

电子学实验

江苏师院物理系

一九八〇年九月

电子学实验须知

实验一、	单管放大器	3
实验二、	两级阻容耦合放大器	10
实验三、	射极输出器	16
实验四、	功率放大器	23
实验五、	LC调谐放大器	32
实验六、	差分放大器	36
实验七、	宽带放大器	43
实验八、	结型场效应管的静态特性	48
实验九、	RC相移振荡器	52
实验十、	调幅	58
实验十一、	检波	64
实验十二、	电子稳压器	67
实验十三、	用JT-1型晶体管特性测试仪测试晶体管特性参数	79
实验十四、	晶体管超外差式收音机主要参数测定	93
实验十五、	多谐振荡器和双稳态电路	97
实验十六、	计数器	107
实验十七、	电子管扩大机	115
附录		120—168
附录一、	高频讯号发生器(高频-1甲型)	120
附录二、	真空管毫伏表(GB-2型)	122
附录三、	ST16型示波器	126
附录四、	SZ-3失真度测量仪	139
附录五、	高频信号发生器(XFG-7型或FCC-6甲型)	143
附录六、	HFT-8型超高频晶体管毫伏表	149
附录七、	BT-3型频率特性测试仪	151

附录八、	BT-1 型低频频率特性测试仪	-----	154
附录九、	PB-2 型十进频率仪	-----	159
附录十、	PZ-5 型直流数字电压表	-----	163
附录十一、	SBE-20 双踪示波器	-----	166
附录十二、	晶体管超外差收音机线路及装配图	-----	168

电子学实验须知

本课程的实验目的，一方面是巩固和加深电子学的理论知识，另一方面是培养基本的实验技术和科学工作的态度。通过实验要求掌握常用仪器的使用方法和基本的实验操作技能，并写好实验报告。为此必须遵守下列几则：

一：实验前的准备

1. 实验前必须充分预习，明确所做实验的要求，基本原理及实验内容、步骤等。
2. 完成所要求的计算和图表
3. 熟悉实验线路，及所用仪器的性能、规格、使用方法。

二：实验的进行

1. 每次实验前要经教师检查（或抽查）同学的预习情况，回答检查性问题后方可进行实验。如不合要求，应重新预习。然后按实验桌上的清单核对仪器及实验器材。如有差错或不符，要及时报告教师。
2. 按实验要求接好线路，一般情况下，需经教师检查后方可接通电源。对仪器设备必须了解其性能及使用规则后才可使用，未了解各开关及旋钮作用时，不得乱动。由于违反操作规程或粗心大意而损坏国家财产者，要根据具体情况处理。（详见赔偿制度）
3. 实验中所测定和记录的各种数据，均要测定三次，然后求其平均值。
4. 实验完毕后，先将所测数据交教师审阅后，方可拆除线路。拆线路前首先必须关闭电源。整理好所用仪器、设备和接线，做好桌面和地面的清洁工作，将签名卡签好名字由指导教师检查签名后，方可离开实验室。
5. 必须遵守实验室各项纪律和规章制度，私人元件和器材不得带进实验室测定或调试。

三、实验报告要求：

1. 实验报告必须用规定的实验报告纸书写，一般情况，必须交出前一个实验报告，方可做下一个实验。

2. 实验报告内容应有下列各项：

- (1) 实验目的
- (2) 实验线路图（要用直尺和其他工具画，特别要注意交接点的圆点）。
- (3) 实验所用仪器及器材（需写明名称、规格、编号）。
- (4) 各实验内容结果的记录（必须要注明实验条件、数据要列表注明量程、单位）。
- (5) 波形的描绘：必须注明座标及时间的对应关系和波形的名称。
- (6) 曲线的制作：必须注明名称及实验条件，座标轴应注明单位，尤其是对数坐标要取正确，如一个图上同时要画几条曲线时，应分别描出坐标。每一条曲线应用一致的符号表示如 $\circ$, $\times$, $\triangle$ 等。曲线应尽量布满全图，不要过大或过小，并且要用曲线板画工整。
- (7) 实验结果的必要分析和问题的讨论。

实验一 单管放大器

一、实验目的

1. 了解静态工作点对放大器的放大倍数和输出波形的影响
2. 掌握测量放大器的电压放大倍数、频率响应曲线的方法。

二、实验原理

一个放大器，如果静态工作点设计不当，就不能使电路的设计性能得到充分发挥，甚至根本无法工作，因此正确的设计工作点，是一切放大电路的基础，为此，在进行各类放大器的实验之前，首先应了解放大器静态工作点的设计和调试方法。

(1) 放大器的静态工作点和直流负载线

放大器的静态工作点，是指在没有外加信号输入时，晶体管的直流工作点。它可以用集电极电流 I_{CQ} 和“集—射”之间的电压 U_{CEQ} 来描述，对应每组 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 均可在晶体管输出特性座标中找到一对应的点 $Q(I_{CQ}, U_{CEQ})$ 如图(1-1)所示。

显然，放大器的静态工作点 Q 在输出特性座标中的位置将与电路参数有关。以图(1-2)单管放大器为例，有

$$I_{BQ} = \frac{E_c - U_{BE}}{R_b}$$

$$I_{CQ} = h_{fe} I_{BQ} + I_{CEO}$$

$$I_c = U_{CEQ} + I_{CQ} R_c$$

由此求出 $U_{CEQ} = E_c - I_{CQ} R_c$ 为一直线方程。它们在 X 轴、 Y 轴上的截距分别是 $E_c (I_{CQ} = 0)$ 和 $\frac{E_c}{R_c} (U_{CEQ} = 0)$ [图(1-1)]，由于直线的斜率取决于直流负载电阻 R_c ，故称之为放大器的直流负载线，直流负载线规定了静态工作点的移动轨迹。

