DOI：10.13382/j.jemi.B2307151

段塞流分相流量的多传感器信息融合测量*

赵　宁[1,2]　温佳祺[1,2]　李金硕[1,2]　李新龙[1,2]　谢　飞[1,2]
（1.河北大学质量技术监督学院　保定　071000；2.计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心　保定　071000）

摘　要：气液两相流广泛存在于能源化工领域，由于两相流流动特性复杂多变，为流量准确测量带来了极大困难。为了建立准确的气液两相流量测量模型，针对气液两相段塞流分相流量测量，充分利用声发射传感器捕获气液两相流动噪声的功能和近红外吸收会因介质类别产生较大差异的特性，设计了一种新型测量传感器。在文丘里管的喉管和延伸段分别安装两组声发射探头，并在文丘里管的喉管处安装两组近红外光电探测器。设计了声发射与近红外同步采集系统，以水平管段塞流为实验对象，在河北大学高精度气液两相循环装置上完成了 54 组段塞流试验的数据采集，并进行融合处理，得到气液两相流特征参数。引入时域分析方法，提取声发射与近红外测量数据的标准差与偏斜度。结合参数拟合方法，建立两相流流量预测模型并进行误差分析。经验证，92.6%的流量预测值的相对偏差在±20%以内。结果表明，基于声发射传感器与近红外传感器的多传感器信息融合方案为气液两相流流动特征参数研究提供了一种新的思路。

关键词：段塞流；数据融合；相含率；流量；声发射；近红外
中图分类号：TH814；TN65　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：460.40

Flowrate measurement model for plug flow based on multi-sensor information fusion

Zhao Ning[1,2]　Wen Jiaqi[1,2]　Li Jinshuo[1,2]　Li Xinlong[1,2]　Xie Fei[1,2]
（1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071000, China;
2. National and Local Joint Engineering Research Center for Measuring Instruments and Systems, Baoding 071000, China）

Abstract: Gas-liquid two-phase flow, pervasive in energy and chemical industries, presents significant measurement challenges due to its inherently complex and dynamic nature. Accurate quantification of flow parameters remains elusive, given the variability in phase distribution and interaction dynamics. To address the need for accurate gas-liquid two-phase flow measurement, a novel sensor design is introduced. Leveraging the acoustic emission sensor's capability to detect flow-induced noise and the pronounced variation in near-infrared absorption across different media, the proposed sensor is specifically tailored for plug flow characterization in two-phase systems. Acoustic emission probes were dually installed in both the venturi pipe and its extension section, complemented by dual near-infrared photodetectors positioned within the venturi pipe. A synchronized acoustic emission and near-infrared acquisition system was developed. Utilizing this setup, 54 datasets of plug flow were meticulously gathered on the high-precision gas-liquid two-phase loop at Hebei University. Through integrated processing, characteristic parameters of the two-phase flow were successfully extracted. Time-domain analysis was employed to extract the standard deviation and skewness from the acoustic emission and near-infrared datasets. In conjunction with parameter fitting techniques, a predictive model for two-phase flow was formulated, followed by comprehensive error analysis. Through verification, the relative deviation of 92.6% of the predicted flow value is within ±20%. The results show that the multi-sensor information fusion scheme based on acoustic emission sensor and near-infrared sensor provides a new way to study the flow characteristics of gas-liquid two-phase flow.

Keywords: plug flow; data fusion; phase volume fraction; flow rate; acoustic emission; near Infrared

收稿日期：2023-12-24　　Received Date: 2023-12-24
*基金项目：国家自然科学基金（61475041）、河北省自然科学基金资助项目（F2022201034）、河北大学高层次人才科研启动项目（521000981319）资助

0　引　言

气液两相流广泛存在于石油、天然气等能源化工领域[1-2]，与日常生活密不可分。气液两相流动形态对流型本身的运动特性和内在机理产生影响，流动过程中会产生丰富的噪声信息，主要包括流体间相互作用产生的噪声、流体与管壁耦合噪声和背景噪声[3]。气液两相流动特征参数，如流型、相含率、分相流量，是表征气液两相流动特性的重要参数，其准确测量对工业设备创新与优化设计具有重要的研究意义。

