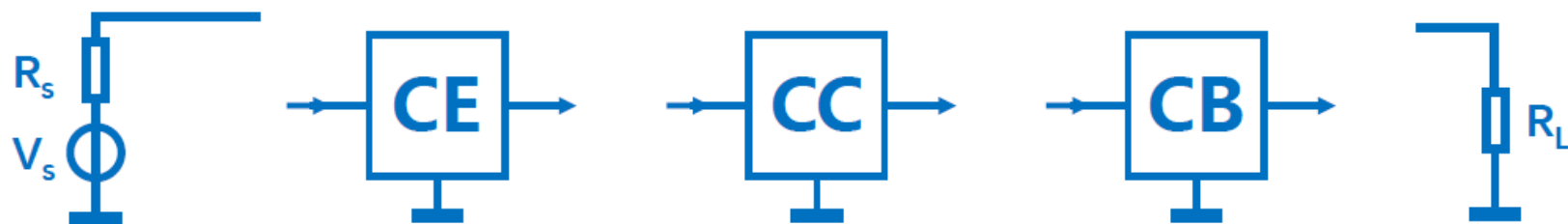


16.1 级联放大



☑ 已知CE、CC、CB三个放大器内部都不含独立电容。它们在理想电压源驱动、负载空载时，测得指标：

▶ CE: $A_{V0} = -10$, $R_i = 10\text{k}\Omega$, $R_o = 2\text{k}\Omega$

▶ CC: $A_{V0} \approx 1$, $R_i = 50\text{k}\Omega$, $R_o = 50\Omega$

▶ CB: $A_{V0} = 10$, $R_i = 50\Omega$, $R_o = 2\text{k}\Omega$

☑ 用四个电容（均为 $10\mu\text{F}$ ），采取电容耦合组成级联电路，而实际源 $R_s=1\text{k}\Omega$ ，实际负载 $R_L=1\text{k}\Omega$ 。有两种方案：

