

放大器非线性失真研究装置设计报告

摘要：设计并制作一个放大器非线性失真研究装置。用外接信号源输入固定正弦波信号，用晶体管、阻容元件、模拟开关等设计并实现受控晶体管放大器，输出无明显失真、顶部失真、底部失真、双向失真、交越失真五种波形。以

STM32F407VE单片机作为测量控制系统核心，通过控制模拟开关的通断输出相应的波形，输出信号波形经处理后接至单片机AD口进行采样，根据FFT算法得出五种波形的总谐波失真。以键盘和触摸屏实现人机交互，并对波形和失真度进行显示。同时预留端口方便进行测试。

关键词：晶体管放大、总谐波失真、STM32单片机

1. 方案论证

1.1 总体方案选择

1.1.1 系统组成框图

放大器非线性失真研究装置的系统组成框图如下图1.1所示。

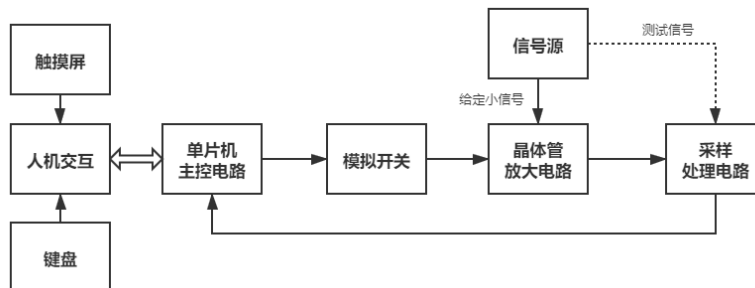


图1.1 放大器非线性失真研究装置系统组成框图

1.1.2 系统工作原理

信号源给定小信号，通过晶体管电路进行放大，由单片机主控电路控制模拟开关切换，从而输出无明显失真、顶部失真、底部失真、双向失真、交越失真五种波形。输出波形经处理后被单片机AD采集，通过FFT算法得出总谐波失真。以旋钮编码器、键盘和触摸屏实现人机交互，并对波形和失真度进行显示。

1.2 关键电路选择

1.2.1 主控电路选择

(1) 方案一：使用51单片机

51单片机价格便宜、编程简单，但运行速度不高，外设引脚很少。

(2) 方案二：使用STM32单片机

STM32系列单片机功能强大、种类齐全，结合了高性能、实时、低功耗、低电压等特性，同时保持了高集成度和易于开发的优势。综合考虑性价比、响应快速性、可拓展性，我们选择方案二STM32系列微控制器(如STM32F407VE)。

1.2.2 电压采样电路选择

(1) 方案一：电阻分压

由于输出电压信号的幅值较大, 不满足单片机AD引脚的输入电压范围, 因此必须对其进行分压。为避免负载过小影响晶体管放大电路的输出, 必须选用大负载, 但这将和ADC的输入电阻相当, 使输入电压产生偏差。

(2) 方案二: 电阻分压+运放跟随

在电阻分压后加入运放跟随器, 可增加前一级的输出电阻和后一级的输入电阻, 从而保证电压采样的准确性。因此我们选择方案二电阻分压+运放跟随。

1.2.3 模拟开关选择

(1) 方案一: 使用继电器

继电器控制逻辑简单, 导通电阻小, 但体积和功耗过大, 切换速度慢。

(2) 方案二: 使用CD4052

CD4052是双4选1多路模拟开关, 切换速度快, 且可同时实现两路开关的通道切换, 减少了控制引脚数量。虽然其导通电阻较大, 但仍远小于晶体管放大电路中的电阻, 不会对电路产生很大影响。因此我们选择方案二CD4052。

2. 理论分析

2.1 无失真放大

考虑将峰峰值为20mV的正弦波微弱信号放大到2V以上, 放大倍数约为100倍, 使用普通的单管共射放大电路即可实现, 其电路图如图2.1所示。将电路分为直流通路和交流通路, 用图解法进行分析, 波形分析图如图2.2所示。

