



模拟电子技术基础

Fundamentals of Analog Electronic

主讲教师：张静秋

第3章 分立元件放大电路

3.1 共射放大电路组成原理

3.2 共射放大电路图解分析法

3.3 共射电路等效电路分析法（固定偏置、射极偏置）

3.4 共源放大电路

3.5 共集和共漏放大电路

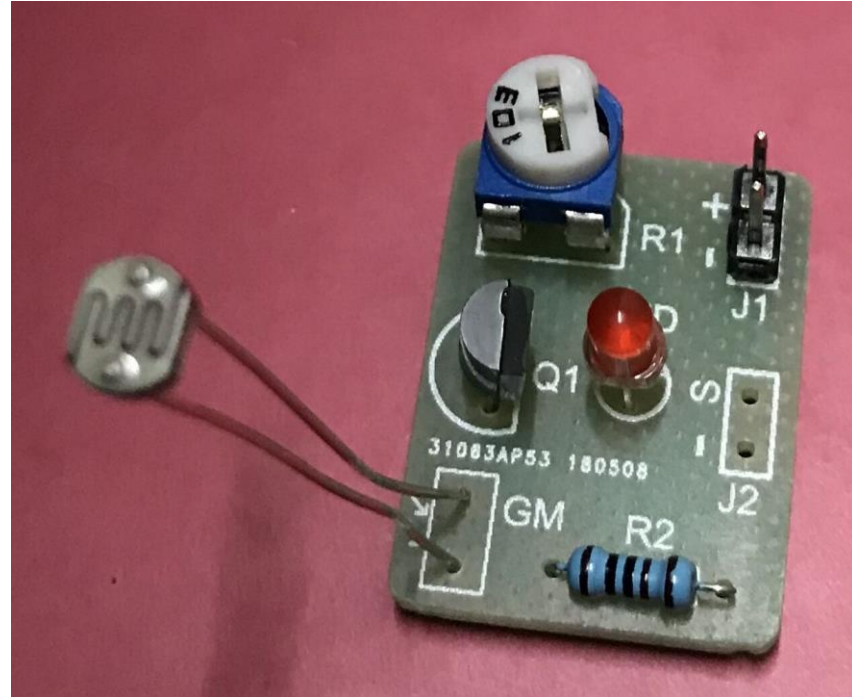
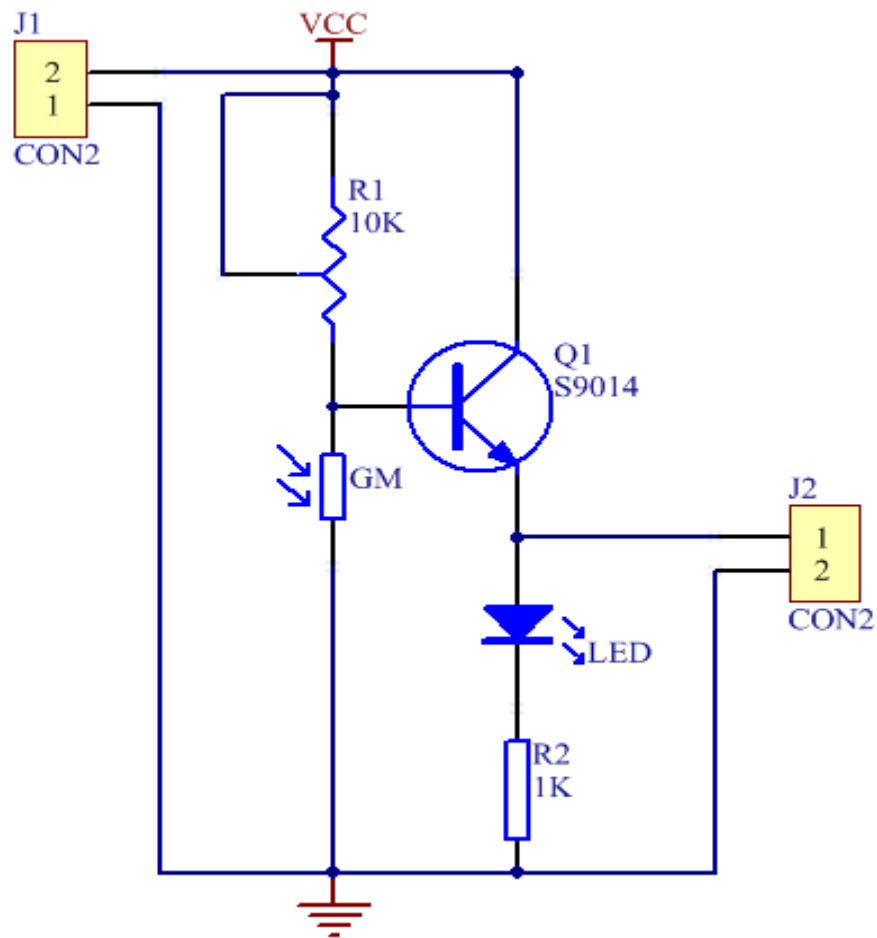
3.6 共基和共栅放大电路

3.7 分立元件放大电路对比

3.8 多级分立元件放大电路

3.9 分立元件放大电路的频率响应

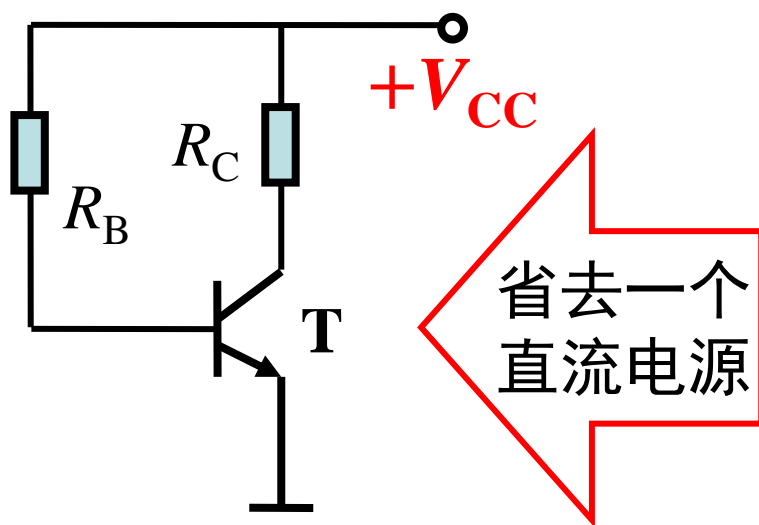
实例：光控灯电路



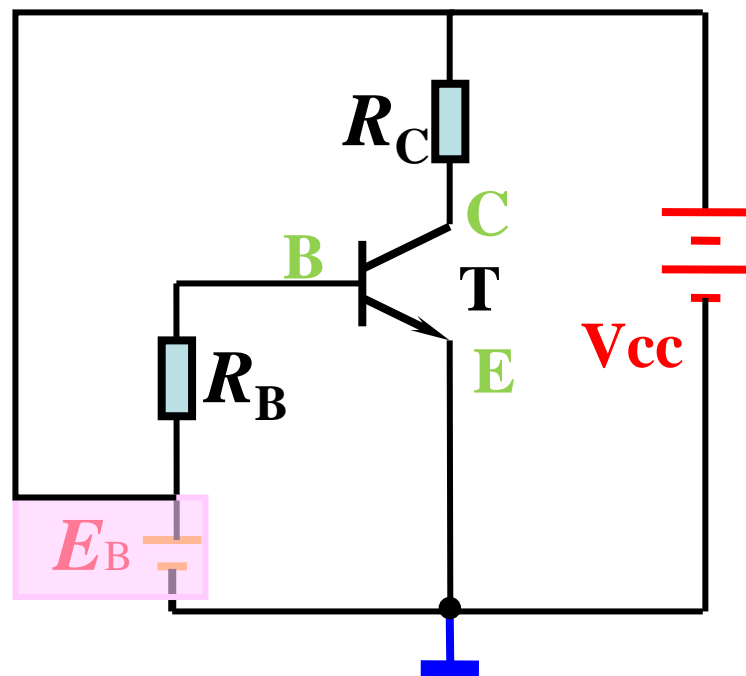
3.1 共射放大电路的组成原理

1、基本放大电路的组成

外电路必须保证BJT：
发射结正偏，集电结反偏



简单画法



共发射极接法放大电路

2、放大电路中各元件的作用

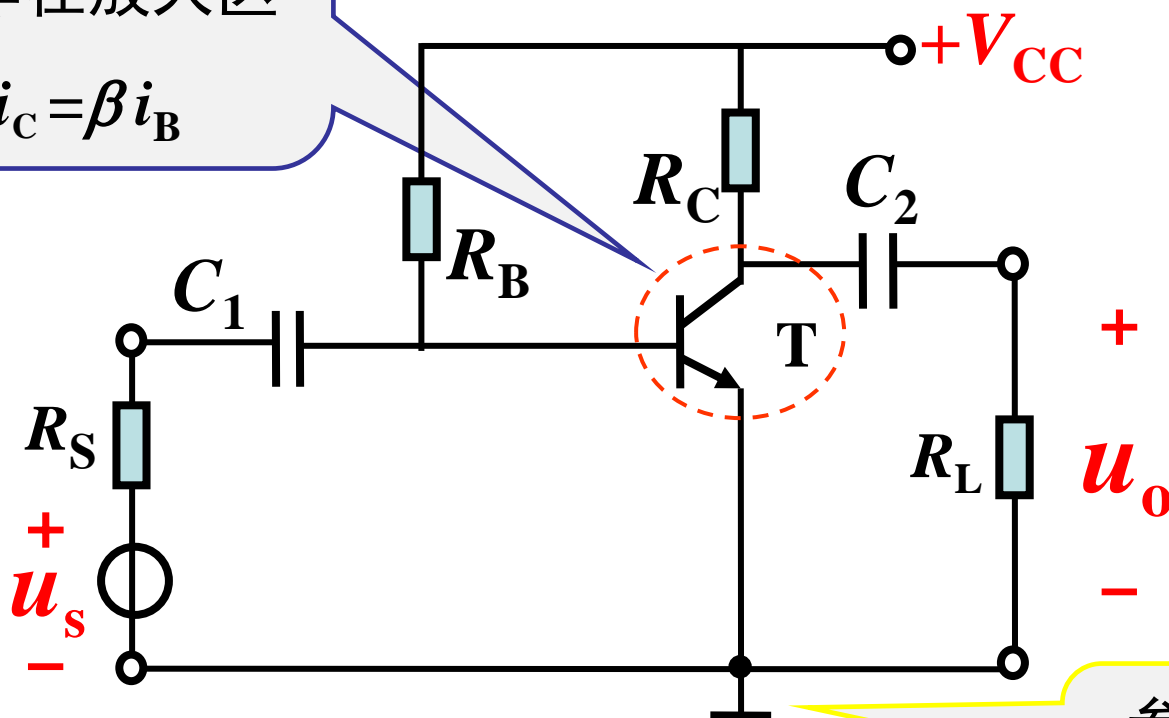
T 放大元件

工作在放大区

$$i_C = \beta i_B$$

V_{CC} 直流电源

使发射结正偏集电结反偏；
并为信号放大提供能量



参考电位点
俗称“地”

阻容耦合 固定偏置 共射 放大电路

2、放大电路中各元件的作用

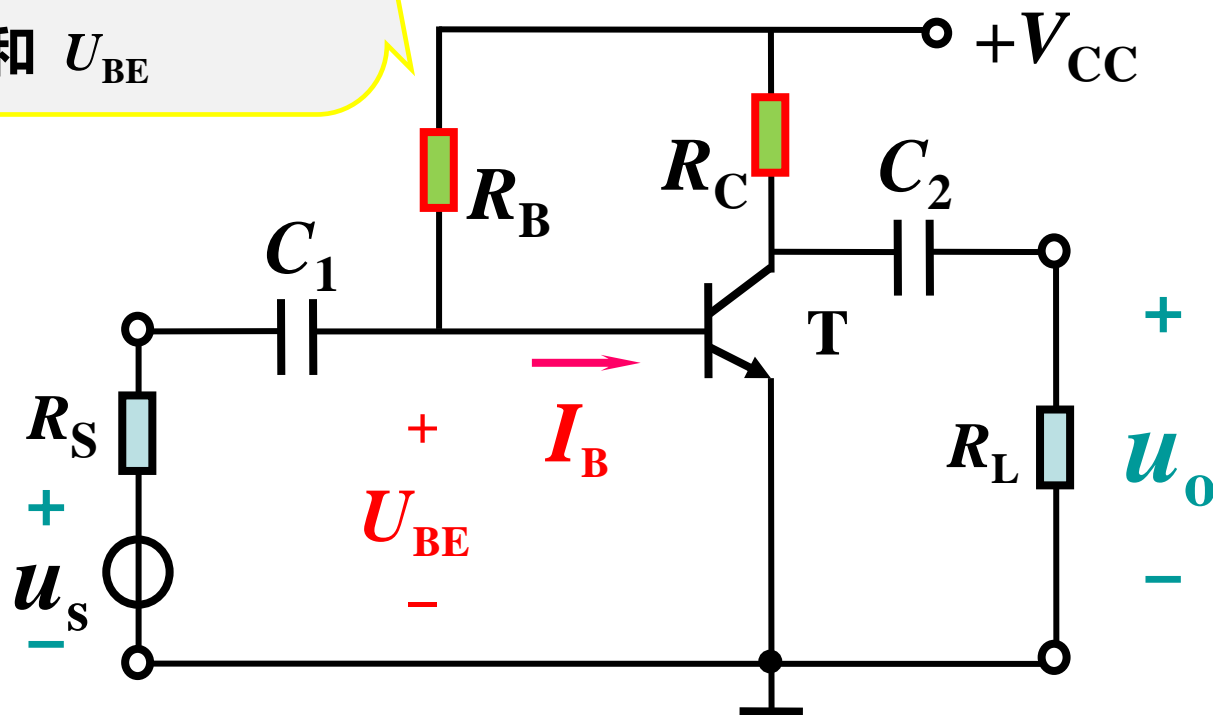
R_B 基极电阻

配合 V_{CC} 使发射结正偏
并提供适当的静态工作点

I_B 和 U_{BE}

R_C 集电极电阻

提供合适的Q点；
将变化的电流转变为
变化的电压



阻容耦合 固定偏置 共射 放大电路

2、放大电路中各元件的作用

C_1 用来隔断放大电路与信号源之间的直流通路;
 C_2 用来隔断放大电路与负载之间的直流通路;

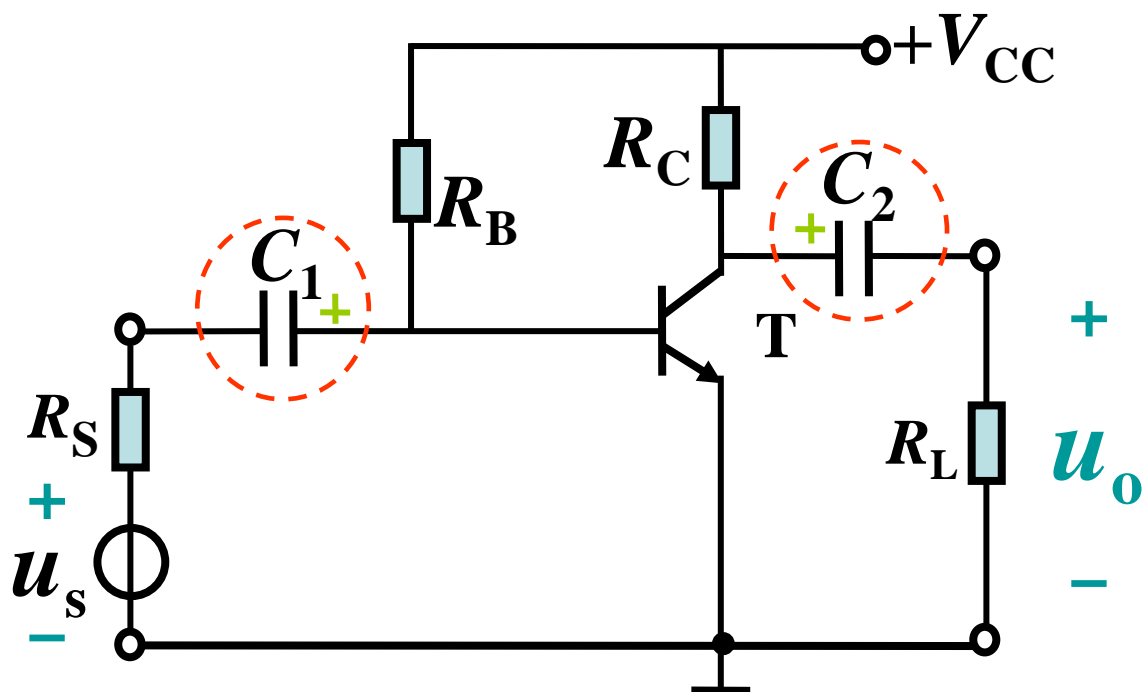
隔直通交

耦合电容

电解电容

有极性

约 $10\mu\text{F}\sim 50\mu\text{F}$



阻容耦合 固定偏置 共射 放大电路

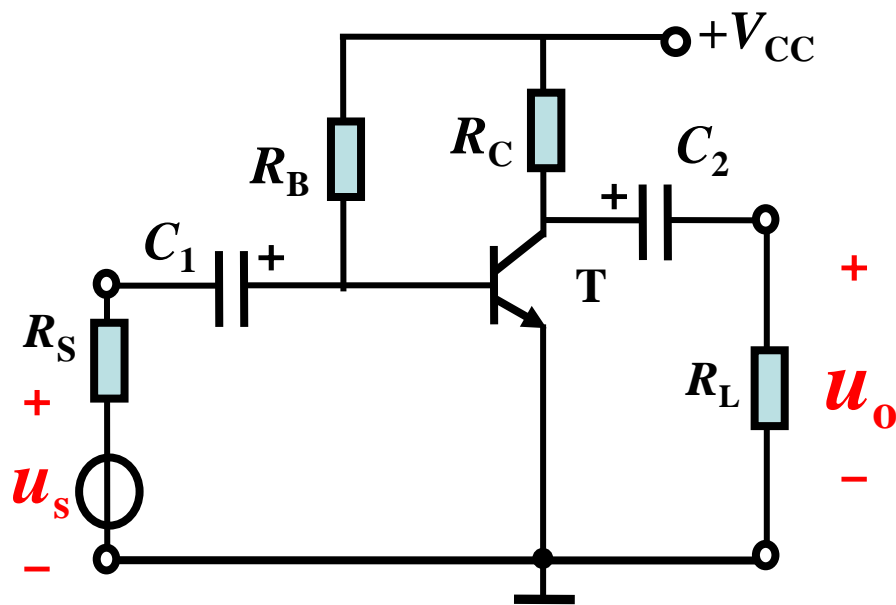
3.2 放大电路图解分析

1、电路分析的基本思路

非线性电路 经适当近似后 可按线性电路对待，
利用叠加定理，分别分析电路中的交、直流成分。

直流通路 ($u_i = 0$)
分析静态工作点。

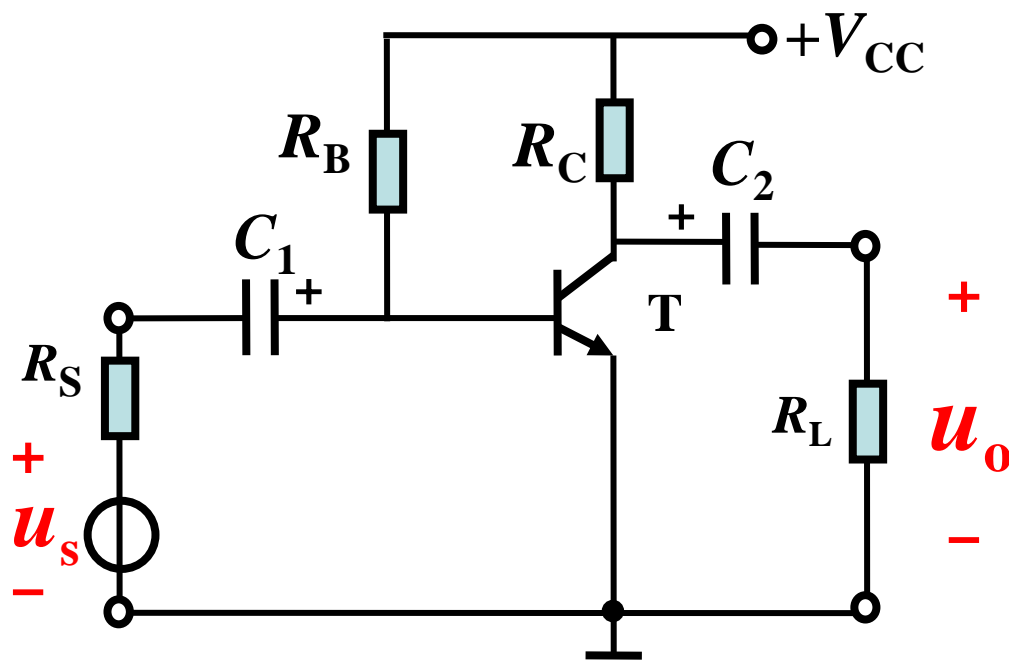
交流通路 ($u_i \neq 0$)
分析动态性能指标，
只考虑变化的
电压和电流。



阻容耦合 固定偏置 共射 放大电路

2、图解法静态分析

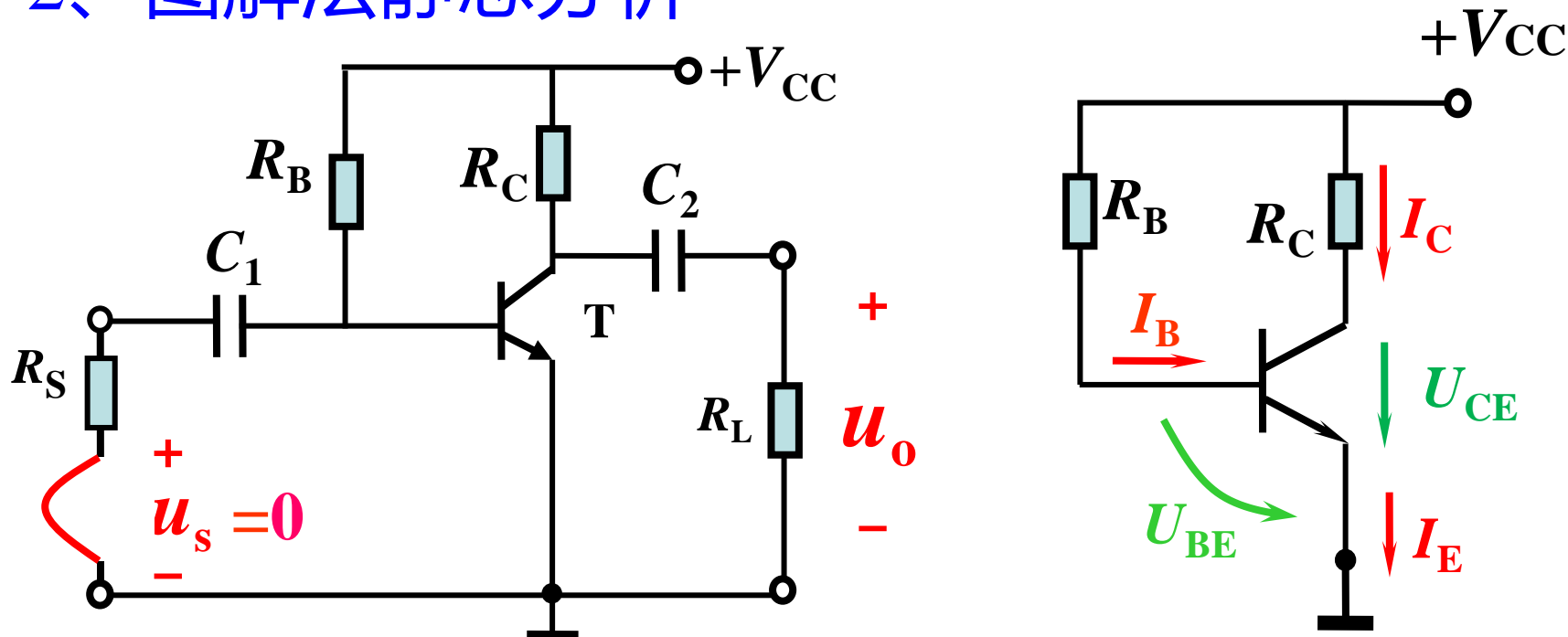
- 目标：确定静态值（直流值） U_{BE} I_B I_C 和 U_{CE}
- 方法：需要用放大电路的直流通路来分析。



U_{BE} 值：
硅管约为 0.7V
锗管约为 0.3V
不必计算

阻容耦合 固定偏置 共射 放大电路

2、图解法静态分析

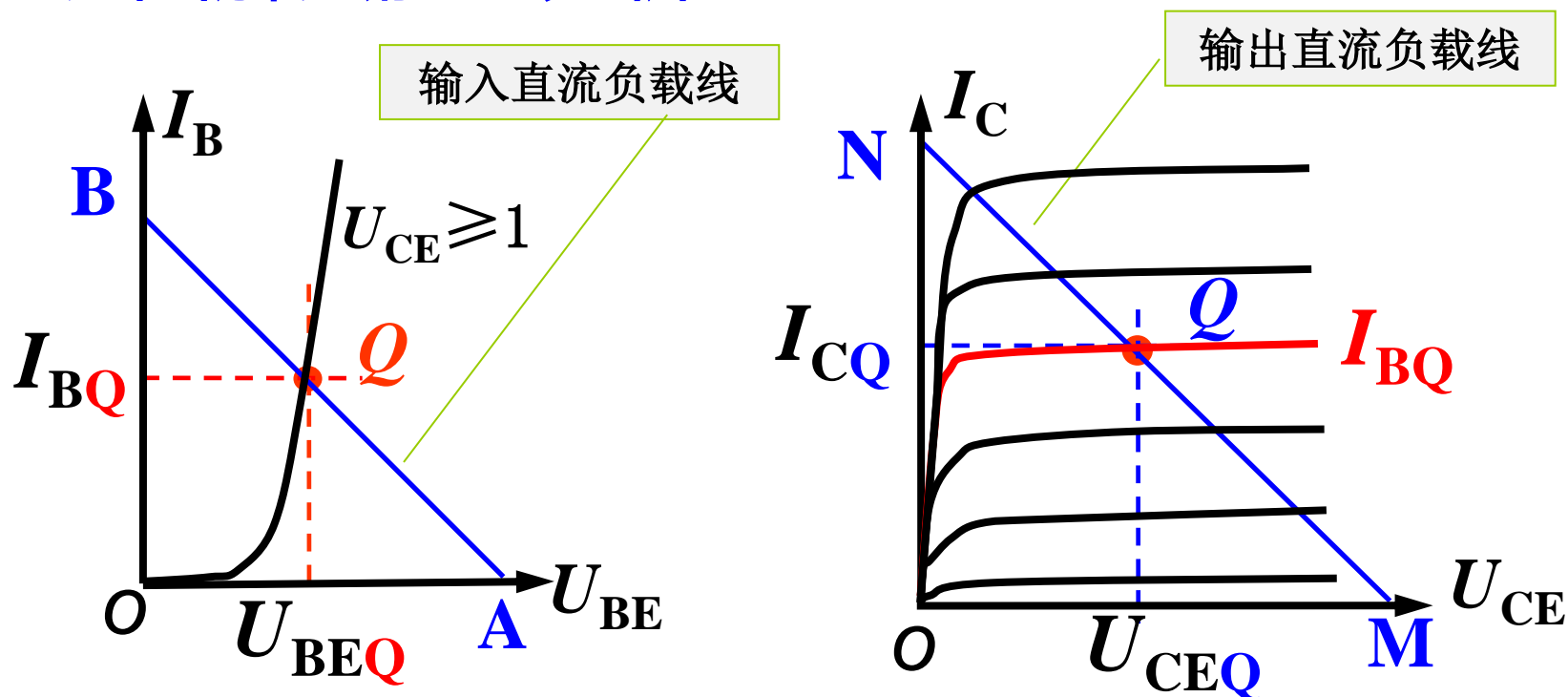


阻容耦合 固定偏置 共射 放大电路

直流通路画法

- (1) 交流电压源视为短路保留其内阻
- (2) 电容视为开路

2、图解法静态分析

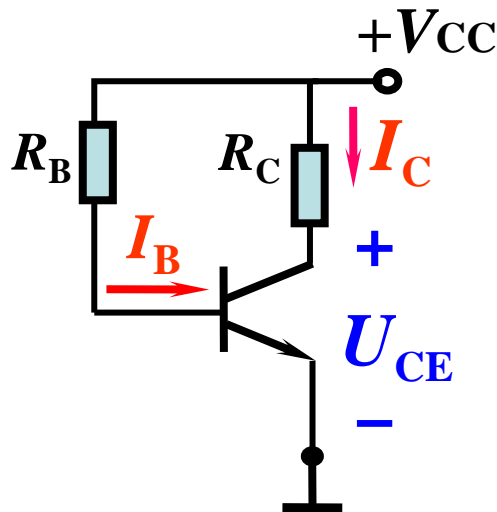


- 坐标点 $Q (U_{BEQ}, I_{BQ})$ 是BJT 在放大区的近似输入特性曲线与输入直流负载线AB的交点 (实际不易获得) ;
- 坐标点 $Q (U_{CEQ}, I_{CQ})$ 是 I_{BQ} 所确定的那条输出特性曲线与输出直流负载线MN的交点;

[例1] 在基本共射放大电路中，已知 $V_{CC} = 12V$, $R_C = 4k\Omega$, $R_B = 280k\Omega$, 已知三极管的特性曲线，试求静态值。

解： 1) 输入回路列方程求 I_B

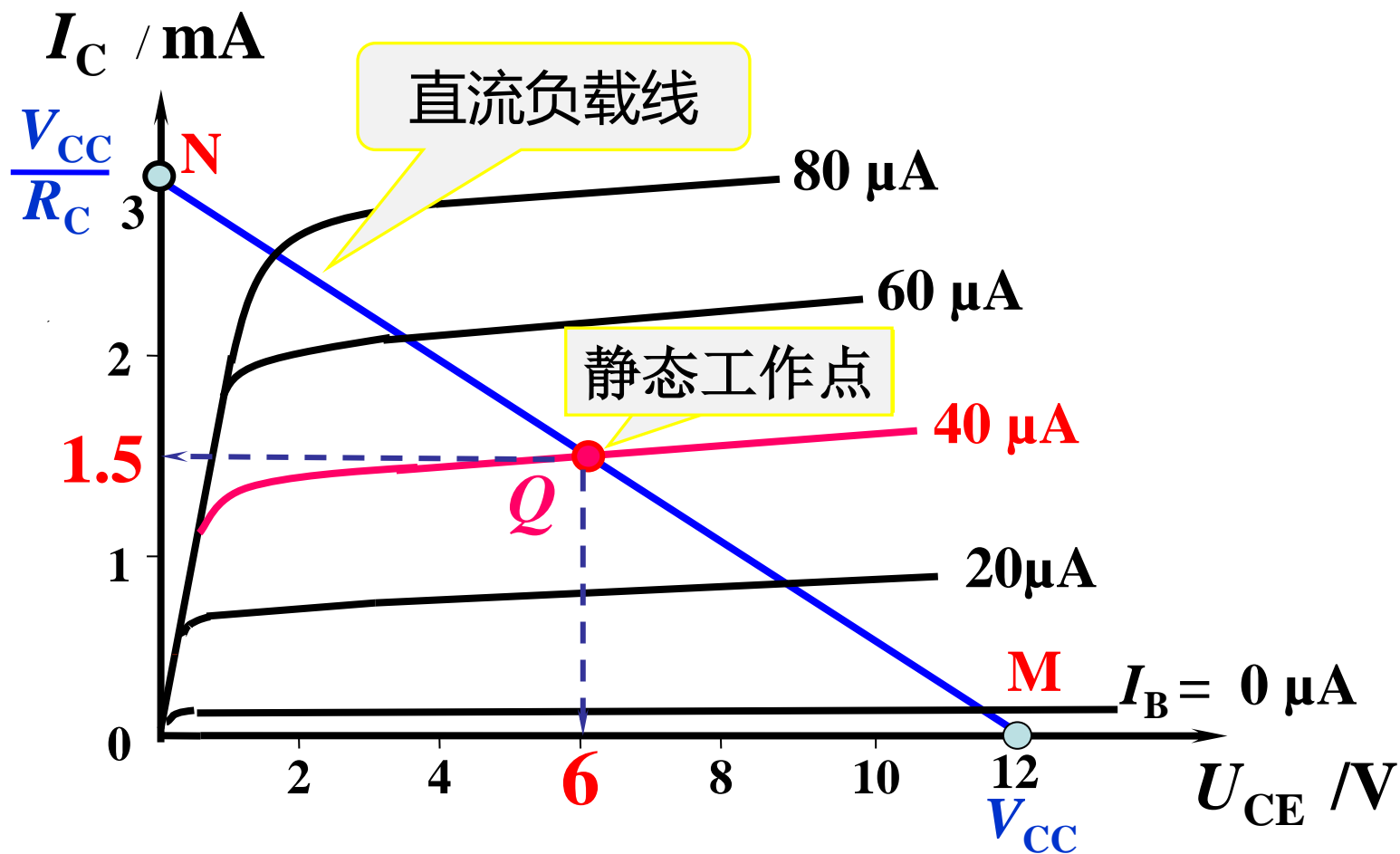
$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0.6}{280} \approx 40\mu A$$



2) 将方程 $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ 所示直线
画在三极管输出特性曲线的坐标平面上

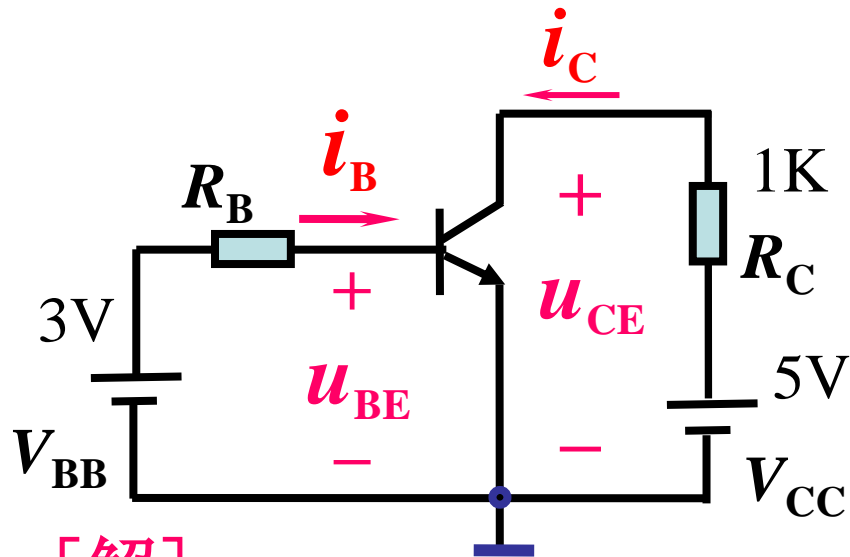
直线上的两点: $\begin{cases} \text{N点: } I_C = V_{CC} / R_C = 3mA, U_{CE} = 0 \\ \text{M点: } I_C = 0, U_{CE} = V_{CC} = 12V \end{cases}$

