

基于体标定追迹法的光场 PIV 权系数计算方法

吴治安, 朱效宇, 李健^{**}, 张彪, 许传龙^{*}

东南大学能源与环境学院火电机组振动国家工程研究中心, 江苏 南京 210096

摘要 针对光场粒子图像测速(PIV)技术中介质折射率变化及镜头畸变等因素而导致权系数计算误差较大的问题,提出一种基于体标定追迹技术的光场 PIV 权系数计算方法。该方法首先通过体标定方法建立空间物点与微透镜之间的映射关系,然后利用光线追迹技术计算控制体内的离散体素对像素的权系数,最后将该方法计算的权系数与直接追迹法计算的结果进行比较,并对标定板特征点的空间位置进行重建实验研究。实验结果表明,体标定追迹法计算出的权系数与直接追迹法的计算结果高度吻合;重建获得的标定板特征点在横向和深度方向上的位置误差分别小于 0.002 mm 和 0.250 mm。

关键词 图像处理; 体重建; 光场 PIV; 体标定; 权系数

中图分类号 O359

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2010001

Volumetric-Calibration Ray Tracing-Based Calculation Method of Weight Coefficient in Light Field PIV

Wu Zhian, Zhu Xiaoyu, Li Jian^{**}, Zhang Biao, Xu Chuanlong^{*}

National Engineering Research Center of Turbo-Generator Vibration, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract Aiming at the problem of large calculation errors of weight coefficients caused by factors, such as medium refractive index changes and lens distortion in light field particle image velocimetry (PIV) technology, a method for calculating light field PIV weight coefficients based on volumetric calibration tracking technology is proposed. First, the mapping relationship between the spatial object points and the microlens is established by the volume calibration method. Second, the ray tracing technology is used to calculate the weight coefficient of the discrete voxel to pixel in the control body. Finally, the weight coefficient calculated by this method is compared with the direct tracking method, and the spatial positions of the feature points of the calibration plate are reconstructed experimentally. The experimental results show that the weight coefficient calculated by the volumetric calibration tracking method is highly consistent with the calculation results of the direct tracking method. The position errors of reconstructed calibration plate feature points in transverse and depth directions are less than 0.002 mm and 0.250 mm, respectively.

Key words image processing; volumetric reconstruction; light field PIV; volumetric calibration; weight coefficient

OCIS codes 100.3010; 100.6890; 080.1510

1 引言

能源化工和航空航天等工程领域的流动现象大多是三维非稳态的,实现三维瞬时速度场的准确测

量对深入研究流动机制和相关系统的优化具有重要意义^[1-3]。粒子图像测速(PIV)技术是一种可获取瞬时速度场的非侵入式测量技术,目前已发展的三维 PIV 技术有体视 PIV^[4-6]、全息 PIV^[7-8]、层析

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-04-27; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51976038)、江苏省重点研发计划(社会发展)(BE2020691)、中央高校基本科研业务费专项资金(3203002101C3)

通信作者: *chuanlongxu@seu.edu.cn; **eelijian@seu.edu.cn

PIV^[9-10]和合成孔径 PIV^[11]等,已经在流体力学实验和工程中得到了广泛的应用。然而,由于上述技术在应用的过程中通常需要使用多台相机对流场图像信息进行采集,为此这些技术在光学窗口受限的场合中的应用受到限制。光场相机通过将传统相机的图像传感器与微透镜阵列(MLA)进行耦合,能够在一次曝光下完成对流场示踪粒子三维空间位置信息的采集^[12-13]。凭借这一特点,基于光场成像的三维 PIV 技术(光场 PIV)实现了单个视角下三维流场的测量,近年来在流动测试领域,尤其是在光学条件受限的应用场合下得到了快速发展^[14-19]。

在光场 PIV 技术中,为获得控制体内示踪粒子的空间分布,通常采用体重建算法对示踪粒子的位置进行三维重建。体重建算法主要包括数字重聚焦算法^[16,20-22]和层析重建算法^[11,18,23-24],其中数字重聚焦算法具有计算量小和重建速度快的特点,但受限于微透镜尺寸,利用该算法得到的重建结果的分辨率较低,而且出现在重聚焦平面的模糊斑会对重建结果产生影响。相比之下,层析算法可以实现较高的重建分辨率和准确性,常用于解决因视角范围受限引起的不适定和欠定重建问题^[14,25]。在采用层析重建算法的过程中,须预先准确计算测量体离散体素对光电传感器(CCD)上像素强度的贡献程度,即权系数。目前,光场 PIV 权系数的计算方法主要是基于薄透镜模型通过光线追迹法来实现^[14,18,24],计算的过程中除了需已知光场相机的光学参数外,还需预先确定光在传播过程中的空间参数与物性参数。然而在实际流场测量中,光线因在传播过程中经过多种光学介质(如流场介质、光学窗口和空气等)并发生数次折射,其传播路径往往无法准确还原。此外,光线追迹法未能考虑成像系统中光学元件的像差和偏斜等实际不利因素,为此权系数计算的准确性也会受到影响。针对这一问题,上海交通大学 Shi 等^[24]在理想薄透镜模型中加入了修正补偿系数,通过已知空间位置的点源在光场图像中所形成的点状斑来确定补偿系数,以实现光线在传播过程中折射和偏斜的修正,进而通过蒙特卡洛法计算离散体素的权系数。然而,在实际应用过程中,由于采用具有一定尺寸的标定板圆点代替理想点源进行成像,这与相应光场图像中所获取的光斑特征存在一定误差,而且可能会对权系数的计算准确度产生影响。此外,在距离焦面较远处圆点所形成的光斑尺寸较大,当不同圆点的光斑发生相互重叠时,光斑特征将无法有效提取,限制了该方法

在远离焦面位置的应用。

在传统的体视和层析 PIV 技术中,针对此多介质成像的问题,以及为了实现体素与像素的准确关联,Soloff^[6]和 Scarano 等^[26]均采用体标定的方法建立实际过程中的物像映射关系,其原理是采用 PIV 成像系统拍摄已知空间位置的目标点,从图像中提取目标点所成像的像素位置,并将二者通过数学关系进行拟合。这种方法在目标点样本量充足的条件下可以有效规避由光线追迹带来的误差。但需要说明的是,针对传统成像过程,上述模型仅考虑了物像位置的对应关系,忽略了光线的传播方向。而在光场成像过程中,由于存在微透镜阵列的二次成像效果,为此光场图像中像素的位置不仅反映了光线的投影强度,还反映了光线从主镜头出射的方向信息。因此,通过数学关系式直接建立物点空间位置坐标和光线传播方向与光线入射至微透镜的位置坐标难度较大。但光场成像可以从光场原图像中提取出光场视差图(子孔径图像^[22]),由于光场视差图可以看作光线经主镜头不同位置的子孔径后在微透镜面所成的像,因此可以建立起物点和光线方向与光线入射微透镜平面位置的映射关系。考虑到追迹技术的误差主要源于物空间的光线折射,而非光场相机内部。因此,在上述关系确立的基础上,可以进一步从微透镜平面至图像平面追迹光线,从而将物空间体素与像素对应起来。

