

# 第五章 基本放大电路

## —— 5.6 一般组合放大电路

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**





## 5.6 一般组合放大电路

### 本节内容

5.6.1 组合放大电路的级间耦合方式

5.6.2 组合放大电路的分析方法

5.6.3 共源-共射放大电路

5.6.4 共射-共基放大电路



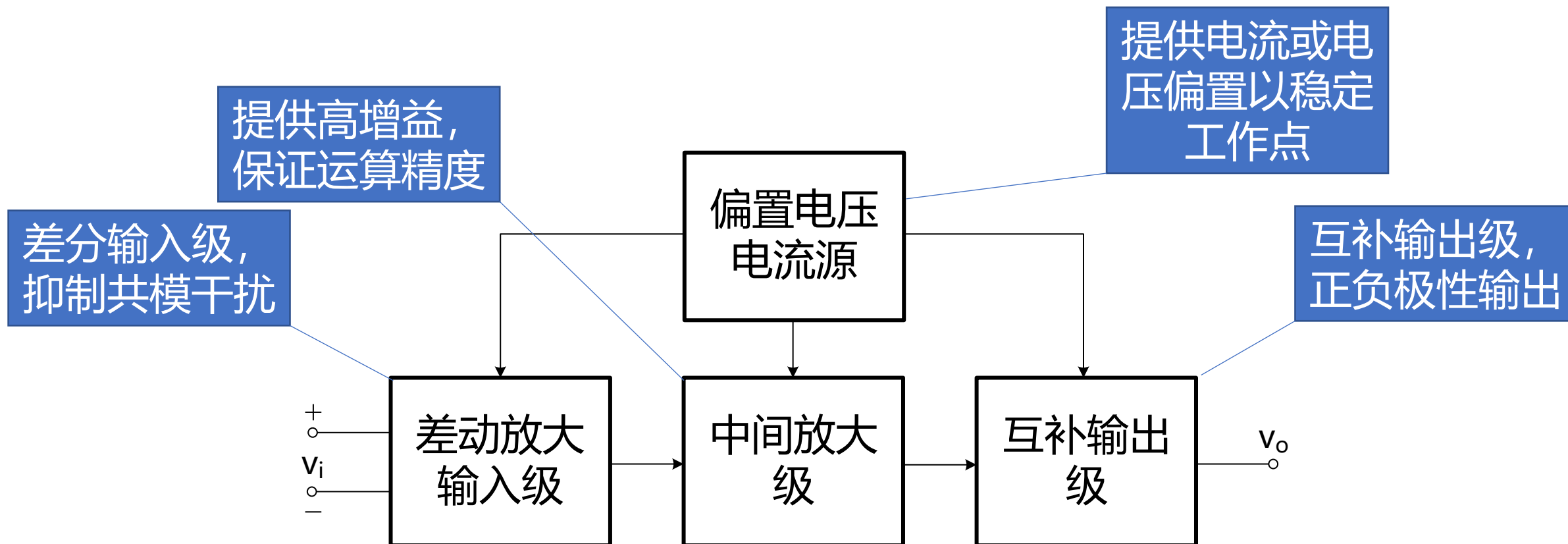
## 5.6.1 组合放大电路的级间耦合方式

### ✓ 为什么要组合放大电路：

- 单级放大电路无法兼顾实际应用中的所有要求：
  - 电压放大倍数
  - 带宽
  - 输入阻抗
  - 输出阻抗
  - .....

## 5.6.1 组合放大电路的级间耦合方式

- ✓ 一般使用两级或者两级以上的的基本放大电路构成：
  - 可以是级联，也可以是并联，或其他形式



## 5.6.1 组合放大电路的级间耦合方式

✓ 耦合方式：级与级间的连接，即信号的传送

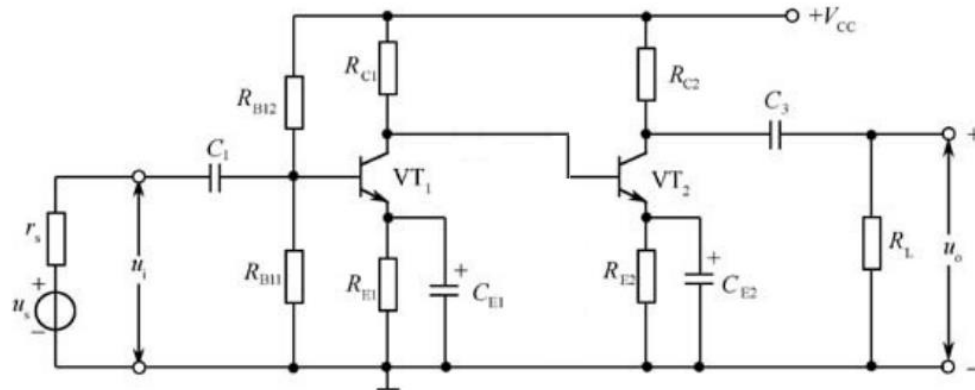
- 直接耦合、阻容耦合、变压器耦合

- 前后级直接相连

- 优点：易于集成，能处理从直流到交流的信号

- 缺点：级间直流工作点相互影响，

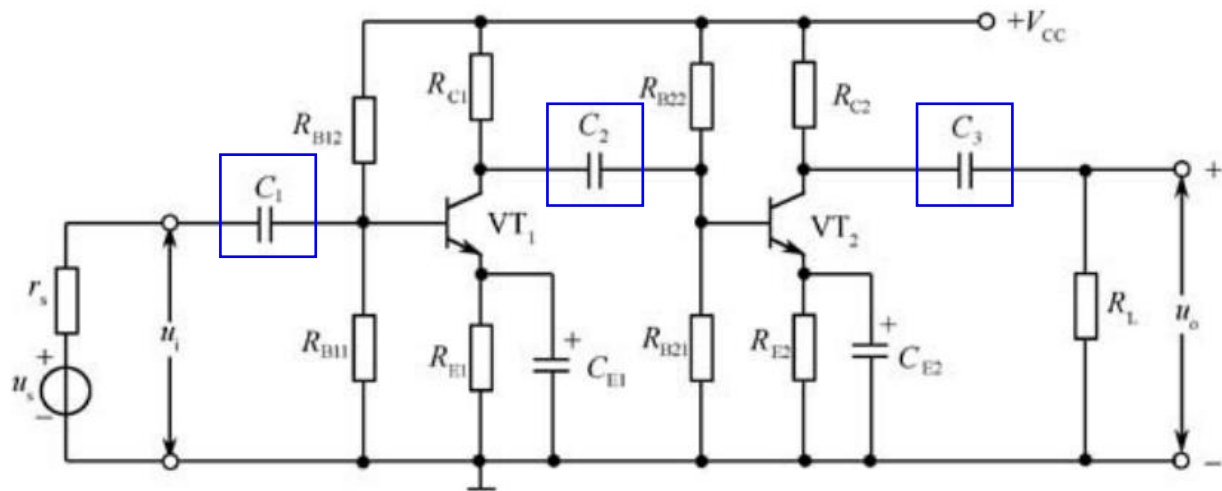
零点漂移（工作点Q随时间/温度偏离），可用差动放大解决



## 5.6.1 组合放大电路的级间耦合方式

✓ 耦合方式：级与级间的连接，即信号的传送

- 直接耦合、**阻容耦合**、变压器耦合
  - 前后级采用电容或电阻与电容的串并联（分立器件常用）
  - 优点：静态工作点相互独立，电容大，信号损失小，放大倍数高
  - 缺点：下限截止频率，不能处理直流信号，且不易集成



