

# 简易电路特性测试仪

2019年全国大学生电子设计竞赛试题（D题）

2022年7月11日

# 简易电路特性测试仪——任务

设计制作一个测试仪：

- 测量特定放大电路的特性（基础部分）
- 判断放大器故障原因（发挥部分）

该测试仪**仅有一个输入端口和一个输出端口**，与特定放大器电路连接如图1所示。

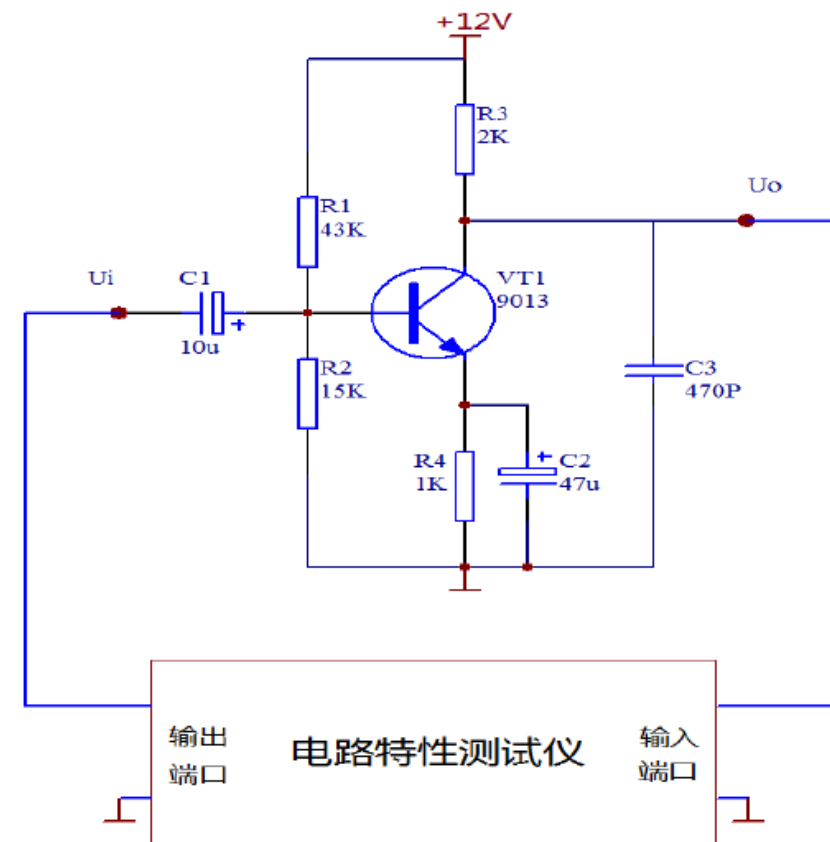


图 1 特定放大器电路与电路特性测试仪连接图

# 简易电路特性测试仪——被测放大器电路

- 该电路板上的元件按图1电路图布局，保留元件引脚，尽量采用可靠的插接方式接入电路，确保每个元件可以容易替换。
- 电路中采用的电阻相对误差的绝对值不超过5%，电容相对误差的绝对值不超过20%。晶体管型号为9013，其 $\beta$ 在 $60\sim 300$ 之间皆可。
- 电路特性测试仪的输出端口接放大器的输入端 $U_i$ ，电路特性测试仪的输入端口接放大器的输出端 $U_o$ 。

