

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2025.07.007

引用格式:周洋,周文雄,谭煦滨,等.加热棒束通道丝网传感器两相流探测方法及影响因素研究[J].重庆大学学报,2025,48(7): 75-84.



加热棒束通道丝网传感器两相流探测方法及影响因素研究

周 洋^{a,b},周文雄^{a,b},谭煦滨^{a,b},潘良明^{a,b}

(重庆大学 a. 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室; b. 能源与动力工程学院,重庆 400044)

摘要: 加热棒束通道内的气液两相特性分析对反应堆安全运行至关重要。通常采用实验的方法对棒束通道内的两相流特性展开研究。常温下棒束通道的实验中丝网传感器是一种常用的测量手段,但其在带电棒束通道中的应用较少。基于有限元仿真软件中的静电场方法分析了带电棒束通道内电场的存在对丝网传感器的测量影响,并通过实验对仿真结果进行验证。结果表明,在带电棒束通道中,施加给发射电极的激励电压越大,测量区域对气液两相的敏感性越强,越有利于丝网传感器对气液两相的识别。通过 20 V 激励电压下的成像实验证明了该条件下丝网传感器测量的可行性。

关键词: 棒束通道; 两相流; 丝网传感器; 有限元法

中图分类号:TL352

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)07-075-10

Study on two-phase flow detection method and influencing factors of wire mesh sensor in heating rod bundle channel

ZHOU Yang^{a,b}, ZHOU Wenxiong^{a,b}, TAN Xubin^{a,b}, PAN Liangming^{a,b}

(a. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technology and System, Ministry of Education; b. School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The analysis of gas-liquid two-phase characteristics in heating rod bundle channels is critical for ensuring the safe operation of nuclear reactors. While experimental methods are commonly used to investigate two-phase flow in rod bundle channels, wire mesh sensors are typically applied under room temperature conditions and have seen limited use in electrically heated rod bundle experiments. This study employs the electrostatic field method in finite element simulation software to analyze the influence of electric field in electrically heated rod bundle channels on wire mesh sensor measurements. The simulation results are verified by experiments. Both the simulation and experimental results show that, within a charged rod bundle channel, an increase in the excitation voltage applied to the transmitting electrode enhances the sensor's sensitivity to gas-liquid two-phase flow, thereby improving its detection capability. Imaging experiments conducted under a 20 V excitation voltage confirm the feasibility and effectiveness of wire mesh sensor measurements under such conditions.

Keywords: rod bundle; two phase flow; wire mesh sensor; finite element method

收稿日期:2024-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U22B2090)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(U22B2090).

作者简介:周洋(1996—),硕士研究生,主要从事多相流测量相关技术研究,(E-mai)202110021002@stu.cqu.edu.cn。

通信作者:周文雄,博士,副教授,(E-mai)zhouwenxiong@cqu.edu.cn。

棒束通道是传统反应堆(如压水堆)堆芯的基本结构,其运行过程中通过对流换热的方式带走燃料棒束中产生的热量^[1]。在棒束通道内可能出现过冷沸腾^[2],而过冷沸腾引起的两相流动对堆芯换热效率和安全性影响较大,所以需要对加热棒束通道中的气液两相特性展开研究。

由于加热棒束通道内处于高温环境,大部分测量装置无法使用。目前,加热棒束通道实验使用的测量技术多是基于非侵入式测量技术^[3],Arai 等^[4]使用高能 X 射线断层扫描系统获取到了 5×5 加热棒束在 0.1~7.2 MPa 压力范围内的空泡份额分布,但复杂的布置方式及昂贵的设备极大地限制了这些方法的应用^[5]。随着技术的发展,光纤探针作为一种侵入式传感器也被应用到了加热棒束通道实验中,Bak 等^[6]采用光纤探针测量了低压条件下 4×4 加热棒束的局部空泡份额,但由于光纤探针对测量环境及被测介质有较高的要求^[7-8],实际应用存在较多限制。

基于电学原理的丝网传感器因其良好的响应特性和可成像的优点^[9],满足棒束通道的测量要求,被应用到了实验中。例如,Nagataka 等^[10]利用丝网传感器进行实验获得了 2.6 MPa 下蒸汽-水两相流的空泡份额和界面速度分布。目前,大多数棒束通道实验并未对棒束进行加热,这是因为加热棒束通道常采用电加热,其引起的高温和电场都会对测量信号产生影响,可能会导致无法识别的微弱信号或无法滤除的噪声。高温环境会影响探测器结构,Pietruske 等^[11]在高温环境下发现了电极变形等问题。文中针对棒束电场对丝网的影响展开研究。

随着计算流体力学的发展,多采用数值仿真的方法对丝网传感器的电场特性进行先验分析^[12],仿真研究弥补了实验无法对所有条件都展开研究的不足。因此,文中先通过仿真方法分析了带电棒束通道电场对丝网传感器测量的影响,再设置带电棒束通道实验,通过该方法保证仿真结果的正确性。

