

内转式进气道异形面光学窗口设计及成像畸变修正

郭鹏宇¹, 薛志亮², 林文辉², 汪磊², 吴迎春^{2*}, 余安远¹, 吴颖川¹, 吴学成²

¹中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所高超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000;

²浙江大学热能工程研究所能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 基于光线轨迹跟踪, 提出一类内表面保形、外表面修正, 且双侧窗口对称的异形面光学窗口设计方法, 设计了异形面光学窗口。搭建异形面光学窗口实验系统, 研究了通过光学窗口观测到的流场图像畸变特性及其修正方法, 提出了二阶多项式成像畸变的修正模型, 并对畸变图像进行修正。结果表明: 平行光经过异形面光学窗口后有明显的偏折, 导致亮度分布不均匀, 存在亮带和暗斑; 同时, 使棋盘格标定板的图像发生平移、缩放和旋转, 不同位置处的畸变特征不同。构建畸变图像修正模型, 对畸变图像进行修正, 修正后的图像与原图像基本重合, 各角点坐标差值小于 1 pixel (7.4 μm), 说明修正模型具有较高的精度。异形面光学窗口的设计及修正模型的发展有助于获得精确的内转式进气道异形曲面的流道内部流场结构和流动特性。

关键词 图像处理; 内转式进气道; 异形面光学窗口; 成像畸变; 标定板

中图分类号 V11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1211004

Heteromorphic Optical Window Design and Imaging Distortion Correction for Inward-Turning Inlet

Guo Pengyu¹, Xue Zhiliang², Lin Wenhui², Wang Lei², Wu Yingchun^{2*},
Yu Anyuan¹, Wu Yingchuan¹, Wu Xuecheng²

¹Science and Technology on Scramjet Laboratory, Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China;

²State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Institute of Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract This work proposes a strategy of designing the optical heteromorphic window which comprises a pair of symmetrical conformal internal surface and correction external surface that are determined using ray tracing. An experimental system is set up to analyze the characteristics and correction of image distortion of the optical heteromorphic window. A correction model of two-order polynomial imaging distortion is proposed and then applied to distorted image correction. The results show that after passing through the optical heteromorphic window, the parallel light has obvious deflection, resulting in uneven brightness distribution and bright and dark spots. At the same time, the image of the calibration board is translated, zoomed, and rotated, and its distortion characteristics at different positions are different. By constructing the correction model, the distorted image is corrected, and the corrected image is highly coincident with the original image. The coordinate difference of each corner point is less than 1 pixel (7.4 μm), demonstrating that the correction model has high precision. The design of the optical heteromorphic window and the development of the correction model contribute to obtaining an accurate internal flow field structure in the inward-turning inlet.

Key words image processing; inward-turning inlet; optical heteromorphic window; imaging distortion; calibration board

OCIS codes 100.2000; 150.1488; 160.4760

收稿日期: 2019-07-03; 修回日期: 2019-08-13; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: 能源清洁利用国家重点实验室开发课题(ZJUCEU2018014)

* E-mail: wycgsp@zju.edu.cn

1 引 言

高超声速内转式进气道是冲压发动机的关键部件,其性能对整个推进系统来说至关重要。此类进气道具有捕获流量高、压缩能力强、气动阻力小、容易与燃烧室对接等优点^[1-2],受到了国内外相关领域学者的广泛关注。国外已经将内转式进气道引入到高超声速一体化飞行器的设计中^[3-4]。为了保证高速气流被压缩、流动阻力被减小,内转式进气道的型面是三维非规则曲面,高速气流流动时会形成三维曲面激波,激波反射相互干扰,使得其内部流场均匀性变差,流动具有明显的特殊性和复杂性^[5-6]。通过实验获得内转式进气道的内部流场结构及其流动特性,可以用来评判进气道的气动性能,进而指导进气道结构优化。