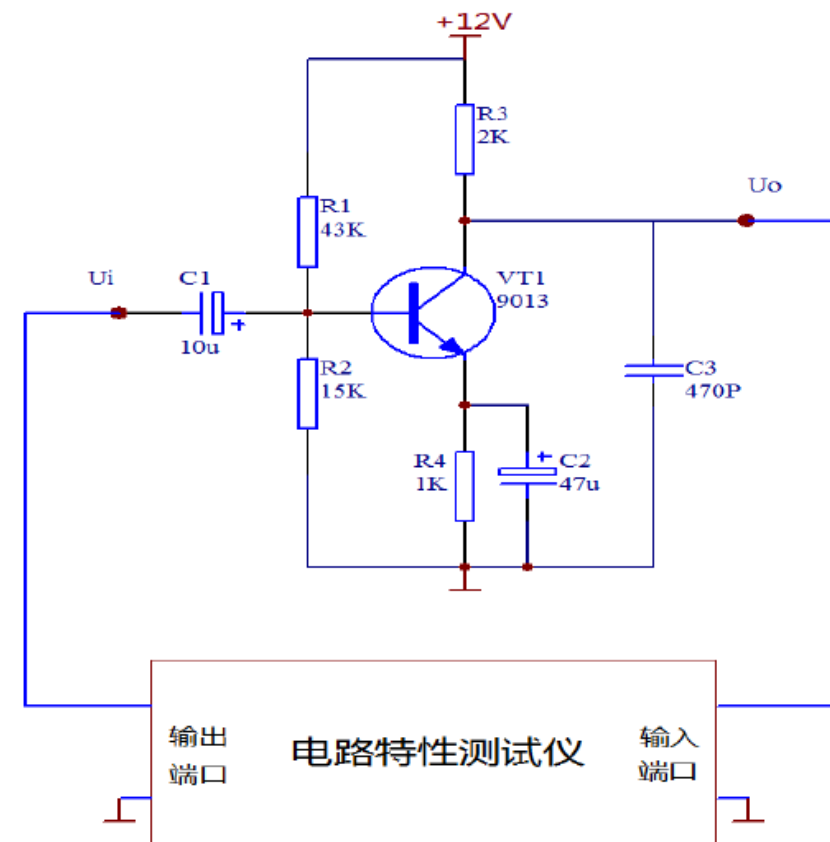


图1 特定放大器电路与电路特性测试仪连接图

# 简易电路特性测试仪——基本要求

- 电路特性测试仪输出1kHz正弦波信号，自动测量并显示该放大器的**输入电阻**。输入电阻测量范围 $1\text{k}\Omega \sim 50\text{k}\Omega$  相对误差的绝对值不超过10%。
- 电路特性测试仪输出1kHz正弦波信号，自动测量并显示该放大器的**输出电阻**。输出电阻测量范围 $500\Omega \sim 5\text{k}\Omega$ ，相对误差的绝对值不超过10%。
- 自动测量并显示该放大器在**输入1kHz频率时的增益**。相对误差的绝对值不超过10%。
- 自动测量并显示该放大器的**频幅特性曲线**。**显示上限频率值**，相对误差的绝对值不超过25%。

# 简易电路特性测试仪——发挥部分

- 该电路特性测试仪能判断放大器电路元器件变化而引起故障或变化的原因。任意开路或短路R1~R4中的一个电阻，电路特性测试仪能够判断并显示故障原因。
- 任意开路C1~C3中的一个电容，电路特性测试仪能够判断并显示故障原因。
- 任意增大C1~C3中的一个电容的容量，使其达到原来值的两倍。电路特性测试仪能够判断并显示该变化的原因。
- 在判断准确的前提下，提高判断速度，每项判断时间不超过2秒。
- 其他。

# 说明

- 不得采用成品仪器搭建电路特性测试仪。电路特性测试仪输入、输出端口必须有明确标识，不得增加除此之外的输入、输出端口。
- 测试发挥部分1~4的过程中，电路特性测试仪能全程自动完成，中途不得人工介入设置测试仪。

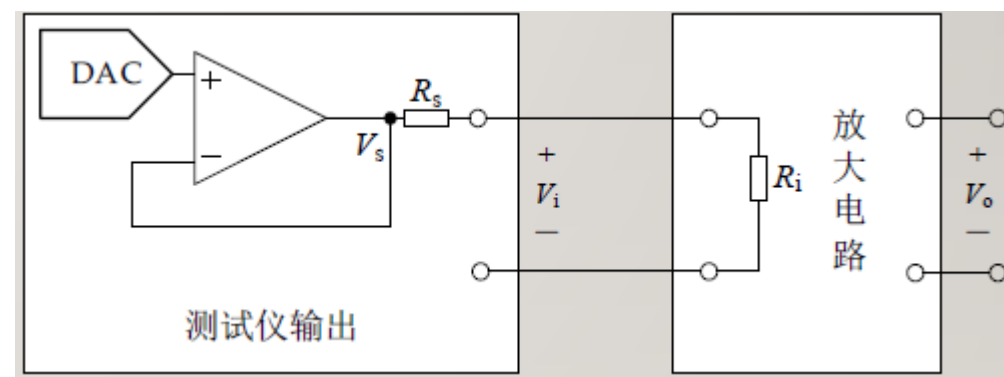
# 基础部分——基本原理

输入电阻测量范围  $1\text{k}\Omega \sim 50\text{k}\Omega$   
相对误差的绝对值不超过10%

## • 输入电阻测量分析

对于任意一个二端口网络，在信号输入端，输入电压与输入电流之比，称为输入电阻，即： $R_i = U_i / I_i$ ，测量输入电阻的原理如右图所示。在测试仪的输出端串联一只阻值已知的电阻  $R_s$ ，输入信号的幅度到达放大器的输入端会被减小。用ADC分别测出  $R_s$  两端的对地电压  $V_s$  和  $V_i$ ，两者差值即  $R_s$  上的电压降  $V_s - V_i$ ，所以输入电阻：

