

第3章 分立元件基本电路

3.1 共发射极放大电路

3.2 共集电极放大电路

3.3 共源极放大电路

3.4 分立元件组成的基本门电路





3.1 共发射极放大电路

3.1.1 电路组成

3.1.2 静态分析

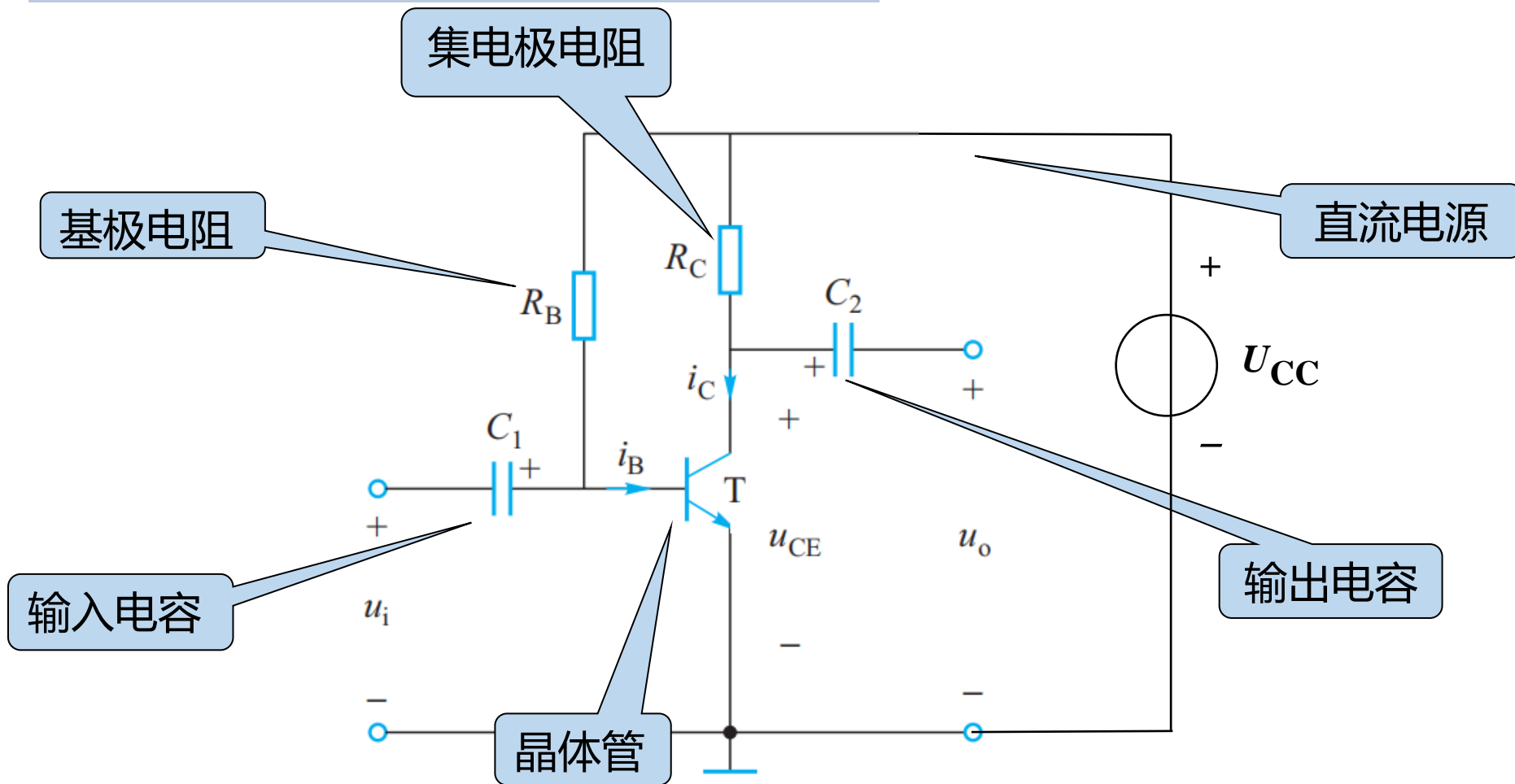
3.1.3 动态分析

3.1.4 静态工作点的稳定

3.1.5 频率特性



3.1.1 电路组成





3.1.1 电路组成

各元件的作用

- 晶体管：电流放大作用，发射结正偏，集电结反偏；
- 直流电源 U_{CC} ：提供放大所需的能量；
- 偏置电阻 R_B ：调节 R_B ，可调节基极电流；
- 集电极负载电阻 R_C ：将集电极电流的变化转换成电压的变化送到输出端；
- 耦合电容 C_1 、 C_2 ：隔直，不适用于低频电路。



3.1.2 静态分析

所谓**静态**是指当放大器没有输入信号 ($u_i = 0$) 时, 电路中各处的电压电流都是直流恒定值, 亦称为**直流工作状态**。

静态分析目的: 1) 确定三极管工作状态

2) 确定三极管静态工作点的合理性

静态分析内容: 在直流电源作用下, 确定三极管

1) 基极电流 I_B ;

2) 集电极电流 I_C ;

3) 集电极与发射极之间的电压值 U_{CE} 。

静态分析方法: 1) 图解法;

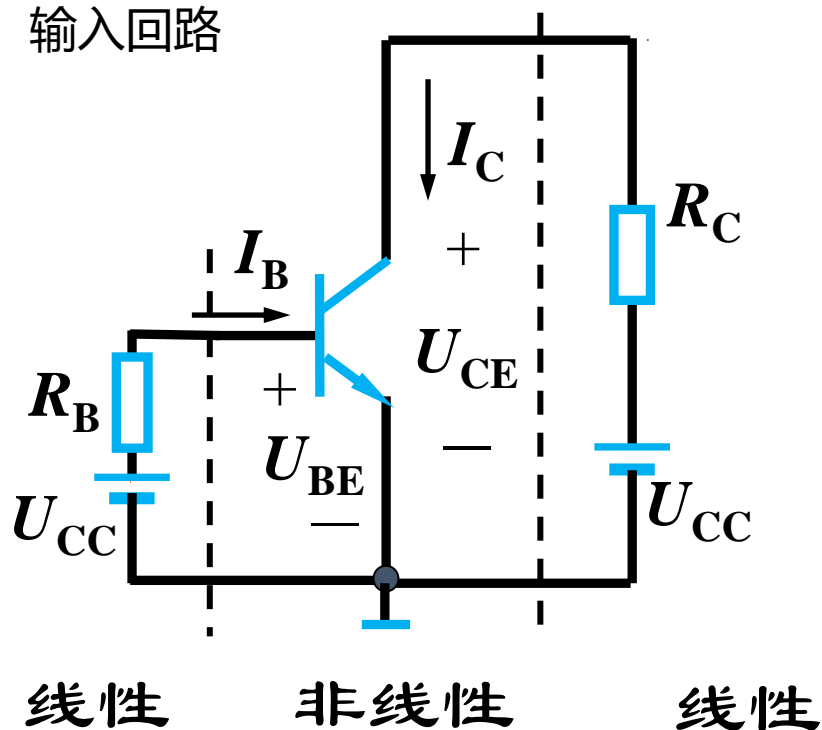
2) 估算法。



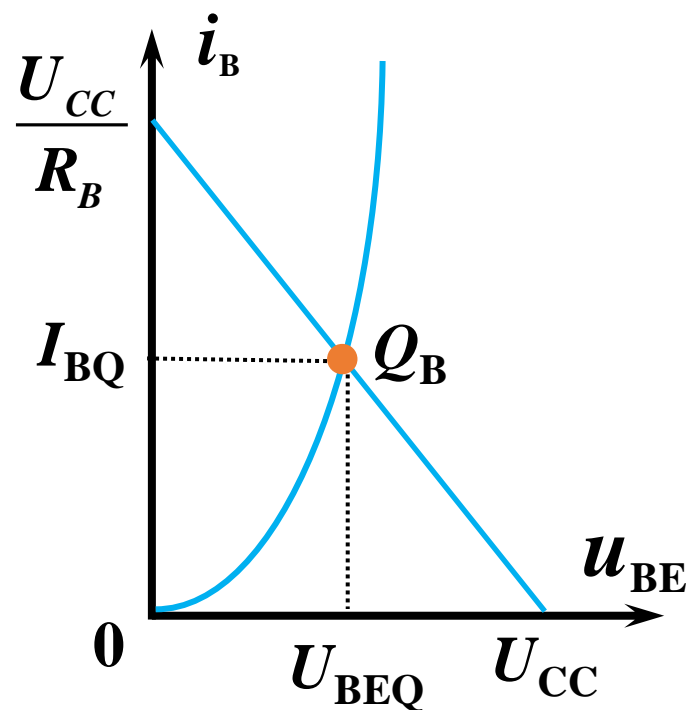
3.1.2 静态分析

1) 图解法

输入回路



$$U_{BE} = U_{CC} - R_B I_B$$



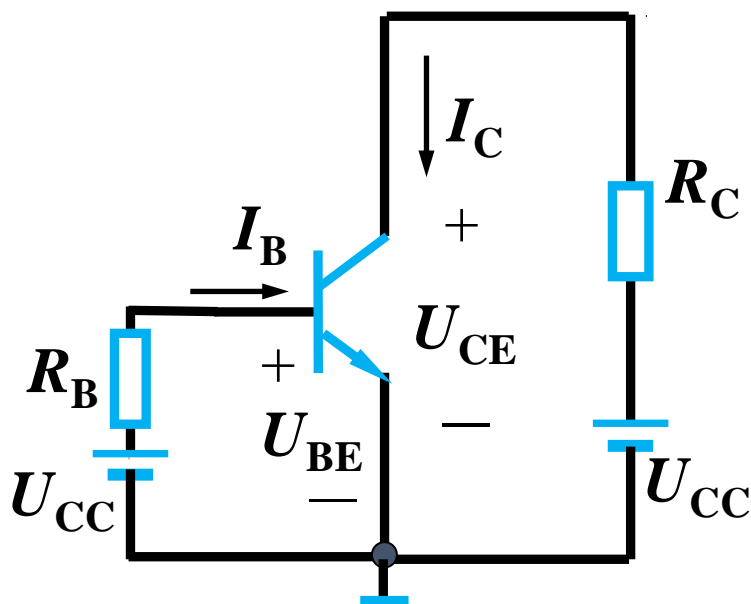
$$i_B = f(u_{BE})$$



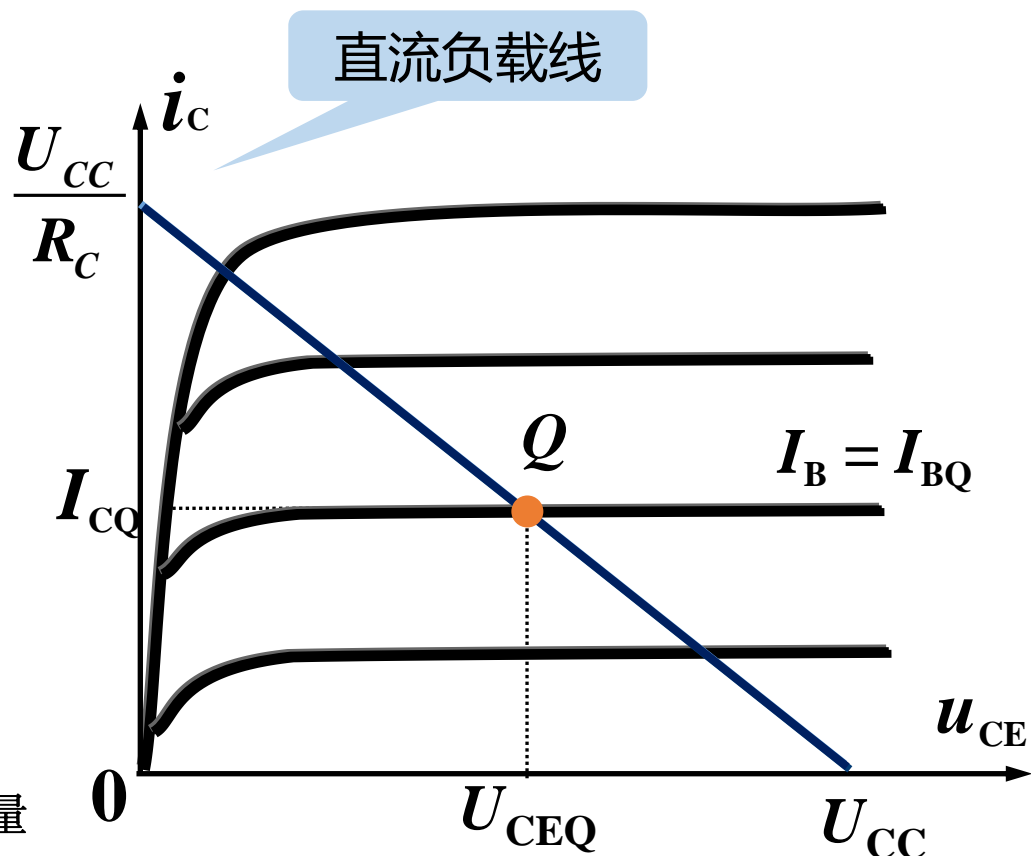
3.1.2 静态分析

1) 图解法

输出回路

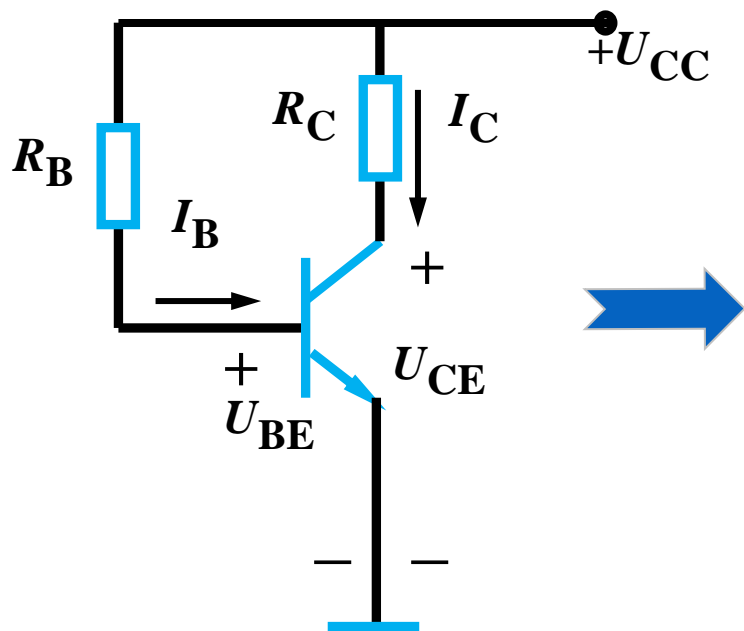


$$\begin{cases} I_C = f(U_{CE}) \mid I_B = \text{常量} \\ U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C \end{cases}$$



3.1.2 静态分析

2) 估算法



直流通路

$$\begin{cases} U_{CC} = R_B I_B + U_{BE} \\ U_{CC} = U_{CE} + R_C I_C \end{cases}$$



$$\begin{cases} I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} \\ I_C = \beta I_B \\ U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C \end{cases}$$



3.1.3 动态分析

所谓动态是指放大电路有信号输入时，电路中各处的电压电流都处于变动工作状态。

动态分析内容：输入信号变化时，电路中各种变化量的变动情况和相互关系。

- 1) 电压放大倍数 A_U ;
- 2) 输入电阻 r_i ;
- 3) 输出电阻 r_o 。

动态分析方法：1) 图解法；
2) 微变等效电路分析方法。



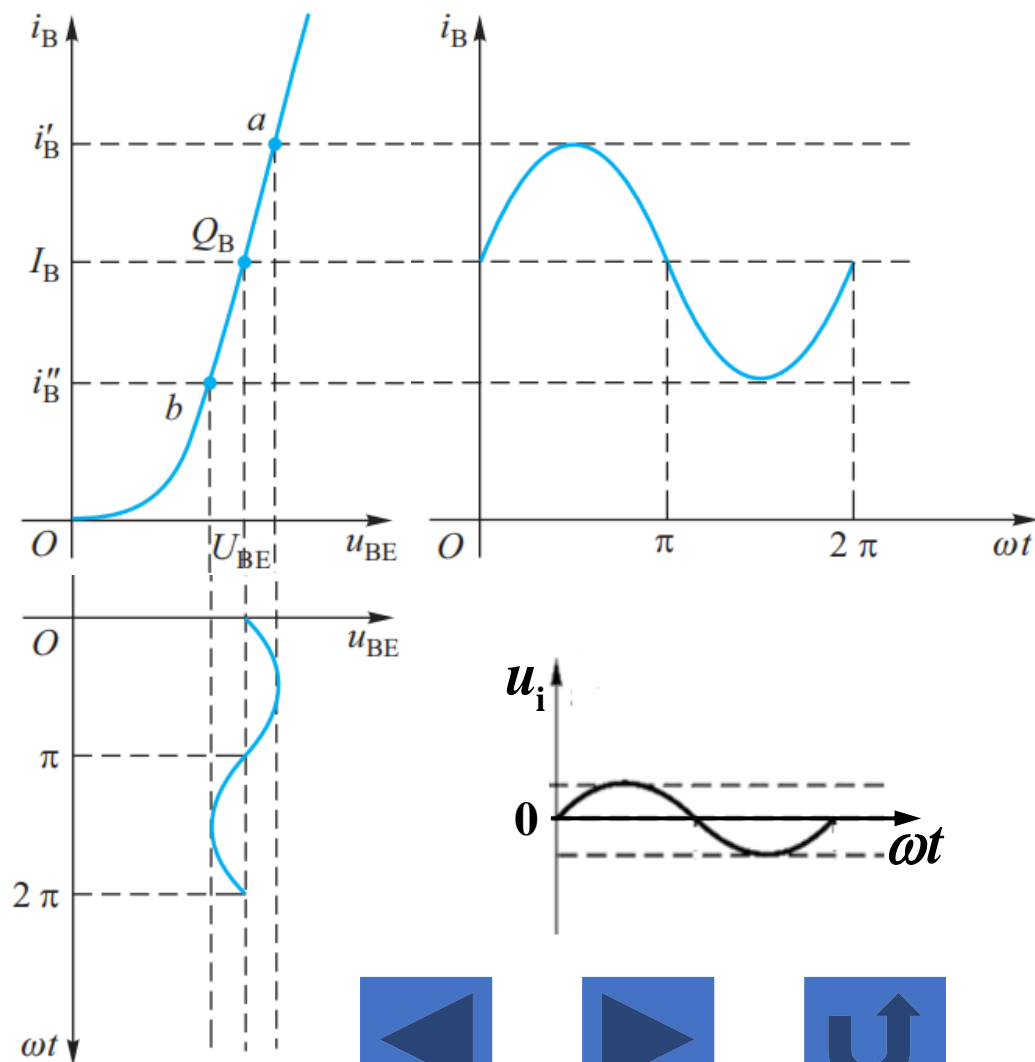
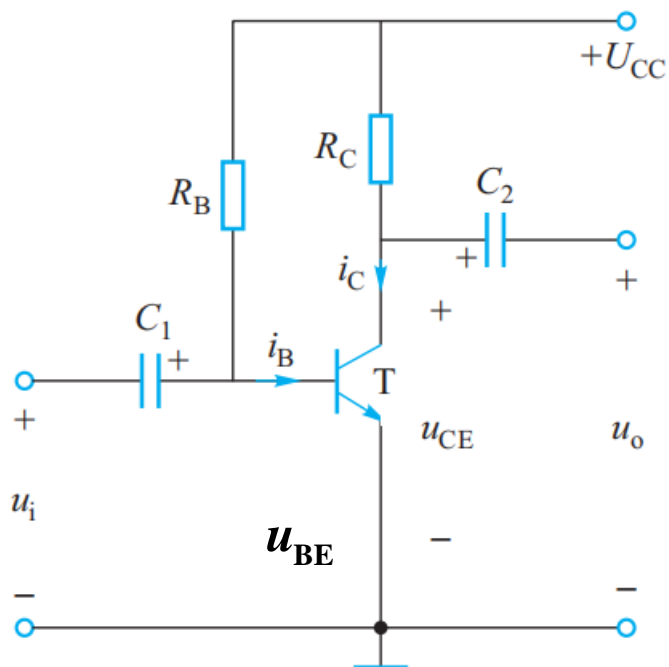
3.1.3 动态分析