[例1图解]

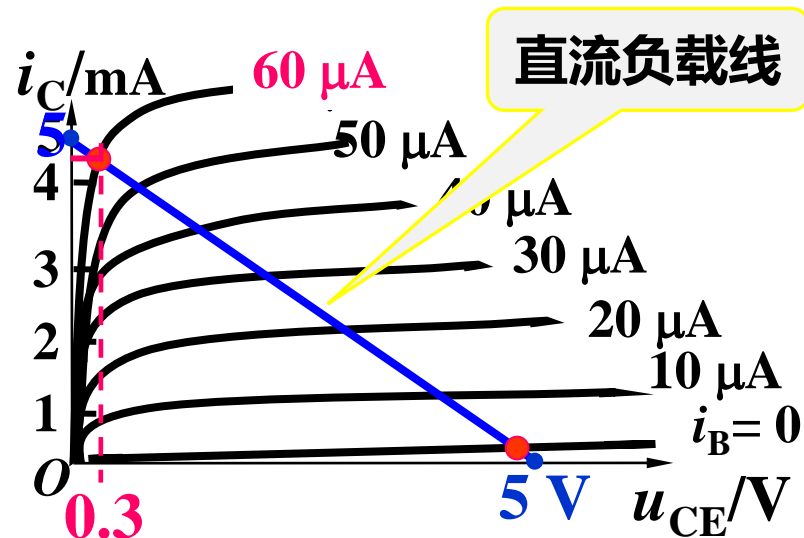


3) 读出静态值: $I_C = 1.5\text{mA}$, $U_{CE} = 6\text{V}$, $I_B = 40\mu\text{A}$

[例2] 设 $R_B = 38 \text{ k}\Omega$, 求 $V_{BB} = 0 \text{ V}$ 、 3 V 时的 i_C 、 u_{CE} 。



[解]



1) 当 $V_{BB} = 0 \text{ V}$ 时 $i_B \approx 0$, $i_C \approx 0$, $u_{CE} \approx 5 \text{ V}$

2) 当 $V_{BB} = 3 \text{ V}$ 时 $i_B = \frac{V_{BB} - U_{BE(\text{on})}}{R_B} = 60 \mu\text{A}$

$U_{CE} \approx 0.3 \text{ V} \approx 0$, $i_C \approx 5 \text{ mA}$

3、图解法动态分析

- **动态分析** 是在静态值确定后, 分析信号的传输情况。
- **分析目标** 波形失真情况、求最大不失真输出电压 U_{om} 。

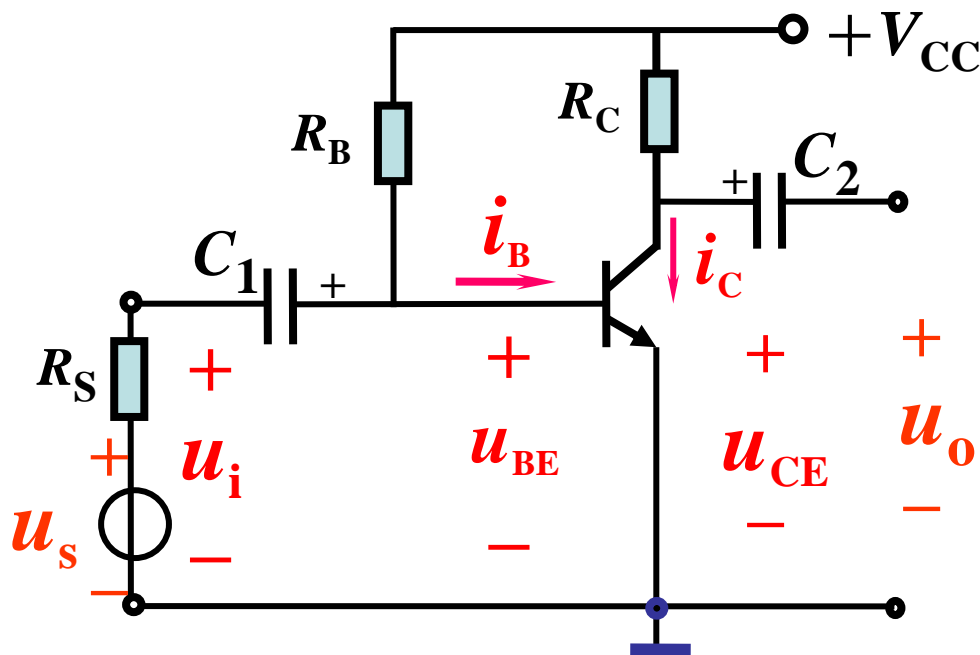
1) 放大器空载

直流负载线:

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

交流负载线:

$$u_{CE} = V_{CC} - i_C R_C$$



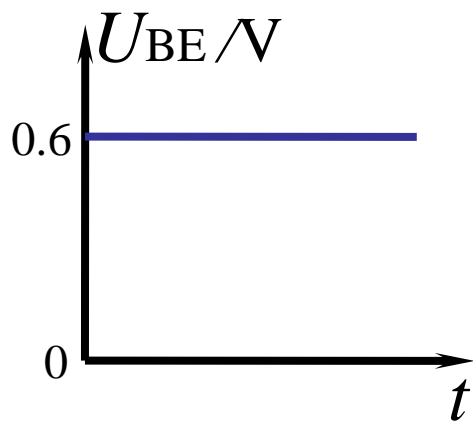
- 放大器输出端开路时, 交、直流负载线重合。

3、图解法动态分析

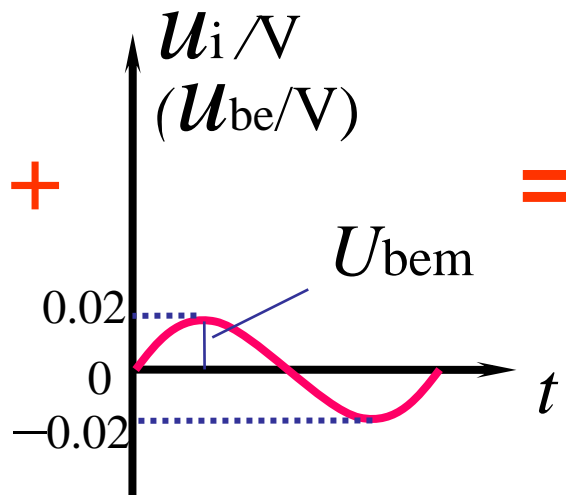
根据输入回路的KVL方程：

$$u_{BE} = U_{BE} + u_i = U_{BE} + \overbrace{U_{im} \sin \omega t}^{u_{be}} = 0.6 + 0.02 \sin \omega t (\text{V})$$

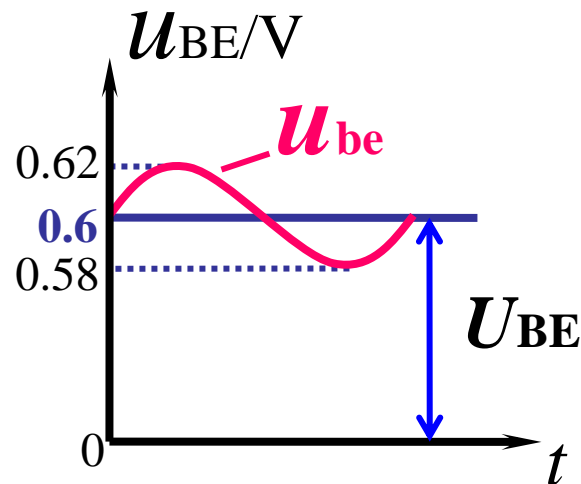
u_{BE} 的波形：



直流分量

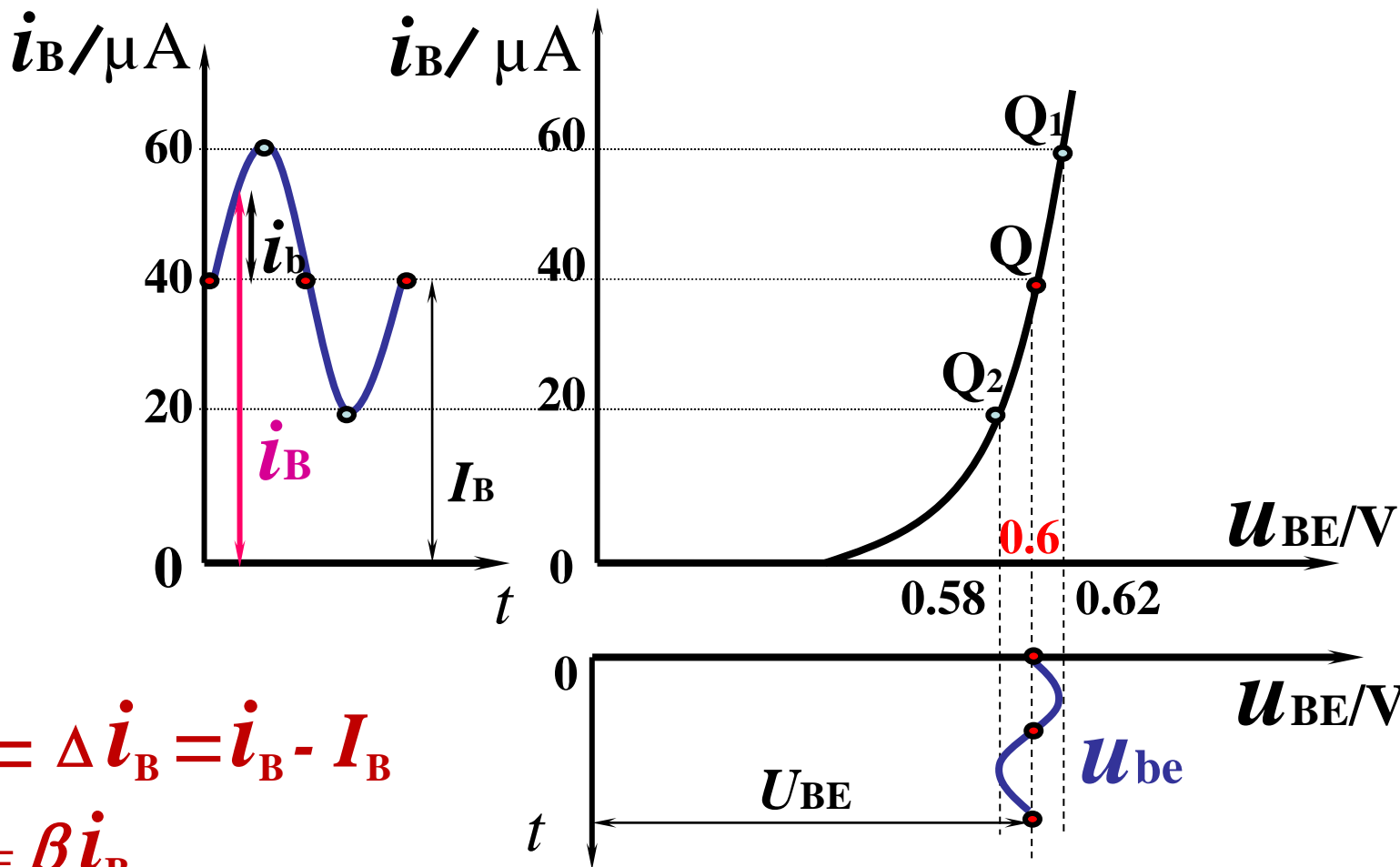


交流分量



交直流总量

3、图解法动态分析 — 在输入特性上作图

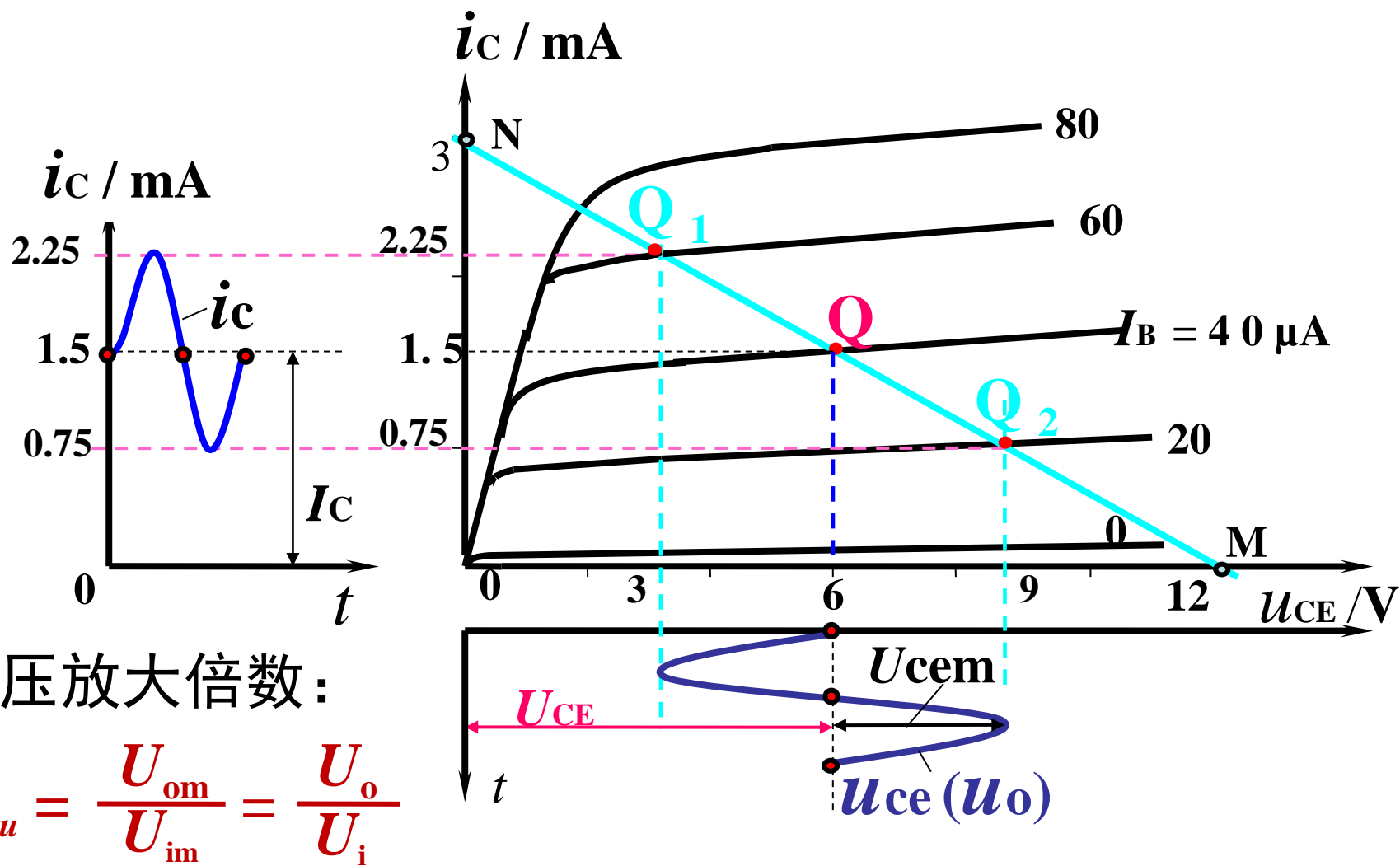


$$i_b = \Delta i_B = i_B - I_B$$

$$i_c = \beta i_B$$

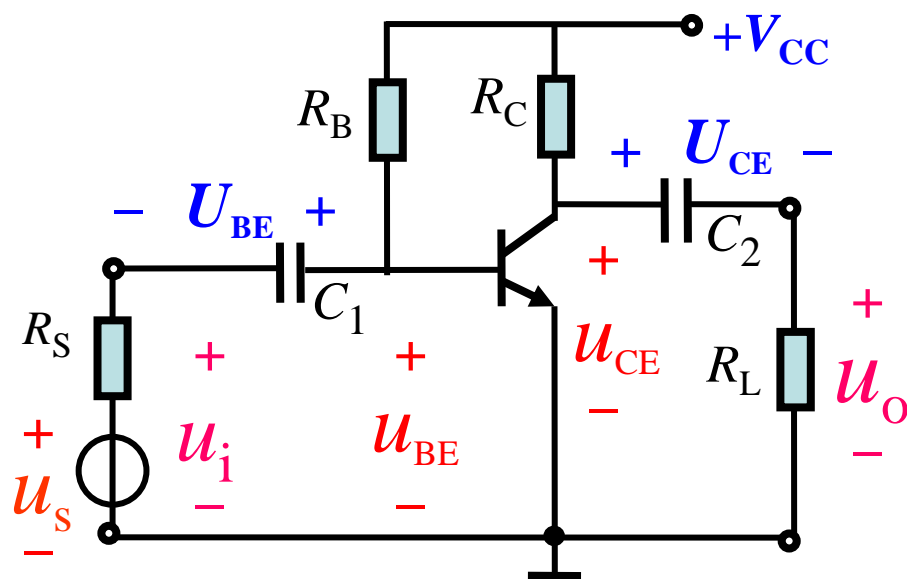
Go on

3、图解法动态分析 —在输出特性上作图

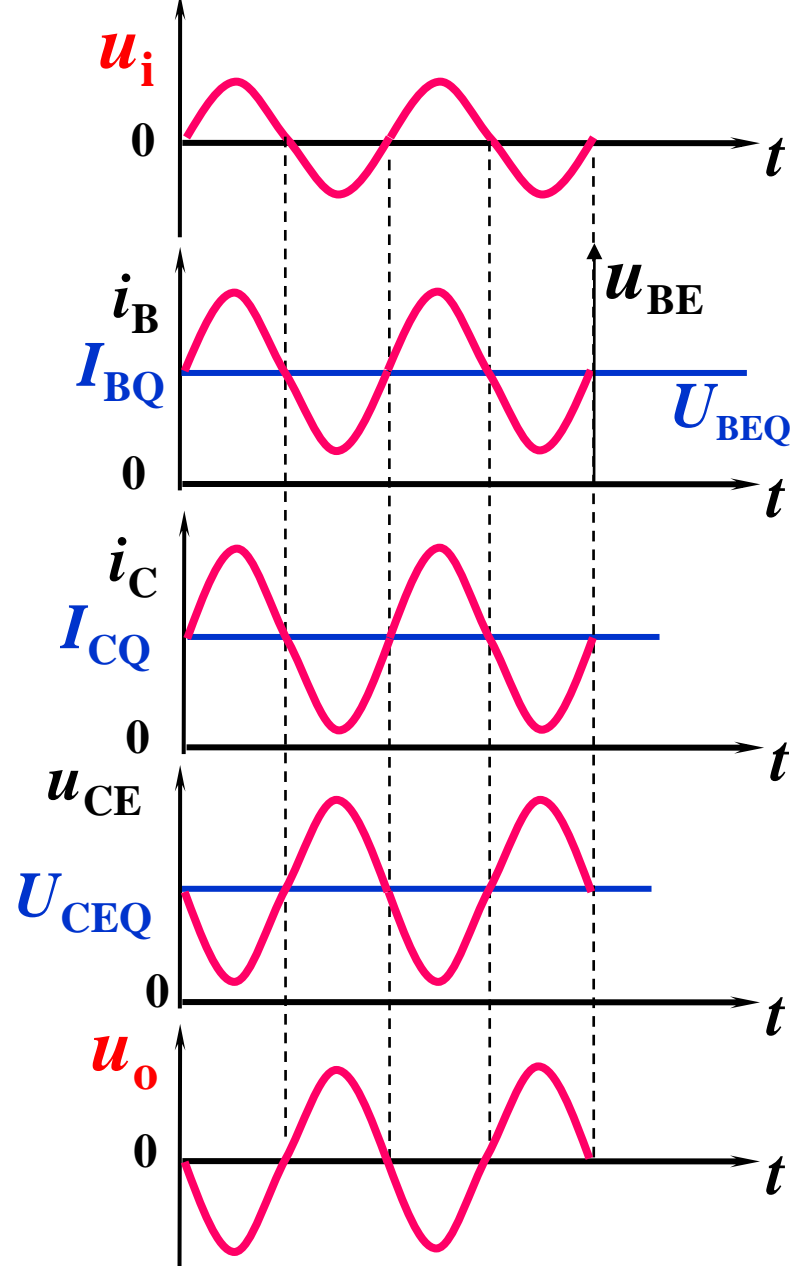


● 总结：信号放大过程

$$\dot{U}_i \rightarrow \Delta u_{BE} \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta i_C (\beta \Delta i_B) \\ \rightarrow \Delta u_{CE} (-\Delta i_C \times R_C) \rightarrow \dot{U}_o$$



注意 物理量
的书写格式



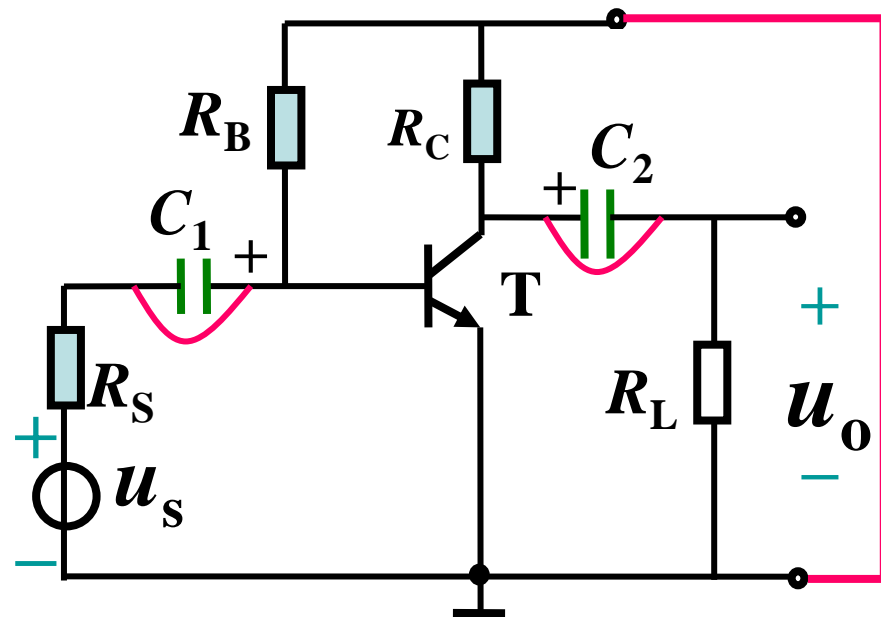
3、图解法动态分析

2) 放大器接负载

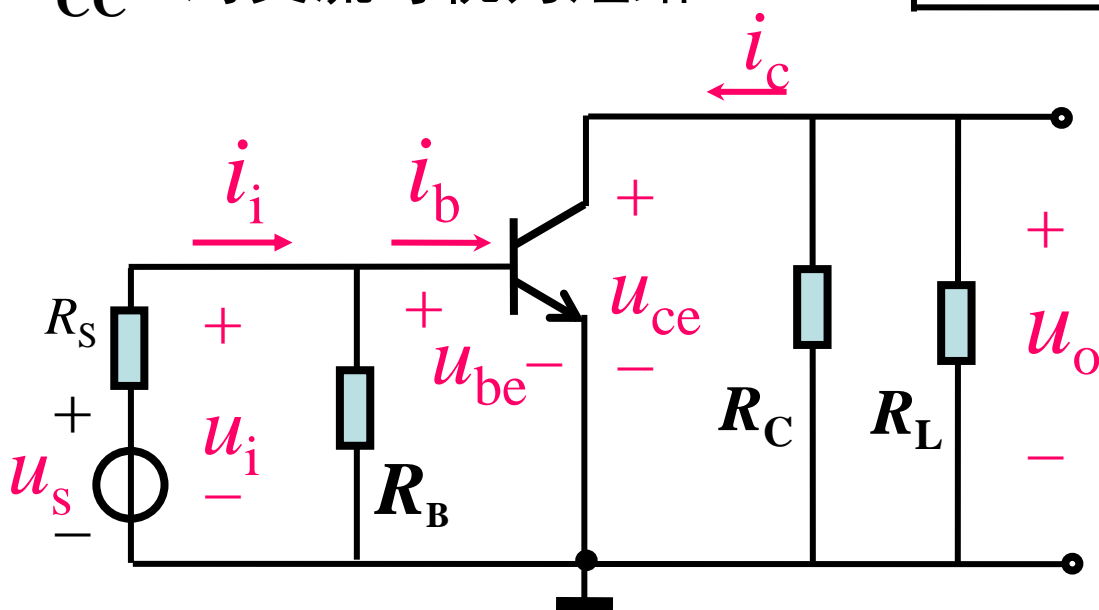
画出交流通路:

C_1, C_2 对交流可视为短路

V_{CC} 对交流可视为短路



共射 放大电路



共射 放大电路的交流通路

3、图解法动态分析

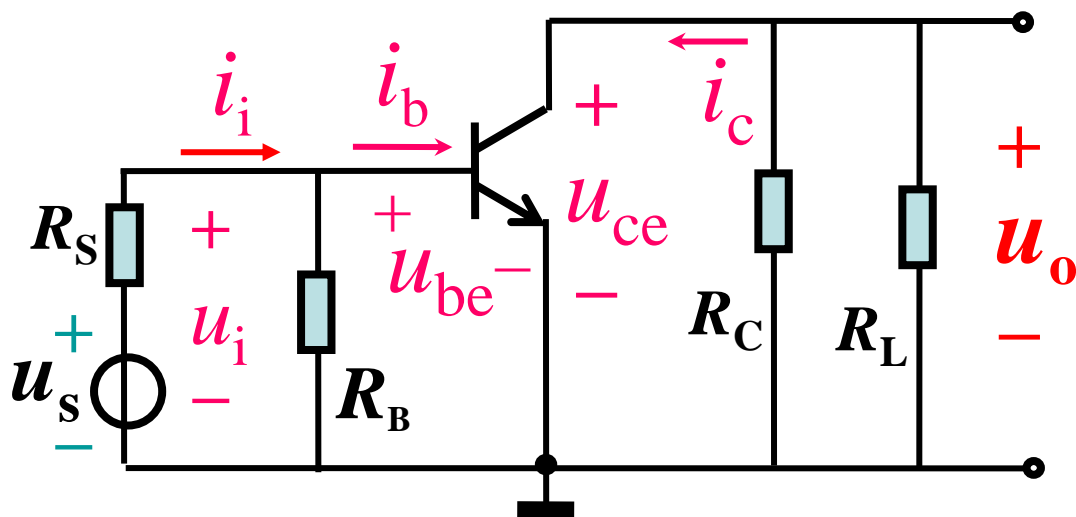
2) 放大器接负载

$$u_{ce} = -i_c(R_C // R_L) = -i_c R_L'$$

$$\frac{i_c}{u_{ce}} = -\frac{1}{R_L'}$$

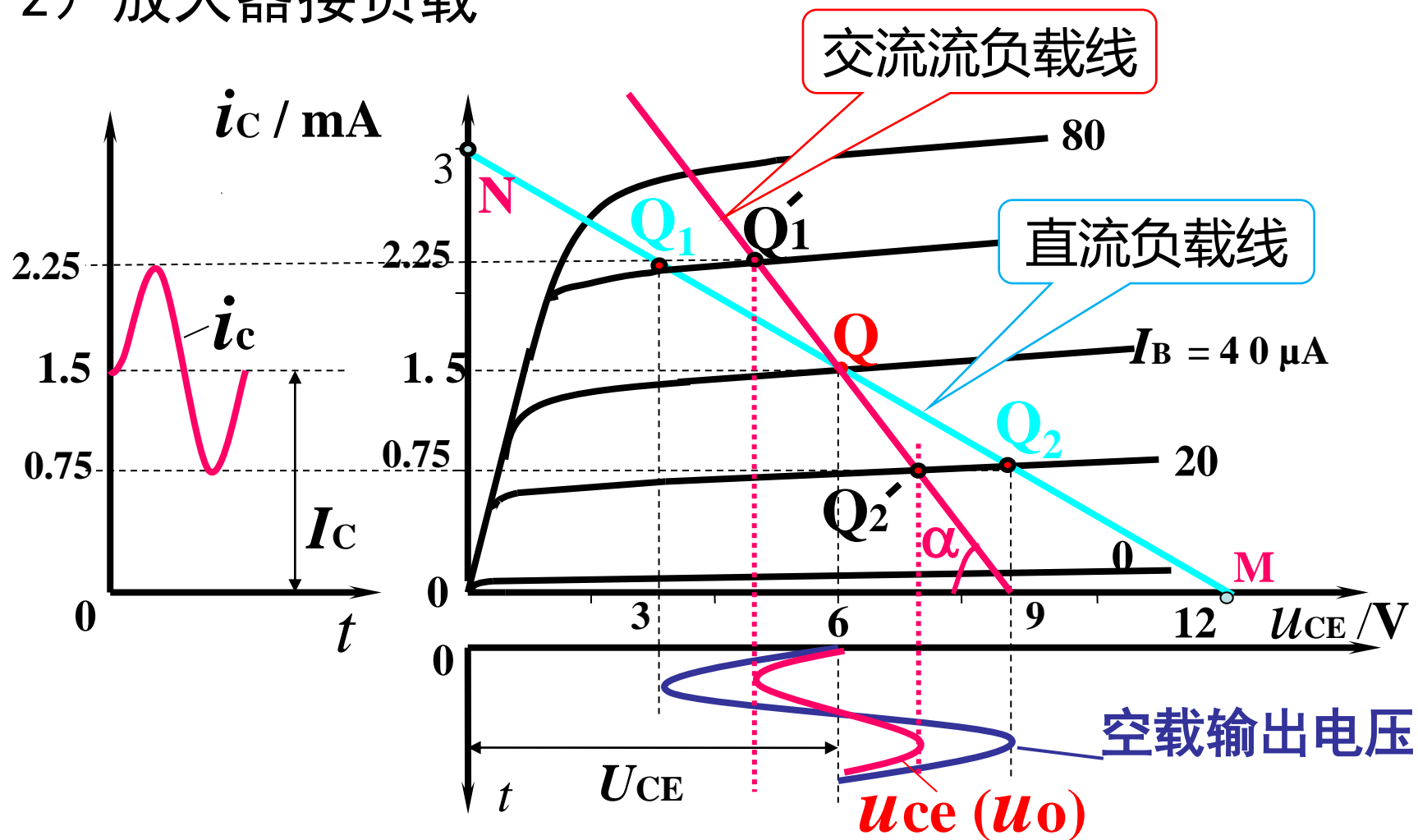
因为 $R_L' < R_L$
故交流负载线变陡

i_c 与 u_{ce} 仍为直线关系，
且该直线通过静态工作点，
将其称为**交流负载线**。



- 放大器接负载时，交、直流负载线交于 Q 点。

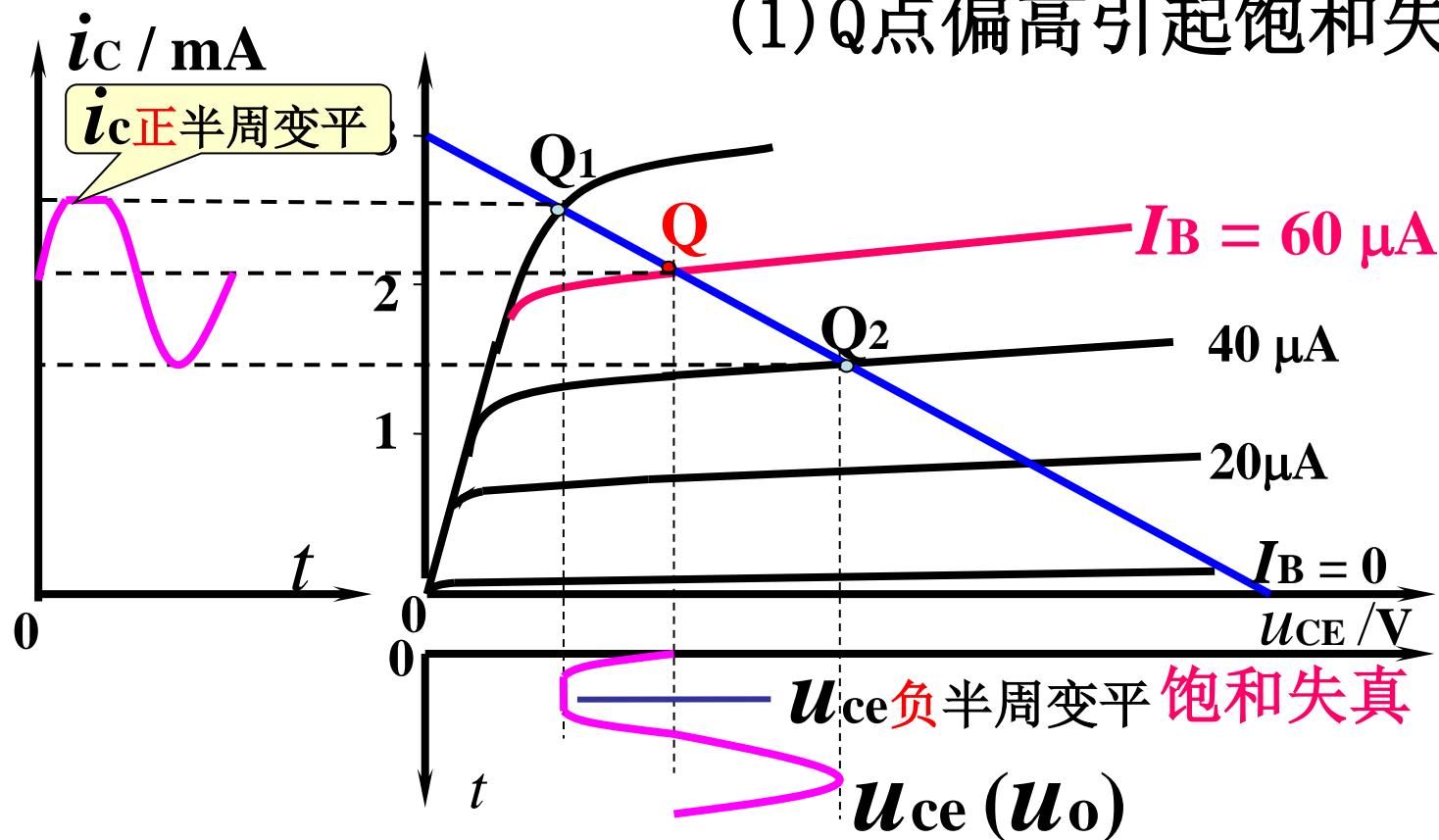
2) 放大器接负载



- 接负载后，放大器的 U_{om} 减小， A_u 下降。

3) 放大器输出非线性失真分析

(1) Q点偏高引起饱和失真

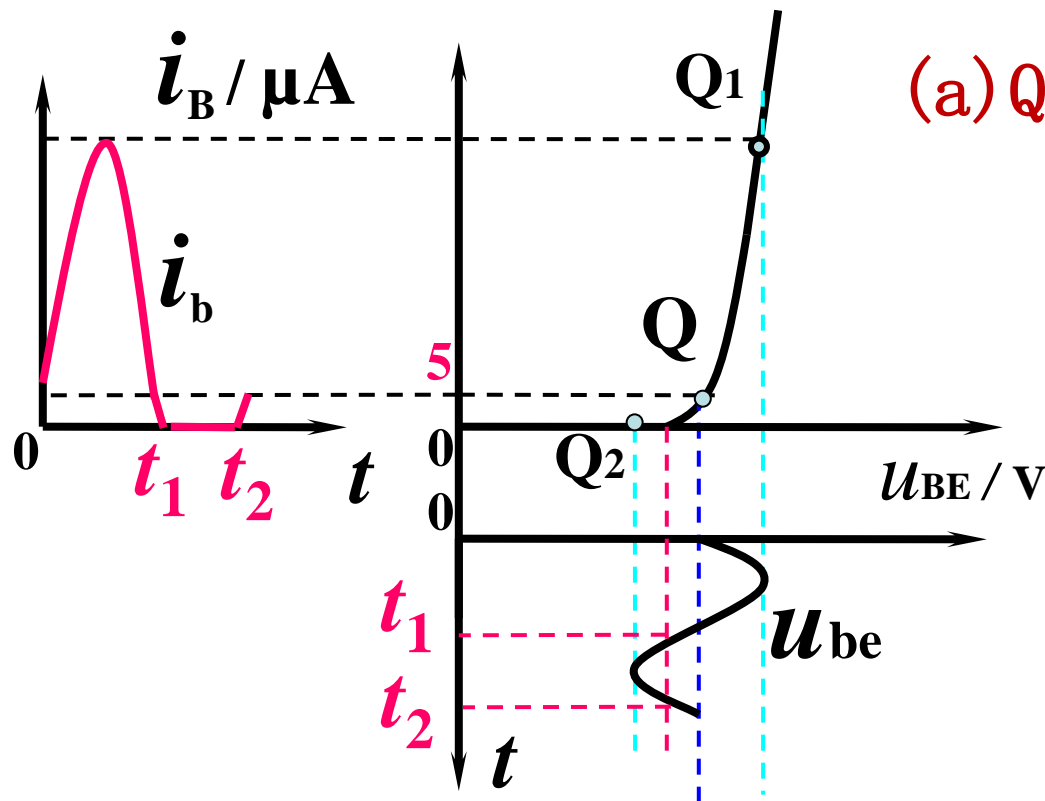


- 不发生饱和失真的条件: $I_{BQ} + I_{bM} < I_{BS}$
- NPN管输出电压波形的低部失真为 饱和失真

3) 放大器输出非线性失真分析

(2) Q点偏低引起截止失真

(a) Q点偏低引起 i_b 失真

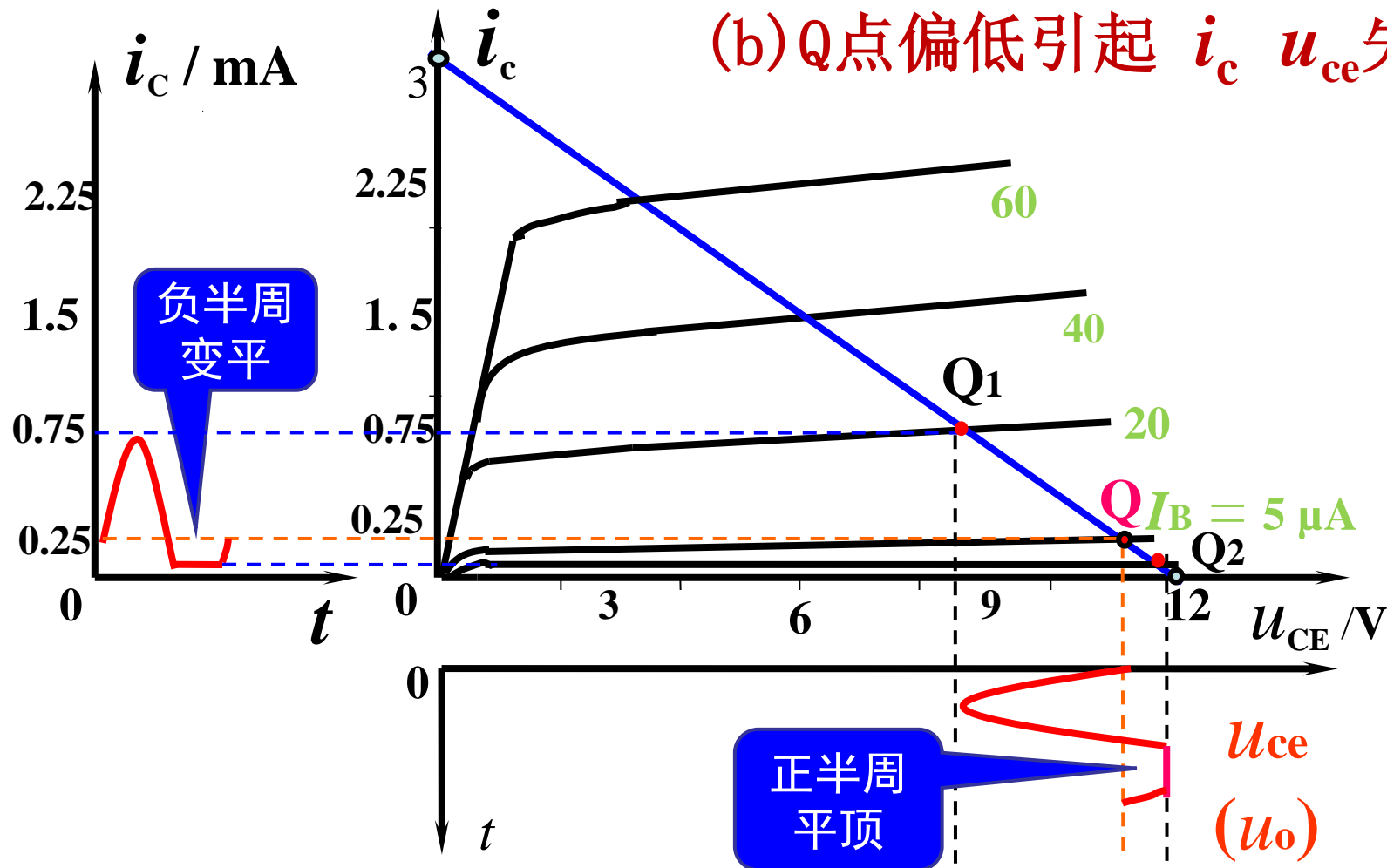


- 不发生截止失真的条件: $I_{BQ} > I_{bM}$ (信号峰值)

3) 非线性失真分析

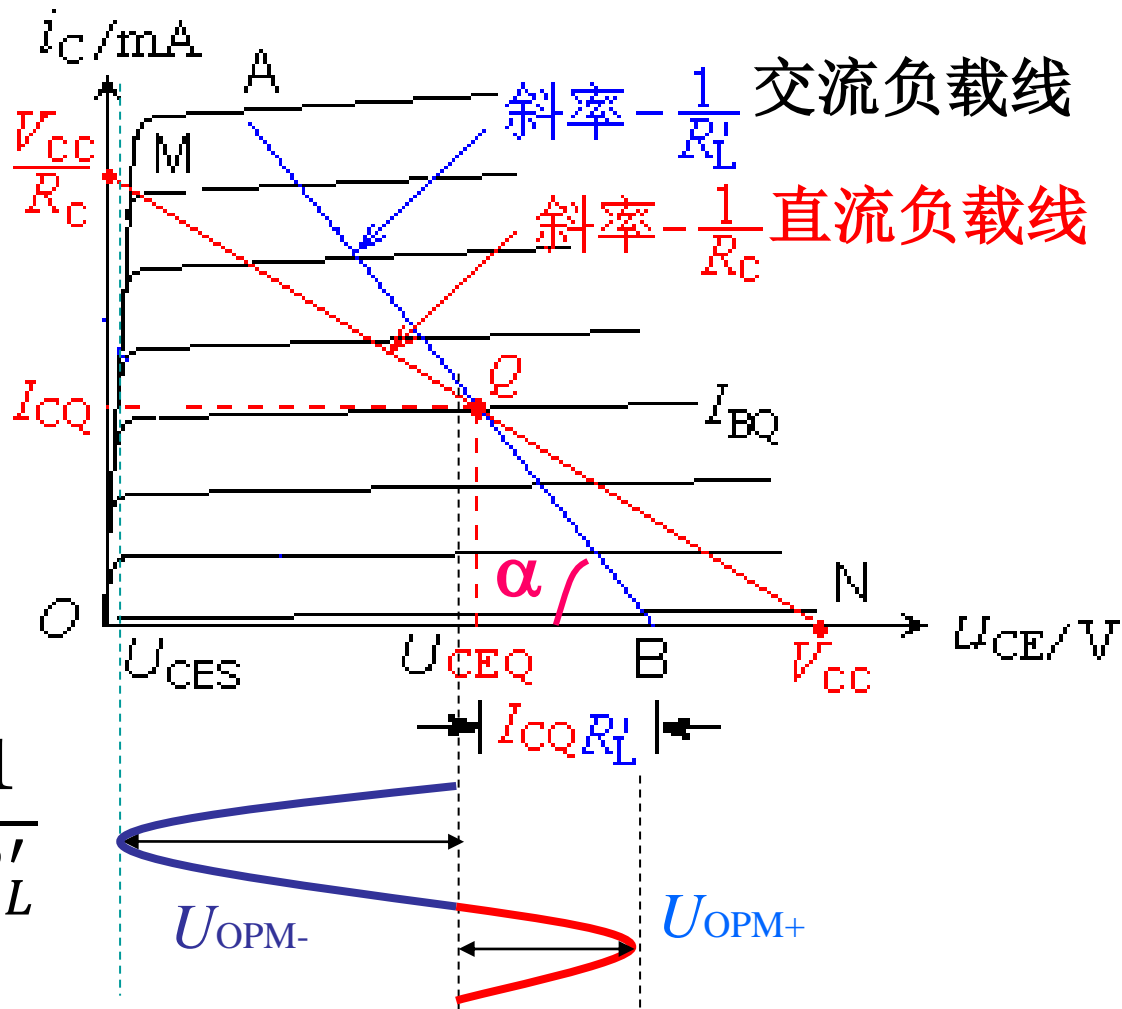
(2) 工作点偏低引起截止失真

(b) Q点偏低引起 i_c u_{ce} 失真



● NPN管输出电压波形的顶部失真为 截止失真

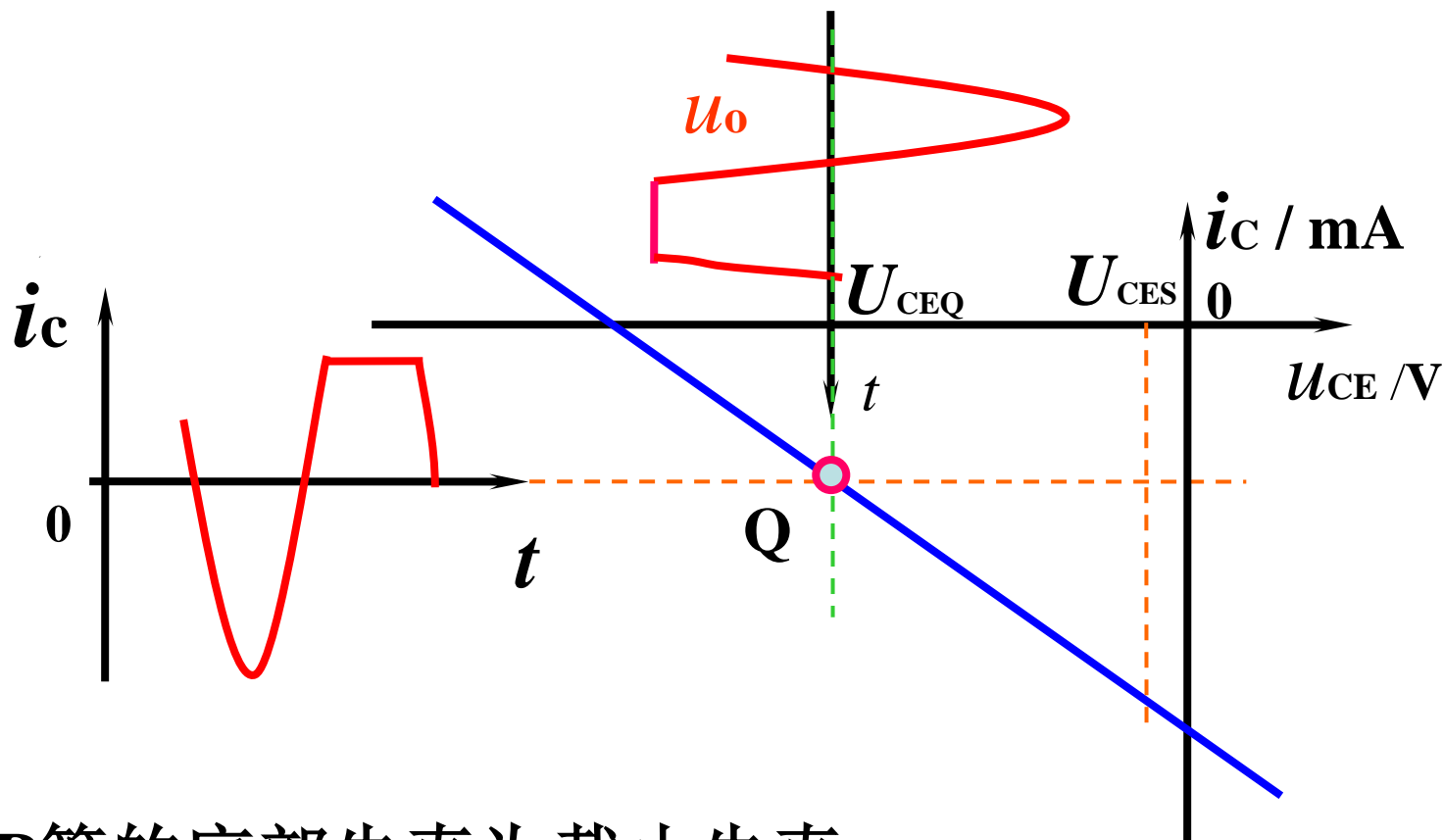
最大不失真
输出电压 U_{omax}



- 最大输出幅度（有效值）计算公式：

$$U_{oM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \min \left\{ U_{CEQ} - U_{CES}, I_{CQ} R'_L \right\}$$

*思考：PNP管截止失真时 u_o 的波形

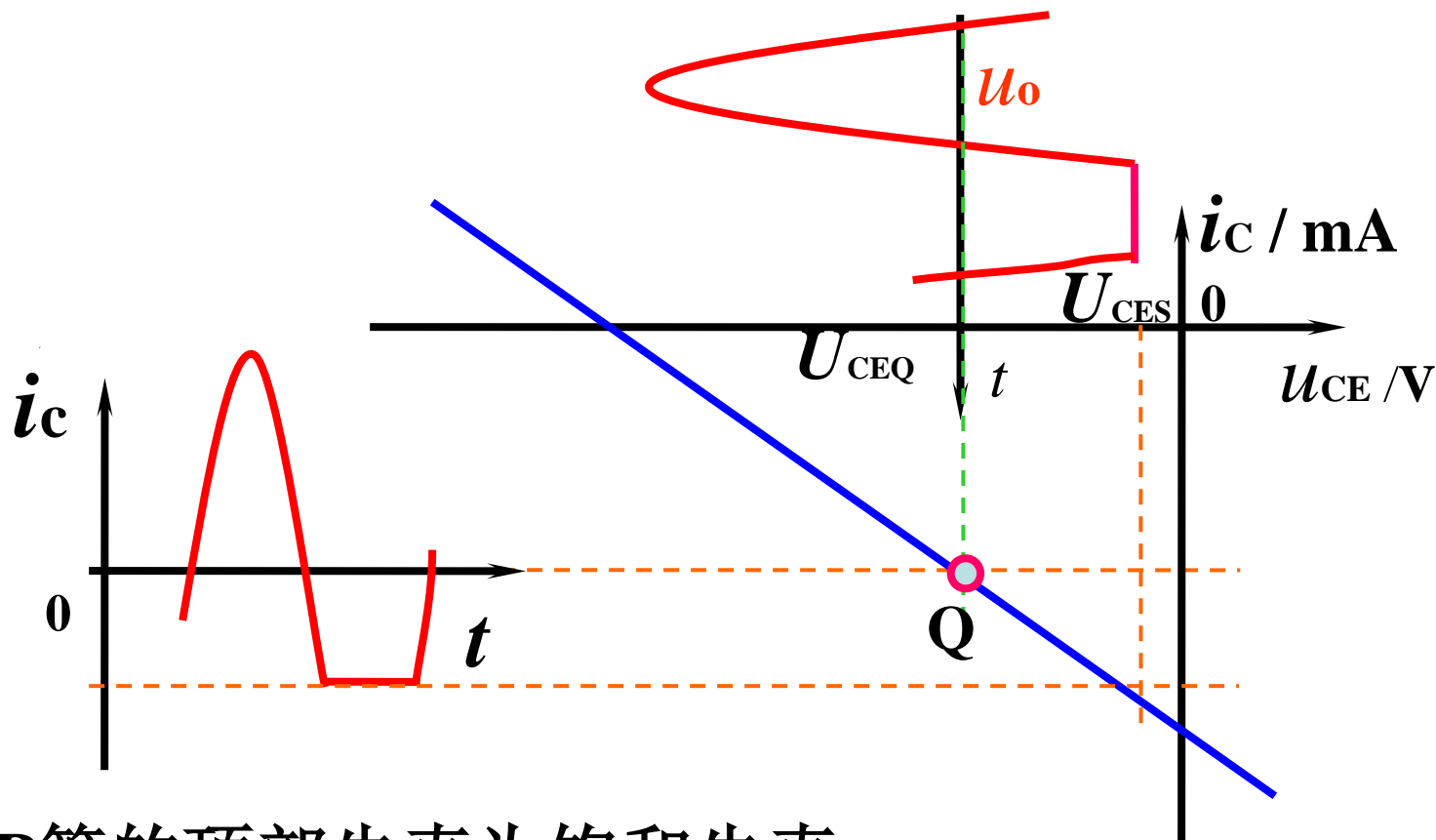


- PNP管的底部失真为截止失真

示波器显示 u_o 波形：



*思考： PNP管饱和失真时 u_o 的波形



- PNP管的顶部失真为饱和失真

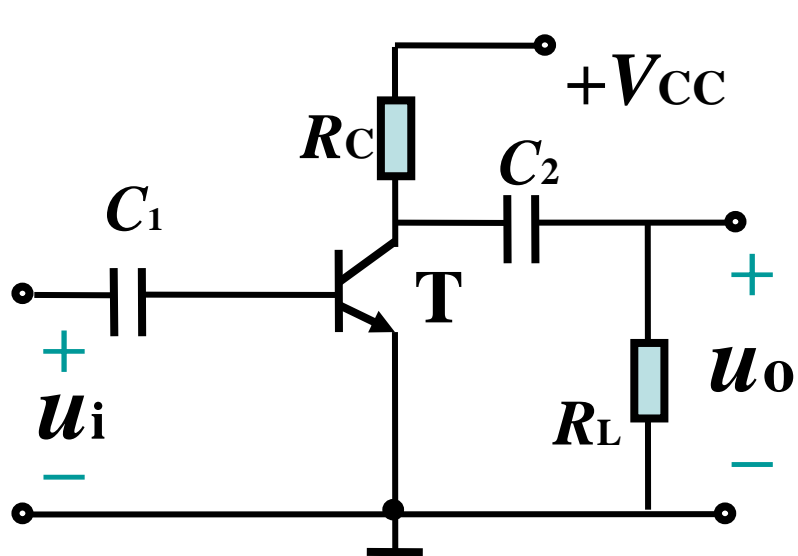
示波器观察 u_o 波形：



4、放大电路的组成原则

- (1) 为了不失真的放大交变电压信号，
必须给放大电路设置合适的静态工作点。
- (2) 在输入回路加入 u_i 应能引起 Δu_{BE} ，
从而引起 i_B 和 i_C 的变化（ Δi_B 和 Δi_C ）。
- (3) 输出回路的接法应使 i_C 尽可能多地流到 R_L 中去，
或者说应将 Δi_C 转化为 Δu_{CE} 送到输出端。

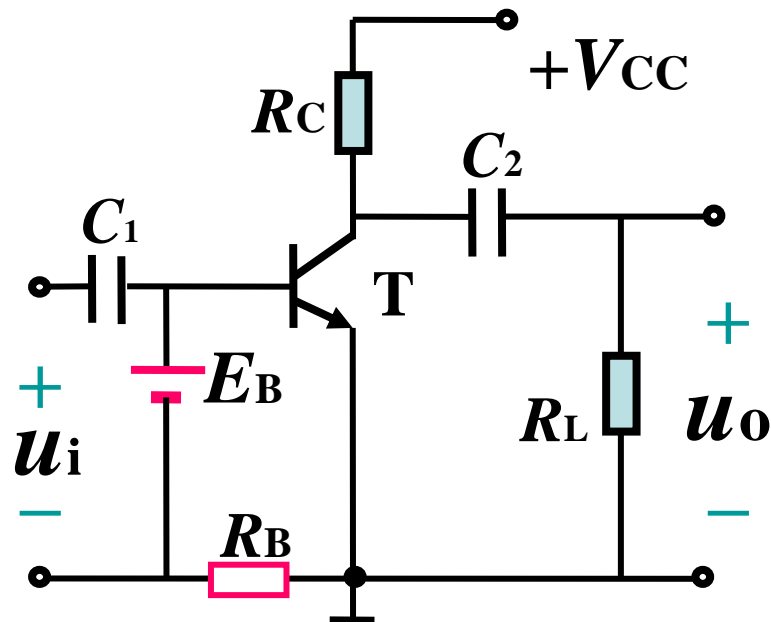
[例3]下面各电路能否放大交流电压信号？



(a)

答 (a)

没有设置静态偏置，不能放大。

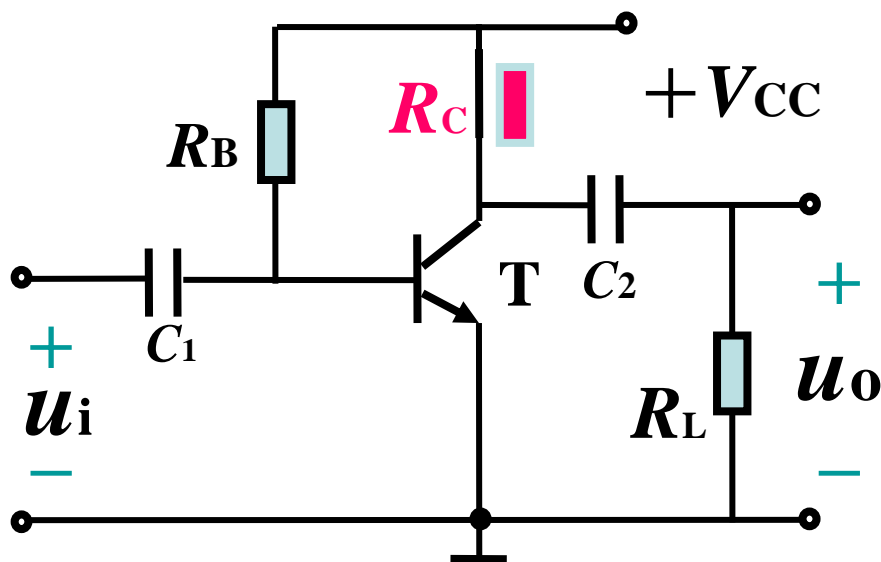


(b)

答 (b)

有静态偏置，但 u_i 被 E_B 短路，不能引起 i_B 的变化，故不能放大。

[例3]下面各电路能否放大交流电压信号？



(c)

答 (c)

放大电路有静态偏置, 有变化的 i_B 和 i_C , 但因没有 R_C , 不能把集电极电流的变化转化为电压的变化送到输出端, 故不能放大交流电压信号

3.3 等效电路分析法-共射电路

内容提要:

3.3.1 固定偏置电路静态分析

(基于三大方程求解)

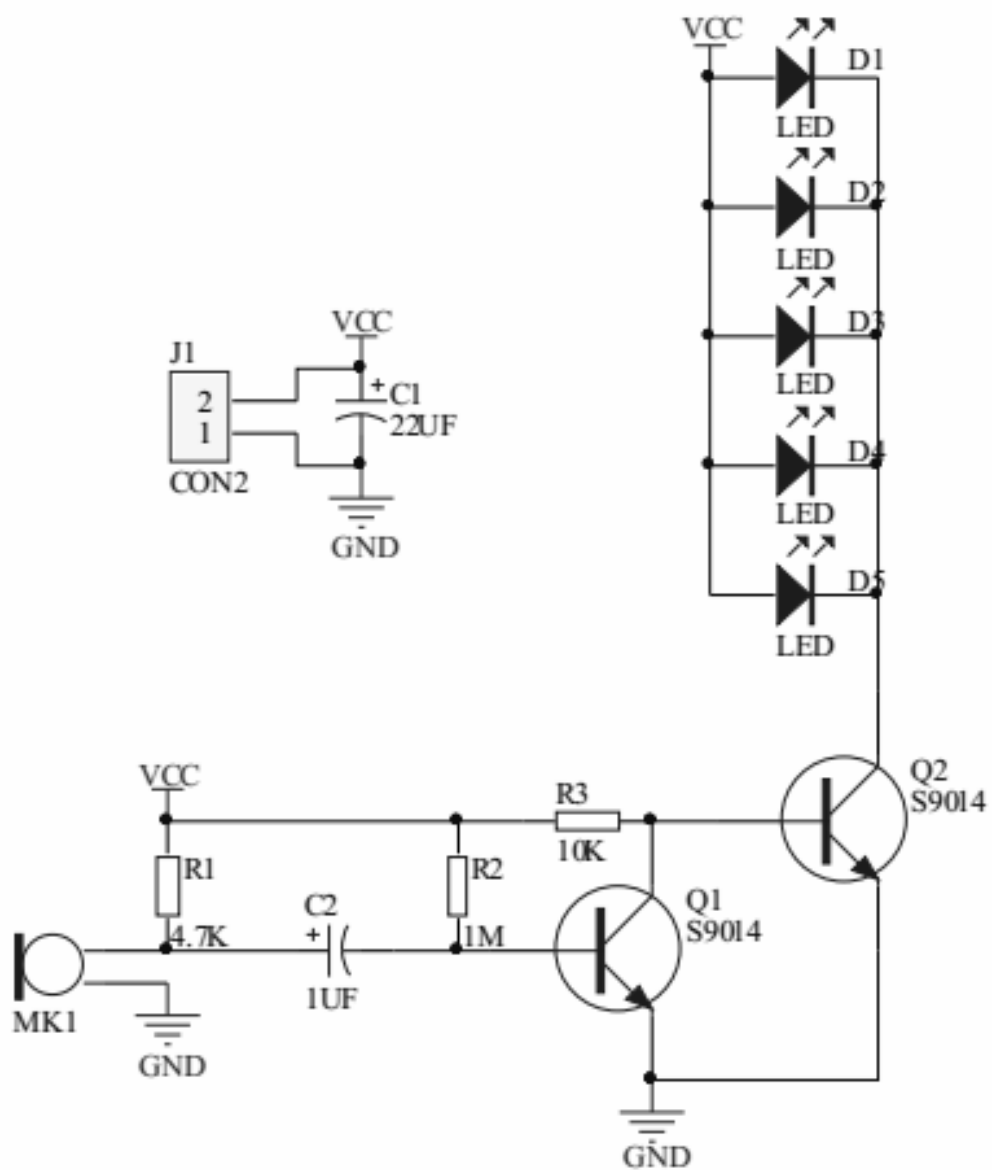
3.3.2 固定偏置电路动态分析

(基于微变等效电路求解)

3.3.3 分压式射极偏置放大电路

(稳定Q点原理、射极旁路电容对性能的影响)

制作-声控旋律灯

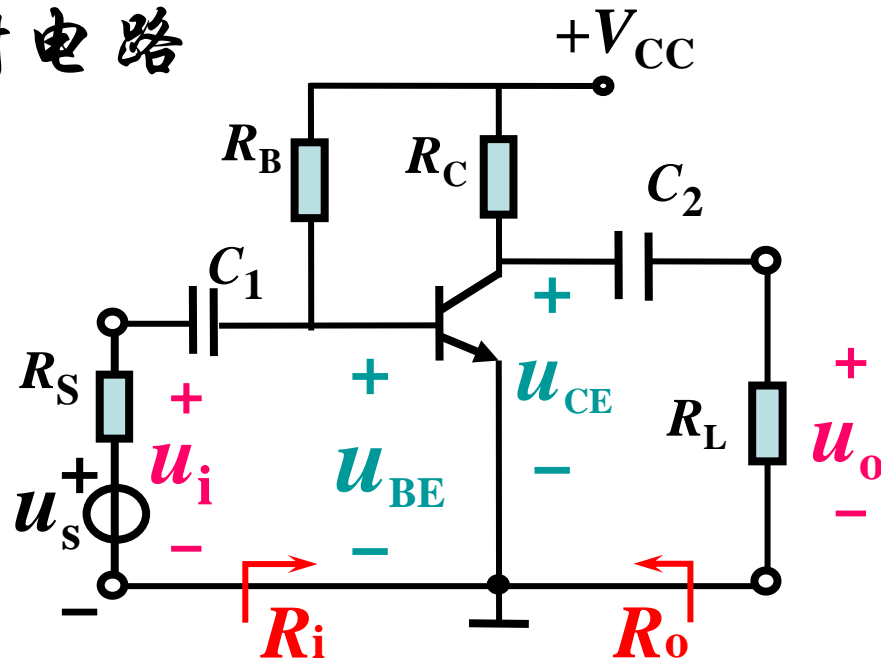


3.3 等效电路分析法-共射电路

1、静态分析

➤ 目标:
确定静态值 I_B I_C 和 U_{CE}

➤ **方法：**
用放大电路的直流等效电路分析。



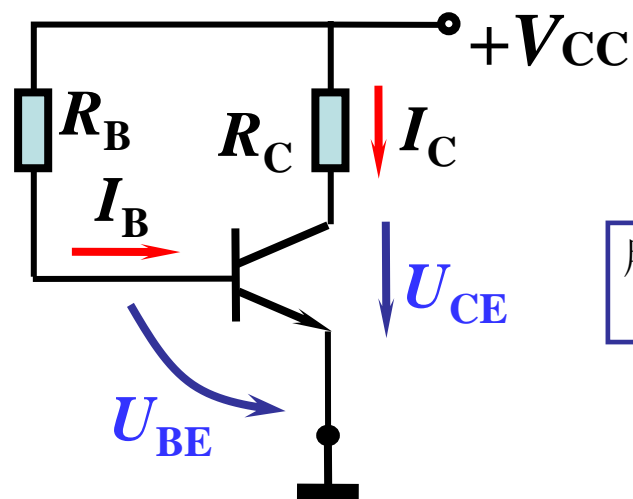
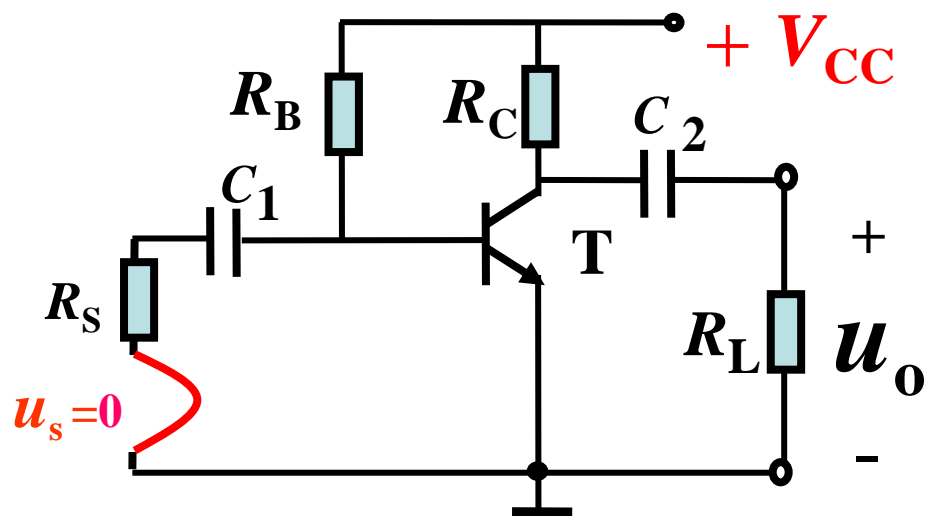
固定偏置共射 放大电路