本文提出了一种基于体标定追迹法(VCT)的光场 PIV 权系数计算方法。首先从光场原图像中提取光场子孔径图像,建立物点空间位置坐标和光线传播方向与光线入射微透镜位置坐标的映射关系。将所建立的映射关系应用于目标体素并结合光线追迹技术计算其权系数。为了验证所提的体标定追迹法计算权系数的准确性,在数值实验中,将计算得到的权系数与理论真值分别导入乘法代数重建技术(MART)中用于标定板位置的数值重建,并对重建结果的准确性进行了比较分析。进一步通过自组装的笼式光场相机开展了流场内标定板的重建实验研究。

2 基于体标定追迹法的权系数计算方法

流场内示踪粒子的光场成像过程如图 1 所示,其中 (x, y, z) 为空间物点坐标, I_j 为 CCD 上测量体内第 j 个体素的强度值, $I^{(k)}$ 为第 k 次迭代后体素的强度, (u, v) 为光线从物点发出后入射至主镜

头的位置坐标, (s, t) 为光线经主镜头折射后入射至微透镜阵列平面的坐标, (p, q) 为像素坐标。光线从控制体离散体素内发出后, 经流场-壁面界面、壁面-空气界面、主镜头和微透镜阵列的多次折射后最终入射到 CCD 上。CCD 的像素强度等于其在光线上体素强度的投影积分, 可表示为

$$P_i = \sum_j \omega_{i,j} I_j, \quad (1)$$

式中: P_i 为 CCD 上第 i 个像素的强度值; $\omega_{i,j}$ 为第 j 个体素对第 i 个像素强度贡献的权系数。作

为光场成像的逆过程, 光场 PIV 层析重建是利用流场内示踪粒子的光场图像, 并采用 MART (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) 算法来重建测量体内光强空间分布的过程, 其迭代过程为

$$I_j^{(k+1)} = I_j^{(k)} \left[P_i / \sum_{j=1}^N I_j^{(k)} \omega_{i,j} \right]^{\mu \omega_{i,j}}, \quad (2)$$

式中: $I_j^{(k)}$ 为第 k 次迭代中第 j 个体素的强度; N 为第 i 个像素在光线上的体素总数; μ 为松弛因子。

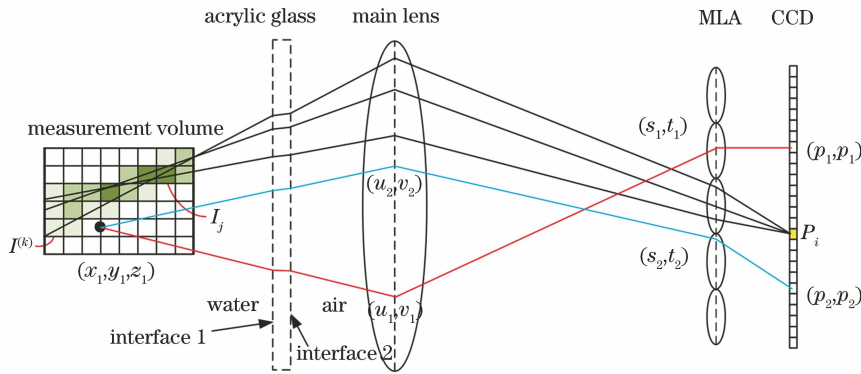


图 1 光场成像的原理示意图

Fig. 1 Principle of light field imaging

采用 MART 算法来重建示踪粒子的空间分布, 必须准确计算控制体内各个体素与 CCD 对应像素间的权系数 $\omega_{i,j}$ 。理论上权系数可以基于理想薄透镜模型通过光线追迹法计算得到。然而, 理想薄透镜模型未考虑镜头畸变和相机内外参数误差等因素, 导致由光线追迹法计算的权系数存在误差。此外, 在实际的流场测量过程中, 示踪粒子散射发出的光线在传播过程中会经过多种光学介质, 并在界面发生折射后入射到光场相机, 而折射面相对于主镜头的位置往往无法准确确定, 因此光线的传播路径无法准确追迹。

为解决这一问题, 本文借鉴体视 PIV 技术中体标定方法的思路, 并结合光场成像技术的特点通过两步实现控制体体素权系数的计算。首先, 通过光场成像系统拍摄已知空间位置的目标点, 在光场视差图(子孔径图像)中提取目标点的图像坐标, 从而建立物点与从物点发出光线入射至微透镜的位置关系。物点位置与物点发出光线入射至微透镜位置的关系 L , 可表示为

$$L(x, y, z, u, v) = (s, t). \quad (3)$$

为了获取 (u, v) 和 (s, t) , 可以从光场原图像中提取光场子孔径图像, 提取光场子孔径图像的原理如图 2 所示。光场相机的方向分辨率取决于每个微透

镜下覆盖的像素个数, 因此可以根据微透镜下的像素数目将主孔径离散化为多个子孔径。对于非聚焦型光场相机, 由于主孔径平面与 CCD 平面关于微透镜平面共轭, 光线从同一子孔径出射后, 经各个微透镜折射最终入射的像素位置相对于各微透镜中心是相同的(图 2 的微透镜子图像中不同灰度的像素分别与主镜头中各个子孔径的像素共轭)。因此, 提取所有微透镜子图像中相同位置的像素即可获得一幅光场子孔径图像。举例来说, 图 2 的空间物点 (x_1, y_1, z_1) 发出两束光线分别经子孔径 (u_3, v_2) 、 (u_3, v_5) 和微透镜两次折射后入射到 CCD 上, 将各个微透镜子图像中的浅色与深色像素点亮。将这部分像素分别提取出来, 即可获得光线经子孔径 (u_3, v_2) 和 (u_3, v_5) 后所形成的图像。在此基础上, 通过高斯拟合可以得到物点在两幅子孔径图像上所成的像的中心坐标, 该坐标即为光束中心主光线经过子孔径 (u_3, v_5) 和 (u_3, v_2) 后入射至微透镜平面的位置坐标 $[s_1(u_3, v_5), t_1(u_3, v_5)]$ 和 $[s_1(u_3, v_2), t_1(u_3, v_2)]$ 。

