



# 电子技术基础模拟部分

---

- 1 绪论
- 2 运算放大器
- 3 二极管及其基本电路
- 4 场效应三极管及其放大电路
- 5 双极结型三极管及其放大电路
- 6 频率响应
- 7 模拟集成电路
- 8 反馈放大电路
- 9 功率放大电路
- 10 信号处理与信号产生电路
- 11 直流稳压电源



## 5 双极结型三极管及其放大电路

---

### 5.1 BJT

### 5.2 基本共射极放大电路

### 5.3 BJT放大电路的分析方法

### 5.4 BJT放大电路静态工作点的稳定问题

### 5.5 共集电极放大电路和共基极放大电路

### 5.6 FET和BJT及其基本放大电路性能的比较

### 5.7 多级放大电路

### 5.8 光电三极管



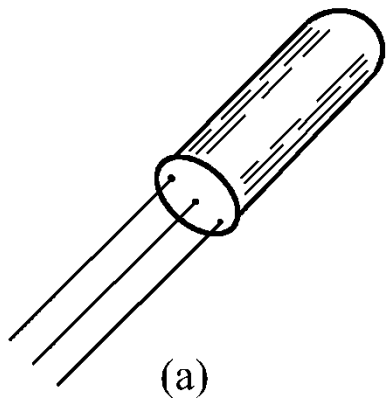
## 5.1 BJT

---

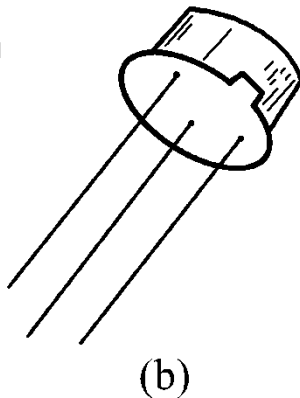
- 5.1.1 BJT的结构简介
- 5.1.2 放大状态下BJT的工作原理
- 5.1.3 BJT的  $V-I$  特性曲线
- 5.1.4 BJT的主要参数
- 5.1.5 温度对BJT参数及特性的影响



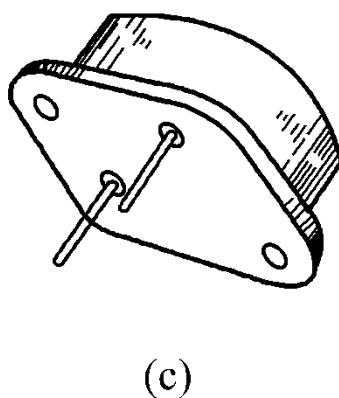
## 5.1.1 BJT的结构简介



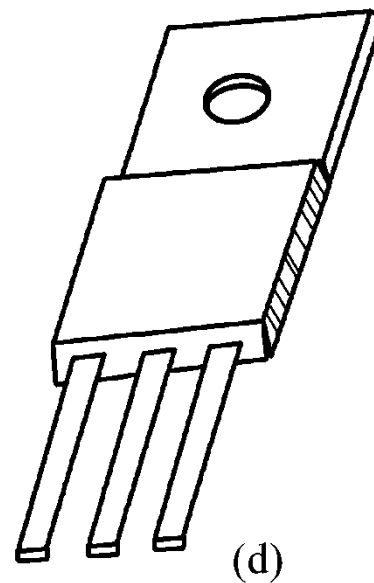
**(a) 小功率管**



**(b) 小功率管**



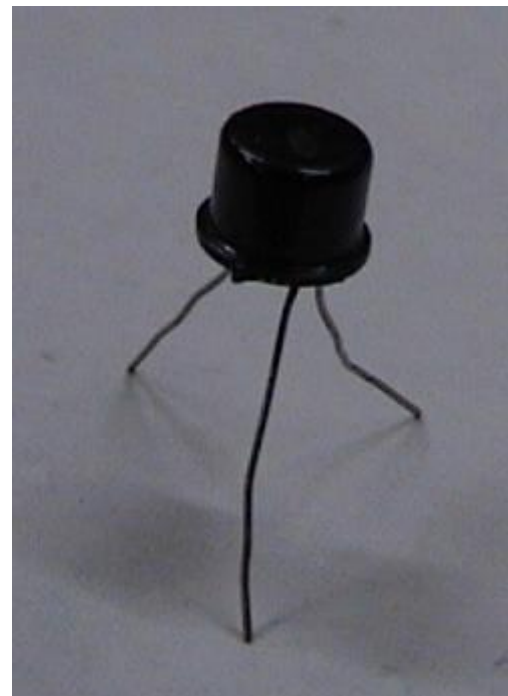
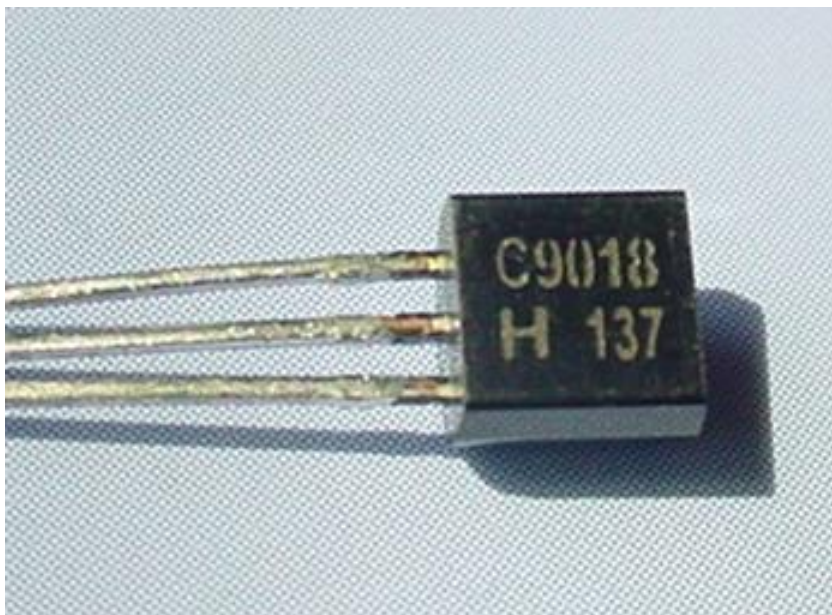
**(c) 大功率管**



**(d) 中功率管**



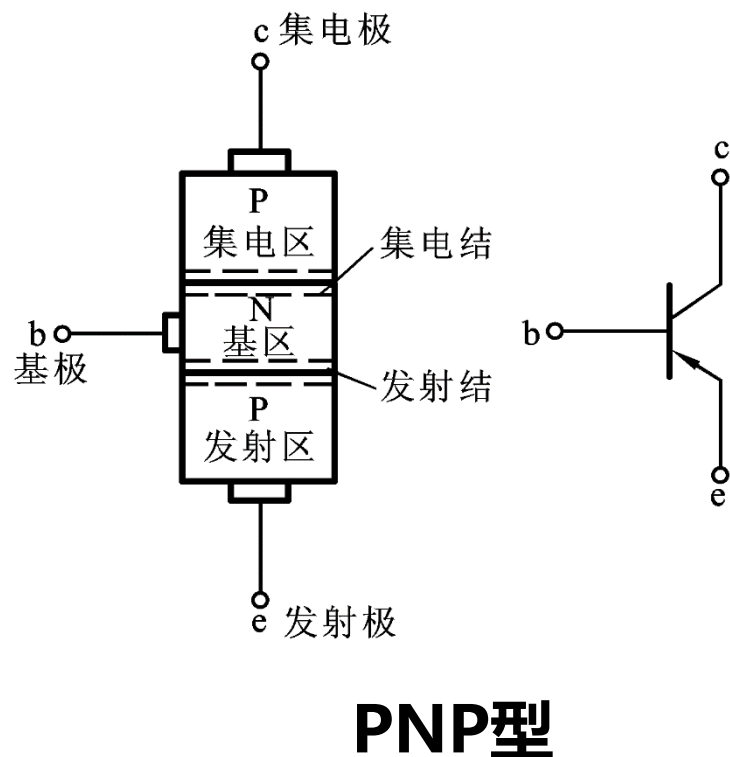
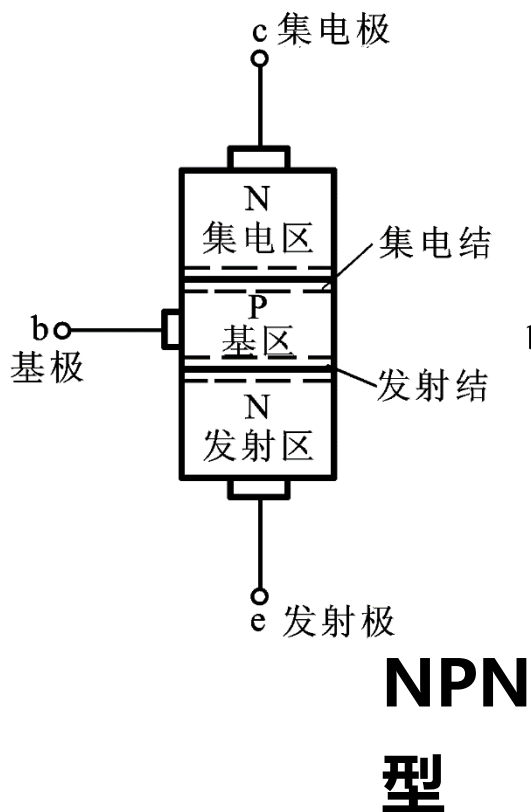
## 5.1.1 BJT的结构简介





## 5.1.1 BJT的结构简介

半导体三极管的结构示意图如图所示。它有两种类型：**NPN**型和**PNP**型。



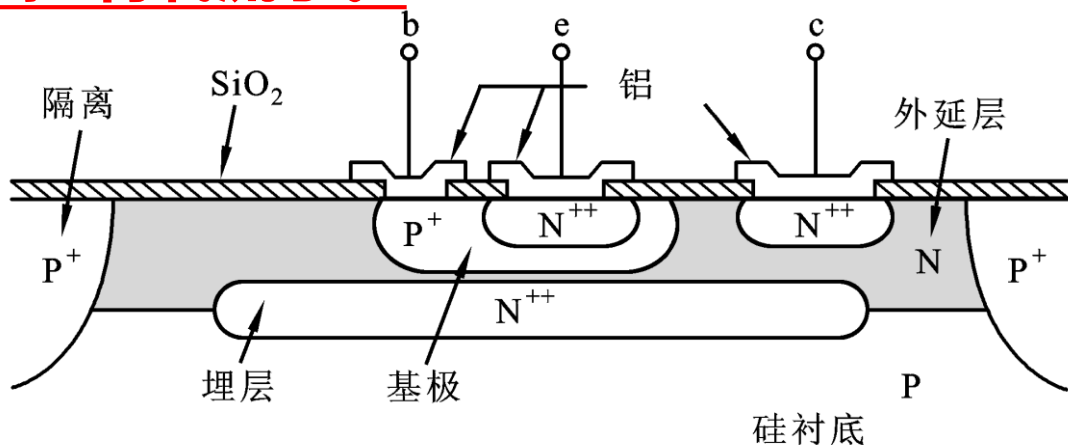


## 5.1.1 BJT的结构简介

了解

### 结构特点：

- 发射区的掺杂浓度最高，发射载流子；
- 集电区掺杂浓度低于发射区，且面积大，收集载流子；
- 基区很薄，一般在几个微米至几十个微米，且掺杂浓度最低。传送和控制载流子。



集成电路中典型NPN型BJT的截面图

**说明：**三极管的放大作用是在一定的外部条件控制下，通过载流子传输体现出来的。



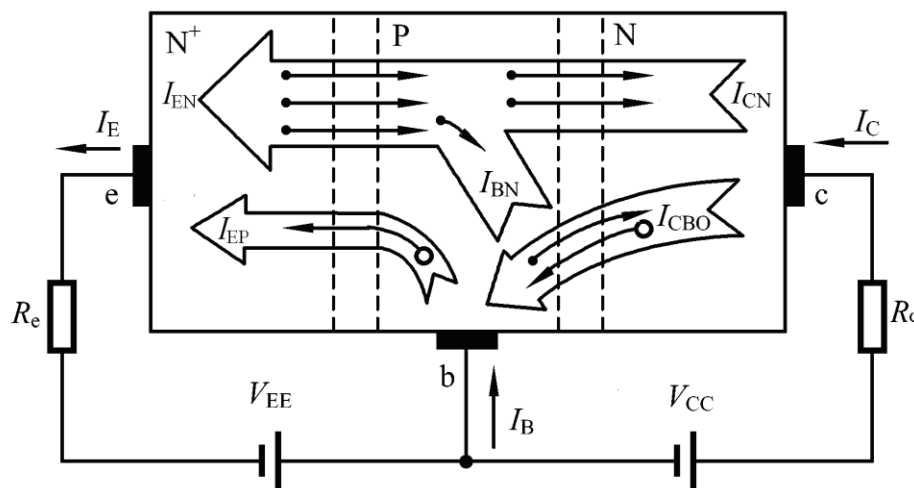
## 5.1.2 放大状态下BJT的工作原理

了解

放大状态的外部条件：**发射结正偏，集电结反偏**

### 1. 内部载流子的传输过程

**1)发射结正偏时，从高浓度掺杂的发射区将有大量的电子向基区漂移形成 $I_{EN}$ ；同时低浓度掺杂的基区向发射区也有少量的空穴扩散，形成 $I_{EP}$ 。**



载流子的传输过程定性图解

由于三极管内有两种载流子(自由电子和空穴)参与导电，故称为双极型三极管或**BJT** (Bipolar Junction Transistor)。





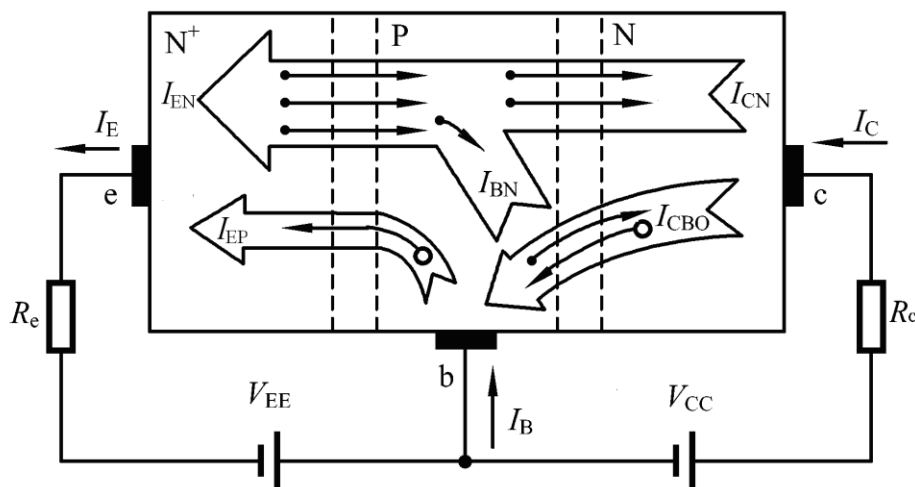
## 5.1.2 放大状态下BJT的工作原理

了解

放大状态的外部条件：**发射结正偏，集电结反偏**

1. 内部载流子的传输过程

**2)进入基区的电子流由于基区为低掺杂，其空穴浓度低，所以被复合的概率小，而且由于基区很薄，在集电极反向偏压的作用下，这些电子在基区停留时间很短，很快就运动到集电极形成 $I_{CN}$ ，有少量会被集电极吸收形成 $I_{BN}$ 。集电极也有少量空穴漂移到基极形成 $I_{CBO}$ 。**



载流子的传输过程定性图解



## 2. 电流分配关系

了解

根据传输过程可知

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO}$$

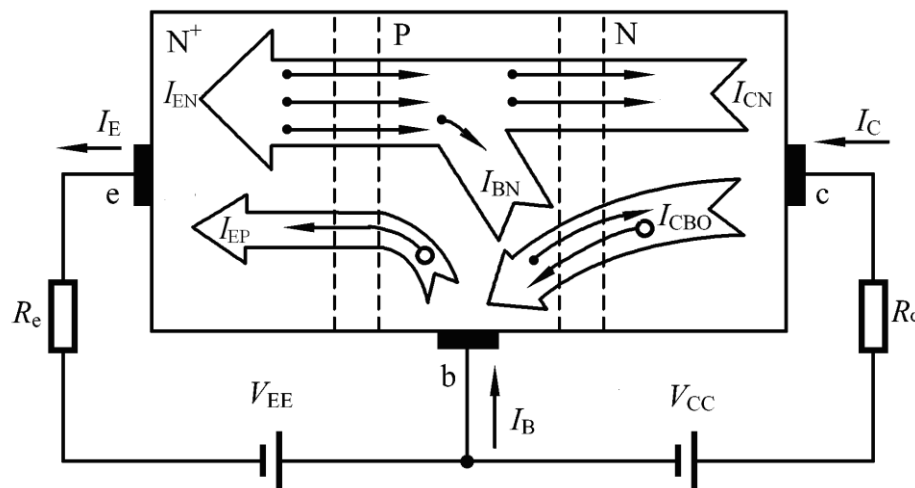
设  $\alpha = \frac{\text{传输到集电极的电流}}{\text{发射极注入电流}}$

$$\text{即 } \alpha = \frac{I_{CN}}{I_E}$$

通常  $I_C \gg I_{CBO}$

$$\text{则有 } \alpha \approx \frac{I_C}{I_E}$$

$\alpha$  为电流放大系数。它只与管子的结构尺寸和掺杂浓度有关，与外加电压无关。一般  $\alpha = 0.9 \sim 0.99$ 。



载流子的传输过程



## 2. 电流分配关系

(定性结论)

$$\left. \begin{array}{l} I_E = I_B + I_C \\ \alpha = \frac{I_C}{I_E} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \equiv \beta$$

$\beta$  是另一个电流放大系数。同样，它也只与管子的结构尺寸和掺杂浓度有关，与外加电压无关。一般  $\beta \gg 1$ 。



## 5.1.2 放大状态下BJT的工作原理

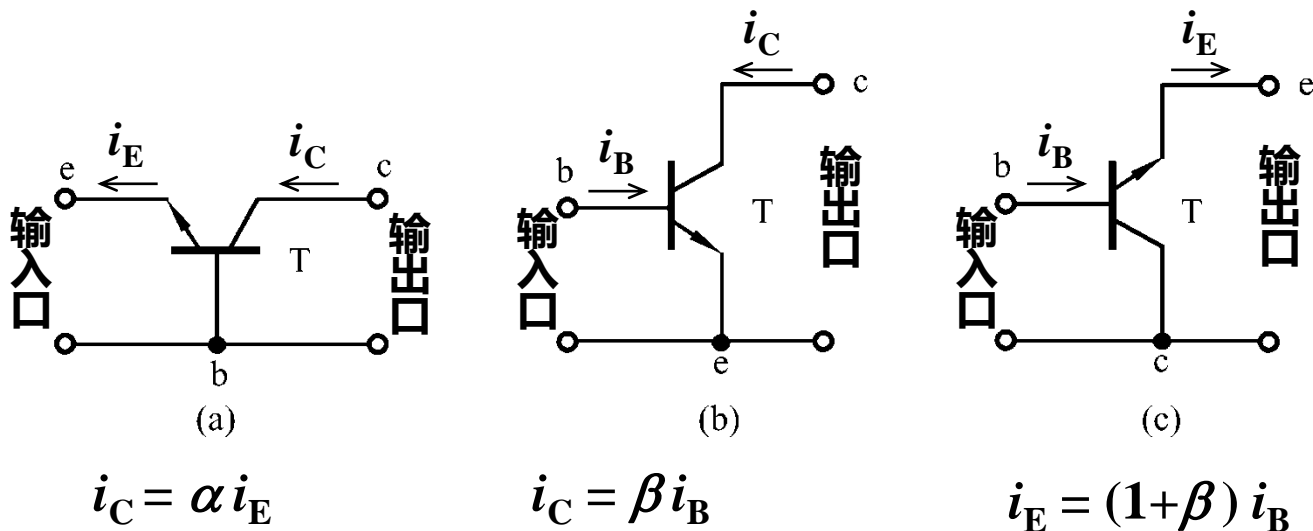
**综上所述，三极管的放大作用，主要是依靠它的发射极电流能够通过基区传输，然后到达集电极而实现的。**

**实现这一传输过程的两个条件是：**

- (1) 内部条件：**发射区杂质浓度远大于基区杂质浓度，且基区很薄。
- (2) 外部条件：**发射结正向偏置，集电结反向偏置。



# 三极管的三种组态



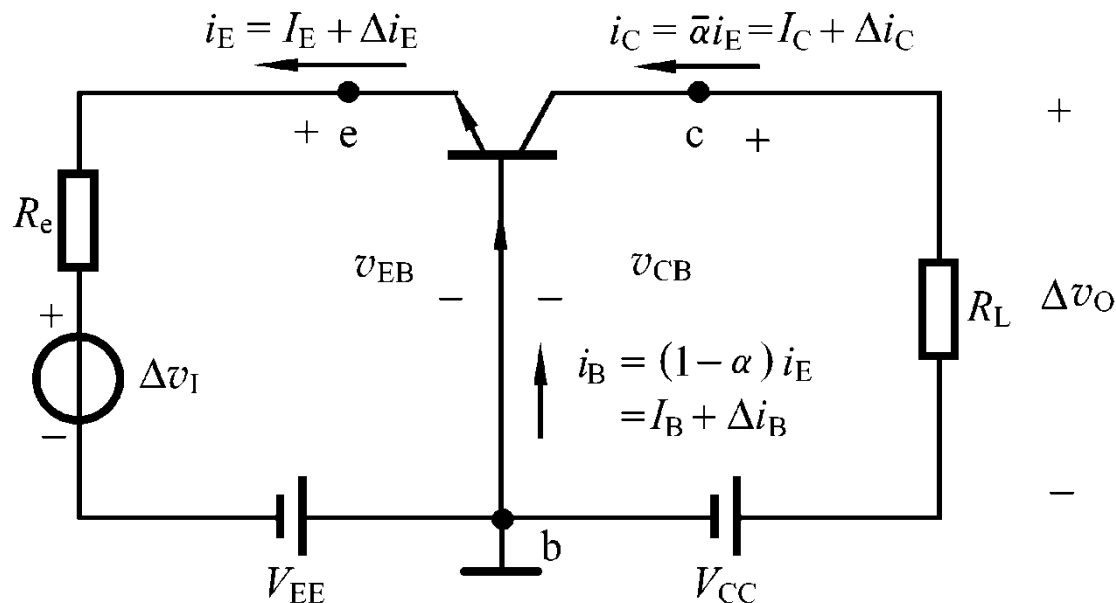
**共发射极接法**，发射极作为公共电极，简称**CE**；

**共基极接法**，基极作为公共电极，简称**CB**；

**共集电极接法**，集电极作为公共电极，简称**CC**。



# 放大作用



共基极放大电路

若  $\Delta v_I = 20\text{mV}$  使  $\Delta i_E = -1\text{mA}$ , 当  $\alpha = 0.98$  时,

则  $\Delta i_C = \alpha \Delta i_E = -0.98\text{mA}$ ,  $\Delta v_O = -\Delta i_C \cdot R_L = 0.98\text{V}$ ,

电压放大倍数  $A_v = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_I} = \frac{0.98\text{V}}{20\text{mV}} = 49$



