

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311729

一种测量液膜厚度的超声相控阵实验装置*

赵宁^{1,2}, 孙铭聪^{1,2}, 刘苗苗^{1,2}, 庞丽丽^{1,2}, 张荣香^{1,2,3}

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 零碳能源建筑与计量技术教育部工程研究中心建设项目 保定 071000; 3. 河北大学物理科学与技术学院 保定 071002)

摘要:气液两相流存在于核反应堆蒸发、飞行器冷却、化工生产降膜蒸发等过程,界面波的动态测量对工业过程监控和生产优化具有重要意义。界面波的准确识别与特性参数测量是开展科学研究与工程实践的重要前提。基于超声相控阵测量系统,设计了扇扫的测量方式,可以用于气液界面清晰的流型中液膜厚度和界面波形态三维测量。通过静态标定和圆管验证,确定了像素点和液膜厚度之间的关系,在气相表观流速为0.071 9~0.431 6 m/s,液相表观流速为0.056 7~1.416 1 m/s的工况下进行实时动态实验,获得了实时流动过程中较高精度的截面气液相界面信息,并构建了管道内部界面波三维分布形态,为界面波特性研究提供了一种实验参考方法。

关键词:气液两相流;液膜;超声相控阵;扇扫;界面波

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Ultrasonic phased array experimental device for liquid film thickness measurement

Zhao Ning^{1,2}, Sun Mingcong^{1,2}, Liu Miaomiao^{1,2}, Pang Lili^{1,2}, Zhang Rongxiang^{1,2,3}

(1. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. Engineering Research Center of Zero-carbon Energy Buildings and Measurement Techniques, Ministry of Education, Baoding 071000, China; 3. College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: Gas-liquid two-phase flow exists in processes such as nuclear reactor evaporation, aircraft cooling, and chemical production falling-film evaporation. Dynamic measurement of interfacial waves is of great significance for industrial process monitoring and production optimization. The accurate identification and characteristic parameter measurement of interfacial waves are important prerequisite for scientific research and engineering practice. Based on the ultrasonic phased array measurement system, the measurement method of sector scan is designed, which can be used for liquid film thickness and three-dimensional measurement of interfacial wave morphology with clear gas-liquid interfacial. Through static calibration and circular tube verification, the relationship between pixel points and liquid film thickness is determined. The real-time dynamic experiments are carried out under the gas superficial velocity is 0.071 9~0.431 6 m/s and the liquid superficial velocity is 0.056 7~1.416 1 m/s. The cross-sectional gas-liquid interfacial information with high accuracy in real-time flow process is obtained, and the three-dimensional distribution of interfacial waves is built, which provides an experimental reference method for the study of interfacial wave characteristics parameters.

Keywords: gas-liquid two-phase flow; liquid film; ultrasonic phased array; sector scan; interfacial wave

0 引言

两相流在化工、石油、发电厂等许多工业工程中占据

重要作用,且在核工业领域具有特殊意义,数以百计的研究工作聚焦于探索两相流的流动过程。其中,界面波对流体间的传质和传热影响显著^[1-3],近年来国内外学者广泛开展了以界面波为研究对象的研究,研究气液两相流

界面波特征参数(如波幅、波长、波动速度和频率等)主要是基于实验测量液膜厚度进行的。根据采用不同的测量原理和信号的本质,其测量方法主要分为图像分析法^[4]、声波法^[5]、电学法^[6-8]、光学法^[9-11]和核辐射法^[12]等,电导探针法只适用于对导电液膜进行局部测量,所得的液膜厚度是为探针附近液膜厚度的平均值。此外,探针可能对流场造成干扰、存在流体的“爬杆效应”、并受探针的老化与杂质沉积等因素影响,导致探针在界面波的特征提取和特性研究方面存在较大误差;而高速摄影法和光学法需要严格的光学环境条件、测试系统复杂,维修成本高;射线法安全成本高,使用不当可能造成安全事故。对于工业应用中的两相系统,如管道和反应器,存在严重的限制,限制了用于执行光学测量的透明窗口的引入。在这种情况下,使用超声波被视为一种替代方法。超声相控阵技术最初被广泛应用于医学领域,超声束的移动聚焦特性使其能够扫描人体内部器官并对其进行成像检测^[13]。近年来,超声相控阵技术逐渐引入到两相流动特性的研究中。

目前超声相控阵在两相流研究的应用中处于起步阶段,相控阵超声检测通过使用特定的成像算法,能够将检测结果形象具体的展现出来,以便检测者分析和判读。传统的相控阵超声成像算法包括傅里叶成像算法、合成孔径算法等,主要用于实时成像检测^[14]。Fang等^[15]提出了基于相控阵换能器的气液两相流流型识别的方法,获得了不同流型的扇形B型图像,并对其进行分类处理;Ingram等^[16]利用一个基于128阵元的超声相控阵成像系统获得B型图像,从而确定管道轴向中的气泡尺寸;Liu等^[17]通过一种超声相控阵成像新方法,探究了界面气泡分布,实验结果验证了此方法精度高,能解决部分问题。可见超声相控阵方法在两相流轴向和截面的测量上是可行的,具有一定优势。

