

清华大学

第三章 多级放大电路

2001 11 11



第三章 多级放大电路

§ 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 差分放大电路

§ 3.4 互补输出级

§ 3.5 直接耦合多级放大电路读图





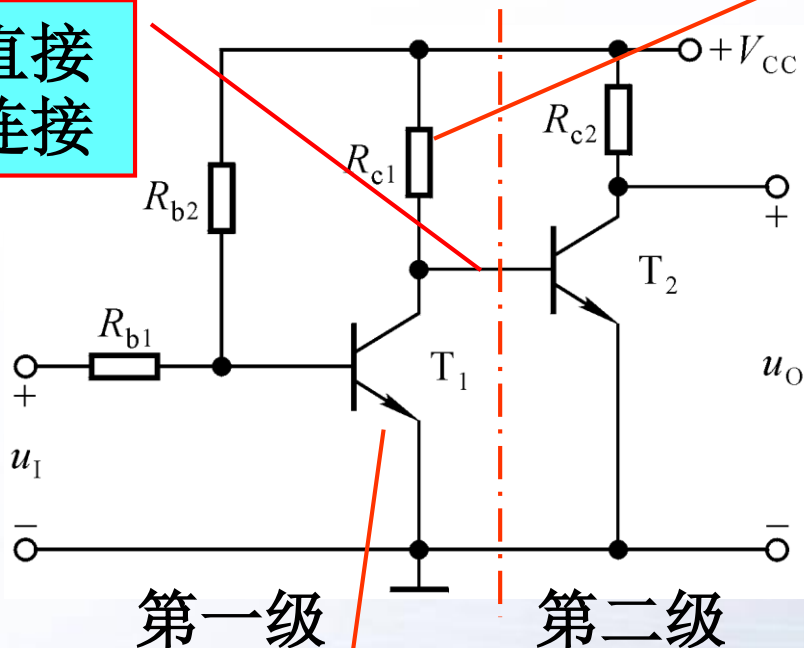
§ 3.1 多级放大电路的耦合方式

- 一、直接耦合
- 二、阻容耦合
- 三、变压器耦合



一、直接耦合

直接
连接



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

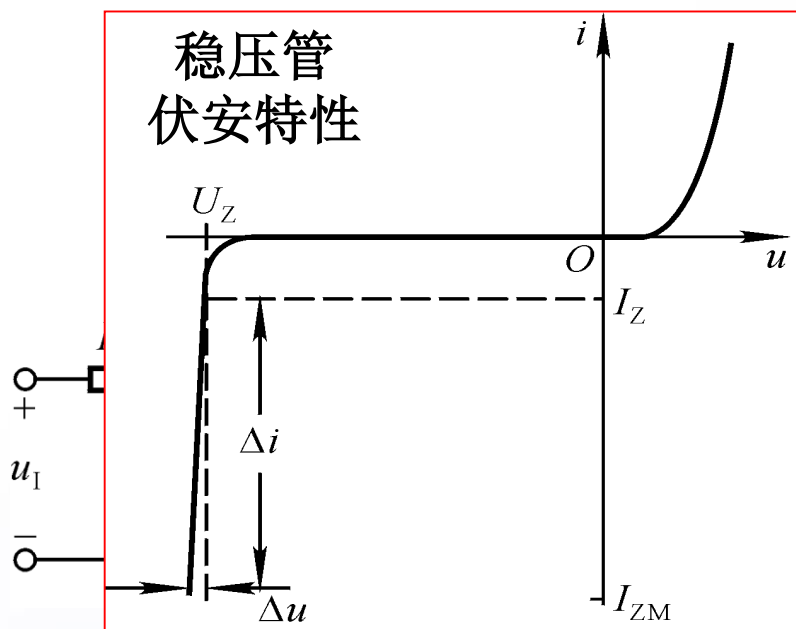
Q_1 合适吗？

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。

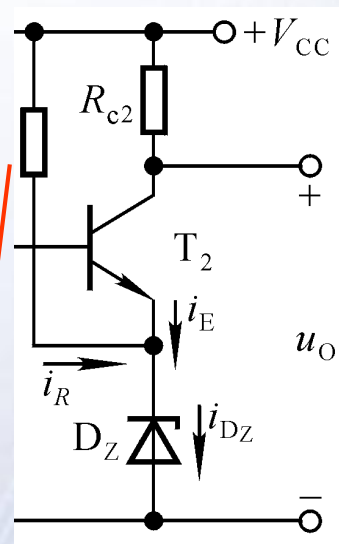


如何设置合适的静态工作点?



对哪些动态参数产生影响?

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?

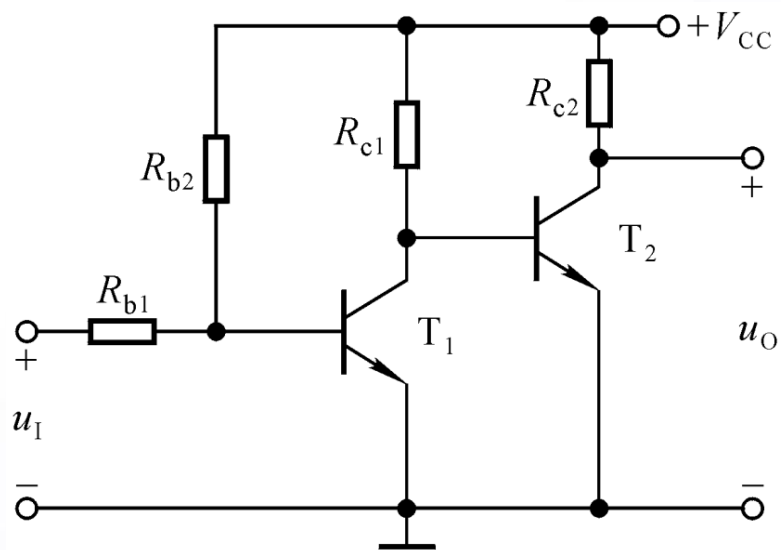
二极管导通电压 $U_D \approx ?$ 动态电阻 r_d 特点?

若要 $U_{CEQ} = 5V$, 则应怎么办? 用多个二极管吗?

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 。

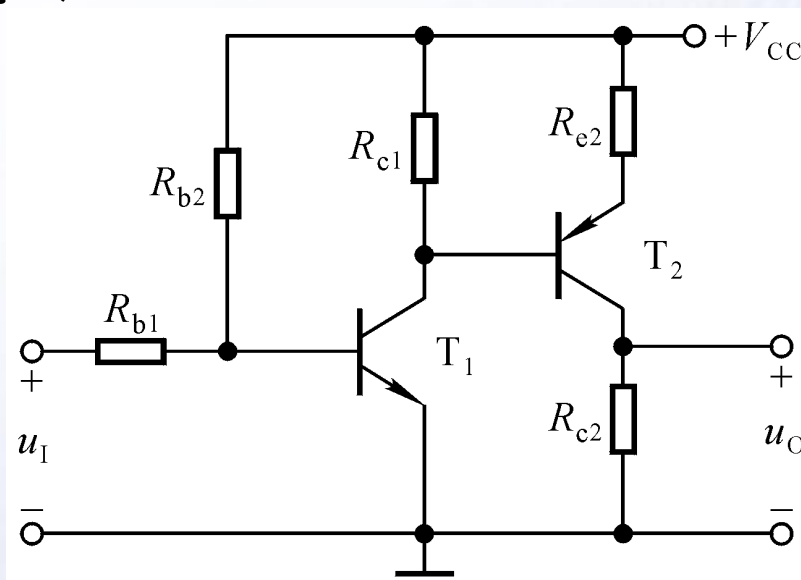


NPN型管和PNP型管混合使用



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

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



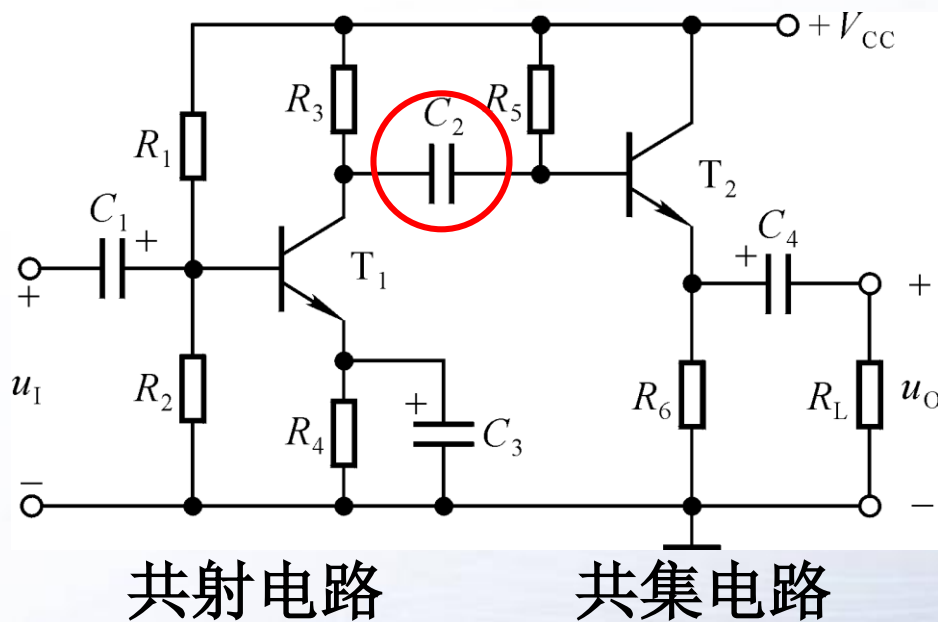
$$U_{CQ1} (U_{BQ2}) > U_{BQ1}$$

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

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。



二、阻容耦合



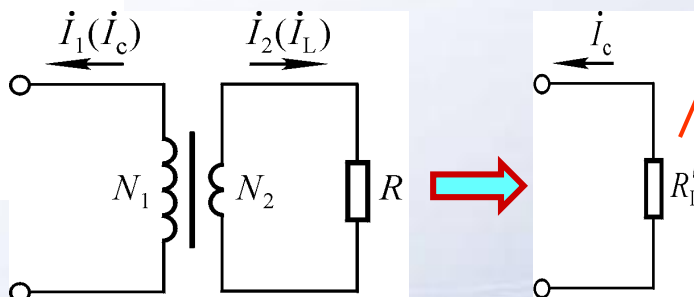
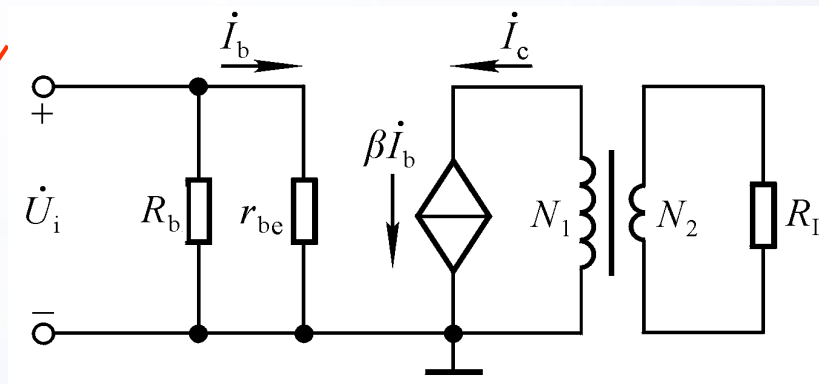
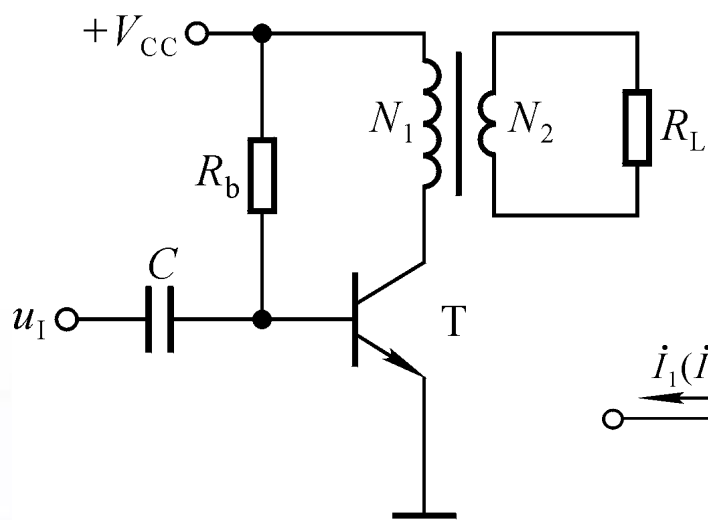
利用电容连接信号源与放大电路、放大电路的前后级、放大电路与负载，为阻容耦合。

