

## Measurement and Analysis of Phase Interface Parameters of Horizontal Pipe Section Plug Flow Based on Ultrasonic Phased Array Technology\*

ZHAO Ning<sup>1 2</sup>, WANG Chen<sup>1 2</sup>, WU Liliang<sup>3</sup>, LI Siwen<sup>1 2</sup>, FANG Lide<sup>1 2\*</sup>

(1. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding Hebei 071000, China;

2. National & Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Hebei University, Baoding Hebei 071000, China;

3. Hebei Baisha Tobacco Co., Ltd., Baoding Cigarette Factory, Baoding Hebei 071000, China)

**Abstract:** Plug flow is a type of two-phase flow, which is intermittent and unstable and lacks real-time accurate detection means. Ultrasonic phased array is adopted to detect the phase interface of gas-liquid two-phase flow and corresponding analysis is performed. The focusing law is designed, then the scanning acoustic beam, deflection angle and experimental parameters are determined. Experimental measurements are conducted under 18 flow conditions, and the acquired data are analyzed. 4th-order polynomial equation fitting method is utilized to obtain the gas-liquid interface and two feature values, i.e., the liquid level height at the center of the gas-liquid interface and the cross-section gas content rate. The results show that when the gas superficial velocity is fixed, the liquid level height increases with the increase of the liquid superficial velocity. When the liquid superficial velocity is fixed, the liquid level height decreases with the increase of the gas superficial velocity. It is deduced that the change in the gas superficial velocity has more significant influence on the liquid level height of the plug flow after comparing the data. In addition, the increase of the superficial flow velocity slip between the gas and liquid phases leads to the increase of the liquid level height and the decrease of the cross-section gas content rate. When the difference of the superficial flow velocity between the gas and liquid phases is small, the gas-liquid interface fluctuates more apparently and the liquid level height and cross-section gas content rate change significantly. The method lays the foundation for the measurement of gas-liquid two-phase flow parameters.

**Key words:** plug flow; phase interface measurement; ultrasonic phased array; liquid level; void fraction

EEACC: 7230      doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2022.07.014

## 水平管段塞流相界面参数的超声相控阵测量及分析\*

赵 宁<sup>1 2</sup>, 王 晨<sup>1 2</sup>, 武立强<sup>3</sup>, 李斯文<sup>1 2</sup>, 方立德<sup>1 2\*</sup>

(1. 河北大学质量技术监督学院, 河北 保定 071000; 2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心, 河北 保定 071000;

3. 河北白沙烟草有限责任公司保定卷烟厂, 河北 保定 071000)

**摘 要:** 段塞流是两相流的一种典型流型, 其流动的间歇性、不稳定性在传输过程中会带来许多问题。本文采用超声相控阵技术对段塞流相界面进行了测量和分析。通过设计聚焦法则, 确定扫描声束、偏转角度和实验参数, 在气液两相流装置上开展了 18 种流动条件下的实验测量。结合扇扫界面的数据分析, 利用四阶多项式方程拟合方法获取了气液相界面曲线, 提取了两相界面中心点处液位高度和截面含气率两个特征值。结果表明, 当气相表观流速一定时, 随着液相表观流速的增加, 液位高度增加。当液相表观流速一定时, 随着气相表观流速的增加, 液位高度下降。通过比较数据得出气相表观流速的变化对段塞流液位高度影响更加显著。此外, 气相和液相表观流速滑差的增大会导致液位高度升高, 截面含气率降低, 气液表观流速之差较小时, 气液界面波动较大, 液位高度和截面含气率变化明显。该测量方法为段塞流流动参数测量奠定了基础。

**关键词:** 段塞流; 相界面测量; 超声相控阵; 液位高度; 截面含气率

中图分类号: TH814

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2022)07-0960-07

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(62173122); 京津冀协同创新共同体建设专项(20540301D); 河北省自然科学基金重点项目(F2021201031); 河北省自然科学基金项目(F2022201034)

