Design of Capacitive Sensors for Measuring Void Fraction in Annular Flow Pipes*

LIU Xinyang, KAN Zhe*
(School of Information and Control Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning 113001, China)

Abstract: Gas-liquid two-phase flow is common in petroleum and chemical industry, the proportion of gas phase in the gas-liquid two-phase stratified flow, i.e., the void ratio, is of great significance in oil and gas transportation and chemical production process. The two-phase flow consisting of vacuum and water is used to simulate the two-phase flow of oil and gas in industry, and the theoretical model of capacitance sensor is established, by which the void fraction of the annular flow of the vertical pipeline can be measured, and the formula for the calculation of the void fraction is explained. In the comparison tests, two types of electrodes, plate type and ring type, are considered. In order to determine the optimum gap size for each sensor type, several numerical tests are carried out and the parameters such as sensitivity and linearity of the two types of electrodes are discussed through the simulation data, and the numerical results show that the sensitivity of the ring electrode is better than that of the plate electrode, and the linearity of the plate electrode is better than that of the ring electrode. In the void ratio measurement experiment, the real-time waveform is displayed in the upper computer by connecting the acquisition card with the actual output of the measurement circuit. The reliability of the simulation results is verified by four sets of actual measurements and the calculation of the relative errors.

Key words: void fraction; capacitive sensors; sensitivity; linearity; measurement circuits; relative error
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.10.006

测量环状流管道空隙率的电容传感器设计*

刘欣阳, 阚 哲*
(辽宁石油化工大学信息与控制工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要: 气液两相流在石油、化工领域中普遍存在, 特别是在气液两相分层流中气相所占比例, 即空隙率, 在油气输送和化工生产过程中都具有重要意义。通过真空和水组成的两相流来模拟工业上的油气两相流, 建立了电容传感器理论模型, 通过建立的模型可以测量垂直管道环形流动的空隙率, 并对空隙率的计算公式进行说明。在对比试验中, 考虑了板型和环型两种电极。为了确定每种传感器类型的最佳间隙尺寸, 进行了多次数值试验, 通过仿真数据对两类电极的灵敏度、线性度等参数进行了讨论, 数值结果表明, 环型电极的灵敏度优于板型电极, 板型电极的线性度优于环型电极。在空隙率测量实验中, 通过测量电路的实际输出连接采集卡, 在上位机中显示实时波形。通过 4 组实际测量结果并计算相对误差验证了仿真结果的可靠性。

关键词: 空隙率; 电容传感器; 灵敏度; 线性度; 测量电路; 相对误差
中图分类号: TP212.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)10-1768-07

两相分层流广泛存在于石油、化工等领域, 对于空隙率的测量更加具有意义。例如, 从地下采出的原油中可能夹杂着天然气, 在陆地进行油气长距离混相输运时, 油气所占的比率对管道的压强和流速都有影响[1]; 雾化喷嘴内气液两相流的含量对反应器内的反应速率和产物收率均有影响; 在管式加热炉中进行气液两相流的实验时, 气体和液体的体积对反应速率有影响等。所以对空隙率进行测量是十分重要的。由于两相间存在着可变相界面和相对速度, 其流动特性远比两相环状流更为复杂, 使得两相流空隙率测量难度大, 现有的各种检测手段对两相分层流空隙率的计算方法较为复杂。目前的测量方法有多种, 但是都有些难以解决的缺点, 比如, 快关阀技术的主要缺点是: 关闭阀门需要一定时间, 每次测量都要切断系统, 从而影响系统运行; γ 和 X 射线吸收法的缺点是: 空泡的方向性和空隙率随时间的

项目来源: 辽宁省教育厅基金项目(JYTMS20231448); 石油化工过程运行优化与节能技术国家地方联合工程实验室开放课题项目(LJ2325101480001)
收稿日期: 2023-09-22 **修改日期**: 2023-12-21

脉动对测量结果都有一定的影响,而且在使用过程中存在与辐射操作有关的安全问题;测量局部空隙率的 γ 侧散射法的缺点是测量精度需要很长的计数时间且计算复杂;中子散射法的缺点是所需中子的价格极其昂贵;阻抗法的缺点是对于给定的空隙率,随流型不同,可能会得到很不相同的阻抗值[2]。此外,由于阻抗法具有极短的响应时间,试验数据有一定的不确定性。本文所采用的方法是电容法,利用电容传感器来测量空隙率,该方法具有非接触性、测量过程连续、精度高、操作安全、结构简单、价格低廉等优点,必将成为以后测量参数的主流方式[3]。

1　电容传感器理论模型

当从地下采出的油在陆地上进行水平输送时以及在管道中进行气液反应时,管道中的气液会发生分层现象,这就是两相分层流的等效模型,如图 1 所示。但使用这种等效模型对于理论公式的推导和计算较为复杂。为了方便计算,我们通常将图 1 的分层流模型等效成如图 2 所示的环状流模型。

