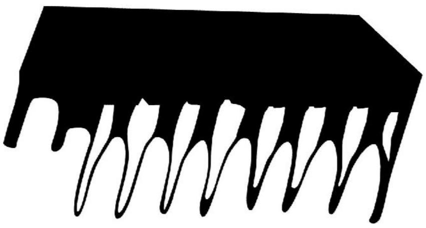
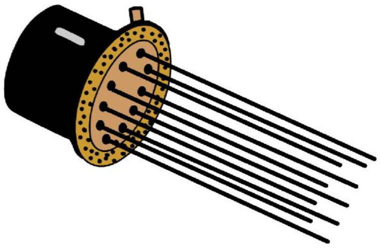
第六章 集成运算放大器

运算、放大、波形变换

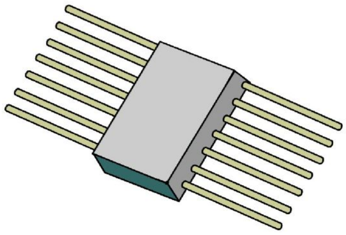
集成电路的外形



(a)



(b)



(c)

(**a**)双列直插式 (**b**)圆壳式 (**c**)扁平式

一、集成电路分类

按信号性质分类
- 数字
- 模拟
  - 运放　宽带放大器　功放
  - 乘法器　稳压电源

按集成度分类 → **SSI、MSI、LSI、VLSI**（每片百万元件）

按性能分类 → 高速、低功耗、高精度、高输入电阻

一、集成电路分类

二、集成电路特点

1. 同一硅片，相同工艺一元件参数相对误差小，对称性好，适用于构成差动放大电路。