收稿日期: 2021-09-16      修改日期: 2021-11-11

段塞流是气液两相流的典型流型之一,其特点是气相和液相交替流动,充满整个管道流通面积的液塞被气团分割,气团下方是沿管道底部流动的液膜<sup>[1-2]</sup>。段塞流动时,管道压力、管道出口气流瞬时流量波动较大,并伴有强烈的振动,对管道连接设备和下游工艺装置有很大的破坏作用。在段塞流参数中,流速、界面分布和相分数关系到生产安全、反应效率和设备的优化设计<sup>[3-4]</sup>。因此,开展段塞流界面分布和相分数等研究对于针对气液两相流系统提供准确的判断方法和控制手段具有重要学术价值和现实意义<sup>[5]</sup>。

非稳态流动的相界面结构复杂且变化多样,无法利用两相流体动力学方程进行准确求解。随着测试技术的进步,相界面的主流实验测试方法包括电导探针法、丝网传感器法<sup>[6]</sup>、层析成像技术<sup>[7-10]</sup>、图像可视化<sup>[11]</sup>和超声法<sup>[12]</sup>。李广军<sup>[13]</sup>用双平行电导探针法对两相流的瞬时液膜厚度进行了测量,得到气液两相流界面上的波动规律。王凡<sup>[14]</sup>利用四头电导探针对泡状流局部界面面积浓度进行了测量,该方法只能对管道某一截面上直径位置上单次测量,不能得到截面分布的完整形态,且只能用于非导电管道,应用在工业生产中有一定局限性。Johnson、Prasser等利用金属丝网传感器对气液相界面进行重构,获取相关参数及特征,可以检测整个界面的流动特征,但丝网与流体充分接触,易对流体产生干扰,影响测量结果<sup>[15]</sup>。近年,电学成像技术因具有不干扰流场、快速、成本低、无放射性等优点,在多相流检测领域具有广泛的应用前景<sup>[7]</sup>。许燕斌等<sup>[8]</sup>基于电阻层析成像技术将独立成分分析和多尺度分析相结合提取水平管气液两相流分相界面波动信息,并经过实验验证,表明该方法可有效获得多种流型的界面波动信息。Xu等<sup>[9]</sup>通过实验评估了使用RTD数据的CAA的效率,通过将获得的相关成分与构建的图像层进行比较,可提取独立成分,表明该方法可提取流动状态信息,同时也能防止两相的波动。Ru等人<sup>[10]</sup>利用电容层析成像结合机器学习算法进行水平管道内油基系统的界面检测。由于电学层析成像固有的“软场”特性,使得边缘和界面检测分辨率较低。对于监测两相流动态变化,高速摄像技术可以更直观地记录,姜北<sup>[16]</sup>基于高速摄像技术对小管道段塞流相含率进行了测量,其检测难点在于管道或被测对象需透明,同时大量的图像分析任务艰巨。超声法作为一种非干扰式测量技术,对流体不会产生干扰,适用介质种类多,且对大部分介质来说穿透力强,具有较高的测量精度。张月皓<sup>[17]</sup>利用超

声衰减和FPGA技术实现了气液两相流气泡含气率的测量;梁法春<sup>[18]</sup>利用超声多普勒测速仪测量了波动分层液膜厚度。相对普通超声法,超声相控阵检测速度快,效率高,探头具有灵活的偏转角度和精准的聚焦性能,可以多角度大范围地对两相流界面进行检测,较完整地观测气液界面分布情况。

超声相控阵技术最初应用在医学领域,超声束的移动聚焦特性可以扫描人体内部器官,实现扫描面的成像检测<sup>[19]</sup>。随着电子信息的发展,超声相控阵技术被应用于工业无损检测中,实现对被检元件缺陷位置及形态的检测。近年来,学者将超声相控阵技术引入到两相流参数测量中,例如方立德等人<sup>[20]</sup>将相控阵用于两相流的流型检测中。

本文基于超声相控阵技术对水平管段塞流相界面进行了扇形扫面测量,提取了液位高度和截面含气率两个特征参数,利用四阶多项式拟合与高速摄像法的验证得到了气液界面曲线,为段塞流界面参数的测量提供了一种新的测量思路和研究方法。阵列式换能器通过延时控制声束的扫描角度和范围,可大大提高对两相流界面的检测范围和精度。

## 1 实验测试系统

### 1.1 超声相控阵系统

超声相控阵测量系统由发射和接收两部分构成,其原理分别如图1和图2所示。超声相控阵换能器由多个独立的压电晶片组成阵列,相邻阵元间距为 $d$ ,按照预先设计的聚焦法则激发各个晶片单元,确定延迟时间控制声束的偏转和聚焦,遇到异质界面返回回波信号,通过对每个阵元接收的信号进行延迟补偿和叠加处理得到检测点的反射信号。

