

第五章 基本放大电路

—— 5.1 放大电路的组成与技术指标

李泳佳

东南大学电子系国家ASIC工程中心
yongjia.li@outlook.com



第五章内容

5.1 放大电路的组成及技术指标

5.2 放大电路的分析方法

5.3 放大电路的稳定偏置

5.4 各种基本组态放大电路的分析与比较

5.5 放大电路的频率相应

5.6 一般组合放大电路





5.1 放大电路的组成及技术指标

本节内容

5.1.1 放大的基本概念

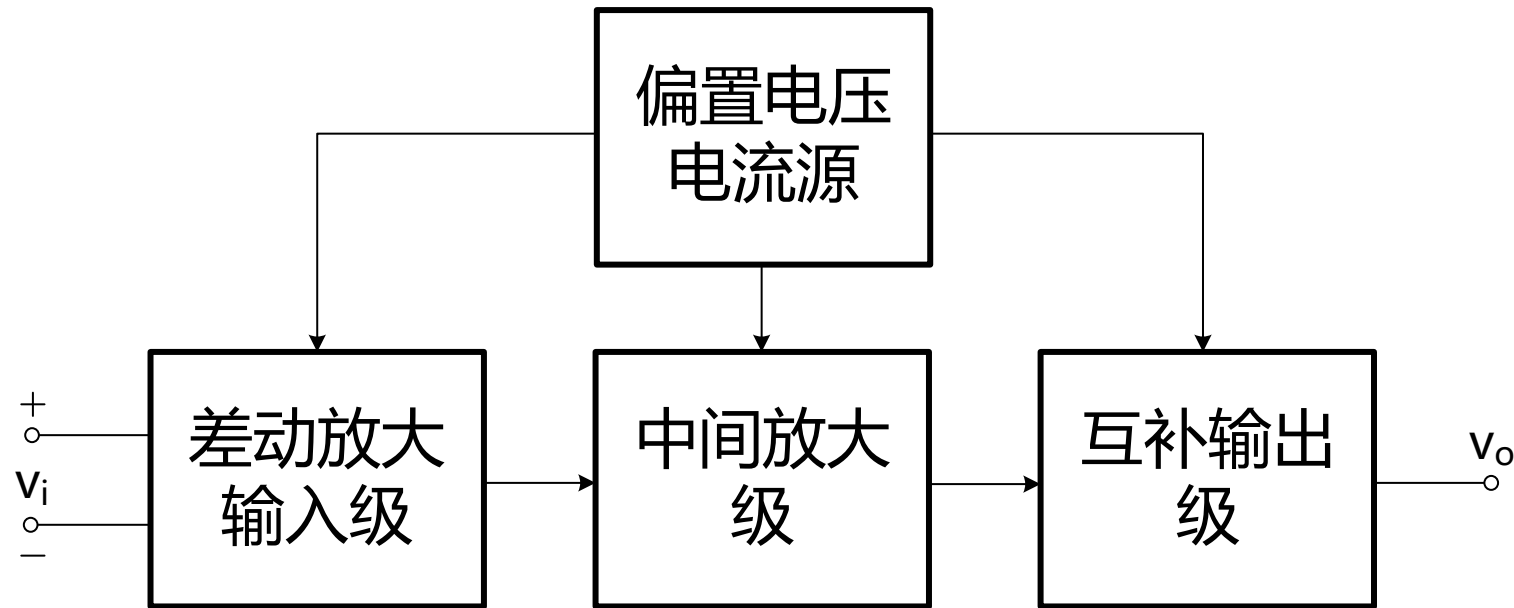
5.1.2 放大电路的组成及工作原理

5.1.3 放大电路的主要技术指标

5.1.1 放大的基本概念

✓ 单级放大:

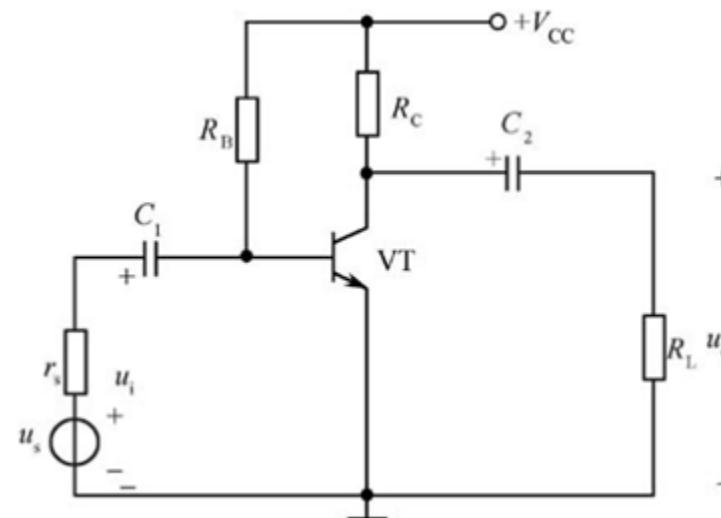
- **三种基本组态放大**: 共发射/集电/基极 (三极管), 共源/漏/栅极 (MOS管)
- **放大电压/电流**: 通过晶体管控制, 增强微弱信号, 能量来自电源
- **放大实质**: 能量的转换, 直流到交流, 晶体管是换能器



5.1.2 放大电路的组成及工作原理

✓ 共发射极电路组成:

- 三极管VT: 放大作用
- 负载电阻 R_C 、 R_L : 将变化的电流转换为电压输出
- 偏置电路 V_{CC} 、 R_B 、 R_C : 提供直流偏置
- 耦合电容 C_1 、 C_2 : 隔直流通交流



