



# 第三章 集成运算放大电路

§ 3.1 多级放大电路的一般问题

§ 3.2 集成运放概述

§ 3.3 集成运放内部的单元电路

§ 3.4 集成运放内部电路简介



## § 3.1 多级放大电路的一般问题

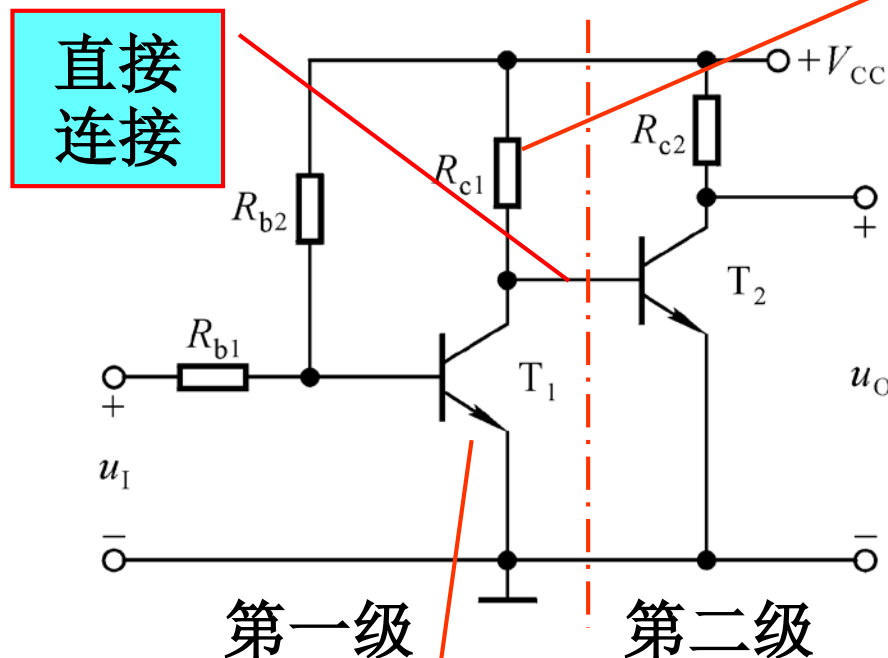
- 一、多级放大电路的耦合方式
- 二、多级放大电路的动态分析





# 一、多级放大电路的耦合方式

## 1. 直接耦合



既是第一级的集电极电阻，  
又是第二级的基极电阻

能够放大变化缓慢的信号，便于集成化， $Q$ 点相互影响，存在零点漂移现象。

输入为零，输出产生变化的现象称为零点漂移

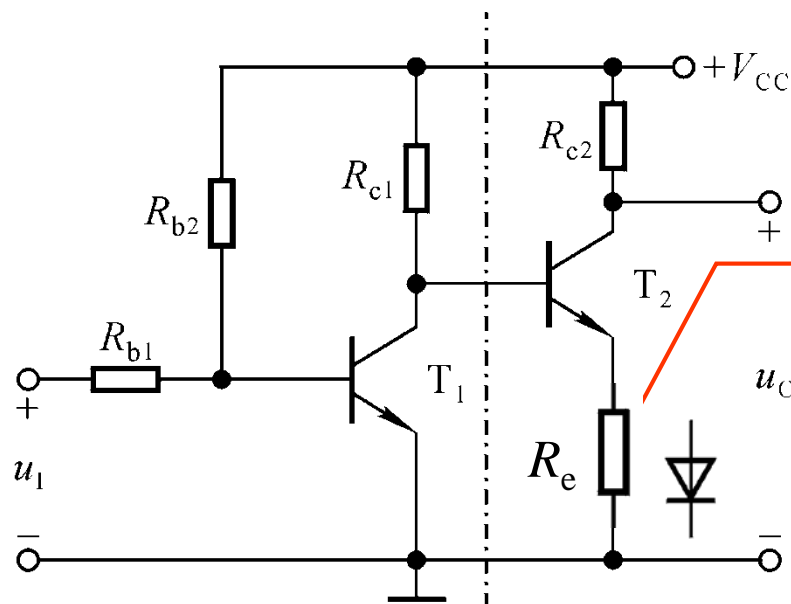
$Q_1$ 合适吗？

当输入信号为零时，前级由温度变化所引起的电流、电位的变化会逐级放大。

求解 $Q$ 点时应按各回路列多元一次方程，然后解方程组。



## 如何设置合适的静态工作点？



对哪些动态参数产生影响？

用什么元件取代 $R_e$ 既可设置合适的 $Q$ 点，又可使第二级放大倍数不至于下降太多？

二极管导通电压 $U_D \approx ?$  动态电阻 $r_d$ 特点？

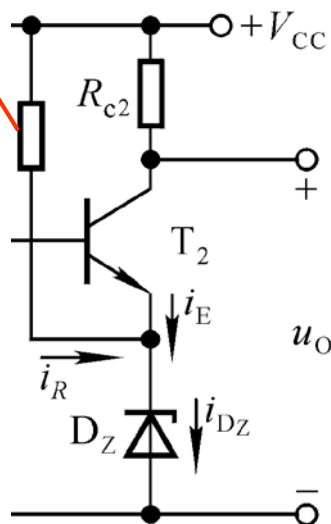
若要 $U_{CEQ} = 10V$ ，则应怎么办？用多个二极管吗？



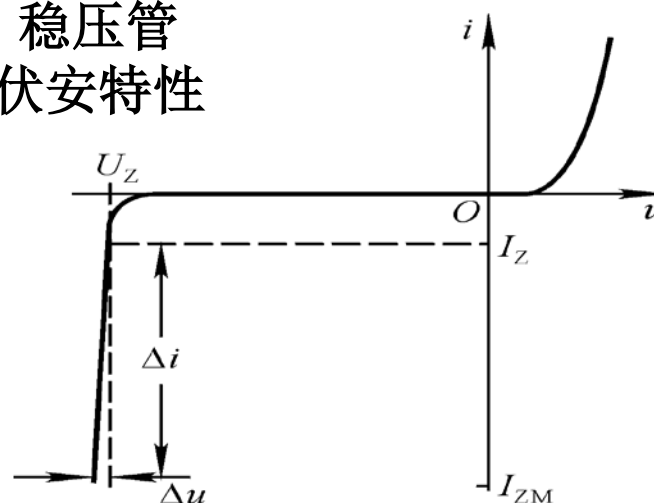


# 如何设置合适的静态工作点?

必要性?



稳压管  
伏安特性



稳定电压 $U_Z$ : 几~几十伏

稳定电流 $I_Z$ : 达到稳定电压的最小电流。小功率管多为5mA。

最大稳定电流 $I_{ZM}$ : 稳压区的最大工作电流。

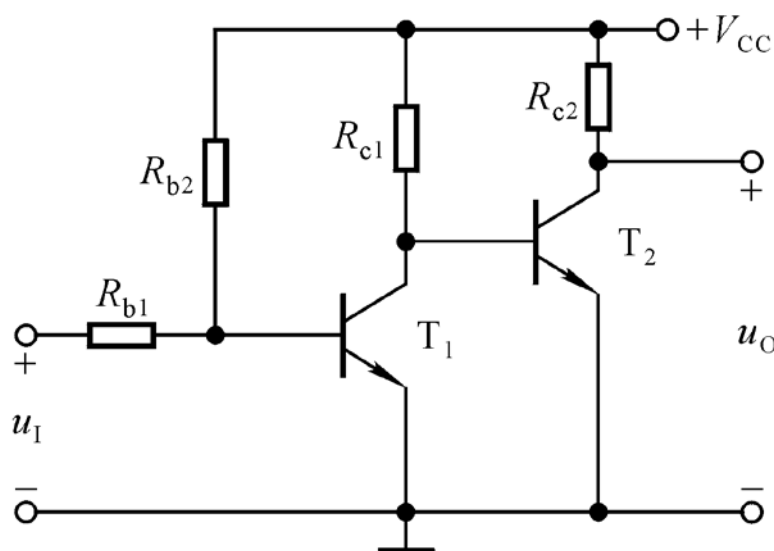
最大耗散功率 $P_{ZM}$ :  $=I_{ZM} U_Z$ 。多为几十~几百毫瓦。

动态电阻 $r_z$ :  $= \Delta U_{DZ} / \Delta I_{DZ}$ 。小功率管几~几十欧姆。

$U_{CEQ1}$  太小  $\rightarrow$  加  $R_e$  ( $A_{u2}$  数值  $\downarrow$ )  $\rightarrow$  改用  $D \rightarrow$  若要  $U_{CEQ1}$  大, 则改用  $D_Z$ 。

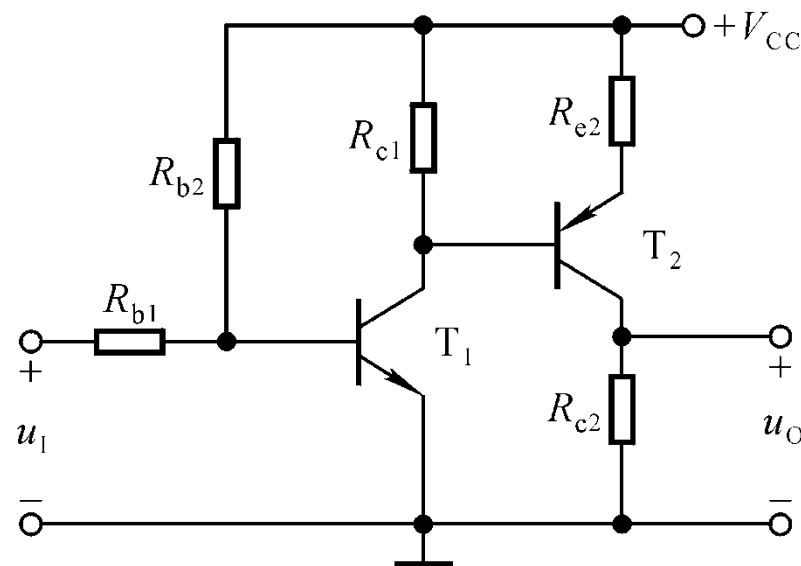


## NPN型管和PNP型管混合使用



$$U_{CQ1} (U_{BQ2}) > U_{BQ1}$$

$$U_{CQ2} > U_{CQ1}$$



$$U_{CQ1} (U_{BQ2}) > U_{BQ1}$$

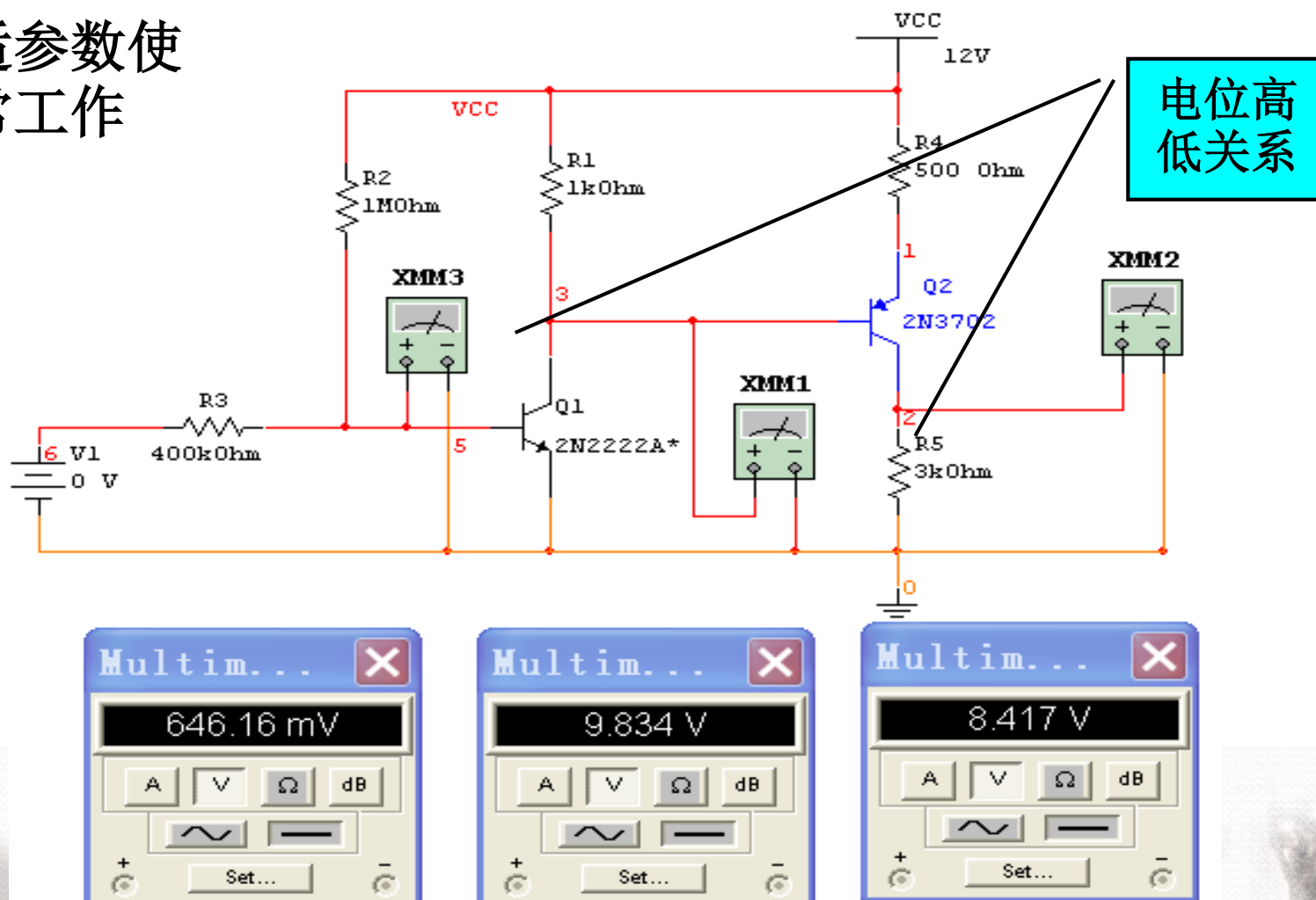
$$U_{CQ2} < U_{CQ1}$$

在用NPN型管组成 $N$ 级共射放大电路，由于 $U_{CQi} > U_{BQi}$ ，所以 $U_{CQi} > U_{CQ(i-1)}$  ( $i=1 \sim N$ )，以致于后级集电极电位接近电源电压， $Q$ 点不合适。



# 讨论：两级直接耦合放大电路

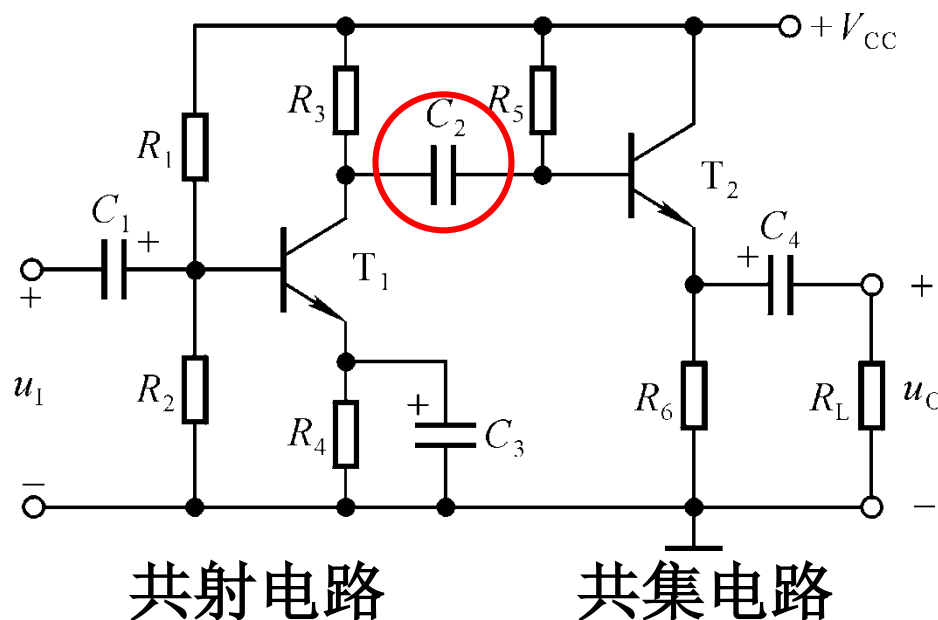
选择合适参数使  
电路正常工作



如何让Q点设计不相互影响？



## 2. 阻容耦合



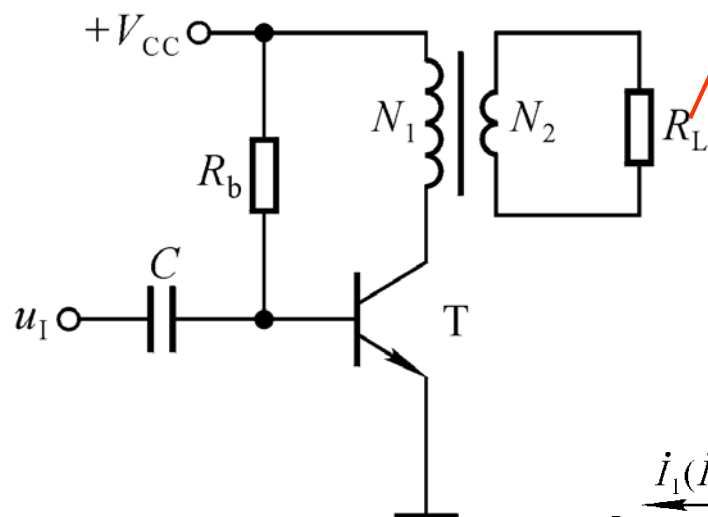
利用电容连接信号源与放大电路、放大电路的前后级、放大电路与负载，为阻容耦合。

有零点漂移吗？

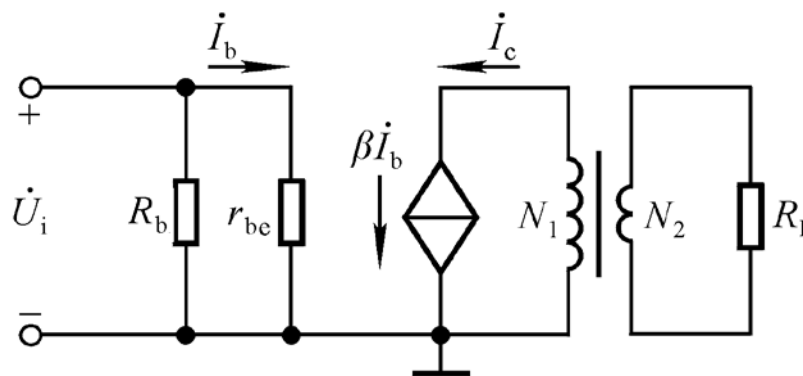
$Q$ 点相互独立。不能放大变化缓慢的信号，低频特性差，不能集成化。



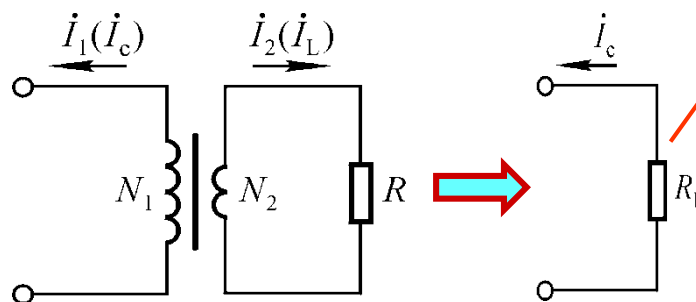
### 3. 变压器耦合



可能是实际的负载，也可能是下级放大电路



$$P_1 = P_2, I_c^2 R_L' = I_l^2 R_L$$



从变压器原边看到的等效电阻

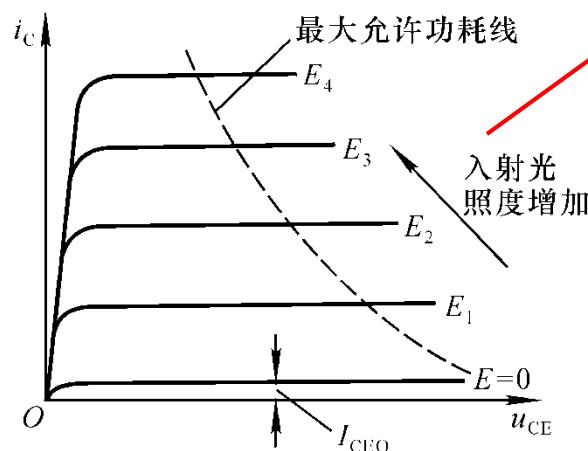
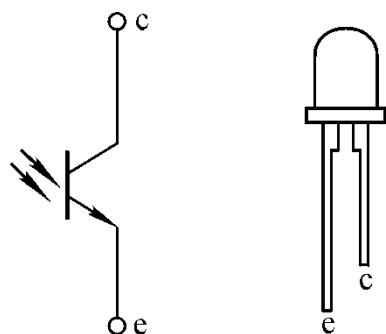
理想变压器情况下，负载上获得的功率等于原边消耗的功率。

$$R_L' = \frac{I_l^2}{I_c^2} \cdot R_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_L, \text{ 实现了阻抗变换。}$$