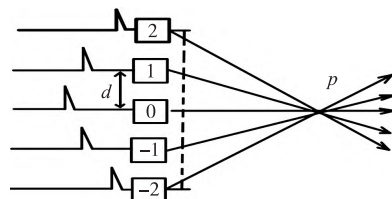


图1 超声发射原理图

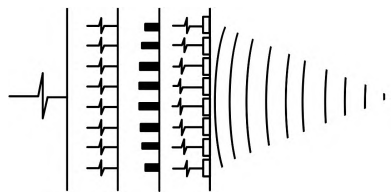


图2 超声接收原理图

本文使用的是CTS-PA22X超声波探伤系统,该系统由监控主机、CTS-PA22X相控阵检测模块、相控阵探头及相关扫查装置组成。监控主机上的软件通

过网络接口向 CTS-PA22X 发送指令,并接收其回传的波形数据和处理后图像。超声探头的频率为 4 MHz,共有 16 个阵元,呈线性排列,还可通过导入聚焦法则,实现对声束的控制。每次扫描最多可设置 128 条声束,即发射 128 个方向的声束。该系统还可以实现数据采集,采集得到的数据即为不同方向上的回波信号,对应扇形图像上的 128 条采集线。每条声束方向上可以采集 448 个数据点,故每次数据采集能够获得一个  $128 \times 448$  的数据矩阵。相控阵探头发射电压为 45 V,重复频率为 10 kHz,脉冲宽度为 150 ns。接收器延迟精度为 2.5 ns,增益范围为 48 dB,输入阻抗为 50  $\Omega$ 。图 3 为超声相控阵扇扫返回数据图像。

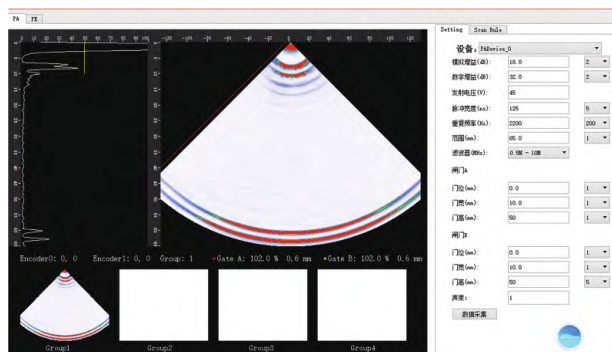


图 3 扇形扫描界面

## 1.2 实验装置

在河北大学高精度气液多相流试验装置上,利用水和压缩空气进行实验,主管道管径为 DN50,在水平管段和竖直管段上配有 0.5 m 长的有机玻璃管道作为测试管段,以方便观察流态。在液体循环回路中,用科里奥利质量流量计和电磁流量计将水抽入水回路后进行测量。在气体循环回路中,空气首先被空气压缩机压缩,然后进入压力容器,再通过干燥器和质量流量计。被测水和气体在两相混合器中混合,进入垂直试验段。最后,被测流体进入储水罐,经过重力分离后,水继续循环,气体直接排放到空气中。通过 PLC 系统和 LabVIEW 软件实现对系统的控制和数据的实时采集,包括温度、压力和各个管道的流量等,为后续数据处理提供依据,多相流实验系统如图 4 所示。

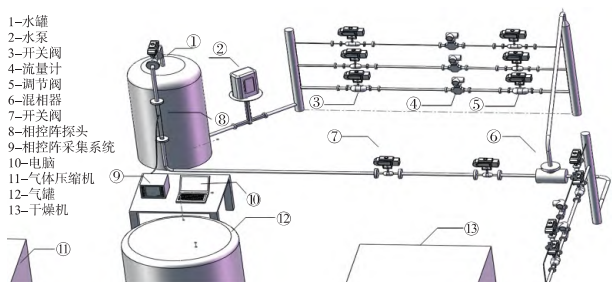


图 4 实验装置图

## 1.3 实验过程

超声相控阵探头使用扇形扫描方式,扫描角度为  $-45^\circ \sim 45^\circ$ ,根据频率和结构参数的选用原则,最终确定模拟增益为 18 dB,数字增益为 32 dB,脉冲宽度为 125 ns,脉冲重复频率为 2 200 Hz。本实验在内径为 50 mm,壁厚 5 mm 的水平管道进行,将超声探头、楔块与管道连接,并在探头与楔块、楔块与管道间添加耦合剂,在多相流系统上进行不同流型的实验,如图 5 所示,探头对管道内流体在横截面上扫描检测采集数据。同时,利用高速摄像机对透明管道内流体进行拍摄,以观察记录,拍摄图如图 6 所示。实验参数见表 1,得到共 18 个工况点下  $128 \times 448$  的回波信号数据。