研究人员已发展出多种手段来观测内转式进气道的复杂流动,例如壁面油流、丝线显示、压力测量、纹影等^[7-8]。壁面油流技术主要用于显示物面的流动图谱^[9],如向安宇等^[10]、岳连捷等^[11]利用壁面油流技术研究了有无支板下进气道的基本流动特性,黄舶等^[12]应用壁面油流技术显示了进气道近壁面处的流动图像。丝线流谱可以实时显示当地近壁面的流动特性,用来判断层流向湍流的转捩,如李祝飞等^[13]和郭鹏宇等^[14]借助高速相机实时拍摄的丝线流谱,研究了进气道的自启动特性及其前体压缩面的流动分离情况。压力测量能够获得进气道的流场品质、流量等关键参数^[15],如王翼等^[16]、Huang等^[17]在进气道壁面布置沿程静压测点,根据壁面压力变化趋势判断流动分离的位置,同时利用皮托耙获得了沿程多个流向截面的压力分布,丰富了内转式进气道的内部流场信息。纹影技术具有结构简单、精度高等优势,在流体力学实验中具有广泛的应用。为了观察进气道外部的波系结构、刻画内流场的涡结构,南向军等^[18]、李永洲等^[19]应用纹影技术对方转圆高超声速内转式进气道进行实验研究,获得了激波、激波串、由激波与边界层相互作用形成的分离区等流动结构。李一鸣等^[20]发展了粒子平面激光散射技术,利用水蒸气在测量段的凝结作为纳米示踪粒子,通过巧妙地布置光路系统,对类椭圆形转圆形高超声速内转式进气道进行了实验,获得了进气道前体及隔离段的精细流场结构。Do等^[21]采用PLRS(planar laser Rayleigh scattering),以CO₂凝结作为示踪粒子,揭示了边界层的发展和转捩,分析了二元进气道的不启动现象。借助数值仿真可以

获得内转式进气道内部流场更详细的流动特征^[22],但这些流动特征的验证需要获得相应的实验结果。

内转式进气道的结构特征中存在内流道被遮挡的情况,传统的丝线显示,壁面油流结合压力测量获得的流场信息有限。若要应用纹影、阴影和PLRS等光学测量技术观测内流场信息,需要在流道壁面上开设光学窗口,而内转式进气道的型面都是异形曲面,常规的平面玻璃窗会引起流场结构改变,从而无法得到真实的流场信息。本文采用光线轨迹跟踪的方法,根据马吕斯定律设计了应用于内转式进气道的异形面光学窗口,从理论上研究了平行光通过异形面光学窗口时产生的光学偏折,提出了一种内表面保形的异形面设计与准则。实验发现,受异形面光学窗口加工精度的限制,窗口内图像光强不均匀,流场发生畸变,影响实验结果分析。记录平行光经过异形面光学窗口后的亮度分布,在异形面光学窗口间放置标定板,记录有无窗口下标定板的图像,分析异形面光学窗口的成像畸变特征,进一步计算标定板特征点的位移,提出修正方法,并验证修正方法的准确性,为获得清晰的内转式进气道内部流场结构及其流动特性提供了参考。

2 异形面光学窗口设计

利用纹影、阴影、全息等技术观测内转式进气道内流道流场时,由于进气道结构沿中心截面对称,因此往往会布置一对镜像对称的光学窗口,平行光从一侧窗口入射,携带流场信息的光线从另一侧窗口出射并传播到图像传感器。在该类布置中,理想情况为在无流场扰动时,通过两个窗口后的出射光线与入射光线平行。该类光学窗口的设计思路为通过调整外表面形状,使得平行光在通过内表面与内转式进气道异形曲面内流道壁面一致的异形面光学窗口后仍旧为平行光。光线经过异形面光学窗口传播的示意图如图1所示。光学窗口包括内表面 I 和外表面 O ,光学窗口的中心厚度为 d ,根据风洞实验参数选定光学窗口材质,其折射率记为 n 。假设入射光的方向为 y 轴的正方向,以垂直于入射光方向的 xz 平面建立三维坐标系。入射平行光线平行 y 轴入射至 P_1 点,经过曲面 I 折射后到达校正曲面 O 上的 P_2 点,再经过曲面 O 折射后平行于 x 轴出射。该设计准则保证入射光经过玻璃窗后,出射光的传输方向与入射光一致。设计外表面为校正曲面,用于消除内表面产生的光线偏折。在已知曲面 I 、玻璃折射率 n 和玻璃厚度 d 的情况下,根据光的折射

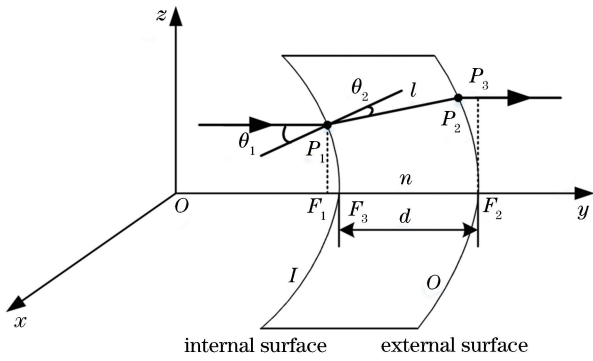


图 1 光线经过异形面光学窗口的传播示意图
Fig. 1 Diagram of light passing through optical heteromorphic window

