

实验 7 单管低频电压放大电路

实验目的

1. 认识实验所用的电子元器件（双极型晶体管、电阻、电位器和电容器等）。
2. 学习看图接线，能熟练使用常用电子测量仪器。
3. 学习单管电压放大电路的基本测试方法。
4. 了解双极型晶体管电压放大电路中引入负反馈后对其工作性能的影响。

实验原理

1. 单管低频电压放大电路介绍

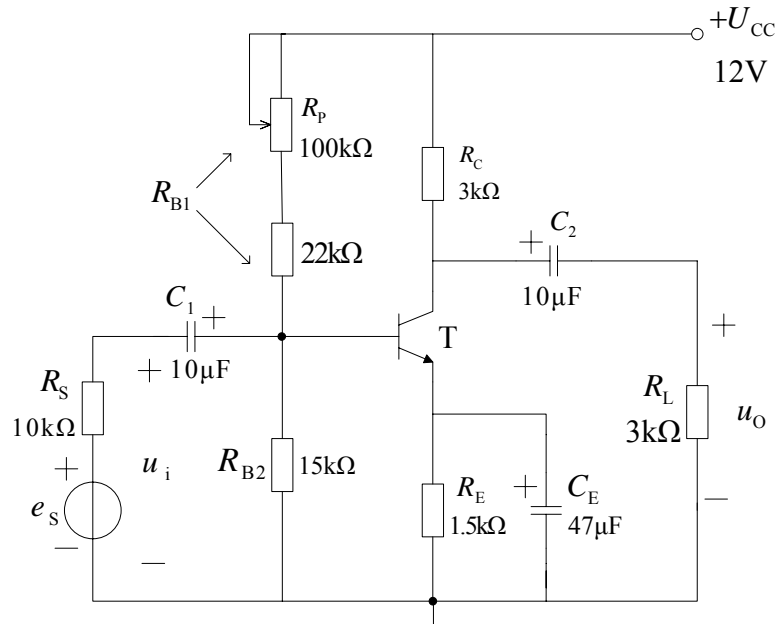


图 3.7a.1 单管低频电压放大电路

阻容耦合分压偏置共发射极电压放大电路如图 3.7a.1 所示。该电路中的双极型晶体管 T 是电路中的放大器件，它能把输入回路（基极—发射极）中微小的电流信号在输出回路中（集电极—发射极）放大为一定大小的电流信号。输出回路中得到的较大输出电流是源自直流电源，双极型晶体管在电路中实际上起着电流控制作用。电源 U_{CC} 提供放大电路能量，还为双极型晶体管的集电极提供反向偏置，使其处于放大工作状态；并通过基极电阻 R_{B1} 和 R_{B2} 的分压，提供合适的基极电压，调节电位器 R_p 的阻值可以改变基极电流，从而改变集电极电流。集电极电阻 R_C 可以将集电极电流的变化变换为集电极电压的变化，在输出回路中得到放大的电压信号。发射极电阻 R_E 对集电极电流的直流分量有负反馈的作用，稳定了静态工作电流。发射极电容 C_E 对集电极电流的交流分量提供了交流通路，起了分流交流作用。 C_1 、 C_2 能够分隔直流电位，通过交流分量电流，起到隔直流通交流的作用；它们分别把交流信号电流输入基极以及把放大后的交流信号电压送到负载端，而不影响晶体管的直流工作状态。

2. 静态工作点 Q 的估算

当外加输入信号为零时，在直流电源的作用下，基极和集电极回路的直流电流和电压分别用 I_{BQ} 、 U_{BEQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 表示，并在其输入和输出特性上各自对应一个点，称为静态工作点。此时电路的直流通路如图 3.7a.2 所示。

假设 $I_1 \gg I_{BQ}$ ， $U_{BE} = 0.7V$ ，则有

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}, \quad I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BE}}{R_E}, \quad I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

由于 $I_{CQ} \approx I_{EQ}$ ， $U_{CEQ} \approx U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E)$

