

文章编号 1004-924X(2026)14-2125-11

面向流场密度观测的聚焦纹影参数分析与 光学设计

张战飞¹, 郝歌扬¹, 支冬², 孔荣宗², 胡守超², 吴国俊^{1*}, 黄 龙^{2*}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 飞行器流体物理全国重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 聚焦纹影技术能够捕捉和测量单层流场区域的横向结构分布, 在流场可视化和流场参数测量中扮演着重要角色。为了保证聚焦纹影系统在超高速环境中的流场测量效果, 本文从流马赫数、激波角等流场特性参数出发, 推导了急剧聚焦深度和气流偏折角之间的关系, 结合系统测量需求确定灵敏度、急剧聚焦深度和分辨率指标的取值范围。在此基础上, 立足聚焦纹影成像原理及光路特点, 进行系统参数优化, 提升系统性能。针对源格栅-刀口栅成像及不同物距下的流场目标成像设置多重结构, 实现了 $\Phi 300$ mm 视场大口径聚焦纹影系统的设计。对装调完成的聚焦纹影系统进行检测, 物距变化范围 1 m 的情况下, 系统对测试区成像分辨率均达到了 23 lp/mm 以上, 急剧聚焦深度均在 35 mm 以内。利用该系统对高速动态流场画面进行拍摄, 显示效果良好。测试结果表明, 所设计光学系统能够满足流场密度的精细化观测需求。

关键词: 流场密度; 聚焦纹影; 马赫数; 急剧聚焦深度; 优化设计

中图分类号: O439; V211.752 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263414.2125

CSTR: 32169.14.OPE.20263414.2125

Focusing schlieren parameter analysis and optical design for flow field density observation

ZHANG Zhanfei¹, HAO Geyang¹, ZHI Dong², KONG Rongzong²,

HU Shouchao², WU Guojun^{1*}, HUANG Long^{2*}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Xi'an 710119, China;

2. National Key Laboratory of Aerospace Physics in Fluids, Mianyang 621000, China)

* Corresponding author, E-mail: wuguojun@opt.ac.cn; longhuang09@163.com

Abstract: Focusing schlieren technique can capture and measure the transverse structure distribution of single-layer flow field, and plays an important role in flow field visualization and flow field parameter measurement. In order to ensure the flow field measurement effect of the focusing schlieren system in the ultra-high speed environment, the relationship between the depth of sharp focus and the flow deflection angle was derived from the flow field characteristic parameters, which included Mach number and shock angle,

收稿日期: 2026-04-03; 修订日期: 2026-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62305383); 中国科学院重点部署科研专项 (No. KGFZD-145-25-15)

etc. The value ranges of the system sensitivity, depth of sharp focus and other indicators were determined according to system measurement requirements. On the basis of imaging principles and optical path characteristics, the optimization of the system parameters was completed, and the system performance was improved. The design of the large-aperture focusing schlieren system with a field of view of $\Phi 300$ mm was completed. By setting multiple structures, the source grid-knife edge grid imaging and the flow field target imaging under different object distances were realized. The focusing schlieren system was tested. When the object distance changed within 1 m, the imaging resolution of the system in the test area reached more than 23 lp/mm, and the depth of sharp focus was within 35 mm. The high-speed dynamic flow field was photographed with the system, and the display effect was good. The experimental results show that the designed optical system can meet the needs of fine observation of flow field density.

Key words: flow field density; focusing schlieren; Mach number; depth of sharp focus; optimized design

1 引言

聚焦纹影技术作为一种流动显示测量技术,被广泛应用于湍流、激波等高速流动现象研究^[1-4]、燃烧过程分析^[5-6]、飞行器设计^[7-8]、武器测试与评估^[3]、发动机诊断与分析^[9-11],是推动上述领域技术发展的重要技术手段。相对于传统纹影,聚焦纹影技术具有以下优势:首先,聚焦纹影成像景深较小,能够避免流场观测区域外的目标干扰,突出某一层的流场密度信息;其次,聚焦纹影在大视场测试的情况下,实现成本较低,这使得聚焦纹影技术越来越受到研究人员的重视。

美国学者 R. A. Burton 于 1949 年提出了聚焦纹影的核心原理,通过引入源格栅和刀口栅替代传统的点光源与刀口,实现对特定平面密度梯度的选择性成像^[12]。宾夕法尼亚州立大学 Settles G S、NASA 的 Weinstein L M 等对聚焦纹影技术做了进一步完善和拓展^[13-14]。之后陆续有学者利用该技术开展相关研究,Hargather M J 等人将聚焦纹影技术与 PIV 测量相结合,用于研究超声速湍流边界层^[15];日本学者 Kashitani 等对聚焦纹影定量测量进行了研究,结合图像处理算法提取流场密度梯度^[16];德国学者 FÖRSTER F J 等结合聚焦纹影技术和视觉成像对发动机燃烧室内的火焰特性进行了可视化分析^[5]。中国空气动力研究与发展中心在该领域取得了诸多成果,谢爱民团队提出的双截面聚焦纹影技术,通过多平面成像提升流场结构解析能力,应用于激波风洞实验,显著提高了密度场测量精度^[17]。此外,该

团队将聚焦纹影技术与数字图像处理算法结合,实现了密度场的定量重构^[4]。岳茂雄等通过反射式布局实现了大视场的聚焦纹影显示,为扩大聚焦纹影技术的测量范围提供了新思路,并利用该布局实现了凹腔燃烧截面波系及温度场同步显示^[18]。中国科学院力学研究所周芮旭等将激光诱导荧光技术与聚焦纹影技术相结合,为超声速燃烧流场的测量提供了更丰富、更准确的信息,推动了聚焦纹影技术在燃烧诊断领域的应用发展^[19];席锋等提出了采用环型源栅和刀口栅的改进聚焦纹影系统,实现了流场中复杂扰动的重构^[20];浙江大学林志明等将聚焦纹影与全息干涉技术结合,提出前置式全息聚焦纹影方法,通过光场模拟计算实现了流场密度的重构和定量测量^[21]。对聚焦纹影技术而言,光学系统是决定观测效果的关键。然而在以往研究当中,针对光学系统的设计思路缺乏深入探讨,使得设备研制过程中,系统灵敏度、分辨率和聚焦特性的提升与兼顾较为困难,这也是实现流场密度高精度观测的难点所在。

