



DOI: 10.12086/oe.2022.210437

用于气泡流检测的双波长测量模型研究

曹鸣¹, 孔明^{1*}, 刘若琳¹, 单良²¹中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018;²中国计量大学信息工程学院, 浙江 杭州 310018

摘要: 针对已有单波长方法测量小通道竖直上升气液两相气泡流相分布参数误差较大的问题, 提出了用双波长透射法进行测量研究。通过几何光学原理计算双波长激光经过气液两相流的光强分布, 然后提取双波长光强分布特征量, 建立了一种基于双波长测量理论的气泡流相分布参数识别模型。利用 Trace Pro 模拟 445 nm、635 nm 的激光经过位于管道截面不同位置处的不同尺寸气泡时, 得到相应光强分布曲线并提取出特征量, 使用仿真得到的特征量数据集对神经网络进行训练, 将训练好的神经网络用来预测实验中气泡流的相分布。仿真实验结果表明, 建立的模型对气泡中心位置、半径预测的平均绝对误差分别为 0.018 mm、0.007 mm, 均优于单波长方法, 证明了所建模型的有效性和准确性。在搭建的实验平台进行了气泡流测量, 重建了气泡流的三维图。

关键词: 几何光学; 双波长; 两相流; 小通道; 气泡流; 神经网络

中图分类号: O351

文献标志码: A

曹鸣, 孔明, 刘若琳, 等. 用于气泡流检测的双波长测量模型研究 [J]. 光电工程, 2022, 49(6): 210437

Cao M, Kong M, Liu R L, et al. Research on dual-wavelength measurement model for bubble flow detection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(6): 210437

Research on dual-wavelength measurement model for bubble flow detection

Cao Ming¹, Kong Ming^{1*}, Liu Ruolin¹, Shan Liang²¹College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;²College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract: Aiming at the deficiency of the existing single-wavelength method in measuring the phase distribution parameters of the vertically rising gas-liquid two-phase bubble flow in a small channel, a dual-wavelength method is proposed. Based on the principle of geometric optics, the light intensity distribution of dual-wavelength laser passing through gas-liquid-two-phase-flow is calculated, and the characteristics of light intensity distribution of dual-wavelength laser are extracted. An identification model of bubble flow phase distribution parameters based on the dual-wavelength measurement theory is established. Trace Pro is used to simulate 445 nm and 635 nm laser passing through bubbles with different phase distribution parameters, and then the features of the dual-wavelength light intensity distribution curves can be extracted. The characteristic quantity data set of simulation is used to train the neural network. The trained neural network is used to predict the phase distribution parameters of bubble flow in

收稿日期: 2022-01-15; 收到修改稿日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52076200, 51874264)

*通信作者: 孔明, mkong@cjl.u.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

the experiment. The simulation results show that the average absolute errors of the model for predicting the bubble center position and radius are 0.018 mm and 0.007 mm respectively, which are better than the single-wavelength method, which proves the effectiveness and accuracy of the model. The bubble flow was measured on the experimental platform, and the three-dimensional diagram of bubble flow was reconstructed.

Keywords: geometric optics; dual-wavelength; two-phase flow; small channel; bubble flow; neural network

1 引言

气液两相流广泛存在于石油、航天、制冷、化工等工业领域^[1-2], 特别是在化学和生物化学工业中小通道两相流有广泛的应用^[3]。在小通道中, 两相流流态决定了气相、液相和通道壁中的传质、传热特性, 因此彻底了解管内的两相流流态至关重要, 对工业应用具有重要的促进作用。圆形小通道中气液两相流的典型流态之一是气泡流, 气泡流的相分布参数描述了在特定时间和区域内的气泡流流动特性。因此, 测量气泡的相分布参数是一项必不可少的重要工作, 可以有效指导工业, 对安全生产和生产的提高具有重要意义^[4]。

一些学者通过数值模拟研究气泡流的流动参数, 除了数值模拟方法之外, 近年来学者们对气泡流测量尝试过多种方法, 大致可以分为以下几类: 高速摄像法、层析成像法、光学检测法等。其中光学检测方法是气液两相流的一个重要研究方向, 而光学类方法又可以分为侵入式和非侵入式。侵入式光学检测方法中研究较广泛的是光学探针法^[5-6]。侵入式光学检测方法在一定程度上会影响气液两相流自身的特性, 为了弥补这一不足, 部分学者利用光在管道中的折射、反射特性, 对气液两相流的参数进行非侵入式测量。

临界散射法是非侵入式中较为典型的一种方法, 部分研究者基于临界散射/散射图样的光学检测方法对气液两相流进行研究。Onofri^[7]1999年提出可以通过观察临界角附近的散射图样来确定流中球形颗粒的大小和相对折射率, 这种方法对水为液相的气泡流中气泡半径预误差小于10%, 但无法获取颗粒的位置信息。Jagannathan等人^[8]通过用高速相机记录激光经过气液两相流后的图案, 经过图像处理计算泰勒流的长度和速度, 速度测量误差为2.73%, 但是没有对相分布参数进一步测量。在此基础上, 为了捕捉泰勒流和层流过程中激光束在屏幕上形成的各种光学图案, Arunaganesan等人^[9]布置了由六个光电二极管组成的阵列, 组合分析每个光电二极管电压变化实现对两相

流流型的辨识和泰勒流长度、速度的测量, 并没有研究相分布参数。另外, Vendruscolo等人^[10]提出了一种激光相对于流向倾斜入射的方法, 他采用三个紧贴管道壁外侧的光电探测器接收激光散射信号, 提取信号特征并结合机器学习算法, 最后算得气液两相流的气相、液相表观速度, 未对相分布参数进一步研究。Revellin等人^[11]利用两个光电二极管接收由一定间隔的两束平行激光片经过气液两相流的光信号, 经过一系列数据处理, 可以测得小通道中气液泰勒流的气泡速度和空隙率。类似地, Long等人^[12]采用由两组带有间隙的光电二极管来接收光信号, 两个激光片最初投射在光学传感器的中间间隙上。当泰勒流经过激光片时, 激光投射在光电二极管上时, 将引入电流信号。经过信号处理, 同样可以测量小通道中气液泰勒流的气泡速度和空隙率, 空隙率测量的相对误差在 $\pm 10\%$ 范围内。除了可见光波段的激光, 红外线也可用于气液两相流的检测。Duan等人^[13]将红外线和激光结合, 测量塞流的速度和频率。Mithran等人^[14]分析了气液两相流期间红外收发器传感系统的输出信号特征, 建立了数值模型, 然后将高速成像用于流态的图像配准。但当管径接近红外发射器锥形体积时, 信号输出变得不可预测, 此方法也不再适用。戴振韬^[15]用两束片状激光分别从水平、竖直方向垂直照射被测水平管道, 同时用两片高速传感器测量经气液两相流折射后产生的光强分布, 通过光强分布特征实现小通道气液两相流的相分布测量和液膜厚度, 所得液膜测量的相对误差在 $\pm 15\%$ 范围内。

综合已有的气泡流光学检测研究方向的文献, 它们各有特点, 但部分方法目前在测量气泡流的相关参数时, 未对管道截面内气泡的大小、位置进一步研究, 不能得出准确的相分布参数。此外戴振韬^[15]提出的基于单波长光强分布特征的相分布测量方法是较新颖的研究方向, 但建立的模型仅适用于水平管道, 测量得到相分布参数结果误差较大。在本研究中, 利用双波长激光光源对小通道中气相流量较小时出现的气泡流进行测量, 旨在获取更多激光经过小通道气泡流后