在气液两相流动特征参数测量方面，国内外学者做了大量工作，主要集中在对流型、相含率以及分相流量的研究与分析。仝卫国等[4]提出了一种基于多层感知器(multilayer perceptron，MLP)的气液两相流流型识别方法，通过调整权重和偏置，可以在非线性映射中找到最优解，实现了对复杂数据模式的学习和识别。方立德等[5]提出了一种基于物质吸光度的气液两相流相含率测量模型，通过测量流体的透光率或吸光度，结合光学原理和实验数据分析，间接对相含率进行估计，为流体工程中的相含率测量提供了一种高精度、非侵入式的解决方案。陈阳正等[6]设计了一种基于微小电容测量电路的电容法相含率测量系统，并经实验证实了双环式传感器结构的测量系统线性度最好，实现了对气液两相流相含率的稳定、连续、高效测量。李金霞等[7]提出了一种基于三轴加速度检测的涡街流量计过读校正和湿气分相流量测量方法，设计了一款具有高频率响应的三轴加速度探头，实现了湿气中气相流量的准确测量，同时可预测液相流量，显著提高了湿气测量的精度。

目前，气液两相流动特征参数的检测方法主要有两种。一是基于经验模型的检测方法。该方法利用量纲分析提炼各变量间的关系，最终通过参数拟合与回归的方式建立预测模型，但模型的预测精度与外推性有较大的局限性。二是基于传统传感器的检测方法，如差压流量测量法[8-9]、科里奥利流量测量法[10]和涡街流量测量法[11-13]等。这些方法简单、方便、使用较早，可作为多相流前期检测的主要手段，广泛应用于气液两相流动检测领域。

上述检测方法多针对单一流动参数，对单一模态信号进行分析，其对流动状态信息的自适应能力有限，导致预测模型外推性不足。随着先进制造工艺水平的提升，新型测量传感器如声学传感器[14]、光学传感器[15]和电学传感器[16]等，开始逐步应用到多相流检测领域。新型传感器测量精度高、实时性好，能准确反映流动演变过程，但无法克服单个传感器的测量局限性；近年来，更多信息处理技术逐步应用于多相流[17]领域，如时频分析和人工智能算法，提高预测精度的同时，降低了检测难度。

声发射技术是一种无创测量技术，对流场没有干扰，适用于所有流体系统。气液两相流动过程中会产生各种流动噪声信息，这些信息与流型、相含率和流量密切相关。近红外光谱主要是由于分子振动的非谐振性使分子振动从基态向高能级跃迁时产生的，主要反映的是含氢基团 X-H(如 C-H、N-H 和 O-H 等)振动的倍频和合频吸收，其检测限可达 0.1%。空气和水均为均匀透明介质，基于其吸收峰不重叠且空气吸收峰为零这一特性，选取特定近红外波长可以实现对水的痕量测量。

充分利用声发射传感器捕获气液两相流动噪声的功能和近红外吸收会因介质类别产生较大差异的特性，设计了一种声发射与近红外信号同步采集系统，可以实现声、光、差压多模态的信号检测。以水平管段塞流为实验对象，提取声发射与近红外装置采集的相关数据，对其标准差与偏斜度进行多元非线性回归，建立体积含气率的预测模型并进行误差分析。最后在模型基础上用常规公式进行流量预测。

1　实验测试系统

实验在河北大学高精度气液两相流循环装置上进行，装置如图 1 所示，全部实验管段都配有温度、压力变送器，可实现对整个回路温度、压力动态参数的跟踪反馈，便于进行后续数据分析。实验中两相介质分别为水和经压缩后的空气。气相循环回路分为两路，其管径分别为 DN10 和 DN40，由空气压缩机作为气源，后接稳压罐与干燥机，保证提供稳定且干燥的气流。管道配有科里奥利质量流量计，提供气路标准流量。液相循环回路分为 3 路，对应管径分别为 DN10、DN32、DN40，方便对液相流量精确控制和调节。各回路管段前方均装有科里奥利流量计或电磁流量计，对流经液体进行精确测量，同时配备调节阀，用以实时调节管道内流量的大小，并通过喷淋装置，在试验段中与空气充分混合。混合后空气、水两相介质经过前直管段(13 m)充分发展后进入测试管段，采集相关数据。试验参数信息通过 NI 数据采集卡上传给计算机，由基于 LabVIEW 设计开发的数据采集系统进行参数调节和存储。实验中涉及的装置开关及阀门可通过上位机进行控制。其中所用到标准表的主要参数如表 1 所示。