## 5.1.3 BJT的 I-V 特性曲线

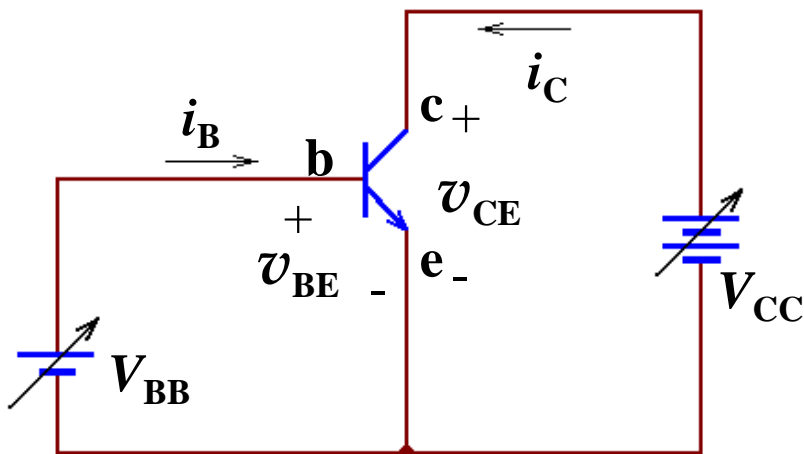
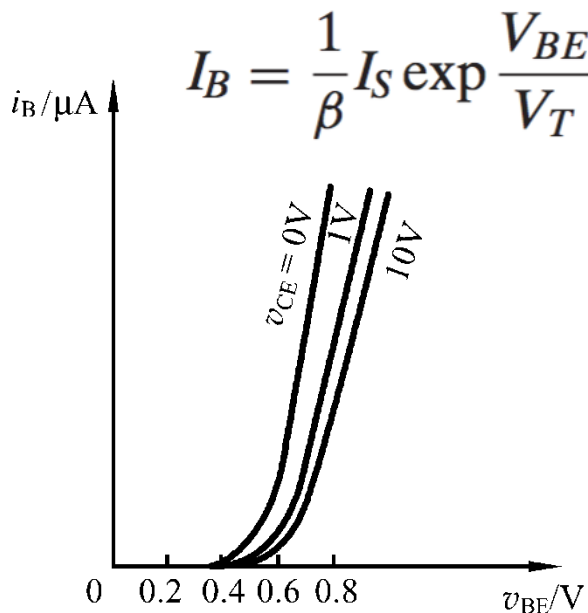
### 1. 输入特性曲线

(以共射极放大电路为例)

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

(1) 当  $v_{CE} = 0V$  时, 相当于发射结的正向伏安特性曲线。

(2) 当  $v_{CE} \geq 1V$  时,  $v_{CB} = v_{CE} - v_{BE} > 0$ , 集电结已进入反偏状态, 收集载流子能力增强, 基区复合减少, 同样的  $v_{BE}$  下  $I_B$  减小, 特性曲线右移。



共射极放大电路



## 5.1.3 BJT的 I-V 特性曲线

了解

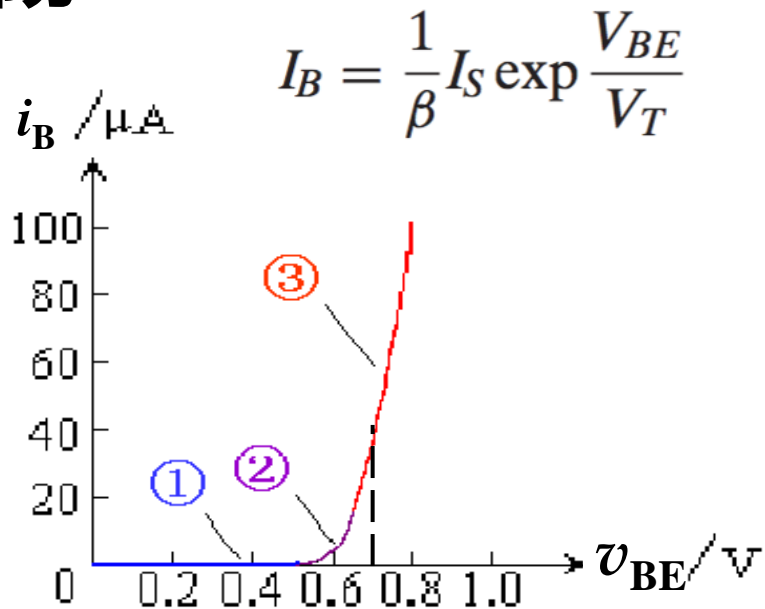
### 1. 输入特性曲线

#### (3) 输入特性曲线的三个部分

①死区

②非线性区

③近似线性区







## 5.1.3 BJT的 I-V 特性曲线

了解

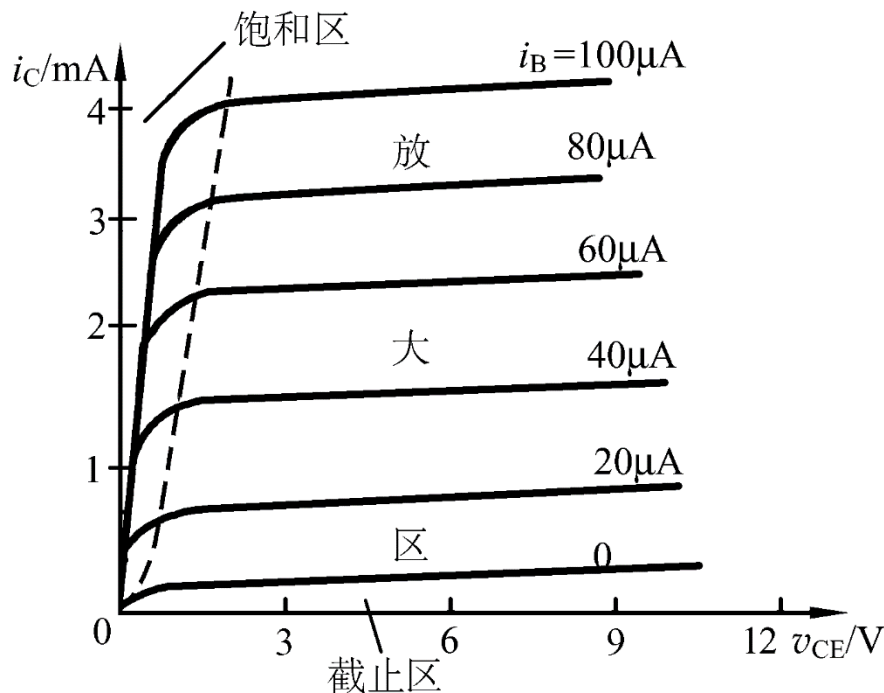
### 2. 输出特性曲线

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

输出特性曲线的三个区域:

**饱和区:**  $i_C$  明显受  $v_{CE}$  控制的区域, 该区域内, 一般  $v_{CE} < 0.7\text{V}$  (硅管)。此时, 发射结正偏, 集电结正偏或反偏电压很小。

**截止区:**  $i_C$  接近零的区域, 相当  $i_B=0$  的曲线的下方。此时,  $v_{BE}$  小于死区电压。



**放大区:**  $i_C$  平行于  $v_{CE}$  轴的区域, 曲线基本平行等距。此时, 发射结正偏, 集电结反偏。



## 5.1.4 BJT的主要参数

了解

### 1. 电流放大系数

#### (1) 共发射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B} \Big|_{v_{CE}=\text{const}}$$

#### (2) 共发射极交流电流放大系数 $\beta$

$$\beta = \Delta I_C / \Delta I_B \Big|_{v_{CE}=\text{const}}$$



## 5.1.4 BJT的主要参数

了解

### 1. 电流放大系数

(3) 共基极直流电流放大系数  $\bar{\alpha}$

$$\bar{\alpha} = (I_C - I_{CBO}) / I_E \approx I_C / I_E$$

(4) 共基极交流电流放大系数  $\alpha$

$$\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E \big|_{V_{CB} = \text{const}}$$

当  $I_{CBO}$  和  $I_{CEO}$  很小时,  $\bar{\alpha} \approx \alpha$ 、 $\bar{\beta} \approx \beta$ , 可以不加区分。



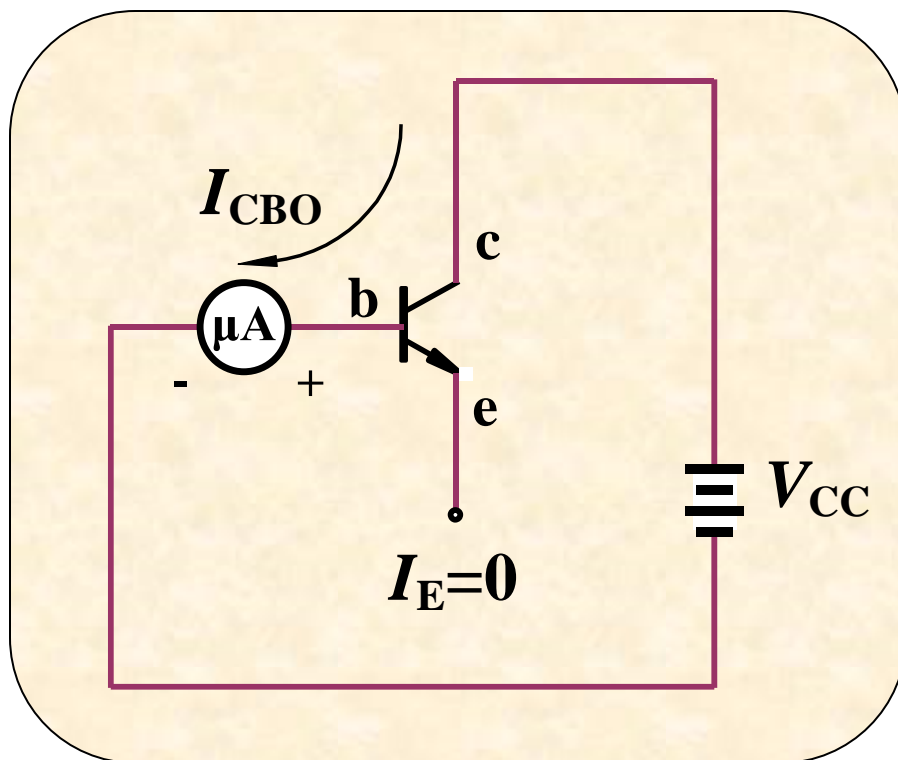
## 5.1.4 BJT的主要参数

了解

### 2. 极间反向电流

(1) 集电极基极间反向饱和电流  $I_{CBO}$

发射极开路时，集电结的反向饱和电流。



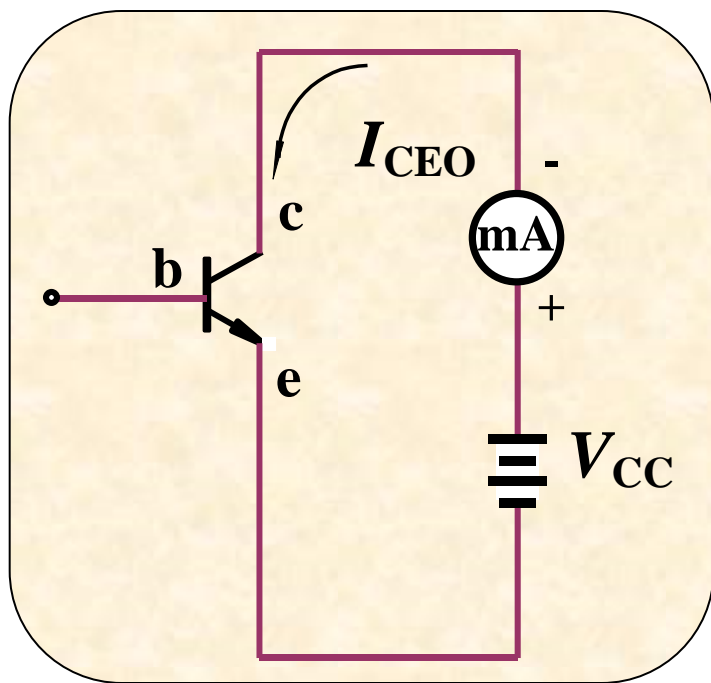


### 2. 极间反向电流

#### (2) 集电极发射极间的反向饱和电流 $I_{CEO}$

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

即输出特性曲线  $I_B=0$  那条曲线所对应的  $Y$  坐标的数值。  $I_{CEO}$  也称为集电极发射极间穿透电流。





### 3. 极限参数

(1) 集电极最大允许电流  $I_{CM}$

(2) 集电极最大允许功率损耗  $P_{CM}$

$$P_{CM} = I_C V_{CE}$$

(3) 反向击穿电压

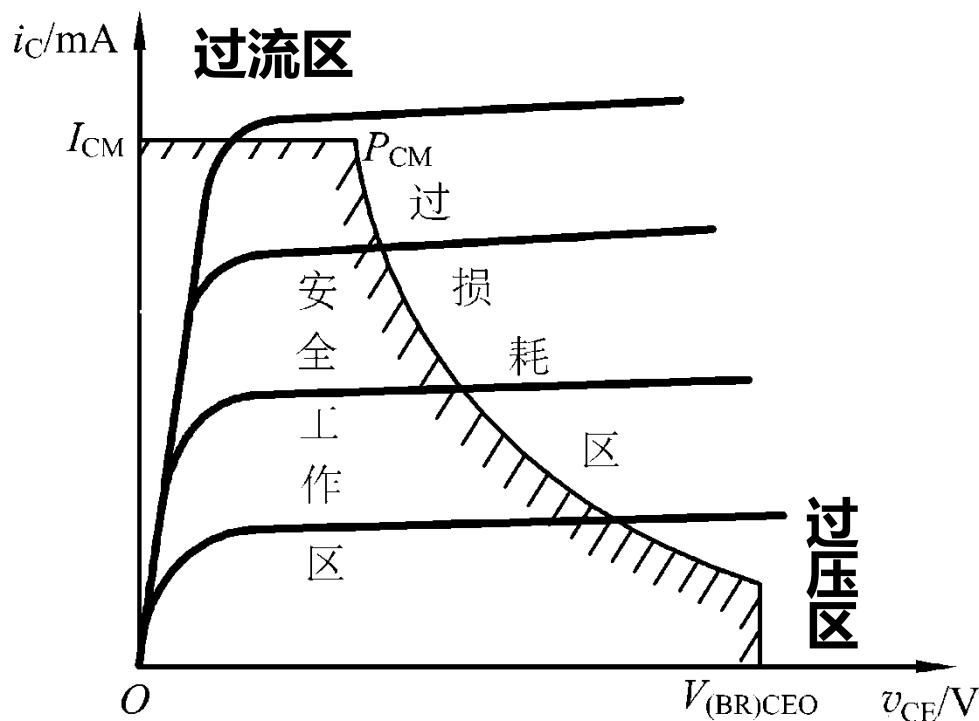
- $V_{(BR)CBO}$ ——发射极开路时的集电结反向击穿电压。
- $V_{(BR)EBO}$ ——集电极开路时发射结的反向击穿电压。
- $V_{(BR)CEO}$ ——基极开路时集电极和发射极间的击穿电压。



## 5.1.4 BJT的主要参数

了解

由 $P_{CM}$ 、 $I_{CM}$ 和 $V_{(BR)CEO}$ 在输出特性曲线上可以确定过损耗区、过电流区和击穿区。



输出特性曲线上的过损耗区和击穿区



## 5.1.5 温度对BJT参数及特性的影响

了解

### 1. 温度对BJT参数的影响

#### (1) 温度对 $I_{CBO}$ 的影响

温度每升高 $10^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{CBO}$ 约增加一倍。

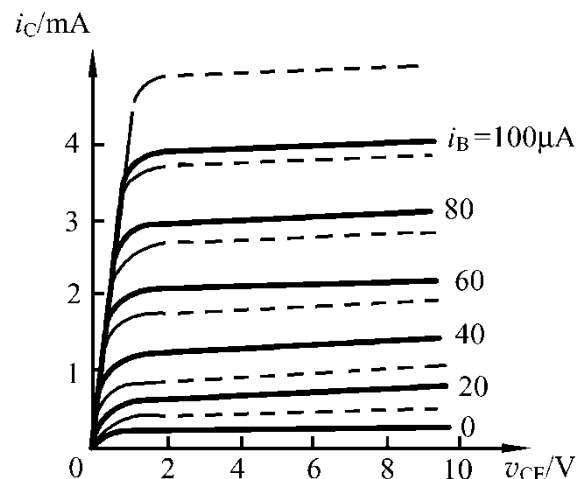
#### (2) 温度对 $\beta$ 的影响

温度每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,  $\beta$ 值约增大 $0.5\%\sim 1\%$ 。

#### (3) 温度对反向击穿电压 $V_{(BR)CBO}$ 、 $V_{(BR)CEO}$ 的影响

温度升高时,  $V_{(BR)CBO}$ 和 $V_{(BR)CEO}$ 都会有所提高。

### 2. 温度对BJT特性曲线的影响





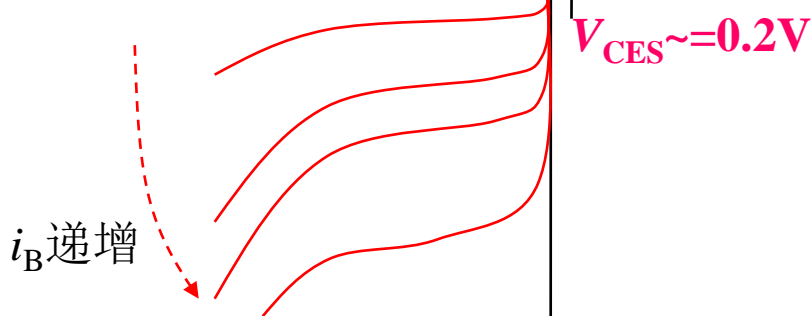


# 总结：BJT的I-V特性之一——工作区

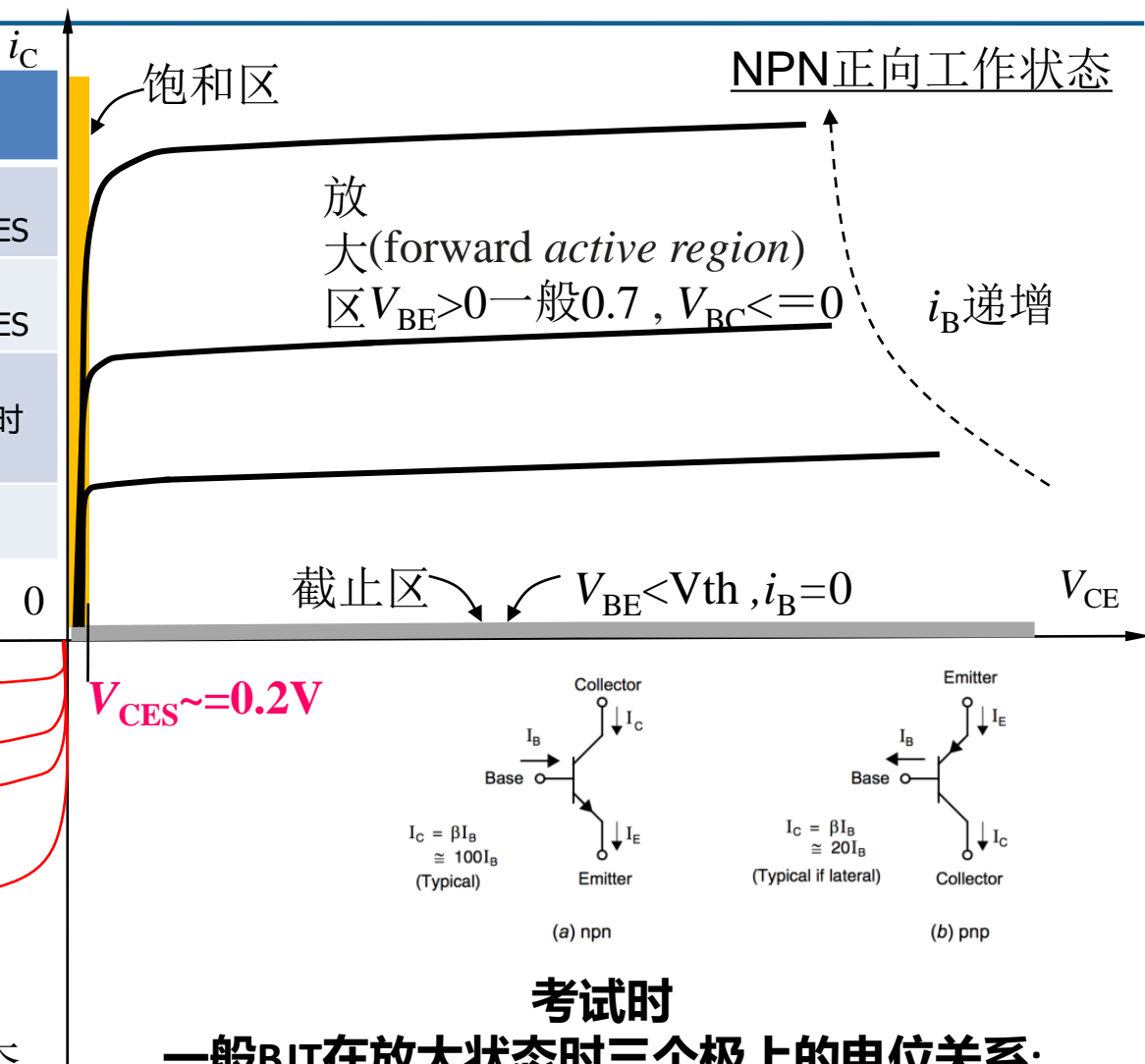
工作状态	发射结 BE	集电结 BC
放大	正偏: $V_{BE} \geq V_{th}$	反偏: $V_{CB} \geq 0$ 工程中: $V_{CE} \geq V_{CES}$
饱和	正偏: $V_{BE} \geq V_{th}$	正偏: $V_{CB} \leq 0$ 工程中: $V_{CE} < V_{CES}$
截止	没正偏: $0 \leq V_{BE} < V_{th}$	反偏: $V_{CB} \geq 0$ (注: $V_{BC} \geq 0.7$ 时会从B向C导电)
倒置	反偏: $V_{BE} < 0$	$V_{BC} \geq 0.7$

$V_{th}$ : PN结的开启阈值电压

$V_{CES}$ : 饱和压降, 一般0.2V



NPN反向（倒置）工作状态  
(TTL数字电路使用)



**考试时**

**一般BJT在放大状态时三个极上的电位关系:**

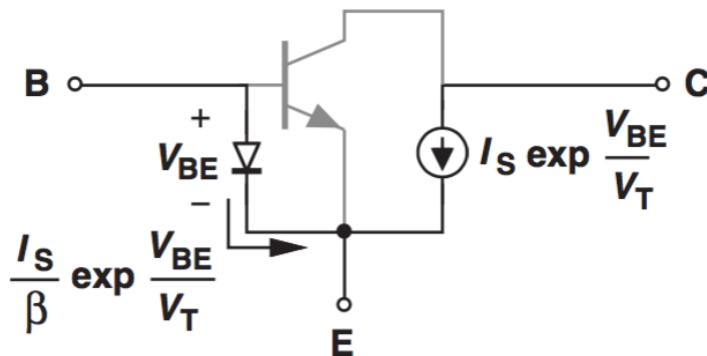
**NPN型:**  $V_C \geq V_B > V_E$ , 一般硅管:  $V_{BE} \sim 0.7$

**PNP型:**  $V_C \leq V_B < V_E$ , 一般硅管:  $V_{EB} \sim 0.7$



# 总结：BJT(NPN)在放大区的大信号I-V模型

, PNP类似



Large-signal model of bipolar transistor in active region.

$$I_C = I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_B = \frac{1}{\beta} I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_S = \frac{A_E q D_n n_i^2}{N_B W_B}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = I_C + I_B$$

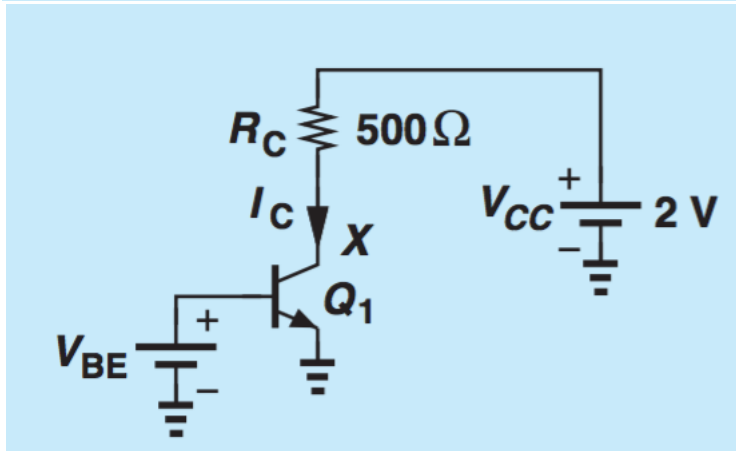
$$= I_C \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

$I_S$ 为强正温度系数，  
一般 $V_{BE}$ 为负温度系数

给题目时，若没有告诉 $I_S$ ，  
一般base会接限流电阻，  
用 $v_{be}=0.7V$ 去估算，但它  
一定要告诉 $\beta$ 值！

### Example

Consider the circuit shown in Fig. 4.14 (a), where  $I_{S,Q1} = 5 \times 10^{-17}$  A and  $V_{BE} = 800$  mV. Assume  $\beta = 100$ . (a) Determine the transistor terminal currents and voltages and verify that the device indeed operates in the active mode. (b) Determine the maximum value of  $R_C$  that permits operation in the active mode.



