

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108536

石油生产光纤-电导组合探针阵列多分相测井仪研究^{*}

陈基亮^{1,2},孔德明³,郝 虎^{1,2},刘国权⁴,仲美玉^{1,2}

(1.燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004; 2.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; 3.燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004; 4.中国石油集团测井有限公司生产测井中心 西安 710077)

摘 要:为解决石油生产多分相测量问题,基于课题组研制的创新型光纤-电导组合探针设计研制一种用于石油生产多参数测量的高精度、高灵敏度探测仪器。采用 ZEMAX 光线追迹方法和 FEM 数值分析方法对光纤-电导组合探针阵列多分相测井仪电场分布、响应特性进行了理论分析,且验证了其在流量为 5、10、20、30 m³/d,持气率为 10%、20%、30%、40%,持水率为 90%、80%、70%、60%等工况下良好的测量效果。为进一步证明其优良性能,以液相流量 30 m³/d,液相持水率 25%、45%、65%及 85%,气流量 6、12、24 m³/d 等多相流工况为例进行动态实验分析,其持气率测量误差在 5% 以内,持水率误差在 10% 以内。实际动态实验与仿真模拟结果保持相同。充分表明光纤-电导组合探针阵列多分相测井仪的良好性能。

关键词: 多分相测井仪;多分相监测;持水率;持气率;仿真研究

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 a fiber-conductance combined probe array multi-phase logging tool in petroleum productions

Chen Jiliang^{1,2},Kong Deming³,Hao Hu^{1,2},Liu Guoquan⁴,Zhong Meiyu^{1,2}

(1. Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Hebei Key Laboratory of Computer Virtual Technology and System Integration, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 4. Production Logging Center, China Petroleum logging Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract:To solve the problem of multi-phase measurement in oil production, a high-precision and high-sensitivity detection instrument for multi-parameter measurement of petroleum production is designed and developed, which is based on the innovative fiber-conductance combined probe developed by the research group. The ZEMAX ray tracing method and the FEM numerical analysis method are both used to theoretically analyze the electric field distribution and response characteristics of the fiber-conductance combined probe array multi-phase logging tool. It has been verified that a good measurement effect can be realized under working conditions such as flow rate of 5, 10, 20, 30 m³/d, gas holdup of 10%, 20%, 30%, 40%, and water holdup of 90%, 80%, 70%, 60%, etc. To further prove its excellent performance, the multiphase flow conditions are considered, such as liquid flow rate 30 m³/d, the liquid phase water holdup 25%, 45%, 65% and 85%, and the gas flow rate 6, 12, 24 m³/d, etc. The dynamic experimental analysis is carried out. The measurement error of FCCPA_MLT gas holdup is within 5%, and the water holdup error is within 10%. The actual dynamic experiment and the simulation results remain the same. Results show that the developed fiber-conductance combined probe array multi-phase logging tool has good performance.

Keywords: multi-phase logging tool; multi-phase monitoring; water holdup; gas holdup; simulation analysis

收稿日期:2021-09-07 Received Date: 2021-09-07

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(62173289)、河北省自然科学基金青年科学基金(F2019203526)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2020118)、秦皇岛市重点研发计划科技支撑项目(202005A004)资助

0 引 言

产出剖面测井是生产测井的一种重要测井方式^[1],我国一些主力油田多数为陆相沉积、多层系开发的低产液机采油田,由于长期注水、注气开发及井下压力变化的原因,油井井下流体大都由原来的油水两相流转化为油气水三相流^[2-3]。而产出剖面测井中分相含率是表征油井动态变化和评价油层生产状况的重要参数,对指导油井注入产出、提高采油率及预测油井开发寿命等具有重要意义^[4-5]。

侵入式探测技术^[6]具有易于安装、体积小、可直接定位于流体内、能准确反映流体局部特征等优良特性,已引起石油生产领域越来越多学者和研究人员的关注。当前,侵入式探测技术主要有电导探针技术^[7-8]、光纤探针技术^[9]、电容探针技术^[10]等,其中电导和光纤两项探针技术因其测量速度快、响应灵敏度高、制造简单受到广泛青睐。Xie 等^[11]基于电导探针阵列技术设计了一种自动累积流量计并成功测量了低产液水平井油水两相流水相流量参数。Zhou 等^[12]研制了一种用于近水平井油水两相流持水率测量的平行导线电导率探头传感器并成功获取了该类型井相应的参数。Jin 等^[13]利用分布式光纤探针阵列传感器成功对气液段塞流和搅拌流中气相分布进行了实验研究。为了保证测试仪器的测量精度,当前国内外均以集流测井方法为产出剖面主要测井技术,其中集流测井技术主要包括机械封隔器技术^[14]、伞式集流器

技术^[15]和皮球式集流器技术^[16]等,而伞式集流器技术因其高可靠性、良好的耐用性、制造简单等特点目前在测井领域被广泛应用。

本文结合电导探针、光纤探针和伞式集流器三项技术,在研制的创新型光纤-电导组合探针^[17]基础上研究一种用于石油生产多相流多参数测量的光纤-电导组合探针阵列多分相测井仪(fiber-conductance combined probe array multi-phase logging tool, FCCPA_MLT)。其典型特点就是由创新型光纤-电导组合探针形成的“人”字形四探针阵列实体构成。“人”字形四光纤-电导探针组合体既可测得多相流参数又能使仪器内流体流动性得到改善,提高了仪器的测量性能。同时本文对 FCCPA_MLT 数值模型、测量机理、结构参数及不同多相流工况下响应特性等问题开展了深入研究。

1 FCCPA_MLT 结构模型及测量原理

1.1 FCCPA_MLT 结构模型

如图 1 所示,石油生产井下光纤-电导组合探针阵列多分相测井仪结构由上至下主要由信号处理电路仓、进出液口、光纤-电导组合探针阵列传感器(fiber-conductance combined probe array sensor, FCCPAS)、集流伞与驱动电机等组成。其中光纤-电导组合探针阵列多分相测井仪管道内径为 $R=20\text{ mm}$,机械接口通过 O 型圈密封,螺纹连接。

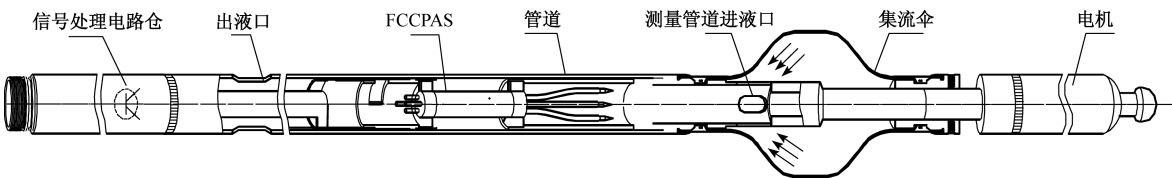
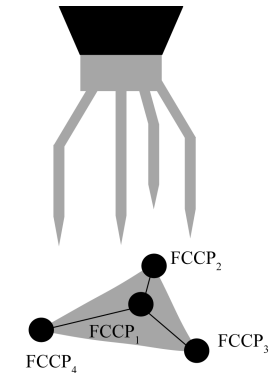


图 1 FCCPA_MLT 结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of FCCPA_MLT

光纤-电导组合探针(fiber-conductance combined probe, FCCP)最大截面半径为 1 mm。由于受 FCCPA_MLT 尺寸的限制,探针个数应不超过 4 个为宜^[18]。而“人”字形四探针阵列结构不仅具有较大的探针分散度、较强的分散相捕获能力,而且还有效改善了管道内流体流动性^[19]。因此本文设计研究的 FCCPAS 采用“人”字形四探针阵列结构^[20-21]。其结构、径向位置及中心角度分布、管道内分布截面示意图分别如图 2(a)~(c)所示。

由图 2 可知,FCCPAS 由 4 个呈“人”字形分布的 FCCP 组成,4 个 FCCP 依次放置在 FCCPA_MLT 管道的中心、 $1/4R$ 、 $2R/3$ 、 $3/4R$ 处,且外围的 FCCP₂、FCCP₃、FCCP₄ 与中心 FCCP₁ 连线后相互之间呈 120°角。