1) 图解法

输入电路

$$u_{BE} = U_{BE} + u_i$$

$$i_B = I_B + i_b$$



3.1.3 动态分析

1) 图解法

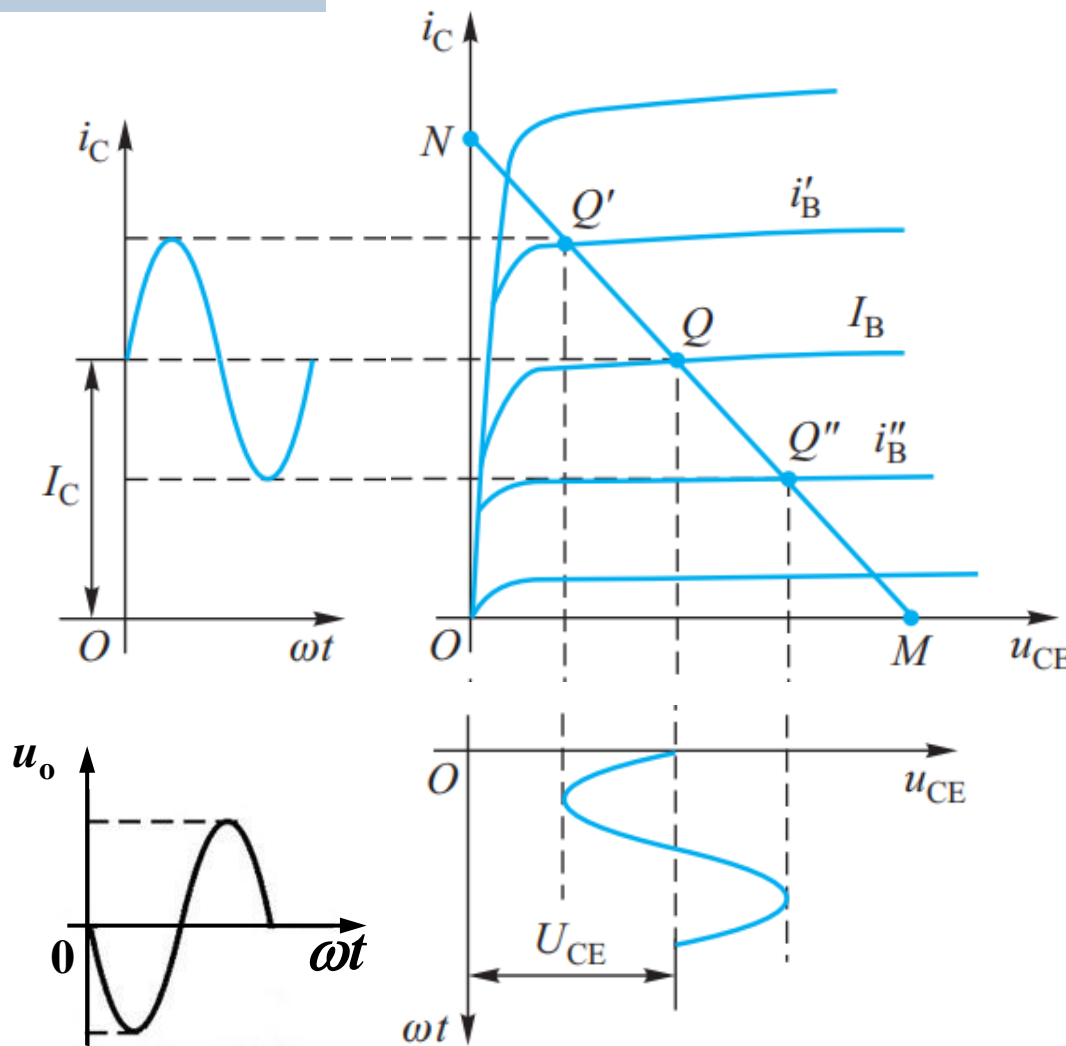
输出电路

$$\begin{aligned} i_C &= \beta i_B = \beta I_B + \beta i_b \\ &= I_C + i_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{CE} &= U_{CC} - R_C i_C \\ &= (U_{CC} - R_C I_C) - R_C i_c \\ &= U_{CE} + u_{ce} \end{aligned}$$

经电容隔直后:

$$\begin{aligned} u_o &= u_{CE} - U_{CE} \\ &= u_{ce} \end{aligned}$$

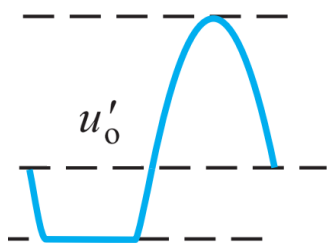
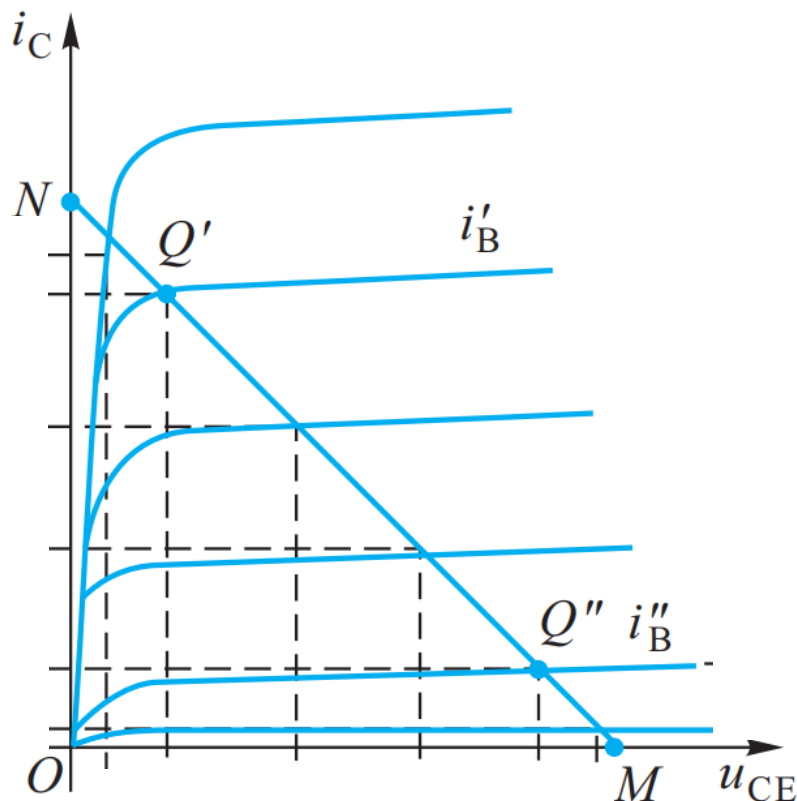


3.1.3 动态分析

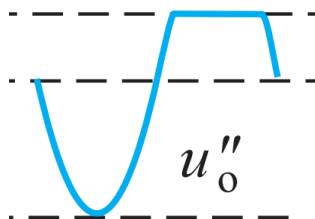
工作点与
波形失真

Q点过高
饱和失真

Q点过低
截止失真



饱和失真



截止失真

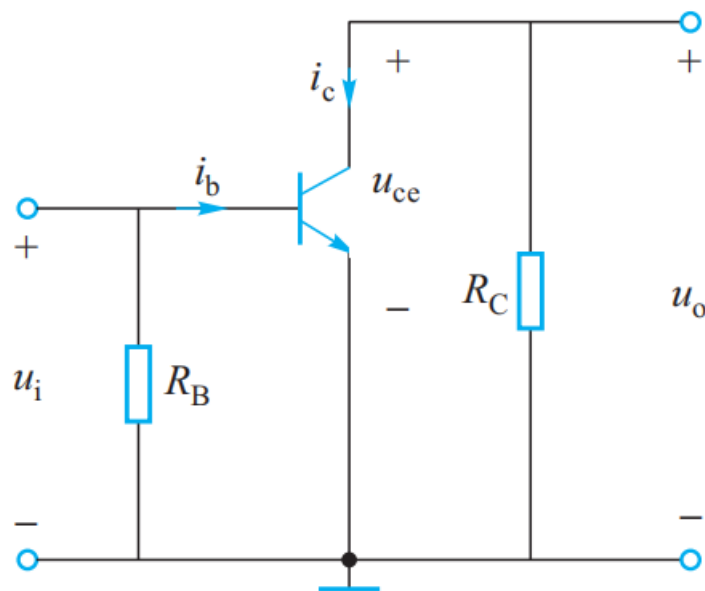
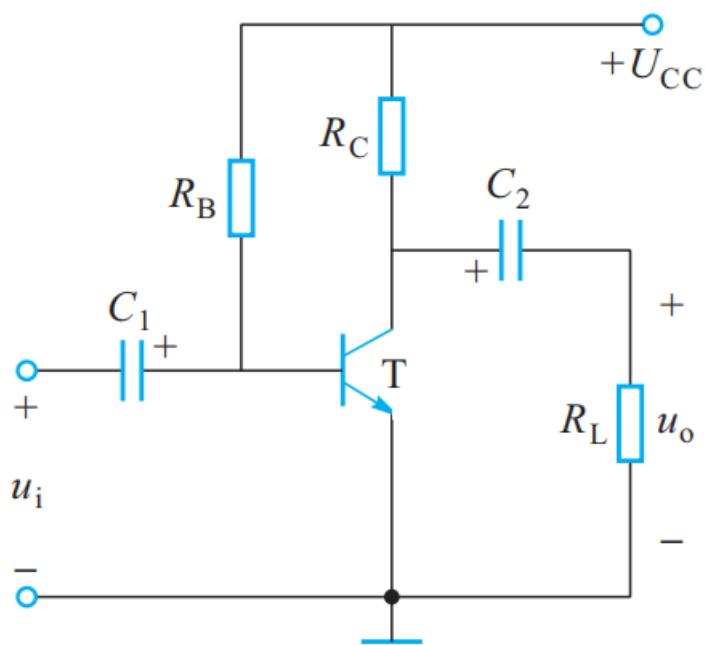


3.1.3 动态分析

2) 微变等效电路分析法

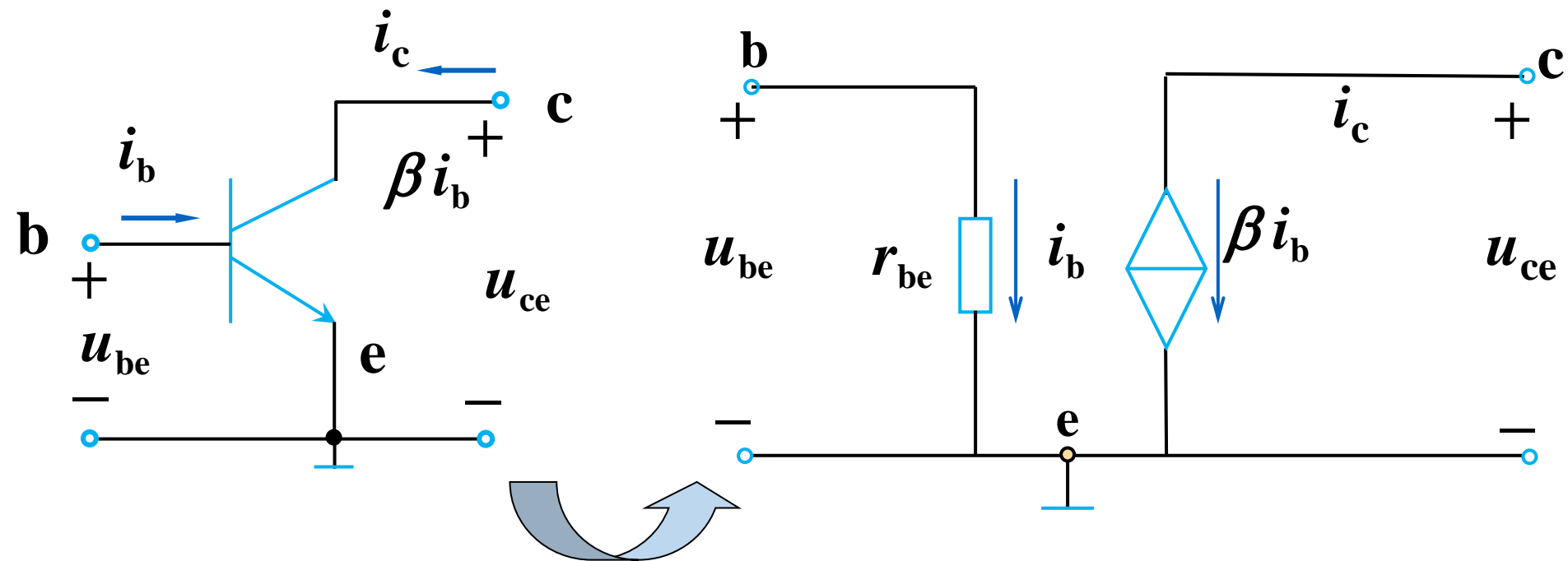
交流通路

交流通路：将电路中的电容和直流电源短路。



3.1.3 动态分析

晶体管的小信号模型

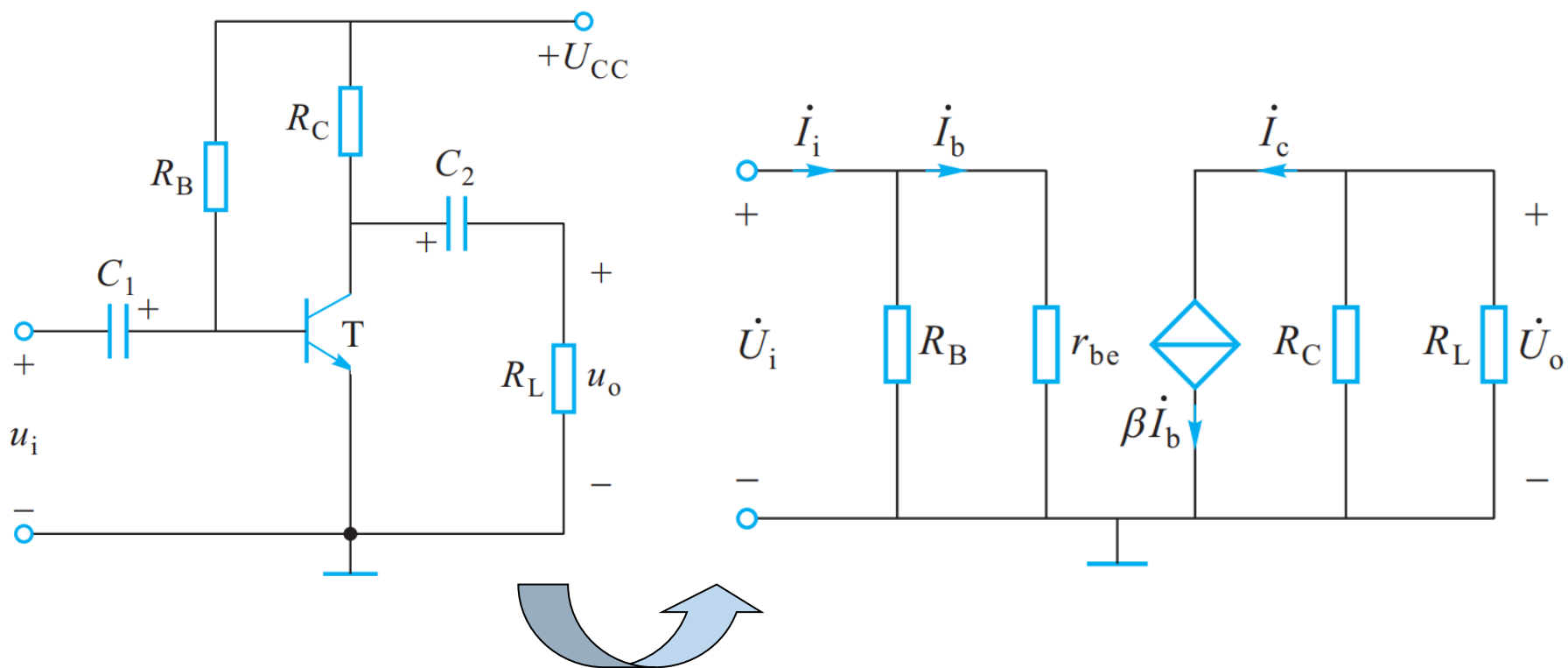


微变等效电路：将晶体管用小信号模型来代替。



3.1.3 动态分析

微变等效电路



3.1.3 动态分析

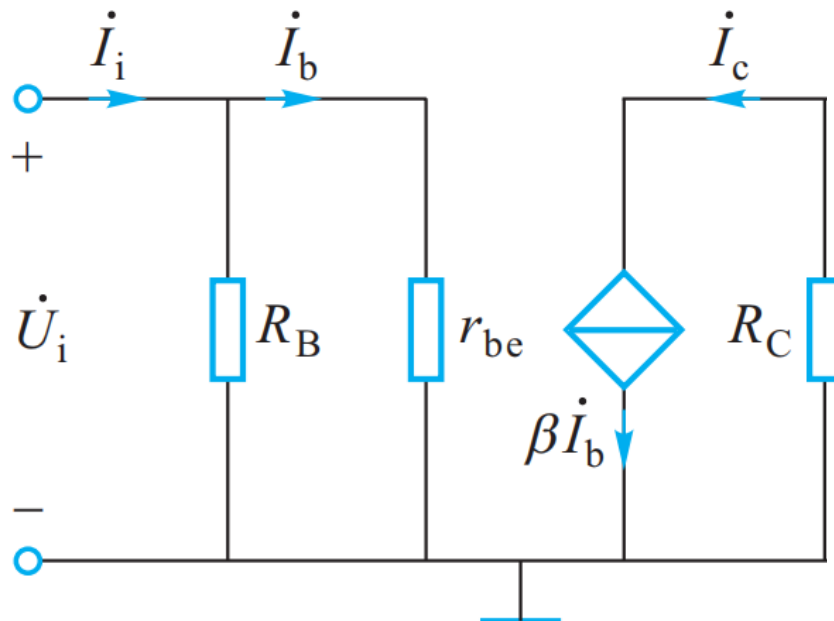
(1) 电压放大倍数

不带负载时

$$\dot{U}_i = r_{be} \dot{I}_b$$

$$\dot{U}_o = -\beta R_C \dot{I}_b$$

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\beta \frac{R_C}{r_{be}}$$



上式说明，选择适当的参数，可使信号得到放大。

A_u 为负值，说明输出信号与输入信号反相，即共射极放大电路具有倒相作用。

$$\text{带负载时 } A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b (R_C // R_L)}{r_{be} \dot{I}_b} = -\beta \frac{(R_C // R_L)}{r_{be}}$$

