

文章编号 1004-924X(2017)03-0555-07

基于激光扫描的密集泡状流三维重建与优化

薛 婷*, 阮维鹏, 张少杰

- (1. 天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072;
2. 天津市过程检测与控制重点实验室, 天津 300072)

摘要:为测量密集气液泡状流的流动形态及参数,建立了基于激光扫描的三维可视化测量系统。采用片状激光结合旋转正多边形棱镜实现对流场的光学扫描,高速摄像机采集扫描切片图像,首先对图像进行预处理。针对扫描成像中产生的切片重复曝光问题,提出二阶微分平均卷积优化算法,该方法不仅可以有效提取多切片图像中重复曝光的特征点,而且可以去除冗余及噪声信息。实验结果表明,针对分散相遮挡的密集泡状流,基于激光扫描可完整重建其三维结构,二阶微分优化算法可以有效降低重建畸变影响,重建后体积含气率的相对误差优于 6%。激光扫描方法非侵入、重建精度高,具有传统方法不可比拟的优势。

关键词:光学三维测量;激光扫描;密集泡状流;三维重建;模板卷积;含气率

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0555

3D reconstruction and optimization of dense bubbly flow based on laser scanning

XUE Ting*, RUAN Wei-peng, ZHANG Shao-jie

- (1. School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: xueting@tju.edu.cn

Abstract: In order to reconstruct the flow regime of dense bubbly flow and to measure flow parameters, a 3D visual measurement system based on laser scanning was constructed. Laser sheet combined with a rotating polygonal prism was employed for optical scanning of the flow field. The slice images of field were recorded by a high-speed camera and the 3D structure was reconstructed by a series of image preprocessing methods. Considering the multiple exposure in slices during the scanning process, an optimization algorithm based on template convolution of second-order differential and mean was proposed, which can effectively extract feature points of multiple exposure from slices and simultaneously remove redundant and noise information. The experiment results demonstrated that the 3D structure of dense bubbly flow with overlapped projection of bubbles can be perfectly reconstructed by the proposed laser scanning method. The optimization algorithm based on second-order differential can effectively reduce the distortion of reconstructed structure. The volume void fraction of reconstructed field is less than 6% in relative error compared to the actual value. The non-

收稿日期:2016-09-28;修订日期:2016-11-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61372143, No. 61671321)

intrusive measurement based on laser scanning can realize 3D reconstruction of the dense bubbly flow with high accuracy, thus proving remarkable advantages in comparison with traditional methods.

Key words: optical three-dimensional measurement; laser scanning; dense bubbly flow; three-dimensional reconstruction; template convolution; void fraction

1 引言

气液泡状流作为气液两相流中最常见的形式之一,广泛存在于能源、化工、冶金、航天和核工业等工业生产中。泡状流的流动结构和含气率等流动参数,描述了泡状流在特定时间和区域内的流动特性。因此,流动结构的可视化以及流动参数的准确检测,可以有效指导工业实践,对安全生产和经济效益的提高具有重要意义。

传统的泡状流测量方法主要有电学探针法和光学探针法^[1-3],通常为单点或多点测量,所以无法获得平面或空间的流动信息,难以实现流动结构的可视化。随着科学技术的发展,高速摄影法逐渐被应用到气液泡状流的测量中^[4-7]。该方法通过高速相机采集两相流图像,利用图像处理技术,可实现投影平面内流动结构的可视化以及特征参数的测量。高速摄影法具有非侵入和瞬时测量的特点,可用于稀疏分散相的流动测量,而当分散相较密集时,则会出现投影重叠,这将影响流动特征的识别与检测。针对该问题,Lau^[8]和Zhong^[9]等人分别采用分水岭算法和凹点提取算法对重叠气泡进行分割,以提取气泡尺寸等信息。这些方法对重叠程度不高的气泡具有较好的分割效果,但当重叠过于严重时分割则会失败。

