

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2005975

# 微小管道两相流流动图像畸变校正研究\*

李华军, 刘光宇, 余善恩

(杭州电子科技大学自动化学院 杭州 310018)

**摘要:**由于管壁折射的影响,可视化方法获得的微小管道气液两相流流动图像具有一定的畸变,无法准确反映流动信息。通过光路和仿真分析,研究了几种常见状态下图像畸变。结果表明,可视化方法获得的图像相比真实结构为线性放大,放大率随着液相折射率的增加而线性增加,受到管道内径、管壁厚度以及管壁折射率等因素的影响较弱,一般情况下放大率在1.30~1.44之间。进行了毫米级管道下的相含率测量实验,利用该图像畸变校正方法,大幅降低了测量结果的最大绝对误差(2.06, 3.14, 4.22 mm管径下降幅分别为5.46%, 4.66%和5.16%),验证了该校正方法的有效性。本研究揭示了图像畸变作用的多个重要因素,对准确获取微小管道气液两相流的流动信息具有重要作用。

**关键词:**微小管道;气液两相流;可视化方法;图像畸变校正

中图分类号: TH701 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.10

## Flow image distortion correction for two-phase flow in micro/mini pipes

Li Huajun, Liu Guangyu, Yu Shan'en

(School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Due to the refraction of the pipe wall, the flow images of gas-liquid two-phase flow in micro-/mini-pipe obtained with visualization method are distorted, which fail to reflect the flow information accurately. The present paper investigates the image distortion under several common conditions through light path and simulation analysis. The results indicate that the images obtained with visualization method are linearly enlarged compared with the real structure, and the magnification ratio increases linearly with the increase of refractive index of the liquid phase. The influences of the inner diameter, wall thickness and refractive index of the pipe are relatively small. The magnification ratio is in the range between 1.30 and 1.44 under normal circumstances. Practical void fraction measurement experiments in millimeter-scale pipes were carried out. With the image distortion correction method, the maximum absolute error of the measurement results is decreased significantly (the decrements for the pipes with inner diameters of 2.06, 4.14 and 4.22 mm are 5.46%, 4.66% and 5.16%, respectively), which verifies the effectiveness of this correction method. This study reveals the important influence factors of image distortion, which is of great important significance for accurately obtaining the flow information of gas-liquid two-phase flow in micro-/mini-pipes.

**Keywords:** mirco-/mini-pipe; gas-liquid two-phase flow; visualization method; image distortion correction

## 0 引 言

工业设备微型化是20世纪90年代以来自然科学与工程技术发展的一个重要趋势<sup>[1]</sup>。随着微化工技术的快速发展,微型化、小型化工业设备开始大量涌现,如微型反应器、微型散热器以及微型萃取系统等<sup>[1-2]</sup>。与

常规工业设备相比,微型工业设备最突出的特点就是采用了微米级和毫米级通道,比表面积大幅增加,使得通道内流体的传热传质过程得到了显著强化,反应过程更加彻底。微型工业设备能够精准控制反应过程,具有结构紧凑、安全性高和过程连续等特点<sup>[1]</sup>。

微小通道气液两相流研究开展首要解决的关键问题是通道内两相流参数的测量问题。两相流参数的准确测

收稿日期:2020-01-03 Received Date:2020-01-03

\* 基金项目:国家自然科学基金(51906053)项目资助

量对了解两相流动机理、流动特性、传热传质特性等方面有着非常重要的作用,一直是化工、能源、生物等领域研究的重点内容<sup>[3-4]</sup>。在微小型工业设备中,气液两相流参数的测量与准确估计对设备的热工设计、工业生产的稳定控制和生产过程的优化起到至关重要的作用,是微化工技术发展的重要基础,具有重要的科学意义和工业应用价值。

多年来,国内外研究学者针对微小通道气液两相流进行了深入的研究,通过借鉴和沿用常规通道两相流的测量技术,提出了多种适用的参数测量方法。现有的测量方法主要可以分为侵入式与非侵入式两大类<sup>[5-7]</sup>。根据测量原理,又可以分为电学测量法、光学测量法、可视化方法、超声波测量法和射线法等<sup>[6-9]</sup>。