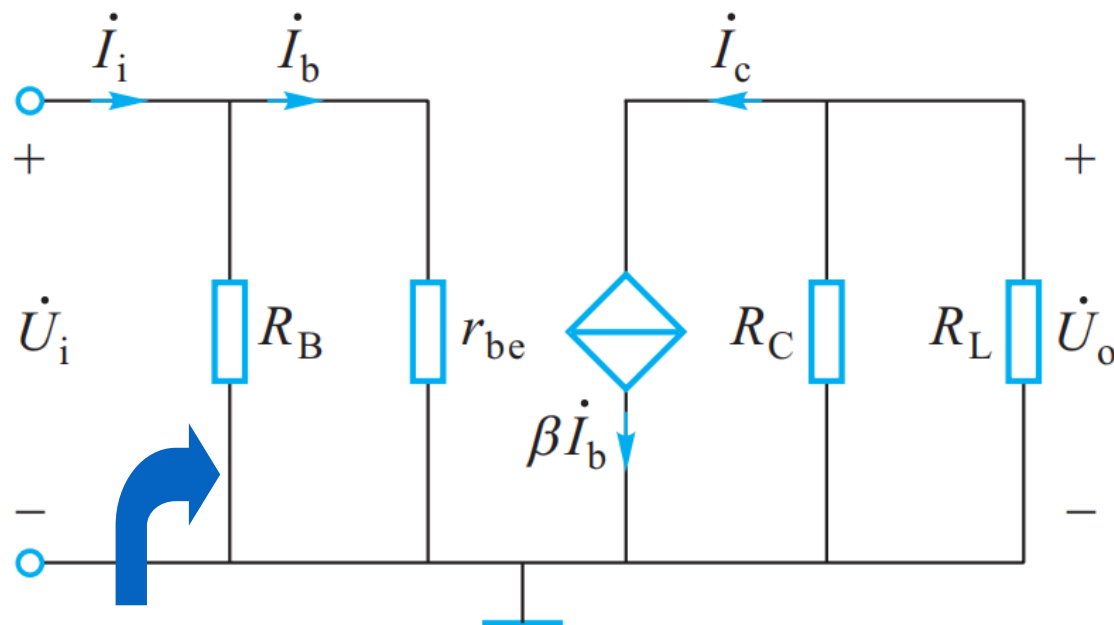
可见带负载使放大倍数下降。



3.1.3 动态分析

(2) 输入电阻

对信号源而言，放大电路相当于它的负载，负载电阻即为放大电路的输入电阻。



放大电路的输入电阻：

$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

根据以上的微变等效电路：

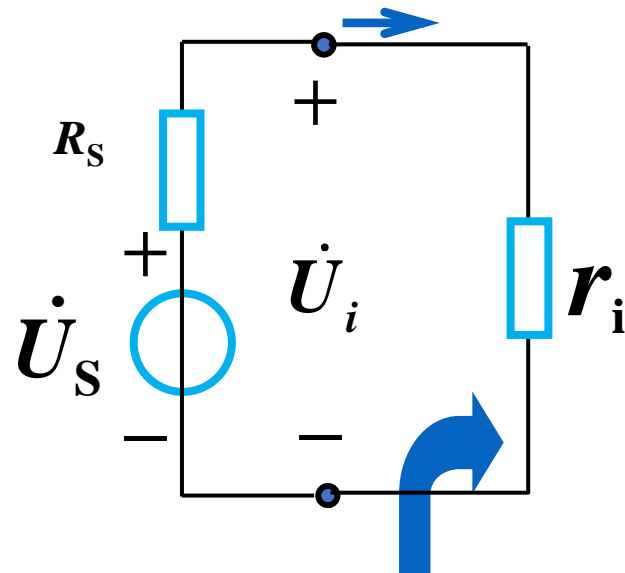
$$r_i = R_B // r_{be}$$



3.1.3 动态分析

如右图所示，把一个内阻为 R_S ，源电压为 \dot{U}_S 的信号源加到放大电路的输入端，由于 r_i 的存在，实际的 \dot{U}_i 为：

$$\dot{U}_i = \frac{r_i}{R_S + r_i} \dot{U}_S$$



r_i 是衡量放大电路对输入电压衰减程度的重要指标。

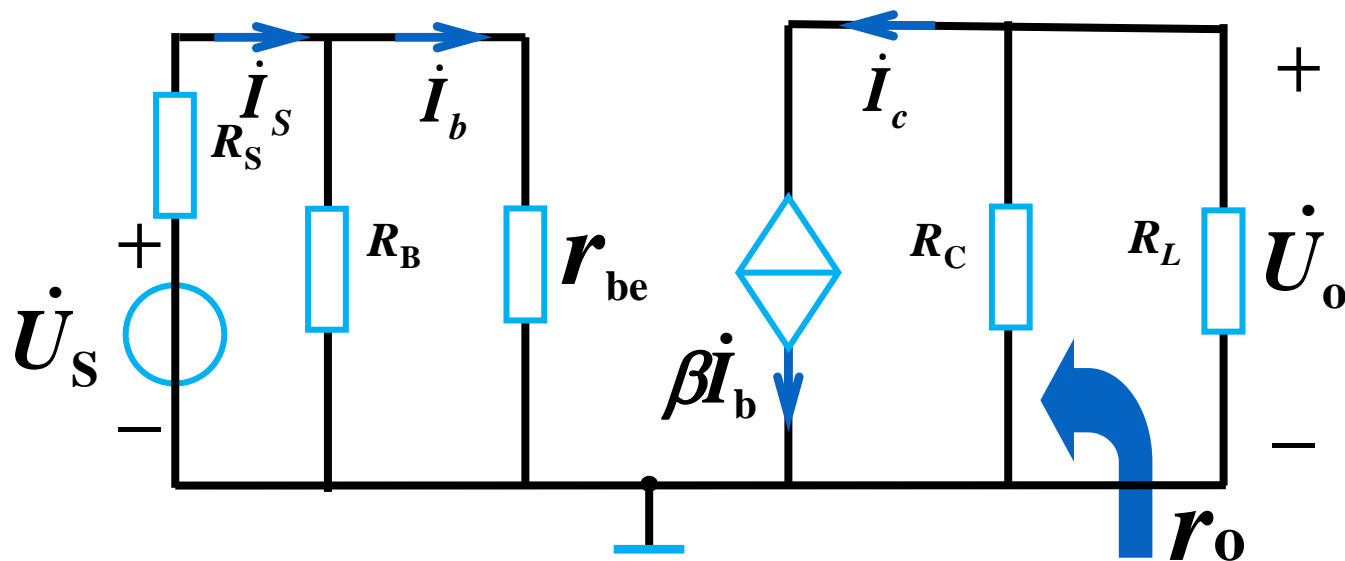
或者说是衡量放大电路接收输入信号能力的重要指标。



3.1.3 动态分析

(3) 输出电阻

对负载而言，放大电路相当于一个具有内阻的信号源，信号源的内阻就是放大电路的输出电阻。



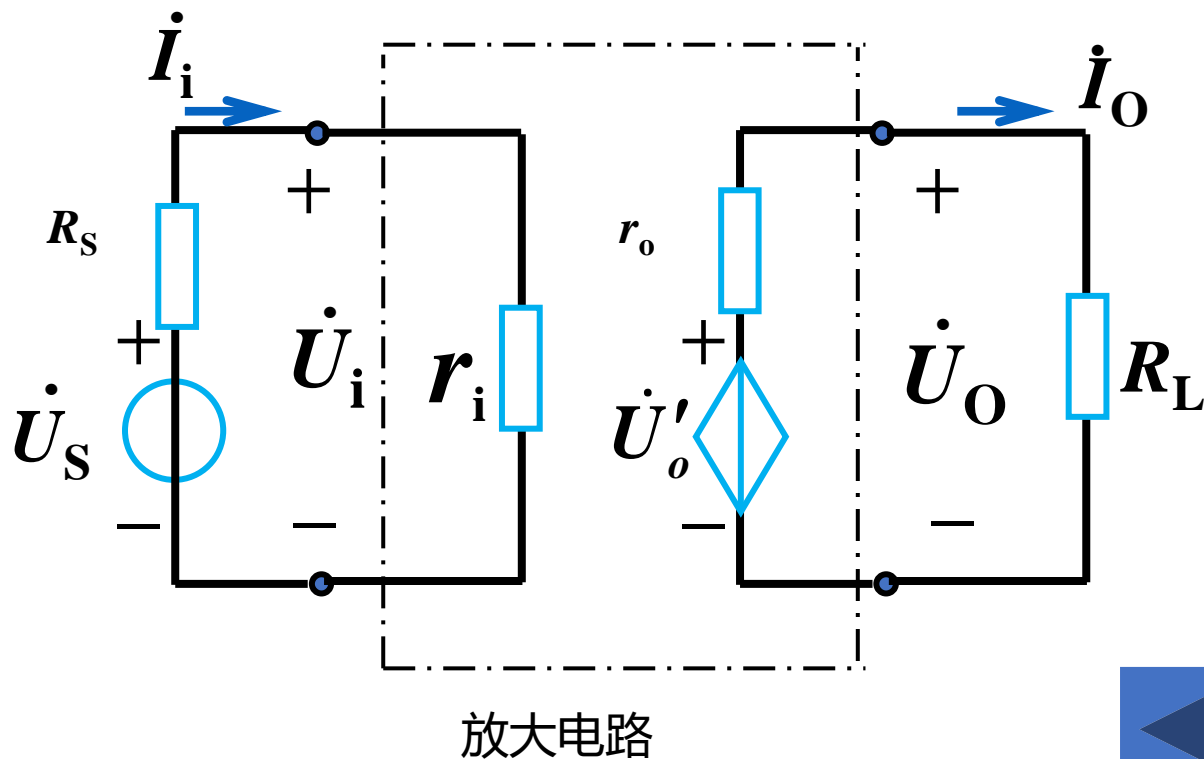
$$r_o = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R_C$$



3.1.3 动态分析

输出电阻求取——1) 实验法
适用于内部结构未知情况

分别测放大器空载电压 \dot{U}'_o 及已知 R_L 的负载电压 \dot{U}_o



$$\dot{U}_o = \frac{R_L}{r_o + R_L} \dot{U}'_o$$

$$r_o = \left(\frac{\dot{U}'_o}{\dot{U}_o} - 1 \right) R_L$$

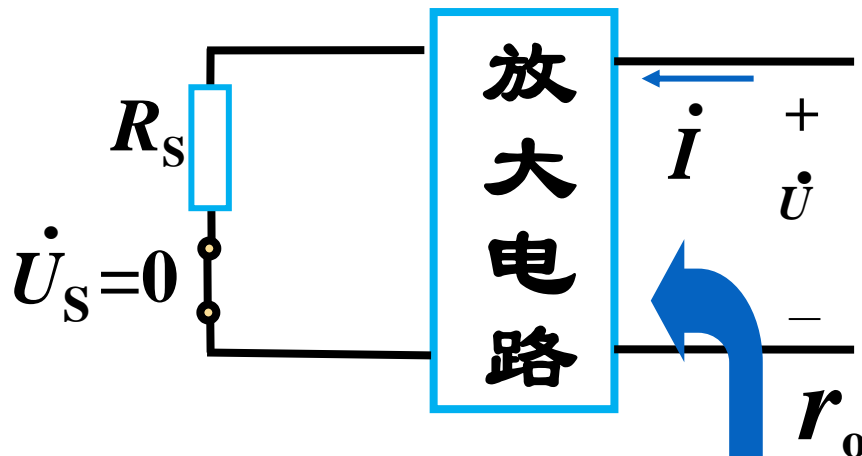


3.1.3 动态分析

输出电阻求取——2)外施电压法

适用于内部结构已知情况

$$\therefore r_o = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$



可用外加电压法求 r_o

对于前面所述的共发射极放大电路

$$\therefore r_o = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R_C$$



例题

[例题3.1.1] 共射极放大电路如图，设 u_i 为正弦信号

已知电路参数， $U_{BE}=0.7V$ 。求：

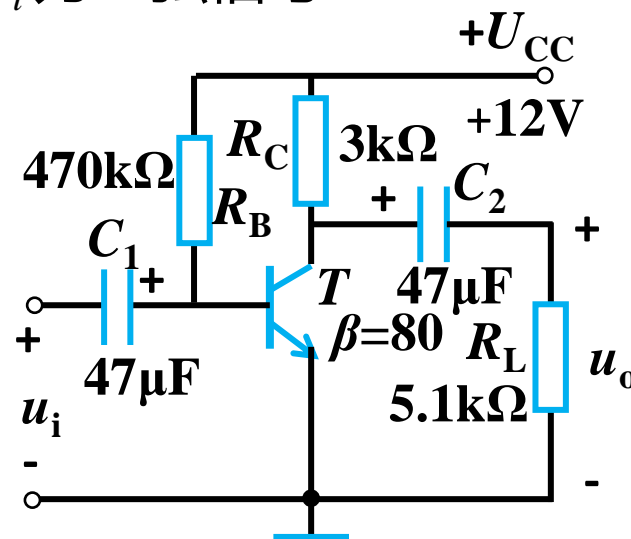
- (1) 不接负载时的放大倍数
- (2) 接负载 R_L 时的放大倍数
- (3) 放大电路的 r_i 与 r_o

[解] 静态分析

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0.7}{470 \times 10^3} = 0.024\text{mA} \quad I_C = 1.92\text{mA}$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B = 81 \times 0.024 = 1.94\text{mA} \quad U_{CE} = 6.24V$$

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = 200 + 81 \times \frac{26}{1.94} = 1.286\text{k}\Omega$$



例题

(1) 不接负载 R_L 时的电压放大倍数

$$A_{uo} = -\beta \frac{R_C}{r_{be}} = -80 \times \frac{3 \times 10^3}{1.286 \times 10^3} = -186.6$$

(2) 接负载 R_L 时的放大倍数

$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -80 \times \frac{1.89 \times 10^3}{1.286 \times 10^3} = -117.6$$

其中

$$R'_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} = \frac{3 \times 5.1}{3 + 5.1} = 1.89 \text{k}\Omega$$

