

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.09.009

用于水平环状流周向液膜特性测量的电导探针阵列*

王超¹ 陈超¹ 赵宁^{1,2} 孙宏军¹

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院 天津 300072; 2. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002)

摘要:水平管周向液膜分布具有不对称性,是研究液体输送机理的关键。根据间接电导法测量原理,设计了用于水平环状流周向液膜特性测量的电导探针阵列,结合相关测速方法,实现了周向液膜厚度分布以及周向波动速度分布的测量。针对探针间的信号耦合问题,通过仿真分析,确定了周向探针分时与轴向探针同时相结合的工作方式。设计了基于FPGA的液膜参数测量系统,在天津大学湿气装置上进行实验,实验结果表明周向液膜厚度随着角度的增大而减小,周向波动速度随着角度的增大而基本不变。

关键词:水平环状流;电导探针阵列;信号耦合分析;周向液膜厚度;周向波动速度

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Conductivity probe array for circumferential liquid film characteristic measurement in horizontal annular flow

Wang Chao¹ Chen Chao¹ Zhao Ning^{1,2} Sun Hongjun¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. College of Quality and Technology Supervising, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: The circumferential liquid film distribution is asymmetric, and it plays an important role in studying the mechanism for transport of liquid. In this paper, a conductivity probe array for circumferential liquid film characteristic measurement in horizontal annular flow is designed based on indirect conductivity measurement principle. Combined with cross-correlation velocity measurement, it is realized that the distribution of circumferential liquid film thickness and circumferential wave velocity is measured respectively. As for the signal coupling issue between the probes, it is acknowledged that the circumferential probe must work in different time and the axial probe can work together after simulation analysis. A measurement system for liquid film parameter based on FPGA is designed. The experiment is implemented on Tianjin University moisture setup, and the result shows that the liquid film thickness decreases with the increase of angel and the wave velocity remains the same with the increase of angel.

Keywords: horizontal annular flow; conductivity probe array; analysis of signal coupling; circumferential liquid film thickness; circumferential wave velocity

0 引 言

液膜对气液两相流的传热、传质和阻力特性有很大的影响^[1-3],因此,正确有效地对液膜特性进行测量是研究这些特性的重要基础。近年来,液膜特性测量已成为

国内外研究的热点,但是还是存在一些重要问题没有解决,液体输送机理就是其中之一。已提出的4种较为可信的液体输送机理分别为气体二次流机理、液体携带与沉降机理、波的扩散和混合机理、扰动波抽吸机理^[4-5],但是至今还没有一个机理得到公认。由于周向液膜分布对研究液体输送机理起着关键性作用,故而对周向液膜特

性的测量变得尤为重要。

光学法和电导法是应用于周向液膜特性测量的两种主要方法。Lin 等人^[6]采用荧光强度法,利用在荧光剂浓度固定的情况下,荧光强度随荧光剂分子个数增加而增加的原理测量水平管周向液膜厚度分布;Hurlburt 等人^[7]、Schubring 等人^[8]分别采用全内反射法,利用两相流体折射率差异,光在其界面处发生全反射来获得水平管周向液膜厚度分布。虽然光学法具有测量精密度高、理论技术成熟等优点,但光学测量设备价格普遍昂贵,而且对使用环境有极其严格的要求,限制了其在工业领域的应用。电导法传感器结构简单,对使用环境要求低,在液膜测量领域发挥着重要的作用。李卫东等人^[9]、Paras 等人^[10]、Han 等人^[11]采用5组双平行电导探针,根据探针周围液膜高度与测量电导存在的对应关系,对水平管周向液膜厚度分布进行了测量。

虽然电导探针阵列对于周向液膜分布得到了广泛的运用,但是,由于每组探针间距相对较小,不同电导探针的测量必然会存在耦合现象,对信号耦合造成的测量精度问题至今被忽略。此外,目前已有的电导探针阵列都仅仅针对周向液膜厚度分布的测量,而没有对周向波动速度的分布的测量。针对以上两个问题,本文设计了用于水平环状流周向液膜特性测量的电导探针阵列,通过与相关测速方法结合,实现对周向液膜厚度和周向波动速度两个参数的测量。仿真分析了探针间的信号耦合问题,确定了激励测量策略,并基于FPGA的液膜参数测量系统,实现了对水平环状流周向液膜特性的测量。

