

第七章

模拟集成电路

姚恒

hyao@usst.edu.cn



本章重点掌握两个内容

1. 电流源电路（直流偏置技术）
2. 差分放大电路



7.1 模拟集成电路中的 直流偏置技术

7.1.1 BJT电流源电路

1. 镜像电流源
2. 微电流源
3. 高输出阻抗电流源
4. 组合电流源

7.1.2 FET电流源

1. MOSFET镜像电流源
 2. MOSFET多路电流源
 3. JFET电流源
-



7.1.1 BJT电流源电路

为什么要有电流源

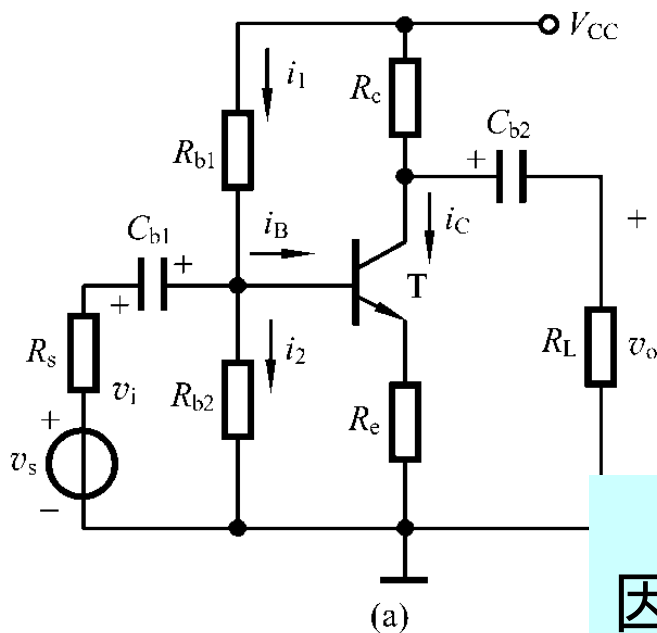
回忆一下：第四章核心

共射电路



基本阻容耦合共射电路

基极分压射极偏置共射电路



优点在哪里：静态工作点稳定
(克服温度漂移)

静态工作点分析方法：基极分压后
直接 I_E 被锁定

但在模拟集成电路中：不实用
因为电阻体积大，不如在射极接恒流源

7.1.1 BJT电流源电路

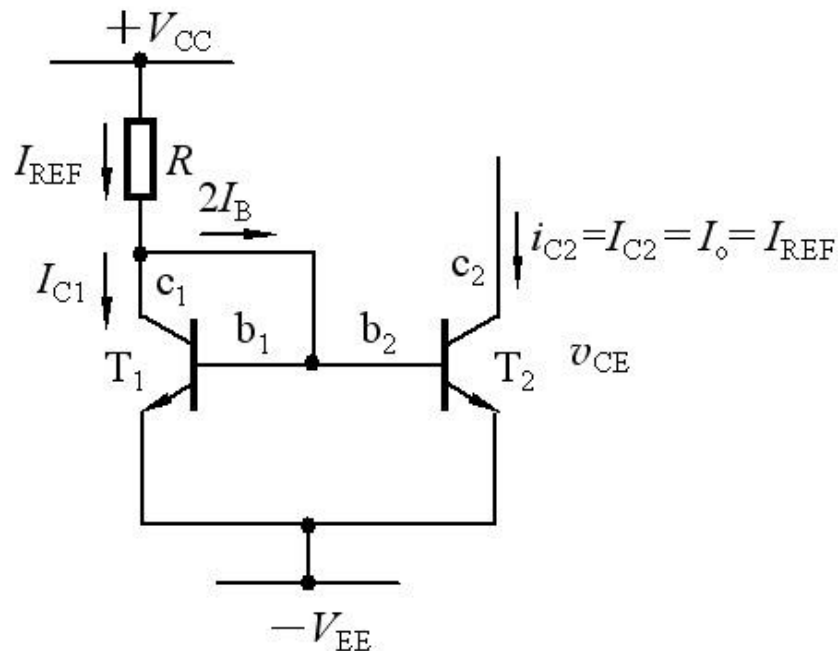
1. 镜像电流源

T_1 、 T_2 的参数全同

即 $\beta_1 = \beta_2$, $I_{CEO1} = I_{CEO2}$

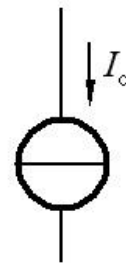
$$V_{BE2} = V_{BE1} \quad I_{E2} = I_{E1}$$

$$I_{C2} = I_{C1}$$



当BJT的 β 较大时, 基极电流 I_B 可以忽略

$$I_o = I_{C2} \approx I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE} - (-V_{EE})}{R} \approx \frac{V_{CC} + V_{EE}}{R}$$



代表符号

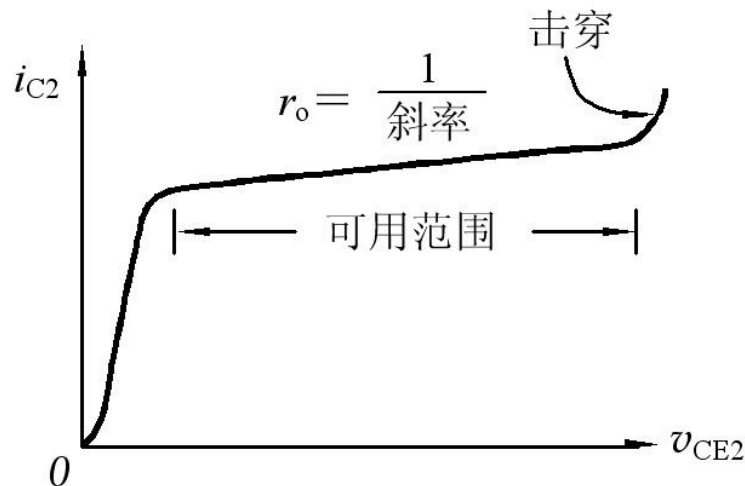
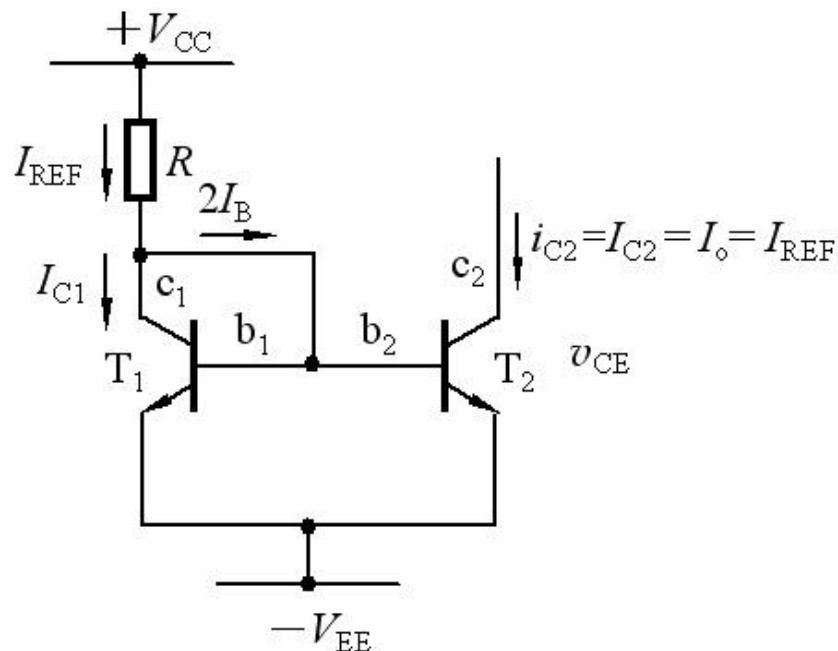
7.1.1 BJT电流源电路

1. 镜像电流源

动态电阻

$$r_o = \left(\frac{\partial i_{C2}}{\partial v_{CE2}} \right)^{-1} \Big|_{I_{B2}}$$
$$= r_{ce}$$

一般 r_o 在几百千欧以上



7.1.1 BJT电流源电路

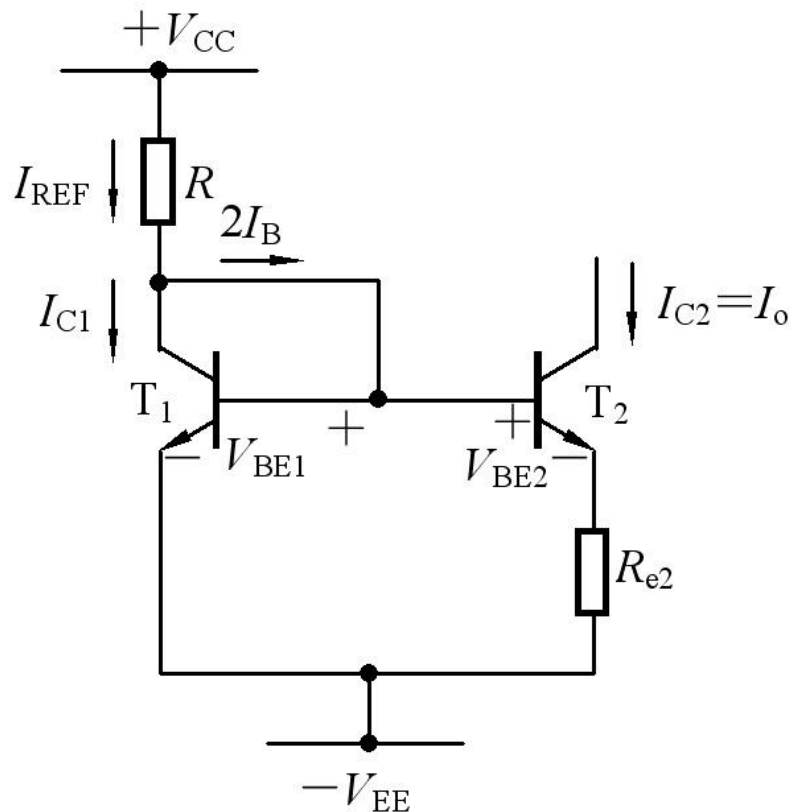
2. 微电流源

$$I_O = I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_{e2}}$$
$$= \frac{\Delta V_{BE}}{R_{e2}}$$

由于 ΔV_{BE} 很小，

所以 I_{C2} 也很小。 $r_o \approx r_{ce2} \left(1 + \frac{\beta R_{e2}}{r_{be2} + R_{e2}} \right)$

(参考射极偏置共射放大电路的输出电阻 R'_o)