按上述方法, 对于主孔径所划分的 m 个子孔径(子孔径数目等于每个微透镜下覆盖的像素数), 以及物空间的 n 个目标点, 共可以获得 $m \times n$ 组 (x, y, z) 、 (u, v) 以及 (s, t) 。通过数学拟合可以确定映

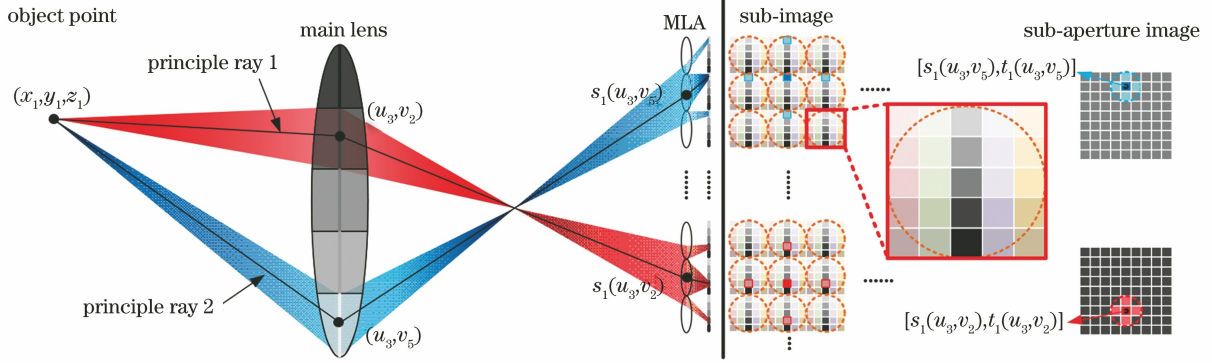


图 2 提取光场子孔径图像的原理

Fig. 2 Principle of extracting light field subaperture image

射关系 L , 将 L 表示为四阶多项式形式, 即

$$s = a_{s1} + a_{s2}x + a_{s3}y + a_{s4}z + a_{s5}u + a_{s6}v + a_{s7}x^2 + a_{s8}xy + a_{s9}xz + a_{s10}xu + a_{s11}xv + a_{s12}y^2 + a_{s13}yz + a_{s14}yu + a_{s15}yv + a_{s16}z^2 + a_{s17}zu + a_{s18}zv + \dots + a_{s123}u^2v^2 + a_{s124}u^4 + a_{s125}u^3v + a_{s126}v^4, \quad (4)$$

$$t = a_{t1} + a_{t2}x + a_{t3}y + a_{t4}z + a_{t5}u + a_{t6}v + a_{t7}x^2 + a_{t8}xy + a_{t9}xz + a_{t10}xu + a_{t11}xv + a_{t12}y^2 + a_{t13}yz + a_{t14}yu + a_{t15}yv + a_{t16}z^2 + a_{t17}zu + a_{t18}zv + \dots + a_{t123}u^2v^2 + a_{t124}u^4 + a_{t125}u^3v + a_{t126}v^4, \quad (5)$$

式中: $a_{s1} \sim a_{s126}$ 和 $a_{t1} \sim a_{t126}$ 为两组待定系数。

为了确定 $a_{s1} \sim a_{s126}$ 和 $a_{t1} \sim a_{t126}$, 可通过 (x, y, z) 、 (u, v) 和 (s, t) 建立方程组, 即

$$\begin{cases} \mathbf{s}' = \mathbf{A}\mathbf{a}_s \\ \mathbf{t}' = \mathbf{A}\mathbf{a}_t \end{cases}, \quad (6)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & x_1(u_1, v_1) & y_1(u_1, v_1) & z_1(u_1, v_1) & u_1 & v_1 & x_1(u_1, v_1)^2 & \dots & v_1^4 \\ 1 & x_2(u_1, v_1) & y_2(u_1, v_1) & z_2(u_1, v_1) & u_1 & v_1 & x_2(u_1, v_1)^2 & \dots & v_1^4 \\ 1 & x_2(u_1, v_1)^2 & y_3(u_1, v_1) & z_3(u_1, v_1) & u_1 & v_1 & x_3(u_1, v_1)^2 & \dots & v_1^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n(u_m, v_m) & y_n(u_m, v_m) & z_n(u_m, v_m) & u_m & v_m & x_n(u_m, v_m)^2 & \dots & v_m^4 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{s}' = [s_1(u_1, v_1) \quad s_2(u_1, v_1) \quad \dots \quad s_1(u_2, v_1) \quad \dots \quad s_n(u_m, v_m)]^T; \mathbf{a}_s = [a_{s1} \quad a_{s2} \quad a_{s3} \quad \dots \quad a_{s126}];$$

$$\mathbf{t}' = [t_1(u_1, v_1) \quad t_2(u_1, v_1) \quad \dots \quad t_1(u_2, v_1) \quad \dots \quad t_n(u_m, v_m)]^T; \mathbf{a}_t = [a_{t1} \quad a_{t2} \quad a_{t3} \quad \dots \quad a_{t126}].$$

在已知 \mathbf{s}' 、 \mathbf{t}' 和 \mathbf{A} 的情况下, 根据最小二乘原理并采用左除法即可求得系数向量 \mathbf{a}_s 和 \mathbf{a}_t , 表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{a}_s = \mathbf{A} \setminus \mathbf{s}' \\ \mathbf{a}_t = \mathbf{A} \setminus \mathbf{t}' \end{cases}. \quad (7)$$

在获得映射关系 L 后, 对于控制体内任意位置的物点, 均可准确计算由该点发出任意角度的光线

经过任意子孔径位置后入射到微透镜阵列的坐标。由于光线入射到微透镜平面的位置 (s, t) 及角度 (θ, φ) 均已知, 在光场相机内部参数已知的条件下, 光线经微透镜折射后入射到像素的位置可由光线的矩阵传输方程求得, 表达式为

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \\ \theta' \\ \varphi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1/f_m & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/f_m & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ t \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s_x/f_m \\ s_y/f_m \end{bmatrix} \right), \quad (8)$$