2、动态分析

➤ 目标：求解性能指标 R_i R_o A_u U_{oM}

➤ 方法：用放大电路的微变等效电路来分析。

3.3.1 固定偏置电路静态分析

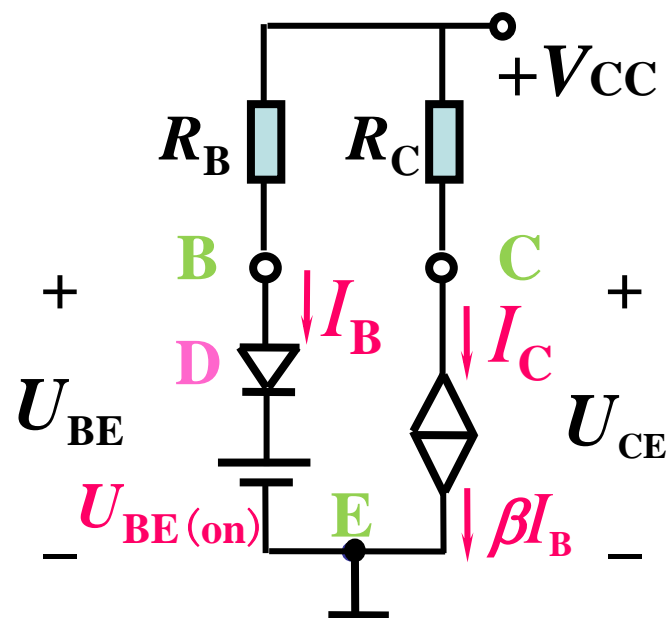


用BJT直流
模型替换

直流通路

1、直流通路画法

- ① 交流电压源视为短路
- ② 电容视为开路



直流等效电路

3.3.1 固定偏置电路静态分析

2、直流通路三大方程：

①由输入回路方程求 I_B ：

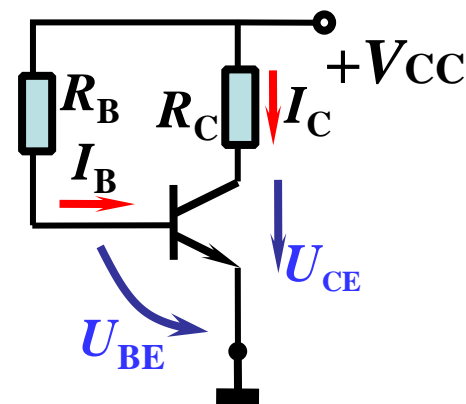
$$V_{CC} = I_B R_B + U_{BE}$$

②由放大区电流方程求 I_C ：

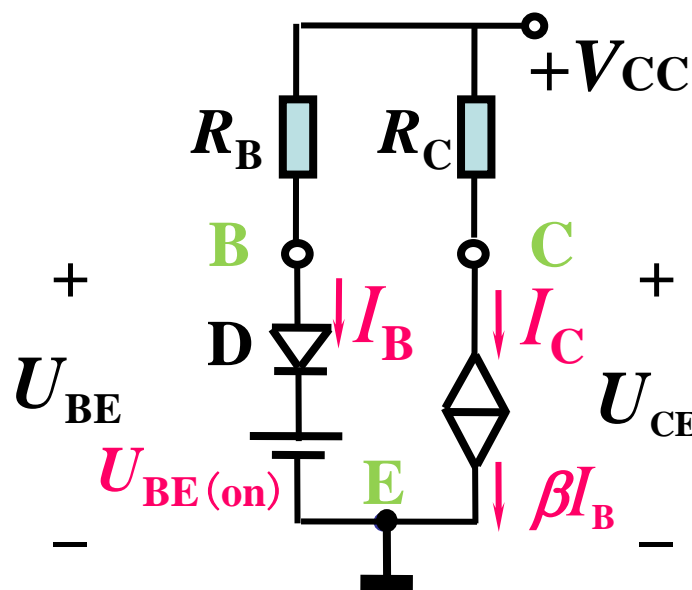
$$I_C = \beta I_B$$

③由输出回路方程求 U_{CE} ：

$$V_{CC} = U_{CE} + I_C R_C$$



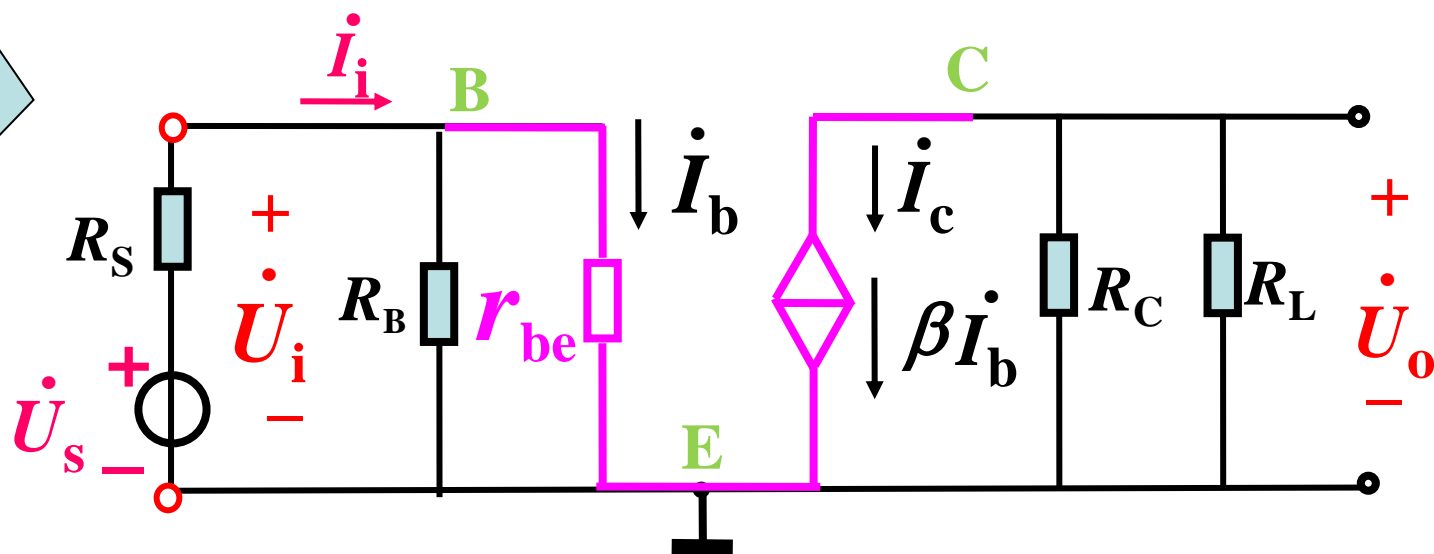
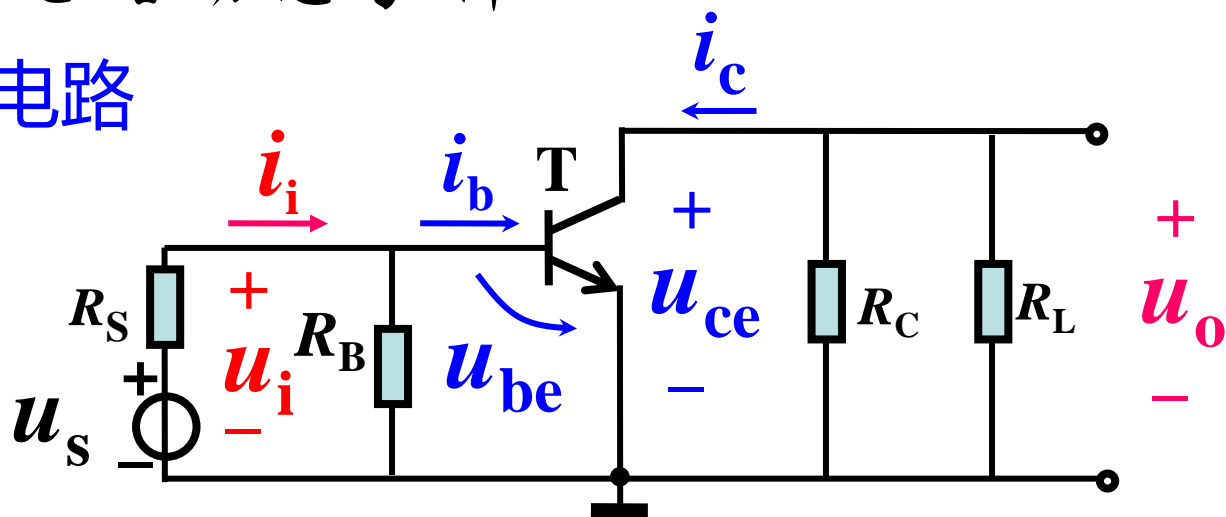
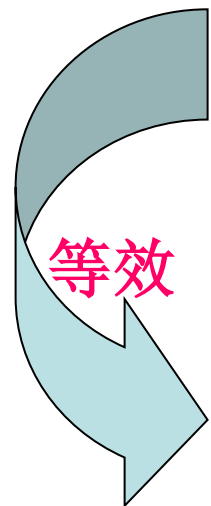
直流通路



直流等效电路

3.3.2 固定偏置电路动态分析

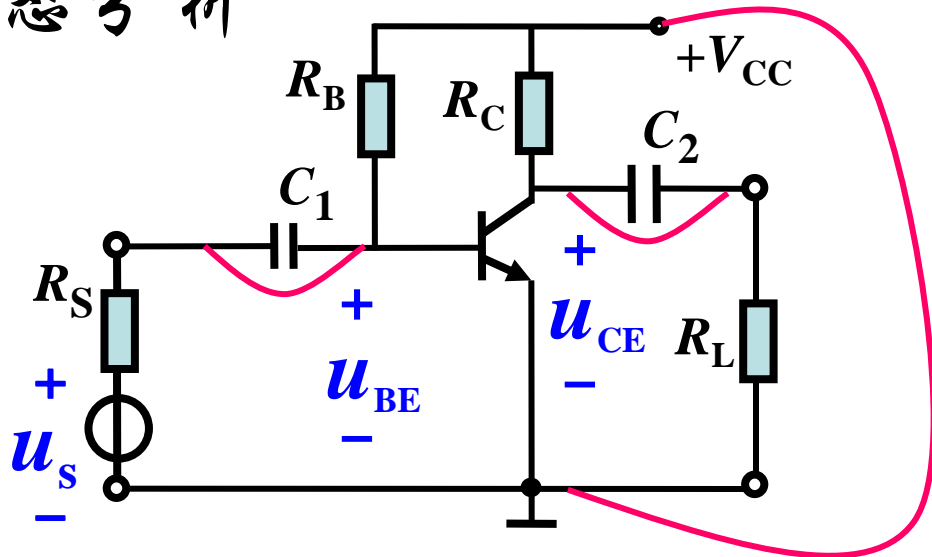
1、作微变等效电路



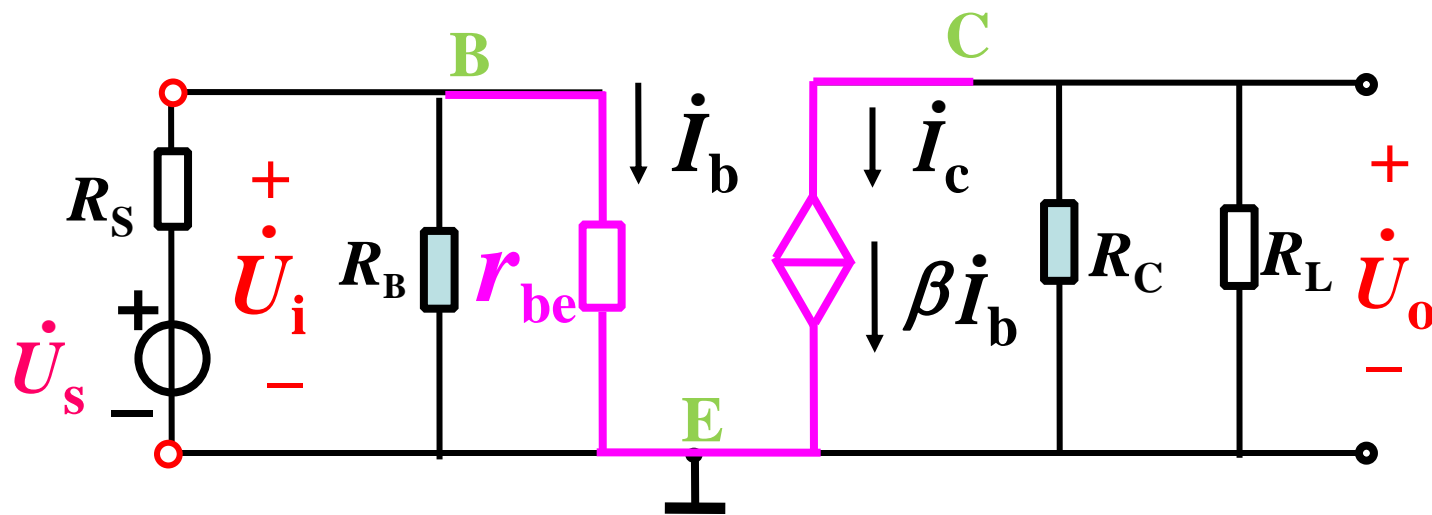
共射放大电路的微变等效电路

3.3.2 固定偏置电路动态分析

1、作微变等效电路



用
BJT
交流
模型
替换

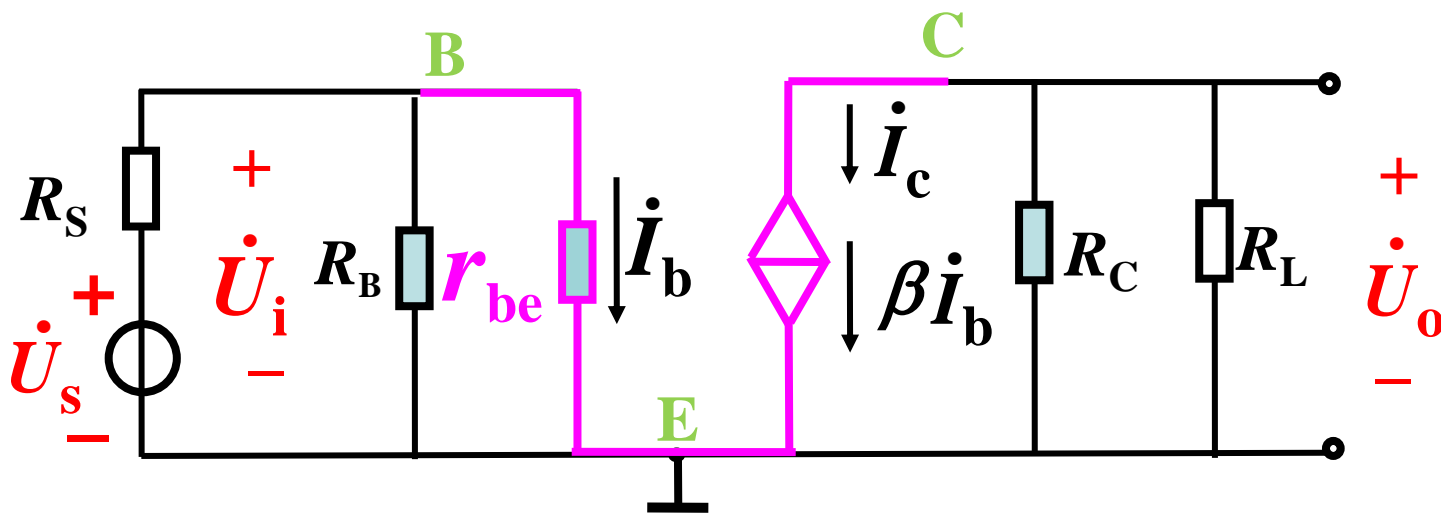


共射放大电路的微变等效电路

2、求放大电路性能指标

1) 求电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b (R_C // R_L)}{r_{be} \dot{I}_b} = -\beta \frac{(R_C // R_L)}{r_{be}}$$

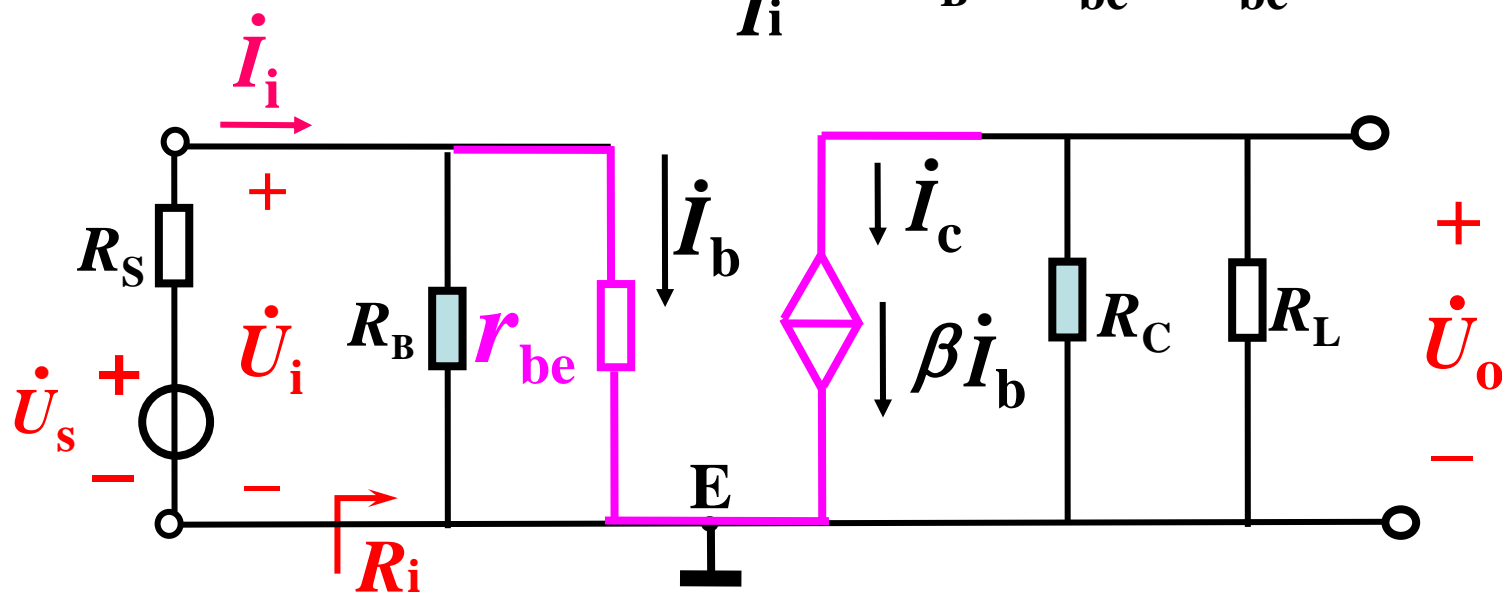


共射放大电路的微变等效电路

2、求放大电路性能指标

2)求放大电路的输入电阻

输入电阻定义：
$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_B // r_{be} \approx r_{be}$$

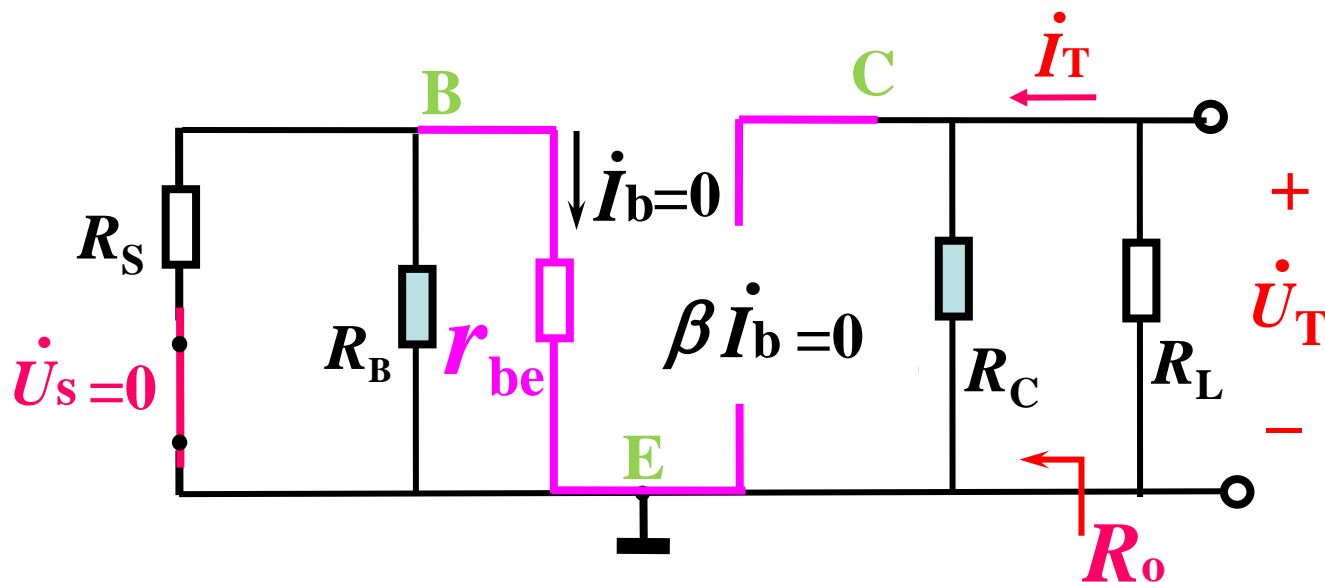
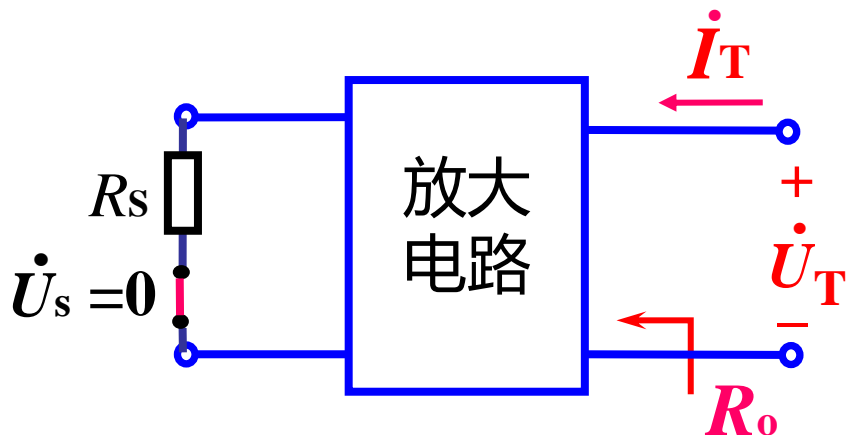


- 电路的输入电阻越大，从信号源取得的电流越小，因此，一般希望放大器有较大的输入电阻。

2、求放大电路性能指标

3)放大电路的输出电阻

$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_T}{\dot{I}_T} \right|_{\substack{\dot{U}_s = 0, R_s \text{保留} \\ R_L \text{开路}}} = R_C$$

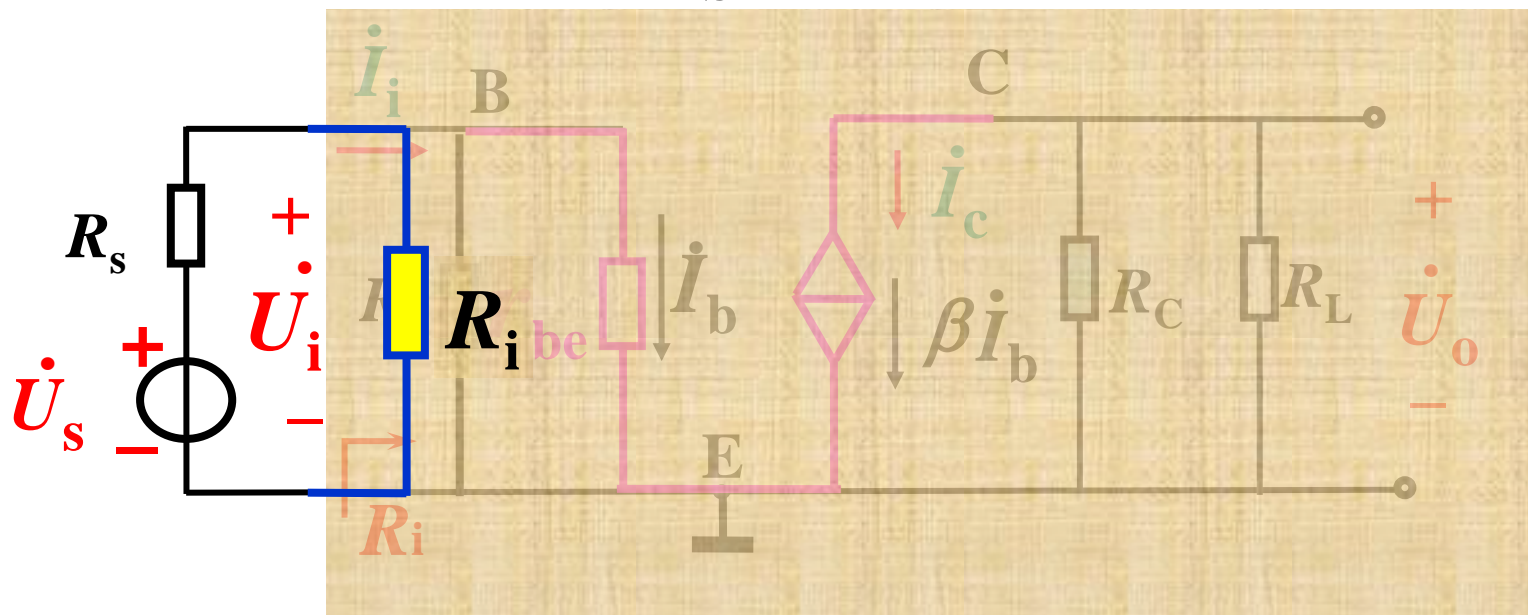


- 电路的输出电阻越小，负载获得的电压越稳定，因此，一般希望放大器有较小的输出电阻。

2、求放大电路性能指标

4)求源电压放大倍数

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_I} \cdot \frac{\dot{U}_I}{\dot{U}_s} = \dot{A}_u \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i}$$



共射放大电路的微变等效电路

2、求放大电路性能指标

5)求最大输出幅度

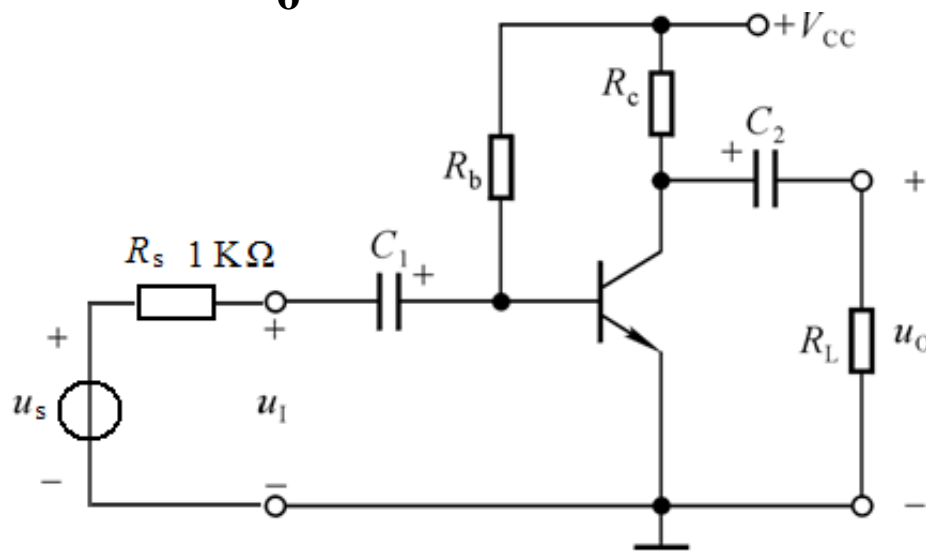
给定参数: $\beta = 100$, $r_{be} = 1\text{k}\Omega$, $U_{BE} = 0.7\text{V}$ 。 $R_c = R_L = 3\text{K}\Omega$, $V_{CC} = 12\text{V}$

$$U_{oM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \min \{ U_{CEQ} - U_{CES}, I_{CQ} R'_L \}$$

6) 当 $U_s = 20\text{mV}$ (有效值) 时, 求 $U_o = ?$

$$A_{us} = \frac{U_o}{U_s}$$

7) 当 $U_s = 40\text{mV}$ 时,
 u_o 会发生何种失真?
用示波器观察 u_o 是底部
还是顶部失真? 为什么?



3、共射放大电路的特点和应用

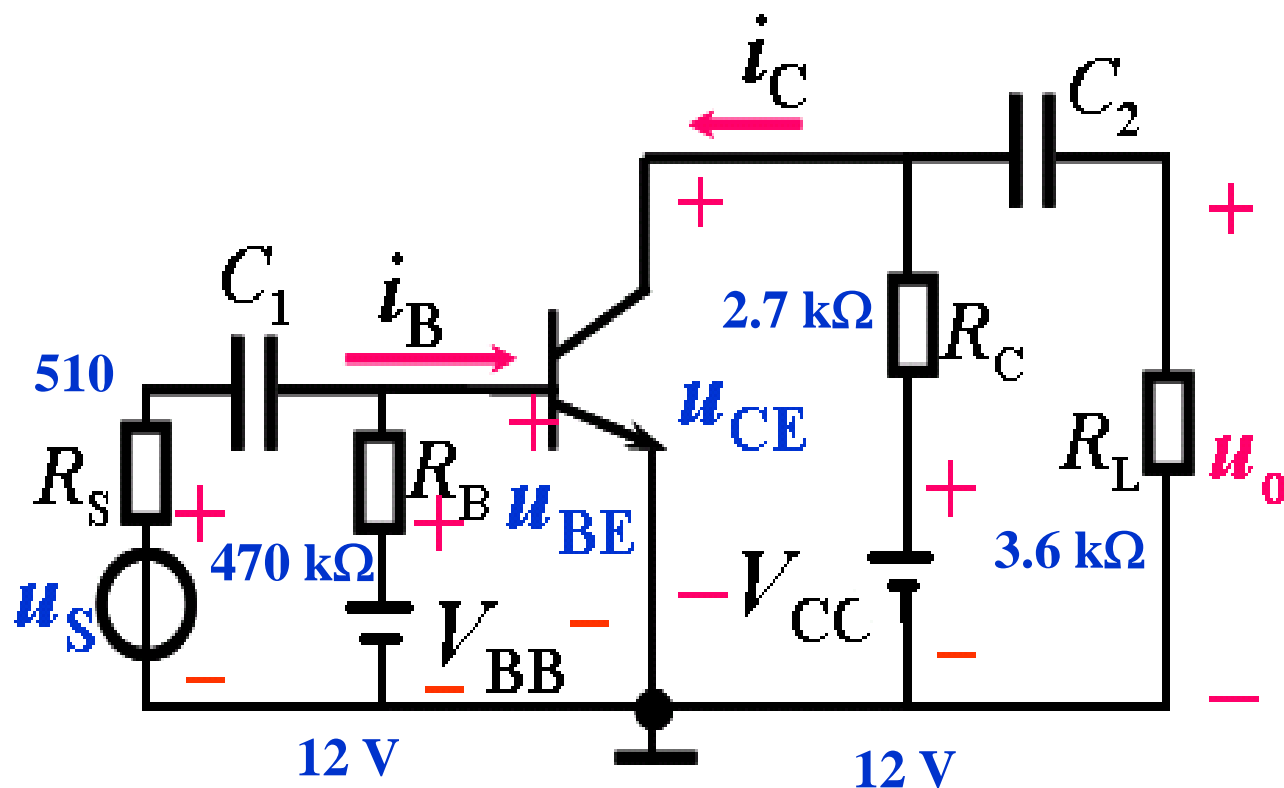
1) 特点

- 电压放大倍数约一两百倍；
- 输出电压与输入电压极性相反；
- 输入电阻不高；
- 输出电阻不低；
- 有电流放大作用（功率放大作用最强）

2) 应用

应用于多级放大电路的中间级

[例4] $\beta = 100$, $u_s = 10\sin \omega t$ (mV),
求叠加在“Q”点上的各交流量。



双电源供电 基本共射放大电路

[例4 解]

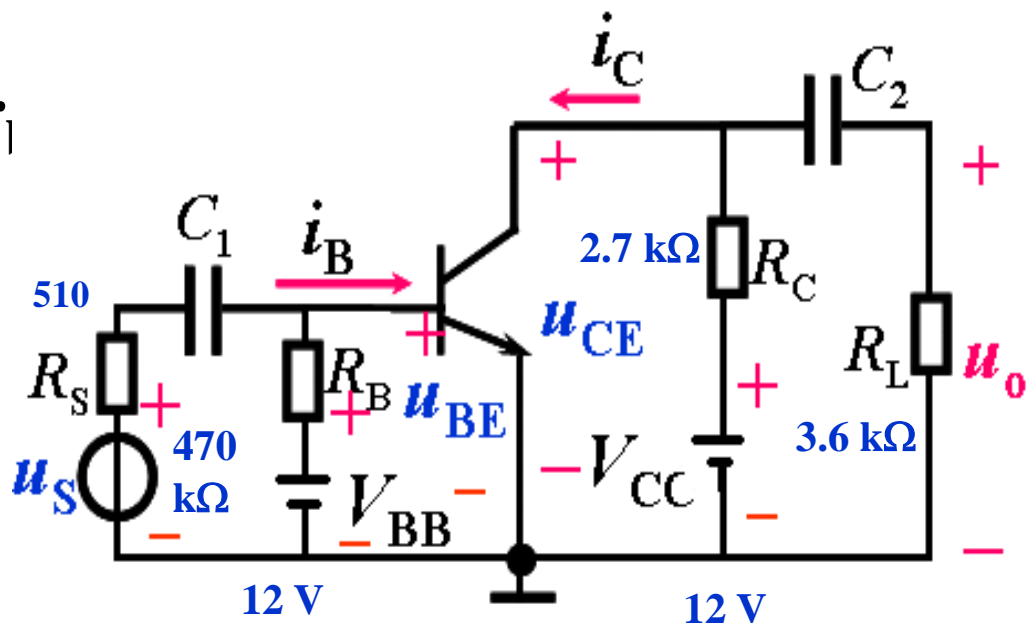
① 求“ Q ”，并计算 r_i

$$I_{BQ} = \frac{12 - 0.7}{470} = 0.024 \text{ (mA)}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2.4 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = 12 - I_C R_C = 5.5 \text{ (V)}$$

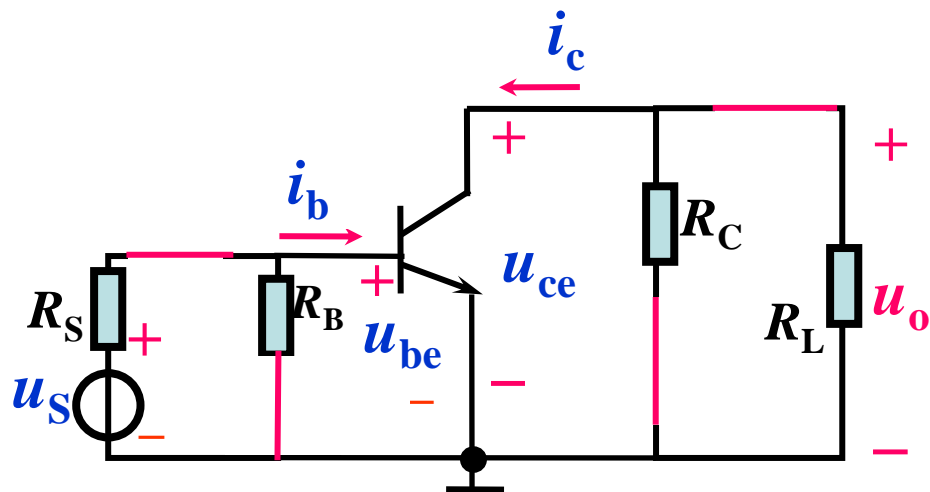
$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 200 + \frac{26}{0.024} = 1\,283 \text{ (}\Omega\text{)}$$



