

## 简易电路特性测试仪

**摘要：**本设计实现的简易电路特性测试仪，只通过一个输入和输出端口，可以测量指定电路的特性，实现测量电路输入输出电阻等功能。系统由六部分组成。电源模块，串口屏，ESP8266 模块，前端调理电路，后端调理电路，单片机。

**关键词：** STM32F103，DDS 模块，片上 AD 模块，串口屏模块，放大电路

# 简易电路特性测试仪（D 题）

## 【本科组】

### 一、 系统方案

#### 1. 比较与选择

##### 1.1 开关设计方案

方案一：用 9013 三极管构成开关电路，控制测试输入输出电阻等电路量时对应电路段的短路，优点是简便，电路便于搭建。

方案二：在 9013 的基础上，用继电器开关控制电路，缺点是电路设计要求较高，优点是开关的压降更稳定，对电路的控制也更可靠。

方案选择：方案一，搭建方便；方案二，性能可靠。综合考虑，使用方案二。

##### 1.2 ADC 传输方案

方案一：使用 ad7833 芯片搭建 ADC，可在硬件层面实现。

方案二：使用单片机自带的 ADC 通道，优点是采样便于控制，减轻硬件压力。

方案选择：方案一，搭建需要时间，且需要测试与调试时间；方案二，可靠快捷，有现成的例程参考。综合考虑，使用方案二。

##### 1.3 信号发生电路 dds 方案

方案一：使用 9854 芯片构成的 dds 电路，提供信号

方案二：使用 ad9833 模块直接提供信号，更方便快捷

方案选择：方案一，电路体积交大，且有待调试；方案二，可靠快捷，可以不搭配 dac 模块使用。综合考虑，使用方案二。

#### 2. 方案描述

本设计以单片机 STM32F407 为核心，通过对 DDS 模块、A/D 采集模块、继电器控制模块实现控制的产生与信号的处理，利用串口屏显示模块实现人机交互。总体框图如图 1 所示。连接好相关连线，把测试仪的两个端口与放大电路连接后即可开始进行电路特性的测试。串口屏上有三个按键分别对应功能：1.测量输入电阻；2.输出电阻；3.通频带电

压增益 、幅频特性曲线及上限频率 ； 4.故障检测； 5.复位。按下相应测量按键后，在串口屏上将会显示目标参数；按下检测故障按键后，则会显示出放大器电路里的电路故障；按下复位键，系统初始化。系统框图如图 1 所示。

