

第三章 集成运算放大电路

- ❑ 多级放大电路
- ❑ 集成运放的组成，及特点
- ❑ 集成运放中的单元电路
- ❑ 集成运放的等效电路，性能参数

3.1 多级放大电路

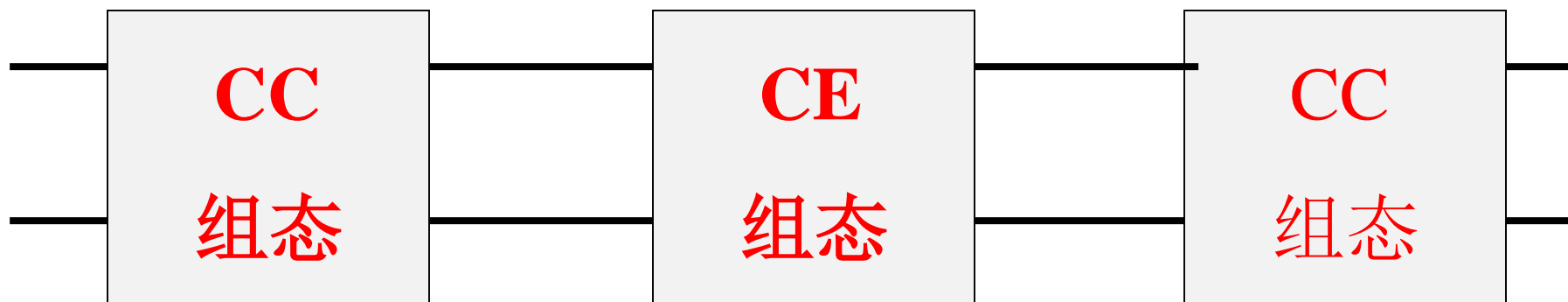
为什么需要多级放大电路？

基本放大电路的特点

- ❑ **CE组态** 电压放大、电流放大， **R_i** 、 **R_o** 大小居中
- ❑ **CC组态** 电流放大、无电压放大， **R_i** 高， **R_o** 小
- ❑ **CB组态** 电压放大、无电流放大， **R_i** 小， **R_o** 大

基本放大电路有自己的特点，不能满足实际需要

多级放大电路：将多个基本放大电路进行级联，来改善交流性能指标，如提高增益，改善 R_i 、 R_o 等。



电压放大电路：电压放大， R_i 大， R_o 小

基本放大电路可称为**单级放大电路**

多级放大电路中的每个基本放大电路称为“**一级**”。

一、放大电路的耦合方式

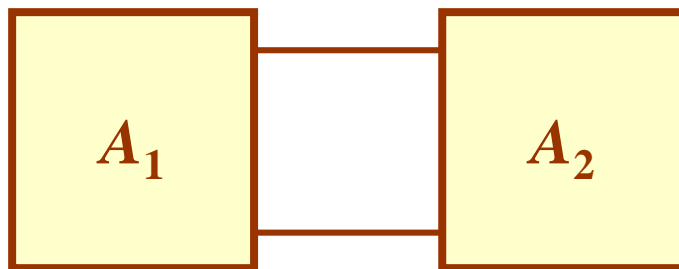
放大电路的**耦合方式**：放大电路各级之间的**连接方式**

- ❑ 信号源与放大电路之间的耦合
- ❑ 放大电路各级之间的耦合
- ❑ 放大电路与负载之间的耦合

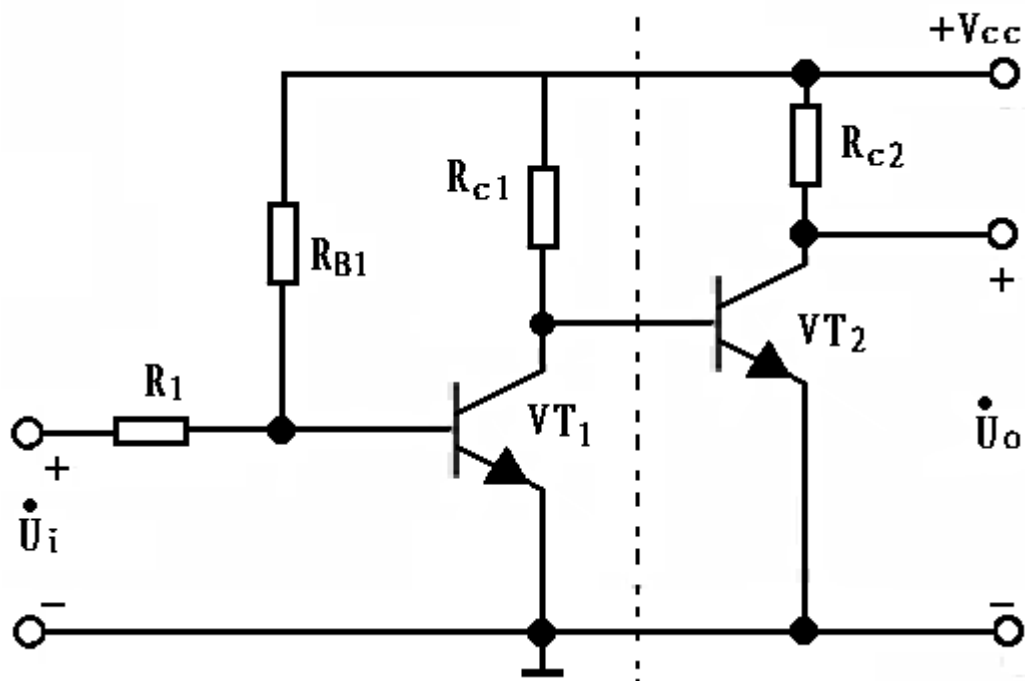


直接耦合、阻容耦合、变压器耦合、光电耦合

1、直接耦合



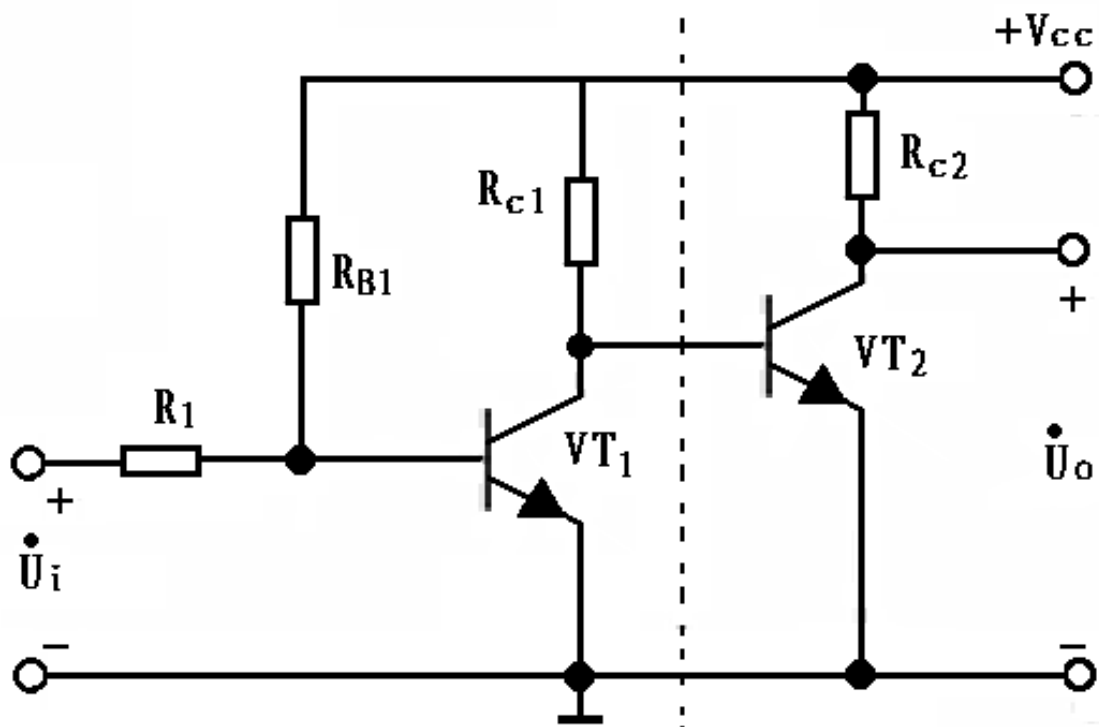
直接耦合连接方式



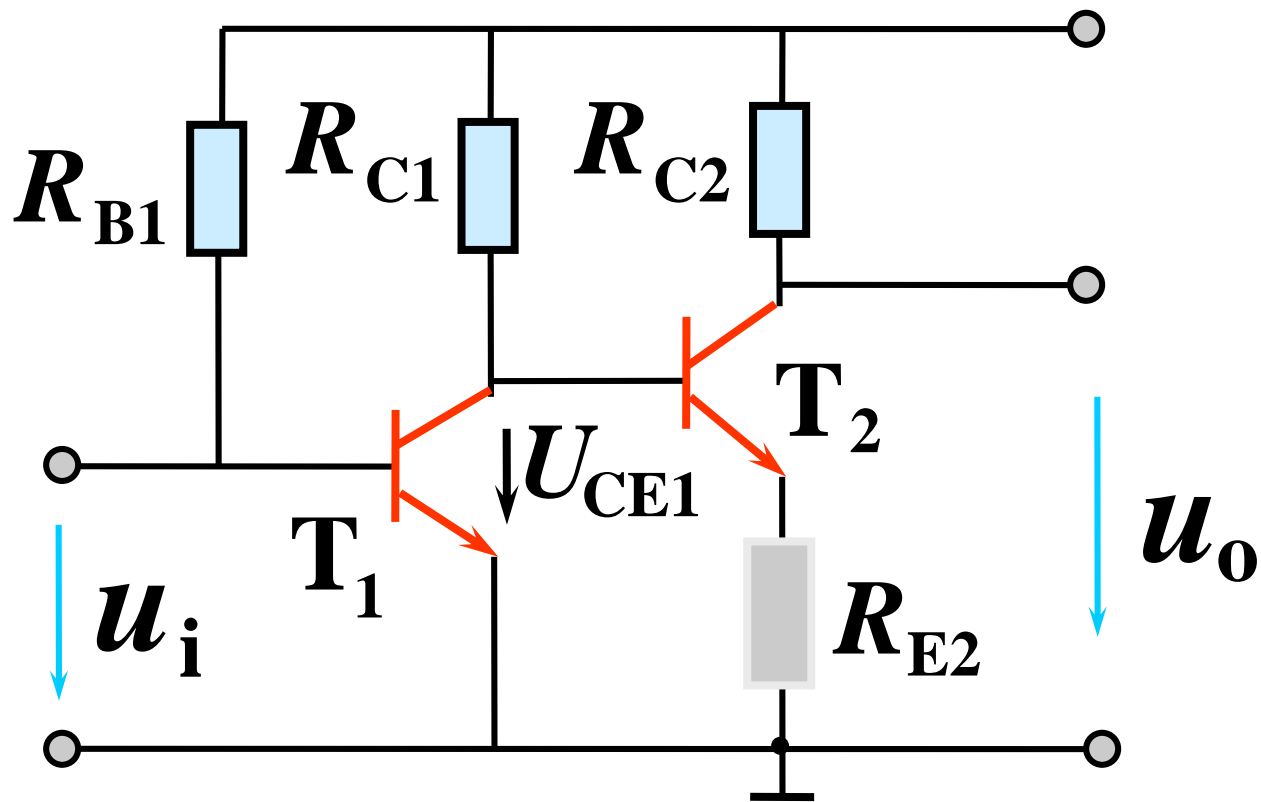
两级直接耦合放大电路

❑ 直接耦合存在的问题

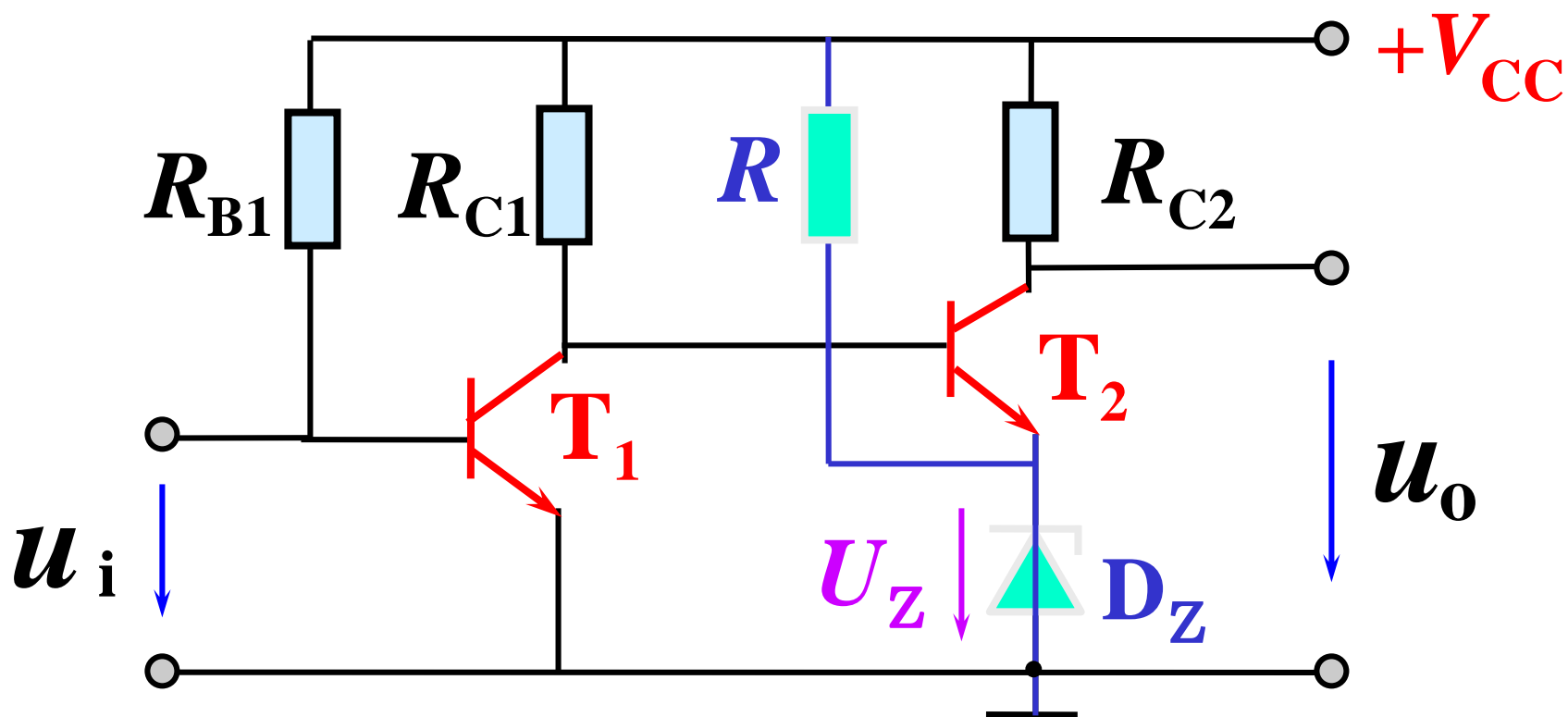
1) 静态工作点不合适



第一级工作点靠近饱和区，易引起饱和失真

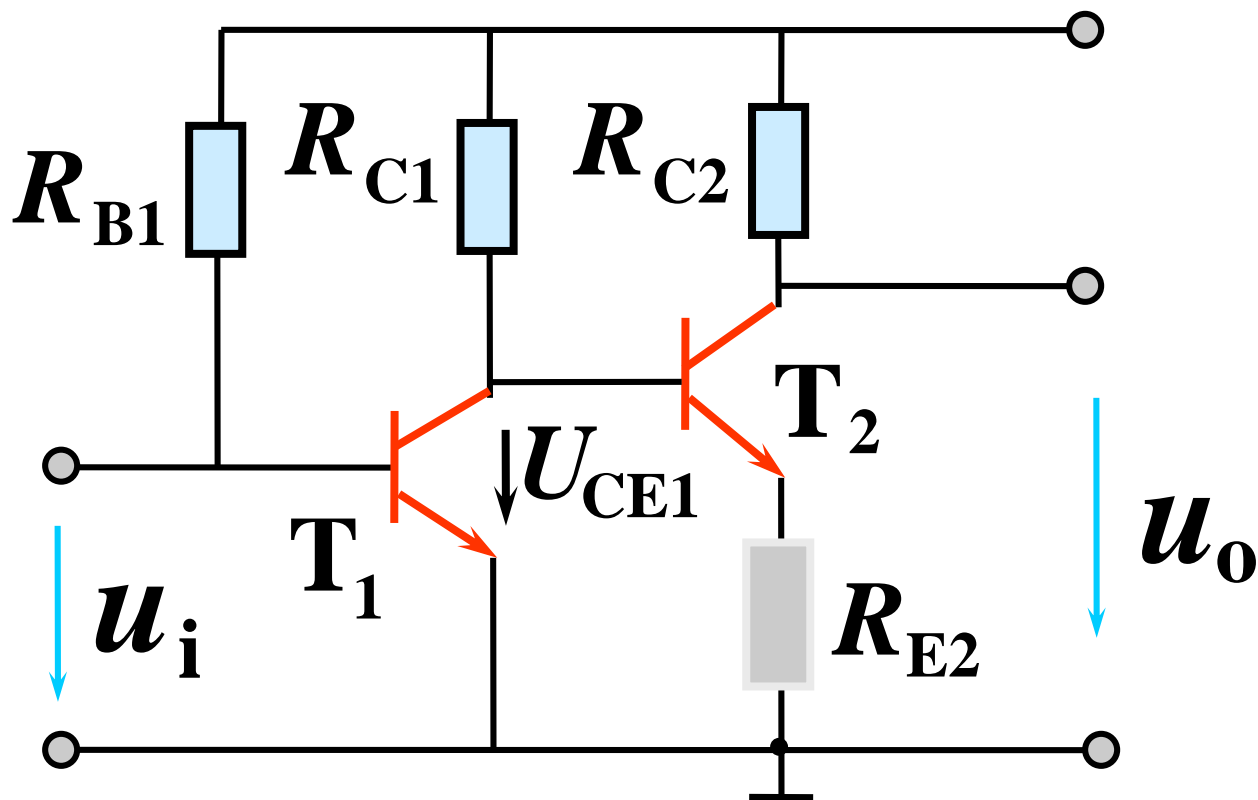


加入电阻 R_{E2} 来提升第一级集电极电位
但会使第二级增益下降

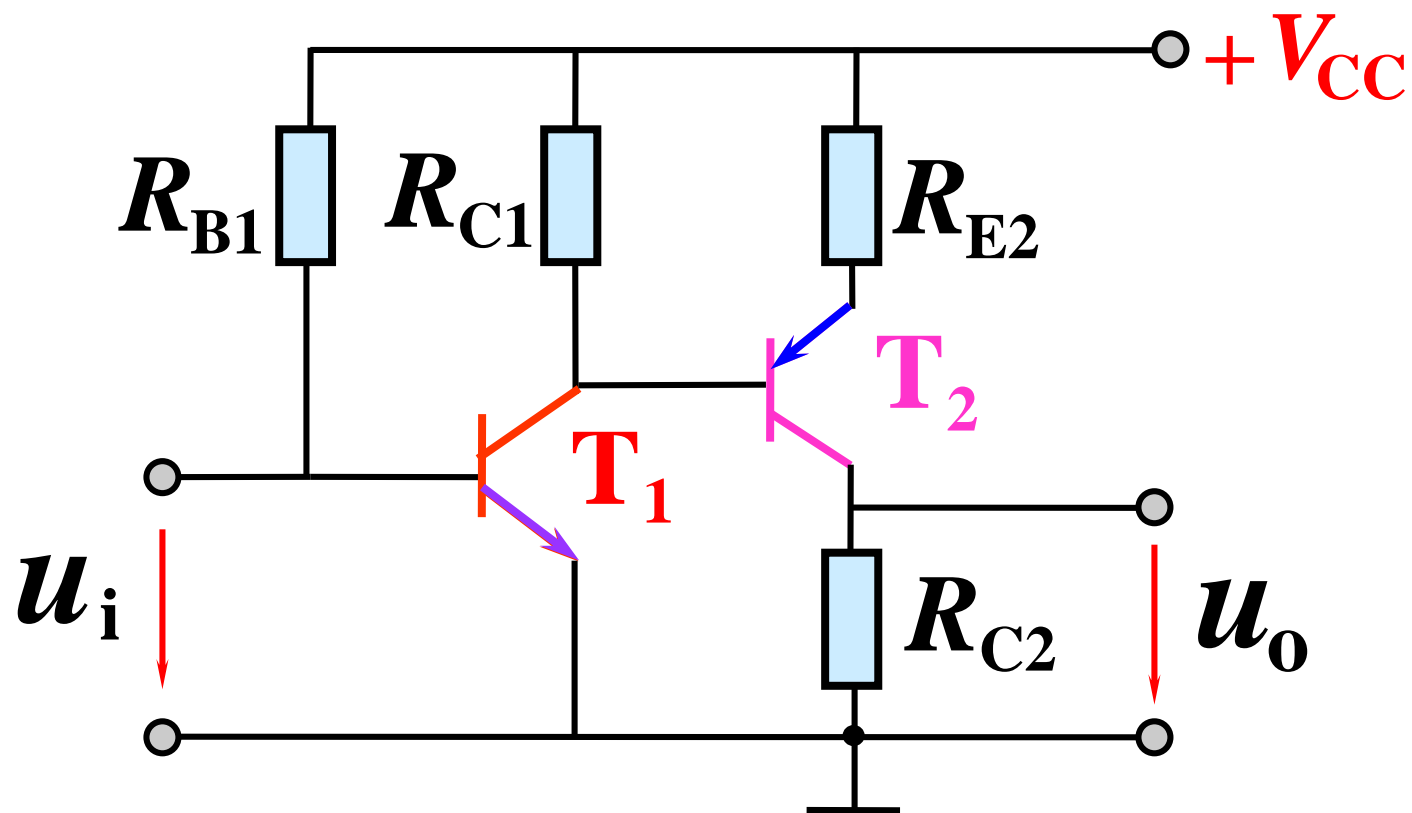


在 T_2 的发射极加入稳压管
 静态时，稳压管反向击穿，稳压
 动态时，具有很小的动态电阻

2) 当用同种管子构成时，级数不能太多



由于集电极电位逐级升高，使后级的静态工作点不合适



利用**NPN**型管和**PNP**型管进行电平配置

直流时，可以解决工作点问题

交流时，**NPN**和**PNP**完全相同

3) 零点漂移（工作点漂移）

输入信号为零时，存在缓慢变化的输出信号的现象称为**零点漂移**

晶体管参数随温度的变化是产生零点漂移的主要原因

零点漂移也称为温度漂移（温漂）

对直接耦合多级放大电路来说，输入级的零点漂移会逐级放大，在输出端造成严重的影响。特别时当温度变化较大，放大电路级数多时，造成的影响尤为严重。当零点漂移的大小足以和输出的有用信号相比拟，就无法正确地将两者加以区分。

