

Oil Water Content Detector Based on Dielectric Constant Method with High Accuracy*

ZHANG Pingchuan^{1,2}, LI Xingshan³, LI Buyin^{2*}

(1. School of Information Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxing Henan 453003, China;
2. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. Luohe Medical College, Luohe Henan 462002, China)

Abstract: The military equipment reliability of hydraulic system, fuel system, lubricating oil system in submarines and aircrafts are greatly influenced by the water content of the oil, so the water content of the oil is often required less than 0.01% (0.01 Level). In order to develop such an instrument for detecting water content, this paper based on the dielectric constant principles to design a capacitance sensor for collecting the dielectric constant changing of the oil-water mixture and established the related mathematical model which is revised by temperature compensation for improving the measuring accuracy to 0.01. The S3C2410 ARM9 was used as the controller and WinCE as an operating system to manage multiple tasks, AD7745 for digital conversion of capacitance. It can be concluded from the experiments results that under the condition of $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $0 \sim 0.35\%$ water content for detecting lubricating oil and light oil products, both of the accuracy reached 0.01 level, and has good repeatability, high reliability, etc. It can be used in the fields strict for oil water content such as military ships, electric power, and aerospace, to ensure the high reliability of military equipment.

Key words: oil of submarines and aerospace; water content of oil; dielectric constant; capacitance sensor model; reliability; ARM

EEACC: 7210A; 7230L; 7310K; 7990

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2014.03.026

基于介电常数法的高精度油品含水率检测仪*

张平川^{1,2}, 李兴山³, 黎步银^{2*}

(1. 河南科技学院信息工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉 430074;
3. 漯河医学高等专科学校, 河南 漯河 462002)

摘要: 油品含水率影响潜艇和飞机等装备的液压系统、燃油系统、滑油系统的可靠性和安全性, 要求含水率小于 0.01%。基于介电常数法建立了采集油水混合乳液介电常数变化的电容传感器的数学模型, 并经过温度补偿修正。采用 S3C2410 ARM9 作为控制核心, 以 WinCE 作为操作系统管理多个任务, 通过 AD7745 实现介电常数与电容量的数字转换, 设计实现了 0.01 级精度的油品含水率检测仪。实验表明: 在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度条件下和 $0 \sim 0.35\%$ 含水率范围内, 润滑油和轻质成品油的含水率精度达到了 0.01, 且具有重复性好、可靠性高、设备简单等优点。可应用在舰艇、电力、航空航天等对油品含水率要求严格的领域, 以保证装备的可靠性和安全性。

关键词: 潜艇与飞机油品; 含水率; 介电常数; 电容传感器模型; 可靠性; ARM

中图分类号: TP212.1; E919

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2014)03-0416-05

油品中的水分对潜艇、飞机等装备中的高性能液压系统、燃油系统、滑油系统可靠性和安全性等有着重要影响, 这些系统通常要求含水率小于 0.01%, 即达到 0.01 级的品质^[1-2]。目前, 国内对 0.01 级油品含水率检测装置主要是进口国外产品。用于油品含

水率检测的方法主要有: 短波吸收法、射频法。短波法是对油管内二相流体进行点线式的采样, 不能有效表达混合两相流的情况, 尤其是工况条件下, 油水的混合不可能是完全均匀的, 因此工况条件下存在较大的测量误差。射频法是基于射频阻抗理论, 具有重复

项目来源: 河南省教育厅自然科学科技攻关项目(2011C510009)

收稿日期: 2013-12-31 修改日期: 2014-03-07

性好、体积小、响应快等特点。但是,该方法电路复杂、成本高,而且工况条件下高频电路随着工作时间的延长而产生显著漂移,难以得到0.01级精度的检测。考虑到水和油介电常数相差较大,且油品含水量是影响油品介电常数的主要因素,其微小变化就可引起油品介电常数的较大变化,当建立与介电常数变化相对应的电容值变化的数学模型后,通过测量电容值就可得到含水率^[3-4]。因此,本文拟采用介电常数法研究0.01级精度的油品含水率检测方法和仪器,以满足高精度油品含水率检测到需求。

1 油品电容模型设计

1.1 介电常数法原理

介电常数是介质的一种电特性,它与介质在电场中被极化的程度和过程相关。真空的介电常数 ε_0 约为 8.854×10^{-12} F/m,习惯上用相对介电常数表示(以下简称介电常数),其定义为介电常数与真空介电常数之比,即 $\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0$,柴油的介电常数为2.1,汽油的为1.9,而水的介电常数为80,油与水的介电常数相差较大,含水率微小的变化就会引起油水混合乳液介电常数的变化^[3]。根据电介质物理学的理论,油水混合乳液的介电常数的表达式为:

$$\varepsilon = \varepsilon_H \left(1 + \frac{3W}{\frac{\varepsilon_0 + 2\varepsilon_H - W}{\varepsilon_0 - \varepsilon_H}} \right) \quad (1)$$

