

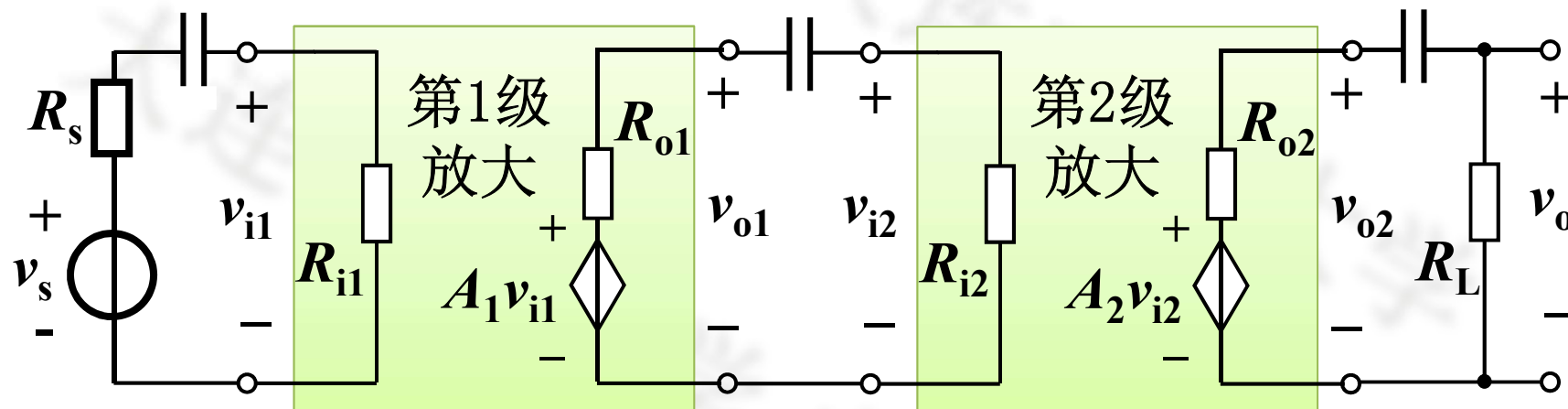
选择合适的放大电路

- (1) 静态工作点稳定、反相电压放大； 含射级偏置的共射电路
- (2) 输入阻抗几十千欧姆，电压跟随； 共集电路
- (3) 同相电压放大且增益较大； 共基电路
- (4) 输入阻抗几十千欧姆，电压增益约100； ?
- (5) 输出阻抗几十欧姆，电压增益约100； ?
- (6) 电压增益约1000； ?

**很多情况下，单管放大电路无法满足全部的设计要求；
必须采用多级组合放大电路。**

4.6组合放大电路

Multistage Amplifiers



多级放大器所考虑的主要问题：

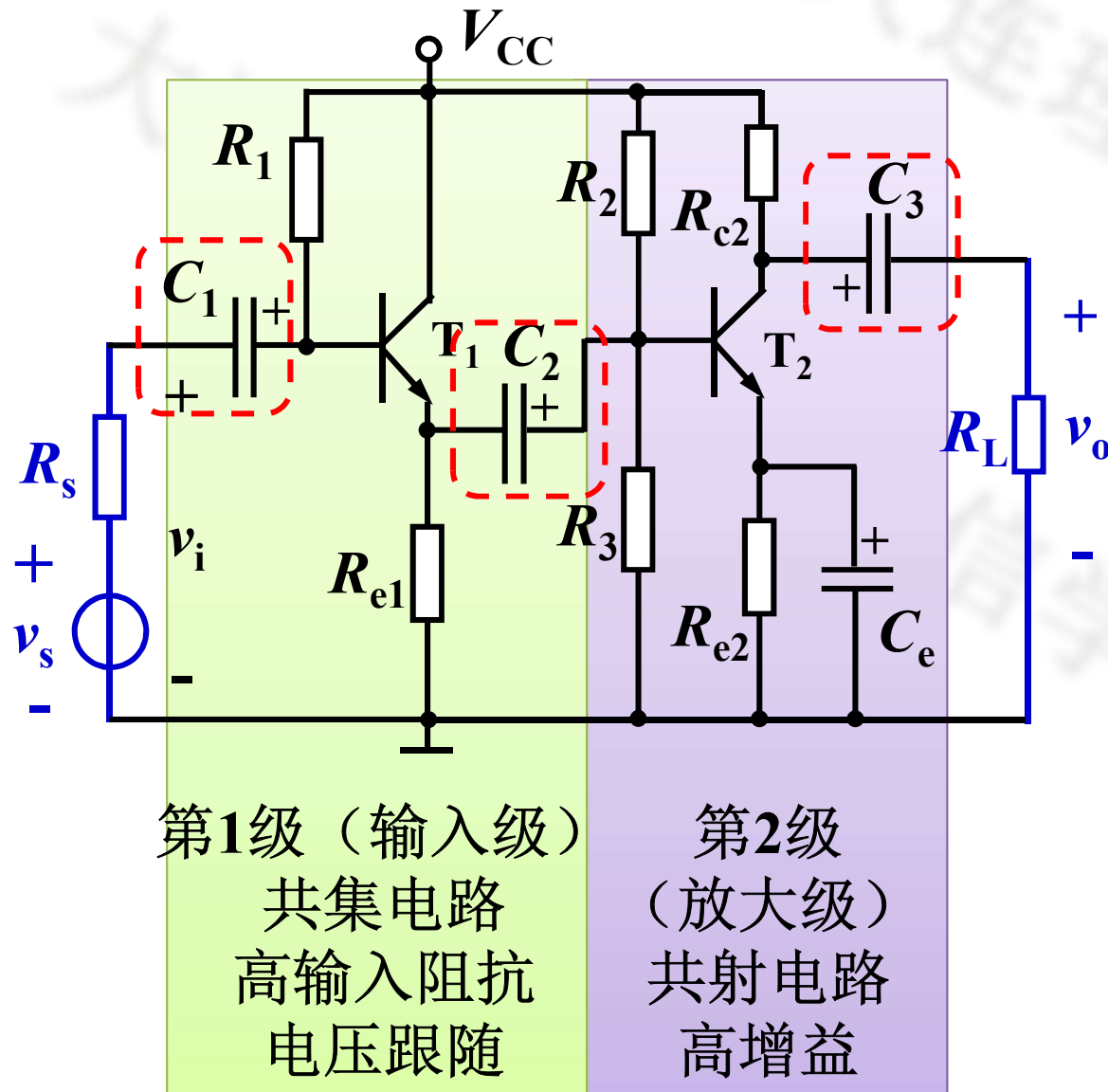
- 1.级间耦合方式； 影响电路的Q点、信号的传送。
- 2.电路的小信号参数计算；
- 3.电路的频率特性。