针对气液泡状流的三维重建,近年来一些基于光学多视角的测量方法被提出并应用到流场测量中。Luo等人^[10-11]采用单台高速相机与平面镜结合,获得泡状流场的前景和侧面可视化图像,并通过图像匹配得到了气泡的三维尺寸及空间位置信息。Xue等人^[12-13]采用单台相机与两组对称平面镜构建虚拟双目立体视测量系统,提出了标定和双视角匹配的方法,对上升气泡进行三维测量并重建其三维运动轨迹。Belden等人^[14-15]采用3×3阵列摄相机组实现对泡状流的多视角立体检测,获得了气泡速度场、位置及尺寸信息。三维体视法基于多视角获取流场投影,可在一定程度上

降低气泡投影重叠带来的影响,但随着气泡密集程度的增加,即便采用非单一视角也难以实现全场流动特征的可视化与三维重建。

本文采用片状激光结合旋转正多边形透镜的激光扫描方式,建立了气液泡状流的三维可视化测量系统,对密集气液泡状流进行三维重建与含气率测量。针对扫描过程中重复曝光的难题,提出了二阶微分平均卷积优化算法,用以去除扫描切片图像中的冗余信息。实验结果表明,该方法非侵入、重建精度高,具有传统方法不可比拟的优势。

2 测量原理与系统

根据折射定律,光线穿过平行板透明介质时,出射光与入射光保持平行。由于介质内部光线发生偏转,出射点位置相对入射方向将产生一定位移。如图1所示,光从空气(折射率为 $n_0=1$)入射到正六边形棱镜(折射率为 n_1),经两次折射后从对边平行射出,由折射定律可知:

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sin \gamma, \quad (1)$$

其中: θ 为入射角, γ 为折射角。结合几何分析,可得出射点相对于入射方向的偏移距离为:

$$S = d \sin \theta \left[1 - \frac{\cos \theta}{\sqrt{\left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2 - \sin^2 \theta}} \right], \quad (2)$$

其中 d 为棱镜的内接圆直径。

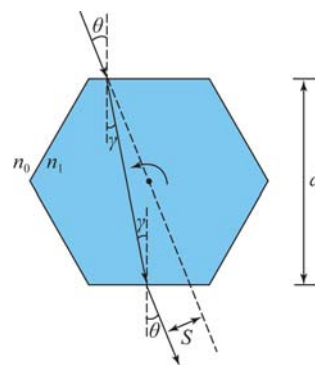


图1 光透过棱镜的光路图

Fig. 1 Optical path of light transmitting through prism

式(2)揭示出偏移距离 S 随入射角 θ 的变化关系。若保持入射光位置不变,使棱镜绕其中心轴旋转(即改变入射角 θ),那么 S 将随之变化。入射角 $\theta \in (-\pi/6, \pi/6)$ 固定,棱镜沿逆时针方向旋转,则出射光可对同一区域形成扫描。棱镜采用有机玻璃构成,其折射率 $n_1 = 1.49$,棱镜内接圆直径 $d = 78.3 \text{ mm}$ 。将上述参数代入式(2),可得 S 为 $-15 \sim 15 \text{ mm}$,即扫描范围 $z = 30 \text{ mm}$ 。

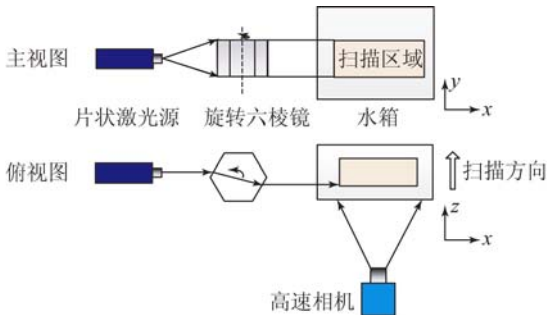


图 2 激光扫描测量系统框图

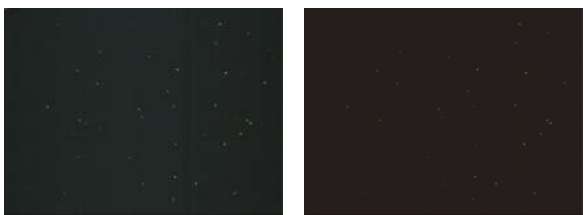
Fig. 2 Schematic of laser-scanning measurement system