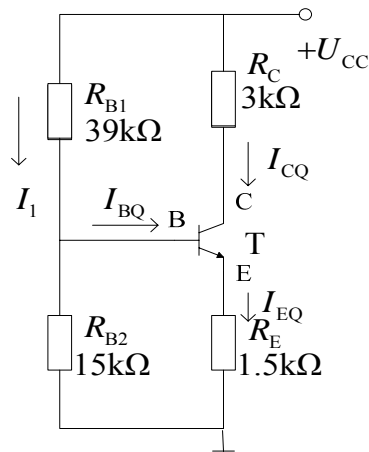


图 3. 7a. 2 电压放大电路的直流通路

3. 静态工作点的选择

放大器静态工作点 Q 的位置对放大器放大信号有很大影响，从图 3.7a.3 的输出特性图上能直观地看到。选择 Q 点时，若静态电压居中，集电极电流 I_{CQ} 也适中，它能最大不失真地放大输入的信号，放大器工作在晶体管的放大区域。如调节 R_p ，改变基极偏置电流 I_B 从而也改变了集电极电流 I_C ，使工作点上移到 Q_1 点，放大器就工作在晶体管放大电路的饱和区。输入较大的信号就会产生饱和失真，输出波形的下半波被截。如果工作点下移到 Q_2 点，放大器工作在晶体管放大电路的截止区，输入较大的信号就会产生截止失真，输出波形的上半波被截。

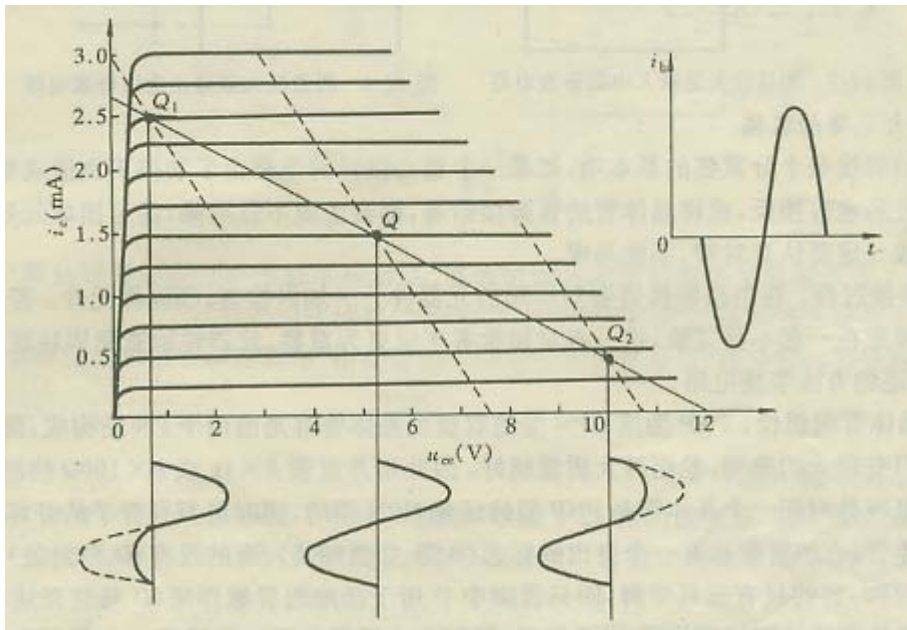


图 3. 7a. 3 放大电路的静态工作点

4. 放大电路的电压放大倍数

如把放大电路看作一个“黑盒子”，并等效为一个双端口有源网络，如图 3.7a.4 所示，在输出端断开（空载）及接通负载电阻 R_L （负载）两种情况下测定 U_i 及 U_o ，求出它们的比值 A_u 。称为放大电路的电压放大倍数。

$$\text{空载时 } A_{uO} = \frac{\dot{U}_{OC}}{\dot{U}_i} \qquad \text{负载时 } A_{uL} = \frac{\dot{U}_{OL}}{\dot{U}_i}$$

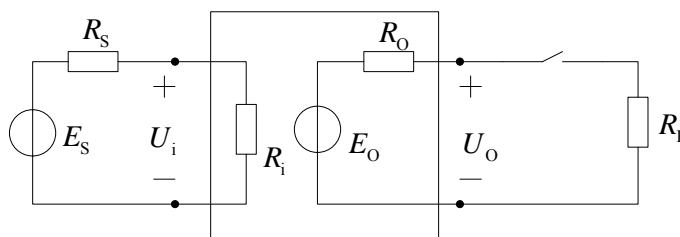


图 3.7a.4 测量放大电路电压放大倍数的等效电路

5. 输入电阻的测量

输入电阻 R_i 即为放大电路输入端看入的内阻。在图 3.7a.4 的输入回路中具有以下的电压关系：

$$\frac{R_i}{R_s} = \frac{U_i}{E_s - U_i} \qquad \text{则 } R_i = \frac{U_i}{E_s - U_i} R_s$$

所以，已知 R_s 并测出 E_s 及 U_i 即可求得 R_i 。

6. 输出电阻的测量

输出电阻 R_o 即为放大电路输出端看入的内阻。

(1) 输出端开路短路法

开路时测开路电压 $U_{OC} = E_o$ ，短路时测短路电流 I_{SC} ，则输出电阻 $R_o = \frac{E_o}{I_{SC}} = \frac{U_{OC}}{I_{SC}}$ 。