的光信号特征, 减小相分布参数测量的误差。这将为研究气泡流特性提供一种新思路。

2 测量系统与理论

2.1 测量系统

检测系统原理如图 1 所示, 双波长激光光源经过狭缝和分束镜, 得到两束片状激光束, 成 90° 垂直入射到管道, 高速 CMOS 传感器在管道另一侧记录气泡形成及运动的整个过程的实时光强分布数据, 并将光强分布数据实时传送至计算机。当有气泡通过检测段时, 包含两个波长的片状激光在截面内发生折射。由于管道和管道内液体对不同波长光的折射率不同, 同时不同尺寸不同位置的气泡对激光的折光效果不同, 传感器上接收到的双波长光强分布曲线呈现出不同的特征, 提取其中包含的双波长分布特征。将提取出的光强分布特征输入到由仿真数据集训练好的神经网络

中, 得出气液两相流管道中的相分布参数; 根据相分布参数对气泡进行重建。

2.2 双波长散射的几何光学原理

小通道中气液两相流的典型流型——气泡流, 常发生在低质量含气率区, 其特征为在液相中带有散布在液体中的细小气泡, 因此将管道中气泡流简化成如图 2 所示的二维光学模型。当一束包含两个波长的光从管道一侧射向另一侧时, 由于管道、液体对不同波长的光折射率不同, 两波长的光会入射在管道另一侧的检测平面上的不同位置上, 双波长的间隔、宽度与管道中气泡的大小、位置参数有关。本文通过对光检测平面上双波长入射形成的特征参数进行分析, 从而得到管道中气泡的相分布参数。

下面详细介绍上述简化模型中的光强分布计算过程。在几何光学理论中, 光线的传播路径由折射、反射定律确定。图 2 是光线入射到气液两相流截面的光

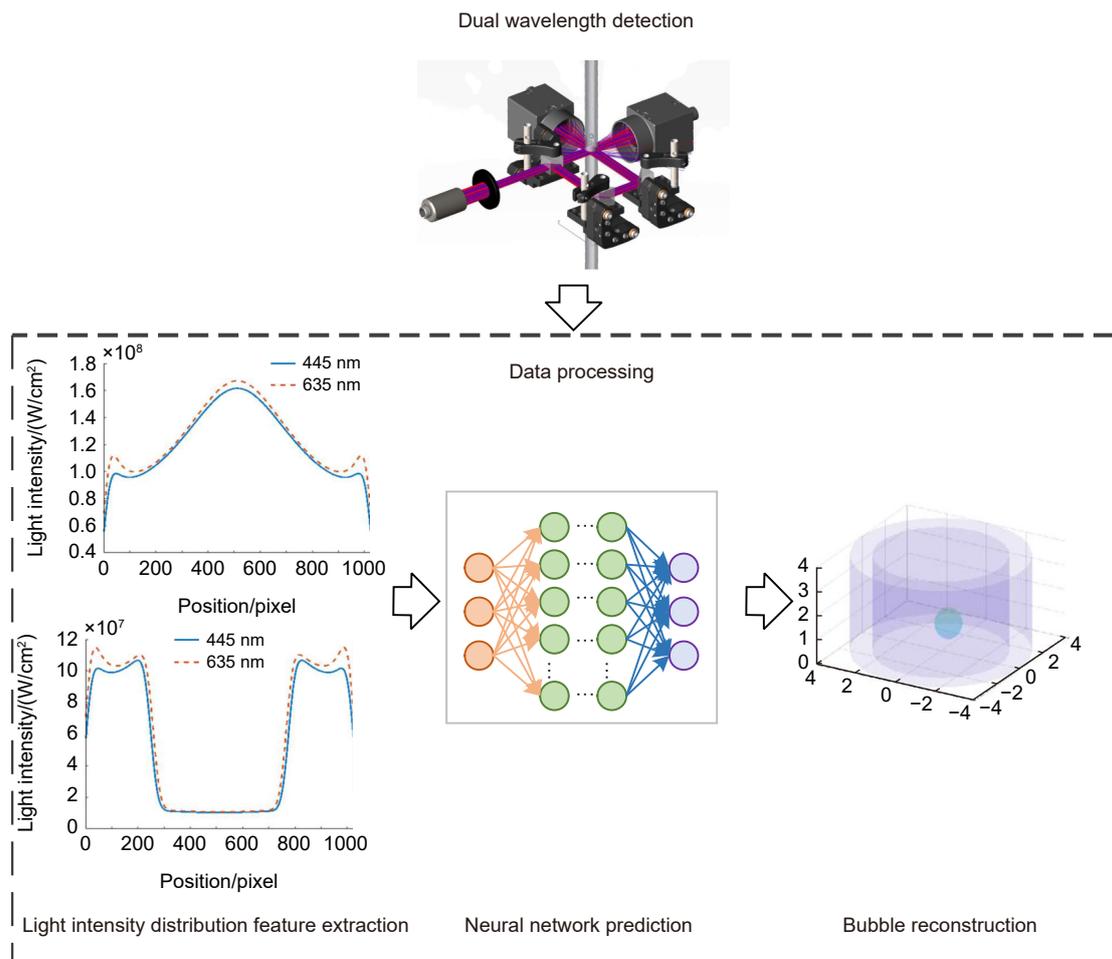


图 1 气液两相流实验系统

Fig. 1 Experimental system of gas-liquid two-phase flow

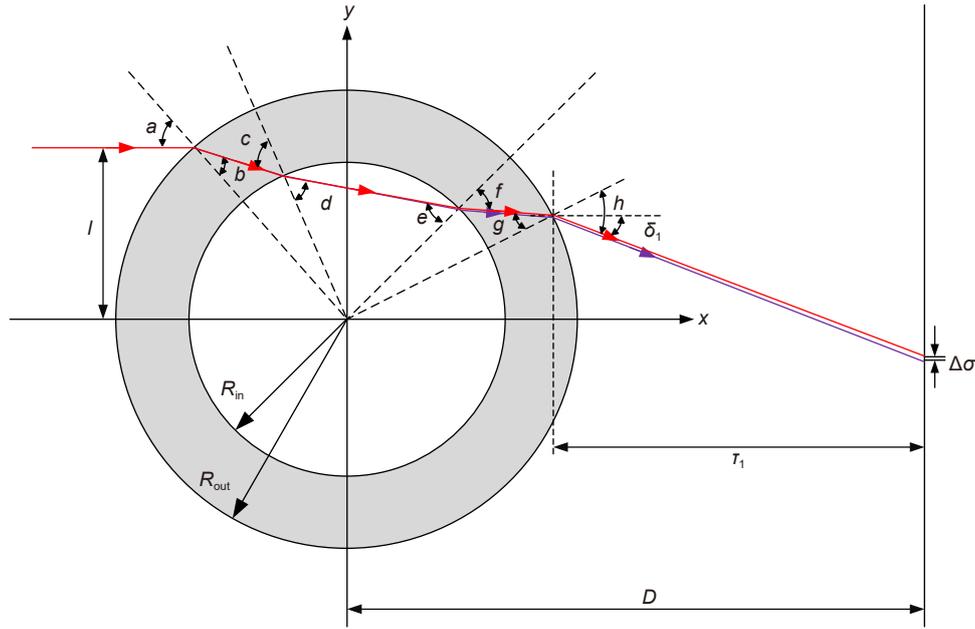


图 2 全液相管道截面

Fig. 2 Full liquid phase pipeline section

学传播示意图。当一束距管道中心轴线 l 的光线，包含波长 λ_1 、 λ_2 ，入射到内径为 R_{in} 、外径为 R_{out} 的气液两相流管道时，管道对波长 λ_1 、 λ_2 的折射率分别为 n_{q1} 、 n_{q2} ，液体对波长 λ_1 、 λ_2 的折射率分别为 n_{l1} 、 n_{l2} ，空气折射率为 n_g ，管道中心与光检测平面间的距离为 D 。根据斯涅尔定律，可以得出波长 λ_1 、 λ_2 经过气液两相流管道部分之后出射角度不同，分别入射到光检测平面相距 $\Delta\delta$ 的两点。

