

## 第二章 基本放大电路(2)

### 2.3.3 放大电路等效电路法

晶体管在小信号(微变量)情况下工作时，可以在静态工作点附近的小范围内用直线段近似地代替三极管的特性曲线，三极管就可以等效为一个线性元件。这样就可以将非线性元件晶体管所组成的放大电路等效为一个线性电路。

#### 一、微变等效条件

{ 研究的对象仅仅是变化量  
信号的变化范围很小

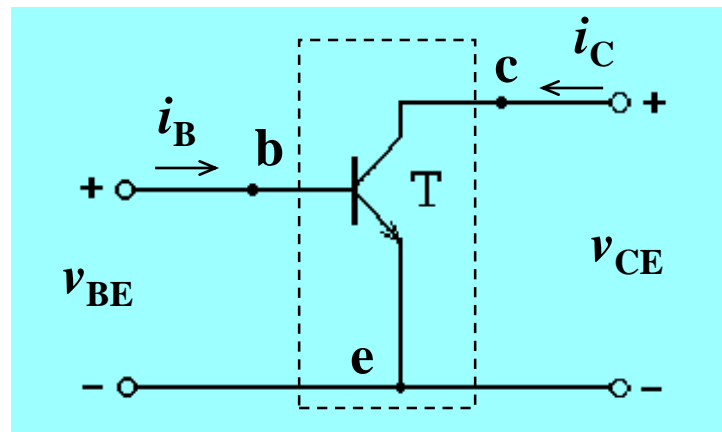
## 二、晶体管共射参数等效模型

### 1. H(hybrid)参数的引出

输入、输出特性如下：

$$i_B = f(v_{BE}) \Big|_{v_{CE} = \text{const}}$$

$$i_C = f(v_{CE}) \Big|_{i_B = \text{const}}$$



可以写成： $v_{BE} = f(i_B, v_{CE})$        $i_C = f(i_B, v_{CE})$       BJT双口网络

在小信号情况下，对上两式取全微分得

$$dv_{BE} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{v_{CE}} \cdot di_B + \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B} \cdot dv_{CE}$$

$$di_C = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{v_{CE}} \cdot di_B + \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B} \cdot dv_{CE}$$

用小信号交流分量表示  $v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$$

## 2. H参数的物理意义

其中：

$$v_{be} = h_{ie}i_b + h_{re}v_{ce}$$

$$i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce}$$

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}} \quad \text{输出端交流短路时的输入电阻；}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}} \quad \text{输出端交流短路时的正向电流传输比或电流放大系数；}$$

$$h_{re} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B} \quad \text{输入端交流开路时的反向电压传输比；}$$

$$h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B} \quad \text{输入端交流开路时的输出电导。}$$

四个参数量纲各不相同，故称为混合参数。

**hybrid** (H参数)

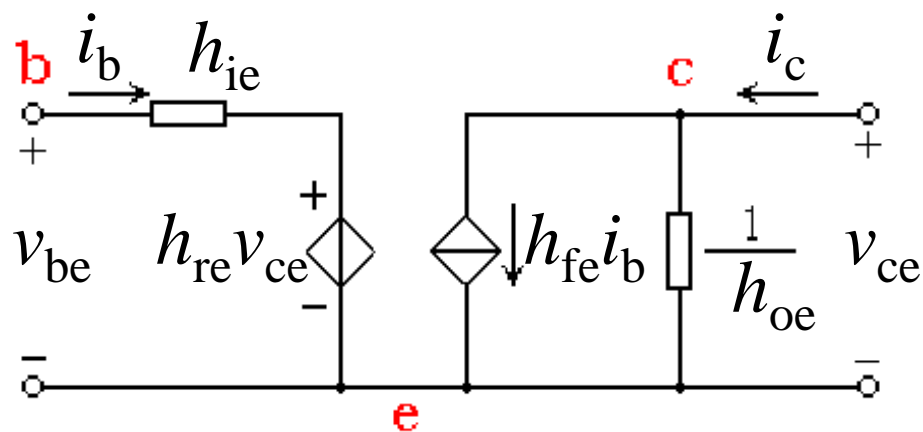
### 3. H参数小信号模型

根据

$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$$

可得

- H参数都是小信号参数，即微变参数或交流参数。
- H参数与工作点有关，在放大区基本不变。
- H参数都是微变参数，所以只适合对交流信号的分析。



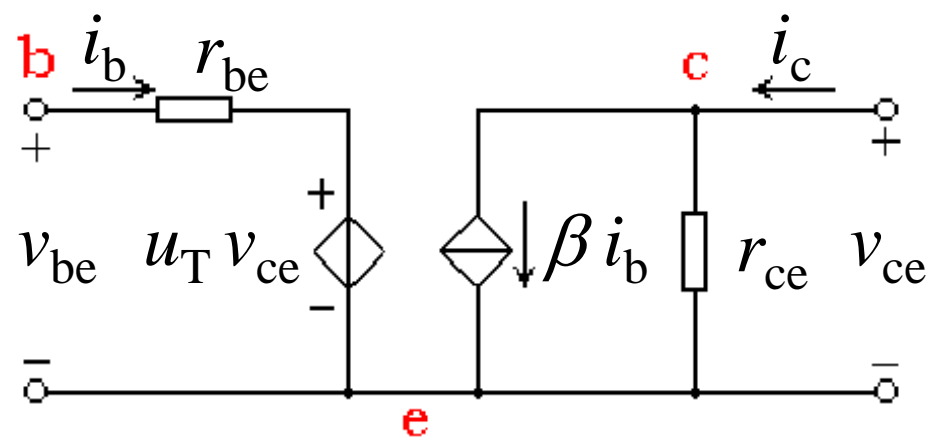
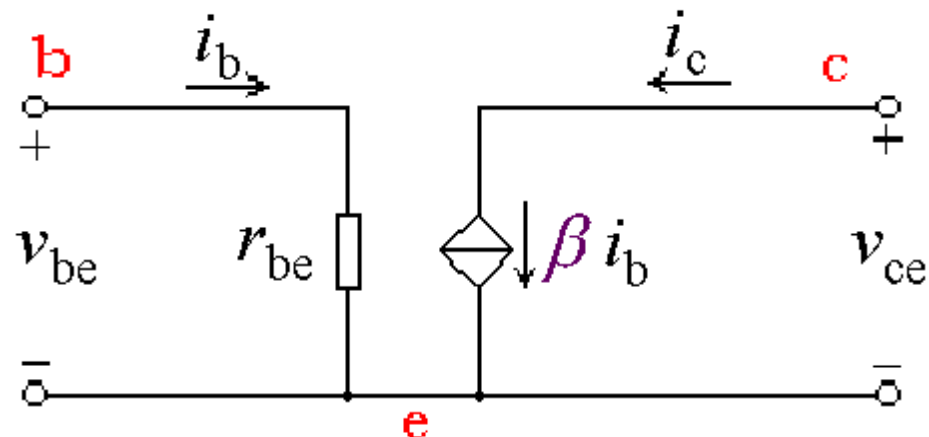
BJT的H参数模型

