

# 一种新型全量程原油含水率测试仪的研制

王 雄\*, 胡绪山, 吴剑勇, 梁 军, 王国财, 许 军

荆州市明德科技有限公司, 湖北 荆州

收稿日期: 2021年7月14日; 录用日期: 2021年9月6日; 发布日期: 2021年9月13日

## 摘 要

通过对电容式原油含水率传感器的设计与分析、传感器信号驱动和调理电路的开发、含水率误差补偿及数据处理算法的研究, 试制了一种新型全量程含水率测试仪。它的创新点是: 利用有限元分析方法建立传感器电磁场仿真模型, 对传感器电场和磁场参数进行分析, 改变传感器尺寸和结构, 实现性能优化; 建立电容传感电路噪声传递模型, 对各类噪声源进行分析, 并采用误差抑制技术, 提高电路信噪比, 优化电路性能; 研究原油含水率数据高精度标定算法, 并针对现场监测需求, 将标定算法内嵌入单片机系统, 实现远端实时标定。

## 关键词

原油, 含水率, 传感器, 信噪比, 全量程, 测试仪

# Development of a New Full-Range Water Content Tester of Crude Oil

Xiong Wang\*, Xushan Hu, Jianyong Wu, Jun Liang, Guocai Wang, Jun Xu

Jingzhou Mingde Technology Co., Ltd., Jingzhou Hubei

Received: Jul. 14<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 6<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 13<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Through the design and analysis of capacitive crude oil water content sensor, the development of

\*通讯作者。

文章引用: 王雄, 胡绪山, 吴剑勇, 梁军, 王国财, 许军. 一种新型全量程原油含水率测试仪的研制[J]. 传感器技术与应用, 2021, 9(4): 216-225. DOI: 10.12677/jsta.2021.94026

sensor signal drive and conditioning circuit, water content error compensation and data processing algorithm research, a new full range water content tester was trial-produced. Its innovative points are: using the finite element analysis method to establish a sensor electromagnetic field simulation model, analyze the sensor's electric and magnetic field parameters, change the sensor's size and structure and achieve performance optimization; establish a noise transfer model of capacitor sensing circuit, analyze various noise sources, and adopt error suppression techniques to improve the signal-to-noise ratio of the circuit and optimize the circuit performance; study the high-precision calibration algorithm of crude oil water content data, and embed the calibration algorithm into the single-chip system to achieve remote real-time calibration according to the needs of on-site monitoring.

## Keywords

Crude Oil, Water Content, Sensor, Signal-to-Noise Ratio, Full Range, Tester

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前,可用于在线测量的方法有很多,比如射频法、微波法、电容法、电磁波法等,它们都可以有效的测量原油输送中的含水率,以实现原油的监控,更好的管理油井生产[1] [2] [3] [4] [5]。这里,笔者通过对电容式原油含水率传感器的设计与分析、传感器信号驱动和调理电路的开发、含水率误差补偿及数据处理算法的研究,试制了一种新型全量程含水率测试仪。