以一束波长为 λ_1 的光线为例，与管道中心轴线距离 l 满足条件 $0 < l < \arcsin(n_{l1}R_{in}/n_gR_{out})$ 时，假设 a 为入射角为， b 为光线经过管外壁后的折射角， c 为光线管道内壁的入射角， d 为光线经过管道内壁后的折射角， e 为光线二次入射到管道内壁的入射角， f 为光线经管道内壁后折射角， g 为光线二次入射到管道外壁的入射角， h 为光线经管道外壁后折射角， δ_1 为波长为 λ_1 的出射光线与 x 方向夹角。计算出波长为 λ_1 的出射光线与 x 方向夹角 δ_1 后，同理可算得波长为 λ_2 的出射光线与 x 方向夹角 δ_2 ，最后结合管道中心与光检测平面间的距离为 D ，即可算得同一位置入射的双波长光线在检测平面上对应点的距离 $\Delta\sigma$ 。入射角 a 与管道中心轴线距离 l 有以下关系：

$$a = \arcsin\left(\frac{l}{R_{out}}\right). \quad (1)$$

根据斯涅耳定律，经过管外壁后的折射角 b ：

$$n_g \sin a = n_{q1} \sin b, \quad (2)$$

即：

$$b = \arcsin\left(\frac{n_g \sin a}{n_{q1}}\right) = \arcsin\left(\frac{n_g l}{n_{q1} R_{out}}\right). \quad (3)$$

由正弦定理可得管道内壁的入射角 c 与经过管外壁后的折射角 b 的关系：

$$\frac{R_{out}}{\sin(\pi - c)} = \frac{R_{in}}{\sin b}, \quad (4)$$

化简后可得：

$$c = \arcsin\left(\frac{R_{out} \sin b}{R_{in}}\right) = \arcsin\left(\frac{n_g l}{n_{q1} R_{in}}\right). \quad (5)$$

根据斯涅耳定律，经过管道内壁后的折射角 d ：

$$d = \arcsin\left(\frac{n_{q1} \sin c}{n_{l1}}\right) = \arcsin\left(\frac{n_g l}{n_{l1} R_{in}}\right). \quad (6)$$

结合式 (1)、(3)、(5)、(6) 得二次入射到管道内壁的入射角 $e=d$ ，经管道内壁后折射角 $f=c$ 。同理可得二次入射到管道外壁的入射角 $g=b$ ，经管道外壁后折射角 $h=a$ 。

假设波长为 λ_1 的出射光线与 x 方向夹角 δ_1 ，由各角度间几何关系可得：

$$\delta_1 = 2\left(\arcsin\left(\frac{l}{R_{out}}\right) + \arcsin\left(\frac{n_g l}{n_{q1} R_{in}}\right) - \arcsin\left(\frac{n_g l}{n_{q1} R_{out}}\right) - \arcsin\left(\frac{n_g l}{n_{l1} R_{in}}\right)\right). \quad (7)$$

同理，对于波长为 λ_2 、从与管道中心轴线距离

为 l 的位置入射的光, 出射光线与 x 方向夹角 δ_2 :

$$\delta_2 = 2 \left(\arcsin \left(\frac{l}{R_{\text{out}}} \right) + \arcsin \left(\frac{n_g l}{n_{q2} R_{\text{in}}} \right) - \arcsin \left(\frac{n_g l}{n_{q2} R_{\text{out}}} \right) - \arcsin \left(\frac{n_g l}{n_{12} R_{\text{in}}} \right) \right). \quad (8)$$

假设波长为 λ_1 、 λ_2 出射点距离接收平面距离分别为 τ_1 、 τ_2 , 根据几何关系可算得:

$$\tau_1 = D - R_{\text{out}} \cos \left(2 \left(\arcsin \left(\frac{n_g l}{n_{q1} R_{\text{out}}} \right) + \arcsin \left(\frac{n_g l}{n_{11} R_{\text{in}}} \right) - \arcsin \left(\frac{n_g l}{n_{q1} R_{\text{in}}} \right) - \arcsin \left(\frac{l}{R_{\text{out}}} \right) \right), \quad (9)$$

$$\tau_2 = D - R_{\text{out}} \cos \left(2 \left(\arcsin \left(\frac{n_g l}{n_{q2} R_{\text{out}}} \right) + \arcsin \left(\frac{n_g l}{n_{12} R_{\text{in}}} \right) - \arcsin \left(\frac{n_g l}{n_{q2} R_{\text{in}}} \right) - \arcsin \left(\frac{l}{R_{\text{out}}} \right) \right). \quad (10)$$

综合式 (7)~式 (10), 最后计算得到同一位置入射的波长为 λ_1 、 λ_2 的光线经过充满液体的管道截面后, 入射到光检测平面上两点间距离 $\Delta\sigma$ 为

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &= |\tau_1 \sin \delta_1 - \tau_2 \sin \delta_2| \\ &= 2l \left| \frac{\tau_1 - \tau_2}{R_{\text{out}}} + n_g \left(\frac{\tau_1}{n_{q1}} - \frac{\tau_2}{n_{q2}} \right) \left(\frac{1}{R_{\text{in}}} - \frac{1}{R_{\text{out}}} \right) + \frac{n_g}{R_{\text{in}}} \left(\frac{\tau_1}{n_{11}} - \frac{\tau_2}{n_{12}} \right) \right|. \quad (11) \end{aligned}$$

当 $\arcsin \left(\frac{n_{11} R_{\text{in}}}{n_g R_{\text{out}}} \right) < l < \arcsin \left(\frac{n_{q1} R_{\text{in}}}{n_g R_{\text{out}}} \right)$ 时, 入射光线在管道内壁发生全反射, 两点间距离 $\Delta\sigma$ 为

$$\Delta\sigma = \frac{2l(\tau_1 - \tau_2)}{R_{\text{out}}} + 2n_g l \left(\frac{1}{R_{\text{in}}} + \frac{1}{R_{\text{out}}} \right) (\tau_1 n_{q1} - \tau_2 n_{q2}). \quad (12)$$

当 $\arcsin \left(\frac{n_{q1} R_{\text{in}}}{n_g R_{\text{out}}} \right) \leq l \leq R_{\text{out}}$ 时, 入射光线在管道内经两次折射到达接收平面, 两点间距离 $\Delta\sigma$ 为

$$\Delta\sigma = \frac{2l}{R_{\text{out}}} |\tau_1 - \tau_2 - n_g (\tau_1 n_{q1} - \tau_2 n_{q2})|. \quad (13)$$

以上计算过程仅针对同一位置发出的包含两个波长光线的追迹, 如果要计算光检测平面上双波长光强分布, 至少要同时计算并记录上百万条入射光线的传播路径。对于特定波长的光, 光检测平面上的光强分布可以看做是由光入射到管道中产生的反射、折射这两部分叠加而成。复振幅函数可以描述光在空间中的光强分布。假设光线入射角为 θ , 则对应光检测平面上的复振幅函数可表示为

$$S(\theta) = S_{\text{reflect}}(\theta) + \sum_p S_{\text{refract},p}(\theta), \quad (14)$$

式中: $S(\theta)$ 为复振幅函数, θ 为入射角, $S_{\text{reflect}}(\theta)$ 为反射部分的复振幅函数, $S_{\text{refract},p}(\theta)$ 为折射部分的复振幅函数。 $p=0$ 时, $S_{\text{refract},0}(\theta)$ 表示反射光的复振幅函数; $p \geq 1$ 时, $S_{\text{refract},p}(\theta)$ 表示折射进入管道内经过 $p-1$ 次内表面反射后出射光线的复振幅函数。

根据式 (11)~式 (13) 可以推论, 由于介质对不同波长的光折射率不同, 折射率与入射光的波长呈负相关, 波长值相差越大折射率相差越大。同一位置发出的两个不同波长的光在经过两相流管道之后, 到达光检测平面上的不同位置两点间的距离越大。若对数以万计的光线进行追迹, 结合式 (14), 光线相互叠加, 最终在光检测平面上两个波长的光形成的光强分布也呈现出明显的不同。较为理想的是选用两个波长值相差较大的光, 考虑到介质对红外波长可能有选择吸收, 出现反常色散, 而紫外波长具有一定的辐射。因此, 选用一个红光和一个紫光是较为折中的方案, 再结合市场现有双波长光源的调研, 最终选定了波长分别为 635 nm 和 445 nm 的双波长激光光源。

