

基于数字重聚焦技术的多平面粒子图像测速技术的研究

曹丽霞 田杏

Research on multi-plane particle image velocimetry based on digital refocusing technology

CAO Li-xia, TIAN Xing

引用本文:

曹丽霞, 田杏. 基于数字重聚焦技术的多平面粒子图像测速技术的研究[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0040

CAO Li-xia, TIAN Xing. Research on multi-plane particle image velocimetry based on digital refocusing technology[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0040

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0040>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大口径平面镜的瑞奇-康芒检测数据处理方法

Data processing method for Ritchey-Common test for large-aperture mirrors

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1164 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0017>

基于光线场追迹的国产3D可视化衍射光波导仿真模块研究

Domestic 3D visualization diffractive waveguide simulation module based on ray-field tracing

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 756 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0002>

旋转式大气色散校正器的优化设计方法

Optimization design method for counter-rotating prisms atmospheric dispersion corrector

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 859 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0204>

基于数字微镜区域翻转的强光干扰抑制技术

Intense light interference suppression technology based on regional flipping of digital micromirror device

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1409 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0095>

双路偏振结构的激光多普勒测速系统

Laser Doppler velocimetry with a dual polarization structure

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 753 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0211>

光读出高精度惯性传感器残余气体噪声仿真研究

Simulation of residual gas noise in high-precision inertial sensors with optical readout

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 612 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0186>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-13

基于数字重聚焦技术的多平面粒子 图像测速技术的研究

曹丽霞*, 田 杏

(中国计量大学 计量测试与仪器学院, 杭州 310018)

摘要: **目的:** 光场相机在传统相机的 CCD 探测器前方增设微透镜阵列 (Micro-lens Array, MLA), 以同时捕获入射光线的空间信息和角度信息, 可实现先拍摄、后对焦的数字重聚焦, 进而获得物空间中任意深度平面的清晰对焦图像。为了获取三维流场中多个深度平面的速度场分布, **方法:** 本文提出了一种基于逆向光线追迹数字重聚焦的多平面粒子图像测速技术 (Particle Image Velocimetry, PIV)。为了实现光线追迹, 本文重新推导了光场相机的 F 数匹配关系, 计算了光场图像中子图像的渐晕区域和非渐晕区域, 并通过逆向光线追迹技术, 分别追迹渐晕区域和非渐晕区域发出的主光线, 使其依次穿过微透镜阵列、主镜头并映射至三维物理空间, 从而获得不同深度平面的粒子的重聚焦图像。随后, 利用期望最大化 (Expectation-Maximization, EM) 算法对重聚焦图像进行去模糊处理。最后, 利用二维互相关技术计算三维流场中多个平面的速度场分布。为了验证所提方法的有效性, 搭建了淹没水射流实验装置并开展实验。**结果:** 实验结果表明, 所提出的基于数字重聚焦技术的多平面 PIV 技术能实现三维流场中多平面速度场的测量。

关键词: 粒子图像测速; 光场; 数字重聚焦技术; 光线追迹; 渐晕

中图分类号: O438.1 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0040 CSTR: 32171.14.CO.2026-0040

Research on multi-plane particle image velocimetry based on digital refocusing technology

CAO Li-xia*, TIAN Xing

(College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

* Corresponding author, E-mail: caolx2019@gmail.com

Abstract: **Objective:** A light field camera incorporates a micro-lens array (MLA) in front of the CCD sensor to simultaneously capture both the spatial and angular information of the incident light rays, thereby enabling digital refocusing after image acquisition and generating sharply focused images at arbitrary depths in the object space. To achieve multi-plane velocity field measurements in three-dimensional (3D) flow fields, **Method:** a multi-plane particle image velocimetry (PIV) method based on the backward ray tracing-based digital refocusing is proposed in this paper. First, the F-number matching relationship of the light field camera is re-derived to facilitate the implementation of the ray-tracing process. The vignetted and non-vignetted regions within the sub-images of the light field image are then calculated. Subsequently, backward ray tracing is em-

收稿日期: 2026-03-12; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 12302370)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12302370)

ployed to project the principal rays from different regions through the MLA and the main lens into the 3D physical space, thereby generating refocused particle images at different depth planes. Subsequently, the Expectation-Maximization (EM) algorithm is further applied to deblur the refocused particle images. Finally, the velocity field distributions at multiple depth planes are calculated using a two-dimensional (2D) cross-correlation algorithm. To validate the effectiveness of the proposed method, a submerged water jet experimental system is constructed and corresponding experiments are conducted. **Result:** The experimental results demonstrate that the proposed multi-plane PIV method based on the digital refocusing technique can achieve measurements of multi-plane velocity fields in 3D flow fields.

Key words: particle image velocimetry; light field; digital refocusing technology; ray tracing; vignetting

1 引 言

受限空间内的非定常流动,是指流体在狭窄封闭或受约束空间中,其流动参数与运动状态随时间持续变化的流动过程。这类流动广泛存在于工业、航空航天、汽车及能源等关键领域^[1-4],例如火箭发动机、燃煤锅炉、内燃机与高压燃油离心泵等装置内部流场均属于典型的受限空间非定常流动^[5-8]。此类流动通常具有明显的三维空间特性、流动脉动性、时间瞬态性及演化非周期性等特征。流场速度场作为表征非定常相干流拓扑结构全貌的重要物理量,对于揭示流动机理和演变规律具有重要意义^[9-10]。因此,针对各类工程受限空间非定常流动的研究,通常需要围绕速度场特征开展分析。

粒子图像测速技术 (Particle Image Velocimetry, PIV) 是一种典型的流动可视化方法,也是测量流场速度场的重要技术之一^[11-12]。其中,二维粒子图像测速 (2D-PIV) 技术具备非接触、高精度、高时空分辨率及全场测量等优势,已在流场速度测试中得到广泛应用^[13-14]。然而,传统 2D-PIV 单次曝光仅可采集流场单一深度平面的粒子图像,仅能获得该深度平面的二维速度场分布,难以满足复杂三维流场尤其是非定常流动的测量需求。对于具有明显空间结构演化特征的流场,通常需要获取多个深度平面的速度场信息,甚至实现三维速度场测量,才能完整描述其流动规律。为实现复杂流场的多平面测量,研究人员在传统二维 PIV 技术的基础上提出了扫描式 PIV 技术^[15-16]。该技术通过控制激光片光源在垂直方向上对流场进行逐层扫描,并利用高速相机同步记

录各照明平面的粒子图像,再采用二维互相关技术对图像进行分析,进而重构出三维流场的多平面速度场分布。然而,扫描式 PIV 要求激光扫描时间尺度远小于流场的特征时间,确保扫描过程中流场状态近似保持恒定,即实现流场相对激光扫描过程的准静态化。因此,对于快速变化或强非定常流动,扫描式 PIV 难以实现真正意义上的同步测量,其测量结果易受到时间失配的影响。2D PIV 所使用的传统成像相机仅记录光场的空间位置信息,无法捕捉光线的传播方向信息,因此单次曝光只能聚焦于流场内某一固定深度。与传统相机不同,光场相机在 CCD 探测器前方加装微透镜阵列,该阵列可对主透镜收集的入射光线进行二次细分,依据光线传播方向完成光束拆分,并将其分别成像于 CCD 探测器的对应像素区域^[17-18]。因此,单台光场相机能够同时采集光场的强度、空间位置及传播方向信息。近年来,众多研究者致力于开发基于单光场相机的三维三分量 (3D-3C) 速度场 PIV 测量方法^[19]。T. W. Fahringier 首次提出了光场层析粒子图像测速 (光场 Tomo-PIV) 方法,该方法采用单台光场相机代替多台相机采集示踪粒子的光场图像。当流场周边光学观测空间受限、光路布置困难时,基于单台光场相机的 PIV 技术可高效便捷地实现受限空间内部流场速度场的测量^[20];同时,该技术还降低了多相机 PIV 系统的复杂性^[21]。过去十年间,多个研究团队围绕光场 PIV 开展了研究^[22-24]。光场 Tomo-PIV 技术也取得了显著进展^[25-28]。然而,单台光场相机沿 Z 轴的深度分辨率通常低于其沿 X 轴和 Y 轴横向分辨率,且深度分辨率会随沿 Z 轴的深度位置变化^[26]。为解决这一问题,研究