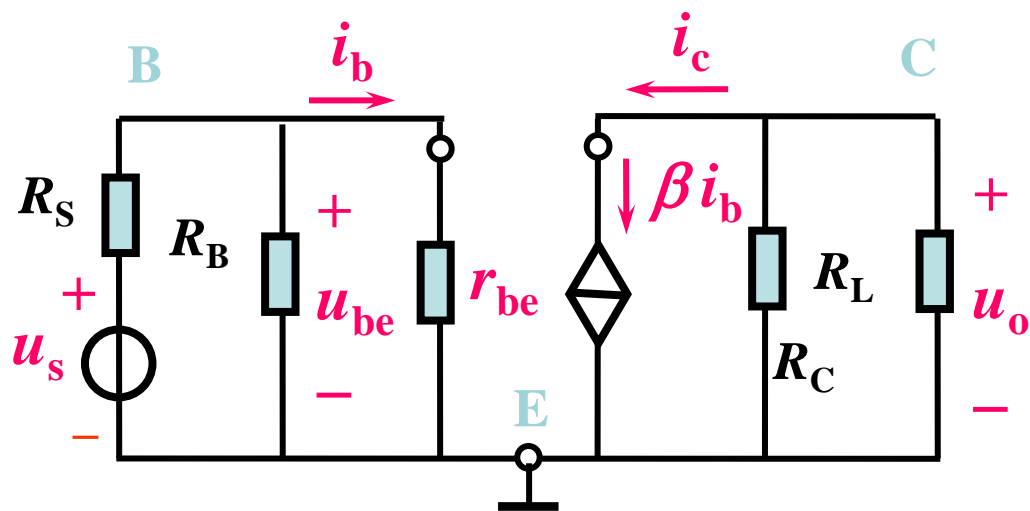
基本共射放大电路

[例4解]

② 交流通路



③ 微变等效电路



[例4解]

④ 分析各极交流量

$$u_{be} = \frac{u_S (R_B // r_{be})}{R_S + R_B // r_{be}} = 7.2 \sin \omega t \text{ (mV)}$$

$$i_b = \frac{u_{be}}{r_{be}} = 5.5 \sin \omega t \text{ (}\mu\text{A)}$$

$$i_c = \beta i_b = 0.55 \sin \omega t \text{ (mA)}$$

$$u_{ce} = u_o$$

$$= -i_c (R_C // R_L) = 0.85 \sin \omega t \text{ (V)}$$

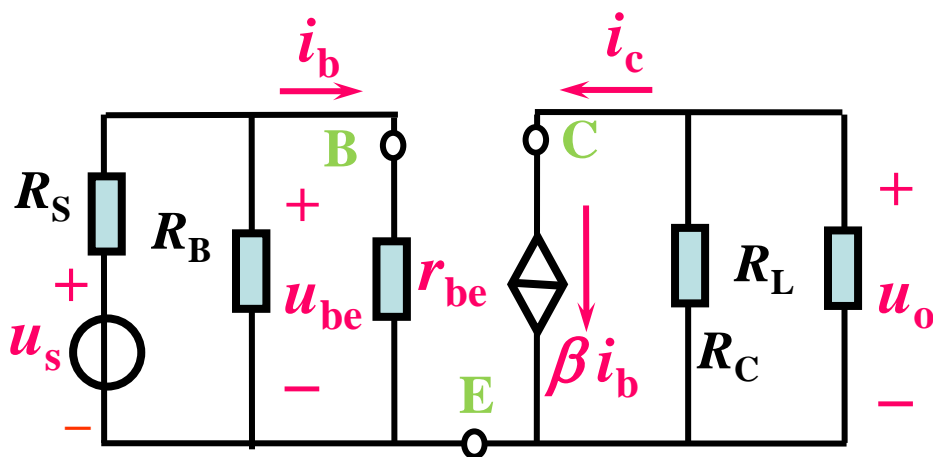
⑤ 分析各极总电量

$$u_{BE} = (0.7 + 0.0072 \sin \omega t) \text{ V}$$

$$i_B = (24 + 5.5 \sin \omega t) \mu\text{A}$$

$$i_C = (2.4 + 0.55 \sin \omega t) \text{ mA}$$

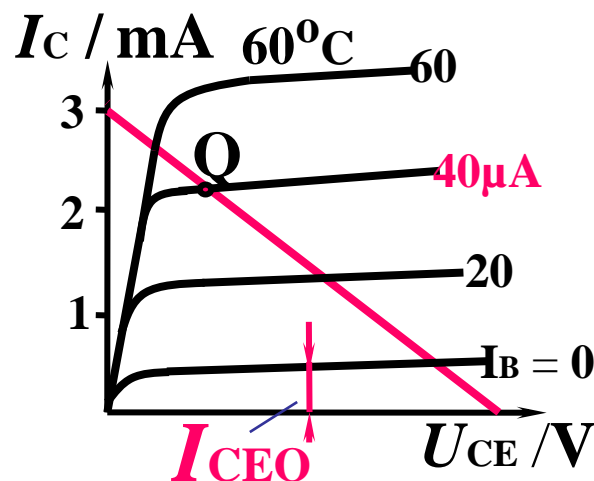
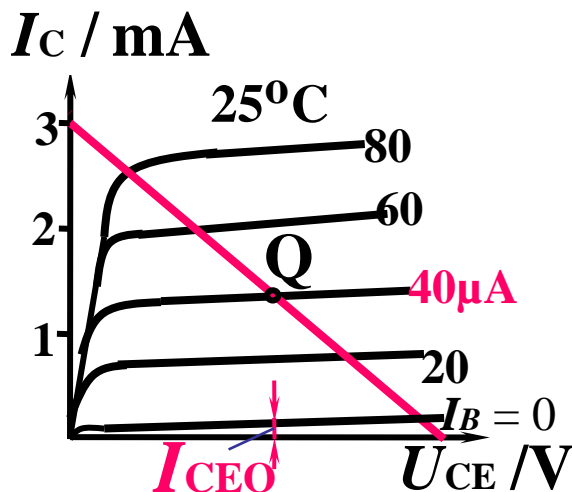
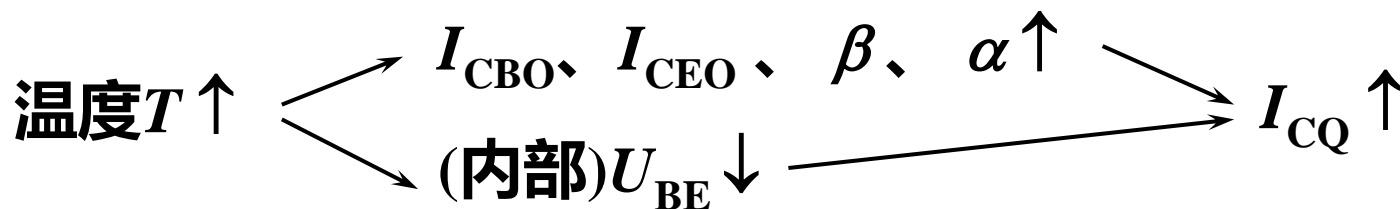
$$u_{CE} = (5.5 - 0.85 \sin \omega t) \text{ V}$$



微变等效电路

3.3.3 分压式偏置放大电路

1、温度对BJT的影响



- 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} 。

3.3.3 分压式偏置放大电路

2、温度对固定偏置共射电路的影响

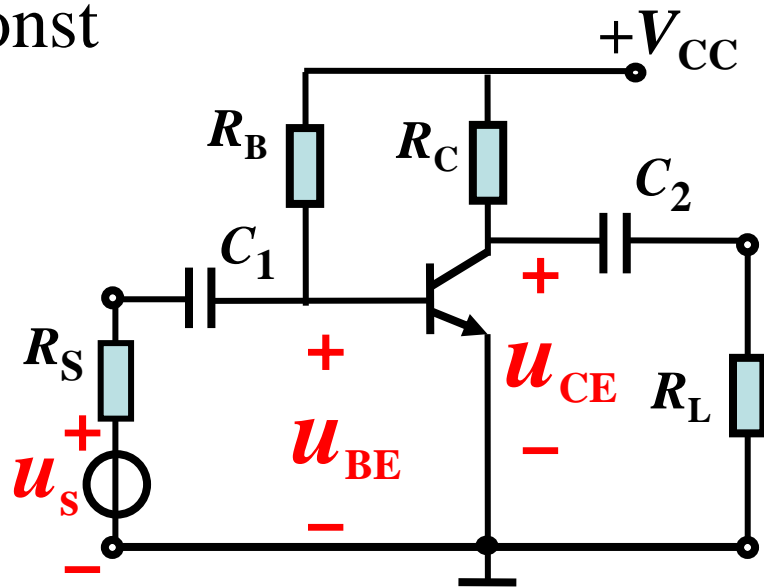
➤ 因：
$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{V_{CC}}{R_B} = \text{const}$$

即，在固定偏置共射放大电路中，
 I_B 近似为恒定值；

➤ 温度升高， β 和 I_{CEO} 增大，

而 $I_C = \beta I_B + I_{CEO}$

必然导致 I_C 增大，Q点上移。

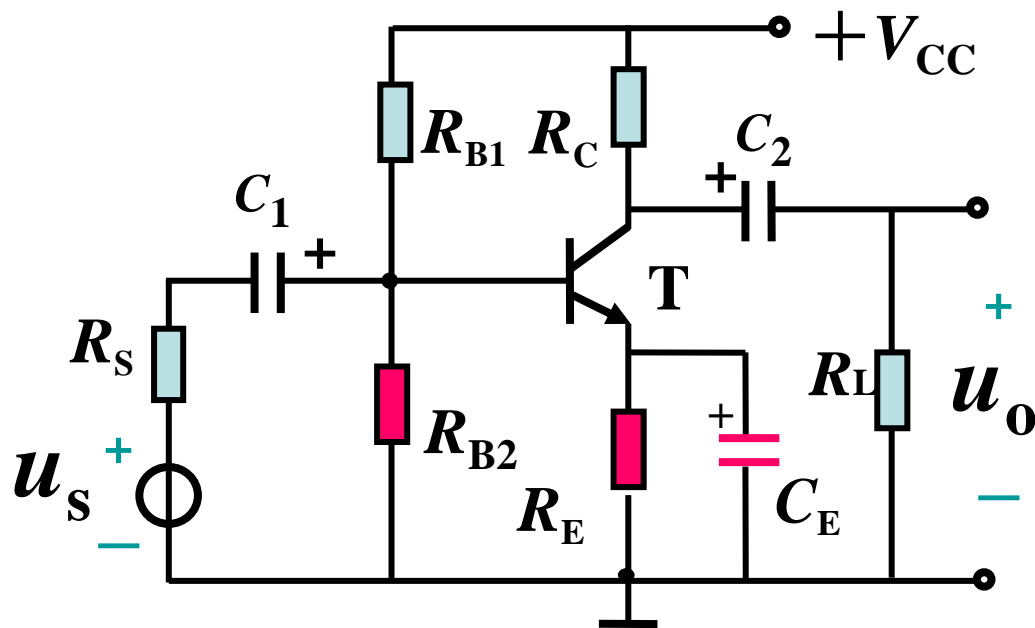


固定偏置共射电路

- 固定偏置共射放大电路，Q点随温度升高而向饱和区靠近。

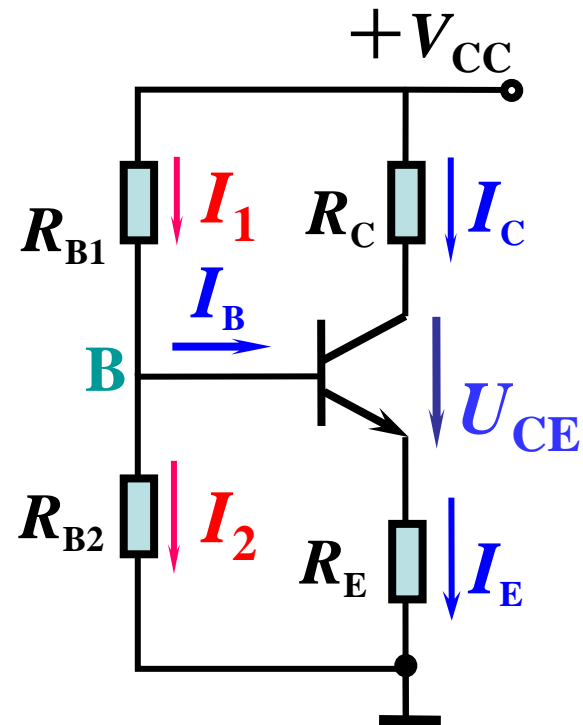
3.3.3 分压式偏置放大电路

3、射极偏置稳定Q点的原理



条件：对于设计好的电路均能满足

$$I_1 \gg I_B, I_2 \gg I_B$$



直流通路

可以认为 $I_1 \approx I_2$

3.3.3 分压式偏置放大电路

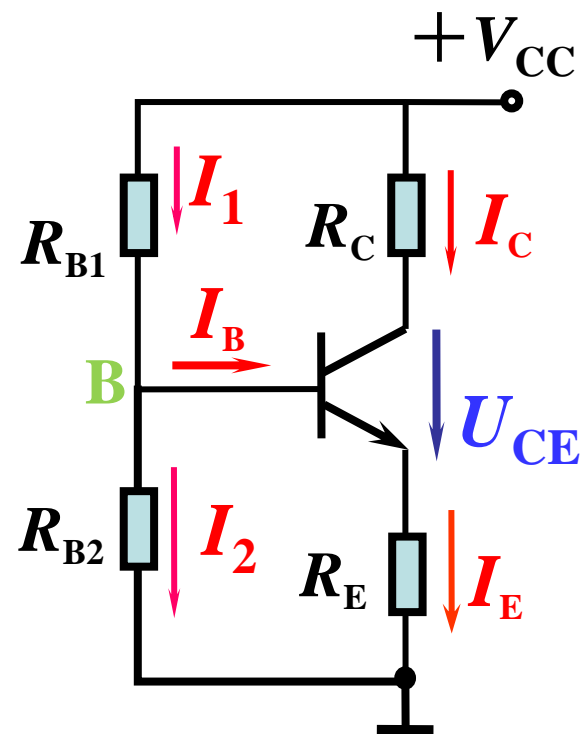
3、射极偏置稳定Q点的原理

$$V_B = V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$U_{BE} = V_B - V_E$$

Q点稳定过程:

温度升高 $\rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow V_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow$
 $I_C \downarrow \leftarrow I_B \downarrow$



直流通路

4、射极偏置电路分析

[例5]在分压式偏置电路中，已知： $V_{CC}=12V$ ， $R_{B1}=30K\Omega$ ， $R_{B2}=10K\Omega$ ， $R_C=4K\Omega$ ， $R_E=2.2K\Omega$ ， $R_L=4K\Omega$ ， $C_E=100\mu F$ ， $C_1=C_2=20\mu F$ ， $\beta=50$ 。

(1) 计算静态值 I_B 、 I_C 和 U_{CE} ；

(2) 计算 \dot{A}_u 和 R_o R_i

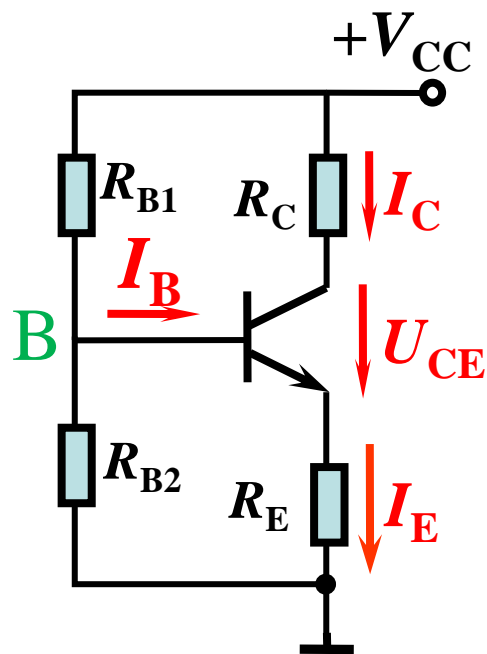
解： (1) 用估算法求Q点的值

$$V_B = V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = 3V$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} = 1.09 \text{ mA}$$

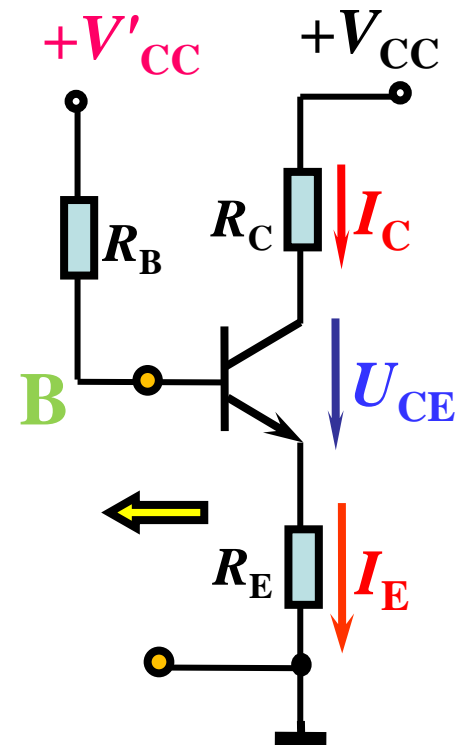
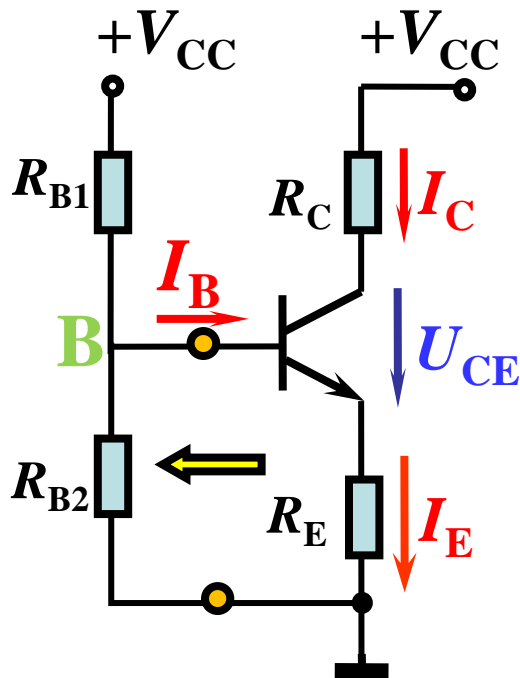
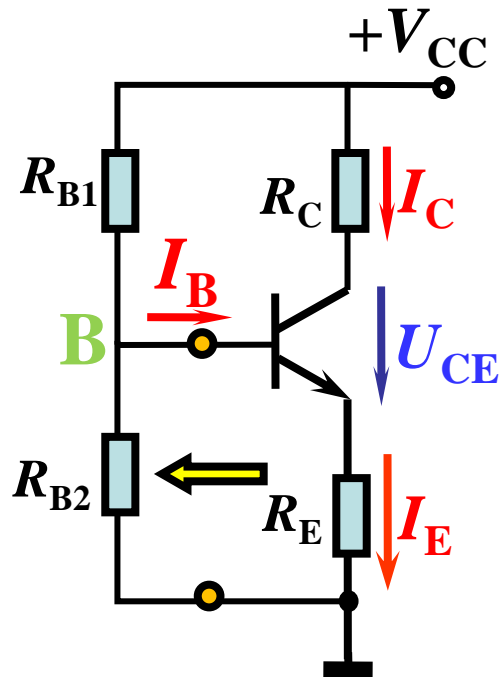
$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 21.8 \mu A$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E = 5.24V$$



直流通路

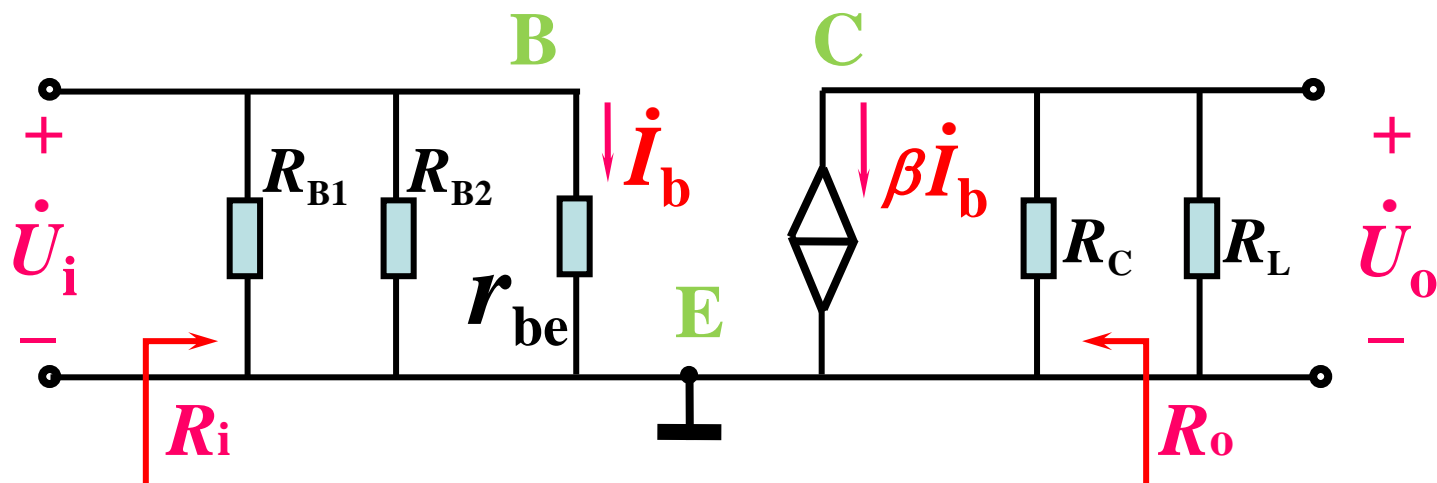
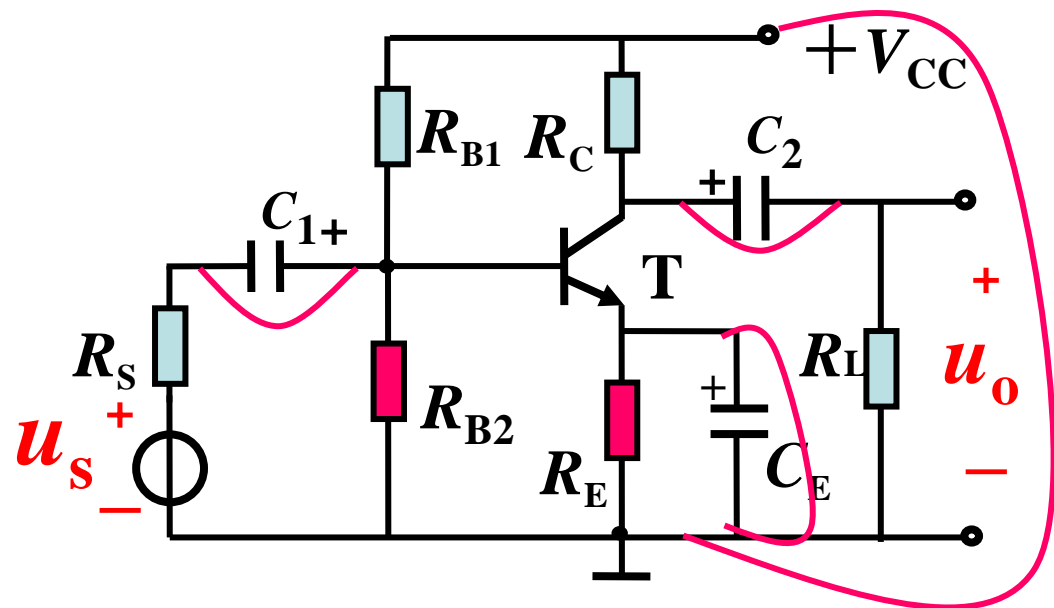
[例5解] (2) 用戴维宁定理求静态值



$$\begin{cases} V'_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot R_{B2} \\ R_B = R_{B1} // R_{B2} \end{cases}$$

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

[例5解] (3) 动态分析



分压式偏置电路的微变等效电路

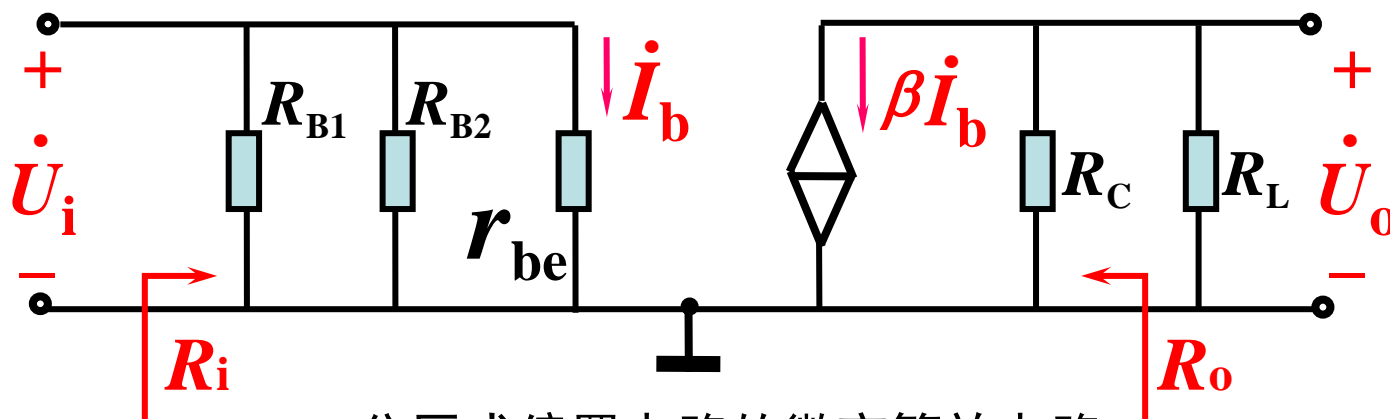
[例5解] (3) 动态分析

$$r_{be} = 200 + (1+\beta) \frac{26}{I_E} = 200 + 51 \times \frac{26}{1.09} = 1.42\text{k}\Omega$$

$$\dot{A}_u = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}} = -50 \times \frac{4//4}{1.42\text{k}\Omega} = -70.4$$

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} = 30//10//1.42 = 1.19\text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_C = 4\text{ k}\Omega$$

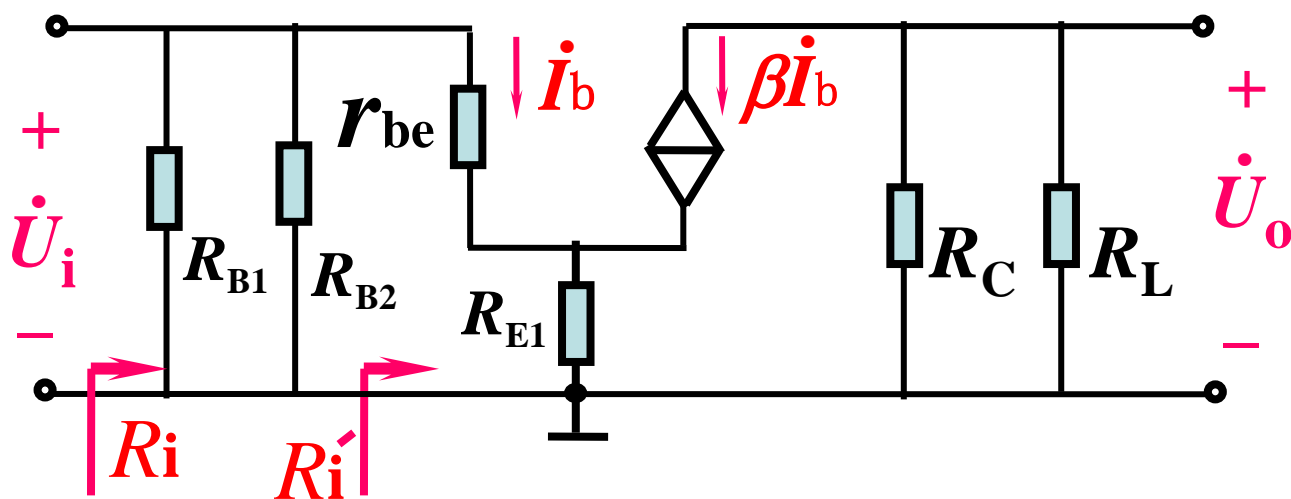
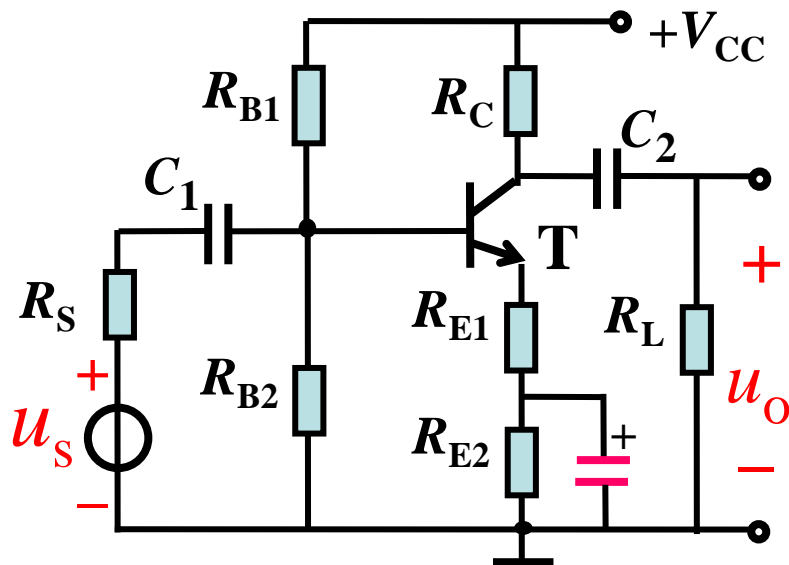


分压式偏置电路的微变等效电路

[例5解] 分析 R_{E1} 对 \dot{A}_u 和 R_i 的影响

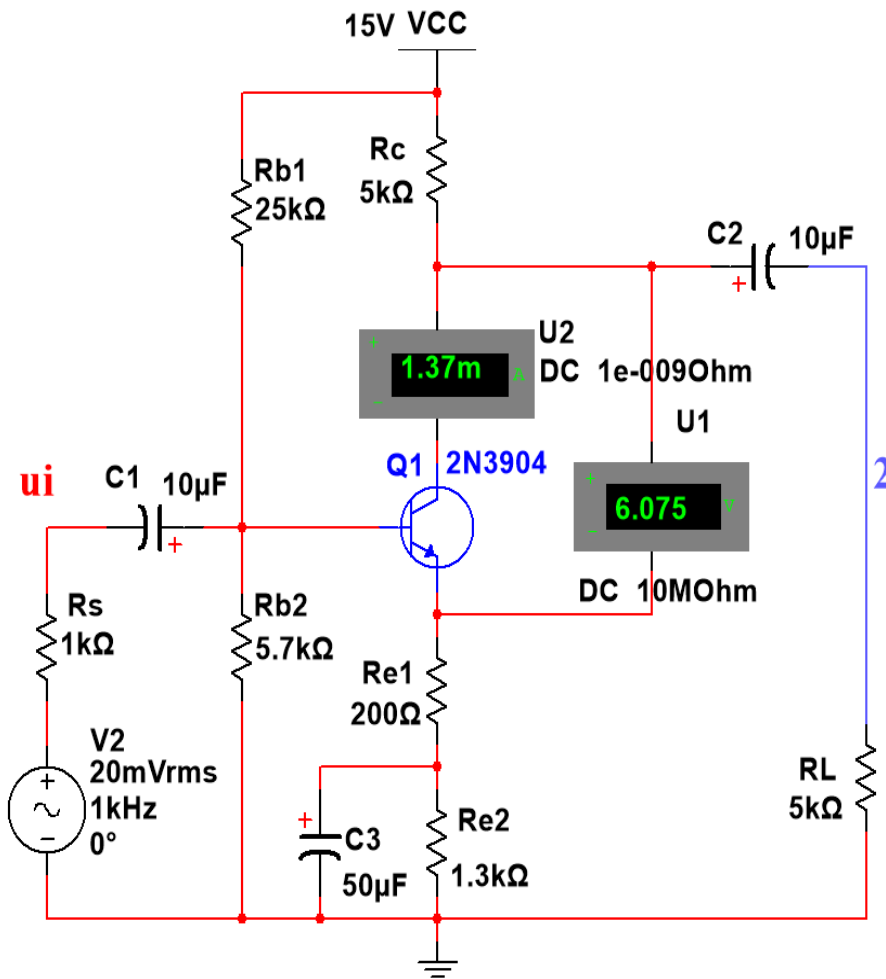
$$\dot{A}_u = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}}$$

$$\begin{aligned} R_i &= R_{B1} // R_{B2} // R_i' \\ &= R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}] \end{aligned}$$

