

1. 放大电路的建模与分析

1.1 放大电路的基本概念

1.2 单管放大电路的分析

1.3 *CMOS放大电路

1.4 多级放大电路

1.5 放大电路的频率特性分析

1.6 差分放大电路

1.7 互补对称共集电路

1.8 集成运算放大器

1.9 *应用案例解析

§ 1.1 放大电路的基本概念

一、放大电路的基本概念

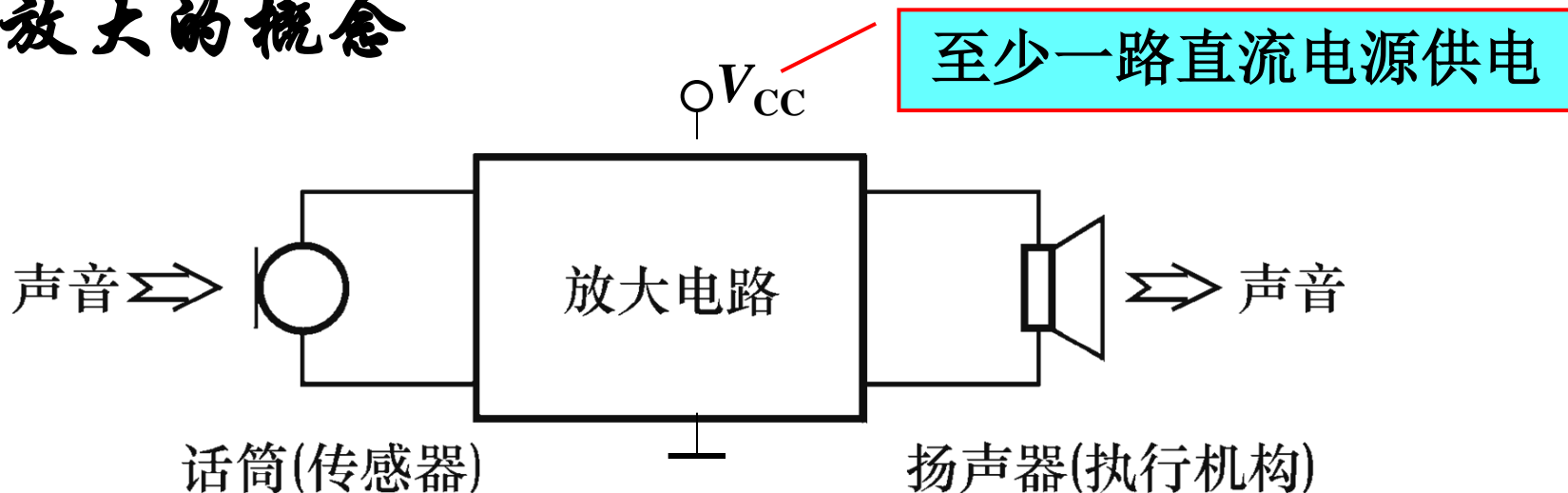
二、基本共射放大电路工作原理

三、基本放大电路的分析方法

四、场效应管放大电路

一、放大电路的基本概念

1、放大的概念



u 放大的对象：变化量

u 放大的本质：能量的控制

u 放大的特征：功率放大

u 放大的基本要求：不失真——放大的前提

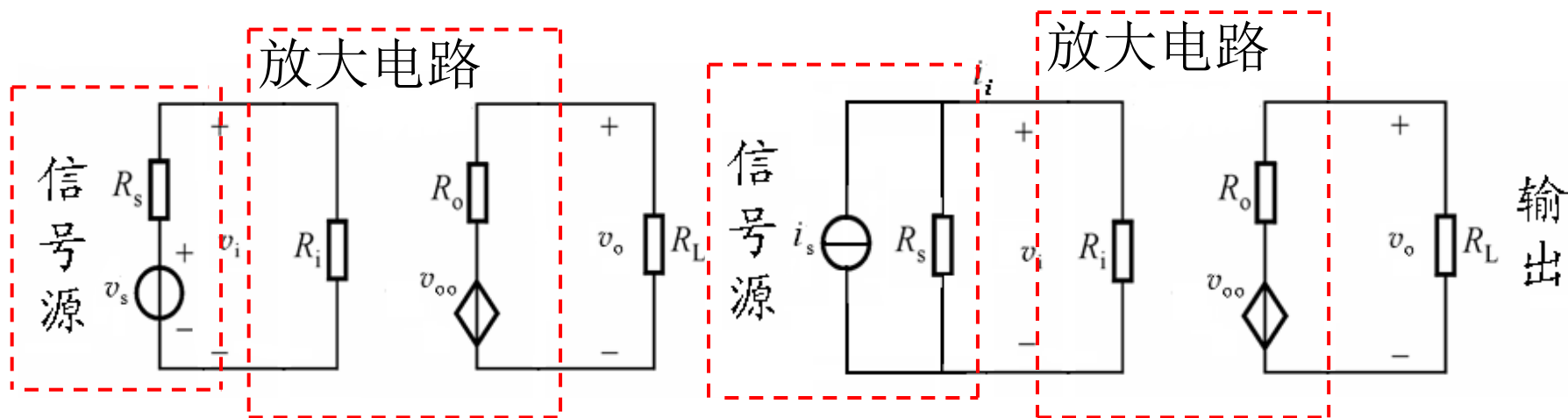
判断电路能否放大的基本出发点

2、放大电路的输入信号源和输出负载

- 放大器的指标因放大器的功用不同而异。
- 有些指标与信号源及电路负载有关。

❖输入信号源

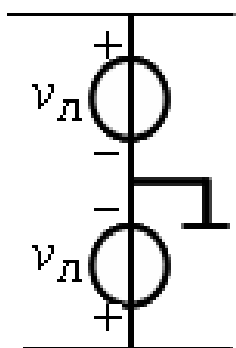
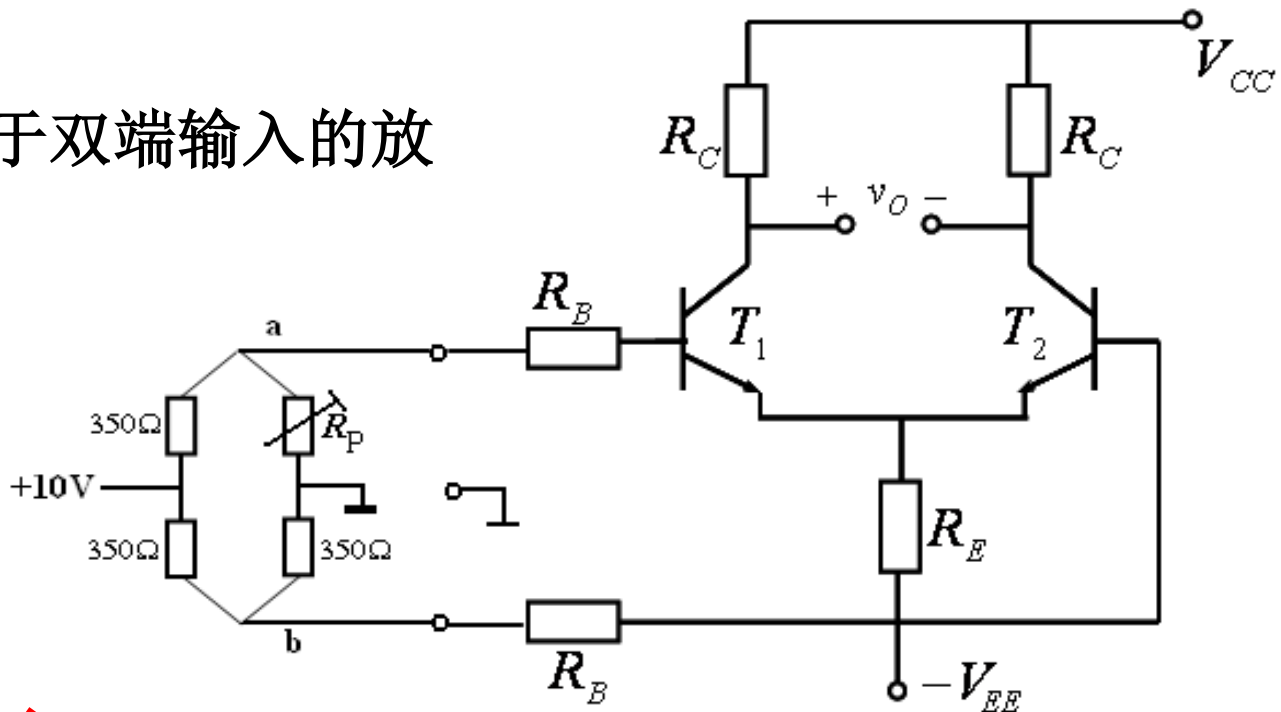
单端信号源：适用于单端与地之间输入信号的放大电路。



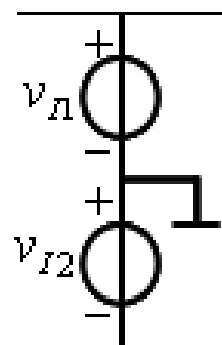
信号源为电压源

信号源为电流源

对称信号源：适用于双端输入的放大电路。



R_P 为 350Ω
时 $V_a = V_b$



R_P 不是 350Ω 时
 $V_a \neq V_b$

差分放大电路需要这种信号

❖ 输出负载

放大电路的负载种类很多，对不同的负载，要求放大电路有不同的指标输出。

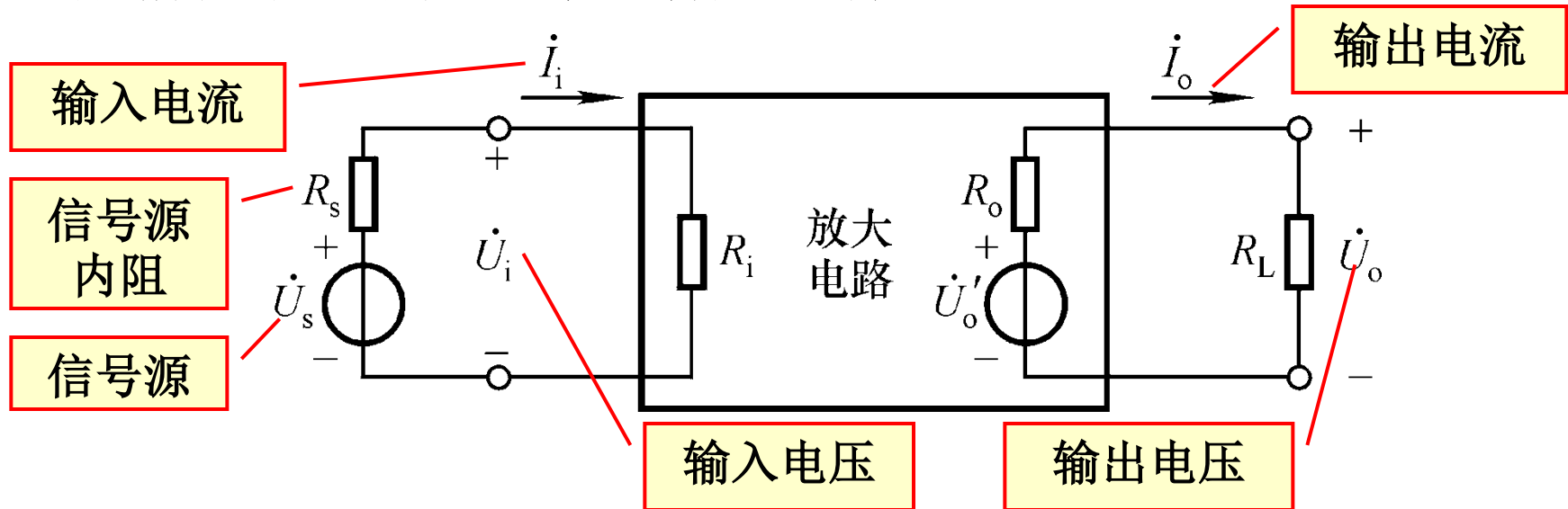
仅要求放大电路有**足够大的输出电压**，如负载是高内阻的电压表；

仅要求放大电路有**足够大的输出电流**，如负载是继电器线圈；

仅要求放大电路有**足够大的输出功率**，即既要有大的输出电压幅度，还要有尽量大的输出电流。如低频功放的负载是扬声器，能放出响亮的声音。

3、放大电路的性能指标

一般情况下，放大电路可看成二端口网络。



1. 放大倍数A (**Amplify**增益) : 输出量与输入量之比

$$A_{uu} = A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

$$A_{ii} = A_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$$

$$A_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i}$$

$$A_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$$

电压放大倍数是最常被研究和测试的参数

❖ 增益

➤ 又称放大倍数，衡量放大电路放大信号的能力。

➤ 电压增益定义：

$$A_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$$

⇐ 电压增益

输出和输入电压向量之比

$$A_{vo} = \frac{\dot{V}_{oo}}{\dot{V}_i}$$

⇐ 开路电压增益

负载开路（即 $R_L = \infty$ ）时的电压增益

$$A_{vs} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s}$$

⇐ 源电压增益

输出电压与信号源电压之比

➤ 其它增益定义：

电流 A_i 、互阻 A_r 、互导 A_g 、功率 A_p

➤分贝

✓增益常用分贝（dB）作为单位，1分贝=1/10贝尔

✓源于功率增益的对数： $A_p(dB) = 10\lg(P_o/P_i)$

✓当用于电压增益时： $A_v(dB) = 20\lg(V_o/V_i)$

“0dB” 相当于 $A_v=1$

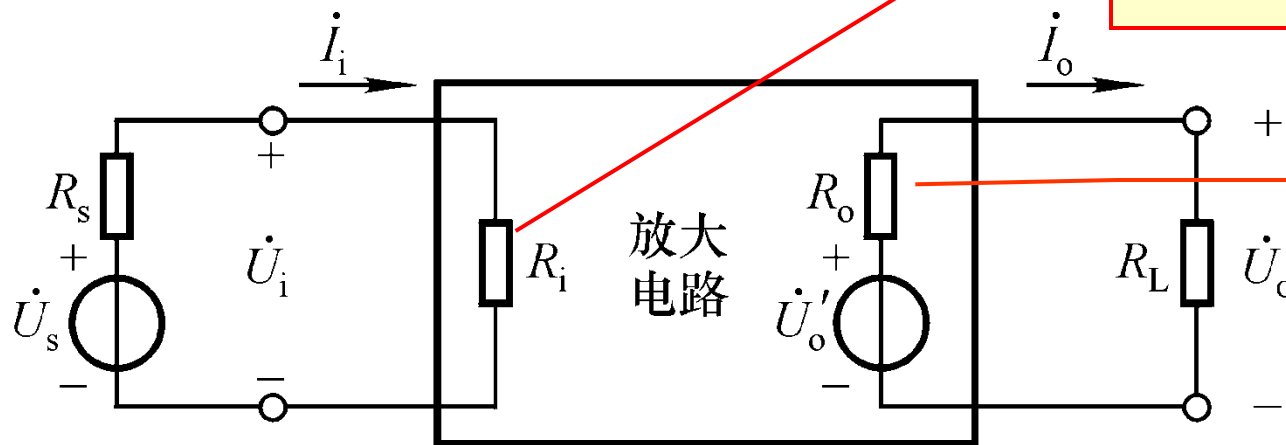
“20dB” 相当于 $A_v=10$

“40dB” 相当于 $A_v=100$

“−20dB” 相当于 $A_v=0.1$

“−40dB” 相当于 $A_v=0.01$

2. 输入电阻和输出电阻



从输入端看进去的
等效电阻

将输出等效
成有内阻的电
压源，内阻就
是输出电阻。

输入电压
与输入电
流有效值
之比

$$R_i = \frac{U_i}{I_i}$$

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

带 R_L 时的输出电
压有效值

空载时输出
电压有效值

输入电阻反映了放大电路从信号源所汲取电压的能力。

R_i 越大，放大电路从信号源索取的电流越小， u_i 越接近 u_s 。

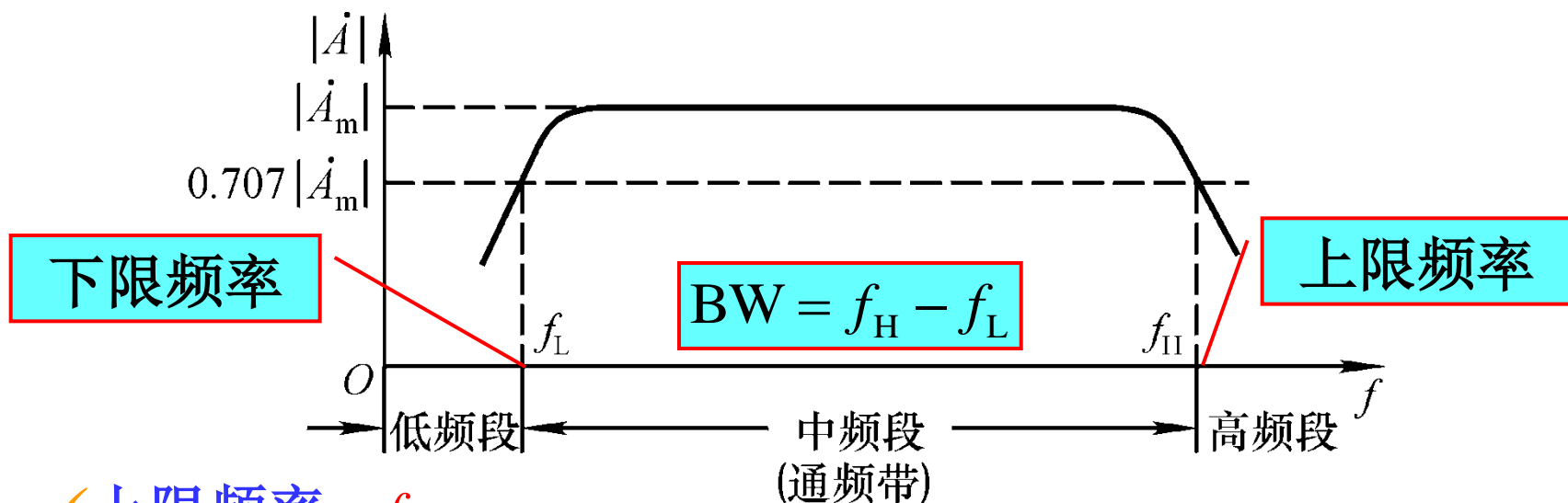
输出电阻 R_o 的大小，反映了放大电路带负载的能力。

R_o 越小，放大电路带负载能力越强，电路输出越接近恒压源。

3. 通频带

衡量放大电路对不同频率信号的适应能力。

由于电容、电感及放大管PN结的电容效应，使放大电路在信号频率较低和较高时电压放大倍数数值下降，并产生相移。



✓ 上限频率: f_H

✓ 下限频率: f_L

✓ 通频带: $BW = f_H - f_L \approx f_H$

扩音机电路，其通频带应大于音频范围(20Hz~20kHz)。

通频带越宽，表明放大电路对不同频率信号的适应能力越强。

4. 线性失真和非线性失真

线性失真：信号各频率成分的频率响应不一致

非线性失真：器件的非线性所致

5. **最大不失真输出电压** U_{om} ：交流有效值。

6. **最大输出功率** P_{om} 和**效率** η ：功率放大电路的参数

❖ 最大不失真输出幅度

放大电路在输出波形不产生非线性失真的条件下，所能提供的最大输出电压(或输出电流)的峰值，用 V_{om} （或 I_{om} ）表示。

✓ **截止失真：**工作点进入截止区后产生的失真。

✓ **饱和失真：**工作点进入饱和区后产生的失真。

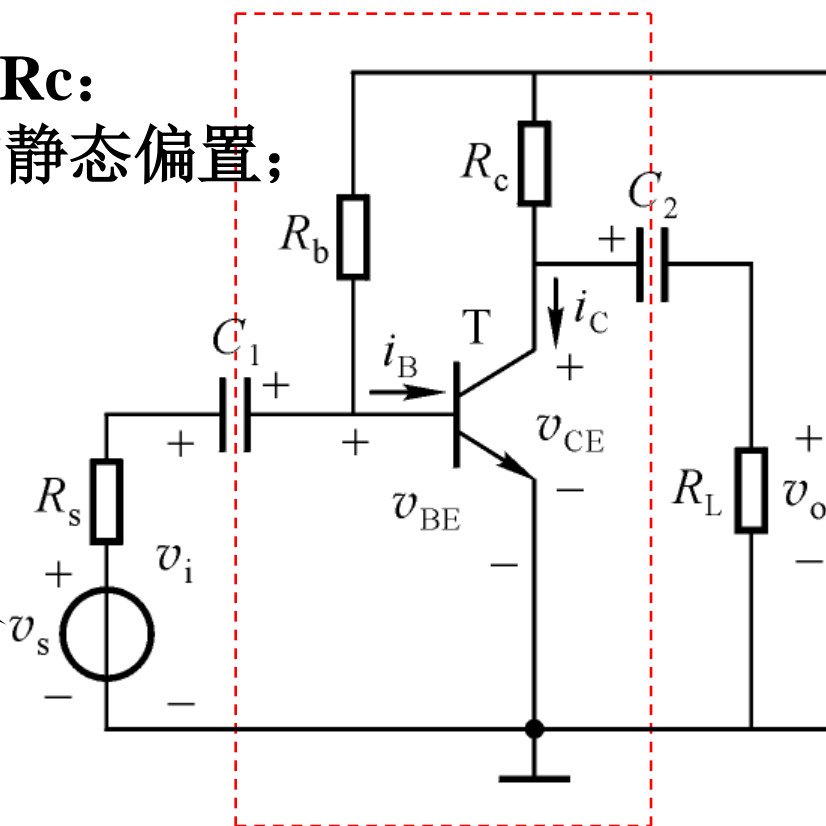
4、放大电路分析方法

❖ 基本共射放大电路

✓ V_{CC} 、 R_b 和 R_c :

提供合适的静态偏置;
提供能源。

信号源



电源

✓ C_1 、 C_2 :

(隔直/耦合) 电容;
隔离直流信号,
传输交流信号。

负载

各支路电流和电压为
一个直流量叠加了一个
交变量

放大电路的小信号分析=直流工作点+小信号响应

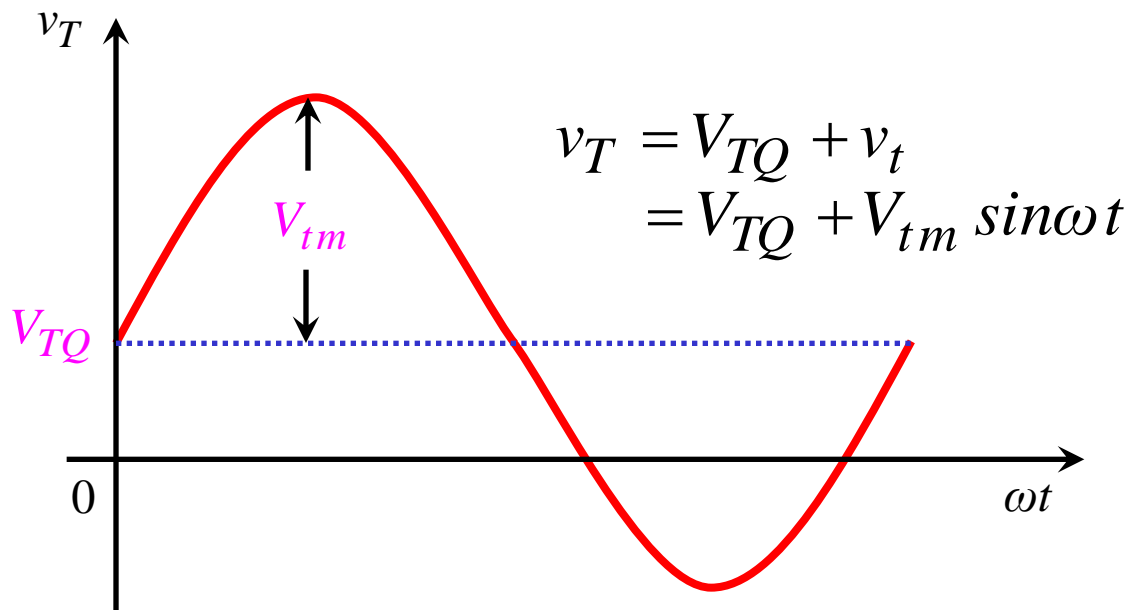
偏置电路
的响应

微变等效电路 (三端
元件线性化) 的响应

❖ 电路变量符号表示

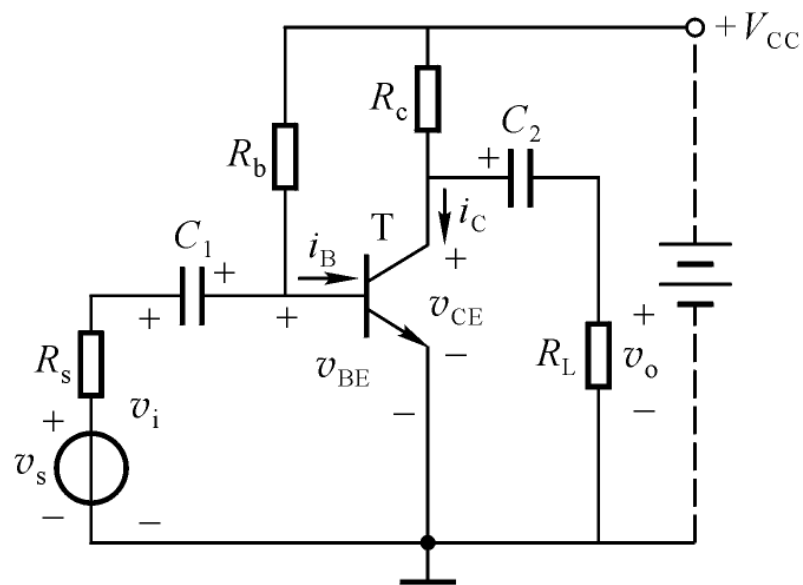
基本符号	下标符号	定义
大写	大写	静态（直流）分量
小写	小写	动态（交流）瞬时分量
小写	大写	瞬时总量
大写	小写	动态（交流）分量有效值

