



第三章 集成运算放大电路

§ 3.1 多级放大电路的耦合方式

§ 3.2 多级放大电路的动态分析

§ 3.3 集成运放概述

§ 3.4 差分放大电路

§ 3.5 互补输出级

§ 3.6 集成运放中的电流源

§ 3.7 集成运放的电路分析及性能指标



§ 3.1 多级放大电路的耦合方式

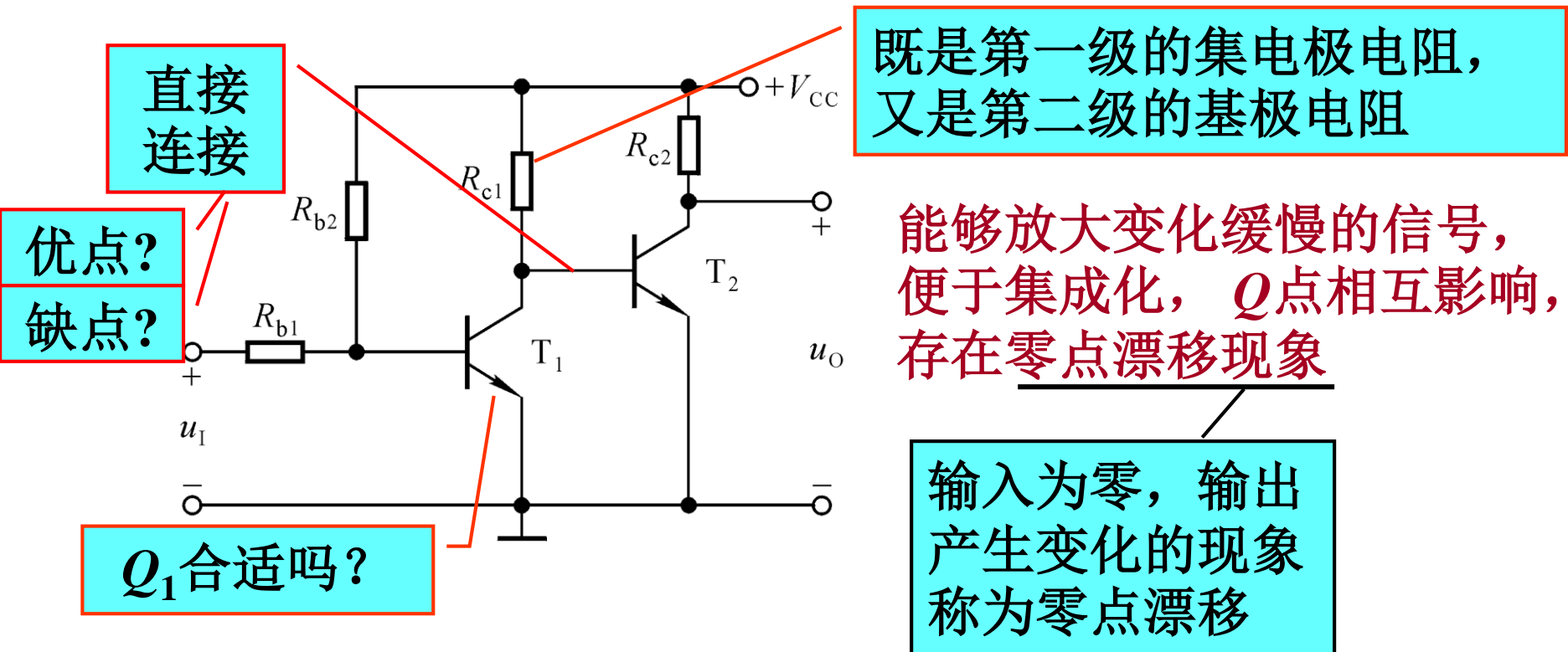
一. 直接耦合

二. 阻容耦合

三. 变压器耦合

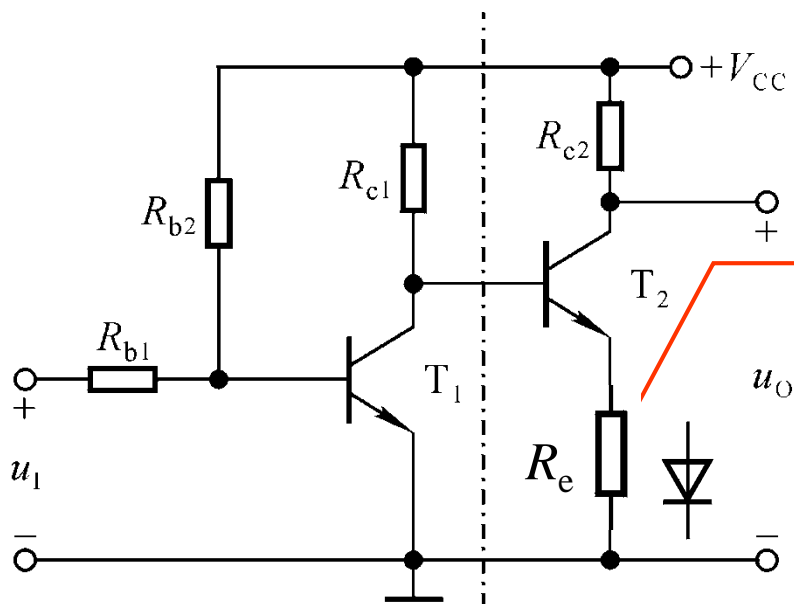
➤ 耦合方式：多级放大电路级与级之间的连接方式

一、直接耦合



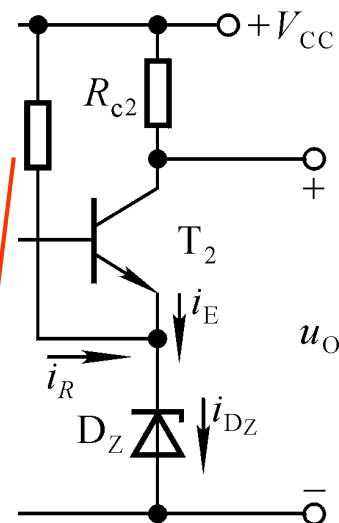
当输入信号为零时，前级由温度变化所引起的电流、电位的变化会逐级放大

➤ 如何设置合适的静态工作点？



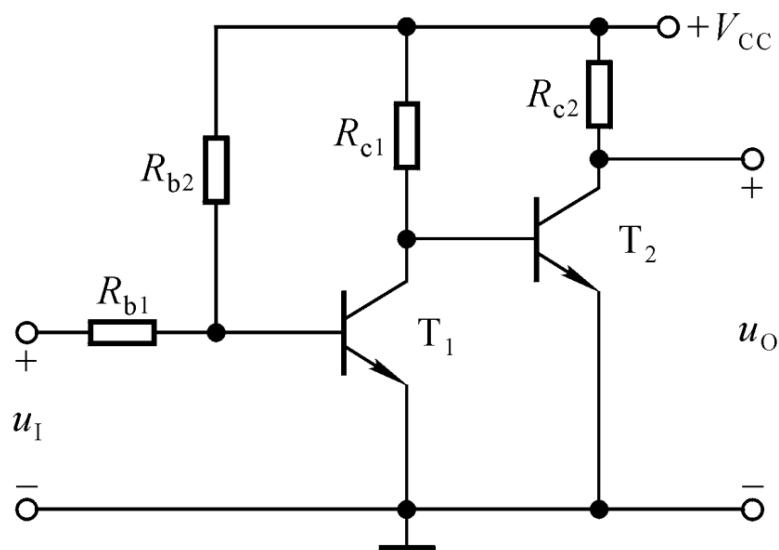
对哪些动态参数产生影响？

必要性？



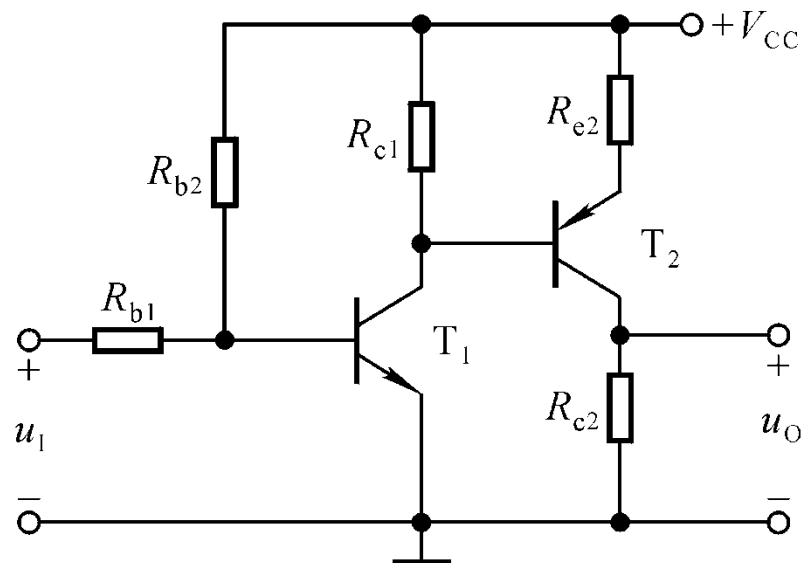
- 用什么元件取代 R_e 既可设置合适的 Q 点，又可使第二级放大倍数不至于下降太多？
- 二极管导通电压 $U_D \approx ?$ 动态电阻 r_d 特点？
- 若要 $U_{CEQ} = 10V$ ，则应怎么办？用多个二极管吗？

➤ NPN型管和PNP型管混合使用



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

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

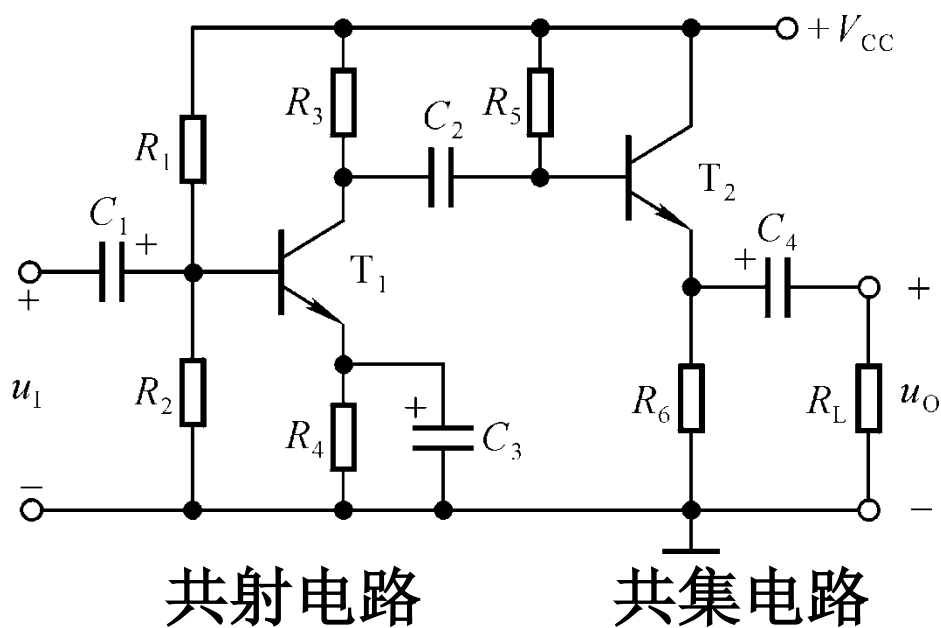


$$U_{CQ1} (U_{BQ2}) > U_{BQ1}$$

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

□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

二、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



有零点漂移么？

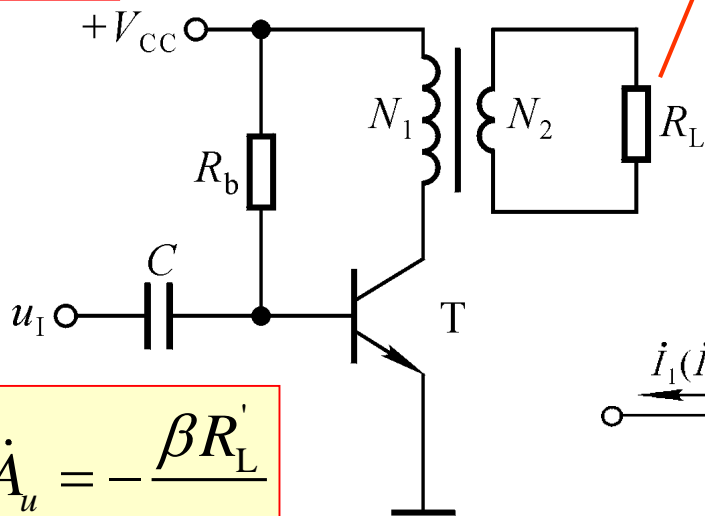
- ✓ Q 点相互独立
- ✓ 不能放大变化缓慢的信号，低频特性差
- ✓ 不能集成化

三、变压器耦合

优点?

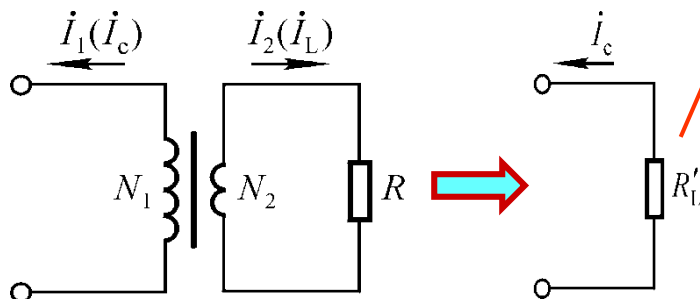
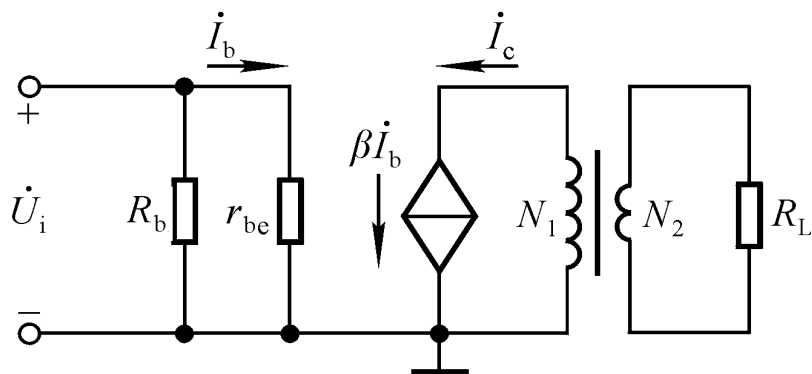
缺点?

可能是实际的负载，也可能是下级放大电路



$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

□ 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



从变压器原边看到的等效电阻

$$P_1 = P_2, \quad I_c^2 R'_L = I_l^2 R_L$$

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

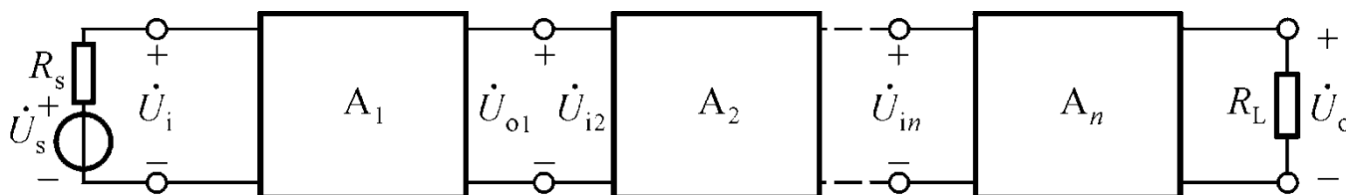
§ 3.2 多级放大电路的动态分析

一. 动态参数分析

二. 分析举例

一、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

$$R_i = R_{i1}$$

可能与后一级电路及负载有关

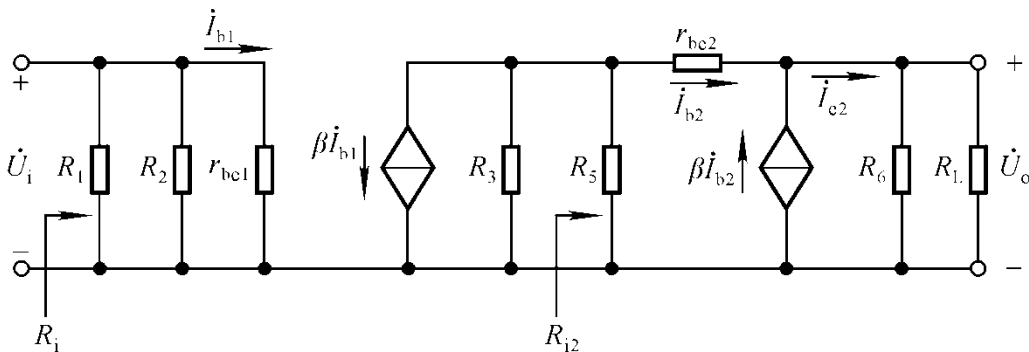
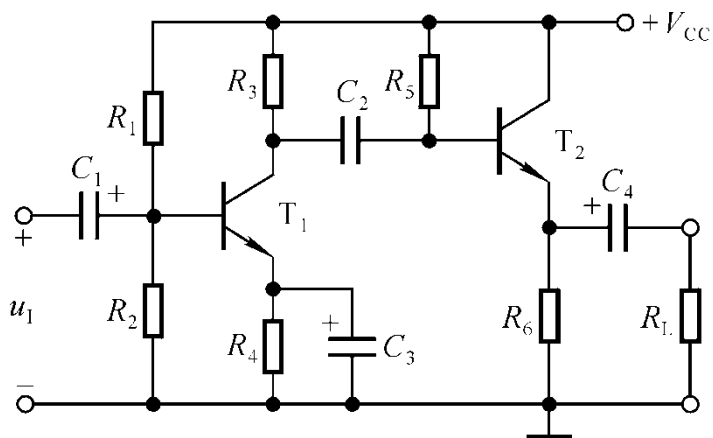
3. 输出电阻

$$R_o = R_{on}$$

可能与前一级电路及信号源内阻有关

□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

二、分析举例



$$\dot{A}_{u1} = -\frac{\beta (R_3 // R_{i2})}{r_{be1}}$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{(1 + \beta_2) (R_6 // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2) (R_6 // R_L)}$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2}$$

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

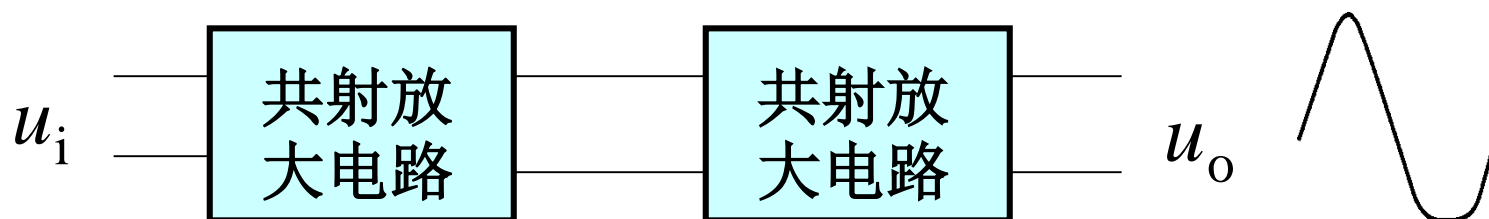
$$R_i = R_1 // R_2 // r_{be1}$$

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

为带负载情况下的电压放大倍数

讨论

➤ 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？

□ 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：放大电路的选用

按下列要求组成两级放大电路：
注意级联时两级的相互影响！

- $R_i = 1 \sim 2\text{k}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 3000
- $R_i \geq 10\text{M}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 300
- $R_i = 100 \sim 200\text{k}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 150
- $R_i \geq 10\text{M}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 10 , $R_o \leq 100\Omega$

