

# 第一章 半导体器件

我们学习半导体器件的目的是为了正确使用和选择器件，而不是去设计制造半导体器件。因此，我们应着重于了解和掌握管子的外特性，即管子的电流和各极电压的关系以及管子的主要参数。

**本章的主要学习要点是：**

- (1) 半导体的导电特性；
- (2) PN 结的工作原理和主要特性；
- (3) 三极管的工作原理和主要特性。

## 1.1 本章小结

### 1.1.1 半导体导电性能

#### 1. 本征半导体

本征半导体是纯净的半导体晶体。常用的半导体材料锗和硅均是四价元素，当它们组成晶体时，每个原子与周围四个原子组成共价键。

在绝对温度 0 K (−273℃) 时，本征半导体中的电子受原子核的束缚，故该半导体不存在能导电的粒子，从而呈现绝缘体的性能。温度增加，电子获能，有少数电子获能较多，可以摆脱原子核的束缚，形成带负电的自由电子和带正电的空穴，它们在电场作用下均作定向运动，所以把自由电子和空穴统称为载流子，载流子在电场作用下的定向运动称为漂移运动，形成的电流称为漂移电流。显然，本征半导体中自由电子数  $n_i$  等于空穴数  $p_i$ ，即

$$n_i = p_i$$

产生自由电子和空穴对的同时，部分电子也失去能量返回到共价键处，使自由电子和空穴对消失，我们称此过程为载流子的复合。在一定的温度下，载流子处于动态平衡状态，即每一时刻产生的载流子数和复合的载流子数相等，载流子数始终等于某一常数。温度增加，载流子数上升，其导电能力也上升。

需要指出的是，空穴导电是束缚电子接力运动的结果，其导电能力低于自由电子。

#### 2. 杂质半导体

在本征半导体中可人为地有控制地掺入少量的特定杂质，这种掺杂半导体称为杂质半导体。

在本征半导体中掺入少量的五价元素（又称为施主杂质），形成 N 型半导体。在室温下杂质基本电离，形成自由电子和不参与导电的正离子。与此同时，也有硅原子中的电子摆脱原子核的束缚，形成自由电子和空穴。所以，N 型半导体中自由电子是多数载流子，空穴称为少数载流子，即  $n_n \gg p_n$ 。

同理,在本征半导体中掺入三价元素(又称为受主杂质),形成P型半导体。P型半导体中多数载流子是空穴,少数载流子是自由电子,即 $n_p \ll p_p$ 。

本节要求了解以下概念:本征半导体;杂质半导体;N型半导体;P型半导体;多数载流子和少数载流子;载流子的产生与复合。

### 1.1.2 PN 结

#### 1. 异型半导体接触现象

P型和N型半导体相接触,其交界面两侧由于载流子的浓度差,将产生扩散运动,形成扩散电流。由于载流子均是带电粒子,因而扩散的同时,将分别留下带正、负电荷的杂质离子,形成空间电荷和自建场。在该电场作用下,载流子作漂移运动,其方向与扩散方向相反,阻止扩散,平衡时扩散运动与漂移运动相等,通过界面的电流为0。这样在交界面处形成了缺少载流子的空间电荷区,此区呈现高阻,称之为阻挡层(又称为耗尽层)。

#### 2. PN 结的单向导电特性

在PN结两端加正向电压,该电压削弱自建场的作用,故扩散大于漂移,将由多数载流子的扩散运动产生正向电流,且外加电压增大,正向电流也增大,其关系为指数关系。同时阻挡层变薄。

加反向电压时,该电压与自建场方向一致,增强了电场作用,故漂移大于扩散,阻挡层变厚。此时,少数载流子在电场作用下作漂移运动,产生反向电流,由于是少数载流子运动形成电流,故反向电流很小(硅管在 $10^{-9}$  A数量级,锗管在 $10^{-6}$  A数量级),且当反向电压 $|U_D| > U_T$ 时,其值基本不变,故将反向电流称为反向饱和电流。

由上可看出,加正向电压时,PN结处于导通状态,其正向电流随正向电压增大而增大;加反向电压时,PN结处于截止状态,其反向电流是一个很小的值,基本不随外加电压变化,这就是PN结的单向导电性。

PN 结的电流、电压关系为

$$I_D = I_S(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$$

#### 3. PN 结的击穿特性

当反向电压超过某一值后,反向电流急剧增加,这种现象称为反向击穿。

击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。击穿时管子不一定损坏,只要电路中加有一定的串联电阻,其电流不要太大,使 $U_D \cdot I$ 小于最大功率损耗,管子就不会因过热而烧坏,当反向电压数值降低时,PN结的单向导电特性可以恢复正常。

#### 4. PN 结的电容效应

PN结的两端电压变化时,引起PN结内电荷变化,此即为PN结的电容效应。

PN结的电容有两种:势垒电容和扩散电容。

PN结电压变化,阻挡层厚度也发生变化,从而引起阻挡层内电荷变化。此种电容称为势垒电容 $C_T$ 。

PN结正向运用时,多数载流子在扩散过程中引起电荷积累,正向电压变化,其积累的电荷也变化,此种电容称为扩散电容 $C_D$ 。

PN 结的结电容用  $C_j$  表示。一般情况下, PN 结加正向电压时,  $C_j \approx C_D$ ; 加反向电压时  $C_j \approx C_T$ 。PN 结电容均随外加电压变化而变化。

### 5. 半导体二极管及其参数

二极管实际就是一个 PN 结。PN 结加上引线和管壳即为二极管。

二极管具有 PN 结的全部特性: 单向导电特性、击穿特性和电容效应。

二极管正向运用存在门限电压  $U_m$ , 当正向电压大于此值时, 二极管电流明显增大, 小于  $U_m$  时电流很小。常用  $U_m$  作为二极管导通或截止的界限。

二极管的主要参数有: 最大整流电流  $I_F$ , 最大反向工作电压  $U_R$ , 反向电流  $I_R$ , 直流电阻  $R_D$ , 交流电阻  $r_d$ , 最高工作频率  $f_M$ 。

### 6. 稳压二极管及其主要参数

稳压二极管是利用 PN 结的反向击穿特性。当管子击穿时, 反向电流在较大范围内变化, 其管子两端电压基本不变, 达到稳压的目的。

稳压管的主要参数有: 稳定电压  $U_Z$ 、稳定电流  $I_Z$ , 电压温度系数  $\alpha_U$ , 动态电阻  $r_Z$ , 额定功率损耗  $P_Z$ , 最大稳定电流  $I_{Zmax}$ 。

### 7. 二极管的应用

二极管的应用基础, 就是其单向导电特性, 所以分析二极管应用电路时, 关键是判断二极管的导通与截止状态。

本节的主要要求是掌握 PN 结的单向导电特性。掌握二极管和稳压二极管的主要参数。对以下概念应搞清楚: 漂移运动与扩散运动; 漂移电流与扩散电流; 直流电阻和交流电阻; 阻挡层与外加电压的关系。

## 1.1.3 半导体三极管

三极管是组成各种电子线路的核心器件。

### 1. 三极管的结构及类型

三极管有两个互相影响的 PN 结: 发射结和集电结; 三个区域(引出线为对应的极): 发射区(引出发射极)、基区(引出基极)和集电区(引出集电极)。

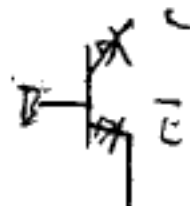
三极管分 NPN 和 PNP 两大类, 它们的区别是: 形成电流的载流子不同, 外加电压极性相反, 各极电流方向相反。

### 2. 三极管的放大作用

为实现放大, 三极管应满足下列条件:

- (1) 发射区重掺杂;
- (2) 基区很薄;
- (3) 集电结面积大;
- (4) 发射结正向偏置, 集电结反向偏置。

工作过程如下: 由于 e 结正向运用, 且 e 区重掺杂, 因而发射区的多数载流子大量扩散注入至基区, 又由于 c 结反向运用, 故注入至基区的载流子在基区形成浓度差, 所以注入的载流子在基区扩散至集电结, 被电场拉至 c 区形成集电极电流。由于基区很薄, 因此





注入的载流子在基区复合得较少,绝大多数均被c结收集。

电流分配关系如下:



$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$$

其中,  $I_{CBO}$  为c结少数载流子形成的反向饱和电流;  $I_{CEO}$  为  $I_B = 0$  时, c、e 极之间的穿透电流;  $\alpha$  为共基极电流放大系数;  $\beta$  为共发射极电流放大系数。 $\alpha$ 、 $\beta$  的定义为

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

注意  $\alpha$ 、 $\beta$  有两种定义:

一种是直流电流之比,称为直流放大系数:

$$\bar{\alpha} = \frac{\text{直流集电极电流 } I_C}{\text{直流发射极电流 } I_E}$$

$$\bar{\beta} = \frac{\text{直流集电极电流 } I_C}{\text{直流基极电流 } I_B}$$

另一种是变化量(交流)之比,称为交流放大系数:

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \quad \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

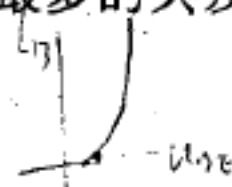
显然交、直流放大系数其含义是不同的。由于一般情况下,  $\alpha \approx \bar{\alpha}$ ,  $\beta \approx \bar{\beta}$ , 因此常常不区分  $\alpha$  与  $\bar{\alpha}$ ,  $\beta$  与  $\bar{\beta}$ 。

### 3. 特性曲线

三极管的特性曲线与三极管的接法有关,我们主要讲述用得最多的共发射极的特性。

(1) 输入特性:

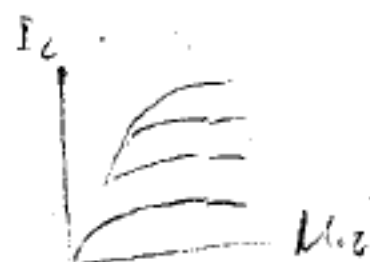
$$I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}=C} \quad (C \text{ 表示常数})$$



它与PN结的正向特性相似,由于三极管的两个PN结互相影响,因此输出电压  $U_{CE}$  对输入特性有影响,且  $U_{CE} > 1 \text{ V}$  时输入特性基本重合。一般输入特性用  $U_{CE} = 0 \text{ V}$  和  $U_{CE} \geq 1 \text{ V}$  两条特性曲线表示。

(2) 输出特性:

$$I_C = f(U_{CE})|_{I_B=C}$$



输出特性可分为三个区域:

- 截止区。  $I_B \leq 0$  的区域称为截止区,此时集电极电流近似为零,管子的集电极电压就等于电源电压,两个结均反向偏置。

- 饱和区。此区  $U_{CE} \uparrow \rightarrow I_C \uparrow$ , 此时  $I_C = \beta I_B$  关系不成立,而是由外电路确定,  $U_{CE} \approx 0.3 \text{ V}$ , 两个结均处于正向偏置。

- 放大区。此区  $I_C = \beta I_B$ ,  $I_C$  基本不随  $U_{CE}$  变化而变化,即特性曲线的平坦部分,可利用此特性组成恒流源。此时发射结正向偏置,集电结反向偏置。

## 4. 三极管的主要参数

(1) 电流放大系数  $\alpha$  或  $\beta$ ，主要表征管子的放大能力。一般二者关系为

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

(2) 极间反向电流:

$I_{CBO}$ ——集电极—基极反向饱和电流。

$I_{CEO}$ ——穿透电流，与  $I_{CBO}$  的关系为

$$I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO}$$

它们是由少数载流子形成的，与温度有关。

(3) 极限参数:

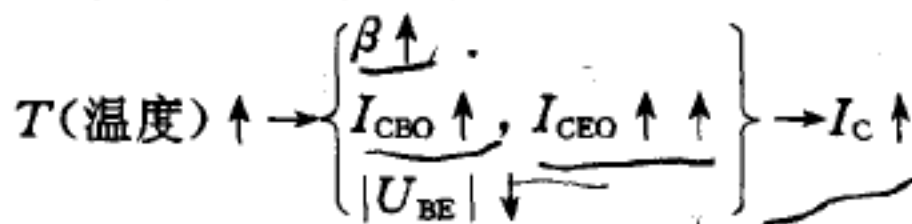
$I_{CM}$ ——集电极最大允许电流。

$P_{CM}$ ——集电极最大允许功率损耗。

$BU_{CBO}$ 、 $BU_{CEO}$ 、 $BU_{EBO}$ ——三极管的击穿电压。

$I_{CM}$ 、 $P_{CM}$ 、 $BU_{CEO}$  共同确定三极管的安全工作区。

## 5. 参数与温度的关系



本节主要要求读者掌握三极管的工作原理；能正确判断管子工作在什么区域；正确理解三极管主要参数。

## 1.2 典型题举例

例 1 在半导体中掺入三价元素后的半导体称为\_\_\_\_\_。

- ① 本征半导体      ② P型半导体  
③ N型半导体      ④ 半导体

答案: ②

例 2 少数载流子是空穴的半导体是\_\_\_\_\_。

- ① 本征半导体中掺入三价元素，是 P 型半导体  
② 本征半导体中掺入三价元素，是 N 型半导体  
③ 本征半导体中掺入五价元素，是 N 型半导体  
④ 本征半导体中掺入五价元素，是 P 型半导体

答案: ③

例 3 P 型半导体多数载流子是带正电的空穴，所以 P 型半导体\_\_\_\_\_。

- ① 带正电      ② 带负电  
③ 没法确定      ④ 电中性

答案: ④

例 4 PN 结加正向电压时, 其正向电流是由 多数载流子扩散 而成的。

- ① 多数载流子扩散而成  
② 多数载流子漂移而成  
③ 少数载流子扩散而成  
④ 少数载流子漂移而成

答案: ①

例 5 如果 PN 结反向电压的数值增大(小于击穿电压), 则 阻挡层变厚, 反向电流基本不变。

- ① 阻挡层不变, 反向电流基本不变  
② 阻挡层变厚, 反向电流基本不变  
③ 阻挡层变窄, 反向电流增大  
④ 阻挡层变厚, 反向电流减小

答案: ②

例 6 二极管的反向饱和电流在  $20^{\circ}\text{C}$  时是  $5\mu\text{A}$ , 温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ , 其反向饱和电流值增大一倍, 当温度为  $40^{\circ}\text{C}$  时, 反向饱和电流值为  $20\mu\text{A}$ 。

- ①  $10\mu\text{A}$     ②  $15\mu\text{A}$     ③  $20\mu\text{A}$     ④  $40\mu\text{A}$

答案: ③

例 7 理想二极管电路如图 1-1 所示, 已知输入为正弦波  $u_i = 30 \sin \omega t$  (V), 试画出输出电压  $u_o$  的波形。

解: 关键在于判断二极管  $V_{D1}$ 、 $V_{D2}$  的导通与截止状况。如  $V_{D1}$  导通,  $u_o = 20\text{V}$ ;  $V_{D2}$  导通,  $u_o = 5\text{V}$ , 只有  $V_{D1}$ 、 $V_{D2}$  均截止时,  $u_o = u_i$ 。

$u_i \geq 20\text{V}$  时,  $V_{D1}$  正偏导通,  $V_{D2}$  反偏截止, 所以输出  $u_o$  等于  $20\text{V}$ 。

$u_i \leq 5\text{V}$  时,  $V_{D1}$  反偏截止,  $V_{D2}$  正偏导通, 所以输出为  $5\text{V}$ 。

当  $5\text{V} < u_i < 20\text{V}$  时,  $V_{D1}$ 、 $V_{D2}$  均反偏截止, 输出  $u_o$  等于输入  $u_i$ , 其波形图如图 1-2 所示。

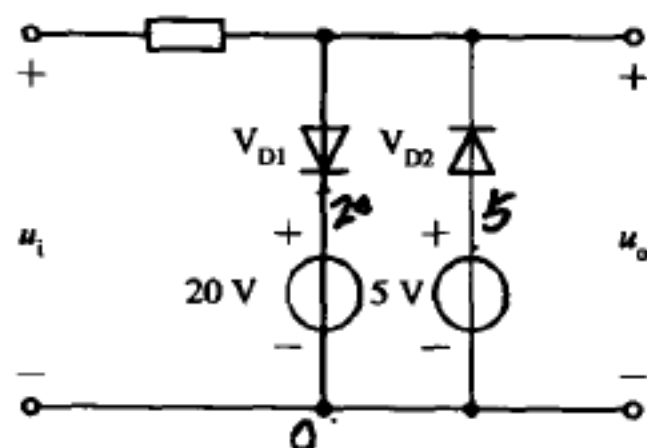


图 1-1 例 7 图

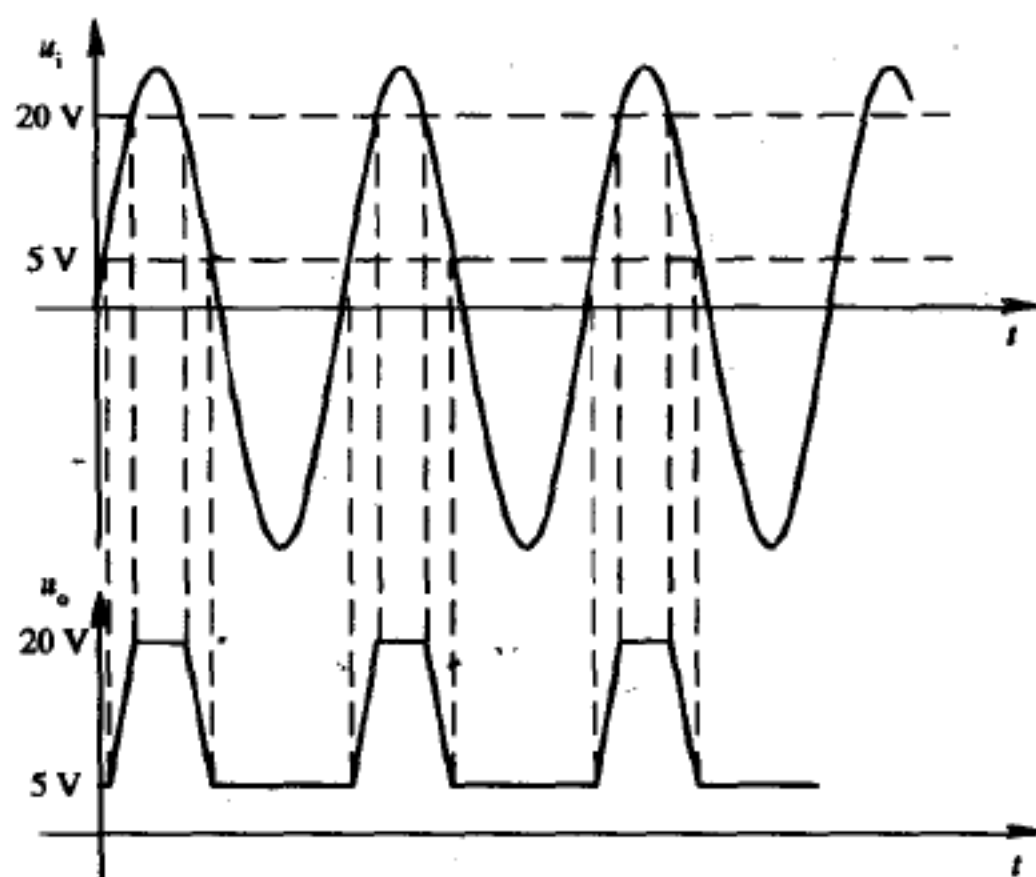


图 1-2 波形图

**例 8** 理想二极管电路如图 1-3 所示, 试问输出端电压  $U_o = ?$

**解:** 如孤立地看,  $V_{D1}$ 、 $V_{D2}$ 、 $V_{D3}$  每管均为正向偏置, 处于导通状态。实际上, 它是一个整体, 互相有影响, 当输入电压不相同, 只可能有一只二极管导通, 即正向电压最大的二极管导通, 其余的均截止。对此例,  $V_{D3}$  管压降  $U_3 = 4.5 \text{ V}$  最大, 故该管导通,  $U_o = 0.3 \text{ V}$ ,  $V_{D1}$ 、 $V_{D2}$  截止。

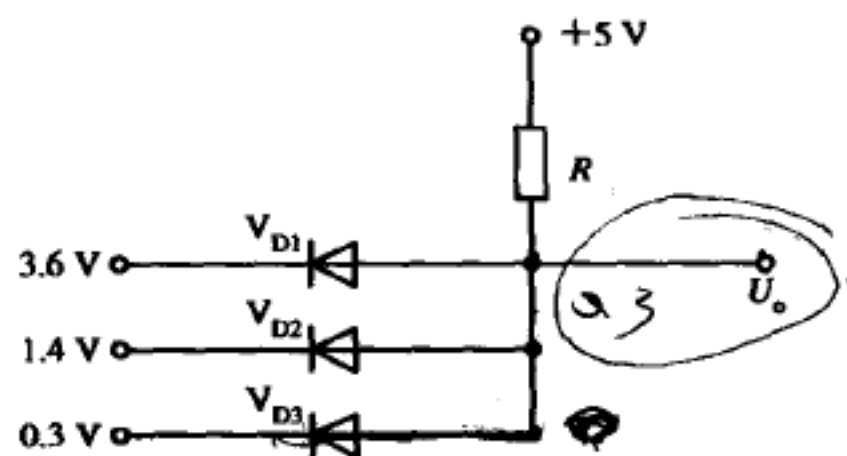


图 1-3 例 8 图

如在分析时, 认为  $V_{D1}$  导通, 则  $U_o = 3.6 \text{ V}$ , 此时  $V_{D2}$ 、 $V_{D3}$  仍正向偏置, 而  $V_{D2}$  导通,  $U_o = 1.4 \text{ V}$ , 此电压使  $V_{D1}$  截止, 但仍能使  $V_{D3}$  导通。而  $V_{D3}$  导通,  $U_o = 0.3 \text{ V}$ , 此电压使  $V_{D1}$ 、 $V_{D2}$  均截止, 所以, 此电路只能  $V_{D3}$  导通,  $U_o = 0.3 \text{ V}$ 。

**例 9** 要使三极管正常放大信号, 要求三极管

- ① 发射极重掺杂
- ② 基区很薄
- ③ 集电结面积大于发射结面积
- ④ 发射结、集电结均正向运用
- ⑤ 发射结正向运用, 集电结反向运用

**答案:** ① ② ③ ⑤

**例 10** 测得三极管的三个电极电位为  $U_x = 5 \text{ V}$ ,  $U_y = 1.2 \text{ V}$ ,  $U_z = 1.7 \text{ V}$ , 试判断该管是锗管还是硅管, 是 PNP 管还是 NPN 管, 并确定 e、b、c 极。

**答:** 这类题型首先应找出发射结, 相差为  $0.7 \text{ V}$  (硅管) 或  $0.2 \text{ V}$  (锗管) 的两个极为发射结, 按其相差的数值确定是锗管还是硅管。发射结确定后, 第三个极必定是集电极, 再根据 NPN 三极管  $U_c > U_b > U_e$ , PNP 三极管  $U_c < U_b < U_e$ , 确定出是 NPN 三极管还是 PNP 三极管, 最后即可确定 e、b、c 极。

对该题按上述过程可判断出:

- ① 因为  $U_y - U_z = 0.2 \text{ V}$ , 故该管为锗 (Ge) 管。
- ②  $U_x$  为集电极电位, 且电位最高, 故为 NPN 三极管。
- ③ NPN 管  $U_c > U_b > U_e$ , 故 x 为集电极, y 为基极, z 为发射极。

**例 11** 晶体管工作在放大区, 测得当  $I_B = 10 \mu\text{A}$  时  $I_C = 1 \text{ mA}$ ,  $I_B = 30 \mu\text{A}$  时  $I_C = 2 \text{ mA}$ , 求该管交流放大系数  $\beta$  和直流放大系数  $\bar{\beta}$ , 该管穿透电流  $I_{CEO}$  为多大?

**解:** 按交流放大系数定义:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

则

$$\beta = \frac{(2 - 1) \times 10^{-3}}{(30 - 10) \times 10^{-6}} = \frac{1 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-6}} = 50$$



由直流放大系数定义：

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

当  $I_B = 30 \mu\text{A}$  时，

$$\bar{\beta} = \frac{2 \times 10^{-3}}{30 \times 10^{-6}} = 66$$

可能读者会问，教材讲了一般情况下  $\beta = \bar{\beta}$ ，而此处为何相差如此之大，且  $\bar{\beta}$  不是一个常数。这主要是  $I_{CEO}$  太大所致。所以，当  $I_{CEO}$  太大时  $\beta = \bar{\beta}$  不成立，且  $\bar{\beta}$  随直流工作点而变化。

下面求该管的  $I_{CEO}$ ：

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$

则

$$I_{CEO} = I_C - \beta I_B = 1 \times 10^{-3} - 50 \times 10 \times 10^{-6} = 0.5 \text{ mA}$$

或

$$I_{CEO} = 2 \times 10^{-3} - 50 \times 30 \times 10^{-6} = 0.5 \text{ mA}$$

例 12 三极管参数为  $P_{CM} = 800 \text{ mW}$ ， $I_{CM} = 100 \text{ mA}$ ， $BU_{CEO} = 30 \text{ V}$ ，在下列几种情况中，属于工作正常的是\_\_\_\_\_。

①  $U_{CE} = 15 \text{ V}$ ， $I_C = 150 \text{ mA}$

②  $U_{CE} = 20 \text{ V}$ ， $I_C = 80 \text{ mA}$

③  $U_{CE} = 35 \text{ V}$ ， $I_C = 100 \text{ mA}$

④  $U_{CE} = 10 \text{ V}$ ， $I_C = 50 \text{ mA}$

答案：④

### 1.3 思考题和习题解答

1. 什么是本征半导体？什么是杂质半导体？各有什么特征？

答：本征半导体是纯净的半导体晶体，而杂质半导体是在本征半导体中，人为地掺入少量的三价或五价元素而成的。本征半导体中参与导电的是自由电子和空穴，且自由电子数等于空穴数。杂质半导体根据掺入的杂质不同其导电特性也不同，掺入三价元素，空穴数多于自由电子数，参与导电的主要是空穴，所以称为 P 型半导体；掺入五价元素，自由电子数多于空穴数，参与导电的主要是自由电子，所以称为 N 型半导体。

2. N 型半导体是在本征半导体中掺入五价元素，其多数载流子是自由电子，少数载流子是空穴。

答案：五；自由电子；空穴

3. P 型半导体是在本征半导体中掺入\_\_\_\_\_价元素，其多数载流子是\_\_\_\_\_，少数载流子是\_\_\_\_\_。

答案：三；空穴；自由电子

4. 在室温附近，温度升高，杂质半导体中的\_\_\_\_\_浓度明显增加。

答案：少数载流子

5. 什么叫载流子的扩散运动、漂移运动？它们的大小主要与什么有关？

答：由于载流子浓度差引起的运动称为扩散运动；由于电场存在，在电场作用下的运



动称为漂移运动。扩散运动的大小主要与载流子的浓度差有关,即  $i_D \propto \frac{dP}{dX} \left( \frac{dN}{dX} \right)$ ; 漂移运动主要与电场的大小有关,即  $i_E \propto E$ 。

6. 在室温下,对于掺入相同数量杂质的 P 型半导体和 N 型半导体,其导电能力\_\_\_\_\_。(a) 二者相同; (b) N 型导电能力强; (c) P 型导电能力强)

答案: (b)

解释 因为自由电子运动比空穴运动(束缚电子运动)容易得多,自由电子导电能力强于空穴,所以在掺杂浓度相同的前提下, N 型半导体导电能力好于 P 型半导体。

7. PN 结是如何形成的? 在热平衡下, PN 结有无净电流流过?

答: P 型和 N 型半导体接触时,在交界面两侧,由于自由电子和空穴的浓度相差悬殊,则将产生扩散运动。自由电子由 N 区向 P 区扩散,空穴由 P 区向 N 区扩散。由于自由电子和空穴均是带电粒子,因而自由电子由 N 区向 P 区扩散的同时,在 N 区剩下带正电的杂质离子;同样,空穴由 P 区向 N 区扩散的同时,在 P 区剩下带负电的杂质离子,这就形成了空间电荷区。故在 P 区和 N 区交界处形成 N 正 P 负的电场(称为自建场)。在此电场作用下,载流子将作漂移运动,其方向与扩散运动方向相反,阻止了扩散运动。扩散越多,电场越强,漂移运动越强,对扩散的阻力越大。平衡时,扩散运动与漂移运动相等,通过界面的载流子为 0,即 PN 结的电流为 0,这就是 PN 结的形成过程。

热平衡时,通过界面的载流子数为 0,所以净电流也为 0。

8. PN 结未加外部电压时,扩散电流\_\_\_\_\_漂移电流;加正向电压时,扩散电流\_\_\_\_\_漂移电流,其耗尽层\_\_\_\_\_;加反向电压时,扩散电流\_\_\_\_\_漂移电流,其耗尽层\_\_\_\_\_。

答案: 等于; 大于; 变薄; 小于; 变厚

9. 什么是 PN 结的击穿现象? 击穿有哪两种? 击穿是否意味着 PN 结坏了? 为什么?