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。



三、变压器耦合



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。

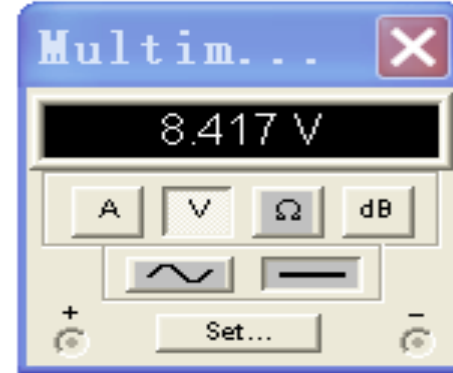
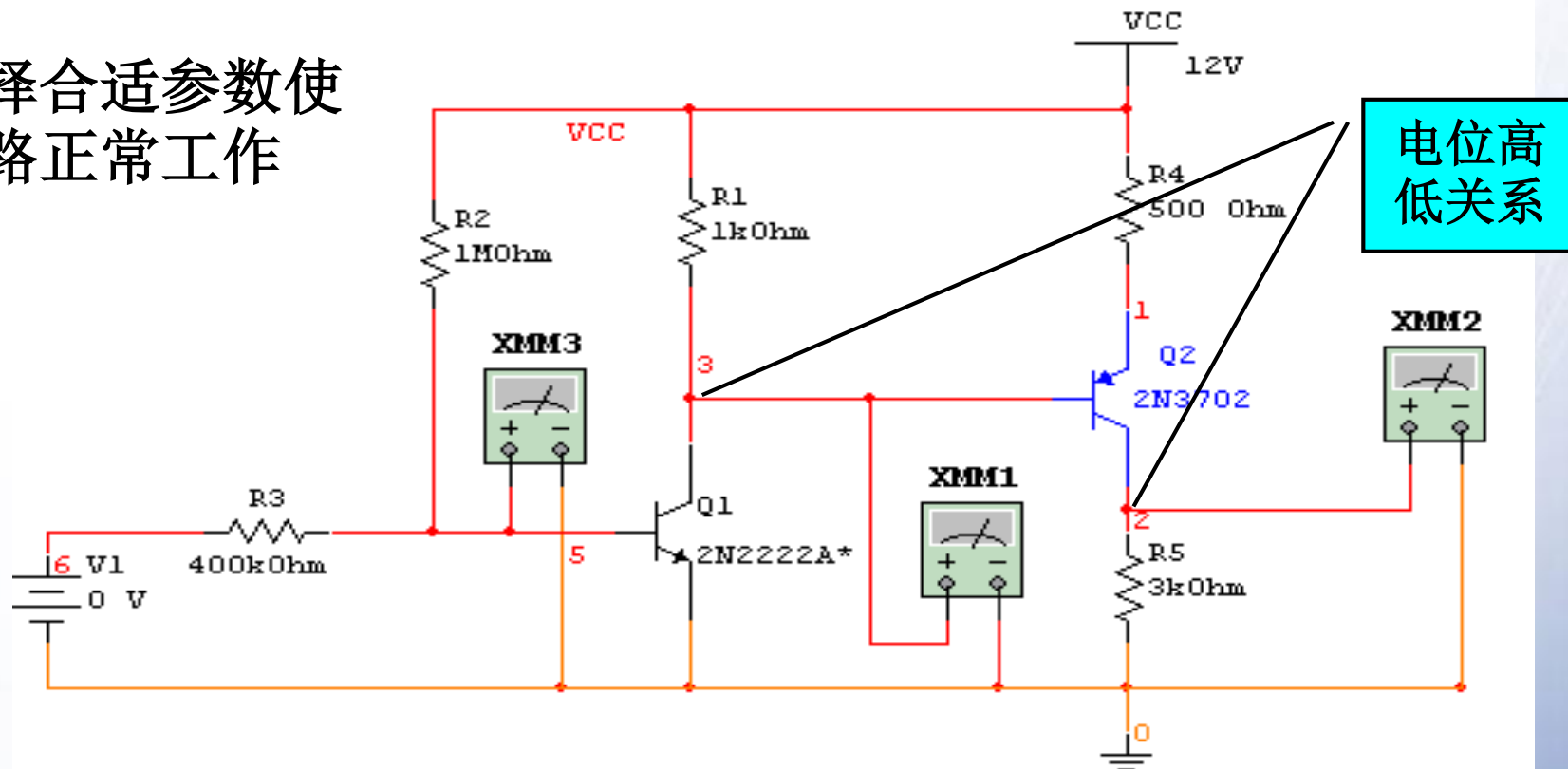
$$P_1 = P_2, \quad I_c^2 R'_L = I_l^2 R_L$$

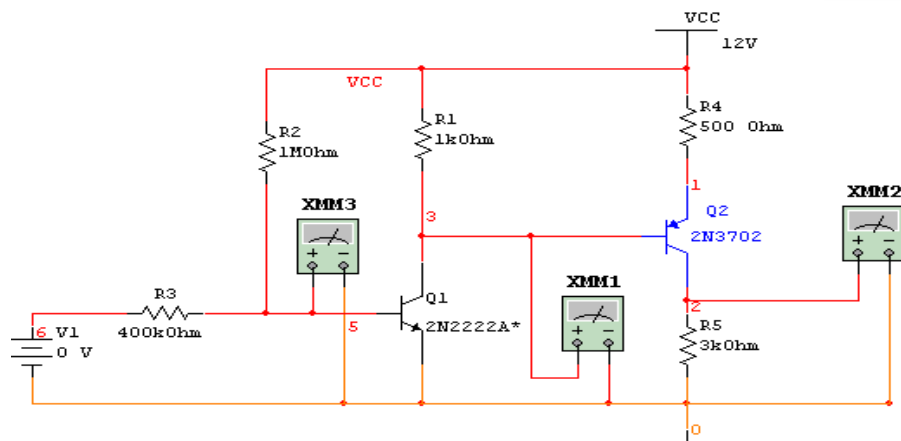
$$R'_L = \frac{I_l^2}{I_c^2} \cdot R_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_L, \quad \text{实现了阻抗变换。}$$



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





从Multisim “参数扫描”
结果分析两级放大电路Q点的
相互影响。

R1取何值时T2工作在饱和
区？

两级直接耦合放大电路
Device Parameter Sweep:

| \$2, r:xr1 resistance=200 | 62.04060μ | 11.55568 |
|----------------------------|-----------|----------|
| \$2, r:xr1 resistance=400 | 1.10850 | 11.11594 |
| \$2, r:xr1 resistance=600 | 3.50805 | 10.68260 |
| \$2, r:xr1 resistance=800 | 5.96670 | 10.25524 |
| \$2, r:xr1 resistance=1000 | 8.41732 | 9.83392 |
| \$2, r:xr1 resistance=1200 | 10.18472 | 9.49504 |
| \$2, r:xr1 resistance=1400 | 10.11609 | 9.38828 |
| \$2, r:xr1 resistance=1600 | 10.04646 | 9.30447 |
| \$2, r:xr1 resistance=1800 | 9.98646 | 9.23613 |
| \$2, r:xr1 resistance=2000 | 9.93553 | 9.17919 |

u_{C2}

u_{C1}

T₂工作在
放大区



§ 3.2 多级放大电路的动态分析

一、动态参数分析

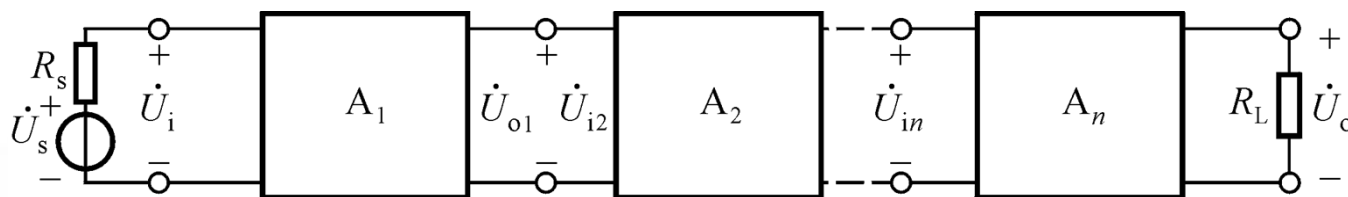
二、分析举例





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

$$R_i = R_{i1}$$

3. 输出电阻

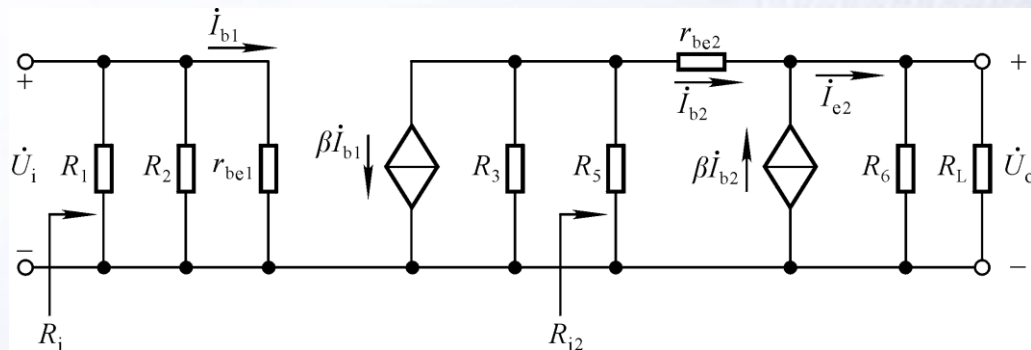
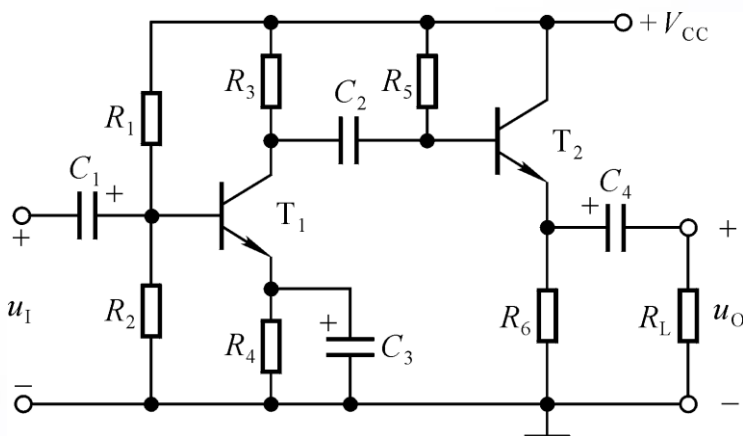
$$R_o = R_{on}$$

