

基于 STM32F103C8T6 的 数字多用表

设计报告

队伍成员：廖钟涛、聂汝琦、胡广

2024-11-9

目录

目录	1
一、 方案论证	2
1.1 芯片选型	2
1.2 检测方式	3
1.3 滤波方式	4
1.4 供电设计	6
二、 理论分析与计算	7
2.1 直流电压	7
2.2 交流电压真有效值	7
2.3 电阻	7
2.4 待机功耗	8
三、 电路与程序设计	9
3.1 电路设计	9
3.2 程序设计	12
四、 测试方案与测试结果	19
4.1 直流电压测试	19
4.2 交流电压测试	19
4.3 电阻测试	19
附件一：实际各项参数测定	20
附件二：原理图	21
附件三：PCB 图纸、 3D 打印模型	22

一、方案论证

1.1 芯片选型

1.1.1 ADC 芯片选择

方案：直接采用 STM32F103C8T6 内置的 ADC，因其使用广泛，程序设计简单，且当其处于停止模式时，电流消耗仅为 $24\mu\text{A}$ ，完全能够满足题目的功耗要求。

1.1.2 运算放大器选择

方案一： LMV358

LMV358 是一款具有轨到轨输入，工作电压为 2.7V 至 5.5V 的运放，但由于输入失调电压典型值为 0.3mV ，极其勉强能够满足直流电压检测的精度要求。

方案二： OP07

OP07 是一款经典的精密运放，输入失调电压典型值为 $75\mu\text{V}$ ，能够满足要求，但由于其无法工作在 5V 单电源下，需要额外设计电源输入，略显繁琐。

方案三： TL072

TL072 是一款精密的运放元件，适用性广。有较高的输入阻抗满足要求。其可在 5V 和 -5V 电压下工作，保证信号不会出现饱和失真。其集成多通道设计可简化工作电源设计，是电路图更简单。

方案四： AD8571

AD8571 是一款超高精度、零漂移的单运算放大器，具有轨到轨输入，失调电压极低，但其只有单通道且价格昂贵。

方案五：AD8630

AD8630 同样具有超高精度，轨到轨输入，且具有四通道，失调电压极低，价格适中，能够满足要求。

综上，最终选择 **TL072** 与 **AD8630** 两款运放作为交流电与直流电放大芯片。

1.2 检测方式

1.2.1 挡位与量程切换方式

方案一：使用三个两挡拨动开关进行各自的量程电路切换，三种挡位分别用三对导线检测。

方案二：使用一个 7 挡旋钮开关，各挡位各自接一个引脚，旋转旋钮进行挡位和量程的切换。

对比两种方案，方案二更加方便且节省空间，因此选择**方案二**进行挡位与量程的切换。

1.2.2 直流电压检测方式

方案：输入电压经过电压跟随器(2V 量程)和运放放大(0.2V 量程)后输入到 ADC。

1.2.3 交流电压检测方式

方案一：利用直流偏执调节负电压，频率为 10~100hz。利用 500hz 的检测速度取样保证不失真。在电路中用一个反向求和电路

搭配一个反向比例电路的多级放大，利用运放电路使其抬升至 STM32 的 ADC 可以检测的电压（以正弦交流电峰值为有效值 1.414 确定元件数据，并预留了部分量程），再通过计算式反推。采样数据取均值可得有效数。

方案二：利用二极管单向导通区分正负极，单独测量两向电压。

方案二误差较大且电路更为复杂，选取**方案一**更好。

1.2.4 电阻检测方式

方案一：分别采用两个 200Ω 、 $200k\Omega$ 电阻串联在 3.3V 下，待测电阻并联到一个电阻上的方案，ADC 读取中间电压并算出待测电阻值。

方案二：分别采用一个 100Ω 、 $100k\Omega$ 电阻接在 3.3V 下，待测电阻串联至地，经过电压跟随器缓冲，ADC 读取中间电压并算出待测电阻值。