抑制零点漂移的措施：

- ❑ 采用温度补偿法。就是在电路中用热敏元件或二极管（或晶体管的发射结）来与工作管的温度特性互相补偿。
- ❑ 采用直流负反馈稳定静态工作点。
- ❑ 用特性相同的两个管子来提供输出，使它们的零点漂移相互抵消。这就是“差动放大电路”的设计思想。
- ❑ 各级之间采用阻容耦合。

□ 直接耦合优缺点

优点:

- (1) 电路可以放大缓慢变化的信号和直流信号。
- (2) 便于集成。

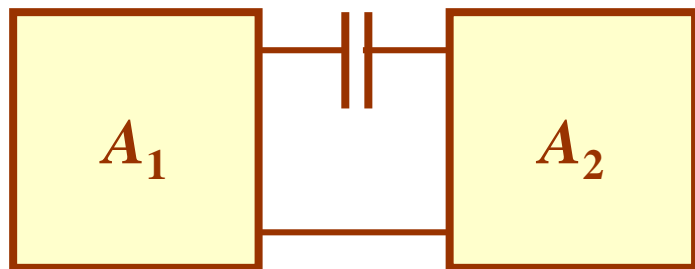
由于电路中只有晶体管和电阻，没有电容器和电感器，因此便于集成。

缺点:

- (1) 各级的静态工作点不独立，相互影响。会给设计、计算和调试带来不便。
- (2) 引入了零点漂移问题。

在集成电路中应用较广泛，实现直流信号和缓慢变化的信号的放大

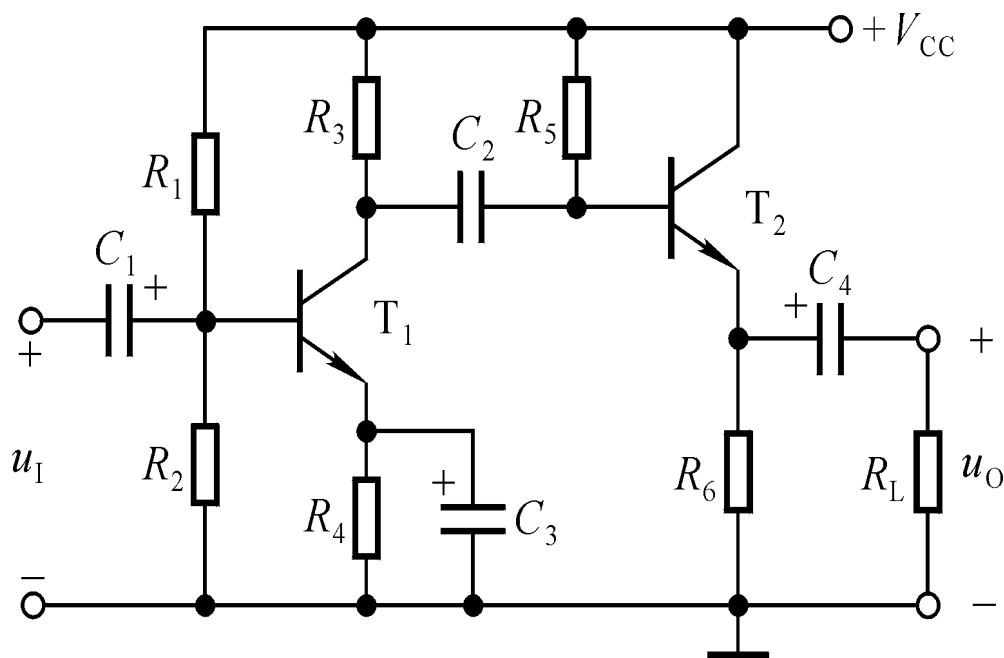
2、阻容耦合



利用电容将前后级进行连接

耦合电容

隔直流通交流



两级阻容耦合放大电路

阻容耦合优缺点

优点：

(1) 各级的直流工作点相互独立。

各级可以分别按单级处理。

(2) 在传输过程中，交流信号损失少。

只要耦合电容选得较大，则变化的信号可以由前级几乎不衰减地加到后级，实现逐级放大。

(3) 电路的温漂小。

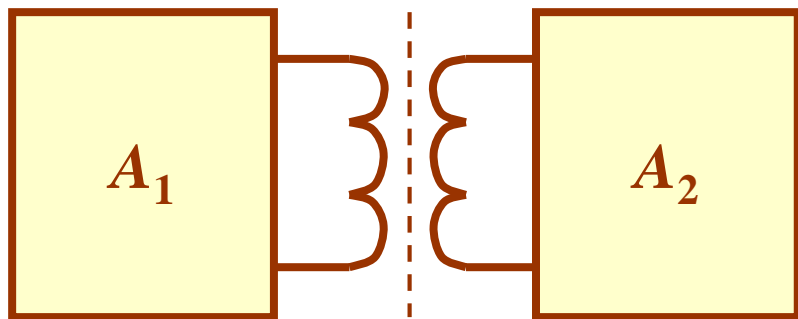
缺点：

(1) 不易集成

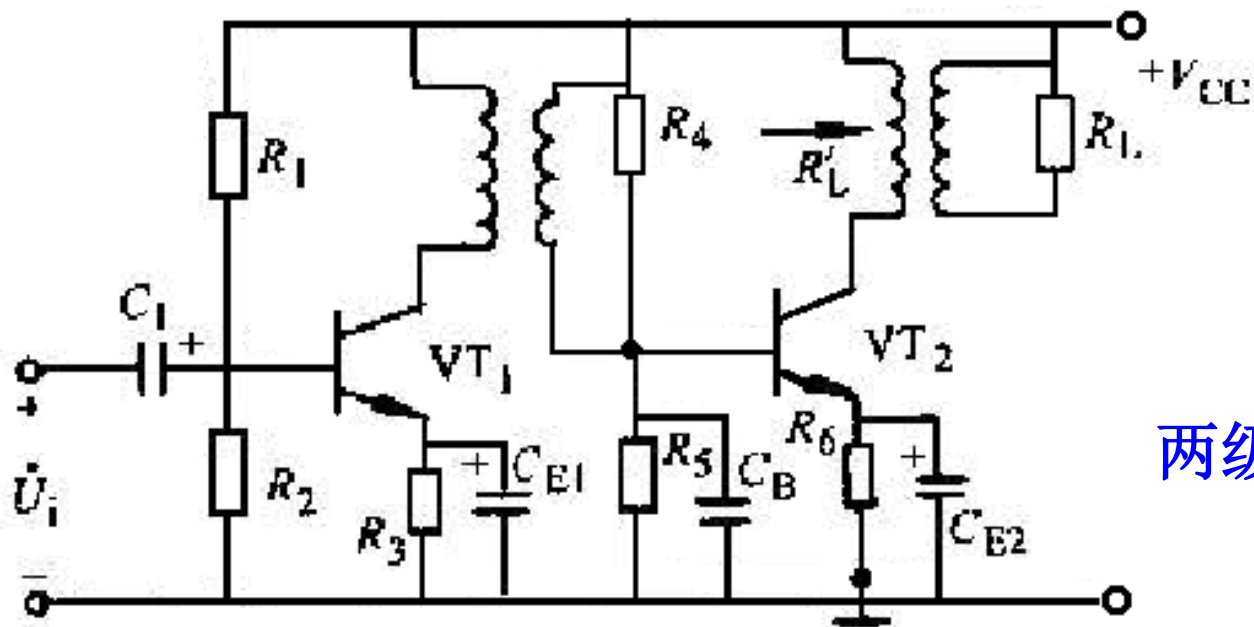
(2) 低频特性差。

多用于分立电路，实现交流信号的放大

3、变压器耦合

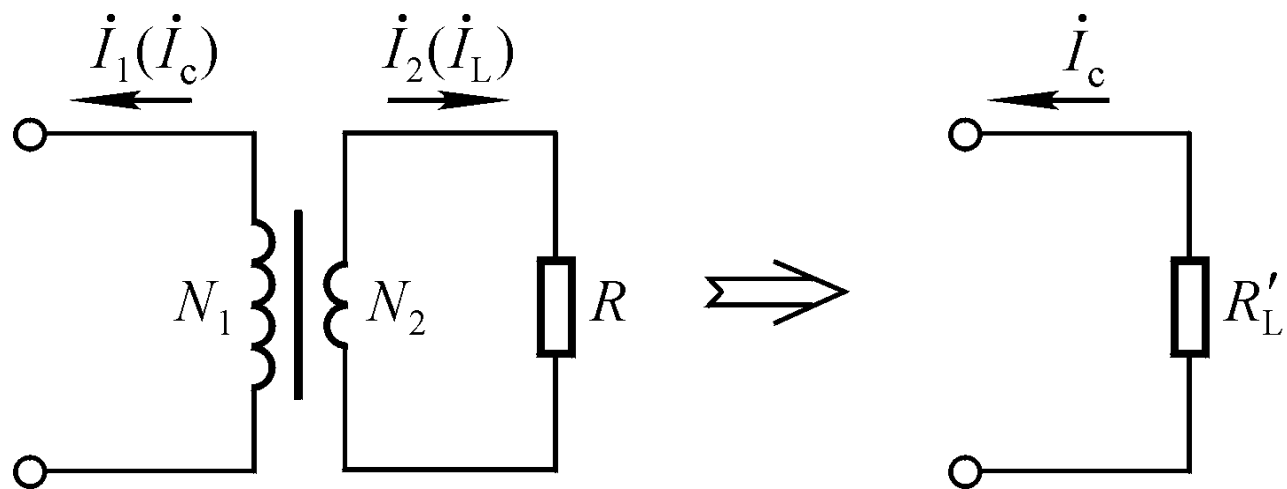


前后级通过变压器连接



两级变压器耦合放大电路

利用变压器耦合方式实现阻抗变换



$$\frac{U_1}{U_2} = n, \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{n} \quad R'_L = \frac{U_1}{I_1} = \frac{nU_2}{\frac{I_2}{n}} = n^2 \frac{U_2}{I_2} = n^2 R_L$$

实现阻抗匹配，提高电压增益

变压器耦合优缺点

优点:

- (1) 各级的直流工作点相互独立。
各级可以分别按单级处理。
- (2) 在传输信号过程中, 实现阻抗变换。
- (3) 电路的温漂小。

缺点:

- (1) 体积大, 不能集成
- (2) 低频特性差。

多用于分立的选频放大器、功率放大器电路

二、多级放大电路的分析

1、静态分析

变压器耦合方式

阻容耦合方式



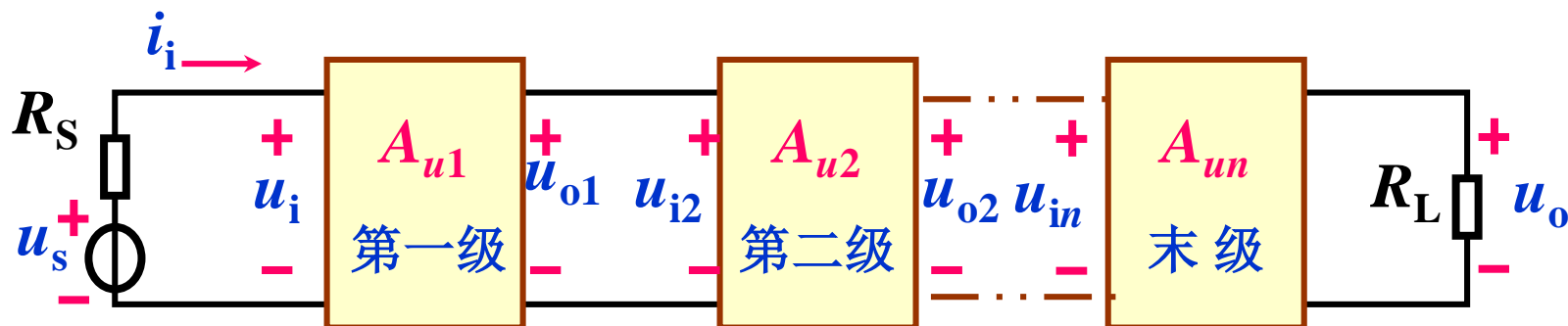
对每级进行独立分析，
同基本放大电路分析

直接耦合方式

根据电路的约束条件和管子的 I_B 、 I_C 和 I_E 的相互关系，列出方程组求解。

2、动态分析 (A , R_i , R_o)

(1) 放大倍数的计算



$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_{o1}}{u_i} \frac{u_{o2}}{u_{i2}} \frac{u_{o3}}{u_{i3}} \cdots \frac{u_o}{u_{in}} = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdots A_{un}$$

$$\dot{A}_u = \prod_{i=1}^n \dot{A}_{uj}$$

考虑级与级之间的相互影响，计算各级电压放大倍数时，应把后级的输入电阻作为前级的负载处理!!!

(2) 输入、输出电阻的计算

多级放大电路的输入电阻为第一级放大电路的输入电阻。

$$R_i = R_{i1}$$

把后续各级放大电路作为第一级的负载

当第一级为CE或CB组态时，则 R_i 与后续各级形成的负载无关

当第一级为CC组态时，则 R_i 与后续各级形成的负载有关

多级放大电路的输出电阻为最后一级放大电路的输出电阻。

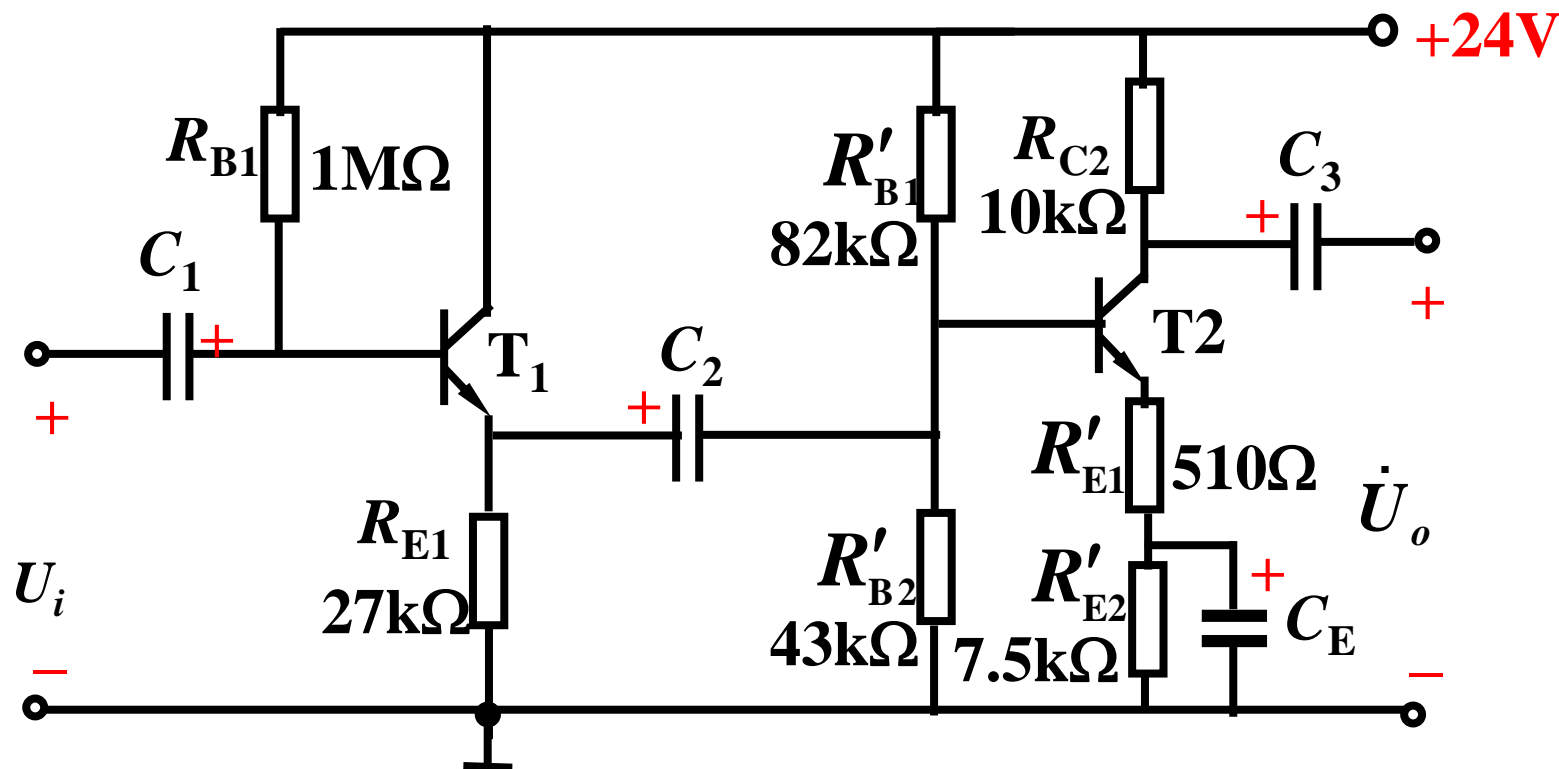
$$R_o = R_{on}$$

把前面各级放大电路作为最后一级的信号源

当最后一级为CE或CB组态时，则 R_o 与前面各级无关

当最后一级为CC组态时，则 R_o 与前面各级有关

例：如图所示的两级电压放大电路，已知 $\beta_1 = \beta_2 = 50$

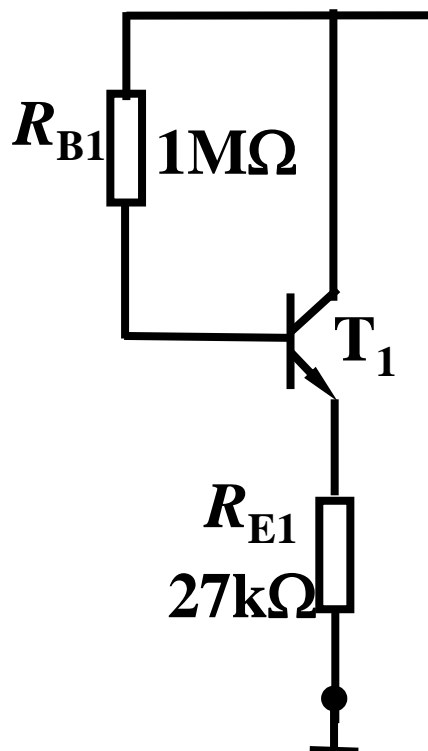


- (1) 求各级电压的放大倍数及总电压放大倍数。
- (2) 求放大电路的输入电阻和输出电阻

解:

1) 静态分析

电容耦合，因此可以各级独立分析



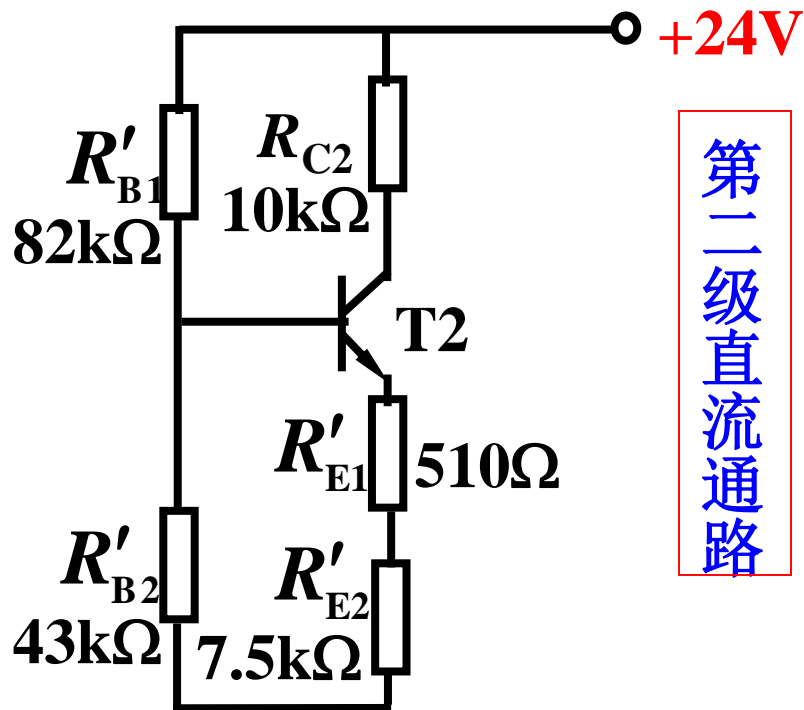
+24V

第一级直流通路

$$U_{BEQ1} = 0.7V$$

$$I_{BQ1} = \frac{24 - U_{BEQ1}}{R_{B1} + (1 + \beta_1)R_{E1}}$$

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



+24V

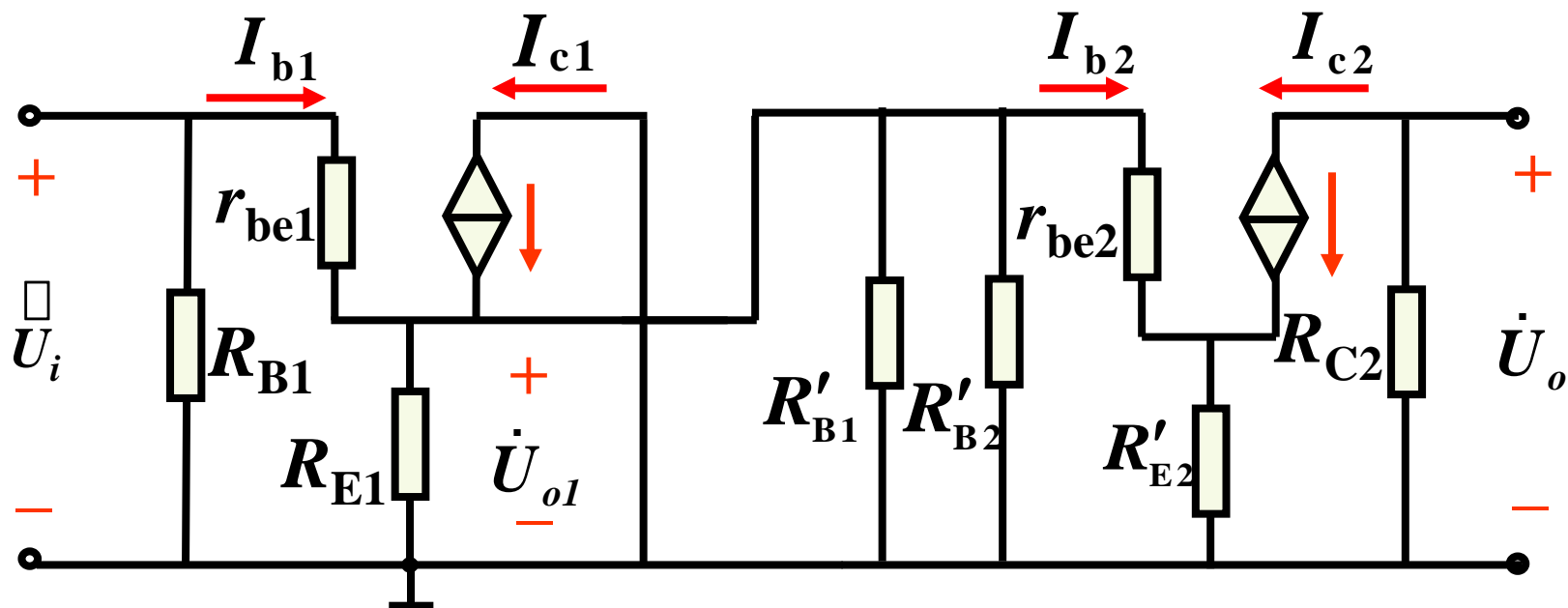
第二级直流通路

$$I_{BQ2} = \frac{V_{BB} - U_{BE2(on)}}{R_B + (1 + \beta_2)(R'_{E1} + R'_{E2})}$$

