

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209457

基于交流阻抗测量的智能油水检测方法

蒋丹^{1,2} 林海军² 湛西羊¹

(1.湖南石油化工职业技术学院 岳阳 414118; 2.湖南师范大学设计与工程学院 长沙 410081)

摘要:近年来,市场上出现了很多用于原油脱水的油水传感器和油水检测系统,但是都存在精度较低、误差大等问题,性能指标有待进一步提高,提出一种基于交流阻抗测量的智能油水测量方法。介绍了油水检测系统的原理和构成,构建了一种基于最小二乘法的非线性误差补偿模型,解决了介质温度与含水率对交流阻抗的影响,有效提高智能油水检测的准确性。实验结果表明本文所提出的方法能够有效提高原油含水检测的检测精度;采用这种非线性误差补偿方法的油水检测系统含水率检测范围为0%~100%,检测精度可以达到0.3%,检测系统准确度高,达到了设计要求,能够满足相关企业的需求。

关键词: 油水检测;非线性误差补偿;最小二乘法;阻抗测量

中图分类号: TP216;TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Intelligent oil and water detection method based on AC impedance measurement

Jiang Dan^{1,2} Lin Haijun² Zhan Xiyang¹

(1. Hunan Petrochemical Vocational Technical College, Yueyang 414118, China;

2. College of Design and Engineering, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: In recent years, a lot of oil-water sensor and oil-water detection systems for crude oil dehydration appear on the market, but there are problems emerged such as low accuracy, large error and so on. The performance indicators need to be further improved. Therefore, based on impedance measurement technology, an intelligent oil and water construction method based on AC impedance measurement was proposed. The principle and structure of the oil-water detection system are introduced, a nonlinear error compensation model based on the least square method is constructed, which solves the influence of the temperature and water content of the medium on the AC impedance are solved, and the accuracy of the intelligent oil-water detection effectively are improved. The experimental results show that the method proposed in this paper can effectively improve the detection accuracy of water content detection in crude oil. The detection range of water content in the oil-water detection system using this nonlinear error compensation method is 0%~100%. The detection accuracy can reach 0.3%. The detection system has high accuracy, meets the design requirements, and the needs of related enterprises.

Keywords: oil-water detection; nonlinear error compensation; least square method; the impedance measurement

0 引言

智能油水检测系统主要用在原油灌区油罐自动脱水器上,是保证脱水器完成自动脱水的重要器件,它的好坏(或精度)直接决定自动脱水器的使用效果。目前,国内基本上都是基于油水的特性差异来研究设计检测系统,根据工作原理的不同大致可以分为:电容式^[1]、差压式^[2]、超声波式^[3]、射频导纳式^[4]、雷达式^[5]及阻抗式^[6]等。其中,射频导纳和超声波界面油水检测传感器及检测系统应用较为广泛。

国内外许多学者和工程师开展了油水检测^[7]传感器及检测方法研究。胡金海等设计了一种由4个圆环不锈钢组成的油水检测激励电极和测量电极,当作为激励信号的恒定电流从激励电极流过、经过被测介质时,根据阻抗与介质电导率成反比关系,测量介质含水率。张玉辉等对阻抗式含水率传感器电极对的位置和间距进行了优化,提高了传感器的分辨能力。江杰等^[8]把含水率检测中微电容的变化转化为频率的变化,较好地提高油水界面测量精度。谭丽等^[9]提出了将油水界面检测技术用到原油罐原油脱水,