▶ 方案1：实际源 \rightarrow CC \rightarrow CB \rightarrow CE \rightarrow 实际负载

▶ 方案2：实际源 \rightarrow CE \rightarrow CB \rightarrow CC \rightarrow 实际负载

☑ 请计算上面两个级联方案的：总 $A_V=V_{RL}/V_S$, R_i , R_o , f_L

增益：示例

$$R_{i2} = r_b + (r_e + R_4) \cdot (1 + \beta)$$

$$I_B = V_S / R_{i2}$$

$$I_C = \beta I_B = \beta V_S / R_{i2}$$

$$V_{RL} = -(R_3 // R_L) \cdot \beta V_S / R_{i2}$$

$$R_{i2} = r_b + (r_e + R_4 // R_L) \cdot (1 + \beta)$$

$$I_B = U_S / R_{i2}$$

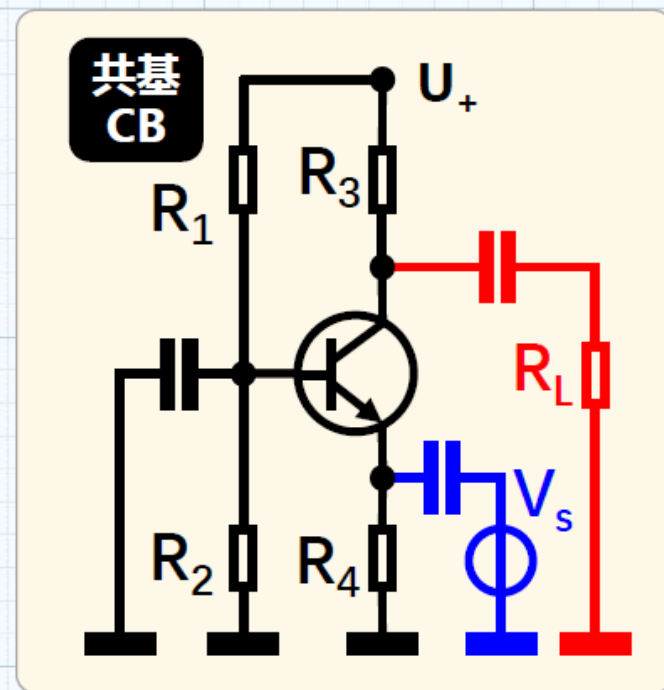
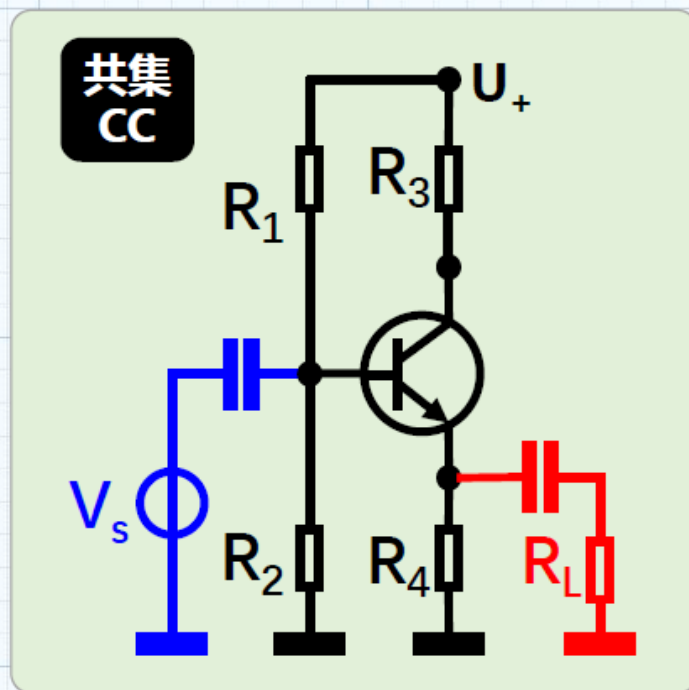
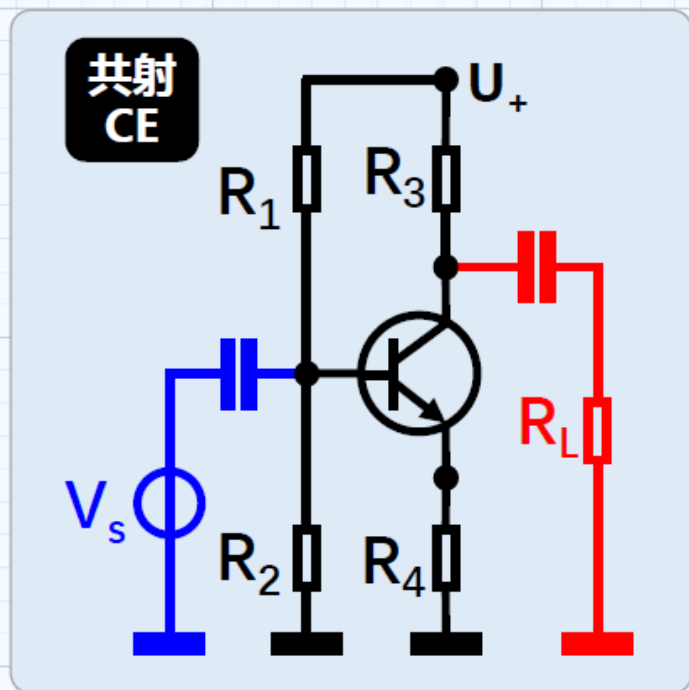
$$I_E = (1 + \beta) I_B = (1 + \beta) V_S / R_{i2}$$

