

文章编号 : 0258-0926(2016)02-0180-05 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.02.0180

双探针两相流测量机理的数值模拟

刘 航¹, 潘良明¹, 邓佳佳¹, 袁德文², 黄彦平²

1. 重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆, 400044;
2. 中国核动力研究设计院中核集团核反应堆热工水力技术重点实验室, 成都, 610041

摘要: 基于流体体积函数 (VOF) 模型, 通过用户自定义标量方程 (UDS), 建立电导探针测量气-液两相流参数的基本模型。采用所建立的模型对垂直圆管气-液两相流双探头电导探针测量过程进行模拟, 得到气泡流动过程中探针外部空间的电场分布。模拟结果显示: 气泡通过探针时会引起的电流电压的巨大变化; 电流电压分布不受噪声信号、气泡形状变化以及电流电压信号响应滞后的影响。通过模拟得到, 当气泡经过探针时会产生电流和电压的近方波信号, 该结果能真实反映探针测量气-液两相流的基本过程。

关键词: 双探头电导探针; VOF; 气-液两相流; 电场模拟

中图分类号: TL124 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Double-Sensor Conductivity Probe Measurement Mechanism for Two-Phase Flow

Liu Hang¹, Pan Liangming¹, Deng Jiajia¹, Yuan Dewen², Huang Yanping²

1. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Chongqing University, Chongqing, 400044, China;
2. CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology, NPIC, Chengdu, 610041, China

Abstract: Based on the model of VOF (Volume of Fluid) and UDS (User Defined Scalar), this paper builds the simulation model of using conductivity probe measuring two-phase flow parameters. The process of using double-sensor probe measuring two phase flow was simulated. The electric field distribution was obtained when the probe pierced the bubbles. The results show that the probe piercing the bubbles cause the distinct change of the distribution of current and voltage. As the process of simulation is not influenced by noise signal, bubble shape variation and signal response delay, the ideal signal is obtained such as the square wave signal of current and voltage. The simulation results truly reflect the basic process of the measurement by using the double-sensor probe for gas liquid two-phase flow.

Key words: Double-sensor conductivity probe, VOF, Gas-liquid two-phase flow, Electric field simulation

0 引言

由于气-液两相流流动传热过程研究对空泡测量的迫切需求, 电导探针在两相流测量方面应用越来越广泛。国内外已有诸多针对电导探针的相关研究。Ishii 等^[1]在探针测量方面做了较多的工作, 其单探针、双探针、四探针技术广泛应用于两相流参数的测量及界面传输相关研究中。Wu 等^[2]对泡状流中双探头电导探针的敏感性进行了

研究。孙科霞等^[3]基于双探头电导探针技术测量气泡局部参数, 研究了气-液两相泡状流的内部流动规律, 并发现探针尖部的导通距离、沿流向探针间的距离和 2 个针尖的间隙都是设计电导探针的关键尺寸。Kataoka^[4]推导出双探针和四探针测量界面浓度的方程和测量方法。Shen^[5]基于探针得到了气泡界面速度。Euh^[6]对探针测量界面浓度的方法进行了扩展。此外, 李广军等^[7]进行了气-

收稿日期: 2015-09-26; 修回日期: 2015-12-12

作者简介: 刘 航 (1989—), 男, 博士研究生, 现从事反应堆热工水力研究工作

液两相流界面波的双平行电导探针的测量方法的研究,设计了一种能够快速测量液膜厚度的电导探针,自行设计信号的处理电路,但没有解决信号噪声的问题。韩梅^[8]做了一种刺破气泡能力强、机械强度好的双探针电导探头,但抗干扰特性不好。

多数情况下探针并不是从气泡中心穿过,因此实际测量中存在较大偏差,如气泡直径、气泡速度、空泡份额以及界面浓度等。结合前人在使用探针测量两相流过程中遇到的一些问题,发现在实际的测量以及操作中很难去判定探针各个参数以及采集卡等因素对信号的影响。目前,对于电导探针的研究,国内外都采用实验方式,没有进行过模拟分析。可以通过数值模拟的方法研究气泡经过探针过程中的电场的变化过程。

本文基于流体体积函数(VOF)模型建立了能够模拟实际气泡穿过电导探针过程的数值模型。研究气-液两相流流动过程中电场的变化特性,了解探针测量两相流的基本过程。

1 气泡测量的数学物理模型

1.1 问题简化和建模

如图 1a 所示,研究的几何模型尺寸为底面直径 10 mm、高 50 mm 的圆管;探针直径为 0.3 mm,2 个探针径向距离为 0.6 mm、轴向距离为 2 mm。其中 2 个探针顶部圆锥台的表面都为正极端,顶部尖端半径为 0.05 mm 的台面,恒定电流,负极为较粗圆柱,为其整个侧面提供 0 V 电压,探针侧面,管道侧面都为绝缘壁面。

