

单片机智能控制的液体表面张力测量仪设计*

段政 龚志仁 张琨 张轩策 许凌云

(南京航空航天大学 南京 210016)

摘要:液体表面张力系数是液体的重要热学参量,提出一种环境鲁棒性强、测量准确、操作便捷的智能液体表面张力测量仪具有重要意义。设计了一款智能控制的液体表面张力测量仪,基于STM32单片机,其包括了上位机系统、温度控制系统、OLED波形显示系统、微拉力机系统、LB-TC液体表面张力系数测量仪。装置借助于单片机进行实时信号传输对于数据变化精准定位,并能对数据进行快速分析、绘图、导出,实现数据采集分析一体化。整体上,装置引入单片机智能控制,充分提高了液体表面张力仪的操作可行性、数据准确性、样本完备性、结果精确性,使得液体表面张力测量实验更具有便捷性与可靠性。针对液体表面张力测量计算量大的问题,加入了STM32单片机自动计算与控制,实验证明装置能够有效数据测量时间,提高效率;针对待测液体温度难以精确改变与控制的问题,增加了温度控制装置,兼具温度控制与加热功能,实验证明装置能够既能减小误差又扩大测量范围;针对数据采集困难的问题,使用OLED显示屏绘出波形曲线并显示测量值;针对实验数据难以保存的问题,增加了无线数据传输系统,将数据保存在上位机中,方便实验结束后的数据分析与误差计算。

关键词:STM32;智能控制;温控系统;ADC数据采集;OLED显示系统;无线发送系统;微拉力计-测量仪系统

中图分类号: TN215-34; TM925.91 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Design of a liquid surface tension measuring instrument controlled by a single chip microcomputer

Duan Zheng Gong Zhiren Zhang Kun Zhang Xuance Xu Lingyun

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Surface tension coefficient is an important thermal parameter of liquid. It is of great significance to propose an intelligent liquid surface tension measuring instrument with strong environmental robustness, accurate measurement and convenient operation. Under intelligent control, liquid surface tension measuring instrument, based on STM32 microcontroller, can be divided into PC system, temperature control system, OLED waveform display system, micro-tensile machine system, and LB-TC liquid surface tension coefficient measuring instrument. The device uses single chip microcomputer for real-time signal transmission to accurately locate data changes, and quickly analyze, plot and export data to realize the integration of data acquisition. On the whole, the intelligent control of single chip microcomputer is introduced into the device, which fully improves the operation feasibility, data accuracy, sample completeness and result accuracy of the liquid surface tension meter, and makes the liquid surface tension measurement experiment more convenient and reliable. Aiming at the problem of large amount of calculation in liquid surface tension measurement, STM32 single chip microcomputer is added to automatically calculate and control that the experiment proves the device can improve the efficiency. Aiming at the problem that the temperature of the liquid to be measured is difficult to accurately change and control, a temperature control device is added, which has both temperature control and heating functions. The experiment proves that the device can reduce the error and expand the measurement range. In order to solve the problem of difficult data acquisition, OLED display is used to draw the waveform curve and display the measured value. Aiming at the problem that the experimental data is difficult to save, a wireless data transmission system is added to save the data in the upper computer, which is convenient for data analysis and error calculation after the experiment.

Keywords: STM32; intelligent control; temperature control system; ADC data acquisition; OLED display system; infinite sending system; micro tension meter-measurement system

收稿日期:2021-05-20

* 基金项目:国家级大学生创新基金(202010287033Z)项目资助

0 引言

液体表面张力系数是液体的重要热学参量,在众多领域都得到了广泛的应用,了解液体表面张力的性质与现象,并掌握测定液体表面张力系数的方法具有重要意义。目前主要的测量液体表面张力的途径有吊环法、悬滴法、旋转液滴法、最大气泡压力法等,吊环法结合拉脱法是目前使用最为普遍的方法。然而传统吊环法通常具有操作性差、误差大、度数不准确^[1-3]等问题。

代伟等^[1,4]根据吊环法原理对液体表面张力系数测量仪器进行改进。闫昕等^[2]提出增加控温装置并结合最小二乘法改进仪器。赵婷婷^[6]提出利用电子天平测量液体表面张力大小,通过三线调节和水平监测装置解决吊环水平问题。陈庆东等^[7]和郑经学等^[8]指出可以改变吊环和容器材料优化仪器。梁小冲等^[9]根据拉脱法测量液体表面张力的原理,指出了现有仪器的不合理之处。郑晓慧等^[10]设计了一种可控温表面张力系数测定仪,增加了金属环水平调节装置,改进了液膜拉脱方式,增加液体加热装置。魏云等^[11]在理论上引入了金属环液膜力学分析。张振磊等^[12]基于 PASCO 物理实验平台进行测量。宗倩格等^[13]将计算机辅助设计引入测量系统。杨桦等^[14]基于低频表面波激光衍射法进行系统搭建和测量。