式(1)中, W 表示油品含水率, ε_0 、 ε_H 、 ε 分别表示纯水、纯油和混合乳液的介电常数。

当采用电容传感器来检测油水混合乳液的介电常数 ε 时,传感器输出电容 C_x 可表示为:

$$C_x = \varepsilon C_a + C' \quad (2)$$

式(2)中, C_a 表示介质为真空(干燥空气)时传感器的电容, C' 表示传感器的杂散分布电容。

当电容传感器的结构及几何尺寸确定之后,它的输出电容 C_x 就是油中含水率 W 的单值函数,这时传感器相对纯油时的电容变化量 ΔC 为:

$$\Delta C = \frac{3W}{\frac{\varepsilon_0 + 2\varepsilon_H - W}{\varepsilon_0 - \varepsilon_H}} C_H \quad (3)$$

式(3)中, C_H 为纯油时传感器的输出电容。

由式(3)可以看出,当油中为低含水率时,电容传感器的 ΔC 与含水率 W 成线性关系。可见,在含水率较小的情况下,传感器测得油中水分具有较好的线性度,此时含水率与电容值的关系可表示为:

$$W = \mu C_x + \eta \quad (4)$$

介电常数法利用油水混合乳液的介电常数和含

水率有关的原理来实现对油中含水率的测量。通常情况下为了便于分析计算,认为油水混合乳液的介电常数只与含水率有关,而常忽略烃类组成、压力、密度、含气量和温度等因素的影响,对于潜用柴油来说,温度的影响不可忽视,对于柴油这样的轻质油品,介电常数随温度的变化的升高而减小。这是由于温度升高时油水乳化液中分子的热运动加强,使其极化更加困难。据测试,在含水率小于10%的时候,如果忽略温度的因素,被测油温变化10℃时,会引入约0.15%的测量误差。

对于使用工况较好(如烃类组成稳定、微含气量、流动均匀、密度和压力恒定)的柴油而言,温度变化对油品含水率测量结果影响较大,因此,考虑介质温度补偿后,建立的电容传感器的数学模型为:

$$W = \mu C_x + \beta(t - t_0) + \gamma \quad (5)$$

式(5)中, W 为油中含水率, μ 、 β 、 γ 为系数, t_0 为基准温度, t 为介质温度, C_x 为电容实际数值。在已知标准含水率及介质温度下,对上式进行标定,即可得到需要的电容传感器的数学模型。

由式(5)可知,计算含水率 W 的相关因素中, C_x 和 t 为 W 的两个变元。根据最小二乘法的原理,确定参数 μ 、 β 、 γ 的问题最终归结为求以下三元一次函数的极小点(μ^* 、 β^* 、 γ^*)。

$$S(\mu, \beta, \gamma) = \sum_{i=1}^m [\mu C_{x_i} + \beta(t_i - t_0) + \gamma - W_i]^2 \quad (6)$$

由多元函数取极值的必要条件可知, μ^* 、 β^* 、 γ^* 为下列方程的解。

$$\frac{\partial S}{\partial \mu} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial \beta} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial \gamma} = 0 \quad (7)$$

即可得到如下方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m [\mu^* C_{x_i} + \beta^*(t_i - t_0) + \gamma^* - W_i] C_{x_i} = 0 \\ \sum_{i=1}^m [\mu^* C_{x_i} + \beta^*(t_i - t_0) + \gamma^* - W_i] (t_i - t_0) = 0 \\ \sum_{i=1}^m [\mu^* C_{x_i} + \beta^*(t_i - t_0) + \gamma^* - W_i] = 0 \end{cases} \quad (8)$$

若取基准温度 $t_0 = 20$ ℃,在标准含水率 W_i 条件下,测量电容传感器的输出电容 C_{x_i} 和介质温度 t_i ,将实验数据代入上式,即可求出参数 μ^* 、 β^* 、 γ^* ,由此,电容传感器的温度补偿数学模型就可以建立了。

从模型可以看出,介电常数法采用管道内混合流体的平均值,适合于工况条件下二相流型复杂的要求,即使管道有少量游离气体存在,也不会引起较大测量值误差,容易实现工况条件下的测量精度的要求。且介电常数法的量程小,特别适用于检测