本实验装置在普通文丘里管的基础上，对文丘里管的喉部进行了延伸，以便于在此装置上安装近红外和声发射传感器，构成声-光-差压测量传感器，如图 2(a)和(b)所示。前后管段通过细螺纹与喉管连接，延伸的喉管段内部镶嵌了透明管段，材质为石英玻璃管，透光性好且对近红外传感器的测量没有影响，便于充分接收光

图 1　高精度气液两相流测试系统

Fig. 1　Highly accurate gas-liquid two-phase flow test system

强信号。长喉颈文丘里管的前直管段与喉管部位的引压管,用于连接差压变送器。在长喉颈文丘里管喉管部位的侧壁上对称开了两组通孔,如图 2(a)(3~6),用于安装近红外传感器。喉管内探头间距较小,在流体流动状态一定的条件下,减少了信号损失,具有一定抗背景干扰的能力,提高了测量精度。新型文丘里管通过法兰盘与实验主管道进行连接。

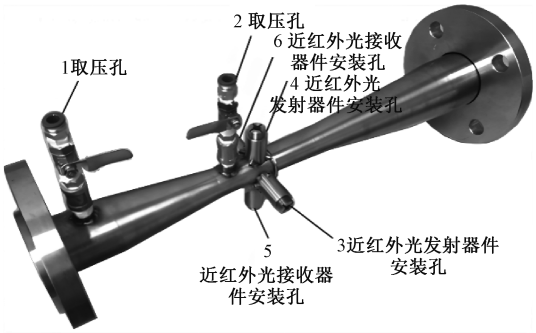
图 3 为声发射与近红探头外安装示意图。近红外传感器安装在文丘里管喉部,声发射探头用于采集流动噪声,安装在文丘里管喉部和延伸段,其中 1、2 号探头放置在文丘里管延伸段,3、4 号探头放置在文丘里管喉部。在声发射探头与管道接触面之间填充耦合剂,不仅起到润滑作用,减轻接触面之间的摩擦效应,控制和降低伴随产生的杂散背景噪声,使声发射探头与管道充分耦合,减少噪声信号传递过程中的损耗,保证信号的完整、连续传输,提高了测量精确度和可靠性。

另外,在实验管道上下游嵌入橡胶密封圈,有效减少管道震动对声发射信号的干扰,提高数据采集精度。长喉颈文丘里管前端连接了有机玻璃透明管段,与连接的直管段相通,管径为 DN50,可方便观察流型。实验参数范围如表 2 所示。

表 1　测量仪器的主要参数

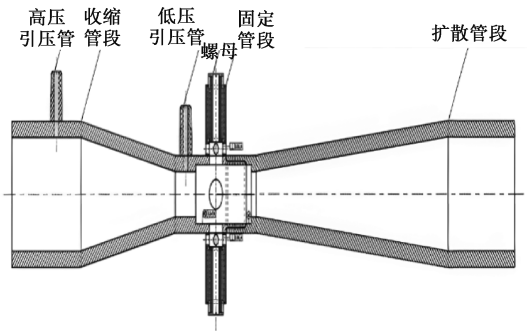
Table 1　Main parameters of measuring instruments

设备	参数				
	型号	管径/mm	测量范围	不确定度	k
科里奥利流量计(液相循环回路)	83F40-FQ16/0(Endress+Hauser)	DN40	(0.03~40) m^3/h	U=0.1%	2
电磁流量计(液相循环回路)	OOTIFLUX2300(KROHNE)	DN32	(0.03~20) m^3/h	U=0.2%	2
电磁流量计(液相循环回路)	OPTIFLUX4300(KROHNE)	DN10	(0.03~1.2) m^3/h	U=0.2%	2
科里奥利流量计(气相循环回路)	83E08-3HX0/0(Endress+Hauser)	DN10 DN40	(0.06~1) m^3/h (0.06~50) m^3/h	U=0.1%	2
温度变送器	JWB/38Z/A	/	(0~50)℃	U=0.2%	2
压力变送器	JT-8016CRA	/	(0~1) MPa	U=0.5%	2



(a) 文丘里管及近红外传感器设计图

(a) The design diagram of Venturi sensor and NIR sensor



(b) 长喉文丘里管整体装配图

(b) The assembling drawing of Long throat Venturi

图 2　声-光-差压流量测量系统

Fig. 2　Acoustic-optical differential pressure flow measurement system

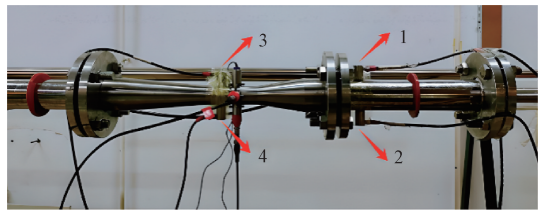


图 3　传感器装置示意图

Fig. 3　Diagram of the sensor device

表 2　实验参数范围

Table 2　Range of experimental parameters

气相流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	液相流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	压力/MPa	温度/℃	工况点
0.5~3	2~10	0.105	20	54