(2) 选择放大器静态工作点的原则与非线性失真

放大器的基本任务是在不失真(达到规定的失真度)的条件下，对输入信号进行放大，从这个基本任务出发，选择放大器工

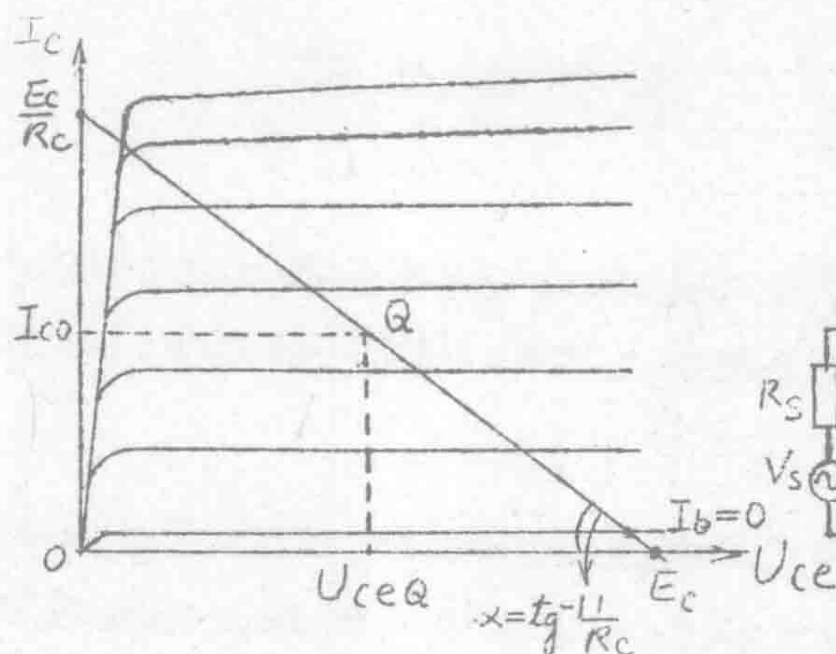


图1-1 放大器的直流负载线

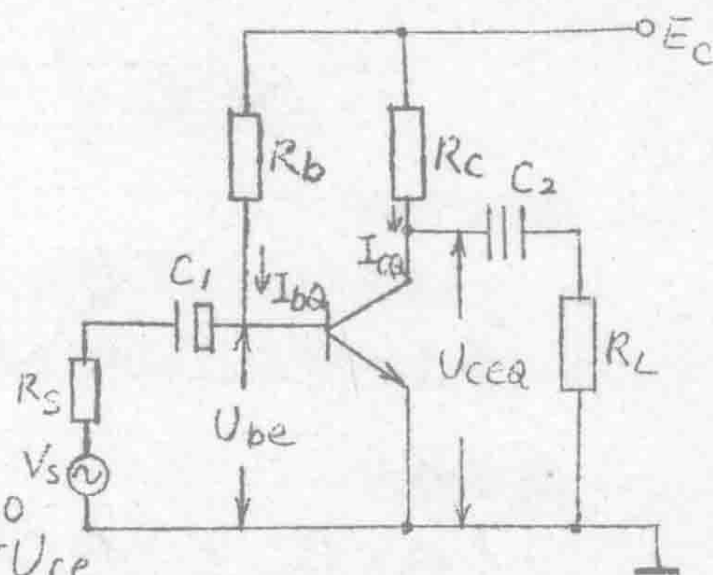


图1-2 单管放大电路

作点的原则就是，保证波形达到规定的失真度和使放大器具有较大的增益。而放大器输出波形失真度的大小，主要取决于晶体管在外加信号输入后其工作点的变化范围是否进入到晶体管的非线性区。为此，必须求出放大器的交流负载线。

对于大多数放大器而言，它们的输出端一般要带动一定的负载，如图(1-2)。其中 C_2 是耦合电容， R_L 为放大器负载。在交流信号输入时，由于 C_2 取得足够大，以至它的阻抗可以认为近似等于零，而被忽略，这时的负载将是 R_c 和 R_L 并联，即：

$$R'_L = \frac{R_c R_L}{R_c + R_L}, \text{ 所以对于交流信号负载线的斜率不再是 } \frac{1}{R_c}$$

而应该是 $\frac{1}{R'_L}$ ，因为 $R'_L < R_c$ ，所以新的负载线总是比原来的陡一些。

交流负载线的作法：首先作出直流负载线，直流负载线是通过静态工作点 Q 斜率为 $\frac{1}{R_c}$ 的一条直线(图(1-3)中用虚线表示)。当有信号输入时，晶体管的工作点从静态工作点 Q 出发，沿着负载为 $R'_L = R_c \parallel R_L = \frac{R_c R_L}{R_c + R_L}$ 的负载线移动，因此，交流负载线应该是通过静态工作点 Q 作为斜率为 $\frac{R_c + R_L}{R_c R_L}$ 的直线(图(1-3)中实线)。