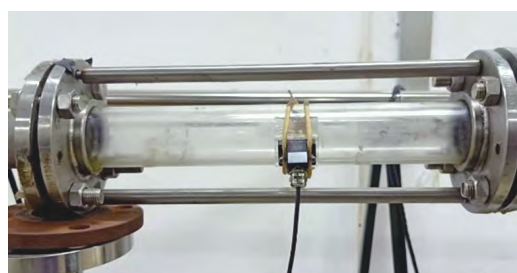


图 5 水平管段现场安装图



图 6 高速摄像机拍摄图

表 1 实验参数范围

管道压力 /MPa	温度 /℃	气相表观流速 /(m/s)	液相表观流速 /(m/s)	采样 点
0.105	25	0.049 5~0.120 3	0.707 4~1.414 8	18

利用曼德汉流型图对本文 18 个实验点的流型进行了分析,如图 7 所示,依据实验工况点的分布,本实验中水平管段气液两相流流型为段塞流。

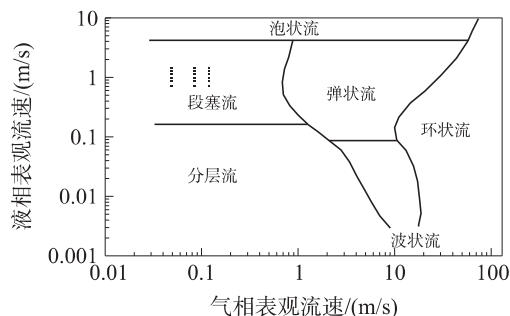


图 7 水平管气液两相流流形图



## 2 数据处理及分析

### 2.1 坐标转换及剔除异常值

坐标转换与所设定的聚焦法则相关,扇扫图像所显示的距离是根据声速所得。超声相控阵探头发射的超声束碰到气液界面发生反射传回  $128 \times 448$  的矩阵数据。本实验多相流管道内径 50 mm,管壁厚 5 mm,根据满管时扫描数据波形图,在横坐标点 374 处波峰指向性最好,这说明超声束碰到管道内壁发生反射,楔块高度相切有机玻璃管道高度为 11 mm,加上管道壁厚及内径,超声阵列换能器阵元排列间距忽略不计,将其看作质点,每条声束碰到气液界面返回的距离点和其对应的液位高度  $y_i$  成一定的比例,检测原理图如图 8。坐标转换关系如式(1)和式(2)所示:

$$y_i = y \frac{66}{374} - 16 \quad (1)$$

$$x_i = y_i \tan \theta \quad (2)$$

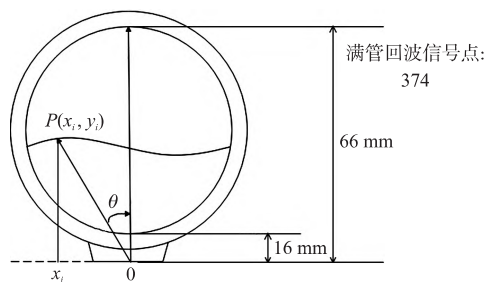


图 8 检测原理图

本实验测量数据较少且每组工况下筛选出一组数据,故利用狄克逊准则剔除异常值。本实验中由于流体运动过程中气液界面是波动的,所以超声遇到异质界面返回的信号数据中必然有异常值存在,如果一组测量数据中有极度不符合实验理论的值出现,则该值可初步被判断为异常值。

### 2.2 基于最小二乘法的气液界面曲线拟合

最小二乘法是一种数学优化方法,它通过计算最小化误差的平方和来寻找已知数据的最合适的函数匹配,见式(3):

$$f(x) = \partial_1 \varphi_1(x) + \partial_2 \varphi_2(x) + \cdots + \partial_m \varphi_m(x) \quad (3)$$