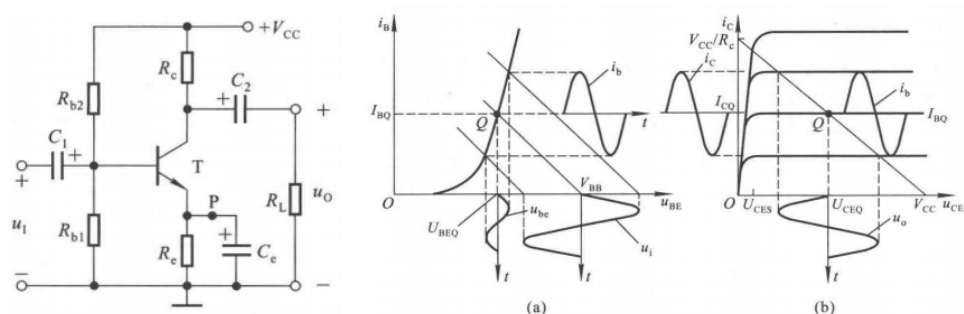


图2.1 单管共射放大电路图

图2.2 无失真放大电路输入输出波形分析

当静态工作点合适且输入信号幅值较小时, 三极管就工作在线性放大区, 就可以对输入的微弱信号进行无失真地放大。

2.2 顶部失真

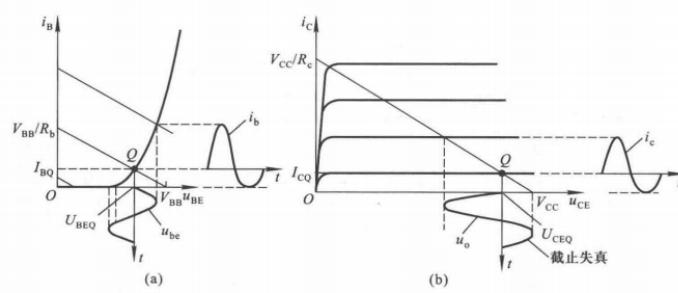


图2.3 顶部截止失真放大电路输入输出波形分析

当静态工作点过低时，在输入信号负半周靠近峰值的某段时间内，晶体管be间电压小于开启电压，晶体管截止， i_b 产生底部失真，因此 u_c 产生顶部失真。因此调大 R_{b2} 电阻就可以输出顶部截止失真波形。波形分析图如图2.3所示。

2.3 底部失真

当静态工作点过高时，由于输入信号正半周靠近峰值的某段时间内晶体管进入饱和区，导致 i_c 产生顶部失真，因此 u_c 产生底部失真。因此调小 R_{b2} 电阻就可以输出底部饱和失真波形。波形分析图如图2.4所示。

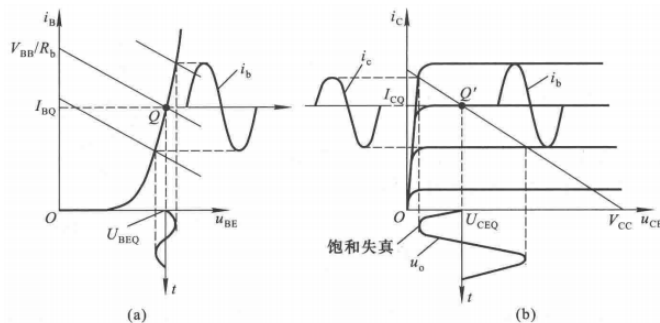


图2.4 底部饱和失真放大电路输入输出波形分析

2.4 双向失真

当静态工作点处于中点附近，但放大倍数过大时，这时同时出现饱和失真和截止失真， u_c 发生双向失真。放大倍数和 R_c 阻值成正比，因此在无失真放大电路的基础上增大 R_c 的阻值，就可以输出双向失真波形。

