第33卷第8期 2022年8月

DOI:10.16136/j.joel.2022.08.0773

## 基于哈特曼原理的两相流气相参数研究

刘若琳,孔 明\*,曹 鸣,王道档,单 良

(中国计量大学 计量测试工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要:本文提出哈特曼光线追踪的方法来测量气液两相流的气相参数,并进行了理论和实验研究。首先,采用哈特曼模板获得阵列光束,通过模拟追踪光线在气液两相流中的传播过程,研究出射光线与两相流中气泡尺寸、位置等参数之间的关系,其次,建立 BP 神经网络模型来实现气泡参数的准确反演,仿真结果表明,气泡定位相对误差在 7%以内,气泡粒径的相对误差在±4%以内。在此基础上搭建了实验系统,以已知大小的透明颗粒在垂直管道沉降模拟单个气相通过管道的过程,进行了实验研究,结果表明气泡粒径的相对误差可控制在±6%以内。 关键词:哈特曼原理;两相流; BP 神经网络;气相参数

中图分类号:TN29 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2022)08-0840-11

# Research on gas phase parameters of two-phase flow based on Hartmann's principle

LIU Ruolin, KONG Ming<sup>\*</sup>, CAO Ming, WANG Daodang, SHAN Liang (College of Metrology and Testing Engineering, Chinese Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: This paper proposes the Hartmann ray tracing method to measure the gas-phase parameters of the gas-liquid two-phase flow, and conducts theoretical and experimental research. First, the Hartmann template is used to obtain the array beam, and the propagation process of the light in the gas-liquid two-phase flow is simulated and traced to study the relationship between the emitted light and the bubble size and position in the two-phase flow. Second, the BP neural network model is established to achieve accurate inversion of bubble parameters. The simulation results show that the relative error of bubble positioning is within 7%, and the relative error of bubble size is within  $\pm 4\%$ . On this basis, an experimental system is built to simulate the process of a single gas phase passing through the pipeline with transparent particles of known size settling in a vertical pipeline. Experimental research is carried out. The results show that the relative error of bubble size can be controlled within  $\pm 6\%$ .

Key words: Hartmann's principle; two-phase flow; BP neural network; gas phase parameters

## 1 引 言

气液两相流广泛存在于石油、化工、核工业等 工业领域<sup>[1]</sup>,如换热器中的气泡分布及上升速度 决定着有效传质面积和热量交换;曝气池中通过 调节气泡尺寸可改善曝气效率;根据舰船尾流中 的气泡大小、速度分布可实现舰船跟踪等<sup>[2]</sup>。在 气液两相流系统中,气相作为气液两相流中的分 散相,是连接宏观尺度与微观尺度的桥梁和纽带, 对整个体系的动量、质量和热量传递具有重要影响<sup>[1]</sup>。气相特征主要包含气相粒径、气相体积、气相中心位置等,气相的体积大小可以准确反映气 液两相流中气相的体积含气率<sup>[3]</sup>;气相中心位置 可以对气相作准确定位,与气相的运动特征分析 关系密切<sup>[3]</sup>。因此,在气液两相流的流动过程中 获取气相参数具有重要的应用价值,对后续探索 气相的运动状况具有重要意义。

目前较为主流的非侵入式测量气相参数的方

 <sup>\*</sup> E-mail:mkong@cjlu.edu.cn
 收稿日期:2021-12-16 修订日期:2021-12-21
 基金项目:国家自然科学基金(51874264,52076200)资助项目

法有光学测量法和可视化方法。王红一[3]通过高 速摄像拍摄气液两相流中上升气泡的运动过程, 结合数字图像处理技术还原了单个气泡体积并得 到气相体积含气率。薛婷团队[4,5] 对竖直向上气 泡的形态及运动特征提取方法进行研究,提出双 阈值小波去噪方法并对气泡特征区域进行自动识 别;该团队后续建立了基于激光扫描的三维可视 化测量系统来测量密集气液泡状流的流动形态。 潘志成[6]采用高速摄像法和数字图像处理技术开 展了鼓泡塔内多尺度气泡尺寸分布测量研究。LI 等[7,8] 基于激光折射原理,通过光电阵列传感器获 取信号,确定气体速度和横截面几何形状,根据空 间间隔堆积获得 3D 图像;后续他又提出基于新的 光学传感器对气液二相流三维图像重建的新方 法,对段塞流的直径和高度的测量最大相对误差 为8%。方立德等[9]提出一种基于近红外光衰减 的气液两相流相含率检测方法,建立相含率测量 模型,最终保证相对误差在±3.5%以内。 HUANG 等<sup>[10]</sup>提出了一种将荧光成像技术与图 像处理技术相结合的荧光成像方法来测量水平管 窗口内两相流动截面空隙率,并间接地测量体积 空隙率,控制误差范围在14%左右。