## 5.6.1 组合放大电路的级间耦合方式

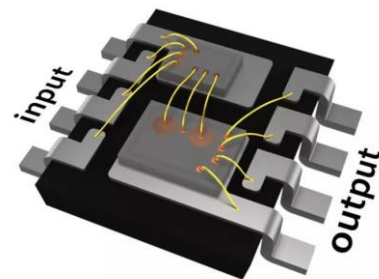
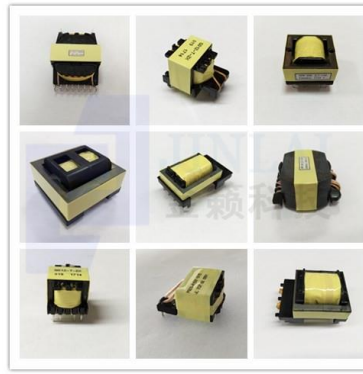
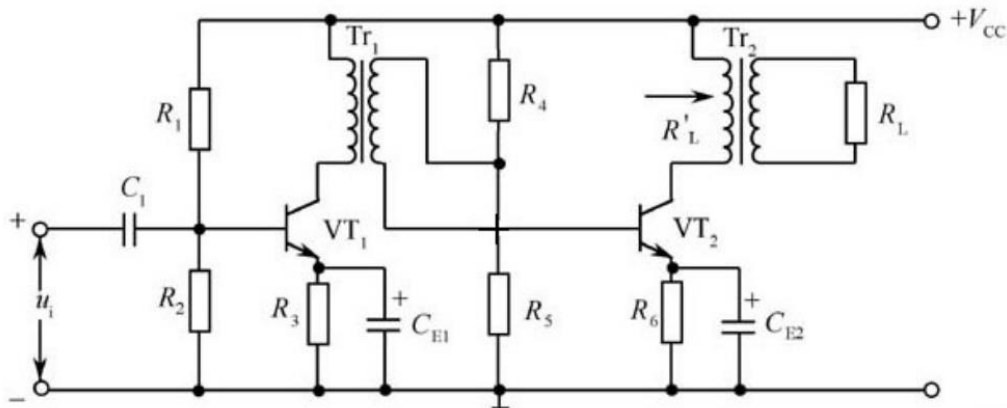
✓ **耦合方式：级与级间的连接，即信号的传送**

- 直接耦合、阻容耦合、**变压器耦合**

- 前后级采用变压器实现信号传递

- 优点：静态工作点相互独立，阻抗易变换易匹配

- 缺点：频率特性差，难以集成（目前已有全集成产品）

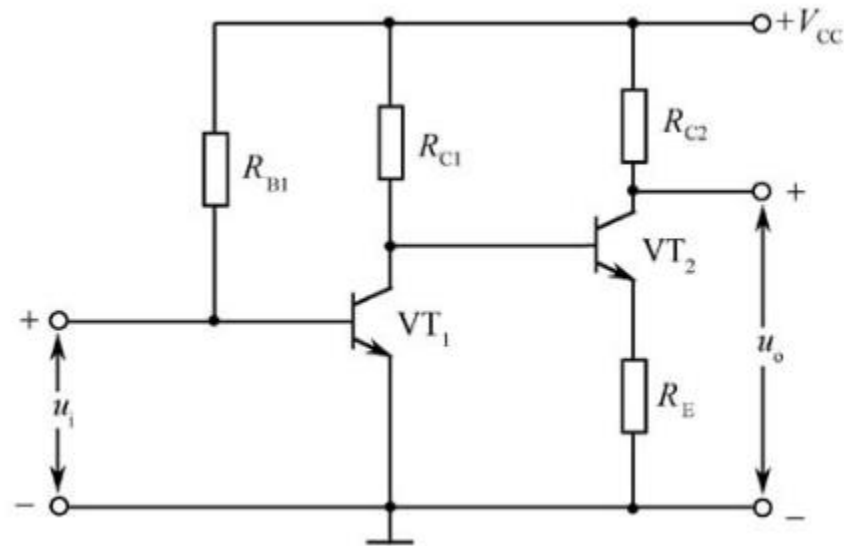




## 5.6.2 组合放大电路的分析

### ✓ 静态分析:

- 直流通路的静态工作点 (Q) : 与耦合方式有关
  - 阻容耦合、变压器耦合: 各级Q相互独立
  - 直接耦合: 各级Q相互影响



## 5.6.2 组合放大电路的分析

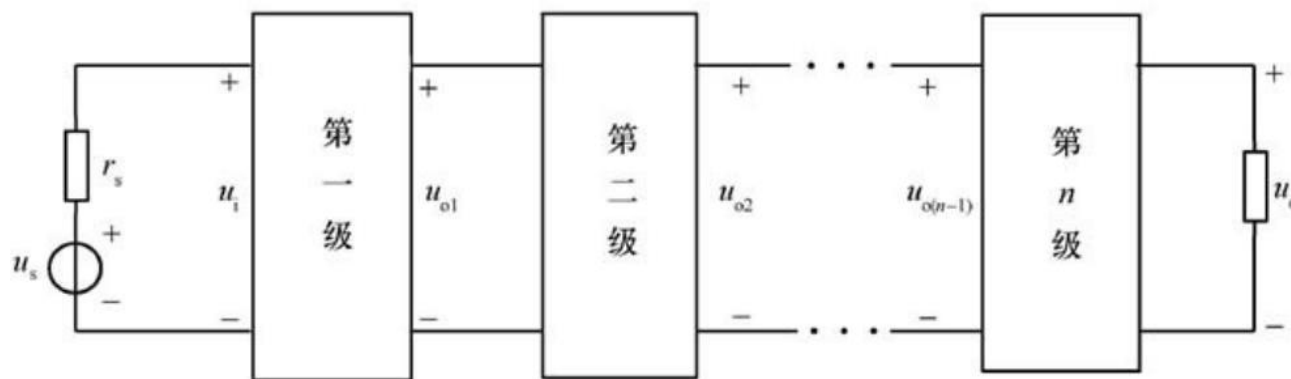
### ✓ 动态分析:

- 与耦合方式无关

$$- A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_{o1}}{V_i} \cdot \frac{V_{o2}}{V_{i2}} \cdot \frac{V_{o3}}{V_{i3}} \cdots \frac{V_o}{V_{in}}$$