$$R_i = \frac{V_i}{V_s - V_i} R_s$$



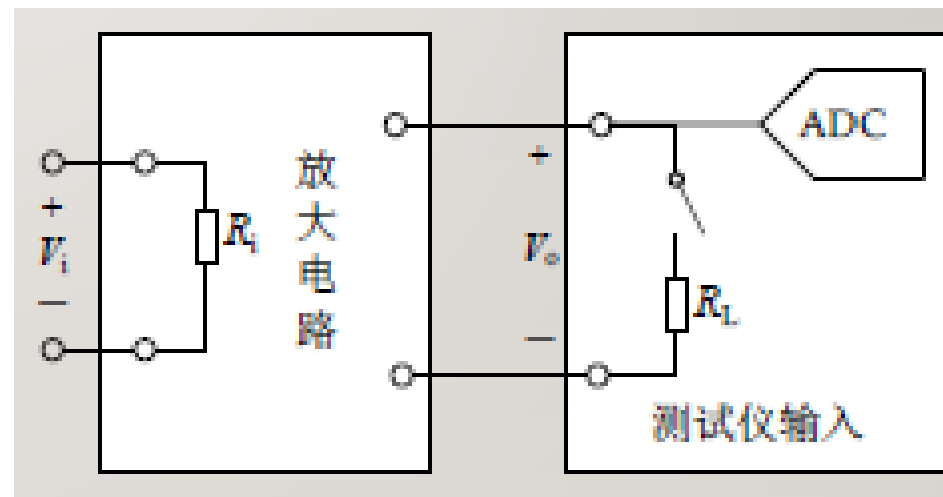
# 基础部分——基本原理

输出电阻测量范围  $500\ \Omega \sim 5\text{k}\ \Omega$   
相对误差的绝对值不超过10%

## • 输出电阻测量分析

放大器的输出端可视作有源二端网络，把它看做一个交流信号源，输出阻抗即为其内阻，所以测量原理与测量信号源内阻类似，测量电路如右图所示。用电压表分别测出不接负载 $R_L$ 时的空载电压 $V_O$ 和外接负载 $R_L$ 后的输出电压 $V_{OL}$ ，则输出阻抗 $R_O$ 的表达式为：

$$R_O = \left( \frac{V_O}{V_{OL}} - 1 \right) R_L$$





# 基础部分——基本原理

- 幅频特性测量分析

利用DDS原理，通过DAC输出正弦波信号，调理后接放大电路输入端，由ADC采集放大电路输入、输出的信号，取整数周期的样本，做峰值、谷值计算，两者相减，即可得到不含直流分量的正弦信号峰峰值，输入、输出信号相除，得所测网络在特定频率点的增益（幅频特性）即：

$$AV=U_o/U_i$$

（AV：电压增益， $U_i$ ：输入交流峰峰值， $U_o$ ：输出交流峰峰值）

对放大电路进行扫频测量即可得到放大电路的幅频特性曲线。

# 故障分析

对于放大器电路故障的分析应分成静态工作点分析和交流输出分析两部分，电阻故障可以分为短路或断路故障；电容故障可以分为开路故障和容值翻倍。由此可以看出有14种故障的可能性，对应有14种不同的故障状态表现形式。