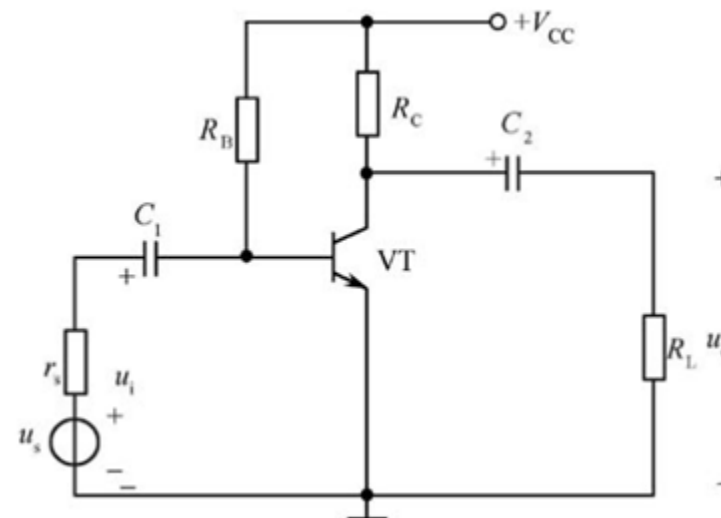
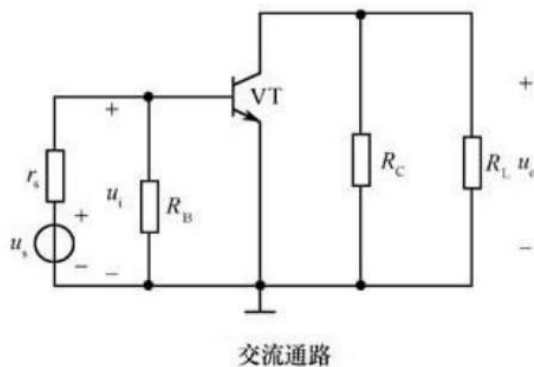
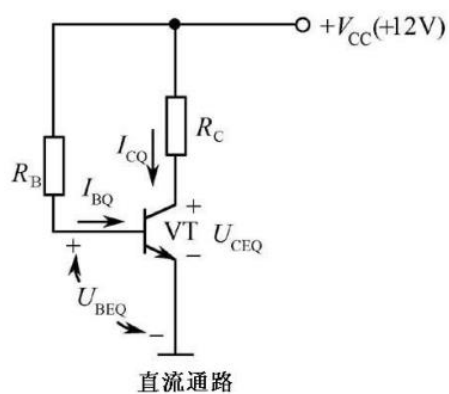
5.1.2 放大电路的组成及工作原理

✓ 静态和动态:

- **静态**: 无输入信号时, 放大器的工作状态, 也称为直流工作状态
- **动态**: 输入信号不为0时, 放大器的工作状态, 也称为交流工作状态

✓ 直流通路和交流通路:

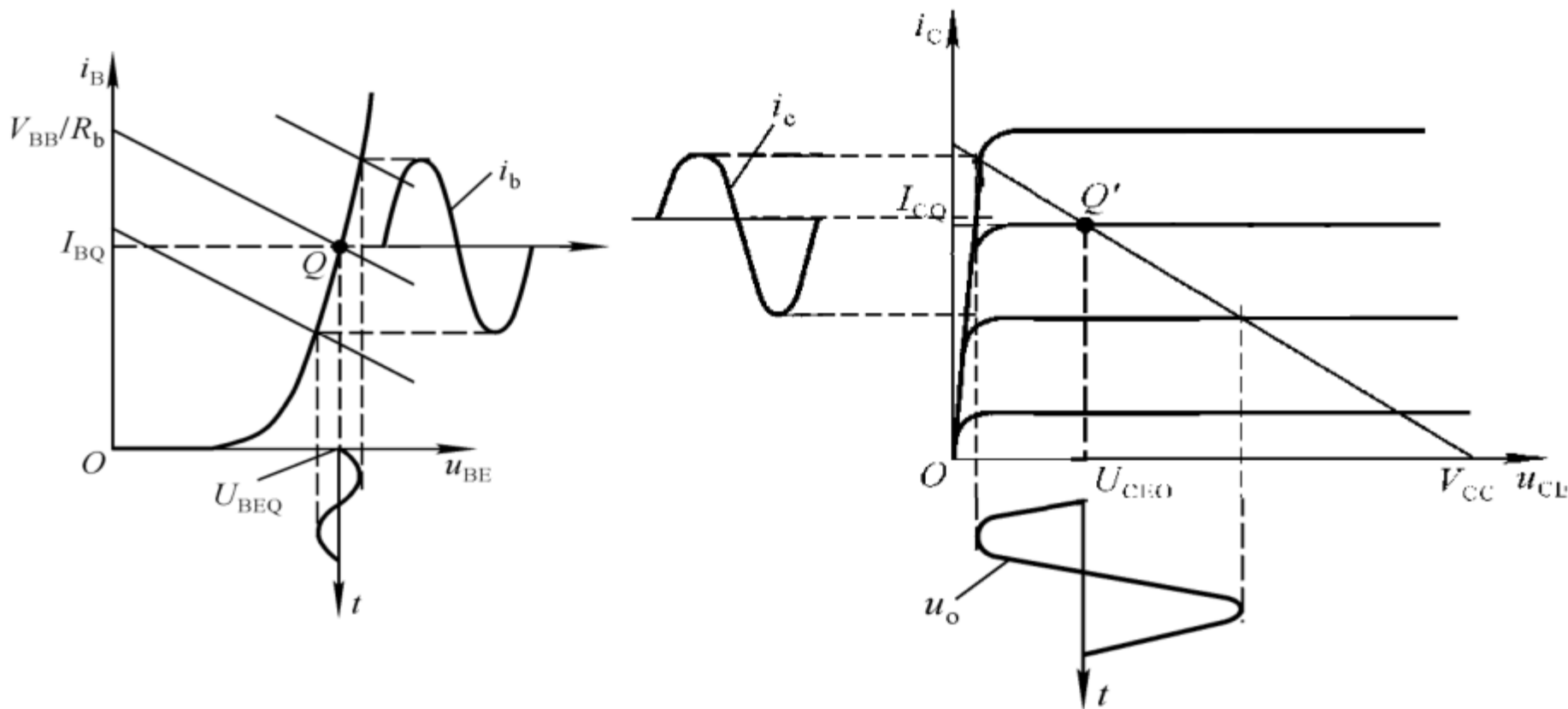
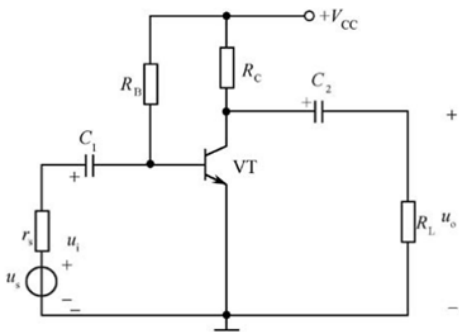
- **直流通路**: 电容开路, 直流传递路径
- **交流通路**: 直流电源和电容短路, 交流传递路径



