

# 液压油品实时检测系统研究

刘 姣, 吕玉祥

兴县经开区铝镁新材料研发有限公司, 山西 吕梁

收稿日期: 2023年5月22日; 录用日期: 2023年6月23日; 发布日期: 2023年6月30日

## 摘 要

采掘机是综采成套设备的主要装备之一, 液压油品被广泛应用在各种机械中, 液压油品的水分含量是一个很重要的指标。本文提出了一种可以对液压油品水分含量进行实时检测的装置, 在总结现有的采掘机液压油品含水率检测方法的基础上, 从数据采集、模型建立、传感器设计、硬件电路设计、软件编程等多方面入手, 设计出了一套可以用于检测采掘机液压油品含水率的实时检测系统。该系统采用电容传感模块, 主控模块, 显示模块, 温度传感模块等进行集成设计, 可实现多功能测量。电容传感器在不同含水率情况下电容值会发生变化, 电容值的变化可以体现油品中的含水量。经过测试实验, 该检测系统精度可以达到0.01%, 可实现实时在线检测, 环境友好且检测范围广, 具有实际使用意义。它的应用可以使油品的水分含量数据实时显示, 确保遇到异常情况可以及时报警被发现, 为确保液压系统的可靠性, 延长液压元件的使用寿命提供了新的保障。

## 关键词

液压油品, 油品含水率, 实时监测, 关系模型

# Research on the Real-Time Detection System of Hydraulic Oil Products

Jiao Liu, Yuxiang Lyu

Xingxian County Economic Development Zone Aluminum Magnesium New Material Research and Development Co., Ltd., Lüliang Shanxi

Received: May 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2023; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Mining machine is one of the main equipment of fully mechanized mining equipment, hydraulic oil is widely used in all kinds of machinery, the moisture content of hydraulic oil is a very important index. This paper proposes a real-time detection system for hydraulic oil products, based on the existing detection method of hydraulic oil products, including data acquisition, sensor design, model

building, hardware circuit design and software programming. The system adopts capacitive sensor module, main control module, display module, temperature sensing module for integrated design, which can realize multi-function measurement. Capacitance value will change under different water content, and the change of capacitance value can reflect the water content in oil products. After the test experiment, the accuracy of the detection system can reach 0.01%, and can realize real-time online detection, environment-friendly and wide detection range, with practical use significance. Its application can make the moisture content data of oil products displayed in real time, to ensure that abnormal situations can be found in time to alarm, to ensure the reliability of the hydraulic system, prolong the service life of hydraulic components to provide a new guarantee.

## Keywords

Hydraulic Oil, Water Content of Oil, Real-Time Monitoring, Relationship Model

Copyright © 2023 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

采掘机是综采成套装备的主要设备之一,是一个大型的复杂系统,该系统集机械、液压、电气为一体,其中液压油是供给动力和能量的基础。常见的各种动力系统,燃油系统的可靠性与安全性都和液压油中含水率有关[1]。液压系统的大多数故障都是由油液污染引起的,而油滴污染主要是指液压油中水的污染,水污染是导致液压系统的可靠性下降,引起液压油性能恶化以及控制系统出现故障的主要原因之一[2]。

液压油中的水污染不仅会影响油品的质量,而且会导致使用液压油的仪器受到损坏[3]。液压油中水分含量经常用百分数来表示,油品的含水量会直接影响到油品的好多方面,比如生产,储存,运输以及使用等。根据目前国内外的相关资料显示,液压系统大部分故障都是由于油滴污染引起的,水与油滴发生反应生成的物质会对液压元件以及油滴有不良影响,所以能及时检测出油品中的水分含量对液压系统的正常工作具有重要意义[4]。故需要设计一种能快速实时检测油品中的含水量并能反馈给数据接受端,从而可以对得到的油品数据进行快速分析的实时检测装置[5]。

## 2. 油品水分含量检测系统方案设计

### 2.1. 整体结构设计

液压油实时检测系统的整体结构主要由硬件电路设计和软件编程两大部分组成,硬件电路是该检测系统的基础,在有硬件电路的基础上需要进行上下位机软件的配合。该检测系统的硬件电路部分主要由最小系统,电源电路,电容采集传感部分,温度采集电路,液晶显示电路,蓝牙通讯电路等组成;软件编程分为上位机软件和下位机软件部分,下位机软件该系统使用 keil uVision5,该软件开发系统可以支持 Cortex-M, Cortex-R4, ARM7 和 ARM9 等系列器件[6]。上位机可以用 LABVIEW 软件实现所需功能,LabVIEW 软件使用的是图形化编程的方式,最终会产生框图形式的程序。该系统的整体结构设计如图 1 所示。

