

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107837

基于激光诱导荧光成像技术的截面含气率检测研究*

韩棒棒, 赵治月, 赵俊雨, 张真玉, 方立德
(河北大学质量技术监督学院 保定 210046)

摘要:截面含气率作为气液两相流动过程中的基本参数之一,对石油管道的开采、输运,核反应堆冷却塔的设计等过程具有重要意义。本文提出了基于激光诱导成像技术和高速摄录系统的截面含气率直接检测方法,有效的避免管道曲率和介质折射率导致的光学畸变。在河北大学多相流循环装置进行实验,测量了18个流量点,液相流量测量范围10~35 L/min,气相流量测量范围2.0~3.0 L/min。运用计量比对的思想,对两种检测技术获得的截面含气率值求取偏差并进行修正,最大偏差仅为0.014 59。结果表明两种方法得到的截面含气率值具有较好的一致性,证明本文提出的荧光成像技术对气液两相分层流截面含气率的检测是有效的。

关键词: 分层流;截面含气率;激光诱导荧光成像技术;高速摄录系统

中图分类号: TH744 TN247 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4035

Study on the detection of void fraction based on laser-induced fluorescence imaging technology

Han Bangbang, Zhao Zhiyue, Zhao Junyu, Zhang Zhenyu, Fang Lide

(School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 210046, China)

Abstract: Void fraction as one of the basic parameters of gas-liquid two-phase flow is of great significance to the development and transportation of petroleum pipelines and the design of nuclear reactor cooling towers. This paper proposes a direct detection method of void fraction based on laser-induced fluorescence imaging technology and high-speed video recording system, which can effectively avoid optical distortion caused by pipe curvature and refractive index of the medium. Experiments were carried out on the multiphase flow circulation device of Hebei University, and 18 flow points were measured. The liquid flow measurement range is 10~35 L/min and the gas flow measurement range is 2.0~3.0 L/min. Using the idea of measurement comparison, the deviation of the void fractions obtained with two detection technologies is calculated and corrected, and the maximum deviation is only 0.014 59. The results show that the void fraction values obtained with the two methods are in good agreement, which proves that the fluorescence imaging technology proposed in this paper is effective for the detection of gas-liquid two-phase stratified flow void fraction.

Keywords: stratified flow; void fraction; laser-induced fluorescence imaging technology; high-speed video recording system

0 引 言

气液两相流广泛存在于石油,化工,核工业等工业领域^[1]。截面含气率反映气液两相在管道截面的真实占比,是获得两相真实流速的决定性参数,在两相流检测中占有极其重要的地位。已有测量截面含气率的方法可以分为侵入式和非侵入式两类,侵入式方法主要

有:光纤探针^[2]、电学探头传感器^[3-4]、金属丝网传感器等^[5],侵入式方法的缺点是探头会对流场产生干扰。非侵入式方法主要有摄像法^[6]、X射线^[7]和 γ 射线断层扫描^[8]等技术,非侵入式方法是当前研究的热点,其中摄像法提供了流动的直接视觉信息数据,基于图像处理技术可以获得两相截面含气率大小,较其他技术更直观可信,是实验室截面含气率溯源技术之一。臧丽叶等^[9],提出一种利用平面激光诱导荧光技术测量

