

文章编号: 1002-1582(2025)06-0716-08

四棱锥纹影技术及其在矢量喷流测量中的应用

张峻筠, 王涛*

(火箭军工程大学 作战与保障学院, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对矢量喷流的研究需求, 研发了四棱锥纹影技术。技术通过优化光路、光源以及成像系统, 并结合高效算法处理, 实现了矢量喷流流场的高灵敏度、高分辨率测量。技术以四棱锥结构替代传统纹影刀口, 通过分光、成像与波前重构的方法实现流场密度测量, 并结合互相关算法同步获取流场速度。针对传统激光光源的干涉问题, 采用多序列脉冲激光器作为光源, 经特殊匀化处理, 有效消除激光散斑与干涉环, 获取清晰的纹影图像。在矢量喷流测量中, 技术可精确捕捉边界层转捩现象, 全面揭示高速边界层的细节信息与流动结构特征, 为喷流特性分析和优化设计提供重要实验依据。

关 键 词: 矢量喷流; 流场显示技术; 光学测试技术; 纹影技术

中图分类号: V211.7

文献标识码: A

Application of pyramid prism schlieren technique in vector jet measurement

ZHANG Junfeng, WANG Tao*

(School of Combat and Logistics, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In response to the research demands for vector jet analysis, a pyramid schlieren technique was developed in this study. By optimizing the designs of the optical path, light source, and imaging system, and integrating highly efficient algorithmic processing, this technique achieves highly sensitive and high-resolution measurement of the vector jet flow field. The technique replaces the traditional knife-edge with a tetrapyramid structure, and measures the flow field density via beam splitting, imaging, and wavefront reconstruction methods, and synchronously obtains the flow field velocity by using the cross-correlation algorithm. To address the interference problems associated with traditional laser sources, a multi-sequence pulsed laser is adopted as the light source. After undergoing special homogenization treatment, laser speckles and interference rings are effectively eliminated, enabling the acquisition of clear schlieren images. In vector jet measurement, this technique can accurately capture the boundary layer transition phenomenon, comprehensively reveal the detailed information and flow structure characteristics of high-speed boundary layers, and provide important experimental bases for jet characteristics analysis and optimization design.

Keywords: vector jet; flow visualization technology; optical testing technology; schlieren technique

0 引 言

纹影技术是一种常见的光学方法, 利用光线偏折来揭示折射率场。该方法最早可追溯至17世纪的罗伯特·胡克 (Robert Hooke)^[1]提出的理念。

然而, 直至19世纪中叶, 经由奥古斯特·托普勒 (August Toepler)^[2]的重新改进, 纹影技术才逐渐成为实验室中的标准工具, 并在观测冲击波等诸多重大科学发现中发挥了关键作用。如今, 纹影技术在科学实验中的应用已极为广泛。纹影法通

收稿日期: 2025-06-18; 收到修改稿日期: 2025-07-28

作者简介: 张峻筠 (1988—), 男, 工程师, 硕士, 从事发动机推力矢量装置流场特性先进光学测试技术研究。
xiaofenglunwen@126.com

王涛 (1977—), 男, 教授, 博士, 从事发动机推力矢量装置流场特性先进光学测试技术研。

* 通讯作者: 1044816795@qq.com

常采用非相干“白光”进行成像,具有直观性,一度被视为仅具备定性可视化功能,缺乏激光干涉测量法的定量能力。但最新的研究表明,这一观念已不再准确^[3]。

纹影法作为一种光学技术,依赖于精密的透镜、镜子和相机,用于对透明介质中的折射扰动进行成像。关于各种光学装置及其理论支持的详细描述,可参考文献[1]及其引用的众多其他参考资料。典型的纹影系统光路,包括光源、狭缝、主反射镜、刀口和相机等关键部件。纹影系统的光路设计简洁明了,各部件易于加工与组装。典型的纹影法在几何光路推导、图像灰度分析、偏折角计算以及灵敏度分析等方面具有显著优势和严谨的理论解释。然而,由于其主光路采用平行光,存在空间积分效应,导致对三维流动结构的解析能力受限。同时,经典纹影技术在光源和成像方面往往不具备瞬态结构的辨析能力,因此在高速气流和强非定常流动的测量研究中,易受时间平均效应的影响。

在流动测量领域,纹影法的理论基础主要基于几何光学,并额外考虑衍射效应的作用,相关论述可见参考文献[1, 4-6]及其他背景资料。当光线通过介质时,介质的密度梯度会导致光线偏转。部分偏转的光线被刀口阻挡,与未被阻挡的光线形成明暗变化的纹影图像。值得注意的是,在纹影图像中看到的明暗模式并不直接表示介质的折射率 n ,而是反映了沿垂直于光轴及刀口方向的折射率梯度 $\partial n/\partial x$ 。根据格拉德斯通-戴尔定律(Gladstone-Dale law),流体密度 ρ 与其折射率 n 之间满足线性关系。通过这一转换机制,流体中的密度梯度被转化为易于分析的光强变化图像,从而实现了流动密度变化的可视化与分辨。时至今日,纹影技术凭借其直观显示气流变化的能力,在空气动力学实验研究中占据了重要地位。