检测系统的外壳主要完成对内部电路,电源,传感器等元件的固定;电容采集传感装置主要由电容采集部分和电容处理部分组成;硬件电路主要由电源电路,温度采集电路,电容采集电路以及数据通信电路组成;上位机显示电路,主要是接收下位机部分传来的信号,与下位机部分进行通讯,接着对信号进行处理,最后显示在屏幕上。

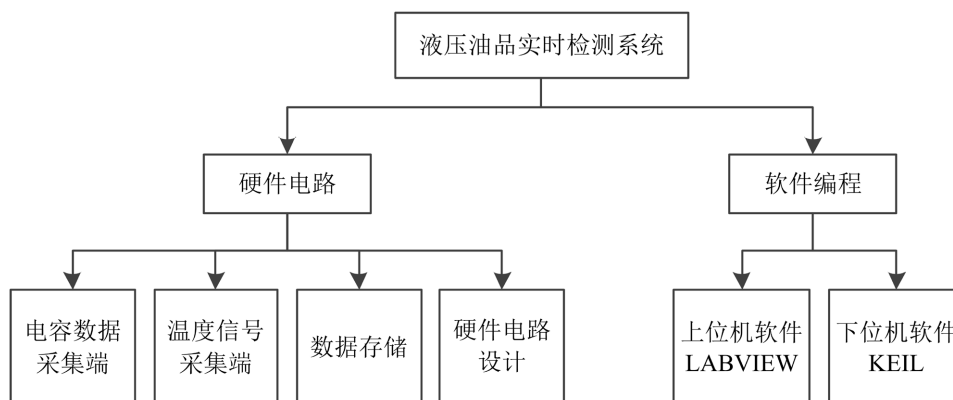


Figure 1. System overall block diagram  
图 1. 系统整体框图

## 2.2. 采集装置外壳设计

采集仪的外壳主要是为了固定设计的电路板, 传感器, 电源, 屏幕等需要元件。在满足基本功能的前提下, 在采集仪的上边开孔放置显示器件 LCD 屏幕, 左边开孔可以放置开关以及在特殊情况下进行外加电源供电接口, 右边开孔可以作为电容信号采集端, 由于 FDC2214 主芯片有四路通道可以采集电容数据, 所以在装置右边开孔从而可以测得多路电容数据[7]。

壳体可以对外界信号起到一定的防护干扰作用, 由上下壳体和前后挡板两部分组成, 由于该仪器中有电池进行驱动, 该结构设计可以方便在后续使用时更换电池。

## 2.3. 电容采集传感器设计

电容传感器在应用于油品含水量测量时, 由于电容值相较而言比较小, 目前主要利用不同含水率时电容的介电常数不同, 从而测得的油品含水率不同的原理, 利用水和油的介电常数相差较大的特性, 可借助电容传感器测得的电容值不同来测量油滴的含水率。不同形状的平行板电容器其使用场景不同, 常见的电容器主要有平行板型, 圆柱型, 圆筒型和螺旋线型等。

平行板电容器由正负极板构成, 在不考虑边缘效应的情况下, 平行板电容器中电场分布平行, 并且电场是垂直极板的; 圆柱型电容器是一种线性结构的容器, 由两个同轴的金属圆筒组成电容器的内外电极, 圆柱形电容器中可以放置液体, 当液体的含水率发生变化时, 混合介质的介电常数也会发生变化; 圆筒型电容器主要由外筒壁和内极柱组成, 一般会在外筒壁涂抹绝缘材料从而可以降低电磁干扰; 螺旋线型电容器主要由检测极板和激励极板组成, 其结构比较均匀, 被广泛应用于过程参数的检验。

对四种不同形状电容传感器进行分析, 可得到平行板电容器的分辨率最好, 最后选用平行板型电容器进行设计。其测量原理是将非电量转化为电容量, 根据电容量的变化可以实现油品中水分含量的测量与检验。