1 电导探针阵列传感器设计

1.1 测量原理

1) 液膜厚度测量原理

Williams^[12]认为当双平行电导探针间距相较于探针直径足够近时,则探针间的折算电阻和折算电容可以由式(1)和(2)表示。

$$R = \ln((D_c + \sqrt{D_c^2 - d^2})/d)/\sigma_l h \quad (1)$$

$$C = \epsilon_l h/4\ln((D_c + \sqrt{D_c^2 - d^2})/d) \quad (2)$$

式中: σ_l 是液体的电导率, ϵ_l 是液体的介电常数, h 是液膜厚度, D_c 是探针间距, d 是探针直径。

如果给探针施加交流电作为激励,那么探针间总的电阻抗可以定义为:

$$Z = \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2} \quad (3)$$

由式(1)~(3)可得探针间液膜的厚度与电阻抗之间的关系为:

$$h = \sqrt{\alpha^2/\sigma_l^2 + 16\alpha^2/\omega^2\epsilon_l^2}/Z \quad (4)$$

式中: $\alpha = \ln((D_c + \sqrt{D_c^2 - d^2})/d)$,当双平行电导探针

结构确定时, α 为一固定值。

当频率较高时,探针间的容抗可忽略,探针间液膜的厚度与电阻之间的关系为:

$$h = \alpha/\sigma_l R \quad (5)$$

2) 波动速度测量原理

相关测量技术的基本思想是通过流动“噪声”信号的分析,将流速的测量转化为时间间隔。如图1所示,在被测流体管道中相距 L 处安装两个相同特性的传感器可分别测出被测流体流过相应测量区域时所产生的随机流动噪声信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ ^[13]。

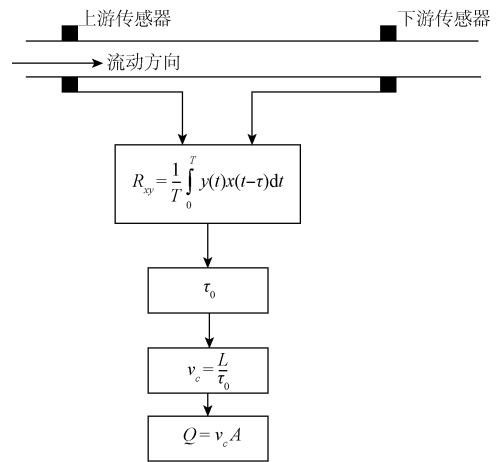


图1 相关测量基本原理

Fig. 1 Schematic diagram of cross-correlation measurement

将上下游传感器信号作互相关运算,则互相关函数为 R_{xy} 为:

$$R_{xy} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)x(t-\tau)dt \quad (6)$$

式中: T 为积分时间, τ 为滞后时间,一般称为渡越时间。如果两个传感器间距 L 适当,流体在上下游传感器之间的流动特性变化较小,在理想流动条件下,即流体通过上下游传感器的流动符合“凝固”流动模型假设条件下,被测流体截面平均波动速度 V_m 可以用相关速度 V_c 表示:

$$V_m \approx V_c = L/\tau_0 \quad (7)$$

1.2 传感器结构设计

电导探针阵列传感器结构和实物分别如图2和3所示。

传感器管段为有机玻璃结构(绝缘材料),内径50 mm、外径70 mm、长300 mm,两端装有公称通径50的标准法兰,以便和实验装置连接。在两个截面上设置电导探针,两个截面的距离为100 mm。每个截面的0°(管道底部)、45°、90°、135°、180°位置分别安装一个双平行电导探针。双平行电导探针电极使用镍铬合金丝制成,