2. 阻值范围**:**几十Ω到几十**k**Ω，用恒流源实现高阻。

3. 直接耦合方式**(** 难制作大电容和电感**)** 。

4. **NPN**、**PNP**管的 β 值差别较大，**PNP** 的 $\beta \leqslant$ **10** 。

5. 因为直接耦合，新问题 → 零漂 。

三、运放简介

运放名称的来历、作用

运放电路的耦合方式

运放电路的组成、各级需要解决的问题

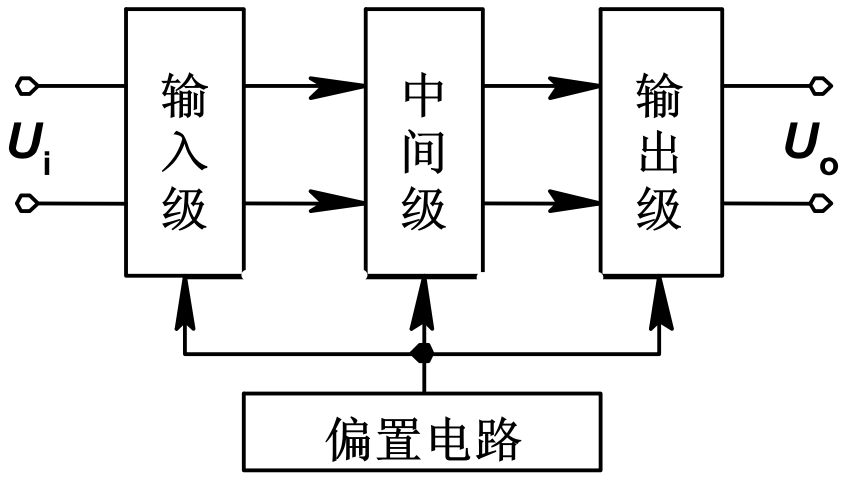


图6-1 集成运放框图

6.1 零点漂移

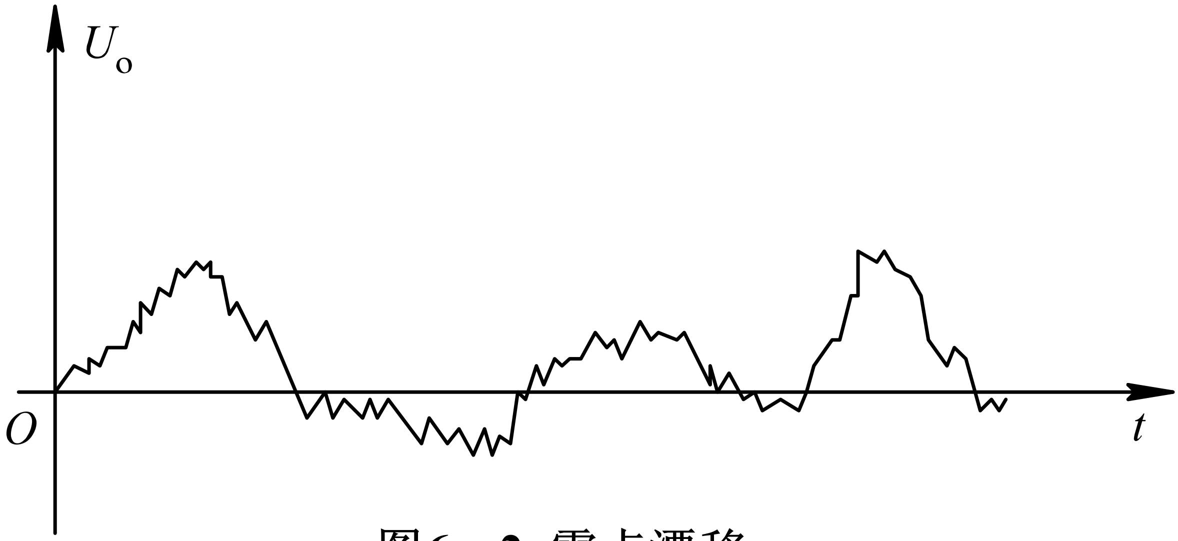
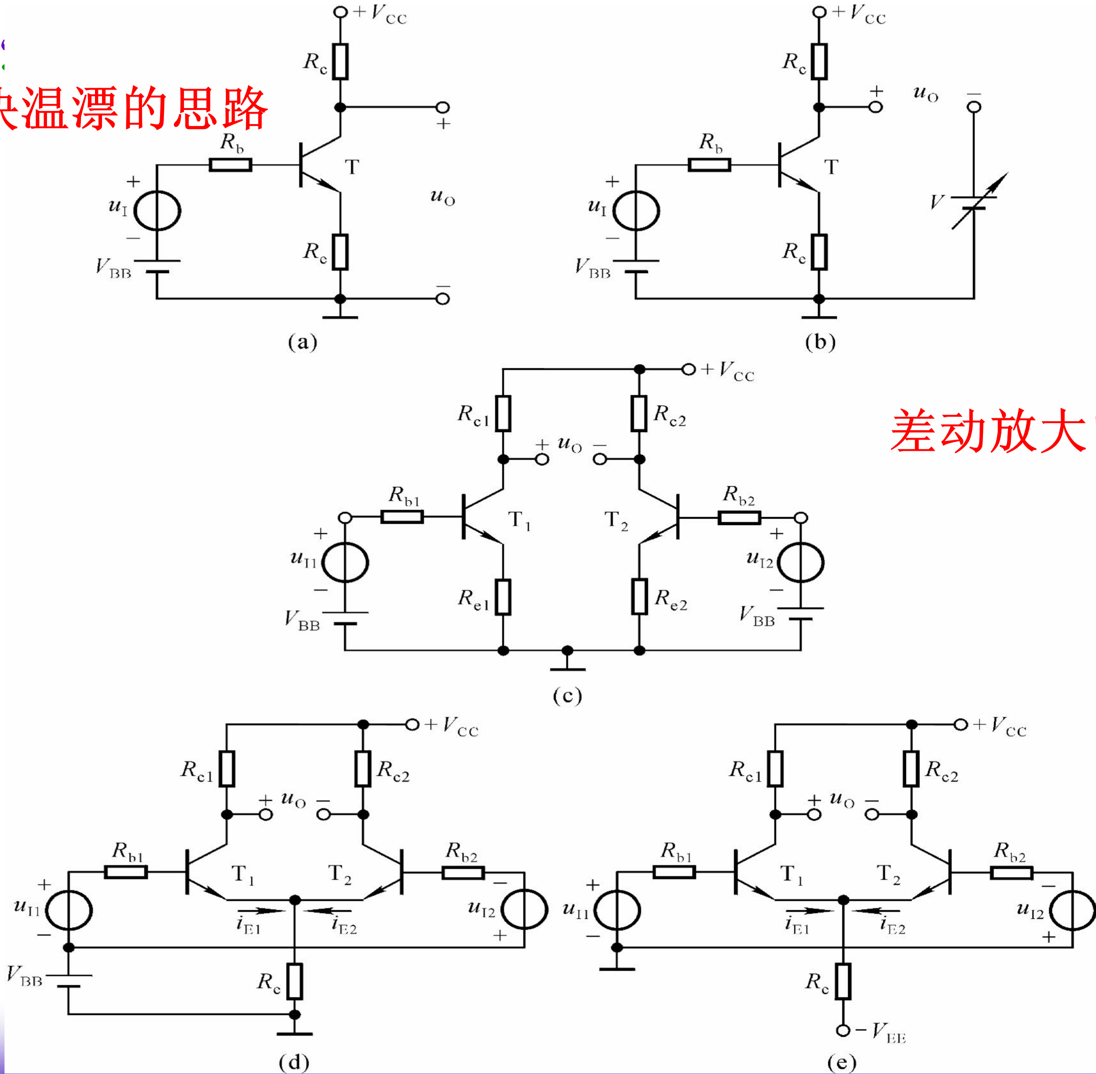