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。





二、分析举例



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

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

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

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

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

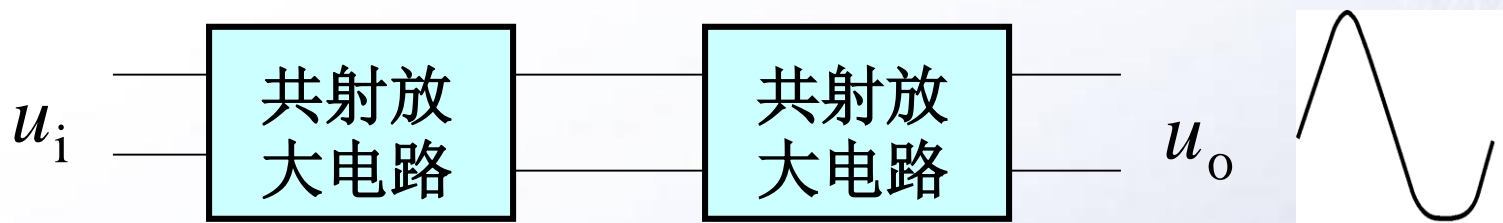
$$R_o = R_6 // \frac{R_3 // R_5 + r_{be2}}{1 + \beta}$$





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：放大电路的运用

1. 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！

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

①共射、共射；②共源、共射；
③共集、共射；④共源、共集。

2. 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放大倍数，则如何求解它们连接后的三级放大电路的电压放大倍数？



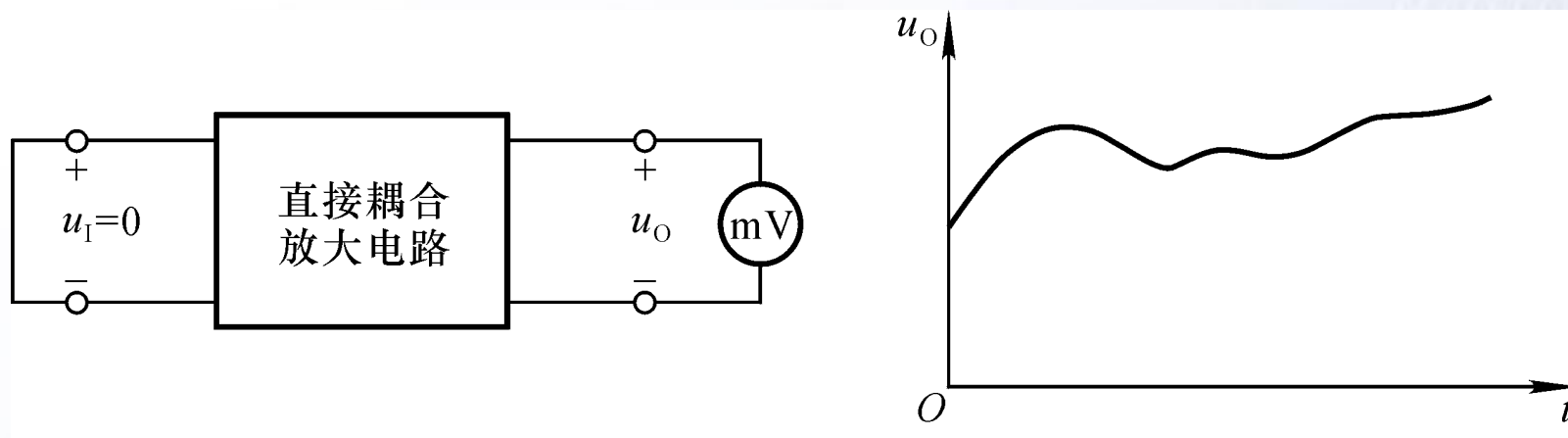
§ 3.3 差分放大电路

- 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。



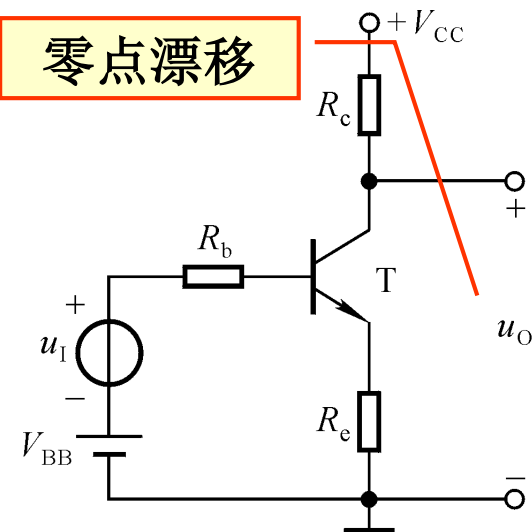
产生原因：温度变化，直流电源波动，元器件老化。其中晶体管的特性对温度敏感是主要原因，故也称零漂为温漂。

克服温漂的方法：引入直流负反馈，温度补偿。
典型电路：差分放大电路

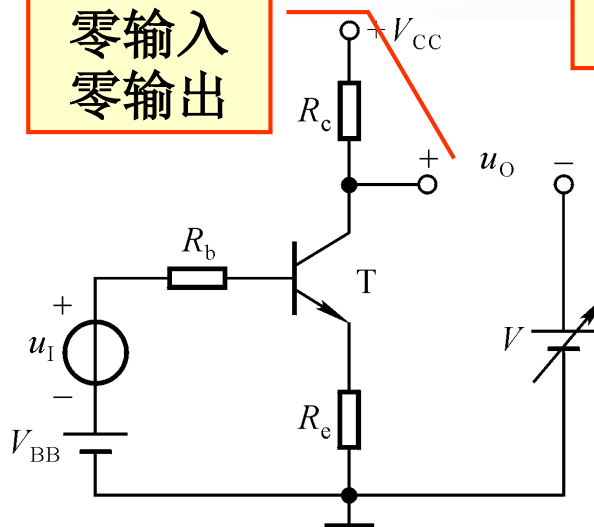


二、长尾式差分放大电路的组成

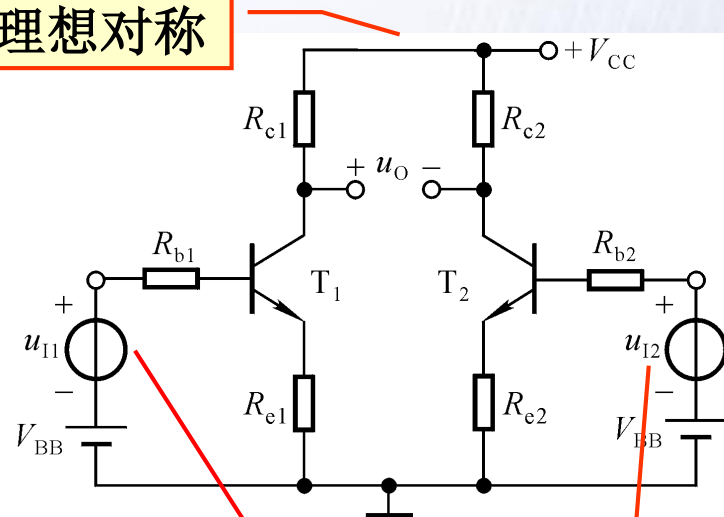
零点漂移



零输入
零输出

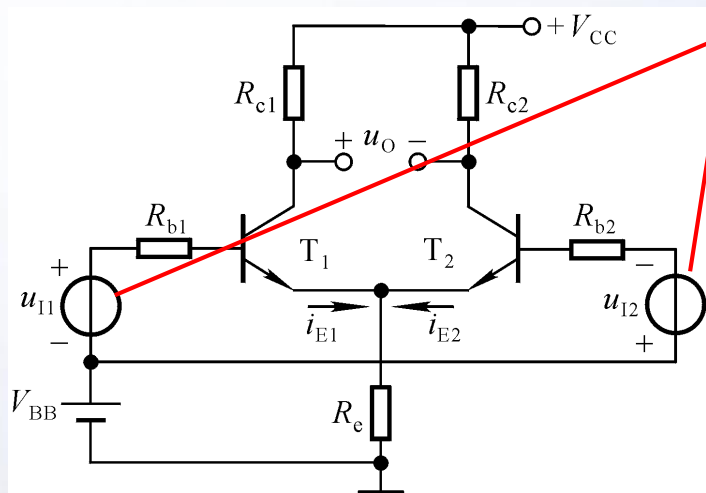


理想对称



信号特点？
能否放大？

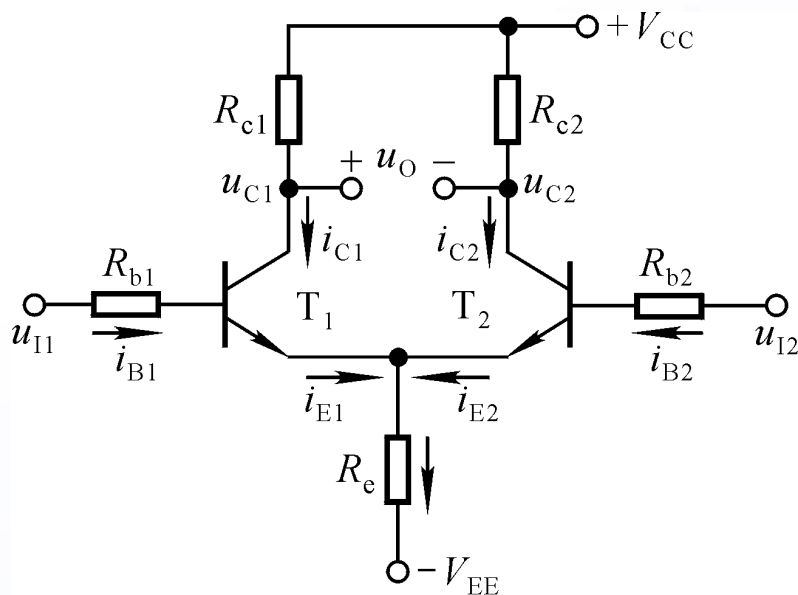
信号特点？能否放大？



共模信号：大小相等，极性相同。

差模信号：大小相等，极性相反。

典型电路



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

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

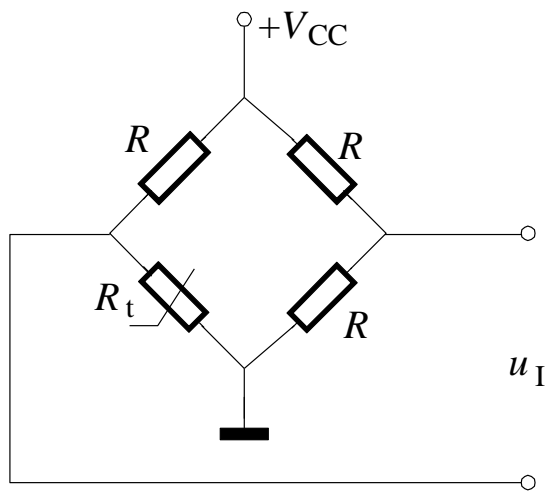
$$I_{EQ1} = I_{EQ2} = I_{EQ}$$

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

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

在理想对称的情况下：

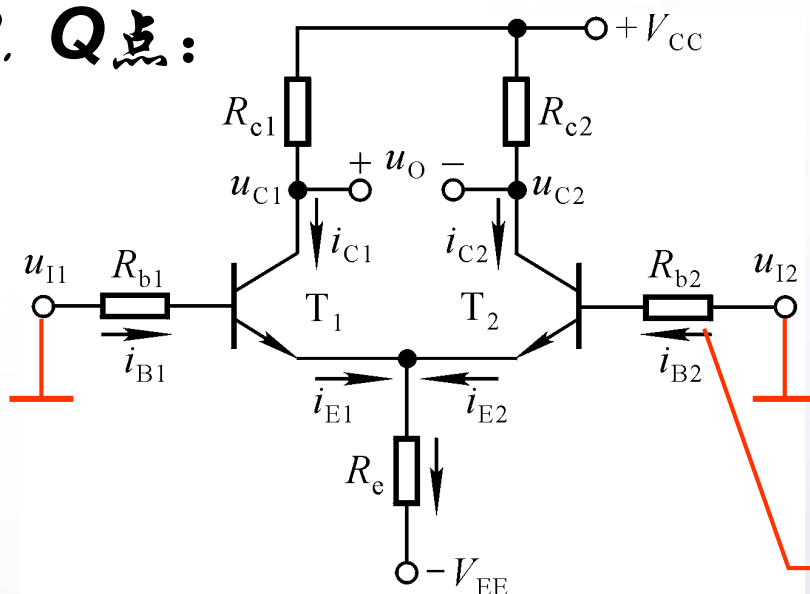
1. 克服零点漂移；
2. 零输入零输出；
3. 抑制共模信号；
4. 放大差模信号。