经计算，方案一从 0Ω 到最大值能够使电压变化范围为 $0\sim 1.1V$ ，方案二为 $0\sim 2.2V$ ，方案二的测量方式能够检测的精度更高，因此选择**方案二**。

1.3 滤波方式

1.3.1 硬件滤波方式

方案：电源输入的 5V 经过滤波电容滤波后接入运放，直流电压

和电阻检测的输入 ADC 前均进行 RC 低通滤波，其中直流电压输入前先经过一次滤波电容滤波。

1.3.2 软件滤波方式

方案一：算术平均滤波

优点：适用于对一般具有随机干扰的信号进行滤波，这种信号的特点是有个平均值，信号在某数值范围附近上下波动

缺点：对于测量速度较慢或要求数据计算速度较快的实时控制不适用，比较浪费 RAM。

方案二：中位值平均滤波

优点：融合了“中位值滤波法”+“算术平均滤波法”两种滤波法的优点。对于偶然出现的脉冲性干扰，可消除由其所引起的采样值偏差，对周期干扰有良好的抑制作用。平滑度高，适于高频振荡的系统。

缺点：对于测量速度较慢或要求数据计算速度较快的实时控制不适用，比较浪费 RAM。

方案三：递推平均滤波

优点：对周期性干扰有良好的抑制作用，平滑度高，适用于高频振荡的系统。

缺点：灵敏度低，对偶然出现的脉冲性干扰的抑制作用较差.不易消除由于脉冲干扰所引起的采样值偏差.不适用于脉冲干扰比较严重的场合.比较浪费 RAM。

方案四：一阶卡尔曼滤波

优点：实时性高，可以给出最准确的状态估计，能很好地滤除噪声

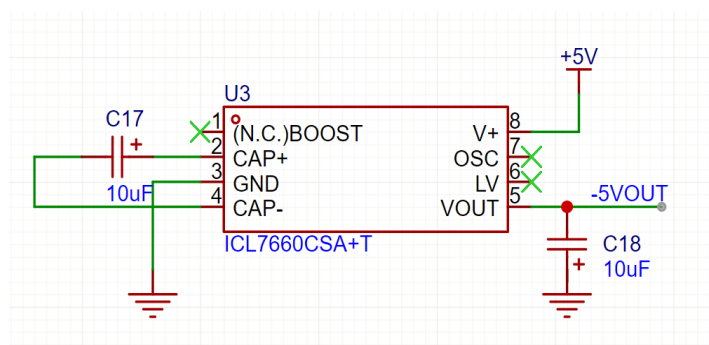
缺点：初始值难以确定，运算复杂。

综合优缺点考虑、题目需求与实际测试，目前各挡位均选用**中位值平均滤波**，已经能够满足精度要求。

1.4 供电设计

本作品采用 3.7v18650 锂电池外部供电。两节 18650 锂电池并联，经过电源模块降压到 3.3v 为单片机供电。电源模块也可提供 5v 电压，经过 ICL7660CSA+T (MAX1044) 开关电容电压变换器芯片，将 5v 电压变为 -5v，为 TL072CP 运算放大器提供工作电压。

供电电路如图所示：



图表 1

C17、C18 采用漏电小、介质损耗率低的钽电容，以提高电流转换效率。

二、理论分析与计算

2.1 直流电压

2V 量程：输入电压 U_{in} 经过电压跟随器缓冲后(输入阻抗大于 $10M\Omega$)输入到 ADC，得到数值 DC_{2V} ，则 $U_{in} = \frac{DC_{2V}}{4095} \times 3.3V$ ，其中 0~4095 的一点表示 0.0008V。在此量程下，精度要求变化范围为 $\pm 0.0012V$ ($20000 \times 0.05\% = 10 + 2$ 个字)，满足要求。

