

电容持水率检测方法研究及传感器设计

刘国权¹ 陈强¹ 王志杰¹ 邱闯² 魏勇² 甘如饴²

LIU Guoquan CHEN Qiang WANG Zhijie QIU Chuang WEI Yong GAN Ruyi

摘要

持水率作为油井产出剖面评价的关键参数,对产水层位确定、提高油气产量至关重要。目前常用的持水率传感器存在变化范围小、性能易受杂散电容影响的不足,导致其测量精度较低。因此,提出了一种电容持水率传感器前端数字化的思想,设计了一款适用于低持水率(<50%)环境下的微型持水率传感器,通过增加多谐振荡电路,使该传感器同时具备小型化和数字化的特点。测试结果表明,所设计的传感器的测量误差小于1.9%,具有分辨率高、性能稳定的特点。上述研究为电容持水率传感器的阵列化和井下流体流动的可视化奠定了基础。

关键词

低持水率; 电容法; 传感器; 小型化; 前端数字化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.05.021

0 引言

随着电子信息技术及计算机技术的快速发展,以电学参数为主的持水率测量方法及相应仪器在各个领域得到了广泛应用。在石油开采、石油化工行业中,采用电容法对井下流体持水率进行高精度在线检测可有效提高石油开发效率。目前,国内外相关学者基于电容法对传感器进行了设计研究。例如,赵晓强等人^[1]提出了利用杆状电容传感器测量油水持水率的方法,尽管该传感器可通过测量截面水位的高度来获取持水率信息,但它仅适用于水平井和低流量时界面分离情况,当流量较高或电容器截面直径远小于井筒截面直径时,传感器的测量精度会受影响,导致测量结果出现偏差。另外,于宝等人^[2]设计了同轴式电容传感器,吴昊等人^[3]研制了电导电容组合传感器,上述两种传感器体积较大,导致传感器在油井截面上分布有限。根据原油持水率在线测量需求,要获取油井截面上持水率的分布信息,要求持水率传感器在油井截面上呈阵列式分布。传感器阵列的优势在于它能同时采集多个数据,可精确反映油水分布信息,且在不影响油水混合流体流型的基础上,还可以对环境干扰进行补偿,减少误差,提高测量稳定性。因此,传感器的小型化对提升测量精度和稳定性十分重要。

此外,当前基于电容法测量持水率的原理均是将电容值转化为油水混合流体的相对介电常数,进而获得持水率数据。这种测量方法的弊端在于:电容传感器与检测电路间通过较长的导线进行连接,传感器在工作时的电容变化量往往小于10 pF,而导线的弯曲、变形、热噪声等带来的杂散电容远大于其电容变化量,且油井高温高压环境也会对杂散电容的大小产生影响,从而使传感器的测量精度骤降。因此,如何消除井下杂散电容对持水率测量的影响成为当前的重中之重。前端数字化是一种在传感器内部就将信号数字化的方法,它能够将易受环境因素影响的模拟信号转化为不易受影响的数字信号,在减小噪声的同时,提高测量精度和抗干扰能力。

综上所述,要提高电容传感器检测精度,必须解决两个问题:一是传感器结构小型化,二是前端数字化。因此,本文将基于电容持水率检测方法设计一款数字探针式电容传感器,该传感器具备结构集成度高、分辨率高和精度高等特性,为井下持水率高效测量奠定坚实基础。

1 基于电容法的持水率检测方法分析

对于油水混合物而言,根据其共混状态,其等效介电常数为^[4]:

$$\epsilon_m^a = Y_w \epsilon_w^a + (1 - Y_w) \epsilon_o^a \quad (1)$$

式中: ϵ_o 是原油的相对介电常数, ϵ_w 是水的相对介电常数, ϵ_m 是油水混合介质的相对介电常数, Y_w 是油水混合介质的持水率, a 是油水状态分布系数,取值范围为 $[-1, 1]$ 。 $a=0$ 表示油水混合均匀; $a=1$ 表示油水按同轴层状分布; $a=-1$ 表示油水按水平同轴层状分布。

