

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107861

环状流波状液膜时平均厚度动态校准方法^{*}

贾慧君^{1,2,3}, 李超凡^{1,2,3}, 赵宁^{1,2,3}, 方立德^{1,2,3}, 王晨^{1,2,3}

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071002;
3. 河北省能源计量与安全检测技术重点实验室(筹) 保定 071002)

摘要:为实现环状气液两相流界面波液膜厚度的准确测量,基于环状流界面波的理论分析和实验研究,将实时海浪模拟思想引入界面扰动波研究,建立了基于三级海浪函数的界面扰动波模型。设计了一种基于直接测量法的可调节插入深度的波状液膜厚度测量传感器。提出了基于占空比算法的时平均液膜厚度动态校准方法。对测量传感器进行测量不确定度来源分析及评定,提出了系统误差补偿算法。在双闭环可调压中压湿气实验装置上对上述测量传感器进行了实验验证,结果表明:以三级海浪为模型进行研究在任意统计时间与任意插入深度增量条件下,94.44%的实验点的相对测量不确定度在2%以内;基于直接测量法实现液膜厚度复现并使用系统误差补偿算法,提高了测量精度。

关键词: 环状气液两相流;界面;液膜厚度;海浪模型;动态校准;测量不确定度

中图分类号: TE372 TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Dynamic calibration method for mean thickness of annular flow wavy liquid film

Jia Huijun^{1,2,3}, Li Chaofan^{1,2,3}, Zhao Ning^{1,2,3}, Fang Lide^{1,2,3}, Wang Chen^{1,2,3}

(1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China;
2. National & Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Baoding 071002, China;
3. Hebei Key Laboratory of Energy Metering and Safety Testing Technology, Baoding 071002, China)

Abstract: The real-time ocean wave simulation idea is introduced into the study of interface disturbance wave in annular flow to realize the accurate measurement of the liquid film thickness. A model of interface disturbance wave based on three-level ocean wave function is established based on the theoretical analysis and experimental research of the annular flow interface wave. A wavy liquid film thickness measurement sensor with adjustable insertion depth is designed based on direct measurement method. A dynamic calibration method of time-average liquid film thickness based on duty cycle algorithm is proposed. The source of measurement uncertainty of the sensor is analyzed and evaluated, and the system error compensation algorithm is proposed. The sensor is tested and verified on a double closed-loop adjustable pressure medium pressure humidity experimental device. Results show that: under the conditions of arbitrary statistical time and arbitrary insertion depth increment, the relative measurement uncertainty of 94.44% of the experimental points is within 2% when using the three-level ocean wave model. The liquid film thickness is reproduced using the direct measurement method and the measurement accuracy is improved using the system error compensation algorithm.

Keywords: annular flow; interface; liquid film thickness; ocean wave model; dynamic calibration; measurement uncertainty

0 引言

环状流是气液两相流动的最典型的流型之一^[1-2],广

泛存在于传统和新兴工业领域,如页岩气管道输运、核反应堆冷却、蒸发和冷凝系统等领域^[3-4]。其典型特征为管道内壁四周是厚度较薄且波动的液膜,水平管液膜的周向分布具有不对称性,管道中心是沿轴向高速流动且伴

收稿日期:2021-04-29 Received Date: 2021-04-29

^{*} 基金项目:京津冀协同创新共同体建设专项(20540301D)、河北大学高层次人才科研启动项目(521000981319)、河北省研究生创新项目(CXZZSS2021011)资助

有夹带液滴的气核。在环状流动中,液膜是液相质量运输的重要载体,液膜一般可分为基膜区、扰动波区和波纹区,扰动波是液相运输的主要形式,其厚度是基膜的几倍至十几倍,其液膜厚度测量准确与否与界面扰动波密切相关。针对液膜厚度的研究主要分为预测模型和测量方法两类。文献[5-7]指出有液膜厚度多是通过实验测量方法获得,预测模型多是基于液膜粗糙度这一概念获得,其液膜划分方式不同(比如单区模型和双区模型)导致液膜预测模型的适用性和精度不同。因此实验测量方法研究是精确获取环状流液膜厚度的重要技术手段。

根据实验测量技术物理原理的分类方法分为直接测量方法和间接测量方法。近年来大量的国内外专家学者基于不同测量原理设计出不同的测量装置,提出多种测量方法致力于提高液膜厚度测量准确性,主要包括声学法,光学法,核辐射法和电学法^[8-13]。上述间接测量方法的测量不确定度受结构,液膜厚度,激励方式的制约。与间接测量方法相比,直接测量方法具有许多优点,如直观,可靠性和可追溯性。Mcmanus等^[14]测量了水平环状流动中薄膜接触探针的相对时间,并提出了平均薄膜厚度。Hewitt等^[15]利用音频信号研究接触频率和相对时间。Koskie等^[16]和侯昊等^[17]利用单探针结构与管道壁面形成回路以测量表面相对光滑的垂直下降液膜。

不同于上述根据实验测量技术物理原理的分类方法,Clark^[18]根据液膜测量范围进行了分类,分为截面平均液膜厚度、局部平均液膜厚度、点液膜厚度、空间液膜厚度。液膜厚度测量精细化程度直接决定了环状流特征参数的测量精度。从理论上分析可知点液膜厚度测量方法的精细化程度更高。由于动态波动液膜厚度真值的未知特性,液膜厚度实验测量方法在使用前进行标定是十分必要的。目前实验测量方法的测量精度多是以静态标定的方式给出,其测量方法的精度是否能够保证值得商榷,因此开展对液膜厚度实验测量方法的动态测量装置和标定方法研究是十分必要的。