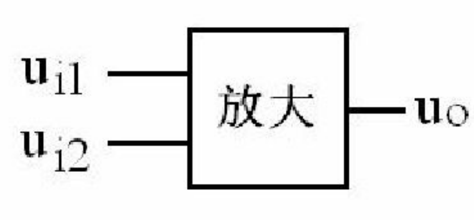
图6－2 零点漂移

解决办法？　　　第一级：差动放大

解决温漂的思路



差动放大电路



预备知识："共模信号、差模信号"

任意两个信号均可分解为共模信号与差模信号之和

例1: $u_{i1} = 10\ \text{mV}$, $u_{i2} = 6\ \text{mV}$

可分解成： $u_{i1} = 8\ \text{mV} + 2\ \text{mV}$

$u_{i2} = 8\ \text{mV} - 2\ \text{mV}$

例2: $u_{i1} = 10\ \text{mV}$, $u_{i2} = 0$

差 $u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$

可分解成： $u_{i1} = 5\text{mV} + 5\ \text{mV}$

$u_{i2} = 5\ \text{mV} - 5\ \text{mV}$

共模信号　　差模信号

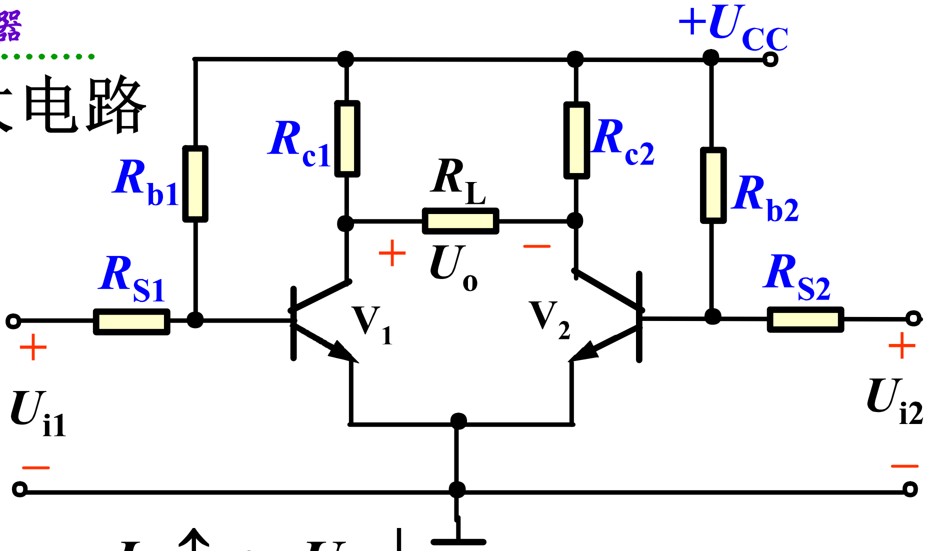
共模 $u_{ic} = (u_{i1} + u_{i2}) / 2$

差模 $u_{id1} = u_{id2} = (u_{i1} - u_{i2}) / 2$

放大器只放大两个输入信号的差值信号—差动放大电路。

6.2 差动放大电路

6.2.1 基本形式



一、电路

管子**配对,**电路**对称**

二、抑制温漂

$(U_{i1}=U_{i2}=0)$

$$T\uparrow \begin{cases} I_{C1}\uparrow\rightarrow U_{C1}\downarrow \\ I_{C2}\uparrow\rightarrow U_{C2}\downarrow \end{cases} \rightarrow U_o=0$$

三、Q 点的计算

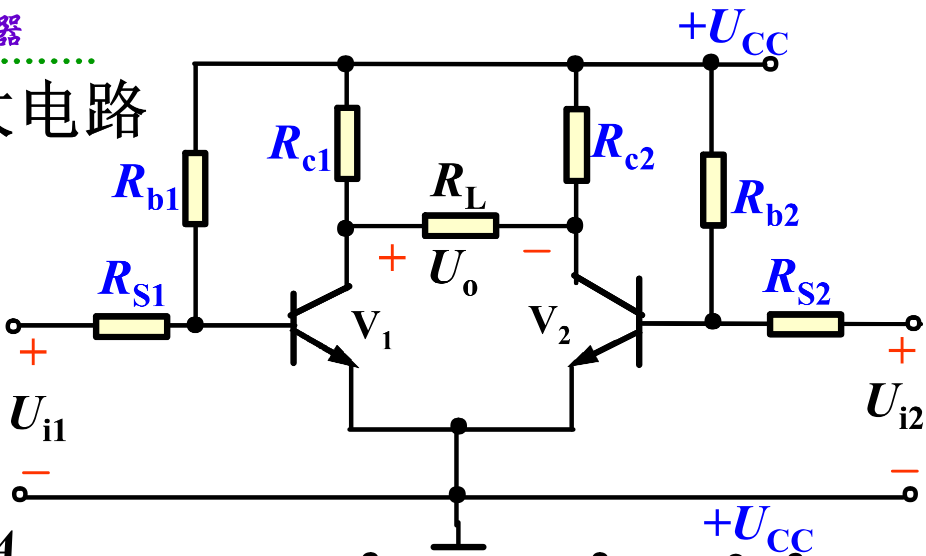
$U_{i1}=U_{i2}=0$， $U_{EQ}=0 \rightarrow U_{BQ}=0.7\text{V}$，