三、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

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

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

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

选合适的 V_{EE} 和 R_e 就可得合适的 Q



2. 抑制共模信号

共模信号：数值相等、极性相同的输入信号，即

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

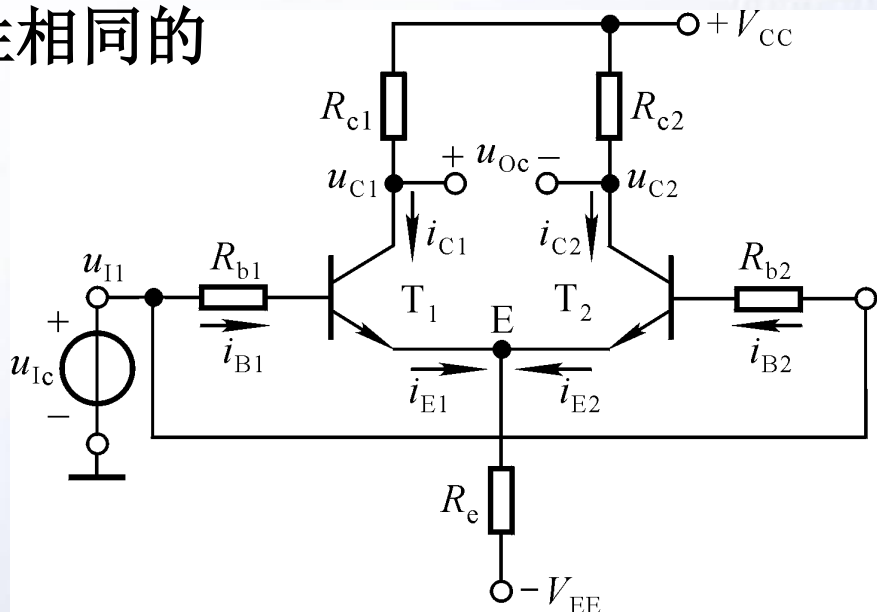
$$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}$$

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

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

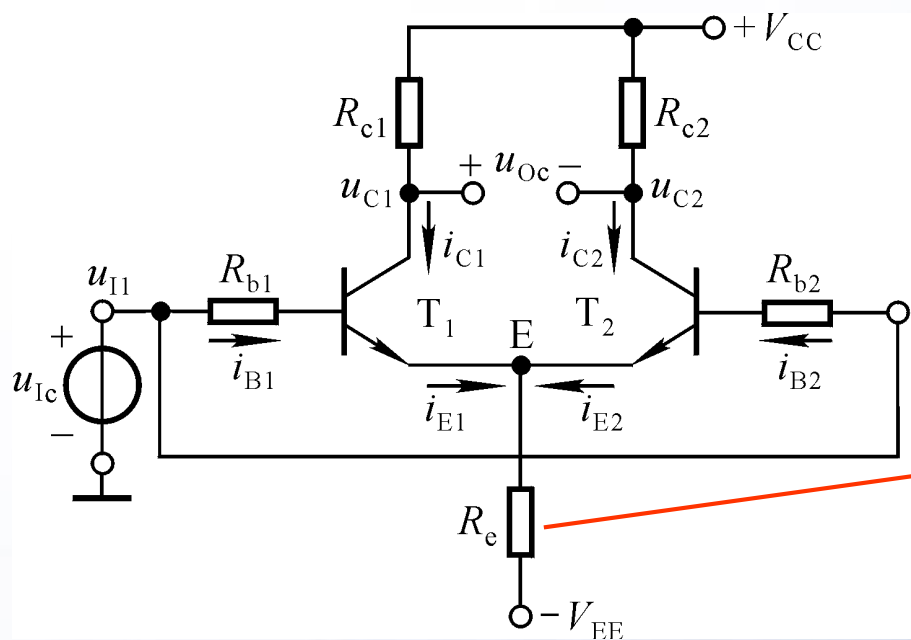
$$u_O = u_{C1} - u_{C2} = (u_{CQ1} + \Delta u_{C1}) - (u_{CQ2} + \Delta u_{C2}) = 0$$

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





2. 抑制共模信号： R_e 的共模负反馈作用



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

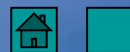
$$\text{参数理想对称时 } A_c = 0$$

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。





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

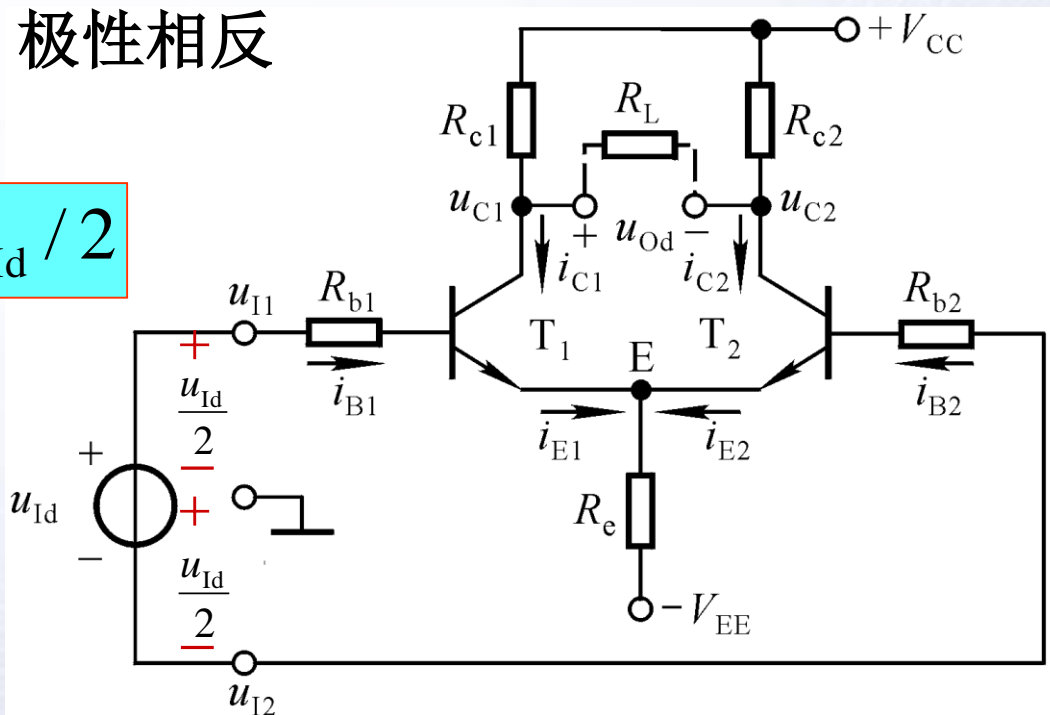
$$u_{I1} = -u_{I2} = u_{Id} / 2$$

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

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

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

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



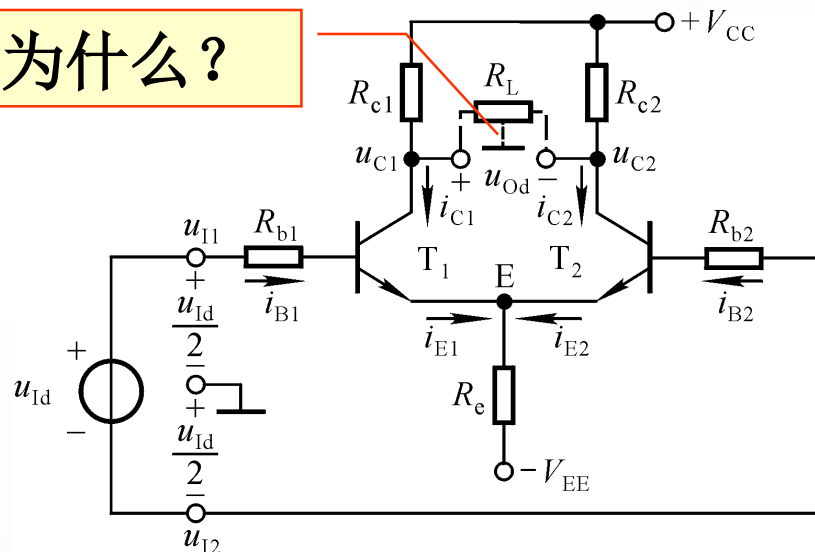
$\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$, R_e 中电流不变，即 R_e 对差模信号无反馈作用。





差模信号作用时的动态分析

为什么？

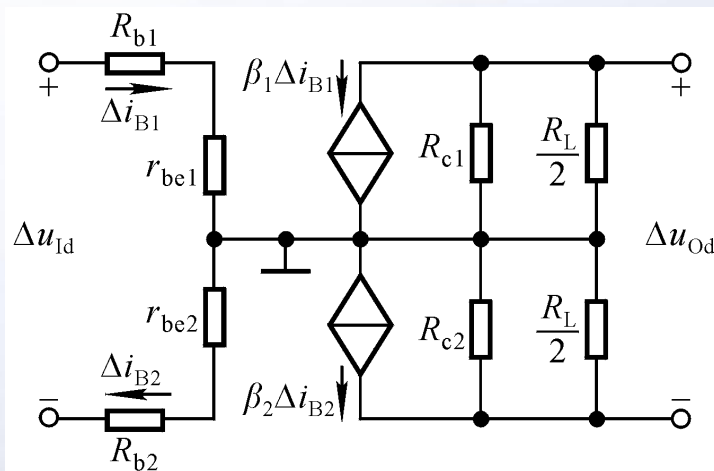


差模放大倍数

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

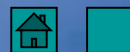
$$A_d = -\frac{\beta (R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$$