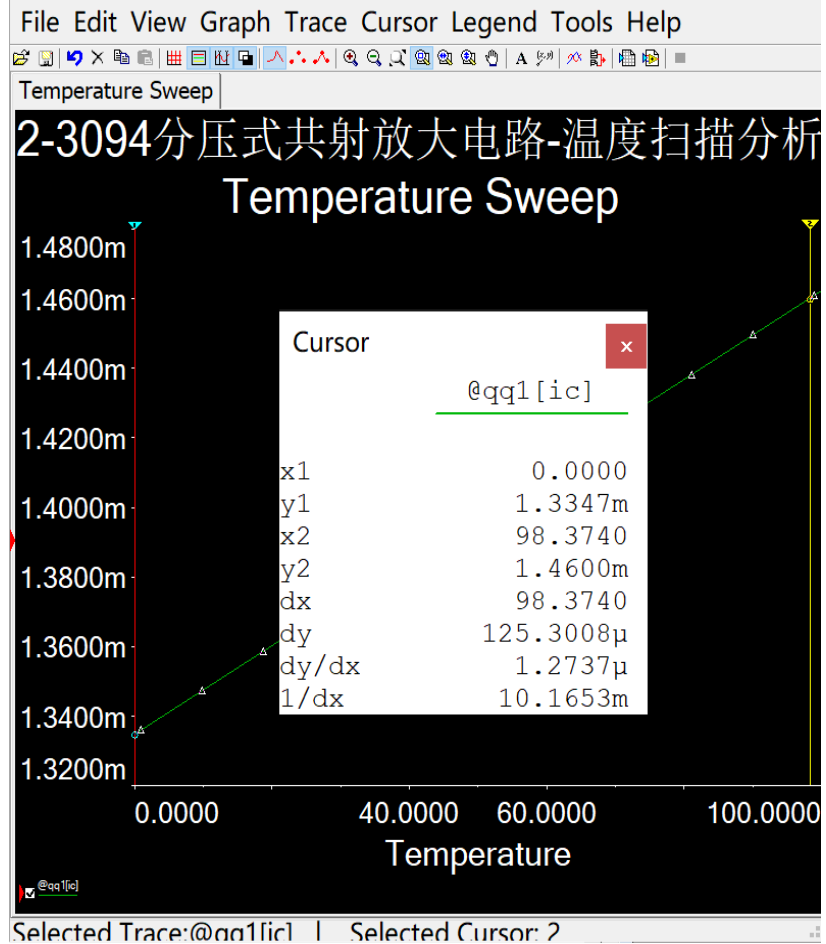


● R_{E1} 使 A_u 值减小、 R_i 增加、 R_o 不变

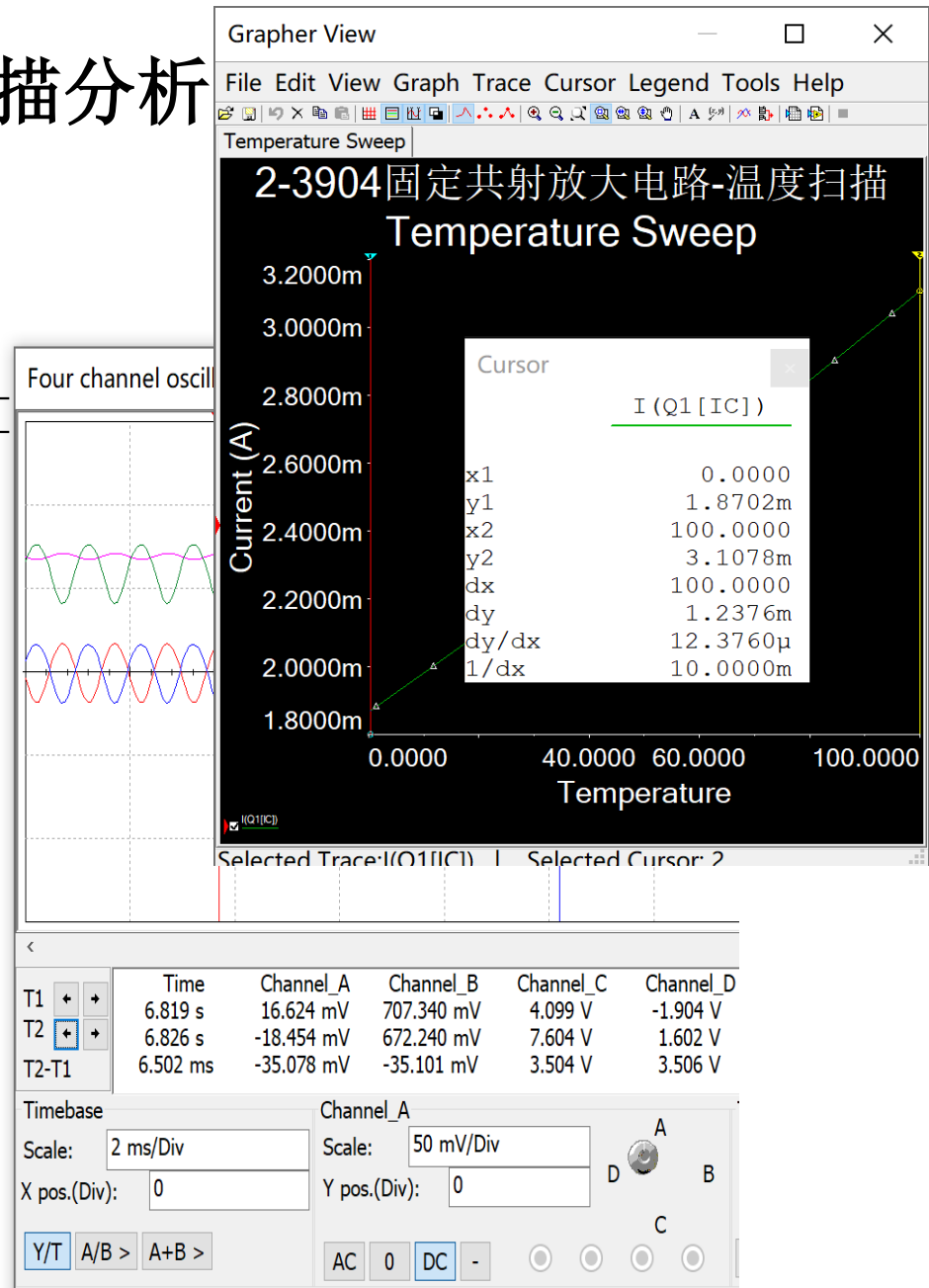
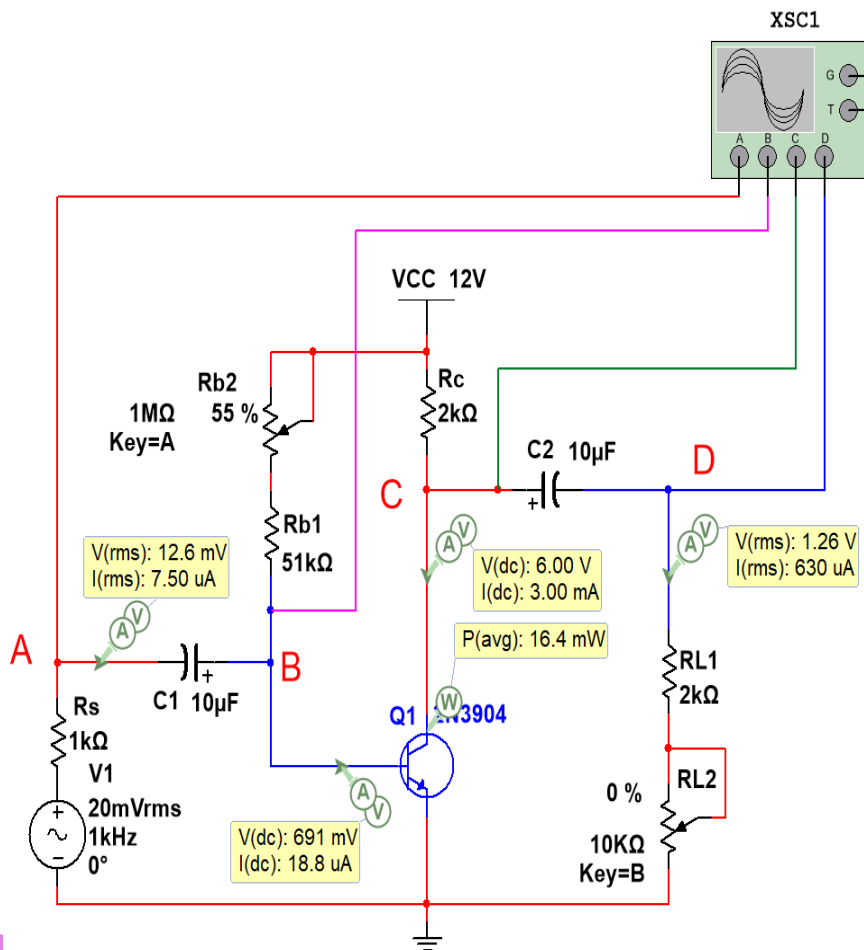
* 分压式射极偏置共射电路 温度扫描分析



Grapher View



* 固定偏置共射电路 温度扫描分析



3.4.1 场效应管放大电路的静态偏置

三种组态： 共源、共漏、共栅

特 点： 输入电阻极高，噪声低，热稳定性好

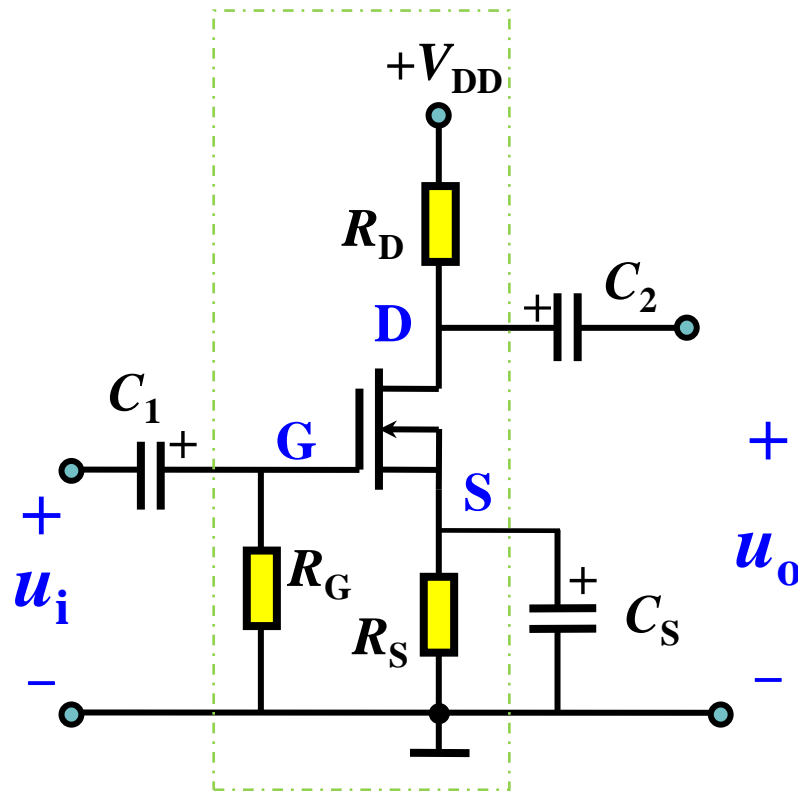
1、自给偏压电路

$$U_{GSQ} = V_{GQ} - V_{SQ} = -I_{DQ}R_S$$

- 自给偏压方式

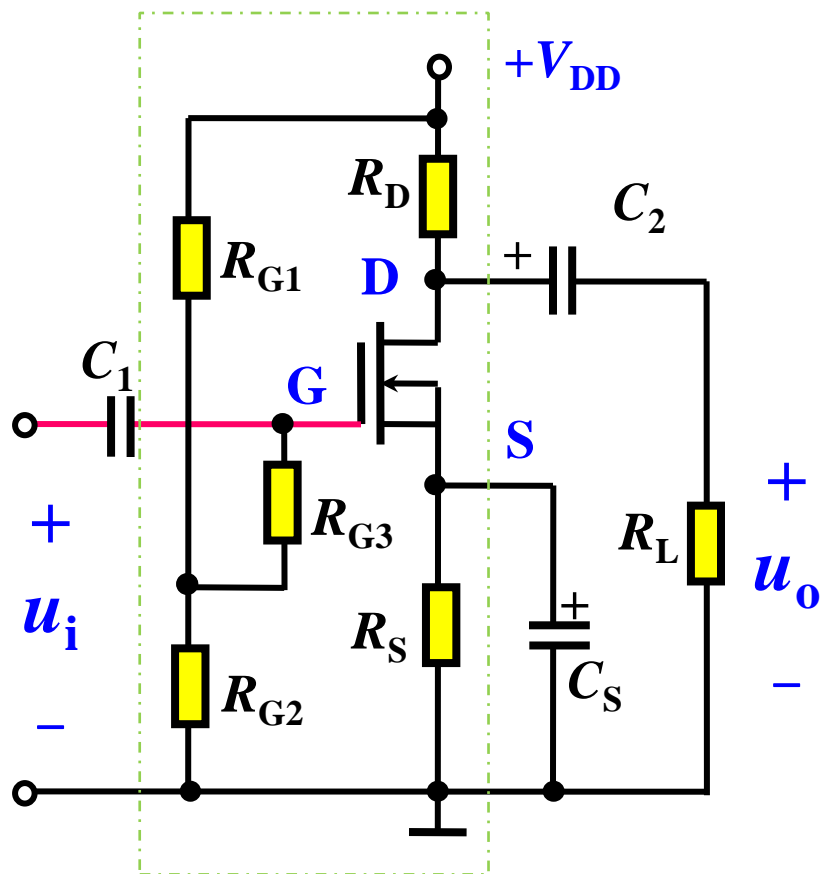
适合于JFET和

耗尽型MOSFET放大电路。



3.4.1 场效应管放大电路的静态偏置

2、分压式自偏压电路



$$V_{GQ} = \frac{V_{DD} \cdot R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} ; V_S = I_{DQ} R_S$$

$$U_{GSQ} = \frac{V_{DD} \cdot R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} - I_{DQ} R_S$$

调整电阻的大小, 可获得:

➤ $U_{GSQ} > 0$

➤ $U_{GSQ} = 0$

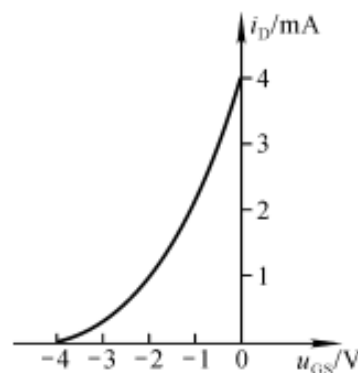
➤ $U_{GSQ} < 0$

- 分压式偏压适合于: 所有FET组成的放大电路。

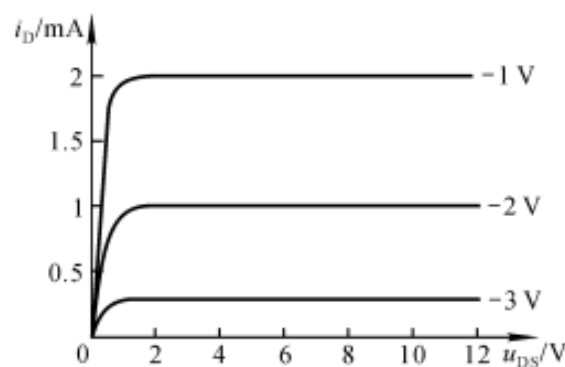
[例6] 已知 电路中场效应管的转移特性和输出特性分别如图 (b) (c) 所示。

(1) 利用图解法求解 Q 点；

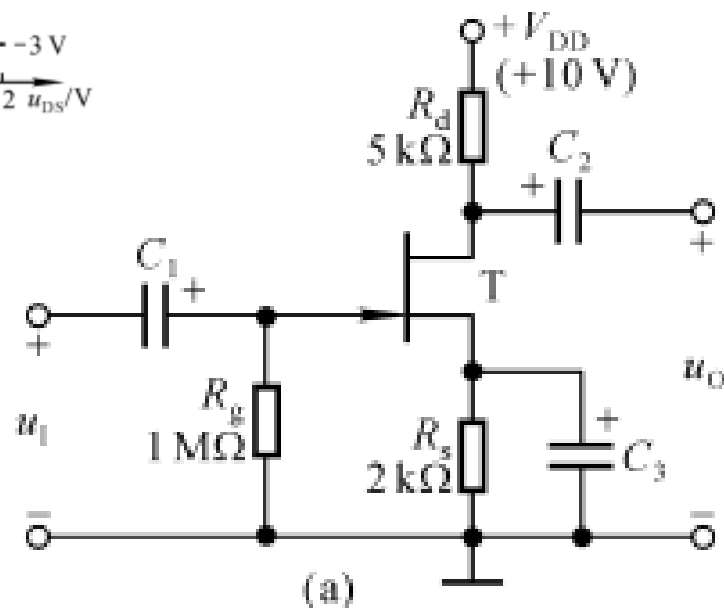
(2) 利用等效电路法求解 \dot{A}_u 、 R_i 和 R_o 。



(b)



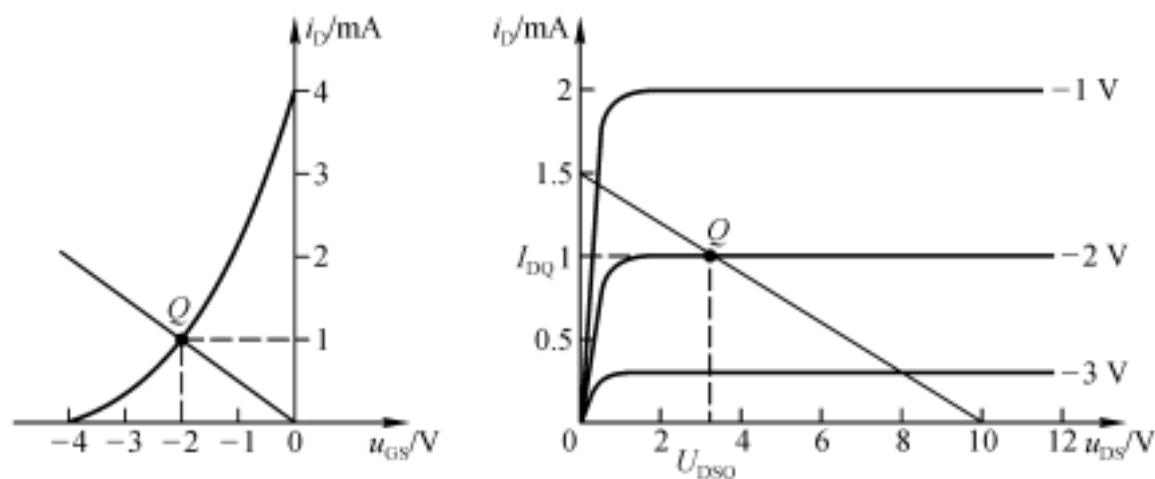
(c)



(a)

[例6]

解：(1) 在转移特性中作直线 $u_{GS} = -i_D R_S$ ，与转移特性的交点即为 Q 点；读出坐标值，得出 $I_{DQ} = 1\text{mA}$ ， $U_{GSQ} = -2\text{V}$ 。



在输出特性中作直流负载线 $u_{DS} = V_{DD} - i_D (R_D + R_S)$ ，与 $U_{GSQ} = -2\text{V}$ 的那条输出特性曲线的交点为 Q 点， $U_{DSQ} \approx 3\text{V}$ 。

(2) 首先画出交流等效电路，然后进行动态分析。

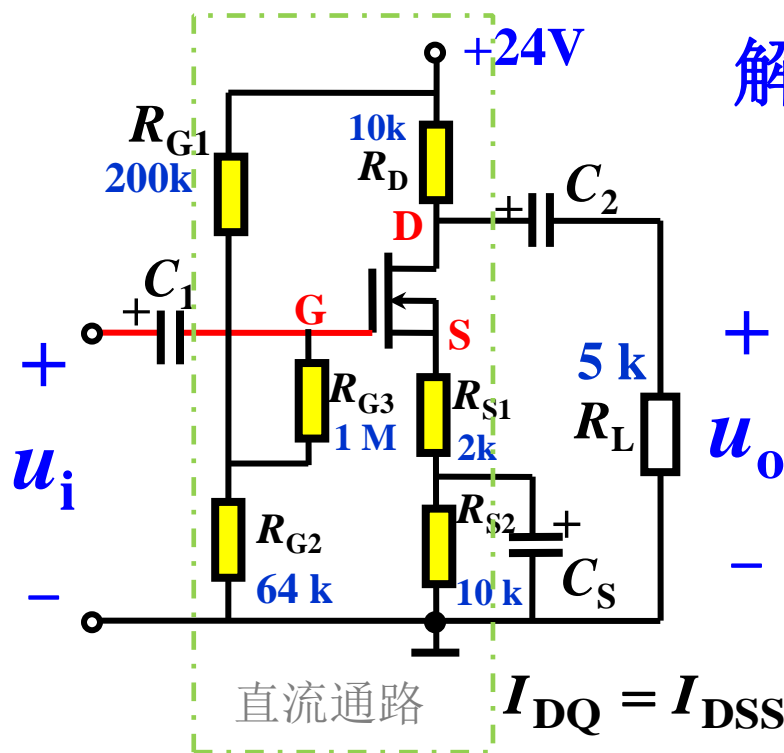
$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}} = \frac{-2}{U_{GS(\text{off})}} \sqrt{I_{DSS} I_{DQ}} = 1\text{mA/V}$$

$$\dot{A}_v = -g_m R_D = -5$$

$$R_i = R_g = 1\text{M}\Omega$$

$$R_o = R_D = 5\text{k}\Omega$$

[例7] 已知 $U_{GS(off)} = -0.8 \text{ V}$, $I_{DSS} = 0.18 \text{ mA}$, 求 Q 点。



解:

1) 输入回路:

$$V_{GQ} = \frac{24 \times 64}{200 + 64} = 5.8 \text{ (V)}$$

$$U_{GSQ} = 5.8 - (10 + 2)I_{DQ} \\ = 5.8 - 12I_{DQ}$$

2) 恒流区电流方程:

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}\right)^2 = 0.18 \left(1 - \frac{5.8 - 12I_{DQ}}{0.8}\right)^2$$

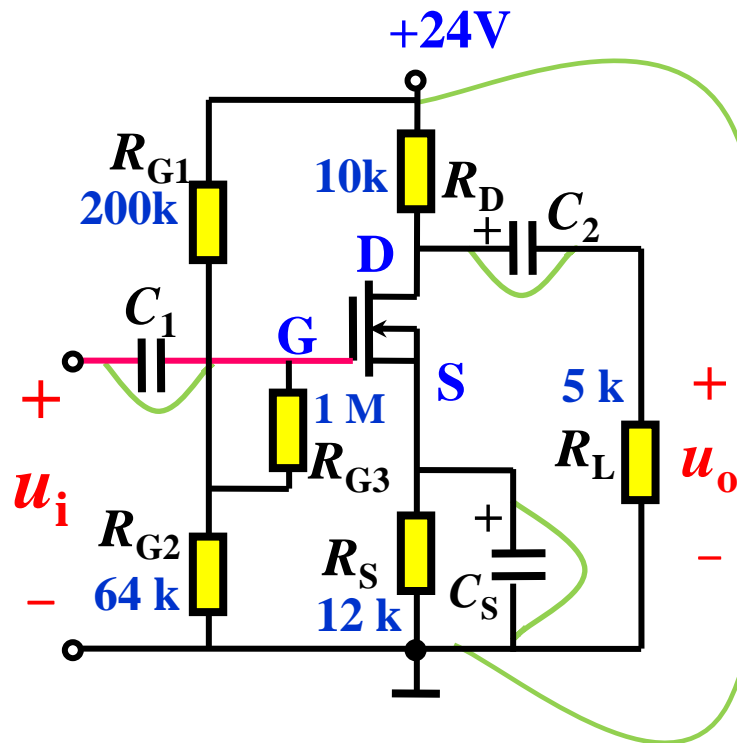
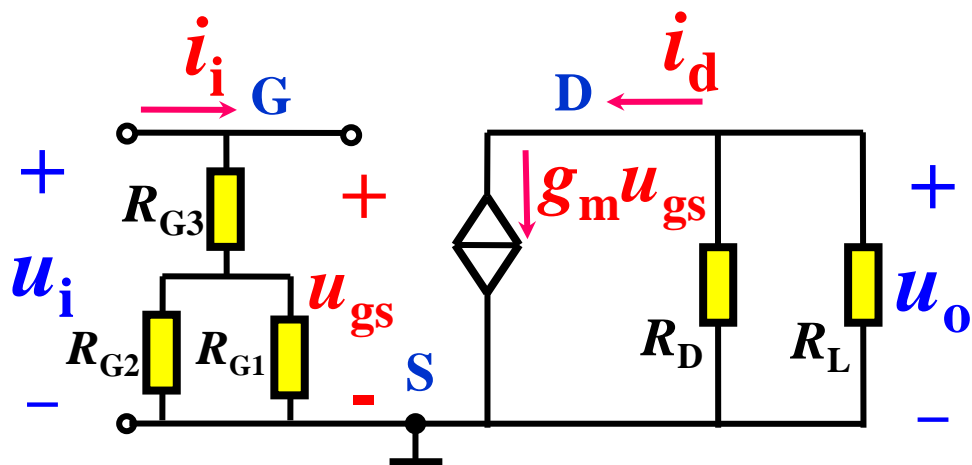
解方程组得: $I_{DQ1} = 0.69 \text{ mA}$, $U_{GSQ} = -2.5 \text{ V}$ (增根, 舍去)

$$I_{DQ2} = 0.45 \text{ mA}, \quad U_{GSQ} = -0.4 \text{ V}$$

3) 输出回路方程: $U_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S) = 14.1 \text{ (V)}$

3.4.2 共源放大电路动态分析

➤ 有 C_S 时的交流等效电路:

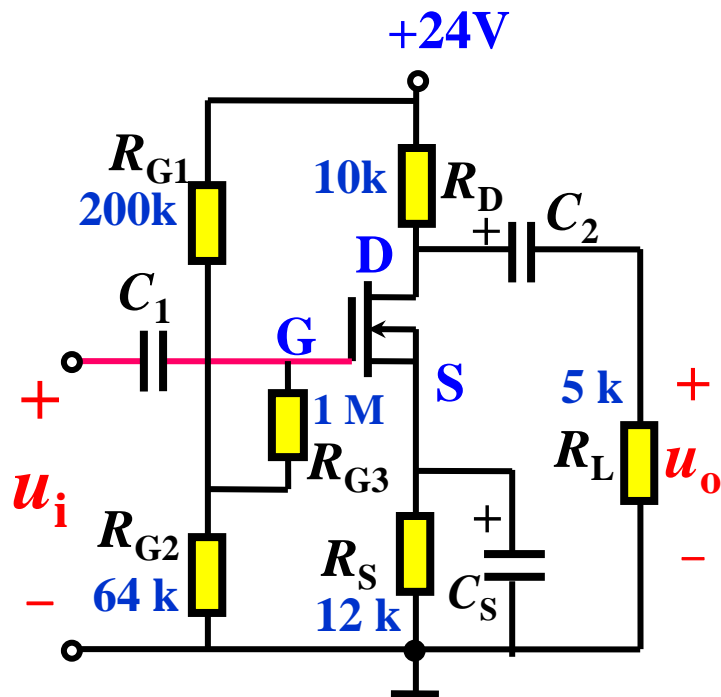
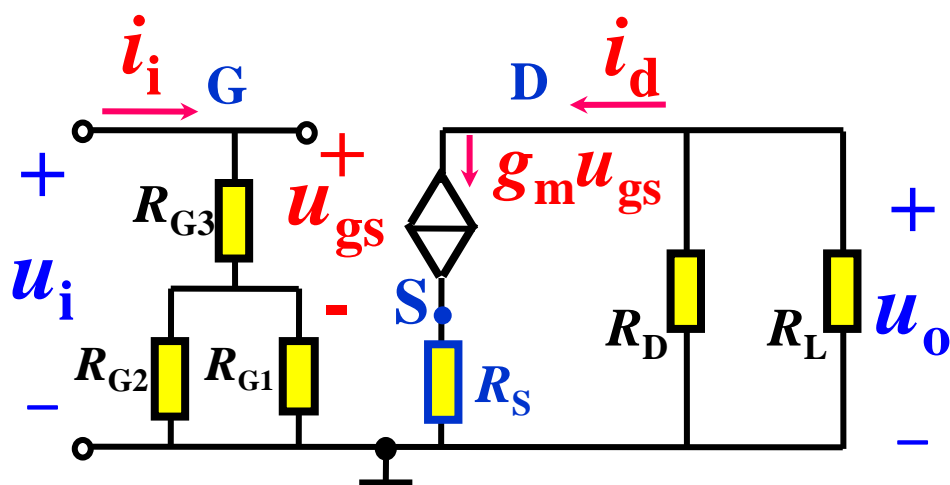


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m \dot{U}_{gs} (R_D // R_L)}{\dot{U}_{gs}} = -g_m R'_L$$

$$R_i = R_{G3} + R_{G1} // R_{G2}, \quad R_o = R_D$$

3.4.2 共源放大电路动态分析

➤ 无 C_S 时的交流等效电路:



$$\dot{A}_u = \frac{-g_m \dot{u}_{gs} (R_D // R_L)}{\dot{u}_{gs} + g_m \dot{u}_{gs} R_S} = \frac{-g_m R'_L}{1 + g_m R_S}$$

● 无 C_S 时, R_i 、 R_o 不变。

3.5 共集和共漏放大电路

教学内容（教学要点）：

3.5.1 共集放大电路

也称为射极输出器、射极跟随器

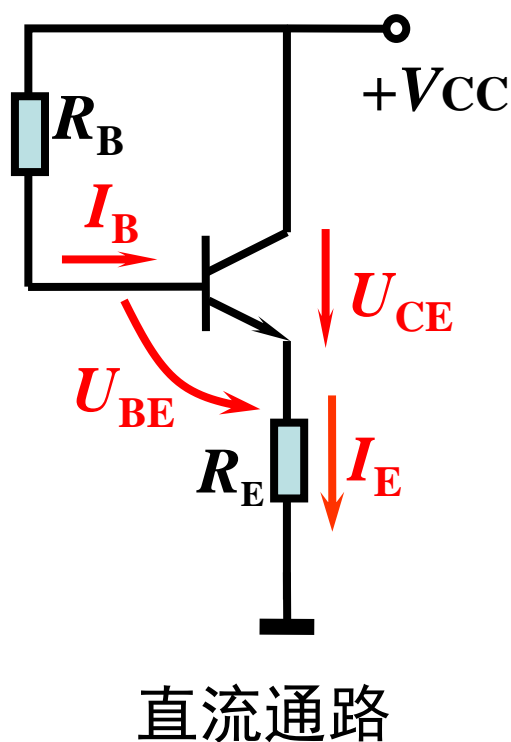
（性能指标计算和电路特点）

3.5.2 共漏放大电路

（性能指标计算和电路特点）

3.5.1 射极输出器

1、静态分析



◆ 直流通路三大方程

①由输入回路方程求 I_B :

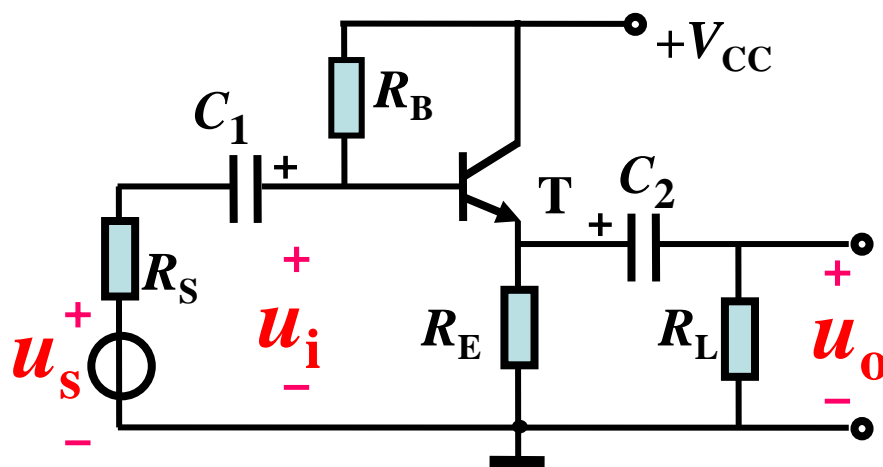
$$V_{CC} = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + (1 + \beta) I_{BQ} R_e$$

②由放大区电流方程求 I_E :

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

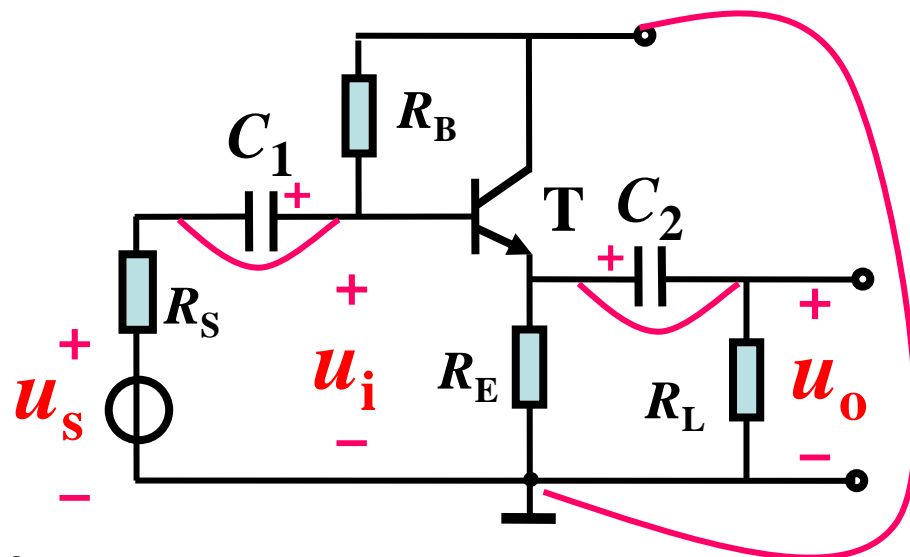
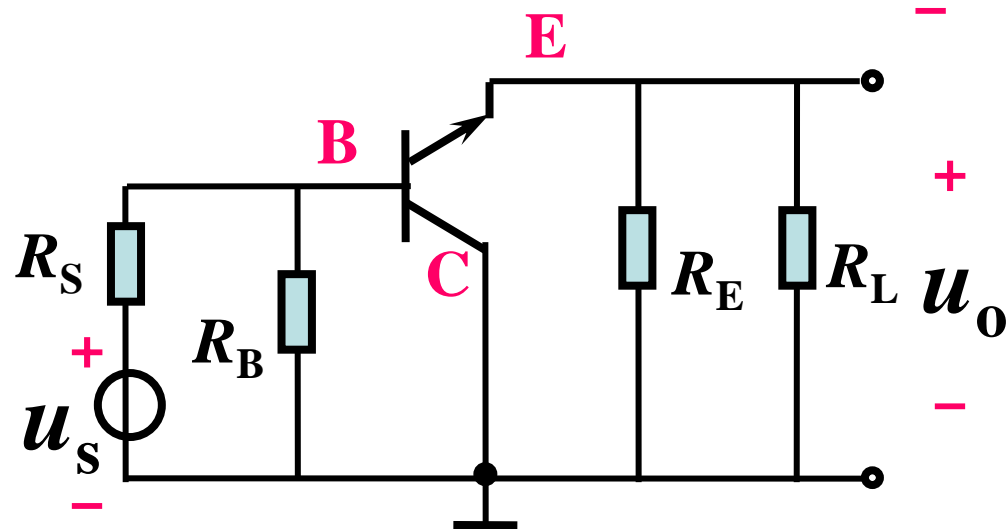
③由输出回路方程求 U_{CE} :

$$V_{CC} = U_{CEQ} + I_{EQ} R_e$$



2、射极输出器动态分析

作射极输出器交流通路：

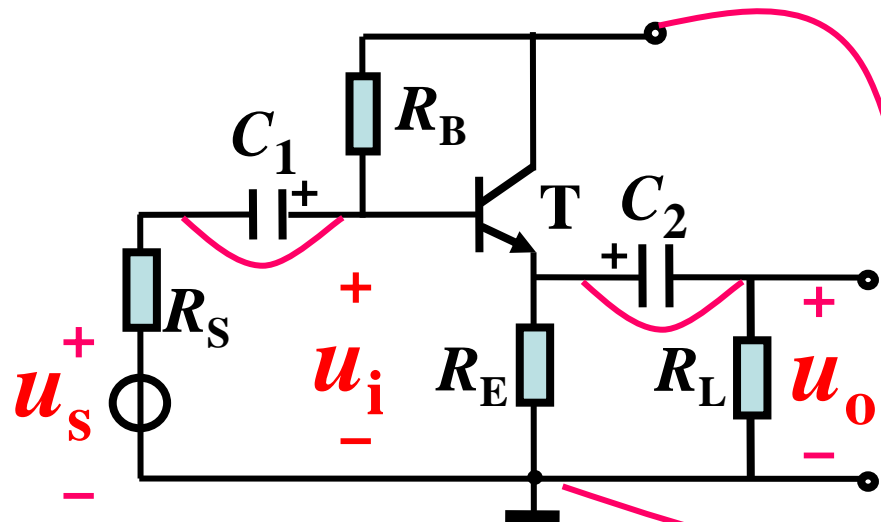


射极输出器

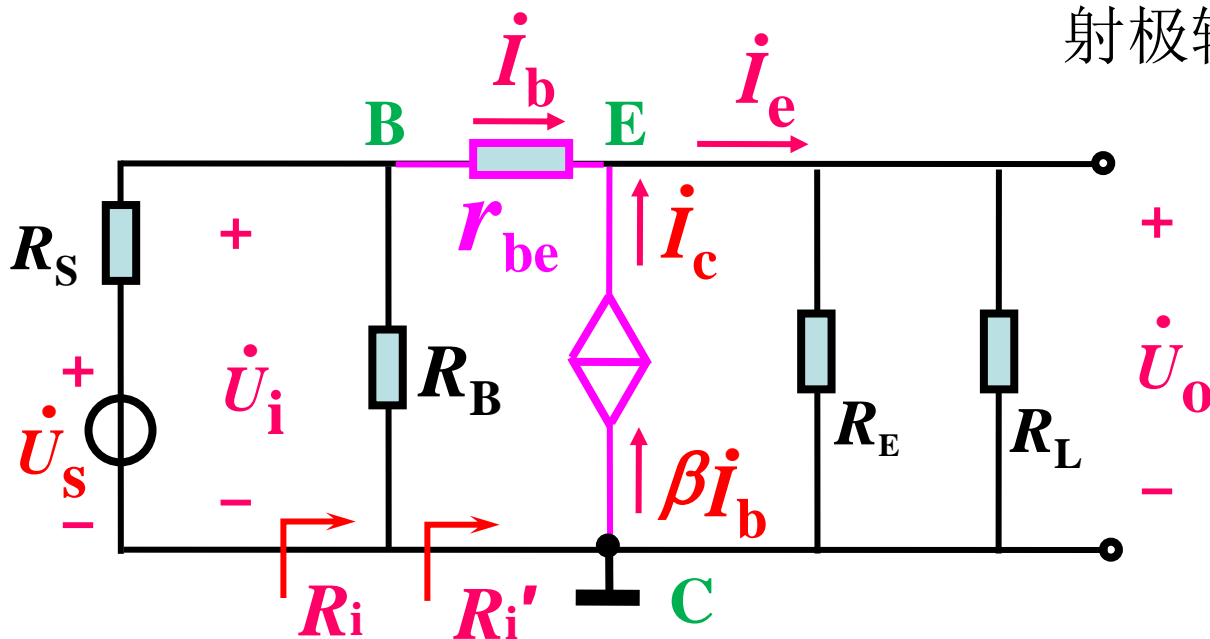
- 对输入信号而言，BJT集电极接地，集电极是输入和输出电路的公共端，因而射极输出器是共集电极放大电路。