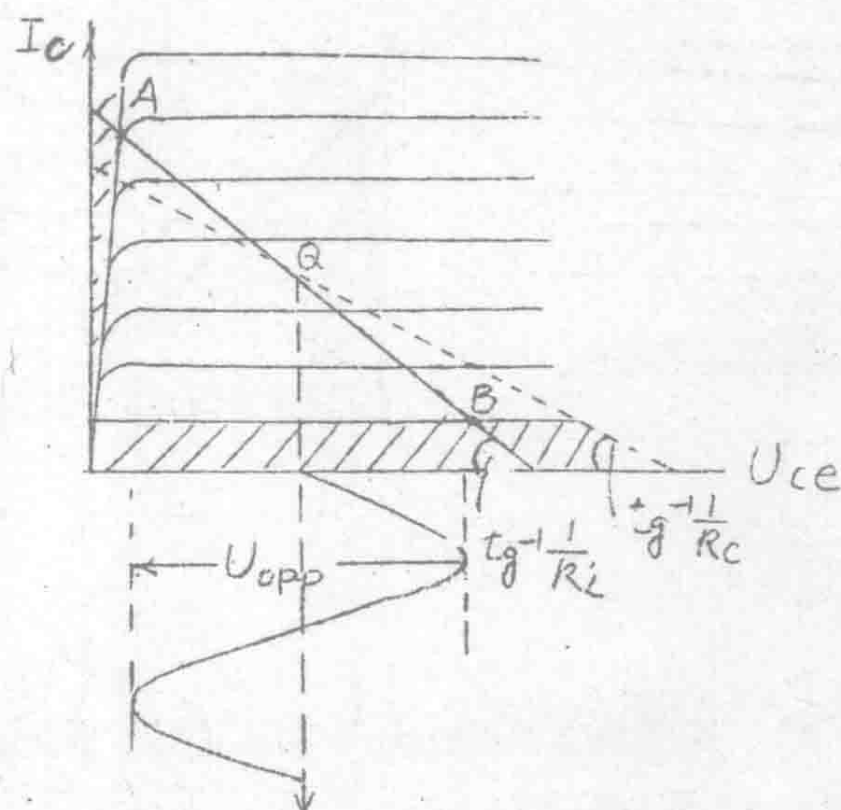


图 1-3 放大器的交流负载线

从交流负载线我们可以看出：

(1) 放大器输出电压的最大摆动幅度 U_{opp} 不会超过交流负载线的 A 点和 B 点，因为晶体管的工作点一旦进入特性曲线的饱和区和截止区，集电极电压就不再随输入电压而变。显然，要输出波形不产生严重的非线性失真，就应使放大器的输出幅度不超过其最大摆动， U_{opp} 。严格地讲，由于晶体管是一个非线性器件，其线性是相对于饱和区和截止区而言的，只有在小信号时才能近似看作一个线性器件，因此，在大信号时，输出波形或多或少有些失真，不过当要求不高时，为了便于比较和估计，常常用 U_{opp} 来衡量放大器的动态范围，若对输出波形的非线性失真有严格的要求，则其线性动态范围将小于最大摆动 U_{opp} 。

(2) 为了充分利用交流负载线的线性区，以获得量大的摆动，放大器的静态工作点 Q ，应选在交流负载线的中点（注意不是直流负载线的中点），因为，若 Q 点选得太高，则当输入信号使 I_c 加大时，很快就进入到饱和区，使输出波形负半周限幅，如图 (1-4a) 所示。

反之若工作点 Q 选得太低，则 I_c 减小很快进入截止区，使

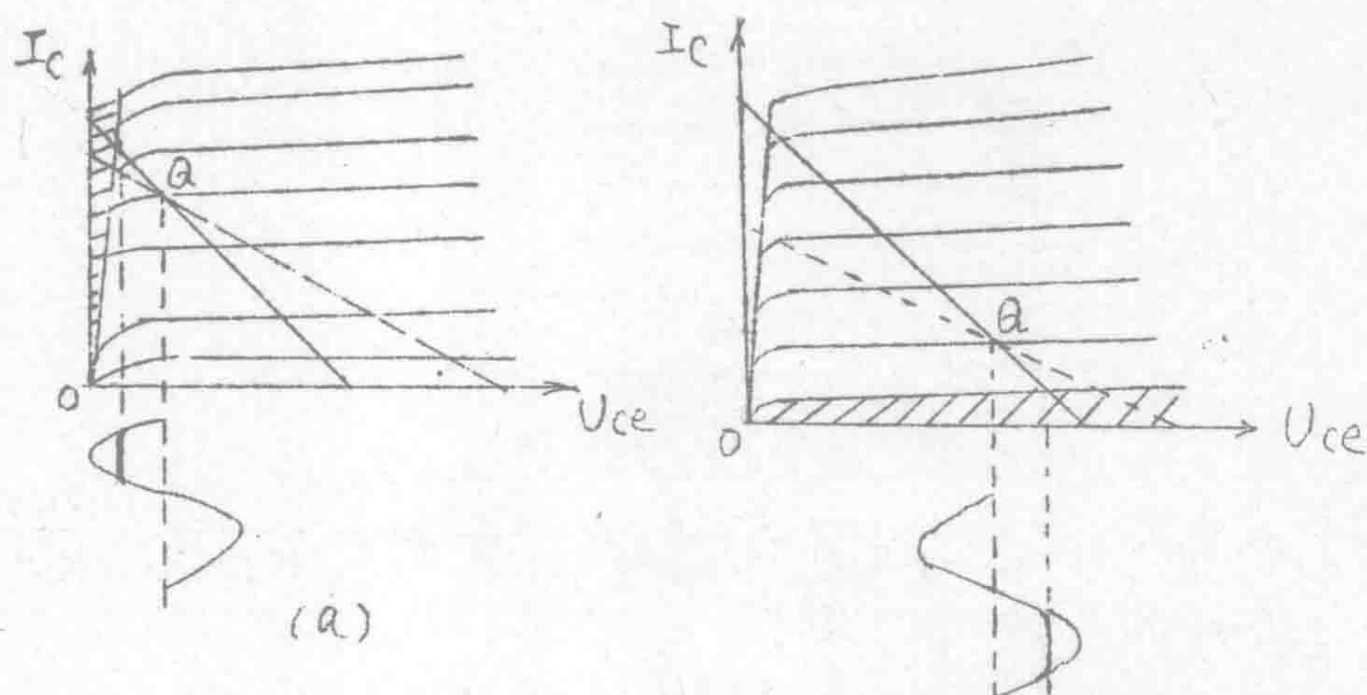


图1-4 由于工作点选择不当引起的波形失真

波形正半周限幅如图(1-4b)示。

(3) 静态工作点与增益

我们将图(1-2)中的晶体管用H参数来等效,就可以画出其交流等效电路如图(1-5)所示,在工程计算中:晶体管的内反馈都可以忽略不计(即 $h_{re} = 0$),这样利用等效电源定理可简化为图(1-5b)。

