

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106650

## 非接触式液体物理参数自动测量装置\*

杨文韬<sup>1</sup> 庄建军<sup>2</sup> 张雨辰<sup>1</sup> 梅永<sup>2</sup> 王沁<sup>3</sup>(1.南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210044; 2.南京信息工程大学 工程训练中心 南京 210044;  
3.德州仪器半导体技术(上海)有限公司 中国大学计划部 上海 200122)

**摘要:** 液体物理参数测量是众多领域最频繁的测量操作之一,为科研生产的分析决策提供原始数据。但现有仪器多为接触式、手工方式、单一参数测量,工作效率低,且存在污染测试样品的风险。为此,设计了一种非接触式液体物理参数自动测量装置。该装置以 STM32 微处理器作为主控,利用平行板电容原理,采用 FDC2214 电容传感芯片和柔性 PCB 为核心,通过拟合计算实现液体体积测量,同时利用电阻式薄膜压力传感电路测量液体质量。经实验测试,该装置测量的液体体积和质量误差分别为 2.31% 和 1.07%,可满足大部分情况下的液体测量要求,为生物化学等场合的液体自动测量提供了一种新方法。

**关键词:** 电容传感器;非接触式;自动测量

**中图分类号:** TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Non-contact automatic measurement device for liquid physical parameters

Yang Wentao<sup>1</sup> Zhuang Jianjun<sup>2</sup> Zhang Yuchen<sup>1</sup> Mei Yong<sup>2</sup> Wang Qin<sup>3</sup>(1. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;  
2. Engineering Training Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;  
3. China University Program, US Texas Instruments Semiconductor Technologies (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

**Abstract:** The measurement of liquid physical parameters is one of the most frequent measurement operations in many fields, which provides raw data for the analysis and decision-making of scientific research and production. However, most of the existing instruments are contact, manual, single parameter measurement, with low efficiency and the risk of contamination of test samples. Therefore, a non-contact automatic measurement device for liquid physical parameters is designed. The device is mainly controlled by STM32 microprocessor. Based on the principle of flat capacitance, flexible PCB and TI company's FDC2214 capacitance sensor chip are used as the core. The liquid volume measurement is realized by fitting calculation. At the same time, the liquid quality is measured by the resistive film pressure sensing circuit. The experimental results show that the errors of liquid volume and mass measured by the device are 2.31% and 1.07% respectively, which can meet the requirements of liquid measurement in most cases. It provides a new method for automatic liquid measurement in biochemistry and other occasions.

**Keywords:** capacitance sensor; non contact; automatic measurement

## 0 引言

随着电子信息产业的发展与成熟,涌现出了大量种类丰富的传感器,被广泛应用于工业、农业等领域。其中,液体测量是科研与生产中最频繁的测量项目之一,为各实验进行分析、决策提供重要数据。如今,在工业和日常使用中,人们对传感器的结构、使用等方面都提出了更高的要求。电容传感器因其结构简单、灵敏度高、成本低廉等特点

脱颖而出,并且尤为适合应用于液体测量中<sup>[1]</sup>。

非接触式测量是指在对物体进行测量时,测量仪器不与被测物体直接接触的测量方式<sup>[2]</sup>。非接触式测量具有安全、方便、卫生等优点,可以应用于腐蚀性以及医药用液体的测量中,是其他测量方案无法比拟的。电容是描述物体间电场的物理量,电容传感器因其物理特性,可以方便地实现非接触式测量。常见的采用电容传感器进行液体测量的装置多数利用电容的边缘效应进行测量<sup>[3]</sup>。该方案的激励

收稿日期:2021-05-11

\* 基金项目:教育部产学合作协同育人项目(20182012896)资助

信号在穿透深度、信号强度方面受多种外部因素影响过大,直接影响系统信噪比;在实施时需要较大的空间,由于极板间开放空间较大,易受外部因素的干扰,尤其对潮湿环境的灵敏度过高。并且该技术需要采用具有高输入阻抗的电路,易受外界噪声干扰,在具体实施时具有较高难度。