7.2 差分式放大电路

7.2.1 差分式放大电路的一般结构

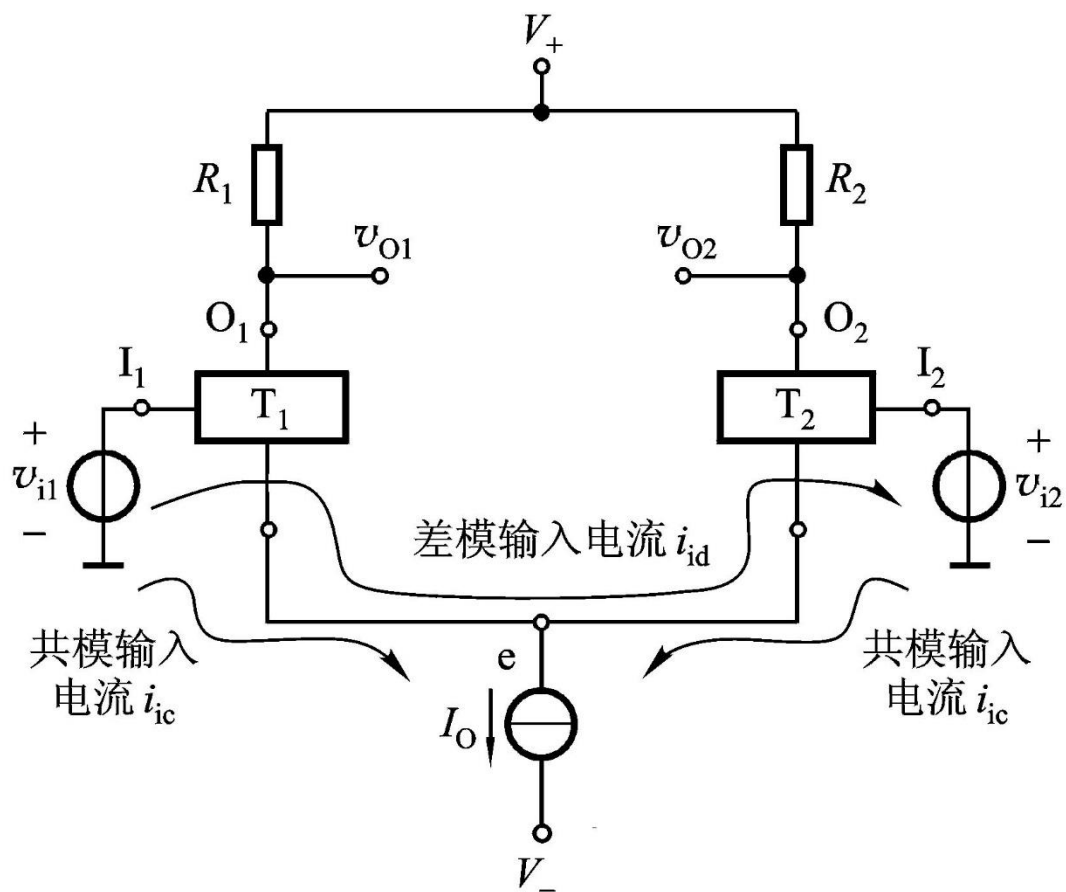
7.2.2 射极耦合差分式放大电路

6.2.3 源极耦合差分式放大电路



7.2.1 差分式放大电路的一般结构

1. 用三端器件组成的差分式放大电路



7.2.1 差分式放大电路

2. 有关概念

$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2} \quad \text{差模信号}$$

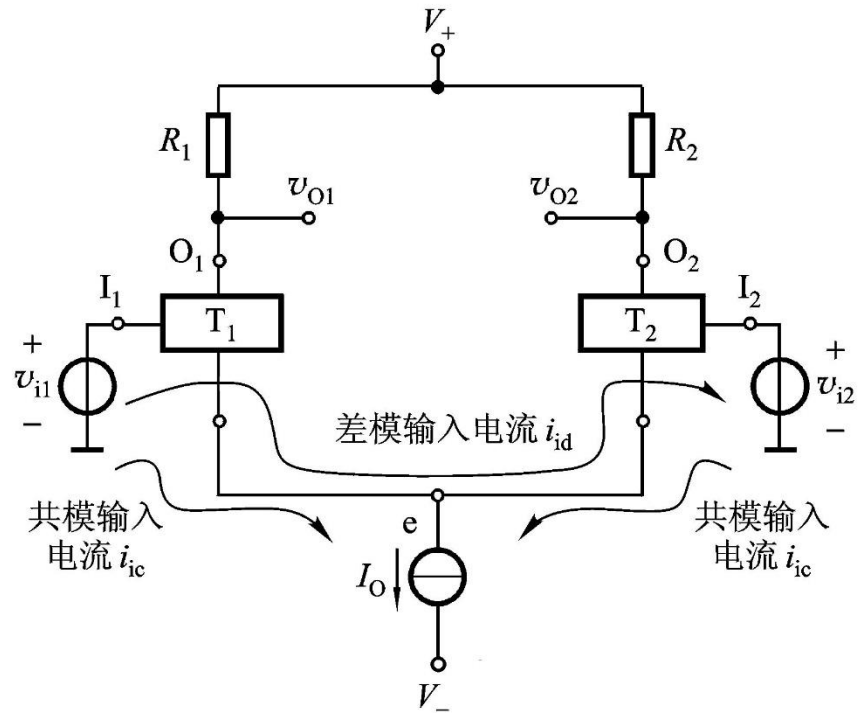
$$v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2}) \quad \text{共模信号}$$

$$A_{vd} = \frac{v'_o}{v_{id}} \quad \text{差模电压增益}$$

$$A_{vc} = \frac{v''_o}{v_{ic}} \quad \text{共模电压增益}$$

其中 v'_o —— 差模信号产生的输出

v''_o —— 共模信号产生的输出



总输出电压

$$\begin{aligned} v_o &= v'_o + v''_o \\ &= A_{vd} v_{id} + A_{vc} v_{ic} \end{aligned}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \quad \text{共模抑制比}$$

反映抑制零漂能力的指标

7.2.1 差分式放大电路

2. 有关概念

根据 $v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$

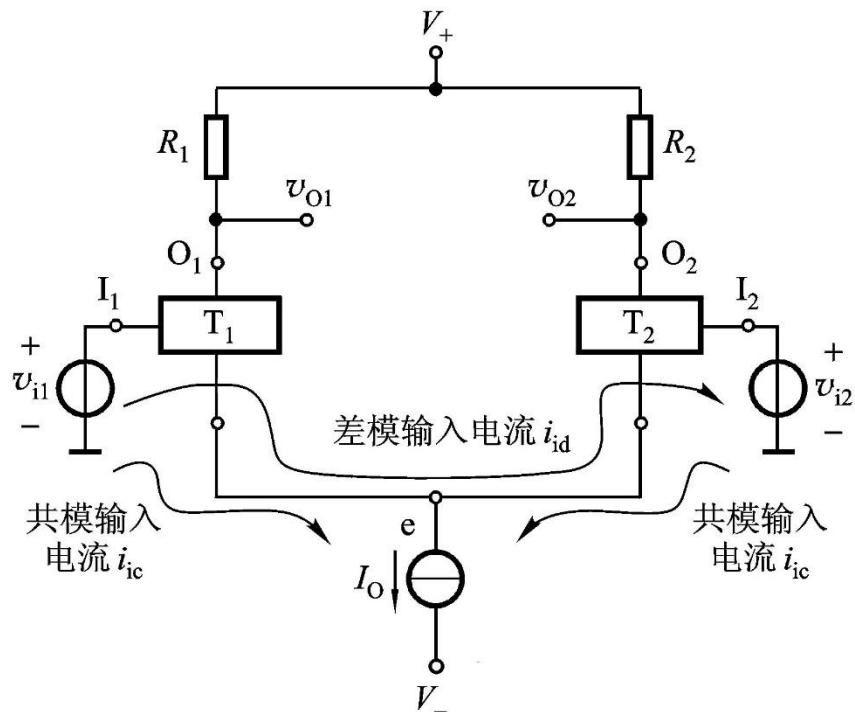
$$v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2})$$

有 $v_{i1} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2}$

$$v_{i2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$

共模信号相当于两个输入端信号中相同的部分

差模信号相当于两个输入端信号中不同的部分

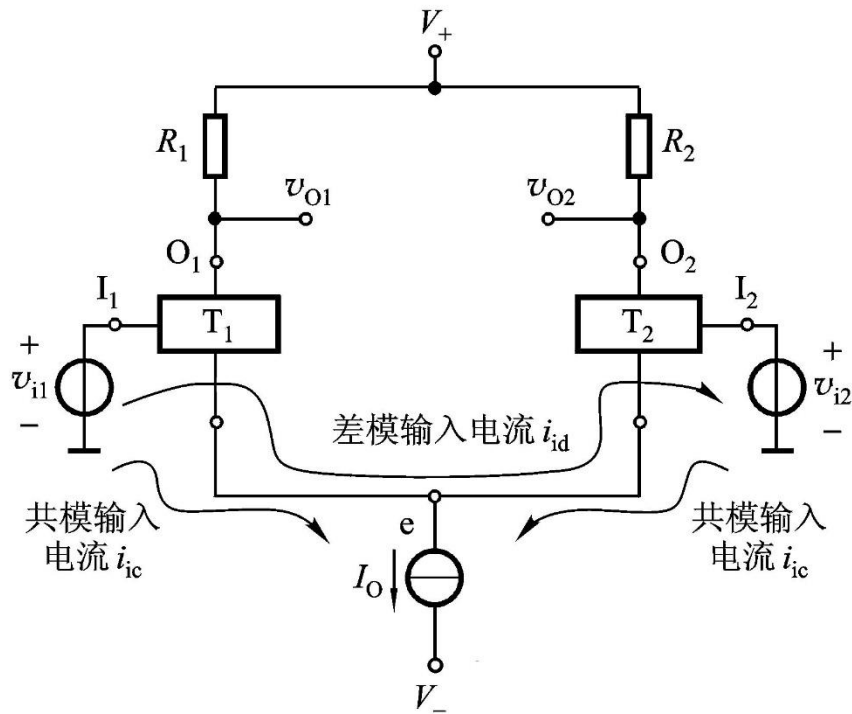


两输入端中的共模信号大小相等，相位相同；差模信号大小相等，相位相反。

7.2.1 差分式放大电路

2. 有关概念

共模信号： 由于温度变化或者电源波动引起，属于无用分量
差模信号： 待放大的有用分量



差放电路的核心目标：

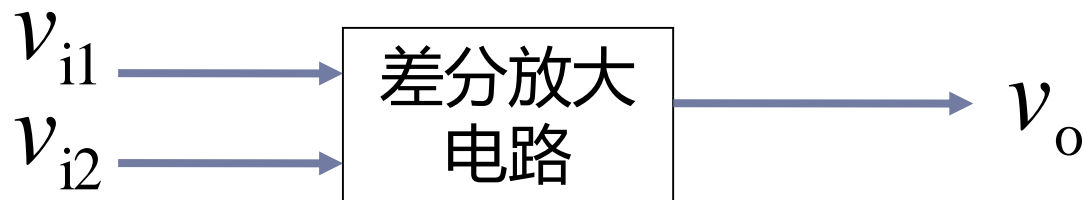
放大差模信号

抑制共模信号

7.2.1 差分式放大电路的一般结构

2. 有关概念

差分电路是一个双端输入的放大电路



v_{i1} 和 v_{i2} 为任意输入
可以分解为：

$$v_{i1} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2}$$

$$v_{i2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$

其中：

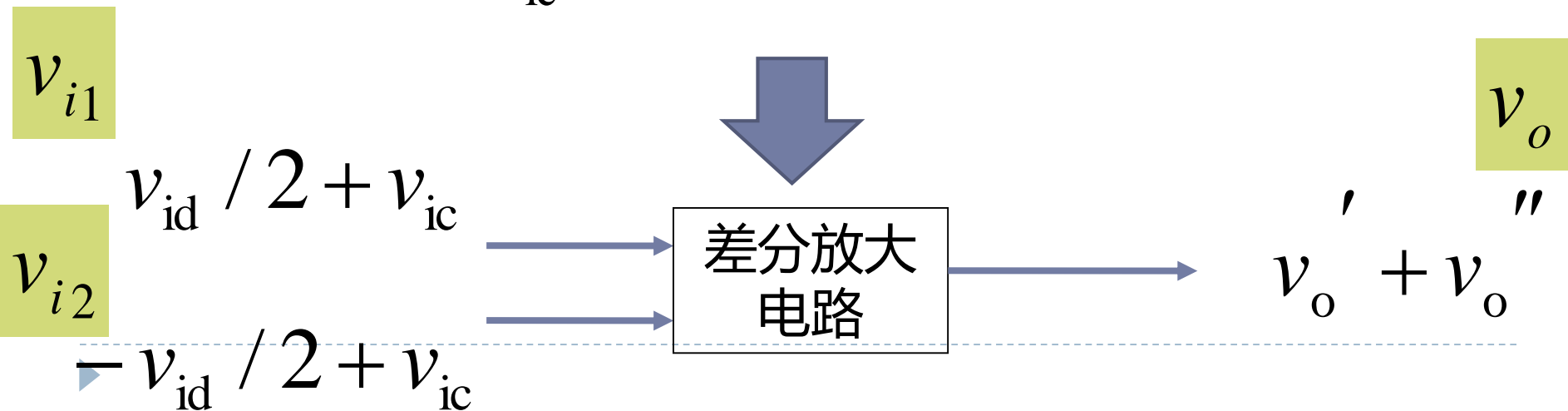
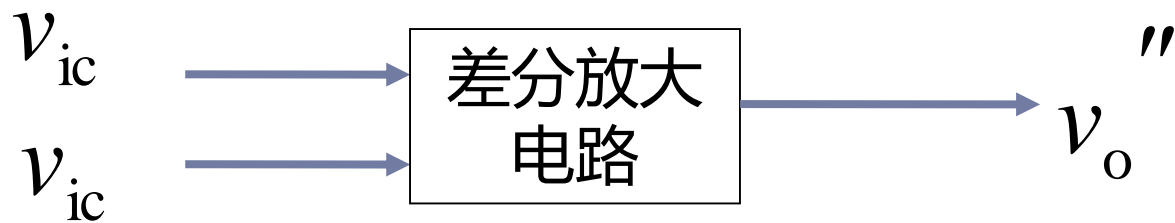
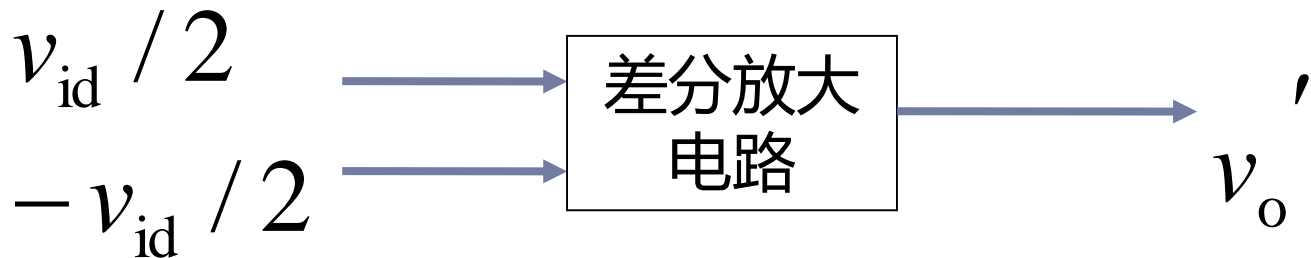
▶ $v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$ 差模信号