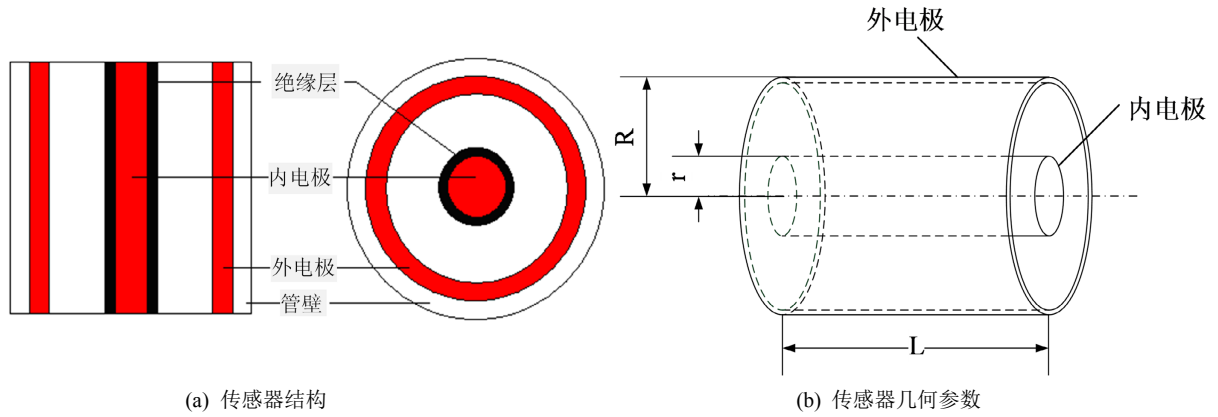
## 2. 电容式原油含水率传感器的设计与分析

### 2.1. 电容传感器结构优化设计

采用同轴电容结构,通过芯极与接地外壳之间的电容测量,将含水率测量转化为介电常数测量。基于电学特性的电容传感器具有以下优点:电容传感器原理简单,工作可靠;可实现非接触式测量,便于“卡钳式”安装;适应性广,响应快;价格低廉,便于应用。此外,同轴电容传感器结构紧凑,易于实现电气屏蔽,抗机械振动干扰能力强,适于做成比较坚固可靠的工业用传感器。并且同轴传感器的检测电场均匀[6] [7]。含水率检测测量的是均值,同轴传感器具有轴对称结构,适于对均值的测量。所以很多含水率测量传感器选用同轴电极结构。

同轴流体电容传感器结构如图 1(a)所示。该传感器由内电极和外电极两部分组成。其中,内电极表面涂有绝缘层,放置在管道轴心;外电极与流体接触环绕在外围,与内电极形成电容。当混合液体由两电极之间通过时,油水介电常数的差异会引起电容值的实时差异,通过该电容值变化便可以将流体持油率变化反映出来。

图 1(b)表示的是同轴流体电容传感器的简化结构及其几何参数,主要有:电极长度(以  $L$  表示);内电极半径(以  $r$  表示);外电极半径(以  $R$  表示)。同轴流体电容传感器在含水率检测中,流经电极之间的油水配比或流型不同时,其等效介电常数也不同,从而产生测量电容值的变化。内外电极之间的电容值变化就反应了油水两相流局部持水率变化的信息。



**Figure 1.** Coaxial fluid capacitance sensor structure and geometric parameters  
**图 1.** 同轴流体电容传感器结构和几何参数

同轴流体电容传感器的理想测量模型为

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon L}{\ln(R/r)} = k\epsilon, k = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(R/r)} \quad (1)$$

式中： $\epsilon_0$ 为绝对介电常数，为  $8.85 \times 10^{-12}$  (F/m)； $\epsilon$ 为混合液的相对介电常数； $R$ 为外电极内半径； $r$ 为内电极外半径。由式(1)可知，在电容传感器的外形与尺寸不变，即  $L$ 、 $R$ 、 $r$  均为定值时， $k$  为常数，电容值  $C$  仅与含水原油的相对介电常数有关。假设含水原油的相对介电常数增加  $\Delta\epsilon$ ，电容传感器的测量电容增加  $\Delta C$ ，传感器的灵敏度  $S$  可表示为

$$2\pi(\epsilon_1 - \epsilon_2) \frac{1}{R} \eta \left[ -\frac{1}{\ln^2 e} + \frac{2}{\ln^3 e} \right] = 2\pi(\epsilon_1 - \epsilon_2) \frac{\eta}{R} \quad (2)$$

由式(2)可知，在电容传感器的尺寸结构确定后以及忽略外界环境干扰的情况下，电容传感器的灵敏度  $S$  为一常数，仅与电容传感器长度及电容传感器外内电极半径之比有关，增大电容传感器长度或减小外内电极之比，均会增大电容传感器的灵敏度。但在实际应用中，需要考虑现场管道测量条件与机械加工能力，电极过长不易保证加工的圆柱度与电极间隙精度，因此电极尺寸不能随意加长，而且考虑到原油黏度与压力等因素，内外电极也无法做到十分接近。最重要的是，电容传感器的实际测量范围并不是无穷的，传感器间的电介质仅在纯油与纯水之间变化，因此需要从实际出发对传感器尺寸参数进行优化设计。

考虑到实际测量中电容传感器的测量值只会为浸没在纯油之中的电容值  $C_o$  到浸没在纯水之中的电容值  $C_w$  之间变化，当传感器浸没在纯水之中时，传感器的电容值  $C_w$  满足如下的表达式

$$C_w = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_1 L}{\ln(R/r)} \quad (3)$$

其中， $\epsilon_1$  为水的介电常数。

当传感器浸没在纯油之中时，传感器的电容值  $C_o$  满足如下的表达式

$$C_o = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_2 L}{\ln(R/r)} \quad (4)$$