本文通过对环状流界面波的理论分析和实验研究,建立了基于三级海浪函数的界面扰动波模型。设计了一种基于直接测量法的适用于密封管薄膜流动的可调节插入深度的波状液膜厚度测量传感器。提出了基于占空比算法的时平均液膜厚度动态校准方法。对测量传感器进行测量不确定度来源分析及评定,提出了系统误差补偿算法。

1 环状流界面扰动波三级海浪模型

进行液膜厚度测量时,由于液膜波动是连续变化的,使得所测得的离散样本不能完全代替被测液膜的厚度,因此不可避免的会对测量结果产生影响。通过理论分析

可知,液膜表面不同的波形是定量确定不确定度分量的关键参数,因此对于环状气液两相流液膜表面界面波的波形研究是十分必要的。

Ottens等^[19]利用非接触的视频图像分析技术准确测量并给出了以气相表观流速为划分依据的水平管($D=0.051\text{ m}$)气液两相流界面波的分类。李广军等^[20]给出类似的界面波波形分类,并指出扰动波特点为振幅较大、外形极不对称,即波峰前端陡而短,波峰后则相对平缓而长。上述结论与Peng等^[21]对该波形形状特征描述一致。

在双闭环可调压中压湿气实验装置上进行实流实验的液膜表面界面波时序信号如图1所示。从图中可以明显看出四种实验条件下的界面波均为扰动波,其具有鲜明的扰动波特点,如不对称分布、波前陡峭波后平缓,扰动波区域与基膜区域之间的过渡平缓。

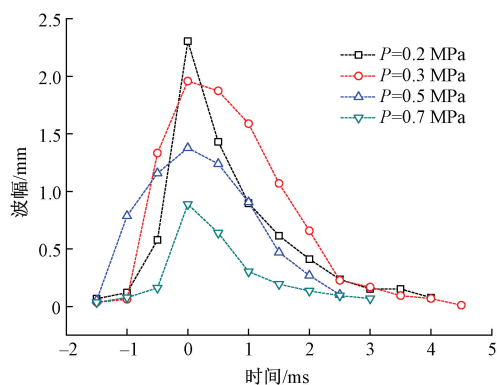


图1 不同压力条件下的界面扰动波

($u_{sg}=12.7\text{ m/s}$, $u_{sl}=0.142\text{ m/s}$)

Fig. 1 Interfacial disturbance wave under different pressure conditions ($u_{sg}=12.7\text{ m/s}$, $u_{sl}=0.142\text{ m/s}$)

由图1可知,可将正弦波模型和实时海浪模型引入界面扰动波研究,通过理论分析和实验研究表明,海浪模型更适用于界面扰动波,因此本文以近似扰动波的海浪模型进行定量分析。在虚拟现实技术中,实时海浪模拟是一个非常重要的问题。海浪主要是风引起的,现对海浪模拟的研究主要有两个方面:一种是基于统计学的角度描述海面各质点的运动状态,另一种是基于物理方法描述海浪的运动状态。比较海浪模型的优缺点,如表1所示。

这里运用介于上述两种方法之间的一种方法,用一组简单紧凑的方程描述动态海浪。大的海浪是顶端尖锐,底部圆滑的一种次摆线形状,利用统计学的方法获得海浪的三级次摆线模型,用次摆线代替正弦波,再利用Pierson Moskowitz滤波器获得控制次摆线的参数,最后叠加二级湍流函数描述细节^[26]。这种方法可根据风速的不同对海浪高度进行仿真,更接近于真实的海浪波形,

表 1 海浪模型比较
Table 1 Ocean wave model comparison

	方法	优点	缺点
基于统计学方法	Fourier 等 ^[22] 提出参数方程,该海浪模型的侧剖面有一定尖锐程度的次摆线,更接近于真实的海浪	具有良好波的特性,只需要模拟小部分海面	计算复杂,不适合描述细节
	Perlin ^[23] 提出 3D 降噪方法模拟同心圆海浪	计算量小,模拟效果较好	方程的参数难确定,结果不可控
基于物理方法	Navier Stokes 方程 ^[24] 通过处理参数产生一个巨大的有限元网格来模拟海浪	符合流体力学理论,模拟逼真度好	计算量大,难控制预期的效果
	通过 Pierson Moskowitz 滤波器用白噪声获得真实的海浪频谱 ^[25]	模拟效果较好,可控	尺寸有限,不能描述任意级别的细节

计算更有效率,海浪模型为:

$$x(x_0, t) = x_0 + \sum_i \hat{k}_i A_i \sin(k_i x_0 - w_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

$$z(x_0, t) = z_0 - \sum_i A_i \cos(k_i x_0 - w_i t + \varphi_i) \quad (2)$$

$$T(x, y, z, t) = z(x_0, t) + T(x, y, z, t, m) \quad (3)$$

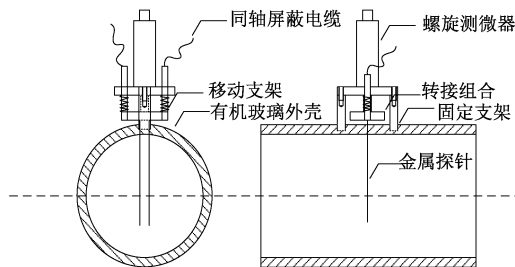
$$F(f, \alpha) = F_{PM}(f) D(f, \alpha) \quad (4)$$

式中: $x = (x, y)$ 是质点在 t 时刻的水平位置坐标; z 是纵轴坐标; $\hat{k}_i$ 是海浪传播方向 k_i 的单位矢量; φ_i 是随机相位; $T(x, y, z, t)$ 是湍流函数; A_i 是湍流函数振幅; m 是频率乘法器; $D(f, \alpha)$ 为方向因数,取决于海浪传播方向和风向的夹角 α ; $F_{PM}(f)$ 为滤波器表达式; f 为液膜界面波特征频率。