本文提出了一种超声相控阵测量系统,通过静态标定和圆管验证实验建立实际液膜厚度与液相像素数之间的关系,利用了扇扫测量方式来获取气液实时流动中较高精度的截面液膜厚度信息,分析了二维数据对气液相界面进行识别、提取,构建基于动态实时数据的界面波三维分布形态,为界面波特性参数的分析提供了实时的界面波动参考。

1 超声相控阵测量理论

1.1 超声相控阵测量原理

超声波作为声波的一种,符合所有声波传播所遵循的基本定律,连续性方程、运动方程、状态方程是描述超声波在其声场中传播产生波动的3个定量。液体无法承受剪切应力,当超声波的传播介质为液体时,声场中只存

在超声波产生的纵波。

超声相控阵检测的基本思想是惠更斯原理,其灵活性主要表现在声束数量、方向可控和聚焦动态。其工作原理为多阵元近似为多个发射各向同性和球形声波的理想点声源,每个阵元都可以独立控制。在扫描过程中,系统通过在各单元激发通道中引入时间延迟,调整发射声波到达特定点的相位关系,使波束聚焦和偏转,进而形成一个特定方向的超声波束。当传播到多层介质,分界面的存在使得声阻抗不连续,发出的超声波经过反射呈球面扩散,超声相控阵系统通过调整发射元件的延时来实现聚焦,根据其特定的聚焦法则调整超声波的相位来形成焦点,得到各个阵元处信号的相位差,通过叠加回波信号获得分界面处的实际回波。

1.2 延迟时间分析与计算

在超声相控阵系统中,阵元激励脉冲的延迟控制能够转换声束方向。加入时间延迟改变的是施加在每一个阵元上的脉冲相位。现有时间延迟的计算公式不适用于圆形管道,因此根据探头与被测实验段的贴合情况附加与曲面贴合的透声楔块。经过楔块和管壁后,超声波在管壁界面下的切点不同,在界面处发生折射沿不同方向传播。每一条阵元声束线的聚焦路径是多方向、非平行的,导致波叠加产生巨大误差,波束不能聚焦偏转,所以需要重新计算延迟时间。声束传播路径示意图如图1所示。

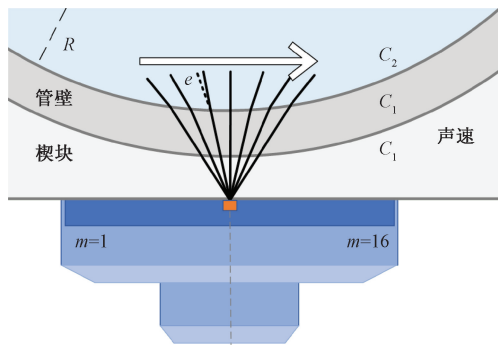


图1 声束传播路径示意图

Fig. 1 Diagram of beam propagation path

考虑到无限聚焦距离,直接接触时声束偏转,时间延迟为:

$$\Delta\tau = \frac{d \cdot \sin\theta}{c_x} \left(n - \frac{N-1}{2} \right) \quad (1)$$

加平面楔块接触时,楔块与被测物属于两种不同的介质,所以超声波在楔块界面处发生折射,折射角可根据斯涅耳定律计算得出:

$$\theta' = \arcsin \left(\frac{c_x}{c_i} \cdot \sin(\theta_i + \theta) \right) \quad (2)$$

此时声束的偏转角度则是折射角与探头相对于楔块平面的夹角的差值,延迟时间变为:

$$\Delta\tau=\frac{d\cdot\sin(\theta'-\theta_i)}{c_x}\left(n-\frac{N-1}{2}\right)\tag{3}$$

式中: θ 是探头与楔块平面的夹角; θ' 是声束相对于中心阵元轴线的偏转角; d 是相邻阵元的距离; c_x 是楔块的声速; c_l 是水声速。

因为中心阵元轴线、曲面楔块轴线与实验管段轴线三线重合,则激发的第 n 个阵元到曲线界面的垂直距离为:

$$L_n=R-\sqrt{R^2-\left(n-\frac{1}{2}\right)^2d^2}+L_0\tag{4}$$

式中: L_0 为探头中心到曲面楔块的最短距离; R 为内管道半径。

第 n 个阵元发射的超声波在曲面的交点与水中形成平行声束位置的垂直距离:

$$L_2=\sqrt{R^2-\left(n-\frac{1}{2}\right)^2d^2}-\sqrt{R^2-(N\cdot d)^2}\tag{5}$$