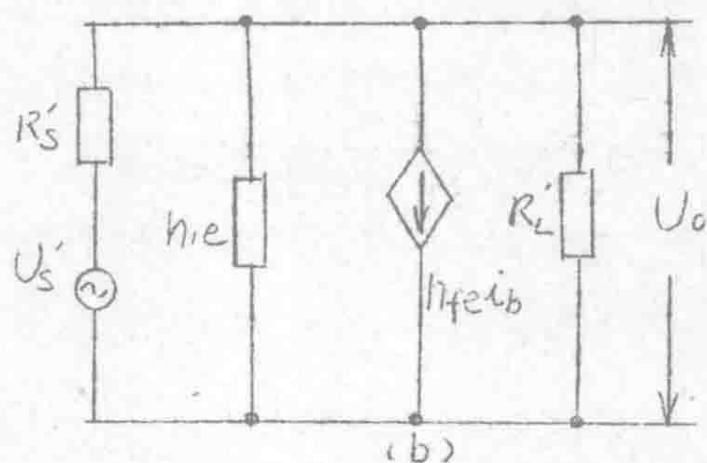
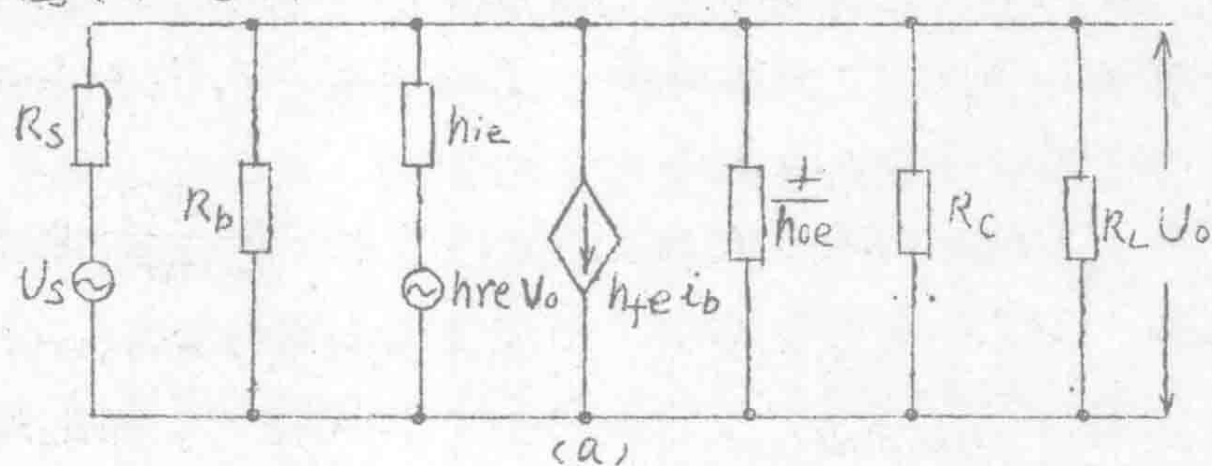


图1-5 放大器的交流等效电路

其中 $R'_s = R_s \parallel R_b = \frac{R_s R_b}{R_s + R_b}$

$$U'_s = \frac{R_b}{R_b + R_s} U_s$$

$$R'_L = R_c \parallel R_L \parallel \frac{1}{h_{oe}} \doteq R_c \parallel R_L$$

从而，求出放大器的电压增益 $K_V = \frac{U_o}{U_s} = - \frac{R_b}{R_b + R_s} \cdot \frac{h_{fe} R'_L}{R'_s + h_{ie}}$
当忽略信号源内阻，则

$$K_V = \frac{-h_{fe} R'_L}{h_{ie}}$$

式中 h_{fe} 是晶体管共射电流增益，在线性区 h_{fe} 基本上与工作电流无关。

h_{ie} 是晶体管输入阻抗（共射）其值与工作电流关系密切。
根据T型等效电路可知：

$$h_{ie} = r_b + (1 + h_{fe}) r_e$$

式中 r_b 是晶体管基区体电阻，由基区材料决定，对于高频大功率管 $r_{bb} = (1-5) \Omega$ ，高频小功率管 $r_{bb} = (10-200) \Omega$ ，低频小功率管 $r_{bb} = (100-500) \Omega$ ， r_{bb} 基本上不随工作电流而变。

r_e 是发射结正向交流电阻且 $r_e (\Omega) = \frac{26 (mV)}{I_e (mA)}$ 即 r_e 与工作电流 I_e 成反比。由此可见，工作电流对 K_V 的影响，主要表现在 h_{ie} 随工作电流变化上，如果信号源内阻 R_s 都较小，且有 $R_b \gg R_s$ 则 $R'_s = R_s$ 则

$$\begin{aligned} K_V &= \frac{-R_b}{R_b + R_s} \cdot \frac{h_{fe} R'_L}{R'_s + r_b + (1 + h_{fe}) r_e} \\ &= \frac{-h_{fe} R'_L}{R'_s + r_b + (1 + h_{fe}) r_e} \end{aligned}$$