1 带电棒束通道丝网传感器测量仿真

为研究将丝网传感器应用到带电棒束通道内的可行性,采用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件中的静电场仿真方法分析带电棒束通道内丝网传感器的测量结果。通过建立带电棒束通道内丝网传感器的测量模型,获取其接收电极对气液两相电势差的响应。将该结果与不带电棒束通道下的结果进行对比,以分析带电棒束的电场对丝网传感器的测量影响。

1.1 模型构建

建立丝网传感器的仿真模型,将丝网层间距设置为 2 mm,电极直径设置为 0.3 mm。此外,仿真模型中还设置了 3×3 分布的直径为 7 mm 的不锈钢棒束,模型中所涉及到的材料与相关参数如表 1 所示。模型构建如图 1 所示。进行模型的网格划分时,在各电极处采用精细网格,在水域中选择细网格,以获得更加精确的电极电压测量结果,并对模型进行网格无关性分析,结果如图 2 所示,当网格数大于 813 414 后,对仿真结果基本没有影响,故采取 813 414 的网格数。

表 1 丝网传感器仿真模型材料定义

Table 1 Materials for wire mesh sensor simulation model

序号	部件	材料	电导率/(S·m ⁻¹)	介电常数
1	电极/棒束	不锈钢	1 100 000	1
2	水	水	0.4	81
3	空气	空气	0	1.000 6

实际的棒束通道内,为了使棒束起到加热作用,会给棒束附加 1 个电压,该电压一般由 12 V 电源提供。在该电场环境下,丝网传感器常用的 2.5 V 激励电压可能会完全失效,同时,输入端信号也会损坏激励电路。为避免上述情况的发生,应使发射电极的激励电压大于施加给不锈钢棒束的电压。因此,分别给发射电极施加 12.5、15.0、17.5、20.0 V 的激励电压,同时,获取接收电极所测到的电压值,以气液两相的电势差分析此时带电棒束的存在对测量区域内气液两相识别带来的影响。

