其在风洞试验中的应用等方面的研究。

E-mail: zzyxjd@163.com(通信联系人)

的测试及校正。如发生波前畸变的激光束将出现抖动、偏折、散焦现象,使机载激光攻击武器的能量抵达打击目标时大幅降低^[5]。

由于试验模型的尺度与其边界层的厚度和绕流变化密切相关,应尽可能在大型风洞开展气动光学波前畸变测量与校正实验研究,故急需大幅面、高空间分辨率的波前畸变场测量方法。

目前,波前畸变场的测量方法有:纹影和阴影方法,干涉测量方法以及波面传感器和背景纹影(BOS)方法^[5-11]。其中,波面传感器是当前研究波面畸变的主要仪器之一,但其空间分辨率一直受限于微透镜板的尺寸以及 CCD 的大小,整套系统包括激光源、平行光学组件、缩放光束孔径的可伸缩光学器件等,费用较高^[6];而高分辨率的干涉系统十分昂贵、易受环境干扰且后处理算法复杂,以全息双光路干涉技术为例,若两次曝光间有振动或相位变化都会在全息干涉图上表现出来,将出现黑条纹或反相情况的全息图(很难进行准确的判读和处理)^[10]。

BOS 方法测量光路简单,已用于波前畸变场测量^[5,9],国外有用 CCD 相机、以森林为背景测量直升机旋翼绕流密度场的报道^[9]。该方法被认为是具有巨大应用前景的一种波前畸变场测量技术。但目前的 BOS 方法采用基于图像互相关性分析的粒子图像测速(PIV)方法求取偏移量,该方法不能处理具有空间周期性结构的背景^[5],另一方面,若图像互相关窗口选择过小将得不到正确偏移量,而窗口选择过大,又会降低偏移量的精度^[11]。

为此,本文采用视频测量技术精确测量相机与高密度圆点的空间位置关系,将高密度圆点的偏折位移场测量值转化为光束从摄影中心(即入瞳中心)出发穿过扰流区到圆点的光程差,并研究 Zernike 多项式阶数对大幅面波前畸变场重构精度的影响。

2 基本原理

2.1 偏折角与波前畸变关系

按照气动光学波面畸变原理与光线追迹理论^[1],光线穿过扰流产生的折射角为

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

式中 n 为折射率,而光程(OPL)的定义为

$$l = \int_s n ds, \quad (2)$$

有

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

即,光线穿过流场总偏折角与光程的梯度直接相关。因气动光学应用中^[12-13],偏折角和通过介质总光程比较小,沿光线传播方向可近似认为 $ds = dz$,则

$$l = \int n dz, \quad (4)$$

推出光程差(OPD)

$$\Delta l = \int (n - n_0) dz \approx \epsilon \Delta Z, \quad (5)$$

式中 n 表示时刻 t 对应的流场折射率, n_0 表示初始时刻 t_0 对应的流场折射率, ΔZ 为光束穿过流场扰动区的长度。

2.2 偏折角计算方法

同一背景小圆点光线在风洞吹风(有扰动)时和未吹风(无扰动)时形成的夹角 ϵ 如图 1 所示,光线偏折角 ϵ 为沿光线路径折射率梯度的积分,有

$$\epsilon = \int_{z_D - \frac{1}{2}\Delta Z}^{z_D + \frac{1}{2}\Delta Z} \nabla n dz, \quad (6)$$