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

$$R_B = R'_{B1} // R'_{B2} \quad V_{BB} = \frac{R'_{B2}}{R'_{B1} + R'_{B2}} V_{CC}$$

2) 动态分析



交流等效电路

第一级CC组态放大电路

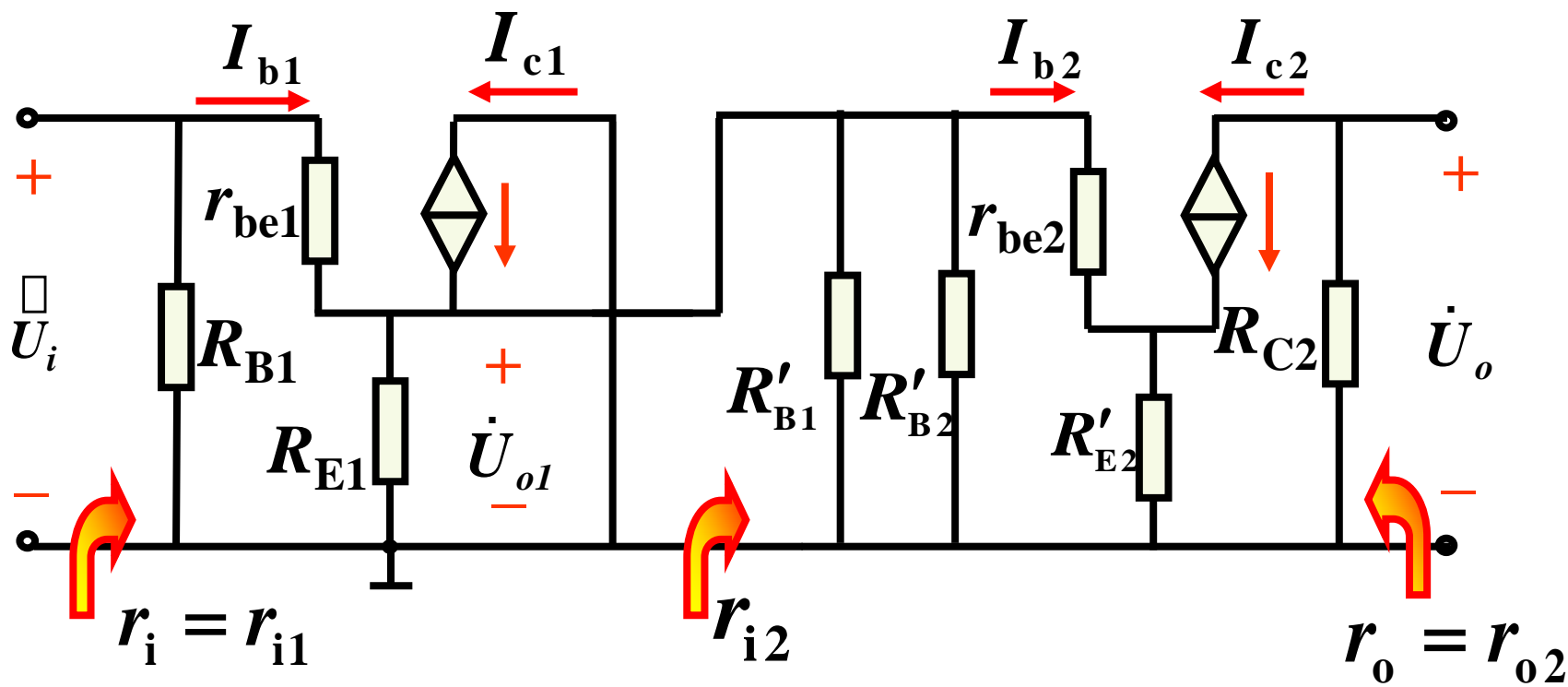
第二级CE组态放大电路

$$A_{u1} = \frac{(1 + \beta_1) R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1) R'_{L1}}$$

$$A_{u2} = - \beta_2 \frac{R_{C2}}{r_{be2} + (1 + \beta_2) R'_{E2}}$$

总电压放大倍数 $A_u = A_{u1} \times A_{u2}$

计算输入输出电阻



$$r_i = r_{i1} = R_{B1} // [r_{be1} + (1 + \beta_1) R'_{L1}]$$

$$R'_{L1} = R_{E1} // r_{i2}$$

$$r_o = r_{o2} = R_{C2}$$

$$r_{i2} = R'_{B1} // R'_{B2} // [r_{be2} + (1 + \beta_2) R'_{E2}]$$

3.2 集成运放组成和特点

集成电路：在半导体制造工艺的基础上，将整个电路中的元器件制作在一块硅基片上，构成特定功能的电子电路。其体积小，而性能却很好。

集成电路按其功能分，有**模拟集成电路**和**数字集成电路**。模拟集成电路的种类繁多，其中**集成运算放大器**（简称**集成运放**）是应用极为广泛的一种。

特点:

1. 电路结构与元件参数具有对称性

电路中各元件在同一基片上，又是通过相同工艺过程制造的，容易制成特性相同的管子。通常同一块基片上相邻的元件具有同相偏差，它们的比值误差较小，匹配性好，对称性也好，因此集成电路中大量采用比值电路和对称电路。

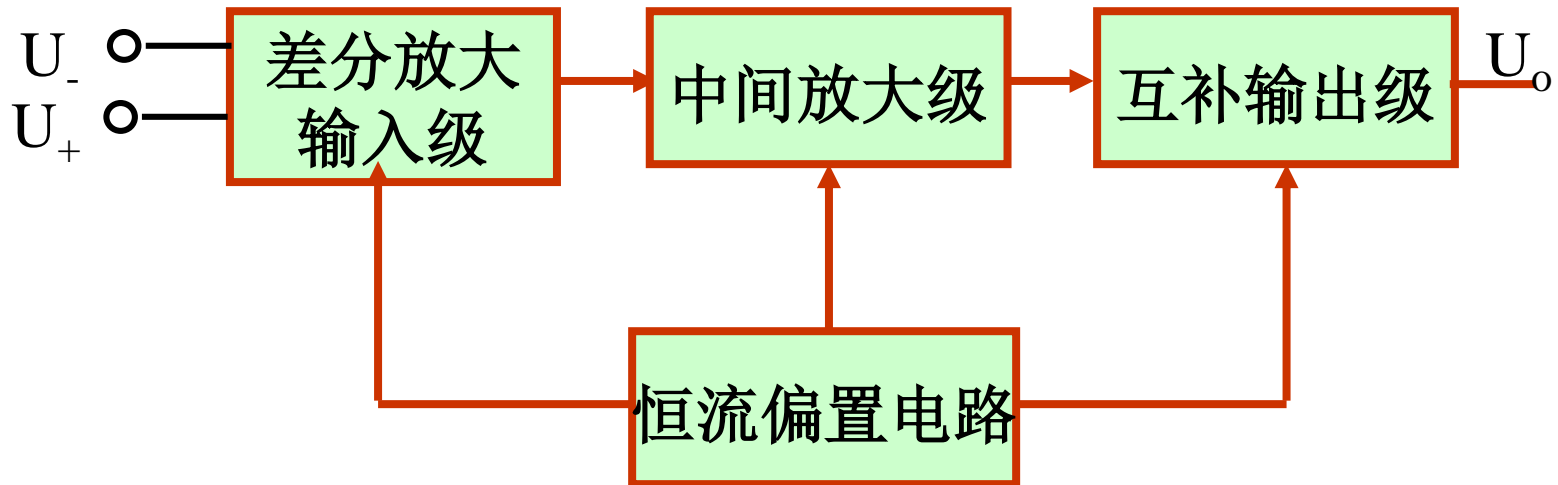
2. 三极管是集成化元器件中最容易制造的、最基本的元件，二极管大多由三极管的发射结构成。

3. 用有源器件代替无源器件。

(1) 电阻元件由半导体的体电阻构成，阻值越大，占用面积越大，其范围几十 Ω - 20k Ω ；高阻值的电阻多用三极管等有源元件代替或外接。(2) 电容元件一般由PN结的结电容或MOS管电容来制作，一般的容量小于200PF。不易制造大电容和电感元件，故集成电路中常采用直接耦合方式。

一、集成运放组成

集成运算放大器是用集成电路工艺制成的具有高电压增益、高输入电阻和低输出电阻的多级直接耦合放大电路。可以实现直流和低频信号的放大。



1) 输入级

一般由BJT或MOS等的差分放大电路组成，对输入级的要求：

- a) 具有较理想的输入性能 (R_i 大, K_{CMR} 大)，失调和温漂要小
- b) 提供一定的增益

2) 中间级

一般由CE或CE的组合电路构成，采用有源负载，是运放增益的主要提供者。

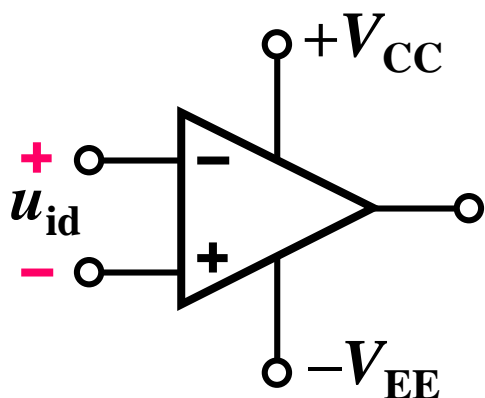
3) 输出级

一般由互补型推挽工作的射极跟随器组成。要求

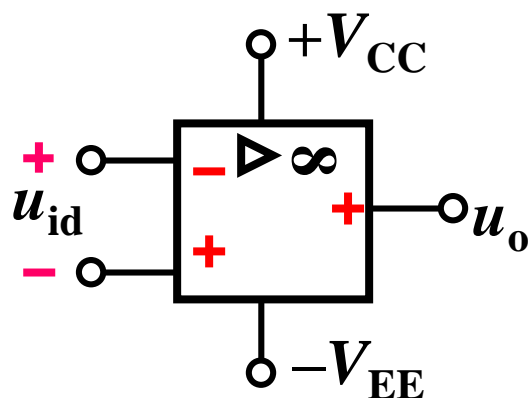
- a) 提供一定数值的电压、电流和功率
- b) 要有较强的带负载能力

4) 偏置电路

采用恒流源偏置电路，设置静态工作点。



一般表示符号



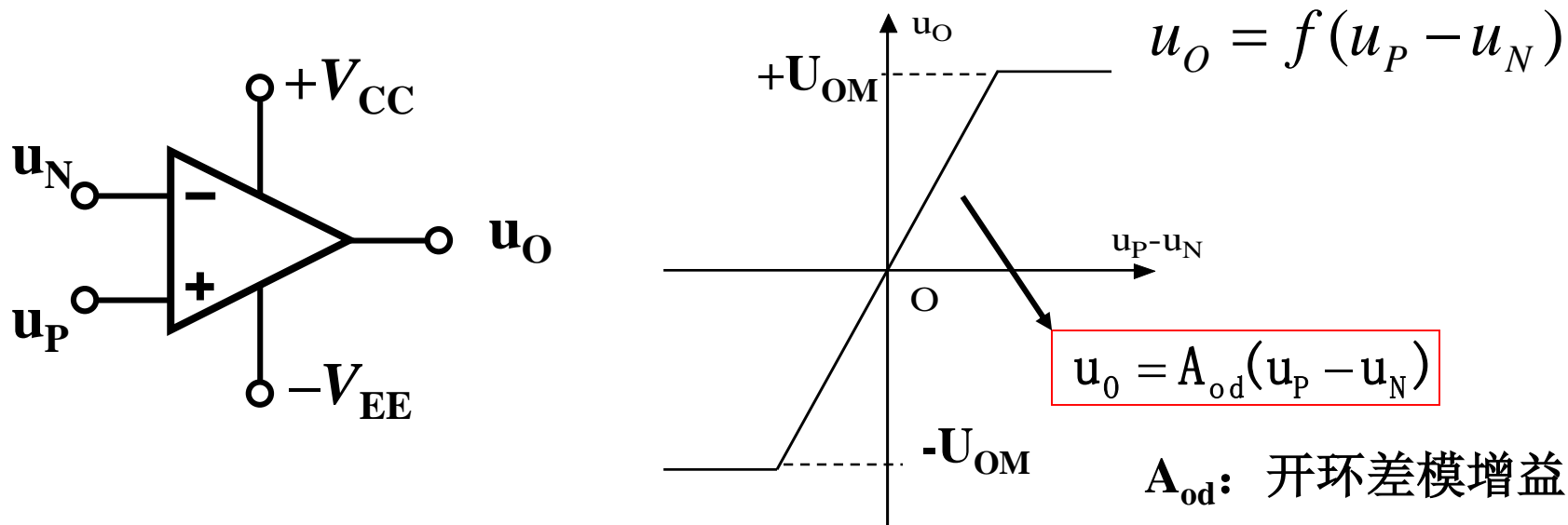
标准符号

差分输入级有两个输入 U_+ 、 U_- ，当信号从 U_- 输入，输出 U_o 与 U_- 极性相反，称 U_- 为反相输入端（N端）；当信号从 U_+ 输入，输出 U_o 与 U_+ 极性相同，称 U_+ 为同相输入端（P端）。

集成运放的特点：

- 电压增益高
- 输入电阻大
- 输出电阻小

二、电压传输特性



线性区（放大区）：输入电压较小时，实现信号的放大

非线性区（限幅区、饱和区）：

输入电压较大时，输出 $\pm U_{OM}$ （饱和电压）

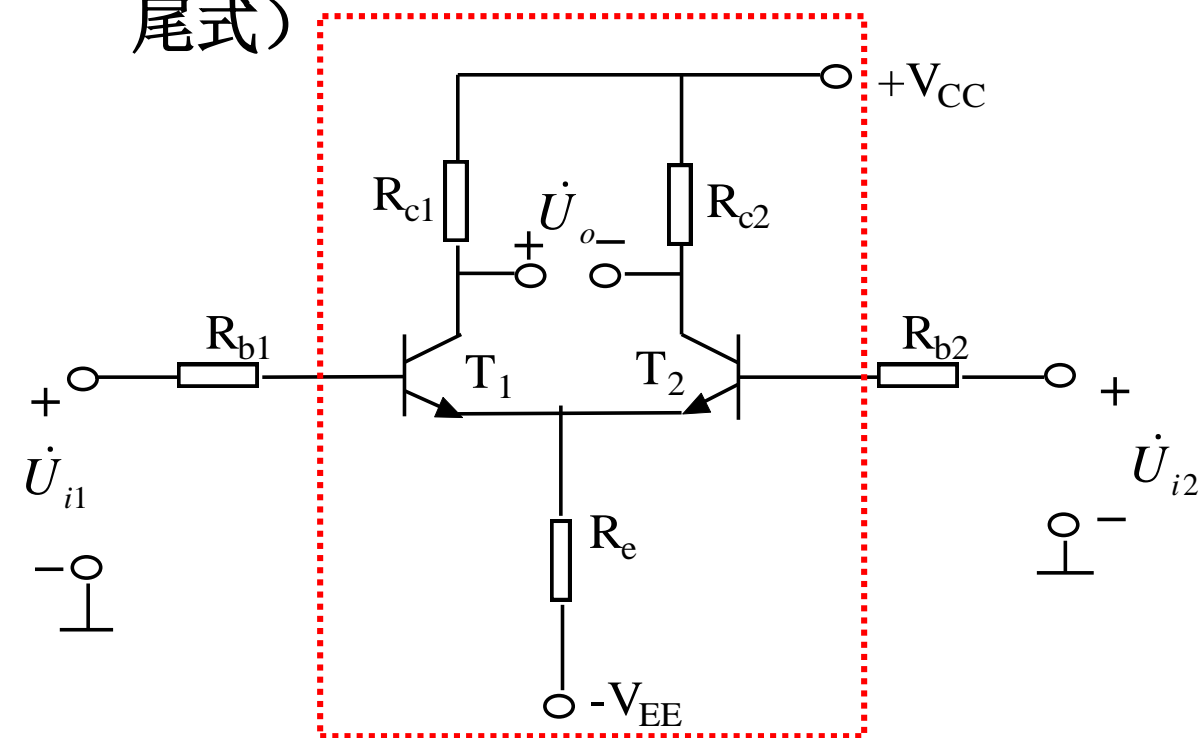
3.3 集成运放中的单元电路

- ❑ 差分放大电路
- ❑ 电流源电路
- ❑ 中间级放大电路
- ❑ 直接耦合互补输出电路

一、差分放大电路

1、电路结构

特点：两个完全对称的共射放大电路（带发射极电阻）组合而成，属于直接耦合放大电路，采用正负双电源供电。（长尾式）



T_1 、 T_2 特性相同

$R_{c1}=R_{c2}$

$R_{b1}=R_{b2}$

两个输入端 { 单端输入
双端输入

两个输出端 { 单端输出
双端输出

通常情况下， R_b 为信号源内阻

2、性能特性

a) 对直流具有零输入、零输出的特性（直流特性）

$$u_{I1} = u_{I2} = 0$$

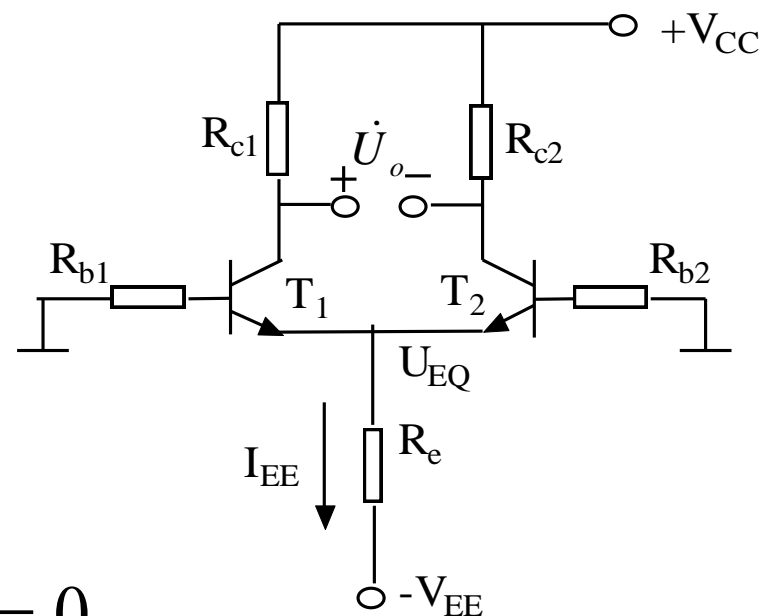
电路对称，管子性能一致，有

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx \frac{1}{2} I_{EE}$$

$$U_{CQ1} = U_{CQ2}$$

直流输出： $u_o = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0$

工作点：
$$I_{EE} = \frac{U_{EQ} + V_{EE}}{R_e} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R_e}$$



改变 R_e 可调整
静态工作点

直流特性反映了电路结构的对称性和元件参数是否完全相同

b) 对差模信号有较强的放大能力（差模特性）

差模信号：一对大小相同、极性相反的信号

$$u_{Id1} = -u_{Id2}$$

加入差模信号

➤ T_1 管放大

$$u_{i1} \uparrow \rightarrow i_{b1} \uparrow \rightarrow i_{c1} \uparrow \rightarrow u_{c1} \downarrow$$