以液体表面张力测量为典型的电子测量技术还有丰富的测量方式可供研究。王欢等^[15]利用高精度的无线环境实现了温湿度测量。崔玉国等^[16]利用激光三角法实现了对平面式大型微结构表面的测量。王兰^[17]利用优化的测量仪完成了对机械设备的故障诊断。刘宇等^[18]对于数字压力计测量结果进行了详细的不确定度分析。

装置系统基于 STM32 单片机控制和吊环拉脱法,吊环脱离水面导致表面张力发生突变,STM32 单片机处理检测吊环受力的微拉力传感器的电信号,并将数据波形显示在 OLED 显示屏上。单片机检测到微拉力传感器的电压发生突变时,根据电压突变值大小,计算出表面张力系数的大小并显示在 OLED 上。同时,STM32 利用数据传输模块,将整个过程中微拉力传感器的数据以无线发送的形式实时传输到上位机上,便于实验数据的保存以及实验后期的数据分析。最后,在检测杯中加入温度控制装置,扩大测量范围,提高测量准确度。

1 系统总体设计

1.1 仪器设计思路

仪器设计思路与接线示意图分别如图 1、2 所示。微拉力计将浸于检测杯液体中的微拉力计产生的力信号转换成电信号并在液体表面张力系数测量仪的数码管显示屏上显示。另由 STM32 单片机采集电信号,一方面在 OLED 显示屏上打印像素点,形成波形曲线,另一方面将信号传输至上位机显示波形。为了采集张力变化数据,打

开检测杯的阀门使液体缓慢下降,液膜脱离吊环的瞬间吊环受到的表面张力瞬间消失,对应产生一个电压跳变沿。STM32 单片机捕捉跳变沿,根据电压和力的线性关系即可自动计算出表面张力值的大小。鉴于温度是影响液体表面张力的一个重要参数,增加了温控系统,采集液体温度信息并通过增量式 PID 控制加热膜的加热功率,以拓宽测量范围。

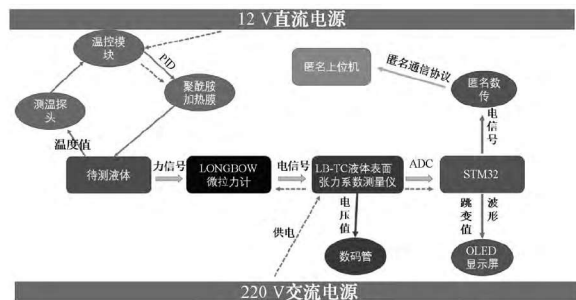


图1 仪器设计示意图

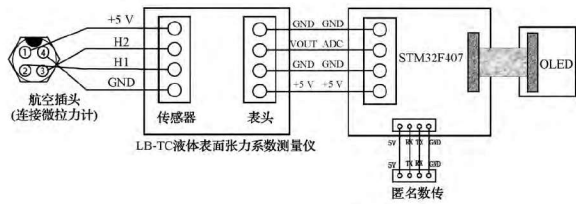


图2 仪器接线示意图

1.2 硬件总体设计

系统硬件示意图如图 3 所示。LONGBOW 微拉力计采集吊环的力信号,并转换成电信号,通过航空插头连接到 LB-TC 液体表面张力系数测量仪上。测量仪将电信号进行处理,显示在数码管显示屏上。STM32F407 单片机用 ACD 功能采集测量仪的电信号,一方面将电压随时间变化的波形曲线显示在 ALIENTEK 型 OLED 显示屏上,同时捕捉电压跳变边沿并显示跳变电压;另一方面将数据利用串口通信通过匿名数传模块发送到匿名上位机上,方便后续的数据处理和分析。针对实验温度受限于室温的问题,增加了温控系统,由测温探头负责采集温度数据,XH-W1308 温控模块采用增量式 PID 算法,根据测温探头的温度信息和设定的目标温度,控制加热膜的加热功率,使待测液体稳定在目标温度附近。