随着研究的深入,基于经典纹影技术,研究人员根据不同应用场景的需求,开发出了高速纹影、聚焦纹影、脉冲纹影^[7-9]等一系列特种纹影技术。其中,高速纹影技术采用大功率LED光源配合高速相机,能够实现高达数万帧每秒的成像速率,尤其适用于极短过程对象的研究。然而,受限于硬件条件,高速相机的分辨率随帧频提升而显著下降。对于聚焦纹影技术^[10-12],采用了非平行光路,可有效消除空间积分的影响。然而,该技术目前仍面临信噪比低、测量范围有限等挑战。脉冲纹影^[13]技术则通过以电火花脉冲光源替代常规连续光源,并在高精度同步控制下实现毫秒级脉

宽成像。

本文为满足矢量喷流研究的实验需求,以上述纹影技术为基础,研发了四棱锥纹影测量技术。该技术整合了瞬态捕捉、高速成像及定量分析等特种纹影技术优势,构建了多维参数耦合、宽速域覆盖的精密测量平台。其核心创新在于采用四棱锥光学元件替代传统刀口装置,利用锥顶角对光束的精确分光特性,在焦平面形成四象限对称分布的光斑阵列结构。通过波前重构算法可将离散光斑信号解析为连续波前相位分布,实现流动密度梯度的定量测量;结合多通道耦合图像序列分析与数字互相关算法,可同步获取速度场参数。针对激光光源的干涉特性,提出了匀化处理方法,有效抑制了激光散斑噪声对测量精度的影响。实验结果表明,该技术有效提升了矢量喷流场的成像质量。该技术兼具流场可视化显示与多物理场参数定量分析功能,为高速飞行器矢量喷流流动现象研究提供了新的实验测量手段。

1 四棱锥纹影的系统原理及其子系统

1.1 四棱锥纹影系统原理

图1展示了一种四棱锥纹影光路布局。按照光线从发射到接收的顺序,首先是光源子系统,光线从这里发出,到达第一主反射镜。光线经反射后,抵达第二主反射镜,再次反射并通过四棱锥刀口,最终进入成像子系统。整个系统由计算机及同步控制系统进行调控。其中光线路径(简称光路)以蓝色带箭头实线表示^[12,14-17]。

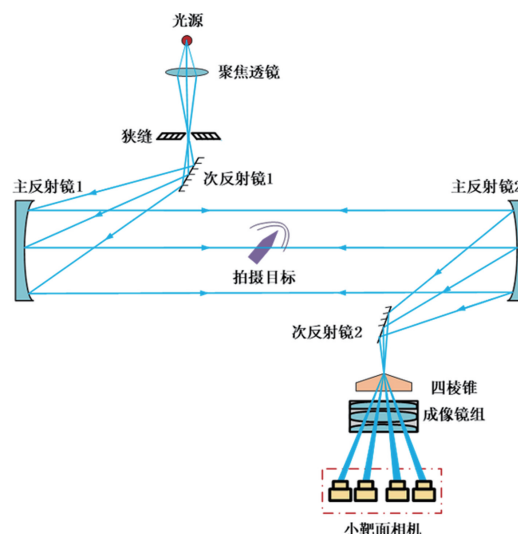


图1 四棱锥纹影系统组成

整体布局呈现“Z”字形,结合光路部分更为明显。中间主光路(连接两个主反射镜之间的光路)设计为平行光路,光路传播维持平行而非锥形收缩或发散。为实现此目的,光源子系统需精

确置于第一主反射镜的焦点处，由几何光学原理可知，光源位于焦点时，反射光路将形成平行光。同理，为使第二主反射镜反射的光线聚焦于成像子系统，成像子系统应设置于第二主反射镜的焦点位置。

四棱锥纹影的成像系统与传统纹影，该系统采用四棱锥代替刀口，四棱锥将光路分割为四组，这种设计灵感来自 Ragazzoni 提出的金字塔波前传感器（Pyramid wavefront sensor）技术概念^[18]。如图 2 所示，四棱锥形似“屋脊”，由四条棱边构成，其底面为平面。

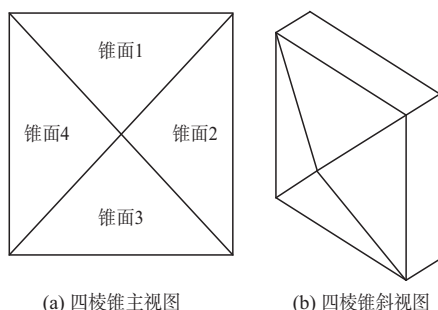


图 2 四棱锥锥面示意图

刀口的“屋脊”顶点恰好位于第二主反射镜的焦距处，用于接收来自分束镜的激光，使得二次光源在此成像，各个面上的光线正常透过，而面的两条棱上的光场发生衍射，其合成的光场自由传播，并经过成像镜组聚焦。整个过程中，四棱锥形成四个不同方向的常规刀口效果。由于切割方向各异，因此产生了四幅不同的纹影图像，如图 3 所示。这四幅图像可以用来计算入射波前。在四个子图像中的每一个内部，由于每束光的光路不同，光线强度分布 $S(x,y)$ 也略有不同。这种强度分布的不均匀性是恢复波前相位 $\varphi(x,y)$ 的前提。