答: PN 结的反向电压加到某一数值时,反向电流突然剧增,这种现象称为击穿现象。击穿有雪崩击穿和齐纳击穿两种,前者是载流子在强电场作用下高速运动,具有很大的动能,在与硅原子(或锗原子)碰撞时,将载流子打出来,新的载流子再作高速运动;与半导体原子碰撞时,仍会打出新的载流子,这样一变二、二变四……,载流子大增,所以电流急剧增加。后者是在电场作用下,直接将载流子从半导体材料的原子中拉出来,使载流子大增,电流急剧增大。

击穿不一定损坏 PN 结,只要在电路中串入一个适当的限流电阻即可,使流过二极管的反向电流与反向电压的乘积不超过允许功率损耗,管子就不会损坏。

10. 什么是 PN 结的电容效应? 何谓势垒电容、扩散电容? PN 结正向运用时,主要考虑何种电容? 反向运用时,主要考虑何种电容?

答: 当外加电压变化,引起 PN 结两侧电荷变化,这种现象称为 PN 结的电容效应。

势垒电容: 外加电压变化,引起阻挡层厚度变化,从而引起阻挡层内电荷变化,这种电容效应称为势垒电容。

扩散电容: 外加电压变化,载流子扩散也变化,从而引起阻挡层外电荷变化,这种电容效应称为扩散电容。

显然,反向运用时主要考虑势垒电容;正向运用时主要考虑扩散电容。

11. 二极管的直流电阻  $R_D$  和交流电阻  $r_d$  有何不同? 如何在伏安特性曲线上表示出来?

答: 直流电阻  $R_D$  是二极管两端的直流电压与流过二极管的直流电流之比, 即

$$R_D = \frac{U_F}{I_F}$$

其在伏安特性曲线上的表示如图 1-4(a) 所示。

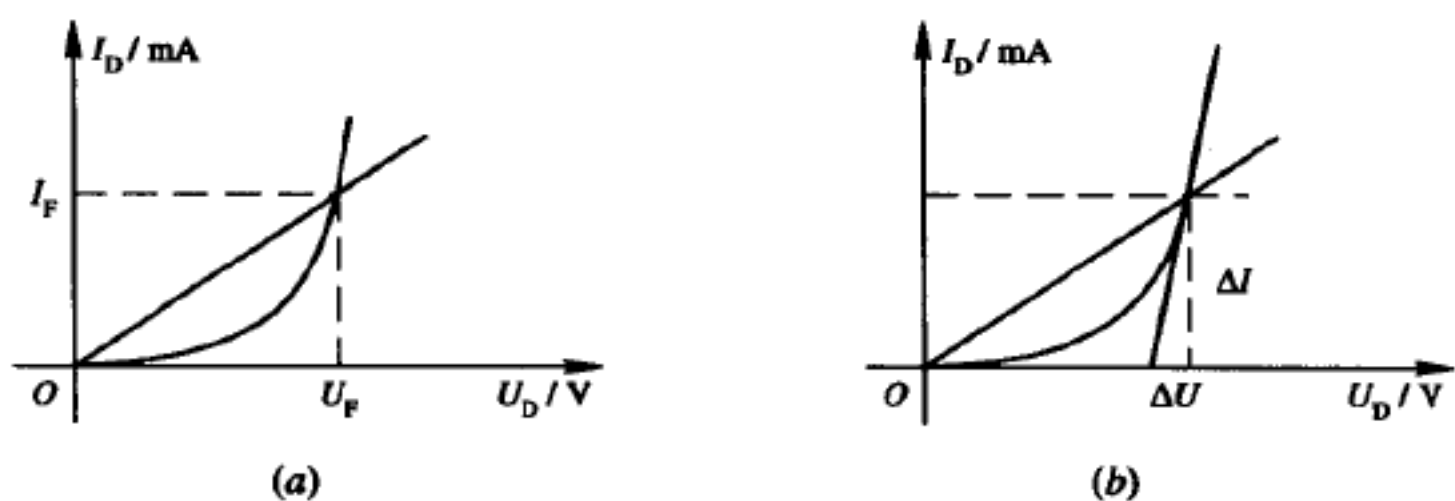


图 1-4 交、直流电阻在伏安特性曲线上的表示

交流电阻  $r_d$  是二极管工作点附近电压的微变值  $\Delta U$  与相应的微变电流值  $\Delta I$  之比, 即

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

其在伏安特性曲线上的表示如图 1-4(b) 所示。

一般情况下这种电阻是非线性的, 其值均随工作电流加大而减小, 且  $R_D > r_d$ 。

12. 二极管的伏安特性方程为

$$I_D = I_S(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$$

试推导二极管正向导通时的交流电阻

$$r_d = \frac{dU}{dI} = \frac{U_T}{I_D}$$

室温下  $U_T = 26 \text{ mV}$ , 当正向电流为  $1 \text{ mA}$ 、 $2 \text{ mA}$  时, 估算其电阻  $r_d$  的值。

解:

$$dI_D = d[I_S(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)] = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{U}{U_T}} dU \approx \frac{I_D}{U_T} dU$$

即

$$r_d = \frac{U_T}{I_D} = \frac{26(\text{mV})}{I_D}$$

$I_D = 1 \text{ mA}$ ,  $2 \text{ mA}$  时,  $r_d$  的值分别为

$$r_{d1} = \frac{26 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 26 \Omega$$

$$r_{d2} = \frac{26 \text{ mV}}{2 \text{ mA}} = 13 \Omega$$

13. 稳压二极管是利用二极管的 反向击穿 特性。

((a) 正向导通; (b) 反向截止; (c) 反向击穿)

答案: (c)

14. 二极管电路如图 1-5 所示, 已知输入电压  $u_i = 30 \sin \omega t (\text{V})$ ; 二极管的正向压降

和反向电流均可忽略。试画出输出电压  $u_o$  的波形。

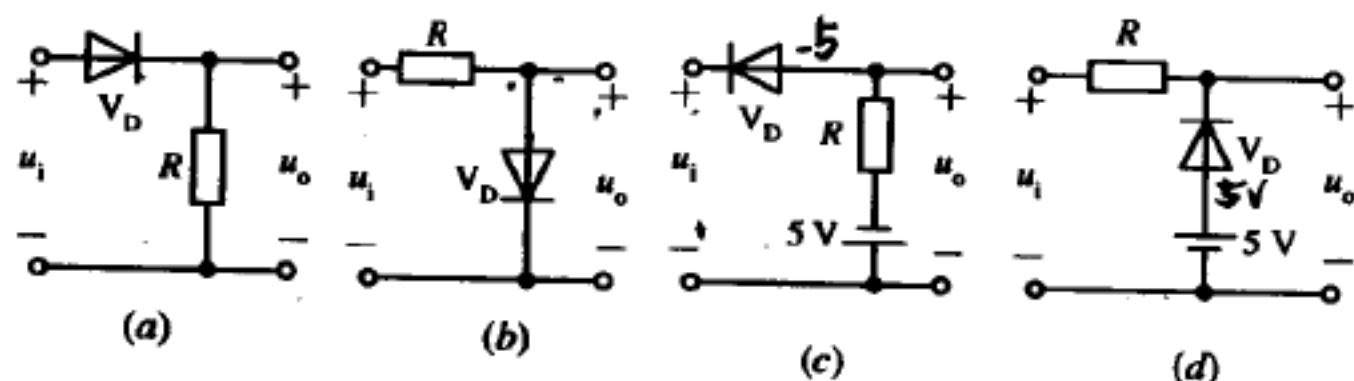


图 1-5 题 14 图

解: (a)  $u_i > 0$ , 二极管导通,  $u_o = u_i$ ;  $u_i < 0$ , 二极管截止,  $u_o = 0$  V。波形图如图 1-6 (a) 所示。

(b)  $u_i > 0$ , 二极管导通,  $u_o = 0$  V;  $u_i < 0$ , 二极管截止,  $u_o = u_i$ 。波形如图 1-6 (b) 所示。

(c)  $u_i > -5$  V, 二极管截止,  $u_o = -5$  V;  $u_i < -5$  V, 二极管导通,  $u_o = u_i$ 。波形如图 1-6 (c) 所示。

(d)  $u_i > 5$  V, 二极管截止,  $u_o = u_i$ ;  $u_i < 5$  V, 二极管导通,  $u_o = +5$  V。波形如图 1-6 (d) 所示。

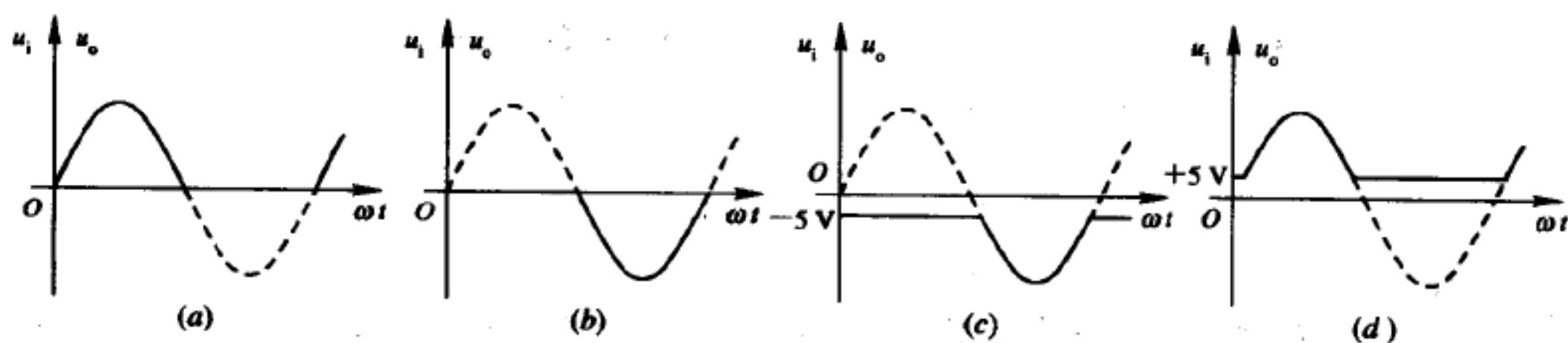


图 1-6 题 14 解图

15. 电路如图 1-7 所示,  $u_i = 5 \sin \omega t$ , 试画出输出电压波形  $u_o$ 。

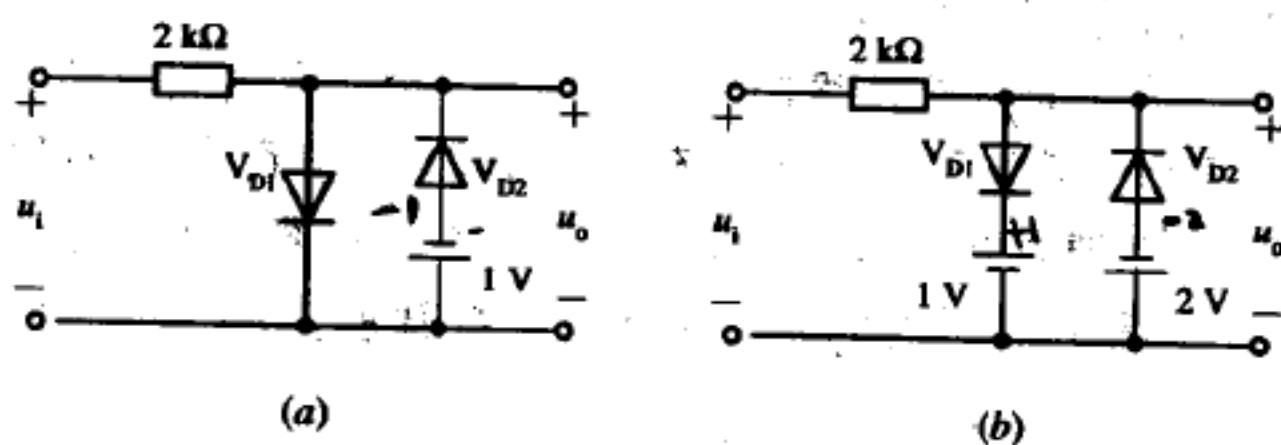


图 1-7 题 15 图

解: (a)  $u_i > 0$  V,  $V_{D1}$  导通,  $V_{D2}$  截止,  $u_o = 0$  V;  $u_i < -1$  V,  $V_{D1}$  截止,  $V_{D2}$  导通,  $u_o = -1$  V;  $-1$  V  $< u_i < 0$  V,  $V_{D1}$ 、 $V_{D2}$  均截止,  $u_o = u_i$ 。波形如图 1-8 (a) 所示。

(b)  $u_i > 1$  V,  $V_{D1}$  导通,  $V_{D2}$  截止, 输出电压  $u_o = 1$  V;  $u_i < -2$  V,  $V_{D1}$  截止,  $V_{D2}$  导通,  $u_o = -2$  V;  $-2$  V  $< u_i < 1$  V,  $V_{D1}$ 、 $V_{D2}$  均截止,  $u_o = u_i$ 。输出电压波形如图 1-8 (b) 所示。

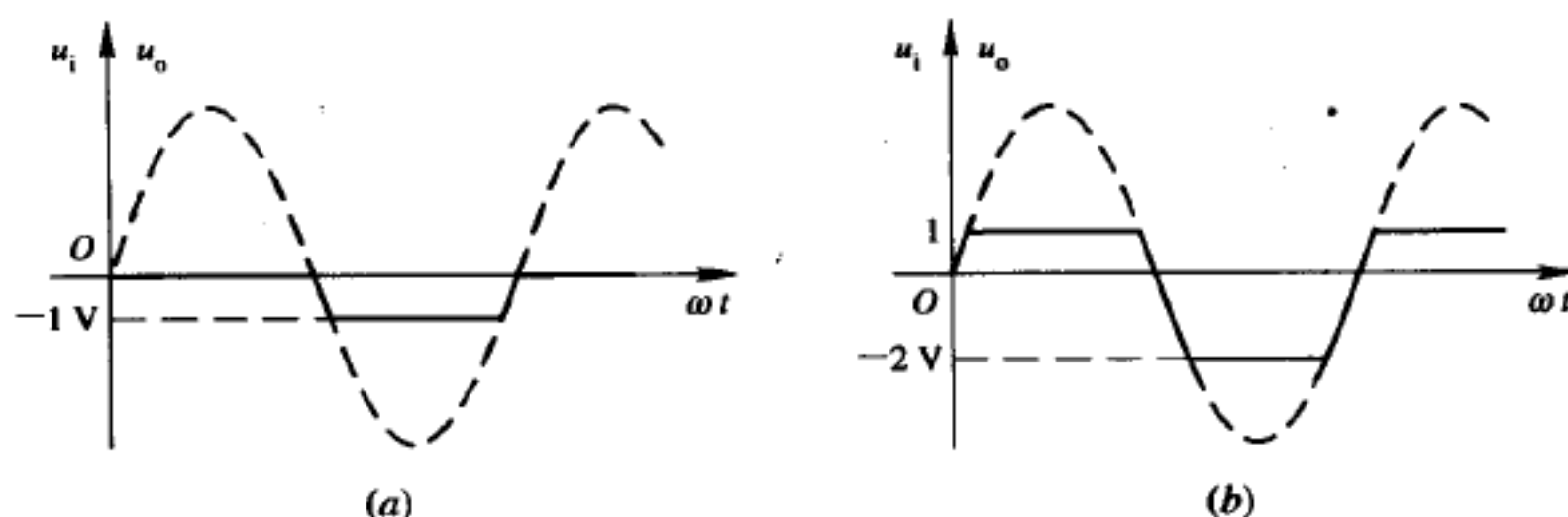


图 1-8 题 15 解图

16. 由理想二极管组成的电路如图 1-9 所示, 试确定各电路的输出电压  $U_o$ 。

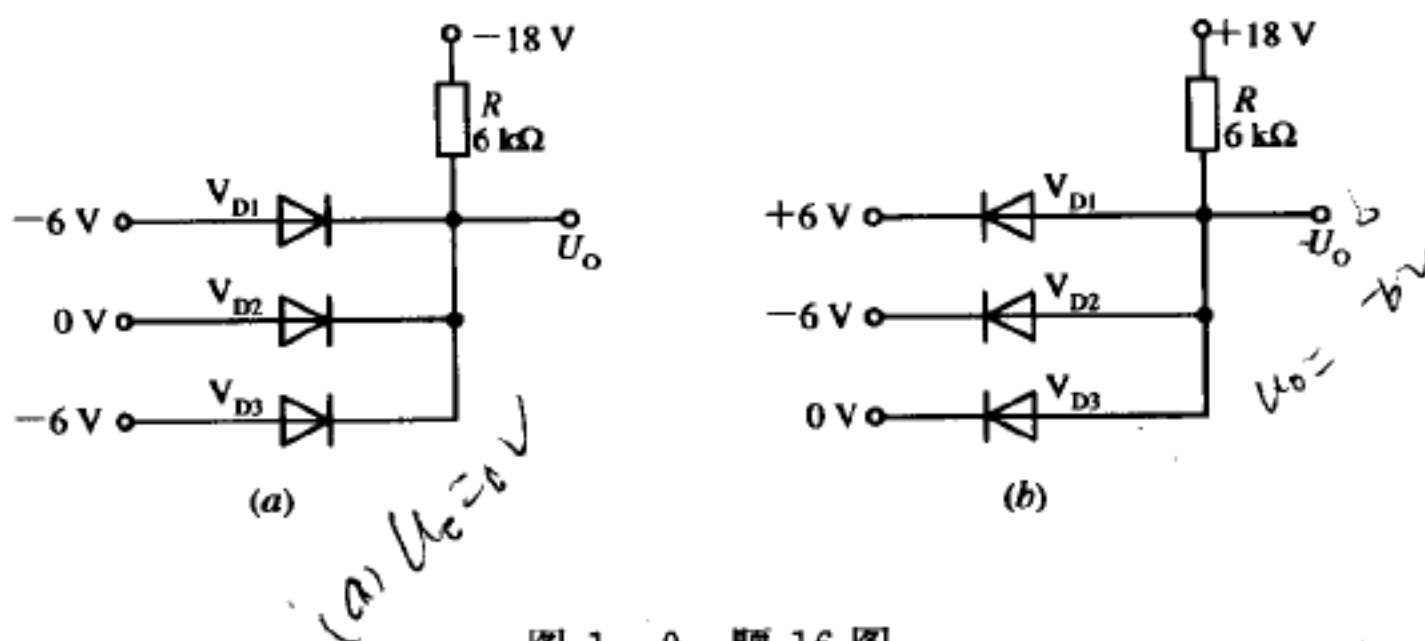


图 1-9 题 16 图

解: (a)  $U_o = 0\text{ V}$ ; (b)  $U_o = -6\text{ V}$

17. 为了使三极管能有效地起放大作用, 要求三极管的发射区掺杂浓度高; 基区宽度要薄; 集电结面积比发射结面积大。其理由是什么? 如图将三极管的集电极和发射极对调使用(即三极管反接), 能否起放大作用?

答: 因为只有由发射极注入到基区的载流子, 才能形成集电极电流, 而基区向发射极注入的载流子, 是构成发射极电流的一部分, 它对载流子的传输无贡献, 使管子的电流放大系数减小, 所以要求发射极为高浓度的掺杂。由发射极注入的载流子, 在基区扩散的同时, 不断地复合, 而复合的载流子不利于载流子的传输, 它使到达集电极的载流子数下降, 即集电极电流下降, 所以要求基区薄, 以减少复合的载流子数。集电极面积愈大, 收集到由发射极注入, 通过基区扩散到达集电极的载流子数就愈多, 所以要求集电结的面积要大。

三极管反接, 无放大作用。

18. 三极管工作在放大区时, 发射结为\_\_\_\_\_, 集电结为\_\_\_\_\_; 工作在饱和区时, 发射结为\_\_\_\_\_, 集电结为\_\_\_\_\_; 工作在截止区时, 发射结为\_\_\_\_\_, 集电结为\_\_\_\_\_。

答案: 正向运用; 反向运用; 正向运用; 正向运用; 反向运用; 反向运用

19. 工作在放大区的某三极管, 当  $I_B$  从  $20\text{ }\mu\text{A}$  增大到  $40\text{ }\mu\text{A}$ ,  $I_C$  从  $1\text{ mA}$  变成  $2\text{ mA}$  时, 它的  $\beta$  约为\_\_\_\_\_。(50、100、200)

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{1}{20}$$



答案: 50  $\left( \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2-1}{0.04-0.02} = \frac{1}{0.02} = 50 \right)$

20. 工作在放大状态的三极管, 流过发射结的电流主要是\_\_\_\_\_, 流过集电结的电流主要是\_\_\_\_\_。(a) 扩散电流, (b) 漂移电流

答案: (a); (b)

21. 当温度升高时, 三极管的  $\beta$  \_\_\_\_\_, 反向饱和电流  $I_{BO}$  \_\_\_\_\_,  $U_{BE}$  下降。

答案: 增大; 增大

22. (1) 某三极管, 其  $\alpha=0.98$ , 当发射极电流为 2 mA 时, 基极电流是多少? 该管的  $\beta$  为多大?

(2) 另一只三极管, 其  $\beta=100$ 。当发射极电流为 5 mA 时, 基极电流是多少? 该管的  $\alpha$  为多大?

解: (1) 由

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

得

$$I_C = \alpha I_E = 0.98 \times 2 = 1.96 \text{ mA}$$

则

$$I_B = I_E - I_C = 2 - 1.96 = 0.04 \text{ mA}$$

故

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.96}{0.04} = 49$$

故

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{0.98}{0.02} = 49$$

(2) 由

$$I_E = I_C + I_B = \beta I_B + I_B = (1 + \beta) I_B$$

得

$$I_B = \frac{I_E}{1 + \beta} = \frac{5}{101} = 0.0495 \text{ mA}$$

故

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} = 0.99$$

23. 三极管的安全工作区受哪些极限参数的限制? 使用时, 如果超过某项极限参数, 试分别说明将会产生什么结果。

答: 三极管的极限参数为最大功率损耗  $P_{\text{max}}$ , 最大集电极电流  $I_{\text{CM}}$  和击穿电压  $BU_{\text{CEO}}$  等。使用时均不能超过它们, 如超过  $P_{\text{max}}$ , 管子将烧坏; 如超过击穿电压, 管子将失去放大作用; 如加有限流电阻, 管子不一定损坏。当超过  $I_{\text{CM}}$  时, 电流放大系数  $\beta$  下降太多, 将产生非线性失真。

24. 放大电路中两个三极管的两个电极电流如图 1-10 所示。

(1) 求另一个电极电流, 并在图上标出实际方向。

(2) 判断它们各是 NPN 还是 PNP 型管, 标出 e、b、c 极。

(3) 估算它们的  $\alpha$ 、 $\beta$  值。

答: 按三极管的关系:

$$-I_E + I_C + I_B = 0$$

所以对图 1-10(a), 有

$$I_E = I_C + I_B = 4 + 0.1 = 4.1 \text{ mA}$$

其电流方向如图 1-11(a)所示向外流, 对图 1-10(b), 有

$$I_C = I_E - I_B = 6.1 - 0.1 = 6 \text{ mA}$$

其电流方向如图 1-11(b)所示向外流。

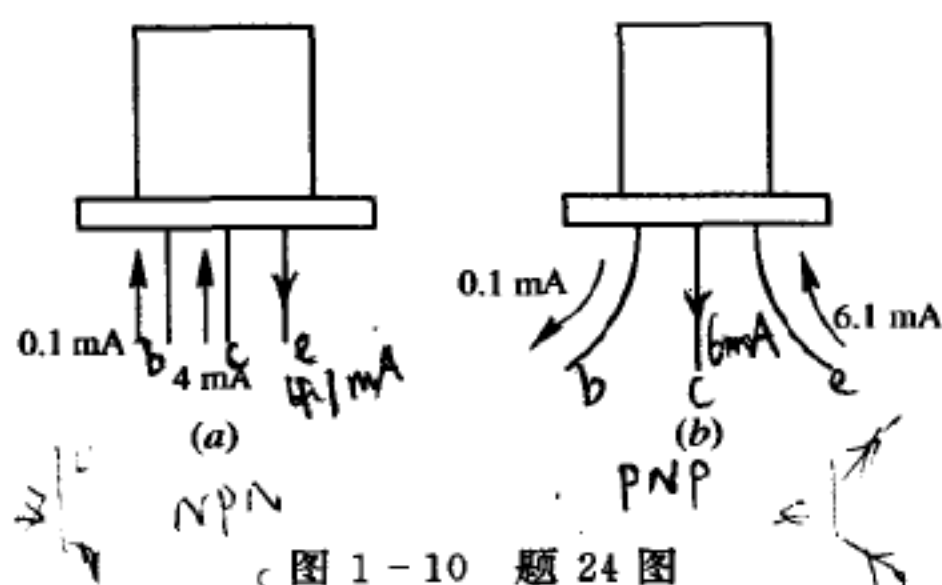


图 1-10 题 24 图

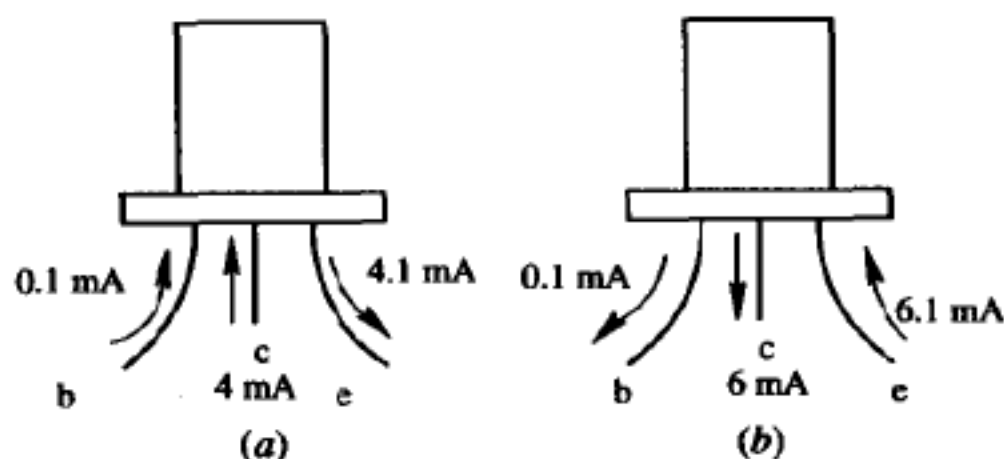


图 1-11 题 24 答图

(2) 按 NPN 和 PNP 电流方向, NPN 管子基极电流和集电极电流均为流进, 发射极电流流出; PNP 管子基极电流和集电极电流均流出, 发射极电流流进。只要工作在放大区, 三个电流的关系为  $I_E > I_C > I_B$ , 故可确定图 1-10(a) 为 NPN 管, 图 1-10(b) 为 PNP 管, 其 e、b、c 极标在图 1-11 上。