超声波穿过曲面楔块,在水中形成平行声束的路程式:

$$l=\frac{L_2}{\cos(|\theta|)}+\sin(|\theta|)\cdot[(N+n-1)\cdot d-L_2\cdot\tan(|\theta|)]\tag{6}$$

此时延迟时间为每个阵元从激发到在水中形成平行声束的位置的最小传播时间,即楔块中的延迟时间与水中延迟时间之和。

$$\Delta\tau=\frac{L_n}{c_x}+\frac{l}{c_l}\tag{7}$$

2 超声相控阵测量系统设计

2.1 平板静态标定

假定楔块和水都是均匀介质,不考虑介质中杂质的存在,忽略其内部晶界面对超声波的反射作用。吸收衰减可通过增大激励来进行补偿,且检测范围为 66 mm,遵循有机玻璃检测最大范围是 1 m 的原则,衰减可近乎为 0。为了减少实验环境的误差,提高测量的精度,首先用方形透明水槽测得真实环境中的水声速和有机玻璃声速,再进行静态实验。

如图 2 所示,平板液膜厚度标定系统包括超声相控阵测量装置、两块有机玻璃平板、游标卡尺、两个参考支撑块、水平仪和注射器等。实验每进行一个步骤,实验前后都用水平仪对实验平面进行水平标定。考虑到平板间水表面张力的局限性,参考支撑块的高度只做到 1.76、1.94、2.35、3.52、4.12 mm;将两块参考支撑块对称地夹在两块平行亚克力平板间,使得两块平板间形成一定高度的均匀液膜间隙,参考支撑块的高度决定了液膜厚度,

利用 CTS-PA22X 型超声相控阵线性探头采集液位的声波信号数据。

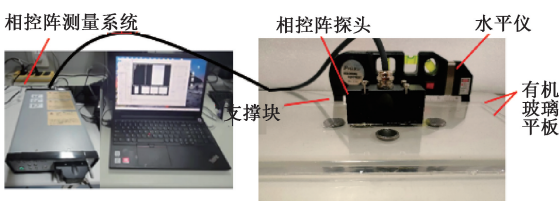


图 2 平板标定实验

Fig. 2 Experimental diagram of plate calibration

对测量数据进行预处理和可视化分析,以声束发射视角生成简单的数据分析图像,无水情况下的图像底色作为对比,区分底板上限、上板下限等重点区域的像素位置并进行标定,考虑到数据的稳定性,并排除非信号区二次回波的影响,针对特定区域进行局部细化方向,提取声波信号特定区域中每一列的最大值,底板上限和上板下限像素位置的差值则代表液膜厚度,底板上像素位置始终为 424,其余实验数据和实验结果如表 1 所示。

表 1 平板扇扫标定实验数据

Table 1 Planar scan calibration experimental data			
液膜厚度/mm	上板底像素位置	水占据的像素数	尺度 pixel/mm
0	424	0	0
1.760	413	11	6.250 0
1.940	412	12	6.185 6
2.350	409	15	6.383 0
3.520	403	21	5.965 9
4.120	400	24	5.825 2
1.760	413	11	6.250 0
1.940	412	12	6.185 6
2.350	410	14	5.957 4
3.520	403	21	5.965 9
4.120	399	25	6.068 0
1.760	413	11	6.250 0
1.940	412	12	6.185 6
2.350	409	15	6.383 0
3.520	404	20	5.681 8
4.120	399	25	6.068 0
1.760	413	11	6.250 0
1.940	412	12	6.185 6
2.350	409	15	6.383 0
3.520	402	22	6.250 0
4.120	400	24	5.825 2

为了获得液膜厚度的标定尺度,假设声波在水介质中均匀传播,可对多次实验结果进行平均。

$$S_{fs} = \frac{\sum_{i=1}^{20} fs_i}{20} \approx 6.125$$

(8)

利用最小二乘法对液膜厚度-水相像素数的多次散点数据均值进行拟合,拟合结果与原始数据的对比结果如图 3 所示,二者建立的对应关系,如式(9)所示。

$$f_s \approx 0.166 \times w_{sp} - 0.045$$

(9)