$$V_{RL} = (R_4 // R_L) \cdot (1 + \beta) V_S / R_{i2}$$

$$R_{i2} = r_e + r_b / (1 + \beta)$$

$$I_C = -\beta V_S / R_{i2} (1 + \beta)$$

$$V_{RL} = (R_3 // R_L) V_S / R_{i2}$$



16.1

(1) CC-CB-CE

只有CC组态的输入(输出)电阻值受负载(源)的影响, 所以分析范围的关键在CC组态
列出CC组态的输入输出电阻

$$R_{in} = R_b || [r_b + (1 + \beta)(r_e + R_e || R_L)]$$

$$R_{out} = R_e || (r_e + \frac{r_b + R_s || R_b}{1 + \beta})$$

当负载空载时 $R_L = \infty$, 有 $R_{in} = R_b || [r_b + (1 + \beta)(r_e + R_e)] = 50k$

当理想源时 $R_s = 0$, 有 $R_{out} = R_e || (r_e + \frac{r_b}{1 + \beta}) = 50$

那么当负载为 $R_L = 50\Omega$, 即下一级为CB组态时CB的输入电阻, 有整个级联的 R'_{in}

$$R'_{in} = R_b || [r_b + (1 + \beta)(r_e + R_e || 50)]$$

考虑这个式子的一个下限的最大估计, $R_e \gg 50$, 利用 R_{out} 整体消去 $r_e + \frac{r_b}{1 + \beta}$

$$R_{out} = R_e || \left(r_e + \frac{r_b}{1 + \beta} \right) \rightarrow r_e + \frac{r_b}{1 + \beta} = 50$$

$$R'_{in} = R_b || [r_b + (1 + \beta)(r_e + R_e || 50)] < r_b + (1 + \beta)(r_e + 50) = 100(1 + \beta)$$

有 $R'_{in} \in (10k, 50k] \Omega$, 这个下界还要更小, 给的是一个最大估计

很多同学只分析了一个极限值, 这里给出了一种分析范围的思路参考

(1) 由于输出是CE, $R_{out} = 2k\Omega$

增益计算, 逐级利用分压乘以该级的电压增益计算, 边界是 $R_{0,out} = R_S$, $R_{4,in} = R_L$

$$A = \prod_{i=1}^3 \frac{R_{i,in}}{R_{i-1,out} + R_{i,in}} A_i \times \frac{R_L}{R_{3,out} + R_L}$$

增益应该也是一个范围, 可以考虑是由CC级看过去的输入电阻的范围导致的

$$A \approx [-13.6, -12.6)$$

f_L 找外电阻的最大值, 每一级的外电阻, 边界 $R_{0,out} = R_S$, $R_{4,in} = R_L$

$$R_{i-1,out} + R_{i,in} \quad i = 1, 2, 3, 4$$

最小的为CC - CB之间的外电阻, $R = 100\Omega$

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \approx 159Hz$$

16.1

(2) CE-CB-CC

输入时CE, $R_{in} = 10k\Omega$

输出是CC, 分析与(1)类似, 给出CC输出电阻表达式

$$R_{out} = R_e \parallel \left(r_e + \frac{r_b + R_s \parallel R_b}{1 + \beta} \right)$$

当理想源时 $R_s = 0$, 有 $R_{out} = R_e \parallel \left(r_e + \frac{r_b}{1 + \beta} \right) = 50\Omega$

级联时源电阻为CB组态的输出电阻 $R_s = 2k\Omega$, 有

$$R'_{out} = R_e \parallel \left(r_e + \frac{r_b + 2k \parallel R_b}{1 + \beta} \right)$$

这个值要略大于 50Ω , 估计下这个值的一个大概上界, 增加最快的情况是 R_e, R_b 都很大

$$R'_{out} - R_{out} < \frac{2k}{1 + \beta} \approx 20\Omega$$

所以有 $R'_{out} \in [50, 70)\Omega$

增益计算思路同前, 代入数据可得 $A \in [-2.03, -1.99)$

f_L 计算思路同前, 最小的外电阻为CC-负载约 $1k\Omega$, $f_L \approx 15Hz$ 。(这里也可以考虑 R'_{out} 为一个范围, f_L 则也是一个范围)