收稿日期:2021-04-26 Received Date: 2010-04-26

* 基金项目:国家自然科学基金(61475041)、河北省自然科学基金(F2021201031)、京津冀协同创新共同体建设专项(20540301D)资助

膜厚的新方法,通过对沿流向不同位置液膜厚度的实时测量,研究液膜波动的时序特征及纵向演化规律。该方法解决传统接触式测量方法对流场产生干扰而导致其准确性较差的问题。Shestakov 等^[10],运用激光诱导荧光技术结合图像粒子测速技术研究非定常三维流态的雷诺数下,在 T 形通道中形成的空间和时间尺度的速度和浓度场的演变。Xue 等^[11]开发了激光诱导荧光的虚拟双目视觉传感器测量圆周膜,建立了畸变模型并提出一种新的畸变校正方法。在不同雷诺数下测量垂直降膜特性。与经典预测模型相比,该方法能够方便、可靠地测量圆周膜及其分布特征。张航等^[12],利用平面激光诱导荧光(PLIF)技术和酚酞显色反应,对不同雷诺数 $Re(20 < Re < 420)$ 下 T 型反应器内的复杂流动结构及界面反应进行了可视化。研究不同流动模式下 T 型反应器内的界面反应特征,结果表明吞噬三维旋涡结构使流体相互卷吸缠绕,通过折叠拉伸形成层状的流体界面,极大增加了反应物的界面接触面积,混合及反应程度显著提升,产物浓度较高且分布均匀。Thome 等利用图像分析和光学测量相结合的方法,即荧光成像技术,在内径为 13.6 mm 和 8.0 mm 管道内液体加入荧光剂,相机与管道轴向呈 40° 的角度,对被激光片光照亮的管道内横截面进行记录,并通过图像校准、图像反转、界面检测等处理方法,得到气液两相分层流的截面含气率数据准确^[13-15]。Huang 等^[16],进一步的发展了 Thome 等的研究,通过在测试管段外部加装筒形窗口,相机以同样的与管道轴向 40° 角,对管道横截面进行记录,通过阈值分割、特征提取等方法得到截面含气率,并通过对给定时间内的所有截面空隙率进行平均,进而间接测量体积空隙率,同时对其方法进行仿真和验证,结果表明,测量的空隙率与滑移率模型和模型的预测值在误差范围内分别为 22% 和 14%。

以上研究,由于相机与管道横截面呈一定的角度拍摄获取图像,难以消除管道曲率和激光散射的影响,导致的图像发生光学畸变。受到以上研究的启发,采用在实验管段尾部加装带有可视窗口的 T 型分流器,通过可视窗口捕捉管道横截面被照亮的荧光图像,运用灰度变换、Prewitt 边缘检测、图像对比度增强、高帽(top-hat)和低帽滤波(bottom-hat)、图像分割算法(卷积神经网络和水平集)、洪水填充、图像反转、二值化等一系列图像处理技术,得到直接测量的截面含气率值,通过与同一截面高速相机拍摄的真实液膜厚度进行对比,获取两种测量技术的偏差,运用计量比对思想,验证两种截面含气率检测技术的有效性。

1 基于激光诱导荧光成像技术的管内截面含气率检测系统建立

图 1 所示为位于河北大学计量仪器与系统工程实验室的多相流循环装置,实验回路允许产生不同流速的空气和无离子水混合物的流动模式。水平亚克力管道长 8 m,内径 25 mm。液相和气相流量分别由玻璃转子液体流量计(Darhor DFA-15T,量程:0.5~4 L/min,精度:4%),玻璃转子气体流量计(Darhor DFG-6T,量程:10~100 L/min,精度:4%)测量。空气通过气泵被压缩在稳压储气罐内,并通过混合器与来自液相管路的无离子水混合,然后流入水平管道,在水平管道尾部加装自行设计的 T 型分流器如图 2 所示。分流器的流体入口与主管段连接,分别通过出口 1 和出口 2 进行分流,可视窗口由壁厚为 6 mm 的石英玻璃封堵,在管路回水出口处,空气被排放到大气中,无离子水流入水箱实现循环。这里需要说明的是,为壁面管路积液影响实验结果,必须保持主管道与分流后的回水管路齐平。通过压力和温度传感器对管道内部的气液两相流体进行压力和温度的测量,并通过控制系统对实验回路进行温压补偿。测试管段外部加装透明方形光学校正箱(400 mm, 200 mm, 200 mm),校正箱内部加入无离子水,减少激光的折射,液相管路无离子水中加入罗丹明 B(粒径 $7 \mu\text{m}$) 荧光粒子。