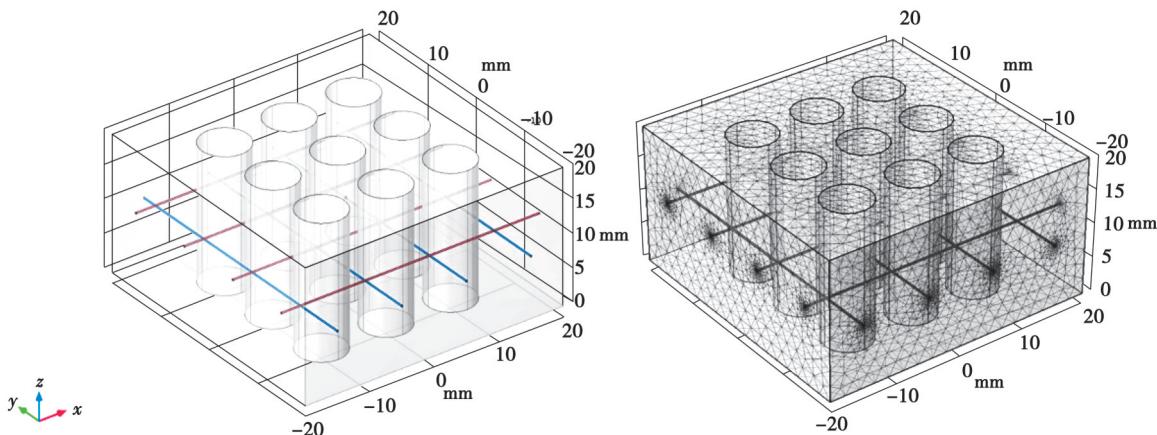


图 1 棒束通道仿真模型

Fig. 1 Rod bundle channel simulation model

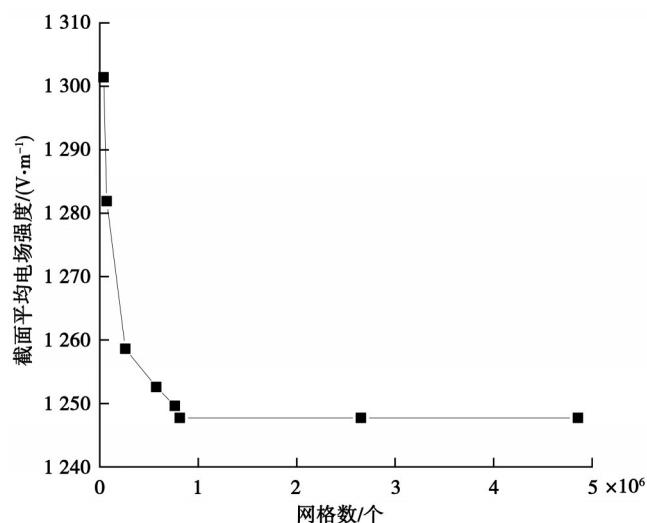


图 2 网格无关性分析

Fig. 2 Grid independence analysis

1.2 仿真分析与结果

分析了各仿真条件下的电势分布图,直观地展现出不同仿真条件下丝网传感器对气液两相的响应。

1.2.1 不带电棒束通道内丝网传感器的测量响应

为了研究丝网传感器对内部存在不锈钢等导电物质时的表现,对模型中的棒束不附加任何电压值作为边界条件,丝网传感器敏感区域内气液两相的电势如图 3 所示。其中,敏感区域内为液相时,接收电极电压值为 0.634 V;敏感区域内为气相时,接收电极电压值为 0.351 V,两者之间的电势差为 0.283 V。可以发现,当流域内存在不锈钢等导电物质时会增大敏感区域内气液两相的电势差值,这有利于信号的采集与分辨。

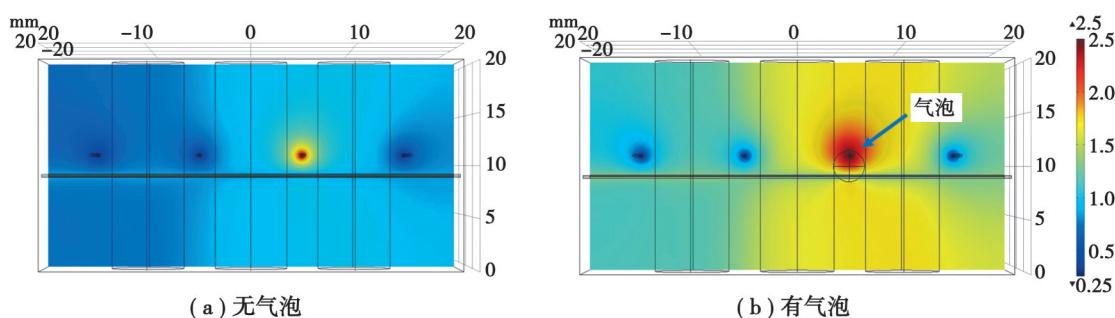


图 3 不带电棒束通道内的电势分布图

Fig. 3 Potential distribution in the uncharged rod bundle channel

1.2.2 带电棒束通道内丝网传感器的测量响应

图4展示了带电棒束通道内各激励电压下的电势分布图,可以看出,随着激励电压的增大,整个流场内的电压随之上升,但上升幅度相对较小,使得激励电压与流场内的测量区域内的电势差增大。各激励电压下的接收电极对气液两相的响应如表2所示,对应的气液两相电势差如图5所示。从仿真结果来看,随着施加给发射电极的激励电压的增大,气液两相的电势差增大,测量系统的信噪比也增大。仿真结果表明,激励电压的增大增强了丝网传感器的气液两相识别能力。