人员在光场 Tomo-PIV 中采用双光场相机捕捉三维流场中示踪粒子发出的散射光, 从而提升三维粒子场重建质量和 3D-3C 速度场测量精度^[29]。此外, 近年来深度学习在 PIV 中的应用已成为研究热点之一, 典型方法包括 LiteFlowNet 网络结构, 以及基于卷积长短期记忆网络 (ConvLSTM) 与 LiteFlowNet 结构的流场速度场的测量方法^[30]。将深度学习与光场成像相结合, 也可以改善单台光场相机的深度分辨率有限所导致的三维粒子场重建质量偏低问题, 该方法已成功应用于 3D-3C 速度场测量^[31-32]。目前, 光场 Tomo-PIV 的三维粒子场重建可达数小时, 三维互相关计算也需数分钟, 大幅降低了速度场的测量效率。相比之下, 光场相机的数字重聚焦技术计算效率优异, 仅需单次曝光采集图像, 即可快速得到流场任意深度及多个深度截面的重聚焦粒子图像, 为利用单台光场相机实现多平面速度场同步测量提供了可行思路。

本文提出一种结合逆向光线追迹技术与数字重聚焦的多平面 PIV 方法, 用于测量流场内部不同深度截面的速度场分布。为实现光线追迹, 本文重新推导了光场相机的 F 数匹配关系, 并利用逆向光线追迹技术, 对渐晕区域和非渐晕区域像素中心发出的主光线进行追踪。随后采用期望最大化 (Expectation-Maximization, EM) 算法对不同深度平面的重聚焦图像进行去模糊处理。最后通过二维互相关算法对不同深度的去模糊图像进行计算, 从而获取三维流场内多平面的二维速度场分布。本文搭建了基于单台光场相机的淹没水射流实验装置, 并开展了淹没水射流速度场的测量研究。

2 基于数字重聚焦技术的多平面 2D PIV 技术原理

2.1 多平面 2D PIV 技术原理

基于数字重聚焦技术的多平面 2D PIV 技术的原理如图 1 所示。首先, 向待测流场中均匀布撒示踪粒子, 再利用脉冲体激光对三维流场测试区域进行全域照射。通过光场相机捕捉示踪粒子的散射光线, 并以 Δt 为时间间隔, 采集连续两帧光场图像。通过逆向光线追迹技术将像素中心发

出的主光线追迹至微透镜阵列中心、主镜头, 最后到达三维流场中的多个深度平面。对于给定的第 j 个体素, L_{ij} 取决于其大小及其中心与主光线之间的距离, 并由高斯函数表征^[33]。多个深度平面的重聚焦图像由下式计算:

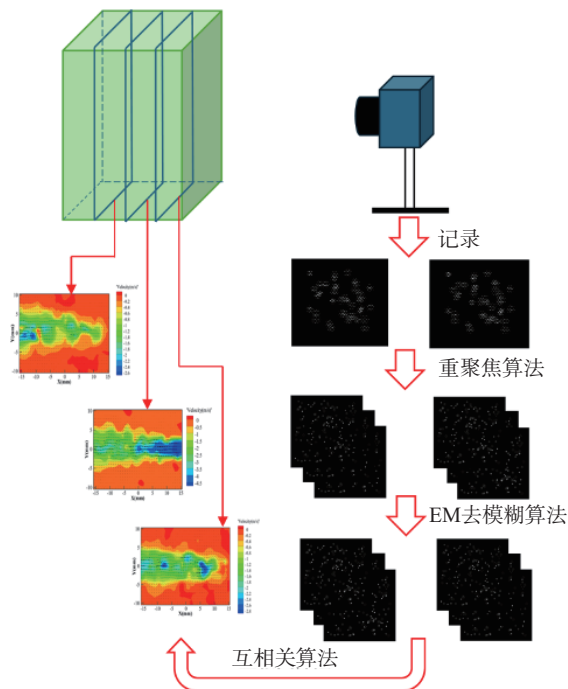


图 1 多平面 2D PIV 技术的原理示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Principle of Multi-Plane 2D PIV Technology

$$\begin{cases} L_{i,j} = A e^{-\frac{d_{ij}^2}{2\sigma^2}} \\ I_{re} = I_i \cdot L_{i,j} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $L_{i,j}$ 为像素对像素的贡献, A 为高斯函数的振幅, σ 为用于表征高斯分布宽度的标准偏差, d_{ij} 为像素中心和主光线之间的垂直距离, I_i 为原始图像, I_{re} 为重聚焦图像。

通过 EM 算法消除重聚焦图像中的模糊粒子, 计算表达式为:

$$E(X_j, Y_j, Z_j)^{k+1} = E(X_j, Y_j, Z_j)^k \left[\frac{P_i}{\sum_{j \in N_i} L_{i,j} E(X_j, Y_j, Z_j)^k L_{i,j}} \right], \quad (2)$$

式中 P_i 是第 i 个像素的强度, k 是迭代次数, $E(X_j, Y_j, Z_j)$ 为第 j 个体素的强度分布, N_i 为与第 i 个像素视线相交的体素数量。通过该公式的迭代计算, 可获得不同深度平面的去模糊图像。

最后,利用二维互相关算法对重聚焦图像进行粒子位移估计,进而得到多个平面的二维速度场分布。

2.2 光场成像模型

2.2.1 光场相机的 F 数匹配

在开展光线追迹计算与示踪粒子的光场图像采集前,首先需要保证光场相机的 F 数匹配关系。在光场相机中,主镜头汇聚的光线通过微透镜阵列映射到 CCD 探测器上,在每个微透镜下方生成一系列子图像,如图 2 所示。为最大化利用 CCD 像素,可调整主镜头光阑以改变 F 数,保证各相邻子图像相互相切(即实现 F 数匹配)。

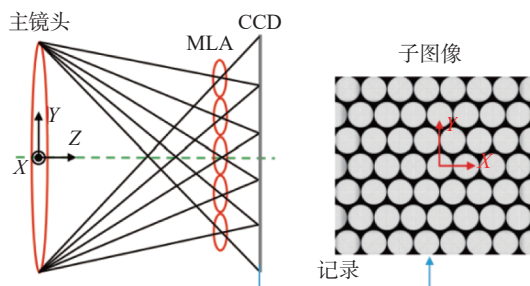
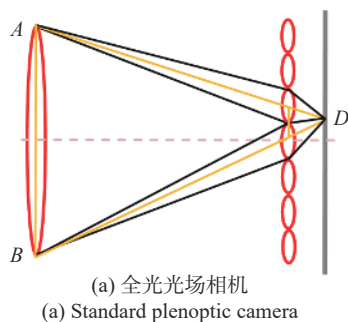