$v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2})$ 共模信号

7.2.1 差分式放大电路的一般结构

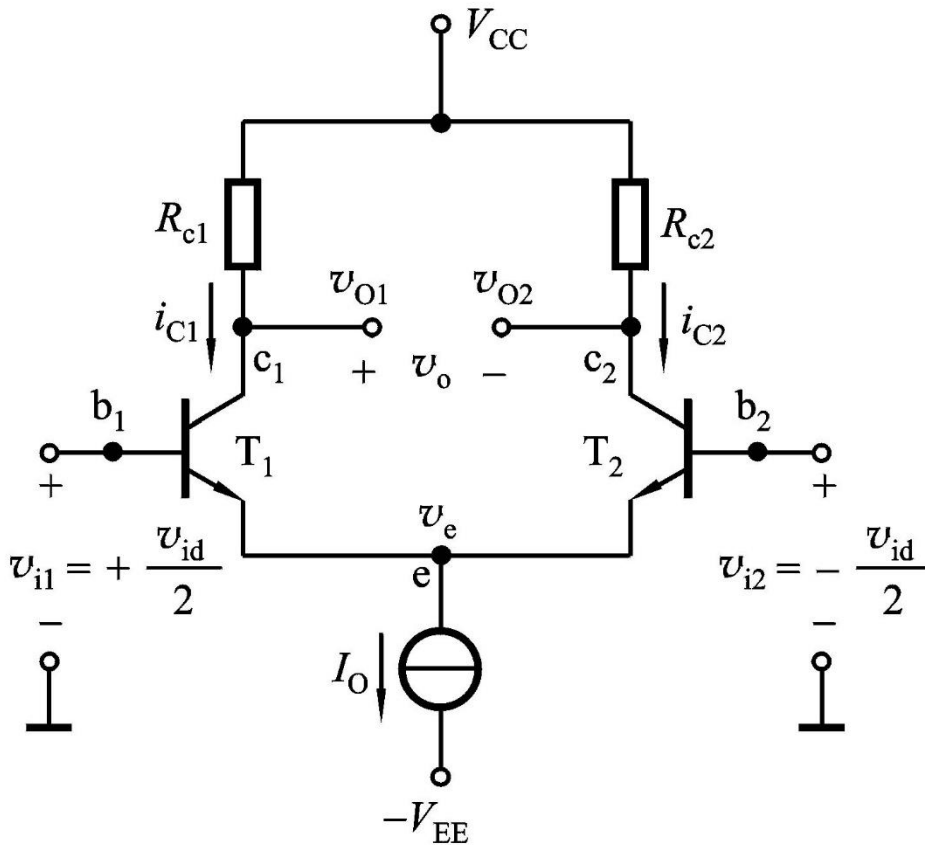
2. 有关概念

利用叠加定理



7.2.2 射极耦合差分式放大电路

1. 电路组成及工作原理



差放电路输入端可分解为：

$$v_{i1} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2}$$

$$v_{i2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$

共模分量

差模分量

利用叠加定理，分别分析差模输入和共模输入时电路的输出情况

7.2.2 射极耦合差分式放大电路

差分放大电路样式

主要看输出端：

1. 是从 v_{o1} 和 v_{o2} 两端输出，还是只从 v_{o1} 端输出？

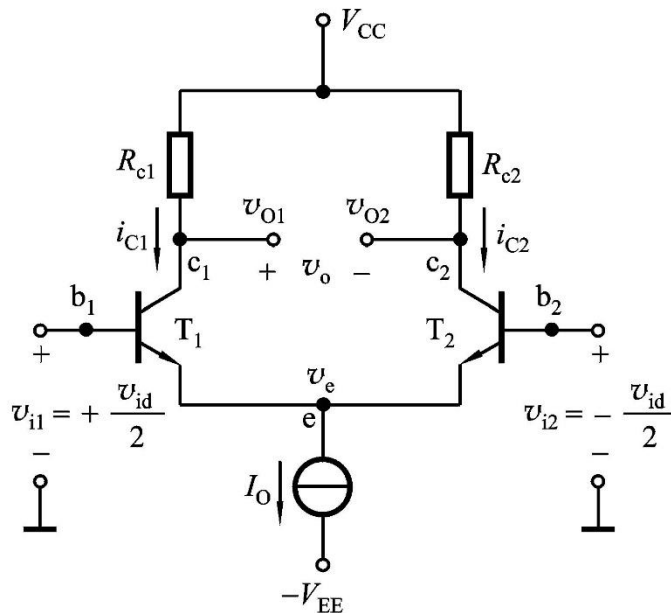
双出

单出

2. 输出端是否接负载？

一共四种样式：

1. 双端输出不接负载
2. 双端输出接负载
3. 单端输出不接负载
4. 单端输出接负载



双出不接
负载电路

7.2.2 射极耦合差分式放大电路

差分放大电路分析流程

主要流程

1. 静态分析（直流分析）

求静态工作点

注意点：由于两三极管参数相同

$$I_{EQ1} \text{ 始终等于 } I_{EQ2}$$

但如果单出挂负载模式， V_{CEQ1} 不等于 V_{CEQ2}

2. 差模输入时交流分析

注意单出、双出 接负载、不接负载区别

计算 A_{vd} (差模增益)

3. 共模输入时交流分析

注意单出、双出 接负载、不接负载区别

计算 A_{vc} (共模增益)

7.2.2 射极耦合差分式放大电路

1. 电路组成及工作原理

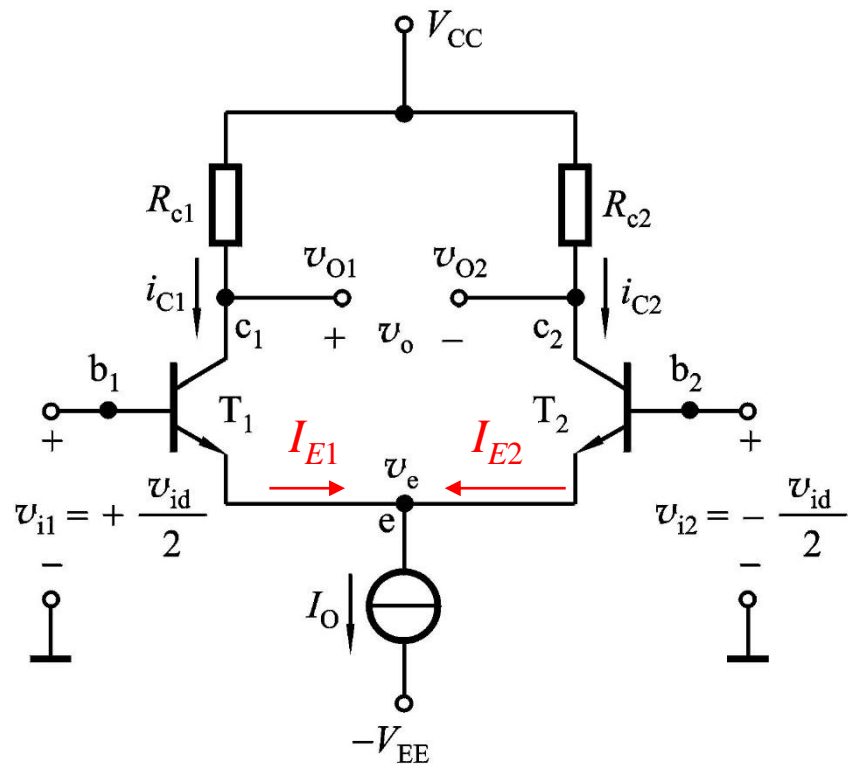
静态（双出不接负载时）

计算静态工作点

$$I_{E1} = I_{E2} = I_{C1} = I_{C2} = I_C = \frac{1}{2} I_O$$

$$\begin{aligned} V_{CE1} = V_{CE2} &= V_{CC} - I_C R_{c2} - V_E \\ &= V_{CC} - I_C R_{c2} - (-0.7V) \end{aligned}$$

$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{I_C}{\beta}$$

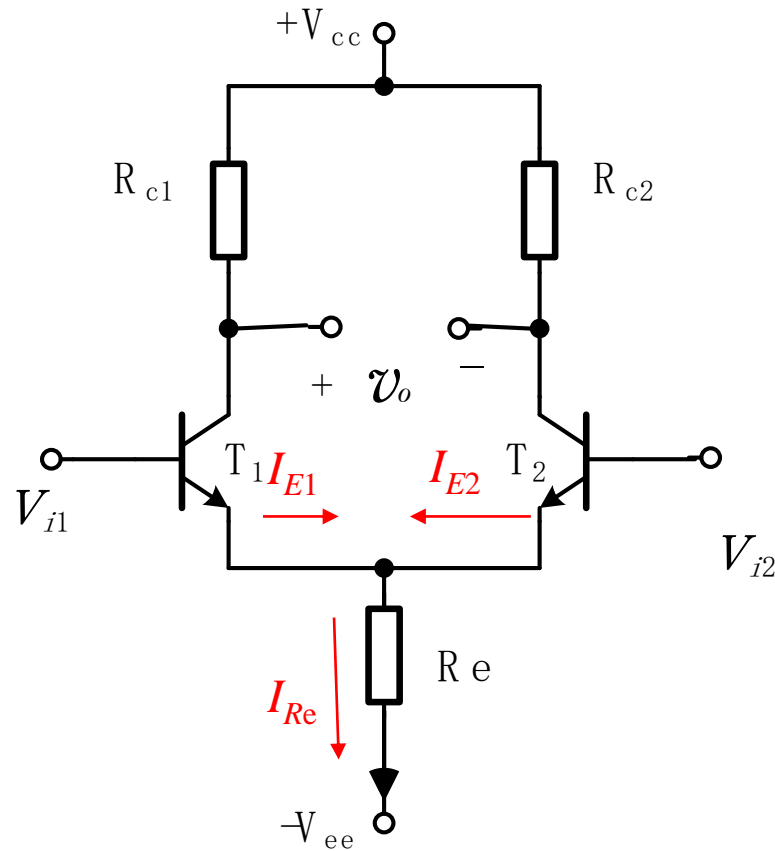


7.2.2 射极耦合差分式放大电路

1. 电路组成及工作原理

静态（双出不接负载时）

如果把电流源改为电阻，
即为长尾型差分电路



$$V_{Re} = V_{ee} - V_{BE}$$

$$I_{Re} = \frac{V_{Re}}{R_e}$$

$$I_{E1} = I_{E2} = I_{C1} = I_{C2} = I_C = \frac{1}{2} I_{Re}$$

$$\begin{aligned} V_{CE1} = V_{CE2} &= V_{CC} - I_C R_{c2} - V_E \\ &= V_{CC} - I_C R_{c2} - (-0.7V) \end{aligned}$$

$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{I_C}{\beta}$$

7.2.2 射极耦合差分式放大电路

1. 电路组成及工作原理

计算静态工作点

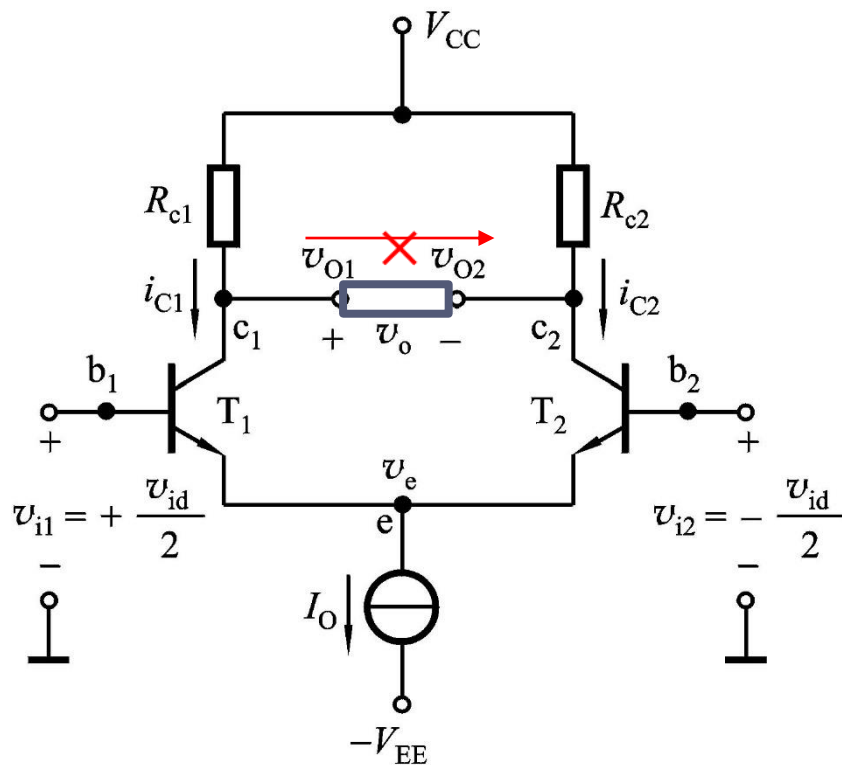
(双出接负载时)