2.5 交越失真

将无失真的放大波形输入到乙类互补对称共集电路中，电路图如图2.5所示。由于静态工作点位于坐标原点，且实际工作状态下不能忽略各晶体管发射结的

开启电压, 因此当输入信号较小时, T1T2处于截止状态, 输出信号为零。所以在输入信号正负半周交替过零区附近, 输出信号将产生因晶体管存在开启电压而引起的非线性失真, 即可输出交越失真波形。交越失真波形分析如图2.6所示。

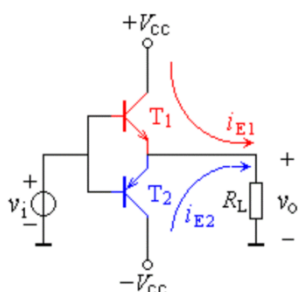


图2.5 乙类互补对称共集电路图

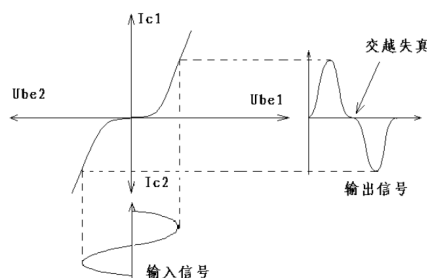


图2.6 交越失真波形分析

3. 单元电路设计

3.1 无失真放大电路和底部失真电路

当 R_e 与 R_{b1} 、 R_{b2} 为相同数量级的电阻值, 可以认为 $I_{BQ} \ll I_{b2}$, 则有

$$V_a = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} \quad A_v = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

。接入电容 C_e 时电压放大倍数为

晶体管放大电路采用12V电源供电。根据静态工作点位置和放大倍数, 代入公式计算可得, $R_{b1}=68K$, $R_{b2}=15K$, $R_c=10K$, $R_e=3.3K$, 隔直电容均取 $4.7\mu F$, 无失真放大电路图如下图3.1所示。调小 R_{b1} 至 $41K$, 即可进入饱和区, 产生底部失真, 底部失真电路图如图3.2所示。