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



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

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





4. 动态参数: A_d 、 R_i 、 R_o 、 A_c 、 K_{CMR}

共模抑制比 K_{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。

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

在参数理想对称的情况下, $K_{CMR} = \infty$ 。

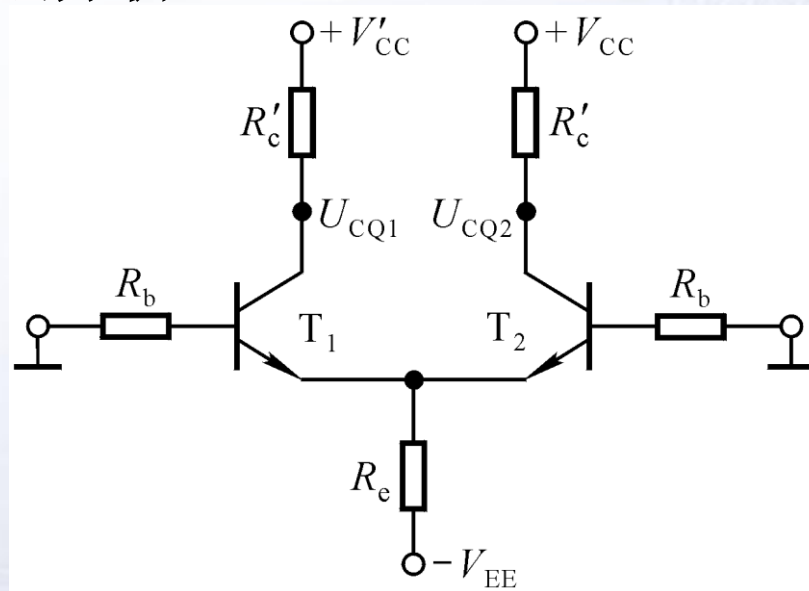
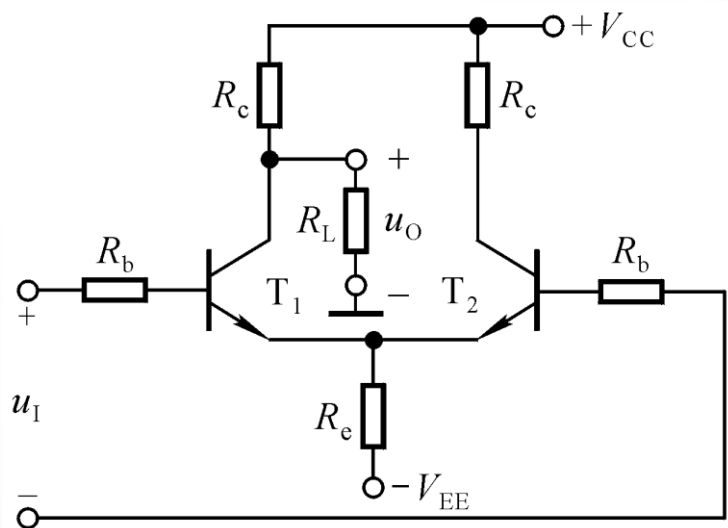
在实际应用时, 信号源需要有“接地”点, 以避免干扰; 或负载需要有“接地”点, 以安全工作。

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。



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



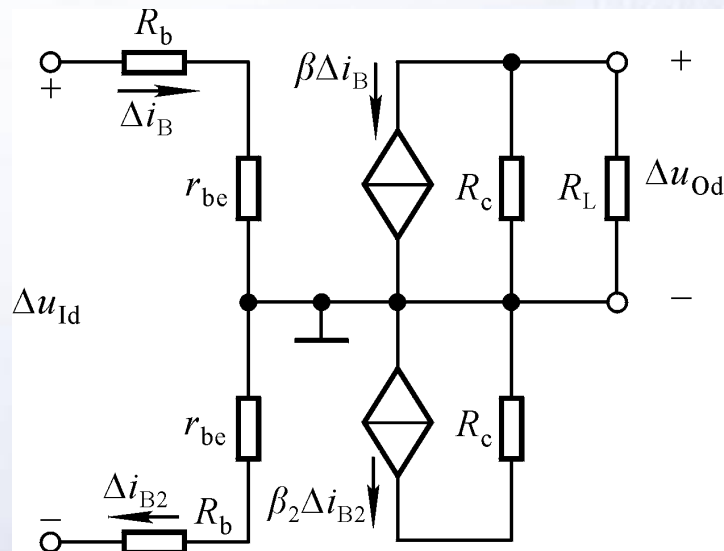
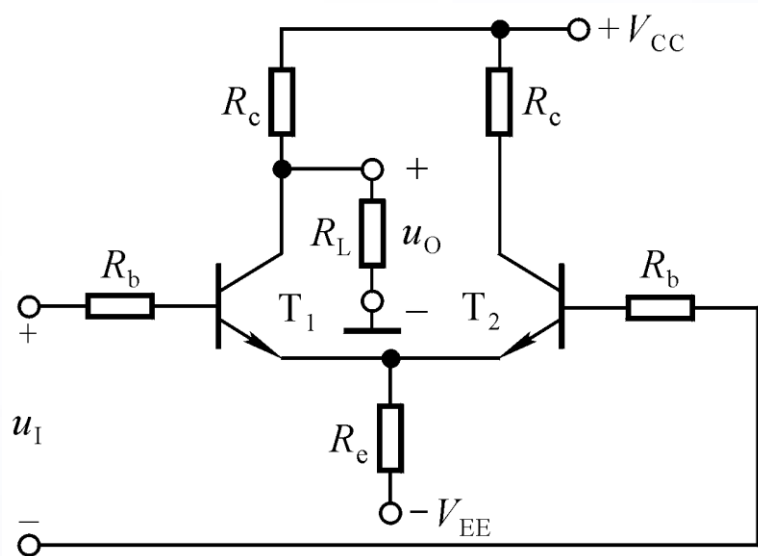
由于输入回路没有变化，所以 I_{EQ} 、 I_{BQ} 、 I_{CQ} 与双端输出时一样。但是 $U_{CEQ1} \neq U_{CEQ2}$ 。

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

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



1. 双端输入单端输出：差模信号作用下的分析



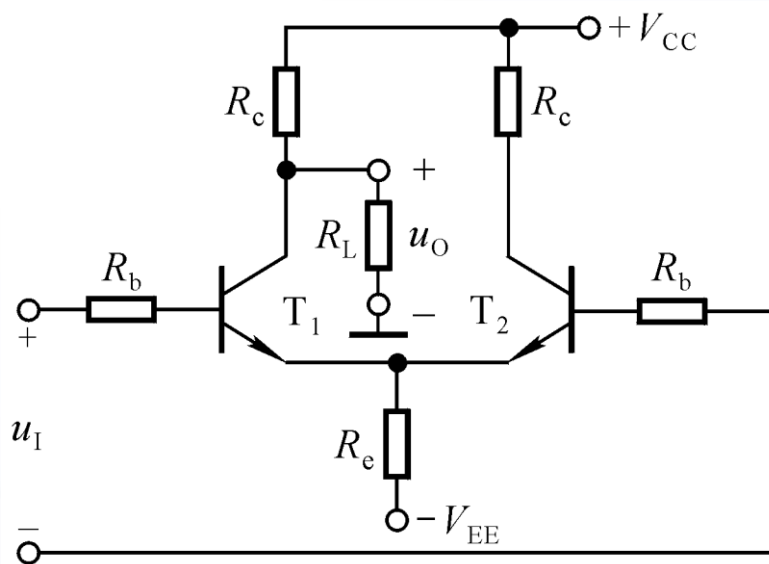
$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

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

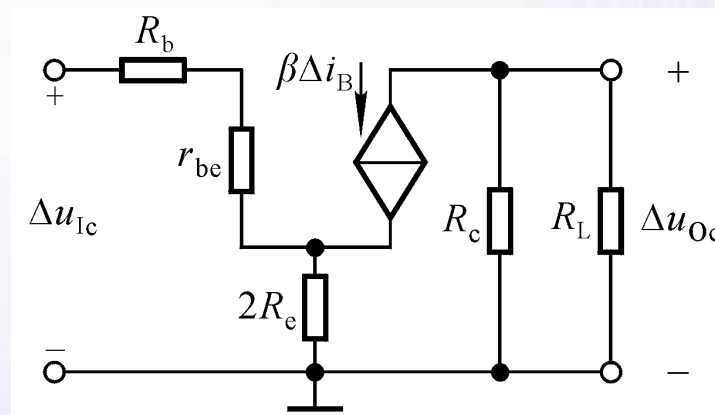




1. 双端输入单端输出：共模信号作用下的分析



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



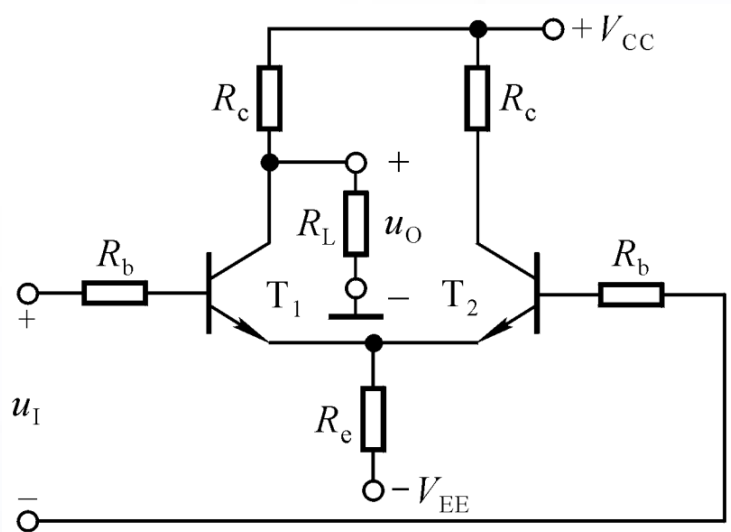
$$A_c = -\frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

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





1. 双端输入单端输出：问题讨论



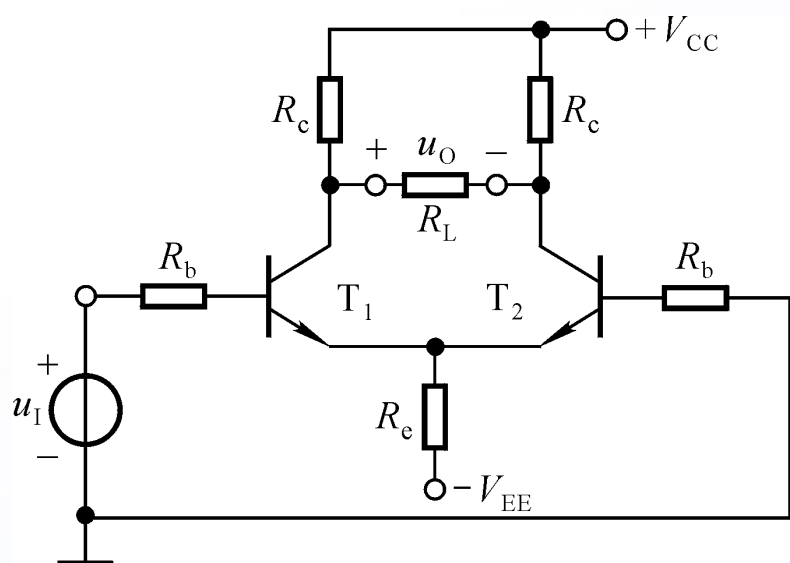
$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

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

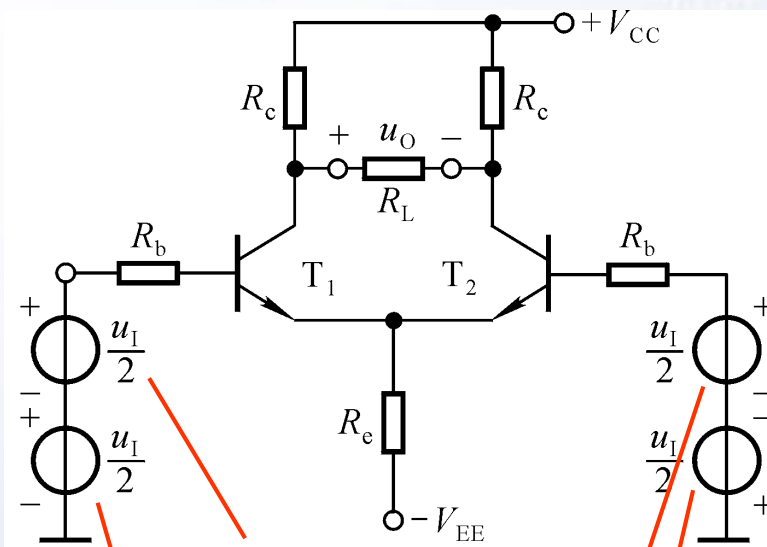
$$R_i = 2(R_b + r_{be}), \quad R_o = R_c$$