式中 $\Delta Z \ll Z_D$ 。根据投影的几何关系可知

$$\tan \theta = \frac{\Delta'}{Z_B} = \frac{\Delta}{f}, \quad (7)$$

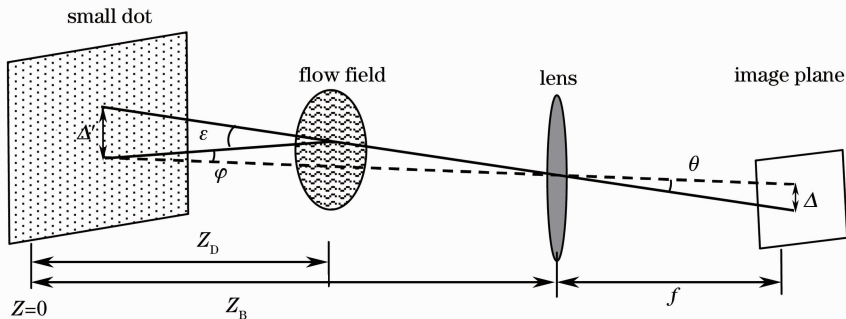


图 1 光束折射示意图

Fig. 1 Principle of a beam refraction

式中 Δ' 为小圆点在世界坐标系下位移量; Δ 为小圆点在像平面坐标系下位移量; Z_B 为相机摄影中心与小圆点背景板的距离; f 为相机焦距, 则有

$$\tan \varepsilon = \tan(\varphi + \theta) = \frac{\tan \varphi + \tan \theta}{1 - \tan \varphi \tan \theta}, \quad (8)$$

$$\varepsilon = \arctan \left[\frac{Z_B \tan \theta}{Z_D - (Z_B - Z_D) \tan^2 \theta} \right]. \quad (9)$$

将(9)式代入(5)式, 即可通过测量图 1 上每个圆点的位移, 解算气动光学的波前畸变(光程差)。

3 实验研究

实验设备包括: 相机 2 个(分辨率为 400 万像素)、图像采集计算机 2 台、50 mm 定焦镜头 2 个、高密度小圆点背景; 风洞实验设备为中国空气动力研究与发展中心的 2 m × 2 m 超声速风洞, 实验模型为某跨大气层飞行器风洞模型, 实验马赫数为 3.0。

从(7)式与(9)式中可知, 偏折角 ε 与背景小圆点到摄影中心的距离 Z_B 和背景圆点到飞行器模型距离 Z_D 相关, 其测量精度严重影响气动光学的波前畸变的测量精度, 故本实验用视频测量方法定量测量小圆点背景板到飞行器模型和摄影中心的距离; 并在 2 m 超声速风洞未吹风时, 测得小圆点到摄影中心直线在风洞试验段两观察窗内的线段长度, 得到从摄影中心出发到背景板各小圆点的光束穿过的流场扰动区的长度。

本次实验采用文献[14]的方法得到相机光学成像系统的畸变参数; 采用四光反射标志(RRT)技术制作背景小圆点, 采用梯度幅值法进行亚像素精度边缘定位, 再用椭圆最小二乘拟合得到小圆点中心[15-17]。文献[17]通过模拟实验和实际图像处理实

验, 证实该方法的圆点定位精度优于 0.02 pixel; 本文采用自主开发的风洞试验模型位移与姿态角视频测量系统, 测得小圆点背景板到摄影中心的距离为 3007.184 mm, 模型到背景的距离为 1005.043 mm, 迎角测量精度为 0.01°[14-16]。

本实验中测得模型的迎角变化范围为 -4.22° ~ 22.32°, 光源为可见光, 相机的曝光时间为 5 μs。

3.1 波前畸变测量数据分析

某跨大气层飞行器风洞模型迎角为 20.73° 时, 其气动光学畸变场测量结果如图 2 所示。图 2(a) 中箭头的长短代表偏折位移的大小, 其箭头方向为光束偏折的方向; 图 2(b) 为光程差云图, 图中正值表明摄影中心到该圆点的光程增加, 负值则表示光程缩短; 图中间的空白区为该飞行器模型位置; 图 2(a) 中从点 P_a 到 P_b 、点 P_c 到 P_d 处偏折位移突然增加, 在图 2(b) 中对应位置表现为光程差突然增长[图 3 为图 2(b) 中虚线方框处的放大图], 即沿 P_a 到 P_b 、沿 P_c 到 P_d , 气动光学畸变量发生突变。为更清晰地定量观察本文的光程差测量结果, 特将图 2(b) 矩形框区域光程差测量数据沿超声速来流方向(即 Y 方向)详细列出(如表 1 和图 4 所示), 从中能明显发现在穿过点 P_a 到 P_b 、点 P_c 到 P_d 处时, 光程差出现“突峰”(均值的 6.28 倍)。由空气动力学理论可知: 超声速飞行的物体, 在物体最前面形成激波, 由于激波前后密度的变化, 使激波成为一个光线折射表面[1]。图 2 中偏折位移量和光程差测量数据表明, 沿 P_a 到 P_b 、 P_c 到 P_d 处出现光线折射表面, 即沿 P_a 到 P_b 、 P_c 到 P_d 处的气动光学畸变分别为机头与机翼的斜激波流动结构所诱发, 这与该飞行器模型的气动布局