定律可以求得曲面 O 。

首先,计算 I 曲面上 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 点的单位法向量 $l=(l_1, l_2, l_3)$,入射光线、出射光线 P_1P_2 、 I 曲面 P_1 的法线 l 三线共面,则有

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n, \quad (1)$$

$$\sin \theta_1 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2}. \quad (2)$$

通过(1)式和(2)式可以得到 θ_1 和 θ_2 。然后取 P_1 在 y 轴方向上的投影 F_1, F_3, F_2 分别是 y 轴和曲面 I, O 的交点, P_3 是 P_2 点出射光线上一点,其在 y 轴方向上的投影为 F_2 ,各点的位置关系如图 1 所示。根据马吕斯定律,光线从 P_1 点到 P_3 点的光程与光线从 F_1 点到 F_2 点的光程相等。假设曲面 O 上有被求点 $P_2(x_2, y_2, z_2)$, F_3 的横坐标为 d_3 ,则有

$$n |P_1P_2| + |P_2P_3| = |F_1F_3| + n |F_2F_3|. \quad (3)$$

根据几何光学,出射光线 P_1P_2 与 y 轴的夹角为 $\theta_1 - \theta_2$,则 $|P_1P_2|$ 可表示为 $(y_2 - y_1) / \cos(\theta_1 - \theta_2)$ 。由(3)式可得

$$\frac{n(y_2 - y_1)}{\cos(\theta_1 - \theta_2)} + (d + d_3 - y_2) = (d_3 - y_1) + dn. \quad (4)$$

由于 P_1P_2 与 l 在同一平面内,存在以下几何关系:

$$\sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} = (y_2 - y_1) \tan(\theta_1 - \theta_2), \quad (5)$$

$$\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} = \frac{l_3}{l_1} (l_1 \neq 0) \text{ or } \frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1} = \frac{l_1}{l_3} (l_3 \neq 0). \quad (6)$$

通过联立(4)~(6)式,可以求解出 P_2 点的坐标 (x_2, y_2, z_2) 。对曲面 I 上每个 P_1 点进行求解,得

到离散点 P_2 的集合,再根据曲面 I 的生成方法得到校正曲面 O ^[23]。

按照上述方法,以进气道内壁面为光学窗口的内表面,设计并制造了光学窗口材质为远紫外光学石英玻璃的异形光学窗口,如图 2 所示。其中,折射率 $n=1.46$,玻璃中心厚度为 20 mm。为了保证平行光的入射角度与设计值一致,设计安装台阶和定位面,用于提高装配精度。

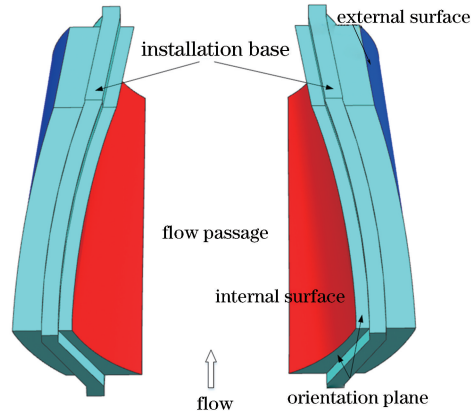


图 2 异形面光学窗口的三维图
Fig. 2 Three-dimensional visualization of optical heteromorphic window

3 异形面光学窗口成像畸变及其修正

利用设计的异形面光学窗口开展内转式进气道流场阴影显示实验。光路系统呈 Z 字型布置,实验风洞喷管出口直径为 0.5 m,实验马赫数为 4.95,来流总压为 1 MPa,总温度为 350 K,利用高速相机记录阴影图像,结果如图 3 所示。透过光学窗口可以看到内流道的激波阴影图像,一定程度上可以判断激波的角度。但是,受到异形面光学窗口加工、装配精度和光学测量系统等的限制,光学窗口存在成像

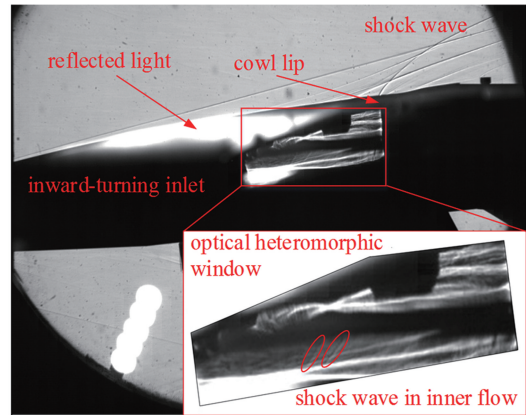


图 3 内转式进气道实验阴影图像
Fig. 3 Shadow image in inward-turning inlet test

偏差,其结果表现为:内转式进气道内流场信息模糊,光强不均匀,流场图像发生畸变,较难获得有效的内流场流动结构。为了定量分析异形面光学窗口的成像畸变特征,在实验室搭建模拟光路系统,记录平行光经过异形面光学窗口后的光强分布,在异形面光学窗口间放置标定板,对比有无窗口下标定板的图像,分析异形面光学窗口的成像畸变特征。

