

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108219

近红外光在弹状流中的传播特性*

方立德,张真玉,徐潇潇,郭素娜,王帆
(河北大学质量技术监督学院 保定 071002)

摘要:弹状流是多相流中常见的流型,流动参数相含率的准确测量是分析流动状态、求取混合物平均密度的前提,对石油、化工等领域意义重大。首先根据菲涅耳定律及麦克斯韦方程理论,推导出管道圆弧上近红外光的能量分布特性。设计了一种单发多收的近红外传感器,研究近红外光在弹状流中的传播特性,通过实验证明了管道圆周各个探头接收到的电压值与探头安装角度成余弦关系。根据朗伯-比尔定律推导了近红外光探测器接收到的电压值、近红外光探测器安装角度与相含率之间的关系,建立了弹状流相含率测量模型。实验在内径为 50 mm 的水平透明管道内进行,气体流量在 0.5 m³/h 和 2 m³/h 之间,液相流量在 5 m³/h 和 9 m³/h 之间。研究表明:相含率的预测模型的相对误差在±7%之间。

关键词:近红外光;相含率;传播特性;弹状流

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

Propagation characteristics of near-infrared ray in slug flow

Fang Lide, Zhang Zhenyu, Xu Xiaoxiao, Guo Suna, Wang Fan
(School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: The slug flow is a common flow pattern in the multiphase flow. The accurate measurement of flow parameter phase fraction is the prerequisite for analyzing the flow state and obtaining the average density of the mixture. It is of great significance to the fields of petroleum and chemical industry. First, according to Fresnel's law and Maxwell's equation theory, the distribution characteristics of light on the pipe arc is derived. A single-shot and multiple-receiving near-infrared sensor is designed to study the propagation characteristics of near-infrared spectrum in slug flow. Experiments prove that the voltage value received by each probe on the circumference of the pipeline is cosine with the installation angle of the probe. According to Lambert-Beer law, the relationship among the voltage value received by the near-infrared probe, the installation angle of the near-infrared receiving probe and the phase fraction deduced is achieved. The phase fraction measurement model of the slug flow is formulated. The experiments are implemented in a horizontal transparent pipe with an inner diameter of 50 mm, the gas flow range is between 0.5 m³/h and 2 m³/h, and the liquid flow rate is between 5 m³/h and 9 m³/h. Research results show that the relative error of the prediction model of phase fraction is within ±7%.

Keywords: the near-infrared ray; phase fraction; propagation characteristic; slug flow

0 引言

近年来,随着光学技术的发展,光学的普适性已经在各个领域彰显。光学测量技术在两相流参数测量领域得到广泛应用^[1]。

光学测量方法可以分为接触式测量和非接触式测

量,常见的光学探针法为接触式。Wang 等^[2]提出使用光学探头对高温高压下垂直管道中沿轴向运动的两相流进行流型识别。光学探针法具有准确度高、速度快的特点,但都需接触流体才能获得流体信息,会干扰流体流动,在两相流中使用受限。非接触测量主要包括激光技术、光学层析成像技术。粒子图像测速技术 (particle image velocity, PIV) 具有瞬时、无接触的测量流场信息的特性。

收稿日期:2021-07-09 Received Date: 2021-07-09

* 基金项目:国家自然科学基金(61475041)、京津冀协同创新共同体建设专项(20540301D)、河北省自然科学基金重点项目(F2021201031)资助

Shi 等^[3]提出利用基于光学相分离方法的 PIV 系统,测量了液相湍流信息,包括平均速度、雷诺应力、液相的湍流动能。韩棒棒等^[4]提出了基于激光诱导荧光和摄像技术的截面含气率的检测方法,提高了测量的精度。但是由于该装置的高成本、复杂性,使得该技术仅限于实验室研究;光学层析成像技术,可以重建流体运动图像。Fadzil 等^[5]提出利用激光层析成像技术检测液体介质中流动的气泡,采用激光光源的平行光束投影技术提高了液相中的成像质量。但是装置较复杂对实验环境要求较高。