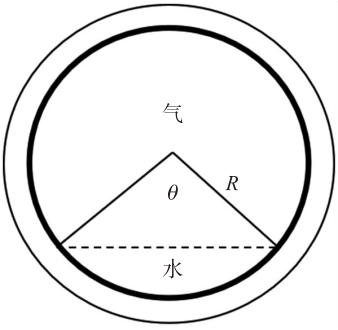


图 1　管道分层流等效图

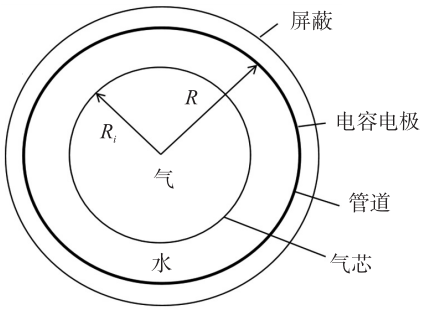


图 2　管道环状流等效图

现对等效关系进行简述,由图 1 可知,油气分别所占的横截面积可以由如下表达式得出:

$$S_{扇}=\frac{\theta}{360°}\times\pi R^2 \tag{1}$$

$$S_{气}=\pi R^2-\frac{\theta}{360°}\times\pi R^2+\frac{1}{2}R^2\sin\theta \tag{2}$$

$$S_{油}=\frac{\theta}{360°}\times\pi R^2-\frac{1}{2}R^2\sin\theta \tag{3}$$

经等效后:

$$S_{气}=\alpha\pi R^2 \tag{4}$$

式中:θ 为油域所对的圆心角,α 为空隙率。

图 3 是电容传感器的立体图,上极板作为激励极板,对其施加 V_i 的正弦激励电压,设 $V_i=A\sin(\omega t+\varphi)$,当电容传感器内部的介质发生变化时,下极板作为接收极板,产生的电容输出信号作为 C/V 转换电路的输入信号,输入信号记为 $V_r=B\sin(\omega t)$,其中液体介电常数为 ε_w,气体介电常数为 ε_a,一般来说,这个假设在恒温条件下是有效的。对于环形传感器,在半径为 R 的管道内壁上安装两个宽度为 h、间距为 H 的电极。其中气芯半径为 R_i,液芯半径为 R,空隙率为 $\lambda=(R_i/R)^2$。

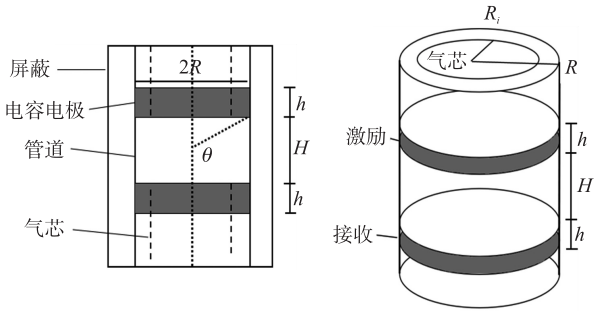


图 3　等效后的油气两相管道

在任意区域中,电势的分布均满足拉普拉斯方程[4-5]:

$$\nabla\cdot\varepsilon_a\cdot\nabla\varphi_a=0 \quad 空气域(0\leqslant r\leqslant R_i) \tag{5}$$

$$\nabla\cdot\varepsilon_o\cdot\nabla\varphi_o=0 \quad 油域(Ri\leqslant r\leqslant R) \tag{6}$$

式中:a 表示空气介质,o 表示油介质,r 表示管道空间内任意一点到坐标原点的距离。下标“a”和“o”分别表示空气域和油域。这里主要讨论当管道空隙率发生改变时,接收极板的电压 V_r 变化情况。控制方程的约束条件为:

$$\varphi_o(R,\theta)=V_r \tag{7}$$

$$\varphi_a(R_i,\theta)=\varphi_o(R_i,\theta) \tag{8}$$

$$\varepsilon_a\frac{\partial\varphi_a}{\partial r}\Big|_{r=R_i}=\varepsilon_a\frac{\partial\varphi_o}{\partial r}\Big|_{r=R_i} \tag{9}$$

拉普拉斯方程的通解形式为:

$$\varphi=\sum_{n=0}^{\infty}\left(a_n r^n+\frac{b_n}{r^{n+1}}\right)P_n(\cos\theta) \tag{10}$$

根据对称性,可得:

$$P_n(\cos\theta)=P_n(1)=1,P_n(\cos\pi)=P_n(-1)=(-1)^n$$

于是上式变为:

$$\varphi=\sum_{n=0}^{\infty}a_{2n}r^{2n}P_{2n}(\cos\theta) \quad r<R \tag{11}$$

$$\varphi=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{b_{2n}}{r^{2n+1}}P_{2n}(\cos\theta) \quad r>R \tag{12}$$