本文从马赫数等待测流场特性参数出发,首先通过理论推导得到不同聚焦深度下的气流偏折角,在此基础上,根据系统需求限定灵敏度和急剧聚焦深度等指标的取值范围,结合光路特点优化系统参数。其次,进行了聚焦纹影光学系统设计,并对设计过程和结果进行了阐述。检测及试验结果显示,该系统指标特性表现良好,能够准确获取流场横向结构信息,满足高速流场密度的精细测量需求。

2 系统原理与设计方法

2.1 原理

聚焦纹影系统光路结构如图 1 所示。在该系统中,光源、柔光屏、菲涅尔透镜和源格栅组成照明端,聚焦镜、刀口栅、接收镜和高速相机组成成像端。发散光源经柔光屏散射后产生均匀光束,并通过菲涅尔透镜的折射实现光束汇聚,汇聚光束经流场测试区域后照亮成像端聚焦镜。此时,聚焦镜同时对源格栅和测试区流场进行成像,其中源格栅成像在刀口栅处,流场成像在流场像面处,从而形成源格栅-刀口栅,流场-流场像面两个共轭关系。其中, L 表示聚焦镜对源格栅成像时的物距, L' 表示聚焦镜对源格栅成像时的像距, l 表示聚焦镜对测试区流场成像时的物距, l' 表示聚焦镜对测试区流场成像时的像距。源格栅和刀口栅均由相邻且周期排布的透光和不透光条纹组成,刀口栅条纹可以看作是源格栅像的负像(亮暗反转),形成类似于传统纹影系统的多组狭缝刀口像。当测试区域某一位置出现流场扰动,其导致的流场密度梯度使光线发生偏折,并被刀口栅所遮挡。若未出现扰动,则光线透过刀口栅,并到达流场像面,这样测试区域流场扰动所引起的流场密度梯度就可转化为成像面上的光强变化,经接收镜后,由高速相机接收,形成聚焦纹影图像。

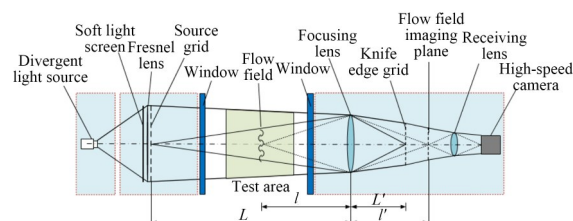


图 1 聚焦纹影系统光路结构图

Fig. 1 Schematic diagram of focusing schlieren system

在上述成像过程中,源格栅和刀口栅产生的多狭缝-多刀口组合构成多个小相对孔径的纹影系统,进而形成大视场、大相对孔径系统,大幅缩短了系统的景深。这里需要指出的是,为使照明光束有效覆盖观测视场,并被聚焦镜充分利用,菲涅尔透镜和源格栅的口径应为观测视场的两倍。

2.2 参数分析与优化

在风洞超声速测试中,若测试对象为飞行器,则其前缘会产生斜激波,气流马赫数、来流密度、急剧聚焦深度决定了光线偏折角的大小,知道光线偏折角后,就可以确定系统灵敏度的范围,然后将其和急剧聚焦深度等指标作为设计依据,进行系统参数优化设计。

首先计算气流偏转角 θ ,其满足如下关系式^[22]:

$$\tan \theta = \frac{2 \cot \beta \cdot (M_a^2 \sin^2 \beta - 1)}{M_a^2 (\gamma + \cos 2\beta) + 2}, \quad (1)$$

其中: M_a 为流场马赫数, β 为激波角, γ 为气体比热容比,取 1.4。将马赫数设为 25,激波角设为 30° ,可计算得到气流偏转角为 24.3° ,符合高超超声速实际测试场景中的正常激波形态。

接下来计算流场引起的密度梯度,设激波前后空气密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 ,可表示为:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{(\gamma + 1) \cdot M_{an}^2}{(\gamma - 1) \cdot M_{an}^2 + 2}, \quad (2)$$

其中: M_{an} 为法向马赫数,满足: $M_{an} = M_a \cdot \sin \beta$,代入数值后可得 M_{an} 为 12.5,则 ρ_1/ρ_2 等于 5.81。根据 Gladstone-Dale 公式可知折射率梯度与密度梯度成正比,气流导致的光线偏折角可近似表示为:

$$\alpha = K \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} \cdot D_s, \quad (3)$$

其中: K 为 Gladstone-Dale 常数,其值为 $0.226 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, x 为激波厚度, $\partial \rho/\partial x$ 为流场密度梯度, D_s 为聚焦纹影系统的急剧聚焦深度(该参数指成像清晰情况下,物平面相对于最佳聚焦平面前后移动的深度范围。该范围内,流场结构清晰可见,该范围外,流场结构模糊)。来流密度取 $2 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{m}^3$,则激波后密度为 $1.162 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3$,激波厚度取 $30 \text{ }\mu\text{m}$,可得到气流密度梯度为 $32.07 \text{ kg}/\text{m}^4$ 。

按照以上方法,对不同急剧聚焦深度下的光线偏折角进行计算,得到如表 1 所示结果。

这里引入聚焦纹影系统灵敏度指标,其代表了系统能够有效测量的最小光线偏折角,以毫弧度为单位时满足^[23]:

$$\epsilon_{\min} = \frac{50aL}{L'(L-l)}, \quad (4)$$

表 1 不同急剧聚焦深度下的气流导致的光线偏折角

Tab. 1 Light deflection angle caused by airflow at different depths of sharp focus