§ 3.3 集成运放概述

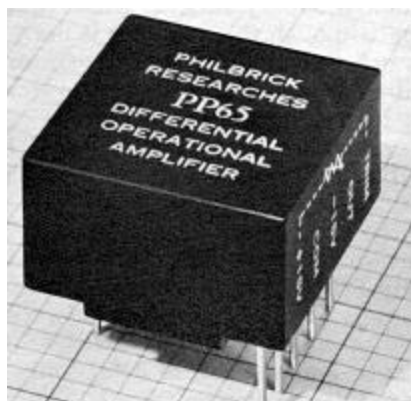
- 一、集成运放的特点
- 二、集成运放电路的组成
- 三、集成运放的电压传输特性

集成运放的发展

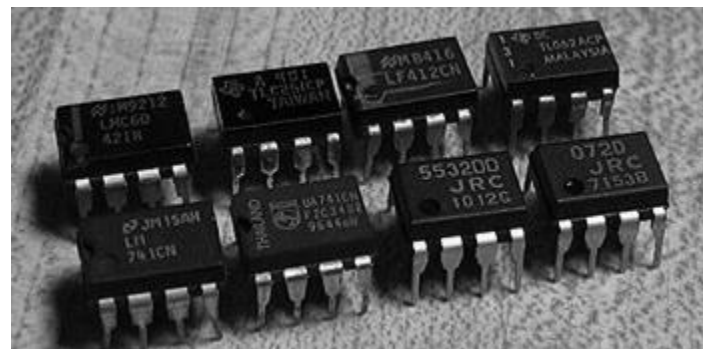
- 1941, 真空管运放, Karl D. Swartzel Jr. (Bell Lab)
- 1962, 晶体管运放 (由分立元件封装而成)
- 1963, 单片集成运放 (晶体管), Bob Widlar (Fairchild)
- 1970, 单片集成运放 (场效应管)



真空管运放



晶体管运放



集成运放

集成运放的应用

➤ 第一代 真空管运放：

模拟计算机，长途电话，中继器

➤ 第二代 晶体管/集成运放：

各种需要信号放大的场合

✓广播、通信：收音机，手机；

✓工业检测与控制；

✓IT产业：计算机、交换机等；

✓家用电子：照相机、摄像机；

✓汽车电子，医学电子等等

➤ 发展方向：高精度、高速、宽带、低功耗

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

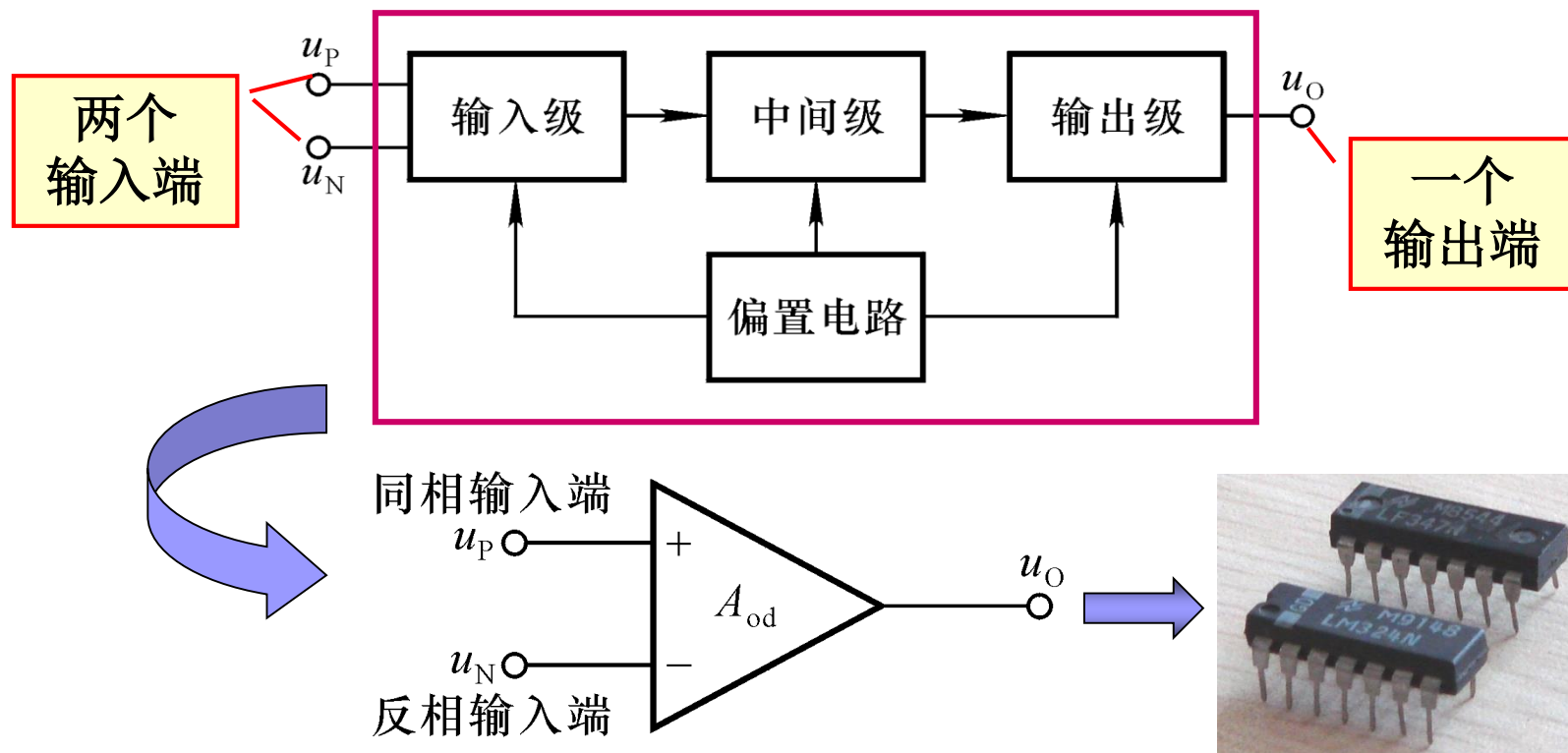
(1) 直接耦合方式，充分利用管子性能良好的一致性，采用差分放大电路和电流源电路

(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

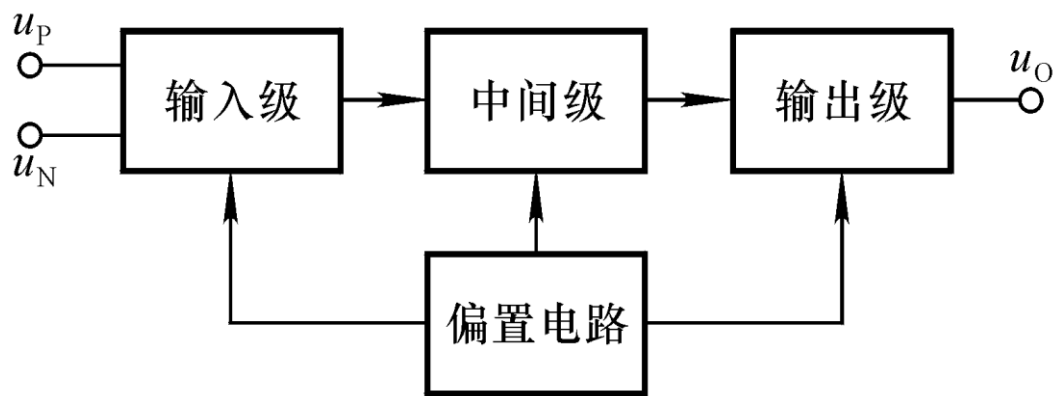
(4) 采用复合管

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

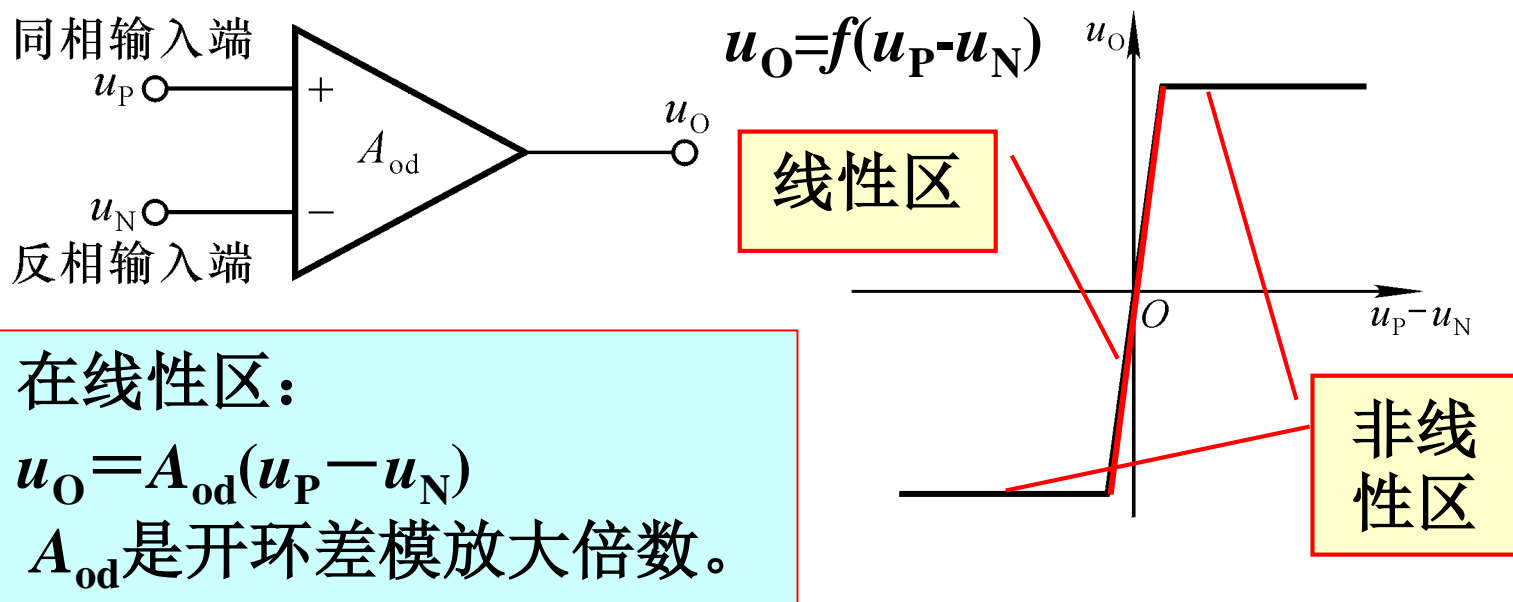
输入级：前置级，多采用差分放大电路。要求 R_i 大， A_d 大， A_c 小，输入端耐压高

中间级：主放大级，多采用共射或者共源放大电路。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



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

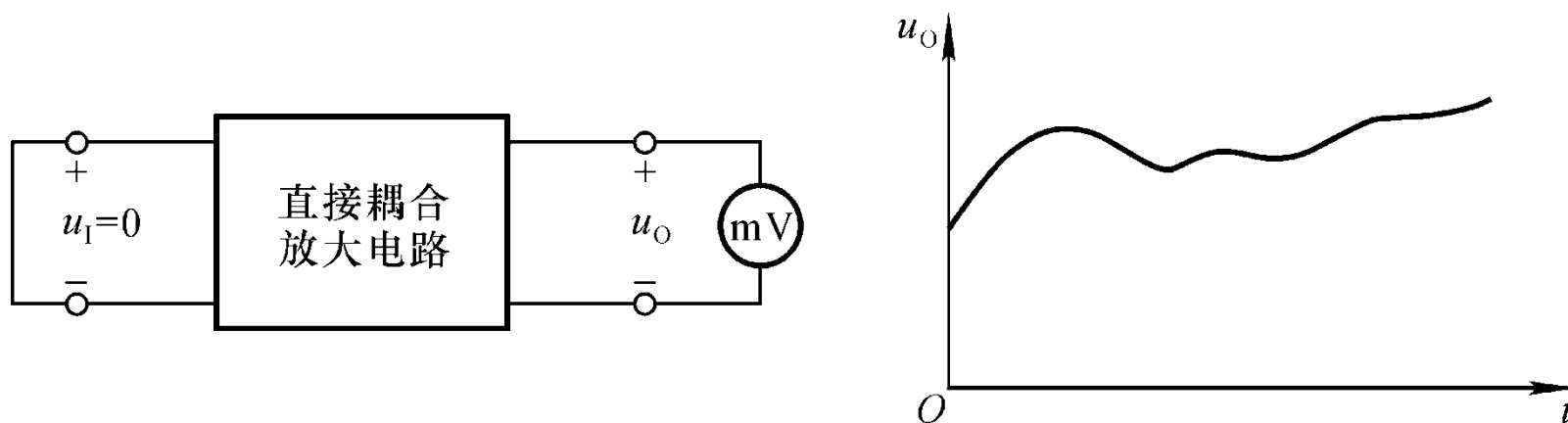
($u_P - u_N$)的数值大于一定值时，集成运放的输出不是 $+U_{OM}$ ，就是 $-U_{OM}$ ，即集成运放工作在非线性区。

§ 3.4 差分放大电路

- 一. 零点漂移现象及其产生的原因
- 二. 长尾式差分放大电路的组成
- 三. 长尾式差分放大电路的分析
- 四. 差分放大电路的四种接法
- 五. 具有恒流源的差分放大电路
- 六. 差分放大电路的改进

一、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。

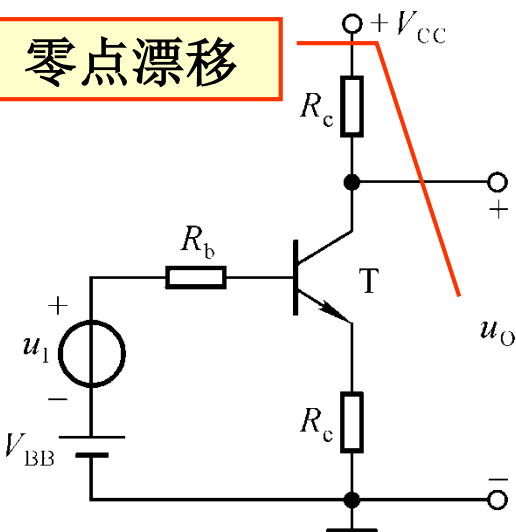


□ 产生原因：温度变化，直流电源波动，元器件老化。其中晶体管的特性对温度敏感是主要原因，故也称零漂为温漂

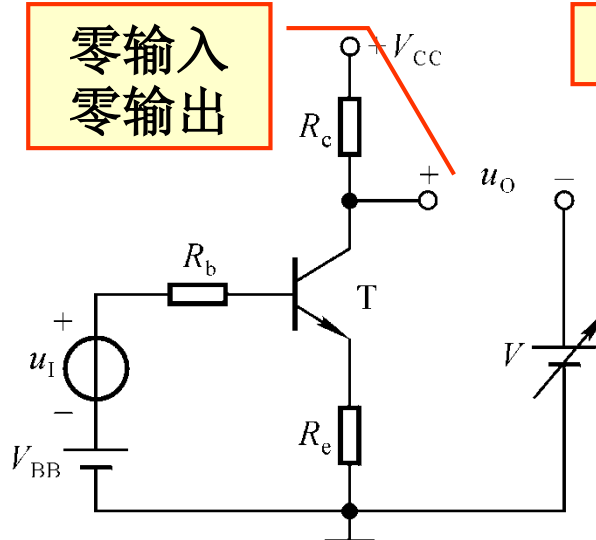
- ✓ 抑制温漂的方法：引入直流负反馈，温度补偿
- ✓ 典型电路：差分放大电路

二、长尾式差分放大电路的组成

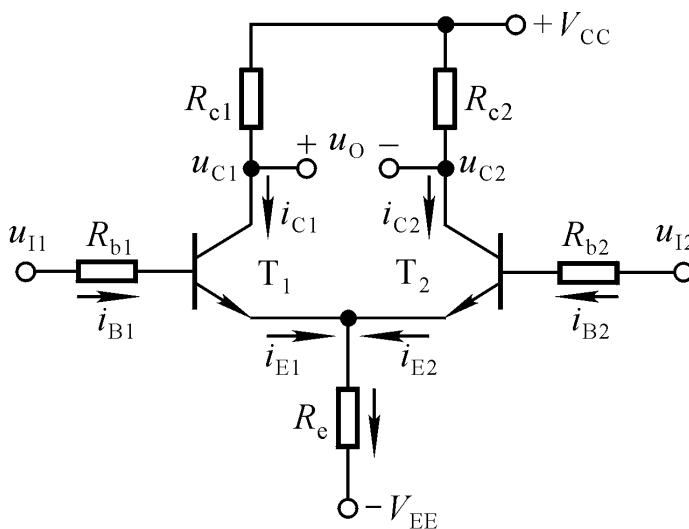
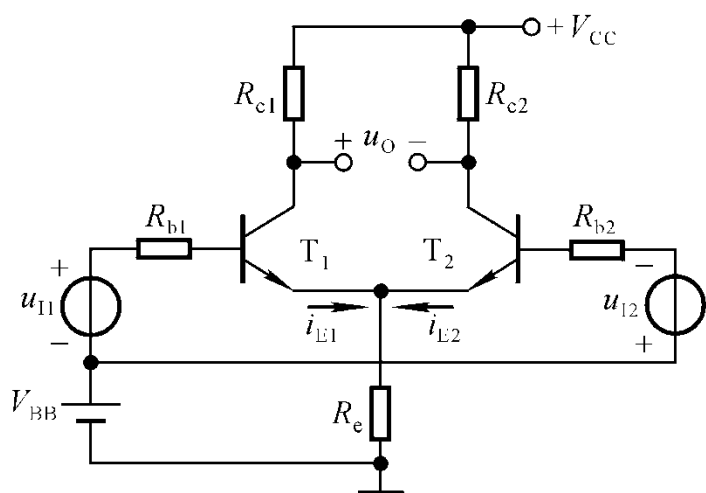
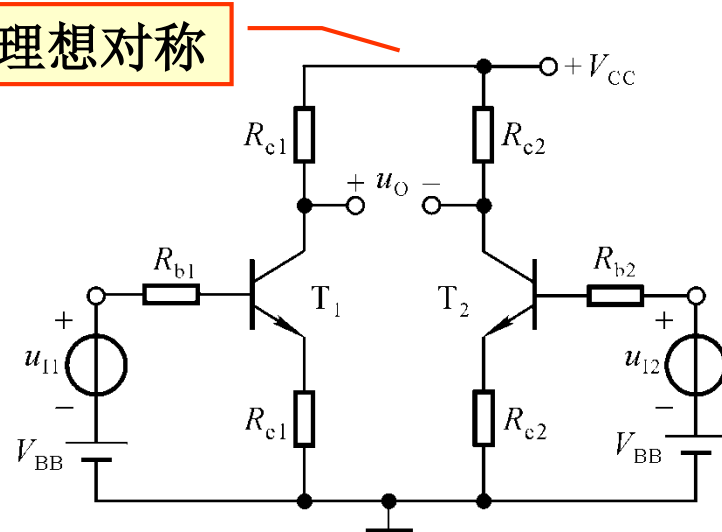
零点漂移