0.2V 量程：输入电压 U_{in} 经过运算放大器放大 16 倍($1 + \frac{15K}{1K} = 16$)后(输入阻抗大于 $10M\Omega$)输入到 ADC，得到数值 $DC_{0.2V}$ ，则

$U_{in} = \frac{DC_{0.2V}}{4095 \times 16} \times 3.3V$ ，其中 0~4095 的一点表示 0.00005V。在此量程下，精度要求变化范围为 $\pm 0.00012V$ ，满足要求。

2.2 交流电压真有效值

2v 量程：由一个反向求和运放电路一个反向比例运放电路得到

$$U_{(输入)} = \frac{1}{4} U_{(输入)} + \frac{5}{4},$$

以符合 STM32 的 ADC 测量量程， $\frac{AC_{2V}}{4095} \times 3.3V$ ，误差在 0.00005v 以内。

0.2 量程：改变反向求和电路的电阻为 $2k\Omega$ 抬升输入电压，使其在测量中仅最后计算式与 2v 量程不同，不用重新考虑减小误差。

$\frac{AC_{0.2V}}{4095} \times 3.3V$ ，误差在 0.00005v 以内。

2.3 电阻

200k Ω 量程：输入电阻 R_{in} 接在 $100k\Omega$ 电阻下，ADC 读取中间电压值并转换数值为 R_{200k} ，则测得电阻值 $R_{in} = \frac{100 \times R_{200K}}{4095 - R_{200K}} k\Omega$ 。其中 0~2730 一点表示 $0.07326k\Omega$ ($4095 \times \frac{2.2}{3.3} = 2730$, $\frac{200}{2730} \approx 0.07326$)。

在此量程下，精度要求变化范围为 $\pm 1.2\text{k}\Omega$ ($2000 \times 0.5\% = 10 + 2$ 个字)，满足要求。

200 Ω 量程：输入电阻 R_{in} 接在 100Ω 电阻下，ADC 读取中间电压值并转换数值为 R_{200} ，则测得电阻值 $R_{in} = \frac{100 \times R_{200}}{4095 - R_{200}} \Omega$ 。其中 0~2730 一点表示 0.07326Ω 。在此量程下，精度要求变化范围为 $\pm 1.2\Omega$ ，满足要求。

2.4 待机功耗

查阅《STM32F103x8B 数据手册（中文）》5.3.5 供电电流特性表 16

表16 停机和待机模式下的典型和最大电流消耗

符号	参数	条件	典型值 ⁽¹⁾		最大值		单位
			$V_{DD}/V_{BAT} = 2.4\text{V}$	$V_{DD}/V_{BAT} = 3.3\text{V}$	$T_A = 85^\circ\text{C}$	$T_A = 105^\circ\text{C}$	
	待机模式下的 供应电流	调压器处于运行模式，低速和高速内部RC振荡器和高速振荡器处于关闭状态(没有独立看门狗)	23.5	24	200	370	
		调压器处于低功耗模式，低速和高速内部RC振荡器和高速振荡器处于关闭状态(没有独立看门狗)	13.5	14	180	340	

图表 2

可知，3.3V 室温下主控芯片处于待机模式时典型消耗电流为 $24\mu\text{A}$ ，则功耗约为 0.0792mW ，远低于 2.5mW 。

三、电路与程序设计

3.1 电路设计

3.1.1 总体系统设计

本系统由 STM32F103C8T6、按键、对插线、旋钮开关、运算放大器、OLED 显示屏、电压转换芯片七部分组成。单片机通过外部供电 5V，经过电压转换芯片产生 -5V 接入 TL072，旋钮开关旋转调节测量档位与量程，待测量通过对插线输入，经过各自电路后输入到单片机的 ADC 引脚，单片机根据当前档位和量程进行待测量的计算，计算结果通过 OLED 显示屏显示。