当管道截面内有气相存在时, 照射到气相位置的光线在气液分界面处发生折射, 大量的光线偏离原传播方向被折射到光检测平面之外的空间。利用光学仿真软件 Trace Pro 模拟光线经过内部半径为 3 mm、壁厚为 1 mm 的管道截面, 且管道截面中包含一个半径为 1 mm、中心位置位于 (0.5, 0.5) 的气泡。光线追迹结果如图 3 所示, 由于折射率的变化, 光线在边界处被反射或偏转, 部分光线在第一次入射到气泡时被完全反射, 部分光线通过两次折射穿透气泡, 光线被分散到测量平面之外, 造成了光检测平面上光强分布出现缺失。并且由于气液分界面对双波长的折射能力不同, 同一相分布情况下两单波长光强分布也有区别, 显然研究两单波长光强分布之间的关系与变化规律, 可以得到更多关于相分布的信息。

2.3 双波长特征参数的提取

为探究光强分布与相分布参数之间的关系, 本文借助光学仿真软件 Trace Pro, 模拟不同气泡相分布参数下, 追迹光源发出的光线经管道和气泡折射后, 得到接收平面处的光强分布曲线。将均质模型引入气泡流^[12,16], 假设气泡尺寸在任何位置都是不变的, 圆形竖直上升小通道中的气泡流可近似为一个单元, 由一个在竖直方向上被拉伸、水平截面为圆形的气泡和包围气泡的液膜组成。

图 4 为不同相分布参数条件下, 水平截面相分布

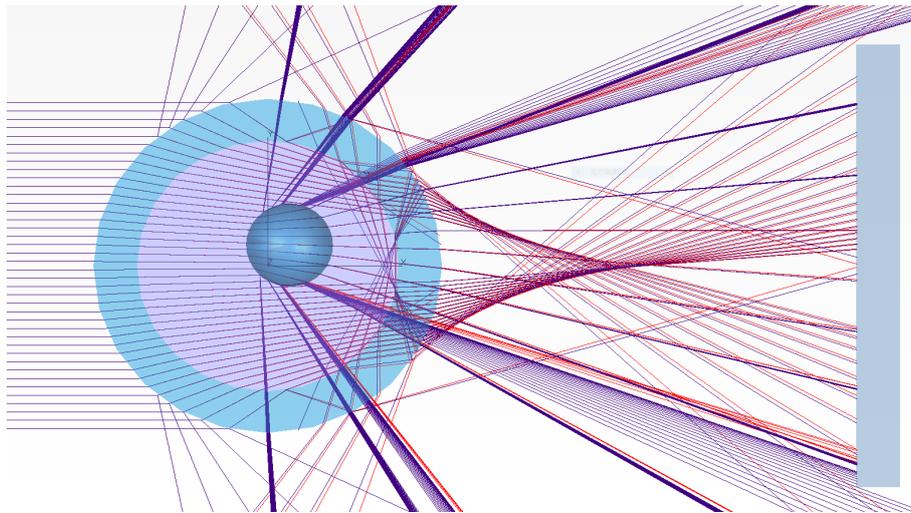


图 3 管道截面中含有气泡时的光线追迹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ray tracing when there are bubbles in the pipe section

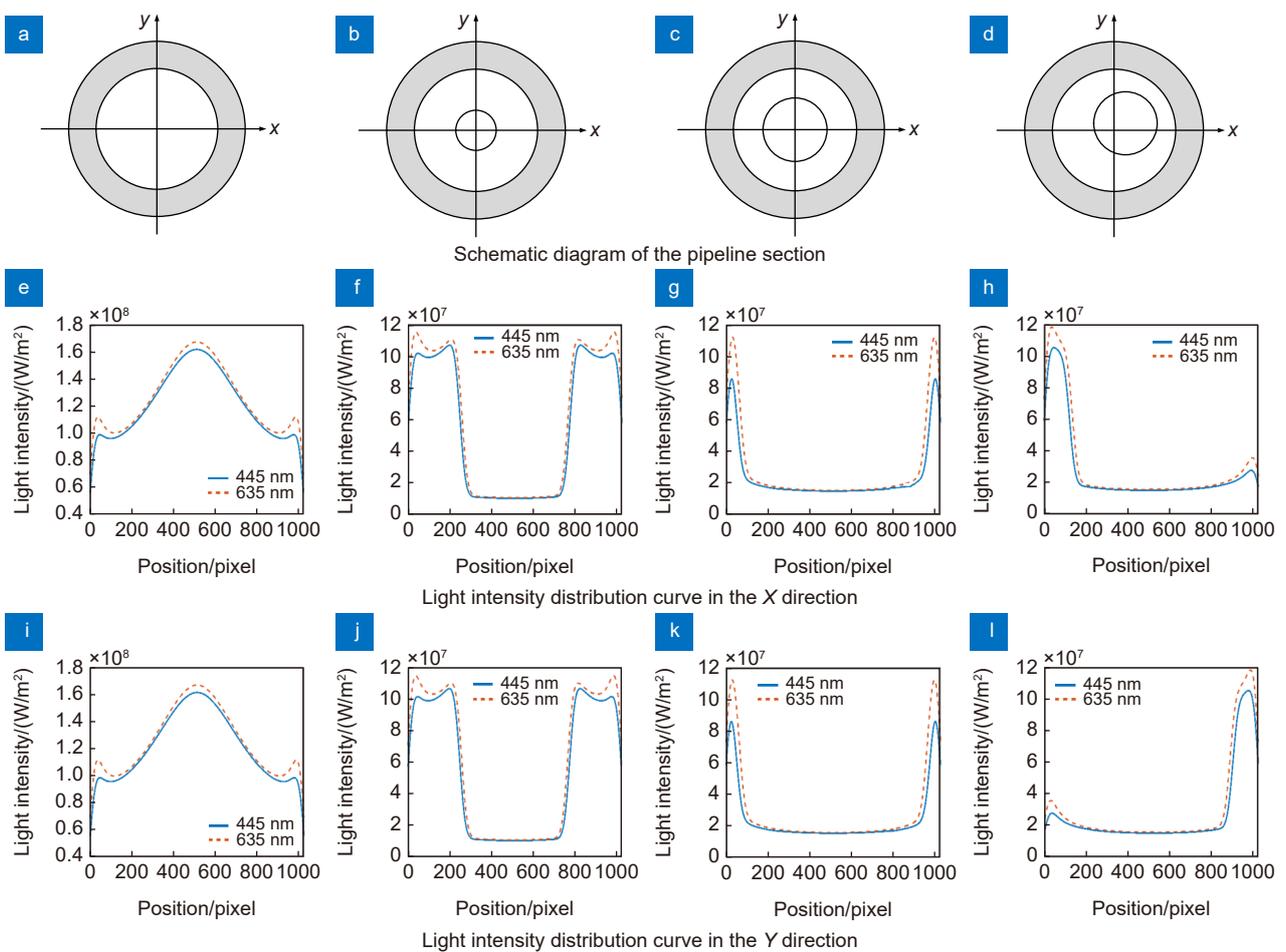


图 4 气泡相分布 (a~d) 参数不同情况光强分布 (e~l) 对比图。

(a) 全液相; (b) (0,0,1); (c) (0,0,1.5); (d) (0.2,0.2,1.5)

Fig. 4 Comparison of light intensity distributions (e~l) under different bubble phase distribution parameters (a~d).

