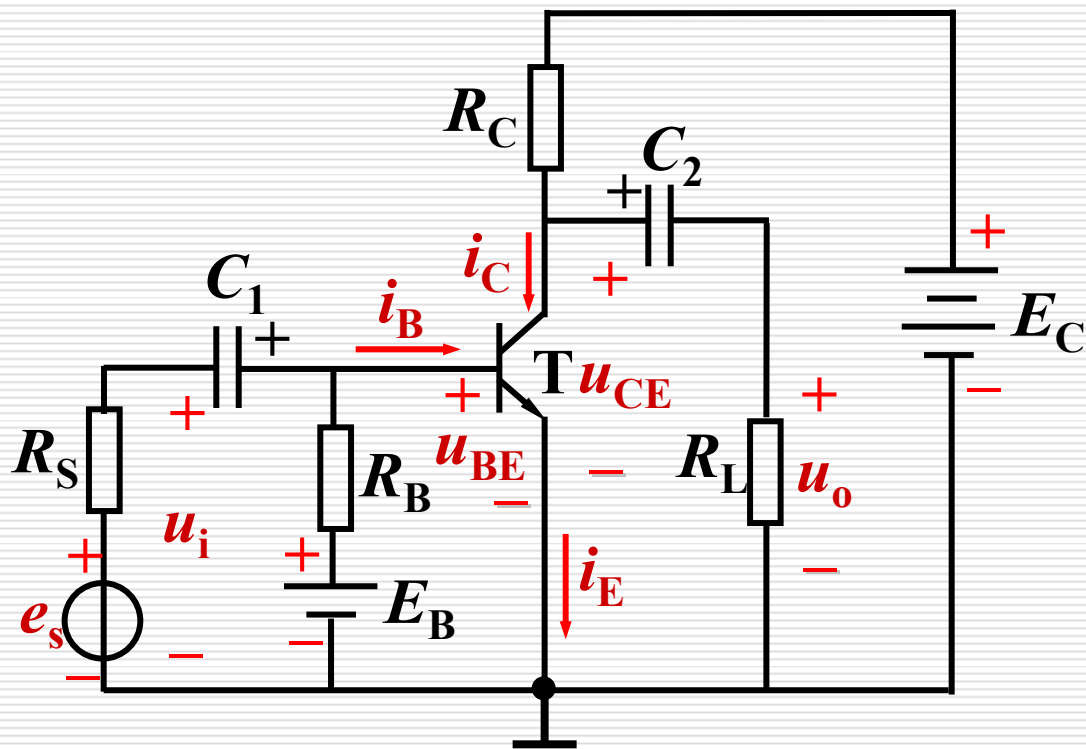


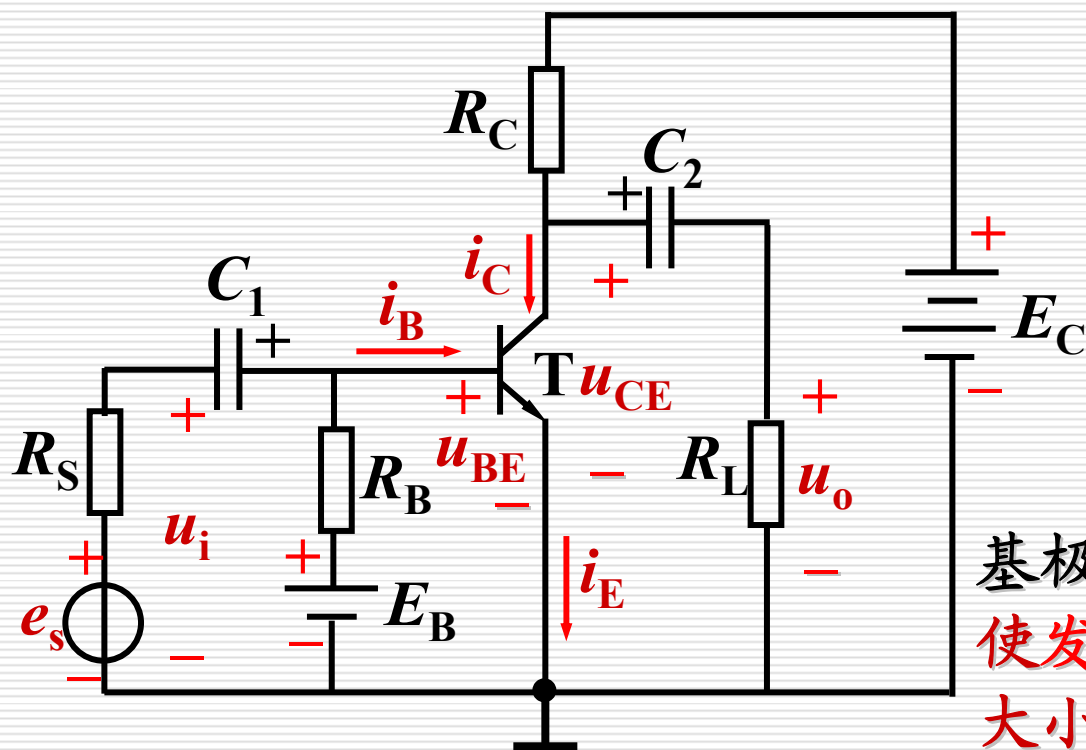
单管放大电路

1. 基本的共射级放大电路
2. 共射级放大电路的主要技术指标
3. 共射级放大电路静态分析
4. 共射级放大电路动态分析
5. 共射级放大电路非线性失真
6. 静态工作点的稳定