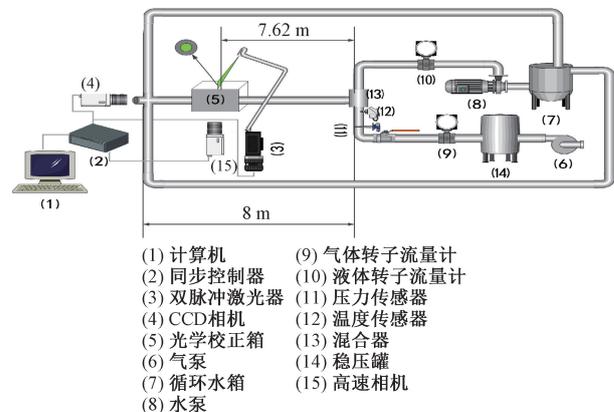


图 1 截面含气率检测系统图

Fig. 1 Void fraction detection system diagram

图像数据采集系统,采用课题组自研系统。波长 532 nm 的片光,由双脉冲激光器发出,在垂直管道轴向位置,照亮管道横截面。CCD 相机(6 600×4 400 Pixel)通过 T 型分流器的可视窗口,对激光照亮的横截面粒子图像进行捕捉,相机镜头被加装滤光片,只允许荧光粒子反射的大于 532 nm 波长的光透过,同时减少杂光干扰。激光与 CCD 相机通过同步控制器进行控制,使得管道被激光照亮的时候,相机捕捉图像。捕捉图像被传输到个人电

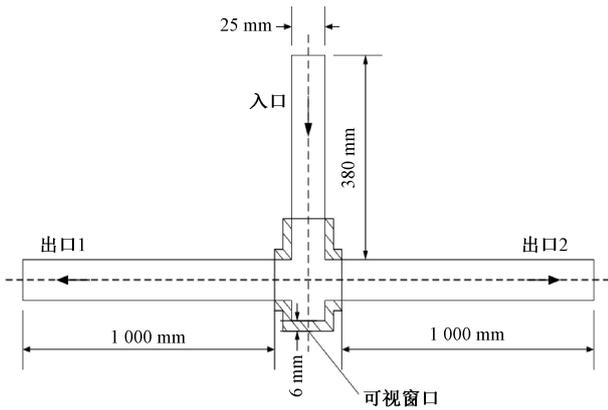


图2 T型分流器

Fig. 2 T-type shunt

脑,并对粒子图像进行可视化处理。实验测量了18个流量点,液相流量(Q_l)范围为2.0~3.0 L/min(2.0、2.5、3.0 L/min),气相流量(Q_g)范围为10~35 L/min(10、15、20、25、30、35 L/min)。

2 基于激光诱导荧光成像技术的管内截面含气率值的提取技术

在目前的工作中,CCD相机捕获的图片被传输到个人电脑储存,做进一步的处理。并通过编写算法进行图像处理,以达到确定水平管气液两相分层流,管道横截面液相所占面积的目的。以下小节对图像处理的步骤进行了详细的描述。

2.1 液固交界面的提取

获得截面含气率测量值,首要解决问题是如何获取横截面液相边缘,这包括液相与管壁的液固交界面,液相与气相的气液界面。为获取液固交界面,本文对实验采集到的原始图像,运用边缘检测技术对不同区域边界进行分割,应用广泛的边缘检测技术有微分算子、Canny算子和LOG算子等。通过比较微分算子中的Sobel算子、Roberts算子和Prewitt算子,来选取最佳的边缘检测方法。以 $Q_l=2.0$ L/min, $Q_g=10$ L/min流量点为例,图2显示了运用微分算子对原始图像处理得到的结果,从图中可以看出3种算子相比,Robert算子如图3(d)所示对图像边缘检测效果最差,图像边缘模糊,难以识别。Sobel算子如图3(b)所示虽然边缘明显,但边缘检测过程中气液界面的粒子部分丢失。Prewitt算子如图3(c)所示检测边缘清晰,气液界面粒子图像无丢失,效果最好。同时,Prewitt算子对图像噪声还有一定的抑制作用。综合以上因素,用Prewitt算子处理的图像进行接下来的进一步图像处理。