(a) All water; (b) (0,0,1); (c) (0,0,1.5); (d) (0.2,0.2,1.5)

示意图以及借助 Trace Pro 软件计算得到的相应光强分布。图 4 中提及的气泡相分布参数依次为气泡中心位置 x 坐标、 y 坐标、半径 r 。相应对比图 4(a)、4(e)、4(i) 与图 4(b)、4(f)、4(j) 可以发现, 管道中有气泡时, 接收平面上的光强分布曲线会出现缺失, 由于管道中气液两相流对不同波长的光折射率不同, 两波长的光强分布曲线存在差异, 光强分布曲线缺失部分两侧存在一定宽度的双波长间隔。相应对比图 4(b)、4(f)、4(j) 与图 4(c)、4(g)、4(k) 可以发现, 管道中气泡尺寸不同时, 接收平面上的光强分布曲线缺失部分的长度不同、双波长宽度不同, 气泡尺寸越大, 光强分布曲线缺失部分长度越长、双波长宽度越宽。相应对比图 4(c)、4(g)、4(k) 与图 4(d)、4(h)、4(l) 可以发现, 当气泡大小不变, 仅有气泡中心位置改变时, X 、 Y 方向的光强分布曲线的缺失部分会随着坐标的改变而产生移动。相同大小的气泡位于不同位置时, X 、 Y 方向的光强分布曲线的缺失部分长度、缺失部分偏移量、双波长宽度会随气泡位置变化而变化。可以得出关于气液两相流光强分布的特点:

1) 从双波长的光强分布曲线中可以看出: 不同半径的气泡在不同位置时, 检测平面上的多波长光强分布曲线是有区别的。管道中半径相同的气泡, 其中心位置 y 坐标相同, x 坐标不同时, 检测平面上的 x 、 y 方向光强分布曲线缺失部分长度、缺失部分偏移量、双波长间隔均有差异。所以可以通过 x 、 y 方向光强分布曲线的特征得到管道中气泡的主要参数: 气泡的中心位置、半径。

2) 不同尺寸的气泡中心位于不同位置时, 光强分布曲线展示出的缺失部分长度、缺失部分偏移量、双波长宽度的特征, 是相对稳定的。

利用几何光学原理, 分析双波长散射可以得出以下结论: 全液相的管道对不同波长的光折射能力不同, 相应的光检测平面上各波长的光强分布也有不同; 当管道截面存在气泡时, 大量经过气泡的光线被折射到空间其他位置, 致使光强分布出现缺失, 缺失部分的位置、长度会受到气泡的位置、尺寸的影响; 而且同一相分布情况下两单波长光强分布也有区别, 因此研究两单波长光强分布之间的关系与变化规律, 相较于单波长方法, 可以获得更准确的相分布信息。

根据仿真得到的光强分布与气泡参数之间的关系, 结合几何光学原理, 可以提取相应的特征。记 ΔL_1 为光强分布缺失部分中心偏移, ΔL_2 为彩虹宽度, ΔL_3

为光强分布缺失长度, ΔL 为钟型光强分布长度。

为了消除量纲的影响, 将光强分布特征与相分布参数进一步转化为无量纲量, 即分别采用 ΔL_1 、 ΔL_2 、 ΔL_3 与 ΔL 的比值作为所研究的光强分布特征, 分别记作 $\overline{\Delta L}_1$ 、 $\overline{\Delta L}_2$ 、 $\overline{\Delta L}_3$; 截面内气泡中心坐标 (x, y) , 半径为 r , 管道内径 R_m 。另外, 分别采用相分布参数与管道内半径 R_m 的比值作为所研究的相分布参数, 记作 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{r})$ 。

$$\bar{x} = \frac{x}{R_i}, \bar{y} = \frac{y}{R_m}, \bar{r} = \frac{r}{R_m}. \quad (15)$$

光检测平面上的光强分布特征 $\overline{\Delta L}_1$ 、 $\overline{\Delta L}_2$ 、 $\overline{\Delta L}_3$ 与相分布参数 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{r})$ 有关, 并且相分布每个参数对光强分布特征的影响不同, 此处分别用 f_1 、 f_2 、 f_3 表示:

$$\begin{cases} \overline{\Delta L}_1 = f_1(\bar{x}, \bar{y}, \bar{r}) \\ \overline{\Delta L}_2 = f_2(\bar{x}, \bar{y}, \bar{r}) \\ \overline{\Delta L}_3 = f_3(\bar{x}, \bar{y}, \bar{r}) \end{cases}. \quad (16)$$

在双波长光强分布特征参数 $\overline{\Delta L}_1$ 、 $\overline{\Delta L}_2$ 、 $\overline{\Delta L}_3$ 提取基础上, 还需要进行相分布参数 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{r})$ 辨识方法的研究, 以达到相分布参数测量的目的。本文借助 BP 神经网络来研究气液两相流相分布每个参数和光强分布特征的关系, 即求解 f_1 、 f_2 、 f_3 。BP 神经网络是一种多层次的神经网络, 主要特点是利用误差反向学习来不断调整各层次的权值, 其中包含了大量的非线性映射关系, 有强大的拟合能力, 可以逼近任何复杂的函数, 对数据的拟合能力是相当强大的。整体思路如图 5 所示。本文中, BP 神经网络隐含层与输出层的传递函数均选择双曲正切函数, 增加神经网络的非线性, 其表达式如式 (17) 所示。网络的初始化参数设置: 训练次数为 500, 学习率为 0.01, 隐含层节点数为 20。

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1. \quad (17)$$

3 实验与结果讨论

3.1 仿真数据分析

在 Trace Pro 软件中, 模拟双波长光源经过外侧半径为 4 mm、内侧半径为 3 mm 管道, 管道中含有不同尺寸、中心位于管道截面各位置的气泡时, 得到光检测平面上双波长光强分布数据。以 X 方向上获得双波长分布数据为例, 先对单个波长进行归一化, 将包含气泡参数信息的光强分布曲线与管道中纯液相时的光强分布曲线相比, 得到归一化后的光强分布。然

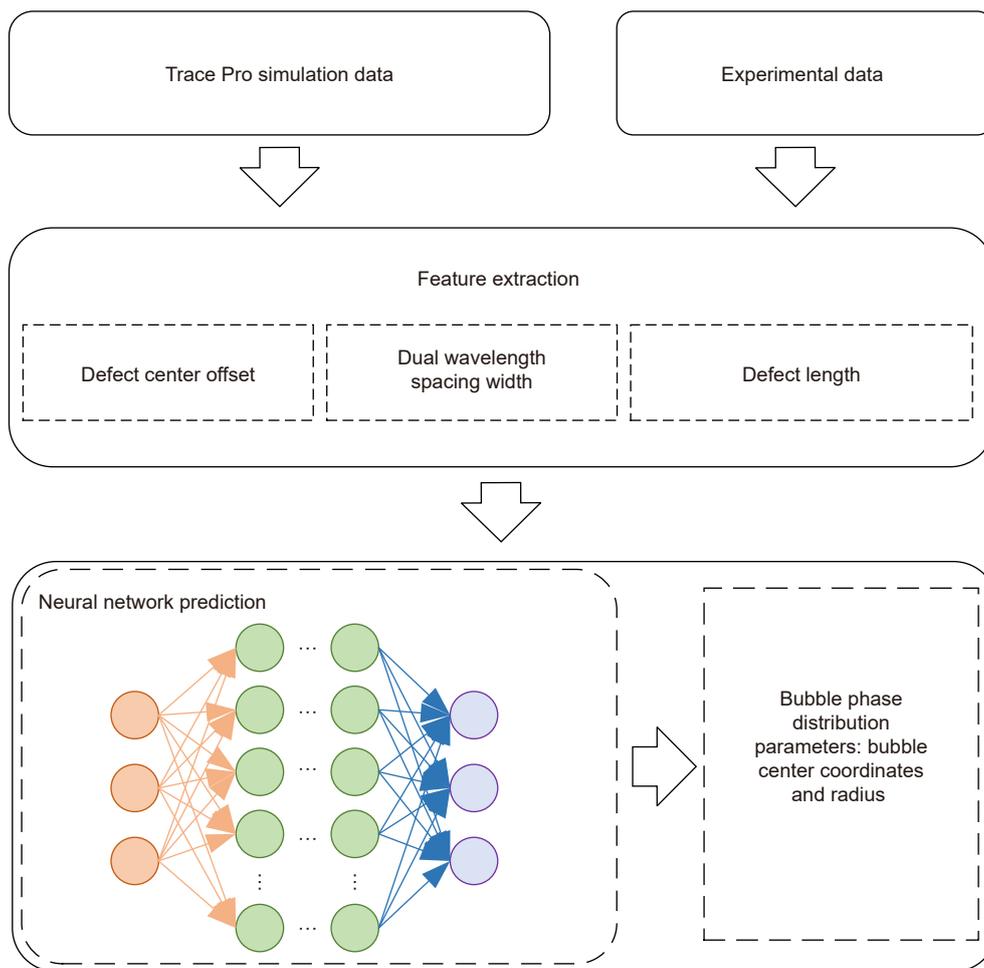


图 5 参数识别方法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the parameter identification method