任意电阻故障都将会影响电路的静态工作点。

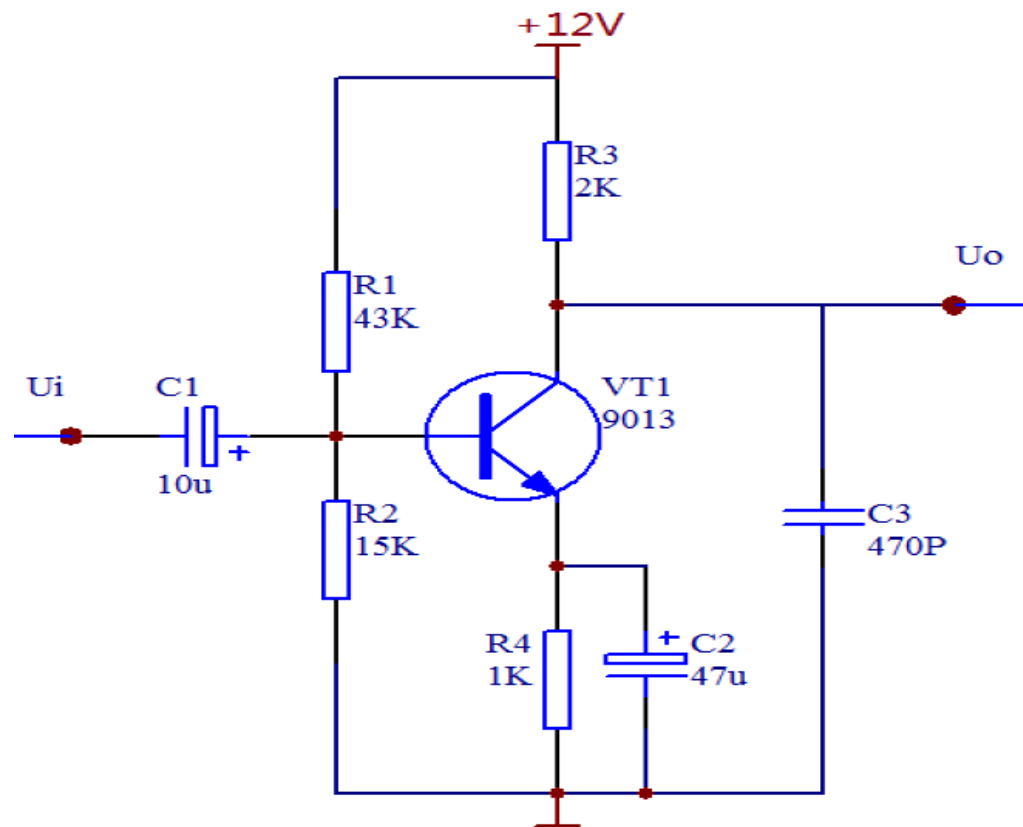
电路正常工作时，三极管静态时

$$V_{BQ}=3V$$

$$V_{EQ}=V_{BQ}-V_{BEQ}=3V-0.7V=2.3V$$

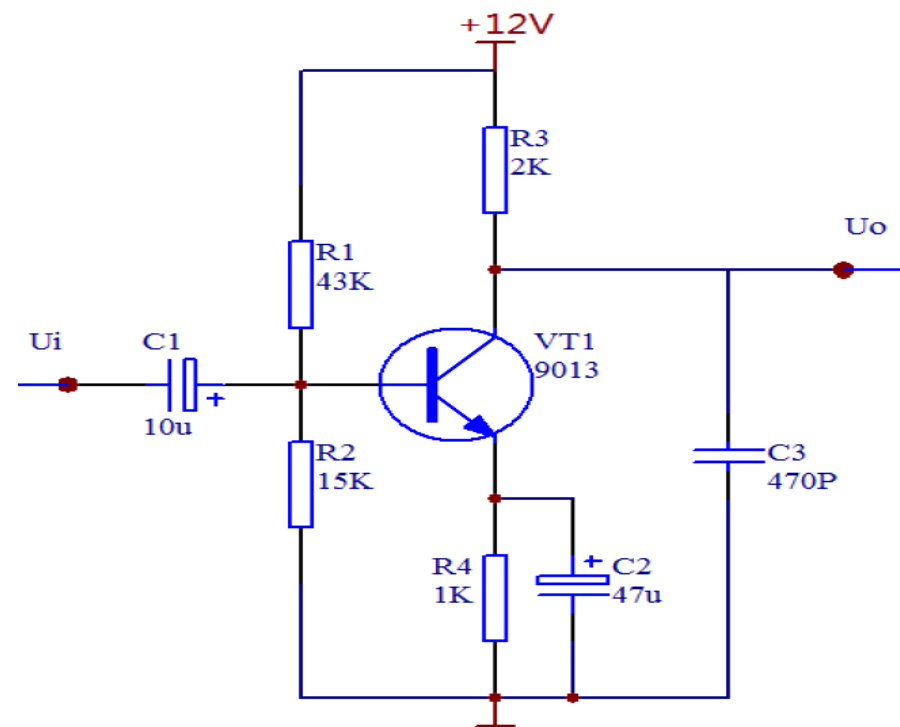
$$I_{CQ}\approx I_{EQ}=V_{EQ}/R_4=2.3mA$$