## 4. 简化的H参数等效模型

- $\beta i_b$  是受控源，且为电流控制电流源(CCCS)。
- 电流方向与  $i_b$  的方向是关联的。

对BJT的H参数模型

- $u_T$  很小，一般为  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，
- $r_{ce}$  很大，约为  $100\text{k}\Omega$ 。故一般可忽略它们的影响，得到简化电路



## 5. H参数的确定

- $\beta$  一般用测试仪测出；
- $r_{be}$  与  $Q$  点有关，可用图示仪测出。

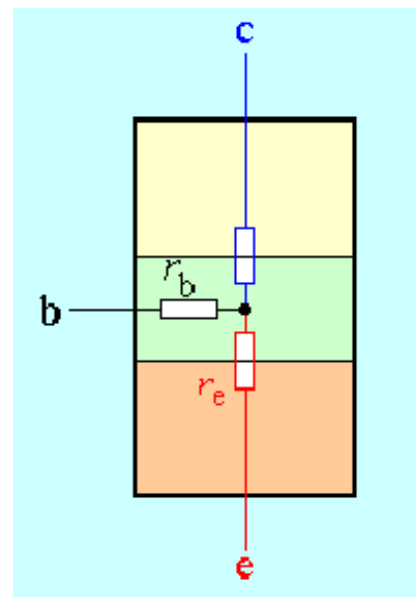
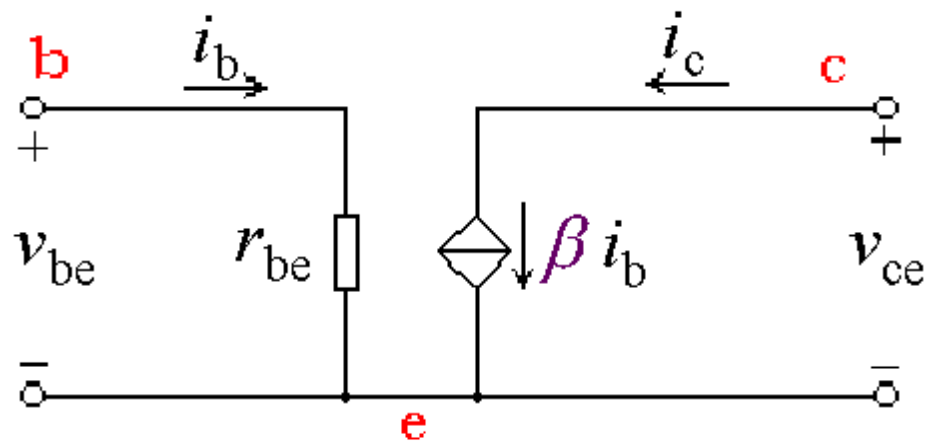
一般也用公式估算  $r_{be}$

$$r_{be} = r_b + (1 + \beta) r_e$$

对于低频小功率管  $r_b \approx (100 - 300) \Omega$

而 
$$r_e = \frac{V_T(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} \quad (T=300\text{K})$$

则 
$$r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$



电路动态参数的分析就是求解电路电压放大倍数、输入电阻、输出电阻。

解题的方法是：

作出h参数的交流等效电路

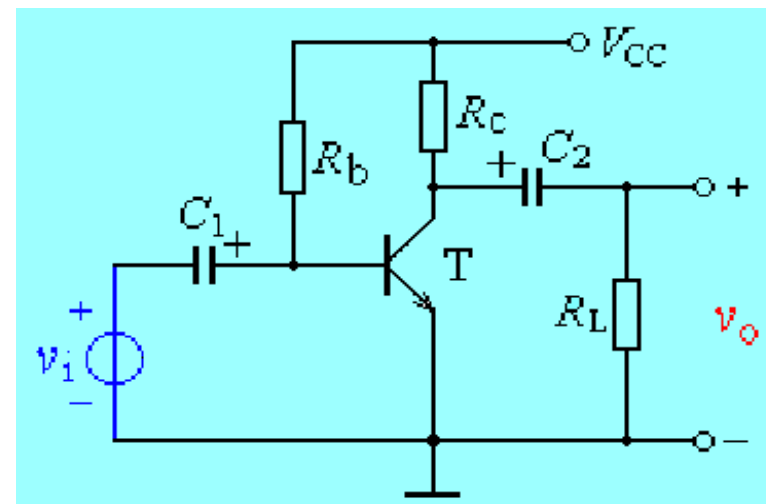
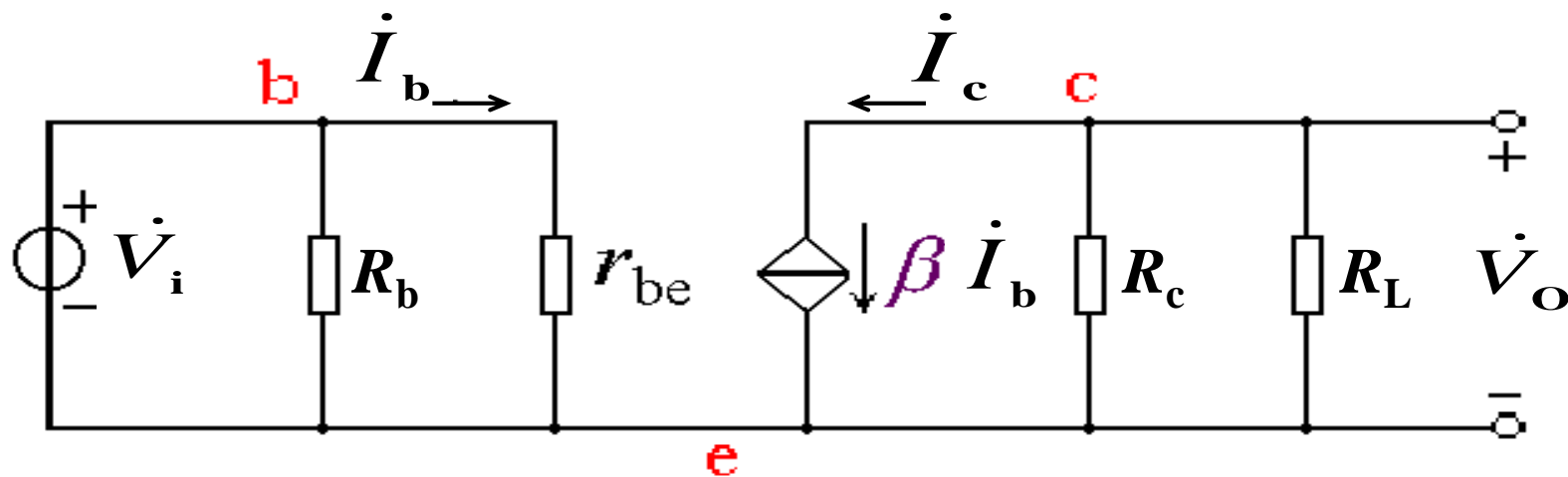
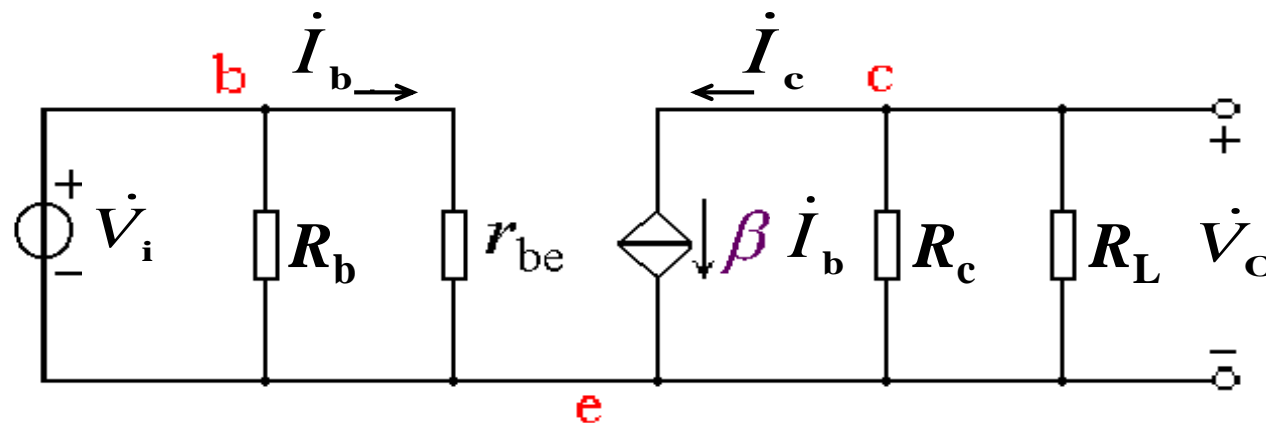