式中:$Pn(\cos\theta)$为勒让德函数[6]。

将 $V_r=B\sin(\omega t)$进行傅里叶级数展开,经计算得:

$$b_n=\frac{4B\sin(\omega t)\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)\sin(n\theta)}{\pi\theta n^2}\quad n=\text{odd} \tag{13}$$

$$V_r(\theta)=\sum_{n=\text{odd}} b_n\cos(n\theta) \tag{14}$$

拉普拉斯方程的解:

$$\varphi_o(r,\theta)=\sum_{n=0}^{\infty}\left[A_n\left(\frac{r}{R}\right)^{2n}+B_n\left(\frac{R}{r}\right)^{2n+1}\right]\times\cos(n\theta)\quad(R_i\leqslant r\leqslant R) \tag{15}$$

$$\varphi_a(r,\theta)=\sum_{n=0}^{\infty}C_n\left(\frac{r}{R}\right)^{2n}\cos(n\theta),(r\leqslant R_i) \tag{16}$$

解得:

$$A_n=\frac{4B\sin(\omega t)\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)\sin(n\theta)}{\left[1+\frac{(1-\lambda)b_n}{1+\lambda}\right]\pi\theta n^2} \tag{17}$$

$$B_n=\frac{4A\sin(\omega t)\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)\sin(n\theta)}{\left[1+\frac{(1-\lambda)b^n}{1+\lambda}\right]\pi\theta n^2}\times\frac{(1-\lambda)b^n}{1+\lambda} \tag{18}$$

由于:

$$\lambda=\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_o} \tag{19}$$

$$\alpha=\left(\frac{R_i}{R}\right)^2 \tag{20}$$

式中:λ 为介电常数之比,α 为空隙率定义式。

查询积分表,我们可以推出近似表达式为

$$C^*=\frac{\ln\frac{1+\alpha+\tau}{1-\alpha+\tau}+4\tanh^{-1}\alpha_\varepsilon}{(\lambda+1)(1-\ln\theta)}+\frac{1}{\lambda-1} \tag{21}$$

式中:

$$\tau=\frac{2}{\mathrm{e}^{\frac{(\lambda-2)(\lambda+1)(1-\ln\theta)}{\lambda-1}-4\tanh^{-1}\alpha_\varepsilon}-1}$$

所以空隙率的表达式为:

$$\alpha=\frac{(\mathrm{e}^{\mu}-1)(\tau+1)}{1+\mathrm{e}^{\mu}} \tag{22}$$

式中:

$$\mu=\left(C^*-\frac{1}{\lambda-1}\right)(\lambda+1)(1-\ln\theta)-4\tanh^{-1}\alpha_\varepsilon$$

经实验验证可得,$0.14\leqslant\alpha_\varepsilon\leqslant0.56$ 时,τ 的值通常为 0.003 73~0.020 00 之间,此时 τ 的值几乎为零,因此我们可以令 $\tau=0$,所以,最终确定的空隙率公式为:

$$\alpha=\frac{\mathrm{e}^{\mu}-1}{1+\mathrm{e}^{\mu}} \tag{23}$$

从上述公式中可以看出,电容传感器的电容变化量与空隙率直接相关,而电容变化量可以转化为微小电压的变化量,换句话说,只要知道了微小电压的变化量就能够通过一系列的公式计算得到所要求的空隙率 α[7-10]。

2 空隙率测量系统

测量系统基本原理是根据不同介质具有不同的介电常数的性质,通过电容传感器测量管道截面上介电常数的分布信息,此信息反映了多相流体的相分布情况,进而求得空隙率。

该系统主要包括了正弦信号产生模块、电容传感器、*C/V* 转换电路、乘法器、低通滤波器、PGA、缓冲器、限幅电路、采集卡、计算机等。其中正弦信号产生模块用于产生正弦信号,通过在激励电极上施加正弦信号,使得管道中的油气两相的介电常数的分布发生改变时,电容信号经 *C/V* 转换电路,转换为计算机可以识别的电压信号,随后该电压信号经乘法器转化为直流信号,经过低通滤波器进行滤波,再对直流信号进行放大、缓冲和限幅等一系列操作,得到最终的可用电压信号,最后使用采集卡采集电压信号,传给计算机进行数值的采集和计算,并在计算机上显示实时电压的波形图[11-14]。整个测量系统如图 4 所示。