$$V_{CQ}=12V-I_{CQ}R_3=12V-4.6V=7.4V$$



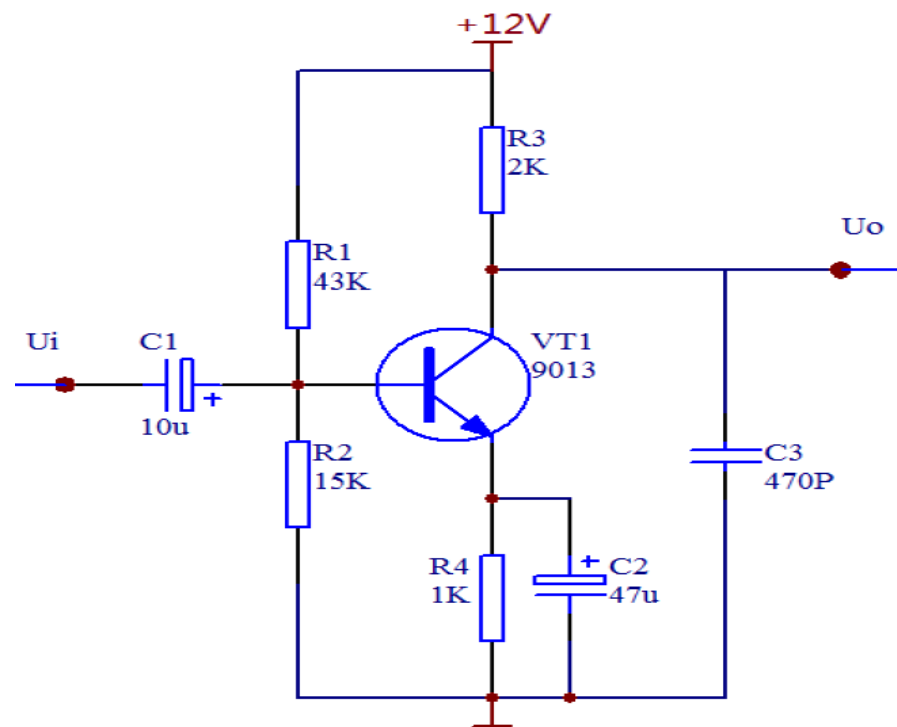
# 故障分析——电阻开路（静态分析）

- 当R1开路时，晶体管处于关断状态，发射极和基极电压均为0。同时，由于集电极电流为0，集电极负载电阻R3上的压降为0，集电极电压等于12V，可测得输出电压的直流偏置为12V。
- 当R2开路时，基极电压升高。由于基极电流的增加，使得晶体管处于饱和导通状态，集电极电压和发射极的电压只有0.1V。电路的输出变形，放大信号的负半波被削减。此时，可测得输出电压的直流偏置为4.1V。
- 当R3开路时，集电极电流为0，发射极电流由基极提供，这时可测得输出电压的直流偏置为0.1V。
- 当R4开路时发射极和地断开，晶体管中没有电流流过。可测得输出电压的直流偏置为12V，与R1开路相同，这时可以根据输入电阻区分。