(2) 输出端通断负载法

若输出端不允许短路或直接测 I_{SC} 有困难，则输出端接通负载电阻 R_L ，此时输出电压

$$U_{OL} = E_o \frac{R_L}{R_o + R_L}, \text{ 换算得 } R_o = \frac{E_o - U_{OL}}{U_{OL}} R_L = \frac{U_{OC} - U_{OL}}{U_{OL}} R_L。$$

7. 放大电路中的负反馈

在分压偏置共发射极单管放大电路中，若在输出端与基极间接入电阻 R_f 则构成电压并联负反馈。 R_f 对外来输入信号电流形成分流（输出信号电压与输入信号电压反相）使基极实际输入的信号电流下降，降低了电压放大倍数。

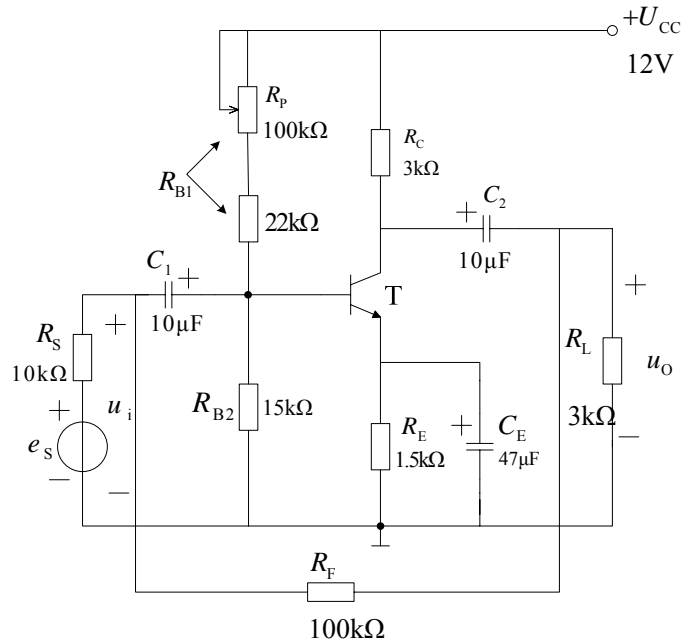


图 3.7a.5 电压并联负反馈电路

若在图 3.7a.1 所示的电路中，在三极管的发射极和 R_E 、 C_E 之间串联接入一个低阻值电阻 R_{E1} ，则构成电流串联负反馈，这样发射极电流中的交流分量通过发射极电阻 R_{E1} 形成交流电压降（与输入信号电压同相），在输入回路中抵消了一部分输入信号电压，使实际输入的信号电压及信号电流减少，电流串联负反馈降低了电压放大倍数。

放大器中引入负反馈后虽然减少了电压放大倍数，但它的电压放大倍数稳定性、非线性失真、输入阻抗、输出阻抗和频带宽度都会得到改善。

8. 射极输出器

射极输出器(图 3.7a.6)电路中的三极管集电极直接接电源，其输出电压从发射极引出，与输入信号电压同相。同时输出电压又全部反馈到输入回路，抵消了大部分输入信号电压，构成了电压串联负反馈放大器，电压放大倍数小于近似于 1。由于大部分输入信号电压被抵消，大大地减少了在 BE 间实际输入的信号电压及信号电流，就相当于把输入阻抗提高了数十倍，同时电压负反馈能够稳定输出信号电压，就相当于大大地减少了放大器的输出阻抗。利用射极输出器输入阻抗很高，输出阻抗很小的特征，可以用作多级放大的输入级或输出级，同时利用其能够放大电流的特点可以起功率输出作用。

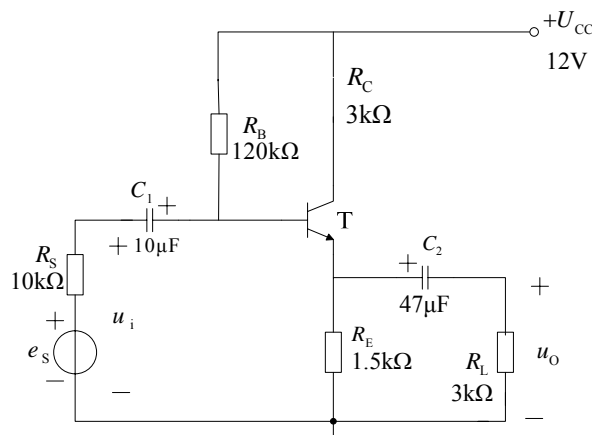


图 3.7a.6 射极输出器

实验仪器

1. 直流稳压电源	0~30V 0~1 A	1 台
2. 函数发生器	2Hz~2MHz 5V _{P-P}	1 台
3. 示波器	0~20MHz 双踪	1 台
4. 交流毫伏表	100 μ V~300V 5Hz~2MHz	1 台
5. 万用表		1 台
6. 直流毫安表	0~50mA	1 只
7. 实验电路板		1 块

