



第二章 基本放大电路

§ 2.1 放大的概念与放大电路的性能指标

§ 2.2 基本共射放大电路的工作原理

§ 2.3 放大电路的分析方法

§ 2.4 静态工作点的稳定

§ 2.5 晶体管放大电路的三种接法

§ 2.6 场效应管及其基本放大电路



➤ 晶体管最大的作用是放大

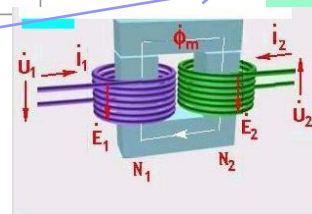
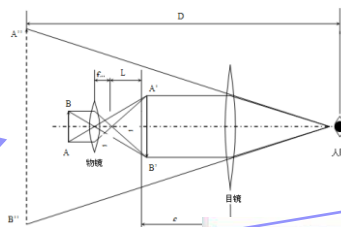
➤ 为什么需要放大？

●应用需求广泛：

□光学放大：投影仪、相机...

□力学放大：杠杆原理...

□电学放大：变压器...



➤ 放大和电子技术的关系？

●BELL电话公司的困境：

□ 1894&1895年，贝尔电话的专利在美国和加拿大过期，此后10年内，美国出现6000多家电话公司，面临竞争，AT&T开始大肆收购电话公司

□ 联邦政府基于谢尔曼法案 (1890年通过的反托拉斯法案) 调查AT&T，1913年，Kingsbury申明的发表，AT &T (BELL) 转为长途电话服务商

□ 长途电话业务，需要高效、可靠的中继器放大声音信号

✓ 放大的需求催生了电子技术(晶体管的发明)和电子产业(硅谷)

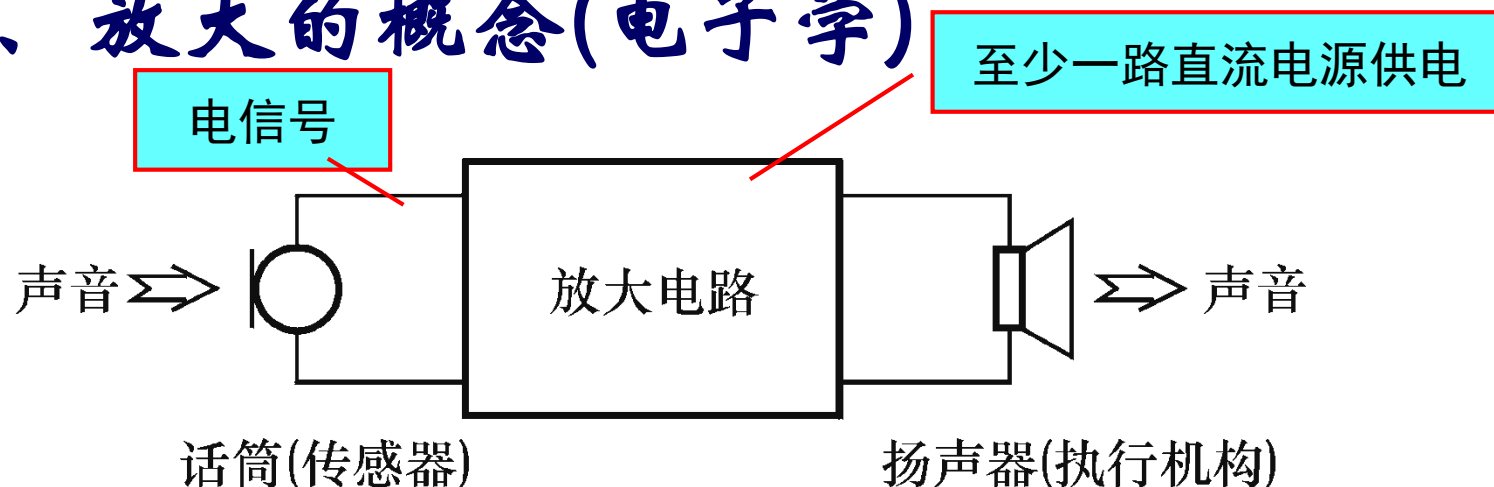
✓ 对电信号的放大是模拟电子技术的最广泛和最基础的应用

§ 2.1 放大的概念与放大电路的性能指标

一.放大的概念(电子学)

二.放大电路的性能指标

一、放大的概念(电子学)

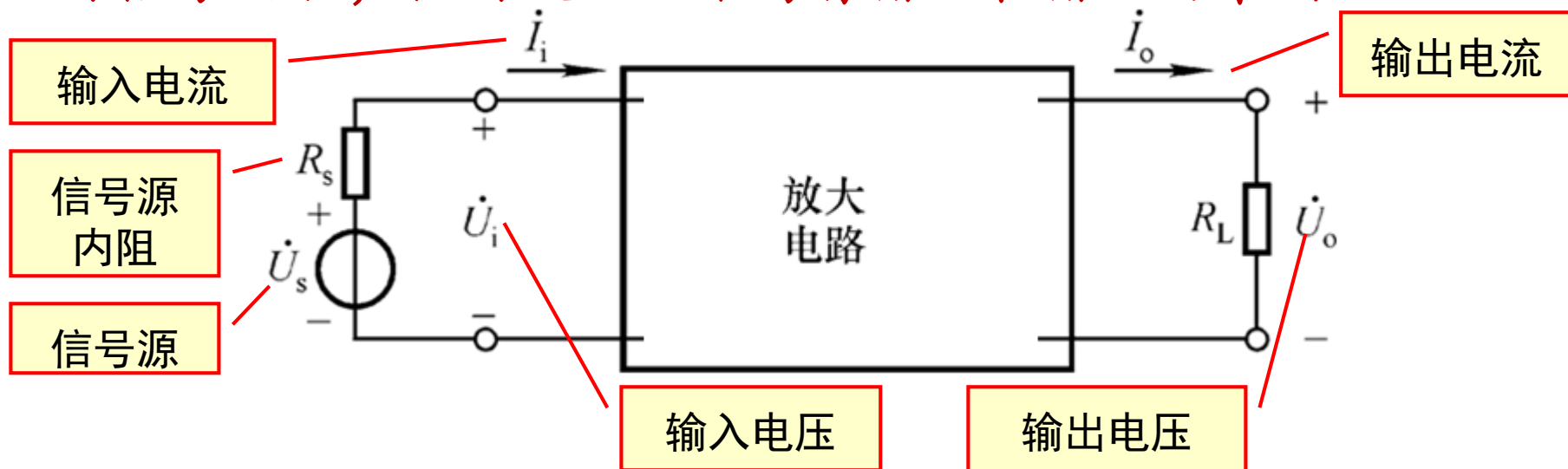


- ❑ 放大的对象：变化量
- ❑ 放大的特征：功率放大
- ❑ 放大的本质：能量的控制和转换
- ❑ 放大的基本要求：不失真——放大的前提

二、性能指标(动态参数)

常以正弦波作为测试信号！

➤ 对信号而言，任何放大电路均有输入和输出两个端口



➤ 1. 放大倍数：输出量与输入量之比

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

电压放大倍数，是最常被研究和测试的参数

$$\dot{A}_{ii} = \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$$

电流放大倍数

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

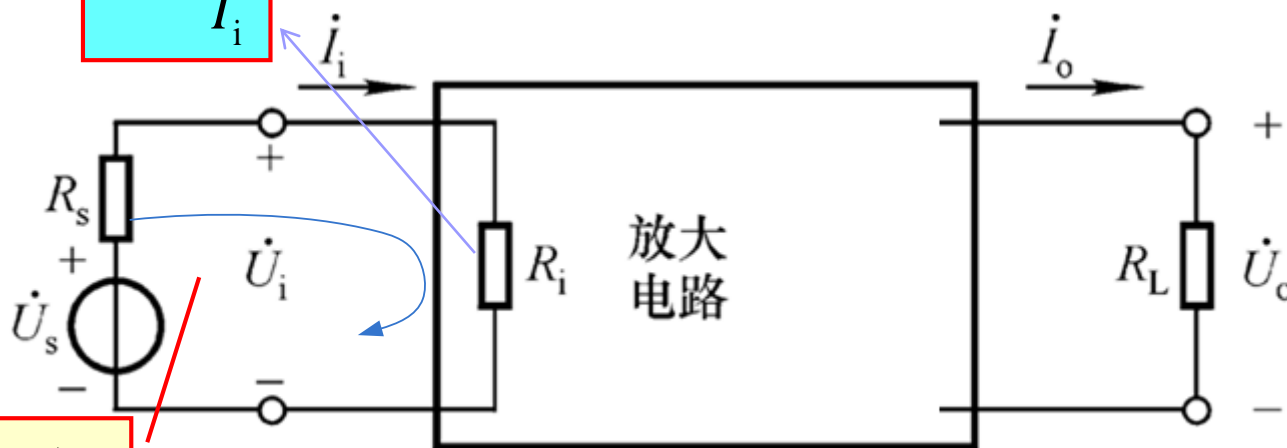
互阻放大倍数

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

互导放大倍数

- **2. 输入电阻：**从放大电路输入端看进去的等效电阻
即，输入电压与输入电流有效值之比

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



输入回路

- R_i ：衡量放大电路向信号源索取电流的大小

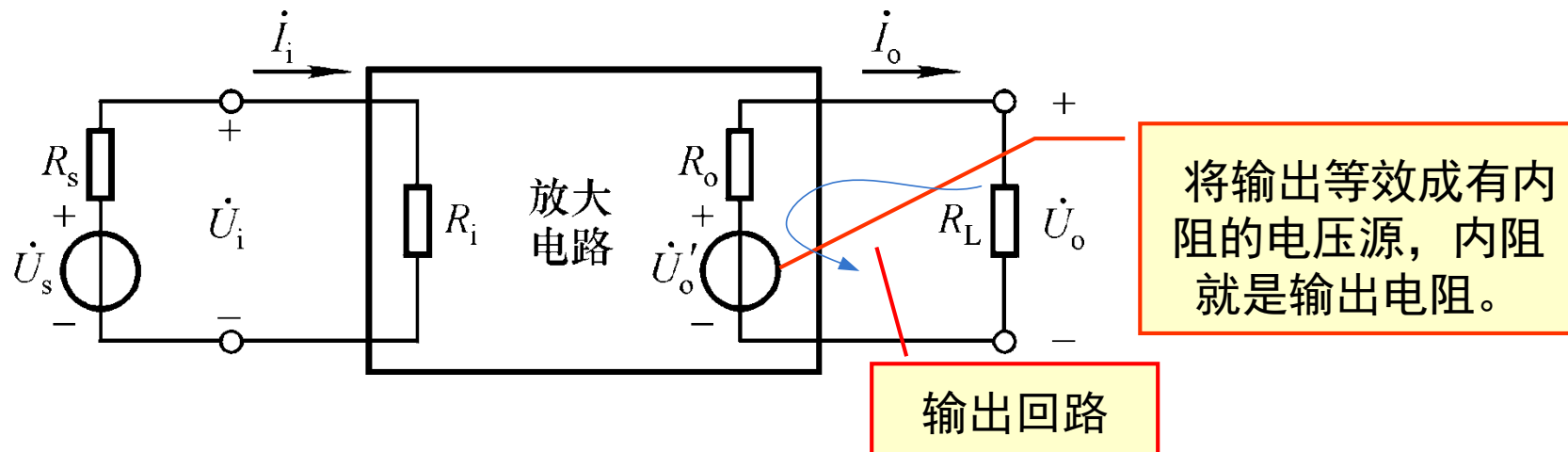


R_i 大些好还是小些好？

若信号源为电压源， R_i 大些好还是小些好？

若信号源为电流源呢？

➤ 3. 输出电阻：从放大电路输出端看进去的等效电阻



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

空载时输出电压有效值

带 R_L 时的输出电压有效值

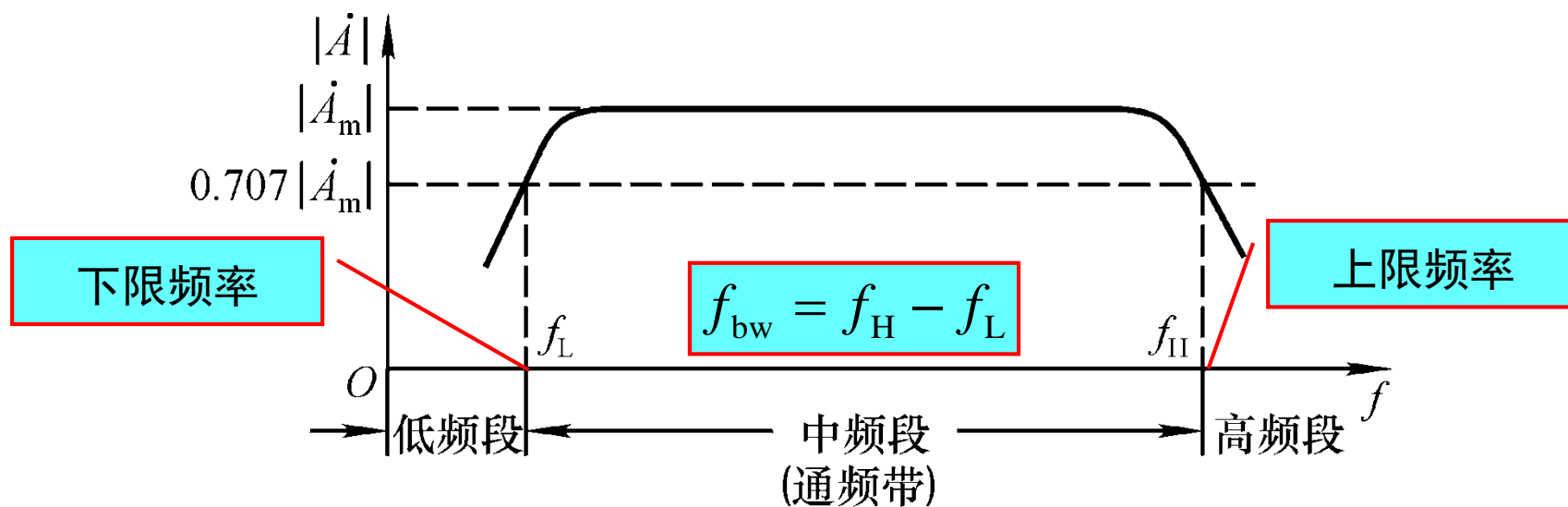
● R_o ：衡量放大电路输出的带负载能力(负载接入对输出的影响)



R_o 大些好还是小些好？

➤ 4. 通频带：上限截止频率与下限截止频率之差

- 衡量放大电路对不同频率信号的放大能力
- 放大电路中的电容、电感及半导体器件PN结电容影响电信号的传递速度，当输入信号频率较低和较高时，放大电路电压放大倍数数值下降，输出产生相移

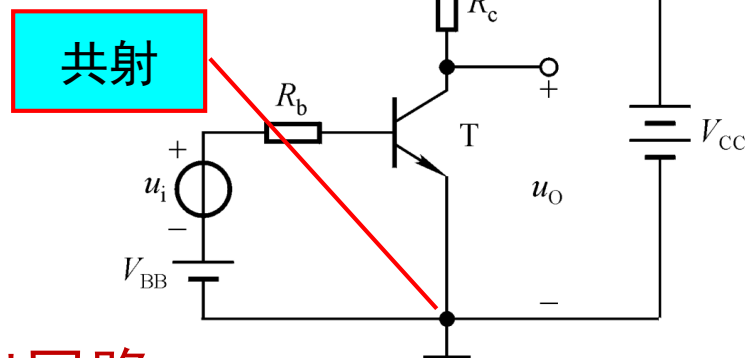
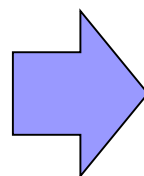
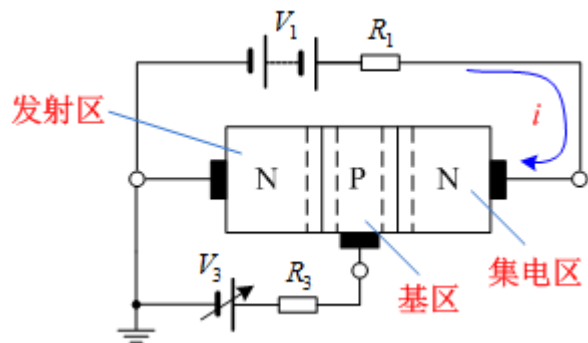


- 5. 最大不失真输出电压 U_{om} ：输出基本不失真情况下的最大 U_o ，一般用有效值表示
- 6. 非线性失真系数 D ：输出波形中谐波成分总量与基波分量之比
- 7. 最大输出功率 P_{om} 和效率 η ：
 - P_{om} ：输出基本不失真情况下负载上能获得的最大功率
 - η ：最大输出功率与电源消耗功率之比 $\eta = P_{om} / P_V$

§ 2.2 基本共射放大电路的工作原理

- 一. 电路的组成及各元件的作用
- 二. 设置静态工作点的必要性
- 三. 波形分析
- 四. 放大电路的组成原则

一、电路的组成及各元件的作用



➤ 输入回路

- V_{BB} : 保证发射结正偏
- R_b : 基极偏置电阻, 作用?
- u_i : 信号源, 被放大的对象

➤ 输出回路

- V_{CC} : 保证集电结反偏
- R_c : 集电极负载电阻

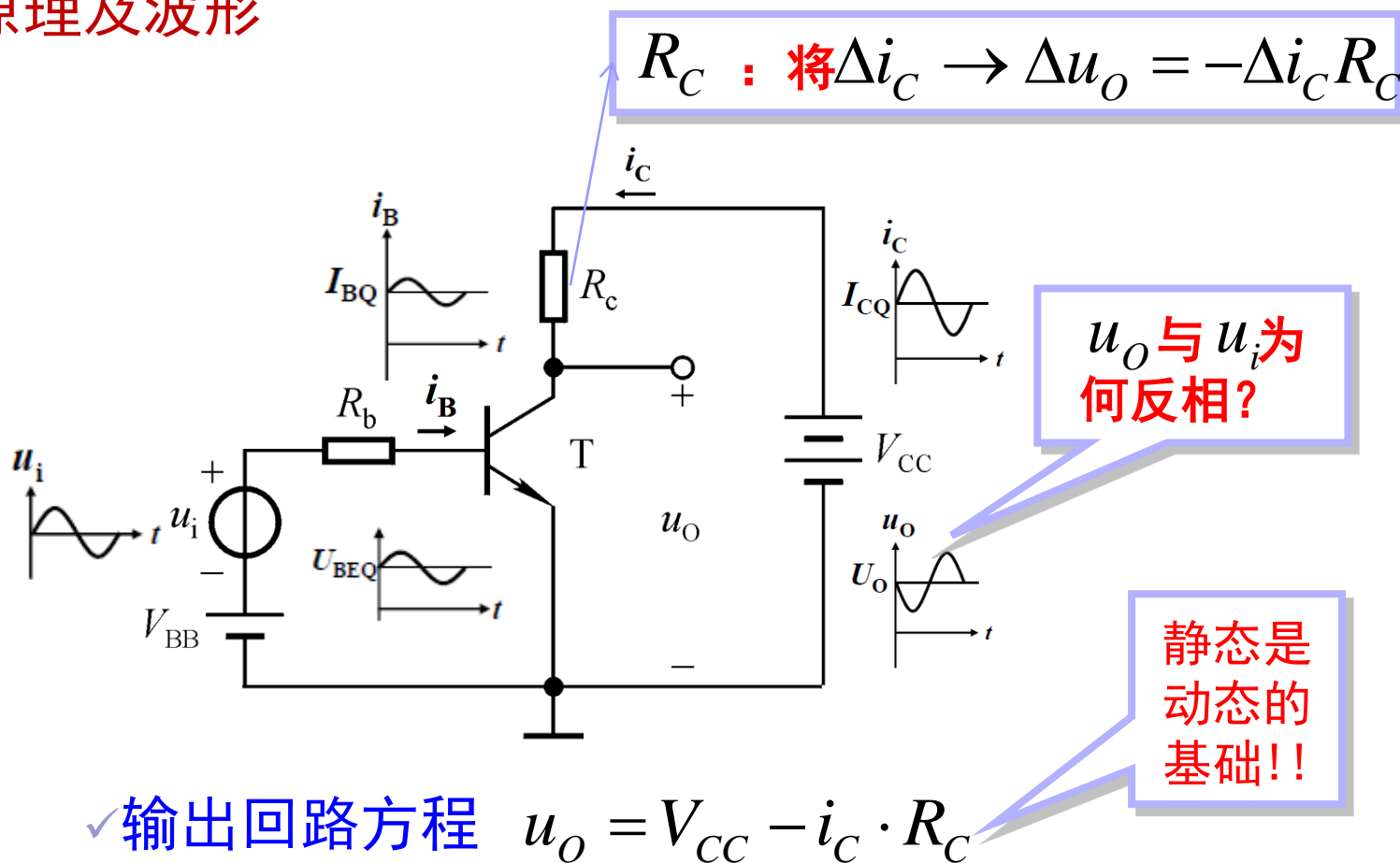
➤ **静态**: $u_i=0$ 时的电路工作状态(直流工作状态)

➤ **静态工作点**: 静态时晶体管各极的直流电流和电压, 简称Q点
 $\rightarrow I_{BQ}, I_{CQ} (I_{EQ}), U_{BEQ}, U_{CEQ}$

➤ **动态**: $u_i \neq 0$ 时的, 电路中各处电压、电流的交变状态

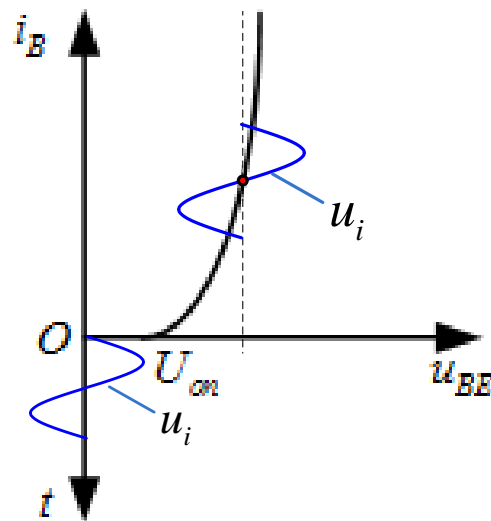
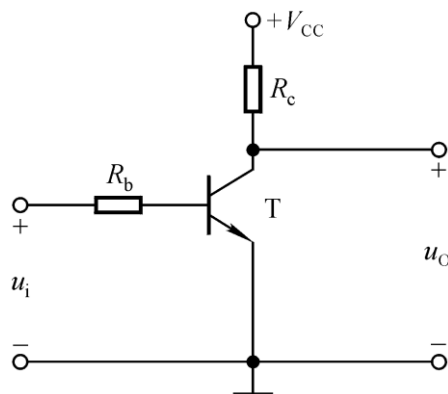
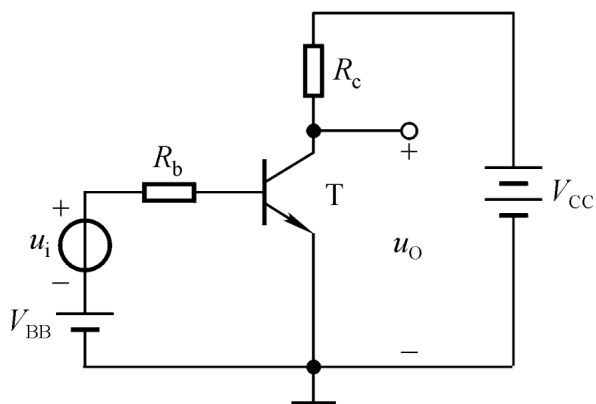
$$\Delta u_I \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta i_C \rightarrow \Delta u_{R_c} \rightarrow \Delta u_{CE} (u_o)$$