针对以上问题,设计了一种利用平行板电容器原理进行液体体积测量的方法。电容极板不与被测液体直接接触,从而实现非接触式测量。利用 FDC2214 数字电容转换芯片实现电容量的采集。同时利用电阻式薄膜压力传感器测量液体的质量。通过单片机 STM32F103C4T6 进行处理,并通过显示屏输出测量数据。

### 1 平行板电容器的基本原理

如图 1 所示,平行板电容器由两个相互绝缘的极板构成。其中一个极板作为驱动电极,另一个极板作为感应电极。给驱动电极施加正电荷,在感应电极上会感应出相应的负电荷,极板间产生电场,电场线穿透被测液体从驱动电极指向感应电极。

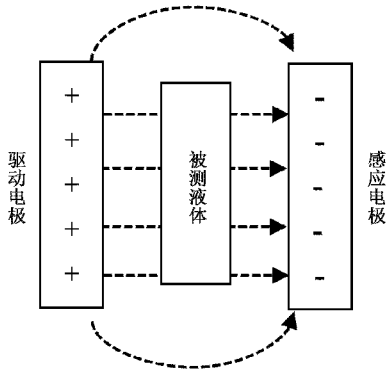


图 1 平行板电容器测量示意图

对于平行板电容器,其电容  $C$  的基本计算公式如下:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} + C_a \quad (1)$$

式中: $\epsilon_0$  为真空介电常数, $\epsilon_r$  为电介质介电常数, $S$  为极板相对面积, $d$  为极板距离, $C_a$  为边缘效应电容。

由式(1)可得,当极板距离和极板相对面积固定时,当极板间  $\epsilon_r$  发生改变会引起实际电容值  $C$  的改变<sup>[4]</sup>。在实际应用中,被测液体种类不变时,液体和空气比例的变化会引起  $\epsilon_r$  的变化,从而引起电容值的变化<sup>[5]</sup>。通过拟合液体体积与电容量的关系即可在获得电容量的情况下得到液体体积数据<sup>[6]</sup>。

为了避免边缘效应电容对测量产生的非线性影响<sup>[7]</sup>,被测液体的上下液面不与电容极板上下沿平行。

### 2 方案设计

测量装置结构如图 2 所示。其中杯壁为双层中空结构,内置一对形状相同、大小相等的柔性电容极板与液体容

器紧密贴合,无需与被测液体直接接触,实现非接触式测量。电容极板长 7 cm,宽 4 cm。液体容器下方安装有电阻式薄膜压力传感器,底座内部放置电路。

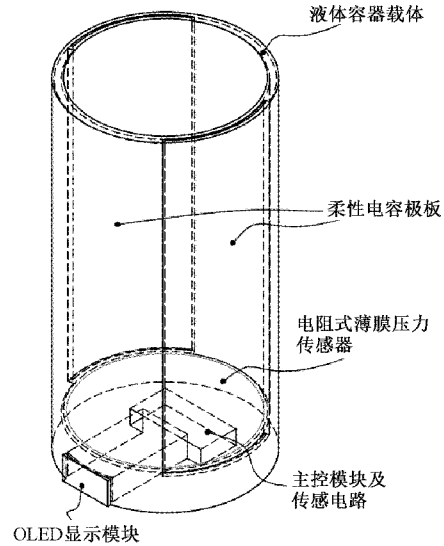


图 2 测量方案示意图

将空液体容器(可选用量杯或烧杯)放置于液体容器载体(可使用 3D 打印)中,此时传感器归零。当有液体进入液体容器后,通过电容传感器电路以及电阻式压力传感器电路获取液体的体积和质量数据。数据经过软件处理后通过 OLED 显示模块显示。