**Solution** (a)

$$I_C = I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_B = \frac{1}{\beta} I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}.$$

$$I_C = 1.153 \text{ mA}$$

$$I_B = 11.53 \mu\text{A}$$

$$I_E = 1.165 \text{ mA}.$$

The base and emitter voltages are equal to +800 mV and zero, respectively. We must now calculate the collector voltage,  $V_X$ . Writing a KVL from the 2-V power supply and across  $R_C$  and  $Q_1$ , we obtain

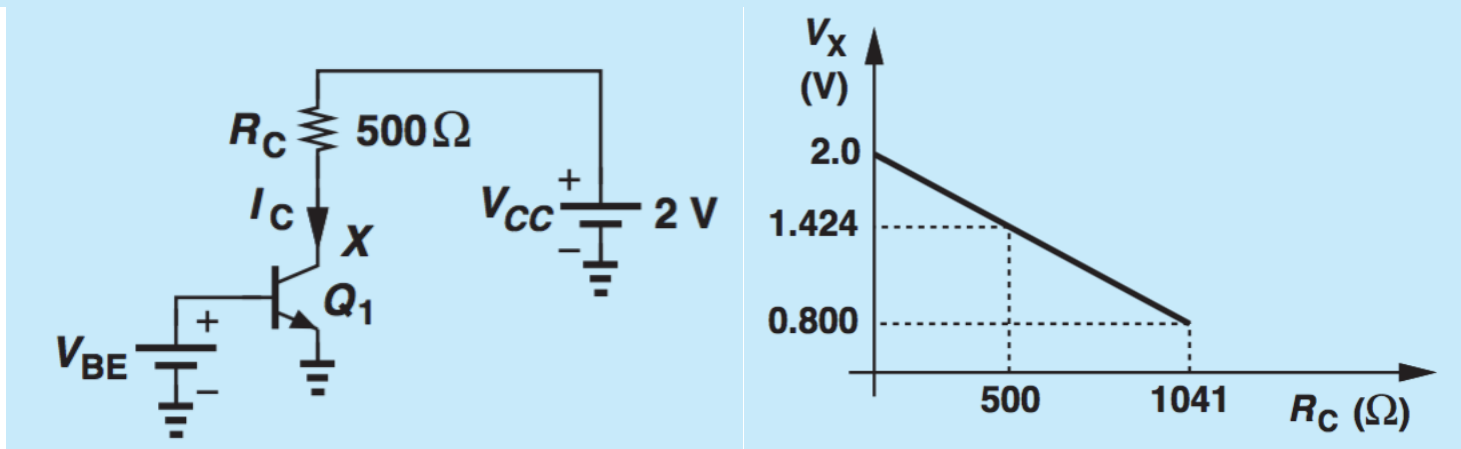
$$V_{CC} = R_C I_C + V_X.$$

That is,

$$V_X = 1.424 \text{ V}.$$

## Example

Consider the circuit shown in Fig. 4.14 (a), where  $I_{S,Q1} = 5 \times 10^{-17}$  A and  $V_{BE} = 800$  mV. Assume  $\beta = 100$ . (a) Determine the transistor terminal currents and voltages and verify that the device indeed operates in the active mode. (b) Determine the maximum value of  $R_C$  that permits operation in the active mode.



The device approaches the “edge” of the forward active region if the base-collector voltage falls to zero, i.e., as  $V_X \rightarrow +800$  mV.

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_X}{I_C},$$

which, for  $V_X = +800$  mV, reduces to

$$R_C = 1041 \Omega.$$



## 5.2 基本共射极放大电路

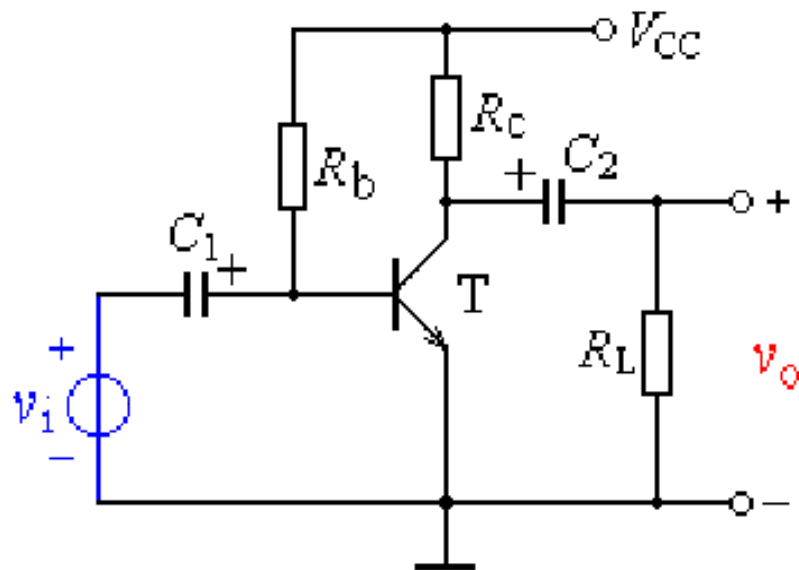
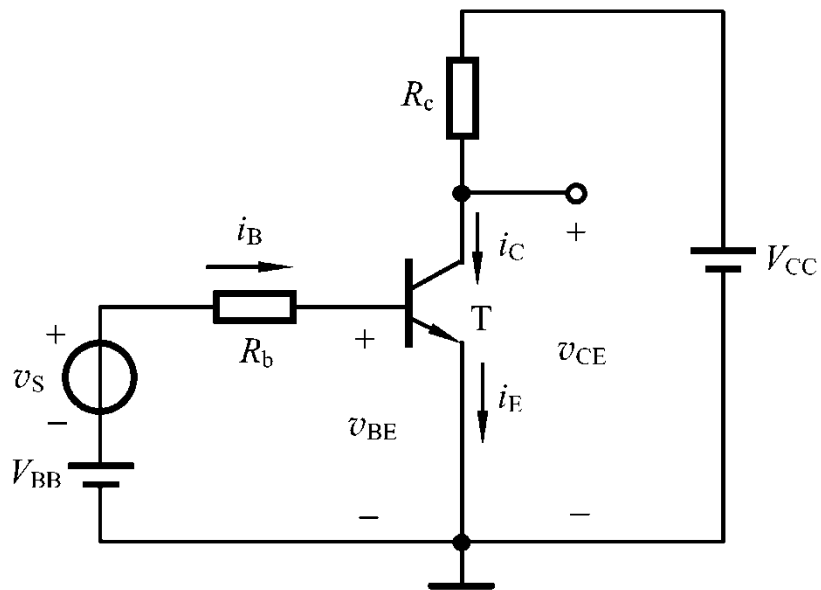
---

5.2.1 基本共射极放大电路的组成

5.2.2 基本共射极放大电路的工作原理



## 5.2.1 基本共射极放大电路的组成





## 5.2.2 基本共射极放大电路的工作原理

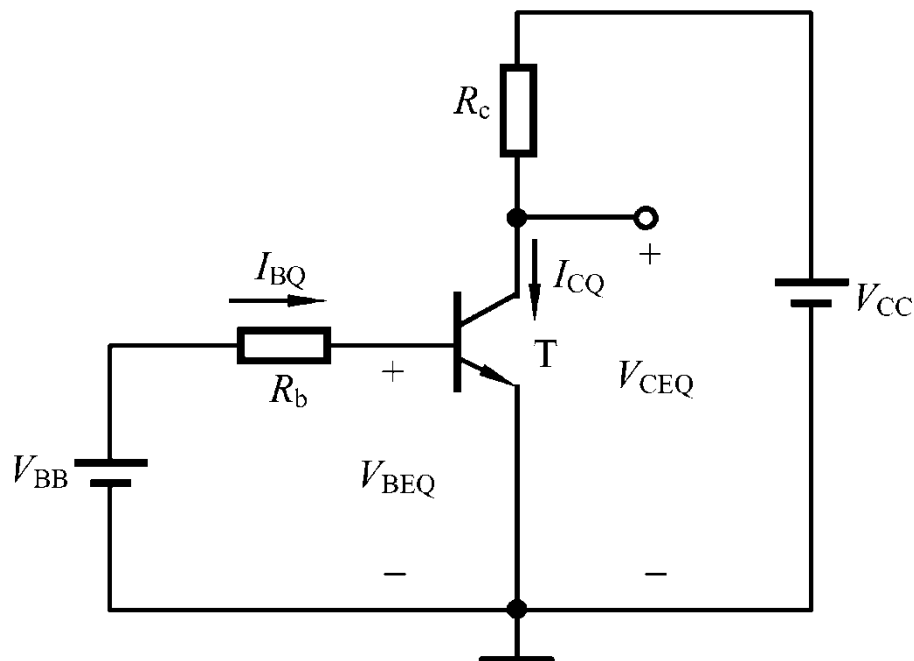
### 1. 静态

输入信号  $v_i = 0$  时,  
放大电路的工作状态称为  
静态或直流工作状态。

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_b}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} + I_{CEO} \approx \beta I_{BQ}$$

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



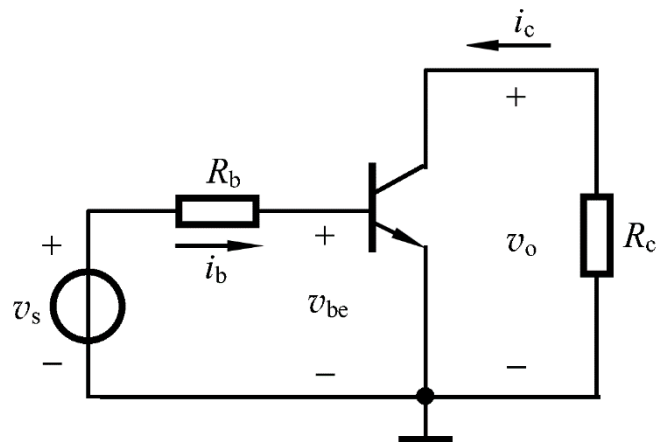
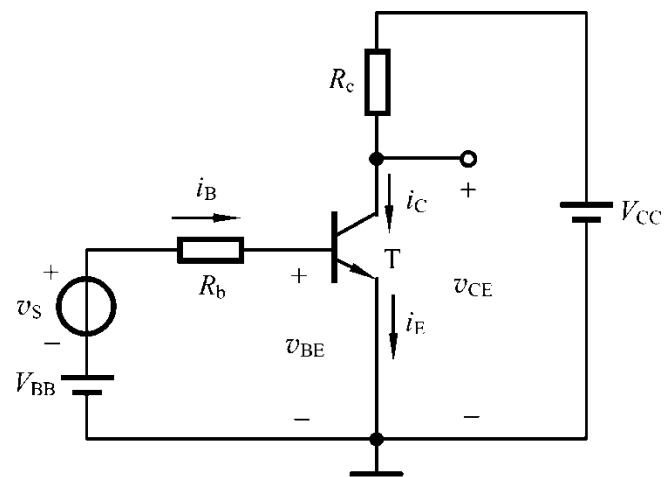
直流通路



## 5.2.2 基本共射极放大电路的工作原理

### 2. 动态

输入正弦信号 $v_s$ 后，电路将处在动态工作情况。此时，BJT各极电流及电压都将在静态值的基础上随输入信号作相应的变化。

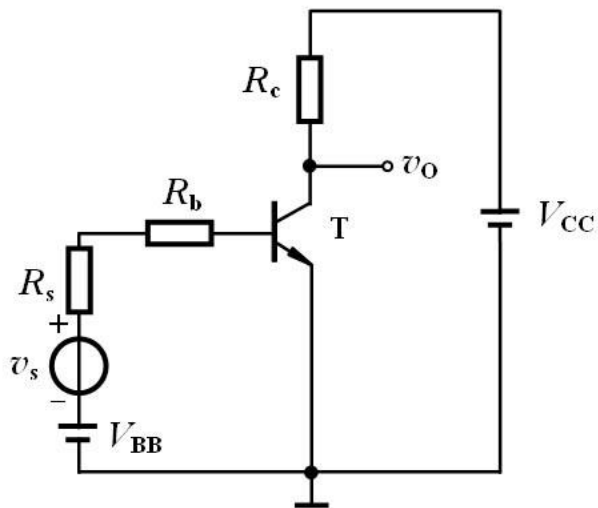


交流通路

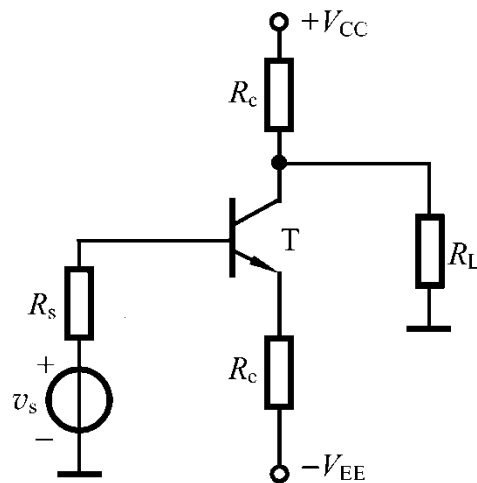
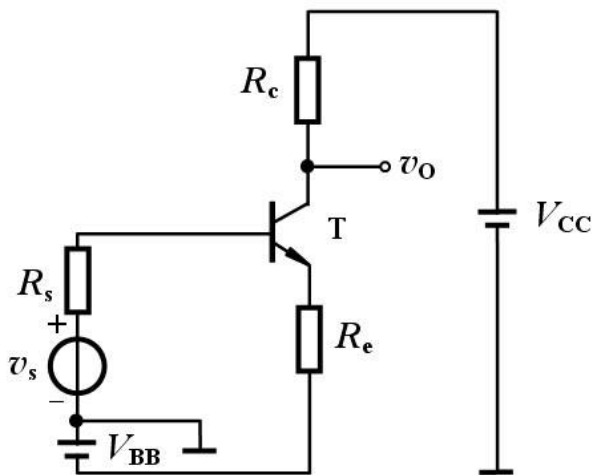
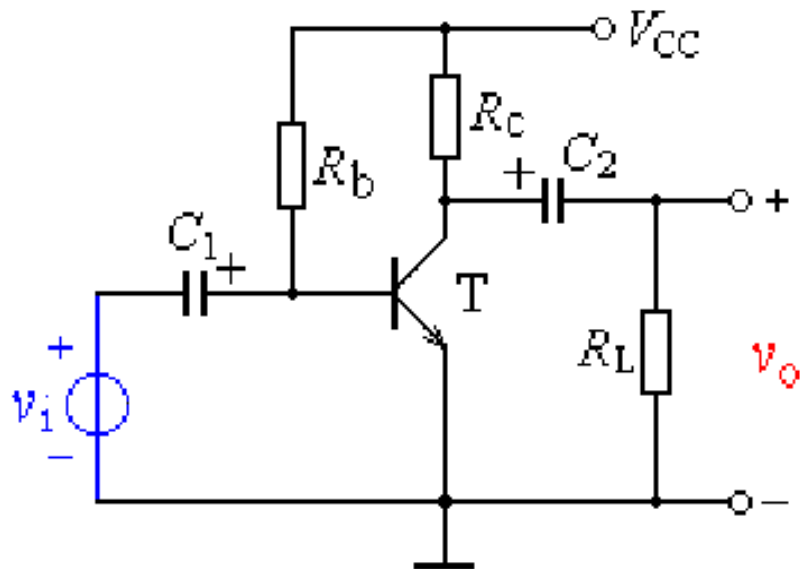




# BJT放大电路的其它组成形式



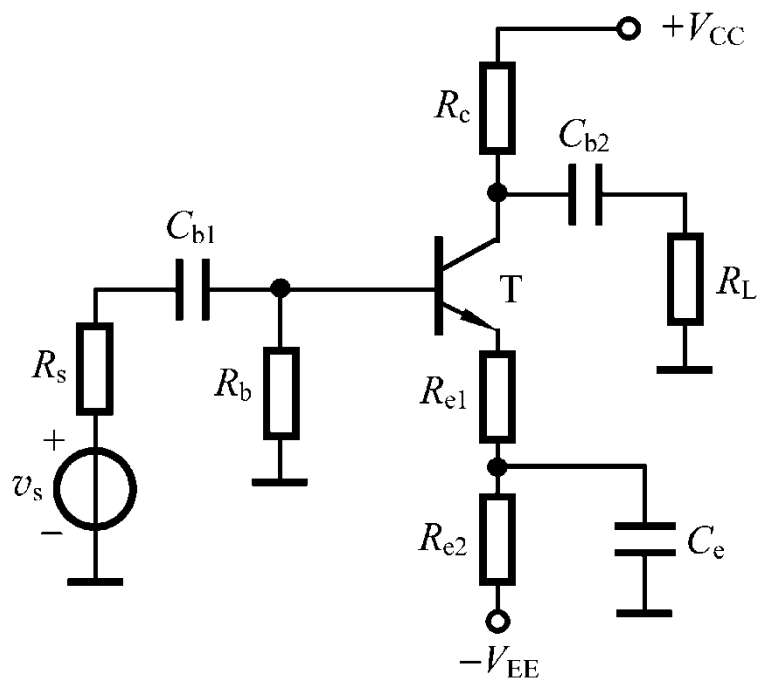
信号源不共地



(b)



# BJT放大电路的其它组成形式



(a)



## 5.3 BJT放大电路的分析方法

---

5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

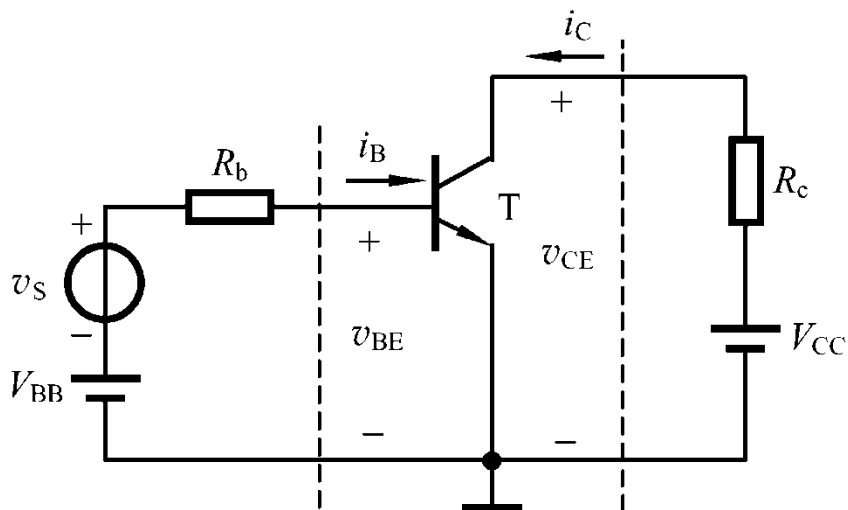
5.3.2 BJT放大电路的小信号模型分析法



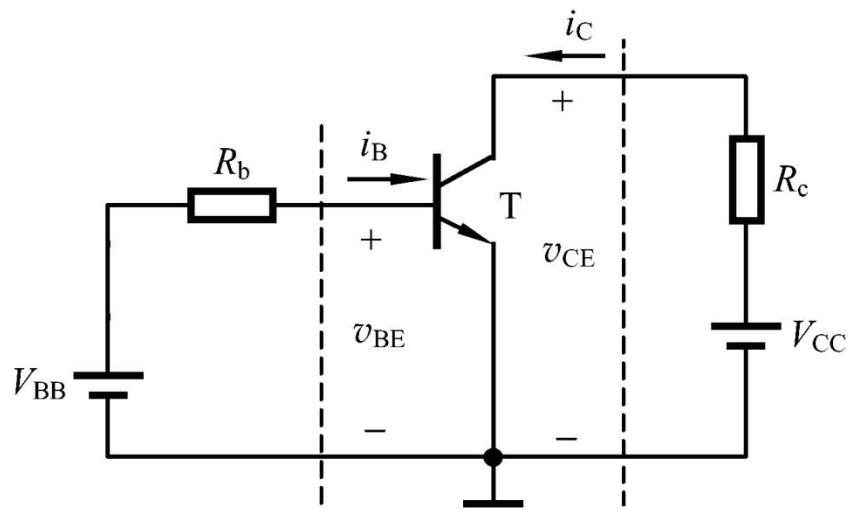
## 5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

### 1. 静态工作点的图解分析

采用该方法分析静态工作点，必须已知三极管的输入输出特性曲线。



共射极放大电路



直流通路

- 首先，画出直流通路



## 5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

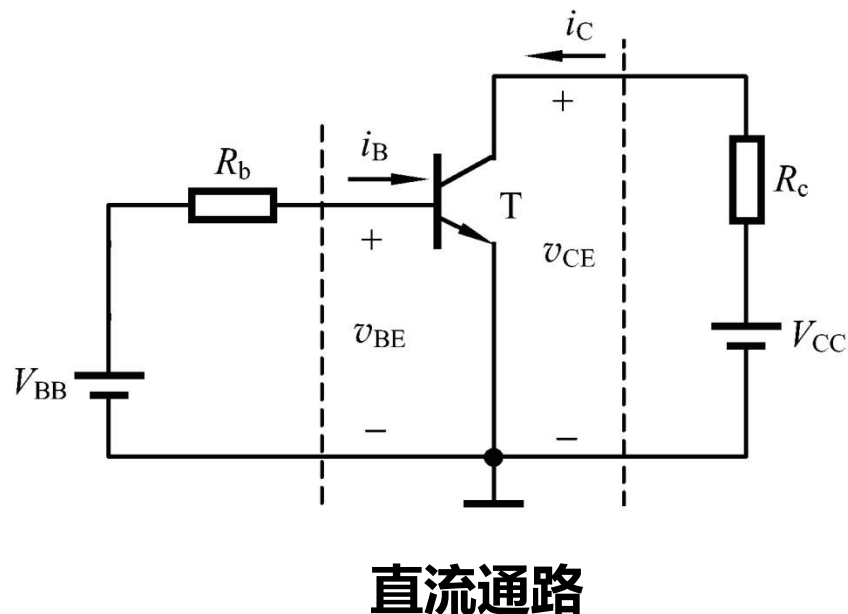
### 1. 静态工作点的图解分析

- 列输入回路方程

$$v_{BE} = V_{BB} - i_B R_b$$

- 列输出回路方程  
(直流负载线)

$$v_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$$

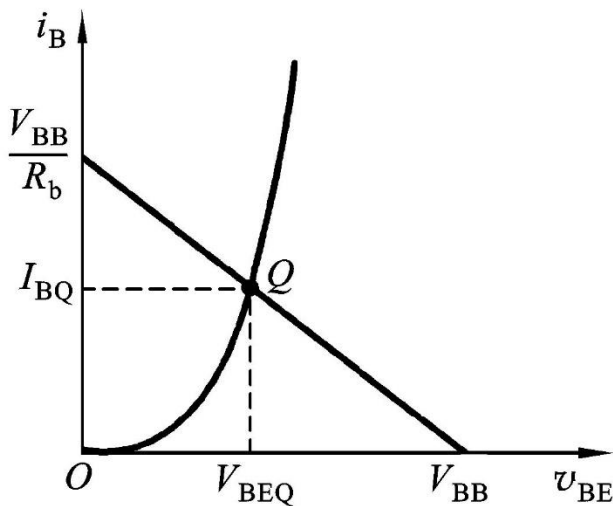




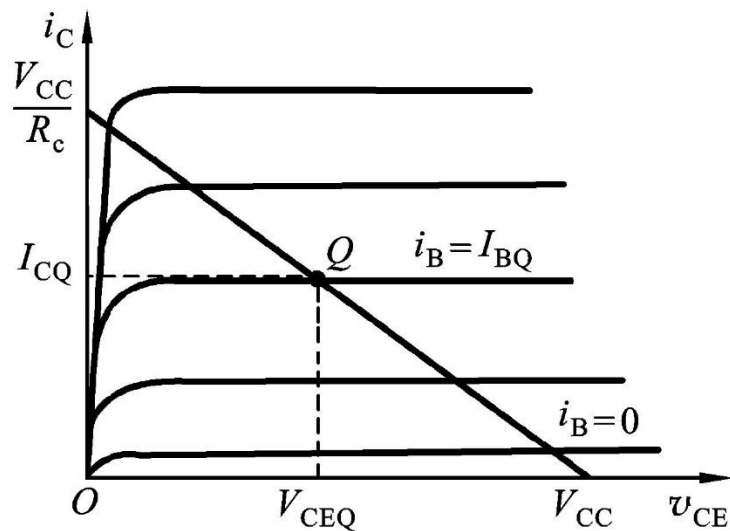
## 5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