- (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



在输入信号作用下发射极的电位变化吗？说明什么？



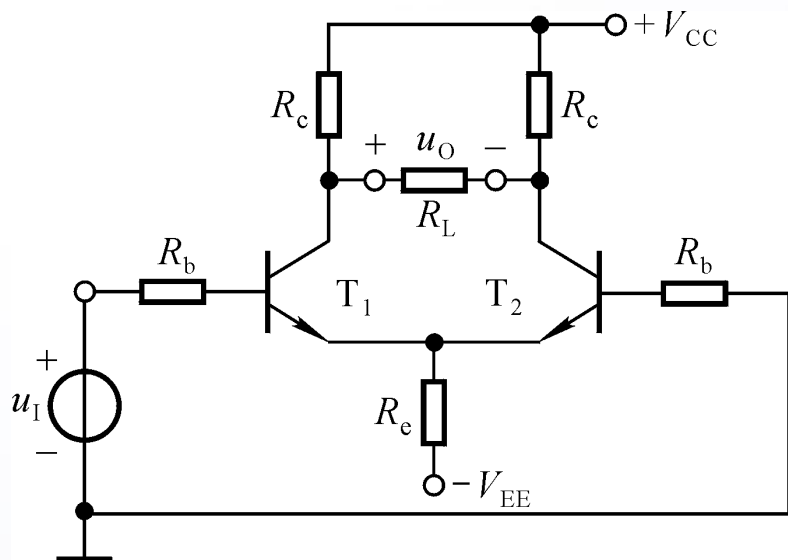
共模输入电压

差模输入电压

输入差模信号的同时总是伴随着共模信号输入：

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

2. 单端输入双端输出



问题讨论：

(1) U_{OQ} 产生的原因？

(2) 如何减小共模输出电压？

测试：

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

静态时的值

差模输出

共模输出



3. 四种接法的比较：电路参数理想对称条件下

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。

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

$$A_c = 0$$

$$K_{CMR} = \infty$$

$$R_o = 2R_c$$

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

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

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

$$R_o = R_c$$



五、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。

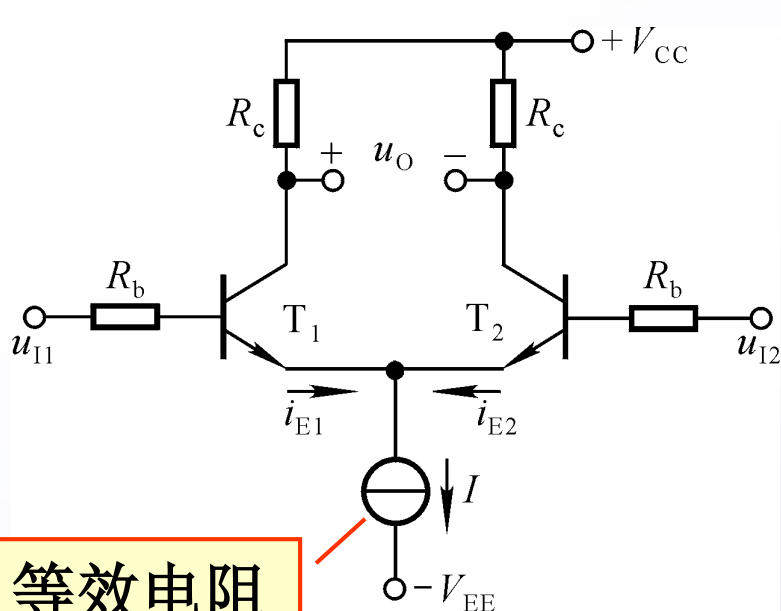
但为使静态电流不变， R_e 越大， V_{EE} 越大，以至于 R_e 太大就不合理了。

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 。

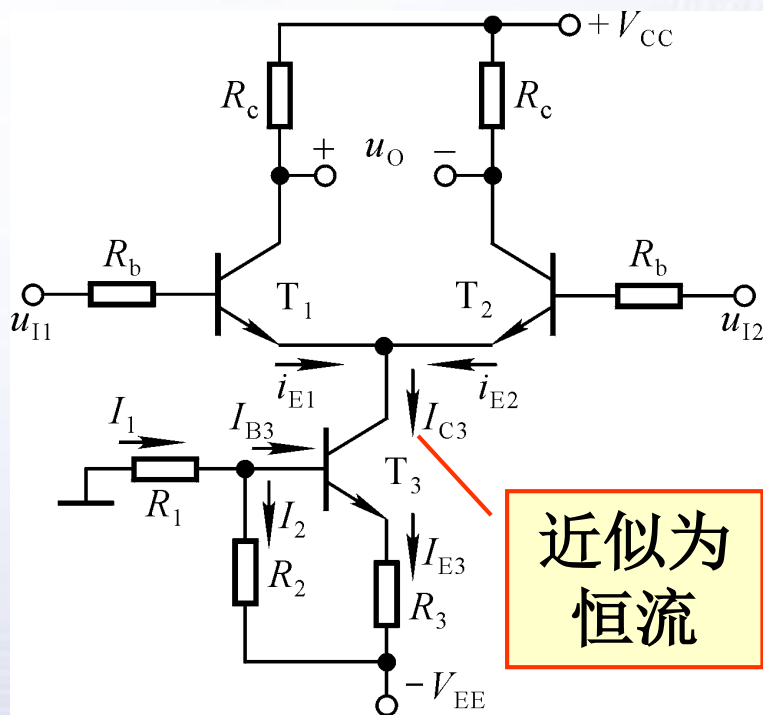
解决方法：采用电流源取代 R_e ！



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

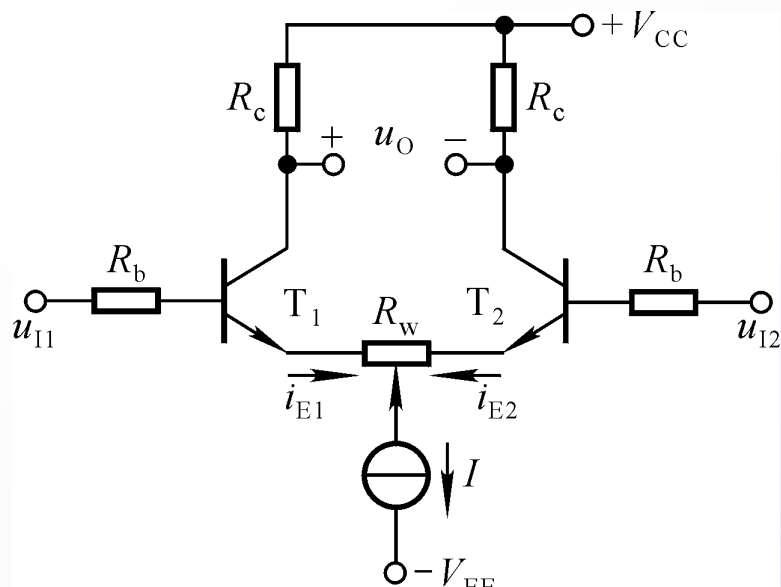
$$I_2 \gg I_{B3}, \quad I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{EE} - U_{BEQ}}{R_3}$$





六、差分放大电路的改进

1. 加调零电位器 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。

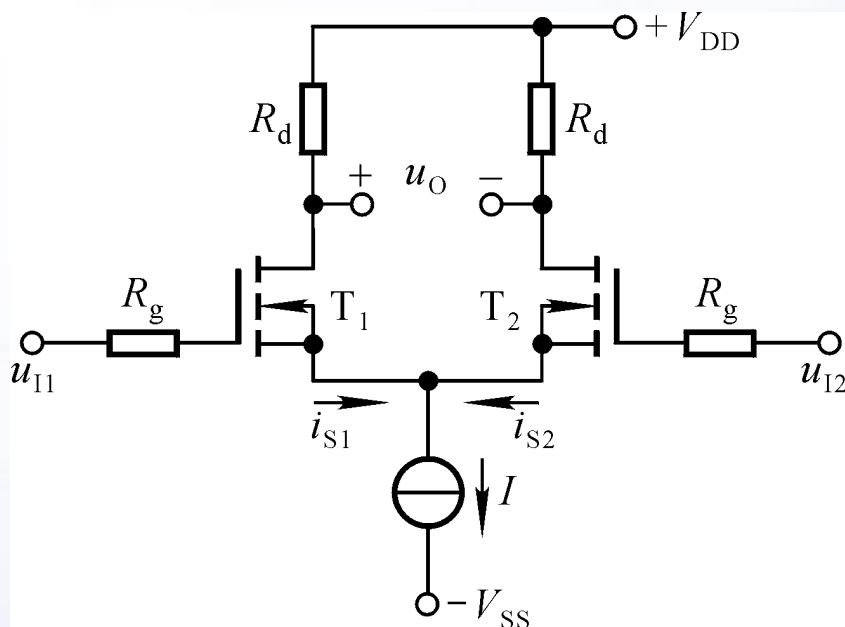
$$A_d = - \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_W}{2}}$$

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





2. 场效应管差分放大电路

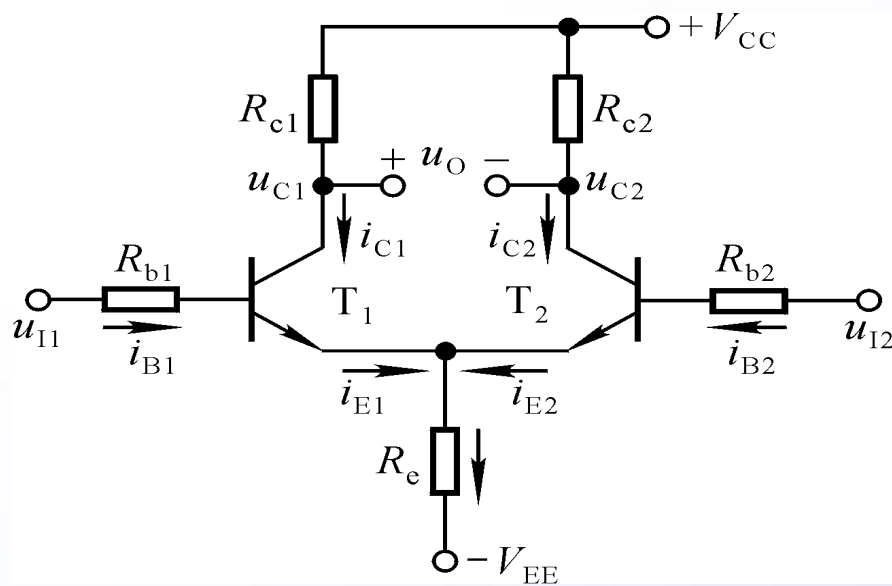


$$A_d = -g_m R_d, R_i = \infty, R_o = 2R_d$$





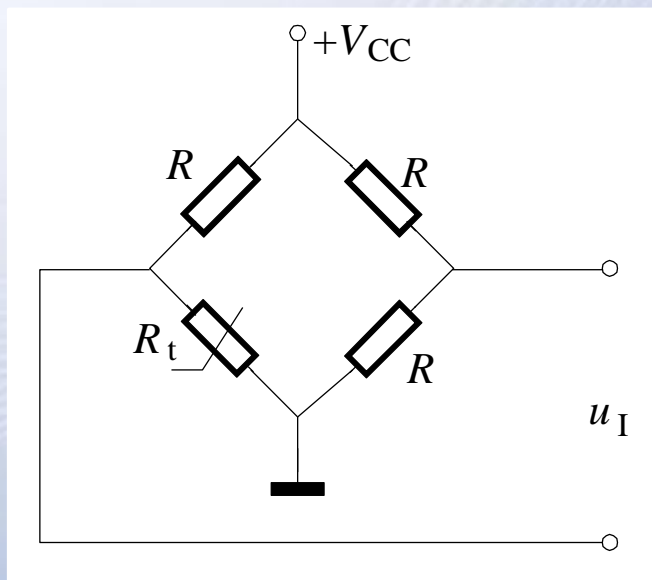
讨论一



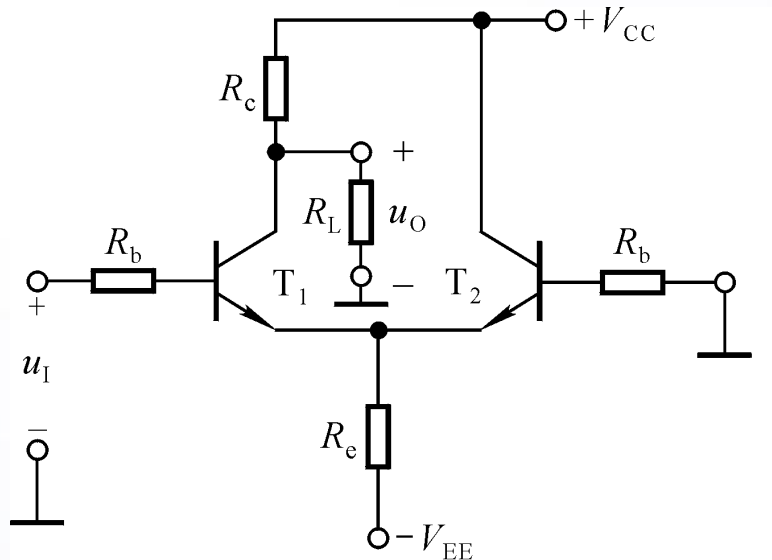
若将电桥的输出作为差放的输入，则其共模信号约为多少？如何设置Q点时如何考虑？

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

$$u_{Id}=5\text{mV} , u_{Ic}=7.5\text{mV}$$



讨论二



- 1、 $u_I=10\text{mV}$ ，则 $u_{Id}=?$ $u_{Ic}=?$
- 2、若 $A_d=-10^2$ 、 $K_{CMR}=10^3$
用直流表测 u_O ， $u_O=?$