式中:  $\varphi_k(x)$  是已确定的一组线性无关的函数,  $\partial_k$  为待定系数 ( $k=1, 2, \cdots, m, m < n$ ), 拟合准则即使  $y_i$  ( $i=1, 2, \cdots, n$ ) 与  $f(x_i)$  的距离  $\delta_i$  的平方和最小。

本实验中由于扫描角度为  $-45^\circ \sim 45^\circ$ , 当液位低于管道半径时,不能完整复现出气液界面,故需利用不同阶次方程求解一条拟合的曲线,呈现出接近管道壁的边缘部分。

根据各阶次的拟合曲线情况比较,多项式阶数较低时,如图 9 中的(a)~(c),拟合曲线不能较好地反

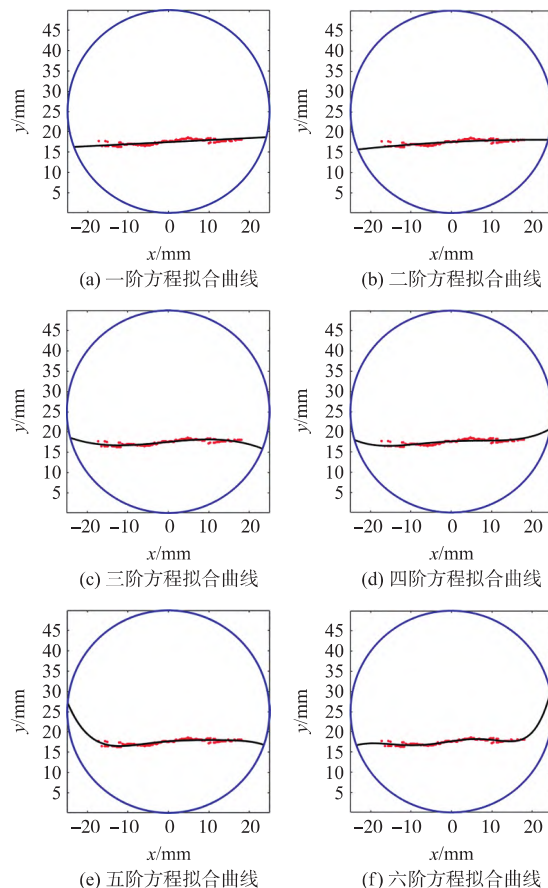


图 9 曲线拟合结果

映出气液界面液位点的分布情况,在图 9(a)和图 9(b)的一阶和二阶拟合方程下,气液界面过于平直,不能体现出流体运动速度和压力分布的梯度变化,不符合黏性流体的流动规律;在图 9(c)的三阶拟合方程下,由于流体流动具有一定的对称性,则三阶拟合的气液界面接近管壁两端的液体分布方向相差较大;而图 9(e)和图 9(f)的五阶和六阶拟合方程出现了振荡的情况,曲线畸变较大。本文利用高速摄像技术去验证各阶多项式拟合结果,从而确定最优曲线。该方法是把高速摄像机拍摄图片进行了灰度处理和锐化处理以更清晰地得到液相与管壁的交界点位置坐标(如图 10 所示),同拟合曲线进行对比验证。验证结果表明,图 9(d)的四阶方程多项式拟合的气液界面效果最好,接近管壁部分体现出两相和各相与管道壁

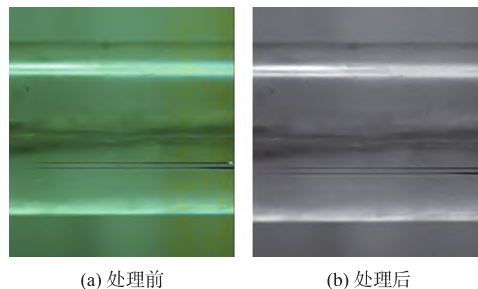


图 10 段塞流气塞处图片处理过程

之间的剪切应力,形成如图 9(d)所示的气液界面分布,且在中线轴线附近体现了界面波动。

### 2.3 基于二值化图像的截面含气率求解

图 11(a)到图 11(d)为数据处理的完整过程,利用狄克逊准则剔除异常值,将扫描数据转换得到的相界面处液位高度的坐标点进行排列,剔除两端的异常值,排除实验时由于设备检测频率或者流体波动等带来的偶然误差,便于后续利用曲线拟合得出一条较完善的气液界面。基于图像灰度转换二值化的原理,对得到的管道横截面气液分布图像进行处理,再通过计算气相截面的像素点占比得到面积比即截面含气率,由于本实验中图像涉及色彩较少,所以在此不进行灰度化处理。

