

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107597

石油生产多组分监测光纤电导一体式传感器研究*

陈基亮¹, 孔德明², 郝虎¹, 孔德瀚³, 刘国权⁴

(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. 河北环境工程学院信息工程系 秦皇岛 066000; 4. 中国石油集团测井有限公司生产测井中心 西安 710077)

摘要:为了解决石油生产多组分监测问题,基于光纤技术和电导技术成功研制了一种用于石油生产多组分监测光纤电导一体式传感器。利用 ZEMA 光线追迹方法和 FEM 方法建立 FOCIS 仿真模型。对电导测量模块(CMM)电场分布、CMM 响应特性、光纤测量模块(OFMM)返回光照强度分布、OFMM 响应特性等进行了仿真分析。不同油气水三相流型条件下 CMM 和 OFMM 测量值与标准含率值呈现出良好的线性关系,测量相含率误差均在 5% 以内。在内径为 32 mm 垂直管道内进行了 FOCIS 现场实验测试,实验结果表明:在气流量 5、20、40 m³/d,油水总流量 10、30、50、70 m³/d,液相含水率 50%、60%、70%、80%、90% 等工况下,测量含水率与含气率误差在 5% 以内。仿真与实验均证明 FOCIS 油气水多组分监测是可行和有效的。

关键词: 光纤电导一体式传感器; 仿真分析; 多组分监测; 电导测量模块; 光纤测量模块

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 fiber-optic and conductance integrated sensor for multi-component monitoring in petroleum productions

Chen Jiliang¹, Kong Deming², Hao Hu¹, Kong Dehan³, Liu Guoquan⁴

(1. School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. Department of Information Engineering, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao 066000, China;
4. Production Logging Center, China Petroleum logging Co., Ltd., CNPC, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to solve the problem of multi-component monitoring in oil production, based on optical fiber technology and electrical conductance technology, successfully develops a fiber-optic and conductance integrated sensor for multi-component monitoring in petroleum production. FOCIS simulation model is established using ZEMAX ray tracing method and FEM method. The electric field distribution of the conductance measurement module (CMM), CMM response characteristics, the return light intensity distribution of optical fiber measurement module (OFMM) and OFMM response characteristics, etc. are simulated and analyzed. The measured values of CMM and OFMM show a good linear relationship with the standard rates of phase content under different oil-gas-water three-phase flow patterns, and the errors of the measured rates of phase content are all within 5%. The FOCIS on site experiment test was carried out in a vertical pipeline with an inner diameter of 32mm. The experiment results show that under the working conditions where the gas flow rate is 5, 20, 40 m³/d, the total oil and water flow rate is 10, 30, 50, 70 m³/d and the liquid phase water content is 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, the errors of the measured rate of water content and rate of gas content are within 5%. Both simulations and experiments prove that the FOCIS multi-component monitoring of oil, gas and water is feasible and effective

Keywords: fiber-optic and conductance integrated sensor; simulation analysis; multi-component monitoring; conductance measurement module; optical fiber measurement module

收稿日期: 2021-03-11 Received Date: 2021-03-11

* 基金项目: 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)、秦皇岛市科学技术研究与发展计划项目(201902A028)资助

0 引言

油气水多相流普遍存在于油田开发中后期的高含水、低产液且常伴有气相存在的油井生产中^[1-2]。而开展石油生产油气水多组分测量对监测产层产量、指导油井注入、提高采油率、节约能源和预测油井开发寿命等具有重要意义^[3-4]。侵入式探测技术^[5]具有易于安装、体积小、可直接定位于流体中,能准确监测该测量点的局部流体特征等优点,已引起石油生产领域越来越多学者和研究人员关注。

侵入式探测技术主要有电导探针技术^[6-7]、光纤探针技术^[8]、电容探针技术^[9]及超声探头技术^[10]等,其中电导探针技术因其制造简单、成本低、测量速度快而得到广泛应用。Teyssedou等^[11]成功研制了一种用于气水两相流局部剖面持水率测量的电导探针传感器。Xie等^[12]基于阵列电导探针技术设计了一种自动累积流量计并成功测量了水平油水两相流中水流量信息。光纤探针技术因其抗电磁干扰能力强、不易腐蚀、响应灵敏度高、优良特性,受到广大研究人员的青睐。Mizushima等^[13]基于楔形光纤探针成功测量出气水两相流空隙率、气泡速度及气泡直径等参数。Yang等^[14]利用分布式多光纤探针成功对气液段塞流和搅拌流中气含率分布进行了实验研究。由于电导探针技术仅对导电相(水相)敏感,光纤探针技术仅对气相敏感,因此本文结合电导探针技术与光纤探针技术,设计研制一种用于石油生产油气水多组分测量光纤电导一体式传感器(fiber-optic and conductance integrated sensor, FOCIS)。并对电导测量模块(Conductance measurement module, CMM)电场分布、CMM响应特性、光纤测量模块(optical fiber measurement module, OFMM)响应特性等问题开展了研究。研制的一种油气水多组分光纤电导一体式传感器获得了较好的检测效果。

1 FOCIS 结构设计及测量原理

1.1 FOCIS 结构设计

图1为FOCIS结构示意图。FOCIS主要由电导测量模块(CMM)和光纤测量模块(OFMM)组成。OFMM主要包括蓝宝石敏感头、耦合光纤束及光纤测量电路等,如图1(b)所示;CMM主要包括激励电极E、绝缘管、激励地电极H及电导测量电路等,如图1(c)所示。激励电极E位于蓝宝石敏感头外侧,陶瓷绝缘管隔开激励电极E和激励地电极H且位于激励电极E和耦合光纤束外侧,位于激励地电极H内侧,激励地电极H为不锈钢外壳具有保护FOCIS内部器件的作用。