收稿日期:2022-03-30

完成了原油自动脱水。

相比国内,国外的智能油水检测传感器获得了广泛应用。Agar 公司率先推出了测量范围在 0%~100% 的含水率测量仪,该仪器是利用复合高频法测量流体复杂介质介电特性来分析溶液浓度的 AGAR OW-300 系列原油含水率检测分析器^[10]。阿美特克 DE 公司根据射频导纳技术设计生产出 CM-6 含水率检测分析仪^[11],该仪器的主要工作特点是可以根据检测环境较方便地校正检测数据,并且可以保证在高温、高压的恶劣环境下正常使用,大大提高了工作效率,也增加了一线工作人员的安全,却不能在含水率较高的混合流体中测量。Strazza 等^[12]提出利用两种液体的介电常数来估计管道给定截面中的滞留量,通过水平安装在实验管外表面上的两个电极之间的电容测量获得估算值,从而找到一种针对存在导电液体电容传感器的模型。Zhang 等^[13]设计了一种基于电容传感器的流阻相移检测系统,通过建立等效电路模型和有限元模型,研究了油水分层流的流动阻抗。Okoro 等^[14]提出了一种具有双电容传感器的电容层析成像工具,通过油气外输测量确定管道内部的介电常数分布,从而有效地测量油气输送管道中的含水率。

上述研究成果为原油水分检测提高了良好借鉴,然而原油含水率^[15]受检测系统非线性、原油温度等因素影响,进一步提高检测结果的准确性。本文通过对国内油水检测传感器的研究,综合考虑原油本身的复杂性,提出了基于交流阻抗的油水检测方法,利用最小二乘法进行了系统的非线性误差补偿,并以 STM32F407 作为微处理控制器,设计了一种智能油水检测系统提高了检测系统的测量精度和智能化程度。

根据工程实际情况,进行合理的简化,按比例缩小搭建实验台。在一定的条件下进行了大量原油含水率的检测试验,对实验的数据进行分析,根据实验效果和设计要求,基本满足设计要求。

1 基于交流阻抗测量的智能油水检测系统工作原理

1.1 油水交流阻抗的特性差异

交流阻抗的油水检测是利用油水导电特性^[16]的不同来进行测量的,主要由检测电路和电极(发射电极和接收电极)组成,如图 1 所示。介质样品不同其电阻抗也是不同的,在介质中,放置一对传感电极,分别是发射电极和接收电极。在实际应用中发现,介质温度在 30℃~40℃ 范围内变化,在激励信号的作用下,原油含水率为 0 与原油含水率为 20% 时,其交流阻抗信号相差 20 倍,原油和水的交流阻抗相差近 400 倍,含水率越多,差异性更大,且在不同幅值、频率激励信号源作用下,交流阻抗差异变化也不一样。本文中,采用幅值为 5 V 的 10 kHz 正弦交流频率信号,方法简单,测量精度高。

1.2 智能油水检测系统工作原理

智能油水检测系统主要由主体控制部分和传感电极组

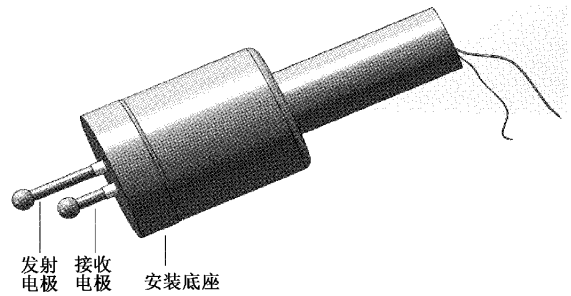


图 1 传感器电极结构示意图

成。主体控制部分主要以 ST 公司生产的超低功耗单片机 STM 32 F 407 为控制与信号处理单元,周围包含有电源模块、人机接口及通信模块、激励信号模块、信号采集模块、控制模块等模块;传感电极包括发射电极和接受电极。图 2 为智能油水检测系统的系统原理框图。