实验步骤

1. 对照电路图（图3.7a.1）认识在实验电路板上的电子元器件（双极型晶体管、电阻、电位器和电容器）及各个接线端。

2. 测量静态工作点

首先按图3.7a.1在实验板上接线，电路输入端不接信号源。接入直流电源（+12V）和直流毫安表。通电后，通过调节基极偏置电路中的100kΩ 电位器 R_p 把 I_C 调到1.6mA，按表

3.7a.1用万用表电压档测量静态工作电压，记录测得的数据。




表3.7a.1测试静态工作点

	U_B / V	U_{BE} / V	U_E / V	U_{CE} / V	I_C / mA
估算值					
实测值					1.6

3. 观察不同工作点的输入和输出波形

在放大器的输入端加入一个频率为1kHz的正弦波，用示波器观察输入和输出波形。在 $I_C = 1.6mA$ 时，逐渐加大输入信号电压，用示波器观察输出波形，使它达到幅度最大且不失真，然后调整 I_C 为2.4 mA 和0.5 mA，不要改变输入信号，再用示波器观察输出波形并画在表3.7a.2中。

表3.7a.2三种工作点的输入和输出波形

I_c	1.6mA	2.4mA	0.5mA
输出波形			

取以上三种工作点时，放大器工作在什么区域？

4. 测量输入电压和输出电压，计算电压放大倍数、输入电阻和输出电阻

在 e_s 端接入1kHz正弦波信号电压，要求 U_i 为10mV， $I_C = 1.6mA$ ，测量信号源输出电压 E_s 、接入负载电阻 R_L 时的输出电压 U_{OL} 、不接 R_L 时的空载输出电压 U_{OC} 。

表3.7a.3电压放大倍数、输入电阻和输出电阻

U_i / mV	E_s / mV	U_{OL} / V	U_{OC} / V	A_{uL}	A_{uO}	$R_i / k\Omega$	$R_o / k\Omega$
10							

根据实验原理中计算式计算电压放大倍数 A_{uL} 、 A_{uO} 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

5. 测量电压并联负反馈放大器的源电压放大倍数及放大倍数稳定性

通过 R_F 把输出电压 U_o 引入输入端S与输入信号并联，形成电压并联负反馈电路如图3.7a.5。（图中若不需要负反馈可把 R_F 断开，就是无反馈电路。）

3.7a.4测量放大器的源电压放大倍数及放大倍数稳定性

	E_S / mV	U_{OC} / V	U_{OL} / V	A_{uSO}	A_{uSL}	$\frac{\Delta A}{A}$
无反馈电路	100					
电压并联负反馈	100					

$$A_{uSO} = \frac{U_{OC}}{E_S} \quad A_{uSL} = \frac{U_{OL}}{E_S} \quad \frac{\Delta A}{A} = \frac{A_{uSO} - A_{uSL}}{A_{uSO}} = \frac{U_{OC} - U_{OL}}{U_{OC}}$$

在输入端加入100mV，频率为1kHz的交流信号，测量电路在无反馈和电压并联负反馈时空载和接入 R_L （3k Ω ）时的输出电压。计算放大器的源电压放大倍数及放大倍数的稳定性。

6. 观察负反馈减小放大器非线性失真

(1) 无反馈电路（图3.7a.1）

在输入端输入频率为1kHz、电压为140mV左右的正弦信号，在输出端用示波器观察输出电压波形，逐渐增大输入信号，使输出电压波形稍有一些失真（上下半波不对称）。

(2) 电压并联负反馈电路（图3.7a.5）

把电路改接成电压并联负反馈电路，增大输入信号电压，使输出信号幅度与无反馈电路相同，在输出端用示波器观察输出电压波形，上下半波不对称情况是否改善。

7. 测量无反馈和有反馈时的带宽

在无反馈和有反馈两种情况下，接通负载电阻 R_L ，用1kHz信号送入放大器，调节输入信号大小，在输出端测得1V电压，并记下此时的 E_S 。然后增大及减小信号频率，保持信号源电压 E_S 幅度不变，测出输出电压为0.6，0.707，0.8，0.9V时的频率，记录在表3.7a.5及表3.7a.6中。

