文章编号:1007－6735(2025)05－0494－11　　DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20240807001

超声回波互相关气泡流速测量影响因素研究

刘　毅，　杨　杨，　哈　雯，　杨　斌
（上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘要：针对超声回波法气液两相流气泡速度测量影响因素，以典型气弹流型为研究对象，采用具有一定时滞的脉冲随机信号作为上下游传感器的信号进行理论建模，开展时滞、噪声、脉冲信号等因素对随机信号互相关分析的影响分析。结果表明：随机信号互相关系数随时滞增加而降低；叠加白噪声后，随机信号互相关系数随信噪比提高而增强，且趋势会逐渐变缓；叠加脉冲信号后，随机信号互相关系数随脉冲信号的个数、高度和宽度增加而增强，并且脉冲信号高度对互相关系数的影响强于宽度的影响。在此基础上，搭建了气液两相流实验平台，开展探测器间距、气量、数据分析长度和超声换能器增益对超声回波信号互相关分析影响的实验研究。结果表明：随着探测器间距增大，气泡速度的误差越来越大，且相关系数也在逐步减小；随着气量的增大，气泡速度的误差在 3 L/min 的位置存在最小值，而相关系数会随之增大；随着数据分析长度的增大，其速度误差在气泡数量大于 4 后可以保持在 10% 以内，而相关系数整体是一个上升的趋势；随着超声换能器增益的增加，其互相关系数基本均处于强相关状态，但所计算的误差仅在超声器增益在 28 dB～32 dB 时保持在 10% 以内。这为超声回波互相关气泡流速测量方法、系统设计、优化及工业应用提供重要参考。

关键词：气液两相流；超声回波法；气泡流速测量；互相关测速；随机信号
中图分类号：TB 551　　**文献标志码：**A

Study on influencing factors of ultrasonic echo cross-correlation bubble velocity measurement

LIU Yi,　YANG Yang,　HA Wen,　YANG Bin
(*School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: This study investigated the factors influencing the measurement of bubble velocity in gas-liquid two-phase flow using the ultrasonic echo method, focusing on a typical gas slug flow pattern. A

收稿日期: 2024−08−07
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52306215)
第一作者: 刘　毅（1999—），男，硕士研究生．研究方向：气液两相流测量方法．E-mail：617057765@qq.com
通信作者: 杨　斌（1985—），男，教授．研究方向：多相流动及其实验测量方法．E-mail：yangbin@usst.edu.cn

引文格式: 刘毅，杨杨，哈雯，等．超声回波互相关气泡流速测量影响因素研究[J]．上海理工大学学报，2025，47（5）：494-504．
Citation: LIU Yi, YANG Yang, HA Wen, et al. Study on influencing factors of ultrasonic echo cross-correlation bubble velocity measurement[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47（5）：494-504.

theoretical model was developed using pulse random signals with a certain time delay as input for the upstream and downstream sensors. The effects of time delay, noise, and pulse signals on the cross-correlation analysis of the random signals were analyzed. The results show that the cross-correlation coefficient decreases as the time delay increases. After adding white noise, the cross-correlation coefficient increases with signal-to-noise ratio, though the rate of increase gradually slows down. With the addition of pulse signals, the coefficient increases as the number, height, and width of the pulses increase, with the height of the pulses having a greater impact on the cross-correlation coefficient than the width. Based on this, an experimental platform for gas-liquid two-phase flow was established to investigate the effects of sensor spacing, gas flow rate, data analysis length, and ultrasonic transducer gain on the cross-correlation analysis of ultrasonic echo signals. The results show that as the sensor spacing increases, the bubble velocity error increases and the cross-correlation coefficient decreases. As the gas flow rate increases, the bubble velocity error reaches a minimum at 3 L/min, while the cross-correlation coefficient increases. Increasing the data analysis length results in a velocity error that remains within 10% when the number of bubbles exceeds 4, with the overall cross-correlation coefficient showing an upward trend. As the ultrasonic transducer gain increases, the cross-correlation coefficient consistently shows strong correlation, with errors staying within 10% only when the gain is between 28 dB and 32 dB. This provides valuable insights for the development, system design, optimization, and industrial application of ultrasonic echo cross-correlation methods for bubble velocity measurement.

Keywords: *gas-liquid two-phase flow*; *ultrasonic echo method*; *bubble velocity measurement*; *cross-correlation velocity measurement*; *random signal*

气液两相流是由气、液两种介质组成的流动体系，广泛存在于化工、医药、石油、环境等领域[1]。例如，在高压直流锅炉中，上升管高温汽水两相流气泡流动将引起锅炉动态响应不稳定[2]；在石油开采过程中，管道内气液两相流气泡的产生和发展会影响油气开采安全运行[3]；在气液反应鼓泡塔中，气液两相流气泡流动与其反应效率密切相关[4]。可见，在气液两相流动中，气泡流速、大小等参数是其重要的表征参数，对工业过程高效稳定安全运行都有重大影响[5-6]。针对气液两相流中的气泡流速测量，目前主要有激光多普勒测速法[7-11]与图像法[12-15]。Yu 等[16]采用激光多普勒测速法，通过激光照射气液两相流，由于气泡流动会产生散射光多普勒频移现象，通过分析激光多普勒频移量可得到静水中氮气气泡速度。阮晓东等[17]通过粒子测速仪 (particle image velocimetry, PIV) 对气液两相流气泡进行光学成像，通过图像处理得到液体的流动速度分布与气泡速度分布。这两种方法的光学测量系统较为复杂，对测量环境要求较高，难以适用于工业应用。互相关测速技术通过在气液两相流中设置一定间距的传感器，基于随机过程理论，对气泡流动引起的上下游传感器数据进行互相关计算得到时滞，从而计算气泡流动速度[18-19]。由于互相关测速方法具有测量系统可靠、抗干扰能力强等优点，使得其在工业应用方面极具优势。

为实现复杂流型多变的气液两相流气泡流速非接触式测量，互相关测速方法通常可与电学法、光学法、声学法相结合，通过对气液两相流一定间距相应传感器的电容、电阻、透射光、超声等信号进行互相关分析得到气泡流速。赵倩等[20]基于电磁互相关测速原理，利用两组电磁传感器对流体中的气泡速度进行测量，对传感器气泡电磁激励信号进行互相关分析得到气泡速度。周颖等[21]将电容耦合式非接触测量与互相关法相结合，利用 C^4D 新型传感器对 3 种不同内径小通道中的两相流速度进行了测量，开展两组气液两相流流体电导信号互相关分析得到其中气泡速度。Yang 等[22]基于光信号衰减的原理，将其与互相关结合，通过双路激光测量得到气泡的速度与尺寸。相较于电学法易受两相流介电参数影响以及光学法对两相流成像要求较高，超声互相关气泡