由于不接负载时 $V_{CE1} = V_{CE2}$

所以

接不接负载 都不会有电流通过 R_L

因此，双出时接不接负载结果相同



7.2.2 射极耦合差分式放大电路

1. 电路组成及工作原理

静态工作点（单出接负载时）

此时两边不对称 $V_{CE1} \neq V_{CE2}$

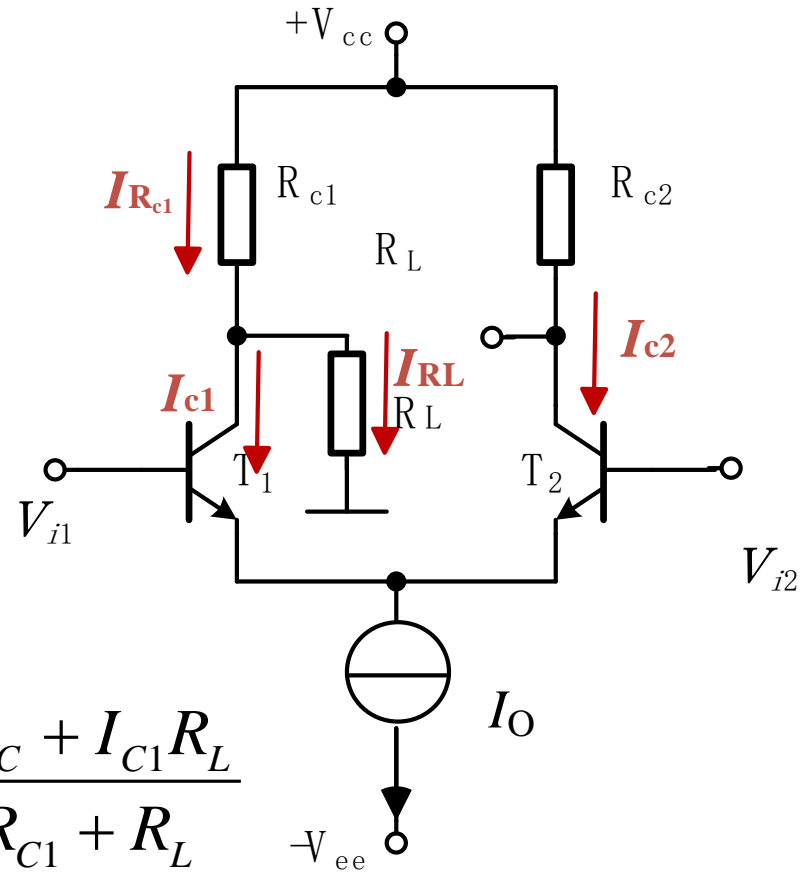
$$I_{E1} = I_{E2} = I_{C1} = I_{C2} = I_C = \frac{1}{2} I_O$$

$$\begin{aligned} V_{CE2} &= V_{CC} - I_C R_{c2} - V_E \\ &= V_{CC} - I_C R_{c2} - (-0.7V) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} I_{RC1} = I_{RL} + I_{C1} \\ V_{CC} = I_{RC1} R_{c1} + I_{RL} R_L \end{cases} \Rightarrow I_{RC1} = \frac{V_{CC} + I_{C1} R_L}{R_{c1} + R_L}$$

$$V_{CE1} = V_{CC} - I_{RC1} R_{c1} - V_E$$

$$\Rightarrow = V_{CC} - I_{RC1} R_{c1} - (-0.7V)$$



7.2.2 射极耦合差分式放大电路

1. 电路组成及工作原理

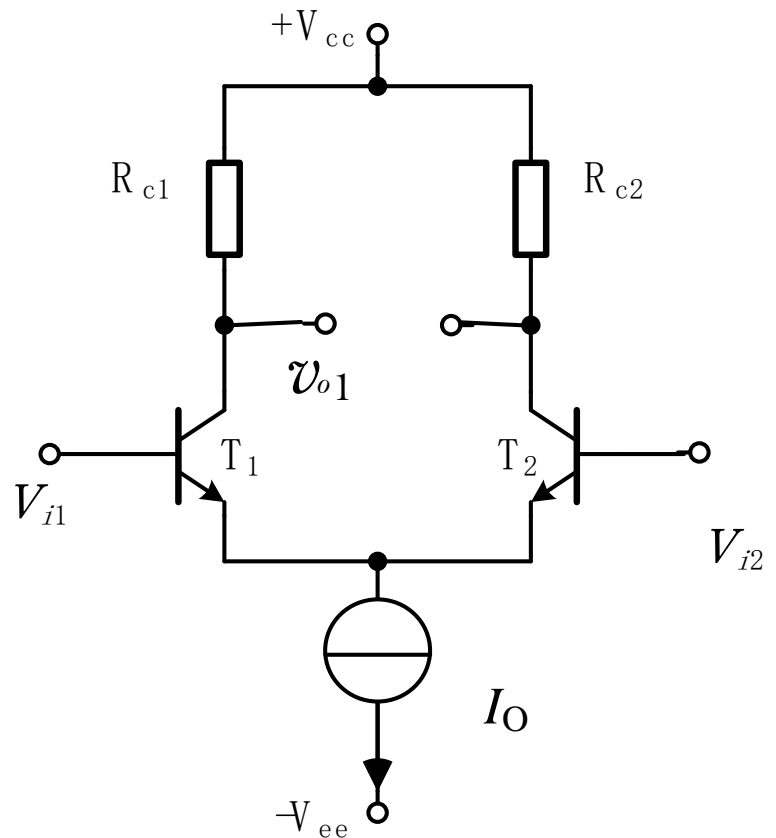
静态工作点（单出不接负载时）

单出不接负载时计算与
双端不接负载时相同

$$I_{E1} = I_{E2} = I_{C1} = I_{C2} = I_C = \frac{1}{2} I_O$$

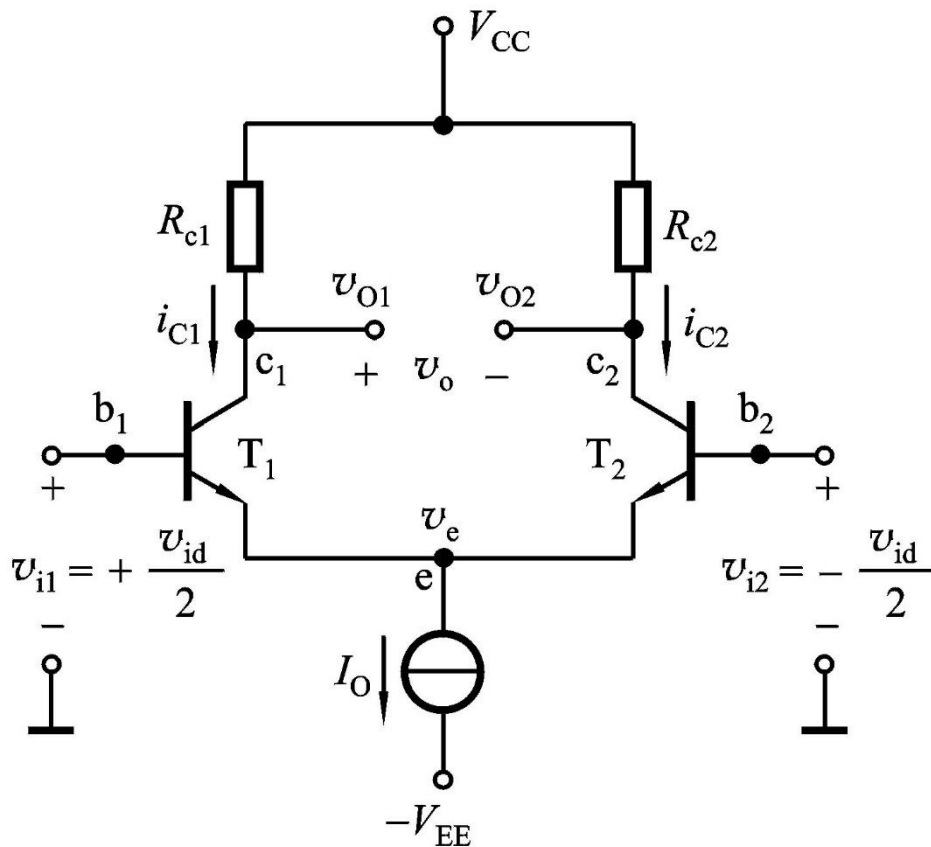
$$V_{CE1} = V_{CE2} = V_{CC} - I_C R_{c2} - V_E$$

$$= V_{CC} - I_C R_{c2} - (-0.7V)$$



1. 电路组成及工作原理

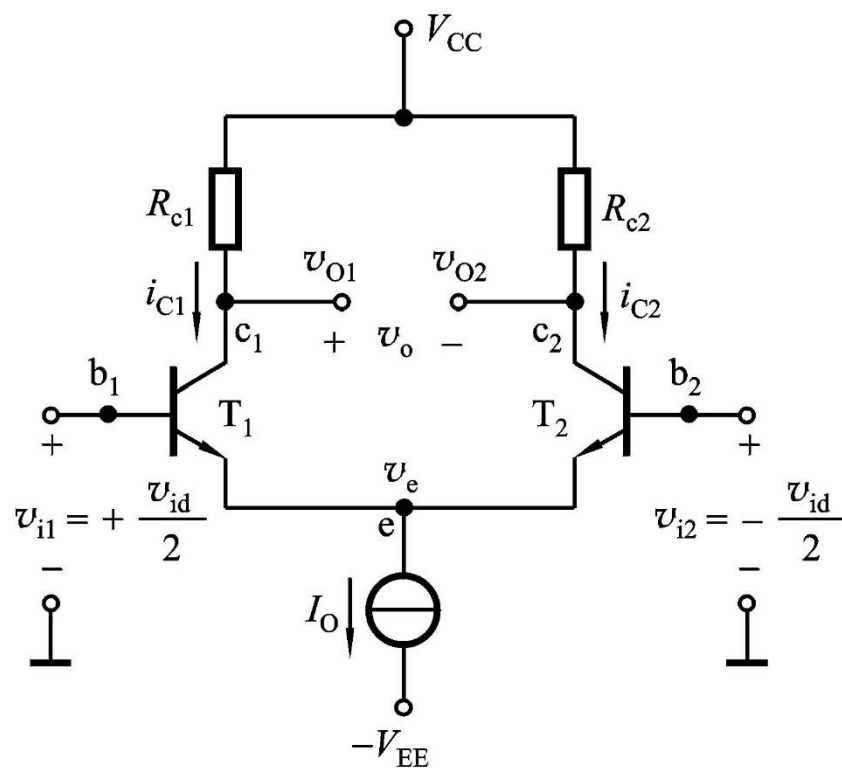
动态 仅输入差模信号， v_{i1} 和 v_{i2} 大小相等，相位相反。
 v_{O1} 和 v_{O2} 大小相等，相位相反。 $v_o = v_{O1} - v_{O2} \neq 0$ ，
信号被放大。