5.1.2 放大电路的组成及工作原理

✓ 静态和动态:

- 正确的直流工作状态是交流动态工作的前提 (Q的选取)



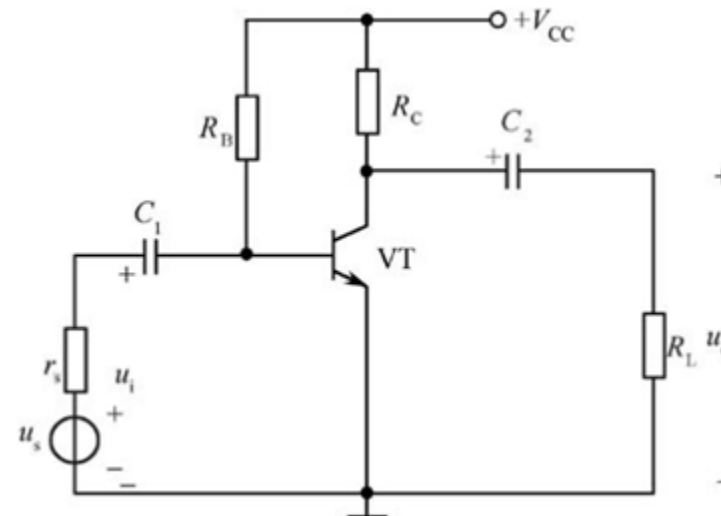
5.1.2 放大电路的组成及工作原理

✓ 放大原理：

- 输入信号通过耦合电容加在三极管的发射极：

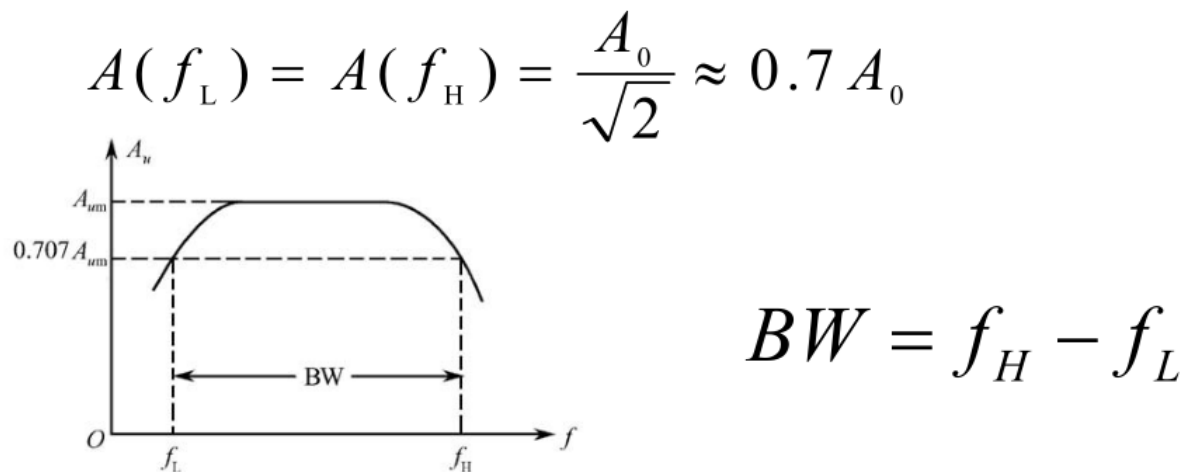
$$u_i \rightarrow u_{be} \rightarrow i_b \rightarrow i_c \rightarrow i_c R_c \rightarrow u_c \rightarrow u_o$$

- 注意电容并没有真正短路：高通截止频率



5.1.3 放大电路的主要技术指标

- ✓ **放大倍数**：电压、电流、功率
- ✓ **输入电阻 R_i** ：从信号源抽取电流的大小
- ✓ **输出电阻 R_o** ：带负载的能力
- ✓ **通频带BW**：





第五章内容

5.1 放大电路的组成及技术指标

5.2 放大电路的分析方法

5.3 放大电路的稳定偏置

5.4 各种基本组态放大电路的分析与比较

5.5 放大电路的频率相应

5.6 一般组合放大电路



5.2 放大电路的分析方法

✓ 静态分析:

- **分析对象:** 静态工作点 (I_B 、 I_C 、 U_{CE} 、 U_{BE})
- **分析路径:** 直流通路
- **分析方法:** 计算法和图解法

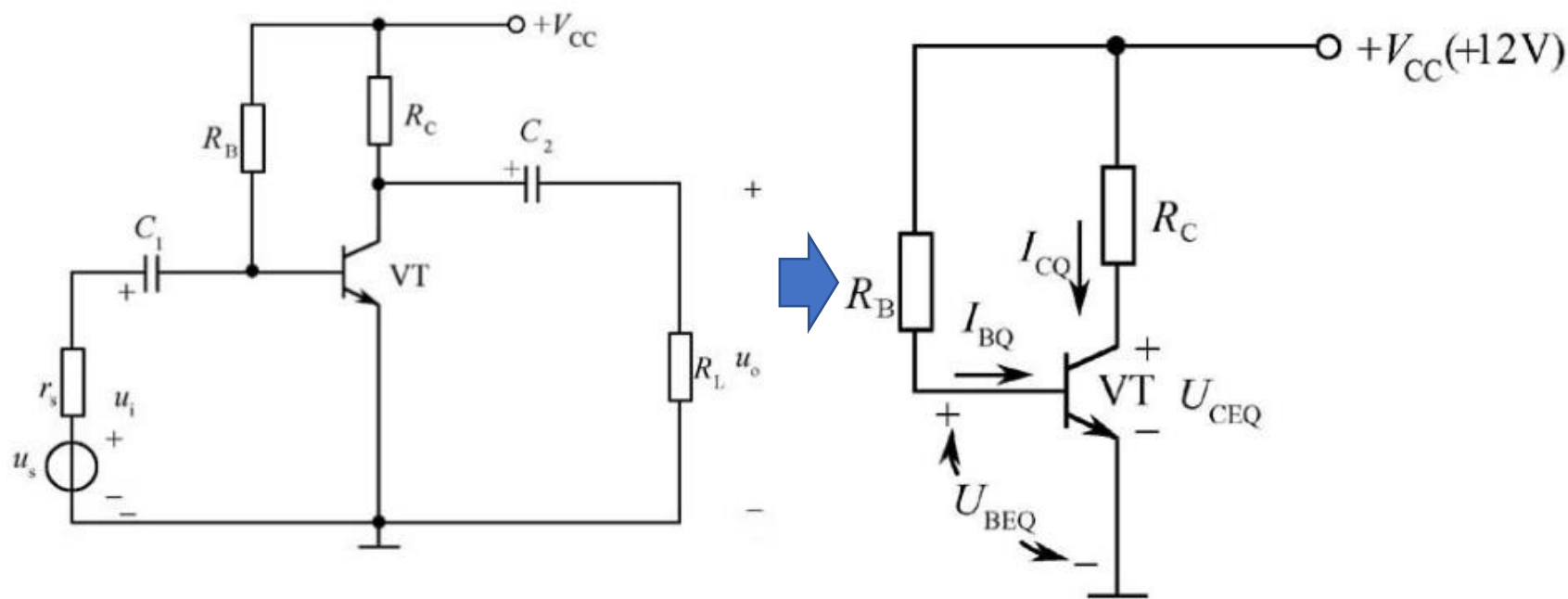
✓ 动态分析:

- **分析对象:** 增益、输入阻抗、输出阻抗
- **分析路径:** 交流通路
- **分析方法:** 图解法和微变等效电路法

5.2.1 放大电路的静态分析

✓ 计算法:

C断开, 求静态工作点 (I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 、 U_{BEQ})



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

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

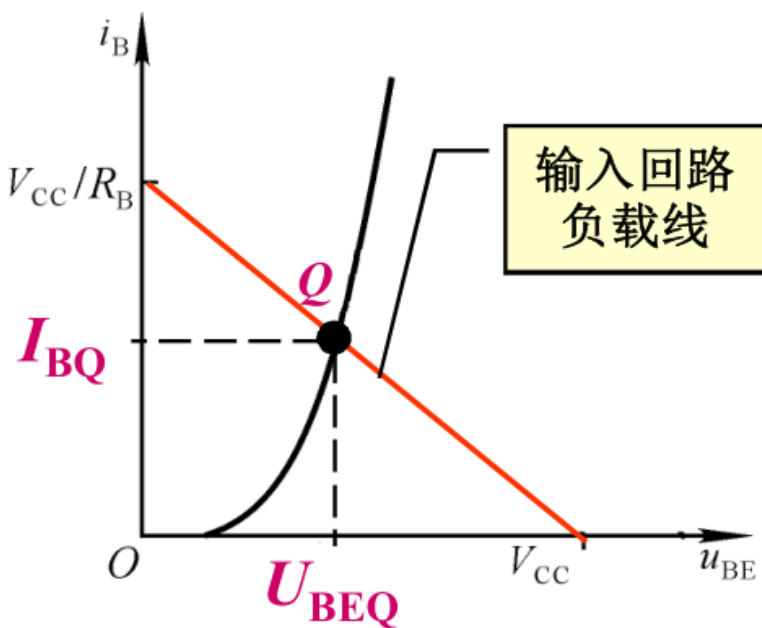
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$

5.2.1 放大电路的静态分析

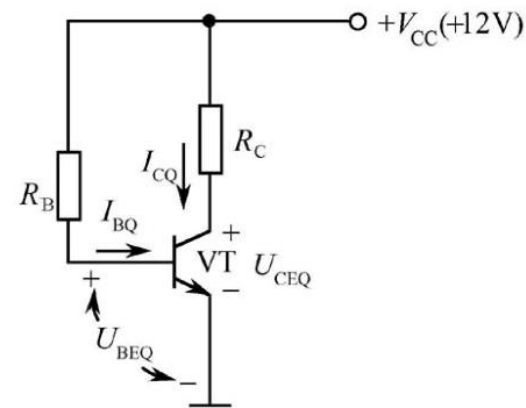
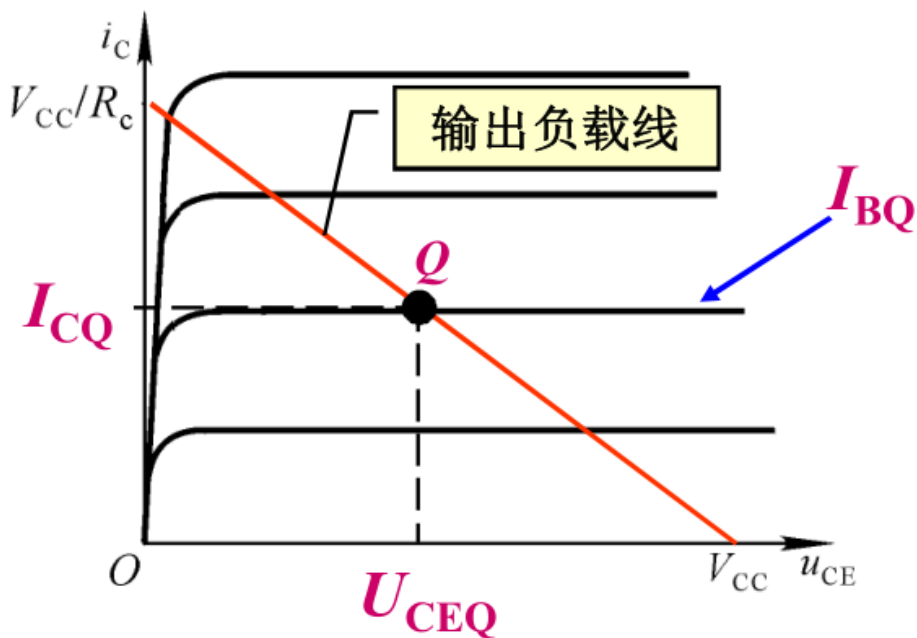
✓ 图解法:

输入负载线和输出负载线, 注意斜率的含义

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



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





5.2.1 放大电路的静态分析

✓ 图解法小结:

- **输入回路**根据KVL, 得到 $U_{BE} = V_{CC} - I_B R_B$,
- 通过极值法确定极值点, 将负载直线画在输入I-V坐标轴
 - > 输入负载直线和I-V曲线的交点即为Q点
- **输出回路**根据KVL, 得到 $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$
- 通过极值法确定极值点, 将负载直线画在输出I-V坐标轴
 - > 输出负载直线和I-V曲线的交点即为Q点