➤ 例：

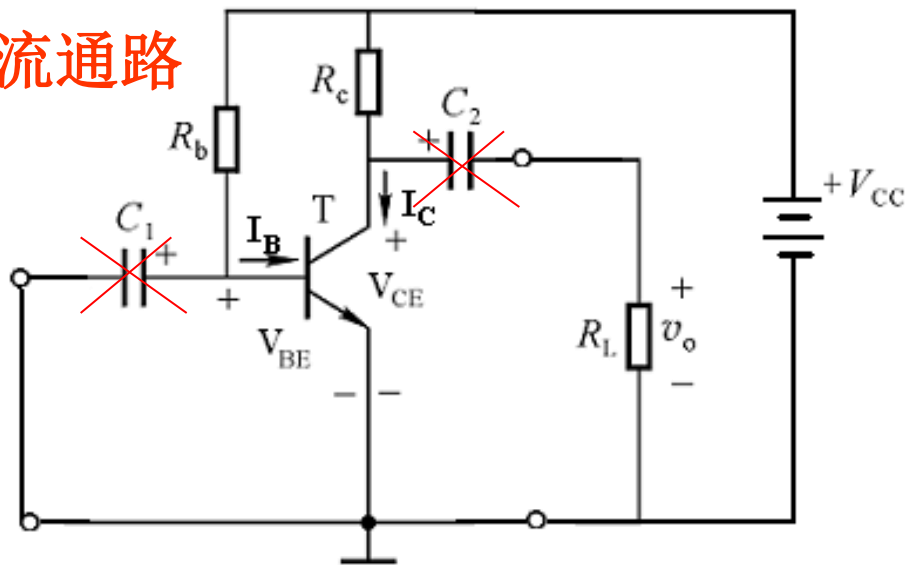


放大电路分析方法

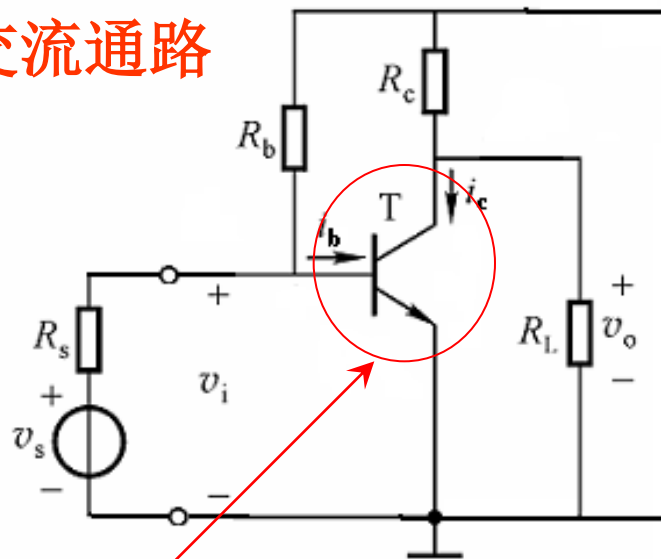
关心小信号的放大性能——指标



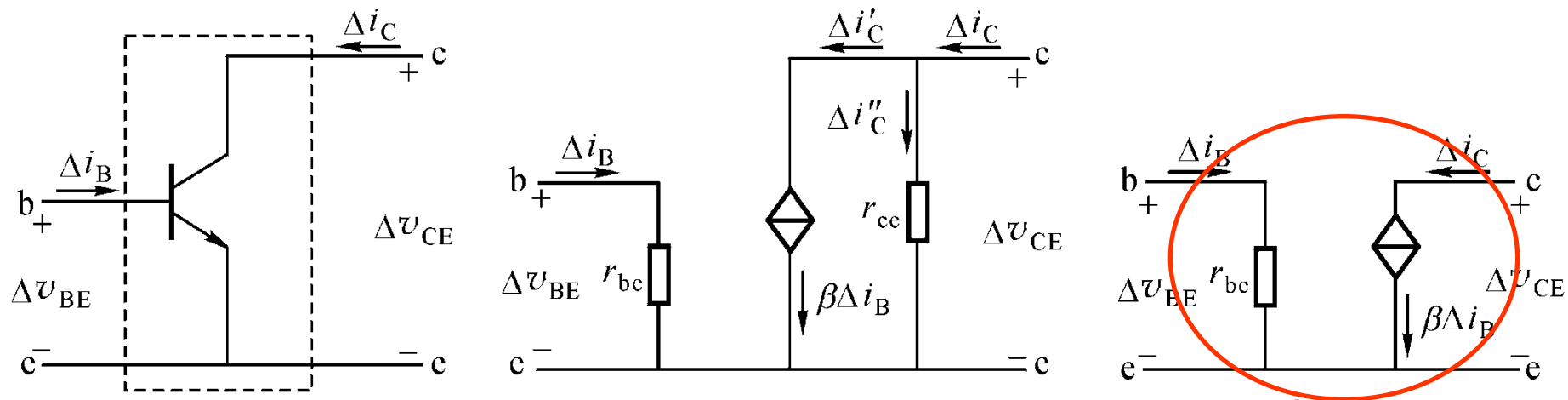
直流通路



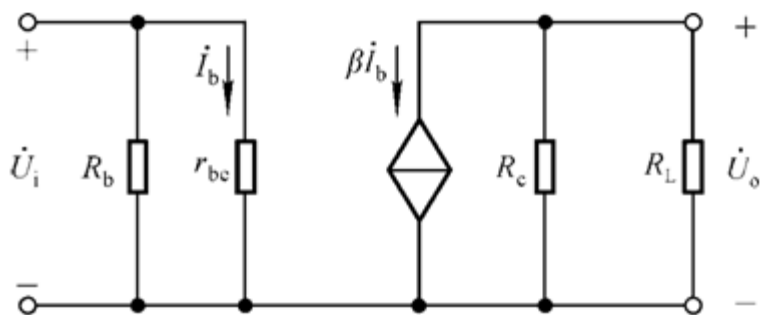
交流通路



中低频性能：晶体管用低频小信号模型

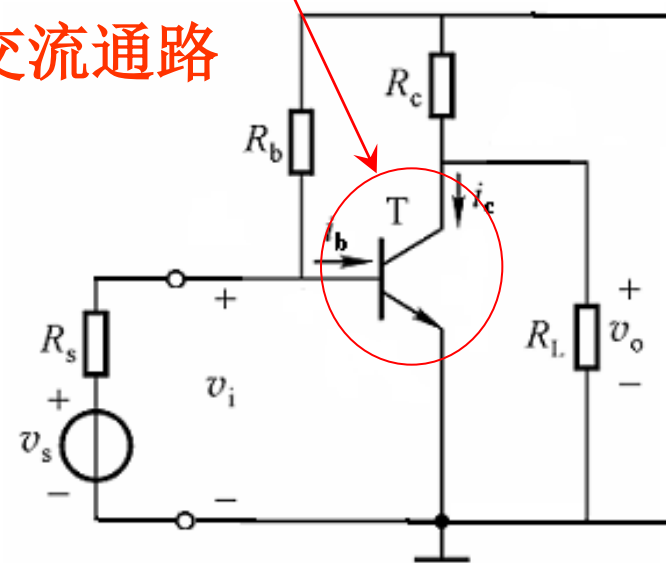


微变等效电路电路



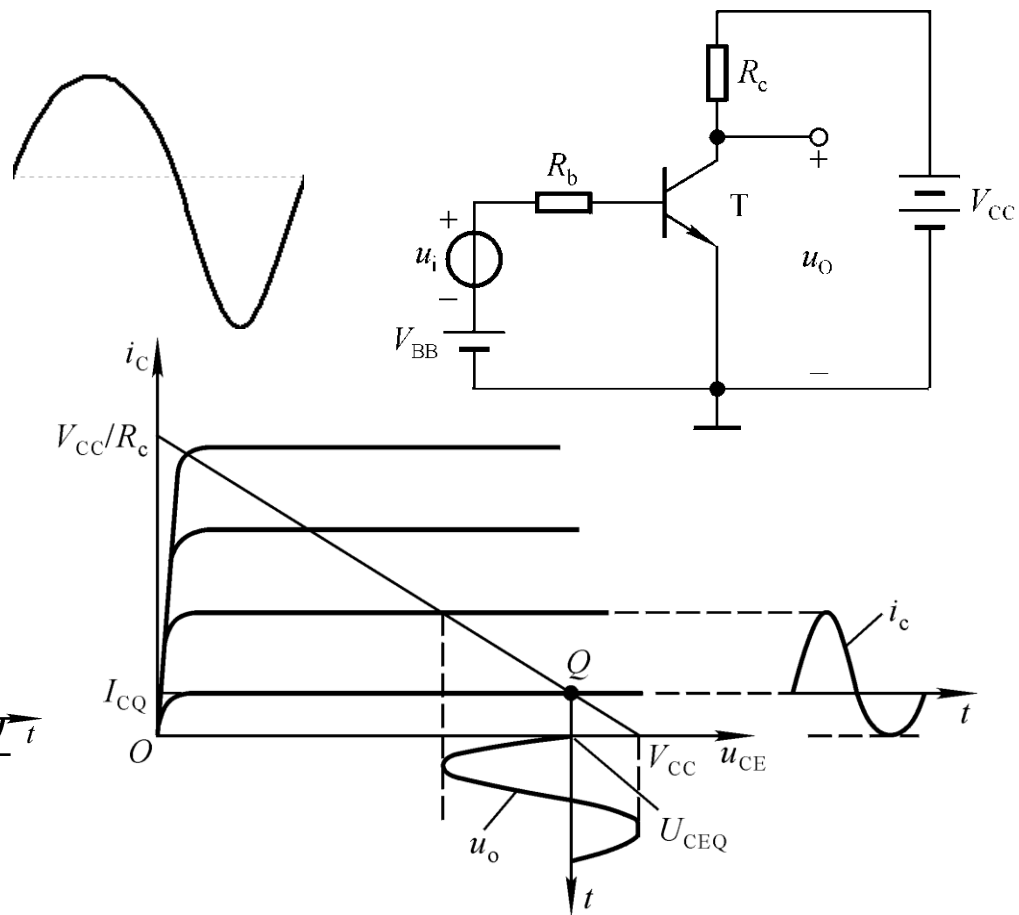
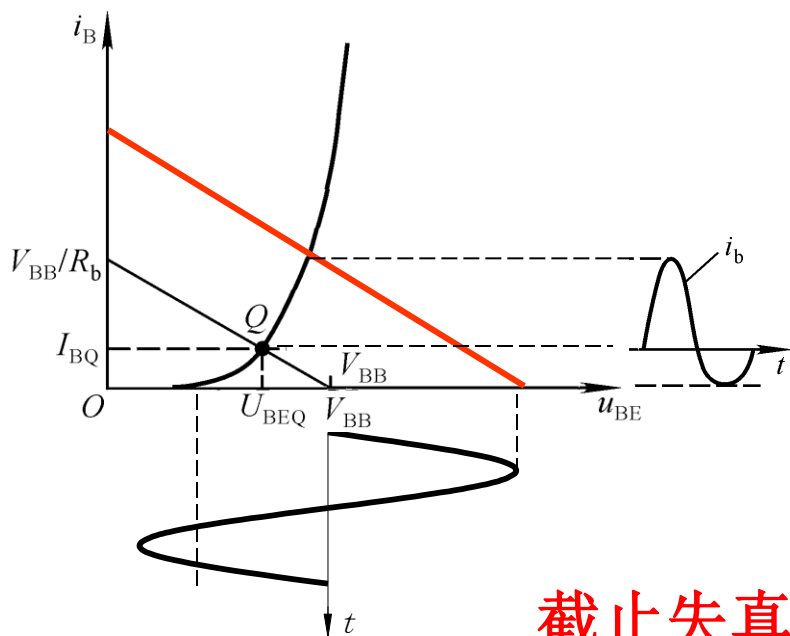
$$v_{ce} = -\beta \frac{v_i}{r_{be}} R_c // R_L \sin \omega t$$

交流通路



3. 失真分析

■ 截止失真 “缩顶”



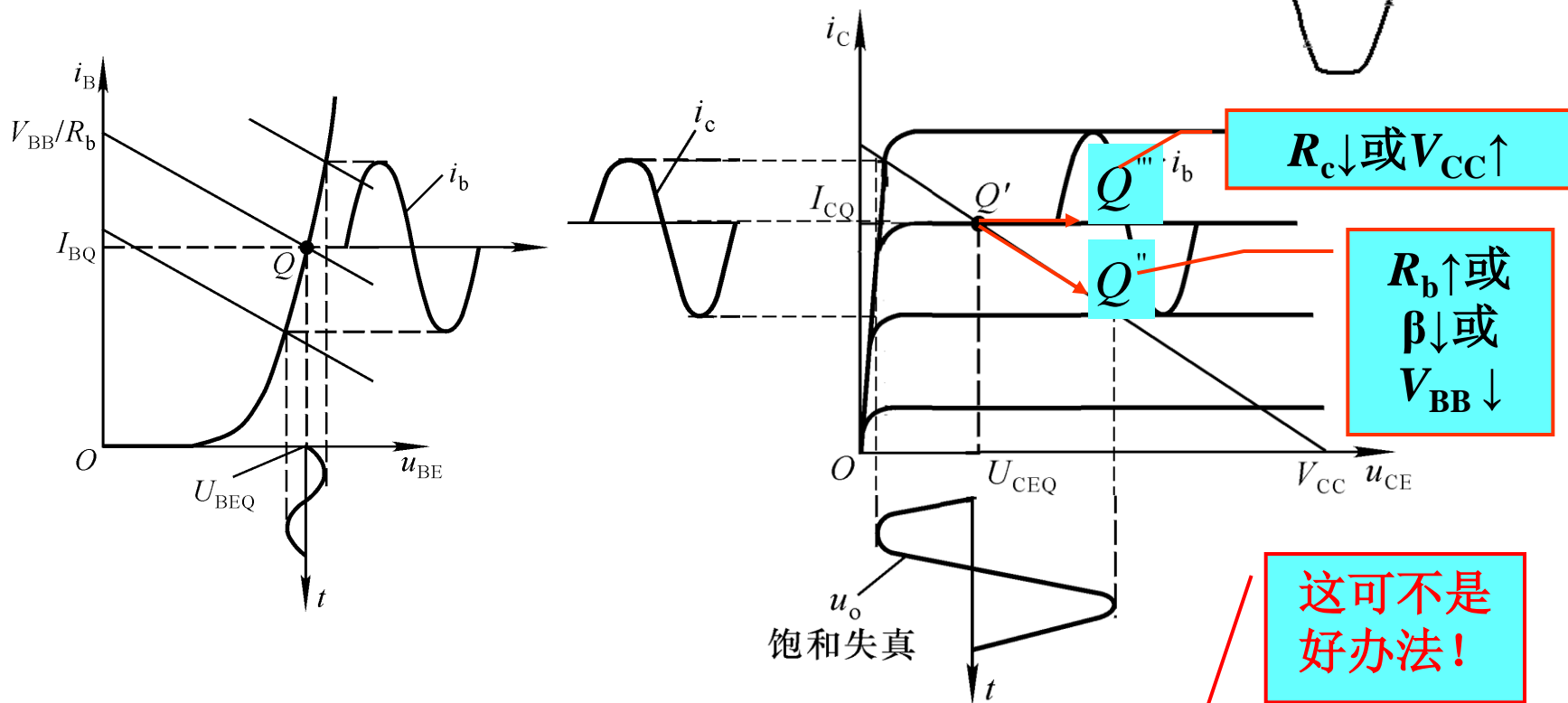
截止失真是在输入回路首先产生失真！

消除方法：增大 V_{BB} ，即向上平移输入回路负载线。

减小 R_b 能消除截止失真吗？

“削顶”

■ **饱和失真**：饱和失真是输出回路产生失真。

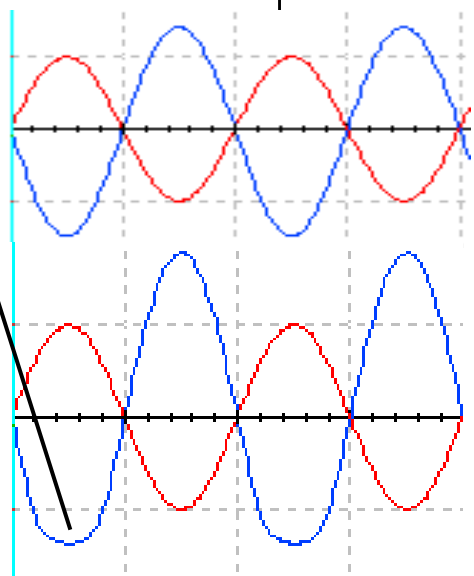
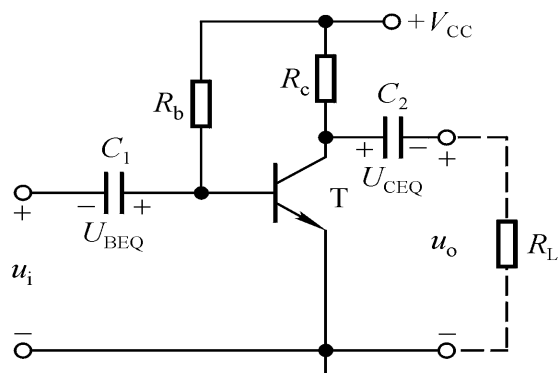


■ 消除方法：增大 R_b ，减小 R_c ，减小 β ，减小 V_{BB} ，增大 V_{CC} 。

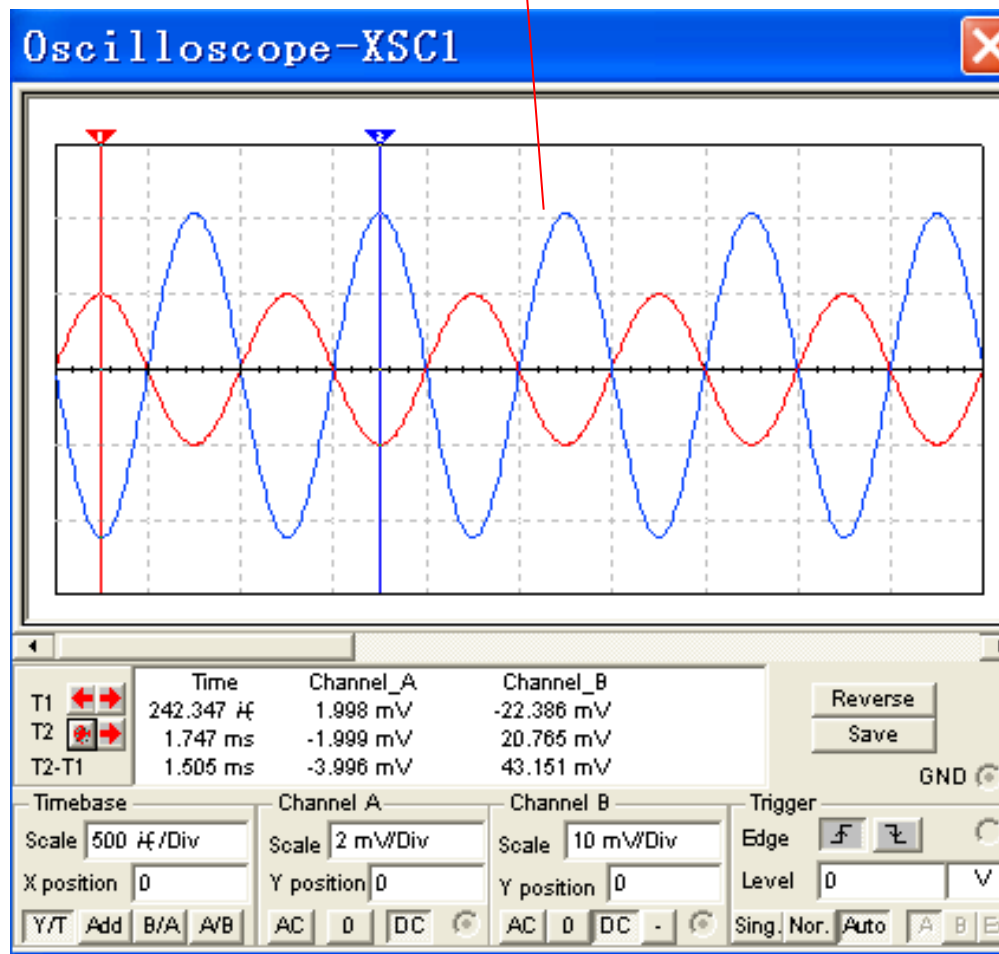
- 最大不失真输出电压 U_{om} ：比较 U_{CEQ} 与 $(V_{CC} - U_{CEQ})$ ，取其小者，除以 $\sqrt{2}$ 。

讨论一：波形分析

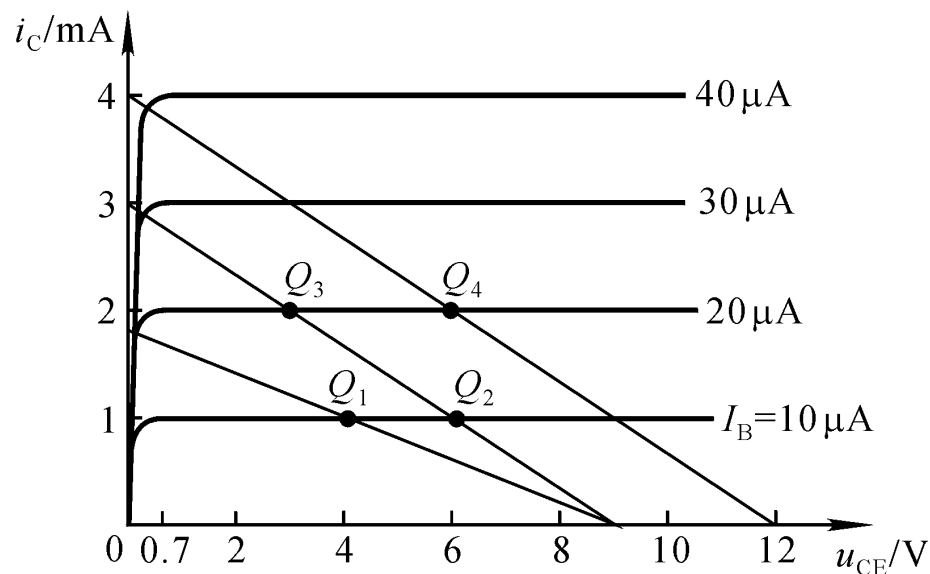
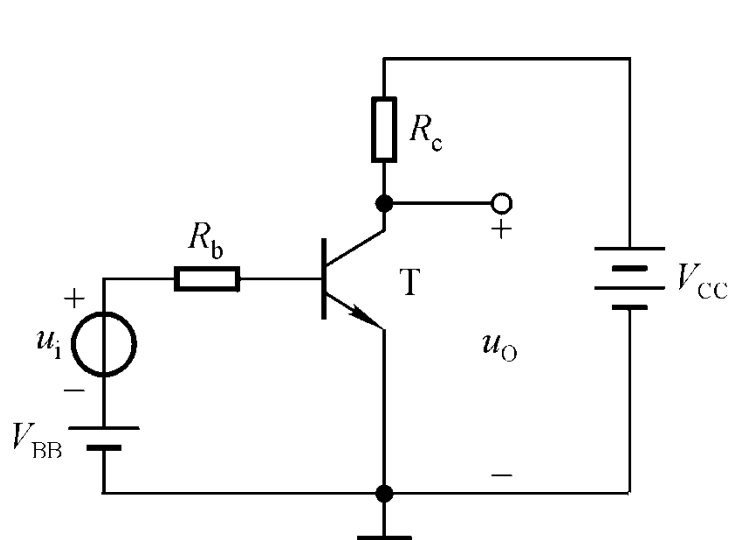
失真了吗？如何判断？原因？



饱和失真



讨论二

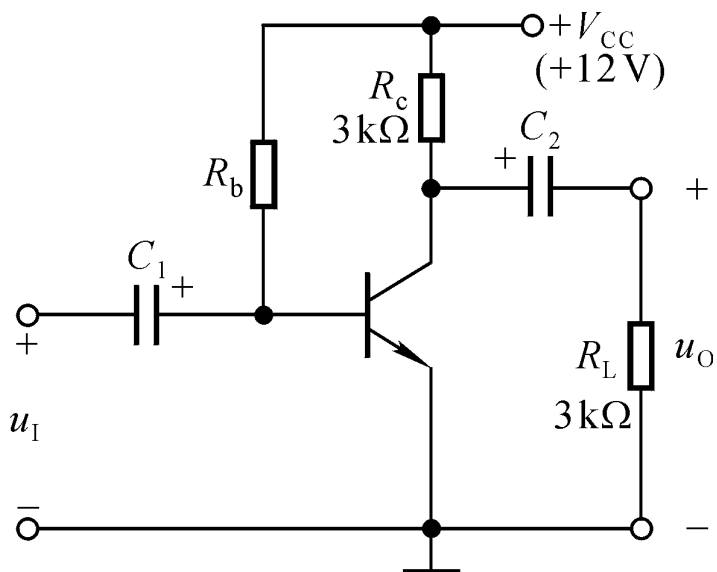


1. 在什么参数、如何变化时 $Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow Q_3 \rightarrow Q_4$?
2. 从输出电压上看, 哪个 Q 点下最易产生截止失真? 哪个 Q 点下最易产生饱和失真? 哪个 Q 点下 U_{om} 最大?
3. 设计放大电路时, 应根据什么选择 V_{CC} ?

讨论三

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$$

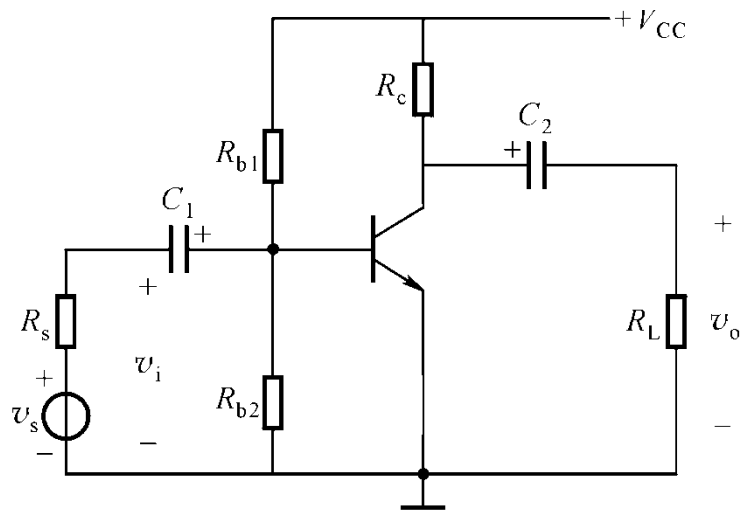
$$r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$



已知 $I_{CQ} = 2\text{mA}$, $U_{CES} = 0.7\text{V}$ 。

1. 在空载情况下，当输入信号增大时，电路首先出现饱和失真还是截止失真？若带负载的情况下呢？
2. 空载和带载两种情况下 U_{om} 分别为多少？
3. 在图示电路中，有无可能在空载时输出电压失真，而带上负载后这种失真消除？
4. 增强电压放大能力的方法？

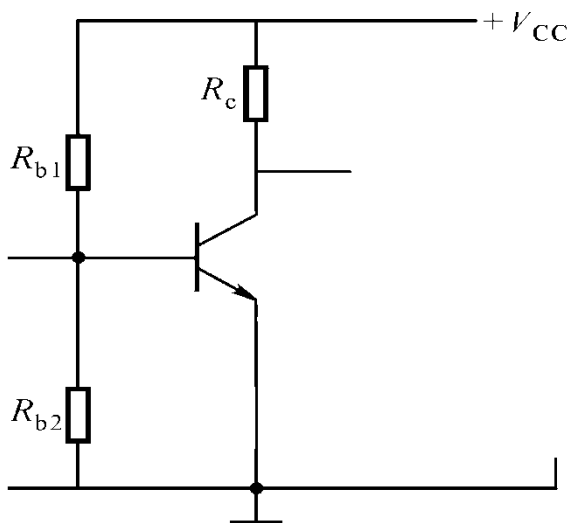
直流负载线与交流负载线



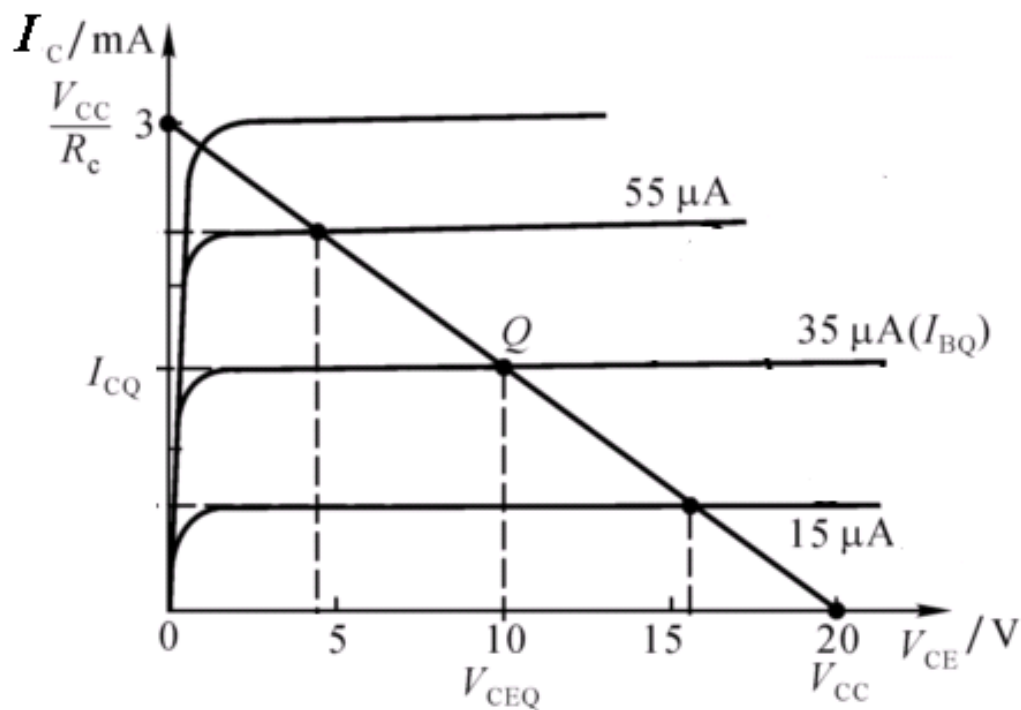
直流负载线斜率与直流电路负载电阻 R_C 有关。

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

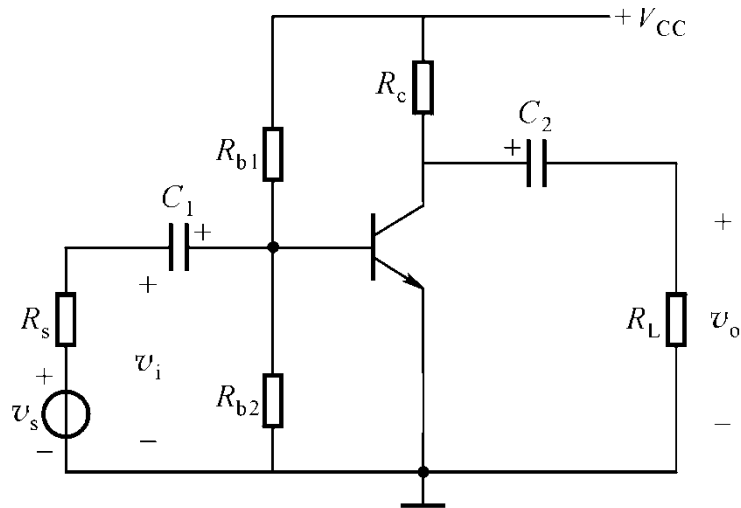
阻容耦合共射放大电路



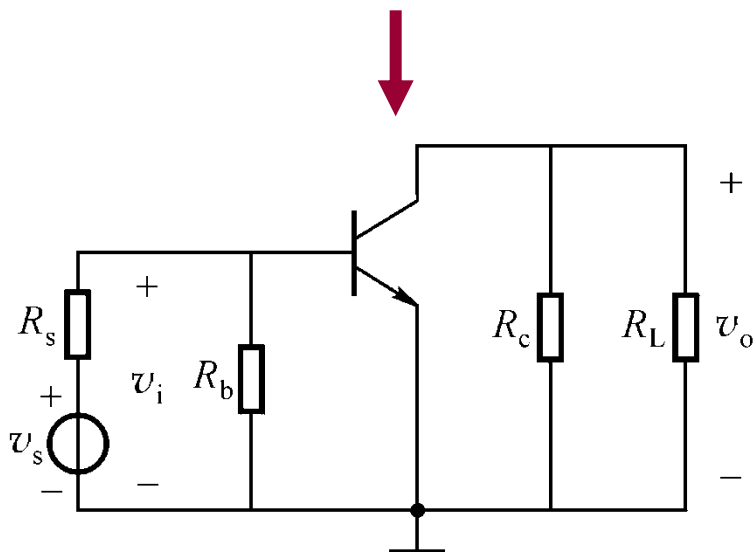
直流通路



直流负载线与交流负载线



阻容耦合共射放大电路



截止失真时的最大不失真电压 $I_{CQ}R_C // R_L$

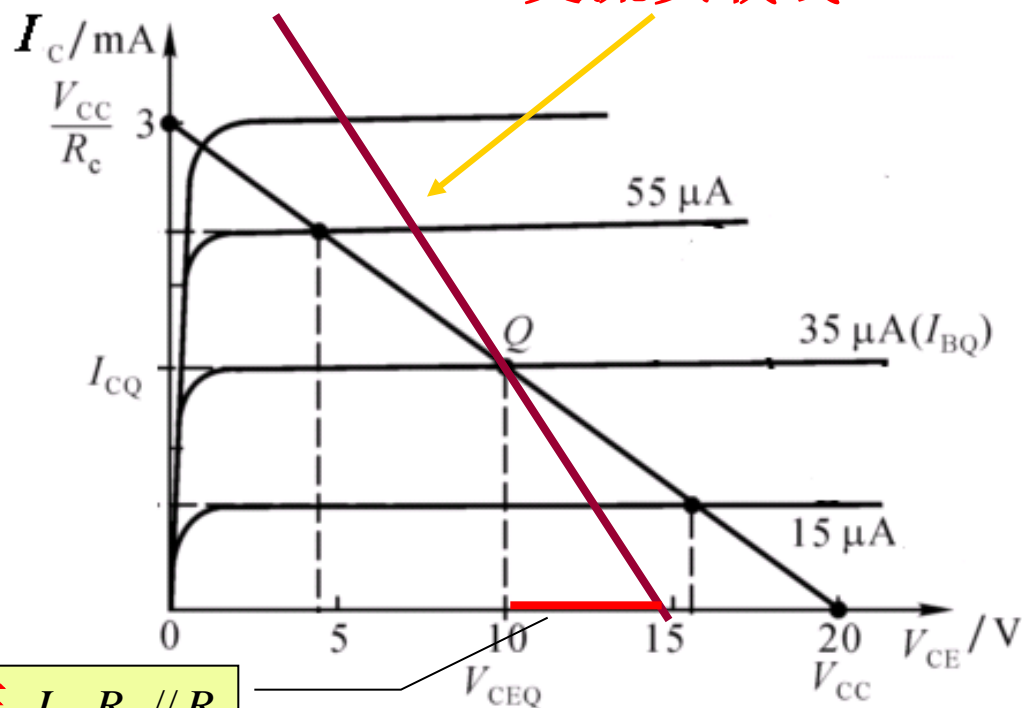
交流负载线斜率与交流电

路负载电阻 $R_C // R_L$ 有关。

$$u_{CE} = -(R_C // R_L)i_C$$

$$i_C = 0 \text{ 时 } U_{CE} = U_{CEQ}$$

交流负载线



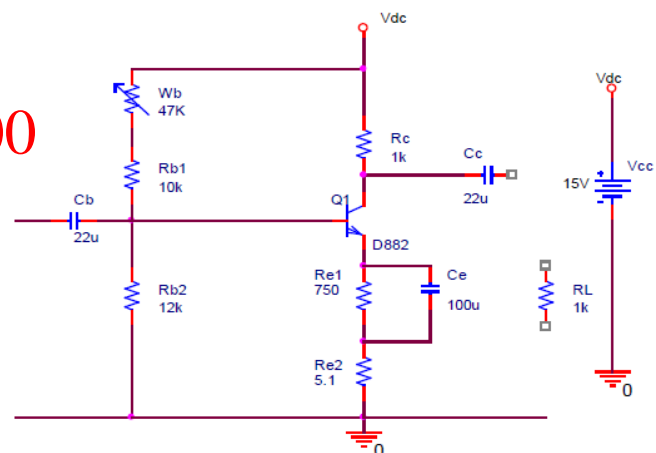
4、实验内容

估算理论值时
 β 取150, $r_{bb'}$ 取200

1. 静态工作点的调整和测量

调节 W_b , 使Q点满足要求($I_{CQ}=4.3mA$)。测量各点的静态电压值

测什么?