式中: f_m 为微透镜的焦距; d_1 为 MLA 与 CCD 之间的距离; s_x 和 s_y 分别为微透镜中心与光轴的横向与纵向距离 (θ' , φ') 为光线入射到 CCD 的角度坐标; (P, Q) 为像素平面的物理坐标。物理坐标 (P, Q) 可进一步转换为 (p, q), 表达式为

$$\begin{cases} p = p_c + \frac{P}{p_x}, \\ q = q_c + \frac{Q}{p_x} \end{cases} \quad (9)$$

式中: (p_c, q_c) 为光场图像的中心像素坐标; p_x 为像素的尺寸。

上述体标定过程考虑了流场界面的折射和镜头畸变等实际因素, 通过所建立的映射关系 L 可以将物点所发出的光线与对应的像素联系起来。在此基础上, 从物点处抽样足够多的光线 (光线数超过 10^6) 并分别计算每条光线入射的像素位置, 即可获得该物点经光场成像系统后的点扩展函数。由于离

表 1 光场相机的参数

Table 1 Parameters of light field camera

Symbol	Parameter	Value	Symbol	Parameter	Value
f_m/mm	Focal length of main lens	100	$f_1/\mu\text{m}$	Focal length of microlens	800
p_m/mm	Main lens aperture	25	p_1/mm	Microlens size	0.1
M	Magnification	-1	$p_x/\mu\text{m}$	Pixel size	5.5
d_{si}/mm	Distance from main lens to MLA	200	$d_1/\mu\text{m}$	Distance from MLA to CCD	800
F_m	F number of main lens	4	F_1	F number of microlens	8

由于物空间的几何参数及物性参数均已知, 故将主镜头等效为理想薄透镜模型, 将 MLA 等效为薄透镜和棱镜的组合模型^[27], 光线可由流场内任意物点追迹至 CCD 像素, 由此可进一步计算控制体内体素的权系数并将其作为标准值。另一方面, 通过模拟生成流场中不同位置处标定板的光场图像, 并使用体标定追迹法对光场 PIV 系统的权系数进行计算。将圆形阵列 (7×7) 标定板沿光场相机的主光轴方向移动, 在近焦 $z_j = -8 \text{ mm}$ 至远焦 $z_y = 8 \text{ mm}$ 之间每隔 0.5 mm 暂停一次并生成相应的光场图像, 共选取 16 个深度位置的光场图像计算权系数, 提取每幅图像的子孔径图像并识别标定板中各个特征点的圆心位置, 以获得光线经子孔径后入射到微透镜的坐标 (s, t)。在此基础上, 利用已知 $784 (7 \times 7 \times 16)$ 个特征点的世界坐标 (x, y, z), 以及 $324 (18 \times 18)$ 个子孔径位置坐标 (u, v) 构建矩阵 \mathbf{A} , 利用识别出的 $254016 (784 \times 324)$ 组圆心坐标 (s, t) 构建向量 \mathbf{s}' 和 \mathbf{t}' , 通过最小二乘拟合系数向量 \mathbf{a}_s 和 \mathbf{a}_t

散体素的权系数可以看作所有点源的点扩展函数的叠加结果^[14], 因此, 在不影响权系数计算准确性的基础上考虑计算效率, 本文在每个体素内随机抽样 400 个不同位置的点源, 计算所有抽样点源的点扩展函数并将结果进行叠加, 由此得到了该体素的权系数。对所有控制体内的离散体素进行遍历, 分别计算其权系数并将结果保存至一个大型稀疏矩阵中, 用于后续 MART 算法的迭代重建。

3 权系数计算方法数值计算验证

通过数值计算重建流场内标定板特征点的空间位置来验证体标定追迹法计算权系数的准确性。数值计算的流场及空间位置如图 3 所示, 流场内焦面与内壁面的距离 d_{s01} 、有机玻璃壁厚 d_{s02} 、外壁面与主镜头物主面的距离 d_{s03} 分别为 $129.0, 4.5, 100.0 \text{ mm}$, 水、有机玻璃和空气的折射率分别为 $1.33, 1.50$ 和 1.00 , 光场相机的主要参数如表 1 所示。

即可准确计算映射函数 L 。最后根据映射函数 L 及光线追迹的矩阵传输方程在控制体内任意体素抽取足够多的点光源并计算权系数。

体重建控制体的尺寸为 $8.1 \text{ mm} \times 8.1 \text{ mm} \times 24.1 \text{ mm}$, 单个体素的尺寸为 $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$, 体素中心坐标如表 2 所示。由于数值计算中物空间各个折射面位置已知, 因此直接追迹 (DRT) 法计算的权系数可以作为标准值, 选取控制体一条对角线上的体素 (表 2), 分别用体标定追迹法和直接追迹法计算其权系数并进行分析。图 4 为不同深度位置处体素的权系数计算结果比较。从图 4 可以看到, 体标定追迹法计算的权系数与直接追迹法高度相似。进一步通过 SSIM (Structural Similarity) 指标衡量两种方法计算结果的相似程度, SSIM 值介于 $0 \sim 1$ 之间, 值越大表明结果的相似度越高^[28]。不同深度位置处的权系数相似度如图 5 所示。从图 5 可以看到, 不同深度位置处权系数的 SSIM 值均大于 0.93 , 焦面附近的 SSIM 值大

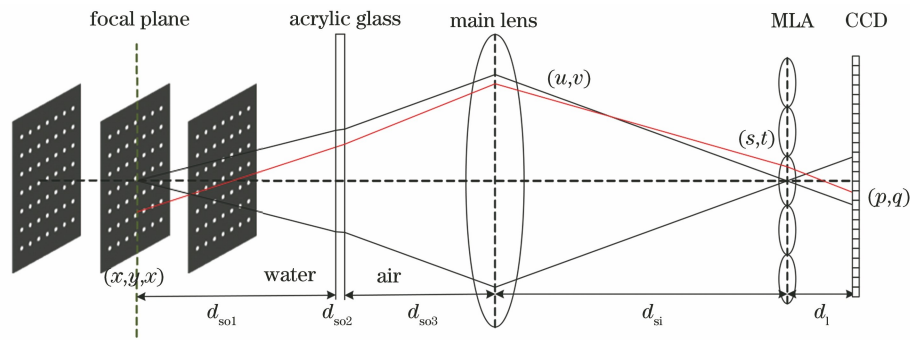


图 3 权系数计算方法的数值验证示意图

Fig. 3 Numerical verification diagram of weight coefficient calculation method

表 2 体素的中心坐标

Table 2 Central coordinates of voxel

unit: mm

Coordinate	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x	-2.4	-2.1	-1.8	-1.5	-1.2	-0.9	-0.6	-0.3	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
y	-2.4	-2.1	-1.8	-1.5	-1.2	-0.9	-0.6	-0.3	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
z	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8

