DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2210274

一种石油生产永置式地面井口持水率 动静态测量装置研究*

郝 虎1,孔德明2,陈晓玉1,3,陈基亮1,孔令富1,3

(1.燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004; 2.燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004;3.燕山大学河北省计算机虚拟技术与系统集成重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要:为满足采油地面井口多相流持水率测量的实际要求,本文结合电导动态测量与筒状电容静态测量技术,研制了一种永 置式石油生产地面井口多相流持水率动静态测量装置(PDSWHMD_SM)。具体地,文中采用有限元方法(FEM)构建了电导-电 容一体式传感器(CCIS)数值模型,在此基础上对 CCIS 管道内流体处于流动及静止状态下分相介质的分布特性、CCIS 结构参 数、CCIS 电学分布特性、不同多相流工况下的响应特性等进行了深入研究,最终确定了 CCIS 最优结构参数: H_e = 90 mm、ID = 30 mm、 Ih_e = 3 mm、 H_c = 375 mm、 IR_1 = 26 mm、 T_e = 1 mm、 H_m = 56 mm,证明了其测量误差在 5% 以内。另外,本文以总流量 5~70 m³/d,持水率 50% ~90% 等多相流工况为例进行了实验研究,实验结果表明:研制的装置 PDSWHMD_SM 持水率测量误差 同样在 5% 以内。仿真和实验均证明了 PDSWHMD_SM 具有良好的持水率测量性能。

关键词:动静态测量;永置式;测量装置;持水率;参数优化

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on the permanent surface wellhead water holdup dynamic and static measuring device for oil production

Hao Hu¹, Kong Deming², Chen Xiaoyu^{1,3}, Chen Jiliang¹, Kong Lingfu^{1,3}

(1. Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. Hebei key laboratory of computer virtual technology and system integration, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To meet the requirements of the multi-phase flow water holdup measurement at the surface wellhead of oil production, a permanently dynamic and static water holdup measuring device for surface wellhead (PDSWHMD_SM) is designed and developed by combining dynamic conductance measurement and cylinder capacitance static measurement techniques. This article establishes a numerical model of the permanent conductance-capacitance integrated sensor (CCIS) using the finite element method (FEM). And the medium distribution characteristics of the fluid flow and stationary state in the pipe, CCIS structural parameters, electric field distribution, and response characteristics have been studied in depth. The optimal structure parameters of CCIS are finally determined: $H_e = 90 \text{ mm}$, ID = 30 mm, $Ih_e = 3 \text{ mm}$, $H_c = 375 \text{ mm}$, $IR_1 = 26 \text{ mm}$, $T_c = 1 \text{ mm}$, $H_m = 56 \text{ mm}$, which are proved to be within 5% of the measurement error. In addition, this article conducts an experimental study with multi-phase flow conditions such as the total flow rate range of $5 \sim 70 \text{ m}^3/\text{d}$ and the water holdup range of $50\% \sim 90\%$. The results show that the developed device PDSWHMD_SM has good water holdup measurement performance with the error of water holdup measurement within 5%. Both simulation and experiment demonstrate that PDSWHMD_SM performs well in water holdup measurement.

Keywords: dynamic and static measurement; permanent type; measuring device; water holdup; parameter optimization

收稿日期:2022-08-08 Received Date: 2022-08-08

^{*}基金项目:国家自然科学基金(62173289)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2020118)、河北省研究生创新项目(CXZZBS2023063)资助

27

0 引 言

长期以来,国内外油田生产关于多相流的测试均以 井下测试为主[1]。在油田生产的初中期开展井下多相流 测量尤为重要,通过井下测试不仅能检测油井各产层产 出液组分,而且还可获取油井不同储层产能和储层储量 分布等重要信息,从而指导油田高效、稳定开采开发^[2-3]。 但是对于进入油田生产中后期的油井而言,开展地面井 口多相流在线测量更具有其特殊的重要性,此阶段石油 生产地面井口测试的需求将明显超过井下测试。鉴于研 究地面井口可以长期稳定和可连续使用的多相流测试装 备具有特殊的技术难度和开发成本,迄今为止,国内外尚 没有可直接应用于地面井口多相流长期在线连续测试的 可靠装备^[4-5]。目前的地面测量大都采用集中计量方式。 所谓的集中计量方式即把一个相当区域的多口石油生产 井产出液各自通过输油管道汇集到一个较为贵重的仪器 站点进行三相流的集中测试,很显然这种测试方式难以 解读每口油井的实际井况及生产指标信息[67]。因此、为 了得到每口油井井况信息,开展地面井口多相流测井以 及相应资料解释已是当前石油生产测井领域亟需研究的 难题。而地面井口多相流持水率参数作为一项重要的且 具有代表性的生产指标,对监测油井产量、指导油井注 采、提高采收率、节约能耗、预测油井开发寿命等诸多方 面具有重要的价值和指导意义[8-10]。这恰好也是本文开 展永置式地面井口多相流持水率测量装置深入研究的目 的所在。

近年来,关于永置式地面井口多相流持水率测量装 置的研制已引起了国内外石油生产领域越来越多研究人 员的关注。Li 等^[11]基于电导测量技术^[12]研制一种适用 于高含水低产液油水两相流地面测量装置并成功实现了 持水率测量。王轩轩[13]基于微波测量技术研制了一种 用于地面的持水率测量仪且成功实现了油井持水率测 量。于洋等[14-16]采用电磁波透射法研制了一种井口原油 持水率在线测量装置目成功实现了井口原油持水率的实 时监测。虽然上述研究都宣称解决了地面井口多相流持 水率测量难题,但是所研究的装备也都存在着占地面积 大、成本高、易渗漏、故障率高、无法长期在线连续工作等 弊端。因此,研制一种能长期在现场使用且能连续可靠 工作的接地气、易推广、无渗漏、高性价比的永置式石油 生产地面井口多相流持水率测量装置是目前石油生产领 域和"数字油田"建设中亟需和制约其发展的持水率测 试终端。