式中: f_s 为扇扫液膜厚度为; w_{sp} 为水相像素数。

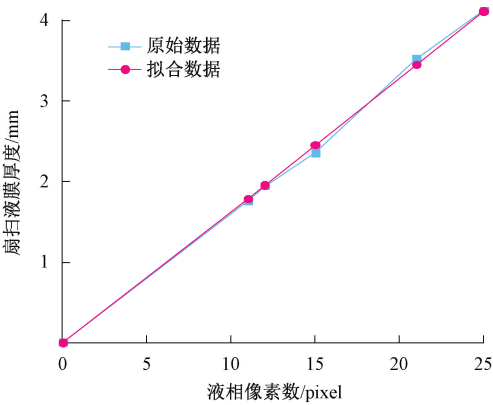


图 3 扇扫拟合结果与原始数据对比

Fig. 3 Comparison between sector scan fitting results and original data

2.2 静态测量实验

如图 4 所示,将相控阵测量系统应用到圆管上,以验证平板标定结果。为了保证探头端与圆管间的贴合度,在管道下方固定楔块,楔块一面是与实验圆管段外壁曲率相同的凹圆弧,另一面是与探头端贴合的平面,同时利用水平仪保证实验管段和楔块的中心轴线处于平行位置,确定管段轴中心线、楔块中心线和探头阵元中心线在同一平面,且与圆管段的截面垂直。通过同等体积方法换算,并利用精度为 0.02 mm 的游标卡尺在管段侧面标注液位。

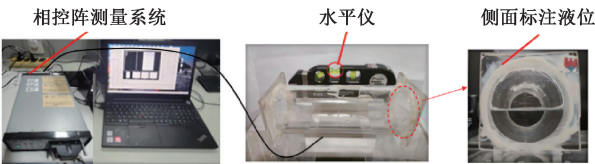


图 4 静态标定结果验证实验

Fig. 4 Experimental verification of static calibration results

如表 2 所示,根据静态圆管实验数据,重复平板数据处理过程获得扇扫下的液膜厚度像素均值,再通过最小二乘法得到液膜厚度计算值,把液膜厚度的计算值与理

想值的相对误差看作像素数-液膜厚度关系式的选取标准。在平板扇扫标定的实验中,通过计算实验数据,确定了一个像素点对应的液膜厚度值,并取这些值的平均值作为真值。静态标定中使用真值乘以像素数,得到了液膜厚度的真值。通过将液膜厚度的真值与实际测得的液膜厚度值进行对比,可以计算出静态标定的最大相对测量不确定度为 1.58%。

表 2 静态标定结果验证实验数据

Table 2 Experimental data for the verification of static calibration results

测量液膜厚度/mm	液膜像素均值 /pixel	计算液膜厚度 /mm	相对测量不确定度/%
14.98	91	15.077 9	1.38
20.02	121	20.063 4	1.46
25.00	151	25.048 9	1.50
30.00	181	30.034 4	1.53
35.04	212	35.186 1	1.55
40.00	242	40.171 7	1.57
45.02	273	45.323 4	1.58

利用计算机程序区分盲区 and 界面波区,盲区包括楔块和管壁的声波信号,检测并剔除管道壁边界外的信号,界面波区则是气液相界面的声波信号,考虑到管道上内壁线和下内壁线不因工况的变化而发生变化,气液界面处恰恰相反,圆管扇扫的标定图如图 5 所示,在图像上能清晰地看出气液界面信号和内管壁线信号,随后,对气液相界面和下内壁线信号处赋 1 进行标记,其他区域赋 0,提取气液界面轨迹和下内壁线。得到气液界面和下内壁线的像素坐标,两者之差则是液膜厚度的像素坐标,结合最小二乘法,得到扇扫标定后的像素与液膜厚度间对应结果。

2.3 动态实验系统

在河北大学计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心的装置上进行实验。该实验将超声相控阵探头安装在测试管段,用于对气液两相进行测试,如图 6 所示,气相和液相分别通过多级离心泵控制,多级离心泵通过变频调节两相流体速度,以确保气相和液相的流速在特定范围内变化。在实验过程中,空气由空气压缩机产生,经由科里奥利质量流量计 (Endress + Hauser 质量流量计, DN15、DN40, $U=0.35\%$, $k=2$) 测量后,进入实验管段前端;水相通过水泵,经科里奥利质量流量计 (Endress + Hauser 质量流量计, DN40, $U=0.1\%$, $k=2$) 和电磁流量计 (科隆 (KROHNE) 测量仪器 (上海) 有限公司, 00T1FLUX2300, DN32、DN10, $U=0.2\%$, $k=2$) 测量后,与

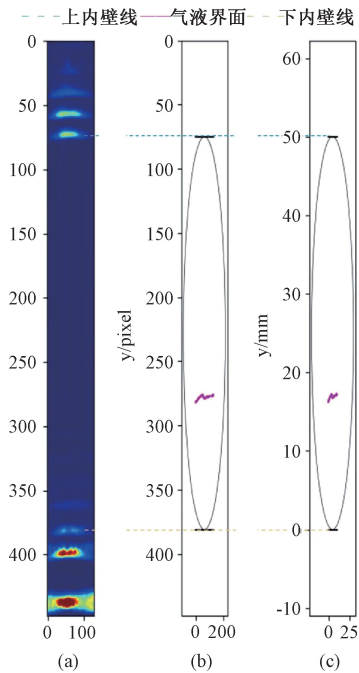


图5 扇扫液膜厚度-像素数的标定图

Fig. 5 Calibration graph of sector scan liquid film thickness-pixel count

气相混合。气液两相混合后流经 200D 的前直管段形成两相流,进入水平管段,经过 400D 的前直管段充分发展后到达实验区域。装置的上位机操作系统通过 PLC 控制阀门开度,调控流量大小,并实时记录气相和液相的流量大小,以便与实验结果相互对比,动态试验测量系统装置图如图 7 所示。