急剧聚焦深度 D_s/mm	气流导致的光线偏折角/mrad
50	0.36
40	0.29
35	0.25
30	0.21
25	0.18

其中: a 为刀口栅不透光条纹宽度。从该式可以看出,刀口栅不透光条纹宽度越小,系统灵敏度越高,能测量到的光线偏折角越小。

首先在考虑系统成像原理的基础上给出部分参数的取值: $L=6\,364\text{ mm}$, $l=3\,186\text{ mm}$, $L'=382\text{ mm}$ 。此时,聚焦镜对源格栅放大率为0.06,实际测试要求视场不小于300 mm,根据光路特点,源格栅通光口径取600 mm,则刀口栅口径为 $600\times 0.06=36\text{ mm}$,该口径下刀口栅加工难度较低,利于不同维度的调节,且源格栅成像像距的取值可使聚焦镜光学总长处于合理范围。将急剧聚焦深度限定在50 mm以内,以此提升单层观测效果。这时气流导致的光线偏折角为0.36 mrad,为了能探测到此偏折角,则 $\epsilon_{\min}$ 应满足: $\epsilon_{\min}<0.36\text{ mrad}$,计算可得 $a<1.4\text{ mm}$ 。

刀口栅不透光条纹宽度越小,灵敏度越高,但刀口栅不透光条纹宽度过细会导致加工后产生毛刺及形变等问题,权衡后将刀口栅不透光条纹设定为0.9 mm。

聚焦纹影系统的急剧聚焦深度 D_s 满足如下关系式^[24]:

$$D_s = \frac{2d \cdot l}{m_f \cdot A_2}, \quad (5)$$

其中: A_2 为聚焦镜通光口径,取180 mm, m_f 为流场成像放大率,可表示为: $m_f=l'/l$ 。 d 为流场目标在像方的最小可分辨长度,可表示为: $d=2(l'-L')\lambda/b$ 。 b 为刀口栅透光条纹宽度, λ 为照明光源波长,取532 nm。

由高斯公式可得聚焦镜焦距 f_F 为: $f_F=1/L+1/L'=360\text{ mm}$,则流场成像像距为: $l'=1/(1/f_F-1/l)=406\text{ mm}$ 。为了保证系统的聚焦效果,将 D_s 设定为 $D_s<50\text{ mm}$,可求得 $b>0.14\text{ mm}$ 。

此外,流场成像分辨率 d_i (线对数)满足如下关系式:

$$d_i = \frac{1}{2d} = \frac{b}{4(l'-L')\lambda}. \quad (6)$$

为达到较好的流场观测效果,将聚焦镜分辨率要求设定为15 lp/mm以上,则刀口栅透光条纹宽度 b 应满足: $b\geq 0.8\text{ mm}$ 。然而 b 值过大会导致纹影图像清晰度下降^[25],为方便加工,最终将 b 的取值和 a 保持一致,均为0.9 mm。为保证系统具备良好的纹影成像效果,气流扰动后光线的遮挡对于流场中各视场需一致,则刀口栅上不同位置的透光和不透光条纹宽度也应该保持一致。

3 系统设计

3.1 聚焦镜设计

聚焦镜是决定聚焦纹影系统性能的关键。上文提到,聚焦镜焦距为360 mm,通光口径为180 mm,则 F 数为2.0。为使聚焦镜结构获得长焦距的同时光学总长较短,选择远摄物镜作为初始结构。聚焦镜组需分别对源格栅及流场区域进行成像,因此在设计过程中对聚焦物镜设置多重结构,源格栅-刀口栅成像设置一重结构,流场目标成像设置三组多重结构,分别对应物距2 500 mm(最近测试位置)、3 000 mm(中心测试位置)和3 500 mm(最远测试位置)。对源格栅成像时物面大小设为600 mm,对流场中心成像时物面大小控制在300 mm以上,利用Zemax光学设计软件对不同物距下的成像质量进行优化,使聚焦镜可对源格栅三个不同物距目标清晰成像(Zemax软件具有界面直观、分析数据准确等特点,文中设计均基于该软件)。在综合考虑聚焦镜最大口径、畸变等轴外像差的基础上,确定光阑位置。为了防止成像端对源格栅的成像和其对流场所成像互相叠加,从而影响流场成像效果,源格栅像面和流场像面之间距离应尽量大。最终得到的聚焦镜光路如图2所示。

聚焦镜主要参数与性能如下:

- (1)工作波长:532 nm(激光照明);
- (2)光学总长:498 mm;
- (3)焦距:360 mm;
- (4)入瞳直径:180 mm;

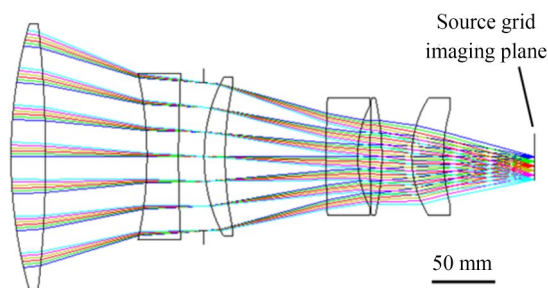


图2 聚焦镜光路图

Fig. 2 Optical path diagram of focusing lens

(5) F 数:2.0;

(6) 流场测试物距范围:2 500~3 500 mm;

(7) 源格栅像面大小:36 mm;

(8) 源格栅像面和流场像面之间最近距离:
>30 mm。

所设计聚焦镜对源格栅成像时 MTF 曲线和畸变曲线如图 3 所示。

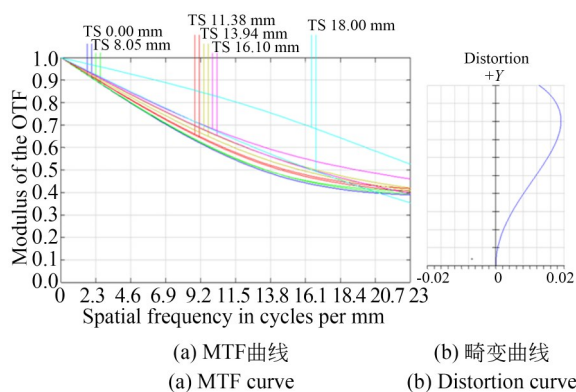


图3 聚焦镜对源格栅成像时的 MTF 曲线及畸变曲线

Fig. 3 MTF curve and distortion curve of focusing lens

本系统相机的探测器像元尺寸为 $22\ \mu\text{m}$,为使探测器性能得到充分发挥,光学系统的成像分辨率须等于或优于该探测器奈奎斯特频率(即极限空间频率,由每毫米内相邻两个像元组成的线对数决定),因此将光学设计的目标分辨率定为 $23\ \text{lp/mm}$ 。上图表明,聚焦镜在刀口栅位置所成源格栅像在 $23\ \text{lp/mm}$ 时的 $\text{MTF} > 0.3$,分辨率良好,畸变小于 0.02% ,该畸变量下,刀口栅条纹宽度变化仅为亚微米量级,实际加工刀口栅与理论差异对纹影效果的影响可忽略。

