

1. 放大电路的失真研究

1.1 电路背景

电路输出波形失真引起信号不能正确的传输,解决失真问题是电路设计工程师面对的一个重要问题。输出波形失真可发生在基本放大、功率放大和负反馈放大等电路中,输出波形失真有截止失真、饱和失真、双向失真、交越失真,以及输出产生的谐波失真和不对称失真等。

1.2 实验目的

掌握失真放大电路的设计和解决电路的失真问题可以提高学生系统地构思问题和解决问题的能力。通过失真放大电路实验可以系统地归纳模拟电子技术中失真现象和掌握消除各种失真技术,培养学生通过现象分析电路结构特点,进而改善电路的能力。

1.3 技术指标及设计要求

1.3.1 基本要求

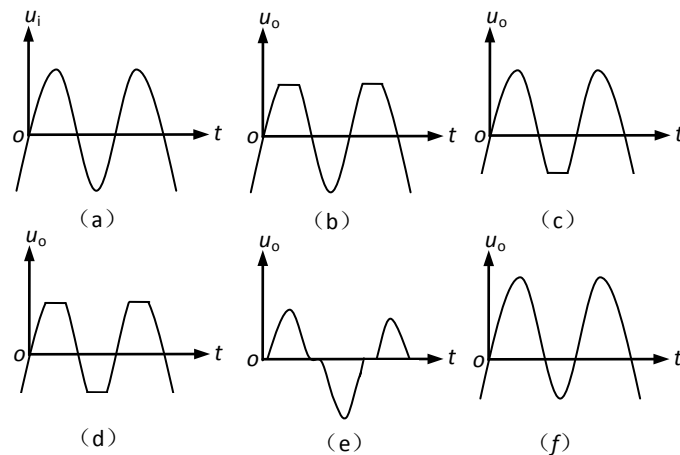


图 1.1

(1) 输入标准正弦波,如图 1.1 (a),频率 2kHz,幅度 50mV,输出正弦波频率 2kHz,幅度 1V。

(2) 图 1.1 (b) 是电路输出波形,若达到要求,如何设计电路,并修改。

(3) 图 1.1 (c) 是电路输出波形,若达到要求,如何设计电路,并修改。

(4) 图 1.1 (d) 是电路输出波形,若达到要求,如何设计电路,并修改。

(5) 输入标准正弦波,频率 2kHz,幅度 5V,设计电路使之输出图 1.1 (e) 输出波形,并改进。

1.3.2 发挥部分

(1) 图 1.1 (f) 是电路输出失真波形,设计电路并改进。

(2) 任意选择运算放大器, 测出增益带宽积 f_T 。并重新完成前面基本要求和发挥部分的工作。

(3) 将运算放大器连接成任意负反馈放大器, 要求负载 $2k\Omega$, 放大器的放大倍数为 100, 将振荡器频率提高至 $f_T/100$ 的 95%, 观察输出波形是否失真, 若将振荡器频率提高至 $f_T/100$ 的 110%, 观察输出波形是否失真。

(4) 放大器的放大倍数保持 100, 将振荡器频率提高至 $f_T/100$ 的 95%或更高一点, 保持不失真放大, 将纯阻抗负载 $2k\Omega$ 替换为容抗负载 $20\mu F$, 观察失真的输出波形。

(5) 改善发挥部分(4)的输出波形不失真, 设计并完成电路。

(6) 其他失真研究

1.3.3 失真研究

(1) 通过图 1.1 (b)、(c) 和 (d) 的失真设计, 讨论产生失真的机理, 阐述解决问题的办法。

(2) 通过图 1.1 (e) 的失真设计, 讨论产生失真的机理, 阐述解决问题的办法。

(3) 通过图 1.1 (f) 的失真设计, 讨论产生失真的机理, 阐述解决问题的办法。

(4) 讨论 npn 型三极管组成的共射放大电路和 pnp 型三极管组成的共射放大电路在截止和饱和失真方面的不同。

(5) 讨论共基放大电路、共集放大电路与共射放大电路在截止和饱和失真方面的不同。

(6) 负反馈可解决波形失真, 解决的是哪类失真?

(7) 双电源供电的功率放大器改成单电源供电会出现哪种失真? 如何使单电源供电的功率放大器不失真?

(8) 由单电源供电的运算放大器组成电路会出现哪种失真?

(9) 测量增益带宽积 f_T 有哪些方法?

(10) 提高频率后若失真, 属于哪类失真?