➤ 工作原理及波形



二、设置静态工作点的必要性

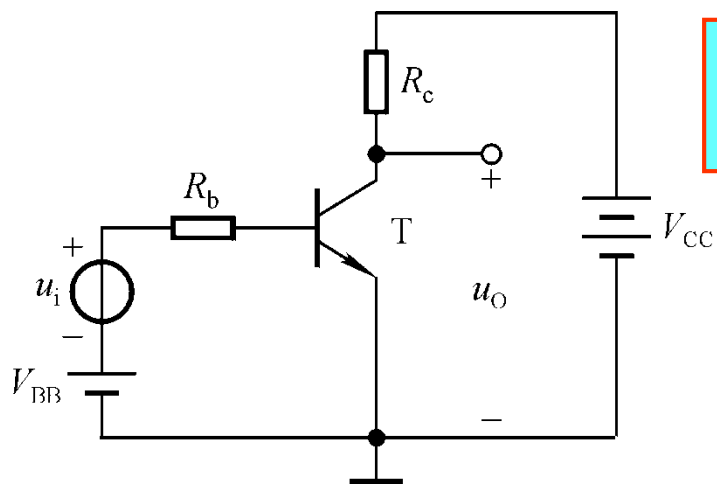
➤ 放大的对象是什么？基本要求是什么？



✓ 输出电压必然失真！

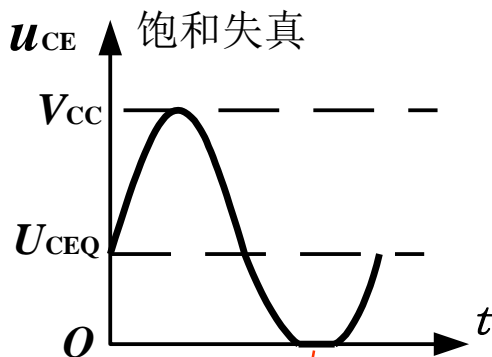
□ 只有设置合适的Q点，使晶体管在信号整个周期内全部处于放大状态，波形才不会失真，Q点几乎影响着所有的动态参数！

三、基本共射放大电路的波形分析

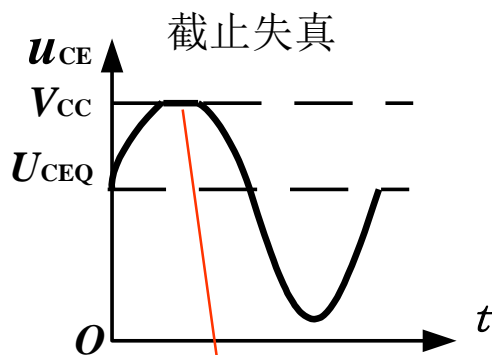


动态信号驮载在静态之上

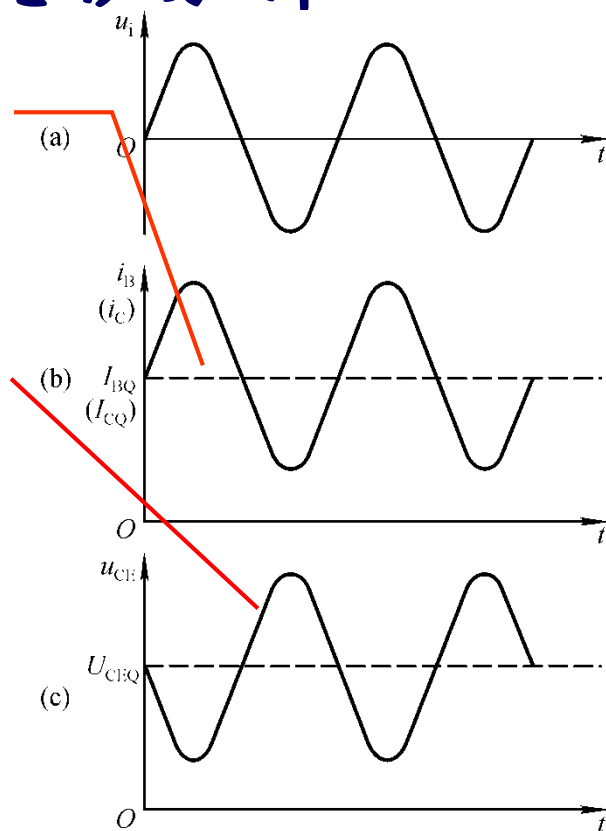
与 i_c 变化方向相反



底部失真



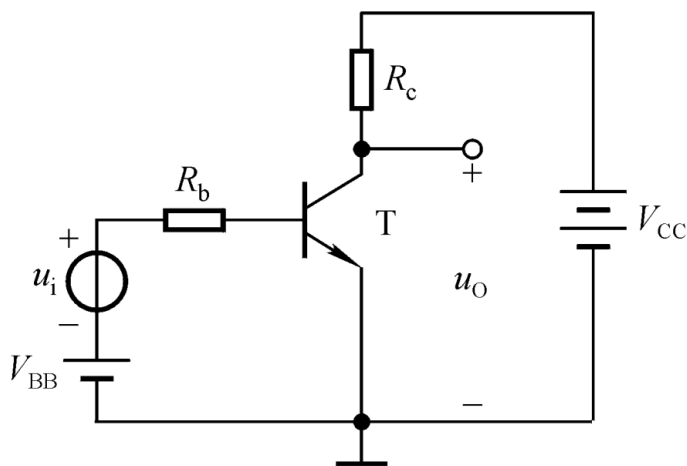
顶部失真



✓ 要想不失真，就要在信号的整个周期内保证晶体管始终工作在放大区！

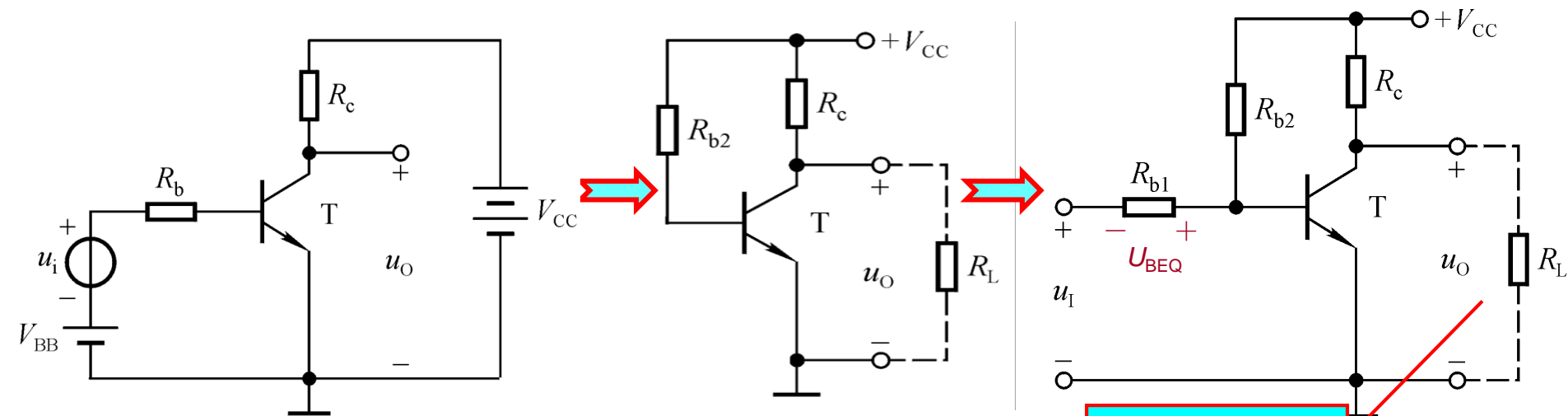
四、放大电路的组成原则

- **静态工作点：**合适的直流电源、合适的电路参数
- **动态信号：**能够作用于晶体管的输入回路，在负载上能够获得放大的动态信号
- **实用放大电路：**共地，直流电源种类尽可能少，负载上无直流分量



➤ 如何组成实用放大电路？

▣ 直接耦合放大电路



✓ 问题：

1. 两种电源
2. 信号源与放大电路不“共地”

将两个电源合二为一

共地，且要使信号驮载在静态之上

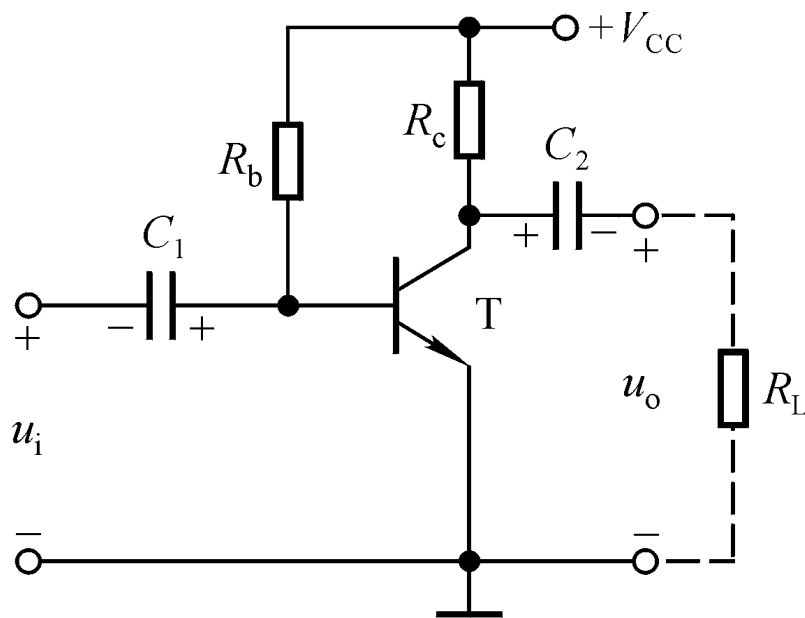
有直流分量

➤ 静态时， $U_{BEQ} = U_{R_{b1}}$

➤ 动态时， V_{CC} 和 u_i 同时作用于晶体管的输入回路。动态信号驮载在静态之上

➤ 如何组成实用放大电路？

□ 阻容耦合放大电路



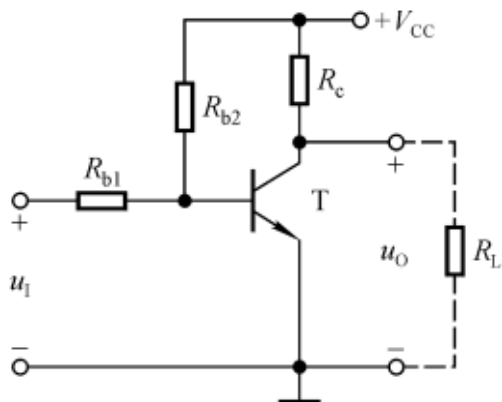
✓ C_1, C_2 为耦合电容

- 耦合电容容量应足够大，对于交流信号可近似为短路，作用“隔离直流、通过交流”

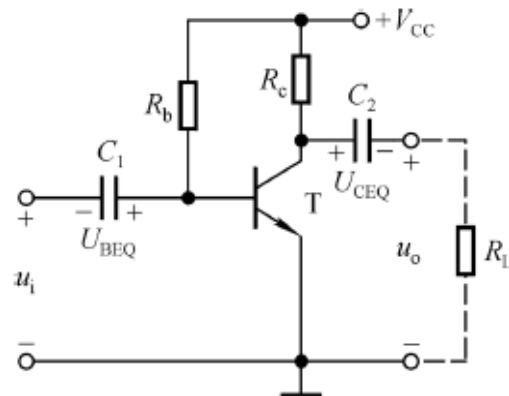
- 静态时， $U_{C1} = U_{BEQ}$, $u_{C2} = U_{CEQ}$
- 动态时， $u_{BE} = u_i + U_{BEQ}$ ，信号驮载在静态之上，负载上只有交流信号

两种实用放大电路的比较

直接耦合共射放大电路



阻容耦合共射放大电路

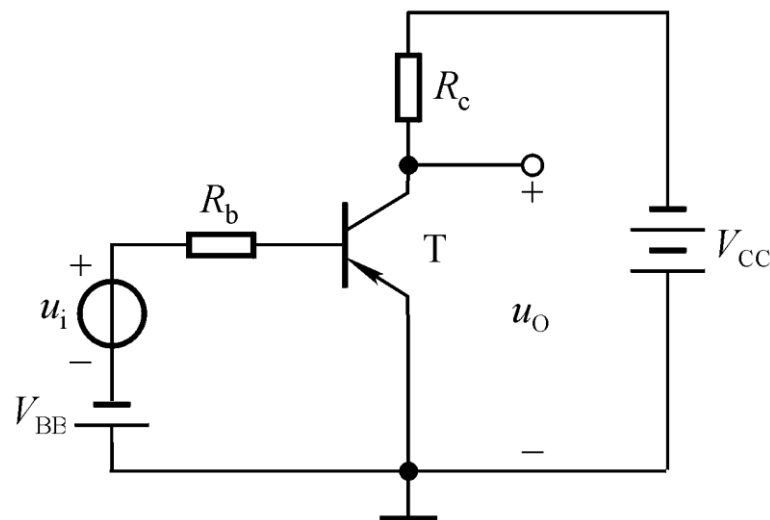
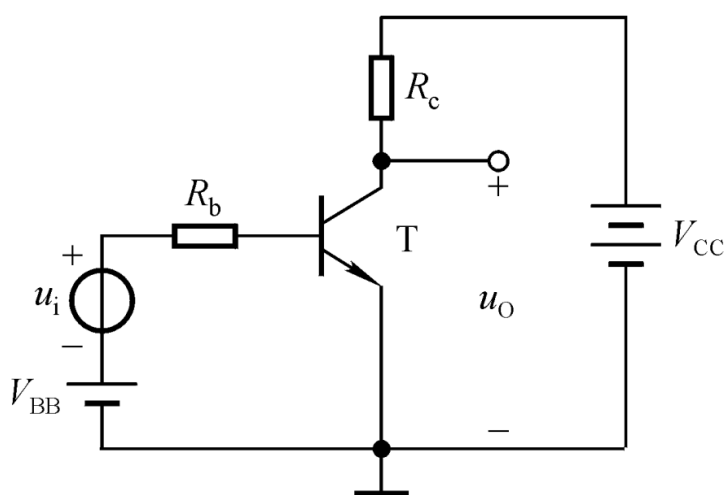


	直接耦合	阻容耦合
共同点	✓ 信号源与放大电路共地 ✓ 单电源供电	
不同点	✓ 电阻 R_{b1} 上有交流损耗 ✓ 负载上有直流信号 ✓ 低频特性好 ✓ 易于集成	✓ 电容 C_1, C_2 上交流损耗很小 ✓ 负载上只有交流信号 ✓ 低频特性差 ✓ 不易于集成

讨论

照葫芦画瓢！

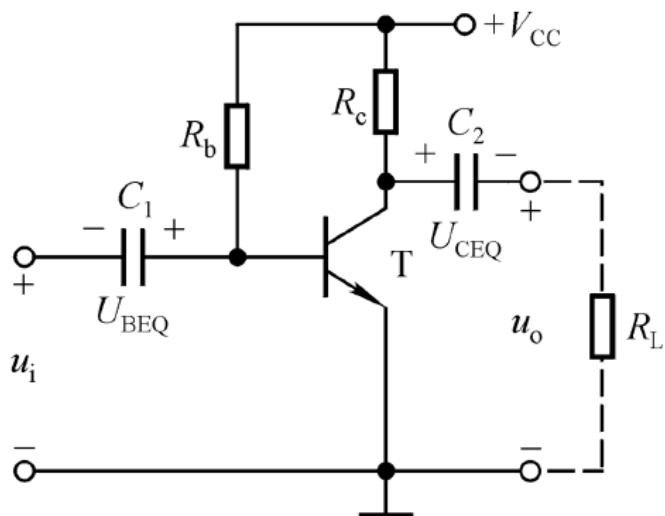
1. 用PNP型晶体管组成一个共射放大电路



§ 2.3 放大电路的分析方法

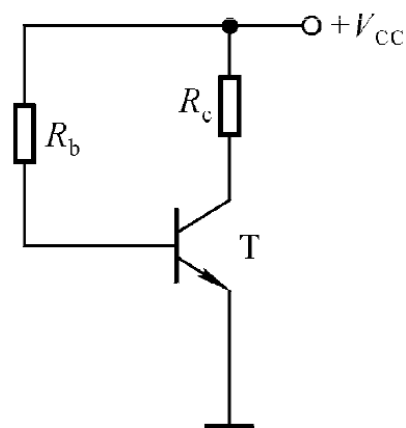
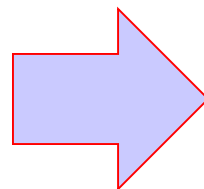
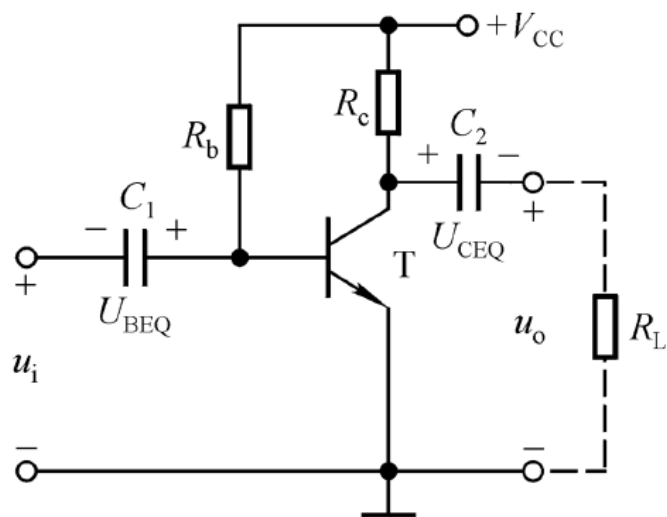
- 一. 放大电路的直流通路和交流通路
- 二. 图解法
- 三. 等效电路法

一、放大电路的直流通路和交流通路

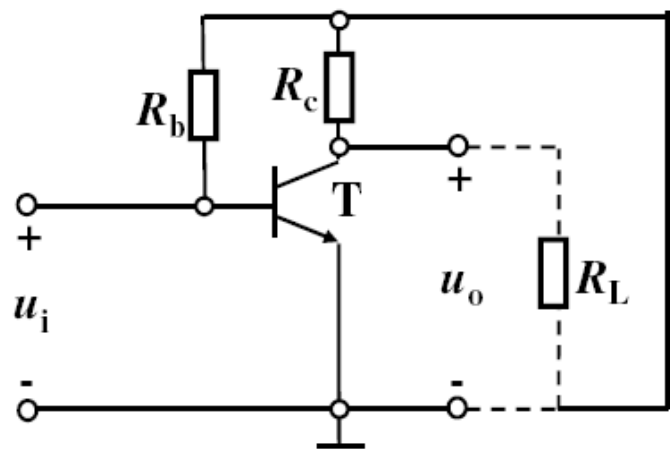


- 多电源电路如何进行定量分析？
 - 叠加原理：适用线性电路
- 如何确保叠加原理适用？
 - 被放大信号：交流小信号
- 如何应用叠加原理？
 - 电路分解为直流通路+交流通路

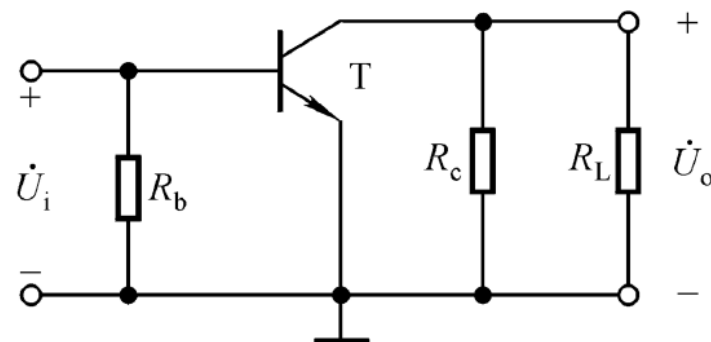
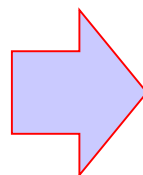
- 直流通路：直流电源作用下直流电流流经的通路
 - ① U_s 短路，保留 R_s ；② 电容开路；③ 电感短路
- 交流通路：输入信号作用下交流信号流经的通路
 - ① V_{CC} 短路，内阻为0；② 电容短路



直流通路



交流通路



交流通路习惯画法

➤ 交、直流通路的作用？

1、定性判断放大电路是否正常工作

- ✓ 静态时晶体管工作在放大区、有合适的Q点
- ✓ 保证交流信号的有效传输

先静态，
后动态！

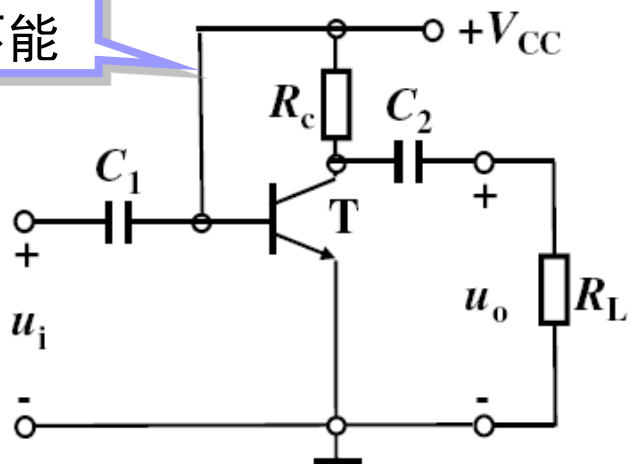
从直流通路分析

从交流通路分析

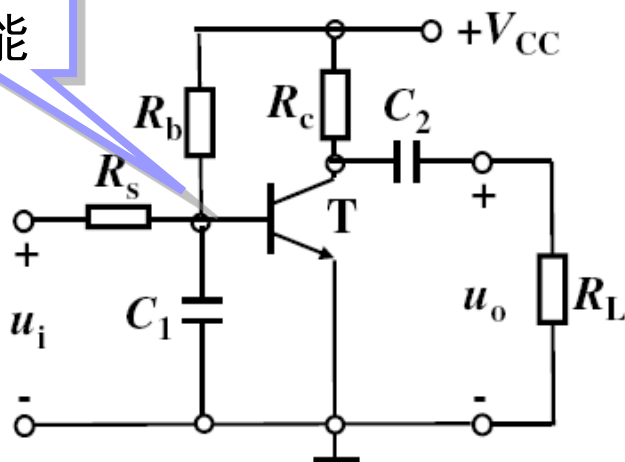
□ 讨论：

- ✓ 以下电路能否正常放大输入信号？若不能，如何改正电路？

不能



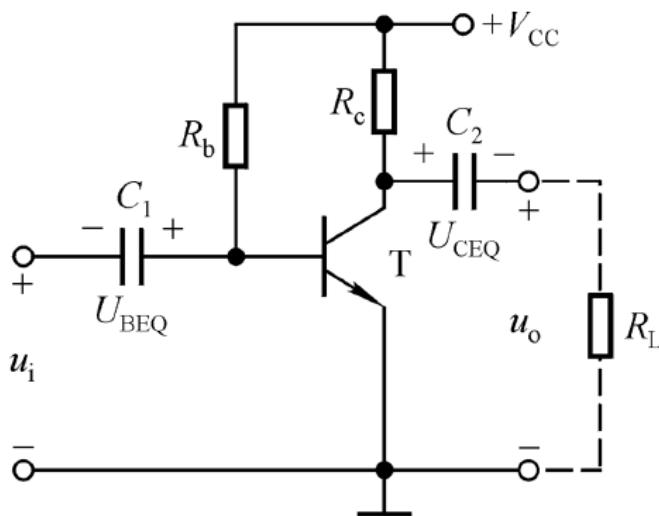
不能



➤ 交、直流通路的作用？

2、定量估算放大电路的静态参数

✓ 直流通路：定量估算静态工作点



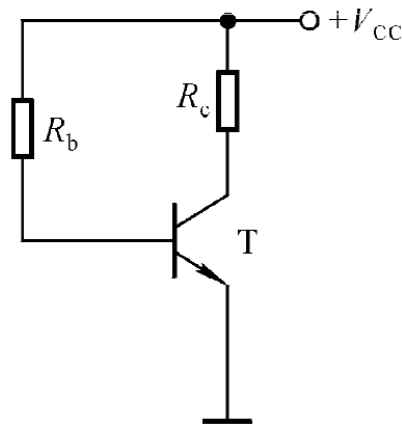
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b}$$