3.1 实验系统

搭建内转式进气道异形面光学窗口成像畸变分析实验台(图 4),其主要包括平行光卤钨灯光源、棋盘格标定板、异形面光学窗口、三维(3D)位移系统、CCD 相机和计算机。光源采用 Z 字型纹影仪光源,平行光光束直径为 200 mm,光强可调。平行光束照射异形面,并在异形面内流道内放置标定板。由于异形面光学窗口成像畸变明显,因此常规的棋盘格标定板较难确定图像畸变前后各角点的对应关系。为此,设计了带有特征符号的标定板。通过符号序列的唯一性确定各角点的位置。标定板黑白块长为 1 mm,符号宽度为 0.2 mm。为了保证实验时异形面光学窗口的平行光入射角和设计值一致,采用 3D 打印制作了光学窗口的固定支架。在异形面内流道另一侧采用 CCD 相机(AVT,GE4900,德国)拍摄标定板图像。相机分辨率为 4872 pixel ×

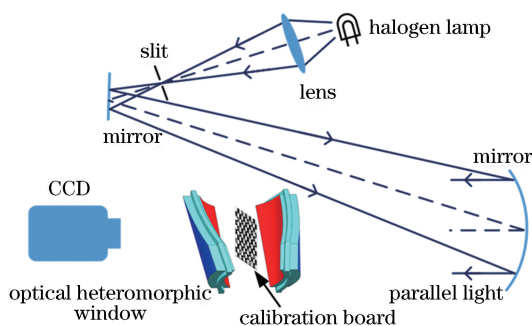


图 4 异形面畸变标定系统示意图

Fig. 4 Diagram of heteromorphic distortion calibration system

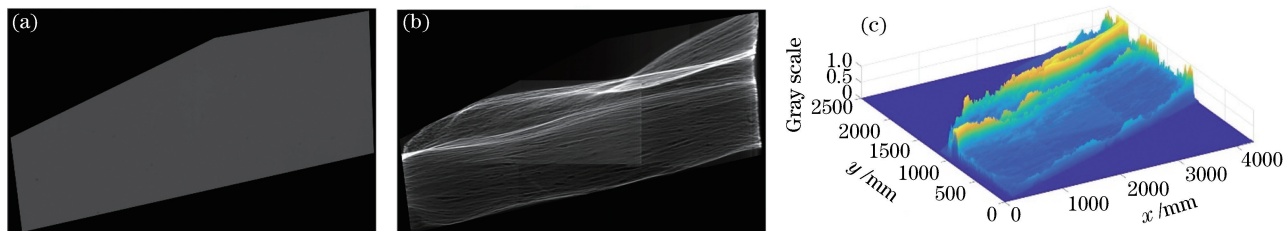


图 5 光源经过光学窗口前后的亮度分布。(a)异形面光学窗口入射光强;(b)异形面光学窗口出射光强;(c)有异形面光学窗口下亮度灰度值的 3D 分布

Fig. 5 Luminance distributions before and after light passing through optical heteromorphic window. (a) Incident light intensity of optical heteromorphic window; (b) output light intensity of optical heteromorphic window; (c) 3D distribution of grayscale with optical heteromorphic window

3248 pixel,像素尺寸 $7.4 \mu\text{m}$ 。为了得到光学窗口不同位置处的高分辨率畸变图像,采用 3D 位移台改变标定板在内流道内的相对位置,然后对记录图像进行拼接,得到整个光学窗口的畸变图像,位移台的精度为 0.01 mm。