1.3 软件总体设计

软件总体设计如图 5 所示,首先对系统进行软件和硬件的初始化,包括开启中断,延时函数的初始化,ADC 初始化,OLED 初始化等。随后在 while(1) 循环里面,读取 ADC 采集到的数值并转换成实际电压信息,一方面经匿名数传发送到匿名上位机上,另一方面

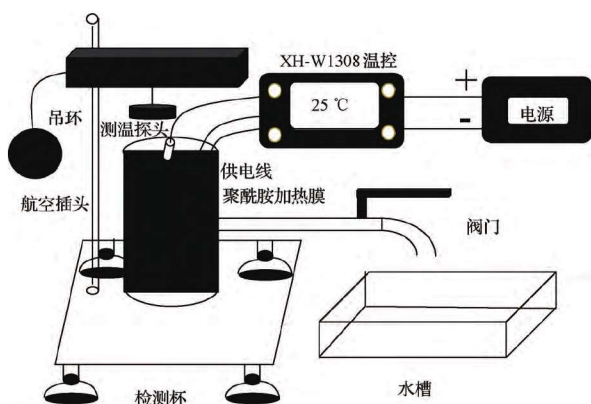


图3 系统硬件示意图

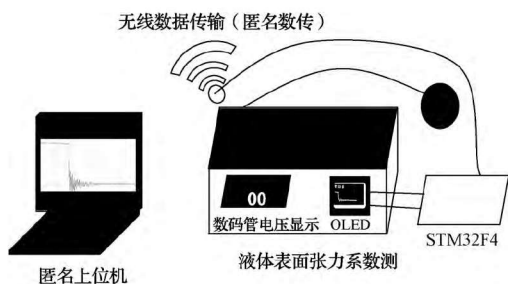


图4 无线数据传输

传至 OLED 并在相应的像素点上打印。每延时 100 ms 进行一次刷新。

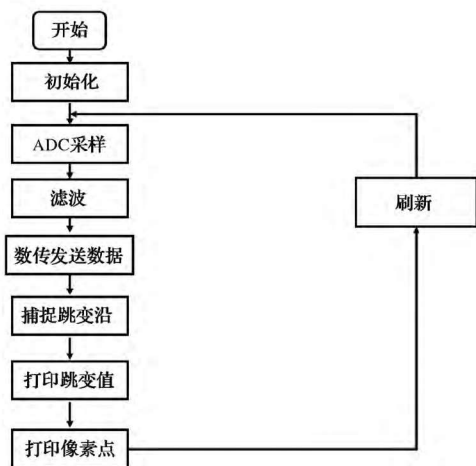


图5 软件总体设计流程

2 系统模块设计

2.1 温控系统

温控系统的核心为 XH-W1308 温控,由 12 V 电源供电,蓝色数码管显示温度示数,测温探头使用 NTC10 K 热

敏电阻温度传感器,加热装置采用聚酰胺加热膜,控制方式采用增量式 PID 控制:

$$\Delta u(k) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (1)$$

该控制方式保证了温度的稳定,最大偏差为 0.1 ℃。温控系统的接线方式如图 6 所示。如需加热使温度稳定在 30 ℃ ± 2 ℃,需对 3 个参数进行设置。直接调整“±”设置目标温度,P0 设置 H,表示加热模式;P1 设置为 2,表示回差值,当波动范围超过 2 ℃,温控系统再次启动。

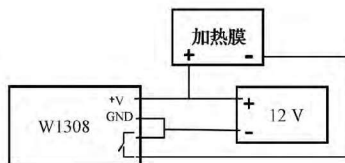


图6 温控系统接线示意图

2.2 ADC 数据采集

1) ADC 硬件设计

ADC 数据采集功能由 STM32F407 的 3 个 12 bit 逐次逼近型的模拟数字转换器实现,即 ADC1、ADC2、ADC3,每路 ADC 有多个通道,包括 3 个内部通道和 16 个外部通道。装置采集电信号需要用到外部通道 GPIO 口,选取 ADC1 通道 5,对应 GPIOA 的 5 引脚,采集电信号。

ADC 正参考电压接入自带的标准 3.3 V 作为参考电压,负参考电压与模拟地相连,12 bit 转换结果以左对齐或右对齐的方式存储在 16 bit 数据寄存器中。基于以上设定,单片机接收的电压数据与实际电压的换算关系为:

$$\text{实际电压值}(V) = \text{读取值} \times 3.3 / 4095 \quad (2)$$

ADC 的通道分为规则通道和注入通道,通道转换模式有单次转换、连续转换、扫描模式等,ADC 触发方式有外部触发和软件触发。装置只需对采集到的电信号进行单次转换,相关的 ADC 模式设置为规则通道,单次转换模式,软件定时器触发。