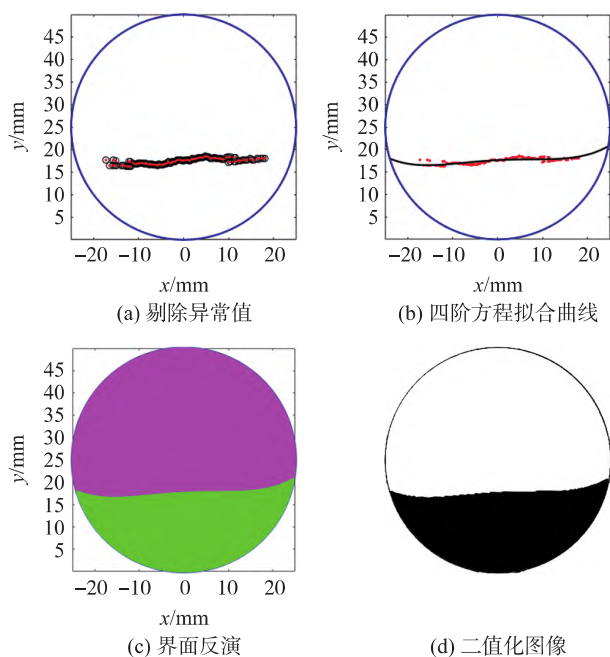


图 11 处理过程

本文使用基于贴标号算法的二值化图像区域分割进行面积计算,在连通域下,输入二值化图像  $I(i, j)$ , 输出图像为标号图像  $L(i, j)$ ,  $i$  为图像的行指标,  $j$  为图像的列指标,预先设置连通区域个数的变量和,记录标号中间结果的标号表。按自上到下,自左到右的顺序逐行处理每一个像素点,扫描整个图像。以工况点  $u_{sl} = 1.2734 \text{ m/s}$ ,  $u_{sg} = 0.0849 \text{ m/s}$  为例,图 11(d)为二值化后的图像,经由以上标号算法可计算出  $\alpha = 0.6923$ 。

本文选择最小二乘法拟合液位散点,对于本实验中的相界面结构来说,综合几种阶次的拟合方程,最终选择的四阶拟合最符合实际情况下的气液分布,从而完整复现了由超声相控阵声束扫描聚焦得到的气液界面。本文利用超声相控阵技术结合多项式拟合方法获得的气液界面曲线,提出了基于二值

化图像处理的截面含气率求解方法,即计算气相部分像素点占管道截面的面积比。

### 2.4 数据分析和结果

本实验选取气塞段运动较平稳的部分作为研究对象,在一定周期范围内,会通过有规律的气塞,通过对超声回波信号数据的处理,对 18 个工况点下水平管段塞流型的液位高度和截面含气率变化进行总结分析作为特征值,研究了气液表观流速变化对它们的影响,为进一步进行界面分布和相分数研究奠定了实验基础。利用实验测量结果研究了液位高度和截面含气率,液位选取水平管道横截面垂直于圆心直线处对应的高度值。

从图 12 和图 13 中可以看出,当  $u_{sg}$  为固定值时,随着  $u_{sl}$  的增加,液位高度上升,以  $u_{sg} = 0.05 \text{ m/s}$  为例,  $u_{sl}$  在  $0.71 \text{ m/s} \sim 1.40 \text{ m/s}$  范围内变化,其每增加  $0.56 \text{ m/s}$ ,液位高度增加  $3.781 \text{ mm}$ ,截面含气率下降  $0.0721$ 。反之,当  $u_{sl}$  为固定值时,随  $u_{sg}$  的增加,液位高度下降,以  $u_{sl} = 0.85 \text{ m/s}$  为例,  $u_{sg}$  增加  $0.07 \text{ m/s}$ ,液位高度下降  $2.414 \text{ mm}$ ,截面含气率上升  $0.0547$ 。由此可看出气相表观流速的变化对段塞流液位高度影响更加显著。