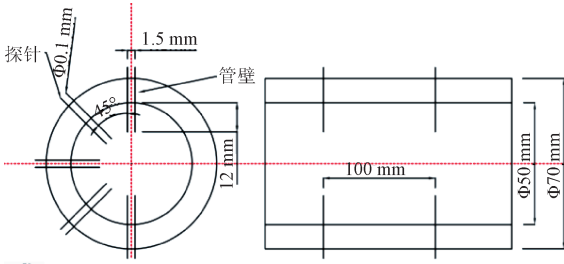


图2 电导探针阵列传感器结构

Fig. 2 Structure of conductivity probe array sensor

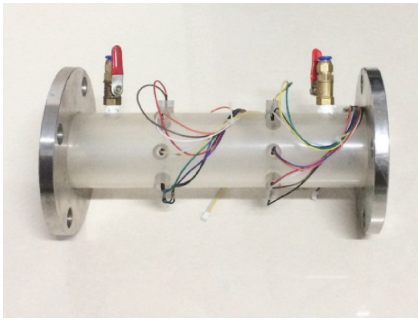


图3 电导探针阵列传感器实物

Fig. 3 Photo of conductivity probe array sensor

电极直径0.1 mm,两电极间距为1.5 mm,插入深度为12 mm。

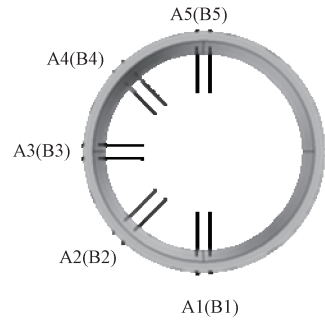
2 电导探针阵列的信号耦合分析及激励测量方式

单独的双平行电导探针用于液膜厚度测量的技术已经比较成熟^[14-16]。因此,对于多个双平行电导探针构成的电导探针阵列,探针间的信号耦合问题是研究的关键。

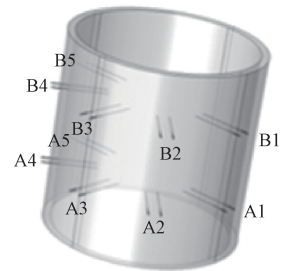
2.1 仿真建模

双平行电导探针对液相参数的测量主要基于传感器的电学敏感特性,当激励信号通过电导探针施加到被测量区域时,管道内部探针附近的区域内产生敏感场,此时流体分布状态的变化将导致电势分布的变化,从而使探针间的电势差发生变化。本文使用 COMSOL Multiphysics 软件建立电导探针阵列传感器的仿真模型,如图4所示。

由于实验中管道为有机玻璃(绝缘材料),因此建模时将其省略。圆柱为简化后的液膜,通过改变其厚度模拟液膜变化。为了提高计算效率、方便求解,将仿真模型进行简化,气、液两相分别设置为单一电导率,由于气相电导率极小,因此将其电导率取为0 S/m;液相电导率设置为自来水的通用电导率 5.22×10^{-4} S/m。探针材料为镍铬合金,其电导率设置为 5.9×10^7 S/m。实验中使用的管道内径为50 mm,因此设置液膜圆柱外径为50 mm。



(a) 仿真模型俯视图
(a) Top view of simulation model



(b) 仿真模型侧视图
(b) Side view of simulation model

图4 仿真模型

Fig. 4 Simulation model

2.2 传感器测量的耦合分析

针对电导探针之间的耦合问题,采用前述仿真模型进行分析,探针编号如图4所示。

1) 周向探针间的信号耦合

在同样液膜厚度条件下,当不同探针同时工作时,通过对对比3号探针的电阻测量结果,对探针间的耦合进行分析,结果如表1所示。

表1 不同探针同时工作对3号探针的电阻测量值

Table 1 Resistance of No. 3 probe with different probes working simultaneously

液膜厚度/mm	不同编号探针工作时3号探针的电阻测量值/kΩ						
	3	3,4	1,3	2,3,4	1,3,5	1,2,3	1,2,3,4,5
0.3	30.68	35.38	33.01	33.11	31.80	34.36	36.69
0.5	18.34	21.15	19.74	19.79	19.01	20.54	21.93
0.7	13.08	15.08	14.07	14.12	13.56	14.56	15.64
0.9	10.32	11.91	11.11	11.14	10.70	11.56	12.36

由表 1 可知,相邻探针间的信号耦合较大,约为相隔探针间耦合的 2 倍。即探针间距离越远,相互的耦合越小。当所有探针同时工作时,探针间的信号耦合最大,相对误差约为 20%,影响较大,不可忽略。因此,在对液膜厚度分布进行测量时,应考虑周向布置的探针分时工作的方式。

2) 轴向探针间的信号耦合

在同样液膜厚度条件下,当 A1 探针单独工作和 A1 和 B1 探针同时工作时,对 A1 探针的电阻测量值进行计算,结果如表 2 所示。

表 2 不同探针同时工作对 A1 探针的电阻测量值
Table 2 Resistance of No. A1 probe with different probes working simultaneously

液膜厚度/mm	A1 探针的电阻测量值/kΩ	
	A1	A1, A2
0.3	30.68	31.10
0.5	18.34	18.49
0.7	13.08	13.48
0.9	10.32	10.50

由表 2 可知,两组探针同时工作与一组探针单独工作的仿真结果的相对误差不超过 2.1%,影响较小,可忽略不计。因此对波动速度分布进行测量时,可采取轴向探针同时工作的方式。