(3) 图 1-10(a) 的  $\alpha$ 、 $\beta$  值为

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{4}{4.1} \approx 0.9756$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{4}{0.1} = 40$$

或

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \approx 39.98$$

图 1-10(b) 的  $\alpha$ 、 $\beta$  值为

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{6}{6.1} \approx 0.9836$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{6}{0.1} = 60$$

或

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \approx 59.98$$

25. 放大电路中, 测得几个三极管三个电极电位  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  分别为下列各组数值, 判断它们是 NPN 型还是 PNP 型, 是硅管还是锗管, 确定 e、b、c。

(1)  $U_1 = 3.3 \text{ V}$ ,  $U_2 = 2.6 \text{ V}$ ,  $U_3 = 15 \text{ V}$ ; 硅 NPN

(2)  $U_1 = 3 \text{ V}$ ,  $U_2 = 3.2 \text{ V}$ ,  $U_3 = 15 \text{ V}$ ; 锗 NPN

(3)  $U_1=6.4\text{ V}$ ,  $U_2=14.3\text{ V}$ ,  $U_3=15\text{ V}$ ; 硅 PNP

(4)  $U_1=8\text{ V}$ ,  $U_2=14.8\text{ V}$ ,  $U_3=15\text{ V}$ ; 硅 PNP

解: (1)  $U_1-U_2=0.7\text{ V}$ , 故 1、2 间为发射结,  $U_3$  即为集电极电位, e 结电压为  $0.7\text{ V}$ , 为硅管, 集电极电压最高, 为 NPN 三极管。所以可判定 1 为基极, 2 为发射极, 3 为集电极。

(2)  $U_2-U_1=0.2\text{ V}$ , 故为锗管,  $U_3$  为集电极电位, 最高, 故为 NPN 三极管。1 为发射极, 2 为基极, 3 为集电极。

(3)  $U_3-U_2=0.7\text{ V}$ , 故为硅管,  $U_1$  为集电极电位, 最低, 故为 PNP 三极管。1 为集电极, 2 为基极, 3 为发射极。

(4)  $U_3-U_2=0.2\text{ V}$ , 故为锗管,  $U_1$  为集电极电位, 最低, 故为 PNP 三极管。1 为集电极, 2 为基极, 3 为发射极。

26. 用万用表测量某些三极管的管压降得下列几组值, 说明每个管子是 NPN 型还是 PNP 型, 是硅管还是锗管, 并说明它们工作在什么区域。

(1)  $U_{BE}=0.7\text{ V}$ ,  $U_{CE}=0.3\text{ V}$ ; 硅 PNP 截止

(2)  $U_{BE}=0.7\text{ V}$ ,  $U_{CE}=4\text{ V}$ ; 硅 NPN 放大

(3)  $U_{BE}=0\text{ V}$ ,  $U_{CE}=4\text{ V}$ ; NPN 截止

(4)  $U_{BE}=-0.2\text{ V}$ ,  $U_{CE}=-0.3\text{ V}$ ; PNP 放大

(5)  $U_{BE}=0\text{ V}$ ,  $U_{CE}=-4\text{ V}$ ; PNP 截止

解: (1)  $U_{BE}=0.7\text{ V}$ , 故为硅管, 其电压均为正值, 故为 NPN 三极管。  $U_{CE}=0.3\text{ V}$ , 工作在饱和区。

(2)  $U_{BE}=0.7\text{ V}$ , 故为硅管, 其电压均为正值, 故为 NPN 三极管。  $U_{CE}=4\text{ V} > 0.3\text{ V}$ , 工作在放大区。

(3)  $U_{BE}=0\text{ V}$ , 管子工作在截止区, 无法判定是锗管还是硅管。  $U_{CE} > 0\text{ V}$ , 故为 NPN 三极管。

(4)  $U_{BE}=-0.2\text{ V}$ , 故为锗管, 其电压均为负值, 故为 PNP 三极管。  $U_{CE}=-0.3\text{ V}$ , 故工作在饱和区。

(5)  $U_{BE}=-0.2\text{ V}$ , 故为锗管, 其电压均为负值, 故为 PNP 三极管。  $U_{CE}=-4\text{ V} < -0.3\text{ V}$ , 故工作在放大区。

(6)  $U_{BE}=0\text{ V}$ , 故为截止区。  $U_{CE}$  为负值, 故为 PNP 三极管, 无法判定是锗管还是硅管。

27. 电路如图 1-12 所示。已知三极管为硅管,  $U_{BE}=0.7\text{ V}$ ,  $\beta=50$ ,  $I_{CBO}$  可不计。若希望  $I_C=2\text{ mA}$ , 试求 (a) 图的  $R_e$  和 (b) 图的  $R_b$  值, 并将二者进行比较。

解: (a) 图中

$$6\text{ V} = U_{BE} + I_E R_e \quad \text{且 } I_C \approx I_E$$

故

$$R_e = \frac{6\text{ V} - U_{BE}}{I_C} = \frac{6\text{ V} - 0.7\text{ V}}{2\text{ mA}} = 2.65\text{ k}\Omega$$

(b) 图中

$$6\text{ V} = U_{BE} + I_B R_b \quad \text{且 } I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

故

$$R_b = \frac{6\text{ V} - U_{BE}}{I_C} \beta = 2.65 \times 50 = 132.5\text{ k}\Omega$$

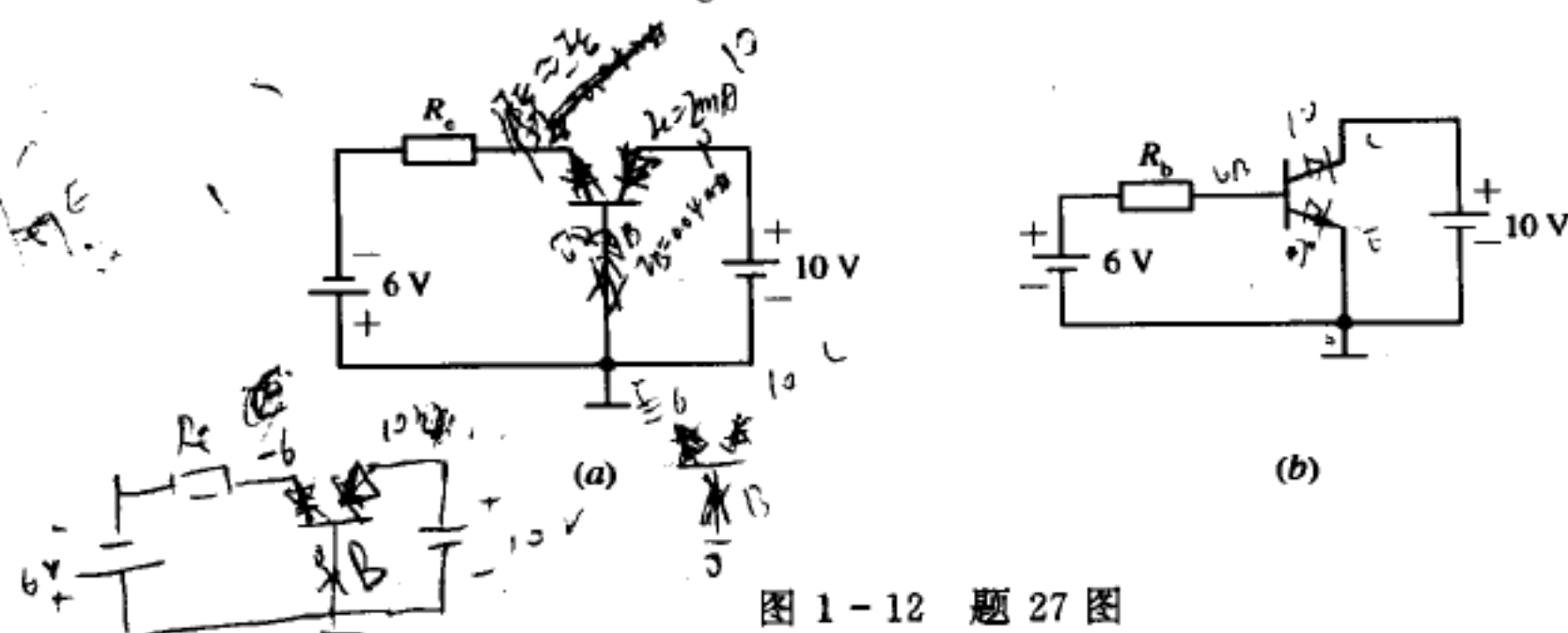


图 1-12 题 27 图

由于流过  $R_b$  的电流  $I_E$  比流过  $R_b$  的电流  $I_B$  大近似  $\beta$  倍, 因此  $R_b \approx \beta R_e$ 。



## 第二章 放大电路分析

本章是本课程的重点内容之一，它包含了基本放大电路和多级放大电路的工作原理及其分析方法，它们均是本课程的最基本部分。

本章介绍了模拟电路的一些基本概念：如交流通路和直流通路、静态和动态、直流和交流负载线、工作点、饱和和截止失真、放大倍数、输入电阻和输出电阻等等。这些概念贯穿本课程的始终，如果这些内容掌握不好，对今后的各章学习将带来许多困难，甚至会导致原则性的错误。

基本放大电路是组成其它各种复杂放大电路的基础，如多级放大电路、负反馈放大电路、运算放大电路及正弦振荡电路等等，所以掌握好本章的内容后，才能进一步学好后面几章的内容。

本章介绍了模拟电子线路中最基本、最常用的分析方法，即图解法和微变等效电路法，要求学生熟练掌握好这些分析法。

基于上述各点，可以看出本章在模拟电子技术课程中的位置是十分重要的，是基础之基础。

另外，初学者学习本章时，常会感到十分困难，其原因是新概念太多，且较为集中提出，一时难于理解和消化。因此要求在学习本章时，要注意准确理解概念，多做习题，通过做题加深理解和应用概念。

**通过本章的学习，要求熟练掌握下面几个重点内容：**

- (1) 放大电路直流工作点(Q点)的估算；
- (2) 放大电路指标计算，含电压放大系数  $A_u = \frac{U_o}{U_i}$ 、源电压放大系数  $A_{us} = \frac{U_o}{U_s}$ 、输入电阻  $r_i$ 、输出电阻  $r_o$  的计算；
- (3) 根据输出电压波形，判断非线性失真的类型，及怎样调整电路参数消除非线性失真。

### 2.1 本章小结

#### 2.1.1 放大电路的组成原理

这一节应搞清下述几个问题：

- (1) 放大电路的组成原理，即放大电路应具备的条件：
  - ① 放大器件应工作在放大区。对三极管而言，发射结应正向运用，集电结应反向运用；
  - ② 输入信号能输送至放大器件的输入端，即三极管的发射结；

## ③ 有信号电压输出。

上述条件必须同时具备，缺一不可。判断给定电路是否具有放大作用，就是依据上述条件。

此类问题的例子，请参阅习题 1 的解答。

(2) 放大电路的直流通路和交流通路。分析放大电路有两类问题：直流问题和交流问题。所以对这两种通路必须分清。

直流通路，即直流成分的通路。将放大电路中的耦合电容和旁路电容视为开路即得。

交流通路，即交流成分的通路，将放大电路中的耦合电容和旁路电容视为短路，直流电源视为短路即得。

此类问题的例子，请参阅习题 4 的解答。

## 2.1.2 放大电路的静态工作状态

本节是本章重点内容之一。应掌握用公式法计算  $Q$  点和用图解法确定  $Q$  点。

1. 公式法计算  $Q$  点

常见电路如图 2-1 所示，它们的工作点估算按下述公式进行：

图 2-1(a)

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

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_c$$

图 2-1(b)

$$\left\{ \begin{aligned} I_{BQ} &= \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_b + (1 + \beta) R_e} & (I_E = (1 + \beta) I_B) \\ I_{CQ} &= \beta I_{BQ} \\ U_{CEQ} &\approx U_{CC} - I_{CQ} (R_c + R_e) \end{aligned} \right.$$

图 2-1(c)

$$U_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{CC}$$

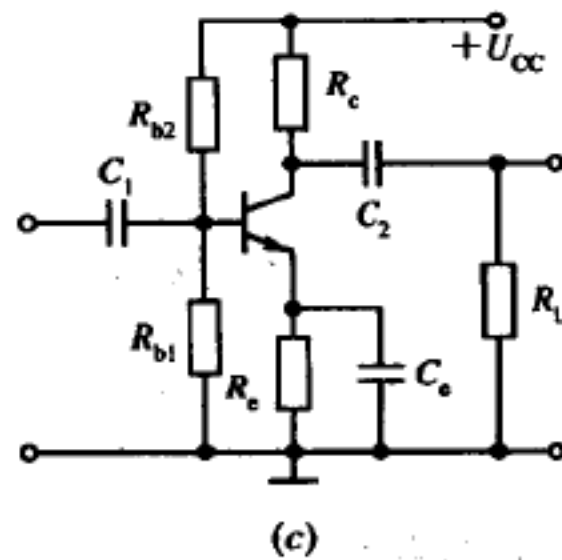
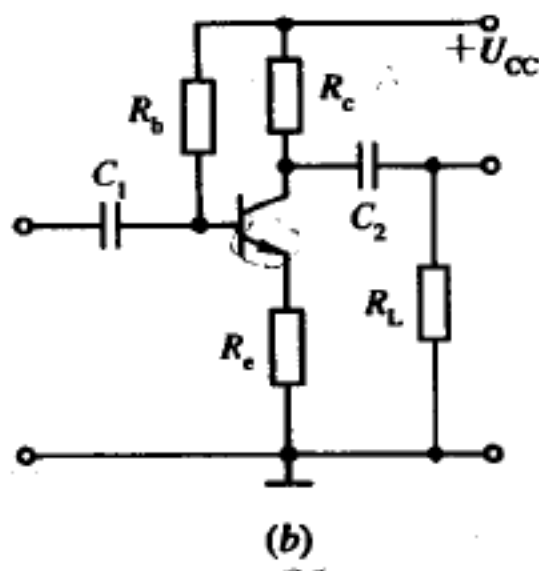
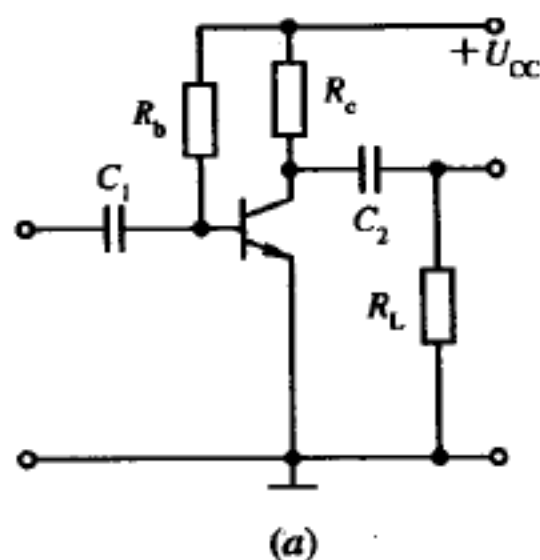


图 2-1 常用放大电路

$$I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_e} \approx I_{CQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

$$U_{CEQ} \approx U_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

对 PNP 放大电路 Q 点的计算与上述一样, 不同之处是实际电流方向与 NPN 相反, 电压极性相反。

## 2. 图解法

图解法的关键是正确作出直流负载线, 通过直流负载线与  $i_B = I_{BQ}$  的特性曲线的交点, 即为 Q 点, 从图上读出 Q 点坐标即得  $I_{CQ}$  和  $U_{CEQ}$ 。

要求通过图解法了解、掌握元件参数变化对直流工作点的影响。

$R_b$  变化只改变  $I_{BQ}$  值, 而对直流负载线不产生影响, 故 Q 点将沿直流负载线移动。

$R_c$  变化只改变直流负载线的斜率, 而对基极电流  $I_B$  不产生影响, 故 Q 点将沿  $I_B = I_{BQ}$  这一条特性曲线移动。

$U_{CC}$  变化比较复杂, 它既影响基极电流  $I_B$ , 同时也影响直流负载线。由于  $R_c$  没有变化, 故直流负载线是平行移动, Q 点将在原 Q 点的右上方或左下方移动。

### 2.1.3 放大电路的动态分析

本节是本章也是本课程的重点内容之一, 主要讲述两个问题。

#### 1. 图解法分析动态特性

当输入交流信号后, 其负载是  $R'_L = R_c // R_L$ , 所以其电流电压关系与交流负载线有关。按交流负载线必通过 Q 点, 且斜率为  $R'_L$ , 作出交流负载线。从交流负载线与特性曲线的交点分析波形关系, 确定最大不失真输出电压, 判断非线性失真的类型。

#### 2. 微变等效电路法

利用微变等效电路分析、计算放大器的性能指标是本课程的重点之一。必须掌握微变等效电路的画法, 以及基本放大电路的电压放大系数、输入电阻、输出电阻的计算等, 掌握三种基本放大电路(共发射极、共集电极、共基极放大电路)的性能比较。

### 2.1.4 静态工作点的稳定及其偏置电路

本节应着重搞清下列问题:

- (1) 温度对静态工作点的影响及带来的后果。
- (2) 工作点稳定电路的计算(Q 点的计算以及电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的确定)。此电路前已讲过, 此处不再重复。

### 2.1.5 多级放大电路

这一节应注意以下两个方面的问题:

#### 1. 多级放大器的耦合方式及其特点

多级放大器的耦合方式有阻容耦合和直接耦合及变压器耦合三种。

阻容耦合: 各级间工作点互相独立, 便于调整; 由于电容器的存在, 它不能放大变化

缓慢的(直流)信号,不便于集成。

直流耦合:工作点前后互相影响,调整困难;它不仅能放大交流信号,也能放大直流信号,便于集成。存在零漂现象。

变压器耦合:工作点互相独立,便于调整;成本高、体积重;只能放大交流信号,不能放大变化缓慢的信号,不便于集成。最大特点是能进行阻抗变换。

## 2. 多级放大器性能指标的计算

(1) 电压放大倍数  $A_u$ :

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot \dots \cdot A_{un}$$

注意之点是:在计算前级放大电路电压放大倍数时,要考虑后级的负载效应,即后级作为前级的负载电阻。故

$$A_{u1} = -\frac{\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}} \quad R'_{L1} = R_{c1} // r_{i2}$$

(2) 输入电阻  $r_i$ :

多级放大器的输入电阻等于输入级的输入电阻,即

$$r_i = r_{i1}$$

当输入级为射极输出器,则  $r_i$  与  $r_{i2}$  有关。

(3) 输出电阻  $r_o$ :

多级放大器的输出电阻等于输出级的输出电阻,即

$$r_o = r_{on}$$

若输出级为射极输出器,则  $r_{on}$  与前级输出电阻有关。

## 2.2 典型题举例

例 1 放大电路如图 2-2 所示,求 Q 点。

解:此电路为 NPN 放大电路,与常规画法不相同,发射极画在上方,从电压关系看,满足放大条件。

$$U_{R_{b1}} = \frac{R_{b1}}{R_{b2} + R_{b1}} \times U_{EE} = \frac{40}{120 + 40} \times 12 = 3 \text{ V}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{R_{b1}} - U_{BE}}{R_e} = \frac{2.3}{2.3} = 1 \text{ mA} \approx I_{CQ}$$

$$U_{CEQ} \approx U_{EE} - I_C(R_c + R_e) = 12 - 1 \times (2.3 + 2) = 7.7 \text{ V}$$

注意:本题的电压是  $U_{R_{b1}}$  不是  $U_B$ ,这是较易出错的地方。

例 2 放大电路如图 2-3(a)所示,特性曲线如图 2-3(b)所示。试说明静态工作点由  $Q_1$  变成  $Q_2$ ,由  $Q_2$  变为  $Q_3$  的原因。

答:  $Q_1 \rightarrow Q_2$ ,是由于  $I_B$  增大即  $R_b$  减小所致;  $Q_2 \rightarrow Q_3$  则是  $R_c$  增大所致。

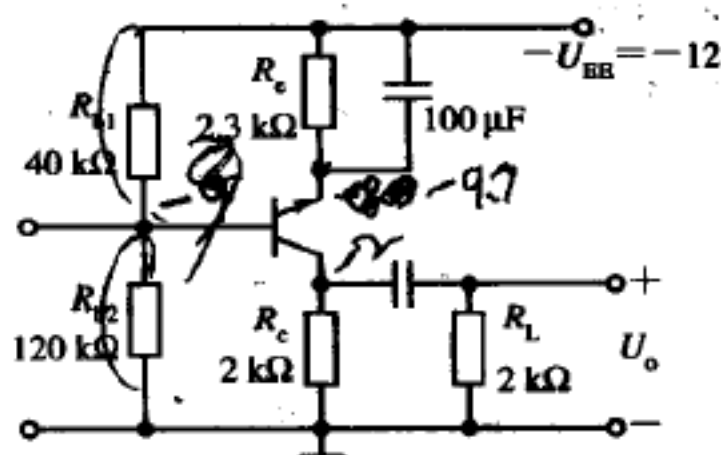
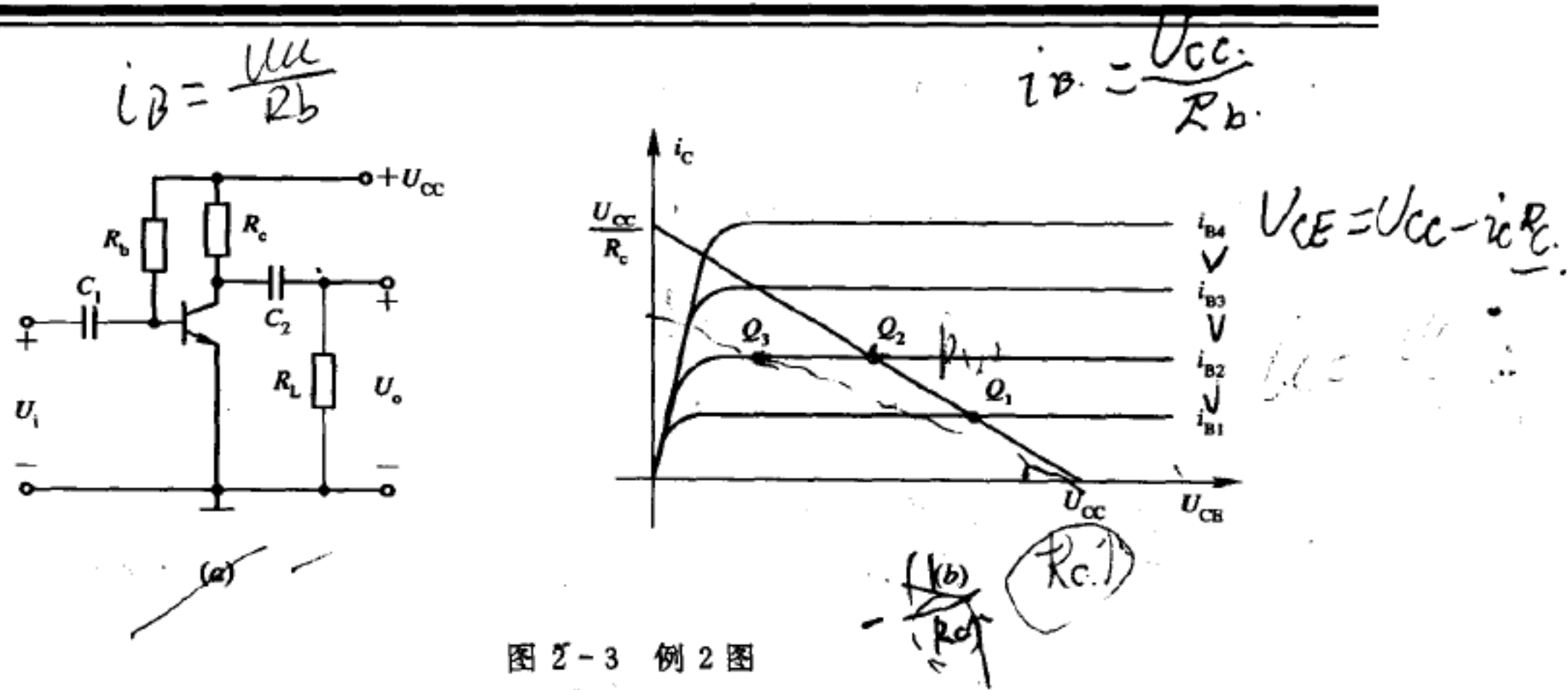


图 2-2 例 1 电路图





题型变换一：要使工作点由  $Q_1 \rightarrow Q_2$ ，应使\_\_\_\_\_。

- ①  $R_L \uparrow$       ②  $R_c \uparrow$       ③  $R_b \downarrow$       ④  $C_2 \uparrow$

答案：③

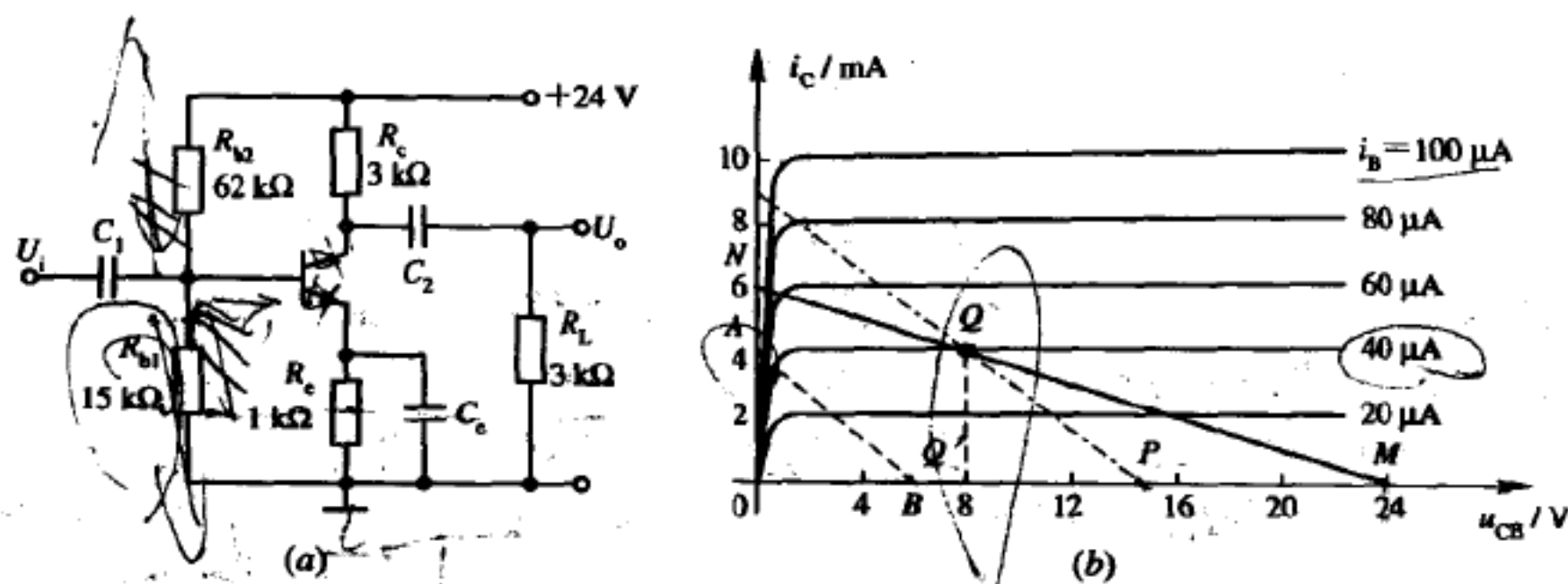
题型变换二：要使工作点由  $Q_2 \rightarrow Q_3$ ，应使\_\_\_\_\_。

- ①  $R_L \uparrow$       ②  $R_c \uparrow$       ③  $R_b \downarrow$       ④  $C_2 \uparrow$

答案：②

这一类型的考题主要涉及工作点与元件参数的关系。

例 3 放大电路如图 2-4(a)所示，管子的特性曲线如图 2-4(b)所示。



✓ (1) 作出直流负载线，确定  $Q$  点。

(2) 作出交流负载线，确定最大不失真的输出电压振幅  $U_{om}$ 。

解：(1) 作直流负载线。写出直流负载方程

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C(R_c + R_L) = 24 - I_C(3 + 1)$$

令  $I_C = 0$

$$U_{CE} = U_{CC} = 24 \text{ V}$$

得  $M$  点

令  $U_{CE} = 0$

$$I_C = \frac{24}{4} = 6 \text{ mA}$$

得  $N$  点

连接  $MN$  点即为直流负载线, 如图 2-4(b) 所示。

再由电路求出  $I_{EQ}$

$$U_B = \frac{R_{b1}}{R_{b2} + R_{b1}} U_{CC} = \frac{15}{62 + 15} \times 24 \approx 4.7 \text{ V}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_e} = \frac{4}{1} = 4 \text{ mA}$$

由  $I_{EQ} = 4 \text{ mA}$  作一条与横坐标平行的线, 它与直流负载线的交点即为  $Q$  点:  $I_{CQ} = 4 \text{ mA}$ ,  $I_{BQ} = 40 \mu\text{A}$ ,  $U_{CEQ} = 8 \text{ V}$ 。

(2) 交流负载线可通过两种方法作出。

① 两点式: 交流负载线必通过  $Q$  点, 另一点是交流负载线在横坐标上的截距  $P$  点;

$$\overline{OP} = \overline{OQ'} + \overline{Q'P}$$

$$U_P = U_{CEQ} + I_{CQ} R'_L = 8 + 4(3 // 3) = 14 \text{ V}$$

连接  $QP$  两点, 即为交流负载线, 如图 2-4(b) 点划线所示。

② 点斜式: 已知交流负载线上的一点  $Q$ , 其斜率由  $R'_L = R_e // R_L$  决定。首先作一条辅助线, 满足

$$R'_L = \frac{U_{CE}}{I_C} = \frac{6}{4} = 1.5 \text{ k}\Omega$$

如图 2-4(b) 虚线  $\overline{AB}$  所示。然后过  $Q$  点作辅助线的平行线, 此线即为交流负载线, 如图 2-4(b) 点划线所示。

两种方法所得结果完全一致。

由交流负载线可以看出, 其最大不失真的输出电压受截止失真的限制。由图 2-4(b) 读出

$$\overline{Q'P} = \overline{OP} - \overline{OQ'}$$

即

$$U_{om} = 14 - 8 = 6 \text{ V}$$

或

$$U_{om} = I_{CQ} \cdot R'_L = 4 \times 1.5 = 6 \text{ V}$$

注意:  $U_{om} = I_{CQ} \cdot R'_L$  只能用于受截止失真的限制的情况。当最大不失真输出电压受饱和失真限制时, 上述公式则不能用, 应该用下式近似估算  $U_{om} = U_{CQ} - U_{CES}$ 。

例 4 电路如图 2-4(a) 所示, 当  $R_{b2}$  增大时首先出现什么失真?