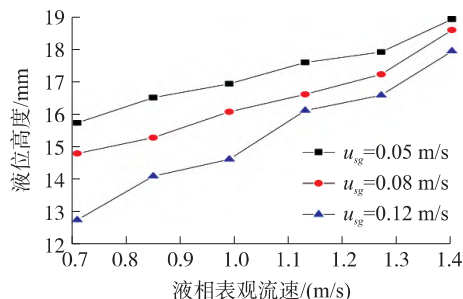


图 12 液位高度随液相表观流速的变化

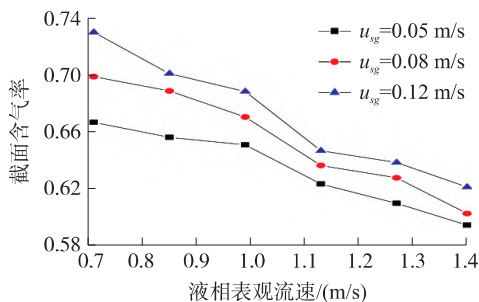


图 13 截面含气率随液相表观流速的变化

本文引入气相和液相表观流速差这一参数,对液位高度和截面含气率的关系进行了进一步研究。

如图 14 和图 15 所示,  $u_{sl} - u_{sg} < 1 \text{ m/s}$  时,气相和液相表观流速差每增加  $0.07 \text{ m/s}$ ,液位高度分别升高  $2.587 \text{ mm}$ ,  $2.4136 \text{ mm}$  和  $2.2151 \text{ mm}$ ,截面含气率分别降低  $0.0631$ ,  $0.0447$  和  $0.0321$ 。  $u_{sl} - u_{sg} > 1 \text{ m/s}$  时,其差每增加  $0.07 \text{ m/s}$ ,液位高度升高

1.375 6 mm, 1.332 7 mm 和 1.072 5 mm, 截面含气率降低 0.023 3, 0.028 6 和 0.026 7。

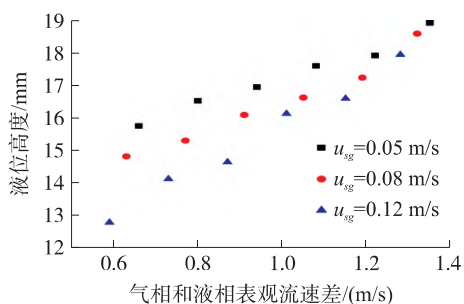


图 14 气相和液相表观流速差对液位高度的影响变化图

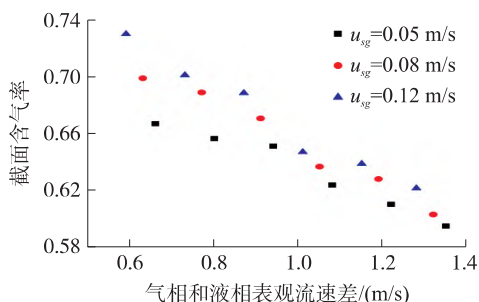


图 15 气相和液相表观流速差对截面含气率的影响变化图

根据上述分析结果可以得知,气相和液相表观流速之差较小时,气液界面波动较大,液位高度和截面含气率变化明显,这是由于流体发生桥塞的液量少,气体快速推动液塞运动使得液体和管道壁产生空隙,液塞抛出和下落循环往复,气体和液体交替运动,气体含量占比增大,则段塞流的截面含气率上升,液位高度降低。而气相和液相表观流速之差较大时,气速降低时,在气体缓慢推动下,液塞长度较长,均匀地吸收液膜并向前运动,所以液面的液位波动较小。综上,由对段塞流相界面的液位和截面含气率随工况变化的规律来看,符合段塞流的形成机理及流动特征,验证了超声相控阵法对气液两相流相界面参数测量与分析的有效性。

### 3 结论

本文基于超声相控阵技术实现了对气液两相流流参数的分析。以段塞流为研究对象,利用超声回波信号数据进行处理及分析,实验前预先对超声相控阵系统确定了扇形扫描方式,并设置合适的气液两相流参数,观察 18 个工况点下的回波数据,发现监测点的每一次超声回波信号和液位高度成一定的比例关系,所以每个工况下筛选出指向性最好的一组波形图,利用 MATLAB 得出一次气液界面液位高