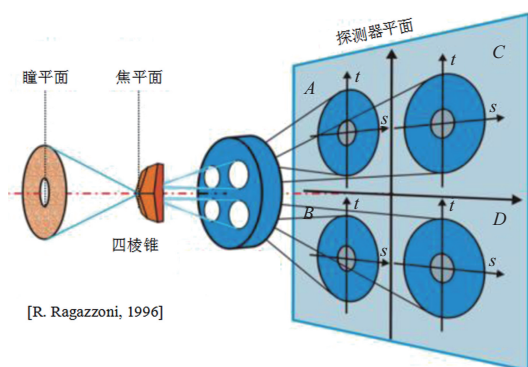


图 3 四棱锥成像示意图

根据标准数据定义（类似于四象限探测器的信号处理），从四个强度模式中可获得两组测量值 $S_x(x,y)$ 和 $S_y(x,y)$ ，表示为

$$\begin{aligned} S_x(x,y) &= \frac{(A+C)-(B+D)}{(A+B+C+D)} \\ S_y(x,y) &= \frac{(A+B)-(C+D)}{(A+B+C+D)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中， $S_x(x,y)$ 和 $S_y(x,y)$ 分别表示 x 方向和 y 方向上的光强分布差异， A 、 B 、 C 、 D 分别表示四幅不同的纹影图像的光强分布，如图 3 所示。

随后根据实际需要和波前测量的精度要求，选择合适的波前重构算法。常见的波前重构算法包括模式法、最小二乘法、迭代重建算法等。本文使用模式法的波前重构算法，以下是模式法的核心原理、以及算法步骤。基于模式法（Modal·Method）的波前畸变重构算法是一种通过预先定义的正交基函数（如 Zernike 多项式、Legendre 多项式等）对波前相位进行展开和重构的方法。其核心思想是将波前畸变表示为一组基函数的线性组合，通过求解基函数的系数来重构波前。波前相位分布 $\varphi(x,y)$ 可表示为一组正交基函数 $Z_n(x,y)$ 的线性组合

$$\varphi(x,y) = \sum_{n=1}^N a_n Z_n(x,y) \quad (2)$$

式中， a_n 为基函数的系数； N 为基函数的阶数（或数量）。最常用的基函数是 Zernike 多项式，因其在单位圆上具有正交性，且能很好的描述光学系统中的像差。随后，建立波前光强分布数据 $S(x,y)$ 与基函数系数 a_n 之间的线性关系，可表示为

$$\begin{aligned} S_x(x,y) &= \sum_{n=1}^N a_n \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial x} \\ S_y(x,y) &= \sum_{n=1}^N a_n \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

通过求解上式，得到系数 a_n ，将系数带入基函数展开式，可计算波前相位分布 $\varphi(x,y)$ 。最后通过 Gladston-Dale 公式^[1]获取流场的密度信息，Gladston-Dale 公式可表示为

$$\varphi(x,y) = \frac{2\pi L K_{532nm} \rho(x,y)}{\lambda} \quad (4)$$

式中， K_{532nm} 表示与介质相关的常数； λ 表示照明激光波长； $\rho(x,y)$ 表示密度变化。

四棱锥纹影技术通过分光、成像和图像处理提取光波波前相位信息，结合波前重构算法计算流场密度分布，效果如图 4 所示。

值得注意的是，对于可压缩流动的雷诺应力测量，需同时获取同一时间、同一空间的速度和密度值。

对流场速度采用互相关算法进行计算，算法原理与粒子图像测速算法（Particle Image Velocim-

etry) 基本一致。互相关算法目的是从两幅相邻流场图像中重建出流场的速度场, 如果相邻像幅图像的时间间隔为已知的, 那么求速度场的问题就转化为求位移矢量^[19]。以图像处理的观点来看, 这是一个运动估计问题, 如图5所示。