流速测量方法基于气液相界面超声回波原理，在气液两相流管道中设置一定间距的两个超声传感器，通过分析气泡经上下游传感器产生的超声回波信号互相关性来计算气泡流动速度，不受两相流介质影响[23-25]。Figueiredo 等[26] 基于反射脉冲能量的超声互相关技术，研制了相应的测量系统，开展弥散气泡和段塞流型的弥散相速度测量，并将结果与图像分析和机理模型进行了比较，验证方法的可行性。Gurevich 等[27] 针对超声互相关流量测量仪的性能可能受到超声传感器位置湍流的显著影响这一问题，提出了生成合成湍流方法，并利用超声互相关流量测量的数学模型与实验数据进行了验证。

在超声回波法气液两相流气泡速度测量过程中，传感器间距、信号信噪比、气泡形状等因素对上下游传感器超声回波信号互相关分析都有较大影响[28-29]，研究这些因素对互相关分析的影响对于提高气泡速度测量精度具有重要价值。因此，本文基于超声互相关原理，开展超声回波互相关气泡流速测量方法研究，通过理论建模重点分析信号时滞、信噪比及信号特征参数等互相关测速影响因素，并以此为基础，搭建气液两相流实验平台，开展超声回波互相关气泡流速测量及其影响因素研究，为气液两相流动机制与优化研究提供的有效测量手段。

1 超声回波气泡流速测量原理及其影响因素理论分析

1.1 超声回波气泡流速测量原理

本文的超声互相关法是基于超声回波反射原理[30]，通过在气液两相流管道中的测量区域安装超声传感器向管道中发射超声波。气液两相的声阻抗差异导致大量超声波能量从界面处发生反射，由传感器接收得到反射信号。其优点是测量装置简单方便，比透射法所需要的超声探头数量要少，且不会对流动状态产生任何影响。将超声回波法与互相关法相结合，则需要两个超声探头，在两相流管道上间隔 L 的距离分别安装，通过外面超声仪器连线使两个仪器的信号同步后，两个超声探头会同时向管道中发射超声信号，当信号碰到气泡或者壁面后会发生反射，并由探头接收到发射信号，如图 1 所示。可以看出，超声探测器接收到的气泡反射信号与壁面反射信号在超声信号中的位置不同，且气泡的反射信号在壁面反射信号之前。

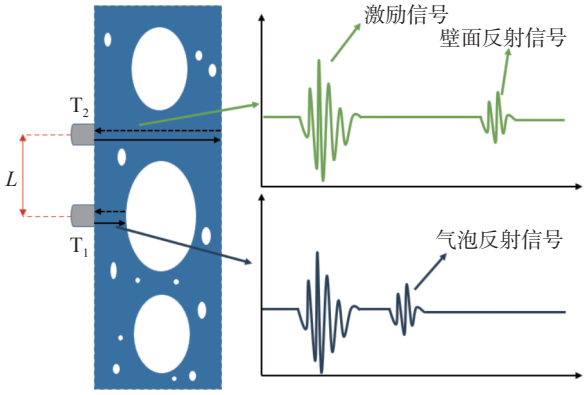


图 1 气液两相流气泡超声回波信号

Fig.1 The ultrasonic echo signal of gas-liquid two-phase flow bubbles

而目的是测量气液两相流中的气泡速度，若假设该流体为“凝固流”，在处理数据中，将超声信号的每个周期按采集顺序单独排列，便可以得到这段信号中的气泡位置与后壁面的位置。通过信号截取将气泡信号从中截出，以避免壁面反射信号造成干扰，两个探头所测得的超声信号经过数据处理后如图 2(a) 所示。对上下游传感器进行互相关分析，典型数据处理结果如图 2(b) 所示。研究可知，理论上仅存在时间差 τ_0，即流体同一点过上游传感器 T_1 和下游传感器 T_2 的时刻的时间差，称为“渡越时间”。由此可以认为，通过上游传感器 T_1 和下游传感器 T_2 所接收到的信号 $x(t)$、$y(t)$ 经过解调、放大和滤波等数据处理后，最终得到的信号之间的关系为

$$y(t) = x(t-\tau_0) \tag{1}$$

已知上下游传感器所接受到的信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间的关系，作互相关计算得到互相关函数 $R_{xy}(\tau)$：

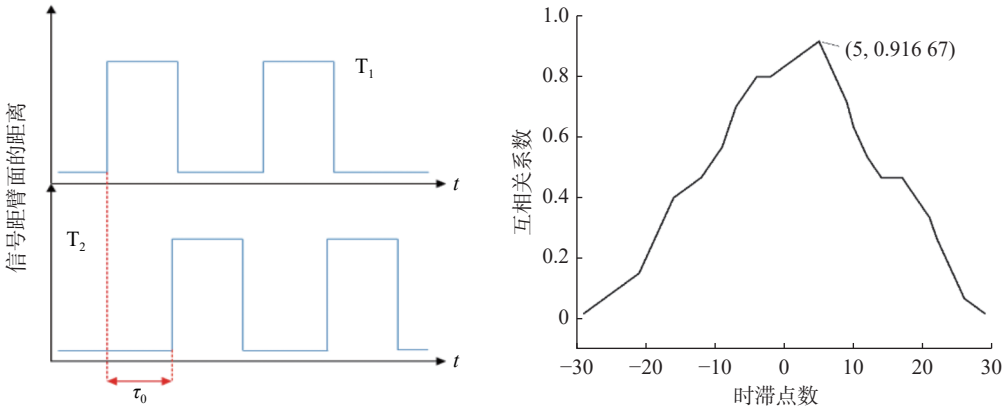
$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T x(t)y(t+\tau)\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中，T 为时间长度。

当 $\tau=\tau_0$ 时，互相关函数取得最大值，从而得知渡越时间 τ_0，进而求得流体的运动速度 v 为

$$v = \frac{L}{\tau_0} \tag{3}$$

渡越时间 τ_0 的准确确定取决于上下游信号具有良好的相关性。在互相关测速中，通常上下游信号的相关系数应大于 0.8，即：R_{xy}> 0.8。此外，保证上下游信号的时延与采样频率匹配，同时必须考虑待测流体的测速范围，然后综合上述因素