2. $R_L=\infty$ 及 $R_L=1k$ 时, 电压放大倍数的测量

保持静态工作点不变! 输入中频段正弦波, 示波器监视输出波形, 测出有效值。

3. $R_L=\infty$ 时, 最大不失真输出电压 V_{omax} (有效值)

增大输入信号幅度, 用示波器监视输出波形、测出该工作点下的最大不失真输出电压 V_{omax} 。

4. 输入电阻和输出电阻的测量

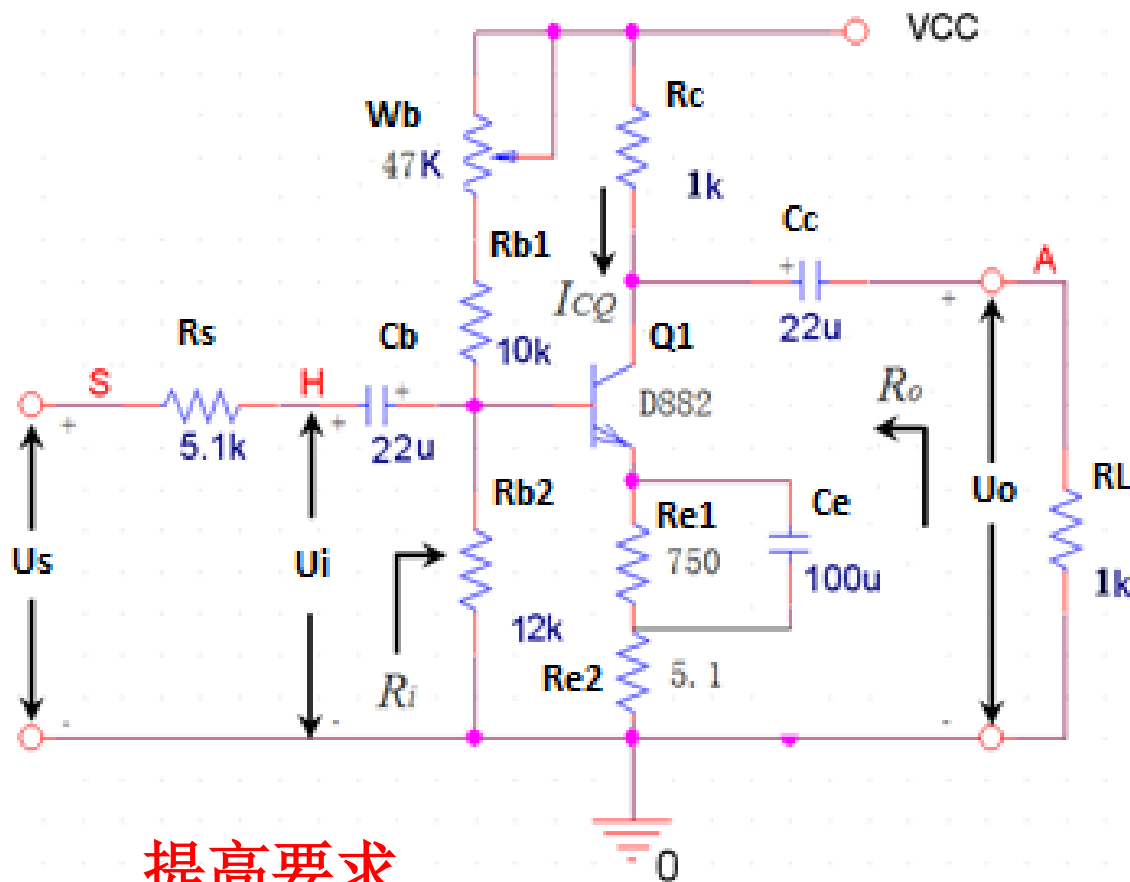
R_L 开路和 $R_L=1k$

5. 放大电路上限频率 f_H 、下限频率 f_L 的测量 (暂时算不了)

改变输入信号频率, 下降到中频段输出电压的0.707倍。 R_L 开路和 $R_L=1k$

6. 观察静态工作点对输出波形的影响

调节 W_b , 和输入信号幅度, 饱和失真、截止失真、同时出现。



- 1、性能 A_v , R_i , R_o , U_{om} 估算方法？与工作点有关吗？
- 2、 R_L 的影响
- 3、 R_{e2} 的影响

提高要求

- 1、multisim 中没有 D882，怎么办？
- 2、不改变偏置电路，你能否对上述含 R_e 的共射放大电路稍作修改，变成共集和共基放大电路？通过仿真比较三种放大电路的动态性能（增益、输入电阻、输出电阻、通频带）

§ 1.2 单管放大电路

- 一、放大电路的基本组成
- 二、静态工作点的稳定
- 三、晶体管放大电路的分析
- 四、场效应管放大电路的分析

一、放大电路的基本组成

- 1、直流偏置电路
- 2、信号的输入和输出电路
- 3、放大电路的组态
- 4、直流通路与交流通路

一、放大电路的基本组成

1、直流偏置电路

■ BJT的直流偏置电路

为保证以放大器件为核心的电路能正常放大信号, 必须加上合适的供电电源和偏置电阻。

保证放大器件(晶体管或场效应管)工作在放大区, 有合适的发射结、集电结偏置, 合适的 I_B 和 I_C 电流。

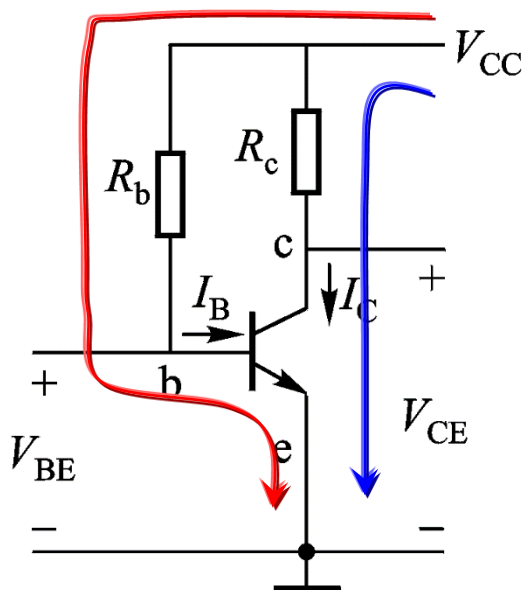
考虑直流偏置时, 输入为零, 即静态。

此时只考虑直流电源作用下的通路, 即直流通路。

几种常见的偏置电路: 基极固定式偏置电路、具有工作点稳定的基极偏置电路、射极偏置电路。

1、直流偏置电路

❖ 基极固定式偏置电路



对电源的要求：

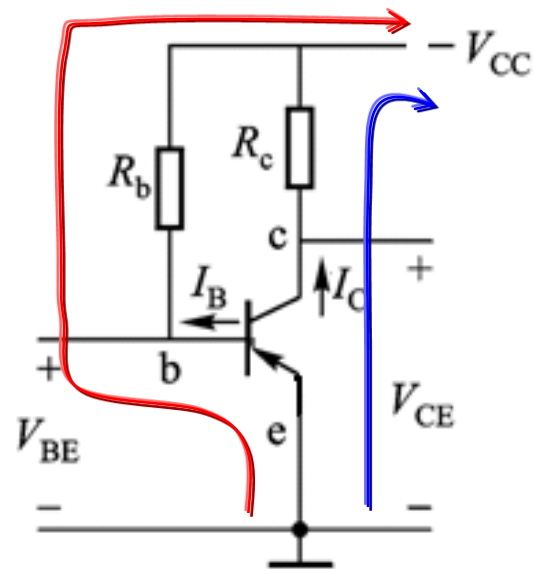
发射结正偏，
集电结反偏。

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

$$I_C = \beta I_B = \beta \times \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b}$$

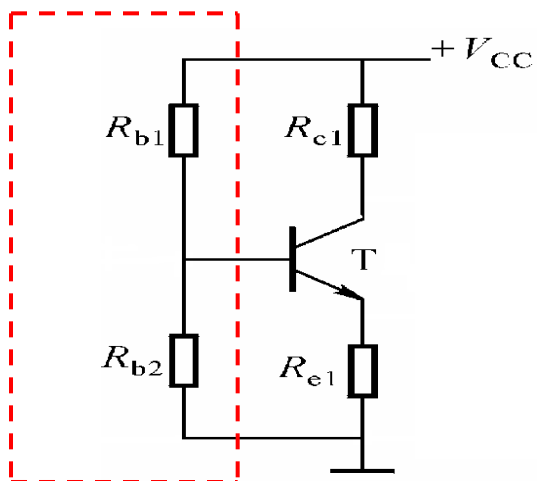
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c > V_{ces}$$

确保了器件工作在放大状态



PNP?

❖具有工作点稳定的基极偏置电路



电路同样能保证 J_E 正偏, J_C 反向偏置。

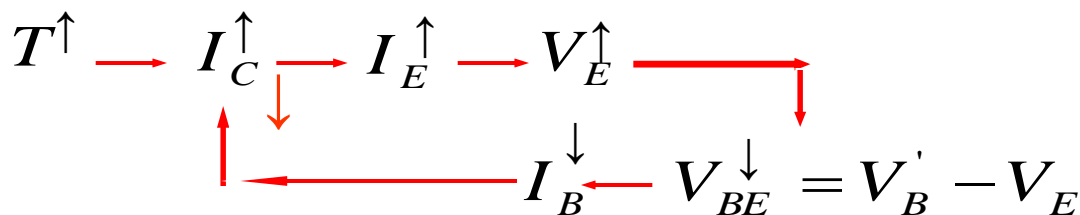
其中: $V'_b = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \times V_{CC}$ $R_b = R_{b1} // R_{b2}$

$$I_B = \frac{V'_b - V_{BE}}{R_b + (1 + \beta)R_{e1}}$$

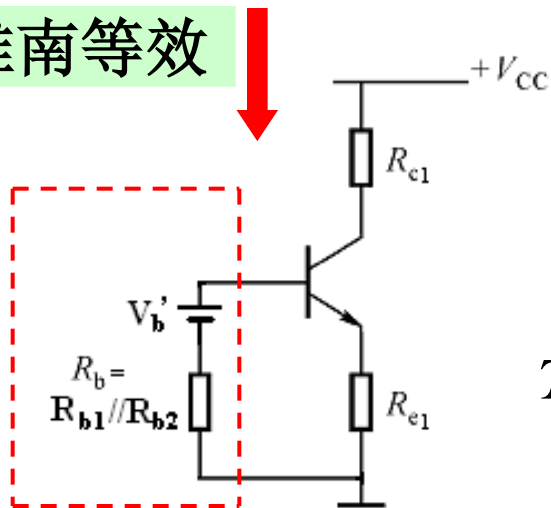
$$I_C = \beta I_B = \beta \times \frac{V'_b - V_{BE}}{R_b + (1 + \beta)R_{e1}}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_{c1} - I_E R_{e1} \approx V_{CC} - I_C (R_{c1} + R_{e1})$$

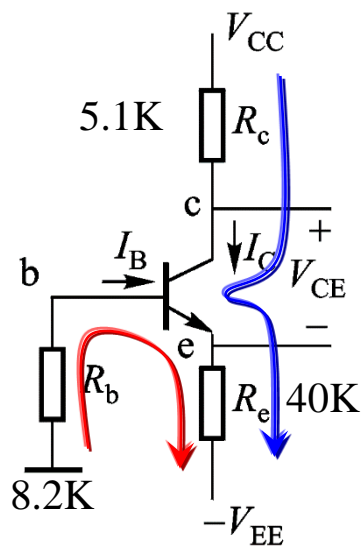
该电路能稳定静态工作点。



戴维南等效

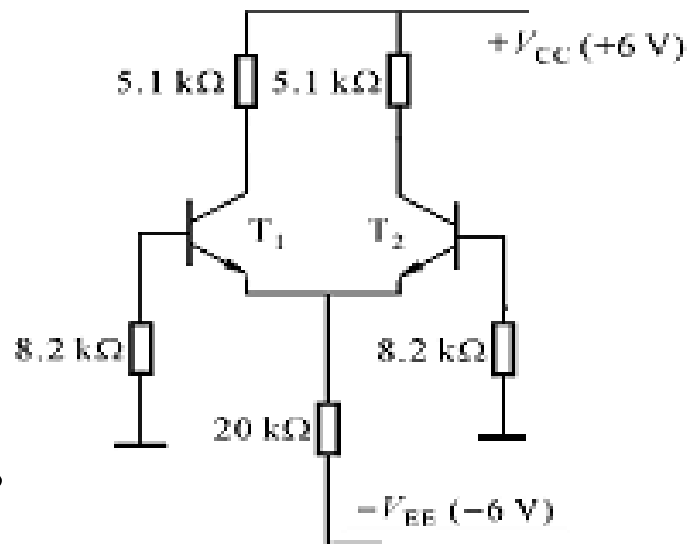


❖ 射极偏置电路



➤ 由于发射极接负电源，
所以发射极正向偏置；

➤ 集电极电阻较小，可以
满足 $(V_C > V_B)$ 的反偏要
求。



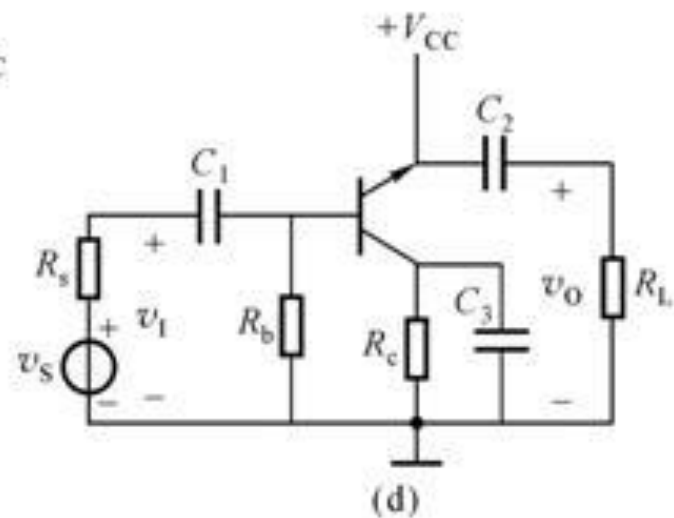
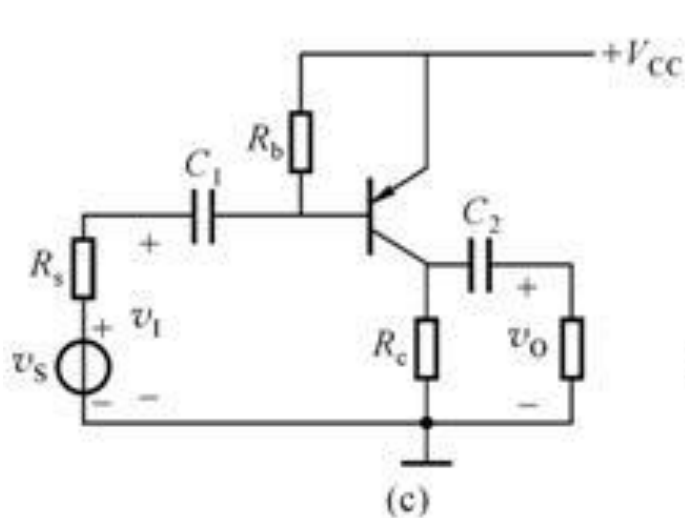
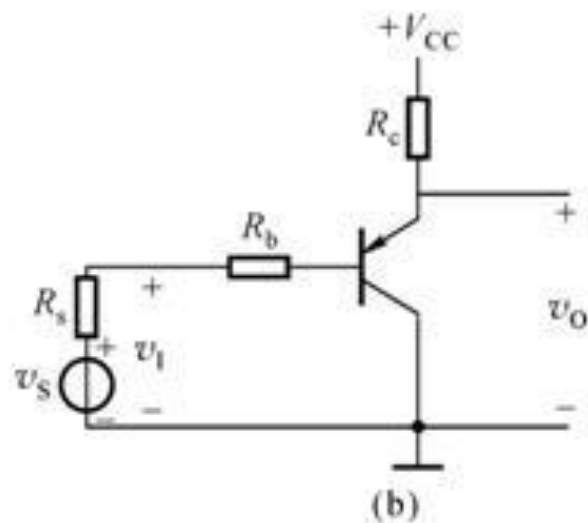
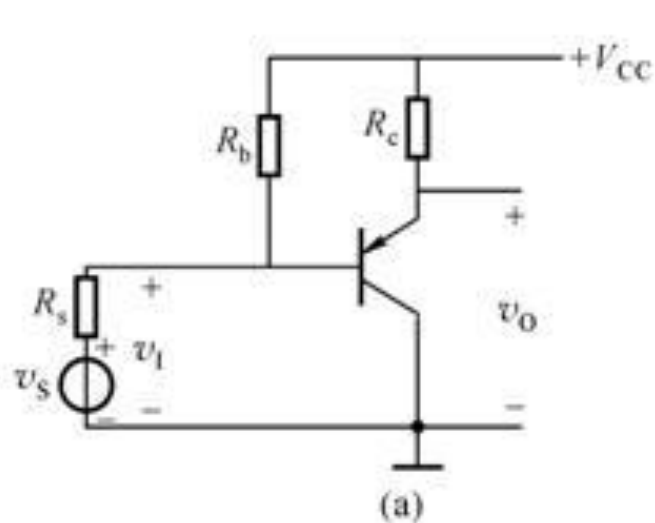
$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{8.2 + (1 + \beta) \times 40} = \frac{5 - 0.7}{8.2 + 51 \times 40} \approx 2.1 \mu A$$

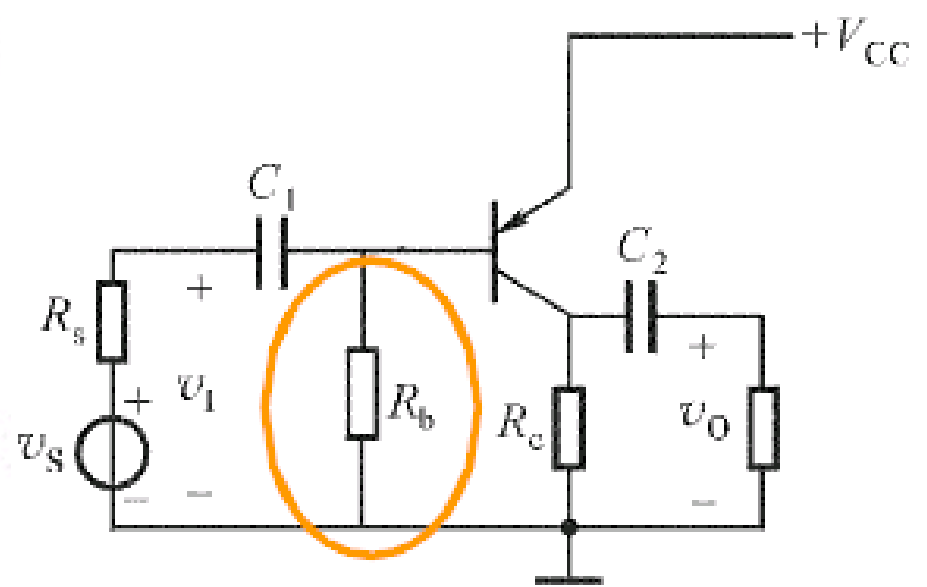
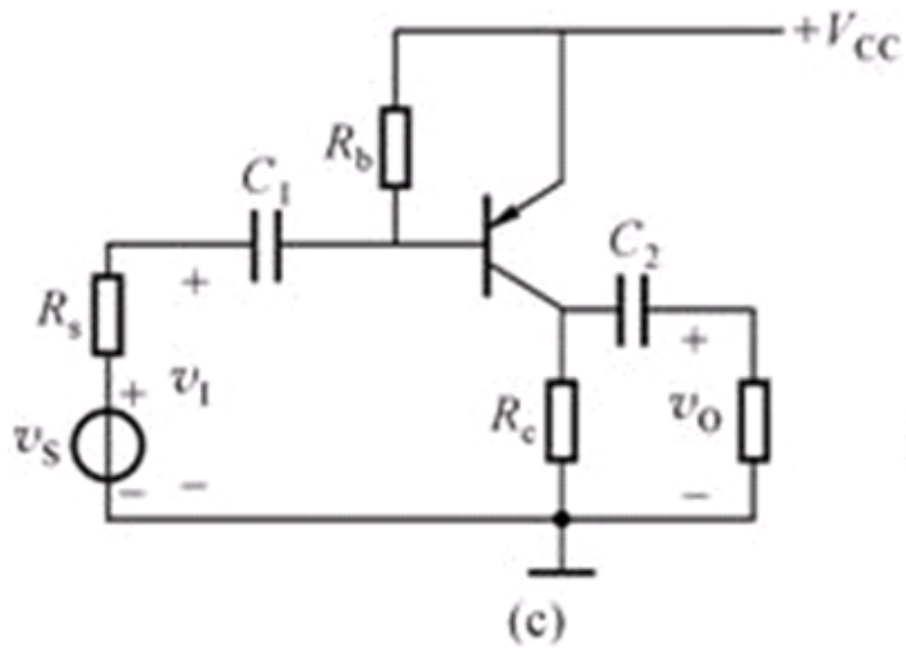
$$I_C = \beta I_B = 0.105 mA$$

$$V_E = -V_{BE} - I_B \times 8.2 = -0.7 - 2.1 \times 8.2 \approx -0.7 V$$

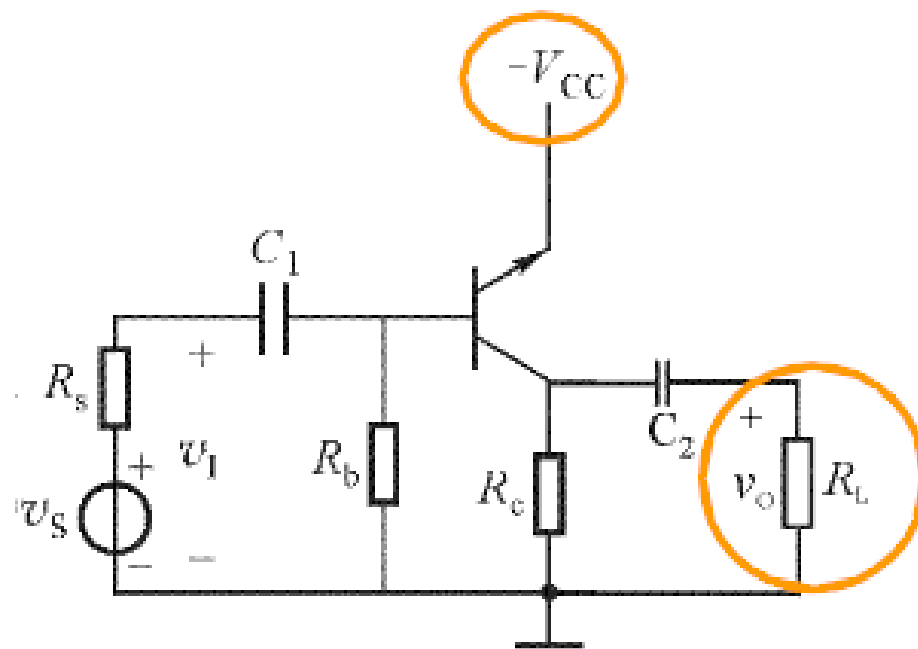
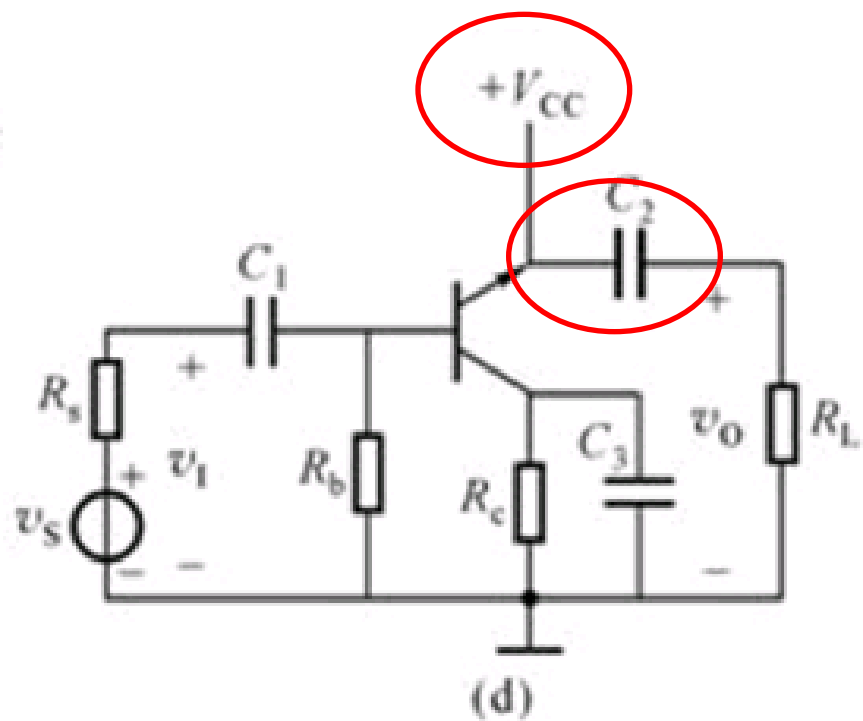
$$V_{CE} = V_{CC} - I_{C1} \times 5.1 - V_E = 6 - 0.105 \times 5.1 - (-0.7) = 6.16 V$$

