

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205294

原油含水率测量传感器性能优化实验研究*

孙金辉 谢丽蓉

(新疆大学 乌鲁木齐 830037)

摘要:石油开采实际工况复杂多变,在利用电导法在线测量含水率时,环境因素温度、矿化度和传感器本身的电极结构会带来测量上的偏差。本研究设计不同电极环内径、激励电极间距的三电极和四电极进行对比实验并利用标定实验获取电导率和温度信息。在考虑到温度、信号调理电路等因素造成非线性性的情况下,建立综合补偿函数并利用最小二乘法进行优化以求取温度和非线性综合补偿参数。通过电极结构的优化和得到的补偿参数实现对传感器的性能优化。搭建含水率测试系统进行模拟测试验证,实验表明,经过电极结构参数优化和补偿的传感器测量误差在2%之内,稳定性较好,可满足原油含水率的测量。

关键词:原油;电极电导传感器;结构优化;温度和非线性综合补偿参数;最小二乘法

中图分类号:TE937;TP212 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**510.8040

Performance optimization and experimental research of crude oil water content measurement sensor

Sun Jinhui Xie Lirong

(Xinjiang University, Urumqi 830037, China)

Abstract: The actual working conditions of oil extraction are complex and changeable. When using the conductometric method to measure the water content online, the environmental factors, temperature, salinity and the electrode structure of the sensor itself will bring about measurement deviations. In this paper, three-electrode and four-electrode with different electrode ring inner diameter and excitation electrode spacing are designed for comparative experiments, and conductivity and temperature information were obtained by calibration experiments. Considering the nonlinearity caused by temperature and signal conditioning circuit, the comprehensive compensation function is established and optimized by the least square method to obtain the temperature and nonlinear comprehensive compensation parameters. The performance of the sensor is optimized by optimizing the electrode structure and compensating parameters. The water content testing system was established for simulation testing and verification. Experiments show that the measurement error of the sensor optimized and compensated for the electrode structure parameters is within 2%, and the stability is good, which can meet the measurement of crude oil water content.

Keywords: crude oil; electrode conductivity sensor; structural optimization; temperature and nonlinear comprehensive compensation parameters; least square method

0 引言

国内油田的开采已进入高含水率阶段,准确及时的含水率测量对于石油产业而言,有助于估计油井的产量和寿命,对石油的品质管控也起到重要的作用^[1]。

原油含水率的检测方法有很多,其中最为常用的主要包括密度法^[2]、微波法^[3]、电容法^[4]、电导法^[5-7]、超声波检测法^[8]、射频法及射频幅值法^[9-10]、多传感器融合^[11]等,这些方法在使用时具有的准确性和精度不同,适用的条件也不同。油水两相流中,只要确定了流体中电阻抗和相分布之间的关系,采用电导法便能解决流体中油相含水率的问题^[12],电极电导法传感器作为截面阵列式电阻

收稿日期:2022-03-23 Received Date: 2022-03-23

* 基金项目:国家自然科学基金(62163034)、新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学重点项目(XJEDU2020I004)资助

的一种,其工作原理为通过激励电极在测量区域建立敏感场,利用流体流动状态改变引起敏感场域内的电导率改变,导致测量边界电压发生变化^[13],适用于高含水油田含水率测量。然而电极电导传感器测量时,易受环境温度和混合溶液矿化度的影响,导致其测量精度较差。因此,需要改善传感器的温度特性和受矿化度带来的不利影响。目前,改善传感器温度特性的手段主要包含硬件补偿和软件补偿两类方法^[14-15]。硬件补偿的方法主要通过串并联热敏电阻、二极管等元件优化测量电路的温度敏感特性^[16]。采用硬件补偿方式,需要相关电路设计和反复调试,较为麻烦。软件补偿方法根据标定数据与传感器输出之间的函数关系以达到温度补偿的目的^[17],其中利用最小二乘法原理拟合传感器的非线性输出特性,具有补偿速度快、易实现在线补偿的特点,适用于电极电导法传感器的补偿校正。

电极电导法传感器的电极是含水率测量的敏感元件,其结构对于改进传感器测量精度有很大的影响。高国旺等^[19]通过对电极电导传感器模型进行仿真分析,从理论上分析了电极结构参数对传感器性能的影响。然而相关研究只给出了电极结构仿真的结论,并未考虑不同结构在经过温度和非线性补偿下精度变化的对比分析。难以对电极式电导传感器在实际工况下测量原油含水率提供直接的参考。