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

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

V_{CC} 越大, U_{BEQ} 取不同的值所引起的 I_{BQ} 的误差越小

✓ 列晶体管输入、输出回路方程, 将 U_{BEQ} 作为已知条件, 令 $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$, 可估算出静态工作点

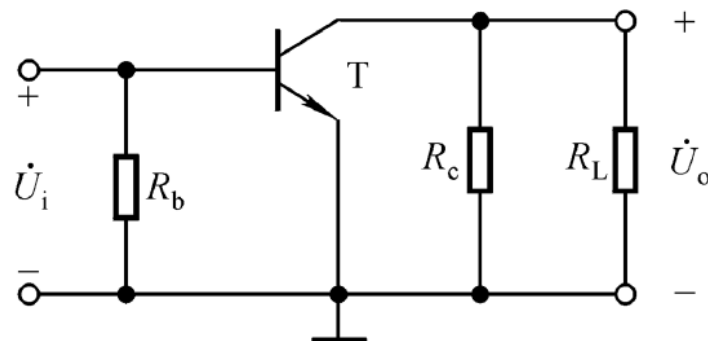
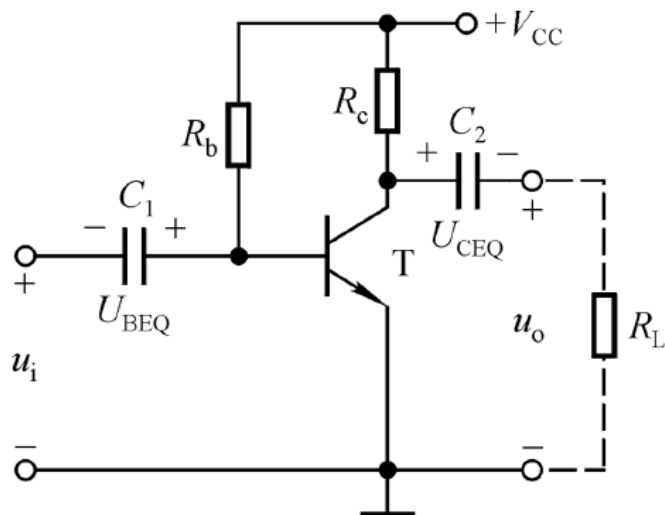


✓ 例, 已知: $V_{CC} = 12V$, $R_b = 600k\Omega$, $R_c = 3k\Omega$, $\beta = 100$, 求 $Q = ?$

$$\checkmark I_{BQ} = 20\mu A, I_{CQ} = 2mA, U_{CEQ} = 6V$$

➤ 交、直流通路的作用？

- ✓ 交流通路：定量分析或估算动态性能



● 如何估算动态性能？

- ✓ 图解法
- ✓ 等效电路法

二、图解法

➤ 已知晶体管的输入、输出特性以及电路中其它元器件参数，利用作图的方法结合交、直流通路来分析放大电路

□ 动态性能分析

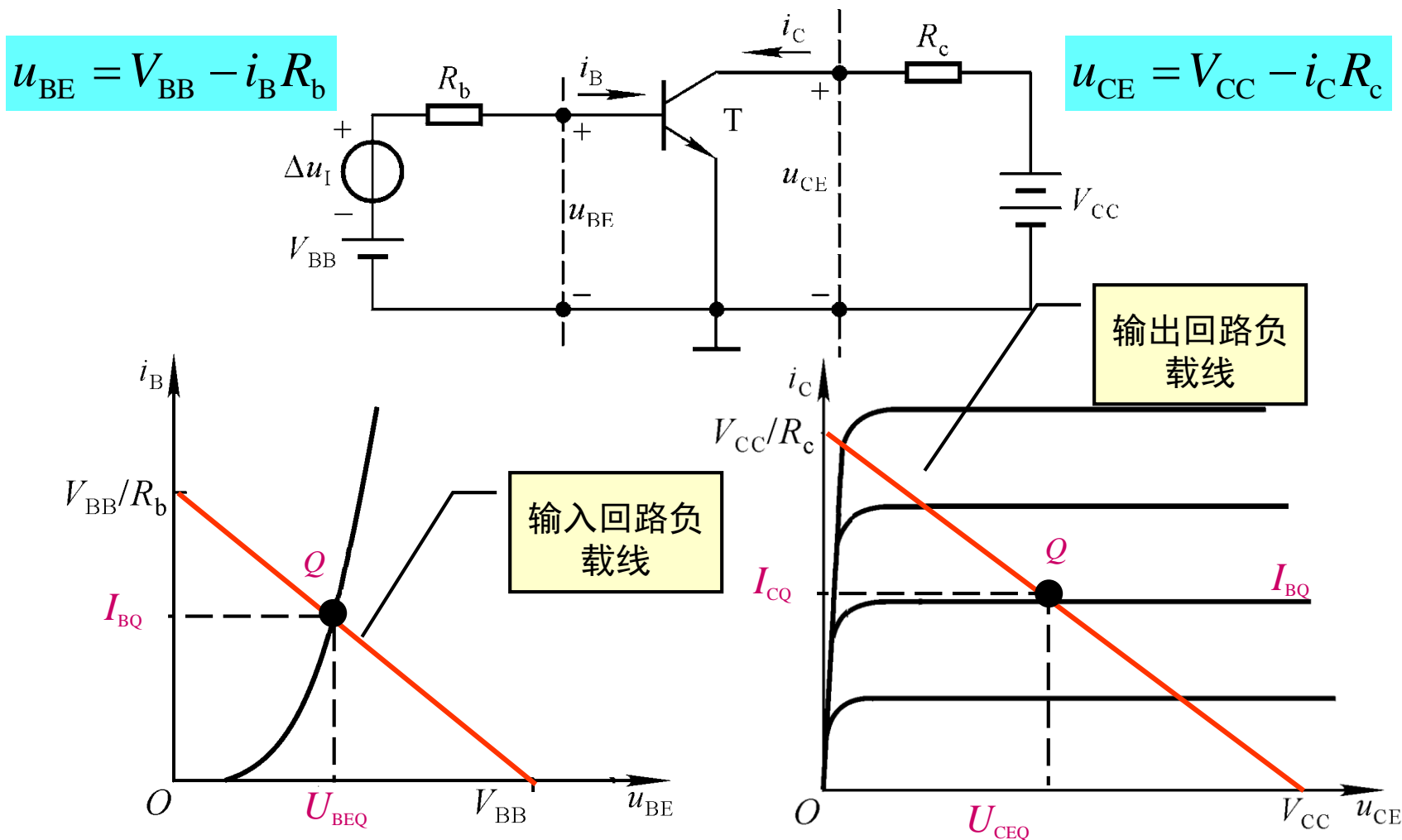
- ✓ 分析电压放大倍数 A_u 、失真情况
- ✓ 分析最大不失真输出电压 U_{om}

□ 静态性能分析

- ✓ 分析Q点

应实测特性曲线!!!

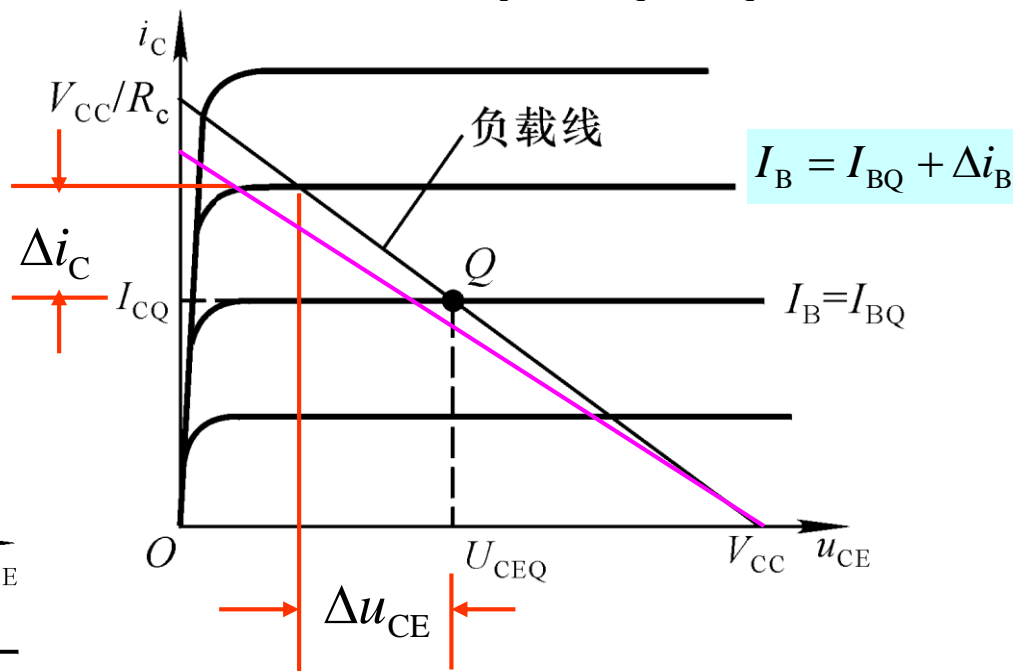
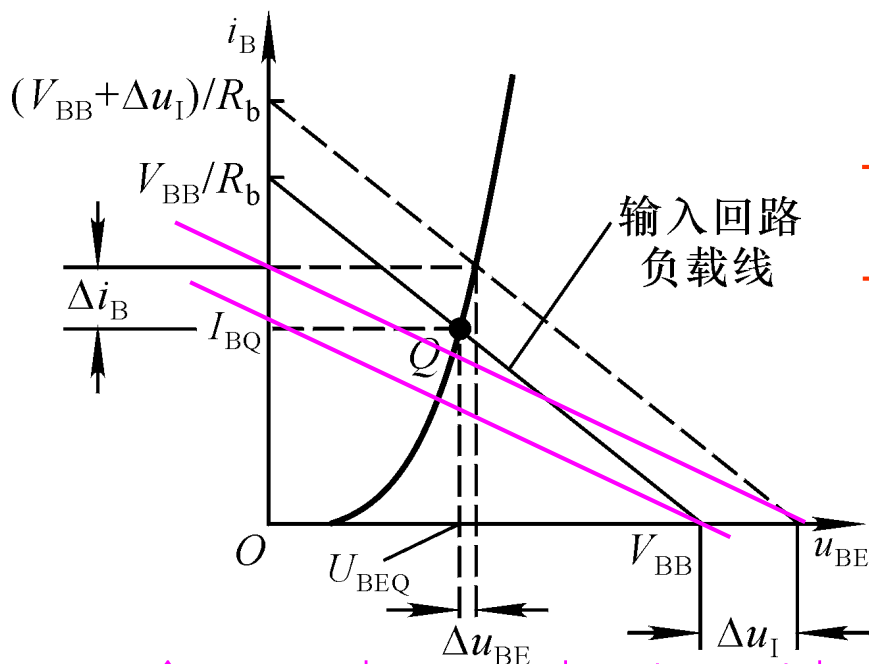
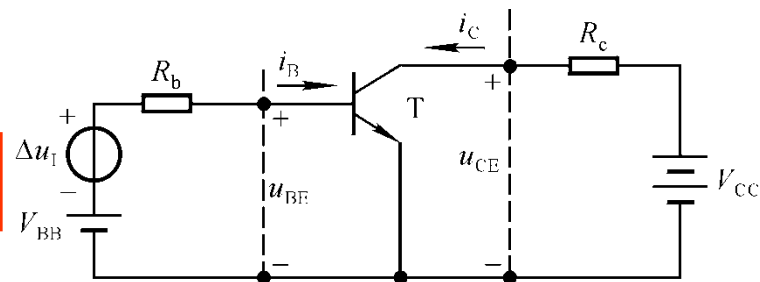
➤ 1. 静态分析：图解二元方程



2. 动态分析：电压放大倍数 A_u

$$u_{BE} = V_{BB} + \Delta u_I - i_B R_b$$

斜率不变



$$R_b \uparrow \Rightarrow \Delta i_B \downarrow \Rightarrow \Delta i_C \downarrow \Rightarrow |\Delta u_{CE}| \downarrow \Rightarrow |A_u| \downarrow$$

$$R_c \uparrow \Rightarrow |\Delta u_{CE}| \uparrow \Rightarrow |A_u| \uparrow$$

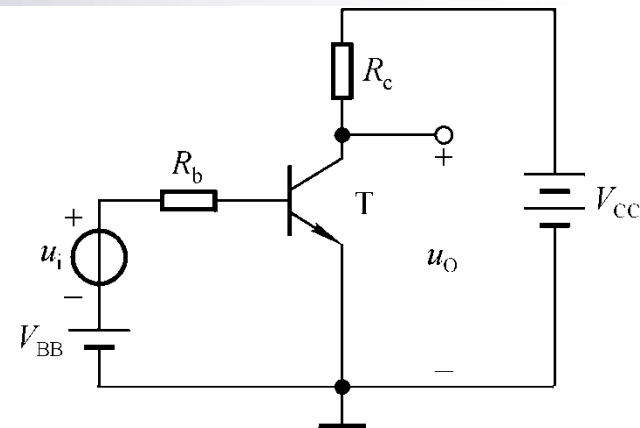
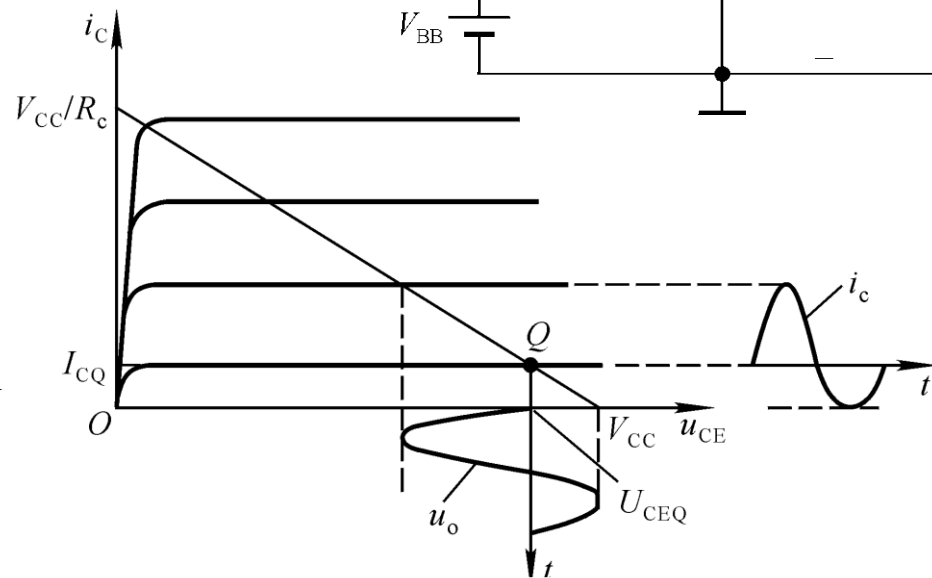
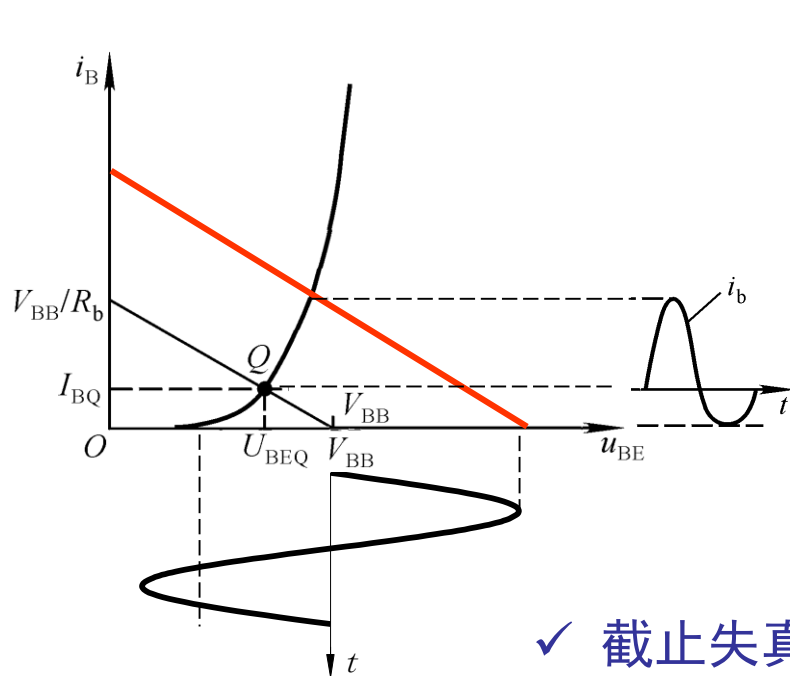
给定 $\Delta u_I \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta i_C \rightarrow \Delta u_{CE} (\Delta u_O) \rightarrow A_u = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I}$

Δu_O 与 Δu_I 反相, A_u 符号为 “-”。



✓ R_b 增大, A_u 变化么?
✓ R_c 增大呢?

➤ 2. 动态分析：失真(截止失真)

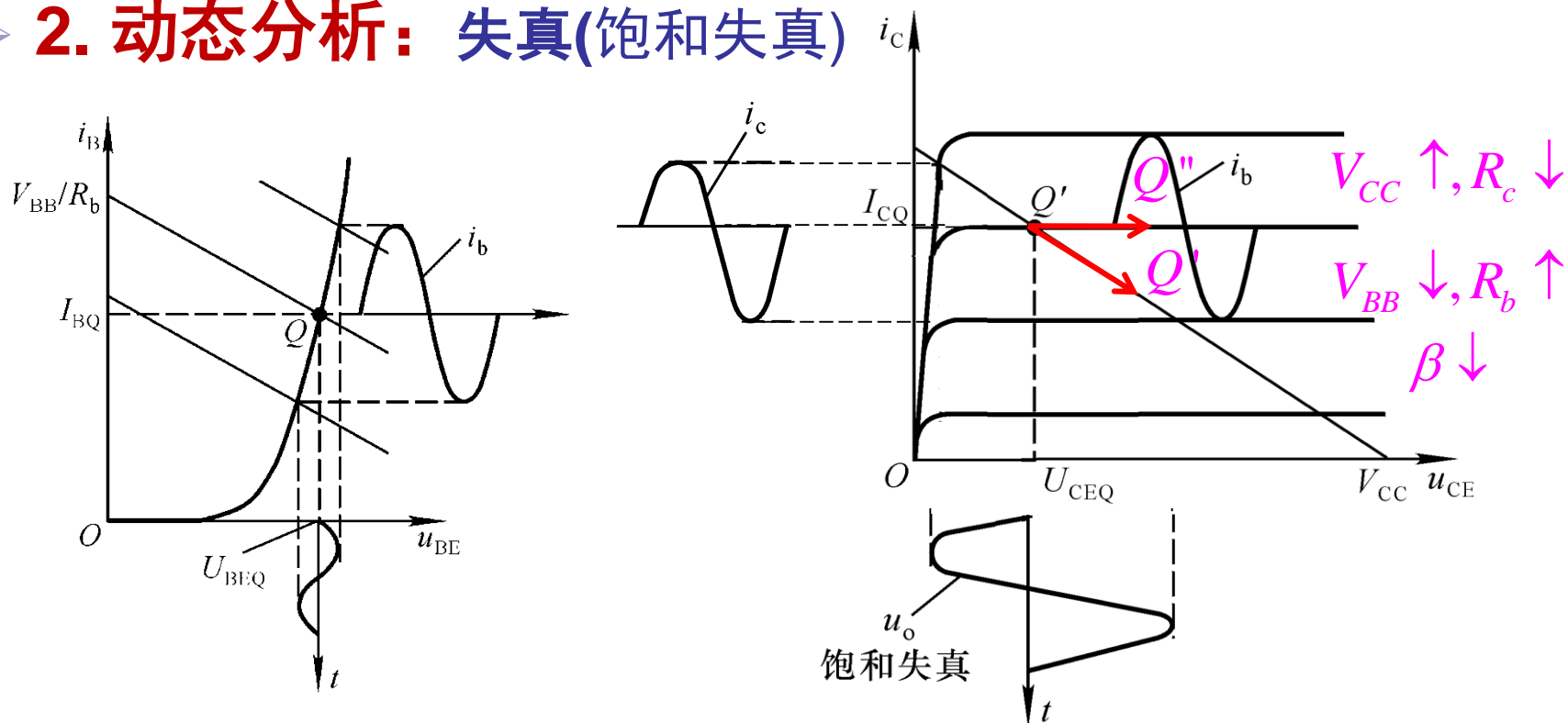


- ✓ 截止失真是在输入回路首先产生失真！
- ✓ 最大截止不失真输出电压峰值为 $(V_{CC} - U_{CEQ})$



- ✓ 消除截止失真的办法？ $V_{BB} \uparrow$
- ✓ 减小 R_b 能消除截止失真吗？
- ✓ 减小 R_c 呢？

➤ 2. 动态分析：失真(饱和失真)



- ✓ 饱和失真是在输出回路首先产生失真！
- ✓ 最大饱和不失真输出电压峰值为 $(U_{CEQ} - U_{CES})$
- ✓ 放大电路的最大不失真输出电压有效值：

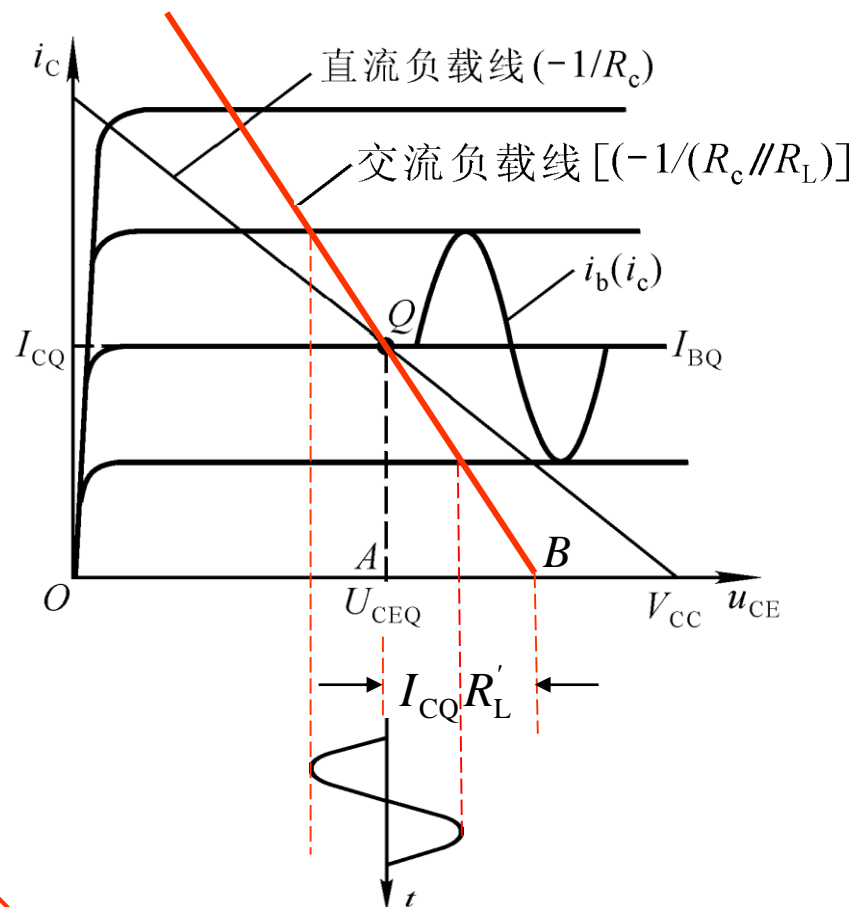
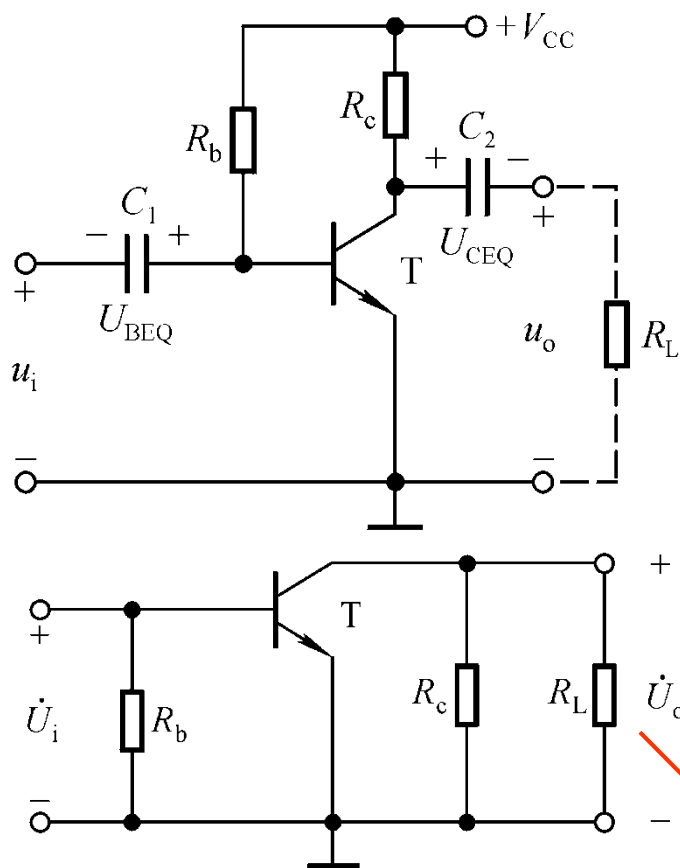
$$U_{om} = \min \left\{ (V_{CC} - U_{CEQ}), (U_{CEQ} - U_{CES}) \right\} / \sqrt{2}$$



✓ 消除方法？

➤ 直流负载线和交流负载线

- ❑ 直接耦合电路：重合
- ❑ 阻容耦合电路：不重合



$U_{om}=?$ Q 点在什么位置 U_{om} 最大?