2　时域特征提取

2.1　标准差

标准差定义为总体各单位标准值与其平均数离差平方的算术平均数的平方根，表示所测数据个体间的离散程度[18]。本实验针对近红外与声发射数据，标准差可以研究数据的离散程度。标准差如式(1)所示。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})}{n-1}} \tag{1}$$

2.2　偏斜度

偏斜度又被叫做歪度，是对统计数据分布偏斜方向及程度的描述[19]，当偏斜度为正值时分布正偏，负值时分布负偏。跟据各工况点数据，计算声发射传感器与近红外传感器信号的偏斜度。偏斜度如式(2)所示。

$$SKEW = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^3}{n}}{\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}\right]^{\frac{3}{2}}} \tag{2}$$

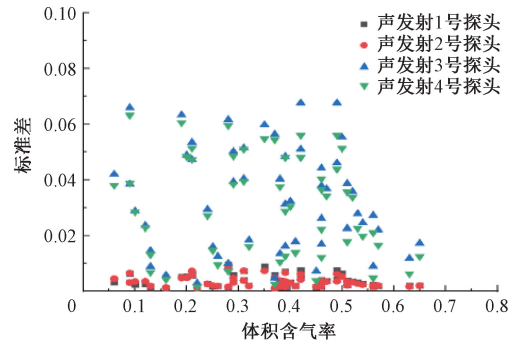
3　模型验证与结果分析

提取实验过程的实验数据，根据流动过程中采集到的流量值及各分相流速、压力及混合后的温度、压力等参数。可以得到实际体积含率如式(3)所示。

$$\gamma = \frac{\frac{(101.3 + P_g) \times Q_g \times (273.2 + T_b)}{(273.2 + T_g) \times (101.3 + P_b)}}{Q_l + \frac{(101.3 + P_g) \times Q_g \times (273.2 + T_b)}{(273.2 + T_g) \times (101.3 + P_b)}} \tag{3}$$

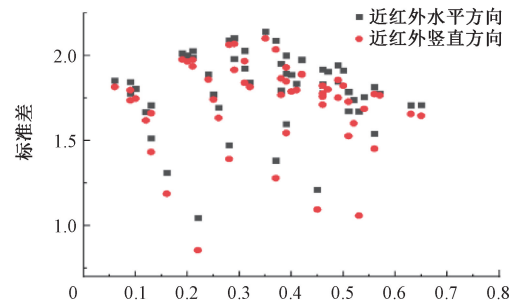
其中，P_g 为气路压力，Q_g、Q_l 为气、液相体积流量，T_b 为背景温度，T_g 表示气路温度，Q_l 表示液相体积流量，P_b 表示背景压力。求得每个工况点下的体积含率，作为实际含气率。

声发射与近红外传感器不同位置采集信号的标准差与实际体积含气率关系如图 4(a)、(b)所示。从图 4(a)中可以看出，声发射 1 号、2 号探头所测数据标准差明显低于 3 号、4 号探头的标准差，说明 1 号和 2 号探头所测数据离散程度小，气液两相流动较为稳定，而 3 号、4 号探头是固定在长喉颈文丘里管的喉部，管径收缩，气液间相互碰撞加剧，流动状态变得更加复杂，离散度升高。对于近红外传感器如图 4(b)所示，水平方向所测数据标准差略高于竖直方向，但差距并不明显，说明近红外所测数据的标准差受重力影响较小。