(11) 电阻负载改成大容性负载会出现什么失真?

(12) 有哪些方法可以克服电阻负载改成大容性负载出现的失真?

(13) 用场效应管组成的放大电路或运算放大器同样会产生所研究的失真吗?

(14) 当温度升高, 三极管组成的电路刚刚产生静态工作点漂移, 使电路产生某种失真, 此时由场效应管组成的电路也同样失真吗? 为什么?

(15) 归纳失真现象, 并阐述解决失真的技术。

1.4 实验特点

(1) 给出不同输出波形失真现象, 逆向设计放大电路并改进, 体现系统性。

(2) 归纳模拟电子技术放大电路失真问题和解决方法, 展开思路, 体现开放性。

加深知识点和技术:

(1) 射极偏置电路、乙类、甲乙类功率放大电路和负反馈电路。

(2) 截止失真、饱和失真、双向失真、交越失真等。

(3) 克服各种失真的技术。

1.5 实验原理

1.5.1 截止、饱和和双向失真

实验采用射极偏置电路实现截止、饱和和双向失真，仿真电路如图 1.2 所示。设输入信号 u_i 为正弦波，并且工作点选择在输入特性曲线的直线部分，使其输入电流 i_b 也为正弦波。

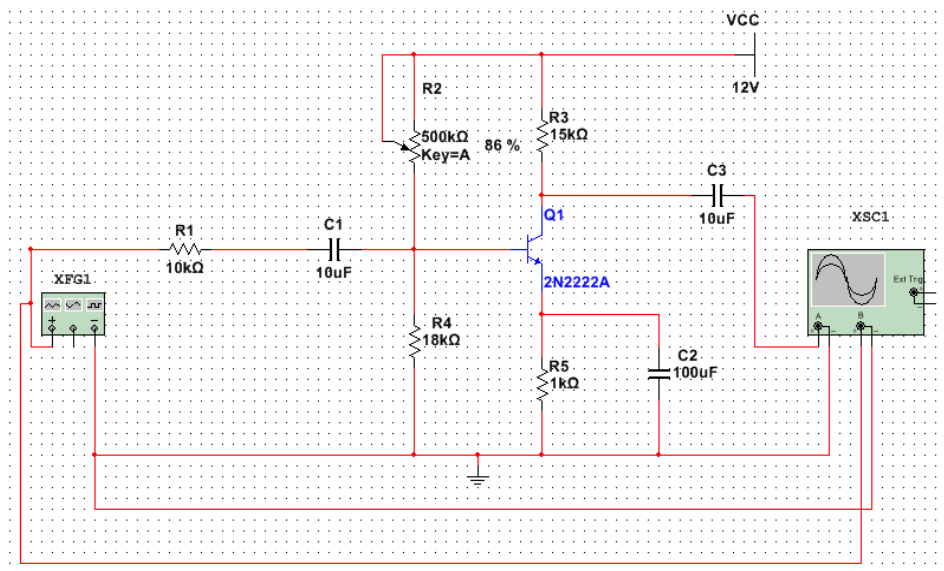


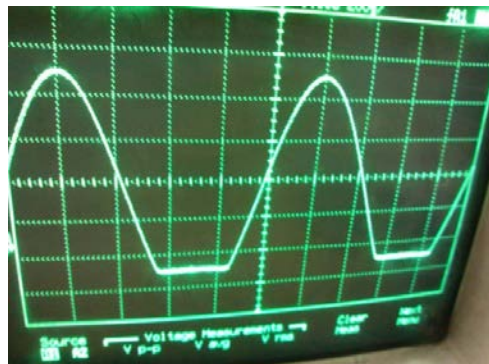
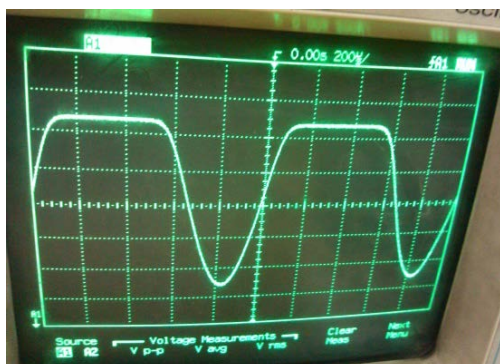
图 1.2 共射放大电路