#### 2.1 硬件电路

硬件电路主要分为液体体积传感模块、液体质量传感模块、主控模块以及 OLED 显示模块。硬件电路框图如图 3 所示。

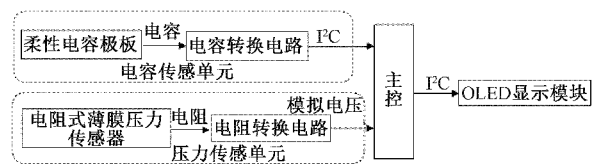


图 3 硬件电路框图

##### 1) 电容传感单元

本系统采用 TI 的 FDC2214 电容-数字转换芯片构成电容传感电路,FDC2214 是一款低功耗高精度的电容传感器芯片,具有 4 个输入通道,28 位精度,使用 I<sup>2</sup>C 协议通信。被测电容与一个电感并联在芯片的输入端上构成 LC 震荡电路。当被测液体体积变化导致极板间电容发生变化时,输入端上的震荡频率也会随之改变<sup>[8]</sup>。

FDC2214 通过外部晶振获得参考频率  $f_{REF}$ ,再通过  $f_{REF}$  与输入端上的震荡频率  $f_{SENSOR}$ ,计算一个与被测电容对应的数据  $DATA_x$ 。其计算公式为:

$$DATA_x = \frac{f_{SENSOR} \times 2^{28}}{f_{REF}} \quad (2)$$

电容极板使用柔性 PCB 制作而成。在使用时,柔性 PCB 紧密贴附于被测液体容器外壁,可最大程度消除极板间空气对测量带来的影响。液体体积传感电路如图 4 所示。

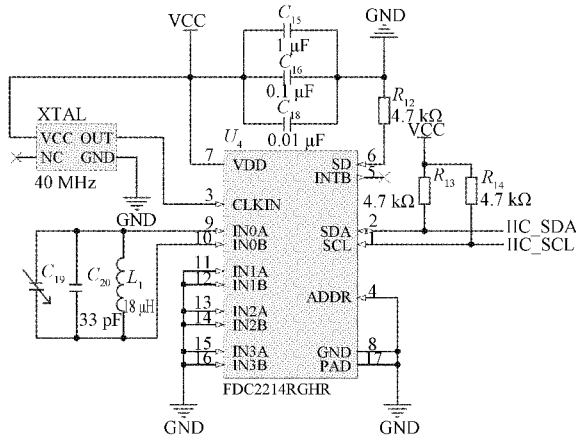


图 4 液体体积传感电路

其中  $C_{19}$  为使用柔性 PCB 制作的平行板电容器。测量数据通过 IIC 协议与主控通信。

2) 压力传感单元

系统采用 FSR402 电阻式薄膜压力传感器作为获取液体质量的敏感元件,此传感器拥有一个敏感区域和两个引脚,在敏感区域上均匀分布着两层电阻丝,并且两层电阻丝分别连接至两个引脚<sup>[9]</sup>。静态下两层电阻丝不发生接触,引脚间电阻无穷大。当向敏感区域施加一定的外力时,电阻丝发生接触,接触面积与外力成正比,导致引脚间电阻与外力成反比,故可以以电阻的变化描述传感器所受外力变化<sup>[10]</sup>。

液体质量传感电路如图 5 所示,  $R_6$  为 FSR402 电阻式薄膜压力传感器,  $R_9$  为可调电阻,可用于调节装置的量程。两者串联在 VCC 和 GND 之间构成电阻分压电路,传感器所测得质量的变化可以转化为  $R_6$  上电压  $U_6$  的变化。将  $U_6$  接入由 OPA333 低噪声轨至轨运放构成的减法运算电路中,当  $R_5=R_7, R_8=R_{10}$  时,可得  $U_0=(R_9/R_7) \times U_6$ ,实现对  $U_6$  在一定范围内的放大,起到提高识别精度的作用。将  $U_0$  与主控的 ADC 相连即可得到与质量相对应的模拟电压值。当静态时,  $R_6$  无穷大,此时运放输出电压  $U_0$  近似为 VCC,可判定质量传感器达到量程下限<sup>[11]</sup>。