为使地面井口多相流持水率测量装置能够实现可 靠、无渗漏、永置式长期现场连续测量和实时在线工作

的要求,本文基于电导持水动态测量[17-18]和电容液位 静态测量[19-20]相结合的方法,创造性研制一种永置式 石油生产地面井口多相流持水率动静态测量装置(a permanently dynamic and static water holdup measuring device for surface wellhead, PDSWHMD_SM)。此装置以 其特有的工作性能,使其不仅能精准测量而且还能在 生产现场做到长期可靠运行,同时自身的低端价位还 具备了能够使其广泛推广的优势。此装置中核心检测 部件电导电容一体式传感器 (conductance-capacitance integrated sensor, CCIS)采用聚醚醚酮(poly ether ether ketone, PEEK)新型材料把多种精准检测传感器注塑在 一个高强度、无渗漏的管件中,其表面光滑、不易沾污、 挂蜡。这种高强度的检测管件不仅具有良好的电检测 特性,而且还解决了该装置能长期在现场连续使用的 永置式、无渗漏、高性价比的难题。另外,文章还采用 有限元方法(finite element method, FEM)对 PDSWHMD _SM 测量原理、电场强度分布、结构参数、响应特性等 问题进行了深入研究。

1 PDSWHMD_SM 结构设计及测量原理

1.1 PDSWHMD_SM 结构设计

研制的 PDSWHMD_SM 结构如图 1 所示。该地面井 口多相流持水率测量装置主要包括主管道、电磁阀 1、电 磁阀 2、手动阀 1、手动阀 2、CCIS 等。

图 1 中, PDSWHMD_SM 核心部件为 CCIS。CCIS 由 下至上由环形多级电导模块(ring multistage conductance module, RMCM)和筒状电容模块(cylindrical capacitance module, CCM)组成,主要包括激励电极环 E1 和 E2、测量 电极环 M1~M4、绝缘层、金属层电极等。其中,激励电极 环 E1 和 E2、测量电极环 M1~M4 嵌入到绝缘层中。与 此相同,金属层电极也嵌入至绝缘层中。另外,绝缘层分 为内绝缘层与外绝缘层,且绝缘层采用聚醚醚酮(polyether-ether-ketone, PEEK)材料注塑而成。金属层采用铍 青铜(beryllium bronze, BB)材料,激励电极环 E1 和 E2、 测量电极环 M1~M4 均采用不锈钢(stainless steel, SS) 材料制作而成。

1.2 PDSWHMD_SM 测量原理

1) PDSWHMD_SM 动态测量原理

由图 1 可知, PDSWHMD_SM 测试时通常电磁阀 1 关闭、2 开启, 手动阀 1 和 2 处于开启状态。当油井井口多相流流经测量管道, 此时 RMCM 开始采集数据, 激励电极环 E1 与直流恒流电流源相连接, 激励电极环 E2 接地。 当多相流持水率发生变化时, 油气水混合电导率也会发 生变化, 从而 RMCM 测量电压也随之变化。则输出电



图 1 PDSWHMD_SM 结构示意图 Fig. 1 Structure diagram of PDSWHMD_SM

压 V_m 为:

$$V_m = K_\sigma \times \sigma_m^{-1} \times I_e = K_\sigma \times \left[\frac{3 - Y_{dw}}{2Y_{dw}\sigma_w}\right] \times I_e \tag{1}$$

式中: K_{σ} 为校正系数, I_{e} 为施加在 RMCM 上的激励电流, σ_{m} 为 RMCM 测量区域油气水混合流体的电导率, σ_{w} 为 水相电导率, Y_{dw} 为 RMCM 持水率动态测量结果。

当管道内充满油气水混合流体, 持水率 Y_{dw} 可以根据 Maxwell 公式表示为:

$$Y_{dw} = \frac{3\sigma_m}{2\sigma_w + \sigma_m} = \frac{3V_w}{2V_m + V_w}$$
(2)

2) PDSWHMD_SM 静态测量原理

当 PDSWHMD_SM 开始静态测量时,电磁阀 1 开启, 2 关闭,检测管中的三相流从流动状态而转入静止状态, 受重力和运动突停影响将导致管中各相分离,其中水相 沉降至 CCIS 底部,油气相则上升至 CCIS 上部或者顶部。 此时,CCIS 流道中的水和其金属外壳相连,整个连续的 水相和金属外壳可以被视为等势体。所以,CCIS 测量系 统的等效电路为两部分电容并联,一组是金属层电极和 金属外壳形成的电容 *C*₁;另一组是金属层电极和水相形 成的电容 *C*₂。当介质各相分离时,CCIS 的截面和对应的 等效电路结果如图 2 所示。

CCIS 电容可表示为:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 H_c}{\ln(CR_4/CR_3)} + \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 H_w}{\ln(CR_2/CR_1)} \quad (3)$$

式中: ε₀ 为真空介电常数, ε 为聚醚醚酮的相对介电常



图 2 CCIS 的截面和对应的等效电路结果



数,H"为水相液面高度。

全油气相电容为:

$$C_o = C_1 = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 H_c}{\ln\left(CR_4/CR_3\right)} = AH_c \tag{4}$$

全水相电容为:

$$C_w = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 H_c}{\ln(CR_4/CR_3)} + \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 H_c}{\ln(CR_2/CR_1)} = BH_c$$
(5)

PDSWHMD_SM 持水率静态测量结果 Y_{sw} 可定义为 在一定长度的管道中水相的体积占管道体积的百分比, 可表示为:

$$Y_{sw} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 H_c}{\ln(CR_4/CR_3)} + \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 H_w}{\ln(CR_2/CR_1)}$$
(6)