5.2.2 放大电路的动态分析

✓ 动态分析:

- **分析对象:** 增益、输入阻抗、输出阻抗
- **分析路径:** 交流通路
- **分析方法:** 图解法和微变等效电路法

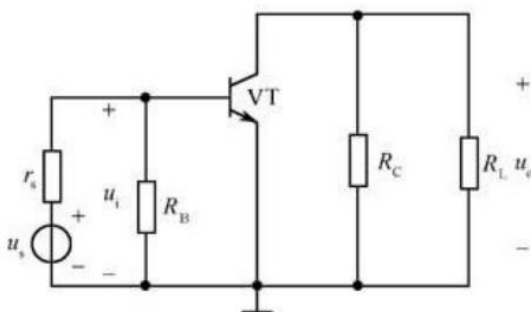
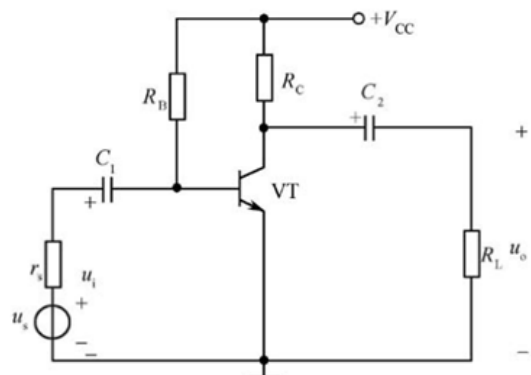
✓ 动态与静态分析:

- 分析出来的直流信号+交流信号才是总的信号
- 总信号在Q点附近微变
- 放大器I-V特性曲线在Q点附近可近似为线性

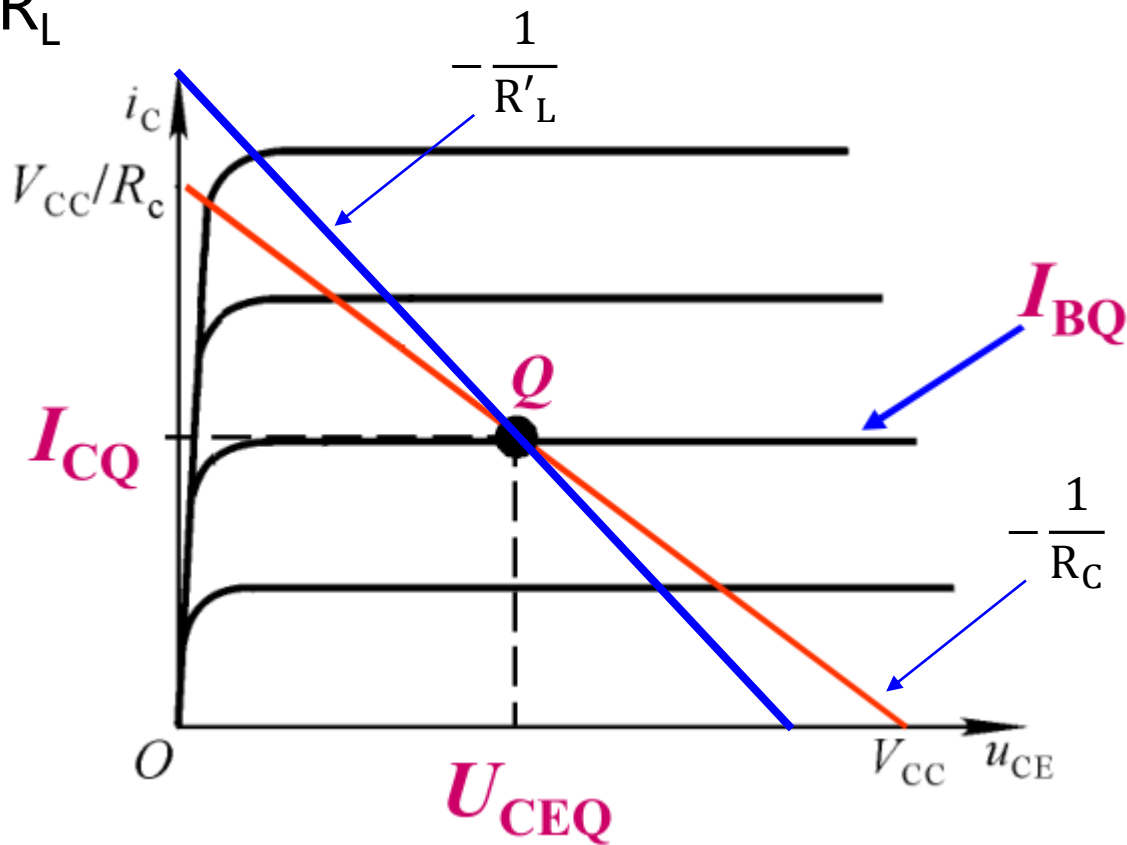
5.2.2 放大电路的动态分析

✓ 图解法:

- 画出交流负载线, 注意 R_L'



