

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209700

电磁波相位传感器弹状流混合介电常数分析*

赵宁^{1,2}, 宋亚净^{1,2}, 叶兴跃^{1,2}, 祝彦^{1,2}, 张栓柱³

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 河北大学认证认可研究所 保定 071000;
3. 河北白沙烟草有限责任公司保定卷烟厂安全管理部 保定 071000)

摘要:根据电磁波传播理论,设计了测量截面含气率的相位传感器。通过在传感器前端加装混相器,使之转化为均相流动,实现弹状流截面含气率的测量,并对不同流动条件下混合介电常数进行了分析。对对数、雷列伊、串并联、H-B 和 Bruggenman 混合介电常数预测模型进行对比评价,平均绝对百分比误差分别为 41.51%、6.07%、80.45%、62.51% 和 56.7%。针对弹状流,提出一种新的加权混合介电常数预测模型,平均绝对百分比误差为 4.37%,71.43% 的数据在 5% 的平均相对误差范围内。根据同一流动条件下基于均相流的截面含气率实验模型作为弹状流模型实验中的参比真值,对提出的混合介电常数预测模型求解的截面含气率的结果进行验证及评价,结果表明,截面含气率预测模型的平均绝对百分比误差为 0.34%。

关键词: 截面含气率;同轴线;混相器;弹状流;电磁波技术

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

Analysis of hybrid dielectric constant of electromagnetic wave phase sensor slug flow

Zhao Ning^{1,2}, Song Yajing^{1,2}, Ye Xingyue^{1,2}, Zhu Yan^{1,2}, Zhang Shuanzhu³

(1. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. Institute of Certification and Accreditation of Hebei University, Baoding 071000, China; 3. Hebei Baisha Tobacco Co., Ltd., Baoding Cigarette Factory Safety Management Department, Baoding 071000, China)

Abstract: Based on the electromagnetic wave propagation theory, this article designs a phase sensor to measure void fraction. By adding a phase mixer to the front of the sensor to convert it into homogeneous flow, the measurement of the void fraction of the slug flow is achieved, and the mixing dielectric constant under different flow conditions is analyzed. The hybrid dielectric constant prediction models, logarithmic, Rayleigh, series-parallel connection, H-B and Bruggenman, are evaluated comparatively with mean absolute percentage error of 41.51%, 6.07%, 80.45%, 62.51%, and 56.7%, respectively. A new weighted mixed dielectric constant prediction model is proposed for the slug flow, and the mean absolute percentage error is 4.37%, with 71.43% of the data within 5% of the mean relative error. Based on the experimental model of void fraction based on homogeneous flow under the same flow conditions as the reference true value in the experiments of the slug flow model, the results of the void fraction solved by the hybrid dielectric constant prediction model proposed in this article are verified and evaluated. Results show that the mean absolute percentage error of the void fraction prediction model is 0.34%.

Keywords: void fraction; coaxial line; phase mixer; slug flow; electromagnetic wave technology

0 引言

气液两相流广泛存在于石油化工、天然气开采及运

输、核反应堆冷却及烟草行业动力管道安全检测等众多工业领域。截面含气率是气液两相流中极为重要的流动参数之一^[1-4]。两相流体常常以混合物形式存在于大自然,通常以气相、液相混合物形式存在,气相包含天然

收稿日期:2022-04-27 Received Date: 2022-04-27

* 基金项目:河北省自然科学基金重点项目(F2021201031, F2022201034)、教育部“春晖计划”合作项目资助

气、空气等成分,液相包含油类或水等成分。为解决管道内气液两相流动的复杂性,已经有许多检测技术被开发出来^[5-7]。近年来,含气率的非侵入式测量手段发展已相当成熟,主要包括射线法、粒子图像测速技术(PIV)、电容法和微波法。