3) 主控

本系统选用 STM32F103C4T6 作为主控,此单片机支持多种硬件通信协议,性能强大,在系统中负责处理数据及协调各模块运行。其中主要包含了电源、时钟电路、复位电路以及主控芯片。电源采用 3.3 V 供电,在用于提供主控内置 ADC 电源的引脚 VDDA 上采用基准电压源芯片 REF2933 提供 3.3 V 基准电压,起到加强 ADC 精度的作用。主控引出一个 UART 串口及 I<sup>2</sup>C 接口,串口用于程序

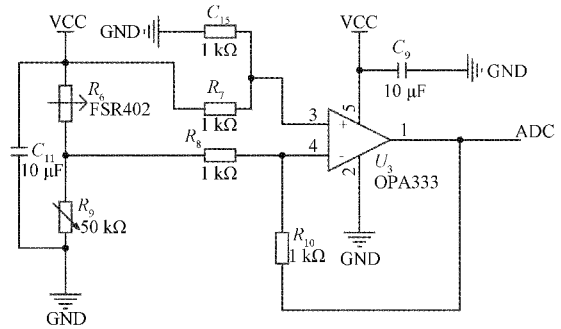


图 5 液体质量传感电路

的烧录及与上位机通信, I<sup>2</sup>C 接口用于读取 FDC2214 的数据及控制屏幕显示<sup>[12]</sup>。

4) OLED 显示

本系统选用使用 I<sup>2</sup>C 协议通信的 OLED 显示模块,用于显示测量结果与操作界面,并可以与电容传感电路共用一路 I<sup>2</sup>C 总线,有效节约单片机引脚资源。

2.2 软件设计

软件主要分为系统初始化、校准、液体原始数据采集、数据处理及显示 5 部分。软件系统的框架图如图 6 所示。

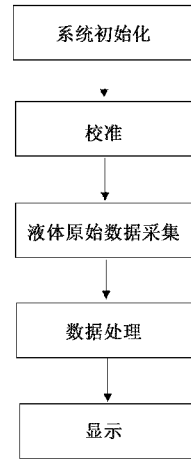


图 6 软件框架图

1) 系统初始化

系统初始化是程序执行的第一步,主要包含了主控的引脚配置、FDC2214 的初始化以及传感器数据的归零操作。

2) 校准

本系统在使用前必须进行校准操作,以减小测量误差。具体操作过程为:将液体容器置于测量载体中,向容器中缓慢注入一定体积的被测液体,记录显示屏上显示的该体积对应的电容值。继续加入液体,并记录各预设液体体积对应的电容值。将液体体积及其对应的电容值输入 Excel、MATLAB 等数据分析软件进行线性回归,即可得到液体体积与电容值之间的函数关系<sup>[13]</sup>。将此函数关系输入微处理器,在后续测量时即可计算出电容值对应的液体体积。

在通过可调电阻调节液体质量传感模块的量程之后,

也需要进行校准操作。操作方法和电容校准过程类似,只需记录显示屏上质量对应的电压值,并进行线性回归,即可得到液体质量与电压值之间的关系。将此函数关系输入微处理器,在后续测量时即可计算出电压值对应的液体质量。

### 3) 液体原始数据采集

主控与 FDC2214 使用 I<sup>2</sup>C 协议进行通信,得到一个等价电容值<sup>[14]</sup>。同时主控使用内置 ADC 读取液体质量传感模块的原始输出电压。

### 4) 数据处理

将得到的原始电容值和原始输出电压值进行滑动平均值滤波<sup>[15]</sup>,滤除因偶然因素引起的脉冲干扰,得到相对平滑的测量数据。将滤波后的电容值和电压值带入校准后得到的线性回归方程,计算液体的体积及质量数据。