后利用 MATLAB 提取上文提到的三类双波长特征参数: 光强分布缺失部分中心偏移 ΔL_1 , 彩虹宽度 ΔL_2 , 光强分布缺失长度 ΔL_3 。用同样的方式处理 Y 方向的光强分布。最终得到包含气泡相分布参数的三类双波长特征参数, X 、 Y 方向上共 12 个特征值。

用上述方法对用 Trace Pro 模拟得到的 22778 组不同尺寸气泡在管道的不同位置时对应的光强分布数据进行处理, 将提取出的三类双波长特征参数值和对应的气泡相分布参数值输入到神经网络中, 作为数据库。为了检验双波长方法的有效性, 从数据库中选取 90% 作为训练集, 对神经网络进行训练。利用训练好的神经网络, 对剩余 10% 测试集进行相分布参数预测。为了验证双波长方法的优越性, 将已有文献^[15]中的单波长参数预测方法进行复现, 然后将两种方法进行对比。单波长方法是从 X 、 Y 方向上的光强分布中提取光强缺失部分长度和偏移量两类特征参数。同

样从仿真得到的数据库选取 90% 作为训练集, 对剩余 10% 测试集进行相分布参数预测。

在使用单波长和双波长方法对相分布参数进行预测时, 可以得到实际数据和预测数据之间的差异, 如图 6 所示。图 6(a)、6(b) 中横坐标为相分布参数真实值, 纵坐标为预测值, 当点位于实线上或越接近实线时, 表明预测值近似真实值, 虚线代表 $\pm 5\%$ 的误差限, 当点在两虚线围成的区域时, 认为预测效果较好, 越接近实线预测结果越准确。图 6(a) 为单波长方法所得实际数据和预测数据之间的差异图, 图 6(b) 为双波长方法所得实际数据和预测数据之间的差异图。通过对比可以发现, 双波长方法得到的点更接近于实线。双波长方法得到的参数值大部分都在 $\pm 5\%$ 的误差限内, 可以清楚地发现实际数据和预测数据之间的一致性, 即双波长方法适用于气泡相分布参数的测量。

本文用相分布参数平均绝对偏差和相分布参数误

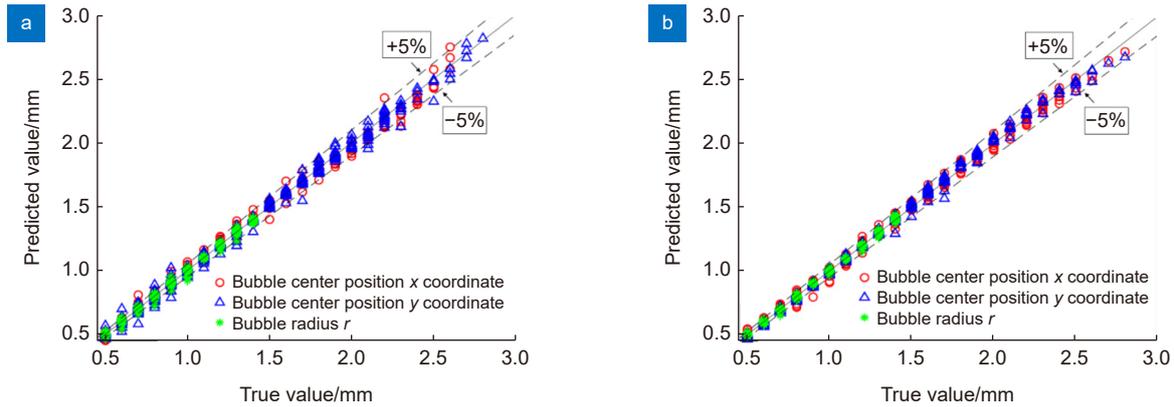


图 6 预测结果比较。

(a) 单波长; (b) 双波长

Fig. 6 Comparison of prediction results.

(a) Single-wavelength; (b) Dual-wavelength

差在±5% 误差范围内的概率 γ_5 作为评价指标。平均绝对误差定义如下:

$$\varepsilon = \sum_N \frac{|\alpha_{\text{exp}} - \alpha_{\text{est}}|}{\alpha_{\text{est}} N}, \quad (18)$$

式中: α_{exp} 为实验所得的相分布参数测量值, α_{est} 为相分布参数真实值。

在仿真数据验证阶段, 将通过 BP 神经网络输出的相分布参数预测值作为测量值 α_{exp} , 仿真时的相分布参数作为真实值 α_{est} 。

对相应数据点进行统计, 得到单波长方法和双波长方法预测气泡中心 x 坐标、 y 坐标、半径 r 的平均绝对误差 ε 、均方误差 σ 、±5% 误差范围内概率 γ_5 进行计算, 结果如表 1 所示。通过对比可以发现双波长方法得到的相分布参数的平均绝对误差 ε 、均方误差 σ 均小于单波长方法所得。从计算时间角度考量, 单波长方法计算用时近似为 12.57 s, 双波长方法用时近似为 22.94 s。虽然双波长方法处理速度较慢, 但是双波长方法的低误差表明了该方法的良好性能, 即本文

提出的双波长方法相比单波长方法精确度更高, 更适用于气泡流的测量。

3.2 实验过程

小通道竖直上升流实验系统如图 7 所示。实验测试段为石英玻璃制成的通道。实验通道尺寸: 内侧半径为 3 mm、壁厚为 1 mm、长度 300 mm。实验是在大气压力和常温下进行的。实验过程中, 先固定液体流量, 逐渐增加气体流量, 气体在通道底部由注射器注入管道内部, 在管道中形成气泡。实验中用到的光源是 Wavespectrum 的型号为 Triplex Pigtailed White Laser System 的三基色激光器, 实验中使用的是波长为 445 nm 和 635 nm 的两通道, 高速 CMOS 传感器是 FLIR 的 BFS-U3-51S5C-C, 有效像素为 2448×2048, 像元尺寸为 3.45 μm ×3.45 μm , 最大帧频达到 200 f/s。为了减小入口效应, 测量截面距离管道底部约 120 mm。

3.3 管道中气泡相分布参数测量

CMOS 传感器记录的是双波长光强叠加之后的图像, 为了研究双波长光强分布之间的关系, 先利用算

表 1 单波长和双波长预测结果准确率对比

Table 1 Comparison of accuracy of single-wavelength and dual-wavelength prediction results

	Single wavelength			Dual-wavelength		
	Mean absolute error ε /mm	Mean square error σ /mm	Probability within $\pm 5\%$ error $\gamma_5/\%$	Mean absolute error ε /mm	Mean square error σ /mm	Probability within $\pm 5\%$ error $\gamma_5/\%$
Bubble center x coordinate	0.0287	0.0017	0.7556	0.0186	0.0011	0.8895
Bubble center y coordinate	0.0276	0.0019	0.7950	0.0179	0.0009	0.8611
Bubble size r	0.0100	0.0004	0.8425	0.0071	0.0003	0.8989