2 环状流液膜动态测量装置

为实现液膜厚度测量传感器的动态标定,本文设计了基于直接测量法的可调节插入深度的波状液膜厚度测量传感器,液膜的厚度直接通过螺旋测微器读取,如图 2 所示,实现了液膜厚度的量值溯源与测量传感器的不确定度评定。

该动态装置主要部件是一对插入深度可调的平行接触探针和螺旋测微器,沿管道径向安装,螺旋测微器用于调节探针插入深度。除探针针尖位置外都涂抹疏水材料,可以有效避免核中夹带液滴和另一侧液膜的影响。



(a) 环状流液膜动态测量装置结构
(a) Schematic of annular flow liquid film dynamic measuring device



(b) 环状流液膜动态测量装置实物图
(b) Object picture of annular flow liquid film dynamic measuring device

图 2 环状流液膜动态测量装置

Fig. 2 Annular flow liquid film dynamic measuring device

与利用电导探针获得电导值的间接测量法不同的是,在没有接触到液膜时,两根探针使得整个电路处于开路状态,即电阻两端为低电平(记为“0”);当两探针接触液膜时,由于水的导电性使得电路导通,即电阻两端为高电平(记为“1”)。本装置中的电压源采用直流稳压电源模块,以此来消除水的极化作用造成的电极间的阻值测量精度问题。为了确定测量回路是否闭合,在测量电路中引入一个精密电阻与金属接触探针串联,通过测量精密电阻两端的电压来确认接触探针是否与液膜接触。其中输出的高低电平值由数据采集卡采集,并将数据存储在笔记本电脑中用于后续的数据处理,其测量电路如图 3 所示。

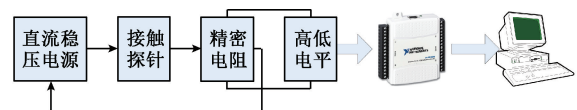


图 3 测量电路

Fig. 3 Measuring circuit

3 测量不确定度分析

3.1 管道曲率引入的测量不确定度分量

通过接触探针液膜测量原理可知,液膜厚度值等于接触探针分别在管道内壁和液膜表面时螺旋测微器示值之差。对于矩形等底部为平面的管道其测量结果无需修正,而对于圆形管道,就必须考虑曲率引入的不确定度的影响,在相同曲率条件下其值与接触探针间距成正比关系。由于探针自身直径、机械加工精度及液相介质表面张力的影响,平行探针不能无限接近,考虑到环状液膜厚度通常在几十到几百微米范围,因此在圆管环状流动液膜厚度测量时必须考虑管道曲率引入的测量不确定度分量对测量结果的影响。

以上述环状流波动液膜厚度动态测量装置为例,两平行的接触探针径向插入管道内部时,探针间距离为 3 mm,如图 4 所示。

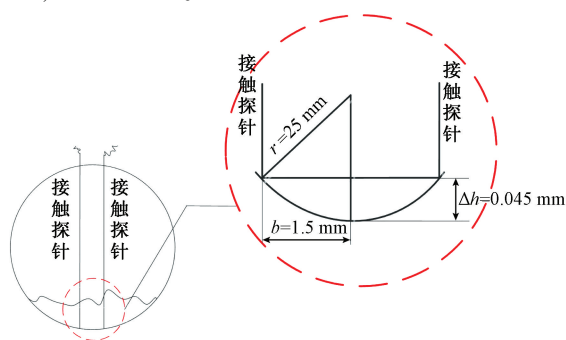


图4 管道曲率带来的不确定度分析

Fig. 4 Uncertainty analysis of pipeline curvature

由图 4 可知,当接触探针与管道内壁接触时,由于探针间距和管道曲率的影响,势必会对液膜厚度测量引入一个测量不确定度分量。该不确定度分量可由式(5)确定:

$$\Delta h = r - \sqrt{r^2 - b^2} \quad (5)$$

式中: Δh 为管道曲率所引入的不确定度; r 代表圆管半径; b 代表探针间距的 1/2。

由式(5)可得,对于 DN50 管道,经计算可得由管道曲率所引入的测量不确定度为 0.045 mm,即当液膜平均厚度为 1 mm 时,由于曲率引入的相对测量不确定度可达 4.5%。

3.2 插入深度的不连续性引入的不确定度分量

统计时间内液膜平均厚度表达式为:

$$\delta = \frac{1}{T} \int_0^T h(t) dt \quad (6)$$

式中: δ 为平均液膜厚度; T 为统计时间; h 为瞬时液膜高度。

探针插入深度不同所采集到的动态波状液膜厚度也不同,不同插入深度下采集到的信号波形,如图 5 所示,从左到右分别表示不同插入深度时的高低电平波形,图中实线表示当前状态下的平均液膜厚度。当探针针尖没有接触液膜时,精密电阻两端电压为零,当探针针尖与液膜接触时,精密电阻两端会随着插入深度的不同而产生不同的电压。若进行连续测量实验,随着液膜的波状起伏,输出信号则表现为高低电平交替出现。本文将高电平占统计时间 T_ω 的比例定义为权重值,不同的插入深度意味着不同的权重。接触探针间的电导值与针尖侵入液膜的深度有关,导致精密电阻两端电压值随机变化。据此测量原理,当输出电压超过某一量值时将此时电平定义为“1”,当输出电压低于这一量值时将此时电平定义为“0”。