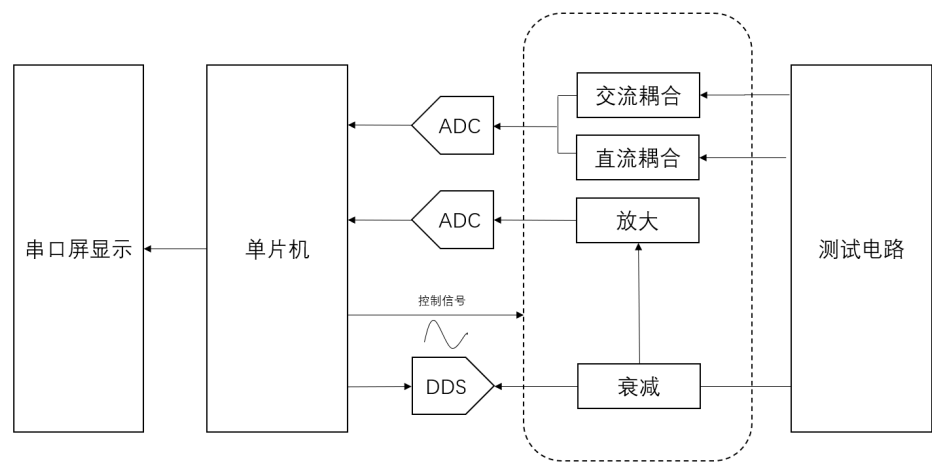


图 1 系统框图

二、 理论分析与计算

1. 放大器电路分析

(1) 放大器静态分析

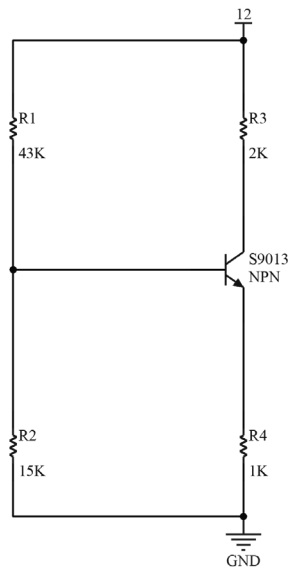


图 2.1 静态等效电路

假设选取的三极管 s9013 的  $\beta=100$ 。

当流过偏置电阻 R1 和 R2 的电流远大于晶体管 s9013 的基极电流  $I_B$  时，则它的静态工作点可以用下式估算， $V_{CC}$  为供电电源，在此为 12V。

$$U_b \approx [R_2 / (R_1 + R_2)] * V_{cc} = 3.1V$$

$$I_E = (U_b - U_{be}) / R_4 \approx I_C = 2.4mA$$

$$U_{ce} = V_{cc} - I_C * (R_3 + R_4) = 4.8V$$

$$U_C = V_{CC} - I_C * R_3 = 7.2V$$

$$r_{be} = 200 + (1 + 100) * 26 / 2.4 = 1294.171.3k\Omega$$

## (2) 放大器动态分析

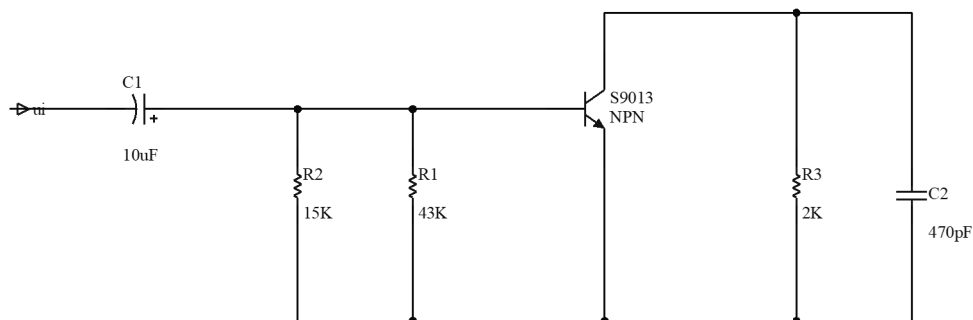


图 2.2 动态等效电路

电压增益：  $A_v = u_o / u_i \approx -\beta(R_3 / r_{be})$

输入电阻：  $R_i = r_{be} / R_1 // R_2 = 1.3k\Omega / 11k\Omega = 1.16k\Omega$

输出电阻：  $R_o \approx R_3 = 2k\Omega$

## 2. 对电路测试仪的分析

### (1) 输入电阻测量电路

为了测量放大器的输入电阻，电路在被测放大器的输入端与信号源之间串联一个已知电阻  $R$ ，在放大器正常工作的情况下，通过 AD 采样模块获得  $U_{o1}$  和  $U_{o2}$ ，由输入电阻的定义式可得

$$R_i = U_i / I_i / (U_R / R) = U_i * R / (U_s - U_i)$$

由于工作点不变，因此两者的  $A_v$  是相等的，可得

$$U_i = U_{o1} / |A_v|$$

$$U_s = U_{o2} / |A_v|$$

由上面各式可得

$$R_i = U_o * R / (U_{o2} - U_{o1})$$

注意：根据题意，输入电阻测量范围  $1k\Omega \sim 10k\Omega$ ，因此电阻  $R$  的值不宜取得过大或过小，以免产生较大的测量误差，此处取与  $R_i$  为同一数量级最佳，可令  $R = 10k\Omega$ 。