射线法包括伽马射线法和X射线法,其中最普遍使用的是伽马射线法。射线的入射强度容易获得,根据气相和液相可以得到衰减系数大小,然后依据比尔定律即可得到平均持水率大小。Nazemi等^[8]通过利用两个NaI探测器,采用了多波束伽马射线衰减技术来确定空隙率。Rossi等^[9]利用X射线衰减测量研究了水平管空隙率的垂直分布。射线法虽可以对截面含气率进行检测,但其在流速、流动状态、时间采集等方面的限制,很难在实际生产中应用。PIV法作为一种新的流动测量技术,利用特殊的示踪粒子加入到流场内,通过激光片光源对待测流场平面进行照射,以便得到相应流动信息。Abhijeet等^[10]利用PIV技术来测量湍流的速度分布,并将测量结果与CFD仿真预测结果进行了比较。Seo等^[11]对低含气率垂直入射泡状射流的流动特性和湍流抑制进行了实验研究,利用PIV研究了气泡分布对流动特性的影响。PIV法可是实现对流场的快速准确测量,受干扰小。但对管道的要求较高,必须是透明管道,并且成本高,难以在现场应用。电容法是利用两相流中介电常数的微小变化与两相含量的多少有关的原理来实现相含率检测的。Chen等^[12]在垂直上升油水两相中利用同轴电容式传感器来对低速油水两相流的持液率进行测量,并通过有限元分析对传感器分布特性及几何尺寸进行了优化。Wang等^[13]研究了一种新的同轴电容传感器网络,其特征在于平行弯曲电极和非平行平面电极。建立了同轴电容式传感器的理论模型,分析了传感器网络中两种电容传感器之间的关系。为了验证理论分析,模拟了同轴电容传感器网络中的电场强度分布,并模拟了不同尺寸和数量的碎片对电容值的影响。对理论模型和仿真结果进行了实验验证,验证了该传感器网络的可行性。但是,电容法易受环境因素的影响,进而会影响检测精度。并且由于管道形状原因,两极板间可包含多种介质(空气、流体等),这会降低测量准确度。同轴圆柱形传感器由于自身独特的结构使得自身不容易受外界干扰,测量范围较平行板电容器较大,对结构内的介电常数变化比较敏感。但是,寄生电容容易影响其电路的稳定性,而且在装置前段需要安装气体分离装置。

微波法可对流体的密度、截面含气率等特征参数进行测量。Makeev等^[14]提出了一种测量流动原油含水率的微波方法并基于微波装置提出了两种改进方法,分别用于测量0.01%~30%范围内的含水率和0.01%~100%范围内的含水率。Sharma等^[15]提出一种新的基于开口

微波谐振腔和近壁面微扰的传感原理,实现对多相流中水液比的非侵入式测量。微波技术具有受外部环境的影响较小,抗干扰能力强,响应速度快等特点。同时,同轴线传输是市场上普遍使用的一种微波传输方式,并逐渐应用于多相流领域。Abbas等^[16]设计了一种同轴传感器用来检测油棕果实的含水量,并在不同成熟度的油棕榈果实上进行了测试实验,采用准静态导纳模型和介质混合模型相结合的方法计算了果实的介电性能。王进旗等^[17]利用同轴传输线作为传感器来测量油水混合介质的持水率,并且研发的同轴线式相位法找水仪可以实现持水率的动态测量。赵才军等^[18]根据微波网络理论推导了电介质的复合介电常数和磁导率的理论公式,并且通过改进的全二端口校准方法消除了同轴夹具的长度以及试样在夹具中的位置对测量结果的影响。同轴线相位测量技术解决了高含水油田油井中原油含水率难以测准的问题,并且具有较高的分辨率和灵敏度,具有较好的推广应用前景。但同轴线多用于油水两相流检测领域,在气水两相流方面研究不足。

本文根据电磁波传播原理,设计了一种基于同轴线相位差原理测量含气率的电磁波相位传感器,并基于均相流模型对弹状流混合介电常数进行了求解。对几种常见混合介电常数模型进行了对比评价,针对弹状流流型,提出了一种新的混合介电常数求解模型,并对其求解得出的截面含气率模型进行了验证。

1 电磁波相位传感器

1.1 电磁波传播机理

根据电磁场理论可知,传播常数 γ 是表征电磁波在气液两相流中变化特性的参数。

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_r} = j\omega\sqrt{(\epsilon_r - j\sigma/\omega)} = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0(\epsilon_r - j\epsilon_2)} \quad (1)$$

γ 一般用复数表征,设 $\gamma = \alpha + j\beta$,其中实部 α 表征传输线的衰减常数,虚部 β 表征传输线的相位常数。将复数表达式代入式(1)求解可得:

$$\begin{aligned} \alpha &= (\omega^2\mu_0\epsilon_0\epsilon_r/2)^{1/2} \{ [1 + (\sigma/\omega\epsilon_0\epsilon_r)^2]^{1/2} - 1 \}^{1/2} \\ \beta &= (\omega^2\mu_0\epsilon_0\epsilon_r/2)^{1/2} \{ [1 + (\sigma/\omega\epsilon_0\epsilon_r)^2]^{1/2} + 1 \}^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: σ 为传输线内介质等效电导率; ω 为信号角频率; ϵ_0 为真空绝对介电常数; μ_0 为真空介质磁导率; ϵ_r 为混合介质相对介电常数。