$$- R_i = R_{i1}$$

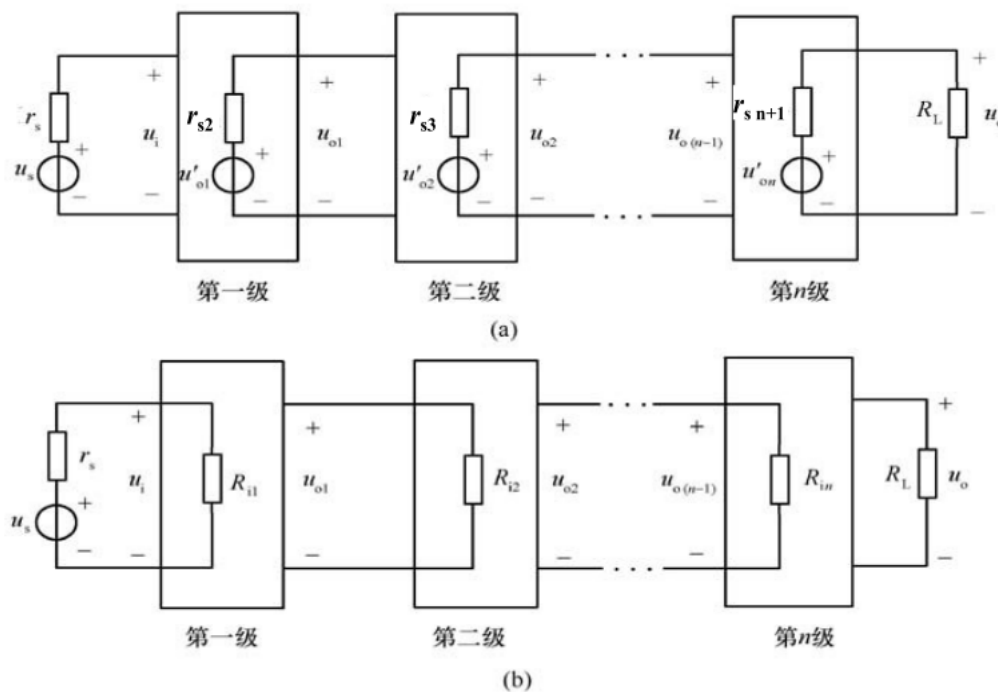
$$- R_o = R_{on}$$



## 5.6.2 组合放大电路的分析

### ✓ 动态分析:

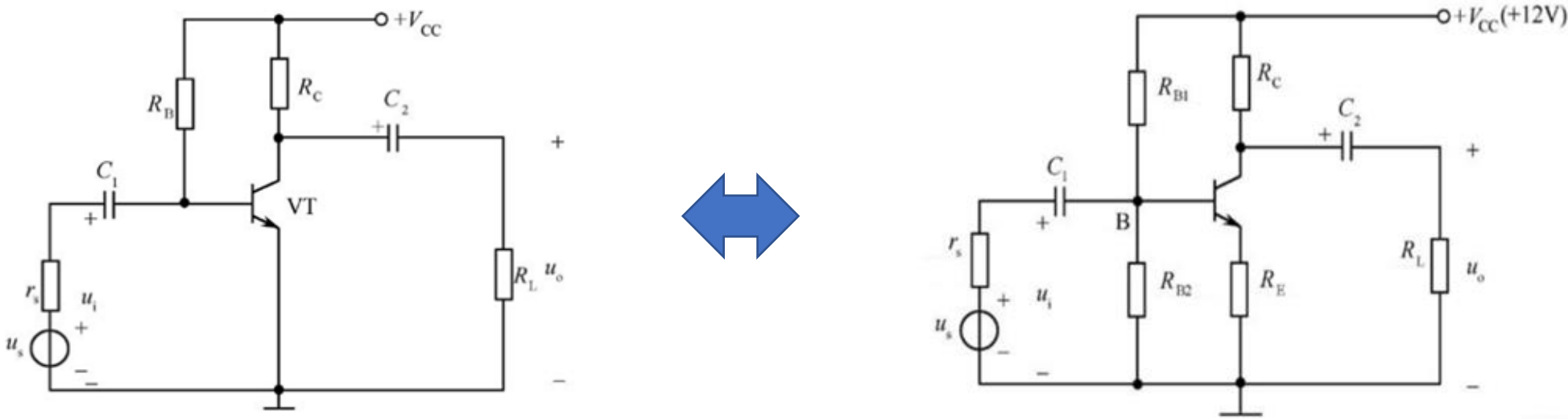
- 前一级对后一级: 信号源, 即  $V_{o1'} = V_{s2}$ ,  $R_{o1} = r_{s2}$
- 后一级对前一级: 负载, 即  $R_{i2} = R_{L1}$



# 5.3.1 温度对工作点的影响

✓ 两种电路比较:

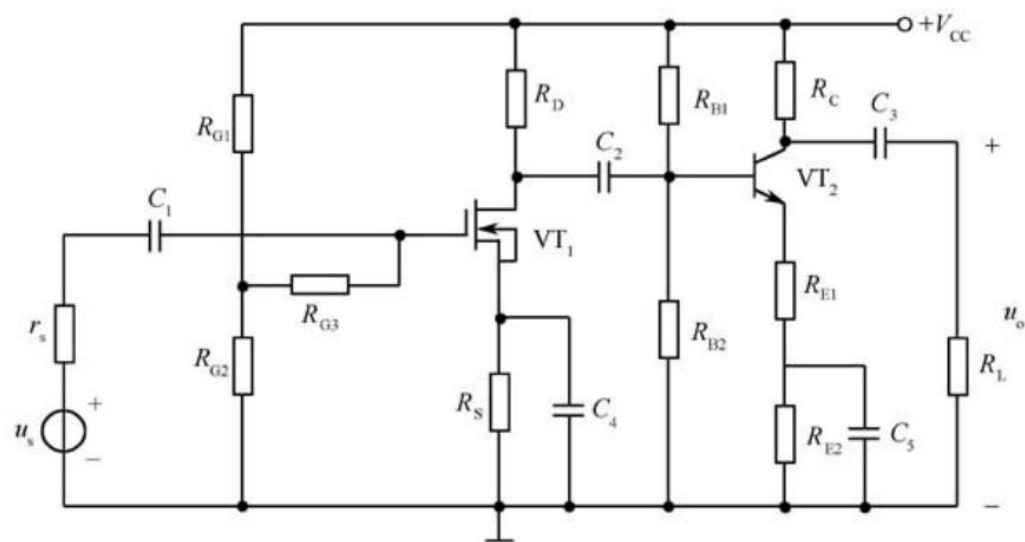
性能	固定式偏置	分压式偏置
电压放大倍数	$-\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$	$-\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_E}$
输入电阻	$r_{be} // R_B$	$[r_{be} + (1 + \beta)R_E] // R'_B$
输出电阻	$R_C$	$R_C$



## 5.6.3 共源-共射放大电路

### ✓ 静态分析:

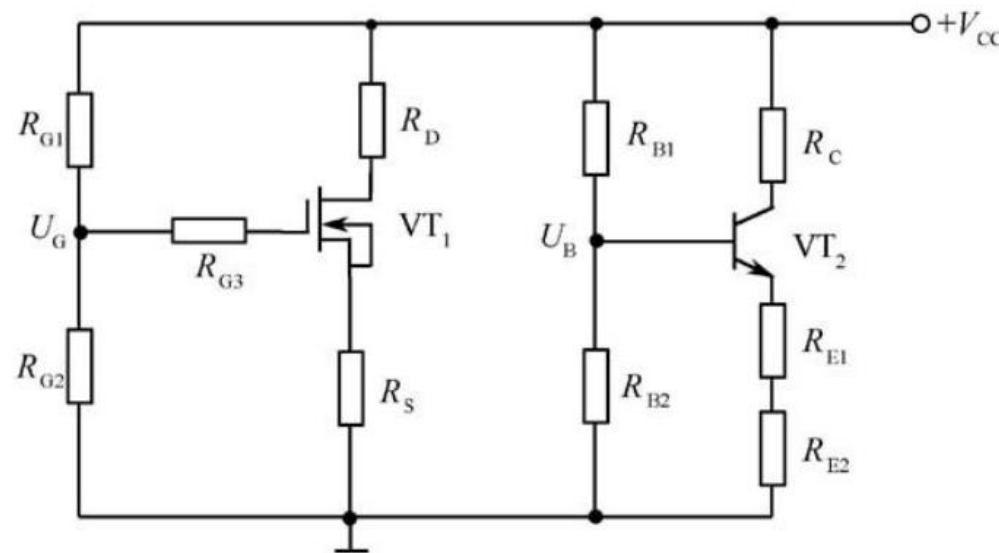
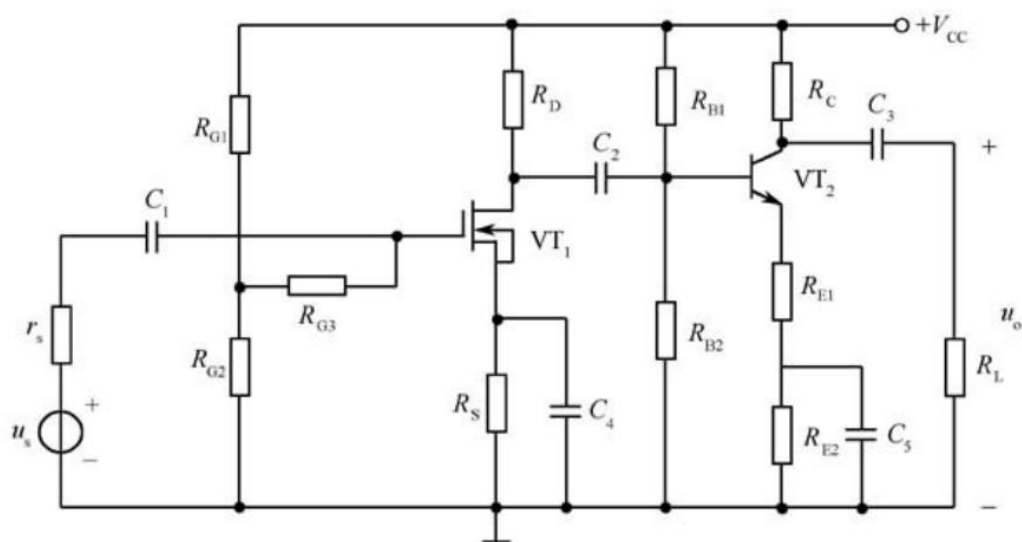
- MOSFET输入阻抗高，对前一级形成的负载较轻
- BJT跨导能力强
- 发射极退耦电阻形成本地反馈