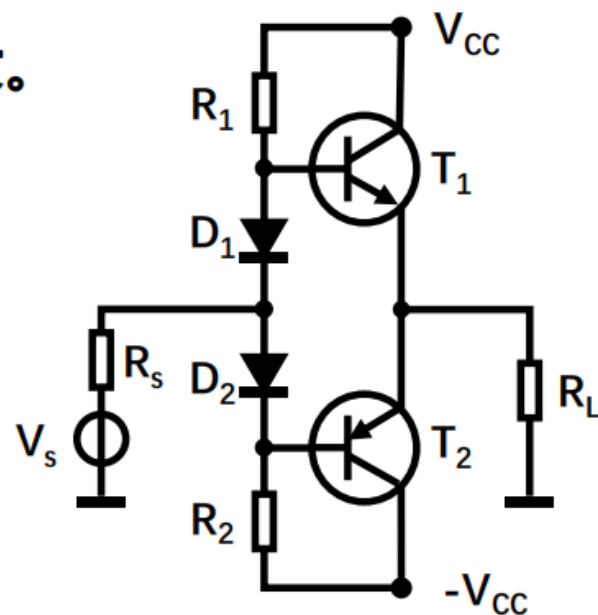
16.2 推挽放大器

☑ 右图中两个BJT均为： $\beta=100$ ， $r_b=1\text{k}\Omega$ ， r_c 非常大。
而 $R_s = 1\text{k}\Omega$ ， $R_1=R_2=193\text{k}\Omega$ ， $R_L=1\text{k}\Omega$

☑ 在 $V_{CC}=20\text{V}$ 时，经测量， $I_{EQ1}=I_{EQ2}=100\mu\text{A}$ ，
且二极管动态电阻可以取 $r_D=26\text{mV}/I_{DQ}$

☑ 请计算：

- 放大器的 R_i ， R_o ， A_v
- R_L 上的线性动态范围是多少？
- 当 R_L 获得最大不失真正弦信号时，估算放大器的效率
(假设可忽略 T_1 和 T_2 在临界导通时的功耗，并忽略 R_1 - D_1 - D_2 - R_2 支路的功耗)。



$$a) \quad I_{DQ} = \frac{19.3V}{193k} = 0.1mA \quad r_D = \frac{26mV}{0.1mA} = 260\Omega$$

$$r_E = \frac{26mV}{0.1mA} = 260\Omega \quad r_{BE} = r_B + (1 + \beta)r_E = 27k$$

正负半周对称，在正半周，T1导通，T2可认为几乎截至。
但偏置电路全部导通，所以

$$R_{i+} = (r_{D2} + R_2) // (r_{D1} + R_1 // (r_B + (1 + \beta)(r_E + R_L))) = 55.2k$$

$$R_{o+} = r_E + \frac{r_B + ((R_S // (r_{D2} + R_2)) + r_{D1}) // R_1}{1 + \beta} = 282\Omega$$

$$A_V \approx \frac{R_{i+}}{R_{i+} + R_S} \cdot \frac{R_1 // (r_B + (1 + \beta)(r_E + R_L))}{R_1 // (r_B + (1 + \beta)(r_E + R_L)) + r_{D1}} \cdot \frac{(1 + \beta)R_L}{r_B + (1 + \beta)(r_E + R_L)} \approx 0.95$$

b) 在处于正半周期时, T1处于线性区, 有

存疑

$$V_{CC} > V_{B1} > 0.7V$$

则有 $0V < V_{E1} = V_{B1} - 0.7V < 19.3V$

负半周期同理, 则动态范围为-19.3V - 19.3V

c) 若忽略R1D1D2R2支路的电流, 可以认为正负半周对称

存疑

$$\eta \approx \eta_+ \approx \frac{P_{R_L}}{P_{V_{CC}}} = \frac{\int_0^{\frac{T}{2}} V_{R_L} I_{R_L} dt}{\int_0^{\frac{T}{2}} V_{CC} I_{R_L} dt} = \frac{\int_0^{\frac{T}{2}} \frac{V_{R_L}^2}{R_L} dt}{\int_0^{\frac{T}{2}} V_{CC} \frac{V_{R_L}}{R_L} dt} = \frac{\int_0^{\frac{T}{2}} V_{R_L}^2 dt}{V_{CC} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{R_L} dt}$$

且有 $V_{R_L} = V_{max} \sin(2\pi ft)$

$$\eta \approx \frac{\frac{1}{2} V_{max}^2}{\frac{2}{\pi} V_{CC} V_{max}} = 75.8\%$$