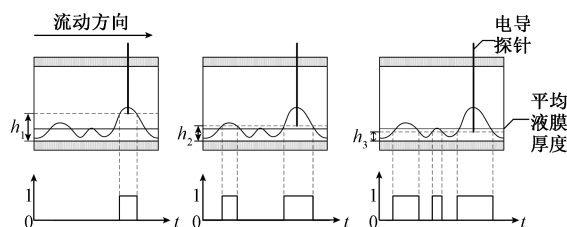


图5 测量原理

Fig. 5 Measurement principle

假设统计时间为 T_ω , h_1, h_2, h_3, h_4 分别代表不同插入深度时探针针尖到管道内壁的距离, t_1, t_2, t_3, t_4 是与该距离相对应的导通时间。在计算较低液膜厚度值(如 h_3)时高电平的统计时间 t_3 会重复计算较高液膜厚度值(如 h_4)的统计时间 t_4 , 因此应当除去这一量值。根据式(6),平均液膜厚度可以表达为:

$$\hat{\delta}_m = \frac{(h_1 \times (t_1 - t_2) + h_2 \times (t_2 - t_3) + h_3 \times (t_3 - t_4) + h_4 \times t_3)}{T_\omega} \quad (7)$$

式中: $t_1/T_\omega, t_2/T_\omega, t_3/T_\omega, t_4/T_\omega$ 分别为不同高度对应的占空比 ω 。

在相同的流动条件时,由于液膜表面界面波的周期性,当统计时间足够长时,可将每组不同插入深度的测量信号视为该深度液膜的平均状态。假设 H 为初始探针尖端至管道底部的高度, Δx 为插入深度增量值,由于高电平持续时间与统计时间之比等于占空比 ω_i , 基于时平均液膜厚度测量的计算方法如式(8)所示:

$$\begin{aligned} \hat{\delta}_m &= H\omega_1 + (H - \Delta x)(\omega_2 - \omega_1) + \dots + \\ & (H - i\Delta x)(\omega_{i+1} - \omega_i) = H\omega_1 + \sum_{i=1}^n (H - i\Delta x)(\omega_{i+1} - \omega_i) \end{aligned} \quad (8)$$

由于接触探针插入深度值不能够进行连续调节,因此不可避免的会产生测量不确定度。由海浪模型可知,

峰值之前可近似看作直线,在实验条件下不确定度几乎为零。因此,考虑插入深度值不能够连续调节,在函数模型峰值之后不可避免的会产生测量不确定度。如图 6 所示, L 代表管道内壁, L_2 为基膜厚度, δ 为平均液膜厚度, Δx 为插入深度增量, T 为占空比统计时间。虽然插入深度增量是离散的,但是界面波是连续的。假设峰值之后探针针尖到管壁的距离在调整插入深度前后分别为 h_1 和 h_2 ($h_1 > h_2$),而厚度介于两个距离间的液膜均被认为厚度值等于 h_2 。因此当计算平均液膜厚度时, $S_{i(i=1,2,3)}$ 区域的面积并没有计算在内,会引入额外的测量不确定度。该面积近似为三角形,其表达式为:

$$S_{i(i=1,2,3)} = \frac{1}{2} \Delta x \times t_i \quad (9)$$

$$\Delta S = \sum_{i=1}^3 S_i = \frac{1}{2} \Delta x \sum_{i=1}^3 t_i \quad (10)$$

因此根据流动条件下的界面扰动波时序信号分析可知,峰值之后相对测量不确定度可以表示为:

$$u_1 = \left| -\frac{\Delta S}{S} \right| = \left| -\frac{k \Delta x}{\delta} \right| \quad (11)$$

其中, $k=0.4$ 。

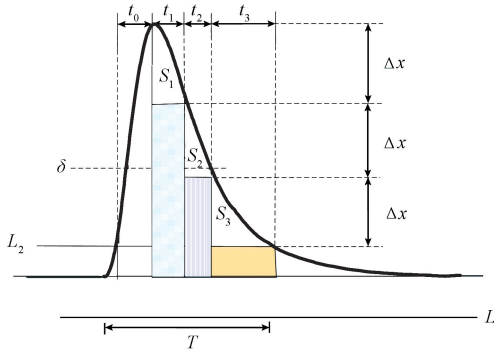


图 6 测量不确定度分析

Fig. 6 Measurement uncertainty analysis

3.3 统计时间引入的测量不确定度

当占空比统计时间足够长时,每个插入深度对应的占空比可以代表占空比时平均值。研究表明不同的流动条件下,液膜表面的扰动波具有不同频谱特性。当利用某一插入深度的时序信号进行占空比计算时,与非整数周期采样问题类似,就会产生非整数周期统计所带来的测量不确定度。

假设 f 为某一流体条件下的液膜界面波特征频率。当计算对应不同插入深度的占空比时,其由非整数周期引起最大绝对误差值为 $\pm 1/2f$ 。因此,占空比的最大相对测量不确定度可由下式计算为:

$$u_2 = \frac{1}{2fT} \quad (12)$$

4 波动液膜厚度修正算法与结果分析

4.1 实验测量装置及液膜厚度测量系统误差修正算法

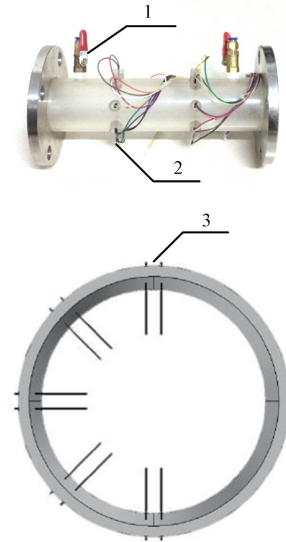
实验在双闭环可调压中压湿气实验装置上进行,流动介质为压缩空气和水,实验管段为 DN50,装置采用双循环回路设计,实验参数范围如表 2 所示。