如果由于电路元件参数选择不当，使 I_{BQ} 比较高，静态工作点电流 I_{CQ} 比较高。对于输入电流的负半周，基极总电流 i_b 和集电极总电流 i_c 都减小，使集电极电压 u_c 升高，形成输出电压的正半周，这个输出电压仍然是正弦波，没有失真。但是在输入电流的正半周中，当 I_{BQ} 增加时， I_{CQ} 随之增大，由于输出电压反相，这样形成的输出电压的负半周的底部被削，不再是正弦波，产生了失真。这种由于放大器件工作到特性曲线的饱和区产生的失真，称为饱和失真。

否则如果静态工作点电流 I_{CQ} 选择的比较低，在输入电流正半周时，输出电压无失真。但是，在输入电流的负半周，晶体管将工作到截止区，从而使输出电压的正半周的顶部被削，产生了失真。这种失真由于放大器工作到特性曲线的截止区产生的，称为截止失真。在图 1.2 所示电路中，截止与饱和失真的调节通过电位器 R_2 实现， R_2 增加，则静态工作点下移，输出波形出现截止失真， R_2 减小，则静态工作点上移，输出波形出现饱和失真。

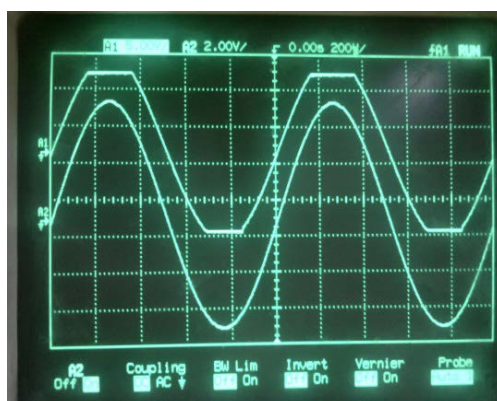
出现双向失真由于信号同时进入了饱和区和截止区，最简单的调节方法是增加输入信号的幅度，本实验就是采取增加输入实现双向失真的。另外，通过调节集电极电阻 R_3 和直流电源 U_{CC} 也可以实现双向失真。