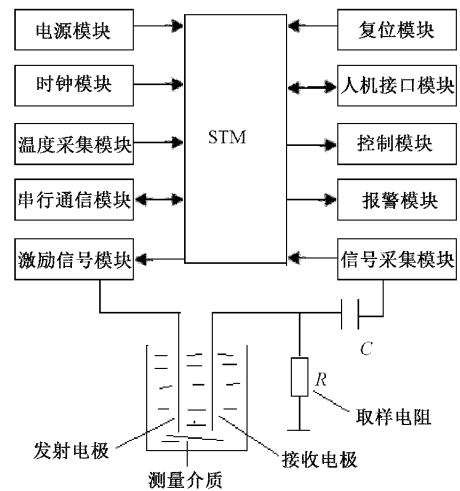


图 2 智能油水检测系统的系统原理框图

智能油水检测系统应用到原油脱水装置上时,系统上电完成初始化,温度采集系统采集介质温度,送至单片机,激励信号模块通过发射电极对外输出正弦交流 10 kHz 频率信号,信号接收模块通过接受电极接收信号,并转发为对应的电压信号进行采集,送至单片机分析,并将温度信号与电压信号进行数据处理,以提高传感器精度。按照频率信号通过原油和水后接收到的信号不同,将接收到的电压信号与设定的电压值进行比较分析,检测是水时,单片机输出指令给气动调节阀“开阀脱水”,随着脱水的进行,油、水界面会下降,当原油罐中的水被脱到底部时,传感器会检测到原油,立即将信息反馈给单片机,单片机输出指令给气动调节阀“关阀停止脱水”。智能油水检测系统所处环境为原油罐区,接触介质为原油,其成分复杂,在测量过程中容易受到温度、压力、介质成分、含水率、测量模型、仪器结构(如传感电极等)等因素的影响,油水检测过程会产生非线性误差,因此,对检测系统的测量结果采用一种基于最小二乘法^[17-18]的二元非线性误差补偿方法^[19-20],对智能油水检测

系统的非线性误差进行补偿,提高传感器测量精度。

2 智能油水检测系统非线性误差补偿方法

2.1 基于最小二乘法的智能油水检测系统非线性误差补偿模型

通过大量的实验发现,检测系统在工作过程中含水率和温度对其的影响是最大的,即不同的含水率、不同的温度,其交流阻抗是不同的,检测系统获得的交流电压信号也是不同的,且存在很大的误差,原油的含水率 P 是交流电压测量值 U 与温度 T 的二元非线性函数,即:

$$P = f(U, T) \quad (1)$$

根据回归分析方法来完成式(1)所示模型的构建。考虑到拟合准确度和计算的复杂度,回归方程采用二元二次多项式,即:

$$P = b_0 + b_1U + b_2T + b_3U^2 + b_4UT + b_5T^2 \quad (2)$$

式中: $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ 为多项式系数。

利用最小二乘法,求解系数 $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ 。设系统共采集 $L \times N$ 个不同温度下的不同含水率的交流电压值数据作为样本 $(T_i, U_i), i = 1, 2, 3, \dots, L \times N, P_{ki}$ 为正常温度下含水率的目标值(即标定值), $Q(b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$ 为标定值与样本的均方误差之和,即:

$$Q(b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) = \sum_{i=1}^M [P_{ki} - (b_0 + b_1U + b_2T + b_3U^2 + b_4UT + b_5T^2)]^2 \quad (3)$$