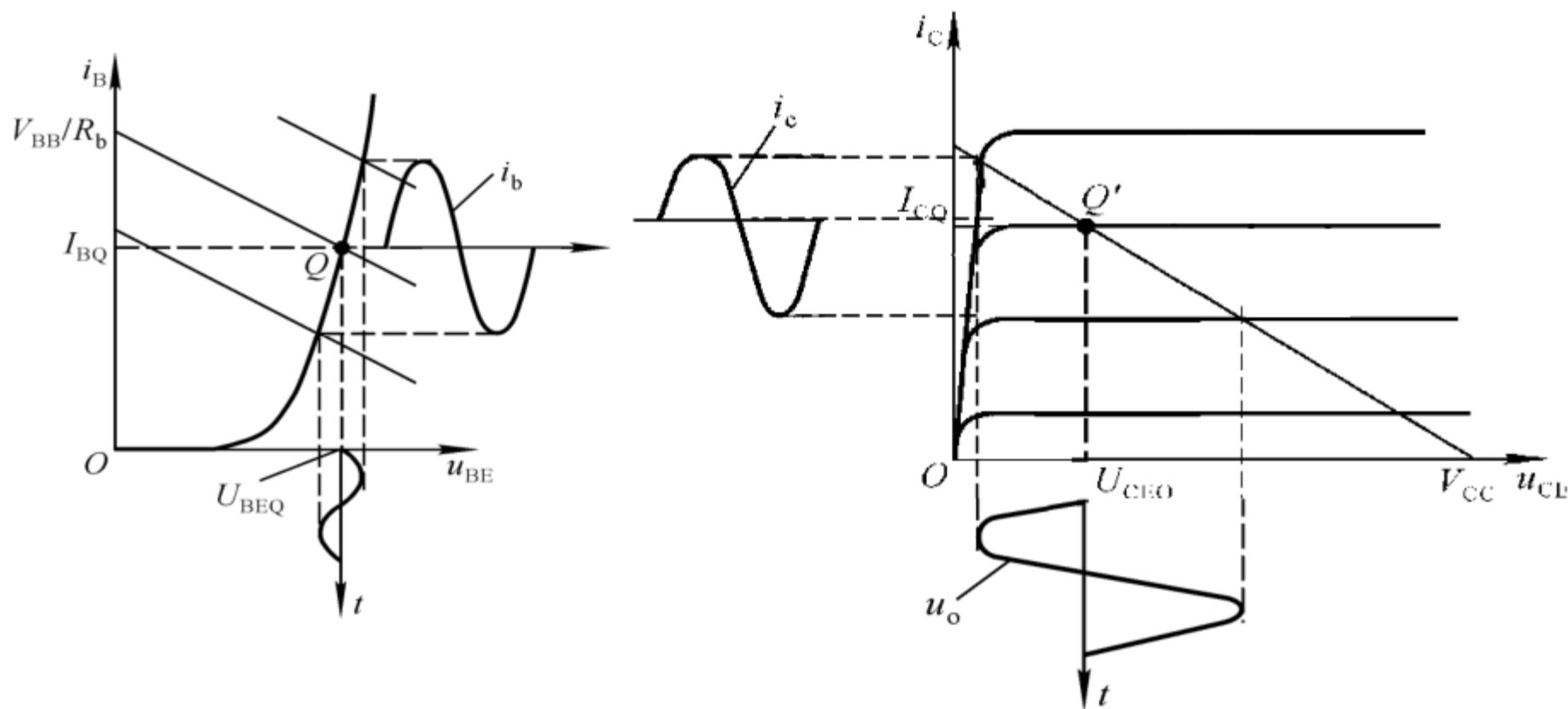
交流通路



5.2.2 放大电路的动态分析

✓ 图解法:

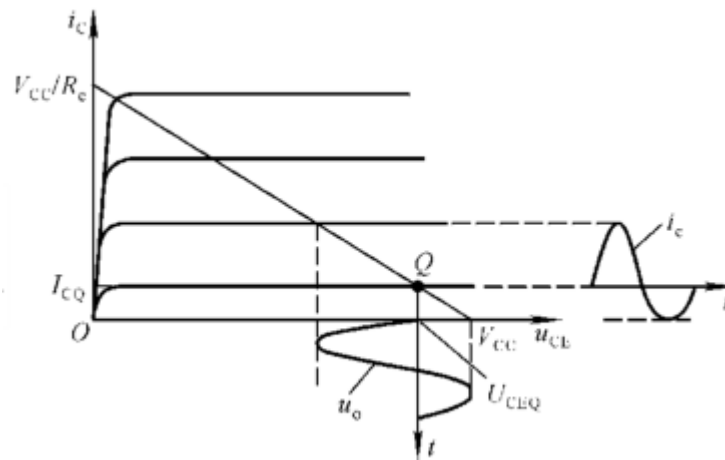
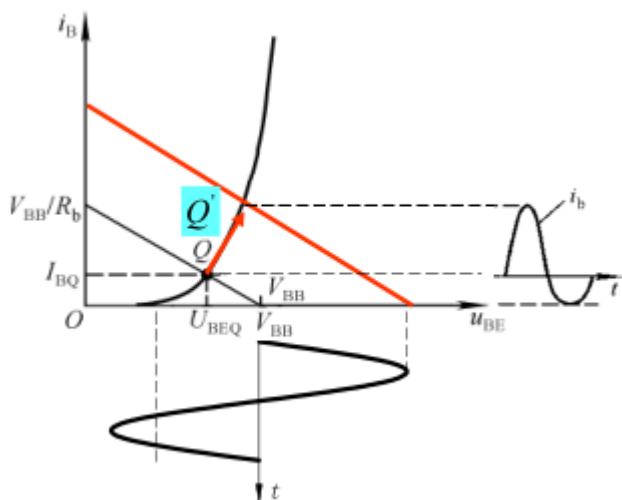
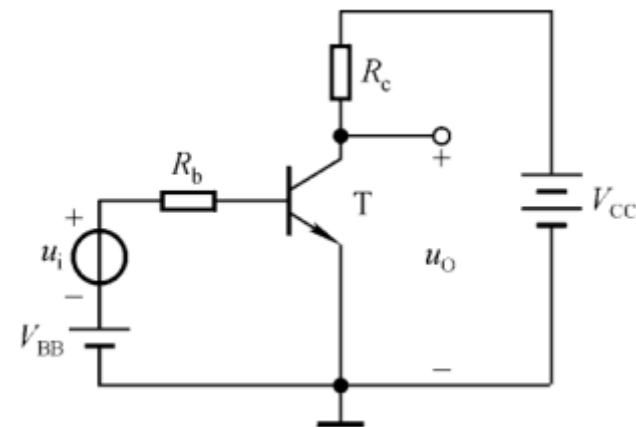
- 画出交流负载线, 注意 R_L'



5.2.2 放大电路的动态分析

✓ 图解法分析波形失真:

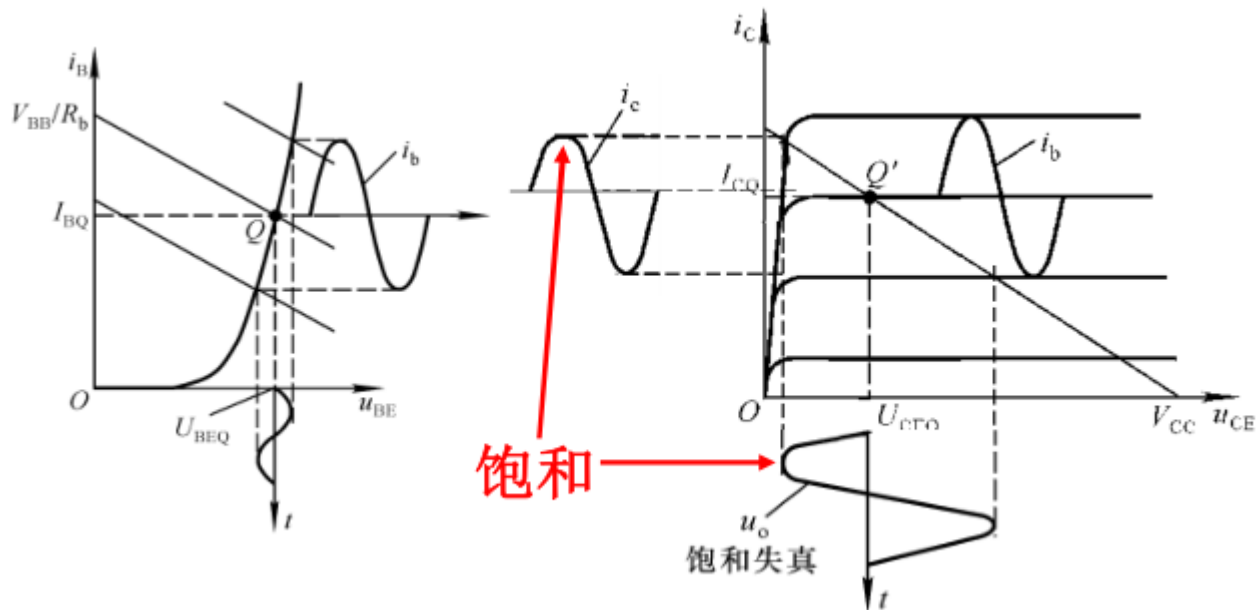
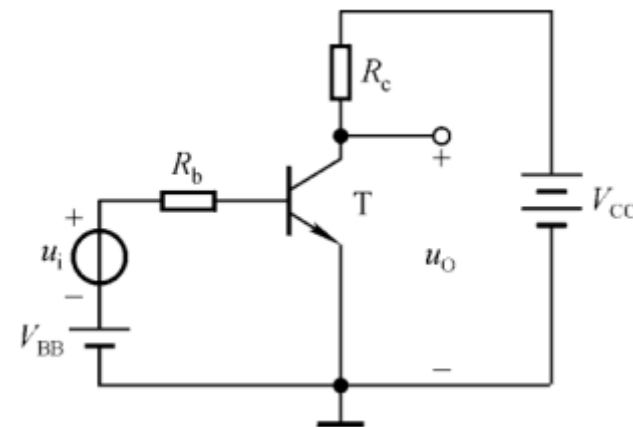
- **截止失真：**在输入回路发生截止
- **消除办法：**提高 V_{BB}



5.2.2 放大电路的动态分析

✓ 图解法分析波形失真:

- 饱和失真: 在输出回路, 动态工作点上移至饱和
- 消除办法: Q点下移 ($R_b \uparrow$ 或 $V_{BB} \downarrow$ 或 $\beta \downarrow$)
Q点右移 ($R_c \downarrow$ 或 $V_{CC} \uparrow$)



以上分析基于
NPN管, 如果是
PNP管, 失真表
现形式刚好相反



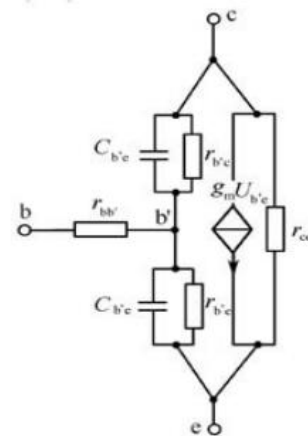
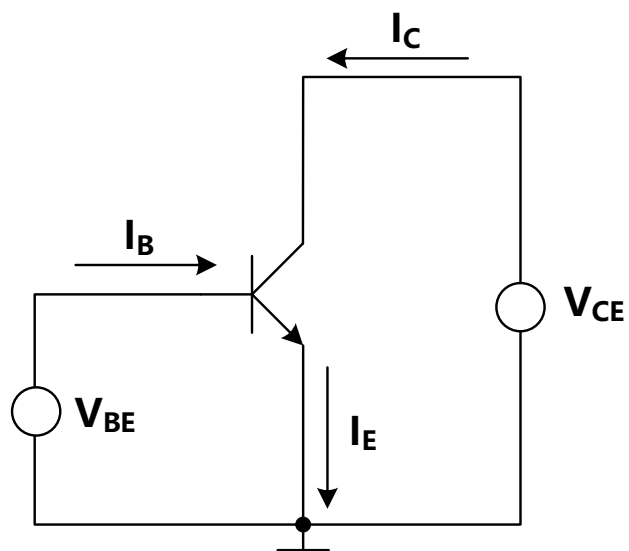
5.2.2 放大电路的动态分析

✓ 图解法特点:

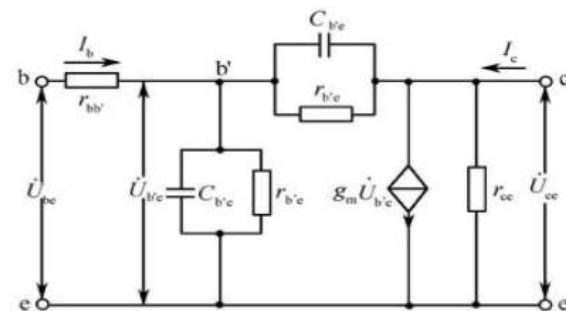
- 形象直观
- 适用于Q点分析、失真分析
- 能用于大信号分析
- 不易准确定量求解
- 不能求解输入电阻、输出电阻、通频带等