调节电路，经过测试可以得到清晰的截止、饱和和双向失真波形，如图 1.3 所示。



(a) 截止失真

(b) 饱和失真

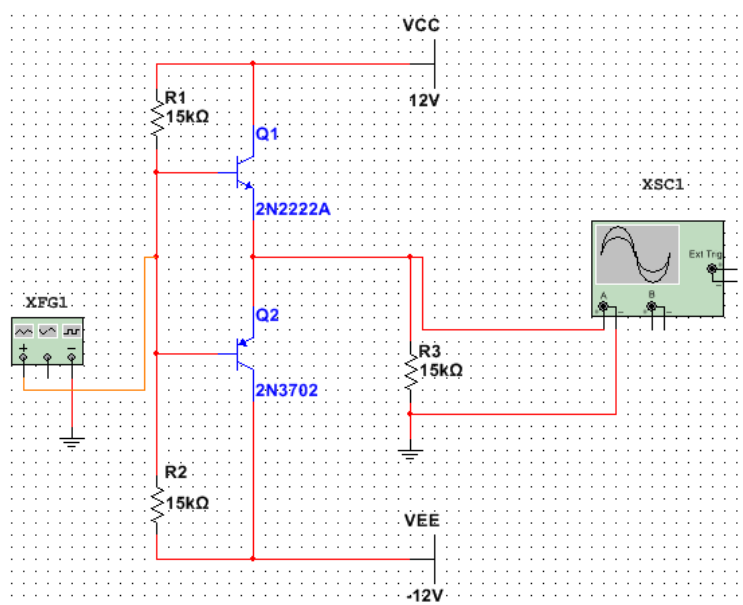


(c) 双向失真及正常正弦波

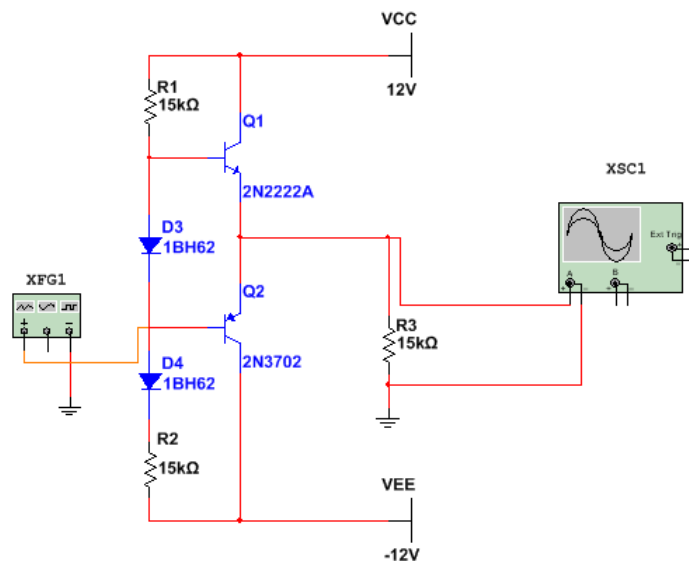
图 1.3 三种失真实验结果

1.5.2 交越失真

采用基本乙类功率放大电路实现交越失真，仿真电路图如图 1.4(a)所示。由于三极管 PN 结的压降，图 1.4(b)所示的互补对称功放电路并不能使输出波形很好地反映输入的变化。



(a) 基本乙类功率放大电路



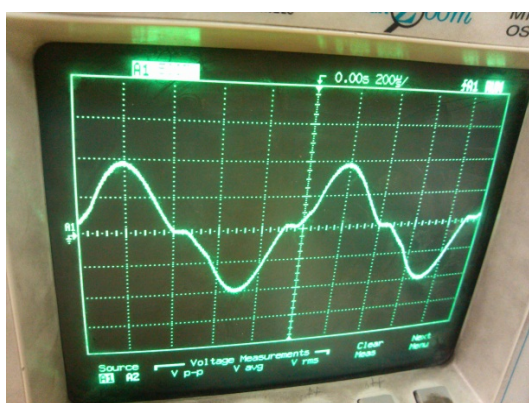
(b) 甲乙类双电源互补对称电路

图 1.4 乙类功率放大电路

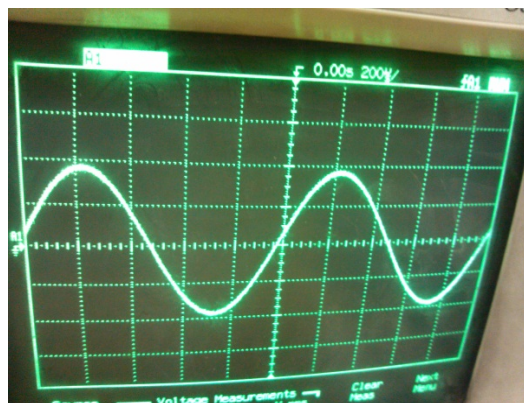
由于采用双电源供电，在没有输入信号时，两个三极管的基极电位为零，由于没有直流偏置，管子的基极电流 i_b 必须在 U_{BE} 大于某一数值（即门槛电压，NPN硅管约为 0.6V，PNP 锗管约为 0.2V）时才有显著变化。当 u_i 低于这个数值时， Q_1 和 Q_2 都截止， i_{c1} 和 i_{c2} 基本为零，负载 R_L 上无电流流过，出现一段死区，这就是交越失真产生的基本原理。

改善的电路采用甲乙类双电源互补对称电路，如图 1.5 (b) 所示。静态时，在二极管 D_3 、 D_4 上产生的压降为 Q_1 、 Q_2 提供了一个适当的偏压，使之处于微导通状态。由于电路对称，静态时 $i_{c1}=i_{c2}$ ， $i_L=0$ ， $u_o=0$ 。有信号时，由于电路工作在甲乙类，即使 u_i 很小也可以进行线性放大。

调节电路，经过测试可以得到清晰的交越失真及其改善波形，如图 1.5 所示。



(a) 交越失真



(b) 交越失真改善

图 1.5 交越失真实验结果

1.5.3 不对称失真

实验实现不对称失真的电路如图 1.6 所示，由差分放大和恒流源电路组成。由开关 A 控制失真电路和改善电路，开关打开时为不对称失真电路，开关闭合时接入负反馈，为不对称