零输入
零输出



理想对称

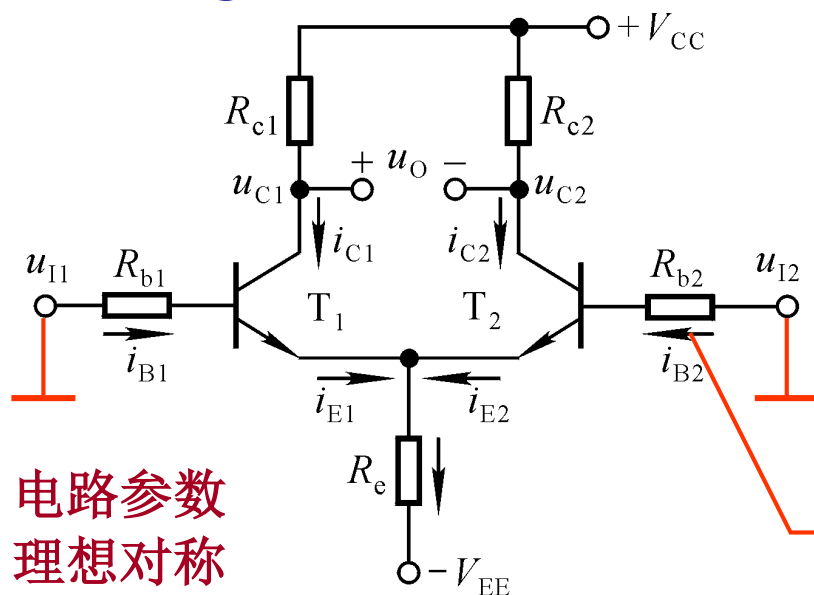


共模信号：大
小相等，极性
相同

差模信号：大
小相等，极性
相反

三、长尾式差分放大电路的分析

1. 静态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

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

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

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

选合适的 V_{EE} 和 R_e 就可得合适的Q

2. 定性动态分析

➤ 抑制共模信号：参数对称性的作用

共模信号：数值相等、极性相同的输入信号，即

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

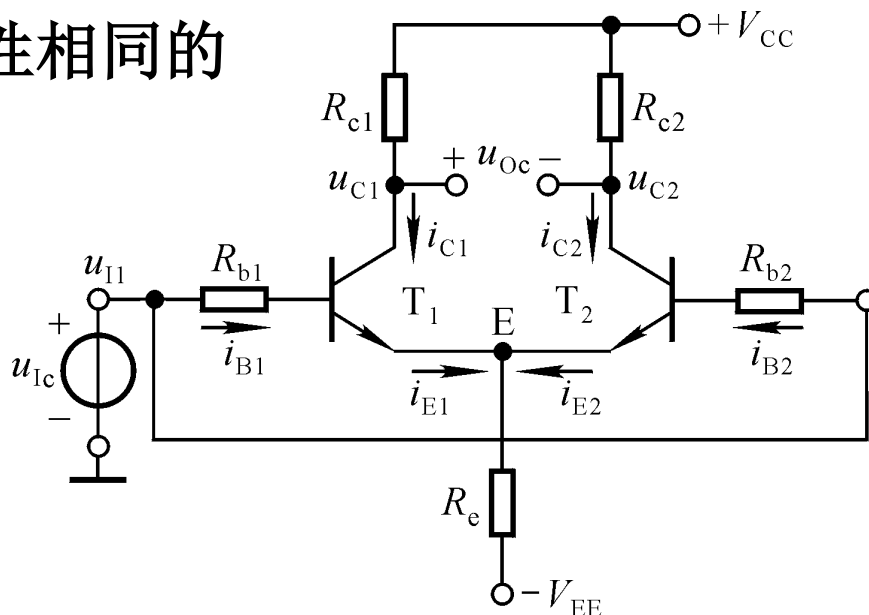
$$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}$$

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

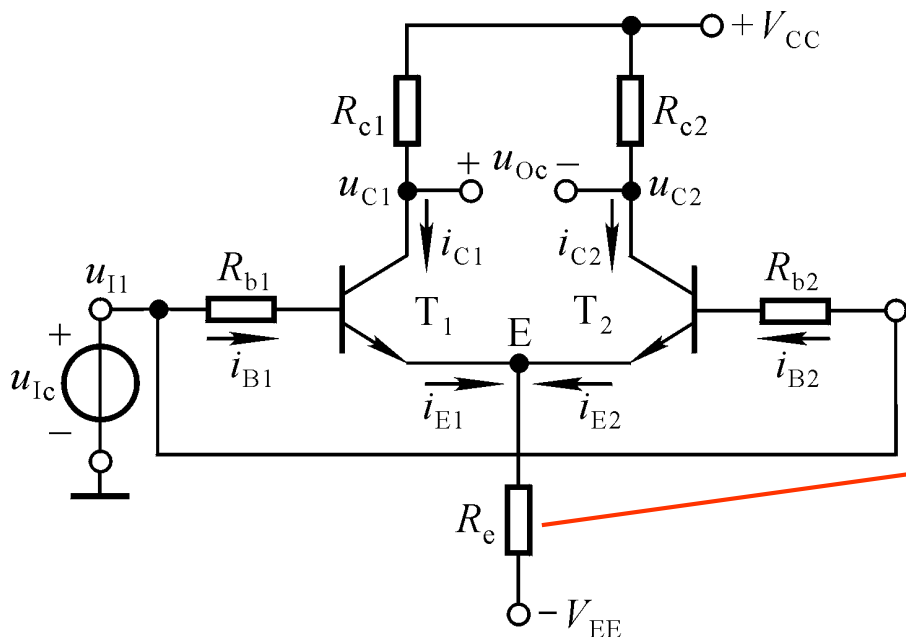
$$\Delta u_{C1} = \Delta u_{C2}$$

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

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



➤ 抑制共模信号： R_e 的共模负反馈作用



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

$$\text{参数理想对称时 } A_c = 0$$

对于每一边电路， $R_e = ?$

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

➤ 放大差模信号

差模信号：数值相等，极性相反的输入信号，即

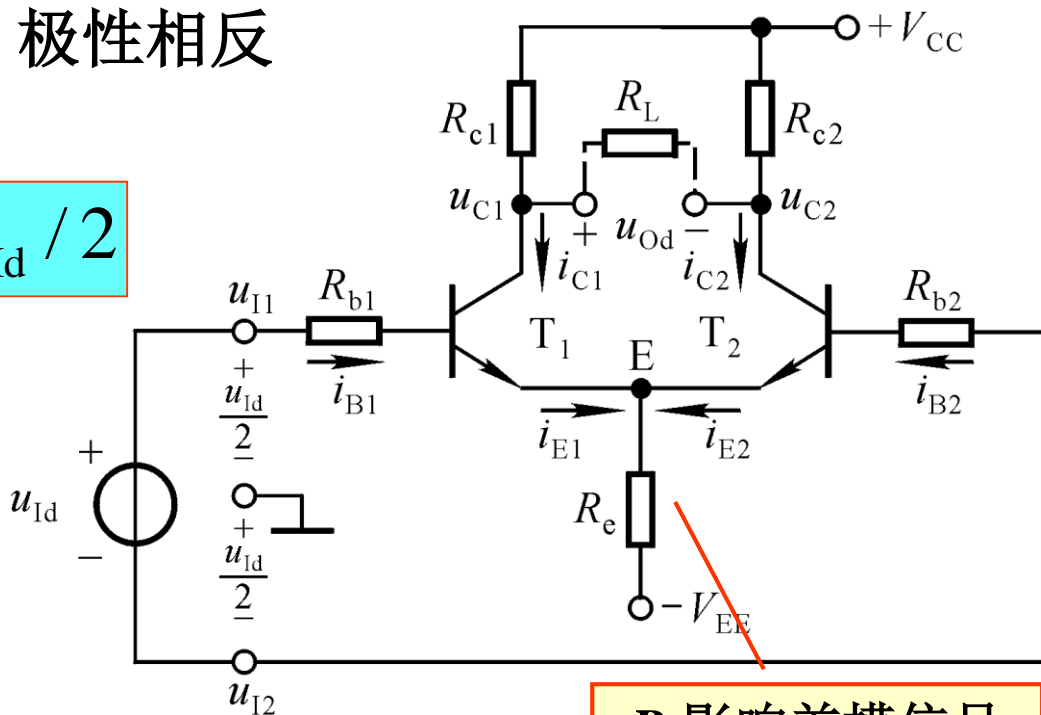
$$u_{I1} = -u_{I2} = u_{Id} / 2$$

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

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

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

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



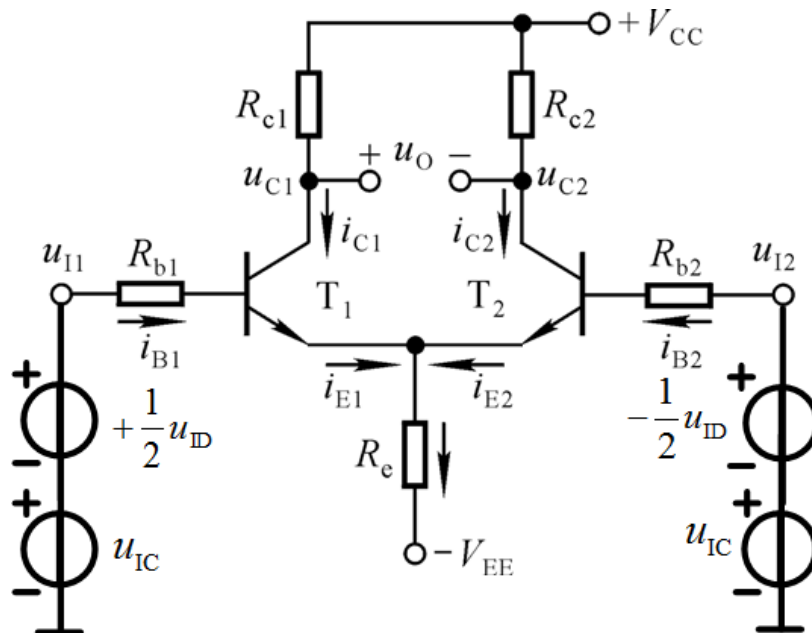
R_e 影响差模信号的动态性能么？

$\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$, R_e 中电流不变, 即 R_e 对差模信号无反馈作用, 故称为共模反馈电阻

3. 定量动态分析

➤ 信号分解

□ 任意输入信号可分解为一对共模和一对差模信号之和



差模信号=输入信号之差

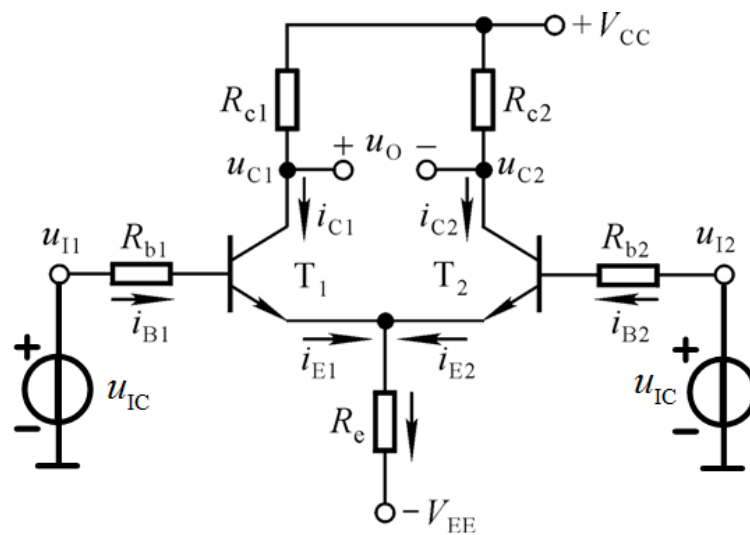
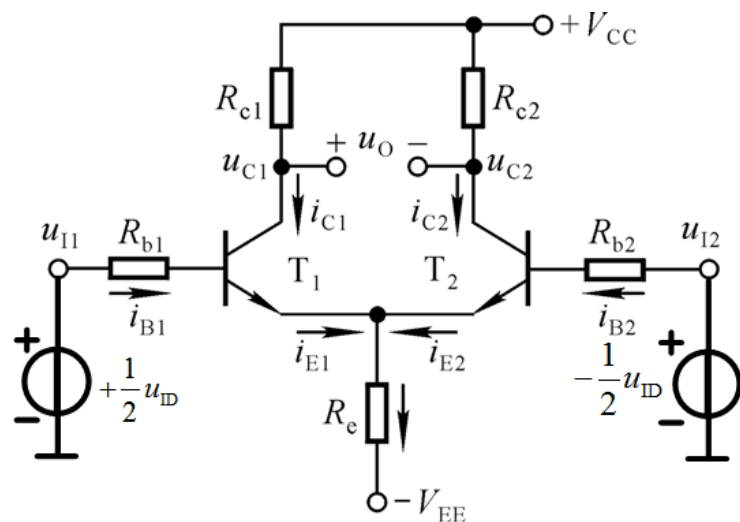
$$u_{ID} = u_{I1} - u_{I2}$$

共模信号=输入信号平均值

$$u_{IC} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2}$$

➤ 电路分解

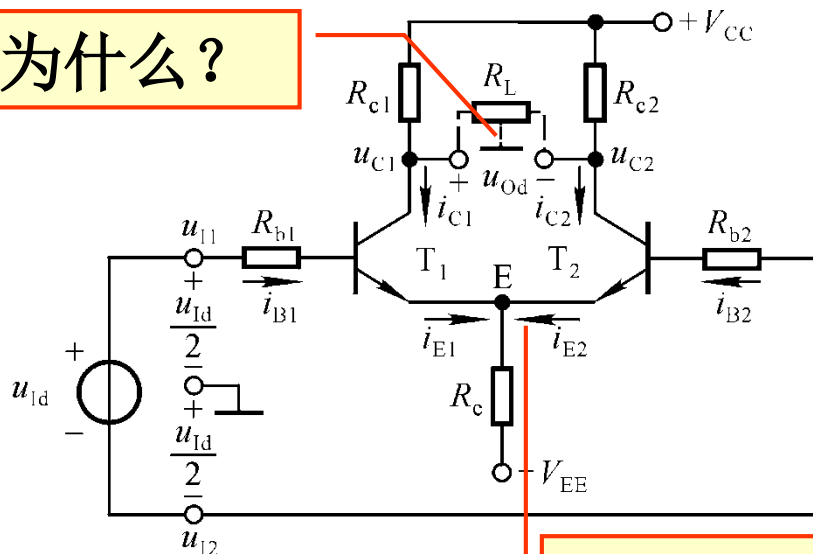
□ 运用叠加原理，分为差模/共模信号通路，分别分析



➤ 差模放大倍数 A_d

□ 基于差模通路的交流等效电路

为什么？



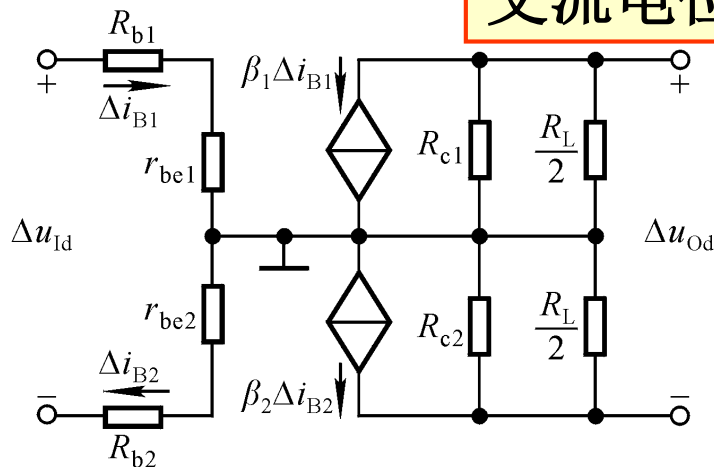
差模放大倍数：

$$A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}}$$

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

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

交流电位？



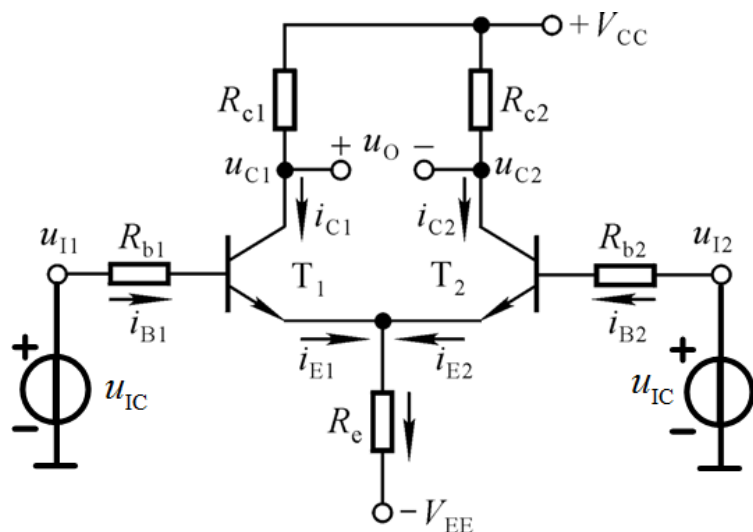
$$\Delta u_{Id} = \Delta i_B \cdot 2(R_b + r_{be})$$

$$\Delta u_{Od} = -\Delta i_C \cdot 2(R_c // \frac{R_L}{2})$$

比较与单管共射放大倍数？

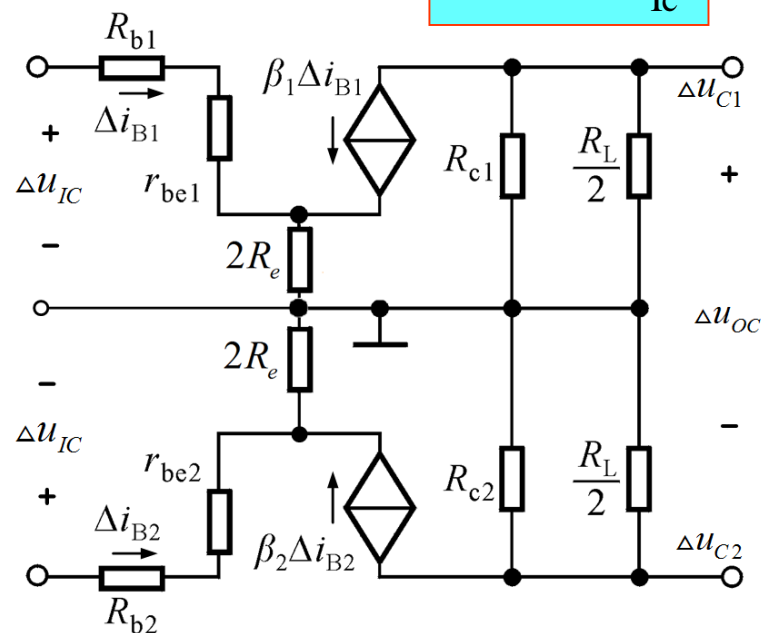
➤ 共模放大倍数 A_c

□ 基于共模通路的交流等效电路



共模放大倍数:

$$A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{IC}}$$



➤ 共模抑制比 K_{CMR}

□ 衡量放大电路放大差模信号、抑制共模信号(温漂)的能力

□ 参数理想对称时,

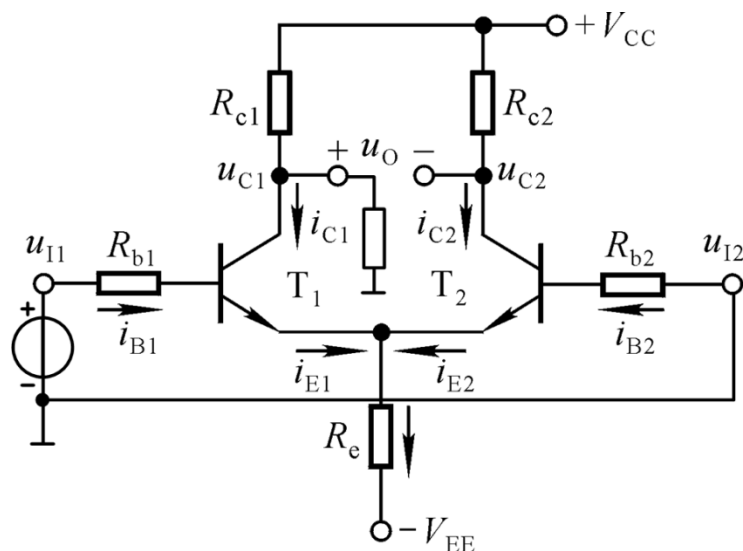
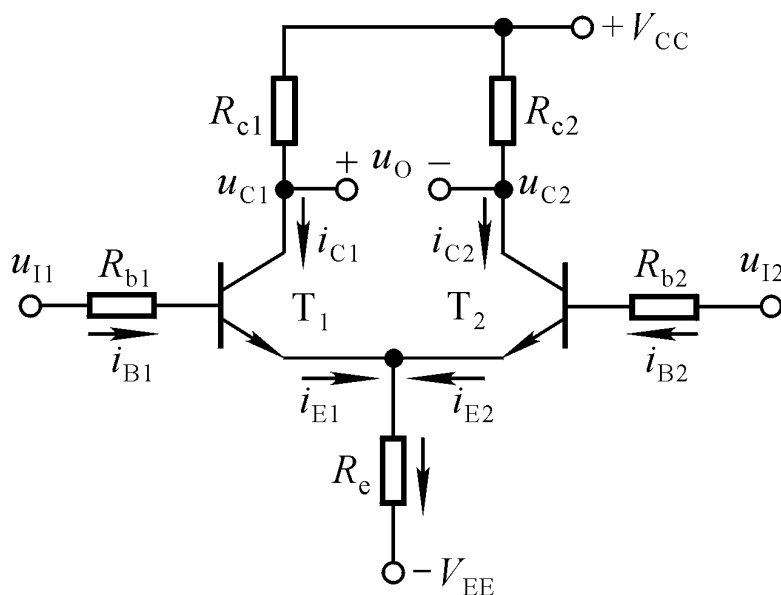
$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \approx \infty$$

$$\Delta u_{C1} = \Delta u_{C2} \Rightarrow \Delta u_{Oc} = 0$$

$$\Rightarrow A_c = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_{IC}} = 0$$