$$u_{Id}=10\text{mV} , \quad u_{Ic}=5\text{mV}$$

$$u_O = A_d u_{Id} + A_c u_{Ic} + U_{CQ1}$$

=?

=?

=?





§ 3.4 互补输出级

- 一、对输出级的要求
- 二、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

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。

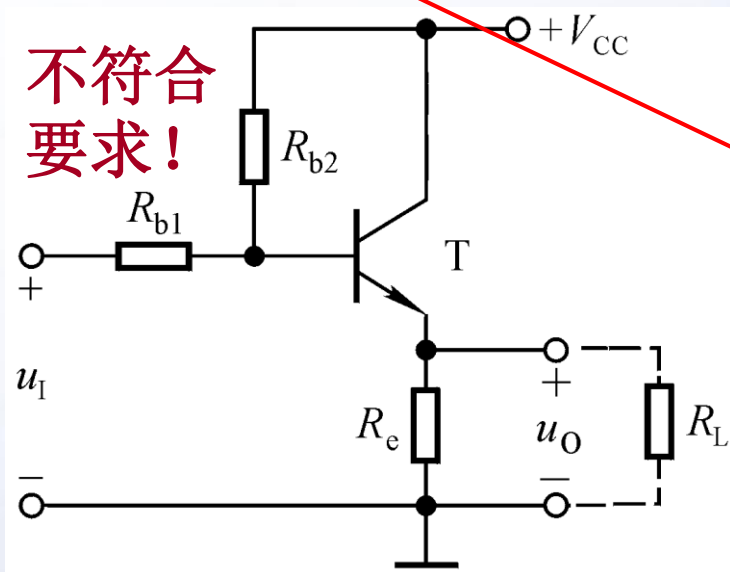
射极输出形式

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。

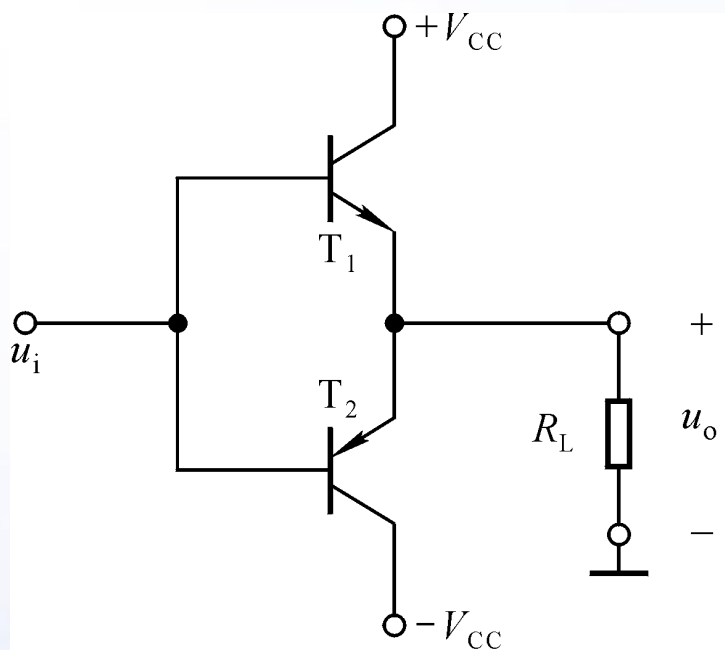




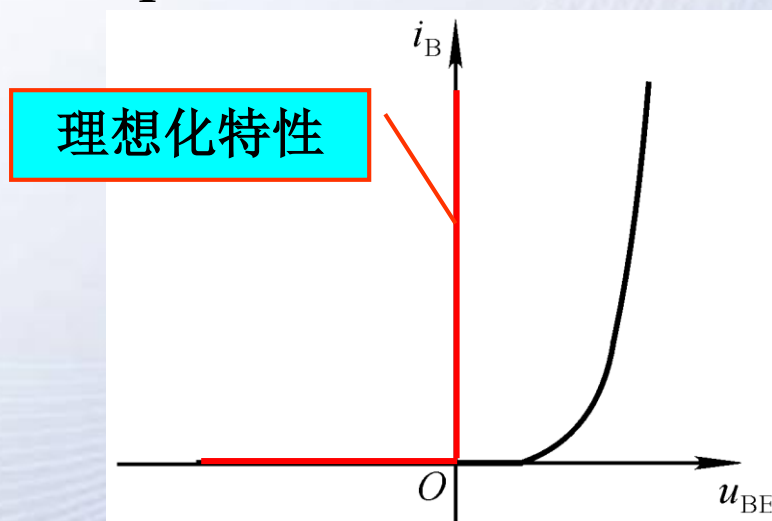
二、基本电路

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

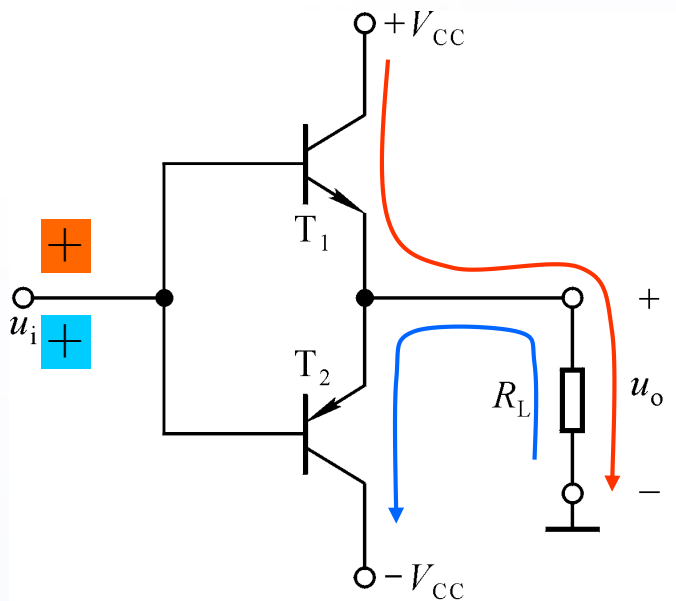


静态时 T_1 、 T_2 均截止， $U_B = U_E = 0$





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 $\rightarrow R_L \rightarrow T_2 \rightarrow -V_{CC}$ ，

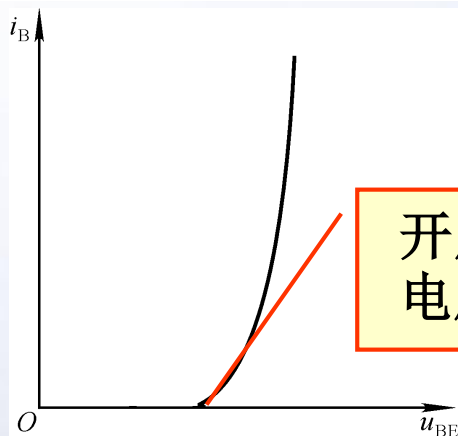
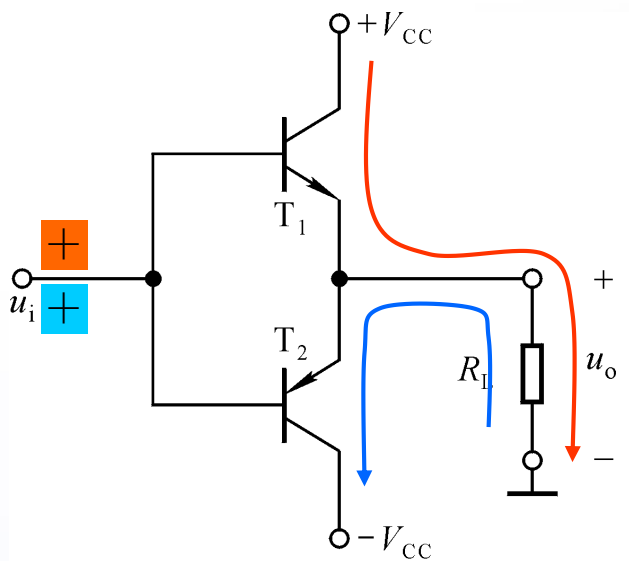
$$u_o = u_i$$