$$I_{BQ}=I_{Rb}-I_{Rs}=\frac{U_{CC}-0.7}{R_b}-\frac{0.7}{R_S}, \qquad I_{CQ}=?$$

$$U_{CEQ}=? \qquad U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}R_C$$

6.2 差动放大电路

6.2.1 基本形式



四、动态分析

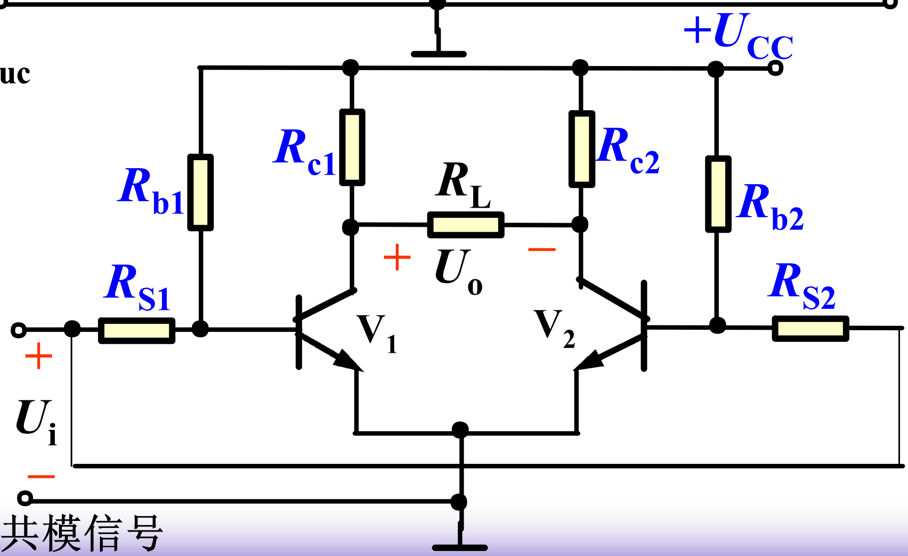
1. 共模电压放大倍数A_{uc}

$$U_{i1} = U_{i2} = U_{ic}$$

$$A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} = 0$$

抑制共模信号，

抑制温漂。



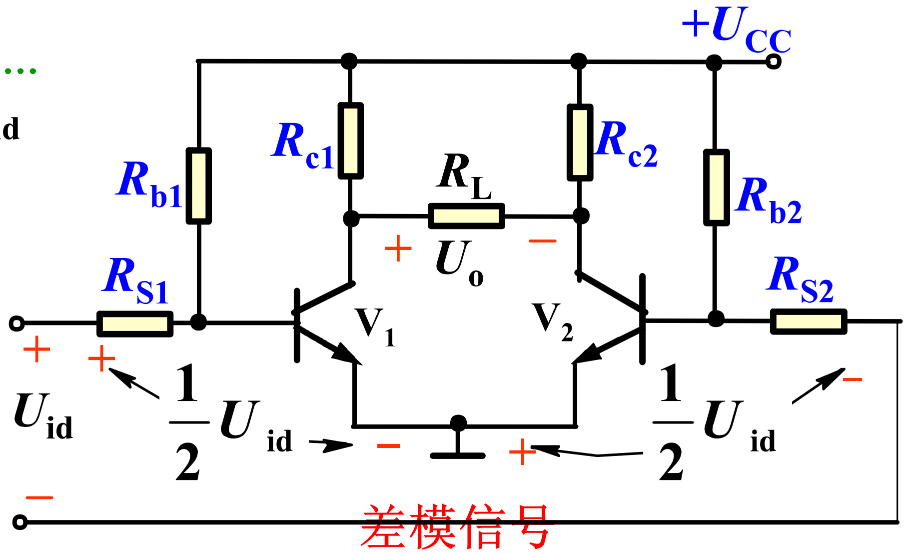
共模信号

2. 差模电压放大倍数A_{ud}

$$U_{i1}=-U_{i2}=\frac{1}{2}U_{id}$$

差模

差 $U_{id}=U_{i_1}-U_{i_2}$



$U_o\neq 0$，$A_{ud}\neq 0$ 对差模信号有放大作用。

$$A_{ud}=\frac{U_o}{U_{id}}=\frac{\frac{1}{2}U_o}{\frac{1}{2}U_{id}}=A_{ud1}\approx-\frac{\beta R_L'}{R_s+r_{be}}$$