5.2.2 放大电路的动态分析

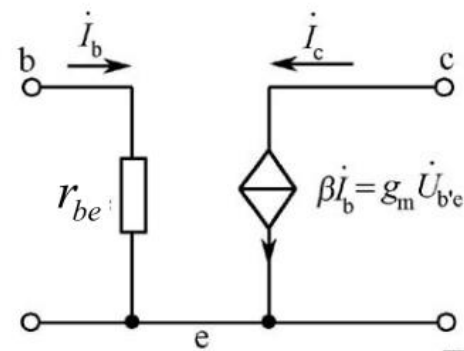
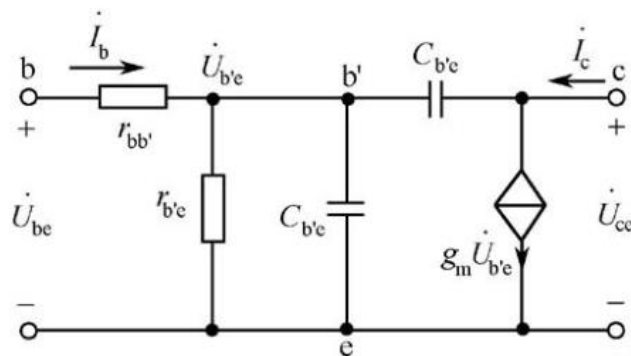
✓ 微变等效电路法:



(a) 三极管的物理模拟电路



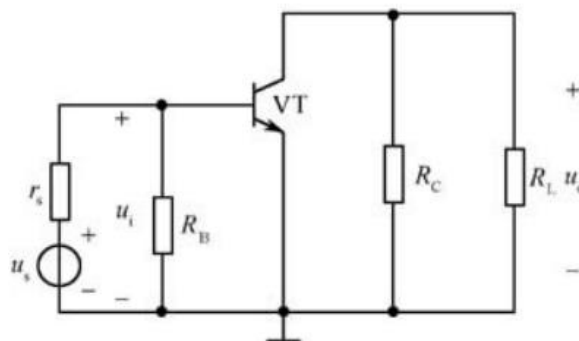
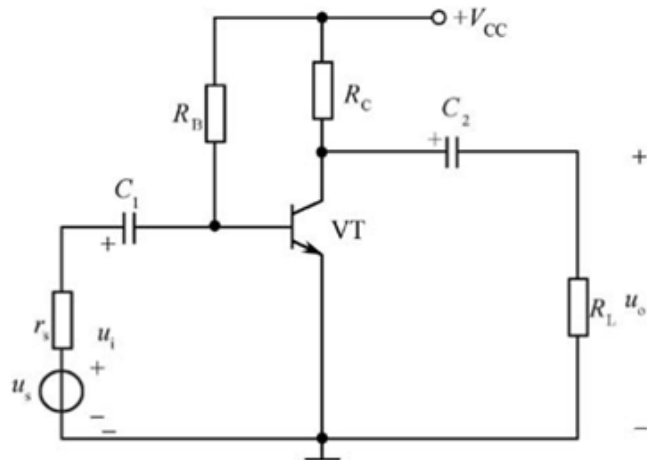
(b) 混合 π 型



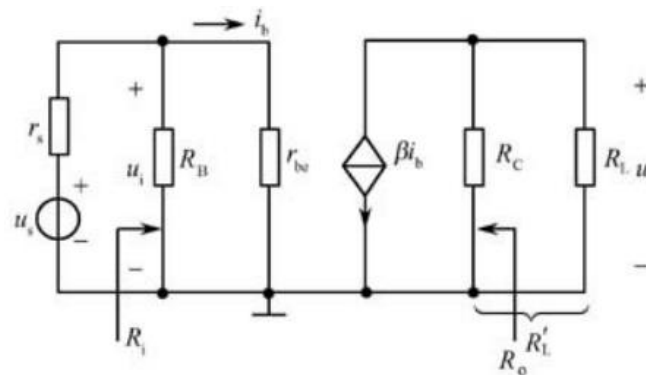
5.2.2 放大电路的动态分析

✓ 微变等效电路法:

- 用交流通路画出其他元件，标出信号输入、输出端
- 三极管用简化模型代替，标出电量符号与极性



(a) 交流通路



(b) 微变等效电路

5.2.2 放大电路的动态分析

✓ 微变等效电路法:

- 电压放大倍数:

$$\dot{A}_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-\beta i_b \cdot R'_L}{i_b \cdot r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}, \text{ 其中 } R'_L = R_C \parallel R_L$$

- 输入电阻:

$$r_{be} = 200\Omega + (1 + \beta) 26 \text{ mV} / I_{EQ}$$

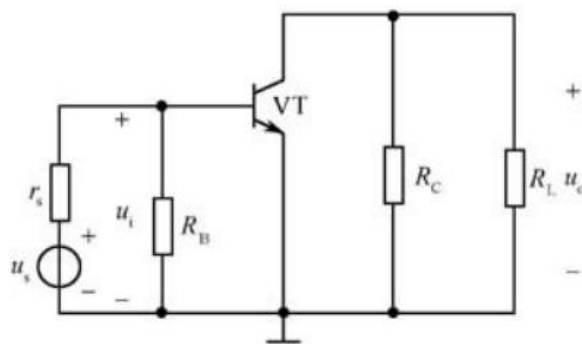
$$R_i = u_i / i_i = R_B \parallel r_{be} \approx r_{be}$$

- 输出电阻:

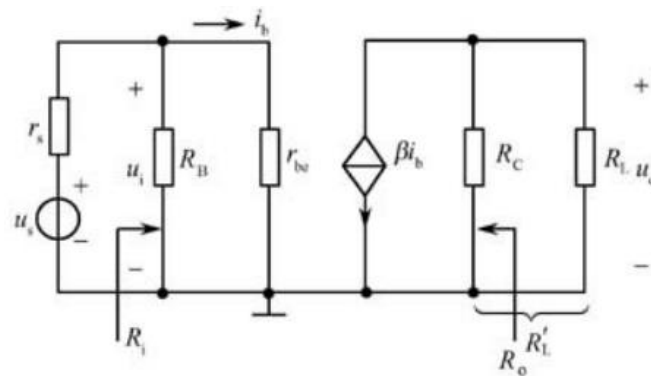
$$R_o = \left. \frac{u_o}{i_o} \right|_{R_L = \infty, \dot{U}_S = 0} = R_C$$

- 源电压放大倍数:

$$\dot{A}_{us} = \frac{u_o}{u_S} = \frac{u_o}{u_i} \cdot \frac{u_i}{u_S} = \dot{A}_u \cdot \frac{R_i}{R_i + r_s}$$



(a) 交流通路



(b) 微变等效电路