交流负载线应过 Q 点，且斜率决定于 $(R_c // R_L)$

➤ 图解法总结

□ 优点

- ✓ 能比较直观、全面地反映晶体管的工作情况

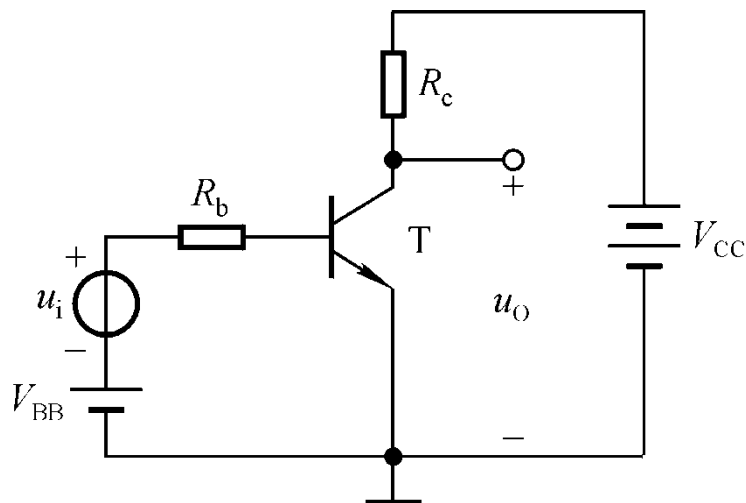
□ 缺点

- ✓ 不方便，晶体管特性曲线不易得到
- ✓ 输入信号较小或频率较高时不准确
- ✓ 只适用于中低频大幅值信号

三、等效电路法

- 半导体器件的非线性特性使放大电路的分析复杂化
- 利用线性元件建立模型，描述一定条件下的非线性特性

✓ 有哪些等效模型？



□ $u_i=0$ 时，仅有直流电源作用，即静态 — **直流等效模型**

□ 在静态的基础上加低频小信号 — **交流等效模型**

□ 在静态的基础上加高频小信号，考虑结电容的影响 — **高频等效模型**

✓ 如何构造等效模型？

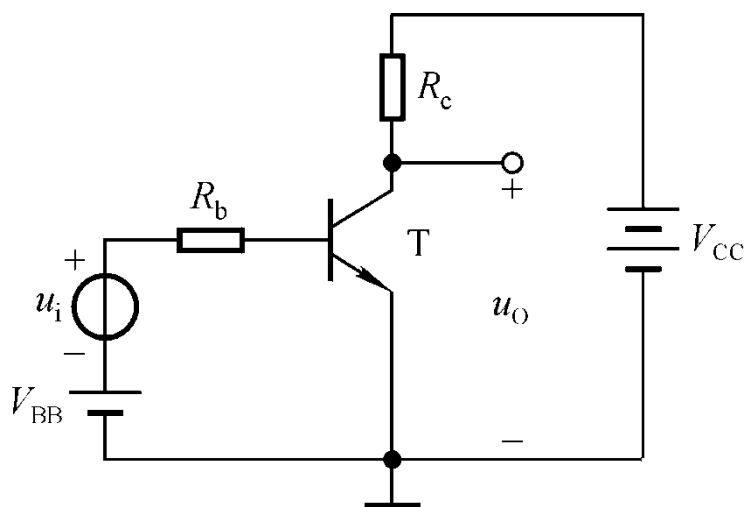
从外部特性

简单，适于近似分析

从内部结构

复杂，适于EDA

➤ 1. 直流模型：适于Q点的分析



✓ 利用估算法求解静态工作点，实质上利用了直流模型

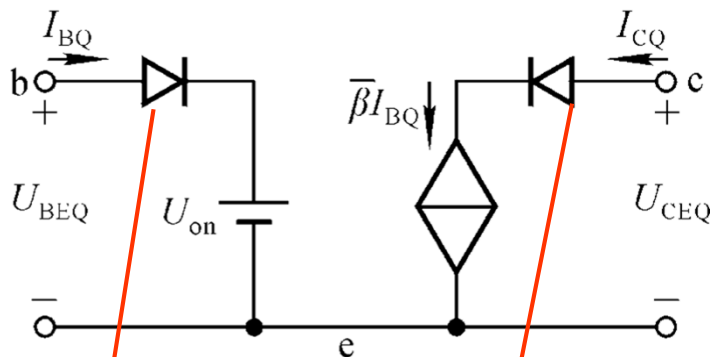
$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b}$$

输入回路等效为恒压源

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

输出回路等效为电流控制的电流源

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

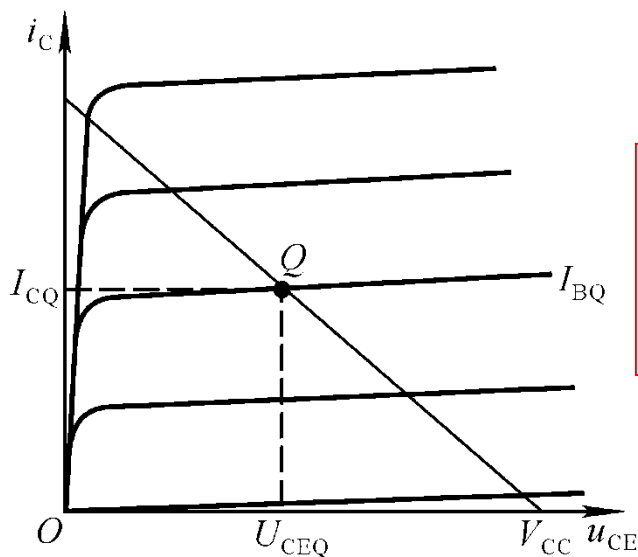
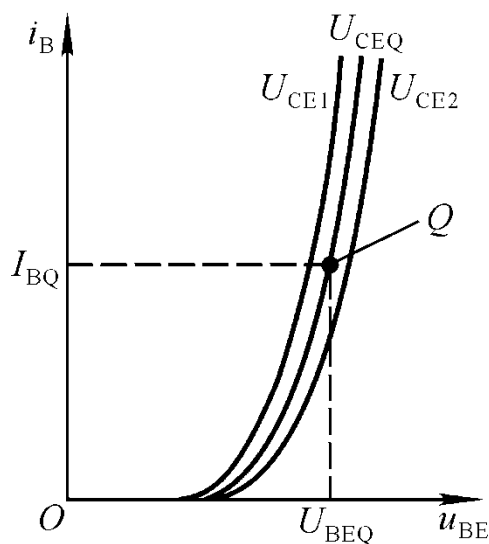
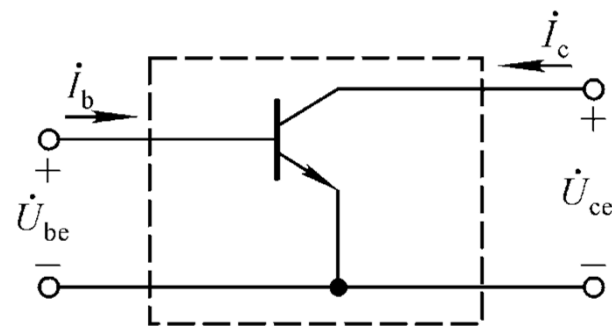


理想二极管

➤ 2. 晶体管的 h 参数等效模型（交流等效模型）

✓ 低频小信号模型

✓ 在交流通路中可将晶体管看成为一个二端口网络：输入回路、输出回路端口



$$\begin{cases} u_{BE} = f(i_B, u_{CE}) \\ i_C = f(i_B, u_{CE}) \end{cases}$$

➤ 2. 晶体管的 h 参数等效模型（交流等效模型）

✓ 在低频、小信号作用下的关系式

$$\begin{cases} du_{BE} = \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \Big|_{U_{CE}} di_B + \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \Big|_{I_B} du_{CE} \\ di_C = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \Big|_{U_{CE}} di_B + \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \Big|_{I_B} du_{CE} \end{cases}$$

电阻

$$\begin{cases} u_{BE} = f(i_B, u_{CE}) \\ i_C = f(i_B, u_{CE}) \end{cases}$$

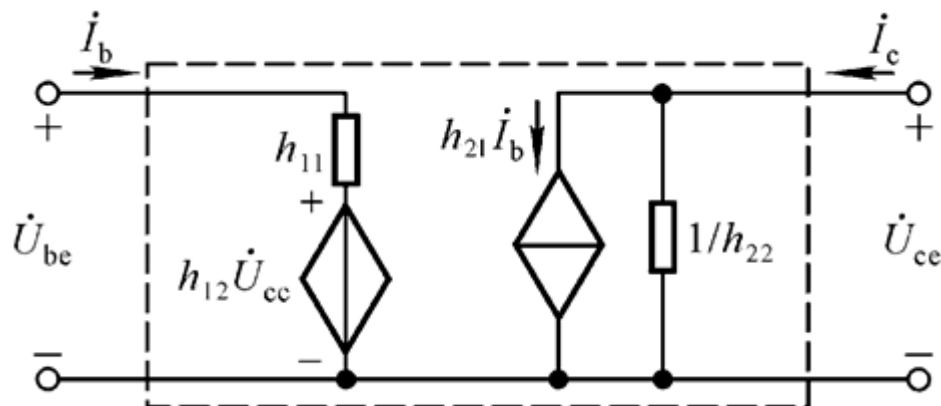
无量纲

$$\begin{cases} \dot{U}_{be} = h_{11} \dot{I}_b + h_{12} \dot{U}_{ce} \\ \dot{I}_c = h_{21} \dot{I}_b + h_{22} \dot{U}_{ce} \end{cases}$$

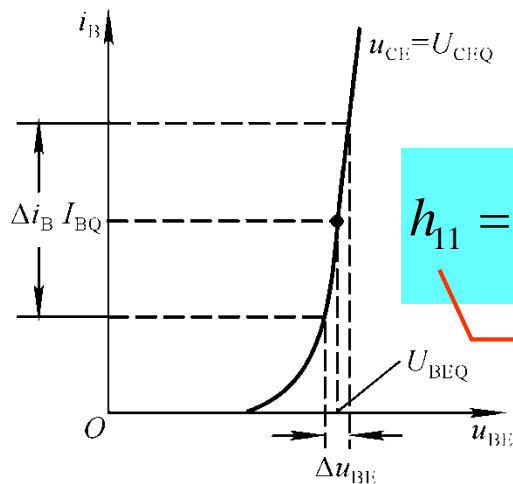
无量纲

电导

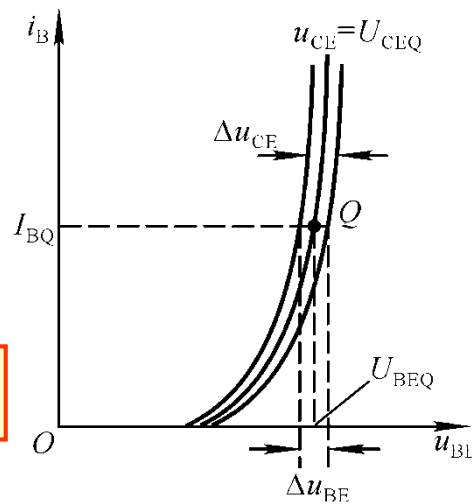
✓ 交流等效模型



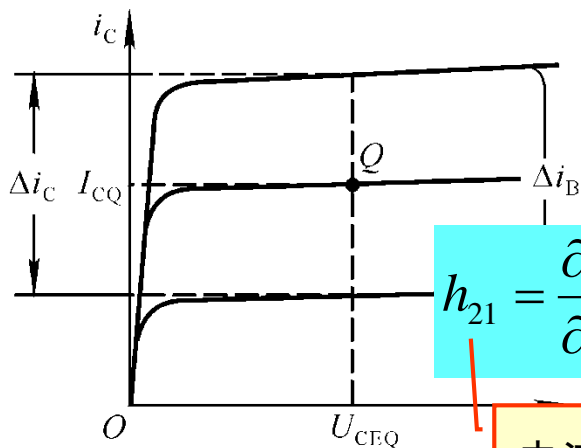
h参数的物理意义



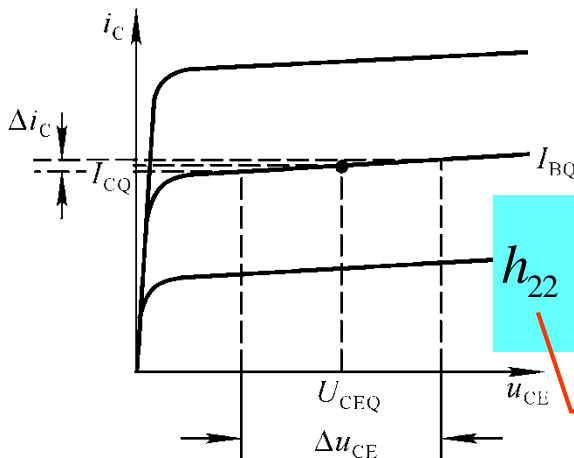
b-e间的动态电阻



内反馈系数



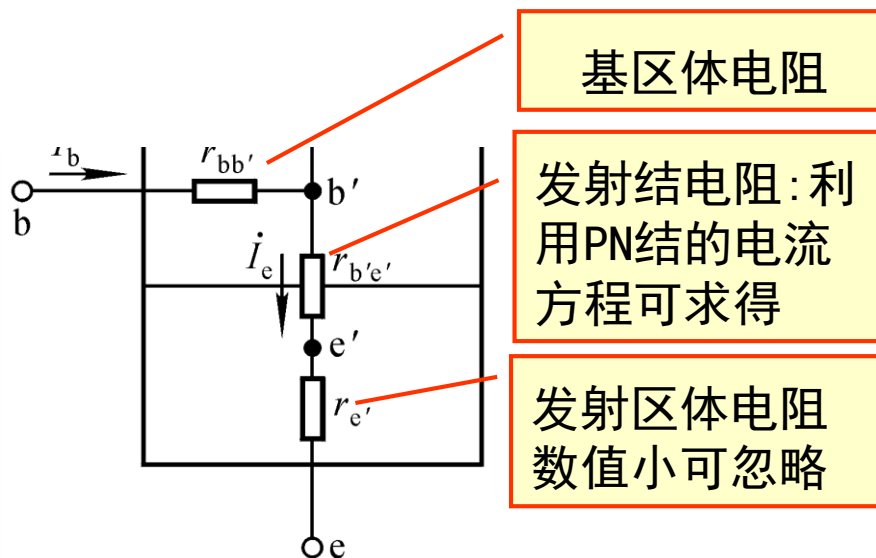
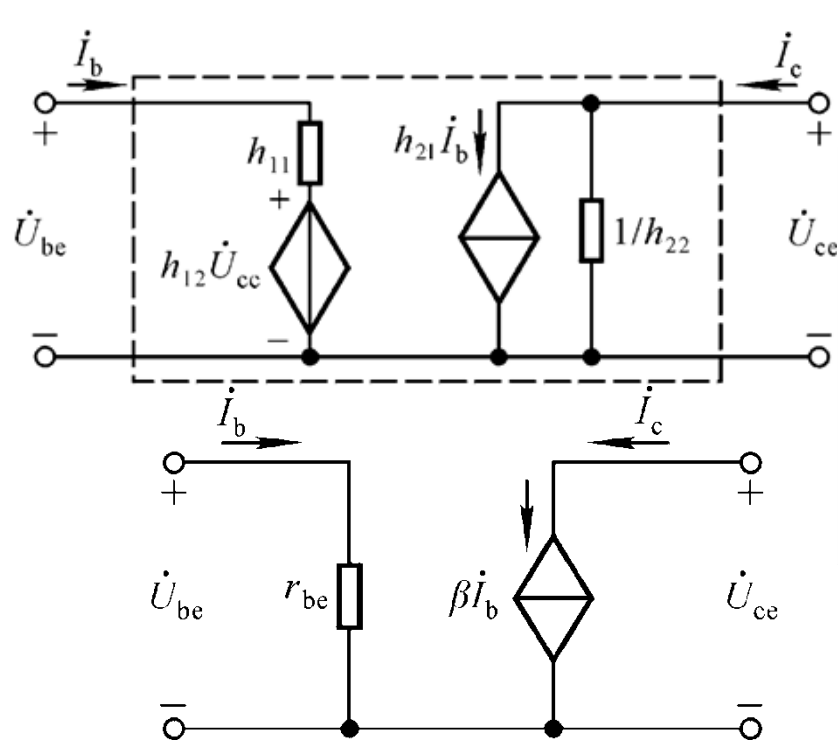
电流放大系数



c-e间的电导

✓分清主次，合理近似！什么情况下 h_{12} 和 h_{22} 的作用可忽略不计？

简化的 h 参数等效电路—交流等效模型



✓在输入特性曲线上，Q点越高， r_{be} 越小！

$$r_{be} = \frac{U_{be}}{I_b} = r_{bb'} + r_{b'e'} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

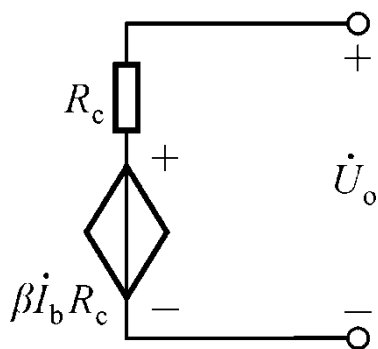
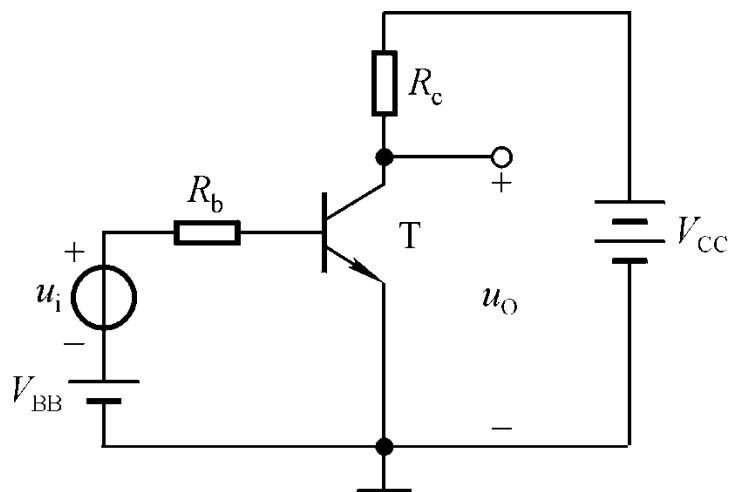
查阅手册

✓ 适用中低频信号输入场合
✓ 适用NPN & PNP型管

由 I_{EQ} 算出

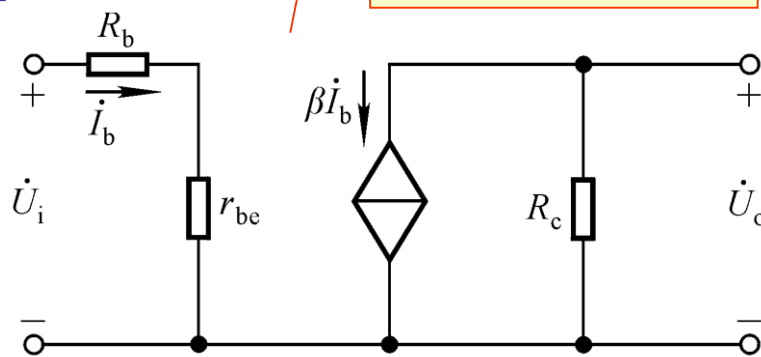
➤ 3. 放大电路的动态分析

□ 直接耦合共射放大电路



$$R_o = R_c$$

放大电路的交流
等效电路



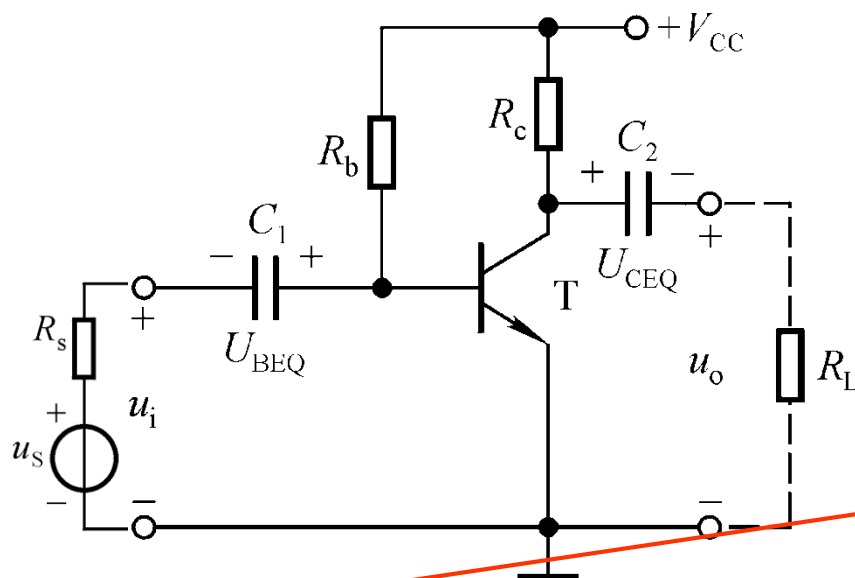
$$\dot{U}_i = \dot{I}_i (R_b + r_{be}) = \dot{I}_b (R_b + r_{be})$$

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R_c$$

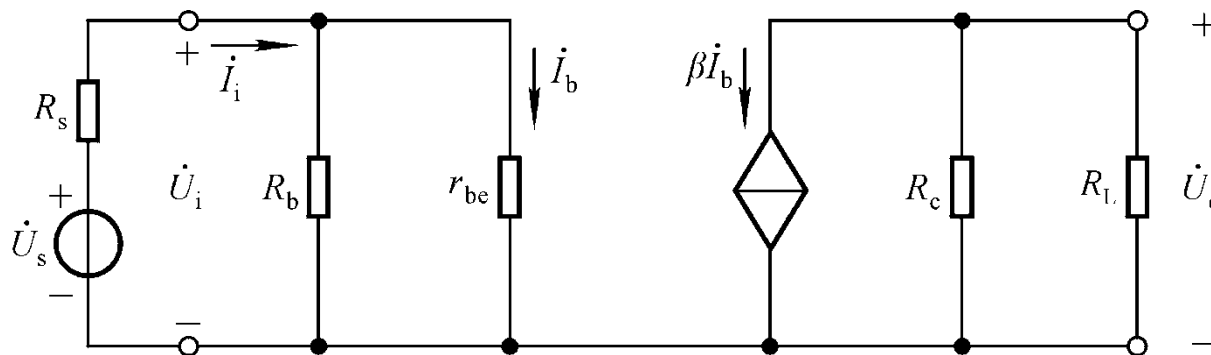
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}}$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_b + r_{be}$$

阻容耦合共射放大电路



输入电阻中
不应含有 R_s !