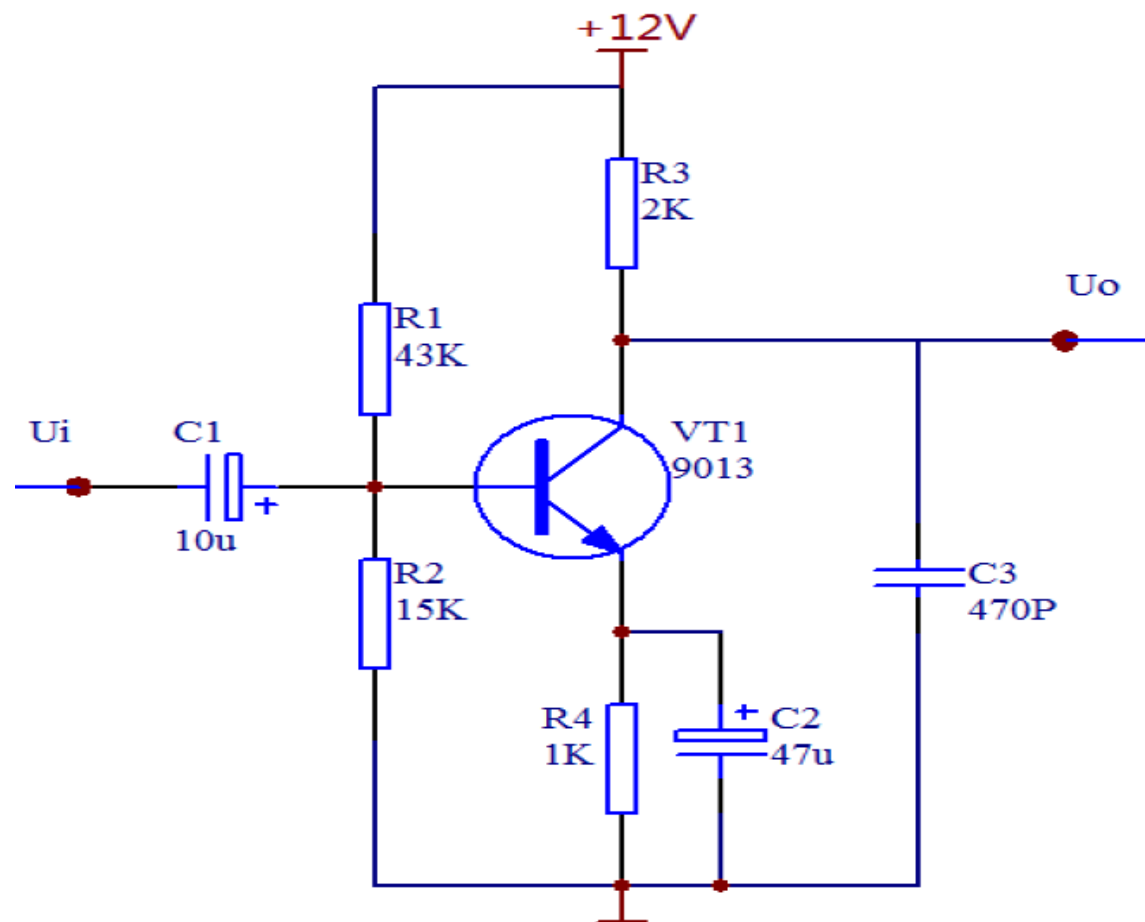
# 故障分析——电阻短路（静态分析）

- 当R1短路时，基极电压为12V，可测得输出电压的直流偏置为11.2V。
- 当R2短路时，基极电压为0，可测得输出电压的直流偏置为12V，这时可以根据输入电阻区分。
- 当R3短路时，可测得输出电压的直流偏置为12V，这时可以根据输出电阻区分。
- 当R4短路时，可测得输出电压的直流偏置为0。



# 故障分析——电容（交流分析）

- 当C1开路时，放大电路的输入阻抗变为无穷大，输出信号无交流成分；