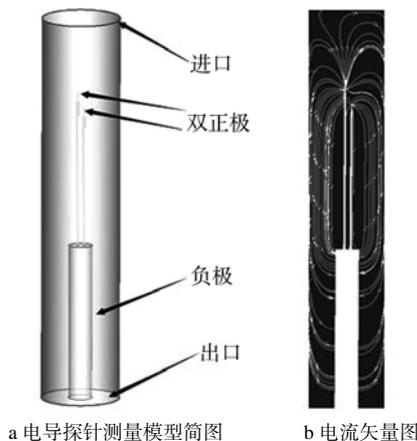


图 1 电导探针测量模型简图及电流矢量图

Fig. 1 Schematic Diagram of Simulation Model of Impedance Void Sensor and Vector of Current

为保证精度,物理模型全部采用六面体结构化网格,网格单元数为 1024854。由于探针顶部台面面积很小,而该区域是整个探针的核心区域,为了确保计算精度,对双探针顶部区域都进行了局部网格加密。

1.2 电场及两相流模拟的数学模型

VOF 模型中,将第 q 相的体积分数记为 α_q ,为 0 时控制体不含 q 相流体;为 1 时控制体充满第 q 相; $0 < \alpha < 1$ 时则表示该控制容积处在界面位置。控制容积中所有相的体积分数之和为 1。

模型对电流电压模拟采用用户自定义标量方程(UDS)。其标准方程形式为:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\psi \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = S_\phi \quad (1)$$

其中,在本问题中 Γ 为流体电导率, $\psi = \rho u_i$ 。标准 UDS 方程中,非稳态项、对流项和源项都为零。根据式(1)编写 UDF 程序,以此计算探针外部空间电场分布。

2 计算结果及分析

由于气泡的电导率远小于溶解了电解质水的电导率,当气泡经过探针的顶部时,改变了整个流场的电阻分布,也使得整个流场的电流和电势发生变化,当气泡离开探针的顶部时,流场的电场则会恢复到气泡经过前的状态。

选取 0.2 m/s 的入口流速,流动方向为 Z 轴正方向。为了研究瞬时的电场分布,不考虑电解,取正极设置为 100 A/m² 的直流电流,负极设置为 0 V,其余面都设置为绝缘。当流道中没有气泡,全部为水时,所有电流都从正极引出,最后终止于负极,如图 1b 所示。长探针的电流从探针顶部流出,分别从左右两侧流入负极;而短探针流出的电流只从右侧流出后流入负极右侧面。在 2 个正极附近电势较大,离正极较近的等势线呈圆形。离正极较远、负极较近的等势线呈直线,且颜色较暗,也与实际相符合。因此,通过 UDS 方程建立的电场环境符合实际。

此外,本文基于恒电流条件下,研究气泡穿过探针时电场特性变化,包括探针针尖及 $Z = 25$ mm 处的电场变化,这是由于不易对整个电场的定量分析,故研究气泡经过时导致的局部电场特性变化。恒电流条件下,探针针尖处电压与实际

过程中数据采集电压相同, 而 $Z = 25 \text{ mm}$ 将反映远离针尖处电场特性变化。

2.1 恒电流条件下, 气泡直径为 2 mm 的电场特性

在距离探针顶部高 1.5 mm 处初始添加 1 个直径为 2 mm 的气泡, 此气泡逐渐穿过双探针, 其电流线沿着气泡的周围流动。由于气泡内水蒸气的电导率很低, 电阻非常大, 只有少数的流线从气泡中心穿过。随着气泡的运动导致流场中的电导率分布发生改变, 同时也引起电场不断变化。

图 2 中, 气泡穿过双探针过程主要分为 3 个步骤:

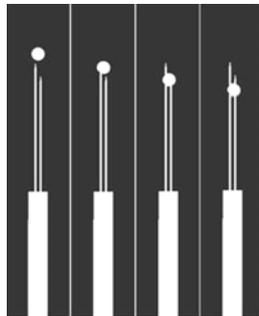


图 2 直径为 2 mm 气泡运动图

Fig. 2 Motion Trajectory of 2 mm Diameter Bubble

(1) 气泡接触直至离开长探针。气泡经过长探针顶部时, 引起整个流场的电势分布发生变化, 尤其是长探针顶部被气泡完全包裹时, 电压梯度完全集中在气泡周围, 而气泡外流场其余区域电势完全为零。因为气泡区域电阻较水的电阻无限大, 从而导致其它区域电压降很小。

(2) 气泡离开长探针但未接触短探针。当气泡刚刚穿过长探针而未接触到短探针, 水的电阻在电场中起主导作用, 此时电场分布与初始状态类似。

(3) 气泡接触直至离开短探针。气泡与短探针正极端接触并将其包裹, 从而高电压主要集中在包裹短探针的气泡周围。当气泡完全穿过双探针正极端后, 气泡运动基本上不再引起电势分布的变化。