输出电阻中
不应含有 R_L !

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

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

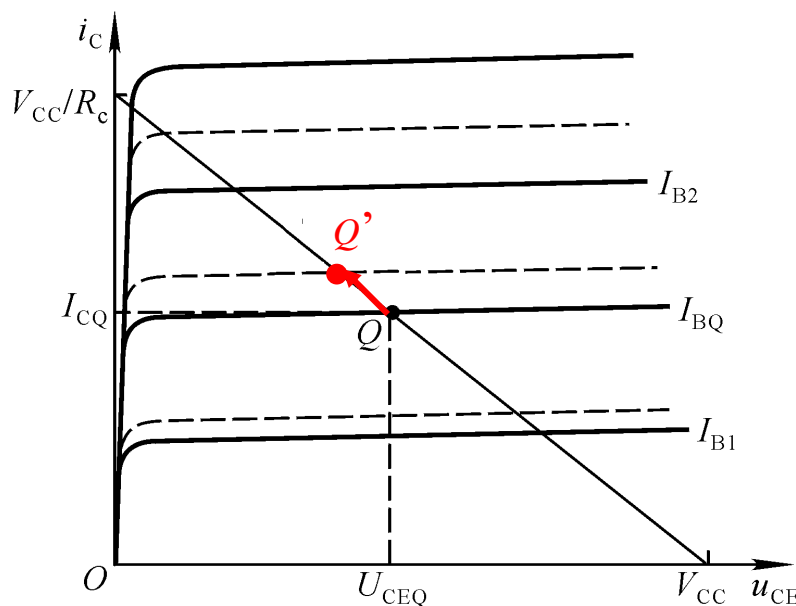
$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be}$$

$$R_o = R_c$$

§ 2.4 静态工作点的稳定

- 一. 温度对静态工作点的影响
- 二. 静态工作点稳定的典型电路
- 三. 稳定静态工作点的方法

一、温度对静态工作点的影响



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

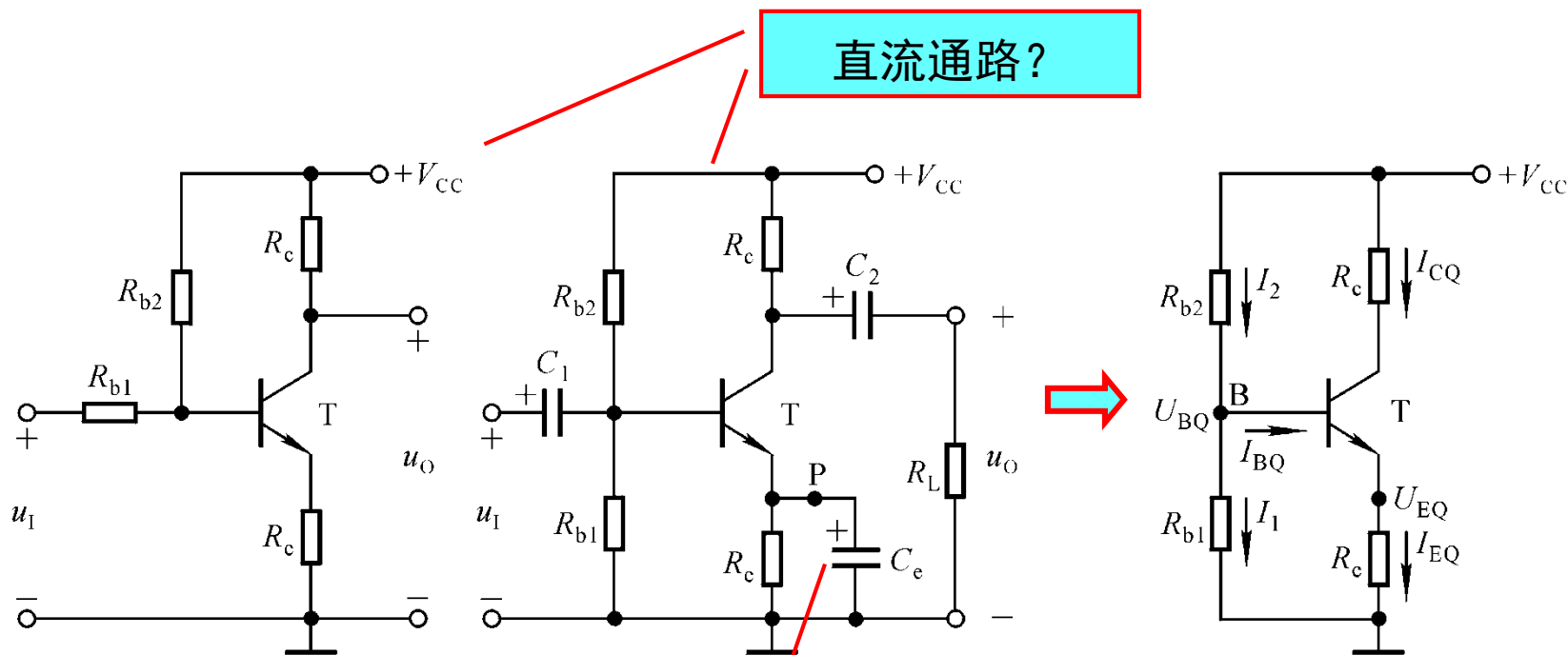
$$\searrow I_{CEO} \uparrow \nearrow$$

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。

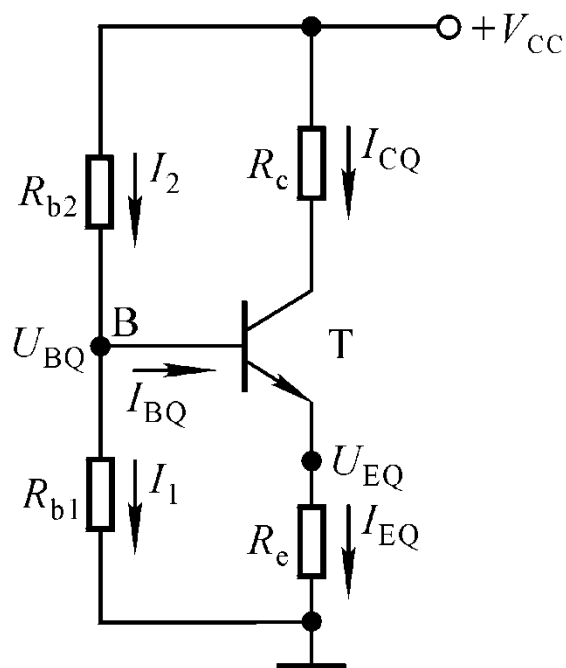
二、静态工作点稳定的典型电路

➤ 1. 电路组成



C_e 为旁路电容, 在交流通路中
可视为短路

➤ 2. 稳Q电路的原理



✓ 为了稳定Q点，若要求 $I_1 \gg I_B$ ，
则 $I_1 \approx I_2$ ；因此

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

基本不随温度变化，则

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

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

➤ R_e 的直流负反馈作用

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

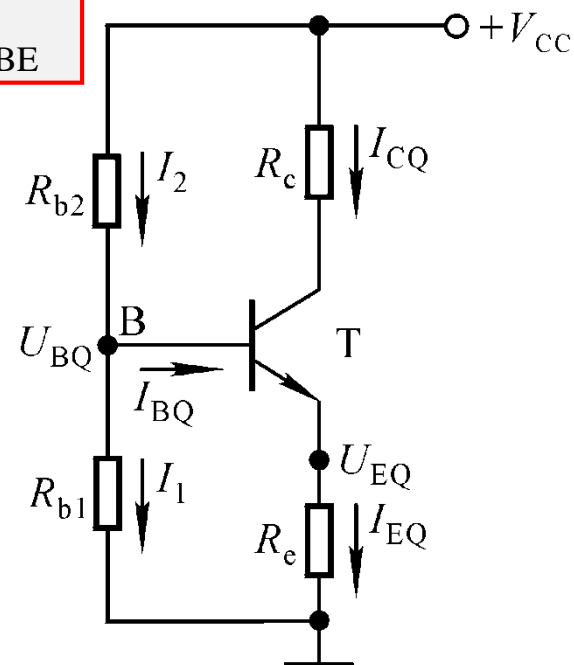
关于反馈的一些概念： I_C 通过 R_e 转换为 ΔU_E 影响 U_{BE}

将输出量通过一定的方式引回输入回路影响输入量的措施称为**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**

温度升高 I_C 增大，反馈的结果使之减小



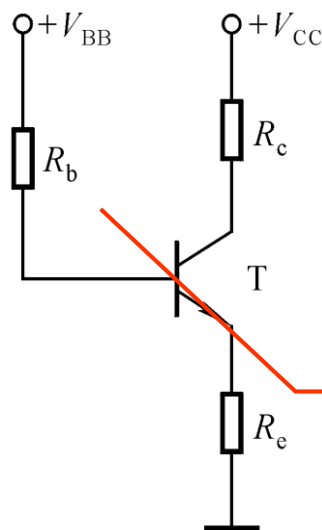
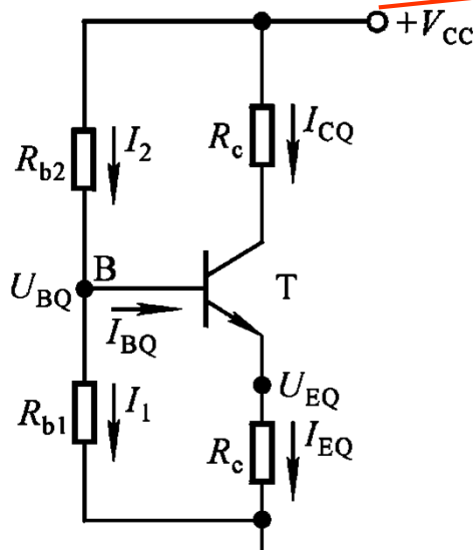
R_e 起直流负反馈作用，其值越大，反馈越强， Q 点越稳定

R_e 有上限值么？

有差调节！

3. Q点分析

分压式电流负反馈工作点稳定电路



$$V_{BB} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

$$R_b = R_{b1} // R_{b2}$$

R_b 上静态电压是否可忽略不计？

忽略了什么？
何时忽略？

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

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

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

判断方法： $R_{b1} // R_{b2} \ll (1 + \beta) R_e$?

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

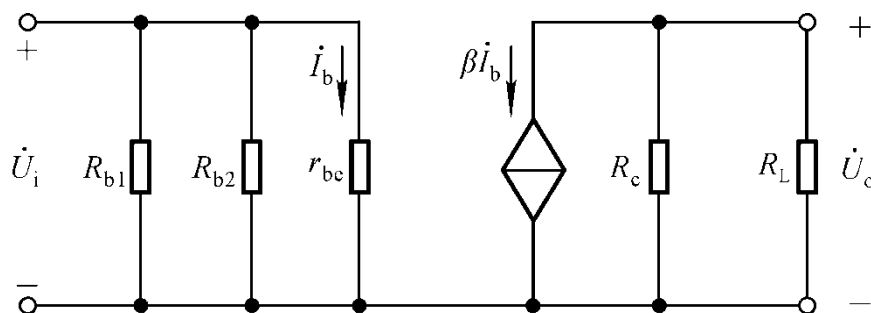
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c - I_{EQ} R_e$$

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

要多小？

4. 动态分析

有旁路电容 C_e 时:

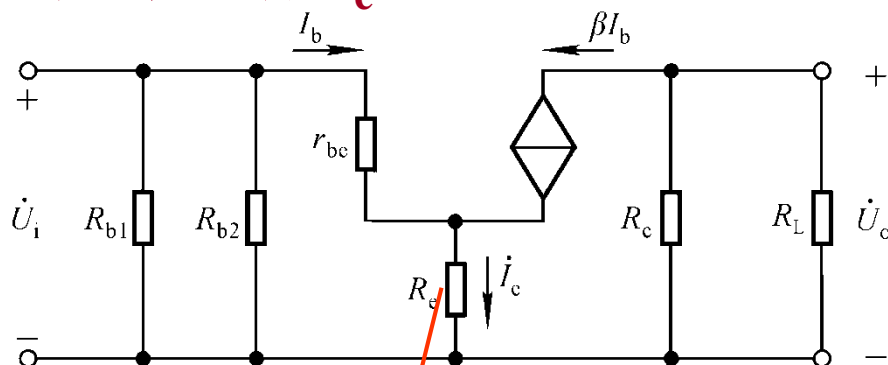


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

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

$$R_o = R_c$$

无旁路电容 C_e 时:



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

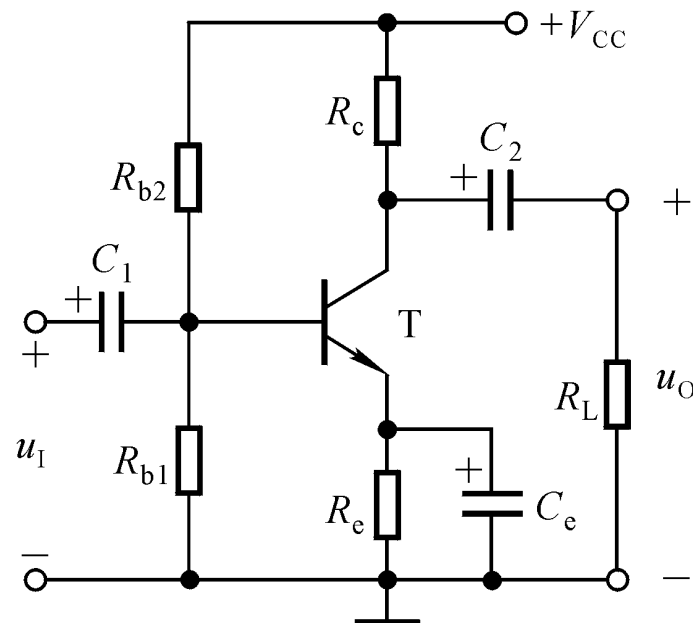
$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \\ &= \frac{-\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e} \\ &= -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \end{aligned}$$

利?弊?

若 $(1 + \beta)R_e \gg r_{be}$, 则 $\dot{A}_u \approx -\frac{R'_L}{R_e}$

三、稳定静态工作点的方法

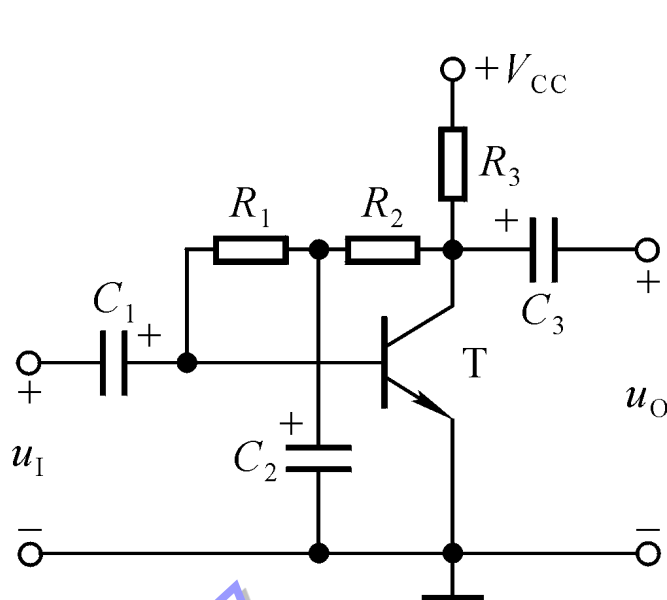
- 引入直流负反馈
- 温度补偿：利用对温度敏感的元件，在温度变化时直接影响输入回路
- 例如， R_{b1} 或 R_{b2} 采用热敏电阻，它们的温度系数？



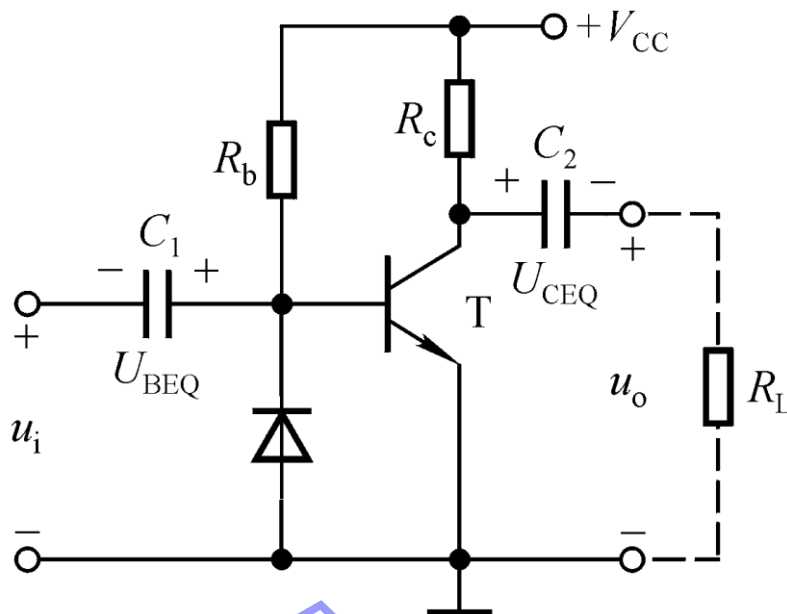
$$\begin{array}{ccccccc}
 T(^{\circ}\text{C}) \uparrow & \rightarrow & I_C \uparrow & \rightarrow & U_E \uparrow & \rightarrow & U_{BE} \downarrow \\
 & \searrow & & & & & \\
 & & R_{b1} \downarrow & \rightarrow & U_B \downarrow & \rightarrow & I_C \downarrow
 \end{array}$$

讨论

□ 图示两个电路中是否采用了措施来稳定静态工作点？若是，则是什么措施？你还能提出哪些方法？



直流负反馈



温度补偿：利用二极管
反向特性, $T \uparrow \rightarrow I_S \uparrow$

§ 2.5 晶体管放大电路的三种接法

一. 基本共射放大电路

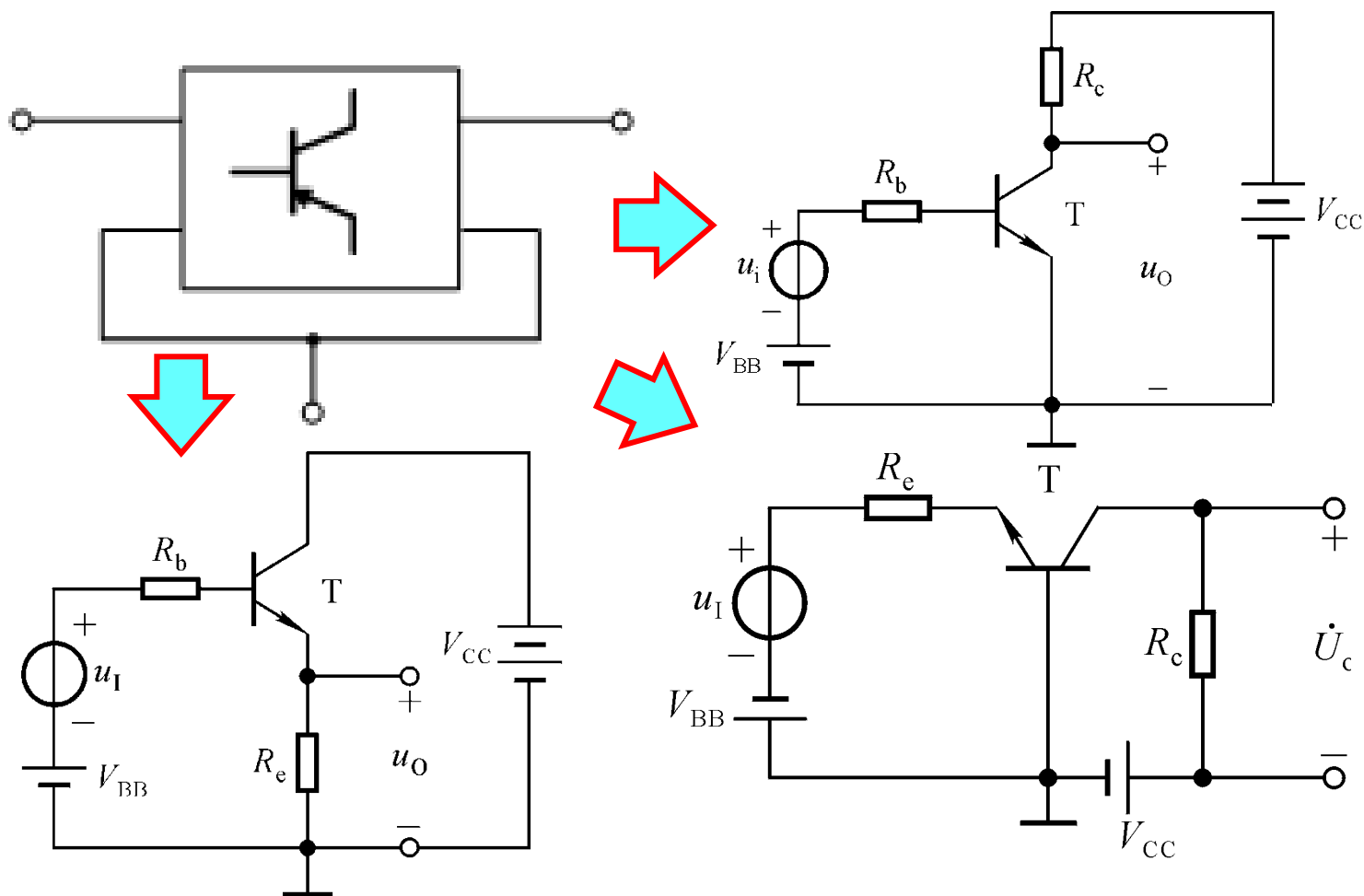
二. 基本共集放大电路

三. 基本共基放大电路

四. 三种接法放大电路的比较

讨论

晶体管放大电路的接法？



➤ 晶体管放大电路的三种基本接法：共射 共集 共基

□ **共射**(CE, Common-emitter): 以e为输入回路和输出回路的公共端，用来实现 i_B 对 i_C 的控制。

□ **共集**(CC, Common-collector): 以c为公共端的接法用来实现 i_B 对 i_E 的控制

□ **共基**(CB, Common-base): 以b为公共端的接法，用来实现 i_E 对 i_C (或 i_C 对 i_E)的控制。

✓**注意：**三种接法都是从交流通路中定义的，即，输入回路和输出回路是指交流通路中的

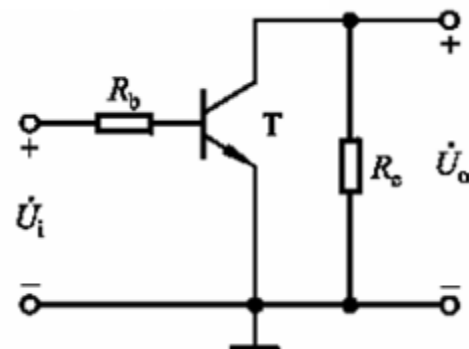
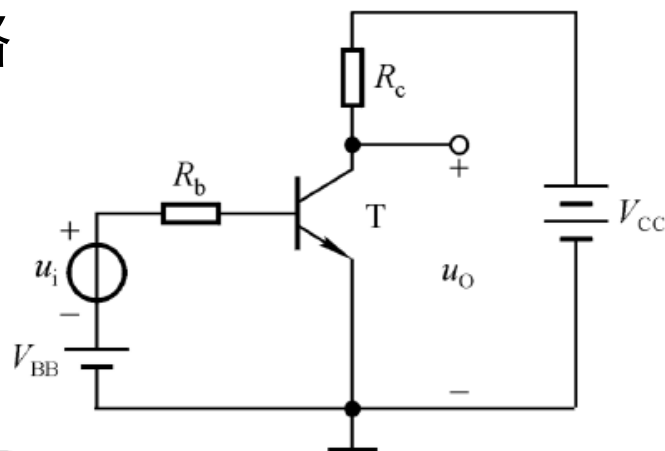
一、基本共射放大电路