1. 基本的共射级放大电路



1. 基本的共射级放大电路

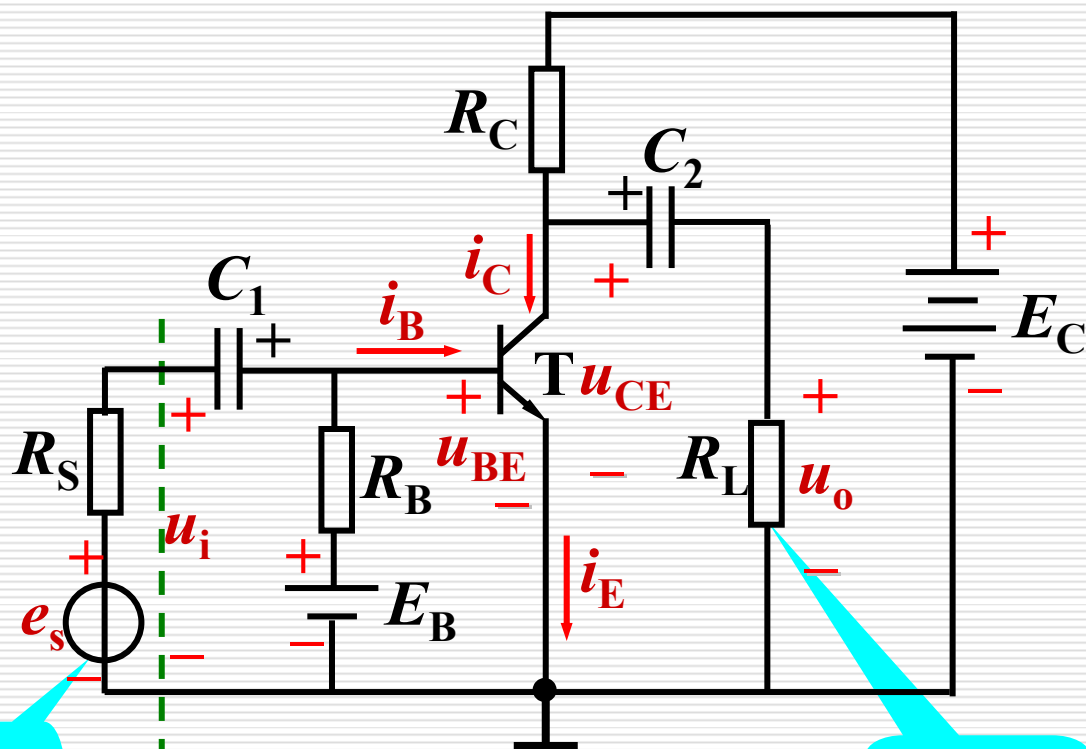


晶体管T—
放大元件， $i_C = \beta i_B$ 。
要保证集电结反偏，发射结正偏，使晶体管工作在放大区。

基极电源 E_B 与基极电阻 R_B —
使发射结处于正偏，并提供大小适当的基极电流。

共发射极基本电路

1. 基本的共射级放大电路



共发射极基本电路

信号源

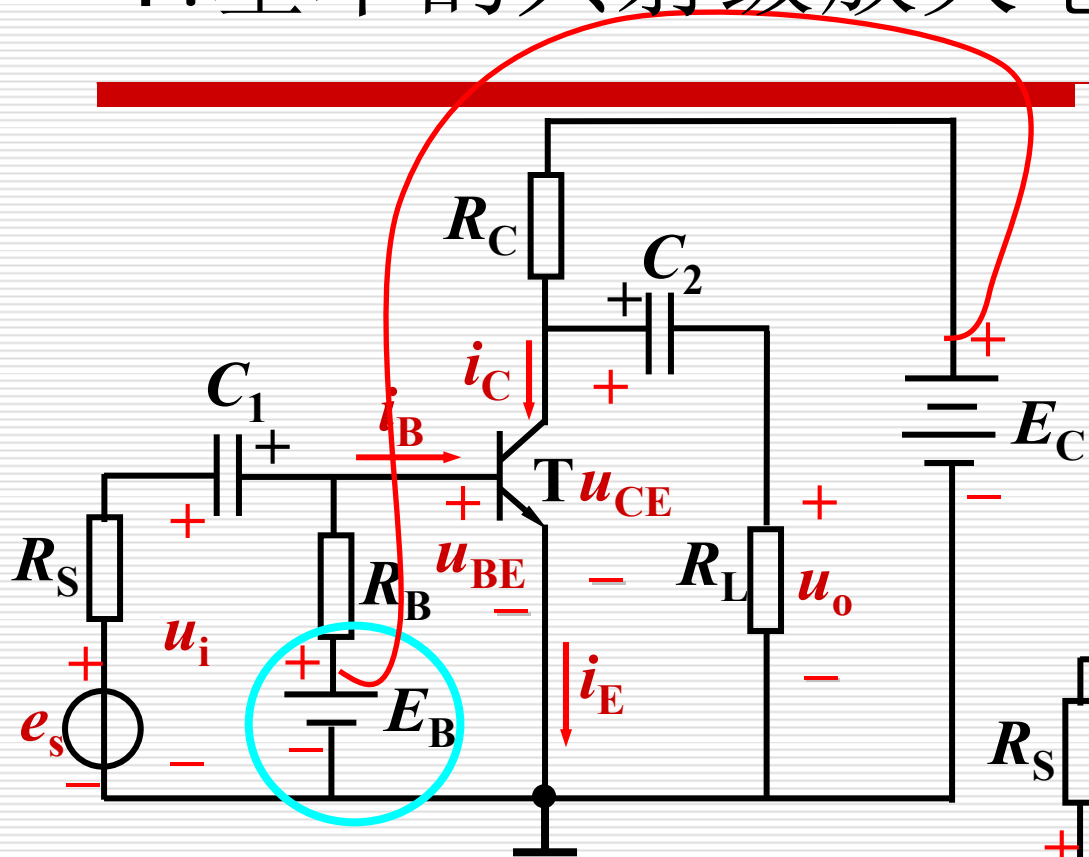
负载

集电极电源 E_C -- 为电路提供能量。并保证集电结反偏。

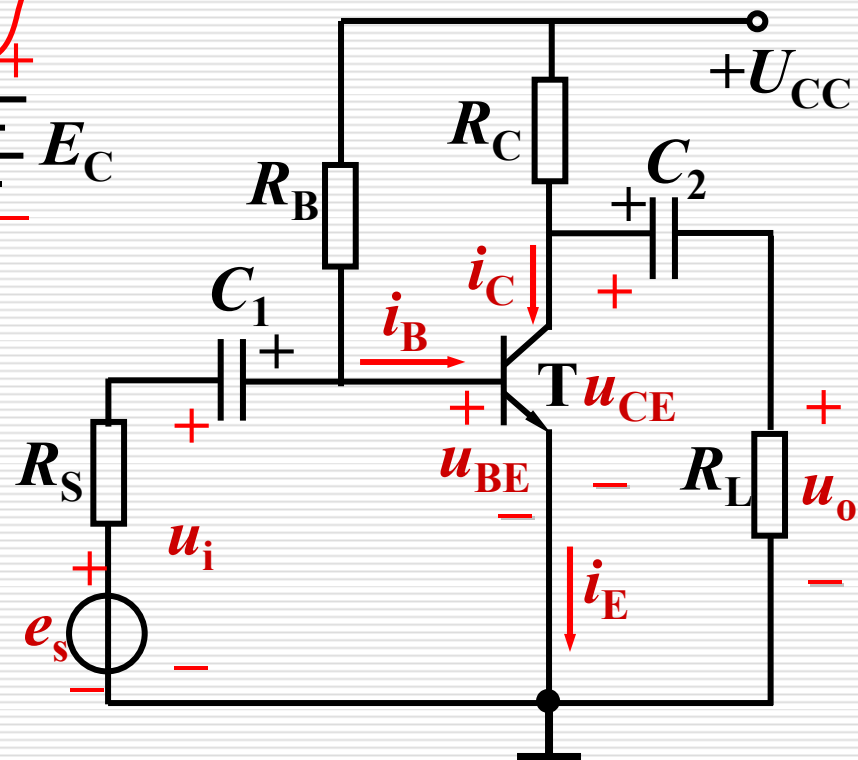
集电极电阻 R_C -- 将变化的电流转变为变化的电压。

耦合电容 C_1 、 C_2 -- 隔离输入、输出与放大电路直流的联系，同时使信号顺利输入、输出。

1. 基本的共射级放大电路



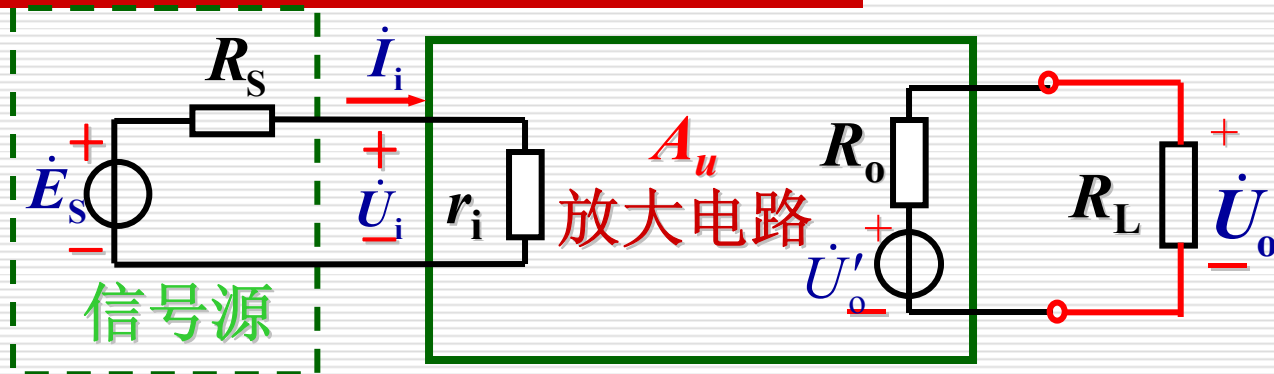
共发射极基本电路



单电源供电时常用的画法

电工与电子技术基础

2. 共射级放大电路的主要技术指标



1. 放大倍数 $A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

2. 放大电路输入电阻 $r_i = \frac{\dot{U}_i}{I_i}$

3. 放大电路输出电阻 R_o

3. 共射级放大电路静态分析

静态：放大电路无信号输入 ($u_i = 0$) 时的工作状态。

静态分析：确定放大电路的静态值。

——静态工作点Q: I_B 、 I_C 、 U_{CE} 。

分析方法：直流通路法、图解法。

分析对象：各极电压电流的直流分量。

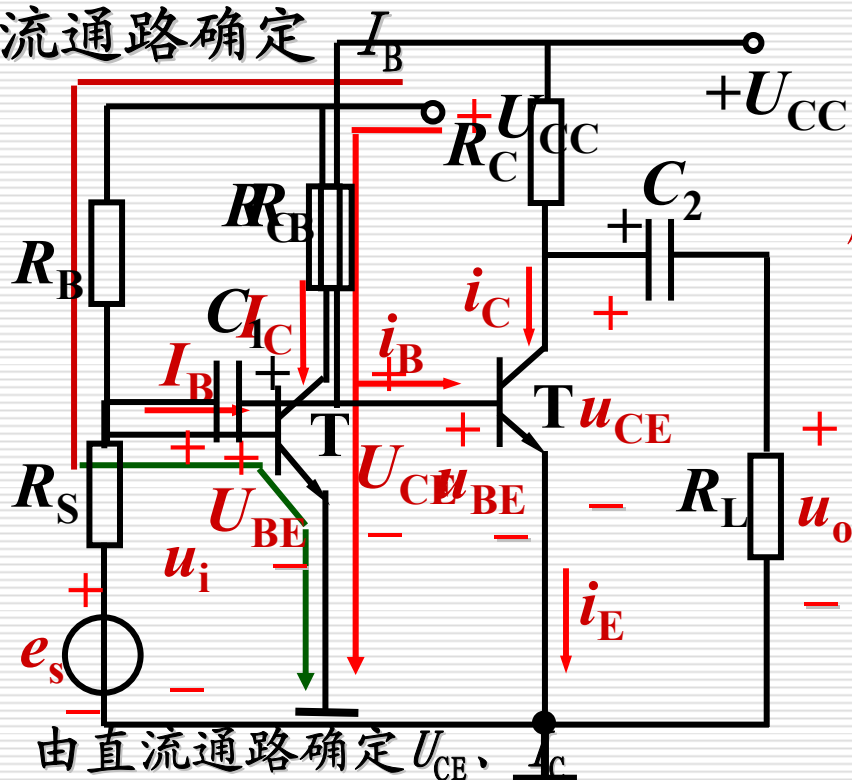
所用电路：放大电路的直流通路。

设置Q点的目的：

- (1) 使放大电路的放大信号不失真；
- (2) 使放大电路工作在较佳的工作状态，静态是动态的基础。

3. 共射级放大电路静态分析

1. 直流通路确定



由KVL: $U_{CC} = I_B R_B + U_{BE}$

所以 $I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$

当 $U_{BE} \ll U_{CC}$

$$I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_B}$$

2. 由直流通路确定 U_{CE} 、 I_C

根据电流放大作用 $I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \approx \bar{\beta} I_B \approx \beta I_B$

由KVL: $U_{CC} = I_C R_C + U_{CE}$ 所以 $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$

3. 共射级放大电路静态分析

例1: 用直流通路计算静态工作点。

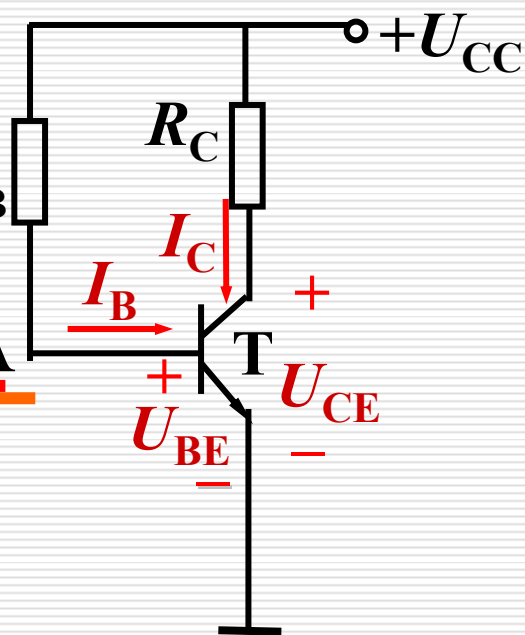
已知: $U_{CC}=12V$, $R_C=4k\Omega$, $R_B=300k\Omega$, $\beta =37.5$

解: $I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_B} = \frac{12}{300} \text{mA} = \underline{40\mu\text{A}}$

$I_C \approx \beta I_B = 37.5 \times 0.04 \text{mA} = \underline{1.5 \text{mA}}$

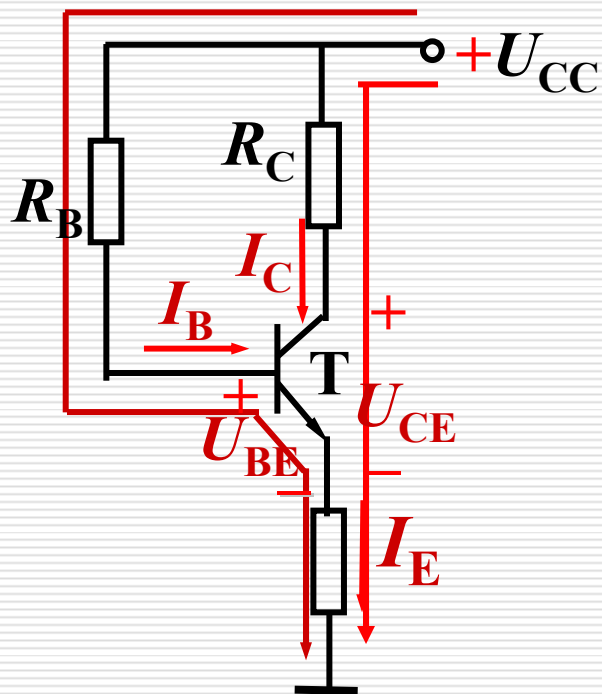
$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$
 $= 12 - 1.5 \times 4 \text{V} = 6 \text{V}$

注意: 电路中 I_B 和 I_C 的数量级不同



3. 共射级放大电路静态分析

例2: 用直流通路法计算图示电路的静态工作点。



由KVL可得:

$$\begin{aligned} U_{CC} &= I_B R_B + U_{BE} + I_E R_E \\ &= I_B R_B + U_{BE} + (1 + \beta) I_B R_E \end{aligned}$$

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

$$I_C \approx \beta I_B$$

由KVL可得:
$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - I_E R_E$$

由例1、例2可知, 当电路不同时, 计算静态值的公式也不同。

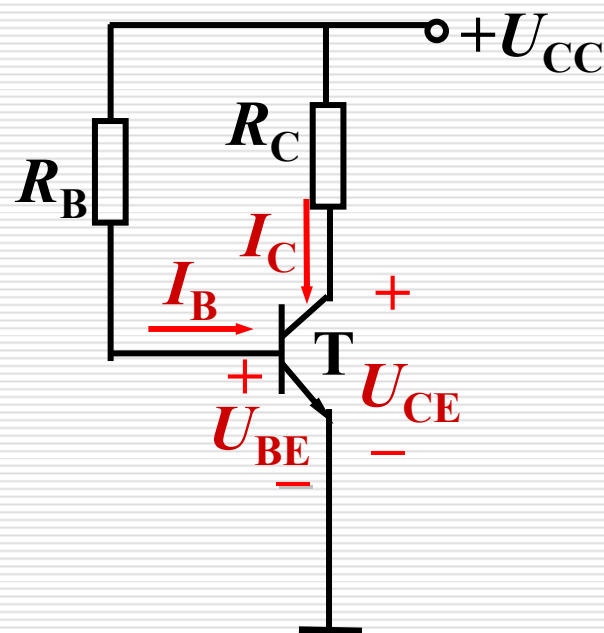
3. 共射级放大电路静态分析

优点：能直观地分析和了解静态值的变化对放大电路的影响。

步骤：

1. 用直流通路法确定 I_B
2. 由输出特性确定 I_C 和 U_{CE}

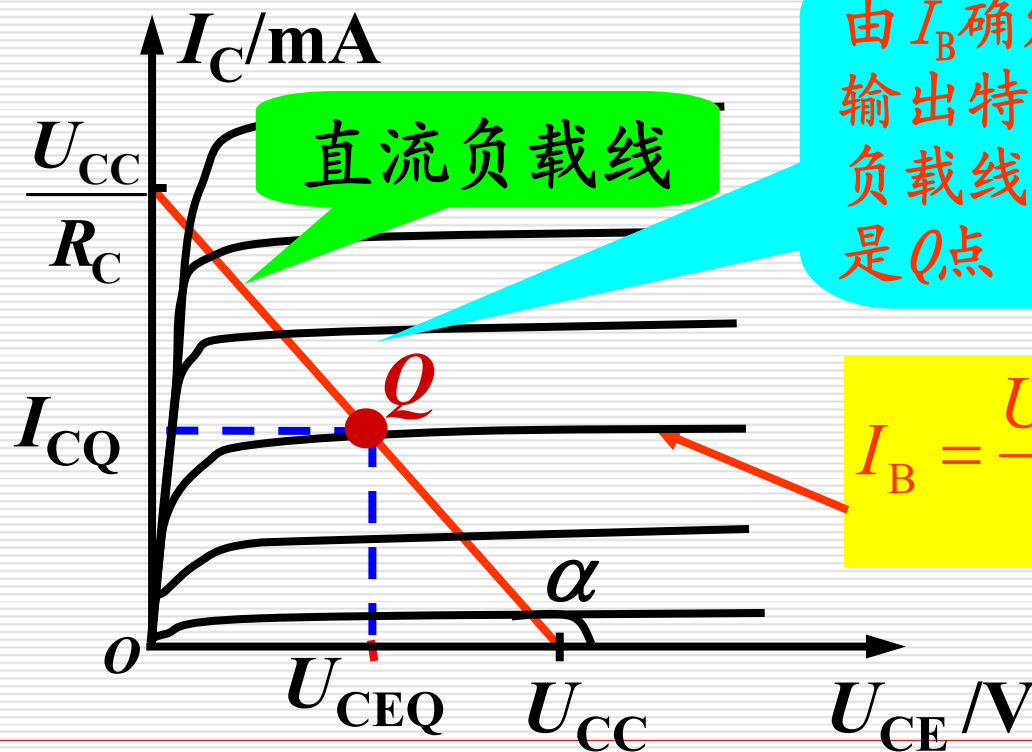
$$\begin{cases} U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C \\ I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B = \text{常数}} \end{cases}$$