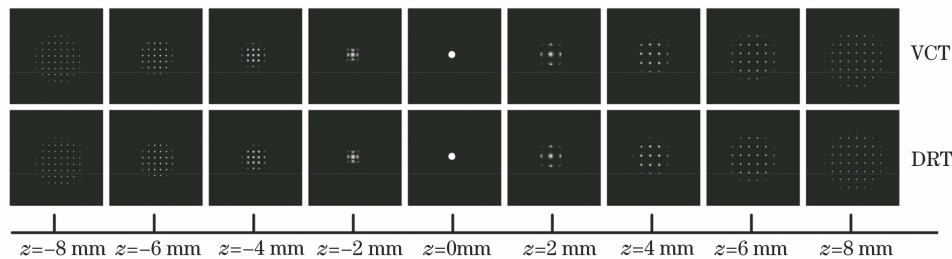


图 4 不同深度位置处的权系数图谱

Fig. 4 Weight coefficient atlas at different depth positions

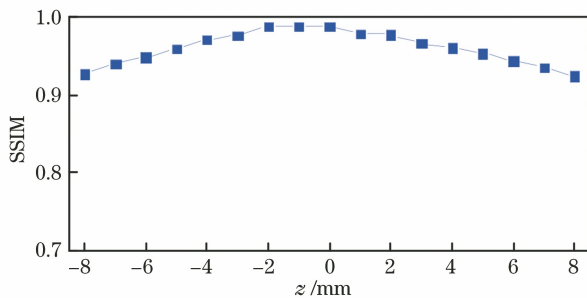


图 5 不同深度位置处的权系数相似度

Fig. 5 Similarity of weight coefficients at different depth positions

于 0.98, 表明在整个控制体内的所有位置(无论近轴、远轴, 还是在焦、离焦)使用体标定追迹法计算的权系数准确性较高。

将两种方法计算的权系数分别代入 MART 算法中, 用于重建标定板在 $-8, -7, \dots, 7, 8$ mm 17 个深度位置处特征点的空间位置, 标定板特征点的中心重建结果如图 6 所示。对标定板特征点的重建强

度分布进行三维高斯拟合, 并取峰值的横坐标为重建中心, 半峰全宽为重建拉伸长度。图 7 为不同深度位置处标定板特征点中心的重建准确性结果。从图 7 可以看到, 两种权系数计算方法的重建横向平均距离 d_x 均与设定的圆心距 1 mm 之间的误差 $\epsilon_x \leq \pm 0.0002$ mm。受到光场相机在深度方向的分辨率较差的影响^[29-30], 体标定追迹法在各深度的重建中心与基准位置的误差 $\epsilon_z \leq \pm 0.25$ mm, 而直接追迹法的深度方向平均位置误差 $\epsilon_z \leq \pm 0.20$ mm。图 8 为标定板体重建拉伸结果。从图 8 可以看到, 在横向方向上两种计算方法的拉伸长度 s_x 均小于 0.15 mm 且二者差异小于 0.01 mm, 在深度方向上两种计算方法的拉伸长度在 3~4 mm 之间, 除焦面处二者差异为 0.4 mm 以外, 其余位置差异均小于 0.1 mm。标定板特征点的空间位置重建结果表明, 体标定追迹法与直接追迹法计算的权系数差异较小, 体标定追迹法可以准确应用于光场 PIV 体重建权系数的计算。

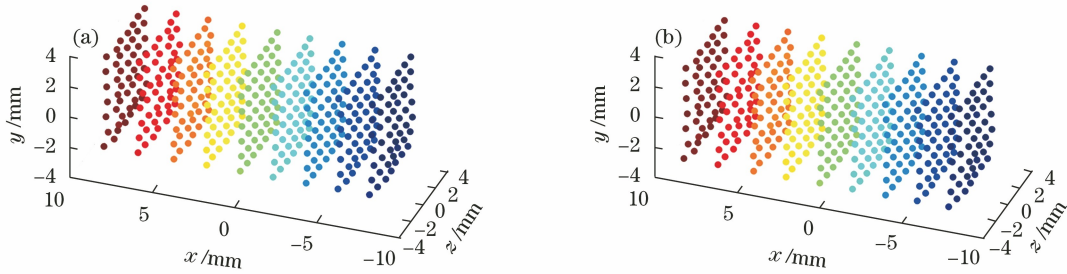


图 6 不同深度位置处标定板的体重建结果。(a)体标定追迹法;(b)直接追迹法

Fig. 6 Weight construction results of calibration plate at different depth positions. (a) VCT method; (b) DRT method

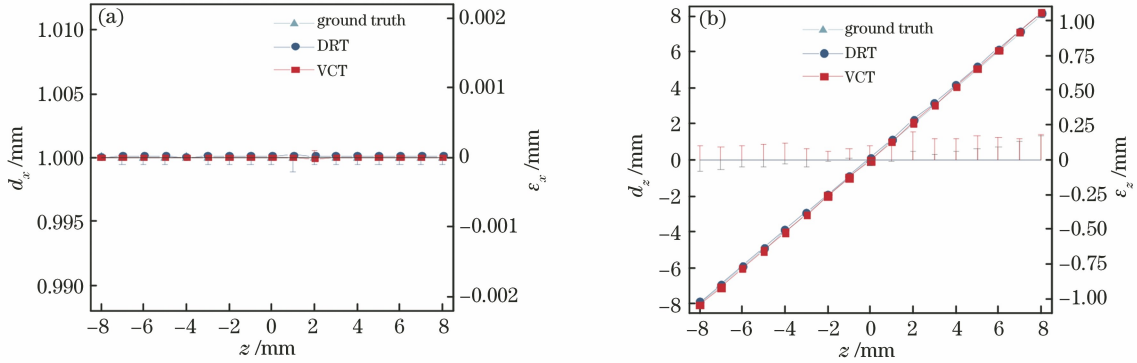


图 7 标定板圆点位置的重建准确性。(a)横向位置误差;(b)深度位置误差

Fig. 7 Reconstruction accuracy of calibration plate dot position. (a) Location errors in lateral; (b) location errors in depth

