

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）

裴熙隆 2021.7.5

一、任务

- 设计并制作一个简易电路特性测试仪。用来测量特定放大器电路的特性，进而判断该放大器由于元器件变化而引起故障或变化的原因。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。

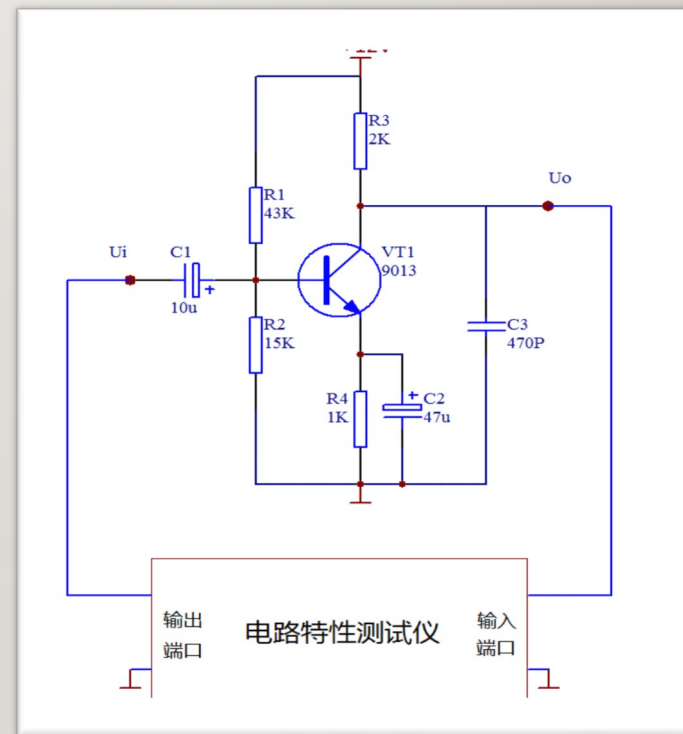


图1 特定放大器电路与电路特性测试仪连接图

一、任务

- 制作图1中被测放大器电路，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 β 在60~300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 。

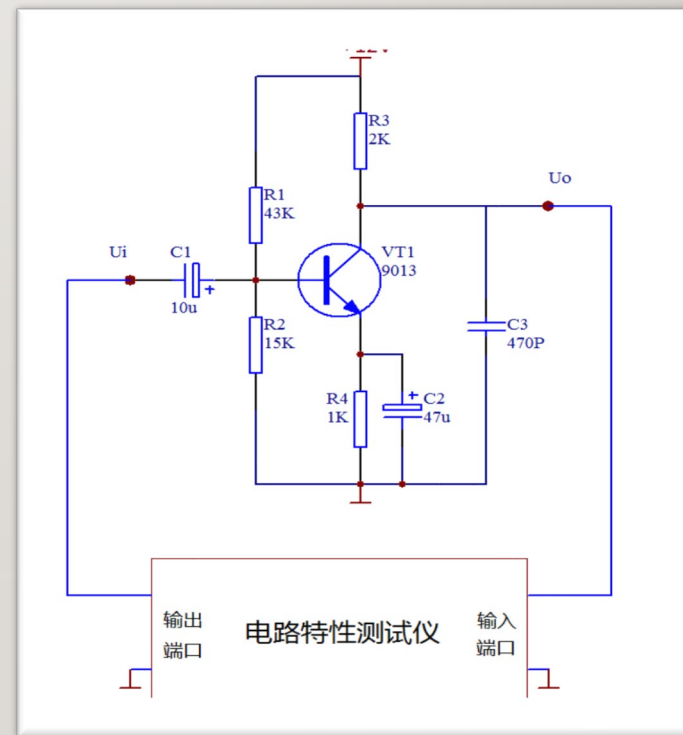


图1 特定放大器电路与电路特性测试仪连接图

二、要求 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1kΩ~50kΩ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500Ω~5kΩ，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%。

二、要求 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** $R_1 \sim R_4$ 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** $C_1 \sim C_3$ 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** $C_1 \sim C_3$ 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。

三、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。

四、放大电路故障分析

- 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。

四、放大电路故障分析

- 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 $V_{BQ}=3V$ ， $V_{EQ}=V_{BQ}-V_{BEQ}=3V-0.7V=2.3V$ ， $I_{CQ}\approx I_{EQ}=V_{EQ}/R_4=2.3mA$ ， $V_{CQ}=12V-I_{CQ}R_3=12V-4.6V=7.4V$ 。
- 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。