直流负载线方程

3. 共射级放大电路静态分析

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



由 I_B 确定的那条输出特性与直流负载线的交点就是 Q 点

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

$$\tan \alpha = -\frac{1}{R_C}$$

直流负载线斜率

电工与电子技术基础

4. 共射级放大电路动态分析

动态：放大电路有信号输入（ $u_i \neq 0$ ）时的工作状态。

动态分析：算电压放大倍数 A_u 、输入电阻 r_i 、输出电阻 r_o 等。

分析对象：各极电压和电流的交流分量。

分析方法：微变等效电路法，图解法。

所用电路：放大电路的交流通路。

目的：找出 A_u 、 r_i 、 r_o 与电路参数的关系，为设计打基础。

4. 共射级放大电路动态分析

微变等效电路:

把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。即把非线性的晶体管线性化，等效为一个线性元件。

线性化的条件:

晶体管在小信号（微变量）情况下工作。因此，在静态工作点附近小范围内的特性曲线可用直线近似代替。

微变等效电路法:

利用放大电路的微变等效电路分析计算放大电路电压放大倍数 A_u 、输入电阻 r_i 、输出电阻 r_o 等。

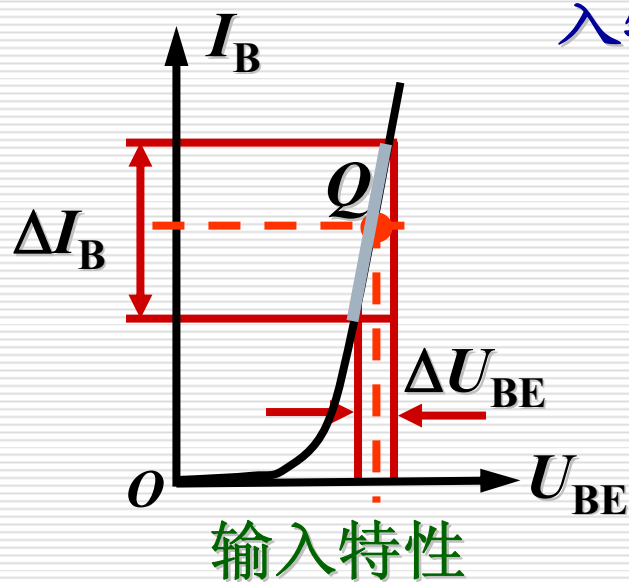
4. 共射级放大电路动态分析

1. 晶体管的微变等效电路

晶体管的微变等效电路可从晶体管特性曲线求出。

(1) 输入回路

当信号很小时，在静态工作点附近的输入特性在小范围内可近似线性化。



晶体管的
输入电阻

$$r_{be} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \Big|_{U_{CE}} = \frac{u_{be}}{i_b} \Big|_{U_{CE}}$$

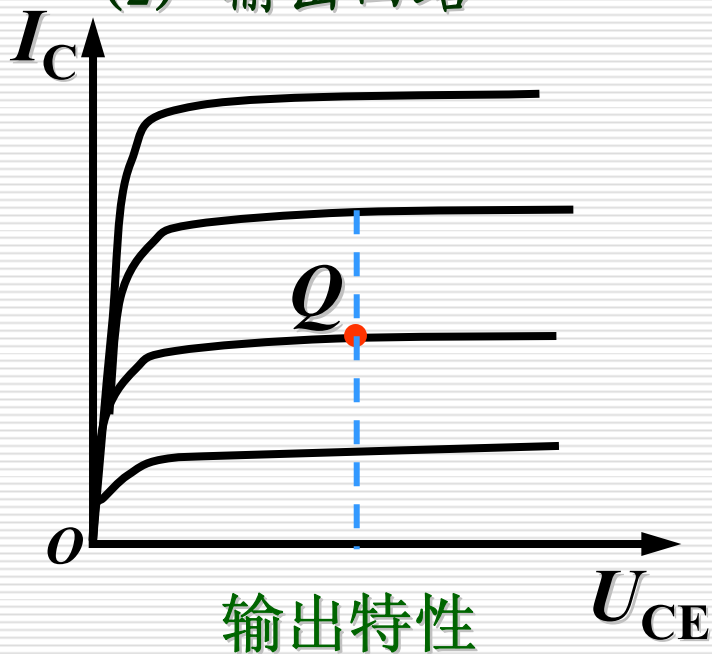
晶体管的输入回路 (B、E之间) 可用 r_{be} 等效代替，即由 r_{be} 来确定 u_{be} 和 i_b 之间的关系。

对于小功率三极管：

r_{be} 一般为几百欧到几千欧。

4. 共射级放大电路动态分析

(2) 输出回路



输出特性在线性工作区是一组近似等距的平行直线。

晶体管的电流放大系数

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{U_{CE}}$$

晶体管的输出回路(C、E之间)可用一受控电流源 $i_c = \beta i_b$ 等效代替，即由 β 来确定 i_c 和 i_b 之间的关系。

β 一般在20~200之间，在手册中常用 h_{fe} 表示。

晶体管的输出电阻

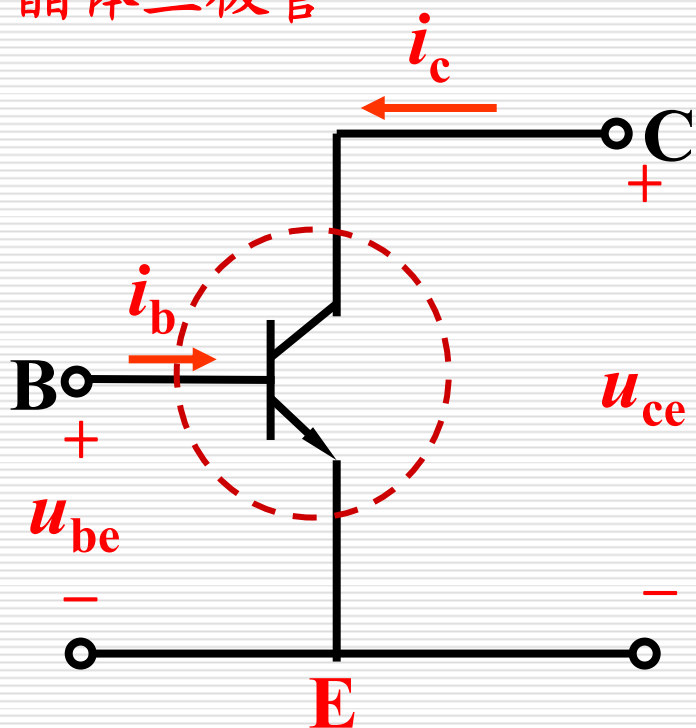
$$r_{ce} = \left. \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} \right|_{I_B} = \left. \frac{u_{ce}}{i_c} \right|_{I_B}$$

r_{ce} 愈大，恒流特性愈好
因 r_{ce} 阻值很高，一般为几千欧至几百千欧

4. 共射级放大电路动态分析

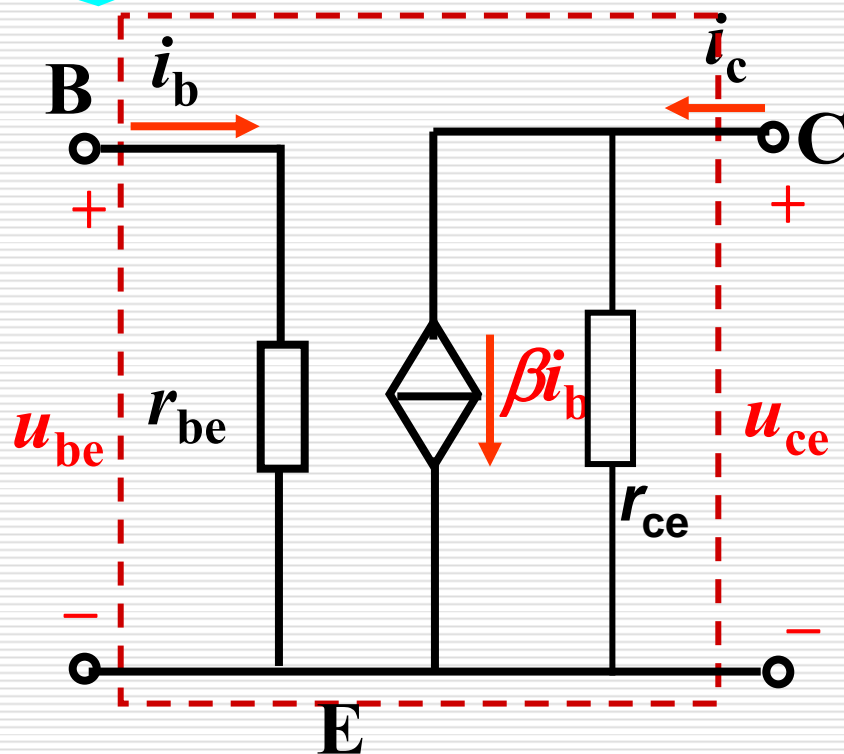
1. 晶体管的微变等效电路

晶体三极管



晶体管的B、E之间可用 r_{be} 等效代替。

微变等效电路

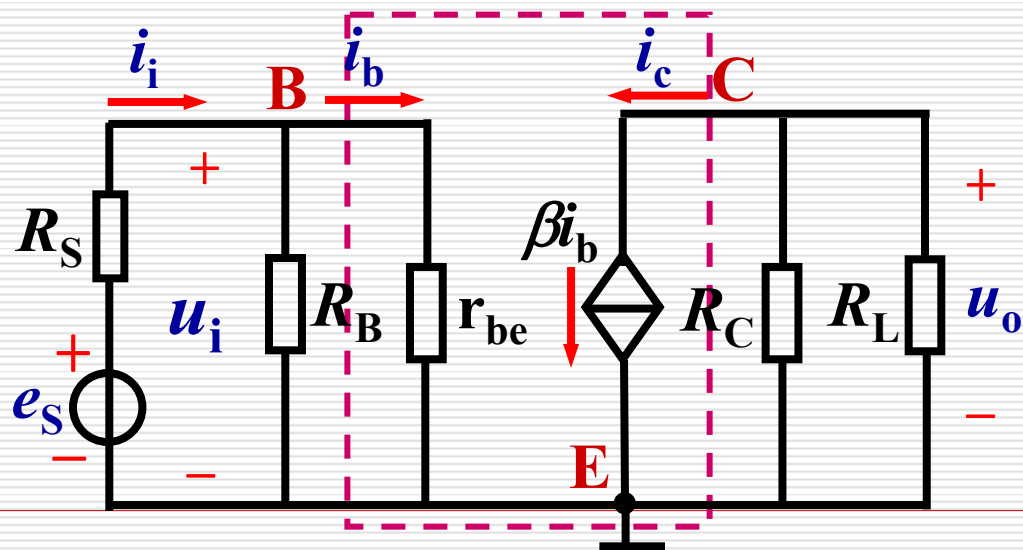
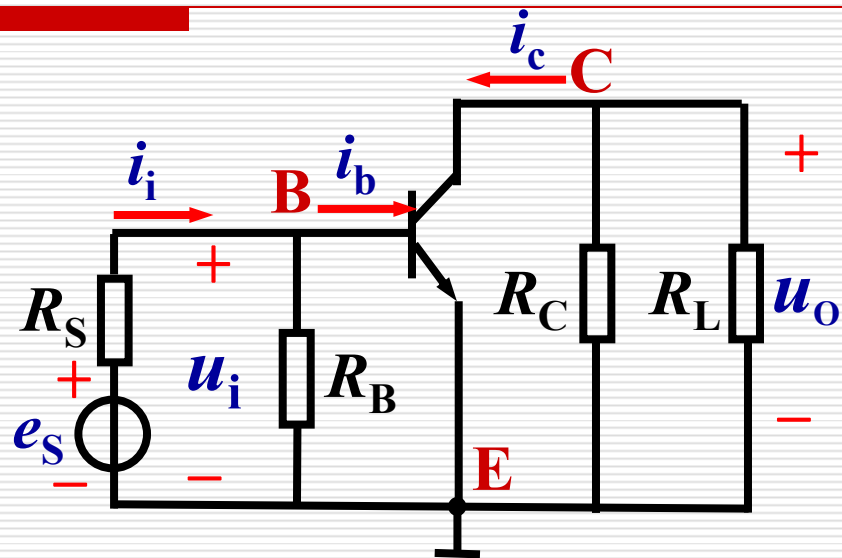