图2.2.5共射极放大电路





## 1. 求电压放大倍数（电压增益）



根据

$$\dot{V}_i = \dot{I}_b \cdot r_{be} \quad \dot{I}_c = \beta \cdot \dot{I}_b$$

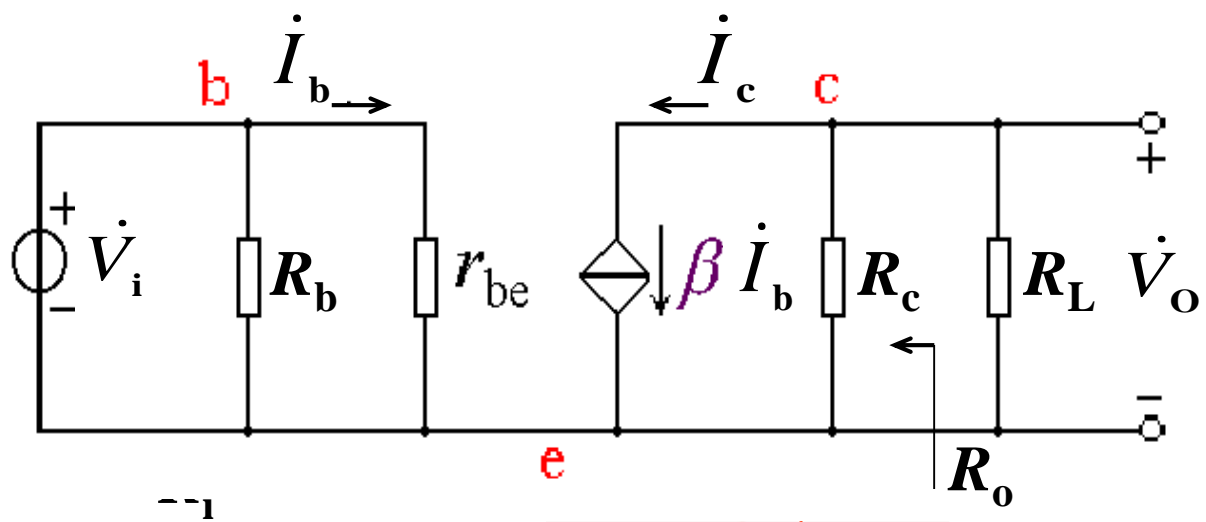
$$\dot{V}_o = -\dot{I}_c \cdot (R_c // R_L)$$

则电压增益为

$$\begin{aligned} \dot{A}_v &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\dot{I}_c \cdot (R_c // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be}} \\ &= \frac{-\beta \cdot \dot{I}_b \cdot (R_c // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be}} = -\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}} \end{aligned}$$

(可作为公式)

## 2. 求输入电阻



$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_b // r_{be}$$

## 3. 求输出电阻

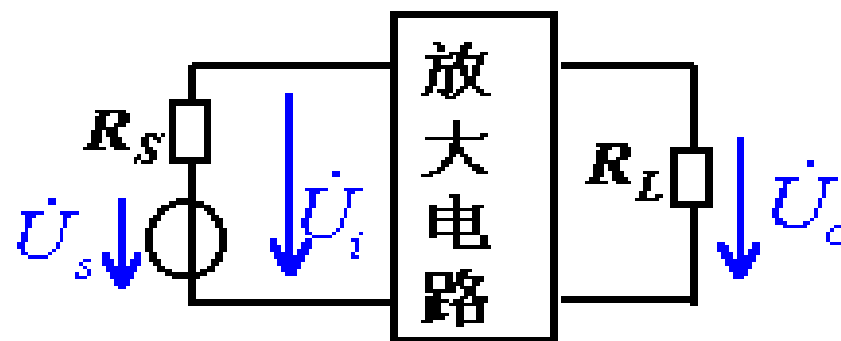
$$R_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \bigg|_{\substack{\dot{U}_s=0 \\ R_L=\infty}}$$

$$\text{令 } \dot{V}_i = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{I}_b = 0 \quad \Rightarrow \quad \beta \cdot \dot{I}_b = 0$$

$$\text{所以 } R_o = R_c$$

#### 4.当信号源有内阻时:

求  $\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$



定义:

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

$$\dot{U}_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{U}_s$$

$R_i$ 为放大电路的  
输入电阻

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s}$$

$$\dot{A}_{us} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{A}_u$$

例 如图，已知BJT的  $\beta = 100$ ， $U_{BE} = -0.7V$ 。

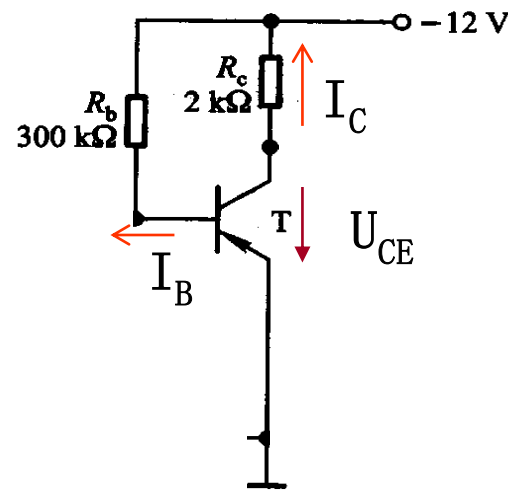
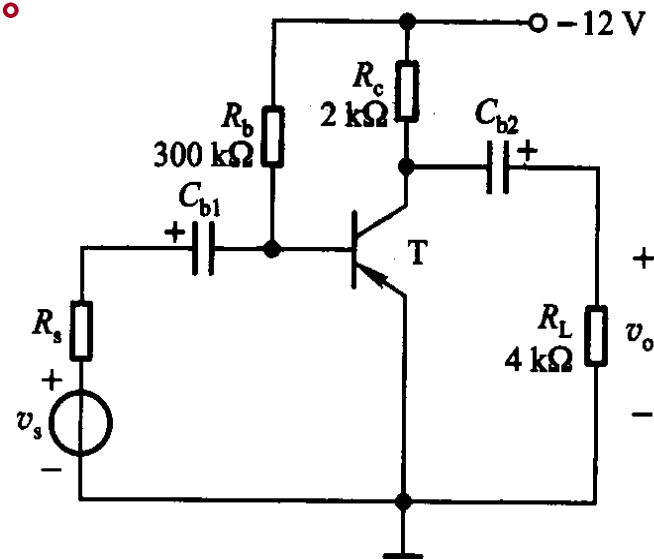
- (1) 试求该电路的静态工作点；
- (2) 画出简化的小信号等效电路；
- (3) 求该电路的电压增益  $A_v$ ，  
输出电阻  $R_o$ 、输入电阻  $R_i$ 。

解 (1) 求Q点，作直流通路

$$I_B = \frac{U_{BE} - V_{CC}}{R_b} = \frac{-0.7 - (-12)}{300K} \approx 40\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 40 = 4mA$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = -12 + 4 \times 2 = -4V$$

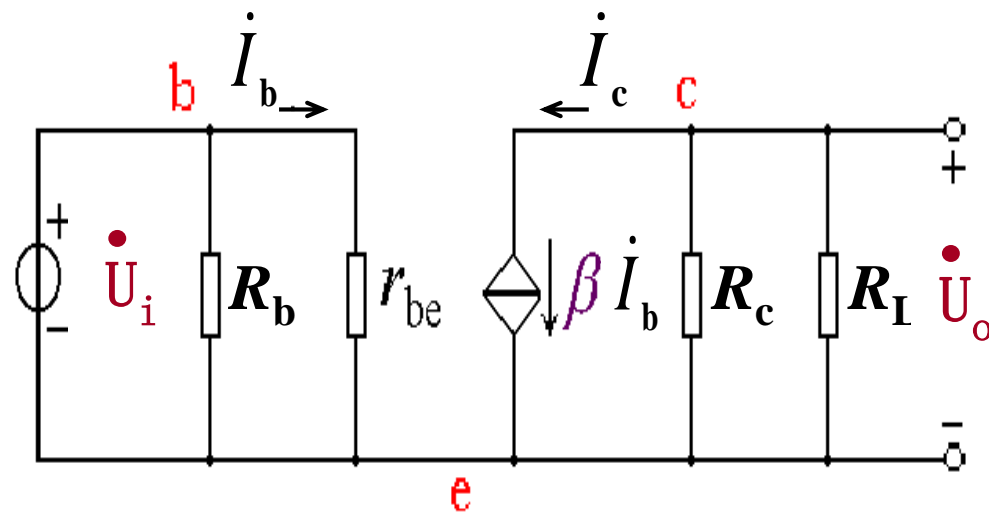
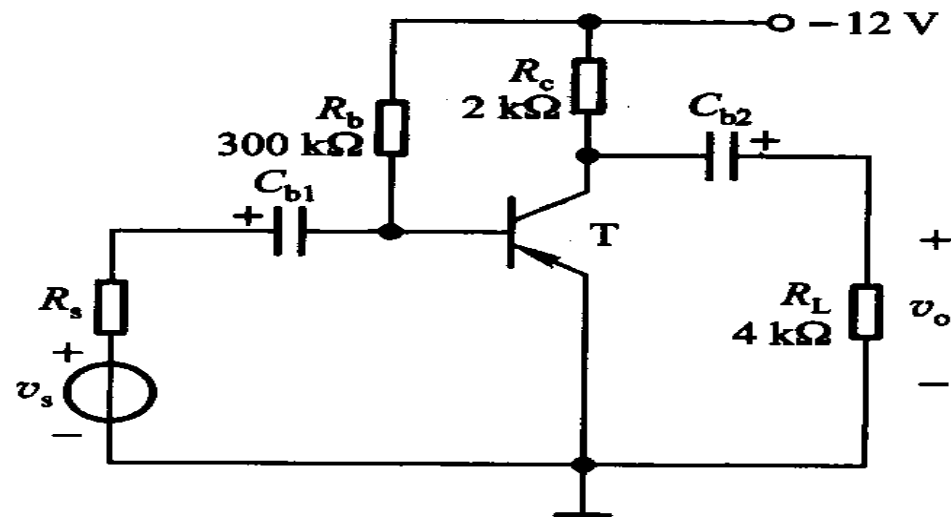


(2) 画出小信号等效电路

(3) 求电压增益、输入电阻和输出电阻

$$\begin{aligned}
 r_{be} &\approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} \\
 &= 200 + (1 + 100) \times 26 / 4 \\
 &= 865\Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{A}_V &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_c \cdot (R_c // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be}} \\
 &= \frac{-\beta \cdot \dot{I}_b \cdot (R_c // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be}} = -\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}} \approx -155.6
 \end{aligned}$$