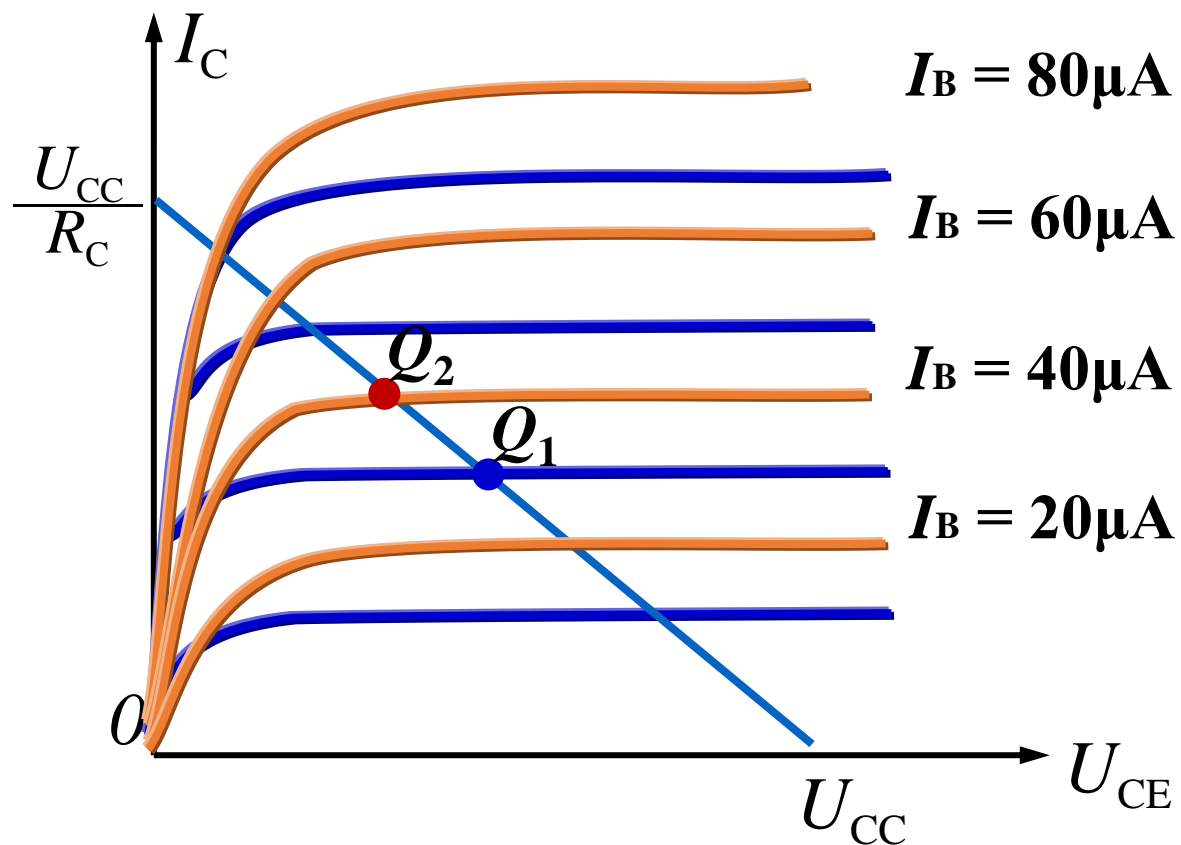
(3) 放大电路的输入电阻 r_i 和输出电阻 r_o

$$r_i = \frac{R_B r_{be}}{R_B + r_{be}} = \frac{470 \times 1.286}{470 + 1.286} = 1.28 \text{k}\Omega$$

$$r_o = R_C = 3 \text{k}\Omega$$



3.1.4 静态工作点的稳定

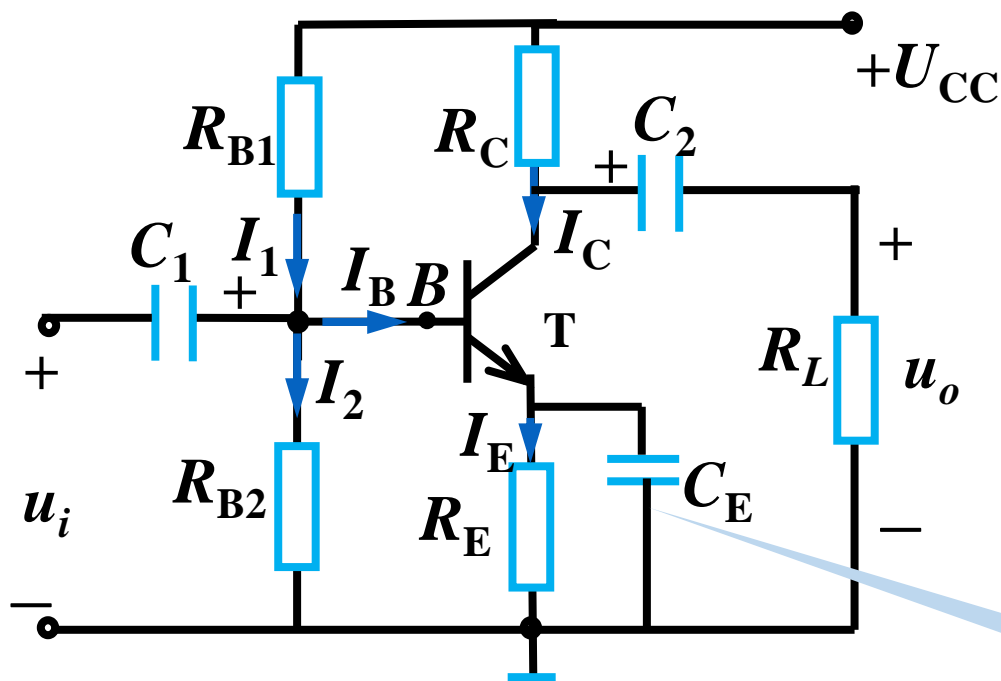


温度升高时，静态工作点将沿直流负载线上移。



3.1.4 静态工作点的稳定

静态工作点稳定的放大电路



$$U_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E}$$

硅管:

$$I_1 = (5 \sim 10) I_E \quad U_B = 3 \sim 5V$$

锗管:

$$I_1 = (10 \sim 20) I_E \quad U_B = 1 \sim 3V$$

静态工作点稳定过程:

设 $\beta \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_B$ 基本不变

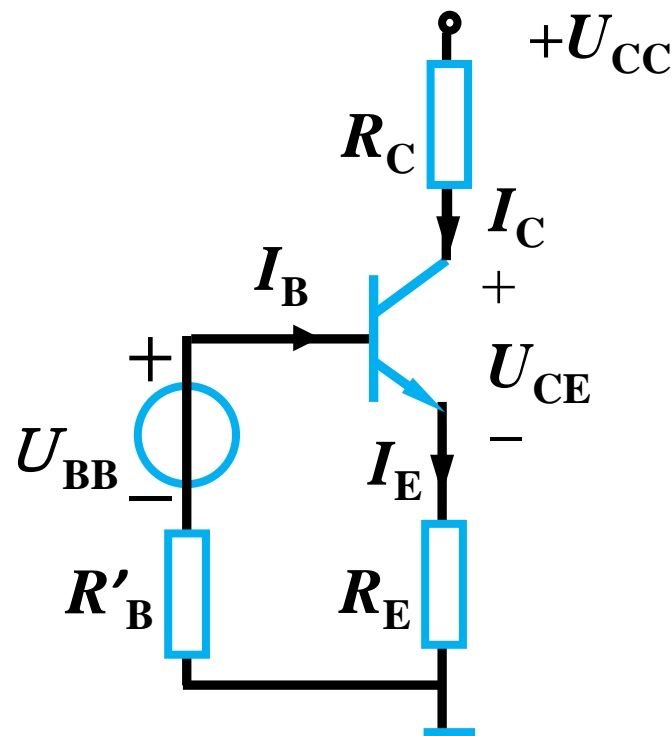
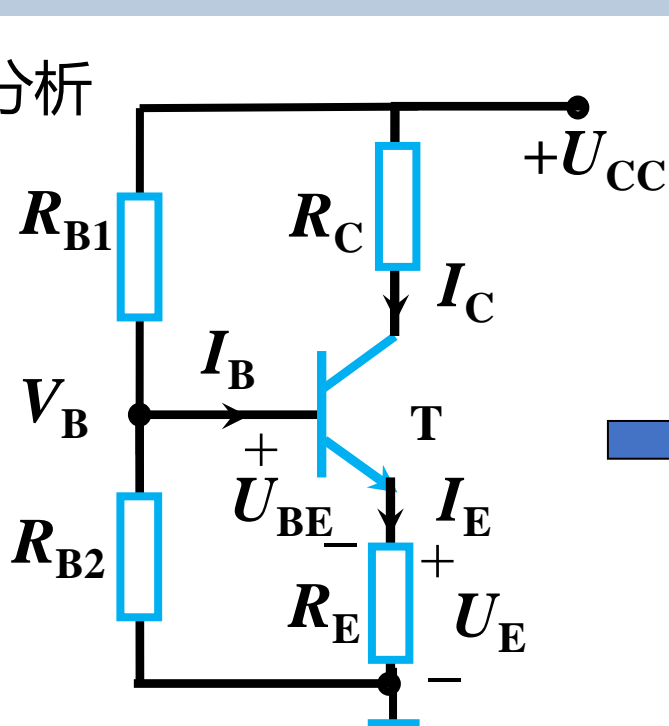
$\uparrow \leftarrow I_C \downarrow \leftarrow I_B \downarrow \leftarrow U_{BE} \downarrow$

C_E : 旁路电容



3.1.4 静态工作点的稳定

静态分析



$$U_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

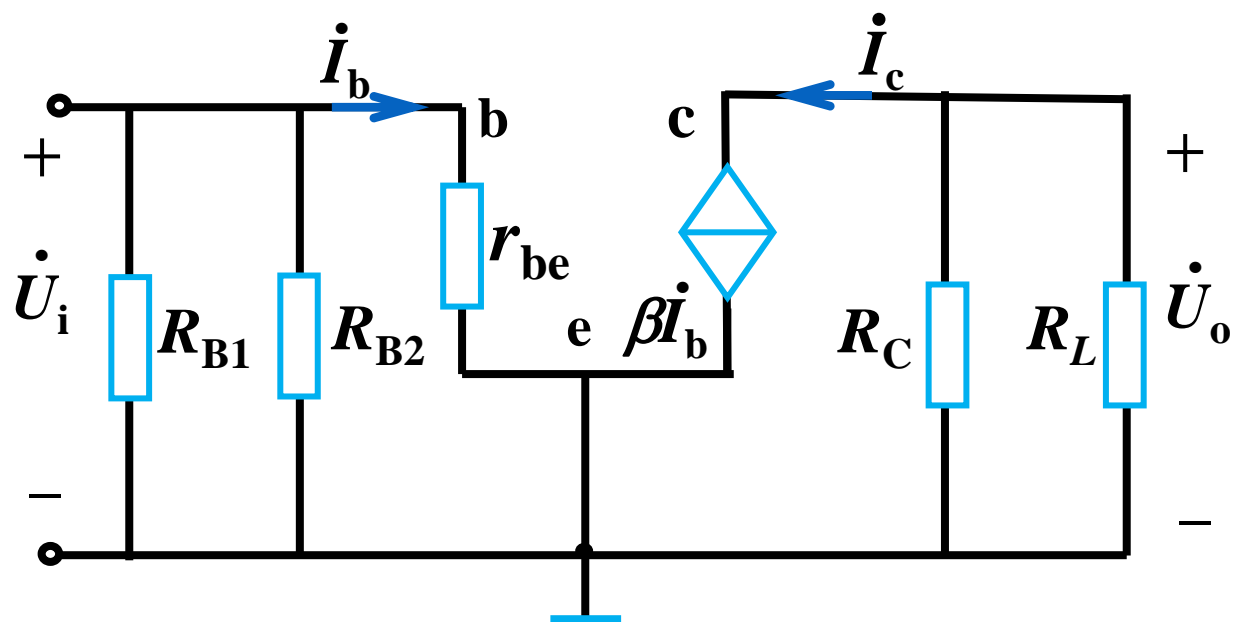
$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R'_B + (1 + \beta)R_E}$$

$$R'_B = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$



3.1.4 静态工作点的稳定

动态分析



$$A_u = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}}$$

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$$

$$r_o = R_C$$

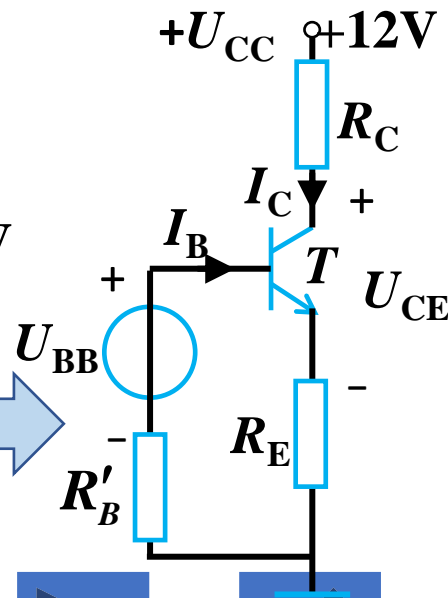
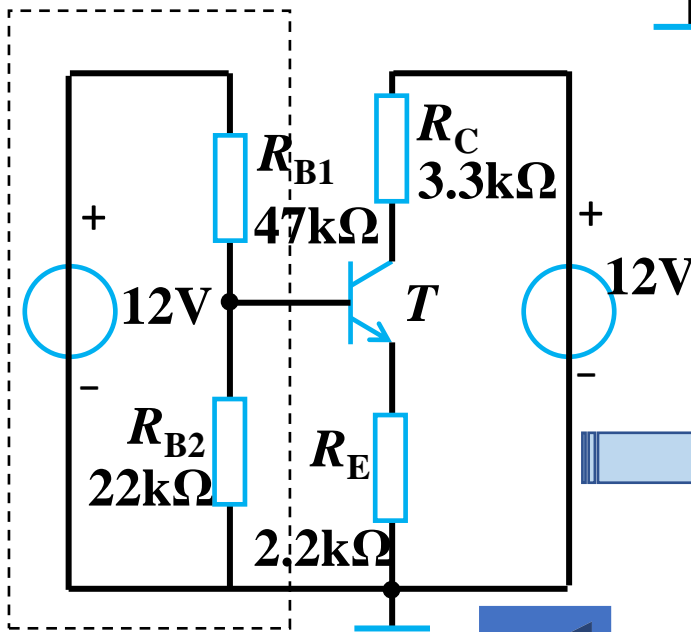
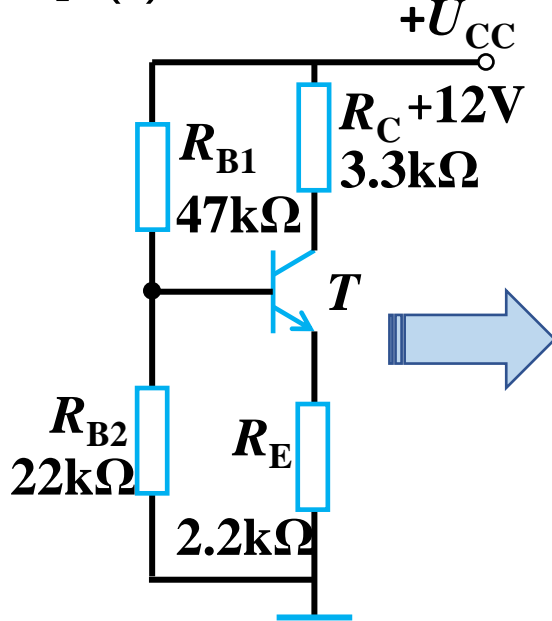
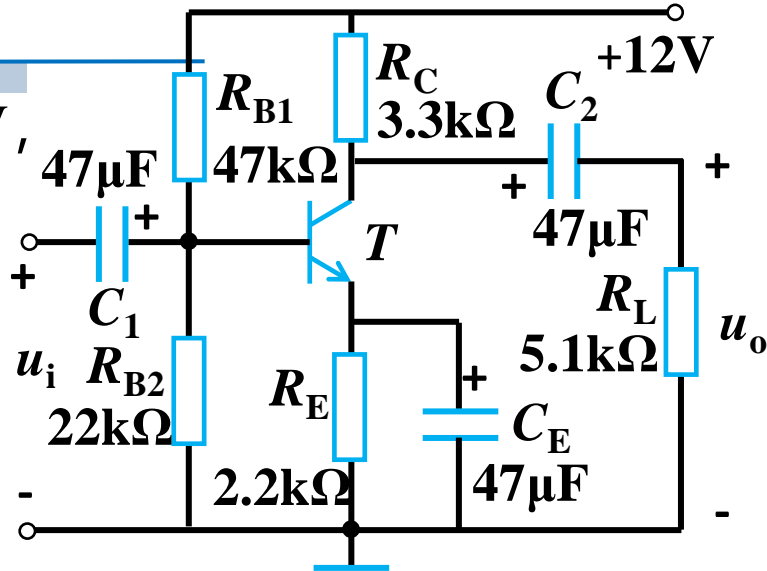


例题

[例题3.1.2] 已知电路参数, $U_{BE}=0.7V$, $\beta=80$ 。求:

- (1) 电路的静态工作点
- (2) 电压放大倍数
- (3) 电路的 r_i 和 r_o

[解] (1) 求静态工作点



例题

$$U_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{22 \times 10^3}{(47 + 22) \times 10^3} \times 12 = 3.83\text{V}$$

$$R'_B = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{47 \times 22}{47 + 22} = 14.99\text{k}\Omega$$

输入回路方程 $U_{BB} = U_{BE} + R'_B I_B + (1 + \beta) R_E I_B$

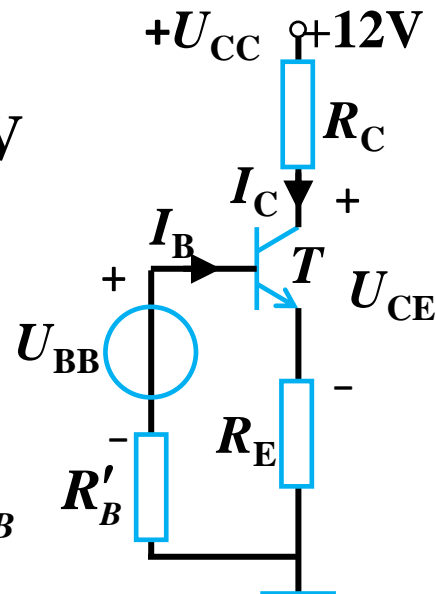
$$\text{故 } I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R'_B + (1 + \beta) R_E} = \frac{3.83 - 0.7}{(14.99 + 81 \times 2.2) \times 10^3} = 0.0162\text{mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 80 \times 0.0162 = 1.30\text{mA}$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B = 81 \times 0.0162 = 1.31\text{mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C - R_E I_E$$

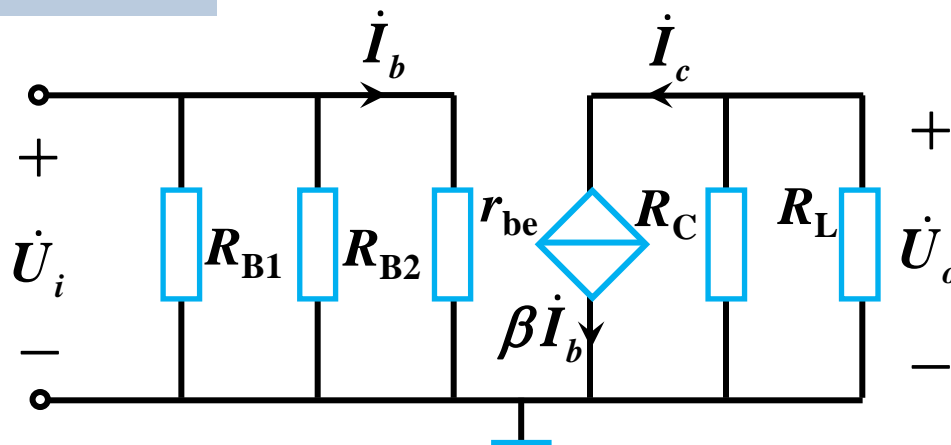
$$\begin{aligned} &= 12 - 3.3 \times 10^3 \times 1.3 \times 10^{-3} - 2.2 \times 10^3 \times 1.31 \times 10^{-3} \\ &= 4.83\text{V} \end{aligned}$$



例 题

(2) 电压放大倍数

由于旁路电容 C_E 的作用, R_E 被交流短路, 晶体管的 E 极直接接地



等效负载电阻
$$R'_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} = \frac{3.3 \times 5.1}{3.3 + 5.1} = 2\text{k}\Omega$$

电压放大倍数
$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -80 \times \frac{2}{1.81} = -88.4$$