在上述多种参数测量方法中,可视化方法具有非接触、采样频率高、信息获取丰富等优点,广泛应用于实验室研究与特定场合的工业应用当中。可视化方法通过相机拍摄透明管道内的气液两相流流动图像,通过图像分割、去噪、边缘提取等处理,获取气液两相流准确的流动结构信息、气液相分布信息、流速信息等<sup>[10-11]</sup>。尤其在微小管道系统中,其他的测量方法如光学、电学以及超声等方法,都或多或少地受到管道尺寸的限制,测量效果受到限制。可视化方法通过直接获取流体图像,能够获得气液两相流直观的流动图像和详细的结构信息。

然而,受到管道曲面管壁的影响,可视化方法获取得到的流体图像受到了一定程度的畸变,使得无法从图像中准确获取流动结构的尺寸信息,为后续的图像处理与信息提取过程引入了不确定因素。这种畸变作用在微小管道气液两相流系统中尤为明显。图像的畸变作用使得可视化方法获得的流动参数与实际的流动结构具有较大的差别,如果不采取校正措施,直接提取图像信息,将使后续的测量和处理引入较大的误差<sup>[12-13]</sup>。可视化方法图像畸变的校正是准确获取两相流流动结构必不可少的步骤,对后续气液两相流机理研究和动态分析起着至关重要的作用。现有的图像畸变校正方法主要包括增加光学部件的物理校正方法和通过理论计算的理论校正方法<sup>[14-15]</sup>。

为消除图像畸变,Kawahara等<sup>[16]</sup>提出了一种采用方形光学校正槽的校正方法,他们将透明管道置于槽中,通过内置与管壁折射率接近的流体减弱管壁对图像的畸变作用。然而,采用方形光学校正槽需要配置与管壁材料折射率相一致的流体,具有一定的难度,同时方形外壳使得无法给管道直接加热,限制了传热传质研究的开展。从结果上看,光学校正槽使得最后获得的图像尺寸略小于真实管道的尺寸,仍然具有一定的偏差。

Fu等<sup>[13]</sup>通过一台高速相机、直角棱镜和反射镜构建了一套能够同时获取微管道两个角度图像信息的光学测

量系统,准确获取管道内气液相的分布信息。他们利用光路分析,在特定管道和管壁折射率情况下,定量地分析了图像的畸变率,并对获得的图像进行了处理,构建了气液两相流三维流动图像。然而,他们仅仅对特定情况下的畸变进行了研究,没有考虑液体折射率、管壁折射率和管道尺寸对畸变作用的影响。

本文针对毫米级管道下的气液两相流,利用理论分析和模拟仿真的方法,研究了在不同管壁折射率、液相折射率、管道尺寸等条件下图像的畸变强度,分析了不同位置对图像畸变一致性的影响。并通过具体实验验证了所提方法的有效性。

## 1 图像畸变校正研究

如图1(a)所示为本实验获得的泡状流实际流动图像。其中所采用的透明管道内径为4.0 mm,外径为6.0 mm,管壁折射率为1.51,液相折射率为1.33,气相折射率为1.00。从图1中可以看出,气泡的最大截面直径达到了5.3 mm,是管道实际内径的1.32倍左右,产生了较大的畸变作用。需要指出的是,图1(a)中红色虚线描绘的是气泡实际边缘所成的图像,即边缘 $B_1$ 和 $B_2$ 所成的像。而红线外灰度值较高的区域则是由 $A_1$ 和 $A_2$ 等点受到管壁折射作用所形成的像。同时,在实际应用中,相机的焦平面一般设置在管道纵剖面上,因此本文主要研究处在管道纵轴上的气泡图像畸变作用。