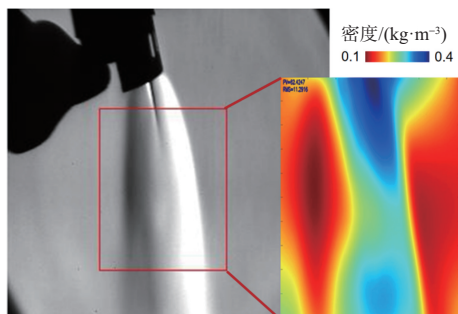


图4 流场密度计算结果

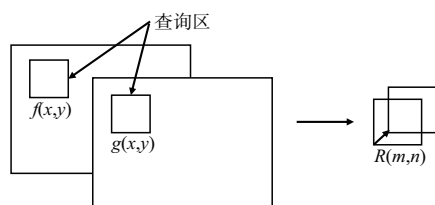


图5 互相关原理

互相关原理如图5所示, $f(x,y)$ 为参考图像中要求取位移量的查询窗口, $g(x,y)$ 为实验图像中的迭代窗口, $R(m,n)$ 为互相关结果。对 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 进行快速傅里叶变换求取其互相关函数 $R(m,n)$, $R(m,n)$ 随这迭代窗口的变化而变化, 当 $R(m,n)$ 取最大值时即将迭代窗口 $g(x,y)$ 的位置视为查询窗口 $f(x,y)$ 在实验图像中的位置, 此时的 $R(m,n)$ 即为查询窗口 $f(x,y)$ 的位移量, 可表示为

$$R(m,n) = \frac{\sum_{y=0}^h \sum_{x=0}^w f(x,y) g(x+m,y+n)}{\sqrt{\sum_{y=0}^h \sum_{x=0}^w f^2(x,y) \sum_{y=0}^h \sum_{x=0}^w g^2(x+m,y+n)}} \quad (5)$$

因此速度 v 可以表示为

$$v = \frac{R(m,n)}{\tau} \quad (6)$$

式中 τ 表示两幅图像的时间差。

依据此原理, 该算法是基于前后两帧图像中所有像素点的移动估算算法, 通过每个像素点的邻域信息来对该像素点的坐标位置进行多项式展开, 得到一个以原坐标 (x_0, y_0) 为自变量、新坐标 (x, y) 为因变量的多项式, 并代入坐标数据来求取该像素点在 x 和 y 方向上的移动量 (dx, dy) 。这意味着需要从四幅图像中解析出速度信息。多序列匀化脉冲激光器能发出多序列脉冲, 每个脉冲可

在四棱锥刀口下一次性生成四幅图像, 构成一组结果。若激光器在短时间内连续发射两个脉冲, 则可获得时间相近的两组结果 (即 A_1, B_1, C_1, D_1 与 A_2, B_2, C_2, D_2)。由于激光器脉冲宽度仅为 10ns, 这两组结果中的八幅图像能够精细捕捉流动结构的变化。因此, 可以选择 A_1-A_2 或 B_1-B_2 等成对图像进行对比分析。由于 A_1 与 A_2 是时间间隔极短的流动结构图像, 通过互相关算法进行计算, 可以得出相应的速度值。值得注意的是, 互相关算法在纹影图像速度测量中的适用性取决于湍流结构的分辨率及流场特性, 高分辨率图像 (像素尺寸远小于结构尺寸) 与明显的湍流结构 (具有高对比度和稳定形态) 是该算法高效运行的前提。

最后, 四棱锥纹影系统测量的速度和密度值均源自同一数据集, 确保了时间和空间的同步性, 示意图如图6所示。图6(a) 四棱锥纹影成像序列, 由于四棱锥棱镜的分光, 每个时刻获得四幅不同的纹影图像, 时刻间隔为 $\Delta t = 10\text{ns}$; 图6(b) 速度场提取 (左上方), 基于连续两帧图像的互相关算法或光流法算法获得的速度场分布; 图6(c) 密度场提取 (右下方), 通过四棱锥成像, 构建两幅正交的纹影图像, 通过波前重构算法或边缘匹配算法获得的密度分布

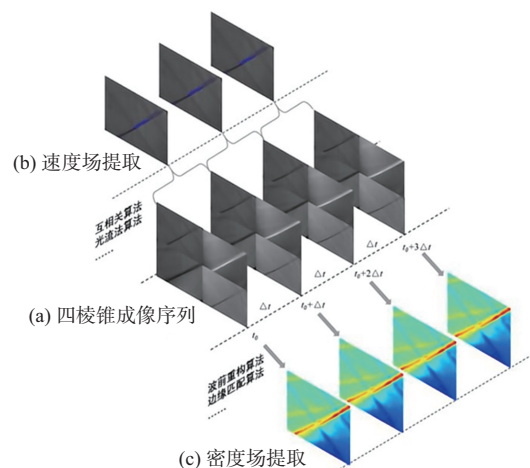


图6 四棱锥纹影拍摄结果以及流场速度场和密度场提取示意图

1.2 光源子系统

本文所研发的四棱锥纹影技术, 采用 532 nm 脉冲激光做为光源, 该激光器是一台多序列匀化脉冲激光器, 脉宽 10ns, 单脉冲能量 20~200mJ 可调, 可以是 2~8 序列, 重复频率 5-15Hz, 每个序列之间的时间间隔 400ns~1s 可调, 如图7所示。