不能放大变化缓慢的信号，不能集成化，变压器自身有损耗。

## 4. 光电耦合 适于信号的远距离传输。

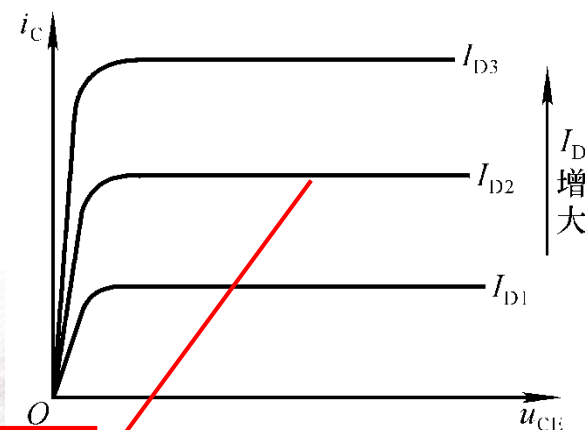
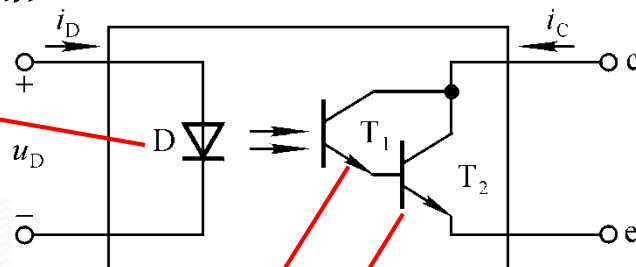
### (1) 光电三极管



入射光照度控制  
集电极电流

### (2) 光电耦合器

发光二极管：  
导通后端电压  
越大，电流越  
大，光强越强。

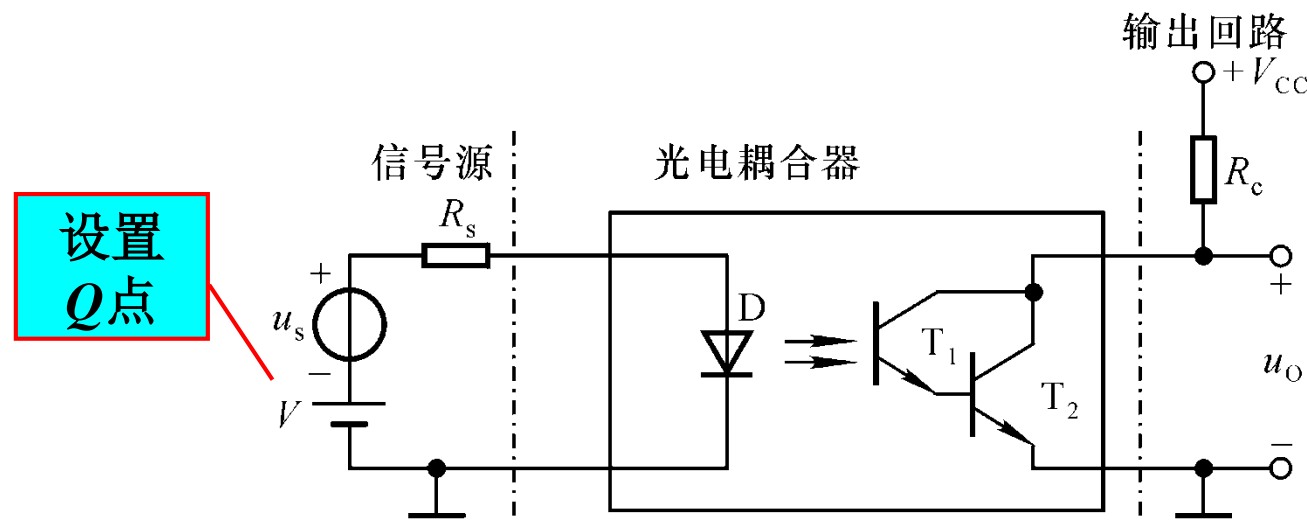


光电  
三极管

增大 $\beta$

$i_D$  控制  $i_C$

### 3. 光电耦合放大电路

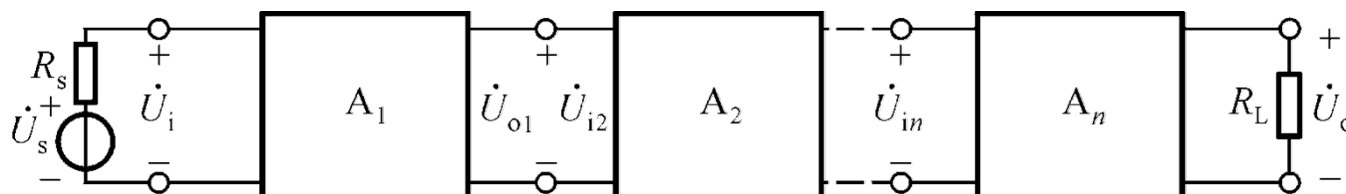


输入回路和输出回路分别接不同的独立电源、独立的“地”，即可避免长距离传输时的电干扰。



## 二、动态参数分析

### 1. 电压放大倍数



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_{i2}} \cdots \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{in}} = \prod_{j=1}^n \dot{A}_{uj}$$

### 2. 输入电阻

$$R_i = R_{i1}$$

### 3. 输出电阻

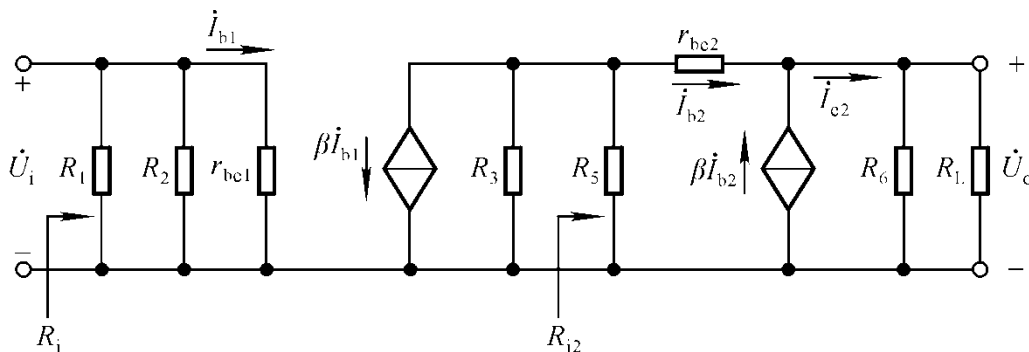
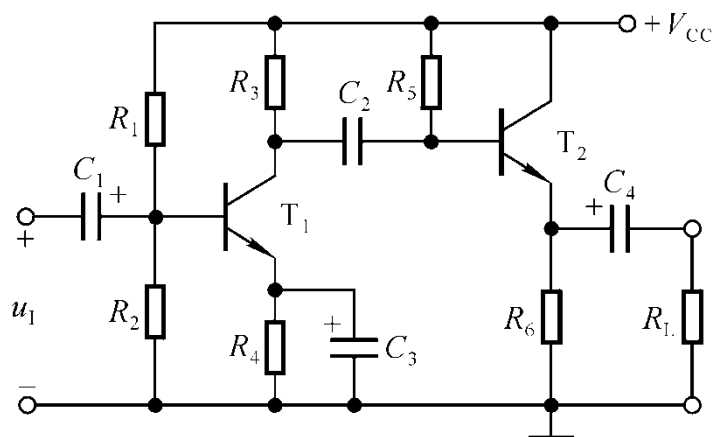
$$R_o = R_{on}$$

对电压放大电路的要求： $R_i$ 大， $R_o$ 小， $A_u$ 的数值大，最大不失真输出电压大。





## 分析举例



$$\begin{aligned}\dot{A}_{u1} &= -\frac{\beta(R_3 // R_{i2})}{r_{be1}} \\ \dot{A}_{u2} &= \frac{(1+\beta_2)(R_6 // R_L)}{r_{be2} + (1+\beta_2)(R_6 // R_L)} \\ \dot{A}_u &= \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2}\end{aligned}$$

$$R_{i2} = R_5 // [r_{be2} + (1+\beta_2)(R_6 // R_L)]$$

$$R_i = R_1 // R_2 // r_{be1}$$

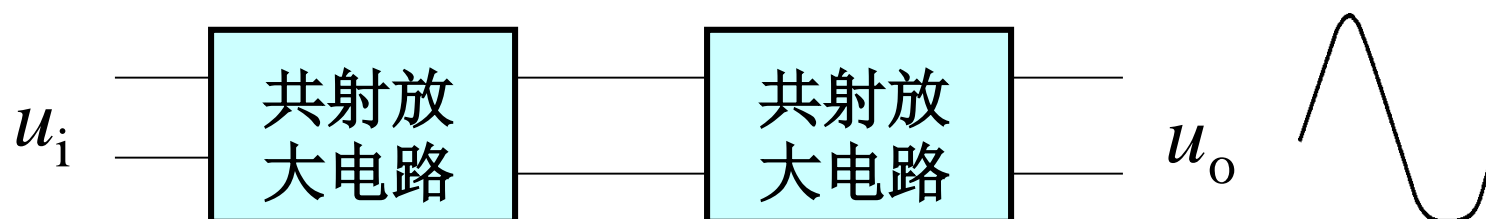
$$R_o = R_6 // \frac{R_3 // R_5 + r_{be2}}{1+\beta}$$

为带负载情况下的电压放大倍数



# 讨论一

失真分析：由NPN型管组成的两级共射放大电路



饱和失真？截止失真？

首先确定在哪一级出现了失真，再判断是什么失真。

比较 $U_{om1}$ 和 $U_{im2}$ ，则可判断在输入信号逐渐增大时哪一级首先出现失真。

在前级均未出现失真的情况下，多级放大电路的最大不失真电压等于输出级的最大不失真电压。



## 讨论二：放大电路的选用

按下列要求组成两级放大电路：

- ①  $R_i = 1 \sim 2\text{k}\Omega$ ,  $A_u$  的数值  $\geq 3000$ ; 共射 共射
- ②  $R_i \geq 10\text{M}\Omega$ ,  $A_u$  的数值  $\geq 300$ ; 共源 共射
- ③  $R_i = 100 \sim 200\text{k}\Omega$ ,  $A_u$  的数值  $\geq 150$ ; 共集 共射
- ④  $R_i \geq 10\text{M}\Omega$ ,  $A_u$  的数值  $\geq 10$ ,  $R_o \leq 100\Omega$ 。 共源 共集

注意级联时两级的相互影响！



## 讨论三：放大电路的动态分析

若测得三个单管放大电路的输入电阻、输出电阻和空载电压方法倍数，则如何求解它们连接之后三级放大电路的电压放大倍数？







## § 3.2 集成运放概述

- 一、集成运放的特点
- 二、集成运放电路的组成
- 三、集成运放的电压传输特性



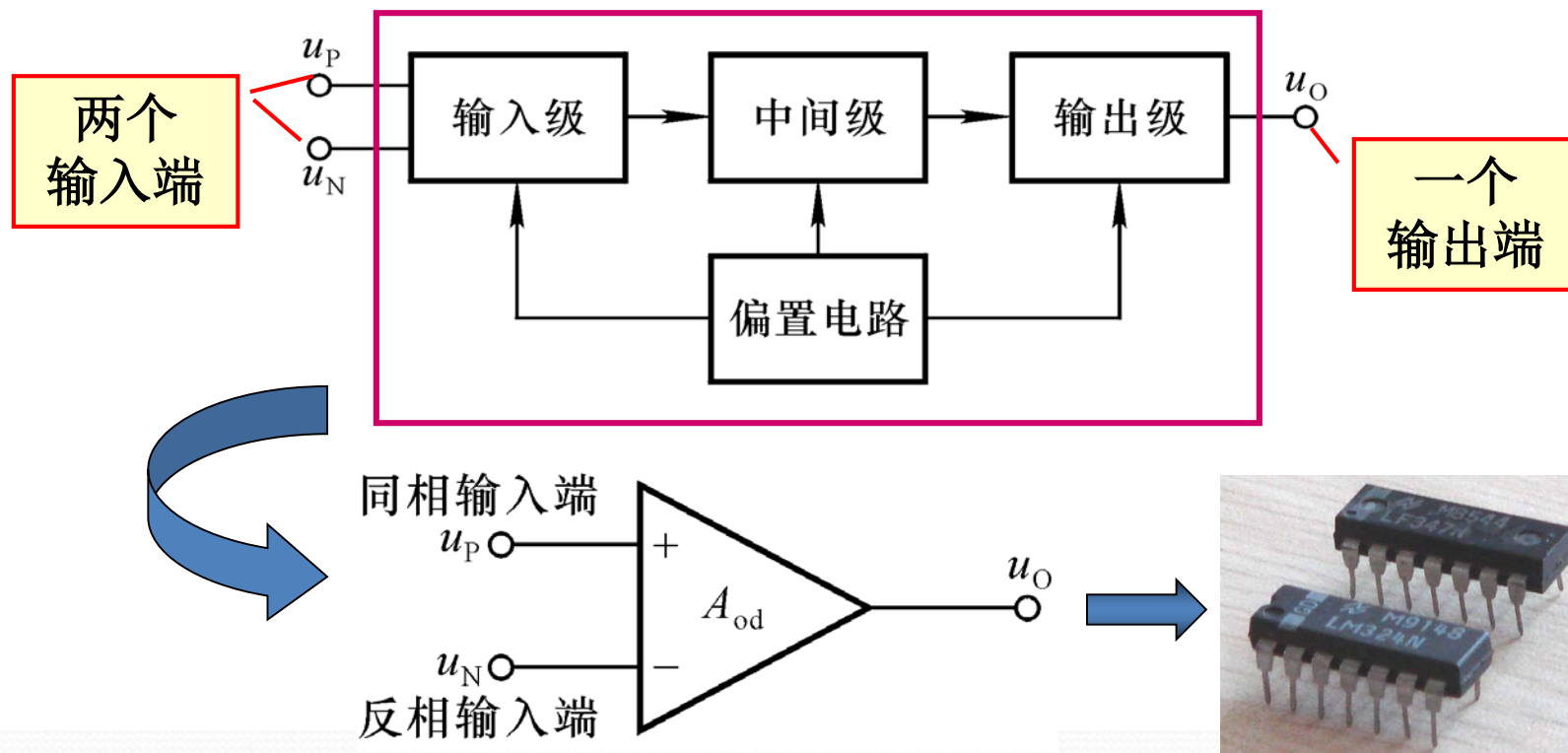


# 一、集成运放的特点

集成运算放大电路，简称集成运放，是一个高性能的直接耦合多级放大电路。因首先用于信号的运算，故而得名。

- (1) 直接耦合方式，充分利用管子性能良好的一致性采用差分放大电路和电流源电路。
- (2) 用复杂电路实现高性能的放大电路，因为电路的复杂化并不带来工艺的复杂性。
- (3) 用有源元件替代无源元件，如用晶体管取代难于制作的大电阻。
- (4) 采用复合管。