基于以上的分析,本文设计了由因瓦合金圆环精制而成的电极和不同电极结构的电导法传感器进行对比实验,确定合适的电极结构参数。同时,搭建标定实验系统采集电导率和温度数据,并将温度和非线性两种影响测量的因素综合考虑进行数学建模并利用最小二乘法求取补偿参数。通过以上研究实现对电极电导传感器测量性能的优化。

1 整体思路

本文整体流程如图 1 所示。首先,设计加工不同结构的电极电导传感器,选择合适的激励信号;其次,对不同结构传感器进行标定得到各自的温度和电导率信息,再将温度和非线性两种影响测量结果的因素综合考虑建立数学模型,使用最小二乘法计算得到相应的补偿参数;最后,进行模拟测试实验,验证是否达到优化传感器性能的目的。

2 电极电导法传感器设计与参数校正

2.1 电导法石油含水率的测量原理

电导率是描述溶液导电能力的一种物理参数,油水混合含水率的检测本质上可以理解为对电导率的测量。

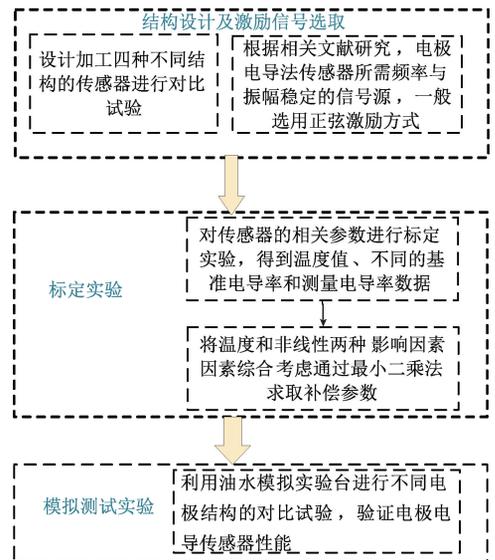


图 1 整体思路流程

Fig. 1 Overall thinking process

环形电极电导式含水率油井测量技术在水为连续相条件下工作性能良好,具有结构简单、成本低廉、响应速度快、重复性一致性良好等优点。其在一些高含水油井开采中得到了较好的应用,测量结果较好。

本文设计研制的环形电导法含水率传感器如图 2 所示,此处以三电极结构为例说明传感器的测量原理。对管道内电极阵列最外侧激励电极对 E1 和 E2 施加电流激励形成电场,通过获取测量电极 D 和激励电极负极间的电势降,可得到被测流场内两相流体阻抗的空间平均值,再经过信号处理电路和放大、滤波及 A/D 转换电路后,输出采集信号,计算得到电导率。

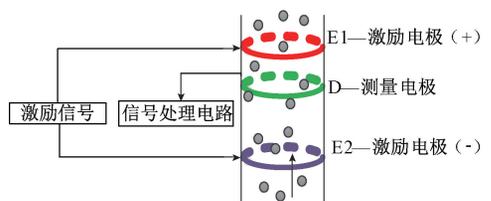


图 2 测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement

油的电导近似为 0,水的电导率取决于其矿化度,而对于油水混合物,其混合流体的电导率主要取决于水的体积含量和相分布状态。根据电导理论,均匀分布在连续的导电相中时,混合相的电导率由体积分数和导电相确定。假设油水均匀混合,且水为连续相时,反映混相电导率与含水率及水的电导率利用 Maxwell 公式表示为:

$$\sigma_m = \frac{2\rho}{3 - \rho} \sigma_w \quad (1)$$

式中： ρ 为油水混合物中的含水率（体积含量的百分比）。

σ_m 和 σ_w 分别为混合流体和水的电导率（西门子/米）。

由式(1)可知,对于油水混相系统,原油含水率可以利用油水混相时的电导率和纯水相的电导率的比值求取得到。

2.2 不同结构传感器设计

常见的电导式传感器根据电极的个数分为二极式、三极式和四极式。相较于二极式而言,三电极和四电极具有可以有效避免电极极化带来测量误差的优点,对矿化度的适应范围更大。

为了便于对比不同电极方式对仪器测量结果带来的影响,本文设计三电极和四电极两类规格的探头,并改变电极的内径、宽度和间距参数,进行研究。

4 种不同传感器电极的设计尺寸参数主要有:传感器电极结构形式包括常规三电极、常规四电极、加宽型三电极、宽内径三电极 4 种类型。相关结构和参数如图 3 所示。常规四电极结构如图 3(a) 所示,主要包括一对间距为 30 mm 的激励电极、一对间距为 10 mm 的测量电极和一个温度探头接口,其中 4 个电极环的内径和电极宽度分别为 15 mm 和 2 mm。加宽、宽内径、常规三电极的结构分别如图 3(b)~(d) 所示,主要包括一对间距为 30 mm 的激励电极、一个距离激励电极负极 20 mm 的测量电极和一个温度探头接口。加宽、宽内径、常规三电极的电极环内径和电极宽度分别为 15 mm 和 4 mm、30 mm 和 2 mm、15 mm 和 2 mm。

在实际设计中,由因瓦合金圆环精制而成的电极环平滑镶嵌在聚醚醚酮(PEEK)管道的内壁上。电极采用因瓦合金制造,其温度膨胀系数小,采用一体化结构注塑减小因温度变化造成的结构变形。探头均设计为贯通式

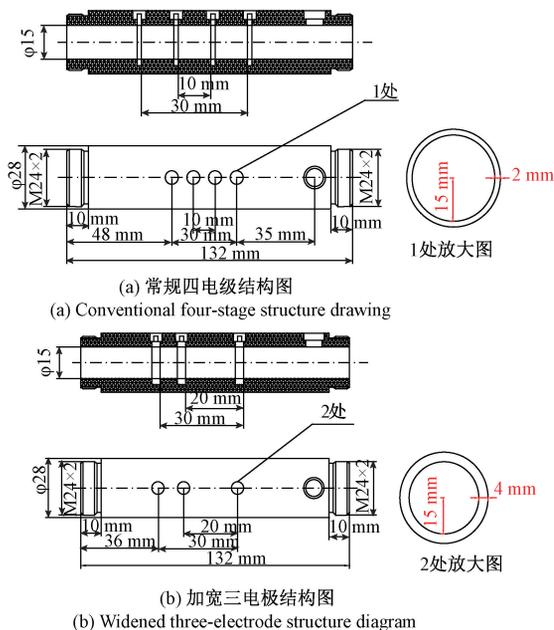


图 3 不同参数传感器结构图

Fig. 3 Structure diagram of sensors with different parameters

结构,即流体自探头一端流入,从另一端流出,电极不会对流体带来阻挡,环形电极的外端通过接线柱将信号引出进行测量。

2.3 激励信号的选取

在基于电学敏感原理的电导式传感器阵列油水两相流测量中,被测流体在不同激励频率信号下有不同的响应^[20]。对电导率传感器激励电极施加直流电源时,会导致电极失去原有的平衡状态,电极电位偏离平衡电位产生极化现象,这将影响电导率的测量精度。在电极两端通常施加交流激励信号代替直流激励信号,可降低极化现象的影响。在交流电源下,造成极化现象的因素可由式(2)表示^[21]:

$$\delta = \frac{U}{f \cdot R_x} \quad (2)$$

其中, R_x 为溶液等效电阻, U 为极化反电势, f 的为频率, δ 为测量偏差。可知测量偏差与频率 f 和 R_x 成反比,与 U 成正比,所以原则上通过增加频率和混合溶液的等效电阻,减少极化现象。采用电流激励电压测量的工作方式,当激励信号频率在 10~100 kHz 时,两相流体主要表现为电阻特性,且电导环测量的幅值变化与流体电阻值成正比^[22]。通常采用提高激励信号的频率,一般是 600~2 100 Hz,最高可达 12 kHz,但是一直持续地提高供电频率,会产生电容效应,影响传感器测量的精度。

2.4 温度和非线性参数综合求取

电导率传感器在测量过程中由于受到水矿化度、溶液温度、流体速度、油水混相状态等外部环境的影响,导致得到的测量值与实际值间存在一定误差,需要进行相关标定实验确定校正参数,以确保测量数值的准确性和稳定性。在石油含水率传感器实际应用环境中,流体速度和油水混相状态不均匀而造成的测量值波动,并无规律性,很难通过离线标定方式进行补偿。本文主要考虑温度和测量非线性对测量结果的影响。