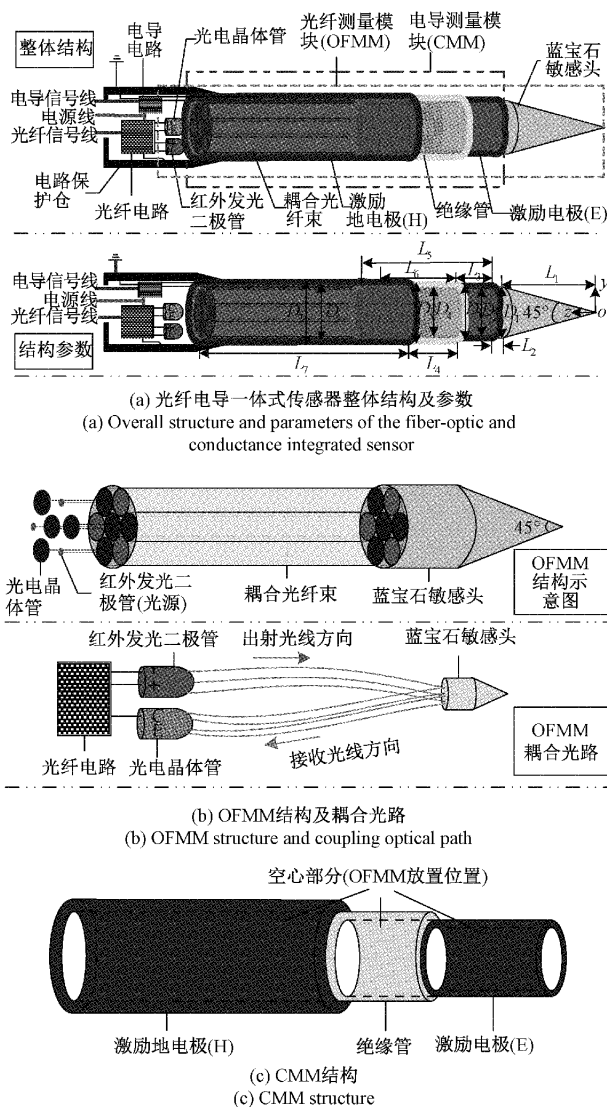


图1 光纤电导一体式传感器结构

Fig. 1 Fiber-optic and conductance integrated sensor structure

图1中, D_1 为蓝宝石敏感头内径, L_1 为蓝宝石敏感头锥体长度, L_2 为激励电极与蓝宝石敏感头锥体部分的距离, L_3 为激励电极E的间距, L_4 为激励地电极H与绝缘管的间距。 D_2 、 D_4 及 D_6 分别为内激励电极、绝缘管和外激励地电极的内径, D_3 、 D_5 及 D_7 分别为内激励电极、绝缘管和外激励地电极的外径。本文在Li等^[15]研究成果基础上,选择锥长为4 mm、锥角45°的蓝宝石锥形光纤敏感头和集束型耦合光路进行OFMM设计;结合Xie等^[12]电导探针结构参数与实际研制环境进行CMM设计;基于上述研究资料对FOCIS关键尺寸进行初步设计研究。则光纤电导一体式传感器关键部件结构参数信息如表1所示。

表 1 FOCIS 关键部件结构参数信息

Table 1 Structural parameter information of FOCIS

key components						
关键部件结构参数/mm						
D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
0.6	0.7	0.9	1.0	1.8	2.0	2.4
L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
1.12	0.56	2.0	4.0	6.0	7.0	8.0

1.2 FOCIS 电路设计

考虑到 FOCIS 实际应用和测量需要,设计一种 FOCIS 适用性电路,如图 2 所示。

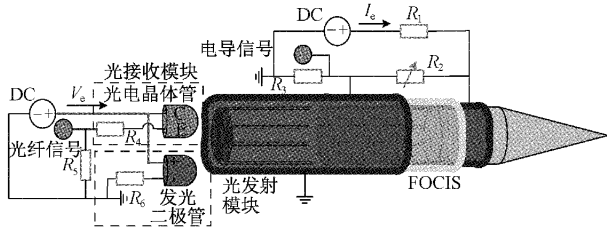


图 2 FOCIS 电路原理

Fig. 2 FOCIS circuit principle

图 2 中光纤测量电路由光发射模块和光接收模块组成,光发射模块由发光二极管与限流电阻 R_6 组成,光接收模块由光电晶体管和采样电阻 R_4 构成。电导测量电路由限流电阻 R_1 、调节电阻 R_2 及采样电阻 R_3 组成,其中调节电阻 R_2 受水的矿化度影响,理想情况下,激励电路输出电压 V_e 为:

$$V_e = \frac{IR_3}{R_1 + \frac{R_2 R_m}{R_2 + R_m} + R_3} \quad (1)$$

1.3 FOCIS 测量原理

实际测量时,FOCIS 被放置在测量管道中央。当油气水多相流流过时,FOCIS 输出随时间连续变化的脉冲信号。FOCIS 测量原理如图 3 所示。若 OFMM 侵入气相时,多数光线由探针返回,返回光强较大;若 OFMM 浸入液相介质时,多数光线散射到液体中,返回光强较小。若 CMM 浸入导电水相时,激励电极(E)与激励地电极(H)形成导电回路,信号输出低电压信号;若 CMM 浸入在非导电相时(油相、气相)时,切断导电回路输出高电压信号。对 OFMM/CMM 电压信号进行阈值处理,即可得到含气率/含水率。

若蓝宝石敏感头侵入折射率为 n_λ 的介质中,则 OFMM 的输出电压可表示为:

$$V_1(n_\lambda) = C \cdot \iint L[x, y, z(x, y)] P(n_\lambda) dS \quad (2)$$

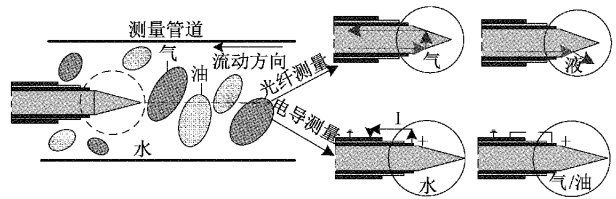


图 3 FOCIS 测量原理

Fig. 3 FOCIS measurement principle

式中: C 表示光电转换系数, $P(n_\lambda)$ 表示 OFMM 在 $L[x, y, z(x, y)]$ 点处光探测器获取的返回光照强度。

气相的概率分布函数 x_g 可定义为:

$$x_g(t) = \begin{cases} 1, & \text{在时刻 } t \text{ 时点 } (x, y, z(x, y)) \text{ 处为气相} \\ 0, & \text{在时刻 } t \text{ 时点 } (x, y, z(x, y)) \text{ 处为液相} \end{cases} \quad (3)$$

若敏感头相对于相态介质的尺寸可看成一点,则当油气水三相流流经探针时,OFMM 的输出电压可表示为:

$$V(t) = \begin{cases} v_g, & \text{点 } (x, y, z(x, y)) \text{ 处 } x_g(t) = 1 \\ v_l, & \text{点 } (x, y, z(x, y)) \text{ 处 } x_g(t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

点 $(x, y, z(x, y))$ 处的瞬时局部持气率 $\alpha(t)$ 为:

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1, & V(t) = v_g \\ 0, & V(t) = v_l \end{cases} \quad (5)$$

测量管道内流体的平均含气率 $\bar{\alpha}_v$ 为:

$$\bar{\alpha}_v = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} [\lim_{r \rightarrow \infty} \alpha(t)] r d\theta dr \quad (6)$$

式中: R 为管道半径。

设激励电极 E 侵入电导率 σ_m 的介质中,则 CMM 输出电压可表示为:

$$V_2(\sigma_m) = K \cdot f(\sigma_m) \quad (7)$$

式中: K 表示标定系数; $f(\sigma_m)$ 为激励电极 E 在电导率 σ_m 介质中的输出电压值。同理, CMM 流体含水率测量原理与 OFMM 含气率测量原理相似,为简单起见,本文对此过程将不再做详细描述。

2 CMM 仿真分析

2.1 CMM 仿真模型构建及灵敏度分析

本文利用 COMSOL 有限元软件建立如图 4 所示的 CMM 有限元模型。旨在模拟理想条件下 CMM 侵入导电相与非导电相的响应特性。CMM 有限元模型包括测量管道、介质、填充液、蓝宝石敏感头、激励电极 E、激励地电极 H 及绝缘管等组成。其中填充液介质设置为水相介质,激励电极 E 和激励地电极 H 的材料设置为铁 (Iron),绝缘管的材料设置为氮化硅 (Si_3N_4),蓝宝石敏感头的材料设置为蓝宝石纤维 (Al_2O_3),介质设置为半径 1.5 mm 的球体。由于激励电极 E、激励地电极 H 及测量

区域远小于电场波长,因此可以将 CMM 的电场视为时不变的。数值模拟仿真研究中,采用直流电流源作为 CMM 激励源。本文将激励电极 E 和激励地电极 H 分别施加 0.1 mA 及 -0.1 mA 的直流电流,同时将激励地电极 H 的电压设置为 0 V。

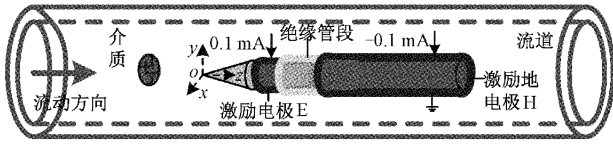


图 4 用于含水率测量的 CMM 有限元模型

Fig. 4 CMM finite element model for the rate of water content measurement

研究 CMM 电场信号,其电势 u 可用具有一定边界条件的三维直角坐标系 $o(x, y, z)$ 下的 Laplace 方程^[16]来描述 CMM 电场分布。

$$\nabla^2 u(x, y, z) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

假设电流密度在电极表面是均匀,则激励电极表面的电势为:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{I_e}{S_R} \left(x = 0, y \in \left[-\frac{D_3}{2}, -\frac{D_2}{2} \right] \cup \left[\frac{D_2}{2}, \frac{D_3}{2} \right], \right. \\ \left. z \in [L_1 + L_2, L_1 + L_2 + L_5] \right) \\ \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{I_e}{S_R} \left(x = 0, y \in \left[-\frac{D_7}{2}, -\frac{D_6}{2} \right] \cup \left[\frac{D_6}{2}, \frac{D_7}{2} \right], \right. \\ \left. z \in [L_1 + L_2 + L_3 + L_4, L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_7] \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中: u 为内部电势分布; I_e 为施加在激励电极上的直流电流; S_R 为电极的表面积。

采用自由四面体网格对其有限元模型进行网格化,网格总单元数为 803 513 个。为验证 CMM 含水率测量精度,对测量场需要进一步研究。获取 CMM 空间灵敏度信息。由于 CMM 的几何形状是轴对称的,CMM 空间灵敏度分布 $s(x, z)$ 可以定义为:

$$s(x, z) = \frac{u(\xi_{x,z}) - u(\xi_w)}{u(\xi_g) - u(\xi_w)} \quad (10)$$

式中: $u(\xi_{x,z})$ 为半径 1.5 mm 的绝缘小球在位置 (x, z) 时的电势,其中以气相绝缘小球为例进行研究; $u(\xi_w)$ 为测量管道内充满水时的电势; $u(\xi_g)$ 为测量管道内充满气相时的电势。 x, z 分别代表绝缘小球的径向位置、轴向位置。则 CMM 的灵敏度分布结果如图 5 所示。

由图可知,灵敏度的峰值主要集中在径向位置 $|x| < 0.6$ mm (激励电极 E) 区域内,轴向方向 1.6 mm $< z < 3.6$ mm 位置区域内,越靠近激励电极 E 时,灵敏度越高。激励电极 E 与其他区域之间的灵敏度呈高

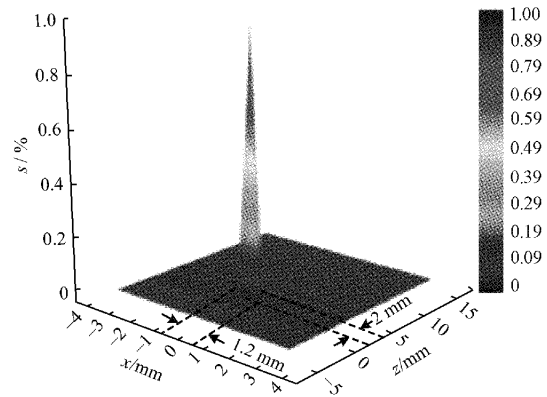


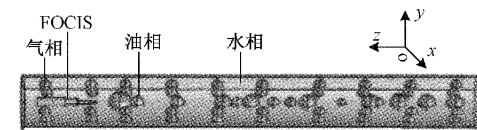
图 5 CMM 的灵敏度分布

Fig. 5 Sensitivity distribution of CMM

梯度且逐渐减少的变化趋势,其他位置灵敏度基本为 0。激励电极 E 处为介质检测的有效区域。

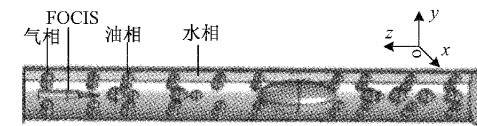
2.2 不同流型状态下 CMM 响应特性分析

为了获取 CMM 在不同油气水三相流流型状态下的响应特性,建立如图 6 所示 4 种流型下的有限元模型^[17-18]。主要包括水基分散泡状流、水基分散过渡流、水基分散块状流及水基分散段塞流。其中,蓝色代表气相,灰色代表油相,测量管道内的其他区域为水相。图 6(a)~6(d) 所示流型中,含水率分别为 0.8、0.56、0.4 及 0.1。