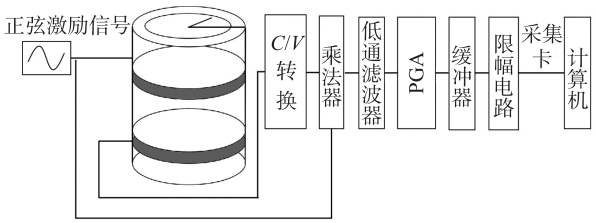
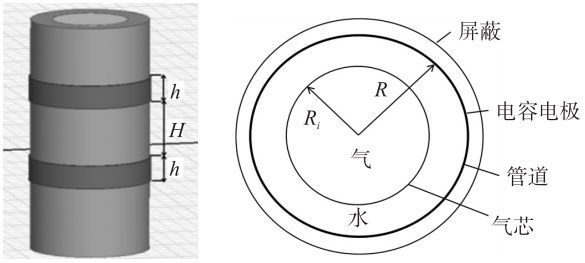


图 4 空隙率测量系统

3 数值仿真对比实验

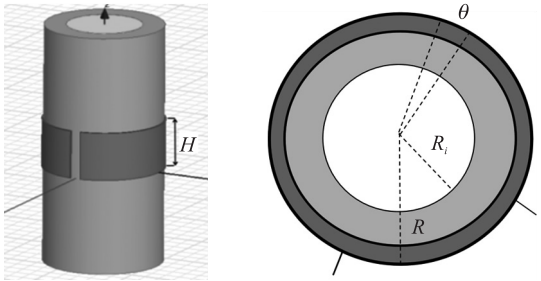
在 Maxwell 仿真软件中,我们采用静电场仿真,并将其中一个电极给定激励电压,另一电极则作为接收电极,我们设气芯半径为 R_i,液芯半径为 R,空隙率 $\lambda=(R_i/R)^2$,通过改变气柱和液柱柱心半径参数,模拟空隙率的变化。通过电容数值矩阵得到两电极间的电容值,利用场强计算器计算电极表面激励电荷。为了便于仿真,首先将柱体高度设置为 200 mm,环形电极和板型电极的半径设置为 40 mm,将激励电压设置为 5 V。通过改变不同极板的可调参数,对比选取最优的电极模型[15]。两种电极仿真立体模型如图 5、图 6 所示。

环状电极和凹状板型电极作为两种不同的电极,在空间中的电场与电势分布是不同的。通过



(a) 主视图　　(b) 俯视图

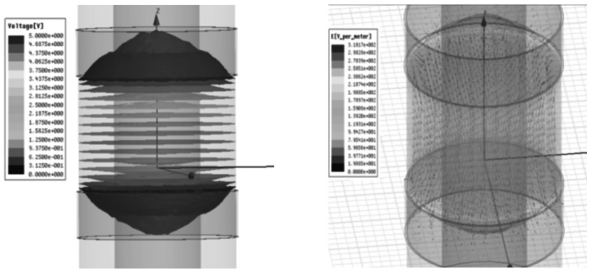
图 5　环型电极视图



(a) 主视图　　(b) 俯视图

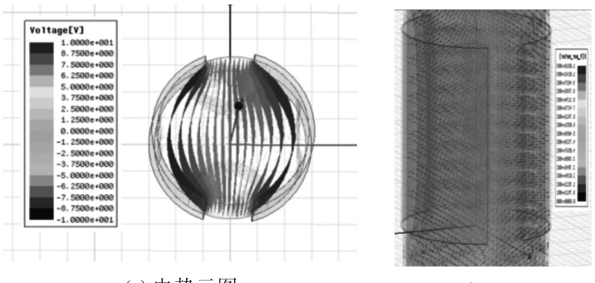
图 6　板型电极视图

Maxwell 软件的仿真,可以得到验证。对于环状电极而言,电势的大小随位置高度和柱心半径的变化而变化,电势变化相对复杂,如图 7 所示。对于板型电极而言,电势的大小仅与柱心半径有关,而与位置高度无关,如图 8 所示。



(a) 电势云图　　(b) 电场矢量云图

图 7　环状电极云图



(a) 电势云图　　(b) 电场矢量云图

图 8　板型电极云图

图 9 和图 10 所示分别为环形电极和板型电极的轴向和径向电势分布。从图中可以看出,环形电极的轴向电势分布和板型电极的径向电势分布是中心对称的,分布较为均匀,且板型电极的径向电势分布可近似为线性。