3) PDSWHMD SM 融合测量

石油生产三相流体变化复杂,有些时候三相流体可 能更适合于动态测量,而有些时候却可能更适合于静态 测量。因此针对这一情况,本文将三相流体经过 CCM 与 RMCM 的两项动静态测量结果进行融合处理而求得 PDSWHMD_SM 的综合持水率为:

$$Y_w = \frac{Y_{dw} + Y_{sw}}{2} \tag{7}$$

CCIS 优化设计模型及参数优化研究 2

CCIS 优化设计模型 2.1

在 CCIS 结构中, H 为 CCIS 高度, Ih, 为电极厚度,

H_a为 RMCM 高度, H_a为 CCM 高度, IR₁为 CCIS 内径, ID 为测量电极间距, H_m 为 RMCM-CCM 间距, $T_s = (CR_2 - CR_2)$ IR,)/2 为内绝缘层厚度等。上述结构参数对其测量性能 会产生重要影响,因此有必要对 CCIS 的这些参数开展优 化设计。本文利用 FEM 建立 CCIS 上述参数的优化设计 模型如图 3 所示,其中图 3 中 CCIS 各参数符号与图 1 中 各参数符号是相互一一对应的。

由于 CCIS 管道内径及测量区域远小于电场波长。 因此可以将 CCIS 的电场视为时不变的。CCIS 测量系统 中采用直流恒流电流源作为 RMCM 的激励源,将直流电 压源作为 CCM 的激励源,对 CCIS 电学特性分布进行研 究如下。







RMCM 电势 u 可用二维坐标系 (r,z) 下的 Laplace 方程[21]来描述,有:

$$\nabla^{2}(r,z) = \frac{\partial^{2}u(r,z)}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r}\frac{\partial u(r,z)}{\partial r} + \frac{\partial^{2}u(r,z)}{\partial z^{2}} = 0$$
(8)

基本的边界条件可以表示为:

$$\begin{cases} u = 0(r = \frac{IR_1}{2}, L_e \leq z \leq L_e + Ih_e, \\ L_e + Ih_e \leq z \leq L_e + H_e - Ih_e, L_e + H_e \leq z \leq H) \\ \frac{\partial u}{\partial z} = 0(z = 0, z = H); \\ \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{I_e}{S_R} \left(r = \frac{IR_1}{2}, L_e + H_e - Ih_e \leq z \leq L_e + H_e, \\ L_e \leq z \leq L_e + Ih_e \right) \end{cases}$$

$$(9)$$

式中:u为RMCM内部电势分布,I。为施加到RMCM激 励电极的直流恒流电流, S_p 是 RMCM 激励电极的表 面积。

忽略 CCIS 空间自由电荷分布, CCM 电位分布满足 拉普拉斯[22]方程:

 $\nabla \cdot \left[\varepsilon_0 \varepsilon(r,z) \ \nabla \varphi(r,z) \right] = 0$ (10)式中: $\varphi(r,z)$ 为静电场电位分布函数,真空介电常数与 (r,z)处的介电常数分别用 ε_0 与 $\varepsilon(r,z)$ 表示,并假设他 们在各剖分单元内是常数, ∇・与∇分别为散度和梯度 算子。

CCM 的边界条件可以表示为:

$$\begin{cases}
\varphi(r,z) = u\left(r = \frac{CR_2}{2}, -\left(\frac{L_e + H_e + H_m}{2}\right) \leq \\
z \leq \frac{H - L_e}{2}\right) & (11) \\
\varphi(r,z) = 0\left(0 \leq z \leq H, -\frac{CR_1}{2} \leq r \leq \frac{CR_1}{2}\right) \\
\hline \text{副分后的泛函表达式表示为:} \\
F(\varphi) = \iint_{\Omega} \left\{\frac{1}{2}\varepsilon \left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)^2\right]\right\} drdz = \\
F_e(\varphi) & (12)
\end{cases}$$

 $\sum_{i=1}^{m} F_{e}(\varphi)$

式中:m 表示场域内单元总数, $F_{\mu}(\varphi)$ 为单元电场能量。

CCM 金属层电极施加电压后,任意封闭曲线或曲面 内的区域中电荷值为:

$$Q = \int_{s} \varepsilon_{0} \varepsilon(r, z) \,\nabla \varphi(r, z) \,\mathrm{d}s \tag{13}$$

式中:s表示 CCIS 电极的封闭曲面。

CCM 电容可表示为:

$$C = \frac{Q}{U} \tag{14}$$

上述式(11)~(13)中所涉及的电学参数设置如下: 向激励1号电极环(E1)输入0.1 mA的直流恒流电流, 则激励2号电极环(E2)流出0.1 mA的直流恒流电流, 月激励2号电极环(E2)接地:向金属层电极加载5V直 流电压,外壳接地。其中,CCIS 中 PEEK 的相对介电常

数为3.水的相对介电常数为80.油气混合相对介电常数为 3.5.CCIS 中 RMCM 电极环 E1、E2 和 M1~M4 以及 CCM 金属层电极的相对介电常数分别为800和1000。水相电 导率为1×10⁻² S/m,油气混合电导率1×10⁻¹⁰ S/m。

2.2 CCIS 参数优化设计

1) RMCM 参数优化

为了获得更精确的测量结果,本文对激励电极厚度、 测量电极间距等参数进行了优化设计,并提出了以下优 化指标:

电流密度轴向分量值的相对误差 e_{luf}:

$$e_{Luf} = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{\min(abs(J_{\max}), abs(J_{\min}))} \times 100\%$$
(15)

式中:J_{max}、J_{min}分别为电流密度轴向分量的最大值和电流 密度轴向分量的最小值。

均匀度 Z_m:

$$Z_{UD} = \frac{L_{UF}}{H_e} \times 100\% \tag{16}$$

式中:Lur 为均匀面积长度,H。为激励电极间距。

电流密度模 J_{avg} :

$$J_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N} J \quad m = 1, 2, \cdots, N$$
 (17)