### 5) 显示

主控与 OLED 显示模块进行 I<sup>2</sup>C 通信,将最终结果显示在屏幕上。

## 3 测试方案与结果分析

根据图 2 所示结构制作的测试装置实物图如图 7 所示。

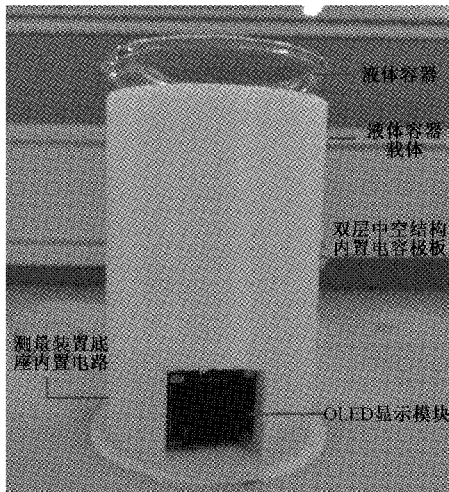


图 7 测量装置实物图

### 3.1 测试方案

选用纯水和食用油作为被测液体,分 5 次对这两种被测液体体积进行 3 次重复测试。测试结果如表 1 所示。

表 1 液体体积重复测量结果

液体体积 V/mL	50	100	150	200	250
纯水体积	50.88	100.53	150.52	199.45	250.93
测量结果	49.92	100.32	149.76	200.37	249.94
$V_w$ /mL	50.23	99.94	150.12	200.21	250.57
食用油体积	50.23	100.83	150.98	200.08	250.72
测量结果	49.39	99.98	150.34	200.06	249.80
$V_o$ /mL	50.23	100.72	149.78	200.12	249.70

选用水作为被测液体测量其体积。进行校准之后向容器内分 20 次注入 20 mL 的被测液体,待数据稳定时读取装置的体积测量结果。测量 3 次求出平均值作为最终测量结果。测量结果如表 2 所示。

表 2 液体体积测量结果及误差

序号	实际液体体积 $V_w$ /mL	测量液体体积 $v_w$ /mL	测量液体 体积误差 E/%
1	20	19.91	-0.45
2	40	38.65	-3.38
3	60	59.16	-1.40
4	80	81.30	1.63
5	100	100.82	0.82
6	120	120.80	0.67
7	140	138.01	-1.42
8	160	161.78	1.11
9	180	177.75	-1.25
10	200	206.58	3.29
11	220	226.68	3.04
12	240	249.59	4.00
13	260	269.71	3.73
14	280	267.95	-4.30
15	300	307.43	2.48
16	320	314.40	-1.75
17	340	345.61	1.65
18	360	352.56	-2.07
19	380	395.74	4.14
20	400	414.47	3.62

在相同的测试条件下,选用水作为被测液体测量其质量。进行校准之后向容器内分 20 次注入 20 g 的被测液体,待数据稳定时读取装置的质量测量结果。测量 3 次求出平均值作为最终测量结果。测量结果如表 3 所示。

### 3.2 结果分析

由表 1 可见,本装置液体体积数据稳定,重复性误差约为 0.51%。由表 2 可见,利用平行板电容器原理测量液体体积时,误差稳定,误差约为 2.31%,且数据成线性,易于修正。由表 3 可见,利用电阻式薄膜压力传感器测量液体质量时,受外界环境变化造成的影响较小,精度较高,误差约为 1.07%。将测得的液体体积和质量通过密度公式计算液体密度,误差约为 2.56%。

分析误差产生的原因,主要有如下几点:1)电路中存在寄生电容,影响电容采样结果<sup>[16]</sup>;2)实际平行板间电容量易受外界温度变化影响,导致拟合结果和实际液体物理参数有偏差;3)电容极板及导线未添加屏蔽措施,易受空气中杂散信号影响。



表 3 液体质量测量结果及误差

序号	实际液体 质量 M/g	测量液体 质量 m/g	测量液体质量 误差 E/%
1	20	20.03	0.15
2	40	40.90	2.25
3	60	60.21	0.35
4	80	79.26	-0.92
5	100	101.22	1.22
6	120	120.83	0.69
7	140	142.98	2.13
8	160	162.43	1.52
9	180	183.47	1.93
10	200	203.24	1.62
11	220	220.46	0.21
12	240	239.09	-0.38
13	260	263.52	1.35
14	280	275.51	-1.60
15	300	298.61	-0.46
16	320	325.47	1.71
17	340	338.35	-0.49
18	360	365.63	1.56
19	380	382.58	0.68
20	400	399.65	-0.09