其中， $\epsilon_2$  为纯油的介电常数。

设二者的差值为  $C_d$ ，则  $C_d$  为实际测量中电容传感器的电容变化范围

$$C_d = C_w - C_o = \frac{2\pi\varepsilon_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)L}{\ln(R/r)} \quad (5)$$

为得到含水率测量半径的最佳取值, 设传感器长度  $L = \eta R$  [8], 其中,  $\eta$  为常数, 求式(5)中  $C_d$  关于  $R$  的一阶导数得

$$\frac{\partial C_d}{\partial R} = 2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\eta \frac{\ln(R/r) - 1}{\ln^2(R/r)} \quad (6)$$

令式(6)等于 0, 有

$$2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\eta \frac{\ln(R/r) - 1}{\ln^2(R/r)} = 0 \quad (7)$$

为保证等式有意义, 需满足  $\ln(R/r) \neq 0$ , 即  $R \neq r$ , 且由于外电极半径须大于内电极半径, 则满足  $R > r$ , 解得  $\ln(R/r) = 1$ , 即  $R = e \times r$  为函数的极值点。为判断极值点的类型, 求取  $C_d$  关于  $R$  的二阶导数得

$$\frac{\partial^2 C_d}{\partial R^2} = 2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\frac{1}{R}\eta \left[ -\frac{1}{\ln^2(R/r)} + \frac{2}{\ln^3(R/r)} \right] \quad (8)$$

代入极值点取值  $R = e \times r$  得到

$$2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\frac{1}{R}\eta \left[ -\frac{1}{\ln^2 e} + \frac{2}{\ln^3 e} \right] = 2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\frac{\eta}{R} \quad (9)$$

由于  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ , 故在极值点  $R = e \times r$  处其二阶导数大于 0, 即  $R = e \times r$  为函数的极小值点, 电容变化范围  $C_d$  在此处取极小值。因此, 为获得更大的电容变化范围, 电容传感器的外内电极半径之比应尽量远离  $e$ , 当外内电极半径之比小于  $e$ , 接近 1 时, 不仅电容传感器的稳定性将会降低, 也不利于粘稠原油的流动; 外内电极半径之比大于  $e$  时, 比值越大, 测量电容的变化范围越大, 测量的灵敏度越高, 但是, 为降低成本、便于维护, 外电极半径不宜过大, 而内电极为保证一定抗冲击能力, 其半径也不宜过小。在此约束条件下, 利用有限元分析方法(FEM)进一步开展传感器设计与仿真。

## 2.2. 电容传感器电磁仿真与分析

利用有限元软件, 建立传感器电磁场仿真模型, 对传感器电场和磁场参数进行分析, 改变传感器尺寸和结构, 实现性能优化。

麦克斯韦方程是电磁场的核心问题, 本质上即是求解线性偏微分方程的问题。一个物理场量的偏微分方程需要通过边界条件来从多个可能的解中确定最终解。其求解方法主要分为基于偏微分方程模型的解析法, 以及基于有限元思想的数值法两类。其中, 常用的数值分析方法有有限单元、边界元素、有限差分 3 种[9]。

由于同轴流体电容传感器的电容值受到流型、介质性质以及分布情况等因素的影响, 内外电极之间电容复杂多变, 用解析法求解十分困难, 用数值法求解更加可靠便捷。随着电脑硬件配置的提高和软件技术的发展, 复杂问题的解决方法趋于模块化, 衍生出了各种工程分析软件, 极大地减少了科研工作量, 提高了科研效率。

有限元法是一种以变分原理为基础的, 高效率的系统化的求解微分方程的数值计算方法, 它被广泛地应用于各类以拉普拉斯方程或泊松方程所表征的物理场中。它的主要思想是将连续的求解域分割为有限个单元, 通过近似函数, 在每个单元内局部地表示求解域上的待求未知场函数, 从变化一个连续的无限自由度问题为离散的有限自由度问题。其中, 近似函数通常通过未知场函数及其导数在单元各个节点

的数值插值函数得到。

静电场有限元分析方法，主要是通过剖分静电场形成有限个离散单元，把静电场方程问题转化为求取能量函数的极值问题，通过有限个节点电位的函数表征静电场能量分布，使物理问题转化为数学问题 [10]。