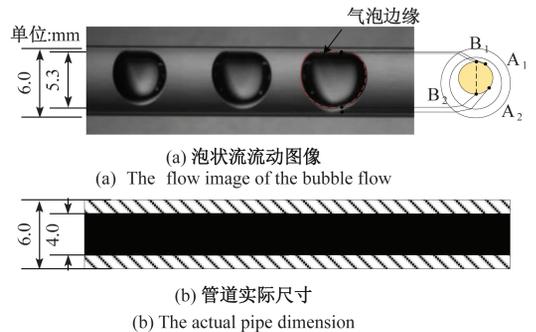


图1 小管道图像畸变

Fig.1 Image distortion of mini-channel

如图2所示为管道纵轴上点A成像的具体过程:光线 $\overrightarrow{AB}$ 从物点A发出,在管道内表面B点发生第1次折射,入射角为 $\alpha_3$ ,出射角为 $\alpha_2$ ;出射光线 $\overrightarrow{BC}$ 到达管壁外表面C点时产生第2次折射,入射角为 $\alpha_1$ ,出射角为 $\alpha_0$ ;出射光线 $\overrightarrow{CD}$ 平行于主光轴到达相机,并最终成像于点 $A'$ 。从图2中可以看出,像点 $A'$ 离管道中心点O的距离 $s'$ ,要大于物点A离O点的距离 $s$ ,即管道图像被放大了,这与图1实际流体图像结果相一致<sup>[13]</sup>。

在点 B 和点 C 利用折射公式,可以得到:

$$n_1 \sin \alpha_2 = n_2 \sin \alpha_3 \quad (1)$$

$$n_0 \sin \alpha_0 = n_1 \sin \alpha_1 \quad (2)$$

同时,分别在图中三角形  $OA''C$ ,  $OA''B$  以及  $OAB$  建立正弦公式,可以得到:

$$\frac{s''}{\sin \alpha_1} = \frac{r_o}{\sin \theta} \quad (3)$$

$$\frac{s}{\sin \alpha_3} = \frac{r_i}{\sin(\theta + \alpha_2 - \alpha_3)} \quad (4)$$

式中:  $r_o$  为管道外壁半径;  $r_i$  为管道内壁半径。  $\theta$  可以通过下式表示:

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \alpha_0 - \alpha_1 \quad (5)$$

由于最后出射光 CD 平行于主光轴,因此:

$$\sin \alpha_0 = s'/r_o \quad (6)$$

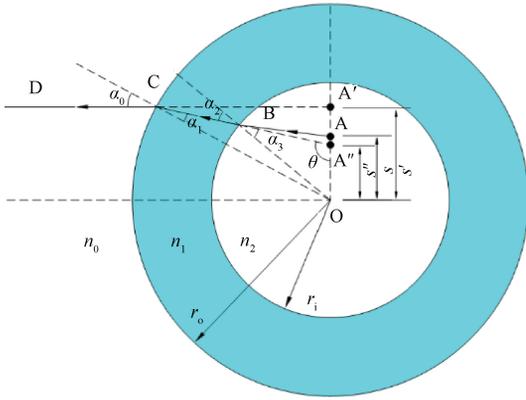


图 2 图像畸变光路

Fig.2 Schematic diagram of the image distortion optical path

通过简化调整上述公式,可以得到最终求解方程为:

$$\begin{cases} \sin \alpha_0 = \frac{s'}{r_o} \\ \sin \alpha_1 = \frac{n_0 s'}{n_1 r_o} \\ \sin \alpha_2 = \frac{n_0 s'}{n_1 r_i} \\ \sin \alpha_3 = \frac{n_0 s'}{n_2 r_i} \\ \sin(\alpha_1 + \alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_0) = \frac{n_0 s'}{n_2 s} \end{cases} \quad (7)$$

在一般情况下,入射角与出射角  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  与  $\alpha_3$  皆为锐角,设定  $n_0 < n_2 < n_1$ , 最终可以求得图像畸变方法率为:

$$\beta = \frac{s'}{s} \quad (8)$$

然而,由于方程组较为复杂,直接求解  $\beta$  的解析解具有一定的难度。因此本文采用 MATLAB 仿真模拟软件,对特定情况下的图像畸变进行了研究。

## 2 仿真实验结果

图 3 所示为在 5 种不同内径下图像放大率的仿真结果。其中管壁厚度  $d_w$  均为 1 mm,管壁折射率  $n_1$  设定为 1.51,液相折射率  $n_2$  为 1.33,环境折射率  $n_0$  为 1,管道内径  $r_i$  分别为 1、2、3、4、5 mm。从图 3 中可以看出,在 5 种不同内径下,图像放大率  $\beta$  均为 1.31 左右,与实际情况相一致。本实验结果也表明在管壁厚度保持一定的情况下,放大率  $\beta$  不受管道内径与外径的影响,与不同的物距  $s$  的取值也不相关,从而表明可视化方法获得的图像,是管道内流体实际尺寸等比例扩大。