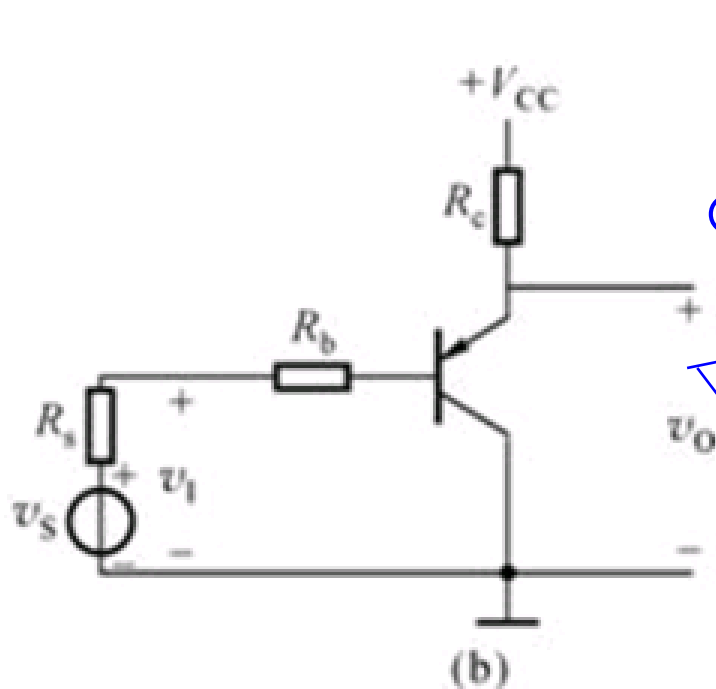
2.1.4 下列电路能否正常放大信号，改错





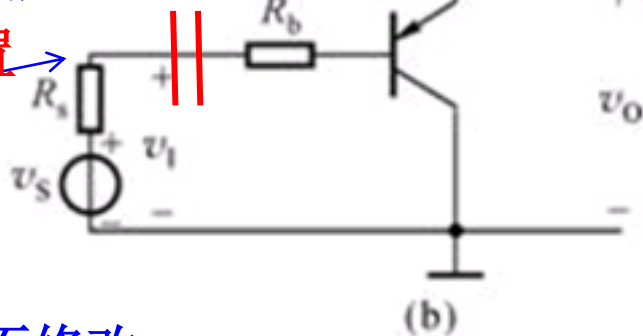
无基极偏置电流， R_b 接电源一端应改为接地





①改成电容耦合

无基极偏置

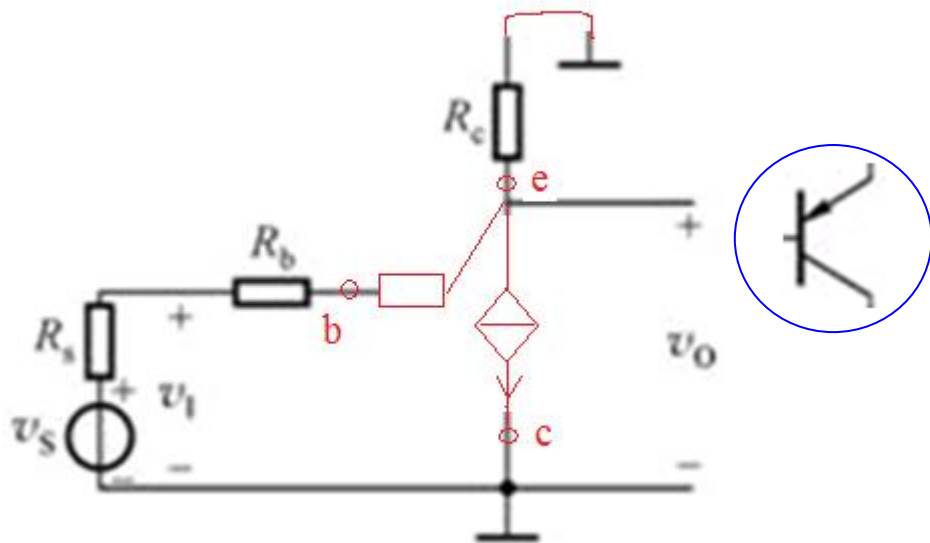
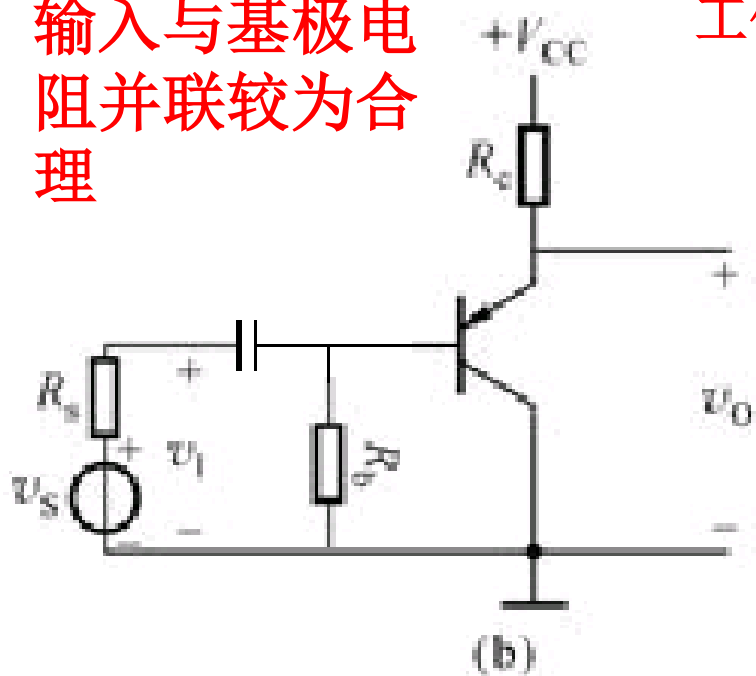


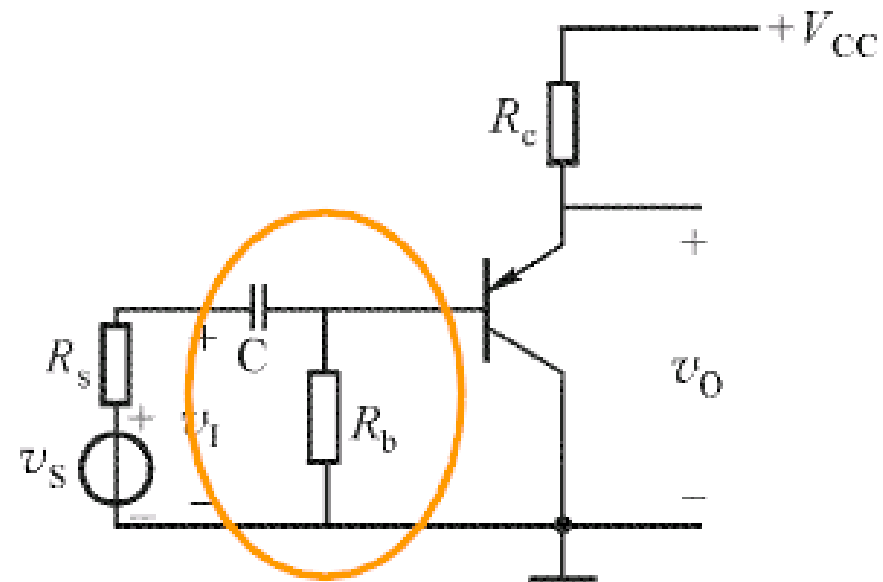
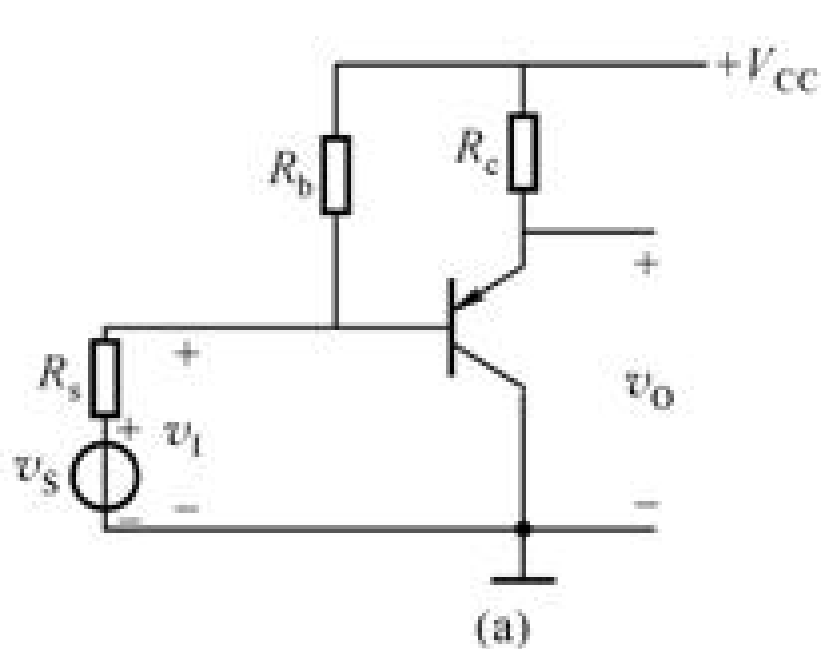
②不修改

理论上可以，实际工作效果不好！

输入与基极电阻并联较为合理

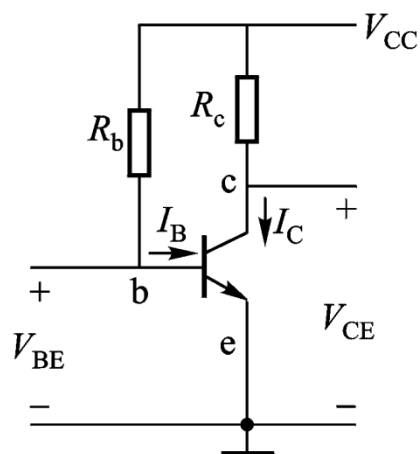
工作点可以、输入输出ok，动态时输入信号衰减大



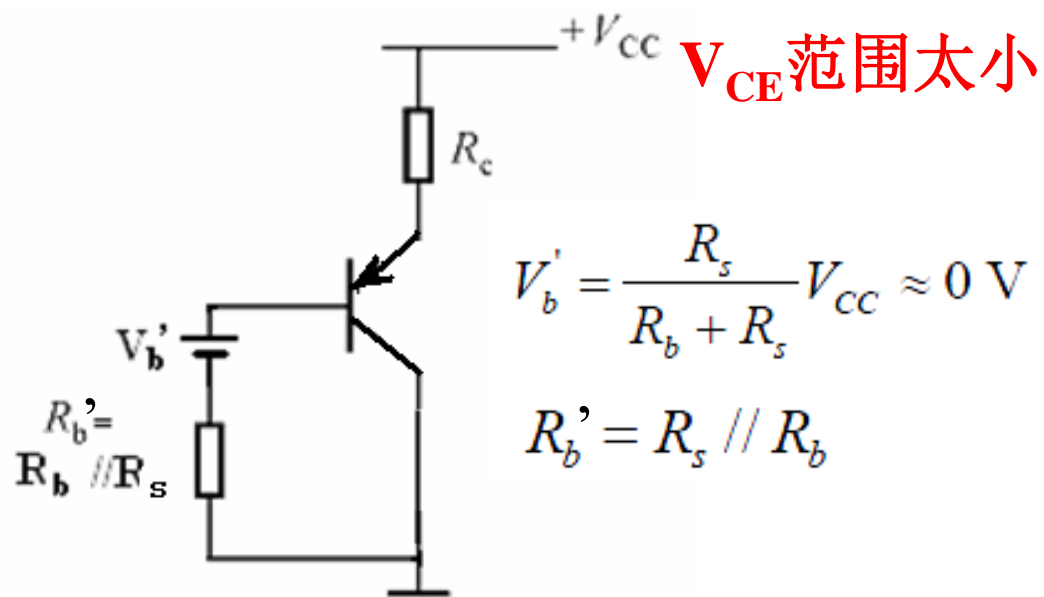


①改成电容耦合

无基极偏置电流， R_b 接电源端应改为接地



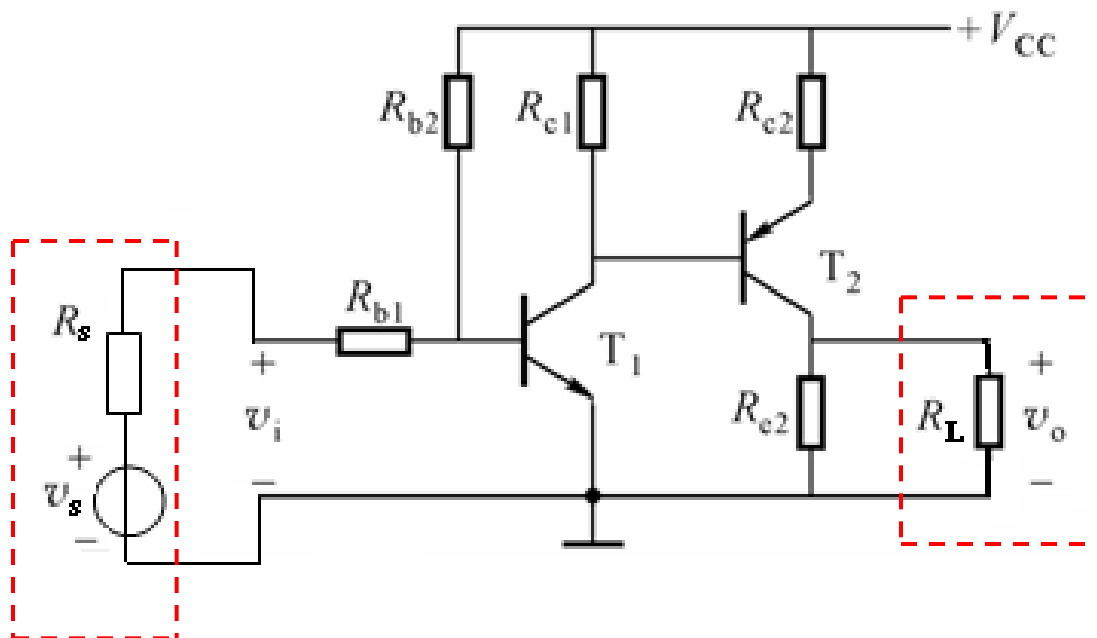
②不修改



2、信号输入和输出电路

输入信号能顺畅、无损失地加到放大器的输入端，并不影响电路的直流偏置。

❖ 直接耦合



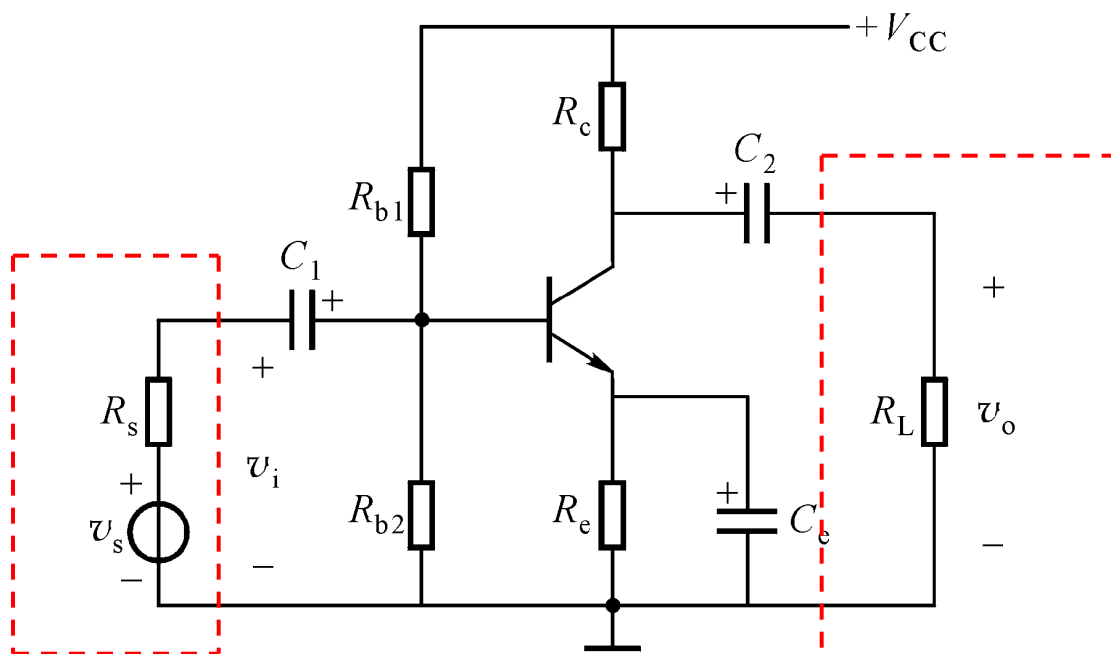
优点

低频特性好，可以放大变化缓慢或直流信号，易于集成化。

缺点

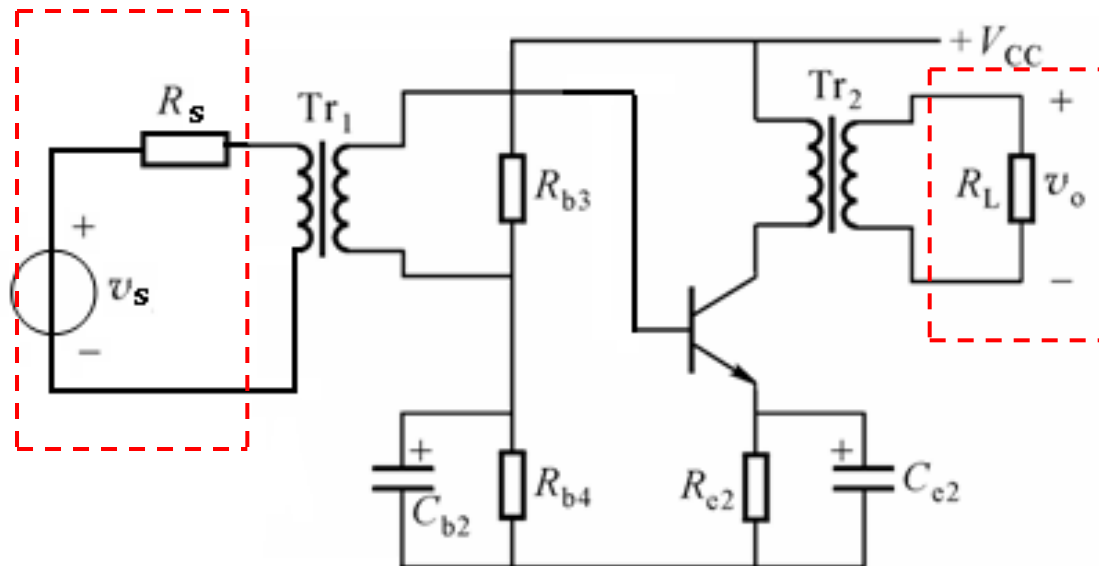
信号源影响静态工作点，分析、设计和调试较困难；在多级中还存在零点漂移问题。

❖ 阻容耦合



电路简单, 又不影响静态工作状态。但要放大一定频率的信号时, 耦合电容器容量应取得较大。

❖ 变压器耦合



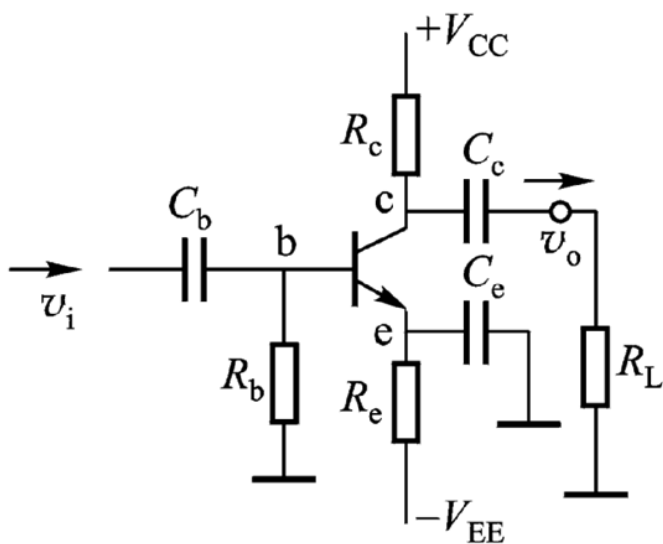
优点是各级静态工作点互不影响，能实现阻抗变换。
缺点是频率特性不好，且非常笨重。

3、放大电路的组态

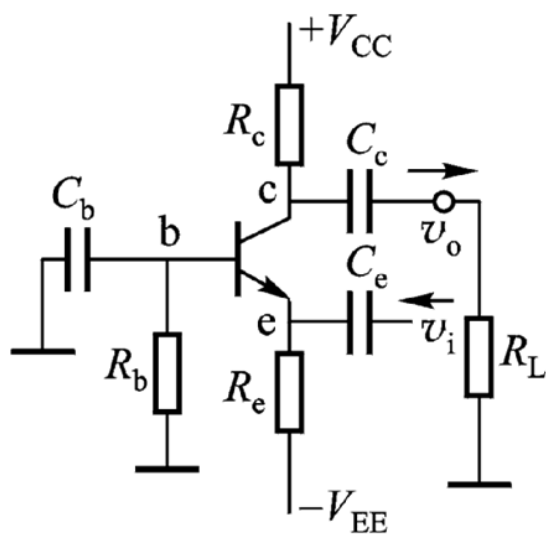
根据输入信号的注入点和输出信号的取出点，放大电路可以构成三种组态。

输入： 只能将基极b和发射极e作为输入，集电极c不能作输入。

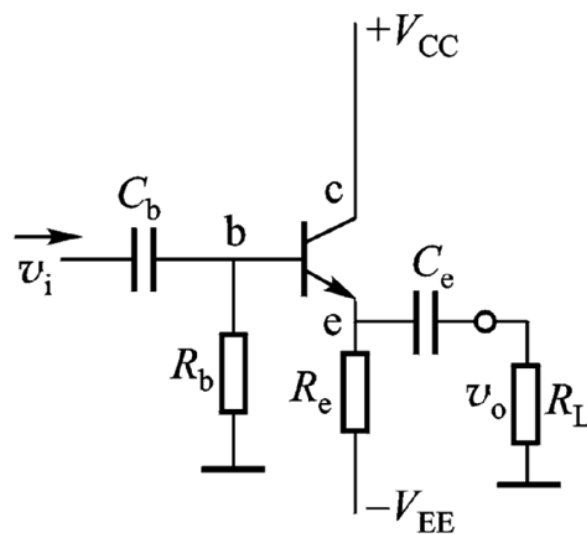
输出： 只能是集电极c 和发射极e作为输出，基极b不能作输出。



共射



共基



共集

4、直流通路和交流通路

➤直流通路的画法:

输入信号只考虑直流成分; $v_i = 0$ 称静态, 求静态工作点:
电路中保留恒压源、恒流源; I_{BQ} I_{CQ} V_{BEQ} V_{CEQ}
电容开路处理;
电感线圈短路处理 (或考虑其直流电阻)。

➤交流通路的画法:

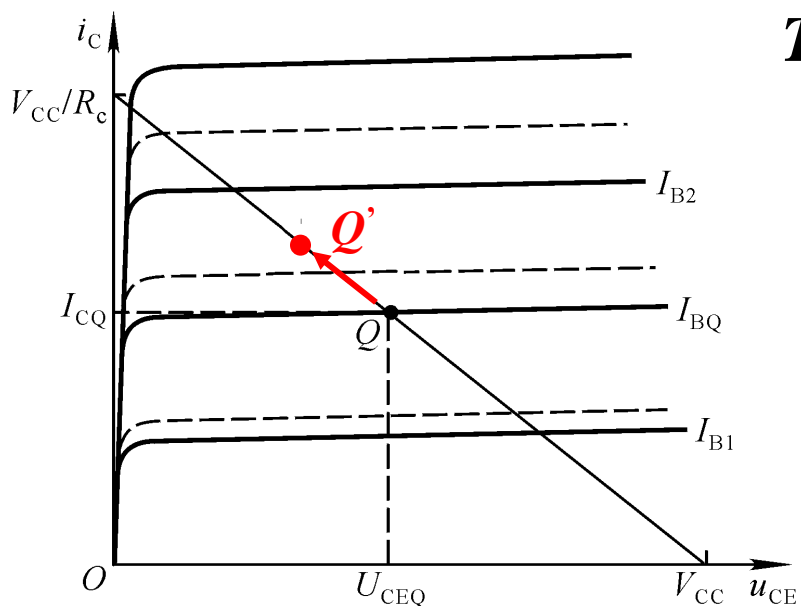
输入信号只考虑交流成分;
电路中恒压源、恒流源分别作短路、开路处理;
电容 (容值较大时) 作短路处理;
电感线圈作开路处理 (或考虑其交流阻抗)。

\dot{A}_v R_i R_o f_L f_H v_i 单独作用下的电流、电压通路, 用来求放大电路的技术指标。

二、静态工作点的稳定

- 1、温度对静态工作点的影响
- 2、静态工作点稳定的典型电路
- 3、稳定静态工作点的方法

1、温度对静态工作点的影响



$$T (^\circ \text{C}) \rightarrow \beta \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow Q'$$

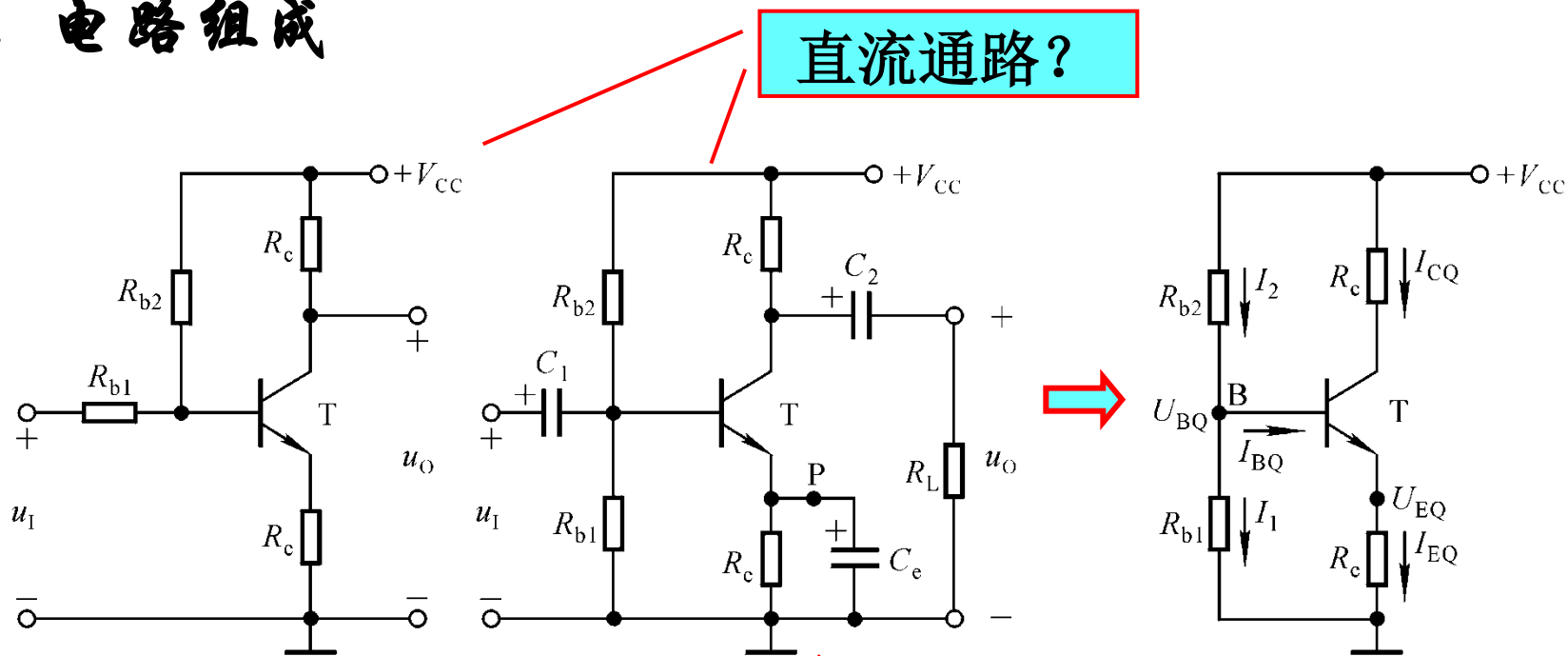
$I_{CEO} \uparrow$
若 U_{BEQ} 不变 $I_{BQ} \uparrow$

若温度升高时要 Q' 回到 Q ,
则只有减小 I_{BQ}

所谓 Q 点稳定, 是指 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 在温度变化时基本不变,
这是靠 I_{BQ} 的变化得来的。

2、静态工作点稳定的典型电路

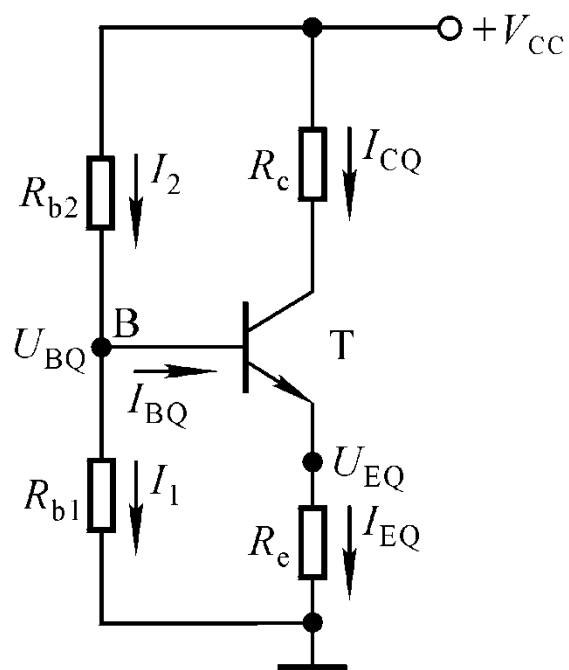
1. 电路组成



直流通路?