如图3(a)所示的管道截面原始粒子图,由于实验过

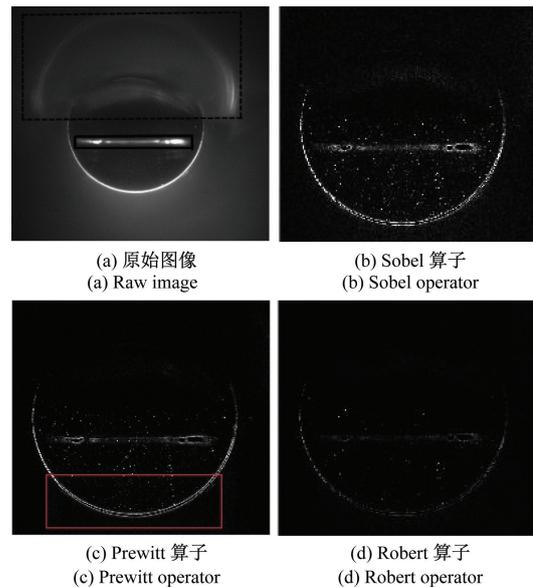


图3 不同边缘检测技术获取液固交界面
Fig. 3 Different edge detection techniques to obtain liquid-solid interface

程中不可避免的激光折射、界面反射等干扰因素,这里对图像进行分析说明。图3(a)中虚线框内,有很明显的光晕,这在实验中是存在且不可避免的,激光打在管道内部的气液界面,由于空气和水的折射率差别,界面相当于一面镜子,导致一部分激光发生反射和折射这是所有光学管道实验都不能避免的。但其并不会对本文的研究产生干扰,并且可以直接消除,因为虚线框内并不是本文感兴趣的部分,图中可以明显看到界面处荧光粒子与光晕是分开的,不会对界面产生干扰图中实线框内存在一条亮线,通过反复实验发现为管段末端可视窗口处的界面,由于激光在界面处折射传播导致,从图中可以看出,其存在于原始图像液相界面下部,因此也不会对实验结果产生影响,在文中做后续图像处理,为保持图像的真实、完整性,并未将其去除。

图3(c)对原始图像进行Prewitt边缘检测后图像,图3(c)中虚线框内可以明显看到,边缘呈现双线,这是由于管壁曲率的影响,导致激光在管壁处汇聚,管道底部最为明显,从原始图像也可以看出。靠近内部的轮廓线为真实的管道内壁,外部的轮廓线为管道自身的壁厚线(亚克力管厚度线),考虑到外轮廓线会对后续的图像处理产生干扰,这里将其去除,仅保留内轮廓线。

2.2 荧光粒子图像增强技术

由于边缘检测后得到的灰度图像较暗,难以进一步识别荧光粒子,需对图像的亮度和对比度进行增强。由RGB(red, green, blue)模型颜色空间变换为HSV(hue, saturation, value)模型,达到增加图像亮度目的。图像对

比度的增强通过形态学图像处理技术的高帽滤波和低帽滤波^[17]。

图像的形态学高帽滤波定义为:

$$H = A - A(A \circ B) \quad (1)$$

式中: A 为加载的图像; B 为采用的结构元素; \circ 为形态学开运算。

图像的形态学低帽滤波定义为:

$$H = A - A(A \cdot B) \quad (2)$$

式中: \cdot 为形态学闭运算。

图 4 中 (I) 为图像进行亮度和对比度增强后的结果,可以看出处理后的图像较之前粒子图像和边缘更明显,图像质量有很大提升。为了进一步凸显气液界面的粒子,达到获取气液分界面的目的,本文采用 Sobel 滤波器,对图像进行纵向滤波,从而得到横向边缘,如图 4 中 (II) 所示。由图像可以看出,粒子图像被横向拉伸,气液界面变得更加明显,但存在的问题是,原来清晰的管壁(图中实线框内)出现边缘丢失、不连续的现象,这样会导致接下来的图像处理出现错误。因此,对管壁轮廓线进行了强化,通过增加一条经过轮廓上每一点中心的曲线,如图 4 中 (III) 所示。