上述方法普遍使用单个角度图像处理对两相 流参数进行测量,仍存在由于畸变使得获取的两 相流信息与实际流动情况不完全匹配的问题,本 文针对可视化测量的现有不足,提出了一种哈特 曼光线追踪方法对气液两相流泡状流的气相参数 进行测量,通过模拟精细化阵列化的光束在气液 两相流中的传播过程,进而获得更加精确的光强 有效信息,利用误差反向传播算法(error backpropagation algorithm, BP)神经网络构建光强分布 特征值与气相空间位置、气相粒径尺寸的关系预 测模型;搭建垂直管道气液两相流实验装置,通过 实验研究对两相流内的气相空间位置及粒径尺寸 进行准确测量。相对于常见的高速摄像可视化方 法,本文提出的测量方法可以获得较为真实的气 相参数,更贴近实际。在实际应用中,准确测定气 液两相流中的气相参数对于石油开采运输系统, 核反应堆的换热器、冷凝塔,航天工业的推进装置 等具有重要意义。

## 2 气泡关键特征检测原理

哈特曼原理最早由德国科学家 Hartmann 于 1900年提出,通常在被测物体前放置一个具有周期 小孔径结构的模板,称为哈特曼光阑<sup>[11,12]</sup>。哈特曼 光阑是以矩阵形式排布的小孔光阑<sup>[13]</sup>,针对哈特曼 测量法原理,哈特曼光阑选择光线并决定测量分辨 率<sup>[14]</sup>。基于哈特曼光阑的测量原理如图 1 所示,光 源产生的平行光扩束后穿过哈特曼光阑,被分割成 入射位置不同的阵列光束,经过两相流系统时发生 多次折射,出射光线大部分能够到达检测边界,最终 在接收平面内形成一个光斑点阵图,可以获得光强 分布数据。每一束光都可等效为通过光斑质心的光 线<sup>[15]</sup>,接收平面上的光斑与哈特曼光阑上的小孔一 一对应。



在几何光学理论中,光线传播路径由折射、反射 定律确定,当光线穿过纯净介质时沿直线传播,穿过 不同介质的界面时光路则会发生折射和反射。在气 相尺寸远大于入射光波长的情况下,通常只考虑直 接照射光线、一次反射光线和两次折射光线等对结 果影响较大的光线。当光线以某个角度入射至管道 时,已知各个介质的折射率,由斯涅尔定律可以确定 光线在其内部继续传播的角度与方向,由此追迹光 路,获得光线最终到达检测界面上的具体位置。当 光线进入两相流系统,存在的相界面使得光线发生 较大角度的折射,原本汇聚的光线变得发散,导致在 光检测界面发生了光线的缺失,光强缺失部分的位 置和大小与两相流内气相位置和大小存在一定 关系。

图 2 主要模拟了某平面内单条光线经两次折射 后出射的路径走向,其中(a)图表示在单相流管道情 况下的路径走向,(b)图表示在两相流管道情况下的 路径走向。

当激光进入管道外壁时,则有:

$$\sin\theta_1 = \frac{H}{R'},\tag{1}$$

引入斯涅尔定律:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \,, \tag{2}$$

根据正弦定理推导可知:

$$\frac{R}{\sin\theta_2} = \frac{R'}{\sin\alpha},\tag{3}$$

$$\alpha = \pi - \theta_2,$$
(4)
当激光进入管道内壁时,则有:

$$n_2 \sin\theta_3 = n_3 \sin\theta_4 \,, \tag{5}$$

式中, $n_1$ 为空气的折射率, $n_2$ 为管道的折射率, $n_3$ 为 液相折射率, $\theta_1$ 、 $\theta_3$ 为光线入射角, $\theta_2$ 、 $\theta_4$ 为光线出射 角,H为入射光线的相对高度,R'为管道外半径,R为管道内半径。