(a) 处理后的信号　　(b) 互相关系数

图 2　互相关测速原理

Fig.2　Principle of cross-correlation velocity measurement

选取合适的上下游传感器的距离 L。

1.2　超声回波随机信号互相关测速影响因素分析

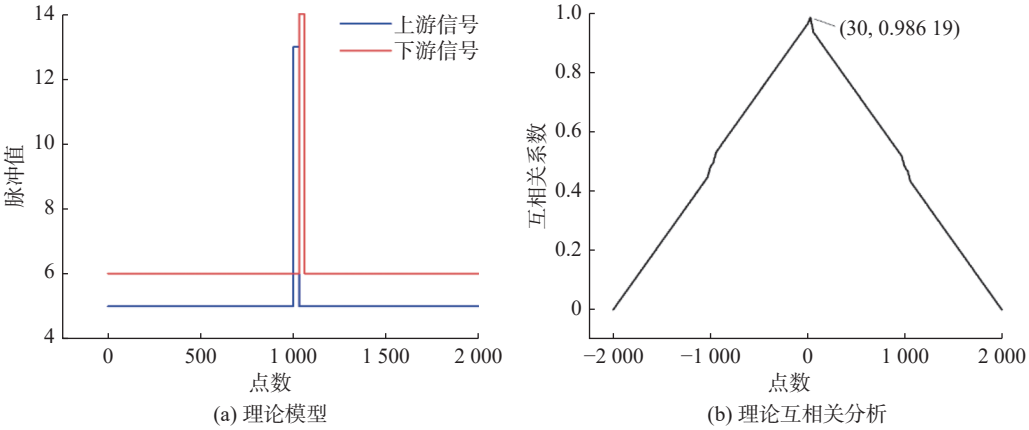
根据超声回波气液两相流测量原理，以典型气弹流型为研究对象，采用具有一定时滞的脉冲随机信号作为上下游传感器的信号进行理论建模。气泡产生的超声回波信号采用脉冲波形式，建立时滞为 30 个点数的时间间隔参考理论上下游传感器信号，并对该对信号进行互相关分析，如图 3 所示。超声回波法气液两相流气泡速度测量过程中，传感器间距、信号信噪比、气泡形状等因素对上下游传感器超声回波信号互相关分析都有较大影响。为了分析这些因素的影响，本节针对各个因素对该参考理论上下游传感器信号进行处理的，以模拟各个因素下的传感器信号，重点讨论各个因素对上下游传感器信号互相关分析的影响。

1.2.1　时滞对随机信号互相关分析的影响

时滞是上下游信号存在的时间差，其对互相关分析的主要影响在于传感器间距设置的不同，进而影响到上下游信号的相关性。因此，通过在如图 3 所示的参考理论上下游传感器信号设置 10、50、100、200、300 个点数的时间间隔，进行不同时滞的随机信号互相关分析，其影响结果如图 4 所示。可见，在无噪声影响的情况下，互相关系数随着时滞的增加而减小。因此，从保证互相关系数较高的前提下，应使上下游传感器时滞尽可能小，但这要求传感器测量频率高，并且能够具有有效信号随机波动特征。然而对于气液两相流气泡流动来说，需要获得有效的气泡特征信号，还与气泡流动速度有关，因此，互相关测速上下游传感器的设置必须综合考虑传感器间距、气泡随机信号特征与气泡流动速度等因素，从而选择适当的传感器参数。

1.2.2　噪声对随机信号互相关分析的影响

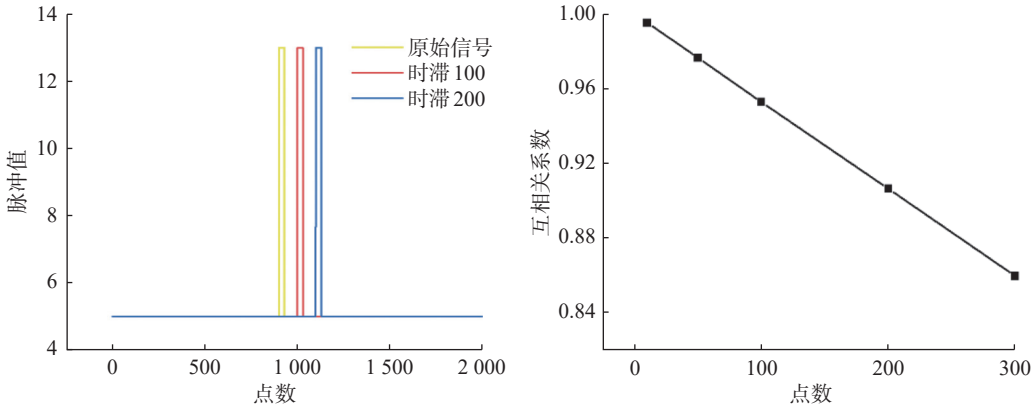
在超声回波互相关气泡速度测量中，超声回波信号的噪声较为复杂，通常来自于气泡流动界



(a) 理论模型　　(b) 理论互相关分析

图 3　超声回波随机信号理论分析模型

Fig.3　Theoretical analysis model of ultrasonic echo random signal

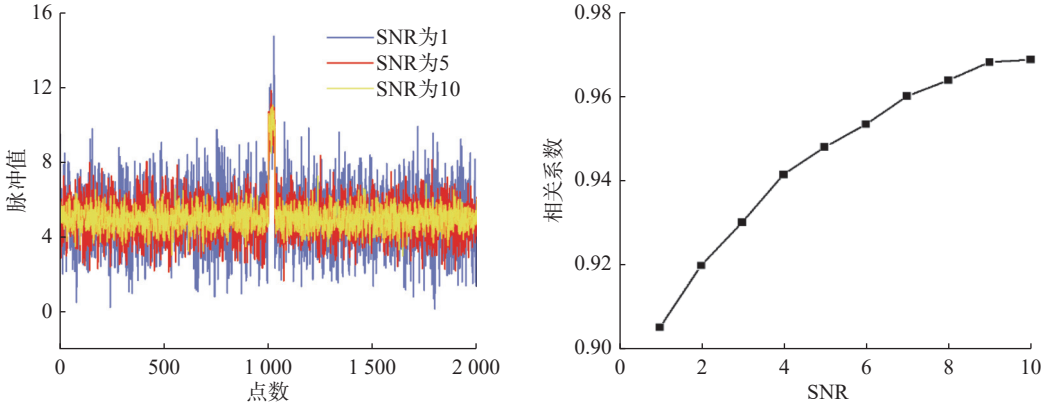


(a) 存在时滞的脉冲波信号 (b) 互相关分析结果

图 4 时滞对随机信号互相关分析的影响

Fig.4 Impact of time delay on cross-correlation analysis of random signals

面波动、多气泡互相关干扰、超声回波信号声电转换等因素。为更好地描述噪声对超声互相关分析的影响，采用白噪声函数（AWGN 函数）对如图 3 所示的参考理论上下游传感器信号进行叠加白噪声，通过将函数中的信噪比（signal-to-noise ratio, SNR）从 1 变化至 10，形成具有不同强度噪声的上下游传感器信号，并对叠加噪声后的上下游信号进行互相关分析，结果如图 5 所示。可以看出互相关系数会随着信噪比的增大而增大，这是因为信噪比越大，其中信号内的噪声信号所占比例也就越小，但互相关系数与信噪比并不是呈线性关系，而是随着信噪比的增大，其互相关系数增加的趋势也会逐渐变缓。因此，保证互相关系数较高的前提下，应使 SNR 尽可能高，可以更好地从噪声信号中分辨出脉冲信号。对于超声回波互相关气泡速度测量来说，需要从噪声中很好地分辨出气泡特征信号，还主要与超声探头的增益相关。因此，需要根据气液两相流中的两相流体的流动速度等因素选择适当的超声探头增益值。