(a) 声发射信号标准差离散度评估

(a) Evaluation of standard deviation dispersion of acoustic emission signal



(b) 近红外信号标准差离散度评估

(b) Evaluation of standard deviation dispersion of near infrared signal

图 4　多传感器信号标准差与体积含气率

Fig. 4　Multi-sensor signal standard deviation versus volume gas fraction

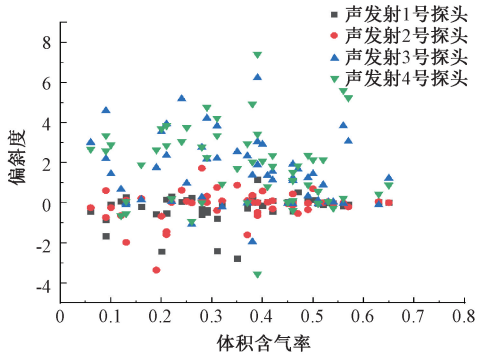
声发射与近红外传感器不同位置采集信号的偏斜度与实际体积含气率关系如图 5(a)和(b)所示。从图中可以看出，位于文丘里管延伸段的声发射信号的偏斜度较为集中，主要分布在 0 附近，表明流动的状态较为稳定。而位于文丘里管喉部的声发射信号的偏斜度波动较大，大多数大于 2，表明位于喉部的流动碰撞剧烈，运动混乱。而位于喉部的近红外信号的偏斜度随着体积含气率的增加整体呈现上升趋势，体积含气率增加，气液两相间相互作用增强，系统变得更加不稳定。

根据时域特征分析，分别提取了声发射和近红外探头数据的标准差与偏斜度进行数据融合，作为特征变量进行多元非线性回归，其中，将声发射探头标准差设为 x_1，偏斜度设置为 x_3，近红外探头数据标准差设置为 x_2，偏斜度设置为 x_4，体积含气率设为 y，其表达式如式(4)所示。

$$y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 \tag{4}$$

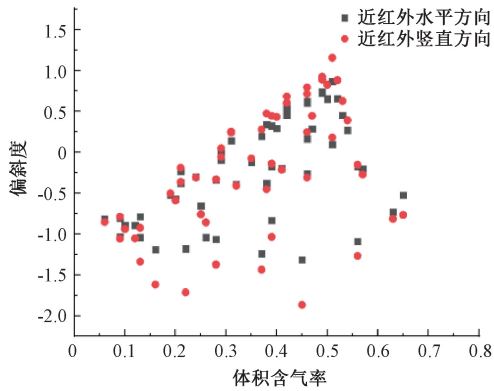
利用实验数据进行拟合得到 $a = -6.008\ 25$，$b = 0.342\ 42$，$c = -0.016\ 92$，$d = 0.164\ 16$。

预测体积含气率与实际含气率如图 6(a)所示，其误差分析如图 6(b)所示。从图 6(a)中可以看出，液相体



(a) 声发射信号偏斜度分布与体积含气率关系

(a) Relationship between skew distribution of acoustic emission signal and volume gas fraction

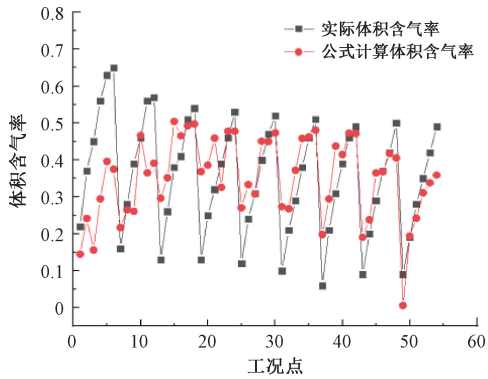


(b) 近红外信号偏斜度分布与体积含气率关系

(b) Relationship between the skew distribution of near infrared signal and the volume gas fraction

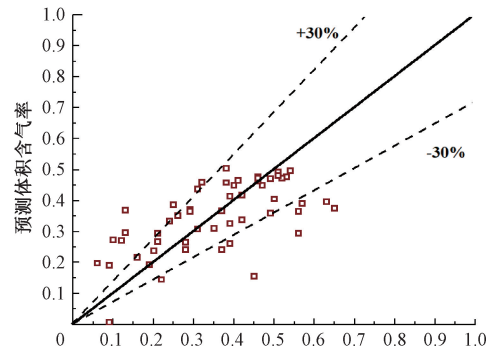
图 5　多传感器信号偏斜度与体积含气率的关系

Fig. 5　Multi-sensor signal skewness versus volume gas fraction



(a) 预测结果

(a) Prediction results



(b) 误差分析

(b) Error analysis

图 6　体积含气率预测结果及误差分析

Fig. 6　Volume gas fraction prediction results and error analysis

积流量较小(如 $Q=2$ m^3/h,$Q=3$ m^3/h)的情况下,体积含气率模型的预测值偏差较大。其原因可能是,由于在该流动条件下气液流速相差不大,经过文丘里收缩段加速后气液两相不能充分混合,导致上下声发射探头、垂直与水平近红外探头数值差异性较大,式(4)预测效果不佳。而在液相体积流量比较大(如 $Q=4\sim10$ m^3/h)的情况下,大的气塞被收缩段加速后的液相介质击碎成小气泡,与液相介质充分混合均匀,使得上下声发射探头、垂直与水平近红外探头数值差异性减小,因此预测模型的精度提升。从图 6(b)中可以看出,体积含气率预测模型的 MAPE 为 25.7%,70.1%的流量预测点相对偏差在±30%以内,表明建立的关联式可以作为体积含气率的预测模型。