2. 抑制零点漂移原理

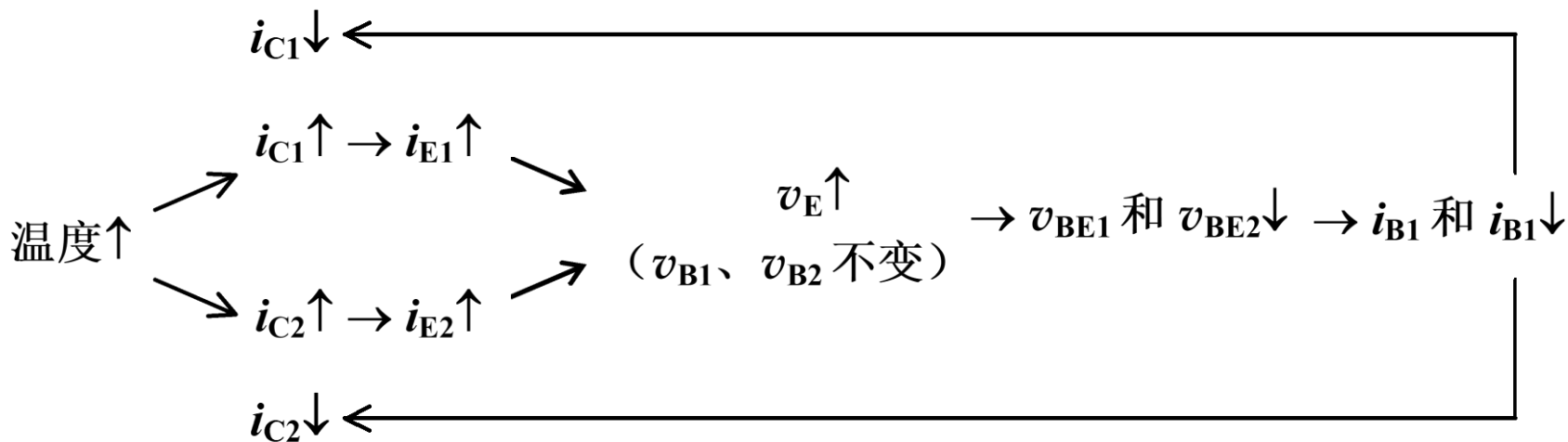
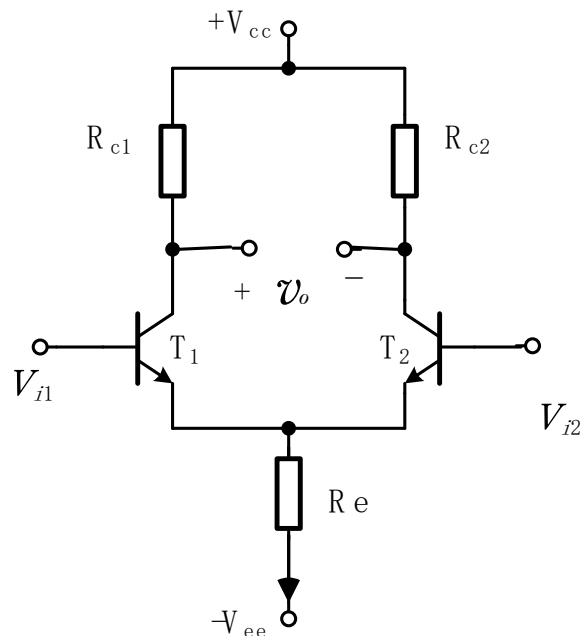
温度变化和电源电压波动，都将使集电极电流产生变化。且变化趋势是相同的，

其效果相当于在两个输入端加入了共模信号。



2. 抑制零点漂移原理

这一过程类似于分压式射极偏置电路的温度稳定过程。所以，即使电路处于单端输出方式时，仍有较强的抑制零漂能力。

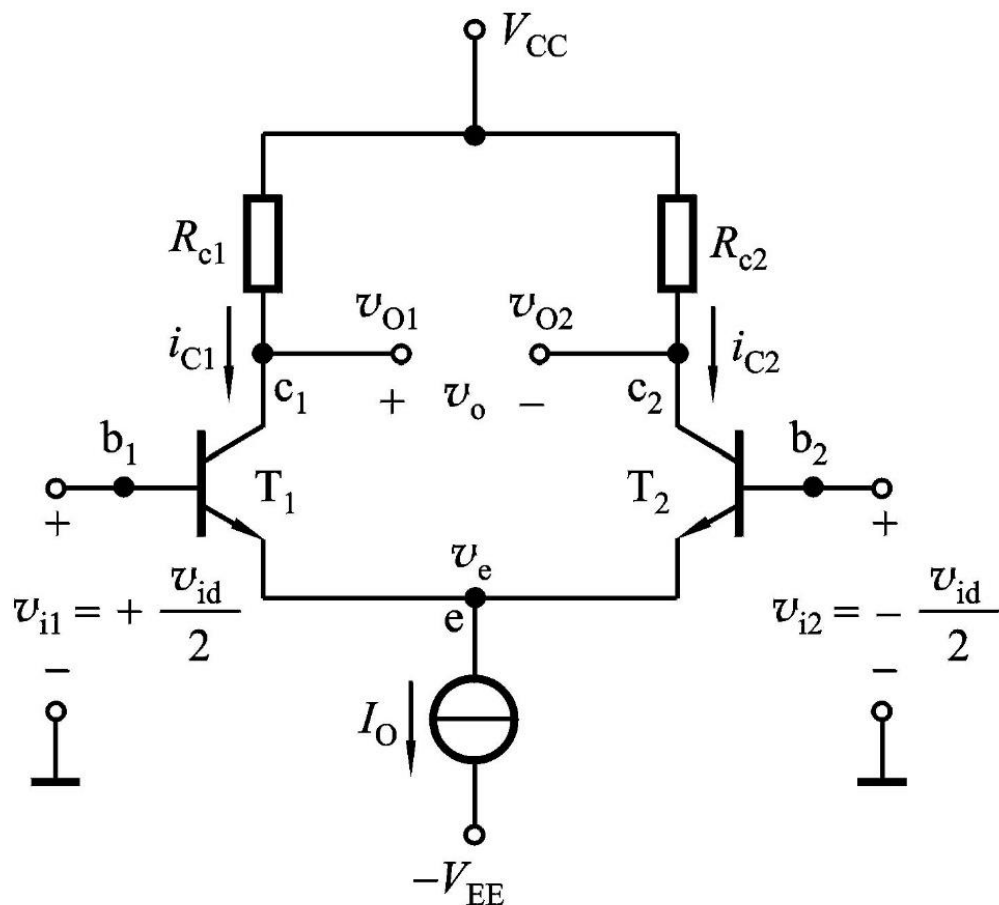


差分式放大电路对共模信号有很强抑制作用

3. 主要指标计算

(1) 差模情况

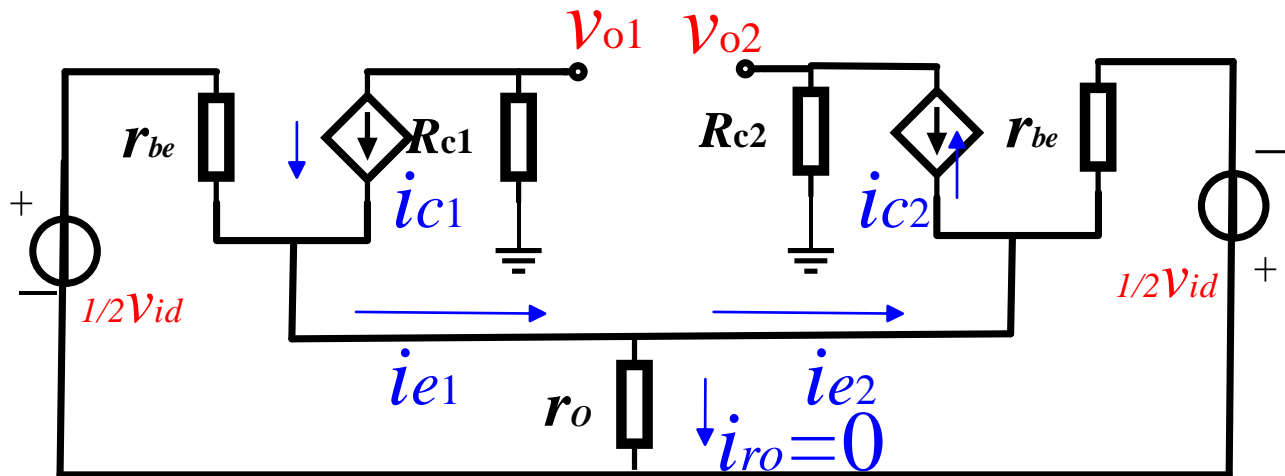
<A> 双入双出不接负载情况



画交流小信号模型图
要点:

1. 所有直流电压偏置变成接地
2. 电流源因为内部并联大的内阻, 变为大电阻

差模情况 <A> 双入双出不接负载情况



$$v_{o1} = -i_{c1} R_{C1} \quad v_{o2} = i_{c2} R_{C2}$$

注意此处 i_{c1} 和 i_{c2} 方向相反

$$A_{vd} = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{id}} = \frac{-2i_{c1} R_{C1}}{2i_{b1} r_{be}} = \frac{-\beta R_{C1}}{r_{be}}$$

双出不接负载时差模增益

$$R_i = 2r_{be}$$

差模输入电阻

$$R_o = 2R_{c1}$$

双出输出电阻

输入电阻从输入端口看, r_o 没有电流所以不考虑, 要注意

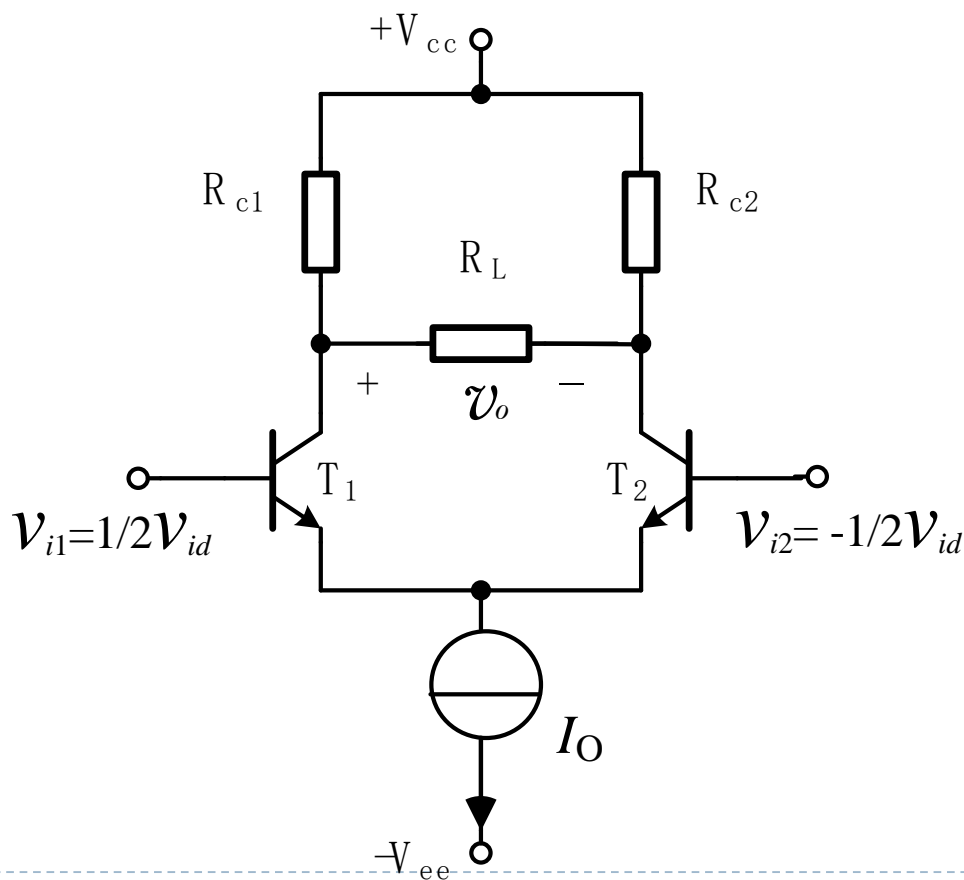
$$R_i = \frac{v_{id}}{i_i} = 2 \frac{1/2 v_{id}}{i_i} = 2r_{be}$$

输出电阻从输出端口看, 此时 R_{c1} 和 R_{c1} 呈现串联状态

3. 主要指标计算

(1) 差模情况

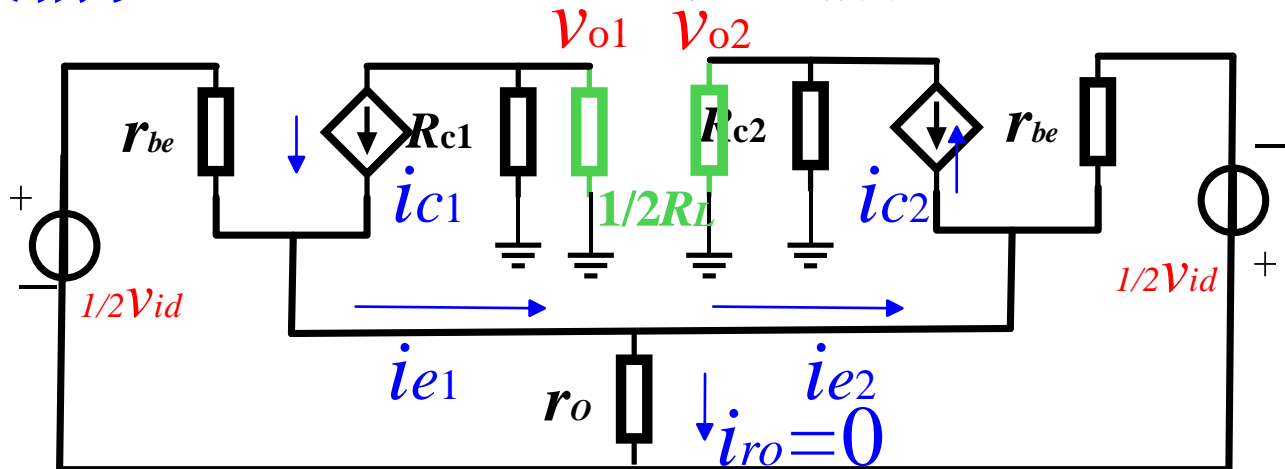
〈B〉 双入双出接负载情况



画交流小信号模型图
要点:

1. 所有直流电压偏置变成接地
2. 电流源因为内部并联大的内阻, 变为大电阻
3. R_L 要进行变化, 可以从中间一切为二, $1/2 R_L$ 分别接在输出两边

差模情况 双入双出接负载情况



$$v_{o1} = -i_{c1} \left(R_{C1} \parallel \frac{1}{2} R_L \right) \quad v_{o2} = -v_{o1} = i_{c2} \left(R_{C2} \parallel \frac{1}{2} R_L \right)$$

$$A'_{vd} = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{id}} = \frac{-2i_{c1} \left(R_{C1} \parallel \frac{1}{2} R_L \right)}{2i_{b1} r_{be}} = \frac{-\beta \left(R_{C1} \parallel \frac{1}{2} R_L \right)}{r_{be}}$$

双出接负载时
差模增益

$$R_i = 2r_{be}$$

差模输入电阻

输入电阻从输入端口看, r_o 没有电流所以
不考虑, 要注意

$$R_i = \frac{v_{id}}{i_i} = 2 \frac{1/2 v_{id}}{i_i} = 2r_{be}$$

$$R_o = 2R_{c1}$$

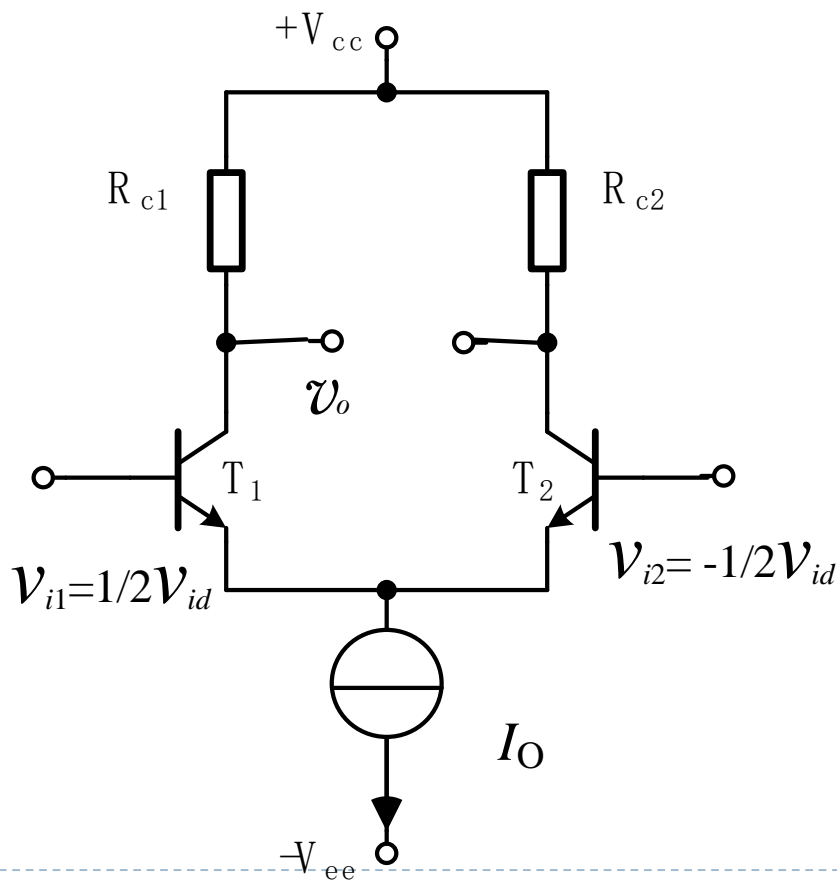
双出输出电阻

输出电阻从输出端口看, 此时 R_{C1} 和 R_{C1} 呈
现串联状态, 此处不应考虑 R_L

3. 主要指标计算

(1) 差模情况

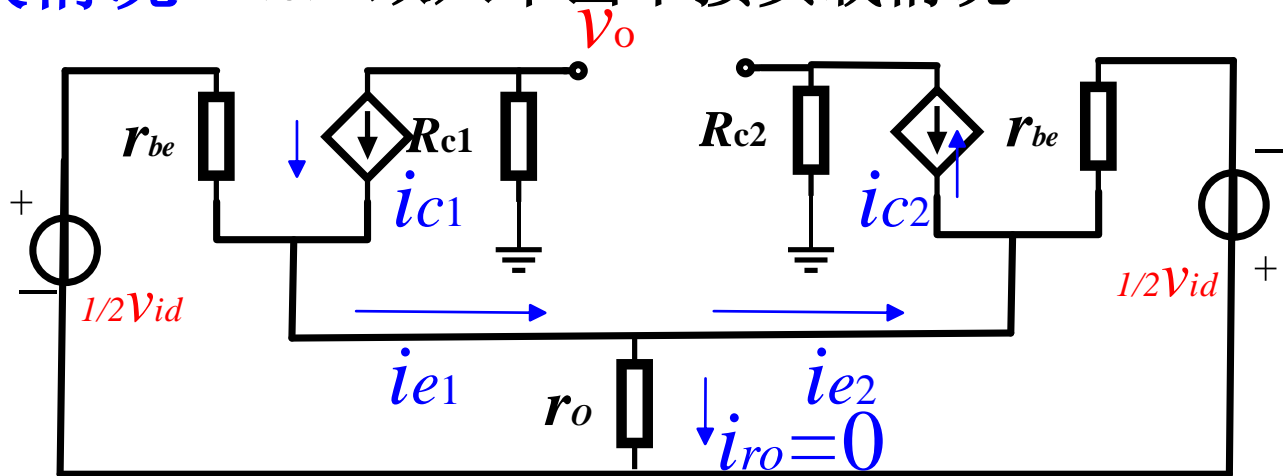
<C> 双入单出不接负载情况



画交流小信号模型图
要点:

1. 所有直流电压偏置变成接地
2. 电流源因为内部并联大的内阻, 变为大电阻

差模情况 <C> 双入单出不接负载情况



$$v_o = -i_{c1} R_{C1}$$

$$A_{vd1} = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{-i_{c1} R_{C1}}{2i_{b1} r_{be}} = \frac{-\beta R_{C1}}{2r_{be}}$$

注意如果单出是从 R_{C2} 端引出，结果需取相反符号

单出不接负载时差模增益

$$R_i = 2r_{be}$$

差模输入电阻

输入电阻从输入端口看， r_o 没有电流所以不考虑，要注意

$$R_i = \frac{v_{id}}{i_i} = 2 \frac{1/2 v_{id}}{i_i} = 2r_{be}$$

$$R_o = R_{C1}$$

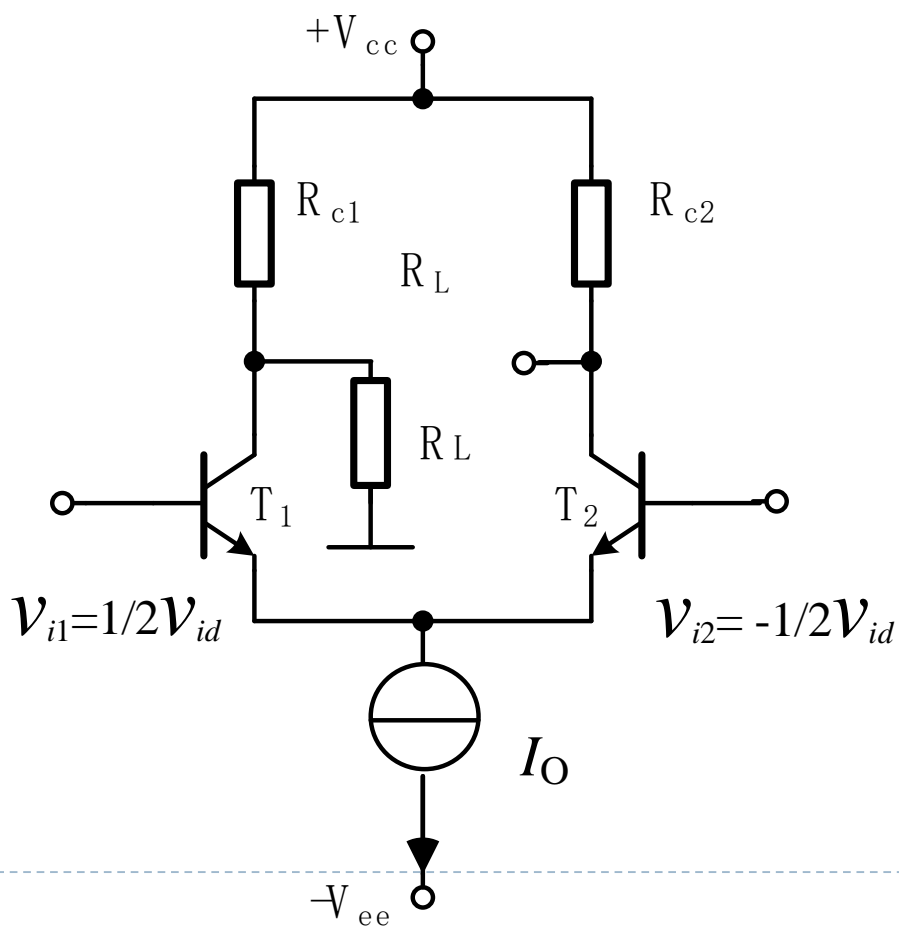
单出输出电阻

输出电阻从输出端口看，此时 R_{C1} 与输出端直接连接

3. 主要指标计算

(1) 差模情况

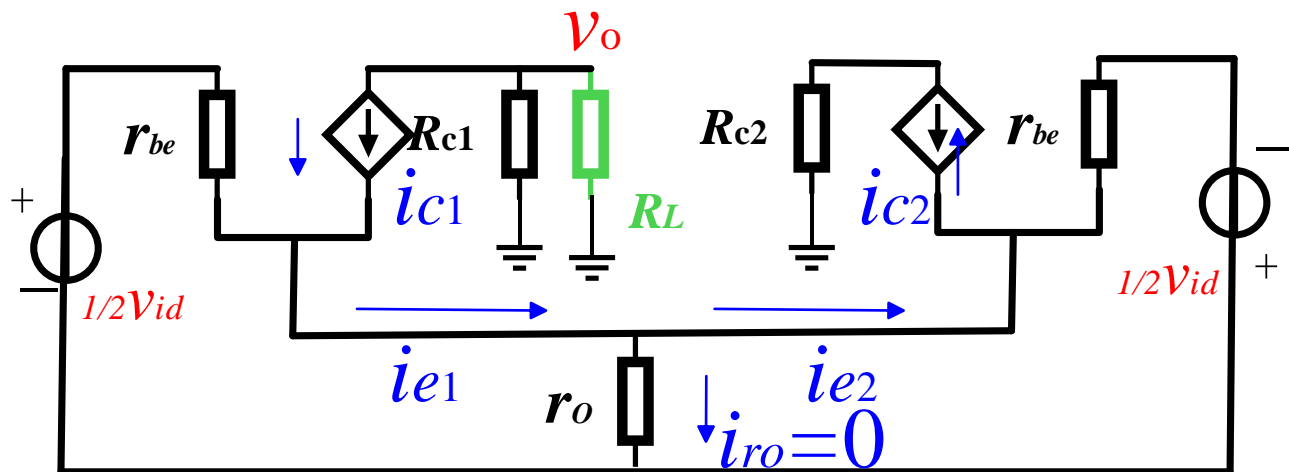
<D> 双入单出接负载情况



画交流小信号模型图
要点:

1. 所有直流电压偏置变成接地
2. 电流源因为内部并联大的内阻, 变为大电阻
3. R_L 直接并在 R_{C1} 端

差模情况 <D> 双入单出接负载情况



注意如果单出是从 R_{c2} 端引出，结果需取相反符号

$$v_o = -i_{c1} (R_{C1} \parallel R_L)$$

$$A_{vd1}' = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{-i_{c1} (R_{C1} \parallel R_L)}{2i_{b1} r_{be}} = \frac{-\beta (R_{C1} \parallel R_L)}{2r_{be}}$$