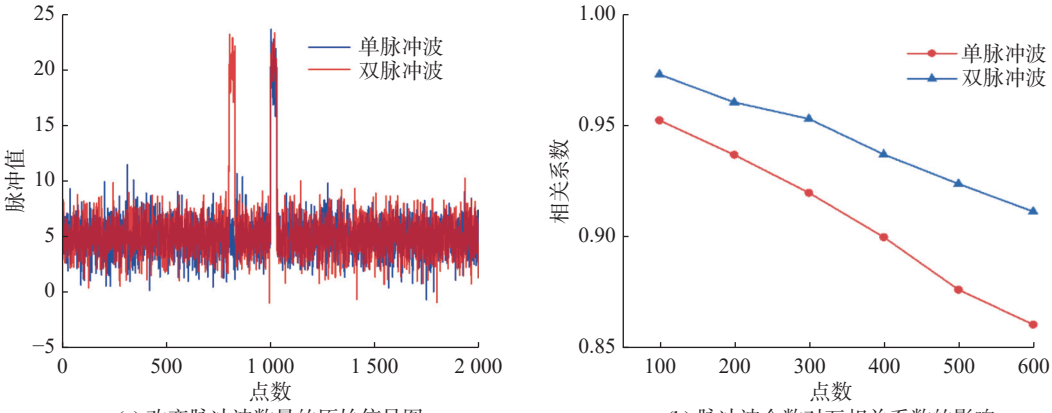
(a) 不同信噪比的脉冲波信号 (b) 互相关分析结果

图 5 信噪比对随机信号互相关分析的影响

Fig.5 Impact of signal-to-noise ratio on cross-correlation analysis of random signals

1.2.3 脉冲信号个数对随机信号互相关分析的影响

在超声回波互相关气泡流速测量中，多气泡超声信号的特征明显强于单气泡情况。因此，通过延长数据采集时间的方法增加数据宽度，以获得多个气泡超声回波信号来进行分析，可有效提高上下游传感器的互相关系数。为此，对图 5 中的叠加噪声后的信号增加 1 个脉冲波信号，并设置不同时滞的上下游传感器信号进行互相关分析，结果如图 6 所示。可以看到，相关性会随着脉冲波数量的增加而增强，但随着脉冲波数量的增多，互相关系数增加的趋势会逐渐平缓，且在设置的每个时滞下所呈现的规律均是如此。因此为了保证互相关系数尽量高，在所分析的数据中



(a) 改变脉冲波数量的原始信号图　　(b) 脉冲波个数对互相关系数的影响

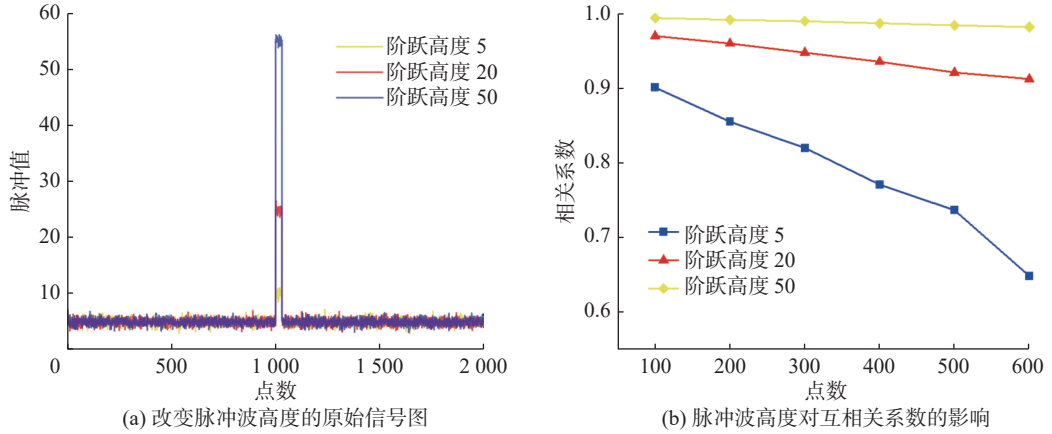
图 6　脉冲波数量对随机信号互相关分析的影响

Fig.6　Impact of pulse wave quantity on cross-correlation analysis of random signals

要尽可能多的脉冲信号，对于超声回波互相关气泡速度测量来说，在不改变气量的情况下，则需要延长数据的采集时长，但数据过长会加大互相关计算的时间，所以需要根据气泡速度及计算时间选择合适的采集时长。

1.2.4　脉冲信号阶跃高度及宽度对随机信号互相关分析的影响

在超声回波互相关气泡流速测量中，气量的大小会影响互相关计算所得的气泡速度的准确性。因此，通过改变气量进行互相关分析，可以探究其对互相关系数的影响。而脉冲波信号的宽度与高度主要与气液两相流中气量相关。为此，改变图 5 所示单脉冲波信号的高度与宽度，并设置不同时滞的上下游传感器信号进行互相关分析，结果如图 7 和图 8 所示。在脉冲波宽度一定的情况下，随机信号的相关性随着其脉冲波高度的增大而增加，而脉冲波高度为 20 的情况是一个较为明显的分界线。当脉冲波高度低于 20 时，互相关系数下降的趋势明显变快；而在脉冲波高度高于 20 时，互相关系数基本都可稳定在 0.9 以上且下降趋势较为缓慢。在脉冲波高度一定的情况下，随机信号的相关性随着脉冲波宽度的增大而增加，且在设置的每个时滞下所呈现的规律均是如此。因此，为了保证互相关系数尽量高，对所分析的数据中的脉冲波高度和宽度有一定的要求。对于超声回波互相关气泡速度测量来说，气量的不同直接影响这两点因素，所以针对不同的气量应选择合适的测量参数。