含水率较小的情况。

1.2 电容器结构设计

电容传感器是检测仪的关键部件,为了简化制造工艺和安装方便,采用同轴圆筒形电容结构,电容传感器探头采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢制备,电容的外电极板上开一定规律的圆孔,能够起到自均流作用。内电极涂敷聚四氟乙烯绝缘层,表面光滑,以消除水分的导电效应,也可增强探头的机械强度,增大抗压能力,使得输出信号基本稳定^[5-8]。电容传感器结构如图 1 所示。

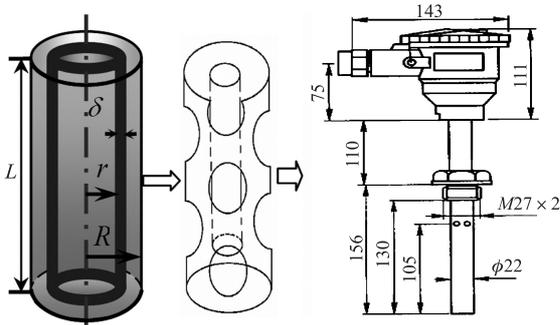


图 1 电容传感器结构示意图

图 1 中,设同轴圆筒形电容传感器探头内电极半径为 r ,外电极半径为 R ,内电极绝缘层厚度为 δ ,绝缘材料介电常数为 ε_1 ,电极长度为 L ,油水混合乳液的介电常数为 ε_2 。电容传感器的电容 C_p 等效为绝缘层和油水混合乳液电容的串联值。 C_p 的表达式为:

$$C_p = \frac{2\pi\varepsilon_1\varepsilon_2L}{\varepsilon_1 \ln\left(\frac{R}{r+\delta}\right) + \varepsilon_2 \ln\left(\frac{r+\delta}{r}\right)} \quad (9)$$

由于 δ 取值较小(约几十 μm),远小于 r 和 R (约几十毫米),因此上式可变换成:

$$C_p = \frac{2\pi\varepsilon_2L}{\ln(R/r)} \quad (10)$$

又已知 C_p 相对纯油时的电容增量 ΔC 为:

$$\Delta C = \frac{3W}{(\varepsilon_0 + 2\varepsilon_H)/(\varepsilon_0 - \varepsilon_H) - W} C_p \quad (11)$$

式中, ε_H , ε_0 , ε 分别表示纯油、纯水和混合乳液的介电常数, W 表示油中含水率。

取 $L=100\text{ mm}$, $R=40\text{ mm}$, $r=20\text{ mm}$, 纯油的情况下, $C_p \approx 16.82\text{ pF}$, 如果 W 为 $0 \sim 3\%$, 代入上式, 可得到 $\Delta C \approx 1.44\text{ pF}$ 。

传感器采用全封闭铠装结构,以保证其有很好的屏蔽性,可安装在油箱的底部或侧面。

2 系统方案设计

油品含水率检测仪系统方案如图 2 所示,其主要由传感器和测控两部分组成^[9-13]。

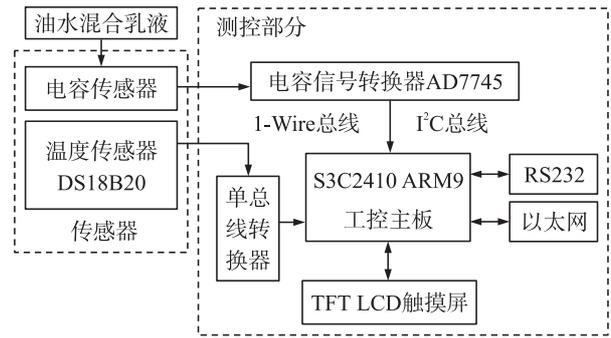


图 2 检测装置组成原理图

图 2 中,电容传感器将油水乳液的介电常数转换为电容量,实现油中含水率的在线实时测量,温度传感器实现油水乳液实时温度的测量,电容和温度信息输入到测量装置,并由测控装置完成数据采集与处理、温度补偿处理,结果显示以及远程信息输出等功能。

本系统采用专用集成电路 AD7745 实现电容传感器的信号转换^[14-15]。AD7745 是美国 ADI 公司推出的 24 bit Σ - Δ 电容数字转换器(CDC),可直接连接电容传感器实现测量。其特点是:高分辨率(最低 4 aF)、高线性度($\pm 0.01\%$)和高精度($\pm 4\text{ fF}$ 工厂校准)等;具有一个双线式与 I²C 兼容的串行接口;可采用 2.7 V ~ 5.25 V 单电源供电,额定工作温度范围为 $-40\text{ }^\circ\text{C} \sim 125\text{ }^\circ\text{C}$ 。