Fig. 2 Single ray path diagram

将以上公式联立进行计算,得到进入管道内部 激光相对于入射激光的偏折角度:

$$\Delta \theta_1 = \arcsin \frac{n_1 H}{n_3 R} - \arcsin \frac{n_1 H}{n_2 R} - \arcsin \frac{H}{R'} + \arcsin \frac{n_1 H}{n_2 R'}, \qquad (6)$$

同理推导管道内部激光相对于出射激光的偏折 角度:

$$\Delta \theta_2 = \arcsin \frac{n_1 H}{n_3 R} - \arcsin \frac{n_1 H}{n_2 R} - \arcsin \frac{n_3 H}{n_1 R'} + \arcsin \frac{n_3 H}{n_2 R'}, \tag{7}$$

则入射光线与出射光线总的偏折角度等于二者之 和,如式(8)所示:

 $\Delta \theta = \Delta \theta_1 + \Delta \theta_2 = \varphi(n_1, n_2, n_3, H, R, R')$ 。(8) 由此确定了单相流情况下在已知各介质折射率  $n_1$ 、  $n_2$ 、 $n_3$ 和管道的内半径 R 与外半径 R'的值不变的情况下,出射光线与入射光线的偏折角度主要与入射 光线相对管道中心的高度因素有关。

同理推导,当液相中含有单个气相界面时,在已 知各介质折射率 n<sub>1</sub>、n<sub>2</sub>、n<sub>3</sub>和管道的内半径 R 与外半 径 R'的值不变的情况下,气相所在中心位置和大小, 即图中圆心坐标(x,z)和半径 r 将成为出射光线与 入射光线的偏折角度的主要影响因素,如式(9) 所示:

 $\Delta \theta = \varphi(n_1, n_2, n_3, H, R, R', r, x, z).$ (9) 本文除了需要在检测界面获得光线的最终到达 位置,还需要根据光强分布获得光强分布曲线。几 何光学理论中忽略光线的波长可将能量看作沿着光 线传输,依照菲涅尔定律,因不同介质界面的折射和 反射,同样强度的入射光将会出现不同程度的衰减 甚至缺失,由于本文中使用的激光为非偏振光,因此 采用两种偏振状态下的算数平均值作为折射光强与 入射光强的最终光强比。

假设进入气液两相流系统的入射光强为 *I*<sub>i</sub>,出射 光强为 *I*<sub>e</sub>,则二者比值为:

$$\frac{1}{T_{i}} = \tau \cdot T, \qquad (10)$$

式中, *r* 表示由介质各次折射光强的变化因数, 介质 折射的光强比值 *T* 符合菲涅尔方程, 如式(11)—(13)所示:

$$T_{s}(n_{i}, n_{j}, \gamma, \delta) = 1 - \left(\frac{n_{i}\cos\gamma - n_{j}\cos\delta}{n_{i}\cos\gamma + n_{j}\cos\delta}\right)^{2}, \quad (11)$$

$$T_{p}(n_{i}, n_{j}, \gamma, \delta) = 1 - \left(\frac{n_{i}\cos\delta - n_{j}\cos\gamma}{n_{i}\cos\delta + n_{j}\cos\gamma}\right)^{2}, \quad (12)$$
$$T(n_{i}, n_{j}, \gamma, \delta) = \frac{1}{2} \cdot \left(T_{s}(n_{i}, n_{j}, \gamma, \delta) + \frac{1}{2}\right)^{2}, \quad (12)$$

 $T_{\rm p}(n_{\rm i},n_{\rm j},\gamma,\delta)), \qquad (13)$ 

式中,*n<sub>i</sub>*、*n<sub>j</sub>*分别表示入射光和折射光所在介质的折 射率,*y*、*δ*分别表示入射角和折射角,*T<sub>s</sub>*、*T<sub>p</sub>*分别表示 两种偏振态下的光强比。本文中所述的光强即辐照 度,常用来表征电磁辐射入射于曲面时每单位面积 的功率,单位为瓦每平方米(W/m<sup>2</sup>)。

## 3 气相参数测量模型

## 3.1 气相参数的特征值提取

本文利用 TracePro 模拟两相流系统中入射光线 产生的光学现象,并对出射光线在检测界面内所形 成的光强分布与气相参数的关系作进一步分析。假 设管道内同一时刻至多包含一个气泡且两相界面光 滑,如图 3 所示,图(a)以管道正中心为原点建立空间 直角坐标系,管道的外半径为 R',内半径为 R,管道 高度即为光线可通过高度,记作 L;图(b)将管道内部 含有的气相界面具体表述为在高度为 y 的截面内直 径为 d 的一个球体,其球心坐标可以记作(x,z)。