$R_L'=?$

$$R_L'=R_C//\frac{1}{2}R_L$$

放大差模信号

"差动"，无差不动，有差才动。

3. 存在问题：①单端仍有温漂② 难绝对对称

解决？

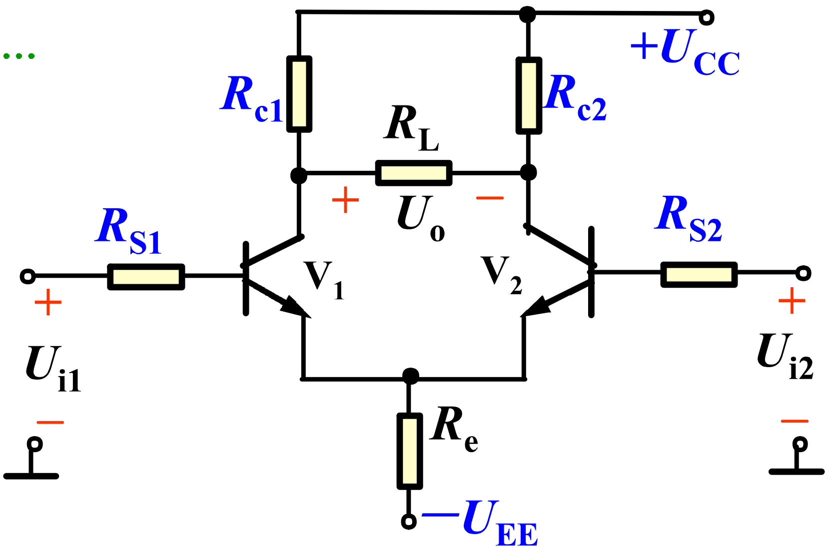
6.2.2 长尾式差放

直流负反馈具有稳定Q点的作用

一、电路

二、抑制温漂作用

三、Q 点的计算



$U_{i1}=U_{i2}=0$，　$U_{B1Q}=U_{B2Q}=0 \rightarrow$　$U_{EQ}=-0.7\text{V} \rightarrow$

$$I_{Re}=\frac{U_{EQ}-(-U_{EE})}{R_e},\quad I_{E1Q}=?\quad I_{E1Q}=I_{E2Q}=\frac{1}{2}I_{Re}$$

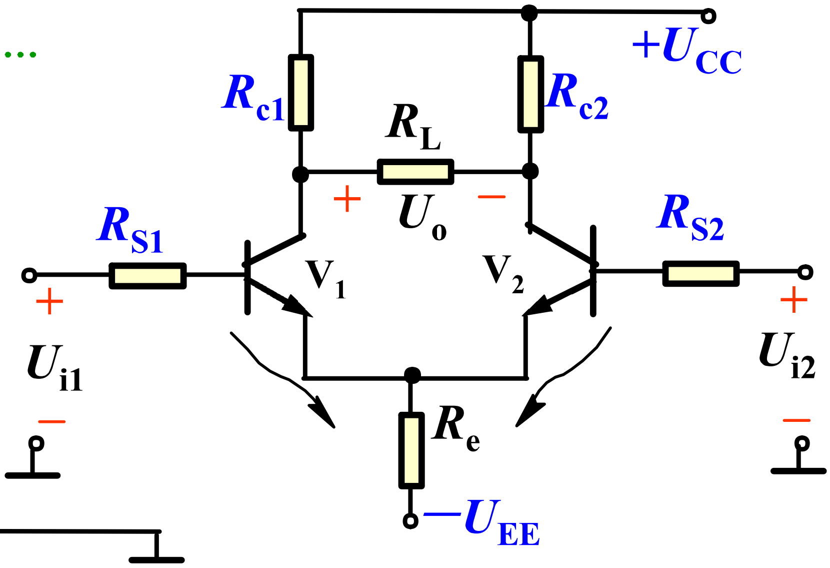
$$U_{CEQ}=?\quad U_{CEQ}=U_{CQ}-U_{EQ}\quad =U_{CC}-I_{CQ}R_C-(-0.7)$$