设置 AD7745 工作在单端偏置模式,电容输入范围为 13 pF ~ 21 pF,根据上述分析,在含水率计量范围为 $0 \sim 3\%$ 时,电容传感器的变化范围约为 16.82 pF ~ 18.26 pF,显然可以满足 AD7745 的输入要求。假设电容传感器在计量范围内测量结果是理想的,计量精度为 R_M ,计量动态范围为 $\Delta M = 3\%$,已知 AD7745 在整个量程范围内最大绝对误差为 $R_C = |\pm 4\text{ aF}| = 4 \times 10^{-3}\text{ pF}$,量程为 $\Delta C \approx 1.44\text{ pF}$,则依据 $R_M/\Delta M = R_C/\Delta C$,可得含水率转换精度 $R_M \approx \pm 8.3 \times 10^{-6}$ 。

温度补偿电路中,选用抗干扰能力强的数字温度传感器 DS18B20 采集温度数据。

嵌入式工控主板选用具有“ARM9+WinCE”架构的 S3C2410 来实现,S3C2410 为三星公司生产,已内置了 WinCE 嵌入式操作系统;显示屏选用带触摸屏的 TFT LCD,实时显示含水率、温度等数据信息。

系统工作时,ARM 处理器通过 I²C 接口电容信号转换器以及温度单总线转换器相连,实现数据采集;以太网接口为主机调试接口,通过其下载执行代码;RS232 串口实现与其他扩展智能串口设备连接;显示屏主要完成界面显示功能;矩阵键盘为输入设备,主要实现参数的输入和控制等功能。

3 系统软件设计

本系统的嵌入式操作系统为 WinCE 5.0,开发环境为 Embedded VC++4.0。

系统中的功能程序模块结构如图3所示。采用多线程结构,利用多个线程、完成数据采集、数据处理、数据显示和数据存储等任务。

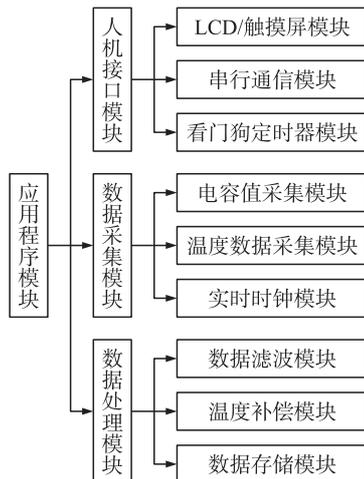


图3 应用软件功能模块

系统充分利用 Windows CE 操作系统的多线程的特点将不同的任务分布到各个线程中,使各个任务同步而协调地进行。主线程负责人机接口,其中包括数据的 LCD 实时显示、串口数据的定时发送、触摸屏输入响应以及看门狗 WDT 的响应等。为了保证数据的采集不被其他线程中断,设置了一个优先级较高的线程管理数据采集,保证了各个任务线程(人机接口线程、数据采集线程、数据处理线程)协调地完成各自的工作。线程间的通讯通过消息响应函数实现。

4 系统实验

为了检验检测仪的性能,分别采用 5W-40/SM 润滑油和 93 号轻质成品油进行了检测实验,在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,测得的与不同含水率相对应的电容值变化和介电常数的变化关系如图4和图5所示。

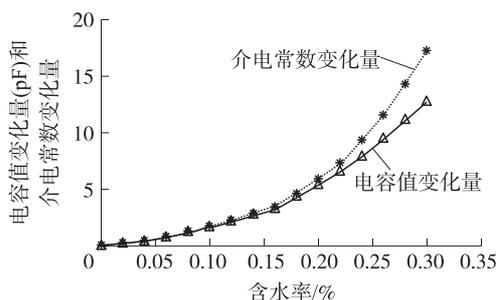


图4 润滑油电容及介电常数与含水率变化关系

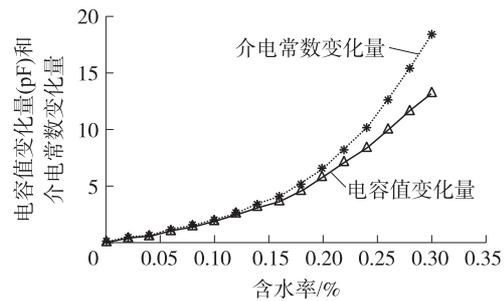


图5 轻质成品电容及介电常数与含水率变化关系

从图4和图5可以看出,两类油品中含水率的增加时,油品的介电常数变化显著,使得检测得到的电容值也相应变化,在0.01精度要求范围内,电容值与含水率的关系呈线性关系。