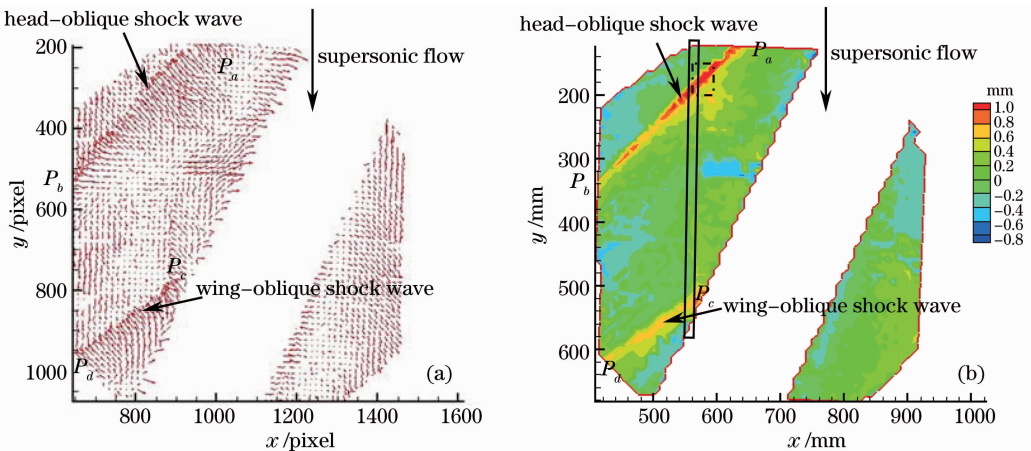


图 2 迎角 20.73° 时偏折位移与光程差图。(a) 偏折位移矢量图; (b) 光程差云图

Fig. 2 Displacement and OPD at angle of attack 20.73°. (a) Displacement vector diagram; (b) OPD nephogram

形成的激波位置吻合,表明本文方法的测量结果正确;从表 1 和图 4 可知,本次实验测得的光程差最大

值为 1.124 mm,最小值为-0.430 mm,平均值为 0.179 mm。

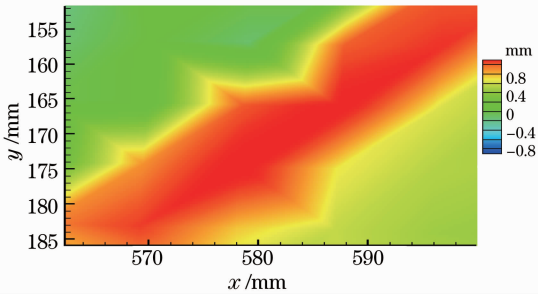


图 3 图 2(b)虚线方框处的放大图

Fig. 3 Amplification map in dotted box of Fig. 2(b)

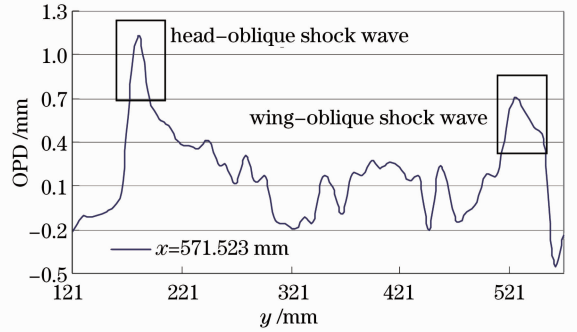


图 4 图 2(b)实线长方框中光程差与 y 的关系曲线

Fig. 4 Relationship between OPD and y in solid rectangle of Fig. 2(b)