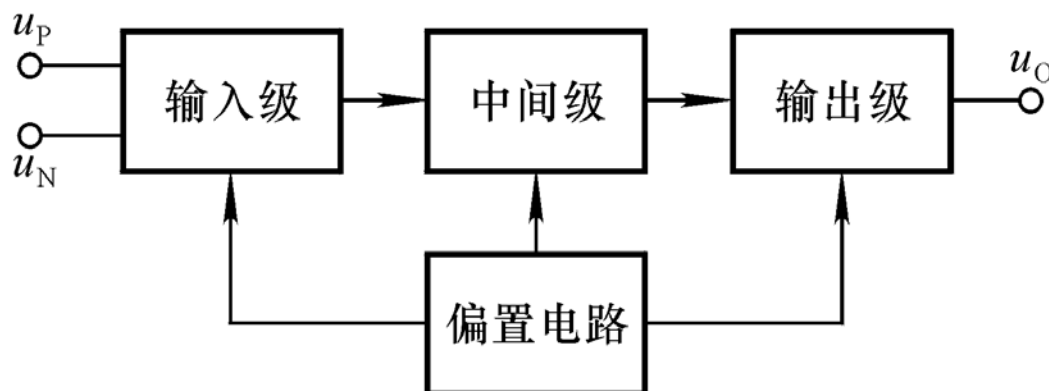
## 二、集成运放电路的组成



若将集成运放看成为一个“黑盒子”，则可等效为一个高性能的双端输入、单端输出的差分放大电路。



## 集成运放电路四个组成部分的作用



**偏置电路：**为各级放大电路设置合适的静态工作点。采用**电流源电路**。

**输入级：**前置级，多采用**差分放大电路**。要求 $R_i$ 大，放大能力强，抑制零点漂移能力强，输入端耐压高。

**中间级：**主放大级，多采用**共射放大电路**。要求有足够的放大能力。

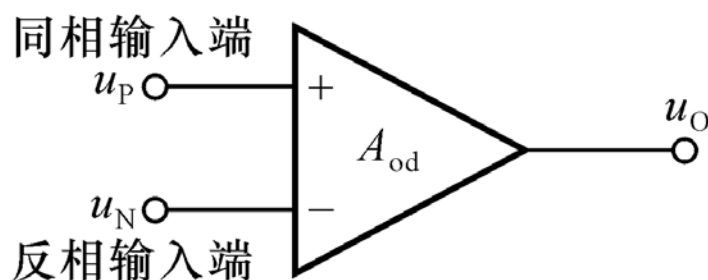
**输出级：**功率级，多采用**准互补输出级**。要求 $R_o$ 小，最大不失真输出电压尽可能大。

**几代产品中输入级的变化最大！**



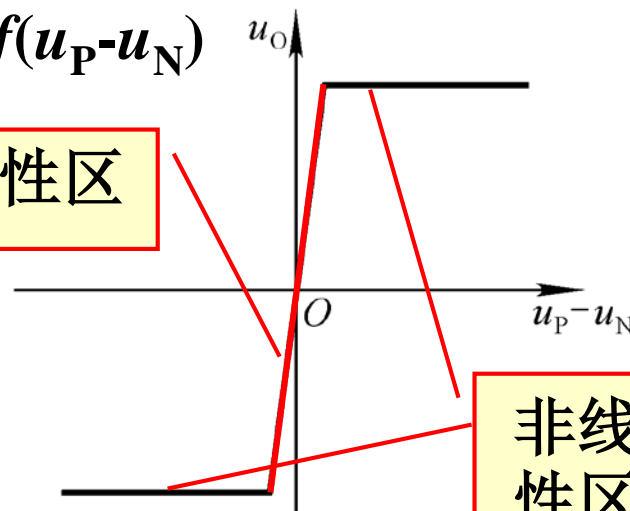


### 三、集成运放的电压传输特性



$$u_O = f(u_P - u_N)$$

线性区



在线性区:

$$u_O = A_{od}(u_P - u_N)$$

$A_{od}$ 是开环差模放大倍数。

非线性区

由于 $A_{od}$ 高达几十万倍，所以集成运放工作在线性区时的最大输入电压( $u_P - u_N$ )的数值仅为几十~一百多微伏。

( $u_P - u_N$ )的数值大于一定值时，集成运放的输出不是 $+U_{OM}$ ，就是 $-U_{OM}$ ，即集成运放工作在非线性区。



## § 3.3 集成运放中的单元电路

- 一、差分放大电路（输入级）
- 二、电流源电路（偏置电路、有源负载）
- 三、互补输出级（输出级）



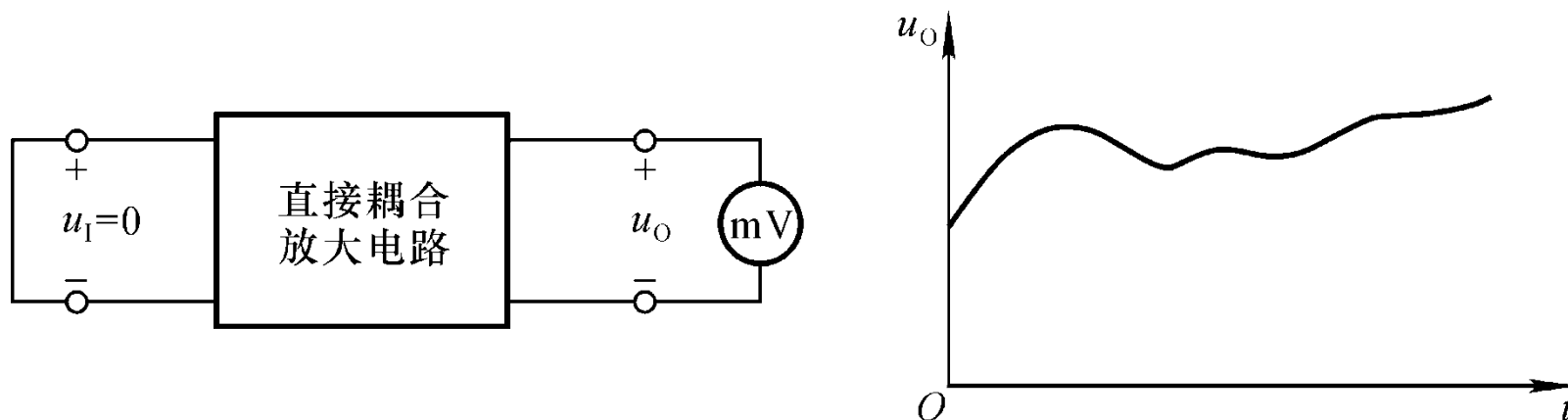
# 一、差分放大电路

1. 零点漂移现象及其产生的原因
2. 长尾式差分放大电路的组成
3. 长尾式差分放大电路的分析
4. 差分放大电路的四种接法
5. 具有恒流源的差分放大电路
6. 差分放大电路的改进



# 1. 零点漂移现象及其产生的原因

(1) 什么是零点漂移现象： $\Delta u_I = 0$ ， $\Delta u_O \neq 0$ 的现象。



产生原因：温度变化，直流电源波动，元器件老化。其中晶体管的特性对温度敏感是主要原因，故也称零漂为温漂。

克服温漂的方法：引入直流负反馈，温度补偿。

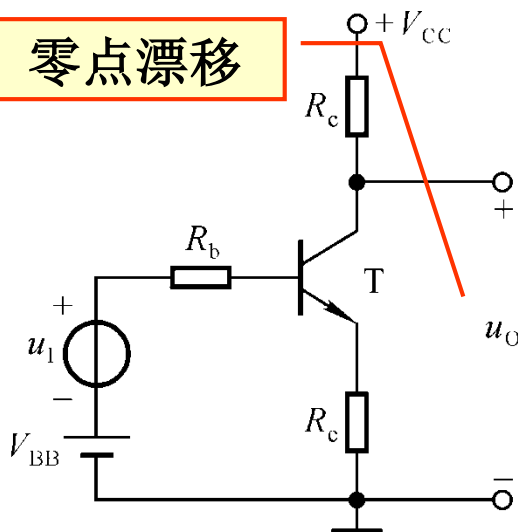
典型单元电路：差分放大电路



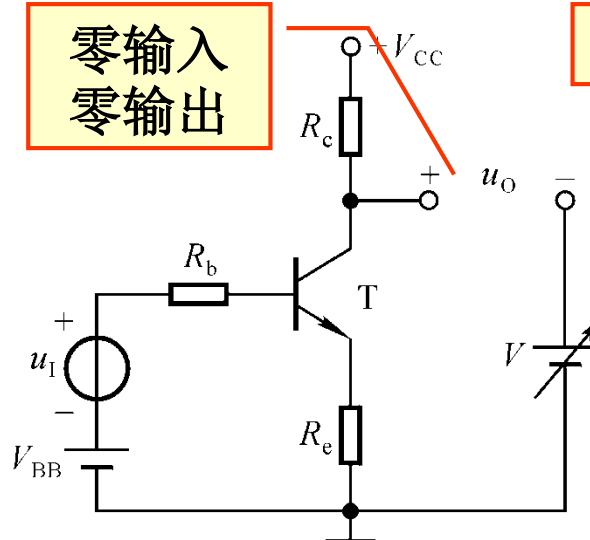


## 2. 长尾式差分放大电路的组成

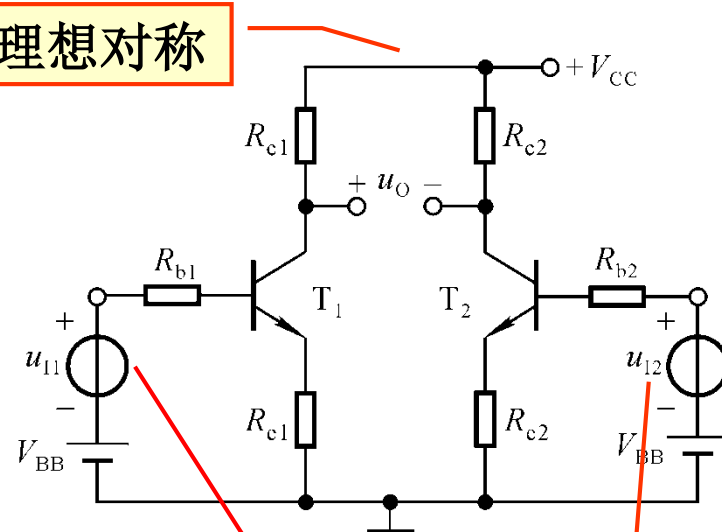
零点漂移



零输入  
零输出

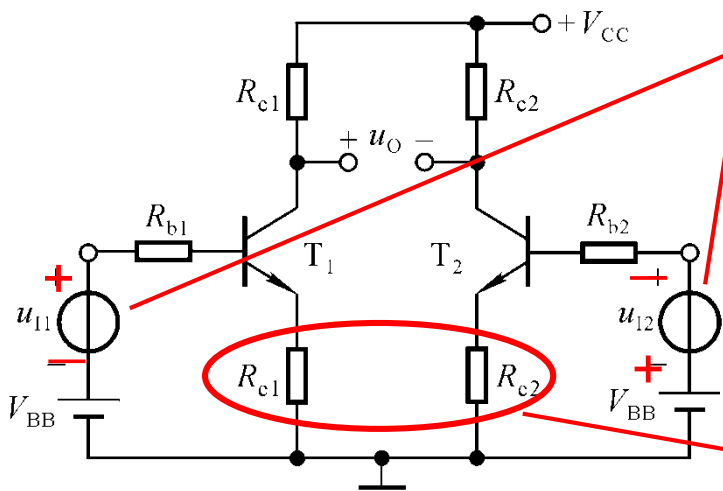


理想对称



信号特点？  
能否放大？

信号特点？能否放大？

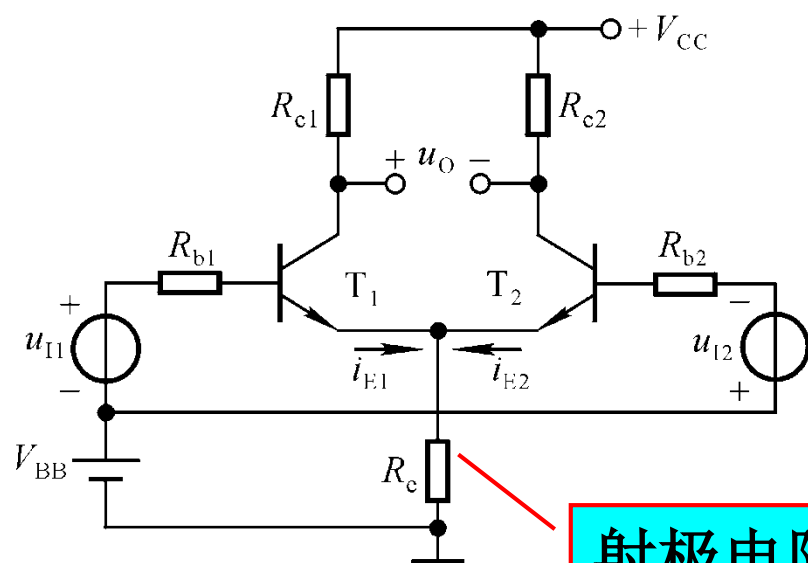


共模信号：大小相等，极性相同。

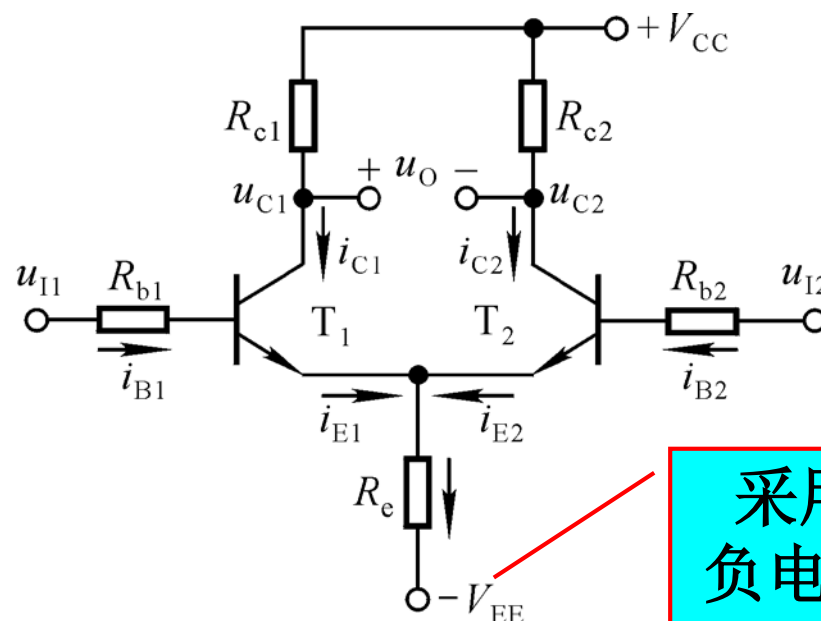
差模信号：大小相等，极性相反。

能合二为一吗？有什么好处？

# 典型的长尾差分放大电路



射极电阻  
合二而一



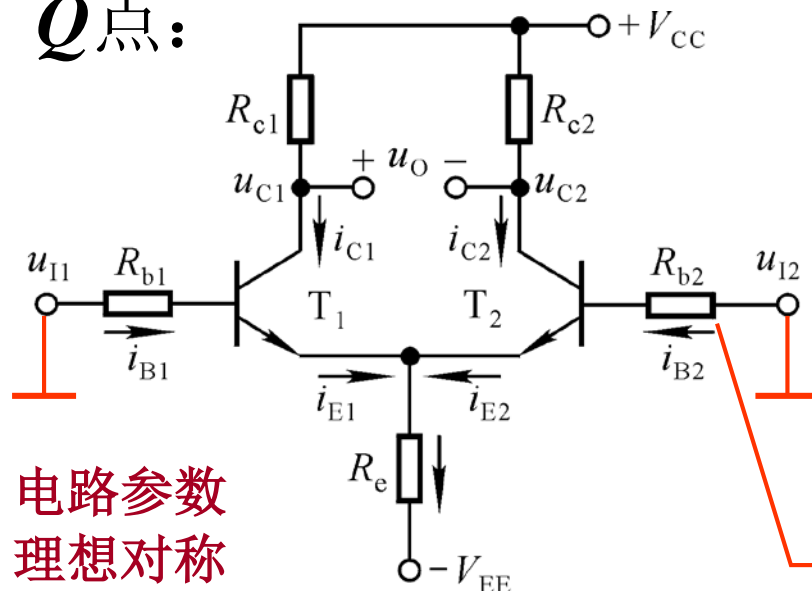
采用  
负电源

加差模信号时  $R_e$  电流的变化为零，因而加差模信号时发射极电位无变化。



### 3. 长尾式差分放大电路的分析

(1)  $Q$ 点:



$$I_{BQ1} = I_{BQ2} = I_{BQ}$$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = I_{CQ}$$

$$I_{EQ1} = I_{EQ2} = I_{EQ}$$

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

$$u_O = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0$$

$R_b$ 是必要的吗?

晶体管输入回路方程:  $V_{EE} = I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_e$

通常,  $R_b$ 较小, 且  $I_{BQ}$  很小, 故

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

$$I_{EQ} \approx I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

选合适的  $V_{EE}$  和  $R_e$  就可得合适的  $Q$

## (2) 抑制共模信号

共模信号：数值相等、极性相同的输入信号，即

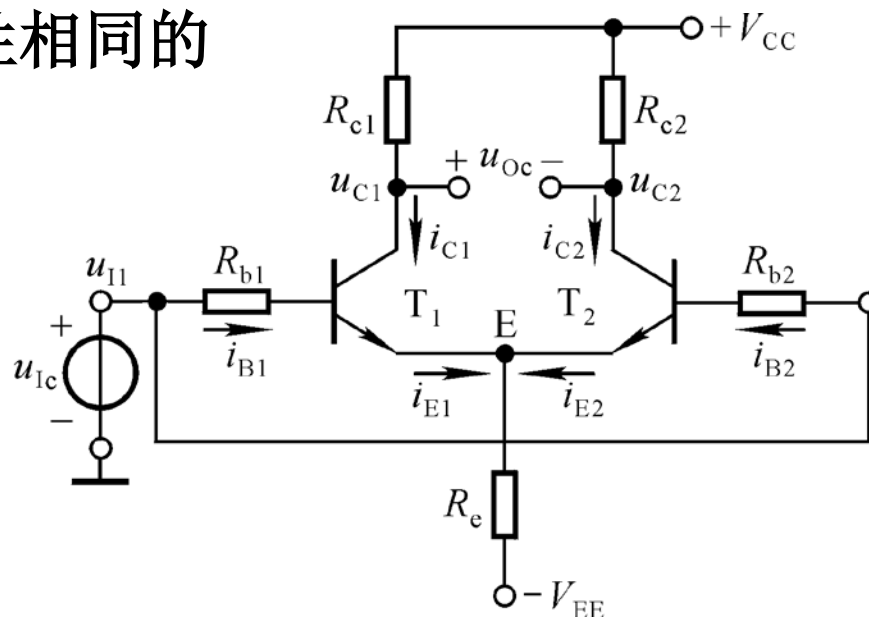
$$u_{I1} = u_{I2} = u_{Ic}$$

$$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}$$

$$\Delta i_{C1} = \Delta i_{C2}$$

$$\Delta u_{C1} = \Delta u_{C2}$$

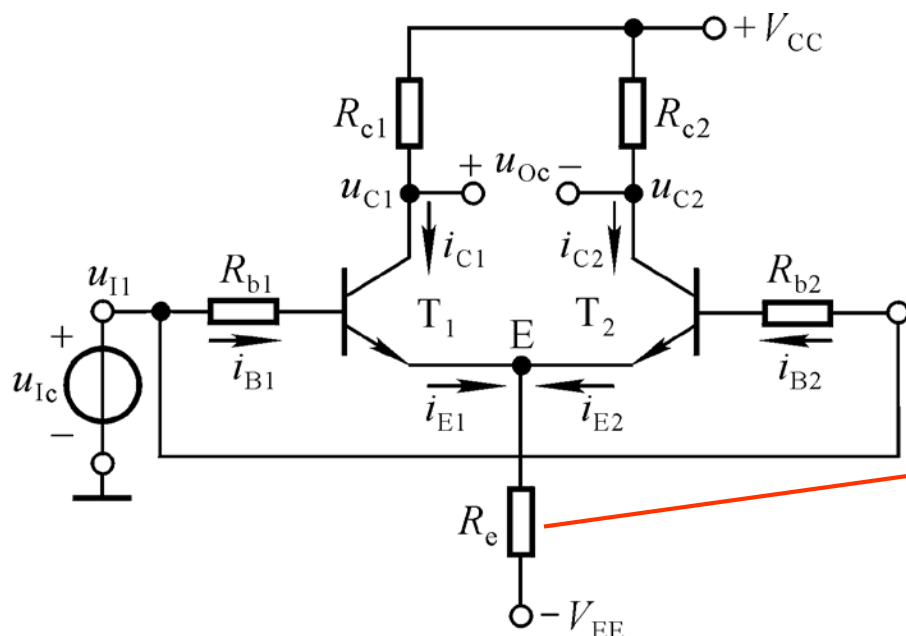
$$u_O = u_{C1} - u_{C2} = (u_{CQ1} + \Delta u_{C1}) - (u_{CQ2} + \Delta u_{C2}) = 0$$



$$\text{共模放大倍数 } A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}, \text{ 参数理想对称时 } A_c = 0$$



## (2) 抑制共模信号： $R_e$ 的共模负反馈作用



共模放大倍数  $A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}$

参数理想对称时  $A_c = 0$

对于每一边电路  
发射极电阻=?