近红外光谱检测技术^[6]在世界上的认可度高,具有检测效率高、穿透能力强、非接触检测等特点,在分析化学领域应用已经相当成熟,在气液两相流领域的应用也日趋增多。

近红外光谱技术作为一种光学测量方法,在气液两相流中近红外光线会发生折射、散射、透射等现象,也常被用来测定气液两相流特性参数^[7]。光散射法常用来测液膜厚度、粒径大小等信息。苏明旭等^[8]提出使用波长消光法和光散射法测得蒸汽液滴粒径和含量,证明了超声衰减法测量蒸汽液滴粒径及含量参数的可靠性;透射法在光学测量中常被用来测量两相流含气率、识别流型。Jean 等^[9]提出使用透射法研究两相流流动特性,使用两对光学传感器测量了两相流中的相含率。赵宁等^[10]提出基于近红外吸收技术构建了液膜参数测量传感器,实现了环状液膜厚度及波动参数的测量。Thorben 等^[11]提出利用光度计流量传感器检索时空分辨泰勒段塞流信息,通过液滴几何特性的相关因子,从传感器的时域传输信号中提取瞬时液滴速度。韩建等^[12]提出了利用红外光谱测量原油中的含水率的超稀疏表示方法,有助于提升光纤式传感器的使用性能;近红外光学层析成像技术应用也逐渐增多。Julien 等^[13]提出通过热成像图像与近红外光在薄膜中的吸收成像得到的薄膜厚度图同步的方法,降低了边界层厚度与温度的相关性。Vendruscolo 等^[14]开发了一种近红外光学层析成像系统,用于实时监测气液两相流流动状态。Mithran 等^[15]提出使用红外收发器测量微通道中的相含率,通过数值模拟的方法得到泰勒段塞流的头尾曲线形状对液膜厚度、流型辨别的影响,提出了段塞流的三维图像重建算法。张晓娟等^[16]根据 Tikhonov 正则化方法提出了近红外漫射相关光谱血流成像技术,提高了图像重建的质量和精确度。近红外层析成像技术具有成像质量不高、装置繁复等特点,在两相流领域中应用受限。近红外检测技术在两相流应用中,对光路的传播特性进行了研究。方立德等^[17]基于近红外光源传感器设计了测量相含率的装置,减小了两相流中近红外光的折射和反射,提高了测量准确度。方立德等^[18]提出利用近红外技术设计了气液两相流检测装置,该装置可以实时识别两相流中不同的流型,且效果显

著。李华军等^[19]提出通过分析微小管道中的光路变化,研究了影响图像畸变的因素,提高了相含率的测量精度。吉勇等^[20]针对水下成像质量不高等问题,在光场成像的条件下提出了水下图像清晰度增强的算法,提高了成像图像的质量。Mithran 等^[21]利用红外收发装置,分析装置的特性测出了液膜厚度以及气弹的长度。光学法的测量原理都用到感光元件接收到光子转变成电压或电流的形式,针对光学测量方法多使用散射、透射法中的一种,其测量准确性有待提高。

基于前人的研究发现光学测量方法具有响应速度快、测量准确等优点,但是也存在装置复杂、仅利用光学测量方法中的一种原理计量的问题。因此本文研究近红外线在两相流中传播特性,综合近红外光线在流体中发生的反射、折射、散射现象。设计了单发多收近红外传感器,该装置由 1 个发射传感器与 7 个接收传感器构成,8 个探头传感器均匀绕圆形管道一周,不同方位的接收传感器会接收到不同方向近红外光线,从而分析近红外光线在两相流中的传播特性,建立相含率的预测模型。

1 理论分析

光在各向同性介质界面上会发生反射、折射等光学现象,当近红外线穿过的两种介质的界面相对平滑,那么反射光和折射光的能量占绝大部分。气液两相流体中,近红外光信号的变化主要是由液相吸收导致的衰减,但是反射、折射、散射也影响近红外光信号的变化。

1.1 近红外光线吸收和散射的能量分析

当近红外光线穿过气液两相流时,其能量变化如图 1 所示。

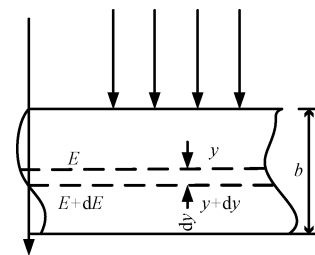


图 1 近红外光线能量分析

Fig. 1 The near infrared energy analysis

光的电矢量振幅 A 使流体中的粒子做受迫运动,根据能量守恒定律,光子损失的能量,一部分能量给了流体中做受迫运动的粒子,还有一部分能量转化为热能流失了。将近红外线的强度记为 E_i ,光线沿 y 方向穿过气液两相流,穿透距离 y 后近红外光的强度记为 E ,从微分角度看,穿透 dy 距离的流体后,近红外线强度记为 dE , K 表示吸光系数, b 为光程。Lambert 提出 dE/E 与吸收物

质的距离 dy 成正比,得到式(1),积分后得式(2)。

$$dE/E = K \cdot dy \quad (1)$$

$$E_i = E \cdot e^{-Kb} \quad (2)$$

在气液两相流中,当少部分光子和水中分子、离子发生碰撞时,根据动量守恒定律,光子本来的运动路径发生改变,能量也会随碰撞过程交换,就会产生散射现象。

1.2 近红外光线反射光和折射光的能量分析研究

光滑界面上平行入射光的折射和反射如图2所示。入射光为 I_1 ,反射光为 I_1' ,折射光为 I_2 。入射光在截面照射的面积为 σ 。两种介质的折射率分别表示为 n_1, n_2 。两种介质的介电常数分别表示为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 。两种介质的磁导率分别表示为 μ_1, μ_2 。入射角为 i_1 ,反射角为 i_1' ,折射角为 i_2 。使用 A 表示光的电矢量振幅,其中, p 表示与入射光线同一平面内的垂直分量, s 表示与入射光线垂直平面上的垂直分量。