运用 ANSYS 有限元分析软件建立传感器三维模型并进行剖分，剖分后传感器的三维有限元模型如图 2 所示。管道经过仿真计算得到传感器内部径向电势和轴向电场分布，如图 3 所示。由图 3 可知，中心电极附近电势较高，随着向外电极靠近，电势逐渐降低，呈梯度分布；靠近中心电极区域电势变化明显，靠近外电极区域电势变化不大。由于电场分布直接影响传感器对于油泡的感知能力，所以通过电场分布的特点，可以推测同轴流体电容传感器测量最灵敏区域很可能集中在靠近中心电极附近。

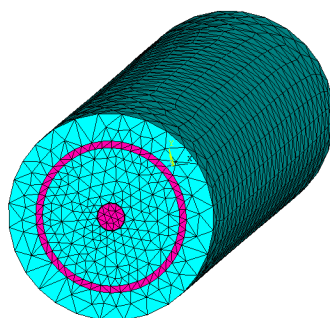


Figure 2. Three-dimensional finite element dissection model of coaxial fluid capacitance sensor

图 2. 同轴流体电容传感器三维有限元剖分模型

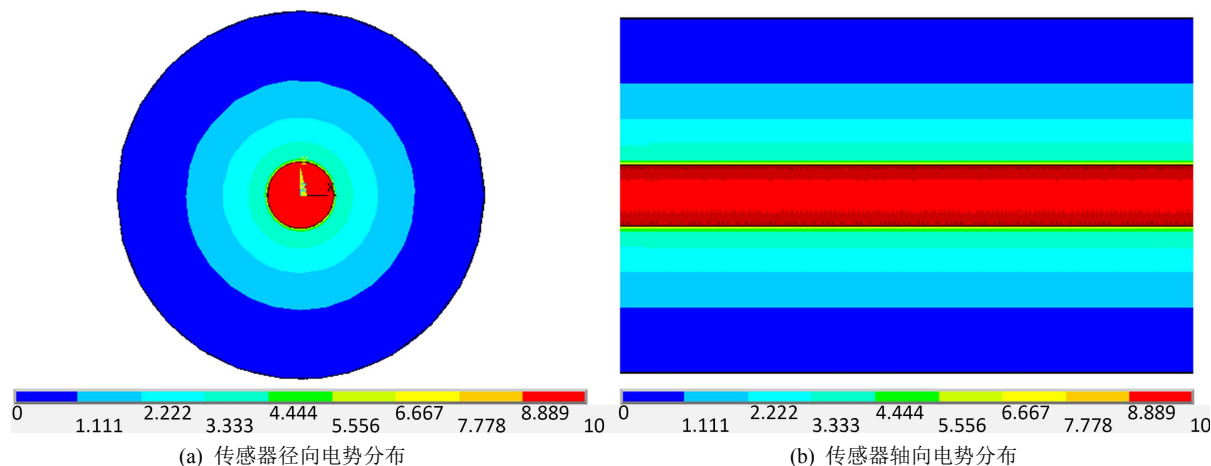


Figure 3. The electric potential distribution of coaxial fluid capacitance sensor detection field

图 3. 同轴流体电容传感器检测场电势分布

通过 ANSYS 有限元分析软件考察同轴流体电容传感器各结构参数对内部电势分布影响，比对传感器不同径向位置电势值大小。总的来看，同轴流体电容传感器电势分布呈中心高、边缘低的趋势。其中，电极长度对电场分布的影响不大。而绝缘层厚度、中心电极直径、外电极内径对电场分布影响显著，由此可见这 3 个参数对优化结果有重要影响。

由以上分析可以得出，同轴流体电容传感器不同结构尺寸对传感器内部电场分布影响显著，而电场分布又会对传感器灵敏场分布产生影响，结构优化的方向是在提高传感器灵敏度的同时，尽量使传感器



检测场电势以及灵敏场分布更均匀。值得指出的是,对于这种传感器,靠近内电极区域的电势变化梯度较大,越靠近外电极电势变化梯度越平稳。

### 3. 传感器信号驱动和调理电路的开发

#### 3.1. 电容传感器电路模型建立与设计

建立电容传感器电路信号传递模型,设计开发低噪声电容传感器电路,包括信号驱动、放大、滤波、采集电路,以及温度检测、串行通讯和低功耗单片机系统。

含水率的准确检测依赖于传感器电容检测的精确度,而电容电压转换电路直接影响电容检测的精确性。同轴流体电容传感器的测量区域较广,其中电容变化复杂,较其他电容传感器也容易受到各种干扰的影响,测量电容值及其变化量难度很大,测量电路的设计需要考虑很多方面。