式中:J为电流密度轴向分量值。

单元灵敏度 $\psi_m(x, y, z)$ 可表示为:

$$\psi_{m}(x,y,z) = \frac{\Delta U_{m}(x,y,z)}{\left[\Delta U_{m}(x,y,z)\right]_{MAX}} \times 100\% \quad m = 1,2,$$

 \dots N

式中: $[\Delta U_m(x,y,z)]_{MAX}$ 为设定范围内油气粒子遍历所 有位置获取的输出电压差 $\Delta U_m(x,y,z)$ 的最大值, N 为测 量区域内单元体积总数。

相对灵敏度 S_{avg} :

$$S_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N} \psi_m(x, y, z) m = 1, 2, \cdots, N$$
(19)

均匀性误差 S_m :

$$S_{vp} = \frac{\left(\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N} \left(\psi_{m}(x, y, z) - S_{avg}\right)^{2}\right)^{1/2}}{S_{avg}} \times 100\%$$

$$1, 2, \dots, N$$
(20)

 $m = 1, 2, \dots, N$

(18)

本文在 Du 等^[23]研究成果的基础上,同时考虑到 PEEK 注塑水平及石油生产地面井口多相流测试装置小 型化要求。获取 $H_e \in [50 \text{ mm}, 100 \text{ mm}]$ 、 $h_e \in [1 \text{ mm},$ 8 mm]、ID ∈ [20 mm, 50 mm]范围内 RMCM 参数优化结 果如图4所示。

由图 4(a) 可知, 随着 RMCM 高度 H_a 的增加, 电流密 度轴向分量值的相对误差 eLut、均匀度 Z D 呈现上升趋 势,电流密度模 J_{ave}、输出电压 U 呈下降趋势。由图 4(b) 可知,当电极厚度小于3mm时,随着电极厚度的增加,电



图 4 RMCM 参数优化结果

Fig. 4 Parameter optimization results of RMCM

流密度轴向分量值的相对误差 eLut、均匀度 Zup 呈现上升 趋势,电流密度模 J_{avg} 呈下降趋势;当电极厚度大于 $3 \, \mathrm{mm}$ 时,电流密度轴向分量值的相对误差 eLuf、均匀度 ZUD 和 电流密度模 Jacg 基本不受电极厚度 In_ 的影响。由 图 4(c)可知,当 ID = 30 mm 时, S_{vo} 值最小, S_{avg} 值最大。 因此,本文最终确定图 3 中参数 $H_e = 90 \text{ mm}$ 、 $Ih_e = 3 \text{ mm}$ 、 $ID = 30 \text{ mm}_{\odot}$

2) CCM 参数优化

CCM 内绝缘层厚度 $T_c = (CR_2 - IR_1)/2$ 、高度 H_c 、内径 IR_1 等参数是影响 CCM 灵敏度 S_c 、边缘效应影响因子 K_c 的重要参数,S、K。的表示式分别为:

$$S_{c} = \frac{\Delta C}{\Delta P_{w}} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_{0}H_{c}}{\ln\left(\frac{R_{1}+2T_{c}}{R_{1}}\right) \times 50\%}$$

$$K_{c} = \frac{|C_{t}-C_{r}|}{|C_{t}-C_{r}|}$$
(21)

$$K_c = \frac{1}{C_r} \frac{C_r}{C_r}$$
(22)

$$C_{t} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_{0}H_{c}}{\ln\left(\frac{R_{1}+2T_{c}}{R_{1}}\right)}$$
(23)

式中: ΔC 表示 CCM 响应电容变化量, ΔP_{w} 为待测流体的 含水率变化量,e 为绝缘区域相对介电常数, C_i 为全水相 时 CCM 电容理论计算值, C_i 为 CCM 电容有限元计算值。

本文在文献[24-25]研究成果的基础上,以及考虑到 PEEK 注塑水平及石油生产地面井口多相流测试装置小型化要求,获取 $T_e \in [0.1 \text{ mm}, 10 \text{ mm}], IR_1 \in [10 \text{ mm}, 40 \text{ mm}], H_e \in [100 \text{ mm}, 400 \text{ mm}]范围内 CCM 参数优化结果。CCM 几何参数与灵敏度 <math>S_e$ 、边缘效应影响因子 K_e 的关系曲线如图 5 所示。



图 5 CCM 参数与灵敏度 S_e、边缘效应影响因子 K_e 的关系 Fig. 5 Relationship curves of CCM parameters with sensitivity S_e and edge effect influence factor K_e

由图 5 可知,随着 CCM 高度 H_e 的增加,CCM 灵敏度 S_e 呈线性增长,边缘效应的影响因子 K_e 呈指数型降低; 随着内绝缘层厚度 T_e 增加,边缘效应影响因子 K_e 趋于 均匀增长,灵敏度 S_e 呈指数型下降;随着 CCM 内径 IR_1 的增加,其灵敏度 S_e 呈线性升高,边缘效应影响因子 K_e 逐渐减小。因此,其高度 H_e 越高,内径 IR_1 越大,绝缘层 厚度 T_e 越小越有利于 CCM 的测量。因此,本文最终确 定图 3 中参数 H_e = 375 mm、 T_e = 1 mm、 IR_1 = 26 mm。

3) RMCM-CCM 间距参数优化

RMCM-CCM 间距是影响 CCIS 性能的重要参数。忽略电容测量的影响, CCIS 等效电路可以视为电阻 R_1 、 R_2 与 R_3 串联。CCIS 电学特性和简化电路模型如图 6 所示。