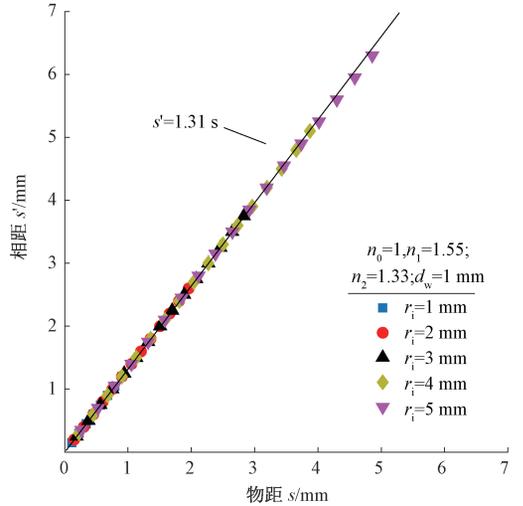


图 3 不同管道内径下图像放大率

Fig.3 Image magnification ratio for different inner diameters

图 4 所示为几种不同液相流体下图像放大率仿真结果。其中,管壁厚度  $d_w$  为 1 mm,内径  $r_i$  为 4 mm,环境折射率  $n_0$  为 1,管壁折射率  $n_1$  设定为 1.51,液相折射率  $n_2$  分别为 1.33(水)、1.36(乙醇)、1.47(甘油)、1.50(苯)。从图 4 中可以看出,图像放大率  $\beta$  随着液相折射率的不同具有较大的变化,即液相折射率增大,放大率随之增大。且放大率与液相折射率具有一定的线性关系。同时,从图 4 中可以看出,在液相折射率为 1.33(水)与 1.36(乙醇)时,放大率较为稳定,不随物距  $s$  的变化而变化。然而当液相折射率达到 1.50(苯)时,液相折射率与管壁折射率较为接近,放大率随着物距的增大而减小。由于局部放大率的不同,使得图像产生更为复杂的畸变,在后续图像处理中具有较大的难度。

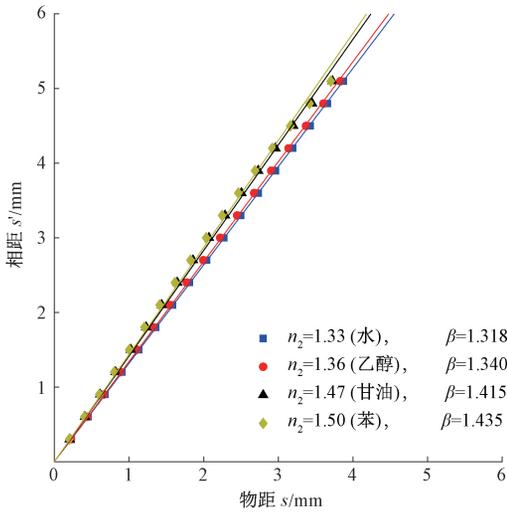


图4 不同液相折射率下图像放大率

Fig.4 Image magnification ratio for different refractive indexes of liquid phase

图5所示为几种不同材质管道下图像放大率仿真结果。其中,管壁厚度 $d_w$ 为1 mm,内径 $r_i$ 为4 mm,环境折射率 $n_0$ 为1,液相折射率 $n_2$ 为1.33,管壁折射率 $n_1$ 分别为1.51(冕玻璃K6)、1.61(重冕玻璃ZK8)、1.65(重火石玻璃ZF1)、1.75(重火石玻璃ZF6)。从图5中可以看出,在不同的管壁折射率下,图像的放大率 $\beta$ 具有较强的一致性,且不随物距的变化而变化。同时,在不同管壁折射率情况下,图像放大率基本保持不变。