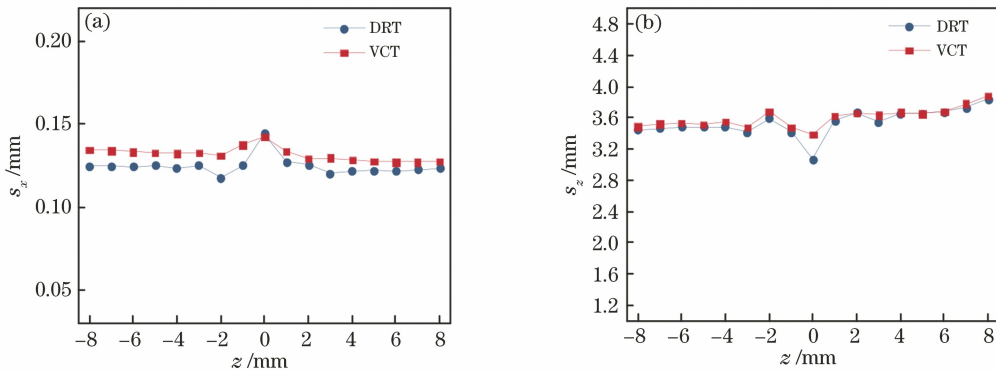


图 8 标定板圆点的重建拉伸长度。(a)横向拉伸;(b)深度拉伸

Fig. 8 Reconstructed stretch length of calibration plate dot. (a) Lateral elongation; (b) depth elongation

4 实验验证

4.1 实验系统

为了进一步评估体标定追迹法计算权系数的可行性,构建的笼式光场相机实验系统如图 9 所示,其中 PC 为个人计算机。含有 7×7 圆点阵列的标定板被固定在高精度的位移台上(移动精度为 $2 \mu\text{m}$),并将位移台放置于充满水的容器中,整个流场装置由 LED 光源照亮。标定板所在平面正对笼式光场相机且标定板中心与笼式光场相机的主光轴位于同一水平线上。调整主镜头的参数: F 数等于 4,放大

率 M 等于 1。通过位移台控制标定板沿光场相机的主光轴在 $-8 \sim 8 \text{ mm}$ 之间以 0.5 mm 为增量移动并拍摄共计 33 张光场图像。

光场相机选用的是笼式光场相机^[31],主要由主镜头、MLA、中继镜头组和 CCD 相机组成,如图 10 所示。其中中继镜头组由两个正对镜头组成,可将微透镜阵列后焦面的像 1:1 地成像在 CCD 相机的光电传感器上。使用中继镜头组可以在空间上分离微透镜阵列和图像传感器,这不会影响其成像效果,而且大大降低了相机的组装难度,又能很好避免在装配过程中可能对光电传感器造成的损伤,同时也

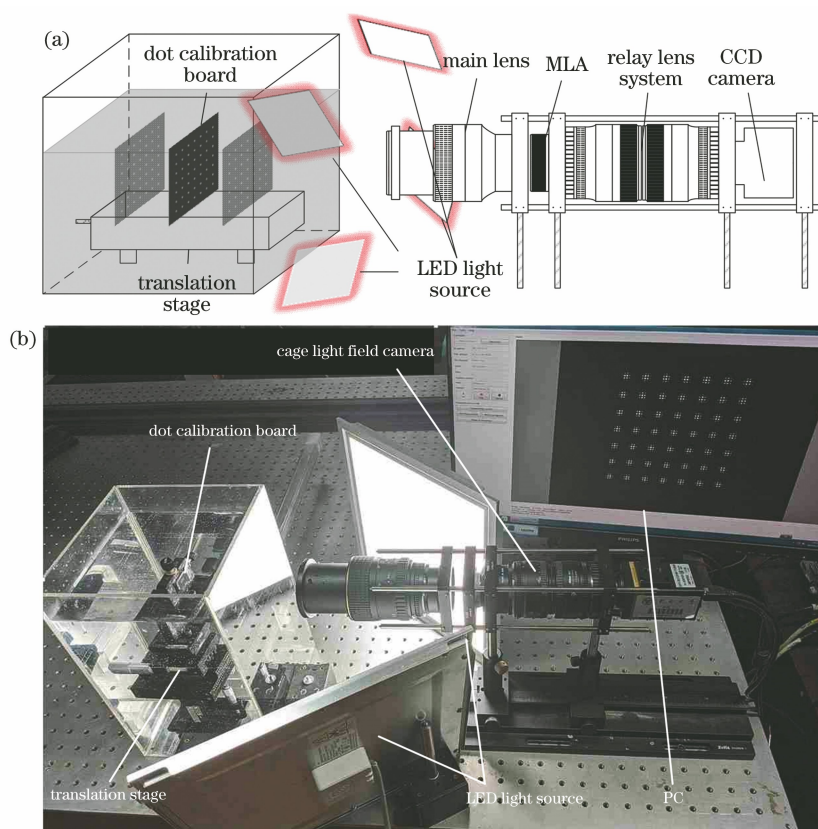


图 9 权系数计算实验的验证系统。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 9 Verification system of weight coefficient calculation experiment. (a) Schematic diagram; (b) physical figure

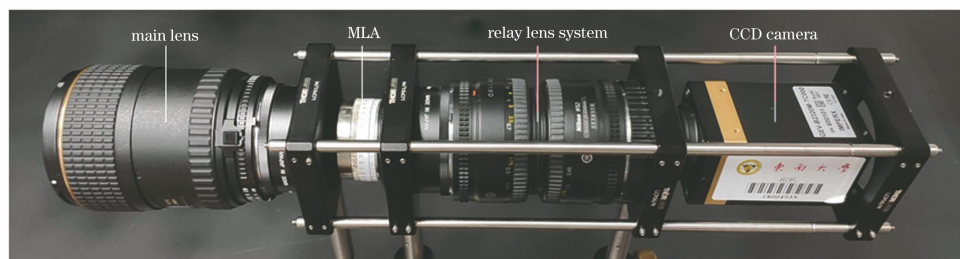


图 10 笼式光场相机

Fig. 10 Cage light field camera

能够灵活地调整相机光学参数。微透镜阵列被装配在高精度位移套筒内部并通过笼杆与笼板固定在整个系统中。主镜头选用图丽 F 卡口镜头, CCD 相机选用 IMPERX 工业相机, 高精度位移套筒为 Thorlabs SM1ZM(有效行程为 4.1 mm, 位移精度为 $\pm 2 \mu\text{m}$)。光场相机调试后的光学参数与表 1 一致。