仿真实验系统与实际实验系统相一致,通过设置真实材料的属性,同时追迹上万条光线,最终在管 道两侧的检测边界上得到光强分布图。如图 4、图 5 分别展示了两种不同情况下光线追迹对比图和光强 分布对比图,图(a)为管道内部含有单纯液相的情况 下,图(b)为管道内部含有气液两相的情况下,图中 只展示了垂直入射 X-Y 截面方向的光线,垂直 Y-Z 截面方向的光线与其基本一致。可以看出管道内的 气相界面导致光线发生更大角度的折射,使得检测 界面内气相界面所在位置的光线发生了缺失。综 上,光强的部分缺失与气相界面的存在有直接关系。



(a) Schematic diagram of spatial structure(b) Schematic diagram of plane structure

图 3 仿真参数定义





图 4 垂直入射 X-Y 截面方向的光线追迹对比图 Fig. 4 Ray tracing diagram of perpendicular incidence X-Y section direction

根据垂直 X-Y 截面方向和垂直 Y-Z 截面方向的 光强分布图获取其光强分布矩阵,每个光强分布矩 阵都代表了某采样时刻下气相所在位置的光强分布 情况,针对某一行或某一列是否含有光强缺失部分 即可判断该截面内气相是否存在。为判断气相所在 空间位置,选择对光强分布矩阵进行降维处理,将横 向投影累积数据和纵向投影累积数据作为最终光强 分布曲线进行分析。



图 5 垂直入射 X-Y 截面方向的光强分布对比图 Fig. 5 Light intensity distribution diagram in the direction of vertical incidence X-Y section direction

管道注入水后的整体相当于一个凸透镜,对位 置不同的光束产生的汇聚效果也不相同,因此光强 分布曲线最终呈现为多个大小不等的钟型曲线相连 接的波浪型曲线。如图 6 所示,当管道内部只含有 液相时,空间坐标系内 *X*、*Y*、*Z* 3 个轴向上都会产生 完整的连续钟形曲线,如(a)图、(c)图、(e)图;当管道 内部含有气液两相时,连续钟形曲线会产生缺失,如 (b)图、(d)图、(f)图。

仿真发现 3 个轴向累积光强分布曲线,在气相 直径 d 不变,中心位置(x,y,z)改变的条件下,曲线 缺失部分会跟随气相中心位置改变而发生移动:当 气相的中心位置仅在 X 轴上发生移动时,3 个轴向 的累积光强分布曲线都发生部分缺失,但只有 X 轴 光强分布曲线的缺失会较明显地跟随气泡位置而变 化,其他两个轴向的光强分布曲线变化较为细微,Y 轴与 Z 轴同理;在气相中心位置(x,y,z)不变,直径 d 改变的条件下,3 个轴向的累积光强分布曲线的缺 失宽度都会跟随气泡直径变化而变化。由此得出结 论:气相存在导致累积光强分布曲线产生缺失,气相 参数(x,y,z,d)影响缺失部分的位置和宽度,可以通 过对光强分布曲线缺失部分的特征值提取来反演气 相所在的位置及粒径大小。



图 6 累积光强分布曲线对比图 Fig. 6 Cumulative light intensity distribution curve of single-phase pipeline

根据差影算法,设每个轴向上的累积光强分布 曲线缺失部分的宽度为 *labs*,设每个轴向上的累积光 强分布曲线缺失部分的偏移距离为 *lofs*,将其共同 作为某采样时刻下反演气相参数的特征值,基于空 间坐标系的基础上共提取到 6 个特征值,如图 7 所示,(a)图表示X、Z轴的曲线,(b)图表示Y轴的曲线,含三角形标记的曲线为二者的差值曲线,其宽度即代表 *labs*,其中心偏移距离即代表 *lofs*,做差值处

理不仅可以消除量纲的影响还可以降低噪声。



图 7 特征值的选取 Fig. 7 Selection of eigenvalues

#### 3.2 基于 BP 神经网络的测量模型设计

本文在研究气相参数与光强分布特征值的关系 时,采用 BP 神经网络算法进行学习,进而搭建气相 参数的测量模型。神经网络模型如图 8 所示,采用 3 层网络来描述气液两相流中的气相参数测量模型。