(a) FCCPAS 结构示意图
(a) Structure diagram of FCCPAS

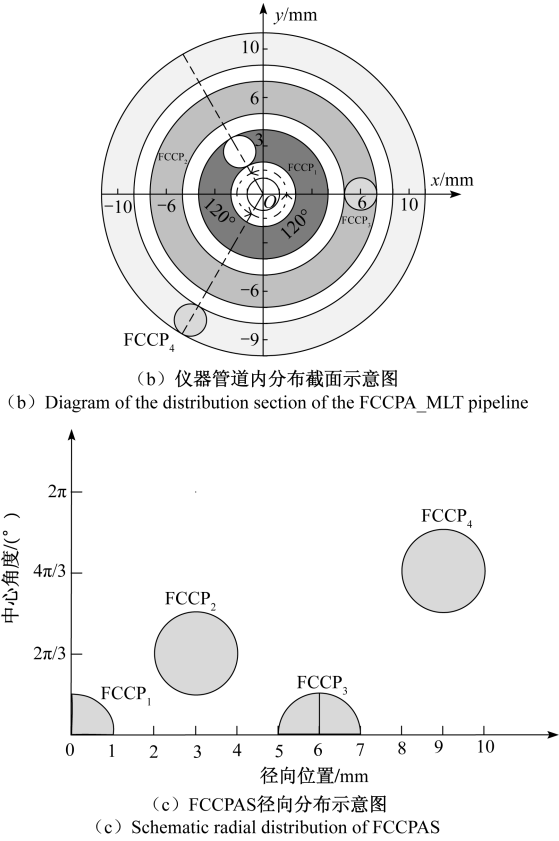


图2 光纤-电导组合探针阵列传感器结构示意图

Fig.2 Diagram of the fiber-optic conductance combined probe array sensor

1.2 FCCPA_MLT 测量原理

实际应用中,FCCPA_MLT 被垂直放置在测量管道内。如图3所示,当油气水多相流从进液口流入 FCCPA_MLT 时,光纤-电导组合探针中起持气率测量作用的光学测量模块(optical measurement module of fiber-conductance combined probe, FCCP_OMM)输出随时间连续变化的波动脉冲信号。具体为若 FCCP_OMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 侵入气相介质时,FCCP_OMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 输出高电平信号;若 FCCP_OMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 侵入非气相介质时,FCCP_OMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 输出低电平信号。光纤-电导组合探针中起持水率测量作用的电导测量模块(electrical measurement module of fiber-conductance combined probe, FCCP_EMM)输出随时间变化的电导率测量信号。具体为该 FCCP_EMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 输出的电压信号与其周围流体电导率成反比。

若光纤敏感头相对于被检测介质的尺寸可看成一点,则当油气水三相流流经 FCCPA_MLT 时,FCCP_OMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 的输出电压可表示为:

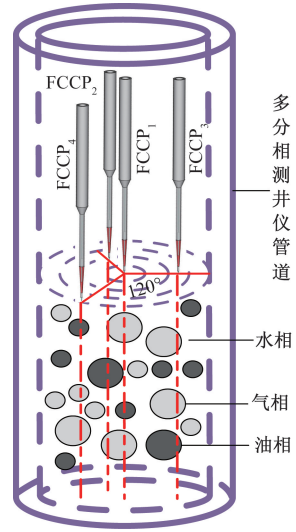


图3 FCCPA_MLT 测量示意图

Fig.3 Diagram of FCCPA_MLT measurement principle

$$V_f(t) = \begin{cases} C \cdot \iint L[x, y, z(x, y)] P(n_g) ds, & \text{测量点处气相} \\ C \cdot \iint L[x, y, z(x, y)] P(n_l) ds, & \text{测量点处液相} \end{cases} \quad (1)$$

式中: C 表示光电转换系数, $P(n_g)$ 与 $P(n_l)$ 分别表示 FCCP_OMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 于 $L(x, y, z(x, y))$ 点处接触气相和液相的返回光照强度。则点 $L(x, y, z(x, y))$ 处的局部持气率为:

$$y_g^i = \frac{\sum t_{fg}^i}{\sum (t_{fg}^i + t_{fl}^i)}, \quad 1 \leq i \leq 4, i \in N^* \quad (2)$$

式中: y_g^i 表示 FCCP_OMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 测量得到的局部持气率; t_{fg}^i 表示 FCCP_OMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 侵入气相介质的持续时间, t_{fl}^i 表示 FCCP_OMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 侵入液相的持续时间。

当多相流流经 FCCPA_MLT 时,FCCP_EMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 输出电压可表示为:

$$V_m = k_\sigma \times \sigma_m^{-1} \times I_e = k_\sigma \times [(3 - \beta)/2\beta\sigma_w] \times I_e \quad (3)$$

其中, k_σ 为校正系数, I_e 为激励电流,激励电极测量区域流体的电导率为 σ_m ,连续水相的电导率为 σ_w , β 为 FCCP_EMM_i (1 ≤ i ≤ 4, i ∈ N*) 处连续水相的体积分。 σ_m 与 σ_w 之比由 Maxwell 公式给出^[22]:

$$\frac{V_w}{V_m} = \frac{\sigma_m}{\sigma_w} = \frac{2\beta}{3 - \beta} \quad (4)$$

FCCPA_MLT 输出电压信号与 FCCPA_MLT 持水/气率可表示为式(5)所示。

$$\begin{cases} \hat{V}_g = \sum_{i=1}^N \alpha_g^i V_g^i, \\ \hat{V}_w = \sum_{i=1}^N \alpha_w^i V_w^i, \\ \hat{y}_g = \sum_{i=1}^N \alpha_g^i y_g^i, \\ \hat{y}_w = \sum_{i=1}^N \alpha_w^i y_w^i, \end{cases} \quad N = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

式中： α_w^i, α_g^i 表示 FCCP_i ($1 \leq i \leq 4, i \in N^*$) 处水相和气相的概率分布； V_w^i, V_g^i 表示 FCCP_i ($1 \leq i \leq 4, i \in N^*$) 光纤测量模块与电导测量模块的输出电压； $\hat{V}_w, \hat{V}_g$ 表示 FCCPA_MLT 输出电压； y_w^i, y_g^i 表示 FCCP_i ($1 \leq i \leq 4, i \in N^*$) 测量得到的局部持水率和持气率； $\hat{y}_w, \hat{y}_g$ 表示 FCCPA_MLT 测量的持水率及持气率。

2 FCCPA_MLT 数值模拟

2.1 FCCPA_MLT 仿真模型构建

本文利用 ZEMAX 光线追迹方法和 FEM 数值分析方法建立 FCCPA_MLT 有限元模型,如图 4 所示。FCCPAS 位于直径为 20 mm,高度为 300 mm 的 FCCPA_MLT 管道内。其中 FCCP₁、FCCP₂、FCCP₃、FCCP₄ 径向位置坐标分别为(0,0)、(-1.5,2.56)、(6,0)、(-4.2,-7.4)。由于 FCCP_i ($1 \leq i \leq 4, i \in N^*$) 内径及测量区域远小于电场波长,因此 FCCP_i ($1 \leq i \leq 4, i \in N^*$) 电场可看作时不变的,为此在数值模拟中,采用直流电流源作为激励信号来研究 FCCPAS 的电场分布特性^[23]。在 FCCP_i ($1 \leq i \leq 4, i \in N^*$) 中向激励电极 E 输入 0.1 mA 的激励电流,激励地电极 H 流出 0.1 mA 的电流,且激励地电极 H 的电压设为 0 V。同时将与光源相连的每根光纤的一端均放置一个功率相等的点光源,且所有点光源的功率之和为 3.75 mW。同样在与探测器相连的每根光纤的一端均放置一个圆形探测器,其尺寸与其对应的光纤横截面大小相同,属性设置为 ABSORB。FCCP_i ($1 \leq i \leq 4, i \in N^*$) 仿真模型的详细参数参见文献[17],为简单起见,本文对此过程不再详细描述。

近年来许多主力油田纷纷步入高含水阶段,因此石油生产多相流流体是以导电水相为连续相,以非导电油、气相为分散相的水基流动工况。为了获取 FCCPA_MLT

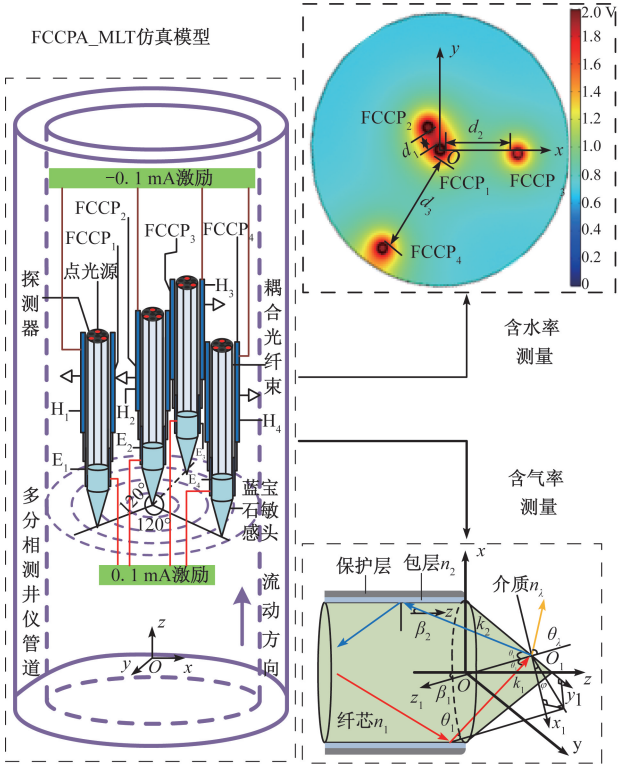


图4 FCCPA_MLT 仿真模型
Fig. 4 FCCPA_MLT simulation model

不同多相流工况下电导响应特性,构建以导电水相为连续相和以非导电油、气相为分散相的 FCCPA_MLT 多相流有限元仿真模型^[24],如图 5 所示。模型中非导电油、气相沿轴向分布在 FCCPA_MLT 测量区间内,FCCPA_MLT 测量区间内的其余位置分布为水相,且气相的电导率设置为 1×10^{-10} S/m,油相的电导率设置为 5×10^{-10} S/m,水相的电导率为 1×10^{-2} S/m,不同多相流工况下 FCCPA_MLT 测量区间内的导电水相分布规律、非导电油、气相分布规律参考文献[17,25]。其中多相流工况选用总流量为 5、10、20、30 m³/d,持水率分别为 90%、80%、70%、60%,持气率分别为 10%、20%、30% 及 40%。