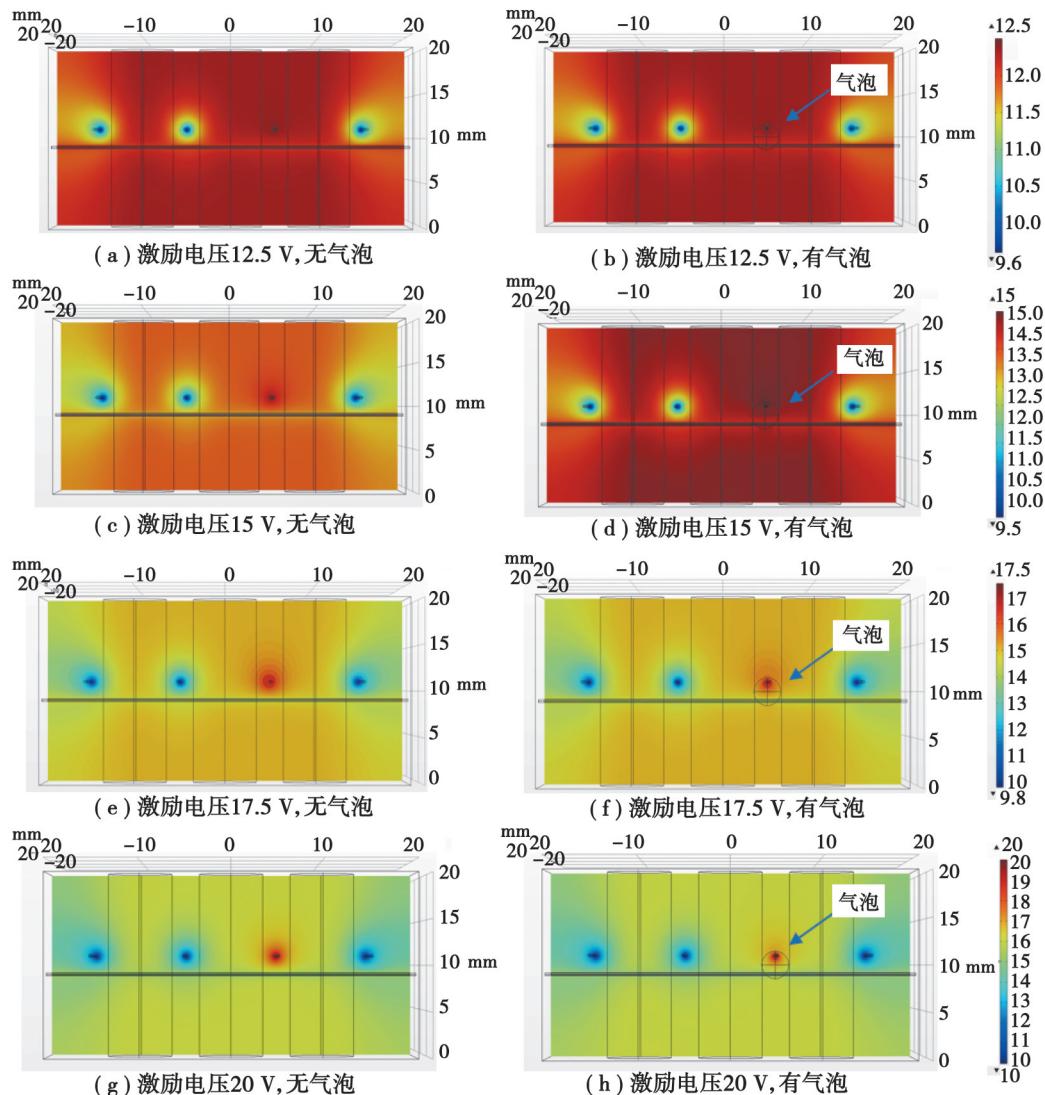


图4 带电棒束通道内不同激励电压下的电势分布图

Fig. 4 Potential distribution under different excitation voltages in the charged rod bundle channel

表2 带电棒束通道的仿真结果

Table 2 Simulation results of charged rod bundle channel

激励电压/V	无气泡电压/V	有气泡电压/V
12.5	10.51	10.42
15.0	10.57	10.43
17.5	10.66	10.47
20.0	10.73	10.51

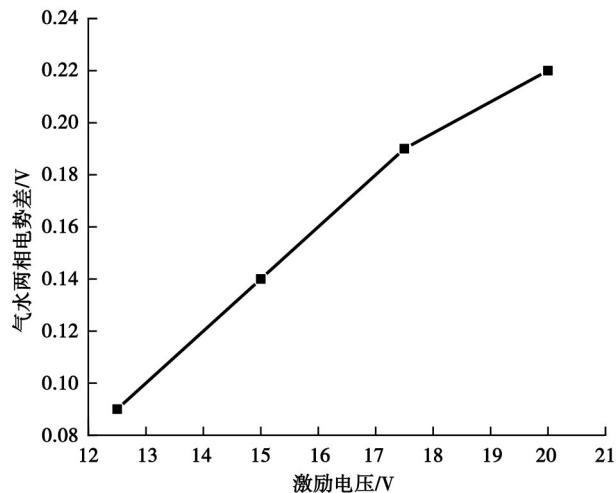


图 5 不同激励电压下测量区域内气液两相电势差

Fig. 5 The gas-liquid two-phase potential difference in the measurement area under different excitation voltages

2 带电棒束通道实验

为了验证仿真结果,设置了带电棒束通道实验,对比分析带电棒束对丝网传感器测量的影响,并在最大工作电压下对丝网传感器的测量数据采用直接成像法验证可行性。

2.1 实验装置

2.1.1 实验回路

实验在重庆大学气水两相流实验回路进行,实验装置如图 6 所示,其主体为聚甲基丙烯酸甲酯材料所制成的 $34 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$ 的方形竖直管道,全长为 1.23 m,棒束与丝网传感器安置在距管道底面 1 m 处($L/d = 29.4$)。管道内通过多孔介质实现气水混合,使管道内气泡分布均匀。

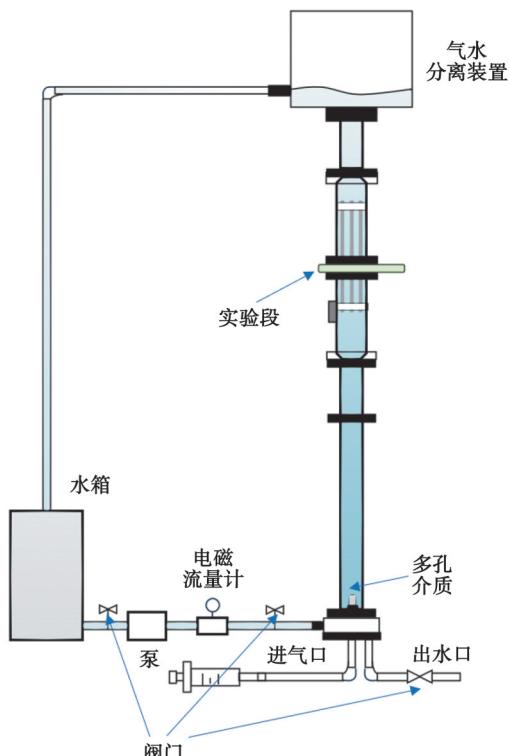


图 6 实验装置原理图

Fig. 6 Principle of experimental device

实验以水为液相工质,通过蠕动泵产生稳定的液相回路,以空气为气相工质通过 60 mL 注射器产生固定体积的气泡,实验回路中装有涡轮流量计,该流量计的测量范围为 0.1~0.6 m³/h,满量程为 0.5% 的不确定度。