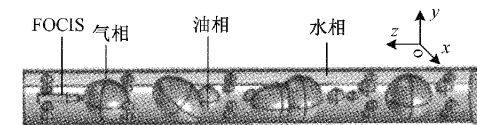
(a) 水基分散泡状流有限元模型

(a) Finite element model of water-based dispersed bubbly flow



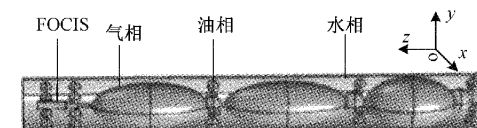
(b) 水基分散过渡流有限元模型

(b) Finite element model of water-based dispersed transition flow



(c) 水基分散块状流有限元模型

(c) Finite element model of water-based dispersed block flow



(d) 水基分散段塞流有限元模型

(d) Finite element model of water-based dispersed slug flow

图 6 油气水三相流有限元模型

Fig. 6 Finite element models of oil-gas-water three-phase flow

保持油气水三相流有限元模型所有参数相同的条件下,仅更改 FOCIS 的 z 轴坐标,其中 FOCIS 每下移 0.4 mm 测量一次。则 CMM 在油气水三相流流型状态下的静态响应曲线,如图 7 所示。

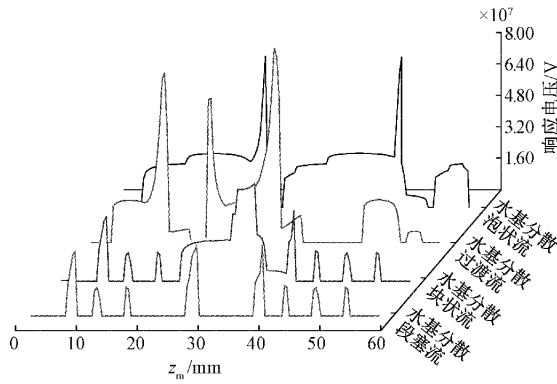


图 7 不同流型状态下 CMM 响应结果
Fig. 7 CMM response results under different flow patterns

由图 7 可知,不同流型状态下 CMM 响应信号整体为低压脉冲信号与高压脉冲信号交替输出,其中高压脉冲信号包括油相电压信号与气相电压信号。随着非导电介质逐渐增多,CMM 输出高压脉冲信号逐渐增多,高压脉冲宽度也逐渐增加。其中水基分散泡状流下高压脉冲信号宽度较小;水基分散过渡流下 CMM 输出信号与水基分散泡状流下的 CMM 输出信号大致相同,但是高压脉冲信号中有宽脉冲信号;水基分散块状流下高压脉冲信号呈宽脉冲信号;水基分散段塞流中高压脉冲信号为超宽脉冲信号。

为了验证 CMM 在高含水多相流中含水率测量的准确性,本文以不同含水率下水基分散泡状流的 CMM 响应特性为例进行仿真研究,CMM 响应曲线如图 8 所示。其中含水率的变化是通过改变水基分散泡状流有限元模型中油滴/气泡的体积。

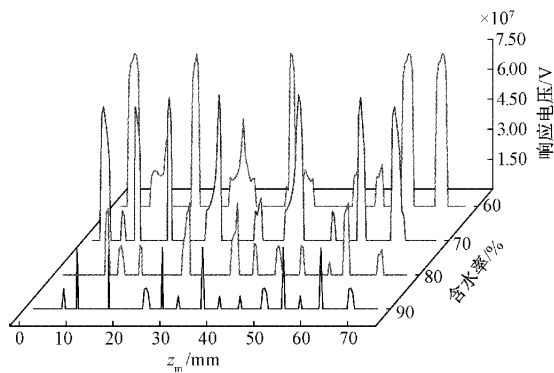


图 8 水基分散泡状流状态下 CMM 响应结果
Fig. 8 CMM response results under water-based dispersed bubbly flow

如图 8 所示,随着含水率的降低,CMM 输出的高压脉冲强度更强,脉冲宽度更宽,而低压脉冲宽度逐渐较少。CMM 响应曲线能够较好的反映不同含水率下水基分散泡状流的真实情况。采集 CMM 响应信号,设置 CMM 非导电相信号阈值为 6×10^6 V,通过阈值处理后得到 CMM 含水率信息。如图 9 所示。

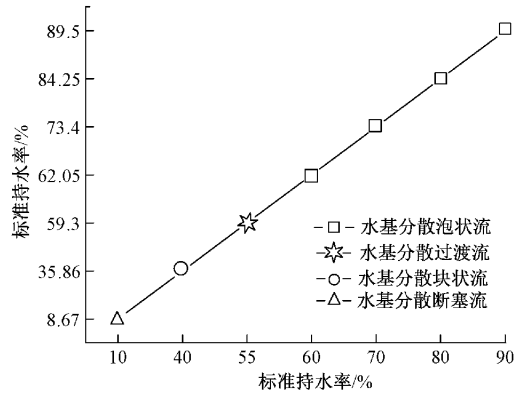


图 9 不同流型状态下 CMM 测量结果
Fig. 9 CMM measurement results under different flow patterns

由图可知,不同流型状态下 CMM 测量结果随着标准含水率的减少而减少,表现出良好的线性特性,且测量含水率绝对误差结果在 5% 以内。因此,本文所述 CMM 可以用于油气水三相流含水率测量。

3 OFMM 仿真分析

3.1 OFMM 仿真模型构建及光线追迹分析

基于光学设计软件 ZEMAX 非序列模式^[19]下建立 OFMM 仿真模型,如图 10 所示。耦合光纤束由 7 根直径为 220 μm 的石英光纤组成,其中纤芯直径为 200 μm ,包层直径为 220 μm 。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,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,属性为 ABSORB。锥形敏感头形状为 45° 的圆锥形,材质设置为蓝宝石 (AL₂O₃),直径为 660 μm 。激励电极为内径 660 μm 外径 900 μm 的环形电极,材质设置为不锈钢 (IRON)。绝缘管为内径 660 μm 外径 1 000 μm 的陶瓷管 (CERAMIC);激励地电极为内径 1 000 μm 外径 1 400 μm 的不锈钢管 (IRON),将介质设置为短轴半径为 1 mm,长半轴半径为 1.5 mm 的椭球体。将水箱设置为直径为 2 mm,高度为 4 mm 的圆柱体。