四种耦合方式：

直接耦合、阻容耦合、变压器耦合、光电耦合。

4.6组合放大电路

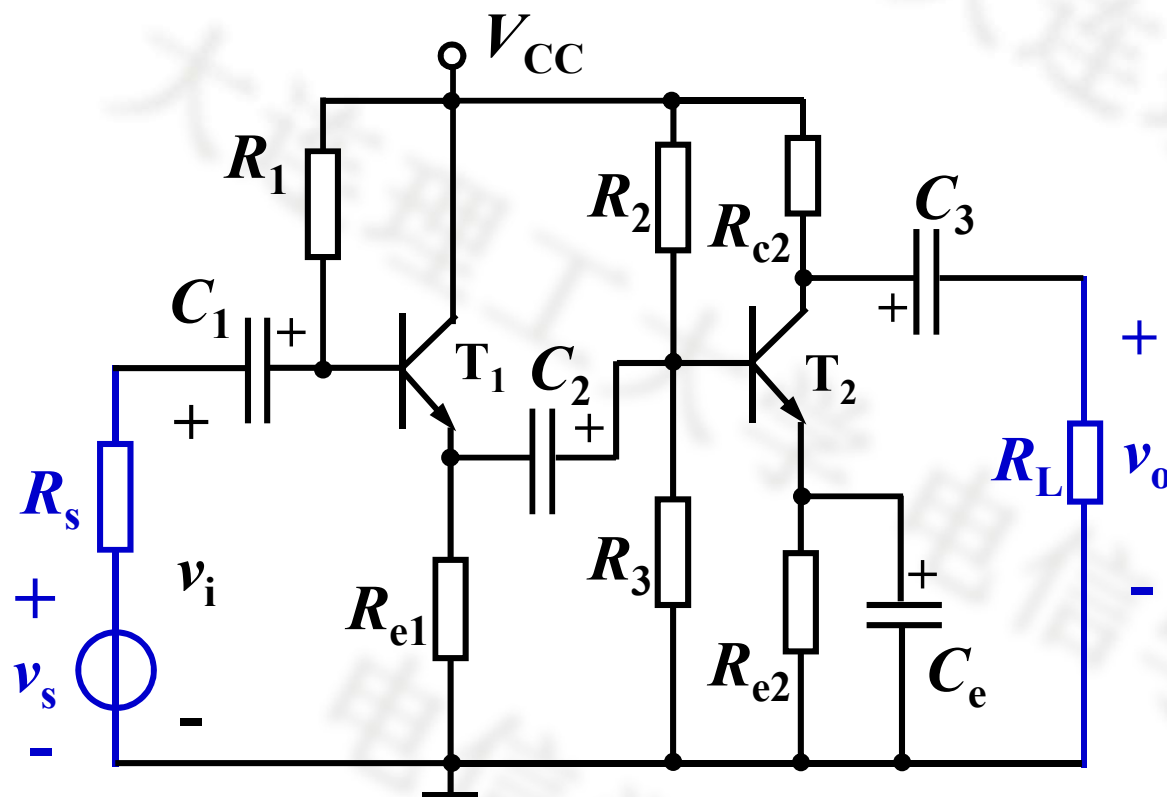
1. 级间耦合方式 (1) 阻容耦合



利用电阻和**电容**
将前一级和后一
级联接起来。

4.6组合放大电路

1. 级间耦合方式 (1) 阻容耦合



阻容耦合：各级的Q点独立计算

优点：

- ①各级直流通道相互独立，互不影响；
- ②只要耦合电容足够大，则信号能够顺利地加到后一级。

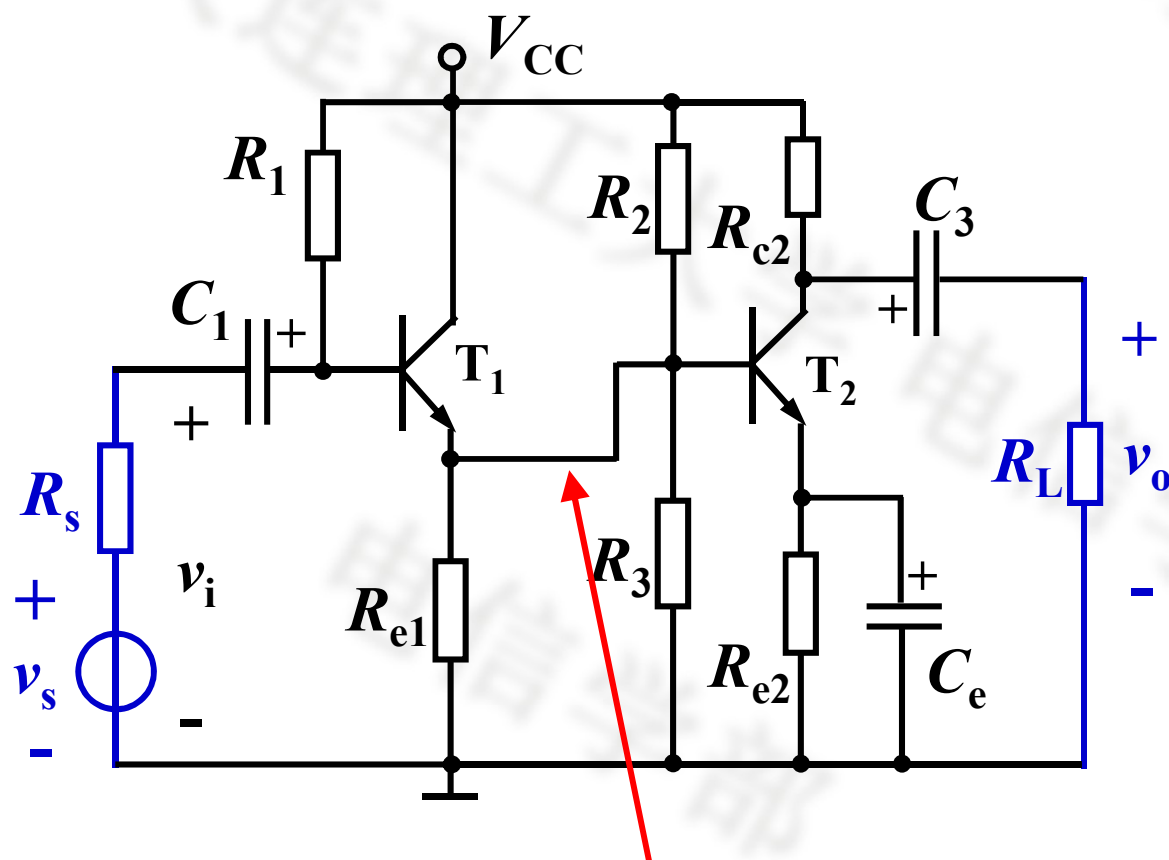
缺点：

- ①不适合传送缓慢变化的信号；
- ②不适用于集成电路（电容太大）。

4.6组合放大电路

1. 级间耦合方式 (2) 直接耦合

直接耦合：前级的输出直接（或经电阻）接到下一级的输入端。



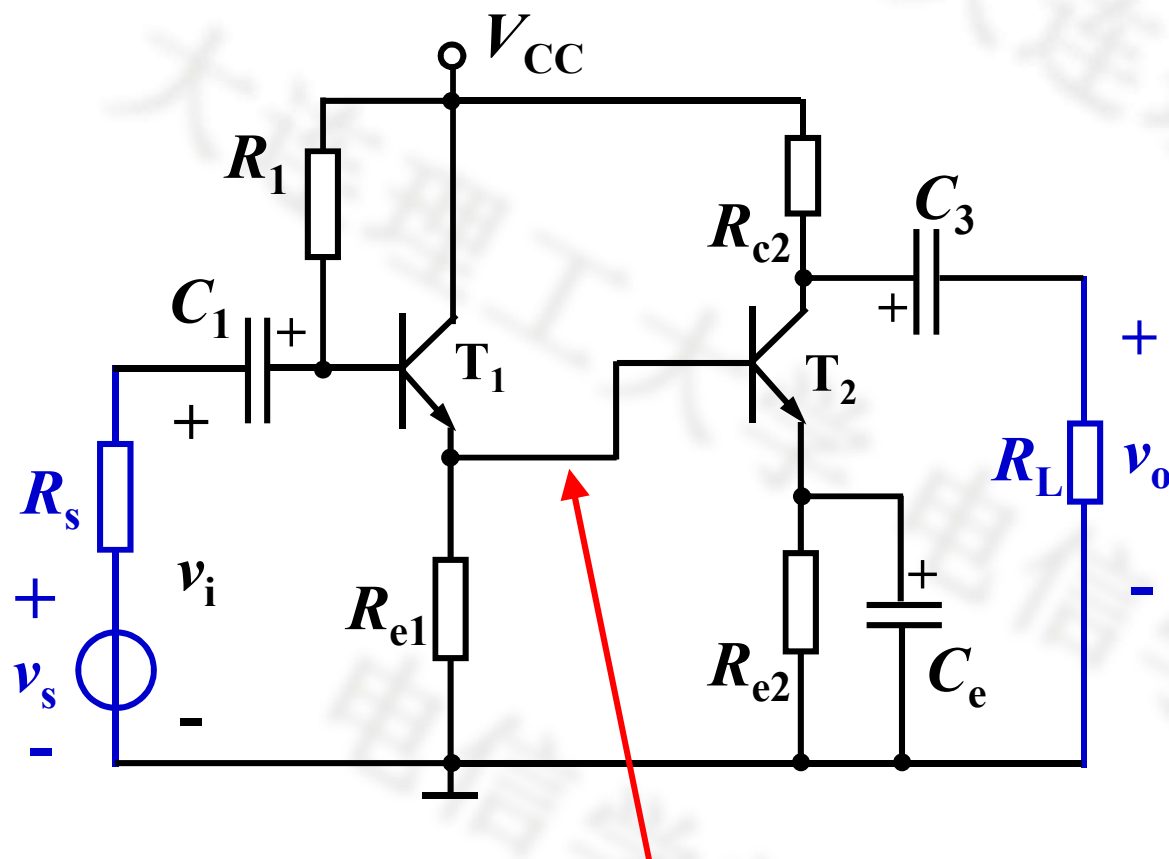
如何计算Q点？

第二级的输入端偏置电压可简化为由前一级的输出端直接提供。

两级之间直接耦合

4.6组合放大电路

1. 级间耦合方式 (2) 直接耦合



两级之间直接耦合

下一级的输入端偏置电压
由前一级的输出端提供

优点:

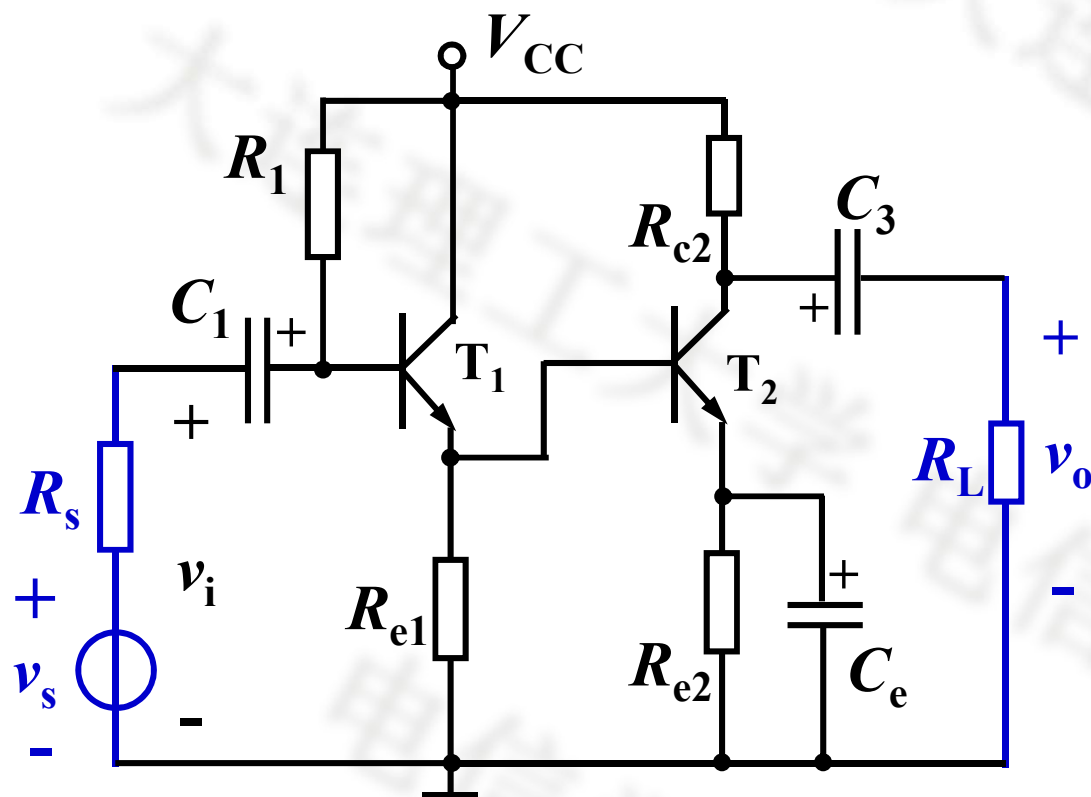
- ①适用于直流、极低频信号的放大;
- ②适用于集成电路。

缺点:

- ①直流电位相互牵制 (综合设计Q点);
- ②零点漂移问题 (集成电路可克服此问题)。

4.6组合放大电路

1. 级间耦合方式 (2) 直接耦合



Q点计算:

通常, $I_{BQ2} \ll I_{EQ1}$

第一级的Q点计算不受第2级影响。

$$I_{BQ1} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ1}}{R_1 + (1 + \beta_1) R_{e1}}$$

$$I_{CQ1} = \beta_1 I_{BQ1}$$

$$V_{CEQ1} = V_{CC} - I_{CQ1} R_{e1}$$

$$I_{CQ2} \approx I_{EQ2} \approx \frac{I_{CQ1} R_{e1} - V_{BEQ2}}{R_{e2}}$$

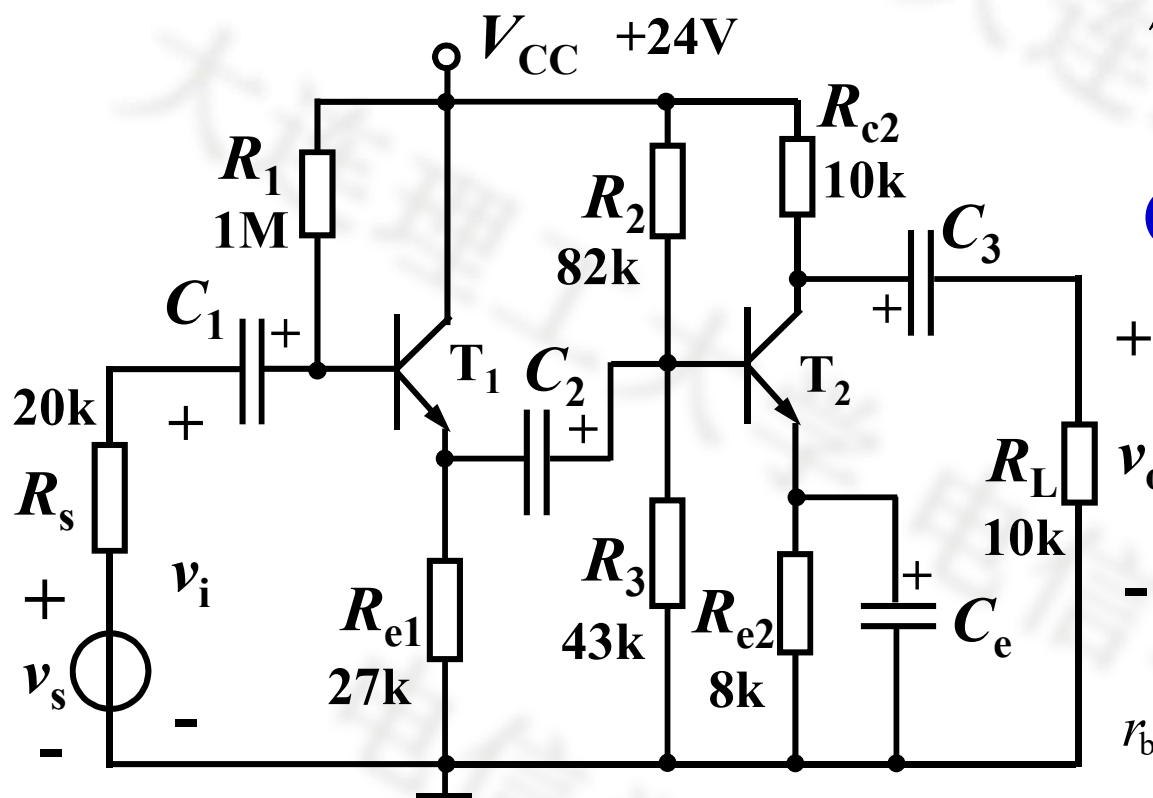
$$I_{BQ2} = I_{CQ2} / \beta_2$$

$$V_{CEQ2} \approx V_{CC} - I_{CQ2} (R_{c2} + R_{e2})$$

需要根据实际
电路灵活计算

4.6组合放大电路

2. 小信号参数分析（阻容耦合）



例：已知 $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ，
求 R_o 、 R_i 、 A_v 和 A_{vs}

(1). 阻容耦合，分别计算 Q_1 和 Q_2 ，求 r_{be1} 和 r_{be2} 。

$$I_{BQ1} \approx \frac{V_{CC}}{R_1 + (1 + \beta_1)R_{e1}} \approx 10\mu A$$

$$I_{EQ1} \approx \beta_1 I_{BQ1} = 0.5mA$$

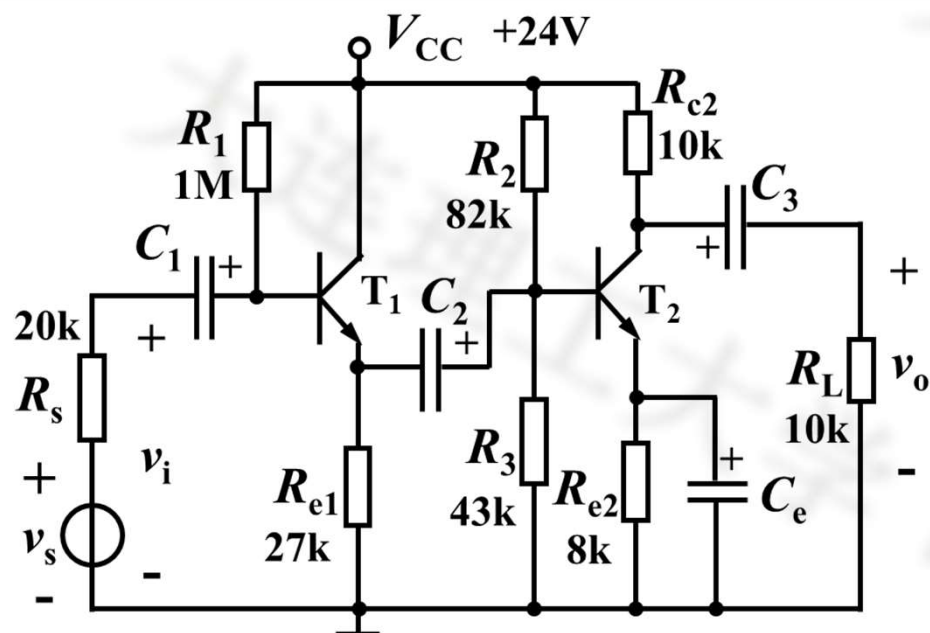
$$r_{be1} = 200 + (1 + \beta_1) \frac{26mV}{I_{EQ1}} \approx 2.8k\Omega$$

$$V_{BQ2} \approx \frac{V_{CC}R_3}{R_2 + R_3} = 8.26V \quad I_{EQ2} \approx \frac{V_{BQ2}}{R_{e2}} \approx 1mA$$

$$r_{be2} = 200 + (1 + \beta_2) \frac{26mV}{I_{E2}} \approx 1.5k\Omega$$

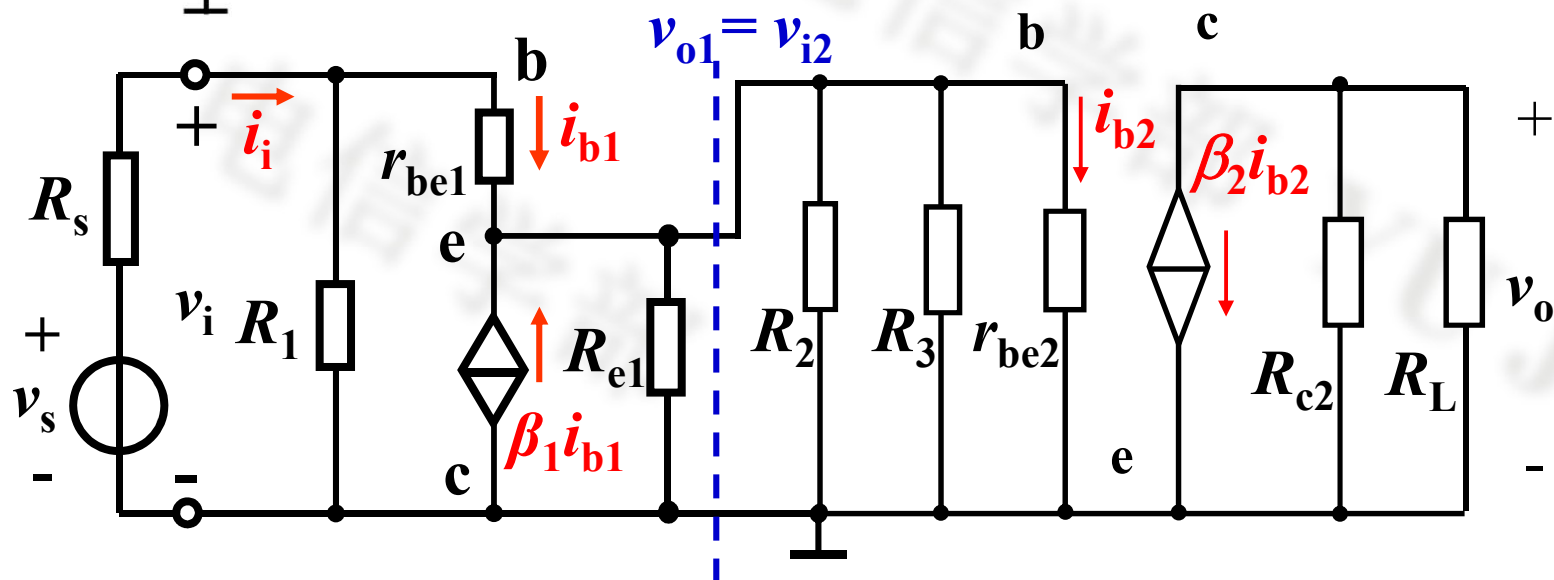
4.6组合放大电路

2. 小信号参数分析 (2) 小信号等效电路



要点（与前文完全一致）：

- ①耦合和旁路电容都短路；
- ②直流电压源改为交流地；
- ③三极管be结之间是 r_{be} ，ce结之间是受控电流源。



4.6组合放大电路

2. 小信号参数分析 (3) 输入阻抗:

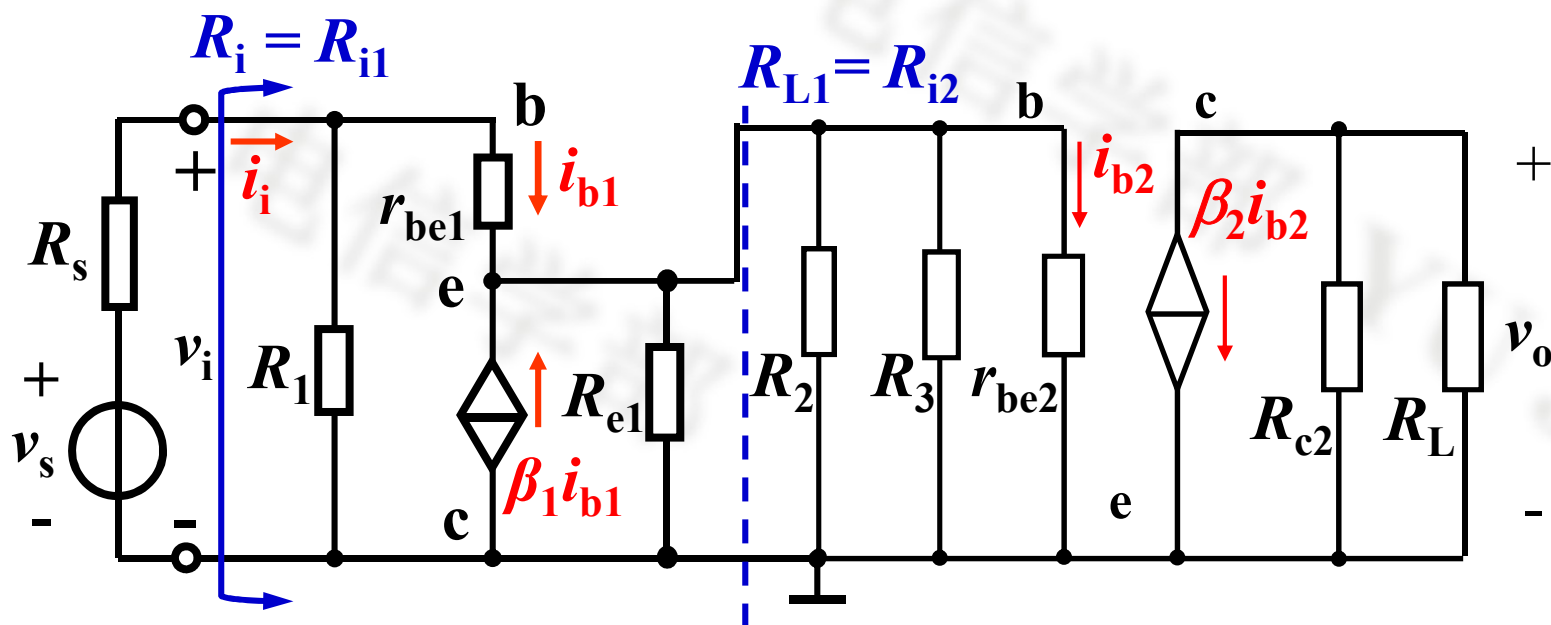
方法一：直接电路分析

$$R_i = R_1 // [r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_{e1} // R_2 // R_3 // r_{be2})] \approx 66.7 \text{ k}\Omega$$

方法二：使用公式。组合电路的 R_i 是第一级的输入阻抗

$$R_i = R_1 // [r_{be1} + (1 + \beta_1) R'_{L1}] \quad R'_{L1} = R_{e1} // R_{L1} \approx 1.35 \text{ k}\Omega$$

第一级的负载是第二级的输入阻抗。 $R_{i2} = R_2 // R_3 // r_{be2}$



4.6组合放大电路

2. 小信号参数分析

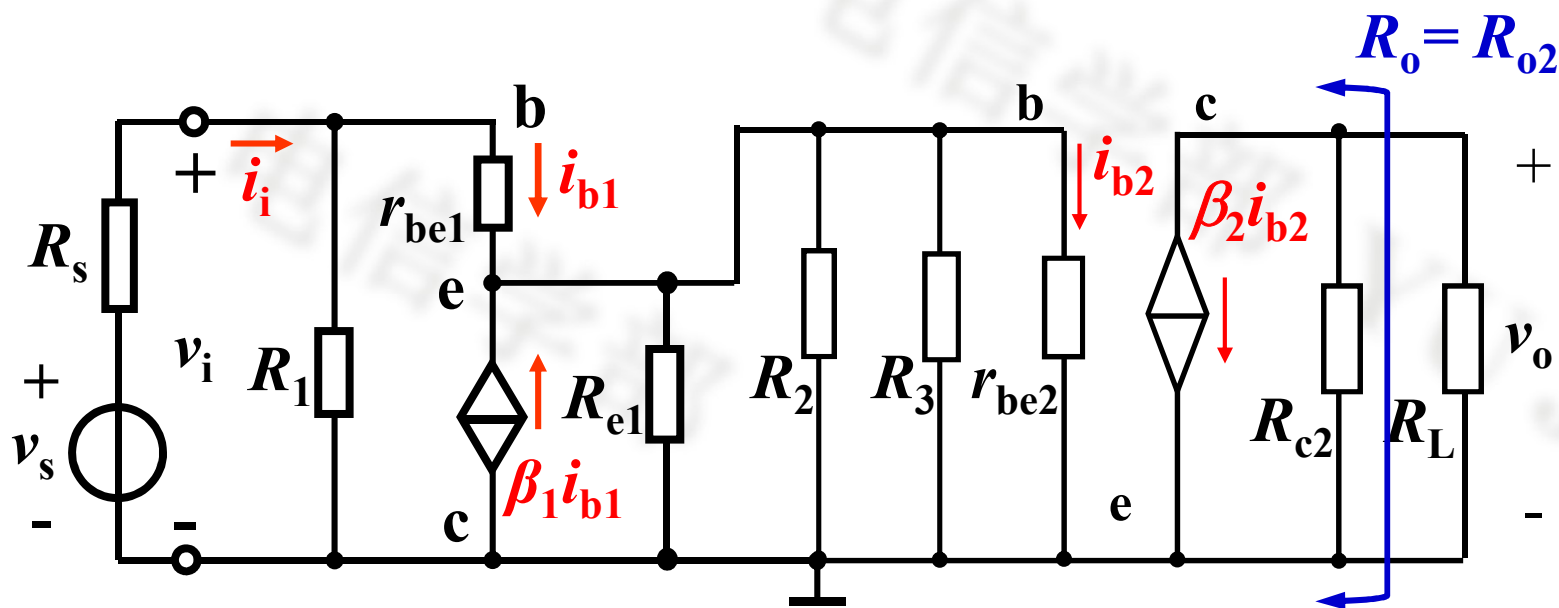
(4) 输出阻抗

方法一：直接电路分析

$$R_o = R_c$$

方法二：使用公式。组合电路的 R_o 就是输出级的输出阻抗

$$R_o = R_{o2} = R_c$$



4.6组合放大电路

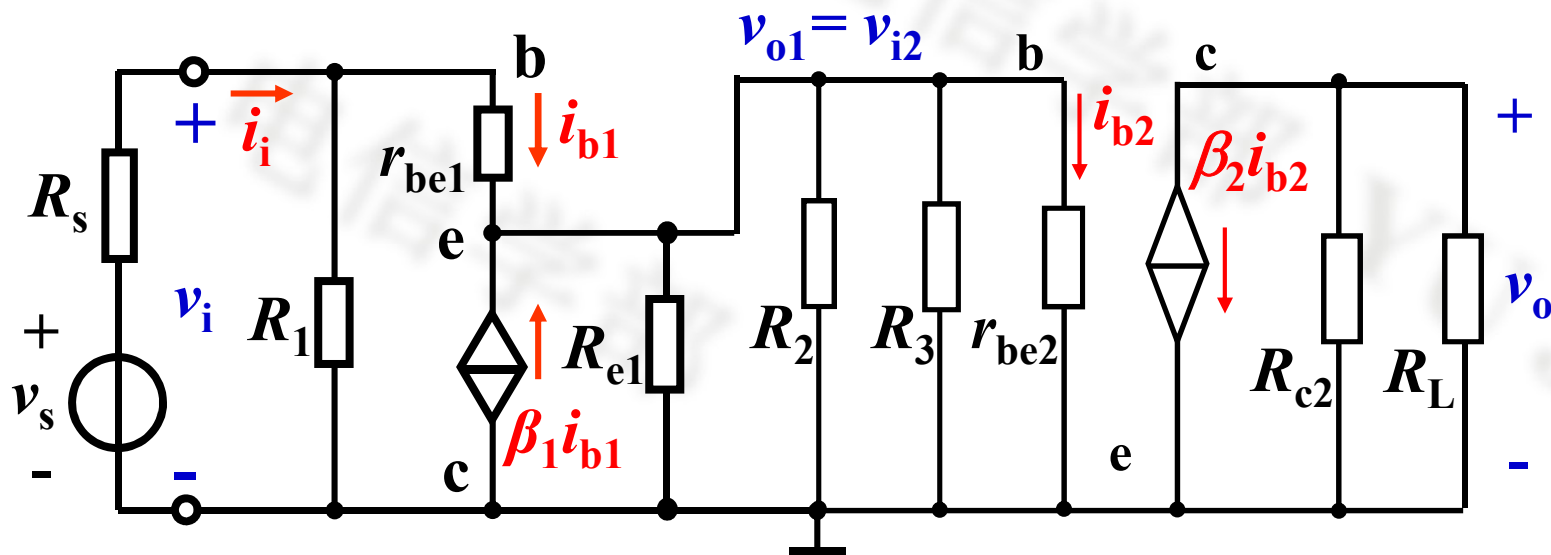
2. 小信号参数分析 (5) 电压增益 A_v

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_{o1}}{v_i} \times \frac{v_o}{v_{o1}} = A_{v1} \times A_{v2} \approx -160$$

总电压增益是各级电压增益之积，各级使用公式

$$A_{v1} = \frac{(1 + \beta_1)R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1)R'_{L1}} = \frac{51 \times 1.35k}{2.8k + 51 \times 1.35k} \approx 0.96$$

$$A_{v2} = -\frac{\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}} = -\frac{50 \times (10 // 10)}{1.5} = -166.7 \quad R'_{L2} = R_{c2} // R_L$$