关于 FCCPA_MLT 电场信息,其电势 u 可用具有一定边界条件的柱坐标系(r, φ, z)下的 Laplace 方程^[26]来描述 FCCPA_MLT 电场分布。

假设电流密度在电极表面是均匀,则激励电极表面的电势如式(6)和(7)所示:

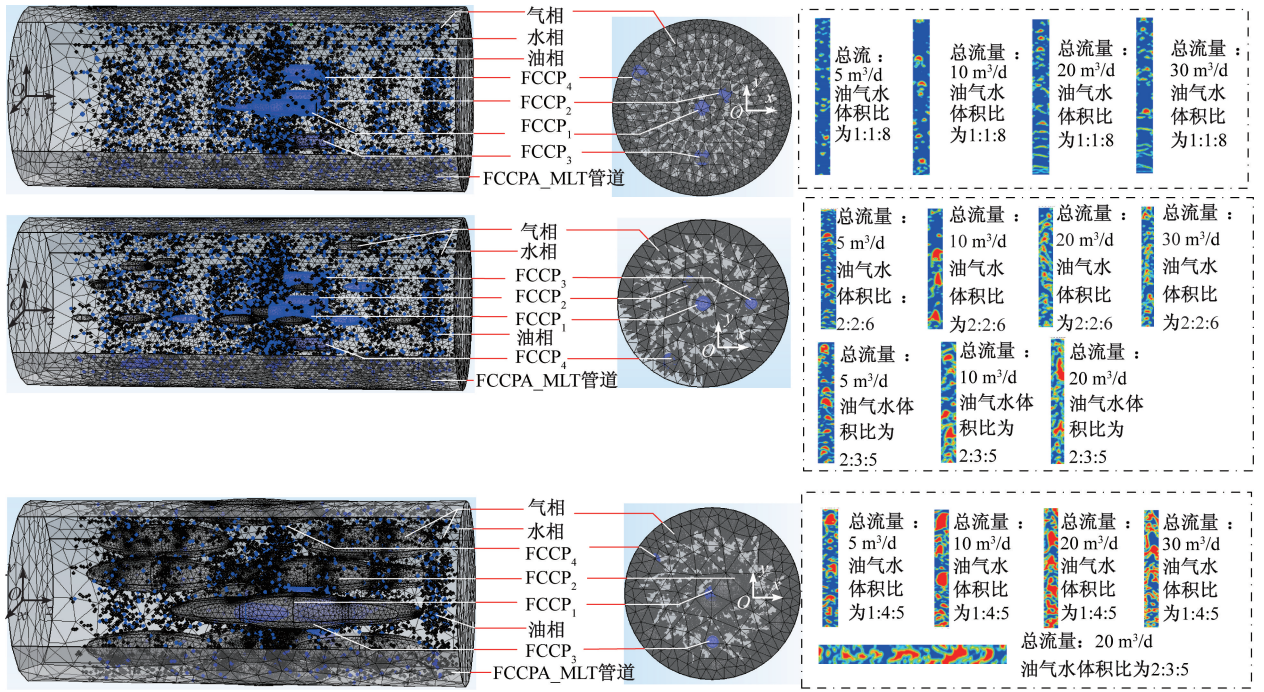


图 5 多相流工况

Fig. 5 Multiphase flow conditions

$$\nabla^2 u(r, \varphi, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} u &= 0 \left(y \in \left[-\frac{D_7}{2}, -\frac{D_6}{2} \right] \cup \left[-\frac{D_7}{2} + 2.598, -\frac{D_6}{2} + 2.598 \right] \cup \left[-\frac{D_7}{2} - 7.4, -\frac{D_6}{2} - 7.4 \right] \cup \left[\frac{D_6}{2}, \frac{D_7}{2} \right] \cup \right. \\ &\quad \left. \left[\frac{D_6}{2} + 2.598, \frac{D_7}{2} + 2.598 \right] \cup \left[\frac{D_6}{2} - 7.4, \frac{D_7}{2} - 7.4 \right], z \in [L_1 + L_2 + L_3 + L_4, L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_7] \right) \\ \frac{\partial u}{\partial r} &= \frac{I_e}{S_R} \left(r = \frac{D_3}{2}, y \in \left[-\frac{D_3}{2}, -\frac{D_2}{2} \right] \cup \left[-\frac{D_3}{2} + 2.598, -\frac{D_2}{2} + 2.598 \right] \cup \left[-\frac{D_3}{2} - 7.4, -\frac{D_2}{2} - 7.4 \right] \cup \right. \\ &\quad \left. \left[\frac{D_2}{2}, \frac{D_3}{2} \right] \cup \left[\frac{D_2}{2} + 2.598, \frac{D_3}{2} + 2.598 \right] \cup \left[\frac{D_2}{2} - 7.4, \frac{D_3}{2} - 7.4 \right], z \in [L_1 + L_2, L_1 + L_2 + L_5] \right) \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中: u 为内部电势分布; I_e 为流入激励电极 E 的直流电流; S_R 为激励电极的表面积。

为了获取不同多相流工况下 FCCPA_MLT 光纤响应特性, 将图 4 多相流模型中气相介质的折射率设为 1, 油相介质的折射率设为 1.44, 水相介质的折射率设为 1.33。由于多模光纤纤芯直径远大于光波长, 故采用几何光学^[27] 来模拟光纤内部光线传输轨迹。图中, $o(x, y, z)$ 为全局坐标系, z 轴与敏感头中心轴线重合, x 轴和 z 轴位于光纤中心轴线所在的剖面上, y 轴垂直于纸面向外。 $o_1(x_1, y_1, z_1)$ 为局部坐标系, 其中 x_1 轴方向与探针敏感头表面相切, z_1 轴方向垂直于敏感头表面, y_1 轴方向垂直于纸面向外。 k_1 和 k_2 表示入射光和反射光, θ_1 表示入射角, φ_1 为方位角。此时 k_1 在局部坐标系 $o_1(k_1, \theta_1, \varphi_1)$ 中可以表示为:

$$k_{1x} = k_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1, k_{1y} = k_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1, k_{1z} = k_1 \cos \theta_1 \quad (8)$$

设敏感头纤芯的折射率为 n_1 , 包层折射率为 n_2 , 敏感头所接触介质折射率为 n_a 。当 k_2 和 z 轴的夹角 β_1 小于 $\theta_{1\max} = \pi/2 - \arcsin(n_2/n_1)$ 时, 光线在纤芯内发生全反射并继续传输。 z 轴方向的单位矢量可表示为 $z = (-\sin \beta_1, 0, -\cos \beta_1)$, 则传输光波矢应满足:

$$-k_{2x} \sin \beta_1 - k_{2z} \cos \beta_1 \geq \frac{2\pi n_2}{\lambda n_1} \quad (9)$$

对多相流而言, 由于 $n_o \approx n_w > n_g$, 因此采用光纤探针进行气相检测时可行的。

2.2 FCCPA_MLT 电场分析

本文采用自由四面体网格对 FCCPA_MLT 有限元模型进行网格划分, 网格总单元数目为 314 063。FCCPA_MLT 电场分布如图 6 所示。FCCP_i ($1 \leq i \leq 4, i \in N^*$) 中激励电极 (E) 与激励地电极 (H) 之间的电势呈高梯度变化且逐渐减少, 而远离激励电极 E 区域的电势变化比