1) 信号驱动电路——位于主电路和控制电路之间,用来对控制电路的信号进行放大的中间电路(即放大控制电路的信号使其能够驱动功率晶体管)。驱动电路的基本任务,就是将信息电子电路传来的信号按照其控制目标的要求,转换为加在电力电子器件控制端和公共端之间,可以使其开通或关断的信号。对半控型器件只需提供开通控制信号,对全控型器件则既要提供开通控制信号,又要提供关断控制信号,以保证器件按要求可靠导通或关断。

2) 信号放大电路——基本放大电路一般是指有一个三级管和场效应管组成的放大电路,主要功能是无失真地放大微弱信号。放大电路的功能是利用晶体管的控制作用,把输入的微弱电信号不失真的放大到所需的数值,实现将直流电源的能量部分的转化为按输入信号规律变化且有较大能量的输出信号。放大电路的实质,是用较小的能量去控制较大能量转换的一种能量装换装置。

3) 滤波电路——常用于滤去整流输出电压中的纹波,一般由电抗元件组成,如在负载电阻两端并联电容器 C,或与负载串联电感器 L,以及由电容、电感组成的各种复式滤波电路。滤波是信号处理中的一个重要概念。根据高等数学理论,任何一个满足一定条件的信号,都可以被看成是由无限个正弦波叠加而成。换句话说,就是工程信号是不同频率的正弦波线性叠加而成的,组成信号的不同频率的正弦波叫做信号的频率成分或叫做谐波成分。只允许一定频率范围内的信号成分正常通过,而阻止另一部分频率成分通过的电路,叫做经典滤波器或滤波电路。常用的滤波电路有无源滤波和有源滤波两大类。若滤波电路元件仅由无源元件(电阻、电容、电感)组成,则称为无源滤波电路。无源滤波的主要形式有电容滤波、电感滤波和复式滤波(包括倒 L 型、LC 滤波、 $LC\pi$  型滤波和  $RC\pi$  型滤波等)。若滤波电路不仅由无源元件,还由有源元件(双极型管、单极型管、集成运放)组成,则称为有源滤波电路。有源滤波的主要形式是有源 RC 滤波,也被称作电子滤波器。

4) 信号采集电路——功能是把输入的模拟信号进行衰减、放大,并把模拟量转换为数字量存入 RAM。电路的基本要求是,能在宽频率范围内保持衰减系数或放大倍数的恒定,有较高的模数转换速率,能以水平扫描时间所规定的频率将转换结果写入。信号采集电路主要由程控衰减、放大,高速 A/D,扫描时间因数,地址形成等电路以及构成。

5) 温度检测电路——在自动控制系统电路设计中的使用是相当广泛的,系统往往需要针对控制系统内部以及外部环境的温度进行检测,并根据温度条件的变化进行必要的处理,如补偿某些参数、实现某种控制和处理、进行超温告警等。因此,对所监控环境温度进行精确检测是非常必要的,尤其是一些对温度检测精度要求很高的控制系统更是如此。良好的设计可以准确的提取系统的真实温度,为系统的其他控制提供参考;而相对不完善的电路设计将给系统留下极大的安全隐患,对系统的正常工作产生非常不利的影响。

6) 串行通信——作为计算机通信方式之一，主要起到主机与外设以及主机之间的数据传输作用，串行通信具有传输线少、成本低的特点，主要适用于近距离的人-机交换、实时监控等系统通信工作中，借助于现有的电话网也能实现远距离传输，因此串行通信接口是计算机系统当中的常用接口。

7) 低功耗单片机系统——用于系统控制，数据的接收、处理与上。传采用低功耗设计不仅能减少使用中的功耗，而且可以大大减少备用状态下的功耗。许多低功耗设计大多采用最大静态化设计，在节省能源的同时，也减少电磁污染。低功耗系统设计涉及方面很多，其中有硬件设计方面的内容，也有软件设计方面的内容。硬件设计主要是器件选择和电路设计，软件设计主要是根据系统的运行状况对系统中的器件进行功耗管理，包括 CPU 自身的功耗管理。

### 3.2. 电容传感器信号噪声分析与优化

建立电容传感电路噪声传递模型，对各类噪声源进行分析，并采用误差抑制技术，提高电路信噪比，优化电路性能[11]。噪声相对于有用信号来说，通俗的讲就是干扰。如果噪声干扰不去除，就会造成信号失真，严重的会使得通信无法正确和有效的进行。在含水率测量中，希望的是该传感器传出的除了电容值信号外，不应该添加任何噪声。