又当晶体管工作电流不是太大时，且满足 $(1 + h_{fe}) r_e \gg (R'_s + r_b)$ ，则

$$K_v = -\frac{R'_L}{Y_e} = -\frac{1}{26} I_e R'_L = \frac{1}{26} I_{CQ} R'_L$$

这便是忽略了 R_s 、 R_b 、 r_b 及 h_{ie} 后所能得到的最大增益。

总之，静态工作点不仅会影响放大器的最大不失真幅度，而且还影响放大器的增益。

三、实验线路：

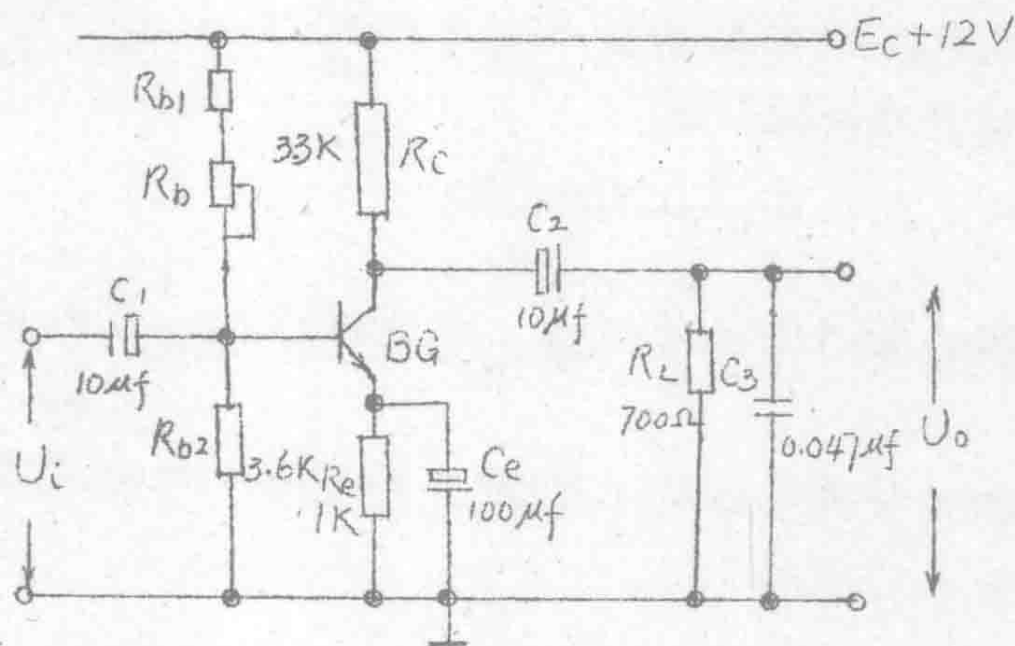


图1-6 单管放大器实验线路

实验线路如图1-6所示，图中 $C_3 = 0.047 \mu\text{f}$ 是为了降低高丰功率点的频率而接入的，这样高丰功率点频率可以在音频信号发生器的频率范围之内，因为音频信号发生器最高频率为 20 KHz 。所有插孔均是作为改变电路参数而设置的。

四、实验仪器：

音频信号发生器	1台	示波器	1台
直流稳压电源	1台	真空管毫伏表	1台
失真度测量仪	1台	万用表	1只
实验线路板	1块		

五、实验内容

- 1、利用线路板中的插孔和连线，接成图1-6中所示的元件数值，加入 $+12 \text{ V}$ 电源电压，调电位器 R_b ，使静态工作电流

约在 1mA 左右,即在发射极电阻上量得电压约 1V 左右。

2. 测量电压放大倍数 K_v ,这时加入 $f=1\text{kHz}$ $U_i=5\text{mV}$ 的音频信号至放大器输入端,用示波器观看放大器输出波形,用真空管毫伏表测量放大器输出电压,用失真度测量仪,测量放大器输出波形的失真度。(使用方法见附录四)使失真度小于 6% ,计算电压放大倍数。

3. 测放大波形的失真度随工作点改变而变化情况:

保持放大器输入信号为 $f=1\text{kHz}$ $U_i=5\text{mV}$ 条件下,改变放大器的工作状态,测量工作电流 I_{CQ} 为 0.5mA 、 2mA 、 2.5mA 时的输出波形的失真度,并用示波器观看波形,并描绘饱和失真,截止失真和正常放大不失真时的波形。

[注意]在观察截止失真时,可把输入信号幅度加大。

4. 测频率响应曲线(即 $K_v \sim f$ 曲线)

和测量放大倍数的方法相同,保持放大器的输入信号(即音频信号发生器的输出信号) $U_i=5\text{mV}$ 不变,改变音频信号的频率,每改变一次频率,就测一次放大倍数。频率变化范围从 20Hz 到 20kHz 。测量应注意取点恰当,根据对数坐标选取,并且在放大倍数变化大的频段应多测几点,在中频段放大倍数略有变化可少测几点。在测量时特别要注意的是,当改变信号频率时,要随时调节输入信号幅度,使它保持为 5mV 。根据所测得的数据横轴取对数坐标,纵轴为放大倍数,画出 $K_v \sim f$ 曲线,计算该放大器的频带宽度,求出上、下截止频率。

5. 改变 R_e 、 R_L 和去掉 C_e 等观察对放大器的影响,试讨论之。

六、思考题

1. 如果把 $C_3=0.047\mu\text{f}$ 去掉,耦合电容 C_2 加大($C_2=47\mu\text{f}$),这时测出的频率响应曲线会有什么变化?
2. 如要考虑放大器的动态范围,工作点应该怎样选取才是动态范围最大?

实验二 两级阻容耦合放大器

一、实验目的：

1. 掌握两级阻容耦合放大器的工作原理和调试方法。
2. 了解两级放大器中后级对前级的影响，验证电压总增益是单级电压增益的乘积。
3. 了解两级放大器的通频带比单级通频带宽的关系。