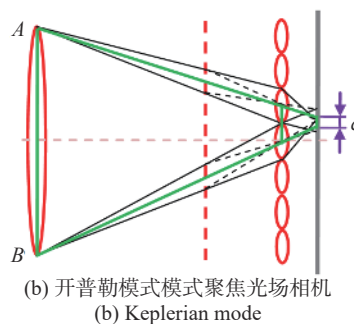
图 2 子图像产生的原理示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of the Principle of Sub-Image Generation

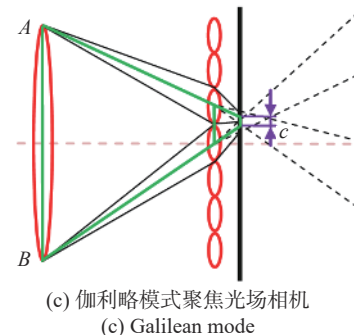
图 3 展示了不同光场相机系统中 F 数匹配的工作原理。在光场相机成像系统中,主镜头的光瞳面可等效为若干离散的点光源集合。图 3(a) 展示了标准全光相机的 F 数匹配原理。根据主镜头与 CCD 探测器之间的共轭关系,子图像中的边缘点 D ,是由主镜头光瞳内的点光源 A 和 B 穿过相邻微透镜形成的成像点。子图像的边缘像素,由主镜头光瞳边缘光束经微透镜成像后形成。为保证相邻子图像相切,相邻子图像的边缘点应位于同一点 D 。因此, F 数匹配关系可通过黄色线条围成的三角形关系进行计算:



(a) 全光场相机
(a) Standard plenoptic camera



(b) 开普勒模式聚焦光场相机
(b) Keplerian mode



(c) 伽利略模式聚焦光场相机
(c) Galilean mode

图 3 不同光场相机的 F 数匹配原理示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of F-Number Matching Principle for Different Light Field Cameras

$$\frac{P_m}{d_2} = \frac{P_l}{l_m + d_2} \approx \frac{P_l}{l_m} (l_m \gg d_2) \quad (3)$$

式中 P_m 为微透镜阵列中每个微透镜的尺寸, P_l 为主镜头的尺寸, d_2 为微透镜阵列平面和 CCD 探测器之间的距离, l_m 为主镜头和微透镜阵列之间的距离。

聚焦光场相机包括开普勒模式和伽利略模式。目前,聚焦光场相机的 F 数匹配的计算方式采用标准全光相机的 F 数匹配的计算方式^[34]。然而,该计算方式会造成相邻子图像之间产生重叠区域,且重叠范围内的成像信息难以有效区分。因此,可用于光线追迹的子图像中的像素数量将减少。这需重新计算并推导聚焦光场相机的 F 数匹配关系。图 3(b)、3(c) 展示了聚焦光场相机的 F 数匹配原理示意图。在开普勒与伽利略模式下,微透镜阵列将穿过主镜头的光线分别映射至 CCD 探测器前方和后方的平面。由于主镜头和 CCD 探测器不满足共轭关系,主镜头上的点(点 A 和点 B)经微透镜接收后,在 CCD 探测器上呈离焦状态,形成了直径为 c 的模糊图像。对于开普勒模式,直径 c 可以通过以下公式计算:

$$c = \frac{P_m(d_2 l_m - d_2 f_{m2} - l_m f_{m2})}{l_m f_{m2}} \quad (4)$$

式中, f_{m2} 为微透镜阵列的焦距。对于伽利略模式, 直径 c 可以通过以下公式计算:

$$c = \frac{P_m(l_m f_{m2} - d_2 l_m + d_2 f_{m2})}{l_m f_{m2}} \quad (5)$$

为了确保每个相邻的子图像都相切, 聚焦光场相机的 F 数匹配是通过梯形关系 (图 3 (b)、3(c) 中的绿线) 来计算的:

$$\frac{P_m - c}{d_2} = \frac{P_l - c}{l_m + d_2} \approx \frac{P_l - c}{l_m} (l_m \gg d_2) \quad (6)$$

2.2.2 光场相机的渐晕

图 4 展示了光场相机的渐晕原理。如图 4 (a) 所示, 标准全光相机的主镜头瞳孔边缘顶部和底部发出的光线, 穿过同一微透镜阵列后, 分别聚焦于子图像边缘的两个点上。单个微透镜阵列捕捉物平面内的同一区域, 主镜头光瞳与 CCD 探测器平面之间呈共轭关系, 因此不存在渐晕现象。对于伽利略和开普勒模式 (图 4 (b)、4(c)), 光束 (标记为橙色、绿色和黑色的光柱) 由像素中心两条边界光线所围合的光线柱, 经过微透镜阵列的顶部和底部后到达主镜头, 最终投射至物空间的物面上^[35]。橙色、绿色和黑色光束中心的橙色、绿色、黑色虚线定义为像素视线。可发现整个绿色光束完全穿过主镜头并投射至物面上。主镜头的孔径和微透镜阵列均未阻碍绿色光束的传播。因此, 绿色的像素视线可用于表征绿色光束, 称为绿色光束的主光线。绿色光束及其像素视线位于光场图像的子图像的非渐晕区域。因此, 绿色的像素视线可用于表征光场的方向, 绿色光束的采样角通常小于 10° ^[36]。

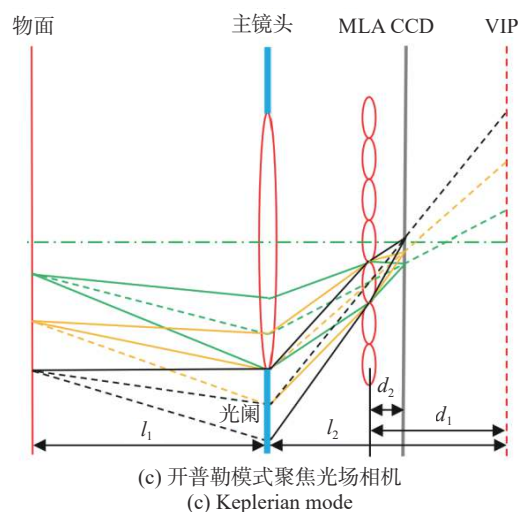
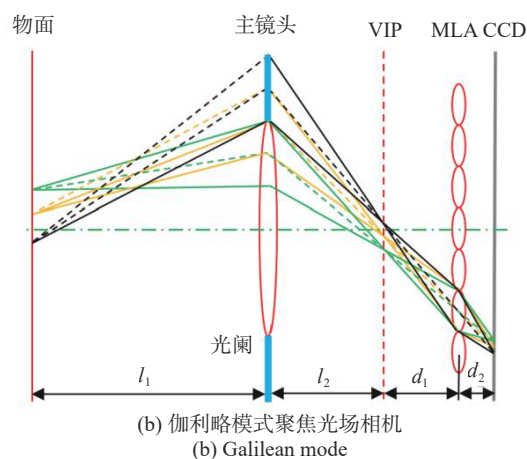
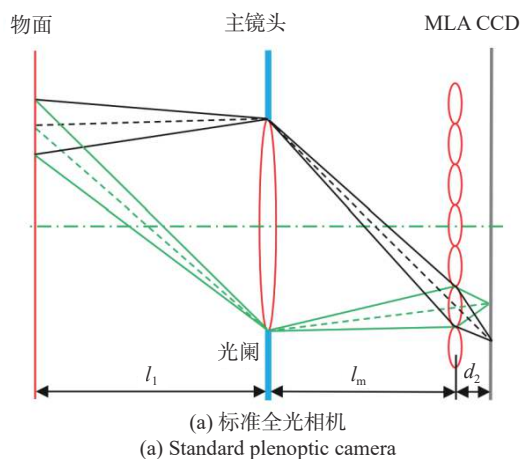