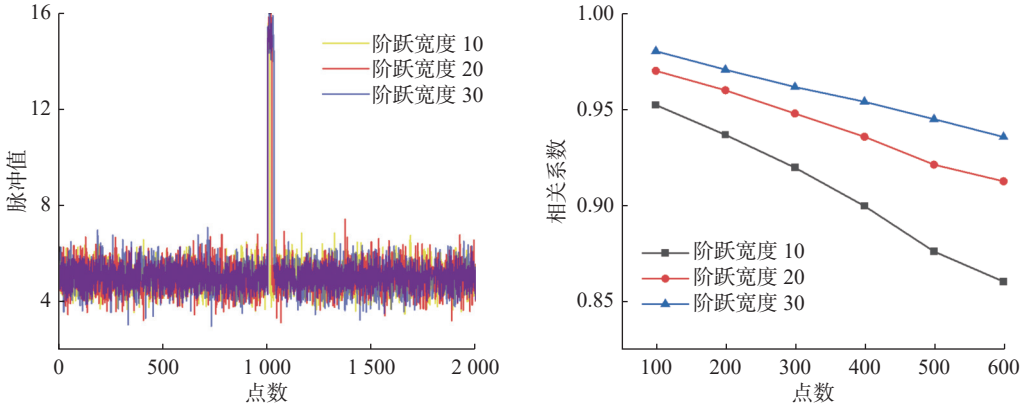
(a) 改变脉冲波高度的原始信号图　　(b) 脉冲波高度对互相关系数的影响

图 7　脉冲波高度对随机信号互相关分析的影响

Fig.7　Impact of pulse wave amplitude on cross-correlation analysis of random signals

2　气液两相流实验平台及超声回波气泡流速测量系统

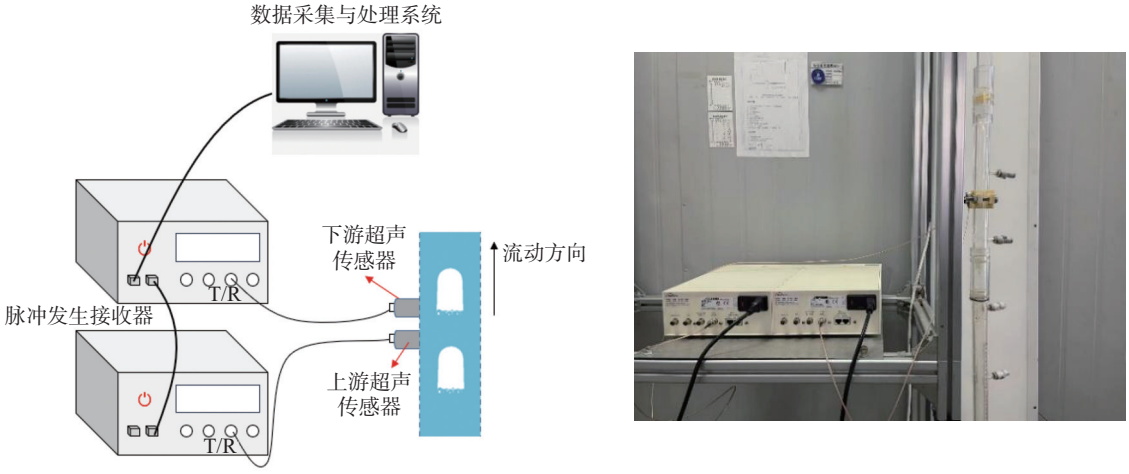
为进一步研究超声回波互相关气泡流速影响因素，搭建如图 9 所示的气液两相流实验平台，开展超声互相关实验研究。超声互相关测速系统由脉冲发生接收器、两个超声传感器、气液两相流平台以及数据采集系统组成。其中，将两个超



(a) 改变脉冲波宽度的原始信号图 (b) 脉冲波宽度对互相关系数的影响

图 8 脉冲波宽度对随机信号互相关分析的影响

Fig.8 Impact of pulse wave width on cross-correlation analysis of random signals



(a) 实验系统示意图 (b) 实验系统实物图

图 9 超声回波互相关气泡流速测量系统示意图

Fig.9 Schematic diagram of an ultrasonic echo cross-correlation bubble flow velocity measurement system

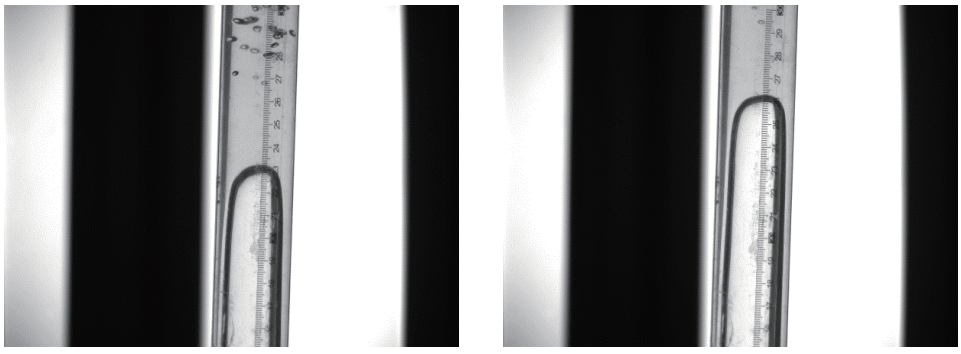
声传感器安装在垂直管道的壁面上，因管道外壁面有一定的弧度，且超声传感器与壁面之间需要紧紧贴合，所以在中间需要用楔块作为介质进行安装。本次超声实验测量的主要是气液两相流中影响气体速度的参数，所以实验中选择静水状态下测量气泡的速度，在一定程度上可以减小气体速度的测量误差。

实验过程中，首先启动水泵与管路中的阀门，待水路在管道中上升到一定高度后关闭水泵及阀门，让管道中的水处于静水状态；然后打开空压机进气，通过气体流量计控制所需要的气量大小，待超声仪器参数设置好以及管路中的两相流动稳定后，打开数据采集系统，并通过设定触发采集模式、采样频率及采样长度确定采集总时长，对超声信号进行采集。选择气量为 3 L/min 工况作为参考基准工况，设置上下游超声传感器间距为 L 为 $0.5D$（D 为测量管道内径）[27]，超声传感器的发射中心频率为 2.25 MHz，根据 Nyquist 定律，将信号采样频率设为 5 MHz。同时，利用相机对测量的气泡成像，获得的典型工况气泡流动图如图 10 所示。通过两张图所示气泡所到达的标尺刻度的差值与照片拍摄的时间差值，可以得到气泡流动速度。取多个气泡速度测量平均值作为参考值，分析超声回波互相关气泡速度测量偏差。典型工况下，多个气泡的图像法速度测量结果如表 1 所示，该工况下气泡平均速度为 0.319 m/s。