在含水率测量中，信号转化的每一个环节中都会相应的引入额外的噪声。线缆用于连接探测器组件和信号采集电路。线缆不仅是系统中最长的部分，而且它还类似于一个拾取和辐射噪声的高效天线，是噪声传导的良好通道，因此线缆是系统中最薄弱的部分。

1) 调理电路——主要将探测器输出信号调理成与 ADC 器件输入范围相匹配，以达到动态范围相匹配的作用。仪器仪表放大电路具有高共模抑制比、高输入阻抗、低噪声、低线性误差、低失调电压和失调电压漂移、低输入偏置电流和失调电流误差、带宽充裕等特征，适合光电成像系统，能够较好地完成图像信息的获取工作。电阻和运放噪声是调理电路噪声来源的主要部分，在该电路中电阻和运放本身均是理想器件，电阻在电流流过时不可避免产生热噪声，运放则主要包括 N 端和 P 端的等效输入电流噪声及两端之间的等效电压输入噪声。

2) 电源输出模块——如 LDO 和 DC/DC 等，在输出电压时，都会有一定的输出纹波，在器件的 Datasheet 中有明确的规格参数。对这一类噪声，一旦 IC 供电芯片确定了，这部分噪声也就确定了。但是，如果负载瞬态电流的变化速率要求高些，供电 IC 就无法对负载的需求做出实时的响应，这样就会出现电压的跌落，从而引入噪声。对于高于供电 IC 实时响应的瞬态负载电流，就需要增加额外的去耦电容满足这一需求。采用不同容值、不同材质的电容组合可以有效去除。

3) 模拟数字转化(ADC)模块——主要完成模拟图像信号的模拟数字转化工作。对于 ADC，由于有效量化位数的限制，存在着不可避免的量化噪声。量化噪声主要受到信号统计特征和量化位数的限制。量化噪声是信息获取系统中一个必然存在的量，随着量化位宽的增加呈指数下降的趋势。对于 ADC 器件，除了存在量化噪声这一物理量之外，还存在半导体器件共同具有的  $1/f$  噪声、热噪声等，只是这些噪声在器件设计之初已经被很好的限制，相对于量化噪声可以忽略不计。因此在实际分析中只需要重点关注量化噪声。

4) 滤波器——工程实践中，为了解决噪声干扰问题，通常采用滤波器进行有用信号外的无用信号过滤。建立电容传感电路噪声传递模型，对各类噪声源进行分析，采用误差抑制技术最大程度地抑制电路的噪声以提高信噪比，可有效地提高测量的精度。

## 4. 含水率误差补偿及数据实时标定算法

### 4.1. 原油含水率温度补偿方法

针对含水率温度漂移，通过传感器温度同步在线检测，提出高精度原油含水率温度漂移补偿方法，

建立补偿算法模型。

误差补偿技术是贯穿于每一设计细节的关键技术之一[12]。对仪器仪表进行误差补偿主要考虑两种情况：第一种是待测对象随环境因素变化而变化，在不同测量条件下，待测量会有较大变化，因而影响测量结果；第二种是仪器自身的结构或者元件也会随环境条件变化而略有变形或表现出不同品质。一般而言，对于第一种情况可采用相对测量方法或建立恒定测量条件的方法予以解决；而对于第二种情况，应在设计阶段就仔细考虑仪器各组成零件随温度变化的情况，进行反复选材，斟酌每一个细小结构。

精密测量中的误差补偿技术主要有误差分离技术、误差修正技术和误差抑制技术3种形式[13]。误差分离技术的核心是将有用信号与误差信号进行分离，它有两种方式：基于信号源变换和基于模型参数估计的误差信号分离。基于信号源变换的误差分离技术要建立误差信号与有用信号的确定函数关系，然后再经相应信号处理，进而达到将有用信号与误差信号分离的目的。基于模型参数估计的误差分离技术是在确切掌握了误差作用规律并建立了相应数学模型后，对模型进行求解或估计。误差修正技术可分为基于修正量预先获取型和基于实时测量型误差修正技术，其核心是通过某种方式获取误差修正量，再从测量数据中消除误差分量。误差抑制技术是在掌握误差作用规律的情况下在测量系统中预先加入随误差源变量变化而自动调控输入输出，从而达到使误差抵消或消除的目的。一般可分为直接抑制型和反馈抑制型。