晶体管的C、E之间可用一受控电流源 $i_c = \beta i_b$ 等效代替。

4. 共射级放大电路动态分析

2. 放大电路的微变等效电路

将交流通路中的晶体管用晶体管微变等效电路代替即可得放大电路的微变等效电路。

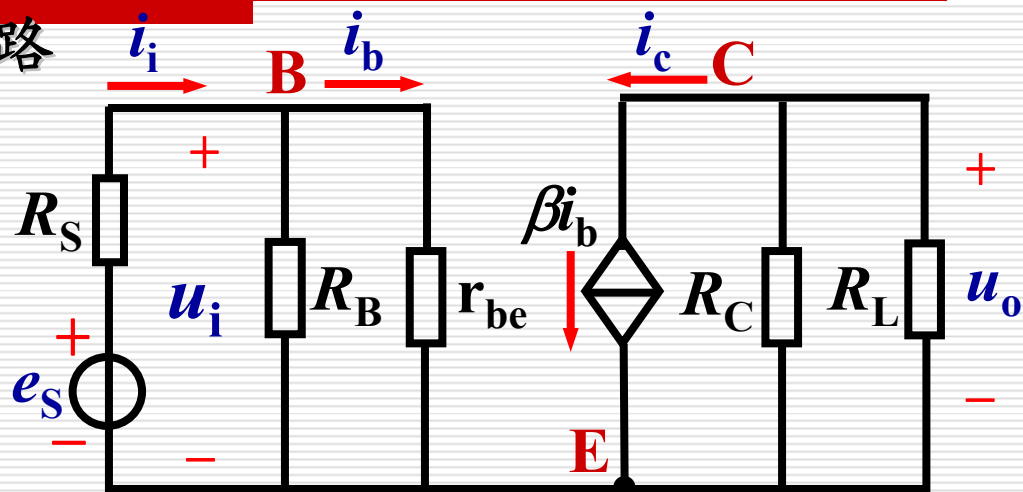


交流通路

4. 共射级放大电路动态分析

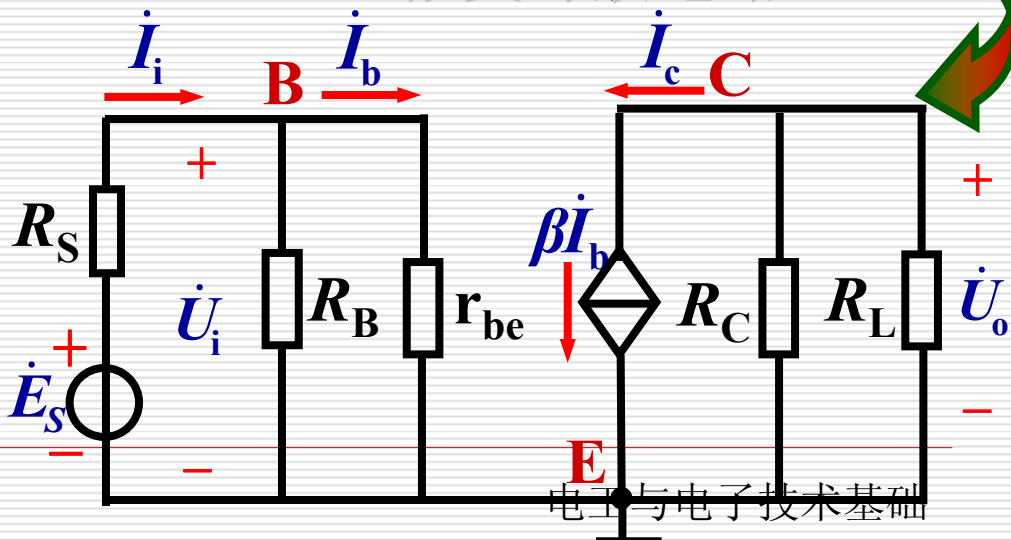
2. 放大电路的微变等效电路

将交流通路中的晶体管用晶体管微变等效电路代替即可得放大电路的微变等效电路。



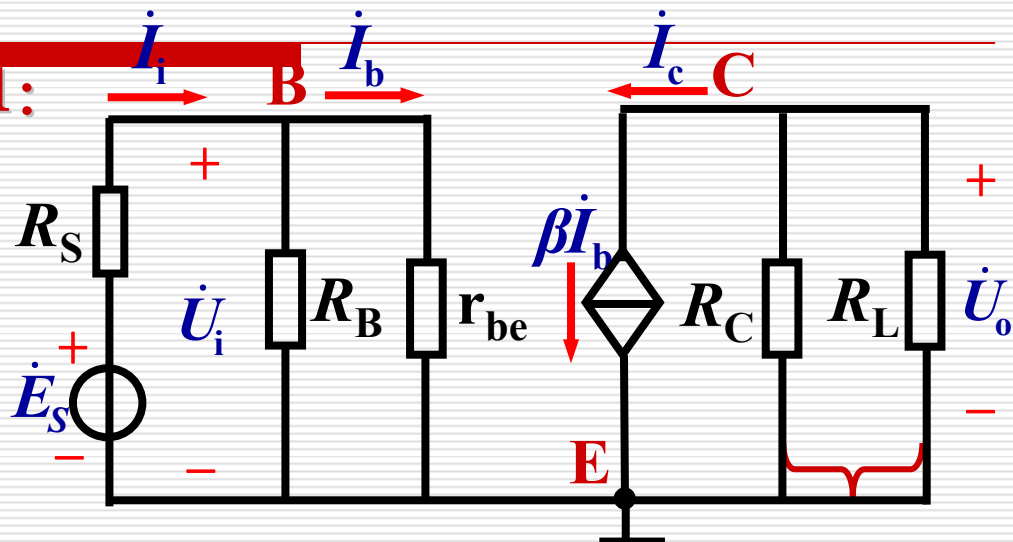
微变等效电路

分析时假设输入为正弦交流，所以等效电路中的电压与电流可用相量表示。



4. 共射级放大电路动态分析

3. 电压放大倍数的计算 **例1:**



$$R'_L = R_C // R_L$$

定义: $A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

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

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R'_L = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

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

式中的负号表示输出电压的相位与输入反。

当放大电路输出端开路 (未接 R_L) 时,

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

负载电阻愈小, 放大倍数愈小。

因 r_{be} 与 I_E 有关, 故放大倍数与静态 I_E 有关。

电工与电子技术基础

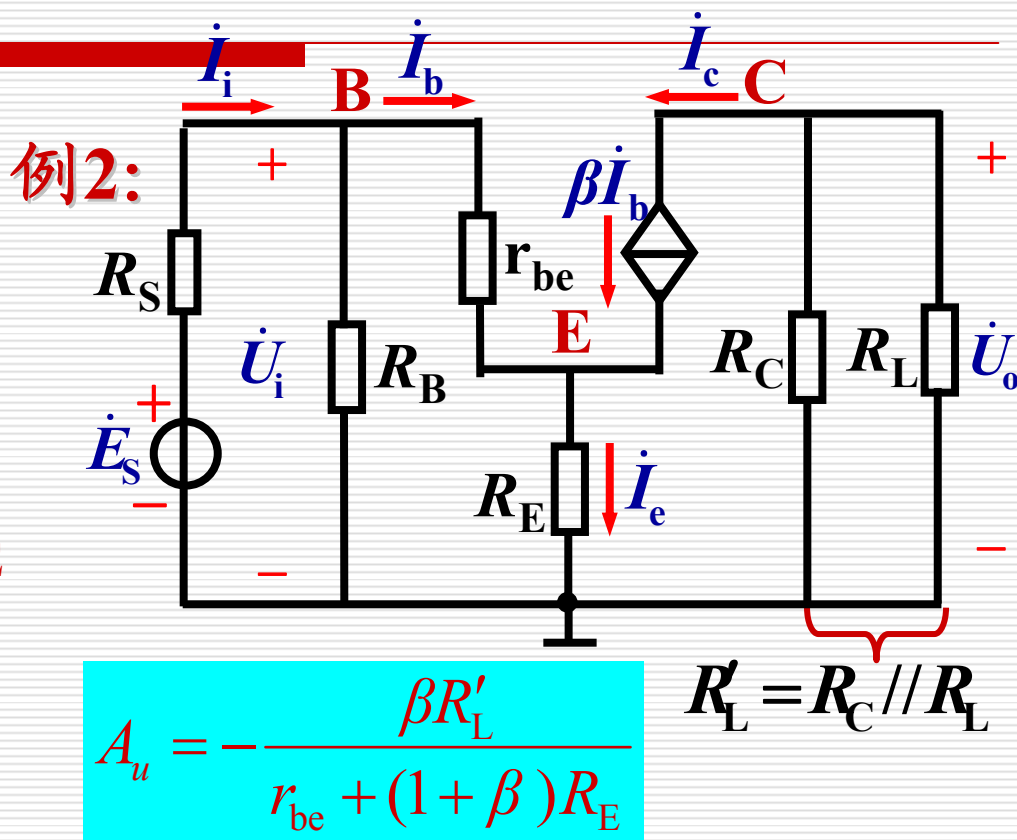
4. 共射级放大电路动态分析

3. 电压放大倍数的计算

定义: $A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

$$\begin{aligned} \dot{U}_i &= \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_E \\ &= \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R_E \end{aligned}$$

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R'_L = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

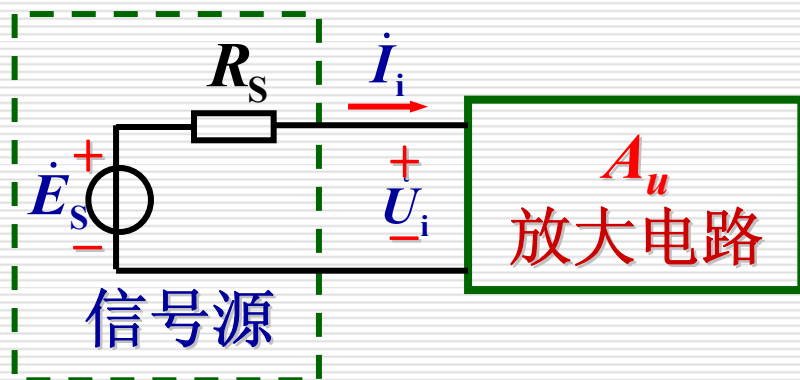


由例1、例2可知，当电路不同时，计算电压放大倍数 A_u 的公式也不同。要根据微变等效电路找出 u_i 与 i_b 的关系、 u_o 与 i_c 的关系。

4. 共射级放大电路动态分析

4. 放大电路输入电阻的计算

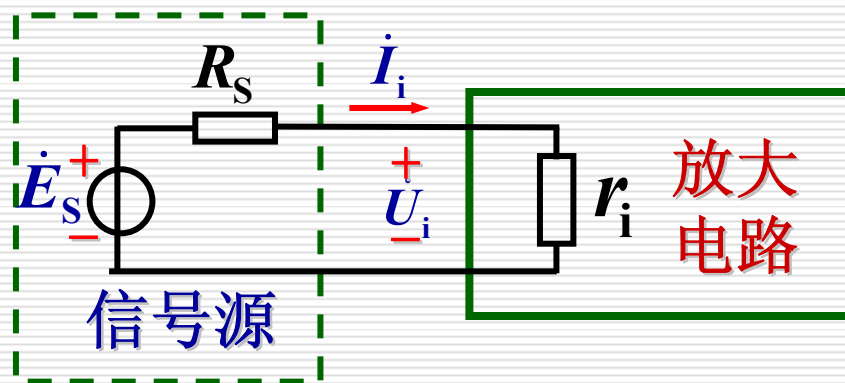
放大电路对信号源 (或对前级放大电路) 来说, 是一个负载, 可用一个电阻来等效代替。这个电阻是信号源的负载电阻, 也就是放大电路的输入电阻。



输入电阻是对交流信号而言的, 是动态电阻。

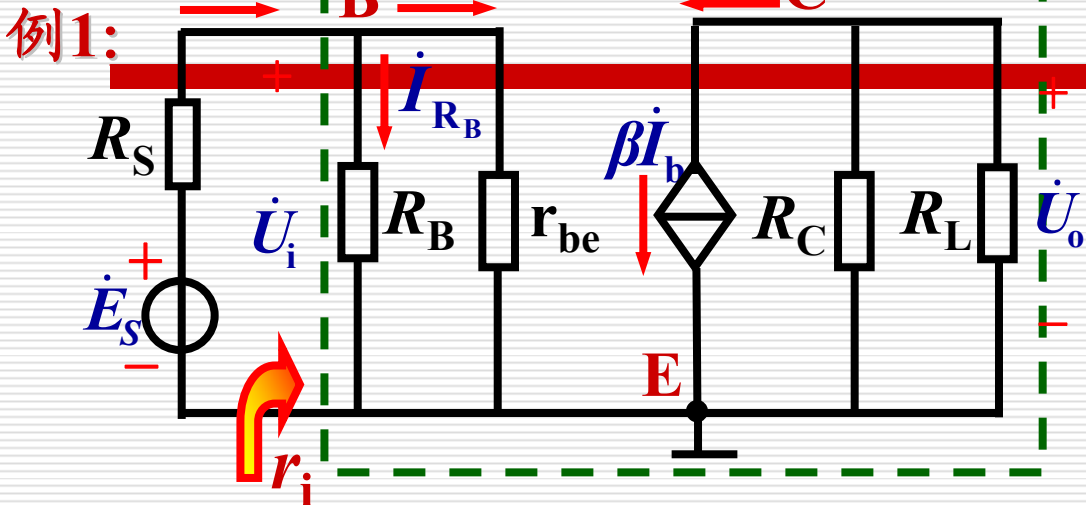
定义:

输入电阻 $r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$



输入电阻是表明放大电路从信号源吸取电流大小的参数。电路的输入电阻愈大, 从信号源取得的电流愈小, 电源负担愈小, 输入电压愈大。因此一般总是希望得到较大的输入电阻。