答:  $R_{b2} \uparrow \rightarrow U_B \downarrow \rightarrow I_{EQ} \downarrow \rightarrow Q$  点下降, 所以, 首先出现截止失真, 对 NPN 放大电路而言是顶部失真。

例 5 放大电路如图 2-4(a) 所示, 其输出波形如图 2-5 所示, 为消除失真应改变哪个电路参数?

答: 首先应判定是什么性质的失真, 由波形判定失真性质的思路如下:

首先观察输出波形是在最高处产生失真还是在最低处产生失真, 此题是在最低处产生失真。然后由放大电路判定是饱和还是截止时输出电压最低。此题放大电路是 NPN 放大电路, 截止时  $U_C = U_{CC}$ , 输出电压最高; 饱和时  $U_{CE} = U_{CES}$ , 输出电压最低。所以, 是饱和失真。



图 2-5 例 5 输出波形

饱和失真由于Q点过高所致，因此，为消除失真，应使Q点下降，即 $I_B$ 下降。可改变下述元件： $R_{b2} \uparrow$  或  $R_{b1} \downarrow$  或  $R_e \uparrow$ 。

题型变换一：电路如图2-4(a)所示，输出波形如图2-5所示，为消除失真，应该

- ①  $R_{b2} \downarrow$     ②  $R_{b1} \downarrow$     ③  $R_e \downarrow$     ④  $R_e \uparrow$

答案：②

题型变换二：电路如图2-4(a)所示，输出波形如图2-5所示，为消除失真，可以采取的措施是\_\_\_\_\_。(多项选择)

- ①  $R_{b2} \uparrow$     ②  $R_{b1} \downarrow$     ③  $R_e \uparrow$     ④  $R_e \downarrow$     ⑤  $R_L \uparrow$

答案：①、②、③、④

判断波形失真不能死记硬背，生搬硬套，必须掌握前述的思路和方法。要注意电路是由什么类型的管子所组成的；是集电极输出还是发射极输出。

例6 放大电路如图2-6所示，输出波形如图2-5所示，该电路产生何种失真？

答：该电路是射极输出。

截止时： $I_c = 0$ ,  $U_o = I_c R_c = 0$ ，电位最低；

饱和时： $I_c = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_c}$ ，电流最大， $U_o$ 也最高。

所以，在最低处的失真是截止失真。

例7 放大电路如图2-7所示。

(1) 画出微变等效电路。

(2) 写出各电路的电压放大系数  $A_u = \frac{U_o}{U_i}$ 、源电

压放大系数  $A_{us} = \frac{U_o}{U_s}$ 、输入电阻  $r_i$  和输出电阻  $r_o$ 。

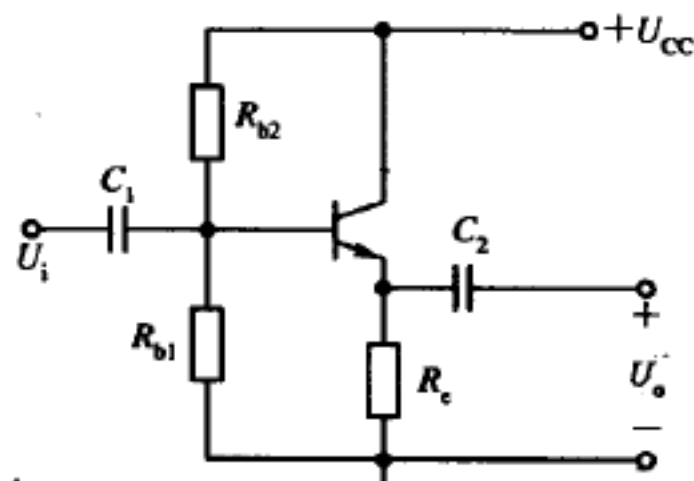


图2-6 例6图

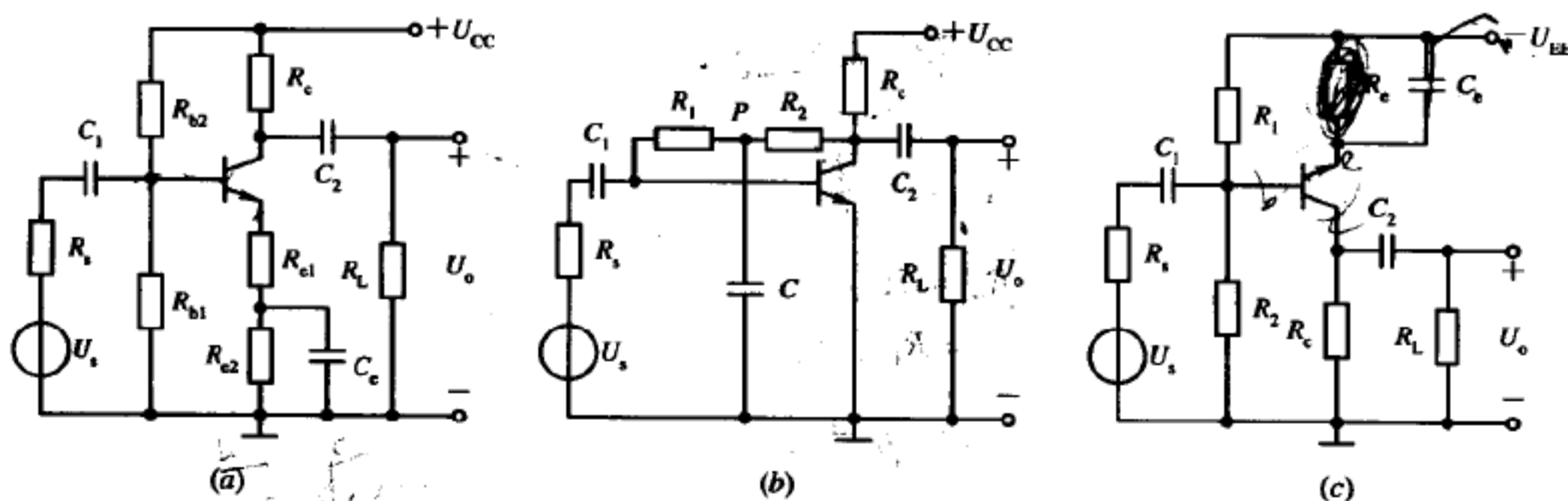
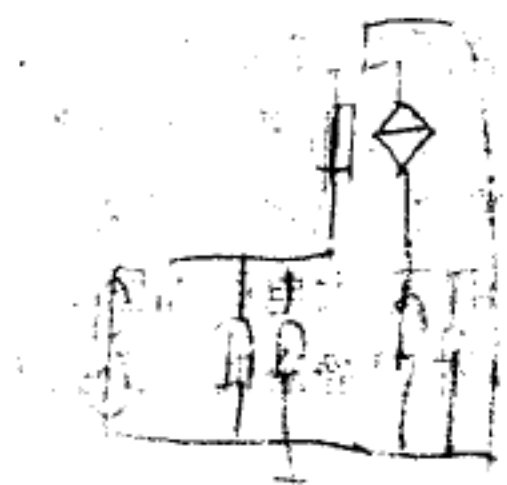


图2-7 例7图

解：(1) 微变等效电路如图2-8所示。

(2) 各电路的指标如下所述：



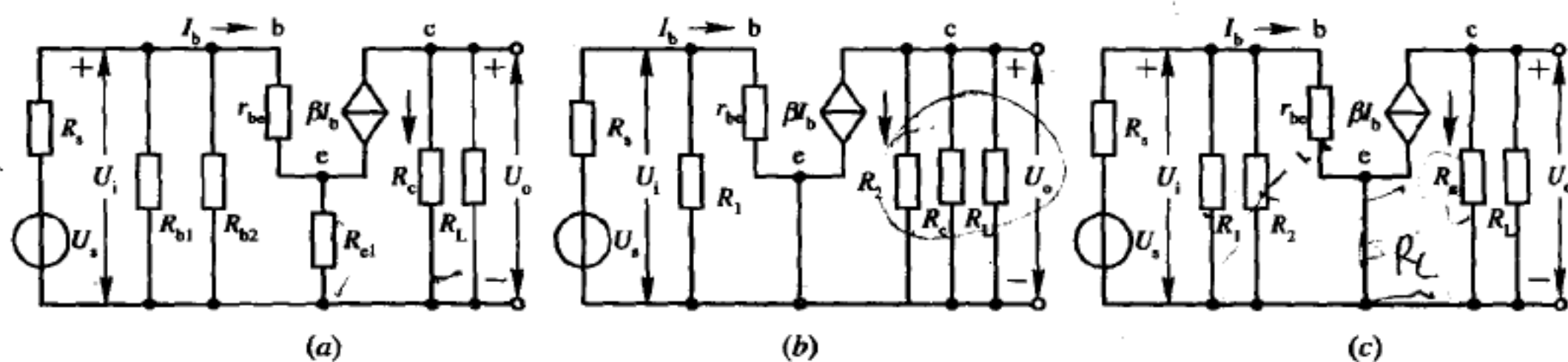


图 2-8 例 8 图

图 2-7(a)

$$A_u = - \frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_{e1}}$$

$$R'_L = R_c // R_L$$

$$r_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_{e1}]$$

$$A_{us} = \frac{r_i}{R_s + r_i} A_u$$

$$r_o = R_c$$

图 2-7(b)

$$A_u = - \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$R'_L = R_2 // R_c // R_L$$

$$r_i = R_1 // r_{be}$$

$$A_{us} = \frac{r_i}{R_s + r_i} A_u$$

$$r_o = R_c // R_2$$

图 2-7(c)

$$A_u = - \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$R'_L = R_c // R_L$$

$$r_i = R_1 // R_2 // r_{be}$$

$$A_{us} = \frac{r_i}{R_s + r_i} A_u$$

$$r_o = R_c$$

注意图 2-7(b)中  $R_1$ 、 $R_2$  的处理，由于电容  $C$  的存在， $P$  点实际接地，图 2-7(c)中电路的画法与习惯画法不一致，射极在上，但画等效电路时只要注意  $e$ 、 $b$ 、 $c$  的位置，与其它电路的等效电路画法完全一样。

**例 8** 放大电路如图 2-9 所示，已知晶体三极管  $r_{be} = 300 \Omega$ ， $\beta = 20$ ， $U_{BE} = 0.7 \text{ V}$ 。

(1) 估算静态时的  $I_{CQ}$ 、 $U_{CEQ}$ 。



- (2) 求电压放大系数  $A_u = \frac{U_o}{U_i}$ 。
- (3) 求输入电阻  $r_i$  和输出电阻  $r_o$ 。
- (4) 若接入  $R_L = 8.7 \text{ k}\Omega$ ,  $A_u = ?$
- (5)  $R_L$  开路,  $R_s = 1 \text{ k}\Omega$  时  $A_{us} = \frac{U_o}{U_s} = ?$
- (6)  $C_e$  开路 ( $R_L$  开路) 时  $A_u = \frac{U_o}{U_i} = ?$

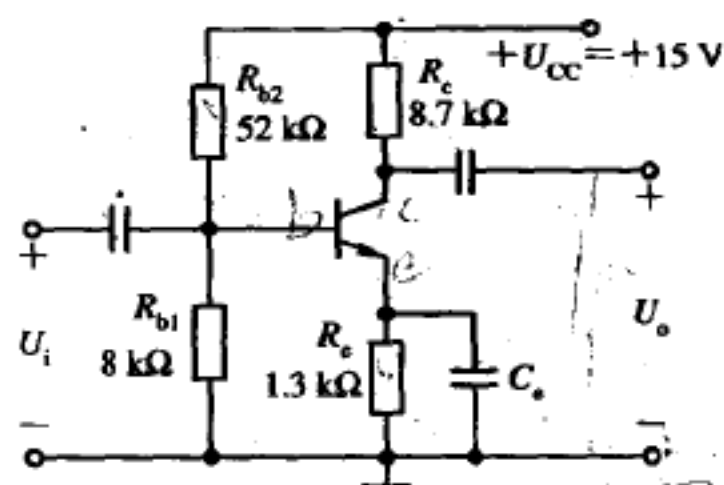


图 2-9 例 8 图

解: (1)  $U_B = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{CC} = \frac{8}{52 + 8} \times 15 = 2 \text{ V}$

$$I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_e} = \frac{1.3}{1.3} = 1 \text{ mA} \approx I_{CQ}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_C(R_c + R_e) = 15 - 1 \times (8.7 + 1.3) = 5 \text{ V}$$

(2)  $A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$  其中  $R'_L = R_c // R_L = R_c = 8.7 \text{ k}\Omega$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 300 + 21 \times \frac{26}{1} = 846 \Omega$$

$$A_u = -\frac{20 \times 8.7}{0.846} \approx -205.7$$

(3)  $r_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} \approx r_{be} = 0.846 \text{ k}\Omega$

$r_o = R_c = 8.7 \text{ k}\Omega$

(4)  $R_L = 8.7 \text{ k}\Omega$  则  $R'_L = R_c // R_L = 4.35$

$$A_u = -\frac{20 \times 4.35}{0.846} \approx -102.8$$

(5)  $A_{us} = \frac{r_i}{R_s + r_i} A_u = \frac{0.846}{1 + 0.846} \times (-205.7) \approx -94.3$

(6)  $C_e$  开路,  $R_e$  将对放大器的性能产生影响。

$$A_u = -\frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e} = \frac{-20 \times 8.7}{0.846 + 21 \times 1.3} \approx -6.2$$

由上可看出  $R_e$  对放大倍数有很大影响。 $R_e$  不该考虑时考虑了, 或者该考虑时又没考虑, 都将产生大的错误。

例 9 三种基本放大电路中, 输入电阻最大的是 共集极 放大电路; 输入电阻最小的是 共基极 放大电路; 输出电压与输入电压相位相反的是 共射极 放大电路; 电压放大倍数最大的是 共射极 放大电路; 电压放大倍数最小的是 共集极 放大电路; 输出电阻最小的是 共集极 放大电路; 电流放大系数最大的是 CC 放大电路; 电流放大系数最小的是 CB 放大电路; 既有电流放大又有电压放大的是 CE 放大电路。

答: 按填空位依次填入: 共 c 极; 共 b 极; 共 e 极; 共 e 极; 共 b 极; 共 c 极; 共 c 极; 共 c 极; 共 b 极; 共 e 极。

题型变换一: 三种基本放大电路中电压放大系数近似为 1 是 共集极。

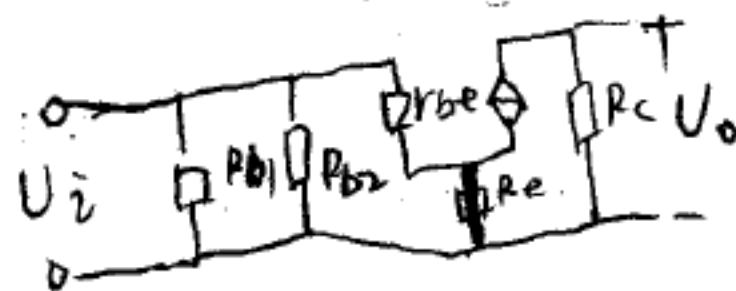
① 共 e 极放大电路

② 共 c 极放大电路

③ 共 b 极放大电路

④ 无法确定

答案: ②



$$R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$$

$$-\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

不电

**题型变换二：**共c极放大电路的主要特点是\_\_\_\_\_。(多重选择)

- ① 电压放大系数最大
- ② 输出电压与输入电压相位相同
- ③ 输出电压近似等于输入电压
- ④ 输入电阻大
- ⑤ 输出电阻小

**答案：**②、③、④、⑤

**例 10** 放大电路如图 2-4(a)所示, 为使电压放大倍数提高, 可以\_\_\_\_\_。(多重选择)

- ① 增大  $R_c$
- ② 增大  $R_L$
- ③ 减小  $R_{b2}$
- ④ 增大  $R_{b1}$
- ⑤ 减小  $R_e$

**答案：**①、②、③、④、⑤

此题①、②比较明显, 而对③、④、⑤的判断读者一般容易出错, ③、④、⑤是通过  $r_{be}$  影响放大倍数的

$$A_u = - \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}}$$

凡能影响  $I_{EQ}$  上升的均可使  $A_u$  上升, 而  $R_{b2}$ 、 $R_e$  的下降,  $R_{b1}$  的增大, 均能使  $r_{be}$  减小, 从而  $A_u$  提高。

**例 11** 放大电路如图 2-10 所示, 晶体管  $\beta = 40$ ,  $r_{be} = 0.8 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{BE} = 0.7 \text{ V}$ , 各电容均足够大。试求:

- (1) 静态工作点;
- (2) 画出微变等效电路, 求电压放大倍数  $A_u = \frac{U_o}{U_i}$ ;
- (3) 求输入电阻  $r_i$ , 输出电阻  $r_o$ ;
- (4) 求源电压放大倍数  $A_{us} = \frac{U_o}{U_s}$ ;
- (5) 求最大不失真输出电压幅值(设饱和压降  $U_{CES} = 0.3 \text{ V}$ )。

**解：**(1)

$$U_B = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_d + R_{b2}} U_{CC} = \frac{20}{60} \times 12 = 4 \text{ V}$$

$$U_E = U_B - U_{BE} = 4 - 0.7 = 3.3 \text{ V}$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_E}{R_{e1} + R_{e2}} = \frac{3.3}{2} \times 10^{-3} = 1.65 \text{ mA}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta} = \frac{1.65}{41} \approx 40 \mu\text{A}$$

$$U_{CEQ} \approx U_{CC} - I_C(R_c + R_{e1} + R_{e2}) = 12 - 1.65 \times 4 = 5.4 \text{ V}$$

(2) 微变等效电路如图 2-11 所示。(注意电阻  $R_d$  对交流而言两头均接地, 故微变等效

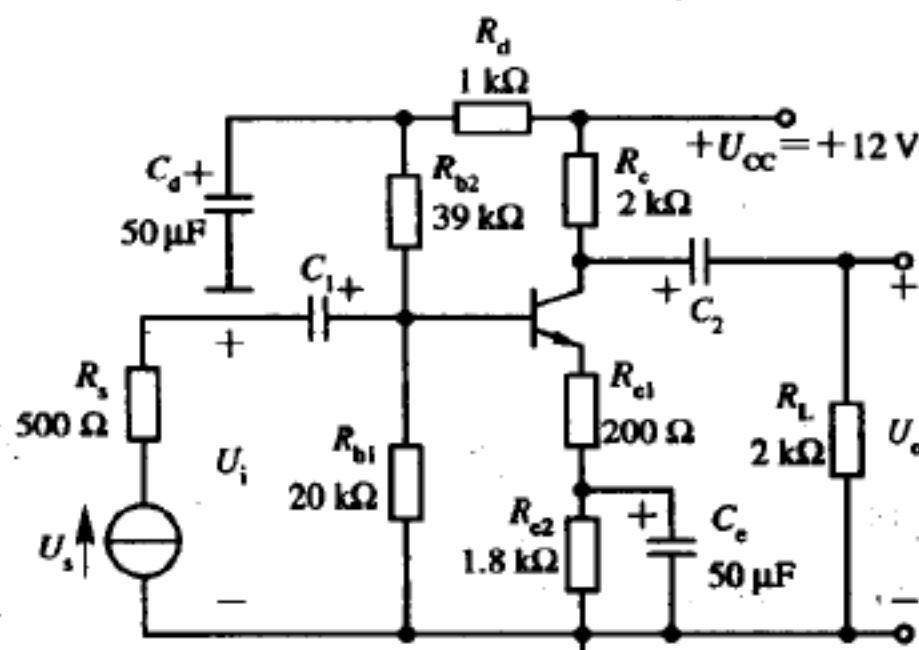
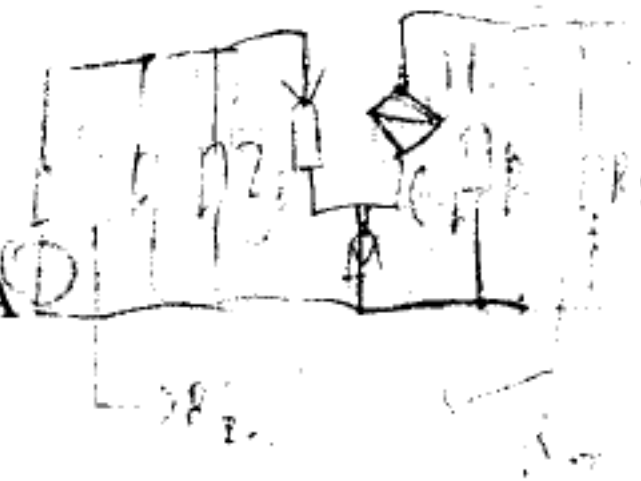


图 2-10 例 11 电路图



电路中无  $R_d$ 。

由等效电路可求出：

$$A_u = - \frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_{e1}}$$

$$= - \frac{40}{0.8 + 41 \times 0.2} = - \frac{40}{9}$$

$$\approx -4.4$$

(3)

$$r_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_{e1}]$$

$$= 20 // 39 // 9 = 5.36 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = R_c = 2 \text{ k}\Omega$$

$$(4) A_{us} = \frac{r_i}{R_s + r_i} A_u = \frac{5.36}{0.5 + 5.36} \times (-4.4) \approx -4$$

(5) 考虑截止失真的限制

考虑饱和失真的限制

$$U'_{om} = I_{CQ} R'_L = 1.65 \text{ V}$$

$$U''_{om} = \frac{R'_L}{R'_L + R_{e1}} (U_{CEQ} - U_{CES})$$

$$= \frac{1}{1 + 0.2} (5.4 - 0.3) = 4.25 \text{ V}$$

故  $U_{om} = U'_{om} = 1.65 \text{ V}$ 。

例 12 直接耦合放大电路的特点是\_\_\_\_\_。(多项选择)

- ① 工作点互相独立
- ② 便于集成
- ③ 存在零点漂移
- ④ 能放大变化缓慢的信号
- ⑤ 不便调整

答案：②、③、④、⑤

例 13 二级放大电路如图 2-12 所示，写出电压放大倍数  $A_u$ 、输入电阻  $r_i$ 、输出电阻  $r_o$  的表达式。已知  $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ， $r_{be1} = 1.6 \text{ k}\Omega$ ， $r_{be2} = 1.3 \text{ k}\Omega$ 。

(1) 求电压放大倍数  $A_u$ 。

(2) 求  $r_i$ 、 $r_o$ 。

解：(1)