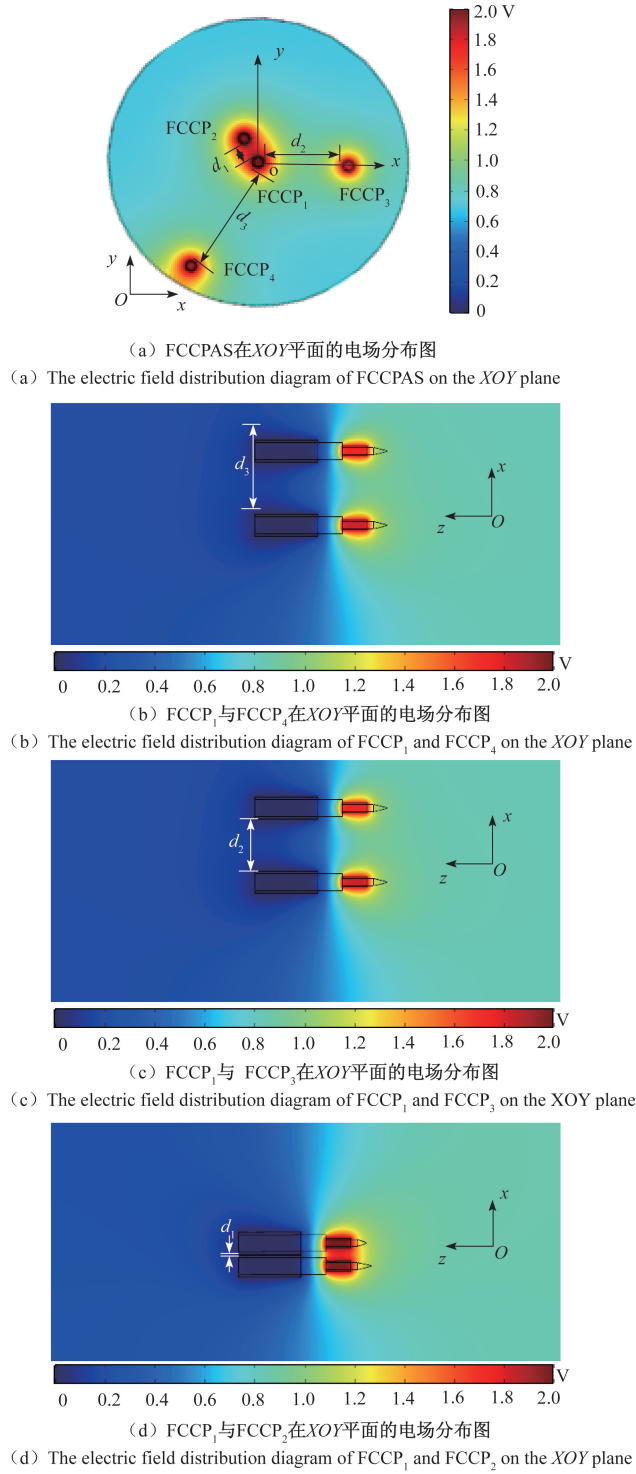


图6 FCCPAS 电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of FCCPAS

较缓慢。图6(a)为FCCPAS在XOY平面的电场分布图,由图可知,FCCP₁~FCCP₄中激励电极(E)处的电势最强,是主要的介质感应区。图6(b)~(d)为FCCP₁与FCCP_i(2≤i≤4,i∈N*)在XOZ平面的电场分布。

其中FCCP₁与FCCP₃、FCCP₄间的电场并无交叉影响,由于FCCP₁与FCCP₂之间间距较近,其电场分布存在明显的交叉影响,因此有必要对图6中距离参数d₁变化与FCCP₁、FCCP₂电场强度分布之间的关系进行深入研究。

图7所示为距离参数d₁分别为0.08182、0.5323、1.1999、1.6731及2.1999mm情况下FCCP₁与FCCP₂在XOZ平面的电场分布特性。由图可知,随着参数d₁的不断增大,FCCP₁与FCCP₂之间电场的交叉影响逐渐减小,且分布逐渐均匀。为了准确获取FCCP₂区域的介质信息同时避免与FCCP₁电场相互影响。对比图7所示的不同距离参数d₁情况下FCCP₁与FCCP₂之间的电场分布特性。当距离参数d₁=1.1999mm时,FCCP₁与FCCP₂之间的电场基本无交叉影响,且FCCP₁与FCCP₂之间间距较小。

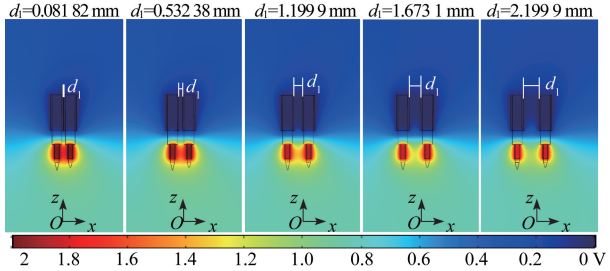


图7 不同距离参数d₁情况下FCCP₁与FCCP₂间的电场强度分布

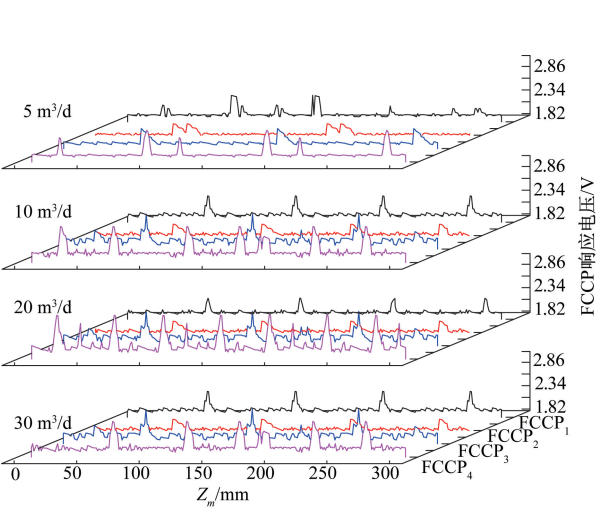
Fig. 7 The electric field intensity distribution between FCCP₁ and FCCP₂ under different distance parameters d₁

综上所述,当FCCP₁位于FCCPA_MLT管道中心,FCCP₁与FCCP₂间距为d₁=1.1999mm,FCCP₁与FCCP₃间距为d₂=4mm,FCCP₁与FCCP₄间距为d₃=7.434mm时,FCCP_i(1≤i≤4,i∈N*)形成的局部电场相互独立,无交叉影响。因此d₁=1.1999mm、d₂=4mm、d₃=7.434mm为“人”字形四探针阵列实体的最优阵列结构,FCCPA_MLT具有优良的响应特性。

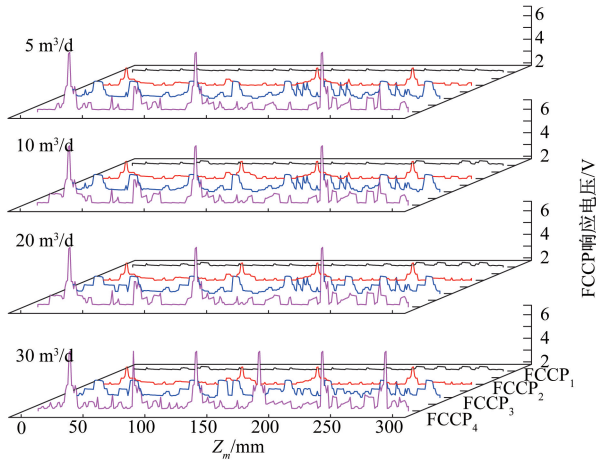
2.3 FCCPA_MLT 电导响应特性分析

利用图5所示多相流模型,仿真获取FCCP_i(1≤i≤4,i∈N*)在总流量5、10、20、30m³/d,持水率为90%、80%、70%、60%等多相流工况下的响应曲线,如图8所示。

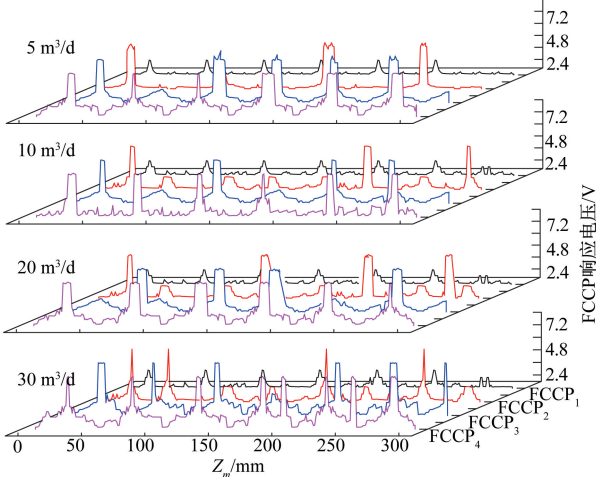
由图8可知,FCCP_i(1≤i≤4,i∈N*)输出信号为连续变化的波动信号。随着测量管道内持水率的降低,FCCP_i(1≤i≤4,i∈N*)输出电压的幅度逐渐升高,FCCP_i(1≤i≤4,i∈N*)的高电平信号逐渐增多,同时FCCP₁、FCCP₂、FCCP₃及FCCP₄之间输出信号的高电平



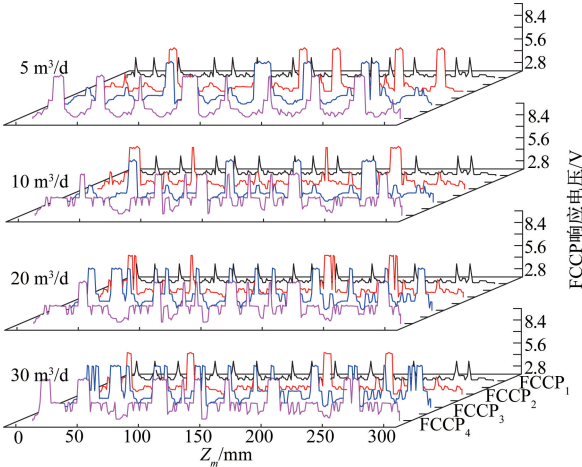
(a) 持水率90%时FCCP输出电压
(a) FCCP_i output voltage at 90% water holdup