由于在油井环境中,水的相对介电常数 ϵ_w 为80,油的

1. 中国石油集团测井有限公司测井技术研究院 陕西西安 710077
2. 长江大学电子信息与电气工程学院 湖北荆州 434023
[基金项目] 中石油科学研究与技术开发项目“井下长置式产层动态监测与控制关键技术研究”(2021DJ4004); 中石油科学研究与技术开发项目“水平井动态监测测井仪器现场试验”(2022ZS04)

相对介电常数 ϵ_o 为 2.1, 故持水率 Y_w 仅与流体的相对介电常数和油水混合状态有关, 因此可根据流体的相对介电常数求得流体持水率。

对式 (1) 进行变换, 可得到持水率的计算公式:

$$Y_w = \begin{cases} (\epsilon_m - \epsilon_o) / (\epsilon_w - \epsilon_o) & a=1 \\ (\sqrt{\epsilon_m} - \sqrt{\epsilon_o}) / (\sqrt{\epsilon_w} - \sqrt{\epsilon_o}) & a=0.5 \\ (\ln \epsilon_m - \ln \epsilon_o) / (\ln \epsilon_w - \ln \epsilon_o) & a=0 \\ [\sqrt{\epsilon_w}(\sqrt{\epsilon_m} - \sqrt{\epsilon_o})] / [\sqrt{\epsilon_m}(\sqrt{\epsilon_w} - \sqrt{\epsilon_o})] & a=-0.5 \\ (\epsilon_w - \epsilon_o \epsilon_w / \epsilon_m) / (\epsilon_w - \epsilon_o) & a=-1 \end{cases} \quad (2)$$

图 1 为 a 分别取 1、0.5、0、-0.5、-1 时油水持水率与相对介电常数的关系。由图 1 可知, 对于不同的油水分布状态, 持水率与相对介电常数呈单调递增关系。

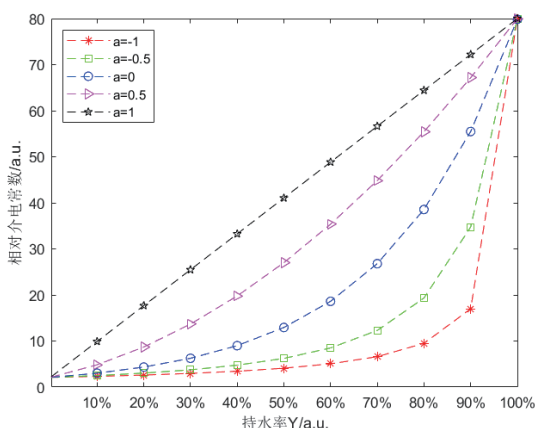


图 1 持水率与相对介电常数的关系

综上所述, 不同持水率的油水混合流体的相对介电常数有较大差异, 这为通过电学参数的测量来确定油井中原油的持水率提供了一种有效的技术手段。具体来说, 在已知油水混合状态的前提下, 可以通过测量油水混合物的相对介电常数, 推算出持水率。

2 探针式电容传感器的设计与实现

2.1 传统电容传感器结构分析

传统电容传感器结构示意图如图 2 所示。

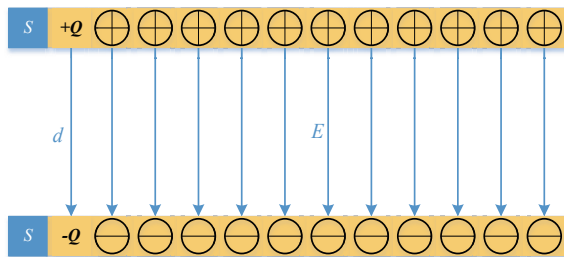


图 2 传统电容传感器结构

该传感器由带等量异种电荷的上下极板组成, 上下极板间形成稳定电场, 当两极板间有流体经过时, 其相对介电常

数会发生变化, 进而引起电容值变化, 因此可通过测量电容值判断流体的特性, 其计算公式为:

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (3)$$

式中: C 表示电容, ϵ 表示流体的相对介电常数, S 表示电容器的电极面积, d 表示电容器的电极间距, 可看出电容与介电常数成正比, 故可用电容值计算出流体持水率。

尽管传统电容式传感器已能够应用于油水混合流体的持水率测量, 但由于其体积过大, 测量范围受限, 且在油井腐蚀环境下, 双极板结构易被破坏, 从而出现测量精度失准的问题, 导致其无法适应当前油井开发趋势。因此, 设计一款具有小型化特性、分辨率良好且测量精度高的传感器至关重要。

2.2 探针式电容传感器结构设计

基于前述理论分析, 图 3 给出了探针式电容传感器的结构示意图。由图 3 可知, 该传感器由圆柱形内电极、绝缘层和圆环形外电极构成, 其中外电极长 25 mm, 内径为 6 mm; 绝缘层长 20 mm, 内径为 3.9 mm, 外径为 6 mm; 内电极长 14 mm, 直径为 3.9 mm。内外电极间形成的稳定电场, 对流过其表面的油水混合流体的介电常数进行测量。

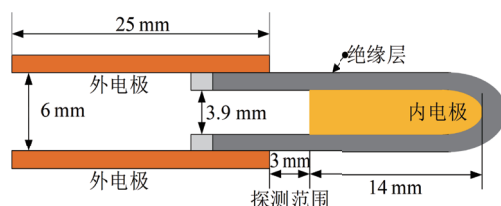


图 3 探针式电容传感器结构

2.3 传感器前端数字化处理

为克服杂散电容对测量的影响, 本文设计了一种数字化振荡电路, 如图 4 所示。

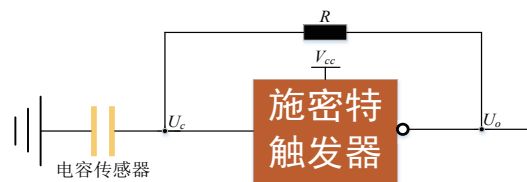


图 4 多谐振荡电路结构原理图

该电路由电容传感器和反相施密特触发器组成, 其工作原理为: 电源 V_{cc} 开启瞬间, 电容传感器两端电压 U_c 为 0, 此时输出电压 U_o 为高电平, 通过电阻 R 对电容传感器充电, 当 U_c 超过最高阈值电压时, 电容开始放电, 输出电压变为低电平, 当 U_c 降到最低阈值电压时, 输出变为高电平, 如此循环往复形成振荡, 通过测量振荡频率, 即可得到相应的持水率数据。振荡频率计算公式为:

$$f = \frac{1}{RC_{sen} \ln \left(\frac{V_{cc} - V_{T-}}{V_{cc} - V_{T+}} \cdot \frac{V_{T+}}{V_{T-}} \right)} \quad (4)$$

式中： f 为振荡频率， R 为电阻， V_{cc} 为电源电压， V_{T+} 为最高阈值电压， V_{T-} 为最低阈值电压， C_{sen} 为传感器电容值。由上式可知，除传感器电容值 C_{sen} 外，其余均为常量，当常量保持恒定时，振荡频率仅与传感器电容值有关。因此，多谐振荡电路可实现电容到频率的转化。通过测量频率即可得出相应的持水率信息，这有效克服了传感器受杂散电容影响而导致精度较差的弊端。

2.4 探针式电容传感器的装配

根据前述分析，将多谐振荡电路模块与探针式电容传感器进行内部整合。整合后的数字探针式电容传感器结构如图5所示，该传感器由陶瓷外壳、内电极、多谐振荡电路、外电极等四部分构成，其内外电极间形成稳定电场，当油水混合流体流经传感器时，其电容值会转化为频率值，从而获得持水率信息。