C_e 为旁路电容，在交流通路中可视为短路

2. 稳定原理



为了稳定 Q 点, 通常 $I_1 \gg I_B$, 即 $I_1 \approx I_2$; 因此

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

基本不随温度变化。

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

设 $U_{BEQ} = U_{BE} + \Delta U_{BE}$, 若 $U_{BQ} - U_{BE} \gg \Delta U_{BE}$, 则 I_{EQ} 稳定。

前提条件: $R_{b1} // R_{b2} \ll (1 + \beta)R_e$?

R_e 的作用

$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow$ (U_B 基本不变) \rightarrow

关于反馈的一些概念:

将输出量通过一定的方式引回输入回路
施称为反馈。

直流通路中的反馈称为直流反馈。

反馈的结果使输出量的变化减小的称为负反馈，反之称为正反馈。

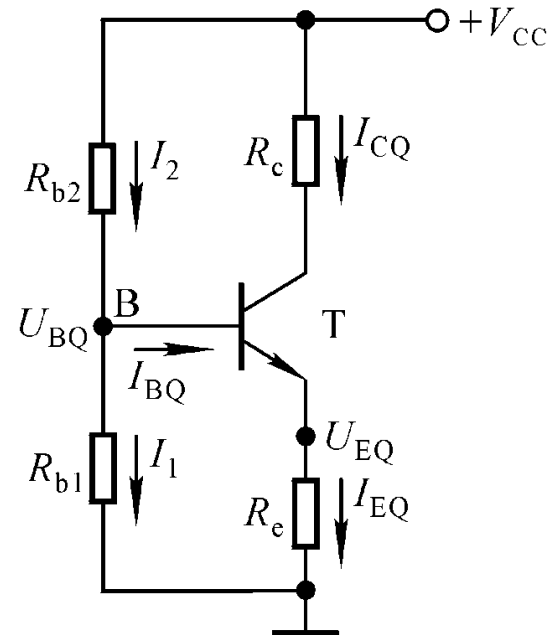
I_C 通过 R_e 转换为 ΔU_E 影响 U_{BE}

温度升高 I_C 增大，反馈的结果使之减小

R_e 起直流负反馈作用，其值越大，反馈越强， Q 点越稳定。

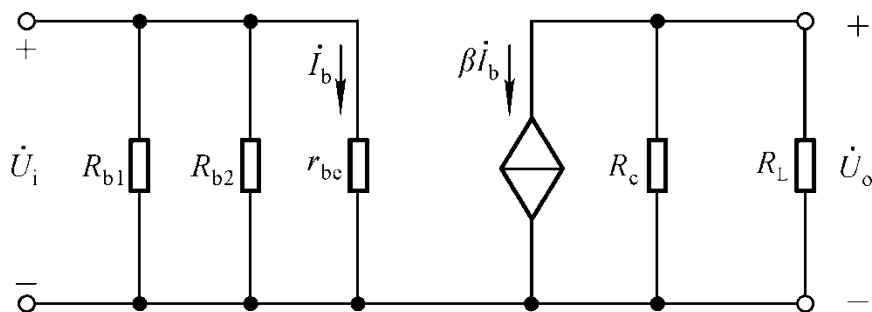
R_e 有上限值吗？

不能进入饱和区



4. 动态分析

有旁路电容 C_e 时:



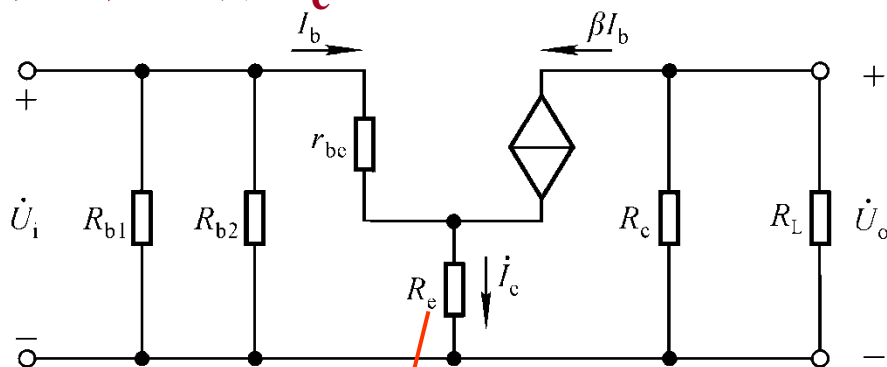
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

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

$$R_o = R_c$$

如何提高电压放大能力?

无旁路电容 C_e 时:

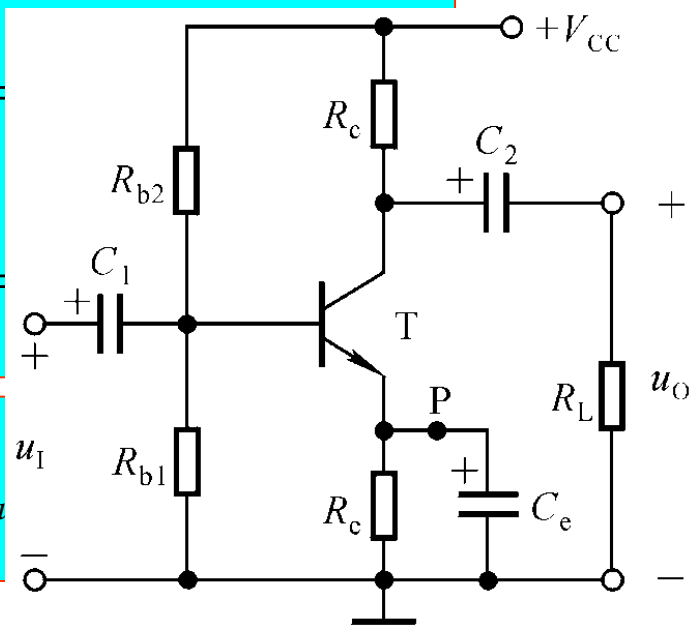


$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_e]$$

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

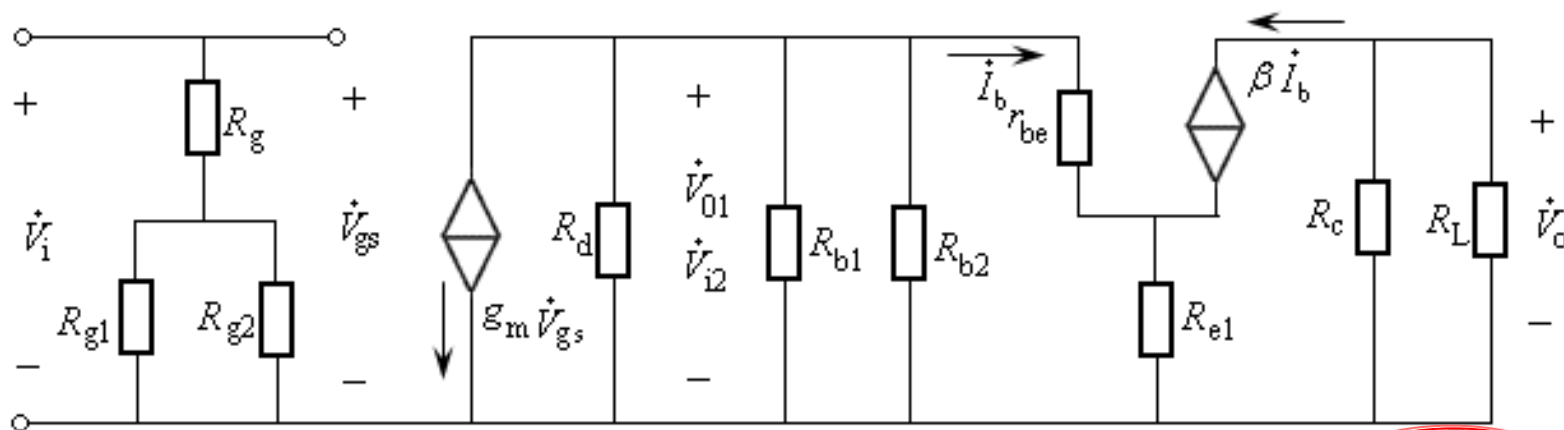
利?弊?

若 $(1 + \beta)R_e \gg r_{be}$, 则 A_u



(5) 当加大输入信号时，

思路：应从第2级的工作点出发，
分别估算出向截止方向和向饱和
方向的可能幅度。 (为什么?)



若出现截止失真： $V_{om}^+ \approx I_{CQ} \cdot R_L' = 1.25 \times (3 // 3) = 1.875 \text{ V}$

若出现饱失真： 先出现截止失真，最大输出不失真电压幅度为

$$V_{om}^- = (V_{CEQ} - V_{CES}) \frac{R_L'}{R_{e1} + R_L'} = (8.625 - 0.7) \frac{1.5}{0.1 + 1.5} = 7.3 \text{ V}$$

含 R_e 共射放大器最大不失真输出电压估算原则:

斜率: $1/(R_c + R_{e1} + R_{e2})$

直流负载线

交流负载线

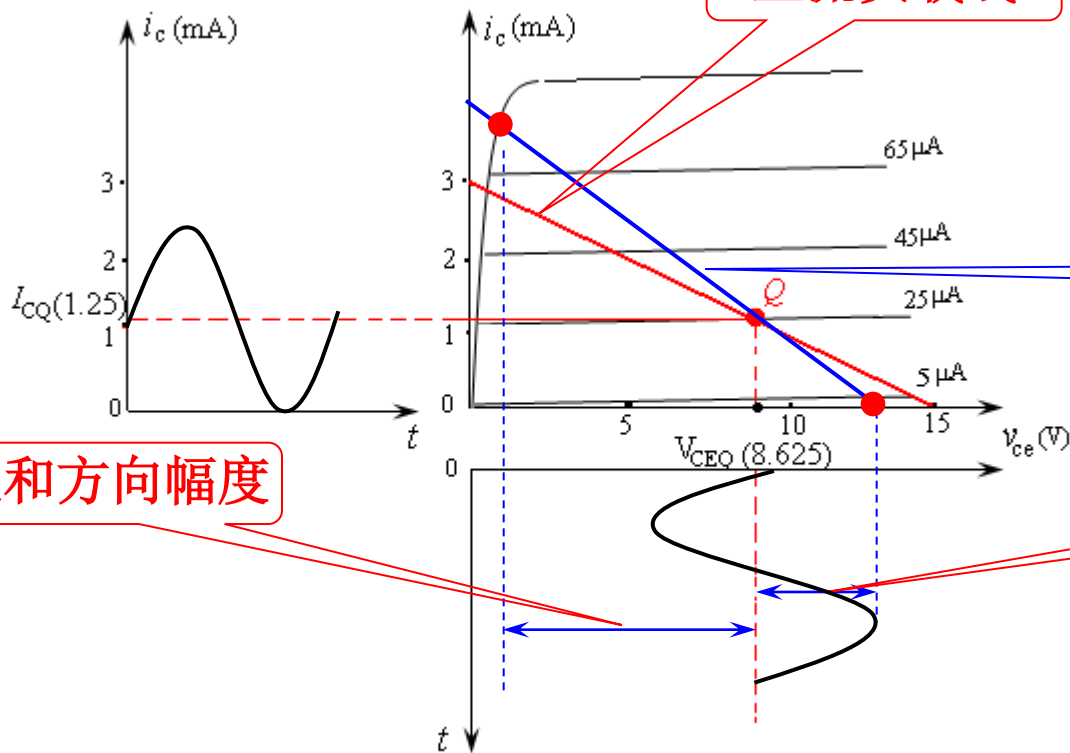
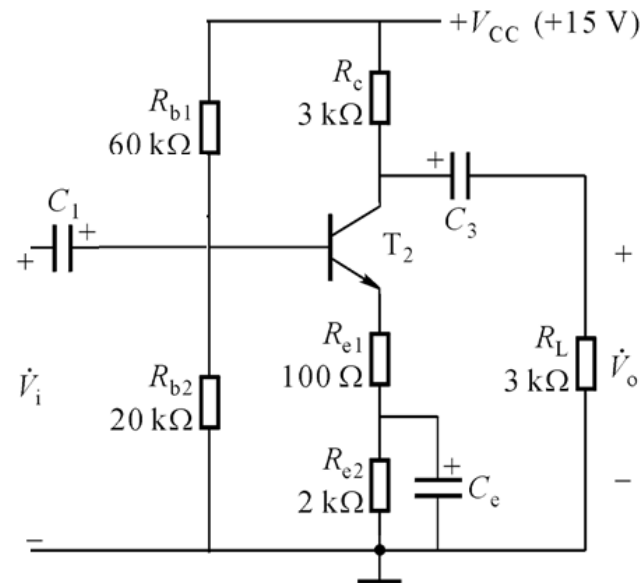
斜率: $1/(R'_L + R_{e1})$

截止方向幅度

饱和方向幅度

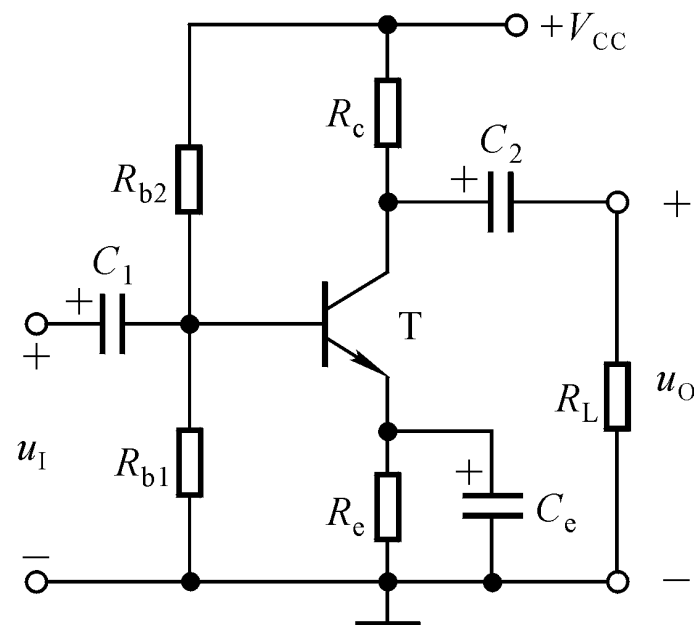
$$V_{om}^+ \approx I_{CQ} \cdot R'_L$$

$$V_{om}^- = (V_{CEQ} - V_{CES}) \frac{R'_L}{R_{e1} + R'_L}$$



3、稳定静态工作点的方法

- 引入直流负反馈
- 温度补偿：利用对温度敏感的元件，在温度变化时直接影响输入回路。
- 例如， R_{b1} 或 R_{b2} 采用热敏电阻。它们的温度系数？



$$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$
$$\quad \quad \quad \searrow \rightarrow R_{b1} \downarrow \rightarrow U_B \downarrow \nearrow$$

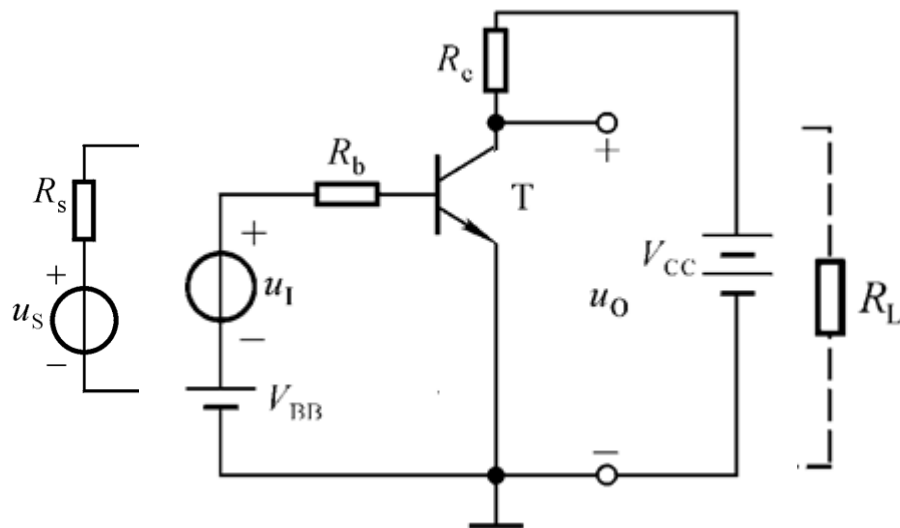
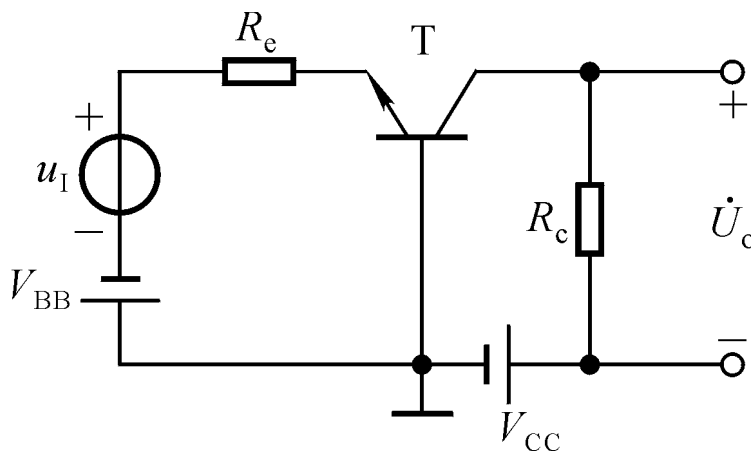
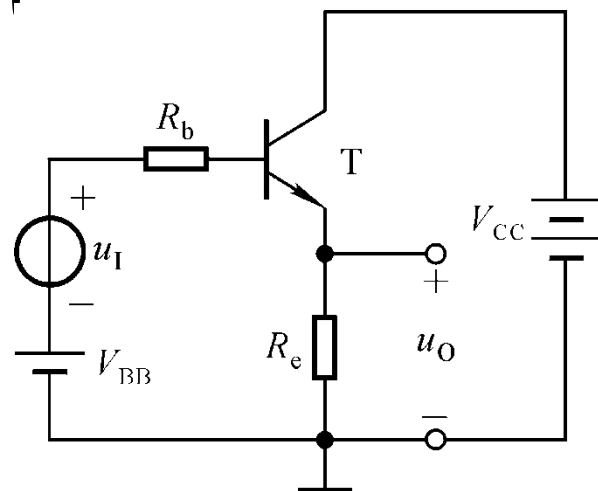
三、晶体管放大电路的分析

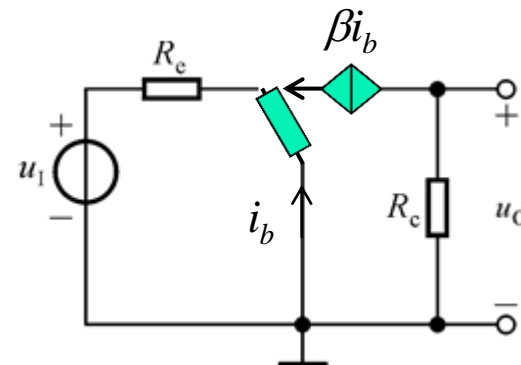
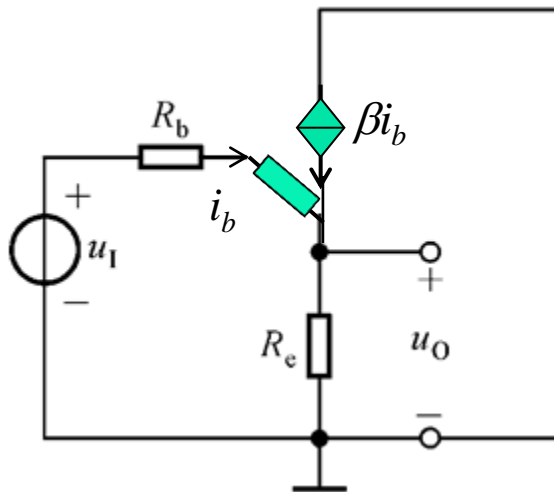
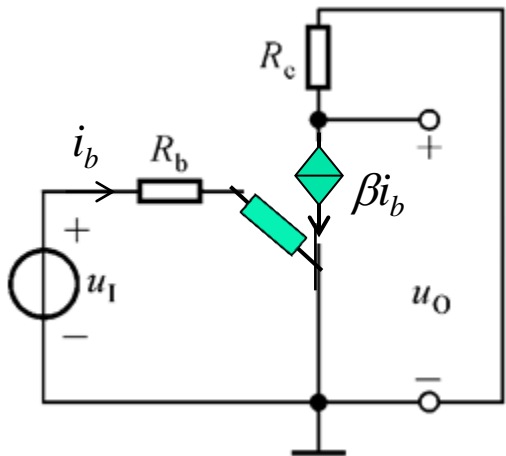
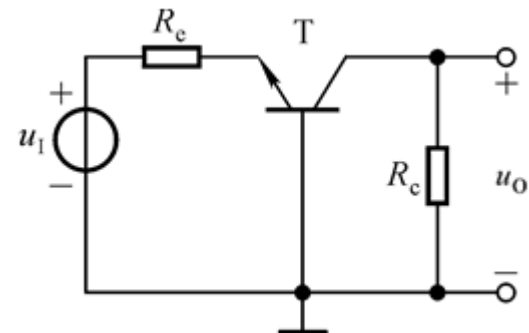
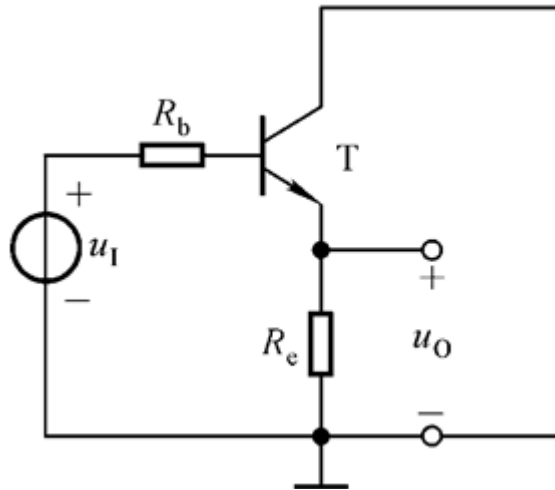
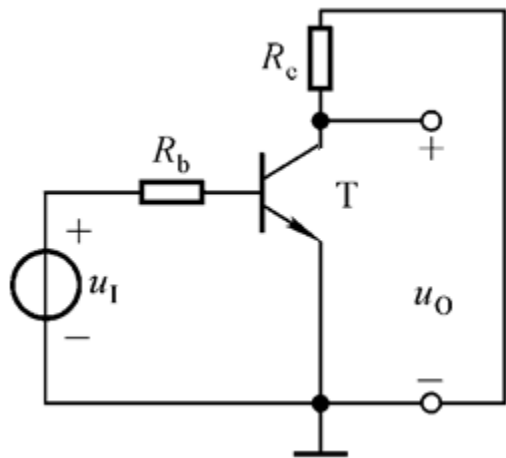
1、基本共射放大电路-**CE**

2、基本共集放大电路-**CC**

3、基本共基放大电路-**CB**

4、三种接法放大电路的比较





$$A_v = \frac{-\beta R_c}{R_b + r_{be}}$$

$$R_i = R_b + r_{be}$$

$$R_o = R_c$$

$$A_v = \frac{(1 + \beta) R_e}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

$$R_i = R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e$$

$$R_o = R_e // \frac{R_b + r_{be}}{1 + \beta}$$

$$A_v = \frac{\beta R_c}{R_e (1 + \beta) + r_{be}}$$

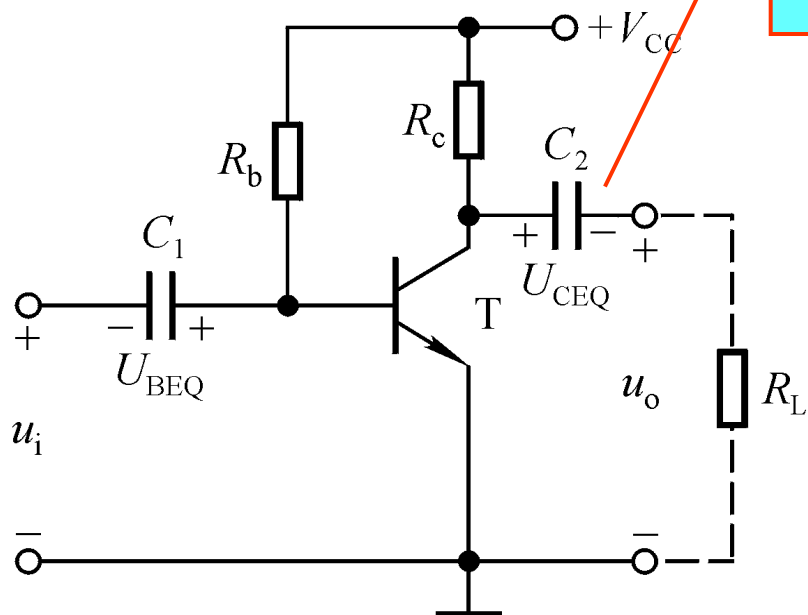
$$R_i = R_e + \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

$$R_o = R_c$$

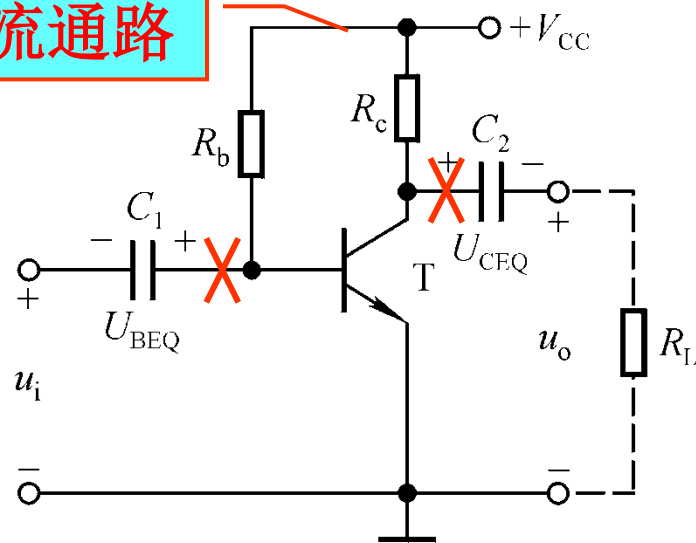


1. 基本共基放大电路

阻容耦合共射放大电路



直流通路



1. 静态分析

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

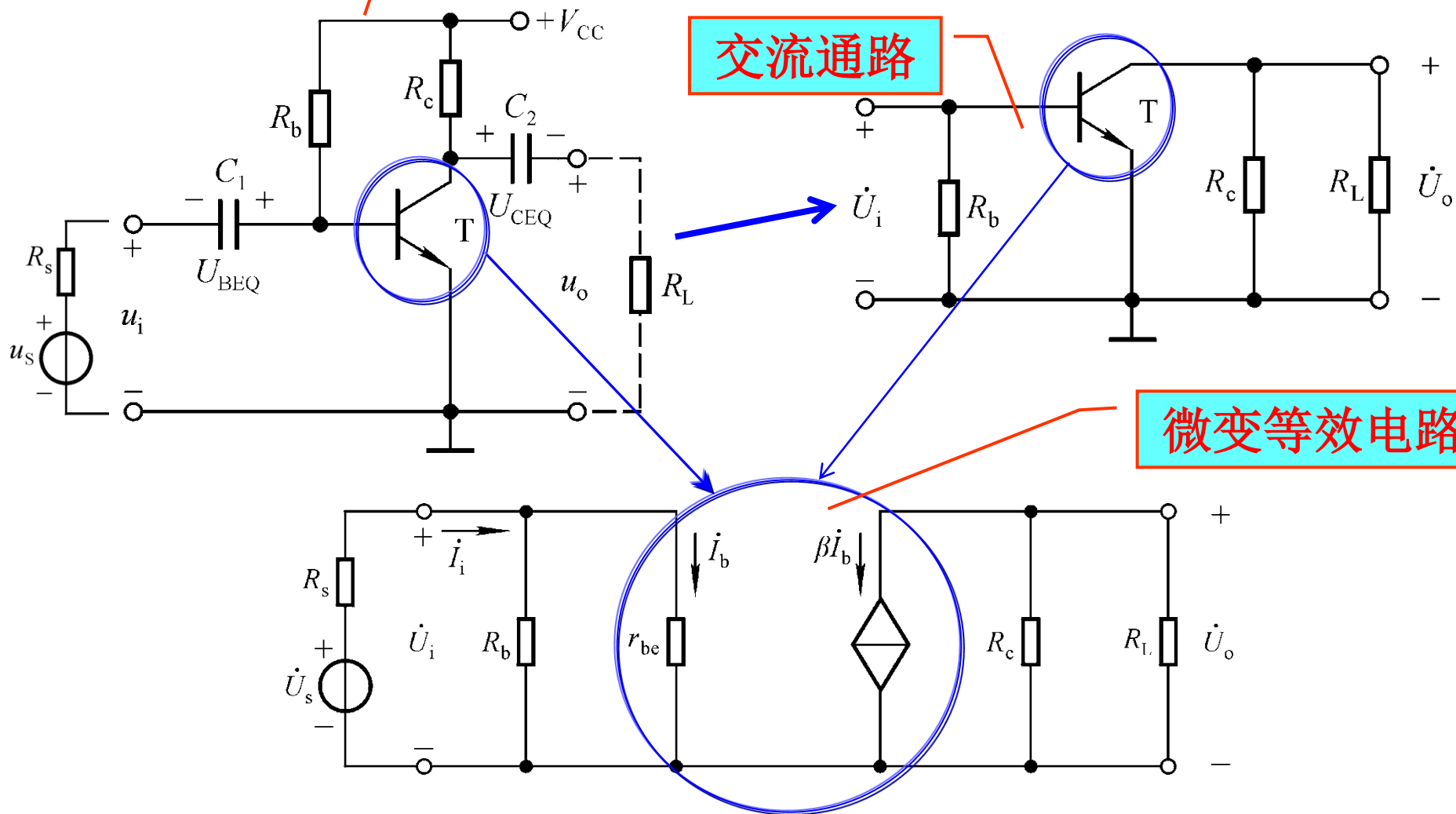
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