图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental setup

法从记录的单幅双波长光强分布图中提取出两幅单波长光强分布图。提取出两单波长光强分布曲线之后,按照仿真数据的处理方法,对其曲线分布特征进行提取,包括缺失部分长度、缺失部分偏移量、双波长间隔宽度三类。值得注意的是,由于实际实验过程中,CMOS 采集到的信号具有噪声,可能会对后续数据处理带来较大的负面影响,需要进行平滑。因此在进行特征提取时,先将两单波长光强分布曲线分别进行归一化,再进行平滑。然后分别计算出 445 nm、635 nm 归一化光强分布曲线的缺失部分长度、缺失部分偏移量,同时算得双波长间隔宽度。

为了证明双波长检测技术对实际气液两相流问题的适用性,在一个停滞液柱上进行了实验。气体通过针孔注射器从底部注入。数据以 199 f/s 的速度记录了 25 s。将从实验采集到的信号中提取出的三类特征参数:缺失部分长度、缺失部分偏移量、双波长间隔宽度,共计 12 个特征值输入到由仿真 22778 组数据训练好的神经网络中,得到相应的气泡相分布参数。

图 8 为实验中 50 帧内气泡流的三维可视化,三坐标轴分别表示测量平面 X 、 Y 方向和高速 CMOS 帧序数,根据得到的气泡相分布参数,生成不同半径气泡在管道中的分布。从实验采集的图像中,对双波长检测方法测量得的气泡尺寸分布数据进行统计。气泡均是通过向停滞液柱里注射空气生成的,气泡尺寸具有一定的随机性。对多个气泡尺寸进行统计,应当成正态分布。如图 9 所示,显示了实验测量的气泡尺寸分布,近似为正态分布,验证了这一规律。

4 结论

本文提出了一种使用双波长散射法测量小通道气泡流相分布参数的技术,基于双波长散射理论,结合神经网络进行参数预测,针对竖直接管气泡流分布特性进行了试验研究,具体结论如下:

1) 理论上建立了基于双波长折射的气液两相流相分布参数测量模型,用 Trace Pro 对光路进行仿真,追迹双波长光束的折射轨迹,并研究了相应双波长光强分布曲线的关键特征,提取出三类特征参数:缺失部分长度、缺失部分偏移量、双波长间隔长度。

2) 建立神经网络模型,用仿真得到的数据集对神经网络进行训练,并进行了相分布参数模拟实验测量研究,结果证明预测结果和仿真数据吻合良好,相对误差在 $\pm 5\%$ 范围内。将多波长和单波长方法进行了对比,结果表明双波长方法精确度更高,更适用于气液两相流的测量。

3) 搭建了双波长气液两相流测量系统,通过向停滞液柱中输入气体得到了气泡流,进行了实验研究,并统计了气泡尺寸分布曲线。

未来发展的一个重要方向将是改进重建算法。总的来说,双波长散射方法提供了良好的结果,并为气泡相分布参数测量提供了一种替代方法。此外,该技术有助于测量和在线监测气泡流参数。结合快速的数据采集,可为气液两相流提供复杂情况下的相分布参数测量,例如低气体分数的泡状流或泰勒流。类似地,还可以应用于稀释颗粒流或具有一定折射率差的液液两相流。

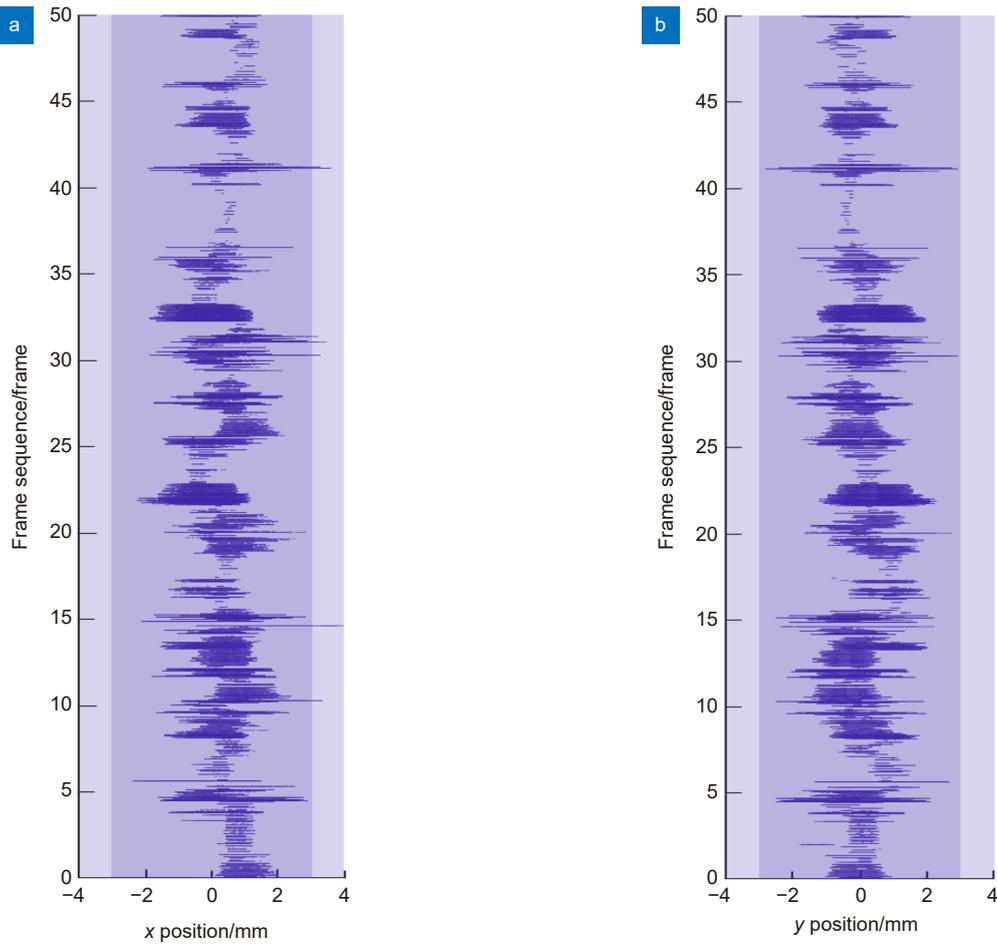


图 8 气泡流。

(a) x 方向; (b) y 方向

Fig. 8 Bubble flow.