由式(2)可知, γ 的大小主要取决于气液两相混合介质的介电特性,即相对介电常数和电导率。

当 ω 足够大时, $(\sigma/\omega\epsilon_0\epsilon_r) \ll 1$,则式(2)化简为:

$$\beta \approx \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r} \quad (3)$$

则电磁波在 L 长的同轴线内传输时的相位移如下所示:

$$\Delta\varphi = L\beta \quad (4)$$

式中: L 为同轴线长度。

1.2 传感器原理及结构设计

电磁波相位传感器的设计原理是当气液混合介质流过同轴线装置内外导体之间时,不同的流动状态会导致气液混合介质的介电常数发生变化,进而导致电磁波的相位特性发生变化。在选择合适的传感器参数基础上,经测量电磁波在同轴线内传播的相位特性获得混合介电常数,最后利用气液混合介电常数模型经数据处理求出弹状流混合介质的含气率。根据电磁场理论,以及基于已知的气液两相流相含率测量方法及原理,合理设计了电磁波相位传感器的结构。

传输线是用来引导传输电磁波能量和信息的装置,电磁波相位传感器以同轴线作为传输线来引导电磁波向特定方向的传播,由内、外导体构成。同轴线中采用TEM波作为主模式,在这一条件下,电场与磁场只分布在横截面内,电场仅存在于内外导体之间,呈辐射状且场结构稳定。同时外导体能起到一定的屏蔽作用,抗干扰性好。同轴线的内电极由一根金属棒构成,外电极由金属管道导电部分构成。在管壁上沿一条水平线取两个孔,从孔中插入一根内部为铜芯,外部包裹着绝缘不导电材料的U型管作为同轴线,其直径为10 mm,长为180 mm。将U型管安装在不锈钢管段的轴心位置,该位置保证流体经过U型管时流动形态基本保持不变。传感器主体由DN50的不锈钢管构成,两端以法兰连接,电磁波相位传感器结构如图1所示。



图1 电磁波相位传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic wave phase sensor structure

电磁波相位测量系统主要由电磁波相位传感器、功分器和电路系统组成,如图2所示。电路系统集成成了STM32主控器、DDS数字频率合成器、鉴相器、RS485通讯模块和电源模块。电路系统中的信号源产生一定频率的电磁波信号,电磁波信号传输至功分器,功分器产生两路频率、相位等传输参数一致的电磁波信号,一路输出信号传至电磁波相位传感器输入端,另一路传输至鉴相器,电磁波同轴相位传感器输出端连接鉴相器,最后原始参考信号与过电磁波同轴相位传感器的信号进入鉴相器,两路信号会在鉴相器内进行相位差对比,得到相位差输

出值。由于经过同轴线内的电磁波信号经过气液混合介质后,会发生相位偏移,再经鉴相器比较、处理后,经AD转换器,将收集值转换计算并上传到上位机,获得测量段内含气率。

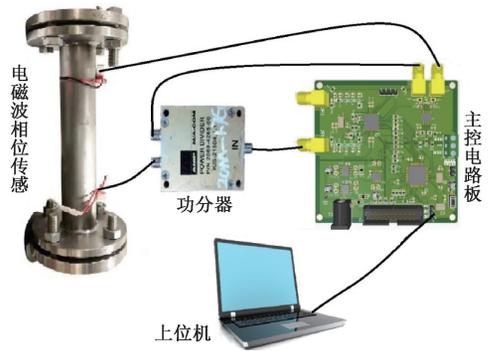


图2 电磁波同轴相位传感器测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the electromagnetic wave coaxial phase sensor measurement system

对于气液两相混合介电常数的求解,不光涉及到气相和液相各自的介电常数,还与气液两相流的混合状态有关。弹状流由气弹和液塞交替流动,气弹与管壁之间被液膜隔开,并且液塞与气弹交接处尾随着很多小气泡,这种流动特征会对 ϵ_r 的求解造成很大的不确定性。为准确获得混合介电常数值,本文对气液混合介电常数的求解采用均相流模型,气液两相流为遵守单相流体基本方程的均匀介质,使得两种介质能够串联成与电场垂直的连续层以提高计算精度。

基于此本文对电磁波相位传感器加装了混相器装置。当来流流经传感器之前先经混相器对弹状流进行搅拌,使气液两相得到充分混合。本文采用SV型静态混相器,其流程简单,结构紧凑,能耗小,是一种没有运动不见的高效混合设备,混相器结构如图3所示。SV型静态混合器的内部结构是利用金属片制成的波纹板交替重叠在标准管中,将混合单元彼此呈 90° 相交构成。



图3 混相器内部结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the internal structure of the mixer