(3) 电路的 r_i 和 r_o
$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} = 1.61\text{k}\Omega$$

$$r_o = R_C = 3.3\text{k}\Omega$$



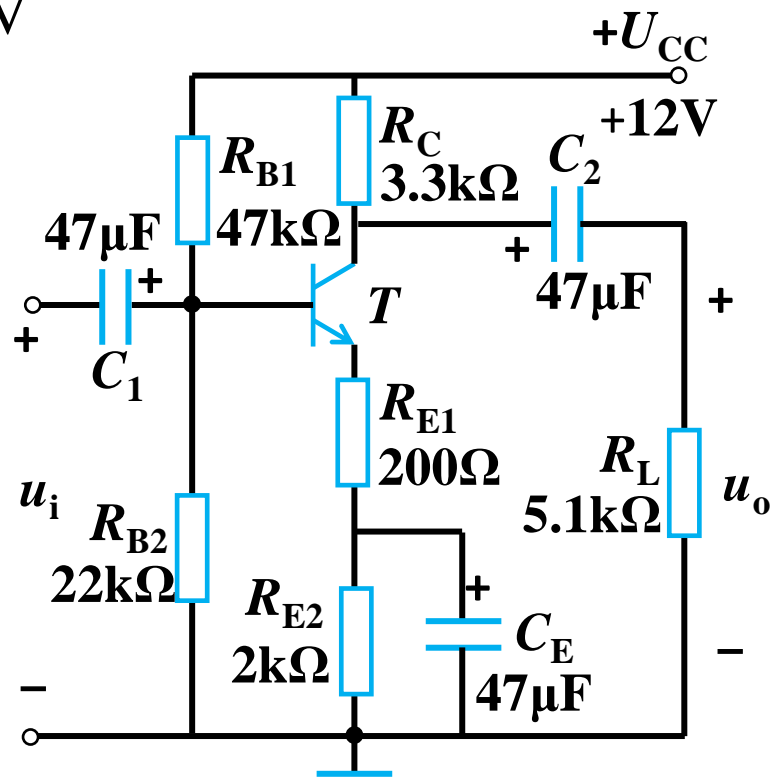
例题

[例题3.1.3]

电路如右图所示, $\beta=80$, $U_{BE}=0.7V$

试计算:

- (1) 电压放大倍数
- (2) 输入电阻
- (3) 输出电阻





例 题

静态工作点与例题3.1.2相同

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R'_B + (1 + \beta) R_E} = \frac{3.83 - 0.7}{(14.99 + 81 \times 2.2) \times 10^3} = 0.0162(\text{mA})$$

$$I_C = \beta I_B = 80 \times 0.0162 = 1.30(\text{mA})$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B = 81 \times 0.0162 = 1.31(\text{mA})$$

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C - R_E I_E = 4.83(\text{V})$$

晶体管输入电阻

$$r_{be} = 200 + (1 + 80) \frac{26}{1.31} = 1.81(\text{k}\Omega)$$

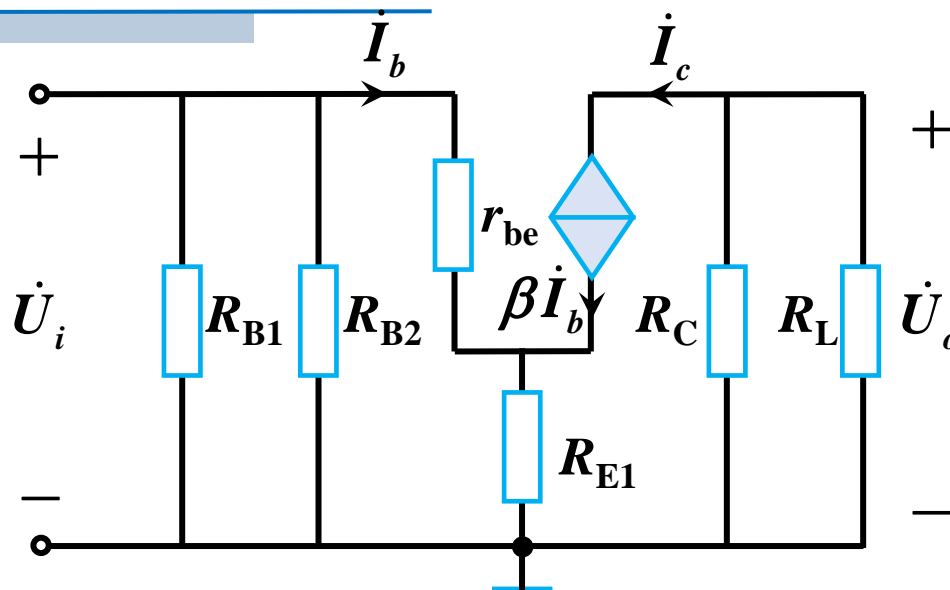


例 题

微变等效电路：

$$R'_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

$$= \frac{3.3 \times 5.1}{3.3 + 5.1} = 2\text{k}\Omega$$



$$\dot{U}_i = [r_{be} + (1 + \beta)R_{E1}] \dot{I}_b \quad \dot{U}_o = -R'_L \dot{I}_c = -\beta R'_L \dot{I}_b$$

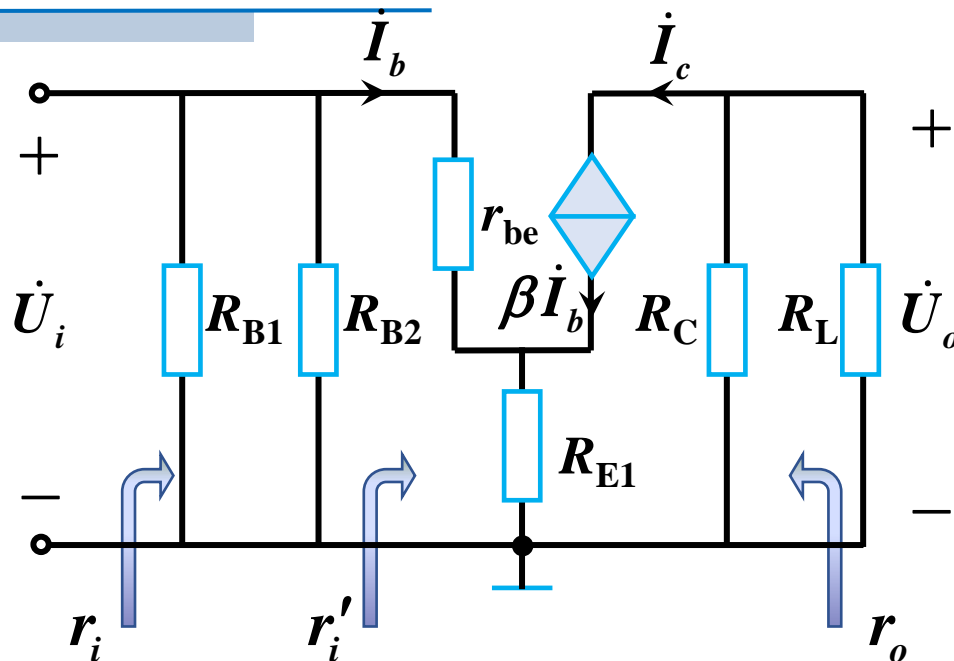
(1) 放大倍数

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_{E1}} = -\frac{80 \times 2}{1.81 + 81 \times 0.2} = -8.88$$



例题

微变等效电路：



(2) 输入电阻

$$\dot{U}_i = [r_{be} + (1 + \beta)R_{E1}] \dot{I}_b$$

$$r'_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} = r_{be} + (1 + \beta)R_{E1} = [1.81 + (1 + 80) \times 0.2] = 18.01(\text{k}\Omega)$$

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // r'_i = 8.18 \text{ k}\Omega$$

(3) 输出电阻 $r_o = R_C = 3.3 \text{ k}\Omega$



3.1.5 频率特性

影响微变等效电路分析法结论的因素：

- 在信号频率较低时，耦合电容等的影响无法忽略
- 简化的晶体管小信号模型的局限性，无法体现高频时晶体管结电容的分流作用
- 电路分布参数的作用
- 假设负载为纯电阻性质的片面性

上述原因，使电路放大倍数随频率的变化而变化

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{U_o \angle \varphi_o}{U_i \angle \varphi_i} = \frac{U_o}{U_i} \angle \varphi_o - \varphi_i = |A_u| \angle \varphi$$

A_u 随频率变化曲线称为频率特性



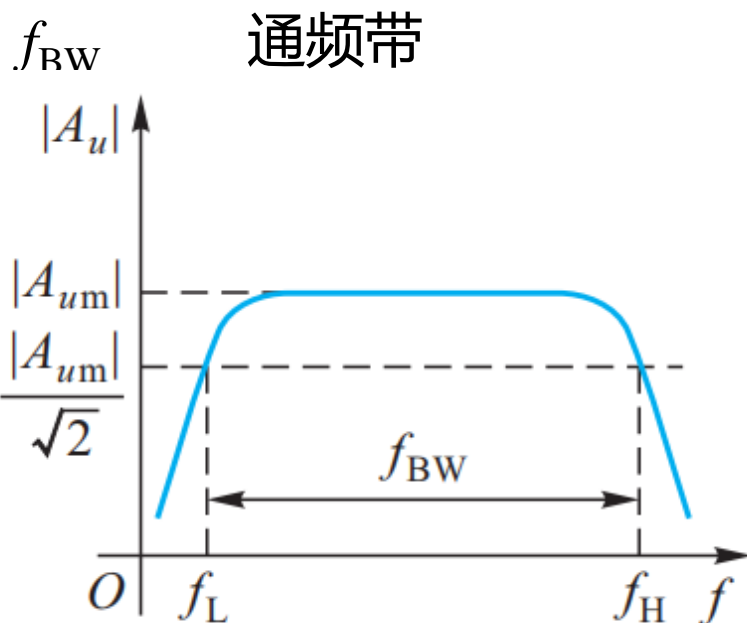
3.1.5 频率特性

A_u 幅值随频率变化

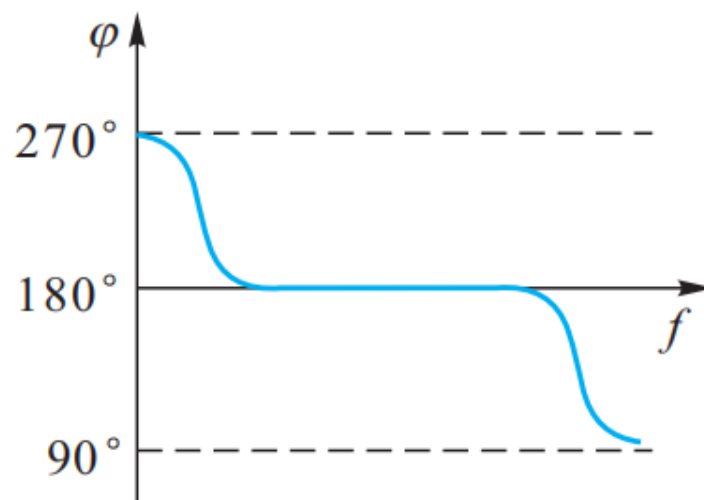
$$|A_u| = F(f) \quad \text{幅频特性}$$

A_u 相位随频率变化

$$\varphi = F'(f) \quad \text{相频特性}$$



幅率特性



相频特性



3.2 共集电极放大电路

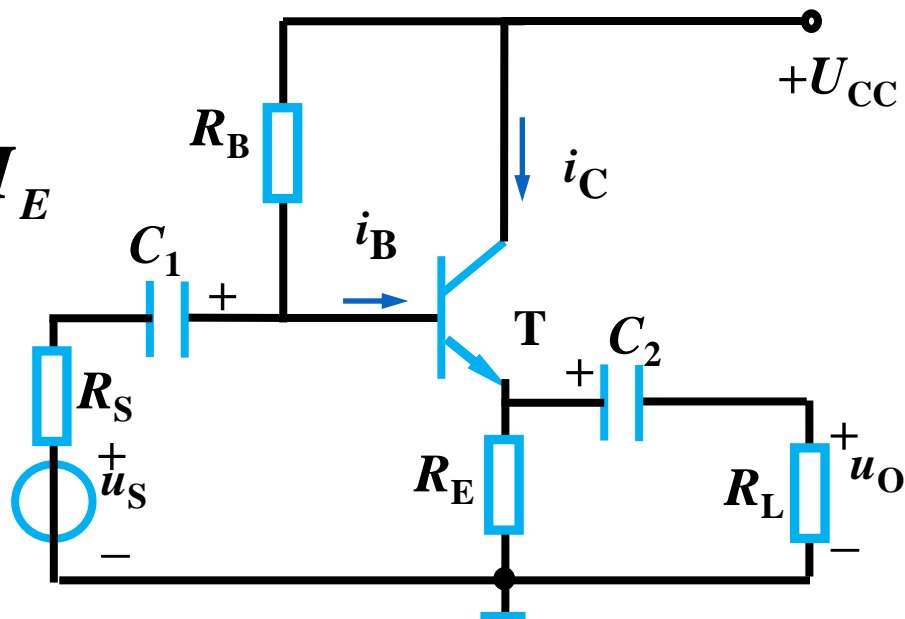
静态分析:

$$U_{CC} = R_B I_B + U_{BE} + R_E I_E$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

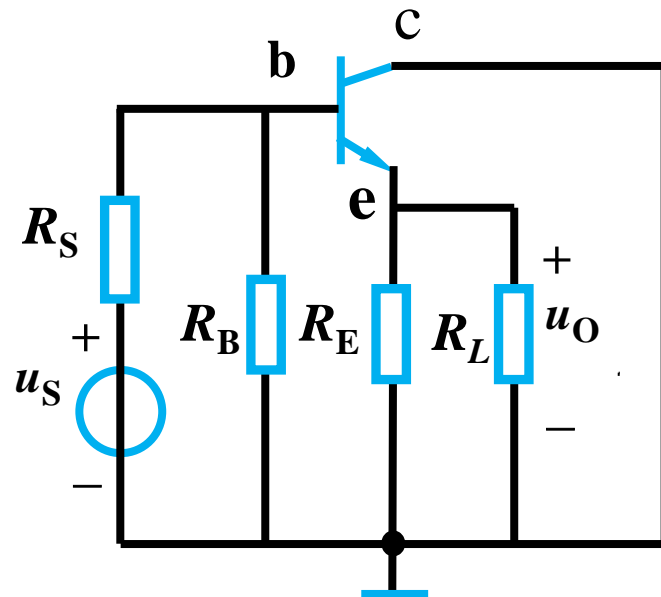
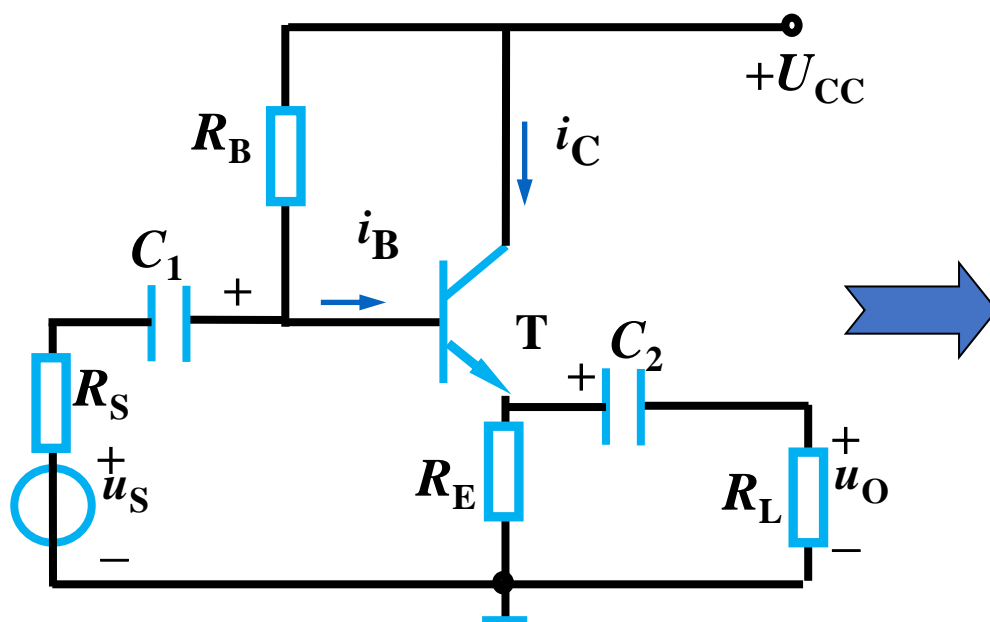
$$I_E = (1 + \beta) I_B$$

$$U_{CE} = U_{CC} - R_E I_E$$



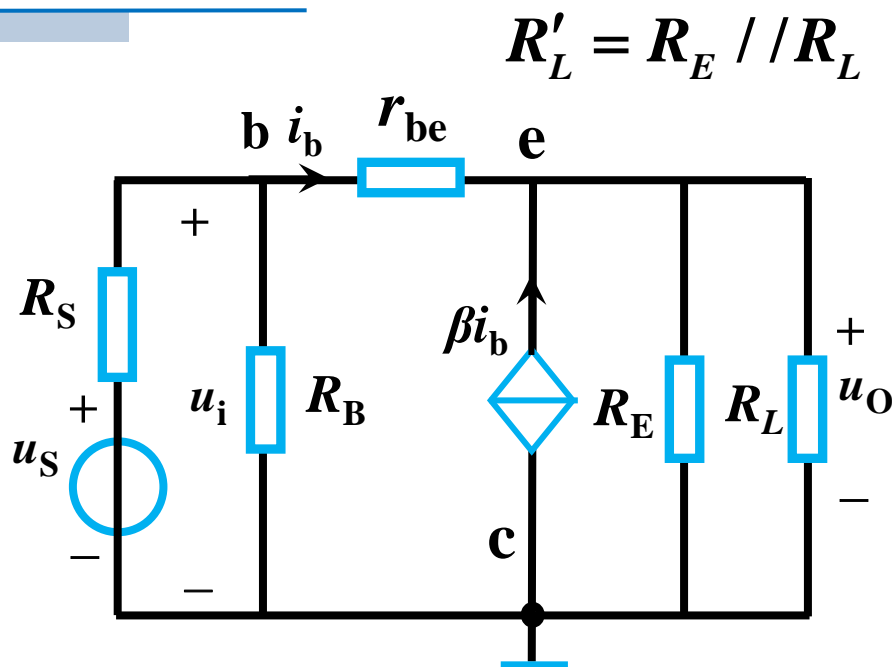
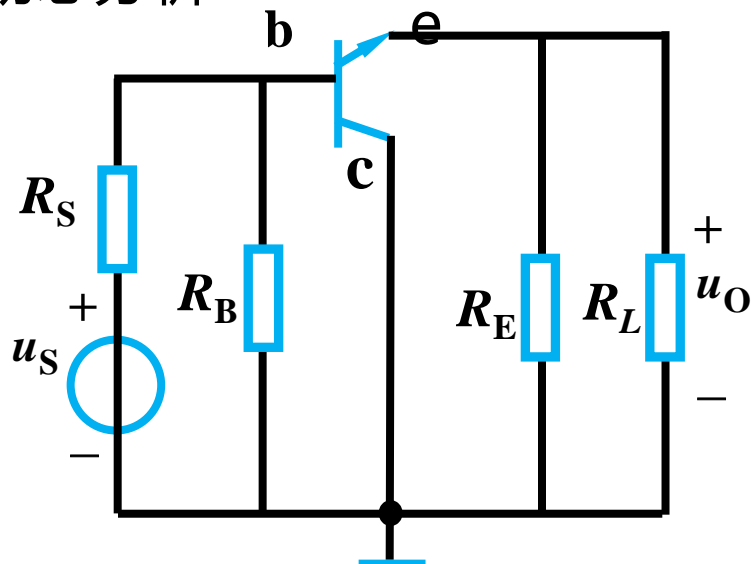
3.2 共集电极放大电路