图 4 光场相机的渐晕产生原理

Fig. 4 The Principle of Vignetting in Light Field Cameras

相较于绿色光束, 光阑 (图 4 (b)、4(c) 中的蓝线) 阻挡了橙色光束的一部分。黑色光束则被主镜头的光阑完全阻挡, 落在子图像的边缘。由于光阑的遮挡, 橙色和黑色虚线并不能代表橙色和黑色光束的主光线。这意味着从物面上的一个点发出的光线不会完全落在 CCD 传感器的单个像素上。此外, 橙色和黑色虚线不能分别用于表征橙色和黑色光束的方向。橙色与黑色光束在 CCD 传感器上的成像点通常远离子图像中心, 位于子图像的渐晕区域。需要重新推导和计算橙色和黑色光束的主光线。在此之前, 需先计算子图像中渐晕区域的范围。

1) 子图像、渐晕和非渐晕的尺寸

图 5 展示了开普勒模式下子图像及其渐晕的示意图。图 5(a) 中子图像是一个直径为 EE' 的圆, 图 5(b) 中子图像的均匀区域 (非像的中心), 直径同样为 EE' 。因此, 渐晕是环形的, 其区域可以通过以下公式计算:

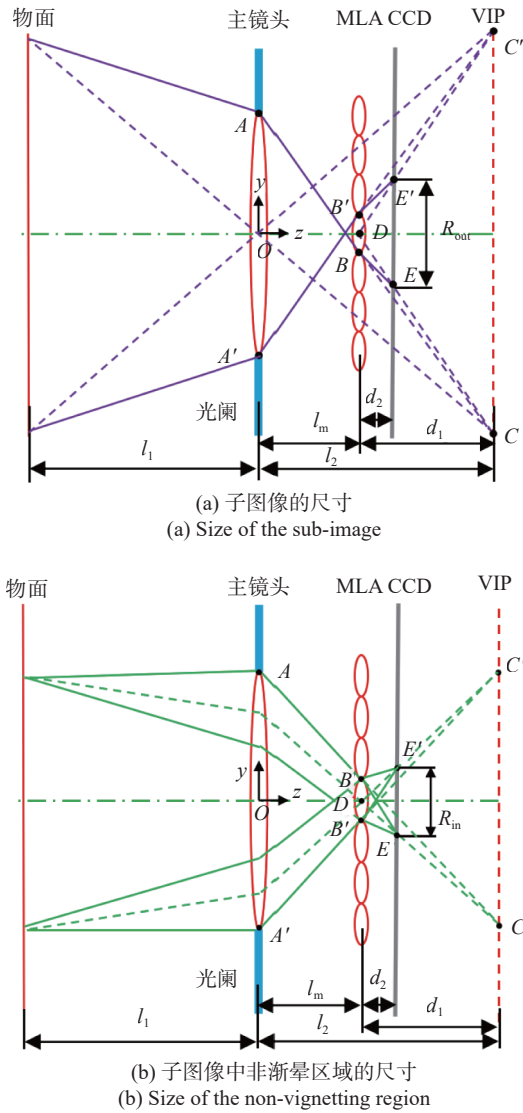


图 5 子图像的渐晕和非渐晕示意

Fig. 5 Schematic of the vignetting and non-vignetting of the sub-image

$$R_{\text{vig}} = R_{\text{out}} - R_{\text{in}}, \quad (7)$$

式中, R_{vig} 为渐晕区域的大小, R_{out} 为子图像的大小, R_{in} 为非渐晕区域的大小。

根据图 5 (a)、(b), R_{out} 和 R_{in} 的计算公式为:

$$R_{\text{out}} = R_{\text{in}} = y_{E'} - y_E, \quad (8)$$

式中, y_E 为直线 CD 和 CCD 传感器平面的交点 E 的坐标, $y_{E'}$ 为直线 $C'D$ 和 CCD 传感平面的交点 E' 的坐标。

直线 CD 和 $C'D$ 的方程可以表示为:

$$\begin{cases} \text{Line } CD: y = y_D - \frac{y_D - y_C}{l_m - l_2} l_m + \frac{y_D - y_C}{l_m - l_2} z \\ \text{Line } C'D: y = y_D - \frac{y_D - y_{C'}}{l_m - l_2} l_m + \frac{y_D - y_{C'}}{l_m - l_2} z \end{cases}, \quad (9)$$

式中, y_C 为直线 AC 和 VIP 平面的交点 C 的坐标, $y_{C'}$ 为直线 $A'C'$ 和 VIP 平面的交点 C' 的坐标, l_2 为主镜头和 VIP 平面的距离, l_m 为主镜头与微透镜阵列 MLA 之间的距离。点 D 位于微透镜阵列的中心。

点 E 和 E' 在 Z 轴上的坐标为 $z_E = z_{E'} = (l_m + d_2)$ 。根据方程式 (9), 图 5(a)、5(b) 中点 E 和 E' 在 Y 轴上的坐标由下式计算:

$$\begin{cases} y_E = y_D - \frac{y_D - y_C}{l_m - l_2} l_m + \frac{y_D - y_C}{l_m - l_2} (l_m + d_2) \\ y_{E'} = y_D - \frac{y_D - y_{C'}}{l_m - l_2} l_m + \frac{y_D - y_{C'}}{l_m - l_2} (l_m + d_2) \end{cases}. \quad (10)$$

根据方程式 (8) 和 (10), 图 5(a) 和 5(b) 中 Y 轴上的 R_{out} 和 R_{in} 计算如下:

$$R_{\text{out}} = R_{\text{in}} = \left[y_D - \frac{y_D - y_{C'}}{l_m - l_2} l_m + \frac{y_D - y_{C'}}{l_m - l_2} (l_m + d_2) \right] - \left[y_D - \frac{y_D - y_C}{l_m - l_2} l_m + \frac{y_D - y_C}{l_m - l_2} (l_m + d_2) \right]. \quad (11)$$

2) 点 C 、 D 和 C' 的坐标计算

在公式 (11) 中, 只要确定点 C 、 D 和 C' 的坐标, 就可以建立方程 (11)。图 5(a)、5(b) 中的点 C 和 C' 分别是直线 AB 和 $A'B'$ 与 VIP 平面的交点。为了计算点 C 、 D 和 C' 的坐标, 需要先计算出直线 AB 和 $A'B'$ 的方程。尽管 R_{out} 和 R_{in} 的计算表达式相同, 但图 5(a)、5(b) 中点 C 、 D 和 C' 的计算过程不同。

从图 5(a) 中可以看出, 为了计算 R_{out} , y_{AB} 和 $y_{A'B'}$ 两条直线可表示为:

$$\begin{cases} \text{Line } AB: y = \frac{n_1 P_m - \frac{P_l}{2}}{l_m} z + \frac{P_l}{2} \\ \text{Line } A'B': y = \frac{n_2 P_m + \frac{P_l}{2}}{l_m} z - \frac{P_l}{2} \end{cases}, \quad (12)$$

式中 $n_1 = \pm \frac{1}{2} \pm \frac{3}{2} \pm \frac{5}{2} \cdots$, $n_2 = 1 + n_1$ 。

根据方程式 (12), 图 5(a) 中点 C 和 C' 在 Y 轴上的坐标由下式计算:

$$\begin{cases} y_C = \frac{n_1 P_m - \frac{P_l}{2}}{l_m} l_2 + \frac{P_l}{2} \\ y_{C'} = \frac{n_2 P_m + \frac{P_l}{2}}{l_m} l_2 - \frac{P_l}{2} \end{cases}. \quad (13)$$