2.1.2 实验段设计

为了使实验条件贴近仿真模型,采用 2 个截面尺寸为 34 mm×34 mm 尼龙制作的方形格架,通过胶黏的方式固定 3×3 排列的不锈钢棒束。其中,单个不锈钢棒束的直径为 7 mm,长度为 200 mm,不锈钢棒束在格架中的分布如图 7 所示。

不锈钢棒束固定在格架后,将丝网传感器布置于不锈钢棒束中间,再将带有不锈钢棒束的两端分别伸入 2 根管道中,最后将 2 根管道在丝网传感器处通过法兰连接在一起。由于格架与管道内部尺寸吻合良好,经测试,该实验段的密封性良好,不锈钢棒束在通道内位置固定不变,满足该实验的要求。为了配合棒束的排列方式,此处用 4×4 测点的印刷电路板(PCB)制成的丝网传感器作为测量工具,图 8 为实验段实物图与丝网传感器的电极分布图。图 8(b)中,横向排列为发射电极,纵向排列为接收电极,同一层内相邻的电极间距为 10 mm,发射电极与接收电极的层间距为 2 mm,电极采用直径为 0.3 mm 的不锈钢丝制成。

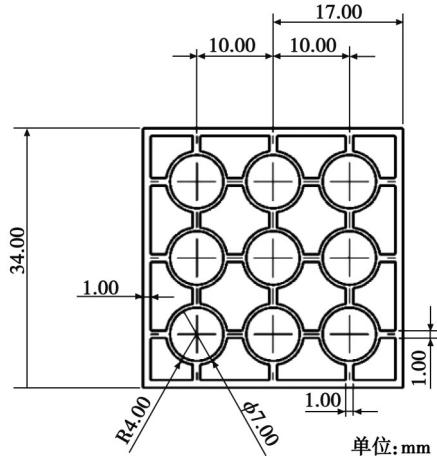
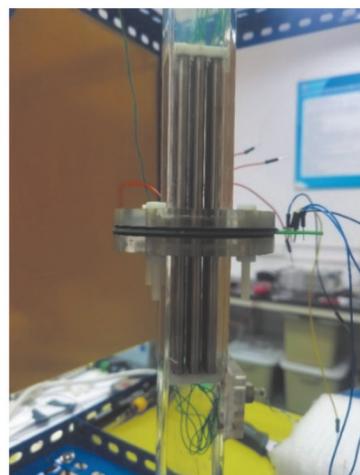
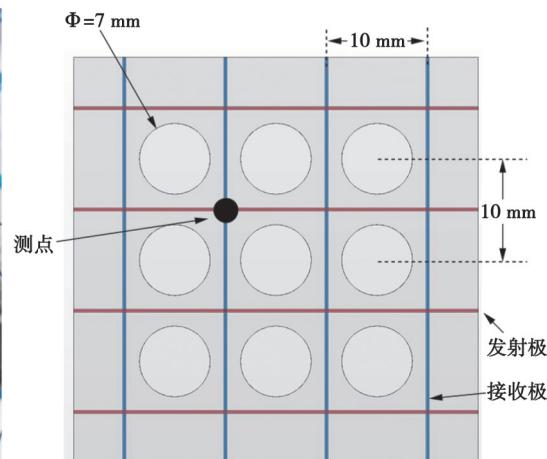


图 7 棒束分布图

Fig. 7 Rod bundle distribution



(a) 实验段实物图



(b) 电极分布图

图 8 实验段布置图

Fig. 8 Experimental section

2.1.3 测量装置

该丝网传感器系统的测量装置如图 9(a)所示,适用于 16 通道的丝网传感器测量系统,实验中仅使用到其中 4 个通道。图 9(a)中,左侧为激励模块,负责提供激励电压及对激励电压的多路复用;右侧为数据获取模块,负责获取接收电极的测量数据。由于该系统的激励电压为 ±2.5 V,数据获取设备的测量量程为 ±5 V,不能满足实验要求,故对其各通道利用 TL074H 运算放大器通过反相放大电路的反馈电阻 R_f 实现对激励电压的倍数增大及对接收电极的信号减小,使其满足测量要求,如图 9(b)所示。图 10 为该装置的测量原理图,通过激励模块将电压施加到发射电极,并在接收电极处通过数据获取模块采集信号,再将信号传到上位机中用于分析处理。