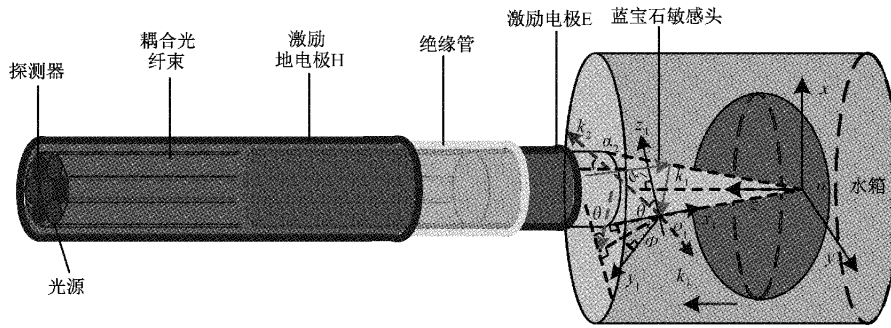


图10 OFMM 仿真模型

Fig. 10 OFMM simulation model

由于多模光纤纤芯直径远大于光波长,故采用几何光学^[20]来模拟光纤内部光线传输轨迹。图10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。任取一条入射光线,其在敏感头中的波矢为 k_1 , θ 为入射角, Φ 为方位角,此时 k_1 在局部坐标系 $o_1(k_1,\theta,\Phi)$ 中可以表示为:

$$k_{1x} = k_1 \sin \theta \cos \Phi, k_{1y} = k_1 \sin \theta \sin \Phi, k_{1z} = k_1 \cos \theta \quad (11)$$

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 α_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 方向的单位矢量可表示为 $z = (-\sin \alpha_1, 0, -\cos \alpha_1)$,则传输光波矢应满足:

$$-k_{2x} \sin \alpha_1 - k_{2z} \cos \alpha_1 \geq \frac{2\pi n_2}{\lambda n_1} \quad (12)$$

在该点传输进敏感头的光功率为:

$$p(\alpha_1, \alpha_2) = \iint T(\theta, \Phi) \sin \theta d\theta d\Phi \quad (13)$$

式中: $T(\theta, \Phi)$ 表示入射光从敏感头表面上的点全反射传入纤芯的辐射量。

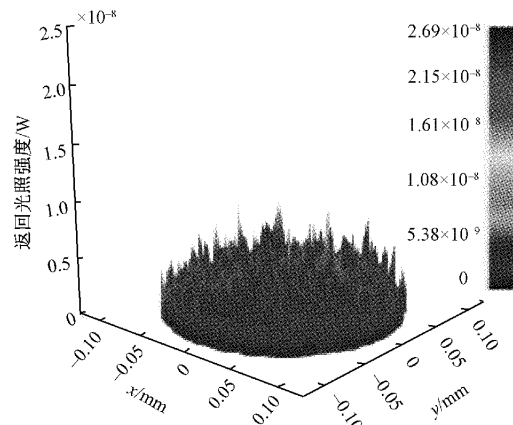
在 ZEMAX 非序列模式下保持所有参数相同的条件下,分别对油气水介质进行百万次光线追迹,OFMM 在油气水介质中的返回光照强度分布如图 11 所示。

如图 11 所示, x 和 y 表示探测器的长度和宽度,原点为探测器中心。OFMM 在油气水介质的返回光照分布基本相同,且 OFMM 在气相介质的回光强度大于 OFMM 在油水介质中的回光强度,而油水相之间返回光照强度相差较小。因此 OFMM 可用于气相检测。

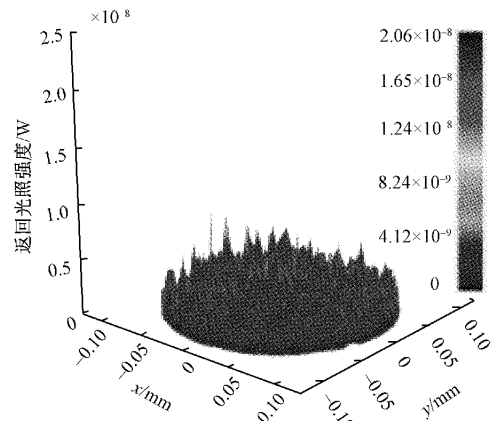
3.2 不同流型状态下 OFMM 响应特性分析

为了获得 OFMM 在不同油气水三相流流型状态下的响应特性,依据 2.2 节中油气水三相流工况建立

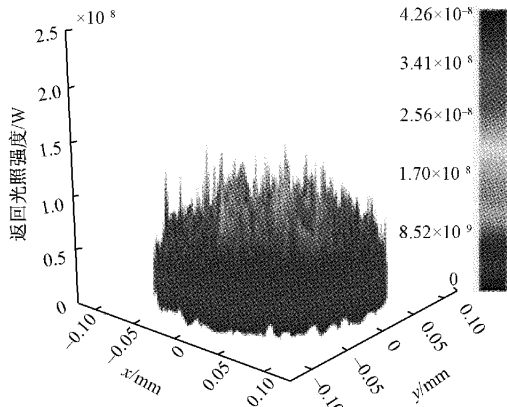
ZEMAX 仿真模型。其中各工况下含气率分别为 0.30、0.40、0.55 及 0.65。在 ZEMAX 仿真模型所有参数相同的条件下,仅更改 FOCIS 的 z 轴坐标,其中 FOCIS 每下移 0.4 mm 测量一次。则 OFMM 在油气水三相流流型状态下的静态响应曲线,如图 12 所示。



(a) OFMM敏感头置于水相中的返回光照强度分布
(a) The return light intensity distribution of the OFMM sensing probe placed in the water



(b) OFMM敏感头置于油相中的返回光照强度分布
(b) The return light intensity distribution of the OFMM sensing probe placed in the oil phase



(c) OFMM敏感头置于气相中的返回光照强度分布
(c) The return light intensity distribution of the OFMM sensing probe placed in the gas phase

图 11 OFMM 敏感头置于测量介质中的返回光照强度分布
Fig. 11 The return light intensity distribution of the OFMM sensing probe placed in the measuring media