$R_e$ 的共模负反馈作用：温度变化所引起的变化等效为共模信号

如  $T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow I_{C2} \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow I_{B1} \downarrow I_{B2} \downarrow \rightarrow I_{C1} \downarrow I_{C2} \downarrow$

抑制了每只差分管集电极电流、电位的变化。

### (3) 放大差模信号

差模信号：数值相等，极性相反的输入信号，即

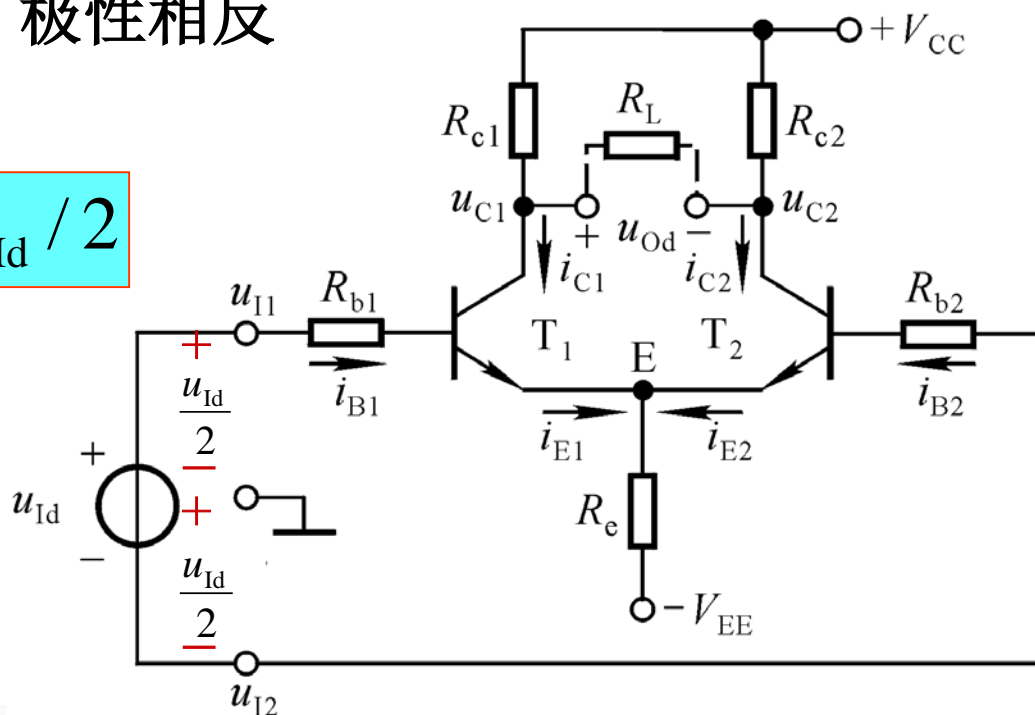
$$u_{I1} = -u_{I2} = u_{Id} / 2$$

$$\Delta i_{B1} = -\Delta i_{B2}$$

$$\Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}$$

$$\Delta u_{C1} = -\Delta u_{C2}$$

$$\Delta u_O = 2\Delta u_{C1}$$

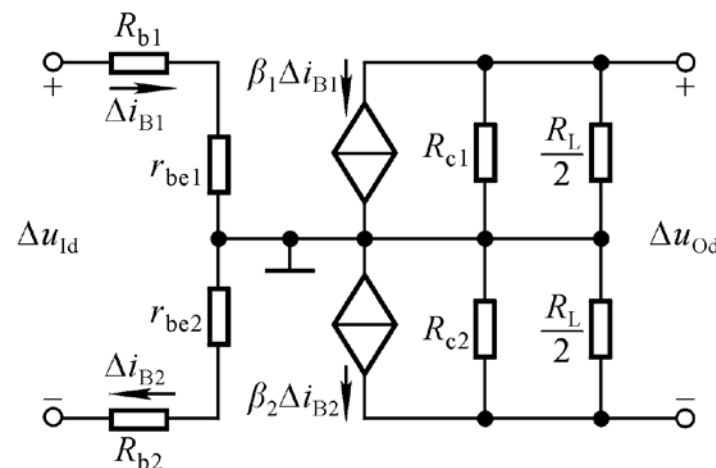
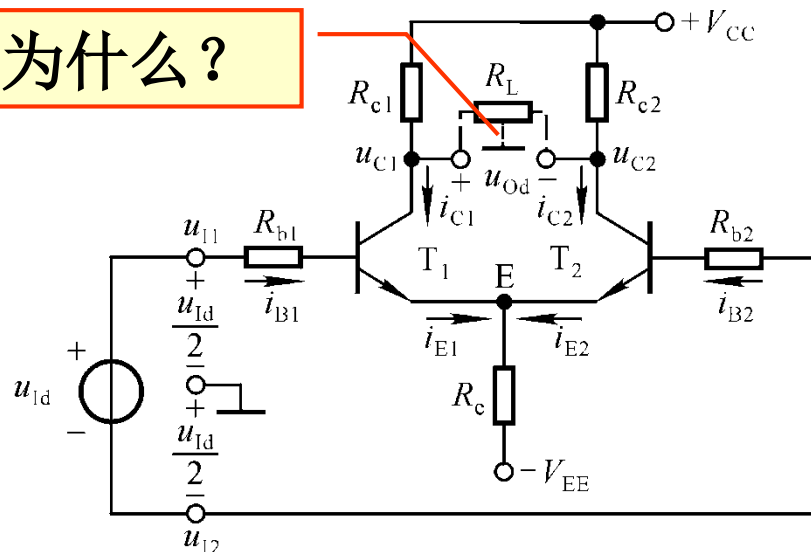


$\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$ ,  $R_e$  中电流不变，即  $R_e$  对差模信号无反馈作用。



# 差模信号作用时的动态分析

为什么？



$$\Delta u_{Id} = \Delta i_B \cdot 2(R_b + r_{be}) \quad \Delta u_{Od} = -\Delta i_C \cdot 2(R_c // \frac{R_L}{2})$$

差模放大倍数: 
$$A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = - \frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_c + r_{be}}$$

$$R_i = 2(R_b + r_{be}), \quad R_o = 2R_c$$



(4) 动态参数:  $A_d$ 、 $R_i$ 、 $R_o$ 、 $A_c$ 、 $K_{\text{CMR}}$

共模抑制比 $K_{\text{CMR}}$ : 综合考察差分放大电路放大差模信号的能力和抑制共模信号的能力。

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

在参数理想对称的情况下,  $K_{\text{CMR}} = \infty$ 。

在实际应用时, 信号源需要有“接地”点, 以避免干扰; 或负载需要有“接地”点, 以安全工作。

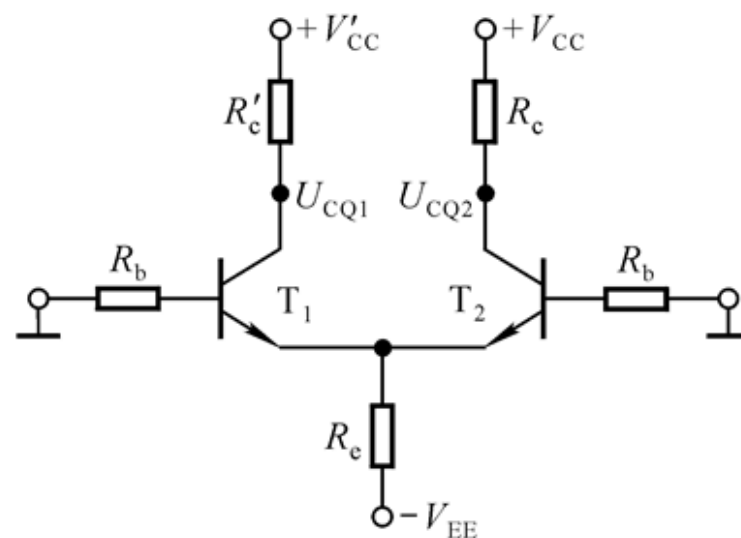
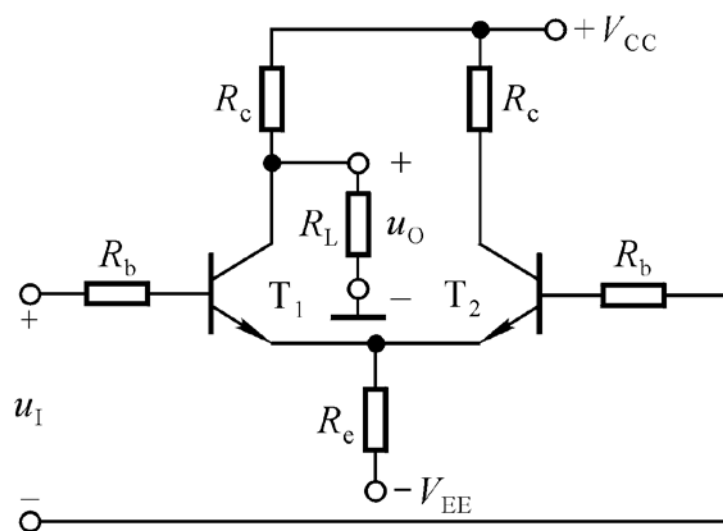
根据信号源和负载的接地情况, 差分放大电路有四种接法: 双端输入双端输出、双端输入单端输出、单端输入双端输出、单端输入单端输出。





## 4. 差分放大电路的四种接法

### (1) 双端输入单端输出： $Q$ 点分析

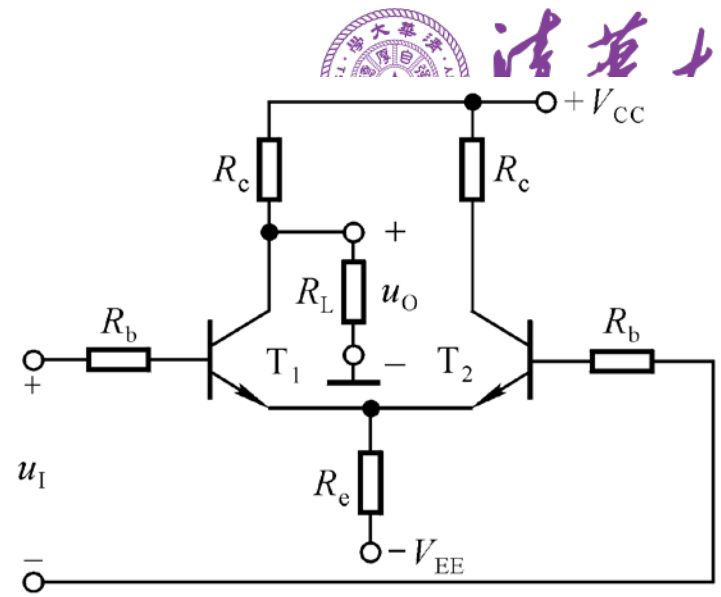
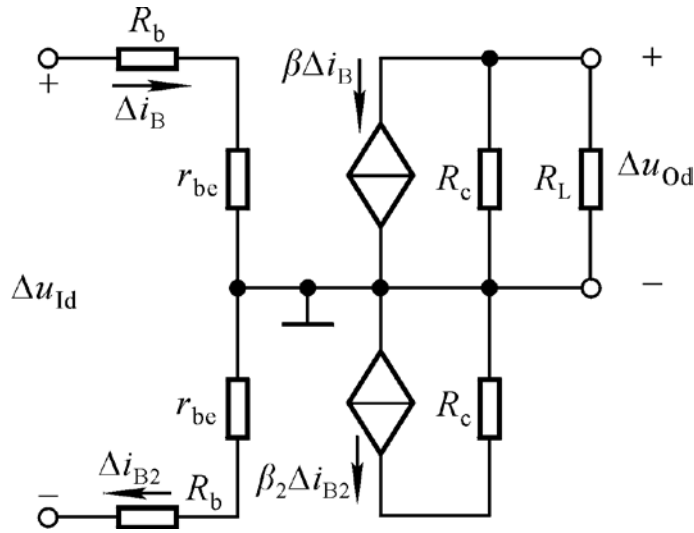


由于输入回路没有变化，所以 $I_{EQ}$ 、 $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$ 与双端输出时一样。但是 $U_{CEQ1} \neq U_{CEQ2}$ 。

$$U_{CQ1} = \frac{R_L}{R_c + R_L} \cdot V_{CC} - I_{CQ}(R_c // R_L)$$
$$U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$$

# (1) 双端输入单端输出：动态分析

## 差模信号作用下的分析

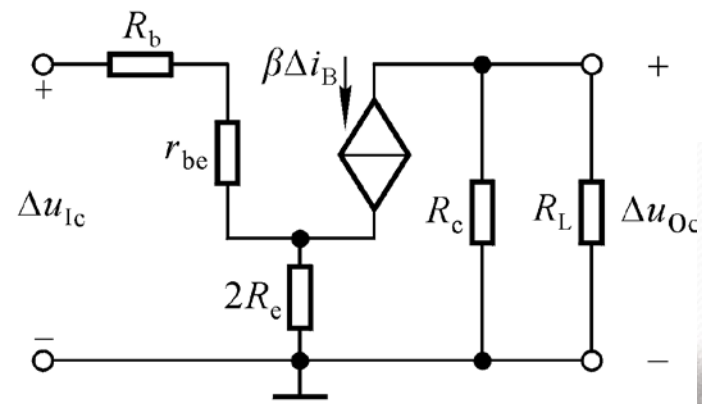


$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

$$R_i = 2(R_b + r_{be})$$

$$R_o = R_c$$

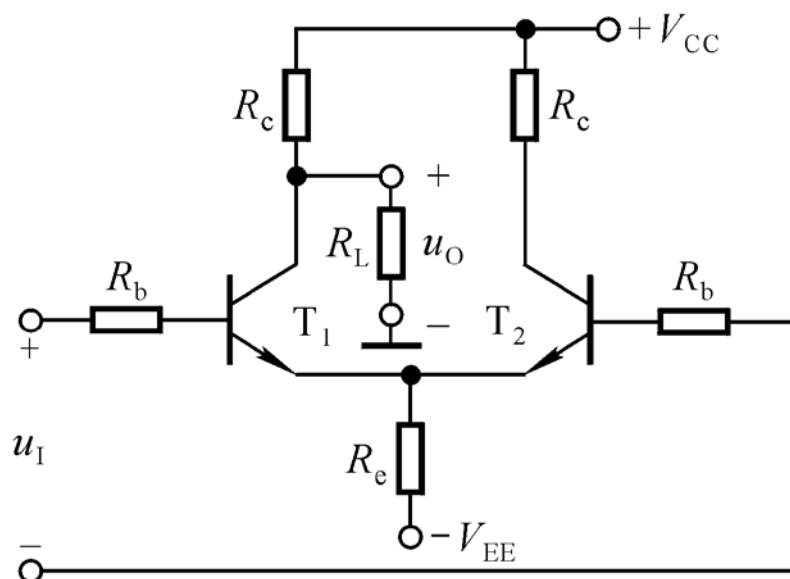
## 共模信号作用下的分析



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

$$K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})}$$

# 讨论



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

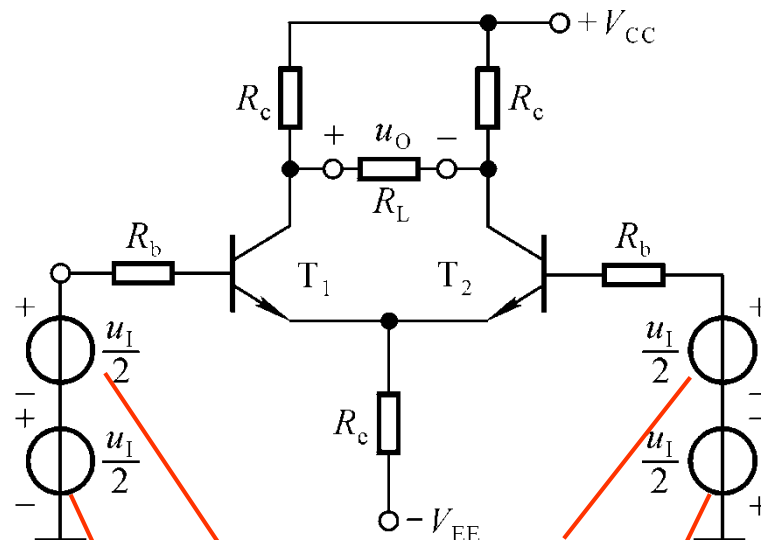
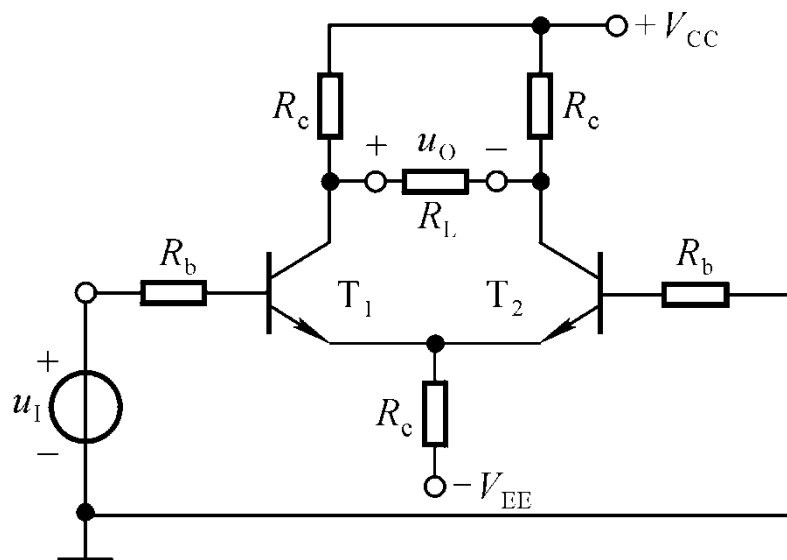
$$K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{R_b + r_{be}}$$

$$R_i = 2(R_b + r_{be}), \quad R_o = R_c$$

- (1)  $T_2$ 的 $R_c$ 可以短路吗？
- (2) 什么情况下 $A_d$ 为“+”？
- (3) 双端输出时的 $A_d$ 是单端输出时的2倍吗？