2、射极输出器动态分析

直接作出
射极输出器
微变等效电路



射极输出器



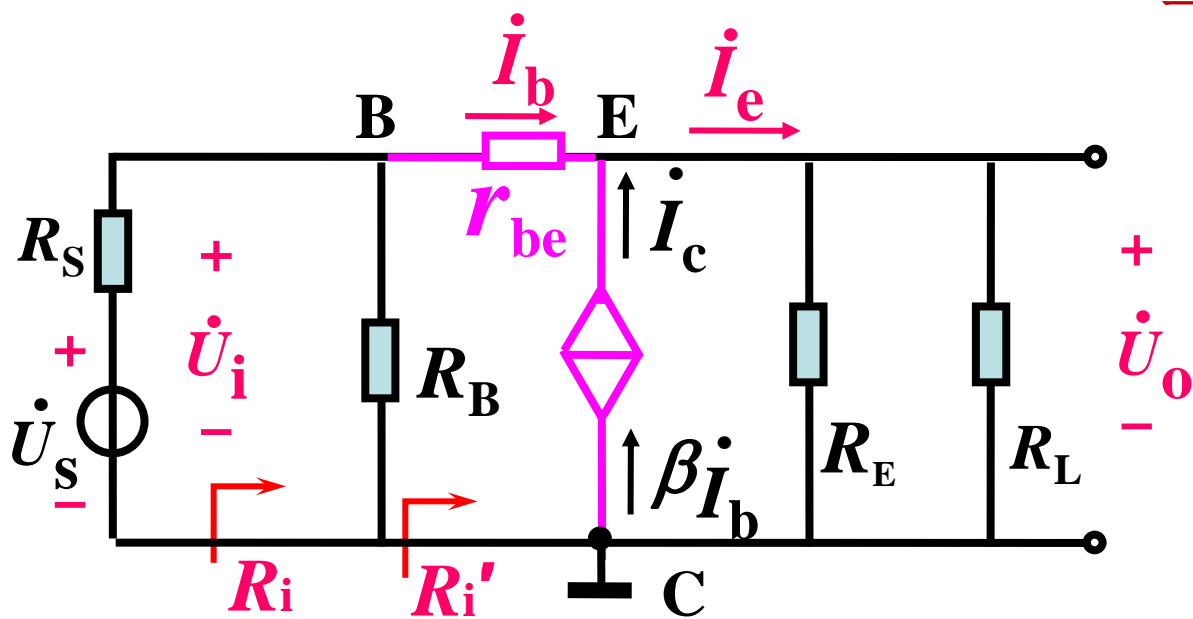
射极输出器的微变等效电路

2、射极输出器动态分析

1) 电压放大倍数 $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \approx 1$

2) 输入电阻 $R_i = R_B // R_i' = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)]$

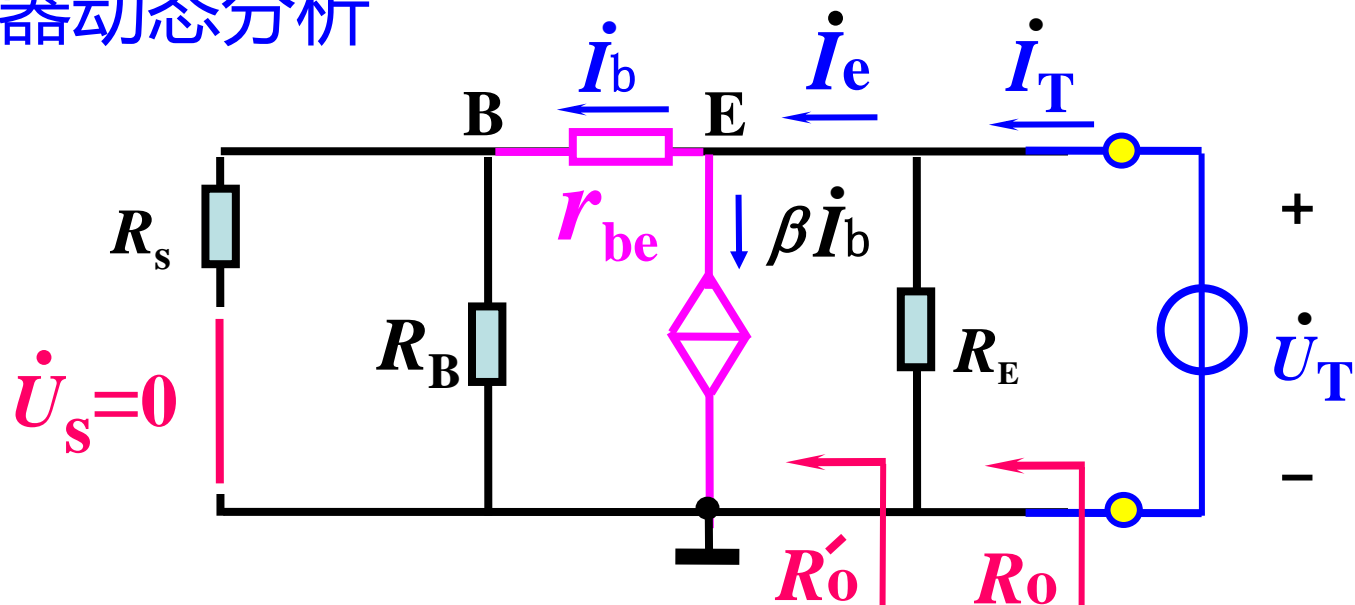
一般约百KΩ



射极输出器的微变等效电路

2、射极输出器动态分析

3) 输出电阻



求解输出电阻的等效电路

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_T &= \dot{I}_b [(R_s // R_B) + r_{be}] \\ \dot{I}_e &= (1 + \beta) \dot{I}_b \end{aligned} \right\} R_o' = \frac{\dot{U}_T}{\dot{I}_e} = \frac{R'_s + r_{be}}{(1 + \beta)}$$

$$\text{得: } R_o = R_o' // R_E = \frac{R'_s + r_{be}}{(1 + \beta)} // R_E \quad (\text{一般约几十欧姆})$$

3、射极输出器特点和应用

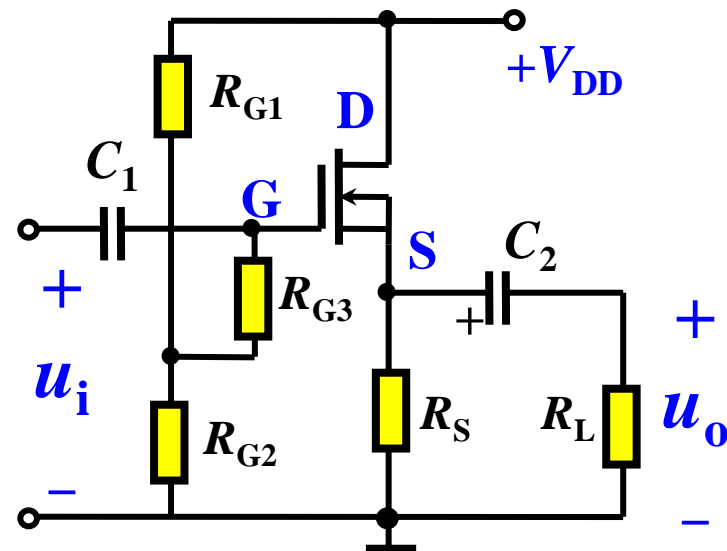
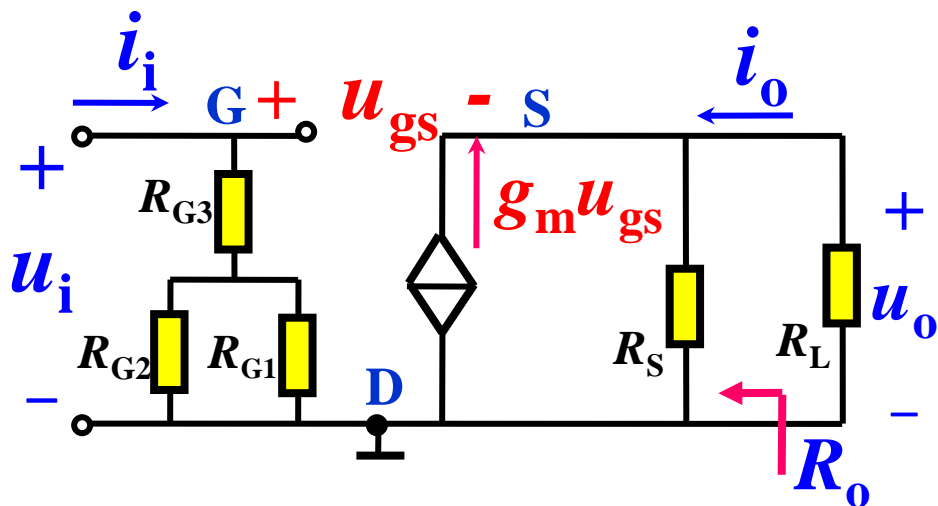
1) 特点

- 电压放大倍数小于1，但近似等于1；
- 输出电压与输入电压同相，具有跟随作用；
- 输入电阻高；
- 输出电阻低；
- 较强的电流放大作用；

2) 应用 于多级放大电路的

输入级、中间缓冲级、输出级。

3.5.2 共漏放大电路动态分析



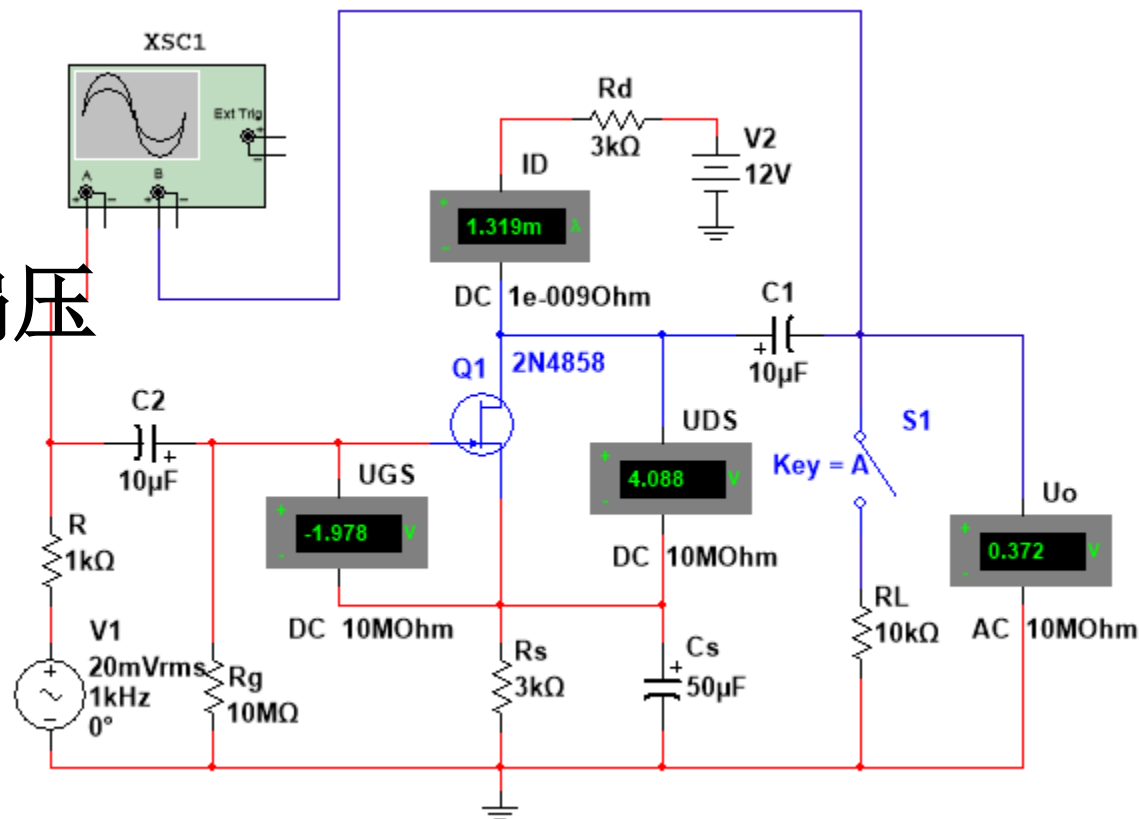
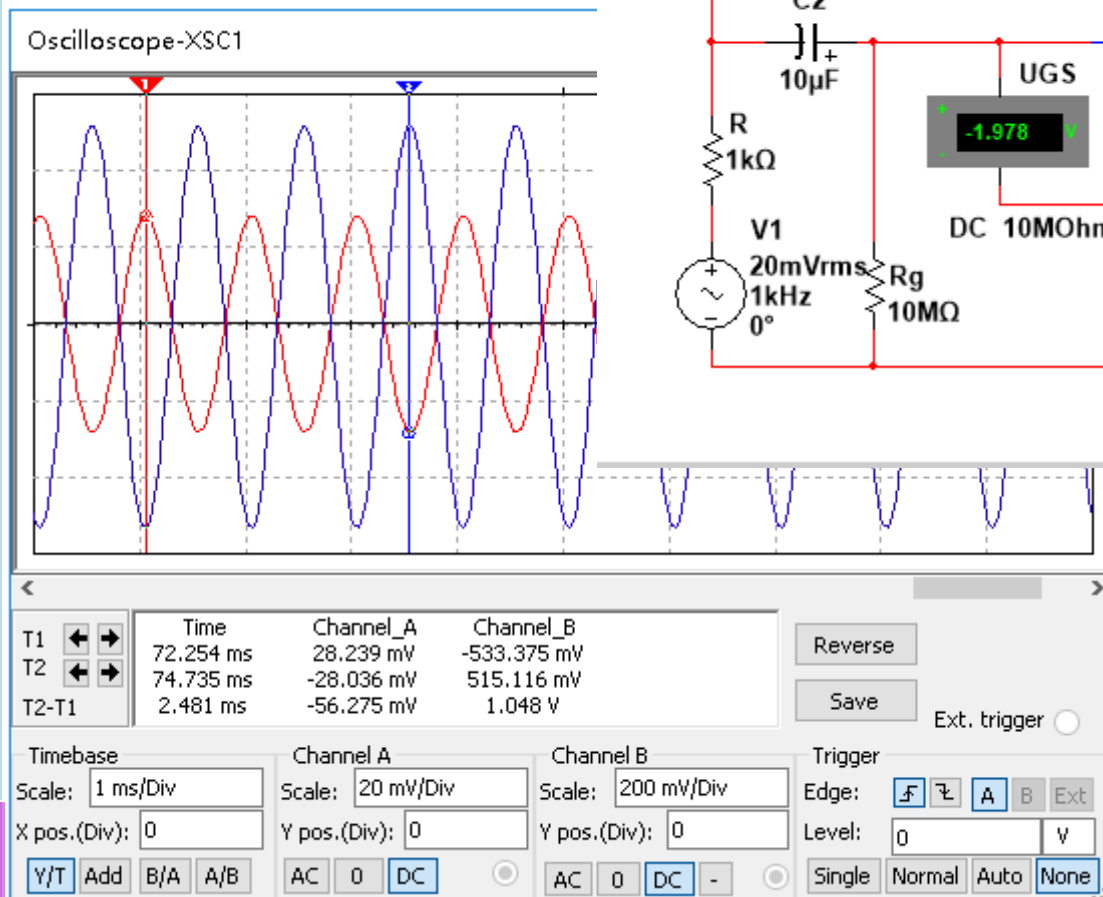
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{u}_o}{\dot{u}_i} = \frac{g_m \dot{u}_{gs} (R_S // R_L)}{\dot{u}_{gs} + g_m \dot{u}_{gs} (R_S // R_L)} = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} < 1$$

$$R_i = R_{G3} + R_{G1} // R_{G2}$$

$$R_o = \frac{\dot{u}_o}{\dot{i}_o} = \frac{\dot{u}_o}{\frac{\dot{u}_o}{R_S} - g_m \dot{u}_{gs}} = \frac{\dot{u}_o}{\frac{\dot{u}_o}{R_S} - g_m \dot{u}_o} = \frac{\dot{u}_o}{\frac{\dot{u}_o}{R_S} + g_m \dot{u}_o} = R_S // \frac{1}{g_m}$$

◆ 共源放大电路 仿真测试

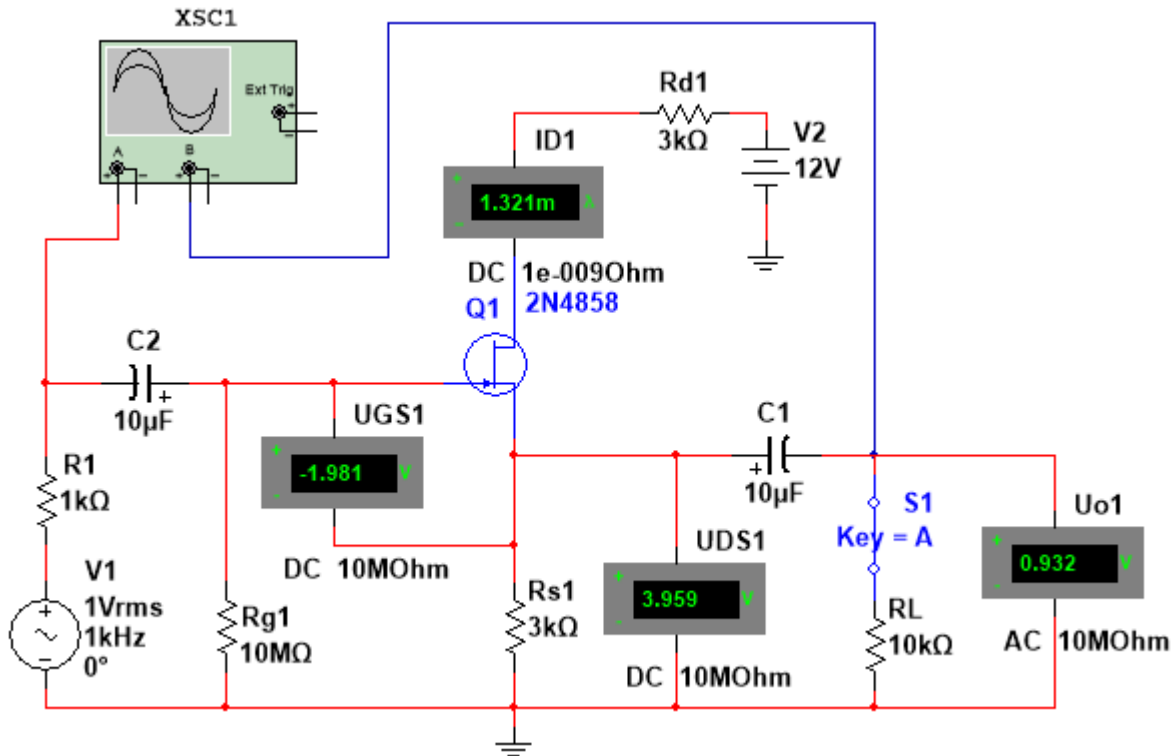
JFET工作于负偏压



共源放大电路特点:

- 电压放大倍数小
- 输入和输出反极性
- 负载后放大倍数显著下降

JFET工作于负



- 电压跟随（源极跟随器）
- 负载后放大倍数变化很小

3.6 共基和共栅放大电路

教学内容（教学要点）：

3.6.1 共基放大电路

也称为射极输出器、射极跟随器

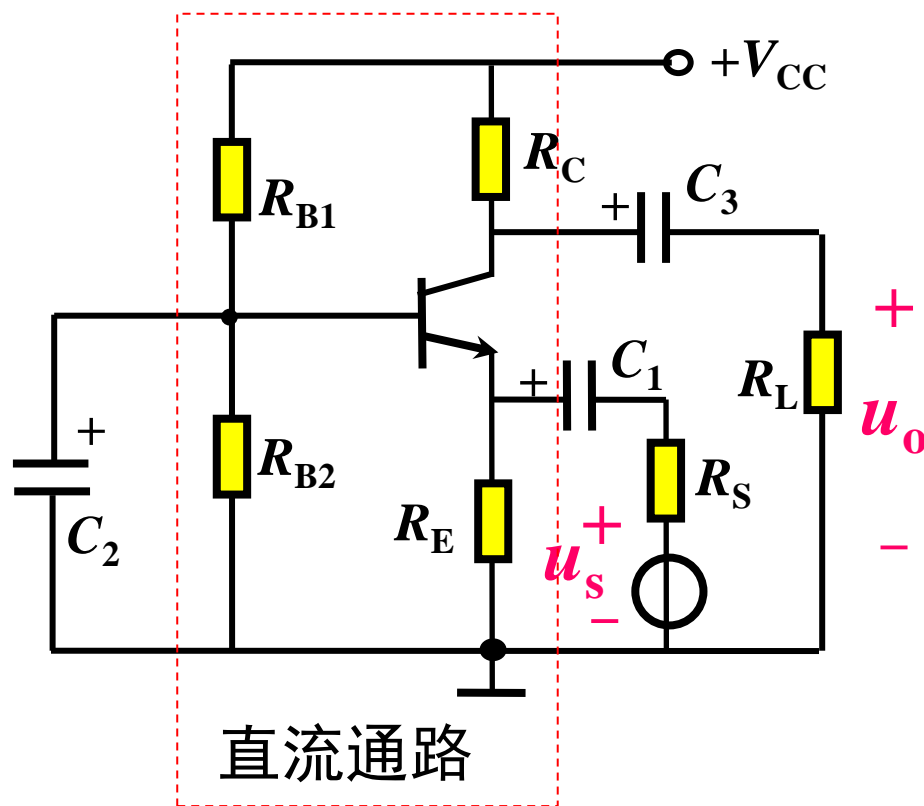
（性能指标计算和电路特点）

3.6.2 共栅放大电路

（性能指标计算和电路特点）

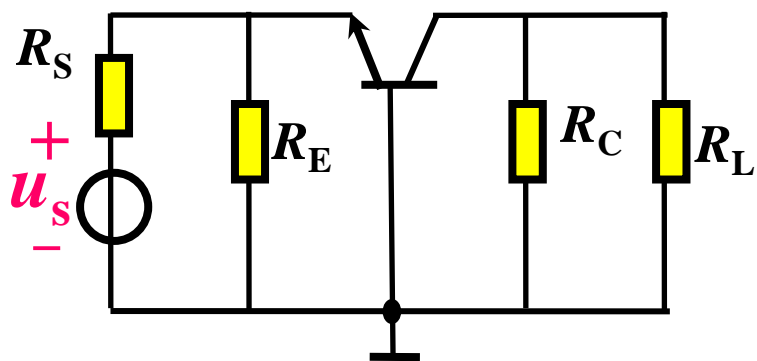
3.6.1 共基极放大电路

1、静态分析

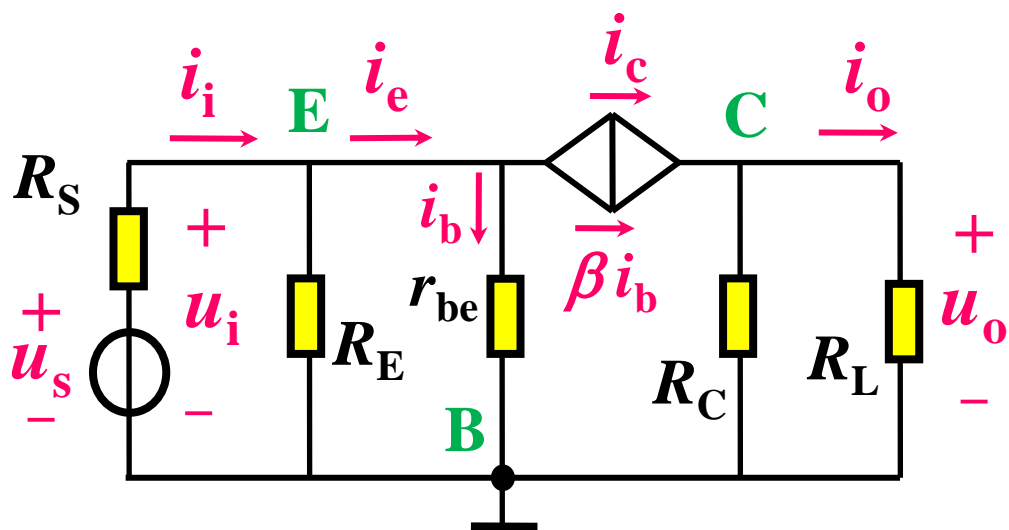
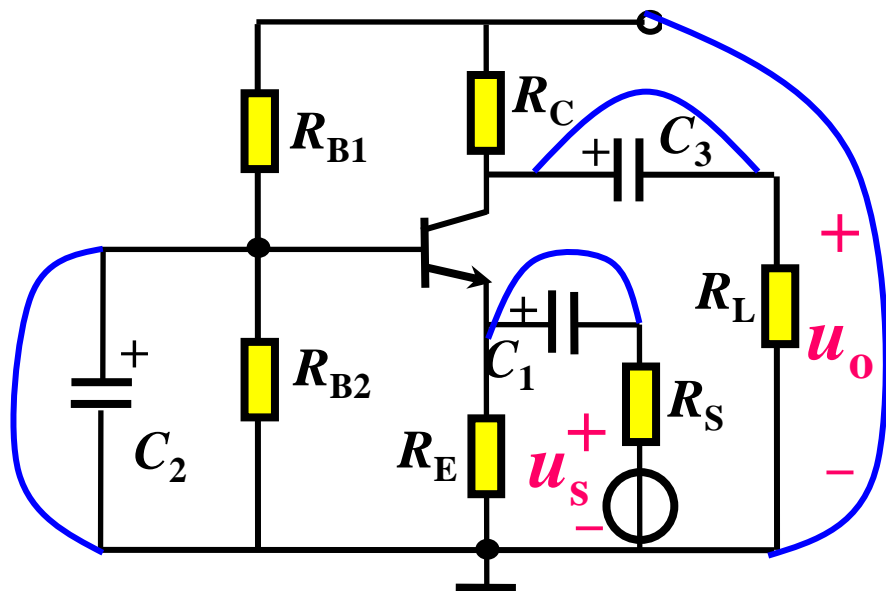


- 共基放大电路与分压式射极偏置共射放大电路有相同的直流通路，静态分析方法一样（此略）

2、共基电路动态分析



交流通路



微变等效电路

2、共基电路动态分析

求解三大性能指标：

1) 电压放大倍数

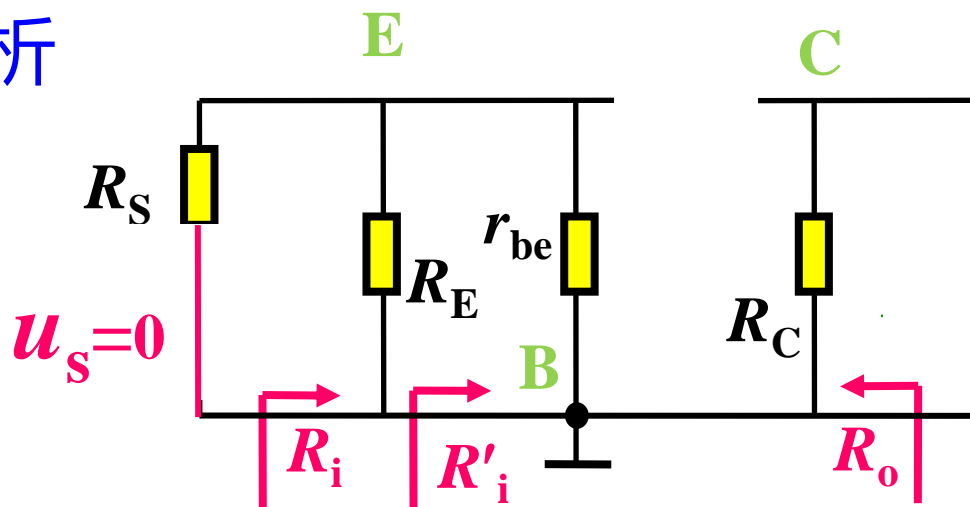
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

2) 输入电阻

$$R'_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{i}_e} = \frac{\dot{i}_b r_{be}}{(1 + \beta) \dot{i}_b} = \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

3) 输出电阻

$$R_o = R_C$$



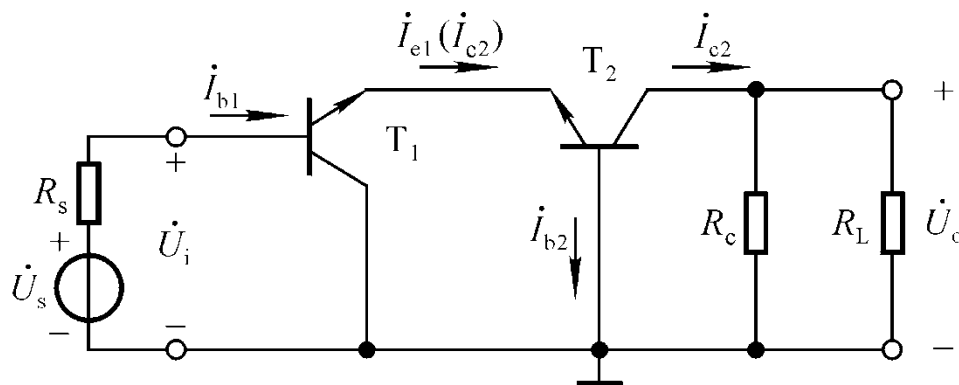
共基微变等效电路

$$\text{得: } R_i = R_E // \frac{r_{be}}{(1 + \beta)}$$

3、共基电路的特点和应用场合

1) 特点

- 共基电路 A_u 大小与共射电路相当;
- 输入输出电压极性相同;
- 输入电阻很小;
- 输出电阻不小;
- 有电流跟随作用;
- 上限截止频率高;



2) 应用

- 共集-共基组合作为多级电路的输入级 (如上图)
- 在高频振荡电路中作为放大器。

3.7 三种组态放大电路的比较

	共发射极电路	共基极电路	共集电极电路
电路			
工作点 Q	$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b}$ $I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ}$ $U_{CEQ} = V_{CC} - R_C \cdot I_{CQ}$	$U_{BQ} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$ $I_{CQ} \approx \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$ $U_{CEQ} \approx V_{CC} - (R_c + R_e) I_{CQ}$	$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$ $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ $U_{CEQ} \approx V_{CC} - R_e \cdot I_{CQ}$

3.7 三种组态放大电路的比较

	共发射极电路	共基极电路	共集电极电路
小信号等效电路			
A_u	$-\frac{\beta \cdot R'_L}{r_{be}}$ 高	$\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$ 高	$\frac{(1+\beta) R'_L}{r_{be} + (1+\beta) R'_L} \approx 1$ 低
r_i	$R_b // r_{be}$ 中	$R_e // \frac{r_{be}}{1+\beta}$ 低	$R_b // [r_{be} + (1+\beta) R'_L]$ 高
r_o	R_c 高	R_c 高	$\frac{r_{be} + R'_s}{1+\beta} // R_e$ 低