四棱锥纹影系统采用脉冲激光作为照明光源, 但激光的高度相干性会在被测目标表面产生密集的干涉条纹, 形成严重的背景噪声, 显著降低成

像质量。传统匀化技术（如毛玻璃、匀化片及微透镜阵列）^[20-21]难以达到理想效果，本研究提出一种基于荧光转换的匀化系统。该系统通过 532nm 脉冲激光激发藻红蛋白（R-Phycoerythrin, R-PE）染料溶液，产生中心波长 575~578nm 的橙黄色荧光作为新型照明光源。

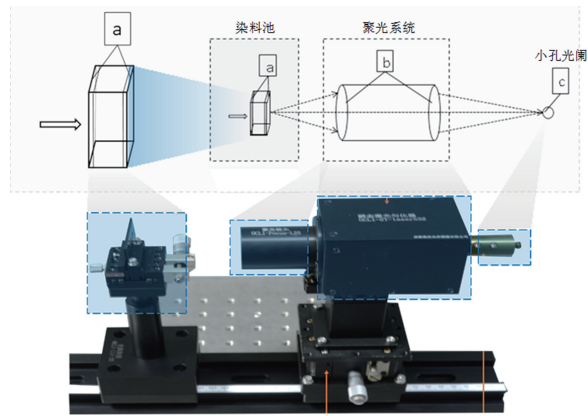
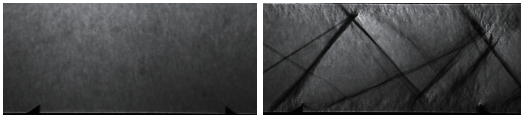


图 7 匀化脉冲激光器光路

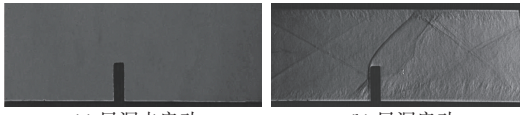
藻红蛋白（R-Phycoerythrin, R-PE）是从红藻中提取的天然荧光蛋白^[22]，其溶液配置方法如下：首先将藻红蛋白溶解于 10mM 磷酸盐缓冲液（PBS）中，配制浓度为 5mg/mL 的工作液；随后经 10 分钟离心处理去除不溶杂质，收集上清液即得活性稳定的染料溶液。该溶液可高效吸收 532nm 激光能量，并转化为 575~578nm 波段的橙黄色荧光。

系统光路设计如图 7 所示：染料池 a（装有藻红蛋白溶液）采用双面石英窗口结构，通光面镀可见光宽带增透膜，用来辅助激光激发染料的效率，非通光面进行磨砂处理便于手持操作；聚光系统 b 由两片消像差胶合透镜与套筒组成，负责对荧光进行准直整形；输出端配置小孔光阑 c 实现空间滤波。当脉冲激光照射染料池时，激发产生的荧光经聚光系统整形后通过光阑输出，最终形成均匀性较好，没有激光固有的干涉条纹及散斑噪声，满足背景光源的化需求。

图 8、9 对比展示了采用普通商用激光器（未匀化）与本研究系统（匀化后）的超声速风洞纹影成像结果。在空风洞状态下，未匀化光源（图 8）产生的密集散斑作为背景噪声显著干扰流场观测；风洞启动后，噪声与超声速边界层信号叠加，导致后期图像处理难以有效分离。而采用荧光匀化光源时（图 9），空风洞背景呈现均匀照明，风洞运行状态下流场结构清晰可辨。验证了该技术对复杂流场测量的具有一定改善效果。



(a) 风洞未启动 (b) 风洞启动
图 8 无光斑匀化的激光纹影图像



(a) 风洞未启动 (b) 风洞启动
图 9 光斑匀化的特殊处理后的瞬态激光纹影

1.3 成像子系统

成像子系统的主要功能是记录光学信息，并最终生成清晰的图像，以便于观察及后续的计算处理。该系统配备的相机拥有 5k×5k 的高像素分辨率，整体系统的工作频率范围为 1~20Hz。光学信息中蕴含的流场信息，在经过透镜的反射与聚焦后，被四棱锥分割为四束光。这些光束通过一系列设计的成像镜组，最终被聚焦传入 CCD 相机中。值得注意的是，相机与各自成像刀口的距离无需特别设定，因为相机镜头配备了变焦功能，可以灵活调整焦距，从而满足系统运行的各项需求。

2 流体测量中的应用

矢量喷流是流体动力学领域一种具有方向可控性的高速射流现象，其核心特征在于通过主动调控喷嘴几何结构或出口边界条件，实现流动方向的动态改变与推力矢量的精确控制。这种流动形态在航空航天推进系统、超声速燃烧室等工程领域具有关键应用价值，图 10 展示了一种飞行器上常见的推力矢量喷管。