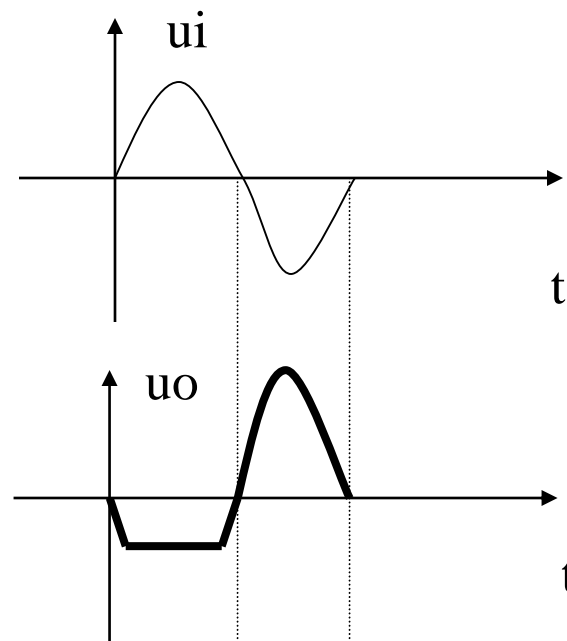
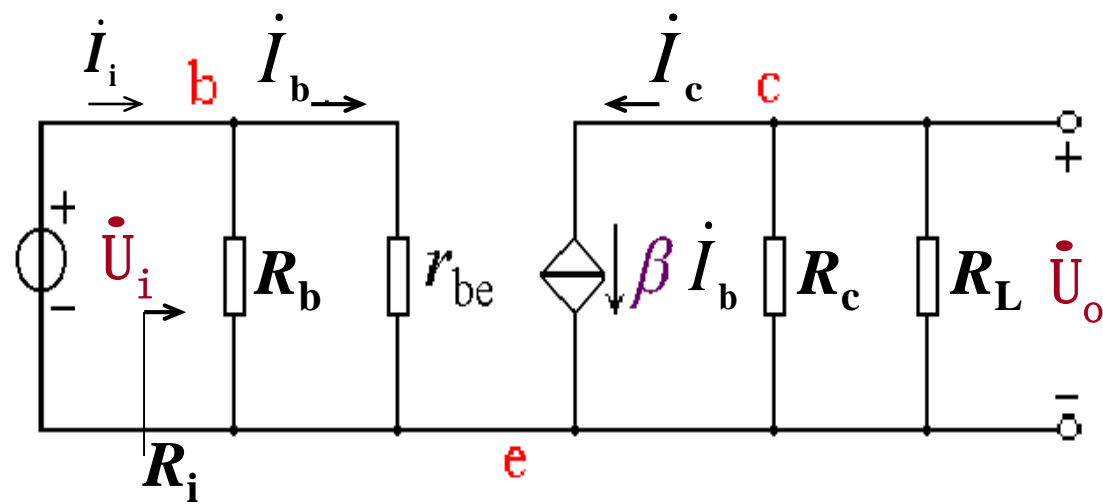
$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_b // r_{be} \\ \approx 865\Omega$$

$$R_o = R_c = 2K$$

## 非线性失真判断

底部失真即截止失真

基极电流太小，应减小基极电阻。



## 等效电路法的步骤(归纳)

1. 首先利用图解法或近似估算法确定放大电路的静态工作点  $Q$  。
2. 求出静态工作点处的微变等效电路参数  $\beta$  和  $r_{be}$  。
3. 画出放大电路的微变等效电路。可先画出三极管的等效电路, 然后画出放大电路其余部分的交流通路。
4. 列出电路方程并求解。

## 2.4 放大电路静态工作点的稳定

### 2.4.1 静态工作点稳定的必要性

三极管是一种对温度十分敏感的元件。温度变化对管子参数的影响主要表现为：

1.  $U_{BE}$  改变。 $U_{BE}$  的温度系数约为  $-2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ，即温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ， $U_{BE}$  约下降  $2 \text{ mV}$ 。

2.  $\beta$  改变。温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ， $\beta$  值约增加  $0.5\% \sim 1\%$ ， $\beta$  温度系数分散性较大。

3.  $I_{CBO}$  改变。温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ， $I_{CBQ}$  大致将增加一倍，说明  $I_{CBQ}$  将随温度按指数规律上升。