➤ 实用电路的一些考虑

- 信号源“接地”(避免干扰)
- 负载“接地”(电平转换或安全工作)

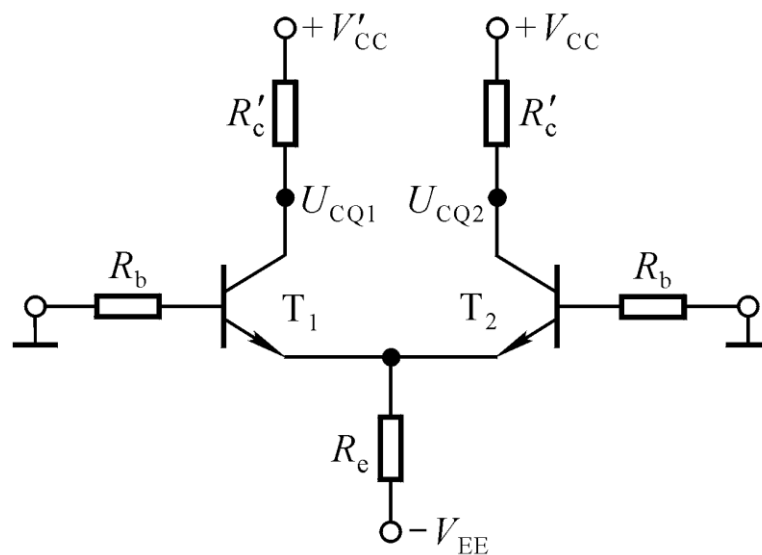
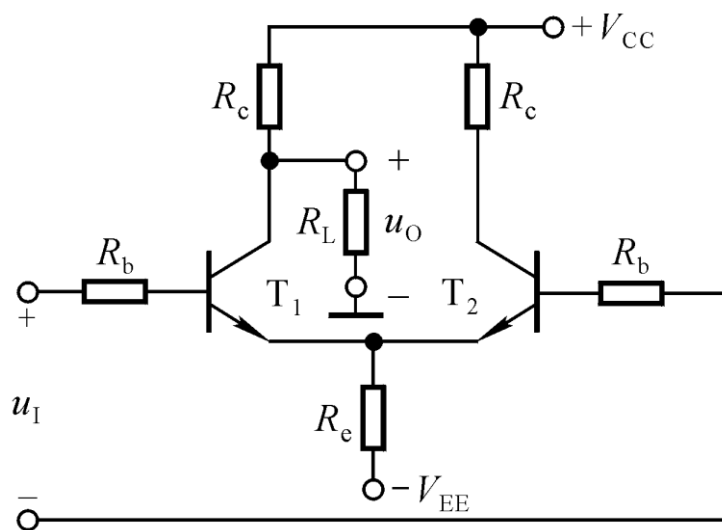


- 根据信号源和负载的接地情况，差分放大电路有四种接法：双端输入双端输出、双端输入单端输出、单端输入双端输出、单端输入单端输出

四、差分放大电路的四种接法

1. 双端输入单端输出:

➤ Q点分析



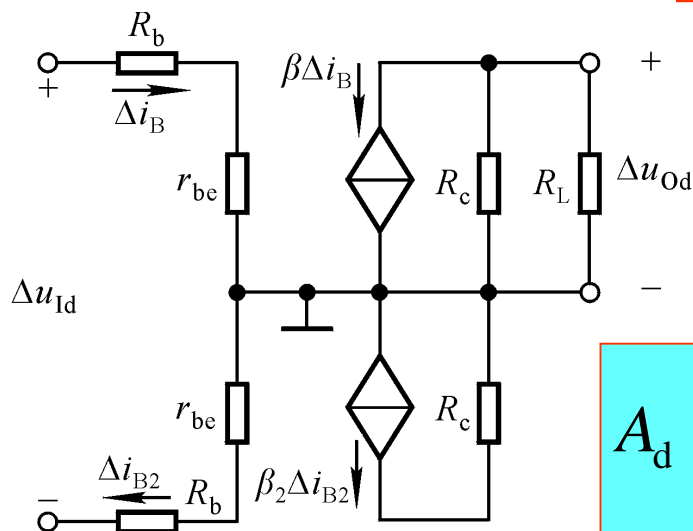
□ 由于输入回路没有变化，所以 I_{EQ} 、 I_{BQ} 、 I_{CQ} 与双端输出时一样。但是 $U_{CEQ1} \neq U_{CEQ2}$

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

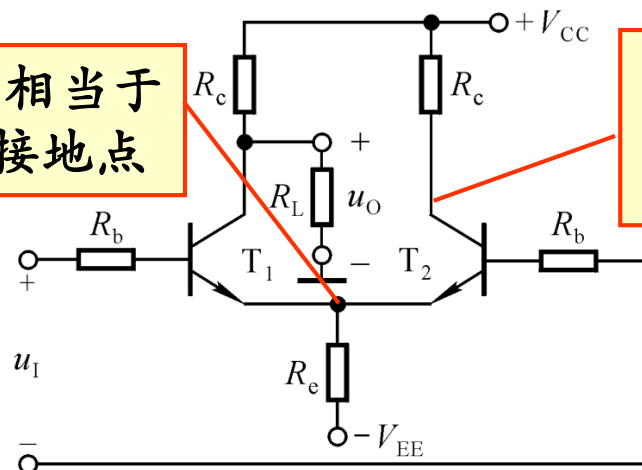
$$U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$$

➤ 动态分析

□ 差模信号作用



E点仍相当于交流接地点



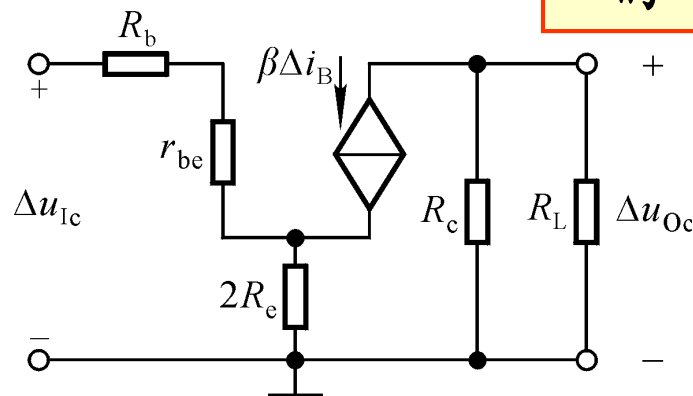
若从T2集电极输出， $A_d = ?$

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

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

$$R_o = R_c$$

□ 共模信号作用

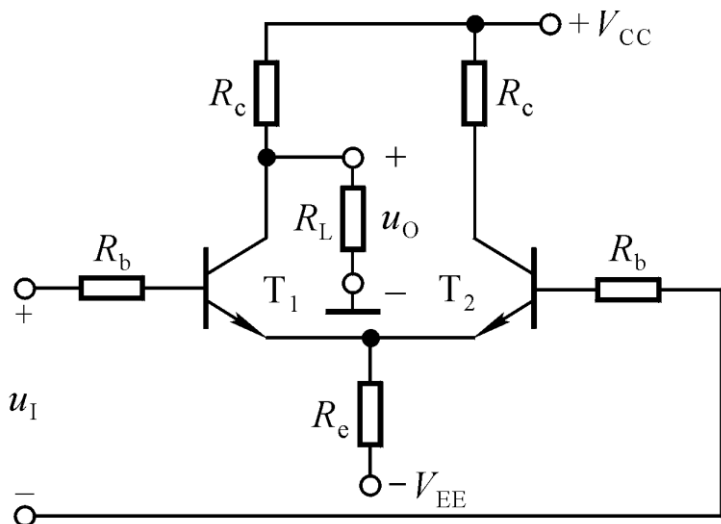


为双端输出的一半？

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

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

讨论



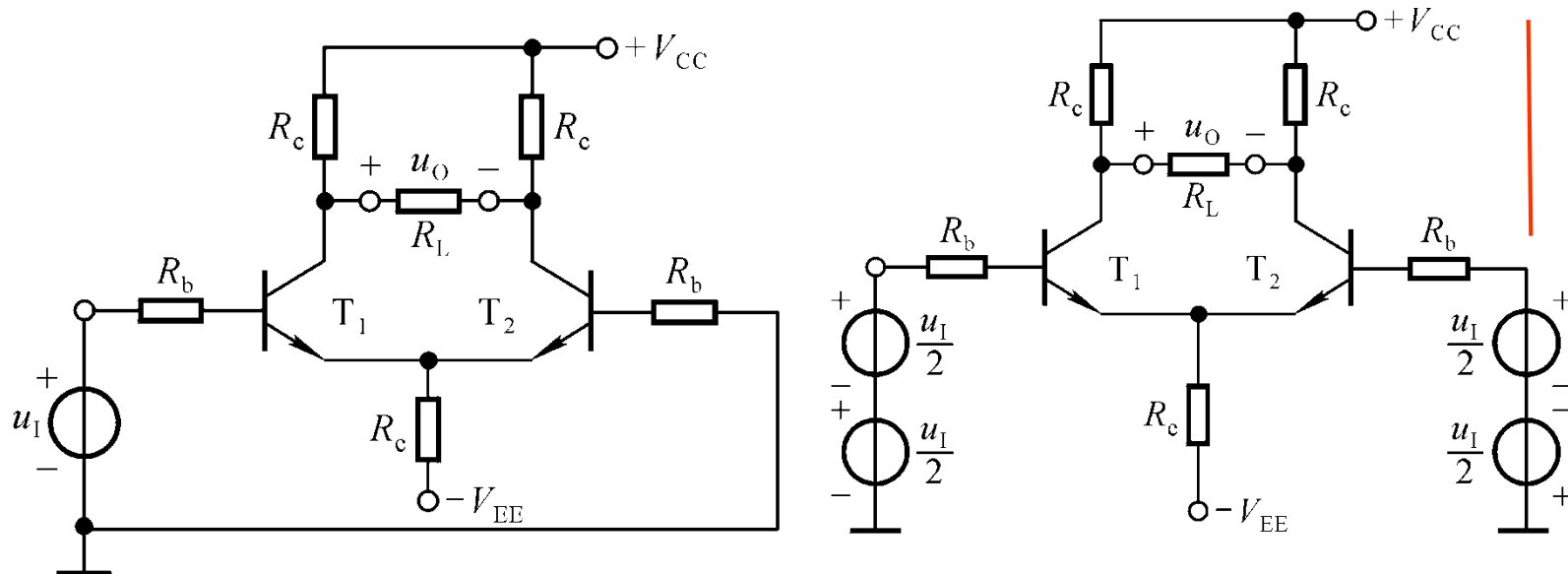
$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

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

- (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？
- (4) 如何提高共模抑制比？
- (5) R_e 可以无限增加么？

2. 单端输入双端输出

缺点:人为引入共模输入



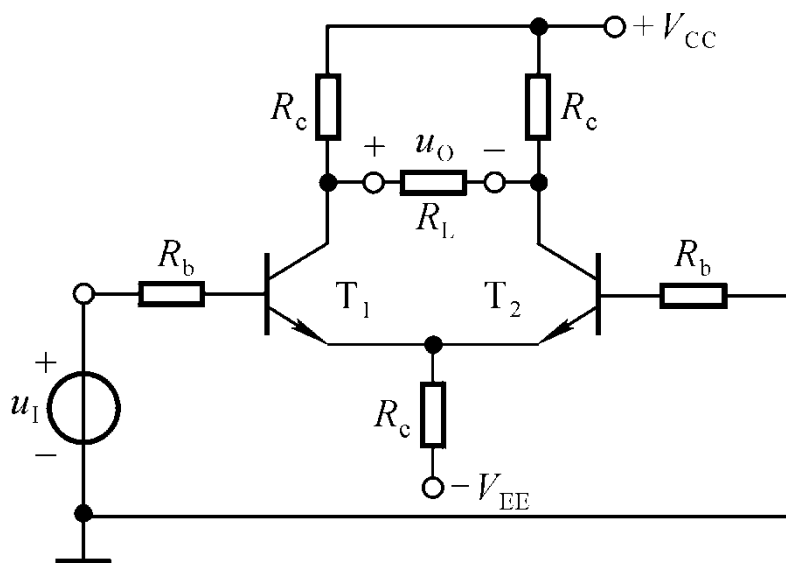
□ 在输入信号作用下发射极的电位变化吗？说明什么？

➤ 静态：同双端输入双端输出

➤ 动态： $u_{Id} = u_I, u_{Ic} = u_I / 2$

$$A_d = -\frac{\beta (R_c // \frac{1}{2} R_L)}{R_b + r_{be}}, A_c = 0$$

讨论



➤ 电路非理想对称条件下，若用直流毫伏表测量输出，

$u_O = ?$

(1) U_{OQ} 产生的原因？

(2) 如何减小共模输出电压？

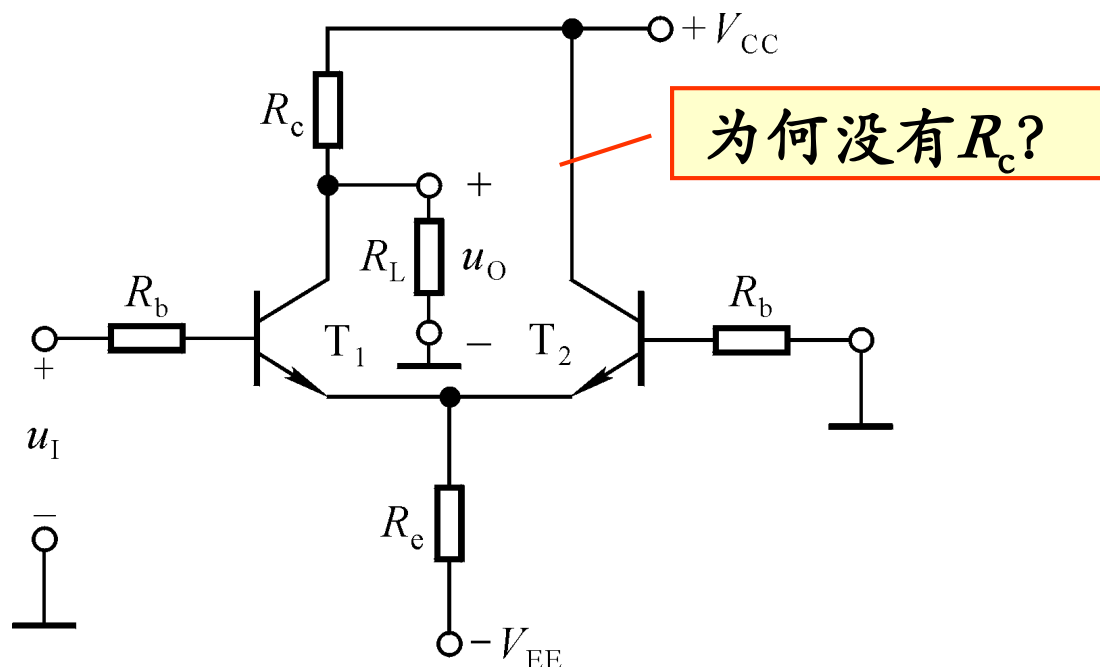
$$u_O = A_d \cdot u_I + A_c \cdot \frac{u_I}{2} + U_{OQ}$$

差模输出

共模输出

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

4. 四种接法的比较 电路参数理想对称条件下

- **输入方式不同**: 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
- **输出方式不同**: Q 点、 A_d 、 A_c 、 K_{CMR} 、 R_o 均与之有关

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

$$A_c = 0$$

$$K_{CMR} = \infty$$

$$R_o = 2R_c$$

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

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

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

$$R_o = R_c$$

五、具有恒流源的差分放大电路

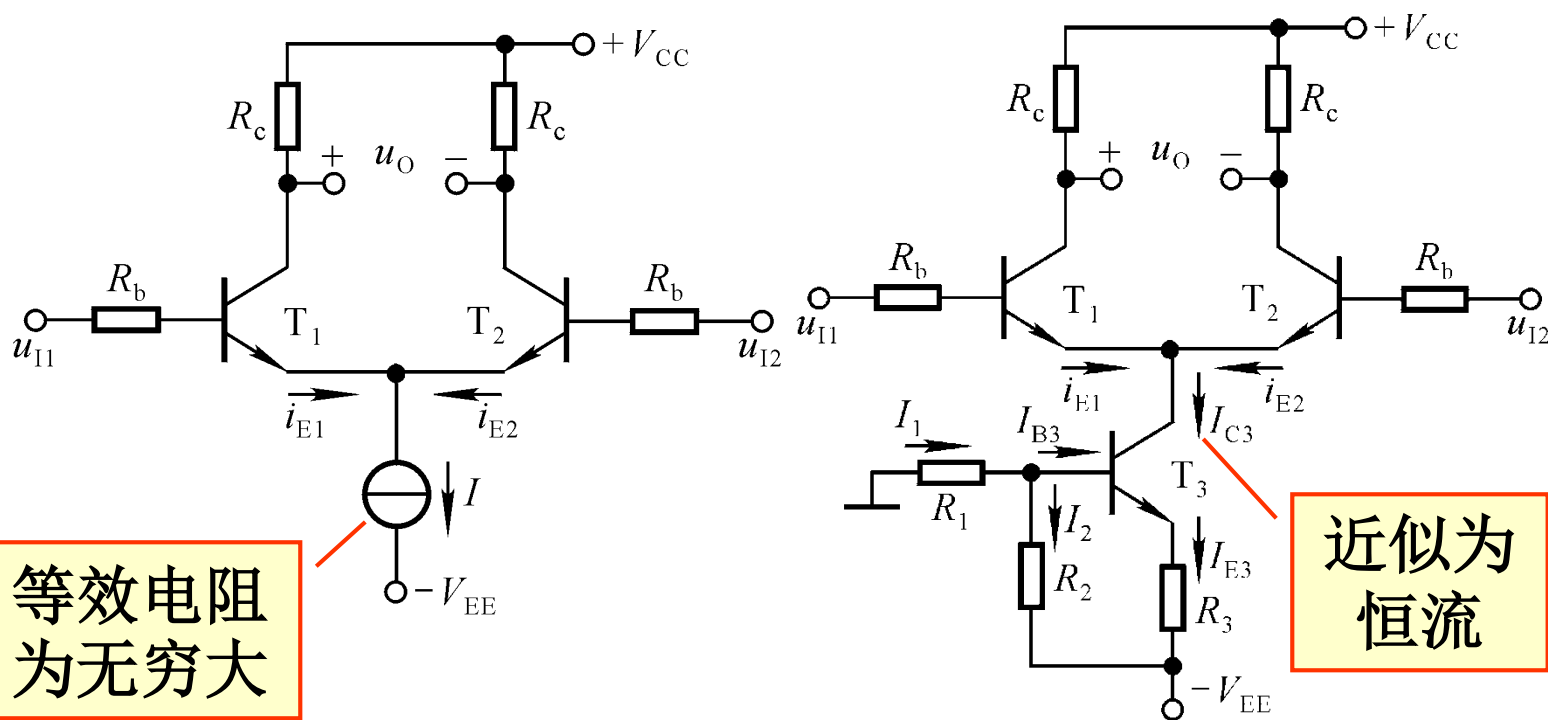
➤ 为什么要采用电流源？

- R_e 越大，共模负反馈（动态）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
- R_e 太大，静态工作点（静态）就不合适了
- 需在保证合适的静态工作点，同时动态得到趋于无穷大的 R_e