3 实验结果与讨论

3.1 探测器间距对超声回波信号互相关分析的影响

针对于时滞的分析可得，互相关系数随时滞呈反比关系，所以在时滞的选择上应当尽量小，而在气体速度不变的情况下，时滞所对应的就是探测器的间距。针对互相关的影响因素，首先应



(a) 0 ms　　(b) 101 ms

图 10　典型图像法气液两相流气泡速度测量结果

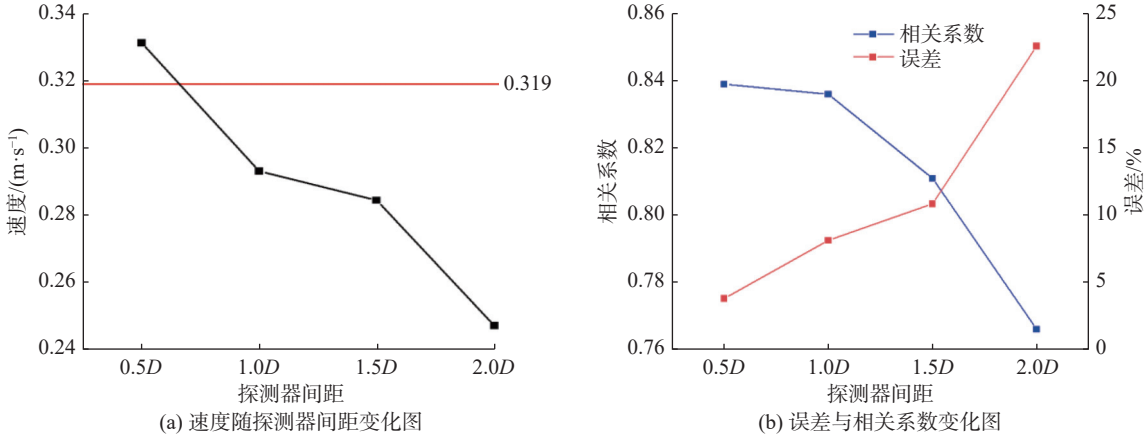
Fig.10　Typical image-based measurement results of gas-liquid two-phase flow bubble velocity

表 1　典型工况图像法多个气泡速度测量结果

Tab.1　Typical image-based measurement results of gas-liquid two-phase flow bubble velocity

气泡次序	速度/(m·s^{-1})
1	0.330
2	0.310
3	0.303
4	0.323
5	0.317
6	0.329
7	0.321

该探究的是探测器的间距对互相关的影响，通过分别采集 0.5*D*～2*D* 探测器间距下气弹游过的信号并进行互相关计算，然后对比其相关性与速度误差，进而探求探测器间距的影响。探测器间距对超声互相关速度测量的影响结果如图 11 所示。可知，探测器间距从 0.5*D* 增加至 2*D* 时，气泡速度的误差越来越大，且相关系数也在逐步减小，与数值仿真的结论相符合。在互相关测量中，探测器的间距越小越好，这能增加上下游传感器信号的相似性，同时减小探测器间隔路段中的噪声干扰。但在实际中，探测器本身有一定的半径使其间距不能无限减小，因此，综合考虑认为，选取 0.5*D* 的探测器间距开展超声回波互相关测量更为合适。



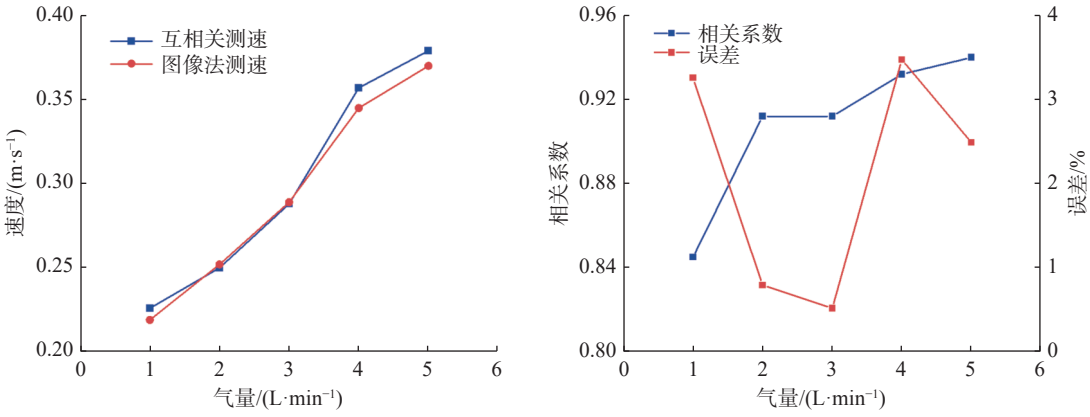
(a) 速度随探测器间距变化图　　(b) 误差与相关系数变化图

图 11　探测器间距对超声回波信号互相关分析的影响

Fig.11　Impact of detector spacing on cross-correlation analysis of ultrasonic echo signals

3.2　气量对超声回波信号互相关分析的影响

水流量不变的情况下增加气量，气泡的数量与长度在一定范围内均会增加，当气泡的长度增大至一定程度时，气泡的数量便会减小。所以，通过改变气量，研究不同气泡的长度、数量等因素对超声回波互相关气泡速度测量的影响。气量对超声互相关速度测量的影响结果如图 12 所示。可以看出，相较于图像法，互相关测得的速度误差并不会随着气量的增大一直减小。当气量为 3 L/min 时，互相关所测得的速度误差最小。这是因为，气量从 1 L/min 增长至 3 L/min时，固定的采集时间内的气弹数量没变，但气弹的长度一直在增



(a) 互相关法和图像法速度图 (b) 误差和互相关系数变化图

图 12 气量对超声回波信号互相关分析的影响

Fig.12 Impact of gas volume on cross-correlation analysis of ultrasonic echo signals