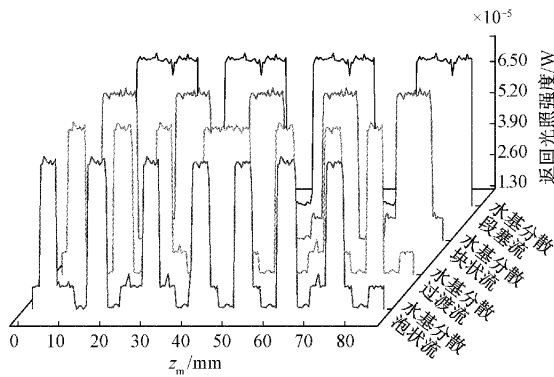


图 12 不同流型状态下 OFMM 响应结果

Fig. 12 OFMM response results under different flow patterns

由图 12 可知,不同流型状态下 OFMM 响应信号波形为低压脉冲与高压脉冲交替输出,其中高压脉冲信号值(气相)约为 7×10^{-5} W,低压脉冲信号包括油相信号与水相信号,油相返回光照强度约为 1.3×10^{-5} W,水相返回光照强度约为 2×10^{-5} W,气相返回光照强度大于油水相返回光照强度,且油水相之间返回光照强度相差较小,所以 OFMM 只可用于气液相鉴别。随着含气率增多,OFMM 输出高压脉冲信号逐渐增多,且高压脉冲宽度逐渐增加。其中水基分散泡状流下高压脉冲信号宽度最小,水基分散断塞流下高压脉冲信号宽度最大。

为进一步验证 OFMM 在高含水多相流中含气率测量的准确性,本文以不同含气率下水基分散泡状流的 OFMM 响应特性为例进行仿真研究。则 OFMM 在水基分散泡状流下的静态响应曲线如图 13 所示。其中水基分散泡状流下含水率的调节是通过改变 ZEMAX 仿真模型中气泡的体积。

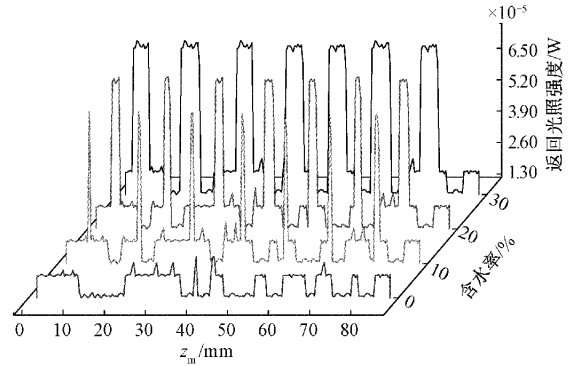


图 13 水基分散泡状流状态下 OFMM 响应结果
Fig. 13 OFMM response results under water-based dispersed bubbly flow

如图 13 所示,随着含气率增加,OFMM 输出的高压脉冲宽度更宽,低压脉冲宽度逐渐减小。因此 OFMM 响应曲线能够较好的反映不同含气率下水基分散泡状流的真实情况。本文设置 OFMM 气相阈值为 5×10^{-5} W,通过阈值处理后计算 OFMM 含气率信息,如图 14 所示。

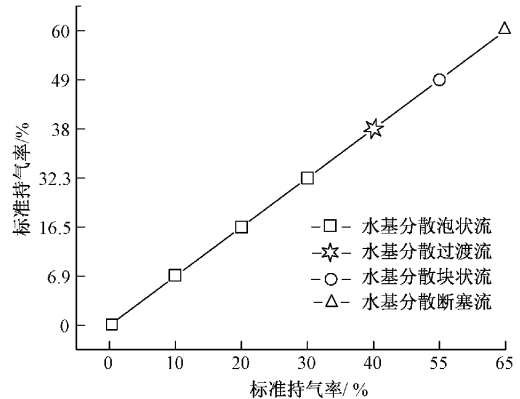


图 14 不同流型状态下 OFMM 测量结果

Fig. 14 OFMM measurement results under different flow patterns

由图可知,不同流型状态下 OFMM 测量含气率随着标准含气率的增加而增加,表现出良好的线性特性,且测量含气率绝对误差结果在 5% 以内。因此,本文所述 OFMM 可以用于油气水三相流含气率测量。

4 多相流动态实验结果分析

4.1 实验环境

多相流实验平台主要包括输送管线、储油罐、储水罐、混合罐、气泵、计量泵、直径为 32 mm 的垂直上升测量管道,如图 15 所示。FOCIS 测量系统包括光纤电导一体式传感器、直流电源(5 V、24 V)、CMM 激励及信号处理

电路、多通道信号采集盒及PC机组成。其中 FOCIS 安装于垂直上升管道中心,5 V 直流电源为 OFMM 提供驱动动力。CMM 测量系统主要包括 CMM、抑制电流损耗的 20 kHz 正弦波激励源、放大滤波调制电路、RMS-DC 转换器、取样电阻、24 V 直流电源等,频率为 20 kHz 的正弦波激励信号源为激励电极 E 提供稳定的恒流源。多通道数据采集盒同步采集光纤信号与电导信号,并将信号传输给 PC 机。多通道采集盒的采样频率为 16 kHz,采样点数为 1 024。

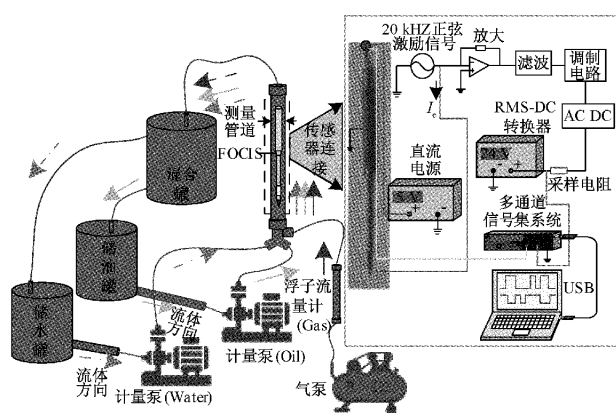


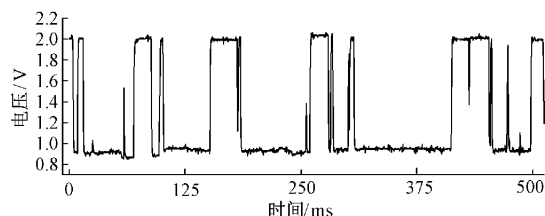
图 15 多相流实验平台

Fig. 15 Multiphase flow experiment platform

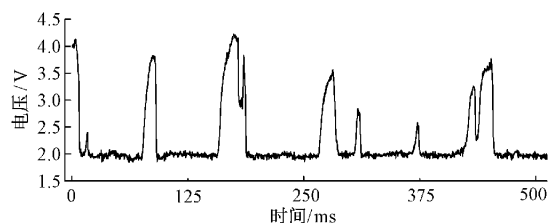
实验过程中,实验流体为自来水和工业白油,实验气体为空气。从储水罐流出的水、储油罐流出的油及气泵产生的气经计量泵共同输入到内径为 35.8 mm 的垂直上升测量管道中,FOCIS 对流经其的混合流体输出随时间连续变化的 OFMM 电压信号与 CMM 电压信号。最后,混合流体经由垂直上升测量管道流入混合罐中,通过重力沉降原理进行油水相分离,使其循环使用。