温度升高将导致  $I_C$  增大， $Q$  上移。波形容易失真。

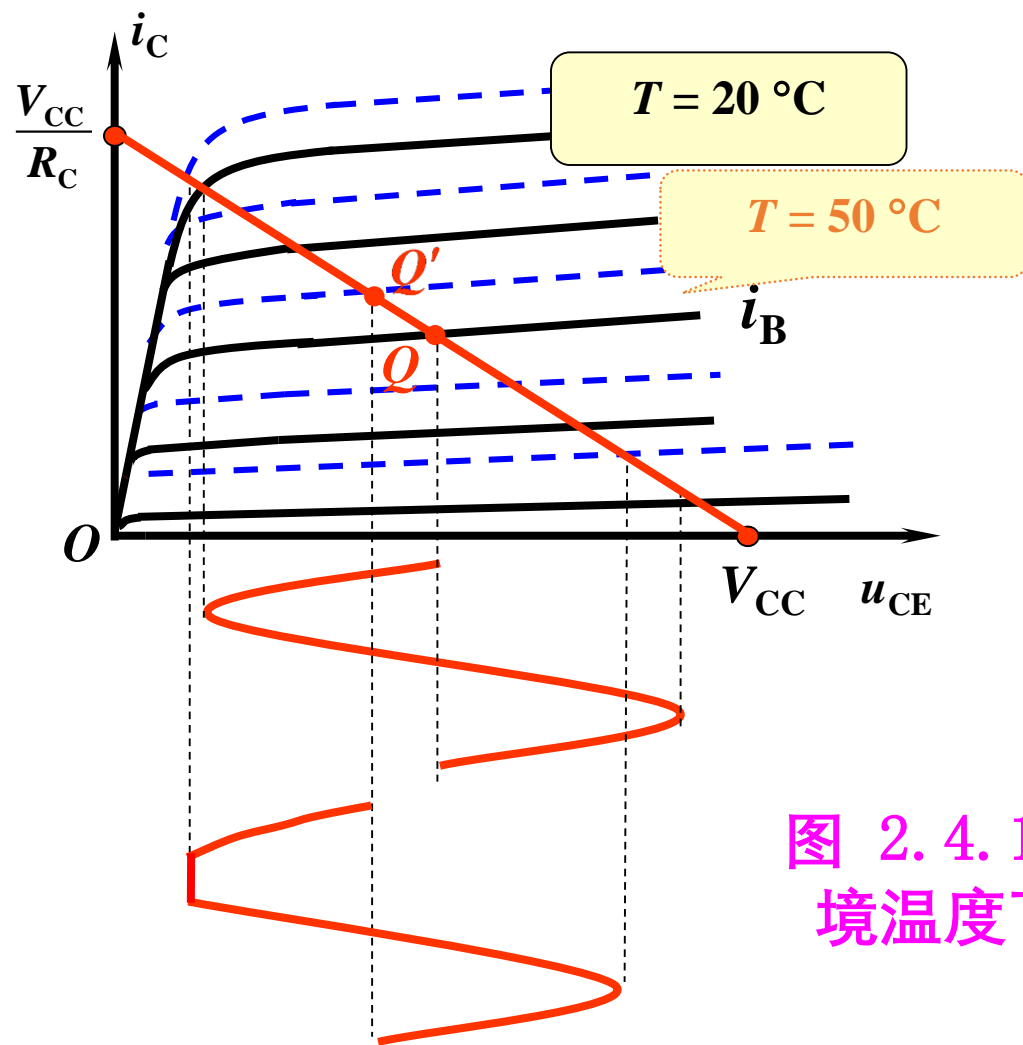


图 2.4.1 晶体管在不同环境温度下的输出特性曲线

## 2.4.2典型的静态工作点稳定电路

稳定Q点常引入直流负反馈或温度补偿的方法使 $I_{BQ}$ 在温度变化时与 $I_{CQ}$ 产生相反的变化。

### 一、电路组成和Q点稳定原理

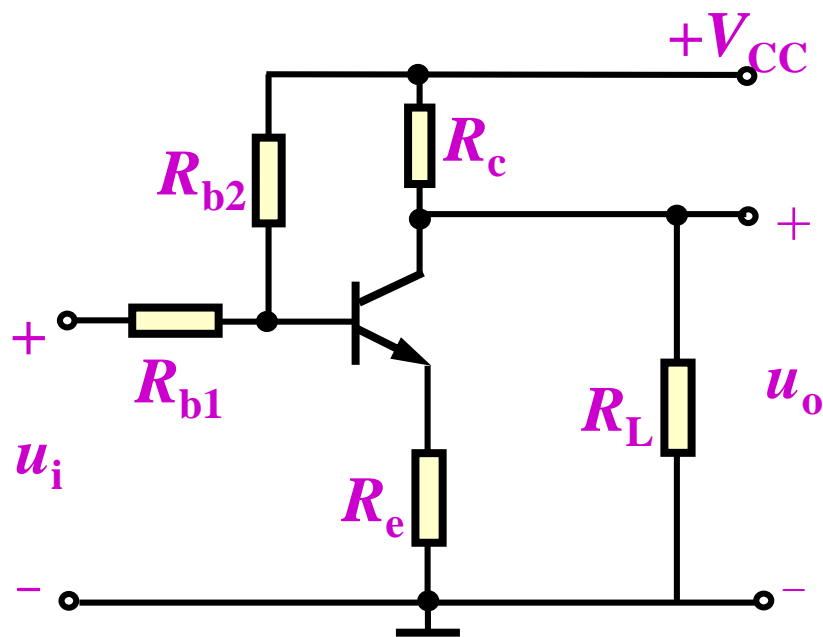


图 2.4.2直接耦合的静态工作点稳定电路a

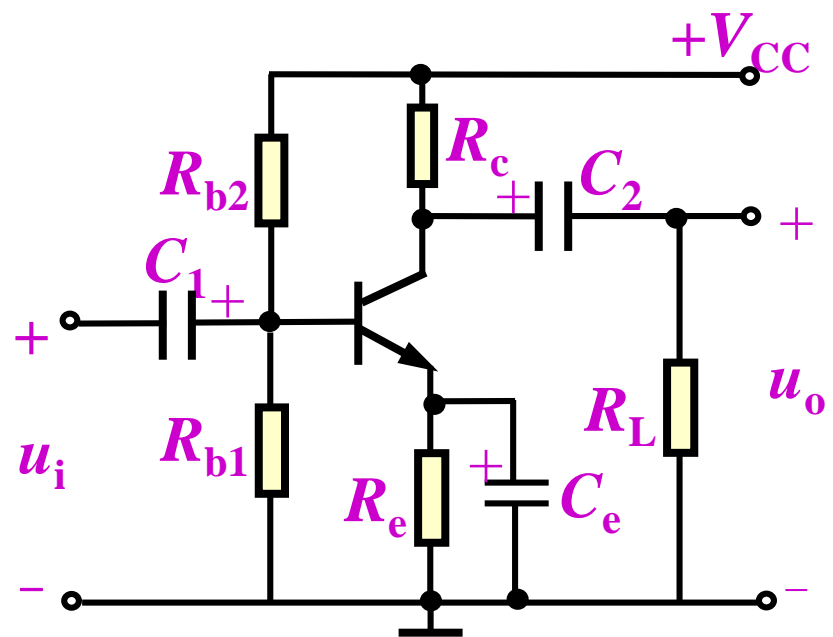


图 2.4.2阻容耦合的静态工作点稳定电路b

## 阻容耦合的静态工作点稳定电路

由于  $I_R \gg I_{BQ}$ ，可得(估算)

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$$

所以  $U_{BQ}$  不随温度变化，

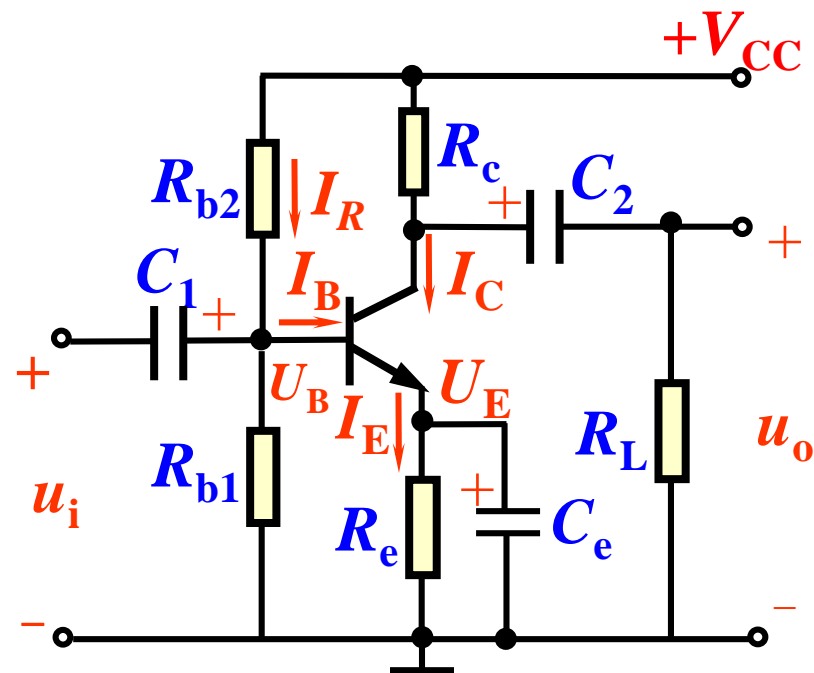


图 2.4.2 阻容耦合的静态工作点稳定电路

$$\begin{aligned} T \uparrow &\rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{BEQ} (= U_{BQ} - U_{EQ}) \\ &\downarrow \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow \end{aligned}$$

——电流负反馈式工作点稳定电路

## 二、静态工作点的估算

由于  $I_R \gg I_{BQ}$ ，可得(估算)

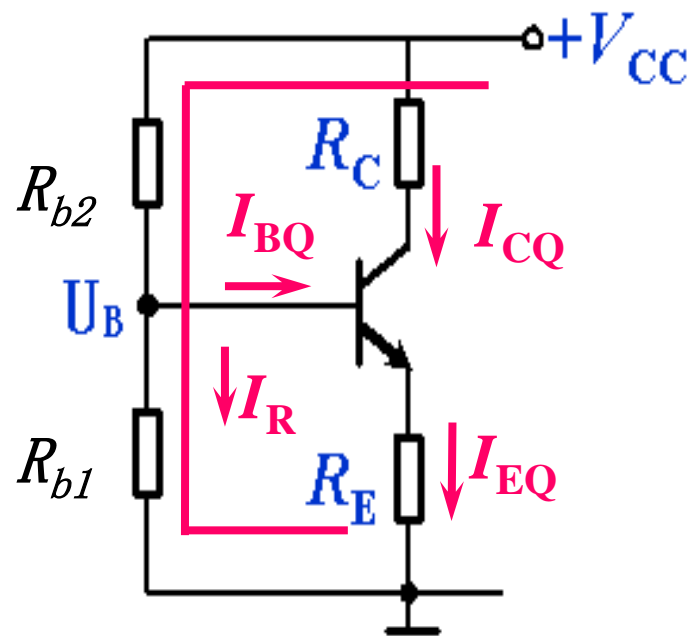
$$\text{则 } I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{EQ}}{R_e} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