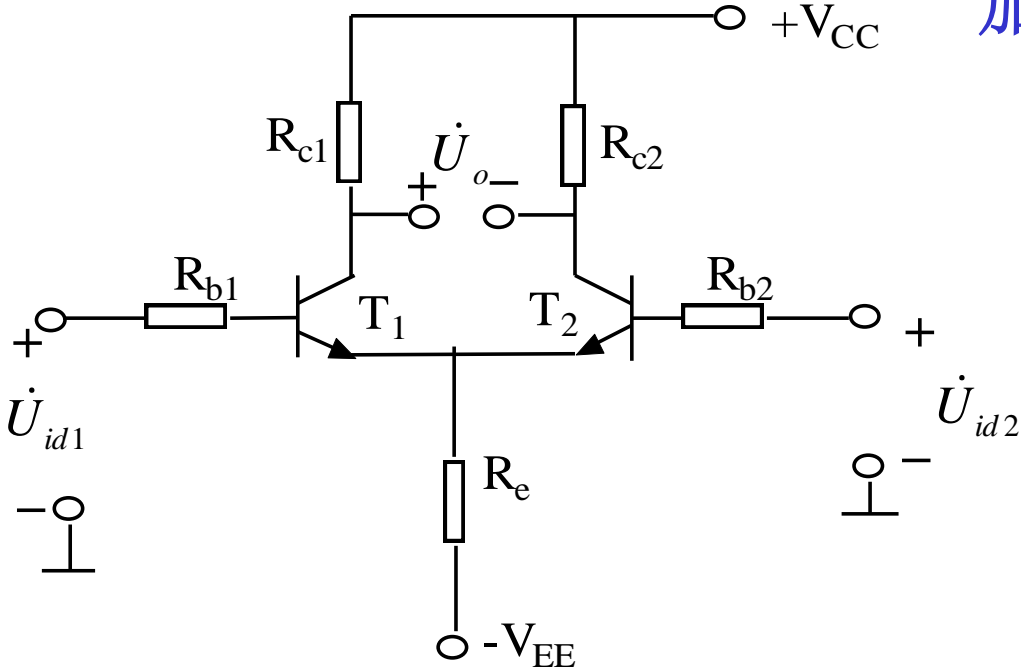
$$\dot{U}_{od1} = -A_u \dot{U}_{id1}$$

➤ T_2 管放大

$$u_{i2} \downarrow \rightarrow i_{b2} \downarrow \rightarrow i_{c2} \downarrow \rightarrow u_{c2} \uparrow$$

$$\dot{U}_{od2} = -A_u \dot{U}_{id2} = A_u \dot{U}_{id1}$$

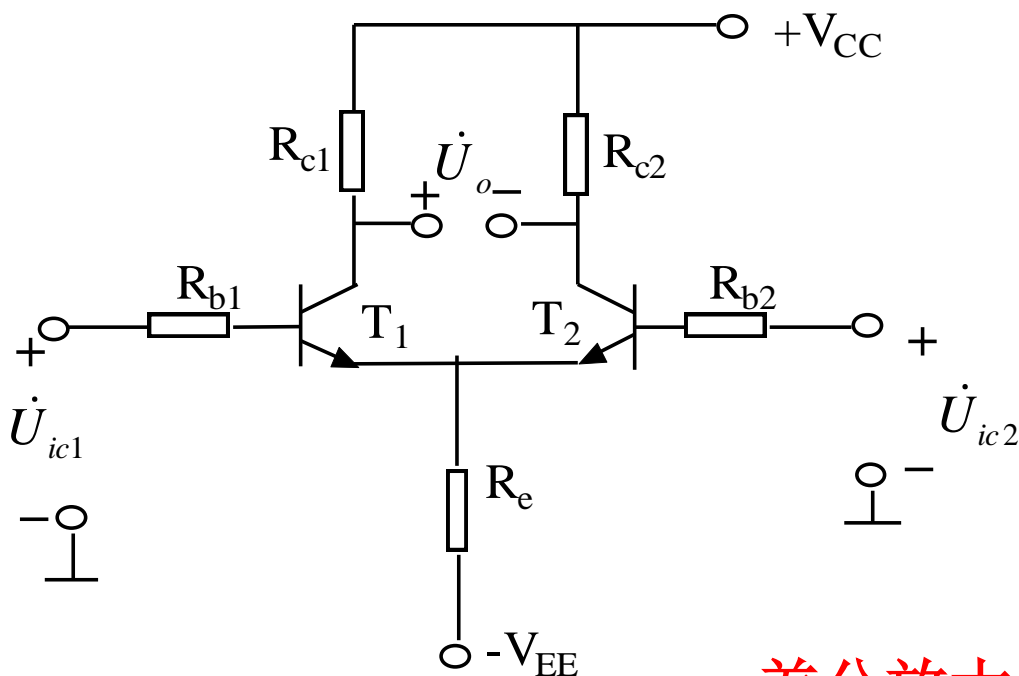
$$\dot{U}_o = \dot{U}_{od1} - \dot{U}_{od2} = -2A_u \dot{U}_{id1}$$



c) 对共模信号有较强的抑制作用（共模特性）

共模信号：一对大小相同、极性相同的信号

$$u_{Ic1} = u_{Ic2}$$



由于 $\dot{U}_{Ic1} = \dot{U}_{Ic2}$

所以在两个晶体管的集电极产生的信号也相同

因此，有

$$\dot{U}_o = 0$$

差分放大电路是很好的低温漂电路

主要作为多级放大电路的输入级使用，来有效消除温漂现象。

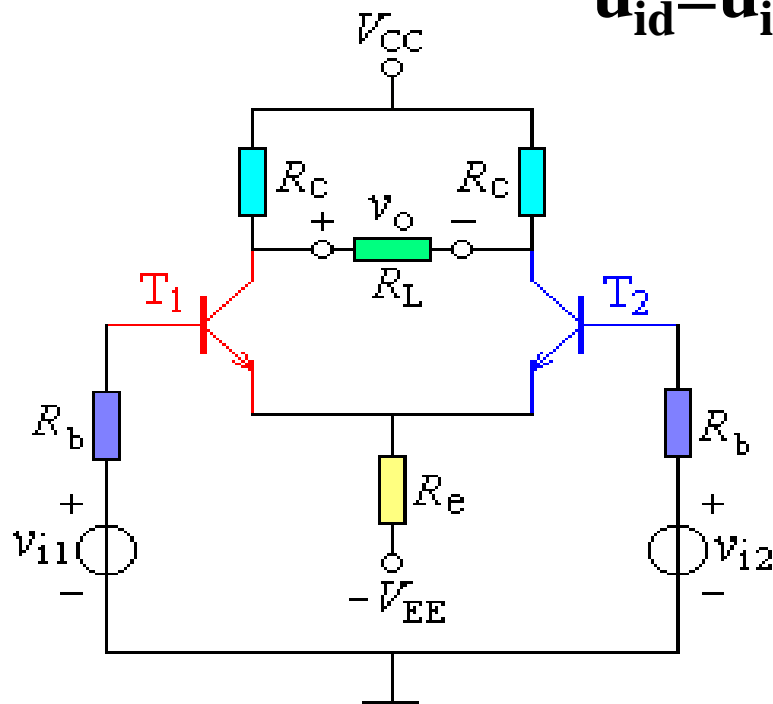
3、交流性能分析

a) 输入差模信号时的交流性能

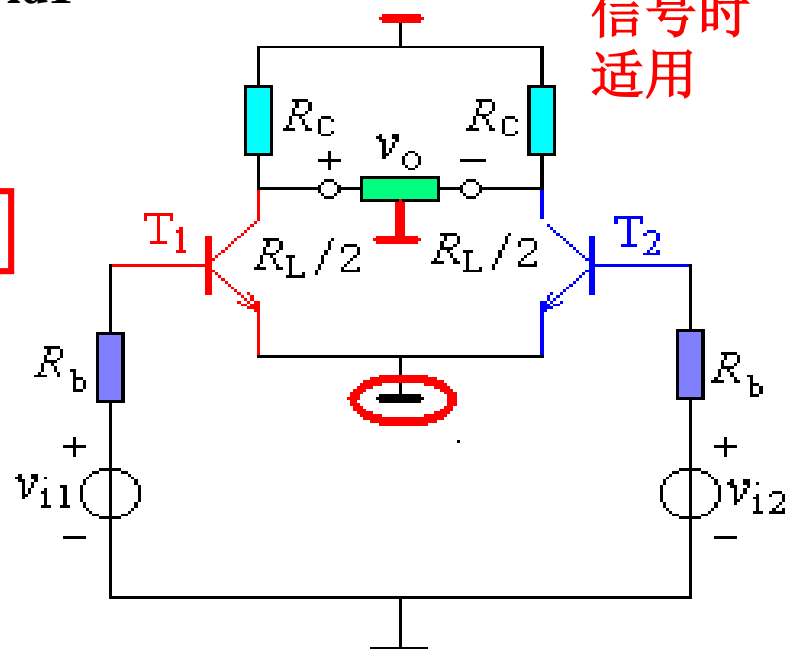
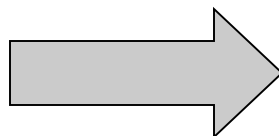
输入一对差模信号 $v_{i1}=u_{id1}$, $v_{i2}=u_{id2}$ $u_{id1} = -u_{id2}$

则差分放大电路两个输入端之间的电压为

$$u_{id}=u_{id1}-u_{id2}=2u_{id1}$$

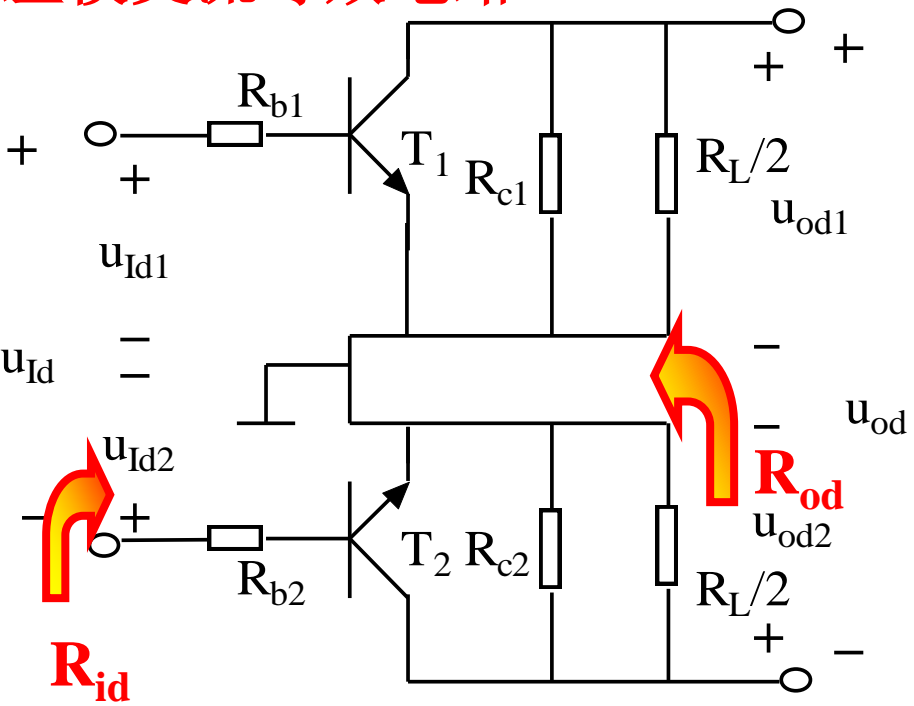


交流通路



静态分析同前面，因为 R_L 相当于开路

差模交流等效电路



i) 差模输入电阻 R_{id}

$$R_{id} = 2 (R_b + r_{be1}) = 2 (R_b + r_{be2})$$

ii) 差模输出电阻 R_{od}

$$R_{od} = 2R_c$$

iii) 差模电压增益 A_{ud}

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{Id}} = \frac{u_{od1} - u_{od2}}{2u_{Id1}} = \frac{u_{od1}}{2u_{Id1}} + \frac{u_{od2}}{2u_{Id2}} = - \frac{\beta (R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$$

结论：差模电压放大倍数等于半电路电压放大倍数，因此是以牺牲放大倍数来换取低温漂效果。

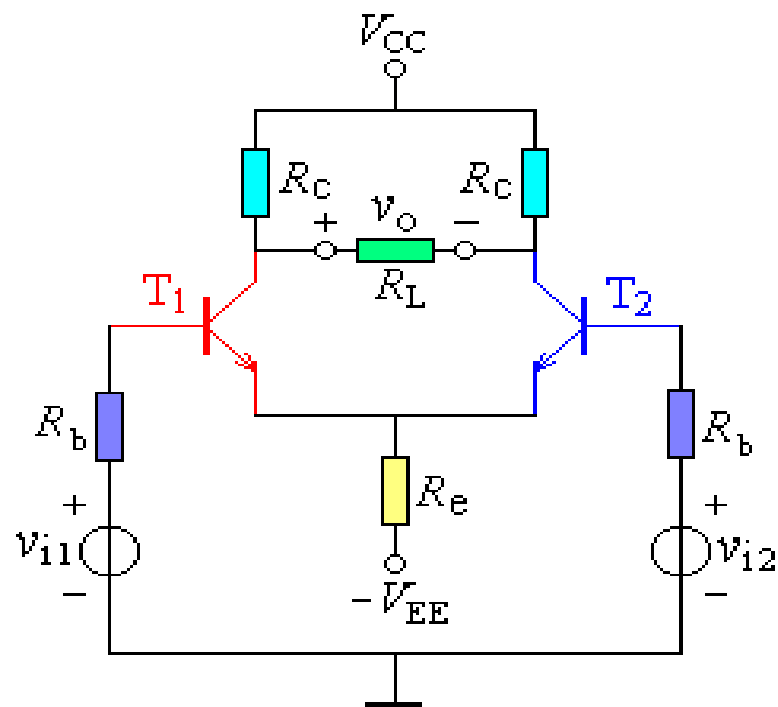
b) 输入共模信号时的交流性能

输入一对共模信号 $v_{i1}=u_{ic1}$, $v_{i2}=u_{ic2}$

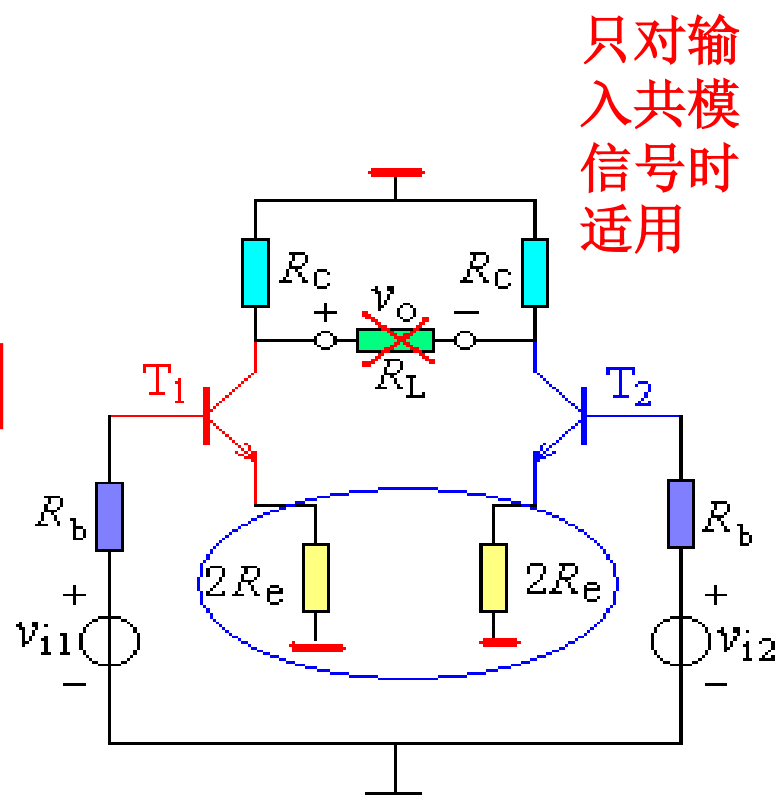
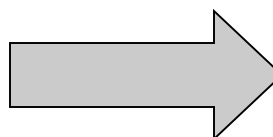
$$u_{ic1} = u_{ic2}$$

则差分放大电路输入电压为

$$u_{ic}=u_{ic1}=u_{ic2}$$

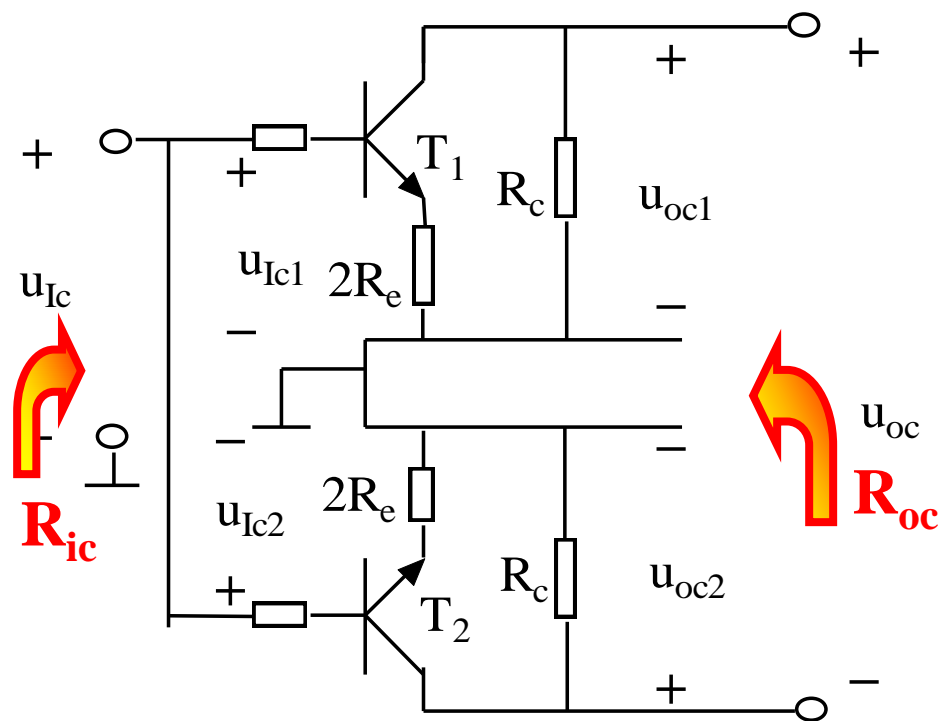


交流通路



静态分析同前面

共模交流等效电路



i) 共模输入电阻 R_{ic}

$$R_{ic} = \frac{1}{2}(R_b + r_{be} + (1 + \beta) \cdot 2R_e)$$

ii) 共模输出电阻 R_{oc}

$$R_{oc} = 2R_c$$

iii) 共模电压增益 A_{uc}

$$A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{Ic}} = \frac{u_{oc1} - u_{oc2}}{u_{Ic}} = \frac{u_{oc1}}{u_{Ic1}} - \frac{u_{oc2}}{u_{Ic2}} = 0$$

结论：在理想情况下，差分放大电路共模电压增益为0，可以很好的抑制共模信号，抵消温漂。

共模抑制比 K_{CMR}

定义：差模电压增益对共模电压增益之比的绝对值，记为 K_{CMR}

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{\text{ud}}}{A_{\text{uc}}} \right| \quad \text{或} \quad K_{\text{CMR}} = 20 \lg \left| \frac{A_{\text{ud}}}{A_{\text{uc}}} \right| (\text{dB})$$

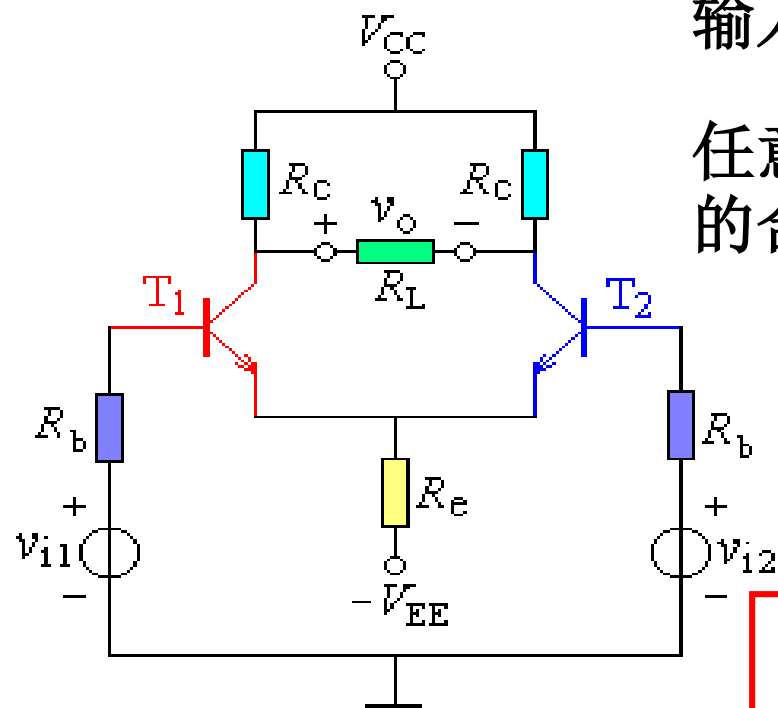
- 共模抑制比反映了差分放大电路对共模信号的抑制能力，以及对差模信号的放大能力。
- 共模抑制比越大，电路性能越好

在理想情况下，差分放大电路的共模抑制比为无穷大。

c) 输入任意信号时的交流性能

输入任意信号 $v_{i1} = u_{I1}$ $v_{i2} = u_{I2}$

任意信号可以分解为差模信号和共模信号的合成



$$\left\{ \begin{aligned} u_{I1} &= \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} + \frac{u_{I1} - u_{I2}}{2} \\ u_{I2} &= \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} + \left(-\frac{u_{I1} - u_{I2}}{2}\right) \end{aligned} \right.$$

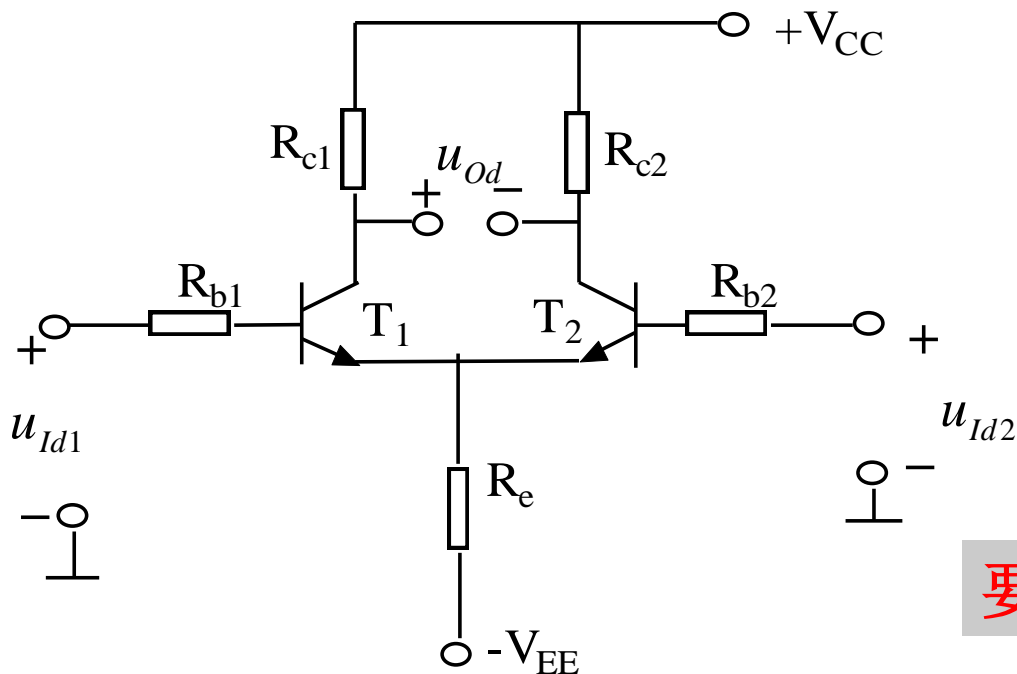
$$\begin{aligned} v_{i1} &= \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} + \frac{u_{I1} - u_{I2}}{2} = u_{ic} + u_{id} \\ v_{i2} &= \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} + \left(-\frac{u_{I1} - u_{I2}}{2}\right) = u_{ic} + (-u_{id}) \end{aligned}$$