表 2 实验参数范围

Table 2 Range of experimental parameters

管道压力/MPa	气相表观流速/(m/s)	液相表观流速/(m/s)	采样点
0.01~0.2	31.0~60.0	0.03~0.09	12

为了验证该动态液膜厚度测量方法的有效性和准确性,本文采用间接电导法获得的液膜厚度时间序列作为测试数据,用来模拟动态波状液膜。电导探针部分由两根平行的镍-铬合金导线组成,直径为 0.1 mm,两根探针间距 1.5 mm,插入深度为 12 mm,如图 7 所示。统计时间 5 s 内的液膜厚度时间序列如图 8 所示。



1-取压孔;2, 3-平行电导探针

图 7 平行探针液膜厚度测量传感器

Fig. 7 Parallel-wire probes measurement sensor of liquid film thickness

根据式(6),利用上述液膜厚度时间序列计算 3 种流动条件下的平均液膜厚度,并将该液膜厚度作为参考值或真值。选取 4 种不同插入深度增量以及 3 种统计时间对上述时间序列进行模拟测量,得到了 36 组实验结果如图 9 所示。

如图 9(a)、(b)、(c) 所示,测量结果的相对测量不

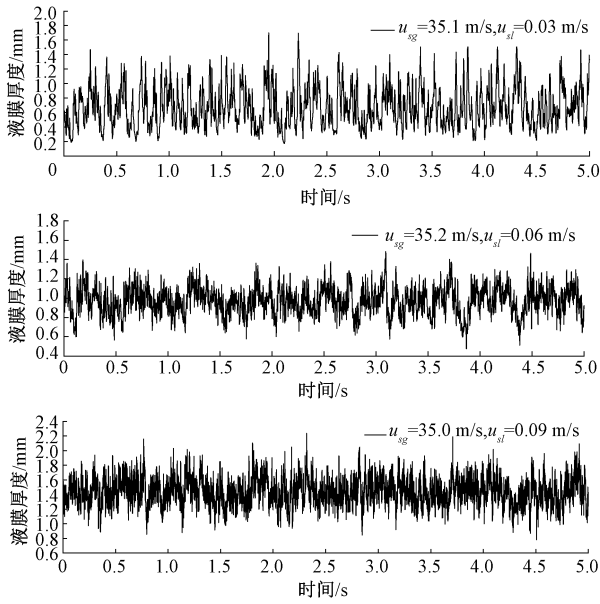
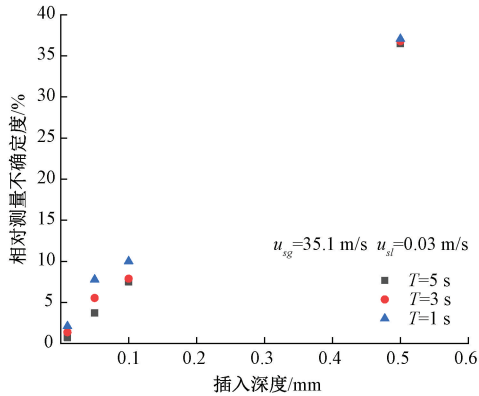
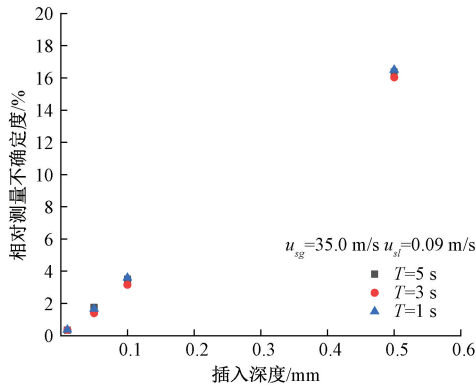


图8 瞬时液膜厚度信号时间序列

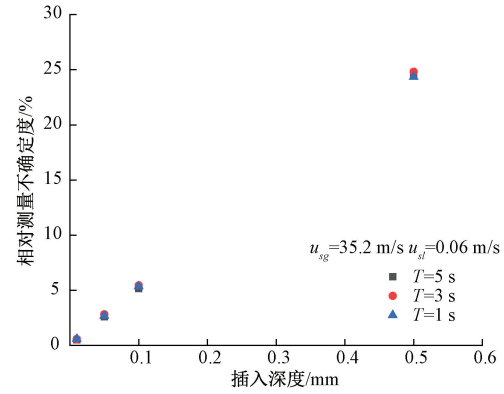
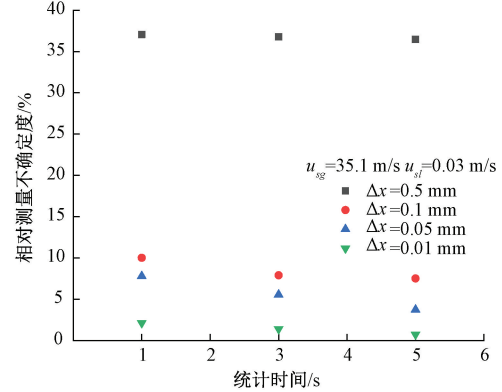
Fig. 8 Time series of instantaneous liquid film thickness signal

(a) 不同统计时间下的实验结果相对测量不确定度
($u_{sg}=35.1$ m/s, $u_{sl}=0.03$ m/s)(a) Relative uncertainty of experimental results under different statistical times ($u_{sg}=35.1$ m/s, $u_{sl}=0.03$ m/s)(c) 不同统计时间下的实验结果相对测量不确定度
($u_{sg}=35.0$ m/s, $u_{sl}=0.09$ m/s)(c) Relative uncertainty of experimental results under different statistical times ($u_{sg}=35.0$ m/s, $u_{sl}=0.09$ m/s)