在气液两相流流量研究的过程中,已经得出了多种测量模型,如 James 模型、分相流模型、林宗虎模型、Chisholm 模型等[20],将段塞流以均相流模型来处理。均相流模型之间没有相对速度,两相流混合密度如式(5)所示。

$$\frac{1}{\rho_{\mathrm{W}}}=\frac{x}{\rho_{\mathrm{g}}}+\frac{1-x}{\rho_{\mathrm{l}}} \tag{5}$$

式中:ρ_{w} 是气相与液相的混合密度,ρ_{g} 与 ρ_{l} 分别为气相密度与液相密度,x 为干度,将气液两相流作为密度为 ρ_{w} 的单相流体,如式(6)所示。

$$Q_{\mathrm{w}}=\frac{C\varepsilon\beta^2\pi R^2}{\sqrt{1-\beta^4}}\frac{\sqrt{\dfrac{2\Delta P_{\mathrm{W}}\rho_{\mathrm{g}}}{\rho_{\mathrm{g}}+x\left(1-\dfrac{\rho_{\mathrm{g}}}{\rho_{\mathrm{l}}}\right)}}}{\rho_{\mathrm{w}}} \tag{6}$$

其中,C 为流出系数,R 为入口管道半径,ε 为膨胀系数,β 为节流装置节流比,ΔP_{W} 为两相流体流过节流装置的差压。取 $R=0.025$ m,$\beta=0.4$,$C=0.975\ 53$。理论与研究表明,膨胀系数 ε 与雷诺数无关,对于已知节流比的节流装置,ε 只取决于节流装置上游压力、差压和等熵指数[21],可由式(7)计算求得:

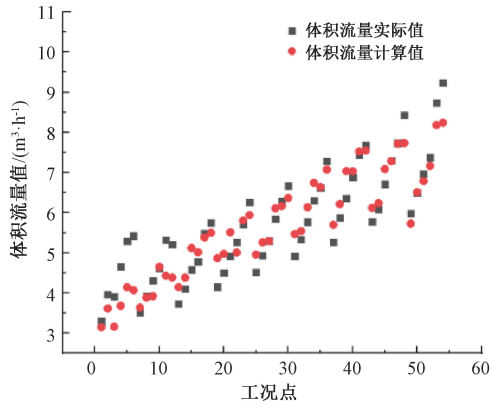
$$\varepsilon=\sqrt{\left(\frac{\kappa\tau^{\frac{2}{\kappa}}}{\kappa-1}\right)\left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4\tau^{\frac{2}{\kappa}}}\right)\left(\frac{1-\tau^{\frac{k-1}{k}}}{1-\tau}\right)} \tag{7}$$

其中,τ 为压力比,无量纲量如式(8)所示。

$$\tau = \frac{101.3 + P_b - \Delta P_w}{101.3 + P_b} \tag{8}$$

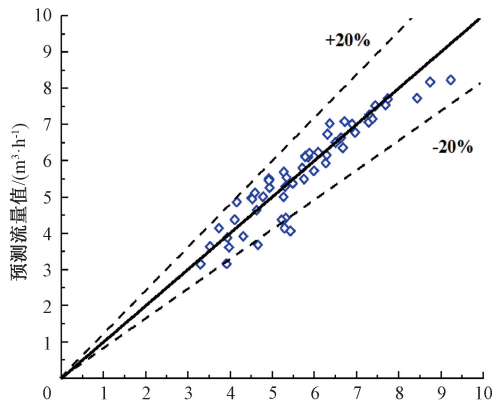
其中，κ 为等熵指数，属于无量纲量。等熵指数是在等熵（可逆绝热）过程中，压力的相对变化量与密度的相对变化量的比值，取 $\kappa = 1.4$。