根据叠加原理可得

$$u_o = A_{ud} \cdot (u_{I1} - u_{I2})$$

输出只跟输入信号的差值有关，而与输入信号本身无关。

d) 电压传输特性



同相输入端

在参考极性下，输入与输出同相

反相输入端

在参考极性下，输入与输出反相

要注意输入与输出的相位关系

输入端

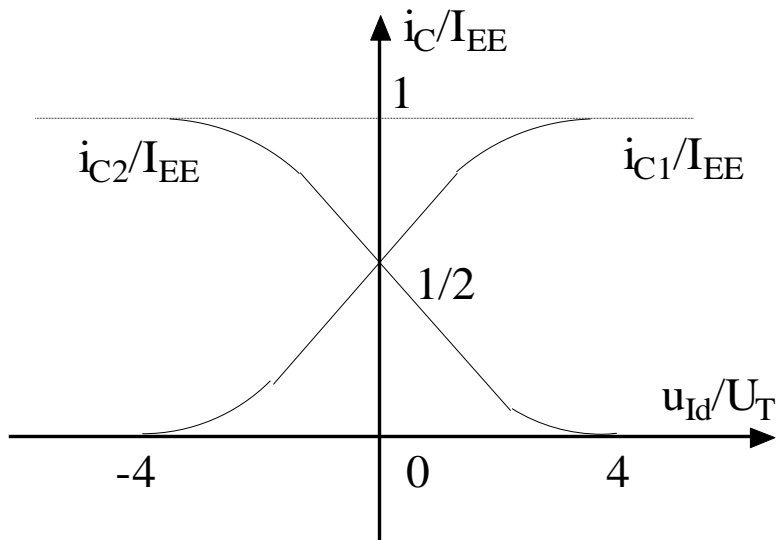
$$u_{Id} = u_{Id1} - u_{Id2}$$

差模传输特性

$$i_{c1} \text{ 或 } i_{c2} = f(u_{Id})$$

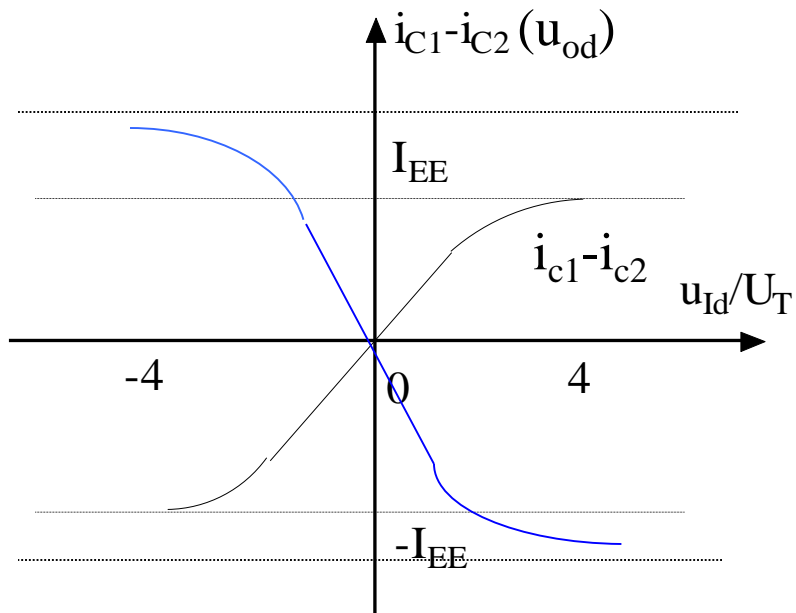
$$i_{c1} - i_{c2} = f(u_{Id})$$

$$u_{Od} = f(u_{Id})$$



$$i_{C1} = \frac{1}{2} I_{EE} + \frac{1}{2} I_{EE} \tanh\left(\frac{u_{Id}}{2U_T}\right)$$

$$i_{C2} = \frac{1}{2} I_{EE} - \frac{1}{2} I_{EE} \tanh\left(\frac{u_{Id}}{2U_T}\right)$$

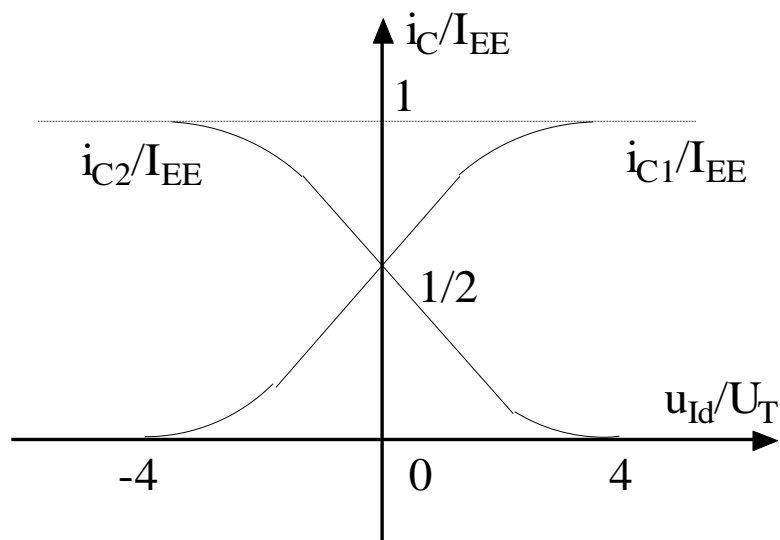


$$i_{C1} - i_{C2} = I_{EE} \tanh\left(\frac{u_{Id}}{2U_T}\right)$$

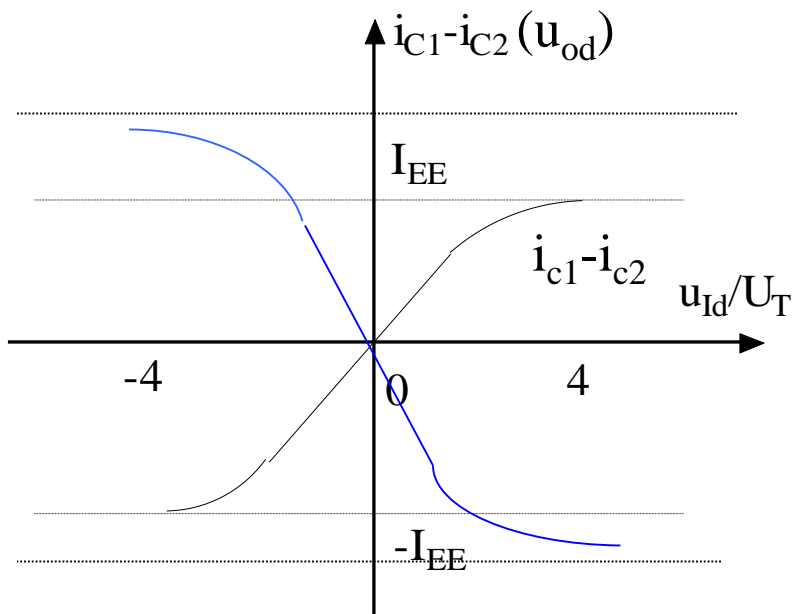
$$u_{0d} = -I_{EE} R_c \tanh\left(\frac{u_{Id}}{2U_T}\right)$$

差模传输特性

差模传输特性



- a) 传输曲线符合双曲正切曲线，两管电流一增一减，之和恒为 I_{EE} 。
- b) 当 $u_{Id}=0$ 时，即静态时 $i_{C1}=i_{C2}=I_{EE}/2$
- c) 当 $|u_{Id}|$ 较小时，曲线呈线性，即 $|u_{Id}/2U_T| \leq 0.5$ ， $|u_{Id}| < 26\text{mV}$ 。
- d) 当 $|u_{Id}/2U_T| > 2$ ，即 $|u_{Id}| > 104\text{mV}$ 时，曲线相当于限幅，一管截止，电流全部流入另一管子。



最大差模输入电压范围

最大共模输入电压范围

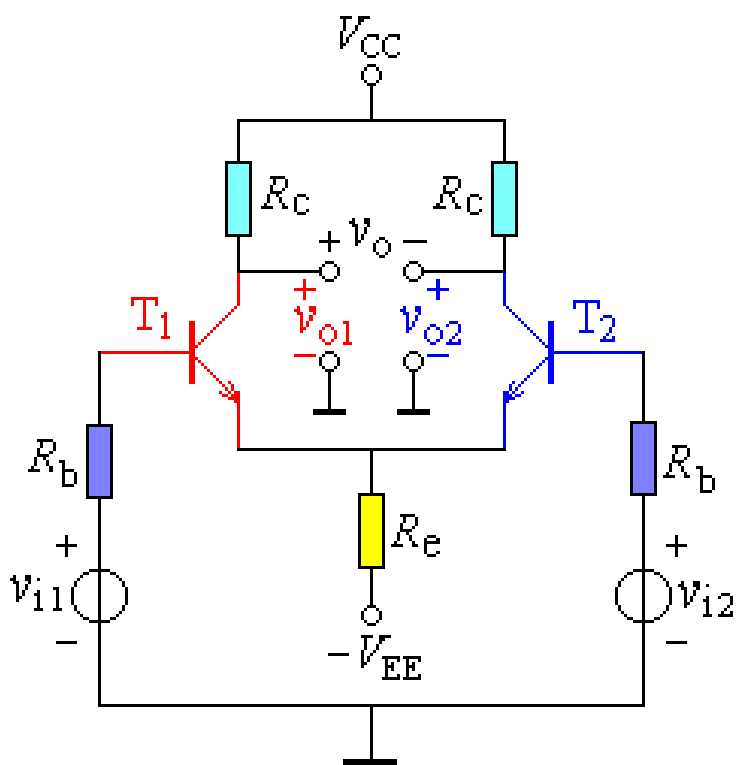
4、差分放大电路的输入输出方式

共有四种输入输出方式：

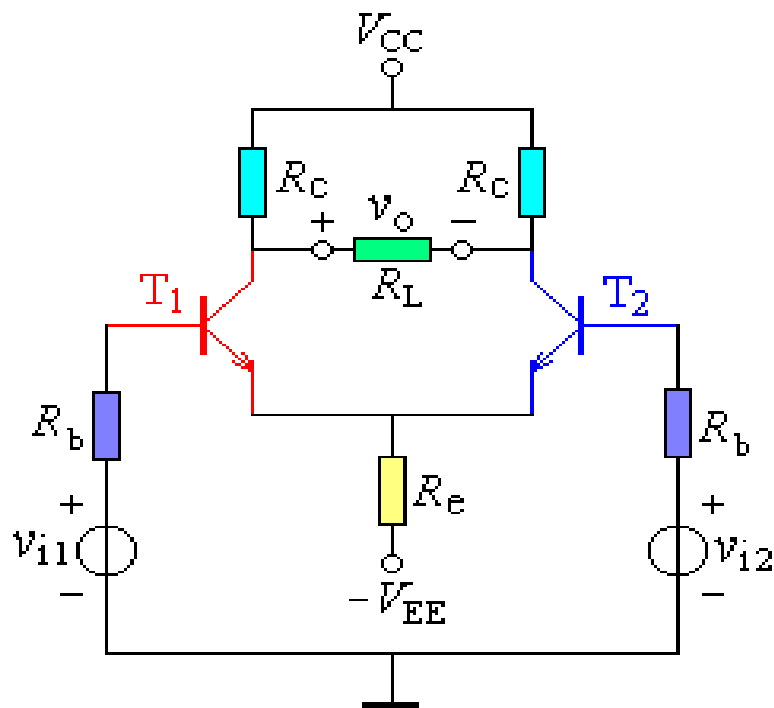
1. 双端输入、双端输出（双入双出）
2. 双端输入、单端输出（双入单出）
3. 单端输入、双端输出（单入双出）
4. 单端输入、单端输出（单入单出）

主要讨论的问题有：

差模电压放大倍数
共模电压放大倍数
输入电阻
输出电阻



a) 双端输入、双端输出



静态:

$$I_{CQ} = \frac{U_{EQ} + V_{EE}}{2R_e} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$$

$$U_{CEQ} \approx V_{cc} - I_{CQ}R_c + U_{BEQ}$$

共模特性

$$R_{ic} = \frac{1}{2} [R_b + r_{be} + (1 + \beta) \cdot 2R_e]$$

$$R_{oc} = 2R_c \quad A_{uc} = 0$$

差模特性

$$R_{id} = 2(R_b + r_{be}) \quad R_{od} = 2R_c$$

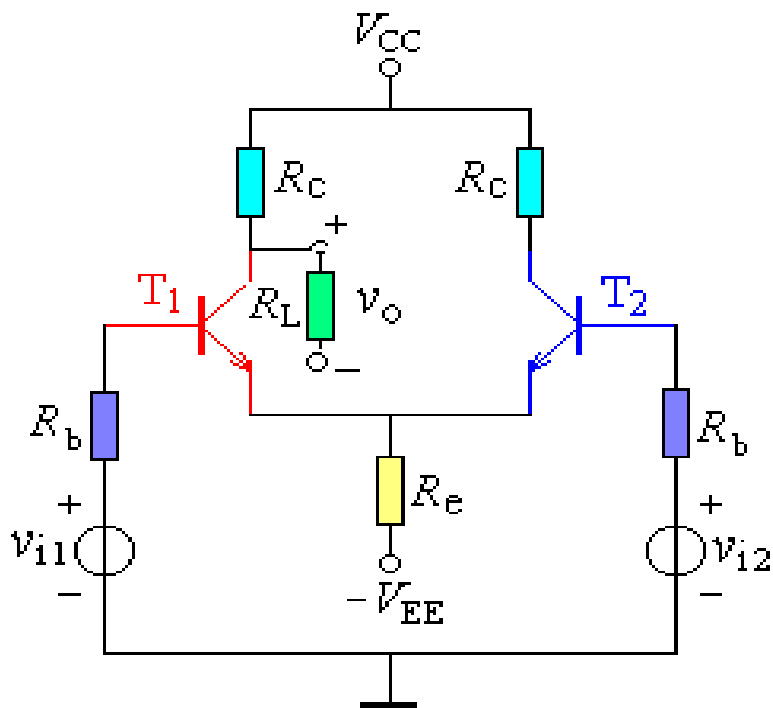
$$A_{ud} = - \frac{\beta (R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$$

$$K_{CMR} = \infty$$



b) 双端输入、单端输出

静态:



$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = \frac{U_{EQ} + V_{EE}}{2R_e} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$$

$$U_{CEQ1} \approx V'_{cc} - I_{CQ} R'_c + U_{BEQ}$$

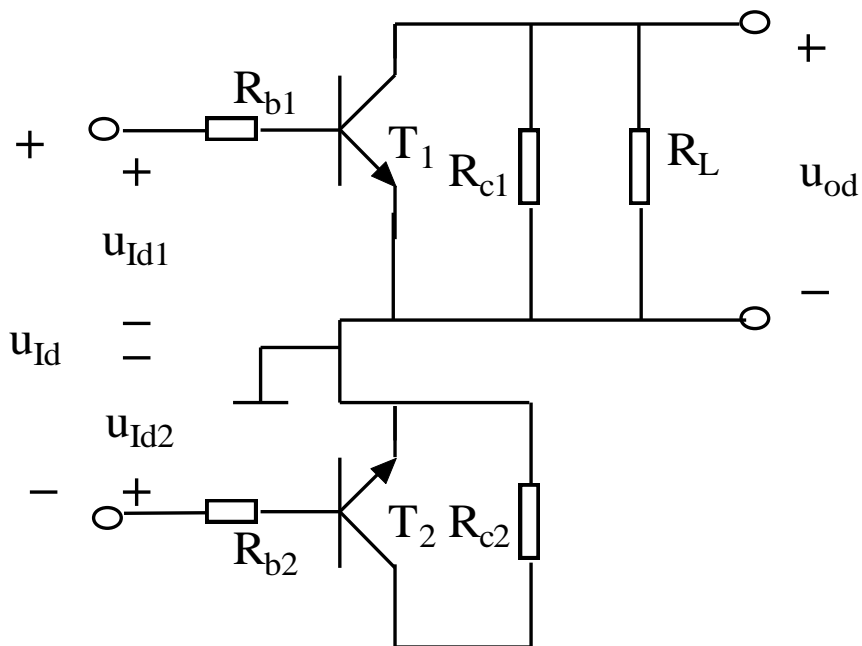
$$U_{CEQ2} \approx V_{cc} - I_{CQ} R_c + U_{BEQ}$$

其中:

$$V'_{cc} = \frac{R_L}{R_L + R_c} V_{CC}$$

$$R'_c = R_c // R_L$$

差模输入

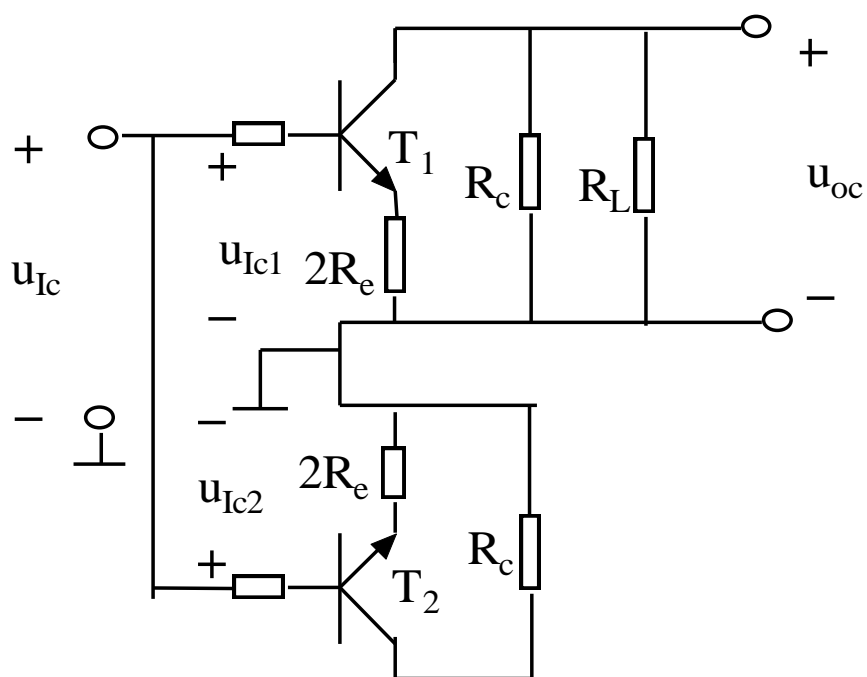


$$R_{id} = 2(R_b + r_{be})$$

$$R_{od} = R_c$$

$$A_{ud} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

共模输入



$$R_{ic} = \frac{1}{2} [R_b + r_{be} + (1 + \beta) \cdot 2R_e]$$

$$R_{oc} = R_c$$

$$A_{uc} = -\frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) \cdot 2R_e}$$

结论（与双端输出比较）：

- 输入电阻保持不变
- 输出电阻为二分之一
- 差模增益为一半
- 共模增益不为0

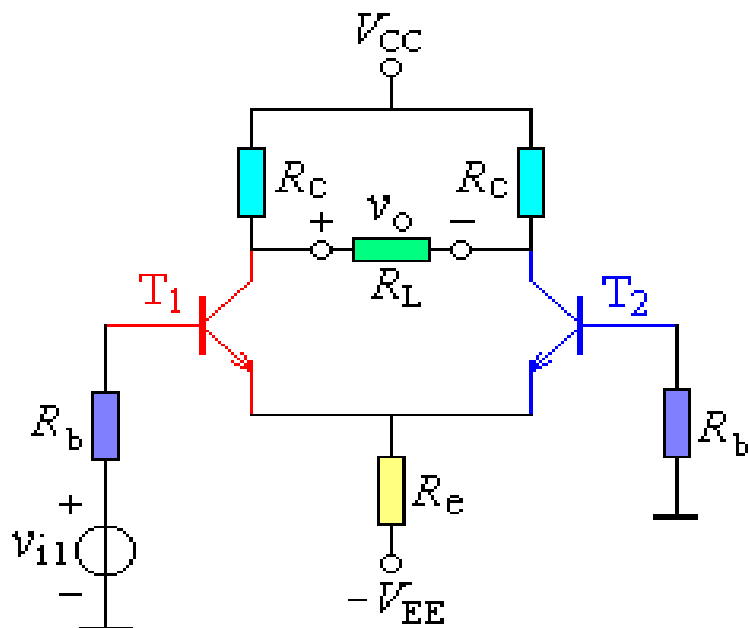
$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{\text{ud}}}{A_{\text{uc}}} \right| = \frac{R_b + r_{\text{be}} + (1 + \beta) 2R_e}{2(R_b + r_{\text{be}})}$$

共模抑制比不为无穷大

$$u_o = A_{\text{ud}} \cdot (u_{\text{I1}} - u_{\text{I2}}) + A_{\text{uc}} \left(\frac{u_{\text{I1}} + u_{\text{I2}}}{2} \right)$$

A_{ud} , A_{uc} 分别为双端输入、单端输出的差模增益和共模增益

c) 单端输入、双端输出



与双端输入、双端输出分析相同

相当于任意信号输入下的双端输入方式：

$$u_{i1}=u_{i1}, \quad u_{i2}=0$$

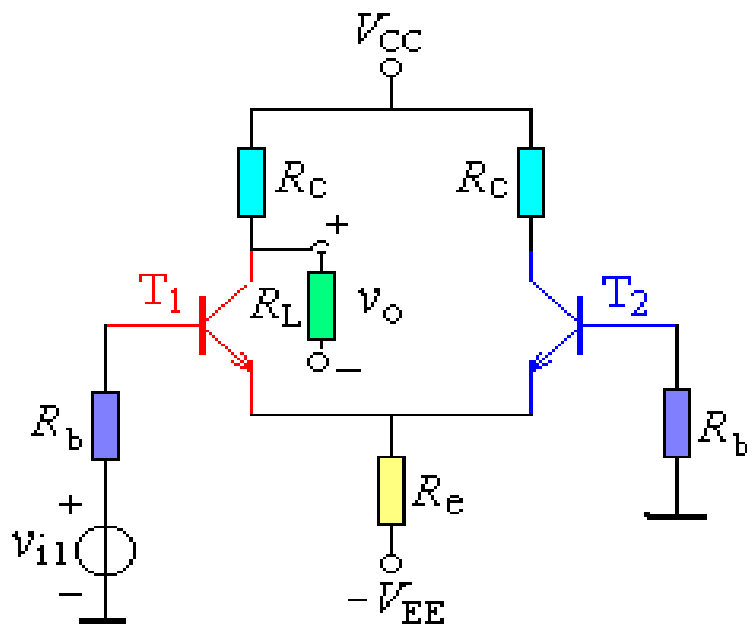
$$u_o = A_{ud} \cdot (u_{I1} - u_{I2}) + A_{uc} \left(\frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} \right)$$