激光扫描测量系统框图如图 2 所示。其中,水箱用于模拟密集气液泡状流的形成;片状激光源与旋转六棱镜构成光学扫描系统,对流场区域进行扫描;高速相机平行于扫描方向进行图像采集,并上传图像至上位机进行处理与重建。

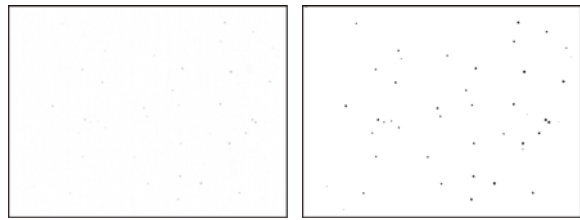
3 图像处理与优化

3.1 图像预处理

测量系统采集的泡状流原始图像需经过图像预处理,以去除不必要的信息。预处理过程包括图像灰度化、差影、反色、图像滤波和阈值分割 5 个步骤,如图 3 所示。原始图像首先被转化为灰度图,通过与背景图像差影,去除环境信息干扰。反色后经中值滤波处理,可消除大部分噪声。阈值分割过程进一步将目标与背景区域完全分开,使图像成为只包含特征的二值图像。



(a)原始图像 (b)灰度化及差影
(a)Original image (b)After graying and subtraction



(c)反色及滤波 (d)阈值分割
(c)After anti-color and filtering (d)After thresholding

图 3 泡状流原始图像预处理

Fig. 3 Preprocessing of original image of dense bubbly flow

3.2 扫描重复曝光及优化

实际激光扫描过程中,由于光片存在一定厚度,切片会不可避免地存在重复曝光的问题。假定高速相机的曝光帧频为 f ,在每相邻两次曝光中,光片位置都会发生重叠。如图 4 所示,激光片的光强度按高斯函数分布,其实际厚度为 δ_z (称为静态厚度)。在相机每次曝光过程中,扫描激光移动 Δz 距离(称为动态厚度),以相机第 i 次和 $i+1$ 次曝光为例,图 4 中 BC 段所示区域即为光片重叠区域。

光片重叠会引起该区域内气泡的重复曝光。图 4 所示位于 AD 段区域内的气泡,其在相机第 $i-1, i, i+1$ 和 $i+2$ 次曝光时都会形成切片,图 5(a) 描述了该区域内气泡的曝光结果。其中第 $i-2$ 和 $i+3$ 次曝光图像仍可能包含该气泡的小部分切片,其主要原因是这两处曝光位置上其他气泡表面的光反射,造成该气泡仍有部分区域被间接照亮。理论上该气泡仅在第 i 和 $i+1$ 次曝光时成像,由此造成多张图像包含其重复曝光成分,导致重建气泡形态产生畸变。

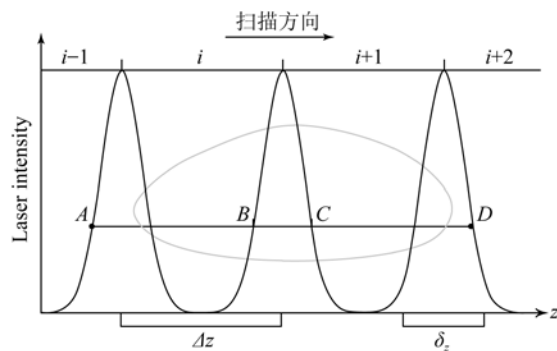
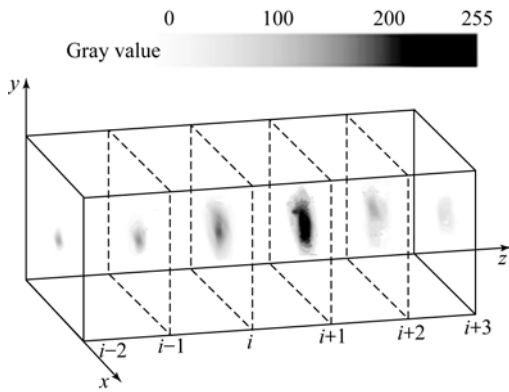
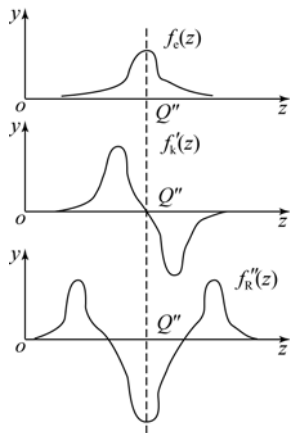