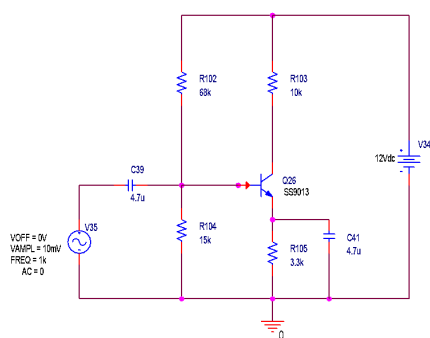


图3.1 无失真放大电路图

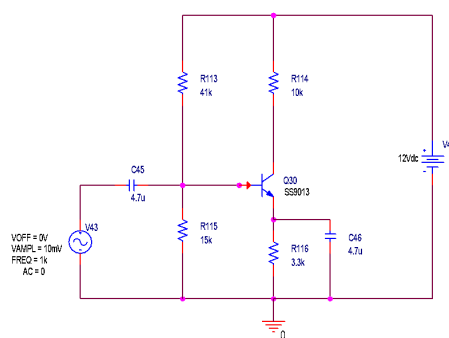


图3.2 底部失真电路图

3.2 交越失真电路

在无失真放大电路的基础上, 在后面接入一级乙类互补对称共集电路。基极输入电压经电容隔直后, 由两个 $10M$ 电阻加入 $6V$ 直流偏置, 同时在共射极处经

510Ω电阻接到6V电源上,即可产生交越失真。交越失真电路图如图3.3所示。

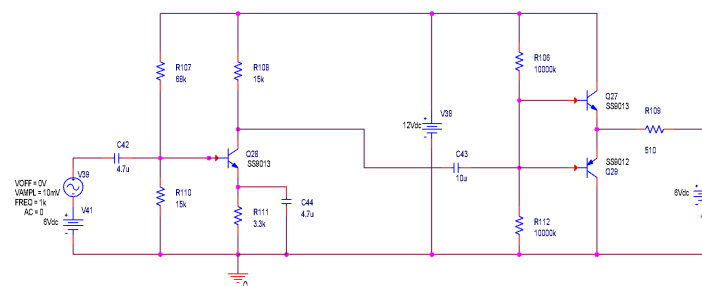


图3.3 交越失真电路图

3.3 顶部失真电路和双向失真电路

由于单级放大电路难以实现顶部失真,所以采用两级放大再调偏置的方法来实现。调节 R_{b1} 阻值使得静态工作点靠近截止区,即可输出顶部失真波形。电路图如图3.4所示。在顶部失真的基础上,放大增益,将第一级电路的 R_c 由1K调节为1.05K,即可同时进入截止区和饱和区,出现双向失真。

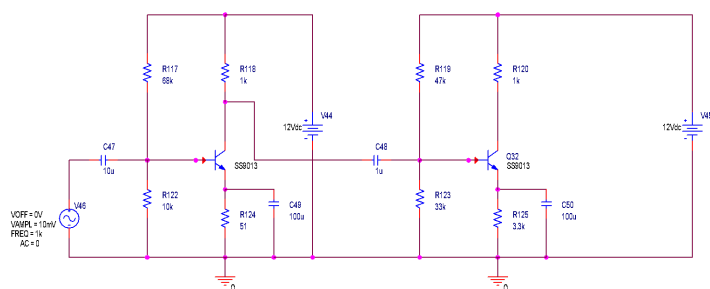
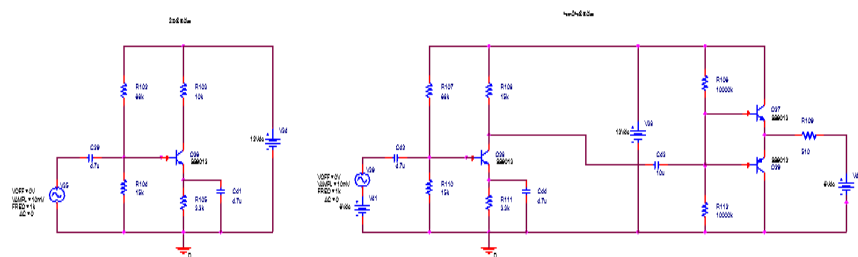


图3.4 顶部失真电路

3.4 总体电路图

总体电路图如下图3.5所示。无失真电路、底部失真电路和交越失真电路大部分元件可以共用,所以只需要用模拟开关切换相应电阻即可输出对应波形。同理,顶部失真和双向失真也只需模拟开关切换一个电阻值即可。