表 1 图 2(b)实线长方框中光程差数据

Table 1 Data for OPD in solid rectangle of Fig. 2(b)

x (571.523mm)							
y /mm	OPD /mm	y /mm	OPD /mm	y /mm	OPD /mm	y /mm	OPD /mm
121.504	-0.211	183.061	1.124	—	—	517.019	0.496
130.282	-0.116	191.865	0.706	464.519	0.075	525.760	0.704
139.111	-0.117	200.745	0.555	473.260	-0.149	534.506	0.615
147.852	-0.089	209.555	0.518	482.051	-0.080	543.285	0.503
156.650	-0.052	218.359	0.396	490.817	-0.011	551.949	0.418
165.492	0.055	227.176	0.373	499.614	0.180	560.715	-0.430
174.245	0.881	235.980	0.356	508.374	0.175	569.449	-0.238

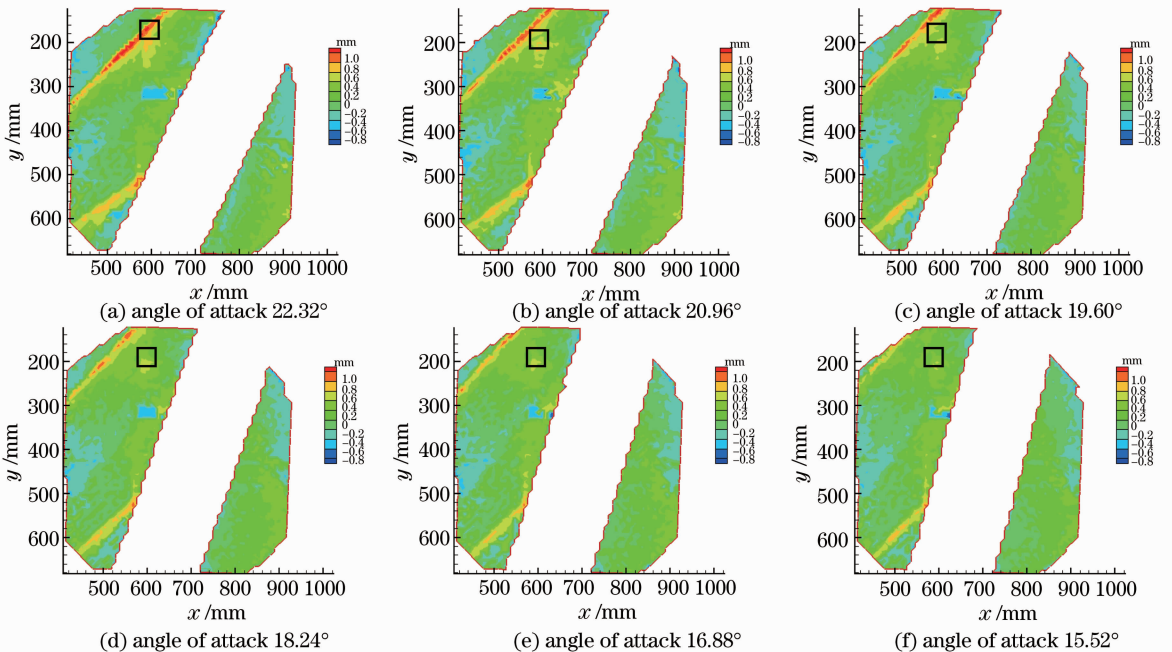


图 5 随迎角变化的光程差测量值云图

Fig. 5 Measured value for OPD with changing angle of attack

表 2 随迎角变化的光程差数据

Table 2 OPD data with changing angle of attack

Angle of attack / (°)	OPD($x=579.084$, $y=156.986$) /mm	OPD($x=587.583$, $y=166.158$) /mm	OPD($x=596.153$, $y=175.253$) /mm
22.32	-0.094	1.057	0.654
20.96	0.939	0.664	0.519
19.60	0.542	0.319	0.229
18.24	0.350	0.297	0.283
16.88	0.207	0.261	0.183
15.52	0.211	0.178	0.126