失真改善电路。

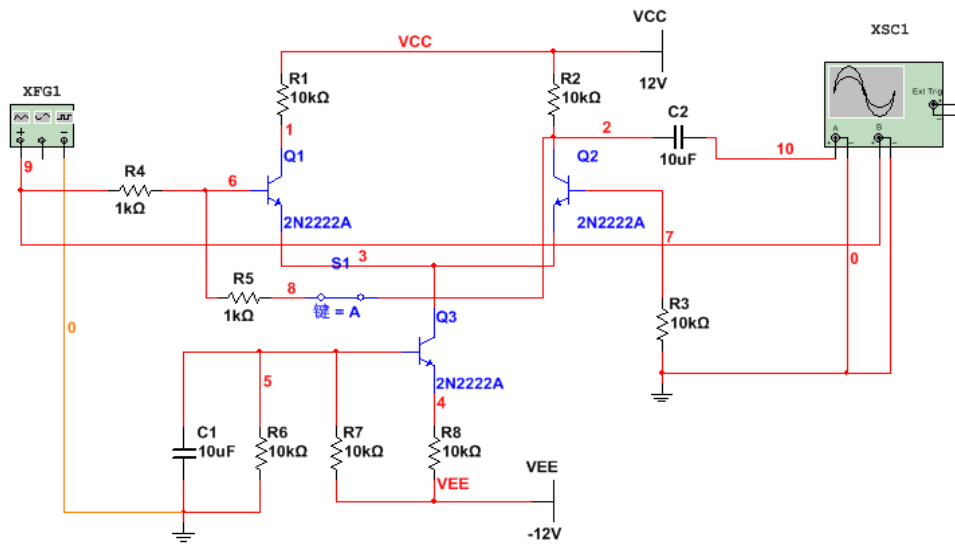
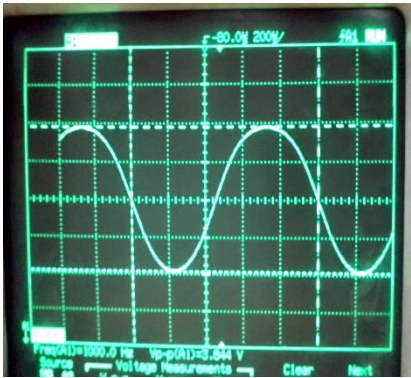


图 1.6 不对称失真电路

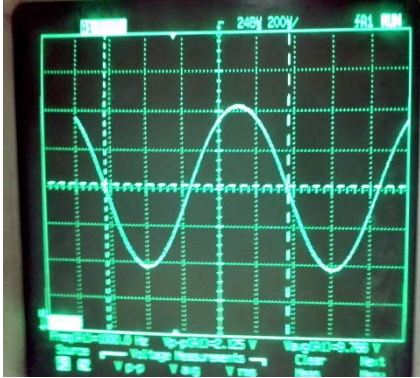
三极管输入电阻 r_{be} 在正弦信号电压瞬时变化过程中一直随着总电流变化, 电流越大, r_{be} 越小, 这段区域就是三极管的非线性区。当输入信号进入非线性区时, 在正弦信号电压负半波, 电流总量较小, r_{be} 较大, 结果使信号电流、基极电流交流分量、集电极电流交流分量的负半波都比较小, 反相后反映为负载电压正半波矮胖; 在正弦信号电压正半波, 电流总量较大, r_{be} 较小, 使信号电流、基极电流交流分量、集电极电流交流分量的正半波都比较大, 反相后反映为负载电压负半波瘦长。就是说, 输入信号电压虽然是正弦波形, 但由于三极管的非线性输入特性, 输出电压畸变为上半部矮胖下半部瘦长的非正弦波形, 这就是不对称失真。

改善不对称失真的方法就是引入负反馈。引入负反馈后, 也就是在这种失真的输出信号中取出一部分信号送回到输入端, 那么相应地反馈信号 u_f 也是正半波矮胖, 负半波瘦长。由于反馈信号 u_f 与原来的输入信号 u_i 是反相的, 因此反馈信号对原来的输入信号起削弱作用, 这样使得净输入信号 u_{id} 变成正半波瘦长而负半波矮胖, 再经过放大, 就可使两个半周的波形之间的差别比没有负反馈时要小, 从而改善了不对称失真的程度。