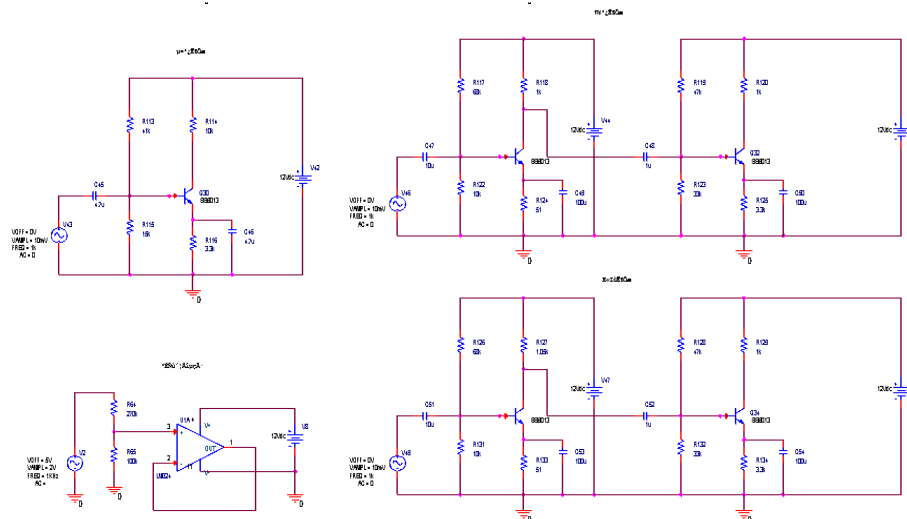


图3.5 系统总体电路图

4. 软件设计

4.1 主程序

主程序的初始化包括串口屏初始化、各控制端口的电平初始化等。之后的主循环中, 首先接收上位机指令, 包括键盘、旋钮以及串口屏。之后开启AD转换, 并对采集到的数据进行FFT处理。每200ms进行一次FFT运算, 每400ms刷新一次屏幕。同时系统还可以对输入的1kHz各种波形进行滤波, 滤得并输出对应的正弦波, 用户通过上位机进行该功能的选择控制。主程序流程图如图4.1所示。

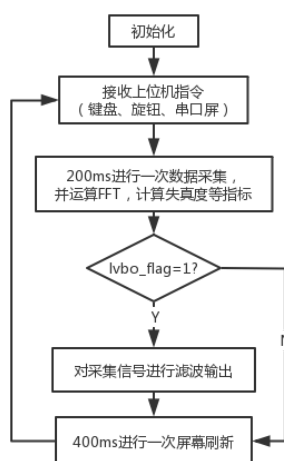


图4.1 主程序流程图

4.2 关键子程序

4.2.1 子程序

失真度测量子程序：

以32kHz频率采样4096点进行FFT运算，对于1kHz的输入正好可以采集整数个周期，从而减小频谱分散的程度，提升失真度的测量精度。遍历所有频点找到最大幅值从而确定基波频率，倍乘得到谐波频率的大概位置，并取其上下五点的最大幅值处作为谐波频率点，失真度测量子程序流程图如图4.2(a)所示。

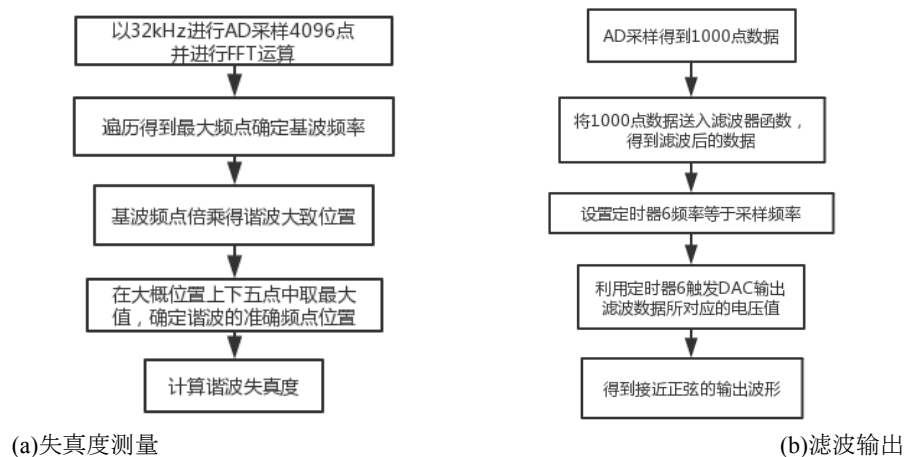


图4.2 关键子程序

4.2.2 子程序

滤波输出子程序：

利用MATLAB的fdatool工具设计一个以1kHz为截止频率的28阶的低通滤波器，并利用STM32的DSP库函数，实现了从失真输入波形数据中滤出1kHz正弦波数据的功能。通过定时器触发DAC输出，即可输出对应的正弦波形，滤波输出子程序流程图如图4.2(b)所示。

5. 系统测试

5.1 测试条件

本次测试中涉及仪器设备如下表5.1所示。

表5.1 测试仪器与设备

仪器名称	型号	主要指标	数量
直流稳压电源	GPD-4303S	3/4路独立输出	1
示波器	GDS-1102A-U	双通道150Mhz	1
信号源	AFG-2225	25MHz	1