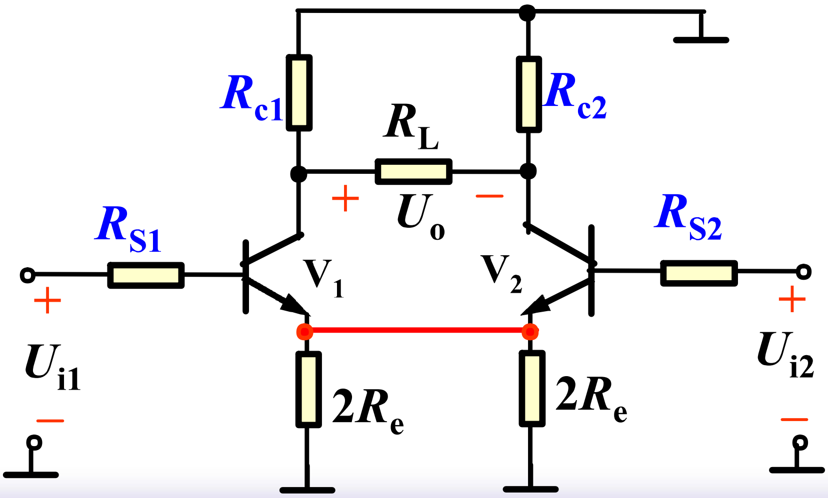
6.2.2 长尾式差放

四、动态分析

1. 共模输入

$$U_{i1} = U_{i2} = U_{ic}$$



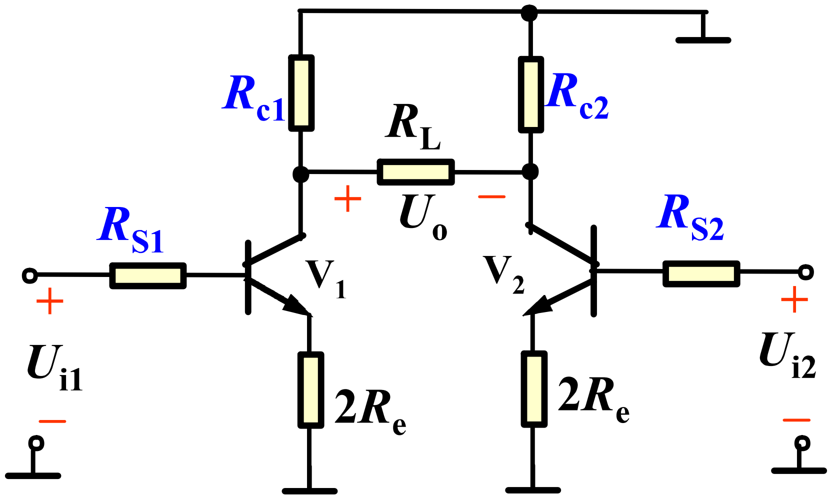


6.2.2 长尾式差放

四、动态分析

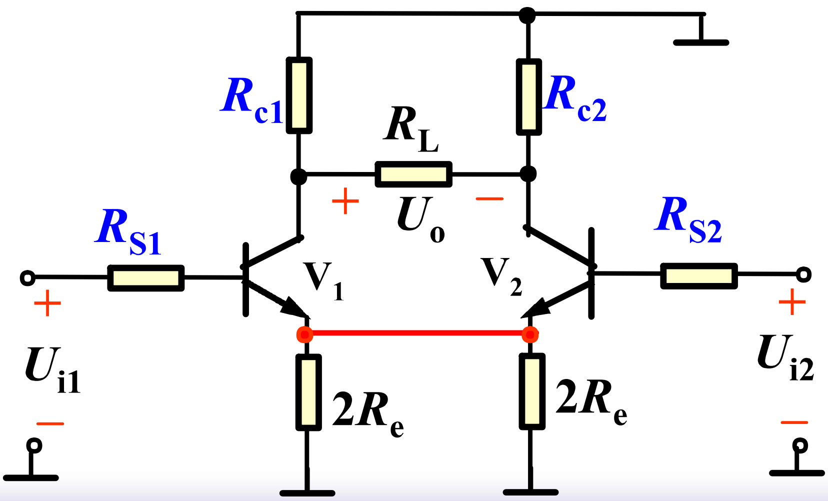
1. 共模输入

$$U_{i1}=U_{i2}=U_{ic}$$



A_{uc}=?

如果单端输出$A_{uc单}$=?