4.6组合放大电路

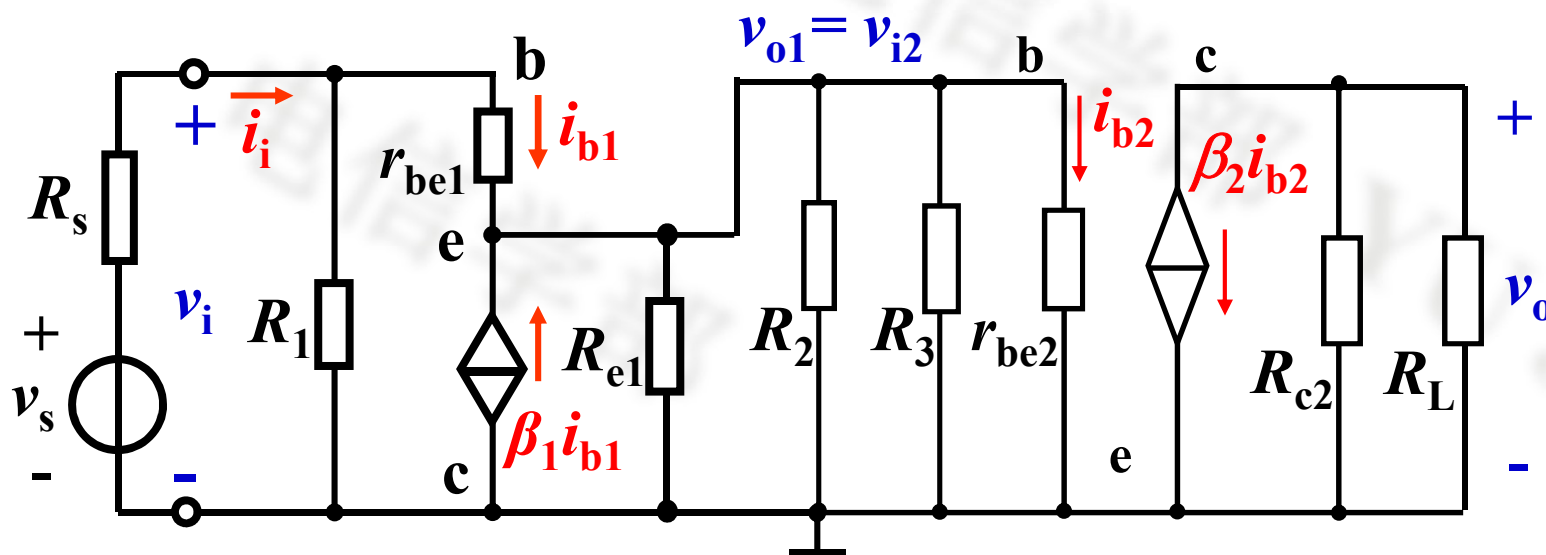
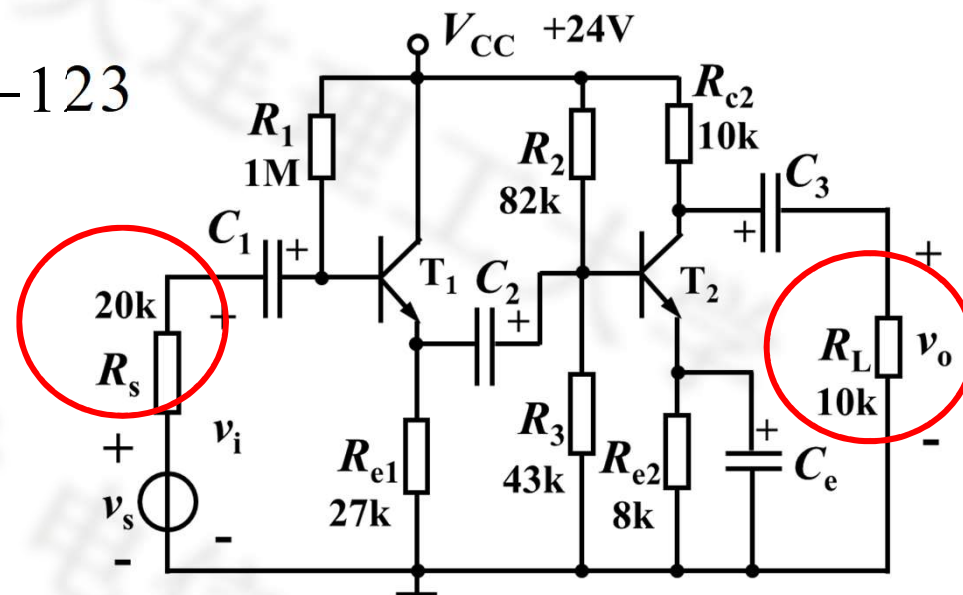
2. 小信号参数分析 (6) 源电压增益 A_{vs}

$$A_{vs} = A_v \times \frac{R_i}{R_s + R_i} \approx 0.77 A_v \approx -123$$

为什么要多级？

第一级的作用？

第二级的作用？



4.6组合放大电路 2. 小信号参数分析

使用单管放大电路公式解决组合电路问题（以两级放大为例）：

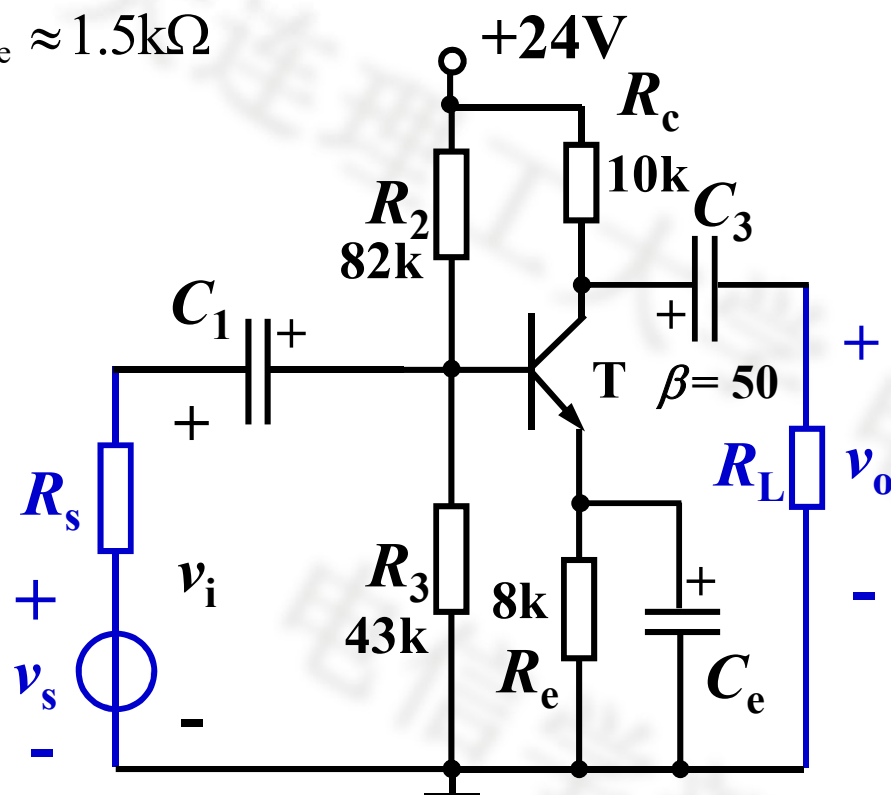
- (1) 判断每一级电路的组态：共射？共集？共基？
- (2) 阻容耦合，则各级放大器静态工作点相互独立，分别估算；
直接耦合，则需考虑静态工作点的相互影响；
- (3) 通过静态工作点分析，得到每个BJT管的 r_{be} ；
- (4) 总输入阻抗是第一级的输入阻抗（ $R_i = R_{i1}$ ）；
- (5) 每级电路的负载是下一级电路的输入阻抗（ $R_{L1} = R_{i2}$ ）；
- (6) 总输出阻抗是输出级的输出阻抗（ $R_o = R_{o2}$ ）；
- (7) 每级电路的信号源内阻是上一级的输出阻抗（ $R_{s2} = R_{o1}$ ）；
- (8) 每级电路的输出电压是下一级的输入电压（ $v_{o1} = v_{i2}$ ）；
- (9) 总电压增益是各级电压增益之积（ $A_v = A_{v1} A_{v2}$ ）。

4.6组合放大电路

3. 如何选择合适的电路组合?

例: $R_s=20\text{k}\Omega$, $R_L=10\text{k}\Omega$, 如果只用一级共射放大, 求 A_{vs} 。

$$r_{be} \approx 1.5\text{k}\Omega$$



$$A_v = -\frac{\beta(R_L // R_c)}{r_{be}} = -166.7$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} \approx 1.42\text{k}\Omega$$

$$A_{vs} = A_v \times \frac{R_i}{R_s + R_i} = 0.07 A_v \approx -11$$

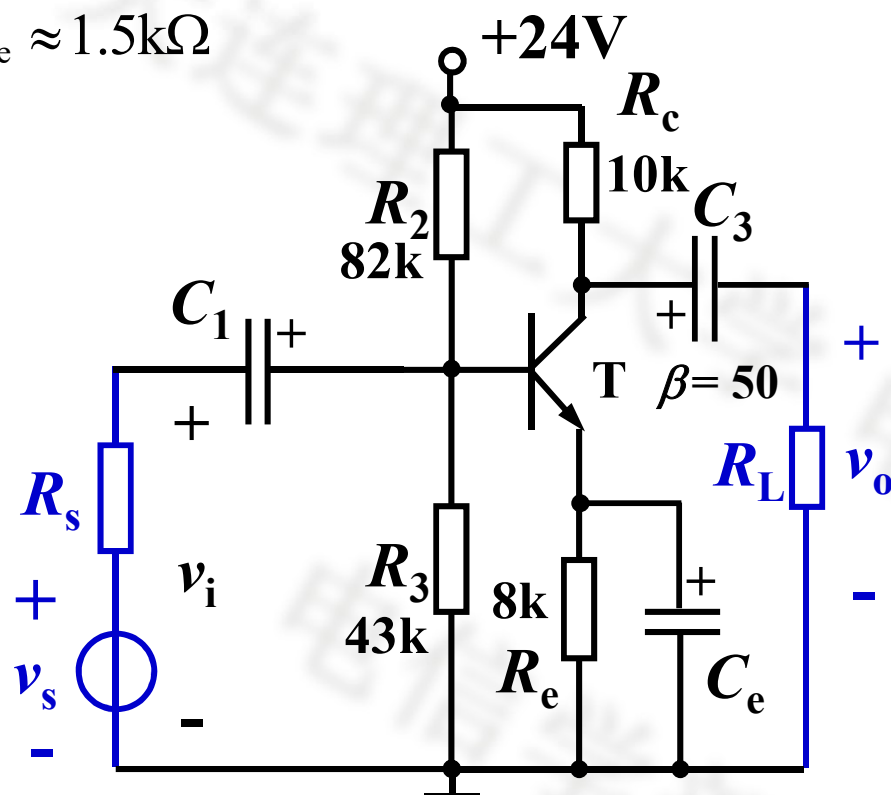
由于 R_s 大, 而共射放大电路 R_i 小, 致使电压增益降低!
选用高输入阻抗的共集电路作为第一级, A_{vs} 达到 -123。