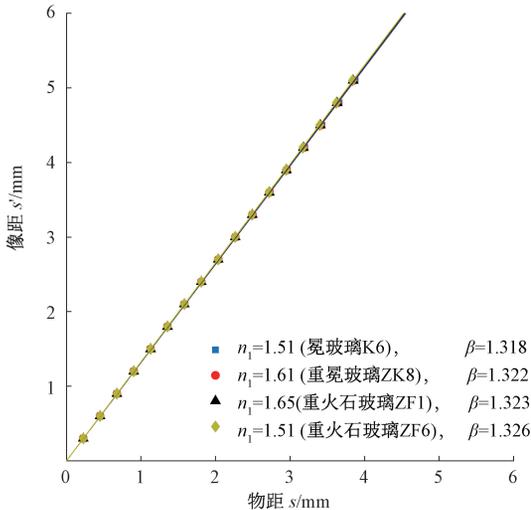


图5 不同管壁折射率下图像放大率

Fig.5 Image magnification ratio for different refractive indexes of pipe wall

图6所示为不同管壁厚度下图像放大率仿真结果。其中,管道内径 $r_i$ 为4 mm,环境折射率 $n_0$ 为1,液相折射率 $n_2$ 为1.33,管壁折射率 $n_1$ 为1.51,管壁厚度 $d_w$ 分

别为0.75、1.00、1.25、1.50 mm。从图6中可以看出,管壁厚度的不同对图像放大率 $\beta$ 的影响较小。在不同管壁厚度下, $\beta$ 的一致性较强。

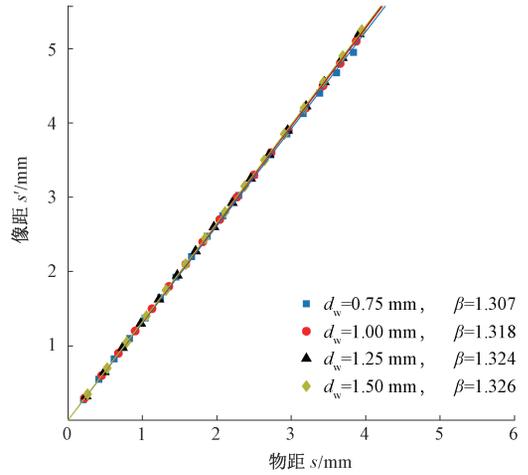


图6 不同管壁厚度下图像放大率

Fig.6 Image magnification ratio for different pipe wall thickness

### 3 验证实验

为验证所提出的图像畸变校正方法,本文针对多种尺寸的管道进行了气液两相流相含率测量实验。为本文设计并搭建的两相流相含率测量装置如图7所示,包括氮气罐,储水罐,转子流量计,混相器,测试管道,高速相机,频闪灯,储水罐,快关阀测量系统等。其中,氮气罐作为压力源输送氮气与水进入测试管道。气相流量与液相流量分别由两个转子流量计测量。高速相机用于拍摄两相流流动图像,在本实验中,气液相流速较低(15~80 cm/s),拍摄频率设定为100 FPS,曝光时间为40  $\mu$ s,满足实验要求。快关阀测量系统用于获取相含率标定值,它采用两个能够同时关闭的阀门截取两相流,通过电子天平称重不同状态下管道的重量从而计算得到相含率标定值<sup>[3]</sup>。本文实验采用的电子天平量程为0.5~6 200 g,精度为0.01 g,满足相含率测量精度要求。整个系统处于开环状态,液相流体最终流入2号储水罐。

本文通过分析高速摄像所得图像获取流体气液相含率,如图8所示,图像处理过程包括图像背景去除、图像差值、边缘提取、图像二值化与孔洞填充等。

气相相含率通过求取多个截面的截面相含率均值获得:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum \alpha_i = \frac{1}{N} \sum \frac{4\pi r_i^2}{\pi D^2} \quad (9)$$