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

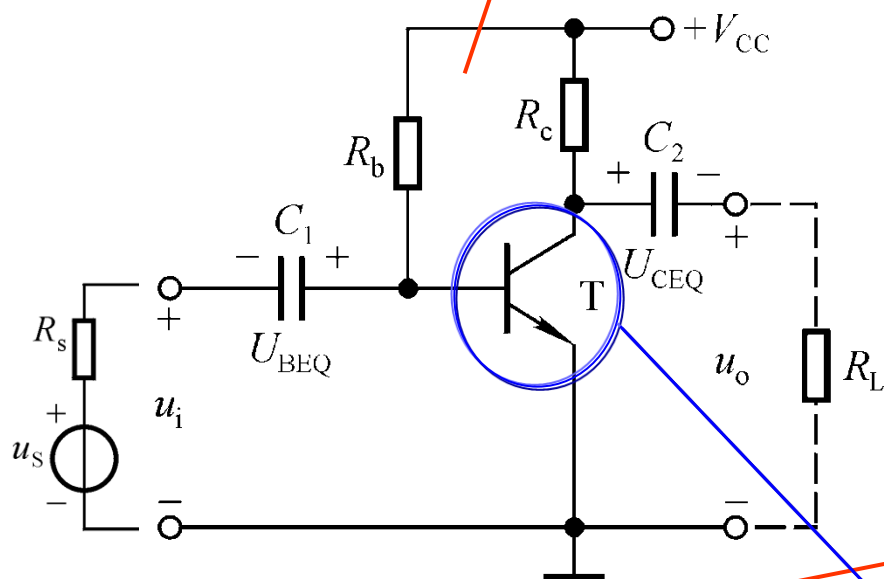
当 $V_{CC} \gg U_{BEQ}$ 时, $I_{BQ} \approx \frac{V_{CC}}{R_b}$

2. 动态分析:

阻容耦合共射放大电路



阻容耦合共射放大电路



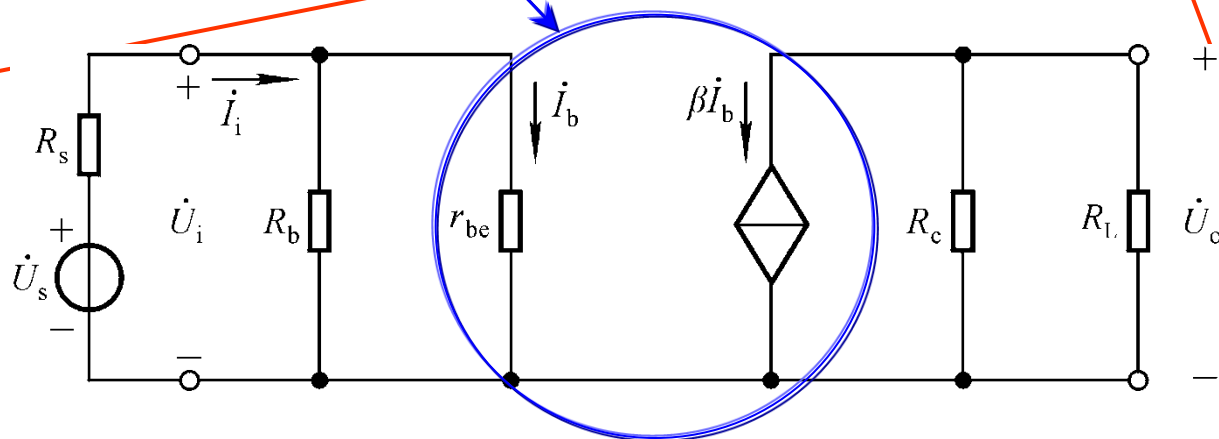
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_c (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

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

$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be}$$

$$R_o = R_c$$

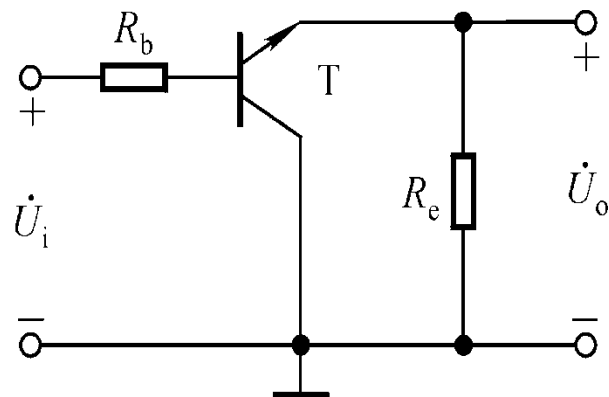
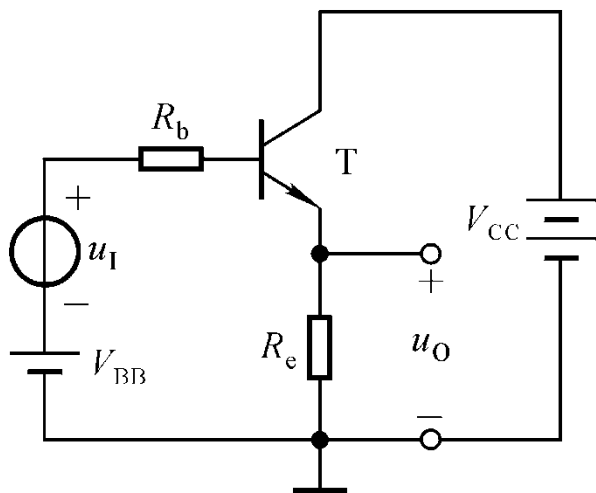
输入电阻中不应含有 R_s !



输出电阻中不应含有 R_L !

3. 特点：输出反向；电压放大倍数大；输入输出电阻居中！

2. 基本共集放大电路



1. 静态分析

$$V_{BB} = I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + I_{EQ}R_e$$

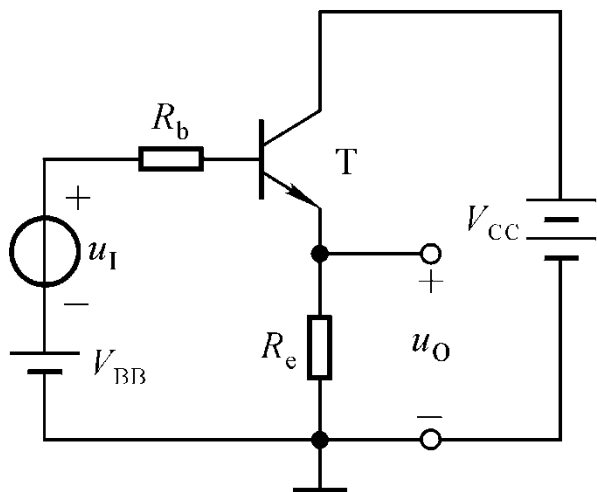
$$V_{CC} = U_{CEQ} + I_{EQ}R_e$$

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

$$I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ}$$

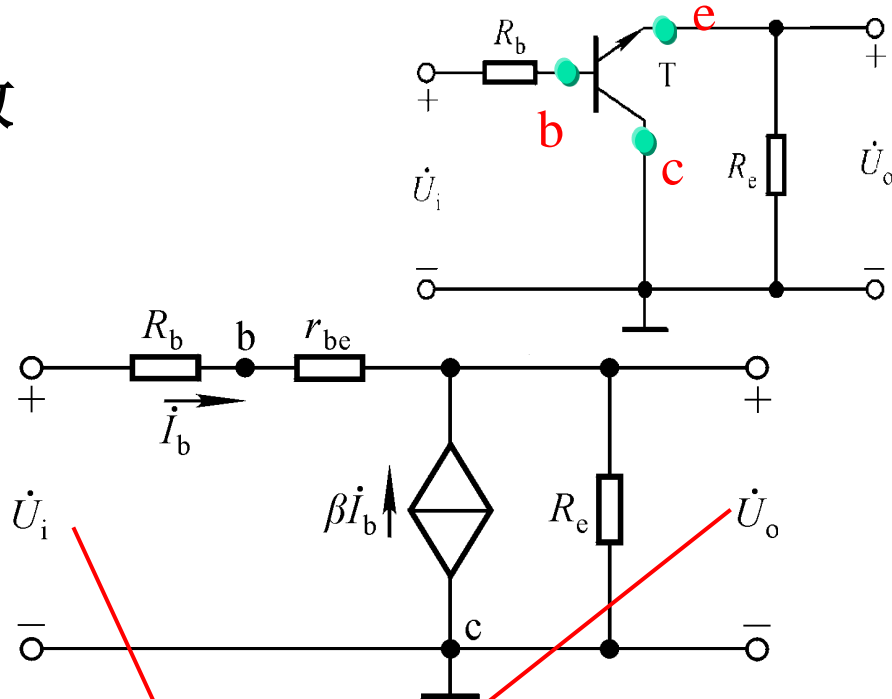
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}R_e$$

2. 动态分析：电压放大倍数



$$\begin{aligned}\dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_e R_e}{\dot{I}_b (R_b + r_{be}) + \dot{I}_e R_e} \\ &= \frac{(1 + \beta) R_e}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e}\end{aligned}$$

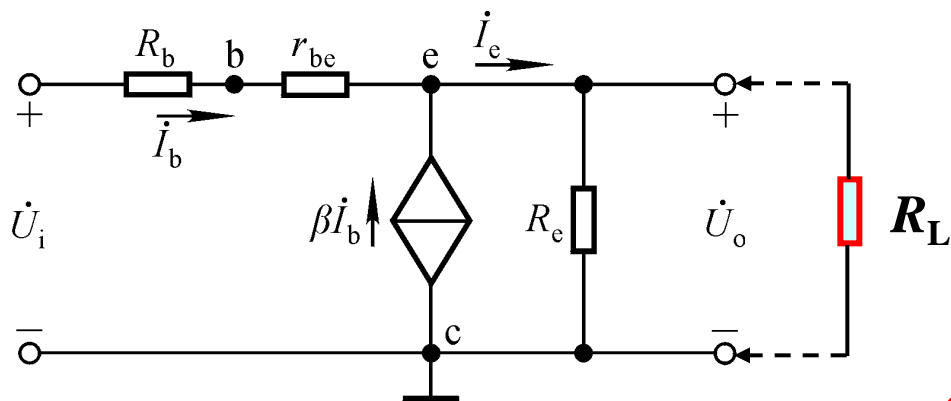
若 $(1 + \beta) R_e \gg R_b + r_{be}$, 则 $\dot{A}_u \approx 1$, 即 $U_o \approx U_i$ 。



$$U_o < U_i$$

故称之为射
极跟随器

2. 动态分析：输入电阻的分析



从基极看 R_e ，被增大到 $(1+\beta)$ 倍

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{I_b} = R_b + r_{be} + (1 + \beta)R_e$$

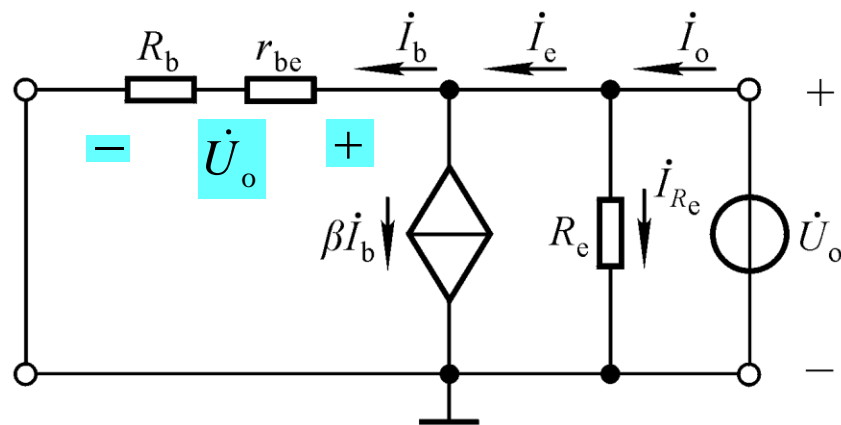
带负载电阻后

$$R_i = R_b + r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)$$

R_i 与负载有关！

2. 动态分析：输出电阻的分析

令 U_s 为零，保留 R_s ，在输出端加 U_o ，产生 I_o ， $R_o = U_o / I_o$ 。



R_o 与信号源内阻有关！

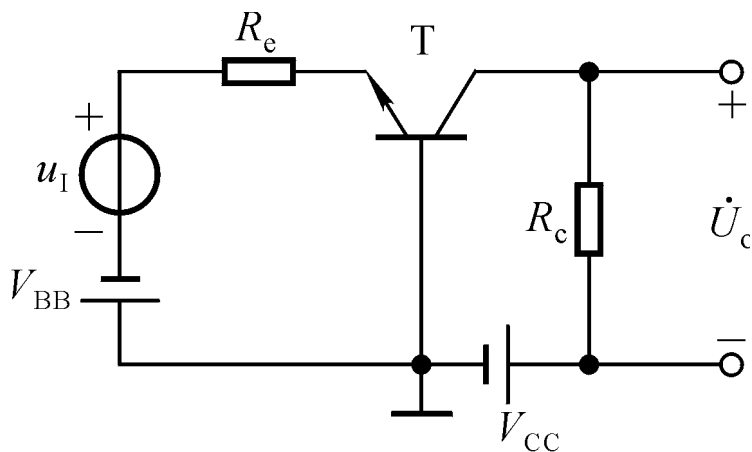
从射极看基极回路电阻，被减小到 $(1+\beta)$ 倍

$$\begin{aligned} R_o &= \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{I_{R_e} + I_e} \\ &= \frac{U_o}{\frac{U_o}{R_e} + (1+\beta)\frac{U_o}{R_b + r_{be}}} \\ &= R_e // \frac{R_b + r_{be}}{1+\beta} \end{aligned}$$

3. 特点：输入电阻大，输出电阻小；只放大电流，不放大电压；在一定条件下有电压跟随作用！

3、基本共基放大电路

1. 静态分析



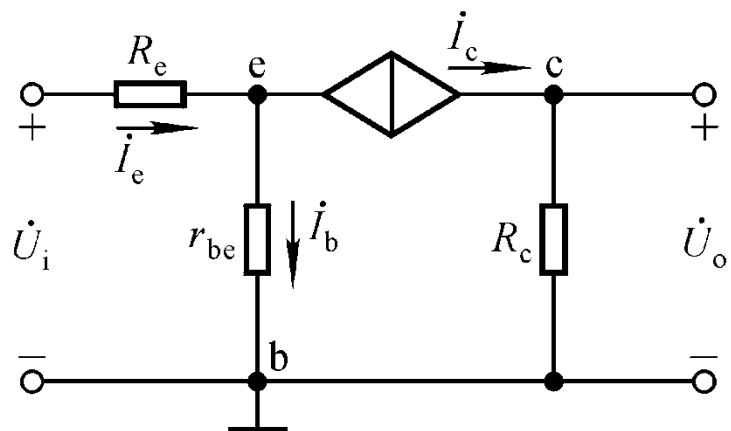
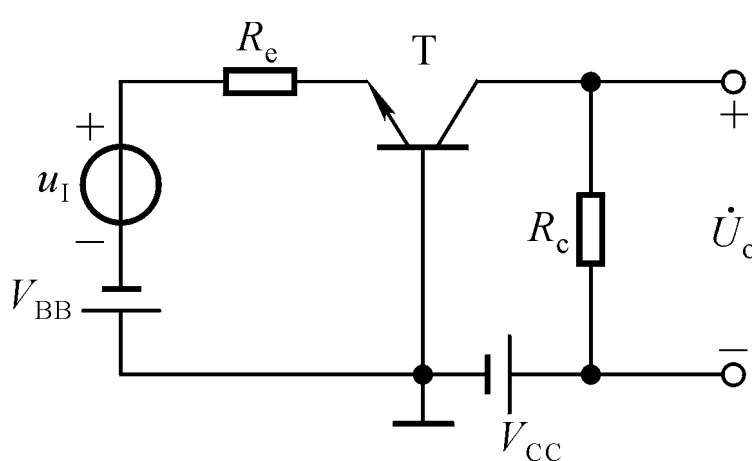
$$\begin{cases} U_{BEQ} + I_{EQ} R_e = V_{BB} \\ I_{CQ} R_e + U_{CEQ} - U_{BEQ} = V_{CC} \end{cases}$$

$$I_{EQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_e}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{EQ} R_c + U_{BEQ}$$

2. 动态分析



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_c R_c}{\dot{I}_e R_e + \dot{I}_b r_{be}} = \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

$$R_i = R_e + \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

$$R_o = R_c$$

3. 特点

输入电阻小，频带宽！只放大电压，不放大电流！

3、放大电路三种组态性能指标的比较

	电压增益	输入电阻	输出电阻	特点	用途
共射 (CE)	反相, 增益大	较大 (几千欧)	较大 (R_C)	既有电压放大作用 又有电流放大作用	应用广泛 中间级
共集 (CC)	同相, 近似为1	大	最小	输入电阻高 输出电阻低	阻抗变换、 电流放大
共基 (CB)	同相, 增益较大	最小 (几十欧)	较大 (R_C)	频率特性好	宽频或高频 放大电路

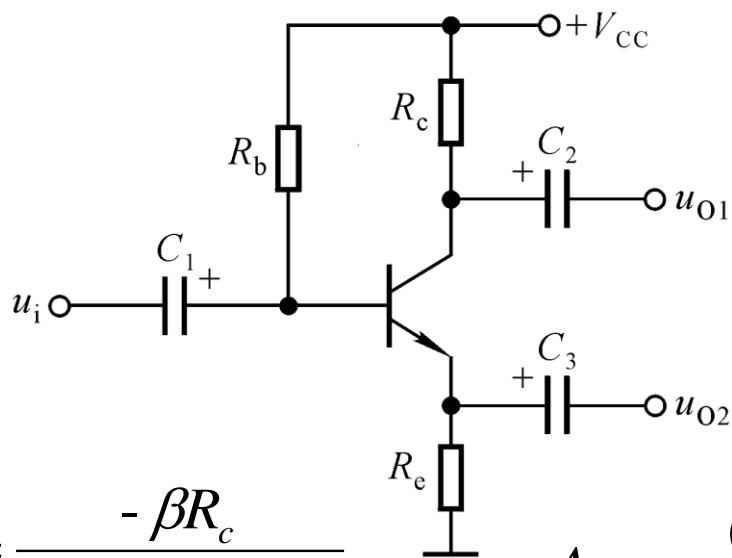
空载情况下
三种接法的比较:

接法	共射	共集	共基
A_u	大	小于1	大
A_i	β	$1 + \beta$	α
R_i	中	大	小
R_o	大	小	大
频带	窄	中	宽

讨论一：

图示电路为哪种基本接法的放大电路？它们的静态工作点有可能稳定吗？求解静态工作点、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的表达式。

接法	共射	共集	共基
输入	b	b	e
输出	c	e	c



$$A_1 = \frac{-\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$$

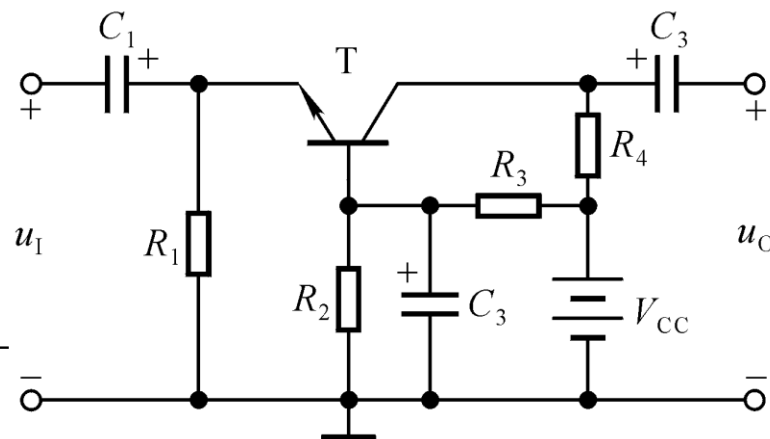
$$A_2 = \frac{(1 + \beta)R_e}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$$

$$R_i = R_b // (r_{be} + (1 + \beta)R_e)$$

$$R_o = R_c$$

$$R_i = R_b // (r_{be} + (1 + \beta)R_e)$$

$$R_o = R_e // r_{be} / (1 + \beta)$$



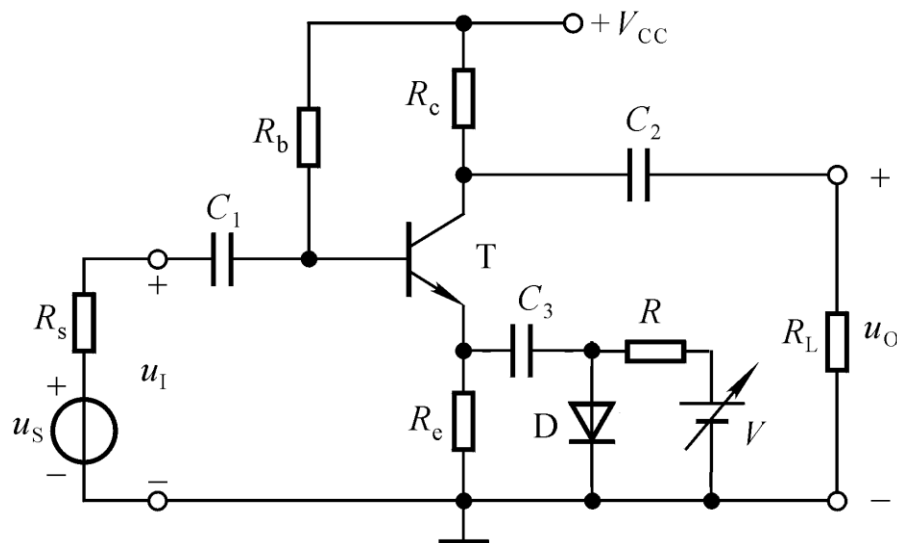
$$A_3 = \frac{\beta R_4}{r_{be}}$$

$$R_i = R_1 // r_{be} / (1 + \beta)$$

$$R_o = R_4$$

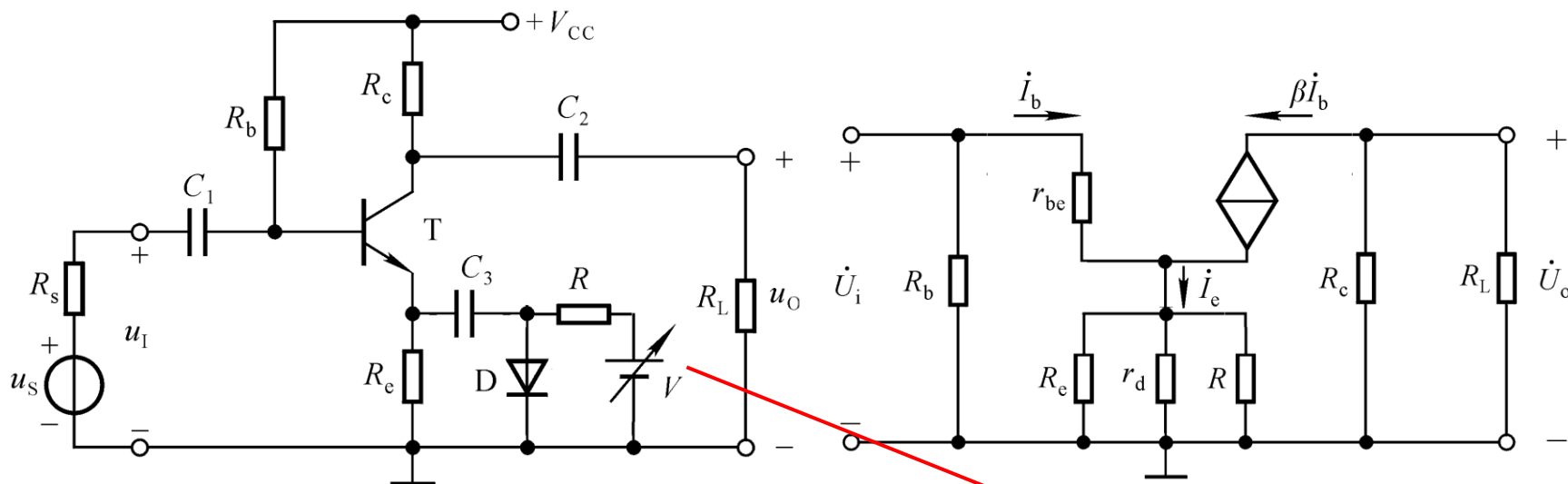
讨论二

电路如图，所有电容对交流信号均可视为短路。



1. Q 为多少？
2. R_e 有稳定 Q 点的作用吗？
3. 电路的交流等效电路？
4. V 变化时，电压放大倍数如何变化？

讨论二

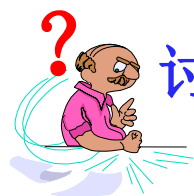


$$\dot{A}_u = - \frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e // r_d // R)}$$

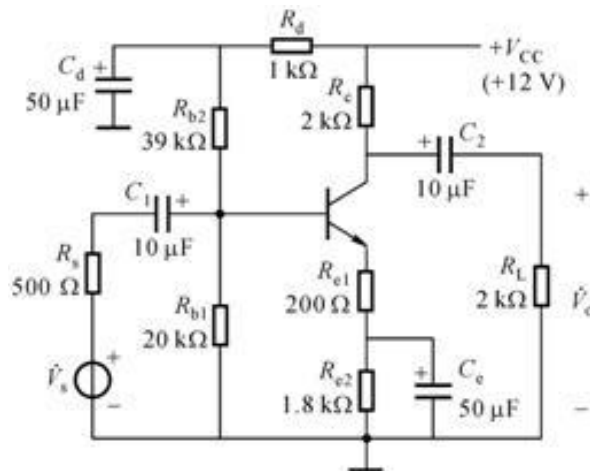
改变电压放大倍数

当 $R_e // R \gg r_d$ 时,

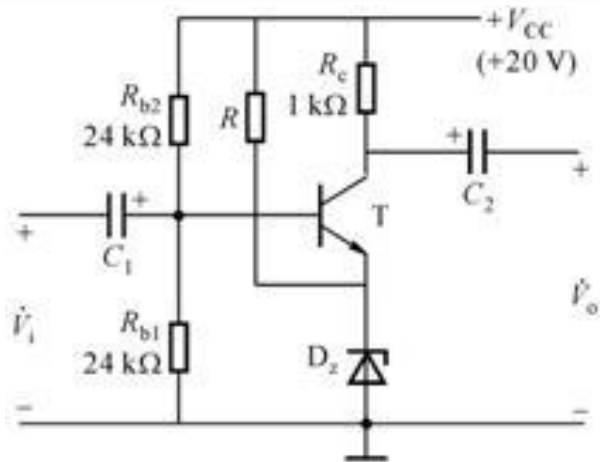
$$\dot{A}_u \approx - \frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)r_d}, \quad V \uparrow \rightarrow r_d \downarrow \rightarrow |\dot{A}_u| \uparrow$$



讨论 1.10 (3) 求电路的最大不失真输出电压幅值。



1.11 (5) 若 D_z 的极性接反, 电路能否正常放大? 试计算此时的静态工作点, 并定性分析 D_z 反接对 A_v 和 R_i 的影响。



作业

- 1.6, 7; 9, 10, 11 单管
- 1.5, 12, 13
- 1.14*, 15*, 16, 17 多级
- 1.22, 23, 24, 25 差分
- 1.28, 29, 30 频率特性
- 仿真 1.18, 19

四、场效应管放大电路

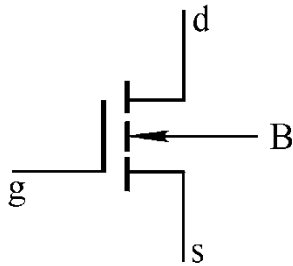
- 1、场效应管特性曲线（已讲）
- 2、场效应管放大电路静态工作点的设置方法（已讲）
- 3、场效应管放大电路的动态分析

1、场效应管特性曲线

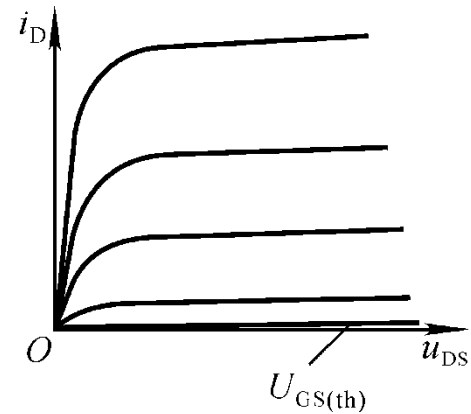
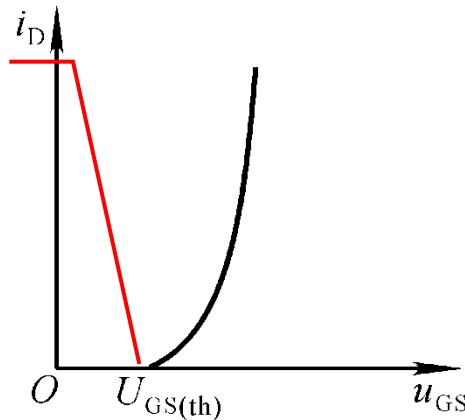
在恒流区时， $i_D = I_{D0} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$