4.6组合放大电路

3. 如何选择合适的电路组合？

例： $R_s=20\Omega$, $R_L=200\Omega$, 如果只用一级共射放大, 求 A_{vs} 。

$$r_{be} \approx 1.5k\Omega$$



$$A_v = -\frac{\beta(R_L // R_c)}{r_{be}} \approx -6.67$$

$$R_i = R_2 // R_3 // r_{be} \approx 1.42k\Omega$$

$$A_{vs} = A_v \times \frac{R_i}{R_s + R_i} = 0.99 A_v \approx -6.6$$

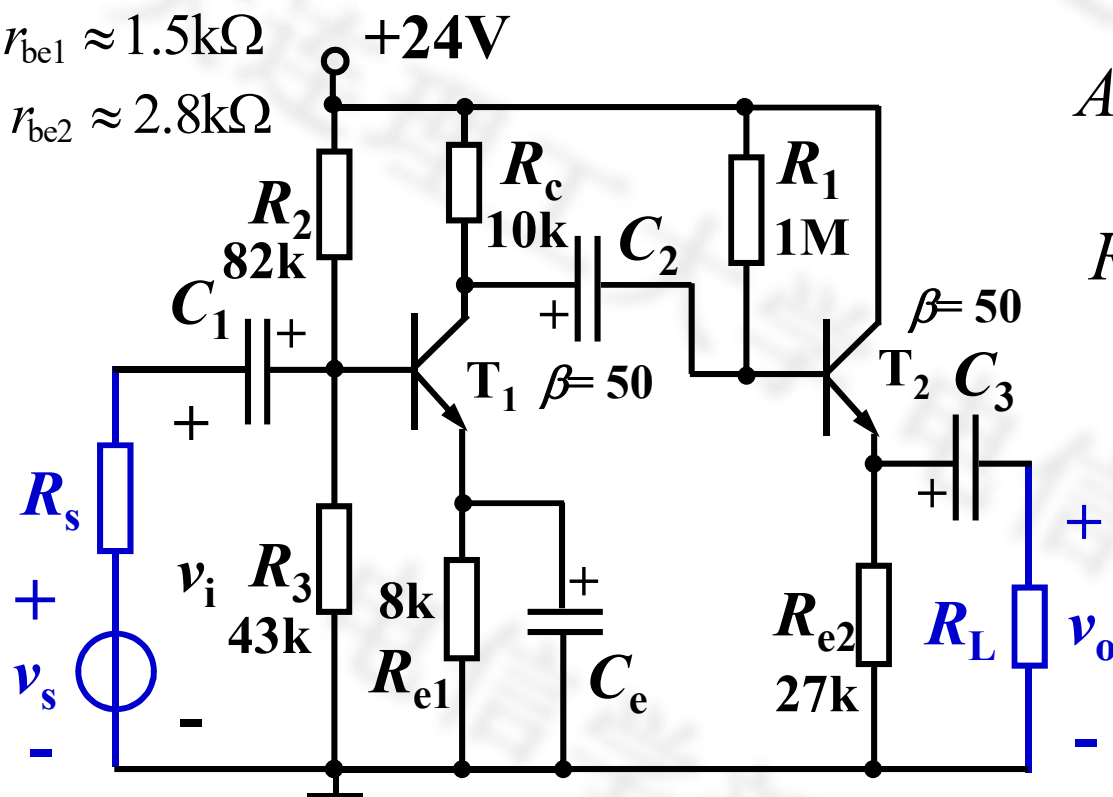
由于 R_L 小, 而共射放大电路 R_o 较大, 致使电压增益降低!
选用低输出阻抗的共集电路作为输出级。

4.6 组合放大电路 3. 如何选择合适的电路组合？

例： $R_s=20\Omega$, $R_L=200\Omega$, 共射+共集放大, 求 A_{vs} 。

$$r_{be1} \approx 1.5k\Omega$$

$$r_{be2} \approx 2.8k\Omega$$



$$A_{v1} = -\frac{\beta(R_c // R_{i2})}{r_{be1}} \approx -187$$

$$R_{i2} = R_1 // [r_{be2} + (1 + \beta)R'_{L2}] \approx 12.8k\Omega$$

$$R'_{L2} = R_{e2} // R_L \approx 0.2k\Omega$$

$$A_{v2} = \frac{(1 + \beta)R'_{L2}}{r_{be2} + (1 + \beta)R'_{L2}} \approx 0.78$$

$$A_{vs} = A_{v1}A_{v2} \times \frac{R_i}{R_s + R_i} \approx -144$$

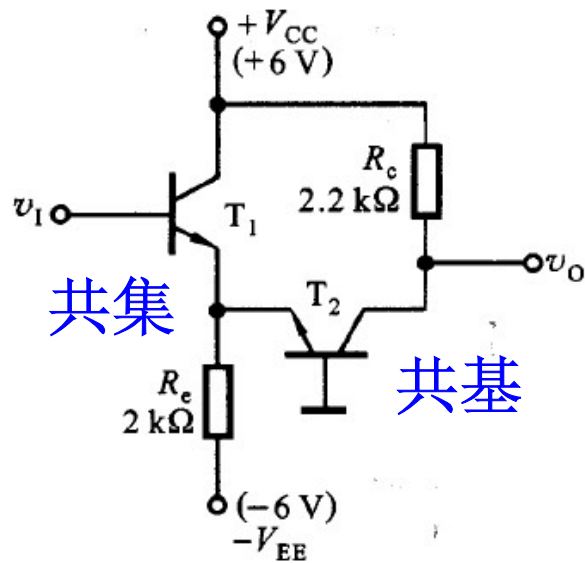
$$R_i = R_2 // R_3 // r_{be1} \approx 1.42k\Omega$$

4.6 组合放大电路 3. 如何选择合适的电路组合？

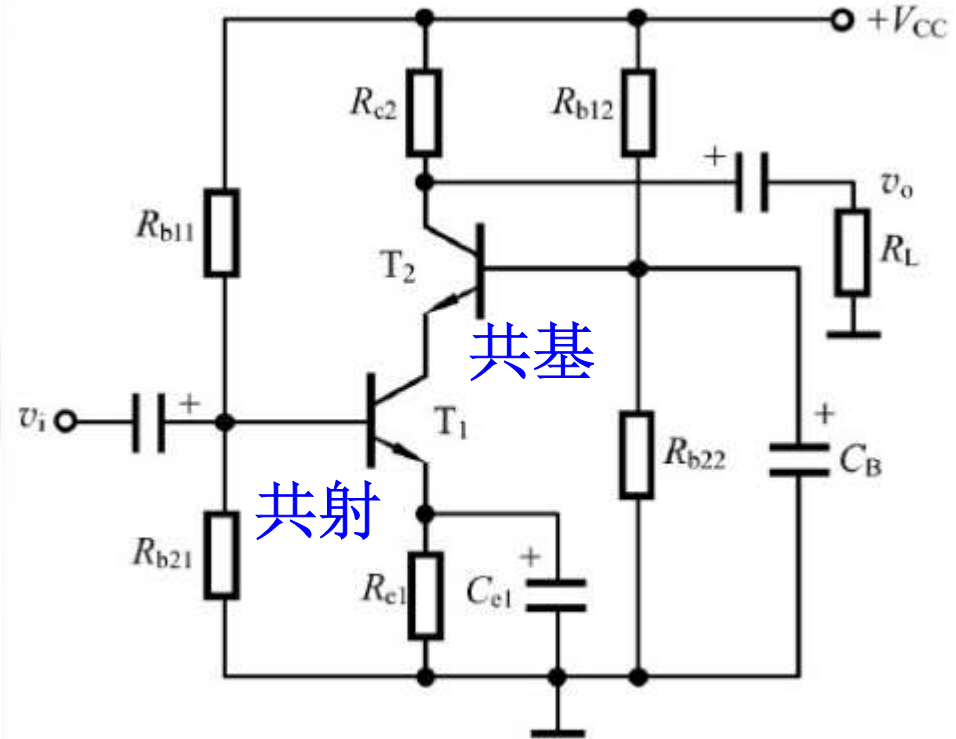
- ① 如果信号源内阻 R_s 很大 ($k\Omega$) ,
应选输入阻抗高的共集电路作为输入级;
- ② 如果要求 A_v 较大 (百倍) ,
选电压增益高的共射(或共基)做增益级;
- ③ 如果要求 A_v 很大 (千倍) , 选两级共射组合电路;
- ④ 如果 R_L 小 ($百\Omega$) ,
应选用输出阻抗低的共集电路作为输出级, 提高带载能力;
- ⑤ 如果要求电路通频带较宽, 选共基电路作为增益级;
- ⑥ 如果要求反相放大, 电路中应含有奇数个共射电路;
如果要求同相放大, 则不采用或者采用偶数个共射电路。