确定度与插入深度增量成正比关系。在任意统计时间内,随着液相表观流速的增加,相对测量不确定度逐渐减小。如图9(d)、(e)、(f)所示,相对测量不确定度随着统计时间的增加而减小,但是随着液相表观流速的增加,统计时间的作用逐渐弱化,即统计时间引入的测量不确定度对总的测量不确定度的贡献逐渐降低。其原因可能是随着液相表观流速的增加其界面波频率也随之增加,即界面波波动周期越来越短。由式(12)可知,界面波频率越高,统计时间对测量不确定度的影响越小。由此可以看出,插入深度增量引入测量不确定度分量要远大于统计时间。

从图9中可以看出,所有测量结果的相对测量不确定度与本文上述中测量不确定度分析结果一致,说明该测量装置存在系统效应引入的不确定度分量。为了减小该不确定度影响,本文提出了一个针对系统效应引入不确定度的补偿修正算法。由于平均液膜厚度的真值未知,因此液膜厚度的测量值被用于替代真值估计该不确定度分量,设 δ 为液膜厚度测量值, $\hat{u}_1$ 为不确定度估计值,则:

$$\hat{u}_1 = \left| -\frac{k\Delta x}{\delta} \right| \quad (13)$$

(b) 不同统计时间下的实验结果相对测量不确定度
($u_{sg}=35.2$ m/s, $u_{sl}=0.06$ m/s)(b) Relative uncertainty of experimental results under different statistical times ($u_{sg}=35.2$ m/s, $u_{sl}=0.06$ m/s)(d) 不同插入深度增量下的实验结果相对测量不确定度
($u_{sg}=35.1$ m/s, $u_{sl}=0.03$ m/s)(d) Relative uncertainty of experimental results under different insertion depth increments ($u_{sg}=35.1$ m/s, $u_{sl}=0.03$ m/s)

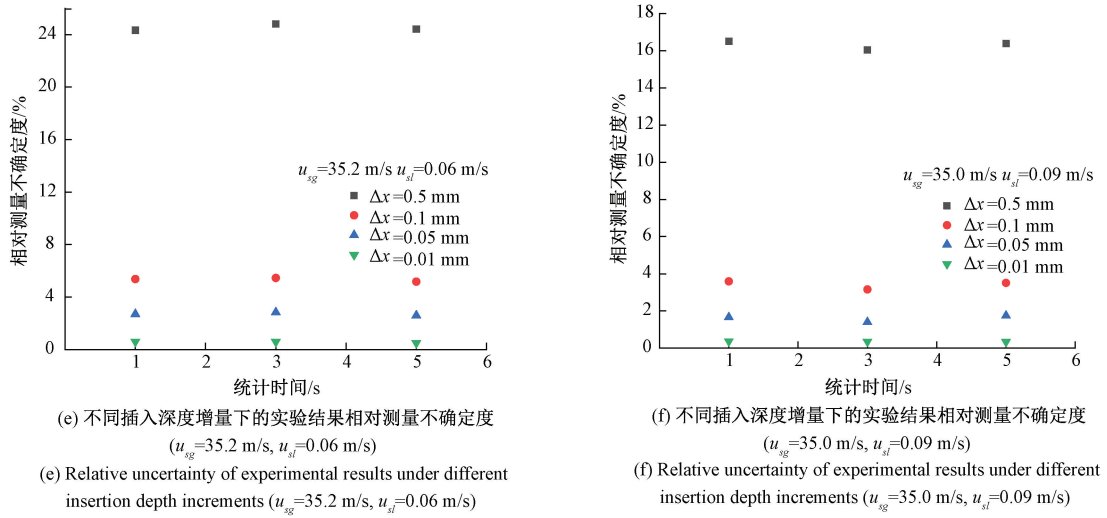


图 9 不同插入深度增量以及不同统计时间下的实验结果相对测量不确定度

Fig. 9 Relative uncertainty of experimental results under different insertion depth increments and different statistical times

利用式 (14) 就实现了系统误差补偿算法, 其表达式为:

$$\bar{\delta} = \hat{\delta}(1 + \hat{u}_1) \quad (14)$$

式中: $\bar{\delta}$ 为补偿后的平均液膜厚度。

u_b 和 u_a 分别定义为修正前后的相对测量不确定度, 其表达式分别为:

$$u_b = \left| \frac{(\hat{\delta} - \delta)}{\delta} \right| \times 100\%, \quad (15)$$

$$u_a = \left| \frac{(\bar{\delta} - \delta)}{\delta} \right| \times 100\%, \quad (16)$$

4.2 实验结果分析

如表 3 所示, 在任意统计时间条件下, 经过系统误差补偿算法后的相对测量不确定度都有了显著的改善。以统计时间 5 s, 插入深度增量为 0.5 mm 为例, 当 $u_{sg} = 35.1$ m/s, $u_{sl} = 0.03$ m/s 时, 相对测量不确定度由 36.47% 减小到 0.14%; 当 $u_{sg} = 35.2$ m/s, $u_{sl} = 0.06$ m/s 时, 相对测量不确定度由 24.42% 减小到 0.80%; 当 $u_{sg} = 35.0$ m/s, $u_{sl} = 0.09$ m/s 时, 相对测量不确定度由 16.38% 减小到 0.68%。在任意统计时间与任意插入深度增量条件下, 94.44% 的实验点的相对测量不确定度在 2% 以内。

在 3 种流动条件下, 插入深度增量为 0.5、0.1、0.05、0.01 mm, 统计时间分别为 5、3、1 s 时, 对比以三级海浪和正弦波为模型产生的相对测量不确定度, e_a 为以正弦波模型进行定量分析的相对测量不确定