□ **静态Q点：** 直流通路

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

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

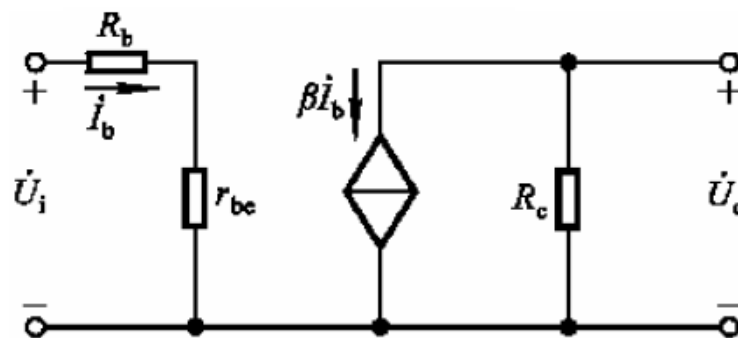
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$$



□ **动态：** 求 A_u 、 R_i 、 R_o 。

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_c R_c}{\dot{I}_b (R_b + r_{be})} = \frac{-\beta R_c}{R_b + r_{be}}$$

$$R_i = \dot{U}_i / \dot{I}_b = R_b + r_{be} \quad R_o = R_c$$



□ **特点：**

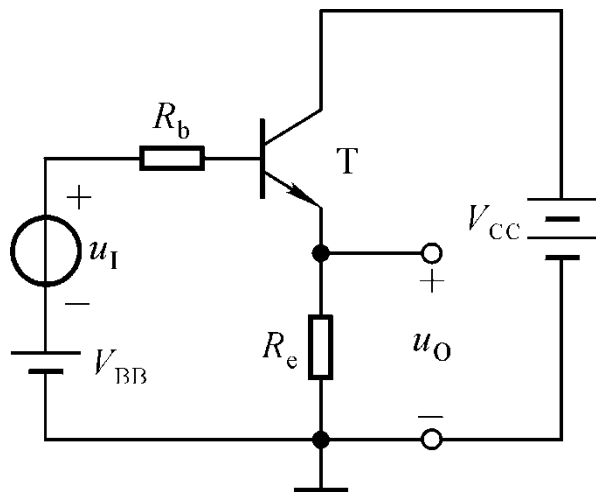
✓ 既能放大电压，又能放大电流

✓ A_u 大

✓ U_o 与 U_i 反相

二、基本共集放大电路

➤ 1. 静态分析



□ 输入回路

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

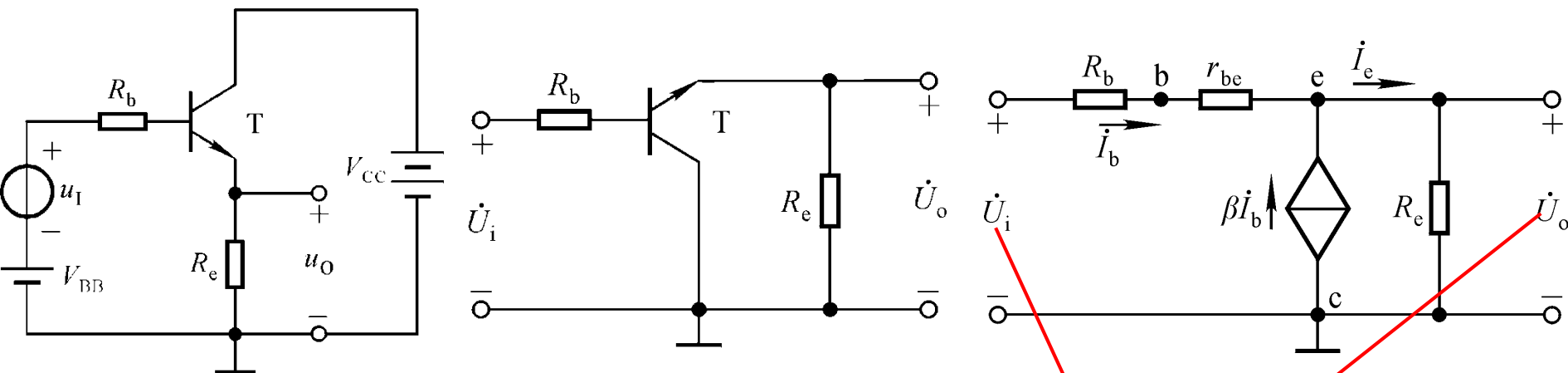
$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$$

□ 输出回路

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

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

➤ 2. 动态分析：电压放大倍数



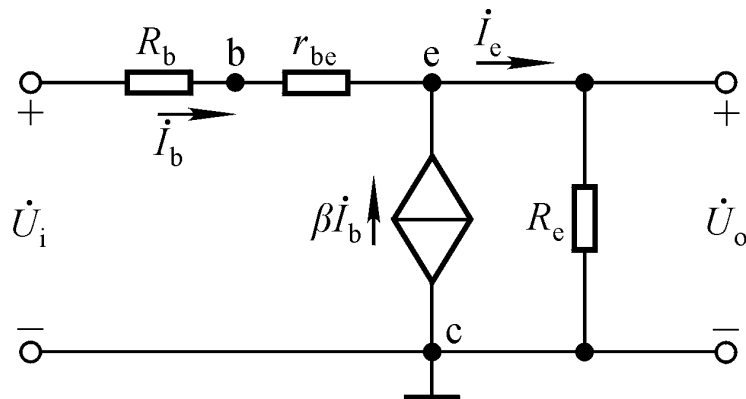
$$\begin{aligned}\dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_e R_e}{\dot{I}_b (R_b + r_{be}) + \dot{I}_e R_e} \\ &= \frac{(1 + \beta) R_e}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e}\end{aligned}$$

$$U_o < U_i$$

故称之为射
极跟随器

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

2. 动态分析：输入电阻



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

从基极看 R_e ，被增大到 $(1 + \beta)$ 倍

R_i 大：几十千
~几百千欧

带负载电阻后

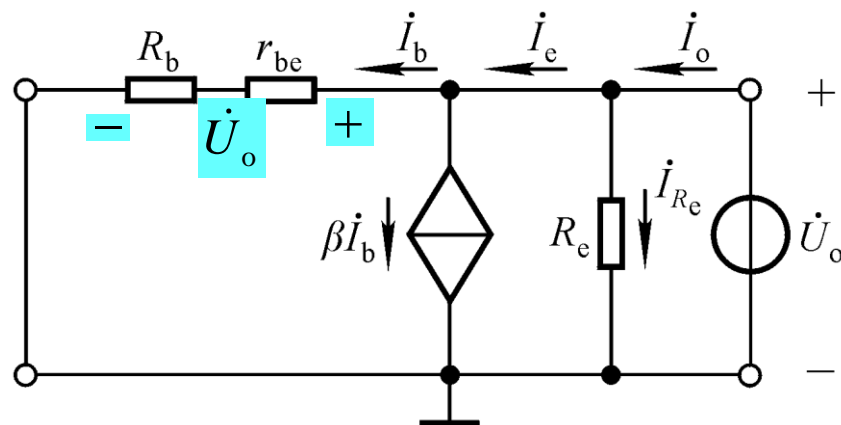
$$R_i = R_b + r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)$$

R_i 与负载有关！受后级电路影响

➤ 2. 动态分析：输出电阻

加压求
流法！

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

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

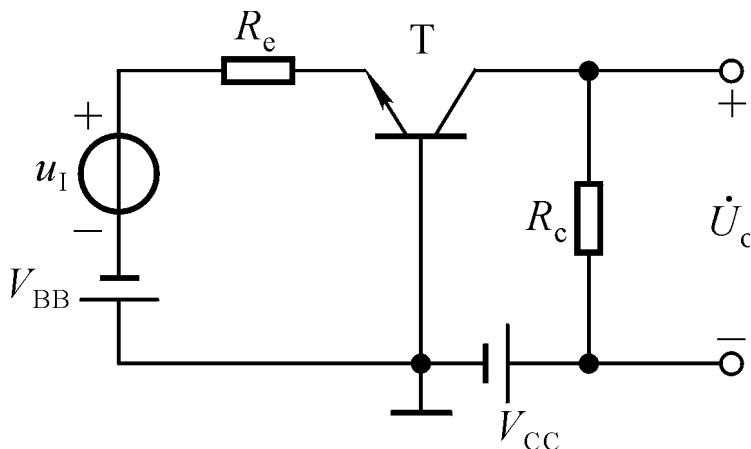
R_o 小：几十
~几百欧

➤ 3. 共集放大电路的特点：

- 具有电压跟随作用($A_u \approx 1$), U_o 、 U_i 同相
- R_i 大(几十到几百 $k\Omega$), 从信号源索取的电流小
- R_o 小(几十到几百 Ω), 带负载能力强
- 只放大电流, 不放大电压
- 一般作为输入级、输出级或者中间缓冲电路

三、基本共基放大电路

➤ 1. 静态分析



□ 输入回路

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

□ 输出回路

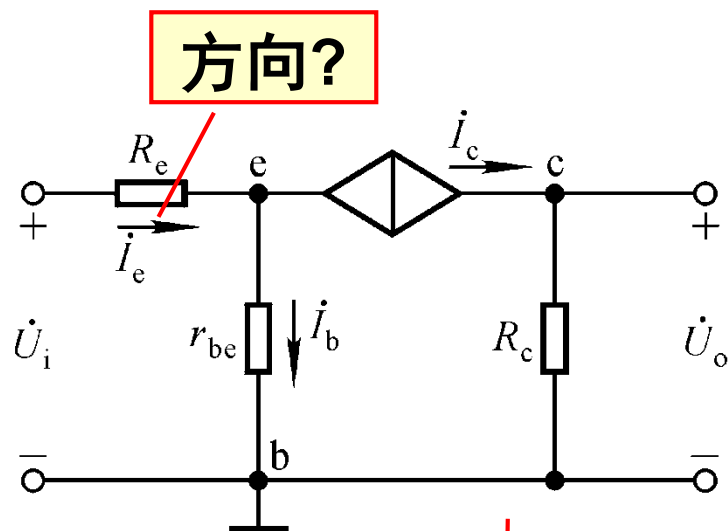
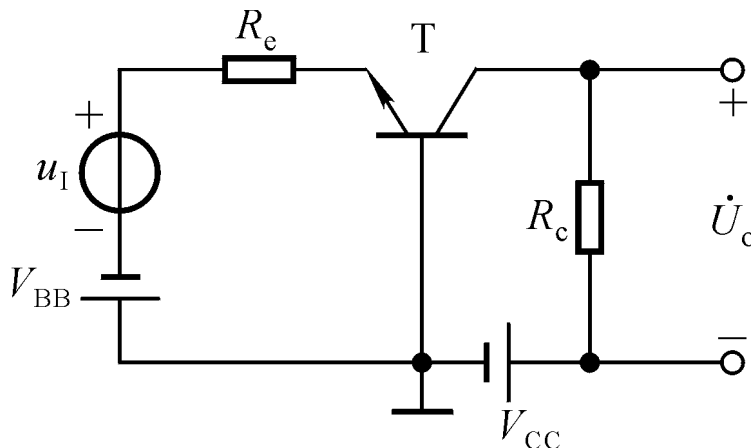
$$I_{CQ}R_e + U_{CEQ} - U_{BEQ} = V_{CC}$$

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

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

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

➤ 2. 动态分析



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

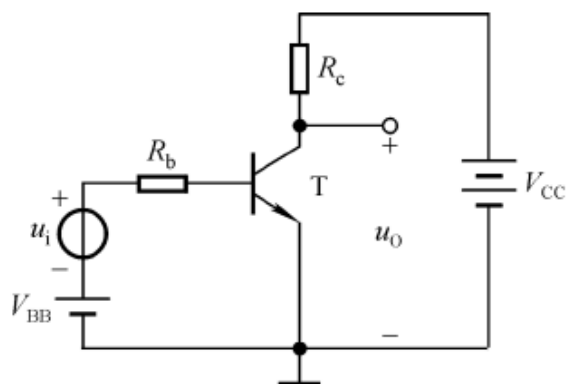
$$R_i = R_e + \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

$$R_o = R_c$$

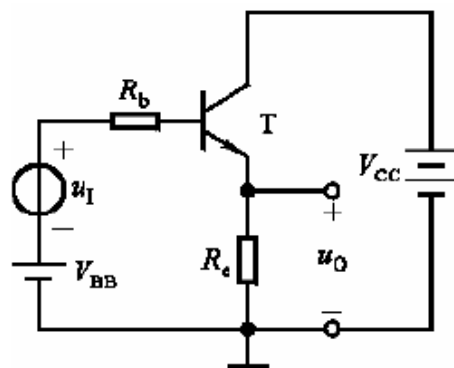
$$A_i = ?$$

- 3. 特点
- 输入电阻小，频带宽，用于宽频带放大电路；
 - 只放大电压，不放大电流！

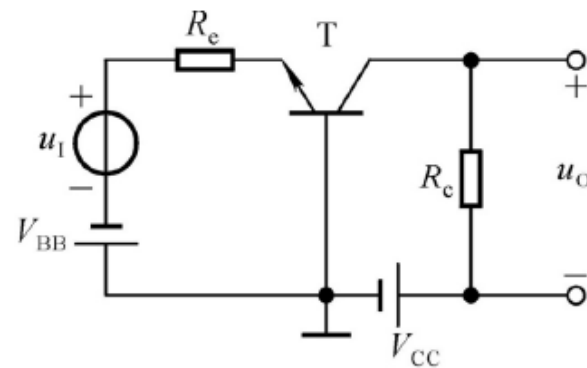
四、三种接法的比较：空载情况下



共射



共集

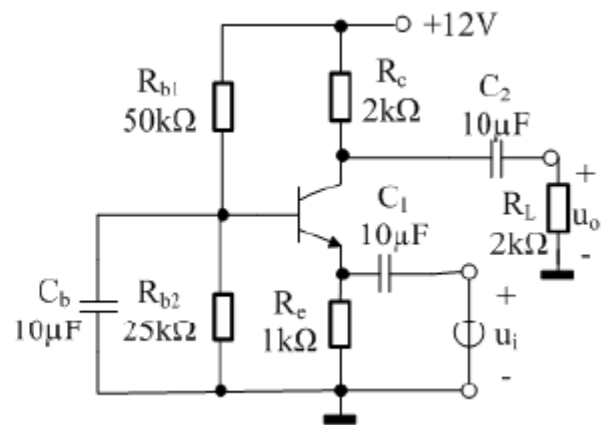
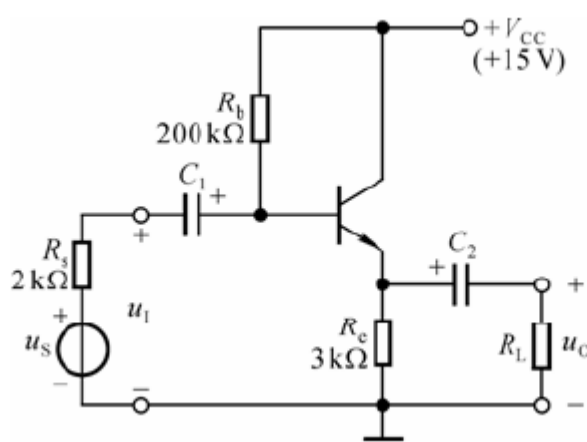
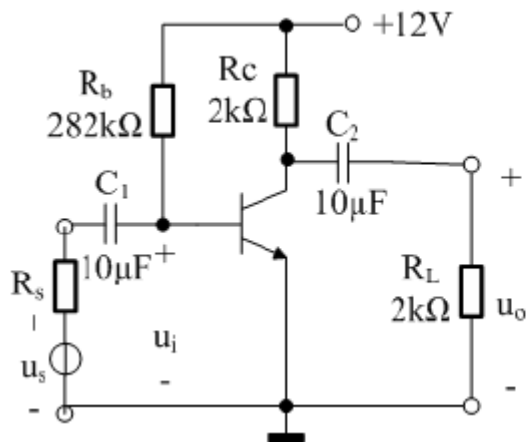


共基

基本接法	CE	CC	CB
$ A_u $	大(U_o 与 U_i 反相)	<1 (U_o 与 U_i 同相)	中(U_o 与 U_i 同相)
A_i	β	$1+\beta$	$\alpha=\beta/(1+\beta)<1$
R_i	中	大	小
R_o	R_c	小	R_c
f_w	窄	中	宽
主要用途	用于低频电压放大	输入级和输出级	宽频带放大电路

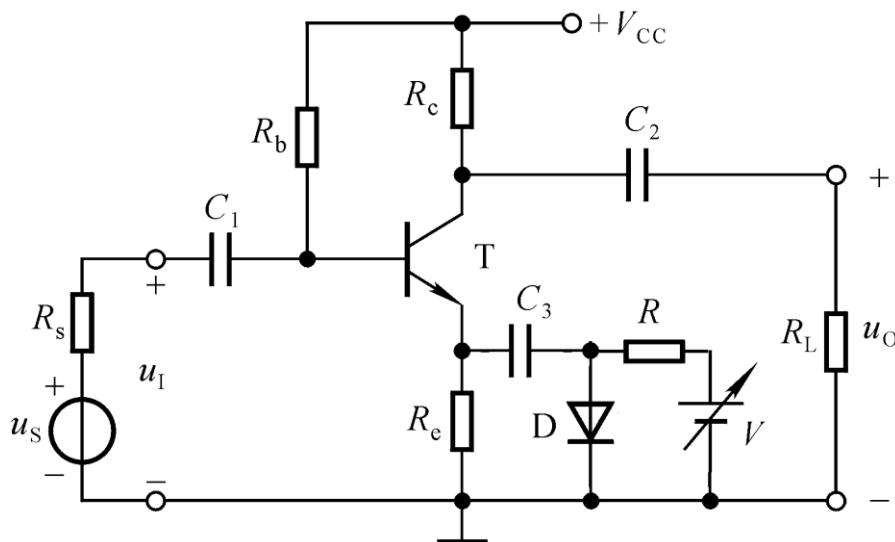
➤ 讨论1

□ 判断放大电路的接法

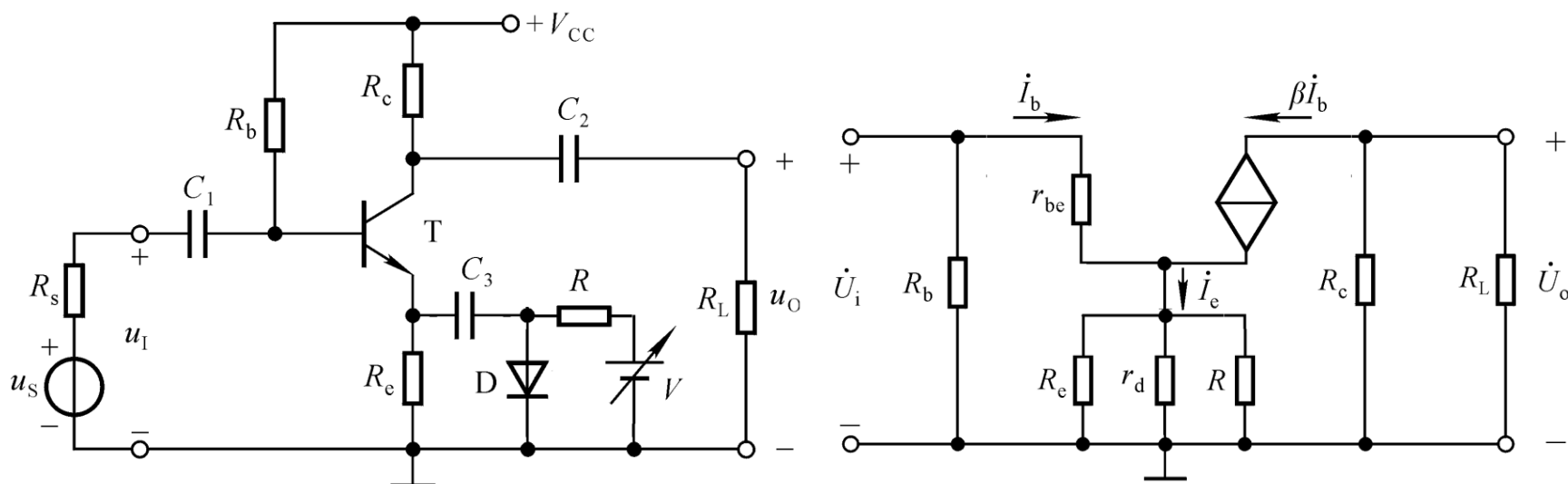


讨论2

□ 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？



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

当 $R_e // R \gg r_D$ 时,

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

§ 2.6 场效应管及其基本放大电路

一. 场效应管

二. 场效应管放大电路静态工作点的设置方法

三. 场效应管放大电路的动态分析

一、场效应管

➤ 特点：

- 输入电阻高 ($M\Omega$ 以上)
- 制作体积小，集成工艺简单，广泛应用于大规模和超大规模集成电路
- 噪声低，热稳定性好，抗辐射能力强
- 耗电少，工作电压范围宽