解决方法：采用电流源！

五、具有恒流源的差分放大电路

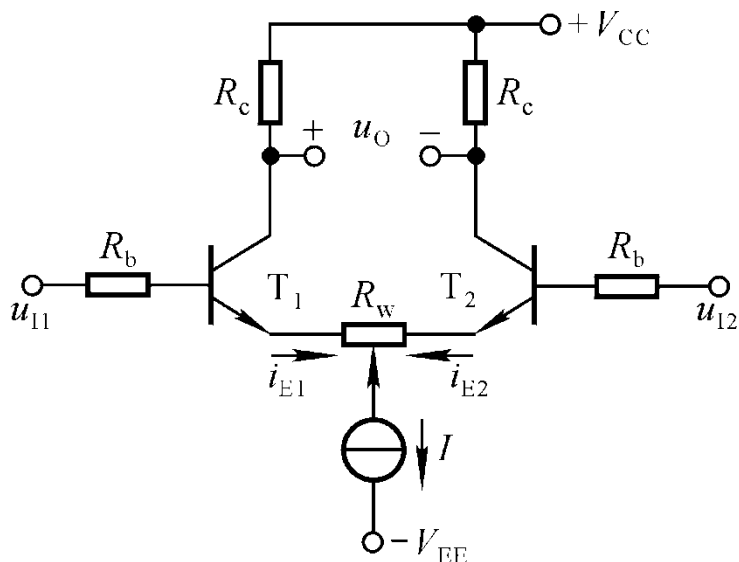
➤ 具有恒流源差分放大电路的组成



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

六、差分放大电路的改进

1. 加调零电位器 R_W



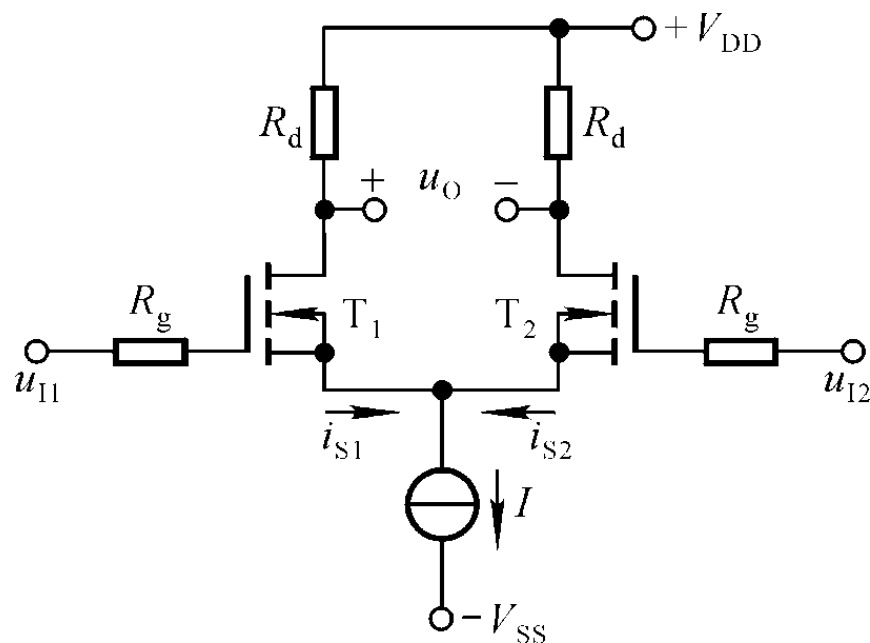
$$A_d = - \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_W}{2}}$$

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

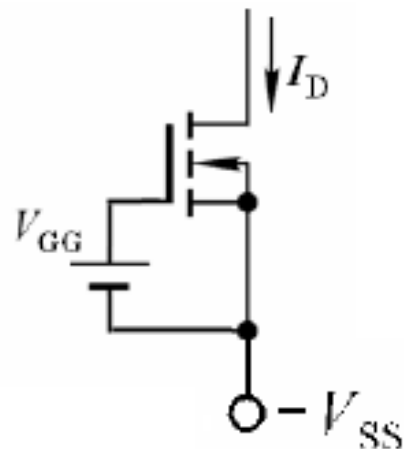
- 1) R_W 取值应大些？还是小些？
- 2) R_W 对动态参数的影响？
- 3) 若 R_W 滑动端在中点，写出 A_d 、 R_i 的表达式

六、差分放大电路的改进

2. 场效应管差分放大电路-MOSFET



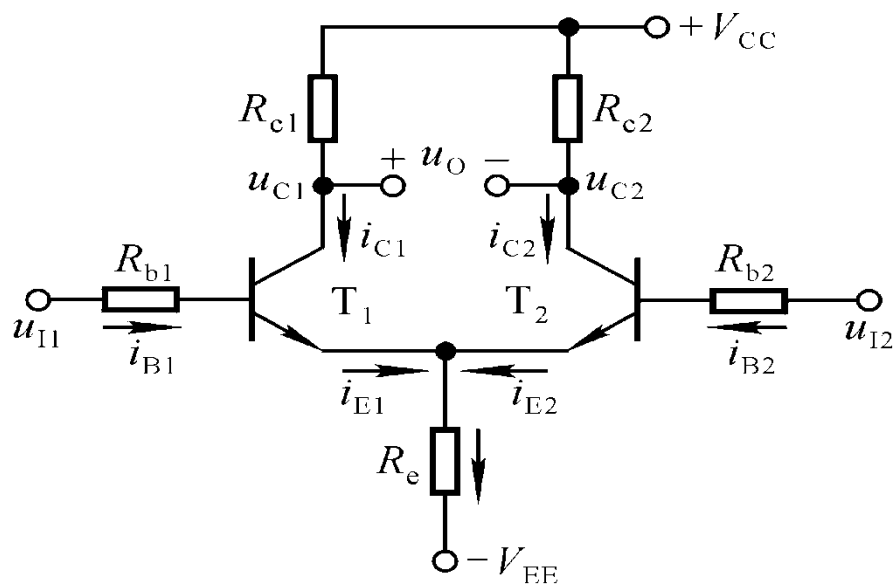
MOSFET恒流源



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

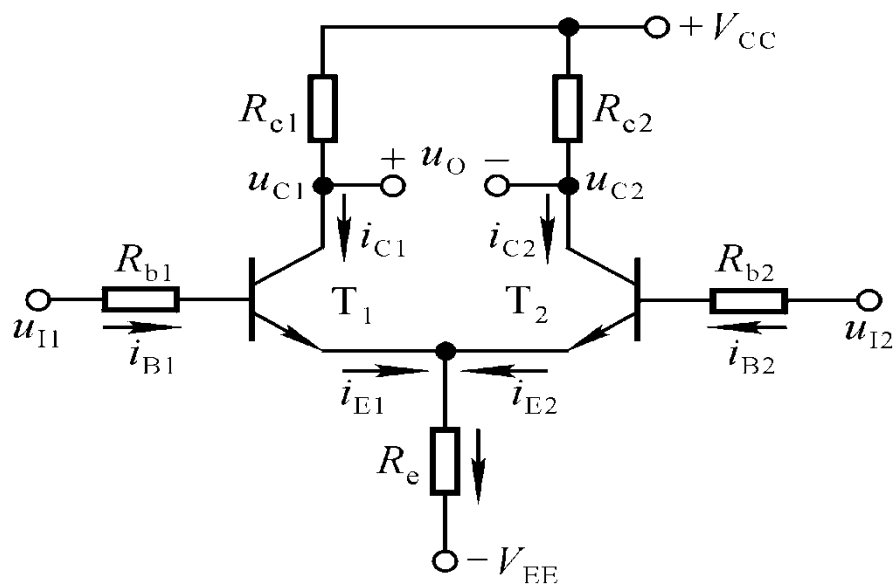
- ✓ 如何设置静态工作点?
- ✓ 如何分析静态、动态?

讨论一



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

讨论二



已知 $u_{I1}=10\text{mV}$, $u_{I2}=5\text{mV}$ 时, $u_O=100\text{mV}$;

问 $u_{I1}=25\text{mV}$, $u_{I2}=20\text{mV}$ 时, $u_O=?$

思考题

- 四种差分放大电路的动态分析方法可以总结为几种？
- 双端（差分）输入和单端输入的区别？
- 双端输出和单端输出抑制温漂的方法有何不同？
- 既然单端输出的差模放大倍数仅为单管共射放大电路的一半，为何不直接采用共射放大电路而采用单端输出差分放大电路？
- 为什么采用恒流源式差分放大电路？此时电路中静态电流如何确定？E(或S)点仍可认为是差模交流等效电路的接地点吗？
- u_{Id} 、 u_{Ic} 有上限吗？

§ 3.5 互补输出级

- 一. 对输出级的要求
- 二. 互补输出级的基本电路
- 三. 消除交越失真的互补输出级
- 四. 准互补输出级

一、对输出级的要求

➤ 对直接耦合输出级的要求：

□ 带负载能力强

射极输出形式

□ 直流功耗小

静态工作电流小

□ 负载电阻上无直流功耗

输入为零时输出为零

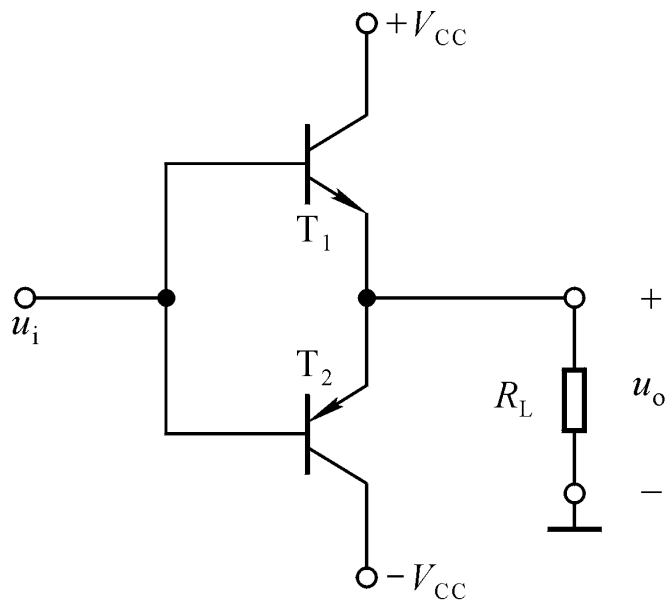
□ 最大不失真输出电压最大



射极输出器可以满足要求么？
若不能满足，电路如何改进？

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

➤ 采用互补电路作为输出级电路



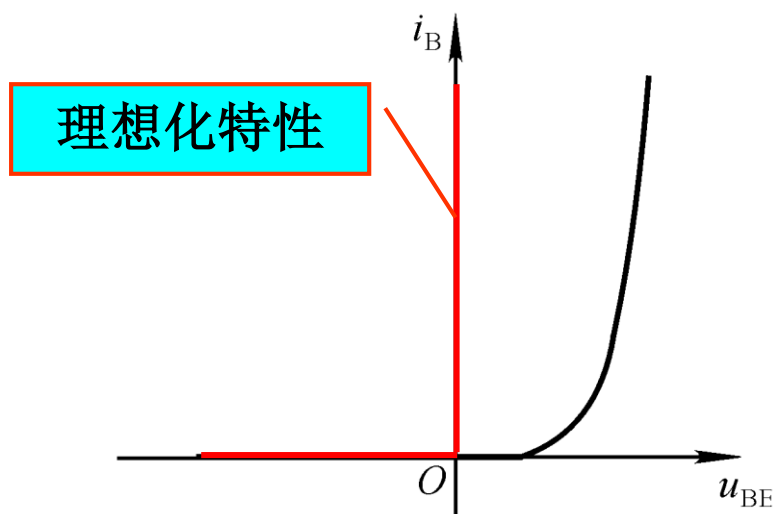
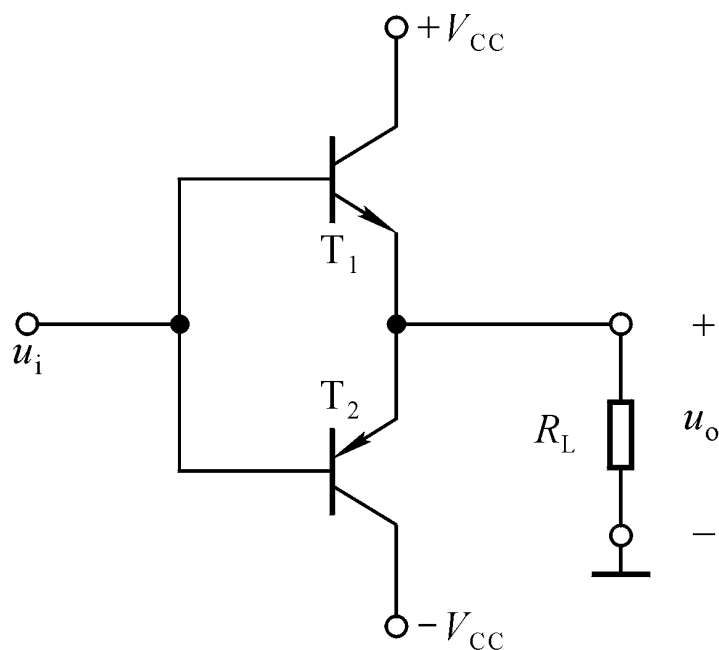
- 带负载能力强：射极输出
- 直流功耗小：静态功耗为零
- 负载电阻无直流功耗： $u_i=0$ ，输出为零
- 最大不失真输出电压：

$$\text{正向 } U_{om} = V_{CC} - U_{CES} \approx V_{CC}$$

$$\text{负向 } U_{om} = -V_{CC} + U_{CES} \approx -V_{CC}$$

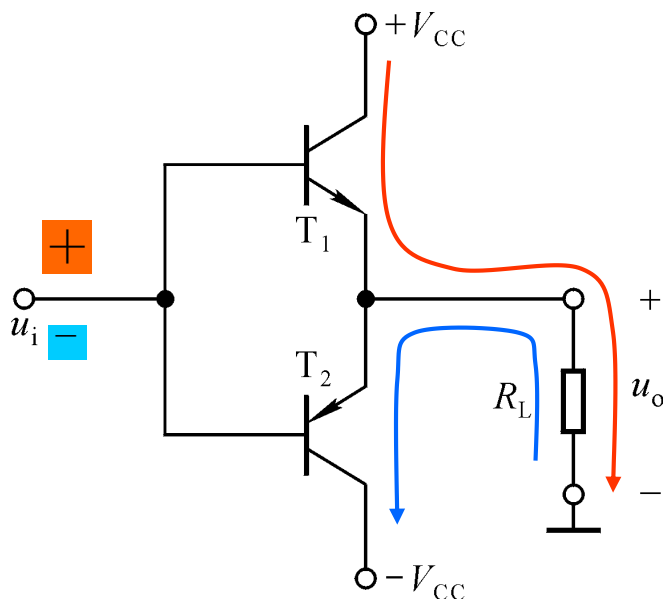
二、互补输出级的基本电路

1. 特征: T_1 、 T_2 特性理想对称
2. 静态分析



➤ 静态时, $U_B = U_E = 0$, 零输入零输出
 T_1 、 T_2 均截止, 静态功耗为零

3. 动态分析



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

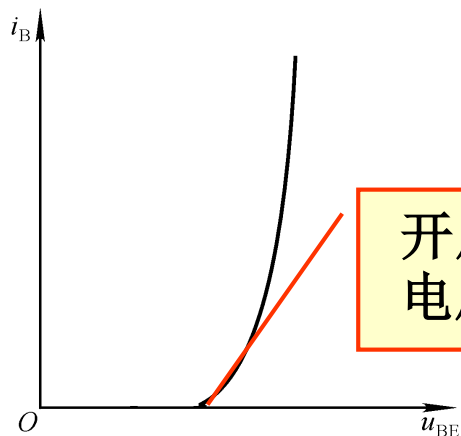
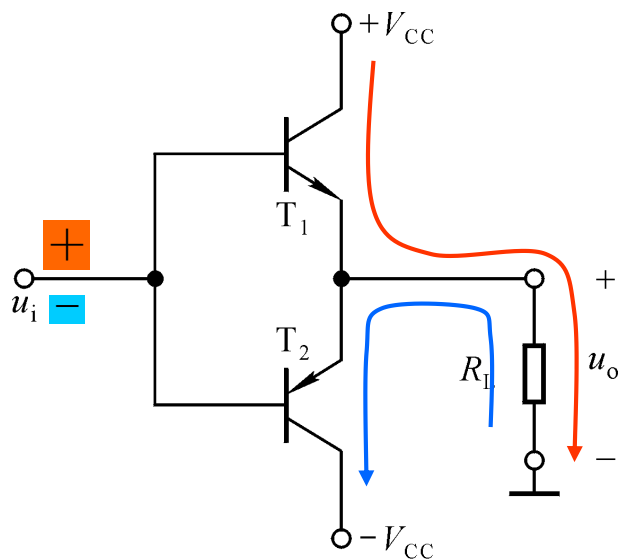
$$u_o = u_i$$