6.2.2 长尾式差放

四、动态分析

1. 共模输入　2. 差模输入

$$U_{i1} = -U_{i2} = \frac{1}{2}U_{id}$$

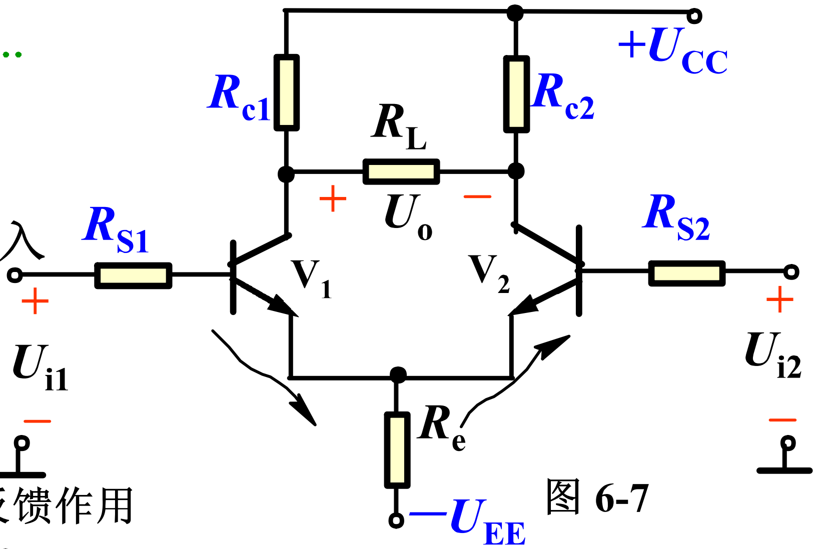
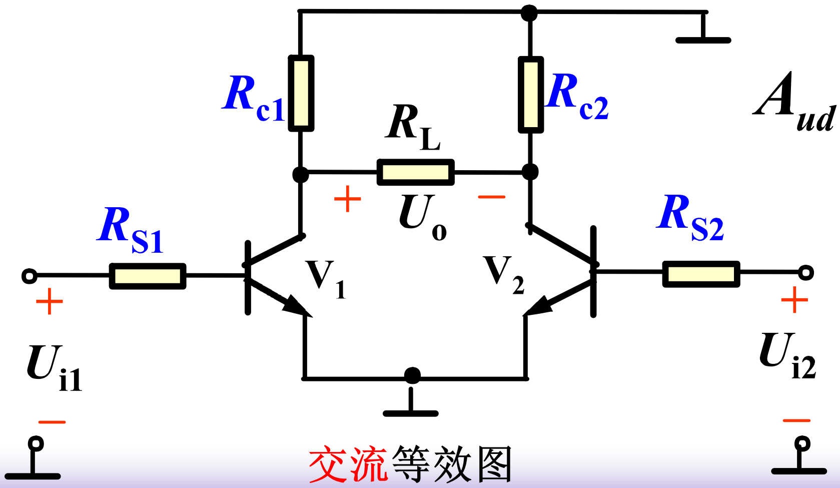