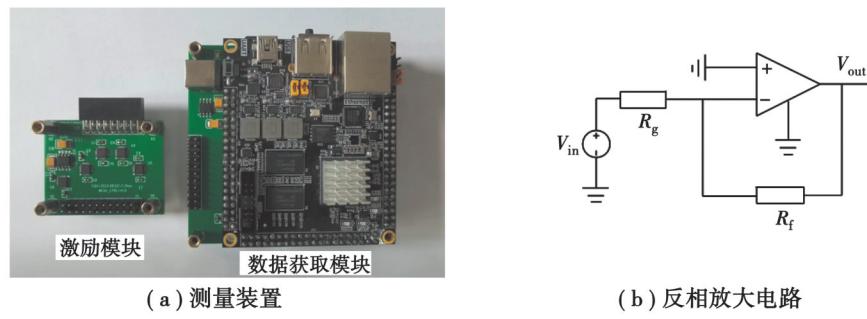


图 9 测量系统

Fig. 9 Measuring system

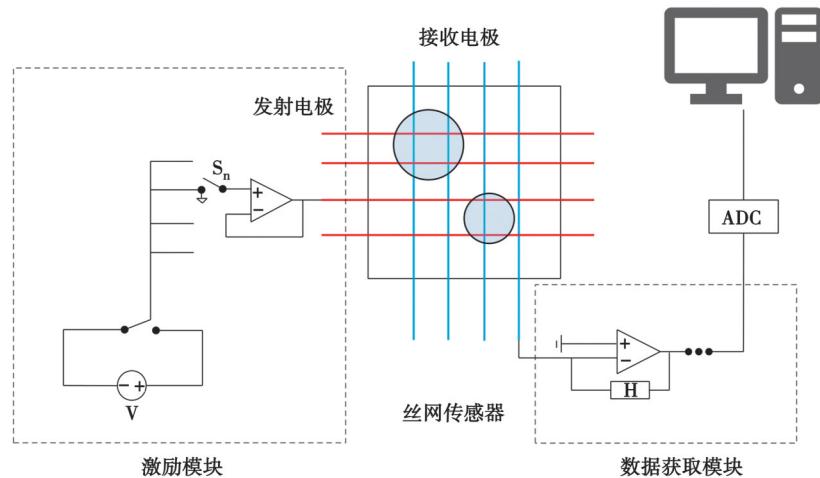


图 10 测量原理图

Fig. 10 Measurement principle

2.2 实验方案

实验研究带电棒束通道内的电场对丝网传感器测量结果的影响,并验证仿真结果。文中选取图 8(b)中所示测点数据进行实验分析,保证与仿真中所选测点一致。

进行带电棒束通道实验前,需要获得不带电棒束通道内丝网传感器的测量结果,该通道内丝网传感器的应用较为广泛^[13],通过将带电棒束通道内的结果与该结果进行比较,可知带电棒束对丝网传感器的测量影响。对不带电棒束通道实验,激励电压设置为 2.5 V。在设备正常工作后,使回路内的水开始循环流动,其流量为 50 L/h,再利用 60 mL 注射器给回路内注入定量气体,使其形成气泡,通过数据获取设备读取全水条件下及气泡经过测点时的电压。为避免偶然误差,每种条件下进行 5 次测量,对测量结果取平均值。

对于带电棒束通道实验,图 11 为给棒束通电的原理图,将 9 根不锈钢棒束通过导线并联后将其与 12 V 电源串联在一起。为避免实验中发生短路烧毁设备,需在不锈钢棒束后端串联入 1 个功率电阻。实验对丝网传感器的激励电压设定为以 2.5 V 的间隔覆盖 12.5~20.0 V,其余实验步骤与带电棒束通道实验一致,以此分析带电棒束的存在对测量区域内气液两相识别带来的影响。

为了验证最大工作电压下系统可以正常工作,对最大工作电压(20 V)下的测量数据利用直接成像法进行截面瞬时成像以及侧面成像(通过对 400 ms 内的截面数据取行最

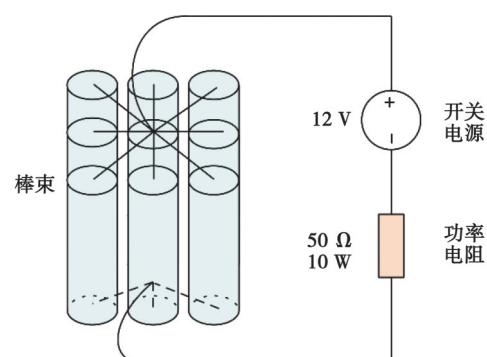


图 11 棒束电路原理图

Fig 11 Rod bundle circuit principle

大值沿时间轴纵向绘图获得)。成像前为了将数据映射到灰度值区间(0~255),需对原始数据进行归一化和二值化,依据气水两相的信号响应,以0.3作为数据归一化后二值化的阈值。对于成像实验,通过针筒依次注入35~60 mL的气泡,间隔为5 mL。