➤ 分类：

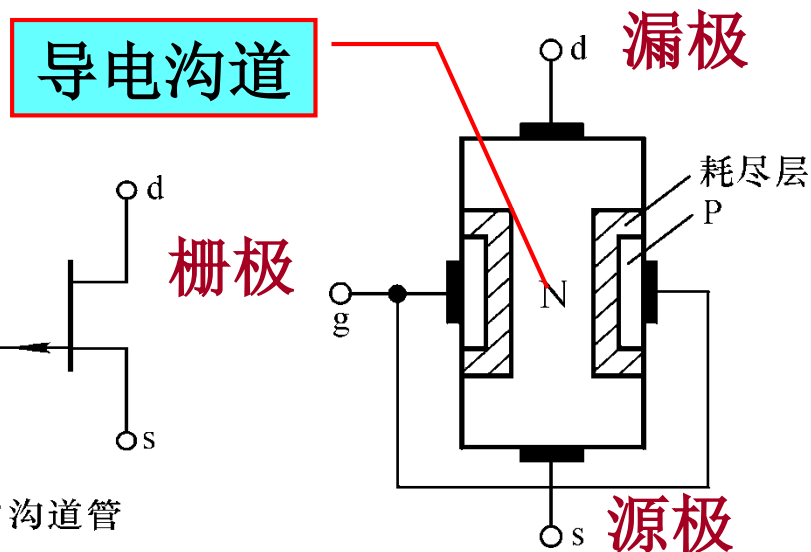
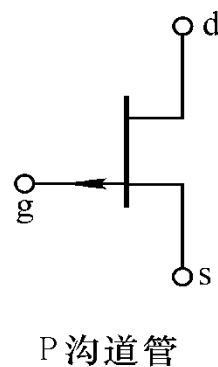
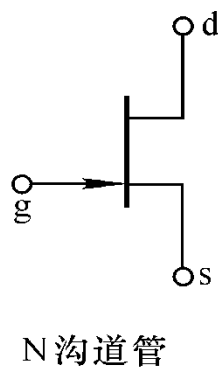
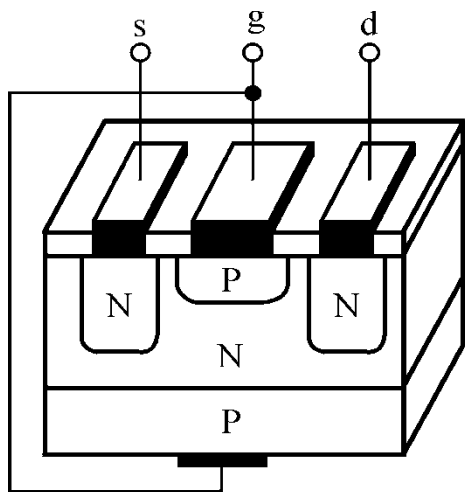
- 结型 (JFET, Junction field effect transistor)
- 绝缘栅型 (MOSFET, Metal Oxide Semiconductor FET)

一、场效应管（以N沟道为例）

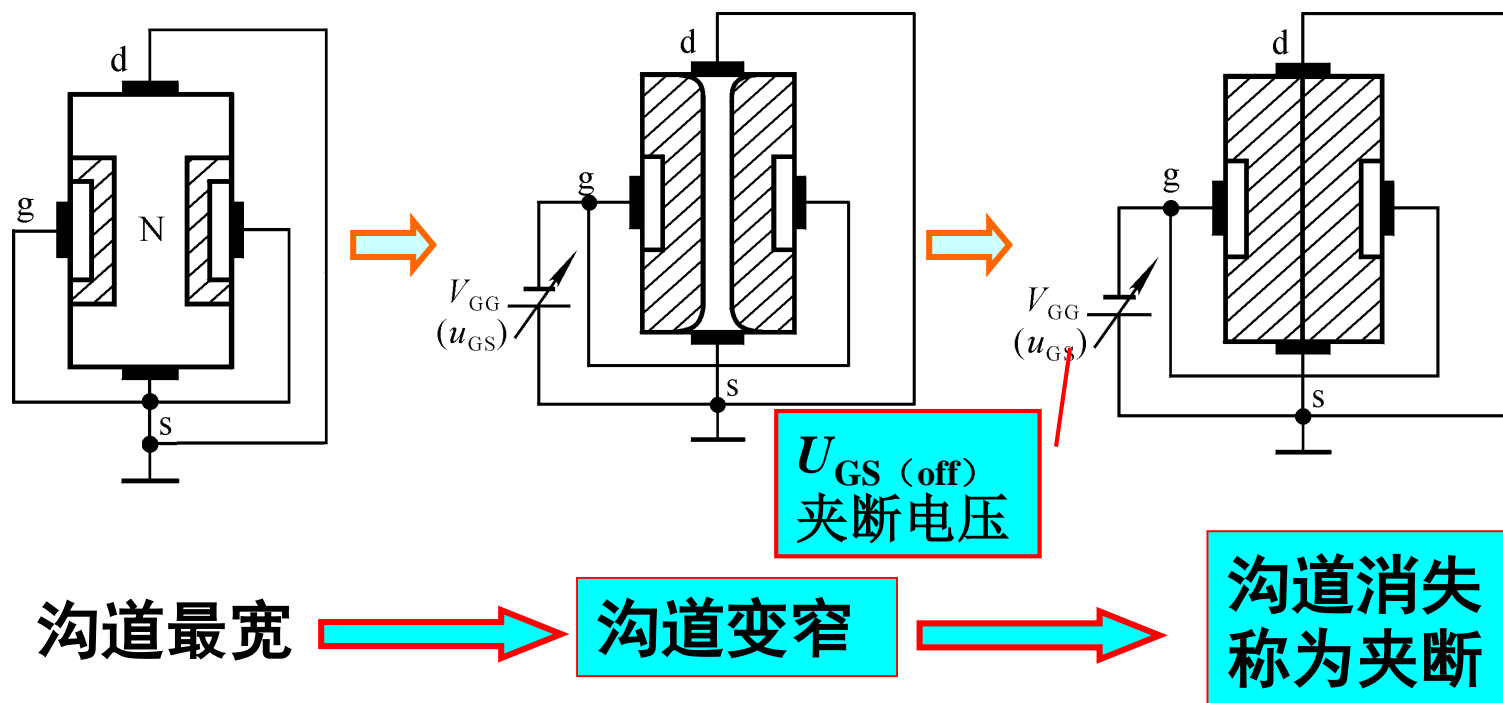
➤ 单极型管

- 三个极：源极 (s), 栅极 (g), 漏极 (d), 对应晶体管的e, b, c
- 三个工作区：截止区、恒流区、可变电阻区，对应晶体管的截止区、放大区、饱和区

➤ 1. 结型场效应管



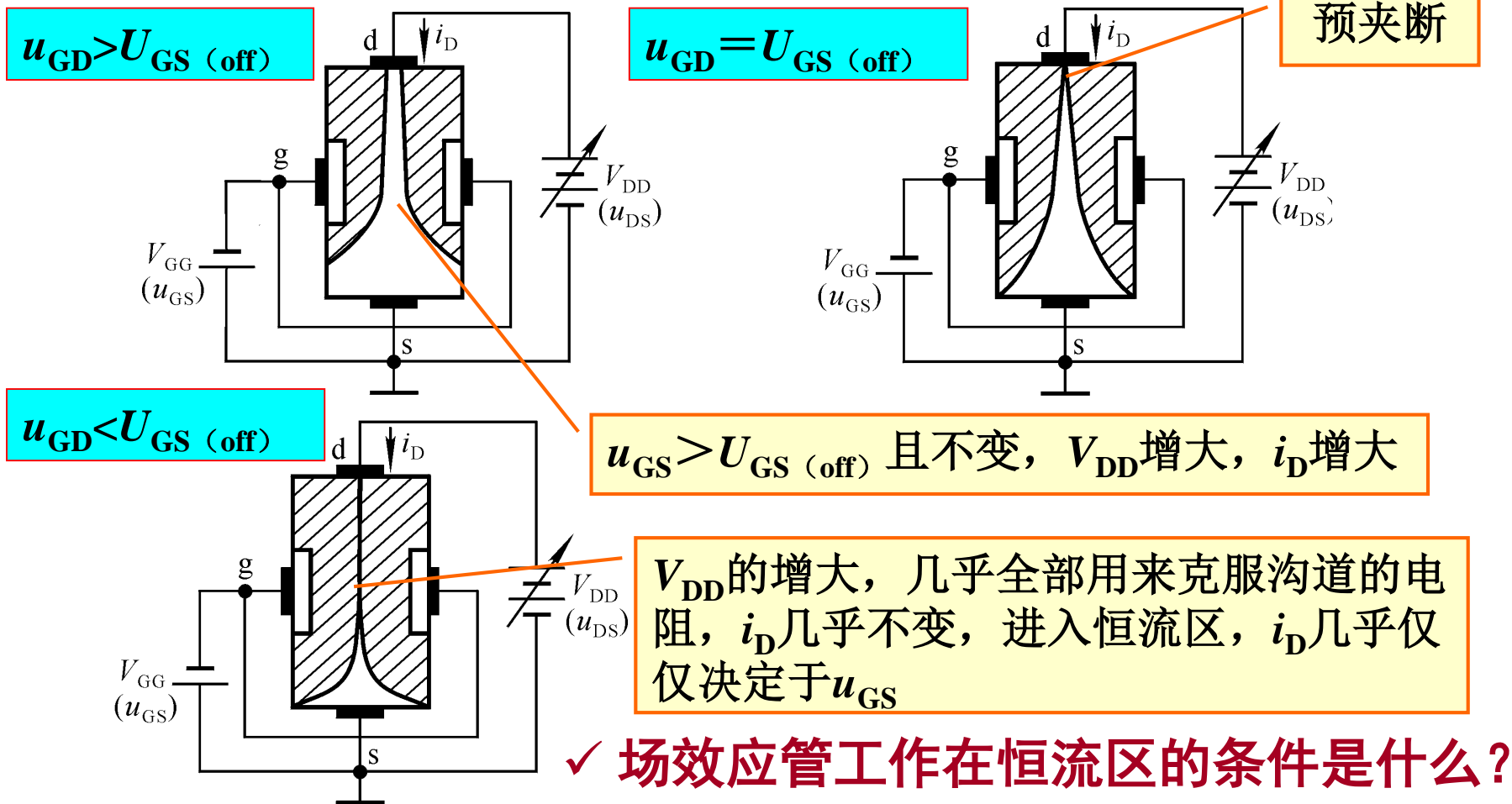
➤ 栅-源电压对导电沟道宽度的控制作用



✓ u_{GS} 可以控制导电沟道的宽度

✓ 为什么g-s必须加负电压？

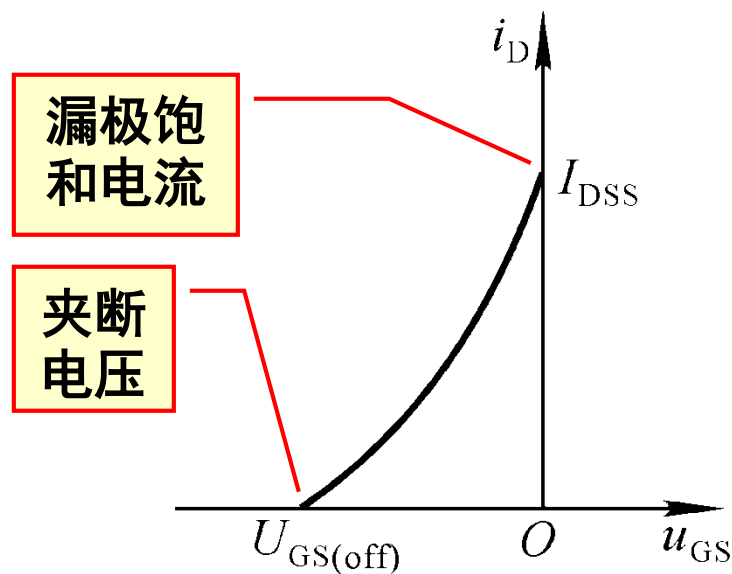
➤ 漏-源电压对漏极电流的影响



➤ 转移特性

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{U_{DS}=\text{常量}}$$

场效应管工作在恒流区，因而 $u_{GS} \geq U_{GS(\text{off})}$ 且 $u_{GD} < U_{GS(\text{off})}$



在恒流区时

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

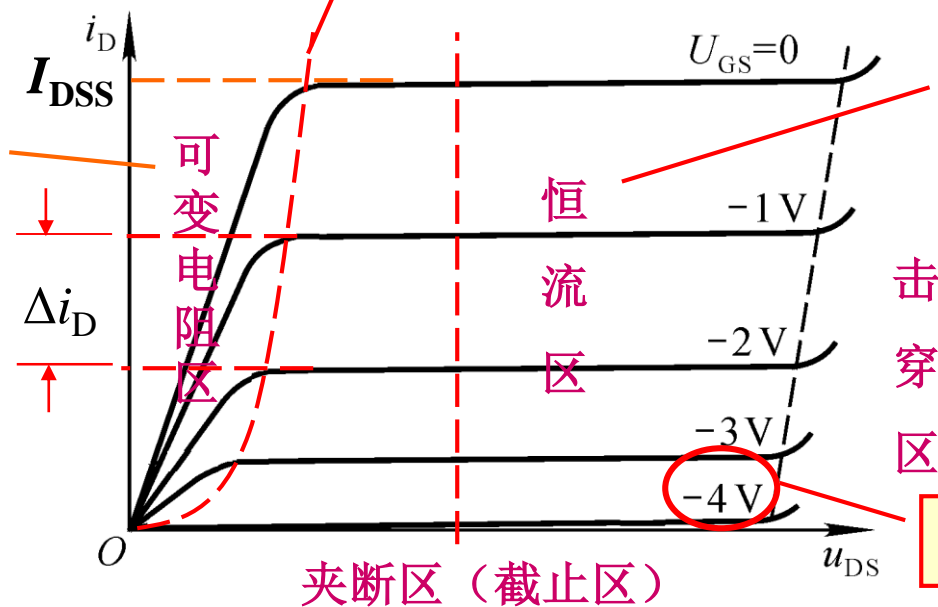
肖克利
方程

➤ 输出特性

$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{U_{GS}=\text{常量}}$$

预夹断轨迹, $u_{GD} = U_{GS(\text{off})}$

g-s电压控制
d-s的等效电阻, 可做压
控电阻

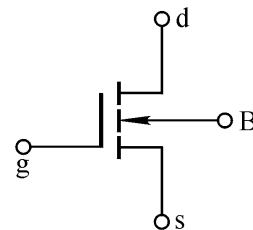


$$g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \Big|_{U_{DS}=\text{常量}}$$

不同型号的管子 $U_{GS(\text{off})}$ 、 I_{DSS} 将不同,
同型号的管子也有分散性!

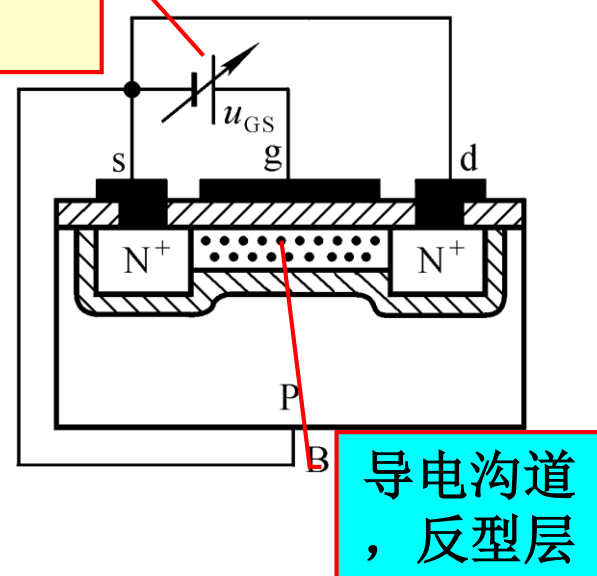
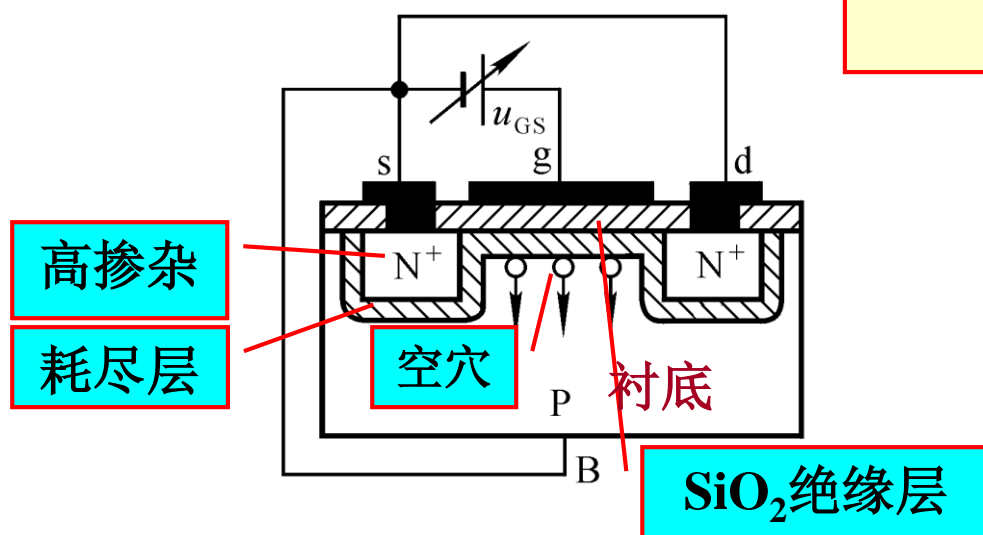
二、绝缘栅型场效应管

增强型MOS管



➤ 1、增强型MOS管

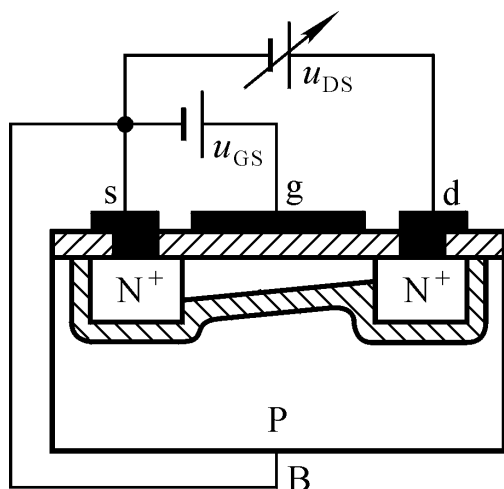
□ u_{GS} 对导电沟道的影响



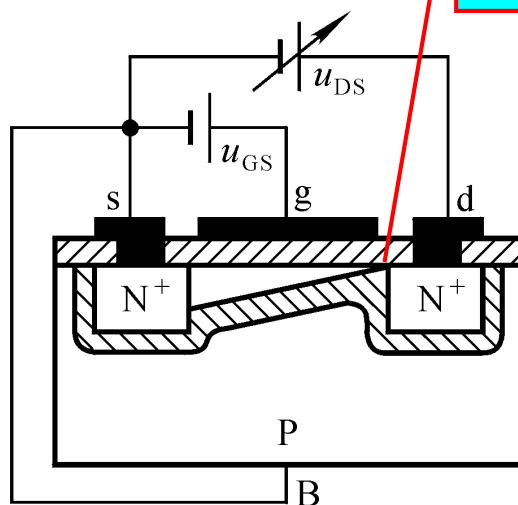
u_{GS} 增大，反型层（导电沟道）将变厚变长。当反型层将两个N区相接时，形成导电沟道

- ✓ 为何增强型MOS管输入电阻大？
- ✓ 导电沟道形成的条件是什么？

□ u_{DS} 对 i_D 的影响



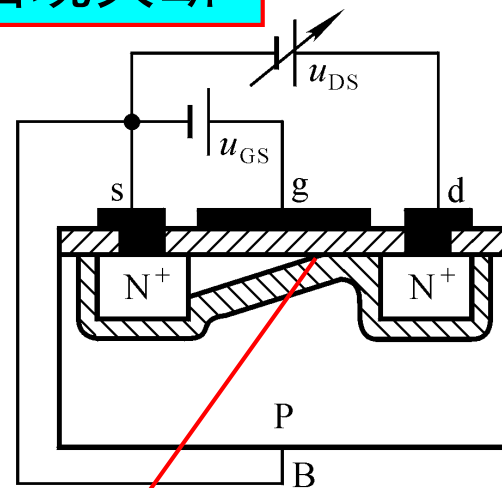
i_D 随 u_{DS} 的增大而增大，可变电阻区



$u_{GD} = U_{GS(th)}$, 预夹断

u_{GS} 的增大几乎全部用来克服夹断区的电阻

刚出现夹断

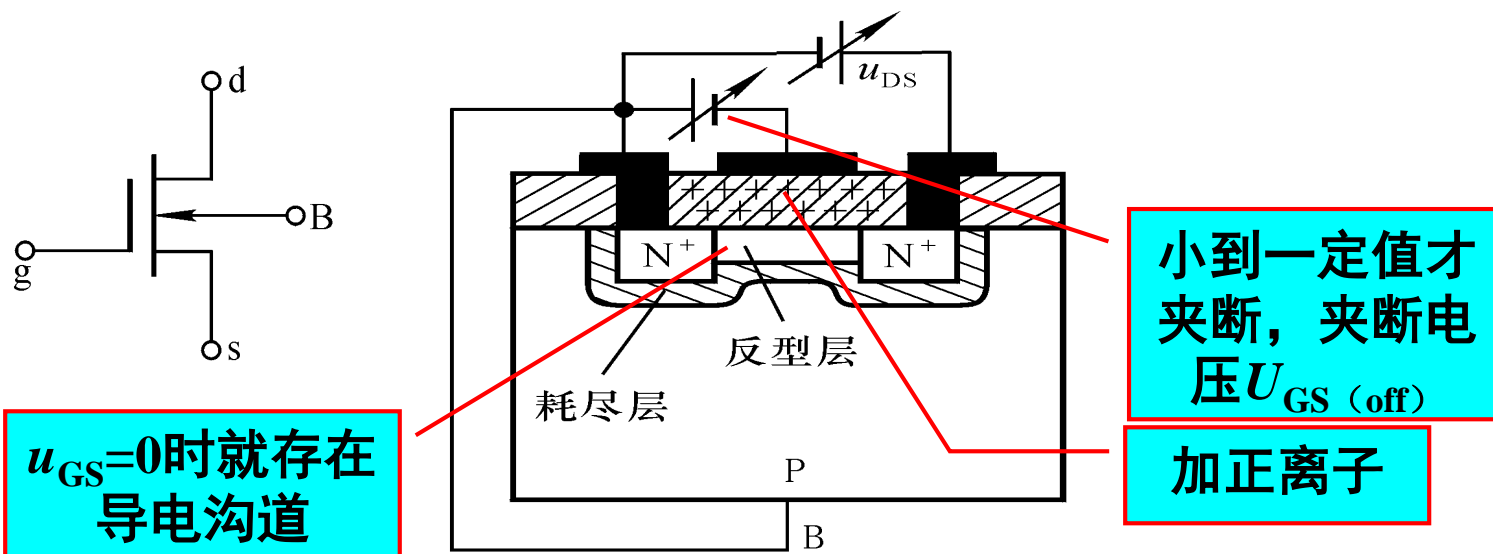


$u_{GD} < U_{GS(th)}$, i_D 几乎仅仅受控于 u_{GS} , 恒流区

用场效应管组成放大电路时应使之工作在恒流区

✓ N沟道增强型MOS管工作在恒流区的条件是什么？

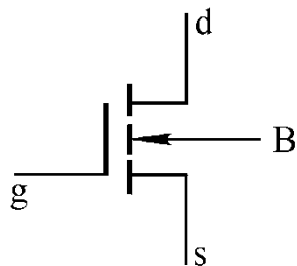
➤ 2、耗尽型 MOS管



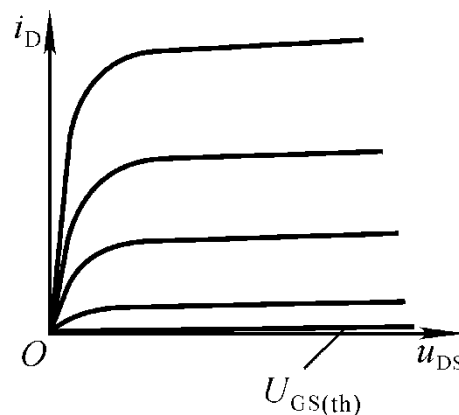
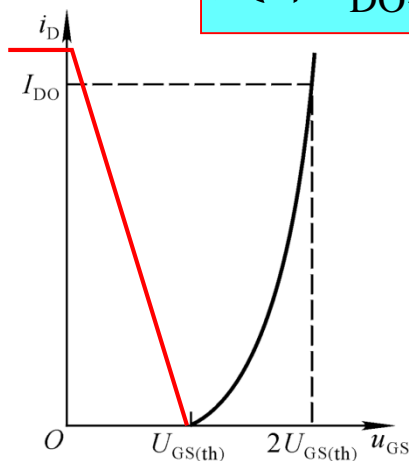
耗尽型MOS管在 $u_{GS} > 0$ 、 $u_{GS} < 0$ 、 $u_{GS} = 0$ 时均可导通，且与结型场效应管不同，由于 SiO_2 绝缘层的存在，在 $u_{GS} > 0$ 时仍保持g-s间电阻非常大的特点