### 1. 静态工作点的图解分析

- 在输入特性曲线上，作出直线  $v_{BE} = V_{BB} - i_B R_b$ ，两线的交点即是  $Q$  点，得到  $I_{BQ}$ 。
- 在输出特性曲线上，作出直流负载线  $v_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$ ，与  $I_{BQ}$  曲线的交点即为  $Q$  点，从而得到  $V_{CEQ}$  和  $I_{CQ}$ 。



(a)



(b)



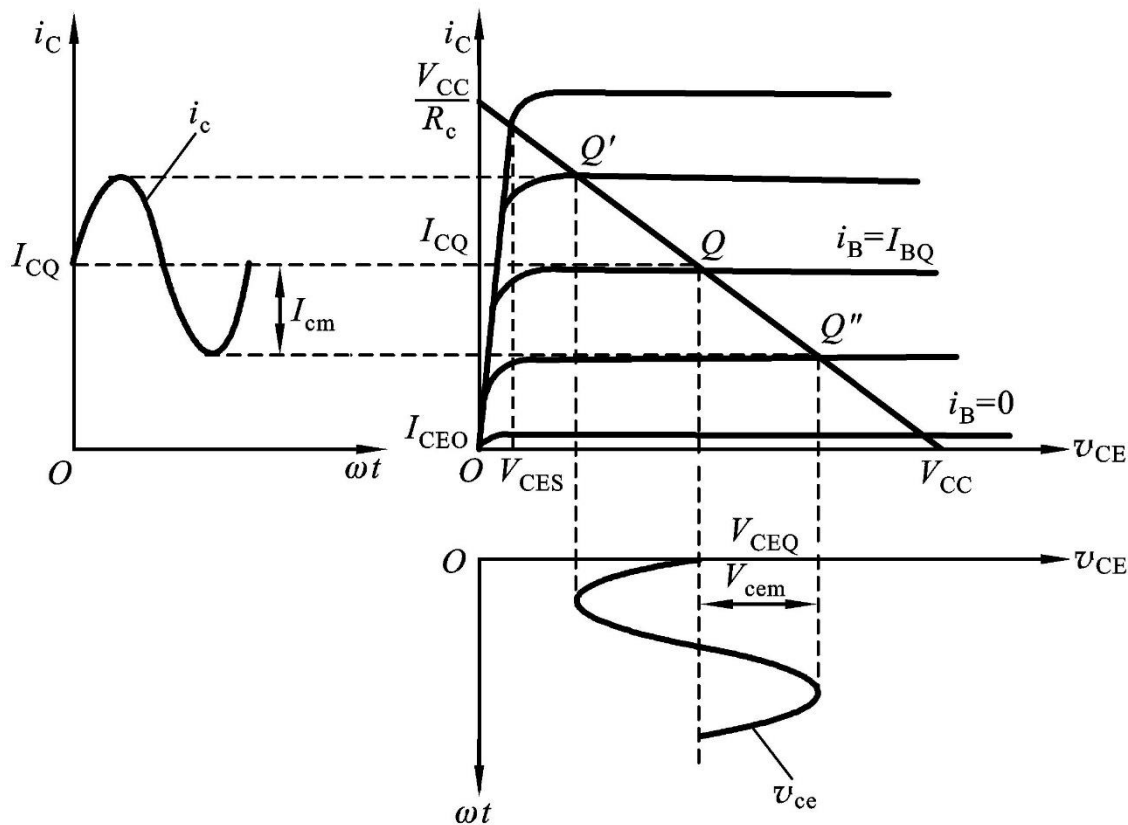


## 5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

### 2. 动态工作情况的图解分析

- 根据 $i_B$ 的变化范围在输出特性曲线图上画出 $i_C$ 和 $v_{CE}$ 的波形

$$v_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$$

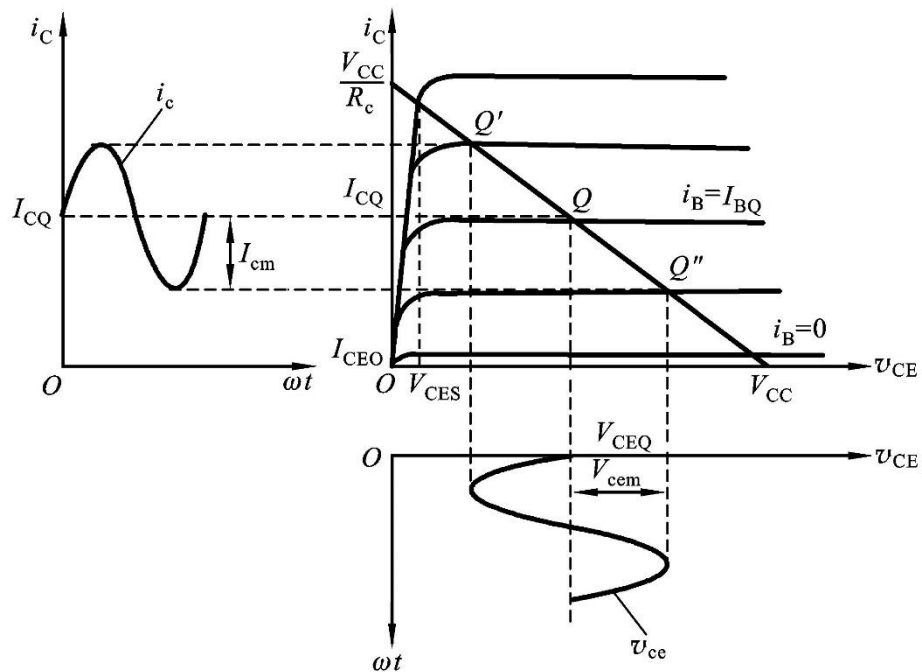
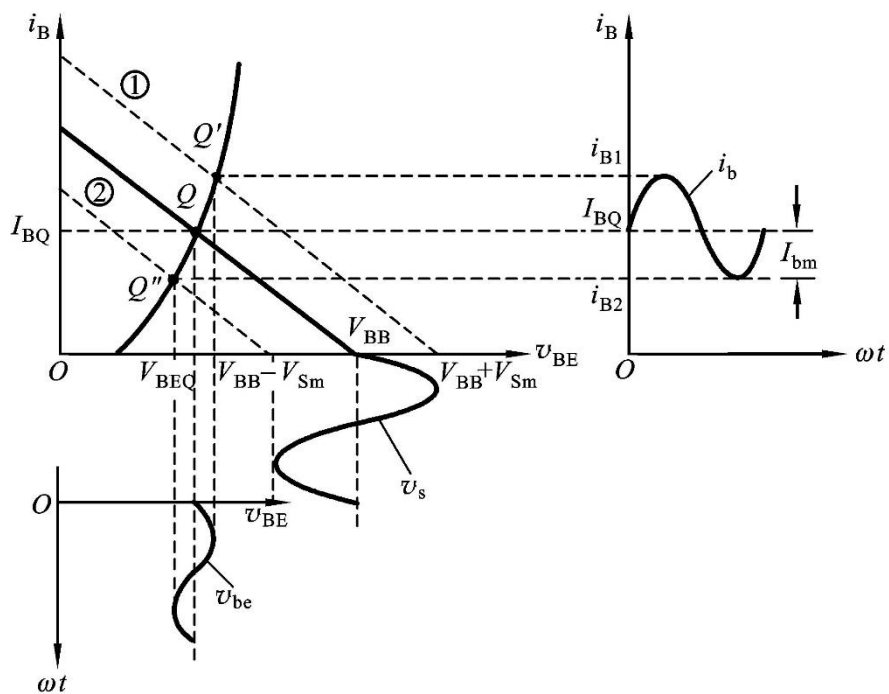






## 5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

### 2. 动态工作情况的图解分析

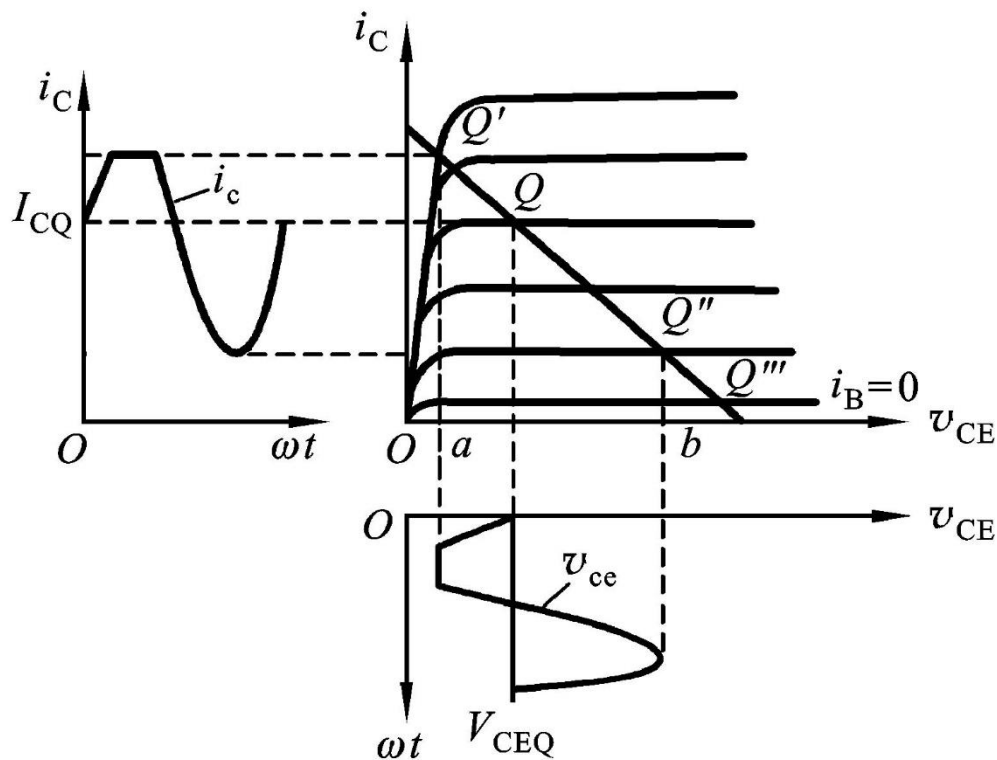




## 5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

### 3. 静态工作点对波形失真的影响

静态工作点太高容易出现饱和失真



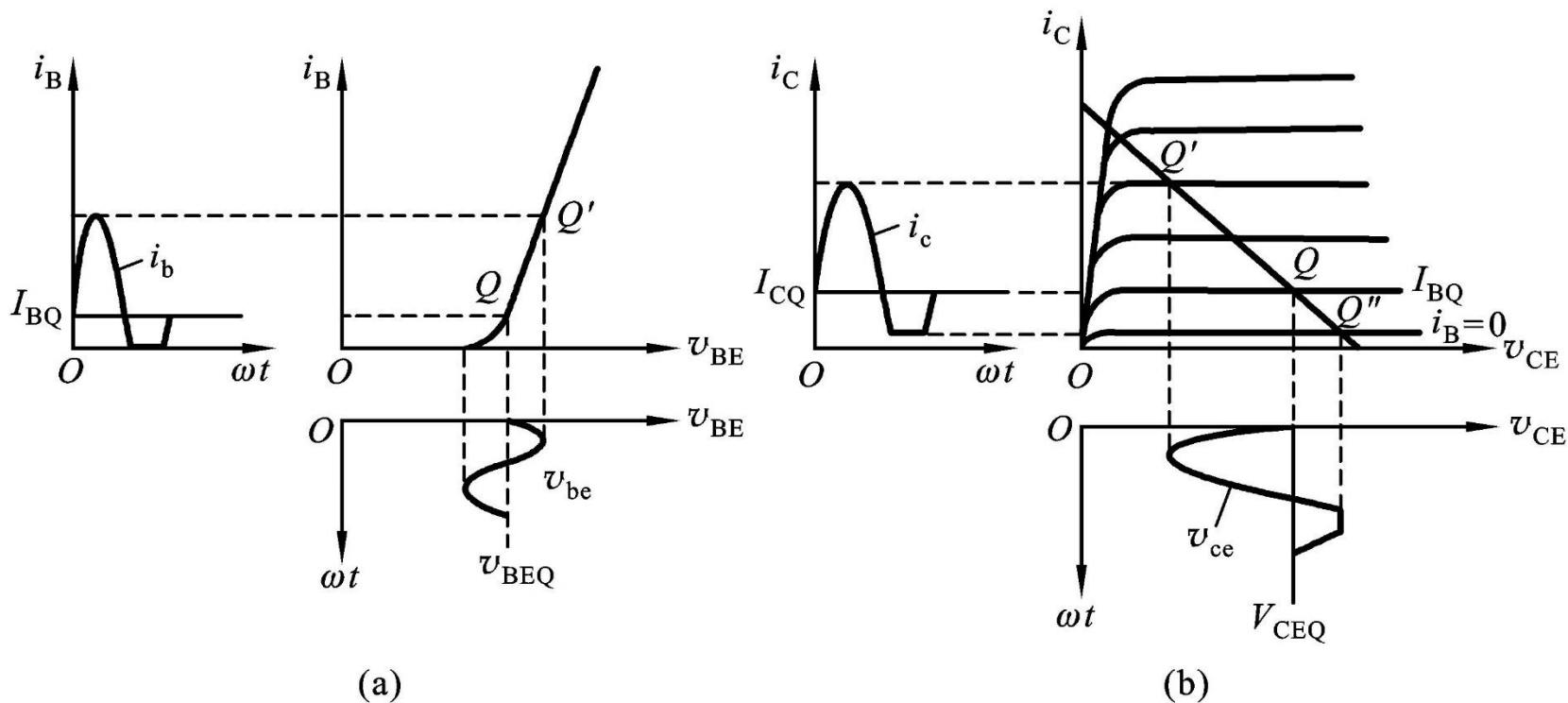
饱和失真的波形



## 5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

### 3. 静态工作点对波形失真的影响

静态工作点太低容易出现截止失真



截止失真的波形



## 5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

### 例5.3.1 阻容耦合共射极放大电路图解

与前一个电路相比，静态时输入回路方程略有差别

$$v_{BE} = V_{CC} - i_B R_b$$

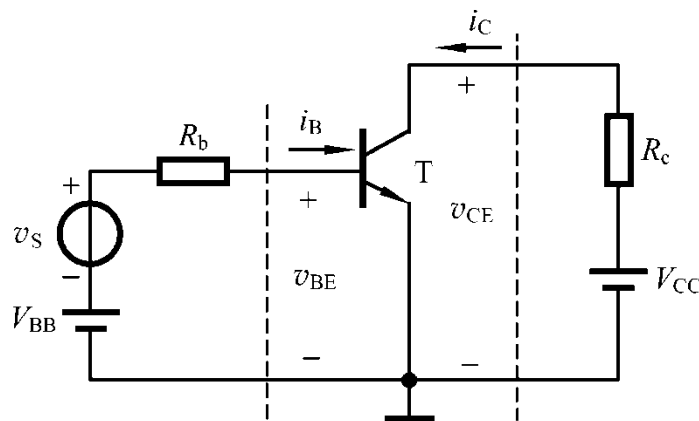
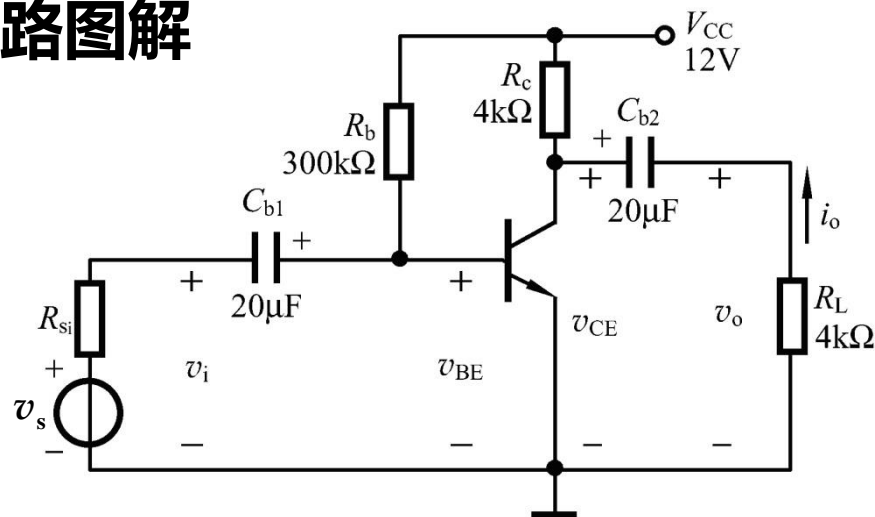
且电容 $C_{b1}$ 充电完成后，其电压等于 $V_{BEQ}$

输出回路方程相同

$$v_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$$

动态时，输入信号 $v_i$ 叠加 $C_{b1}$ 上已充的静态电压 $V_{BEQ}$ ，然后加在BJT的b-e间，即

$$v_{BE} = V_{BEQ} + v_i$$





## 5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

### 例5.3.1 阻容耦合共射极放大电路图解

由于输出端有隔直电容，所以动态和静态时有差别。

由交流通路可得交流负载线：

$$v_{ce} = -i_c \cdot (R_c \parallel R_L)$$

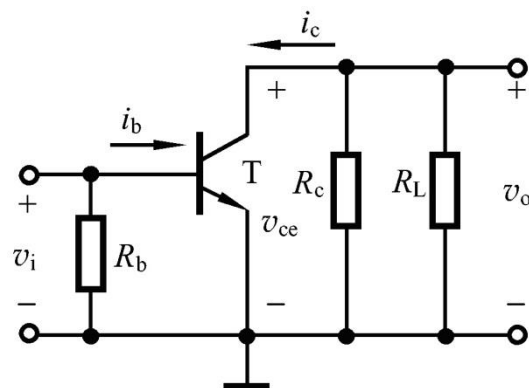
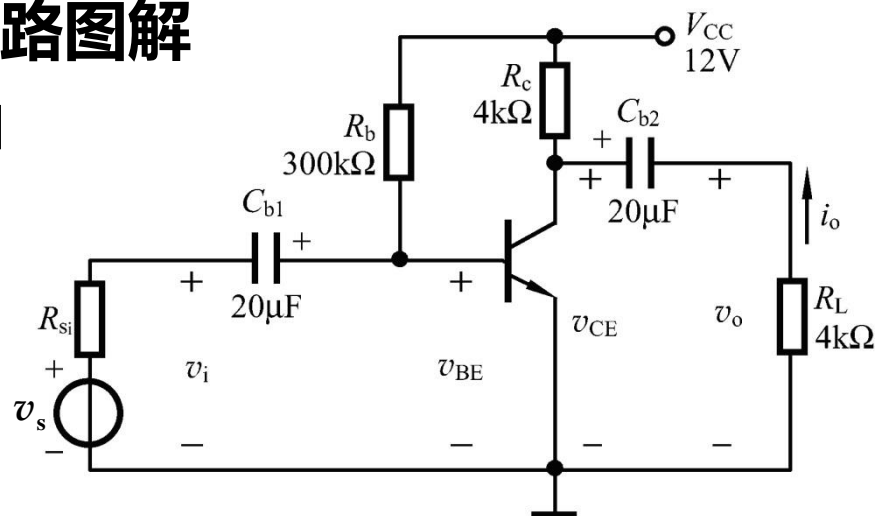
因为交流信号过零时，电路中电压、电流值就等于静态值，所以交流负载线必过 $Q$ 点，即

$$v_{ce} = v_{CE} - V_{CEQ}$$

$$i_c = i_C - I_{CQ}$$

同时，令 $R'_L = R_c \parallel R_L$  则交流负载线为

$$i_C = (-1/R'_L) \cdot v_{CE} + (1/R'_L) V_{CEQ} + I_{CQ}$$



交流通路



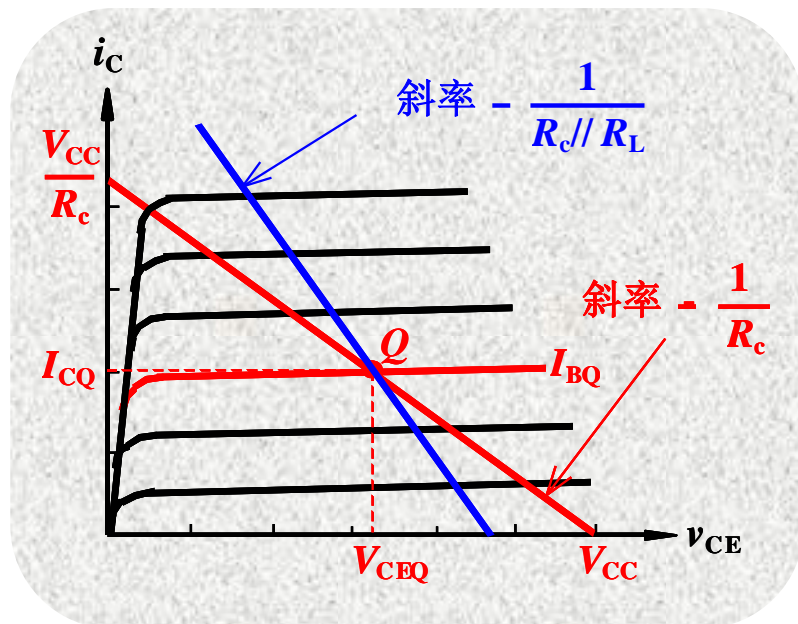
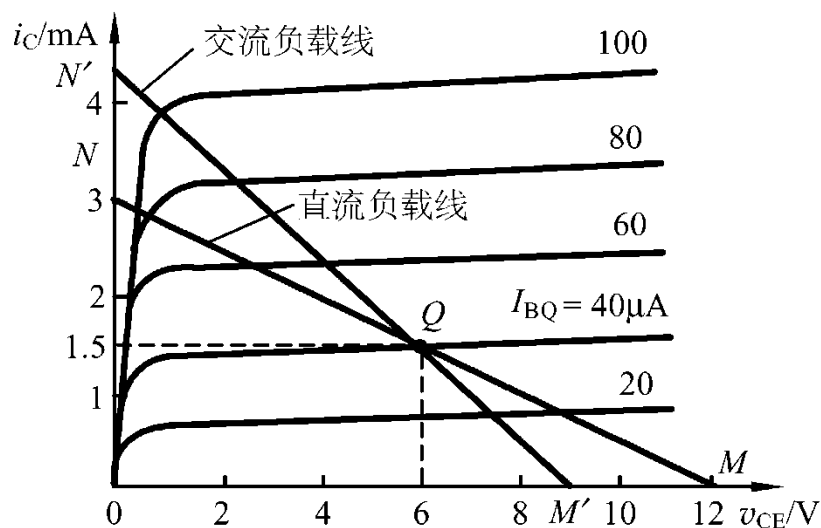
## 5.3.1 BJT放大电路的图解分析法

### 例5.3.1 阻容耦合共射极放大电路图解

#### 交流负载线

$$i_C = (-1/R'_L) \cdot v_{CE} + (1/R'_L) V_{CEQ} + I_{CQ}$$

交流负载线是有交流输入信号时 $Q$ 点的运动轨迹。





## 5.3.2 BJT放大电路的小信号模型分析法

### 1. BJT的H参数及小信号模型

**与FET类似，也可通过BJT的小信号模型来分析其放大电路的动态指标。**

**当放大电路的输入信号电压很小时，就可以把BJT小范围内的特性曲线近似地用直线来代替，从而可以把三极管这个非线性器件所组成的电路当作线性电路来处理。**



# 1. BJT的H参数及小信号模型

## • H参数的引出

对于BJT双口网络，已知输入输出特性曲线如下：

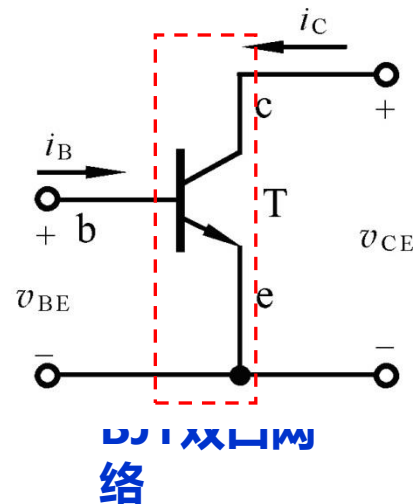
$$i_B = f(v_{BE}) \big|_{v_{CE}=\text{const}} \quad i_C = f(v_{CE}) \big|_{i_B=\text{const}}$$