4.2 动态实验结果分析

采集油气水三相流工况下 FOCIS 的输出响应信号。以多相流工况总流量 $Q = 70 \text{ m}^3/\text{d}$,水流量 $Q_w = 27 \text{ m}^3/\text{d}$,气流量 $Q_g = 40 \text{ m}^3/\text{d}$ 为例对 FOCIS 在多相流工况下的输出信号波形进行分析,多相流输出信号波形如图 16 所示。



(a) Q70W27G40 多相流工况下的 CMM 输出信号波形
(a) CMM output signal waveform under multiphase flow working condition (Q70W27G40)



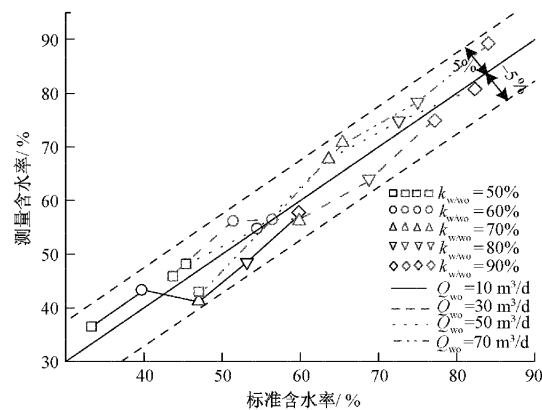
(b) Q70W27G40 多相流工况下的 OFMM 输出信号波形
(b) OFMM output signal waveform under multiphase flow working condition (Q70W27G40)

图 16 FOCIS 输出信号波形

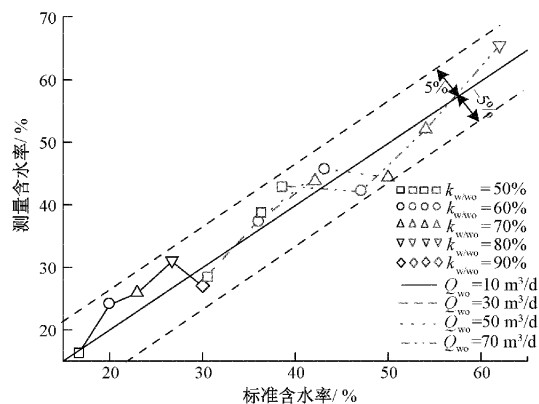
Fig. 16 The output signal waveform of FOCIS

由图 16 可知,随着介质交替流过 FOCIS 时,CMM 与 OFMM 交替输出出低压脉冲信号与高压脉冲信号,多相流实验结果与仿真结果相同。

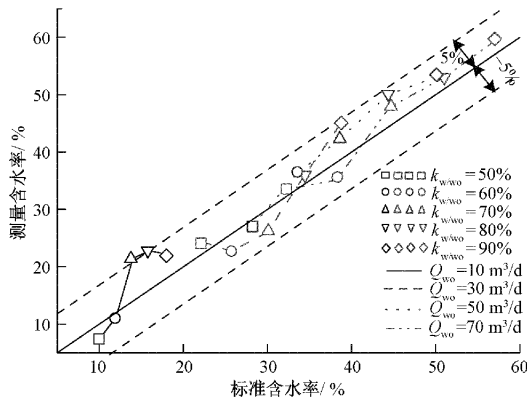
为了验证 FOCIS 置于垂直上升管内多相流相含率检测性能。实验中对对应气体流量 (Q_g) 分别为 5、20、40 m^3/d 。油水总流量 (Q_{wo}) 分别为 10、30、50 及 70 m^3/d ,水相 (Q_w) 占油水总流量 (Q_{wo}) 比例 ($k_{w/wo}$) 分别 50%、60%、70%、80% 及 90%。采集 FOCIS 输出信号后,设置 CMM 非导电相信号阈值为 1.96 V,通过阈值处理后得到含水率信息如图 17 所示。



(a) 气体流量为 $5 \text{ m}^3/\text{d}$ 的多相流下含水率测量结果
(a) The measurement result of rate of water content under multiphase flow with gas flow rate of $5 \text{ m}^3/\text{d}$



(b) 气体流量为 $20 \text{ m}^3/\text{d}$ 的多相流下含水率测量结果
(b) The measurement result of rate of water content under multiphase flow with gas flow rate of $20 \text{ m}^3/\text{d}$



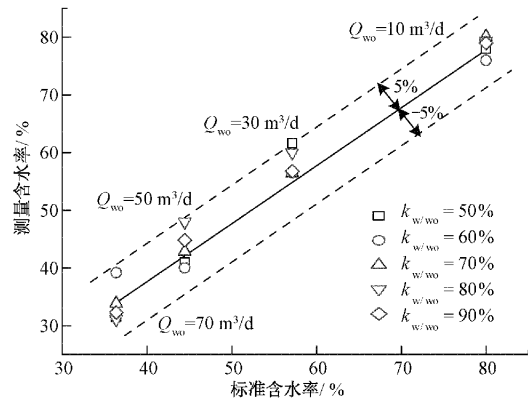
(c) 气体流量为40 m³/d的多相流下含水率测量结果
 (c) The measurement result of rate of water content under multiphase flow with gas flow rate of 40 m³/d

图 17 多相流下的含水率测量结果

Fig. 17 The rate of water content measurement results under multiphase flow

由图可知,不同工况下,测量含水率随着标准含水率的增加而增大,表现出良好的线性特性,且测量含水率绝对误差绝大部分结果在 5% 以内。因此 CMM 可以有效测量多相流含水率参数信息。

设置 OFMM 气相阈值为 1 V,通过阈值处理后得到含气率信息。如图 18 所示。



(c) 气体流量为40 m³/d的多相流下含气率测量结果
 (c) The easurement results of rate of gas content under multiphase flow with gas flow rate of 40 m³/d