调节电路, 经过测试可以得到清晰的不对称失真及其改善波形, 如图 1.7 所示。



(a) 不对称失真



(b) 不对称失真改善

图 1.7 不对称失真实验结果

1.5.4 运算放大器增益带宽积测量及失真

本实验实现运算放大器增益带宽积测量以及失真研究的电路图如图 1.8 所示。设计电路共有 4 个开关，不同开关组合时能实现不同功能。

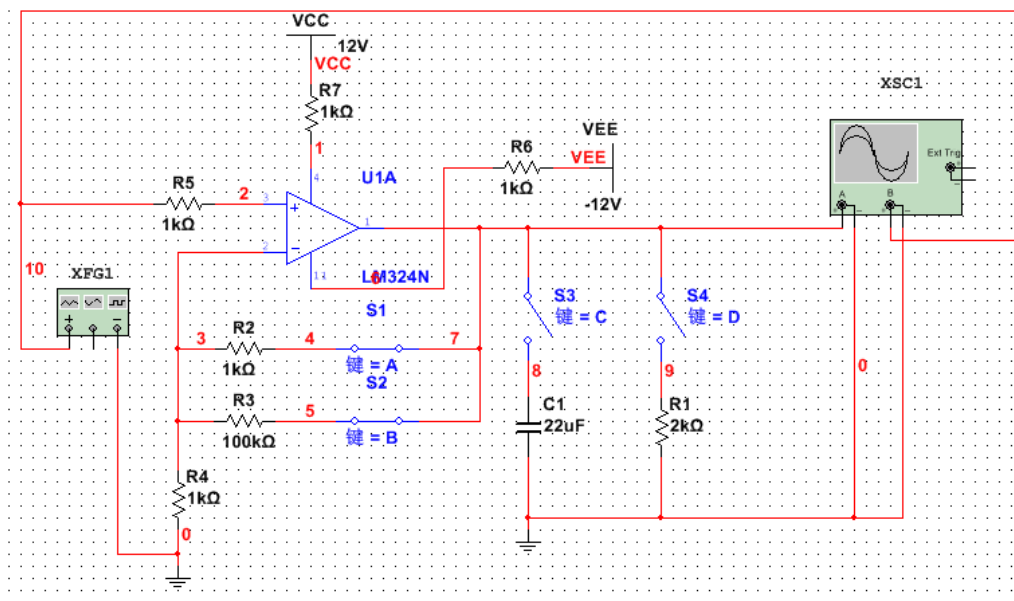


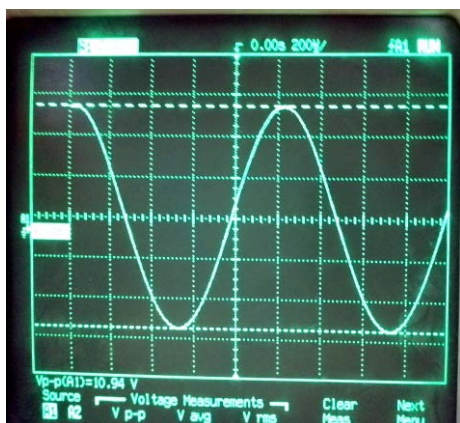
图 1.8 运算放大器电路

当开关 A 断开、开关 B 闭合时，图 1.8 是同相比比例放大电路。

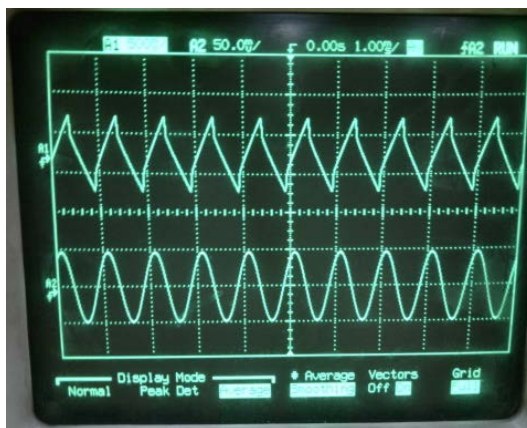
$$A_u = \frac{R_3}{R_4} = 100$$

运算放大器实现 100 倍放大功能。增益带宽积测量方法如下：先调出 100 倍不失真放大波形，调节信号源频率，观察示波器输出电压幅度示值，当增益下降到原来的 0.707 倍的时候，用此时的频率乘以增益 100 即可得到增益带宽积。当频率增高时，可以明显观察到正弦波幅度变小，这就是频率失真中的幅度失真。当开关 C 闭合时，运算放大器带容性负载，出现尖峰失真，再闭合开关 A 时，波形得到改善，原因是引入电压串联负反馈，负反馈程度增大，输出阻抗减小，提高了运算放大器带负载的能力。

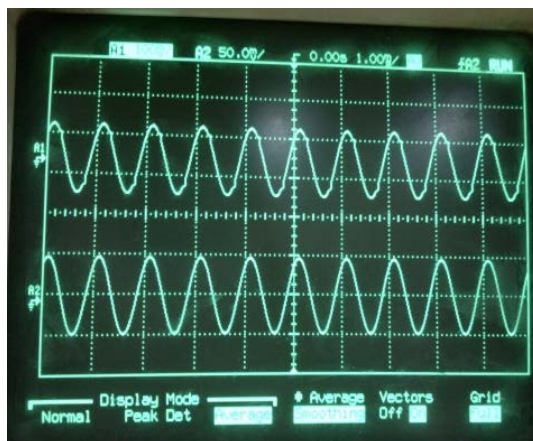
调节电路，经过测试可以得到清晰的运算放大器失真及其改善波形，如图 1.9 所示。