式中: $N$ 为截面相含率计算数量; $\alpha_i$ 为第 $i$ 个截面的截面相含率; $r_i$ 为该截面下气相介质半径; $D$ 为管道内径。

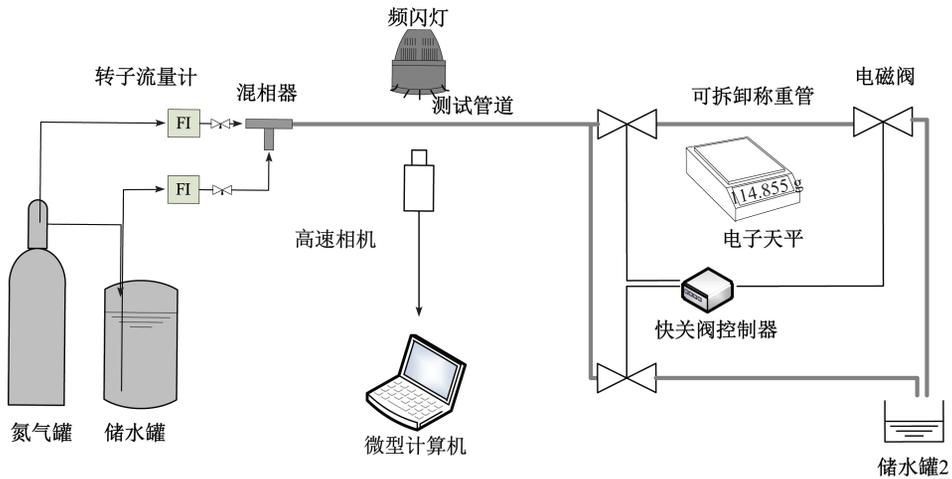


图 7 气液两相流相含率测量实验装置

Fig.7 Schematic diagram of the void fraction measurement experiment setup for gas-liquid two-phase flow

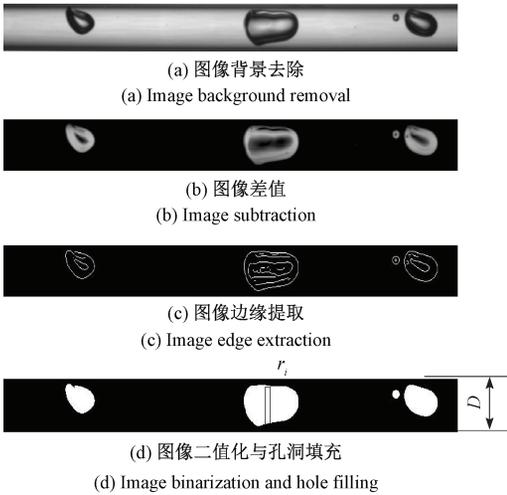


图 8 图像处理过程

Fig.8 Image processing procedure

若考虑透明管道对两相流图像的畸变作用,气相介质半径需要缩小,校正后气相含率计算公式为:

$$\alpha_{\beta} = \frac{1}{N} \sum \alpha_i = \frac{1}{N} \sum \frac{4\pi r_i^2}{\pi D^2 \beta^2} \quad (10)$$

在实际研究中,通过求取 100 张图像的相含率平均值作为结果,以减少由于气泡分布等问题对相含率计算值的干扰。在该验证实验中,管道折射率为 1.51,液相折射率为 1.33,壁厚 1.0 mm,由图 4 可知, $\beta=1.31$ 。

表 1 所示为管道内径为 2.16、3.04、4.22 mm 下相含率测量结果。从表 1 中可知,在 3 种管径内,直接采用原始图像进行相含率的计算,测量最大绝对误差在 11.17% 至 13.09% 之间,误差较大。采用了图像畸变校正之后再行相含率计算,最大绝对误差在 6.51% 至 7.20% 之间,测量误差明显下降。

表 1 相含率测量实验结果

Table 1 Experiment result of void fraction measurement

内径/mm	相含率测量最大绝对误差/%	
	$\alpha$	$\alpha_{\beta}$
2.16	11.17	6.51
3.04	13.09	7.63
4.22	12.36	7.20