## (2) 单端输入双端输出



共模输入电压

差模输入电压

在输入信号作用下发射极的电位变化吗？说明为什么？

输入差模信号的同时总是伴随着共模信号输入：

$$u_{Id} = u_I, \quad u_{Ic} = u_I / 2$$

测试：

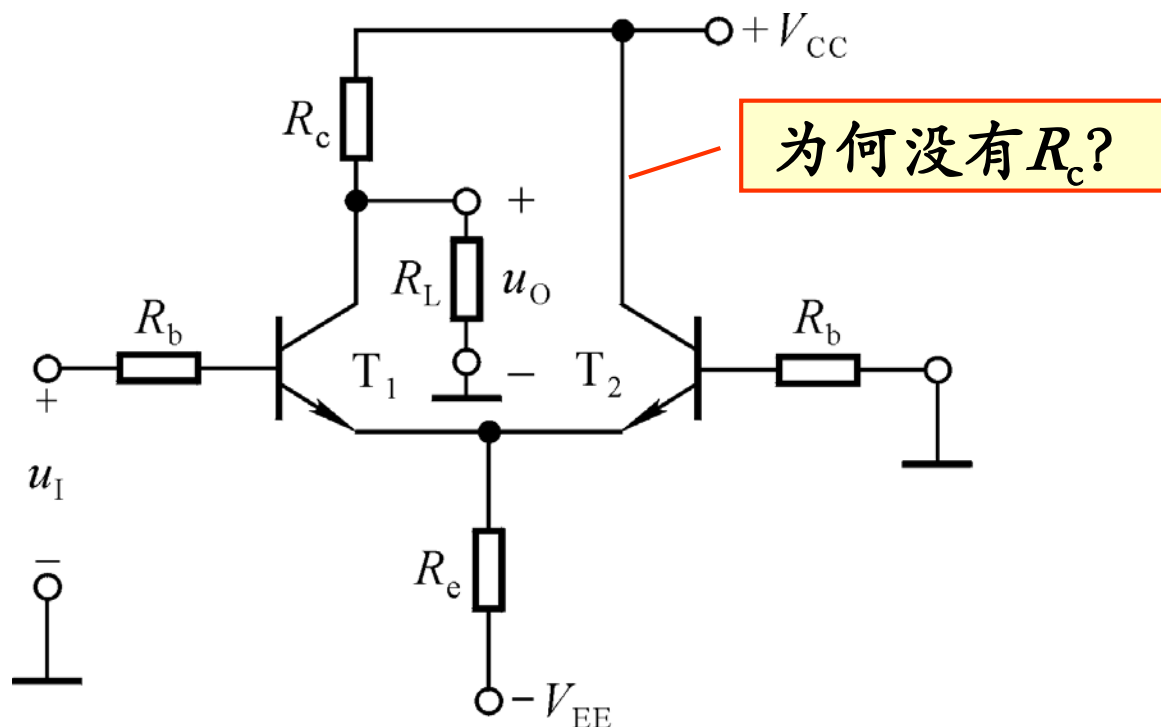
$$u_O = A_d \cdot u_I + A_c \cdot \frac{u_I}{2} + U_{OQ}$$

静态时两个集电极电位差





### (3) 单端输入单端输出



- 静态和动态参数的分析同双端输入单端输出电路
- 分析方法只与输出方式有关



### (3) 四种接法的比较：电路参数理想对称条件下

四种输入方式：  $R_i$  均为  $2(R_b + r_{be})$ ;

双端输入时无共模信号输入，单端输入时有共模信号输入。

输出方式：  $Q$  点、  $A_d$ 、  $A_c$ 、  $K_{CMR}$ 、  $R_o$  均与之有关。

$$\text{双端输出: } A_d = \frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$$

$$A_c = 0$$

$$K_{CMR} = \infty$$

$$R_o = 2R_c$$

$$\text{单端输出: } A_d = \frac{\beta(R_c // R_L)}{2(R_b + r_{be})}$$

$$A_c = \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

$$K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})}$$

$$R_o = R_c$$



## 5. 具有恒流源的差分放大电路

$R_e$  越大，每一边的漂移越小，共模负反馈越强，单端输出时的  $A_c$  越小， $K_{CMR}$  越大，差分放大电路的性能越好。

但为使静态电流不变， $R_e$  越大， $V_{EE}$  越大，以至于  $R_e$  太大就不合理了。

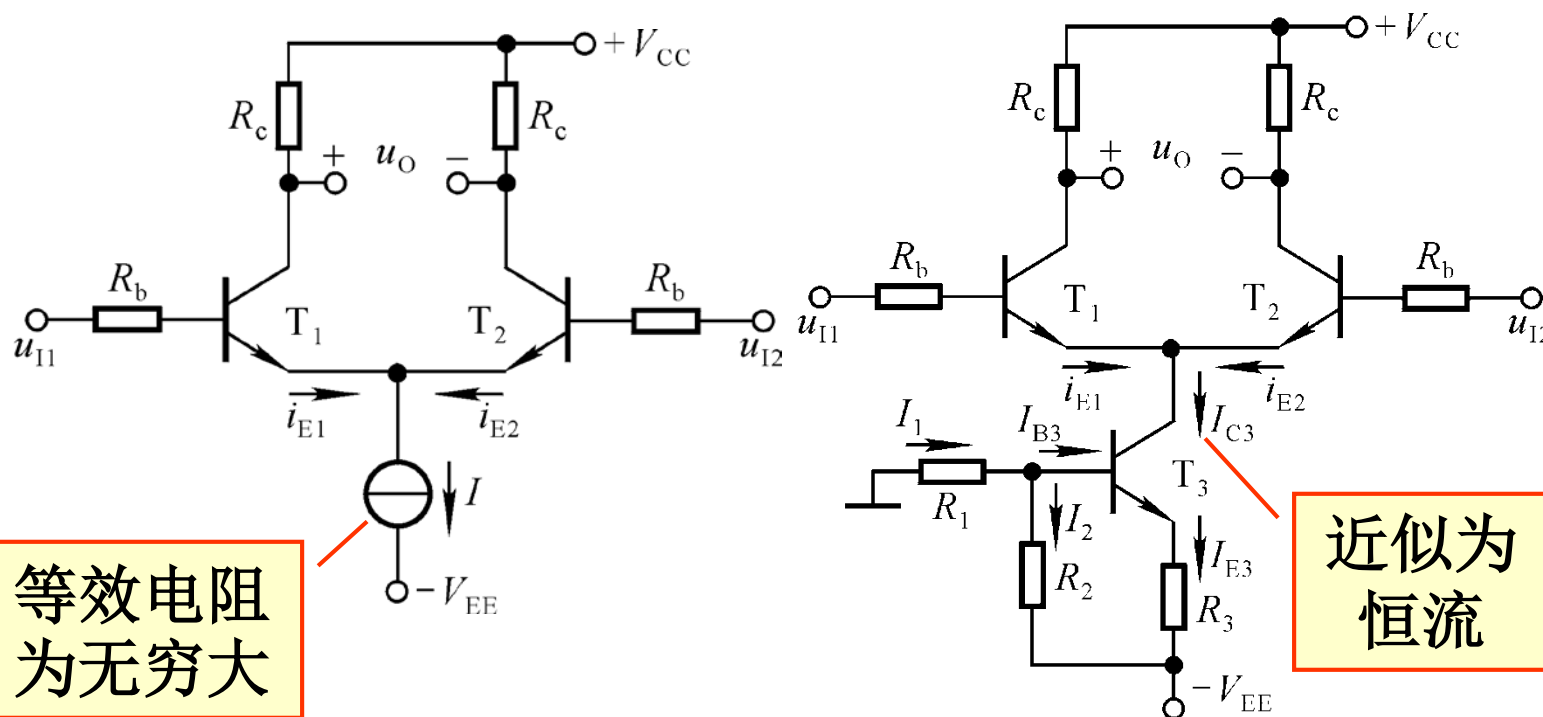
需在低电源条件下，设置合适的  $I_{EQ}$ ，并得到趋于无穷大的  $R_e$ 。

**解决方法：采用电流源取代  $R_e$ ！**





# 具有恒流源差分放大电路的组成



等效电阻  
为无穷大

近似为  
恒流

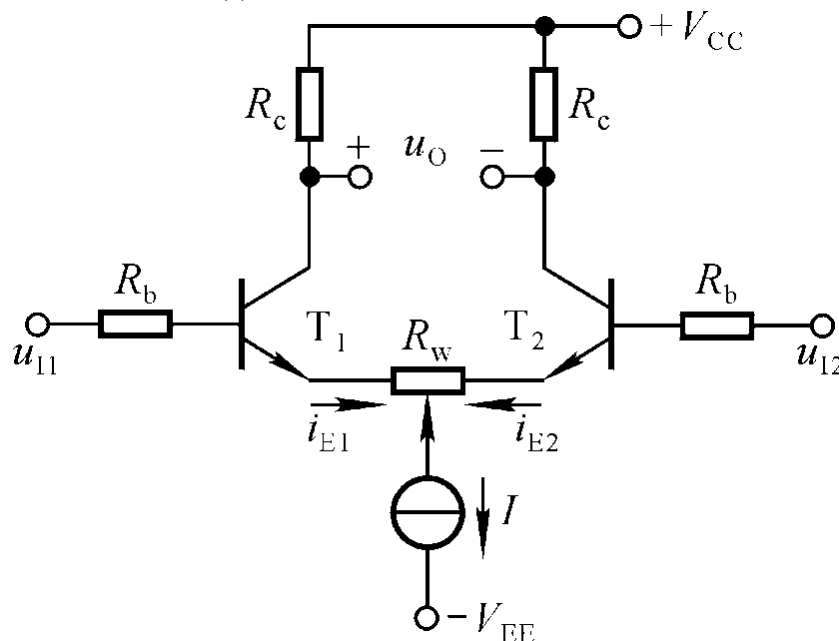
$$I_2 \gg I_{B3}, \quad I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{EE} - U_{BEQ}}{R_3}$$





## 6. 差分放大电路的改进

### (1) 加调零电位器 $R_W$



- 1) 为什么加 $R_W$ ?
- 2)  $R_W$ 取值应大些? 还是小些?
- 3)  $R_W$ 对动态参数的影响?
- 4) 若 $R_W$ 滑动端在中点, 写出 $A_d$ 、 $R_i$ 的表达式。

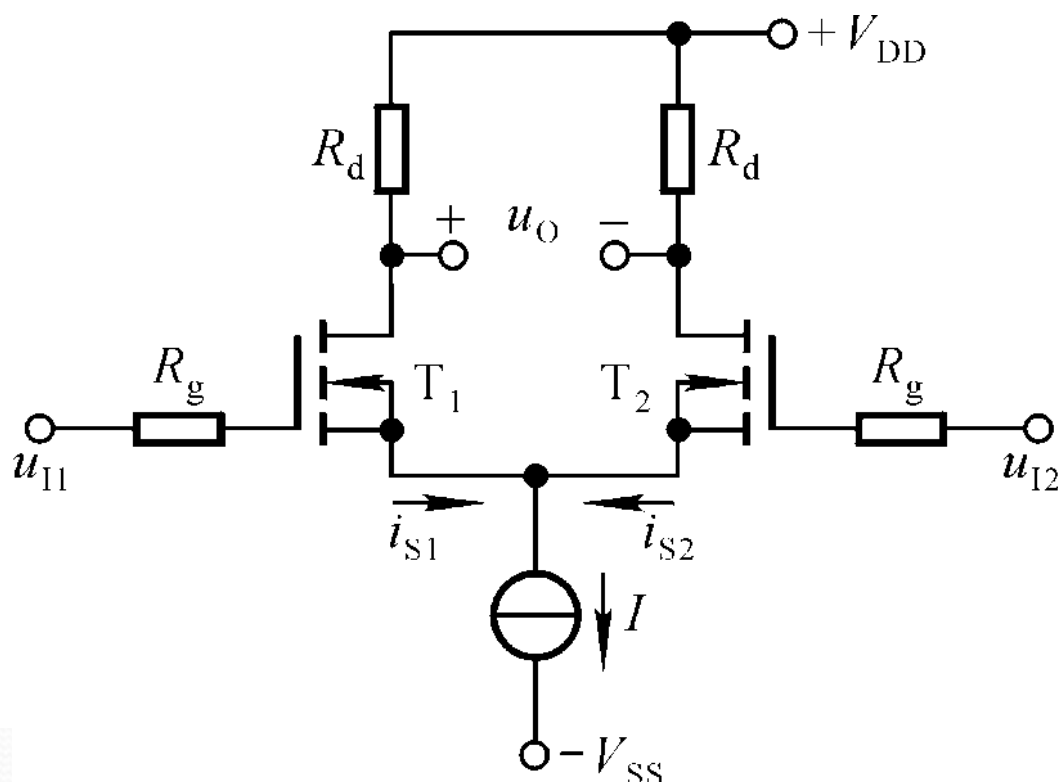
$$A_d = - \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_W}{2}}$$