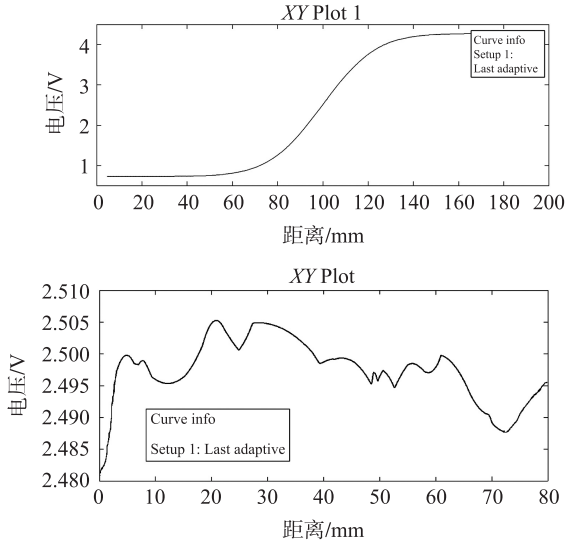


图 9　环形电极轴向电势与径向电势分布

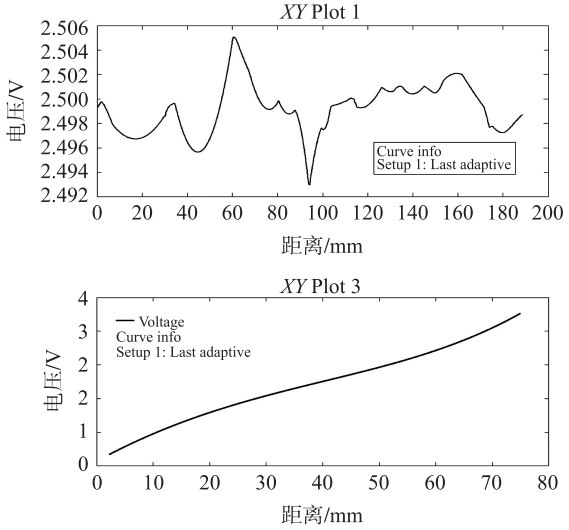


图 10　板型电极轴向电势与径向电势分布

3.1　改变环形电极参数的影响

在衡量传感器的性能的各项指标中,线性度是一个非常重要的概念,传感器的线性程度直接影响着测量结果的精度和可靠性。如果传感器的线性程度偏低,那么误差就会不断地累积,在测量结果中产生较大的误差。在一些要求高精度和高可靠性的测量中,尤其需要传感器具有较高的线性程度。在环形电极的仿真实验中,将环形电极的宽度设置为 10 mm~40 mm 可变,两电极间距设置为 10 mm~70 mm 可变,通过改变传感器的电极宽度、电极间距设计对比实验,利用多项式线性拟合的方法对仿真得到的激励极板电荷数据进行处理,在电极间距不变的前提下,对比同组电极宽度对电容值变化的影响。图 11 是不同电极间距下的不同电极宽度多项式线性合度 R^2。

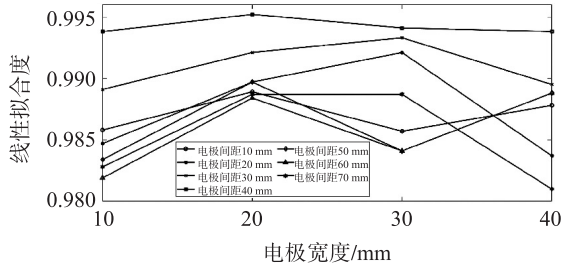


图 11 环型电极不同参数下的线性拟合度

从图 11 中可以得出如下结论:电极间距和尺寸不是越大越好。在电极间距为 40 mm,电极宽度 20 mm 的电极尺寸下,线性拟合度最好。其拟合图像如图 12 所示。

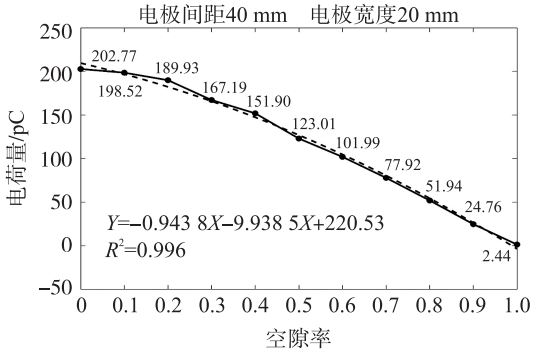


图 12 间距 40mm 宽度 20mm 拟合图

当电容传感器介质发生改变时,将极板间电容变化量(输入量)定义成 ΔC,将接收极板的电荷变化量(输出量)定义成 Δq,将它们的比值定义为电容传感器的灵敏度,即 $S=\Delta q/\Delta C$。