总体设计思路如下图：



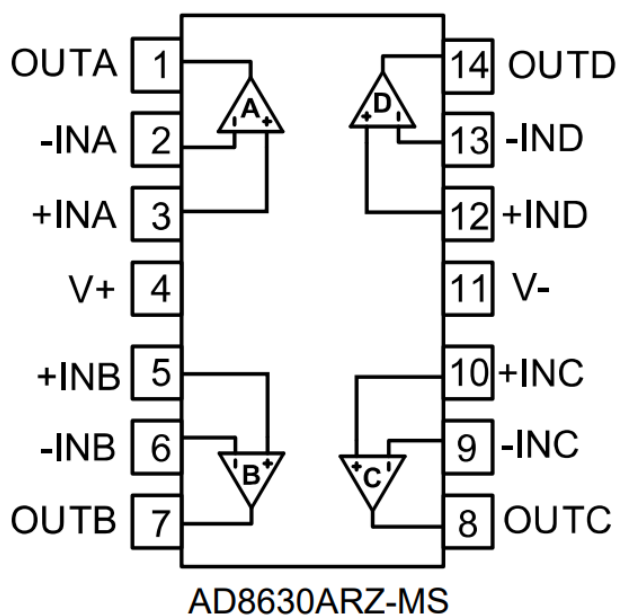
图表 3

3.1.2 直流电压检测电路

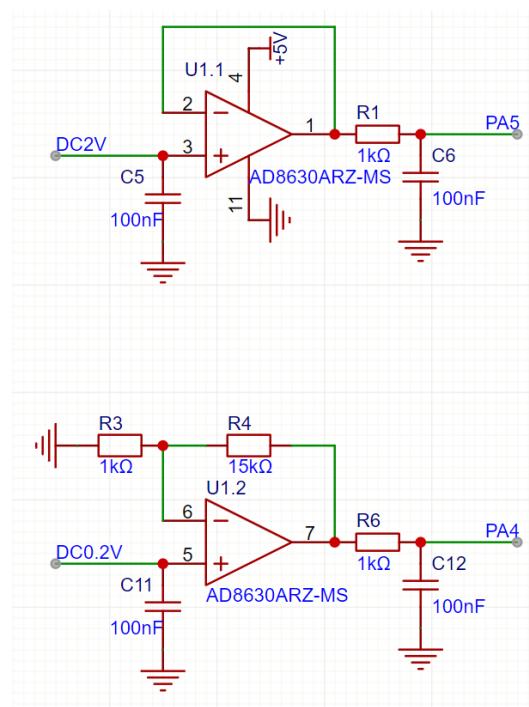
本部分电路以 AD8630 芯片为核心进行搭建. AD8630 是一款超低偏置电压的精密运算放大器, 适用于要求高精度和低噪声的应用, 输入失调电压典型值在 $10\ \mu\text{V}$ 以内, 低温漂, 能够满足精密测量需求。

其芯片引脚及分布如图 4 所示。

AD8630 芯片的几个主要引脚介绍: 1、2、3 引脚, 5、6、7 引脚, 8、9、10 引脚, 12、13、14 引脚各构成四个运放单元. 直流电压检测电路使用 A 和 B 两个单元, 原理图如图 5。