图 6 CCIS 截面与简易等效电路示意图



设 CCIS 内部充以均匀、线性、各相同性且电导率为 $\sigma = 0.01$ S/m 的连续流体。其中电阻 $R_1 \ R_2 \ D \ R_3$ 阻值 按照下式进行估算:

$$R = \frac{x}{\sigma S} \tag{24}$$

式中:x 表示要计算阻值的区域长度,S 表示内流道的截面积。电容测量部分电势近似为 $V_{av} \approx 3.98 V^{[26]}$ 。油田 实际测井中 CCIS 存在电流漏失的现象,本文忽略两端边缘效应的影响,仅对 RMCM-CCM 间距参数 H_m 进行优化分析。调整参数 H_m 值,使得电导-电容间距电压趋近于激励环(E1)表面的电压 V_{E1} ,以达到抑制激励电流分流的目的。本文定义抑制分流特征为:

$$LD = |V_m - V_{E1}| / V_{E1}$$
(25)

在模型参数不变的条件下,对不同 RMCM-CCM 间距的 CCIS 抑制分流特征进行分析,得到 $H_m \in (1 \text{ mm}, 160 \text{ mm})范围内的抑制分流程度特征值变化曲线如图 7 所示。$





如图 7 所示,抑制分流特征值随 RMCM-CCM 间距 H_m变化的曲线,抑制分流特征值随 H_m的增大呈现先减 小后增大的趋势。当抑制分流特征为0时,电导电容间 距 H_m 为56 mm,此时,电导电容相互影响最小,该条件下 的 RMCM-CCM 间距为最优。但是考虑到 PDSWHMD_ SM 小型化设计要求及 PEEK 注塑工艺限制,故图 3 中选 择参数 H_m =50 mm 为最佳的 RMCM-CCM 间距。

综上所述,通过分析不同结构参数对 CCIS 性能的影响,得到了图 3 中 CCIS 的最优结构参数为: $H_e = 90$ mm、 ID = 30 mm、 $Ih_e = 3$ mm、 $H_c = 375$ mm、 $IR_1 = 26$ mm、 $T_c = 1$ mm、 $H_m = 56$ mm。而图 3 中参数 H 的取值主要依据工 程需要,所以本文未给出此参数受检测性能影响而优化 出的取值大小。

4) CCIS 电场分布特性研究

通过图 3 所示的有限元优化设计模型得到 CCIS 内 部电势和电场分布等电学特性响应结果,如图 8 所示。 其中,传感器内不同区域的颜色代表电势在该区域的强 弱,电力线代表电场强度。

由图 8 (a)可知, RMCM 激励电极 E1 和 E2 之间测量区域的电势呈现高梯度变化并逐渐减小的趋势,远离激励电极测量区域的电势基本保持不变; CCM 金属层电极是等势的,金属层电极与水相之间有电势梯度变化。由图 8 (b)可知, RMCM 测量电极之间区域的电场强度较大且均匀分布, 而激励电极(E1 与 E2)与测量电极(M1 与 M4)处之间电场强度呈现梯度变化; CCM 的内绝缘层与外绝缘层均存在均匀的静电场且强度较大,金属层电极的静电场朝向金属外壳和流道中的水相。此结构参数下 CCIS 测量区域内激励电极 E1 和 E2 之间的电势较强,电场分布均匀。因此,可以较好地用于表征其管道内持水率的变化, 利于持水率的测量。



图 8 CCIS 内部电学特性分布结果



3 CCIS 响应特性仿真分析

3.1 CCIS 测量管道网格模型

本文针对国内陆上油田普遍存在的高含水开采现 状,模拟了多相流总流量 5~70 m³/d、含水率 50~90% 范 围内等 15 种工况下 PDSWHMD_SM 内运动状态下水相 介质的分布特性。由于多相流在 CCIS 测量管道内流动 时,相态之间存在明显的分界面,因此采用瞬态的 VOF 模型及 Geo-Reconstruct 算法对石油生产多相流进行数值 模拟不同多相流流动特性。建立 CCIS 管道的网格模型 如图 9 所示。所述网格模型选用单元类型为 Tri 网格,总 共剖分单元 145 704 个。模型结构尺寸为 539 mm× 26 mm,边界条件为左边是速度入口,右为压力出口,内 部为流体。模型中忽略了温度对流场的影响,流体全部 视为不可压缩流体,并且管道壁面设定为无滑移壁面。 多相流模型选择 VOF 模型,湍流模型选择 k-e 模型并对 壁面采用标准壁面函数进行修正。







采用 VOF 模型跟踪相与相之间的界面,通过求解一 相或多相体积分数的连续方程完成。针对第 q 相,建立 守恒方程。

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})$$
(26)

式中: ρ_q 为第 q 相的密度; α_q 为第 q 相体积分数; S_{α_q} 为第 q 相在单元中所占的面积; m_{pq} 为第 p 相到第 q 相的质量输送; m_{qp} 为第 q 相到第 p 相的质量输送; v_q 为第 q 相流体的 速度。

湍流脉动动能方程(k方程):

$$\rho \frac{\partial \kappa}{\partial t} + \rho u_{i} \frac{\partial \kappa}{\partial x_{i}} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{i}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_{j}} \right] + G_{\kappa} + G_{b} - \rho \varepsilon - Y_{M} + S_{k}$$
(27)

$$\ddot{m} \ddot{m} \vec{m} \vec{n} \vec{k} \vec{k} \vec{b} \vec{j} \vec{a} (\varepsilon \vec{j} \vec{k}) :$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}\varepsilon}{\omega} (G_{\kappa} + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho \frac{\varepsilon^2}{\omega} + S_{\varepsilon}$$
(28)

式中: G_κ 为平均速度梯度引起的湍动能 κ 的产生项; G_ь

为浮力引起的湍动能的产生项; Y_M 为可压缩湍流中脉动 扩张贡献; μ_i 为湍流黏度, $u_i \setminus u_j$ 为时均速度, κ 为湍流动 能, ε 为湍流耗散率; ρ 为流体密度; $\sigma_\kappa \cdot \sigma_s$ 分别为 κ 方程 和 ε 方程的湍流 Prandtl 数; S_κ 和 S_s 为用户自定义的原 项,标准 $k - \varepsilon$ 模型中的常数 $C_{1s} \cdot C_{2s} \cdot C_{3s} \cdot \sigma_\kappa$ 和 σ_s 取值分 别是 1.44、1.92、0.90、1.0和 1.3。