二、实验原理：

图2-1是一个典型的两级阻容耦合低频放大器：

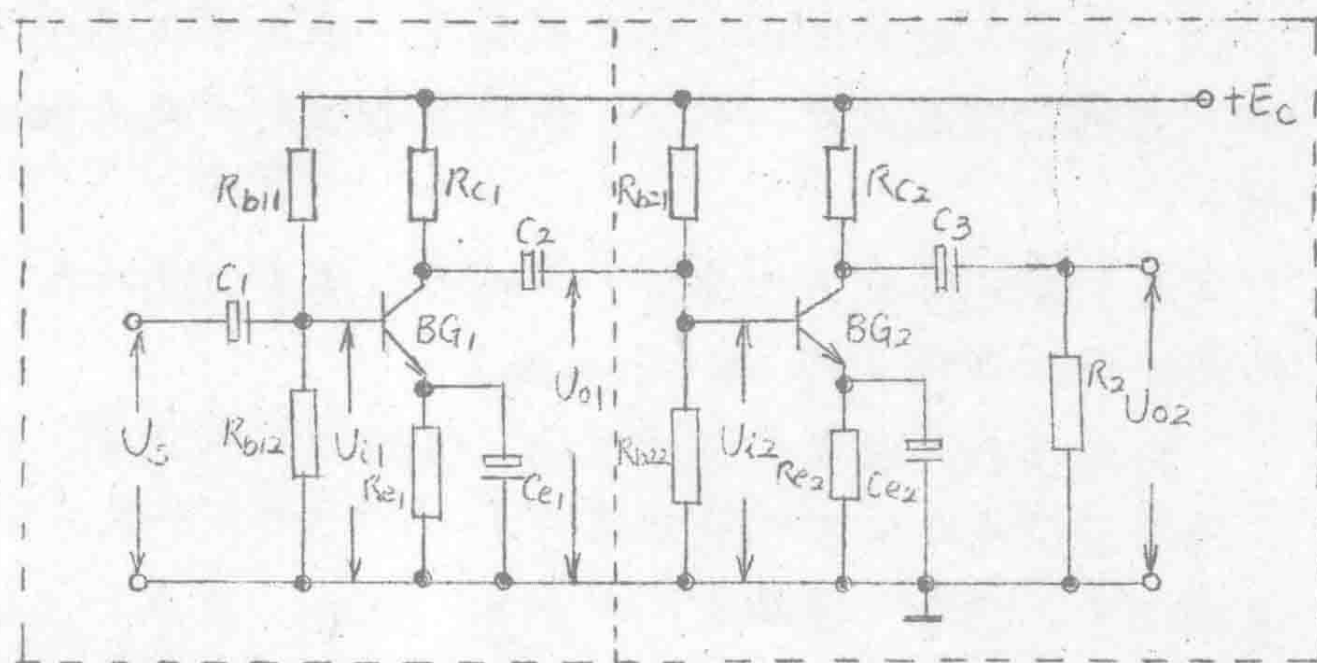


图2-1 典型两级阻容耦合放大电路

1. 电压增益的计标：关于级的划分，习惯上规定第一级是从信号源到第二个晶体管BG₂的基极。第二级是从第二个晶体管的基极到负载，如图中虚线框所示。这样两级放大器的电压总增益K_V为：

$$K = \frac{U_{o2}}{U_s} = \frac{U_{o2}}{U_{i1}} = \frac{U_{o2}}{U_{i2}} \cdot \frac{U_{i2}}{U_{i1}} = \frac{U_{o2}}{U_{i2}} \cdot \frac{U_{o1}}{U_{i1}} = K_{V2} \cdot K_{V1} \quad (2-1)$$

式中电压为有效值，且 $U_{o1} = U_{i2}$ 。由此可见，两级放大器电压总增益是单级电压增益的乘积。此结论可推广到多级放大器。

当忽略信号源内阻 R_s 和偏流电阻 R_b 的影响时，放

大时的中频电压增益为:

$$K_{V1} = \frac{U_{o1}}{U_s} = \frac{U_{o1}}{U_{i1}} = \frac{\beta_1 R_{c1}}{h_{ie1}} = \beta_1 \frac{R_{c1} \parallel h_{ie2}}{h_{ie1}} \quad \dots (2-2)$$

$$K_{V2} = \frac{U_{o2}}{U_{i2}} = \frac{U_{o2}}{U_{o1}} = \frac{\beta_2 R_{c2}}{h_{ie2}} = \beta_2 \frac{R_{c2} \parallel R_L}{h_{ie2}} \quad \dots (2-3)$$

$$K_V = K_{V1} \cdot K_{V2} = \frac{\beta_1 R_{c1} \parallel h_{ie2}}{h_{ie1}} \cdot \frac{\beta_2 R_{c2} \parallel R_L}{h_{ie2}} \quad \dots (2-4)$$

必须要注意的是: K_{V1} , K_{V2} 都是考虑了下一级输入电阻 (或负载) 的影响, 所以第一级的输出电压即为第二级的输入电压, 而不是第二级的开路输出电压。当第一级增益已计入下级输入电阻的影响后, 在计算第二级增益时, 就不必再考虑前级的输出阻抗, 否则计算就重复了。

2. 影响增益的因数: 当外接负载一定时, 各级中频电压增益与总中频电压增益与那些因素有关呢, 从式 (2-4) 可以得出:

(1) 提高各级集电极负载电阻 R_{c1} , R_{c2} 可以提高增益, 但是电源电压 E_c 一定时, R_{c1} , R_{c2} 不可能无限提高, 所以增益的提高受到一定的限制。

(2) 晶体管电流放大系数 β_1 , β_2 的提高, 对本级增益无多大影响。

因为 $h_{ie} = Y'_{bb} + (1+\beta) Y_e = 300\Omega + (1+\beta) \frac{26}{I_e}$ 对小功率管来说 Y'_{bb} 约为 300Ω , 当 β 较大, I_e 较小的情况下, $Y'_{bb} \ll (1+\beta) \frac{26}{I_e}$, $h_{ie} \approx (1+\beta) \frac{26}{I_e} = \beta Y_e$

这样式 (2-2) (2-3) 可得

$$K_{V1} = \frac{\beta_1 R_{c1} \parallel h_{ie2}}{h_{ie1}} = \frac{\beta_1 R_{c1} \parallel h_{ie2}}{\beta_1 Y_{e1}} = \frac{R_{c1} \parallel h_{ie2}}{Y_{e1}} = \frac{R_{c1} \parallel h_{ie2} I_{e1}}{26} \quad (2-5)$$

$$K_{V2} = \frac{\beta_2 R_{c2} \parallel R_L}{h_{ie2}} = \frac{\beta_2 R_{c2} \parallel R_L}{\beta_2 Y_{e2}} = \frac{R_{c2} \parallel R_L}{Y_{e2}} = \frac{R_{c2} \parallel R_L I_{e2}}{26} \quad (2-6)$$