在 $Z = 25 \text{ mm}$ 处截面平均电流和电压如图 3 所示。

由图 3 可看出, 在 $Z = 25 \text{ mm}$ 处, 无论截面平均电流还是截面平均电压都是恒定值, 这是因为在恒电流条件下, $Z = 25 \text{ mm}$ 处所代表的电阻

值不变, 因此该处的电阻和电势都不变, 与理想情况相符。但在实际测量过程中由于电流电压会受噪声信号、气泡形状变化以及电流电压信号响应滞后等因素的影响, 采集得到的信号会出现多的杂波信号, 因此模拟环境下对探针的测量更接近理想状态。

由图 4 中可看出, 当 2 mm 气泡分别经过 2 个探针时, 使得探针附近的电阻突然增大很多, 恒电流条件下, 使得正极端中平均电压迅速上升; 气泡分别离开 2 个探针时, 正极端中平均电压迅速下降, 产生了如图 4 所示的近方波信号。此外, 由于 2 个探针之间的轴向距离为 2 mm, 而初始添加的气泡直径也为 2 mm, 加上球形气泡弧度的影响, 2 个探针的高电压峰值正好错开。

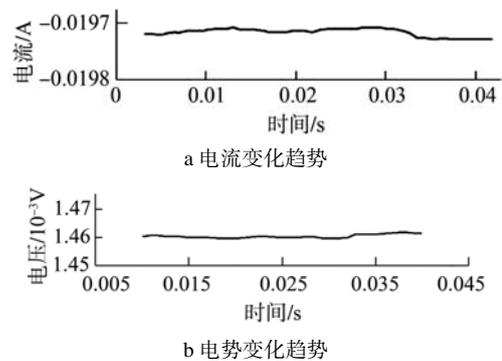


图 3 $Z = 25 \text{ mm}$ 处截面电场变化趋势 (2 mm)

Fig. 3 Averaged Trend of Electric Field at $Z=25\text{mm}$ (2 mm)

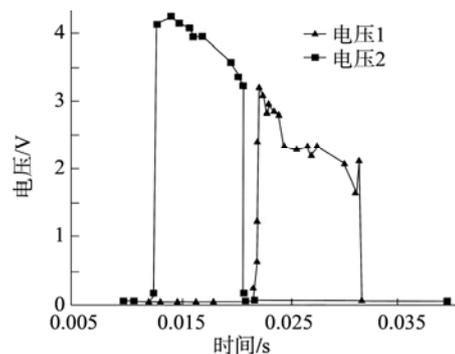


图 4 探针针尖区域面积平均电压变化趋势 (2 mm)

Fig. 4 Average Voltage Trends in the Area of the Probe Tip (2 mm)

电压 1—短探针尖端平均电压; 电压 2—长探针尖端平均电压; 下同

由图 4 可计算出气泡的轴向速度, 由于两探针垂直距离为 2 mm, 而气泡顶端界面与底端界面先后经过 2 个探针的间隔都为 0.01 s, 可求得气泡前后界面的速度都为 0.2 m/s, 因此气泡的轴向

速度为 0.2 m/s。

2.2 恒电流条件下, 气泡直径为 4 mm 的电场特性

选取 0.2 m/s 的入口流速, 流动方向为 Z 轴正方向。在距离探针顶部高 2.5 mm 处初始添加一个直径为 4 mm 的气泡。同样不考虑电解效应, 正极设置为 100 A/m^2 的恒定直流电流, 负极端设置为 0 V, 其余面为绝缘条件。

当气泡直径为 4 mm, 初始电场与 2 mm 气泡基本相同, 电流线同样尽量绕开气泡所在的区域。与 2 mm 直径气泡不同的是, 由于气泡直径为 4 mm 大于 2 mm 的双探针轴向距离, 因此气泡可同时完全包裹 2 个正极端, 如图 5 所示。

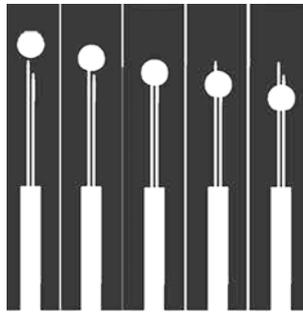


图 5 直径为 4 mm 气泡运动图
Fig. 5 Motion Trajectory of 4 mm Diameter Bubble

当气泡经过探针顶部, 即正极端时, 由于气相电导率极低, 电阻值极大, 就导致流场的电势变得较大, 在探针顶部电势最大。当气泡离开探针顶部后, 流场的电势分布就恢复到原来的状态。同时, 由于气泡尺寸较大, 使得气泡可以完全包裹 2 个正极端, 这样就导致高电势分布区域相比 2 mm 气泡要大得多, 此时也是整个气泡流动过程中高电势分布区域最大时。当气泡完全穿过 2 个探针, 气泡对电势的分布影响消失, 整个区域电势分布回归到与初始状态相似。