Fig. 8 Diagram of neural network structure

神经网络的输入是由多组位置分布不同、粒径 大小不同的气相所呈现的 6 个光强分布特征值,设 输入层含有 i=6 个神经元;神经网络的输出对应气 相所在位置的空间坐标系的 3 个坐标值和粒径,设 输出层含有 j=4 个神经元。输入层和隐含层之间的 权重值矩阵为 $W_{is}$ , 除含层和输出层之间的权重值矩 阵为 $W_{is}$ , 采用 LM(Levenberg-Marguqrdt)算法作为 训练函数,均方误差(mean-square error, MSE)来评 估网络,根据多次实验设定隐含层神经元个数 k=13。

在气液两相流系统的特定范围内,随机选取 m 个采样时刻下,直径为 d mm、中心位置为(x,y,z)的 气泡作为数据集的参考点,每个参考点对应的值为:  $C_m = (x_m, y_m, z_m, d_m),$  (14)  $F_m = (labs_x_m, lofs_x_m, labs_y_m, lofs_y_m, labs_z_m,$  $lofs_x_m),$  (15)

式中: C<sub>m</sub> 代表第 m 个采样时刻气相的特征参数, (x<sub>m</sub>, y<sub>m</sub>, z<sub>m</sub>)表示第 m 个采样时刻气相中心坐标位 置, d<sub>m</sub> 表示第 m 个采样时刻的气相粒径, F<sub>m</sub> 代表第 m 个采样时刻气相最终提取的光强分布特征量。选 取数据集中 K 个样本作为神经网络的训练集, 余下 的 m-K 个样本作为测试集, 用来测试模型并评估模 型的误差大小。基于 BP 神经网络的气相参数测量 模型算法的原理如图 9 所示。



图 9 基于 BP 神经网络的气相参数测量模型原理图 Fig. 9 Schematic diagram of gas phase parameter measurement model based on BP neural network BP 神经网络训练过程中,输出层不断反向传播 位置误差,通过不断修正各层的权重值和阈值来逼 近实际的位置坐标和直径大小,从而提升预测精度, 最终建立光强分布特征值与气相粒径大小及气相中 心位置的关系测量模型。

## 4 基于哈特曼原理的测量装置系统

气液两相流气相特征的光学检测实验系统如图 10 所示,(a)图为实验光路图,(b)图为实验装置图。 系统由激光器、扩束准直装置、哈特曼光阑、分光棱 镜、反光棱镜、互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS) 传感器及镜 头组共同构成,其中采用 Wave Spectrum 公司的激 光器,波长为635 nm,发光功率为50 mW;采用的哈 特曼光阑具有 14×14 个半径为1 mm 的规则排列圆 孔,其中每个孔的边缘最小间隔为1mm;采用凌云 光型号为 BFS-U3-51S5 的高速 CMOS 面阵传感器, 其感光区域尺寸为6.6mm×8.8mm,有效像素为 2448×2048,单个像元尺寸为 3.45 µm×3.45 µm, 实验过程中可以根据气泡运动速度随时调节 CMOS 的采样频率。本文以颗粒沉降垂直管道来模拟气液 两相流中的气相运动情况,实验装置中测试管道为 垂直放置的透明石英玻璃管道,折射率约为1.46,内 半径为15 mm,壁厚5 mm,高度为400 mm,管道内 部液相为水,折射率为1.33,液相内部存在的单个气 相由直径范围在 8-14 mm 的聚丙烯颗粒圆球模拟, 其折射率与空气相近且密度小于水,沉入水中后可 以重新浮于水面。



(a) Diagram of experimental optical path

(b) Diagram of experimental device

#### 图 10 光学检测实验系统图

Fig. 10 Diagram of optical inspection experiment system

实验过程中,激光器产生直径约 10 mm 的激光

束,经扩束准直后获得直径约为 60 mm 的圆形激光 束,然后由哈特曼光阑选择得到均匀分布且半径为 1 mm 的阵列激光束;阵列激光束经过分光棱镜分为 两个方向互相垂直的激光束,其中一个方向的激光 束可以直接进入气液两相流系统,另一个方向的激 光束则需经由两个反射棱镜再垂直入射到气液两相 流系统,在气液两相流的另外两侧合适位置安装高 速 CMOS 面阵相机以便采集经气液两相流折射后的 完整光强分布数据并实时传输至计算机。