共集电极放大电路交流通路



3.2 共集电极放大电路

动态分析:



电压放大倍数 设小信号为正弦波, 则电压电流可用相量表示

$$\dot{U}_i = r_{be} \dot{I}_b + (1 + \beta) R'_L \dot{I}_b$$

$$\dot{U}_o = (1 + \beta) R'_L \dot{I}_b$$

$$A_U = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$

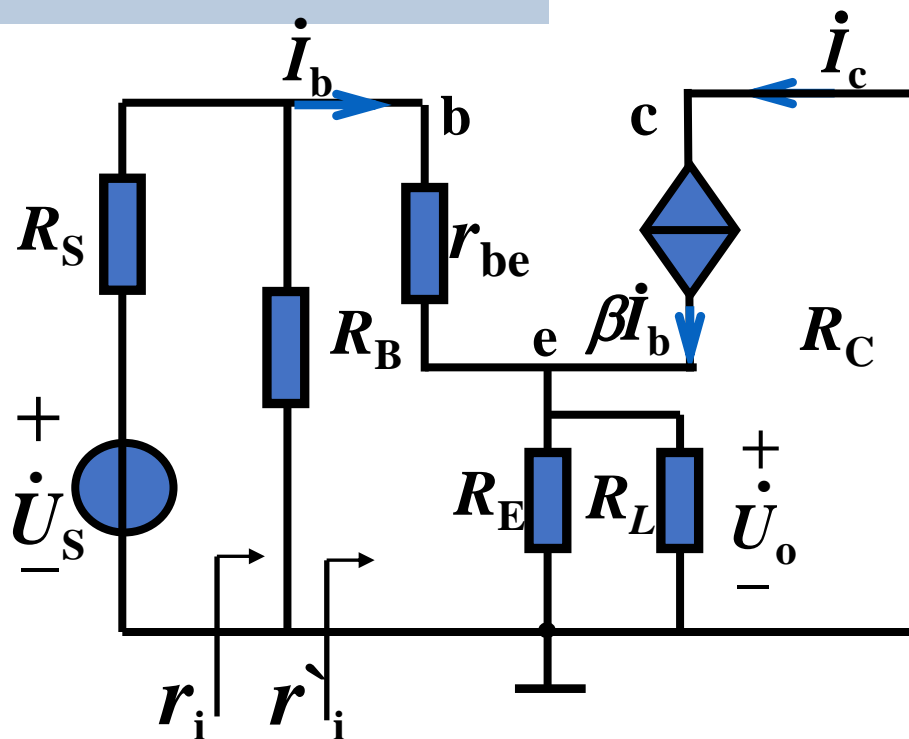
注意: (1) $A_U > 0$

(2) $A_U < 1, A_U \approx 1$



3.2 共集电极放大电路

动态分析:



输入电阻

$$r'_i = \dot{U}_i / \dot{I}_b = r_{be} + (1 + \beta) R'_L$$

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]$$

射极输出器**输入电阻较大**，说明对输入信号的衰减较少，常用于多级放大电路的输入级



3.2 共集电极放大电路

输出电阻

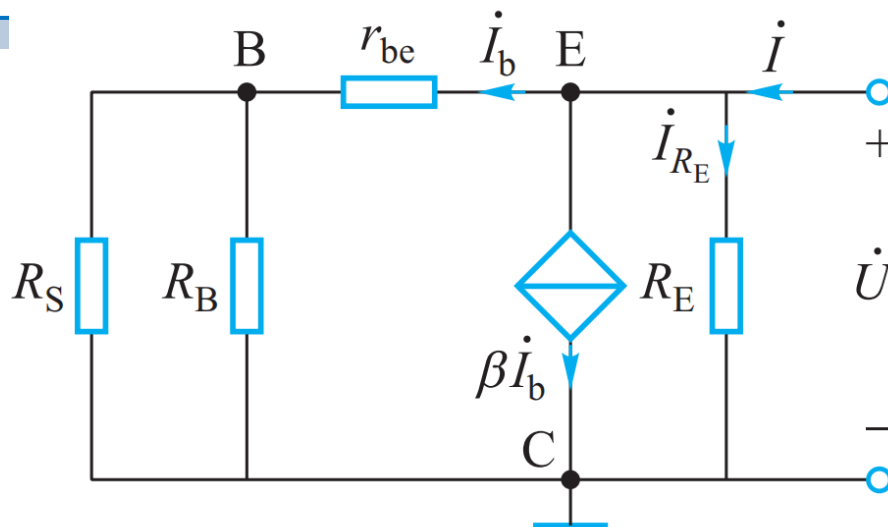
——采用外施电压法

$$\dot{I} = \dot{I}_{RE} + \dot{I}_b + \beta \dot{I}_b$$

$$= \frac{\dot{U}}{R_E} + (1 + \beta) \frac{\dot{U}}{r_{be} + R'_S}$$

$$= \left(\frac{1}{R_E} + \frac{(1 + \beta)}{r_{be} + R'_S} \right) \dot{U}$$

$$r_o = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{1 + \beta}{r_{be} + R'_S}} = R_E // \frac{r_{be} + R'_S}{1 + \beta}$$



求 r_o 的等效电路

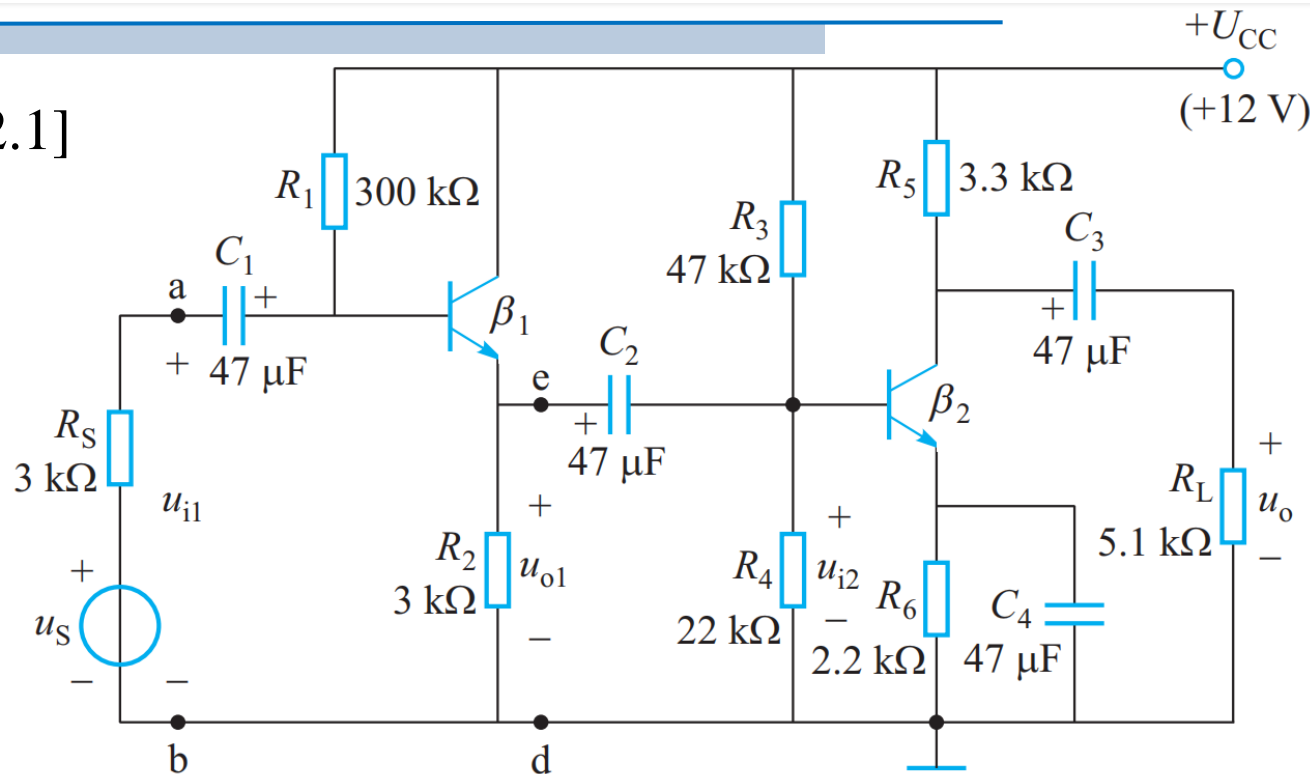
$$(R'_S = R_S // R_B)$$

射极输出器输出电阻较小，说明带负载能力较强，常用于小功率多级放大电路的输出级



例 题

[例题3.2.1]



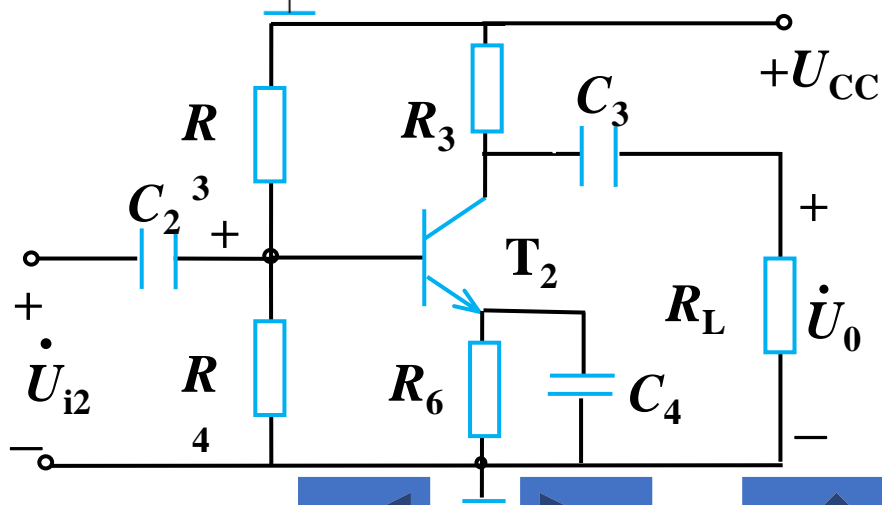
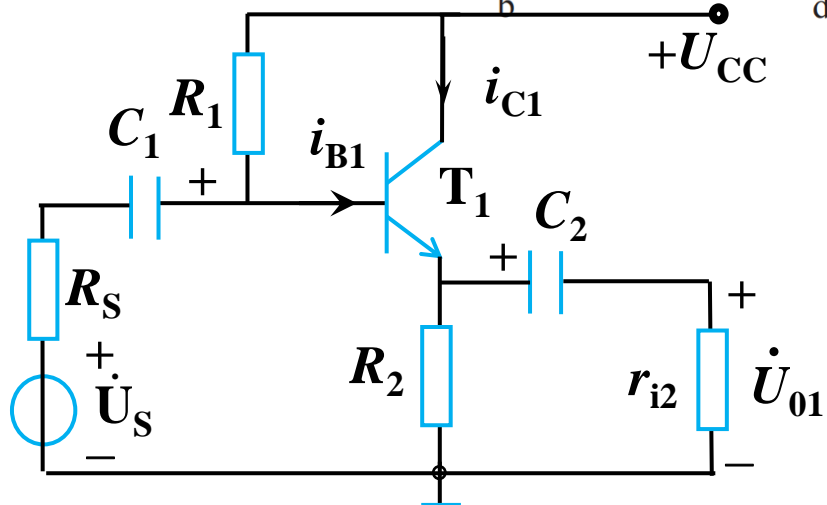
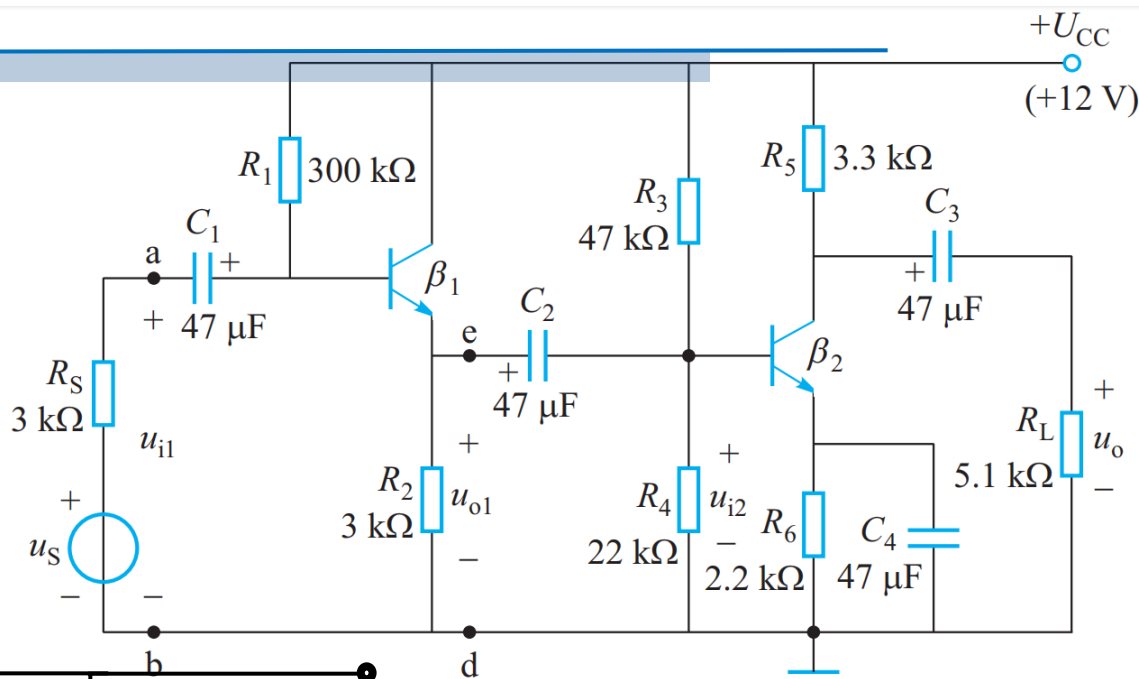
已知: $U_S = 20\text{mV}$, $U_{BE1} = U_{BE2} = 0.7\text{V}$, $\beta_1 = \beta_2 = 80$

- 求: 1) 第一级 A_{u1} 、 r_{i1} 、 r_{o1} ; 2) U_{i2} ;
3) 两级放大倍数 $A = \dot{U}_o / \dot{U}_{i1}$ 及输出电压 U_o ;
4) 若 e , d 与 a , b 直接相连, U_{i2} , U_o 变为多少?



例题

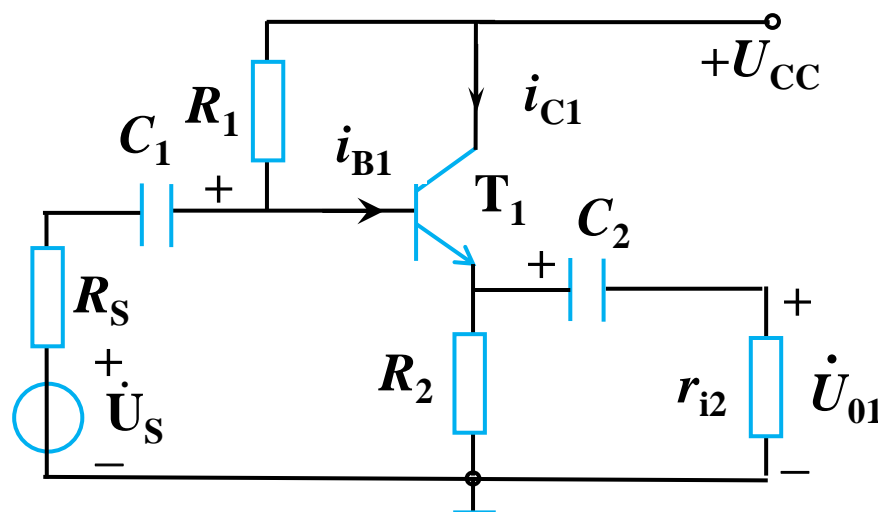
解：



例 题

1) 第一级静态电流

$$\begin{aligned}
 I_{B1} &= \frac{U_{CC} - U_{BE1}}{R_1 + (1 + \beta_1) R_2} \\
 &= \frac{12 - 0.7}{(300 + 81 \times 3) \times 10^3} \\
 &= 0.0208(\text{mA})
 \end{aligned}$$



$$I_{E1} = (1 + \beta_1) I_{B1} = 81 \times 0.0208 = 1.68(\text{mA})$$

$$r_{be1} = 200 + (1 + \beta_1) \frac{26}{I_{E1}} = (200 + 81 \times \frac{26}{1.68}) = 1.45(\text{k}\Omega)$$

第二级的输入电阻 r_{i2} ($=1.61\text{k}\Omega$, 例3.1.2) 即为第一级的负载电阻

$$R'_L = R_2 // r_{i2} = 1.05(\text{k}\Omega)$$



例 题

电压放大倍数

$$A_{u1} = \frac{(1 + \beta_1)R'_L}{r_{be1} + (1 + \beta_1)R'_L} = \frac{81 \times 1.05 \times 10^3}{(1.45 + 81 \times 1.05) \times 10^3} = 0.983$$

输入电阻

$$r_{i1} = R_1 // [r_{be1} + (1 + \beta_1)R'_L] = 67.1 \text{ k}\Omega$$

输出电阻

$$r_{o1} = R_2 // \frac{r_{be1} + R'_S}{1 + \beta_1} = 53.6 \text{ }\Omega$$



例题

2) 信号源输出电压

$$U_{i1} = \frac{r_{i1}}{R_S + r_{i1}} U_S = \frac{67.1 \times 10^3}{3 \times 10^3 + 67.1 \times 10^3} \times 20 \times 10^{-3} = 19.1(\text{mV})$$