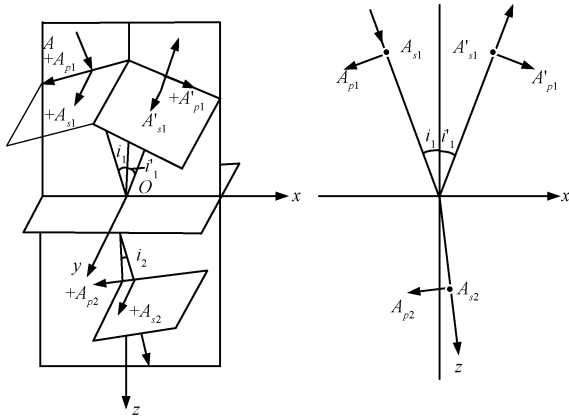


图2 折射光和反射光的立体和平面示意图

Fig. 2 Three-dimensional and planar schematics of refracted and reflected light

根据菲涅耳公式^[22] (Fresnel formula) 和麦克斯韦 (Maxwell) 方程结合电磁场理论^[23],可以推出 I 的表达式如式(3)~(6)。

$$I_{1s}' = (A_{1s}')^2 = \left(\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)} \right)^2 I_{1s} \quad (3)$$

$$I_{1p}' = (A_{1p}')^2 = \left(\frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)} \right)^2 I_{1p} \quad (4)$$

$$I_{2s} = (A_{2s})^2 = \left(\frac{2\sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2)} \right)^2 I_{1s} \quad (5)$$

$$\frac{A_{2p}}{A_{1p}} = \frac{2\sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2) \cos(i_1 - i_2)} \quad (6)$$

可以得到入射光 I_1 、反射光 I_1' 、折射光 I_2 间的关系为:

$$I_1' = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)} \right)^2 + \left(\frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)} \right)^2 \right] I_1 \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2\sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2)} \right)^2 + \left(\frac{2\sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2) \cos(i_1 - i_2)} \right)^2 \right] I_1 \quad (8)$$

反射光和折射光中电矢量的能量流密度 S_0 的表达式为式(9),反射光和折射光中电矢量的能量流 w 的表达式为式(10)。

$$S_0 = \frac{1}{2} A^2 \quad (9)$$

$$w = I \sigma \cos i = \frac{1}{2} n \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} A^2 \sigma \cos i \quad (10)$$

1.3 近红外光线在弹状流中传播特性的模型分析

近红外光源发出近红外光的能量记为 N_0 ,共进入与当前不同流体 x 次,经过某相流体后的近红外光的能量记为 N_{x-1} ,再次经过另一相流体后近红外光的能量记为 N_x 。根据反射光和折射光的能量分析,得到弹状流的近红外光线传播示意图如图3所示。

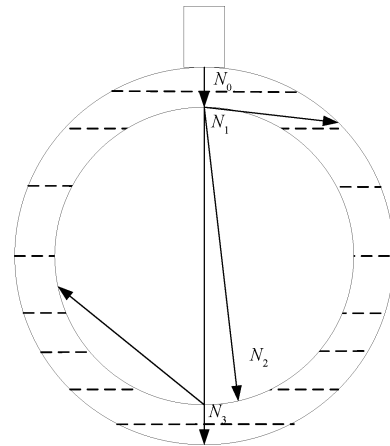


图3 弹状流的近红外光线传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the near-infrared propagation of slug flow

将安装近红外光光源的切面内部所有的折射、散射和反射看成一个整体,将切面圆周分割成无数段,则每一小段上都有经过折射、反射的近红外光线。将反射光的能量转化电压参数用 m_1 表示,将折射光的能量转化电压参数用 m_2 表示,那么,每一段小圆弧的近红外传感器接收到信号的电压值 u_m 可以用式(11)表示:

$$u_m = m_1 \frac{1}{2} n \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} A^2 \sigma \cos i + m_2 \frac{1}{2} n \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} A^2 \sigma \cos i \quad (11)$$