两只管子交替工作，两路电源交替供电，
双向跟随。

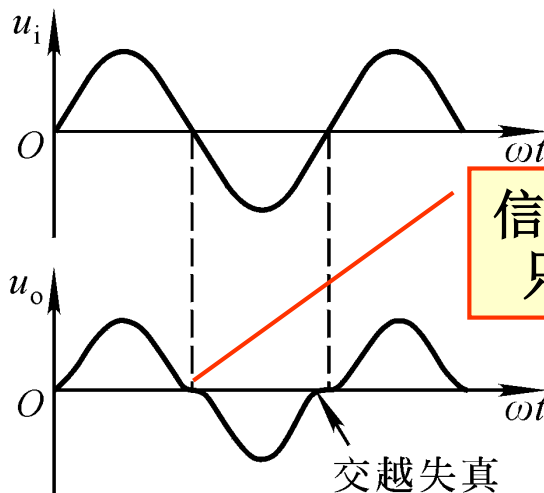




4. 交越失真



开启电压



信号在零附近两只管子均截止

交越失真

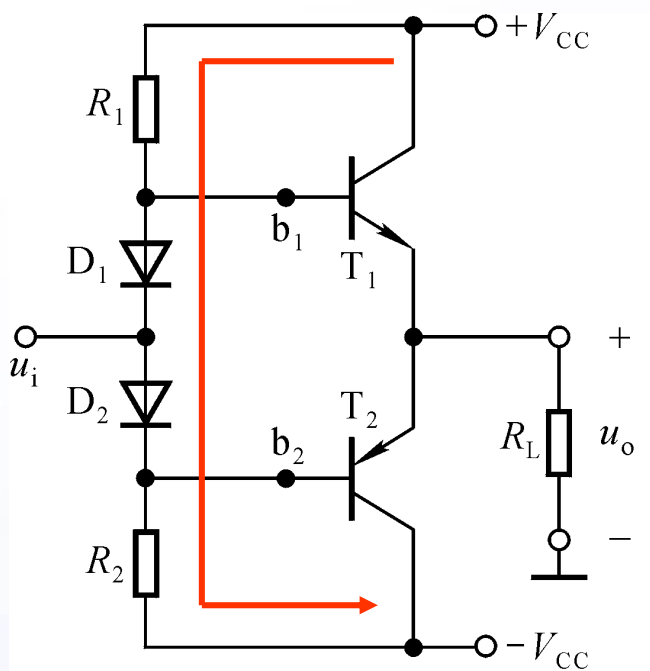
消除失真的方法：
设置合适的静态工作点。

- 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。



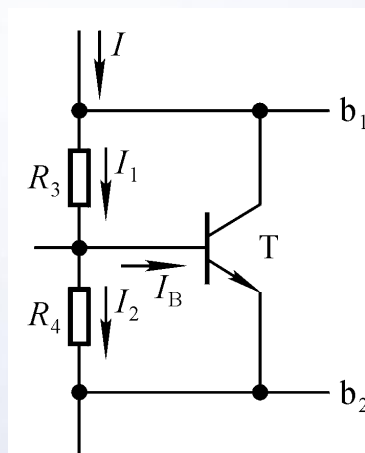


三、消除交越失真的互补输出级



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

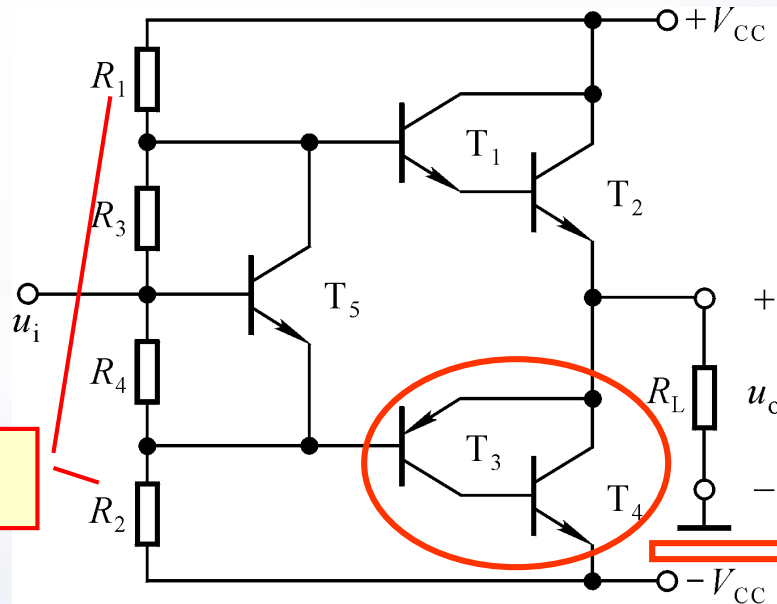
$$U_{B1B2} \approx \frac{R_3 + R_4}{R_4} \cdot U_{BE}$$

故称之为 U_{BE} 倍增电路



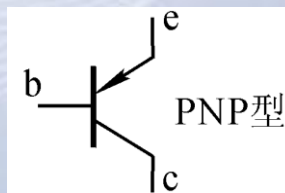
四、准互补输出级

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



大!



§ 3.5 直接耦合多级放大电路读图

一、放大电路的读图方法

二、例题





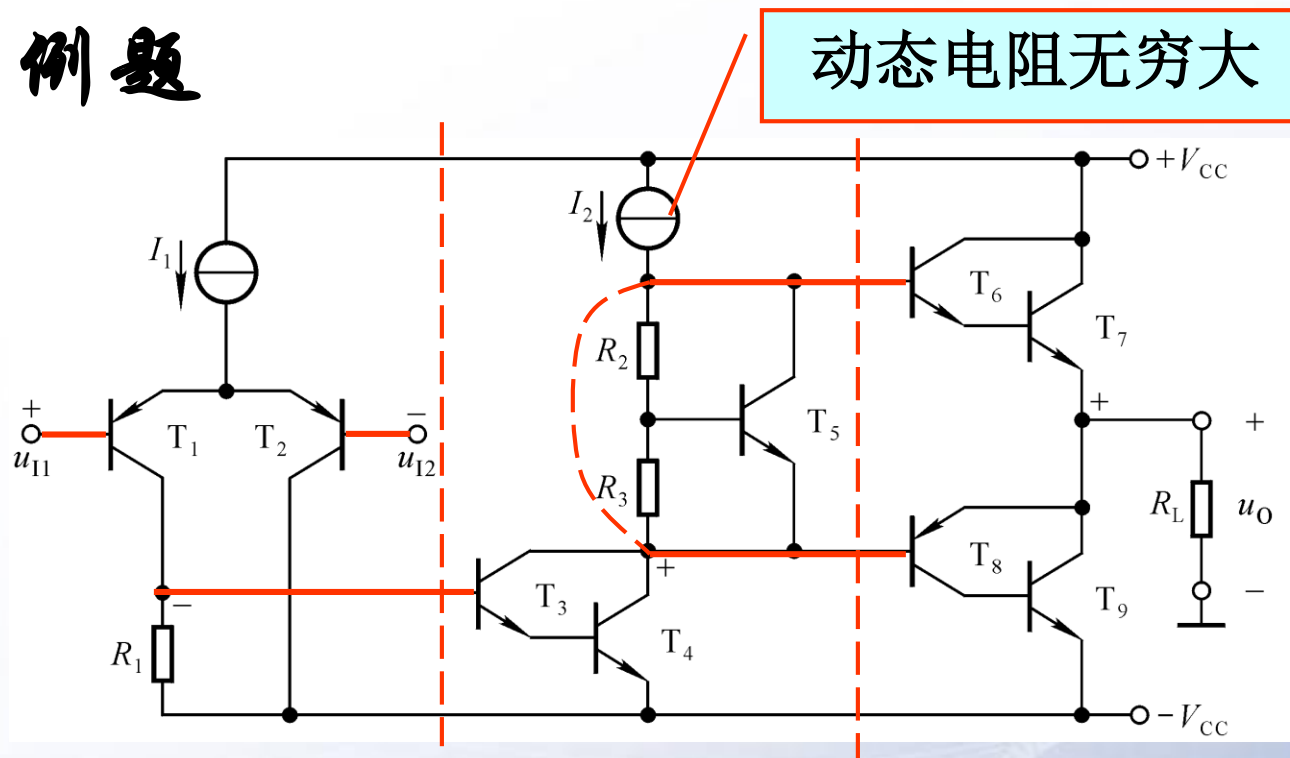
一、放大电路的读图方法

1. **化整为零**: 按信号流通顺序将 N 级放大电路分为 N 个基本放大电路。
2. **识别电路**: 分析每级电路属于哪种基本电路, 有何特点。
3. **统观总体**: 分析整个电路的性能特点。
4. **定量估算**: 必要时需估算主要动态参数。

信号从放大管的哪个极输入?
又从哪个极输出?



二、例题



1. 化整为零，识别电路

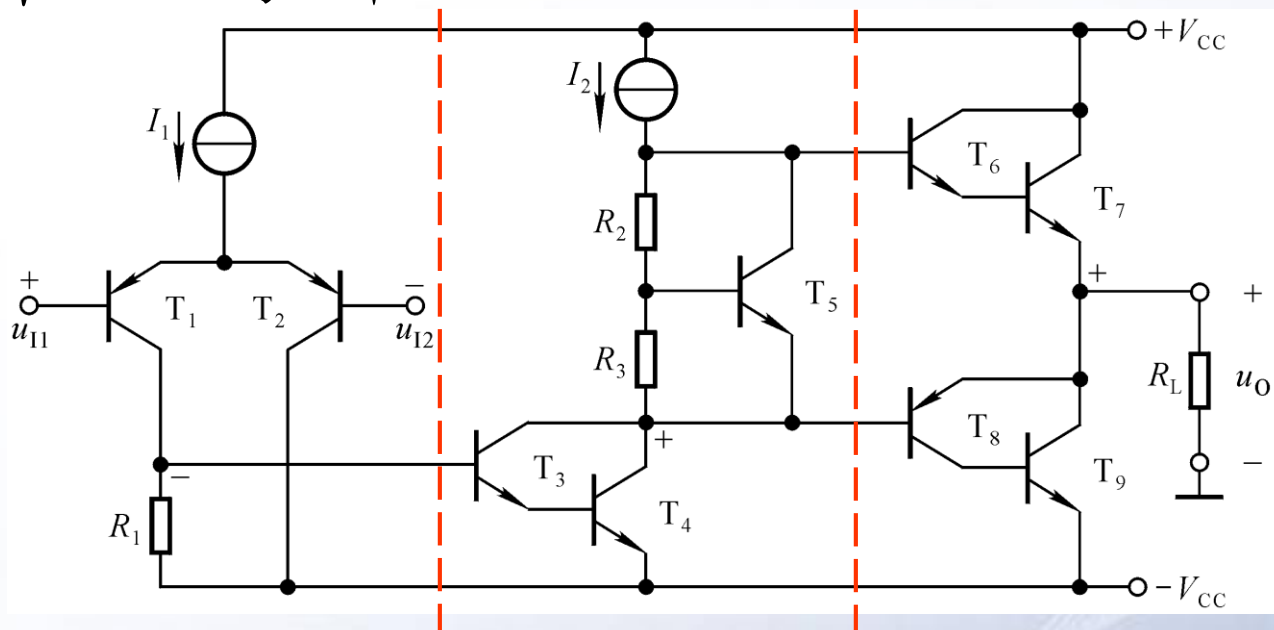
第一级：双端输入单端输出的差放

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. 基本性能分析



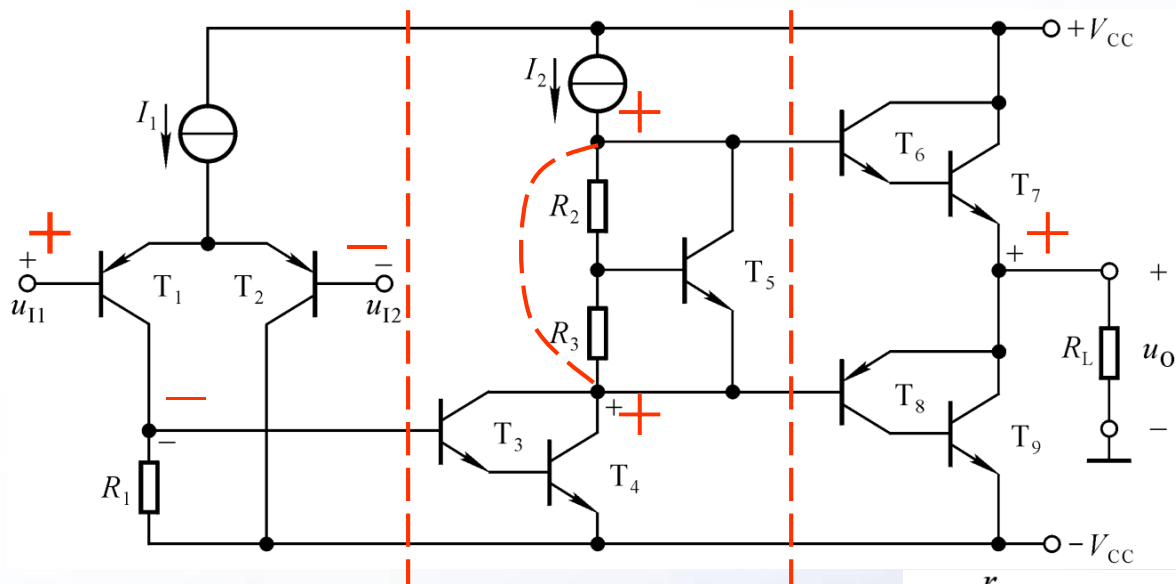
输入电阻为 $2r_{be}$ 、电压放大倍数较大、输出电阻很小、最大不失真输出电压的峰值接近电源电压。

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。





3. 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。