## 5 实验结果及分析

#### 5.1 仿真实验结果

由 Tracepro 仿 真 实 验 采 集 的 直 径 为 10 mm、 12 mm、14 mm 且中心位置在管道特定范围内可变 的单个气相的光强分布特征值数据集共 22 000 组, 其中设置训练数据共 20 000 组,测试数据共 2 000 组,通过 BP 神经网络构建的气相特征测量模型进行 重复多次的气相位置定位及粒径尺寸预测。

如图 11 所示,其中(a)图展示了部分测试数据气 相粒径尺寸的神经网络训练结果,(b)图、(c)图和 (d)图分别对应展示了部分测试数据气相中心位置 坐标x、y、z的预测值,横坐标为训练样本数,其中含 圆形标记的曲线表示预测值,含星号标记的曲线表 示实际值,无标记的曲线表示训练预测值与实际值 的绝对误差,可以看出训练过程中无过拟合现象

后续进一步利用气相参数测量模型对未知气相 粒径的光强分布特征数据集进行气相位置定位及粒 径尺寸预测,得到的测量结果如图 12 所示,图中曲 线显示气相粒径和气相中心位置的 3 个坐标值的绝 对误差均在0值上下小范围内浮动,说明测量结果 发生较为准确。

#### 5.2 误差分析

为验证测量模型的结果准确性,针对待测量的 气相中心位置(*x*,*y*,*z*)确立其误差评价指标:即气相 定位的相对误差,如式(16)所示:

$$Dis = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{d_0}$$
• 100%, (16)

式中, $(x_i, y_i, z_i)$ 表示气相中心位置的预测值, $(x_0, y_0, z_0)$ 表示气相中心位置的实际值, $d_0$ 表示气泡的实际直径值。

针对待测量的气泡粒径尺寸确定其误差评价指标:即气相粒径尺寸的相对误差,如式(17)所示:











$$Rad = \frac{d_i - d_0}{d_0} \cdot 100\%, \qquad (17)$$

式中,*d*; 表示气相粒径的预测值,*d*。表示气相粒径的 实际值。

图 13 展示了以上两组仿真实验通过 BP 神经网 络测量模型针对已知气相参数的预测误差对比图, 其中(a)图和(b)图分别展示了已知粒径和未知粒径 的位置预测误差图,通过对预测结果的误差分析可 以看出,测量模型对气相位置的预测误差可以控制 在7%以内;(c)图和(d)图分别展示了已知粒径和未 知粒径的粒径预测误差图,分析可知对气相粒径的 预测误差可以控制在±4%以内。由此认为本文中 所采用的 BP 神经网络所构建的气相参数测量模型 可以较好地预测两相流中存在的单个气相的粒径以



Fig. 13 Error comparison chart of neural network prediction results

及中心位置坐标值。

### 5.3 实验研究

本文在基于哈特曼原理的测量装置系统中进一步开展了实际实验,将测试管段中的单个浮动气泡 作为实验对象,以水为连续液相,利用直径为 10 mm、12 mm、14 mm 的聚丙烯圆球模拟单个气泡, 聚丙烯的折射率与空气相近且密度低于水,聚丙烯 圆球进入垂直管道内沉降后再次上升直至漂浮在液 相表面,模拟形成连续单个气泡稳定上升的过程。 通过 CMOS 采集到多个采样时刻下气液两相流系统 中含单个气泡时两个方向的最终光强分布图片。通 过数据处理获得光强分布特征值,并将其作为气相 特征测量模型的测试集放入 BP 神经网络气相特征 测量模型中进行参数预测,可以获得气泡在当时采 样时刻下在气液两相流系统中的空间位置坐标值, 部分气相定位的预测结果如图14中图(a)、图(b)、 图(c)所示。鉴于实验对象为动态球体,在实际实验 中无法确定其中心的空间真实位置,无法具体分析 位置测量误差,由此不做定量的误差计算。

针对气相粒径的预测,图 14 中图(d)展示了其 相对误差分析图,经分析可以确定该气相特征测量 模型在实际实验中能够对粒径做较好的预测,其粒





径预测最大相对误差普遍在±6%以内。

## 6 结 论

本文设计了一种基于哈特曼原理的气相特征测 量方法,实现了在气液两相流中对气相参数的测量, 并构建了 BP 神经网络气相参数测量模型用于气相 参数的反演。仿真实验证明,该方法对气相定位的 测量相对误差可以保证在 7%以内,对气相粒径的测 量相对误差可以保证在±4%以内,通过实际实验验 证气相粒径的测量相对误差在±6%以内。

## 参考文献:

[1] WANG J M, LI B, WANG Q, et al. Velocity measurement of gas-liquid two-phase flow based on lifting wavelet time

• 850 •

delay estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3):653-663.