(b) 持水率80%时FCCP输出电压
(b) FCCP_i output voltage at 80% water holdup



(c) 持水率70%时FCCP输出电压
(c) FCCP_i output voltage at 70% water holdup

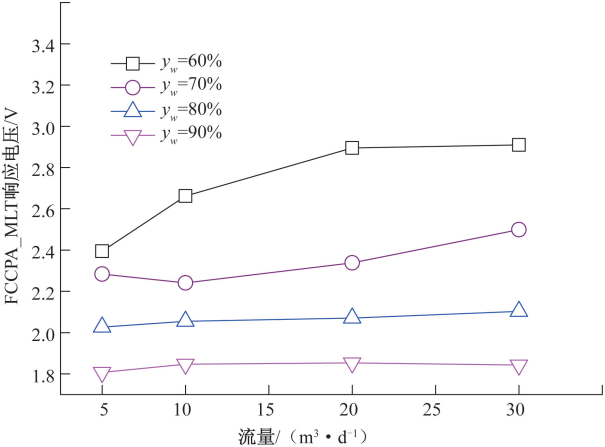


(d) 持水率60%时FCCP₁输出电压
(d) FCCP₁ output voltage at 60% water holdup

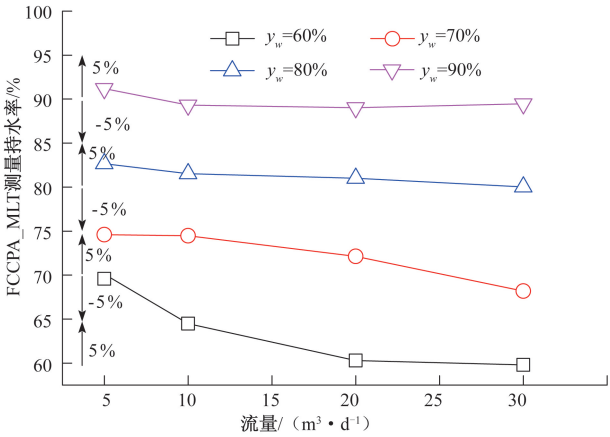
图 8 多相流工况下 FCCP_i 响应特性
Fig. 8 Response characteristics of FCCP_i under multiphase flow conditions

信号数量与宽度逐渐减少。而在同一持水率下,FCCP_i (1≤i≤4,i∈N^{*})输出信号基本不受流量变化的影响。在 FCCP_i (1≤i≤4,i∈N^{*}) 输出信号和局部持水率测量结果基础上,利用式(5)计算 FCCPA_MLT 输出电压及持水率,如图 9 所示。其中 FCCP₁、FCCP₂、FCCP₃、FCCP₄ 敏感区域的水相分布概率分别为 26%、23%、23% 及 22%^[18,26]。

由图 9 可知,FCCPA_MLT 输出电压结果随着标准持水率的增加而单调减小,持水率测量结果随着标准持水率的增加而单调递增,二者受流量影响较小,持水率测量误差绝大部分结果在 5% 以内。综上所述,FCCPA_MLT 可用于多相流持水率测量。



(a) FCCPA_MLT 输出电压结果
(a) FCCPA_MLT output voltage result



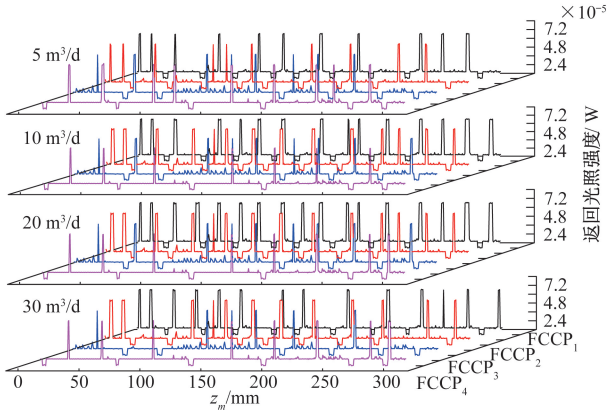
(b) FCCPA_MLT 持水率测量结果
(b) water holdup measurement results of FCCPA_MLT

图9 FCCPA_MLT 测量结果

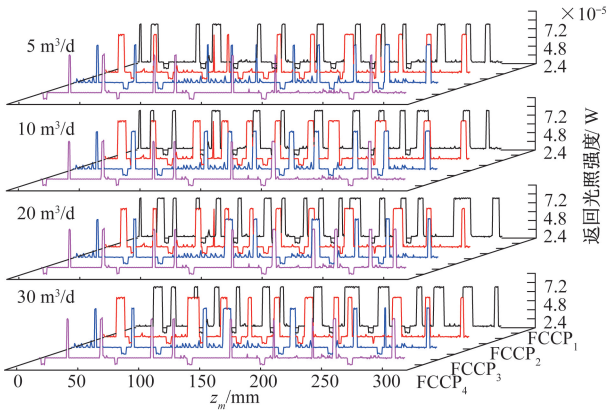
Fig. 9 Measurement results of FCCPA_MLT

2.4 FCCPA_MLT 光纤响应特性分析

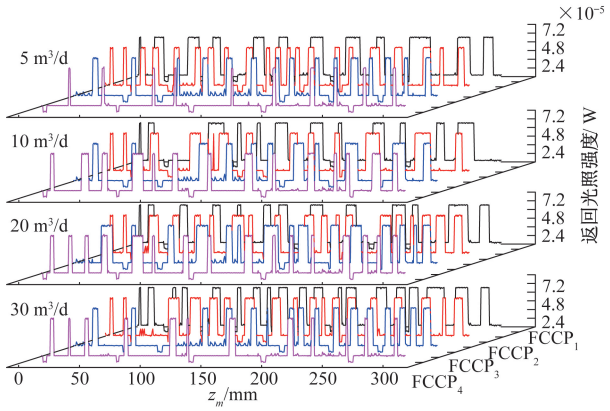
利用图5所示多相流模型,仿真获取FCCPA_MLT在总流量5、10、20、30 m³/d,持气率为10%、20%、30%、40%等多相流工况下的响应曲线,如图10所示。



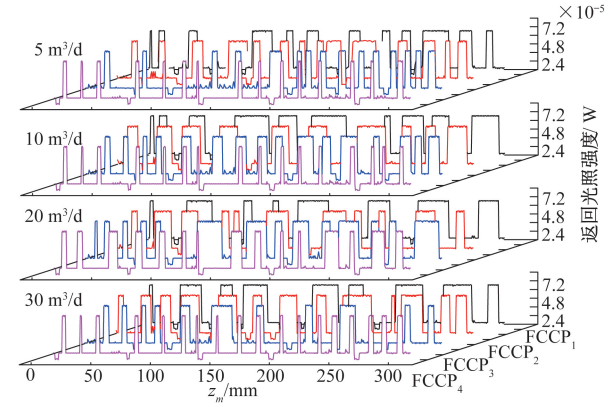
(a) 持气率10%时FCCP_i输出电压
(a) FCCP_i output voltage at 10% gas holdup



(b) 持气率20%时FCCP_i输出电压
(b) FCCP_i output voltage at 20% gas holdup



(c) 持气率30%时FCCP_i输出电压
(c) FCCP_i output voltage at 30% gas holdup



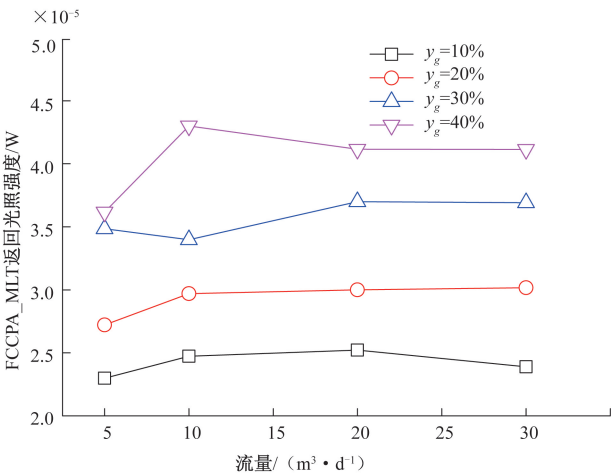
(d) 持气率40%时FCCP_i输出电压
(d) FCCP_i output voltage at 40% gas holdup