度点的分布。应用狄克松准则剔除异常值,以最小二乘法确立了四阶多项式方程拟合曲线,还原了完整的气液界面分布,基于二值化图像的方法计算出段塞流相界面的截面含气率。

测试数据结果表明,气相和液相表观流速差的变化对段塞流的液位高度及截面含气率有一定影响,规律为气液表观流速差较大时,段塞流的液位高度偏高,截面含气率较低;气液表观流速差较小时,段塞流的液位高度偏低,截面含气率较高。气相表观流速要比液相表观流速对液位和截面含气率的影响更加显著。

### 参考文献:

- [1] Morgado A O, Miranda J M, Araújo J D P. Review on Vertical Gas-Liquid Slug Flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 85: 348-368.
- [2] Jaeger J, Santos C M, Rosa L M. Experimental and Numerical Evaluation of Slugs in a Vertical Air-Water Flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 101: 152-166.
- [3] 傅春, 谭超, 董峰. 基于多频带谱熵的水平气液两相流结构复杂性分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1138-1146.
- [4] 方立德, 张涛, 徐英. 垂直于水平流向的气液两相流重位压差波动信号分析[J]. 传感技术学报, 2008, 21(7): 1184-1189.
- [5] 周云龙, 张学清, 孙斌. 应用电导探针技术识别气液两相流流型方法及电导波动信号噪声的辨识[J]. 传感技术学报, 2008, 21(10): 1708-1712.
- [6] 孙圆圆, 李坤, 李凯, 等. 基于丝网传感器的气水两相流流型转换测量[J]. 传感技术学报, 2020, 33(3): 364-369.
- [7] Wang Q, Wang H X, Cui Z, et al. Fast Reconstruction of Electrical Resistance Tomography (ERT) Images Based on The Projected CG Method [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 27: 37-46.
- [8] 许燕斌, 王化祥, 崔自强. 水平管气水两相流分相界面识别[J]. 天津大学学报, 2010, 43(8): 743-748.
- [9] Xu Y, Cui Z, Wang H, et al. Independent Component Analysis of Interface Fluctuation of Gas/Liquid Two-Phase Flows-Experimental Study [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2009, 20(6): 220-229.
- [10] Ru Y, Pradeep C, Mylvaganam S. Neural Networks in Electrical Capacitance Tomography (ECT)-Based Interface Detection [J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(10): 104006.
- [11] 李坤, 白慧敏, 王鉴等. 两相流测量技术研究[J]. 测试技术学报, 2020, 34(3): 257-264.
- [12] Wang M, Zheng D, Wu Y. Experimental and Modeling Study on Interfacial Disturbance Wave Velocity in Horizontal Gas-Liquid Flow by Ultrasonic Method [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 109: 109908.
- [13] 李广军, 郭烈锦, 陈学俊, 等. 气液两相流界面波的双平行电导探针测量方法研究[J]. 计量学报, 1997(3): 9-14.
- [14] 王凡, 匡波, 曹乘雀, 等. 四头电导探针在气液两相流动局部参数测量中的实验研究[J]. 应用科技, 2019, 46(6): 63-68.

- [15] 饶永超,丁博洋,王树立,等. 基于高速摄像的直管内多相流动特性研究进展[J]. 科技通报, 2018, 34(10): 9-16.
- [16] 姜北. 基于高速摄像的小管道气液两相流段塞流相含率测量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [17] 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.
- [18] 梁法春,方召君,孙石涛,等. 基于超声波的气液两相分层液膜厚度及流量的非介入测量[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(4): 67-71.
- [19] 张慧,郑冠儒,李志,等. 空气耦合电容式微超声换能器线阵设计与测试[J]. 传感技术学报, 2018, 31(5): 803-808.
- [20] Fang L D, Zeng Q Q, Wang F, et al. Identification of Two-Phase Flow Regime Using Ultrasonic Phased Array [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 72: 101726.



赵宁(1983—),男,天津大学博士毕业,现为河北大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为多相流测试技术与仪器 zhaoning1983@tju.edu.cn;



王晨(1996—),女,现为河北大学在读硕士研究生,主要研究方向为多相流测试技术与仪器, WangChen\_hebei@163.com;



方立德(1974—),男,天津大学博士毕业,河北大学教授,博士生导师。现为质量技术监督学院院长。主要研究方向为多相流测试技术与仪器, fanglide@hbu.edu.cn。