式中 I_{D0} 为 $u_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时的 i_D

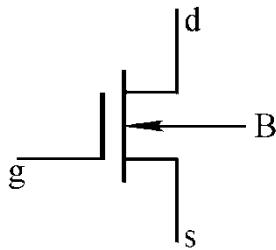
1) 增强型MOS管



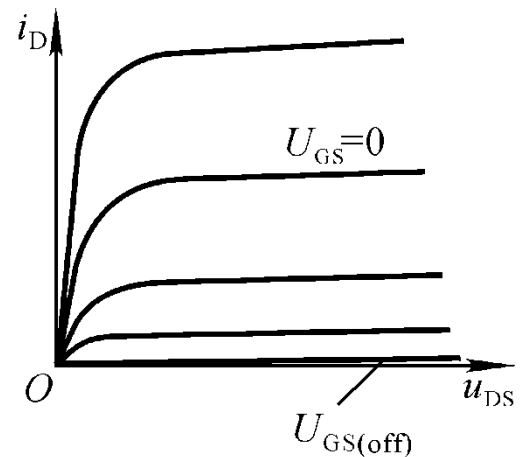
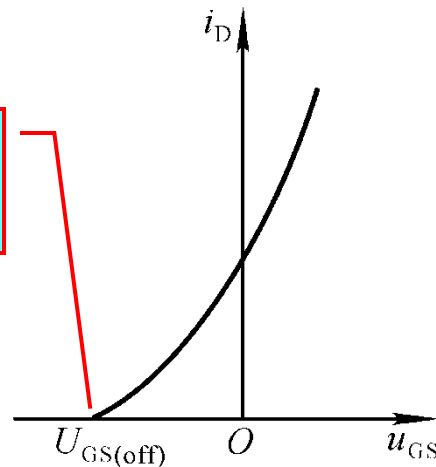
开启
电压



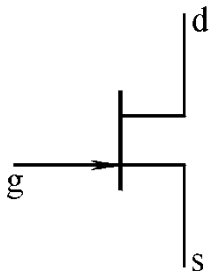
2) 耗尽型MOS管



夹断
电压

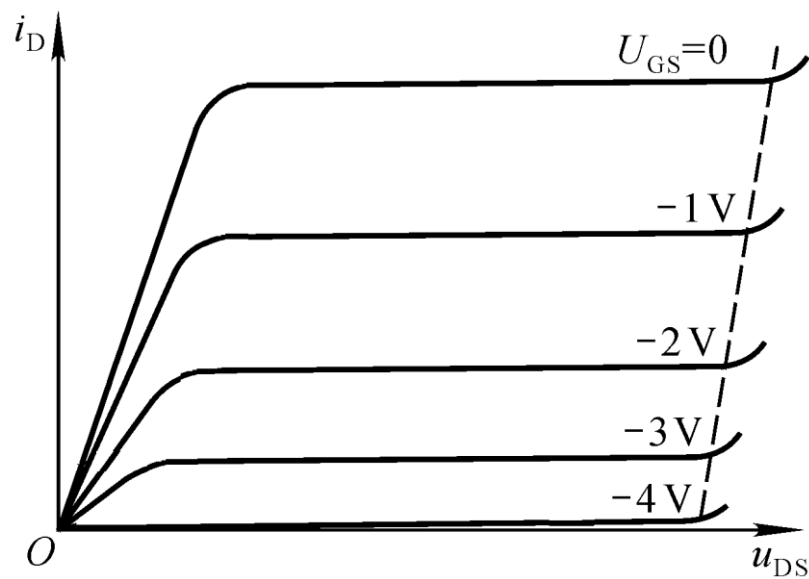
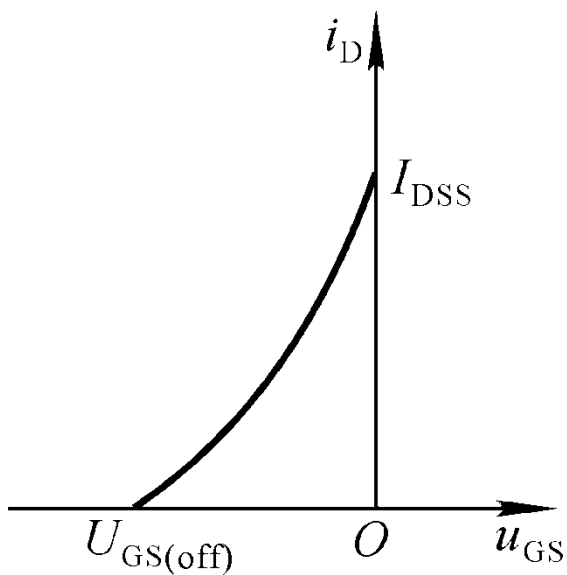


3) 结型场效应管



在恒流区时

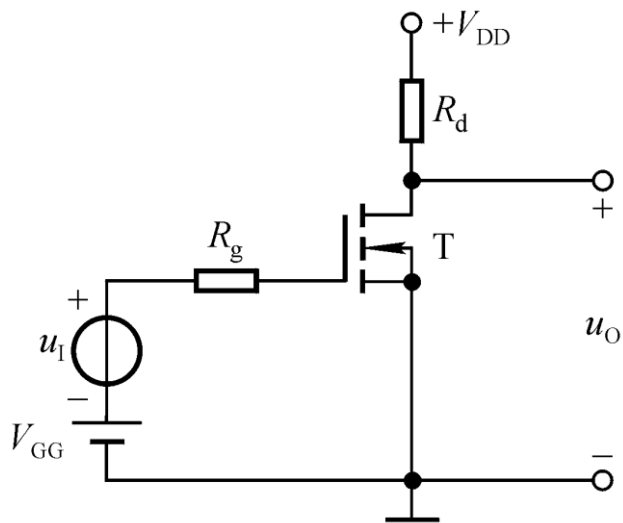
$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$



2、场效应管静态工作点的设置方法

1. 基本共源放大电路

根据场效应管工作在恒流区的条件，在g-s、d-s间加极性合适的电源

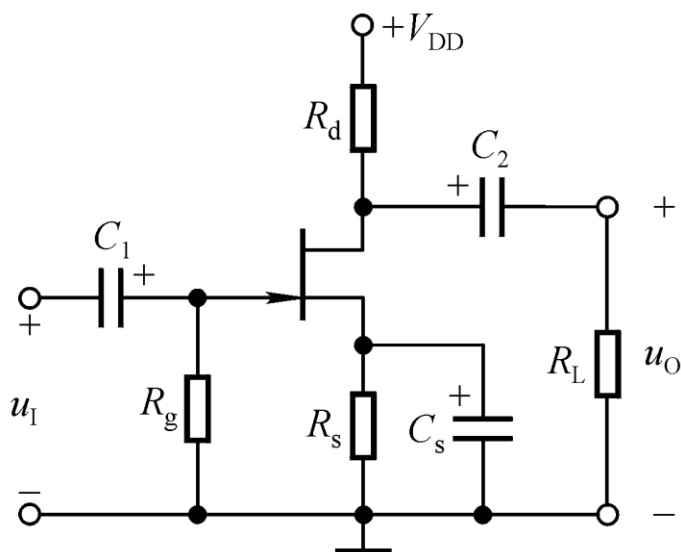


$$U_{GSQ} = V_{BB}$$

$$I_{DQ} = I_{DO} \left(\frac{V_{BB}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d$$

2. 自给偏压电路



$$U_{GQ} = 0, \quad U_{SQ} = I_{DQ} R_s$$
$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = -I_{DQ} R_s$$

由正电源获得负偏压
称为自给偏压

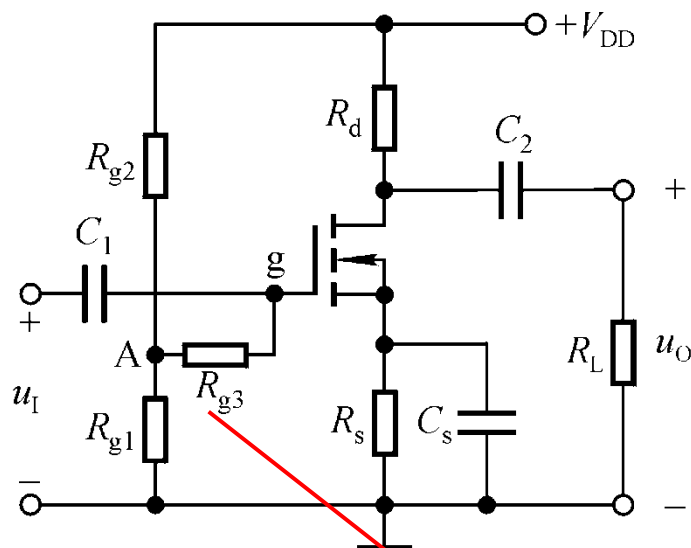
$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s)$$

哪种场效应管能够采用这种电路形式设置 Q 点？

3. 分压式偏置电路

即典型的 Q 点稳定电路



$$U_{GQ} = U_{AQ} = \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot V_{DD}$$

$$U_{SQ} = I_{DQ} R_s$$

$$I_{DQ} = I_{DO} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s)$$

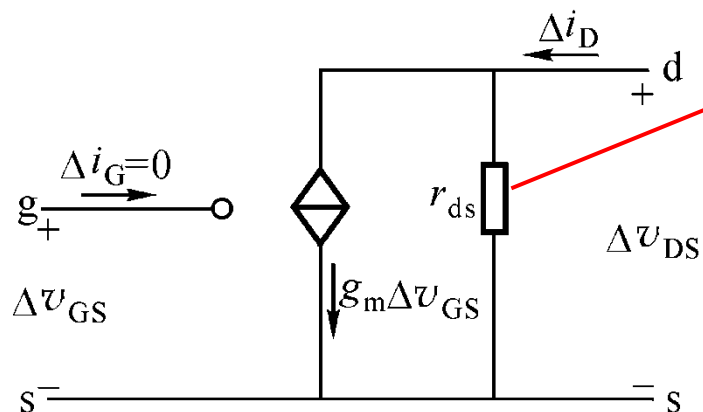
为什么加 R_{g3} ?其数值应大些小些?

哪种场效应管能够采用这种电路形式设置 Q 点?

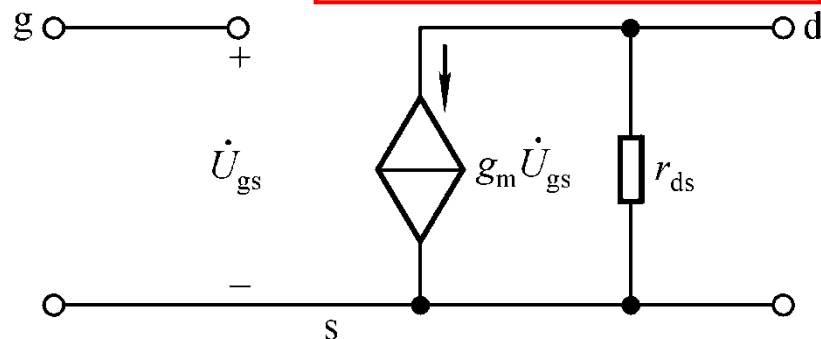
3、场效应管放大电路的动态分析

1. 场效应管的交流等效模型

与晶体管的 h 参数等效模型类比：



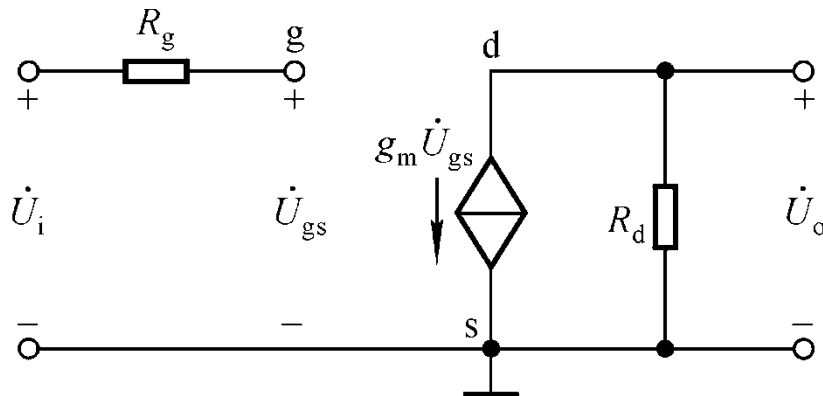
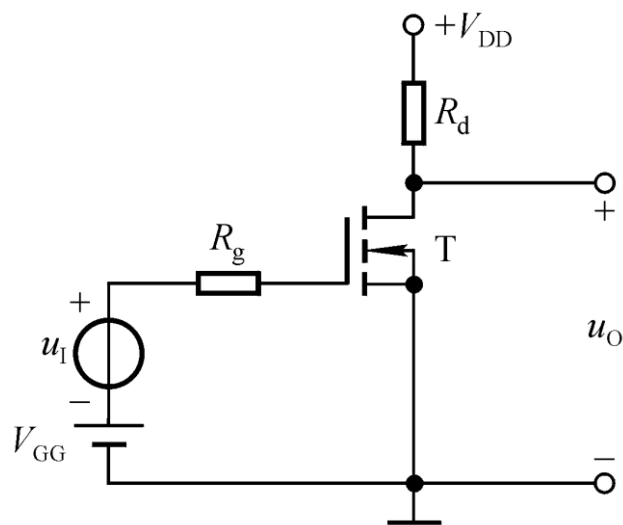
近似分析时可认为其为无穷大！



$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}}$$

根据 i_D 的表达式或转移特性可求得 g_m 。

2. 基本共源放大电路的动态分析



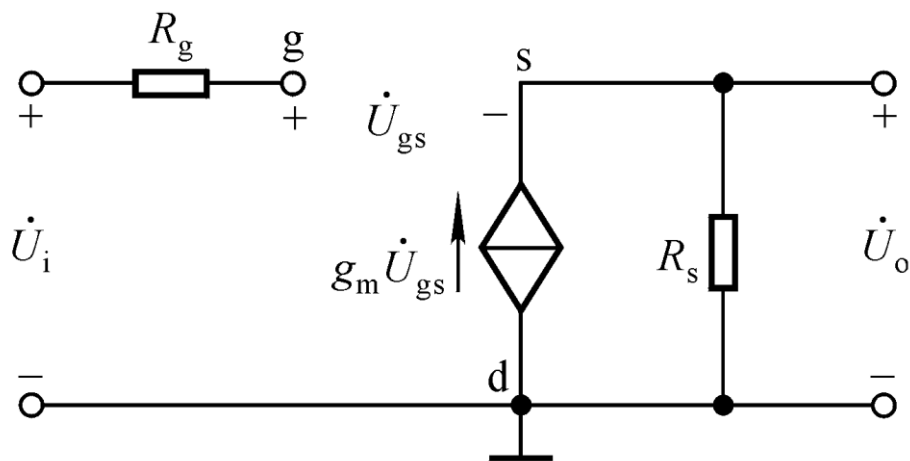
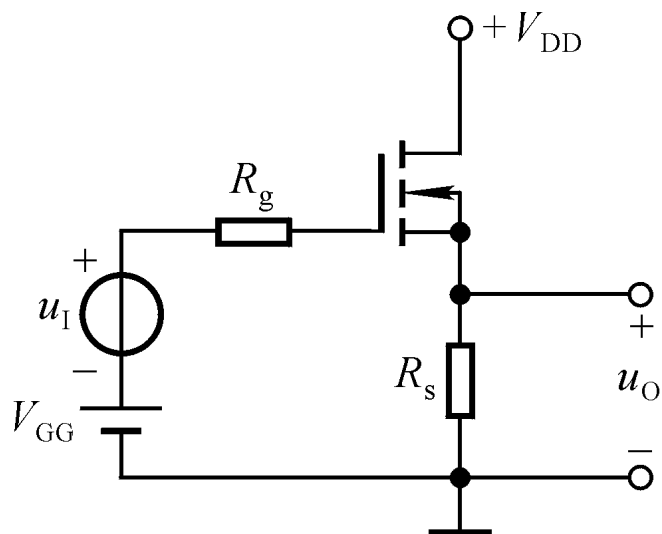
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_d R_d}{\dot{U}_{gs}} = -g_m R_d$$

$$R_i = \infty$$

$$R_o = R_d$$

若 $R_d=3\text{k}\Omega$, $R_g=5\text{k}\Omega$,
 $g_m=2\text{mS}$, 则 $\dot{A}_u = ?$
与共射电路比较。

3. 基本共漏放大电路的动态分析

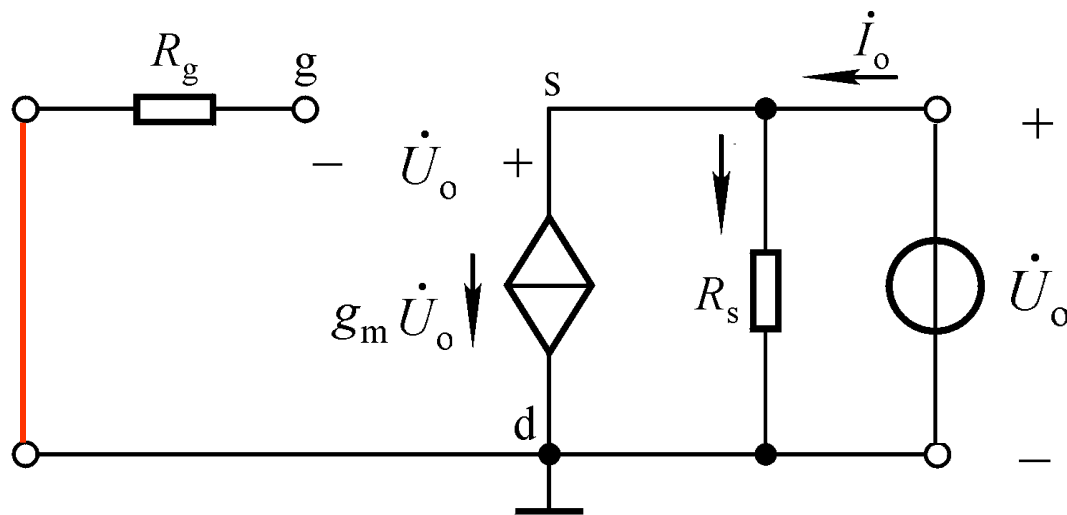


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_d R_s}{\dot{U}_{gs} + \dot{I}_d R_s} = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s}$$

$$R_i = \infty$$

若 $R_s = 3\text{k}\Omega$, $g_m = 2\text{mS}$, 则
 $\dot{A}_u = ?$

基本共漏放大电路输出电阻的分析



$$R_o = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{\frac{U_o}{R_s} + g_m U_o} = R_s // \frac{1}{g_m}$$

若 $R_s = 3\text{k}\Omega$, $g_m = 2\text{mS}$,
则 $R_o = ?$

实例分析 场效应管放大电路的动态分析

❖ 共源（CS）放大电路

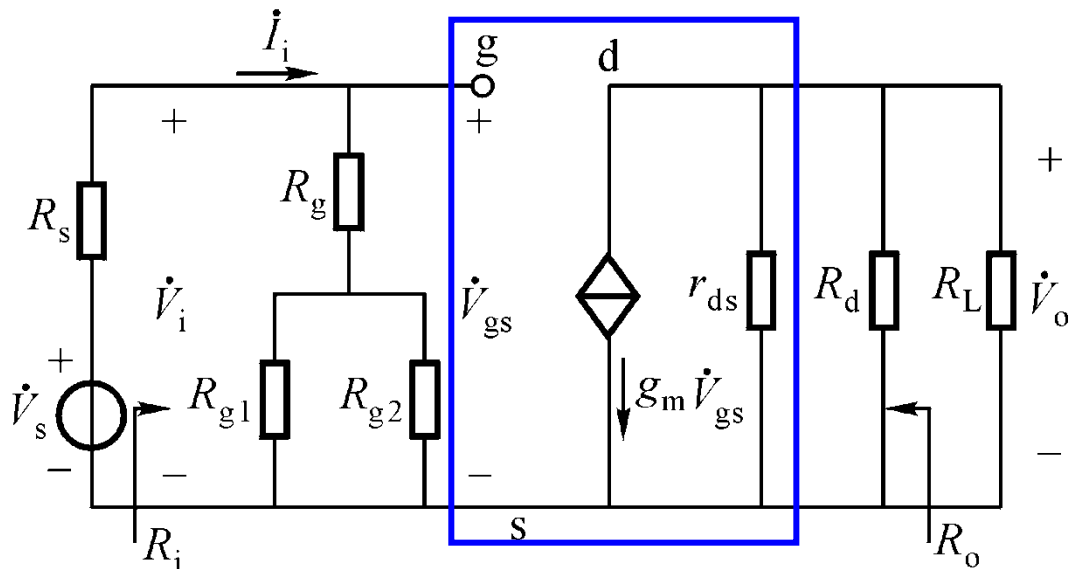
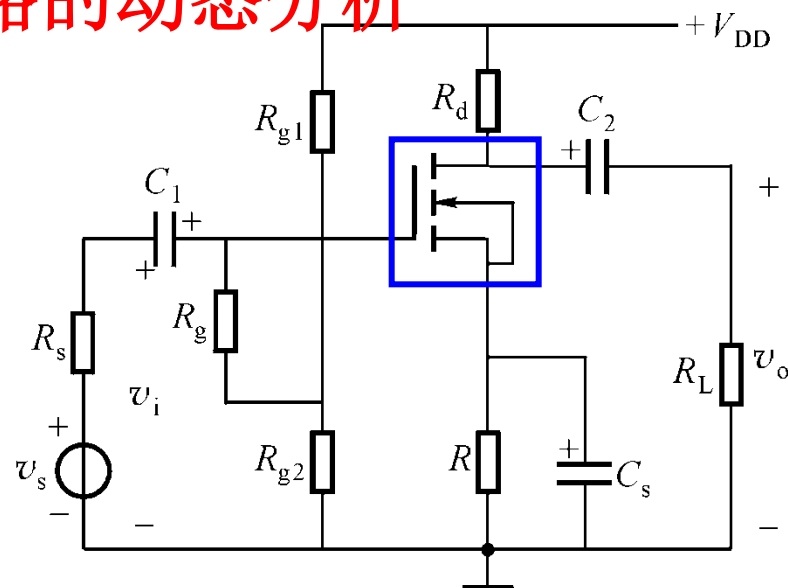
$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-g_m \dot{V}_{gs} R'_L}{\dot{V}_{gs}} = -g_m R'_L$$

$$R'_L = r_{ds} // R_d // R_L \approx R_d // R_L$$

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_g + R_{g1} // R_{g2}$$

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\substack{\dot{V}_s=0 \\ R_L=\infty}} = R_d // r_{ds} \approx R_d$$

与CE电路比较！



❖ 共漏（CD）放大电路

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{g_m \dot{V}_{gs} R'_L}{\dot{U}_{gs} + g_m \dot{V}_{gs} R'_L} = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \approx 1$$

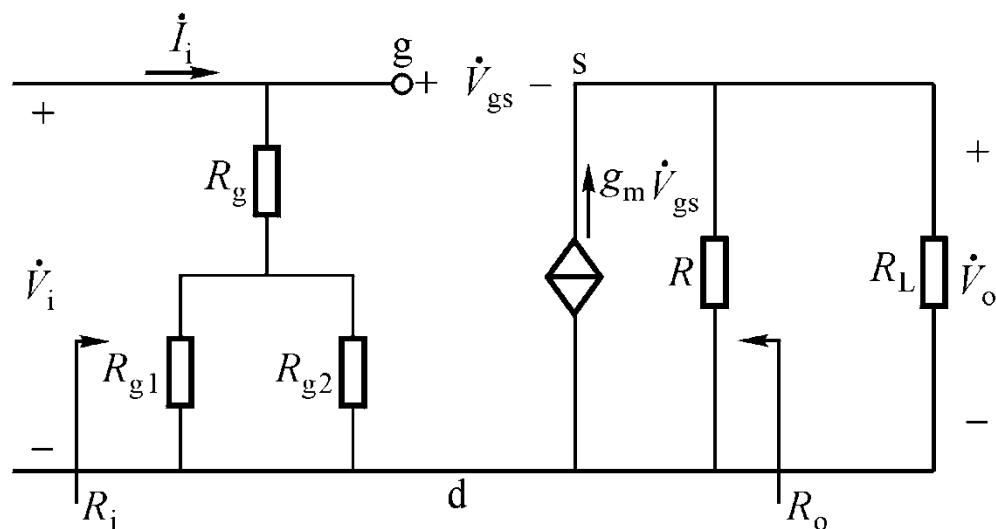
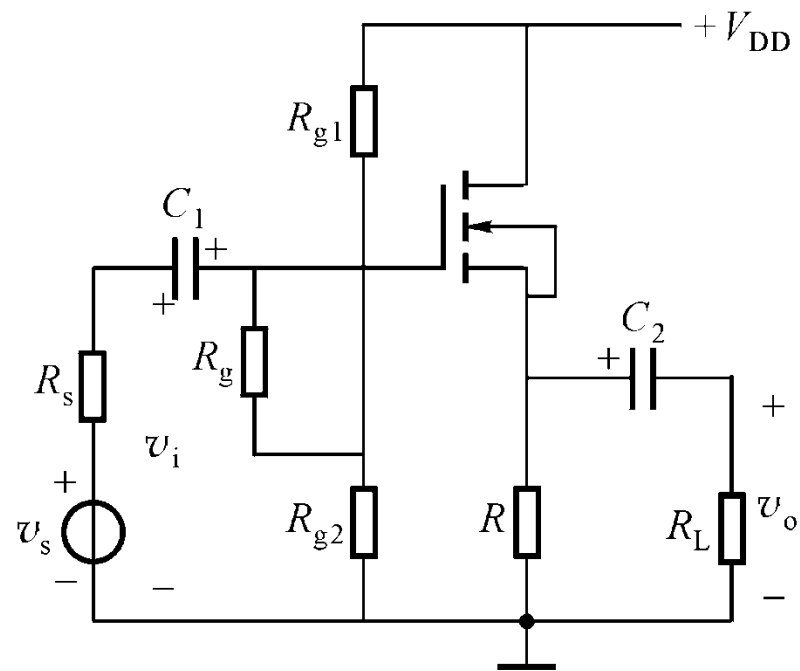
$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_g + R_{g1} // R_{g2}$$

源极跟随器！

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}'_o}{\dot{I}'_o} \right|_{\dot{V}_s=0, R_L=\infty}$$

$$= \frac{\dot{V}'_o}{-g_m \dot{V}_{gs} + \frac{\dot{V}'_o}{R}} = \frac{\dot{V}'_o}{g_m \dot{V}'_o + \frac{\dot{V}'_o}{R}}$$

$$= \frac{1}{g_m + \frac{1}{R}} = R // \frac{1}{g_m}$$

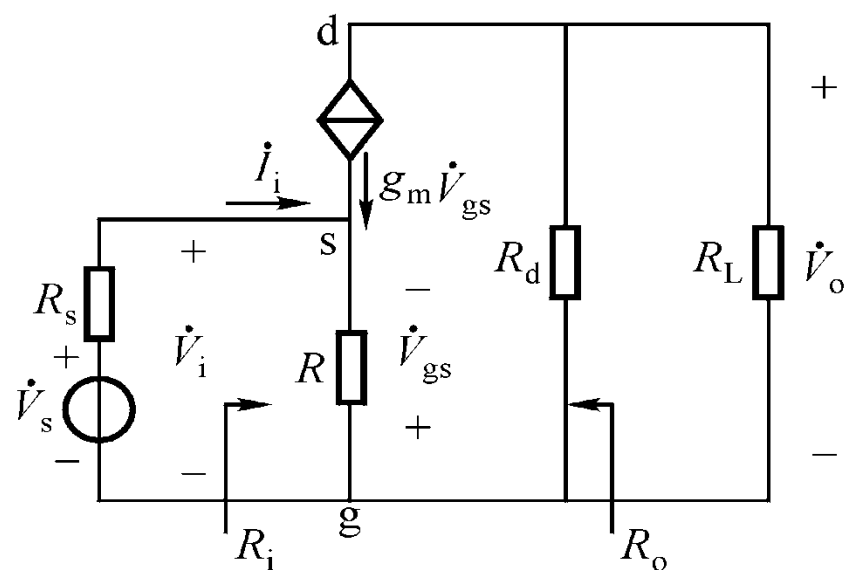
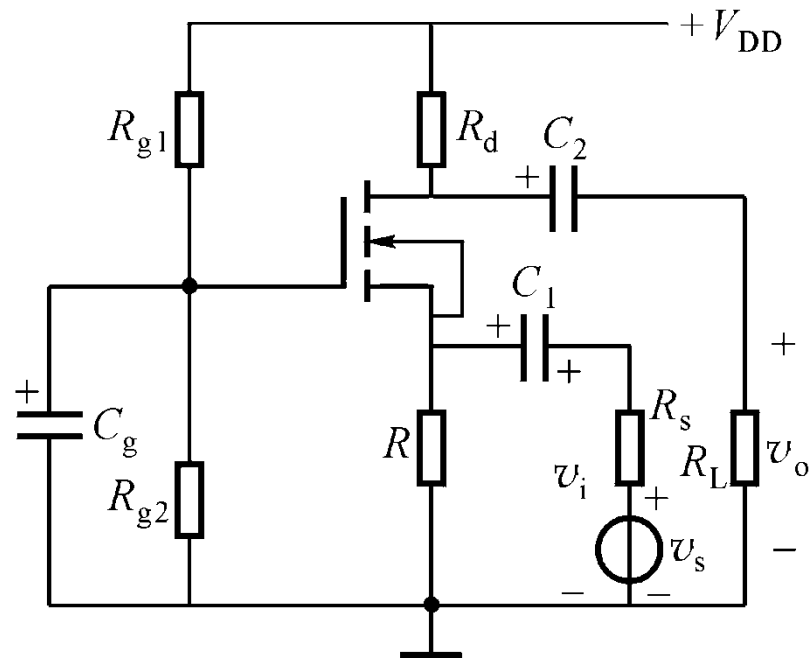