$$R_i = 2(R_b + r_{be}) + (1 + \beta) R_W$$



## 6. 差分放大电路的改进

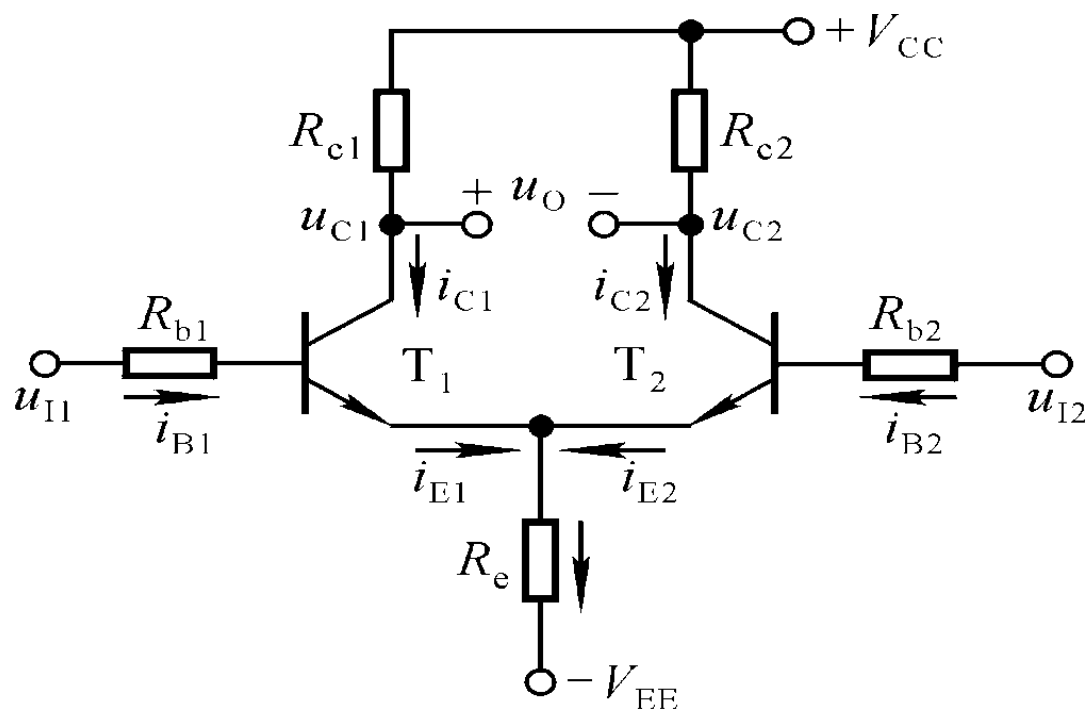
### (2) 场效应管差分放大电路



$$A_d = -g_m R_d, R_i = \infty, R_o = 2R_d$$



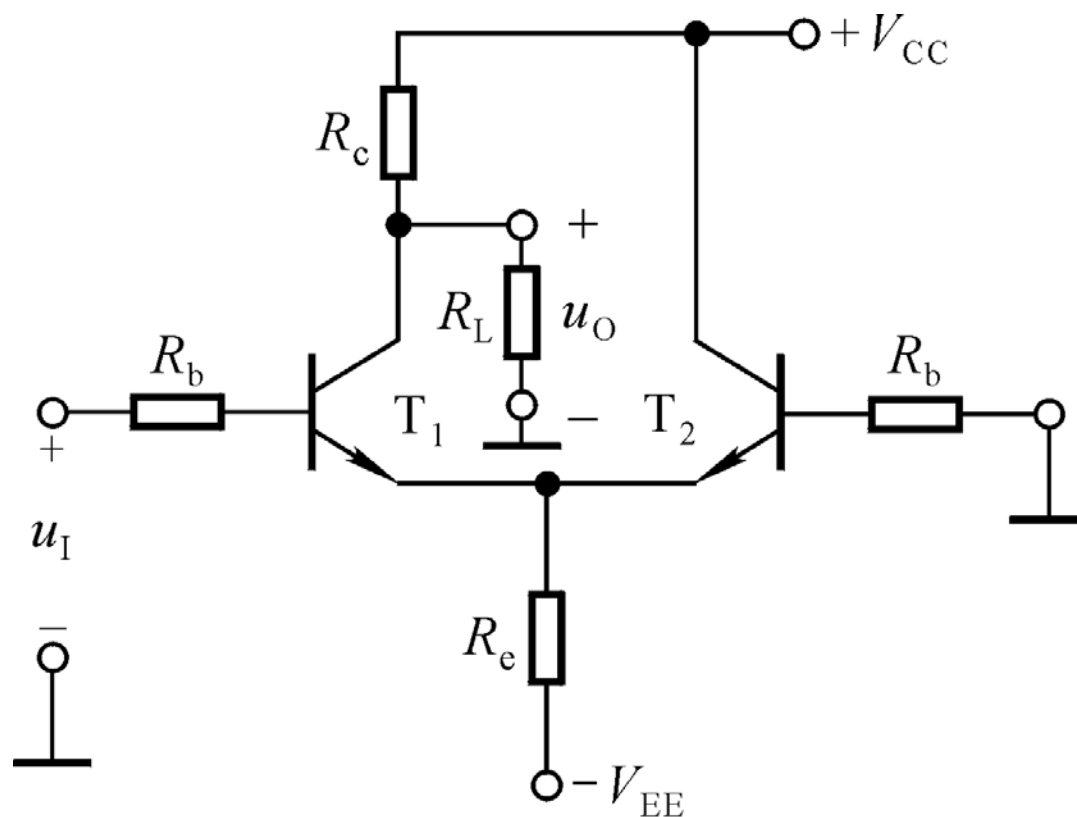
# 讨论一



若 $u_{I1}=10\text{mV}$ ,  $u_{I2}=5\text{mV}$ , 则 $u_{Id}=?$   $u_{Ic}=?$



## 讨论二



若  $u_I = 10\text{mV}$ ，则  $u_{Id} = ?$   $u_{Ic} = ?$



## 二、电流源电路

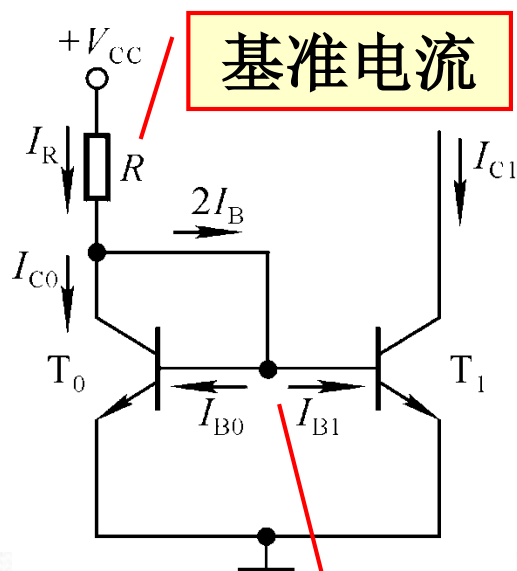
1. 镜像电流源
2. 微电流源
3. 多路电流源
4. 有源负载



# 1. 镜像电流源

在电流源电路中充分利用集成运放中晶体管性能的一致性。

$T_0$  和  $T_1$  特性完全相同。



基准电流

$$I_R = (V_{CC} - U_{BE}) / R$$

$$U_{BE1} = U_{BE0}, \quad I_{B1} = I_{B0}$$

$$I_{C1} = I_{C0} = I_C$$

$$I_R = I_{C0} + I_{B0} + I_{B1} = I_C + \frac{2I_C}{\beta}$$

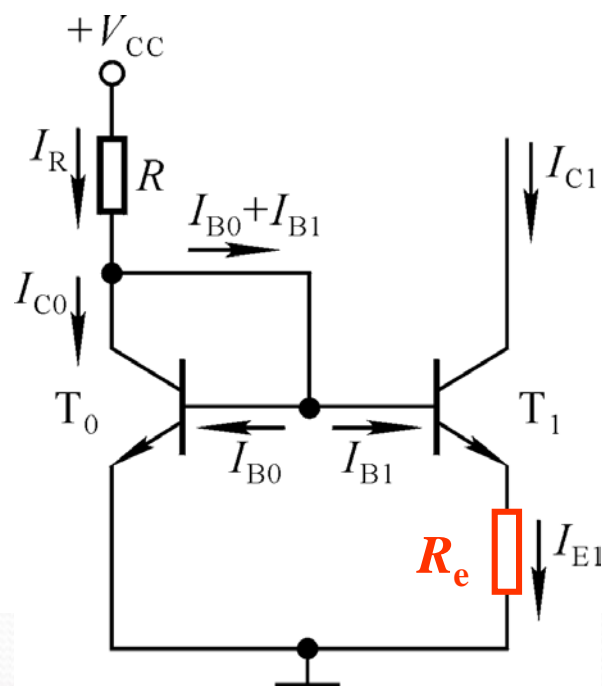
$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I_R$$

电路中有  
负反馈吗？

若  $\beta \gg 2$ , 则  $I_C \approx I_R$

## 2. 微电流源

要求提供很小的静态电流，又不能用大电阻。



$$I_{E1} = (U_{BE0} - U_{BE1}) / R_e$$

$$I_E \approx I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}, \quad \frac{I_{E0}}{I_{E1}} \approx I_S e^{\frac{(U_{BE0} - U_{BE1})}{U_T}}$$

$$U_{BE0} - U_{BE1} = U_T \ln \frac{I_{E0}}{I_{E1}} = I_{E1} R_e$$

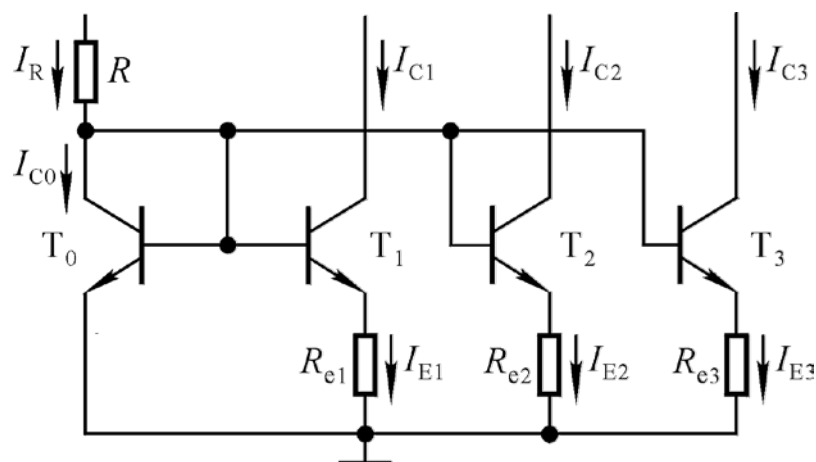
$$I_{E1} \approx I_{C1}$$

$$I_{E0} \approx I_{C0} \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R}$$

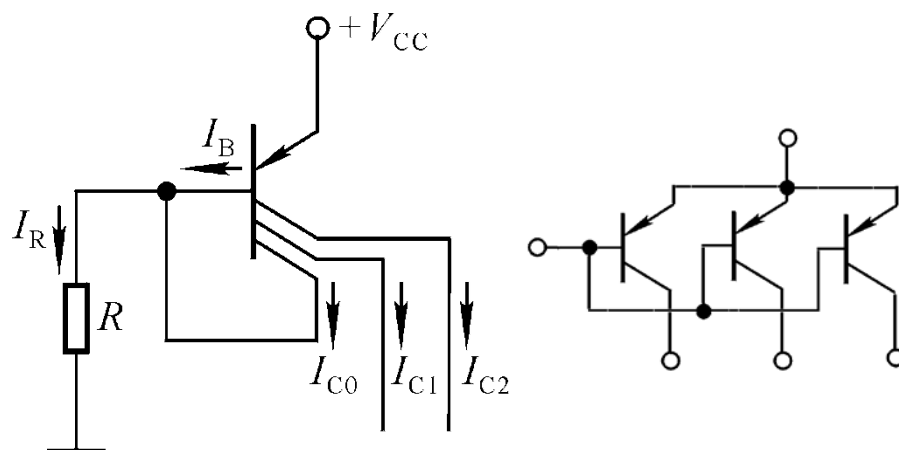
超越  
方程

设计过程很简单，首先确定 $I_{E0}$ 和 $I_{E1}$ ，然后选定 $R$ 和 $R_e$ 。

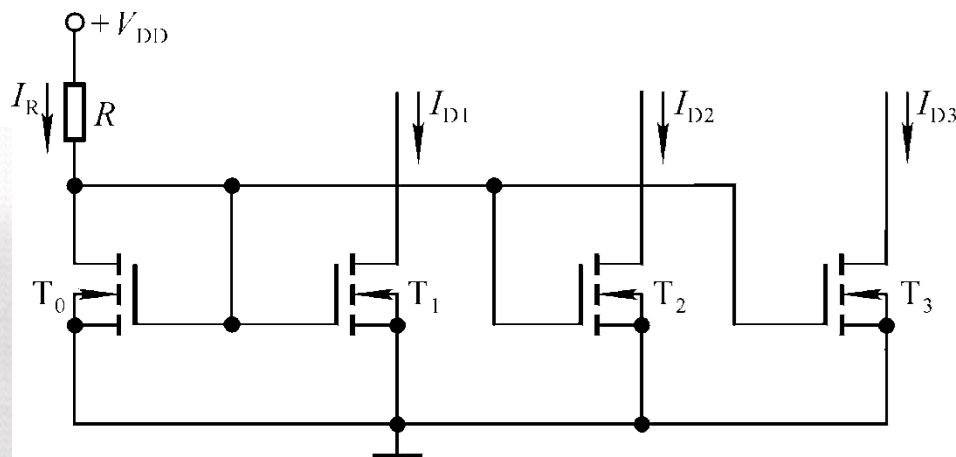
### 3. 多路电流源



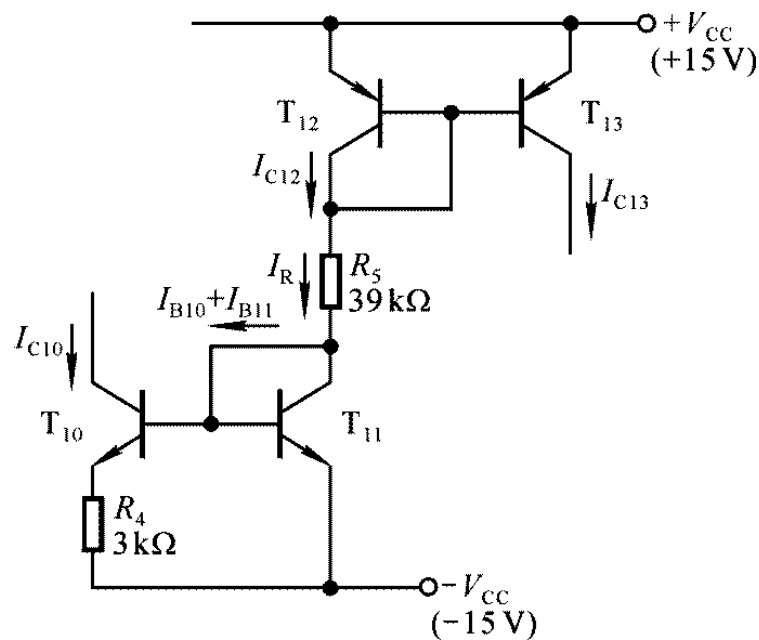
根据所需静态电流，来  
选取发射极电阻的数值。



根据所需静态电流，来  
确定集电结面积。



根据所需静态电流，  
来确定沟道尺寸。



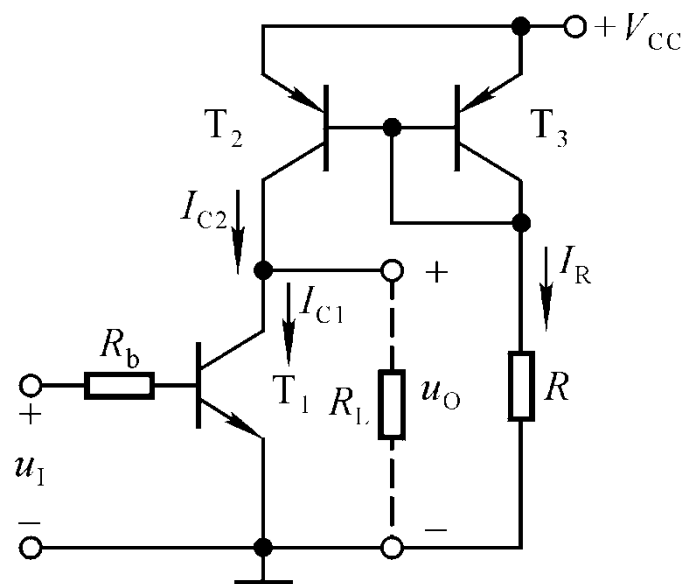
- 1) 基准电流?
- 2) 输出电流与基准电路的关系?



## 4. 有源负载

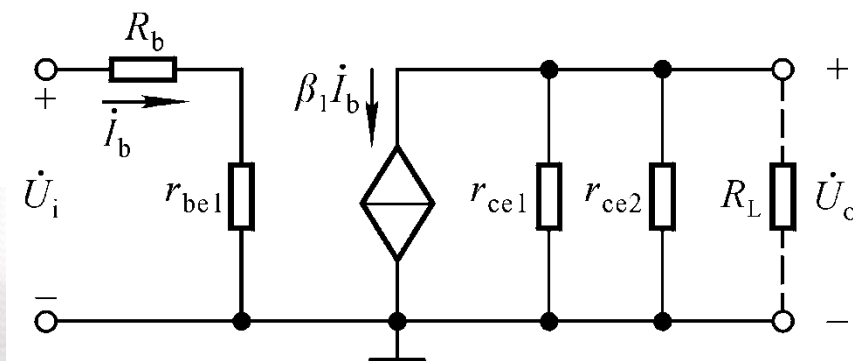
### (1) 用于共射放大电路

- ①哪只管子为放大管？
- ②其集电极静态电流约为多少？
- ③静态时 $U_{IQ}$ 为多少？



- ④为什么要考虑  $h_{22}$ ?

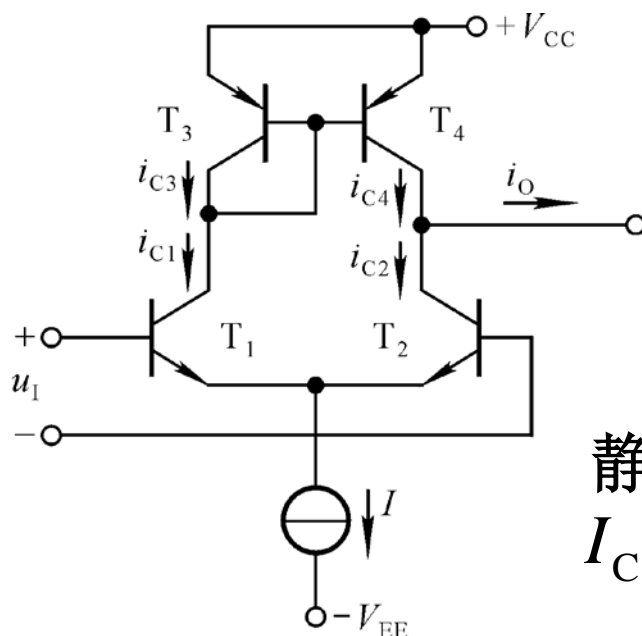
$$\dot{A}_u = -\frac{\beta_1 (r_{ce1} // r_{ce2} // R_L)}{R_b + r_{be1}}$$







## (2) 用于差分放大电路



使单端输出电路  
的差模放大倍数近似  
等于双端输出时的差  
模放大倍数。

①电路的输入、输出方式？

②如何设置静态电流？

③静态时 $i_O$ 约为多少？

④动态时 $\Delta i_O$ 约为多少？

静态：

$$I_{C1} = I_{C2}, \quad I_{C3} \approx I_{C1}, \quad I_{C4} = I_{C3}, \quad I_{C4} \approx I_{C2}$$

$$i_O = i_{C4} - i_{C2} \approx 0$$

动态：  $\Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}, \quad \Delta i_{C4} = \Delta i_{C3} \approx \Delta i_{C1},$