图 18 多相流下的含气率测量结果

Fig. 18 The rate of gas content measurement results under multiphase flow

由图可知,不同工况下,含气率测量值随着标准含气率的增加而增大,体现出良好的线性特性,且含气率测量绝对误差绝大部分结果在 5% 以内。因此 OFMM 可以有效测量多相流含气率参数信息。

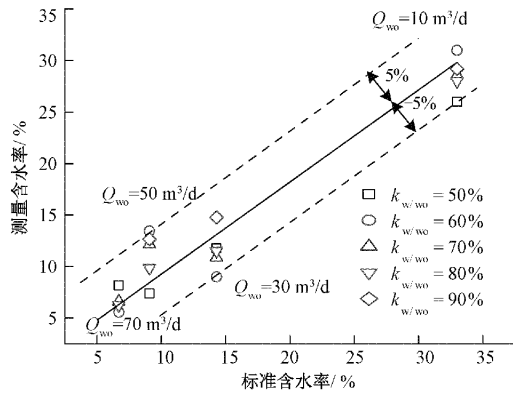
综上所述,FOCIS 有效用于多相流相含率测量,且测量误差约在 5% 以内。进一步证明研制的 FOCIS 用于石油生产多组分测量是有效和准确的。

5 结 论

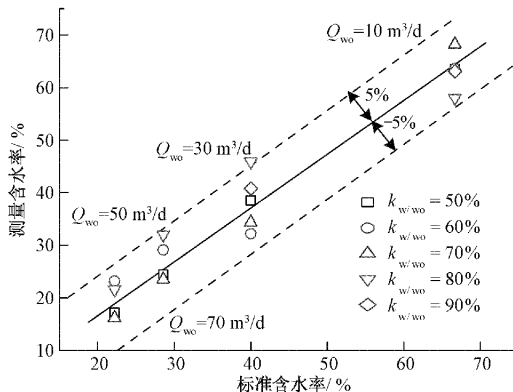
本文研制了一种用于石油生产多组分监测光纤电导一体式传感器,采用 ZEMA 光线追迹方法和 FEM 方法建立 FOCIS 仿真模型。在 FOCIS 数值分析中,对 CMM 电场分布、CMM 响应特性、及 OFMM 响应特性等问题进行了数值仿真分析。并在此基础上对 FOCIS 进行了实验测试研究,仿真和实验结果验证了 FOCIS 多相流多组分测量效果是明显的,在气流量 5、20、40 m³/d,油水总流量 10、30、50、70 m³/d,液相含水率 50%、60%、70%、80%、90% 等工况下。测量误差在 5% 以内。研究成果为多相流多组分测量仪器的研制和生产剖面测井解释评价提供了理论依据和技术参考。但是,随着管道截面越大,管道内三相流混合越不均匀,FOCIS 测量结果代表性越低,准确性越差。因此要结合实际油井井下、井口环境的现场管道尺寸,重新设计研究符合油井井下、井口多组分测量的“阵列光纤电导一体式传感器”。

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



(a) 气体流量为5 m³/d的多相流下含气率测量结果
 (a) The easurement results of rate of gas content under multiphase flow with gas flow rate of 5 m³/d



(b) 气体流量为20 m³/d的多相流下含气率测量结果
 (b) The easurement results of rate of gas content under multiphase flow with gas flow rate of 20 m³/d

- Xingshugang anticline in the Daqing Oilfield, China[J]. *Petroleum Science*, 2016, 13(3): 418-433.
- [2] JIN Q, WANG D, HE R, et al. Identification and description of small faulted-block reservoirs[J]. *Shiyou Xuebao/Acta Petrolei Sinica ActaPet*, 2009, 30(3): 367-371.
- [3] ISMAIL I, SHAMSUL A, ISMAIL I, et al. Review of oil-water through pipes [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, 45(1): 357-374.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] WEI Y, YU H Q, CHEN Q, et al. A novel conical spiral transmission line sensor-array water holdup detection tool achieving full scale and low error measurement [J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4140.
- [10] 王铁峰, 王金福, 张欢, 等. 超声多普勒测速仪在液-固和气-液两相流测量中的应用 [J]. *化工学报*, 2002, 53(4): 427-432.
- WANG T F, WANG J F, ZHANG H, et al. Application of ultrasound doppler velocimetry in multiphase flow measurement [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2002, 53(4): 427-432.
- [11] TEYSSEDOU A, TAPUCU A, LORTIE M. Impedance probe to measure local void fraction profiles[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1988, 59(4): 631-638.
- [12] 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 Scientific Instruments*, 2017, 88(11): 1-14.
- [13] MIZUSHIMA Y, SAKAMOTO A, SAITO T. Measurement technique of bubble velocity and diameter in a bubble column via single-tip optical-fiber probing with judgment of the pierced position and angle[J]. *Chemical Engineering Ence*, 2013, 100(1): 98-104.
- [14] YANG Q Y, JIN N D, WANG F, et al. Measurement of gas phase distribution using multifiber optical probes in a two-phase flow [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(12): 6642-6651.
- [15] LI Y W, ZHAO W, CHEN J L, et al. Modeling and optimal design of fiber-optic probe for medium detection based on computer simulation[J]. *Cluster Computing*, 2017, 22(5): 11207-11226.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 郝虎. 新型双接收端光纤探针传感器分相含率测量技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- HAO H. Research on technology of phase ratio measurement of new dual receiver fiber probe sensor[D]. Qinhuangdao: Yanshan University of China, 2019.
- [20] 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. Now, he is a Ph.D. student in 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 in 2007 and M.Sc. degree in 2010 both from Yanshan University, received his Ph.D. degree from Beihang University

in 2015. Now, he is an associate professor in School of Electrical Engineering, Yanshan University. He is mainly engaged in the research of intelligent information processing technology.



孔德瀚, 2009年于大连理工大学获得学士学位, 2012年于燕山大学获得硕士学位, 2017年于燕山大学获得博士学位, 现为河北环境工程学院信息工程系讲师, 主要研究方向为智能信息处理。

E-mail: kdh0312@163.com

Kong Dehan received his B.Sc. degree from Dalian University of Technology in 2009, received his M.S. degree in 2012 and Ph.D. degree in 2017 both from Yanshan University. Now, he is a lecturer in Department of Information Engineering, Hebei Institute of Environmental Engineering. He is 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 in 1991 from Jiangnan Petroleum Institute and received his M.Sc. degree from Xi'an Shiyou University in 1998. He is the chief engineer in Production Logging Center, China Petroleum Logging Co., Ltd., CNPC. He is mainly engaged in multiphase flow detection, intelligent control and intelligent information processing research.