2.3 实验结果

2.3.1 不带电棒束通道内实验结果

经测量,无电压激励时管道内的基底电压为0 V。存在激励电压时,5次测量结果如表3所示。可以看出,测量区域内的电场较为稳定。当测量区域内存在气泡时,接收电压有所下降。经计算可知,5次不带电棒束通道实验的测量区域气液两相的平均电势差为0.26 V,与仿真结果整体相差不大,该幅度的电势差可以反映测量区域内的气液两相变化。

表3 不带电棒束通道实验的测量结果

Table 3 Measurement results of uncharged rod bundle channel experiment

实验次数	无气泡电压/V	有气泡电压/V	电势差电压/V
1	0.53	0.28	0.25
2	0.54	0.27	0.27
3	0.53	0.29	0.24
4	0.55	0.24	0.31
5	0.54	0.28	0.26

2.3.2 带电棒束通道内实验结果

经测量,无电压激励时,管道内的基底电压为8.6 V。存在激励电压时的测量结果平均值如表4所示。可以看出,带电棒束的存在会较大地提高测量区域内的基底电压。而发射电极的激励电压的范围虽然始终大于棒束的附加电压,但对测量区域内的电压影响较小,具体体现在设备允许的范围内,当激励电压为20 V时,接收电极上所测最大电压始终小于棒束的附加电压。

表4 带电棒束通道实验的测量结果

Table 4 Measurement results of charged rod bundle channel experiment

激励电压/V	无气泡电压/V	有气泡电压/V
12.5	9.12	9.05
15.0	9.54	9.45
17.5	10.01	9.86
20.0	10.24	10.04

图12为仿真结果与实验结果的电势差对比图。可以看出,仿真比实验值略高,考虑这是实验环境因素所导致,实验结果与仿真结果两者电势差的变化趋势的一致性较好,表明了在带电棒束存在的条件下,随着激励电压的增大,气液两相电势差总体呈现上升趋势,增大了系统的信噪比,利于原始数据的采集与获取。所以在带电棒束通道实验中,施加给发射电极的激励电压越大对丝网传感器的测量越有利。

2.3.3 带电棒束通道内成像结果

图13与图14为在20 V激励电压下多种气泡的成像效果,其中,红色区域为气相,蓝色区域为液相。由图13可以看出,随着注入气体的体积增大,气泡穿过丝网传感器瞬间的截面瞬时空泡份额增大。与图14结合分析可知,大多数气泡存在于不锈钢棒束间的子通道内,壁面气泡相对较少。这可能是由于格架边壁较厚,当气泡接触到不锈钢棒束时,无法从较厚的格架边壁穿过。整体看来,该电压激励下丝网传感器可以分辨出气液两相,验证了该实验的可行性。