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2}$$

$$A_{u1} = \frac{-\beta R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta) R_{e1}}$$

$$R'_{L1} = R_{c1} // r_{i2} = R_{c1} // [r_{be2} + (1 + \beta) R'_{e2}] // R_{b2}$$

$$R'_{e2} = R_{e2} // R_L = 2.55 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{L1} = 10 // [1.3 + 51 \times 2.55] // 540 \approx 9.1 \text{ k}\Omega$$

$$A_{u1} = - \frac{50 \times 9.1}{1.6 + 51 \times 0.3} \approx -27$$

则

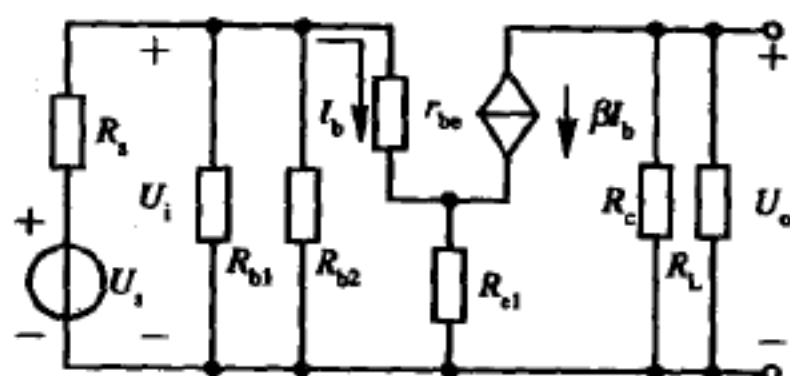


图 2-11 例 11 微变等效电路

$$r_o = R_c$$

$$r_o = R_c$$

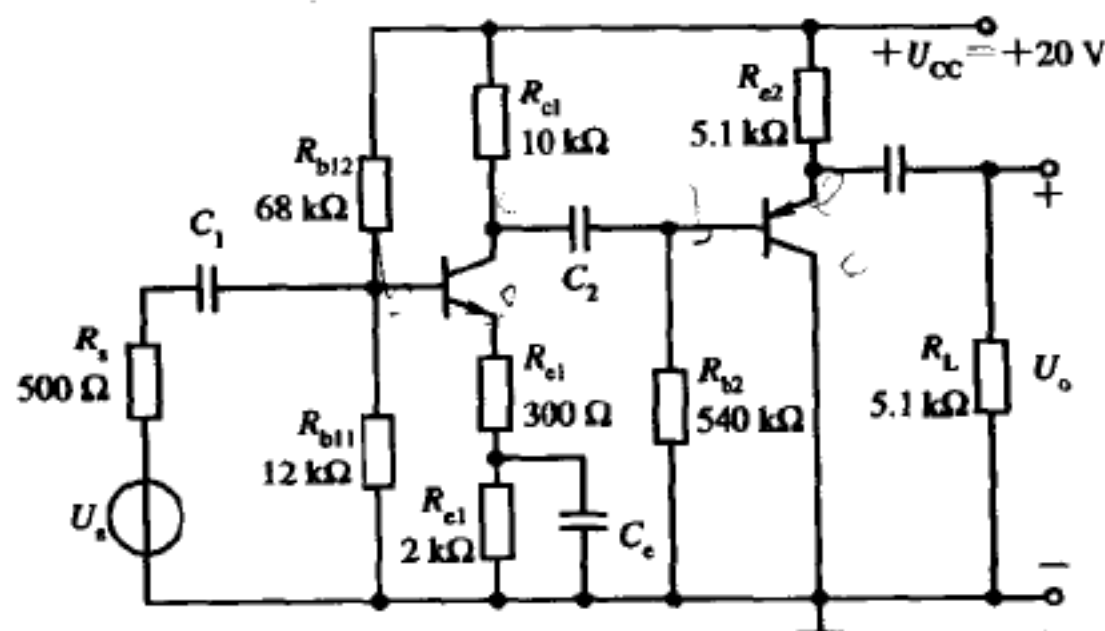


图 2-12 例 13 图

$$A_{u2} = \frac{(1 + \beta)R'_{e2}}{r_{be2} + (1 + \beta)R'_{e2}} = 0.99$$

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = (-27) \times 0.99 = -26.7$$

(2)

$$\begin{aligned} r_i &= r_{i1} = R_{b12} // R_{b11} // [r_{be1} + (1 + \beta)R_{e1}] \\ &= 68 // 12 // [1.6 + 51 \times 0.3] = 68 // 12 // 16.9 \\ &= 6.36 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

$$r_o = R_{e2} // \frac{R' + r_{be2}}{1 + \beta}$$

$$R' = R_{c1} // R_{b2} = 10 // 540 \approx 10 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = 5.1 // \frac{10 + 1.6}{51} = 5.1 // 0.227 \approx 217 \Omega$$

例 14 两级共 e 极放大电路，其输入电阻分别为  $r_{i1}$ 、 $r_{i2}$ ，则组成二级放大电路的输入电阻为         。

①  $r_i = r_{i1}$ ②  $r_i = r_{i2}$ ③  $r_i = r_{i1} + r_{i2}$ ④  $r_i = r_{i1} r_{i2}$ 

答案：①

## 2.3 思考题和习题解答

1. 放大电路组成原则有哪些？利用这些原则分析图 2-13 各电路能否正常放大，并说明理由。

答：组成放大电路的原则为：

- ① 放大器即三极管必须工作在放大区，即 e 结正向运用，c 结反向运用。
- ② 输入信号应加至 e 结。
- ③ 保证有电压输出。

按上述原则可判定本题所给电路，其结果如下：

图(a)不能放大，因为是 NPN 三极管，所加电压  $U_{BB}$  不满足①的要求，e 结反向偏置了。

图(b)可以放大信号。



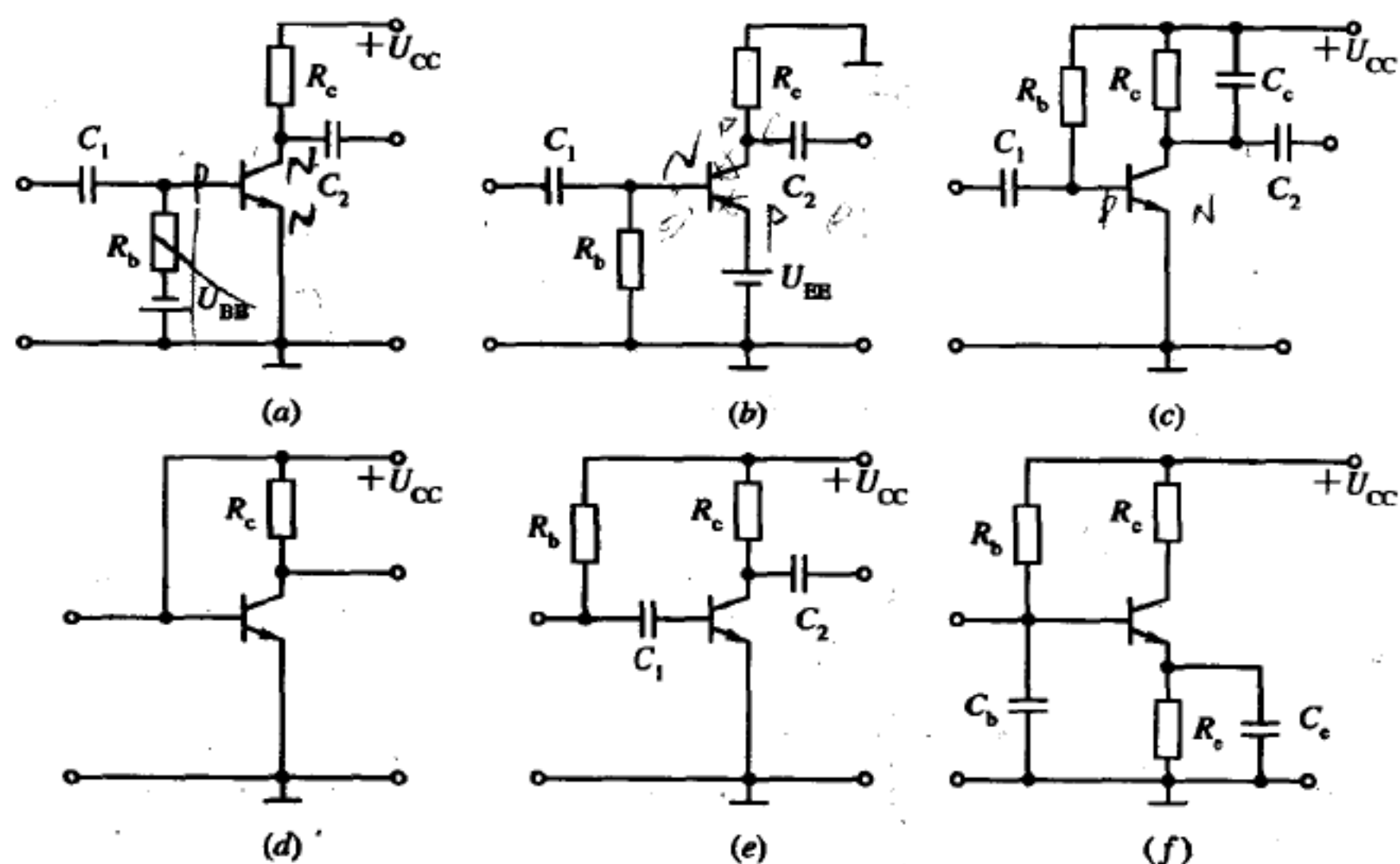


图 2-13 题 1 图

图(c)不能放大信号。因为电容  $C_c$  输出交流短路了, 不满足③。

图(d)不能放大信号, 因为 b 极电位高于 c 极, c 结正向偏置; 不满足条件①, 同时输入短路线通过直流电源将输入端信号短路了, 不满足条件②。

图(e)不能放大信号。因为电容  $C_1$  将直流隔离了, 不能保证发射结正向运用, 即条件①不满足。

图(f)不能放大信号。因为电容  $C_b$  将信号在输入端短路, 所以不满足条件②。

2. 什么是静态工作点? 如何设置静态工作点? 如静态工作点设置不当会出现什么问题?

答: 输入信号  $U_i = 0$  时, 放大电路的工作状态(即直流状态)即为静态工作点, 包含三极管的基极直流电流  $I_{BQ}$ 、集电极直流电流  $I_{CQ}$  和集电极与射极间的直流压降  $U_{CEQ}$ 。工作点一般应设置在中间, 保证信号正半周时三极管不进入饱和状态; 信号负半周时三极管不进入截止状态, 即不产生非线性失真。

静态工作点设置不当, 会产生非线性失真。工作点过高产生饱和失真; 工作点过低产生截止失真。

3. 估算静态工作点时, 应该根据放大电路的直流通路还是交流通路进行估算?

答: 静态工作点即直流工作状态, 所以应根据直流通路确定直流工作点。

4. 分别画出图 2-14 中各电路的直流通路和交流通路。(假设电容对交流视为短路, 电感视为开路, 变压器为理想变压器。)

解: 画直流通路时, 将电容视为开路, 电感、变压器视为短路; 画交流通路时, 将电容、直流电源视为短路。其直流通路如图 2-15 所示, 交流通路如图 2-16 所示。

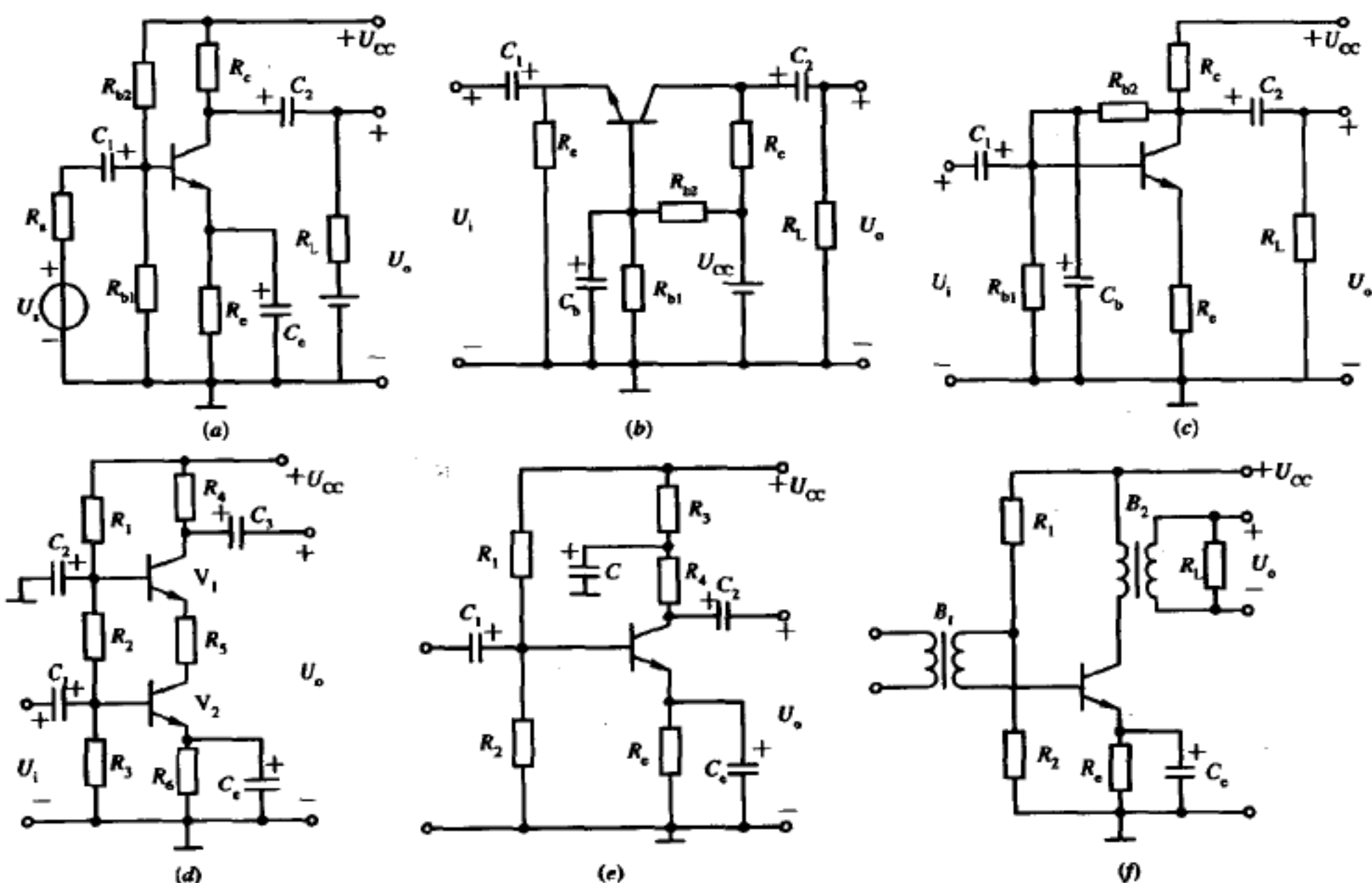


图 2-14 题 4 图

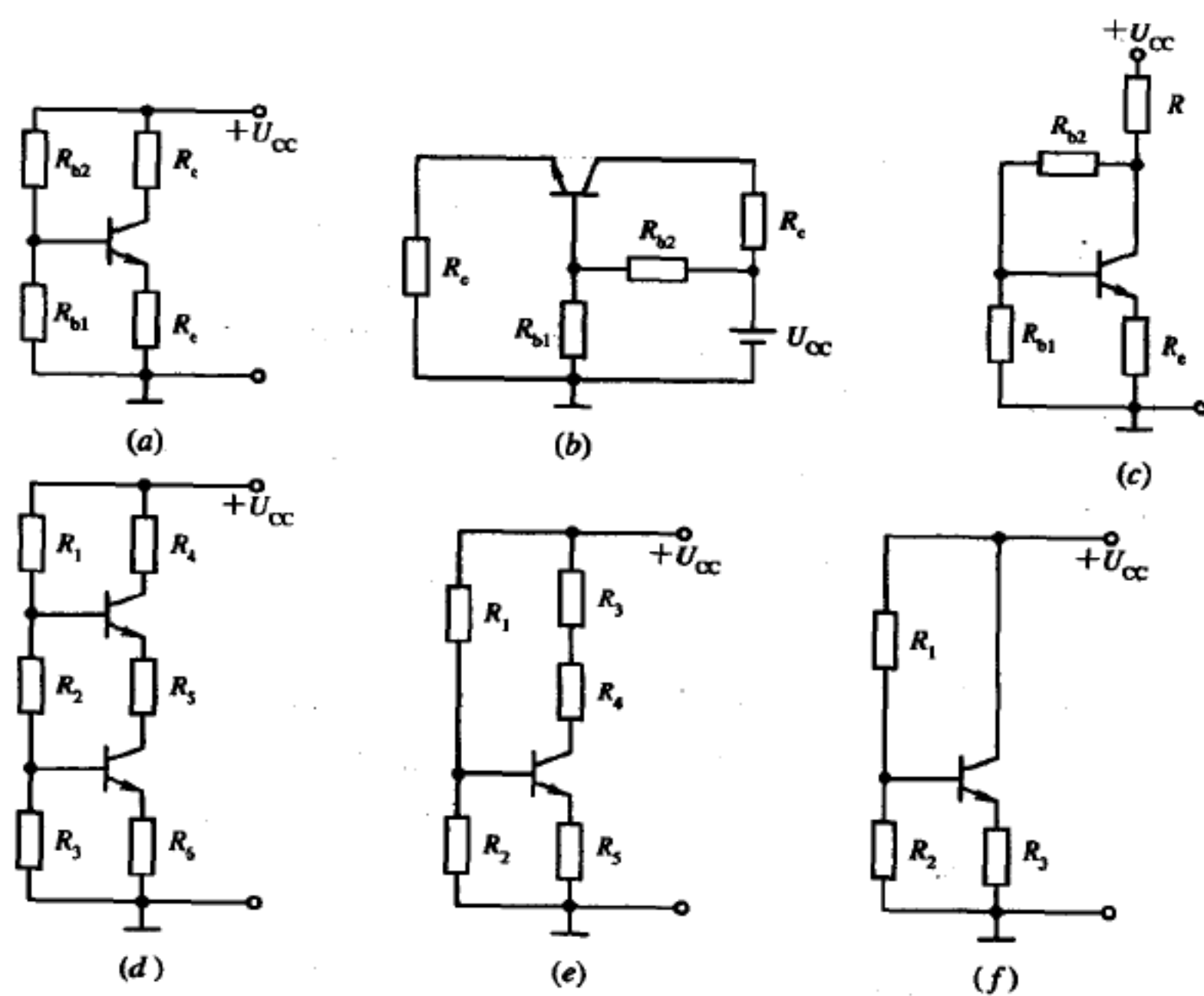


图 2-15 题 4 直流通路

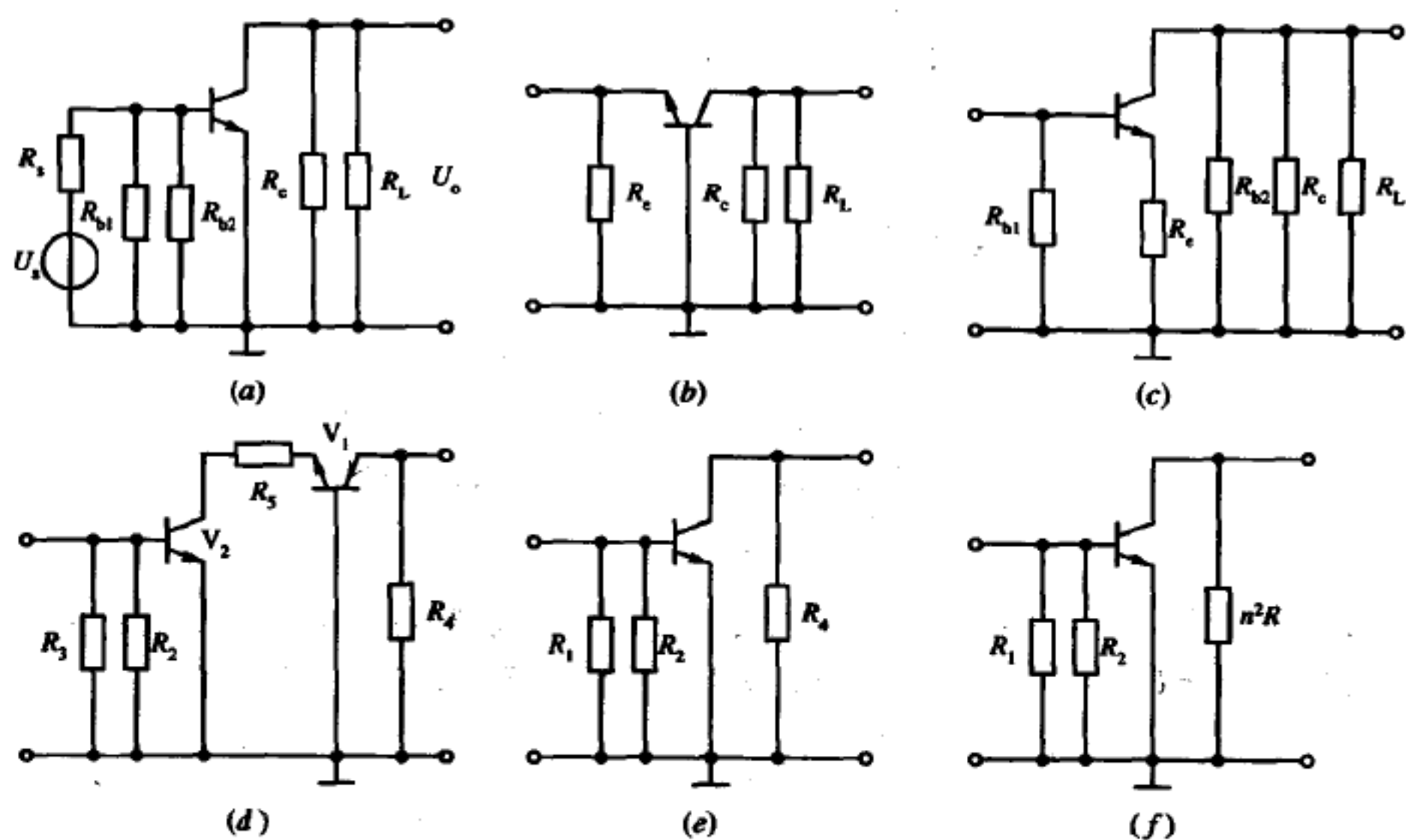


图 2-16 题 4 交流通路

5. 试求图 2-17 各电路中的静态工作点(设图中所有三极管都是硅管,  $U_{BE}=0.7\text{ V}$ )。

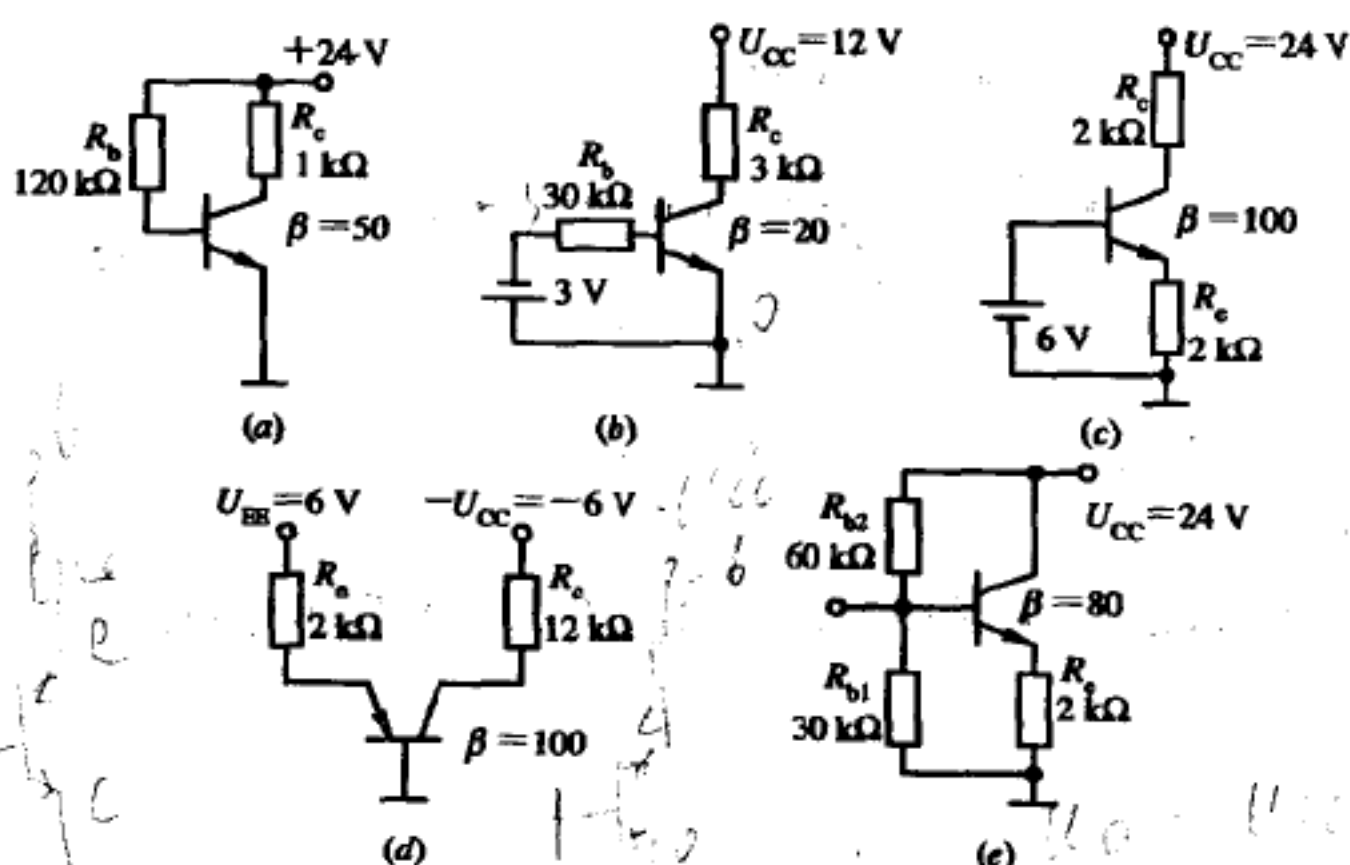


图 2-17 题 5 图

解:

图 2-17(a), 
$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_b} = \frac{24 - 0.7}{120 \times 10^3} \approx 0.194 \text{ mA (或 } 0.2 \text{ mA)}$$
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 0.194 \approx 9.7 \text{ mA (或 } 10 \text{ mA)}$$
$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_c = 24 - 9.7 \times 1 = 14.3 \text{ V (或 } 14 \text{ V)}$$

图 2-17(b)中, 由于发射结反向偏置, 所以

$$I_{BQ} = 0; \quad I_{CQ} = 0; \quad U_{CEQ} = 12 \text{ V}$$

图 2-17(c)中, 由基极回路得

$$6 \text{ V} = U_{BE} + I_{EQ}R_e$$

所以

$$I_{EQ} = \frac{6 - 0.7}{2} = 2.65 \text{ mA (或 } 3 \text{ mA)}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta} = 0.026 \text{ mA (或 } 0.0297 \text{ mA)}$$

$$U_{CEQ} \approx U_{CC} - I_{EQ}(R_c + R_e) = 24 - 2.65 \times 4 = 13.4 \text{ V (或 } 12 \text{ V)}$$

图 2-17(d),

$$I_{EQ} = \frac{U_{EE} - U_{EB}}{R_e} = \frac{6 - 0.7}{2} = 2.65 \text{ mA} \approx I_{CQ}$$

$$U_{CEQ} = -(U_{EE} + U_{CC}) + I_{CQ}(R_c + R_e) = -12 + 37.1 = +25.1 \text{ V}$$

该结果显然不合理, 电阻上的压降不可能大于回路中的电源电压。这说明该管已进入饱和区。此时的管压降  $U_{CE} = U_{CES} = -0.3 \text{ V}$ , 故该管的集电极电流只能由下式求出:

$$I_C = I_{CS} \approx \frac{U_{EE} + U_{CC} - U_{CES}}{R_c + R_e} \approx 0.8 \text{ mA}$$

而基极电流为:

$$I_B = 2.65 - 0.8 = 1.85 \text{ mA}$$

图 2-17(e)可采用估算法或用戴维宁定理法来求。

① 估算法:

$$U_{BB} = \frac{R_{b1}}{R_{b2} + R_{b1}} U_{CC} = \frac{30}{60 + 30} \times 24 = 8 \text{ V}$$

$$U_{R_e} = U_{BB} - U_{BE} = 8 - 0.7 = 7.3 \text{ V}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{R_e}}{R_e} = \frac{7.3}{2} = 3.65 \text{ mA} \approx I_{CQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta} = 0.045 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e) = 24 - 3.65 \times 2 = 16.7 \text{ V}$$

② 戴维宁定理法:

原电路利用戴维宁定理, 将基极电路等效为图 2-18 所示电路。

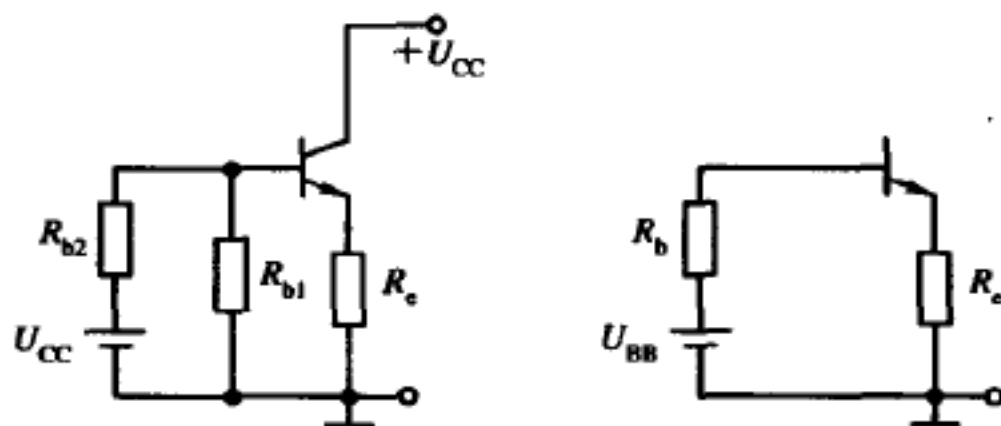


图 2-18 题 5 图(e)的基极等效电路



图 2-18 中,

$$R_b = R_{b2} // R_{b1} = 20 \text{ k}\Omega$$

$$U_{BB} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{CC} = 8 \text{ V}$$

由等效的基极电路得

$$I_{BQ} = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_b + (1 + \beta)R_c} = \frac{7.3}{20 + 162} = 0.040 \text{ mA}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 80 \times 0.04 = 3.2 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e) = 24 - 6.4 = 17.6 \text{ V}$$

显然,两种方法所得结果有差别,后者较精确,前者较简单,工程上常用前者即估算法。后面我们均用估算法。

6. 放大电路如图 2-19 所示,其中  $R_b = 120 \text{ k}\Omega$ ,  $R_c = 1.5 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{CC} = 16 \text{ V}$ 。三极管为 3AX21, 它的  $\beta \approx \bar{\beta} = 40$ ,  $I_{CBO} \approx 0$ 。

(1) 求静态工作点  $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$ 、 $I_{CEQ}$ 。

(2) 如果将三极管换一只  $\beta = 80$  的管子, 工作点将如何变化?