在电导率测量过程中,不同温度下离子的导电性会存在较大差异,随着温度升高,电解质溶液的电导率将增大。在低浓度下,电导率和温度之间的关系可以表示为:

$$\theta_t = \theta_0(1 + \theta_1(t - t_0) + \theta_2(t - t_0)^2) \quad (3)$$

式中: θ_t 为温度 t ($^{\circ}\text{C}$) 下的电导率, θ_0 为温度 t_0 (一般取 25°C) 下的电导率 θ_1 和 θ_2 为溶液的温度系数。在精度要求不高时,可以舍去高次项后得:

$$\theta_t = \theta_0(1 + \theta_1(t - t_0)) \quad (4)$$

由于传感器电极自身的参数偏差、信号调理电路造成的零漂和非线性、AD 转换存在的数据误差等因素,会使传感器的最终测量结果与电导率真实值存在一定偏差,此关系多数情况下是非线性的,且由于影响测量结果的中间环节多、过程复杂,很难用精确的数学模型予以描述,这里可采用 Taylor 展开形式描述测量值与真实值之间的关系:

$$\theta' = f(\sigma) = \lambda_0 + \lambda_1\theta + \lambda_2\theta^2 + \dots + \lambda_n\theta^n \quad (5)$$

式中: θ' 为电导率的真实值, θ 为测量值, $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ 为泰勒展开项系数。为便于描述,这里只取前 4 项对该关系予以简化。

3 实验验证

对不同结构传感器进行温度和非线性综合补偿,需要提前得到测量的温度和电导率信息,计算得到补偿参数。将不同传感器进行校正后,利用模拟测试实验系统,获得数据分析其测量误差和误差 RMS 值,验证是否达到优化传感器性能的目标。

3.1 标定实验

基于电导式测量原理的含水率传感器检测容易受到环境温度、溶液矿化度和液体流量等因素的干扰,本文设计了电导率温度与非线性参数综合标定系统对传感器进行温度补偿和非线性补偿。

该系统如图 4 所示,主要由恒温加热水浴锅、水槽、循环泵、测试管路、标准电导率仪器、数据采集板和计算机等构成。标准电导率仪连接计算机,实时采集监测溶液的实际电导率值和温度值。待测电导率探头和温度传

感器连接到数据采集板上,并进一步连接计算机进行数据采集和监测。通过设定恒温加热器的温度值改变盐溶液的温度,记录标准仪器的数值、采集板的电导率原始值、温度值。测试完多个温度点的数据后,更换不同浓度的盐溶液,重新进行下一组标定实验,如此可以获得多组包含不同矿化度和不同温度条件下的数据,可用多组 (θ', θ, t) 数据表示。

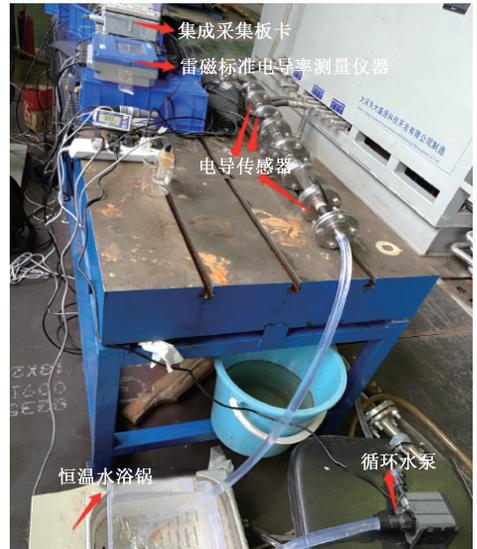


图 4 电导率标定系统

Fig. 4 Conductivity calibration system

将温度和非线性两种因素的影响进行综合补偿参数求取,可得在温度 t 下的电导率真实值可表示:

$$(1 + \lambda_4(t - t_0))\theta' = (\lambda_0 + \lambda_1\theta + \lambda_2\theta^2 + \lambda_3\theta^3) \quad (6)$$

利用获取的多组 (θ', θ, t) 数据来求取参数 $(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$, 首先使用最小二乘法建立优化准则函数:

$$\delta = \sum ((1 + c(t_i - t_0))\theta'_i - (\lambda_0 + \lambda_1\theta_i + \lambda_2\theta_i^2 + \lambda_3\theta_i^3))^2 \quad (7)$$

分别对各待定参数求导,进行整理,可得:

$$M \cdot [\lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4]^T = N \quad (8)$$

最后可知各参数可由下式求得:

$$[\lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4]^T = M^{-1}N \quad (9)$$

通过以上各式进行程序编写,利用采集的数据,求出非线性参数和温度补偿系数以实现传感器的电导率测量结果进行标定和校准,使其能够输出具有良好精度和稳定性的电导率值,作为后续含水率测量的基础。