不同物距下聚焦镜的成像分辨率设计结果如图 4~图 6 所示。

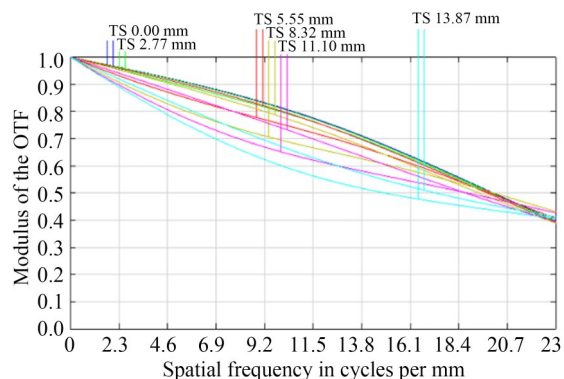


图4 聚焦镜在 2 500 mm 物距时的 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curve of focusing lens at 2 500 mm object distance

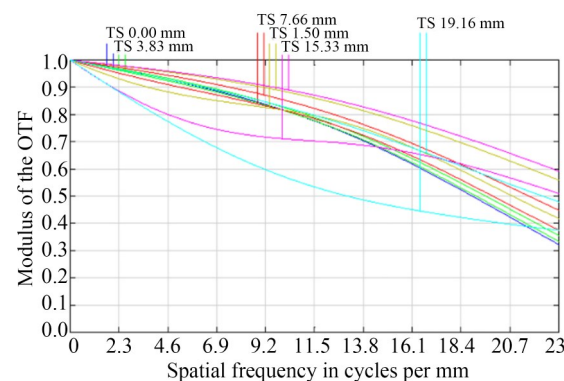


图5 聚焦镜在 3 000 mm 物距(中心物距)MTF 曲线

Fig. 5 MTF curve of focusing lens at 3 000 mm object distance (center object distance)

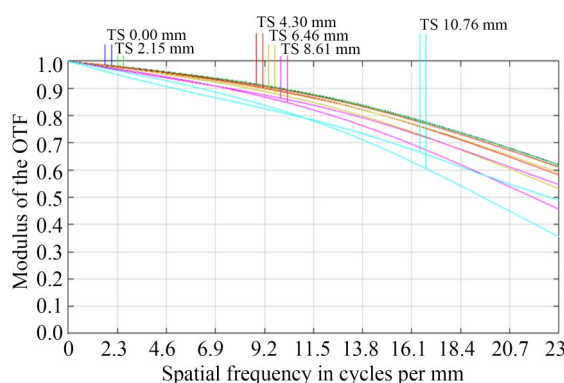


图6 聚焦镜在 3 500 mm 物距 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curve of focusing lens at 3 500 mm object distance

可以看到,各物距下 MTF 在 $23\ \text{lp/mm}$ 时均大于 0.3,成像分辨率良好。

聚焦镜所有镜片口径均大于 90 mm,为避免

装配过程中镜片产生过大的应力,各镜片均采用定心加工。其中最大镜片为第一片,口径 208 mm,材料为常规无色玻璃 H-ZF5,该镜片材料需经过二次精退火后形成大尺寸毛坯,然后经过粗磨、抛光等工序完成镜片加工。

最终装配完成的聚焦镜如图 7 所示。

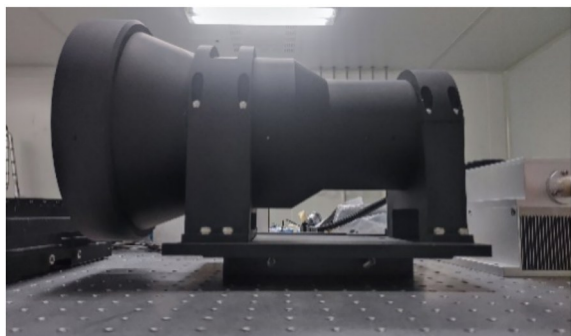


图 7 聚焦镜装配后实物图

Fig. 7 Physical drawing after assembling the focusing lens

3.2 接收镜与成像端设计

为提升系统成像视场,聚焦镜对流场区成像像面将随之增大,另外,该像面附近设有刀口栅,直接在此处放置相机,观测视场将因靶面大小而受到限制,且会妨碍刀口栅的调节。因此在聚焦镜设计完成的基础上,需设计接收镜进行二次成像,以保证流场测试区域的观测效果。

设计时,首先根据系统相机支持的镜头卡口规格设定像面大小及放大率,并控制后截距。本系统相机选择日本 NAC 公司的黑白高速相机,分辨率 $1\,280 \times 896$,像元大小 $22\ \mu\text{m}$,靶面尺寸: $28.16\ \text{mm} \times 19.71\ \text{mm}$ 。考虑到聚焦镜对流场区所成一次像面和成像靶面尺寸比例接近 1:1,因此选择 1:1 中继转像物镜作为接收镜初始结构。将第一透镜设置在一次像附近,并将前表面设置为平面,方便在装调过程中测试同轴性以及一次像位置。需要指出的是,第一透镜和一次像不宜太近,如果第一透镜前表面有缺陷,会成像到流场的最终像面,影响观测效果。最终得到接收镜光路设计结果如图 8 所示。