因为 $A_{uc}=0$

$$u_o = A_{ud} \cdot u_{I1}$$

A_{ud} 为双端输入、双端输出的差模增益

d) 单端输入、单端输出



与双端输入、单端输出分析相同

相当于任意信号输入下的双端输入方式：

$$u_{i1}=u_{i1}, \quad u_{i2}=0$$

$$u_o = A_{ud} \cdot u_{I1} + A_{uc} \frac{u_{I1}}{2}$$

A_{ud} , A_{uc} 分别为双端输入、单端输出的差模增益和共模增益

5、采用恒流源偏置的差分放大电路

双端输出时 $A_{uc} = 0$ $K_{CMR} = \infty$

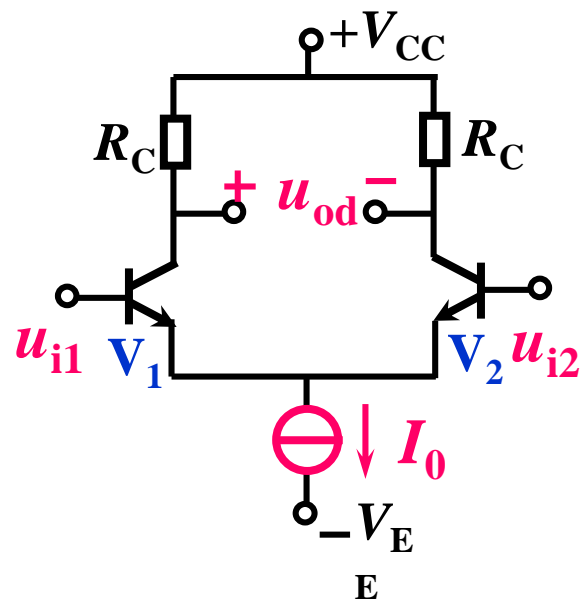
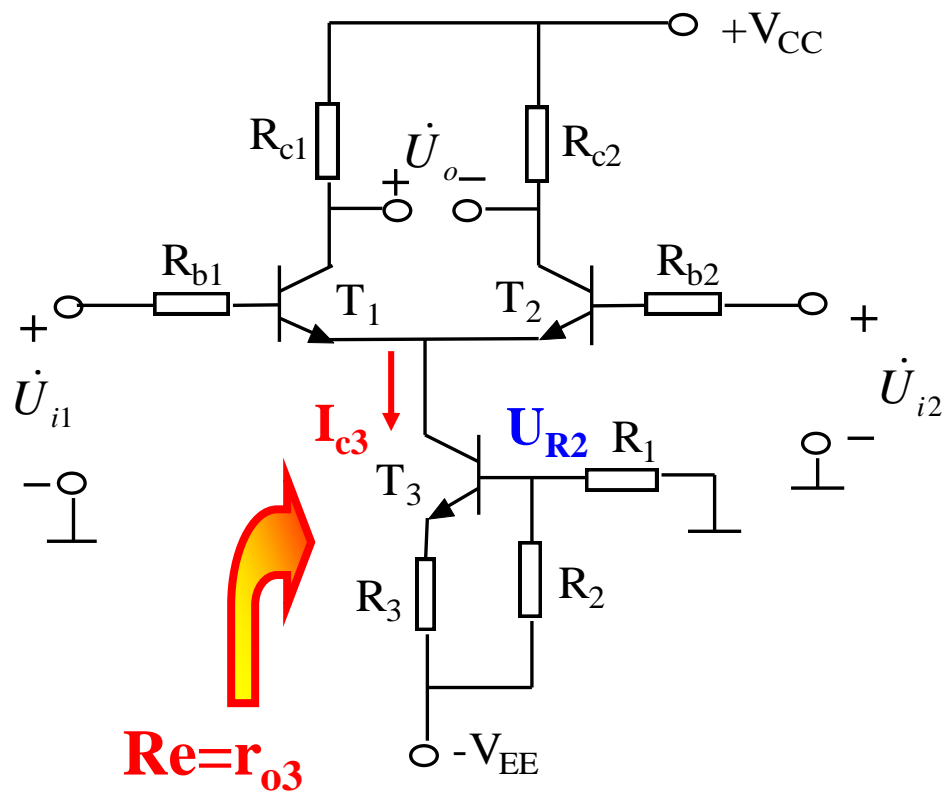
单端输出时 $A_{uc} = -\frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) \cdot 2R_e}$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = \frac{R_b + r_{be} + (1 + \beta) 2R_e}{2(R_b + r_{be})}$$

1、增大 R_e ，可以减小共模增益，从而提高共模抑制比，减少输出信号中的共模分量（ R_e 对共模信号具有负反馈作用）。

2、增大 R_e ，将改变静态工作点，向截止区移动，为了有合适的工作点，要增大 V_{EE} ，这比较困难。

$$I_{CQ} = \frac{U_{EQ} + V_{EE}}{2R_e} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$$



采用恒流源偏置的差分放大电路

静态时:

$$I_{CQ} = \frac{I_{c3}}{2} = \frac{U_{R2} - U_{BE3}}{2R_3}$$

动态时:

$$R_e = r_{o3} = \infty$$

$$K_{CMR} = \infty$$

6、电路不对称时的性能分析

1) 双端输出时的 K_{CMR}

$$u_o = A_{u(d-d)} u_{Id} + A_{u(c-d)} u_{Ic}$$

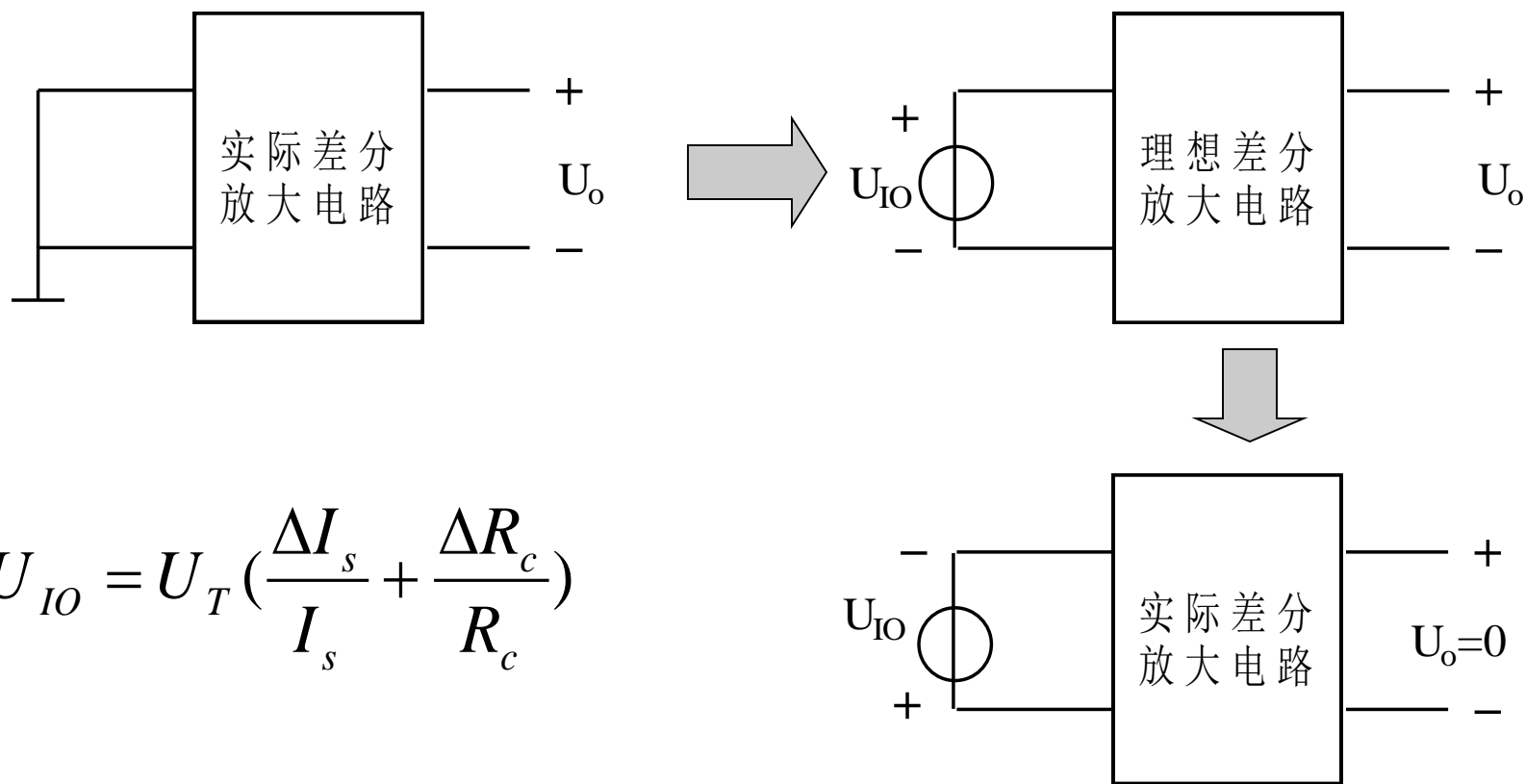
$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{u(d-d)}}{A_{u(c-d)}} \right|$$

利用恒流源偏置差分放大电路可以弥补不对称性。

2) 失调

a) 输入失调电压

当 $u_{i1}=u_{i2}=0$ 时, $U_o \neq 0$, 称为失调。输入失调电压定义为将该失调输出电压 U_o 折算到输入端的差模输入电压, 记为 U_{IO} , 即 $U_{IO}=U_o/A_{ud}$



b) 输入失调电流

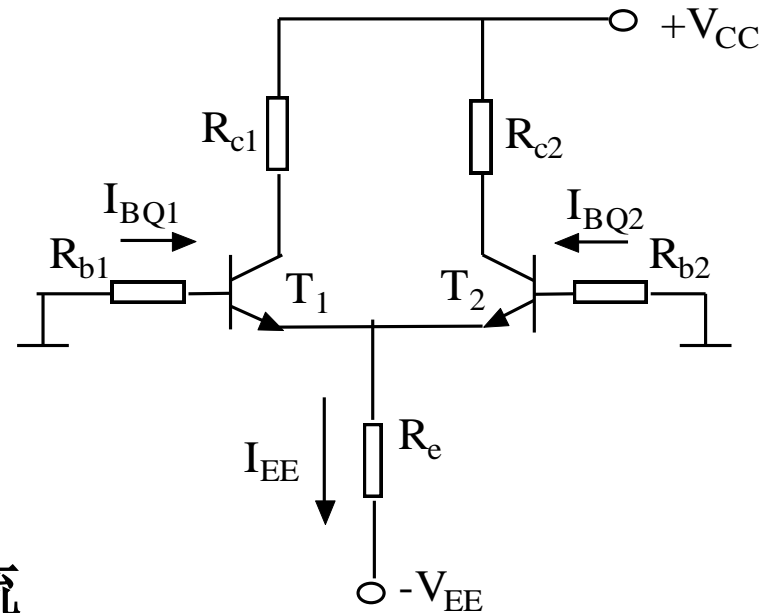
通常将因两管 β 不等而在输入端引入的差值电流称为输入失调电流。

$$I_{IO} = |I_{BQ1} - I_{BQ2}|$$

$$I_{IO} \approx \frac{I_{CQ}}{\beta} \cdot \frac{\Delta\beta}{\beta} = I_B \cdot \left(\frac{\Delta\beta}{\beta}\right)$$

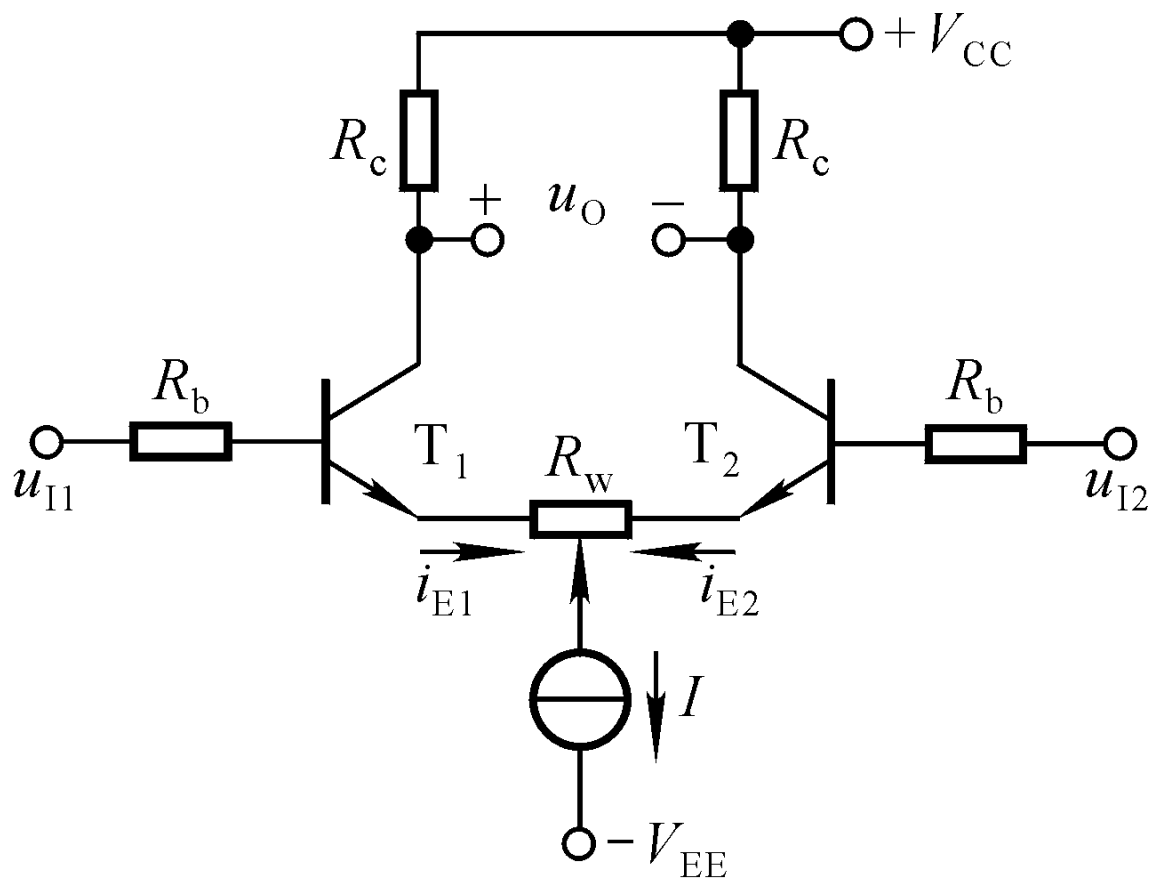
$$I_B = \frac{I_{BQ1} + I_{BQ2}}{2}$$

基极偏置电流



c) 调零电路

通常利用调零电阻来解决不对称引起的失调，加入调零电阻后，差分放大电路的交流性能将发生变化。



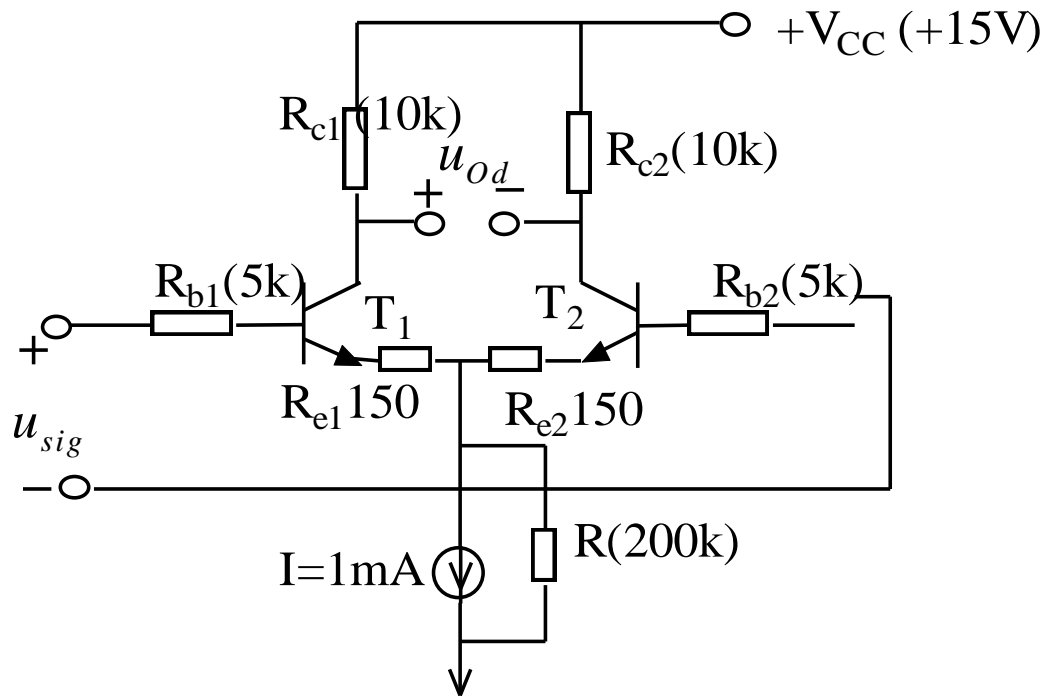
3) U_{IO} 和 I_{IO} 的温漂

外界环境变化引起 U_{IO} 和 I_{IO} 的变化。

$$\frac{\partial U_{IO}}{\partial T} \propto U_{IO}$$

$$\frac{\partial I_{IO}}{\partial T} \propto I_{IO}$$

例



$$\beta=100$$

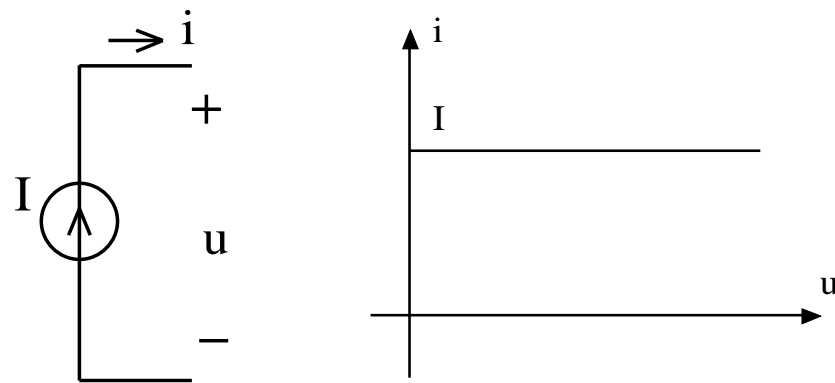
- 1) 差模输入电阻
- 2) 源电压增益
- 3) 求单端输出时的共模电压增益，并求共模抑制比
- 4) 求共模输入电阻

二、电流源电路

电流源：提供恒定电流

- ❑ 为放大电路提供静态电流，稳定静态工作点
- ❑ 作为放大电路的有源负载，增大增益
- ❑ 在集成电路中广泛应用

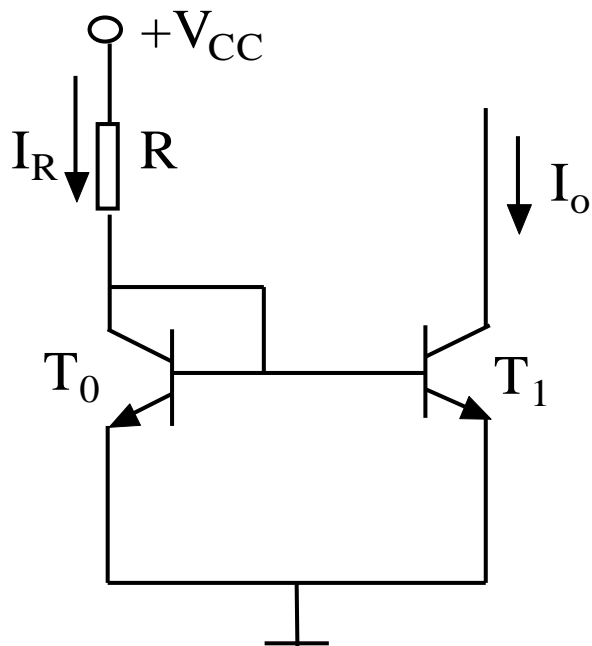
三极管、场效应管均可
作为电流源应用。



当三极管工作在放大区时， I_c 电流几乎与 U_{CE} 电压无关

当场效应管工作在恒流区时， I_d 电流与 U_{ds} 电压无关

1、基本镜像电流源



T_0 、 T_1 性能完全相同

I_R : 参考电流

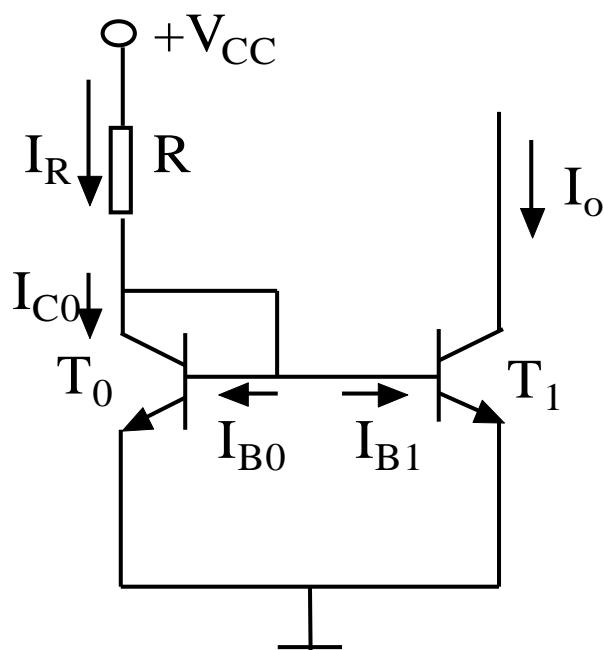
I_o : 恒流源输出

T0: 组成参考电路，确定参考电流，工作在放大模式，

T1: 提供恒流输出，输出端必须加电压，保证工作在放大模式

1) T_1 、 T_2 参数完全相同

基极相连, $U_{BE0}=U_{BE1}$, $\therefore I_{B0}=I_{B1}$



$$I_R = I_{C0} + I_{B0} + I_{B1} = \beta I_{B0} + 2I_{B0} = (\beta + 2) I_{B0}$$

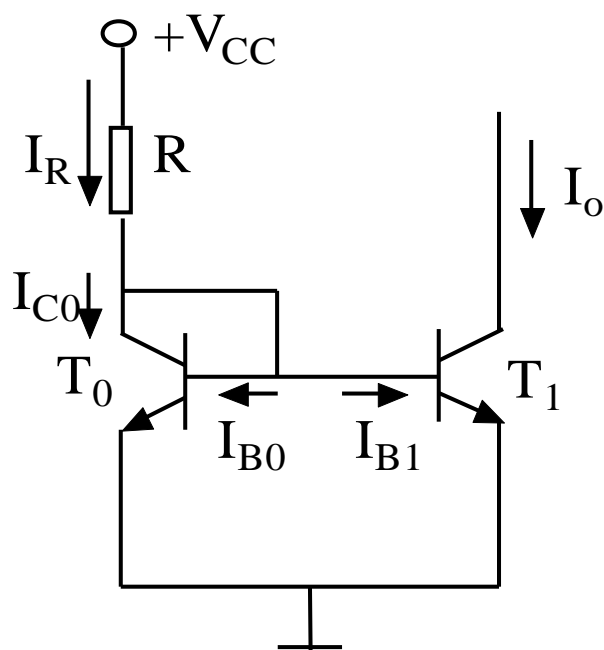
$$I_o = I_{C1} = \beta I_{B1} = \beta \cdot \frac{I_R}{\beta + 2} \approx I_R \quad (\beta \gg 2)$$

$$I_o = I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R}$$

镜像电流源

2) T_1 、 T_2 参数不完全相同

基极相连, $U_{BE0}=U_{BE1}$



$$I_{E0} \approx I_{s0} e^{U_{BE0}/U_T}$$

$$I_{E1} \approx I_{s1} e^{U_{BE1}/U_T}$$

$$I_R = I_{C0} + I_{B0} + I_{B1} = (\beta_0 + 1) I_{B0} + I_{B1}$$

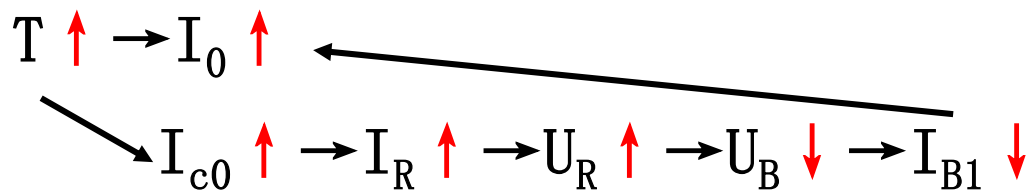
$$I_o = I_{C1} = \beta_1 I_{B1} = \beta_1 \cdot \frac{I_R}{(\beta_1 + 1) \frac{I_{s0}}{I_{s1}} + 1} = \lambda \cdot I_R$$

$$I_o = \lambda \cdot I_R = \lambda \cdot \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R}$$