3.2 异形面光学窗口成像畸变特征分析

利用 CCD 相机记录均匀平行光经过异形面光学窗口的亮度分布(图 5)。图 5(a)为异形面光学窗口入射光的亮度分布,可以看出,平行光光源的亮度分布均匀,对图像灰度值进行归一化,其方差为 0.018。平行光经过异形面光学窗口的亮度分布如图 5(b)所示,可以看出,光学窗口对光线有明显的偏折,导致亮度分布不均匀,存在亮带和暗斑,图像灰度值方差为 0.163,远高于无窗口时的数值。对图 5(b)的图像进行归一化处理,其灰度值的 3D 分布如图 5(c)所示,在光学窗口的左上方和右上方存在多个峰值,且峰值的走向和窗口倾斜角度基本一致。对比光学窗口在实际内转式进气道中的位置,水平方向(气流方向)进气道内表面曲率小、竖直方向曲率大,而峰值位置和走向对应进气道内表面曲率大的位置,说明异形面光学窗口在曲率大的位置加工精度较低,使得光线偏折会聚,形成亮带峰值。

为解决平行光经过异形面光学窗口后亮度分布不均匀的问题,需提高光学窗口大曲率位置的加工精度,采用归一化图像灰度值的方差判断其均匀性。对于较难消除的暗斑,通过定位窗口位置、实验前记录多张背景图像、去除背景的方法可以提高背景的均匀性^[24]。

在两个异形面光学窗口中心截面处放置棋盘格标定板,记录标定板图像。对比有、无光学窗口下局部标定板的图像(图 6)。图 6(a)为无光学窗口下标定板的图像,黑白棋盘格和符号边缘清晰,对各角点进行检测并标识(图中小圈)。图 6(b)为有光学窗

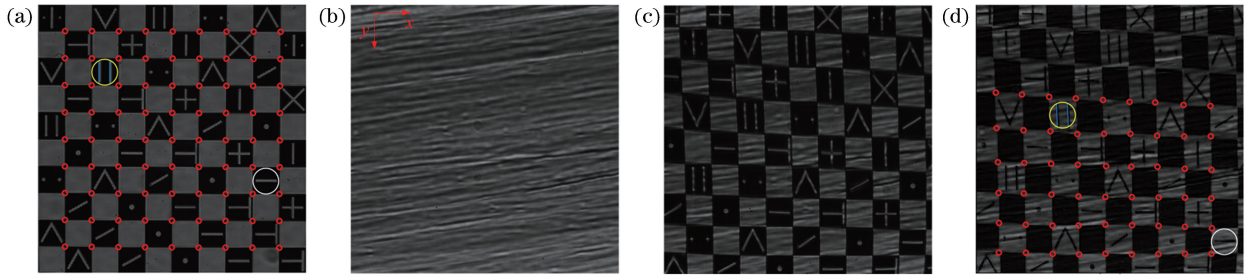


图 6 有、无异形面光学窗口下棋盘格标定板的图像。(a)无异形面光学窗口;(b)背景噪声;(c)有异形面光学窗口;(d)去背景的标定板图像

Fig. 6 Images of checkerboard calibration board with and without optical heteromorphic window. (a) Without optical heteromorphic window; (b) background noise; (c) with optical heteromorphic window; (d) image of calibration board after removing background

口时的背景,图 6(c)是光学窗口中标定板的图像,利用去背景的方法得到图 6(d)。可以看出,异形面光学窗口使标定板的图像发生了明显的畸变,但各符号特征仍然清楚,棋盘格角点仍可以被识别。利用各符号的对应关系,对比图 6(a)和图 6(d),棋盘格各角点坐标发生了显著偏移,部分棋盘格上下被拉伸(图中黄圈位置),部分被压缩(如图中白圈位置),原本正方形的棋盘格被扭曲成平行四边形。计算左上角的圈内符号对应棋盘格中心的位移, x 方向移动 0.70 mm, y 方向移动 1.63 mm,逆时针旋转 2° 。棋盘格横向宽度基本不变,纵向不同位置宽度变化不同,横向的倾斜程度明显大于纵向。总之,有异形面光学窗口后,棋盘格标定板的图像存在平移、缩放和旋转,与亮度分布特征相似,不同位置处的畸变特征不同,且光学窗口曲率大的位置成像畸变大,纵向畸变大于横向畸变。

3.3 异形面光学窗口成像畸变修正模型

异形面光学窗口的成像偏差造成内转式进气道内流场信息模糊、光强不均匀、流场图像畸变,影响实验结果分析。构建成像畸变修正模型,利用标定板求解修正模型参数,对棋盘格标定板图像进行修正,验证修正方法的准确性,以获得清晰的内转式进气道内部流场结构及其流动特性。