2.3 激励测量方式的实现

根据仿真分析,探针的激励测量方式采用周向探针分时与轴向探针同时相结合的工作方式。

考虑到直流电源会造成电极的极化问题,影响测量精度,因此,采用交流激励信号。一般情况下,电解质的电阻抗是输入激励信号频率的函数^[17],Coney^[18]指出,当激励信号频率达到 100 kHz 时,水电阻抗的相位为 0,也就是说,在足够高频的激励信号下,水的电阻抗中仅存在电阻分量。当液膜非常薄时,其等效电阻非常大,若使用恒流源,虽然测量简便,但对于激励源的功率要求极高,几乎无法实现。因此,实验中电源采用交流电压源提供 100 kHz 正弦信号作为激励源。

测量系统以 FPGA 为核心,如图 5 所示。FPGA 采用 Xilinx 公司的 Spartan-3 系列 XC3S400PQ208 芯片。由 FPGA 内部的 DDS IP 核,产生正余弦信号序列,并由 D/A(AD9754 芯片,14 位分辨率,125 Msps 转换速率)和滤波电路将其转换为激励电压信号。通过控制内核对多路选通的选择,采取对周向探针分时与轴向探针同时相结合的工作方式。将检测到的信号经过调理电路和 A/D(AD9649 芯片,14 位分辨率,80 Msps 转换速率)传输到 A/D 接口,由 18×18 硬件乘法器进行解调,参考信号来自于 DDS IP 核,最终将处理后的数据经 USB 接口传至

上位机。

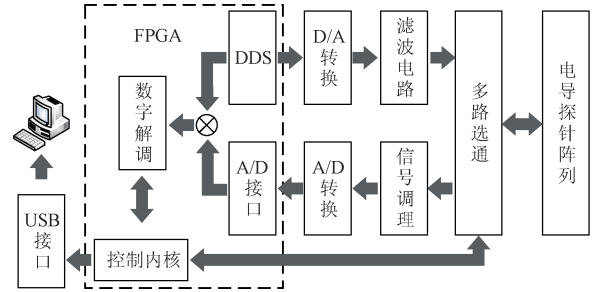


图 5 基于 FPGA 的测量系统

Fig. 5 Measurement system based on FPGA

3 周向液膜特性测量

3.1 静态标定

双平行电导探针测量液膜厚度的原理是探针之间的阻抗值与液膜厚度在一定的环境条件下存在必然的联系,在使用前必须进行标定,以获得该函数关系。将传感器两端用法兰密封并严格调整水平,向传感器中加入自来水,通过注水法或直接测量法得到液膜高度,同时采用对探针交流恒压激励测电流的方式得到探针间的电阻,标定结果如图 6 所示。根据该结果拟合出液膜厚度与探针间电阻的函数关系式如下:

$$h = 66.18 / (R + 3) + 0.62 \tag{8}$$

通过计算,得到该拟合的函数关系式最大的相对误差为 3.1%。

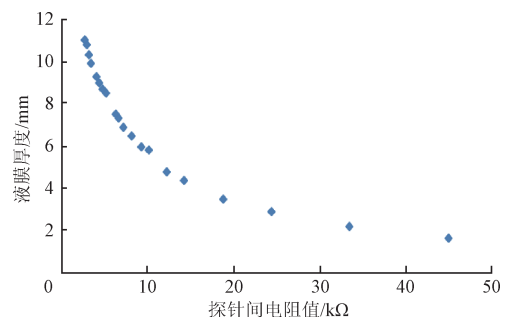


图 6 静态标定曲线

Fig. 6 Static calibration curve

3.2 动态实验

该实验在天津大学湿气装置上进行,如图 7 所示。实验过程中,管路压力为 0.1 MPa,气相表观流速为 20 m/s,液相表观流速为 0.03~0.2 m/s。在该实验条件下,水平管道中的气液两相流流型为环状流^[19]。

将 1 s 内 2 000 个液膜厚度值取平均作为某一实验条件下的平均液膜厚度。图 8 给出了不同实验条件下液

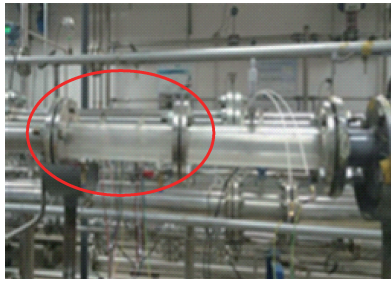


图7 安装于湿气装置的电导传感器

Fig. 7 Photo of sensor installed on Tianjin University moisture setup

膜厚度在空间位置上的分布规律。可以明显看出,随着周向角度的增大,液膜厚度降低;随着液相表观流速的增大,相同周向角度上液膜厚度增大。在 $0^\circ \sim 90^\circ$,液膜厚度随周向角度增大降低较快,在 $90^\circ \sim 180^\circ$,液膜厚度降低较少,基本没有变化。该规律和文献[10]的结果是一致的。