5 结语

依据介电常数法建立了油水混合液含水率检测的电容数学模型,并设计实现了电容传感器。介电常数法采用了管道内混合流体的平均法测量,特别适合工况条件下油水二相流流型复杂的要求。介电常数法的量程范围小,非常适用于检测潜艇与航空类装备中油品含水率较低的应用。采用 ARM 嵌入式系统实现的含水率检测仪,经过对润滑油和轻质油品进行检测实验,验证了含水率与油品介电常数关系及建立的电容数学模型的正确性,在0.01级检测精度要求范围内呈线性关系,使检测仪精度达到了0.01级,可以满足潜艇和航空装备中对检测油品含水率精度的需要,保障系统的可靠性和安全性,也可应用在其他各类对油品含水率有严格要求的领域。具有测量精度高、重复性好、可靠性高,设备简单、安装和维护方便等优点,为实现0.01级精度油品含水率检测仪国产化提供了技术方案。

参考文献:

- [1] 付肖燕,沈继红,赵玉新. 潜艇水下航行的安全性评估[J]. 系统工程与电子技术,2012(11):2407-2412.
- [2] 宋东,周建民,王彦文. 基于模型的飞机燃油系统故障诊断系统的设计与实现[J]. 测控技术,2011(4):43-46.
- [3] 邹大军,李锡文,何锐波,等. 基于有限元分析的粉末介电常数测试装置研制[J]. 仪器仪表学报,2013(2):423-427.
- [4] Abdul Rajab, Aminuddin Sulaeman, Sudaryatno Sudirham, et al. A Comparison of Dielectric Properties of Palm Oil with Mineral and Synthetic Types Insulating Liquid under Temperature Variation [J]. ITB Journal of Engineering Science, 2011, 43(3): 189-206.
- [5] Tomokazu Takahashi, Masto Suzuki, Shota Iwamoto, et al. Capacitive Tactile Sensor Based on Dielectric Oil Displacement out of a Parylene Dome into Surrounding Channels [J]. Micro Machines, 2012, 3(2): 270-278.

- [6] Heerens W C. Application of Capacitance Techniques in Sensor Design[J]. J Phys E:Sci Instrument,1986(19):897-906.
- [7] 边晓娜,赵立志. 基于蓝牙和传感器技术的油含水率测量系统[J]. 传感器与微系统,2008(8):81-83.
- [8] 边晓娜,刘静,赵立志. 电容传感器的电路设计[J]. 仪表技术与传感器,2008(6):104-105.
- [9] 崔丽琴,秦建敏,韩光毅,等. 基于空气、冰与水相对介电常数差异的电容感应式冰厚传感器[J]. 传感技术学报,2013(1):38-43.
- [10] 张晓飞,杨定新,胡政,等. 基于电介质介电常数测量的油液在线监测技术研究[J]. 传感技术学报,2008(12):2088-2092.
- [11] 陈宝,胡晓兵,孙鸿. 基于 AD7745 的电容差压传感器设计[J]. 传感器与微系统,2011(6):71-73.
- [12] 刘海仓,滕召胜,刘静波,等. 基于 AD7745 的数字式油品检测传感器设计[J]. 传感器与微系统,2011(9):81-83.
- [13] 田松峰,王志强,丁宝忠,等. 在线测量透平油含水量实验台设计[J]. 仪器仪表学报,2006(s1):171-173.
- [14] 程建新,赵涛,王志刚. 基于 CDC 与 ARM 的微位移电容传感信号处理电路设计[J]. 传感器与微系统,2013(1):105-107.
- [15] AD7745/AD7746 Datasheet[M]. USA:Analog Device Inc,2005:9.



张平川(1968-),副教授,博士,微电子学与固体电子学专业。研究方向为嵌入式系统、射频技术与信号处理,362764053@qq.com;



李兴山(1972-),男,河南滑县,硕士,1996年于河南师范大学获学士学位,副教授,研究方向为单片机和电子技术应用,604141388@qq.com;



黎步银(1966-),湖北荆州,华中科技大学教授,博导,研究方向为信息功能材料与器件、智能系统、传感器与仪器仪表、锂离子电池与燃料电池,libuyin@mail.hust.edu.cn。