分析异形面光学窗口的成像畸变特征,可以把光学窗口对成像的影响归纳为对图像进行的平移、缩放和旋转等几何变换。

图像的平移是将图像中所有的点按照指定的平移量水平、垂直移动。假设经过光学窗口后图像的水平平移量为 t_x ,垂直平移量为 t_y ,则正常图像像素点坐标与畸变图像像素点坐标的映射关系为

$$\begin{cases} x = u + t_x \\ y = v + t_y \end{cases} \quad (7)$$

图像缩放是指正常图像经过光学窗口后在 x 轴方向上按比例缩放为原来的 $1/s_x$,在 y 轴上按比例缩放为原来的 $1/s_y$,从而得到畸变图像,其映射关系为

$$\begin{cases} x = s_x u \\ y = s_y v \end{cases} \quad (8)$$

图像旋转是指正常图像经过光学窗口后以中心为原点,旋转一定的角度 θ 得到的畸变图像,其映射关系为

$$\begin{cases} x = u \cos \theta - v \sin \theta \\ y = u \sin \theta + v \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

为了便于求解正常图像和畸变图像的映射参数,将图像的平移、缩放和旋转映射关系归纳为

$$\begin{cases} x = a_0 + a_1 u + a_2 v + a_3 uv + a_4 u^2 + a_5 v^2 \\ y = b_0 + b_1 u + b_2 v + b_3 uv + b_4 u^2 + b_5 v^2 \end{cases} \quad (10)$$

一般多项式的次数为 2 时,基本可以修正图像的平移、缩放、旋转和弯曲等畸变。为了求解多项式的系数,即图像的映射参数,需要对光学窗口进行标定,获得畸变图像与正常图像对应像素点的坐标。当多项式最高次数为 m 时,需要 $(m+1)(m+2)/2$ 个对应点坐标。由于异形面光学窗口不同位置的畸变特性不同,因此,首先选取较小的窗口区域对映射参数进行求解,获得局部畸变修正;然后,循环该算法,遍历整个图像,以获得整体畸变修正。

3.4 异形面光学窗口成像修正验证

利用棋盘格标定板对正常图像和畸变图像的映射参数进行求解。首先,根据异形面光学窗口位置截取无窗口时标定板的图像,利用标定板符号阵列的一一对应关系截取畸变后的图像,并对原图像和畸变图像进行角点检测,结果如图 7(a)和(b)所示,得到各角点的坐标。然后,确定多项式的最高次数,

本研究中取 2, 需要 6 个角点坐标, 利用各角点坐标的对应关系拟合求解多项式的系数, 拟合度达 0.9965。得到畸变图像的修正模型参数 $a_0 \sim a_5$ 分别为 0.0091, 0.9114, 0.0237, -0.0022, -0.0027, -0.0058; $b_0 \sim b_5$ 分别为 0.0448, 0.0206, 1.0551, -0.0143, -0.0067, -0.0331。最后, 采用求解的修正模型对畸变图像进行修正, 修正图像与原图像的对比及修正图像和畸变图像的对比分别如图 7(c) 和(d) 所示, 可以看出, 畸变图像经过修正后, 棋盘格的位置、大小与形状发生明显变化, 修正后的

图像与原图像高度重合, 说明利用构建的修正模型可以对异形面光学窗口造成的成像畸变进行校正。

进一步计算修正后图像各角点的坐标和原图各角点坐标的差值, 结果小于 1 pixel (7.4 μm), 标定精度达 0.2 mm, 可以满足实际应用要求。同时还发现, 在满足映射参数求解所需坐标点个数的条件下, 选取的棋盘格数量越少, 修正图像与原图像的吻合度越高, 角点坐标的差值平均值越小, 这主要是由各向异性的异形面窗口在各个地方的畸变不一致所致。

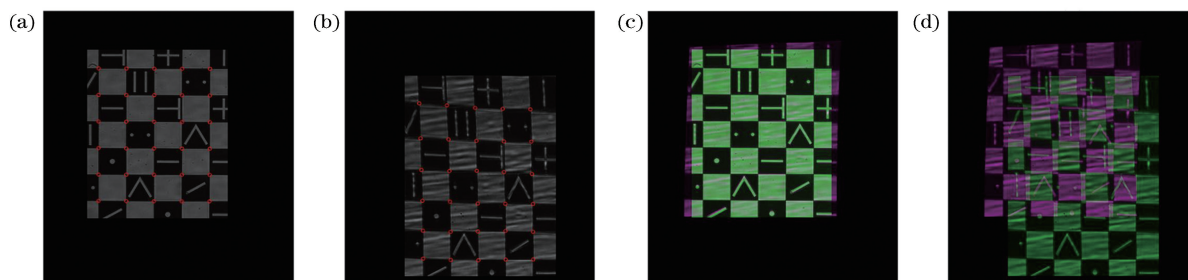


图 7 畸变图像修正结果。(a)原图像角点检测;(b)畸变图像角点检测;(c)修正图像和原图像对比;(d)修正图像和畸变图像对比

Fig. 7 Results of correction of distorted image. (a) Corner detection of original image; (b) corner detection of distorted image; (c) comparison of corrected image with original image; (d) comparison of correction image with distortion image