同图 4 类似, 当气泡开始分别接触 2 个探针时, 使得探针附近的电阻突然增大很多, 恒电流条件下, 使得正极端中平均电压迅速上升, 气泡分别离开 2 个探针时, 正极端平均电压迅速下降, 产生近方波信号。不同之处在于, 图 6 中, 由于气泡直径为 4 mm 大于 2 mm 的双探针轴向距离, 因此 2 个探针的高电压峰值有一段时间的交错。同样可计算出气泡轴向速度为 0.2 m/s。

由图 7 可看出无论电流还是电压都是恒定

值, 这是因为在恒电流条件下, $Z = 25 \text{ mm}$ 处所代表的电阻值不变, 因此该处的电阻和电势都是恒定值, 与实际相符。

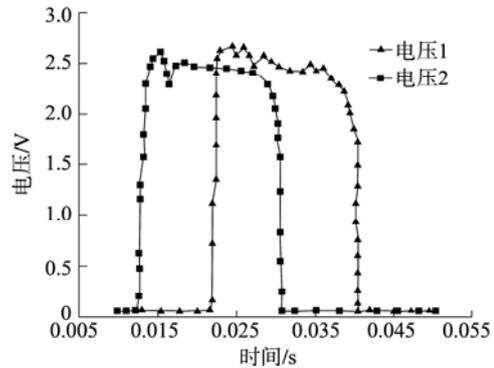
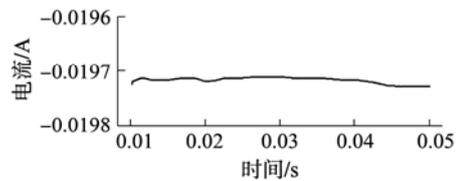
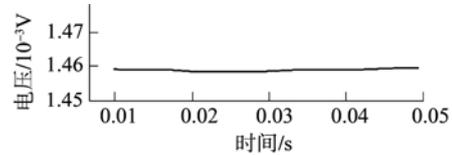


图 6 探针针尖区域面积平均电压变化趋势 (4 mm)
Fig. 6 Average Potential at the Probe Tip (4 mm)



a 电流变化趋势



b 电势变化趋势

图 7 $Z=25 \text{ mm}$ 处截面电场变化趋势 (4 mm)
Fig. 7 Average Change Trend of Electric Field at $Z=25 \text{ mm}$ (4 mm)

3 结 论

通过对垂直圆管流道内气泡穿过双探针过程流场和电场的数值模拟, 揭示了该过程电场变化特性, 得到主要结论如下:

(1) 用恒电流的研究方法, 再现了探针测量两相流的基本过程, 得到了两相流流场中的电场变化特性。

(2) 通过模拟计算, 得到了反映气泡穿过双探针时电场变化的图像, 以及探针针尖和 $Z=25 \text{ mm}$ 处的截面平均电压和平均电流变化的趋势图。

(3) 通过分析气泡界面经过双探针的时间, 可以得到气泡前后界面速度, 并进而得到包括空泡份额等相关两相流参数。

参考文献:

- [1] Ishii M, Kim S. Micro four-sensor probe measurement of interfacial area transport for bubbly flow in round pipes[J]. Nuclear engineering and design, 2001, 205(1-2): 123-131.
- [2] Wu Q, Ishii M. Sensitivity study on double-sensor conductivity probe for the measurement of interfacial area concentration in bubbly flow[J]. International journal of multiphase flow, 1999, 25(1): 155-173.
- [3] 孙科霞, 陈学俊, 张鸣远, 等. 应用双头电导探针技术测量气液两相泡状流局部参数[J]. 计量学报, 1999, 04: 297-303.
- [4] Kataoka I, Ishii M, Serizawa A. Local formulation and measurements of interfacial area concentration in two-phase flow[J]. International journal of multiphase flow, 1986, 12(4): 505-529.
- [5] Shen X, Nakamura H. Local interfacial velocity measurement method using a four-sensor probe[J]. International journal of heat and mass transfer, 2013, 67: 843-852.
- [6] Euh D J, Yun B J, Song C H, et al. Development of the five-sensor conductivity probe method for the measurement of the interfacial area concentration[J]. Nuclear engineering and design, 2001, 205(1-2): 35-51.
- [7] 李广军, 郭烈锦, 陈学俊, 等. 气液两相流界面波的双平行电导探针测量方法研究[J]. 计量学报, 1997, 03: 9-14.
- [8] 韩梅, 沙作良, 伍倩, 等. 双探针电导探头测量气泡参数的信号质量[J]. 过程工程学报, 2009, 2: 222-227.

(责任编辑: 刘 君)