## 2.4. 硬件电路设计

硬件电路作为液压油品含水率采集系统的重要部分, 基于该控制系统的设计需求并在成本符合要求的基础上, 主控制器最终选择意法半导体的基于 Cortex-M3 内核系列的 32 位微控制器芯片 STM32F103RCT6, 该芯片具有满足数量的 I<sup>2</sup>C, UART, SPI 和 CAN 等接口, 主要用于采集电容信号和温度信号, 是整个系统的核心。主控制器构成的最小系统可完成最基本的功能, 主要由启动电路, 调试接口电路, 复位电路, 时钟电路, 电源电路等部分组成。

其中, 时钟电路可以通过写入相应的时序电路来控制电路完成不同的功能; 调试接口支持 JTAG 和 SWD 两种接口标准, 这两种接口都可以使用 GPIO 来供给调试仿真器使用; AMS1117-3.3V 是一个正向压降稳压器, 其内部集成过热保护和限流电路, 可以把 5V 转换为 3.3V。此装置中温度传感器最后选用 DS18B20, DS18B20 是一种温度测量精度比较高, 应用单总线结构的数字温度测量芯片。本信号采集系统选用 Ti 公司的一款低功耗高精度芯片 FDC2214 电容传感器, 最后可以用 TFTLCD 模块进行液晶显示 [8] [9]。图 2 为硬件电路设计原理图。

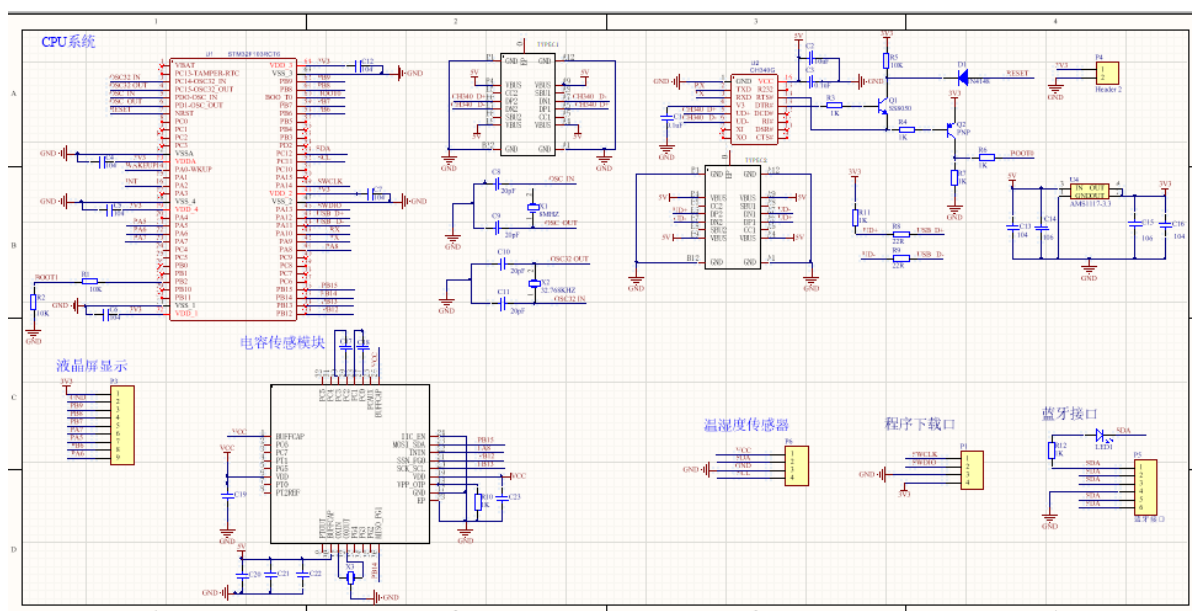


Figure 2. A Schematic diagram of the hardware circuit design

图 2. 硬件电路设计原理图

## 2.5. 软件程序设计

液压油品含水量检测系统是一个复杂的系统, 硬件系统是这个平台的基础, 要想系统可以稳定高效工作, 需要建立相应的软件系统来配合硬件系统来实现具体的功能。图 3 为软件系统整体框图设计。