式中: $M = L \times N$ 。

当 $Q(b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$ 最小时,通过多元函数求极值的方法即可获得系数 $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$, 即:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial b_0} = 0, \frac{\partial Q}{\partial b_1} = 0, \frac{\partial Q}{\partial b_2} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial b_3} = 0, \frac{\partial Q}{\partial b_4} = 0, \frac{\partial Q}{\partial b_5} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} M & b_1 \sum_{i=1}^M U_i & \sum_{i=1}^M T_i & \sum_{i=1}^M U_i^2 & \sum_{i=1}^M U_i T_i & \sum_{i=1}^M T_i^2 \\ \sum_{i=1}^M U_i & \sum_{i=1}^M U_i^2 & \sum_{i=1}^M U_i T_i & \sum_{i=1}^M U_i^3 & \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i & \sum_{i=1}^M U_i T_i^2 \\ \sum_{i=1}^M T_i & \sum_{i=1}^M U_i T_i & \sum_{i=1}^M T_i^2 & \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i & \sum_{i=1}^M U_i T_i^2 & \sum_{i=1}^M T_i^3 \\ \sum_{i=1}^M U_i^2 & \sum_{i=1}^M U_i^3 & \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i & \sum_{i=1}^M U_i^4 & \sum_{i=1}^M U_i^3 T_i & \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i^2 \\ \sum_{i=1}^M U_i T_i & \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i & \sum_{i=1}^M U_i T_i^2 & \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i & \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i^2 & \sum_{i=1}^M U_i T_i^3 \\ \sum_{i=1}^M T_i^2 & \sum_{i=1}^M U_i T_i^2 & \sum_{i=1}^M T_i^3 & \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i^2 & \sum_{i=1}^M U_i T_i^3 & \sum_{i=1}^M T_i^4 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Y} = \left[\sum_{i=1}^M P_{ki} \quad \sum_{i=1}^M P_{ki} U_i \quad \sum_{i=1}^M P_{ki} T_i \quad \sum_{i=1}^M P_{ki} U_i^2 \quad \sum_{i=1}^M P_{ki} U_i T_i \quad \sum_{i=1}^M P_{ki} T_i^2 \right]^S \quad (8)$$

即:

$$\begin{cases} b_0 M + b_1 \sum_{i=1}^M U_i + b_2 \sum_{i=1}^M T_i + b_3 \sum_{i=1}^M U_i^2 + b_4 \sum_{i=1}^M U_i T_i + \\ b_5 \sum_{i=1}^M T_i^2 = \sum_{i=1}^M P_{ki} \\ b_0 \sum_{i=1}^M U_i + b_1 \sum_{i=1}^M U_i^2 + b_2 \sum_{i=1}^M U_i T_i + b_3 \sum_{i=1}^M U_i^3 + \\ b_4 \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i + b_5 \sum_{i=1}^M U_i T_i^2 = \sum_{i=1}^M P_{ki} U_i \\ b_0 \sum_{i=1}^M T_i + b_1 \sum_{i=1}^M U_i T_i + b_2 \sum_{i=1}^M T_i^2 + b_3 \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i + \\ b_4 \sum_{i=1}^M U_i T_i^2 + b_5 \sum_{i=1}^M T_i^3 = \sum_{i=1}^M P_{ki} T_i \\ b_0 \sum_{i=1}^M U_i^2 + b_1 \sum_{i=1}^M U_i^3 + b_2 \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i + b_3 \sum_{i=1}^M U_i^4 + \\ b_4 \sum_{i=1}^M U_i^3 T_i + b_5 \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i^2 = \sum_{i=1}^M P_{ki} U_i^2 \\ b_0 \sum_{i=1}^M U_i T_i + b_1 \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i + b_2 \sum_{i=1}^M U_i T_i^2 + b_3 \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i + \\ b_4 \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i^2 + b_5 \sum_{i=1}^M U_i T_i^3 = \sum_{i=1}^M P_{ki} U_i T_i \\ b_0 \sum_{i=1}^M T_i^2 + b_1 \sum_{i=1}^M U_i T_i^2 + b_2 \sum_{i=1}^M T_i^3 + b_3 \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i^2 + \\ b_4 \sum_{i=1}^M U_i^2 T_i^3 + b_5 \sum_{i=1}^M T_i^4 = \sum_{i=1}^M P_{ki} T_i^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$\mathbf{B} = (b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)^S \quad (6)$$

因此,

$$\mathbf{B} = \mathbf{X}^{-1} \mathbf{Y} \quad (7)$$

2.2 补偿模型求解

第 1 步: 样本采集, 并进行异常点分析。

通过实验获得了数据样本, 主要是温度为 30 °C~40 °C, 含水量为 0%~100% 时, 对应的电压值, 如表 1 所示。

表 1 含水率对应的电压值(30 °C~40 °C)