λ : 加权因子

3) 特点

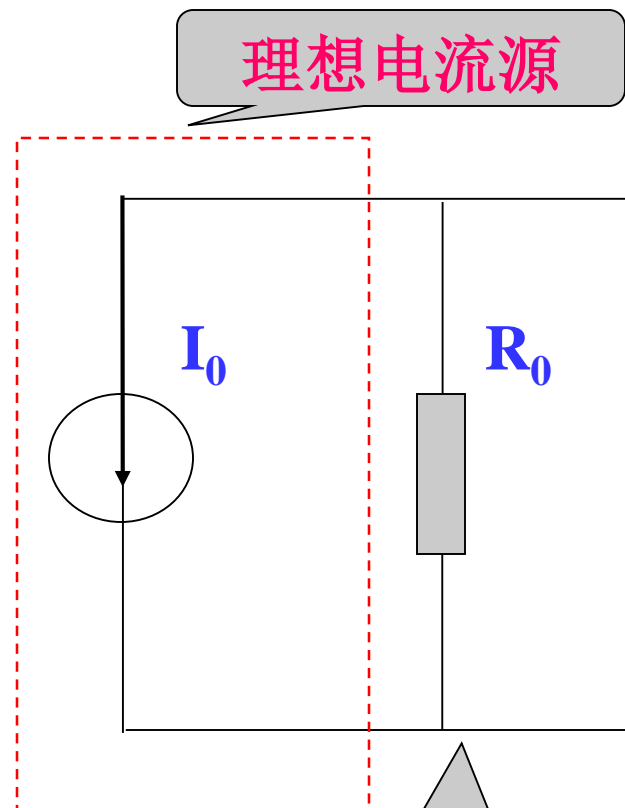
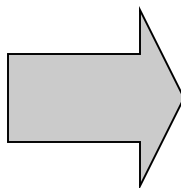
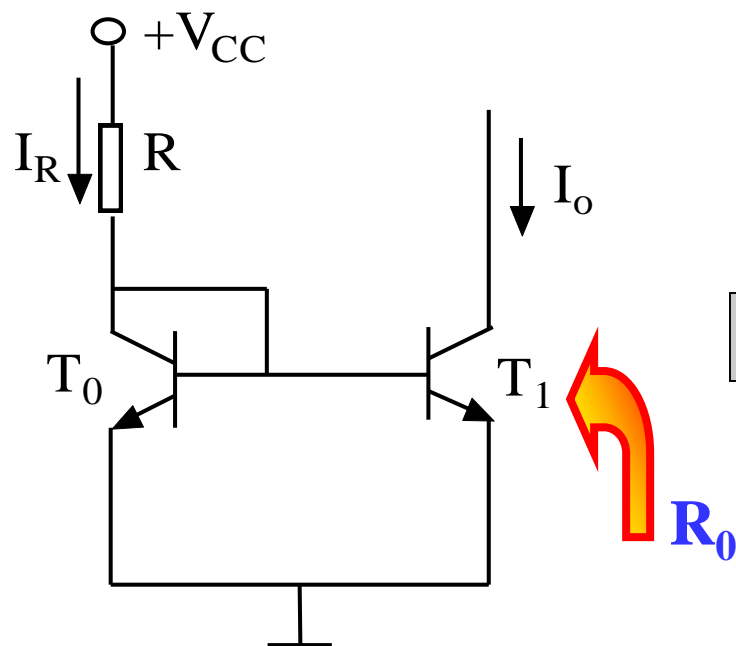
- 利用工作在放大模式的晶体管 I_C 电流不随 U_{CE} 电压变化而变化的特点。输出稳定电流 I_0 。
- I_0 随参考电流 I_R 变化而变化，并近似相等，因此称为镜像电流源。
- 具有一定的温度补偿作用，稳定 I_0 输出。



- 存在误差， β 越小，误差越大

$$I_R = I_{C0} + 2I_{B0} \xrightarrow{\text{近似}} I_R = I_{C0}$$

等效电流源

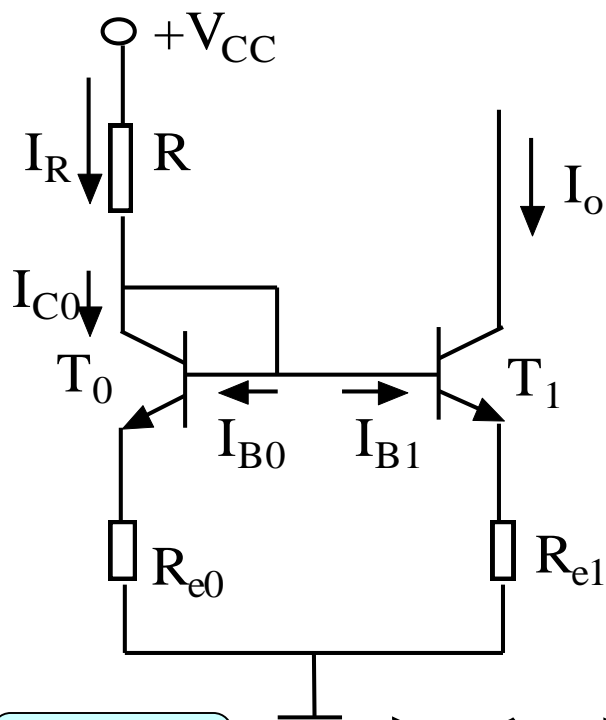


$$I_o = I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R}$$

$$R_0 = r_{ce1} \approx \frac{|V_A|}{I_{CQ1}}$$

V_A : 厄尔利电压

2、比例电流源



条件2

当 I_R 和 I_0 比例适当时，有

$$\mathbf{U}_{\text{BE}0} + \mathbf{I}_{\text{E}0} \mathbf{R}_{\text{e}0} = \mathbf{U}_{\text{BE}1} + \mathbf{I}_{\text{E}1} \mathbf{R}_{\text{e}1}$$

$$U_{BE0} - U_{BE1} = I_{E1} R_{e1} - I_{E0} R_{e0}$$

$$\mathbf{I}_{E1}\mathbf{R}_{e1} - \mathbf{I}_{E0}\mathbf{R}_{e0} \approx U_T \ln \frac{\mathbf{I}_{E0}}{\mathbf{I}_{E1}}$$

当 β 足够大时, 有

条件1

$$\mathbf{I}_{E0} \approx \mathbf{I}_R$$

$$\mathbf{I}_{E1} \approx \mathbf{I}_0$$

因此有

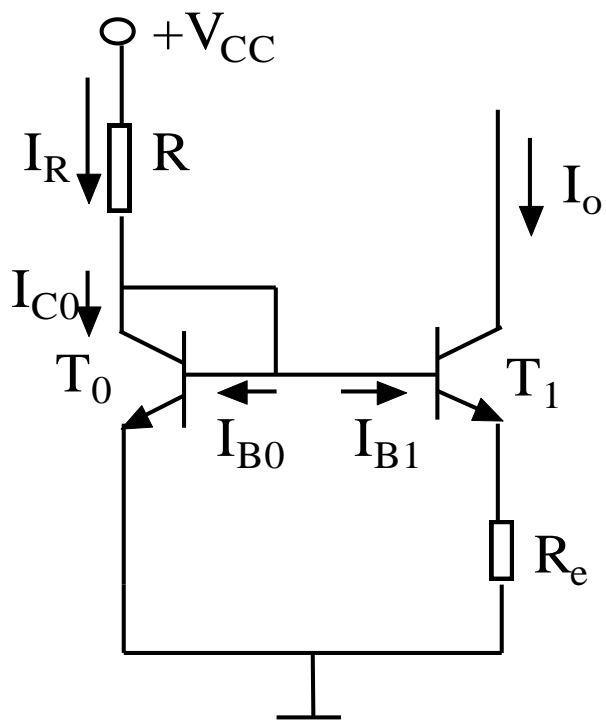
$$I_o \approx \frac{R_{e0}}{R_{e1}} \cdot I_R + \frac{U_T}{R_{e1}} \ln \frac{I_R}{I_o}$$

$$\frac{I_o}{I_R} \approx \frac{R_{e0}}{R_{e1}}$$

由于Re的存在，比基本镜像电流源具有更好的温度稳定性

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R + R_{e0}}$$

3、微电流源—提供小电流



$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R}$$

$$I_o \approx \frac{R_{e0}}{R_{e1}} \cdot I_R + \frac{U_T}{R_{e1}} \ln \frac{I_R}{I_o}$$

$$I_o \approx \frac{U_T}{R_e} \ln \frac{I_R}{I_o}$$

可以提供微安量级的小电流

4、电流源电路的改进

两方面的改进：

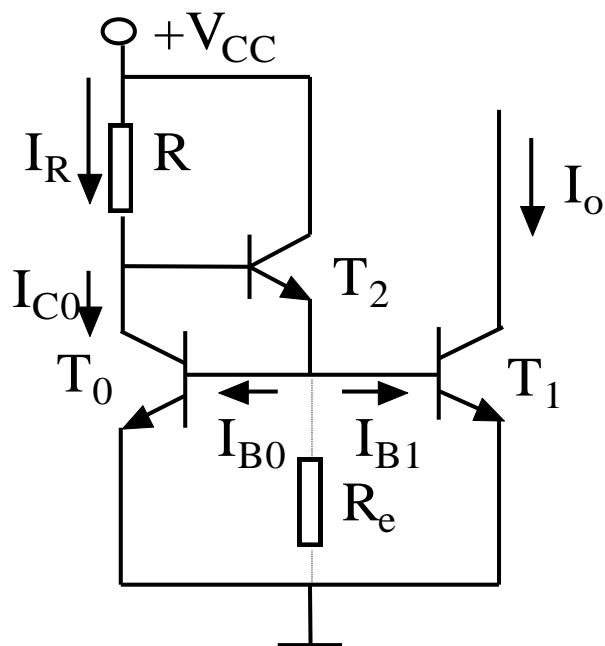
1) 提高 I_o 精度

减小由于 β 引入的误差

2) 改进电流源的恒流特性

增大输出电阻，提高恒流效果

1) 提高 I_0 精度



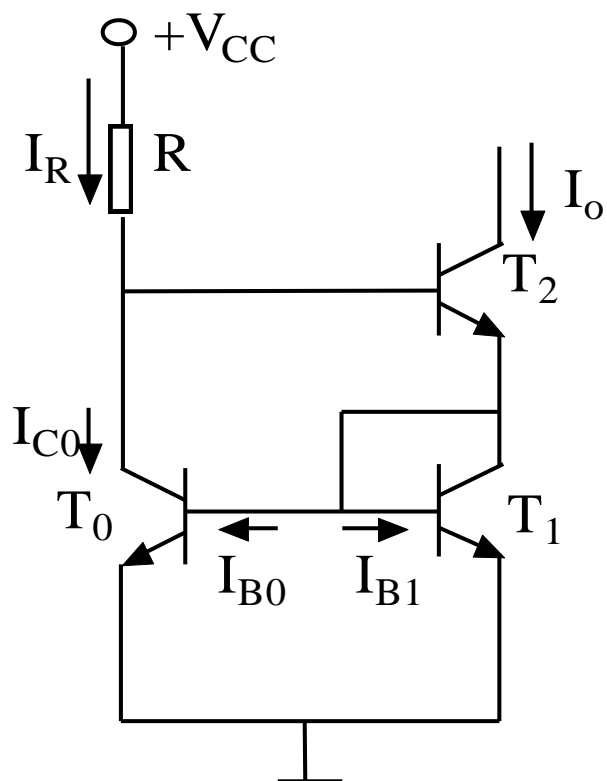
$$I_o = \frac{I_R}{1 + \frac{2}{\beta (1 + \beta_2)}}$$

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE0(on)} - U_{BE2(on)}}{R}$$

当 $\beta (1 + \beta_2) \gg 2$ 时, 有

$$I_0 = I_R$$

利用 T_2 晶体管来减小 T_0 、 T_1 管基极电流对参考电流的分流作用, 提高 I_0 精度



威尔逊电流源

$$I_o = \frac{\beta^2 + 2\beta}{\beta^2 + 2\beta + 2} I_R \approx I_R$$

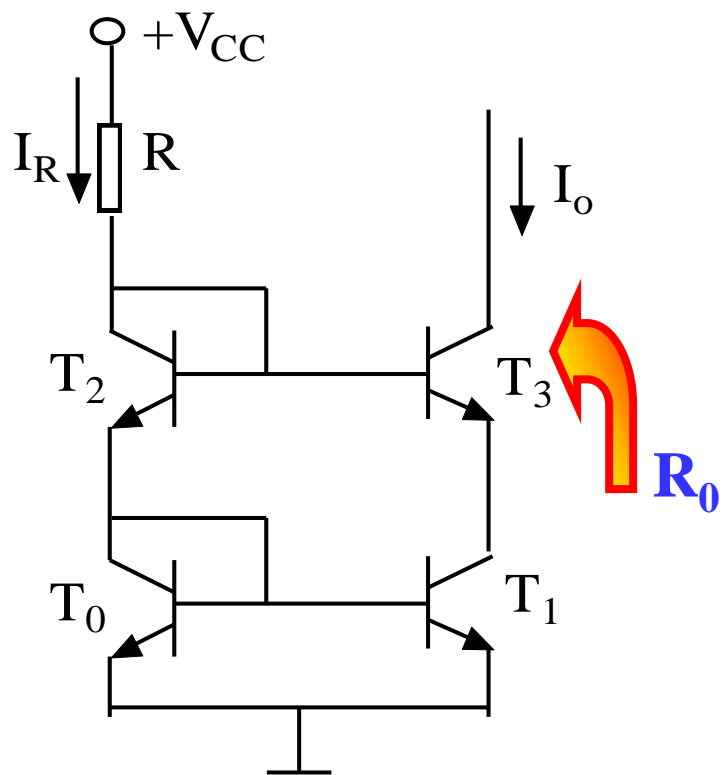
$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE0(on)} - U_{BE2(on)}}{R}$$

条件:

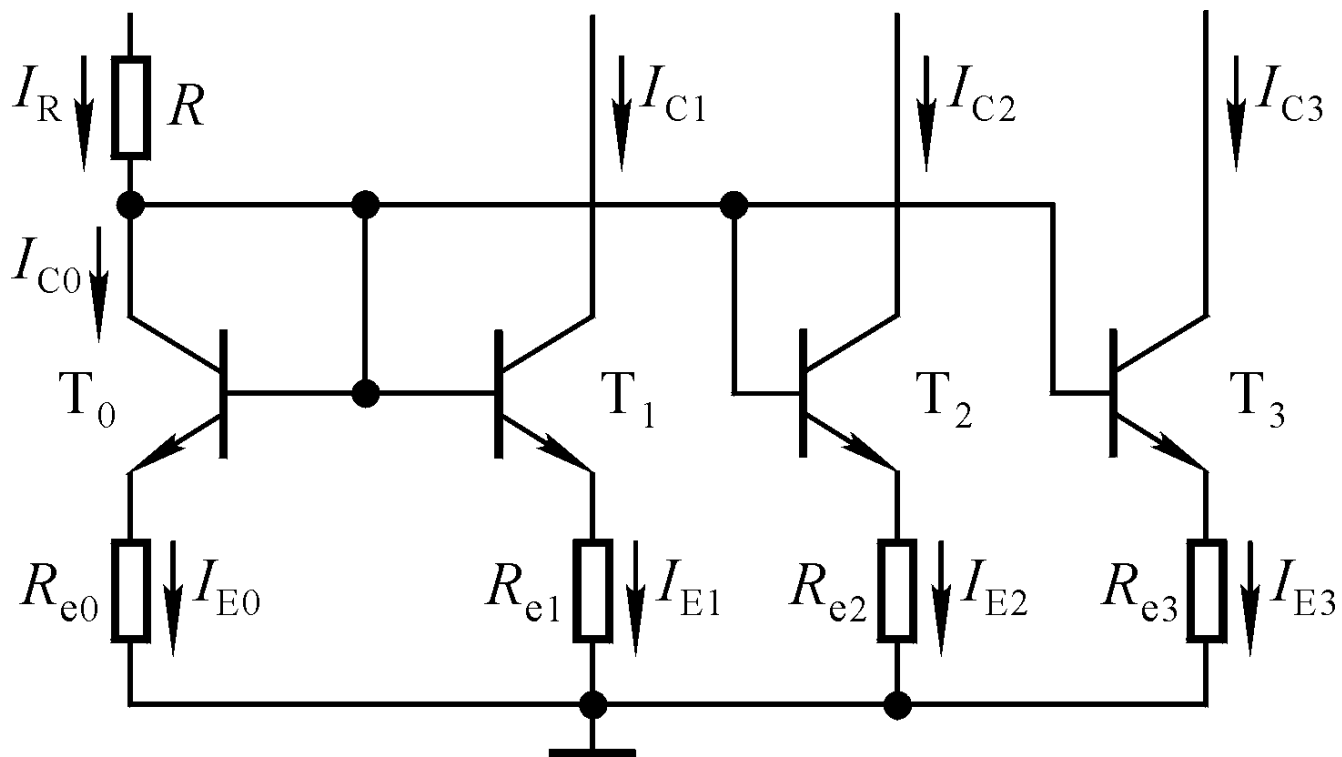
$$\beta^2 + 2\beta \gg 2$$

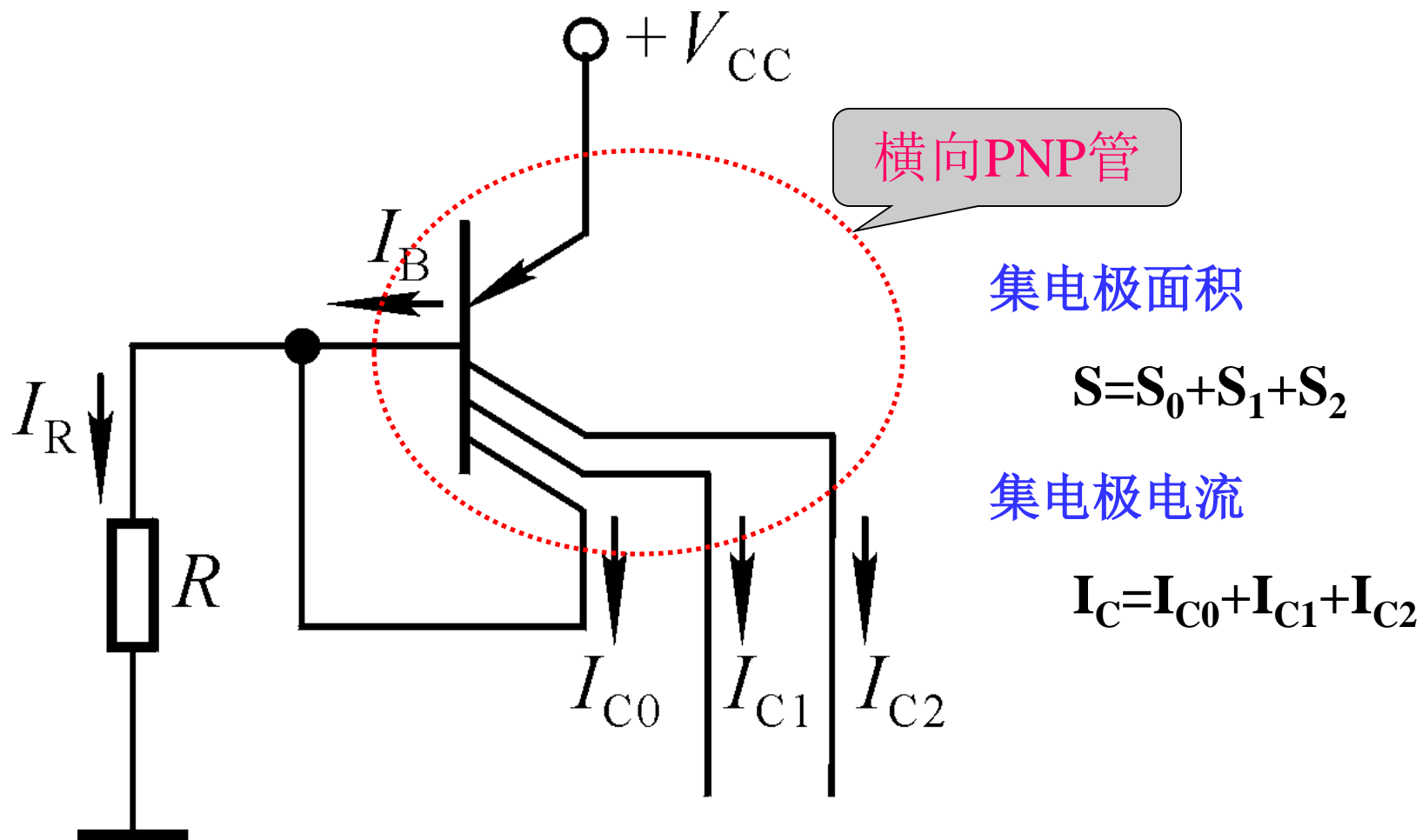
2) 提高恒流特性

提高输出电阻



5、多路电流源电路

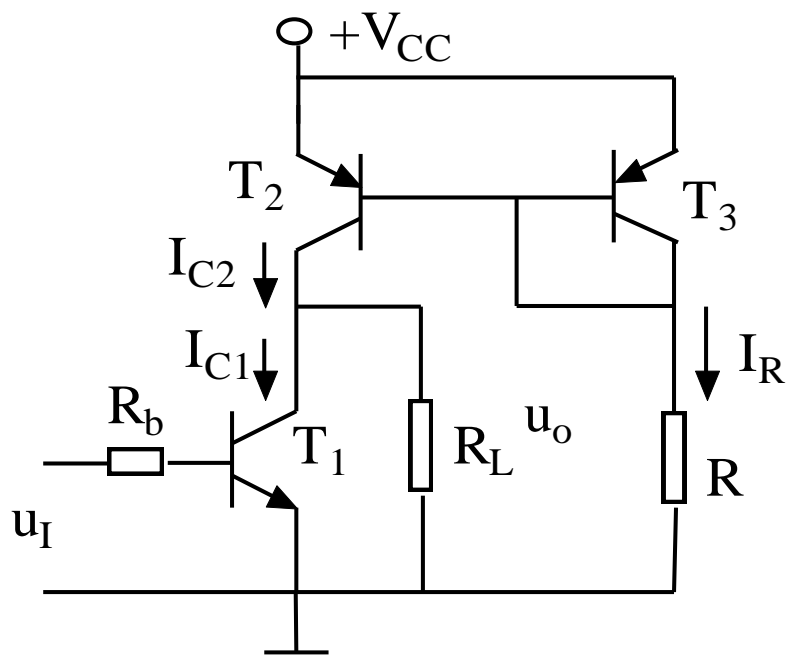




横向PNP管组成电流源

6、电流源作有源负载

1) 有源负载CE放大电路



可以大大提高增益

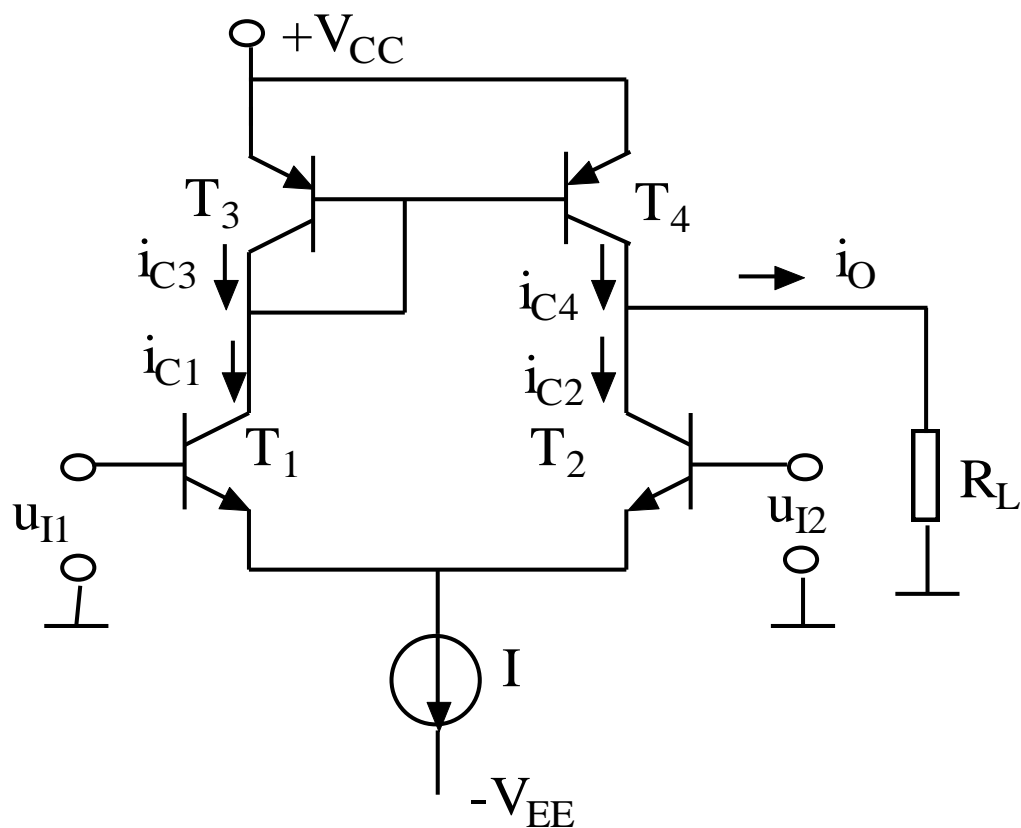
$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{EB3}}{R}$$

$$I_{C2} = \frac{\beta}{\beta + 2} I_R \approx I_R$$

$$\dot{A}_u \approx -\frac{\beta_1 R_L}{R_b + r_{be1}}$$

忽略基区宽度调制效应

2) 有源负载差分放大电路



1) 静态输出为0

2) 共模输入时
输出为0

3) 差模输入时

$$\dot{A}_u \approx \frac{\beta_1 R_L}{r_{be1}}$$

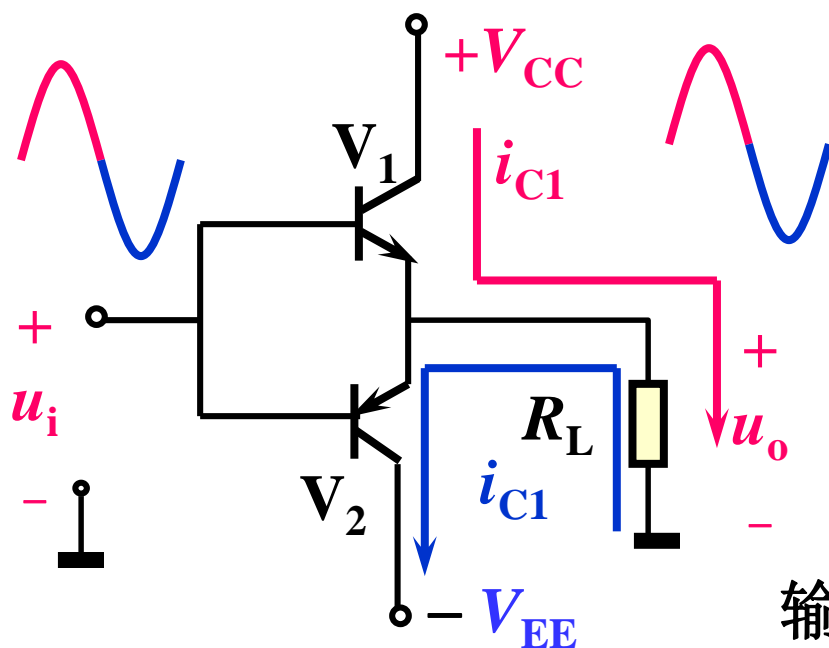
忽略基区宽度调制效应

特点：单端输出的形式具有双端输出的功能；

单端输出具有双端输出的增益大小。

三、直接耦合互补输出电路

电路组成及工作原理



$u_i = 0$ V_1 、 V_2 截止

$u_i > 0$ V_1 导通 V_2 截止

$i_o = i_{E1} = i_{C1}$, $u_o = i_{C1}R_L$

$u_i < 0$ V_2 导通 V_1 截止

$i_o = i_{E2} = i_{C2}$, $u_o = i_{C2}R_L$

输出信号最大幅度

$\pm(V_{CC} - |U_{CES}|)$

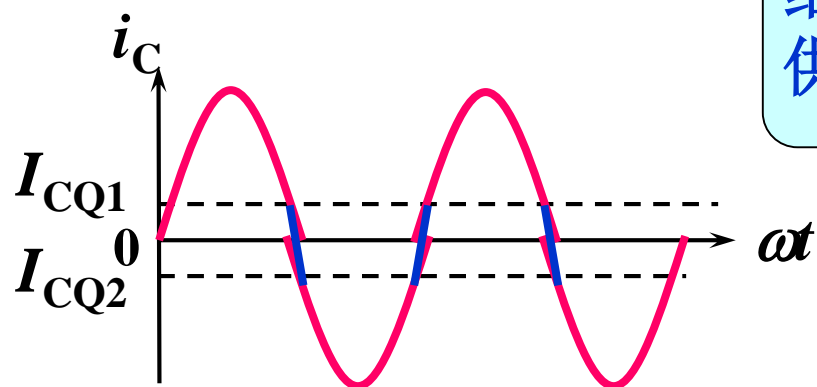
问题：

当输入电压小于死区电压时，
三极管截止，引起 **交越失真**。

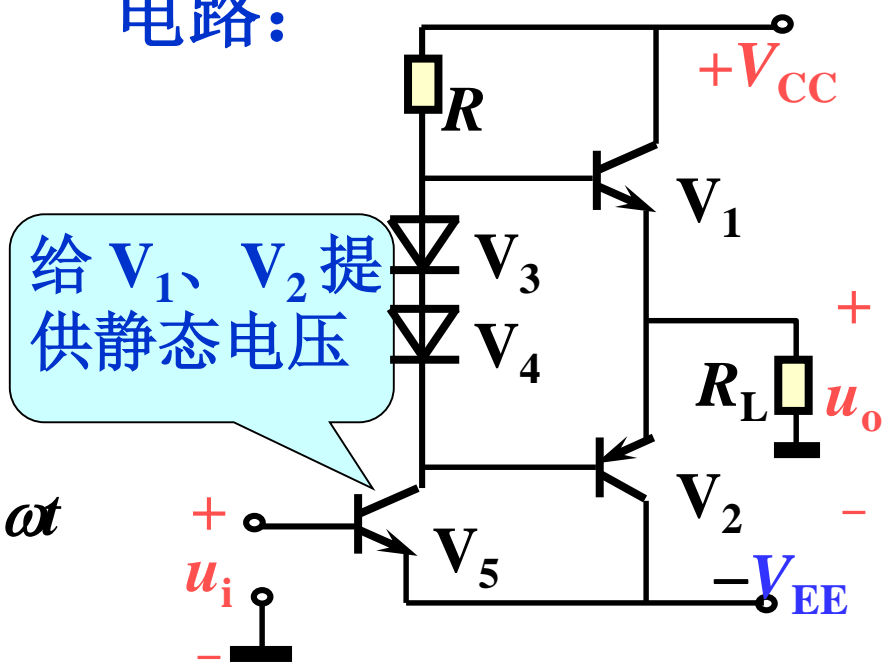


输入信号幅度越小失真越明显。

克服交越失真思路：



电路：



当 $u_i = 0$ 时, V_1 、 V_2 微导通。

当 $u_i < 0$ (\downarrow 至 \uparrow),

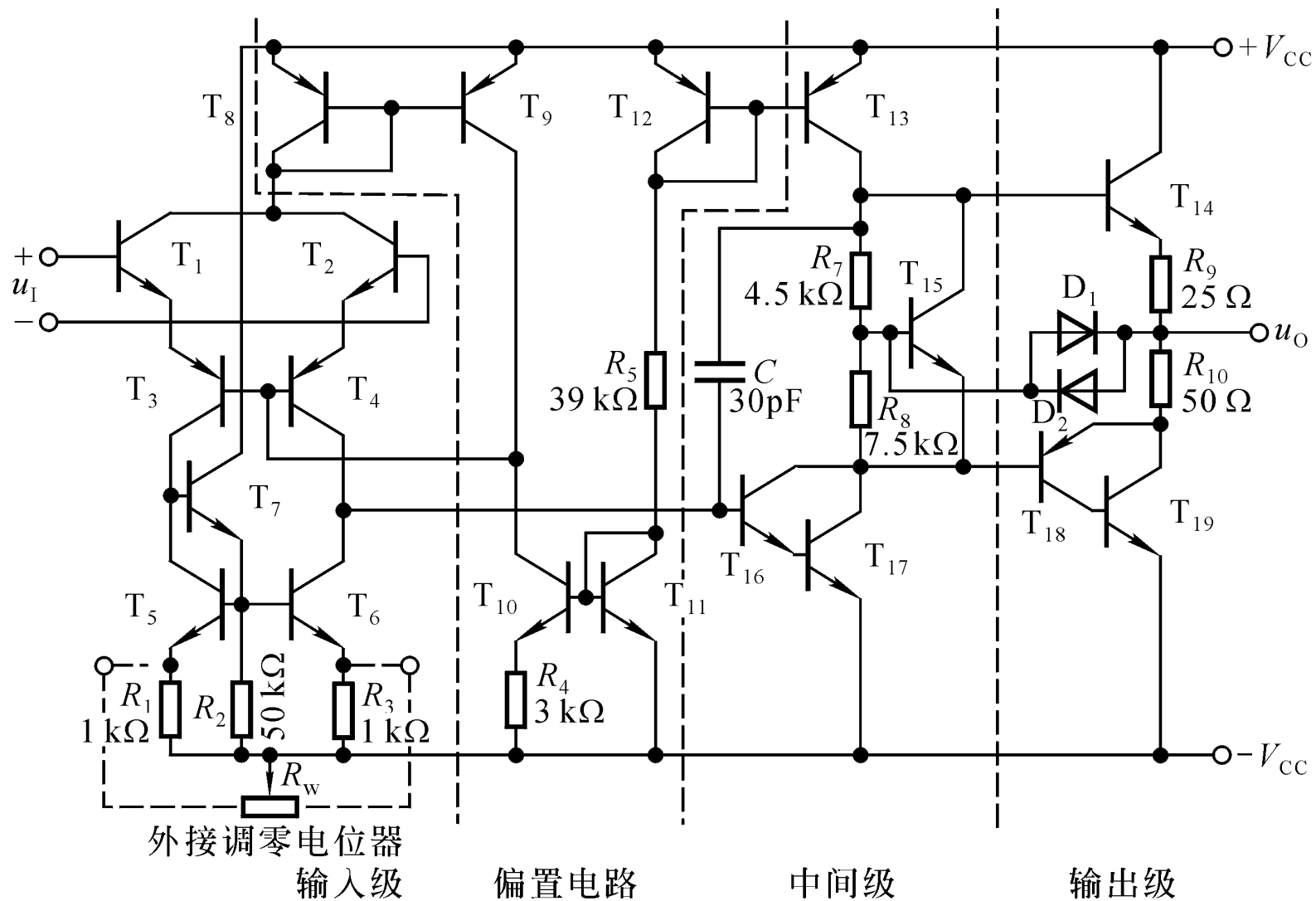
V_1 微导通 \rightarrow 充分导通 \rightarrow 微导通;

V_2 微导通 \rightarrow 截止 \rightarrow 微导通。

当 $u_i > 0$ (\uparrow 至 \downarrow),

V_2 微导通 \rightarrow 充分导通 \rightarrow 微导通;

V_1 微导通 \rightarrow 截止 \rightarrow 微导通。



F007集成运放内部电路

3.4 集成运放性能指标及等效电路

1. 差模特性

- A_{ud} : 差模电压增益, 80dB~140dB
- R_{id} : 差模输入电阻, $M\Omega$ 级
- R_{od} : 输出电阻, 一般小于200 Ω
- U_{IdM} : 最大差模输入电压

2. 共模特性

- K_{CMR} : 共模抑制比, 80dB~120dB
- R_{ic} : 共模输入电阻, 大于100M Ω
- U_{IcM} : 最大共模输入电压

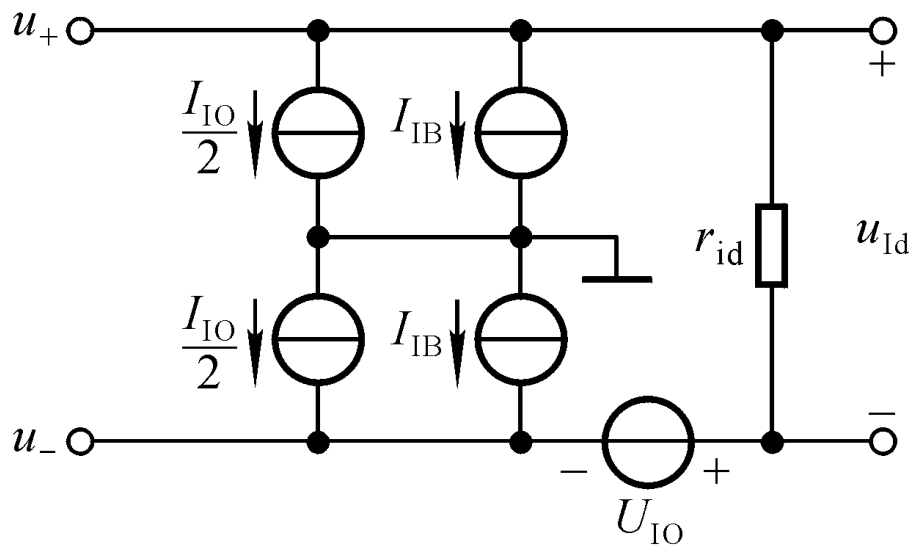
3. 直流特性

- U_{IO} : 输入失调电压, mV级
- I_{IO} : 输入失调电流,
- I_{IB} : 输入偏置电流
- $d U_{IO}/dT$: 输入失调电压温漂
- $d I_{IO}/dT$: 输入失调电流温漂

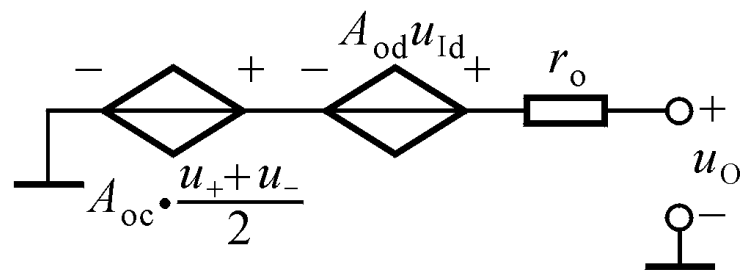
4. 其他

- f_H : 带宽
- f_c : 单位增益带宽
- SR: 转换速率

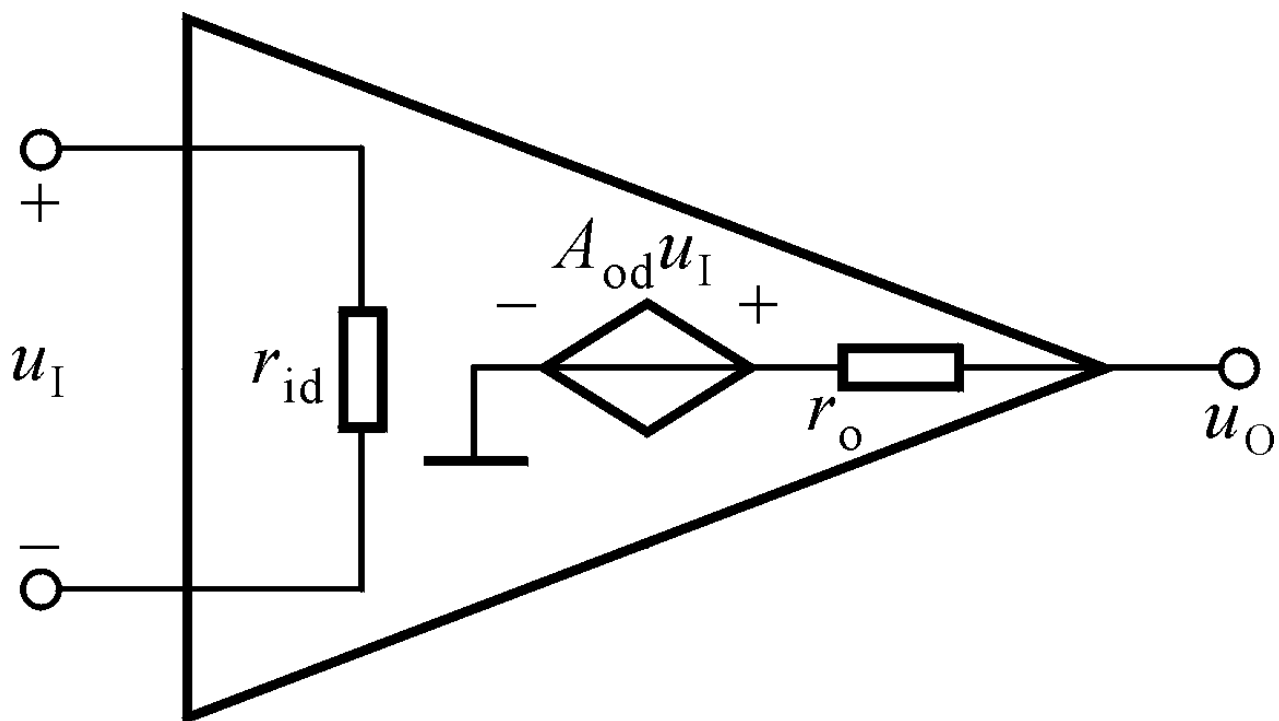
集成运放的低频等效电路



输入端等效电路



输出端等效电路



近似低频等效电路

4.4 集成运放的种类及使用

集成运放是直接耦合的多级放大电路，可以实现直流和低频信号的放大。从20世纪60年代发展至今已经经历了四代产品，品种日益丰富，性能不断完善。

1、集成运放种类

□ 性能指标

通用型

专用型：高输入阻抗型、高精度型、高速型、低功耗型

□ 工作原理

电压放大、电流放大、互阻放大、跨导放大

❑ 组成器件

双极型、CMOS型、混合型（BiFET型）

❑ 其他

单运放、双运放、四运放

单电源、正负双电源对称型和不对称型

可变增益型、多路控制型运放

2、集成运放选择

选择合适的运放来满足电路性能的需求，主要从运放的性能指标来考虑。可以从下面几个方面考虑：

a) 与信号源和负载的匹配

b) 精度要求

c) 环境条件

3、集成运放的使用

❑ 准备工作

- 查阅手册了解引脚的排列及功能
- 检查接线有否错误或虚连，输出端不能与地、电源短路
- 输入端外接直流电阻要相等，小信号高精度直流放大需调零

❑ 使用

- 输入信号应远小于 U_{IdM} 和 U_{ICM} ，以防阻塞或损坏器件，要具有输入保护电路
- 电源不能接反或过高，拔器件时必须断电，要有电源保护
- 需要有输出保护电路