5.2 测试方法与步骤

- ① 将K1K2切到1端子，输入频率1kHz、峰峰值20mV的正弦波，通过触摸屏依次选择输出无明显失真、顶部失真、底部失真、双向失真、交越失真五种波形，将晶体管放大电路输出端口接入示波器，观察是否产生了相应波形并对失真度进行了显示，测量各波形的峰峰值，判断其是否满足不小于2V的要求。
- ② 将K1K2切到2端子，用信号源分别输入标准正弦波、三角波和方波，记录测试仪测得的总谐波失真，和理论值比较。

5.3 测试数据

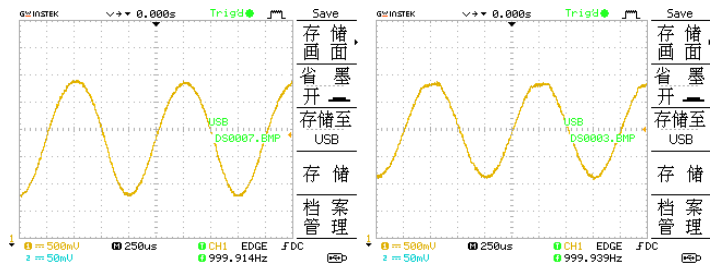


图5.1 无明显失真波形 图5.2 顶部失真波形

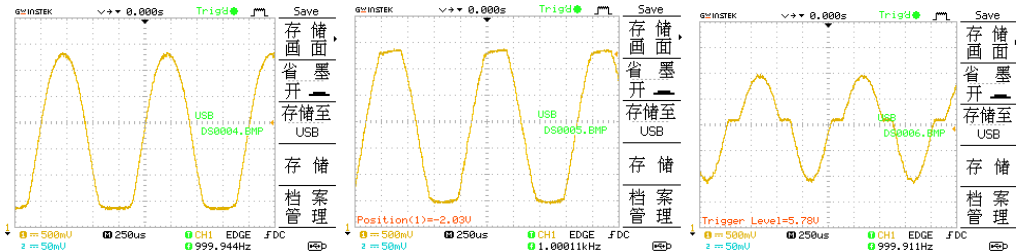


图5.3 底部失真波形 图5.4 双向失真波形 图5.5 交越失真波形

表5.2 晶体管放大电路输出波形测试

波形类型	无明显失真	顶部失真	底部失真	双向失真	交越失真
能否产生对应波形	能	能	能	能	能
峰峰值/V	2.16	3.11	2.72	3.00	2.16V
是否满足峰峰值要求	是	是	是	是	是
失真度	5.15%	6.16%	24.44%	10.44%	23.15%

表5.3 总谐波失真测试

波形类型	正弦波	三角波	方波
理论失真度	0.00%	11.81%	38.87%
实测失真度	0.11%	11.82%	39.66%

5.4 结果分析

经测试,该研究装置符合设计要求,能够产生无明显失真、顶部失真、底部失真、双向失真、交越失真五种波形,且峰峰值均大于2V,并对总谐波失真度进行测量显示。实测失真度和理论值基本相等,测量准确。

6. 结论

本研究装置实现了全部设计要求,能够通过给定的正弦波小信号,产生无明显失真、顶部失真、底部失真、双向失真、交越失真五种波形,且峰峰值不低于2V。同时可测量并显示五种输出电压的总谐波失真,借助标准波形的失真度理论值,和实测值进行比较,可知该研究装置达到了较高的测量精度。除此之外,该系统加入了很多创新功能,如波形显示及调节、峰峰值测量、失真波形滤波输出、二维码显示、使用说明视频等。总而言之,该研究装置是一个功能完善、测量准确、响应迅速的系统,具有极强的实用性、稳定性和创新性。

本次设计还可以对于人机交互界面的友好性、焊接工艺等进行进一步优化。

7. 参考文献

- [1] 童诗白, 华成英: 模拟电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [2] 阮秉涛: 电子设计实践指南[M]. 1版. 北京: 高等教育出版社, 2013.