ADC 时钟来源为总线分频得到,为保证 ADC 采样的准确度,ADC 采样频率一般不超过 36 MHz。STM32F407 单片机总线频率为 84 MHz,预分频系数设为 4,则 ADC 频率为 21 MHz。

2) ADC 软件设计

ADC 的初始化的软件设计如图 7 所示,在函数 ADC_CommonInit() 中设置 ADC_CCR 寄存器的采样间隔、预分频等参数,在 ADC_Init() 函数中对 ADC 控制器进行分辨率、转换模式、触发方式等的设置,最后使用 ADC_Cmd() 函数开启 ADC 转换器。

ADC 的采样过程软件设计如图 8 所示,装置使用 ADC1 通道 5,ADC_RegularChannelConfig() 配置规则通道参数,设置 ADC 序列为 1,设置 ADC1 的通道为通道 5,设置 ADC 采样周期为 48;用 ADC_SoftwareStartConvCmd() 开启 ADC 软件转换,最后,用 while() 循环结构等待

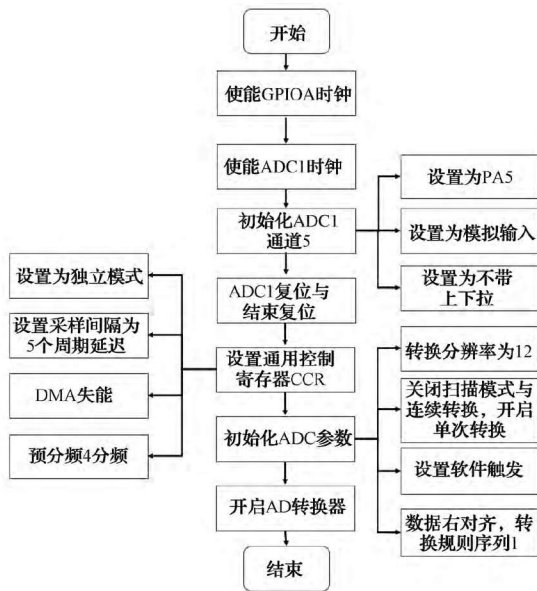


图7 ADC初始化过程

转换完成,并读取 ADC 值。

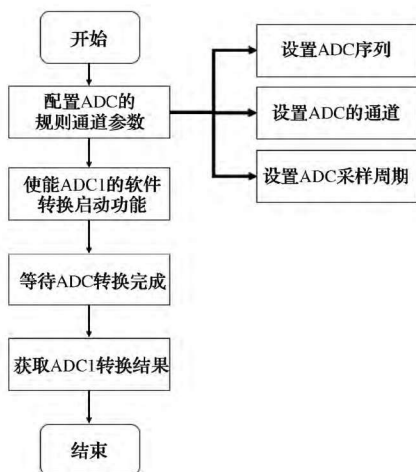


图8 ADC采样过程

2.3 OLED显示系统

STM32 单片机采集电信号后,控制 OLED 显示电压-时间曲线并捕捉跳变沿,OLED 采用 ALIENTEK 型 0.96 英寸的 OLED 显示屏,大小为 128×64 个像素点,其具体实现方式如下。

1)通信方式

ALIENTEK 型 0.96 in 的 OLED 显示屏支持 4 线 SPI、I²C、8 bit 6800、8 bit 8080 等通信方式,由 BS1、BS2 硬件控制通信方式,具体控制方式如表 1 所示,其中 1 表示接 VCC,0 表示接 GND。

表 1 通信方式选择

接口方式	4 线 SPI	I ² C	8 位 6800	8 位 8080
BS1	0	1	0	1
BS2	0	0	1	1

系统硬件上 BS1 和 BS2 默认接 VCC,即采用 8 位 8080 并口方式,除 VCC 和 GND 外,还需 13 根信号线与 STM32 单片机相连,13 根信号线示意图及各自作用如图 9、表 2 所示。