由此可见, 单级电压增益基本上与 β 无关, 所以在单级放大器中, 挑选 β 高的晶体管对提高增益无多大贡献。

(3) 增大 β 能提高本级输入电阻，所以能提高前级增益。所以在多级放大器中挑选 β 高的晶体管能提高总的电压增益。

(4) 在静态工作电流较小 ($< 3\text{mA}$) 情况下，增大 I_e 能提高电压增益。因为只有在 I_e 较小情况下才能将 r_{bb} 忽略，而使 $h_{ie} \approx \beta r_e = \beta \frac{26}{I_e}$ 成立。当 I_e 较大时， I_e 的增大，对增益影响不大。但是 I_e 的增大，却减小了本级的输入电阻，这样对前级不利，所以 I_e 的提高也有一定限制。

总之，在多级放大器中 β 和 I_e 的提高，必须全面考虑，这也就是前后级相互影响的关系。

3. 两级放大器的通频带比单级通频带窄：对两级电路参数相同的放大器其单级通带亦相同，而总的通频带将变窄。如图 2-2 所示，图中纵轴 K_v 用 G_v 表示即 $G_v = 20 \log K_v (\text{dB})$ ，对应通频带的高、低半功率点 f_H, f_L 的增益为 $K_{vH} = \frac{K_{v0}}{\sqrt{2}}$ ， $K_{vL} = \frac{K_{v0}}{\sqrt{2}}$ 式中 K_{v0} 为中频电压增益。这样相应的 G_{vH} 和 G_{vL} 相对于 G_{v0} 下降为 3dB。

对于两级放大器， $K_{u0} = K_{u10} \cdot K_{u20}$ ， $G_{u0} = G_{u10} + G_{u20}$ 。在原单级通频带的高、低半功率点 f_{H1}, f_{L1} 上两级放大器的增益比中频增益下降了 6dB，可见总的增益下降 3dB 的点向内移动了，所以总的通频带变窄。由图 2-2 可见单级通频带为 B_1, B_2 ，总的通频带为 B ，则 $B < B_1$ 。

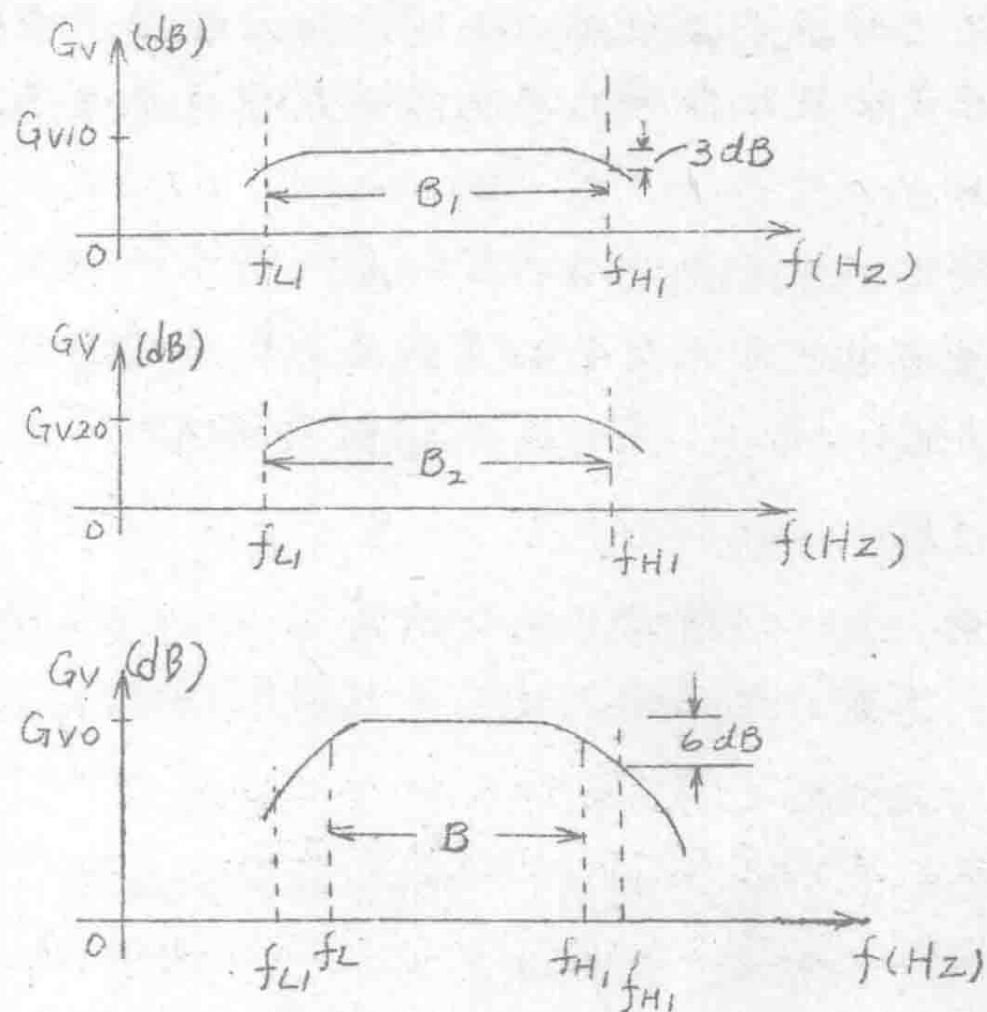


图 2-2 两级放大器与各单级放大器通频带的关系

三. 实验线路

实验线路如图 2-3 所示, 其中晶体管是用的 3AX31. 截止频率可以低一点, 但是由于所用音频讯号发生器的频率范围高端只有 20 KHz, 不加措施; 高丰功率点还测不出来, 线路中的 C_6 , C_7 就是为此而设的, 这样可以使高丰功率点降低。