(a) 100 倍放大波形



(b) 容性负载尖峰失真



(c) 容性负载改善波形

图 1.9 容性负载实验结果

由图可以看出，容性负载改善波形并不是很完美，仍然有少许失真，这是由运算放大器本身结构造成的，运放不能带大容性负载。

1.6 方案比较

研究交越失真过程中，除了用二极管改善电路之外，还可以使用另一种基于负反馈方式的改善电路，电路图如图 1.10 所示。

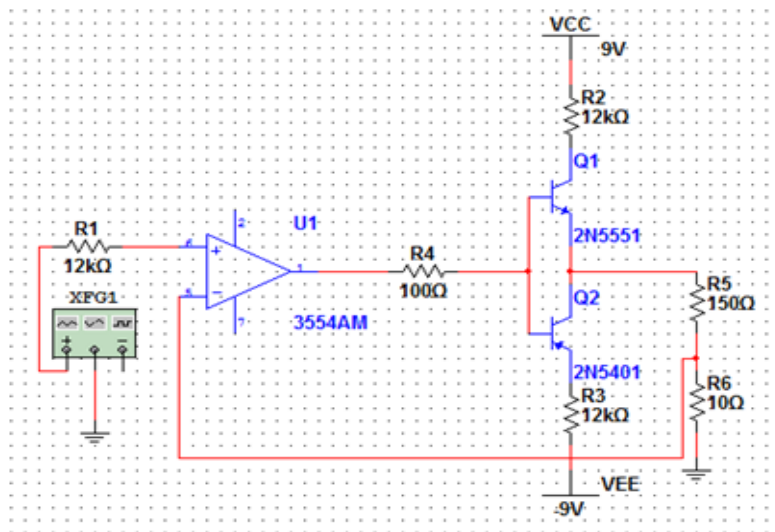
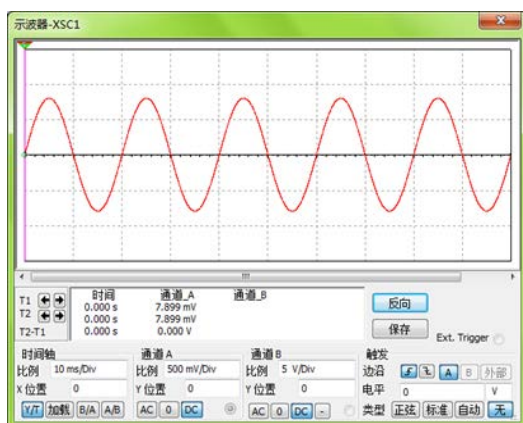
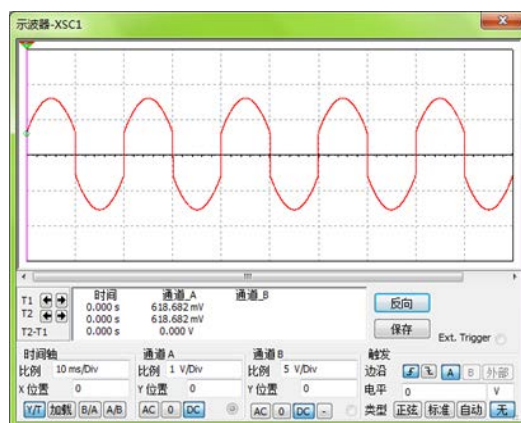


图 1.10 负反馈功率放大电路

如图 1.10 所示，当前级运算放大器的输出电压低于三极管 PN 结电压时，三极管不能导通，电路处于交越失真状态。负反馈信号线采样电压为零，由于运算放大器工作于差分放大，负反馈线上的反馈信号会使运算放大器自动调整放大系数，来增大输出电压，三极管立刻导通，保证输出与输入的线性关系。为了验证上述分析的正确性，使用 Multisim 软件仿真，分别用示波器测量负载波形和基极电压波形，仿真结果如图 1.11 所示。