优化后,接收镜的总长为 565 mm,最大镜片口径 128 mm,焦距为 166 mm。

将成像端各部分组合后进行优化,并保证聚焦镜参数不变,最终得到的成像端光路如图 9

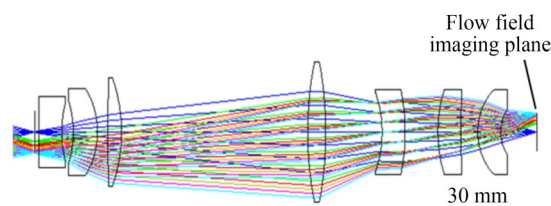


图 8 接收镜光路图

Fig. 8 Physical drawing of focus lens after assembly

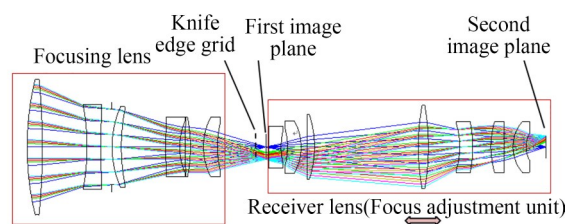


图 9 成像端光路图

Fig. 9 Optical path diagram of imaging end

所示。

成像端主要参数与性能如下:

- (1) 光学总长: $1\,046.7\ \text{mm}$;
- (2) 焦距: $256 \sim 274\ \text{mm}$;
- (3) 流场成像物距范围: $2\,500 \sim 3\,500\ \text{mm}$;
- (4) 流场成像视场: $301\ \text{mm}$;
- (5) 像面大小: $34.38\ \text{mm}$;
- (6) 视场角: 5.3° ;
- (7) 通光口径: $180\ \text{mm}$;

成像端系统分辨率设计同样基于相机参数,最终得到的不同物距下成像性能如图 10~图 13 所示。

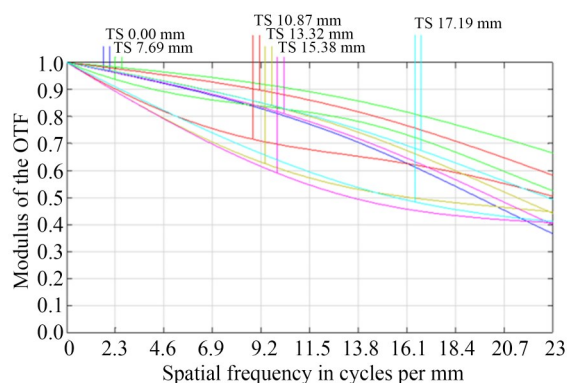


图 10 成像端在 2 500 mm(最近物距)物距时的 MTF 曲线

Fig. 10 MTF curve of imaging end at 2 500 mm (closest object distance) object distance

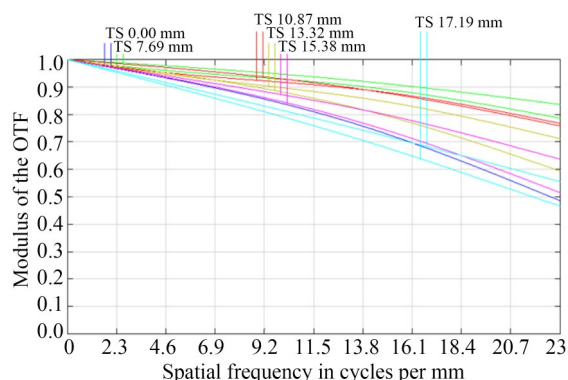


图 11 成像端在 3 000 mm 物距(中心物距)时的 MTF 曲线
Fig. 11 MTF curve of imaging end at 3 000 mm object distance (Center object distance)

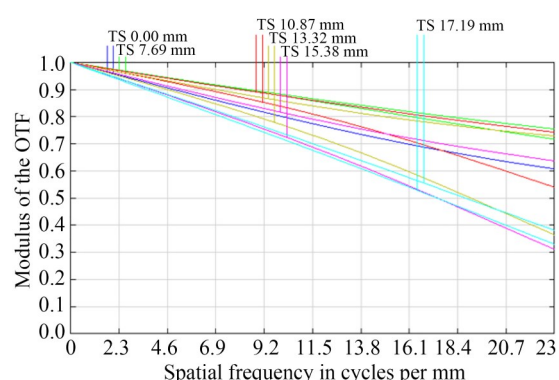


图 12 成像端在 3 500 mm 物距(最远物距)时的 MTF 曲线
Fig. 12 MTF curve of imaging end at 3 500 mm object distance (farthest object distance)

从以上结果可以看出,系统在最近物距、中心物距和最远物距下成像 MTF 均大于 0.3@23 lp/mm,畸变均小于 3.1%,结合实际工程经验,该畸变范围内,成像端对目标流场可视化及特征结构识别的影响可忽略。实际

观测中,通过接收镜整体的前后移动实现不同物距下的清晰成像,在此过程中,聚焦镜位置不变。本系统一次像面处刀口栅和接收镜之间间距充裕,无干涉,便于进行接收镜位置的调节。