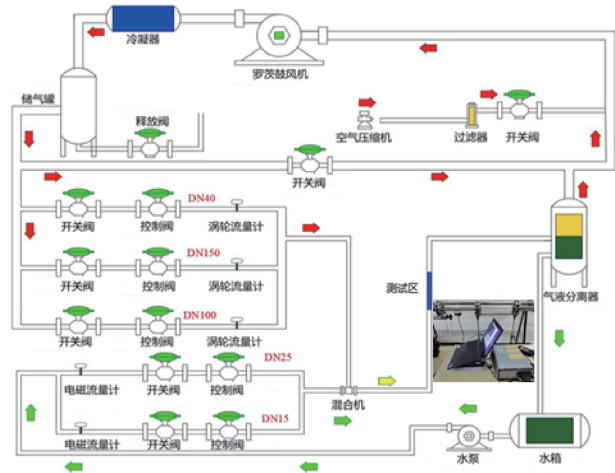


图6 气液两相流实验测量装置示意图

Fig. 6 Diagram of gas-liquid flow measurement device

测量系统的核心部件是超声相控阵仪器 CTS-PA22X,其由控制超声信号生成产生、接收信号策略、信号处理的主机部分和收发一体的超声相控阵探头组成,



图7 实验测量系统装置图

Fig. 7 Experimental measurement system setup

主机配合不同型号的相控阵探头可以产生不同的收发效果,根据实验对象的具体参数,本文选取的探头的阵元数为 16,每个阵元之间的距离为 1 mm,每个阵元的长度为 10 mm,阵元呈线性平行排列,收发频率为 4 MHz。

3 实验结果分析

3.1 扇扫液膜厚度提取

相控阵测量系统采集到的原始数据如图 8(a)所示,是携带各采集点处回波强度信息的二维矩阵,需要将数据还原到圆形管道测量区域对应实际位置,即将二维数组的数据转换为梯形图像。如图 8(b)~(e)所示,扇扫液膜厚度的提取策略由二维数据矩阵转梯形、探测液位数据、拟合气液界面、空间尺度坐标变换 4 个步骤组成。

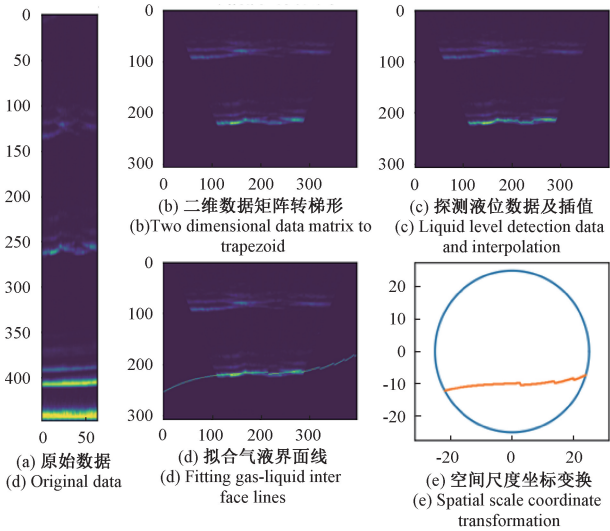


图8 提取扇扫液膜厚度的流程

Fig. 8 Flowchart of extracting liquid film thickness of sector scan

在相控阵中,由于扇形扫描的特性,梯形图像更符合扫描路径,提高了图像的可读性和解析度。梯形图像相较于原始数据更容易理解,通过图像的形成和处理,可以

提高图像的分辨率,使细节更加清晰。相控阵测量越大,二维数组行数越多;扇扫的区域越大,数据的列数越多。将二维数据的每一列写到输出图像的对应像素上。二维矩阵数据中包含了液位和盲区两部分信息,为了更好观测液位变化,先要确定管道上内壁位置、下内壁位置,对数据进行剪裁,剔除静态实验的内管壁以外的盲区数据,并对动态实验结果进行对比,两者管道内部区域一致。如果图像的梯形上底边长度大于矩阵数据的列数,需对数据进行重复操作来填充细节,防止梯形图像间隙过大,甚至出现断点。

如图9所示,原始矩阵数据共有128列,图9(b)为输出的梯形图像,梯形的上底边一共有326个像素,且上底边像素数取决于扇扫角度和液膜高度,对每一列数据重复操作3次,且每次的旋转角度各不相同。但远离探头的测量越大,每条声束的间隔也越大,为避免转换后的梯形图效果过于疏散,重复操作次数增加2次。