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

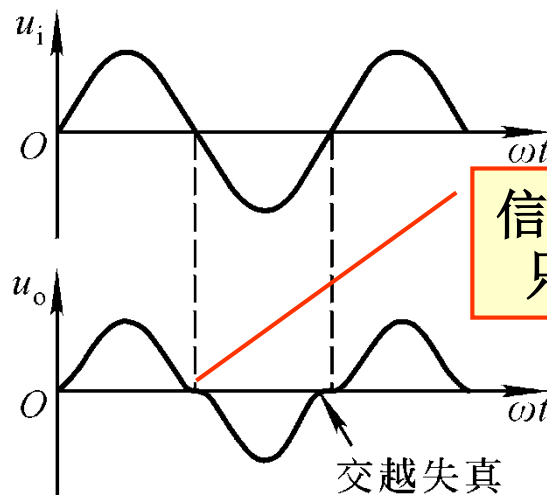
$$u_o = u_i$$

两只管子交替工作, 两路电源交替供电,
 双向跟随

4. 交越失真



开启
电压



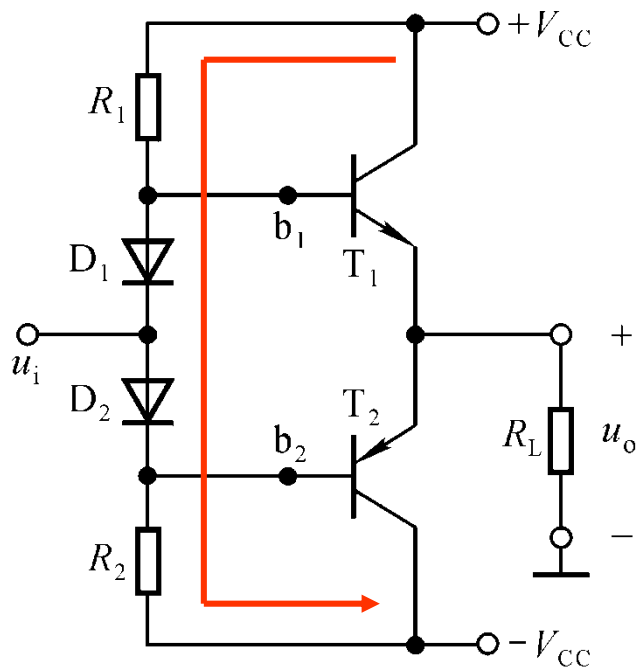
信号在零附近两
只管子均截止

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

三、消除交越失真的互补输出级

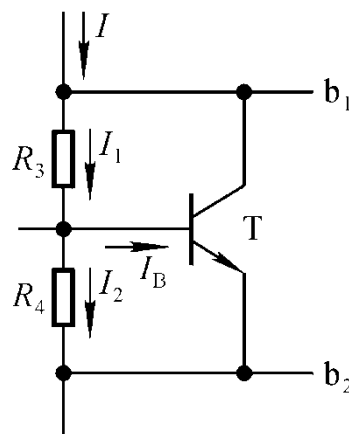
➤ 采用二极管



静态： $U_{B1B2} = U_{D1} + U_{D2}$

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

➤ 采用 U_{BE} 倍增电路



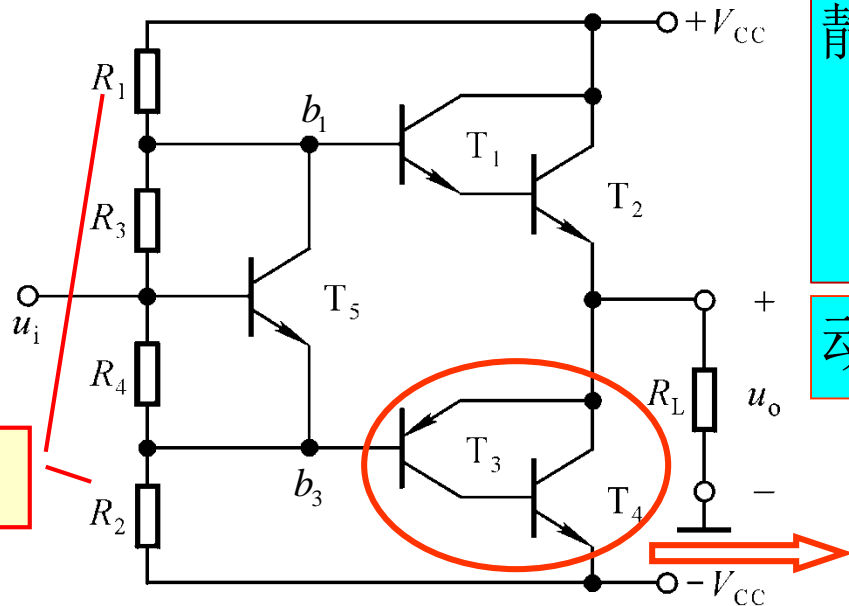
若 $I_2 \gg I_B$ ，则

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

故称之为 U_{BE} 倍增电路

四、准互补输出级

➤ 为了增大输出电流，常采用复合管。在集成电路中不易做到NPN与PNP管完全对称，因而常用PNP与NPN的复合管代替PNP管，做到既对称又互补

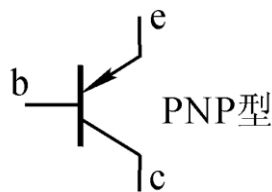


大!

静态时: $U_{BE1} + U_{BE2} + U_{EB3}$

$$\approx \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) U_{BE5}$$

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



§ 3.6 集成运放中的电流源

一、镜像电流源

二、微电流源

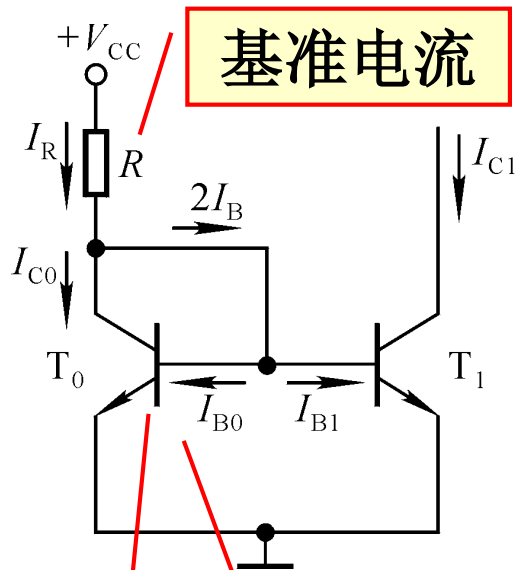
三、多路电流源

四、有源负载

一、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

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

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

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

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

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

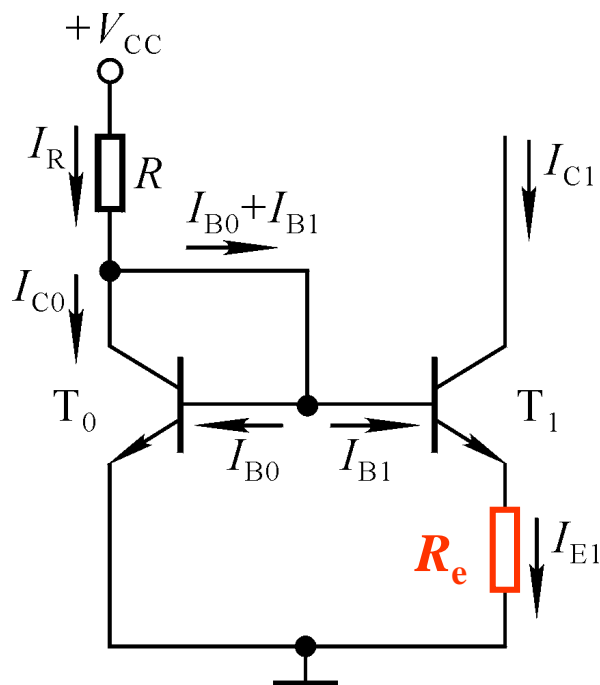
T_0 工作状态?

电路中有负反馈吗?

若 $\beta \gg 2$, 则 $I_C \approx I_R$

二、微电流源

要求提供很小的静态电流，又不能用电大电阻。



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

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

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

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

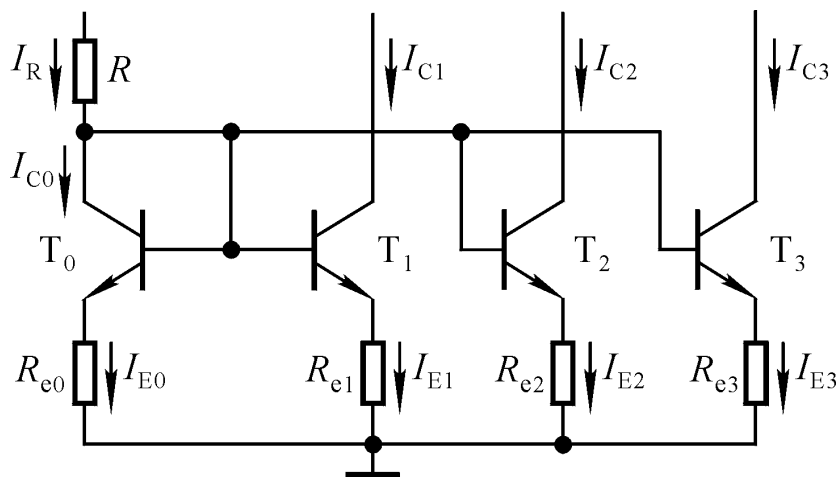
$$I_{E0} \approx I_{C0} \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R}$$

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

三、多路电流源

(1) 基于比例电流源的多路电流源

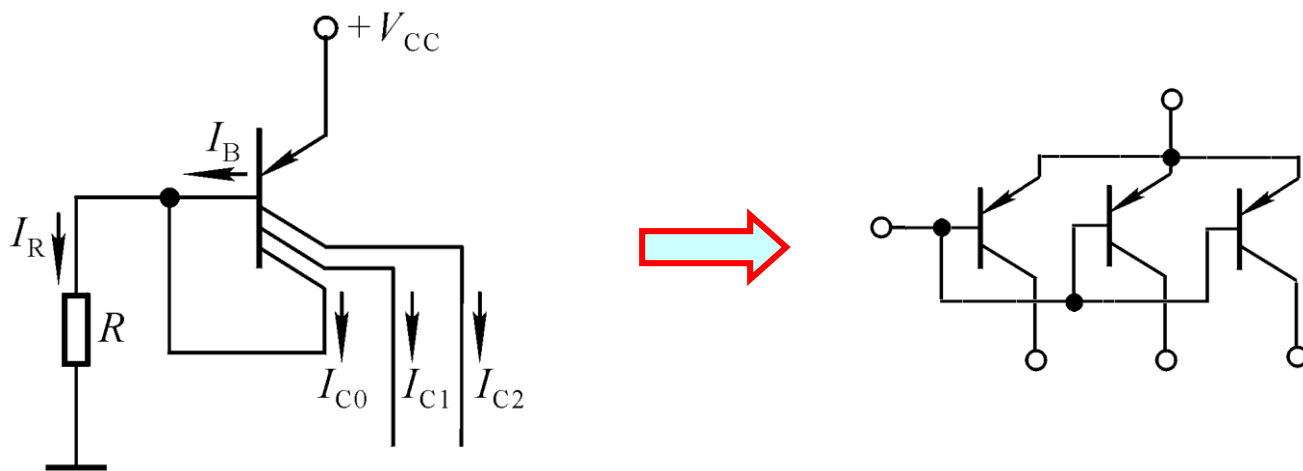


$$\begin{aligned}
 &U_{BE0} + I_{E0}R_{e0} \\
 &= U_{BE1} + I_{E1}R_{e1} \\
 &= U_{BE2} + I_{E2}R_{e2} \\
 &= U_{BE3} + I_{E3}R_{e3}
 \end{aligned}$$

因为 U_{BE} 相差不多，故 $I_{E0}R_{e0} \approx I_{E1}R_{e1} \approx I_{E2}R_{e2} \approx I_{E3}R_{e3}$

根据所需静态电流，来选取发射极电阻的数值

(2) 多集电极管构成的多路电流源

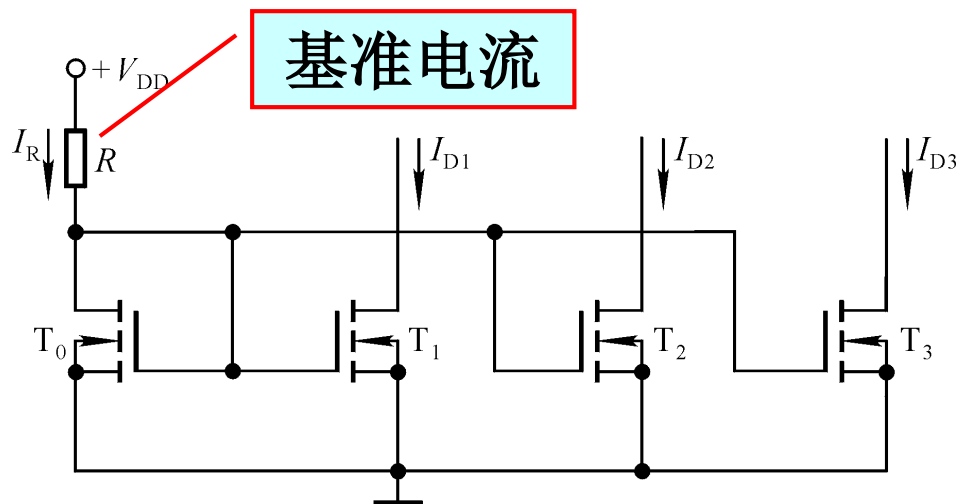


设三个集电区的面积分别为 S_0 、 S_1 、 S_2 ，则

$$\frac{I_{C1}}{I_{C0}} = \frac{S_1}{S_0}, \frac{I_{C2}}{I_{C0}} = \frac{S_2}{S_0}$$

根据所需静态电流，来确定集电结面积

(3) MOS管多路电流源



MOS管的漏极
电流正比于沟道
的宽长比

设宽长比 $W/L=S$ ，且 $T_1 \sim T_4$ 的宽长比分别为 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 ，则

$$\frac{I_{D1}}{I_{D0}} = \frac{S_1}{S_0}, \frac{I_{D2}}{I_{D0}} = \frac{S_2}{S_0}, \frac{I_{D3}}{I_{D0}} = \frac{S_3}{S_0}$$

根据所需静态电流，来确定沟道尺寸

➤ 电流源的作用

- 理想电流源的特点：
 - ✓ 输出电流恒定 → 温漂小
 - ✓ 内阻无穷大 → 对动态电流信号的影响小
- 在放大电路中的作用：
 - ✓ 设置静态偏置电流
 - ✓ 作为有源负载，取代大电阻，提高电压放大倍数