单出接负载时
差模增益

$$R_i = 2r_{be}$$

差模输入电阻

输入电阻从输入端口看， r_o 没有电流所以不考虑，要注意

$$R_i = \frac{v_{id}}{i_i} = 2 \frac{1/2 v_{id}}{i_i} = 2r_{be}$$

$$R_o = R_{c1}$$

单出输出电阻

输出电阻从输出端口看，此时 R_{C1} 与输出端直接连接

3. 主要指标计算

(2) 共模情况

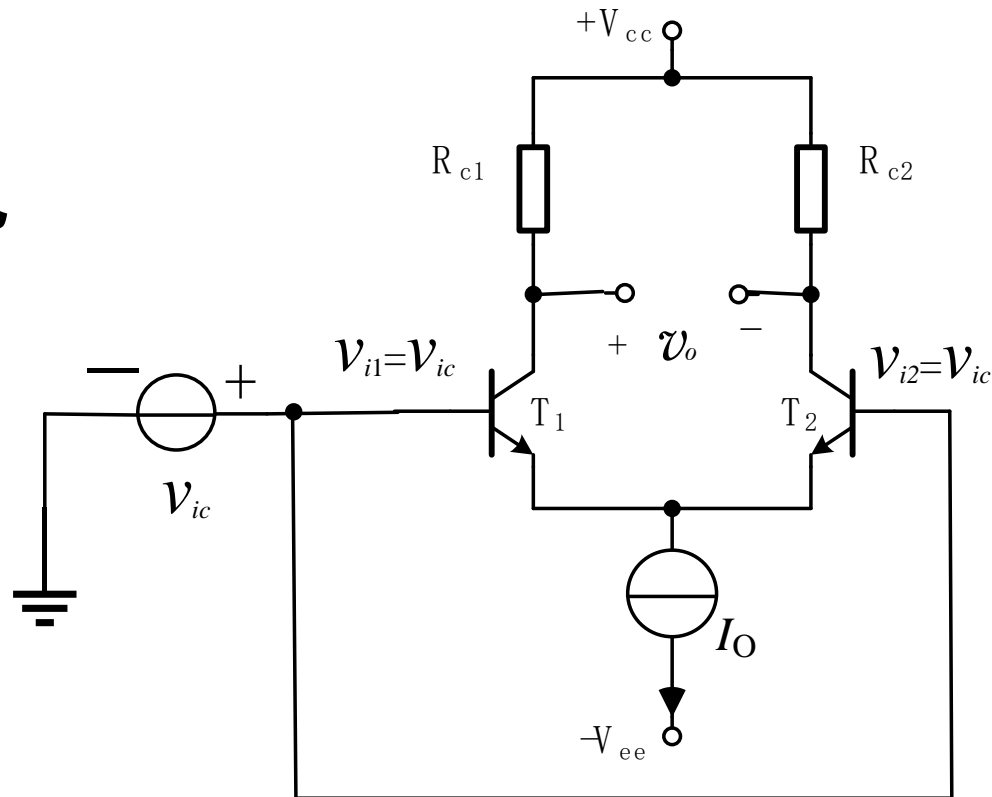
〈A〉 双端输出不接负载

共模信号的输入使两管集电极电压有相同的变化。

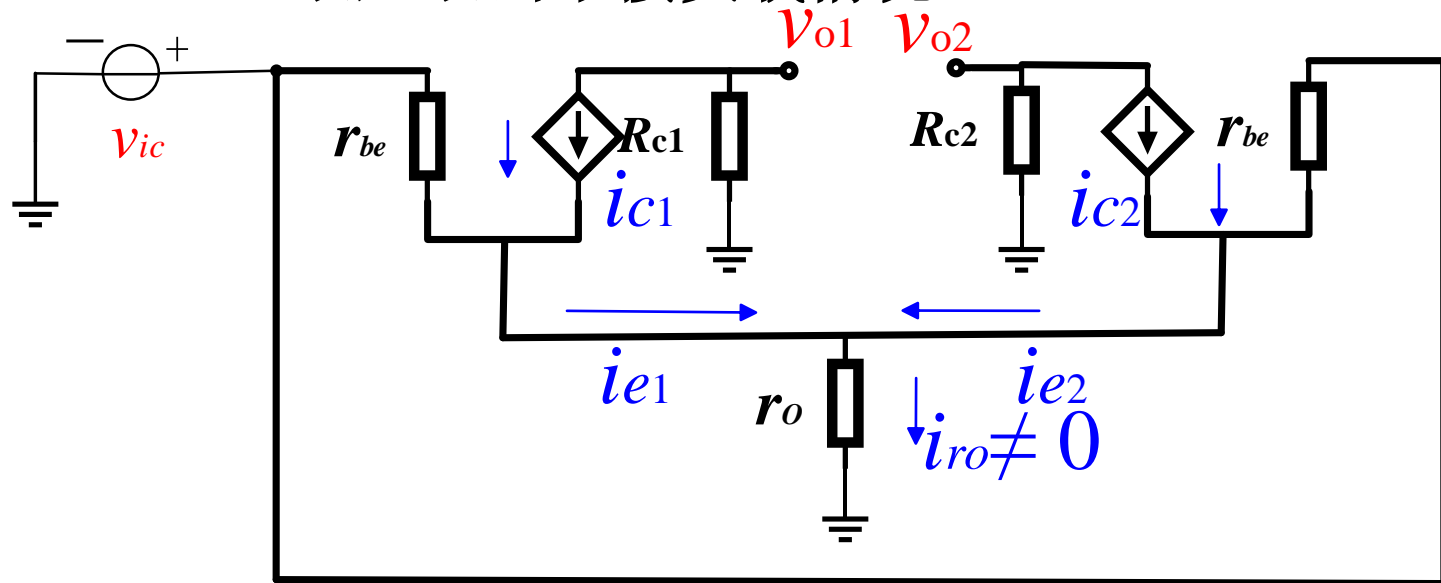
所以 $v_{oc} = v_{oc1} - v_{oc2} \approx 0$

共模增益

$$A_{vc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} \approx 0$$



共模情况 <A> 双入双出不接负载情况



$$v_{o1} = -i_{c1}R_{C1} \quad v_{o2} = v_{o1} = -i_{c2}R_{C2}$$

$$A_{vC} = \frac{v_o}{v_{ic}} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{ic}} = \frac{0}{v_{ic}} = 0$$

双出不接负载时
共模增益

$$R_{iC} = \frac{1}{2} [r_{be} + 2(1 + \beta)r_o]$$

共模输入电阻

输入电阻从输入端口看，输入
电流等于2倍 i_b

3. 主要指标计算

(2) 共模情况

〈B〉 双端输出接负载

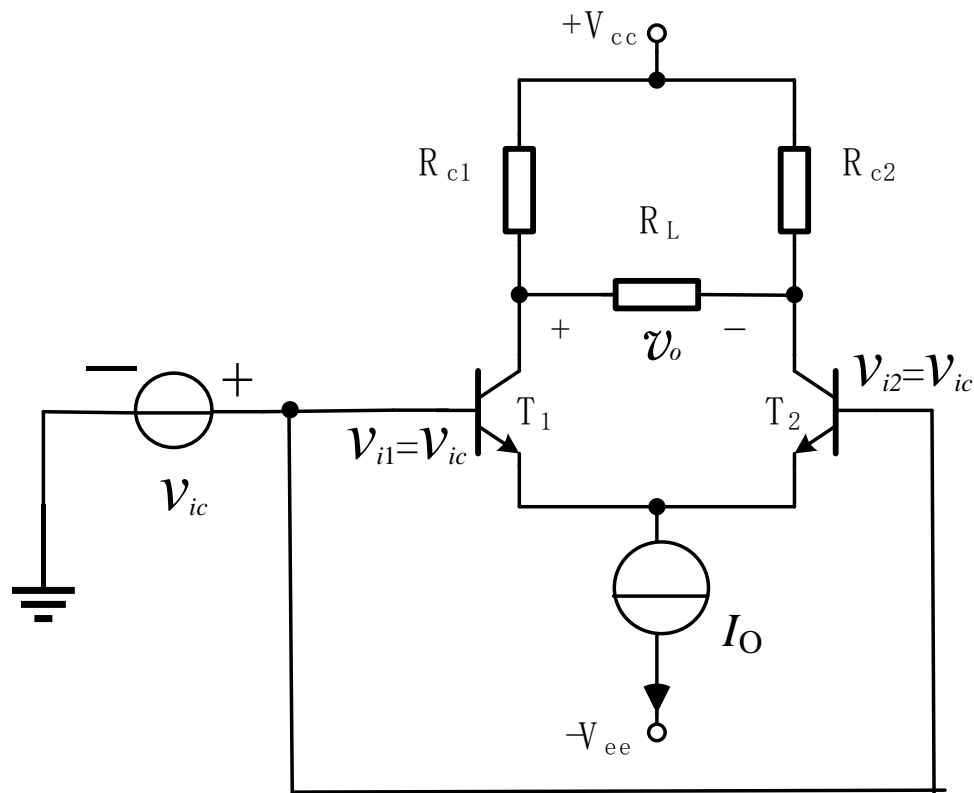
共模信号的输入使两管集电极电压有相同的变化。

未加入 R_L 前，输出两端电势相等，加入 R_L 不影响共模增益

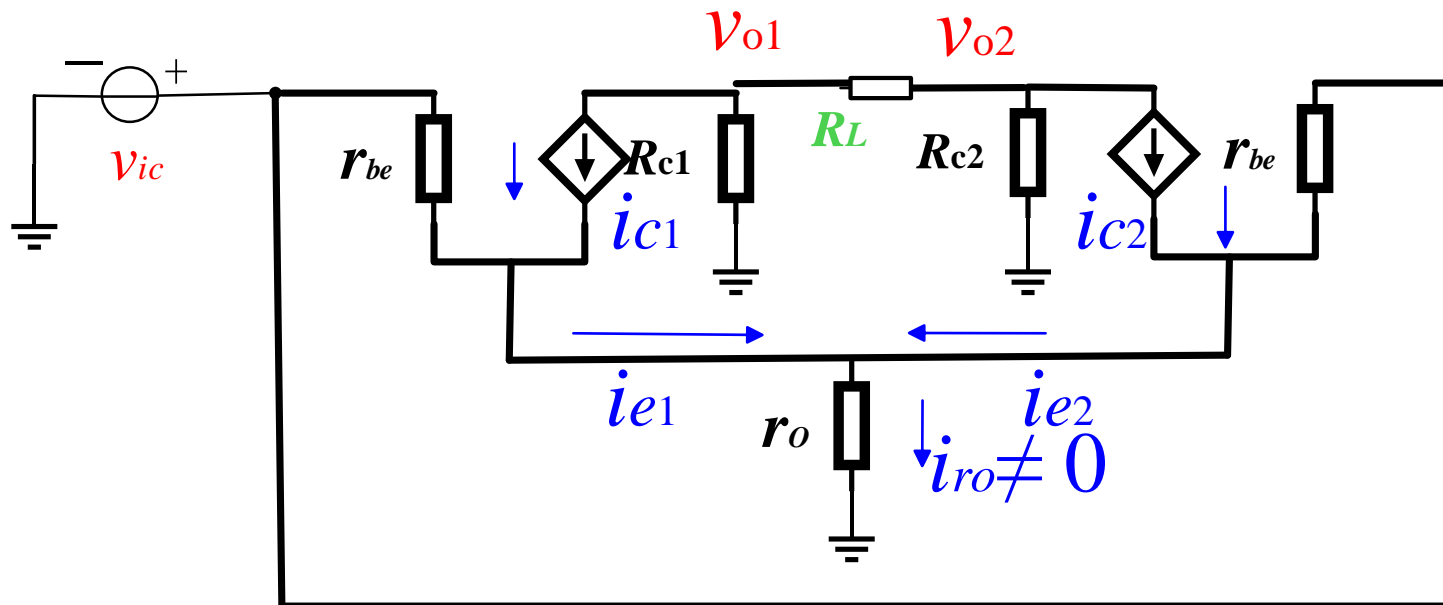
所以 $v_{oc} = v_{oc1} - v_{oc2} \approx 0$