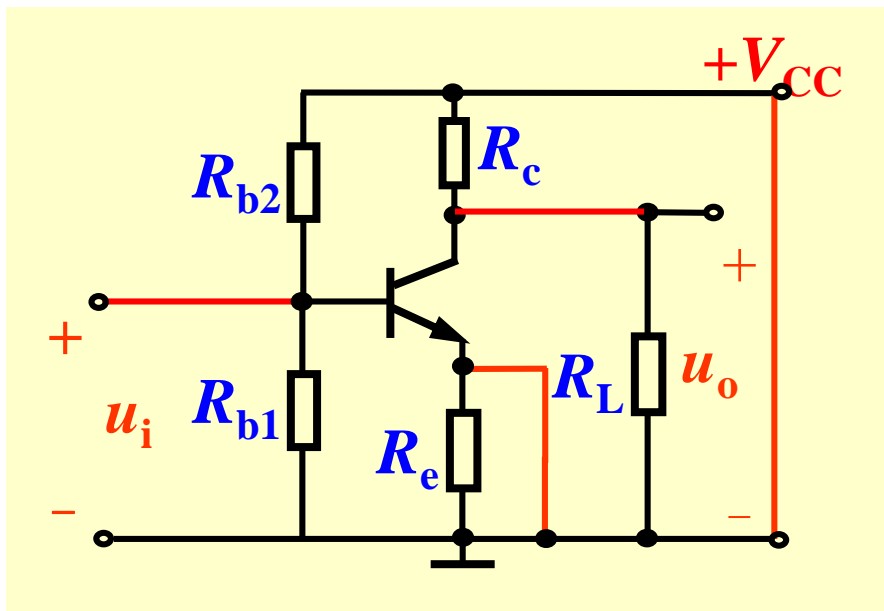
$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= V_{CC} - I_{CQ}R_c - I_{EQ}R_e \\ &\approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e) \end{aligned}$$