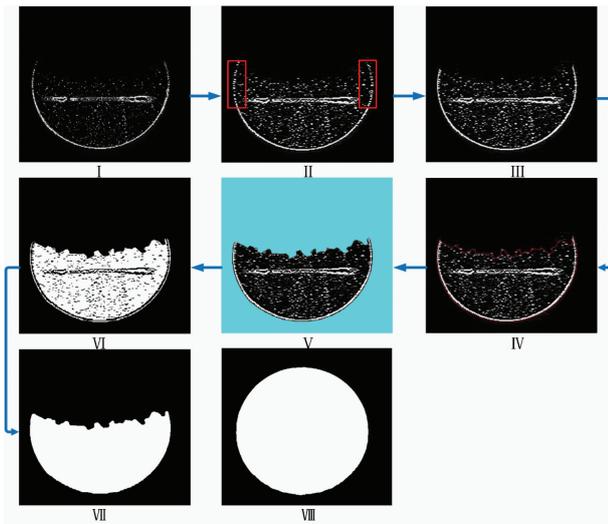


图 4 图像处理流程

Fig. 4 Image processing flow

2.3 气液界面提取技术

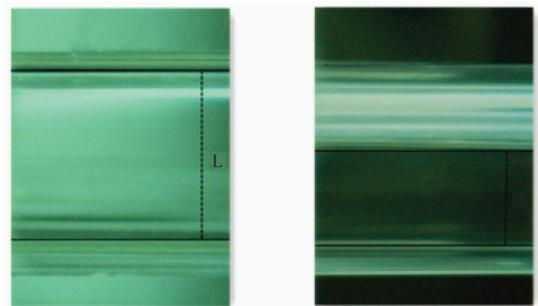
气液界面的提取是获得截面含气率测量值最重要环节,通过运用水平集(level set)方法^[18]来获取气液界面。该方法通过引入了内部能量项来惩罚由信号距离函数造成的水平集函数的偏差,以及外部能量项来驱动零水平集向期望的图像特征运动,实现了很好的分割效果。将这种图像分割方法运用在本研究,从而确定气液两相分层流气液界面的分界线,图像分割结果如图 4 中 (IV) 所示,可以看出分割效果较好,气液界面可以明显的显示出来。

为了进一步凸显和区分液相与图片其他部分的差别,采用描绘线算法(scanline fill)^[19]对图 4 中 (IV) 轮廓线以外的背景进行填充。扫描线种子填充算法的基本思想是:首先填充当前扫描线上的位于给定区域内的一区段,然后确定与这一区段相邻的上下两条扫描线上位于该区段内是否存在需要填充的新区段,如果存在,则依次把它们进行保存。反复这个过程,直到所保存的各区段都填充完毕。图 4 中 (V) 运用该方法将水平集轮廓曲线以外部分进行填充。

对描绘线算法得到图像依次进行灰度变换、二值化(如图 4 中 (VI) 所示)、形态学闭、开运算,可以得到图 4 中 (VII) 所示的二值图像,轮廓线内部区域全部转变为白色,外部变为黑色。并通过 bwarea 函数对白色部分的像素进行获取。至此基于粒子图像的处理已经全部完成,达到了对分层流气液界面获取,以及液相在管道内所占面积的目的。

3 基于高速摄录系统的截面含气率检测技术

在测试管段的轴向位置放置高速相机摄录系统(美国 IDT 公司, Y3-S1 型号,采集速率 4 000 Hz/s),同步拍摄相同测试流量点,激光面处真实的液膜厚度。为了凸显管道内壁轮廓和气液界面,在高速相机对立面布置发光均匀的 LED 光源,对试验管段进行背景补光。



(a) 空管图像
(a) Empty pipe image
(b) 气液两相分层流动图像
(b) Image of gas-liquid two-phase stratified flow

图 5 高速摄录系统的图像采集

Fig. 5 Image acquisition with high-speed video recording system

图 5 为高速摄录系统获取的管道轴向图片,图 5 (a) 为空管状态,通过该图可以准确得到管道内壁,这里用 L 表示,圆管的横截面积 $A = \pi(L/2)^2$ 。图 5 (b) 为气液两相分层流状态。由图 5 可知,气液界面与管道底部内壁的长度,即液膜厚度 h 。管道横截面示意图,如图 6 所示。

管道横截面液相所占的面积为:

$$A_l = S_{fan} - S_{tri} \quad (3)$$

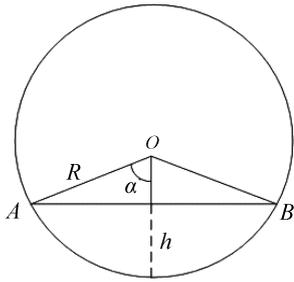


图6 管道横截面

Fig. 6 Pipeline cross-section

式中: S_{fan} 为扇形 AOB 的面积; S_{tri} 为三角形 AOB 面积。

$$S_{fan} = \frac{2\alpha\pi R^2}{360} \quad (4)$$

式中: R 为管道半径, 即 $R=L/2$ 。 2α 为扇形 AOB 的圆心角。

$$S_{tri} = (R - h) \sqrt{R^2 - (R - h)^2} \quad (5)$$

截面含气率也称为空泡份额, 是指两相流动中的某一截面上, 气相所占面积与总的截面积之比。其公式为:

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (6)$$

$$A = A_g + A_l \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{A - A_l}{A} \quad (8)$$

式中: A_g 为气相所占截面积。

其中圆管的横截面积 A , 由液相充满管道状态下采集横截面原始图像, 运用与气液两相分层流动相同的图像处理获得, 满管图像如图4中(VIII)所示。

4 两种截面含气率检测技术的对比分析

由第3部分的基于荧光成像技术的管内截面含气率值提取技术得到, 气液两相分层流不同流量点下的管道截面液相面积。通过式(6)求得不同流量点下截面含气率值如图7所示。

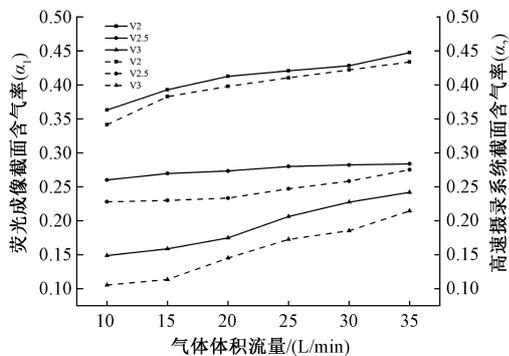


图7 不同流量点截面含气率变化

Fig. 7 Variation of void fraction at different flow points

如图7所示, V_2 、 $V_2.5$ 、 V_3 代表液相分别为 2 L/min、2.5 L/min、3 L/min 的体积流量, 横坐标为气相体积流量, 纵坐标为不同流量点对应的截面含气率的值。虚线线条表示高速摄录系统得到的截面含气率值, 实线条表示荧光成像技术得到的截面含气率值。由图中可以看出, 当液相固定, 随着气相体积流量值的增加, 截面含气率随之增加, 这表明由于气液两相间剪切力的作用, 气相增大将会将管道内的液相流体推出管道, 从而导致管道内液位下降, 液相含率降低, 从而气相含率增加。另一方面, 液相流量为 2 L/min 和 3 L/min 条件下, 折线斜率较大, 说明截面含气率变化较大, 在 2.5 L/min 流量下折线趋于平缓, 截面含气率变化较小。这可能是由于在 2.5 L/min 液相流量附近, 存在一个临界值, 靠近该值截面含气率变化较为缓慢, 反之则变化较大。

运用计量比对的思想, 对于同一检测对象, 如果两种检测技术所获得的结果一致, 则说明两种技术对检测对象的有效性。从图7可以看出, 高速相机获取的截面含气率与荧光成像技术获取的截面含气率值变化趋势是相同的, 说明了两种方法均能有效的获得截面含气率值。有趣的是高速相机获取值总是小于图像处理获取值, 这是由于气液界面并不是绝对的光滑, 甚至呈现凹面, 这是由于相间作用力、管壁的摩擦阻力以及液相润湿管壁的影响, 导致高速相机在轴向位置拍摄到图像, 所确定的界面是气液界面最高点处的液膜厚度, 因此横截面的液相含率偏高, 导致实验结果(即截面含气率的测量值)偏小。

由于激光诱导荧光成像技术处理后的气液界面凹凸不平(如图4中(VII)所示), 这是由于界面处气液相间作用力和荧光粒子分布不均导致。对荧光成像技术实验获取的截面含气率图像, 靠近气液界面部分, 运用相邻平均算法进行修正, 修正后截面含气率值, 以及偏差如图8所示。