3.2 CCIS 内流体运动状态下的响应特性仿真分析

基于上述网格模型,对于多相流模拟时,温度参数设 置为20℃,压力设定为0.1 MPa,流体不可压缩,假设没 有热量质量转移,且各相之间不存在相互滑动;油气混合 密度为879.6253 kg/m³,粘度为0.0392712 Pa·s;水密 度设置为998.2 kg/m³,动力粘度为0.001005 Pa·s。经过 一系列求解步骤后,得到了不同多相流工况条件下介质 分布图,如图10 所示。



图 10 不同多相流工况下 CCIS 测量管内介质分布 Fig. 10 Distribution of the electric field intensity medium distribution in CCIS measurement pipeline under different multi-phase flow conditions

如图 10 所示,当混合流体总流量一定时,随着持水 率的增加,油气相变小分散在水中,油气相的运动轨迹、 浓度分布呈现随机特性;当持水率一定时,随着流量的增 加,流体介质受冲击振荡作用加强,油气相变小、密集、均 匀分散在水中。利用图 10 所示的多相流介质分布特性 建立 CCIS 动态测量有限元模型,如图 11 所示。图中深 色区域代表油气相,其他区域代表水相。电学参数性质 参考前文。

基于图 11 所述的多相流工况下 CCIS 有限元测量 模型, 仿真获取总流量 5~70 m³/d、含水率 50%~90% 范围内流体运动状态下 CCIS 响应特性, 如图 12 所示。 由图 12 可知, 随着多相流流体持水率的增加, CCIS 响 应电压值随着标准持水率的增加而减小。同一标准持 水率不同流量工况条件下 CCIS 响应电压值基本保持 不变, 基本不受多相流流量的影响。持水率测量误差 保持在 5% 以内。因此 CCIS 可在流体运动状态下完成 多相流持水率测量。



图 11 不同多相流工况下 CCIS 有限元测量模型 Fig. 11 Finite element measurement model of CCIS under different multi-phase flow conditions



图 12 不同多相流工况下 CCIS 的动态响应结果 Fig. 12 Dynamic response results of CCIS under different multi-phase flow conditions

3.3 CCIS 内流体静止状态下的响应特性仿真分析

本文基于在总流量 5~70 m³/d、含水率 50%~90% 范 围内 CCIS 管道内多相流流体运动状态进一步获取受重 力沉降及运动突停影响下流体静止分层结果,如图 13 所 示。其中模型详细参数与 CCIS 内流动状态模型参数保 持不变,仅将入口速度更改为 0 m/s。



图 13 不同多相流工况下 CCIS 测量管道内水相沉降结果 Fig. 13 Results of water phase settling in the pipe measured by CCIS under different multiphase flow conditions

如图 13 所示,不同多相流工况下所对应 PDSWHMD _SM 静止状态下水相分布结果中,CCIS 测量管道上部为 油气相,下部为水相,上下部分相应的面积可表征其含量 的多少。当多相流流量一定时,随着水相比例的增加,相 界面下方区域所占的比重越来越大;当持水率含量一定 时,随着多相流流量的增加,上方区域所占的比重更倾向 于设定值。利用图 13 所示的水相介质分布特性建立 CCIS 静态测量有限元模型如图 14 所示。图中相界面上 方区域代表油气相,相界面下方区域代表水相。电学参 数性质参考前文。





基于图 14 所述的多相流工况下 CCIS 有限元测量模型,仿真获取在总流量 5~70 m³/d、含水率 50%~90% 范围内多相流流体静止分层状态下的 CCIS 响应特性,如图 15 所示。





由图 15 可知,随着流体中含水率的增加,CCIS 响应 频率与标准含水率呈现正比例关系,同一含水率不同流 量工况下 CCIS 频率响应值基本保持不变,基本不受油水 两相流总流量的影响。CCIS 频率响应曲线无交叉、重 叠,可以真实的反映流道内流体含水率的变化。

3.4 CCIS 内综合持水率响应特性分析

基于上述分析结果,进一步获取 CCIS 综合持水率测量结果如图 16 所示。



图 16 不同多相流工况下综合持水率响应结果

Fig. 16 Integrated water holdup response results under different multiphase flow conditions

由图 16 可知,随着流体中含水率的增加,CCIS 综合 持水率与标准含水率呈现正比例关系,同一含水率不同 流量工况下 CCIS 测量值基本保持不变,基本不受油水两 相流总流量的影响。综上所述,CCIS 可进行多相流持水 率测量。

4 实验结果与讨论

4.1 实验环境

为了验证 PDSWHMD_SM 的实际测量性能,对其在 大庆石油测井试井检测实验中心进行了不同流量 Q_m 和 持水率 y_w 等多相流工况下的测量实验,多相流实验平台 示意图如图 17 所示。多相流实验平台主要包括储水罐、 储油罐、混合罐、两个蠕动泵、输送管道和永置式石油生 产地面井口多相流持水率动静态测量装置等。实验中, 实验流体采用工业柴油和自来水,自来水储藏在储水罐 中,工业柴油储藏在储油罐中。随着油水混合流体共同 流入永置式石油生产地面井口多相流持水率动静态测量 装置中,CCIS 输出随时间连续变化的波动信号。最后混 合流体经由永置式石油生产地面井口多相流持水率动静 态测量装置流入混合罐中,经重力沉降进行油水相分离, 再使其循环使用。

永置式石油生产地面井口多相流持水率动静态测量 装置外接5 V/24 直流电源,包括 RMCM 激励及信号处理 电路和 CMM 激励与信号处理电路,通过多通道信号采集 系统连接到 PC 机中。其中,RMCM 激励及信号处理电 路主要包括直流恒流电流源、放大滤波调制电路、 RMS-DC 转换器、V/F 转换器、24 V 直流电源等。CMM