(a) x position; (b) y position

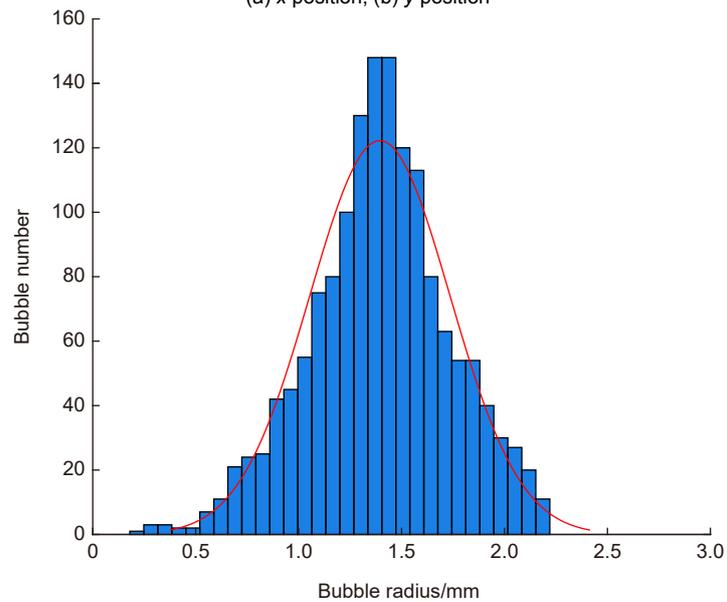


图 9 气泡尺寸分布

Fig. 9 Bubble radius distribution

参考文献

- [1] Roshani M, Phan G T T, Ali P J M, et al. Evaluation of flow pattern recognition and void fraction measurement in two-phase flow independent of oil pipeline's scale layer thickness[J]. *Alex Eng J*, 2021, **60**(1): 1955–1966.
- [2] Ciriminna R, Pagliaro M, Luque R. Heterogeneous catalysis under flow for the 21st century fine chemical industry[J]. *Green Energy Environ*, 2021, **6**(2): 161–166.
- [3] Mir S, Akbari O A, Toghraie D, et al. A comprehensive study of two-phase flow and heat transfer of water/Ag nanofluid in an elliptical curved minichannel[J]. *Chin J Chem Eng*, 2020, **28**(2): 383–402.
- [4] Xue T, Ruan W P, Zhang S J. 3D reconstruction and optimization of dense bubbly flow based on laser scanning[J]. *Opt Precis Eng*, 2017, **25**(3): 555–561.
薛婷, 阮维鹏, 张少杰. 基于激光扫描的密集泡状流三维重建与优化[J]. *光学精密工程*, 2017, **25**(3): 555–561.
- [5] Hohermuth B, Kramer M, Felder S, et al. Velocity bias in intrusive gas-liquid flow measurements[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 4123.
- [6] Ma Y, Muilwijk C, Yan Y J, et al. Measurement of bubble flow frequency in chemical processes using an optical fiber sensor[C]//2018 IEEE SENSORS, 2018: 1–4.
- [7] Onofri F. Critical angle refractometry for simultaneous measurement of particles in flow: size and relative refractive index[J]. *Part Part Syst Charact*, 1999, **16**(3): 119–127.
- [8] Jagannathan N, Chidambaram B, Seshadri A, et al. Characterization of gas-liquid two-phase flows using laser patterns[J]. *Can J Chem Eng*, 2015, **93**(9): 1678–1685.
- [9] Arunaganesan S, Adhavan J, Arunkumar S, et al. Laser-based measurement of gas-liquid two-phase flows in micro and mini channels using multiple photodiode arrangement[J]. *Chem Eng Commun*, 2017, **204**(3): 337–347.
- [10] Vendruscolo T P, Fischer R, Martelli C, et al. Two-phase flow measurement based on oblique laser scattering[J]. *Proc SPIE*, 2015, **9655**: 965541.
- [11] Revellin R, Dupont V, Ursenbacher T, et al. Characterization of diabatic two-phase flows in microchannels: flow parameter results for R-134a in a 0.5 mm channel[J]. *Int J Multiphase Flow*, 2006, **32**(7): 755–774.
- [12] Long J, Ji H F, Wang B L, et al. Online parameters measurement of Taylor flow in small channels using optical technique[C]//2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2012: 2322–2325.
- [13] Duan R X, Yu D, Wu H H, et al. Optical method for flow patterns discrimination, slug and pig detection in horizontal gas liquid pipe[J]. *Flow Meas Instrum*, 2013, **32**: 96–102.
- [14] Mithran N, Muniyandi V. IR transceiver irradiation characteristics on bubble/slug flow regimes in conventional and minichannels[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2019, **68**(1): 240–249.
- [15] Dai Z T. Study on optical measurement of phase distribution for bubble flow and slug flow in small channels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
戴振韬. 小通道泡状流和段塞流相分布光学检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [16] Schleicher E, Da Silva M J, Thiele S, et al. Design of an optical tomograph for the investigation of single-and two-phase pipe flows[J]. *Meas Sci Technol*, 2008, **19**(9): 094006.

作者简介



曹鸣 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为光学检测。

E-mail: P1902085201@cjlu.edu.cn

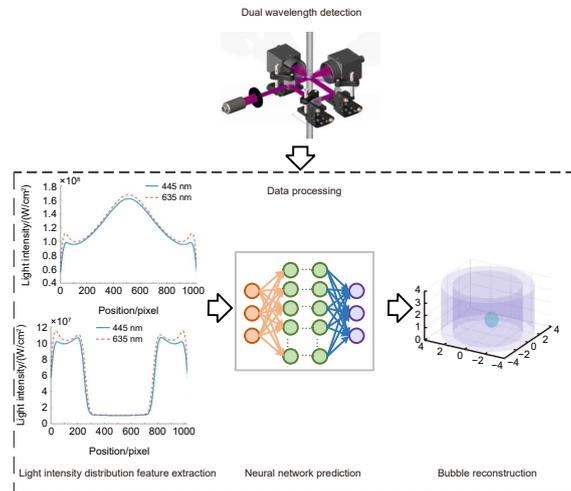


【通信作者】孔明 (1978-), 男, 博士, 教授, 分别于 2000 年和 2005 年在东南大学获得仪器科学与工程学士学位和动力系仪器科学与工程专业博士学位。现为中国计量大学计量测试工程学院的教授。研究方向为光电检测、精密仪器。

E-mail: mkong@cjlu.edu.cn

Research on dual-wavelength measurement model for bubble flow detection

Cao Ming¹, Kong Ming^{1*}, Liu Ruolin¹, Shan Liang²



Dual wavelength measurement model for bubble flow

Overview: Gas-liquid two-phase flow is widely used in the industrial field, and one of the typical flow patterns is bubble flow. Therefore, measuring the bubble flow phase distribution parameters is of great significance for studying the characteristics of two-phase flow and industrial production. Optical technology is widely used in small-channel gas-liquid two-phase flow detection, and it can be divided into invasive and non-invasive. Invasive optical detection methods will affect the characteristics of gas-liquid two-phase flow to a certain extent, so non-invasive measurement is an important research direction of optical technology. Some scholars have proposed a method of measuring phase distribution based on the characteristics of single-wavelength light intensity distribution, but the established model is only suitable for the horizontal pipeline, and the resulting error is large. To solve this problem, a dual-wavelength measurement model of bubble flow phase distribution parameters is proposed in this paper, to obtain more optical signal characteristics of laser passing through bubble flow in small channels and reduce the measurement error of phase distribution parameters. The phase distribution and parameter distribution of vertically rising gas-liquid two-phase bubble flow in a small channel are measured and studied by the dual-wavelength transmission method. The light intensity distribution of dual-wavelength laser passing through gas-liquid two-phase flow is calculated based on the principle of the geometric optics, and then the characteristic quantity of dual-wavelength light intensity distribution is extracted. An identification model of bubble flow phase distribution parameters based on the dual-wavelength measurement theory is established. Trace Pro is used to trace the refraction trajectories of 445 nm and 635 nm laser passing through the pipe section containing bubbles with different phase distribution parameters, and the corresponding light intensity distribution curves are obtained. The key features of the corresponding double wavelength light intensity distribution curves are studied, and three kinds of characteristic parameters are extracted: missing part length, missing part offset, and double wavelength interval length. The neural network is trained by using the simulated feature data set, and the trained neural network is used to predict the phase distribution parameters of bubble flow in the experiment. The simulation results show that the prediction results are in good agreement with the simulation data, and the relative error is within $\pm 5\%$. The average absolute errors of the established model for the prediction of bubble center position and radius are 0.018 mm and 0.007 mm respectively. The results show that the dual-wavelength method has higher accuracy and is more suitable for the measurement of gas-liquid two-phase flow. Finally, a dual-wavelength gas-liquid two-phase flow measurement system is built. The bubble flow in the small vertical rising channel with the small gas flow is measured by using a dual-wavelength laser light source. The bubble flow is obtained by injecting gas into the stagnant liquid column. The experimental research is carried out, and the bubble sizes distribution curve is counted. In general, the dual-wavelength measurement method provides good results and is an alternative method for the measurement of bubble phase distribution parameters. This technology is helpful to measure and monitor bubble flow parameters online.

Cao M, Kong M, Liu R L, et al. Research on dual-wavelength measurement model for bubble flow detection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(6): 210437; DOI: 10.12086/oe.2022.210437

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52076200, 51874264)

¹College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; ²College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

* E-mail: mkong@cju.edu.cn