可以写成：  $v_{BE} = f_1(i_B, v_{CE})$      $i_C = f_2(i_B, v_{CE})$

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

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

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





# 1. BJT的H参数及小信号模型

## ● H参数的引出

$$v_{be} = h_{ie}i_b + h_{re}v_{ce} \quad i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce}$$

其中：

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

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

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

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

四个参数量纲各不相同，故称为混合参数（H参数）。



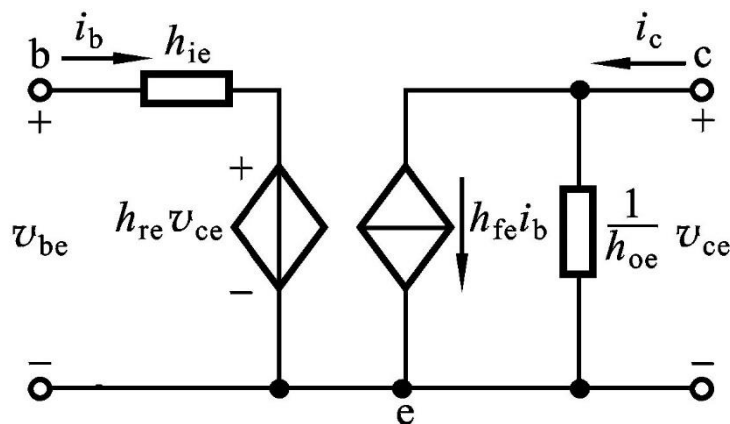
# 1. BJT的H参数及小信号模型

## ● H参数小信号模型

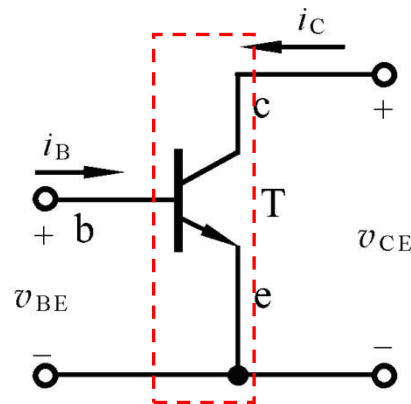
根据  $v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$

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

可得小信号模型



BJT的H参数模型



BJT双口网络

受控电流源  $h_{fe} i_b$ ，反映了BJT的基极电流对集电极电流的控制作用。电流源的流向由  $i_b$  的流向决定。

$h_{re} v_{ce}$  是一个受控电压源。反映了BJT输出回路电压对输入回路的影响。



# 1. BJT的H参数及小信号模型

## ● H参数小信号模型

H参数都是小信号参数，即微变参数或交流参数。

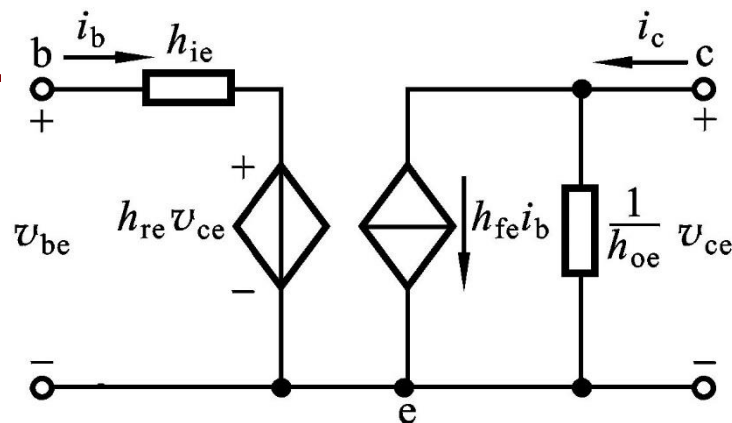
H参数与工作点有关，在放大区基本不变。

H参数都是微变参数，所以只适合对交流信号的分析。

## ● 模型的简化

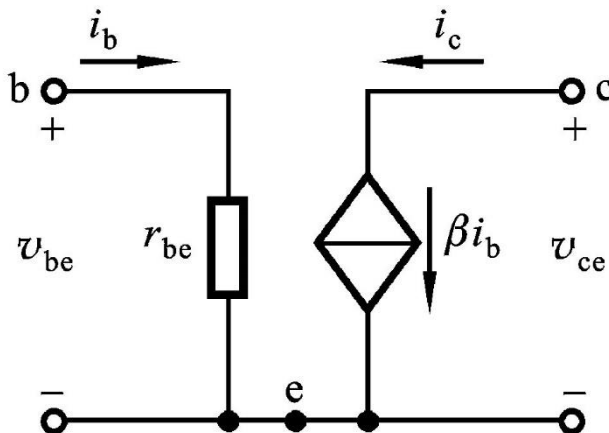
BJT的H参数数量级一般为

$$[h]_e = \begin{bmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^3 \Omega & 10^{-3} \sim 10^{-4} \\ 10^2 & 10^{-5} S \end{bmatrix}$$



$h_{re}$ 和 $h_{oe}$ 都很小，常忽略它们的影响。常用习惯符号

$$r_{be} = h_{ie}, \quad \beta = h_{fe}$$





# 1. BJT的H参数及小信号模型

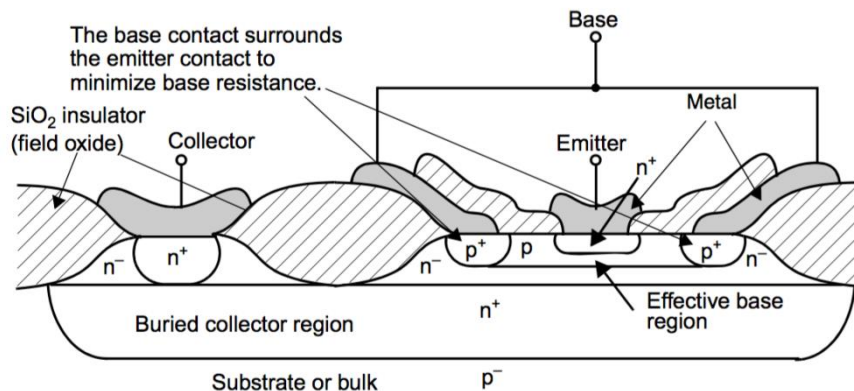
## • H参数的确定

$\beta$  一般用测试仪测出

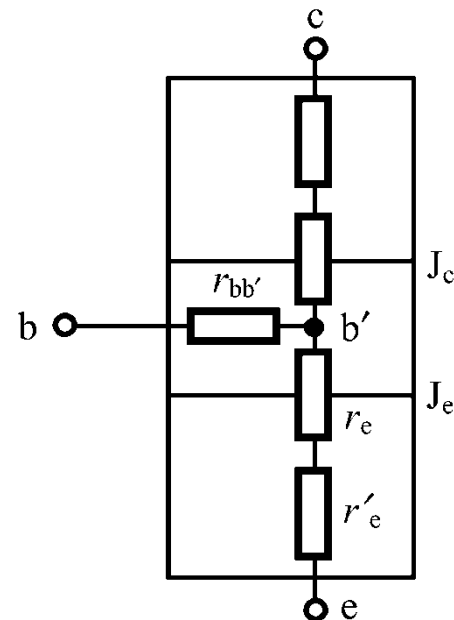
$r_{be}$  与Q点有关, 可用图示仪测出

一般也用公式估算:

$$r_{be} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{i_b r_{bb'} + (1 + \beta) i_b r_{b'e}}{i_b} = r_{bb'} + (1 + \beta) r_{b'e}$$



对于低频小功率管  $r_{bb'} \approx 200\Omega$



• The resistor  $r_{bb'}$  models the resistance of the semiconductor material between the base contact and the effective base region due to the moderately lightly doped base p material.

• This resistor, although small (typically a few hundred ohms or less), can be important in limiting the speed of very-high-frequency low-gain BJT circuits and is a major source of noise.

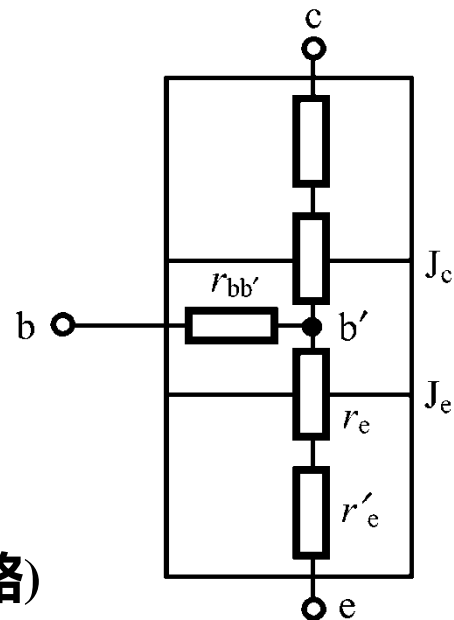


# 1. BJT的H参数及小信号模型

## ● H参数的确定

$$r_{be} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{i_b r_{bb'} + (1 + \beta) i_b r_{b'e}}{i_b} = r_{bb'} + (1 + \beta) r_{b'e}$$

其中 $r_e$ 为发射结小信号电阻,  $r'_e$ 为射极接触电阻(忽略)



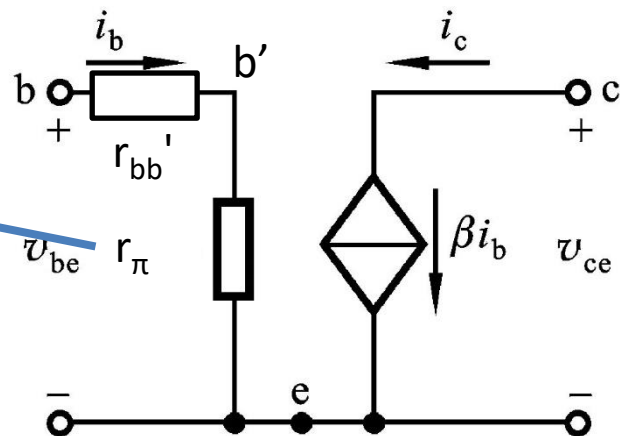
则:

$$r_{b'e} = r_e = \frac{V_T(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = r_{bb'} + \frac{V_T(\text{mV})}{I_{BQ}(\text{mA})}$$

对于低频小功率分离器件  $r_{bb'} \approx 200\Omega$

集成电路设计中可以忽略此电阻

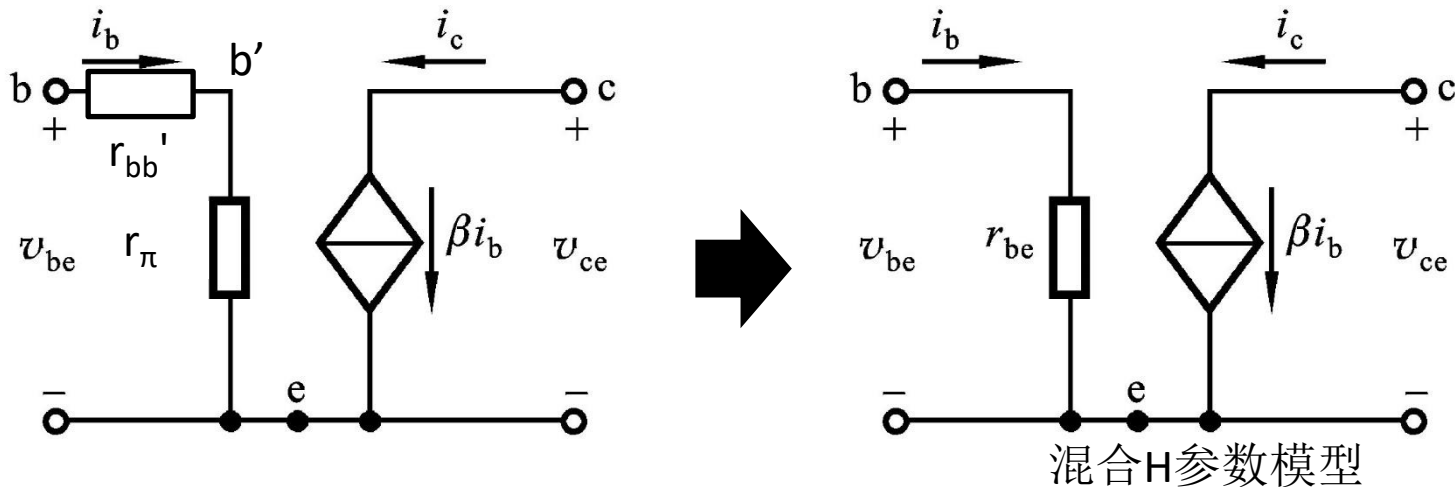


# 若用万用表的“欧姆”档测量b、e两极之间的电阻, 是否为 $r_{be}$ ? 小信号哦!!!



# 1. BJT的H参数及小信号模型

## ● H参数的确定



$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = r_{bb'} + \frac{V_T(\text{mV})}{I_{BQ}(\text{mA})}$$



## 5.3.2 BJT放大电路的小信号模型分析法

### 2. 用H参数小信号模型分析基本共射极放大电路

#### (1) 利用直流通路求Q点

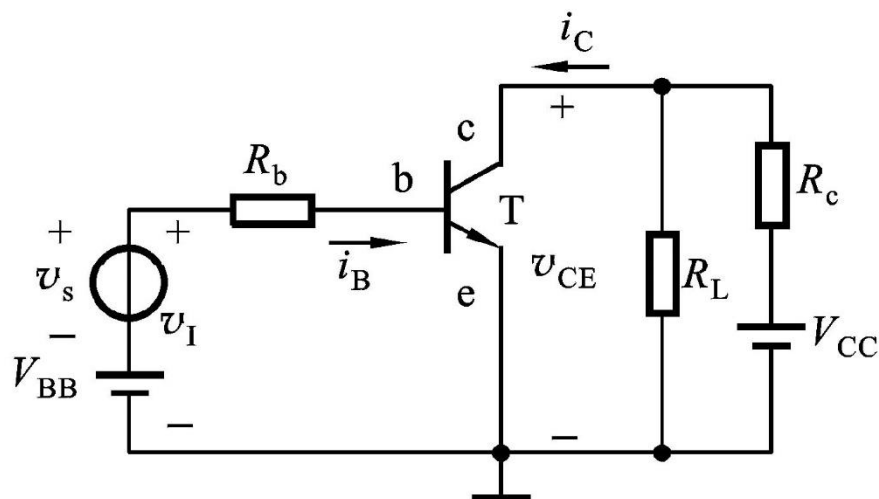
$$v_s = 0$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_b}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = \left( \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_c} - I_C \right) R_L$$

一般硅管  $V_{BE}=0.7V$ ，锗管  $V_{BE}=0.2V$ ， $\beta$  已知。



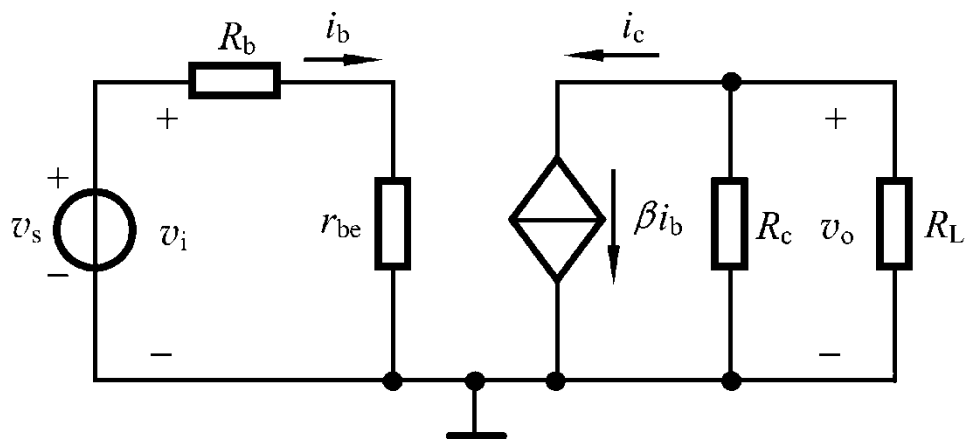
共射极放大电路



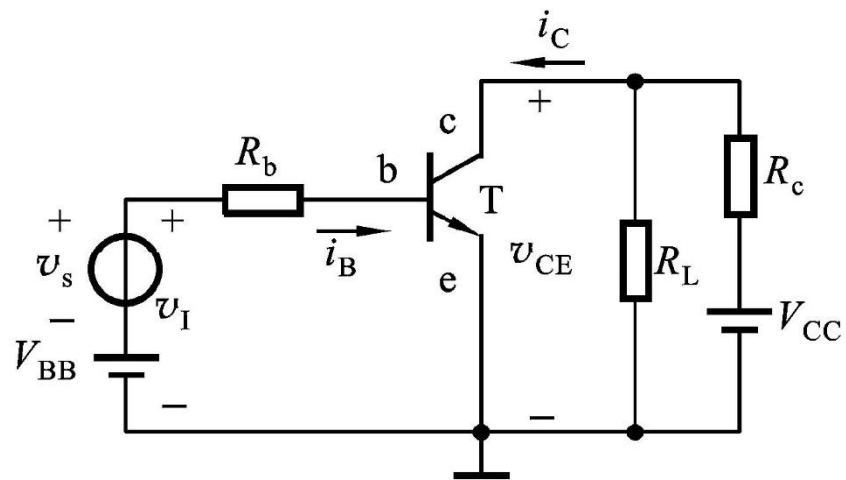
## 5.3.2 BJT放大电路的小信号模型分析法

### 2. 用H参数小信号模型分析基本共射极放大电路

#### (2) 画小信号等效电路



H参数小信号等效电路







## 5.3.2 BJT放大电路的小信号模型分析法

### 2. 用H参数小信号模型分析基本共射极放大电路

#### (3) 求放大电路动态指标

##### 电压增益

已知 $\beta$ ，估算 $r_{be}$

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

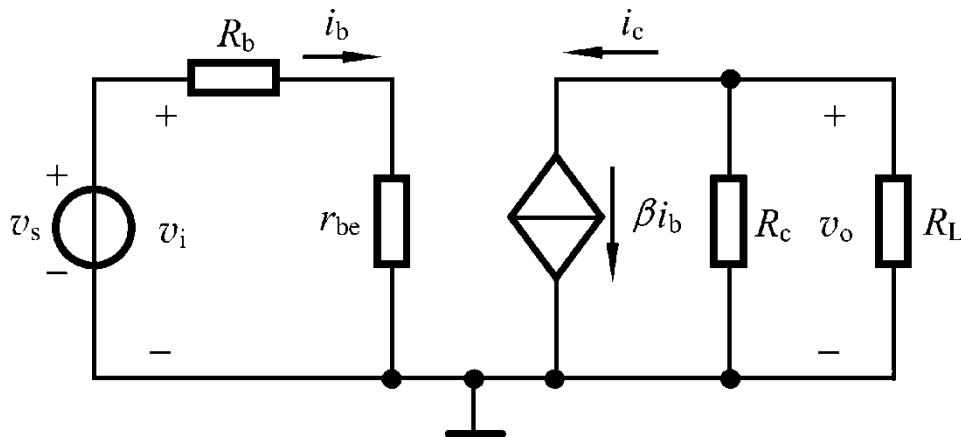
根据  $v_i = i_b \cdot (R_b + r_{be})$

$$i_c = \beta \cdot i_b$$

$$v_o = -i_c \cdot (R_c // R_L)$$

则电压增益为 
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_c \cdot (R_c // R_L)}{i_b \cdot (R_b + r_{be})} = -\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

(可作为公式)





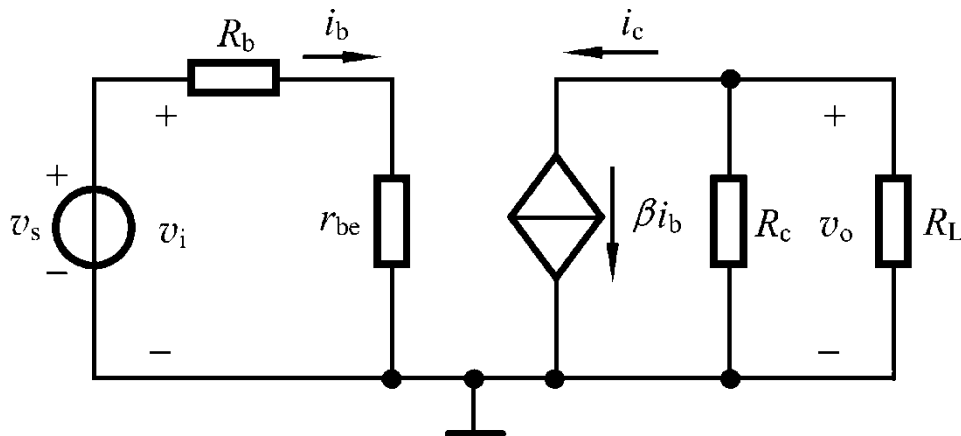
## 5.3.2 BJT放大电路的小信号模型分析法

### 2. 用H参数小信号模型分析基本共射极放大电路

#### (3) 求放大电路动态指标

**输入电阻**

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{i_b}$$
$$= \frac{i_b(R_b + r_{be})}{i_b}$$
$$= R_b + r_{be}$$



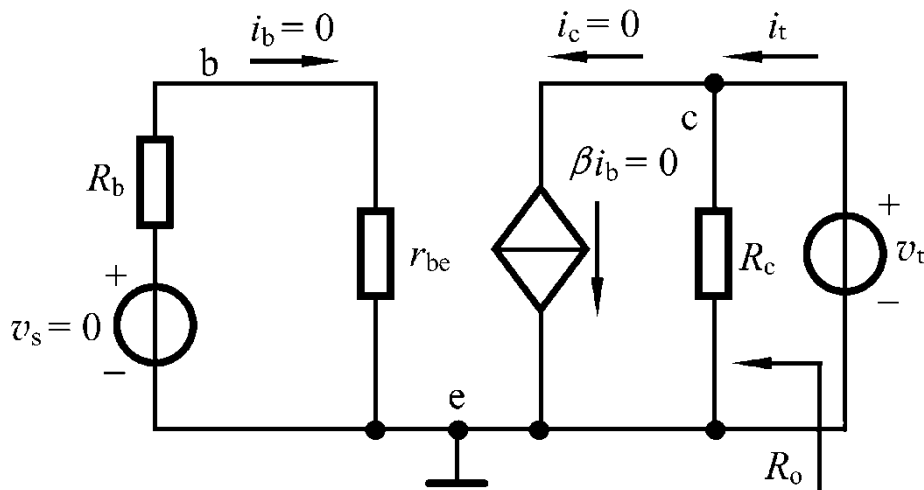
**输出电阻**

$$R_o = \left. \frac{v_t}{i_t} \right|_{v_s=0, R_L=\infty}$$

令  $v_i = 0 \rightarrow i_b = 0$

$\rightarrow \beta \cdot i_b = 0$

所以  $R_o = R_c$

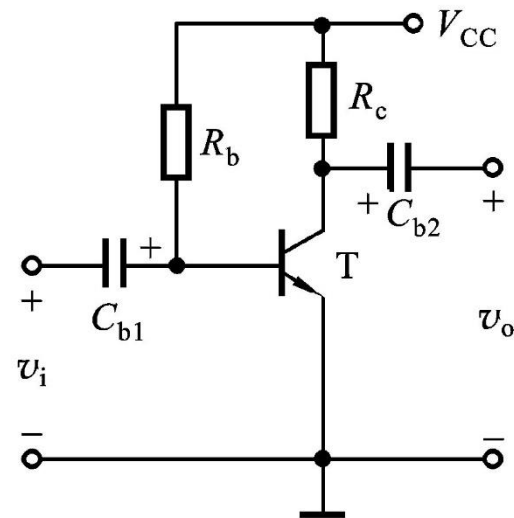


## 例题

1. 放大电路如图所示。已知BJT的 $\beta=80$ ,  
 $R_b=300\text{k}\Omega$ ,  $R_c=2\text{k}\Omega$ ,  $V_{CC}=+12\text{V}$ , 求:

(1) 放大电路的 $Q$ 点。此时BJT工作在哪个区域?