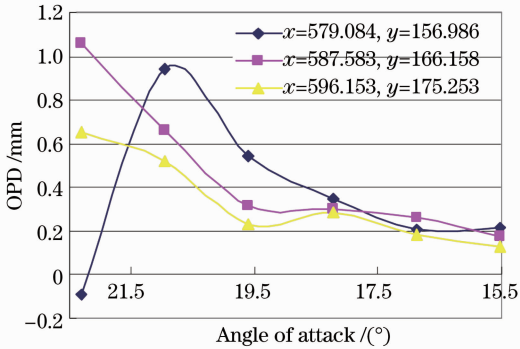


图 6 光程差随迎角的变化曲线

Fig. 6 OPD with changing angle of attack

来流马赫数为 3.0, 某跨大气层飞行器风洞模型迎角分别 22.32°、20.96°、19.60°、18.24°、16.88° 和 15.52° 时测得的光程差分布云图如图 5 所示, 其中, 图 5 中小方框区域中心的光程差随迎角变化曲线如图 6 所示(具体光程差值如表 2 所示), 表明本文所搭建的测量系统能准确测量随模型迎角变化而变化的气动光学波前畸变, 并将波前畸变场及其变化的过程可视化, 为进一步科学研究提供了可靠有效的测量数据。

3.2 Zernike 多项式波前重构与分析

波前重构主要方法有基于区域的偏微分方程模型法、基于频谱分析的 Fourier、小波变换法以及 Zernike 模式法等^[18-19]。其中基于区域的偏微分方程模型, 求解精度较低; Fourier 与小波变换法较适合具有稳定性、周期性的流场; 而 Zernike 模式算法简单且运算量较低, 在光学领域应用广泛, 故, 本文亦采用 Zernike 多项式重构波前。在直角坐标系中, 波前 $\phi(x, y)$ 矩阵可表示为

$$Z_{xy}K = \phi_{xy}. \quad (10)$$

本文采用 Householder 变换法求解(10)式。

文献[19]采用 23~36 阶 Zernike 多项式对不超过 769 个离散点进行了波前重构与精度分析, 并认为 36 阶多项式已足够重构一般实际波面。然而由于实验测量幅面大, 离散数据较多(达 2152 离散

点), 故进一步研究了大幅面且多离散点时 Zernike 阶数对重构精度的影响, 并采用残差量评估重构精度。残差量 e_i 计算公式为

$$e_i = |\phi_{xy} - \phi(x_i, y_i)|, \quad (11)$$

式中 ϕ_{xy} 为测量值, $\phi(x_i, y_i)$ 为重构波前值。

为此, 特选取峰值区域附近 9 个点(如图 7 所示), 绘制随 Zernike 重构阶数 n 增加的残差曲线(如图 8 所示)。从图 8 中可知随着 Zernike 多项式重构阶数的增加, 除某些点(如 499 节点)存在粗大误差外, 重构的波前畸变残差值变小且近似收敛; 图 9 为随迎角变化, 采用 169 阶重构的波前畸变二维云图, 图 10 为图 9(a) 三维展示图。因此, 本文认为: 对于大幅面波前畸变场(测量数据达 2000), 为

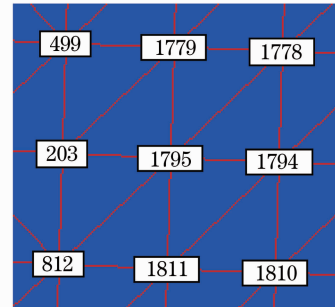


图 7 所选节点分布图

Fig. 7 Nodes distribution

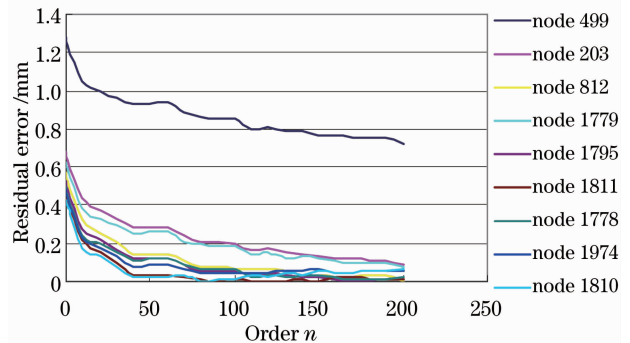


图 8 Zernike 多项式残差曲线图(图 7 节点)

Fig. 8 Relation curves of Zernike polynomial fitting residual error (Fig. 7 nodes)