图 17 多相流实验平台示意图 Fig. 17 Diagram of multi-phase flow experimental platform

激励与信号处理电路主要由激励振荡电路、放大电路、稳 压电源等组成。供电和采集电路共用一根电缆,多通道 信号采集系统同步采集 CCIS 信号,并将 CCIS 信号传输 给 PC 机。多通道采集系统的采样频率为 32 kHz。

4.2 实验结果分析

1) PDSWHMD_SM 动态测量实验结果

本文采用永置式石油生产地面井口多相流持水率动 静态测量装置进行多相流持水率动态实验,以持水率 50%~95%,每次增大10%为实验点,进行多次重复实验。 则 PDSWHMD SM 持水率动态测量结果如图18所示。



图 18 不同油水工况下的 PDSWHMD_SM 动态测量结果 Fig. 18 Dynamic measurement results of PDSWHMD_SM under different oil-water flow

由图 18 可知,PDSWHMD_SM 持水率动态测量结果随着标准持水率的增大而增大,随着流量的增大呈现先减小后平稳的响应趋势;PDSWHMD_SM 响应频率随着标准持水率的增大而减小,随着流量的增大呈现先增大

后平稳的响应趋势。当液流量<30 m³/d 时,随着流量的 增加,输出频率逐渐增大,持水率测量结果逐渐减小,并 趋于平缓;当液流量>30 m³/d 时,输出频率和持水率测 量结果几乎不受流量的影响。此外,通过分析可知, PDSWHMD_SM 持水率的动态测量精度优于 5%,表明研 制的 PDSWHMD_SM 具有良好的动态测量结果。

2) PDSWHMD_SM 静态测量实验结果

PDSWHMD_SM 持水率的静态测量结果如图 19 所示。



图 19 不同油水工况下的 PDSWHMD_SM 静态测量结果 Fig. 19 Static measurement results of PDSWHMD_SM under different oil-water flow

由图 19 可知, PDSWHMD_SM 持水率静态测量结 果、响应频率随着标准持水率的增大而增大,随着流量增 大呈现先减小后平稳的响应趋势。当液流量<20 m³/d 时,随着流量的增加,响应频率、持水率测量结果逐渐减 小,并趋于平缓;当液流量>20 m³/d 时,响应频率、持水 率测量结果基本不受流量的影响。此外,通过分析可知, PDSWHMD_SM 持水率的静态测量精度优于 5%;表明研制的 PDSWHMD_SM 具有良好的静态测量结果。

3) PDSWHMD_SM 融合测量结果

基于上述分析结果,将静态电容与动态电导两项测量结果相结合进行融合处理而求得 PDSWHMD_SM 综合持水率测量结果如图 20 所示。



图 20 不同油水工况下的 PDSWHMD_SM 综合持水率测量结果

Fig. 20 Measurement results of PDSWHMD_SM integrated water holdup under different oil-water flow

由图 20 可知, PDSWHMD_SM 综合持水率测量结果随着标准持水率的增大而增大,随着流量增大呈现先减小后平稳的响应趋势。当液流量<20 m³/d 时,随着流量的增加,综合持水率逐渐减小,并趋于平缓;当液流量>20 m³/d 时,综合持水率几乎不受流量的影响。此外,通过分析可知,当流量小于 10 m³/d 时,综合持水率测量精度优于 5%;当流量大于等于 10 m³/d 时,综合持水率测量精度优于 3%。因此,本文研制的永置式石油生产地面井口多相流持水率动静态测量装置采用动态-静态双模式成功完成持水率测量,持水率测量精度高,能满足油井井口多种测试环境的工作要求。

5 结 论

本文采用有限元方法建立了 CCIS 数值模型,优化了 CCIS 结构参数,分析了 CCIS 电场分布特性,探究了 CCIS 管道内流体处于流动及静止状态下分相介质的分布特性 并模拟了不同多相流工况下 CCIS 的响应特性。在此基 础上研制了一种永置式石油生产地面井口多相流持水率 动静态测量装置(PDSWHMD_SM)。并对此装置在大庆 油田石油测井试井检测实验中心模拟井测试平台上搭建 了实验测量系统和开展了实验研究,结果证明:在油水总 流量 5~70 m³/d,持水率 50%~95%等工况下,持水率测 量误差在 5% 以内。充分证明了研制的 PDSWHMD_SM 具有良好的持水率测量性能。该装置具备承担在采油现场长期连续开展实时三相流监测的重要特性。

参考文献

- [1] KONG W H, LI H, LI L, et al. Water cut measurement of horizontal oil-water flow using trielectrode capacitance sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13686-13695.
- [2] JIA H, BAI Y, DANG R, et al. Experimental study on the choice of transducer resonance frequency in downhole flow measurement [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1894(1): 012057-012064.
- [3] KONG W H, LI H, XING G L, et al. A novel combined conductance sensor for water cut measurement of lowvelocity oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 182734-182757.
- [4] 勾丹. 油井井口三相计量技术的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2008.
 GOU D. Research of three-phase measuring technology at the mouth of oil well [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology of China, 2008.
- [5] FAZAELIZADEH M, MIRHAJ S A, BAHARI-MOGHADAM M, et al. Experimental study to find optimum pressure for separation of wellhead fluids [C]. Spe Production & Operations Conference & Exhibition, 2010: 422-430.
- [6] SHA B, SKA B, MP B, et al. Influence of wellhead pressure and water cut in the optimization of oil production from gas lifted wells[J]. Petroleum Research, 2022, 7(2): 253-262.
- [7] 申洪源,马亮,张雅楠,等. 基于多传感器和 SVR 算法的油田多相流实时计量技术研究[J]. 仪器仪表用户,2019,26(10):15-19.
 SHEN H Y, MA L, ZHANG Y N, et al. Eal-time multiphase flow measurement for oilfield based on multi-sensor and SVR algorithm[J]. Instrumentation, 2019, 26(10): 15-19.
- [8] YANG R F, JIANG R Z, GUO S, et al. Analytical study on the critical water cut for water plugging: Water cut increasing control and production enhancement [J]. Energy, 2021, 214(1): 119012.
- [9] MAJ, JIN ND, WANG DY, et al. Measurement of water holdup in vertical upward high water-cut oil-in-

water flows using a high frequency sensor [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2019, 289: 165-179.