图 5 是采用以上标定方法进行参数标定后,宽内径三电极传感器在温度和非线性补偿之后的输出数据,与雷磁牌标准电导率仪的数据做偏差,可以看到标定后电导率测量数据与基准值偏差较小,满足了标定补偿的要求。

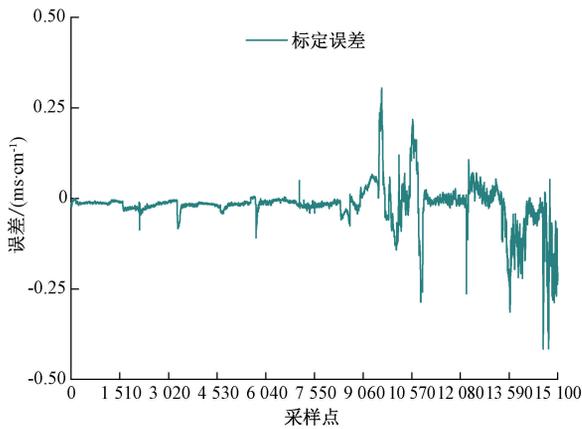


图 5 标定实验与基准数据对比误差曲线

Fig. 5 Comparison error curve between calibration experiment and benchmark data

3.2 不同传感器电极结构的对比实验及分析

在电极电导含水率传感器完成电导率标定后,搭建如图 6 所示的含水率测试系统。该系统由实验室中的多相流循环系统外接相应的管道进行搭建,可进行不同流量、不同温度、不同含水率等条件下的测试。在其流体回路中串入电导率探头和温度探头、标准电导率探头,通过传感器数据的采集和补偿,获得电导率测量值,通过离线测量的全水电导率值,利用 Maxwell 公式求得实时含水率值。

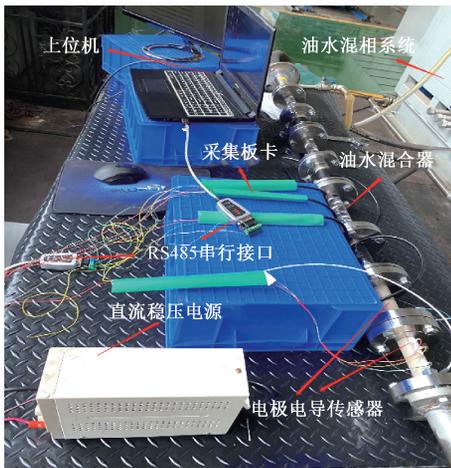
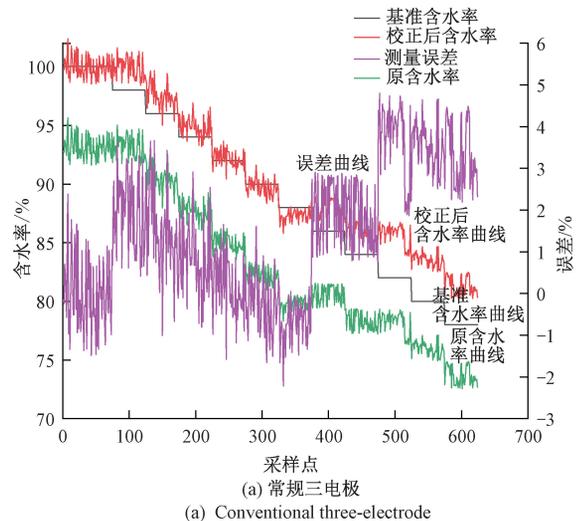


图 6 测试系统实物图

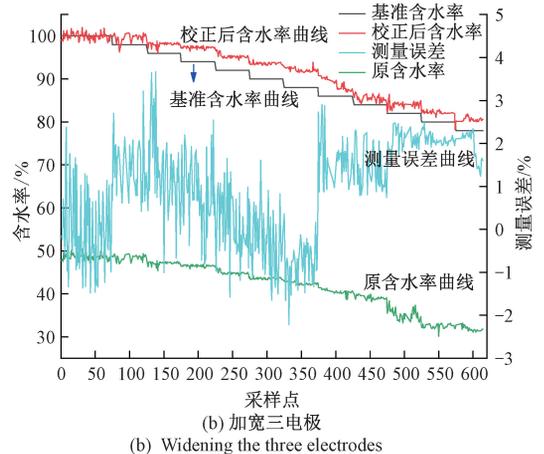
Fig. 6 Physical diagram of the test system