软件系统分为上位机软件和下位机软件, 电容传感器可用于采集多路电容值, 温度传感器可以采集实时温度值, 对采集到的信号进行 AD 转换后可以在 TFTLCD 显示屏显示测得的数据 [10]。为了更加直观地了解电容值与含水率和温度值之间的关系, 最后可以在 LABVIEW 软件上实时显示接收到的数据。软件程序首先对系统, 延时函数, 液晶屏, 串口以及 ADC 等进行初始化设置, 接着进行界面更新, 然后开始信号采集, 分别采集水分含量数据和温度信号, 单片机读取到相应的信号并进行相应处理, 在液晶屏上显示处理得到的数据, 最后与上位机 LABVIEW 进行通讯, 在上位机显示数据。

## 2.6. 软硬件系统测试

在完成软硬件系统设计的基础上, 接着需要进行硬件电路板的制作和焊接, 最后需要进行系统测试。系统测试是一种用于检验设计好的软硬件系统能否可用的必备方法。其具体方法是通过与该系统设计的需求进行对比, 找到开发的系统与用户需求的区别, 进行总结改进, 最后进行改进得到完善的系统。该步骤可以排除系统在设计过程中出现的问题和失误, 根据具体的实验需求, 需要在系统正式使用前对液压油品水分含量的检测系统硬件和软件进行相关测试。

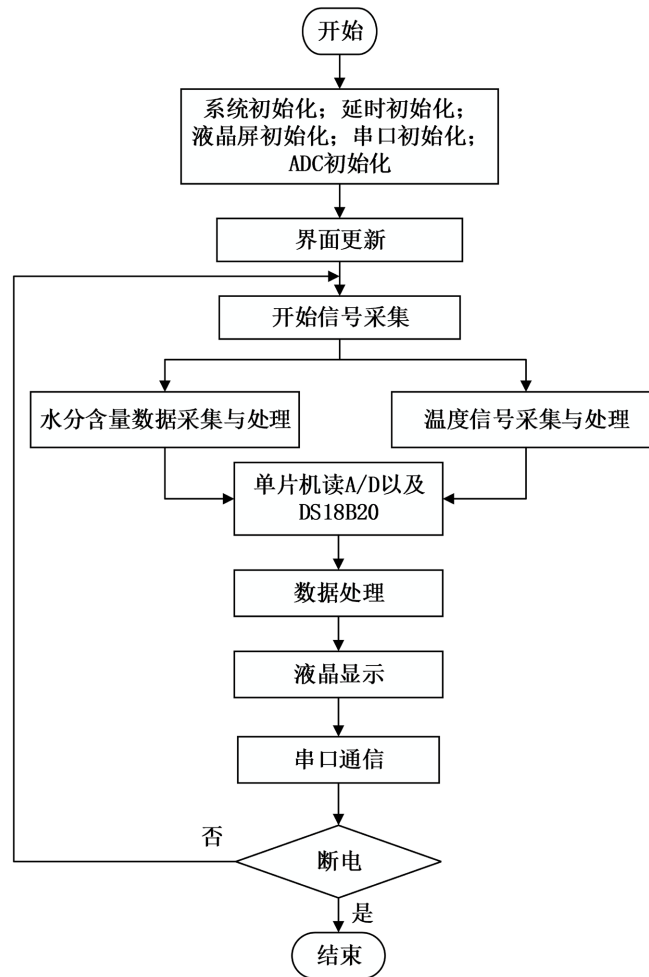


Figure 3. Overall block diagram design of the software system  
图3. 软件系统整体框图设计

### 3. 液压油品含水量检测系统分析与验证

在系统软硬件都设计完成并测试可用的基础上, 接着利用设计得到的液压油品含水率检测系统进行具体分析和验证, 分析得到含水率与输出电压以及电容值变化和介电常数变化之间的关系, 并验证得到的关系模型的可实用性。

#### 3.1. 含水率与输出电压模型分析

根据含水油品的特点, 电容传感器的电容量  $C_p$  可以等效为传感器绝缘层电容值和油水混合物电容值的串联,  $C_p$  的表达式为:

$$C_p = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2L}{\epsilon_1 \ln\left(\frac{R}{r+\delta}\right) + \epsilon_2 \ln\left(\frac{r+\delta}{r}\right)} \quad (1)$$