图 4 扫描激光重叠示意图

Fig. 4 Overlap of scanning laser sheet



(a) 气泡灰度值分布
(a) Gray scale of bubble



(b) 灰度二阶微分

(b) Second-order differential of gray

图 5 气泡重复曝光示意图

Fig. 5 Multiple exposure of bubble

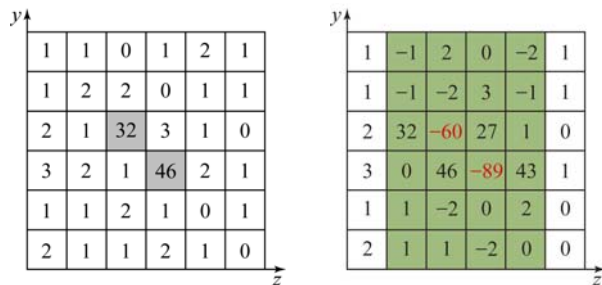
针对上述问题,本文提出二阶微分平均卷积算法进行优化。如图 5(a)所示,通常情况下气泡多切片图像的灰度值沿扫描方向(z 轴方向)呈高斯状分布,即气泡中心位置上的切片(i 和 $i+1$)灰度值较高,气泡两侧位置上的切片($i-2, i-1, i+2$ 和 $i+3$)灰度值较低。而重复曝光主要存在于两侧切片图像中。因此,针对多切片图像的灰度分布特点,基于二阶微分进行分析,如图 5(b)所示,根据其极值分布可提取切片的重复曝光特征点,并通过阈值变换实现对重复曝光去冗余,其中阈值设定为微分负值的均值。

典型的二阶微分算子可选取 $M_{1 \times 3} = [1 - 2 \ 1]$ 。由于微分运算对图像噪声比较敏感,处理时需考虑噪声的影响。图 6(a)所示为多切片图像的局部,方格代表每个像素,数字显示该像素的灰度值。区域中包含两处噪声点(灰色标记),由算子 $M_{1 \times 3}$ 卷积后结果如图 6(b)所示(彩图见期刊电子

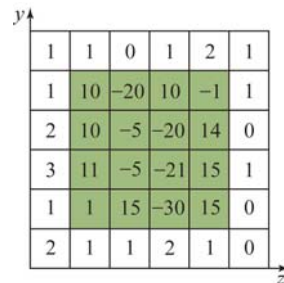
版)。由于噪声处微分低于阈值,阈值变换后其灰度被误保留(红色标记)。因此,本文提出了二阶微分平均算子,即:

$$M_{3 \times 3} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

卷积处理结果如图 6(c)所示,区域噪声点得到了有效地消除。对于包含气泡的多切片图像区域,如图 7(a)所示,其灰度值沿 z 轴方向近似为高斯分布,经二阶微分平均卷积处理后如图 7(b)所示。切片中重复曝光特征点被有效提取,基于阈值变换的气泡特征点(红色标记)可完全保留,而大部分冗余点则得以消除。