- 当C2开路时，放大器的电压放大倍数下降。这是由于C2断路时，交流信号在R4两端产生负反馈；
- 当C3开路时，放大器的上限频率会升高。
- 当C1容值增加一倍时，通过测量放大器在低频区的电压增益可以区分；
- 当C2容值增加一倍时，通过测量放大器在通带内的电压增益可以区分；
- 当C3容值增加一倍时，通过测量放大器在高频区的电压增益可以区分。



# 系统总体方案设计

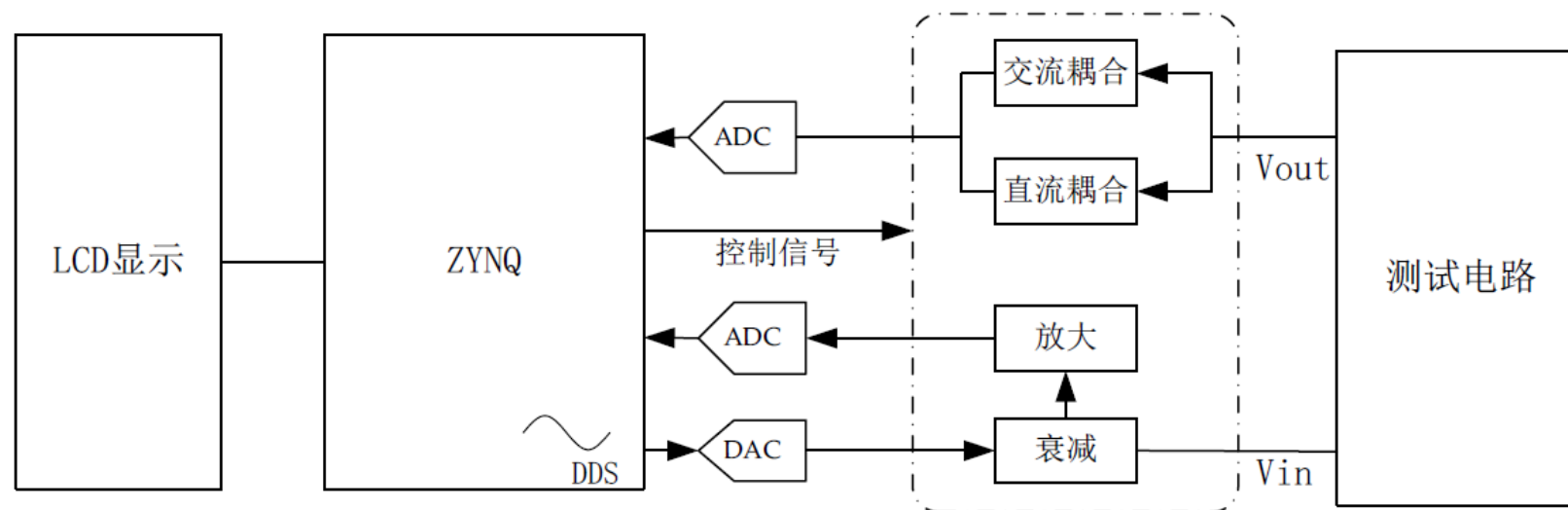
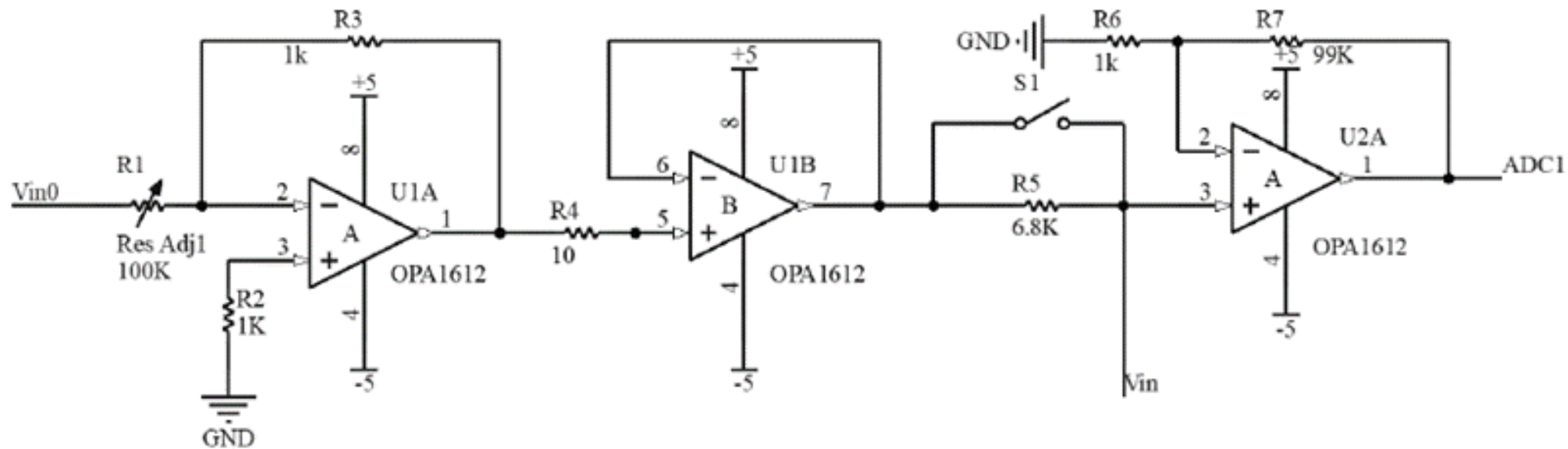