由于管壁对气相介质即气泡的放大作用,根据上述相含率计算公式获得的结果有较大偏差,一般来说,测量值都大于真实值。相含率测量实验结果表明,图像畸变校正能够有效地消除管壁折射对图像的影响,使得相含率测量准确度提高。

## 4 结 论

由于受到透明管壁的影响,可视化方法获得的图像在一定程度上会受到畸变作用,导致获得的气液两相流流动参数具有较大的偏差。本文通过光路分析和仿真验证,研究了管壁折射率、液相折射率以及管道内径等参数对图像畸变的影响。主要结论包括:

1) 图像畸变作用受到管壁内径和管壁厚度变化的影响较小。在一般情况下,图像放大率具有较强的一致性。在后续的图像处理过程中,可以通过等比例缩小即可消除图像的畸变作用。

2) 图像放大率  $\beta$  随着液相折射率的增加而变大,在液相折射率较小的情况下, $\beta$  具有较好的一致性,不随物距  $s$  的变化而变化;然而,当液相折射率逐渐增大而接近管壁折射率时, $\beta$  的一致性受到影响,在物距较大尤其是接近管道内径时, $\beta$  开始显著变小。因此,当液相折射率

与管壁折射率相接近时,图像放大率不再是恒定值,图像畸变较为复杂,在后续图像处理过程中,需要不同位置的图像放大率进行图像校正。

3) 仿真实验结果表明,管壁折射率的变化对图像放大率的影响较小,在不同材质的透明管壁下,图像的畸变作用一般不变,在后续的图像处理中,可以不考虑管壁折射率带来的影响。

4) 相含率测量实验结果表明,本文提出的图像畸变校正方法能够在一定程度上消除畸变影响,减弱透明管壁的作用,提高测量精度。

本文研究了可视化方法获得的图像的畸变作用,确定了多种因素对畸变作用以及图像放大率的影响,为后续图像处理与畸变校正工作提供了有益的借鉴,为获取气液两相流准确的流动结构信息与参数信息提供了新的思路。本文提出的图像畸变校正根据理论公式推导,假设相机与管道距离足够远,气液相分布关于管道纵剖面对称,而且管壁与流体近似为理想光学介质。然而,上述假设情况与实际过程有一定的差异,使得实际应用具有一定的局限性。在后续的工作中,将针对复杂情况下气液两相流流动过程的图像畸变进行研究,结合其他图像畸变校正方法,进一步提高图像获取信息精度。

## 参考文献

- [ 1 ] KANDLIKAR S G. History, advances, and challenges in liquid flow and flow boiling heat transfer in microchannels: A critical review [ J ]. *J Heat Trans-T Asme*, 2012, 134(3), DOI:10.1115/1HTC14-23353.
- [ 2 ] SAISORN S, WONGWISES S. A review of two-phase gas-liquid adiabatic flow characteristics in micro-channels [ J ]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(3): 824-838.
- [ 3 ] WINKLER J, KILLION J, GARIMELLA S, et al. Void fractions for condensing refrigerant flow in small channels: Part I literature review [ J ]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(2): 219-245.
- [ 4 ] WINKLER J, KILLION J, GARIMELLA S. Void fractions for condensing refrigerant flow in small channels. Part II: Void fraction measurement and modeling [ J ]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(2): 246-262.
- [ 5 ] ABDUL W Y, ABDUL R R, FAZALUL R M H, et al. Non-invasive process tomography in chemical mixtures - A review [ J ]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 210:602-617.
- [ 6 ] SARKODIE K, FERGUSSON-REES A, DIAZ P. A review of the application of non-intrusive infrared sensing for gas-liquid flow characterization [ J ]. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 2018, 10(1): 43-56.
- [ 7 ] 贺登辉,陈森林,白博峰.基于V锥流量计压损比的湿气体相流量在线检测 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(7):235-244.  
HE D H, CHEN S L, BAI B F. Online measurement of liquid flow rate in wet gas based on pressure loss ratio of V-cone flowmeter [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(7): 235-244.
- [ 8 ] 张月皓,董峰,许聪,等.气液两相流含气率超声测试方法研究 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(9):2094-2101.  
ZHANG Y H, DONG F, XU C, et al. Ultrasonic method for gas-liquid two phase flow void fraction measurement [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(9):2094-2101.
- [ 9 ] 刘靖,王雪瑶,刘石.多相流测量用动态电容层析成像图像重建算法 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(10): 2355-2362.  
LIU J, WANG X Y, LIU SH. Dynamic image reconstruction method for electrical capacitance tomography in multiphase flow measurement [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(10): 2355-2362.
- [ 10 ] ZHANG P, FU X. Two-phase flow characteristics of liquid nitrogen in vertically upward 0.5 and 1.0 mm micro-tubes: Visualization studies [ J ]. *Cryogenics*, 2009, 49(10): 565-575.
- [ 11 ] CHENG L, MEWES D. Review of two-phase flow and flow boiling of mixtures in small and mini channels [ J ]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2006, 32(2): 183-207.
- [ 12 ] 宋阳,周亚丽,张奇志.鱼镜头径向畸变的校正方法 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(4):1014-1023.  
SONG Y, ZHOU Y L, ZHANG Q ZH. Correction method for radial distortion of fisheye lens [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4):1014-1023.
- [ 13 ] FU X, ZHANG P, HU H, et al. 3D visualization of two-phase flow in the micro-tube by a simple but effective method [ J ]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2009, 19(8):085005.
- [ 14 ] 魏利胜,张平改,费敏锐.基于非线性方程的鱼眼图像畸变矫正方法研究 [ J ]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(11):1584-1593.  
WEI L SH, ZHANG P G, FEI M R. Distortion correction