通过对图 13 中数据进行方差计算处理,得出环型电极在电极宽度为 20 mm,电极间距为 40 mm 时,灵敏度波动最小。

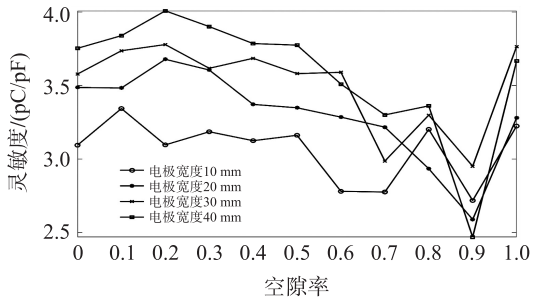


图 13 间距 40 mm 不同宽度极板灵敏度对比图

3.2 改变板型电极参数的影响

在板型电极的仿真实验中,将极板长度设置为 10 mm~150 mm 可变,两电极夹角间隙设置为 5°~20°可变。从图 14 中可以看出,间隙角为 20°的板型电极波动最小,且线性拟合度最接近 1。

通过对图 14 中的数据进行方差计算处理,可以看出电极间隙角 20°,电极宽度 80 mm 的板型电极

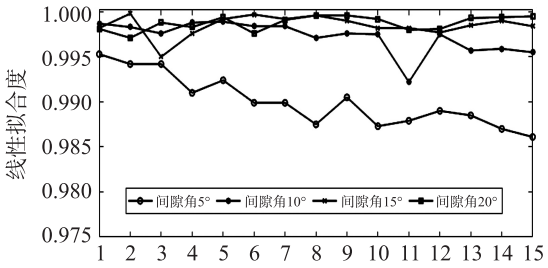


图 14 板型电极不同参数下的线性拟合度

的线性拟合波动最小,数据的线性拟合度最好。其拟合图像如图 15 所示。

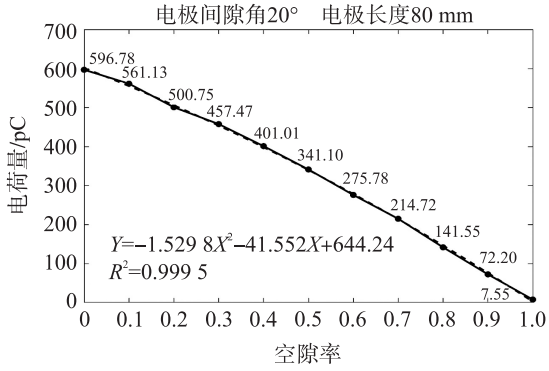


图 15 间隙角 20° 电极长度 80 mm 拟合图

图 16 列出了板型电极的电极高度从 50 mm~110 mm 变化时,灵敏度的变化情况。

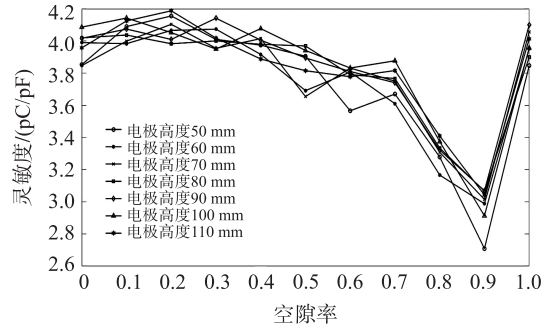


图 16 间隙角 20°不同长度极板灵敏度对比

通过对图 16 中数据进行方差计算处理,得出电极间隙角为 20°,电极高度为 80 mm 的极板灵敏度在不同空隙率下数值波动最小。

3.3 两种电极对比分析

在体积相同,半径相同的电容传感器装置中,电极距离为 40 mm,电极宽度为 20 mm 的环形电极的平均灵敏度为 3.804 pC/pF,电极间隙角为 20°,电极宽度为 80 mm 的板型电极的平均灵敏度为 3.298 pC/pF,因此,在灵敏度方面,环型电极优于板型电极,这使得环型电极在实际测量中能够更快对待测量做出响应。但在空隙率较小时,环形电极的接收极板电荷量变化不明显且变化量小,从图 17 中可以看出,在空隙率为 0~0.1 的变化范围内,环型