由于  $\delta$  的取值为  $\mu\text{m}$  量级比较小, 远小于  $r$  和  $R$  为  $\text{mm}$  量级, 因此上式可以变换为:

$$C_p = \frac{2\pi\epsilon_2L}{\ln(R/r)} \quad (2)$$

$C_p$  相对纯油时的电容增量为:

$$\Delta C = \frac{3W}{[(\varepsilon_w + 2\varepsilon_0)/(\varepsilon_w - \varepsilon_0)] - W} C_p \quad (3)$$

$$F_{Sensor} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

由上式可知, 当油中低含水率比较少时, 含水率与电容值的关系可以用下式表示为:

$$W = \mu C_x + \eta \quad (5)$$

忽略油中的杂质影响, 含水的油品可以看作纯油和纯水两种介质的混合, 由于油和水的介电常数相差比较大, 所以改变油和水的比例会使得介电常数发生变化, 从而使得电容值发生变化。油水混合介质的相对介电常数与油中含水量有关。极性的水分子和非极性的油分子由于在极化电场的作用下极化的方式不同, 所以油水混合物的混合介电常数并不是两种介电常数的简单算术平均。用混合介电常数描述其宏观介电特性, 介电常数的表达式如下:

$$\sqrt{\varepsilon_a} = \theta\sqrt{\varepsilon_1} + (1-\theta)\sqrt{\varepsilon_2} \quad (6)$$

其中为油水混合介质的混合介电常数,  $\theta$  为介质的含水体积百分率,  $\varepsilon_1$  为纯水的介电常数,  $\varepsilon_2$  为纯油的介电常数。

介电常数法主要就是利用油水混合物的介电常数和油中含水量有关的原理来测量油品中的含水率。在含水率为不同百分比 0, 5%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% 的情况下, 测得对应的输出电压值, 接着用 Matlab 软件拟合出液压油含水率与输出电压之间的关系, 得到结果如图 4 所示。由图可知, 液压油含水率与输出电压在近似条件下呈线性关系, 可以根据他们的对应关系计算出含水率。

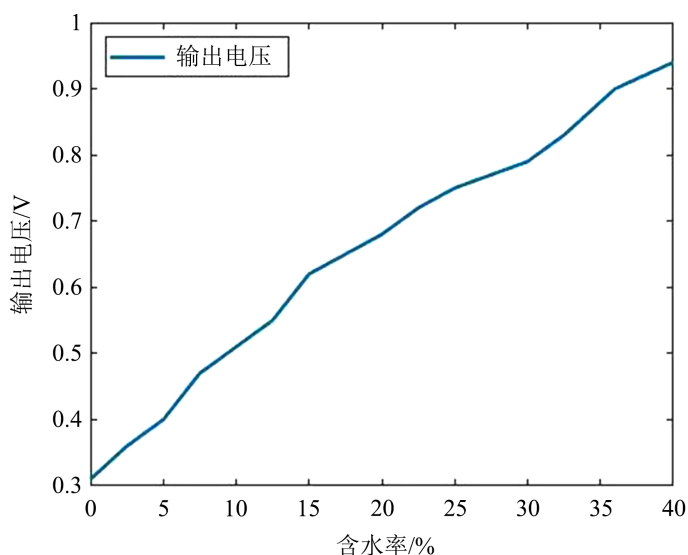


Figure 4. Model for the relationship between water content and output voltage

图 4. 含水率与输出电压关系模型

### 3.2. 含水率检测系统验证

为了对液压油水分检验装置进行可行性检验并测定结果误差, 选用了蒸馏法与本装置进行对比实



验, 在具体实验中都选用含水率由人工调制的标准液压油品, 具体对比实验步骤如下。

用自制的油品水分测量仪器和蒸馏法分别对标准油样进行含水率测定, 蒸馏法水分测定一般采用 ASTM D95-2005 标准, 蒸馏法是测量液压油品水分含量最精确的方法, 所以该实验中使用含水率分别为 0.06%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.5%, 0.7%, 0.8%, 0.9% 的油品分别进行五组实验, 油样蒸馏时利用圆底烧瓶进行加热, 重复上述步骤, 利用测得的数据得到了测量值与原始值之间的误差, 并计算得到平均误差。再利用 MATLAB 软件做出了两种对比方法的平均误差曲线图如图 5 所示。

该部分内容对比了在不同含水率情况下利用自制装置与传统蒸馏法进行对比, 得到测量值与误差值, 最后计算出平均误差, 由两种方法测量结果可得, 实际测量得到的值与标准值有一定的误差, 此误差在允许范围内, 所以可以用自制装置进行测量。