可以看出来,每一段小圆弧的近红外传感器接收到信号的电压值 u_m 与探头安装角度成余弦函数关系。

将一束单色平行光照射气液两相流,则量值关系

可由 Lambert 定律表示为式(12)。

$$E_o = E_i \cdot e^{-kb} \tag{12}$$

流动着的液相厚度 b 可用液相体积含率 β 与光束在流动着的两相流介质中的传播距离 h 表示为式(13)。

$$b = \beta \cdot h \tag{13}$$

$$E_o = E_i \cdot e^{-k\beta h}$$

接收与发射的近红外光转换电压比值用 U 表示,与透光率成正比,设比例系数为 a_3 ,则电压比值 U 与液相体积含率之间的函数关系可以表示为式(14)。

$$U = a_3 \cdot \frac{E_o}{E_i} = a_3 \cdot e^{-k\beta h} \tag{14}$$

2 实验验证

实验系统图如图 4 所示,主要包括气液两相流的驱动部分、基于近红外线的单发多收装置的实验测试部分及数据的采集部分。两相流驱动部分用于产生可调的气相、液相流速,主要包括压缩机、水箱、电磁流量计、混合器、压力传感器、温度传感器等。实验中的液相为水,气相为空气。单发多收装置包括 1 个发射探头、7 个硅光电二极管,单发多收装置从 0 号探头开始,逆时针旋转过的角度为 θ ,每间隔 45° 放置一个接收探头,绕管道一周。其中 0 号探头是发射探头,其余为接收探头,装置示意图如图 5 所示。近红外光谱信号穿过气液两相流射出,接收探头将光强信号转换为感应电压信号后输出,用高频数据采集卡采集数据。数据采集单元对所采集的感应电压信号进行放大、解调、滤波及模数转换,得到电压信号,再将所得数字电压信号发送给计算机,数据采集部分流程图如图 6 所示。使用数据采集卡用 USB 与计算机连接进行数据的传输。实验采用的近红外光谱的波长为 980 nm,接收装置使用硅光电二极管制作的接收探头。接收探头的电源采用 1 A 恒流源,该电源具有较高的稳定性和较高的精度。

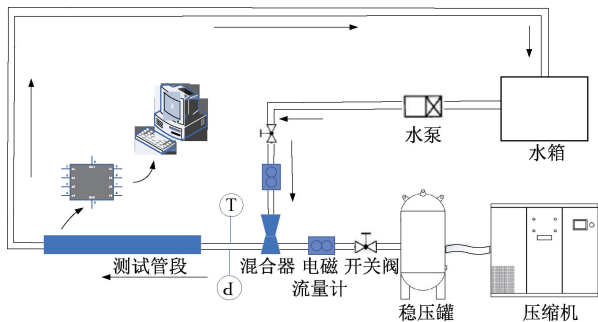


图 4 实验系统图

Fig. 4 Diagram of the experimental system

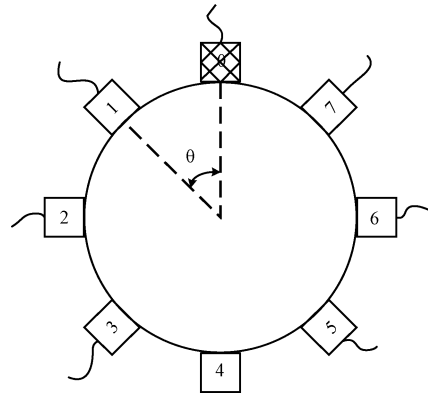


图 5 单发多收装置

Fig. 5 Single-shot multiple-receive device

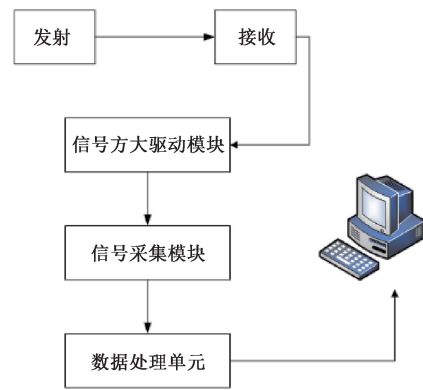


图 6 数据采集流程

Fig. 6 Data acquisition process

3 实验结果与分析

3.1 近红外线在单相流体中的传播特性分析

为了更清楚和更严谨地探究近红外光线在气液两相流体中的传播规律,首先研究近红外光线在单相流体中的传播规律。

为进一步观察气相流体实验中电压值的波动变化情况,绘制不同气相流量下的接收信号图,如图 7 所示。为了进一步观察气相流量增加时,电压值的变化情况,绘制接收电压随气相流量增加的变化图,如图 8 所示。

从样条图能够看出,当气相流量不同时,使用相同的横纵坐标刻度,电压值的波动幅度相似,说明该实验的数据稳定性一致。从接收电压值随气相流量增加的变化图能够看出,当气相流量增加时,电压值的均值稳定在 8.41 V 左右,变化不大。由以上数据处理可以得出,近红外线在气相流体中的传播几乎不受流速的影响。