4.6 组合放大电路

4. 其它组合放大电路



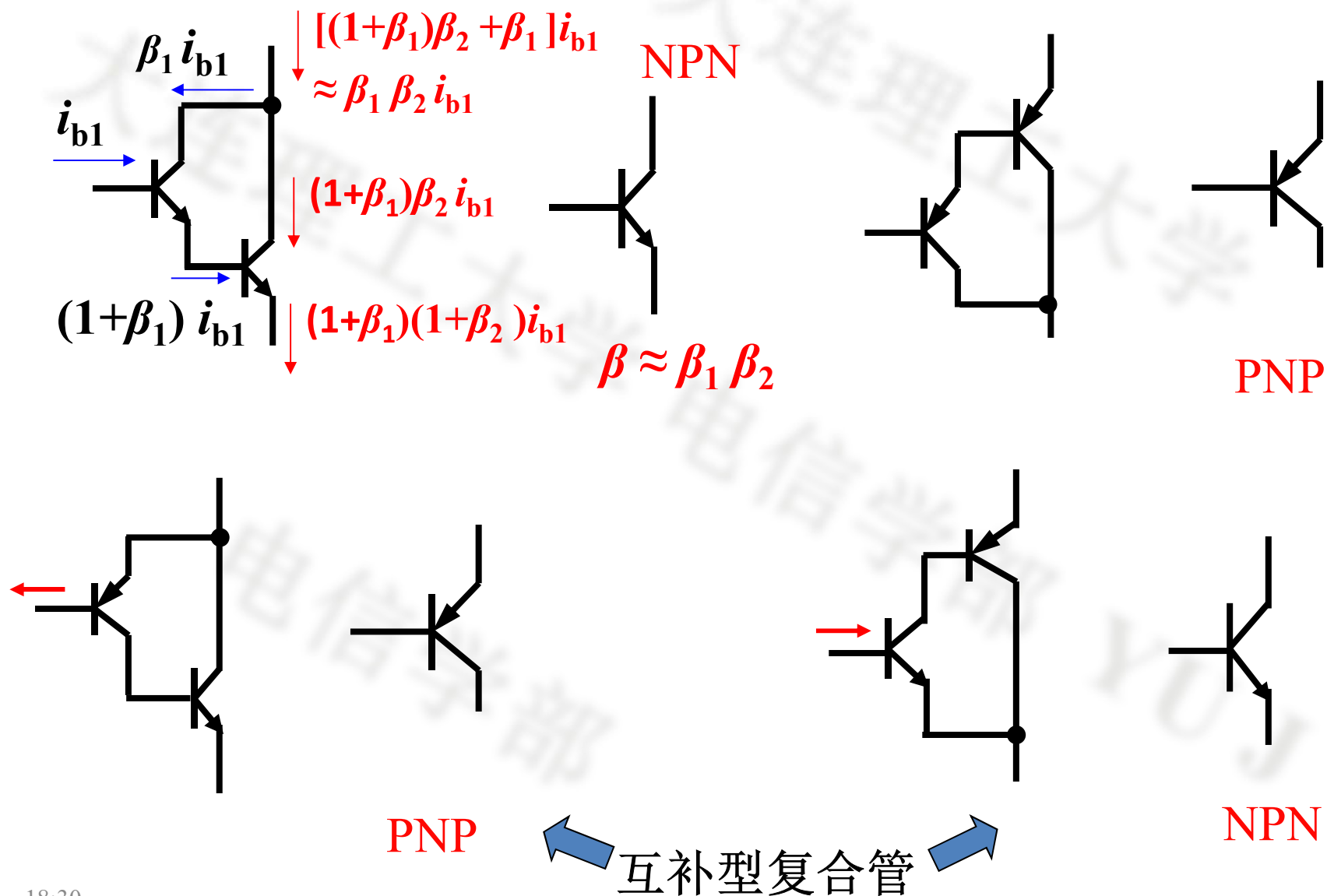
直接耦合
共集-共基
组合放大电路
同相放大



直接耦合
共射-共基
组合放大电路
反相放大

4.6 组合放大电路

4. 其它组合放大电路—达林顿管

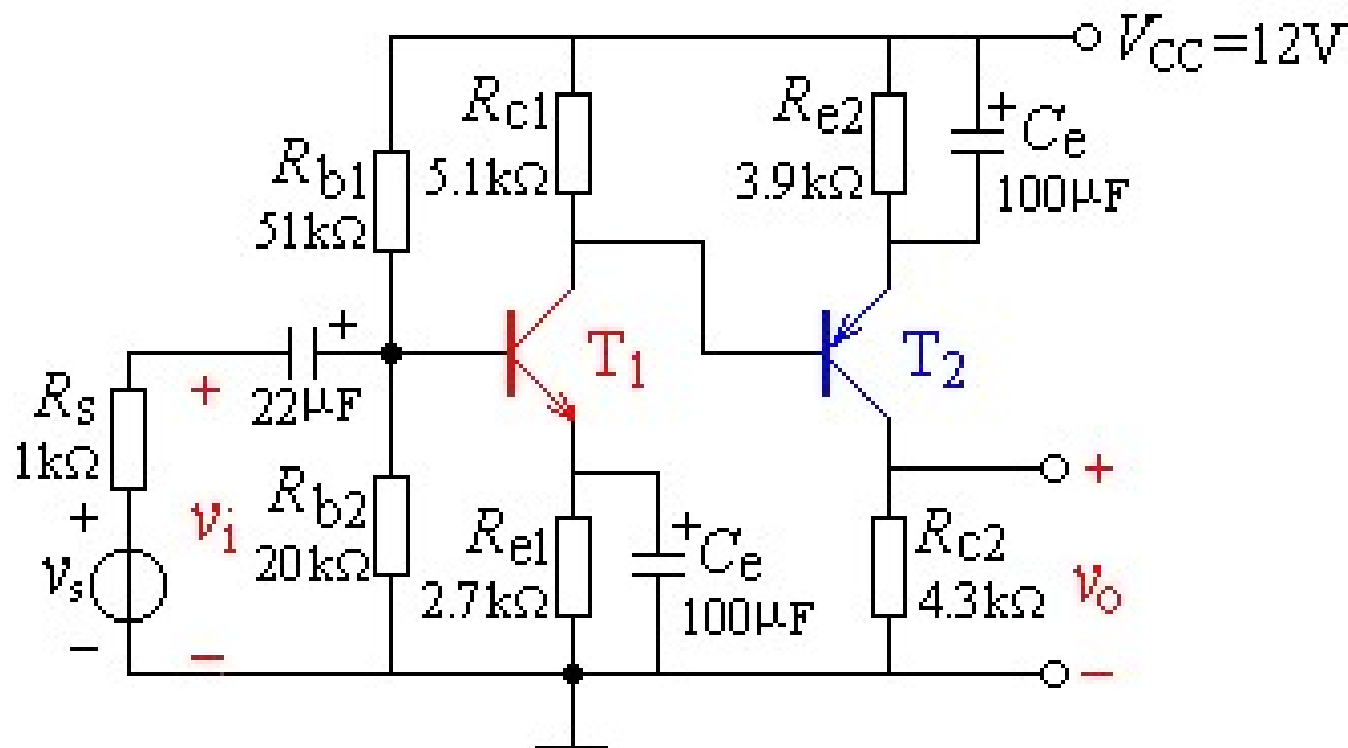


直接耦合的二级放大器分析举例

已知： $\beta_1=\beta_2=\beta=100$ ， $V_{BE1}=V_{BE2}=0.7\text{ V}$ ， $r_{bb'}=300\Omega$ 。

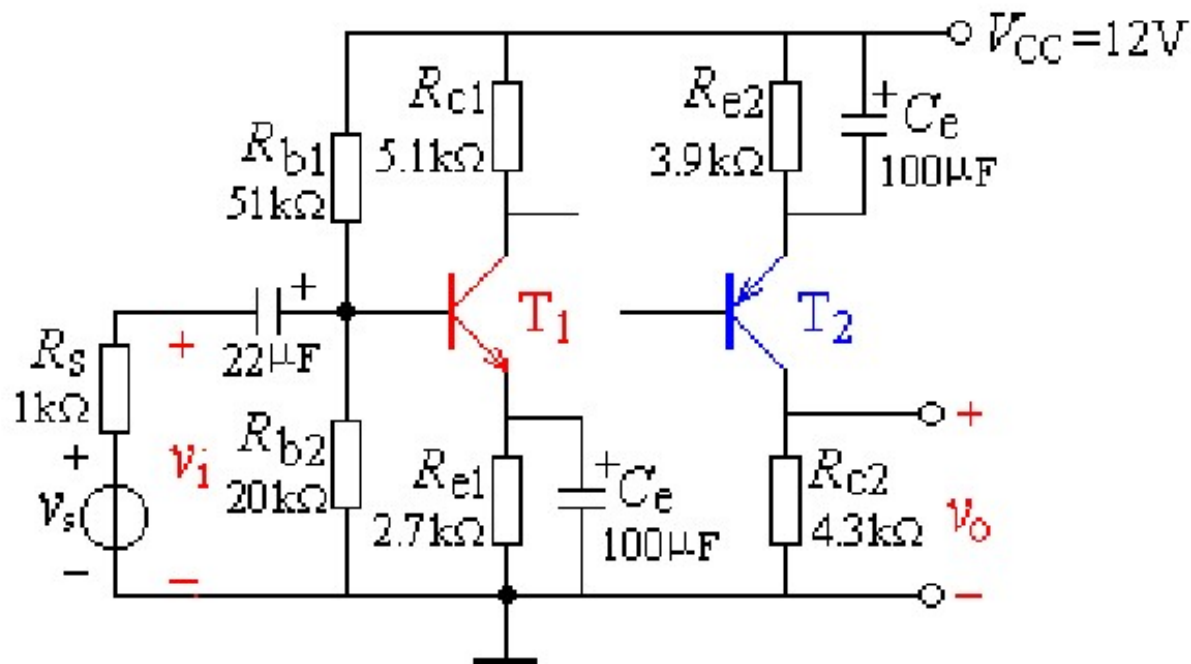
计算：(1) Q1、Q2；

(2) 总电压放大倍数、输入阻抗和输出阻抗。



(1) 求静态
工作点
估算!

Q1:



$$V_{B1} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \bullet V_{CC} = 3.38V$$

$$I_{C1} = \frac{V_{B1} - V_{BE1}}{R_{e1}} = 0.99mA \quad I_{B1} = I_{C1} / \beta = 9.9 \mu A$$

$$V_{CE1} = V_{CC} - I_{C1}(R_{c1} + R_{e1}) = 12 - 0.99 \times 7.8 = 4.3V$$

(1) 求静态工作点

Q2: $V_{B2} = V_{C1} = V_{CC} - I_{C1}R_{c1} = 12 - 0.99 \times 5.1 = 6.95\text{V}$

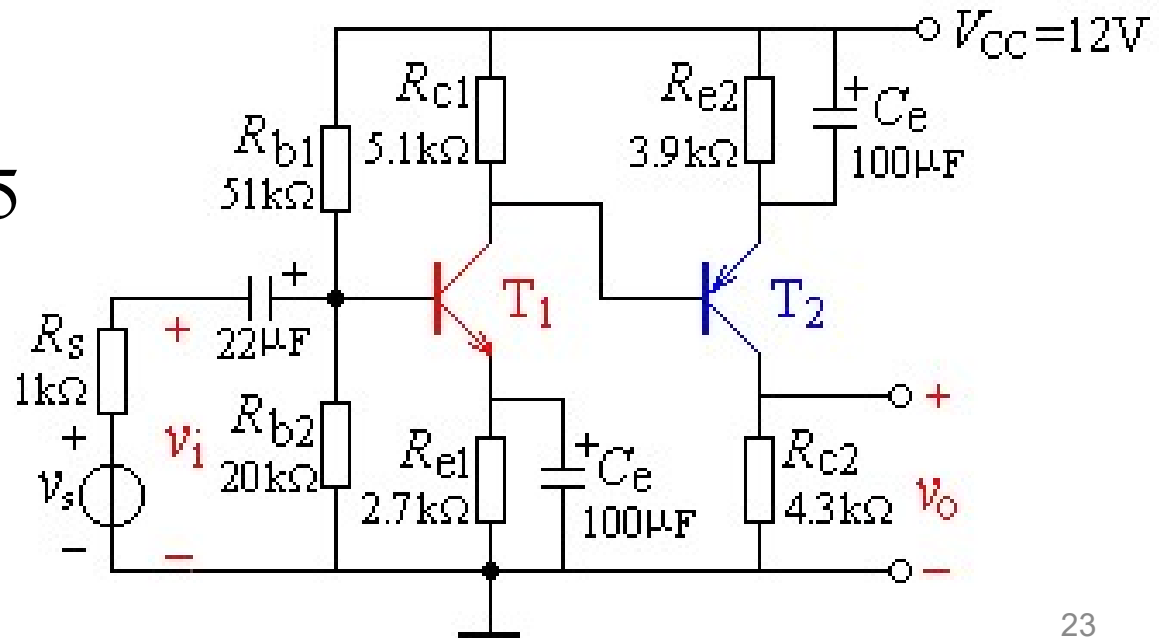
$$V_{E2} = V_{B2} + V_{BE2} = 6.95 + 0.7 = 7.65\text{V}$$

$$I_{E2} \approx I_{C2} = (V_{CC} - V_{E2}) / R_{e2} = (12 - 7.65) / 3.9 = 1.12\text{mA}$$

$$I_{B2} = I_{C2} / \beta = 1.12 / 100 = 11.2\mu\text{A}$$

$$V_{C2} = I_{C2}R_{c2} = 1.12 \times 4.3 = 4.82\text{V}$$

$$\begin{aligned} V_{CE2} &= V_{C2} - V_{E2} \\ &= 4.82 - 7.65 \\ &= -2.83\text{V} \end{aligned}$$