使残差尽可能小且满足应用精度需求,同时不增加其运算量,应采用大于 150 阶的 Zernike 多项式重

构波前。

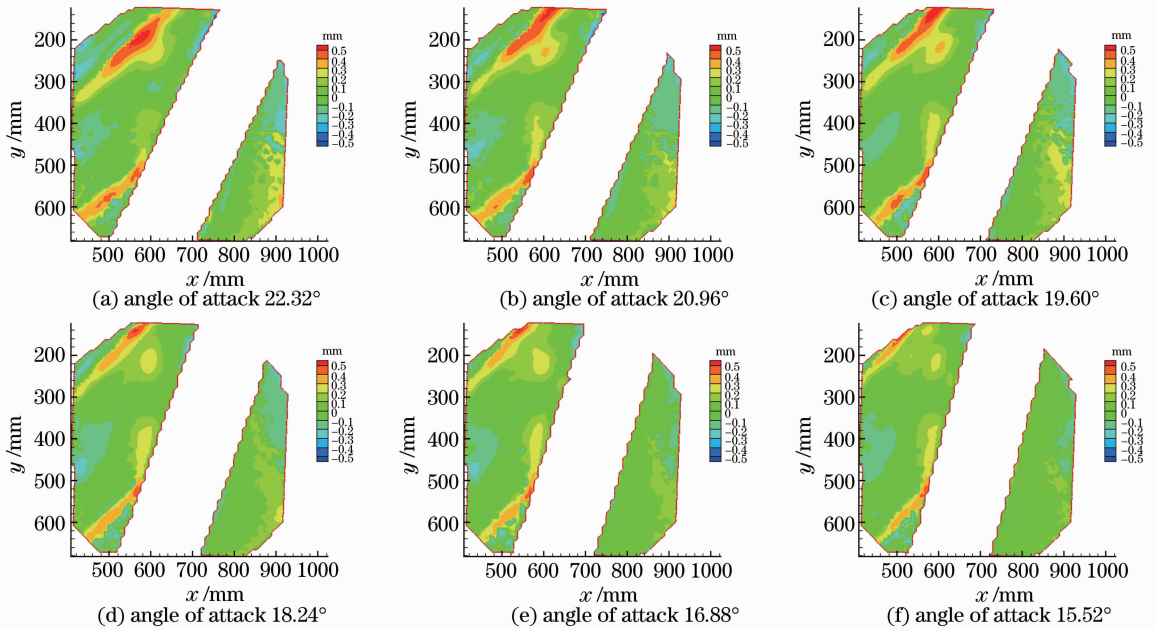


图 9 Zernike 多项式重构的光程差云图(169 阶)

Fig. 9 OPD reconstructed by Zernike polynomials (169 order)

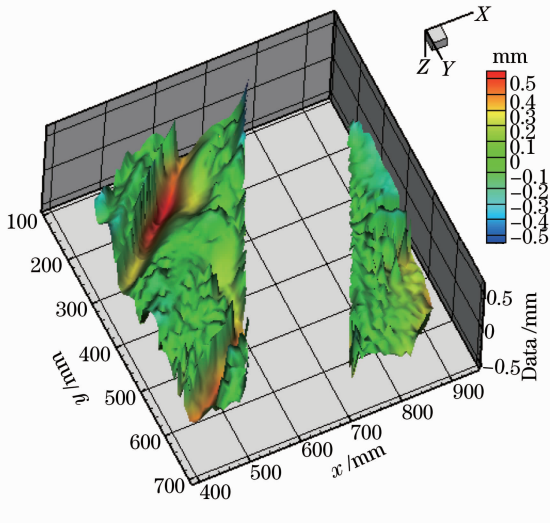


图 10 图 9(a)光程差三维显示图

Fig. 10 Three-dimensional diagram of OPD for Fig. 9(a)

4 结 论

提出大幅面气动光学波前畸变场的测量与重构方法,采用视频测量技术精确测量相机与背景点的空间位置,准确地将背景点的空间偏移测量值转化为光束从相机摄影中心出发穿过流动区到背景点的光程差,实现了气动光学波前畸变场的定量测量。2 m 超声速风洞中某跨大气层飞行器模型实验结果表明:本方法可以定量测量波前畸变场,测得机头与