电压/mV	含水率/%						
	0	20%	40%	60%	80%	100%	
温度/°C	30	1.46	22.46	57.71	139.82	165.35	408.5
	31	1.51	22.88	58.37	140.68	166.68	413.2
	32	1.55	23.19	59.45	141.55	167.98	417.6
	33	1.59	23.56	60.05	142.34	169.63	421.4
	34	1.63	23.87	61.31	142.9	171.17	427.6
	35	1.67	24.35	62.3	143.77	172.84	431.8
	36	1.71	24.62	62.93	144.47	173.81	435.7
	37	1.75	24.99	63.54	145.26	175.44	442.8
	38	1.79	25.35	64.19	146.21	176.64	446.8
	39	1.84	25.69	64.67	146.46	178.61	451.8
	40	1.88	26.05	64.92	148.32	181.65	456.9

因为系统误差的原因会导致一些数据不符合基本的规律, 首先进行异常点的剔除, 通过分析发现本次的训练数据基本符合一定的规律, 不存在异常点。

第 2 步: 分析不同因素的影响。

为了研究温度和输出电压对含水量的影响, 利用相关性分析, 采用协方差的方法分析研究, 可以求得 3 种因素之间的相关性。

对于这些随机变量, 可以根据协方差的定义, 求出电值、温度、含水率 3 个参数两两之间的协方差, 即:

$$\partial(x_m, x_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{mi} - \bar{x}_m)(x_{ki} - \bar{x}_k) \quad (9)$$

因此, 协方差矩阵为:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \partial(x_1, x_1) & \cdots & \partial(x_1, x_d) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial(x_d, x_1) & \cdots & \partial(x_d, x_d) \end{bmatrix} \in R^{d \times d} \quad (10)$$

其中, 对角线上的元素为各个随机变量的方差, 非对角线上的元素为两两随机变量之间的协方差, 即:

$$s = \begin{bmatrix} 1 & 0.9045 & 0 \\ 0.9045 & 1 & 0.0308 \\ 0 & 0.0308 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 含水率主要与输出电压有关, 而温度对其影响较小。所以影响含水量的主要因素是输出电压。

基于最小二乘法, 利用实验数据可求出不同温度下含水率和电压值随温度的表达式, 如式(12)、(14)所示, 可得到不同温度下信号电压与含水率之间的拟合关系, 如图 3 所示。由图可知, 电压信号主要受含水率的影响, 受温度的影响程度较小, 但会随着温度的上升小幅度增长。

$$y|_{T=30^\circ\text{C}} = 2.78 \times 10^{-8}U^3 - 2.41 \times 10^{-5}U^2 + 0.0076U + 0.014 \quad (12)$$

$$y|_{T=35^\circ\text{C}} = 1.91 \times 10^{-8}U^3 - 1.92 \times 10^{-5}U^2 + 0.007U + 0.014 \quad (13)$$

$$y|_{T=40^\circ\text{C}} = 1.6 \times 10^{-8}U^3 - 1.71 \times 10^{-5}U^2 + 0.0067U + 0.013 \quad (14)$$

第 3 步: 求解多元回归模型。

利用最小二乘法对含水率与电压信号(阻抗)和温度进行多元回归建模, 获得模型系数, 如式(15)所示。

$$y = (-7.55 \times 10^{-6})U^2 + 0.0055U + (5.89 \times 10^{-5})T^2 - 0.0054T + 0.156 \quad (15)$$