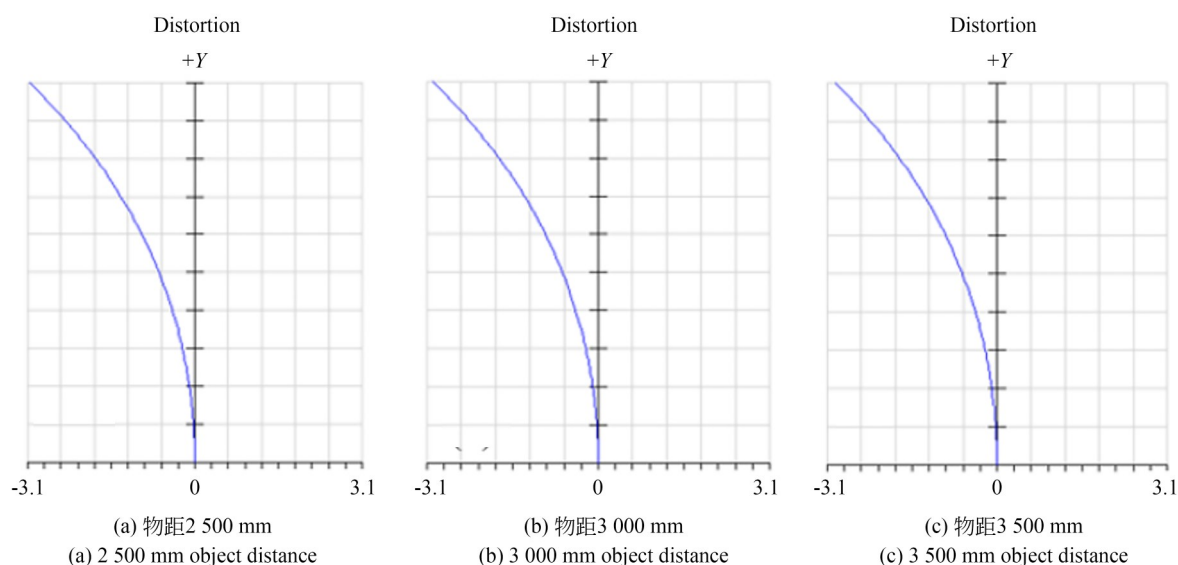


图 13 成像端不同物距下的畸变曲线
Fig. 13 Distortion curve under different object distances at imaging end

4 指标检测与系统试验

4.1 流场成像分辨率及急剧聚焦深度测试

测试方法:在测试区不同物距下利用积分球照亮标准分辨率板(USAF1951),在成像端系统处放置相机,调整接收镜使分辨率板清晰成像并

采集图像,测试现场如图 14 所示;对不同物距下所拍摄图像进行观察,找到人眼刚好能分辨的一组线条,查看标准分辨率板参数对照表,得到对应的分辨率大小,结果如图 15~图 17 所示。

以设计成像分辨率 23 lp/mm 作为焦深的评判基准。当分辨率板位于 2 500 mm 物距(最近

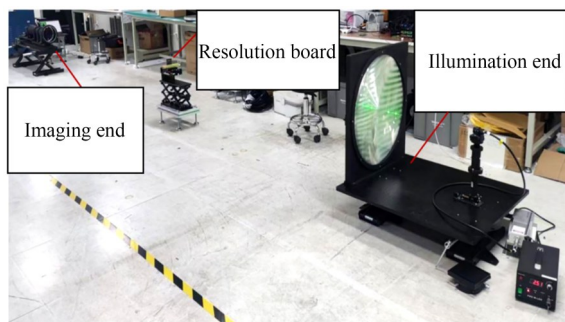
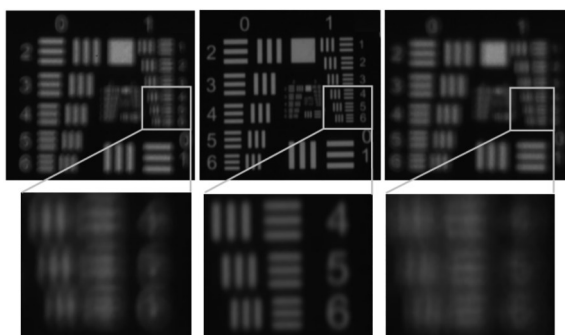


图 14 系统对流场成像分辨率测试现场图

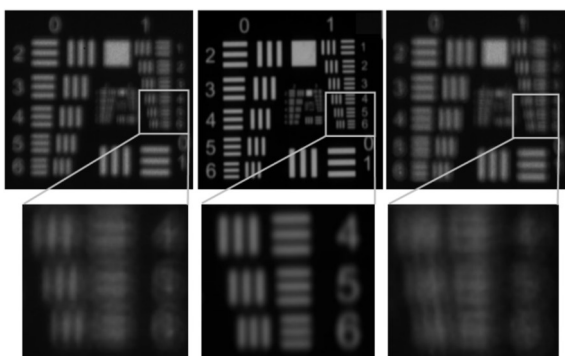
Fig. 14 Field diagram of system flow field imaging resolution test



(a) 2 490 mm物距 (b) 2 500 mm物距 (c) 2 514 mm物距
(a) 2 490 mm object distance (b) 2 500 mm object distance (c) 2 514 mm object distance

图 15 流场成像分辨率测试结果 1

Fig. 15 Flow field imaging resolution test results 1

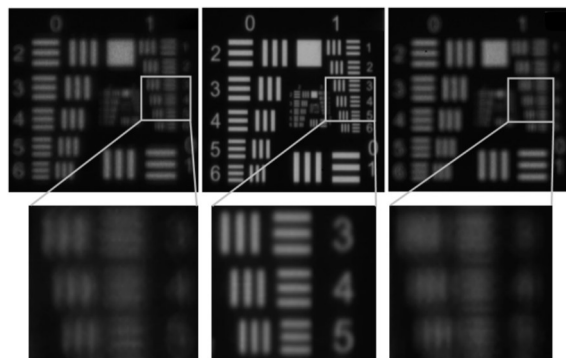


(a) 2 988 mm物距 (b) 3 000 mm物距 (c) 3 016 mm物距
(a) 2 988 mm object distance (b) 3 000 mm object distance (c) 3 016 mm object distance

图 16 流场成像分辨率测试结果 2

Fig. 16 Flow field imaging resolution test results 2

物距)时,系统放大率为 0.147 8,查看 USAF1951 分辨率参数表可知,系统需看清分辨率板上的 1 组 6 号元素,即可认为成像分辨率达



(a) 3 486 mm物距 (b) 3 500 mm物距 (c) 3 517 mm物距
(a) 3 486 mm object distance (b) 3 500 mm object distance (c) 3 517 mm object distance

图 17 流场成像分辨率测试结果 3

Fig. 17 Flow field imaging resolution test results 3

到要求。在物距变化至 2 490 mm 和 2 514 mm 时,分辨率板上的 1 组 6 号元素已无法看清,因此认为该物距下的焦深小于 24 mm(2 514-2 490)。