for fish-eye image based on nonlinear equations [J].  
Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,  
2015, 29(11): 1584-1593.

- [15] DONNIACUO A, CHARNAY R, MASTRULLO R, et al.  
Film thickness measurements for annular flow in  
minichannels: Description of the optical technique and  
experimental results[J]. Experimental Thermal and Fluid  
Science, 2015, 69: 73-85.
- [16] KAWAHARA A, CHUNG P M Y, KAWAJI M.  
Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and  
pressure drop in a microchannel[J]. International Journal  
of Multiphase Flow, 2002, 28(9): 1411-1435.

## 作者简介



**李华军** (通信作者), 2012年和2018年  
于浙江大学控制科学与工程学院分别获得  
学士学位和博士学位, 现为杭州电子科技大  
学自动化学院讲师, 主要研究方向为多相流  
参数检测技术。

E-mail: hjli@hdu.edu.cn

**Li Huajun** (Corresponding author) received his B. Sc. degree  
in 2012 and Ph. D. degree in 2018 both from College of Control  
Science and Engineering, Zhejiang University, respectively. Now,  
he is a lecturer in School of Automation, Hangzhou Dianzi  
University. His main research interests include multi-phase flow  
parameter measurement.



**刘光宇**, 1996年于吉林大学材料科学与  
工程学院获得学士学位, 2006年于墨尔本大  
学获得博士学位, 现在为杭州电子科技大学  
教授、人工智能研究院副院长, 主要研究方  
向为非线性控制系统、人工智能、机器人与  
工业应用等。

E-mail: g.liu@hdu.edu.cn

**Liu Guangyu** received his B. Sc. degree in 1996 from College  
of Materials Science and Engineering, Jilin University, received  
his Ph. D. degree in 2006 from University of Melbourne. Now, he  
is a professor in Hangzhou Dianzi University and the vice  
president of Artificial Intelligence Research Institute, Hangzhou  
Dianzi University. His main research interests include nonlinear  
control systems, artificial intelligence, robotics and industrial  
applications.



**余善恩**, 2004年和2007年于杭州电子  
科技大学分别获得学士学位和硕士学位, 现  
为杭州电子科技大学高级实验员, 主要研究  
方向为智能仪表、远程监控系统、嵌入式系  
统及其应用。

E-mail: Shanen\_yu@hdu.edu.cn

**Yu Shan'en** received his B. Sc. degree in 2004 and M. Sc  
degree in 2007 both from Hangzhou Dianzi University,  
respectively. Now, he is a senior experimenter in Hangzhou  
Dianzi University. His main research interests include smart  
instruments, remote monitoring system, embedded system and its  
applications.