## 5.6.3 共源-共射放大电路

✓ 静态分析:

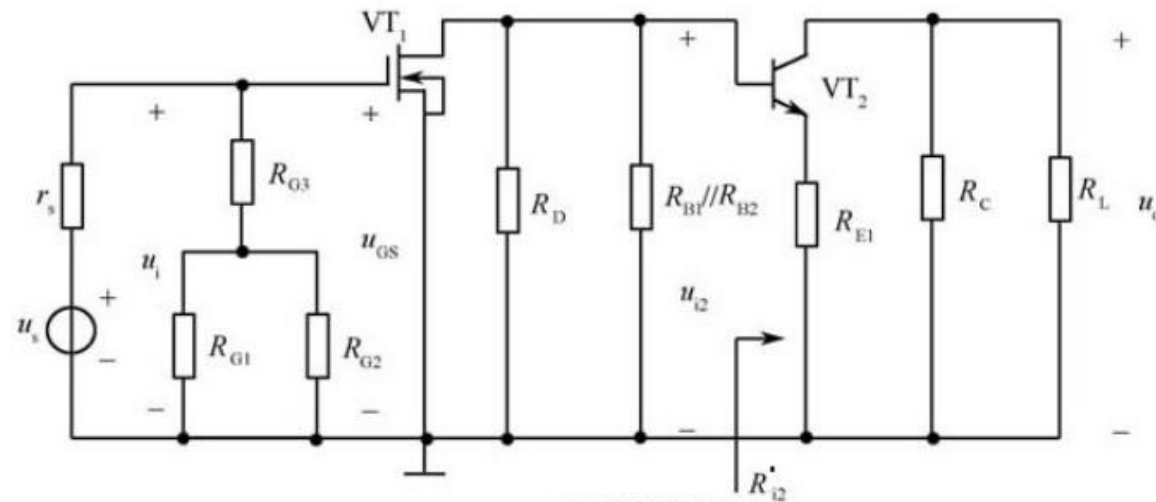
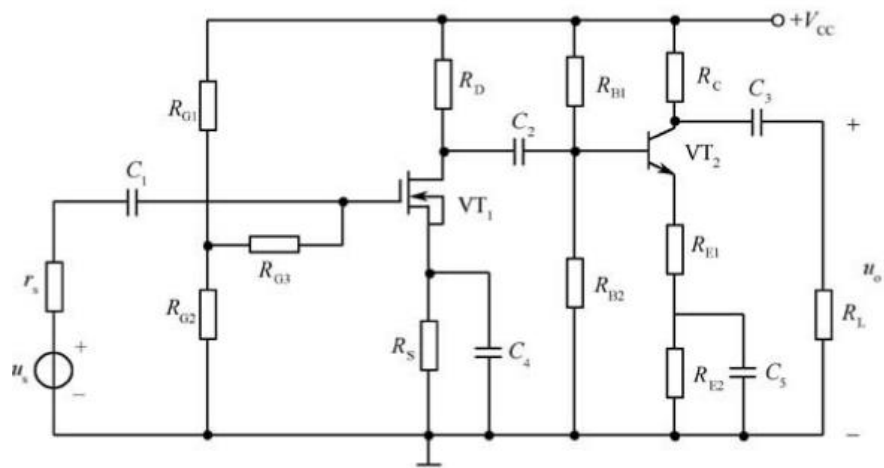
- 直流通路



## 5.6.3 共源-共射放大电路

✓ 动态分析:

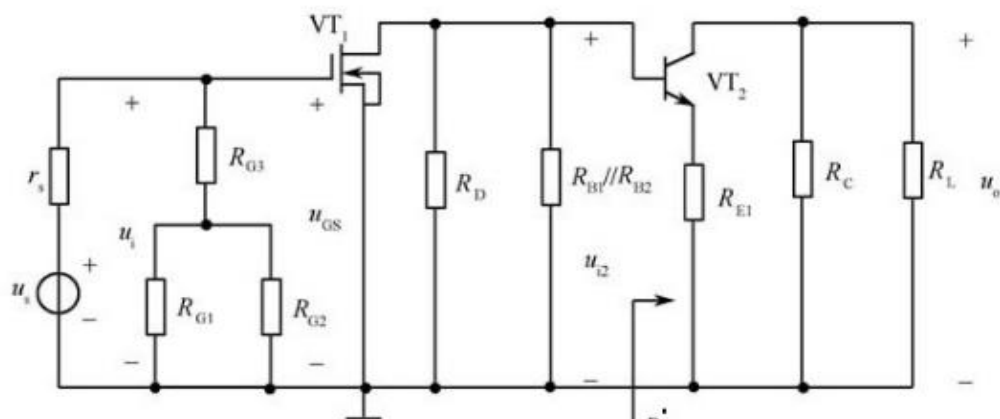
- 交流通路



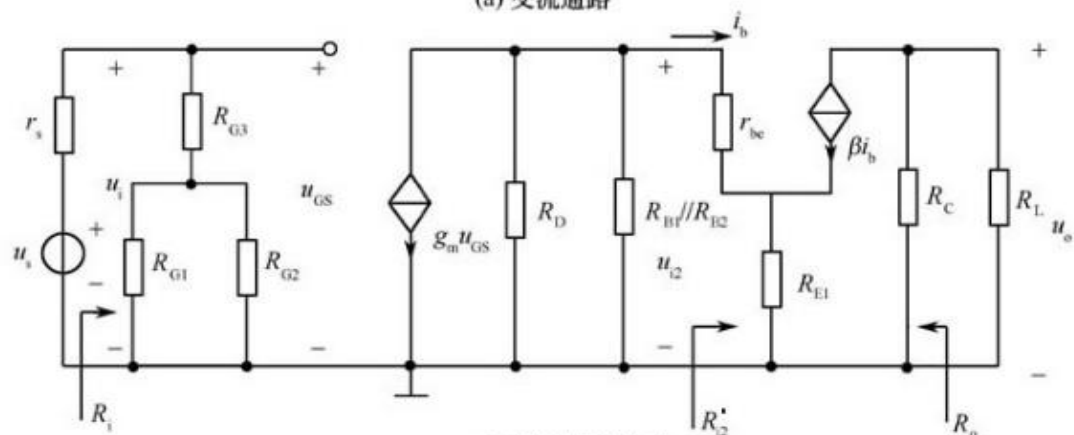
(a) 交流通路

## 5.6.3 共源-共射放大电路

### ✓ 动态分析：小信号阻抗分析



(a) 交流通路



(b) 微变等效电路

输入阻抗

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

输出阻抗

$$R_o \approx R_C$$

源电压增益

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

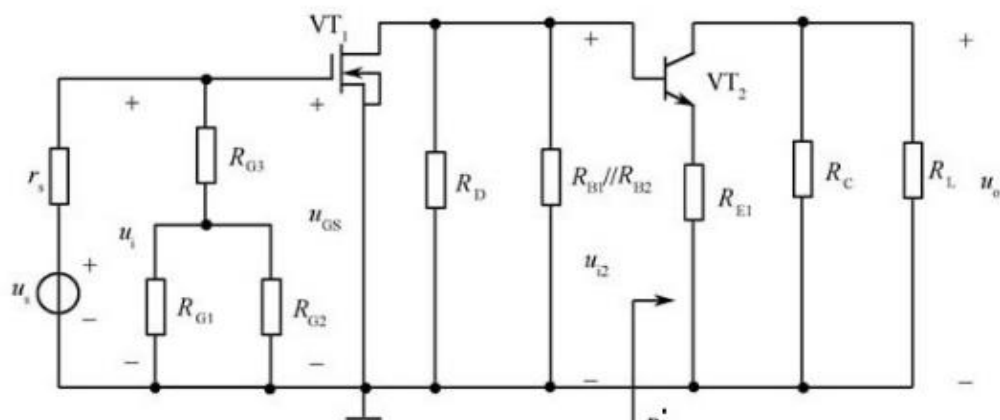
✓ 输入阻抗：高

✓ 输出阻抗：由 $R_C$ 决定

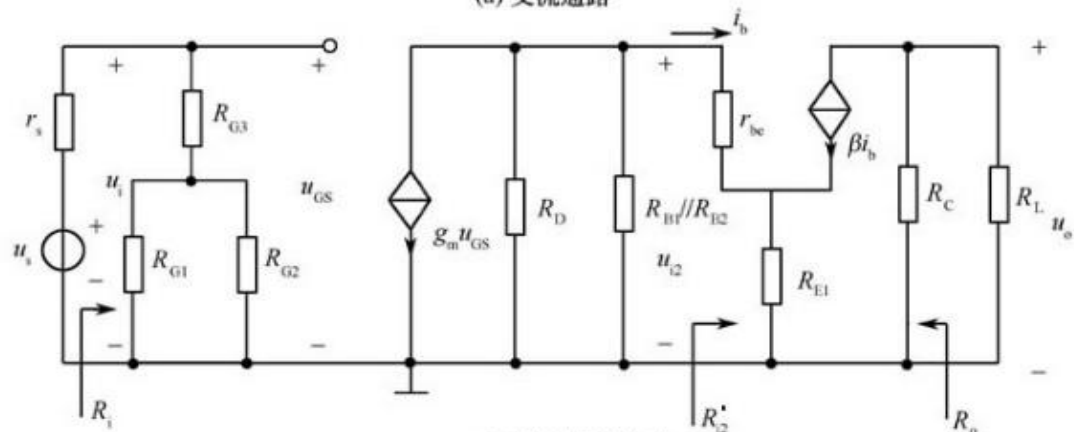


## 5.6.3 共源-共射放大电路

### ✓ 动态分析：小信号增益分析



(a) 交流通路



(b) 微变等效电路

$$\dot{A}_{u1} = -g_m (R_D // R_{B1} // R_{B2} // R'_{i2})$$

$$R'_{i2} = r_{be} + (1 + \beta) \cdot R_{E1}$$

$$r_{be} = r_{b'b} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})}$$

$$\dot{A}_{u2} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) \cdot R_{E1}}$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2}$$

$$= g_m \{ R_D // R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}] \} \cdot \frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}}$$

✓ 退耦化的共射放大：增益为C端与E端看到的负载的比值

✓ 密勒效应：对带宽有影响

## 5.4.1 共基组态基本放大电路

### ✓ 交流分析:

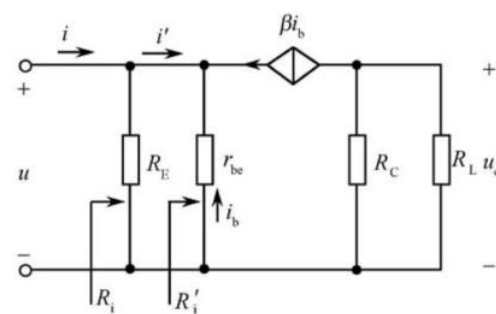
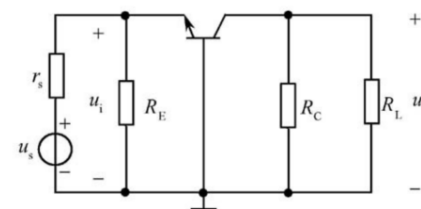
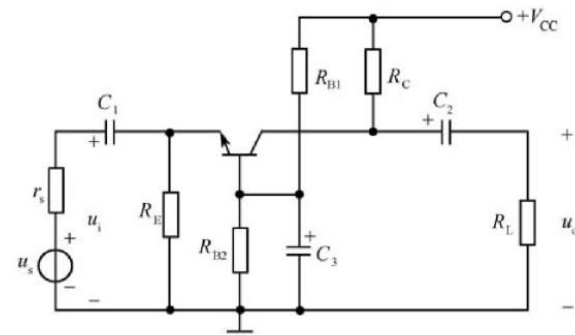
- 输入电阻:  $u = -i_b \cdot r_{be}$

$$i' = -(i_b + \beta \cdot i_b)$$

$$R'_i = u / i' = \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

$$R_i = R_E \parallel R'_i = R_E \parallel \frac{r_{be}}{1 + \beta} \approx \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