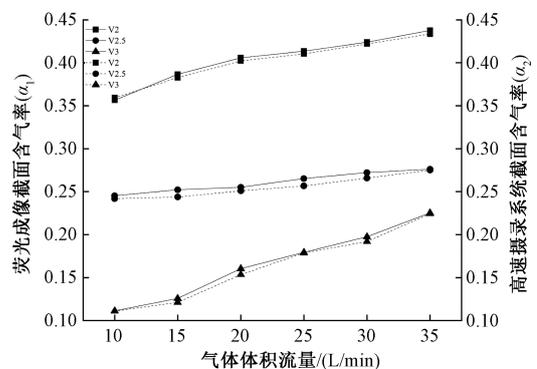


图8 修正后不同流量点截面含气率变化

Fig. 8 Variation of void fraction at different flow points after correction

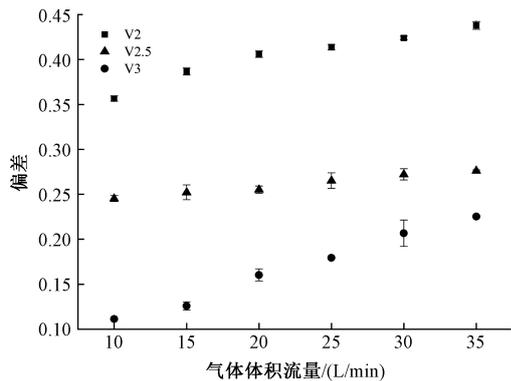


图 9 两种截面含气率检测技术测量结果偏差

Fig. 9 Deviation of the measurement results with two void fraction detection technologies

由图 8 可以看到,修正后两种检测技术的结果具有很好的—致性。图 9 修正后两种测量方法的测量值偏差较小,其中最大的偏差出现在 $Q_l = 3 \text{ L/min}$, $Q_g = 10 \text{ L/min}$ 流量点,偏差值为 0.014 59,偏差是可接受的。

5 结 论

本文针对气液两相流动的重要参数之一:截面含气率,提出了一种基于荧光成像技术的截面含气率检测方法。该方法为非侵入式测量方法,测量过程不会对管道内气液两相流动产生干扰,通过向无离子水中加入 $7 \mu\text{m}$ 粒径的罗丹明 B 荧光粒子,在 532 nm 激光片光的照射下,运用 CCD 相机捕捉荧光粒子,并通过一系列图像处理技术获得截面含气率。在捕捉不同流量点下截面荧光粒子图像的同时,高速相机沿管道轴向,从侧面获取激光面处管道液相的截面含气率值。两种非侵入式的直接检测方法相互验证,并对检测结果进行修正。结果表明,两种检测技术获取的截面含气率值的变化趋势一致,并且相对偏差较小,偏差最大值仅为 0.014 59,这说明所提出的荧光成像截面含气率检测方法的有效性。

参考文献

- [1] 汪剑鸣,李博,王琦,等. 基于提升小波时延估计的气液两相流流速测量[J]. 仪器仪表学报,2017,38(3): 653-663.
WANG J M, LI B, WANG Q, et al. Velocity measurement of gases and liquids two-phase flow based on lifting wavelet time-delay estimation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(3):653-663.
- [2] YANG Q Y, JIN N D, ZHAI L S, et al. Experimental study of slug and churn flows in a vertical pipe using plug-in optical fiber and conductance sensors [J]. Experimental Thermal and Fluid Science (EXP THERM FLUID), 2019, 107(3): 107-138.
- [3] 李秀艳,韩倩,汪剑鸣,等. 基于改进共轭梯度法的 ERT 图像重建 [J]. 仪器仪表学报,2016,37(7): 1673-1679.
LI X Y, HAN Q, WANG J M, et al. ERT image reconstruction based on improved conjugate gradient method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(7):1673-1679.
- [4] 王琦,张荣华,王金海,等. 基于压缩感知的 ECT/CT 双模融合系统成像方法 [J]. 仪器仪表学报,2014, 35(6):1338-1346.
WANG Q, ZHANG R H, WANG J H, et al. Imaging method of ECT/CT dual-mode fusion system based on compressed sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014,35(6):1338-1346.
- [5] GHENDOUR N, MERIBOUT M, AZZI A. Review of measurement techniques for void fraction of two-phase flow through annulus [J]. Measurement, 2020, 165(5): 1-42.
- [6] PENGMAN N, DONG W, YANG Y, et al. Void fraction measurement using an imaging and phase isolation method in horizontal annular flow [J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(2): 1-24.
- [7] HARVEL G D, HORI K, KAWANISHIK, et al. Real-time cross-sectional averaged void fraction measurements in vertical annulus gas-liquid two-phase flow by neutron radiography and X-ray tomography techniques [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1996, 371(3):544-552.
- [8] BRUVIK E M, HJERTAKER B T, HALLANGER A. Gamma-ray tomography applied to hydro-carbon multi-phase sampling and slip measurements [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(3): 240-248.
- [9] 臧丽叶,田瑞峰,孙兰昕,等. 平面激光诱导荧光技术在液膜厚度波动实验研究中的应用 [J]. 原子能科学技术,2014,48(9):1654-1659.
ZANG L Y, TIAN R F, SUN L X, et al. Application of planar laser-induced fluorescence technique in experimental study of liquid film thickness fluctuation [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014,48(9):1654-1659.
- [10] SHESTAKOV, MAXIM. Investigation of unsteady flow regime in a T-shaped channel by means of Time-Resolved PLIF and PIV techniques [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 60(3):1382-1389.
- [11] XUE T, LI CH Y, WU B. Distortion correction and characteristics measurement of circumferential liquid film