图 5(a) 中点 D 的坐标表示为:

$$\begin{cases} y_D = n_3 P_m \\ n_3 = \frac{n_1 + n_2}{2} \end{cases} \quad (14)$$

从图 5 (b) 中, 为了计算 R_m , y_{AB} 和 $y_{A'B'}$ 两条直线表示为:

$$\begin{cases} \text{Line } AB: y = \frac{n'_1 P_m - \frac{P_l}{2}}{l_m} z + \frac{P_l}{2} \\ \text{Line } A'B': y = \frac{n'_2 P_m + \frac{P_l}{2}}{l_m} z - \frac{P_l}{2} \end{cases} \quad (15)$$

其中 $n'_1 = n_2$, $n'_2 = n_1$ 。根据方程式 (15), 图 5(b) 中点 C 和 C' 在 Y 轴上的坐标由下式计算:

$$\begin{cases} y_C = \frac{n'_1 P_m - \frac{P_l}{2}}{l_m} l_2 + \frac{P_l}{2} \\ y_{C'} = \frac{n'_2 P_m + \frac{P_l}{2}}{l_m} l_2 - \frac{P_l}{2} \end{cases} \quad (16)$$

在图 5(b) 中, 点 D 在 Y 轴上的坐标表示为:

$$\begin{cases} y_D = n'_3 P_m \\ n'_3 = \frac{n'_1 + n'_2}{2} \end{cases} \quad (17)$$

将公式 (13)、(14)、(16)、(17) 分别代入公式 (7) 和 (11) 中, 即可计算出渐晕区域。

2.3 逆向光线追迹

2.3.1 非渐晕区

图 6 展示了子图像非渐晕区域中逆向主光线追迹的示意图。从像素中心(点 A_u)出射的主光线(图 6 中的绿色虚线)依次穿过 MLA 的中心点 B_u 、VIP 平面中的点 C_u 、主透镜中的点 D_u , 然后到达物面中的点 E_u 。主光线($A_u B_u$ 线)由下式确定:

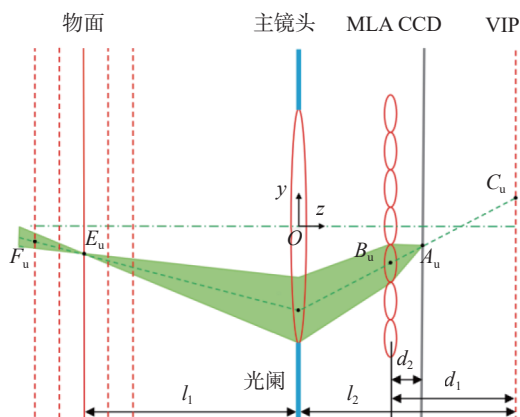


图 6 非渐晕区域的主光线的逆向光线追迹示意图

Fig. 6 Schematic of the backward ray tracing of the chief ray in the non-vignetting region

$$y = y_{B_u} + (l_2 - d_1) \frac{y_{B_u} - y_{A_u}}{d_2} - \frac{y_{B_u} - y_{A_u}}{d_2} z \quad (18)$$

式中, y_{B_u} 为 MLA 在 Y 轴上的中心坐标, y_{A_u} 为像素在 Y 轴上的中心坐标, d_1 为 MLA 和 VIP 平面之间的距离, d_2 为 MLA 和 CCD 传感器之间的距离, l_2 为主镜头和 VIP 平面之间的距离。

主光线 $A_u B_u$ 穿过 VIP 平面上的点 B_u 后, 到达 VIP 平面上的点 C_u 。根据方程式 (18), C_u 点的坐标计算如下:

$$y_{C_u} = y_{B_u} + (l_2 - d_1) \frac{y_{B_u} - y_{A_u}}{d_2} - \frac{y_{B_u} - y_{A_u}}{d_2} l_2 \quad (19)$$

然后, 主光线 $A_u B_u$ 传播到点 D_u 。点 D_u 的坐标计算如下:

$$y_{D_u} = y_{B_u} + (l_2 - d_1) \frac{y_{B_u} - y_{A_u}}{d_2} \quad (20)$$

主光线 $A_u B_u$ 穿过 D_u 后到达物平面上的点 E_u , 点 E_u 的坐标由下式计算:

$$y_{E_u} = -\frac{l_1}{l_2} y_{C_u} \quad (21)$$

式中, l_1 为主镜头和物面的距离。

主光线 $D_u E_u$ 的计算公式为:

$$y = \frac{y_{D_u} - y_{E_u}}{l_1} z + y_{D_u} \quad (22)$$

最后, 通过以下公式计算主光线和任意体素平面(在图 6 所示物体空间中的红色虚线)之间的交点 F_u 的坐标:

$$\begin{cases} y = \frac{y_{D_u} - y_{E_u}}{l_1} [-l_1 - z_3] + y_{D_u} \\ z_3 = 0, \pm s_{\text{voxel}}, \pm 2s_{\text{voxel}}, \pm 3s_{\text{voxel}}, \dots \end{cases} \quad (23)$$

式中, z_3 为重聚焦平面沿轴向的深度位置坐标, s_{voxel} 为 Z 轴上相邻体素平面之间的距离。

2.3.2 渐晕区域

图 7 展示了子图像渐晕区域中逆向主光线追迹的示意图。从图 7 中可以看出, CCD 传感器上的点 A_v 发出的光束由绿光和黄光组成。黄色光束被光阑阻挡, 无法穿过主镜头。只有绿色光束依次穿过微透镜阵列、主镜头, 最终到达物空间。因此, 只需追踪绿色部分的光束。为了追踪代表绿色光束的主光线, 需从点 A_v 出发, 经过微透镜阵列上的点 H_v 和主镜头上的点 G_v , 最终到达物空间中的点 I_v 。点 A_v 是像素中心的坐标, 可

以从光场图像中获得。而点 H_v 、 G_v 和 I_v 的坐标则需要重新推导和计算。

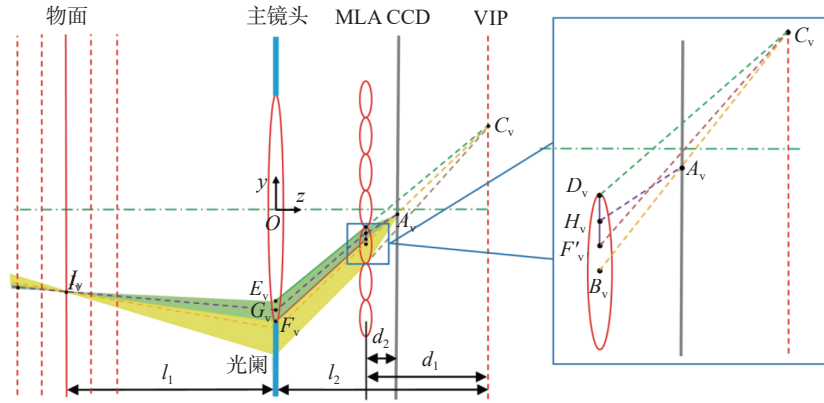


图 7 渐晕区域的主光线的逆向光线追迹示意图

Fig. 7 Schematic of the backward ray tracing of the chief ray in the vignetting region