式中: y 为检测样本含水率, U 为检测样本对应的电压值, T 为检测样本的温度。图 4 为拟合后的效果图。

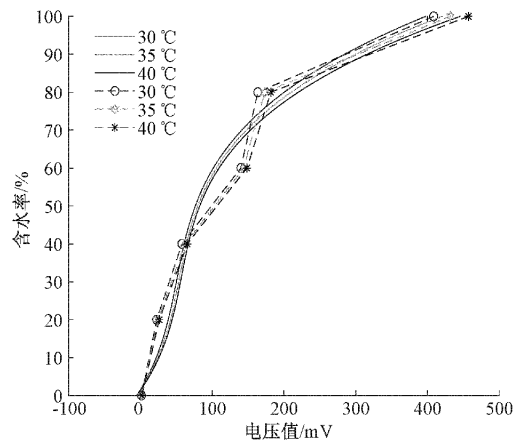


图 3 30 °C、35 °C 和 40 °C 时含水率与电压值的拟合图 (虚线为原始曲线, 实线为拟合后的曲线)

第 4 步: 误差分析

为检验模型的有效性, 对模型的拟合^[21-22]效果进行误差分析。由上面的分析可知, 算法经温度补偿后, 温度的

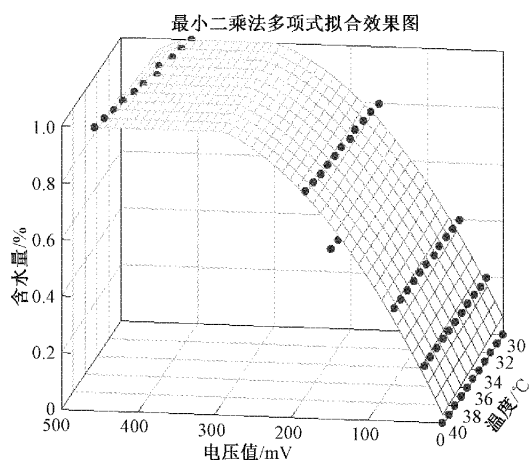


图4 基于最小二乘法的油水检测的多元回归拟合效果图

附加误差将大大降低,可解决温度引起的温漂和误差。

将所有数据都进行温度拟合,可得到温度补偿后的输出数据,如表2所示。

图5为拟合的误差图。由图可知,拟合的数据存在一定的误差。这主要是因为信号电压与温度之间存在一定的共线性程度,共线性使最小二乘法预估的参数不确定且估计值方差较大,方差较大又会导致参数的置信区间增大,因此导致拟合的模型存在一定的误差。

3 交流阻抗测量的油水检测系统实验

模拟原油罐区现场原油脱水工作过程,将电极放入原油罐中,将原油罐底部开口排水,观察工作过程中数据变化,如图6所示。在常温下(保证原油的正常流动),模拟原油罐区,将“罐中”的原油高度恒定为5 cm,“罐中”水的初

表2 温度补偿后的含水率与电压值的关系(30 °C ~ 40 °C)

电压/mV	含水率/%					
	0	20%	40%	60%	80%	100%
30	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46
31	22.43	22.49	22.45	22.46	22.42	22.53
32	57.46	57.37	57.69	57.52	58.02	58.24
33	139.8	139.87	139.95	139.94	139.71	139.79
34	162.32	164.02	163.69	163.7	163.61	163.65
35	409.13	408.96	408.5	407.47	408.76	408.13
36	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46
37	22.43	22.49	22.45	22.46	22.42	22.53
38	57.46	57.37	57.69	57.52	58.02	58.24
39	139.8	139.87	139.95	139.94	139.71	139.79
40	162.32	164.02	163.69	163.7	163.61	163.65