$$\Delta i_O = \Delta i_{C4} - \Delta i_{C2} \approx 2\Delta i_{C1}$$



## 三、互补输出级

1. 对输出级的要求
2. 基本电路
3. 消除交越失真的互补输出级
4. 准互补输出级



## 1. 对输出级的要求

互补输出级是直接耦合的功率放大电路。

对输出级的要求：带负载能力强；直流功耗小；负载电阻上无直流功耗；最大不失真输出电压最大。

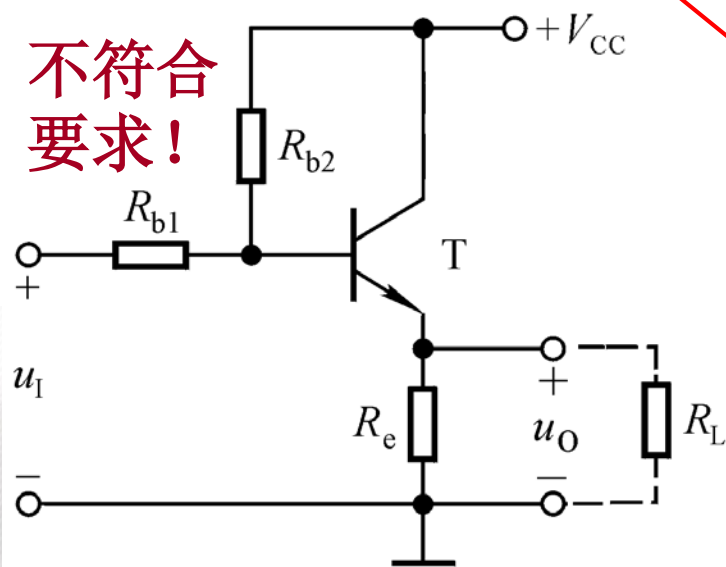
射极输出形式

静态工作电流小

输入为零时输出为零

双电源供电时 $U_{om}$ 的峰值接近电源电压。  
单电源供电 $U_{om}$ 的峰值接近二分之一电源电压。

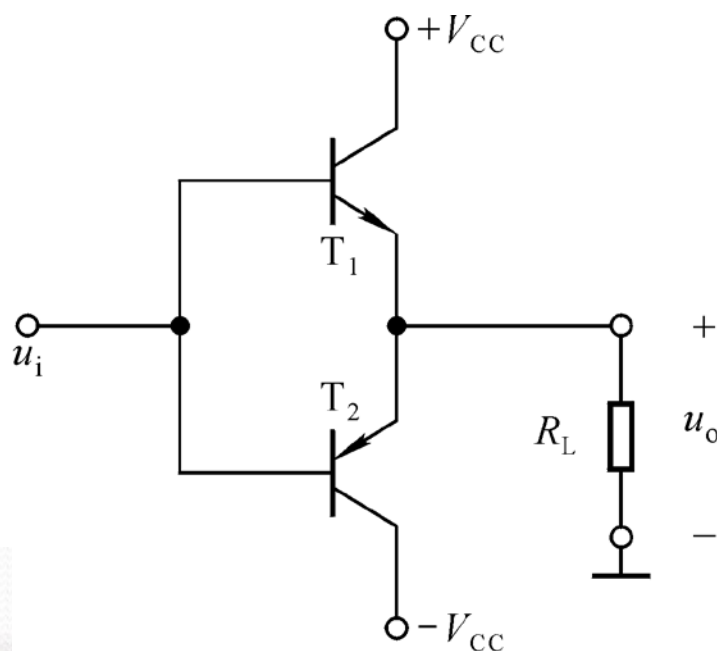
不符合  
要求！



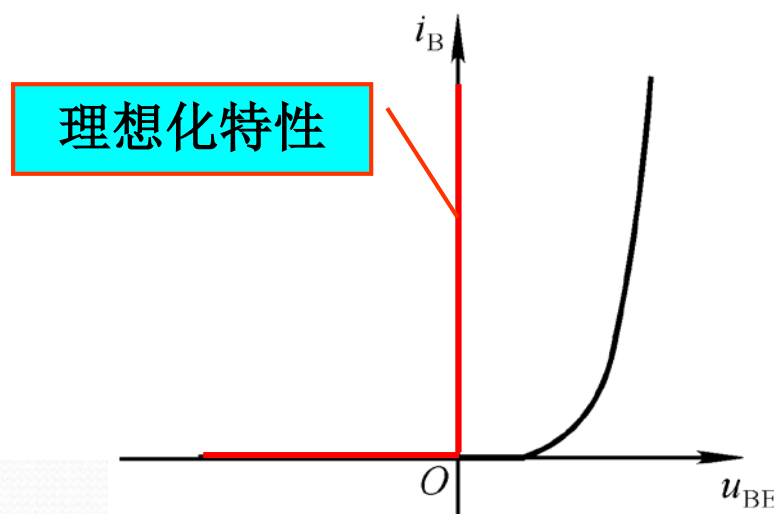
## 2. 基本电路

(1) 特征:  $T_1$ 、 $T_2$ 特性理想对称。

(2) 静态分析

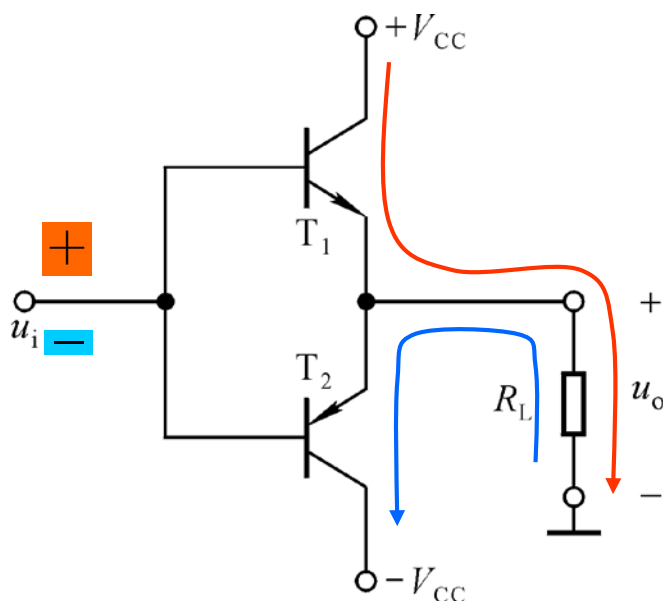


$T_1$ 的输入特性



静态时 $T_1$ 、 $T_2$ 均截止,  $U_B = U_E = 0$ ,  $U_{CE1} = U_{EC2} = V_{CC}$ 。

### (3) 动态分析



$u_i$  正半周，电流通路为  
 $+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow R_L \rightarrow \text{地}$ ,

$$u_o = u_i$$

$u_i$  负半周，电流通路为  
 $\text{地} \rightarrow R_L \rightarrow T_2 \rightarrow -V_{CC}$ ,

$$u_o = u_i$$

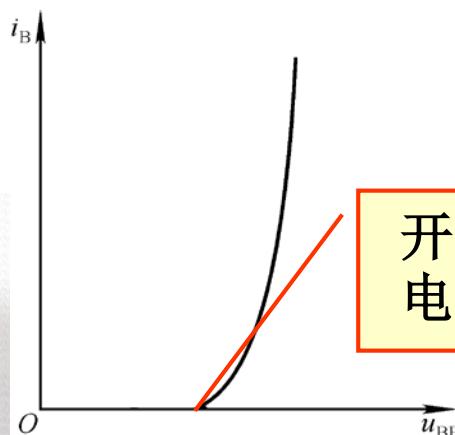
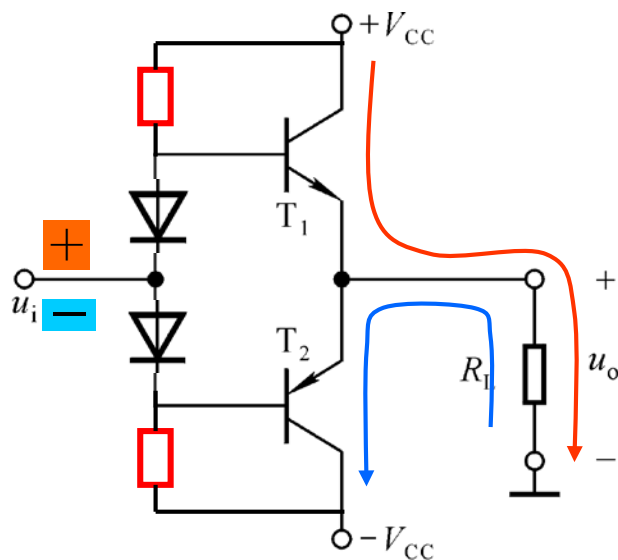
两只管子交替工作，两路电源交替供电，双向跟随。

特点：带负载能力强、直流功耗小、零输入零输出、  
 $U_{om}$  最大

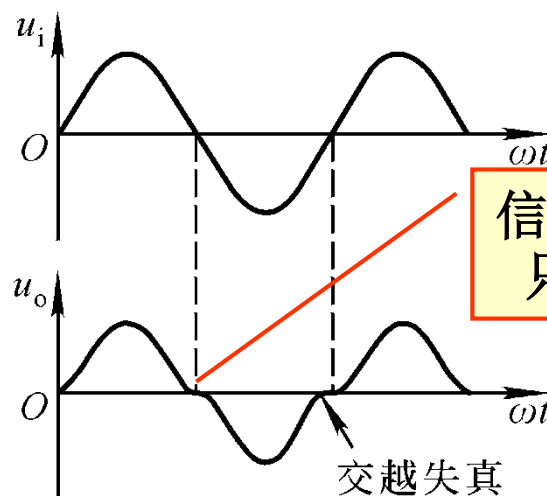




## (4) 交越失真



开启  
电压



信号在零附近两  
只管子均截止

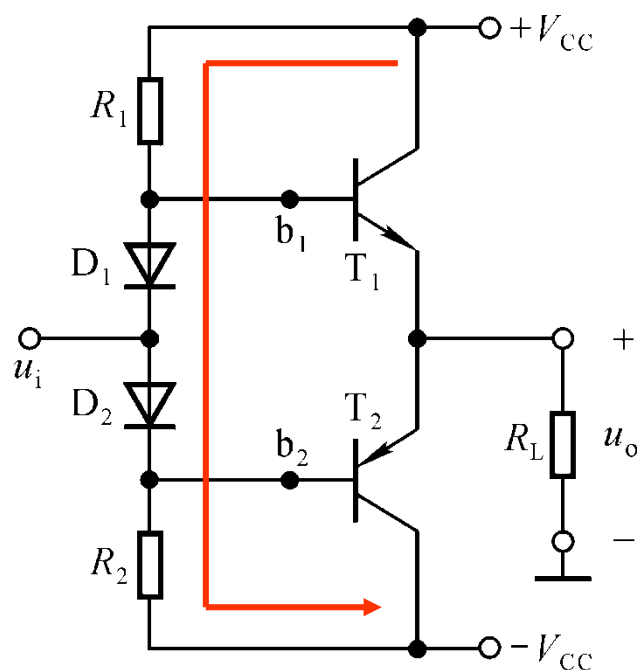
交越失真

消除失真的方法：  
设置合适的静态工作点。

- ① 静态时 $T_1$ 、 $T_2$ 处于临界导通状态，有信号时至少有一只导通；
- ② 偏置电路对动态性能影响要小。

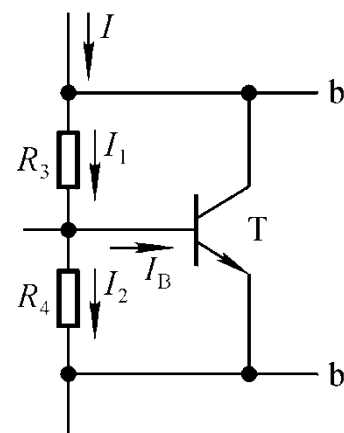


### 3. 消除交越失真的互补输出级



静态:  $U_{B1B2} = U_{D1} + U_{D2}$

动态:  $u_{b1} \approx u_{b2} \approx u_i$



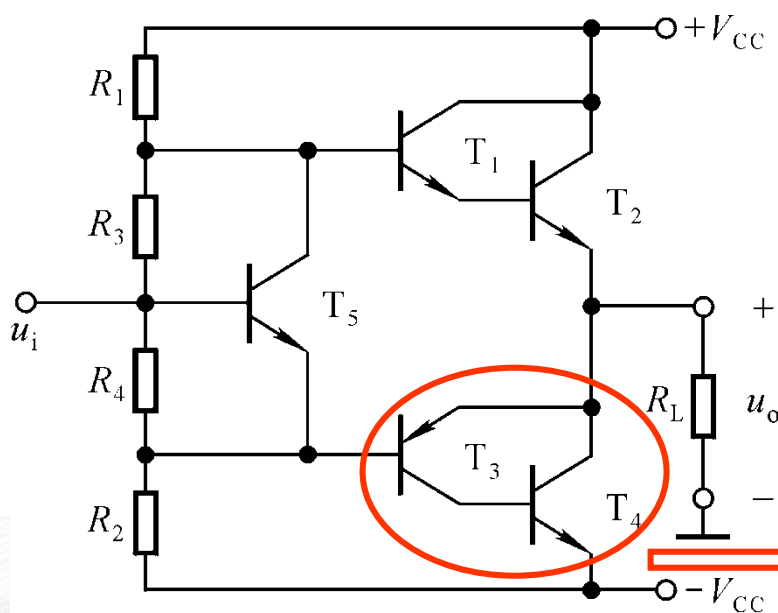
若  $I_2 \gg I_B$ , 则

$$U_{B1B2} \approx \frac{R_3 + R_4}{R_4} \cdot U_{BE}$$

故称之为  $U_{BE}$  倍增电路

## 4. 准互补输出级

为保持输出管的良好对称性，输出管应为同类型晶体管。



静态时:  $U_{BE1} + U_{BE2} + U_{EB3}$   
 $\approx (1 + \frac{R_5}{R_4}) U_{BE5}$

动态时:  $u_{b1} \approx u_{b3} \approx u_i$

$R_3$ 、 $R_4$ 的动态电压可忽略

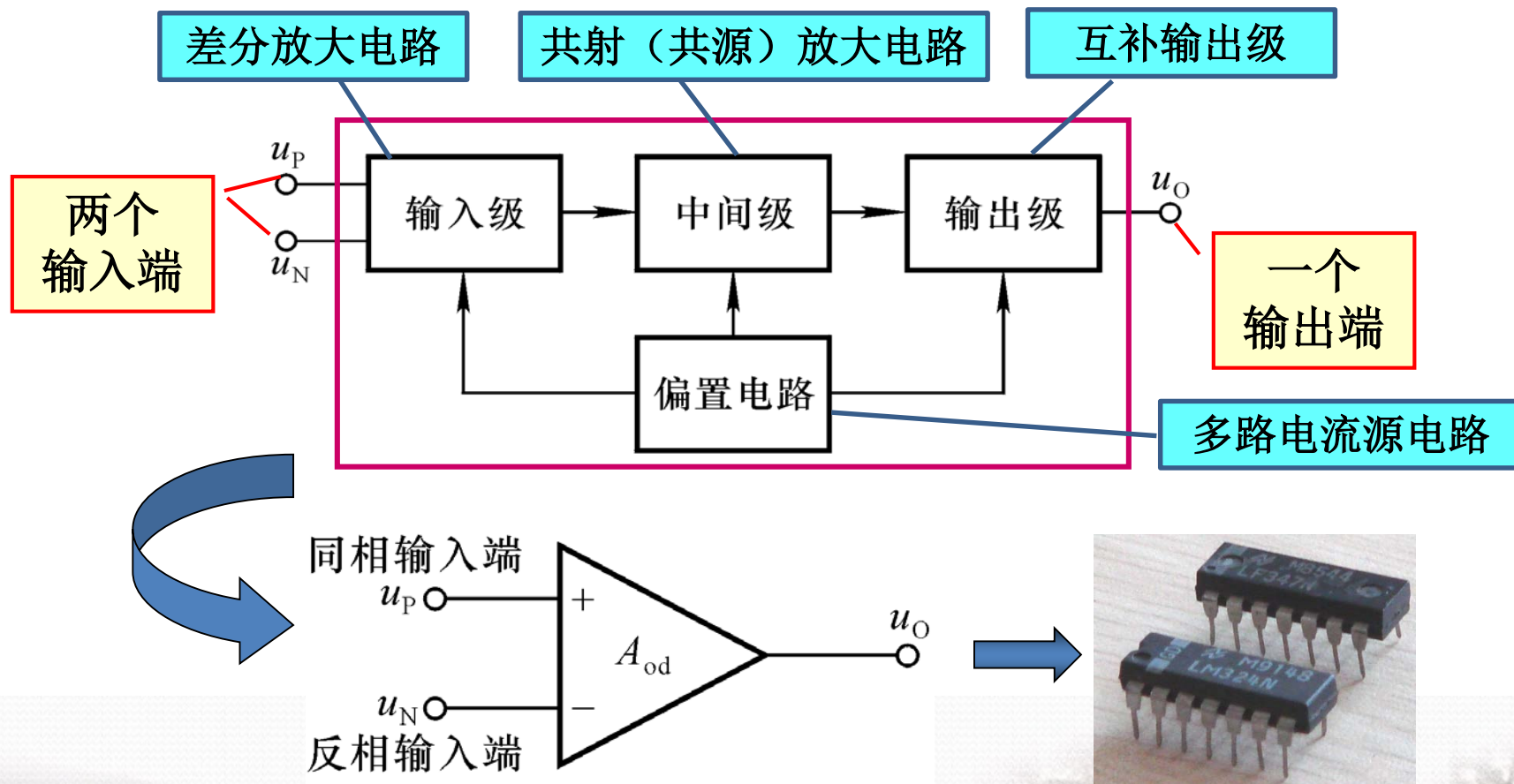
$R_1$ 用电流源取代，集成放大电路中正是如此。



## § 3.4 集成运放内部电路简介

- 一、模拟电路的读图方法
- 二、双极型集成运放电路
- 三、集成运放的主要性能指标
- 四、集成运放的种类

# 回顾：集成运放电路的组成



若将集成运放看成为一个“黑盒子”，则可等效为一个高性能的双端输入、单端输出的差分放大电路。



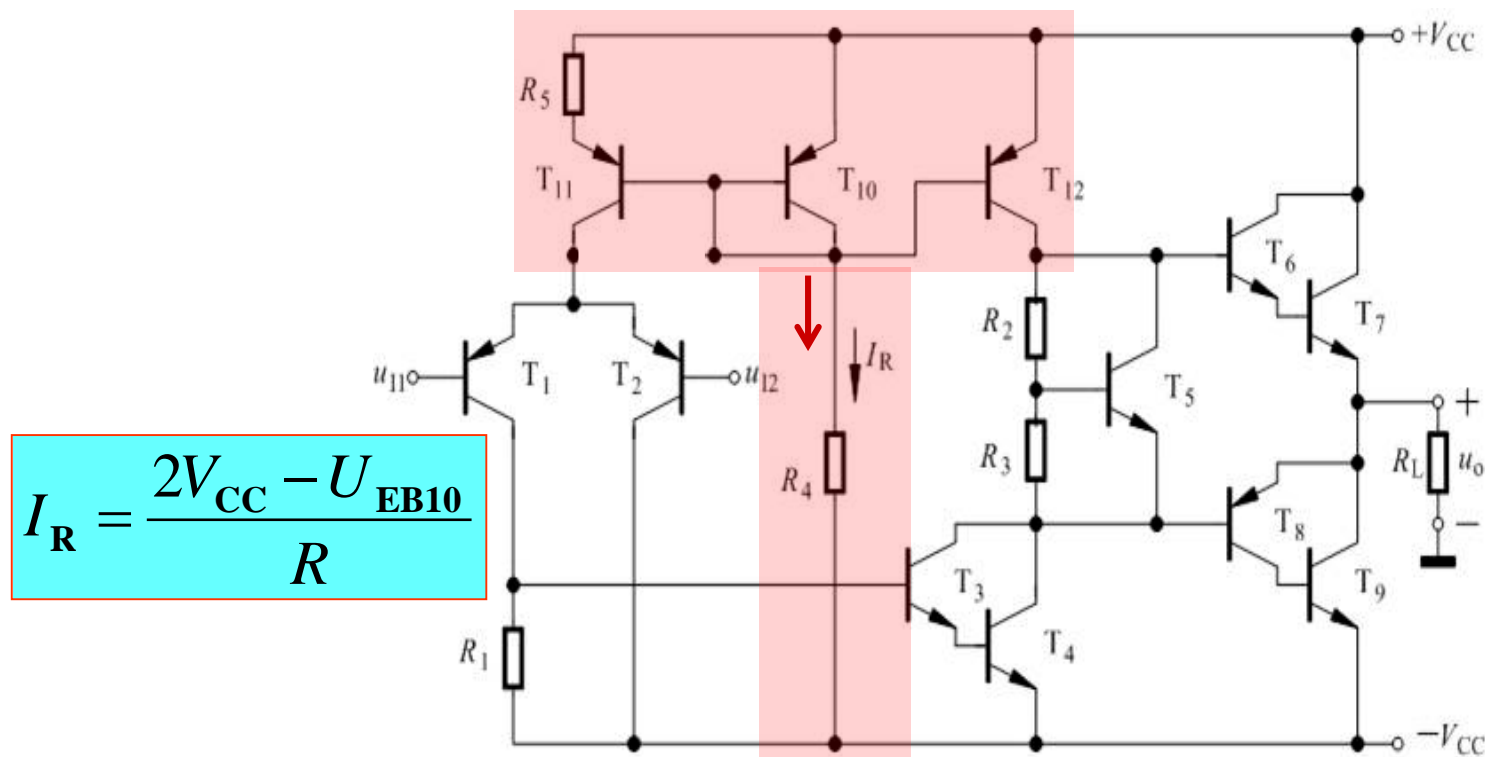


# 一、模拟电路的读图方法

1. **化整为零**：在集成运放电路中先将偏置电路分离出来，然后根据信号流通顺序将放大部分分为输入级、中间级和输出级三级；
2. **分析功能**：弄清偏置电路的特点及每一级电路属于哪种基本放大电路、有何性能特点；
3. **统观整体**：研究各部分电路相互间的联系，理解电路如何实现所具有的功能；
4. **定量估算**：必要时再进行。