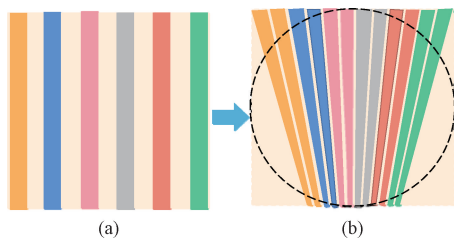


图9 数据矩阵还原梯形的原理

Fig. 9 Schematic diagram of data matrix reduction trapezoid

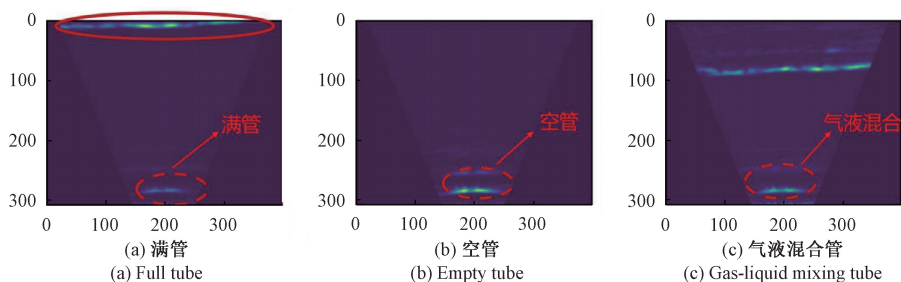


图11 实际梯形图

Fig. 11 Actual trapezoid diagram

转换到梯形图像后,需要识别气液相界面。在批量提取动态测量实验气液相界面信息时,发现回波现象干扰严重,回波信号的干扰包括下管壁回波信号的干扰和气液界面线回波信号的干扰。下管壁回波信号干扰的产生原因主要是超声波传播过程中的反射和多次反射,当超声波传播到下管壁时,部分能量会被下管壁反射回来,形成回波信号。这种反射信号可能会与从气液界面或其他目标返回的信号相混淆;气液界面线回波信号干扰的产生原因主要是声阻抗不匹配导致的部分能量被反射、折射和传播,或者由于存在气泡和液滴,也会引起超声波

为了使气液相界面清晰明亮,还需对图片进行明暗度调整或者降低异常点。分别尝试低端增强法和卷积法提升亮度,低端增强法只提升图片的整体亮度,如图10(a)、(b)所示。因此,本文选用卷积法对图片进行模糊处理,以此来降低梯形图中异常值的影响。

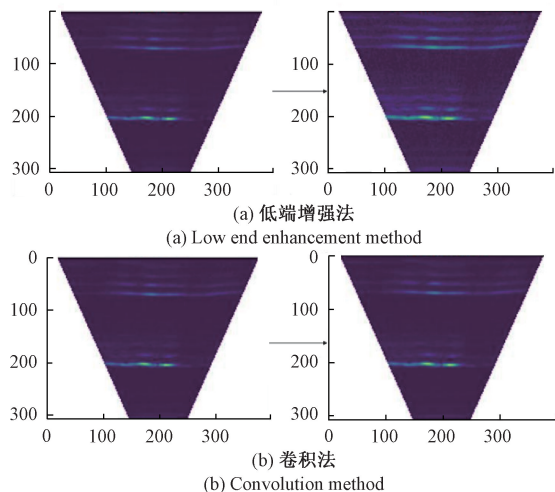
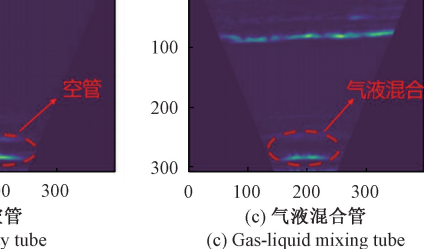


图10 处理前后对比

Fig. 10 Before and after comparison

转换后的管道内部测量效果如图11所示。实线圈对应的是管道上内壁线,虚线圈对应的是管道下内壁线。



的反射和散射,形成额外的回波信号。

观察所有工况下的全局图,确定下管壁回波区域的边界像素数为33,即剪裁梯形数据的后33行,隔绝强度较高的下管壁回波对数据干扰的影响,并视其为提取区域。依据波动趋势确定相邻数据点间最大差值为距离阈值,提取区域中最大亮度值为亮度阈值,若聚集区域包含了全部亮度超过30%的点,且足够宽,则将聚集区域的数据点视为气液界面数据点;若亮度超过90%的数据点处于散列状态,以亮度阈值查找最亮的数据点,存在多个满足亮度阈值的数据点时,初次筛选

出周边数据点中更亮的数据点,并记录下这些数据点的像素位置。然后以初次筛选的行号均值作为二次筛选划分的参考,将二次筛选空间中距离聚集区域较近的数据点加入到聚集区域,二次筛选区域剩下的数据点则为干扰点。