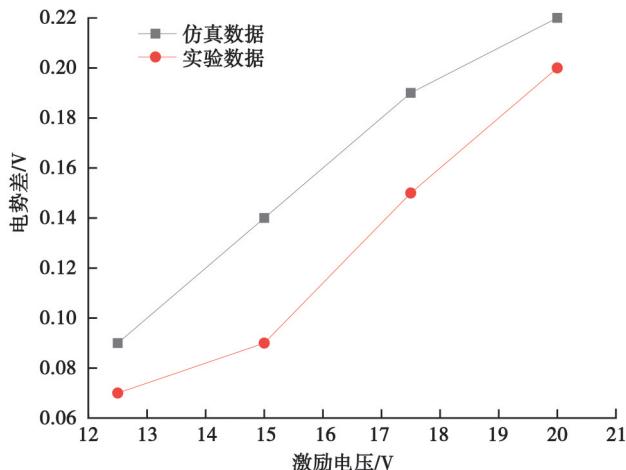


图 12 仿真与实验结果对比图
Fig. 12 Comparison of simulation and experimental results

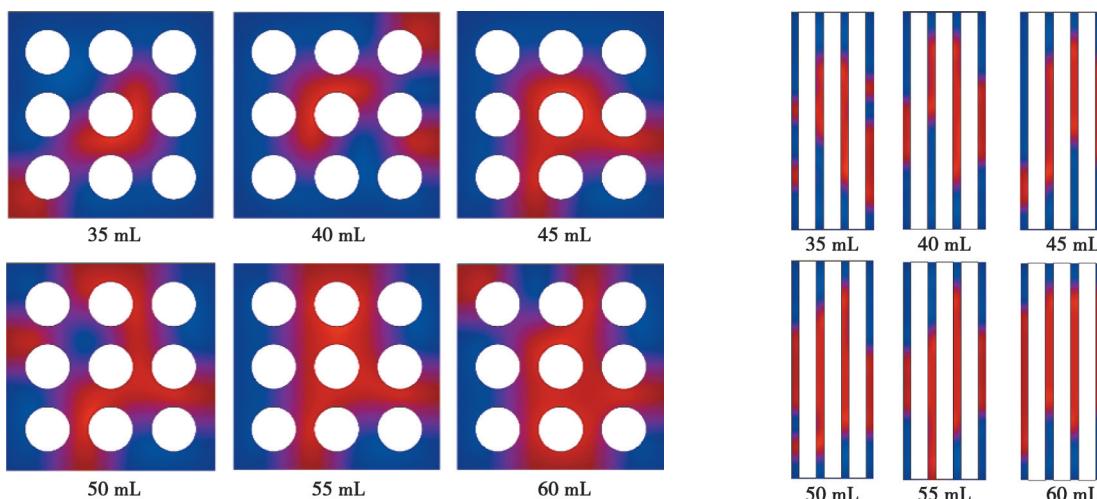


图 13 截面成像图
Fig. 13 Section imaging

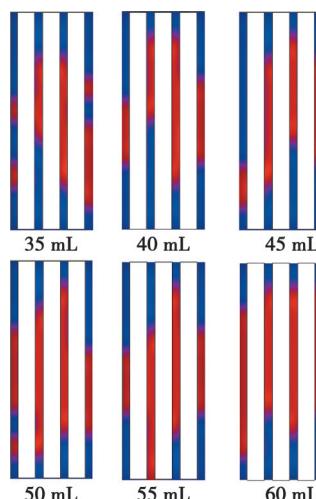


图 14 侧面成像图
Fig. 14 Side imaging

3 结 论

文中研究了带电棒束通道内电场对丝网传感器的测量影响。基于 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件中的静电场方法获取到带电棒束通道内丝网传感器的测量结果，并采用与仿真相同的条件展开带电棒束通道内丝网传感器的测量实验，通过实验的方法验证仿真结果。

1) 带电棒束的存在会较大地提高测量区域内的基底电压(12 V 的棒束附加电压将基底电压从 0 V 提升到 8.6 V)。发射电极的激励电压对测量区域内的电压影响相对较小，当激励电压为 20 V 时，接收电极上所测最大电压始终小于棒束的附加电压。

2) 棒束的存在会增强测量区域内气液两相的电势差，利于接收信号的测量与分辨，满足测量要求。随着激励电压的增大，气液两相电势差总体呈现上升趋势，增大了信号的信噪比，此时丝网传感器可以较好地进行带电棒束通道内的两相流测量，并通过 20 V 激励电压下的成像实验进一步验证了系统的可行性。该结论为带电棒束通道内丝网传感器的应用提供了一种可行方案。

参考文献

- [1] Qi P Y, Li X, Li X, et al. Experimental investigation of the turbulent flow in a rod bundle channel with spacer grids[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 130: 142-156.

- [2] Li Z K, Cheng J, Zhou X W, et al. Experimental study on sub-cooled flow boiling heat transfer characteristics in non-uniform heating tube bundle channel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 172: 121143.
- [3] Gui M, Liu Z H, Liao B, et al. Void fraction measurements of steam - water two-phase flow in vertical rod bundle: comparison among different techniques[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 109: 109881.
- [4] Arai T, Furuya M, Takiguchi H, et al. Void-fraction measurement with high spatial resolution in a 5×5 rod bundle by linear-accelerator-driven X-ray computed tomography over a wide pressure range[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 69: 101614.
- [5] 刘栋. 气液两相流相含率检测实验及研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
Liu D. Experiment and research on volume fraction detection of gas-liquid two-phase flow[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. (in Chinese)
- [6] Bak J, Moon J, Ko Y, et al. Experimental investigation of local two-phase parameters in a 4×4 rod bundle channel under a subcooled boiling flow[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 141: 106603.
- [7] 常亚. 气液两相流相含率电学测量新方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
Chang Y. Study on new electrical methods for void fraction measurement of gas-liquid two-phase flow[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [8] Niu P M, Wang D, Yang Y, et al. Void fraction measurement using an imaging and phase isolation method in horizontal annular flow[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(2): 025301.
- [9] Tompkins C, Prasser H M, Corradini M. Wire-mesh sensors: a review of methods and uncertainty in multiphase flows relative to other measurement techniques[J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 337: 205-220.
- [10] Nagatake T, Yoshida H. Measurement of the water-vapor void fraction in a 4×4 unheated rod bundle[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2023, 60(11): 1417-1430.
- [11] Pietruske H, Prasser H M. Wire-mesh sensors for high-resolving two-phase flow studies at high pressures and temperatures[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2007, 18(2): 87-94.
- [12] 张海. 丝网传感器的气液两相流测量特性仿真与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
Zhang H. Numerical and experimental investigation on measurement characteristics of wire mesh sensor for gas-liquid flow [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021. (in Chinese)
- [13] Yan X, Xiao Y, Zhang H W, et al. Study of gas-liquid two-phase flow redistribution characteristics in the rod bundle channel using wire-mesh sensor[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 282: 119204.

(编辑 陈移峰)