机翼的斜激波所致的波前畸变结构正确;同时,发现 Zernike 多项式阶数超过 150 后波前畸变重构值的残差较小且满足应用精度需求。

方法兼具 BOS 和视频测量的优点,光路简单,且无需使用价格昂贵的相干光源和平行光学组件等(使成本降低),为气动光学效应的定量测量提供了新途径。

参 考 文 献

- Li Guichun. Aero-Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- 李桂春. 气动光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- G Stanislav, J Eric. Aero-optics of supersonic boundary layers [C]. Orlando: 49th AIAA, 2011. AIAA-2011-1325.
- P Chris, R Mark, J Eric. The aero-optical environment of a helicopter in hover [C]. Orlando: 49th AIAA, 2011. AIAA-2011-1328.
- R R Mark, C Grady, J J Eric. Aerodynamic design of an aircraft-mounted pod for improved aero-optic performance [C]. Orlando: 48th AIAA, 2010. AIAA-2010-437.
- Zhao Yuxin, Yi Shihe, Tian Lifeng. Aero-optic distortion and jitter in supersonic mixing layer [J]. Science China: Physics Mechanics Astronomy, 2010, 40(1): 33-46.
- 赵玉新, 易仕和, 田立丰. 超声速混合层气动光学畸变与抖动 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(1): 33-46.
- Abhishek Bichal, Brian Thurow. Development of a background oriented schlieren based wavefront sensor for aero-optics [C]. Chicago: 40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2010. AIAA-2010-4842.
- Feng Sheng. Wave-Front Sensing Technique Research [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of

- China, 2009. 1-9.
冯 胜. 波前检测技术的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009. 1-9.
- 8 L Venkatakrisnan, G E Ameer. Density measurements using the background oriented schlieren technique [J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 37(2): 237-247.
- 9 Kolja Kindler, Erik Goldhahn, Friedrich Leopold, *et al.*. Recent developments in background oriented schlieren methods for rotor blade tip vortex measurements [J]. *Experiments in Fluids*, 2007, 43(2-3): 233-240.
- 10 J M Desse, R Deron. Shadow, schlieren and color interferometry [J]. *Aerospace Lab*, 2009, (1): AL01-09.
- 11 Lü Xiaoliang. Temperature Measurement Based on Background Oriented Schlieren [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. 23-25.
吕小亮. 背景纹影技术的温度场测量 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011. 23-25.
- 12 Zhang Shijie, Li Junshan, Sun Lihui, *et al.*. Aero-optical imaging deviation under the small-incidence-angle condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1001002.
张士杰, 李俊山, 孙李辉, 等. 小入射角条件下气动光学成像偏移 [J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1001002.
- 13 Feng Dinghua, Li Hua, Xiao Fei, *et al.*. Study on optical transmission effect of optical window's cavity flow [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0401004.
冯定华, 李 桦, 肖 飞, 等. 光学窗口凹腔流场的光学传输效应研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0401004.
- 14 Zhang Zhengyu, Huang Shijie, Luo Chuan, *et al.*. Nonlinear distortion correction of camera based on coplanar condition equations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0115002.
张征宇, 黄诗捷, 罗 川, 等. 基于共面条件的摄像机非线性畸变自校正 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0115002.
- 15 Zhengyu Zhang, Shuiliang Wang. Videogrammetric measurement for model displacement in wind tunnel test [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 130-134: 103-107.
- 16 Sun Yan, Zhang Zhengyu, Huang Shijie, *et al.*. Vision measurement for model angle of attack in wind tunnel tests [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(1): 1-7.
孙 岩, 张征宇, 黄诗捷, 等. 风洞试验中模型攻角视觉测量技术研究 [J]. *航空学报*, 2013, 34(1): 1-7.
- 17 Huang Guiping. Study on the Key Technologies of Digital Close Range Industrial Photogrammetry and Applications [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. 54-59.
黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2005. 54-59.
- 18 Sonam Singh, Dinesh Ganotra. Phase estimation for Zernike circle polynomials using phase locked loops for investigation of camera aberrations [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2013, 51(3): 261-269.
- 19 Feng Jie, Bai Yu, Xing Tingwen. Fitting accuracy of wavefront using Zernike polynomials [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(2): 32-34.
冯 婕, 白 瑜, 邢廷文. Zernike 多项式波面拟合精度研究 [J]. *光电技术应用*, 2011, 26(2): 32-34.

栏目编辑: 何卓铭