电极的线性度曲线几乎为水平,在测量系统中这种微弱变化会大大增加测量难度。而板型电极在空隙率从 0~1 的变化中始终能够保持良好的线性且拟合曲线斜率比环型电极大。

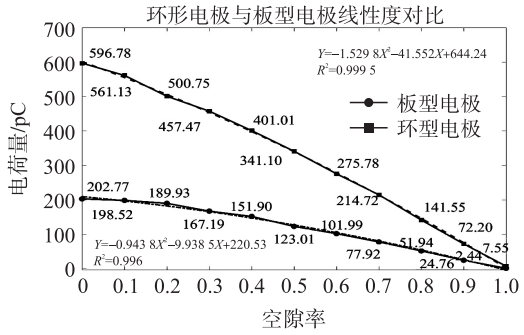


图 17　两种电极线性度对比图

4　空隙率测量实验

在空隙率测量实验中,主要利用图 18 所示的测量装置进行测量。通过向圆柱形电容传感器内加入液体,来改变圆筒内部空气所占比例。

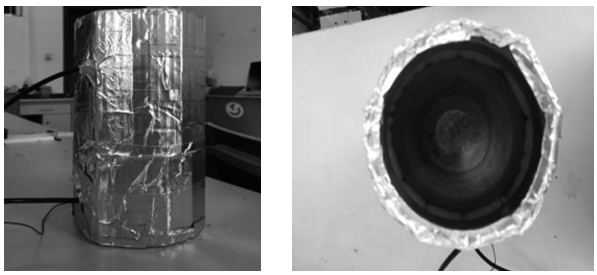


图 18　环型电容传感器实物图

在进行实际测量时,利用波形发生器为电容传感器的激励极板提供激励电压,接收电极信号经过测量电路放大、解调、滤波等一系列处理后,连接上位机显示电压和空隙率波形。

利用 LabView 软件实时显示测量电路输出的电压和空隙率波形[16]。图 19 所示为软件的前面板界面。

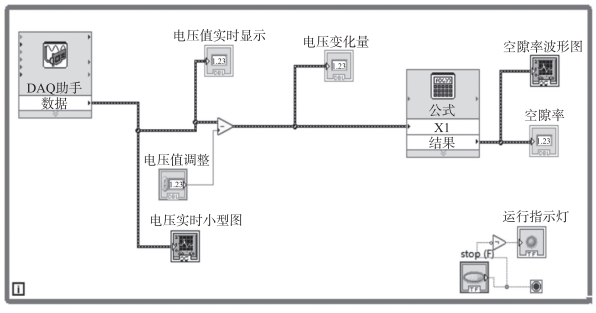


图 19　前面板界面

图 20、图 21 分别为满筒检测(α=0)和空筒(α=1)检测的上位机波形图。从图中可以看出,满筒检测理论空隙率值为 0,首次实际检测值为 0.03。空筒检测理论空隙率值为 1,首次实际检测值为 0.99。

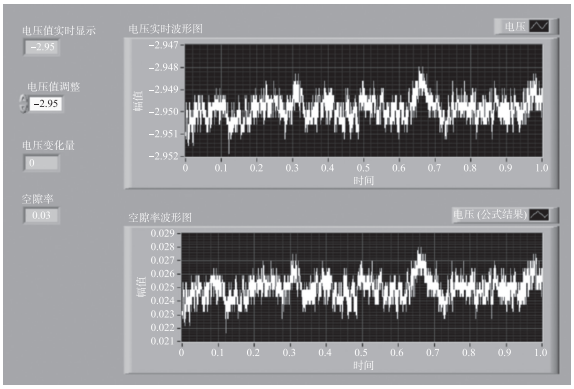


图 20　满筒检测波形图

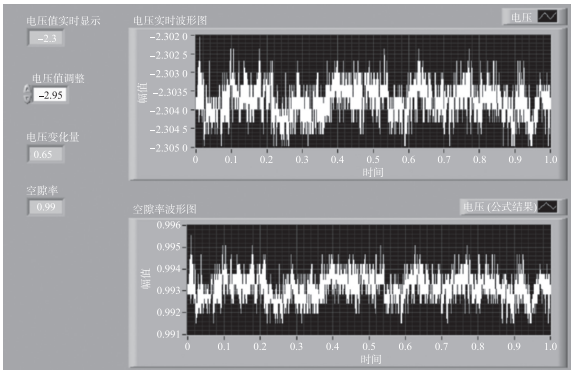


图 21　空筒检测波形图

在数据的误差处理中,相对误差能够反映测量数据的可靠性。在测量实验中,采用仿真结果中的电极宽度为 20 mm 的环型电极进行空隙率测量实验,分别令气芯半径为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm。为了验证理论公式的可靠性,连续进行 4 次实际检测,4 次实测数据的相对误差如图 22 所示。其中定义相对误差 $\delta=\Delta/L\times100\%$,其中 Δ 表示绝对误差,$L$ 表示真值。表中数据精确到小数点后 4 位。从图 22 中可以看出 4 次测量的相对误差最大为 3.3%,最小为 0.62%。