图5 传感器各部分组合图

3 传感器实验分析

为了模拟油水混合流体介电常数从全油状态到全水状态的连续变化过程，按照10%的间隔单位配置了从0%到100%全范围的持水率样品，共获得了11种不同持水率的测试样本。另外，为确保实验条件的一致性，将实验温度设定为25℃，实验装置图如图6所示。

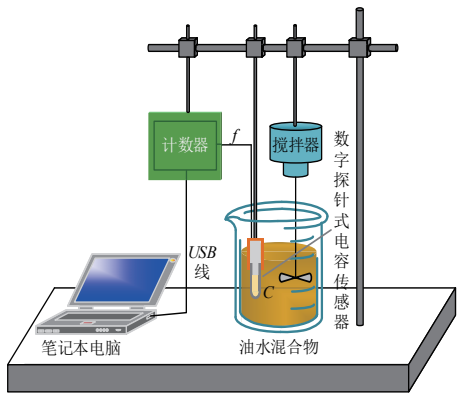


图6 实验装置示意图

该装置主要由铁架台、烧杯、搅拌器、数字探针式电容传感器、计数器电路模块以及笔记本电脑组成，其实验原理为：配置不同比例的油水混合物，利用搅拌器对油水混合物进行充分搅拌，数字探针式电容传感器将测得的电容信息转变为频率信息，继而通过计数器对频率进行计数，最后将所

测数据传输到笔记本电脑，从而获得持水率数据。实验共测得11组数据，测量结果如图7所示。

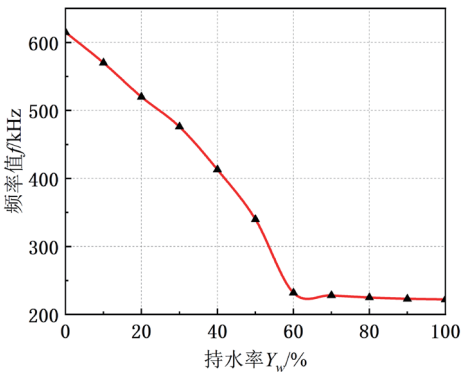


图7 频率值与持水率的关系

由图7可知，（1）随着持水率的增加，频率值不断减小，二者呈单调递减趋势；（2）在0%～50%低持水率段变化显著，具有良好的分辨率；（3）在50%～100%高持水率段变化缓慢，分辨率较差。为检验传感器测试精度，本文进一步对低持水率段的测量误差进行计算，如表1所示。由表1可知，该传感器在低持水率段的最大相对误差为1.9%，最大绝对误差为0.73。以上数据表明，本文所设计的传感器具有误差小、分辨率和精度高、性能稳定的特点。

表1 持水率测量的相对误差和绝对误差

标准持水率 / %	测量持水率 / %	绝对误差	相对误差 / %
5.00	5.09	0.09	1.80
10.00	10.15	0.15	1.50
20.00	20.31	0.31	1.55
30.00	30.57	0.57	1.90
40.00	40.58	0.58	1.42
50.00	50.73	0.73	1.46

4 结论

本文基于电容持水率的检测方法，对传感器进行了优化设计，通过将传统模拟式电容传感器与多谐振荡电路集成，将电容变化转换为交变信号的频率变化，有效地解决了电容变化较小且易受杂散电容的影响而导致的精度不高问题。实验证明，数字化探针式电容传感器在低持水率段（<50%）下具有性能稳定、测量精度高、测量误差小的优点，可以广泛应用于电容法的持水率检测，具有良好的适用性和应用场景。

参考文献：

[1] 赵晓强,郎济凤,张兴凯,等.一种水平井持水率电容测量仪的研制[J].仪表技术与传感器,2014(4):19-21+37.
 [2] 于宝,于靖民,陈钰,等.低流量下同轴阵列电容法测量含水率实验研究[J].测井技术,2012,36(6):559-563.
 [3] WU H, TAN C, DONG X, et al.Design of a Conductance