本研究根据三电极和四电极的结构选择与之匹配的采集卡,信号激励源采用 1 kHz 正弦波,采样频率 1 次/s。传感器整机装配完成后,利用电导率标定系统首先进行

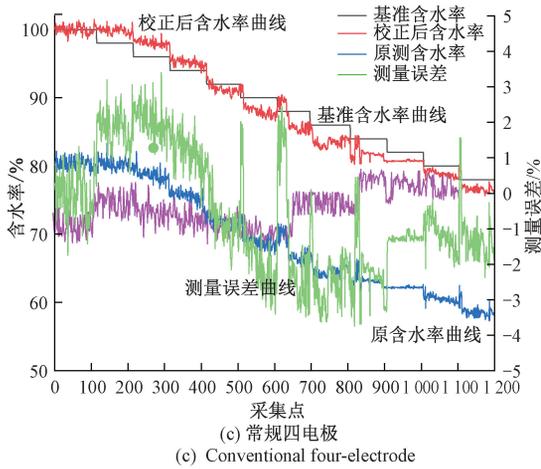
电导率补偿参数的标定。对传感器进行补偿之后,选择相同的温度、流量和矿化度,设置混相系统中混合溶液高含水率范围 100% ~ 78%,并按 2% 为间隔逐一调整含水率设定值,进行测量实验。记录含水率传感器的输出值和基准电导率仪器的显示值,两者一致则表示前期标定结果准确,若偏差太大则终止实验重新标定。采集完实验数据分析传感器校正前后含水率测量结果,同时,将测量结果与含水率设定值(基准含水率)进行比较,计算传感器组件的整体平均测量误差(精度)和误差 RMS 值(稳定性)。对比不同结构的传感器测量误差情况,分析不同电极参数对测量带来的影响。在相同测试条件下,不同电极参数的传感器校正前后的测试曲线如图 7 所示,其中基准含水率为雷磁牌标准电导率测试仪经计算得到的结果,原含水率是电极电导传感器未经过校正的测量结果,校正后含水率是传感器经过温度和非线性补偿校正后的测量结果,此处测量误差为校正后的传感器测量结果和基准含水率的误差值。



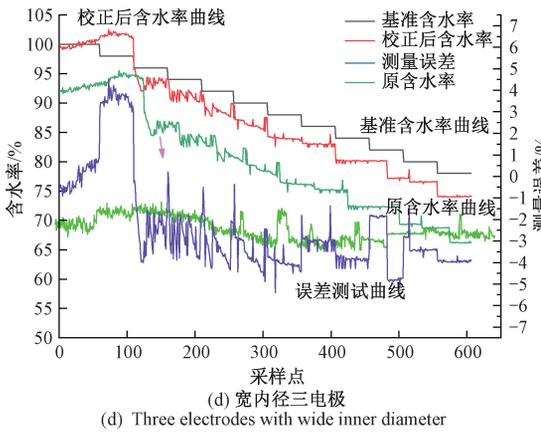
(a) Conventional three-electrode



(b) Widening the three electrodes



(c) 常规四电极
(c) Conventional four-electrode



(d) 宽内径三电极
(d) Three electrodes with wide inner diameter

图 7 4 种规格电极的测试结果

Fig. 7 Test results of four types of electrodes

从测试结果中可以看到,常规三电极、加宽三电极和常规四电极在含水率变化时测量数据有相对良好的过渡梯度,而宽内径三电极则在含水率变化时较难看出梯度变化。分别比较不同结构参数校正前后测量含水率与基准含水率测试曲线图可知,校正前的传感器测量含水率(原含水率)偏差较大,而经过温度和非线性补偿之后,不同结构传感器的测量含水率曲线跟踪基准含水率曲线较好,说明校正后传感器的性能均有改善,其中,加宽三电极结构的传感器未经校正前测量结果较差,但经过校正之后性能改善最为明显。

不同电极结构传感器含水率测量性能对比,可用整体平均误差 V_{AV-A} , 误差 RMS 值 V_{RMS} 描述,具体结果如表 1 所示。

表 1 不同电极结构的含水率测量误差对比表

Table 1 Comparison of water content measurement errors with different electrode structures

探头类型	常规三电极	加宽三电极	常规四电极	宽内径三电极
V_{AV-A}	1.48%	1.35%	1.15%	3.37%
V_{RMS}	1.87%	1.25%	1.41%	4.03%