四、放大电路故障分析

- 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。
- 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，这时可以根据输入电阻区分。
- 当R4短路时，可测得输出电压的直流偏置为0。

四、放大电路故障分析

- 电容故障
- 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。

五、基本原理

- 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图2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：

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

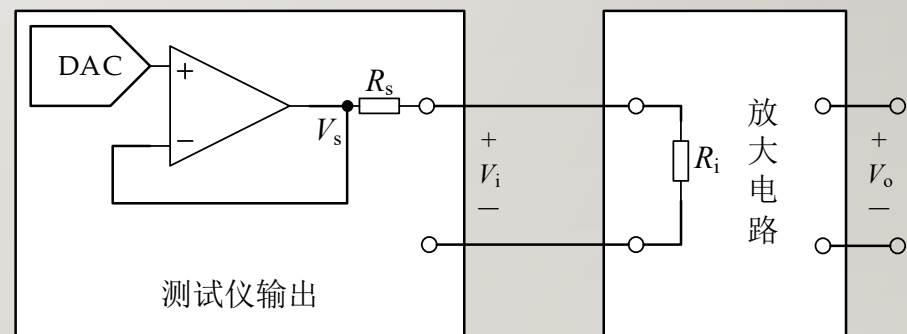


图2 输入电阻测量原理图

五、基本原理

- 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，测量电路如图3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：

$$R_o = \left(\frac{V_o}{V_{oL}} - 1 \right) R_L$$

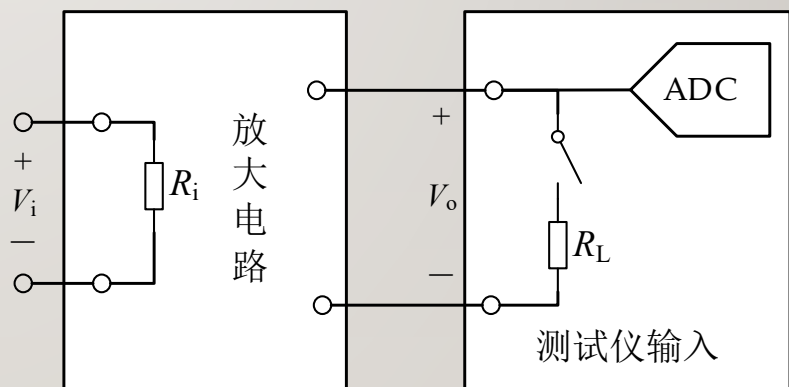


图3 输出电阻测量原理图

五、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： $A_V = U_o / U_i$ （ A_V ：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。

六、系统总体方案设计

- 系统框图如图4所示。系统主控制器采用Xilinx Zynq-7000系列FPGA，其搭载了一个微处理器硬核，使用LCD显示屏完成控制扫频输出与显示参数的人机交互。FPGA控制DAC8811输出一路可扫频的正弦波信号，其频率范围为100Hz~500kHz，输出经过衰减后输入放大电路，此信号取样放大后由模数转换器采集，以便计算增益。经被测网络放大后的信号经过后级检波调理后由AD9235采样，在FPGA中完成对输出信号的峰值检测和均值检测，计算并显示参数、绘制幅频特性曲线。在故障检测中，系统通过对输入信号和输出信号的幅值、偏置等信息判断电路故障。