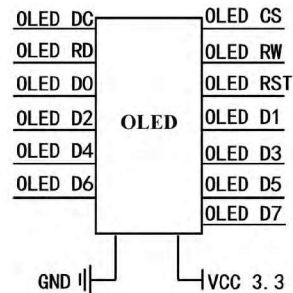


图9 OLED信号线

表 2 OLED 信号线各段功能表

CS	WR	RD	D[7:0]	RST	DC
片选信号	写入数据	读取数据	8 位双向数据线	硬复位	命令/数据标志

2)读写时序与代码实现

OLED 的 8080 读写时序如图 10、11 所示,操作流程如图 12 所示。

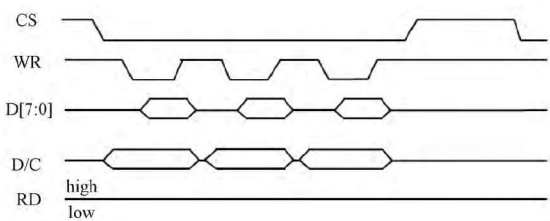


图10 写数据时序图

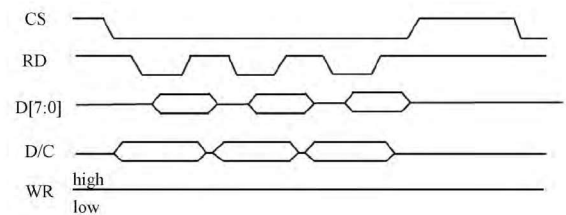


图11 读数据时序图

读入数据需将 RD 置低,写入数据需将 WR 置低。开始将 WR 置低,RD 置高,首先将数据放入数据口,根据数

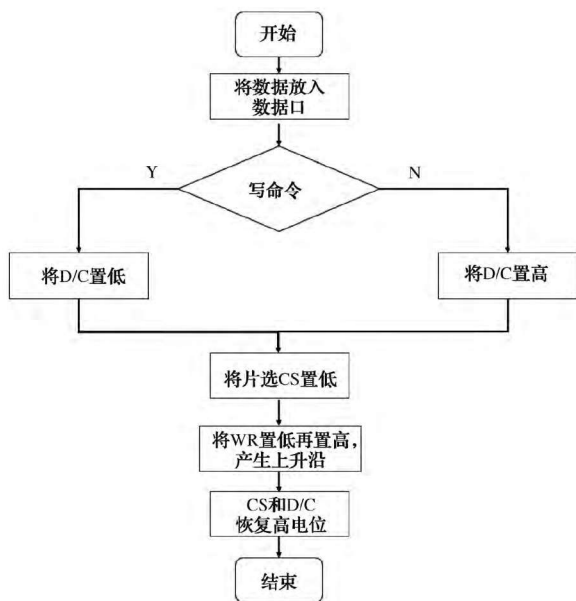


图 12 OLED 写入 1 byte

据/命令的不同分别操作 D/C 置高/低,然后将 CS 置低,WR 置低再置高,产生一个上升沿。数据在上升沿处锁存到数据线 D[7:0]上。

3) 显存结构与程序显示原理

ALIENTEK OLED 模块的控制器是 SSD1306, SSD1306 的显存总共为 128×64 bit 大小,SSD1306 将这些显存分为了 8 页,每页由 128×8 个点阵构成。针对这一显存结构,在 STM32F4 的内部建立一个 128×8 byte 的缓存,在更新数据时首先更新缓存,随后一次性把缓存数据写入 OLED 的 GRAM。编写程序时,只需利用两层 for 循环,第 1 层循环 8 个页码,用写命令设置页地址和列起始地址,第 2 层 for 循环将 128 列数据逐个更新。OLED 显存结构如图 13 所示。

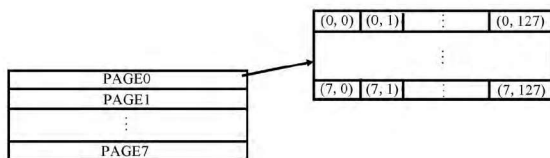


图 13 OLED 显存结构

4) 波形与跳变值显示函数

OLED 显示屏有 128×64 个像素点,横坐标 128 个像素点表示时间,相邻像素点表示 100 ms,纵坐标 64 个像素点表示电压,相邻像素点间隔表示 1 mV。STM32 单片机调用 ADC 采集函数采集信号值,随后将采集到的 ADC 数值转换成电压后打印到 OLED 上,使用延时函数控制两次打印间隔为 100 ms。若检测到相邻两次电压值变化超过阈值时,则认为出现跳变沿,调用字符显示函数 OLED_