确定了干扰点后,再通过三次样条插值法穿过所有数据点,保障数据点间光滑连续,避免对数据点再次平滑处理,确保了实验结果的准确性。插值前后对比如图12所示,图12(a)为原始数据的直接输出结果,能观察到清晰的回波干扰线和气液界面线,且符合回波信号出现在气液界面信号之后、亮度低于气液界面信号的规律,图12(b)和(c)分别为未过滤时提取的气液界面线、经过滤后提取的气液界面线,过滤基本能达到消除干扰点的效果,避免了回波信号的干扰,极大的减小了测量误差,较为真实的反映波动情况,其与实际测量结果对比后,插值后得到的新数值在可接受范围内。

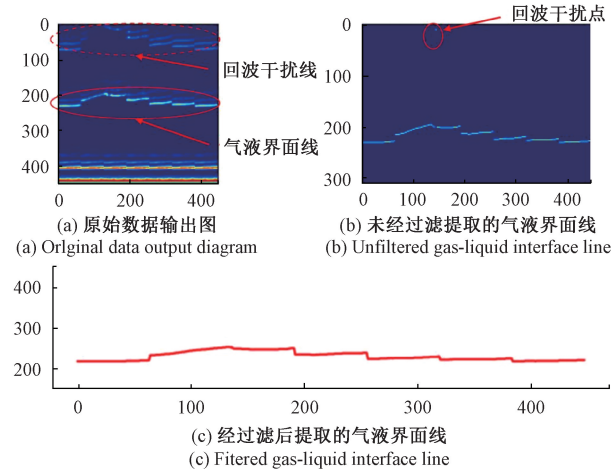


图12 插值前后的对比

Fig. 12 Comparison diagram before and after interpolation

3.2 三维界面波模型建立

由于气液两相间的相互作用复杂多变,界面波结构及其动态特性表现出很强的随机性、快速性、复杂性,很难对所有的运动状态采用同一种方法进行描述。目前的描述方法都是建立在诸多假设基础之上的,因此缺乏准确的机理描述方法。现有研究界面波特征信息的表征参数少、维度少,且多忽略了其与两相介质参数、过程参数的物理关联性理论研究,界面波特征参数的预测模型研究主要受到入口参数、几何尺寸以及介质物性参数等实验研究方面的限制,因此界面波三维时空特征参数的描述是必要的。

扇扫时,同一工况下采集的数据,展现的是不同时刻下管道截面的动态情况,三维模型是将包含截面信息的二维截面梯形测量图沿着时间轴的叠加效果。以管道中心为原点建立直角坐标系,选取了气相表观流速为1 m/s,液相表观流速为0.8 m/s的工况,50 s内的管道内部分层流动的三维界面波分布(如图13所示),其中流动状态中出现了许多类似“波峰”,意味着液相的部分堵塞现象尤为突出,在一定程度上给出了界面运动的动力学演化的证明。

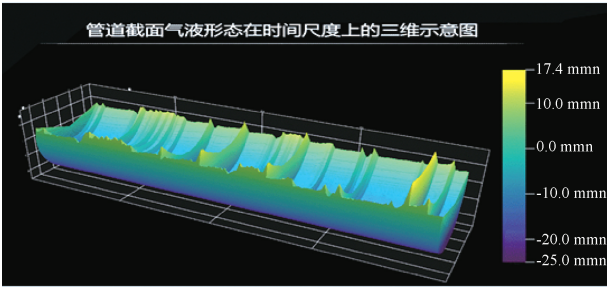


图13 三维界面波分布

Fig. 13 Distribution diagram of 3D interfacial wave

4 结 论

本文对基于超声相控阵的两相流流界面特性进行研究,利用理论分析、实验测量和数据分析方法开展相关研究,建立了基于实验数据的界面波的运动机理描述和界面波运动时空特性分布。

1) 本文介绍了一种超声相控阵测量系统,设计了静态标定、验证和实时动态实验的测量过程,获得了较高精度的气液相界面信息,并建立了像素数与实际液膜厚度间的关系,以此获取液膜厚度数据。

2) 本文针对动态实验中气液界面的识别、提取等问题开展了一系列分析,首先根据超声相控阵的扇扫原理将数据矩阵转换成梯形,并对梯形进行卷积处理,通过对气液界面数据进行插值和拟合,接着根据静态标定结果进行空间尺度变换,还原真实的截面气液界面分布,最后构建了基于动态实时数据的界面波三维分布信息,为界面波特性参数的分析提供了实时的界面波动参考。

本文提出的超声相控阵测量系统可以用于分层流,弹状流,环状流等气液界面清晰的流型中液膜厚度和界面波形态三维测量。为了进一步分析界面波特性,可以尝试与精度较高的传感器进行组合测量,充分发挥传感器的融合作用,可以采集到精确度更高的数据,同时进一步分析界面波其他特性参数。