- based on PLIF[J]. *AICHE Journal*, 2019, 65(8): 1-38.
- [12] 张航, 张巍, 李伟锋, 等. T型反应器内流动、混合及界面反应特征[J]. *化工学报*, 2021, 7(4): 1-15.
ZHANG H, ZHANG W, LI W F, et al. Characteristics of flow, mixing and interfacial reaction in a T-shaped reactor [J]. *Chinese Journal of Chemical Industry*, 2021, 7(4): 1-15.
- [13] WOJTAN L, URSENBACHER T, THOME J R. Measurement of dynamic void fractions in stratified types of flow Exp [J]. *Therm. Fluid Sci*, 2005, 29(3): 383-392.
- [14] WOJTAN L, URSENBACHER T, THOME J R. Interfacial measurements in stratified types of flow [J]. Part II: Measurements for R-22 and R-410A Int. J. *Multiphase Flow*, 2004, 30(1): 125-137.
- [15] URSENBACHER T, WOJTAN L, THOME J R. 2004 interfacial measurements in stratified types of flow [J]. Part I: New Optical Measurement Technique and Dry Angle measurements Int. J. *Multiphase Flow*, 30(1): 107-124.
- [16] HUANG L, WEN S, LIU Y, et al. Development of a fluorescence imaging method to measure void fractions of gas-liquid two-phase flows in a small tube-window for transparent fluids [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(4): 45-57.
- [17] JALBA A C, WILKINSON M, ROERDINK J. Morphological hat-transform scale spaces and their use in pattern classification [J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(2): 901-915.
- [18] LI C, XU C, GUI C, et al. Level set evolution without re-initialization: A new variational formulation [C].

Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, CVPR 2005, IEEE Computer Society Conference on, IEEE, 2005, 38(3): 430-436.

- [19] VUKOVI V, ARIZANOVI B, BLOND S L. Generalized N-way iterative scanline fill algorithm for real-time applications [J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2017, 17(2): 1-20.

作者简介



韩棒棒, 2017年毕业于皖江工学院获得学士学位, 现为河北大学博士研究生, 主要研究方向为多相流检测技术。

E-mail: hanbang1994@sina.com

Han Bangbang received his B. Sc. degree from Wanjiang University of Technology in 2017. Now, he is a doctoral student in Hebei University. His main research interest is multiphase flow detection technology.



方立德 (通信作者), 1998年于中国计量大学获得学士学位, 2005年于河北工业大学获得硕士学位, 2008年于天津大学获得博士学位, 现为河北大学质量技术监督学院教授, 主要研究方向为热工测试技术和多相流检测技术。

E-mail: fanglide@sina.com

Fang Lide (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1998 from China Jiliang University, M. Sc. degree in 2005 from Hebei University of Technology and Ph. D. degree in 2008 from Tianjin University. Now, he is a professor in School of Quality and Technical Supervision, Hebei University. His main research interests include thermal measurement technology and multiphase flow detection technology.