2 含气率测量模型及实验测试

2.1 含气率测量模型

本文利用混相器对弹状流进行搅拌,弹状流均匀混合之后气液两相相互渗透,气水混合物呈均相流状态,流型稳定,因此将气液混合物看成为单一均匀介质。当流体以均相流的形式流过电磁波传感器,采用串联公式对混合介电常数进行求解:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_w \epsilon_g}{\epsilon_w \alpha_g + \epsilon_g (1 - \alpha_g)} \quad (5)$$

式中: α_g 为含气率; ϵ_g 为气体相对介电常数, $\epsilon_g \approx 78.3$; ϵ_w 为水的相对介电常数, $\epsilon_w \approx 1$ 。

ϵ_r 和 V_{PHS} 存在函数关系,对于相位差输出的求解利用对数放大器的对数压缩原理,其相位差为

$$V_{PHS} = k[\phi_A - \phi_B] = -k[|\phi_A - \phi_B - 90^\circ|] + V_Z \quad (6)$$

式中: V_{PHS} 为相位差输出; k 为斜率, $-10 \text{ mV}/^\circ$; ϕ_A 为 A 路输入相位; ϕ_B 为 B 路输入相位; V_Z 为中心点, $V_Z = 0.9 \text{ V}$ 。

结合式(4)可得出 ϵ_r 和 V_{PHS} 之间的函数表达式:

$$V_{PHS} = -0.01 \left(\omega L \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r} - \frac{\pi}{2} \right) + 0.9 \quad (7)$$

故截面含气率的求解公式为:

$$\alpha_g = \frac{4\omega^2 L^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_w \epsilon_g}{(180 - 200V_{PHS} + \pi)^2 (\epsilon_w - \epsilon_g)} - \frac{\epsilon_g}{\epsilon_w - \epsilon_g} \quad (8)$$

2.2 实验结果分析

在河北大学高精度气液两相流实验装置上进行实验,将混相器和电磁波相位传感器安装在测试管段,测试管段可以实现气、液两相的测试实验,如图4所示。气相与液相分别通过所属的多级离心泵控制到达测量管路,多级离心泵可通过变频对两相流体速度进行控制,从而使得气相与液相流速在特定范围内变化。在实验过程中,空气经空气压缩机产生,流经科里奥利质量流量计(安德斯豪斯质量流量计, DN15、DN40, $U=0.35\%$, $k=2$)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(安德斯豪斯质量流量计, DN40, $U=0.1\%$, $k=2$)和电磁流量计(科隆测量仪器(上海)有限公司, 00TIFLUx2300, DN32、DN10, $U=0.2\%$, $k=2$)测量后,流入实验管段前端与气相混合,气液两相混合后流经 200D 的前直管段发展为弹状流,然后两相流进入垂直管段。经过 40D 的前直管段充分发展后到达电磁波传感器区域。将混相器和电磁波相位传感器安装在实验管段,其中,混相器安装在测试管段上游,电磁波相位传感器安装在测试管段下游,两者以法兰连接。弹状流进入实验管

段后先经混相器进行搅拌,使气液两相充分混合为一种均匀介质,然后以均相流的形式流入电磁波相位传感器。最终,混合后的两相流汇入储水罐,水经重力分离后流回水箱继续循环。

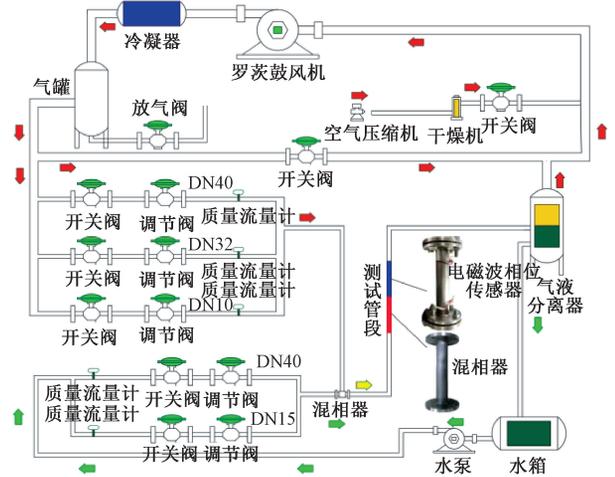


图4 高精度气液两相流实验装置

Fig. 4 High precision gas-liquid two-phase flow experimental device

利用图4的实验装置,开展了不同流动条件下的垂直管弹状流截面含气率测量实验,实验参数范围如表1所示。

表1 实验参数范围

Table 1 Range of experimental parameters

温度/ °C	压强/ MPa	气体表观速 度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	液体表观速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	管径/ mm	样本 数
25	0.105	0.042~0.42	0.7~1.12	DN50	70