含水率测量受油水混合物的等效介电常数影响较大。油水混合物的等效介电常数除了与含水率有关外，还与油水两相的混合模态、温度等多种因素有关。油的介电常数受温度的影响很小，没有明显的函数关系；而水的介电常数受温度的影响比较显著，温度越高，介电常数越小，二者之间近似为线性关系，所以含水率测量受温度的影响较大。为了提高原油含水率测量精度，要考虑温度补偿或者实现恒定温度测量。通过在含水率测量的同时进行温度测量，确定含水率与电容、温度的函数关系，从而建立温度漂移补偿算法模型。

## 4.2. 原油含水率数据实时标定算法

研究原油含水率数据高精度标定算法，并针对现场监测需求，将标定算法内嵌入单片机系统，实现远端实时标定。

在进行原油含水率测量前，需要对仪器进行标定才可以进行准确地测量。标定，主要是指使用标准的计量仪器对所使用仪器的准确度(精度)进行检测是否符合标准，一般大多用于精密度较高的仪器。标定也可以认为是校准。因此，也可以认为标定包含以上两方面的意思。

由于每一口生产井的产出液所含成分、含量都不尽相同，导致即便对于同一系统也会出现测量结果有一定偏差，且目前用于含水率测量的技术都要求必须掌握流体的特性，如介电常数、质量吸收系数等，才能比较精确地计量。因此必须频繁地评价和标定传感器。含水率测量仪现场标定烦琐，而编写实时标定算法内嵌入单片机系统，实现远端实时标定，可节省大量的人力与物力。

## 5. 全量程含水率测试仪试制

### 5.1. 仪器研发

基于电容式原油含水率传感器、信号驱动与调理电路、误差补偿及数据处理算法，开发全量程含水率测试仪及配套软件，实现原油含水率在线测量。如图4所示。

进行含水率测试仪研制，需要基于已研发的电容式原油含水率传感器、信号驱动与调理电路、误差补偿及数据处理算法进行硬件电路设计，通过试验验证测量系统稳定性与各项性能指标并进行调试与优化，以满足最初设计需求。



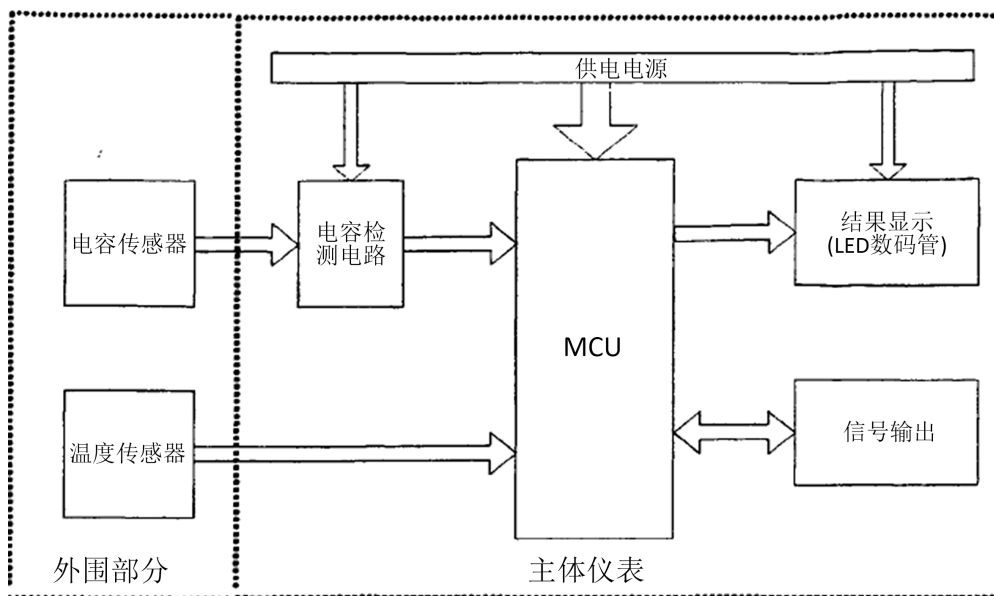


Figure 4. System structure diagram of full-scale water content tester  
图 4. 全量程含水测试仪系统结构图

机械结构的好坏直接影响测量系统的测量效果。进行含水率测试仪研制，需要设计稳定性好的机械结构，以提高复杂测量环境下的测量表现，增加测试仪的使用寿命，减少系统的维护工作量。