第二级输入电压

$$U_{i2} = U_{o1} = |A_{u1}| \times U_{i1} = 0.983 \times 19.1 = 18.8(\text{mV})$$



例 题

3) 一般, n 级组成的多级放大电路的放大倍数 A 等于各级放大电路的放大倍数之积, 即

$$A = \dot{U}_o / \dot{U}_{i1} = A_{u1} \times A_{u2} \times \cdots \times A_{un}$$

本例中, 由 (1) 知, $A_{u1}=0.983$;

$$A_{u2}=-88.4 \quad (\text{见[例题3.1.2]})$$

两级放大倍数

$$A = A_{u1} \times A_{u2} = 0.983 \times (-88.4) = -86.9$$

输出电压

$$U_o = |A| U_{i1} = 86.9 \times 19.1 \times 10^{-3} \text{V} = 1.66 \text{V}$$



例 题

4) 若 e, d 与 a, b 直接相连, 则 U_{i2} 就是信号源的输出电压

$$U_{i2} = \frac{r_{i2}}{R_s + r_{i2}} U_s = \frac{1.61 \times 10^3}{(3 + 1.61) \times 10^3} \times 20 \times 10^{-3} = 6.89(\text{mV})$$

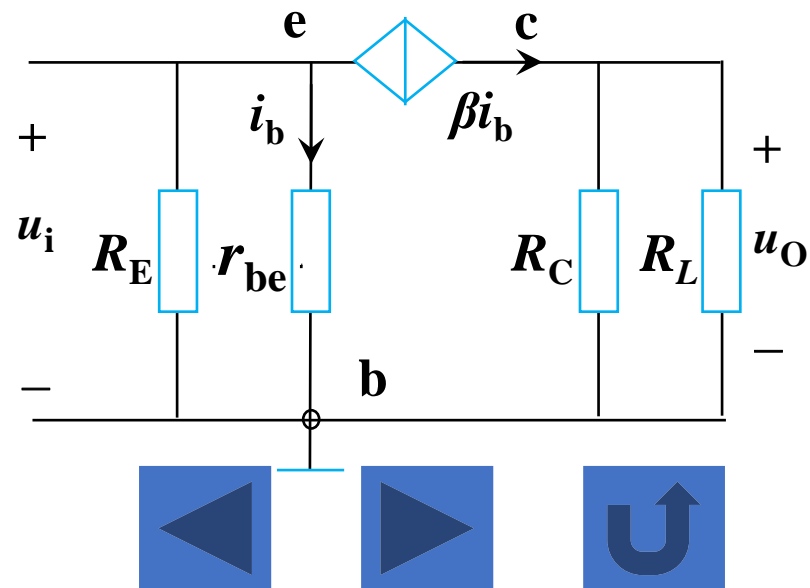
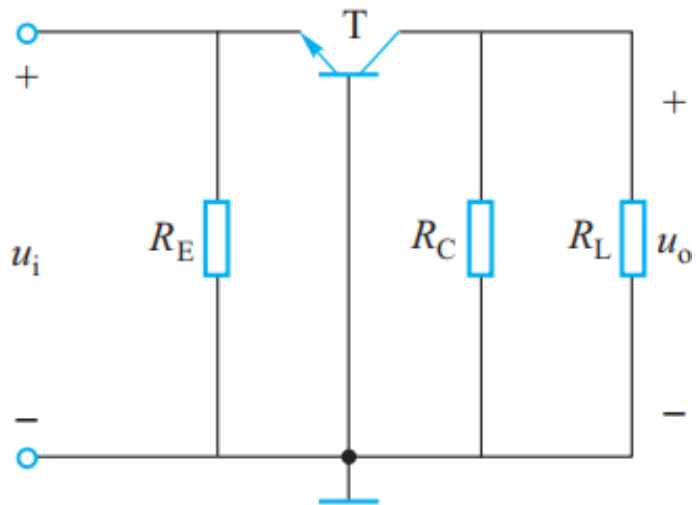
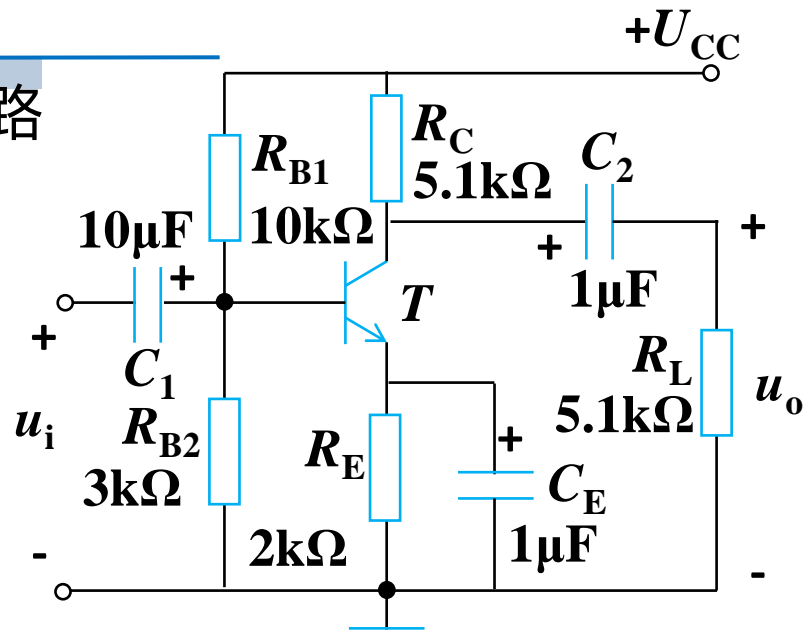
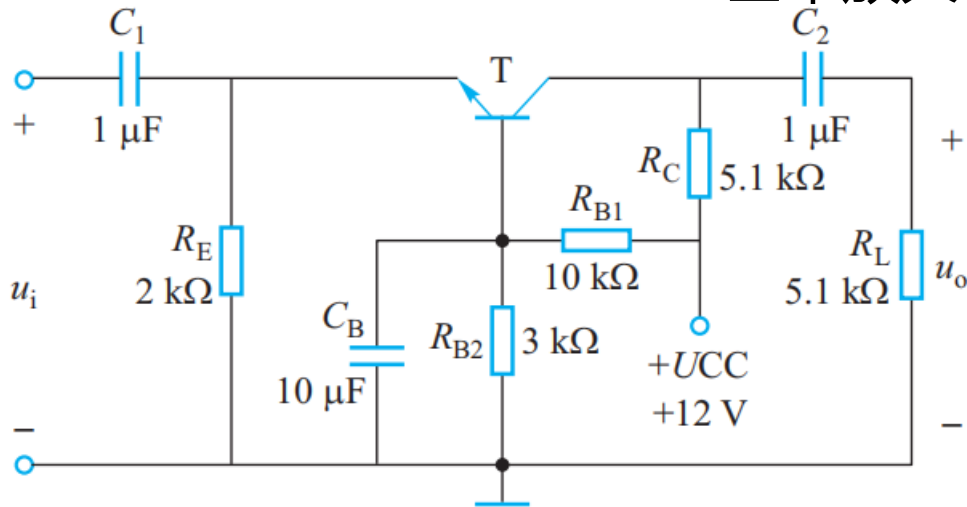
$$U_o = |A_{u2}| U_{i2} = 88.4 \times 6.89 \text{mV} = 0.609 \text{V}$$

可见此时信号源及放大电路的输出电压比前一种情况明显减小, 也就是说, 信号源后面是否接入射极输出器, 对信号源的输出电压和第二级放大电路的输入输出电压均有很大的影响。



共集极放大电路

基本放大电路



3.2 共集电极放大电路

电路静态情况与[例题3.1.2]相似，不再赘述。

电路放大倍数

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\beta i_b R'_L}{i_b r_{be}} = \beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

输入电阻

$$r_i = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

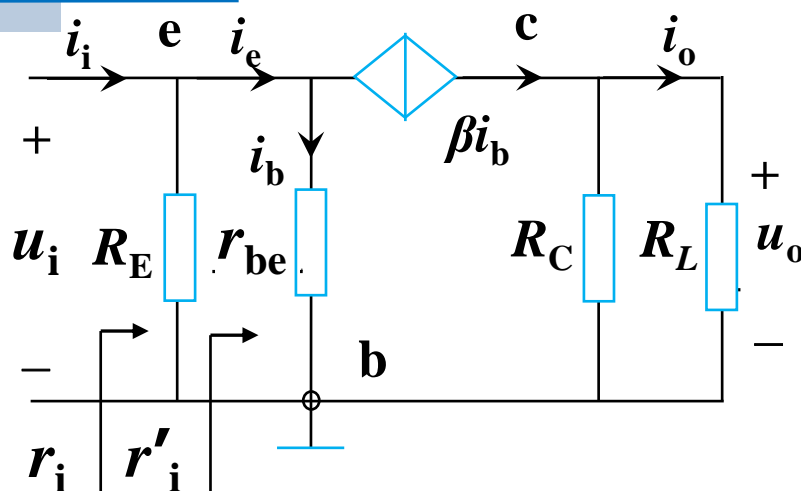
输出电阻

$$r_o \approx R_C$$

电路只能放大电压信号，不能放大电流($I_i > I_o$)；

输出与输入同相； r_i 小， r_o 大。

共基极放大电路的晶体管截止频率为共射级电路的 $(1+\beta)$ 倍，故具有更高的工作频率，广泛应用于高频/宽频放大电路。





3.3 共源极放大电路

3.3.1 静态分析

3.3.2 动态分析



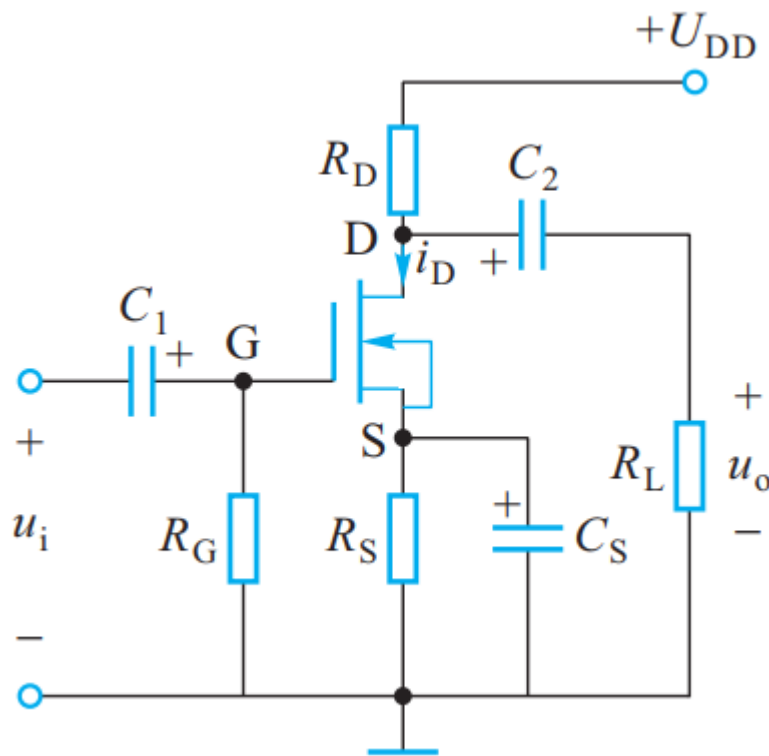
3.3.1 静态分析

自给式偏置共源极放大电路

$$\because U_G = 0$$

$$\therefore U_{GS} = -R_S I_D$$

仅适用于耗尽型场效应管



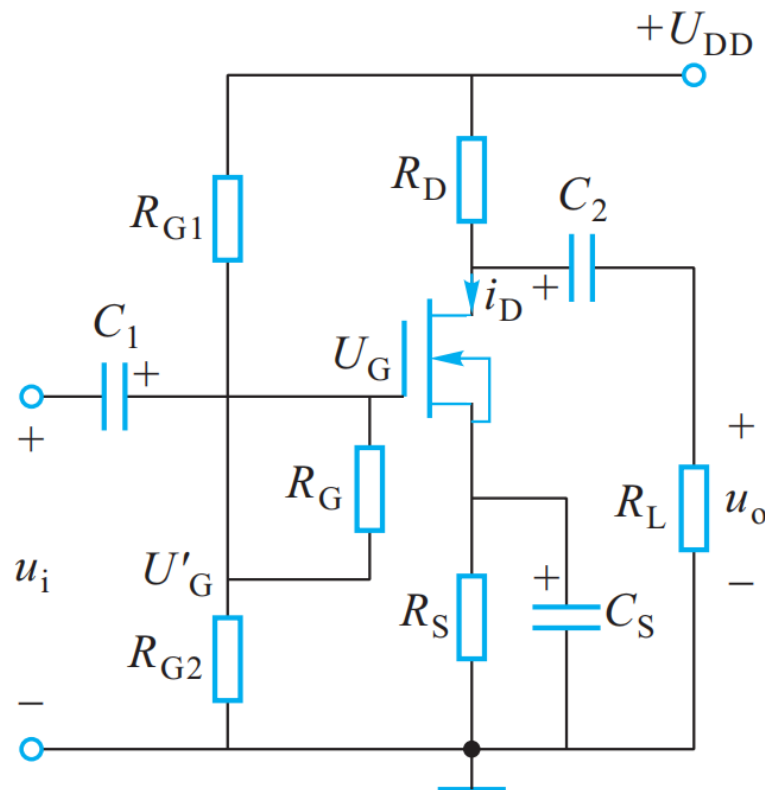
3.3.1 静态分析

分压式共源极放大电路

$$U_G = U'_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD}$$

$$\begin{cases} U_{GS} = U_G - U_S \\ = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD} - R_S I_D \\ I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \quad (\text{耗尽型}) \\ I_D = I_{DO} \left(\frac{U_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \quad (\text{增强型}) \end{cases}$$

两方程联立求得 I_D 和 U_{GS}



I_{DO} 是 $U_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时的 I_D



3.3.2 动态分析

电压放大倍数

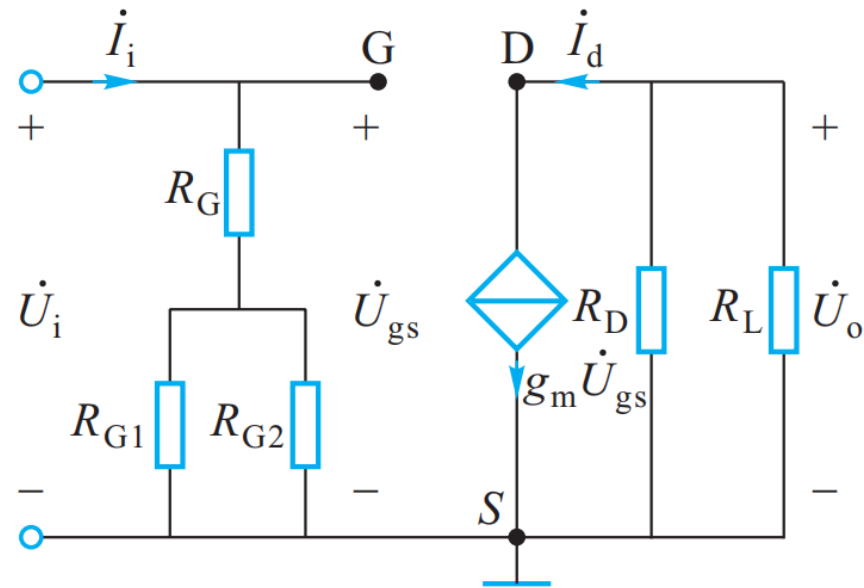
$$\dot{A}_U = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m R'_L \dot{U}_{gs}}{\dot{U}_{gs}} = -g_m R'_L$$

输入电阻

$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_G + \frac{R_{G1} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$$

输出电阻

$$r_o = R_D$$



微变等效电路



例题

[例题3.3.1] 已知电路如图, $g_m = 2mS$

且 $U_{GS(off)} = -2V$, $I_{DSS} = 0.5mA$ 。

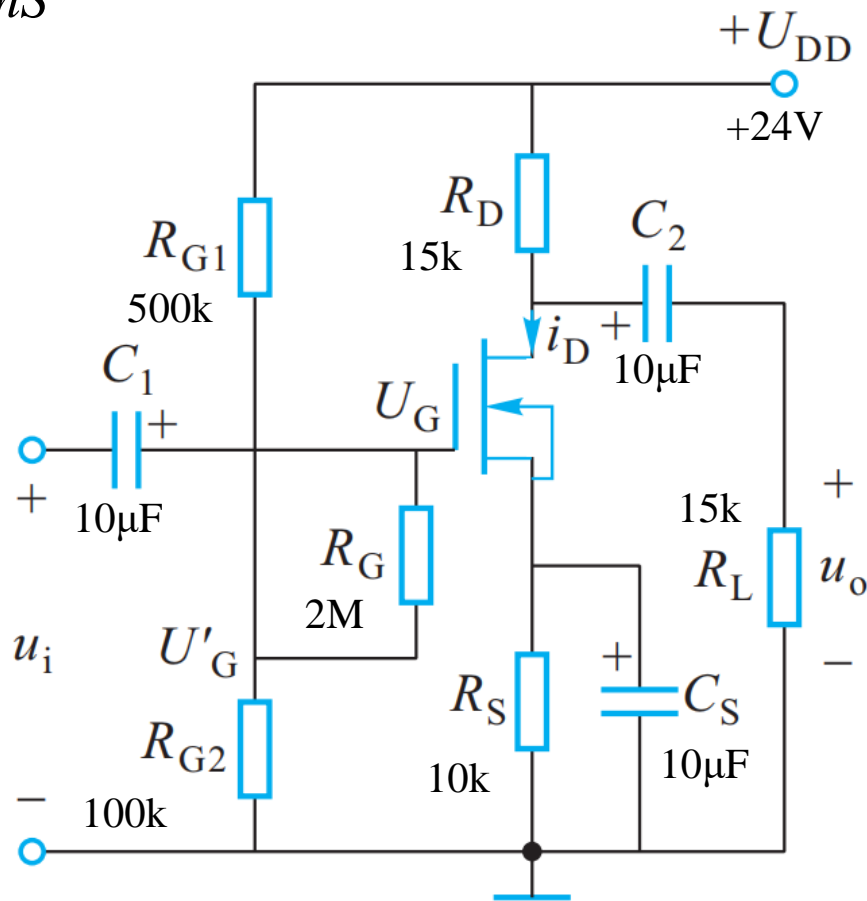
求: (1) 静态工作点 I_D, U_{GS}, U_{DS}

(2) A_U, r_i, r_o 。

[解] (1)

$$U_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD}$$

$$= \frac{100}{(500 + 100)} \times 24 = 4V$$



例 题

$$\left. \begin{aligned} U_{GS} &= U_G - R_S I_D = 4 - 10 I_D \\ I_D &= I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 = 0.5 \times \left(1 + \frac{U_{GS}}{2} \right)^2 \end{aligned} \right\} \text{联立解得}$$

$$\left. \begin{aligned} I_{D1} &= 0.863 \text{mA} \\ U_{GS1} &= -4.63 \text{V} \end{aligned} \right\} \text{①} \quad \left. \begin{aligned} I_{D2} &= 0.417 \text{mA} \\ U_{GS2} &= -0.17 \text{V} \end{aligned} \right\} \text{②}$$