在该实验条件下,根据 Hewitt 和 Roberts 流型图可知,垂直管道中的气液两相流为弹状流,如图5所示。

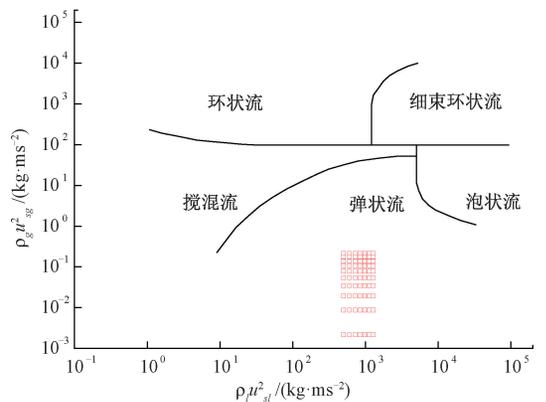


图5 Hewitt 和 Roberts 流型图

Fig. 5 Hewitt and Roberts flow pattern

实验结果表明,在保持液相表观流速不变的情况下,截面含气率随着气相表观速度的增加而增加,而在气相表观流速不变的情况下,截面含气率随着液相表观速度的增加而减少,如图 6 所示。

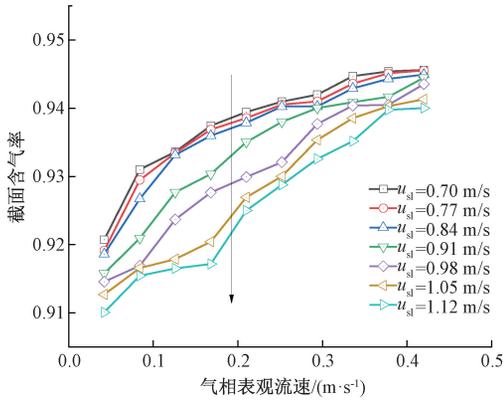


图 6 气相表观流速与截面含气率的关系
Fig. 6 Relationship between gas superficial velocity and void fraction

3 混合介电常数模型

3.1 常见混合介电常数模型分析

在两相流研究领域,由于影响混合介质相对介电常数的因素较多,没有统一的公式,因此本文选择了几种常见的混合介质的介电常数求解公式,如表 2 所示^[19]。本文以基于均相流的混合介电常数实验模型的计算结果为真值,对上述几种混合介电常数预测模型进行了验证和评价。比较了这几种常见的混合介电常数预测模型的计算结果与本文基于均相流的混合介电常数预测模型的实验结果,其实验结果一致性采用平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 的方式表示:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{pre,i} - X_{exp,i}}{X_{exp,i}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中: n 为样本数; $X_{pre,i}$ 为混合介电常数预测值; $X_{exp,i}$ 为混合介电常数实验值。

几种混合介电常数模型预测值的对比结果如图 7 所示。从上述结果可以看出,雷列伊模型的预测结果与实验结果具有很好的关联性。这是因为雷列伊模型主要用于离散相颗粒细小、粒径均匀的场所,要求离散相均匀的分散于另一种连续相之中,离散相应小于 10%。这种情况下的两相流接近于基于均相流的混合介电常数预测模型,故关联结果较好。其他的几种混合介电常数预测模型关联结果偏低,误差较大。原因可能有两个:1) 所引用的混合介电常数预测模型多应用于原油混合物的介电

表 2 常见混合介电常数模型

Table 2 The of common hybrid dielectric constant models

混合介电常数预测模型	计算公式	MAPE/%
对数模型	$\ln \varepsilon_r = \alpha_g \ln \varepsilon_g + \alpha_w \ln \varepsilon_w$	41.51
雷列伊模型	$\varepsilon_r = \varepsilon_g \left(1 + \frac{3\alpha_w}{\frac{\varepsilon_w + 2\varepsilon_g}{\varepsilon_w - \varepsilon_g} - \alpha_w} \right)$	6.07
串并联模型	$\varepsilon_r = k(\varepsilon_g \alpha_g + \varepsilon_w \alpha_w) + (1-k)\varepsilon_g \varepsilon_w / (\varepsilon_g \alpha_w + \varepsilon_w \alpha_g)$ $k = \frac{2\alpha_w}{5 - 3\alpha_w}$	80.45
H-B 模型	$\sqrt{\varepsilon_r} = \alpha_g \sqrt{\varepsilon_g} + \alpha_w \sqrt{\varepsilon_w}$	62.51
Bruggeman 模型	$\frac{\varepsilon_g - \varepsilon_r}{\varepsilon_g - \varepsilon_w} \left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_r} \right)^{1/3} = \alpha_w$	56.70