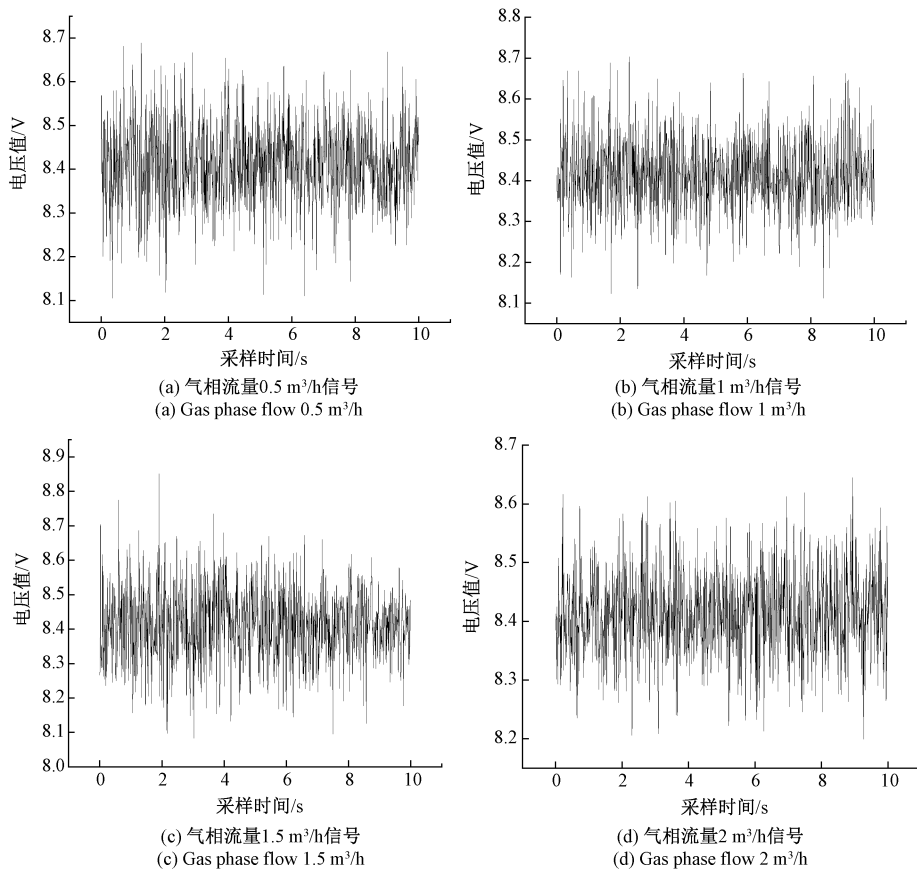


图7 气相流量的接收信号

Fig. 7 Received signal of gas phase flow

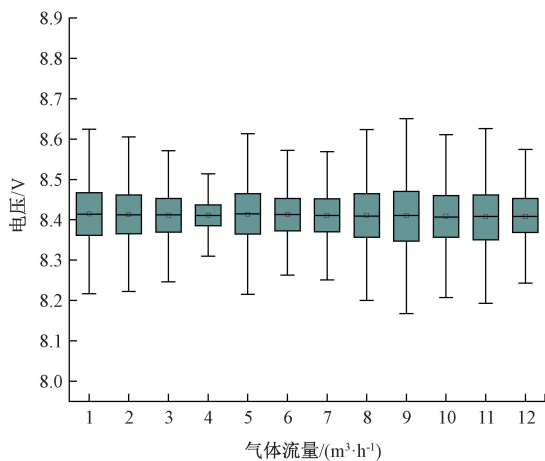


图8 接收电压值随气相流量增加的变化图

Fig. 8 The change graph of the received voltage value with the increase of the gas flow rate

同样的绘制不同液相流量下的接收信号样条图和接收电压值随液相流量增加的变化图,分别如图9和10所示。

从图9能够看出,当液相流量不同时,使用相同的横

纵坐标刻度,电压值的波动幅度相似,说明该实验的数据稳定性一致。从接收电压值随液相流量增加的变化图能够看出,当液相流量增加时,电压值的均值稳定在8.25 V左右,变化不大。与气相实验对比发现,近红外线在管段全水情况下的衰减程度微微大于管段全气的情况,也符合理论知识。

3.2 近红外线在弹状流型下的传播特性分析

弹状流是气液两相流中的重要流型,进行弹状流的数据分析与处理。在气流量为0.5、1、1.5、2 m³/h液相流量分别为5、6、7 m³/h工况下,计算每组工况下采集电压值的平均值,因为弹状流的流型不稳定,所采集的数据中包含气弹头部的数据和气弹尾部的数据,绘制不同流量下的探头位置与电压的关系曲线,如图11所示。

由图11可知,4号探头所接收的电压值均值最高,两侧探头所测均值呈现递减趋势,在6、7号探头位置有递增的趋势,且在不同气液流速下有相同的趋势,因此可得弹状流管道切面圆的每一段小圆弧上信号接收器在所接收到信号的电压值 u_m 与cosine函数呈正相关,证明了理论模型。