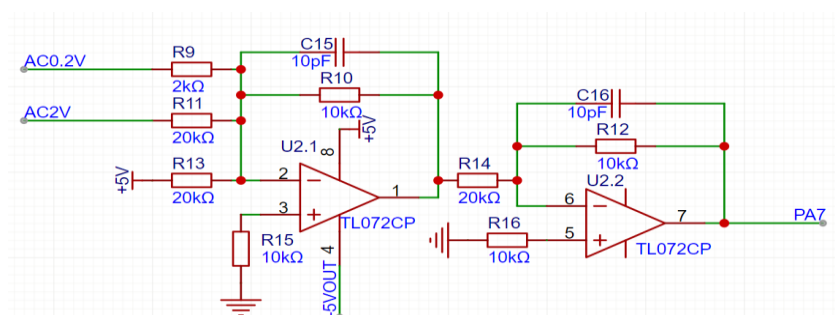
图表 4



图表 5

2V 量程接入电压跟随器使输入阻抗接近无穷大, 0.2V 量程放大 16 倍以提高精度。

3.1.3 交流电压检测电路

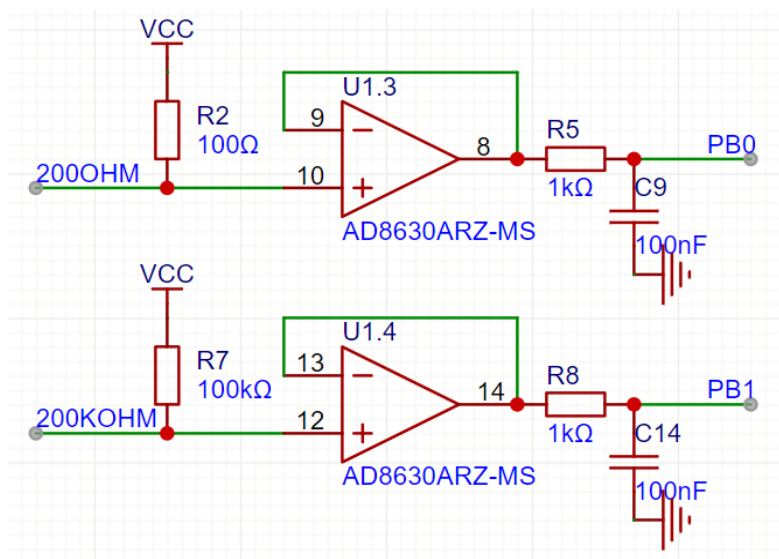


图表 6

以 TL072CP 构成的两个运放电路为核心，将输入电压调至合适测量范围

3.1.4 电阻检测电路

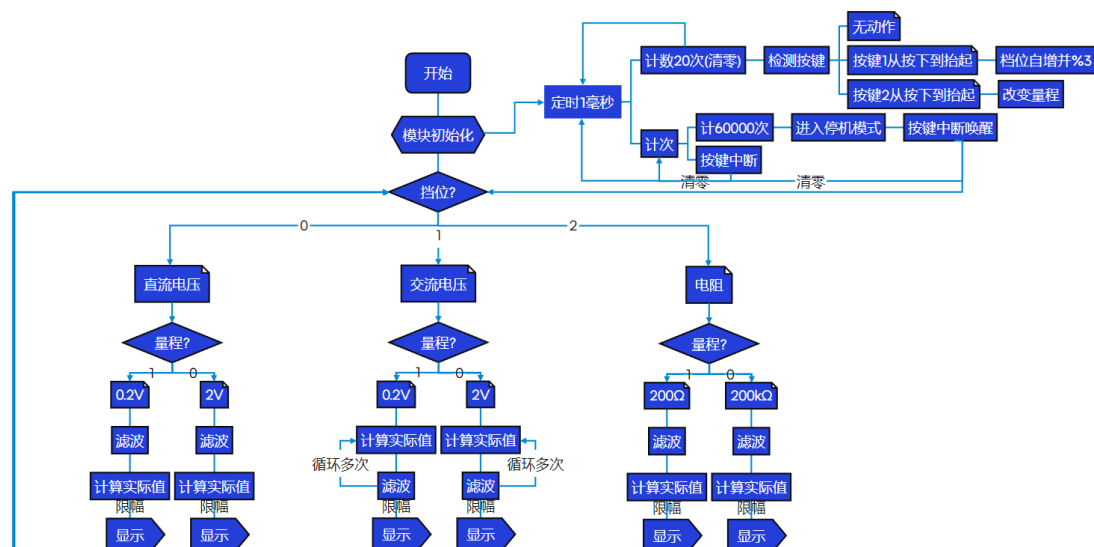
本部分电路同样以 AD8630 芯片为核心进行搭建，使用 C 和 D 两个单元，均用作电压跟随器，原理图如图 7。