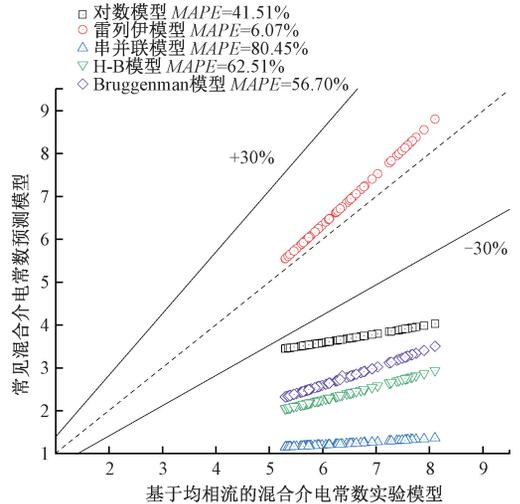


图 7 实验模型与预测模型对比

Fig. 7 Comparison of the experimental model and the prediction model

常数求解,而原油的介电常数比空气的介电常数高,故代入空气的介电常数时会使整体的计算结果偏低;2) 弹状流流动是一个非常复杂的物理过程,没有严格的规律性,具有大的气泡和大的液体块相间出现的特征。这种流动间歇性导致了预测结果较大的误差。故这几种预测模型不适用于对弹状流混合介电常数的求解。

3.2 弹状流混合介电常数预测模型

混合介电常数的大小取决于气液两相的体积占比及各相的介电常数,对于管内垂直上升的弹状流,每个弹单元由气弹和夹带许多小气泡的液弹构成,如图 8 所示。

因此,针对这种间歇性两相流动,为准确得到弹状流的混合介电常数,本文针对气弹和液弹分别进行了考虑。

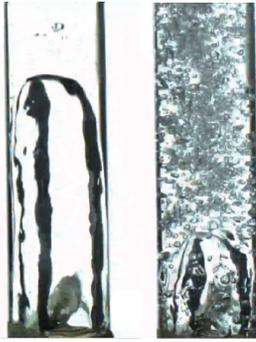


图8 垂直上升管中弹状流流动结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the slug flow structure in the vertical upflow tube

对于单个气弹周期,当气弹流过时,气液两相串联成与电场垂直的连续层,利用串联公式对混合节点常数进行求解:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_g \varepsilon_w}{\varepsilon_g \alpha_w + \varepsilon_w \alpha_g} \quad (10)$$

对于夹带很多小气泡的液弹的混合介电常数求解,利用Wagner由“球形微粒分散系”模型提出的模型来计算:

$$\varepsilon_r = A + \sqrt{A^2 + \varepsilon_g \varepsilon_w / 2}$$

$$A = \frac{\varepsilon_g (3\alpha_g - 1) + \varepsilon_w (2 - 3\alpha_g)}{4} \quad (11)$$

弹状流作为一种结构复杂的混合物,在极化场的作用下,极性水分子取向极化,极化的水分子相互作用、吸引,转向电场方向,以 k 表示气液两相混合物的混合极化状态,以带有含气率 α_g 的函数来表示:

$$k = \frac{1 - 6.5\alpha_g}{0.5\alpha_g - 0.3} \quad (12)$$

因此,对于整个弹状流周期内的混合介电常数预测模型如下所示:

$$\varepsilon_r = k \frac{\varepsilon_g \varepsilon_w}{\varepsilon_g \alpha_w + \varepsilon_w \alpha_g} + (1 - k) (A + \sqrt{A^2 + \varepsilon_g \varepsilon_w / 2}) \quad (13)$$

将此预测模型与均相流模型进行了比较,对比结果如图9所示。预测模型的MAPE值为4.37%,71.43%的数据在5%的平均相对误差范围内。可以看出预测模型与实验结果具有很好得关联性,误差在可接受范围内。