图10 多相流工况下FCCP_i响应特性

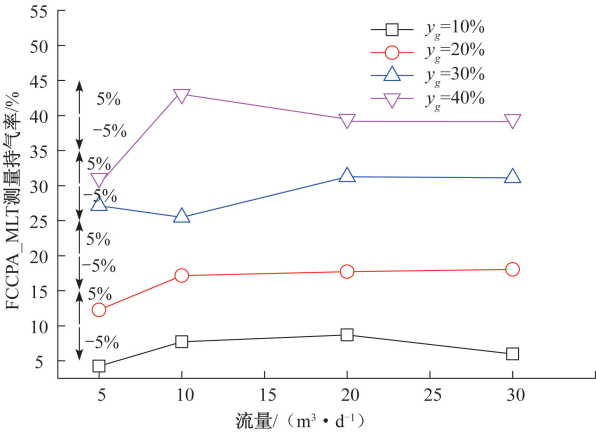
Fig. 10 Response characteristics of FCCP_i under multiphase flow conditions

由图10可知,FCCP_i(1≤i≤4,i∈N*)输出高电平与低电平交替变化的波动信号。随着测量管道内持气率的增大,FCCP_i(1≤i≤4,i∈N*)输出的高电平宽度逐渐增大,高电平与低电平信号的变换频率逐渐减弱;同时FCCP₁、FCCP₂、FCCP₃、FCCP₄之间输出信号的高电平信号数量与宽度逐渐减少。而在同一持气率工况下,FCCP_i(1≤i≤4,i∈N*)输出信号基本不受流量变化的影响。在FCCP_i(1≤i≤4,i∈N*)输出信号和局部持气率测量结果基础上,利用式(5)计算FCCPA_MLT的返回光照强度及持气率,如图11所示。其中FCCP₁、FCCP₂、FCCP₃、FCCP₄处气相分布概率分别为36%、30%、22%及12%^[18,26]。

由图11可知,FCCPA_MLT输出信号与FCCPA_MLT持气率测量结果随着标准持气率的增加而单调递增,受流量影响较小,持气率测量误差绝大部分结果在5%以内。综上所述,FCCPA_MLT可用于多相流持气率测量。



(a) FCCPA_MLT输出响应结果
(a) FCCPA_MLT output response result



(b) FCCPA_MLT持气率测量结果
(b) Gas holdup measurement results of FCCPA_MLT

图 11 FCCPA_MLT 测量结果

Fig. 11 Measurement results of FCCPA_MLT

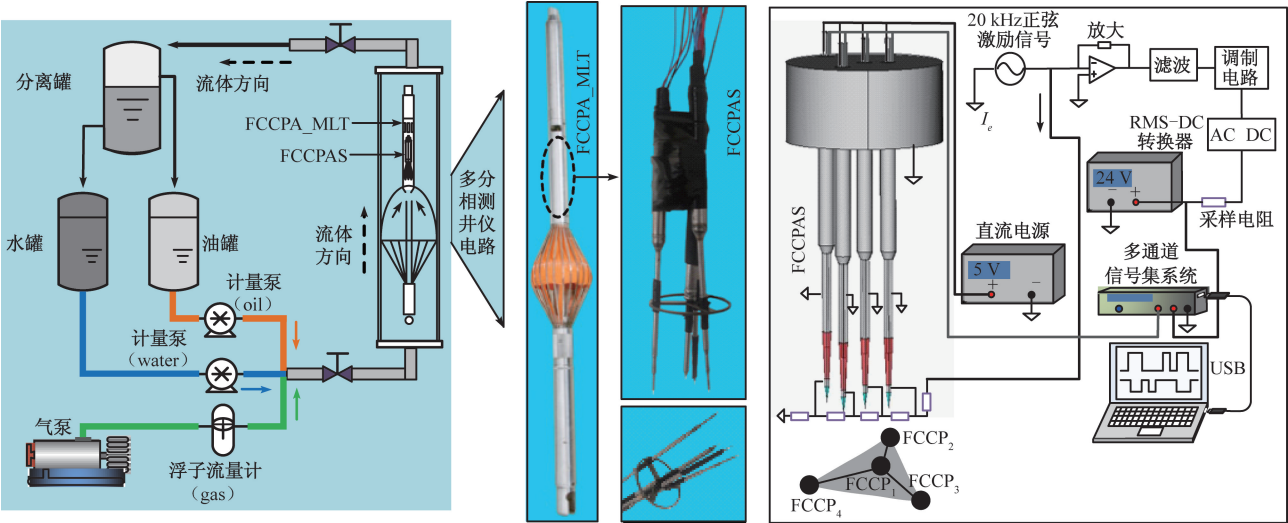


图 12 多相流实验平台示意图

Fig. 12 Diagram of multiphase flow experiment platform

3 多相流动态实验分析

3.1 实验环境

多相流实验平台主要包括管道、储油罐、储水罐、混合罐、气泵、计量泵、垂直测量管道、FCCPA_MLT 及测量系统等,如图 12 所示。FCCPA_MLT 测量系统包括光纤-电导组合探针阵列多分相测井仪、直流电源(5 V 与 24 V)、激励及信号处理电路、多通道信号采集系统及 PC 机等组成,其中 FCCPA_MLT 置于垂直上升管道中心。FCCPA_MLT 测量系统主要包括 20 kHz 正弦激励恒流源、放大滤波调制电路、RMS-DC 转换器、24 V 直流电源灯。多通道信号采集系统同步采集光纤信号与电导信号,并将光纤、电导信号传输给 PC 机。多通道采集系统的采样频率为 32 kHz。

实验中,实验流体采用自来水和工业柴油,实验气体为空气。自来水储藏在水罐中,工业柴油储藏在油罐中,气体由空气压缩机产生,油气水共同组成多相流。油气水多相流流体共同输入垂直上升管道中,FCCPA_MLT 对流经其的混合流体输出随时间连续变化的光纤信号与电导信号。最后混合流体经由垂直上升测量管道流入分离罐中,通过重力沉降原理进行油水相分离,使其循环使用。

3.2 实验结果分析

采集 $FCCP_i (1 \leq i \leq 4, i \in N^*)$ 输出电压信号,以多相流工况液相总流量 $Q_{w0} = 30 \text{ m}^3/\text{d}$,液相含水率 45%,气流量 $Q_g = 12 \text{ m}^3/\text{d}$ 为例对其进行分析,则 FCCPAS 输出电压信号如图 13 所示。

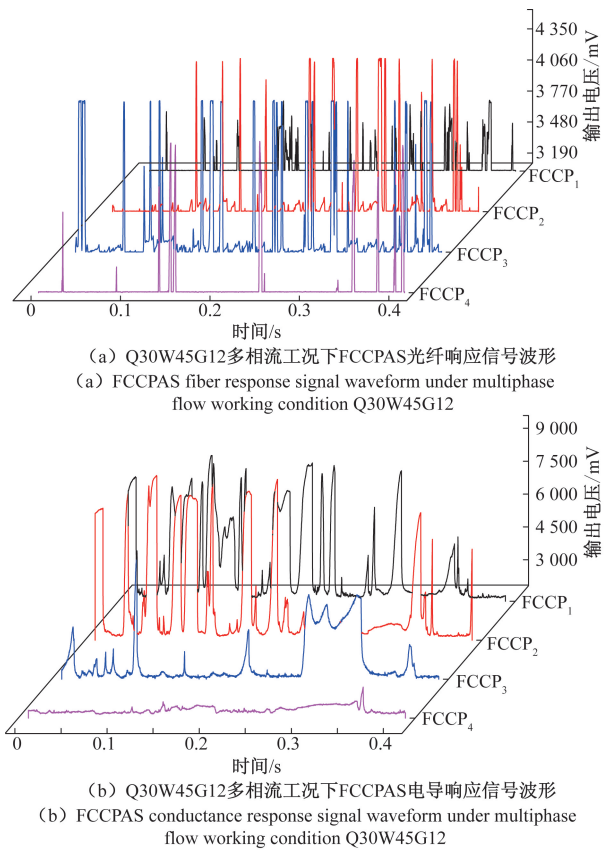
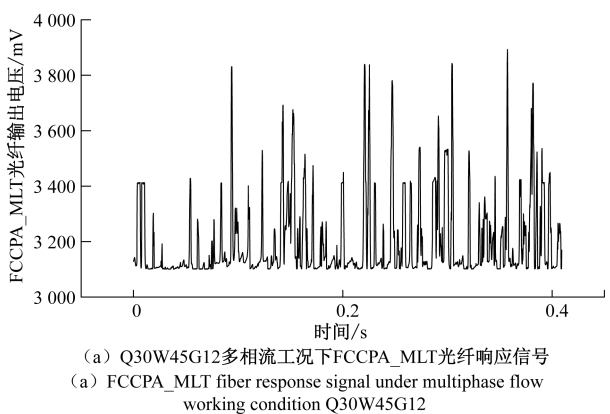


图 13 FCCPAS 响应信号波形

Fig. 13 FCCPAS response signal waveforms

由图 13 可知,FCCP_i(1≤i≤4,i∈N^{*})输出随时间连续变化的电压波动信号,其中 FCCP₁、FCCP₂、FCCP₃ 及 FCCP₄ 之间输出电压信号的高电平信号数量与宽度逐渐减少。动态实验结果与仿真实验结果响应规律相同。基于 FCCP_i(1≤i≤4,i∈N^{*}) 输出电压信号基础上,结合式(5)进一步获取 FCCPA_MLT 输出电压信号,则 FCCPA_MLT 输出信号波形如图 14 所示。