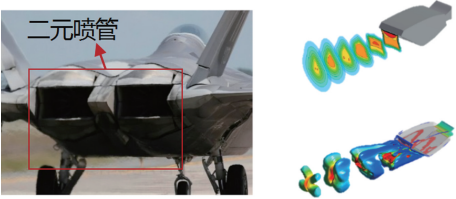


图 10 四棱锥纹影在矢量喷流测量中的应用

四棱锥纹影技术采用脉冲激光作为照明光源，因其瞬时曝光特性可实现高速流动现象的瞬间成像。故而在测量矢量喷流这种高速流动具有一定优势。为验证该技术对矢量喷流场诊断的适用性，本研究设计了如图 11 所示的实验。实验装置依托一座隔离段光学风洞开展试验验证，风洞主体结构包括：来流入口、稳定段、喷管段、等截面隔离段、扩张段、截流段等。风洞采用吸气式运行，来流总压总温为常温常压。试验段面为 75mm×40mm 矩形截面，安装高品质光学玻璃用于实验成像。

矢量喷管置于试验段,且位于纹影光路中心(蓝色光线示意光路路径),采用高压氮气(工作压力0.5~2.0MPa,喷嘴喉道直径 $D=5\text{mm}$)作为模拟工质。选择氮气主要基于其双原子分子结构(弛豫时间 $\tau\approx 10^{-8}\text{s}$)具有流动可控性高、实验安全性好且光学干扰小的优势。通过调节储气室压力与喷嘴构型参数,可复现典型矢量喷流的马赫盘结构、激波系分布及剪切层演化特征,为验证测量技术的有效性提供了理想的流动模型。

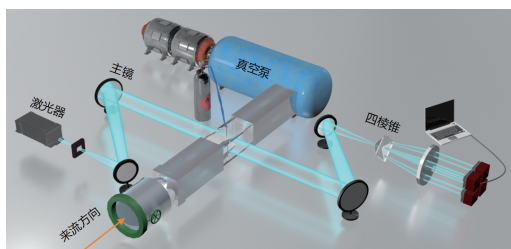


图11 矢量喷流测量实验的示意图

实验结果如图12所示,来流速度为 $Ma=2$,在图中可以清晰的看到激波的结构,并测量其激波角大小 $\theta\approx 25.4^\circ$ 。在矢量喷管边界层位置,四棱锥纹影技术能够精确测量矢量喷流的边界层转捩现象。在使用经匀化后的瞬态激光光源的情况下,高速边界层的细节信息会被清晰的呈现。图中红色箭头分别指出层流位置,转捩区位置以及湍流位置,从层流的稳定,到湍流的紊乱,其密度结构变化清洗可见。此外,四棱锥纹影技术还能进一步通过数据处理和分析,同时揭示矢量喷流的密度场和速度场信息。

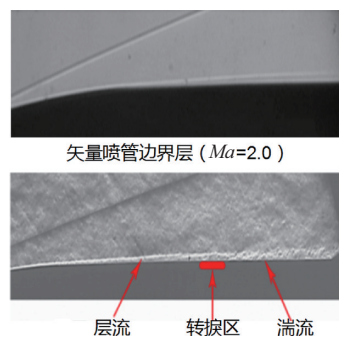


图12 矢量喷流边界层转捩实验

为了验证四棱锥纹影系统测量密度场和速度场的准确性,设计了如下实验,通过对比实验结果与理论值,验证测量系统的可靠性。

实验首先利用该纹影系统观测了涡流发生器对风洞壁面超声速湍流边界层的影响,流场结构如图13(a)所示。图像清晰地呈现了风洞壁面的湍流边界层及涡流发生器脱落的流向涡结构,揭示了包括激波、声波及二次流在内的多种流动特征。实验在低湍流度($Tu<0.5\%$)高速风洞中进

行,采用马赫数 $Ma=2.5$ (对应流场速度578 m/s)的超声速喷管。涡流发生器参数为楔角 $\theta=15^\circ$ 、前缘半径 $r\approx 0.1\text{mm}$,如图13(b)所示。

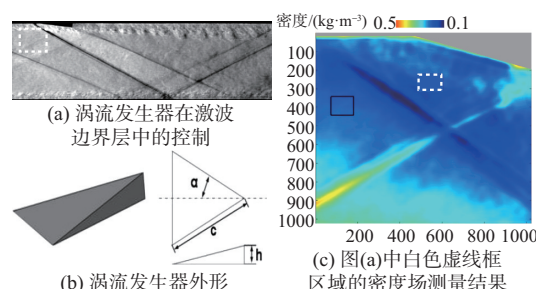


图13 四棱锥纹影的密度测量验证

随后选取激波附近区域(图13(a)白色虚线方框)进行密度计算,该区域存在激波角 $\beta=36^\circ$ 的平面斜激波。密度场计算结果如图13(c)所示,为对比激波前后的密度变化,分别计算激波后(白色方框区域)和激波前(黑色方框区域)的平均密度值,从而得到密度比 $\rho_{\text{后}}/\rho_{\text{前}}=1.79\pm 0.2$ (3次重复实验均值)。