4.2 结果与讨论

图 11 为实验过程中拍摄不同深度位置处标定板圆点的原始光场图像。从图 11 可以看到, 在焦面处标定板圆点点亮的微透镜数量是最少的, 且距离焦面相同位置处的圆点光场图像出现明显差异, 这也为示踪粒子的三维空间位置重建提供基础。将拍

摄的光场图像分为两组, 分别用于权系数计算和体重重建, 权系数计算组的图像在 $-7.5, -6.5, \dots, 7.5 \text{ mm}$, 体重重建组的图像在 $-8, -7, \dots, 8 \text{ mm}$ 。使用体标定追迹法计算光场 PIV 系统的权系数, 并结合 MART 算法对体重重建组的光场图像进行三维重建。图 12 为不同深度处标定板特征点的重建中心结果。从图 12 可以看到, 实验与数值计算的所有特征点在横向方向上的平均重建距离 (d_x) 为 $(1.000 \pm 0.002) \text{ mm}$; 在深度方向上的平均深度位置 (d_z) 均与基准值高度吻合, 深度位置误差 $\epsilon_z \leq \pm 0.25 \text{ mm}$ 。图 13 为不同深度处标定板特征点的重建拉伸结果。从图 13 可以看到, 横向方向上所有特征点的重建拉伸结果均小于 0.15 mm ; 深度方向

上所有特征点的重建拉伸结果均小于 4 mm,且实验中重建拉伸长度随深度位置的变化趋势与数值计算结果相同。总体来看,体标定追迹法计算的权系数具有较高的精确性且能很好地应用于实际流场中

示踪粒子的重建。值得注意的是,为了保证体标定结果的有效性,需要保证测量范围在体标定的深度范围内,超出此范围可能会导致测量结果的偏差较大。

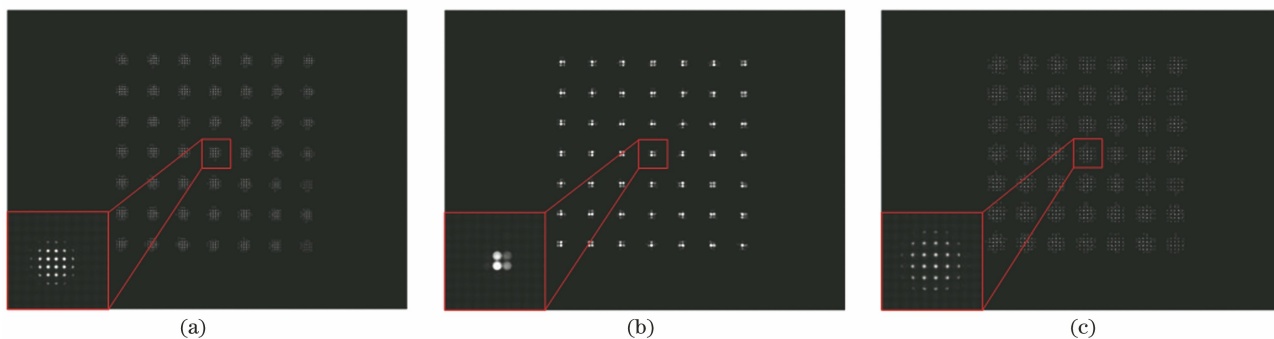


图 11 实验中在不同深度位置处拍摄的标定板光场图像。(a) $z = -5$ mm; (b) $z = 0$; (c) $z = 5$ mm

Fig. 11 Light field images of calibration plate taken at different depth positions in experiment.

(a) $z = -5$ mm; (b) $z = 0$; (c) $z = 5$ mm

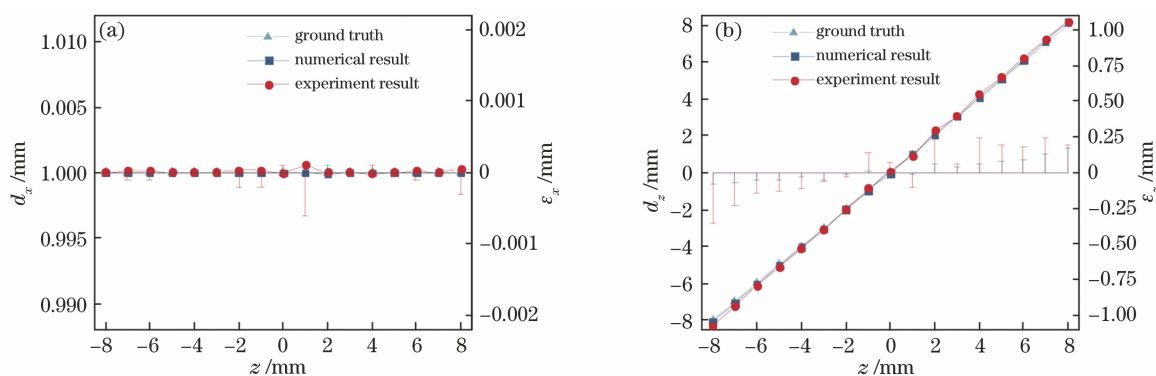


图 12 实验中重建标定板圆点的位置准确性。(a) 横向位置误差; (b) 深度位置误差

Fig. 12 Reconstruction of the accuracy of position of calibration plate in experiment. (a) Location errors in lateral;

(b) location errors in depth

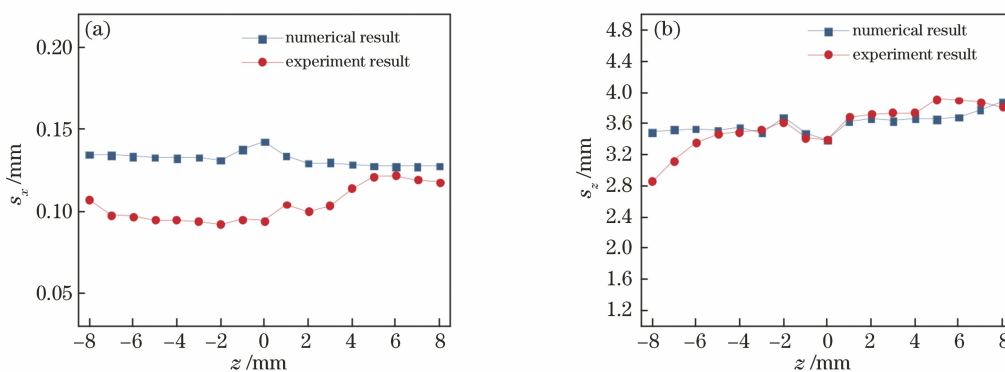


图 13 实验中重建标定板圆点的重建拉伸长度。(a) 横向拉伸; (b) 深度拉伸

Fig. 13 Reconstructed stretch length of dots on reconstituted calibration plate in experiment.