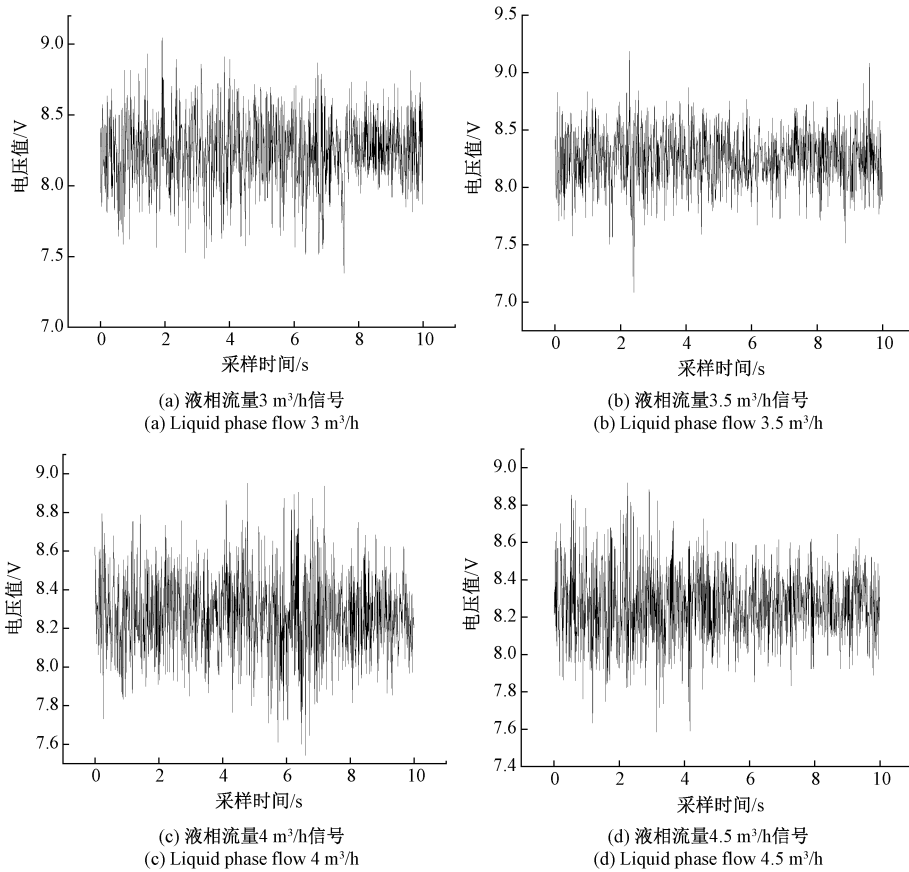


图 9 液相流量的接收信号样条图

Fig. 9 Received signal diagram of liquid phase flow

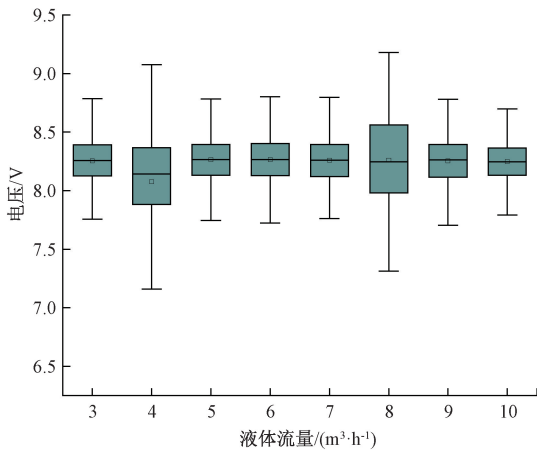


图 10 接收电压值随气相流量增加的变化图

Fig. 10 The change graph of the received voltage value with the increase of the liquid flow rate

3.3 近红外测量弹状流的液相含率模型研究

气液两相流动会影响近红外线的传播路径,光线会发生折射、反射现象,同时两相流会吸收光线,且吸收光

谱能量服从朗伯定律。通过观察各个探头接收到的电压信号可以发现,经过折射、反射、散射的光谱也符合朗伯定律,多个探头测量信息综合起来可以提高液相含率的测量精度,可以建立关于 7 个探头的电压、位置及相含率的测量模型。

考虑到实验装置有 7 个位置,近红外光线发生折射、反射时不同位置获得的能量不同,所以可将位置信息作为权重,通过非线性曲线拟合得到相含率的测量模型,如式(15)所示。

$$\beta = 0.40526 \ln(210.5887 - 0.1058m_1x_1 - 0.40357m_2x_2 + 0.2229m_3x_3 - 8.4704m_4x_4 - 0.24125m_5x_5 - 0.2629m_6x_6 + 0.38851m_7x_7) - 0.01944 \quad (15)$$

式中: m_1, m_2, \dots, m_7 分别为 1, 2, 3, \dots , 7 号探头角度对应的弧度; x_1, x_2, \dots, x_7 分别 1, 2, 3, \dots , 7 号探头同一时刻接收到的电压值。