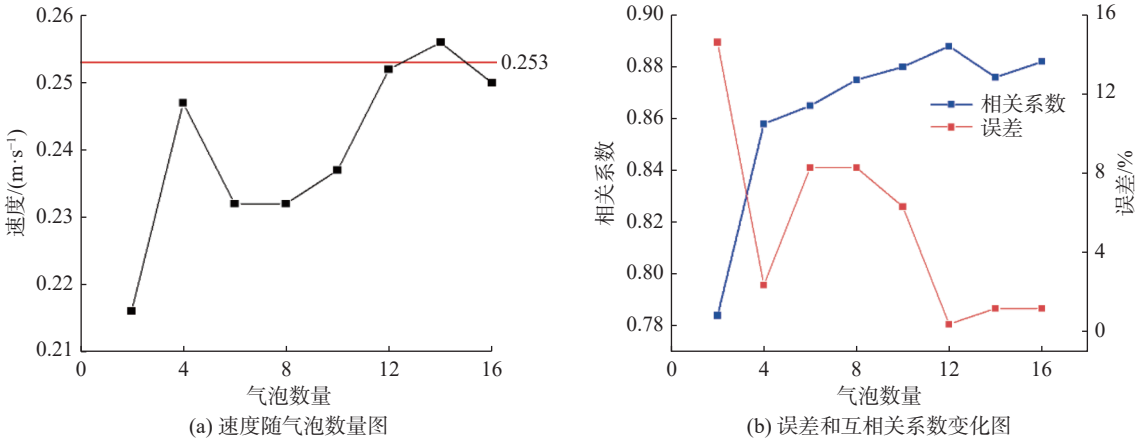
加。而当气量从 3 L/min 增长至 5 L/min时，虽然气弹长度继续增加，但同样采集时间内的气弹数量反而减少，所以测速误差开始增大。因为气量从 1 L/min 增长到 5 L/min 时，气弹长度一直在增加，所以相关系数也随之增长。

3.3 数据分析长度对超声回波信号互相关分析的影响

针对脉冲信号个数的影响分析可得，气泡数量对于互相关系数呈正比。但气泡数量过多会加大计算量，所以，在确定的时滞与流体参数的情况下，通过改变采集到的气泡数量，即数据分析时间段，进而探究气泡数量对互相关分析的影响。数据分析长度对超声互相关速度测量的影响结果如图 13 所示。可以看出，除了前两个气弹所计算的速度误差值较大外，其他气泡数量的误差值均不超过 10%，且相关系数的总体趋势始终处于上升趋势。此结果与仿真中针对于采集时间影响分析一致。在时滞不变的前提下，增加采集时间的同时也增加了气泡的数量，这不仅是缩小了时滞与采集时间的百分比，也同样增加了阶跃信号的个数。从图 13 中可以看出，误差与相关系数并不是一个单调的趋势。这是因为，在两相流中的气泡变化较快，增加少量气泡对最终计算结果的影响会有一定的随机性，但其总体的变化趋势仍是正向的。但在气泡数量大于 12 后，误差与相关系数的变化趋于稳定。所以，当气泡达到一定数量后，就可以保证互相关的计算精度。

3.4 超声换能器增益对超声回波信号互相关分析的影响

针对噪声对互相关分析的影响，表明了信噪比越大其互相关系数越小，即受到噪声的影响越小。在实验中，对于测量得到的信号的功率或信噪比无法精准确定。在超声仪器中，对超声信号影响最明显的是超声器的增益，该参数可以对接收器控制信号进行放大或者衰减的处理，但由于该放大接收器不仅会放大/减小采集到的有用信



(a) 速度随气泡数量图 (b) 误差和互相关系数变化图

图 13 数据分析长度对超声回波信号互相关分析的影响

Fig.13 Impact of selected data analysis length on cross-correlation analysis of ultrasonic echo signals

号，同时也会增大/减小采集到的噪声信号，所以，选取一个合适的超声器增益值对于其互相关计算至关重要。图 14 为增益为 25 dB、30 dB、35 dB 时的单周期超声信号示意图。可以看出，当增益为 25 dB 时，气弹的回波信号较弱，而当增益为 35 dB 时，尽管气弹的回波信号变强，但同时采集到的噪声信号也过强，因此，增益值选取 25 dB～35 dB，开展超声换能器增益对超声回波信号互相关分析影响的实验研究。

超声换能器对超声互相关速度测量的影响结果如图 15 所示。0.289 m/s 为通过图像标定的该工况下的速度，可以看到：在增益为 28 dB～32 dB 的情况下，互相关所计算的速度与图像标定的速度的误差在 10% 以内，属于合理误差范围；而在其他几种增益下，所计算的速度误差较大。当增益小于 28 dB 时，尽管所接收到的噪声信号不大，但由于气泡的回波信号也比较弱，所以有的回波信号会被噪声信号淹没；当增益大于 32 dB 以后，气泡的回波信号又容易被噪声信号所干扰，所以

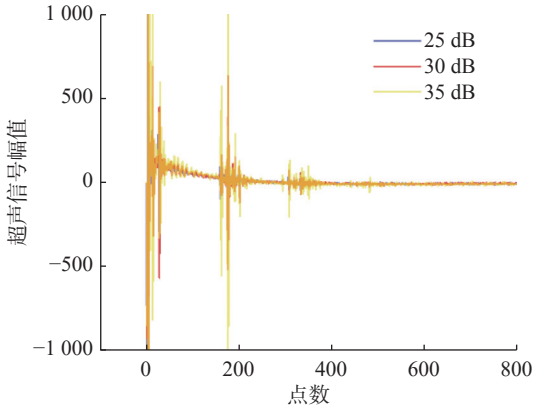


图 14　不同增益下超声回波示意图

Fig.14　Schematic diagram of ultrasonic echo under different gains

增益为 28 dB～32 dB 属于一个噪声会对回波信号产生干扰但影响不大的区间。因为时滞与采样时间没有发生变化，相关系数整体均处在 0.8 以上，且波动不大。所以，针对超声回波互相关测速，应根据两相流的流动情况、气量等因素，选取合适的探测器增益，从而减小噪声对信号的影响。

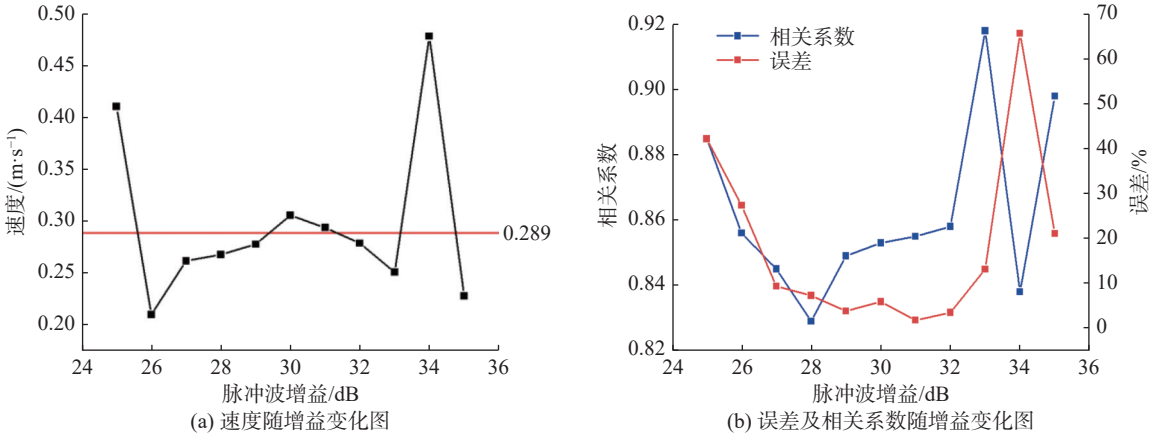


图 15　超声换能器增益对超声回波信号互相关分析的影响

Fig.15　Impact of ultrasound transducer gain on the cross-correlation analysis of ultrasonic echo signals