根据题意第①组解不符，因此静态工作点为解②

$$\begin{aligned} U_{DS} &= U_{DD} - (R_D + R_S) I_D \\ &= 24 - (15 + 10) \times 0.417 = 13.6 \text{V} \end{aligned}$$



例题

(2) 电压放大倍数

$$A_U = -g_m R_L' = -15$$

输入电阻

$$r_i = R_G + \frac{R_{G1} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} = 2.08 \text{M}\Omega$$

输出电阻

$$r_o = R_D = 15 \text{k}\Omega$$





3.4 分立元件组成的基本门电路

3.4.1 二极管与门电路

3.4.2 二极管或门电路

3.4.3 晶体管及场效晶体管非门电路





基本门电路概述

门电路是一种开关电路，其输入和输出之间存在一定的因果关系即逻辑关系。

在逻辑电路中，输入输出信号通常用高低电平来描述，用0和1来表示两种对立的逻辑状态。

正逻辑：1表示高电平，0表示低电平；

负逻辑：0表示高电平，1表示低电平。

基本的逻辑关系有：与逻辑、或逻辑、非逻辑；
相对应的基本门电路有：与门、或门、非门。





3.4.1 二极管与门电路

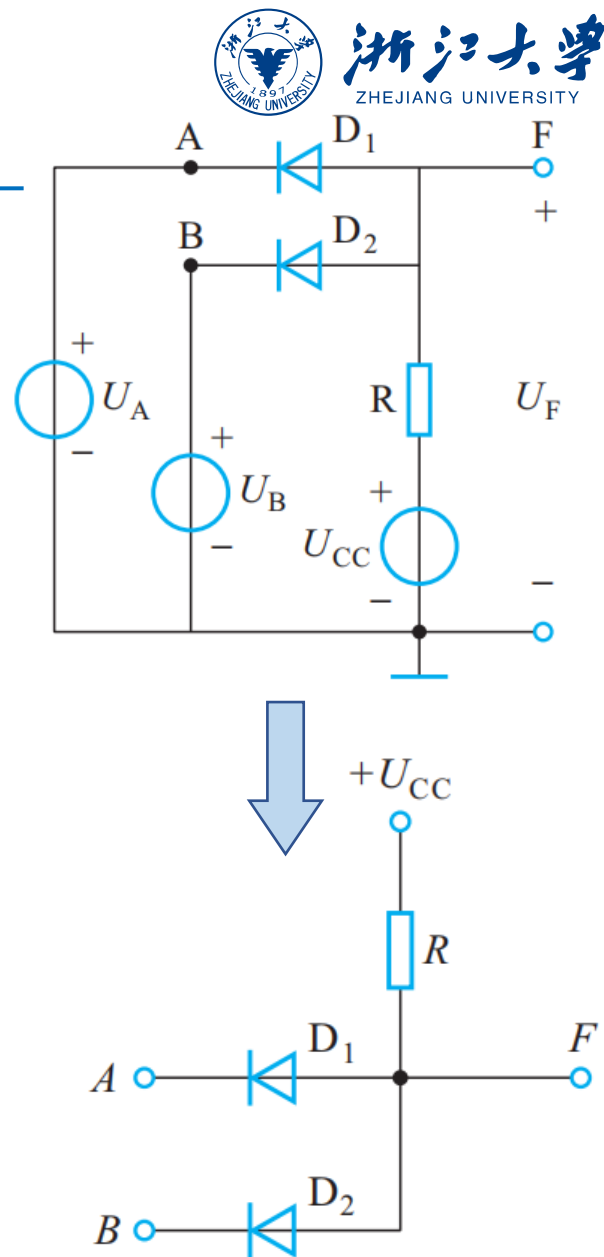
工作原理:

(1) 当 $U_A=U_B=0V$ 时, D_1 、 D_2 均导通, 故 $U_F=0V$, 即 F 为低电平0;

(2) 当 $U_A=0V$, $U_B=3V$ 时, D_1 导通, D_2 截止, 故 $U_F=0V$, 即 F 为低电平0;

(3) 当 $U_A=3V$, $U_B=0V$ 时, D_1 截止, D_2 导通, 故 $U_F=0V$, 即 F 为低电平0;

(4) 当 $U_A=U_B=3V$ 时, D_1 、 D_2 均导通, 故 $U_F=3V$, 即 F 为高电平1。

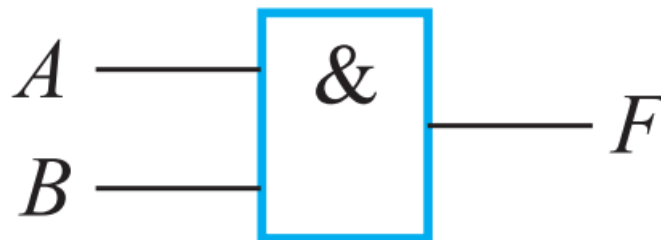


3.4.1 二极管与门电路

二输入与门逻辑表

输 入		输 出
A	B	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

二输入与门逻辑符号



函数表达式:

$$F = A \cdot B$$

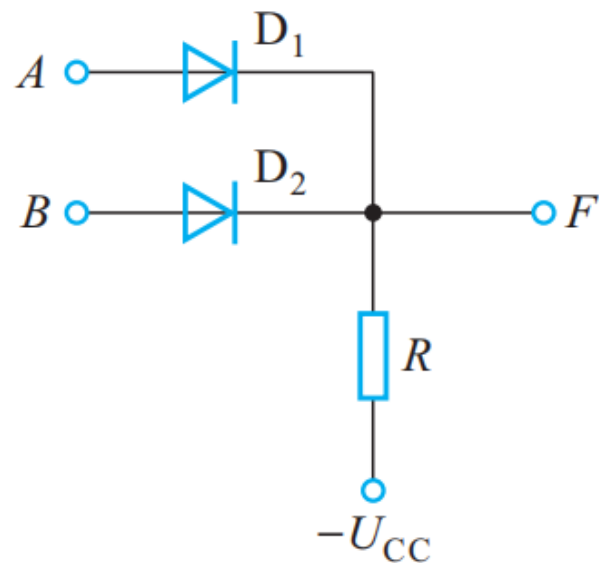


3.4.2 二极管或门电路

工作原理：

(1) 当 $U_A=U_B=0V$ 时， D_1 、 D_2 均导通，故 $U_F=0V$ ，即F为低电平0；

(2) 当 U_A 、 U_B 不全为0时， D_1 、 D_2 至少有一个导通。如 $U_A=3V$ 时， D_1 导通，此时 $U_F=U_A=3V$ ，即F为高电平1。

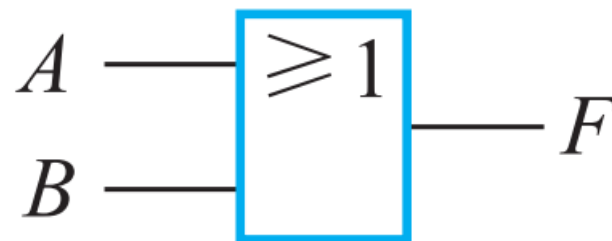


3.4.2 二极管或门电路

二输入或门逻辑表

输 入		输 出
A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

二输入或门逻辑符号



函数表达式:

$$F = A + B$$

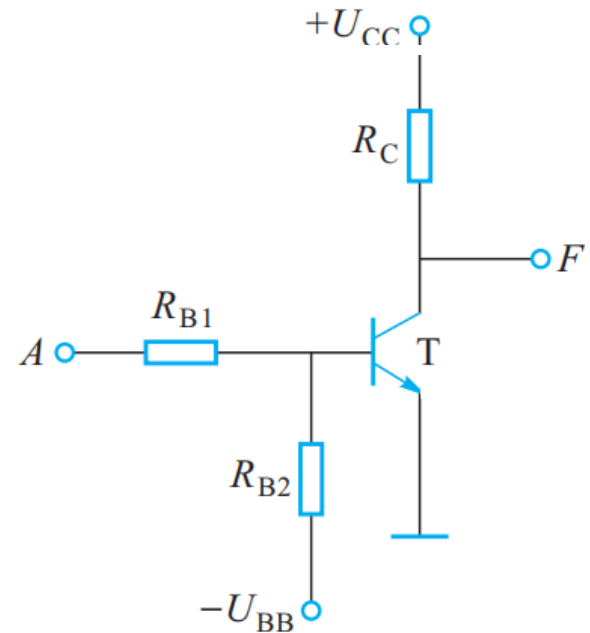


3.4.3 晶体管及场效晶体管非门电路

1. 晶体管非门电路

输入 U_A 为低电平 0 时, $U_{BE} < 0$, 晶体管发射结反偏, 管子截止, 输出端 F 为高电平 1;

输入 U_A 为高电平时, 管子饱和, 输出端 F 为低电平 0。



要使得管子饱和, 须满足

$$I_{CS} = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_C} \approx \frac{U_{CC}}{R_C}$$

此时基极电流至少为 $I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta}$ ——临界饱和基极电流

保证晶体管饱和的条件 $I_B \geq I_{BS}$



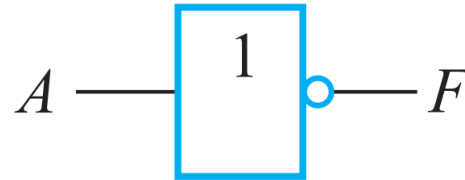
3.4.3 晶体管及场效晶体管非门电路

非门逻辑表、逻辑符号及函数表达式

非门逻辑表

输 入	输 出
A	F
0	1
1	0

非门逻辑符号



函数表达式:

$$F = \bar{A}$$



例题

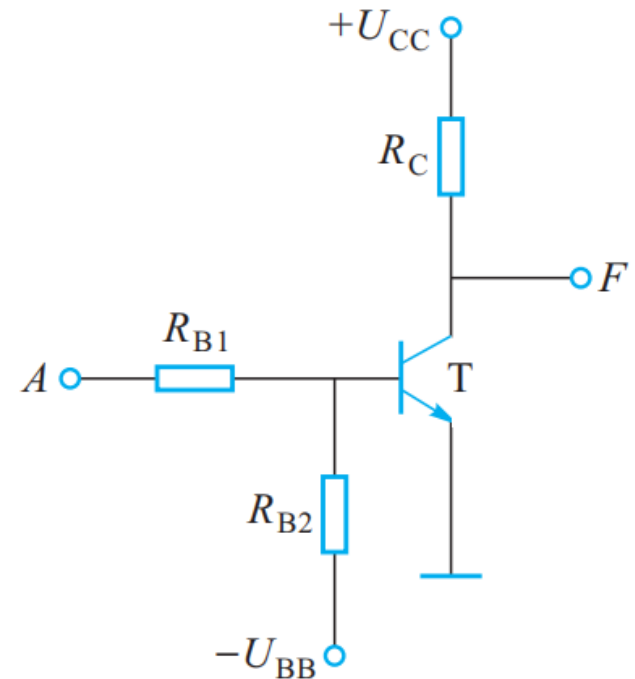
[例3.4.1]

已知: $R_{B1} = 2.7k\Omega$, $R_{B2} = 10k\Omega$, $R_C = 1k\Omega$, $U_{CC} = 5V$, $-U_{BB} = -5V$,
 $\beta = 30$, $U_{BES} = 0.7V$, $U_{CES} \approx 0V$, 截止时 $I_C \approx 0$, $U_{IL} = 0V$, $U_{IH} = 3V$;
试分析管子的输出状态。

解: (1) 输入 U_A 为低电平0时

$$\begin{aligned} U_{BE} &= -\frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{BB} \\ &= -\frac{2.7 \times 10^3}{(2.7 + 10) \times 10^3} \times 5 = -1.06(V) \end{aligned}$$

此时晶体管可靠截止, $U_F \approx U_C = 5V$,
输出F为高电平。



例 题

(2) 输入 $U_A = 3V$, A 为高电平1时
将晶体管基极左侧作戴维南等效 开路电压

$$U_{BO} = U_{IH} - \frac{U_{IH} + U_{BB}}{R_{B1} + R_{B2}} R_{B1}$$

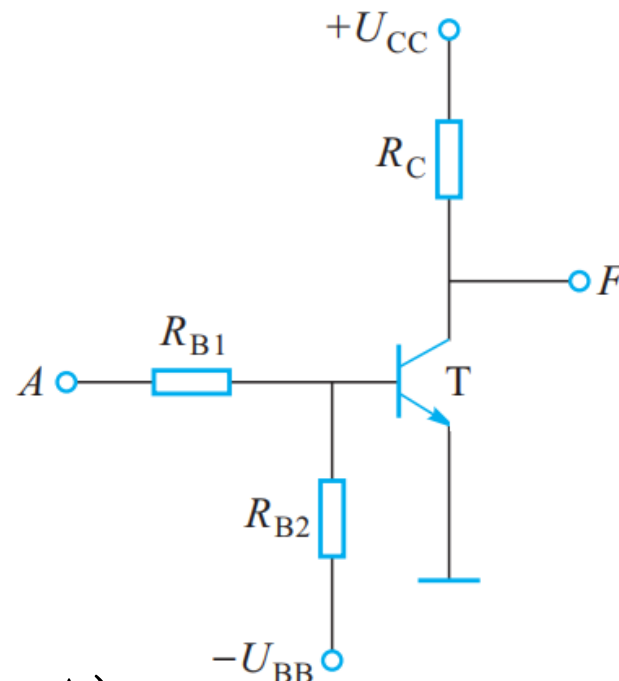
$$= \left[3 - \frac{3 + 5}{(2.7 + 10) \times 10^3} \times 2.7 \times 10^3 \right] = 1.3(V)$$

等效电阻 $R_B = R_{B1} // R_{B2} = 2.13k\Omega$

基极电流 $I_B = \frac{U_{BO} - U_{BES}}{R_B} = \frac{1.3 - 0.7}{2.13 \times 10^3} = 0.28(mA)$

临界基极饱和电流 $I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{U_{CC}}{\beta R_C} = \frac{5}{30 \times 1 \times 10^3} = 0.17(mA)$

因 $I_B > I_{BS}$, 晶体管处于饱和, $U_F = U_{CES} \approx 0V$, F 为0。



3.4.3 晶体管及场效晶体管非门电路

2. 场效晶体管非门电路

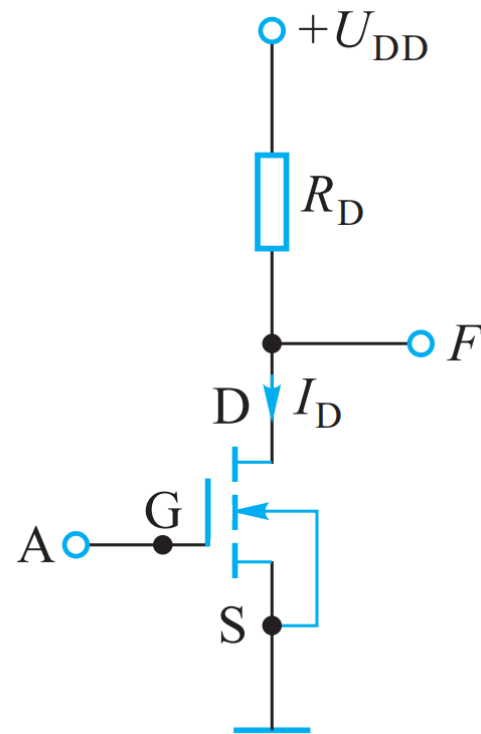
NMOS非门电路

工作原理：

(1) 当输入 U_A 为低电平0时，使 $U_{GS} < U_{GS(th)}$ ，管子处于截止状态， $I_D = 0$ ， $U_F = U_{DD}$ ；输出端 F 为高电平1；

(2) 当输入 U_A 为高电平1时， $U_{GS} > U_{GS(th)}$ ，管子饱和导通， $U_F \approx 0$ ，输出端 F 为低电平0。

故电路满足**非**逻辑关系。



3.4.3 晶体管及场效晶体管非门电路

互补型MOS非门电路

T_N : 增强型NMOS管, 驱动管; T_P : 增强型PMOS管, T_N 的负载管。

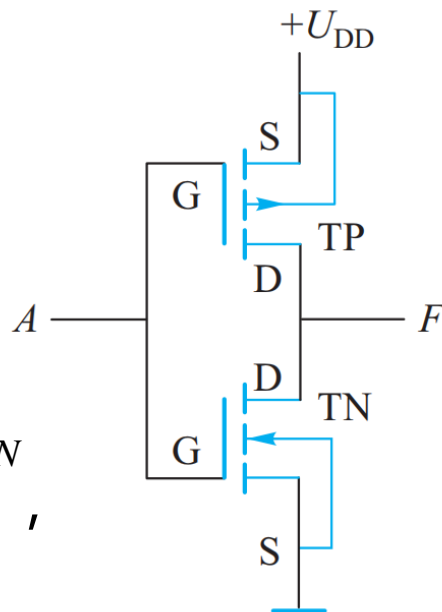
设 T_N 和 T_P 的开启电压为 $U_{GSN(th)}$ 和 $U_{GSP(th)}$

(1) $A=0$ (设 $u_A = 0V$) , $U_{GSN} = 0 < U_{GSN(th)}$, T_N 截止, 而 $|U_{GSP}| \approx |U_{DD}| > |U_{GSP(th)}|$, T_P 导通, $u_F \approx U_{DD}$, $F=1$, 为高电平。

(2) $A=1$ (设 $u_A = U_{DD}$) , $U_{GSN} = U_{DD} > U_{GSN(th)}$, T_N 导通, 而 $U_{GSP} \approx 0V < |U_{GSP(th)}|$, T_P 截止, $u_F \approx 0V$, $F=0$, 为低电平。

从以上分析可知, 该电路具有非门的功能。

相比于NMOS非门电路, 互补型MOS在工作时只有一个MOS管导通, 静态功耗很小; 另外因 T_N , T_P 导通电阻小, 负载电容充电或放电很快, 故工作速度更快。





本章结束 返回目录
第4章 数字集成电路