通过比较经过温度补偿和非线性补偿的不同结构传感器的测试数据可知,宽内径三电极结构的传感器校正后的测量误差的平均值和 RMS 值分别为 3.737% 和 4.03%,说明其总体性能最差,这主要是由于电极环内径的加大虽然可以使流经电极的液体截面更大,均匀性更好,但内径的加大也使电场分布在径向方向上存在更大的差异,电极附近电场强,环形中心电场弱,再加上电荷的集肤效应,并不能体现流经电极的整体液体导电性。

加宽三电极相对于常规三电极和宽内径三电极结构,加宽三电极的平均误差值为 1.35% 略小于常规四电极的 1.15%,说明其精度较好。而相较于其他 3 种结构参数的传感器而言,加宽三电极结构的误差 RMS 值最小,这是因为加宽型电极与流体接触面积更大,其表面被油覆盖的比例更小,使电极的电场分布更为稳定,测量结果受油水混相状态的影响较小。所以综合考虑精度和稳定性,加宽三电极经过温度和非线性补偿校正后的性能最优。

4 结 论

为提升电导法石油含水率传感器的测量性能,本文设计加工了 4 种不同结构参数的传感器,通过标定得到电导和温度信息,并建立综合补偿数学模型,利用最小二乘法求解得到补偿参数实现校正效果。同时,对比 4 种不同结构参数的传感器的测量结果,关于电导法原油含水率传感器结构参数设计得到如下结论,供相关研究人员参考。

1) 在电极结构方面,三电极和四电极方式均能较好的体现油水混相液体中含水率变化情况,两种结构形式对于测量稳定性和准确性而言没有太大差异,考虑到实际应用时,结构优化和减少走线的需要,宜采用三电极结构。

2) 在电极宽度方面,加宽型电极相对于常规电极而言具有更好的数据稳定性,在设计时可适当增加电极宽度。

3) 在电极内径方面,大内径电极采集到的信号幅值相较于常规内径电极要更弱一些,导致测量结果的稳定性相对不佳。设计时不宜盲目加粗内径,需根据液体流量和激励源信号强度的实际需求进行内径的设计。

参考文献

[1] 董虓霄, 谭超, 董峰. 油水两相流含水率测量组合传感器 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36 (7): 1487-1491.
DONG X X, TAN CH, DONG F. Combined ensor for water holdup measurement in oil-water two-phase flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36 (7):