表3.7a.5测量无反馈放大电路的带宽

f / Hz						1k					
U_O / V	0.6	0.707	0.8	0.9	1	1	1	0.9	0.8	0.707	0.6
E_S / mV											

表3.7a.6测量电压并联负反馈放大电路的带宽

f / Hz						1k					
U_O / V	0.6	0.707	0.8	0.9	1	1	1	0.9	0.8	0.707	0.6
E_S / mV											

在单对数坐标纸上画出用逐点法测出的无反馈和有反馈时的幅频特性图，分析两种电路

的通频带宽度，说明负反馈放大的优点。

8. 电流串联负反馈放大电路

在图3.7a.1的基础上，断开晶体管发射极电路，在发射极与发射极电阻和电容并联电路之间串联接入 $200\ \Omega$ 电阻构成一个电流串联负反馈放大电路。对该电路参照电压并联负反馈电路测试方法进行测试，将数据记录在自拟表格中，并计算电压放大倍数、输入电阻和输出电阻，与无反馈时的相应数值作比较。

9. 射极输出器的电压放大倍数、输入及输出电阻测试

(1) 按图3.7a.6连接电路。

(2) 测量输入、输出电压，计算电压放大倍数、输入电阻和输出电阻（计算方法同步骤4）。

表3.7a.7测射极输出器的输入电阻

E_S / mV	U_i / mV	R_i / Ω
100		

表3.7a.8测射极输出器的输出电阻

U_i / mV	U_{eL} / mV	U_{eO} / mV	A_{uL}	A_{uO}	R_O / Ω
100					

实验报告要求

1. 记录双极型晶体管放大器静态工作点及无反馈、有反馈时的各项测试数据。
2. 记录射极输出器的各项测试数据。
3. 根据实验数据及所观察到的波形进行分析，并得出相关的结论。并说明放大器中引入负反馈对放大器性能的影响。
4. 说明测量电压并联负反馈放大器的放大倍数稳定性时，为什么要用源电压放大倍数来作比较。

实验现象

1. 静态工作点的估算值和实测值较吻合。如果差别较大，可能是提供的晶体管 β 值与估算用的 β 值不一样。
2. 观察三种工作点的输出波形时，当 I_C 调得最大时大约为 2.5mA。由于电位器的缘故（接触不良），示波器上有时会没有波形显示，可往回调一些。当 I_C 调得最小时，如果看不清，同样处理。

实验结果分析

1. 静态工作点的估算值和实测值较吻合。如果差别较大，可能是提供的晶体管 β 值与估算用的 β 值不一样。
2. 当 I_C 为 1.6 mA 时，放大器工作在放大区，能够输出最大不失真电压波形。当 I_C 为 2.5 mA 时，放大器工作在饱和区，输出电压负半波被截去部分波形。当 I_C 为 0.5 mA 时，放大器工作在截止区，正半波被截去部分波形。
3. 有反馈和无反馈时输出波形的失真情况。无反馈时当输入较大信号时，输出波形正半波峰值电压明显小于负半波。有反馈时明显改善。
4. 电压并联负反馈改善输出电压波形的失真、降低了输出电阻、增加了带宽和提高了电压放大倍数稳定性。这些性能的改善是以牺牲电压放大倍数为代价的。

实验相关知识

预习要求

1. 了解晶体三极管电压放大电路的工作原理及静态工作点、电压放大倍数、输入电阻、输出电阻、非线性失真和频带宽度的含义。
2. 了解双极型晶体管电压放大电路中引入负反馈的方法及负反馈对放大器工作性能的影响，了解射极输出器的功能。
3. 了解常用电子测量仪器的使用方法。

相关知识点

放大电路的组成	E5060201
放大电路静态分析	E5060202
静态工作点的作用	E506020201
静态工作点的稳定	E506020203
放大电路动态分析	E5060203
放大器基本性能指标	E506020301
微变等效电路	E506020302
射（源）极输出器	E5060204
放大电路中的负反馈	E5060302
反馈的概念	E506030201
反馈的极性与类型	E506030202
负反馈对放大器性能的影响	E506030204

注意事项

1. 双极型晶体管管脚 e、b 和 c 要分清，正确插入管座。
2. 在测电压放大倍数时，必须把 I_C 调至 1.6mA，使放大器工作在放大区。
3. 实验中测量直流电压、交流电压和峰值电压时，应根据不同要求选用万用表、交流毫伏表和示波器。