4. 共射级放大电路动态分析

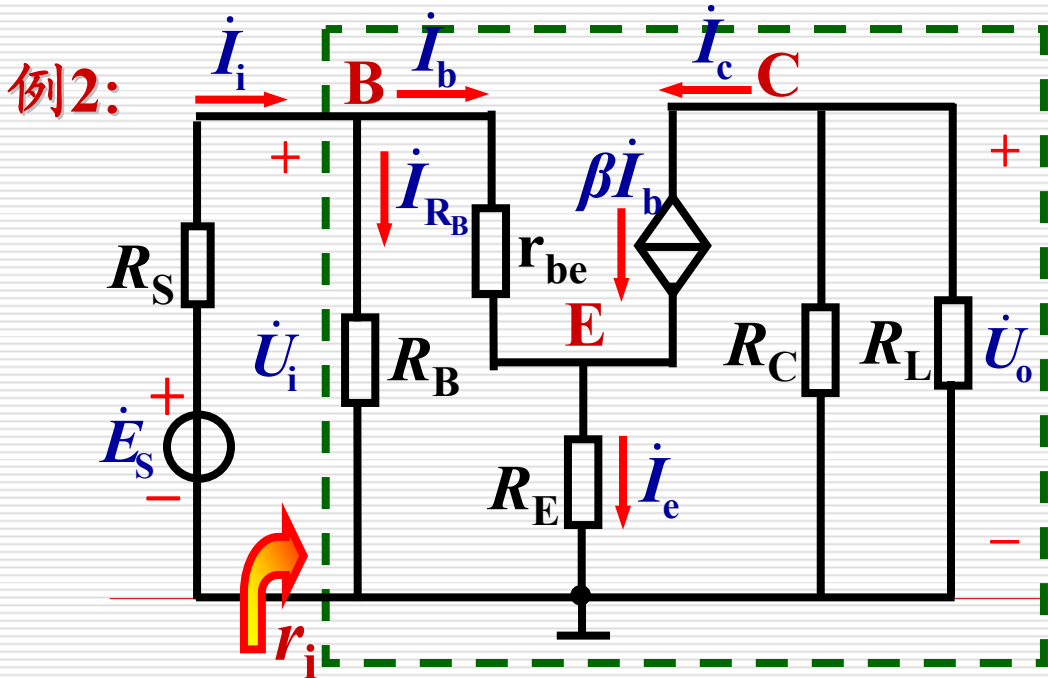


$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_{R_B} + \dot{I}_b}$$

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

当 $R_B \gg r_{be}$ 时,

$$r_i \approx r_{be}$$



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

$$= \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R_E$$

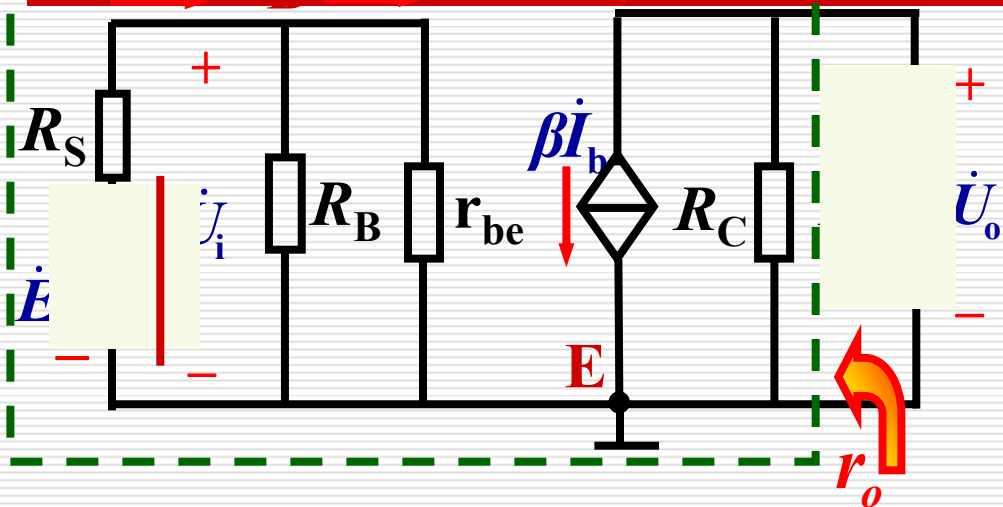
$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_i}{r_{be} + (1 + \beta) R_E}$$

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

电工与电子技术基础

4. 共射级放大电路动态分析

例3: \dot{I}_i \dot{I}_b \dot{I}_c \dot{I}_o



外加

求 r_o 的步骤:

- 1) 断开负载 R_L $\dot{I}_o = \dot{I}_c + \dot{I}_{R_C}$
- 2) 令 $\dot{U}_i = 0$ 或 $\dot{E}_s = 0$ $\dot{I}_c = \beta \dot{I}_b$ $\dot{I}_b = 0$ 所以 $\dot{I}_c = 0$
- 3) 外加电压 \dot{U}_o
- 4) 求 \dot{I}_o $\dot{I}_{R_C} = \frac{\dot{U}_o}{R_C}$ $r_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \approx R_C$