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.

[2] SUN J, JIANG N, CHEN W Y, et al. Experimental study on the motion characteristics of a single large bubble near the wall in still water[J]. Experimental Mechanics, 2019, 34(6):973-980.

孙姣,姜楠,陈文义,等.静止水中单个近壁大气泡运动 特性的实验研究[J].实验力学,2019,34(6):973-980.

- [3] WANG H Y, DONG F. Calculation method of rising bubble volume in gas-liquid two-phase flow[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11):2444-2449.
  王红一,董峰. 气液两相流中上升气泡体积的计算方法 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11):2444-2449.
- [4] XUE T,LI X Y,CHEN Y L. Double-threshold wavelet denoising method for gas-liquid bubbly flow under highspeed photography[J]. Journal of Optoelectronics • Laser,2016,27(2):217-223. 薛婷,李晓阳,陈彦龙.高速摄影下气液泡状流双阈值小
- [5] XUE T, RUAN W P, ZHANG S J. 3D reconstruction and optimization of dense bubbly flow based on laser scanning[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(3): 555-561.

波去噪方法[J].光电子·激光,2016,27(2):217-223.

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.

[6] PAN Z C,ZHAO L H B,ZHANG B, et al. Research on digital image measurement method of multi-scale bubble size distribution[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(7):129-137.
潘志成,赵陆海波,张彪,等.多尺度气泡尺寸分布数字

图像测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(7): 129-137.

- [7] LI H J, JI H F, HUANG Z Y, et al. A new void fraction measurement method for gas-liquid two-phase flow in small channels[J]. Sensors, 2016, 16(2):159-172.
- [8] LI H, JIANG Y, JI H, et al. 3D reconstruction of slug flow in mini-channels with a simple and low-cost optical sensor

[J]. Sensors, 2019, 19(20): 4573.

[9] FANG L D, WANG S C, WANG P P, et al. Phase holdup measurement of gas-liquid two-phase flow based on nearinfrared surface source sensor[J]. Acta Metrology, 2019, 40(6):1043-1049.

方立德,王少冲,王配配,等.基于近红外面源传感器的 气液两相流相含率测量[J].计量学报,2019,40(6): 1043-1049.

- [10] HUANG L, WEN S, LIU Y, et al. Development of a fluorescence imaging method to measure void fractions of gasliquid two-phase flows in a small tube-window for transparent fluids[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(4):045301.
- [11] KNIGHT J S, FEINBERG L, HOWARD J, et al. Hartmann test for the James Webb Space telescope [C]//Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, International Society for Optics and Photonics, July 29, 2016, Edinburgh, United Kingdom. Washington; SPIE, 2016, 9904; 99040C.
- [12] Yu J,Fang F,Qiu Z. Aberrations measurement of freeform spectacle lenses based on Hartmann wavefront technology[J]. Applied Optics, 2015, 54(5): 986-994.
- [13] LI J, JIN T, JIA H Z. Full-aperture diopter measurement of spectacle lenses based on improved Hartmann method [J]. Optics Technology, 2020, 46(2):129-133.
  李靖,金涛,贾宏志.基于改进哈特曼法的眼镜片全孔径 屈光度测量[J].光学技术, 2020, 46(2):129-133.
- [14] LIU Y, WANG J S, LI H J, et al. Determination of the best aperture of the Hartmann diaphragm in an automatic focal meter[J]. Acta Optics, 2021, 41(10):117-124.
  刘颖,王劲松,李华建,等.自动焦度计中哈特曼光阑最 佳孔径的确定[J].光学学报, 2021, 41(10):117-124.
- [15] LI J X. Research on image processing algorithm of Hartmann aberration automatic measurement system[J]. Laser Journal,2009,30(6):45-47.
  李建新.哈特曼法像差自动测量系统图像处理算法的研 究[J].激光杂志,2009,30(6):45-47.

#### 作者简介:

**孔** 明 (1978-),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事精密仪器、 光学检测方面的研究.