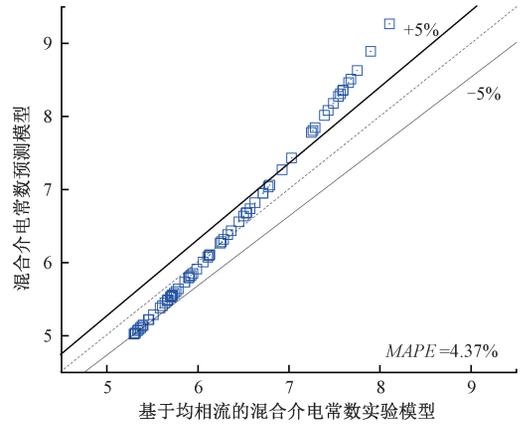


图9 实验模型与预测模型对比

Fig. 9 Comparison of experimental model and prediction model

3.3 弹状流截面含气率预测模型评价

根据获得的混合介电常数预测模型,通过式(6)、(7)中 V_{PHS} 与混合介电常数的函数关系,获得弹状流在不加混相器的情况下截面含气率的模型。并利用现有实验数据对截面含气率预测模型的计算结果进行验证及评价,对比结果如图10所示。截面含气率预测模型的MAPE值为0.34%,模型对弹状流截面含气率的预测具有较好效果。由图10可以看出,对于0.91~0.93范围内的截面含气率,预测模型的关联结果偏高;0.93~0.95范围内的截面含气率,预测模型的关联结果偏低。造成这种偏差的原因可能是弹状流截面含气率预测值的大小与混合介电常数有关,同一液速下的混合介电常数模型对比如图11(b)所示,由图11可知,同一液相表观流速下混合介电常数预测模型随着气相表观流速的增加,预测值变化趋势为由偏高变为偏低,即低气相表观流速时截面含气率预测值偏高,高气相表观流速时截面含气率预测值偏低,导致了弹状流截面含气率预测模型的变化趋势由偏高到偏低。

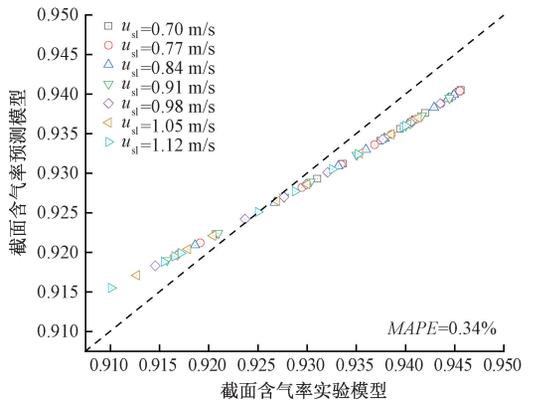


图10 截面含气率实验模型与预测模型对比

Fig. 10 Comparison of experimental model and prediction model of void fraction

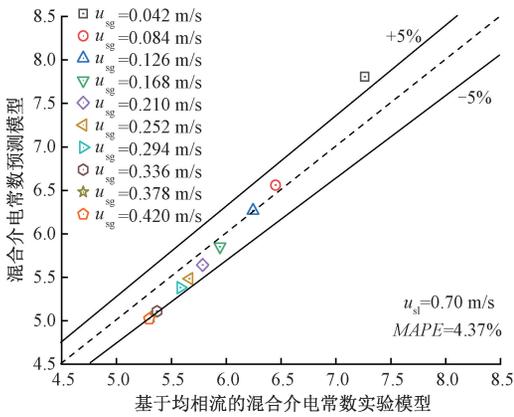


图 11 混合介电常数预测模型与实验模型对比
($u_{sl} = 0.70 \text{ m/s}$)

Fig. 11 Comparison of the hybrid dielectric constant prediction model and the experimental model ($u_{sl} = 0.70 \text{ m/s}$)

4 结 论

根据电磁波理论,流经同轴线的电磁波信号在混合介质中传输时产生的相位差变化,提出了一种基于同轴线相位差原理的测量截面含气率的电磁波相位传感器,并提出截面含气率的预测模型。在 70 种流动条件下进行了垂直管气液两相弹状流实验。

1) 搭建实验平台,通过加装混相器装置,使得气液两相相互渗透,气水混合物呈均相流状态。基于均相流模型提出了混合介电常数的实验模型。

2) 根据电磁场理论以及基于已知的气液两相流相含率测量原理,设计了一种新型的电磁波相位传感器,利用电磁波在同轴线传播时产生的相位差获得含气率,并在 70 种流动条件下进行了实验。

3) 针对几种常见的混合介电常数求解模型进行了验证及评价,结果表明目前的模型不适用于对弹状流混合介电常数的求解。并针对此流型,提出了一种新的预测模型。

4) 根据同一流动条件下的基于均相流的截面含气率实验模型作为弹状流模型实验中的参比真值,对新提出的不加混相器下的预测模型进行了对比。结果表明,预测模型的 MAPE 值为 0.34%,模型对弹状流截面含气率的预测具有较好效果。

参考文献

[1] CHALGERI V S, JEONG J H. Flow regime identification and classification based on void fraction and differential pressure of vertical two-phase flow in rectangular channel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 132:802-816.