ShowString(u8 x,u8 y, const u8 * p,u8 size),先后设置 x、y 方向的坐标,跳变电压值以及字号。

2.4 无线发送系统

1) 匿名数传

匿名数传为串口透传模式,内置 PA+LNA+成品巴伦+成品滤波器,保证了良好的无线信号强度,使用普通天线即可实现视距几百米的稳底数据传输,除此之外,匿名数传拥有超强的数据传输速度,默认串口波特率达 500 000。相应的 STM32 串口初始化函数的波特率须配置为 500 000。匿名数传在与单片机的串口相连接时,由于数传本身硬件设置为反向,应将 TX、RX 正接,设置为主接收的数传则通过 USB 线与计算机相连,其接线示意图如图 14、15 所示。使用之前应使用上位机配置主发送模块和主接收模块,并设置通信端口。

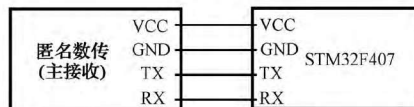


图 14 主发送数传接线示意图

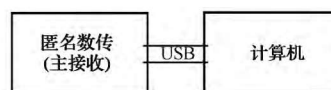


图 15 主接收数传接线示意图

2) 通信协议设置

将匿名数传如上图连接后,即可收到单片机发出的数据。任何上位机只要连接蓝牙即可实现数据传输。为配合匿名上位机显示波形曲线,匿名数传传输的数据以通信协议的形式发送,格式如表 3 所示。根据格式要求,数据帧用 u8 型数组 testdataosend[50]存储,每个数组元素占用 1 byte。USER_DATA 表示用户数据帧,帧头为固定格式“AAAA”,占用前两个数组位置。定义变量“u8_cnt=0”用于表示数组元素位置,每次自加表示数组位置右移,方便自由定义数据长度。定义帧头可用“testdataosend[_cnt++] = 0xAA, testdataosend[_cnt++] = 0xAA”,用户功能字 F1 表示本帧为用户自定义帧,对应高级收码的 F1 功能帧。数据长度暂时定为 0,最后再利用 _cnt 的大小再赋值。数据位由用户自定义,int 型,float 型等非 1 byte 的数据类型需要拆分成单独字节发送。数据位赋值完毕后定义数据长度“testdataosend[3] = _cnt-4”后只需要将用户数据求和用于校验。

2.5 微拉力计-测量仪系统

微拉力计-测量仪系统负责将吊环的力信号转为电信号,其示意图如图 16 所示。该系统是由 LANGBOW 微拉力计和 LB-TC 液体表面张力系数测量仪组成。微拉力计的测量范围为 0~9.9 N,量程较小但精度较高。微拉力

计通过航空插头与测量仪相连,测量仪通过电源变压器连接 220 V 交流电源,并接有数码管、开关等外设。

表 3 通信协议格式

帧	帧头	功能字	长度	数据	校验	备注
USER_DATA	AAAA	F1	LEN	自定义	SUM	用户数据

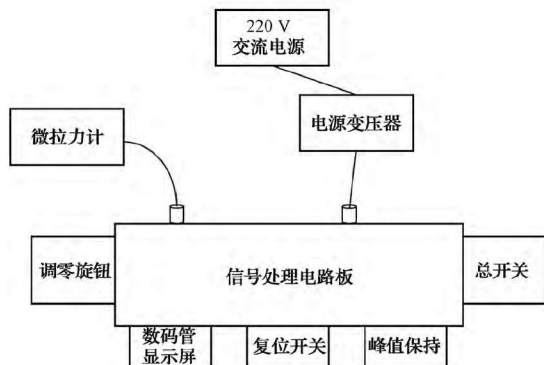


图 16 微拉力计-测量仪系统示意图

3 实验分析

图 17 所示为基于上述核心技术制作而成的基于吊环拉脱法的 LB-TC 型液体表面张力系数测试仪。对该仪器进行性能测试以证明研究的时效性。

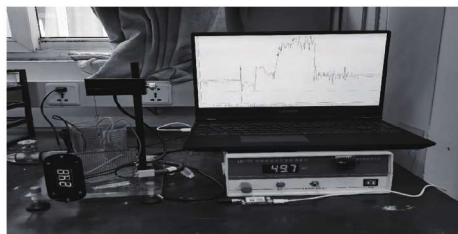


图 17 液体表面张力系数仪

3.1 拉力计灵敏度测算

基于吊环拉脱法,利用设计的液体表面张力测量仪采集数据,空载时,拉力机输出电压 U'_0 为 100 mV,实验数据如表 4 所示。

表 4 拉力计灵敏度测算实验数据

序号	拉力计输出电压 U_n /mV	增加的砝码质量 m_n /mg
1	108.0	500
2	116.3	1 000
3	123.9	1 500
4	131.9	2 000
5	140.2	2 500
6	148.3	3 000
7	156.5	3 500