## (2) 输出电阻测量电路

为了测量放大器的输出电阻，在放大器正常工作的情况下，测出输出端不接负载  $R_L$  的输出电压  $U_o$  和接入负载后输出电压  $U_L$ ，根据分压公式可得

$$U_L = R_L * U_o / (R_o + R_L) \text{ 亦即 } R_o = (U_o / U_L - 1) * R_L。$$

注意：①测试时候必须保持  $R_L$  接入前后输入信号的大小不变；②根据题意，输出电阻的测量范围  $5k\Omega \sim 500k\Omega$ ，因此可取负载电阻  $R_L = 2k\Omega$ 。

## (3) 测量电压增益 $A_v$

保持放大器的静态工作点和输入信号的情况下，通过 AD 采样模块获得  $U_o$ ，则

$$A_v = U_o / U_i$$

## (4) 测量幅频特性曲线

通过测量不同频率信号相应的电压放大倍数  $A_V$ ，通过描点法测出多组数据即可作出相应幅频特性曲线。

注意：①在改变放大器输入信号频率时，要保持输入信号的幅度不变，且输出波形不能失真；②测量时要注意取点要恰当，在低频段和高频段要多测几点，在中频可以少测。（5）故障分析

表 2.1 故障分析表

参数变化	三极管状态	判断说明
$R_1$ 断路	截止	$U_o$ 的直流电压为 12V 左右，且逐渐增大 DDS 模块输出的 $1kHz$ 信号的幅度大于三极管 $V_{th}$ 以后，会有脉动信号的产生
$R_1$ 短路	饱和	$U_o$ 的直流电位等于 $12 - 0.7 = 11.3V$ (继电器 4 接通 $1k\Omega$ 的负载时)
$R_2$ 短路	近饱和	$V_{ce} = 12V$ ；所以 $U_o$ 的直流电位等于 $R_3$ 和 $R_4$ 的分压，所以约等于直流的 $U_o = 4V + 0.3V = 4.3V$ 左右
$R_2$ 断路	截止	$U_o = 12V$ ；此时通入交流 $1kHz$ 大于 $1V_{pp}$ 的信号也会输出交流信号为 0；此时，让继电器 1-3 在电路测试仪的输出端并联接入纯阻性负载 $10k\Omega$ ，如果 $U_i$ 的大小仍然为 0，则表明 $R_2$ 短路
$R_3$ 断路	饱和	$U_o$ 的直流电位等于 0V
$R_3$ 短路	放大	$U_o$ 的直流电位等于 12V，此时通入交流 $1kHz$ 大于 $1V_{pp}$ 的信号时输出交流信号为 0；此时，让继电器 1-3 在电路测试仪的输出端并联接入纯阻性负载 $10k\Omega$ ， $U_i$ 的大小不为 0，且有一定幅值，则表明正常 R2 正常。接着，让继电器 2-3 在电路测试仪的输入端并联接入纯阻性负载 $2k\Omega$ ，如果得到的 $U_o$ 的直流电位仍为 12V，说明 $R_3$ 短路

$R_4$ 断路	截止	$U_o$ 的直流电位等于 12V，此时通入交流 $1kHz$ 大于 $1V_{pp}$ 的信号时输出的交流信号为 0；此时，让继电器 1-3 在电路测试仪的输出端并联接入纯阻性负载 $10k\Omega$ ， $U_i$ 的大小不为 0，且有一定幅值，则表明正常 $R_2$ 正常。接着，让继电器 2-3 在电路测试仪的输入并联接入纯阻性负载 $2k\Omega$ ，得到的 $U_o$ 的直流电位为 6V，说明 $R_4$ 开路
$R_4$ 短路	饱和	$U_o = 0.3V$
$C_1$ 断路	放大	没有交流信号 $U_o$ 输出
$C_2$ 断路	放大	交流信号 $U_o$ 输出幅度降低明显
$C_3$ 断路	放大	放大器上限频率 $f_h$ 会明显增大
$C_1$ 增大	放大	单管放大电路的下限频率下降，但不是差别不太大
$C_2$ 增大	放大	单管放大电路的下限频率下降，且下降比较明显
$C_3$ 增大	放大	上限频率明显变化（高频交流信号会被交流短路了，上限频率会下降）