预测体积流量与实际体积流量如图 7（a）所示，其误差分析如图 7（b）所示。



(a) 预测结果

(a) Prediction results



(b)误差分析

(b) Error analysis

图 7　流量预测结果及误差分析

Fig. 7　Flowrate prediction results and error analysis

图 7（a）可以看出，当液相体积流量较小时，液相体积流量预测值偏大。其原因可能是，在低流量条件下，气液两相混合不够均匀，其流型与均相流模型差异较大，致使利用式（6）计算得到的液相体积流量值误差偏大；随着液相流量的增大，气液两相在文丘里喉部可以实现充分均匀混合，其流型更接近于均相流，因此其预测模型精度逐渐提升，预测效果变好。从图 7（b）中可以看出，流量预测测量结果的 MAPE 为 6.7%，92.6%的流量预测点的相对误差在±20%以内。实验结果表明，建立的模型可以作为段塞流体积流量预测模型。

4　结　论

应用近红外传感器、声发射传感器和差压传感器，在实现声发射与近红外原始数据同步采集的基础上，成功构建了用于段塞流流量研究的多传感器实验测量系统。在文丘里管的喉管上安装两对近红外采集装置和两个声发射采集装置，文丘里管延伸段安装两个声发射传感器的新装置，对 54 个工况点进行了测试，实时记录差压、声发射以及近红外信号。

将测试系统采集的多传感器原始数据信息进行时域特征分析，提取了声发射与近红外测量数据的标准差与偏斜度，基于双模态信息融合，采用多元非线性回归的方法，建立了段塞流体积含气率预测模型，经验证，大多数测量点的误差在±30%以内。基于体积含气率预测模型，引入混合密度，以及等熵指数的膨胀系数模型，建立了基于差压的段塞流流量预测模型。实验结果表明，92.6%的预测结果偏差在±20%内。因此，基于声发射传感器与近红外传感器的多传感器信息融合方案为气液两相流流动特征参数研究提供了一种新的思路。

参考文献

[1] VERDE W M, BIAZUSSI J, PORCEL C E, et al. Experimental investigation of pressure drop in failed electrical submersible pump (ESP) under liquid single-phase and gas-liquid two-phase flow [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 198: 108127.

[2] ZHENG C, ZHANG M, QIU S, et al. Numerical simulation and experimental investigation of gas-liquid two-phase flow in a complex microchannel[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 230: 116198.

[3] 徐宏伟，魏伟，张秋雁，等. 一种含噪声测试的数字化电能表计量性能检测系统[J]. 国外电子测量技术，2017，36(5)：59-65.
XU H W, WEI W, ZHANG Q Y, et al. A metering performance testing system of digital watt hour meter with noise testing function [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(5): 59-65.

[4] 仝卫国，朱赓宏. 基于多层感知器的气液两相流流型识别方法[J]. 热能动力工程，2020，35(6)：116-122.
TONG W G, ZHU G H. Gas-liquid two-phase flow pattern recognition method based on multi-layer perceptron [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(6): 116-122.

[5] 方立德，田梦园，王配配，等. 基于物质吸光度的气液两相流相含率测量模型[J]. 光电子 · 激光，2021，32(4)：409-418.

FANG L D, TIAN M Y, WANG P P, et al. Phase holdup measurement model of gas-liquid two-phase flow based on material absorbance [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2021,32(4):409-418.

[6] 陈阳正,王小鑫,王博,等. 电容法气液两相流相含率测量系统研究[J]. 仪表技术与传感器,2020,(2):114-118.
CHEN Y ZH, WANG X X, WANG B, et al. Study on measurement system of phase volume fraction in gas-liquid two-phase flow with capacitance method [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020,(2):114-118.

[7] 李金霞,丁红兵,孙宏军,等. 基于三轴加速度探头的涡街湿气分相流量测量[J]. 仪器仪表学报,2023,44(7):17-27.
LI J X, DING H B, SUN H J, et al. Gas and liquid flow measurement by vortex metering in wet gas based on three-axis acceleration on probe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(7):17-27.

[8] 申屠云奇,宋煜晨,尹俊连,等. 扩散角对文丘里管内湍流影响的试验研究[J]. 核动力工程,2021,42(2):16-22.
SHEN T Y Q, SONG Y CH, YIN J L, et al. Experimental study on the effect of diffusion angle on turbulence in venturi tubes [J]. Nuclear Power Engineering, 2021,42(2):16-22.