用有源元件取代无源元件！

四、有源负载

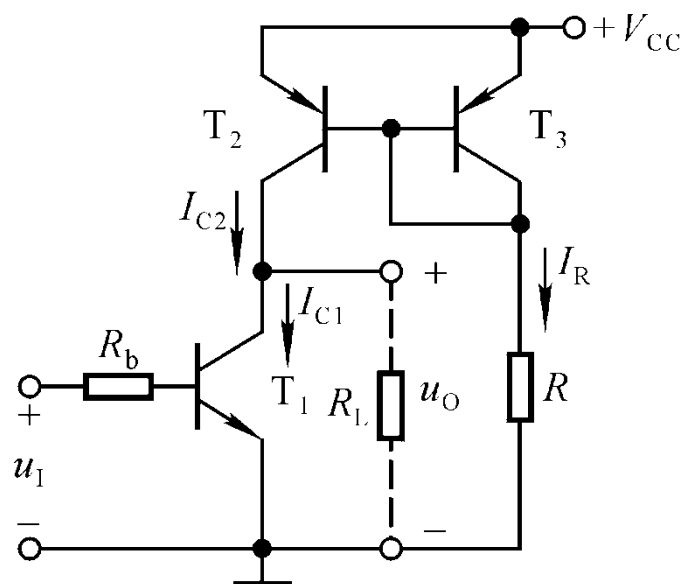
1. 用于共射放大电路

①哪只管子为放大管？

☒ A T_1

☐ B T_2

☐ C T_3



提交

四、有源负载

1. 用于共射放大电路

①哪只管子为放大管？

②其集电结静态电流约为多少？

☒ A

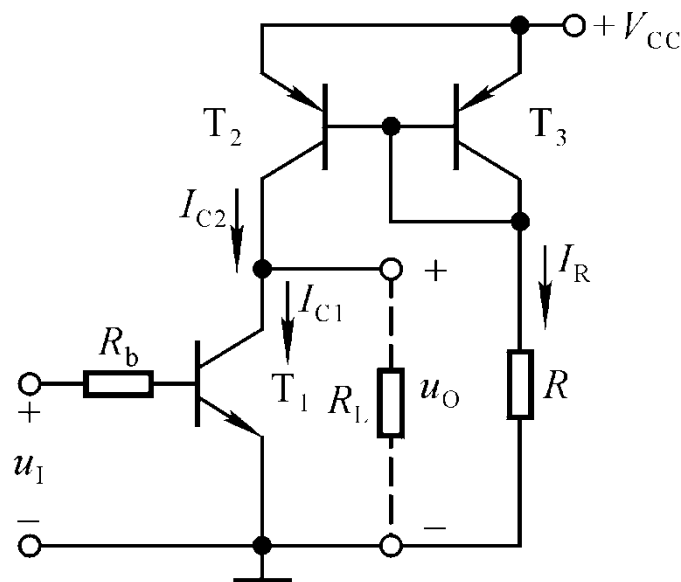
I_R

☒ B

βI_{BQ}

☐ C

0

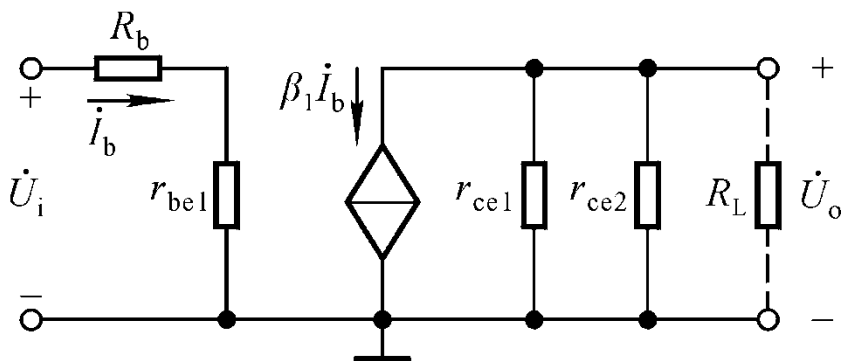


提交

四、有源负载

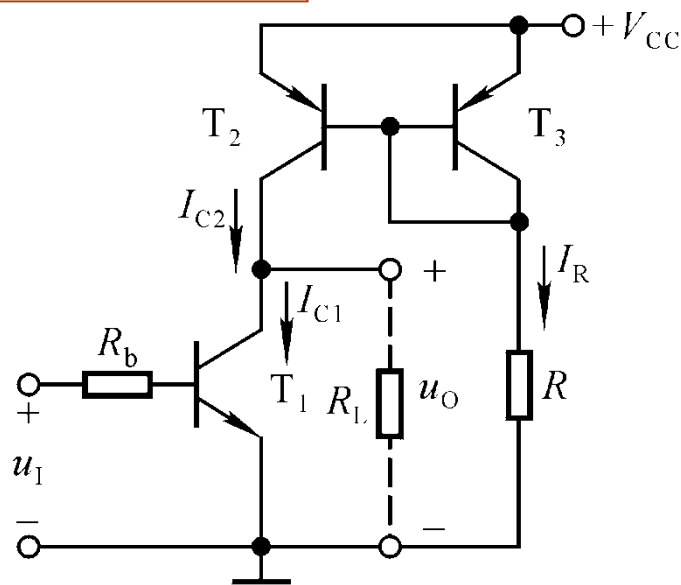
1. 用于共射放大电路

- ①哪只管子为放大管？
- ②其集电结静态电流约为多少？



$$\dot{A}_u = -\beta \frac{R_c // R_L}{R_b + r_{be}}$$

$$R_c \uparrow \Rightarrow |\dot{A}_u| \uparrow$$

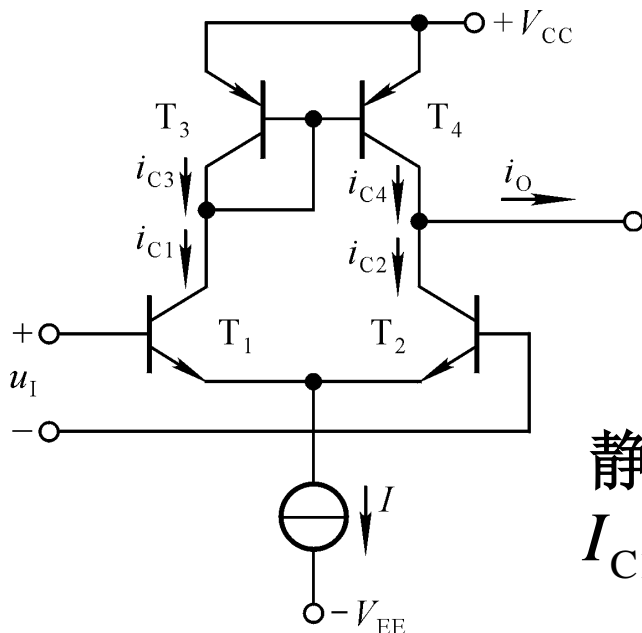


③ $A_u = ?$

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

$$\Delta i_0 = \Delta i_{C4} - \Delta i_{C2} \approx 2\Delta i_{C1}$$

§ 3.7 集成运放的电路分析 及其性能指标

一、读图方法

二、读图举例

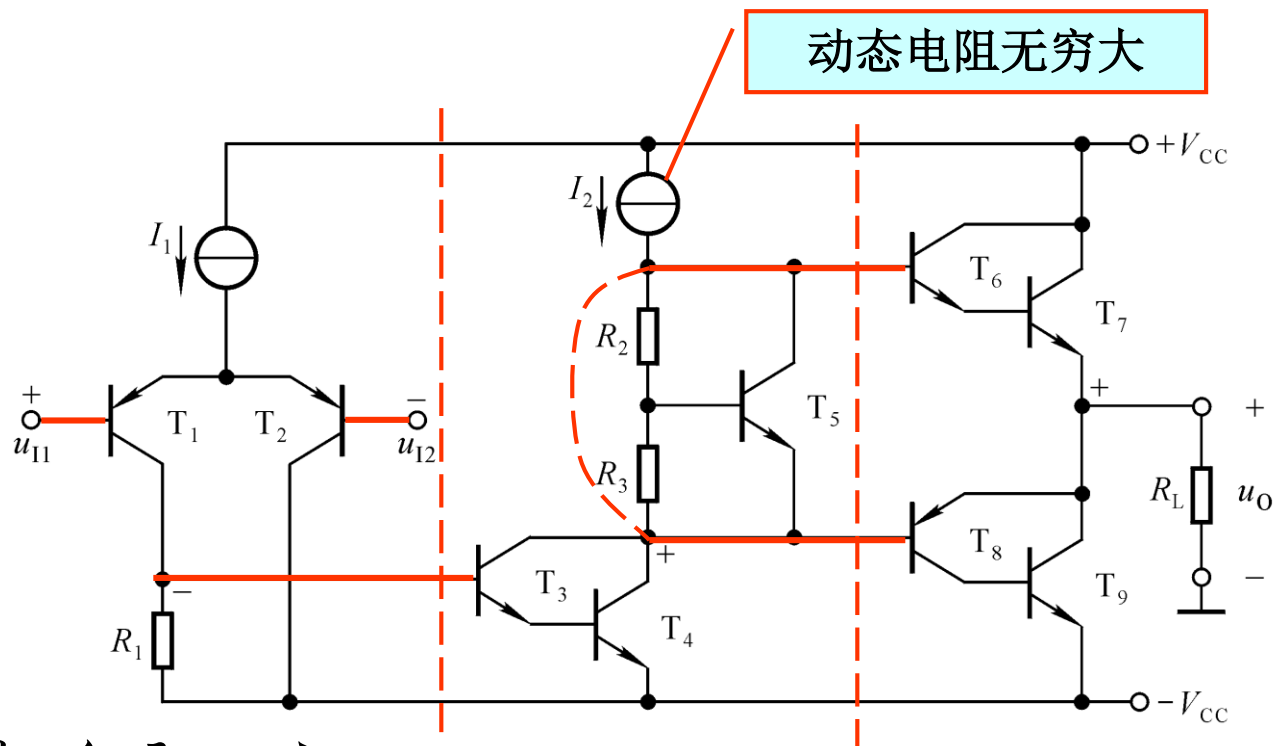
三、集成运放的性能指标

一、读图方法

➤ 已知电路图，分析其原理和功能、性能

- 了解用途：了解电路的应用场合、用途和技术指标
- 化整为零：将整个电路图分为各自具有一定功能的基本电路
- 分析功能：定性分析每一部分电路的基本功能和性能
- 统观整体：电路相互连接关系，连接后电路的功能和性能
- 定量计算：必要时估算或利用EDA工具分析电路主要性能指标

二、举例：简化集成运放



1. 化整为零，分析功能

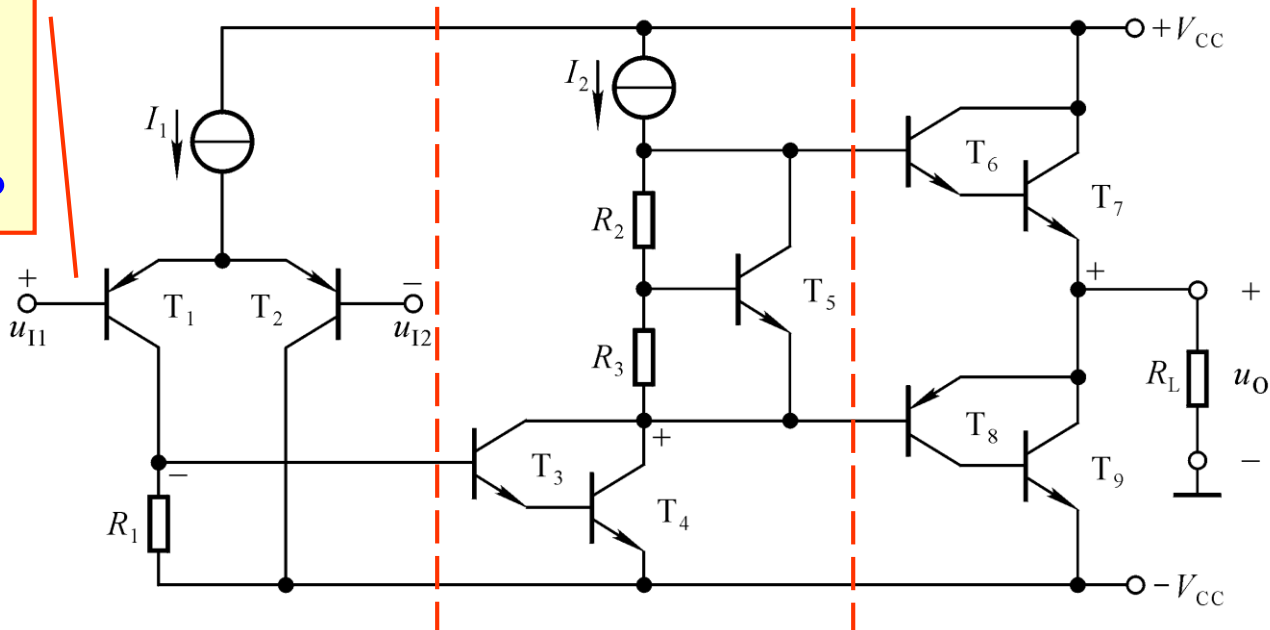
第一级：双端输入单端输出的差放

第二级：以复合管为放大管的共射放大电路

第三级：准互补输出级

2. 统观整体

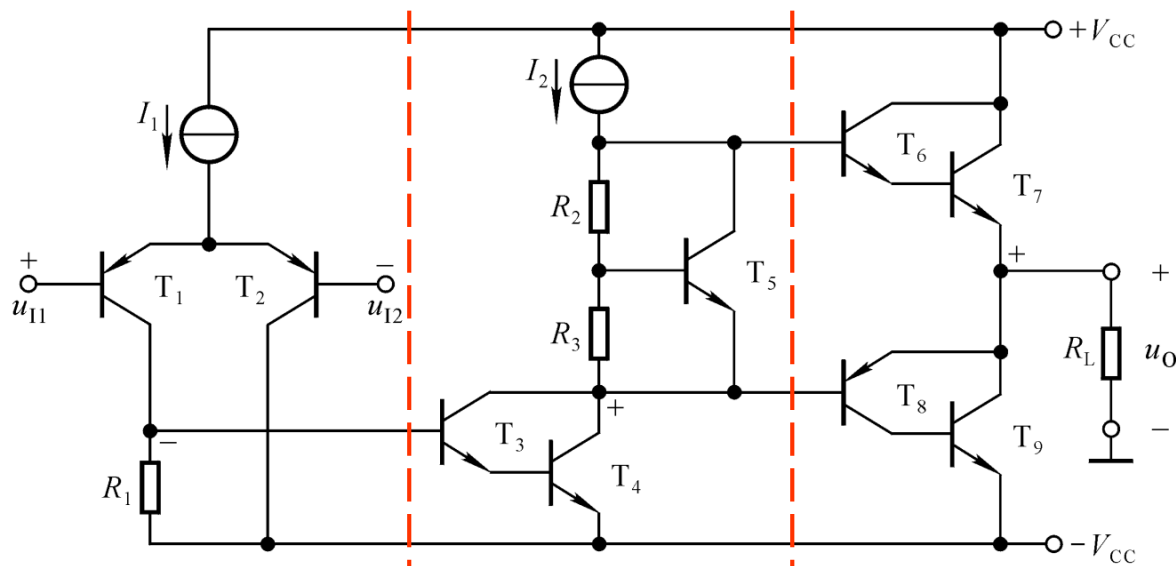
如何判断电路的同相、反相输入端？



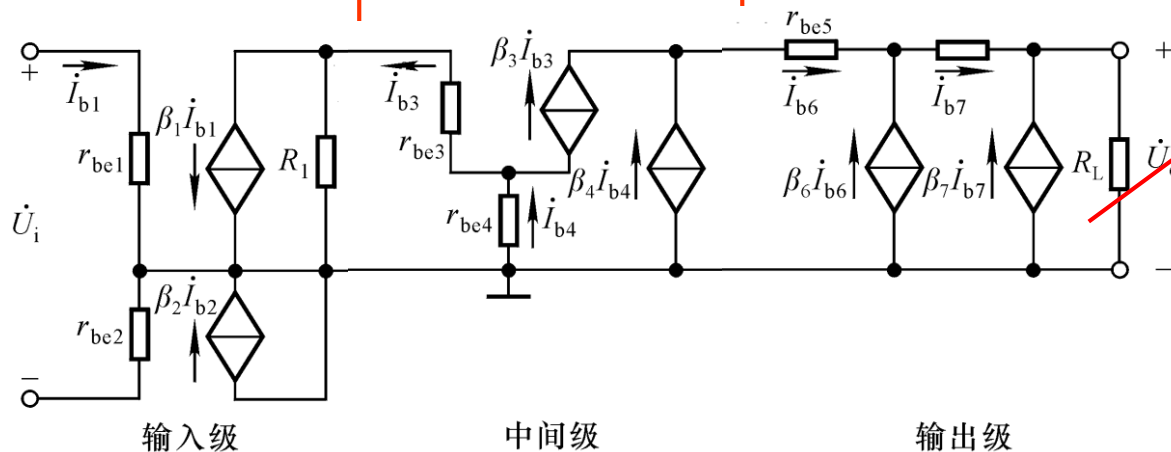
输入电阻为 $2r_{be}$ 、电压放大倍数较大、输出电阻很小、最大不失真输出电压的峰值接近电源电压