解: (1) 该放大电路是 PNP 电路, 求解方法与 NPN 电路一样, 电流方向按实际方向。

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{EB}}{R_b} = \frac{16 - 0.2}{120} = 0.13 \text{ mA}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 40 \times 0.13 = 5.2 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = -U_{CC} + I_{CQ}R_c = -16 + 7.8 = -8.1 \text{ V}$$

(2) 如管子换为  $\beta = 80$  的,  $I_{BQ}$  不变, 而

$$I_{CQ} = 80 \times 0.13 = 10.4 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = -16 + 15.6 = -0.4 \text{ V}$$

由此说明, 该电路静态工作点随管子的  $\beta$  变化。

7. 放大电路如图 2-20 所示。

(1) 设三极管  $\beta = 100$ , 试求静态工作点  $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$ 、 $U_{CEQ}$ 。

(2) 如果要把集-射压降  $U_{CE}$  调整到 6.5 V, 则  $R_b$  应调到什么值?

解: 从  $+U_{CC} \rightarrow R_c \rightarrow R_b \rightarrow$  基极  $\rightarrow$  发射极到回路方程

$$U_{CC} = (I_{CQ} + I_{BQ})R_c + I_{BQ}R_b + U_{BE}$$

考虑到  $I_{EQ} = I_{CQ} + I_{BQ} = (1 + \beta)I_{BQ}$ , 将其代入上式并整理得

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_b + (1 + \beta)R_c} = \frac{10 - 0.7}{120 + 100 \times 3} = 0.022 \text{ mA}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2.2 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}R_c = 10 - 2.2 \times 3 = 3.4 \text{ V}$$

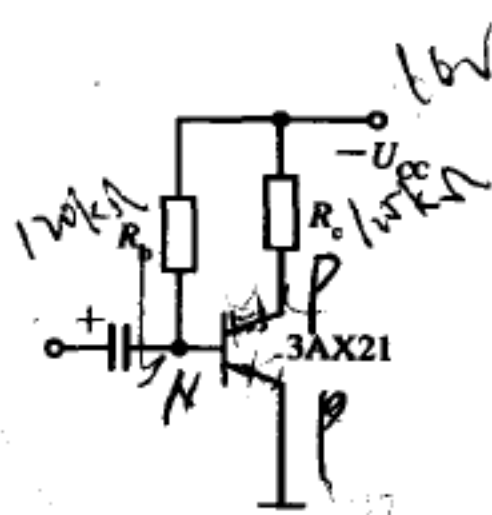


图 2-19 题 6 图

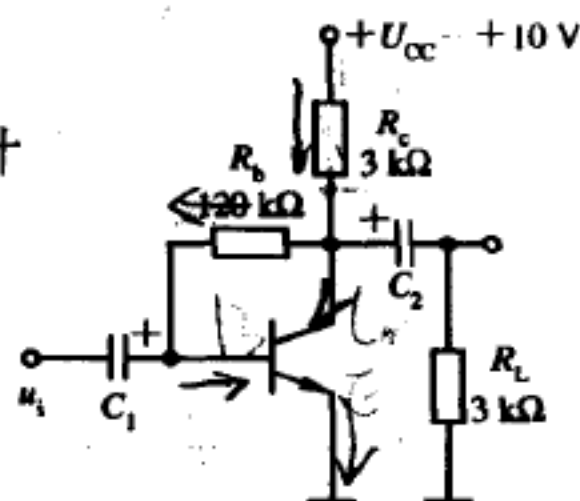


图 2-20 题 7 图

8. 图 2-21 中已知  $R_{b1} = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{b2} = 51 \text{ k}\Omega$ ,  $R_c = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_e = 500 \Omega$ ,  $R_L = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{CC} = 12 \text{ V}$ , 3DG4 的  $\beta = 30$ 。

(1) 试计算静态工作点  $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$ 、 $I_{CEQ}$ 。

(2) 如果换上一只  $\beta = 60$  的同类管子, 工作点将如何变化?

(3) 如果温度由  $10^\circ\text{C}$  升至  $50^\circ\text{C}$ , 试说明  $U_{CQ}$  将如何变化。

(4) 换上 PNP 三极管, 电路将如何改动?

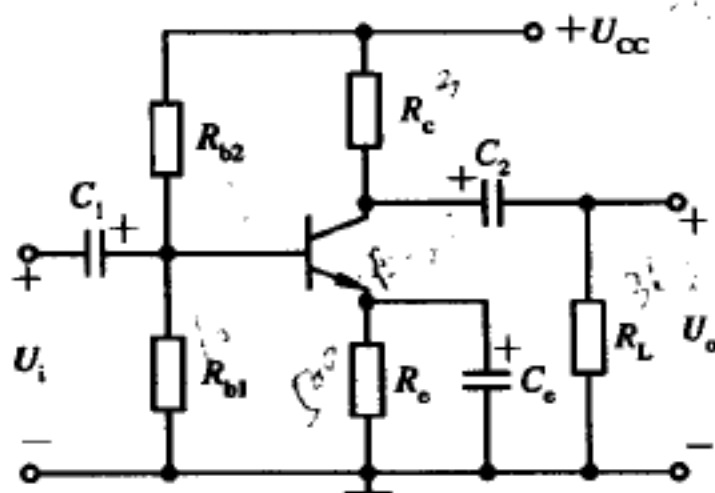


图 2-21 题 8 图

解: (1)

$$U_B = \frac{R_{b1}}{R_{b2} + R_{b1}} U_{CC} = \frac{10}{51 + 10} \times 12 \approx 2 \text{ V}$$

$$U_{R_e} = U_B - U_{BE} = 2 - 0.7 = 1.3 \text{ V}$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{R_e}}{R_e} = \frac{1.3}{0.5} = 2.6 \text{ mA} \quad \text{Handwritten: } I_{BQ} = \frac{2.6}{30}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_L) = 12 - 2.6 \times 3.5 = 2.9 \text{ V}$$

(2) 管子的  $\beta = 60$ , 它不影响  $I_{CQ}$  值和  $U_{CEQ}$  值, 仅改变  $I_{BQ}$  值。所以在  $U_{CE} \sim I_C$  坐标中, Q 点位置不变。由此可看出该电路不仅对温度的影响有稳定作用, 对  $\beta$  的适应性也较强, 所以此类电路便于调整。

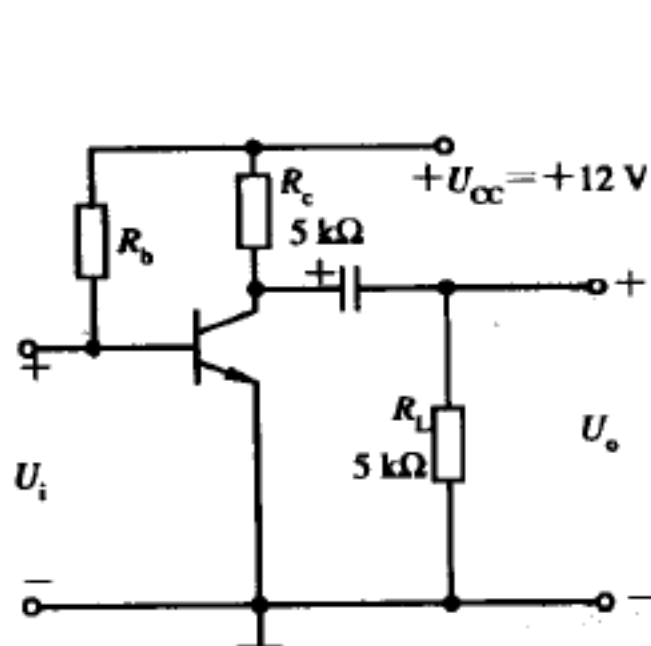
(3) 温度变化时, 由于  $R_e$  对工作点有稳定作用, 所以  $U_c$  基本不变。

(4) 换上 PNP 后电路改动如下: 电源  $+U_{CC}$  改为  $-U_{CC}$ , 电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_e$  的极性要反过来。

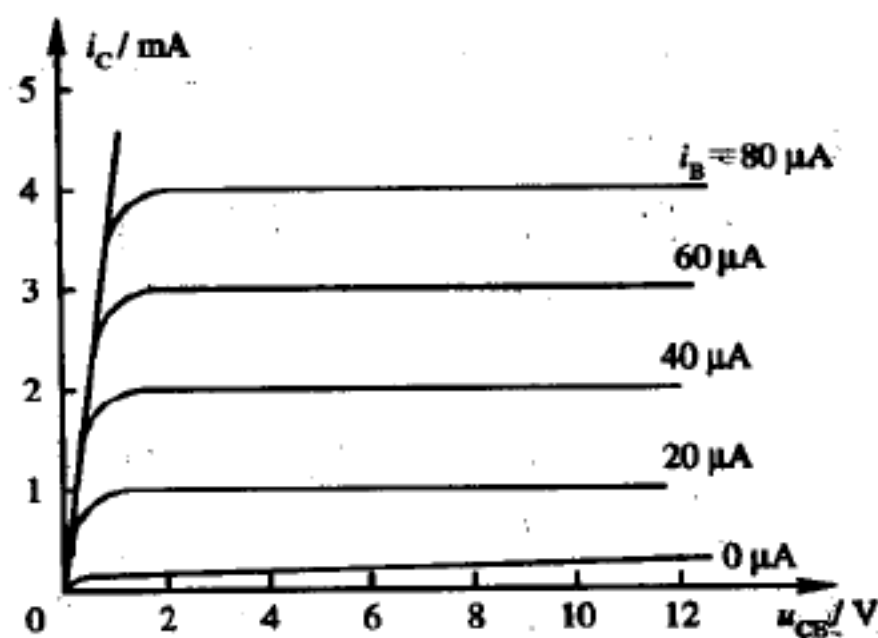
9. 电路及三极管的输出特性如图 2-22(a)、(b) 所示。

(1) 作出直流负载线;

(2) 确定  $R_b$  分别为  $10 \text{ M}\Omega$ 、 $560 \text{ k}\Omega$  和  $150 \text{ k}\Omega$  时的  $I_{CQ}$ 、 $U_{CEQ}$  值。



(a) 电路图



(b) 输出特性

图 2-22 题 9 图

(a) 电路图; (b) 输出特性

(3) 当  $R_b = 560 \text{ k}\Omega$ ,  $R_c$  改为  $20 \text{ k}\Omega$  时,  $Q$  点将发生什么样的变化? 三极管工作状态有无变化?

解: (1) 直流负载线方程如下:

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_c$$

$I_C = 0$ ,  $U_{CE} = U_{CC} = 12 \text{ V}$ , 得  $M$  点;

$U_{CE} = 0$ ,  $I_C = \frac{U_{CC}}{R_c} = 2.4 \text{ mA}$ , 得  $N$  点。

连接  $MN$  点得直流负载线如图 2-23 所示。

(2) 求出  $R_b$  为不同值时的  $I_{BQ}$  值, 再由图上读出直流负载线与其交点, 即得  $Q$  点, 读出  $I_{CQ}$  和  $U_{CEQ}$ 。

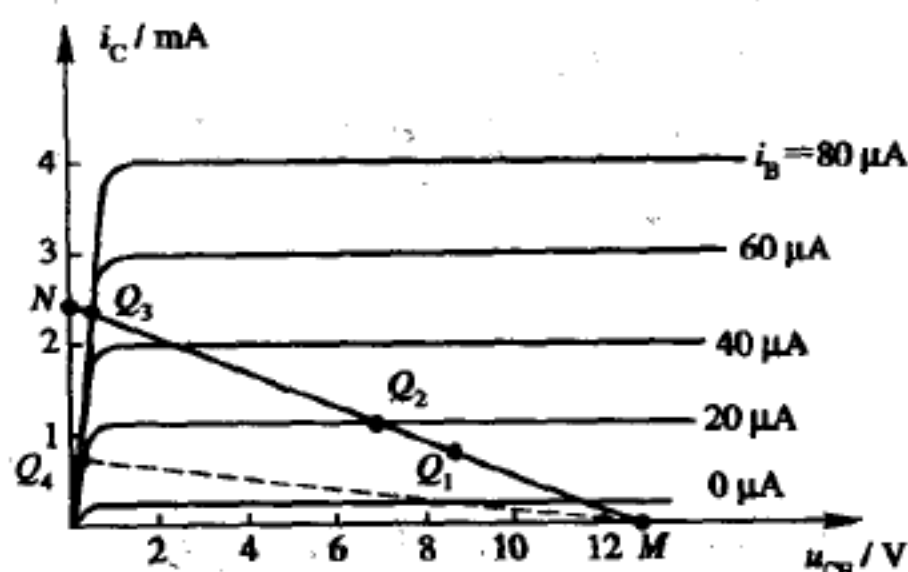


图 2-23 直流负载线

$$R_b = 1 \text{ M}\Omega \quad I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_b} = \frac{12 - 0.7}{10^6} \approx 12 \mu\text{A}$$

与直流负载线交与  $Q_1$  点, 读出  $I_{CQ} = 0.7 \text{ mA}$ ,  $U_{CEQ} = 8.5 \text{ V}$ 。

$$R_b = 560 \text{ k}\Omega \quad I_{BQ} = \frac{12 - 0.7}{560 \times 10^3} \approx 20 \mu\text{A}$$

与直流负载线交与  $Q_2$  点,  $I_{CQ} = 1 \text{ mA}$ ,  $U_{CEQ} = 7 \text{ V}$ 。

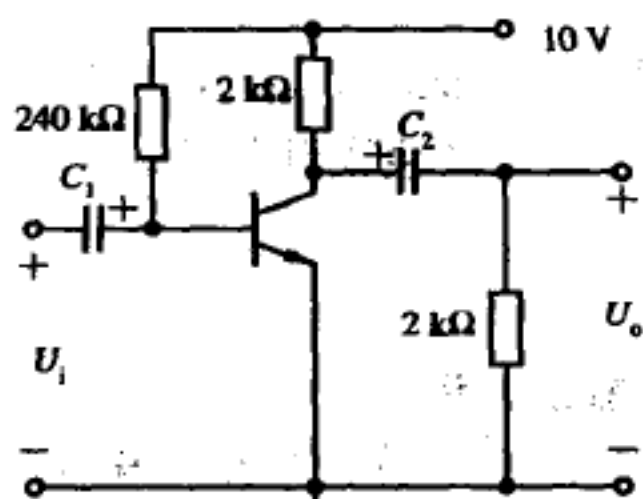
$$R_b = 150 \text{ k}\Omega \quad I_{BQ} = \frac{12 - 0.7}{150 \times 10^3} = 75 \mu\text{A}$$

与直流负载线交于  $Q_3$  点, 显然已进入饱和区,  $I_{CQ} \approx 2.3 \text{ mA}$ ,  $U_{CEQ} = 0.3 \text{ V}$ 。

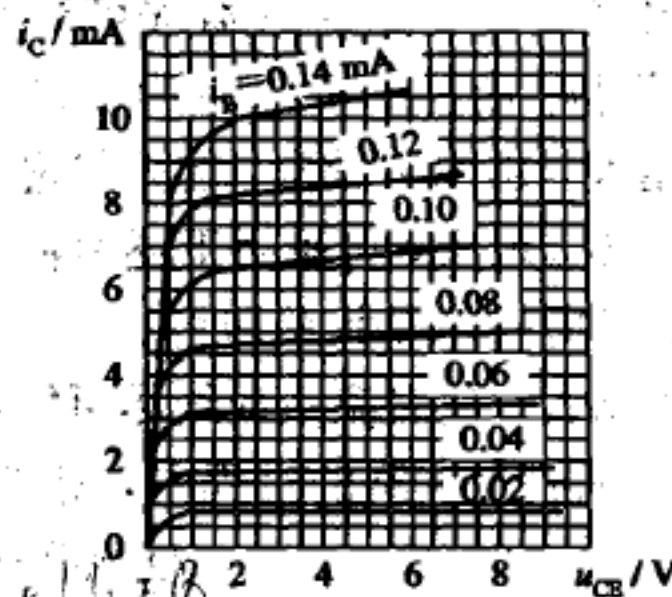
(4)  $R_c$  为  $20 \text{ k}\Omega$  时, 直流负载线将发生变化,  $M$  点不变, 而  $N$  点变为  $N'$  点,  $I_C = \frac{U_{CC}}{R_c} = \frac{12}{20} = 0.6 \text{ mA}$ , 与  $I_{BQ} = 20 \mu\text{A}$  曲线的交点为  $Q_4$ 。显然也进入饱和区,  $I_{CQ} \approx 0.6 \text{ mA}$ ,  $U_{CEQ} \approx 0.2 \text{ V}$ 。

由此题可看出  $Q$  点与  $R_b$  和  $R_c$  的关系。

10. 图 2-24(a) 电路中三极管的输出特性如图 2-24(b) 所示。



(a) 电路



(b) 输出特性

图 2-24 题 10 图

(a) 电路图; (b) 输出特性

- (1) 试画出交、直流负载线;
- (2) 求出电路的最大不失真输出电压  $U_{om}$  (有效值);
- (3) 若增大输入正弦波电压  $U_i$ , 电路将首先出现什么性质的失真? 输出波形的顶部还是底部将发生失真?
- (4) 在不改变三极管和电源电压  $U_{CC}$  的前提下, 为了提高  $U_{om}$ , 应该调整电路中哪个参数? 增大还是减小?

解:

(1) 首先作出直流负载线。

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_c$$

$I_C = 0$ ,  $U_{CE} = U_{CC} = 10\text{ V}$ , 得  $M$  点;  $U_{CE} = 0$ ,  $I_C = \frac{U_{CC}}{R_c} = 5\text{ mA}$ , 得  $N$  点。连接  $MN$  点得直流负载线。如图 2-25 的  $MN$  线。

然后求出  $I_{BQ}$  值, 其对应的特性曲线与直流负载线的交点即为  $Q$  点。

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_b} = \frac{10 - 0.7}{240 \times 10^3} \approx 0.047\text{ mA}$$

最后, 作交流负载线, 可通过两种方法作出交流负载线。

**方法 1: 点斜式。** 已知交流负载线必通过  $Q$  点, 又知其交流负载  $R'_L = R_L // R_c = 1\text{ k}\Omega$ , 即已知交流负载线的斜率。为此作出辅助线  $\frac{U_{CE}}{I_C} = 1\text{ k}\Omega$ , 如图 2-25 中  $M'N'$  线; 过  $Q$  点作  $M'N'$  的平行线即得交流负载线, 如图 2-25 中  $QP$  线。

**方法 2: 两点式。** 已知一点即  $Q$  点, 再得另一点即可。

$$OP = U_{CEQ} + I_{CQ} R'_L = 5 + 2.5 = 7.5\text{ V}$$

这样即得到  $P$  点, 连接  $QP$  即得交流负载线。

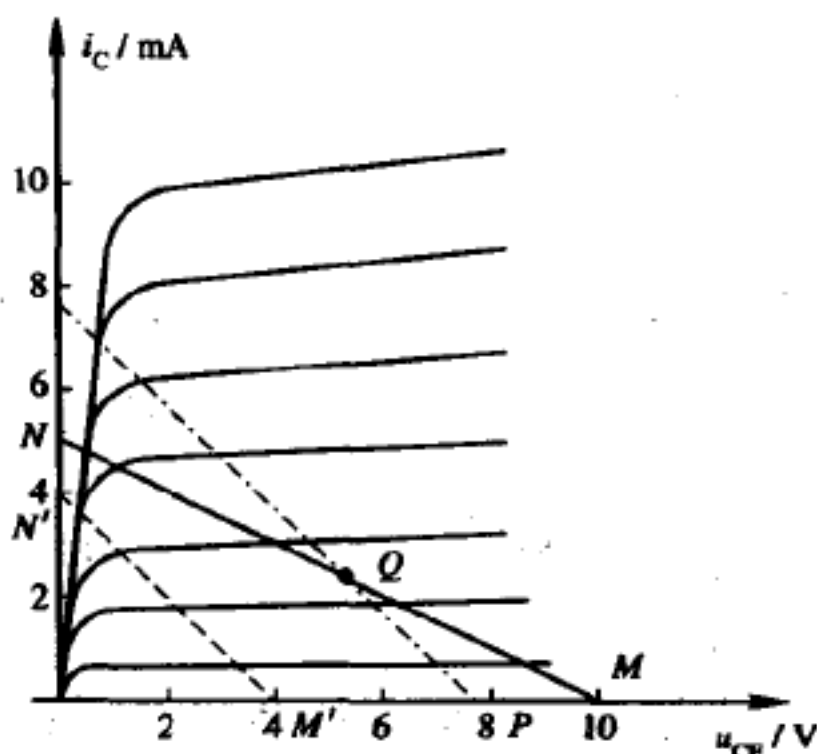


图 2-25

- (2) 由图 2-25 中交流负载线可看出输出电压受截止限制。由图 2-25 中读出  $U_{om} = 2.5\text{ V}$ , 或由公式  $U_{om} = I_{CQ} \cdot R'_L = 2.5\text{ V}$  确定。
- (3)  $U_i$  增大, 由图可看出, 首先将进入截止区, 所以产生顶部失真。
- (4) 为使  $U_{om}$  增大, 可采用下述两种方法:
  - ① 使  $Q$  点提高, 减小  $R_b$  即可。
  - ② 使  $R_L$  增大, 使交流负载线尽可能与直流负载线相近。

11. 在调试放大电路的过程中, 对于图 2-26(a) 所示放大电路, 当输入是正弦波时, 曾出现过如图 2-26(b)、(c)、(d) 所示三种不正常的输出电压波形。试判断这三种情况是分别产生了什么失真, 应如何调整电路参数, 才能消除失真?

答: 图(b)是截止失真, 可通过减少  $R_{b2}$  或增加  $R_{b1}$  及减小  $R_c$ , 使  $Q$  点提高, 以消除失真。



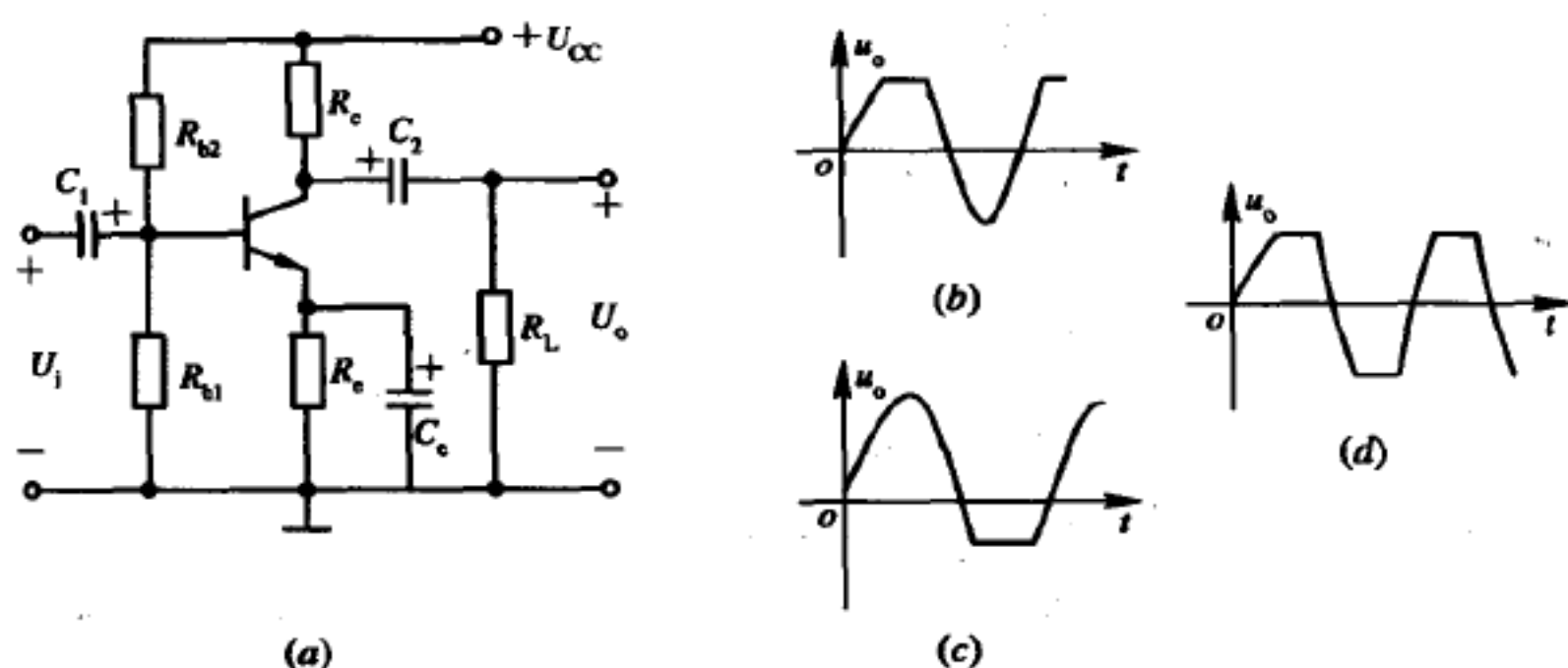


图 2-26 题 11 图

图(c)是饱和失真, 可通过增加  $R_{b2}$  或增加  $R_c$  或减小  $R_{b1}$  来消除失真。

图(d)是双向失真, 正半周进入饱和区, 负半周进入截止失真区, 说明工作点适中, 是由于信号过大引起失真, 可通过减小输入信号来消除失真。

12. 图 2-27 中, 设  $R_b = 300 \text{ k}\Omega$ ,  $R_c = 2.5 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ,  $C_1$ 、 $C_2$  的容抗可忽略不计,  $\beta = 100$ ,  $r_{be} = 300 \Omega$ 。

(1) 试计算该电路的电压放大系数  $A_u$ 。

(2) 若将输入信号幅值加大, 在示波器上观察输出波形时, 将首先出现哪一种形式的失真?