### 3. 误差分析

#### 3.1. 放大器静态误差

（1） $U_b$  实际上并不等于  $R_1$  与  $R_2$  支路的分压，只有流过  $R_1$  和  $R_2$  的电流  $I_{R_1} \gg I_b$  时才能近似处理。

（2）同上， $I_e$  也是近似等于  $I_c$ ，另外，由于制作工艺和材料的差别，三极管 9013 的开启电压  $V_{TH}$  不一定为 0.7V。

#### 3.2. 放大器动态误差

(1) 交变信号对于耦合电容可以近似为短路，实际上耦合电容依旧会有容抗，因此耦合后信号存在衰减和相位差；另外极间电容、旁路电容等容性元件对交流电也会有类似影响。

(2) 交流电对于内阻很小的直流稳压源才可视为短路，实际上电源内部存在大阻抗或者容性元件，会产生较大误差。

### 3.3. 测试仪的误差

(1) 由于元件精度的存在，会存在不可避免的误差。

(2) 射极跟随器的增益不可能为 1，尽量选择  $r_{be}$  小的三极管，使跟随器增益逼近 1，减小衰减。

(3) 由于 AD 采样精度和单片机内部运算的精度限制，会有不可抗因素。

(4) 在测量方法的系统设计上，均采用了理想化的计算分析，实际测量时候可能会与理想值有较大偏差，可在不断调试中调整测量物理量的基准。

## 三、 电路与程序设计

### 1. 测试电路

测试电路如图 3.1 所示。

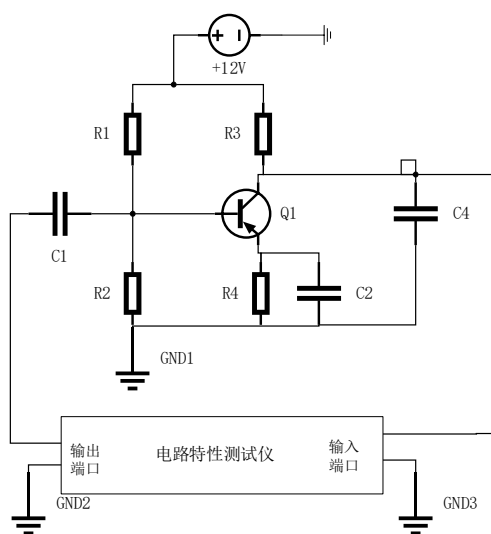
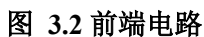


图 3.1 测试电路



前端调理电路将 DDS 信号先进行衰减再通过电压跟随减小对后续电路的影响；通过 S1 控制是否接入输入测试电阻；再经过运放放大输入信号到合适的幅值给 ADC 测量

前端电路如图 3.2 所示。



输出信号通过 S2 控制是否接入负载；输出信号经电压跟随减小影响，通过 S3 控制是否通过电阻分压测量输出直流电压；输出信号通过电容隔直再经过运放进行加法运算使信号附加直流偏置，通过 S4 控制是否测量输出正弦波幅值。