图 1 系统框图

通过数字DDS和DAC模数转换电路产生正弦波信号，经过衰减变为小信号输入测试电路，小信号经过放大电路进入一路ADC采样电路；测试电路输出的信号通过干簧管继电器可切换至交流耦合与直流耦合模式，其中，直流耦合将信号进行电阻分压，交流耦合将交流信号抬升进入另一路ADC采样电路；可通过切换至相应的模式测量相应参数并检测故障。两路ADC采样电路进行采集后输入ZYNQ进行计算处理，最后在显示屏上显示结果。

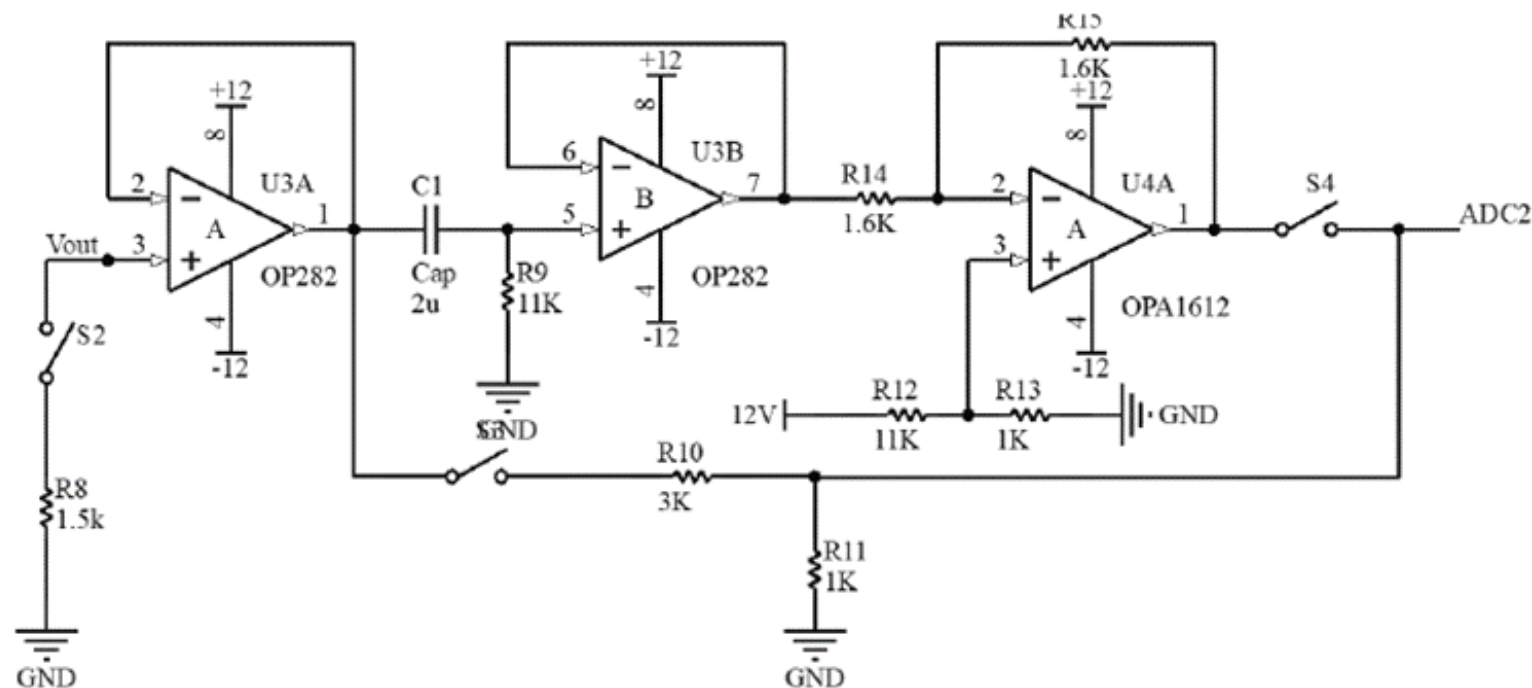
# 参考电路图——前端调理



前端调理：

采用运放OPA1612对信号进行一定倍数的放大，然后通过OPA1612构成的电压跟随器减少对后续电路的影响。其中开关S1可控制电路是否进行输入电阻的测量，随后根据ADC的输入范围对信号进行放大以满足输入范围。

# 参考电路图——后端调理

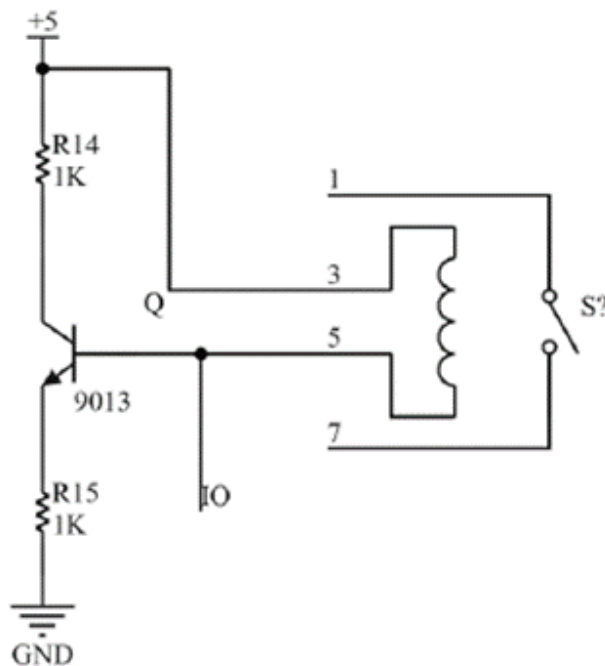


后端调理:

信号经S2开关的控制可测量输出电阻，设计电压跟随器减少对后端电路的影响，随后信号分为两路，一路进行滤波并对得到的交流信号叠加2V的直流分量，另一路直接对信号进行分压（衰减4倍），这样通过控制开关S3，S4可测量不同的量。



# 参考电路图——继电器驱动



## 干簧管继电器驱动电路

为保护控制继电器的IO口，增加三极管驱动电路，其中控制IO口电平的高低，可控制1端口与7端口的导通与否，IO口为低时开关导通，IO口为高时不导通。

# 方案参考

**系统供电：**测试电路12V单电源采用LDO供电，后端处理电路15V双电源采用电压源供电，前端处理电路5V双电源供电采用DC-DC供电

**AD：**ADS7883，其精度为12位，采样率为3MHz。其中两路ADC，Vin-B路可输入范围为正负5V的双极性信号，用来采集前端处理的信号；Vin-E路只能输入范围为0V到5V的单极性信号，用来采集后端处理的信号。看数据手册写驱动

**DA+数字DDS：**采用数字DDS方案+DAC7811，其精度为12位，50MHz串口输入。参考电压为2.5伏，设计电路使其输出范围为正负5伏双极性信号。看数据手册写驱动

**DDS模块：**AD9833，看数据手册写驱动

# 其他细节

- 制作被测电路时选择圆排母，便于拔插元器件
- 通道切换——继电器（统一采购）
- 数据多次采样取平均值
- 电源需要用LDO，避免DC-DC，纹波较大
- 继电器控制电路的运用
- 小信号的传输——同轴线
- 人机交互界面——各项数据清晰明了，做得像一个仪器仪表
- 需要花费较多时间在调试发挥部分，尽早开始软硬件联调

Q&A