4　结　论

通过建立随机信号理论模型，开展时滞、噪声、脉冲信号等因素对随机信号互相关分析的影响分析。结果显示：随机信号互相关系数随时滞增加而降低；叠加白噪声后，随机信号互相关系数随 SNR 提高而增大，且趋势会逐渐变缓；叠加脉冲信号后，随机信号互相关系数随脉冲信号的个数、高度与宽度增加而增大，并且脉冲信号高度对互相关系数的影响强于宽度的影响。

通过搭建气液两相流实验平台，开展超声回波信号互相关分析的影响实验研究。结果显示：随着探测器间距增大，气泡速度的误差越来越大；随着气量的增大，气泡速度的误差在 3 L/min 的位置存在最小值；随着数据分析长度的增大，气泡速度的误差在气泡数量大于 4 后可以保持在 10% 以内；超声换能器的增益值仅在 28 dB～32 dB 的条件下保持在 10% 以内。这为超声回波互相关气泡流速测量方法、系统设计、优化及工业应用提供重要参考。

参考文献：

[1] 李海青. 两相流参数检测及应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.

[2] 王志刚, 雷兆团, 张广才. 超临界 600 MW 机组直流锅炉动态特性研究 [J]. 热力发电, 2010, 39(9): 14–20.

[3] 韦红术, 杜庆杰, 曹波波, 等. 深水油气井关井期间井筒含天然气水合物相变的气泡上升规律研究 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(2): 42–49.

[4] SHAH Y T, KELKAR B G, GODBOLE S P, et al. Design parameters estimations for bubble column reactors[J]. AICHE Journal, 1982, 28(3): 353−379.

[5] 郭烈锦. 两相与多相流动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 1–13.

[6] KUMAR S, CERVANTES M J, GANDHI B K. Rotating vortex rope formation and mitigation in draft tube of hydro turbines–a review from experimental perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 136: 110354.

[7] IBSEN C H, SOLBERG T, HJERTAGER B H, et al. Laser Doppler anemometry measurements in a circulating fluidized bed of metal particles[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6/7): 851−859.

[8] BRANKOVIC A, CURRIE I G, MARTIN W W. Laser-Doppler measurements of bubble dynamics[J]. Physics of Fluids, 1984, 27(2): 348−355.

[9] 周明, 李文采. 激光多普勒测速技术在气液两相流中的应用 [J]. 力学学报, 1991, 23(1): 46–52.

[10] LIU X H, GAO S Q, LI J H. Characterizing particle clustering behavior by PDPA measurement for dilute gas-solid flow[J]. Chemical Engineering Journal, 2005, 108(3): 193−202.

[11] LIU M, DUAN Y F, ZHANG T N. Evaluation of effervescent atomizer internal design on the spray unsteadiness using a phase/Doppler particle analyzer[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(6): 657−665.

[12] DEEN N G, WESTERWEEL J, DELNOIJ E. Two-phase PIV in bubbly flows: status and trends[J]. Chemical Engineering & Technology, 2002, 25(1): 97−101.

[13] CHENG W, MURAI Y, SASAKI T, et al. Bubble velocity measurement with a recursive cross correlation PIV technique[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16(1): 35−46.

[14] 邵建斌, 胡永亭, 陈刚, 等. 水气两相流中气泡运动的 PTV 跟踪算法研究 [J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 121–125.

[15] QU J W, MURAI Y, YAMAMOTO F. Simultaneous PIV/PTV measurements of bubble and particle phases in gas-liquid two-phase flow based on image separation and reconstruction[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 16(6): 756−766.

[16] YU P Y W, VARTY R L. Laser-Doppler measurement of the velocity and diameter of bubbles using the triple-peak technique[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1988, 14(6): 765−776.

[17] 阮晓东, 刘志皓, 瞿建武. 粒子图像测速技术在两相流测量中的应用研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2005, 39(6): 785–788.

[18] 李海, 黄志尧. 特种检测技术及应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.

[19] 王池, 王自和, 张宝珠, 等. 流量测量技术全书 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

[20] 赵倩, 尹武良, 陈广. 气液两相流中气泡速度的电磁互相关测量 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(11): 2181−2186.

[21] 周颖, 黄志尧, 王保良, 等. 基于 C^4D 技术的气液两相流流速测量新方法 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(2): 294–297.

[22] YANG B, WANG W S, PING L, et al. Measurement of bubble/slug velocity and size in vertical pipe based on optical cross-correlation method[J]. Optik, 2023, 272: 170172.

[23] REN R, WANG H L, SUN X L, et al. Design and implementation of an ultrasonic flowmeter based on the cross-correlation method[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7470.

[24] 董虓霄, 谭超, 董峰. 超声多普勒水连续油水分散流流速测量方法 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(4): 775–779.

[25] 马立玲, 郭坤, 王军政. 液体超声流量测量中的传播时间精度分析 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1028–1034.

[26] DE MELO FREIRE FIGUEIREDO M, DE CASTRO TEIXEIRA CARVALHO F, FILETI A M F, et al. Dispersed-phase velocities for gas-liquid vertical slug and dispersed-bubbles flows using an ultrasonic cross-correlation technique[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 79: 101949.

[27] GUREVICH A Y, GOMAN M G, GUREVICH Y G, et al. Synthetic turbulence modeling for evaluation of ultrasonic cross-correlation flow measurement[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 60: 134−143.

[28] 任明照, 黄永巍, 高东海. 基于多幅连续相关法的超声检测信号的缺陷识别技术 [J]. 无损检测, 2012, 34(4): 38–41.

[29] 史风栋, 张宏伟, 苏焕鑫, 等. 超声多普勒流量信号的多声道互相关检测方法 [J]. 传感技术学报, 2021, 34(10): 1334–1339.

[30] JIA L C, XUE B, CHEN S L, et al. A high-resolution ultrasonic ranging system using laser sensing and a cross-correlation method[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1483.

（编辑：董　伟）