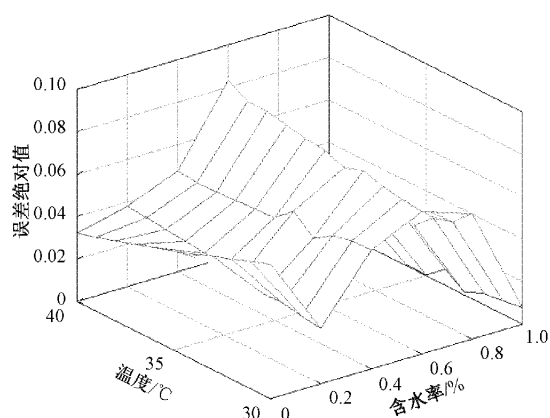


图5 基于最小二乘法的多元回归拟合误差图

始液位为13 cm,对外排水,检测的数据如表3所示。实践证明,智能油水检测系统的实验效果明显,基本满足设计要求。

由表3可知,经过基于最小二乘法油水检测的温度误

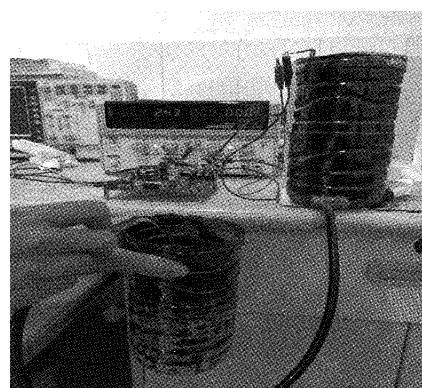


图6 智能油水检测系统模拟现场工作平台

差补偿,含水率最大示值误差降至0.24%,含水率测量误差大大减小,示值误差得到有效补偿,基于最小二乘法的二元非线性误差补偿方法,对智能油水检测系统的非线性误差进行补偿,提高系统测量精度可行性得到证实。试验测试时,在保证原油的正常流动情况下,参考生产现场情

表 3 智能油水检测系统检测数据

水/ cm	原油/ cm	电压值/ V	标准 含水率/%	实测 含水率/%	误差/ %
0	5	0.012	0	0	0
1	5	0.421	16.66	16.67	0.01
2	5	0.689	28.57	28.57	0
3	5	1.025	37.50	37.62	0.12
4	5	1.189	44.64	44.53	-0.11
5	5	1.299	50.00	50.21	0.21
6	5	1.361	54.53	54.77	0.24
7	5	1.461	58.33	58.33	0
8	5	1.536	61.55	61.34	-0.21
9	5	1.587	64.28	64.19	-0.09
10	5	1.635	66.57	66.75	0.08
11	5	1.688	68.75	68.75	0
12	5	1.712	70.59	70.46	-0.13
13	5	1.739	72.22	72.38	0.16

况,将原油和水按照不同的配比分别进行测试,测试结果如表 4 和 5 所示。

表 4 原油和水的配比总量保持不变时,
智能油水检测系统检测数据

水/ cm	原油/ cm	电压值/ V	标准 含水率/%	实测 含水率/%	误差/ %
1	5	0.421	16.67	16.89	0.22
2	4	0.545	33.33	33.54	0.21
3	3	0.804	50.00	50.19	0.19
4	2	1.046	66.67	66.67	0.00
5	1	1.141	83.37	83.25	-0.08

表 5 高含水率时,智能油水检测系统检测数据

水/ cm	原油/ cm	电压值/ V	标准 含水率/%	实测 含水率/%	误差/ %
13	1	1.583	92.86	93.03	0.17
12	2	1.781	85.71	85.71	0
11	3	1.51	78.57	78.37	-0.20
10	4	1.417	71.43	71.64	0.21
9	5	1.587	64.28	64.44	0.16

由实验数据可知,在原油和水不同配比时,因原油和水本身的导电系数不同,加载在两个电极之间的阻抗也不同,从而使得含水率和电压值存在一定的差异,特别是在高含水率情况下。系统的测量准确性引用相对百分误差 δ_i 进行评价,根据:

$$\delta_i = \frac{\partial_i - \partial_i}{\partial_{\text{测量}}} \times 100\% \quad (16)$$

式中: ∂_i 为实际测量含水率, δ_i 为被测量标准含水率, $\partial_{\text{测量}}$ 为系统测量上限与测量下限之差。

根据式(16)可知,采用基于最小二乘法的二元非线性误差补偿,经过非线性校正程序校正后,能够正确有效的测量出含水率,大大降低测试误差,其最大相对百分误差为 0.24%,符合工艺设计要求。