参考文献

- [1] AYDIN T B, TORRES C F, KARAMI H, et al. On the characteristics of the roll waves in gas-liquid stratified-wavy flow: A two-dimensional perspective [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 65: 90-102.
- [2] 赵宁, 宋亚净, 叶兴跃, 等. 电磁波相位传感器弹状流混合介电常数分析[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(7): 131-138.
- ZHAO N, SONG Y K, YE X Y, et al. Analysis of hybrid dielectric constant of electromagnetic wave phase sensor slug flow [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(7): 131-138.
- [3] MAR B, GTTPA B, PJMA C, et al. Evaluation of flow pattern recognition and void fraction measurement in two phase flow independent of oil pipeline's scale layer thickness [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60(1): 1955-1966.
- [4] ALEKSEENKO S V, CHERDANTSEV A V, HEINZ O M, et al. An image analysis method as applied to study the space-temporal evolution of waves in an annular gas-liquid flow[J]. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2011, 21(3): 441.
- [5] SUN X H, ZHENG X Y, XU P ZH, et al. Research on friction state monitoring method of liquid film seal during start-up based on acoustic emission [J]. *Applied Acoustics*, 2023, 210: 109424.
- [6] YAN P, JIN H B, HE F F, et al. Flow characterization of gas-liquid with different liquid properties in a Y-type microchannel using electrical resistance tomography and volume of fluid model[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2022, 136: 104390.
- [7] PRASSER H M. Response of electrical film thickness sensors to waves in the liquid film [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2021, 380: 111304.
- [8] DURUK S. Nonlinear dynamics of thin liquid films subjected to mixed-frequency electrical field[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(5): 052105.
- [9] SOLIS-TINOCO V, LUNA G M, ACEVEDO-BARRERA A, et al. An optical sensor combining surface plasmon resonance, light extinction, and near-critical angle reflection, for thin liquid film biochemical sensing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 158: 107137.
- [10] DRIOUACH A, SAMAD B A, ASHRIT P V. Film thickness dependent electron transport and optical properties of thermochromic VO₂[J]. *Thin Solid Films*, 2023, 779: 139921.
- [11] ARIANNA B, MARION B, PASCAL L, et al. Inter-laboratory optical measurements of film thickness during annular flow condensation in a small diameter channel[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, 148: 110963.
- [12] CHOI C, CHO K H. Effect of asymmetric airflow on liquid film behavior and emergency core coolant bypass in the downcomer geometry of a nuclear reactor pressure vessel [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 117: 104765.
- [13] 张慧, 赵晓楠, 张雯, 等. 空气耦合式电容微超声换能器的设计与分析[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(10): 2218-2225.
- ZHANG H, ZHAO X N, ZHANG W, et al. Design and analysis of air-coupled capacitive micromachined ultrasonic transducers[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* 2016, 37(10): 2218-2225.
- [14] 周进节, 郑阳, 张宗健, 等. 缺陷散射对相控阵超声全聚焦成像的影响研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2): 454-461.
- ZHOU J J, ZHENG Y, ZHANG Z J, et al. Research on the effect of defect scattering on phased array ultrasonic TFM imaging [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(2): 454-461.
- [15] 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.
- [16] INGRAM M, MINEO C, GACHAGAN A, et al. Determination of bubble size distribution using ultrasound array imaging [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(7): 1424-1437.
- [17] LIU H, TAN C, LI Z P, et al. Ultrasound phase array tomography for biphasic medium distribution imaging using synthetic aperture beam scanning [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-12.

作者简介



赵宁,2007 年于河北大学获得学士学位,2010 年于河北大学获得硕士学位,2018 年于天津大学获得博士学位,现为河北大学副教授,主要研究方向为多相流测试技术。

E-mail: zhaoning1983@tju.edu.cn

Zhao Ning received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Hebei University in 2007 and 2010, and Ph.D. degree from Tianjin University in 2018. He is currently an associate professor at Hebei University. His main research interests include multiphase flow measurement technology.



孙铭聪,2022 年于东北林业大学获得学士学位,现为河北大学硕士研究生,主要研究方向为多相流测试技术与仪器。

E-mail: 18844445627@163.com

Sun Mingcong received her B.Sc. degree from Northeast Forestry University in 2022. She is currently a M.Sc. candidate at Hebei University. Her main research interests include multiphase flow measurement technology and instruments.



张荣香,2003 年于河北大学获得学士学位,2006 年于河北大学获得硕士学位,2015 年于天津大学获得博士学位,现为河北大学教授,主要研究方向为超声波检测技术。

E-mail: zrx@hbu.edu.cn

Zhang Rongxiang received her B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Hebei University in 2003 and 2006, and Ph.D. degree from Tianjin University in 2015. She is currently a professor at Hebei University. Her main research interests include ultrasonic measurement technology and instruments.