(3) 电阻调整合适, 在输出端用电压表测出的最大不失真电压的有效值是多少?

解:

$$(1) \quad A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

其中

$$R'_L = R_c // R_L = 2 \text{ k}\Omega;$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}}$$

为此应先求直流电流  $I_{CQ}$ 。

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_b} = \frac{6.7 - 0.7}{300 \times 10^3} = 0.02 \text{ mA}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 100 \times 0.02 = 2 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_c = 6.7 - 2 \times 2.5 = 1.7 \text{ V}$$

故

$$r_{be} = 300 + 101 \times 13 \approx 1.6 \text{ k}\Omega$$

所以

$$A_u = -\frac{100 \times 2}{1.6} = -125$$

(2) 由上求出直流工作点, 可看出其 Q 点过高,  $U_{CEQ} = 1.7 \text{ V}$ , 接近饱和区, 故输出电压的最大不失真电压为

$$U_{om} = U_{CEQ} - U_{CES} = 1.7 - 0.3 = 1.4 \text{ V}$$

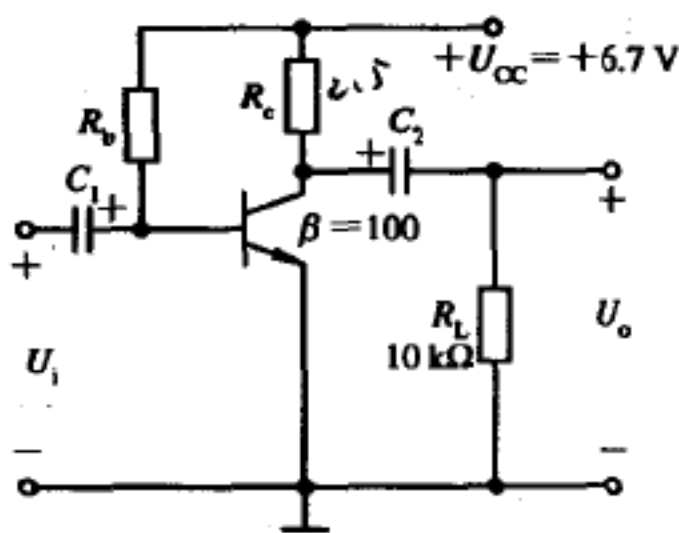


图 2-27 题 12 图

(3) 所谓电阻调整合适, 即  $Q$  点在交流负载线的中点处, 当输入信号增加时, 同时进入截止和饱和状态。如忽略饱和压降

$$I_{CQ} = \frac{1}{2} \frac{U_{CC}}{R_c} = 1.34 \text{ mA}$$

则输出电压幅度为

$$U_{om} = I_{CQ} R'_L = 1.34 \times 2 = 2.68 \text{ V}$$

有效值

$$U_o = \frac{1}{\sqrt{2}} \times U_{om} = 1.88 \text{ V}$$

13. 电路如图 2-28 所示, 设耦合电容和旁路电容的容量均足够大, 对交流信号可视为短路。

(1) 求  $A_u = \frac{U_o}{U_i}$ ,  $r_i$ ,  $r_o$ ;

(2) 求  $A_{us} = \frac{U_o}{U_s}$ ;

(3) 如将  $R_{b2}$  逐渐减小, 将会出现什么性质的非线性失真? 画出波形图。

解: 由于求  $A_u$ 、 $r_i$  时必先求出  $r_{be}$ , 而  $r_{be}$  又与直流工作电流  $I_{EQ}$  有关, 所以应先求直流电流。

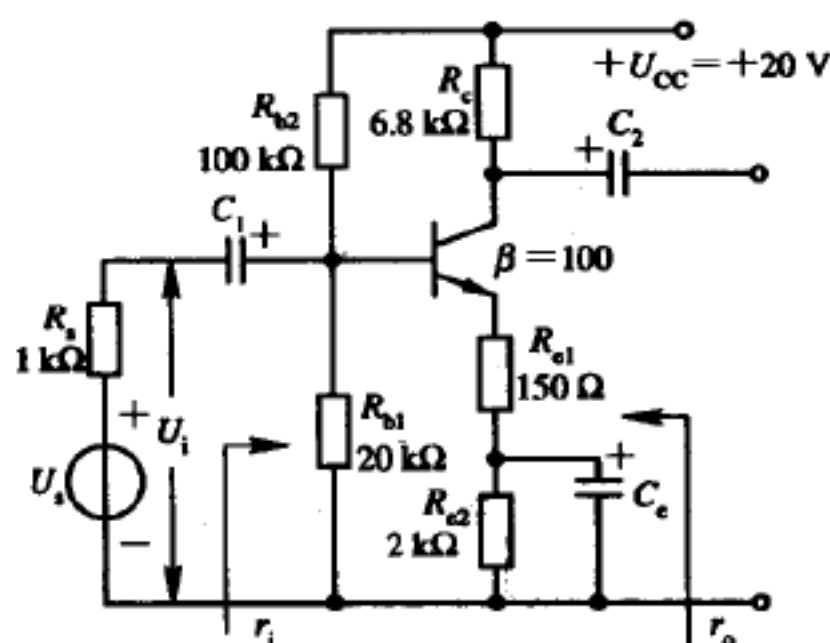


图 2-28 题 13 图

$$U_B = \frac{R_{b1}}{R_{b2} + R_{b1}} U_{CC} = \frac{20}{100 + 20} \times 20 \approx 3.3 \text{ V}$$

$$U_{R_e} = U_B - U_{BE} = 3.3 - 0.7 = 2.6 \text{ V}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{R_e}}{R_e} = \frac{2.6}{2.15} \approx 1.2 \text{ mA}$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 300 + 101 \times \frac{26}{1.2} \approx 2.5 \text{ k}\Omega$$

(1)

$$A_u = - \frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_{e1}} = - \frac{100 \times 6.8}{2.5 + 101 \times 0.15} \approx -38.5$$

$$r_i = R_{b2} // R_{b1} // [r_{be} + (1 + \beta) R_{e1}]$$

$$= 100 // 20 // 17.65 \approx 8.57 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = R_c = 6.8 \text{ k}\Omega$$

(2)

$$A_{us} = \frac{r_i}{R_s + r_i} A_u$$

$$= \frac{8.57}{1 + 8.57} \times (-38.5) \approx -34.5$$

(3)  $R_{b2}$  减小,  $Q$  点上升, 所以首先出现饱和失真, 波形关系如图 2-29 所示。



图 2-29 题 13 波形图

14. 电路如图 2-30 所示, 画出放大电路的微变等效电路, 写出电压放大倍数  $A_{u1} = \frac{U_{o1}}{U_i}$ 、 $A_{u2} = \frac{U_{o2}}{U_i}$  的表达式, 并画出当  $R_c = R_e$  时的输出电压  $U_{o1}$ 、 $U_{o2}$  的波形(输入  $U_i$  为正弦波, 时间关系对齐)。

解: 其微变等效电路如图 2-31(a)所示。

$$A_{u1} = -\frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$$

$$A_{u2} = \frac{(1 + \beta)R_e}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \approx 1$$

当  $R_c = R_e$  时  $U_{o1}$  与  $U_{o2}$  的波形大小相等, 方向相反。此电路常常称为分离倒相电路, 其波形图如图 2-31(b)所示。

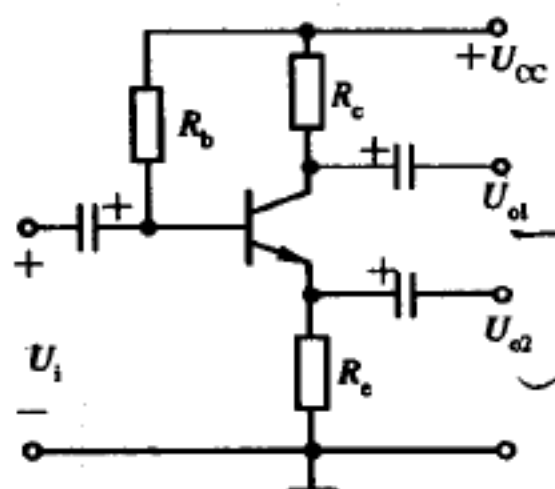


图 2-30 题 14 图

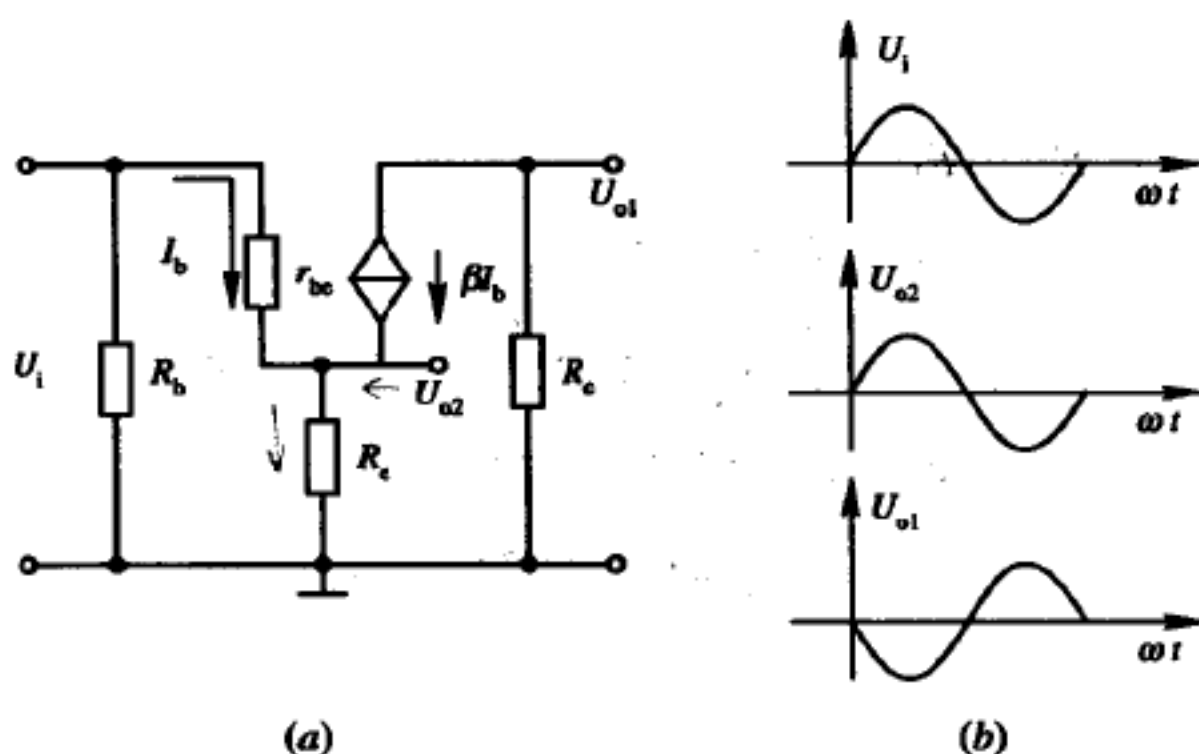


图 2-31

(a) 微变等效电路, (b) 波形图

15. 图 2-32(a)所示为射极输出器, 设  $\beta = 100$ ,  $U_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ,  $r_{bb'} = 300 \Omega$ 。

- (1) 求静态工作点。
- (2) 画出中频区微变等效电路。
- (3)  $R_L \rightarrow \infty$  时, 电压放大系数  $A_u$  为多大?  $R_L = 1.2 \text{ k}\Omega$  时,  $A_u$  又为多大?
- (4) 分别求出  $R_L \rightarrow \infty$ 、 $R_L = 1.2 \text{ k}\Omega$  时的输入电阻。
- (5) 求输出电阻  $r_o$ 。

解:

$$(1) \quad I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_b + (1 + \beta)R_e} = \frac{12 - 0.7}{560 + 101 \times 5.6} = 0.011 \text{ mA}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 100 \times 0.011 = 1.1 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}R_e = 12 - 1.1 \times 5.6 = 5.84 \text{ V}$$

(2) 微变等效电路如图 2-32(b)所示。

$$(3) \quad A_u = \frac{(1 + \beta)R_e'}{r_{be} + (1 + \beta)R_e'}$$

其中

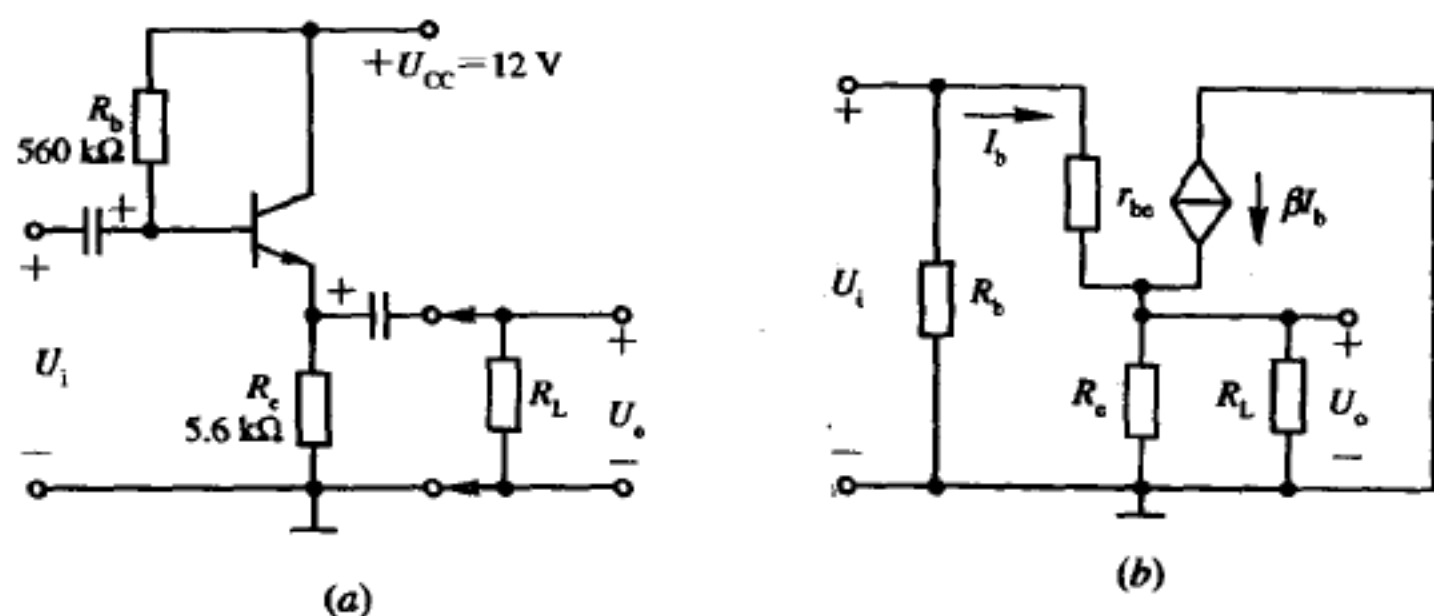


图 2-32

(a) 电路图; (b) 微变等效电路

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 300 + 101 \times \frac{26}{1.1} \approx 2.7 \text{ k}\Omega$$

$$R'_e = R_e // R_L$$

 $R_L \rightarrow \infty$  时,

$$R'_e = R_e = 5.6 \text{ k}\Omega$$

$$A_u = \frac{101 \times 5.6}{2.7 + 101 \times 5.6} = 0.995$$

 $R_L = 1.2 \text{ k}\Omega$  时,

$$R'_e = 5.6 // 1.2 \approx 0.99 \text{ k}\Omega$$

$$A_u = \frac{101 \times 0.99}{2.7 + 101 \times 0.99} = 0.97$$

(4) 输入电阻

$$r_i = R_b // r'_i$$

其中

$$r'_i = r_{be} + (1 + \beta)R'_e$$

 $R_L \rightarrow \infty$  时,

$$r'_i = 2.7 + 101 \times 5.6 = 568.3 \text{ k}\Omega$$

则

$$r_i = R_b // r'_i = 560 // 568.3 = 282.1 \text{ k}\Omega$$

 $R_L \rightarrow 1.2 \text{ k}\Omega$  时,  $R'_e = 5.6 // 1.2 = 0.99 \text{ k}\Omega$ 

$$r'_i = 2.7 + 101 \times 0.99 = 102.69 \text{ k}\Omega$$

$$r_i = 560 // 102.69 \approx 86.8 \text{ k}\Omega$$

(5)

$$r_o = R_e // \frac{R'_e + r_{be}}{1 + \beta}$$

其中

$$R'_e = R_e // R_L \approx 1 \text{ k}\Omega$$

所以

$$r_o = 5.6 // \frac{1 + 2.7}{101} = 5.6 // 0.037 \approx 0.037 \text{ k}\Omega$$

16. 共基极放大电路如图 2-33 所示, 已知  $U_{CC} = 15 \text{ V}$ ,  $\beta = 100$ ,  $U_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ,  $r_{bb'} = 300 \Omega$ , 试求:

(1) 静态工作点。

(2) 电压放大系数  $A_u = \frac{U_o}{U_i}$  和  $r_i$ 、 $r_o$ 。

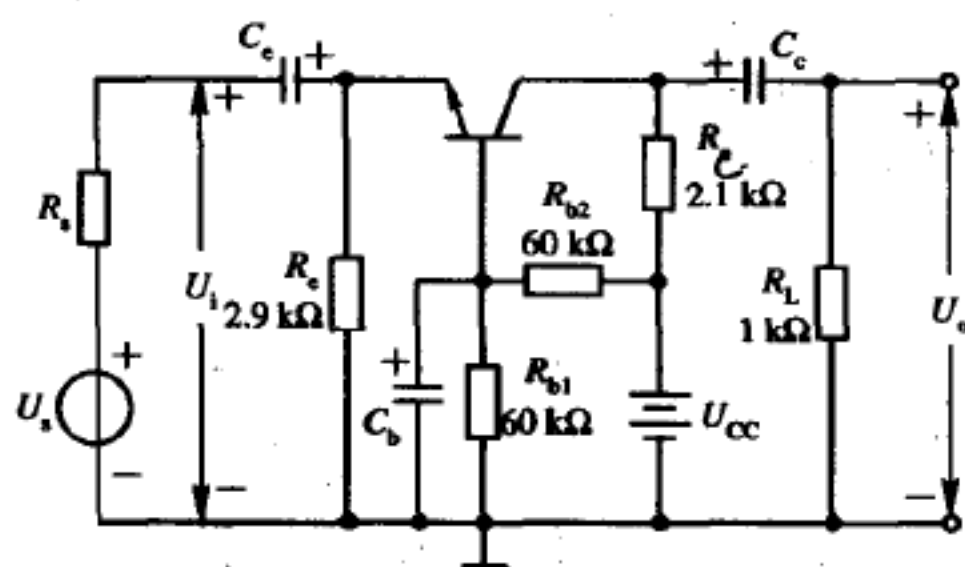


图 2-33 题 16 图

(3) 若  $R_s = 50 \Omega$ ,  $A_{us} = \frac{U_o}{U_s} = ?$

解:

$$\begin{aligned}
 (1) \quad U_B &= \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{CC} = 7.5 \text{ V} \\
 U_{R_e} &= U_B - U_{BE} = 7.5 - 0.7 = 6.8 \text{ V} \\
 I_{EQ} &= \frac{U_{R_e}}{R_e} = \frac{6.8}{2.9} \approx 2.3 \text{ mA} \\
 U_{CEQ} &= U_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e) = 15 - 2.3 \times 5 = 3.5 \text{ V} \\
 (2) \quad A_u &= \frac{\beta R'_L}{r_{be}}
 \end{aligned}$$

其中

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 300 + 101 \times \frac{26}{2.3} = 1.4 \text{ k}\Omega$$

$$A_u = \frac{100(2.1 // 1)}{1.4} = 48.4$$

$$r_i = R_s // \frac{r_{be}}{1 + \beta} = 2.9 // \frac{1.4}{101} \approx 14 \Omega$$

$$(3) \quad A_{us} = \frac{r_i}{R_s + r_i} A_u = \frac{14}{50 + 14} \times 48.4 \approx 10.6$$

17. 某放大电路, 当输入直流电压为  $10 \text{ mV}$  时, 输出直流电压为  $7 \text{ V}$ ; 输入直流电压为  $15 \text{ mV}$  时, 输出直流电压为  $6.5 \text{ V}$ 。它的电压放大倍数为\_\_\_\_\_。

解: 
$$A_u = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} = \frac{6.5 - 7}{15 - 10} \times 10^{-3} = 100$$

18. 有两个放大倍数相同的放大电路 A 和 B, 分别对同一信号源信号进行放大, 其输出电压分别为  $U_{oA} = 5.2 \text{ V}$ ,  $U_{oB} = 5 \text{ V}$ 。由此可得出放大电路\_\_\_\_\_优于放大电路\_\_\_\_\_。其原因是它的\_\_\_\_\_。(a) 放大倍数大, (b) 输入电阻大, (c) 输出电阻小)

答案: A; B; 输入电阻大(即(b)对)

19. \_\_\_\_\_耦合放大电路各级 Q 点互相独立, \_\_\_\_\_耦合放大电路温漂小, \_\_\_\_\_耦合放大电路能放大直流信号。

答: 阻容、变压器; 阻容、变压器; 直接



20. 电路如图 2-34 所示, 三极管的  $\beta$  均为 50,  $r_{bb'}$  = 300  $\Omega$ 。

(1) 求两级静态工作点  $Q_1$  和  $Q_2$ , 设  $U_{BE}$  = -0.2 V。

(2) 求总的电压放大倍数  $A_u$ 。

(3) 求  $r_i$  和  $r_o$ 。

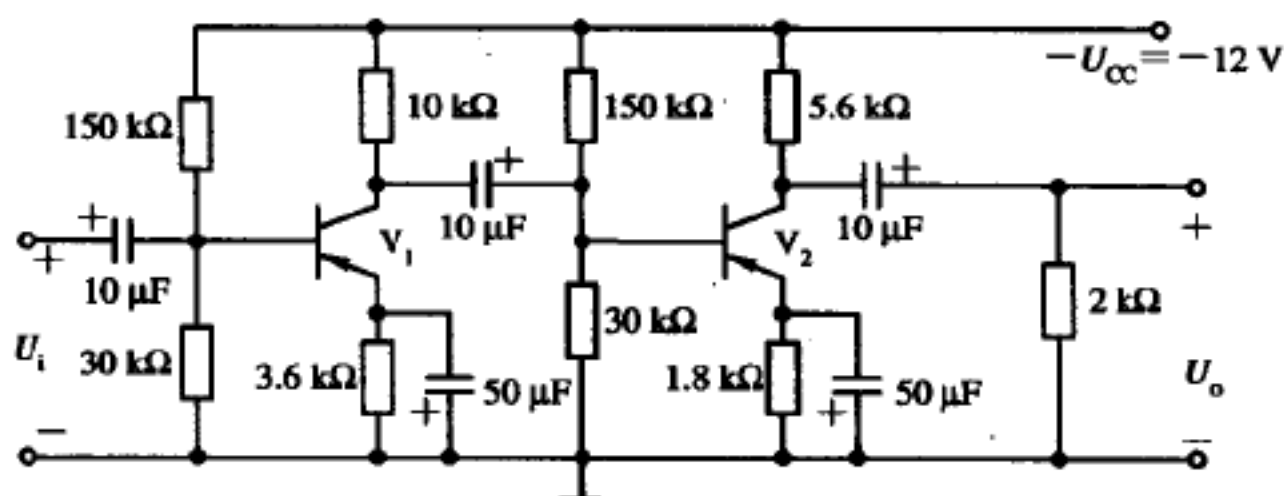


图 2-34 题 20 图

(1) 第一级  $Q_1$  点

$$U_{B1} = \frac{-30}{150 + 30} \times 12 = -2 \text{ V}$$

$$U_{R_{e1}} = |U_{B1} - U_{BE}| = |-2 + 0.2| = 1.8 \text{ V}$$

$$I_{E1} = \frac{U_{R_{e1}}}{R_{e1}} = \frac{1.8}{3.6} = 0.5 \text{ mA}$$

$$U_{CE1} = -U_{CC} + I_C(R_c + R_s) = -10 + 0.5 \times 13.6 = -3.2 \text{ V}$$

第二级  $Q_2$  点

$$U_{B2} = -\frac{30}{150 + 30} \times 12 = -2 \text{ V}$$

$$U_{R_{e2}} = |U_{B2} - U_{BE}| = 1.8 \text{ V}$$

$$I_{E2} = \frac{1.8}{1.8} = 1 \text{ mA}$$

$$U_{CE2} = -10 + 1 \times 7.4 = -2.6 \text{ V}$$

(2)

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = -\frac{\beta R'_{L1}}{r_{be1}} \cdot \left( -\frac{\beta R'_{L2}}{r_{be2}} \right)$$

其中

$$r_{be1} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{E1}} \approx 2.95 \text{ k}\Omega \approx 3 \text{ k}\Omega$$

$$r_{be2} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{E2}} \approx 1.6 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{L1} = R_{c1} \parallel r_{i2}$$

$$r_{i2} = 150 \parallel 30 \parallel 1.6 = 1.5 \text{ k}\Omega$$

所以

$$R'_{L1} = 10 \parallel 1.5 = 1.3 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{L2} = 5.6 \parallel 2 \approx 1.5 \text{ k}\Omega$$

故

$$A_u = \frac{50 \times 1.3}{3} \cdot \frac{50 \times 1.5}{1.5} = 21.7 \times 50 = 1083$$

(3)

$$r_i = r_{i1} = 150 // 30 // 3 \approx 2.68 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = r_{o2} = R_{c2} = 5.6 \text{ k}\Omega$$

21. 电路如图 2-35 所示, 其中三极管的  $\beta$  均为 100, 且  $r_{be1} = 5.3 \text{ k}\Omega$ ,  $r_{be2} = 6 \text{ k}\Omega$ 。

(1) 求  $r_i$  和  $r_o$ ;(2) 分别求出当  $R_L = \infty$  和  $R_L = 3.6 \text{ k}\Omega$  时的  $A_{us}$ 。解: (1)  $r_i = r_{i1} = R_b // [r_{be1} + (1 + \beta)R'_{e1}]$ 

其中

$$R'_{e1} = R_{e1} // r_{i2}$$

$$r_{i2} = R_{b2} // R_{b1} // r_{be2} = 91 // 30 // 6 \approx 4.7 \text{ k}\Omega$$

所以

$$R'_{e1} = 7.5 // 4.7 = 2.9 \text{ k}\Omega$$

故

$$r_i = 1500 // [5.3 + 101 \times 2.9] = 248.7 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = R_{c2} = 12 \text{ k}\Omega$$

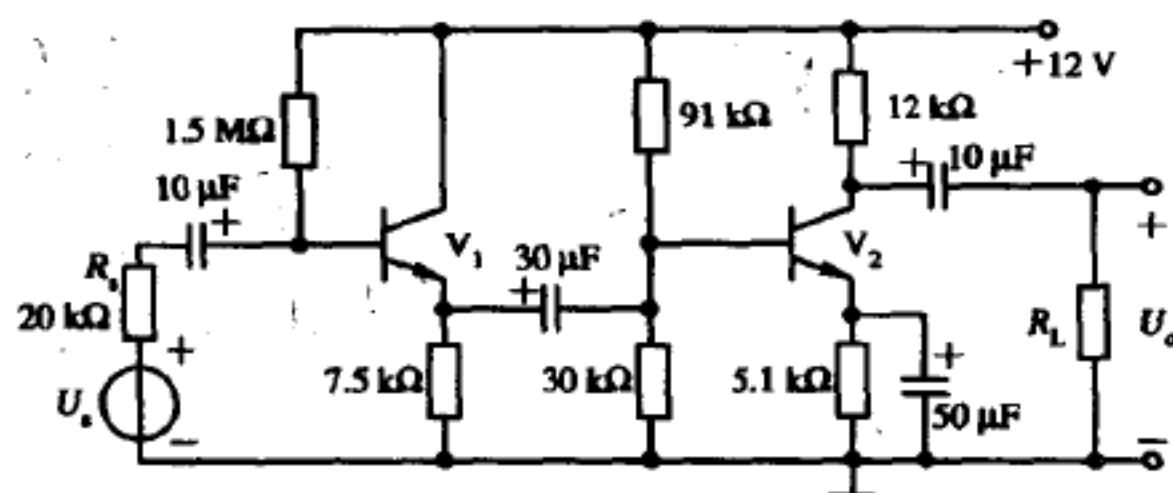


图 2-35 题 21 图

$$(2) \quad A_u = A_{u1} \cdot A_{u2}$$

$$A_{u1} = \frac{(1 + \beta)R'_{e1}}{r_{be1} + (1 + \beta)R'_{e1}} \approx 1$$

$$A_{u2} = \frac{-\beta R'_{L2}}{r_{be2}}$$

其中  $R'_{L2}$  计算如下:当  $R_L \rightarrow \infty$  时

$$R'_{L2} = R_{c2} = 12 \text{ k}\Omega$$

$$A_{u2} = -\frac{100 \times 12}{6} = -200$$

当  $R_L = 3.6 \text{ k}\Omega$  时

$$R'_{L2} = R_{c2} // R_L = 12 // 3.6 = 2.8 \text{ k}\Omega$$

$$A_{u2} = -\frac{100 \times 2.8}{6} = -46.7$$

所以,  $R_L \rightarrow \infty$  时

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = -200$$

$R_L = 3.6 \text{ k}\Omega$  时

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = -46.7$$

22. 若某放大电路的电压放大倍数为 100, 则换算为对数电压增益是多少分贝(dB)? 另一放大电路的对数电压增益为 80 dB, 则相当于电压放大倍数为多少?