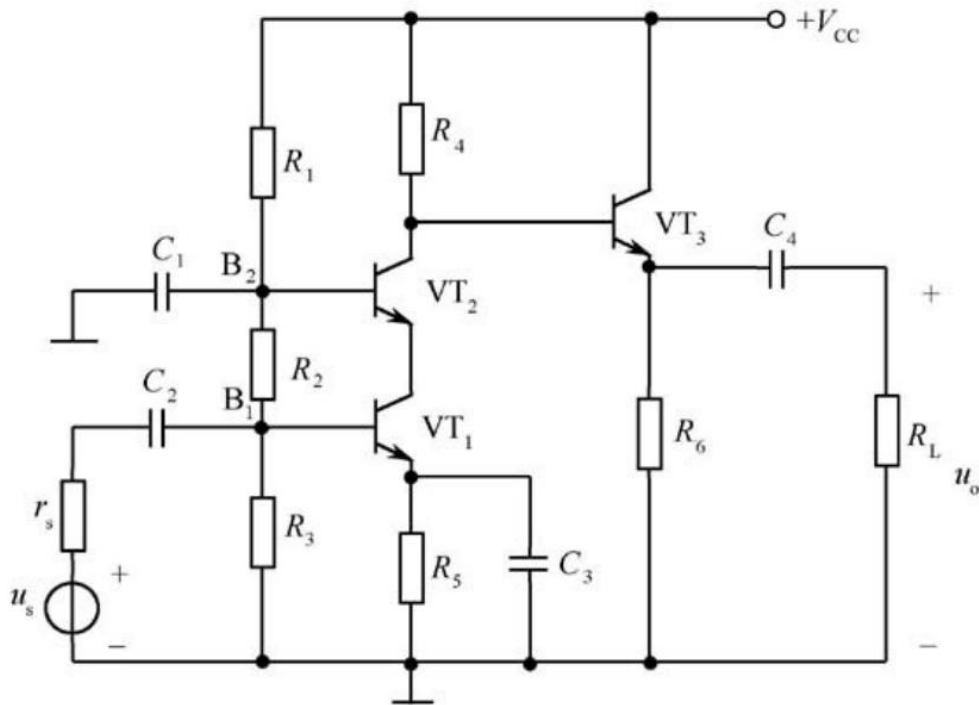
- 输出电阻:  $R_O \approx R_C$



## 5.6.4 共射-共基-共集放大电路

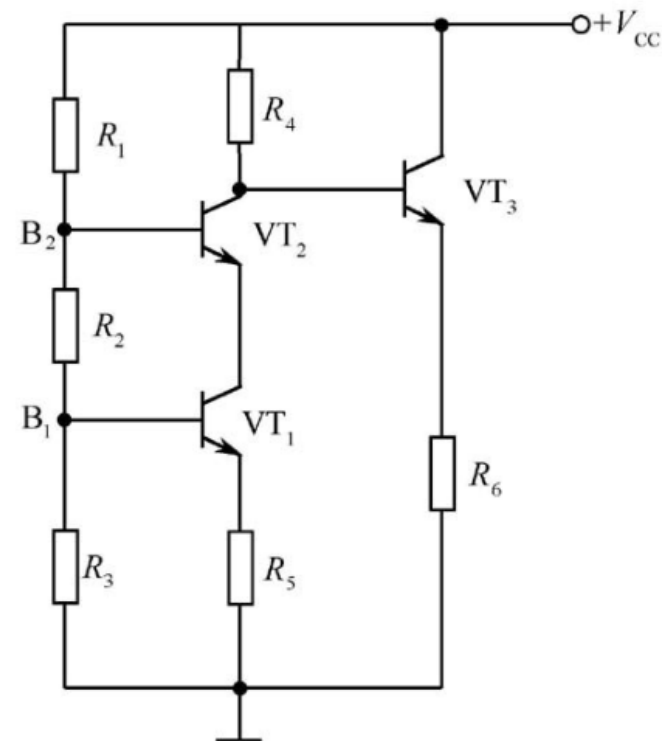
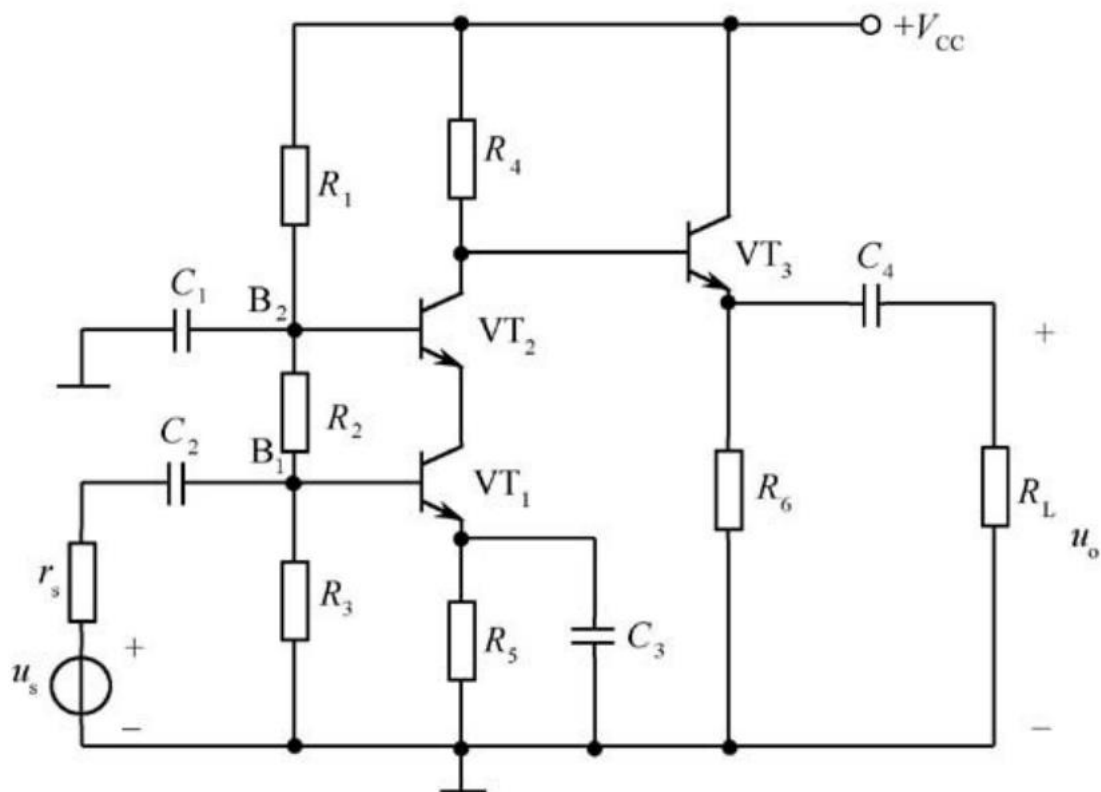
### ✓ 共射-共基-共集电路：

- 共发射共基极/共源共栅：**cascode**，从真空电子管时代就开始使用
- 共集电极输出，阻抗低，驱动较强



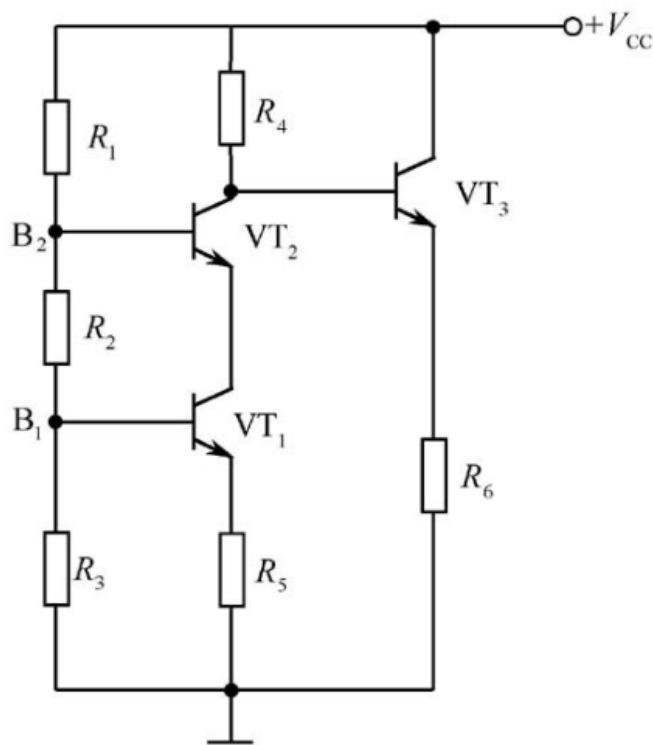
## 5.6.4 共射-共基-共集放大电路

✓ 静态分析：直流通路



## 5.6.4 共射-共基-共集放大电路

✓ 静态分析：直流通路



$$U_{B1} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{CC}$$

$$U_{B2} = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{CC}$$

$$I_{C2Q} \approx I_{C1Q} \approx \frac{U_{B1} - U_{BE1Q}}{R_5}$$

$$I_{C3Q} \approx I_{E3Q} \approx \frac{V_{CC} - I_{C2Q} \cdot R_4 - U_{BE3Q}}{R_6}$$