- [10] JIN N D, LIU D Y, BAI L D, et al. Measurement of water holdup in oil-in-water emulsions in wellbores using microwave resonance sensor [J]. Applied Geophysics, 2021, 18(2): 185-197.
- [11] LI L, LI H, KONG W H, et al. Numerical simulation and experimental investigation of metering device applied to high water cut oil-water two-phase flow [J]. IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association, 2018, 30(1): 543-551.
- [12] 孙金辉, 谢丽蓉. 原油含水率测量传感器性能优化实 验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 97-104.

SUN J H, XIE L R. Performance optimization and experimental research of crude oil water content measurement sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (8): 97-104

[13] 王轩轩. 井口含水率测量研究 [D]. 西安: 西安石油 大学.2014.

> WANG X X. Measurement and research of moisture content of Crude oil wellhead [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2014.

[14] 于洋,田殿龙,李珍,等.井口原油含水率在线直测 装置研发及应用[J]. 石油化工自动化, 2018, 54(2): 51-53.

> YU Y, TIAN D L, LI ZH, et al. Development and application of on-line measurement device for water content of crude oil at wellhead [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2018, 54(2): 51-53.

于洋,魏小林,罗聪英,等.一种基于射频法的井口 [15] 原油含水率在线直测装置: CN105486701A [P]. 2015-12-22.

> YU Y, WEI X L, LUO C Y, et al. An online direct measurement device of crude oil water content at the wellhead based on RF method: CN105486701A [P]. 2015-12-22.

于洋,魏小林,罗聪英,等.一种基于射频法的井口 [16] 原油含水率在线直测装置: CN205449831U [P]. 2015-12-22.

YU Y, WEI X L, LUO C Y, et al. An online direct

measurement device of crude oil water content at the wellhead based on RF method: CN205449831U [P]. 2015-12-22.

- 张峰,杨文阳.微电极材料极化特性研究[J].电子 [17] 测量与仪器学报, 2021, 35(3): 187-196. ZHANG F, YANG W Y. Study on polarization characteristics of micro-electrode materials [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3): 187-196.
- [18] WANG D Y, JIN N D, ZHUANG L X, et al. Development of a rotating electric field conductance sensor for measurement of water holdup in vertical oilgas-water flows [J]. Measurement Science & Technology, 2018, 29(7): 075301.
- 高鹤明,周弘林,宋晓文,等.金属颗粒的电容式速 [19] 度测量方法研究[J] 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 60-67.

GAO H M, ZHOU H L, SONG X W, et al. Research on the capacitive velocity measurement method of metal particles [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 60-67.

- [20] DAIRS, JINND, HAOQY, et al. Measurement of water holdup in vertical upward oil-water two-phase flow pipes using a helical capacitance sensor [J]. Sensors, 2022, 22(2): 690.
- [21] WANG DY, JIN ND, ZHAILS, et al. Measurement of gas holdup in oil-gas-water flows using combined conductance sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(10): 12171-12178.
- 张玉燕, 殷东哲, 温银堂, 等. 基于自适应 Kalman 滤 [22] 波的平面阵列电容成像[J]. 物理学报, 2021, 70(11): 118102. ZHANG Y Y, YIN D ZH, WEN Y T, et al. Planar array capacitance imaging based on adaptive Kalman filter [J]. Acta Phys. Sin, 2021, 70(11): 118102.
- [23] DU M, JIN N D, GAO Z K, et al. Flow pattern and water holdup measurements of vertical upward oil-water two-phase flow in small diameter pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 41: 91-105.
- 徐文峰,李文涛,刘兴斌,等.一种测量低产液水平 [24] 井含水率的筒状电容传感器[J].测井技术, 2008(5): 403-405.

XU W F, LI W T, LIU X B, et al. A new cylindrical capacitance sensor for water-cut measurement in the low-production horizontal well[J]. Well Logging Technology, 2008(5): 403-405.

- [25] LIU X B, HU J H, XU W F, et al. A new cylindrical capacitance sensor for measurement of water cut in a lowproduction horizontal well [J]. Journal of Physics Conference, 2009, 147: 012002.
- [26] 刘远社. 基于 555 时基电路的电容式传感器测量电路[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2015, 41(3): 338-340.

LIU Y SH. Capacitive sensor measuring circuit based on the 555 timer [J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2015, 41(3): 338-340.

作者简介



郝虎,2016年于邢台学院获得学士学 位,2019年于燕山大学获得硕士学位,现为 燕山大学在读博士研究生,主要研究方向为 智能控制与智能信息处理技术。

E-mail: haohu@ stumail. ysu. edu. cn

Hao Hu received his B. Sc. degree from Xingtai University in 2016, and received his M. Sc. degree from Yanshan University in 2019. He is currently a Ph. D. candidate at Yanshan University. His main research interest includes Intelligent control and intelligent information processing technology.



孔德明(通信作者),2007年于燕山大 学获得学士学位,2010年于燕山大学获得硕 士学位,2015年于北京航空航天大学获得博 士学位,现为燕山大学电气工程学院副教 授,主要从事智能信息处理技术方面的

研究。

E-mail: demingkong@ ysu. edu. cn

Kong Deming (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yanshan University in 2007, received his M. Sc. degree from Yanshan University in 2010, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2015. He is currently an associate professor in the School of Electrical Engineering of Yanshan University. He mainly engages in the research of intelligent information processing technology.