由图 14 可知,FCCPA_MLT 输出随时间连续变化的波动电压信号,CCPA_MLT 实际实验结果与数值仿真结果相同。



(a) Q30W45G12多相流工况下FCCPA_MLT光纤响应信号
(a) FCCPA_MLT fiber response signal under multiphase flow working condition Q30W45G12

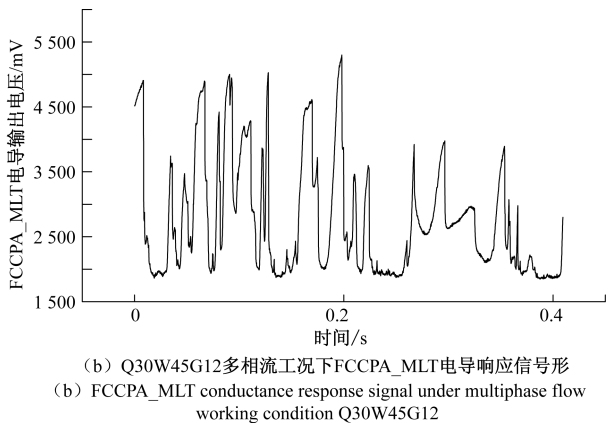
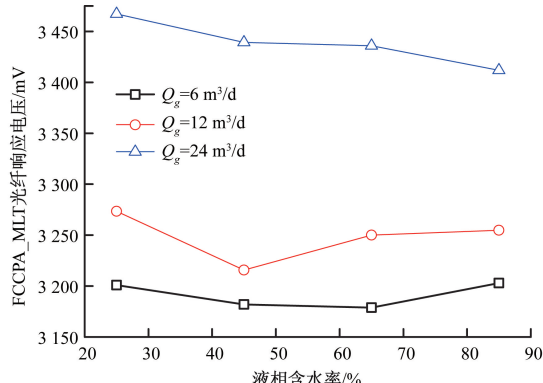


图 14 FCCPA_MLT 响应信号波形

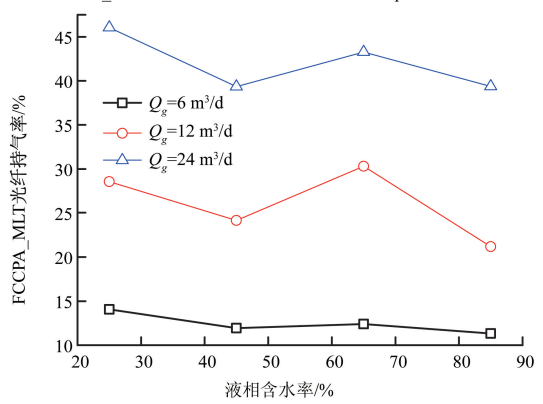
Fig. 14 FCCPA_MLT response signal waveform

为了进一步验证 FCCPA_MLT 多相流相含率检测性能。本文以液相流量 Q_{wo} 为 $30\text{ m}^3/\text{d}$,液相含水率 $k_{w/wo}$ 分别为 25%、45%、65% 及 85%,气流量 Q_g 分别为 6、12、18 及 $24\text{ m}^3/\text{d}$ 等工况为例进行动态实验验证,采集上述工况下的 FCCPA_MLT 光纤输出电压信号。通过 FCCPA_MLT 光纤实验数据建立持气率标定图版、持气率解释图版如图 15 所示。



(a) 多相流工况下FCCPA_MLT光纤标定图版

(a) FCCPA_MLT fiber calibration chart under multiphase flow conditions



(b) 多相流工况下FCCPA_MLT持气率测量结果

(b) FCCPA_MLT measurement results of gas holdup under multiphase flow

图 15 FCCPA_MLT 光纤测量结果

Fig. 15 FCCPA_MLT fiber measurement results

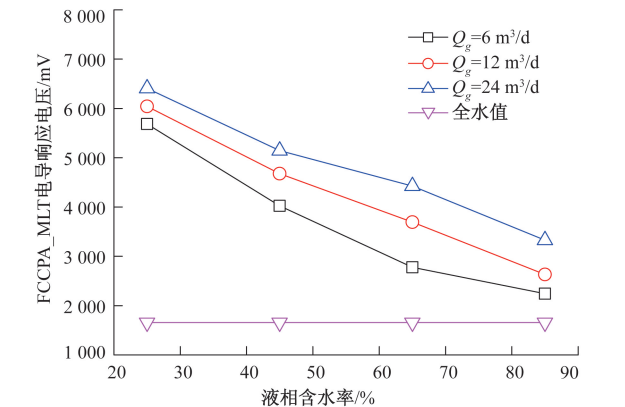
为充分说明 FCCPA_MLT 光纤持气率测量精度,进一步获取 FCCPA_MLT 持气率误差计算结果如表 1 所示。

表 1 FCCPA_MLT 光纤持气率测量误差统计
Table 1 Statistical of FCCPA_MLT fiber gas holdup measurement error

气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	液相含水/ %	标准 持气率/%	测量 持气率/%	测量 误差/%
6	25	16.7	14.065 6	2.634 4
	45		11.934 4	4.765 6
	65		12.393 6	4.306 4
	85		11.323 0	5.377 0
12	25	28.57	28.559 2	0.010 8
	45		24.150 2	4.419 8
	65		30.299 0	1.729 0
	85		21.184 0	7.386 0
24	25	44.4	46.047 4	1.647 4
	45		39.342 6	5.057 4
	65		43.260 4	1.139 6
	85		39.367 0	5.033 0

如图 15 及表 1 所示,随着流体中含气率的增加,FCCPA_MLT 测量结果与标准含气率呈现正比例关系,同一气量不同液相持水率条件下持气率测量值、光纤响应值基本保持不变,基本不受液相含水率的影响。且持气率测量误差主要控制在 5% 以内,最大误差为 7.386。综上所述,FCCPA_MLT 动态实验结果与仿真实验结果相同,充分说明 FCCPA_MLT 多相流持气率测量的有效性。

采集上述工况下 FCCPA_ML 电导输出电压信号。通过 FCCPA_MLT 电导实验数据建立如图 16 所示持水率标定图版、持水率解释图版。



(a) 多相流工况下 FCCPA_MLT 电导标定图版
(a) FCCPA_MLT conductance calibration chart under multiphase flow conditions

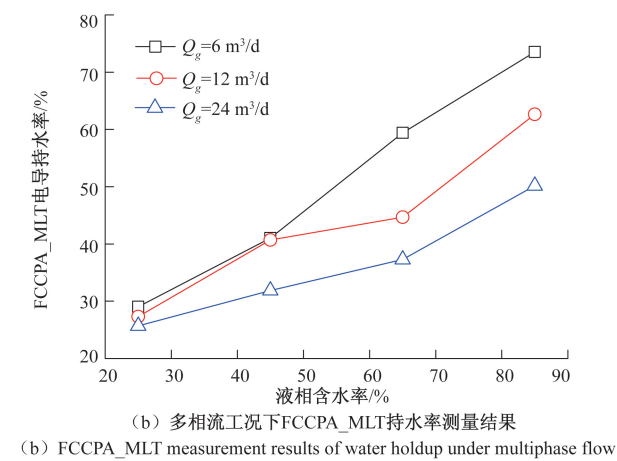


图 16 FCCPA_MLT 电导测量结果
Fig. 16 FCCPA_MLT conductance measurement results

为进一步说明 FCCPA_MLT 电导持水率测量精度,获取 FCCPA_MLT 持水率误差计算结果如表 2 所示。

表 2 FCCPA_MLT 电导持水率测量误差统计
Table 2 Statistical of FCCPA_MLT conductance water holdup measurement error

气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	液相含水 /%	标准 持水率/%	测量 持水率/%	绝对测量 误差/%
6	25	20.83	29.023	8.193
	45	37.50	41.022	3.522
	65	54.17	59.420	5.250
	85	70.83	72.518	1.688
12	25	17.86	27.317	9.457
	45	32.14	40.686	8.546
	65	46.43	44.668	1.762
	85	53.57	62.653	9.083
24	25	13.89	25.688	11.798
	45	25.00	31.853	6.853
	65	36.11	37.299	1.189
	85	47.22	50.171	2.951

由图 16 及表 2 可知,FCCPA_MLT 电导输出电压随着液相持水率的增加而增加,持水率测量结果随着液相持水率的增加而单调递增。含水率响应曲线无交叉、重叠,持水率测量误差结果在 10% 以内。综上所述 FCCPA_MLT 动态实验结果与仿真实验结果相同,充分说明 FCCPA_MLT 多相流持气率测量的有效性。

4 结 论

本文以课题组新研制的创新型光纤-电导组合探针为基础研究一种用于石油生产多分相测量的高精度、高灵敏度及简便的光纤-电导组合探针阵列多分相测井仪。采用 FEM 数值分析方法和 ZEMAX 光线追迹方法建立 FCCPA_MLT 仿真模型。对 FCCPA_MLT 电场分布、结构参数、响应特性等进行了数值仿真研究。仿真结果证明,总流量 5、10、20、30 m³/d,持气率为 10%、20%、30%、40%,持水率为 90%、80%、70%、60%等多相流工况,FCCPA_MLT 响应结果与标准值线性关系良好,可以有效测量流体持水率。同时以液相流量 Q_{wo} 为 30 m³/d,液相含水率 $k_{w/wo}$ 分别为 25、45、65 及 85%,气流量 Q_g 分别为 6、12 及 24 m³/d 等工况为例进行动态实验验证,其中 FCCPA_MLT 持气率测量误差集中在 5%以内,持水率误差在 10%以内。实际动态实验与仿真模拟结果相同,进一步证明了 FCCPA_MLT 相含率测量的有效性。

参考文献

[1] FU X F, LAN X, MENG L D, et al. Characteristics of fault zones and their control on remaining oil distribution at the fault edge: A case study from the Northern Xingshugang Anticline in the Daqing Oilfield, China[J]. Petroleum Science, 2016, 13(3): 418-433.