(2) 当 $R_b=100\text{k}\Omega$ 时, 放大电路的 $Q$ 点。此时BJT工作在哪个区域? (忽略BJT的饱和压降)



**解:** (1) 
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \approx \frac{12\text{V}}{300\text{k}\Omega} = 40\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} = 80 \times 40\mu\text{A} = 3.2\text{mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - R_c \cdot I_{CQ} = 12\text{V} - 2\text{k}\Omega \times 3.2\text{mA} = 5.6\text{V}$$

静态工作点为 $Q$  ( $40\mu\text{A}$ ,  $3.2\text{mA}$ ,  $5.6\text{V}$ ), BJT工作在放大区。

(2) 当 $R_b=100\text{k}\Omega$ 时, 
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC}}{R_b} \approx \frac{12\text{V}}{100\text{k}\Omega} = 120\mu\text{A} \quad I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} = 80 \times 120\mu\text{A} = 9.6\text{mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - R_c \cdot I_{CQ} = 12\text{V} - 2\text{k}\Omega \times 9.6\text{mA} = -7.2\text{V} \quad V_{CE} \text{不可能为负值,}$$

其最小值也只能为0, 即 $I_C$ 的最大电流为: 
$$I_{CM} = \frac{V_{CC} - V_{CES}}{R_c} \approx \frac{12\text{V}}{2\text{k}\Omega} = 6\text{mA}$$

此时,  $Q$  ( $120\mu\text{A}$ ,  $6\text{mA}$ ,  $0\text{V}$ ), 由于  $\beta \cdot I_{BQ} > I_{CM}$ , 所以BJT工作在饱和区。

## 例题

2. 放大电路如图所示。试求：(1)  $Q$ 点； (2)  $A_v = \frac{v_o}{v_i}$ 、 $A_{vs} = \frac{v_o}{v_s}$ 、 $R_i$ 、 $R_o$ 。已知 $\beta=50$ 。

解：(1)

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = \frac{12V}{300k\Omega} = 40\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 40\mu A = 2mA$$

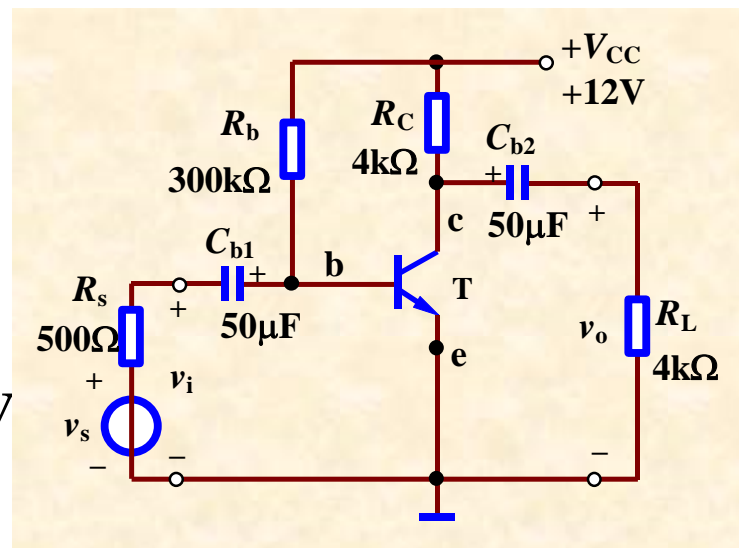
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 12V - 2mA \times 4k\Omega = 4V$$

$$(2) \quad r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_E(mA)}$$

$$\approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_C(mA)}$$

$$= 863\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = - \frac{\beta \cdot (R_c \parallel R_L)}{r_{be}} = -115.87$$

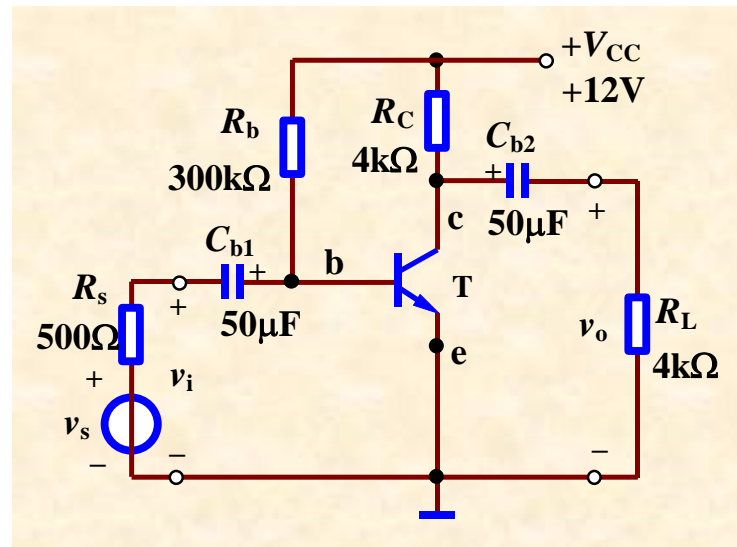
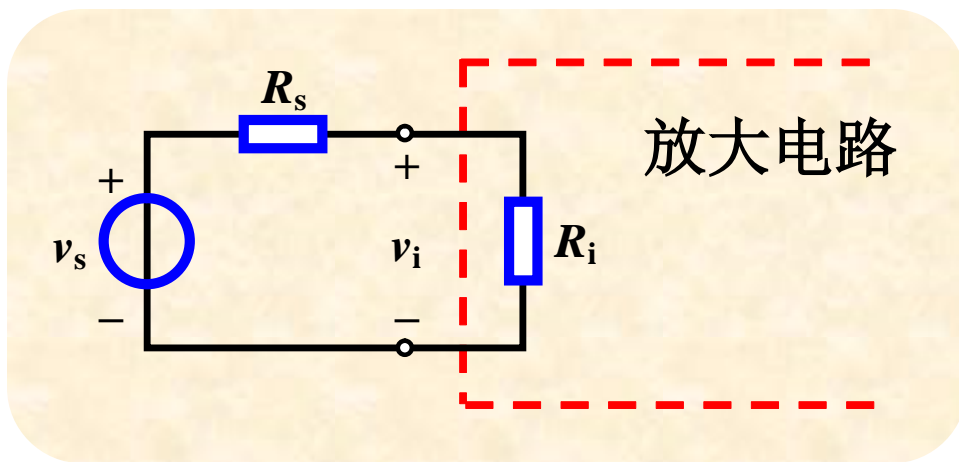


$$R_i = R_b \parallel r_{be} \approx r_{be} = 863\Omega$$

$$R_o = R_c = 4k\Omega$$

# 例题

2. 放大电路如图所示。试求：(1)  $Q$ 点； (2)  $A_v = \frac{v_o}{v_i}$  、  $A_{vs} = \frac{v_o}{v_s}$  、  $R_i$  、  $R_o$  。 已知  $\beta=50$ 。



$$\begin{aligned}
 A_{vs} &= \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_i}{v_s} \cdot \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot A_v \\
 &= \frac{863}{863 + 500} \times (-115.87) \\
 &= -73.36
 \end{aligned}$$



# 总结

1. 低频BJT电路的图解分析法，当有隔直电容时要画交流负载线，并用于评估动态信号失真特性；
2. BJT电路的小信号分析法：先直流工作点分析、再画小信号电路作小信号分析：
  - 2.1 直流工作点分析就是确定 $I_B$ 、 $I_C$ 、 $V_{CE}$ ，并验证是否在放大区；（看看例题就知道咋算的了）
  - 2.2 低频小信号分析就是画出电路等效小信号电路图，然后根据直流工作点参数算 $r_{be}$ ， $A_v$ ，然后算 $R_i$ ， $R_o$ ，甚至 $A_s$ ；（看看例题就知道咋算的了）

说明：到目前为止都是低频特性分析，隔直电容都认为特别的大，在高频时需要考虑器件本身的寄生电容的影响，这在第六章学。



# 考试复习要点

---

- BJT的 $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_E$ ,  $V_{BE}$ 的计算公式, 以及放大器的条件
- 共射极放大电路相关的所有知识: 图解法 (交流负载线、直流负载线, 及其与相关参量的关系)、直流特性计算、交流特性计算。

END



后续内容不纳入3学分课程考查





## 5.4 BJT放大电路静态工作点的稳定问题

---

5.4.1 温度对静态工作点的影响

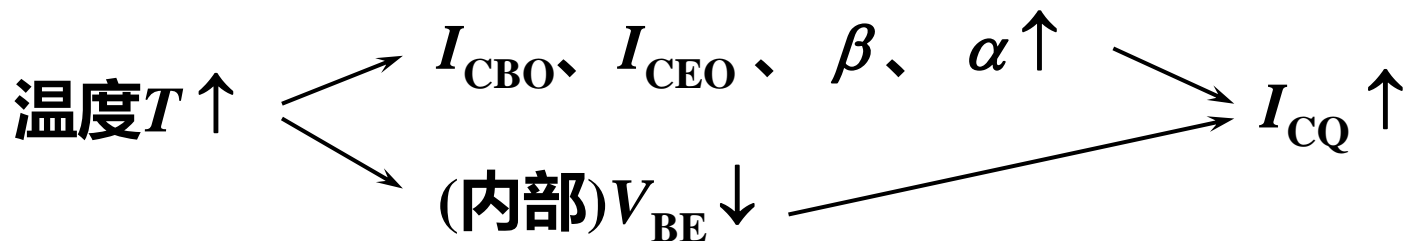
5.4.2 射极偏置电路



## 5.4.1 温度对静态工作点的影响

自学了解

5.1节曾讨论过，温度变化将导致下列结果：



要想使 $I_{CQ}$ 基本稳定不变，就要求在温度升高时，电路能自动地适当减小基极电流 $I_{BQ}$ 。

- 除了温度，实际还有供电电压、以及工艺波动的影响，称为PVT变化。目前主要有两种稳定工作点的基本方法：(1) 负反馈、(2) 采用ptat恒流偏置（集成电路中常用）。
- 本门课主要介绍负反馈的抑制方法！



## 5.4.2 射极偏置电路

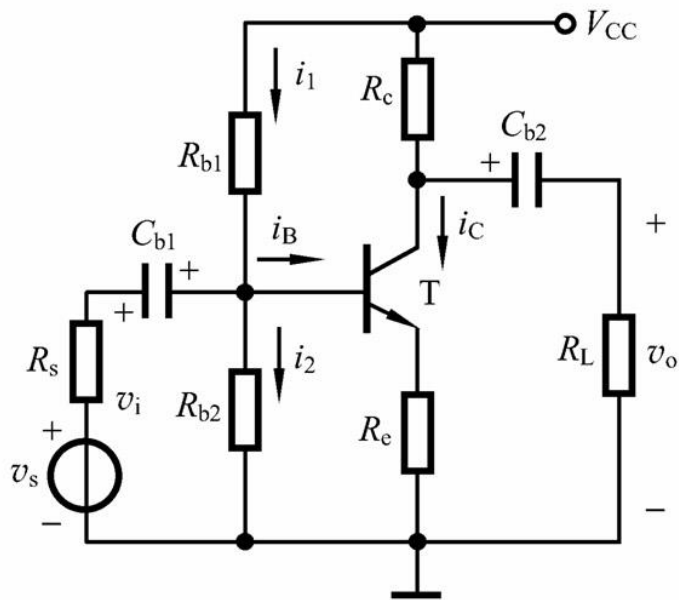
自学了解

### 1. 基极分压式射极偏置电路

#### (1) 稳定工作点的原理

目标：温度变化时，使 $I_{CQ}$ 维持恒定

如果温度变化时， **$b$ 点电位能基本不变**，则可实现静态工作点的稳定。



稳定原理：

$T \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{EQ} \uparrow \rightarrow V_E \uparrow$ 、 $V_B$  不变  $\rightarrow V_{BEQ} \downarrow \rightarrow I_{BQ} \downarrow$   
 $I_{CQ} \downarrow$  (反馈控制)



## 5.4.2 射极偏置电路

自学了解

### 1. 基极分压式射极偏置电路

#### (1) 稳定工作点的原理

***b*点电位基本不变的条件:**

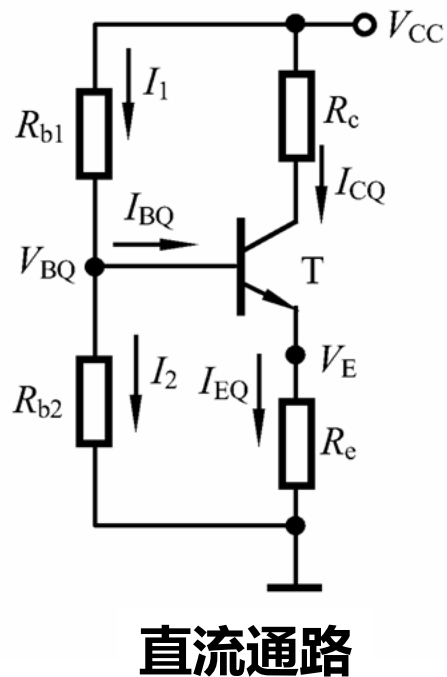
$$I_1 \gg I_{BQ}, \quad V_B \gg V_{BEQ}$$

$$\text{此时, } V_B \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

**$V_B$ 与温度无关**

**$R_e$ 取值越大, 反馈控制作用越强**

**一般取  $I_1 = (5 \sim 10)I_{BQ}$ ,  $V_B = 3 \sim 5V$**





## 5.4.2 射极偏置电路

自学了解

### 1. 基极分压式射极偏置电路

#### (2) 放大电路指标分析

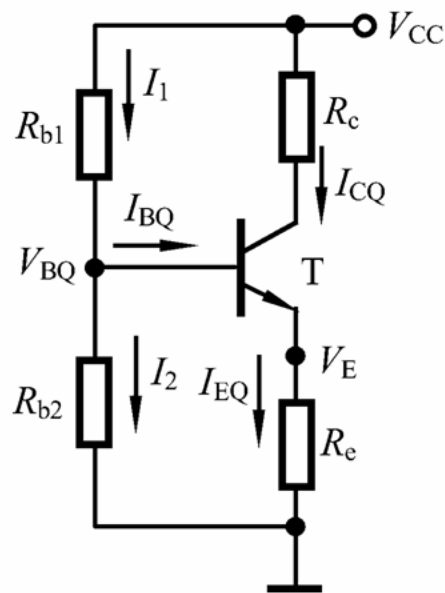
##### ① 静态工作点

$$V_B \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_B - V_{BEQ}}{R_e}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c - I_{EQ}R_e \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

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



直流通路



## 5.4.2 射极偏置电路

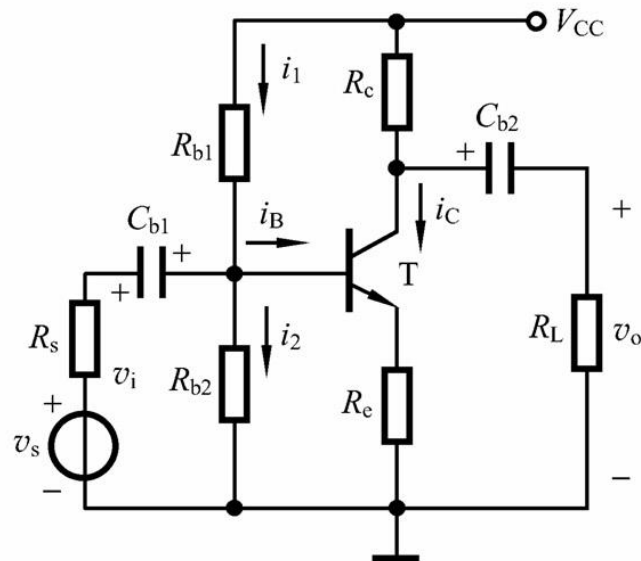
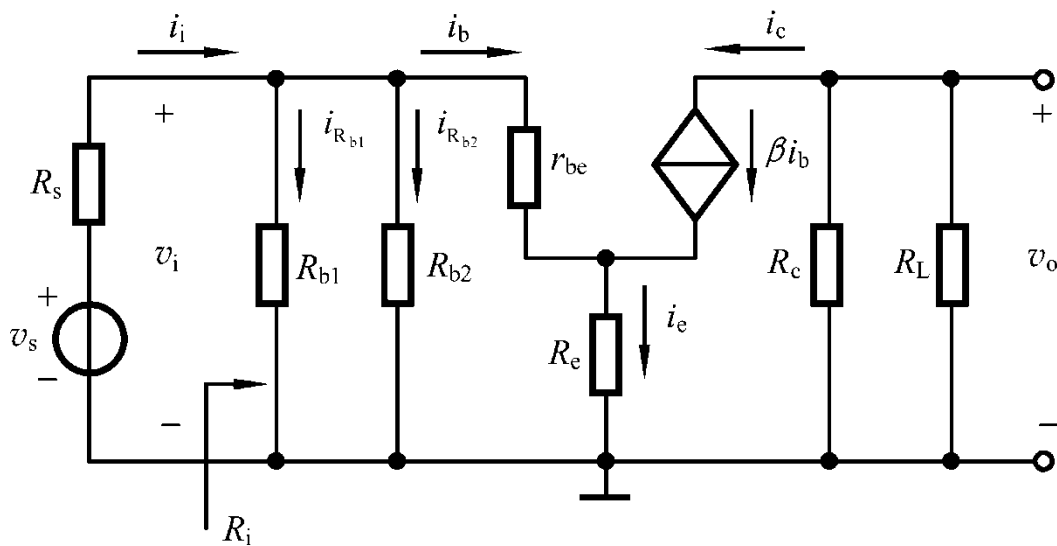
自学了解

### 1. 基极分压式射极偏置电路

#### (2) 放大电路指标分析

##### ②电压增益

<A>画小信号等效电路





## (2) 放大电路指标分析

### ②电压增益

<B> 确定模型参数

$\beta$  已知, 求  $r_{be}$

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

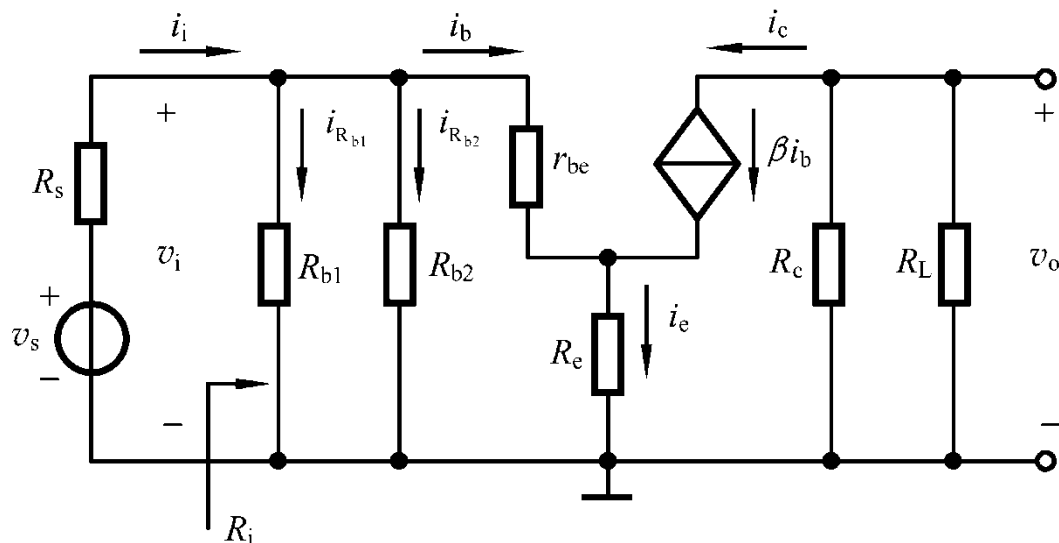
<C> 增益

输出回路:  $v_o = -\beta \cdot i_b (R_c \parallel R_L)$

输入回路:  $v_i = i_b r_{be} + i_e R_e = i_b r_{be} + i_b (1 + \beta) R_e$

电压增益: 
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta \cdot i_b (R_c \parallel R_L)}{i_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]} = -\frac{\beta \cdot (R_c \parallel R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

(可作为公式用)





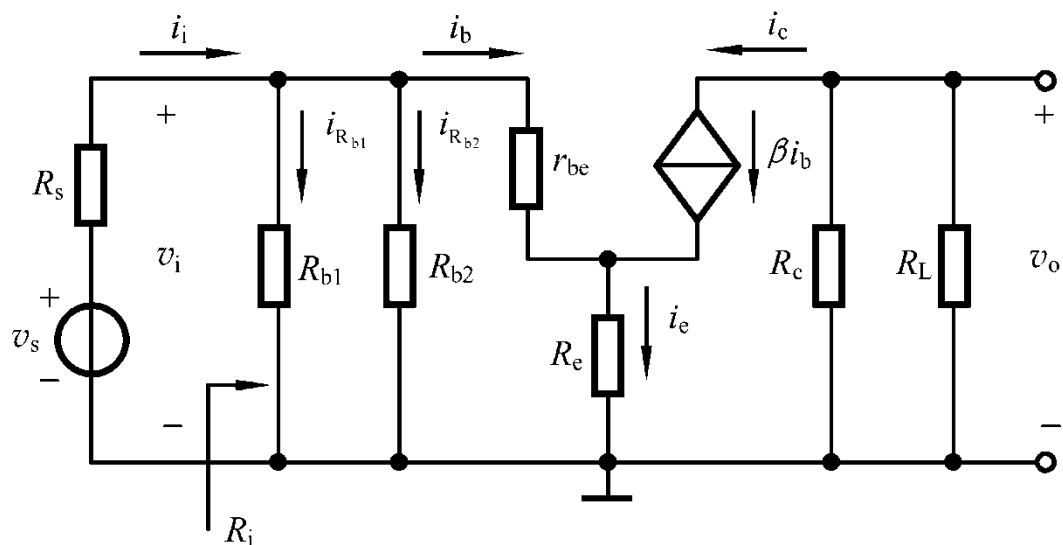
## (2) 放大电路指标分析

### ③输入电阻

根据定义  $R_i = \frac{v_i}{i_i}$

由电路列出方程

$$\begin{cases} i_i = i_{R_b} + i_b \\ i_{R_b} = i_{R_{b1}} + i_{R_{b2}} \\ v_i = i_{R_b} (R_{b1} \parallel R_{b2}) \\ v_i = i_b r_{be} + i_e R_e = i_b r_{be} + i_b (1 + \beta) R_e \end{cases}$$



则输入电阻  $R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$

**放大电路的输入电阻不包含信号源的内阻**





自学了解

## (2) 放大电路指标分析

### ④ 输出电阻

求输出电阻的等效电路

- 网络内独立源置零
- 负载开路
- 输出端口加测试电压

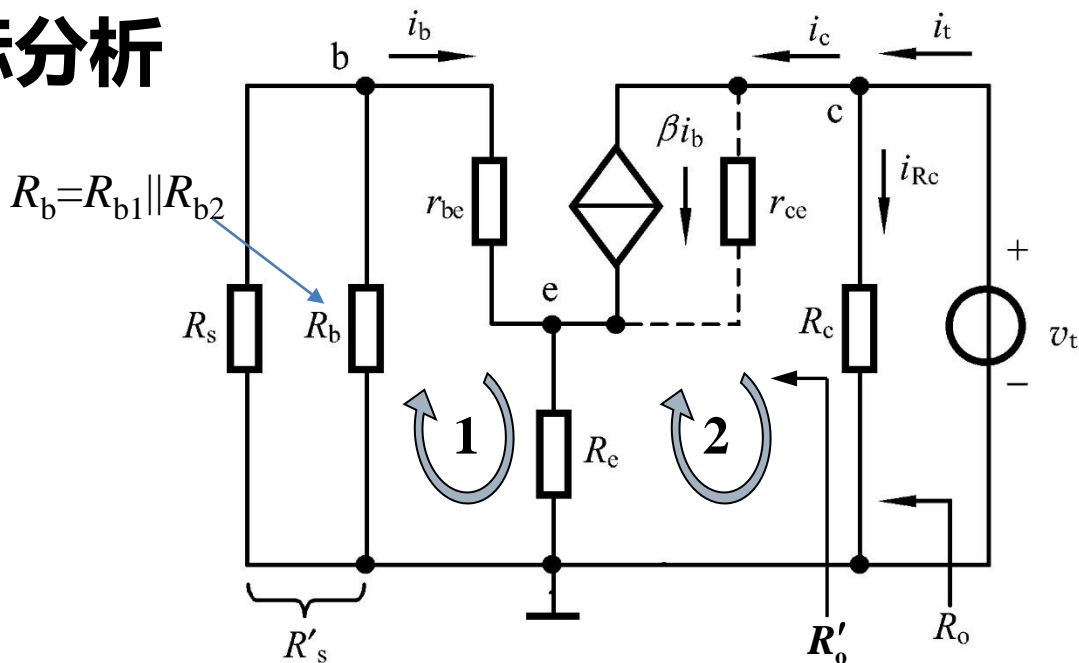
为便于分析考虑  $r_{ce}$  的影响

对回路1和2列KVL方程

$$\begin{cases} i_b(r_{be} + R'_s) + (i_b + i_c)R_e = 0 \\ v_t - (i_c - \beta i_b)r_{ce} - (i_c + i_b)R_e = 0 \end{cases}$$

$$\text{则 } R'_o = \frac{v_t}{i_c} = r_{ce} \left( 1 + \frac{\beta \cdot R_e}{r_{be} + R'_s + R_e} \right)$$

$$\text{其中 } R'_s = R_s \parallel R_{b1} \parallel R_{b2}$$



$$R_o = R_c \parallel R'_o$$

当  $R'_o \gg R_c$  时,

$$R_o \approx R_c$$

(一般  $R'_o > r_{ce} \gg R_c$ )