- 1487-1491.
- [2] 牟亮. 基于密度法原油含水率在线测量技术研究 [D]. 青岛:中国石油大学(华东),2016.
- MOU L. Study of online measuring technology of the water content ratio of crude oil based on density approach [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [3] 于洋,孙香. 微波法原油含水率测量 [J]. 仪表技术与传感器,2011(12): 93-95.
- YU Y, SUN X. Measurement of water content of crude oil by microwave [J]. Instrument Technique and Sensors,2011(12): 93-95.
- [4] 张博,刘润华. 基于电容电导法的原油含水率测试设计 [J]. 仪表技术与传感器,2009(7): 39-40,4.
- ZHANG B, LIU R H. Design of water-cut measurement for crude oil content tester based on capacitive-conductivity technique [J]. Instrument Technique and Sensors, 2009(7): 39-40,4.
- [5] YANG Q H, FU T, HUANG S Z, et al. An embedded downhole conductance sampling system based on adaptive FFT algorithm [C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. OnePetro, 2018.
- [6] YANG Q H, LI M, WANG Q B, et al. An online water cut measurement system based on the conductance sensor[C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. OnePetro, 2018.
- [7] 张国军,申龙涉,齐瑞,等. 原油含水率测量技术现状与发展 [J]. 当代化工,2012,41(1): 59-62,72.
- ZHANG G J, SHEN L SH, QI R, et al. Current status and development of the measurement technology for water content of crude oil [J]. Contemporary Chemical Industry, 2012, 41(1): 59-62,72.
- [8] 郑磊. 超声波测试原油含水率影响因素研究 [D]. 成都:西南石油大学,2018.
- ZHENG L. Research on the factors affecting the moisture content of ultrasonic testing crude oil [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [9] 贾惠芹,韩宏军,孙娅娅,等. 射频法原油含水率测量中的幅度检波方法分析 [J]. 传感技术学报,2018,31(10): 1494-1498.
- JIA H Q, HAN H J, SUN Y Y, et al. Analysis of amplitude detection method in radio frequency measurement of water cut of crude oil [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(10): 1494-1498.
- [10] 张振远,张兴凯,王文雄,等. 油水两相螺旋流状态下射频法测量原油含水率的方法 [J]. 石油与天然气化工,2021,50(1): 101-107,18.
- ZHANG ZH Y, ZHANG X K, WANG W X, et al. Water content measurement by radio frequency method under the condition of oil-water two-phase spiral flow [J]. Petroleum Engineering of Oil & Gas, 2021, 50(1): 101-107,18.
- [11] 李峰,谭超,董峰. 油水两相流中油相流量的测量 [J]. 控制工程,2018,25(9): 1698-1702.
- LI F, TAN CH, DONG F. Measurement of oil phase flow rate in oil-water two-phase flow [J]. Control Engineering of China, 2018, 25(9): 1698-1702.
- [12] JIA J, MI W, SCHLABERG H I, et al. A novel tomographic sensing system for high electrically conductive multiphase flow measurement [J]. Flow Measurement, 2010, 21(3): 184-190.
- [13] 董峰,李昭,李凌涵,等. 多模态动态核主成分分析的气液两相流状态监测 [J]. 自动化学报,2021,1-12.
- DONG F, LI ZH, LI L H, et al. Flow state monitoring of gas-liquid two-phase flow use multimodal dynamic kernel principal component analysis [J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 1-12.
- [14] 彭基伟,吕文华,行鸿彦,等. 基于改进 GA-BP 神经网络的湿度传感器的温度补偿 [J]. 仪器仪表学报,2013,34(1): 153-160.
- PENG J W, LYU W H, XING H Y, et al. Temperature compensation for humidity sensor based on improved GA-BP neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 153-160.
- [15] 唐朝国. 基于改进 Levy 飞行的 PSO 湿度传感器补偿算法 [J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(3): 119-125.
- TANG CH G. PSO humidity sensor compensation algorithm based on improved Levy flight [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 119-125.
- [16] 党瑞荣,张宏伟,宋楠,等. 高温高压井下压力传感器的补偿与校正 [J]. 仪器仪表学报,2016,37(4): 737-743.
- DANG R R, ZHANG H W, SONG N, et al. Compensation and calibration of high temperature and pressure downhole pressure sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 737-743.
- [17] 贺红林,许佳豪,周战,等. 压阻式压力传感器温度误差的插值补偿方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(12): 1-7.
- HE H L, XU J H, ZHOU ZH, et al. Research on interpolation compensation method for temperature error of piezoresistive pressure sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,

- 35(12): 1-7.
- [18] ZHOU G, ZHAO Y, GUO F, et al. A smart high accuracy silicon piezoresistive pressure sensor temperature compensation system [J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 12174-12190.
- [19] 高国旺, 李利品, 党瑞荣, 等. 电导法原油含水率测量传感器的模型优化与仿真 [J]. *传感技术学报*, 2015, 28(9): 1307-1314.
- GAO G W, LI L P, DANG R R, et al. Optimization and simulation of conductivity electrode array sensor for measuring water content of crude oil [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(9): 1307-1314.
- [20] 董峰, 李峰, 谭超. 基于卡尔曼估计融合算法的油水两相流测量 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2014, 47(10): 903-908.
- DONG F, LI F, TAN CH. Oil-water two-phase flow measurement based on Kalman estimation fusion [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2014, 47(10): 903-908.
- [21] 贾子伦. 非线性电导率电极的研制及其测量系统的研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
- JIA Z L. The development of Non-linear conductivity electrode and its Measurement System [D]. Jilin: Jilin

University, 2015.

- [22] FOSSA M J F M, INSTRUMENTATION. Design and performance of a conductance probe for measuring the liquid fraction in two-phase gas-liquid flows [J]. *Flow Measurement*, 1998, 9(2): 103-109.

作者简介



孙金辉, 新疆大学电气工程学院电子信息硕士研究生在读, 主要研究方向为检测技术及自动化控制。

E-mail: 17596165235@163.com

Sun Jinhui is a M. Sc. candidate in electronic information at the School of Electrical Engineering, Xinjiang University. His main research interests include detection technology and automation control.



谢丽蓉(通信作者), 新疆大学电气工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统控制优化理论和新能源并网发电技术。

E-mail: xielirong@xju.edu.cn

Xie Lirong (Corresponding author) is a professor and doctoral supervisor in the School of Electrical Engineering, Xinjiang University. Her main research interests include power system control optimization theory and new energy grid-connected power generation technology.