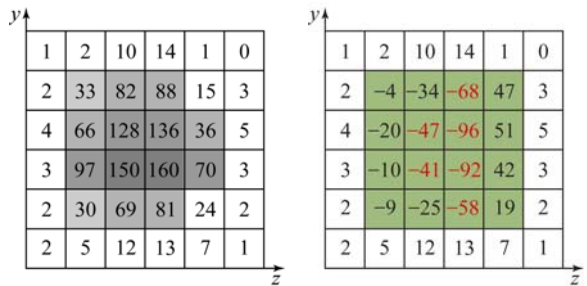
(a) 噪声区域灰度 (a) Gray scale of noise area
(b) $M_{1 \times 3}$ 算子的卷积结果 (b) Convolution result of $M_{1 \times 3}$



(c) $M_{3 \times 3}$ 算子的卷积结果
(c) Convolution result of $M_{3 \times 3}$

图 6 多切片图像中噪声卷积示意图

Fig. 6 Convolution of noise in multi-slice images



(a) 气泡区域灰度 (a) Gray scale of bubble area
(b) $M_{3 \times 3}$ 算子的卷积结果 (b) Convolution result of $M_{3 \times 3}$

图 7 多切片图像中气泡区域卷积示意图

Fig. 7 Convolution of bubble in multi-slice images

4 实验与结果

实验采用的水箱长为 30 cm,宽为 15 cm,水箱底部布有 7×9 阵列的气孔,用于生成密集气泡。孔内径为 0.1 mm,气孔与压强恒定的气室 ($P=112.5\text{ kPa}$, $T=29.8\text{ }^\circ\text{C}$) 连通。激光器产自加拿大 Nanoline Laser 公司,波长为 532 nm,激光片厚度约为 0.5 mm。高速相机采用瑞士 Weinberger 公司的 MiniVis E2 相机,镜头为 35 mm 焦距的定焦镜头。旋转棱镜由伺服电机驱动,且转速可调。

4.1 三维重建

实验中高速相机分辨率为 640×480 ,帧频采用 900 Hz,棱镜转速为 600 r/min。测量系统的扫描周期为 1/60 s,每个扫描周期内相机采集 15 张切片。图 8 所示为一个扫描周期采集的流场切片图像。



图 8 扫描周期内激光扫描系统采集的切片图像(预处理后)
Fig. 8 Slice images captured by laser scanning system in a scanning period (after preprocessing)

通常情况下,扫描切片的层间分辨率(切片间距)与切片图像内像素分辨率(像素间距)不一致,在重建之前需考虑在切片层间进行图像插值^[16]。图 8 中的切片图像经插值处理后,可重建出泡状流场的三维结构,如图 9 所示。激光扫描系统以非侵入方式重建出密集泡状流场的三维结构,相比于其他传统方法,优势明显。

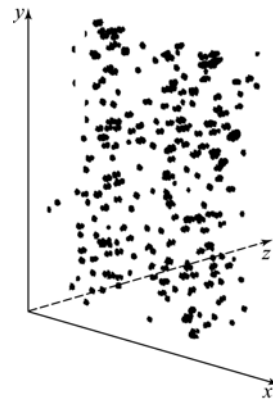
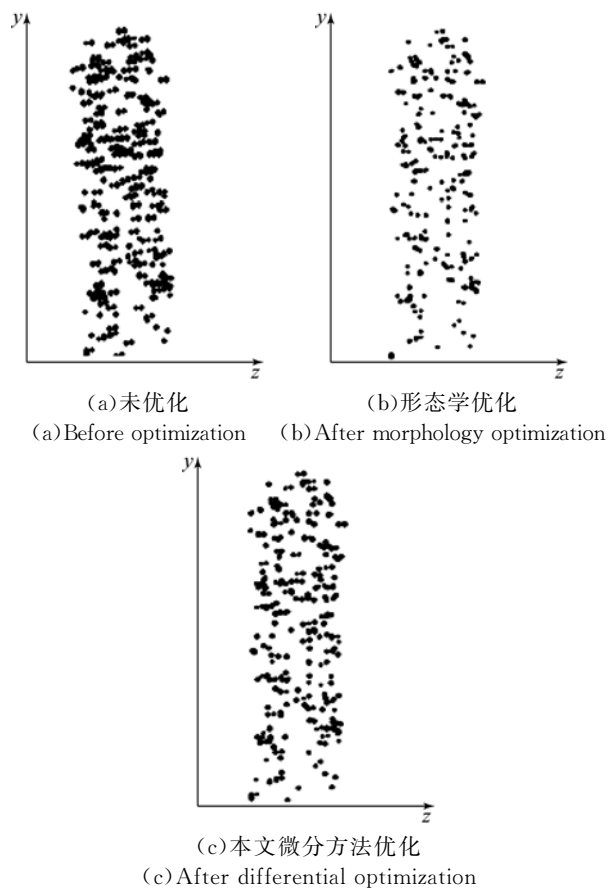