## 4 结 论

本文分析了利用平行板电容器进行非接触式测量的原理,并采用此原理设计了一套基于 FDC2214 的非接触式液体物理参数测量装置,可以实现液体体积和质量的非接触式测量。并通过实验分析了装置的主要性能指标,以水为测试对象测试了装置在 20~400 mL 之间的测量数据及误差。结果表明,本装置工作稳定,测量线性度好,可满足大部分情况下的液体测量要求。

本系统采用串口与上位机通信。未来将考虑增加无线通信模块,增加系统的使用灵活性。另外,目前系统易受温度变化干扰<sup>[17]</sup>,未来将进一步完善软硬件以增强系统的稳定性。

## 参考文献

- [1] 李楠,曹明琛,韩颖,等. 封装液体检测传感器的设计[J]. 电子测量技术,2015,38(5):78-84.
- [2] 胡广,薄涵亮. 控制棒棒位测量系统中两极板电容传感

器设计[J]. 原子能科学技术,2017,51(12):2352-2356.

- [3] 黄云志,单开. 边缘电场传感器测量系统的设计与实验[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(2):161-165.
- [4] 张进,丁力,温铁钝. 某滑油箱电容液位传感器流场——静电场耦合仿真分析[J]. 传感器与微系统,2019,38(3):50-52,56.
- [5] 陈颖光,肖丹. 基于平行板电容传感器的地沟油检测研究[J]. 电子测量技术,2013,36(4):84-86,120.
- [6] 张坤,张子才. 基于 Proteus 的智能数字电容表的设计[J]. 电子测量技术,2014,37(5):57-60.
- [7] 吴晓媛,杨雁,贺青,等. 基于保角变换的微小电容标准建模与设计[J]. 仪器仪表学报,2019,40(9):116-123.
- [8] 翟文盛,成吉聪,于增洋. 一种基于 FDC2214 的多手势识别装置[J]. 科技与创新,2020(3):48-50.
- [9] 杜英魁,姚俊豪,刘鑫,等. 基于电阻式薄膜压力传感器组的人体坐姿感知终端[J]. 传感器与微系统,2020,39(1):78-81.
- [10] 邹文,赵翠莲. 柔性压力传感器在呼吸气流检测中的性能比较[J]. 电子测量技术,2020,43(17):153-158.
- [11] 蓝土庆,赖慧波. 一种用于电阻式传感器的线性灵敏有源半桥电路及其补偿[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(5):134-141.
- [12] 沈镐哲. STM32 的常用外设驱动程序的开发[J]. 电子测试,2021(1):24-26.
- [13] 王鑫,陈成凯,陈梓威,等. 基于 FDC2214 单通道阈值分析的手势识别系统[J]. 实验技术与管理,2020,37(6):112-115,178.
- [14] 朱景山,雷新国. 一种新型软测量汽车油箱油位的系统设计[J]. 自动化与仪器仪表,2021(2):112-115.
- [15] 何志勇,朱忠奎,张茂青. 基于小波包域噪声能量分布的脉冲噪声消除[J]. 仪器仪表学报,2011,32(9):2071-2078.
- [16] 刘秉安. 电容式传感器寄生电容的抑制[J]. 国外电子测量技术,2011,30(3):46-49.
- [17] 张艳华,陈玉玲,赵爽,等. 压阻式压力传感器温度补偿技术的研究及应用[J]. 电子测量技术,2017,40(5):138-142,153.

## 作者简介

杨文韬,本科生,主要研究方向为嵌入式系统设计。

E-mail: ywt-ywt@qq.com

庄建军(通信作者),博士,教授,主要研究方向为嵌入式系统设计与信号处理。

E-mail: jjzhuang@nuist.edu.cn