平均灵敏度 $K = 1.64$

利用了逐差法来计算平均灵敏度 K :

$$K = \frac{U_4 + U_5 + U_6 + U_7 - U_0 - U_1 - U_2 - U_3}{16 \times 500 \text{ Mg} \times 9.8 \text{ N/kg}} = 1.93 \text{ V/N} \quad (3)$$

每一次实验都需测量灵敏度以确保实验结果准确性。基于传统拉脱法测量得到灵敏度为 1.64 V/N,实验证明,改进后仪器相对改进前电压变化更稳定,所测平均灵敏度也更准确,仪器测量准确性表现优良。

3.2 水的表面张力系数测定

实验所用铝环内径与外径分别为 33.00 和 34.96 mm。通过温控模块改变液体温度,分别得到当前环境下的实验测量数据,如表 5 所示。

表 5 水的表面张力系数测定实验数据表-拉力计输出电压

实验组别 变量控制	1		2		3		4	
	液体温度	U_0 /mV	液体温度	U_0 /mV	液体温度	U_0 /mV	液体温度	U_0 /mV
	25	98.3	30	97.5	35	97.7	40	95.3
测试次序	1	123.8	122.1	121.5	119.1			
	2	122.9	121.8	120.9	119.0			
	3	123.1	121.5	121.3	118.7			
	4	122.8	122.3	121.8	119.2			
	5	123.3	122.1	122.7	118.9			
平均值	123.2	122.0	121.6	119.0				

计算水的表面张力系数:

$$\alpha = \frac{F - Mg}{\pi \times (d_1 + d_2)} = \frac{(\bar{U} - U_0)}{K \times \pi \times (d_1 + d_2)} \quad (4)$$

此时测得 4 组水的表面张力系数如表 6 所示。

实验过程中利用温控装置控制待测液体温度在不同范围,在相同条件下对跳变电压进行多次测量,由单片机检测跳变电压值,代入公式并计算,将最终得到的液体表面张力系数显示在 OLED 显示屏上。

表6 水的表面张力系数、相对误差、电压方差

次序	1	2	3	4
$\alpha/(\times 10^{-3})$	71.11	69.97	68.26	67.69
$\eta/\%$	1.21	1.66	2.25	1.81
$D/\%$	0.126	0.080	0.128	0.030

将测得的表面张力系数与标准值相比较并计算误差,4次实验误差值均控制在3%以内,每次电压方差值控制在0.2以内,可以认为实验数据合理有效。同时实验过程中,利用实验装置,自动读取跳变电压值并代入参数进行计算,计算结果直接呈现在OLED显示屏上,将实验测量的平均时间缩短近20 min,极大地提高了实验效率。实验结束后对上位机中的数据进行误差分析,提高实验结果的准确度。

根据实验结果证明,基于上述核心技术制作的液体张力测量仪充分具备操作可行性、数据准确性、样本完备性、结果精确性,使得液体表面张力测量实验更具有便捷性与可靠性。

4 结论

系统的核心思路是基于STM32单片机控制,吊环脱离水面导致表面张力发生突变,STM32单片机处理检测吊环受力的微拉力传感器的电信号,并将数据波形显示在OLED显示屏上。单片机检测到微拉力传感器的电压发生突变时,根据电压突变值大小,计算出表面张力系数的大小并显示在OLED上。同时,STM32利用匿名数据传输模块,将整个过程中微拉力传感器的数据以无线发送的形式实时传输到上位机上,便于实验数据的保存以及实验后期的数据分析。最后,在检测杯中加入温度PID控制装置,扩大测量范围,提高测量准确度。

以上工作涉及硬件和软件方面的诸多技术。硬件方面采用的核心技术有OLED显示技术,温度PID控制技术,无线数据传输技术,ADC采样技术等。其中,系统创造性地将无人机领域的匿名数传模块应用在无线数据传输上,具有数据传输量大,通信速度快,无线透传范围广等诸多优点。PID控制的加热装置采用聚酰胺加热膜,围绕检测杯内壁放置,保证检测杯内各处液体的温度均匀。软件方面,涉及到单片机与上位机的数据传输协议的编写,PID温控参数的调试,OLED时序逻辑的控制与波形显示函数的编写等,相关代码工程在KEIL开发环境内搭建。