图表 7

3.2 程序设计

3.2.1 程序设计框图



图表 8

3.2.2 ADC 设置

启用 GPIOA4、5、7、GPIOB0、1 作为 ADC 通道，并额外启用 ADC 内部参考电压 VREFINT(通道 17)作额外参考以提高精度.ADC 设置为连续转换，扫描模式并启用 DMA 循环模式以及时将数据移至数组中。

3.2.3 定时器、停止模式与按键唤醒

设置定时器为不分频，ARR=1000-1，PSC=72-1(计时 1ms)并开启中断.中断函数内进行计次：

```
//定时器中断函数，1 毫秒进入 1 次  
void TIM2_IRQHandler(void){  
    if (TIM_GetITStatus(TIM2,  TIM_IT_Update) == SET){//是定时器 2 的中断  
        Num++;        //计 1 毫秒  
        Key_Tick();//扫描按键  
        TIM_ClearITPendingBit(TIM2,  TIM_IT_Update); //清除定时器 2 的中  
断标志位  
    }  
}
```

在 Key_Tick()内每 20ms 检测一次按键状态以实现软件消抖, Key_GetState()中按键 1 按下返回 1, 按键 2 按下返回 2:

```
//扫描按键
void Key_Tick(void){
    static uint8_t Count;

    static uint8_t CurrState, PrevState;

    Count++;

    if (Count >= 20){//消抖

        Count = 0;

        PrevState = CurrState;

        CurrState = Key_GetState();

        //判断按键变化状态

        if (CurrState == 0 && PrevState == 1 && !Sleepflag){//按键 1 抬起且不处于停机时

            Mode++;Mode %= 3;

        }

        else if (CurrState == 0 && PrevState == 2 && !Sleepflag){//按键 2 抬起且不处于停机时

            Range = !Range;

        }

    }

}
```

启用按键外部中断以实现唤醒：

```
void EXTI15_10_IRQHandler(void){
    Num = 0;//重新计时
    EXTI_ClearITPendingBit(EXTI_Line10 | EXTI_Line11);    //清除外部中断 10 号
    线和 11 号线的中断标志位
    //中断标志位必须清除
    //否则中断将连续不断地触发，导致主程序卡死
}
```

3.2.4 检测与计算

以直流电压 0.2V 量程为例(其他同理)，先判断当前 Mode 与 Range 的值确定挡位与量程，然后进行原始值滤波与实际值计算，在限幅后显示到 OLED 显示屏上：

```
if (Mode == 0){
    OLED_ShowString(2, 1, "DC:");
    if (Range){//小量程
        OLED_ShowString(1, 7, "0.2V ");
        TrueValue = DC_Filter(&AD_Value[0]) / 4095.0 * 3.3 / 16;//计算真实值
        if (TrueValue >= 0.204){TrueValue = 0;}//空接时置零
        else if (TrueValue >= 0.2){TrueValue = 0.19999;}//超过最大值
        sprintf(OLEDString, "%.5fV ", TrueValue);
        OLED_ShowString(3, 1, OLEDString);
    }
}
```


额外说明交流电压的计算代码：以 delay 函数控制采样频率。

两层 for 循环分别起到算周期内有效值，和滤波减小误差的作用并把显示时间最终控制在约 0.5s 更新一次示数。

```
float AC_Cal_Filter(void) {
    Filt_Value=0;
    if (Range)
    {
        for(int i=0;i<10;i++)
        {
            for(int j=0;j<15;j++)
            {
                u1=(AD_Value[2]*1.3156)/4095-0.509;
                u2+=u1*u1;
                Delay_ms(2);
            }
            ur=sqrt(u2/15);
            u2=0;
            Filt_Value+=ur;
        }
    }
    else
    {
        for(int i=0;i<10;i++)
        {
            for(int j=0;j<15;j++)
            {
                u1=(AD_Value[2]*13.156)/4095-5.09;
                u2+=(u1*u1);
                Delay_ms(2);
            }
            ur=sqrt(u2/15);
            u2=0;
            Filt_Value+=ur;
        }
    }
    Filt_Value/=10;
    return Filt_Value;
}
```