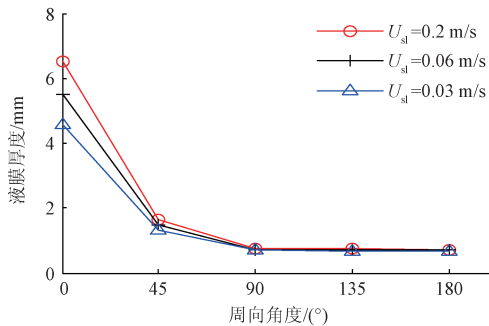


图8 周向液膜厚度分布规律

Fig. 8 Distribution of circumferential liquid film thickness

根据相关测速参数选择规则^[20],积分时间 T 应选择为1 s。图9给出了不同实验条件下波动速度在空间位置上的分布规律。可以明显看出,随着周向角度的增大,波动速度只存在微小波动,但基本保持不变。

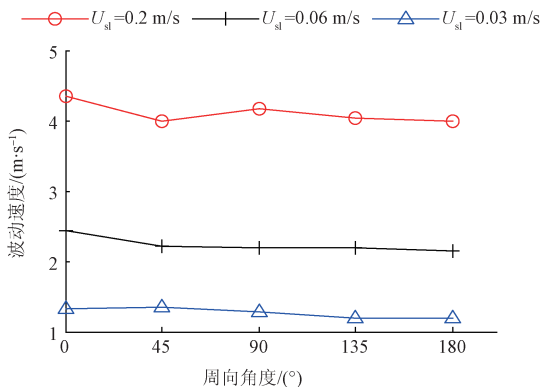


图9 周向波动速度分布规律

Fig. 9 Distribution of circumferential wave velocity

4 结论

本文设计了用于水平环状流周向液膜特性测量的电导探针阵列,在两个截面上设置电导探针,两个截面的距离为100 mm,每个截面的 0° (管道底部)、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 位置分别安装一个双平行电导探针。结合相关测速方法,实现了周向液膜厚度分布以及周向波动速度分布的测量。针对探针间的信号耦合问题,通过仿真分析,确定了周向探针分时与轴向探针同时相结合的方式。设计了基于FPGA的液膜参数测量系统,在天津大学湿气装置上进行实验,结果表明随着周向角度的增大,液膜厚度降低,在 $0^\circ \sim 90^\circ$,液膜厚度随周向角度增大降低较快,在 $90^\circ \sim 180^\circ$,液膜厚度降低较少,基本没有变化;随着周向角度的增大,波动速度只存在微小波动,但基本保持不变。此外,本文只针对常压条件下液膜厚度和速度的周向分布进行了测量,结合天津大学湿气装置,该传感器还可继续开展不同压力条件下液膜特性的测量工作,为环状流传输机理的研究提供更多的实验数据。

参考文献

- [1] 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 & Instrumentation, 2014, 28(5):528-532.
- [2] 孙宏军, 冯越. 基于滑速比模型的气液两相流截面含气率计算方法评价[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7):983-991.
SUN H J, FENG Y. Evaluation on void fraction correlations for gas-liquid two-phase flow based on slip model [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2016, 30(7):983-991.
- [3] 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. Study on measuring gas-liquid two-phase flow with micro-bend type Coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9):1972-1977.
- [4] SUTHARSHAN B, KAWAJI M, OUSAKA A. Measurement of circumferential and axial liquid film velocities in horizontal annular flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 21(2):193-206.
- [5] SETYAWAN A, INDARTO, DEENDARLIANTO. The effect of the fluid properties on the wave velocity and wave frequency of gas-liquid annular two-phase flow in a horizontal pipe [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2016, 71(2):25-41.