[2] 张茂强. 超前注水流入动态模型在低渗透油藏开发中的应用[J]. 特种油气藏, 2020, 27(4): 92-97.

ZHANG J Q. Application of advanced water injection inflow production relation model in low-permeability reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2020, 27(4): 92-97.

[3] 李留仁, 赵艳艳. 低渗透油田注水与注气开发的数值模拟比较[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 1999(1): 10-12.

LI L R, ZHAO Y Y. Comparision of numerical simulation results of water flooding with gas injection in low-permeability reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 1999(1):10-12.

[4] 韦红术, 张俊斌, 魏裕森, 等. 基于质量流量计测定的溶解气对相含率测量的影响[J]. 仪器仪表用户, 2020, 27(3): 34-37.

WEI H SH, ZHANG J B, WEI Y S, et al. Influence of dissolved gas on phase holdup measurement based on mass flowmeter [J]. Instrumentation, 2020, 27 (3): 34-37.

[5] TAN C, DAI W, YEUNG H, et al. A Kalman estimation based oil-water two-phase flow measurement with CRCC[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 72(1): 306-317.

[6] 贺登辉, 陈森林, 白博峰. 基于 V 锥流量计压损比的湿气液相流量在线检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 235-244.

HE D H, CHEN S L, BAI B F. Online measurement of liquid flow rate in wet gas based on pressure loss ratio of V-cone flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 235-244.

[7] 王超, 陈超, 赵宁, 等. 用于水平环状流周向液膜特性测量的电导探针阵列[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9): 1408-1413.

WANG CH, CHEN CH, ZHAO N, et al. Conductivity probe array for circumferential liquid film characteristic measurement in horizontal annular flow [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(9): 1408-1413.

[8] 蔡博, 夏国栋, 贾玉婷, 等. 矩形截面螺旋通道内气液两相流局部含气率分布实验研究[J]. 化工学报, 2018, 69(6): 2474-2480.

CAI B, XIA G D, JIA Y T, et al. Local void fraction distribution of gas-liquid two-phase flow in rectangular helically coiled channel [J]. CIESC Journal, 2018, 69(6): 2474-2480.

[9] ZHOU Y Y, JIN N D, ZHANG H X, et al. Method based on parallel-wire conductivity probe for measuring water hold-up in near-horizontal oil-water two-phase flow pipes [J]. IET Science Measurement and Technology, 2020, 14(6): 676-683.

[10] 任喜伟, 何立风, 宋安玲, 等. 油水界面测量与计算[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 95-115.

REN X W, HE L F, SONG AN L, et al. Measurement

- and calculation on oil-water interface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9): 95-115.
- [11] XIE B B, KONG L F, KONG D M, et al. Design and numerical simulation on an auto-cumulative flowmeter in horizontal oil-water two-phase flow[J]. Review of Entific Instruments, 2017, 88(11): 115003.
- [12] ZHOU Y Y, JIN N D, ZHANG H, et al. A method based on parallel-wire conductivity probe for measuring water holdup in near-horizontal oil-water two-phase flow pipes[J]. IET Science Measurement & Technology, 2020, 14(8): 676-683.
- [13] JIN Q, WANG D, HE R, et al. Identification and descrip-tion of small faulted-block reservoirs[J]. Shiyou Xuebao/Acta Petrolei Sinica ActaPet, 2009, 30(3): 367-371.
- [14] 李雷, 刘兴斌, 孔维航, 等. 测井用自带液柱塞驱动式橡胶皮囊集流器: CN105840177A[P]. 2016-08-10.
- LI L, LIU X B, KONG W H, et al. Self-contained liquid plunger driven rubber bladder current collector for logging: CN105840177A[P]. 2016-08-10.
- [15] 郑旭. 新型产出剖面测井仪集流伞短节设计[J]. 石油仪器, 2013, 27(6): 22-23.
- ZHENG X. Design of the new umbrella sub of production profile logging tools[J]. Petroleum Instruments, 2013, 27(6): 22-23.
- [16] 金宁德, 胡凌云, 郑华, 等. 皮球集流油气水三相流涡轮流量计测量模型研究[J]. 测井技术, 2006(2): 105-108.
- JIN N D, HU L Y, ZHENG H, et al. On turbine flowmeter measurement model for measuring oil-gas-water three phase flow with an inflatable concentrating diverter [J]. Well Logging Technology, 2006(2): 105-108.
- [17] 陈基亮, 孔德明, 郝虎, 等. 石油生产多组分监测光纤-电导一体式传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 261-271.
- CHEN J L, KONG D M, HAO H, et al. Research on fiber-optic and conductance integrated sensor for multi-component monitoring in petroleum production [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 261-271.
- [18] 郝志远. 油气水三相流持气率测量光纤探针传感器结构优化设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- HAO ZH Y. Optimum design of fiber optic probe sensor structure for measurement of gas holdup in oil-gas-water three phase flow [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [19] 康静. 油井井下阵列光纤探针传感器结构优化技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- KANG J. Research on structure optimization of array optical fiber probe sensor in oil well[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [20] ISHII M, KIM S. Micro four-sensor probe measurement of interfacial area transport for bubbly flow in round pipes[J]. Nuclear Engineering & Design, 2001, 205(1/2): 123-131.
- [21] WANG G, ZHU Q, ISHII M, et al. Four-sensor droplet capable conductivity probe for measurement of churn-turbulent to annular transition flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 157(4): 119949.
- [22] 刘梦, 胡钢墩, 张健, 等. 一种基于 ANSYS Maxwell 的变压器漏电感的计算方法研究[J]. 变压器, 2020, 57(7): 20-25.
- LIU M, HU G D, ZHANG J, et al. Research on calculation of transformer leakage inductance based on ANSYS Maxwell [J]. Transformer, 2020, 57(7): 20-25.
- [23] LI H, CUI Y Q, LI J, et al. Response characteristics of conductance sensor and optimization of control-drive circuit in horizontal pipes [J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2020, 10(2): 217-231.
- [24] LI Y W, XIE N, KONG L F. Chaotic recurrence analysis of oil-gas-water three-phase flow in vertical upward pipe[J]. Information Technology Journal, 2011, 10(12): 2350-2356.

[25] LI Y W, CHEN J L, KONG W H, et al. Design and optimization of the fiber-optic probe array for measuring gas holdup in oil-gas-water multiphase flow [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2018; 1-18.

[26] KONG W H, KONG L F, LI L, et al. The influence on response of axial rotation of a six-group local-conductance probe in horizontal oil-water two-phase flow [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28 (6): 065104.

[27] 连重炎, 杜旭日, 庄其仁, 等. 锥形塑料光纤光束准直特性的研究 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2008(2) : 33-36.

LIAN CH Y, DU X R, ZHUANG Q R, et al. Study on the characterization of beam collimation in tapered plastic optical fiber [J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2008(2) : 33-36.

作者简介



陈基亮,2015 年于燕山大学获得学士学位,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: chjiliang@stumail. ysu. edu. cn

Chen Jiliang received his B. Sc. degree from Yanshan University in 2015. He is currently a Ph. D. candidate at Yanshan University. His main research interests include 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. Received his Ph. D. degree from Beihang University in 2015. Now, he is an associate professor in the School of Electrical Engineering of Yanshan University, mainly engaged in the research of intelligent information processing technology.



刘国权,1991 年于江汉石油学院,获得学士学位。1998 年于西安石油大学获得硕士学位。现为中国石油生产测井中心总工程师,主要从事多相流检测、智能控制与智能信息处理方面的研究。

E-mail: liugqhb@ cnpc. com. cn

Liu Guoquan received his B. Sc. degree from Jiangnan Petroleum Institute, China in 1991, and received his M. Sc. degree from Xi'an Petroleum University in 1998. He is the chief engineer with the Production Logging Center at China Petroleum Logging Co. , Ltd. His main research interests include multiphase flow detection, intelligent control and intelligent information processing.