## 二、双极型集成运放

### (1) 化整为零，识别电路

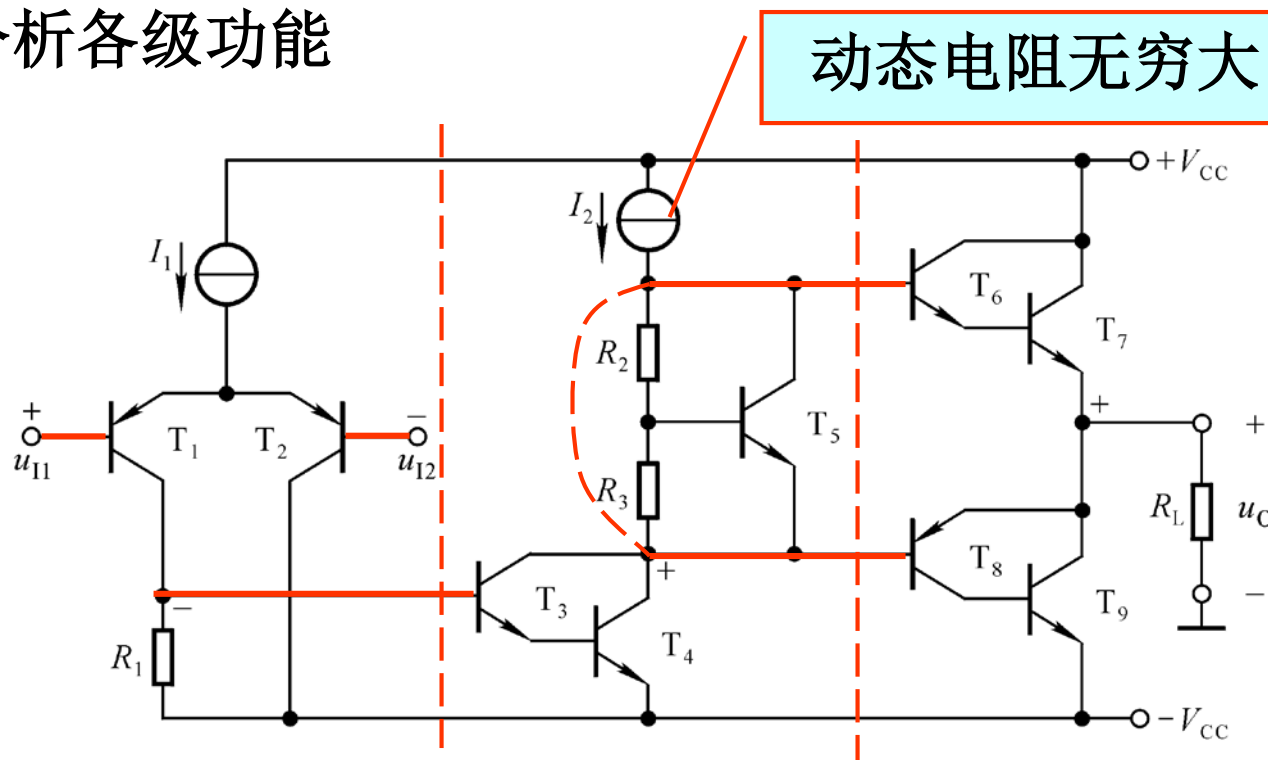


首先找出偏置电路。

在集成运放电路中，若有一个回路电流可以估算出，则该电流为基准电流。

$T_{10}$ 、 $T_{11}$ —微电流源， $T_{10}$ 、 $T_{12}$ —镜像电流源。

## (2) 分析各级功能



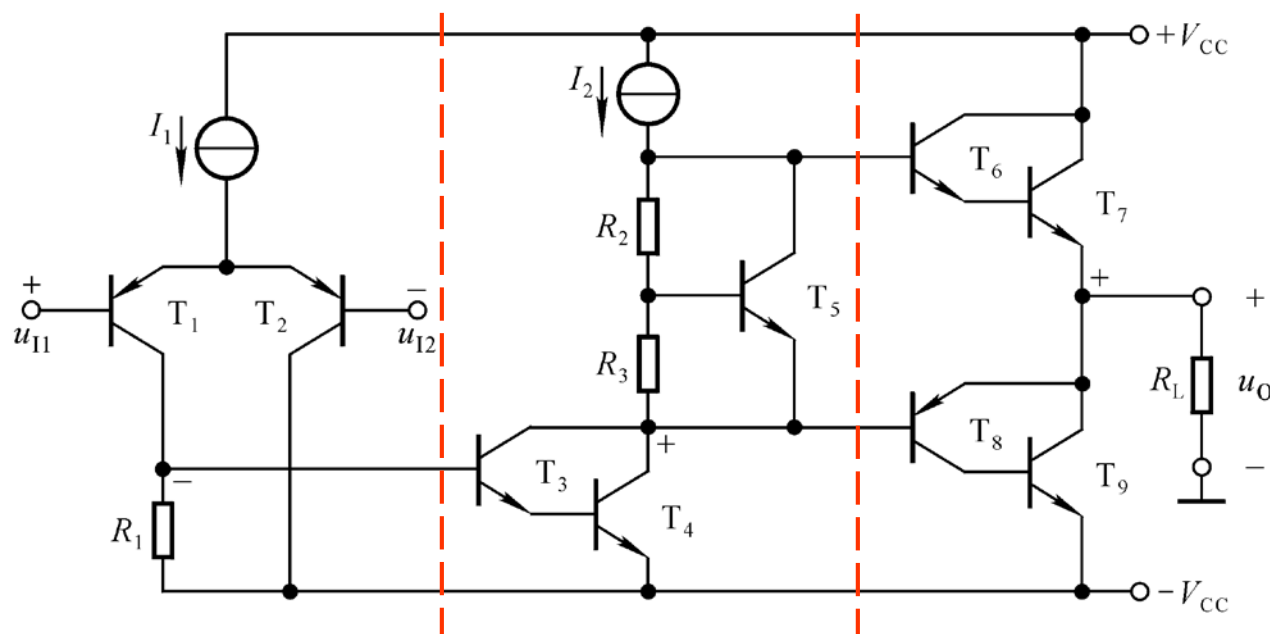
分离出电流源，简化电路；按信号流通顺序分析放大电路。

第一级：具有恒流源的双端输入单端输出差分放大电路

第二级：以复合管为放大管、恒流源做负载的共射放大电路

第三级：准互补输出级， $U_{BE}$  倍增电路消除交越失真

### (3) 基本性能分析



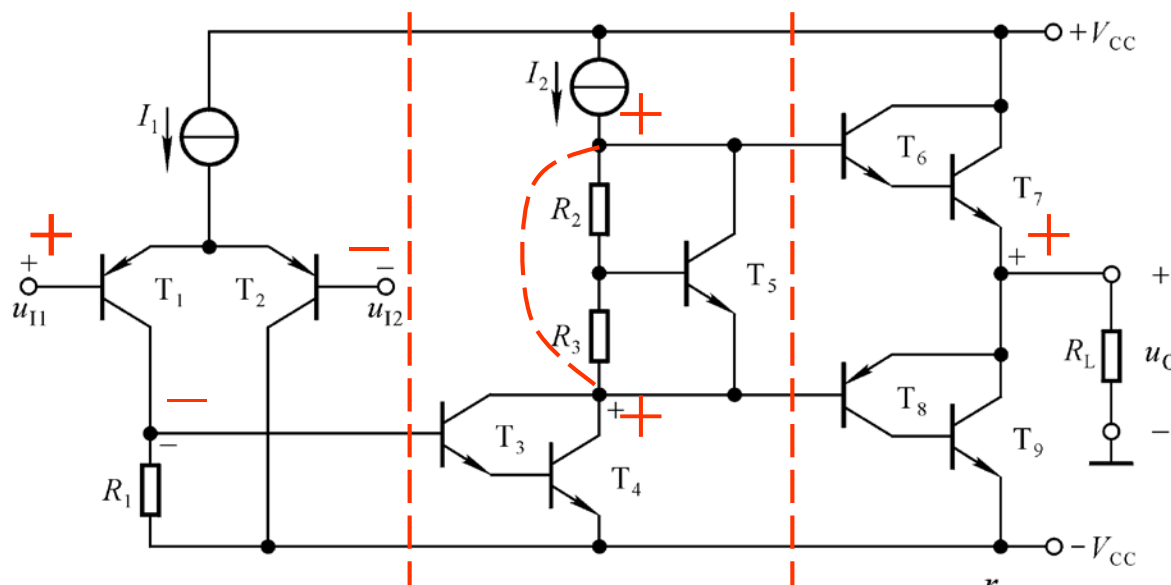
输入电阻为 $2r_{be}$ 、电压放大倍数较大、输出电阻很小、最大不失真输出电压的峰值接近电源电压。

整个电路可等效为一个双端输入单端输出的差分放大电路。

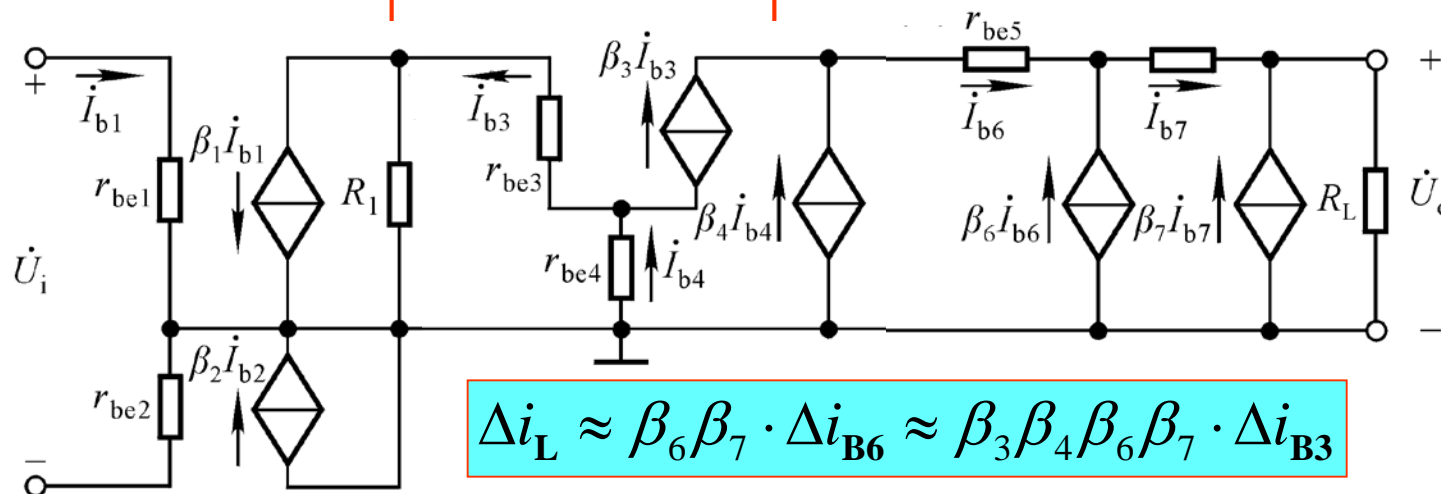




## (4) 交流等效电路



可估算低频小信号下的电压放大倍数、输入电阻、输出电阻等。



$$\Delta i_L \approx \beta_6 \beta_7 \cdot \Delta i_{B6} \approx \beta_3 \beta_4 \beta_6 \beta_7 \cdot \Delta i_{B3}$$

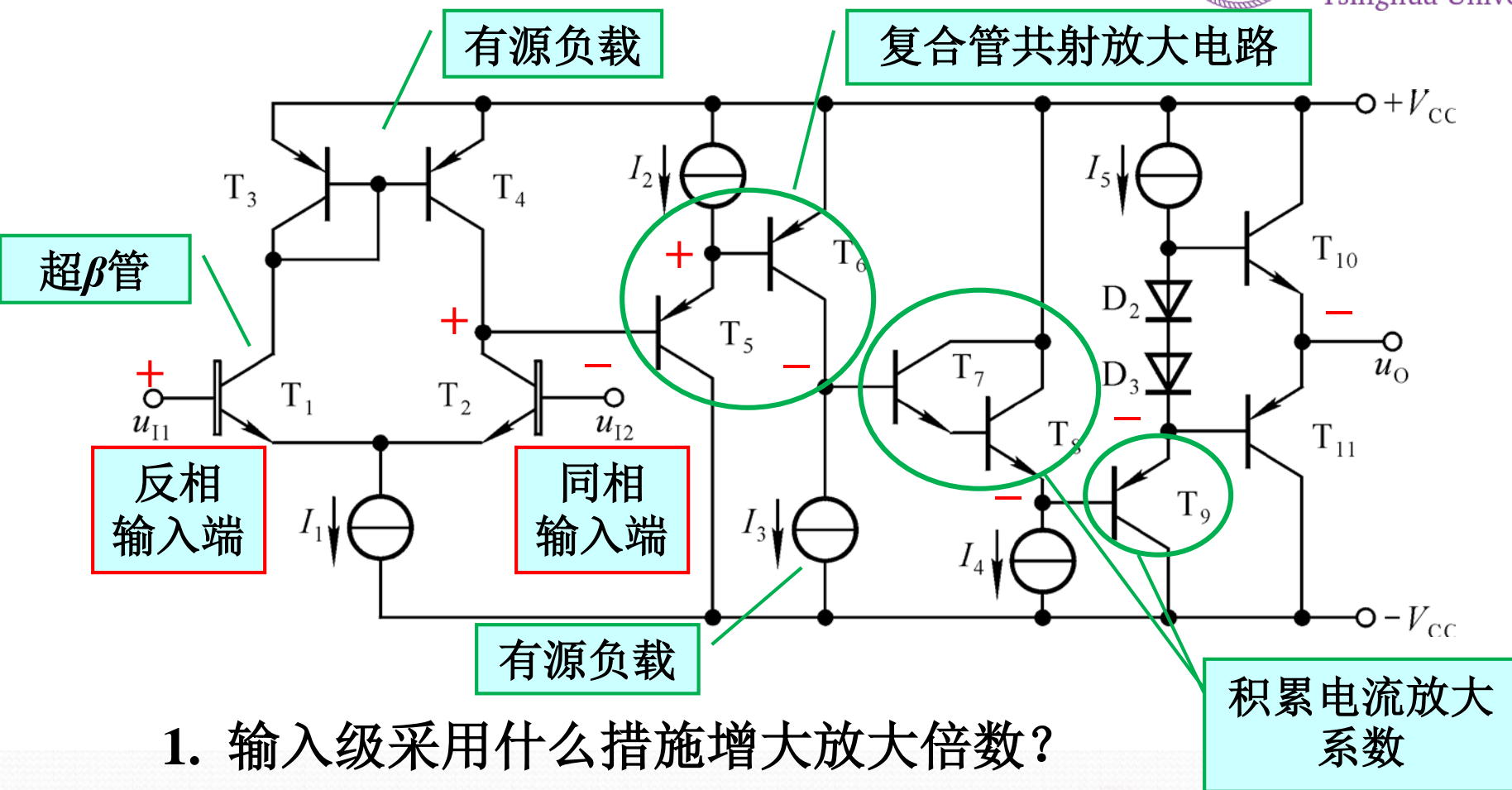
输入级

中间级

输出级



# 实例：高精度集成运放



1. 输入级采用什么措施增大放大倍数？
2. 中间级采用什么措施增大电压放大倍数？
3. 如何消除交越失真？
4.  $u_{I1}$ 、 $u_{I2}$ 哪个是同相输入端？哪个是反相输入端？



### 三、集成运放的主要性能指标

指标参数	F007典型值	理想值
• 开环差模增益 $A_{od}$	106dB	$\infty$
• 差模输入电阻 $r_{id}$	2M $\Omega$	$\infty$
• 共模抑制比 $K_{CMR}$	90dB	$\infty$
• 输入失调电压 $U_{IO}$	1mV	0
• $U_{IO}$ 的温漂 $d U_{IO}/dT(^{\circ}C)$	几 $\mu V/^{\circ}C$	0
• 输入失调电流 $I_{IO}$ ( $  I_{B1} - I_{B2}  $ )	20nA	0
• $I_{IO}$ 的温漂 $d I_{IO}/dT(^{\circ}C)$	几nA/ $^{\circ}C$	0
• 最大共模输入电压 $U_{Icmax}$	$\pm 13V$	
• 最大差模输入电压 $U_{Idmax}$	$\pm 30V$	
• -3dB带宽 $f_H$	10Hz	$\infty$
• 转换速率 $SR(=du_O/dt  _{max})$	0.5V/ $\mu S$	$\infty$



## 四、集成运放的种类

按照性能特点分类：

- ①通用性 ②高阻型 ③高速型 ④高精度型  
⑤低功耗型 ⑥高电压型 ⑦大功率型

- (1) 作低频放大器，应选用\_\_\_。  
(2) 作宽频带放大器，应选用\_\_\_。  
(3) 作幅值为 $1\mu\text{V}$ 以下微弱信号的测量放大器，应选用\_\_\_。  
(4) 作内阻为 $100\text{k}\Omega$ 信号源的放大器，应选用\_\_\_。  
(5) 负载需 $5\text{A}$ 电流驱动的放大器，应选用\_\_\_。  
(6) 要求输出电压幅值为 $\pm 80\text{V}$ 的放大器，应选用\_\_\_。  
(7) 宇航仪器中所用的放大器，应选用\_\_\_。