- [6] LIN T F, BLOCK R C, JR O C J, et al. Horizontal annular flow measurements using pulsed photon activation and film thickness distribution modelling [J]. Nuclear Engineering & Design, 1986, 95(86):353-363.
- [7] HURLBURT E T, NEWELL T A. Optical measurement of liquid film thickness and wave velocity in liquid film flows [J]. Experiments in Fluids, 1996, 21(5):357-362.
- [8] SCHUBRING D, SHEDD T A. Critical friction factor modeling of horizontal annular base film thickness [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(4):389-397.
- [9] 李卫东,李荣先,王跃社,等. 预测水平管气-液环状流周向液膜厚度分布的理论模型[J]. 化工学报, 2001, 52(3):204-208.
LI W D, LI R X, WANG Y SH, et al. Model for prediction of circumferential distribution of film thickness in horizontal gas liquid annular flow [J]. Journal of Chemical Engineering, 2001, 52(3):204-208.
- [10] PARAS S V, KARABELAS A J. Properties of the liquid layer in horizontal annular flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1991, 17(4):439-454.
- [11] HAN H, ZHU Z, GABRIEL K. A study on the effect of gas flow rate on the wave characteristics in two-phase gas-liquid annular flow [J]. Nuclear Engineering & Design, 2006, 236(24):2580-2588.
- [12] WILLIAMS L R. Effect of pipe diameter on horizontal annular two-phase flow [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 1990.
- [13] BECK M S. Correlation in instruments: Cross correlation flowmeters [J]. Journal of Physics E Scientific Instruments, 2000, 14(1):7-19.
- [14] 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.
- [15] 李广军,郭烈锦,陈学俊. 气液两相分层流界面液膜高度的测量与预测 [J]. 西安交通大学学报, 1998(5):42-46.
LI G J, GUO L J, CHEN X J. The measurements and prediction of the liquid film thickness in horizontal gas liquid two phase separated flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998(5):42-46.
- [16] 崔洁,陈雪莉,王清立,等. 电导法测量新型旋风分离器内液膜的分布规律 [J]. 化工学报, 2009, 60(6):1487-1493.
CUI J, CHEN X L, WANG Q L, et al. Double-parallel conductance probe for measuring thickness of liquid film in new-type cyclone separator [J]. Journal of Chemical Engineering, 2009, 60(6):1487-1493.
- [17] BRAUNSTEIN J. Electrolytic conductance measurements and capacitive balance [J]. Journal of Chemical Education, 1970, 48(1):52-52.
- [18] CONEY M W E. The theory and application of

conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two-phase flow [J]. Journal of Physics E Scientific Instruments, 1973, 6(9):903.

- [19] OTTENS M, KLINKSPOOR K, HOEFSLOOT H C J, et al. Wave characteristics during cocurrent gas-liquid pipe flow [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 1999, 19(3):140-150.

- [20] ZHANG W, WANG C, LI L, et al. Parameters selection in the cross-correlation based velocimetry using electrostatic sensors [C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE, 2009:134-138.

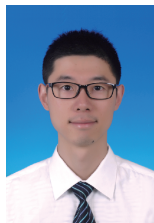
作者简介



王超, 1973 年出生, 分别在 1996 年、1999 年、2002 年于天津大学获得学士、硕士和博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向是电学成像、多相流检测。

E-mail: wangchao@tju.edu.cn

Wang Chao was born in 1973. He received B. Sc., M. Sc., and Ph. D. all from Tianjin University in 1996, 1999, and 2002, respectively. Now, he is a professor of Tianjin University. His main research interests include electrical tomography and measurement of multiphase flow.



陈超, 1991 年出生, 2013 年于天津大学获得学士学位, 现任天津大学电气自动化与信息工程学院学生, 主要研究方向是气液两相环状流液膜参数检测。

E-mail: tjuchencao@yeah.net

Chen Chao was born in 1991. He received B. Sc. from Tianjin University in 2013. Now he is a student in School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University. His main research interest includes detection of liquid film parameters in gas-liquid two-phase annular flow.



赵宁, 1983 年出生, 天津大学博士研究生, 主要研究方向为气液两相流参数检测。

E-mail: zhaoning1983@tju.edu.cn

Zhao Ning was born in 1983. Now, he is a Ph. D. candidate in Tianjin University. His main research direction is detection and measurement of gas-liquid two-phase flow parameters.



孙宏伟(通讯作者), 1974 年出生, 天津大学副教授, 主要研究方向为单相与多相流体过程参数检测、智能仪器仪表与智能传感器。

E-mail: sunhongjun@tju.edu.cn

Sun Hongjun (Corresponding author) was born in 1974. Now, she is an associate professor in Tianjin University. Her research interests include single and multiphase process parameter metering, intelligent instrument and smart sensor.