(a) 负载波形图



(b) 三极管基极电压波形

图 1.11 仿真波形

由于负反馈的作用，三极管基极公共节点处的电压波形已经不再是正弦波，而是在绝对值等于 0.6V 处发生跃变，保证了基极结点处电压绝对值不会低于三极管 PN 结压降，从而保证三极管时刻处于导通状态，这也证明了上面负反馈原理分析的正确性。

但由于这种改善电路需要使用运算放大器，电路相对复杂且成本较高，而用二极管改善的电路更加简单方便，所以在实际焊接过程中选择使用二极管改善。

1.7 实验数据分析

1.7.1 截止饱和失真

截止饱和失真需要测定静态工作点，测定方法就是撤掉输入信号，用示波器分别测量三极管基极、集电极和发射极的电压，间接测出 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 。

调节电位器 R_2 ，出现正常正弦波，撤掉输入，测量静态工作点，结果如下：

$$U_B=815.0\text{mV}, U_C=8.699\text{V}, U_E=224.9\text{mV}$$

重新连入输入，调节 R_2 至截止失真，撤掉输入，测量结果如下：

$$U_B=612.4\text{mV}, U_C=10.233\text{V}, U_E=230.4\text{mV}$$

重新连入输入，调节 R_2 至饱和失真，撤掉输入，测量结果如下：

$$U_B=912.8\text{mV}, U_C=2.044\text{V}, U_E=344.3\text{mV}$$

由测量数据可以看出，当 R_2 增大时， U_B 变小，静态工作点下移，出现截止失真；当 R_2 减小时， U_B 变大，静态工作点上移，出现饱和失真。实验结果和理论分析正好对应。

(1) 交越失真

交越失真可以测量两个三极管静态工作时的基极电压，理论上改善前两个三极管的基极电压为零，改善后应大于 0.7V。测量时应撤掉输入，用示波器分别测量基极电压，测量结果如下：

改善前：

$$U_{B1}=U_{B2}=0.1\text{mV}$$

改善后：

$$U_{B1}=-764.3\text{mV}, U_{B2}=688.5\text{mV}$$

由实验数据可以看出,改善后二极管的加入抬高三极管的基极电位,使三极管处于微导通状态,从而消除交越失真。实验结果和理论分析也是一致的。

(2)运算放大器增益带宽积

首先调出不失真的 100 倍放大波形,如图 1.9(a)所示。用示波器分别测量输入和输出的幅度值,计算增益,测量结果为:

$$u_o=10.06\text{V}, u_i=103.5\text{mV}$$

计算增益为:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{10.06}{0.1035} = 97.2$$

调节频率,使输出幅度减小,此时出现频率失真,当幅度减小为原来的 0.707 倍时,振荡器所示频率就是上限截频。实验中,当频率 $f=12.3\text{kHz}$ 时,输出幅度下降为 $u_o=7.125\text{V}$ 。

由此可以计算运算放大器增益带宽积为:

$$\text{BW}_G=100\times 12.3\text{kHz}=1.23\text{MHz}$$

1.8 实践能力

(1) 系统归纳问题的能力。失真现象是模拟电子技术课程中的一类重要问题,通过实验,系统的归纳了分散在各个章节的各类失真现象,找出了失真之间的联系与区别。

(2) 设计电路与改善电路的能力。基于实验要求中设计相应的电路,通过探究找出失真出现的原因,并掌握消除失真的方法,提高了改善电路的能力。

(3) 逆向思维能力。在理论课上,失真现象直接呈现,所关注的是如何去改善它。而本实验的设计思想是需设计出失真电路,需要逆向思考,找出令电路失真的方法,更加深了对失真原理的理解。

学生的体会:

实验中能够产生一类失真的并不只有一种电路,若从不同角度思考问题,多种途径去解决问题,最后优中选优,找到解决问题的最佳方案。如改善电路的交越失真,从用二极管改善到用运算放大器改善,最终从电路的简洁性和经济性方面考虑,选择了二极管改善电路。辨证地看问题,付出了很多,收获也很多,这些收获是从书本上学不来的知识与经验,更重要的是方法和能力的提高。

参考文献:

- [1]侯建军.电子技术基础实验、综合设计实验与课程设计[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [2]吴援明,唐军.模拟电路分析与设计基础[M].北京:科学出版社,2006.
- [3]郭锁利,刘延飞等.基于 Multisim 的电子系统设计、仿真与综合应用[M].第 2 版.北京:人民邮电出版社,2012.
- [4]王林川.基于负反馈原理的功放电路交越失真解决方法研究[J].北京电子科技学院学报,2008,16(2).