理论计算基于一维定常激波关系式,结合完全气体状态方程推导出空气介质($\gamma=1.4$)的密度比公式表示为

$$\frac{\rho_{\text{后}}}{\rho_{\text{前}}} = \frac{(\gamma+1)Ma^2 \sin^2 \beta}{(\gamma-1)Ma^2 \sin^2 \beta + 2} \quad (7)$$

代入实验参数 $Ma=2.5$ 计算得理论值 $\rho_{\text{后}}/\rho_{\text{前}}=1.81$ 。实验值与理论值的偏差小于10%,验证了系统对密度测量的可靠性。

针对速度场的测量,互相关算法在存在明显细小湍流结构,且像素尺寸远小于结构尺寸时具有较高适用性。因此选取边界层区域脱落的涡结构进行速度场测量,图中像素尺寸约为 $30\mu\text{m}/\text{pixel}$,结构尺寸约为0.2~0.8cm,如图14所示。主流速度测量结果约为574m/s,与来流速度相同,说明了速度测量结果的准确性。

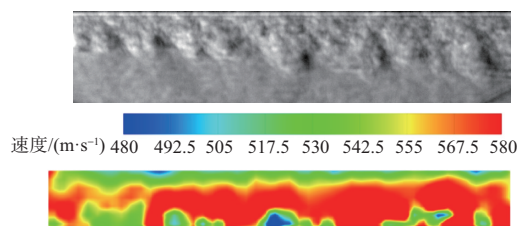


图14 四棱锥纹影速度场测量

四棱锥纹影技术同样适用于其他流体测量场景^[23]。例如,对于低速流动,如昆虫扑翼运动,其流动结构的测量尤为困难。如图15所示,激光纹影技术成功揭示了仿生学研究中至关重要的扑翼流场结构。通过对这些数据进行深入处理与分析,可以获取昆虫扑翼的运动规律及相关流动参数。



图 15 四棱锥纹影在蝴蝶扑翼运动测量中的应用

此外, 本文还利用该纹影测量了激波串的流场结构, 结果如图 16 所示。由于头部激波是整个激波串中强度最大的波系结构, 其与上下面边界层之间的相互作用也是最为强烈的, 边界层受其影响, 发生了严重的分离。在激波串头部上游为速度较高的主流, 气流跨过激波串头部之后开始减速。速度场的结构与纹影的结果相互印证。

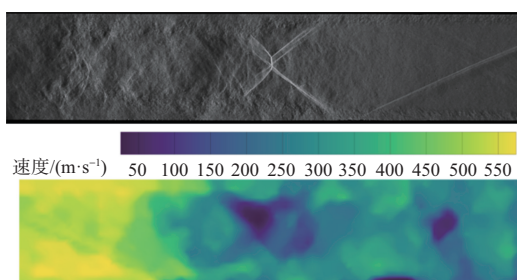


图 16 四棱锥纹影在激波串测量中的应用

3 结 论

本文提出了一种四棱锥纹影测量技术, 并详细阐述了该技术的设计思路。在光路设计方面, 构建了集成化的光路搭建方案, 并对光源子系统与成像子系统进行了针对性优化; 在数据处理方面, 开发了密度场与速度场的同步定量计算方法。

该技术的核心创新在于实现了纹影测量从定性显示到定量分析, 以及建立了密度场与速度场的同步测量体系。相较于传统测量手段, 本技术通过单次数据采集即可实现密度、速度场同步解析, 有效解决了时空不一致性导致的测量误差问题。此外, 该技术相较于传统激光光源, 实验采用的多序列脉冲激光器, 经特殊染料匀化后, 有效抑制了激光的散斑噪声, 提高了测量分辨率; 而脉冲激光的瞬态性, 则提高了测量的灵敏度。

在矢量喷流场实验中, 该技术精确捕捉了激波结构、边界层转捩等复杂流动特征, 验证了其在非定常流动诊断中的分析能力。四棱锥纹影技术不仅具备传统的纹影显示功能, 还兼具定量测量高速流动密度场和速度场的能力, 其高分辨率、高灵敏度以及非接触式测量的优势, 使得该技术能够满足高速飞行器极端流动(如矢量喷流)的测量需求, 为光学测量研究领域引入了一项新的强大工具。

参考文献:

- [1] G S Settles. Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media[M]. Springer Science & Business Media, 2001:331.
- [2] P Krehl, S Engemann, August Toepler. The first who visualized shock waves[J]. Shock Waves, 1995, 5:1—18.
- [3] G S Settles, M J Hargather. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(4):042001.
- [4] H Schardin. Die schlierenverfahren und ihre anwendungen[M]. Ergebnisse Der Exakten Naturwissenschaften, 2007:303—439.
- [5] 朱海军, 王倩, 梅笑寒, 等. 基于高速纹影/阴影成像的流场测速技术研究进展[J]. 实验流体力学, 2022, 36(2):49-73.
Zhu Haijun, Wang Qian, Mei Xiaohan, et al. A review on flow field velocimetry based on high-speed schlieren/shadowgraph systems[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2022, 36(2):49—73.
- [6] C Tropea, A L Yarin, J F Foss. Springer handbook of experimental fluid mechanics[M]. Springer, 2007:237.
- [7] Y Liu, J Roll, S Van Kooten, et al. Schlieren photography on freely flying hawkmoth[J]. Biology Letters, 2018, 14(5):198.
- [8] P K Panigrahi, K Muralidhar. Schlieren and shadowgraph methods[M]. In Heat and Mass Transfer, Springer, 2012:18.
- [9] M Iwamoto, Y Miki, K Kinefuchi. Background-oriented schlieren and laser Rayleigh scattering complementary method for accurate density field visualization[J]. Experiments in Fluids, 2024, 65(6):87—98.
- [10] 李春利, 陈昊云, 王晨希, 等. 聚焦纹影技术研究进展[J]. 现代化工, 2025, 45(06):21—25+31.
Li Chunli, Chen Haoyun, Wang Chenxi, et al. Research progress of focused schlieren technology[J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(6):21—25+31.
- [11] 田立丰, 付双旭. 面向高速流场成像的聚焦纹影研究进展[J]. 中山大学学报, 2025, 64(01):238—249.
Tian Lifeng, Fu Shuangxu. Advances in focusing schlieren technology for high-speed flow field imaging[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2025, 64(01):238—249.
- [12] 黄思源, 谢爱民, 白菡尘. 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 Siyuan, Xie Aimin, Bai Hanchen. Application of dual-section focusing schlieren visualization system[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(6):92—96.
- [13] 陈勇富, 谌君谋, 陈星, 等. 超高速强自发光流场瞬态纹影显示研究[C]//中国力学学会流体力学专业委员会. 第十三届全国流体力学学术会议摘要集. 中国航天空气动力技术研究院, 2024:72.
Chen Yongfu, Chen Junmou, Chen Xing, et al. Research on transient schlieren display of ultra-high-speed strong self-luminous flow field[C]// In Proceedings of the 13th National Congress on Fluid Mechanics Abstracts. China Academy of Aerospace Aerodynamics, 2024:72.
- [14] 陈斯彤. 二维流场纹影法定量测试技术研究[D]. 西安:西安工业大学, 2024.
Chen Sitong. Research on quantitative testing technology of two-dimensional flow field schlieren method [D]. Xi'an: Xi'an

- Technological University, 2024.
- [15] 于之靖, 李雁玲, 郑建文, 等. 采用纹影法的微型航空发动机尾喷温度场测量方法[J]. 光学技术, 2020, 46(04): 420—426.
Yu Zhijing, Li Yanling, Zheng Jianwen, et al. Measurement method of micro aeroengine exhaust temperature field using schlieren method[J]. Optical Technology, 2020, 46(4): 420—426.
- [16] Liu Yulan, Xing Feng, Su Liwei, et al. A Mini-review of recent developments in plenoptic background-oriented schlieren technology for flow dynamics measurement[J]. Aerospace, 2024, 11(4): 303.
- [17] Davami Jonathan, Julianio Thomas J, Moreto Jose R, et al. Density measurements via background-oriented schlieren and parallel-ray omnidirectional integration[J]. Experiments in Fluids, 2025, 66(4): 1—21.
- [18] Chambouleyron, Vincent, et al. Using the Gerchberg - Saxton algorithm to reconstruct nonmodulated pyramid wavefront sensor measurements[J]. Astronomy & Astrophysics, 2024, 681: 48.
- [19] 周述光, 温渝昌, 金启刚. 风洞模型位移光学测量技术应用综述[J]. 实验流体力学, 2009, 23(2): 94—99.
Zhou Shuguang, Wen Yuehang, Jin Qigang. A summary of optics model displacement measuring technique application in wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(2): 94—99.
- [20] 郑雅杰, 卞奇, 王晨, 等. 用于高斯光束匀化整形的微透镜阵列技术研究[J]. 中国激光, 2025, 52(01): 119—126.
Zheng Yajie, Bian Qi, Wang Chen, et al. Research on micro-lens array technology for Gaussian beam homogenization and shaping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(1): 119—126.
- [21] 刘荣战. 基于微透镜阵列的蓝光匀化系统设计及实验研究[J]. 激光技术, 2024, 48(04): 499—504.
Liu Rongzhan. Design and experimental study of blue light homogenization system based on microlens array[J]. Laser Technology, 2024, 48(4): 499—504.
- [22] 崔圆梦, 丁佳琪, 李亦宸, 等. 维生素C与藻红蛋白相互作用及其稳定性分析[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(01): 33—39.
Cui Yuanmen, Ding Jiaqi, Li Yichen, et al. Interaction analysis of vitamin C and phycoerythrin and its stability[J]. Food Research and Development, 2025, 46(1): 33—39.
- [23] Zhang Xiaochen, Zhang Xiangjun, Liu Yonghe, et al. Impact of confined liquid thin film upon bioadhesive force between insect pads and smooth solid surface[J]. Acta Phys. Sin. 2007, 56(8): 4722—4727.