- and Capacitance Combination Sensor for water holdup measurement in oil-water two-phase flow[J].Flow measurement and instrumentation, 2015, 46:218-229.
- [4] 方禹. 阵列式电容持水率检测仪器研究 [D]. 荆州: 长江大学, 2016.
- [5] 方禹, 余厚全, 唐桃波, 等. 基于电容法的原油局部持水率检测方案 [J]. 测井技术, 2016, 40(3):307-310.
- [6] ZHANG H X, ZHAI L S, YAN C, et al. Capacitive phase shift detection for measuring water holdup in horizontal oil-water two-phase flow[J].Sensors, 2018, 18(7):2234.
- [7] DAI R S, JIN N D, HAO Q Y, 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): 690-708.
- [8] 侯培国, 张思远. 基于 CAV444 的电容式原油含水率在线检测 [J]. 仪表技术与传感器, 2015(8):80-81+87.
- [9] 魏勇, 余厚全, 戴家才, 等. 基于 CPW 的油水两相流持水率检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6):1506-1515.
- [10] 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.
- [11] 郝虎, 孔德明, 陈晓玉, 等. 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 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 26-38.
- [12] 李家骏, 马焕英, 李恒, 等. 海上油田水平井阵列电容持水率计算方法 [J]. 测井技术, 2023, 47(1):55-61.
- [13] 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.
- [14] 马舜祺, 刘兴斌, 荣远宏, 等. 一种基于 CAV424 的电容含水率测量系统设计 [J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(2):72-75.
- [15] 史航宇, 宋红伟, 郭海敏, 等. 低产水平井油水两相阵列持水率仅数据处理方法比较 [J]. 中国科技论文, 2021, 16(1): 12-19.
- 【作者简介】**
 刘国权 (1969—), 男, 河北沧州人, 硕士, 工程师, 研究方向: 石油测井仪器。
 邱闯 (2002—), 通信作者 (email: 2830440848@qq.com), 男, 湖北随州人, 硕士研究生, 研究方向: 石油测井仪器。
- (收稿日期: 2024-03-05)

(上接第 96 页)

- [2] RUWANDI F W D, TANTRIGODA D A, ROSA S R D, et al. Infrared thermography as a non-destructive testing method for adhesively bonded textile structures. [J].Infrared physics and technology, 2019, 98:89-93.
- [3] WANG Q, LIU Q, XIA R, et al. Defect depth determination in laser infrared thermography based on LSTM-RNN[J].IEEE access, 2020, 8:153385-153393.
- [4] ZENG Z, LI C, TAO N, et al. Depth prediction of non-air interface defect using pulsed thermography[J].NDT & E international: independent nondestructive testing and evaluation, 2012, 48:39-45.
- [5] HU C, DUAN Y, LIU S, et al. LSTM-RNN-based defect classification in honeycomb structures using infrared thermography.[J].Infrared physics and technology, 2019, 102:103032-103032.
- [6] FANG Q, MALDAGUE X. A method of defect depth estimation for simulated infrared thermography data with deep learning[J].Applied sciences-basel, 2020, 10(19):6819.
- [7] CHEN J, ZU Y, YANG J. Detection method of compound chemical material hole based on deep learning image[J]. Journal of nanomaterials, 2022, 2022(10):1-10.
- [8] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: Better, faster, stronger[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2017: 6517-6525.
- [9] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]//2015 IEEE International Conference on Computer Vision 2015. Piscataway: IEEE, 2015: 1440-1448.
- [10] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[C]//Advances in Neural Information Processing Systems 28, vol. 1. La Jolla: Neural Information Processing Systems, 2015:91-99.
- 【作者简介】**
 李铁军 (1978—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 讲师, 研究方向: 机械设计理论及研究。
 王菁鹭 (2000—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 研究方向: 材料缺陷检测。
- (收稿日期: 2024-03-12)