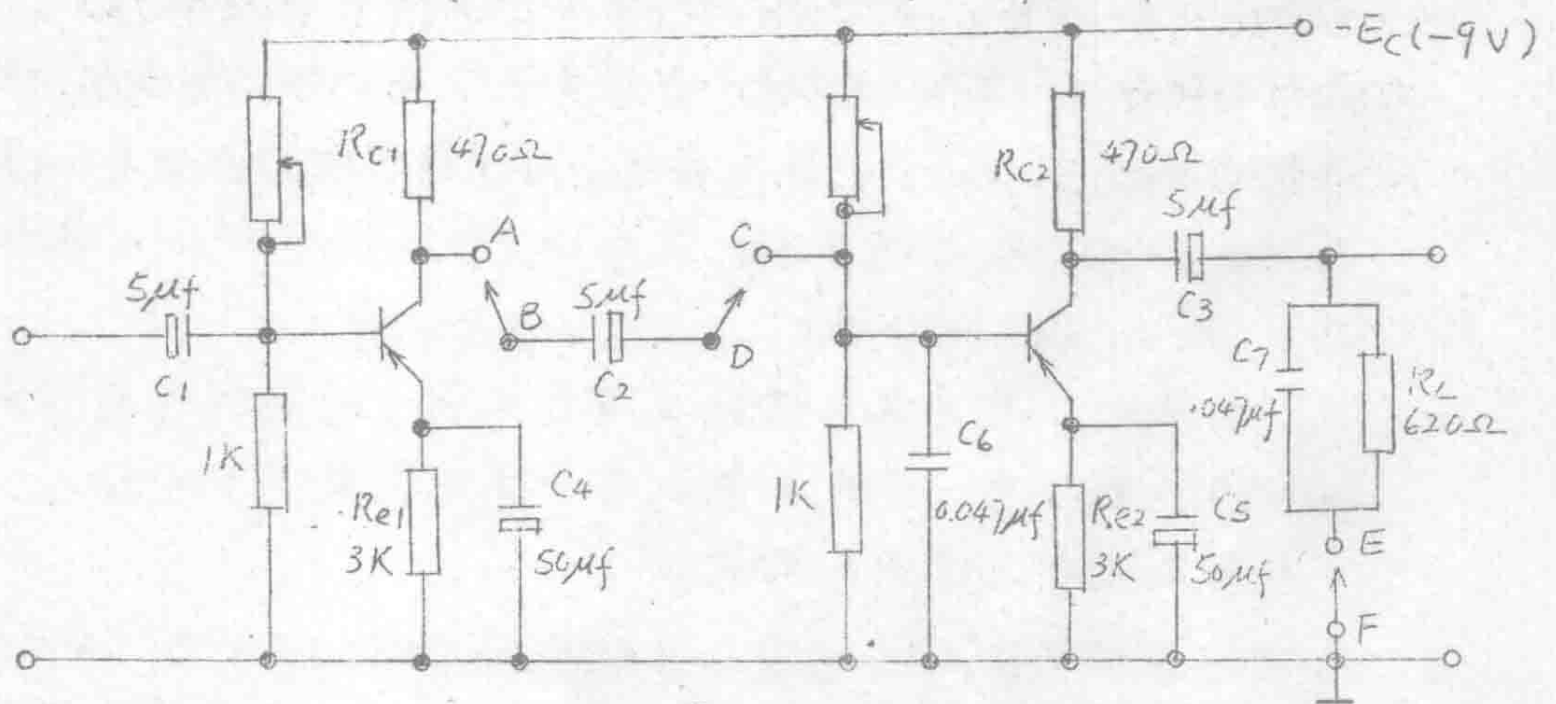


图 2-3

图中A、B、C、D、E、F均为插孔，可以根据实验要求而连接或断开。值得指出的是在不加任何交流反馈电路情况而增益又较高的情况下，所加的输入信号将是很小的（ $< 1\text{mV}$ ），这时测量上就难以精确。为了解决这一问题，要使所加输入信号较大而不产生失真，只有把增益降低，所以集电极负载或负载电阻都是较小。偏置分压电阻也是较小的。（实用上一般都是一般都是取得较大的）。

四、实验仪器

示波器1台，音频讯号发生器1台，稳压电源1台，万用表1只，实验线路板1块，失真度测量仪1台。

五、实验内容

1、测量放大器的增益，了解后级输入电阻（或负载）对前级增益的影响，验证 K_v 、 K_{v1} 、 K_{v2} 关系。

①根据实验线路中元件数据，使 BG_1 的电流 $I_{C1} = 0.5\text{mA}$ 。

BG_2 的电流 $I_{C2} = 2\text{mA}$ 两管的 $\beta_1 = \beta_2 = 60$ ，估称各级静态工作点，各级增益和总增益。

②测量静态工作点和增益与计称值比较

调节偏流电位器 R_{b1} 和 R_{b2} ，分别使第一级电流为 0.5mA ，第二级电流为 2mA ，将输入音频信号调到 $f = 1\text{kHz}$ 。

$U_i = 2\text{mV}$ 。断开CD连线，测出第一级开路电压增益 K_{v01} ，再断AB和EF连线（CD接上）信号从B点加入，测出第二级开路电压增益 K_{v02} 。然后接上所有连线，测出各级电压增益 K_{v1} 、 K_{v2} ，及总增益 K_v 并验证 $K_v = K_{v1} \cdot K_{v2}$ ，且将 K_{v1} 、 K_{v2} 和计称值 K_{v01} 、 K_{v02} 进行比较。

测量时，要注意不使输出信号失真，用毫伏表或示波器测量其电压值，用失真度测量仪使失真度小于5%。

（失真度测量仪使用见附录四）。

2、测量两级放大器总通频带与单级通频带，验证 $B < B_1$ （或 B_2 ），因为实际上很难调到两级的通频带一样，所以实验中是先