[9] 郝彩哲,宋晓明,王东,等. 对称多孔孔板差压式流量计计量性能试验研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(5):174-180.
HAO C ZH, SONG X M, WANG D,et al. Experimental study on metrology performance of symmetrical porous plate differential pressure flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5):174-180.

[10] FADAEI M, AMELI F, HASHEMABADI S H. Investigation on different scenarios of two-phase flow measurement using orifice and Coriolis flow meters: Experimental and modeling approaches [J]. Measurement, 2021, 175: 108986.

[11] 黄绍锋,陈洁,宋佳忆,等. 涡街流量计漩涡发生体位置仿真研究[J]. 电子测量技术,2016,39(1):119-122.
HUANG SH F, CHEN J, SONG J Y, et al. Numerical simulation on vortex generating body position of vortex flowmeter [J]. Electronic Measurement Technology, 2016,39(1):119-122.

[12] 黎翱,徐科军,熊伟. 频率方差与幅值相结合的涡街流量计抗振方法[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(9):161-169.
LI AO, XU K J, XIONG W. Anti-vibration method of vortex flowmeter based on frequency variance and amplitude [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(9):161-169.

[13] 黄云志,翟丽文,吴晨,等. 面向强周期振动干扰的涡街流量计系统研制[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(8):105-112.
HUANG Y ZH, ZHAI L W, WU CH, et al. Development of vortex flowmeter system for strong periodic vibration interference [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (8): 105-112.

[14] HEGDE V, CHAULAGAIN N, TAMANG B H. Design, fabrication and experimental analysis of piezoresistive bidirectional acoustic sensor[J]. Sensor Review, 2024, 44(3):284-289.

[15] 赵宁,王超,孙宏军,等. 一种测量环状流液膜参数的传感器研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(4):995-1002.
ZHAO N, WANG CH, SUN H J, et al. Research on a sensor for measuring liquid film parameters of annular flow [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018,49(4):995-1002.

[16] 李新菊,管小平,杨宁,等. 基于能量最小多尺度曳力模型的搅拌槽内气液两相流计算流体力学模拟及实验研究[J]. 化工进展,2017,36(11):4000-4009.
LI X J, GUAN X P,YANG N, et al. Computational fluid dynamics simulation and experimental study of gas-liquid two-phase flow in a stirring tank based on minimum energy multi-scale drag model [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2017,36(11):4000-4009.

[17] 万倪,钱相臣,闫勇. 多相流互相关测速算法综述[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(5):1-11.
WANG N, QIAN X CH, YAN Y. Review of cross-correlation velocity measurement algorithms for multiphase flow [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(5):1-11.

[18] 邓群,罗传文. 均匀度解释混沌及生态现象的数学依据[J]. 河北大学学报(自然科学版),2016,36(4):343-348.
DENG Q, LUO CH W. The mathematical basis of uniformity in explaining chaos and ecological phenomena [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2016, 36(4):343-348.

[19] MAMONOV V N, SEROV A F. Experimental determination of the volume concentration of the gas phase in gas-liquid flow [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2021, 62(1): 57-62.

[20] 贺登辉,陈森林,白博峰. 基于 Chisholm 模型的 V 锥流量计气液分层流测量新模型[J]. 化工学报,2018,69(8):3428-3435.
HE D H, CHEN S L, BAI B F. New model for measuring stratified gas-liquid flow by Chisholm-model-based V-cone flowmeter [J]. CIESC Journal, 2018, 69(8):3428-3435.

[21] 许文达,张涛,毕英,等. 蒸汽对涡街流量计计量特性影响分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014,47(8):683-688.
XU W D, ZHANG T, BI Y, et al. Analysis of the influence of steam on the measurement characteristics of vortex flowmeter [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014,47(8):683-688.

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与仪器。
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 received his 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 and instruments.

温佳祺,2021 年于山西大学获得学士学位,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。
E-mail: benben93657@ 163. com

Wen Jiaqi received her B. Sc. degree from Shanxi University in 2021. She is currently a M. Sc. candidate in Hebei University. Her main research interest is multiphase flow measurement technology and instruments.

谢飞(通信作者),2006 年于中国计量大学获学士学位,2021 年于河北大学获得硕士学位,现为河北大学实验师,主要研究方向为流量检测技术。
E-mail: xiefei-1214@ 163. com

Xie Fei (Corresponding author), received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 2006 and his M. Sc. degree from Hebei University in 2021. He is currently an experimentalist at Hebei University. His main research interest includes traffic detection technology.