(2) 动态分析

1) Voltage gain

$$A_{v1} = -\frac{\beta(R_{c1} // R_{i2})}{r_{be1}}$$

$$= -\frac{100 \times (5.1 // 2.8)}{3.1} = -58.3$$

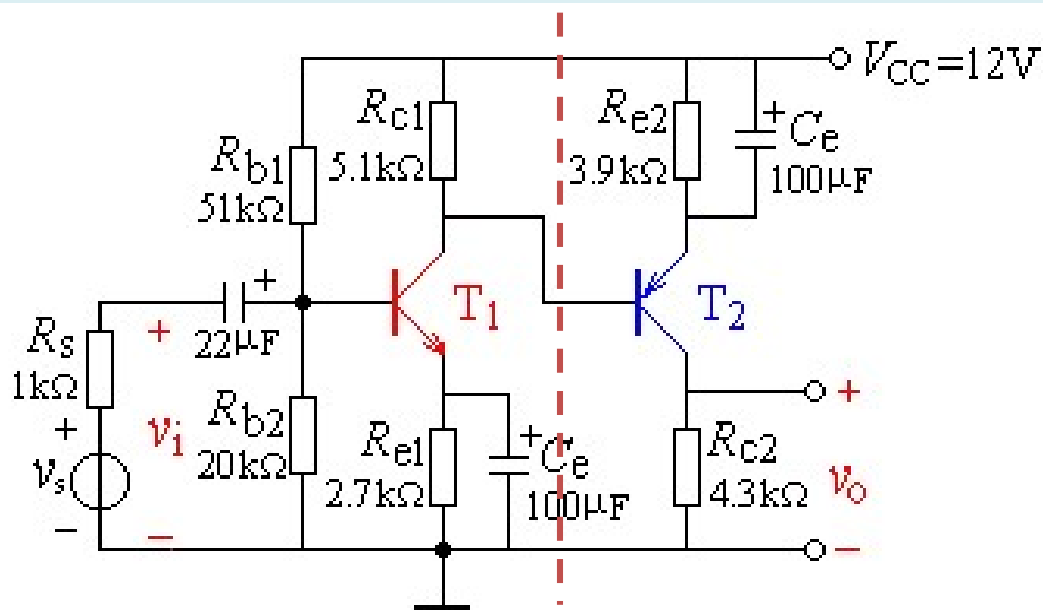
$$R_{i2} = r_{be2}$$

$$r_{be1} = r_{b'b} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{E1}(\text{mA})} = 300 + 101 \times \frac{26}{0.93} \Omega = 3.1 \text{ k}\Omega$$

$$r_{be2} = r_{b'b} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{E2}(\text{mA})} = 300 + 101 \times \frac{26}{1.12} \Omega = 2.64 \text{ k}\Omega$$

$$A_{v2} = -\frac{\beta(R_{c2} // R_L)}{r_{be2}} = -\frac{100 \times 4.3}{2.64} = -163$$

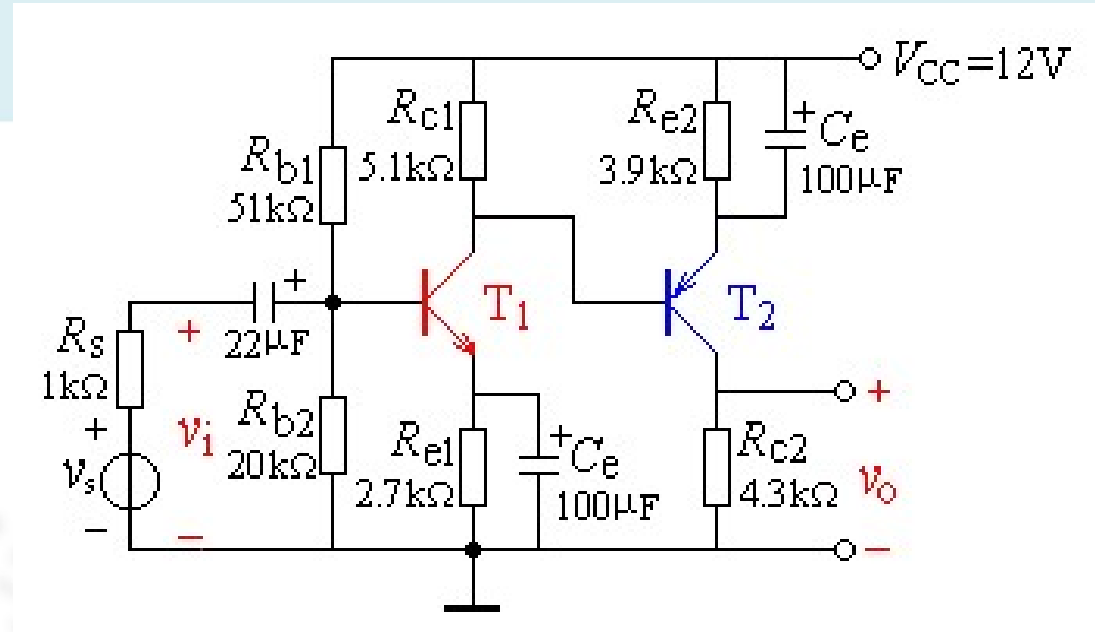
$$A_v = A_{v1} A_{v2} = -58.3 \times (-153.6) = 8955$$



(2) 动态分析

2) Input impedance

$$\begin{aligned} R_i &= R_{i1} \\ &= r_{be1} // R_{b1} // R_{b2} \\ &= 3.1 // 51 // 20 \\ &= 2.55 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$



3) Output impedance

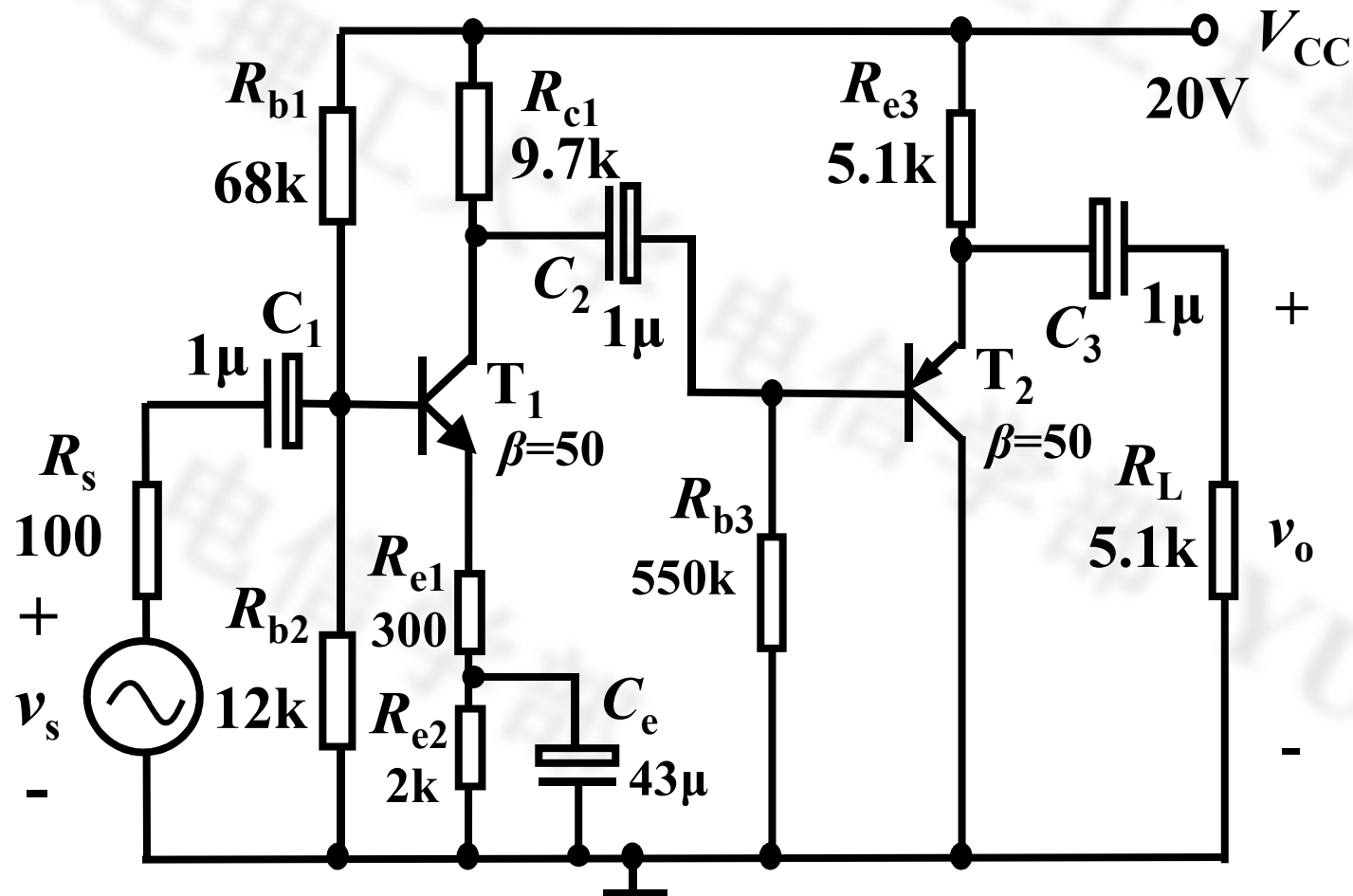
$$R_o = R_{o2} = R_{C2} = 4.3\text{k}\Omega$$

4) 源电压增益 (Small-Signal Voltage Gain)

$$A_{vs} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_v = \frac{2.55}{1 + 2.55} \times 8955 = 6436$$

电路如图所示。

- (1) 静态工作点 I_{CQ1} , V_{CEQ1} , I_{CQ2} , V_{CEQ2} ;
- (2) 小信号模型, 源电压放大倍数 A_{vs} 输入输出电阻 R_i , R_o
- (3) 如果去掉 C_2 改为直接耦合, 分析上述指标是否会有变化, 为什么?



4.6 组合放大电路

小结

了解：多级放大电路的耦合方式；

掌握：多级放大电路的静态工作点和小信号分析；

理解：达林顿管的结构及工作原理

预习：放大电路的频率响应

作业（国庆节后交）

P194： 4.6.1, 4.6.2

问题？