图 9 泡状流场的三维重建
Fig. 9 3D reconstruction of bubbly flow field

比较重复曝光前后及优化方法的处理效果,如图 10 所示。可以看出,未优化时流场 z 向(扫描方向)的结构发生严重畸变,由于切片包含重复曝光,气泡轮廓在 z 向上被明显拉伸。图 10(b)为采用形态学方法的优化结果,沿 z 轴对切片进行腐蚀形态学处理,可以在一定程度上降低气泡群结构的畸变,但同时也会造成流场中大量细节信息的丢失。采用本文提出的二阶微分平均卷积算法处理流场畸变,效果显著,可有效重建流场结构。



(a)未优化 (b)形态学优化
(a)Before optimization (b)After morphology optimization
(c)本文微分方法优化
(c)After differential optimization
图 10 扫描方向上的流场结构
Fig. 10 Reconstructed flow structure along scanning direction

4.2 体积含气率

基于上述重建的流场结构,这里对体积含气率进行了实验测量。统计重建流场区域内的像素点数量以及区域内气泡的像素点总量,分别记为 N 和 N_g ,可计算出重建流场的体积含气率 β ,即:

$$\beta = N_g / N. \quad (4)$$

实验分别在 7 组不同气体流量下测量含气率,采集每组流量时的流场切片图像,进行三维重建,并统计 10 个扫描周期的含气率平均值作为测量值。实际含气率由 Alicat 质量流量计测量得到。表 1 列出了 7 组气体流量下测量含气率与 Alicat 含气率的对应关系。由表 1 可以看出,测量含气率的相对误差优于 6%,具有较高精度。

表 1 不同气体流量下的含气率值

Tab. 1 Void fractions for different gas flow rates

编号	气体流量 ($L \cdot \min^{-1}$)	测量含气 率值/%	Alicat 含气 率值/%	相对 误差/%
1	0.223	5.31	5.51	3.6
2	0.206	5.06	5.14	1.6
3	0.186	4.51	4.69	3.8
4	0.163	4.06	4.28	5.1
5	0.146	3.60	3.78	4.8
6	0.135	3.29	3.49	5.7
7	0.123	3.01	3.19	5.6

参考文献:

- [1] GUNN D J, AL-DOORI H H. The measurement of bubble flows in fluidized beds by electrical probe [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1985, 11(4): 535-551.
- [2] FOSSA M. Design and performance of a conductance probe for measuring the liquid fraction in two-phase gas-liquid flows [J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 1998, 9(2): 103-109.
- [3] HU B, YANG H M, HEWITT G F. Measurement of bubble size distribution using a flying optical probe technique; Application in the highly turbulent region above a distillation plate [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(10): 2652-2662.
- [4] LINDKEN R, MERZKIRCH W. A novel PIV technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows [J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 33(6): 814-825.
- [5] 周云龙,尚秋华,范振儒,等. 气液两相流容积含气率的图像检测方法[J]. *热能动力工程*, 2008, 23(5): 507-511.