❖ 共栅（CG）放大电路

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

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{-\dot{V}_{gs}}{-\frac{\dot{V}_{gs}}{R} - g_m \dot{V}_{gs}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + g_m} = R // \frac{1}{g_m}$$

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}'_o}{\dot{I}'_o} \right|_{\substack{\dot{V}_s=0 \\ R_L=\infty}} = R_d$$

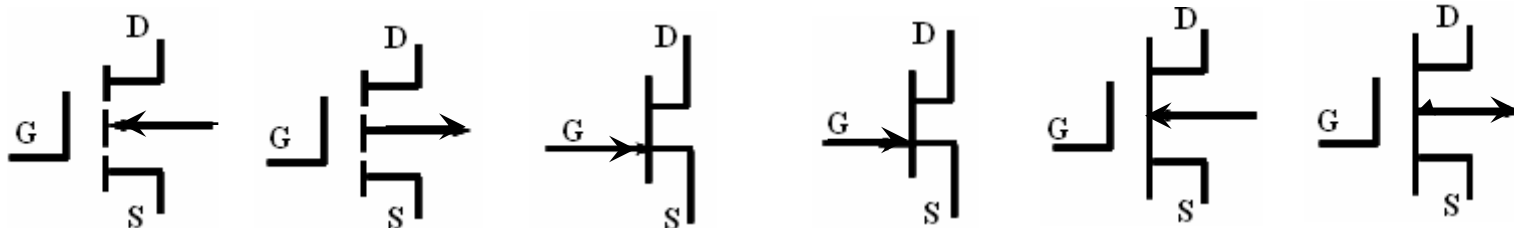


■ FET的直流偏置电路

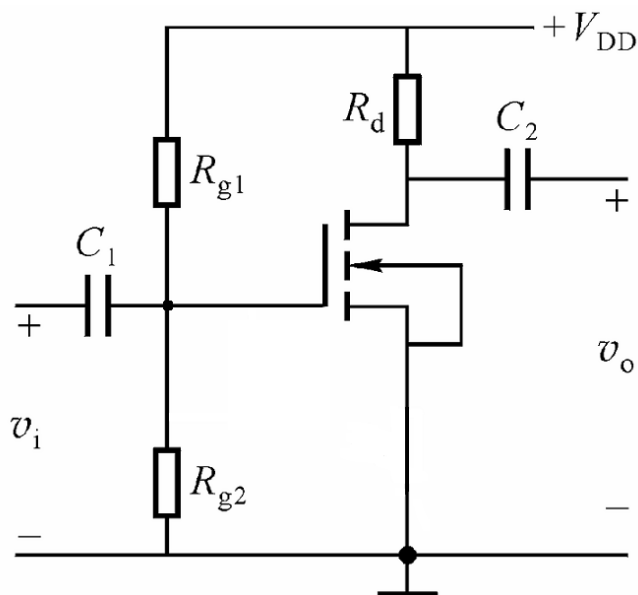
FET晶体管栅极不取电流，而且漏极电流 I_D 受栅源电压 v_{GS} 控制，所以栅极电位用分压器组成。

各种型号的FET，其栅源电压 v_{GS} 和漏源电压 v_{DS} 极性如表所示。

种类 电压	增强型		耗尽型			
	NMOS	PMOS	N 结型	P 结型	NMOS	PMOS
v_{GS}	正	负	负	正	负 (或正)	正 (或负)
v_{DS}	正	负	正	负	正	负



❖ 固定栅极电压偏置电路



适用于增强型

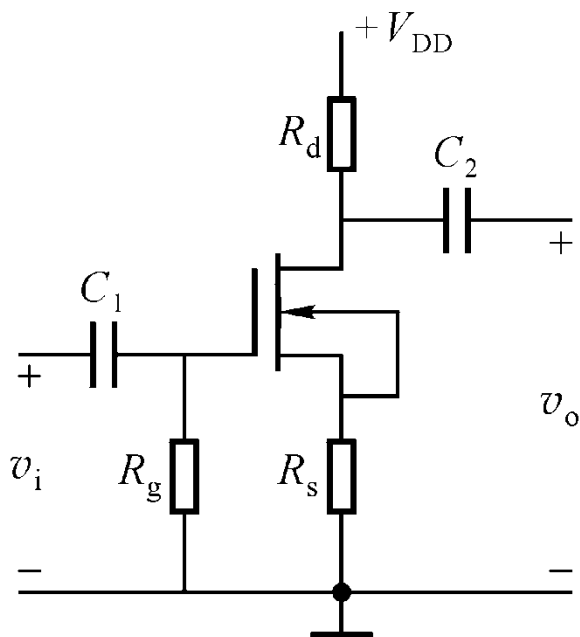
$$V_{GS} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \times V_{DD}$$

只要 R_{g1} 和 R_{g2} 及 R_d 取得合理：
能满足 $V_{GS} > V_T$ 的导电要求，
同时保证 $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ ，使管子工作在恒流区（放大区）

$$I_D = I_{DO} \times \left(\frac{V_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D \times R_d$$

❖ 自偏压偏置电路



$$V_{GS} = V_G - V_S = -I_D \times R_S$$

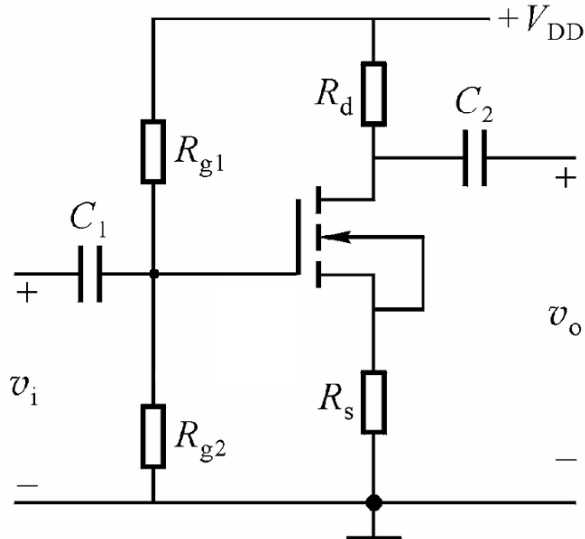
V_{GS} 电压靠 I_D 流过源极电阻产生压降自己建立起来的一称自偏压。

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_d + R_s)$$

适用于耗尽型

❖混合偏置电路



适用于增强、耗尽型

$$V_{GS} = V_G - I_D R_s = V_{DD} \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} - I_D R_s$$

R_{g1} 和 R_{g2} 组成固定偏压电路，
 R_s 为自给偏压，
所以整个偏置电路为混合式偏置。

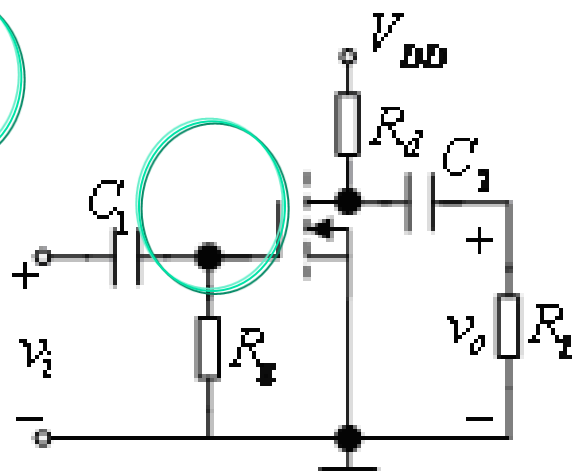
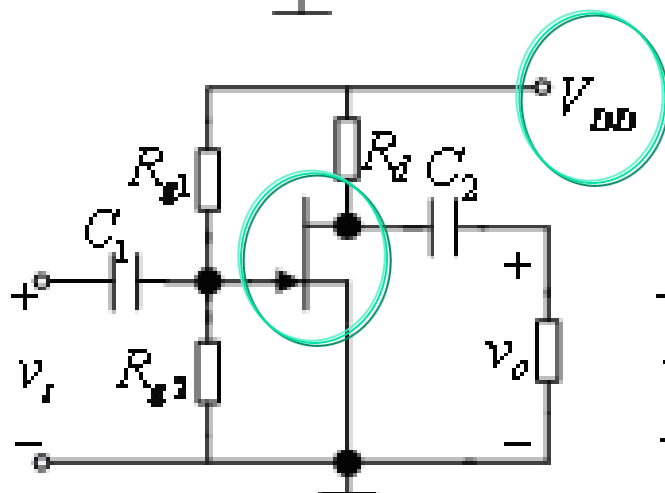
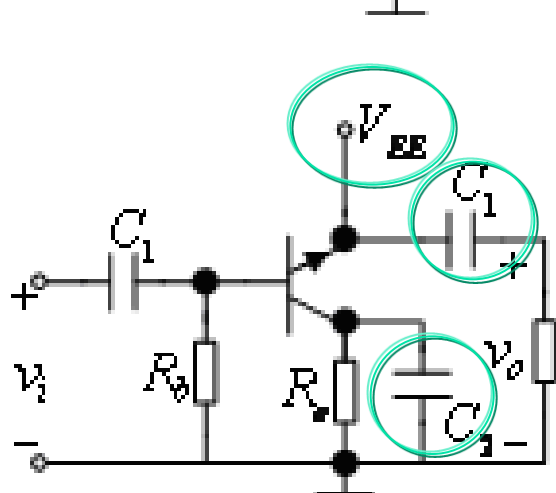
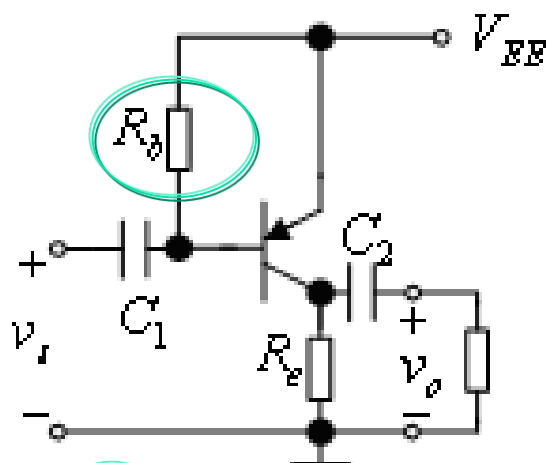
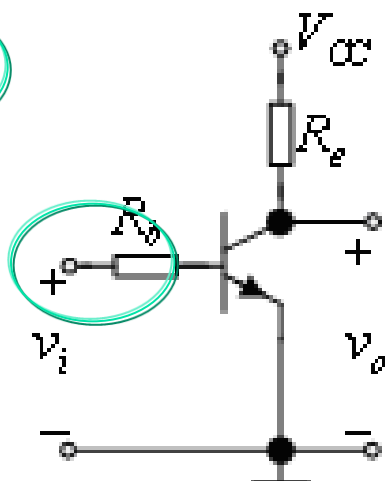
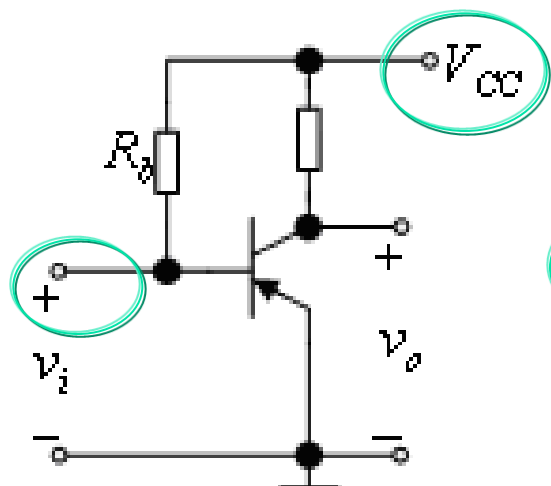
$$I_D = I_{DO} \times \left(\frac{V_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D \times (R_d + R_s)$$

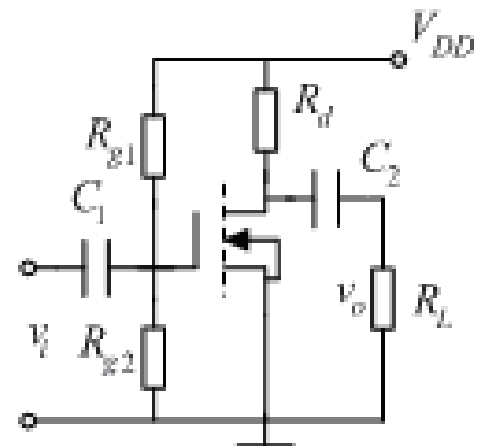
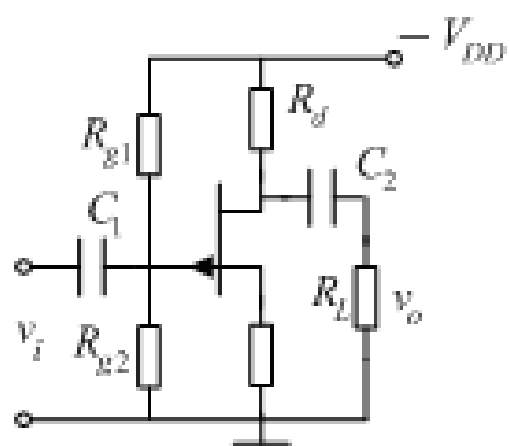
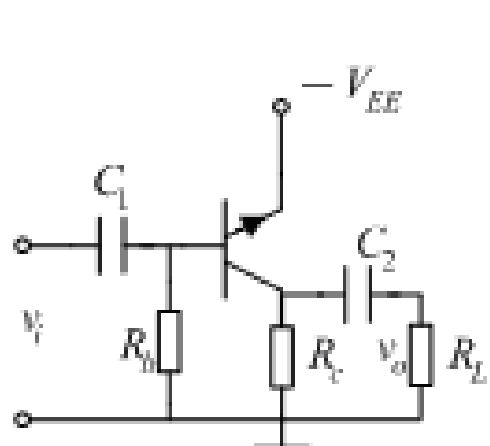
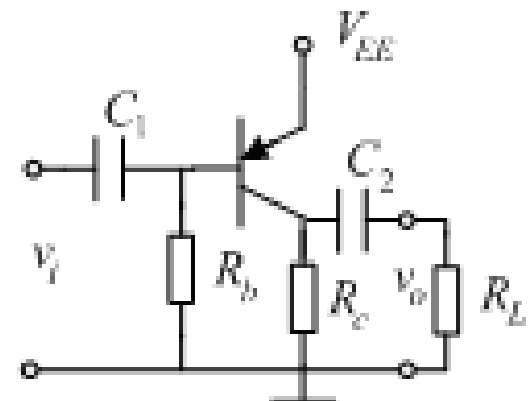
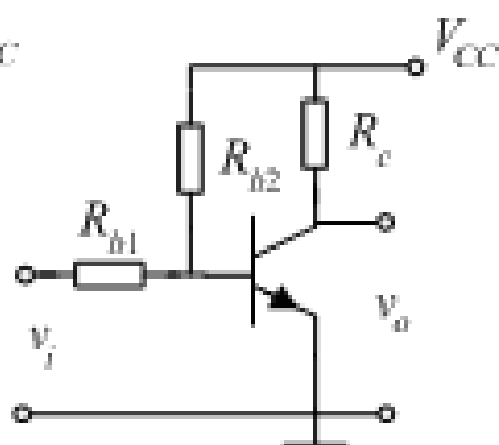
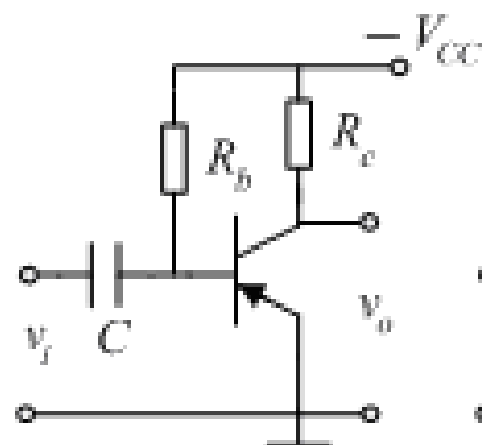
【例】图 (a) ~ (f) 为BJT和FET组成的各种放大电路。

(1) 分别画出直流通路和交流通路；

(2) 从**直流供电电源极性**、**三极管类型**、**偏置电路和信号输入、输出电路**等几方面检查各放大电路的组成是否合理？应如何改正？（设各电容的容量均是够大，对信号而言可视作短路）



解：改正后的放大电路



作业

- 1.6, 7; 9, 10, 11 单管
- 1.5, 12, 13
- 1.14*, 15*, 16, 17 多级
- 1.22, 23, 24, 25 差分
- 1.28, 29, 30 频率特性
- 仿真 1.18, 19

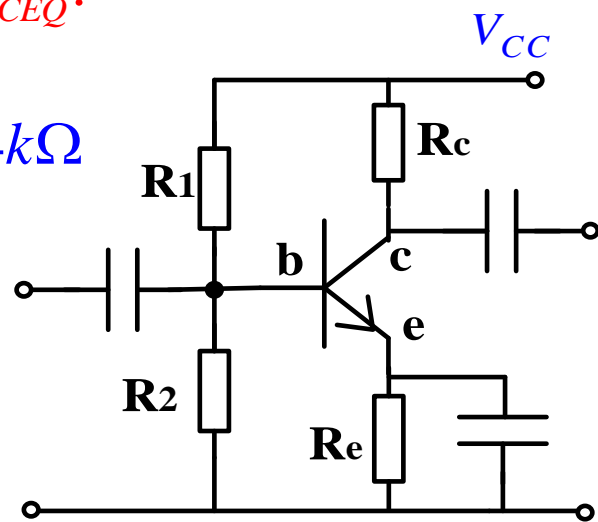
例1: 已知 $R_1 = 12k\Omega, R_2 = 3k\Omega, R_C = 1.5k\Omega, R_e = 500\Omega,$

$V_{CC} = 20V, \beta = 30, V_{BE} \approx 0.7V,$ 计算: $I_{BQ}, I_{CQ}, V_{CEQ}.$

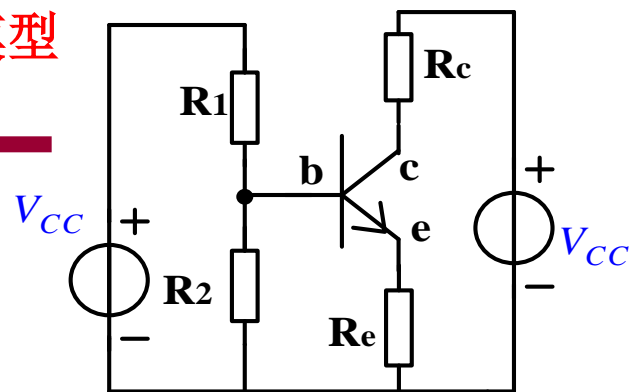
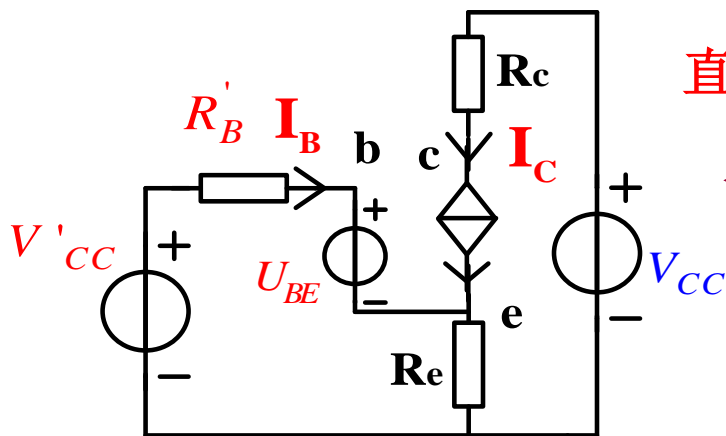
解: $V'_{CC} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4V$ $R'_B = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = 2.4k\Omega$

$$V'_{CC} - V_{BE} = R'_B \times I_B + (1 + \beta)I_B \times R_e$$

$$I_B = \frac{V'_{CC} - V_{BE}}{R'_B + (1 + \beta)R_e} = \frac{3.3}{2.4 + 31 \times 0.5} = 0.184mA$$



直流电路模型



例1: 已知 $R_1 = 12k\Omega, R_2 = 3k\Omega, R_C = 1.5k\Omega, R_e = 500\Omega,$

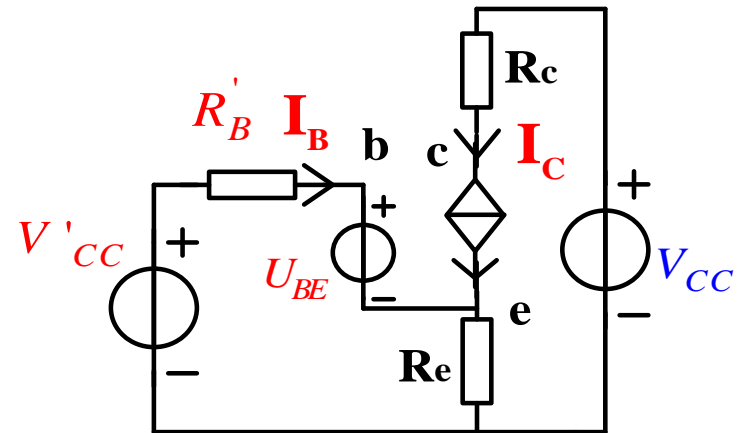
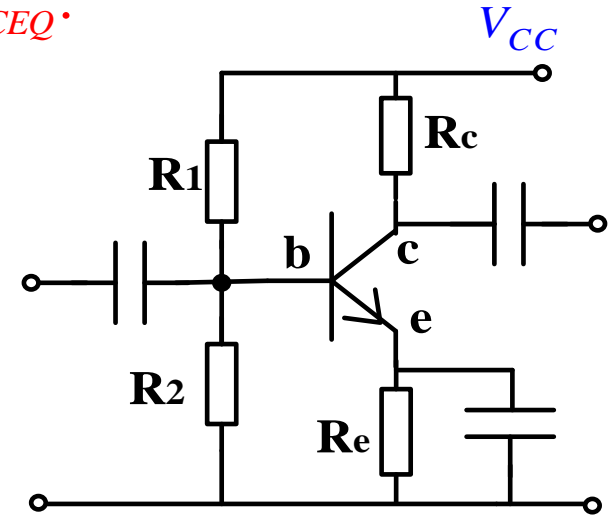
$V_{CC} = 20V, \beta = 30, V_{BE} \approx 0.7V,$ 计算: $I_{BQ}, I_{CQ}, V_{CEQ}.$

$$I_B = 0.184mA$$

$$I_C = \beta I_B = 5.52mA$$

$$U_{CE} \approx V_{CC} - I_C(R_C + R_e) = 8.6V$$

静态工作点处于放大区域!



直流电路模型

例2：判别静态工作点。 $V_{CES} = 0.3V, \beta = 50$

解： $V_B = 12 - 6.7 = 5.3V$ 稳压管作用

$$V_E \approx V_B + 0.7V = 6V \quad I_E \approx \frac{12 - 6}{1k} = 6mA$$

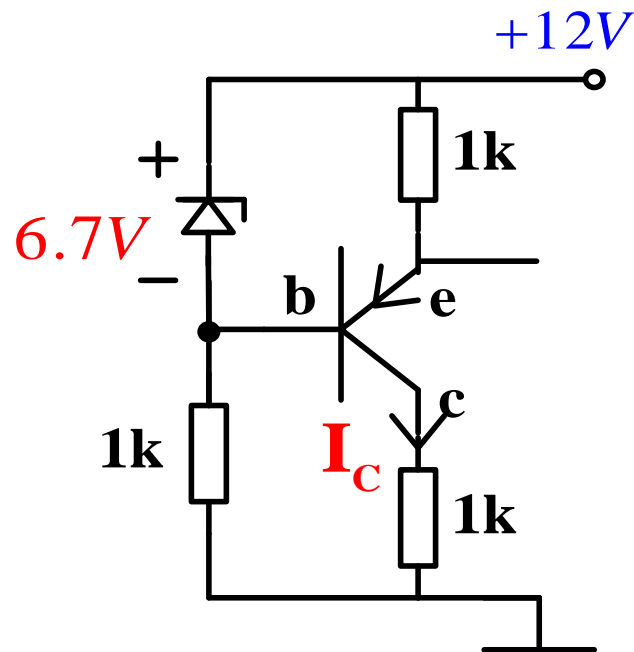
$$I_C \approx I_E = 6mA$$

$$V_{EC} = 12 - 2k \times I_C = 0 \quad \text{??????}$$

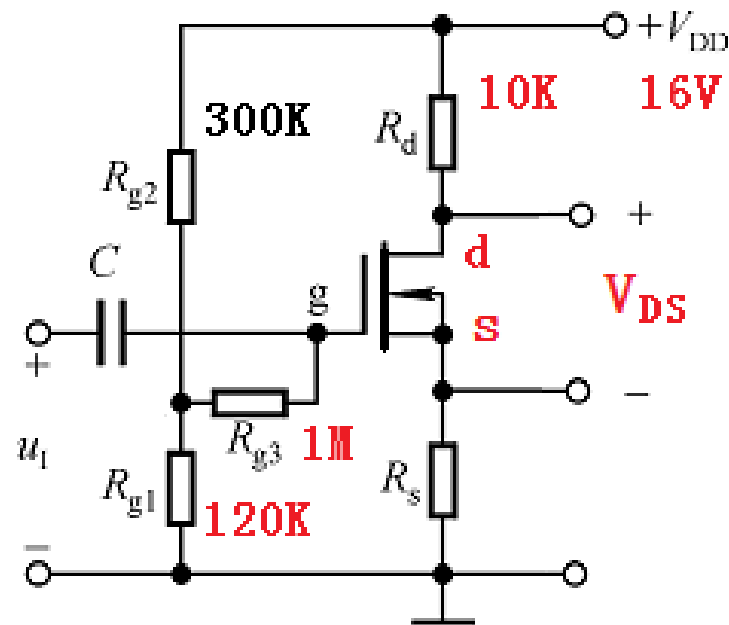
显然，管子工作在饱和状态， $I_C \neq \beta I_B$

$$I_C = \frac{V_E - V_{EVS}}{1k} = \frac{5.3}{1k} = 5.3mA$$

$$I_B = I_E - I_C = 6 - 5.3 = 0.7mA$$



例3：由FET组成的放大电路如图所示。设FET的漏极饱和电流 $I_{DSS}=1\text{mA}$ ，夹断电压 $V_P = -2\text{V}$ ，试求静态工作点，并验证它的合理性。



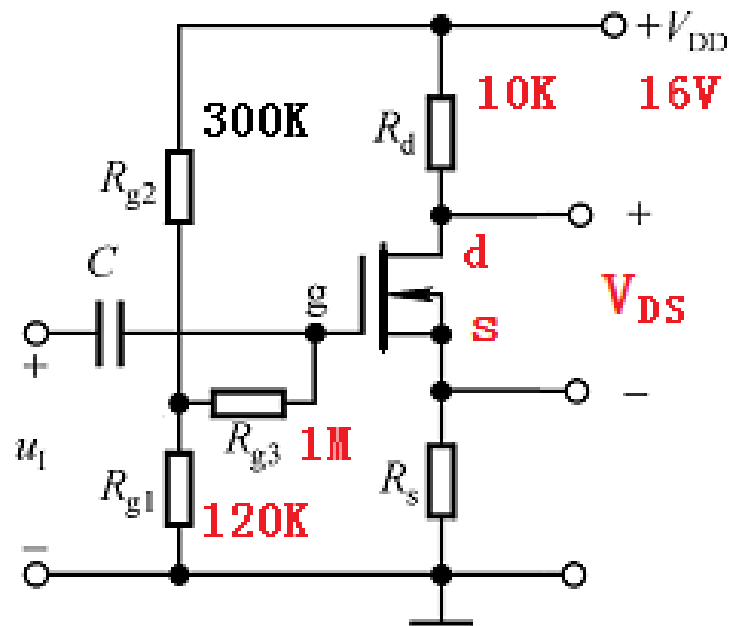
N沟道耗尽型

$$\begin{cases} V_{GS} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} V_{DD} - I_D R_S = \frac{120}{300 + 120} \times 16 - 10 I_D \approx 4.6 - 10 I_D \\ I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = 1 \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{-2}\right)^2 \end{cases}$$

联立求解上列方程，可得二组解：

$$\begin{cases} I_{DQ} = 0.84\text{mA} \\ V_{GSQ} = -3.8\text{V} \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} I_{DQ} = 0.52\text{mA} \\ V_{GSQ} = -0.6\text{V} \end{cases}$$

显然，第①组解是不合理的（因为 $V_{GSQ} = -3.8\text{V} < V_P$ ）所以应舍去。



按第二组解： $I_{DQ} = 0.52\text{mA}$ ， $V_{GSQ} = -0.6\text{V}$

所以 $V_{DSQ} = V_{DD} - (R_d + R_s)I_{DQ} = 16 - (10 + 10) \times 0.52 = 5.6\text{V}$

显然，因 $V_{DSQ} > V_{GSQ} - V_P = 1.4\text{V}$ ，说明FET工作在放大区。