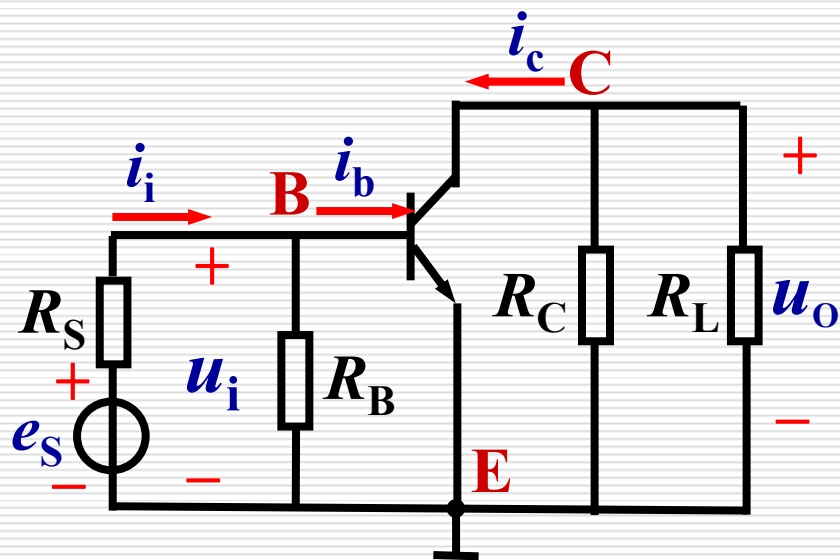
4. 共射级放大电路动态分析

$$u_{ce} = -R'_L i_c$$

是一条斜率为 $-\frac{1}{R'_L}$

且通过 Q 点的直线

称为交流负载线 $\because R'_L < R_C$

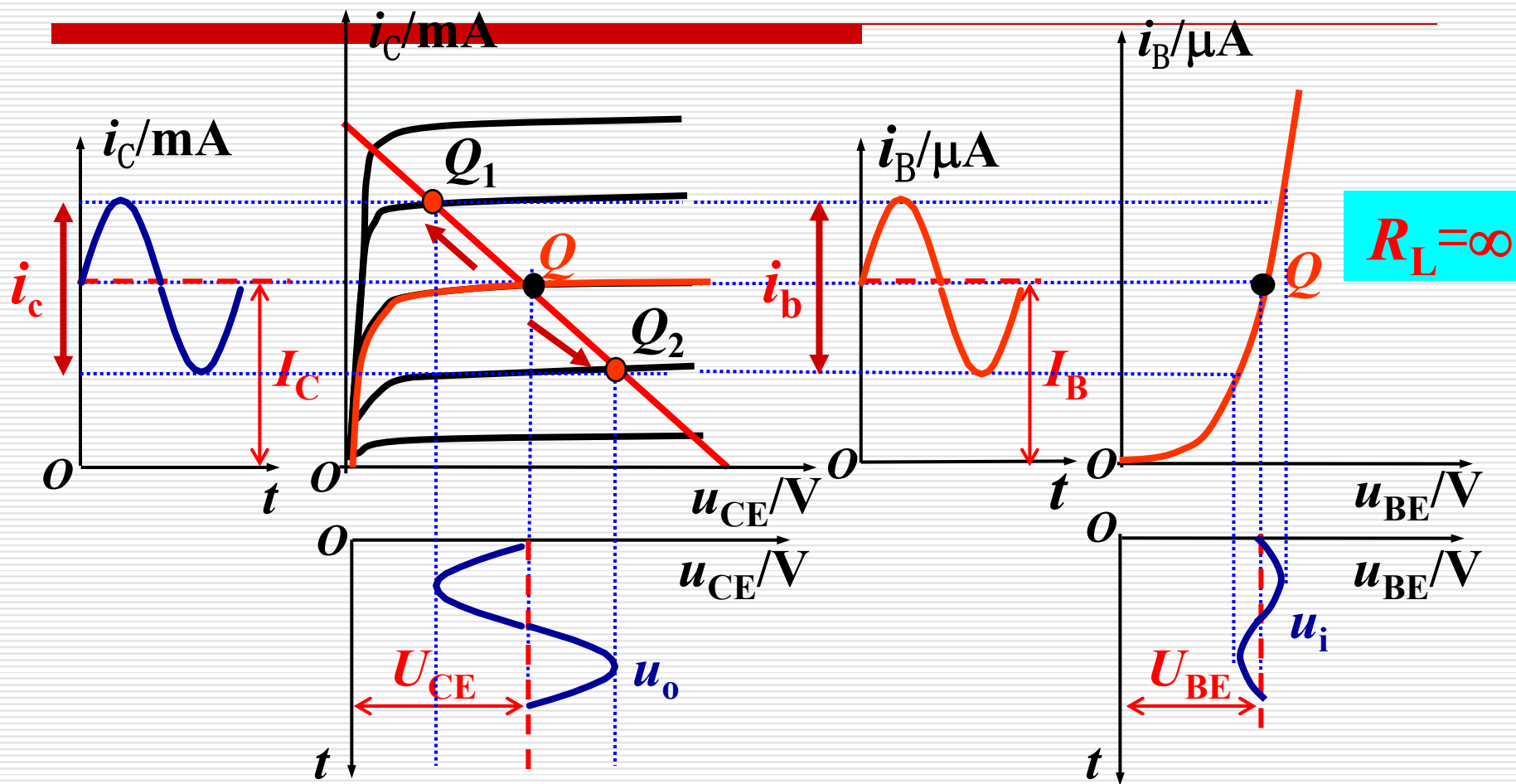


交流通路

所以交流负载线比直流负载更陡

当 $R_L = \infty$ 时，交直流负载重合

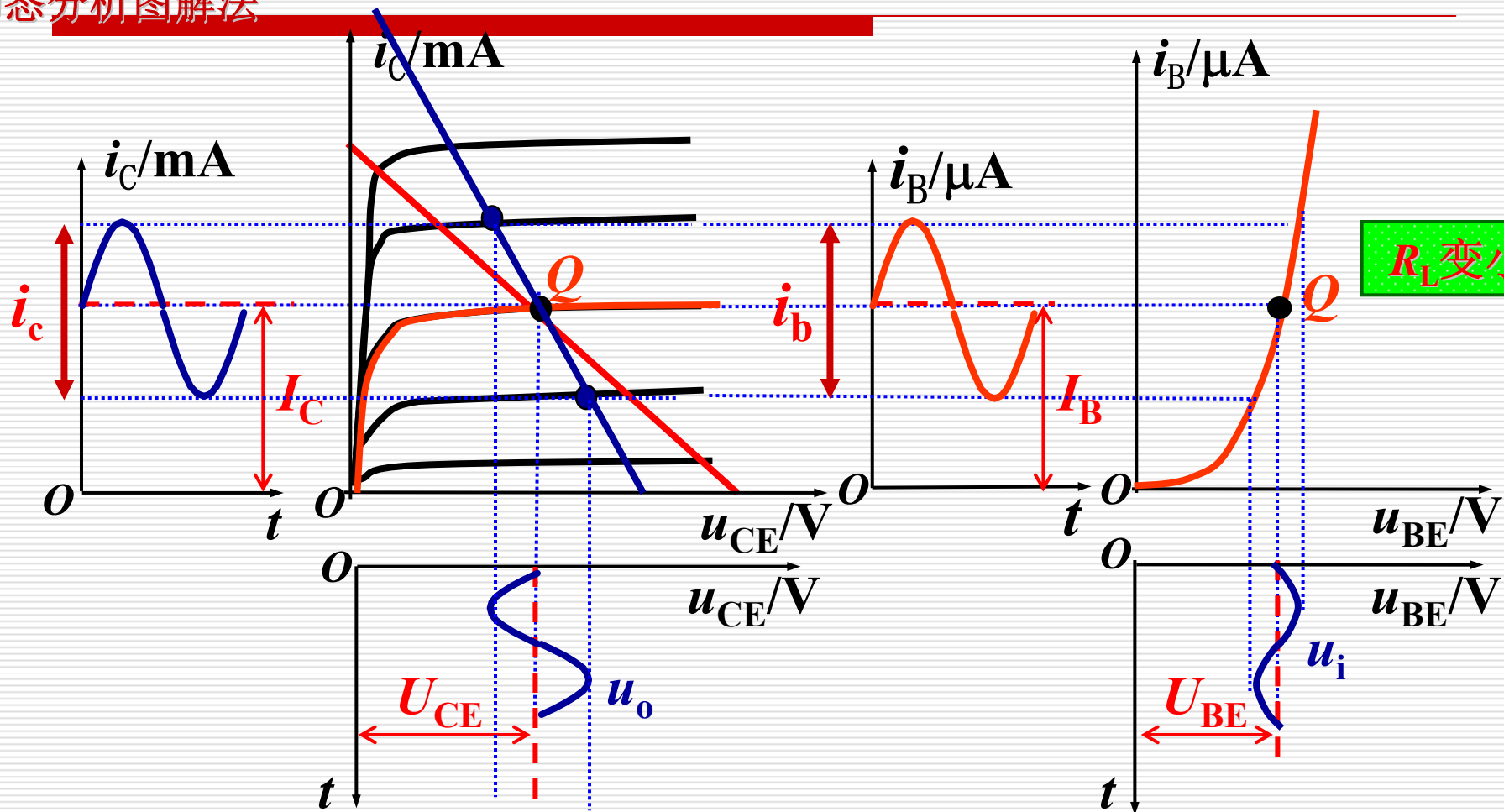
4. 共射级放大电路动态分析



由 u_o 和 u_i 的峰值 (或峰峰值) 之比可得放大电路的电压放大倍数。

4. 共射级放大电路动态分析

动态分析图解法



电压放大倍数将减小。

电工与电子技术基础

中国地质大学（武汉）信息技术教学实验中心

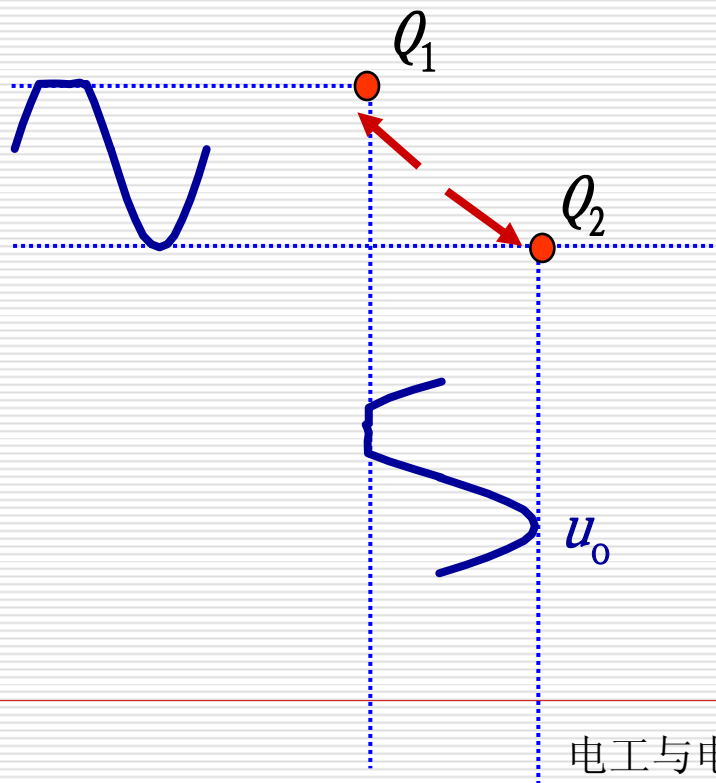
5. 共射级放大电路非线性失真

如果 Q 设置不合适，晶体管进入截止区或饱和区工作，将造成非线性失真。

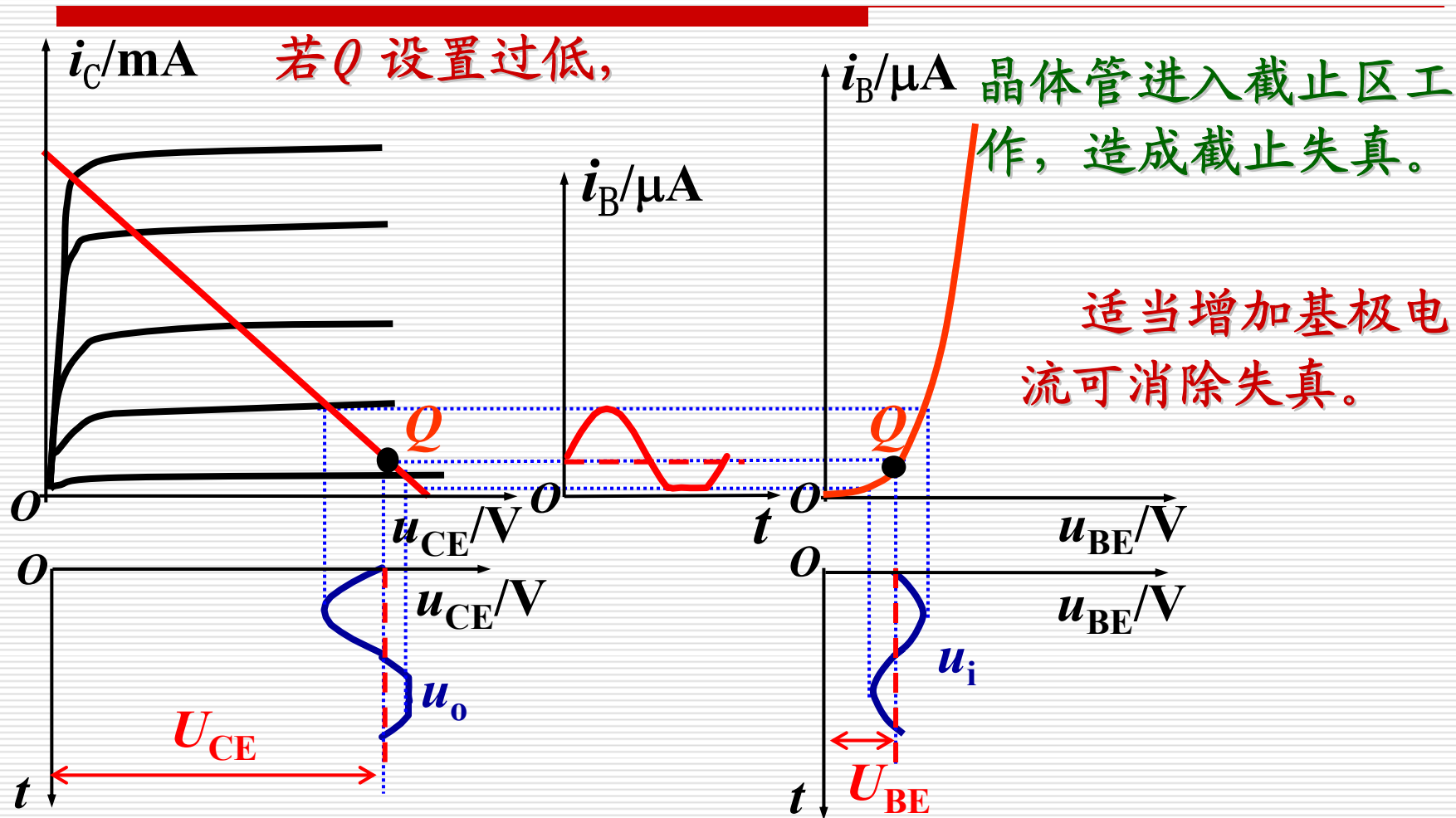
若 Q 设置过高，

晶体管进入饱和区工作，造成饱和失真。

适当减小基极
电流可消除失真。



5. 共射级放大电路非线性失真



如果 Q 设置合适, 信号幅值过大也可产生失真, **减小信号幅值**可消除失真。

6. 静态工作点的稳定

合理设置静态工作点是保证放大电路正常工作的先决条件。但是放大电路的静态工作点常因外界条件的变化而发生变动。

前述的固定偏置放大电路，简单、容易调整，但在温度变化、三极管老化、电源电压波动等外部因素的影响下，将引起静态工作点的变动，严重时将使放大电路不能正常工作，其中影响最大的是温度的变化。

6. 静态工作点的稳定

1、温度变化对静态工作点的影响

在固定偏置放大电路中，当温度升高时，

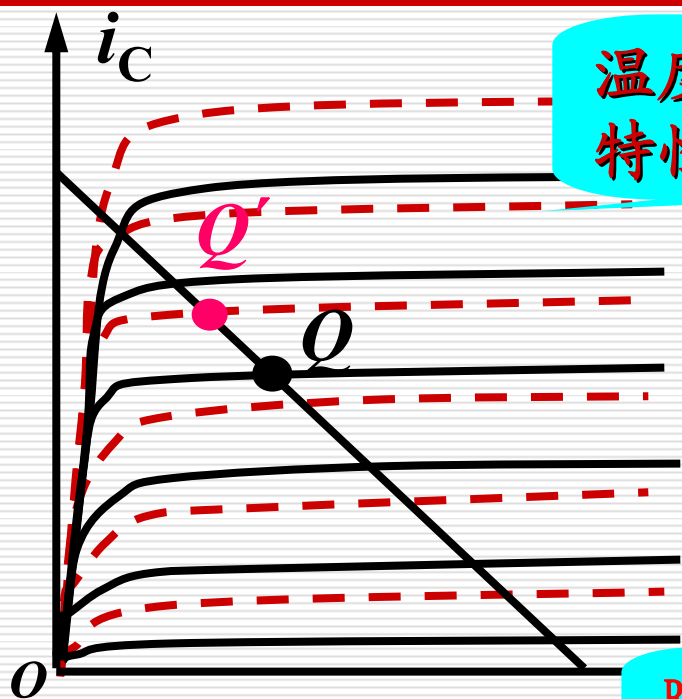
$$U_{BE} \downarrow, \beta \uparrow, I_{CBO} \uparrow \circ U_{BE} = U_{BE(T_0=25^\circ C)} - (T - T_0) 2.2 \times 10^{-3} V$$

$$\begin{aligned} \uparrow I_C &= I_{CE} + I_{CBO} = \bar{\beta} I_{BE} + I_{CBO} = \bar{\beta} (I_B + I_{CBO}) + I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \\ &= \bar{\beta} \uparrow \frac{U_{CC} - U_{BE} \downarrow}{R_B} + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \uparrow \end{aligned}$$

上式表明，当 U_{CC} 和 R_B 一定时， I_C 与 U_{BE} 、 β 以及 I_{CEO} 有关，而这三个参数随温度而变化。

温度升高时， I_C 将增加，使 Q 点沿负载线上移。

6. 静态工作点的稳定



温度升高时，输出特性曲线上移

结论：

当温度升高时， I_C 将增加，使Q点沿负载线上移，容易使晶体管T进入饱和区造成饱和失真，甚至引起过热烧坏

R_B 一旦确定， I_B 就确定了

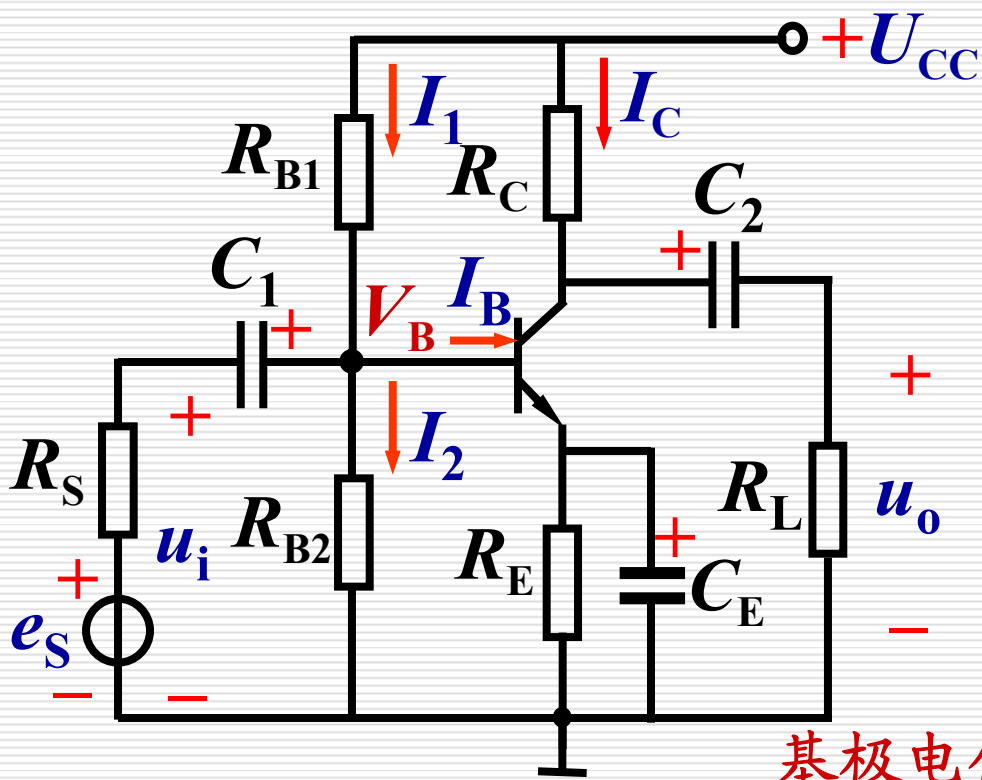
固定偏置电路的工作点

Q点是不稳定的，为此需要改进偏置电路。当温度升高使 I_C 增加时，能够自动减少 I_B ，从而抑制Q点的变化，保持Q点基本稳定。

6. 静态工作点的稳定

2、分压式偏置电路

① 稳定Q点的原理



若满足: $I_2 \gg I_B$

$$I_1 \approx I_2 \approx \frac{U_{CC}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$V_B = I_2 R_{B2}$$