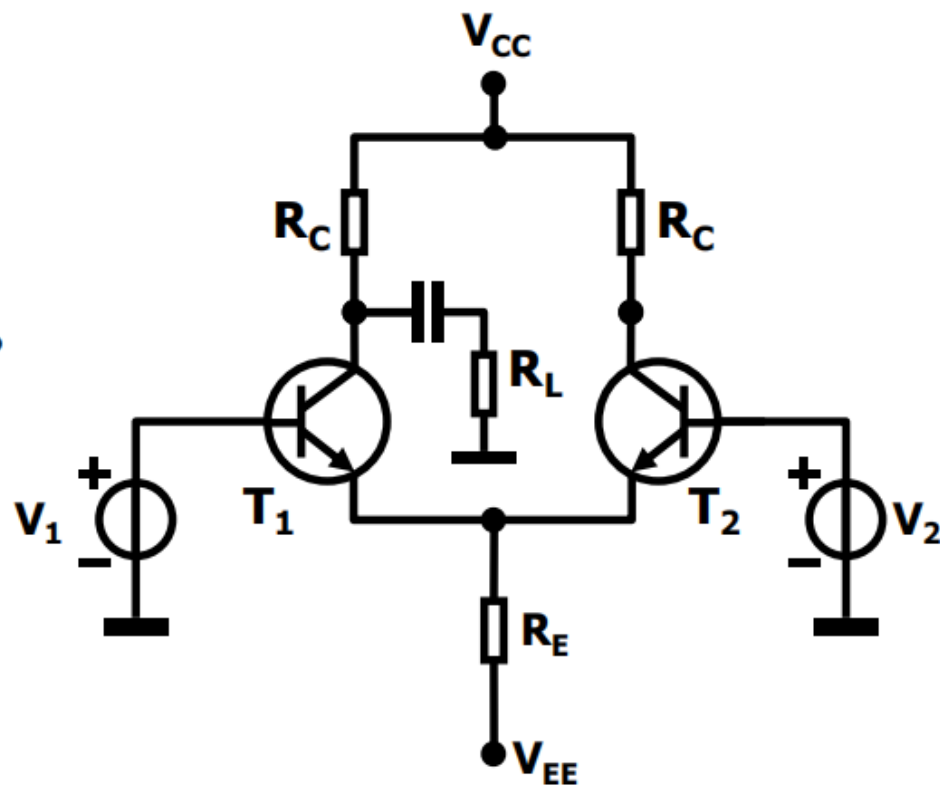
16.3 差分放大器

- ☑ 右图两个BJT的 $\beta=100$, $r_b \approx 1\text{K}\Omega$, r_c 足够大。
 $R_C=10\text{K}\Omega$, $R_L=10\text{K}\Omega$ 。
 $V_{CC}=20\text{V}$, $V_{EE}=-20\text{V}$, $R_E=19.3\text{K}\Omega$ 。
信号源 V_1 和 V_2 是纯正弦电压源。

请计算：

- T_1 和 T_2 的静态工作点和 r_e
- 差模增益 $A_{VD} = V_{RL} / (V_1 - V_2)$
- 共模增益 $A_{VC} = V_{RL} / [(V_1 + V_2)/2]$
- 共模抑制比 $K_{CMR} = A_{VD}/A_{VC}$