度, 如表 4 所示。以插入深度增量为 0.5 mm, 统计时间分别为 5、3、1 s 时为例, 两种模型相对测量不确定度对比如图 10 所示。实验发现, 当插入深度增量较大时, 以三级海浪模型进行定量分析的测量不确定度明显比正弦波模型的测量不确定度小, 测量精度高。当插入深度增量较小时, 总体来看三级海浪模型优于正弦波模型, 但是二者效果相差不大, 因为插入深度增量越小, 产生的测量不确定度越小。综上, 以三级海浪为模型进行研究比正弦波模型更佳。

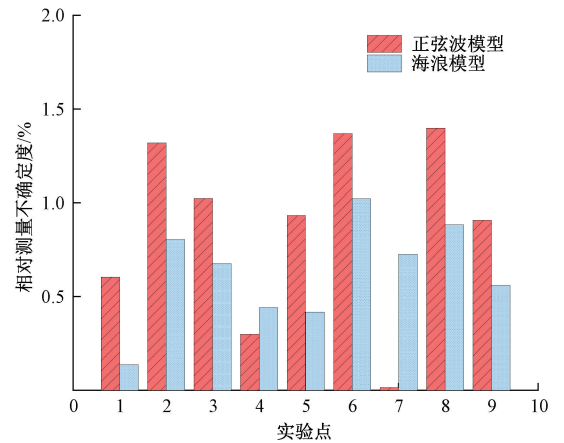


图 10 两种模型相对测量不确定度对比

($\Delta x = 0.5$ mm, $T = 5, 3, 1$ s)

Fig. 10 Comparison of measurement uncertainty of two models

($\Delta x = 0.5$ mm, $T = 5, 3, 1$ s)

表 3 修正前后相对测量不确定度对比

Table 3 Comparison of measurement relative uncertainty before and after correction

T/s	δ/mm	$\Delta x = 0.5 \text{ mm}$		$\Delta x = 0.1 \text{ mm}$		$\Delta x = 0.05 \text{ mm}$		$\Delta x = 0.01 \text{ mm}$	
		$u_b/\%$	$u_a/\%$	$u_b/\%$	$u_a/\%$	$u_b/\%$	$u_a/\%$	$u_b/\%$	$u_a/\%$
5	0.67	36.47	0.14	14.70	0.24	7.51	0.08	3.72	0.003
	0.97	24.42	0.80	10.38	0.12	5.17	0.07	2.60	0.004
	1.44	16.38	0.68	6.99	0.09	3.51	0.04	1.75	0.003
3	0.67	36.78	0.44	15.21	0.63	7.89	1.92	5.55	0.65
	0.97	24.81	0.42	10.74	0.41	5.45	0.30	2.83	0.08
	1.44	16.04	1.02	6.64	0.25	3.16	0.30	1.40	0.01
1	0.67	37.06	0.73	18.15	2.74	10.01	4.16	7.79	1.39
	0.97	24.34	0.88	10.78	0.32	5.37	0.18	2.70	0.09
	1.44	16.50	0.56	7.09	0.18	3.59	0.04	1.66	0.02

表 4 正弦波模型与三级海浪模型相对测量不确定度对比

Table 4 Comparison of measurement relative uncertainty between sine wave model and three-level ocean wave model

T/s	δ/mm	$\Delta x = 0.5 \text{ mm}$		$\Delta x = 0.1 \text{ mm}$		$\Delta x = 0.05 \text{ mm}$		$\Delta x = 0.01 \text{ mm}$	
		$e_a/\%$	$u_a/\%$	$e_a/\%$	$u_a/\%$	$e_a/\%$	$u_a/\%$	$e_a/\%$	$u_a/\%$
5	0.67	0.60	0.14	0.14	0.24	0.09	0.08	0.01	0.003
	0.97	1.32	0.80	0.09	0.12	0.02	0.07	0.02	0.004
	1.44	1.02	0.68	0.03	0.09	0.02	0.04	0.01	0.003
3	0.67	0.30	0.44	0.38	0.63	0.48	1.92	1.84	0.65
	0.97	0.93	0.42	0.45	0.41	0.30	0.30	0.25	0.08
	1.44	1.37	1.02	0.33	0.25	0.32	0.30	0.34	0.01
1	0.67	0.02	0.73	3.31	2.74	2.60	4.16	4.09	1.39
	0.97	1.40	0.88	0.49	0.32	0.22	0.18	0.13	0.09
	1.44	0.91	0.56	0.13	0.18	0.11	0.04	0.08	0.02

5 结 论

基于对环状流界面波的理论分析和实验研究,将实时海浪模拟思想引入环状流界面扰动波研究,建立了基于三级海浪函数的界面扰动波模型。

设计了一种基于直接测量法的适用于密封管的薄膜流动的可调节插入深度的波状液膜厚度测量传感器,探针可以实现 0.045 mm~3 cm 厚度液膜的直接测量,螺旋测微器用于调节探针插入深度,其最小分度值为 10 μm ,最小分辨率可达 $1 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。

进行了全面的测量不确定度分析,找到了 3 个主要不确定度来源(即管道曲率,插入深度不连续性以及统计时间),提出了基于占空比时平均液膜厚度测量的动态校准方法。

对测量传感器进行测量不确定度来源分析及评定,

提出了系统误差补偿算法,提高了测量精确度。以三级海浪为模型进行研究比正弦波模型更佳,其在任意统计时间与任意插入深度增量条件下,94.44%的实验点的相对测量不确定度在 2% 以内。