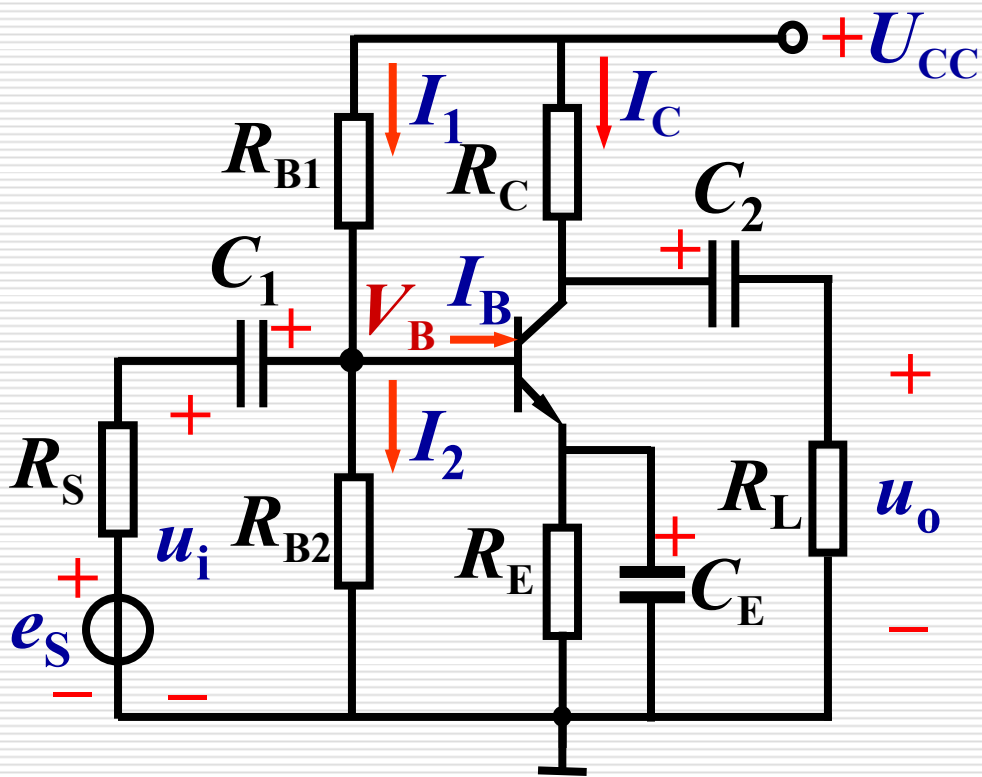
$$V_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

基极电位基本恒定，不随温度变化。

6. 静态工作点的稳定

2. 分压式偏置电路

① 稳定Q点的原理



$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$$

若满足: $V_B \gg U_{BE}$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$$

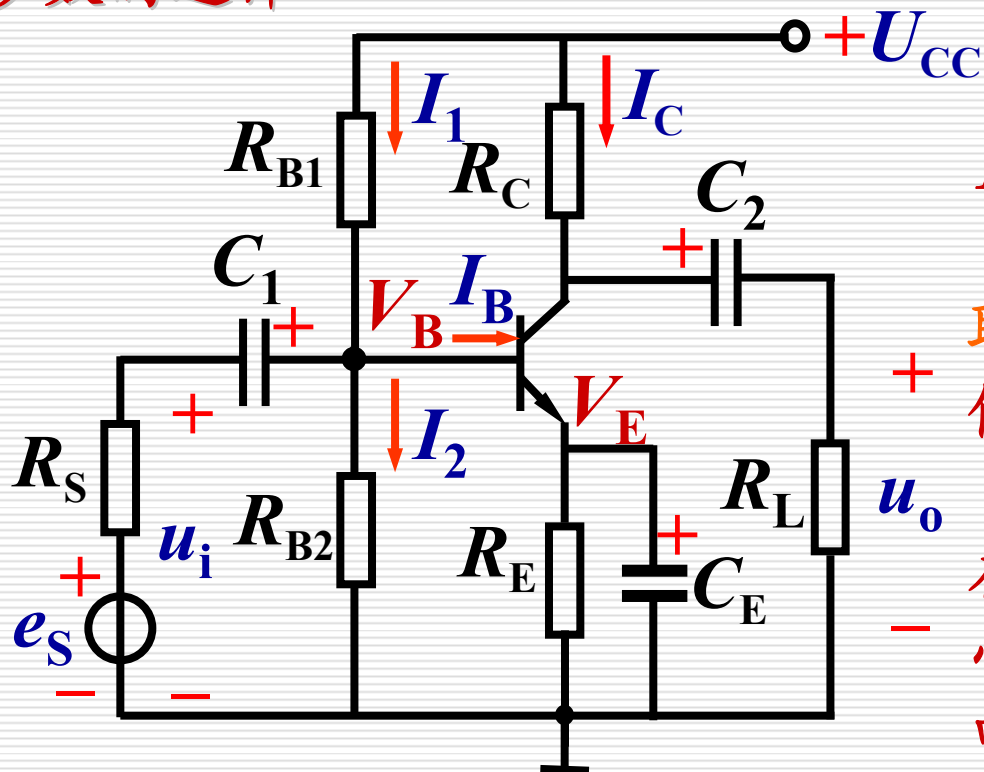
$$\approx \frac{V_B}{R_E}$$

集电极电流基本恒定,

不随温度变化。 电工与电子技术基础

6. 静态工作点的稳定

参数的选择



从Q点稳定的角度来看似乎 I_2 、 V_B 越大越好。

但 I_2 越大， R_{B1} 、 R_{B2} 必须取得较小，将增加损耗，降低输入电阻。

而 V_B 过高必使 V_E 也增高，在 U_{CC} 一定时，势必使 U_{CE} 减小，从而减小放大电路输出电压的动态范围。

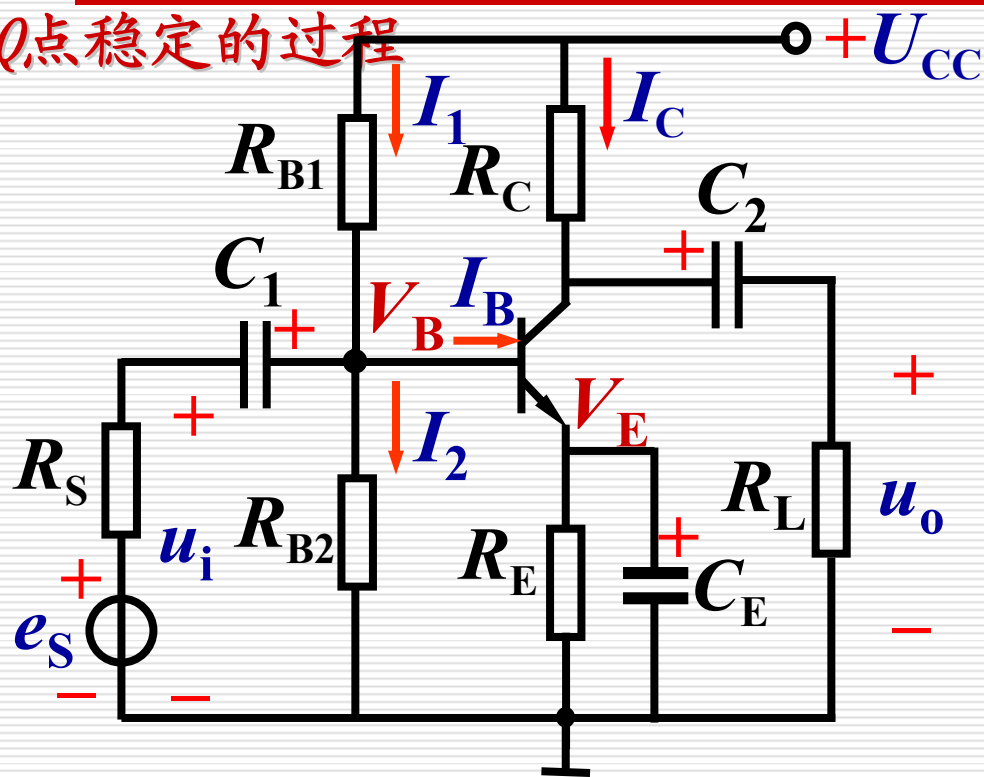
在估算时一般选取：

$$I_2 = (5 \sim 10) I_B, \quad V_B = (5 \sim 10) U_{BE},$$

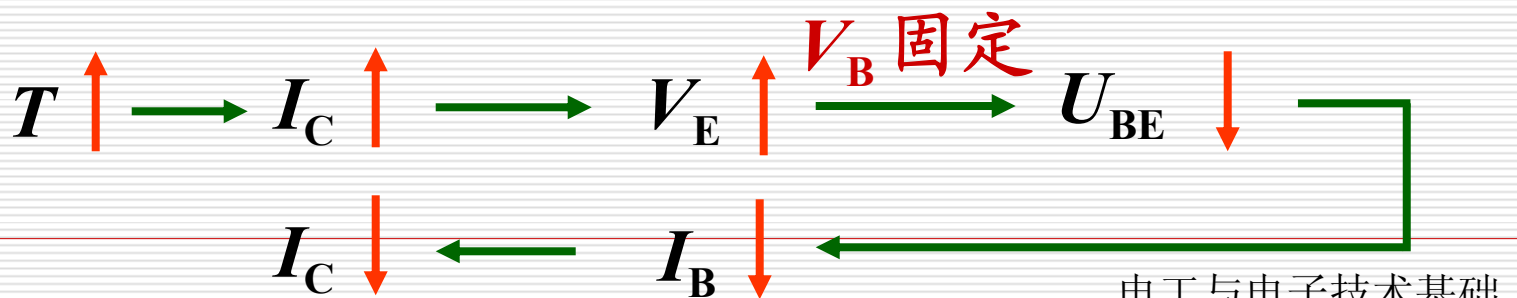
R_{B1} 、 R_{B2} 的阻值一般为几十千欧。

6. 静态工作点的稳定

Q点稳定的过程

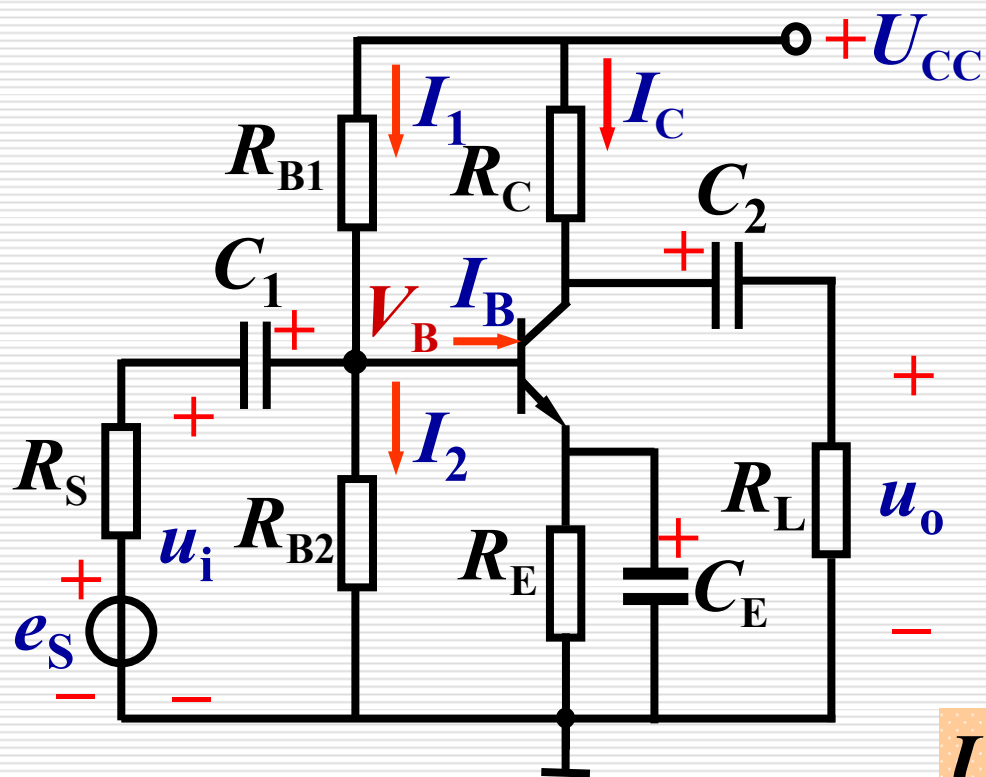


R_E : 温度补偿电阻
 对直流: R_E 越大, 稳定Q点
 效果越好;
 对交流: R_E 越大, 交流损
 失越大, 为避免交流损失加
 旁路电容 C_E 。



6. 静态工作点的稳定

静态工作点的计算



估算法:

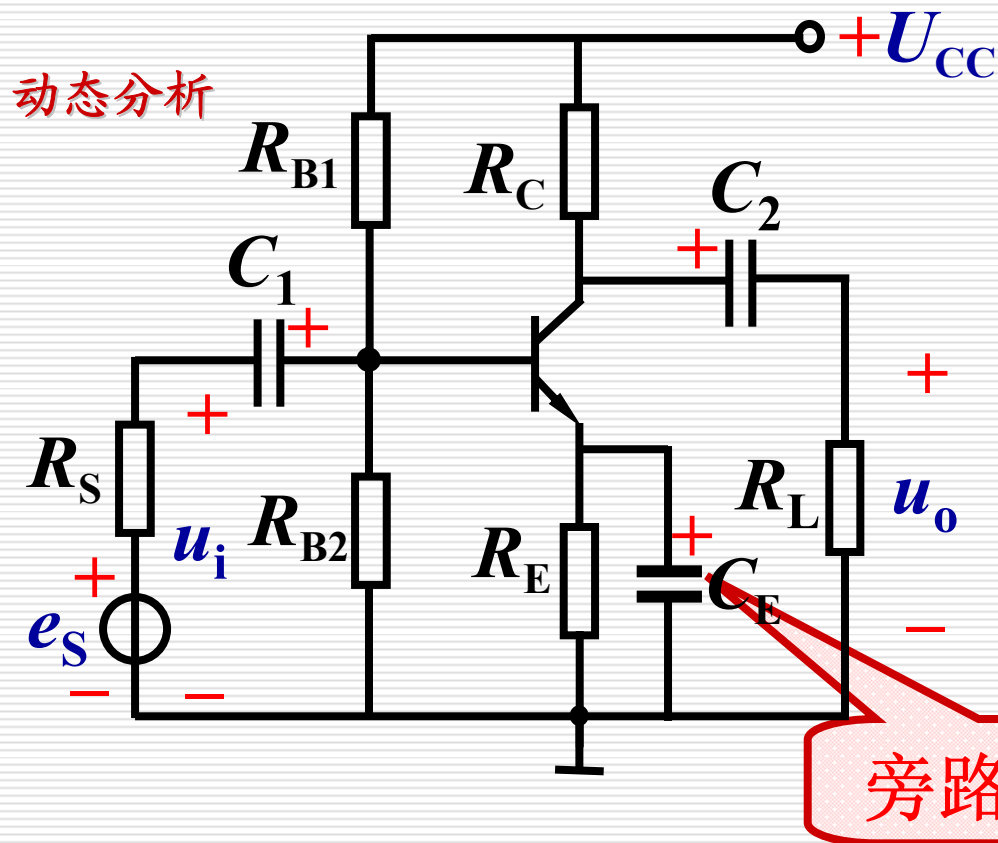
$$V_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$$

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

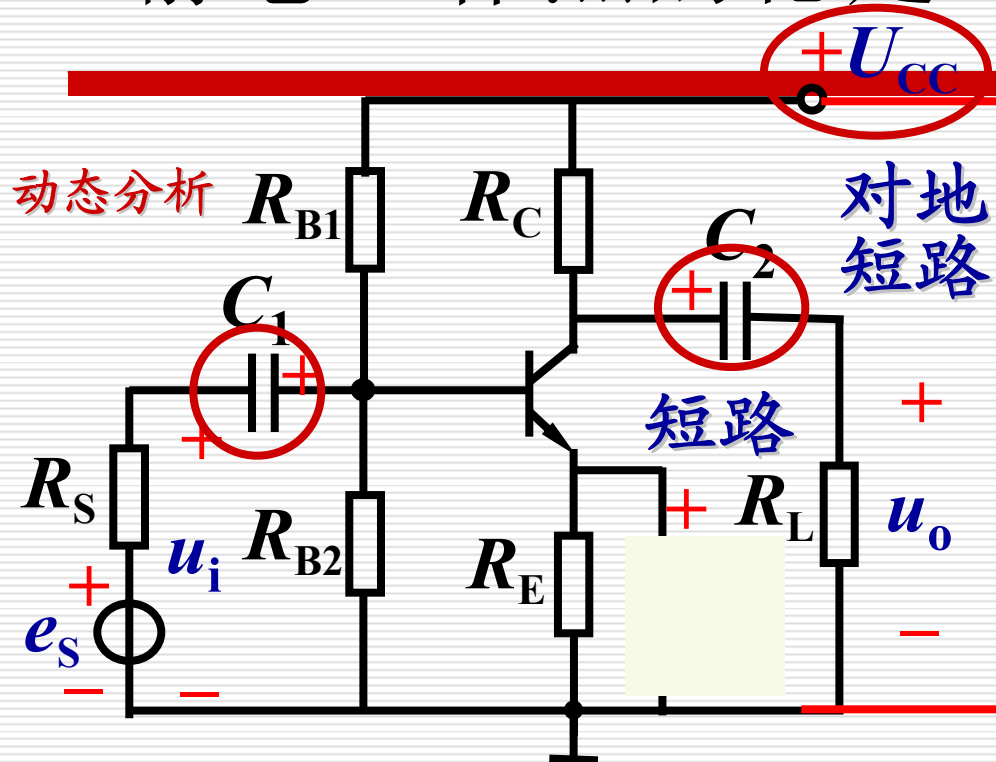
$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - I_E R_E$$

6. 静态工作点的稳定



对交流：旁路电容 C_E 将 R_E 短路， R_E 不起作用， A_u, r_i, r_o 与固定偏置电路相同。

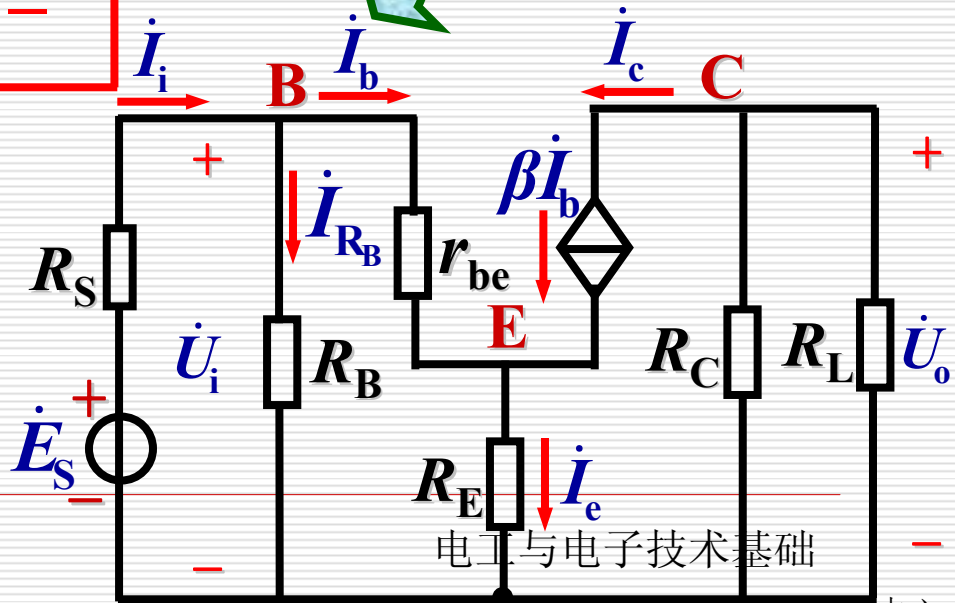
6. 静态工作点的稳定



如果去掉 C_E ,
 A_u, r_i, r_o ?

去掉 C_E 后的
 微变等效电路

$$R_B = R_{B1} // R_{B2}$$



6. 静态工作点的稳定

分压式偏置电路

有旁路电容 C_E

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

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

$$r_o = R_C$$

无旁路电容 C_E

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

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_E]$$

$$r_o = R_C$$

A_u 减小

r_i 提高

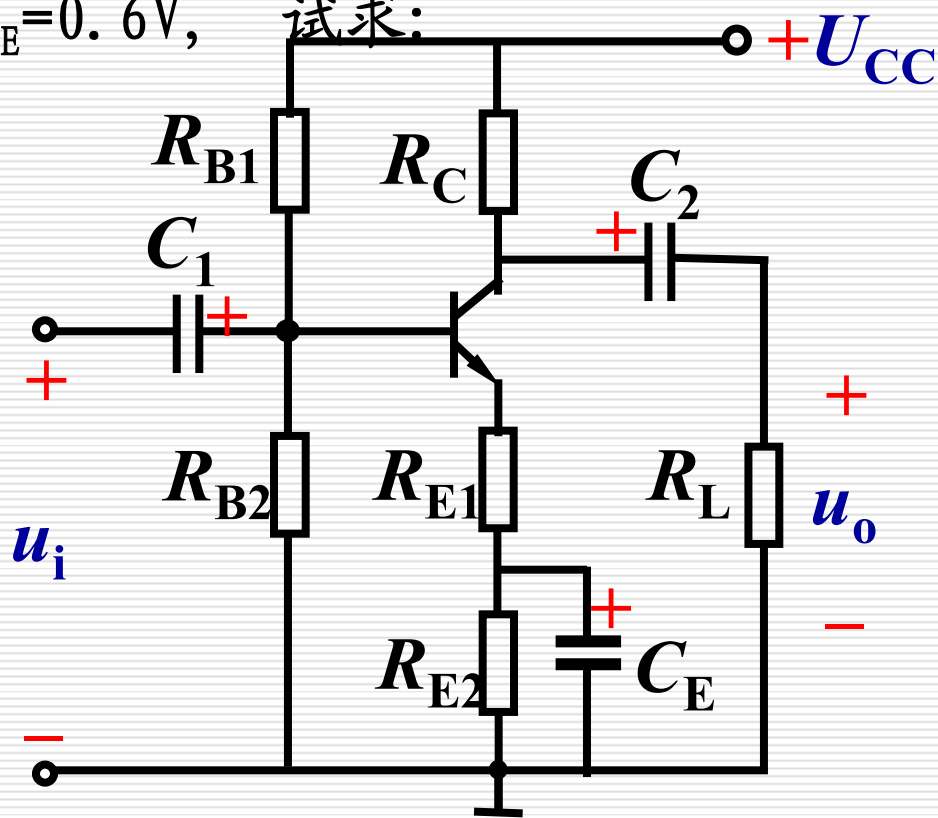
r_o 不变

电工与电子技术基础

6. 静态工作点的稳定

例1: 在图示放大电路中, 已知 $U_{CC}=12V$, $R_C=6k\Omega$,
 $R_{E1}=300\Omega$, $R_{E2}=2.7k\Omega$, $R_{B1}=60k\Omega$, $R_{B2}=20k\Omega$
 $R_L=6k\Omega$, 晶体管 $\beta=50$, $U_{BE}=0.6V$, 试求:

- (1) 静态工作点 I_B 、 I_C 及 U_{CE} ;
- (2) 画出微变等效电路;
- (3) 输入电阻 r_i 、 r_o 及 $A_{u^{\circ}}$.



6. 静态工作点的稳定

解: (1) 由直流通路求静态工作点。

$$V_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{20}{60 + 20} \times 12V = 3V$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{3 - 0.6}{3} \text{ mA}$$

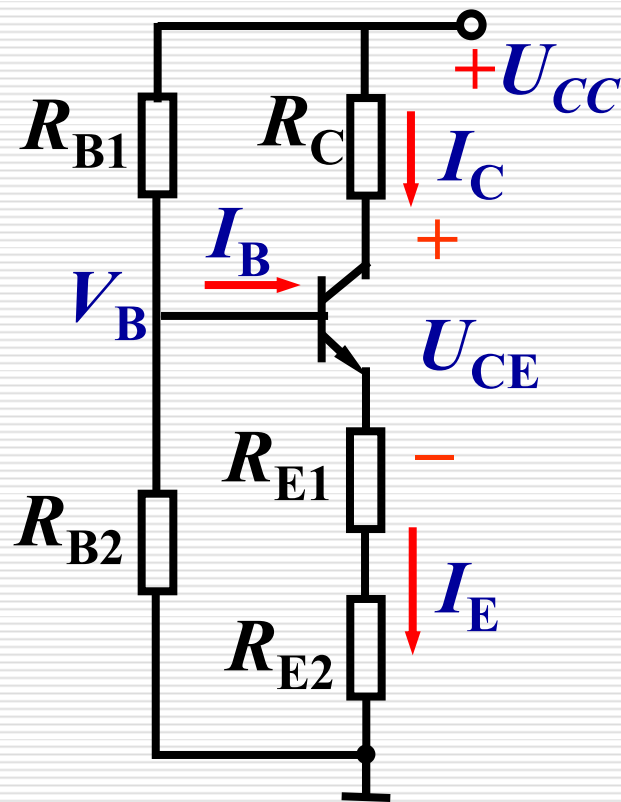
$$= 0.8 \text{ mA}$$

$$I_B \approx \frac{I_C}{\beta} = \frac{0.8}{50} \mu\text{A} = 16 \mu\text{A}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - I_E (R_{E1} + R_{E2})$$

$$= 12 - 0.8 \times 6 - 0.8 \times 3V$$

$$= 4.8 \text{ V}$$



直流通路

6. 静态工作点的稳定

(2) 由微变等效电路求 A_u 、 r_i 、 r_o 。

其中 $R_B = R_{B1} // R_{B2} = 15 \text{ k}\Omega$

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = 200 + 51 \times \frac{26}{0.8} \Omega = 1.86 \text{ k}\Omega$$

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}]$$

$$\approx 8.03 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = R_C \approx 6 \text{ k}\Omega$$

$$A_u = - \frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}}$$

$$= -8.69$$