(a) Lateral elongation; (b) depth elongation

5 结 论

本文提出了一种基于体标定追迹法的光场 PIV

体重建权系数计算方法。通过体标定建立了空间物点位置与物点发出光线入射至微透镜位置的映射关系,并在此基础上基于光线追迹技术实现了权系数

的计算。将该方法的计算结果与标准值进行了比较,并进一步通过实验进行了验证。数值计算结果表明,所提方法计算的权系数与真实值的相似度在不同深度位置处均大于0.93,且焦面附近均大于0.98,证实了体标定追迹法计算的权系数具有很高的精确性。将体标定追迹法计算的权系数与MART算法结合对标定板特征点进行重建。结果表明:在横向方向上,标定板特征点的重建位置误差小于 ± 0.002 mm,重建拉伸长度小于0.15 mm;在深度方向上,受光场相机在深度方向分辨率不足的影响,标定板特征点的重建位置误差小于 ± 0.25 mm,重建拉伸长度小于4 mm。数值和实验结果均表明,体标定追迹法计算的权系数有效地解决由介质折射率变化及镜头畸变等因素导致权系数计算误差大的问题,具有较高的准确性,可应用于光场PIV示踪粒子的空间重建。

参 考 文 献

- [1] Cogotti A. Evolution of performance of an automotive wind tunnel [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(6/7): 667-700.
- [2] Park H, Yeom E, Lee S J. X-ray PIV measurement of blood flow in deep vessels of a rat: an *in vivo* feasibility study [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19194.
- [3] Tokarev M P, Sharaborin D K, Lobasov A S, et al. 3D velocity measurements in a premixed flame by tomographic PIV [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(6): 064001.
- [4] Lawson N J, Finnis M V, Tatum J A, et al. Combined stereoscopic particle image velocimetry and line integral convolution methods: application to a sphere sedimenting near a wall in a non-Newtonian fluid [J]. *Journal of Visualization*, 2005, 8(3): 261-268.
- [5] Kähler C J, Kompenhans J. Fundamentals of multiple plane stereo particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 29(1): S070-S077.
- [6] Soloff S M, Adrian R J, Liu Z C. Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry [J]. *Measurement Science and Technology*, 1997, 8(12): 1441-1454.
- [7] Hinsch K D. Holographic particle image velocimetry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(4): E01.
- [8] Herrmann S, Hinrichs H, Hinsch K D, et al. Coherence concepts in holographic particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 29(1): S108-S116.
- [9] Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(1): 012001.
- [10] Elsinga G E, Scarano F, Wieneke B, et al. Tomographic particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 41(6): 933-947.
- [11] Belden J, Truscott T T, Axiak M C, et al. Three-dimensional synthetic aperture particle image velocimetry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(12): 125403.
- [12] Wu J L, Guo Z H, Chen X F, et al. Three-dimensional measurement method of light field imaging based on deep learning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1204005.
伍俊龙, 郭正华, 陈先锋, 等. 基于深度学习的光场成像三维测量方法研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1204005.
- [13] Yu Z J, Zheng J W, Tao Y K, et al. Three-point light pen measurement method based on light field imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 032001.
于之靖, 郑建文, 陶永奎, 等. 基于光场成像的三点式光笔测量方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 032001.
- [14] 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.
- [15] Song X L, Li S, Gu M T, et al. Three-dimensional reconstruction of micro-scale flow field based on light field microscopic imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1011002.
宋祥磊, 李舒, 顾梦涛, 等. 光场显微成像微尺度流场三维重建方法研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1011002.
- [16] Fahringer T W, Thurow B S. Plenoptic particle image velocimetry with multiple plenoptic cameras [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(7): 075202.
- [17] Li Q H. Study of three-dimensional measurement of bubble in gas-liquid flow by light field photography [D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 3-72.
李庆浩. 基于光场成像的气液两相流中气泡三维测量方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019: 3-72.
- [18] Shi S X, Ding J F, New T H, et al. Light-field camera-based 3D volumetric particle image velocimetry with dense ray tracing reconstruction technique [J]. *Experiments in Fluids*, 2017, 58(7): 1-16.

- [19] Song X L. Study on three-dimensional measurement of micro flow field based light field micro imaging [D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 3-108. 宋祥磊. 光场显微成像微尺度流动三维流场测量方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020: 3-108.
- [20] Hall E M, Guildenbecher D R, Thurow B S. Uncertainty characterization of particle location from refocused plenoptic images [J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21801-21814.
- [21] Fahringer T W, Thurow B S. Filtered refocusing: a volumetric reconstruction algorithm for plenoptic-PIV [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(9): 094005.
- [22] Hall E M, Fahringer T W, Guildenbecher D R, et al. Volumetric calibration of a plenoptic camera [J]. Applied Optics, 2018, 57(4): 914-923.
- [23] Fahringer T, Thurow B. Tomographic reconstruction of a 3-D flow field using a plenoptic camera [C]// 42nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, June 25-28, 2012, New Orleans, Louisiana. Virginia: AIAA, 2012: 2826-2839.
- [24] Shi S 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): 1-16.
- [25] Herman G T, Lent A. Iterative reconstruction algorithms[J]. Computers in Biology and Medicine, 1976, 6(4): 273-294.
- [26] Scarano F, David L, Bsibsi M, et al. S-PIV comparative assessment: image dewarping + misalignment correction and pinhole+geometric back projection[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(2): 257-266.
- [27] Ng R. Digital light field photography[D]. Stanford: Stanford University, 2006.
- [28] Zhu X Y, Zhang B, Li J, et al. Reconstruction of tracer particle distribution in light field PIV using pre-recognition-based SART algorithm[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(6): 1445-1451. 朱效宇, 张彪, 李健, 等. 基于预识别技术及 SART 算法的单光场相机三维流场重建[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(6): 1445-1451.
- [29] 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.
- [30] Deem E A, Zhang Y, Cattafesta L N, et al. On the resolution of plenoptic PIV[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(8): 084003.
- [31] Liu Y D. Study of light field sectioning pyrometry for three-dimensional flame temperature measurement [D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 81-104. 刘煜东. 光场层析成像火焰三维温度场测量方法与系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2020: 81-104.