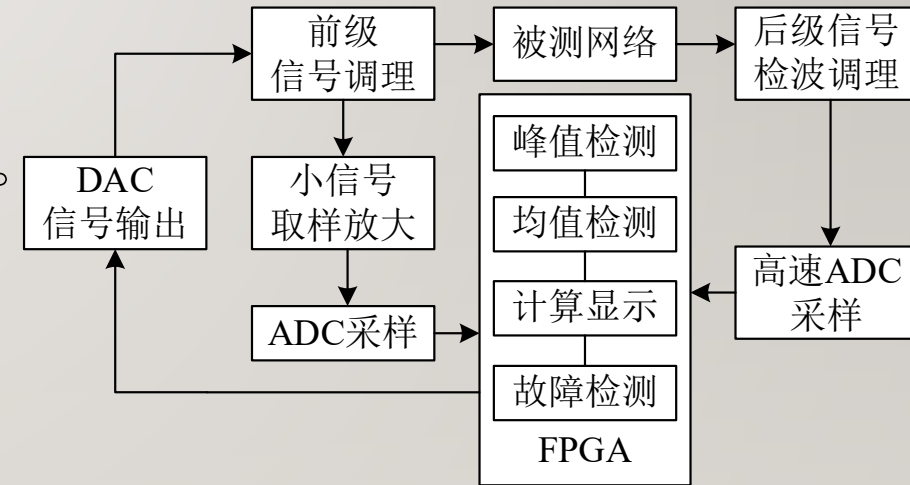
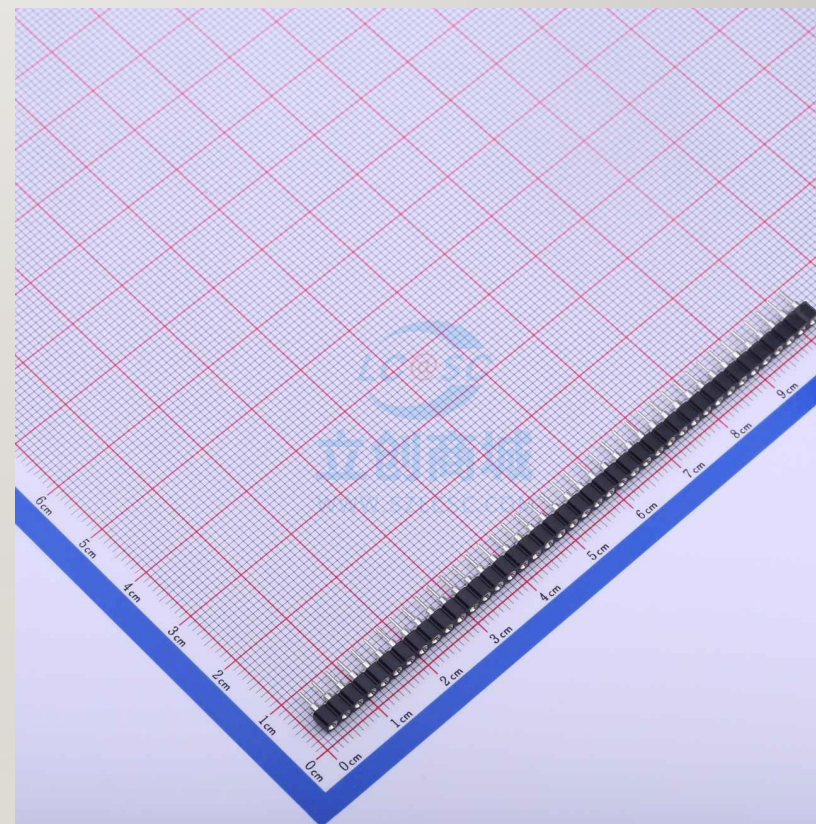