4 结 论

智能油水检测系统基于最小二乘法非线性误差补偿方法,采用幅值为 5 V 的 10 kHz 正弦交流频率信号,进行原油脱水的现场试验,结果表明,该检测系统基本适应所有成品原油,检测精度可以达到 0.3%,该检测系统通信接口为 RS232,通信波特率为 120 Kbps,该检测系统智能化水平高,准确度高,能够满足企业的需求,达到设计要求。

参考文献

- [1] 孔范东. 油水界面检测技术研究[D]. 沈阳:东北大学, 2012.
- [2] 杜鑫. 基于静压强的油罐脱水装置的研究与设计[D]. 武汉:武汉工程大学, 2018.
- [3] 李东. 超声波智能脱水器在储罐脱水作业中的应用及选型研究[J]. 山东化工, 2021, 50(10): 125-126.
- [4] 要东风. 油水分离包在塔顶回流罐中的应用[J]. 广东化工, 2015, 42(14): 188-189.
- [5] 麻文刚. 基于多模型融合的导波雷达物位计回波信号处理方法及应用研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2018.
- [6] 李坤. 电阻抗层析目标高精度提取与两相流三维可视化方法研究[D]. 太原:中北大学, 2019.
- [7] 齐光峰. 三相分离器优化控制系统设计与开发[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(4): 78-81.
- [8] 江杰, 周宝朕. 基于频率法的油水界面检测装置设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(5): 52-54.
- [9] 覃丽, 邬群辉, 李言章. 一种储油大罐油水界面检测技术及应用研究[J]. 中国市场, 2016(23): 72-73.
- [10] 孙娅娅. 混合流体中的含水率测量技术研究[D]. 西安:西安石油大学, 2019.
- [11] 李晓辉. 高含水油井含水率在线检测系统的研究[D]. 西安:西安石油大学, 2018.
- [12] STRAZZA D, DEMORI M, FERRARI V, et al. Capacitance sensor for hold-up measurement in high-viscous-oil/conductive-water core-annular flows [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2011, 22(5): 360-369.
- [13] ZHANG H, ZHAI L, YAN C, et al. Capacitive phase shift detection for measuring water holdup in horizontal oil-water two-phase flow [J]. Sensors, 2018, 18(7), DOI:10.3390/s18072234.

- [14] OKORO E E, RACHAEL J E, SANNI S E, et al. Liquid holdup measurement in crude oil transportation using capacitance sensors and electrical capacitance tomography: Concept review [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 655(1): 012037.
- [15] 韩建, 李雨昭, 曹志民, 等. 原油含水率红外光谱测量的超稀疏表示方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 78-85.
- [16] 刘贵, 郑文晶, 盛彬武. 原油储罐自动脱水技术的选择应用[J]. 广东化工, 2016, 43(8): 166-167.
- [17] 王昭文, 姚毅, 唐碧莹, 等. 基于最小二乘法的电化学传感器温漂补偿研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(2): 69-73.
- [18] 高国旺, 董磊, 陈凯莉, 等. 基于电涡流位移传感器的微间隙测量系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(8): 141-144.
- [19] 林海军, 黄国良, 赖小强. 旋转式粘度仪误差补偿方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3): 189-194.
- [20] 林海军, 李松辉, 汪鲁才, 等. 基于交流阻抗的掺杂煤炭快速识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 577-583.
- [21] 王占利, 傅骁, 梁春疆, 等. 基于连续小波变换与曲线拟合的油液金属屑末传感信号检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 32-38.
- [22] 武亮, 王鑫达, 童鹏, 等. 基于平面驻波磁场的二维位移传感器测量原理与结构优化[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 225-235.

作者简介

蒋丹, 讲师, 高级工程师, 主要研究方向为智能检测。

E-mail: 375332273@qq.com

林海军(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为智能检测与信息处理。

湛西羊, 硕士研究生, 主要研究方向为自动控制理论。