解:

$$G_u = 20 \log A_u = 20 \log 100 = 40 \text{ dB}$$

当  $G_u = 80 \text{ dB}$  时, 则

$$80 = 20 \log A_u$$

$$\log A_u = \frac{80}{20} = 4$$

所以

$$A_u = 10^4$$

## 第三章 频率特性

所谓放大电路的频率特性,就是放大电路对不同频率的响应特性。本章介绍什么是线性失真以及频率失真和相位失真的概念,并对典型电路的频率特性进行分析。

频率特性是放大器的一个重要性能指标,特别是对于音响设备,频率特性的优劣直接反映其质量的好坏。

**通过本章的学习,要求读者:**

- (1) 掌握频率特性的概念;
- (2) 了解影响频率特性的因素;
- (3) 了解放大器频率特性的分析方法。

### 3.1 本章小结

#### 3.1.1 频率特性的基本概念

由于放大电路存在电抗元件耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  和旁路电容  $C_e$ , 以及电路的分布电容  $C_0$  和管子的极间电容, 因而对不同频率其呈现的阻抗不同, 因此放大电路对不同频率成分的放大倍数和相位移不同。放大倍数与频率的关系, 称为幅频关系; 相位与频率的关系, 称为相频关系。

放大器放大的信号, 有时会有若干不同频率的信号, 因此, 放大器对不同频率放大倍数的不同将引起幅频失真; 放大器对不同频率的相位移不同, 将引起相频失真。上述失真统称为频率失真, 由于它们是由线性元件引起的, 故又常称为线性失真。

#### 3.1.2 影响频率特性的因素

- (1) 低频段的频率响应, 主要受耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  和旁路电容  $C_e$  的影响。
- (2) 高频段的频率响应, 主要受三极管的极间电容和电路分布电容  $C_0$  的影响。

#### 3.1.3 上限频率 $f_h$ 和下限频率 $f_l$

通常定义放大倍数下降到中频区放大倍数的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  倍时所对应的频率为截止频率。如用分贝表示, 对应截止频率的分贝数, 比中频区的分贝数下降 3 分贝, 故截止频率又称为 3 分贝频率。低频段的截止频率称为下限频率  $f_l$ , 高频段的截止频率称为上限频率  $f_h$ 。即

$f=f_l$  或  $f=f_h$  时,  $A_u = \frac{1}{\sqrt{2}} A_{um}$  或  $20 \lg A_u = 20 \lg A_{um} - 3 \text{ dB}$ 。

截止频率的确定按以下原则: 某电容所确定的截止频率, 与该电容所在回路的时间常

数  $\tau$  呈下述关系:

$$f = \frac{1}{2\pi\tau}$$

定义

$$f_h - f_l = f_{BW}$$

为频带宽度。输入信号的频率范围在频带宽度  $f_{BW}$  内, 放大器的放大倍数和相位移为常数, 不产生线性失真; 如输入信号的频率范围超出了频带宽度, 则将产生线性失真。

### 3.1.4 放大器频率特性的分析方法

放大器频率特性的分析是按频率段进行的: 中频段求中频电压放大倍数  $A_{um}$ , 高频段求上限频率  $f_h$ ; 低频段求下限频率  $f_l$ 。

多级放大器总的上限频率  $f_h$  比其中任何一级的上限频率都要低; 下限频率  $f_l$  比其中任何一级的下限频率都要高。即多级放大器使得总的放大倍数增大了, 但总的频带宽度变窄了。因此在设计多级放大器时, 必须保证每一级的通频带都比总的通频带宽。如果各级通频带不同, 则总的上限频率基本取决于最低的一级, 而总的下限频率主要取决于最高的一级。故要提高总的上限频率, 主要是提高上限频率最低那一级的上限频率, 因为它对上限频率起主导作用。

通信专业、电子技术专业对该章知识点要求较高, 如要求学生应知道放大器的通频带将影响通话质量和音像设备的音、像质量等。

## 3.2 典型题举例

例 1 放大器的频率特性曲线如图 3-1 所示。当工作频率  $f=30\text{ kHz}$  时, 其放大系数为\_\_\_\_\_。

- ①  $A_u > 100$       ②  $A_u = 100$       ③  $A_u = 70$       ④  $A_u < 70$

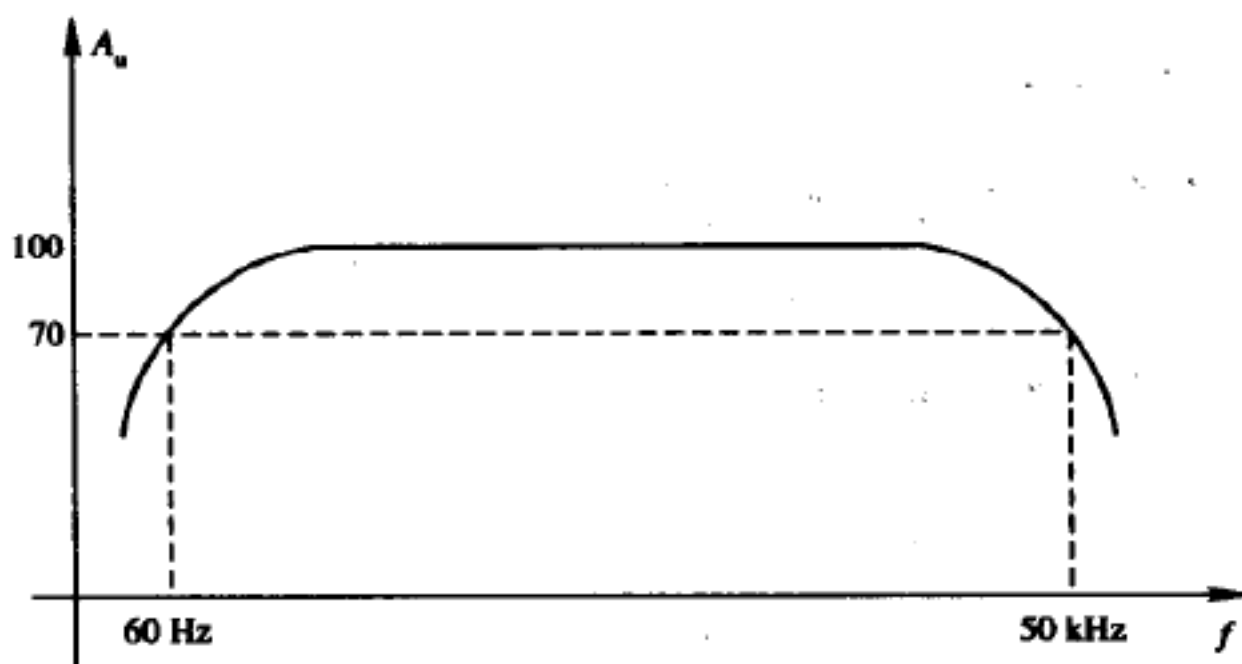


图 3-1 例 1 图

答案: ②



例2 放大器频率特性如图3-1。下列输入信号中,产生线性失真的是\_\_\_\_\_。

- ①  $u_i = U_{im} \sin 2\pi 10^5 t$   
 ②  $u_i = U_{im} \sin 2\pi 100 t$   
 ③  $u_i = U_{im1} \sin 2\pi 100 t + U_{im2} \sin 2\pi 10^4 t$   
 ④  $u_i = U_{im1} \sin 2\pi 10^3 t + U_{im2} \sin 2\pi 2 \times 10^5 t$

答案: ④

分析: 第①、②种输入信号为单一频率,故无线性失真可言;第③种输入信号是由两种频率信号组成的,其频率范围均在带宽范围内,故不产生线性失真;第④种输入信号的前一分量频率为  $10^3$  Hz,在频带范围内,后一分量频率为  $2 \times 10^5$  Hz,在频带范围之外,故将产生线性失真。

例3 某放大器的中频增益  $A_{um} = 40$  dB,上限频率  $f_h = 2$  MHz,下限频率  $f_l = 100$  Hz,输出不失真的动态范围为  $U_{opp} = 10$  V,在下列各种输入信号情况下,会产生何种失真?

- ①  $u_i(t) = 0.1 \sin(2\pi \times 10^4 t)$  (V)  
 ②  $u_i(t) = 10 \sin(2\pi \times 3 \times 10^6 t)$  (mV)  
 ③  $u_i(t) = 10 \sin(2\pi \times 400 t) + 10 \sin(2\pi \times 10^6 t)$  (mV)  
 ④  $u_i(t) = 10 \sin(2\pi \times 10 t) + 10 \sin(2\pi \times 5 \times 10^4 t)$  (mV)  
 ⑤  $u_i(t) = 10 \sin(2\pi \times 10^3 t) + 10 \sin(2\pi \times 10^7 t)$  (mV)

答: ①、②输入的是单一频率信号,故不可能产生线性失真,只可能产生非线性失真。

由于  $A_{um} = 40$  dB,其电压放大倍数为 100 倍。而输出电压的峰峰值为 10 V,则输出电压最大振幅值

$$U_{om} = \frac{1}{2} U_{opp} = 5 \text{ V}$$

对①,  $U_o = A_{um} U_{im} = 100 \times 0.1 = 10 \text{ V} > 5 \text{ V}$ ,故产生非线性失真。

对②,  $U_o = A_{um} U_{im} = 100 \times 10 = 1 \text{ V} < 5 \text{ V}$ ,故不会产生非线性失真。

对③、④、⑤而言,输入的幅度  $U_{im} = 10 \text{ mV}$ ,  $U_o = 1 \text{ V} < 5 \text{ V}$ ,故不会产生非线性失真。

由于③、④、⑤的输入信号是多个频率,故可能产生线性失真。

对③而言,输入信号频率为 400 Hz 和 1 MHz,在频带范围内,均大于  $f_l = 100$  Hz,小于  $f_h = 2$  MHz,故不产生线性失真。

对④而言,输入信号频率为 10 Hz 和 50 kHz,  $10 \text{ Hz} < f_l = 100 \text{ Hz}$ , 50 kHz 在频带范围内,故在低频段将产生线性失真。

对⑤而言,输入信号频率为 1000 Hz 和 10 MHz, 1000 Hz 在频带范围内,而  $10 \text{ MHz} > f_h = 2 \text{ MHz}$ ,故在高频段将产生线性失真。

### 3.3 思考题和习题解答

1. 电路的频率响应,是指对于不同频率的输入信号,其放大倍数的变化情况。高频时放大倍数下降,主要是因为\_\_\_\_\_的影响;低频时放大倍数下降,主要是因为\_\_\_\_\_的影响。

答：管子极间电容和电路分布电容的影响；耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  和旁路电容  $C_e$  的影响。

2. 当输入信号频率为  $f_1$  和  $f_h$  时，放大倍数的幅值约下降为中频时的\_\_\_\_\_，或者是下降了\_\_\_\_\_dB。此时与中频时相比，放大倍数的附加相移约为\_\_\_\_\_。

答： $A_u = \frac{1}{\sqrt{2}} A_{um}$ ；3 dB； $45^\circ$

3. 某三极管  $I_C = 2.5 \text{ mA}$ ， $f_T = 500 \text{ MHz}$ ， $r_{be} = 1 \text{ k}\Omega$ ，求高频参数  $g_m$ 、 $C_\pi$ 、 $\beta$ 、 $f_\beta$ 。

解

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{26} = \frac{2.5}{26} = 96 \text{ mA/V}$$

$$\beta = g_m \cdot r_{be} = 96 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3 = 96$$

$$f_\beta \approx \frac{f_T}{\beta} = \frac{500}{96} \approx 5.2 \text{ MHz}$$

$$C_\pi = \frac{g_m}{2\pi f_T} = \frac{96 \times 10^{-3}}{2\pi \times 500 \times 10^6} \approx 30.6 \text{ pF}$$

4. 电路如图 3-2 所示，三极管参数为  $\beta = 100$ ， $r_{be} = 100 \Omega$ ， $U_{be} = 0.6 \text{ V}$ ， $f_T = 10 \text{ MHz}$ ， $C_\pi = 10 \text{ pF}$ 。试通过下列情况的分析计算，说明放大电路各种参数变化对放大器频率特性的影响。

(1) 画出中频段、低频段和高频段的简化等效电路，并计算中频电压放大倍数  $A_{um}$ 、上限频率  $f_h$  和下限频率  $f_l$ 。

(2) 在不影响电路其它指标的情况下，欲将下限频率  $f_l$  降到  $200 \text{ Hz}$  以下，电路参数应作怎样的变更？

(3) 其它参数不变，若将负载电阻  $R_L$  降到  $200 \Omega$ ，对电路性能有何影响？

(4) 在不换管子，也不改变电路接法的前提下，如何通过电路参数的调整进一步展宽频带？

(5) 其它参数不变，重选三极管， $f_T = 200 \text{ MHz}$ ， $r_{be} = 50 \Omega$ ， $C_\pi = 2 \text{ pF}$ ， $\beta = 100$ ，上限频率可提高多少？

解：(1) 分频段画等效电路，关键是对电抗元件的处理。

中频段将电容  $C_b$  和  $C_e$  视为短路，而将管子的极间电容视为开路，等效电路如图 3-3(a) 所示。

低频段考虑  $C_b$ 、 $C_e$  的作用，极间电容仍视为开路，等效电路如图 3-3(b) 所示。

高频段考虑极间电容的作用， $C_b$ 、 $C_e$  视为短路，等效电路如图 3-3(c) 所示。

为了求  $A_{um}$ ，首先应确定静态工作点，才能确定等效电路的参数。

$$U_B = \frac{R_{b2}}{R_{b2} + R_{b1}} U_{CC} = \frac{8}{62 + 8} \times 18 = 2 \text{ V}$$

$$U_{R_e} = U_B - U_{BE} = 2 - 0.6 = 1.4 \text{ V}$$

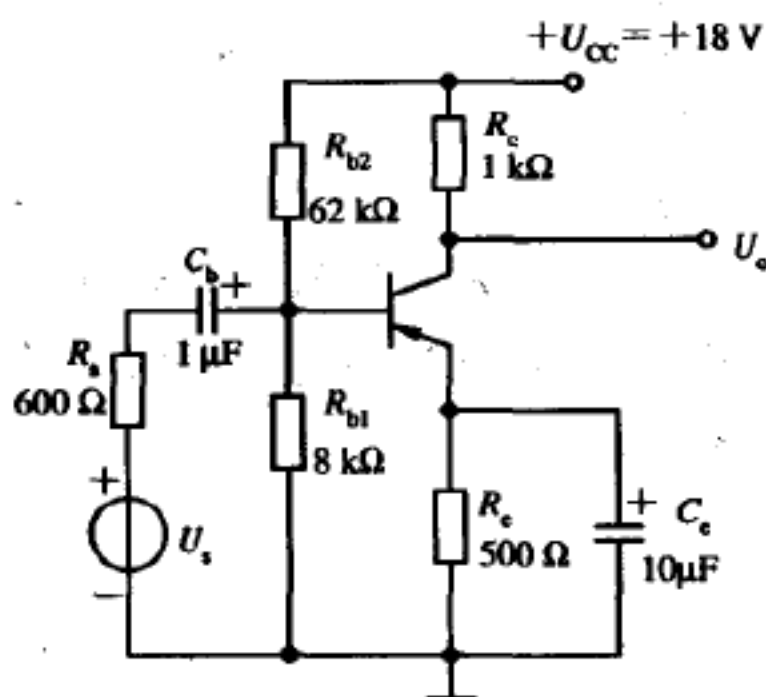


图 3-2 题 4 图

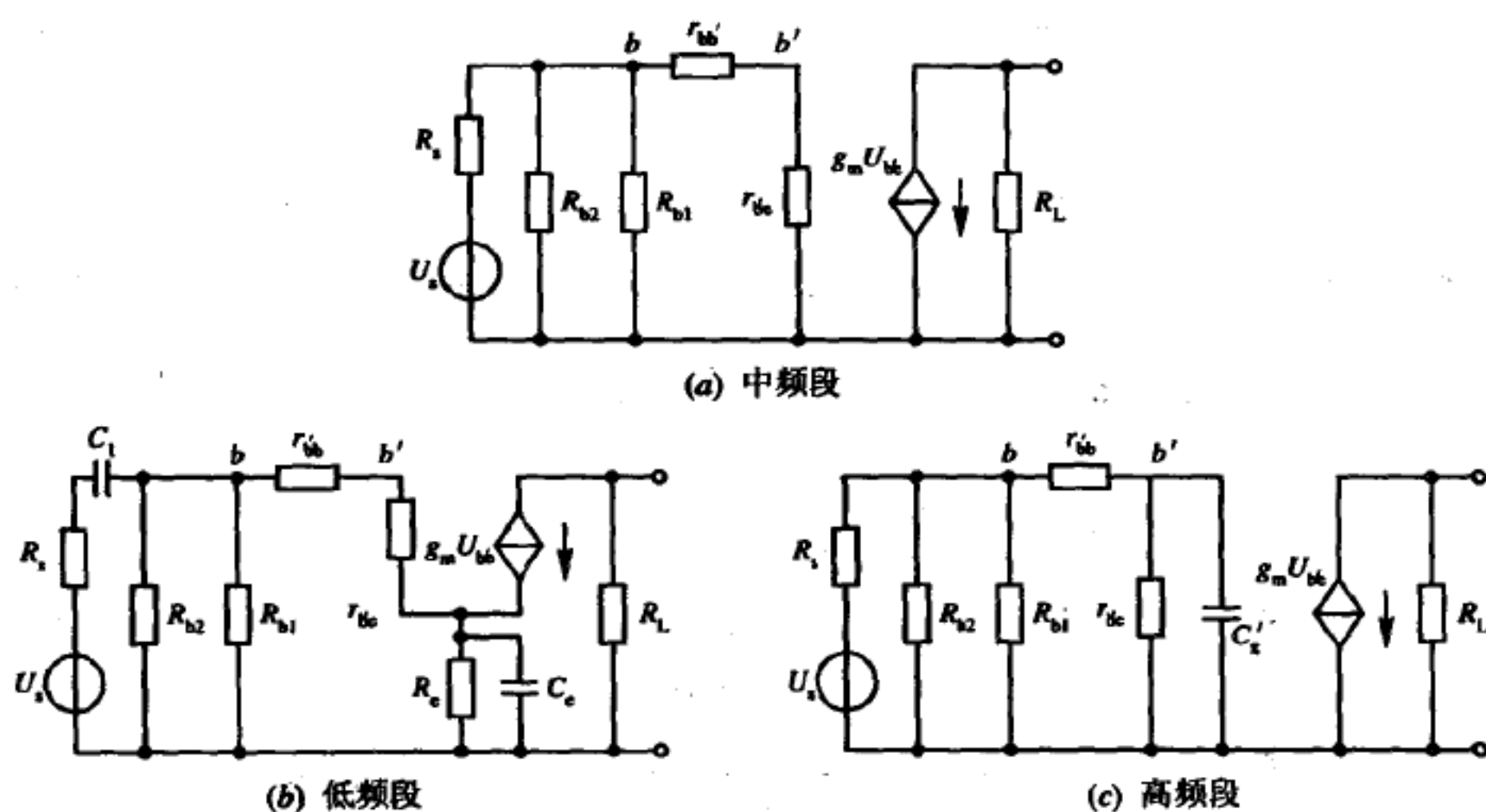


图 3-3

$$I_{EQ} = \frac{U_{R_s}}{R_s} = \frac{1.4}{0.5} = 2.8 \text{ mA}$$

则  $r_{be} = (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 101 \times \frac{26}{2.8} \approx 938 \Omega$

由中频等效电路可求得

$$U_o = -g_m U_{be} R'_L = -g_m U_{be} R_c$$

$$U_{be} = \frac{r_{be}}{r_{bb'} + r_{be}} U_i$$

其中

$$U_i = \frac{r_i}{R_s + r_i} U_s$$

$$r_i = R_{b2} // R_{b1} // (r_{bb'} + r_{be}) = 62 // 8 // 1.038 \approx 0.9 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = \frac{I_E}{26} = \frac{2.8}{26} \approx 108 \text{ mA/V}$$

则

$$U_o = -\frac{r_i}{R_s + r_i} \times \frac{r_{be}}{r_{bb'} + r_{be}} g_m R_c U_s$$

$$A_{um} = -\frac{r_i}{R_s + r_i} \times \frac{r_{be}}{r_{bb'} + r_{be}} g_m R_c$$

$$A_{um} = -\frac{0.6}{0.6 + 0.9} \times \frac{0.94}{1.038} \times 108 \times 1 = -39$$

由高频等效电路可求上限频率

$$f_h = \frac{1}{2\pi R C'_x}$$

其中  $R = r_{be} // [r_{bb'} + R_s // R_b] = 0.93 // [0.05 + 0.6 // 62 // 8] \approx 0.38 \text{ k}\Omega$

$$C'_x \approx (1 + g_m R_c) C_\mu + C_x$$

$$C_{\pi} = \frac{g_m}{2\pi f_T} = \frac{108 \times 10^{-3}}{2\pi \times 10^7} \approx 1720 \text{ pF}$$

$$C_{\pi}' = (1 + 108) \times 10 + 1720 = 2810 \text{ pF}$$

所以 
$$f_h = \frac{1}{2\pi \times 0.38 \times 10^3 \times 2810 \times 10^{-12}} \approx 0.15 \text{ MHz}$$

由低频段等效电路可求下限频率。分别求出  $C_b$  和  $C_e$  所决定的下限频率  $f_{l1}$  和  $f_{le}$  如下:

$$f_{l1} = \frac{1}{2\pi(R_s + r_i)C_b} = \frac{1}{2\pi(0.6 + 0.9) \times 10^3 \times 10^{-6}} \approx 107 \text{ Hz}$$

$$f_{le} = \frac{1}{2\pi \left( R_s // \frac{R_s' + r_{bb'} + r_{be}}{1 + \beta} \right)}$$

式中  $R_s' = R_s // R_{b2} // R_{b1} \approx R_s = 0.6 \text{ k}\Omega$

$$\beta = g_m r_{be} = 108 \times 10^{-3} \times 0.938 = 101$$

$$f_{le} = \frac{1}{2\pi \left( 0.5 // \frac{0.6 + 1.038}{102} \right) \times 10^3 \times 10^{-5}} \approx 880 \text{ Hz}$$

选其中差的一个作为放大电路的下限频率, 即

$$f_l \approx f_{le} = 880 \text{ Hz}$$

(2) 由上述可知下限频率受  $C_e$  的影响大, 所以将  $C_e$  增大 5 倍即  $C_e = 50 \mu\text{F}$  即可, 此时

$$f_l = \frac{880}{5} = 176 \text{ Hz}$$

当然考虑到  $C_b$  的作用, 可使  $C_e$  再选大一些, 或使  $C_b$  增大 10 倍即  $C_b = 10 \mu\text{F}$ , 则

$$f_{l1} = \frac{107}{10} = 10.7 \text{ Hz}$$

这样电路的下限频率受  $C_b$  的影响即可不考虑了。即  $C_e = 50 \mu\text{F}$ ,  $C_b = 10 \mu\text{F}$ 。

(3)  $R_c$  由  $1 \text{ k}\Omega$  降为  $200 \Omega$ , 则电压放大系数  $A_{um}$  将下降, 且  $C_{\pi}' = (1 + g_m R_c) C_{\pi} + C_{\pi}$  也将下降, 所以上限频率  $f_h$  将上升。

$$A_{um} = - \frac{r_i}{R_s + r_i} \cdot \frac{r_{be}}{r_{bb'} + r_{be}} g_m R_c = -7.8$$

$$f_h = \frac{1}{2\pi R [(1 + g_m R_c) C_{\pi} + C_{\pi}]} = \frac{1}{2\pi \times 0.38 \times 10^3 \times [226 + 1720] \times 10^{-12}} \approx 0.215 \text{ MHz}$$

(4) 频带展宽, 需要使  $f_h$  上升,  $f_l$  下降。影响  $f_h$  的主要因素是  $C_{\pi}'$ :

$$C_{\pi}' = (1 + g_m R_c) C_{\pi} + \frac{g_m}{2\pi f_T}$$

使  $g_m$  下降可使  $C_{\pi}'$  减小, 而  $g_m \approx I_E / 26$ , 所以可通过降低  $I_E$  改善频率特性。而  $I_E$  降低可通过增大  $R_{b2}$  或增大  $R_c$  或减小  $R_{b1}$  达到减小  $C_{\pi}'$  的目的, 使  $f_h$  提高。

$f_l$  下降可通过增大  $C_b$ 、 $C_e$  来实现。

(5) 更换晶体管后, 高频等效电路的参数将发生变化。

$$C_{\pi} = \frac{g_m}{2\pi f_T} = \frac{108 \times 10^{-3}}{2\pi \times 2 \times 10^8} = 85.9 \text{ pF}$$