[2] HAASE S. Characterisation of gas-liquid two-phase flow in minichannels with co-flowing fluid injection inside the channel, part II: gas bubble and liquid slug lengths, film thickness, and void fraction within Taylor flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 88: 251-269.

[3] MRA 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] ROSHANI M, PHAN G, ROSHANI H, et al. Combination of X-ray tube and GMDH neural network as a nondestructive and potential technique for measuring characteristics of gas-oil-water three phase flows [J]. Measurement, 2021, 168: 108427.

[5] 唐颖, 崔立宏. 原油含水率测量技术综述 [J]. 石油知识, 2019(3): 48-51.

TANG Y, CUI L H. A review of crude oil moisture content measurement techniques [J]. Petroleum Knowledge, 2019(3): 48-51.

[6] 顾建飞, 田昌, 刘继承. 气液两相流超声过程层析成像理论与实验 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 146-154.

GU J F, TIAN CH, LIU J CH. Theory and experiment of ultrasonic process tomography for gas-liquid two-phase flow measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 146-154.

[7] 葛亮, 阳彩霞, ROBINSON M, 等. 气泡对电磁流量测量的影响特性研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 15-28.

GE L, YANG C X, ROBINSON M, et al. Study of the influence of bubbles on electromagnetic flow measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 15-28.

[8] NAZEMI E, FEGHHI S, ROSHANI G H, et al. Precise void fraction measurement in two-phase flows independent of the flow regime using gamma-ray attenuation [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48(1): 64-71.

[9] ROSSI L, FAYARD R D, KASSAB S. Measurements using X-ray attenuation vertical distribution of the void fraction for different flow regimes in a horizontal pipe [J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 336:129-140.

[10] ABHIJEET H, THAKER M G, KARTHIK V, et al. PIV measurements and CFD simulations of the particle-scale flow distribution in a packed bed [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 374: 189-200.

- [11] SEO H, KIM K C. Experimental study on flow and turbulence characteristics of bubbly jet with low void fraction[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103738.
- [12] CHEN X, HAN Y F, REN Y Y, et al. Water holdup measurement of oil-water two-phase flow with low velocity using a coaxial capacitance sensor [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 81: 244-255.
- [13] WANG Y S, LIN T W, WU D H, et al. A new in situ coaxial capacitive sensor network for debris monitoring of lubricating oil[J]. Sensors, 2022, 22: 1-15.
- [14] MAKEEV Y V, LIFANOV A P, SOVLIKOV A S. Microwave measurement of water content in flowing crude oil[J]. Automation & Remote Control, 2013, 74(1): 157-169.
- [15] SHARMA, PRAFULL, LAO. A microwave cavity resonator sensor for water-in-oil measurements [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 262: 200-210.
- [16] ABBAS Z, YOU K Y, SHAARI A H, et al. Complex permittivity and moisture measurements of oil palm fruits using an open-ended coaxial sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(6): 1281-1287.
- [17] 王进旗, 强锡富, 张勇奎. 同轴线式相位法测量油井含水率[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(1): 74-76.
WANG J Q, QIANG X F, ZHANG Y K. Coaxial transmission line phase method for measuring water content of oil well [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(1): 74-76.
- [18] 赵才军, 蒋全兴, 景莘慧. 改进的同轴传输/反射法测量复介电常数[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 695-699.
ZHAO C J, JIANG Q X, JING Q H. Determining complex permittivity with improved transmission/reflection method using coaxial line[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 695-699.
- [19] 王连海, 王建荣, 郝木明. 电容式原油含水率仪信号解释模型[J]. 石油仪器, 2007, 21(2): 11-12.

WANG L H, WANG J R, HAO M M. Capacitive crude oil moisture content meter signal interpretation model [J]. Petroleum Instruments, 2007, 21 (2): 11-12.

作者简介



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 and instruments.



Song Yajing received her B. Sc. degree from Tangshan University in 2020. She is currently a M. Sc. candidate at Hebei University. Her main research interests include multiphase flow measurement technology and instruments.



Zhang Shuanzhu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from the Open University of Baoding in 2012. He is currently a safety engineer at Hebei Baisha Tobacco Co., Ltd. Baoding Cigarette Factory Safety Management Department. His main research interests include flow detection technology and security testing.

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。

宋亚净, 2020 年于唐山学院获得学士学位, 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: yayajing15@163.com

张栓柱 (通信作者), 2012 年于保定开放大学获得学士学位, 现为河北白沙烟草有限责任公司保定卷烟厂安全工程师, 主要研究方向为流量检测技术及安全检测。

E-mail: aayhsj@163.com