【提示：在差模输入时，节点A是交流地；
在共模输入时，可以考虑把 R_E 看成两个 $2R_E$ 电阻的并联，并利用对称性，二者的顶端之间并无电流】

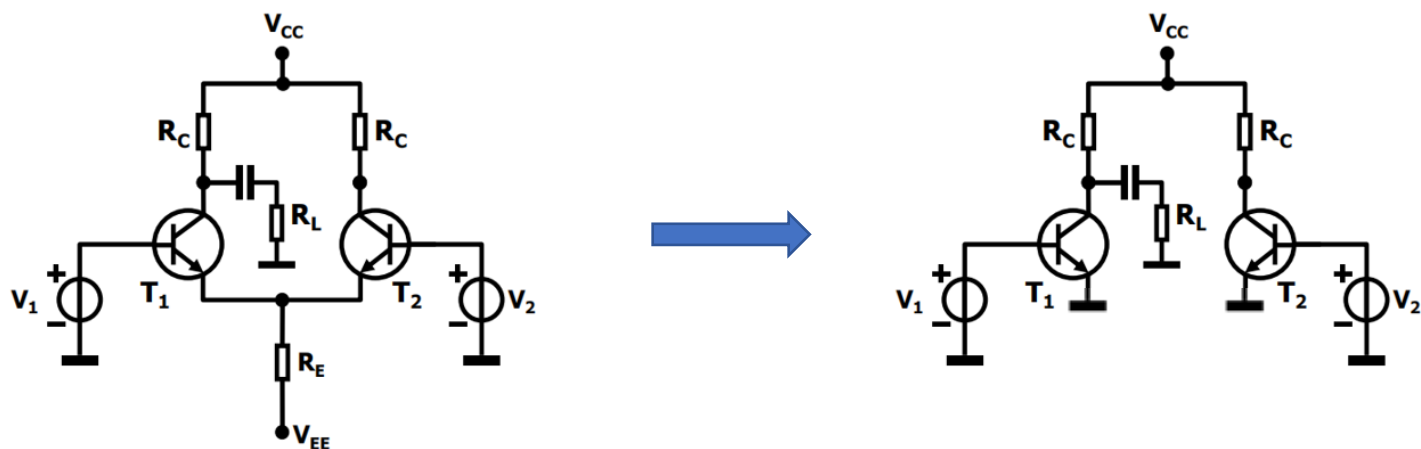


a) $V_{BQ} = 0; V_{EQ} = -0.7V$

$$I_{EQ} = (-0.7 - V_{EE}) / R_E / 2 = 0.5 \text{mA} \approx I_{CQ} \rightarrow V_{CQ} \approx V_{CC} - V_{RC} = 15V$$

$$r_{e1} = r_{e2} = 26 \text{mV} / I_{EQ} = 52\Omega$$

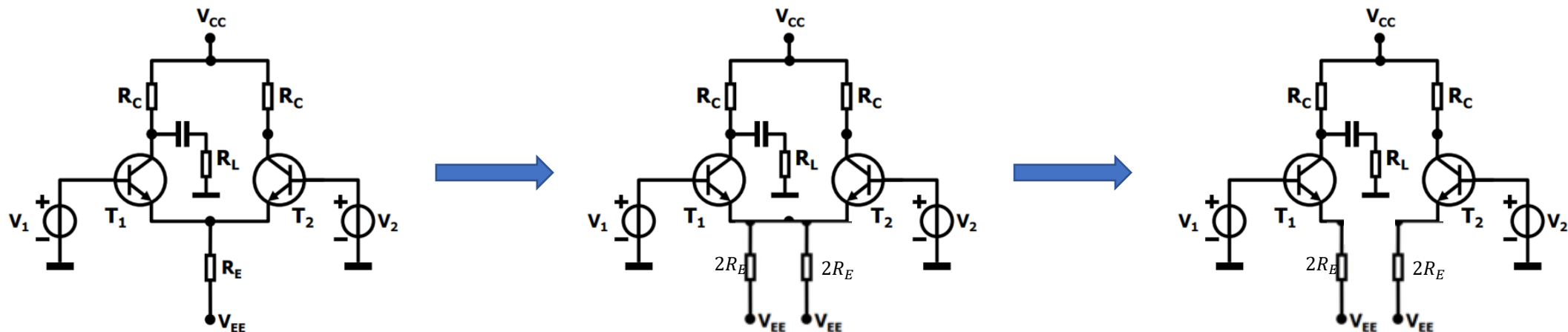
b) R_E 上端交流电压为 0, 可看作交流地, 将电路分开:



差模增益 $A_{VD} = V_{RL} / (V_1 - V_2)$

$$A_{VD} = \frac{-\beta(R_C // R_L)}{2(r_b + (1 + \beta)r_e)} = -40$$

c) 将 R_E 看为两个 $2R_E$ 电阻的并联，根据对称性将电路分开：



$$A_{VC} = \frac{-\beta(R_C // R_L)}{r_b + (1 + \beta)(r_e + 2R_E)} = -0.128$$

d) $K_{CMR} = \frac{A_{VD}}{A_{VC}} = 312.5$