误差产生的原因主要有:(1)扫描过程中气泡的动态运动,其形态和位置不断发生变化,难以完全获得气泡清晰的边缘,导致含气率的测量值与实际值有偏差;(2)图像插值过程中插值图像由插值算法产生,会引入计算误差。

5 结 论

本文根据密集气液泡状流结构可视化和流动参数的测量需求,建立了基于激光扫描的三维可视化测量系统。利用片状激光结合旋转棱镜对流场区域进行扫描,采集扫描切片图像,通过图像预处理和二阶微分平均卷积优化,最终重建了流场的三维结构。针对扫描过程存在的重复曝光问题,提出二阶微分平均卷积算法,有效降低了重建结构的畸变。实验结果表明,基于激光扫描的气液泡状流三维可视化测量系统,不受密集气泡投影重叠的影响,可以非侵入、高精度实现流场结构重建及参数测量,含气率测量误差优于 6%。

- ZHOU Y L, SHANG Q H, FAN ZH R, *et al.*. Image processing based detection method for the measurement of volumetric gas content in a gas-liquid two-phase flow [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2008, 23(5): 507-511. (in Chinese)
- [6] PALERO V R, LOBERA J, ARROYO M P. Three-component velocity field measurement in confined liquid flows with high-speed digital image plane holography [J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 49(2): 471-483.
- [7] BUSCIGLIO A, GRISAFI F, SCARGIALI F, *et al.*. On the measurement of local gas hold-up, interfacial area and bubble size distribution in gas-liquid contactors via light sheet and image analysis: Imaging technique and experimental results [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 102: 551-566.
- [8] LAU Y M, DEEN N G, KUIPERS J A M. Development of an image measurement technique for size distribution in dense bubbly flows [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 94: 20-29.
- [9] ZHONG S, ZOU X, ZHANG Z B, *et al.*. A flexi-

- ble image analysis method for measuring bubble parameters [J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 141: 143-153.
- [10] SONG Q, LUO R, YANG X Y, *et al.*. Phase distributions for upward laminar dilute bubbly flows with non-uniform bubble sizes in a vertical pipe [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27(2): 379-390.
- [11] LUO R, SONG Q, YANG X Y, *et al.*. A three-dimensional photographic method for measurement of phase distribution in dilute bubble flow [J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 32(1): 116-120.
- [12] XUE T, QU L Q, CAO Z F, *et al.*. Three-dimensional feature parameters measurement of bubbles in gas-liquid two-phase flow based on virtual stereo vision [J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2012, 27: 29-36.
- [13] 薛婷,曹兆峰,金俞鑫. 基于虚拟立体视觉的气液两相流三维测量系统的标定[J]. *光学精密工程*, 2012,20(1):124-130.
- XUE T, CAO ZH F, JIN Y X. Calibration of three-dimensional measurement system for gas-liquid two phase flow based on virtual stereo vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 124-130. (in Chinese)
- [14] BELDEN J, TRUSCOTT T T, AXIAK M C, *et al.*. Three-dimensional synthetic aperture particle image velocimetry [J]. *Measurement Science & Technology*, 2010, 21(12): 128-125403.
- [15] BELDEN J, RAVELA S, TRUSCOTT T T, *et al.*. Three-dimensional bubble field resolution using synthetic aperture imaging: application to a plunging jet[J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 53(3): 839-861.
- [16] 王新征,卜雄洙,于靖. 结合多分辨率修正曲率配准的层间插值[J]. *光学精密工程*, 2016,24(5): 1224-1231.
- WANG X ZH, BU X ZH, YU J. Slice interpolation on multilevel modified curvature-based registration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1224-1231. (in Chinese)

作者简介:



薛婷(1977—),女,山西太谷人,博士,副教授,1998年、2004年、2007年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事多相流测试、光学诊断和光电测试等方面的研究。E-mail: xueting@tju.edu.cn



张少杰(1992—),男,湖北天门人,硕士研究生,2014年于南昌大学获得学士学位,主要从事多相流测量、图像处理等方面的研究。E-mail: zhangshaojie_hb@163.com