静态基极电流

$$I_{BQ} \approx \frac{I_{CQ}}{\beta}$$

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$$



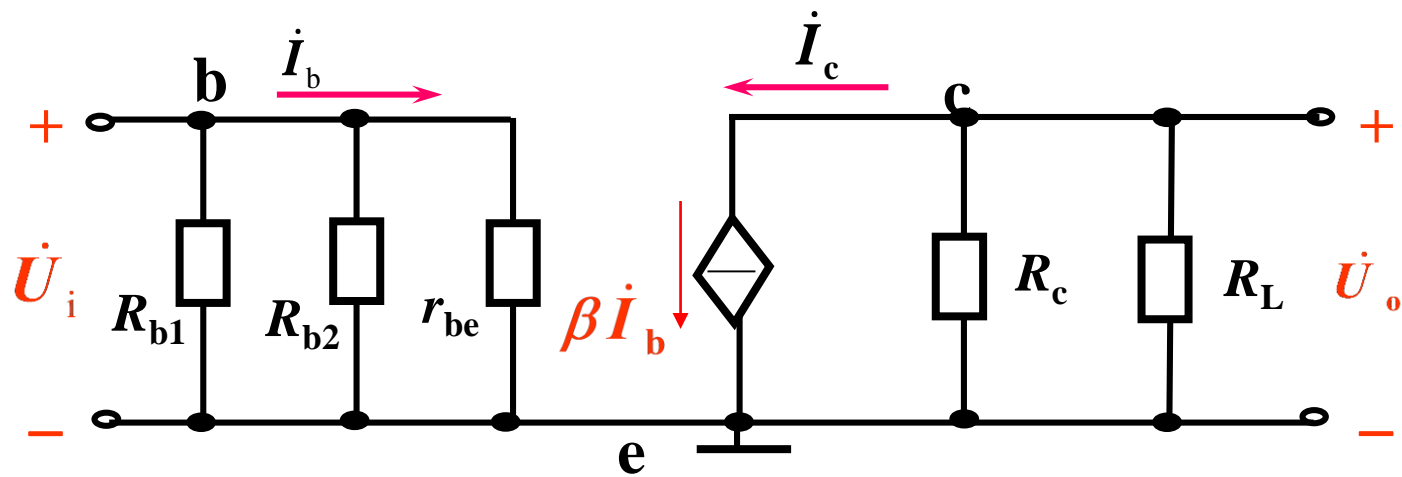


$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

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

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

$$R_o = R_c$$



如无旁路电容，动态参数如何计算？

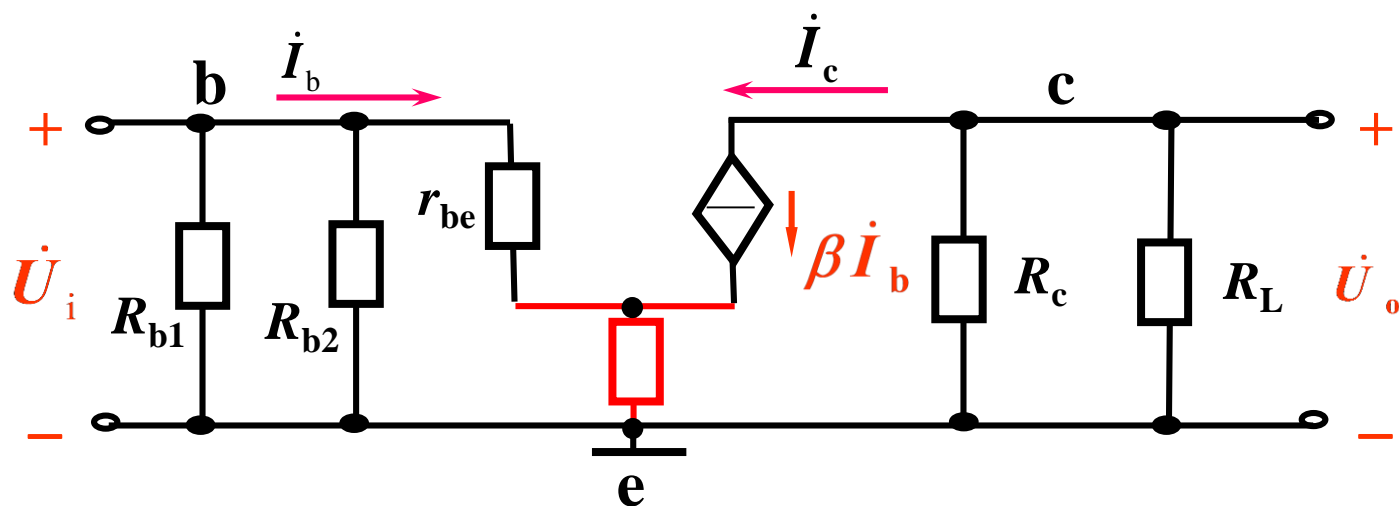
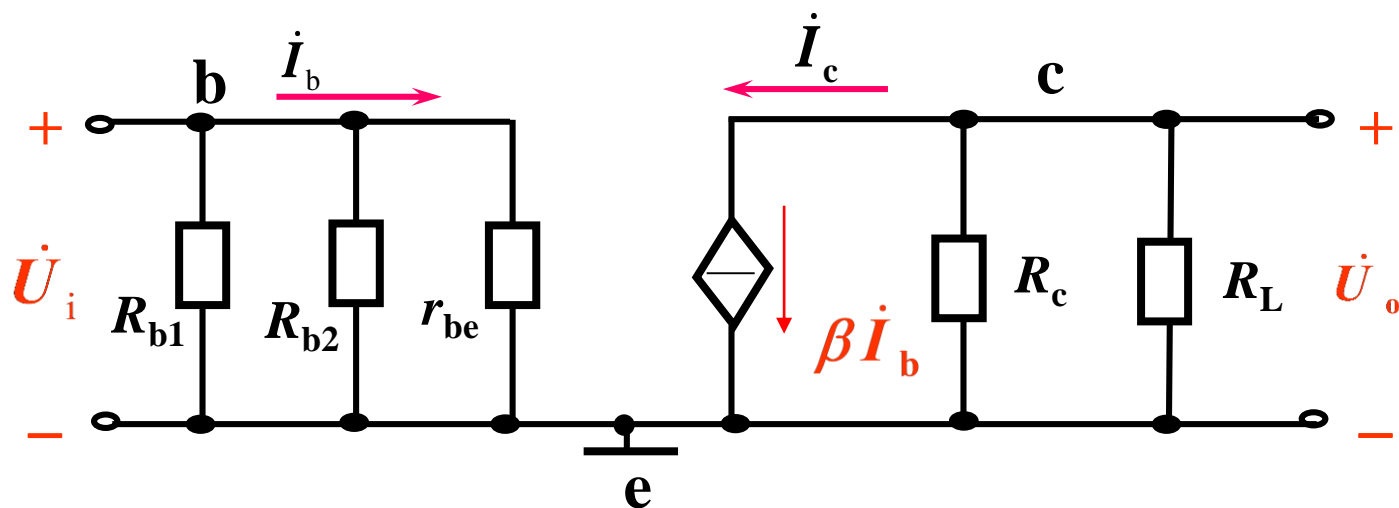


图2.4.4(a)无旁路电容时的交流电路

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

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

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

$$R_o = R_c$$

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_E}$$

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

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

$$R_o = R_c$$

### 2.4.3 稳定静态工作点的措施

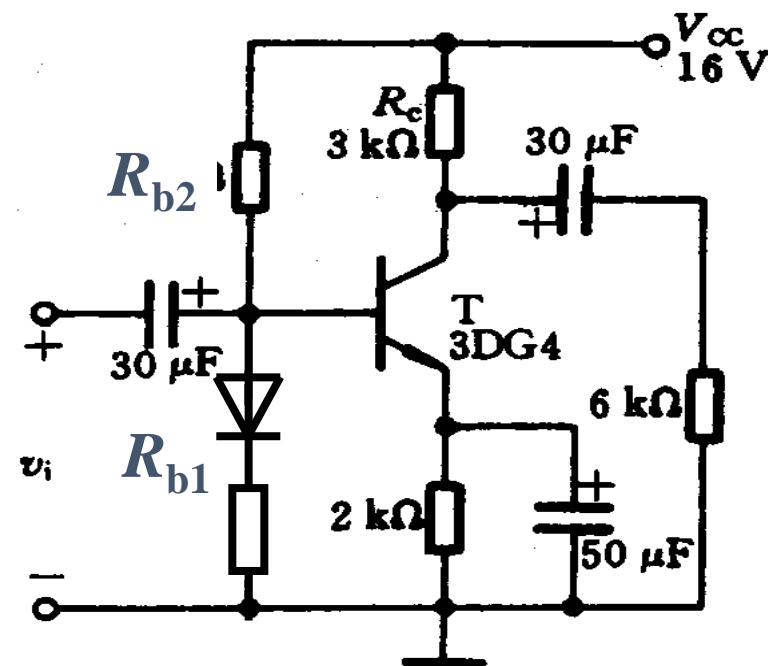
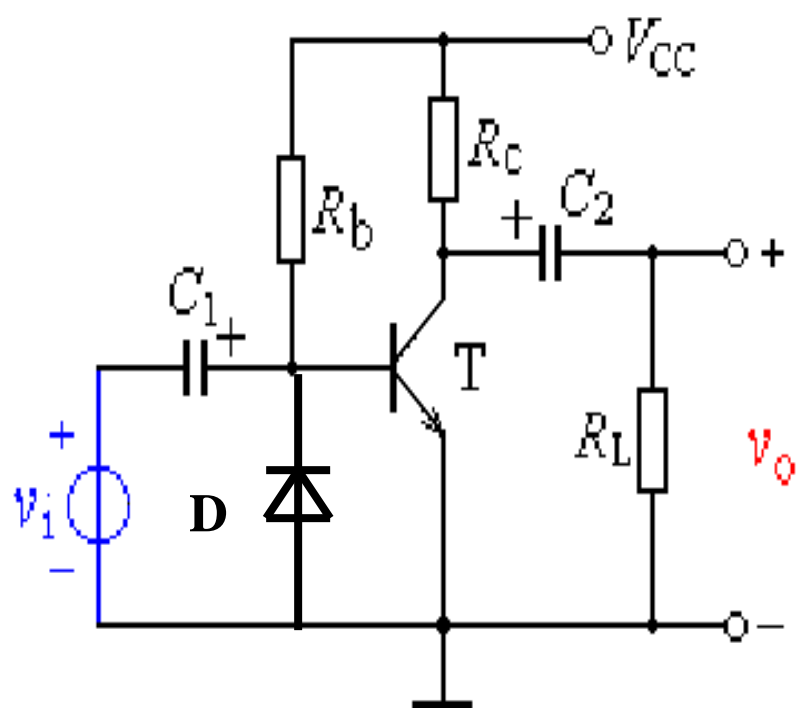


图2.4.5静态工作点稳定电路

a利用二极管的反向特性进行温度补偿

b利用二极管的正向特性进行温度补偿

## 复习：

1.如何用图解法求静态工作点？

用解析式求基极电流，  
作直线  $U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$   
与BJT输出特性曲线的交点。

2.NPN管共射放大电路Q点设置太低，输出电压将会如何？  
如何调节？

3.直流通路、交流通路如何绘制？

4.BJT的h参数等效模型如何？基射极等效电阻如何计算？

5.共射放大电路静态、动态分析包括哪些参数？

6.为什么要稳定静态工作点？如何稳定？