共模增益

$$A_{vc}' = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} \approx 0$$



共模情况 双端输出接负载情况



$$v_{o1} = -i_{c1} R_{C1}$$

$$v_{o2} = v_{o1} = -i_{c2} R_{C2}$$

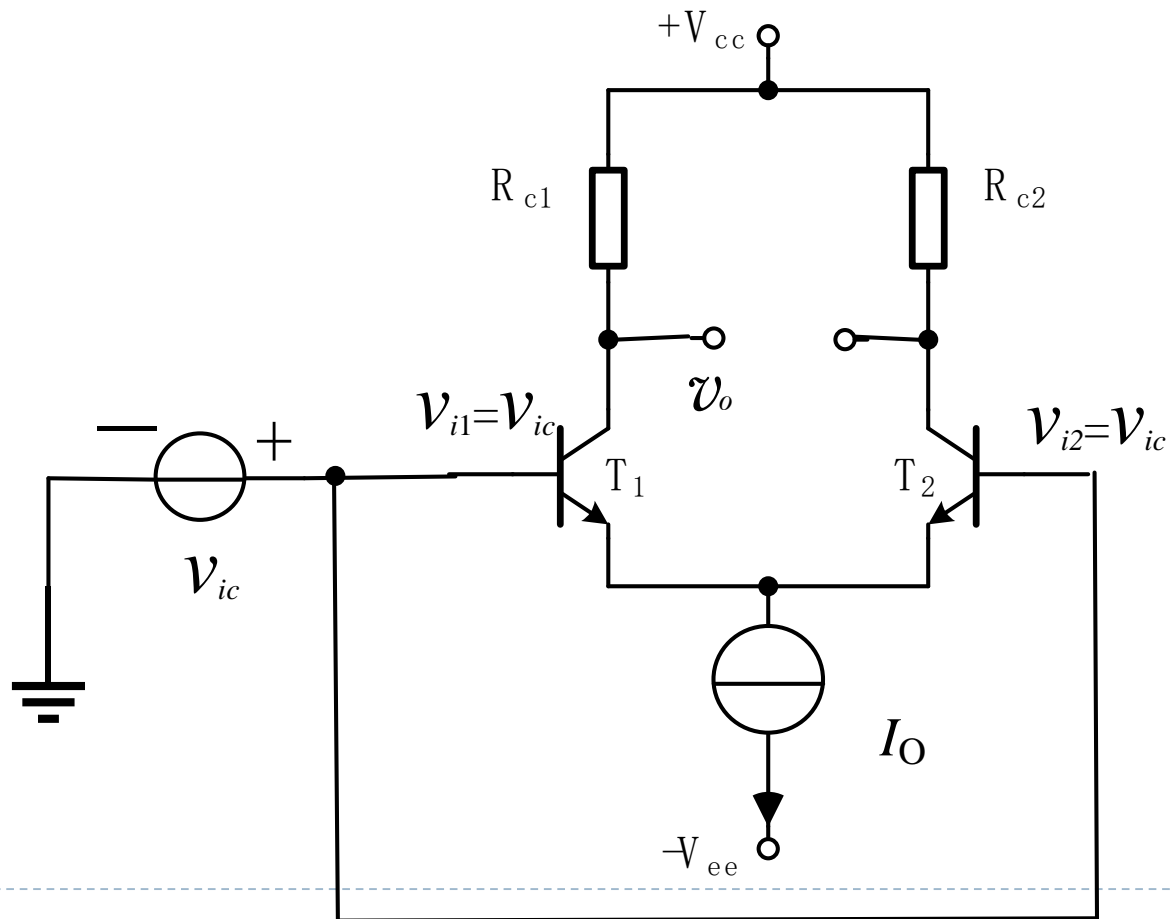
$$A_{v_c}' = \frac{v_o}{v_{ic}} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{ic}} = \frac{0}{v_{ic}} = 0$$

双出接负载时
共模增益

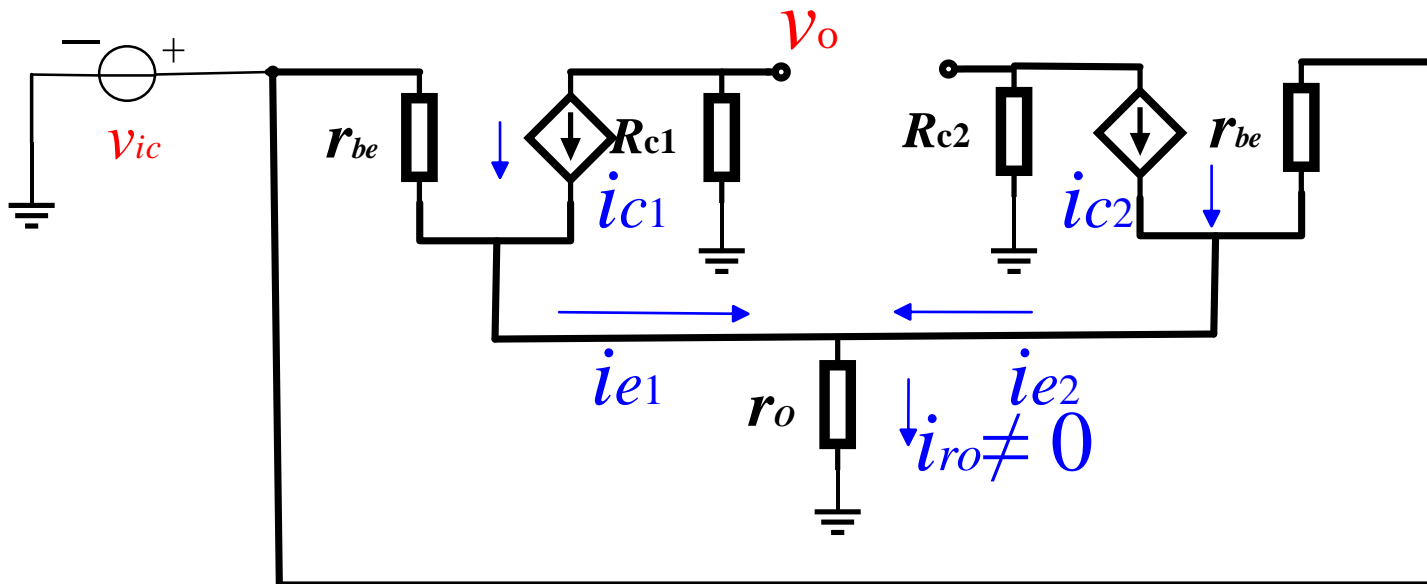
3. 主要指标计算

(2) 共模情况

<C> 单端输出不接负载



共模情况 <C> 单端输出不接负载情况



$$v_o = -i_{c1} R_{C1}$$

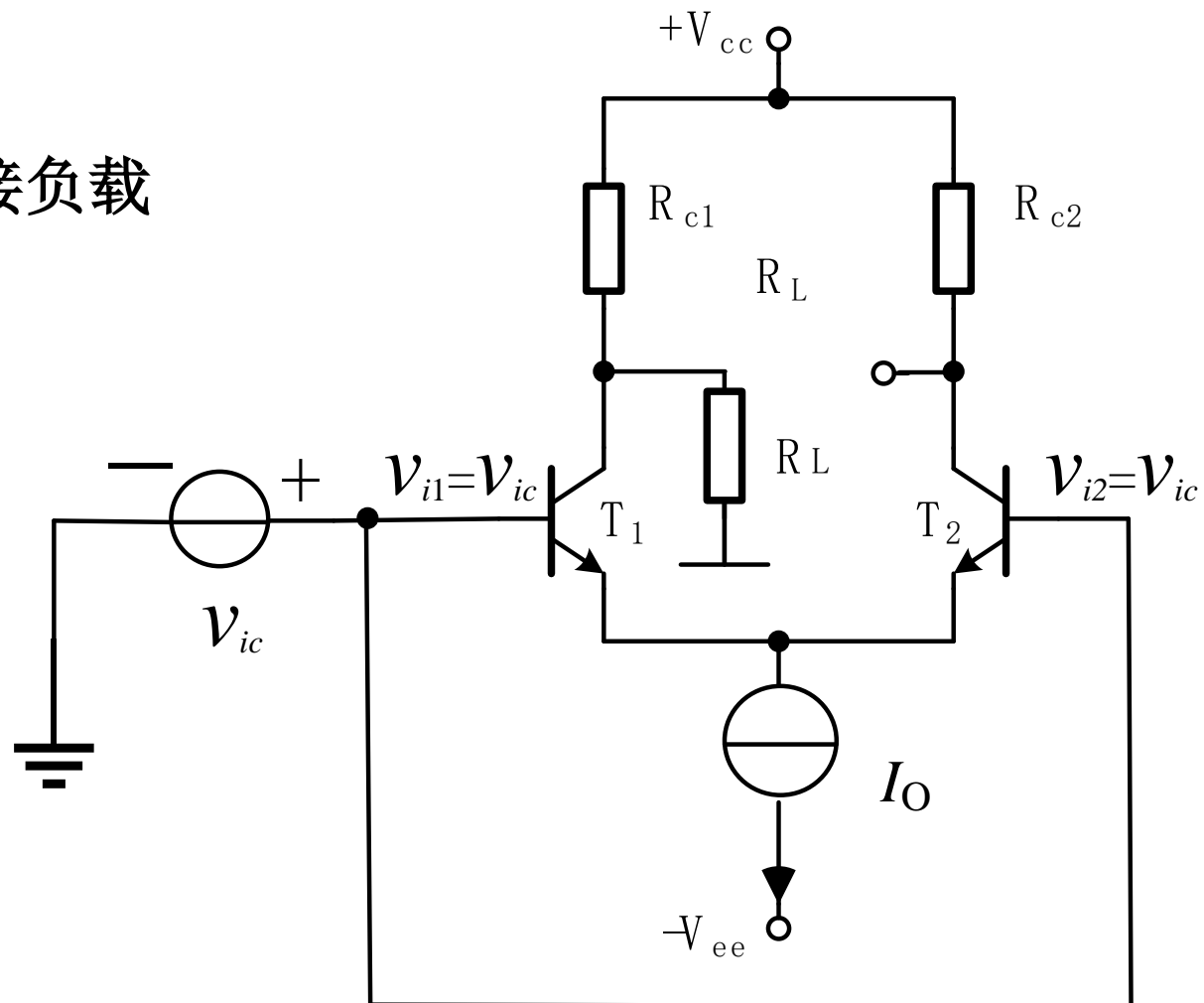
$$A_{v_{oC1}} = \frac{v_o}{v_{ic}} = \frac{-i_{c1} R_{C1}}{r_{be} i_b + 2(1 + \beta) i_b r_o} = \frac{-\beta R_{C1}}{r_{be} + 2(1 + \beta) r_o}$$

单出不接负载时
共模增益

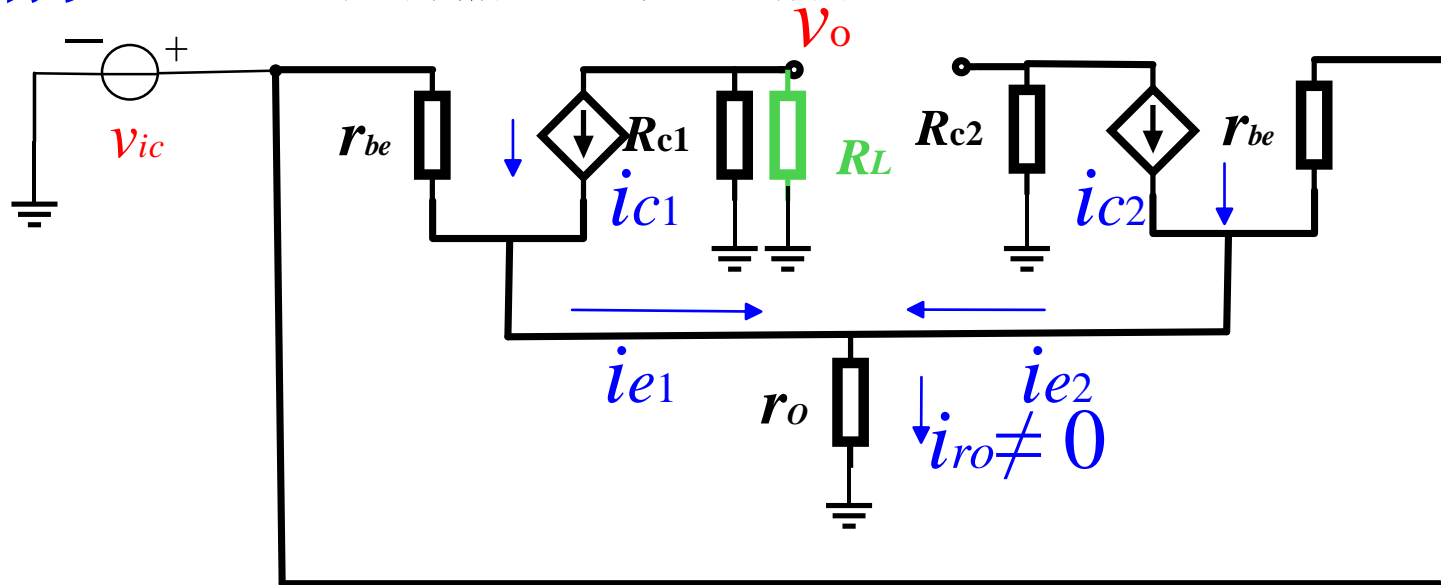
3. 主要指标计算

(2) 共模情况

<D> 单端输出接负载



共模情况 <D> 单端输出接负载情况



$$v_o = -i_{c1} (R_{C1} \parallel R_L)$$

$$A_{v_{C1}}' = \frac{v_o}{v_{ic}} = \frac{-i_{c1} (R_{C1} \parallel R_L)}{r_{be} i_b + 2(1 + \beta) i_b r_o} = \frac{-\beta (R_{C1} \parallel R_L)}{r_{be} + 2(1 + \beta) r_o}$$

单出接负载时
共模增益



(3) 共模抑制比

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \quad K_{\text{CMR}} = 20 \lg \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \text{ dB}$$

双端输出，理想情况 $K_{\text{CMR}} = \infty$

单端输出 $K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{vd1}}{A_{vc1}} \right| \approx \frac{\beta \cdot r_o}{r_{be}}$

K_{CMR} 越大，抑制零漂能力越强

单端输出时的总输出电压 $v_{o1} = A_{vd1} v_{id} \left(1 + \frac{v_{ic}}{K_{\text{CMR}} v_{id}} \right)$

(4) 频率响应

高频响应与共射电路相同，低频可放大直流信号。