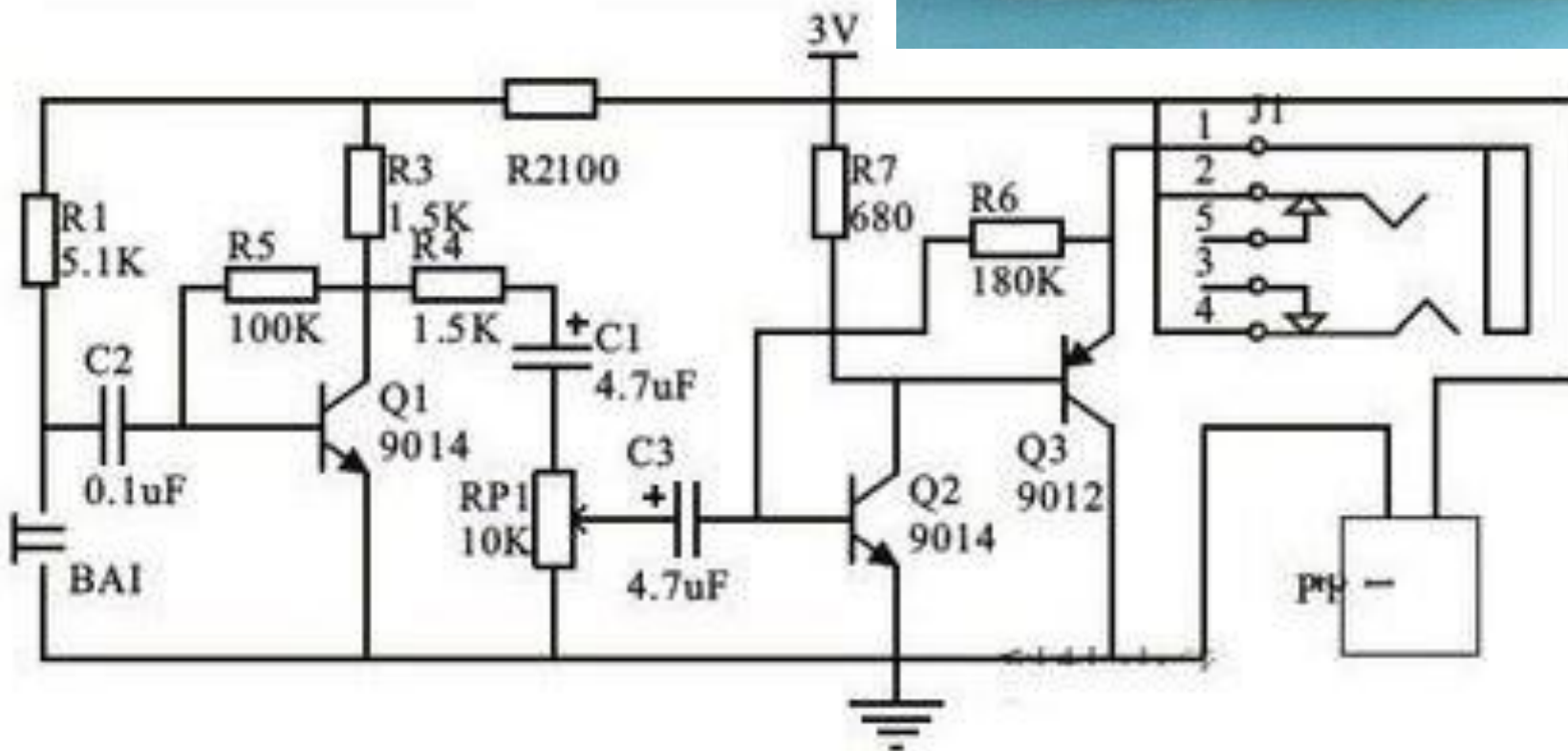
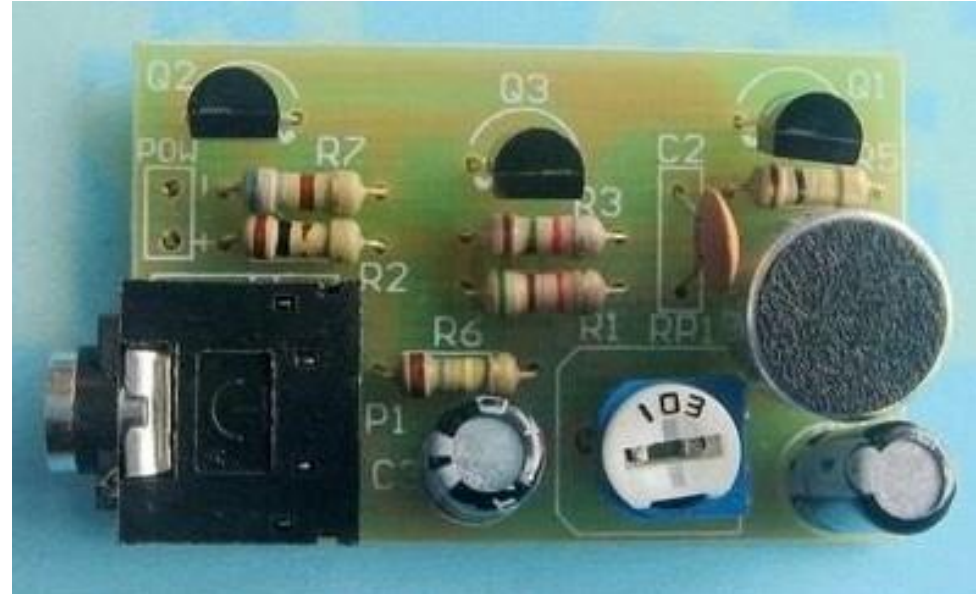
3.7 三种组态放大电路的比较

根据放大器件 { BJT放大电路
FET放大电路

BJT放大电路	FET放大电路
共射放大	共源放大
共基放大	共栅放大
共集放大	共漏放大

六种组态可归纳为三类通用放大电路：
反相电压放大、电压跟随和电流跟随电路。

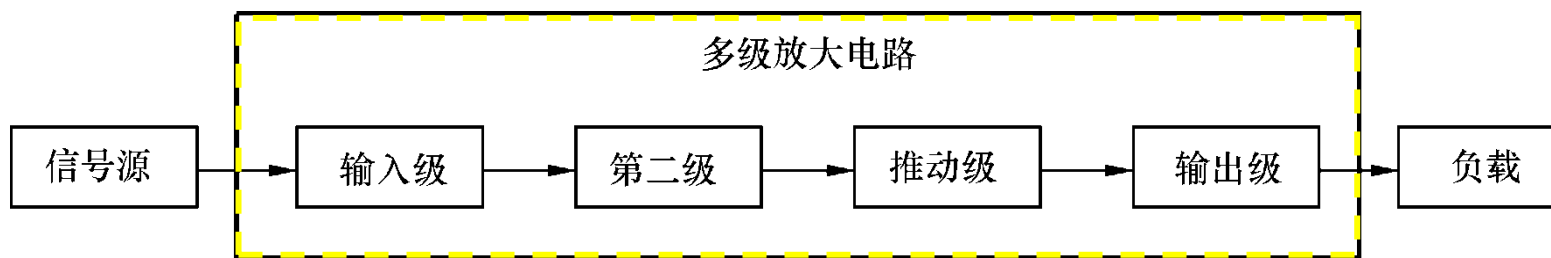
制作-简易助听器



3.8 多级放大电路

3.8.1 级间耦合方式及其电路组成

3.8.2 多级放大电路的分析 (R_i 、 R_o 、 A_u)



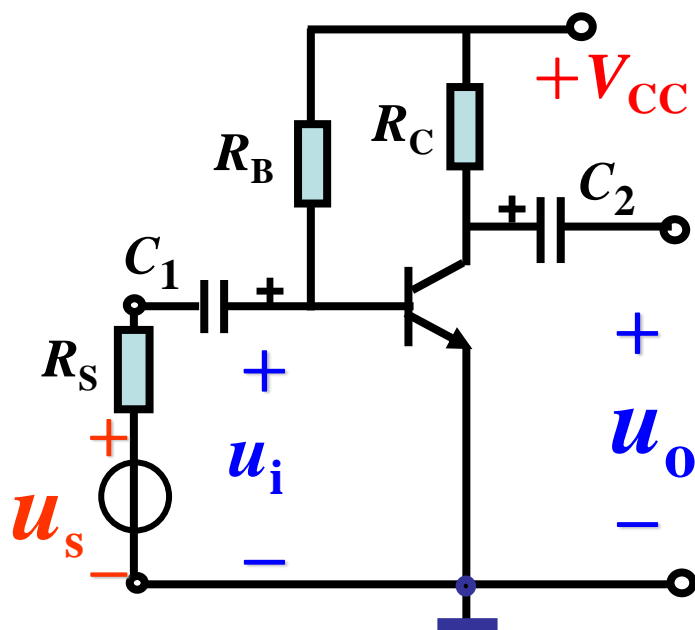
多级放大电路方框图

构成多级放大电路的目的：

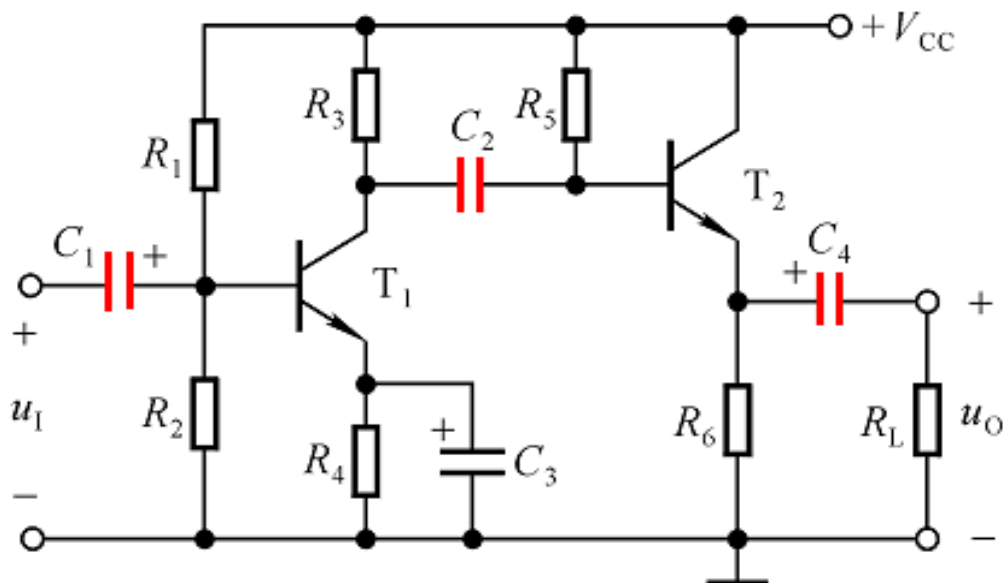
解决{信号的获取→放大→驱动负载}问题。

3.8.1 多级放大电路耦合方式及其电路组成

1. 阻容耦合放大电路



单级阻容耦合放大电路



两级阻容耦合放大电路

- 阻容耦合—放大电路与信号源、负载、级间，通过电容进行连接。

➤ 阻容耦合的优点：

- 1) 各级的直流工作点相互独立。调试和分析方便。
- 2) 在传输过程中，交流信号损失少。

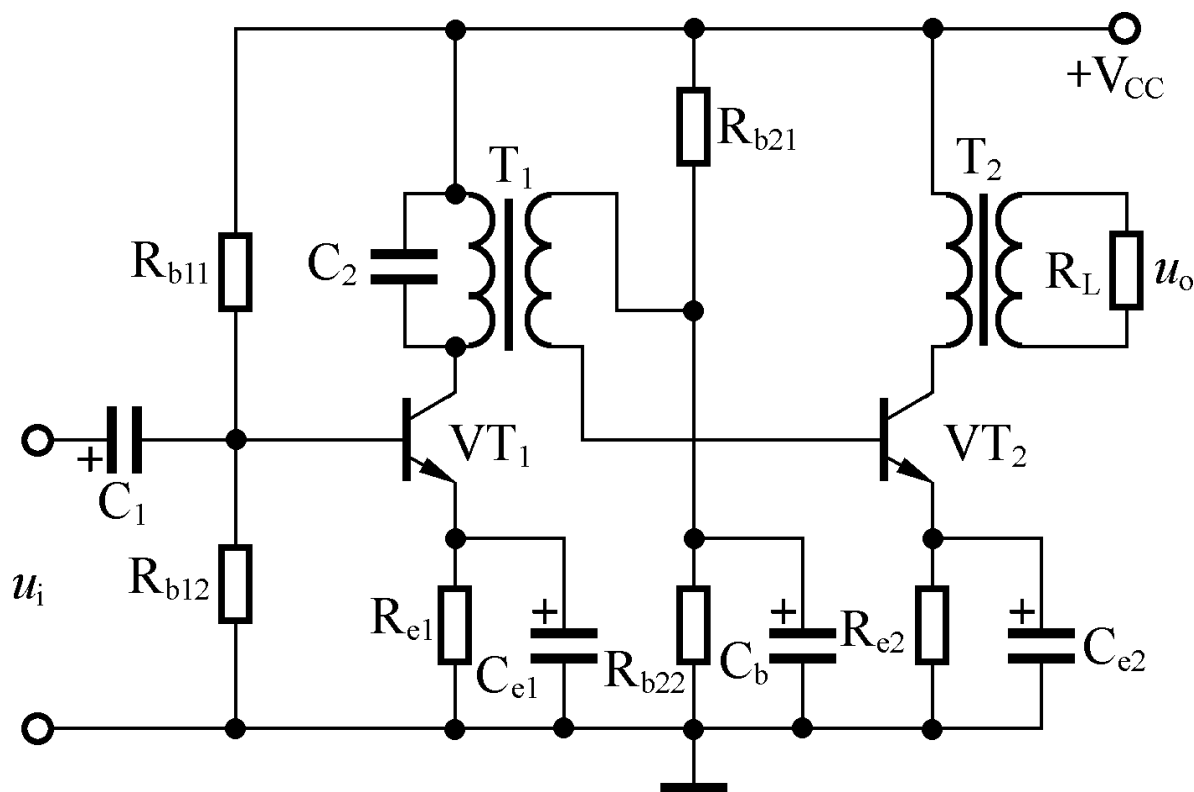
只要耦合电容选得足够大，则较低频率的信号也能由前级几乎不衰减地加到后级，实现逐级放大。

- 3) 电路的温漂小。
- 4) 体积小，成本低。

➤ 阻容耦合的缺点：

- 1) 无法集成；
- 2) 低频特性差；
- 3) 只能使信号直接通过，而不能改变其参数。

2. 变压器耦合放大电路

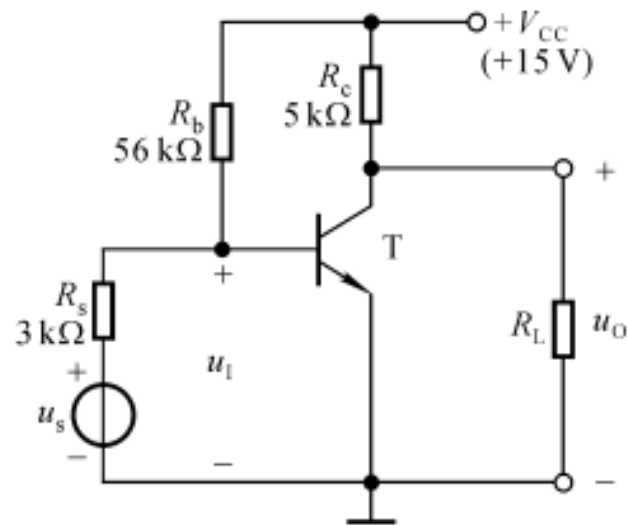


- 变压器可以通过磁路传送交流信号；
- 在大功率输出时起到阻抗变换作用： $R'_L = n^2 R_L$

3.直接耦合放大电路

1) 电路特点

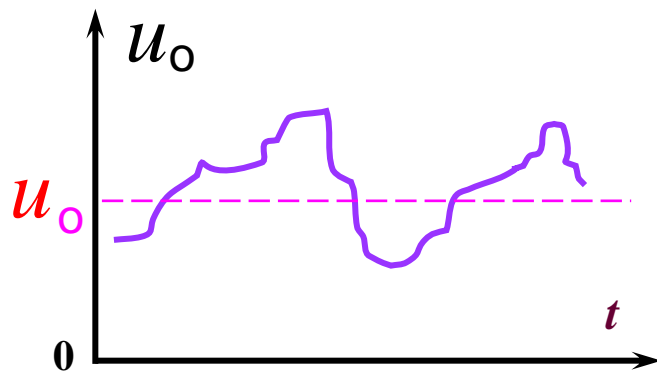
- 各级Q点互相影响，不便于调试；
- 存在零漂，可能淹没有用信号；
- 便于集成；
- 可以放大直流和低频信号。



共射直接耦合放大电路

2) 零漂解决办法

- 直流负反馈稳定静态工作点
- 温度补偿法（热敏元件补偿）。
- 差动电路抑制或抵消零点漂移。



零漂示意图

3.8.2 多级放大电路的分析

1. 静态工作点的分析

- 阻容耦合
 - 变压器耦合
- } 各级静态工作点独立，
静态分析同单级放大电路

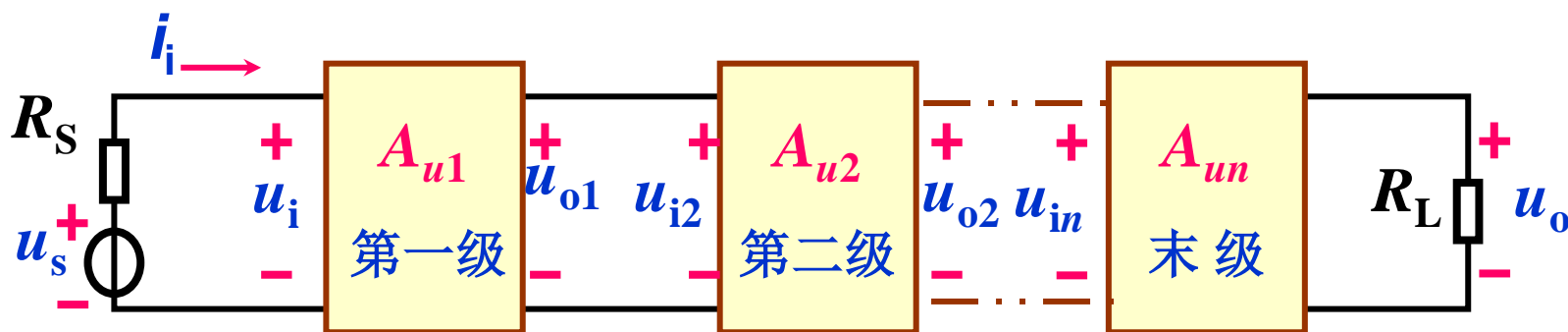
➤ 直接耦合多级放大电路静态分析思路：

- ① 根据电路的约束条件和管子的 I_B 、 I_C 和 I_E 的相互关系，列出方程组求解。
- ① 计算后级 I_C 或 I_E 时，可忽略前级的 I_B 。

3.8.2 多级放大电路的分析

2. 动态工作点的分析 求解 (R_i 、 R_o 、 A_u)

1) 求电压放大倍数—输入电阻法



$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_{o1}}{u_i} \frac{u_{o2}}{u_{i2}} \frac{u_{o3}}{u_{i3}} \cdots \frac{u_o}{u_{in}} = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdots A_{un}$$

- 考虑级与级之间的相互影响，计算各级电压放大倍数时，应把后级的输入电阻作为前级的负载处理!!!

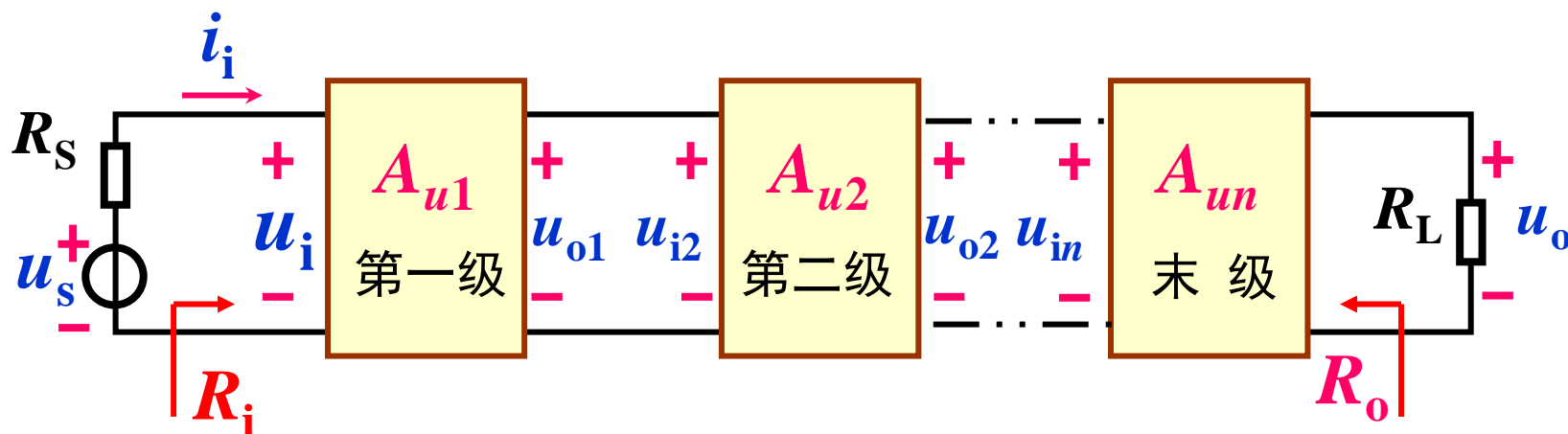
2.动态工作点的分析 求解 (R_i 、 R_o 、 A_u)

2) 多级放大电路的输入电阻就是第一级放大电路的输入电阻:

$$R_i = R_{i1}$$

3) 多级放大电路的输出电阻为最后一级放大电路的输出电阻:

$$R_o = R_{on}$$



【例9】 图(a)电路中, 已知 $\beta_1=50$, $r_{be1}=0.96\text{k}\Omega$, 当负载 R_L 变化50%, 即由 $3\text{k}\Omega$ 变为 $1.5\text{k}\Omega$ 时, 计算电压放大倍数的相对变化量

解: (1) 只有一级:

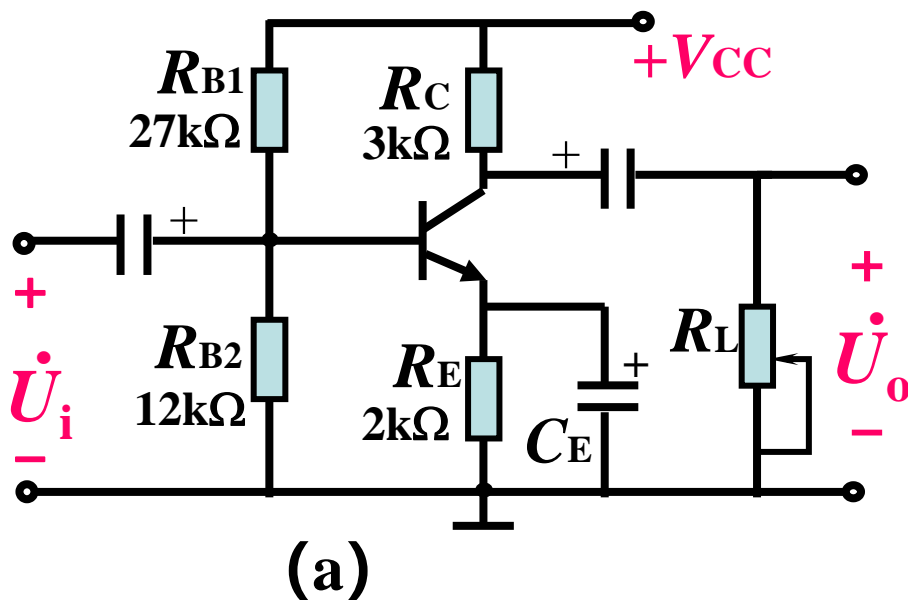
当 $R_L=3\text{k}\Omega$ 时:

$$\dot{A}_u = -\beta_1 \frac{R_{C1} // R_L}{r_{be}} = -78$$

当 $R_L=1.5\text{k}\Omega$ 时:

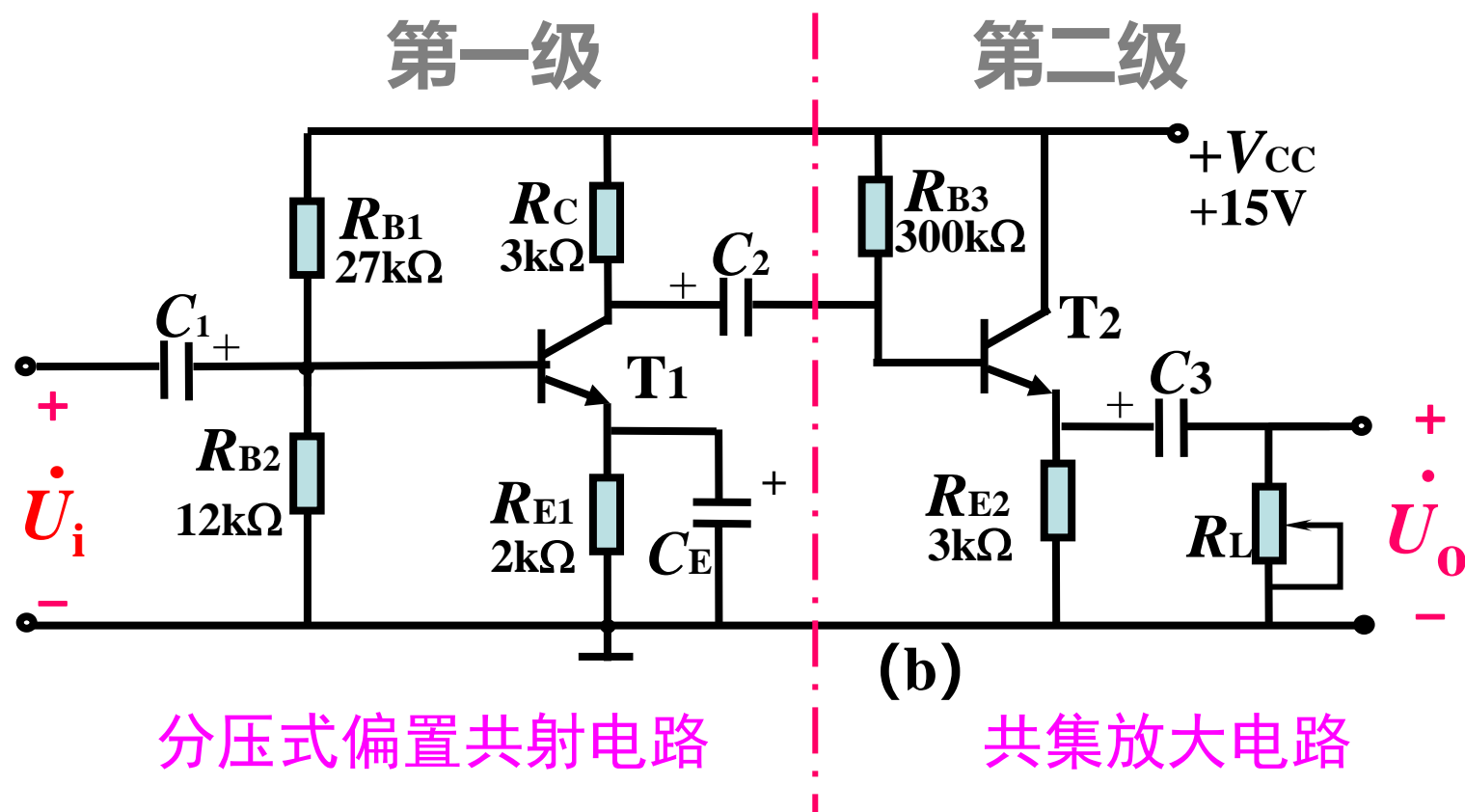
$$\dot{A}_u = -\beta_1 \frac{R_{C1} // R_L}{r_{be}} = -52$$

电压放大倍数的相对变化量: $\frac{\Delta |A_u|}{|A_u|} = \frac{|-52 - (-78)|}{|-78|} = 33.3\%$



● 结论: 共射放大倍数的负载能力不强。

[例10] 在图 (a) 的放大电路和负载之间加一级射极输出器作输出级，如图 (b) 所示。并已知： $\beta_2=50$ ， $r_{be2}=1\text{k}\Omega$ ，再计算 R_L 变化50%时，总电压放大倍数的相对变化量



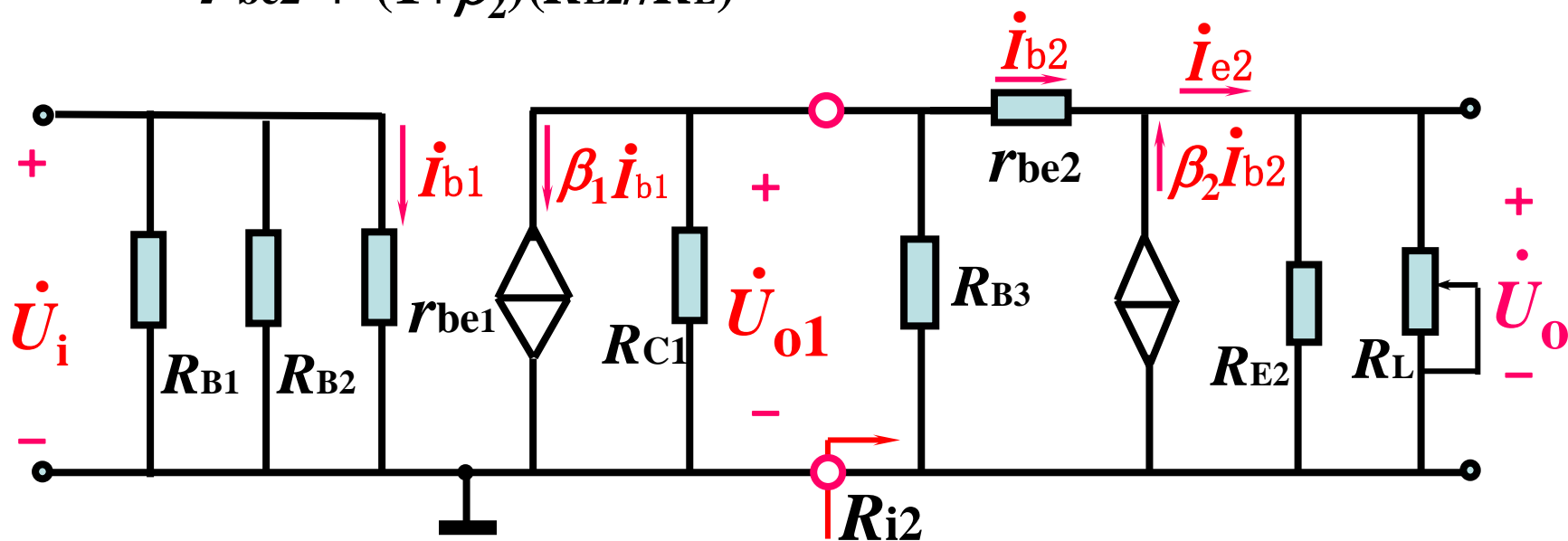
[例10解] 1) 当 $R_L = 3\text{k } \Omega$ 时

$$R_{i2} = R_{B3} // [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)] = 61.6\text{ k } \Omega$$

$$\dot{A}u_1 = -\beta_1 \frac{R_{C1} // R_{i2}}{r_{be1}} = -149$$

$$\dot{A}u = \dot{A}u_1 \cdot \dot{A}u_2 = -147$$

$$\dot{A}u_2 = \frac{(1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)} = 0.987$$



共射电路微变等效

共集电路微变等效

[例10解] 2) 当 $R_L = 1.5\text{k}\Omega$ 时

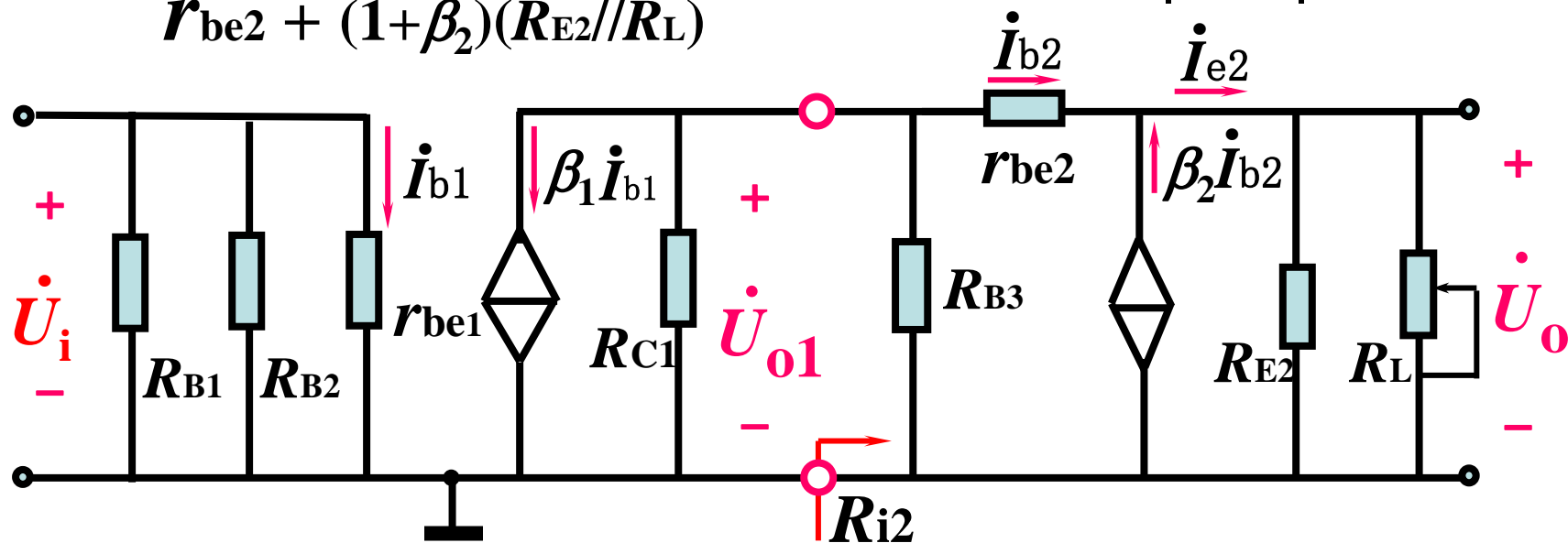
$$R_{i2} = R_{B3} // [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)] = 44.3\text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}u_1 = -\beta_1 \frac{R_{C1} // R_{i2}}{r_{be1}} = -146$$

$$\dot{A}u = \dot{A}u_1 \cdot \dot{A}u_2 = -143$$

$$\dot{A}u_2 = \frac{(1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)} = 0.98$$

$$\frac{\Delta |Au|}{|Au|} = 2.72\%$$



- 在负载变化相同的情况下，接入射极输出器作输出级后，电压放大倍数的稳定性明显提高了。

◆ 论文索引

附件2-模拟电子技术混合教学模式的探讨与实践

《电子制作》2019(15):69-73.”

附件3-共射共基和共集三种基本放大电路特性的仿真研究

《电子制作》2016年23期 ISSN:1006-5059

附件4-静态工作点对放大电路性能指标的影响

《电子制作》2017(11):61-64+56.