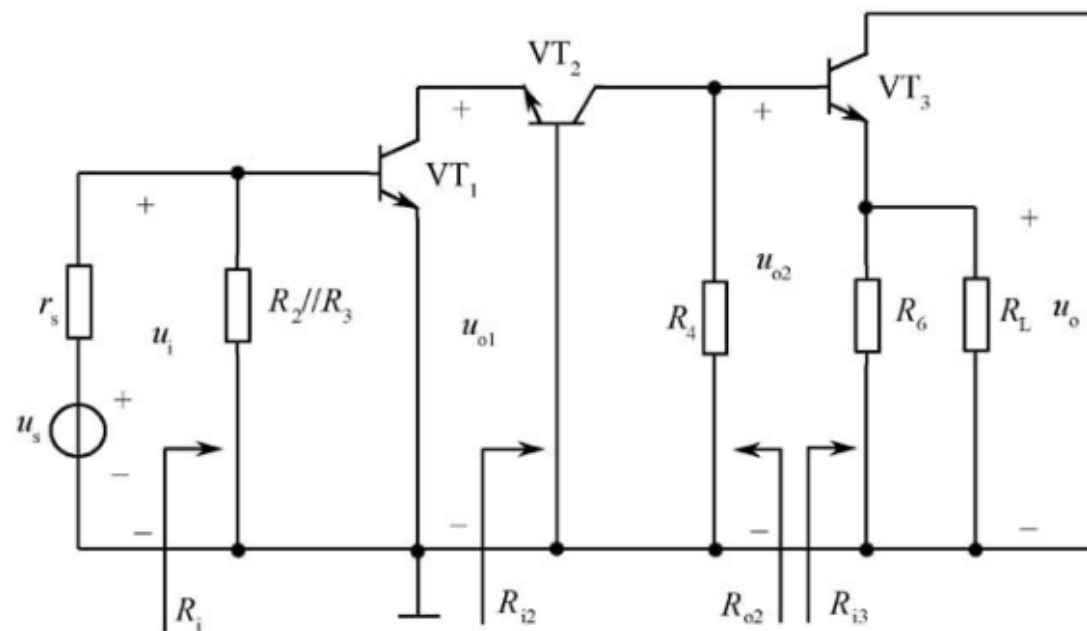
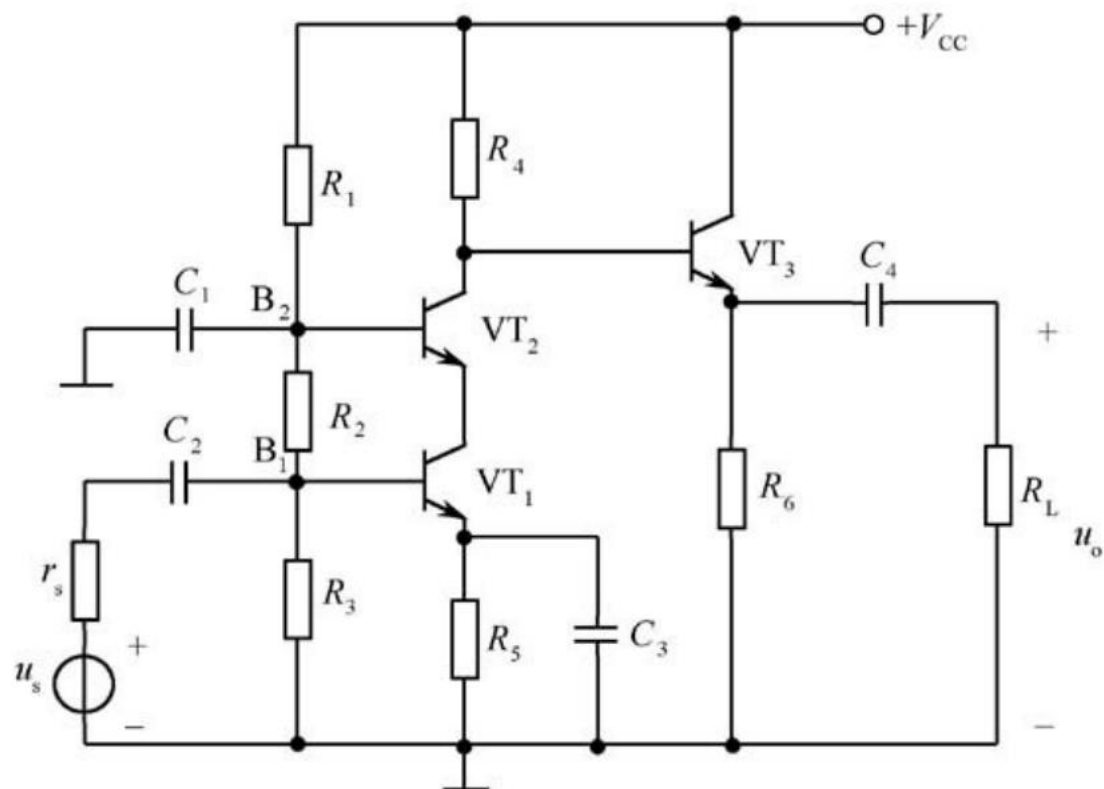
$$U_{CE1Q} = (U_{B2} - U_{BE2Q}) - (U_{B1} - U_{BE1Q}) \\ \approx U_{B2} - U_{B1}$$

$$U_{CE2Q} = V_{CC} - I_{C2Q} \cdot (R_4 + R_5) - U_{CE1Q}$$

$$U_{CE3Q} = V_{CC} - I_{E3Q} \cdot R_6$$

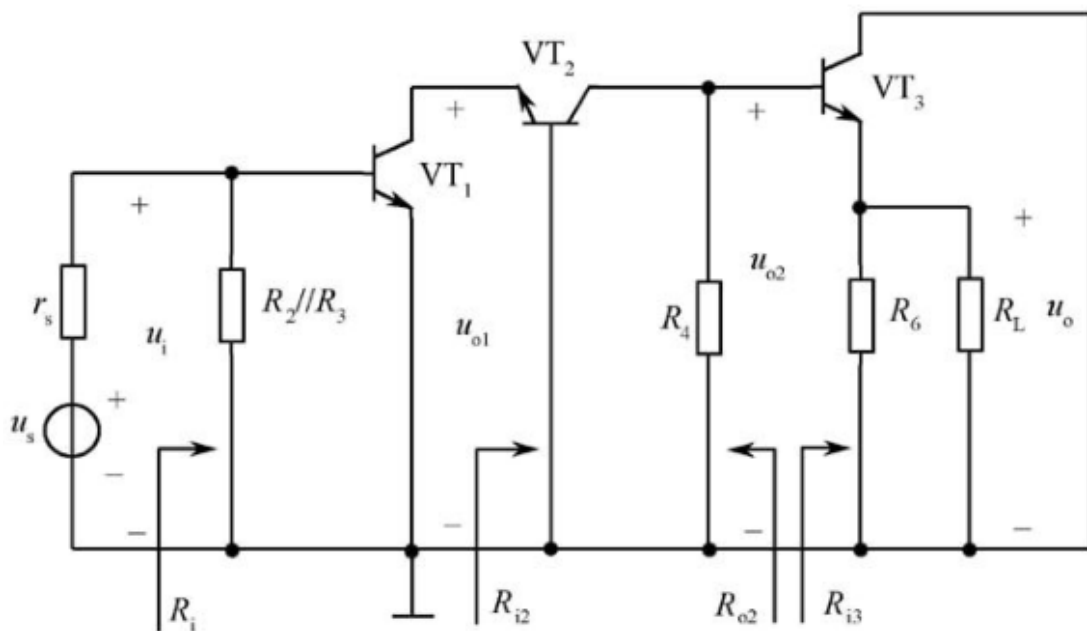
## 5.6.4 共射-共基-共集放大电路

✓ 动态分析：交流通路



## 5.6.4 共射-共基-共集放大电路

✓ 动态分析：交流通路



输入阻抗

$$R_i = R_2 // R_3 // r_{be1}$$

输出阻抗

$$R_o = R_6 // \frac{r_{be3} + R_{o2}}{1 + \beta_3}$$

$$R_{o2} = R_4$$

源电压增益

$$A_{us} = \frac{R_i}{r_s + R_i} \cdot A_u$$

✓ 阻抗换算：基极阻抗折换到发射极要除以增益

## 5.4.1 共基组态基本放大电路

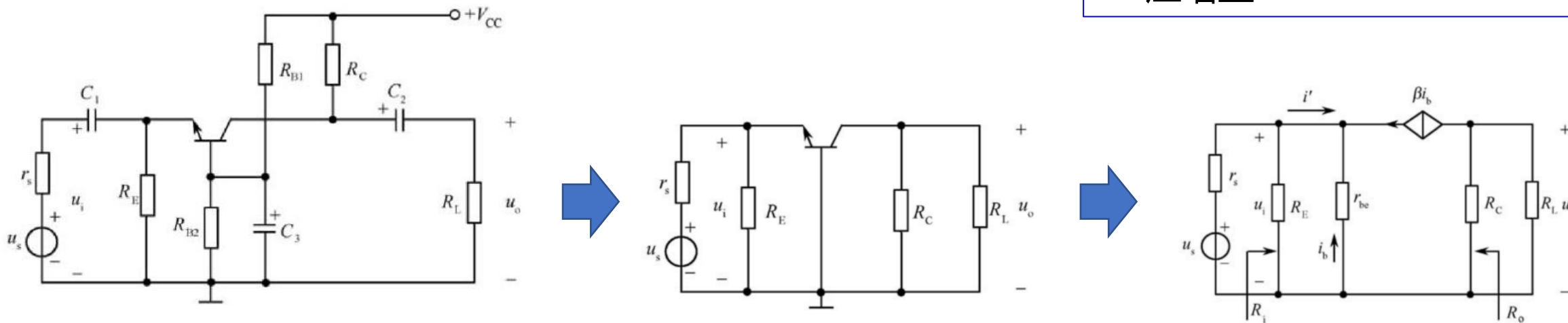
### ✓ 直流分析：

- 与共射组态相同

### ✓ 交流分析：

- 增益：
$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad R'_L = R_C // R_L$$