参考文献

- [1] 孙斌,周云龙,陆军. 水平管气液两相流流型压差波动的 PSD 特征[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 377-378.
SUN B, ZHOU Y L, LU J. PSD characteristics of pressure differential fluctuation of flow pattern in gap-liquid two-phase flow in horizontal pipes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4): 377-378.
- [2] 董帅,徐科军,侯其立,等. 微弯型科氏质量流量计测量气-液两相流研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1972-1977.
DONG SH, XU K J, HOU Q L, et al. Research on gap-

- liquid two-phase flow measurements with micro-curved coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 1972-1977.
- [3] AL-AUFI Y A, HEWAKANDAMBY B N, DIMITRAKIS G, et al. Thin film thickness measurements in two phase annular flows using ultrasonic pulse echo techniques[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 66: 67-78.
- [4] 李华军,刘光宇,余善恩. 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. Flow image distortion correction for two-phase flow in micro /mini pipes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 239-245.
- [5] SCHUBRING D, SHEDD T A, HURLBURT E T. Planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurements of liquid film thickness in annular flow. Part II: Analysis and comparison to models [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(10): 825-835.
- [6] MOREIRA T A, MORSE R W, DRESSLER K M, et al. Liquid-film thickness and disturbance-wave characterization in a vertical, upward, two-phase annular flow of saturated R245fa inside a rectangular channel[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 132: 103412.
- [7] CIONCOLINI A, THOME J R. Liquid film circumferential asymmetry prediction in horizontal annular two-phase flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 51: 44-54.
- [8] 贾惠芹,王成云,张铁煜,等. 非接触式超声波流量计收发电路的设计与性能分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 123-132.
- JIA H Q, WANG CH Y, ZHANG T Y, et al. Design and performance analysis of transceiver circuit of non-contact ultrasonic flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 123-132.
- [9] 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 gas-liquid two-phase flow ultrasonic process tomography [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 146-154.
- [10] LIU W, LYU X F, BAI B F. Axial development of air-water annular flow with swirl in a vertical pipe [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2019, 124: 103165.
- [11] HAN Y, NA Y H. Measurement of liquid film thickness on moving plate during dip-coating process [J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2018, 30(2): 137-143.
- [12] CHEN B W, WANG B, MAO F, et al. Analysis of liquid droplet impacting on liquid film by CLSVOF [J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 143: 107468.
- [13] 周念,黄云志,杨双龙. 并行激励的电磁流量计电导率测量系统研制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 115-122.
- ZHOU N, HUANG Y ZH, YANG SH L. Development of conductivity measurement system for electromagnetic flowmeter with parallel excitation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(10): 115-122.
- [14] MCMANUS H N. An experimental investigation of film characteristics in horizontal annular twophase flow [J]. ASME Paper, 1957: 57-114.
- [15] HEWITT G F, HALL-TAYLOR N S. Annular two-phase flow [M]. Pergamon Press, 1970: 87-98.
- [16] KOSKIE J E, MUDAWAR I, TIEDERMAN W G. Parallel-wire probes for measurement of thick liquid films [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1989, 15(4): 521-530.
- [17] 侯昊,毕勤成,马红. 水平管降膜厚度的电导探针测量方法 [J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(4): 476-480.
- HOU H, BI Q CH, MA H. Conductance probe measurement method for falling film thickness around horizontal tube [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2011, 33(4): 476-480.
- [18] CLARK W W. Liquid film thickness measurement [J]. Multiphase Science and Technology. 2002, 14(1): 1-74.
- [19] OTTENS M, KLINKSPOOR K, HOEFSLOOT H C J, et al. Wave characteristics during co-current gas-liquid pipe flow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1999, 19(3): 140-150.
- [20] 李广军,郭烈锦,陈学俊,等. 水平矩形管内气液两相流界面波特性 [J]. 化工学报, 1997, 48(6): 740-745.
- LI G J, GUO L J, CHEN X J, et al. Interface wave characteristics of gas-liquid two-phase flow in horizontal rectangular tube [J]. CIESC Journal, 1997, 48(6): 740-745.
- [21] PENG C A, JURMAN L A, MCCREARY M J. Formation of solitary waves on gas-sheared liquid layers [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1991, 17(6): 767-782.
- [22] FOURNIERA A, REEVES W T. A simple model of ocean waves [J]. ACM Siggraph Computer Graphics,

1986, 20(4): 75-84.

- [23] PERLIN K. An image synthesizer[J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1985, 19(3): 287-296.
- [24] CHEN J X, LOBO N D V. Toward Interactive-rate simulation of fluids with moving obstacles using Navier-Stokes equations [J]. Graphical Models and Image Processing, 1995, 57(6): 107-116.
- [25] 杨怀平,孙家广. 基于海浪谱的波浪模拟[J]. 系统仿真学报, 2002,14(9):1175-1178.
YANG H P, SUN J G. Wave simulation based on wave spectrum [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(9): 1175-1178.
- [26] 高伟,陈涛,杜亚琦. 基于频谱的湍流函数海浪仿真[J]. 应用科技,2007,34(11):28-31.
GAO W, CHEN T, DU Y Q. Simulation of turbulence function wave based on frequency spectrum[J]. Applied Science and Technology, 2007, 34(11): 28-31.

作者简介



贾慧君,2019 年于河北大学获得学士学位,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: jiahuijun1996@sina.com

Jia Huijun received her B. Sc. degree from Hebei University in 2019. She is currently a master student at Hebei University. Her main research interest is multiphase flow measurement technology and instruments.



E-mail: zhaoning1983@tju.edu.cn

Zhao Ning (Corresponding author) 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 interest is multiphase flow measurement technology and instruments.



E-mail: fanglide@sina.com

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

赵宁(通信作者),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。

方立德,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与仪器。