绘制弹状流拟合得到的测量相含率模型的相对误差图,如图 12 所示,发现液相含率拟合模型的相对误差在 $-5\% \sim 7\%$ 之间,说明预测模型较好。

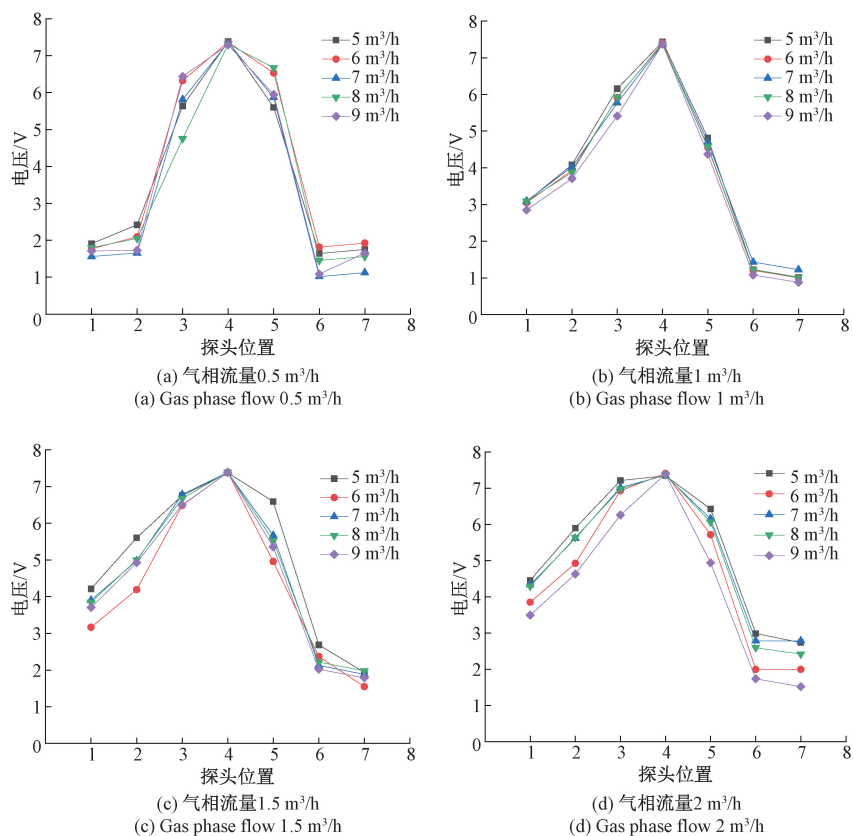


图 11 探头位置与电压的对应关系

Fig. 11 Relationship between probe position and voltage

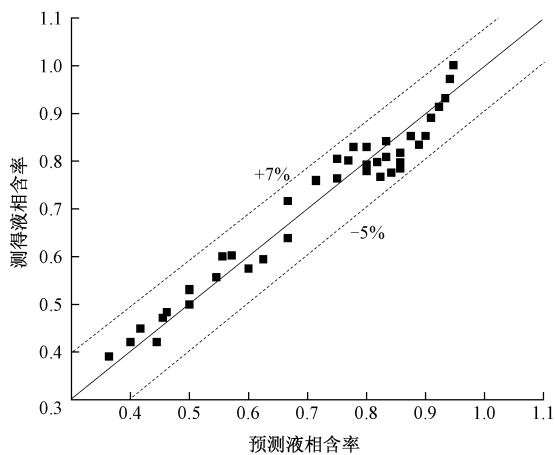


图 12 液相含率测量相对误差图

Fig. 12 Relative error graph of liquid phase fraction measurement

4 结 论

由于弹状流在实际工况下的运动复杂性,近红外光谱在两相流中的传播会不同程度的受到干扰,导致弹状

流的流动参数测量具有较大的偏差。本文使用近红外传感器研究近红外光谱在弹状流中的传播特性,建立相含率预测模型,具体结论如下。

1) 设计近红外传感器的单发多收装置分析近红外线在弹状流中的传播特性。不同的工况点下,通过分析圆周管道不同位置接收到的光强信号,得出管道圆周的近红外线接收探头采集的电压值 u_m 与探头安装角度成余弦函数关系。

2) 建立了相含率预测模型。通过理论分析证明了相含率对近红外线探头接收到的电压有重要影响,在水平管弹状流中,建立了探头安装位置、近红外线电压信号与相含率的预测模型,相含率预测模型的相对误差在 $\pm 7\%$ 之间。

参考文献

[1] 戴振韬. 小通道泡状流和段塞流相分布光学检测研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.