➤ MOS管的特性

1) 增强型MOS管



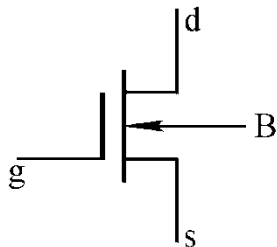
开启
电压



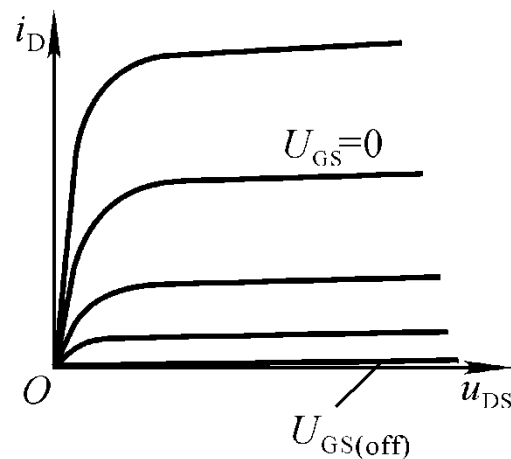
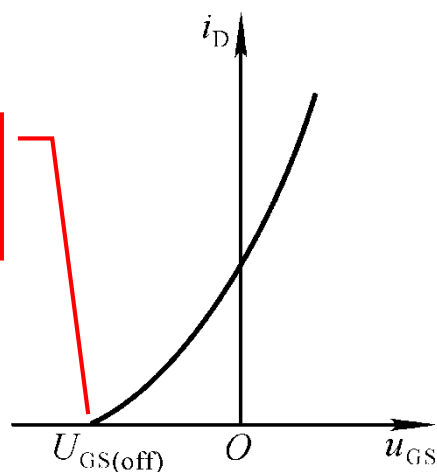
在恒流区时, $i_D = I_{DO} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$

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

2) 耗尽型MOS管



夹断
电压



➤ 3. 场效应管的分类

工作在恒流区时g-s、d-s间的电压极性

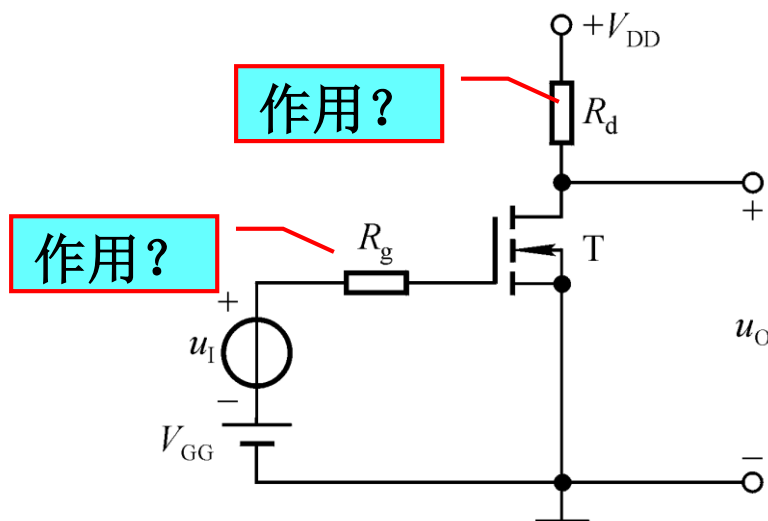
场效应管	结型	N沟道	$u_{GS} < 0, u_{DS} > 0$
		P沟道	$u_{GS} > 0, u_{DS} < 0$
	绝缘栅型	增强型	$u_{GS} > 0, u_{DS} > 0$
		P沟道	$u_{GS} < 0, u_{DS} < 0$
		耗尽型	u_{GS} 极性任意, $u_{DS} > 0$
			u_{GS} 极性任意, $u_{DS} < 0$

- ✓ $u_{GS}=0$ 可工作在恒流区的场效应管有哪几种？
- ✓ $u_{GS}>0$ 才可能工作在恒流区的场效应管有哪几种？
- ✓ $u_{GS}<0$ 才可能工作在恒流区的场效应管有哪几种？

二、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



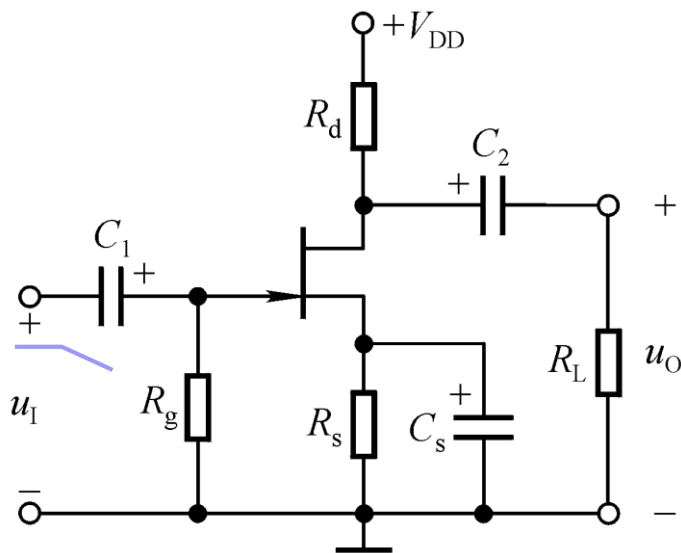
$$U_{GSQ} = V_{GG}$$

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

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

二、场效应管静态工作点的设置方法

➤ 2. 自给偏压电路



缺点？

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

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = -I_{DQ} R_s$$

由正电源获得负偏压
称为自给偏压

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

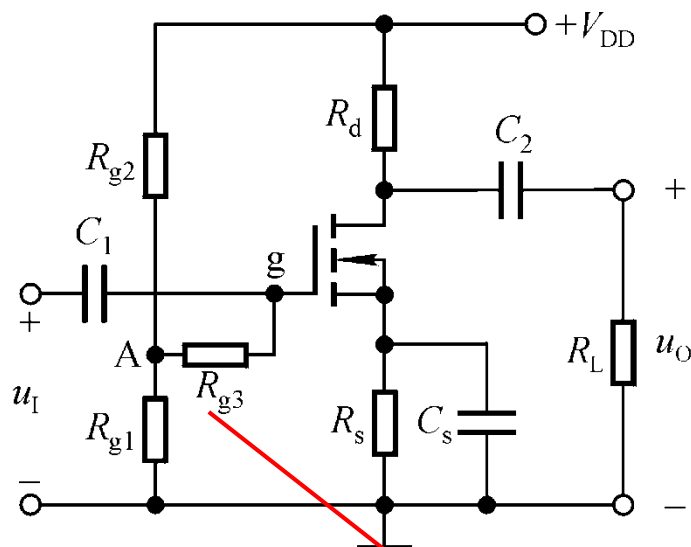
$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s)$$

✓ 哪种场效应管能够采用这种电路形式设置Q点？

二、场效应管静态工作点的设置方法

➤ 3. 分压式偏置电路

□ 即典型的 Q 点稳定电路



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

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

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

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

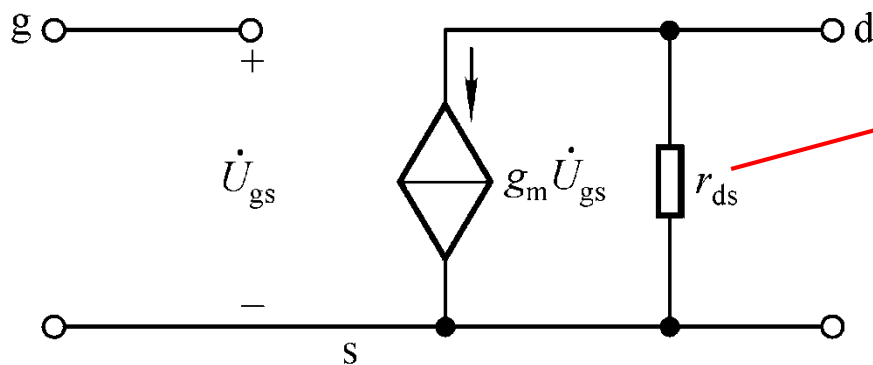
为什么加 R_{g3} ?其数值应大些小些?

✓ 哪种场效应管能够采用这种电路形式设置 Q 点?

三、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：



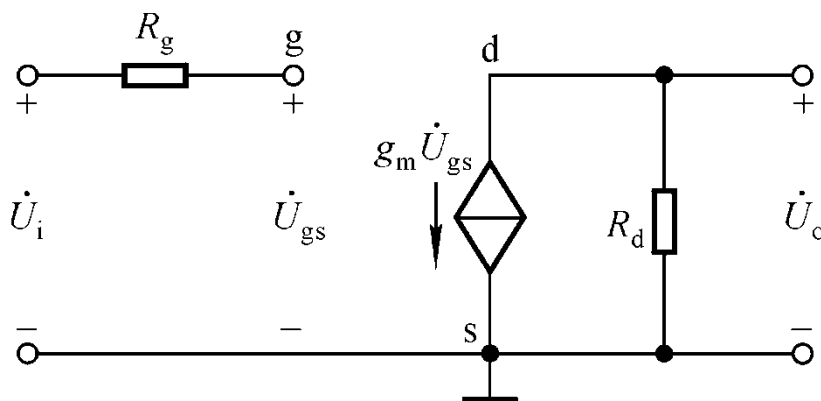
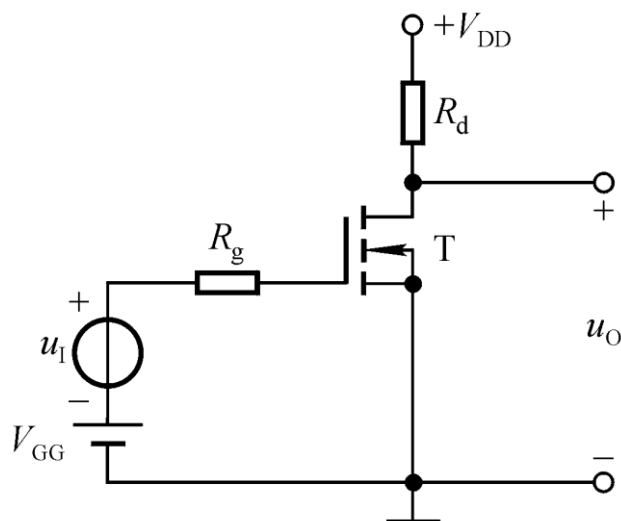
几十到几百千欧，
近似分析时可认为其为无穷大！

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

根据 i_D 的表达式或转移特性可求得 g_m

三、场效应管放大电路的动态分析

➤ 2. 基本共源放大电路的动态分析



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

$$R_i = \infty$$

$$R_o = R_d$$

如何增大 A_u ?

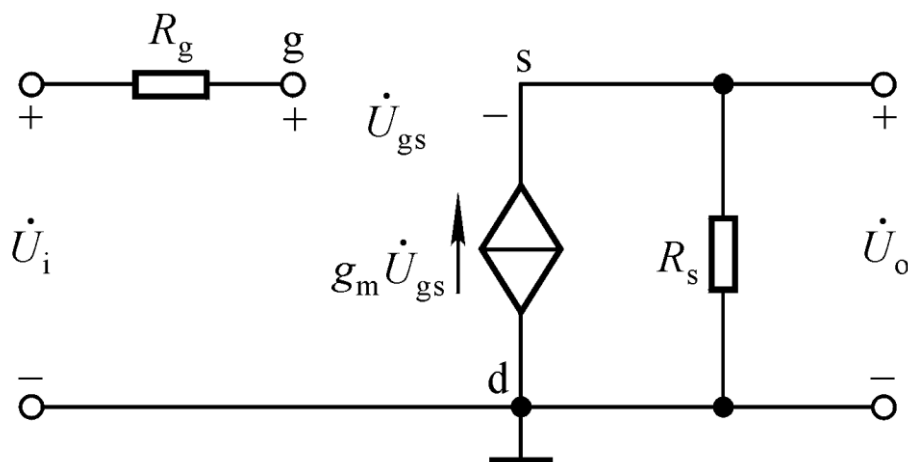
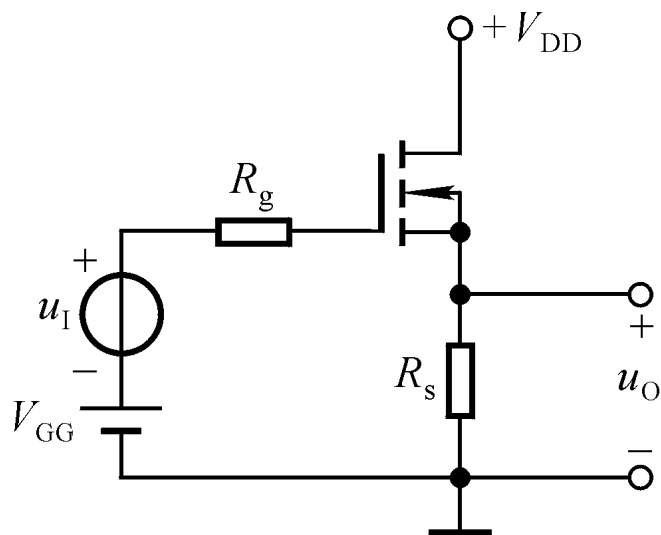
若 $R_d = 3\text{k}\Omega$, $R_g = 5\text{k}\Omega$,

$g_m = 2\text{mS}$, 则 $\dot{A}_u = ?$

与共射电路比较?

三、场效应管放大电路的动态分析

➤ 3. 基本共漏放大电路的动态分析

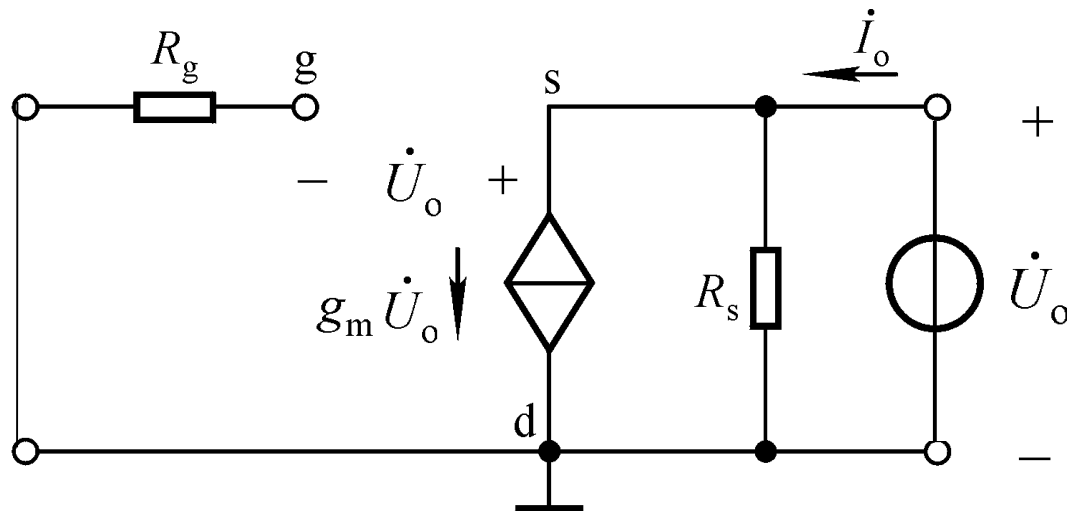


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_d R_s}{\dot{U}_{gs} + \dot{I}_d R_s} = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s}$$

$$R_i = \infty$$

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

➤ 3. 基本共漏放大电路输出电阻的分析



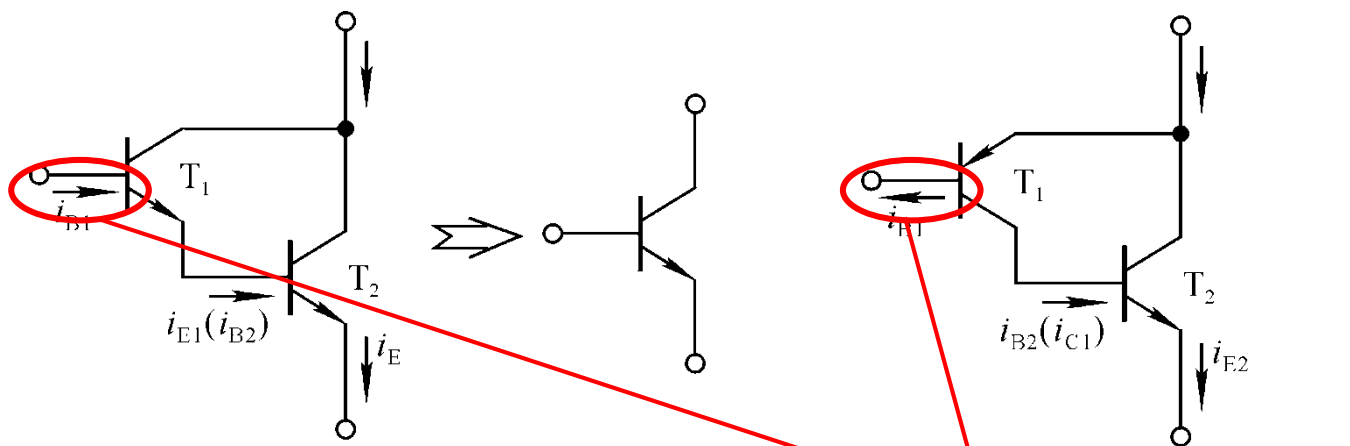
$$R_o = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{\frac{U_o}{R_s} + g_m U_o} = R_s // \frac{1}{g_m}$$

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

§ 2.7 复合管

- 单个晶体管的**输入电阻** (r_{be}) 以及**放大倍数**常常不能满足放大电路的要求，常采用两个或者多个管子组成复合管，以提高 R_i 和放大倍数
- 为了**利用不同晶体管或场效应管的特点**，常采用两个或者多个管子组成复合管，以提高管子的性能
- **复合管组成原则：**
 - 保证每个管子工作在放大状态时各极电流方向正确
 - 保证每个管子工作在放大状态时各极电位关系正确

➤ 复合管的组成：多只管子合理连接等效成一只管子



$$i_E = i_{B1}(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)$$

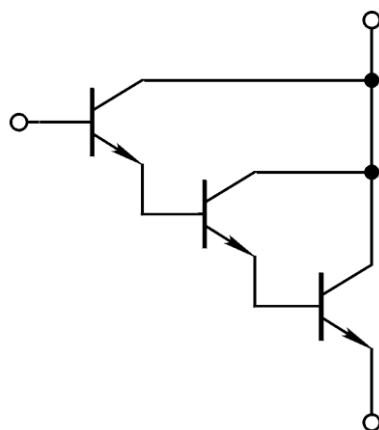
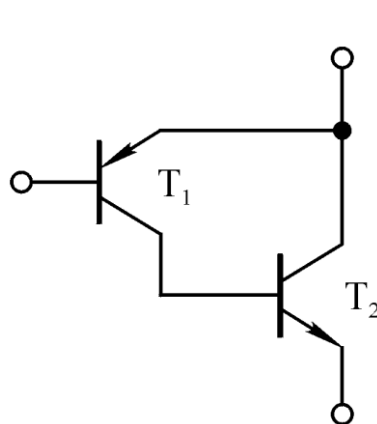
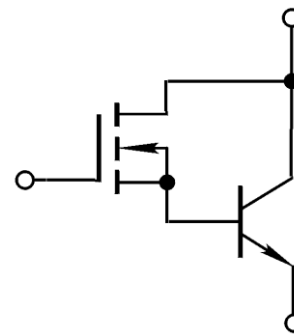
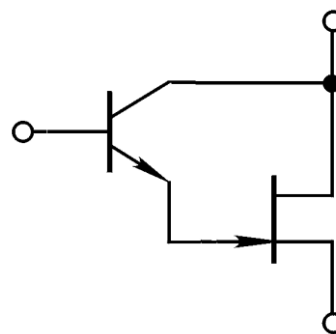
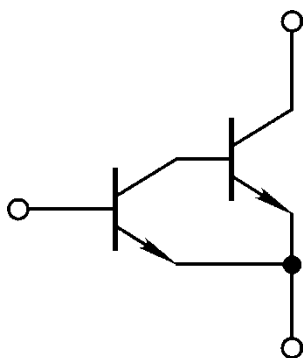
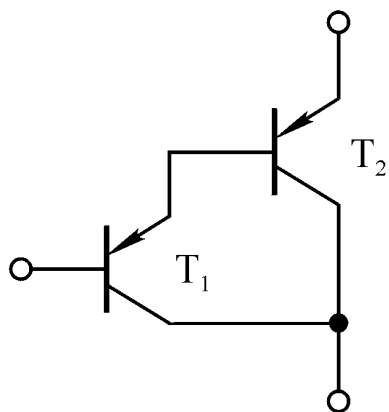
$$\beta \approx \beta_1 \beta_2$$

i_B 方向决定复合管的类型

✓ 不同类型的管子复合后，其类型决定于 T_1 管。

讨论一

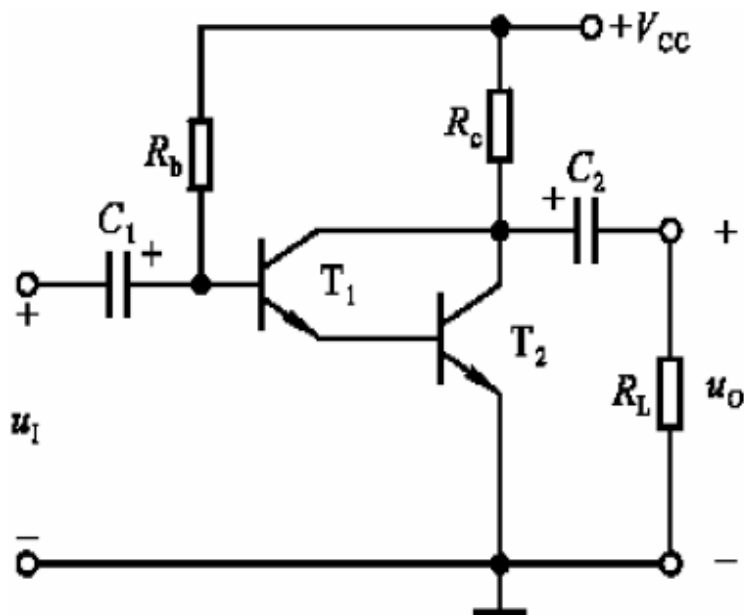
判断下列各图是否能组成复合管



在合适的外加电压下，每只管子的电流都有合适的通路，才能组成复合管

➤ 复合管组成的放大电路

• 基本共射放大电路



- 复合管可视为 $\beta = \beta_1 \beta_2$, $r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2}$ 的晶体管
- 目的：提高 R_i 、 β