当分辨率板位于 3 000 mm 物距(中心物距),系统放大率为 0.114 3,查看 USAF1951 分辨率参数表可知,系统看清分辨率板上的 1 组 4 号元素,即可认为成像分辨率达到要求。在物距变化至 2 988 mm 和 3 016 mm 时,分辨率板上的 1 组 4 号元素无法看清,因此认为该物距下的焦深小于 28 mm(3 016-2 988)。

当分辨率板位于 3 500 mm 物距(最远物距),系统放大率为 0.103 4,查看 USAF1951 分辨率参数表可知,系统看清分辨率板上的 1 组 3 号元素,即可认为成像分辨率达到要求。在物距变化至 3 517 mm 和 3 486 mm 时,分辨率板上的 1 组 3 号元素无法看清,因此认为该物距下的急剧聚焦深度小于 31 mm(3 517-3 486)。综上所述可以看到,系统在不同物距下的聚焦深度均小于 35 mm,聚焦特性良好。

为了进一步验证系统的聚焦性能,在风洞条件下进行了指标检验。在流场测试区域放置一组沿 45°排列的金属丝标尺,相邻的两个金属丝的水平及垂直间距分别为 5 mm,如图 18 所示。通过调整接收镜前后位置,使部分金属丝出现清晰图像,所能清晰地观察到的金属丝数量为 N ,则系统的急剧聚焦深度应不大于 $5 \times N$ mm。

标尺拍摄结果如图 19 所示。流场密度测量系统在测试区域内能够对 19 个相邻的金属丝进行成像,其中清晰状态的金属丝有 6 个,其他金属

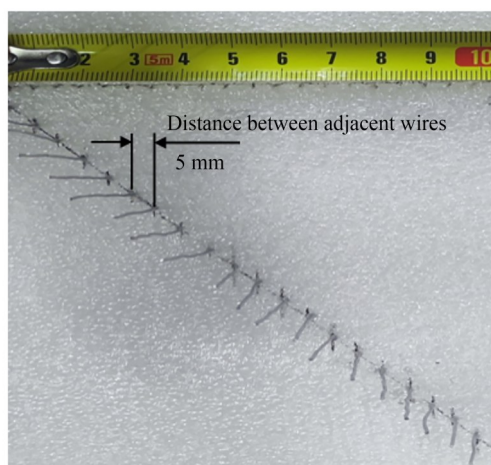


图 18 急剧聚焦深度测试标尺

Fig. 18 Depth of sharp focus test ruler

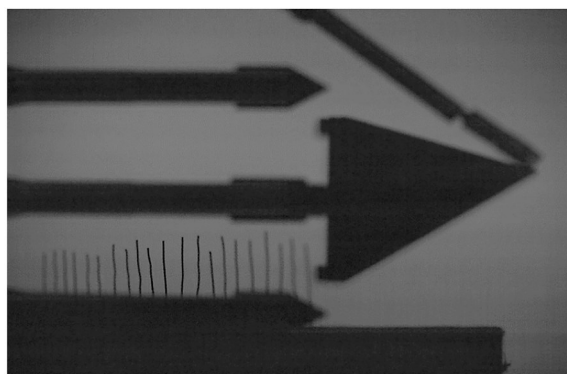


图 19 急剧聚焦深度测试图

Fig. 19 Depth of sharp focus test diagram

丝呈模糊状态,这说明系统急剧聚焦深度小于 35 mm。

4.2 流场试验

将系统照明端和成像端置于风洞试验段两侧,完成光路同轴度调节后,在成像端物距范围内放置高速模型,调节接收镜位置,使系统对模型清晰成像,最终成像端聚焦镜和接收镜间距为 92 mm。调节刀口栅横滚、前后及上下,使刀口栅对源格栅亮条纹有效切割。光路调节完成后,在风洞中注入 25 马赫高速气流,接收端拍摄图像如图 20 所示。

可以看出,在高速气流通过模型时,聚焦纹影系统可以清晰捕获流场结构。基于该数据,结合流场密度解算方法,可以获得测试区域内高速流场的密度分布。

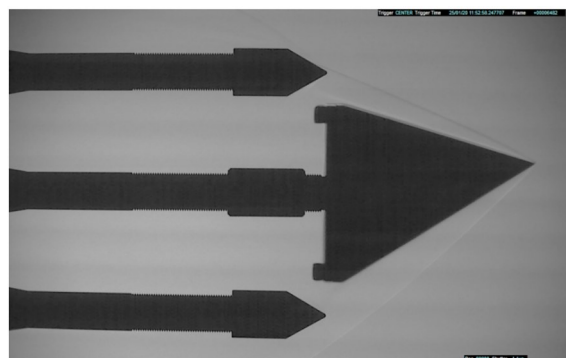


图 20 聚焦纹影系统拍摄的流场实验图像

Fig. 20 Flow field experiment image taken by focusing schlieren system

5 结 论

本文设计完成了一套可满足大口径、高马赫数、大范围测量需求的聚焦纹影系统。为有效提升系统性能,从马赫数等流场特性参数出发,推导得到光线偏折角和急剧聚焦深度之间的关系,进而确定灵敏度、急剧聚焦深度及分辨率指标的取值范围,并优化系统参数。在此基础上,分别对聚焦镜、接收镜进行设计,通过对多组成像关系设置多重结构实现了不同物距下成像端系统的性能优化。对研制设备的主要指标及流场呈现效果进行测试,系统在测试区不同物距下的像方分辨率均优于 23 lp/mm,急剧聚焦深度在 35 mm 以内,采集的流场结构图像清晰明显。本研究可对聚焦纹影系统的优化设计提供有益参考,有助于获取高超声速流场的精细化密度场数据,推动高超声速流动和气动光学效应的机理研究。

作者贡献声明:

张战飞:系统深化设计与分析,论文构思撰写;

郝歌扬:研究方法与实验方案制定,论文修订;

支冬:需求分析与技术支持;

孔荣宗:实验资源提供与现场调试;

胡守超:检验验证与数据分析;

吴国俊:论文审核与指导;

黄龙:系统基本结构设计与指标分析。

参考文献:

- [1] FU B, YOU C, CAI J, *et al.* Experimental study of water jet atomization using the schlieren method [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2025, 18 (11), 2810-2822.
- [2] BATHEL B F, WEISBERGER J M, PAGE W E, *et al.* Digital self-aligned focusing schlieren [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(4): 778-781.
- [3] 郑星, 黄海莹, 毛勇建, 等. 大口径爆炸激波管出口冲击波流场图像测量 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(15): 2355-2362.
- ZHENG X, HUANG H Y, MAO Y J, *et al.* Image measurement of shock wave flow field at outlet of large diameter explosion shock tube [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32 (15): 2355-2362. (in Chinese)
- [4] SCHAUERTE C J, SCHREYER A M. Influences in experimental studies on the characteristics of transonic shock buffet [J]. *AIAA Journal*, 2025, 63 (4): 1278-1294.
- [5] NISHIMOTO S, NAKAYA S, LEE J, *et al.* Effects of the penetration height of ethylene transverse jets on flame stabilization behavior in a Mach 2 supersonic crossflow [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(3): 3117-3126.
- [6] TOSCANO A M, LATO M R, FONTANAROSA D, *et al.* Optical diagnostics for solid rocket plumes characterization: a review [J]. *Energies*, 2022, 15(4): 1470.
- [7] KORTH J H, BURT J M, ZAMAN K Q. Investigation of physical mechanisms for jet noise reduction by plug nozzle porosity [C]. *AIAA SCITECH 2025 Forum*. Orlando, FL. AIAA, 2025: AIAA2025-2163.
- [8] SCHAUERTE C J, SCHREYER A M. On the wake/tailplane interaction for established transonic airfoil buffet [J]. *AIAA Journal*, 2025, 63 (7): 2731-2749.
- [9] CHEN M J, ZHAO Z X, WANG X L, *et al.* Wavelet optical flow velocimetry of a scramjet combustor using high-speed frame-straddling focusing schlieren images [J]. *Combustion and Flame*, 2024, 269: 113705.
- [10] SUNDERMEIER S, PASSMANN M, DER WISCHE SAUS, *et al.* Flow in pillow-plate channels for high-speed turbomachinery heat exchangers [J]. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, 2022, 7(2): 12.
- [11] ZHAO Z X, WANG X L, CHEN M J, *et al.* High spatiotemporal frame-straddling focusing schlieren imaging in a scramjet engine [J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(11): 117004.
- [12] BURTON R A. A modified schlieren apparatus for large areas of field [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1949, 39(11): 907.
- [13] SETTLES G S. The Penn State Full-scale Schlieren System [C]. In *11th International Symposium on Flow Visualization*, Notre Dame, IN, USA, 2004.
- [14] WEINSTEIN L M. Review and update of lens and grid schlieren and motion camera schlieren [J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2010, 182(1): 65-95.
- [15] HARGATHER M J, LAWSON J M, SETTLES G S, *et al.* Focusing-schlieren PIV measurements of a supersonic turbulent boundary layer [C]. *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Paper AIAA-2009-69.
- [16] KASHITANI M, YAMAGUCHI Y, KITANO H. Preliminary study for quantitative measurement of flow fields by focusing schlieren method [C]. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Orlando, Florida. AIAA, 2011: AIAA2011-983.
- [17] 黄思源, 谢爱民, 白茜尘. 双截面聚焦纹影技术应用研究 [J]. *实验流体力学*, 2011, 25(6): 92-96.
- HUANG S Y, XIE A M, BAI H C. Application of dual-section focusing schlieren visualization system [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(6): 92-96. (in Chinese)
- [18] 岳茂雄, 张弯洲, 吴运刚, 等. 基于发散光反射式布局的大视场显示方法研究 [J]. *实验流体力学*, 2021, 35(3): 77-82.
- YUE M X, ZHANG W Z, WU Y G, *et al.* Research on large field visualizaiton based on divergent light reflective layout [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(3): 77-82. (in Chinese)
- [19] 周芮旭, 连欢, 顾洪斌, 等. 激光诱导荧光聚焦纹影系统及超声速燃烧流场应用 [J]. *气体物理*, 2020, 5(2): 14-19.
- ZHOU R X, LIAN H, GU H B, *et al.* Laser-in-

- duced fluorescence focusing schlieren system and its application in scramjet combustor[J]. *Physics of Gases*, 2020, 5(2): 14-19. (in Chinese)
- [20] 席锋, 秦华锋, 胡莉, 等. 可视化聚焦纹影系统实现流场中的三维扰动成像[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0911003.
- XI F, QIN H F, HU L, *et al.* Three-dimensional perturbation imaging in fluid field with visualized focusing schlieren system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0911003. (in Chinese)
- [21] 林志明, 吴学成, 周永刚, 等. 一种前置式全息聚焦纹影成像方法及系统: CN118331012A [P]. 2024-07-12.
- [22] EL-SAYED A F. *Fundamentals of Aircraft and Rocket Propulsion* [M]. London: Springer London, 2016.
- [23] 李桂春. 气动光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- LI G C. *Aero-optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [24] 王敏, 谢爱民, 黄训铭. 直接纹影成像技术初步研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(10): 244-248.
- WANG M, XIE A M, HUANG X M. Preliminary study on direct schlieren technology[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2020, 41(10): 244-248. (in Chinese)
- [25] SETTLES B G S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media* [M]. Berlin: Springer, 2001.

作者简介:



张战飞(1993—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,工程师,2015年于陕西科技大学获学士学位,2018年于西安理工大学获硕士学位,主要从事超高速光学测量方面的研究。E-mail: zhang-zhanfei728@126.com

通讯作者:



黄龙(1990—),男,四川简阳人,博士,工程师,2019年于国防科技大学获得博士学位,主要从事激光技术、气动光学方面的研究。E-mail: long-huang09@163.com

通讯作者:



吴国俊(1978—),男,江苏扬州人,博士,研究员,2004年于西安建筑科技大学获硕士学位,2008年于中国科学院大学获博士学位,主要从事流场光学测量、海洋光学等方面的研究。E-mail: wuguojun@opt.ac.cn