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

3. 定量计算



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

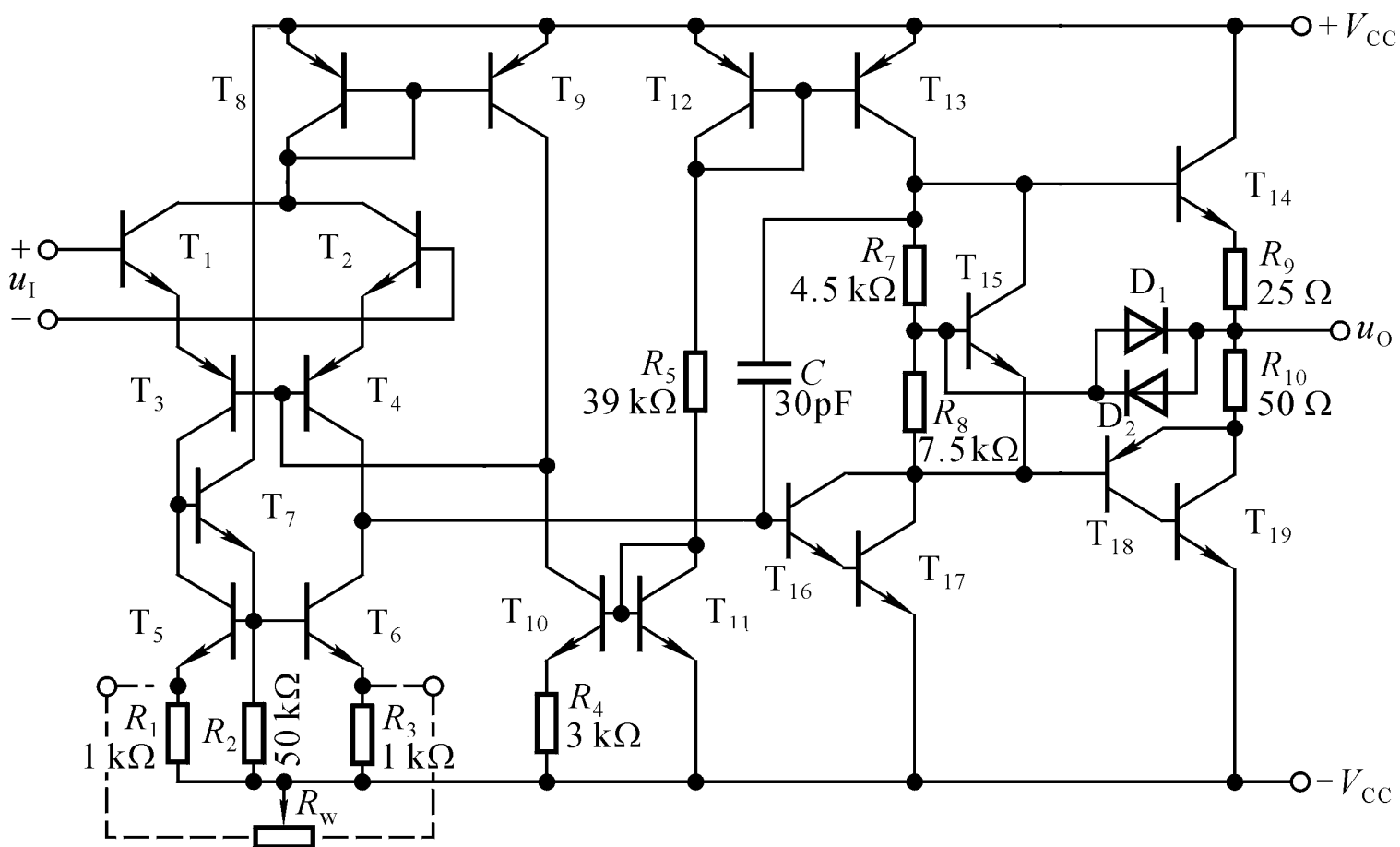


为何只画 T_6 、 T_7 的等效电路

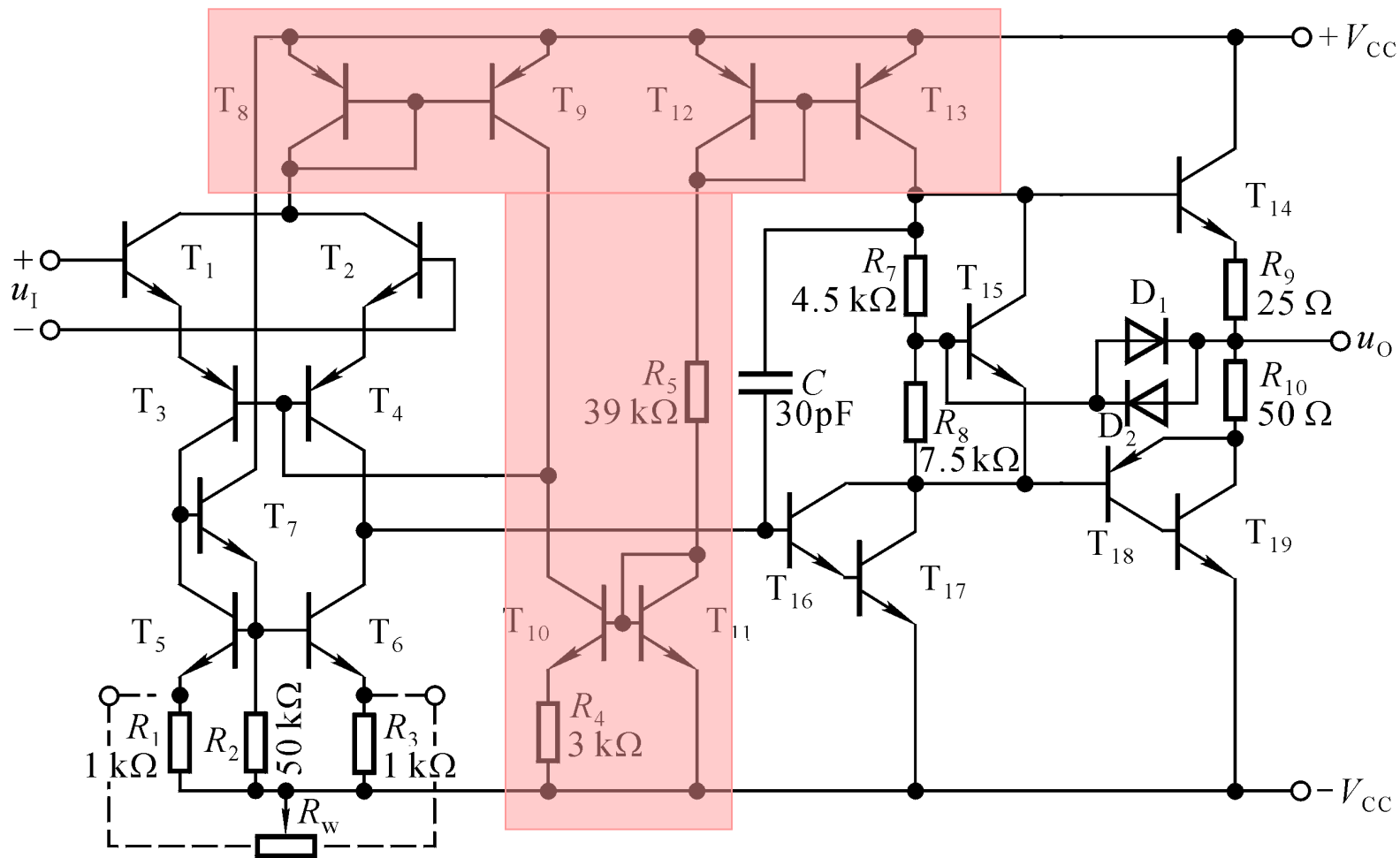
电压放大倍数要靠电流放大倍数的积累转换而来！

二、举例：F007——通用型集成运放

➤ 对于集成运放电路，应首先找出偏置电路，然后根据信号流通顺序，将其分为输入级、中间级和输出级电路

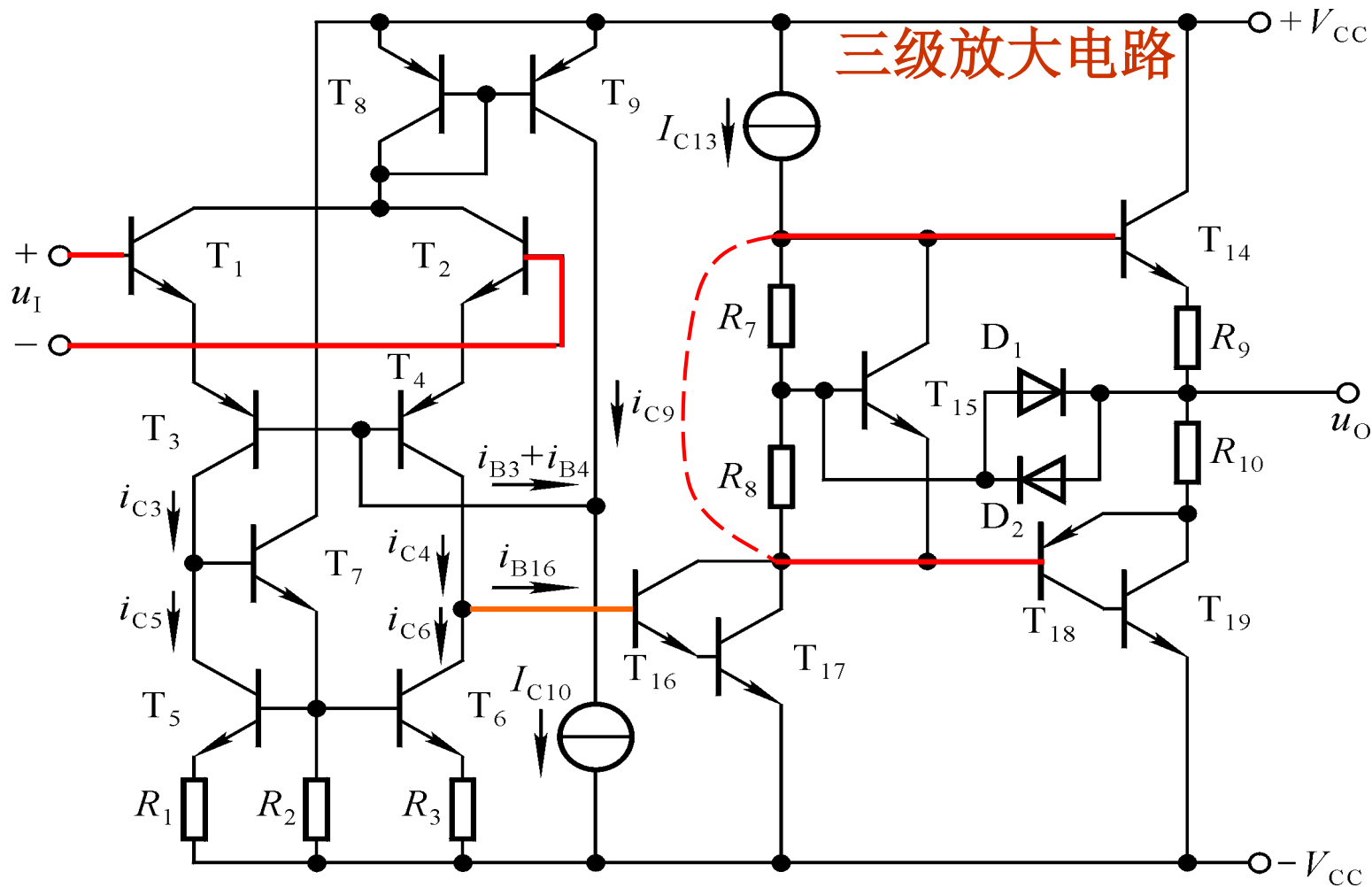


找出偏置电路



➤ 若在集成运放电路中能够估算出某一支路的电流，则这个电流往往是偏置电路中的基准电流

简化电路、分解电路



双端输入、单端
输出差分放大电
路

以复合管为放大管、
恒流源作负载的共
射放大电路

用 U_{BE} 倍增电路消
除交越失真的准
互补输出级

输入级的分析

共集-共基形式

T_1 和 T_2 从基极输入、射极输出

T_3 和 T_4 从射极输入、集电极输出

(1) 共集形式，输入电阻大；共基形式频带宽；

(2) T_3 、 T_4 为横向PNP型管，输入端耐压高；

(3) 允许的共模输入电压幅值大

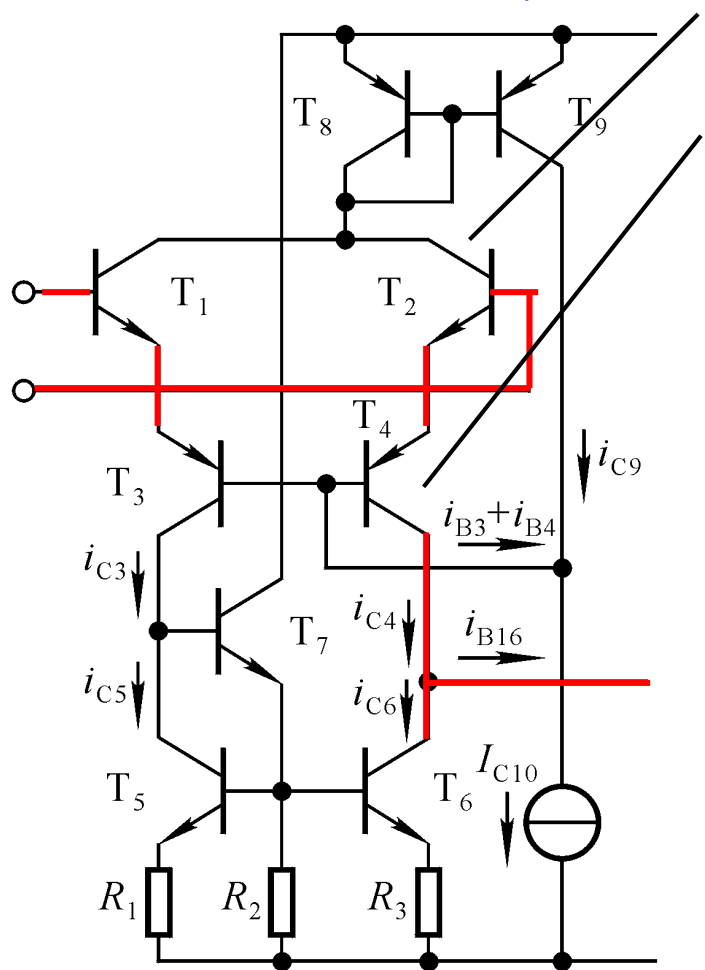
T_8 、 T_9 的作用：稳定 Q 点

$T \text{ (}^\circ\text{C)} \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow I_{C2} \uparrow \rightarrow I_{C8} \uparrow$

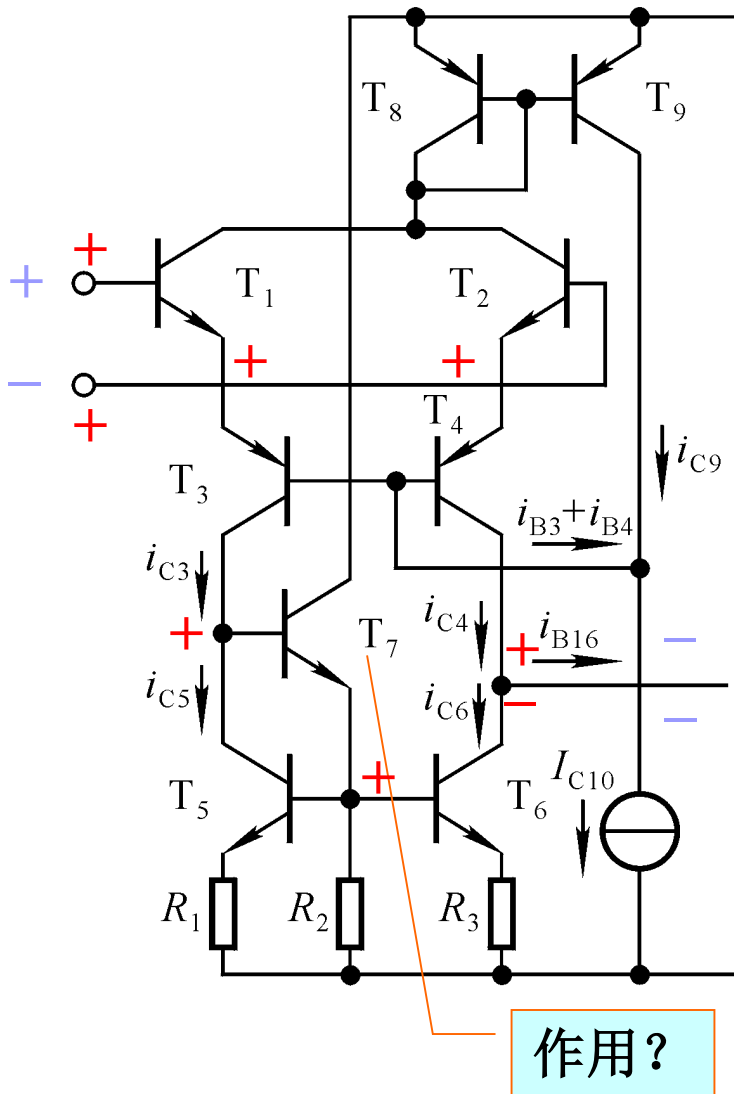
I_{C9} 与 I_{C8} 为镜像关系 $\rightarrow I_{C9} \uparrow$

因为 I_{C10} 不变 $\rightarrow I_{B3} \downarrow I_{B4} \downarrow \rightarrow$

$I_{C3} \downarrow I_{C4} \downarrow \rightarrow I_{C1} \downarrow I_{C2} \downarrow$



输入级的分析



**T₇的作用：抑制共模信号
放大差模信号**

T_5 、 T_6 分别是 T_3 、 T_4 的有源负载，而 T_4 又是 T_6 的有源负载

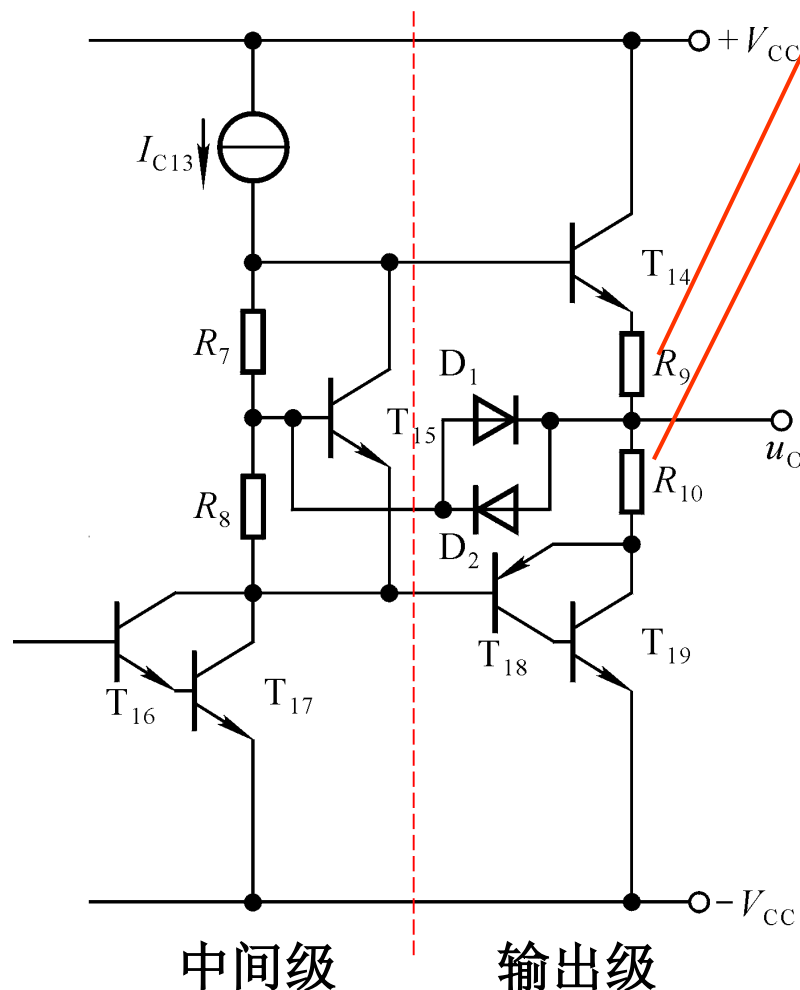
特点:

输入电阻大、差模放大倍数大、共模放大倍数小、输入端耐压高，并完成电平转换（即对“地”输出）

F007的中间级是以复合管为放大管、采用有源负载的共射放大电路。由于等效的集电极电阻趋于无穷大，故动态电流几乎全部流入输出级

输出级的分析

准互补输出级， U_{BE} 倍增电路消除交越失真



电流采样电阻

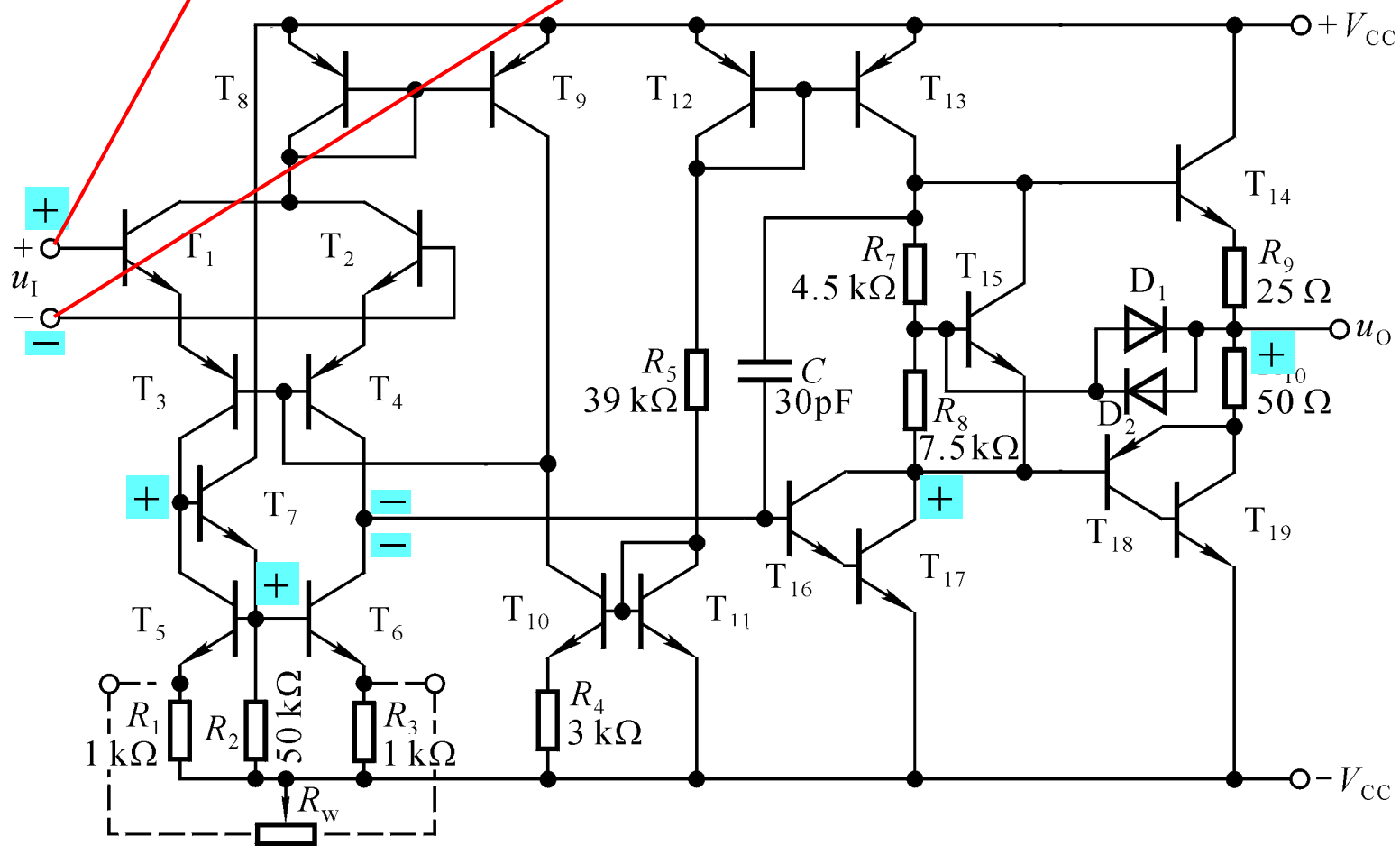
D_1 和 D_2 起过流保护作用，未过流时，两只二极管均截止

$$U_{D1} = U_{BE14} + i_O R_9 - U_{R7}$$

i_O 增大到一定程度， D_1 导通，为 T_{14} 基极分流，从而保护了 T_{14}

特点：
输出电阻小
最大不失真输出电压高

判断同相输入端和反相输入端



F007所具有的高性能

- A_d 较大：放大差模信号的能力较强
- A_c 较小：抑制共模信号的能力较强
- r_{id} 较大：从信号源索取的电流小
- r_o 小：带负载能力强
- U_{om} 大：其峰值接近电源电压
- 输入端耐压高：使输入端不至于击穿的差模电压大小
- $u_{lcm\max}$ 大：接近电源电压

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	∞
• 差模输入电阻 r_{id}	2M Ω	∞
• 共模抑制比 K_{CMR}	90dB	∞
• 输入失调电压 U_{IO}	1mV	0
• U_{IO} 的温漂 $dU_{IO}/dT(^{\circ}C)$	几 $\mu V/^{\circ}C$	0
• 输入失调电流 I_{IO} ($ I_{B1} - I_{B2} $)	20 nA	0
• I_{IO} 的温漂 $dI_{IO}/dT(^{\circ}C)$	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	∞
• 转换速率 $SR(=du_O/dt _{max})$	0.5V/ μs	∞

四、集成运放的种类

按性能指标

通常情况下用通用型运放，特殊情况下才用专用型运放。

高阻型： r_{id} ，可高于 $10^{12}\Omega$ 。

用于测量放大器、信号发生器。

高速型： f_H 和 SR 高， f_H 可达 1.7GHz ， SR 可达 $10^3\text{V}/\mu\text{S}$ 。

用于A/D、D/A转换电路、视频放大器。

高精度型： 低失调、低温漂、低噪声、高增益，

A_{od} 高于 10^5dB 。

用于微弱信号的测量与运算、高精度设备。

低功耗型： 工作电源电压低、静态功耗小，在 $100\sim 200\mu\text{W}$ 。

用于空间技术、军事科学和工业中的遥感遥测。

大功率型、仪表用放大器、隔离放大器、缓冲放大器.....

讨论一

根据下列要求，将应优先考虑使用的集成运放填入空内。
已知现有集成运放的类型是：

①通用型 ②高阻型 ③高速型 ④低功耗型
⑤高压型 ⑥大功率型 ⑦高精度型

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 $1\mu\text{V}$ 以下微弱信号的量测放大器，应选用_____。
4. 作内阻为 $10\text{M}\Omega$ 信号源的放大器，应选用_____。
5. 负载需 5A 电流驱动的放大器，应选用_____。
6. 要求输出电压幅值为 ± 80 的放大器，应选用_____。
7. 宇航仪器中所用的放大器，应选用_____。