3.2.5 待机

当计次 Num 达到 60000(1min)时, STM32 进入停止模式:

```
if (Num >= 60000){  
    Sleepflag = 1;//停机标志  
    /*进入停止模式提示*/  
    OLED_Clear();  
    OLED_ShowString(2, 5, "Sleeping");  
    Delay_ms(2000);  
    OLED_ShowString(2, 5, " ");  
    PWR_EnterSTOPMode(PWR_Regulator_ON, PWR_STOPEntry_WFI);  
    //STM32 进入停止模式, 并等待中断唤醒  
    SystemInit();//唤醒后, 要重新配置时钟  
    /*唤醒提示*/  
    OLED_ShowString(2, 5, "Running");  
    Delay_ms(2000);  
    OLED_ShowString(2, 5, " ");  
    Delay_ms(500);  
    Sleepflag = 0;//清除标志  
}
```

四、测试方案与测试结果

4.1 直流电压测试

使用 1.8V 稳压源测试，结果在 1.81V 左右

4.2 交流电压测试

测试运放的输入输出电压，理论数值 1.25v 现为 1.27v，更改计算参数后减小误差。ICL7660 芯片输出 -4.86v，但能正常保证运算放大器工作。

最终交流电输入 1.8v 有效值，测得 1.810v 左右跳动。

4.3 电阻测试

测量 20k 电阻，结果为 20.0k

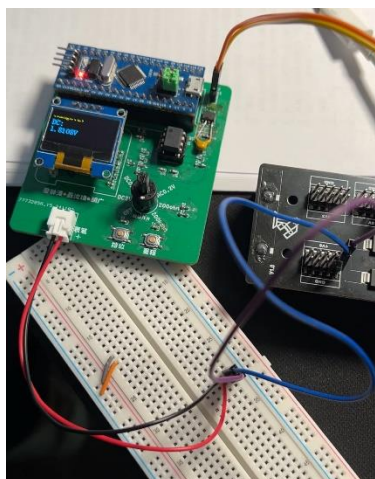
测量 100Ω电阻，结果为 100.6Ω

测量 100k 电阻，结果为 100.4 k

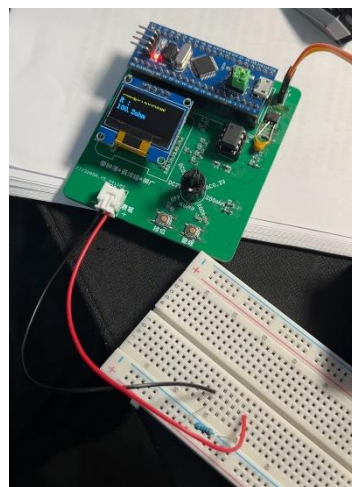
测试结果均基本符合要求

***测试图片见附件一**

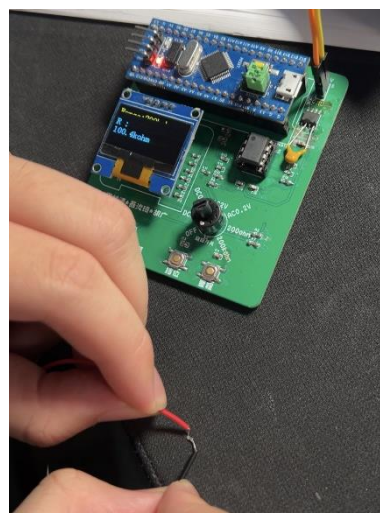
附件一：实际各项参数测定



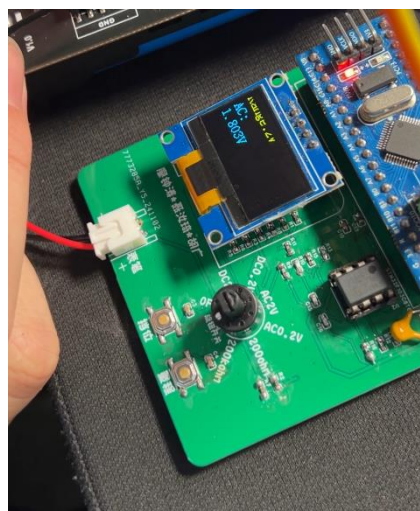
直流电压测试



100 Ω 电阻测试

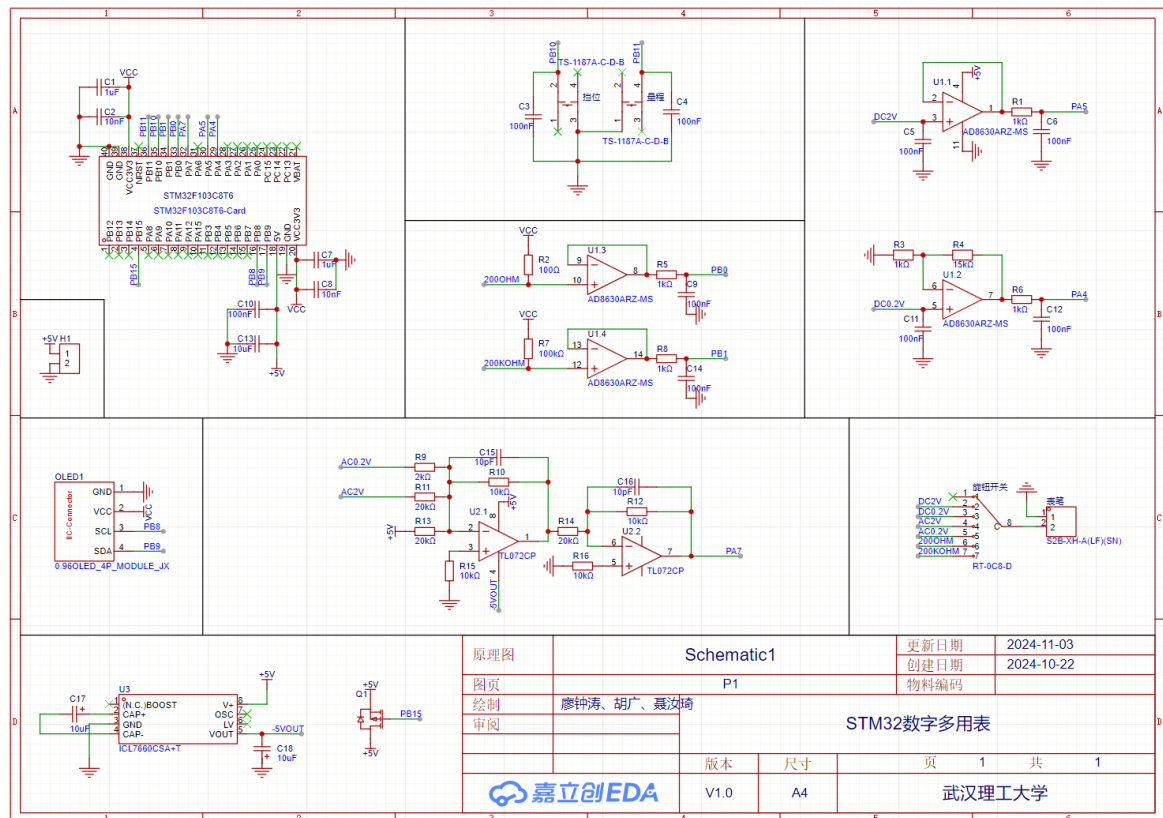


100k 电阻测试



交流电压测试

附件二：原理图



附件三： PCB 图纸、 3D 打印模型