图4 简易电路特性测试仪系统框图

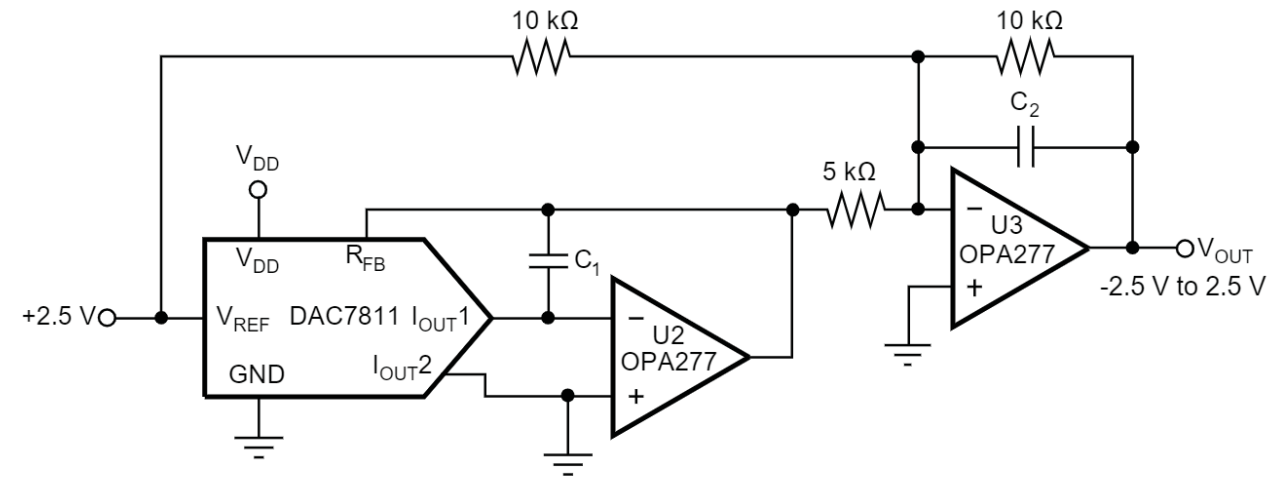
七、其他细节

- 排母的选择
- ——圆排母，便于插拔元器件



七、其他细节

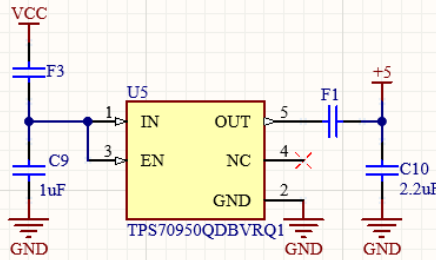
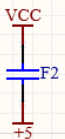
- DAC或DDS选型
- ——AD9833
- ——DAC7811 (统一采购的DAC)
- 右图为双极性输出电路



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

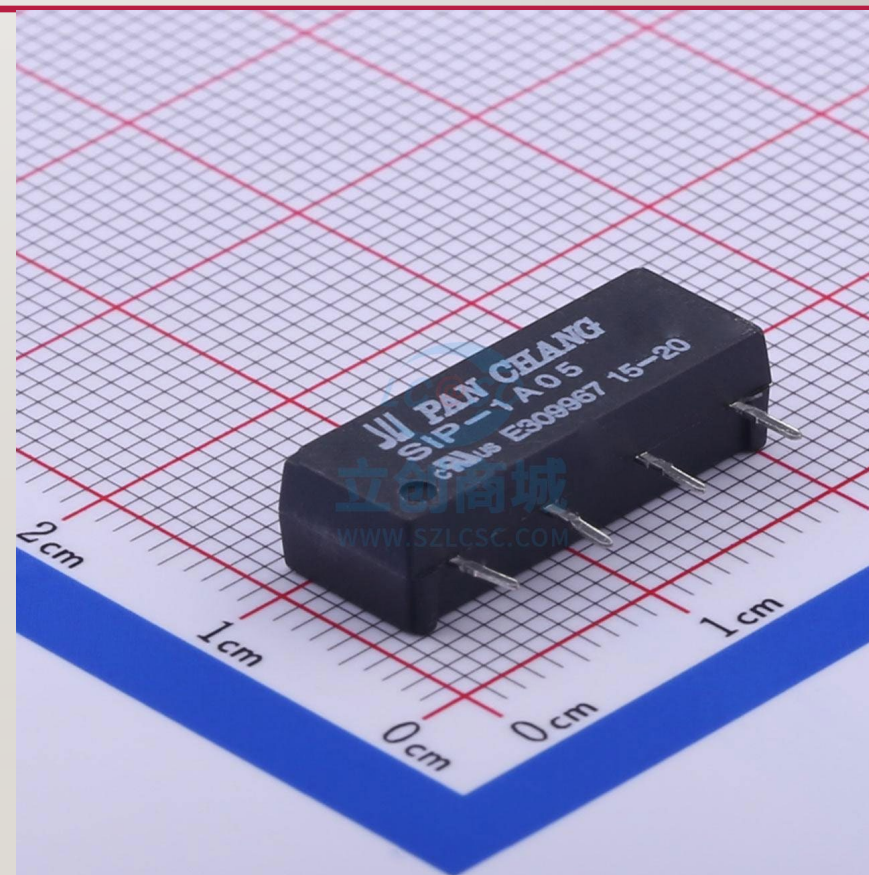
Figure 30. Bipolar Output Circuit

- ADC选型
- ——ADS7883（统一采购的ADC）



七、其他细节

- 通道切换
- ——模拟开关
- ——继电器（统一采购SIP-1A05）



七、其他细节

- 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

八、Q & A