## 5.5 共集电极放大电路和共基极放大电路 自学了解

---

5.5.1 共集电极放大电路

5.5.2 共基极放大电路

5.5.3 BJT放大电路三种组态的比较



## 5.5.1 共集电极放大电路

自学了解

共集电极电路结构如图示

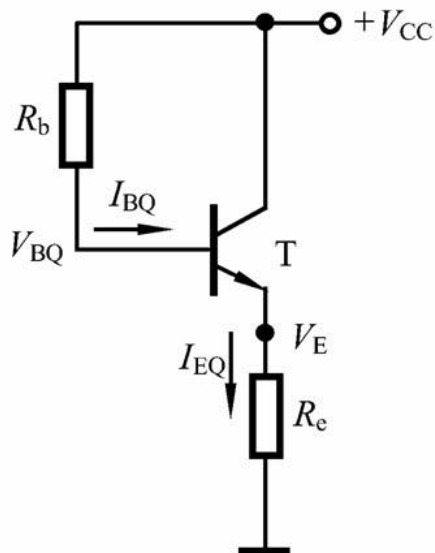
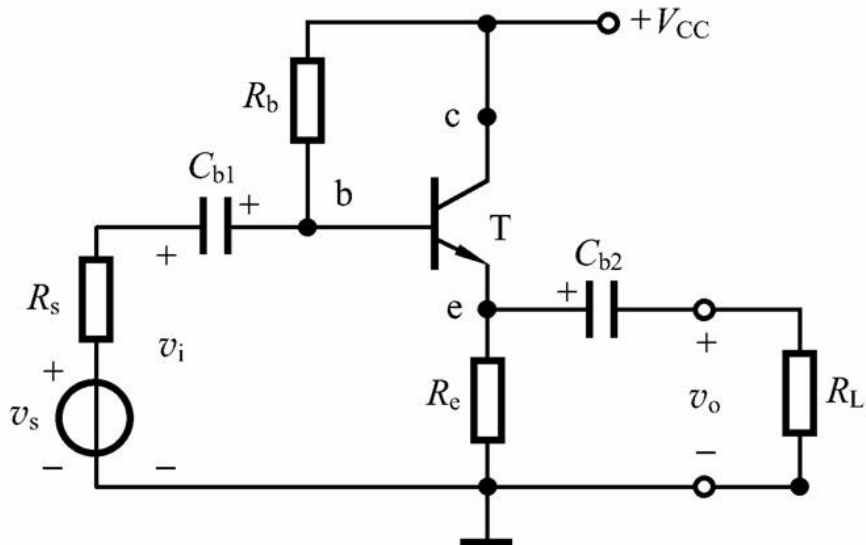
该电路也称为**射极输出器**

### 1. 静态分析

由 
$$\begin{cases} V_{CC} = I_{BQ} R_b + V_{BEQ} + I_{EQ} R_e \\ I_{EQ} = (1 + \beta) I_{BQ} \end{cases}$$

得 
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_e} \quad I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ} R_e \approx V_{CC} - I_{CQ} R_e$$



直流通路

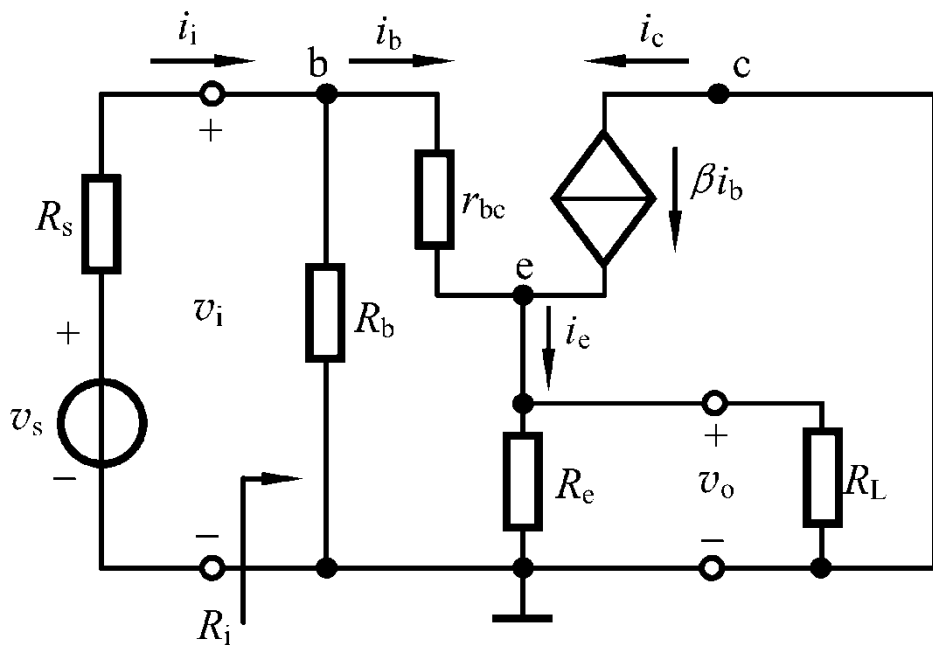
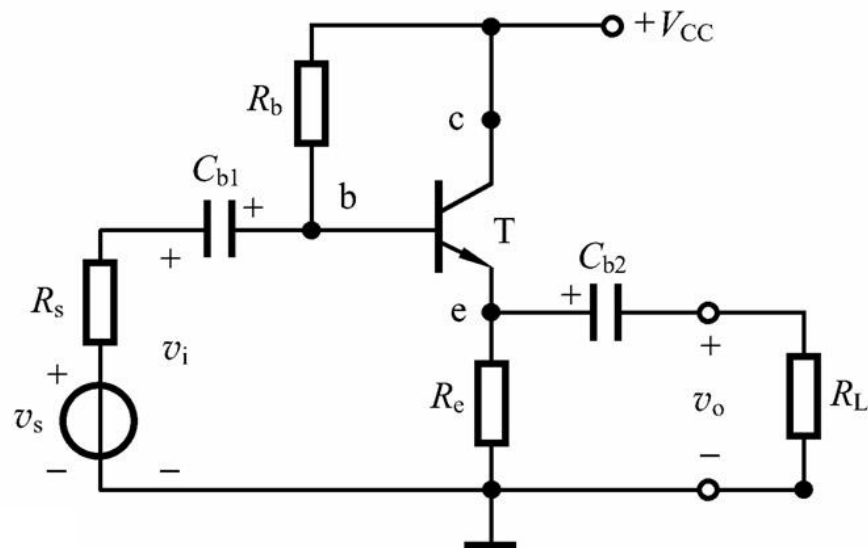


## 5.5.1 共集电极放大电路

自学了解

### 2.动态分析

#### ①小信号等效电路





## 5.5.1 共集电极放大电路

自学了解

### 2.动态分析

#### ②电压增益

输入回路:

$$\begin{aligned}v_i &= i_b r_{be} + (i_b + \beta i_b) R'_L \\ &= i_b r_{be} + i_b (1 + \beta) R'_L\end{aligned}$$

其中  $R'_L = R_e // R_L$

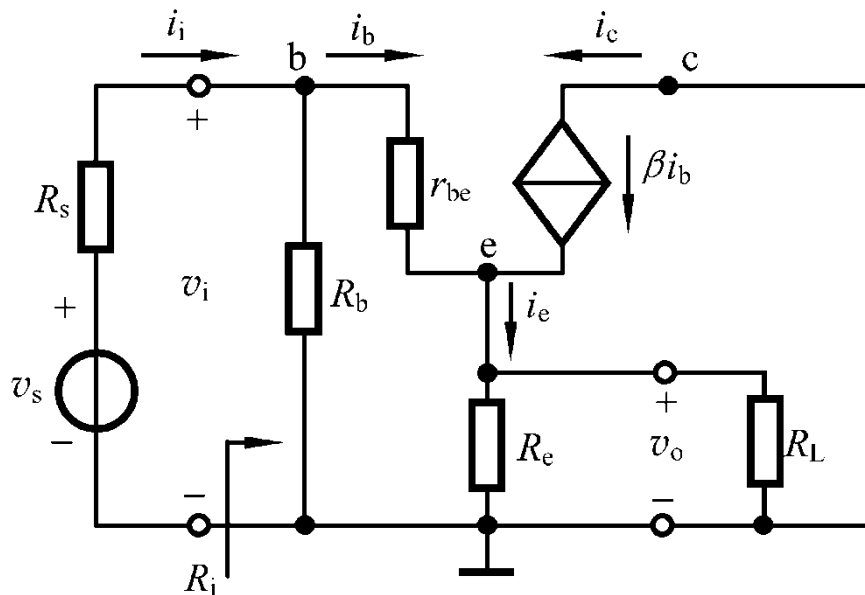
输出回路:  $v_o = (i_b + \beta \cdot i_b) R'_L = i_b (1 + \beta) R'_L$

电压增益:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_b (1 + \beta) R'_L}{i_b [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]} = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L} \approx \frac{\beta \cdot R'_L}{r_{be} + \beta \cdot R'_L} < 1$$

一般  $\beta \cdot R'_L \gg r_{be}$ , 则电压增益接近于1, 即  $A_v \approx 1$ 。  $v_o$  与  $v_i$  同相

电压跟随器





## 5.5.1 共集电极放大电路

自学了解

### 2.动态分析

#### ③输入电阻

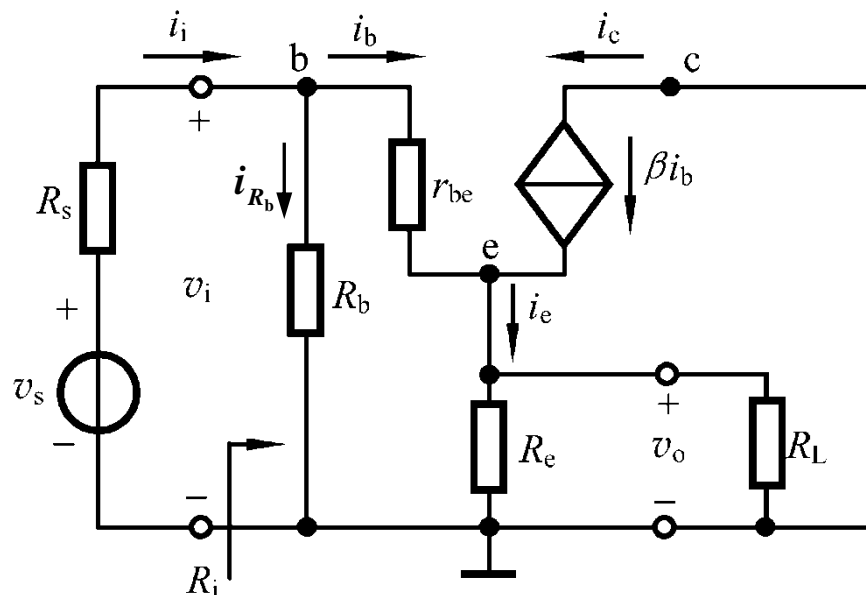
根据定义  $R_i = \frac{v_i}{i_i}$

由电路列出方程

$$\left\{ \begin{array}{l} i_i = i_{R_b} + i_b \\ v_T = i_{R_b} R_b \\ v_T = i_b r_{be} + i_b (1 + \beta) R'_L \\ R'_L = R_e \parallel R_L \end{array} \right.$$

则输入电阻  $R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_b \parallel [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]$

当  $\beta \gg 1$ ,  $\beta \cdot R'_L \gg r_{be}$  时,  $R_i \approx R_b \parallel \beta \cdot R'_L$  输入电阻大





## 5.5.1 共集电极放大电路

自学了解

### 2.动态分析

#### ④输出电阻

由电路列出方程

$$\begin{cases} i_t = i_b + \beta i_b + i_{R_e} \\ v_t = i_b (r_{be} + R'_s) \\ v_t = i_{R_e} R_e \end{cases}$$

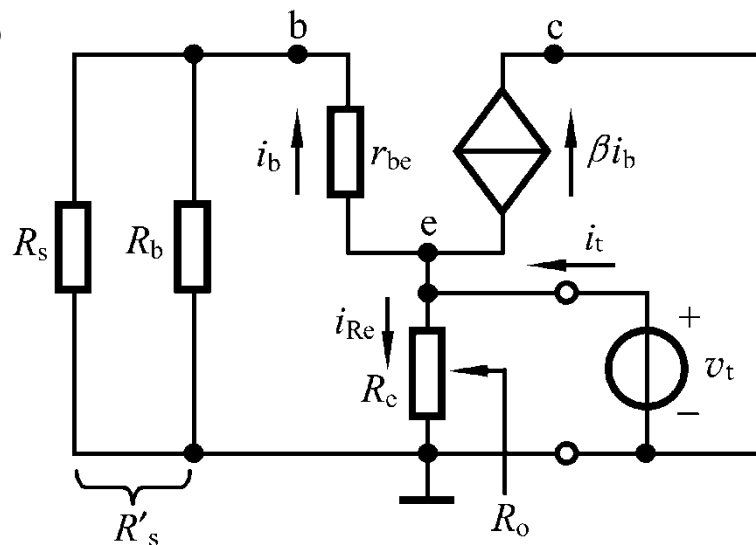
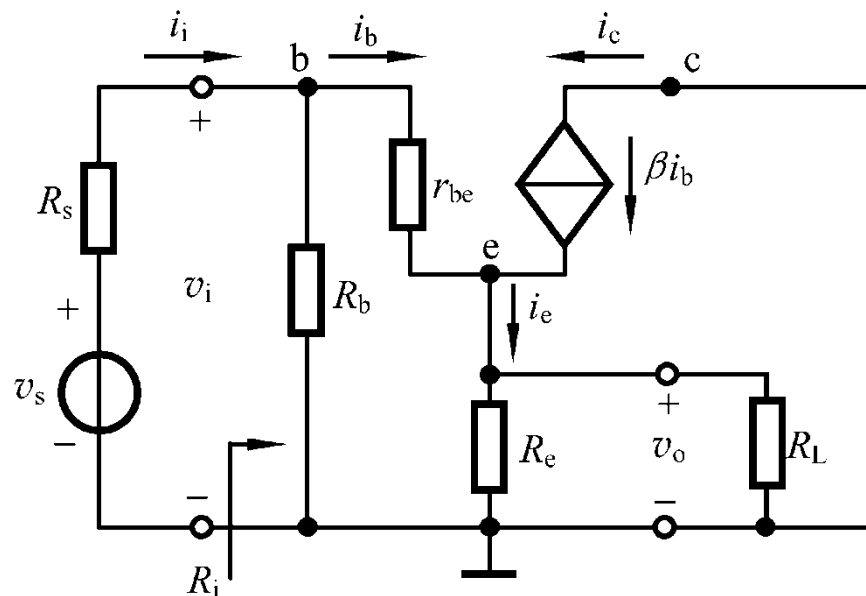
其中  $R'_s = R_s \parallel R_b$

则输出电阻  $R_o = \frac{v_t}{i_t} = R_e \parallel \frac{R'_s + r_{be}}{1 + \beta}$

当  $R_e \gg \frac{R'_s + r_{be}}{1 + \beta}$ ,  $\beta \gg 1$  时,

$$R_o \approx \frac{R'_s + r_{be}}{\beta}$$

输出电阻小





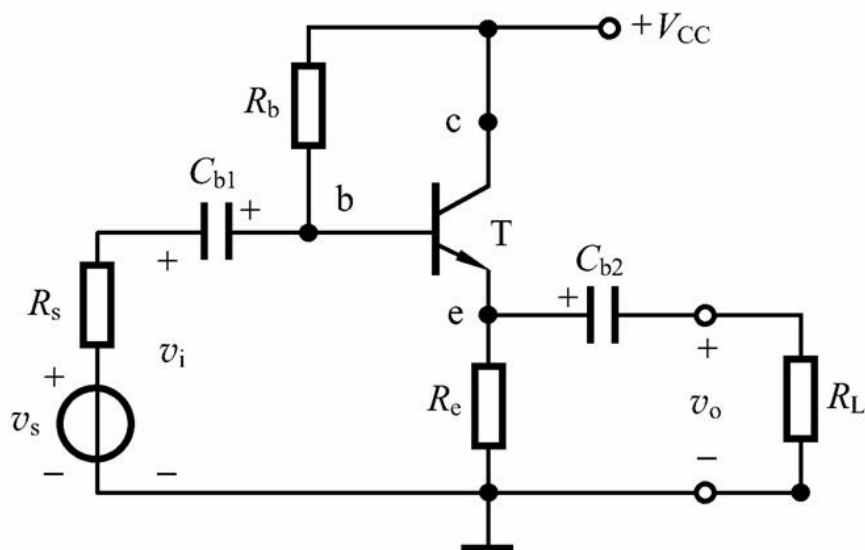
## 5.5.1 共集电极放大电路

自学了解

$$A_v \approx 1$$

$$R_i = R_b \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$$

$$R_o = R_e \parallel \frac{R'_s + r_{be}}{1 + \beta}$$



### 共集电极电路特点:

- ◆ 电压增益小于1但接近于1,  $\dot{V}_o$ 与 $\dot{V}_i$ 同相
- ◆ 输入电阻大, 对电压信号源衰减小
- ◆ 输出电阻小, 带负载能力强

# 既然共集电极电路的电压增益小于1（接近于1），那么它对电压放大没有任何作用。这种说法是否正确？





## 5.5.2 共基极放大电路

自学了解

### 1. 静态工作点

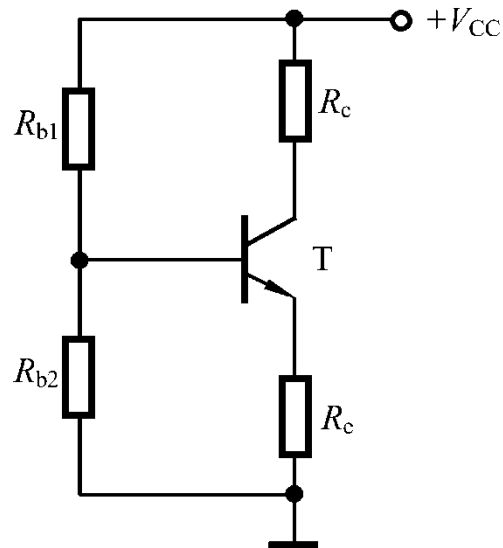
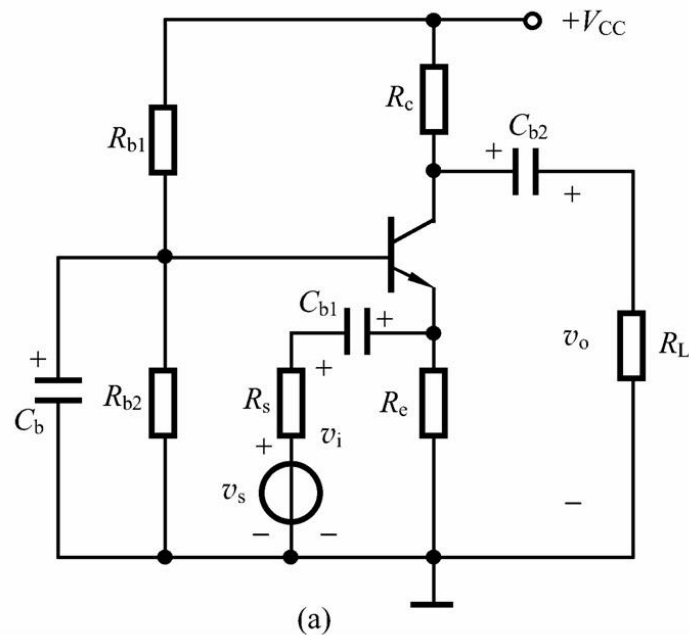
直流通路与射极偏置电路相同

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

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - V_{BEQ}}{R_e}$$

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

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

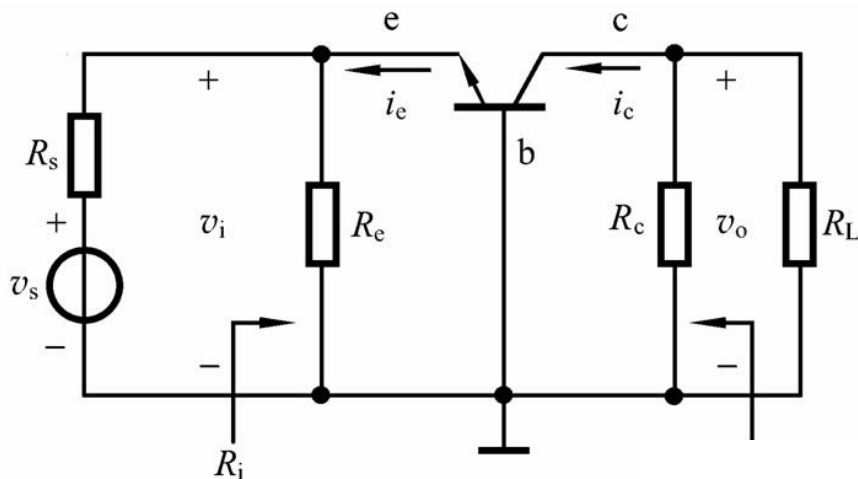




## 5.5.2 共基极放大电路

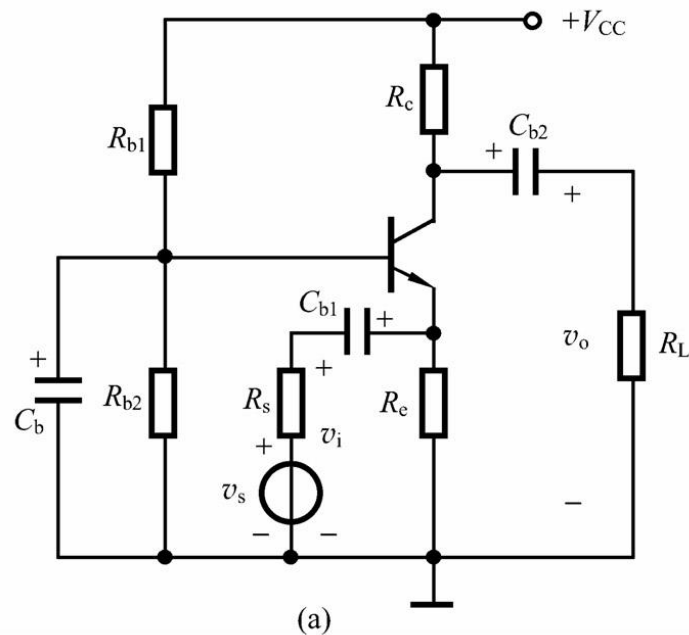
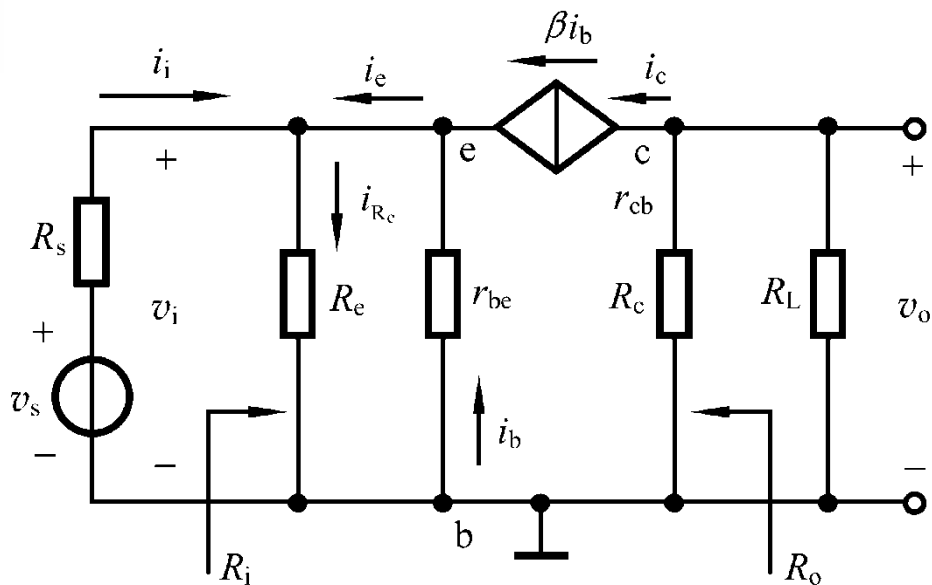
自学了解