第8页

## 4. 软件程序设计

### 1. 程序功能描述

根据题目要求软件部分主要实现对 DDS 和继电器控制、AD 采集、串口屏的显示与交互。

(1) DDS：产生一定频率的正弦波信号并且控制输出支路。

(2) AD 采集：对放大器的相关参数采样至单片机 运算。

(4) 串口屏与 ESP8266：显示电路特性参数。

### 2. 程序流程图

程序设计流程图如图 4 所示。

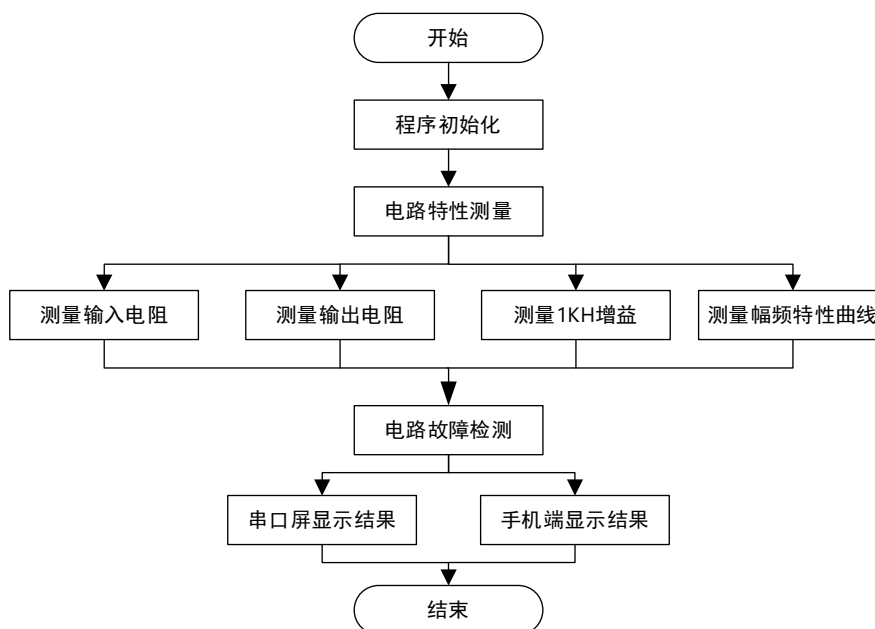


图 3.4 软件设计流程图

## 四、 测试方案与测试结果

### 1. 测试环境

示波器：	Tektronix	MDO2002B 型数字示波器；
信号发生器：	RIGOL	DG4162 型 160M 任意波形发生器；
电 源：	ZhongCe	DF1743003C 型稳压源。

### 2. 测试方案

## 2.1 基础要求测试方案

### 2.1.1 输入电阻测量

使用欧姆定律对输入电阻进行测量，在输入口旁串联一个 6.8k 的电阻，使用继电器对其进行短路与否的控制，继电器关闭时将其短路，测得 US，打开时测得 UI，对输入口旁接放大 100 倍的电路并读入 ADC，通过峰峰值的比例计算输入电阻。

输入电阻计算公式： $INResistor=6.8K *UI/(US-UI)$ ;

### 2.1.2 输出电阻测量

用继电器控制信号通过 1.5K 电阻接地，使用电阻分压的原理，继电器打开时测量 US，关闭时测量 UI，使用公式计算输出电阻，

输出电阻测量： $OUResistor=1.5K *(US-UI)/UI$ ;

### 2.1.3 1KHz 信号增益测量

将 DDS 信号频率调为 1KHz，保持第四个继电器为关闭状态，测量输出的峰峰值和输入的峰峰值，二者相除，计算出增益。

### 2.1.3 信号幅频曲线测量

调节 DDS 输出频率及 ADC 扫描频率，计算得到幅频关系。

## 2.2 提高功能测试方案

## 3. 测试结果与数据

### 3.1 基础要求测试

表 3.1 输入输出电阻及 1KHz 增益测试表

测试次数	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次
1K 增益(dB)	37.71	37.65	37.21	37.92	38.51	37.21
输入电阻(KΩ)	5.162	5.356	5.945	6.395	4.793	5.812
输出电阻(KΩ)	743	874	734	793	759	772

表 3.2 幅频特性测试表

输入频率(Hz)	1K	10K	50K	60K	70K	80K	100K
幅频特性（倍数）	76.1	77.7	79.2	79.6	78.5	77.9	70.6

## 五、 参考文献

- [1]. 罗杰,谢自美.电子线路-设计·实验·测试(第五版),2015,电子工业出版社.
- [2]. 康华光.电子技术基础(模拟部分)(第六版).2013,高等教育出版社.
- [3]. [美]Bruce Carter.运算放大器权威指南(第四版)2014,人民邮电出版社.
- [4]. 全国大学生电子设计竞赛组委会.第十届全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编,北京理工大学出版社.