通过单片机自动控制与计算,大大减少了实验工作量,缩短工作时间,极大地方便了表面张力系数的测量;温控装置一方面精确控制影响液体表面张力的温度因素,减少实验误差,另一方面温度可调扩大了液体表面张力系数的测量范围;OLED波形显示功能实时绘制数据波形,直观地显示拉力变化情况,同时将单片机自动计算的表面张力系数值显示在显示屏上,极大简化数据处理环节;上位机系统则是对实验过程数据的保存与再现,方便实验后的

数据分析与误差计算。

随着自动化技术的普及,未来张力测量仪的研究方向将不再局限于单片机自动计算,而在于实现机电一体化,即增加吊环升降过程中机械结构的设计与自动控制。

参考文献

- [1] 代伟.对FD-NST-I型液体表面张力系数测量仪的改进[J].物理实验,2011,31(10):29-32.
- [2] 闫昕,梁兰菊,孙长文.液体表面张力系数测定仪的改进[J].枣庄学院学报,2013,30(2):65-70.
- [3] 秦平力,余雪里,张昱.拉脱法测量液体表面张力系数实验中影响实验误差的因素及几个被忽略问题[J].大学物理实验,2019,32(4):92-95.
- [4] 刘静,朱泽斌,卞琦琦,等.对液体表面张力系数测量的改进[J].大学物理实验,2018,31(1):16-18.
- [5] 罗泽,梁开明,张宏林.拉脱法测量液体表面张力系数实验的研究与设备改进[J].通信电源技术,2019,36(5):126-127.
- [6] 赵婷婷.液体表面张力系数实验仪的设计与测量原理[J].山西大同大学学报(自然科学版),2019,35(2):15-16,70.
- [7] 陈庆东,王俊平.液体表面张力系数测定仪的改进[J].物理通报,2016(4):79-81.
- [8] 郑经学,冷雪松,王天前,等.液体表面张力系数测量的分析[J].大学物理实验,2017,30(5):74-77.
- [9] 梁小冲,于白茹,何原.液体表面张力测量仪器的改进[J].实验科学与技术,2013,11(3):13-15.
- [10] 郑晓慧,袁晓梅,唐卫红.可控温液体表面张力系数测定仪的设计与制作[J].物理实验,2015,35(11):24-28.
- [11] 魏云,杨龙,周波.一种基于金属环液膜力学分析的液体密度、表面张力的现场测量方法[J].地球物理学进展,2020,35(6):2402-2406.
- [12] 张振磊,周伟,王殿生.基于PASCO物理实验平台的液体表面张力系数测量[J].大学物理,2019,38(11):54-57.
- [13] 宗倩格,叶伟文,洪佳琪.计算机辅助液体表面张力系数测量实验的改进[J].教育教学论坛,2019(8):95-96.
- [14] 杨桦,林少川,刘绍静,等.测量液体表面张力的系统搭建及研究——基于低频表面波激光衍射法[J].科技创新与应用,2018(19):15-17.
- [15] 王欢,黄晨.高精度无线环境温度湿度测量系统设计研究[J].电子测量与仪器学报,2013,27(3):211-216.
- [16] 崔玉国,刘康,惠相君,等.平面式大型微结构表面的螺旋扫描测量[J].仪器仪表学报,2018,39(9):91-98.

- [17] 王兰. 机械设备故障诊断中的振动频率测量仪设计与应用[J]. 电子测量技术, 2020, 43(15):166-171.
- [18] 刘宇, 刘文忠, 武春爱. 数字压力计测量结果不确定度评定方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(8): 134-136.

作者简介

段政, 本科生, 主要研究方向为光学、纳米技术、电子技术。
E-mail: 1572486614@qq.com

龚志仁, 本科生, 主要研究方向为自动化、机器视觉、电子技术。

E-mail: ZhirenGong@nuaa.edu.cn

张琨, 本科生, 主要研究方向为电气工程、自动化。

E-mail: 717772997@qq.com

张轩策, 本科生, 主要研究方向为光学、纳米技术、电子技术。

E-mail: 1090426672@qq.com

许凌云, 副教授, 主要研究方向为物理电子学。

E-mail: xlyun@nuaa.edu.cn