### 2.动态指标



交流通路

小信号等效电路



(a)



## 5.5.2 共基极放大电路

自学了解

### 2.动态指标

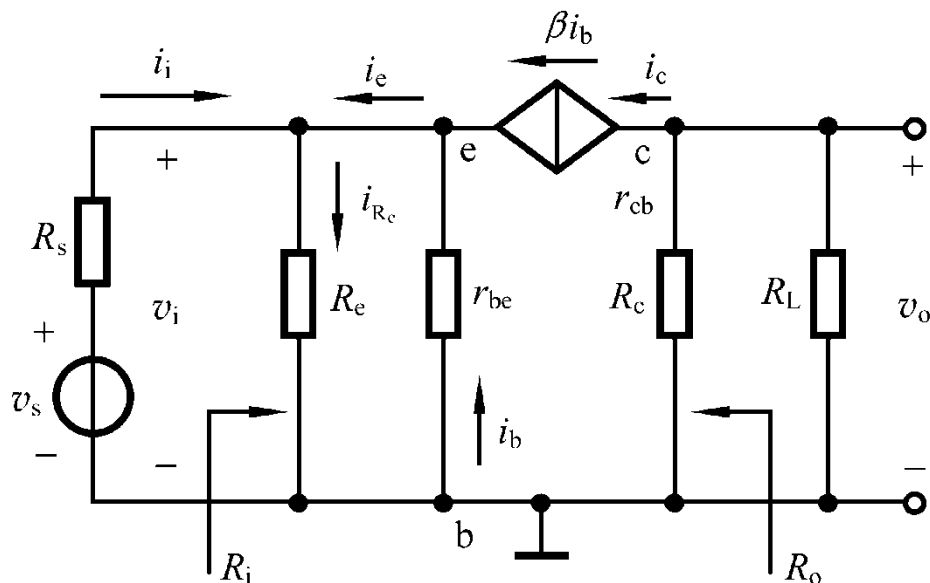
#### ①电压增益

输入回路:  $v_i = -i_b r_{be}$

输出回路:  $v_o = -\beta i_b R'_L$

电压增益:  $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$

$$R'_L = R_c \parallel R_L$$



#### ② 输入电阻

$$R'_i = r_{eb} = \frac{v_i}{-i_e}$$

$$= \frac{-i_b r_{be}}{-(1+\beta)i_b} = \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_e \parallel r_{eb} = R_e \parallel \frac{r_{be}}{1+\beta} \approx \frac{r_{be}}{1+\beta}$$



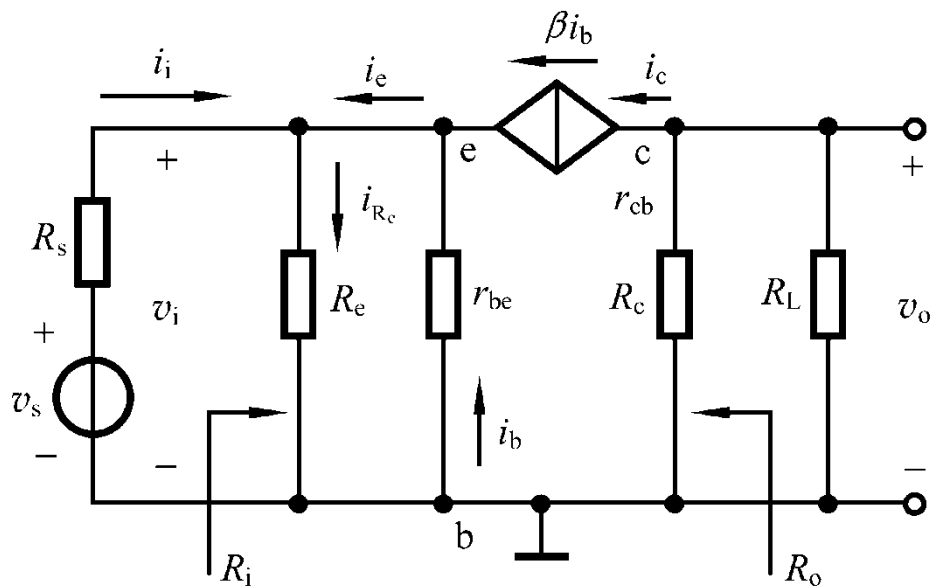
## 5.5.2 共基极放大电路

自学了解

### 2.动态指标

#### ③ 输出电阻

$$R_o \approx R_c$$



# 共基极电路的输入电阻很小，最适合用来放大何种信号源的信号？



## 5.5.3 BJT放大电路三种组态的比较

自学了解

	共射极电路	共集电极电路	共基极电路
电路图			
电压增益 $A_v$	$A_v = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$ $(R'_L = R_c \parallel R_L)$	$A_v = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L}$ $(R'_L = R_e \parallel R_L)$	$A_v = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$ $(R'_L = R_c \parallel R_L)$
$v_o$ 与 $v_i$ 的相位关系	反相	同相	同相
最大电流增益 $A_i$	$A_i \approx \beta$	$A_i \approx 1 + \beta$	$A_i \approx \alpha$
输入电阻	$R_i = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R_e]$	$R_i = R_b \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$	$R_i = R_e \parallel \frac{r_{be}}{1 + \beta}$
输出电阻	$R_o \approx R_c$	$R_o = \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta} \parallel R_e$ ( $R'_s = R_s \parallel R_b$ )	$R_o \approx R_c$
用途	多级放大电路的中间级	输入级、中间级、输出级	高频或宽频带电路



## 5.5.3 BJT放大电路三种组态的比较

自学了解

### 三种组态的特点及用途

#### 共射极放大电路：

电压和电流增益都大于1，输入电阻在三种组态中居中，输出电阻与集电极电阻有很大关系。适用于低频情况下，作多级放大电路的中间级。

#### 共集电极放大电路：

只有电流放大作用，没有电压放大，有电压跟随作用。在三种组态中，输入电阻最大，输出电阻最小，频率特性好。可用于输入级、输出级或缓冲级。

#### 共基极放大电路：

只有电压放大作用，没有电流放大，有电流跟随作用，输入电阻小，输出电阻与集电极电阻有关。高频特性较好，常用于高频或宽频带低输入阻抗的场合，模拟集成电路中亦兼有电位移动的功能。



## 5.7 多级放大电路(了解)

---

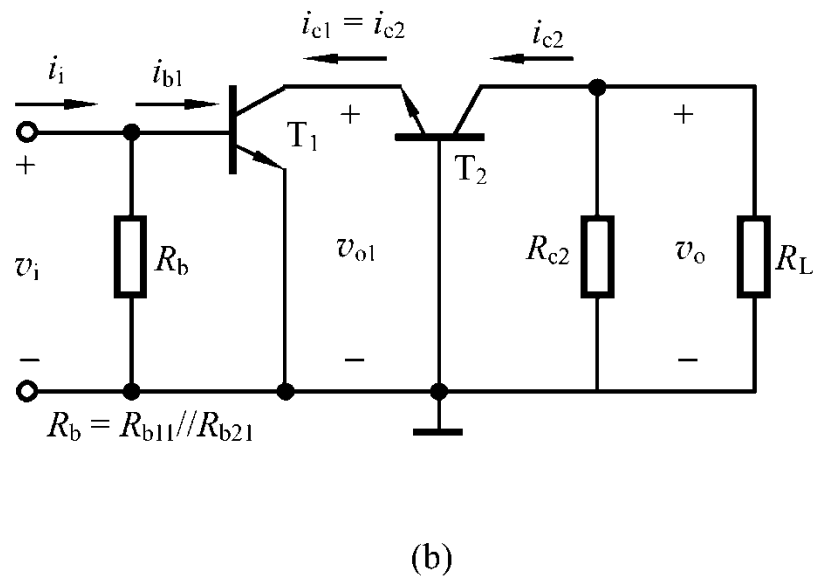
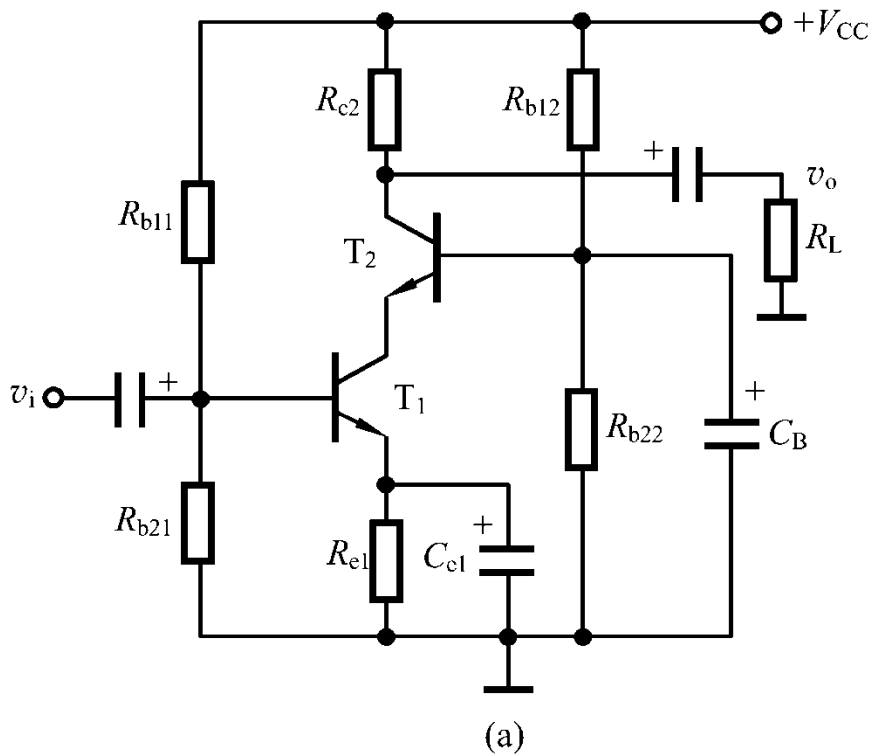
5.7.1 共射-共基放大电路

5.7.2 共集-共集放大电路



## 5.7.1 共射-共基放大电路

了解



共射 - 共基放大电路





## 5.7.1 共射-共基放大电路

了解

### 电压增益

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_{o1}}{v_i} \cdot \frac{v_o}{v_{o1}} = A_{v1} \cdot A_{v2}$$

其中

$$A_{v1} = -\frac{\beta_1 R'_L}{r_{be1}} = -\frac{\beta_1 r_{be2}}{r_{be1}(1 + \beta_2)}$$

$$A_{v2} = \frac{\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}} = \frac{\beta_2 (R_{c2} \parallel R_L)}{r_{be2}}$$

所以

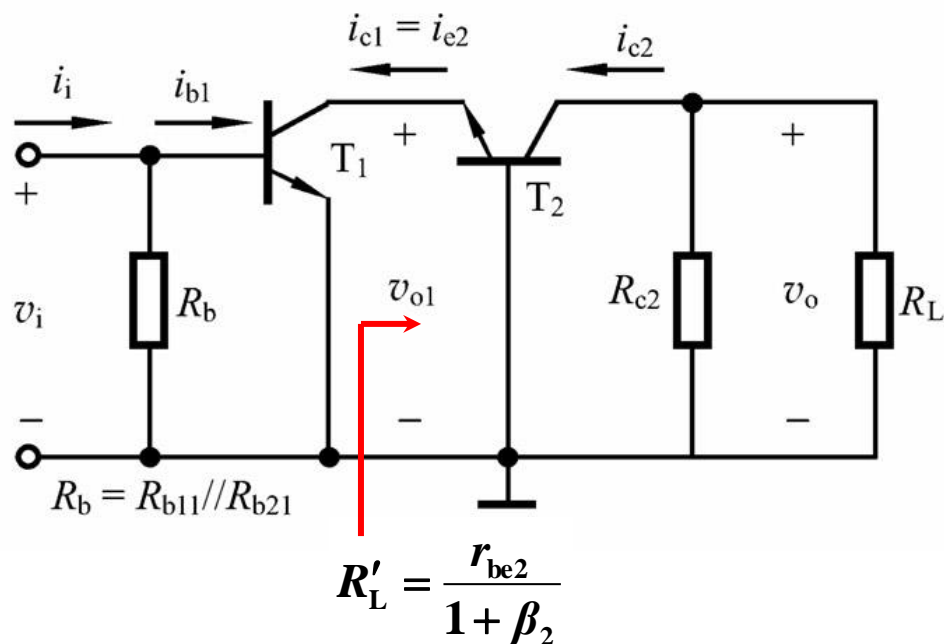
$$A_v = -\frac{\beta_1 r_{be2}}{(1 + \beta_2) r_{be1}} \cdot \frac{\beta_2 (R_{c2} \parallel R_L)}{r_{be2}}$$

因为

$$\beta_2 \gg 1$$

因此

$$A_v = -\frac{\beta_1 (R_{c2} \parallel R_L)}{r_{be1}}$$



组合放大电路总的电压增益等于组成它的各级单管放大电路电压增益的乘积。

前一级的输出电压是后一级的输入电压，后一级的输入电阻是前一级的负载电阻。



## 5.7.1 共射-共基放大电路

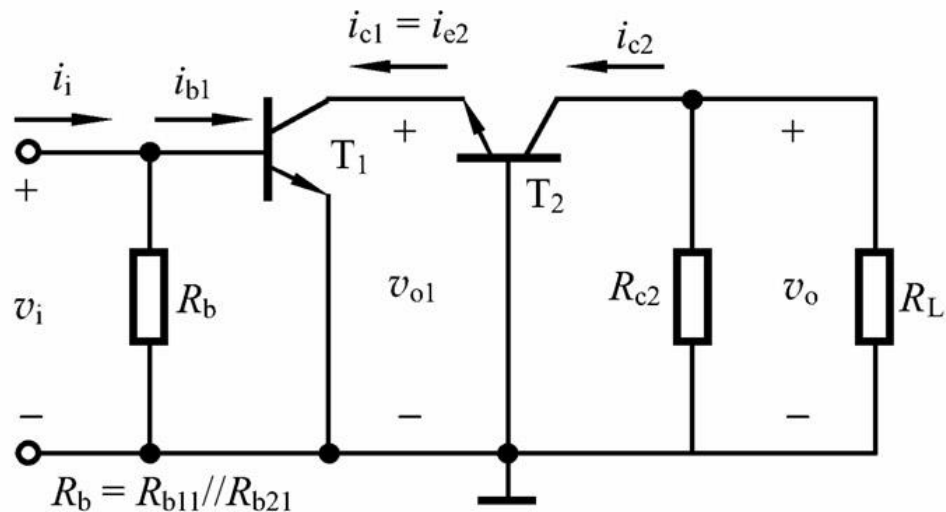
了解

### 输入电阻

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_b \parallel r_{be1} = R_{b11} \parallel R_{b21} \parallel r_{be1}$$

### 输出电阻

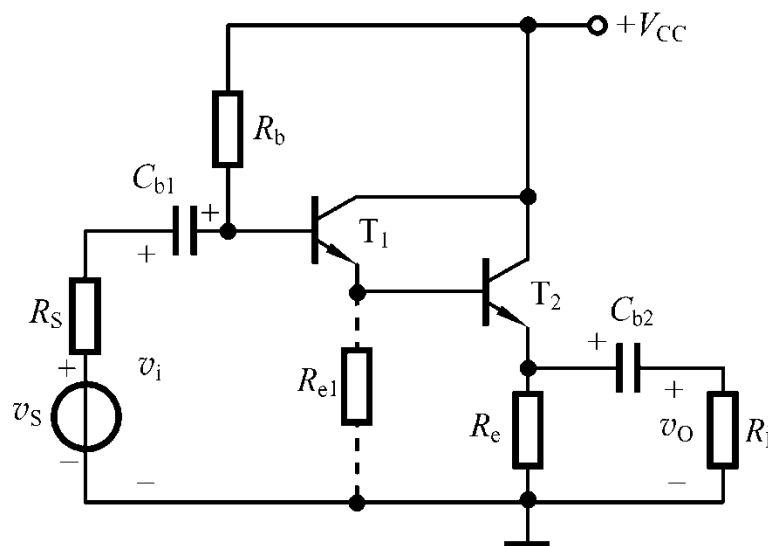
$$R_o \approx R_{c2}$$





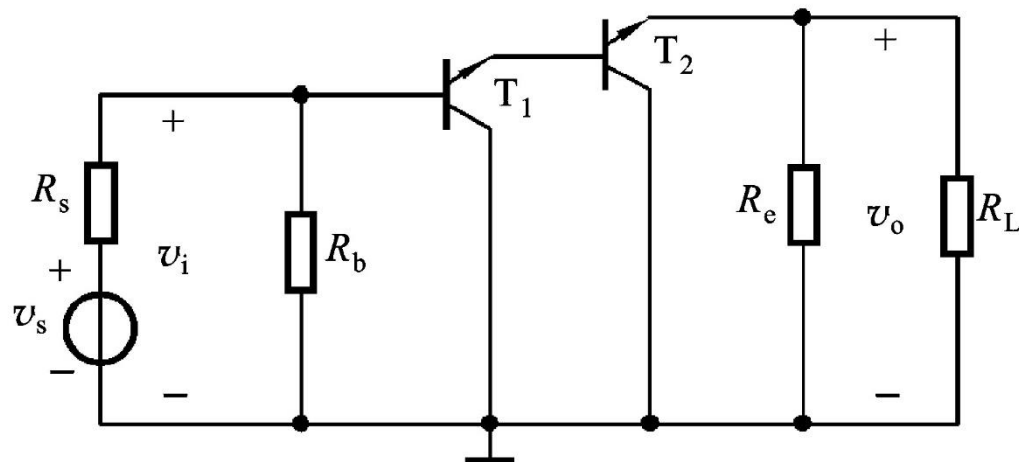
## 5.7.2 共集-共集放大电路

了解



(a)

(a) 原理图



(b)

(b) 交流通路

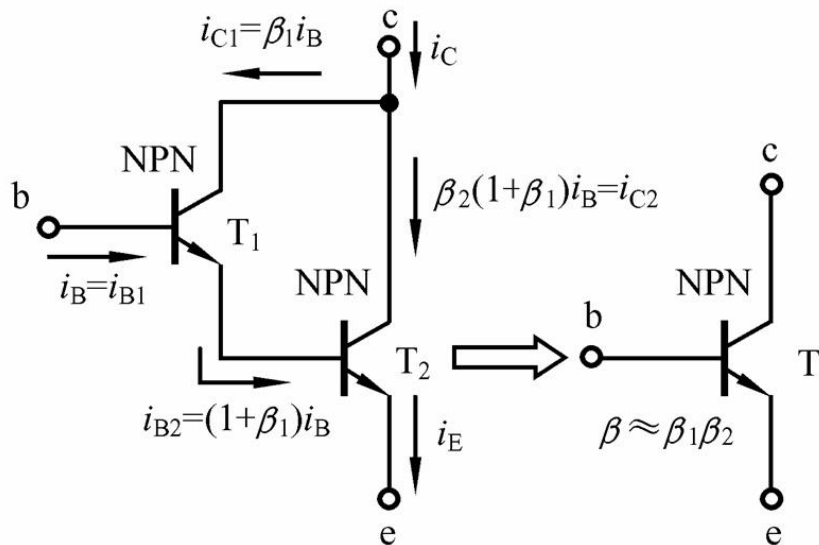
**$T_1$ 、 $T_2$ 构成复合管，可等效为一个NPN管**



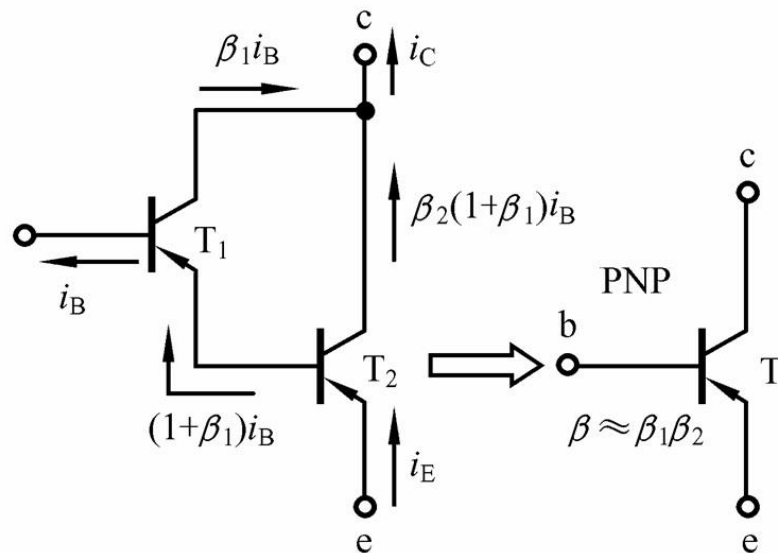
## 5.7.2 共集-共集放大电路

了解

### 1. 复合管的主要特性



两只NPN型BJT组成的复合管



两只PNP型BJT组成的复合管

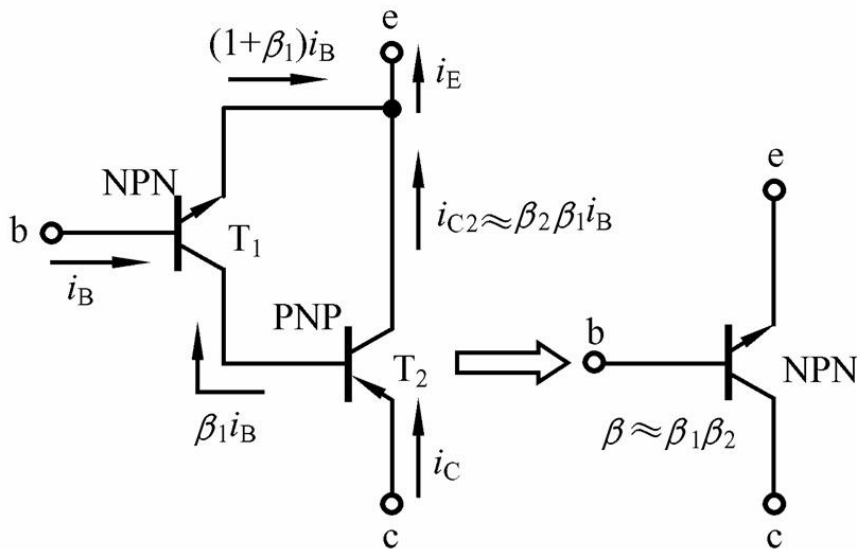
$$r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}$$



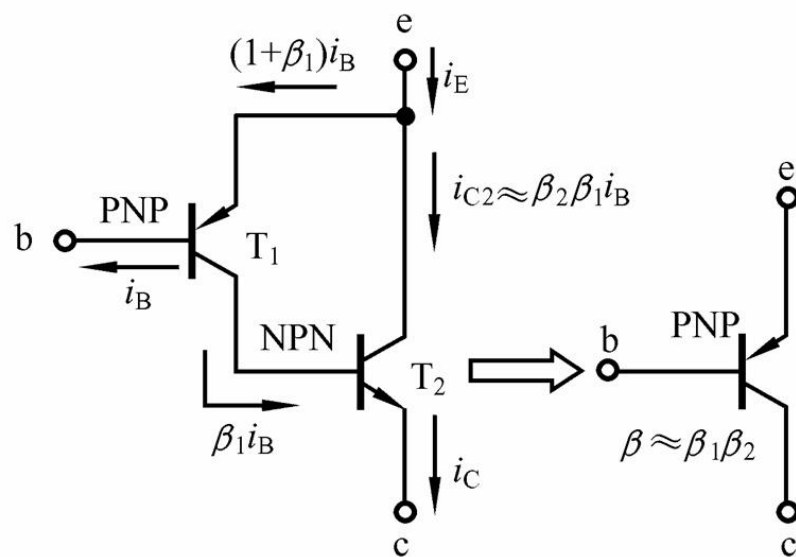
## 5.7.2 共集-共集放大电路

了解

### 1. 复合管的主要特性



NPN与PNP型BJT组成的复合管



PNP与NPN型BJT组成的复合管

$$r_{be} = r_{be1}$$