4 结 论

针对空天装备内转式异形面进气道内流场测量这一基础问题, 提出了一种异形面光学窗口设计方法, 通过实验系统分析了异形面光学窗口的成像畸变特征, 提出成像畸变修正模型, 并对畸变图像进行修正, 主要结论如下。

1) 采用光线轨迹跟踪的方法, 设计了一种内表面与内转式进气道异形曲面内流道壁面一致、外表面为校正曲面的异形面光学窗口, 使得在没有流场扰动的前提下可以使入射光经过光学窗口后出射光的传输方向与入射光一致。

2) 棋盘格标定板成像特性表明, 异形面光学窗口使流道内部的图像发生了平移、缩放旋转, 甚至弯曲, 不同位置处的畸变特征不同, 且光学窗口曲率大的位置成像畸变大, 纵向畸变大于横向。

3) 基于异形面光学窗口的成像畸变特征, 构建二阶多项式修正模型, 利用模型对畸变图像进行修正, 修正后的图像与原图像高度重合, 各角点坐标差值的平均值小于 1 pixel。

提出的异形面光学窗口设计及其畸变修正方法为空天装备等复杂内流道的可视化测量提供了一种

解决方案, 尤其适用于阴影、纹影、全息成像等采用平行光照明的测量系统。异形面光学窗口的设置, 有助于获得复杂流道的流场信息, 提高相关装备的设计水平, 推动我国空天事业的发展。

参 考 文 献

- [1] Fleeman E L. Tactical missile design [M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001: 1-16.
- [2] Emami S, Trexler C A, Auslender A H, *et al.* Experimental investigation of inlet-combustor isolators for a dual-mode scramjet at a Mach number of 4 [R]. USA: NASA Technical Report, 1995.
- [3] Wu Y C, He Y Y, He W, *et al.* Progress in airframe-propulsion integration technology of air-breathing hypersonic vehicle [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(1): 245-260.
吴颖川, 贺元元, 贺伟, 等. 吸气式高超声速飞行器机体推进一体化技术研究进展 [J]. 航空学报, 2015, 36(1): 245-260.
- [4] Yu A Y, Yang D W, Wei F, *et al.* Study on the performance of typical hypersonic inward-rotating inlet [C] // The 8th national conference on hypersonic technology. [S.l.: s.n.], 2015: 21.