DAI ZH T. Study on optical measurement of phase

- distribution for bubble flow and slug flow in small channels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [2] WANG T, LIU Z H, GUI M, et al. Flow regime identification of steam-water two-phase flow using optical probes, based on local parameters in vertical tube bundles [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 79:101928.
- [3] SHI S, WANG D, QIAN Y, et al. Liquid-phase turbulence measurements in air-water two-phase flows using particle image velocimetry[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2020, 124(2-4):103334.
- [4] 韩棒棒,赵治月,赵俊雨,等. 基于激光诱导荧光成像技术的截面含气率检测研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(10):2-8.
- HAN B B, ZHAO ZH Y, ZHAO J Y, et al. Study on the detection of void fraction based on laser-induced fluorescence imaging technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(10):2-8.
- [5] FADZIL N S M, RAHIM R A, JAMALUDIN J, et al. Online simulation to monitor multiphase flow using laser source as transmitter [J]. *Optik*, 2021, 228 (6): 166178.
- [6] BAUMANN L, LIBRELOTTO M, PAPPIS C, et al. An app for chemometric analysis from near infrared spectra[J]. *Journal of Chemometrics*, 2020, 34 (12): e3281.
- [7] TIAGO P, MARCELO V, RODOLFO L, et al. Development of NIR optical tomography system for the investigation of two-phase flows[C]. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2014, 2 (5): 1576-1579.
- [8] 苏明旭,袁安利,周健明,等. 超声衰减与光散射法蒸汽液滴粒径和含量对比测试[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016,47(2):654-660.
- SU M X, YUAN AN L, ZHOU J M, et al. Measurement of steam droplet size and content: A comparison of ultrasonic attenuation and light scattering[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(2):654-660.
- [9] JEAN O, JEAN P L, CHRISTIAN J. Characterization of the two-phase flowregimes and liquid dispersion in horizontal and vertical tubes by using coloured tracer and non-intrusive optical detector [J], *Chemical Engineering Science*, 2008, 63:24-34.
- [10] 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. Measuring sensor of liquid film parameter in annular flow [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018,49(4):995-1002.
- [11] THORBEN H, JORG T, ULRICH M. Retrieving accurate temporal and spatial information about Taylor slug flows from non invasive NIR photometry measurements[J]. *Exp Fluids*, 2017, 58:160.
- [12] 韩建,李雨昭,曹志民,等. 原油含水率红外光谱测量的超稀疏表示方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019,40(6):78-85.
- HAN J, LI Y ZH, CAO ZH M, et al. Ultra-sparse representation method for measuring crude oil watercontent using infrared spectroscopy technique [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(6): 78-85.
- [13] JULIEN D, GUILLAUME M, DOMENICO P, et al. Mid wave infrared thermography of water films in condensing and evaporating environments [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 336: 80-89.
- [14] VENDRUSCOLO T P, ZIBETTI M V W, PATYK R L, et al. Development of NIR optical tomography system for the investigation of two-phase flows[C]. *Instrumentation and Measurement Technology Conference. IEEE*, 2014, 2: 1576-1579.
- [15] MITHRAN N, VENKATESAN M. Volumetric reconstruction of taylor slug gas flow using IR transceiver in minichannels [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 69 (6): 3818-3825.
- [16] 张晓娟,徐金荣,桂志国,等. 结合 Tikhonov 正则化方法的近红外漫射光血流成像技术[J]. *中国医疗设备*, 2018,33(12):26-30.

- ZHANG X J, XU J R, GUI ZH G, et al. Near-infrared diffuse optical imaging of blood flow via combining with tikhonov regularization algorithm [J]. *China Medical Devices*, 2018,33(12):26-30.
- [17] 方立德,王少冲,王配配,等. 基于近红外光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.
- FANG L D, WANG SH CH, WANG P P. et al. Phase volume fraction measurement of gas-liquid two-phase flow based on near-infrared surface source sensor[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019,40(6):1043-1049.
- [18] 方立德,梁玉娇,李小亭,等. 基于近红外技术的气液两相流检测装置[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(5):528-532.
- FANG L D, LIANG Y J, LI X T, et al. Detection device for gas-liquid two-phase flow based on near-infrared technology[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014,28(5):528-532.
- [19] 李华军,刘光宇,余善恩,等. 微小管道两相流流动图像畸变校正研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(4):239-245.
- LI H J, LIU G Y, YU SH EN, et al. Flow image distortion correction for two-phase flow in micro/mini pipes [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(4):239-245.
- [20] 吉勇,李晨,屠大维,等. 水下光场成像清晰度增强研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021,35(4):66-72.
- JI Y, LI CH, TU D W, et al. Research on definition enhancement of underwater light field imaging [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021,35(4):66-72.
- [21] MITHRAN N, VENKATESAN M. Signal characteristics of IR transceiver pair during two phase flow of varying liquid film thickness in a mini-channel [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2021,208(6):870-882.
- [22] 房成敏. 光在反射和折射时的能量分配[J]. *硅谷*, 2012, 9(9):44-45.
- FANG CH M. Energy distribution of light in reflection and refraction[J]. *Silicon Valley*, 2012, 9(9):44-45.
- [23] 宣桂鑫. 浅谈光在反射和折射时的能量关系[J]. *物理教学*, 1983(3):16,23.
- XUAN G X. The energy relationship of light in reflection and refraction[J]. *Physics Teaching*, 1983(3):16,23.

作者简介



方立德(通信作者),1998年于中国计量大学获得学士学位,2005年于河北工业大学获得硕士学位,2008年于天津大学获得博士学位,现为河北大学教授、博士生导师,主要研究方向为多相流测试

技术及仪器。

E-mail: fanglide@sina.com

Fang Lide (Corresponding author) received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 1998, received his M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2005, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2008. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Hebei University. His main research interests include multiphase flow measurement technology and instruments.



张真玉,2019年于河南理工大学获得学士学位,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: zhangzhenyu_2020@sina.com

Zhang Zhenyu received her B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2019. She is currently a master student at Hebei University. Her main research interests include multiphase flow measurement technology and instruments.