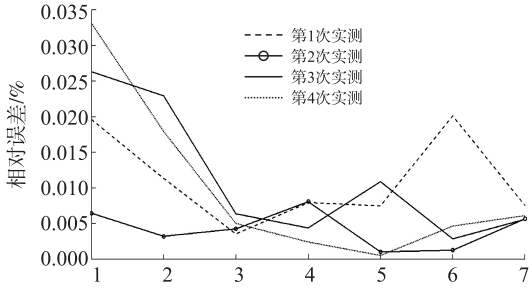


图 22　四次实测数据的相对误差

表 1 是 4 次实测空隙率与仿真空隙率的对比表,由表中可以看出,在空筒和满筒测量时,实测空隙率具有一定的误差,不能达到真正意义的“0”和“1”。

表 1 仿真空隙率与实测空隙率对比

气芯半径	仿真空隙率	第 1 次实测空隙率	第 2 次实测空隙率	第 3 次实测空隙率	第 4 次实测空隙率
0 mm	0	0.030 0	0.031 0	0.029 9	0.030 0
5 mm	0.015 6	0.015 3	0.015 5	0.015 2	0.015 1
10 mm	0.062 5	0.061 8	0.062 3	0.061 1	0.061 4
15 mm	0.140 6	0.141 1	0.141 2	0.141 5	0.139 9
20 mm	0.250 0	0.252 0	0.248 0	0.251 1	0.249 4
25 mm	0.390 6	0.387 7	0.391 0	0.386 4	0.390 4
30 mm	0.562 5	0.551 4	0.561 8	0.560 9	0.559 9
35 mm	0.765 6	0.771 4	0.761 3	0.769 9	0.770 3
40 mm	1	0.990 0	0.989 0	0.992 0	0.988 0

5 结论

对两种不同类型传感器不同参数下的传感器性能进行了数值比较。在空隙率实际测量中,通过 4 次实测数据验证了计算公式的正确性,但同时存在一些问题:在空筒和满筒状态下时,利用公式计算得到的空隙率具有一定的误差,后续应对公式进行进一步的修正,减小数据误差。最终得出如下结论:对于板型电极,间隙角度在 20°、电极长度在 80 mm 时,传感器达到最优。对于环型电极,电极距离设置为 40 mm,电极宽度设置为 20 mm,能够达到最优。因此,当进行高灵敏度测量时,可以采用环型电极电容传感器,若希望输出值呈良好的线性变化,板型电极电容传感器更为适合。

参考文献:

[1] 李庭斌. 浅谈气液两相流测量技术及其应用[J]. 职业,2009(2):114-115.

[2] 顾春来,董守平. 多相流检测技术在石油工业中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版),1999,23(3):109-111.

[3] 胡红利,唐凯豪,唐晨晖,等. 基于电容传感器的两相流参数检测原理及应用[J]. 西北大学学报(自然科学版),2019,49(5):681-690.

[4] 李晓奇. 静电场中拉普拉斯方程的求解要领[J]. 思茅师范高等专科学校学报,2007,23(3):40-43.

[5] 金锋,许会,颜华,等. 气/固两相流相浓度传感器[J]. 东北大学学报,1999,20(1):28-31.

[6] 张之翔. 圆环电荷的电势的几种算法及讨论[J]. 大学物理,2006,25(8):7-9.

[7] 熊斌. 有限长均匀带电薄圆柱面面上的场强[J]. 毕节学院学报,2006,24(4):30-34.

[8] 程昌林,李业凤,王慧. 有限长均匀带电薄圆柱面的电场[J]. 大学物理,2004,23(2):34-35.

[9] Qian H L,Hrnjak P. Void Fraction Measurement and Flow Regimes Visualization of R134a in Horizontal and Vertical ID 7 mm Circular Tubes[J]. International Journal of Refrigeration,2019,103:191-203.

[10] Kim S,Lee J S,Kim K Y,et al. An Approximate Formula for the Capacitance-Void Fraction Relationship for Annular Flows[J]. Measurement Science & Technology,2009,20(12):125404.

[11] 何根平,柯伊宇,徐沧粟,等. 测量液体管内含气率的电容传感器系统的设计[J]. 仪表技术与传感器,2022(11):23-28.

[12] 李晶,于殿泓. 非平行板电容传感器的微小电容检测电路设计[J]. 仪表技术与传感器,2020(1):100-103.

[13] 罗政元. 一种小电容测量电路的性能研究[J]. 计算机光盘软件与应用,2013,16(2):142-143.

[14] 邱桂苹,于晓洋,陈德运. 微小电容测量电路[J]. 黑龙江电力,2006,28(5):362-366.

[15] 杨相飞,马俊贵. 基于 ANSYS Maxwell 的空间电场分布模拟[J]. 农业工程,2017,7(1):42-43.

[16] 庞启,成妍妍,龙翠翠. 基于 LabVIEW 的电容式传感器虚拟仿真实验系统设计[J]. 实验科学与术,2022,58(3):32-34.

刘欣阳(1998—),男,辽宁人,辽宁石油化工大学信息与控制工程学院硕士研究生,主要研究方向为多相流参数测试技术,1652657724@qq.com;

阚 哲(1980—),男,辽宁人,辽宁石油化工大学信息与控制工程学院副教授,主要研究方向为多相流参数测试技术、微弱信号测量技术、嵌入式系统应用,kanzhe_kz@163.com。