1) 计算点 H_v 的坐标

点 H_v 是微透镜阵列上 $D_v F_v$ 线的中心。为了计算点 H_v 的坐标, 首先需要计算点 C_v 、 F_v 和 D_v 的坐标。

步骤一: 对于点 C_v 的计算, 点 C_v 是直线 $A_v B_v$ 和 VIP 平面的交点。点 B_v 是微透镜阵列的中心。光线 $A_v B_v$ 的由下式确定:

$$y = y_{B_v} - (d_1 - l_2) \frac{y_{B_v} - y_{A_v}}{d_2} + \frac{y_{A_v} - y_{B_v}}{d_2} z, \quad (24)$$

式中, y_{B_v} 为微透镜阵列沿 Y 轴的中心坐标, y_{A_v} 为像素沿 Y 轴上的中心坐标。根据方程式 (24), 点 C_v 由下式计算:

$$y_{C_v} = y_{B_v} - (d_1 - l_2) \frac{y_{B_v} - y_{A_v}}{d_2} + \frac{y_{A_v} - y_{B_v}}{d_2} l_2. \quad (25)$$

步骤二: 对于点 F_v 的计算, F_v 是直线 $C_v F_v$ 和微透镜阵列的交点。点 F_v 位于主镜头的边缘。根据方程式 (25), 直线 $C_v F_v$ 由下式确定:

$$y = y_{F_v} + \frac{y_{C_v} - y_{F_v}}{l_2} z, \quad (26)$$

式中 $y_{F_v} = \pm \frac{P}{2}$, 根据方程式 (26), 点 F_v 在 Y 轴上的坐标由下式计算:

$$y_{F_v} = y_{F_v} + \frac{y_{C_v} - y_{F_v}}{l_2} (l_2 - d_1). \quad (27)$$

步骤三: 对于计算点 D_v , D_v 位于微透镜阵列的边缘, 表示为:

$$y_{D_v} = n_4 P_m, \quad (28)$$

式中 $n_4 = \pm \frac{1}{2} \pm \frac{3}{2} \pm \frac{5}{2} \dots$ 。

根据 y_{F_v} 和 y_{D_v} , 即方程式 (27) 和 (28), 交点 H_v 的坐标由下式计算:

$$y_{H_v} = \frac{y_{F_v} + y_{D_v}}{2}. \quad (29)$$

2) 计算点 G_v 的坐标

点 G_v 是主镜头上直线 $E_v F_v$ 的中心。为了计算点 G_v 的坐标, 首先需要计算点 E_v 。点 E_v 表示直线 $C_v D_v$ 与主镜头的交点。

步骤一: 根据 y_{C_v} 和 y_{D_v} , 即方程式 (25) 和 (28), 直线 $C_v D_v$ 的计算公式为:

$$y = y_{C_v} - \frac{y_{C_v} - y_{D_v}}{d_1} l_2 + \frac{y_{C_v} - y_{D_v}}{d_1} z. \quad (30)$$

步骤二: 根据方程式 (30), 点 E_v 的坐标计算如下:

$$y_{E_v} = y_{C_v} - \frac{y_{C_v} - y_{D_v}}{d_1} l_2. \quad (31)$$

步骤三: 根据方程式 (31), 点 G_v 的坐标计算如下:

$$y_{G_v} = \frac{y_{E_v} + y_{F_v}}{2}. \quad (32)$$

3) 计算点 I_v 的坐标

主光线 $G_v I_v$ 和物面的交点 I_v 的坐标由下式计算:

$$y_{I_v} = -\frac{l_1}{l_2} y_{G_v}. \quad (33)$$

物空间中的主光线 $G_v I_v$ 由下式确定:

$$y = y_{G_v} + \frac{y_{G_v} - y_{I_v}}{l_1} z \quad (34)$$

3 淹没水射流速度场的测量

图 8 展示了淹没水射流实验装置的示意图, 包括水槽、阀门、流量计、喷嘴、潜水泵、R29 光场相机、双脉冲激光光源和同步控制器。R29 光场相机的光学参数如表 1 所示。喷嘴出口直径为 5.5 mm。水由潜水泵从喷嘴泵入水槽。流场中散播了平均直径为 50 μm 、密度为 1.03 g/cm^3 、浓度

约为 0.04 ppm (particle per microlens, ppm) 的聚酰胺颗粒。在实验中, 淹没水射流的平均速度和雷诺数 ReD 分别为 4.5 m/s 和 387。EM 算法的收敛判断依据为

$$|E^{k+1} - E^k| \leq 10^{-6} \quad (35)$$

即当前迭代的体素强度值与上一次迭代的体素强度值相差 10^{-6} 时, 迭代截止。由于重聚焦的深度平面只有 5 片, 根据公式 (35), 往往只需要迭代 10 次左右即可。光线追迹的计算时间约为 139 秒, EM 去模糊的计算时间约为 166.8 秒。

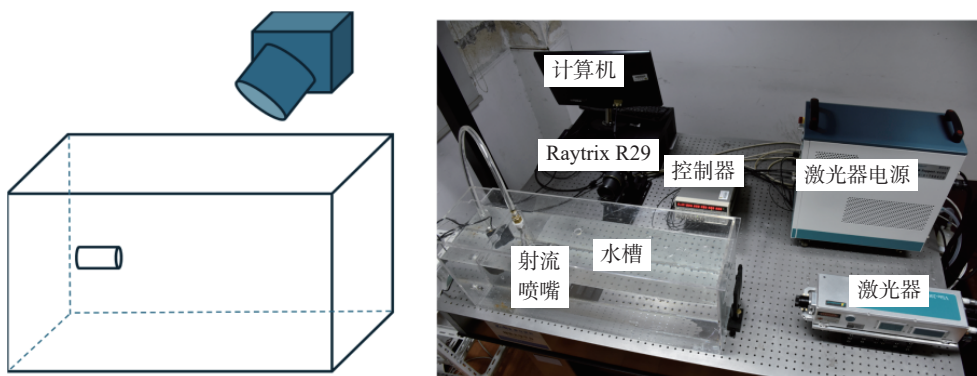


图 8 淹没水射流的 PIV 实验装置

Fig. 8 PIV Experimental Setup for Submerged Water Jets

表 1 Raytrix R29 光场相机的光学参数

Tab. 1 Optical parameters of Raytrix R29 light field camera

d_2 (mm)	f_m (mm)	f_{m1} (mm)	f_{m2} (mm)	f_{m3} (mm)	f (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l'_{v2} (mm)	l_m (mm)	P_m (mm)	P_x (μm)	$W_x \times W_y$ 微透镜数量	$N_x \times N_y$ 像素数量
1.317	-	1.936	1.626	2.335	100	-	200	200	193.07	0.1705	5.5	159×203	4320×6340

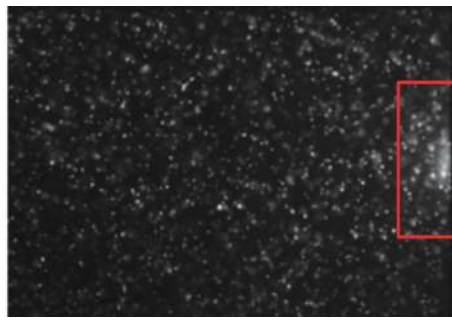
图 9 展示了淹没水流中的原始光场图像、重聚焦的粒子和去模糊的粒子图像。从图 9(a) 中可以看出, 喷嘴位于红色矩形的中心。从图 9(b) 中可以看出, 射流喷嘴周围的示踪粒子浓度高于远离射流喷嘴的示踪粒子浓度。深度平面的尺寸估计为 33.1 mm (X 轴) $\times$ 24.5 mm (Y 轴), 分为 331×245 个体素。