✓ **增益：** BE的跨导将输入电压转换为电流，然后施加上到输出负载电阻上形成电压增益





## 5.4.2 共集组态基本放大电路

### ✓ 交流分析:

- 电压放大倍数:

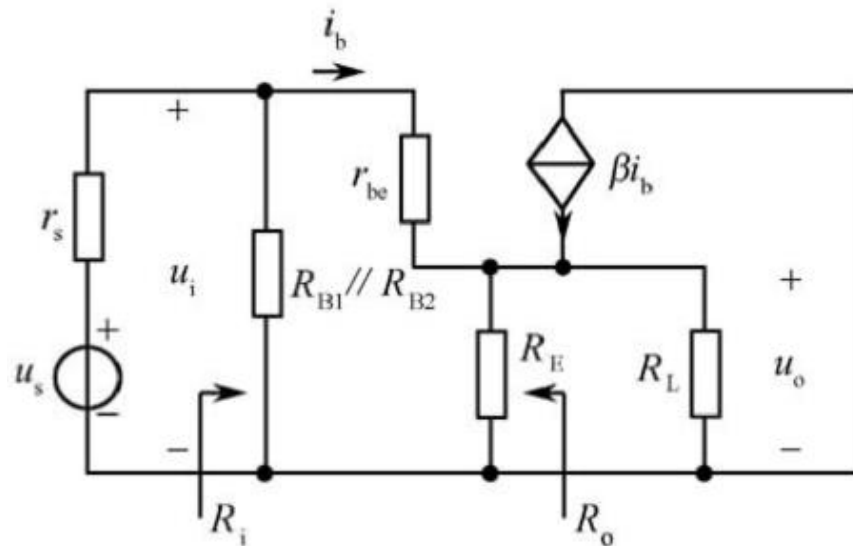
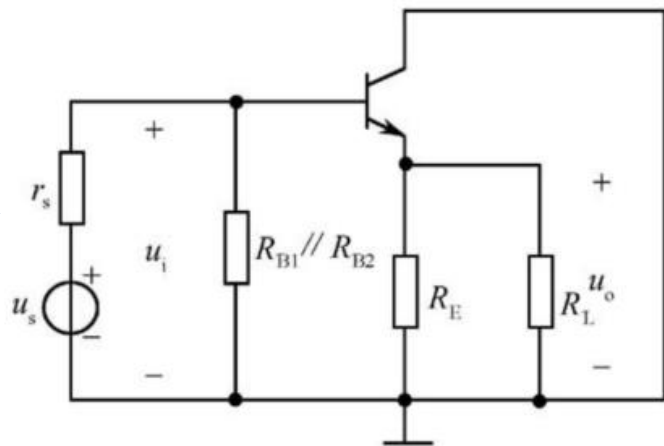
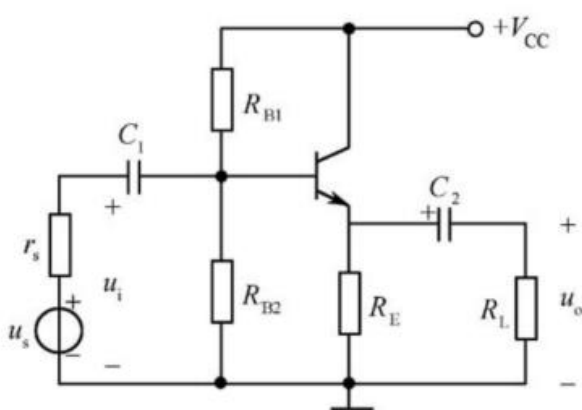
$$R_L' = R_E \parallel R_L$$

$$u_i = i_b \cdot r_{be} + (i_b + \beta \cdot i_b) \cdot R_L'$$

$$u_o = (i_b + \beta \cdot i_b) \cdot R_L'$$

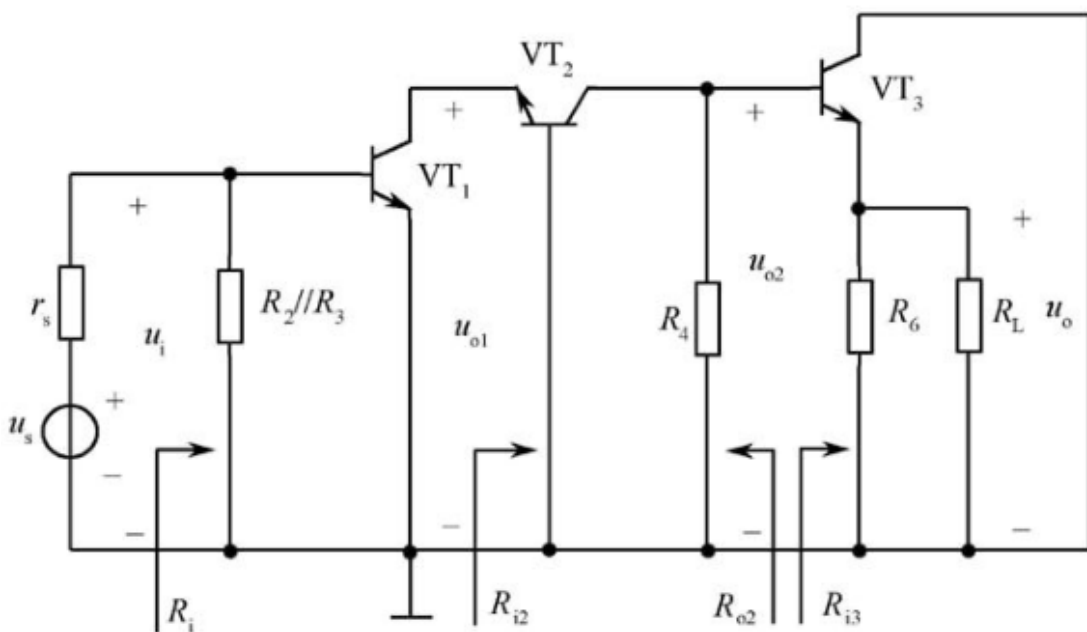
$$\dot{A}_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{(1 + \beta) R_L'}{r_{be} + (1 + \beta) R_L'}$$

✓ **增益:** 发射极视为内阻为  $r_{be}/(1 + \beta)$  的电压源, 增益为内阻与负载电阻的分压



## 5.6.4 共射-共基-共集放大电路

### ✓ 动态分析：交流通路



电压增益  $\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdot \dot{A}_{u3}$

$$R_{i2} = \frac{r_{be2}}{1 + \beta_2}$$

$$\dot{A}_{u1} = -\frac{\beta_1 R_{i2}}{r_{be1}} = -\frac{\beta_1}{1 + \beta_2} \cdot \frac{r_{be2}}{r_{be1}}$$

$$r_{be} = r_{b'b} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})}$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{\beta_2 (R_4 \parallel R_{i3})}{r_{be2}}$$

$$\dot{A}_{u3} = \frac{(1 + \beta_3)(R_6 \parallel R_L)}{r_{be3} + (1 + \beta_3)(R_6 \parallel R_L)}$$

- ✓ 发射极负载：增益低，密勒效应较小，带宽较高
- ✓ VT<sub>2</sub>作为中间级电流缓冲
- ✓ VT<sub>3</sub>作为输出级电压缓冲