开发含水率测试仪配套软件，进行信号控制软件设计、数据存储软件设计和通信软件设计，以实现测试仪的便捷控制、数据存储、通信等功能，从而实现含水率在线测量。

### 5.2. 性能测试

通过电路设计、机械设计及装配，研制的全量程含水测试仪系统样机如图 5(a)所示。用如图 5(b)所示的超声波乳化器配置含水率 20%、40%、60%、80%的样品，与纯油与纯水一起使用含水率测量系统进行测试，每次测量对 10 min 内测量结果取平均值，得到测试结果如表 1 所示。

实际生产现场相对实验室环境复杂，对含水率结果可能产生较大影响。因此，本文下一步将开展全量程含水测试仪针对原油含水率的现场测量试验，通过分布式数据采集建立数据库，探究实际环境因素对测量结果的影响规律，改进实时标定与在线测量的精度。

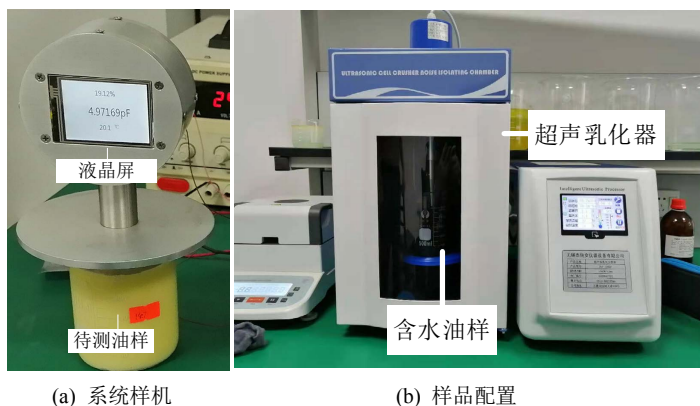


Figure 5. Development and test of full-scale water content tester  
图 5. 全量程含水率测试仪研制与测试

**Table 1.** Test results**表 1.** 测试结果

含水率/%	平均值 1/%	平均值 2/%	平均值 3/%	平均测量误差/%	最大测量误差/%
20.00	19.96	19.96	19.95	-0.043	-0.05
40.00	39.95	39.94	39.94	-0.057	-0.06
60.00	60.05	60.08	60.06	0.063	0.08
80.00	80.08	80.10	80.07	0.083	0.10

### 5.3. 仪器研制创新点

1) 利用有限元分析方法建立传感器电磁场仿真模型, 对传感器电场和磁场参数进行分析, 改变传感器尺寸和结构, 实现性能优化。

2) 建立电容传感电路噪声传递模型, 对各类噪声源进行分析, 并采用误差抑制技术, 提高电路信噪比, 优化电路性能。

3) 研究原油含水率数据高精度标定算法, 并针对现场监测需求, 将标定算法内嵌入单片机系统, 实现远端实时标定。

### 参考文献

- [1] 王艳菊, 康岳屹, 王怀玉. 基于数据融合的原油含水率在线测量方法研究[J]. 压电与声光, 2013, 35(5): 743-745+748.
- [2] 孙广栋. 原油含水率测试方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [3] 朱浩, 于革, 张治国. 新型原油含水率在线监测测试方法[J]. 黑龙江科学, 2015, 6(4): 26-28.
- [4] 赵雪英, 李鹏, 金喜平. 原油含水率的测试方法[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2003(2): 145-146.
- [5] 赵雪英. 原油含水率测试技术及装置的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2003.
- [6] 马舜祺. 油水两相流电容传感器响应特性研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
- [7] 张浩. 油水两相流同轴流体电容传感器测量特性研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.
- [8] 贺国强. 原油含水率测量技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2017.
- [9] 王燕京. 电磁场数值分析方法[J]. 北京建筑工程学院学报, 2003(3): 78-80+40.
- [10] 杨康, 张森旺, 周浚哲. 圆柱体内静电场有限元分析与计算[J]. 沈阳工业学院学报, 1998(2): 3-8.
- [11] 黄玉. 微位移电容传感电路的噪声分析与实验研究[J]. 传感技术学报, 2008(10): 1713-1716.
- [12] 石玺文. 惯性测量组合温度漂移误差补偿技术研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2016.
- [13] 李婷, 王仕成, 张金生. 磁场测量误差补偿技术综述[J]. 电光与控制, 2018, 25(6): 66-71.