测量了深度平面 $Z = -1$ mm、 -0.5 mm、 0 mm、 0.5 mm 和 1 mm 处的二维速度场, 如图 10 所示。二维互相关的询问窗口大小和相邻两个询问窗口的重叠率分别设置为 64×64 和 75%。二维互相关算法的计算时间为 0.6 秒。深度平面 $Z = 0$ mm 位于淹没水射流的中心平面。深度平面 $Z = -1$ mm 和 $Z = 1$ mm 位于淹没水射流的边缘。喷嘴位于 X 轴正方向。射流沿 X 轴的负方向移动。速度随

着 X 轴的减小而减小, 沿着 Y 轴的正负方向减小, 展现出一个三角特征。从图 10 (c) 中可以看出, 淹没水射流在 $X = [5, 15]$ mm 区域具有最大的速度, 约为 3.4 m/s。实验结果表明, 所测得的淹没水射流的速度场分布具有射流的特征。



(a) 粒子的原始光场图像
(a) Raw light field image of the particle



(b) 位于 $Z=0$ mm位置的重聚焦图像
(b) Refocused image at $Z=0$ mm plane



(c) 位于 $Z=0$ mm位置的去模糊的重聚焦图像
(c) Deblurred image at $Z=0$ mm plane

图9 淹没水射流的原始光场图像、重聚焦的粒子和去模糊的粒子图像

Fig. 9 Examples of raw Light Field image, refocused particle image and deblurred image in the Submerged Water Jets

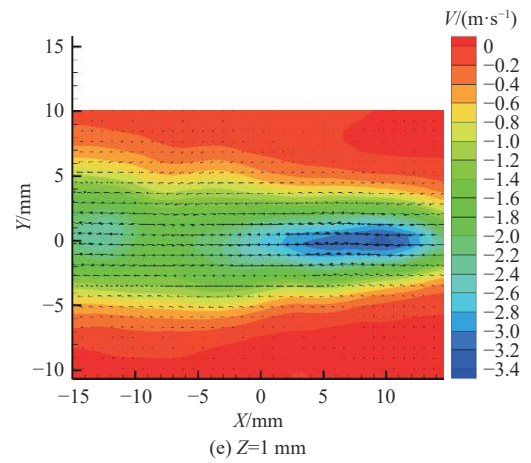
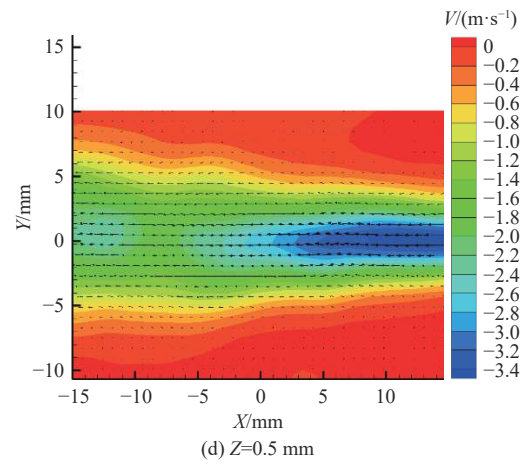
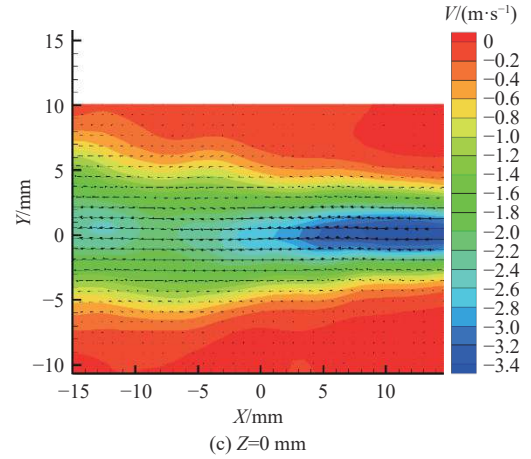
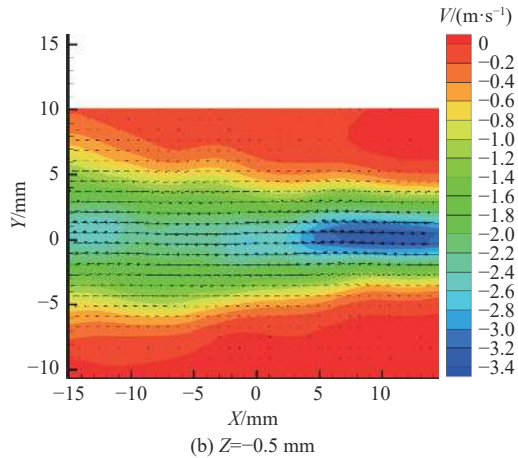
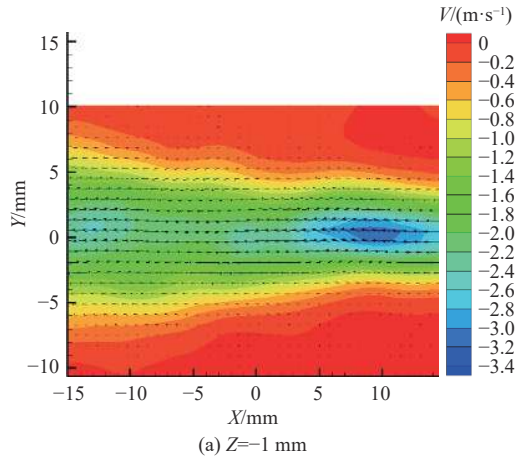


图10 淹没水射流的多平面速度场分布

Fig. 10 Multi-plane velocity field distribution of submerged water jets

4 结 论

提出了基于逆向光线追迹技术的数字重聚焦的多平面 2D PIV 技术。仅通过单台光场相机的一次曝光,即可完成流场深度内多平面二维速度场的同步测量。计算了聚焦光场相机的 F 数匹配关系和渐晕区域的尺寸。分别对非渐晕区域和

渐晕区域的主光线进行了逆向光线追迹计算。使用数字重聚焦算法计算了示踪粒子的重聚焦图像。然后, 采用 EM 算法移除了重聚焦图像中模糊的示踪粒子。最后利用二维互相关算法计算了

三维流场中位于不同深度平面的多个二维速度场分布。二维互相关的计算时间为 0.6 秒, EM 算法的计算时间为 166.8 秒。

参考文献:

- [1] 陈家成, 陈泰然, 梁文栋, 等. 收缩扩张管内液氮空化流动演化过程试验研究[J]. *力学学报*, 2022, 54(5): 1242-1256. CHEN J CH, CHEN T R, LIANG W D, *et al.*. Experimental study on the evolution of liquid nitrogen cavitating flows through converging-diverging nozzle[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(5): 1242-1256. (in Chinese).
- [2] 董亮, 张立新, 刘厚林, 等. 车用凸轮式氢气循环泵内非定常流动特性[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(5): 433-439. DONG L, ZHANG L X, LIU H L, *et al.*. Unsteady flow characteristics of cam type hydrogen circulation pump for vehicle[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(5): 433-439. (in Chinese).
- [3] 房兴龙, 杨伟平. 时序效应对双级涡轮非定常流场和性能的影响[J]. *风机技术*, 2022, 64(2): 25-32. FANG X L, YANG W P. Influence of clocking on the unsteady flow field and efficiency in a two-stage turbine[J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2022, 64(2): 25-32. (in Chinese).
- [4] ZHONG L J, LIU P L, HUA J X, *et al.*. Experimental study on combustion characteristics and pressure oscillations of turbulent jet ignition in a confined space[J]. *Combustion Science and Technology*, 2023, 195(5): 958-981.
- [5] 李龙飞, 杨宝庆, 葛树宏, 等. 流场不均匀对液体火箭发动机纵向振荡燃烧影响及控制[J]. *航空动力学报*, 2023, 38(1): 223-229. LI L F, YANG B Q, GE SH H, *et al.*. Influence and control of non-uniform flow field on longitudinal combustion instability of liquid rocket engines[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(1): 223-229. (in Chinese).
- [6] 孙俊. 基于光场成像的火焰三维温度场测量方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. SUN J. *Three-dimensional temperature measurement of flame based on light field imaging*[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese).
- [7] 李嘉, 李华聪, 张伟, 等. 高压燃油离心泵压力脉动及非定常流动分析[J]. *西北工业大学学报*, 2022, 40(1): 199-205. LI J, LI H C, ZHANG W, *et al.*. Transient flow structures and pressure pulsations of a high-pressure aero-fuel centrifugal pump[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, 40(1): 199-205. (in Chinese).
- [8] KIM D, SHIN J, SON Y, *et al.*. Characteristics of in-cylinder flow and mixture formation in a high-pressure spray-guided gasoline direct-injection optically accessible engine using PIV measurements and CFD[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 248: 114819.
- [9] DE SILVA C M, BAIDYA R, KHASHEHCHI M, *et al.*. Assessment of tomographic PIV in wall-bounded turbulence using direct numerical simulation data[J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(2): 425-440.
- [10] SCARANO F, POELMA C. Three-dimensional vorticity patterns of cylinder wakes[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 47(1): 69-83.
- [11] 曹丽霞, 张彪, 宋祥磊, 等. 聚焦光场成像三维粒子场重建方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(11): 2322-2330. CAO L X, ZHANG B, SONG X L, *et al.*. Reconstruction method of three-dimensional particle field based on focused light field imaging[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(11): 2322-2330. (in Chinese).
- [12] FAN Q B, LIN P CH, TAN L, *et al.*. Non-invasive and fully two-dimensional quantitative visualization of transparent flow fields enabled by photonic spin-decoupled metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 113.
- [13] 巩子琦. 基于粒子图像测速技术的不同润湿性侧壁面气泡生长和上升行为研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2024. GONG Z Q. Research on growth and rising behavior of bubbles on sidewalls with different wettability properties based on PIV[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024. (in Chinese).
- [14] 朱海东, 马壮壮, 李虎, 等. 基于图像处理技术的消除双帧粒子图像背景反射研究[J]. *中国工程机械学报*, 2025, 23(4): 601-605. ZHU H D, MA ZH ZH, LI H, *et al.*. Research on elimination of background reflection in dual-frame particle images

- based on image processing techniques[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2025, 23(4): 601-605. (in Chinese).
- [15] 包全. 层析粒子图像测速技术几个关键问题研究及湍流边界层 Tomo-TRPIV 测量[D]. 天津: 天津大学, 2013.
BAO Q. Research of several key problems in tomographic particle image velocimetry and turbulent boundary layer Tomo-TRPIV measurement[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese).
- [16] 李晓辉, 王宏伟, 黄湛, 等. 层析粒子图像测速技术研究进展[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(1): 86-96.
LI X H, WANG H W, HUANG ZH, *et al.*. Research advances of tomographic particle image velocimetry[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(1): 86-96. (in Chinese).
- [17] NG R, LEVOY M, BRÉDIF M, *et al.*. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[R]. Stanford: Stanford University, 2005.
- [18] 刘煜东, 许传龙, 孙俊, 等. 火焰辐射光场成像光线采样特性[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(11): 2207-2215.
LIU Y D, XU CH L, SUN J, *et al.*. Characterization of ray sampling for flame radiation in light field imaging[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(11): 2207-2215. (in Chinese).
- [19] FAHRINGER T W, LYNCH K P, THUROW B S. Volumetric particle image velocimetry with a single plenoptic camera[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(11): 115201.
- [20] TAN Z P, JOHNSON K, CLIFFORD C, *et al.*. Development of a modular, high-speed plenoptic-camera for 3D flow-measurement[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13400-13415.
- [21] CAO L X, ZHANG B, LI J, *et al.*. Characteristics of tomographic reconstruction of light-field Tomo-PIV[J]. *Optics Communications*, 2019, 442: 132-147.
- [22] SHI SH X, DING J F, NEW T H, *et al.*. Volumetric calibration enhancements for single-camera light-field PIV[J]. *Experiments in Fluids*, 2019, 60(1): 21.
- [23] MEI D, DING J F, SHI SH X, *et al.*. High resolution volumetric dual-camera light-field PIV[J]. *Experiments in Fluids*, 2019, 60(8): 132.
- [24] ZHU X Y, LU J X, HOSSAIN M, *et al.*. Investigation of particle reconstruction quality for three-dimensional light field PIV[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2025, 104: 102888.
- [25] ZHU X Y, HOSSAIN M, LI J, *et al.*. Weight coefficient calculation through equivalent ray tracing method for light field particle image velocimetry[J]. *Measurement*, 2022, 193: 110982.
- [26] ZHU X Y, ZHANG B, LI J, *et al.*. Volumetric resolution of light field imaging and its effect on the reconstruction of light field PIV[J]. *Optics Communications*, 2020, 462: 125263.
- [27] ZHU X Y, WU ZH A, LI J, *et al.*. A pre-recognition SART algorithm for the volumetric reconstruction of the light field PIV[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106625.
- [28] ZHU X Y, XU CH L, HOSSAIN M, *et al.*. Approach to select optimal cross-correlation parameters for light field particle image velocimetry[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(7): 073601.
- [29] ZHU X Y, XU CH L, HOSSAIN M, *et al.*. Fast and accurate flow measurement through dual-camera light field particle image velocimetry and ordered-subset algorithm[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(6): 063603.
- [30] 刘心爱, 孟娟, 杜海, 等. 基于 ConvLSTM 与 LiteFlowNet 架构的粒子图像测速方法[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(7): 1023-1035.
LIU X A, MENG J, DU H, *et al.*. Particle image velocimetry method based on ConvLSTM and LiteFlowNet architecture[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(7): 1023-1035. (in Chinese).
- [31] ZHU X Y, XU CH L, HOSSAIN M M, *et al.*. Accurate weight coefficient estimation of multi-camera light field PIV through backpropagation neural network[J]. *Measurement*, 2024, 226: 114096.
- [32] CAO L X, HOSSAIN M, LI J, *et al.*. Three-dimensional particle image velocimetry measurement through three-dimensional U-Net neural network[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(4): 047136.
- [33] HALL E M, FAHRINGER T W, GULDENBECHER D R, *et al.*. Volumetric calibration of a plenoptic camera[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 914-923.
- [34] PERWASS U, PERWASS C. Digital imaging system, plenoptic optical device and image data processing method: US, 8619177B2[P]. 2013-12-31.
- [35] SUN J, XU CH L, ZHANG B, *et al.*. Three-dimensional temperature field measurement of flame using a single light field camera[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1118-1132.

- [36] CAO L X, ZHANG B, HOSSAIN M, *et al.*. Tomographic reconstruction of light field PIV based on a backward ray-tracing technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(4): 044007.

作者简介:



曹丽霞(1989—),女,浙江磐安人,博士,讲师,研究生导师,2022年于东南大学获得博士学位。现为中国计量大学计量测试与仪器学院讲师。主要从事光场成像、层析成像和流体可视化方面的研究。E-mail: caolx2019@gmail.com



田 杏,女,硕士研究生,主要从事光场成像系统优化和应用方面的研究。
1933270289@qq.com