- 余安远, 杨大伟, 卫锋, 等. 典型高超声速内转式进气道性能研究[C]//第八届全国高超声速科技学术会议论文集. [出版地不详: 出版者不详], 2015: 21.
- [5] Li Z F. An investigation on starting characteristics of hypersonic inlets[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 1-3.
李祝飞. 高超声速进气道起动特性机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 1-3.
- [6] Huang B, Li Z F, Yang J M, *et al.* An experimental observation of 3-D scramjet inlet flow in a shock tunnel [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(1): 23-29.
黄舶, 李祝飞, 杨基明, 等. 激波风洞内超燃冲压发动机三面压缩进气道流场实验观测[J]. *实验力学*, 2012, 27(1): 23-29.
- [7] He J H. Experimental research and numerical simulation of hypersonic inlet [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 2-7.
何继宏. 高超声速进气道试验研究与数值模拟[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 2-7.
- [8] Schrijer F F J, Scarano F, van Oudheusden B W. Application of PIV in a Mach 7 double-ramp flow[J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 41(2): 353-363.
- [9] Deng X Y, Liu M J, Lü Z Y. The principle of oil flow visualization technique and analysis of oil flow patterns[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1987, 5(2): 122-131.
邓学鏊, 刘谋信, 吕志咏. 油流显示技术和油流谱分析原理[J]. *空气动力学学报*, 1987, 5(2): 122-131.
- [10] Xiang A Y, Yue L J, Xiao Y B, *et al.* Investigation on sidewall compression scramjet inlet[J]. *Mechanics in Engineering*, 2007, 29(3): 7-10.
向安宇, 岳连捷, 肖雅彬, 等. 侧压式超燃进气道流场特性研究[J]. *力学与实践*, 2007, 29(3): 7-10.
- [11] Yue L J, Gong P, Xiao Y B, *et al.* Study on flow field characteristics of lateral pressure inlet with central struts[C]//The 7th national academic conference on experimental fluid mechanics. [S. l.: s. n.], 2007: 181-190.
岳连捷, 龚鹏, 肖雅斌, 等. 带中心支板侧压进气道流场特性研究[C]//第七届全国实验流体力学学术会议论文集. [出版地不详: 出版者不详], 2007: 181-190.
- [12] Huang B, Li Z F, Yang J M, *et al.* An experimental observation of 3-D scramjet inlet flow in a shock tunnel [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(1): 23-29.
黄舶, 李祝飞, 杨基明, 等. 激波风洞内超燃冲压发动机三面压缩进气道流场实验观测[J]. *实验力学*, 2012, 27(1): 23-29.
- [13] Li Z F, Huang R, Guo S T, *et al.* Surface tuft flow visualization in hypersonic inward turning inlet [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(7): 1475-1482.
李祝飞, 黄蓉, 郭帅涛, 等. 高超声速内转式进气道流动的壁面丝线显示[J]. *推进技术*, 2017, 38(7): 1475-1482.
- [14] Guo P Y, Yu A Y, Yang D W. Application of silk wire flow display technique in hypersonic internal rotation inlet test[C]//First China aerodynamics conference abstracts. [S. l.: s. n.], 2018: 1702-1703.
郭鹏宇, 余安远, 杨大伟. 丝线法流动显示技术在高超声速内转式进气道试验研究中的应用[C]//首届中国空气动力学大会摘要集. [出版地不详: 出版者不详], 2018: 1702-1703.
- [15] Yu F F, Shi J B, Chen Z, *et al.* Design of inlet pressure measurement rake of an airplane based on annular radiator [J]. *Journal of Machine Design*, 2013, 30(4): 56-59.
于芳芳, 史建邦, 陈钊, 等. 基于环散的飞机进气道出口压力测量耙设计[J]. *机械设计*, 2013, 30(4): 56-59.
- [16] Wang Y, Fan X Q, He J H, *et al.* Effect of sidewall geometry on starting characteristics of two-dimensional hypersonic inlet[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(2): 217-222.
王翼, 范晓楠, 何继宏, 等. 侧板构型对二维高超声速进气道启动性能的影响[J]. *航空学报*, 2010, 31(2): 217-222.
- [17] Huang R, Li Z F, Zhan D W, *et al.* Measurements of the streamwise vortices in a hypersonic inward turning inlet [C] // 21st AIAA International Space Planes and Hypersonics Technologies Conference, March 6-9, 2017, Xiamen, China. USA: AIAA, 2017: 2187.
- [18] Nan X J, Zhang K Y, Jin Z G, *et al.* Numerical and experimental investigation of hypersonic inward turning inlets with rectangular to circular shape transition [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(6): 988-996.
南向军, 张堃元, 金志光, 等. 矩形转圆形高超声速内收缩进气道数值及试验研究[J]. *航空学报*, 2011, 32(6): 988-996.
- [19] Li Y Z, Zhang K Y, Sun D. Experimental investigation on a hypersonic inward turning inlet of rectangular-to-circular shape with controlled Mach number distribution [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(10): 2970-2979.
李永洲, 张堃元, 孙迪. 马赫数可控的方转圆高超声速内收缩进气道试验研究[J]. *航空学报*, 2016, 37

- (10): 2970-2979.
- [20] Li Y M, Li Z F, Yang J M, *et al.* Flow visualization of a typical hypersonic inward-turning inlet using laser scattering[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(12): 121414.
李一鸣, 李祝飞, 杨基明, 等. 典型高超声速内转式进气道激光散射流场显示[J]. *航空学报*, 2017, 38(12): 121414.
- [21] Do H, Im S K, Mungal M G, *et al.* Visualizing supersonic inlet duct unstart using planar laser Rayleigh scattering [J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 50(6): 1651-1657.
- [22] Wang W X, Guo R W. Flow characteristics of an inward turning inlet with circular outlet [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(2): 533-544.
- 王卫星, 郭荣伟. 圆形出口内转式进气道流动特征[J]. *航空学报*, 2016, 37(2): 533-544.
- [23] Wei F, He X Z, Chen J, *et al.* Design and experimental study of minimized shape transformation inward turning inlet with abnormality entrance to circle exit [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 1218-1225.
卫锋, 贺旭照, 陈军, 等. 微修形异型转圆内转式进气道的设计与试验研究[J]. *推进技术*, 2017, 38(6): 1218-1225.
- [24] Wu Y C. Digital particle holography for 3D measurement and its applications [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 46-48.
吴迎春. 数字颗粒全息三维测量技术及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 46-48.