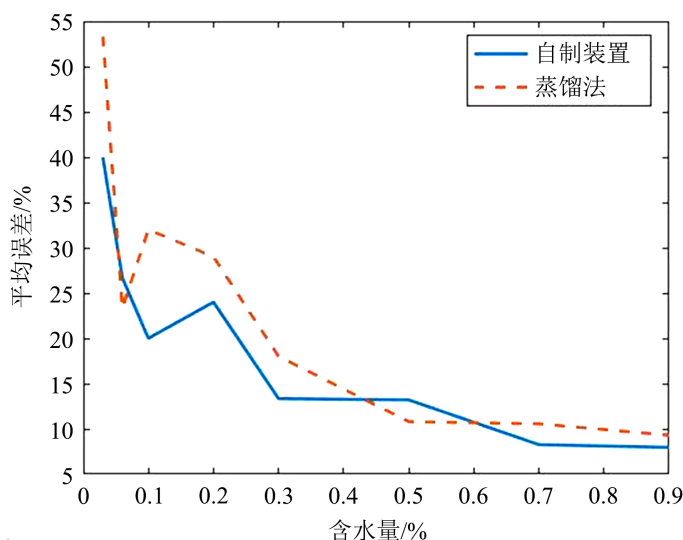


Figure 5. Study on the relationship between capacitance value and temperature

图 5. 两种方法对不同含水量油滴的检测结果对比

## 4. 结语

液压油中含有水分后会影响到油的品质, 并且水污染会导致机械性能出现故障, 加速仪器老化, 所以利用有效方法进行对油品水分含量的检测, 可以得到油品质量的实时数据, 从而可以及时采取积极有效的措施。减少油品中的水分含量, 可以显著延长滚动轴承的寿命, 从而可以对液压油品器件起到一定的保护作用。设计一种装置可以实时检测出油品中水分含量, 根据实时收集到的数据, 对油品情况进行分析, 从而可以采取及时的措施, 就可以避免好多因油品中水分导致的对液压元件的损坏。因此, 本文研制了一种可以实时检测油品水分含量的仪器, 可以对液压油品水分含量进行实时在线检测, 可以时刻清楚油品水分含量, 经检验分析该检测系统便捷实用, 可实现基本需求。

## 参考文献

- [1] 饶美丽, 徐增勇. 基于嵌入式油品含水率检测系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019(2): 48-50+54.
- [2] 张平川, 李兴山, 黎步银. 基于介电常数法的高精度油品含水率检测仪[J]. 传感技术学报, 2014(3): 416-420.
- [3] 孟祥, 赵莹, 李艳娟. 基于 ARM 的精轧机润滑油含水监测系统设计[J]. 润滑与密封, 2020, 45(6): 114-117+124.
- [4] 余婷, 张建, 程小亮, 刘德峰, 王竞翔. 船舶动力与传动装置润滑油状态监测[J]. 测控技术, 2022, 41(11): 102-106.

- 
- [5] Yang, M., Liu, M., Wu, Z., *et al.* (2020) Fluorescence Enhanced Detection of Water in Organic Solvents by One-Pot Synthesis of Orange-Red Emissive Polymer Carbon Dots Based on 1,8-Naphthalenediol. *Micro & Nano Letters*, **15**, 469-473. <https://doi.org/10.1049/mnl.2019.0170>
- [6] 赵满, 时海涛. 基于 CAV444 芯片的测量电容的电路系统设计[J]. 自动化应用, 2018(10): 45-46.
- [7] 李云龙, 燕德国, 邓永强, 张文彪, 韩晓娟. 基于螺旋式电容传感器的生物质含水量测量[J]. 可再生能源, 2020, 38(5): 585-590.
- [8] 杨天麒. 基于电容测量的液位检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [9] Zhang, X.F., Pan, Y.Q., Chen, P.P. and Yu, L. (2019) Impact of Emulsifier on Separation of Oil-in-Water Emulsion by Dynamic Membrane. *Chemical Industry and Engineering Progress*, **38**, 790-797.
- [10] 胡慧敏, 高倩, 张平川. 基于 ARM 的高精度动力油品含水率检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2015(4): 58-60.