图 6-7

Re对差模信号无负反馈作用



交流等效图

$$A_{ud} = \frac{U_o}{U_{id}} \approx -\frac{\beta R'_L}{R_s + r_{be}}$$

$$R'_L = R_C // \frac{1}{2} R_L$$

结果与前相同

6.2.3 差动放大器的主要指标

1. A_{ud} $$A_{ud}=\frac{U_{od}}{U_{id}}$$

2. A_{uc} $$A_{uc}=\frac{U_{oc}}{U_{ic}}$$

3. 共模抑制比CMRR

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

4. 差模输入电阻 $$r_{id}=\frac{U_{Id}}{I_{id}}$$

5. 差模输出电阻 $$r_{od}=\frac{U_{od}}{I_{od}}\bigg|_{\text{四个条件}}$$

6. 共模输入电阻r_{ic} $$r_{ic}=\frac{U_{ic}}{I_{ic}}$$

【例1】设图 6-5 长尾差放对称，求A_{ud}, A_{uc}, CMRR , r_{id}, r_{ic}和r_{od}。

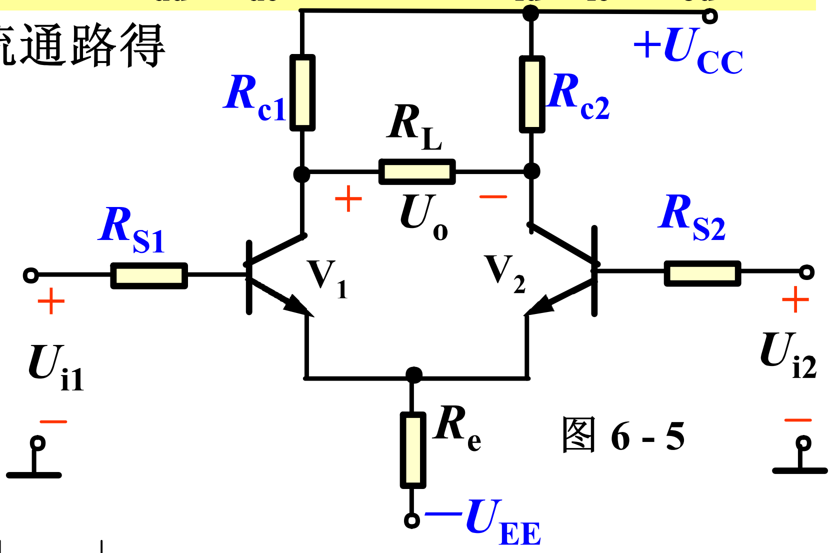


图 6 - 5

解:由图 6 - 7(*b*)所示差模交流通路得

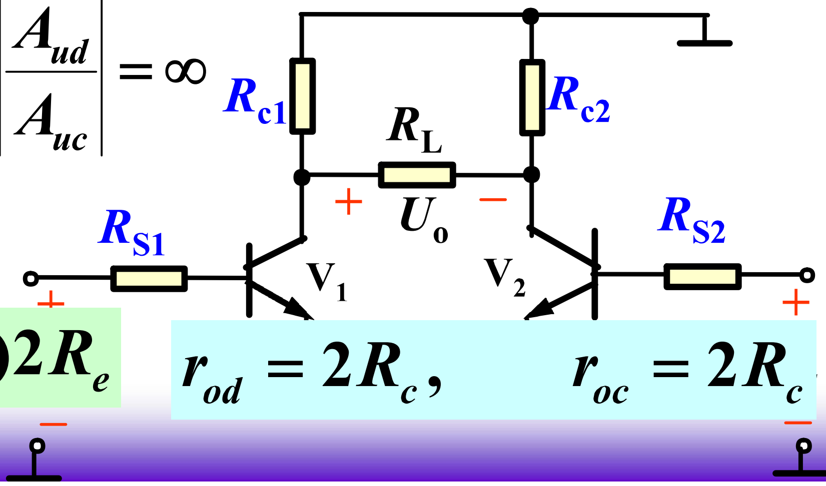
$$A_{ud}=\frac{U_{od}}{U_{id}}=A_{u单}=\frac{U_{o1}}{U_{i1}}$$

$$=\frac{-\beta I_{b1}R_L'}{I_{b1}(R_s+r_{be})}=\frac{-\beta R_L'}{R_s+r_{be}}$$

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

$$A_{uc}=\frac{U_{oc}}{U_{ic}}=0,\quad CMRR=\left|\frac{A_{ud}}{A_{uc}}\right|=\infty$$

$$r_{id}=\frac{U_{id}}{I_{id}}=2(R_s+r_{be})$$



$$r_{ic}=(R_s+r_{be})+(1+\beta)2R_e$$

$$r_{od}=2R_c,\qquad r_{oc}=2R_c$$

【例2】 在图 6 - 5 电路中, 已知差模增益为48dB, 共模抑制比为67dB, U_{i1} =5V, U_{i2}=5.01V,求输出电压U_o。

解:分解 U_{i1}=5.005-0.005V, U_{i2}=5.005+0.005V

所以 U_{iC}=5.005V, U_{id}=-0.01V

因为20lg|A_{ud}|=48dB, 故 A_{ud}≈-251,因为CMR=67dB, 故 CMRR≈2239, 所以

$$\left|A_{uc}\right| = \frac{\left|A_{ud}\right|}{CMRR} = \frac{251}{2239} \approx 0.11$$

所以 A_{uc}=-0.11

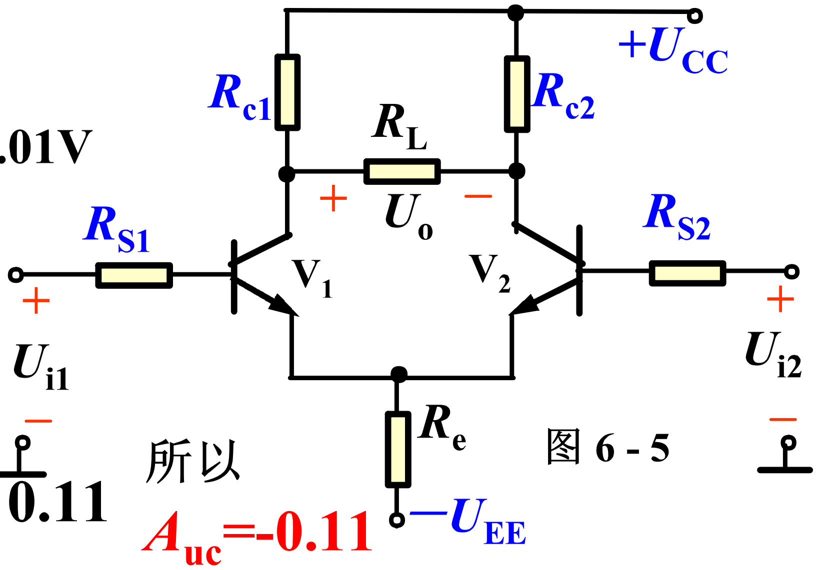


图 6 - 5

$$U_o = A_{ud}U_{id} + A_{uc}U_{ic}$$
$$= -251(5-5.01) - 0.11\left(\frac{5+5.01}{2}\right) = 1.96V$$

改书上P133错

6.2.4 具有调零电路的差动放大器

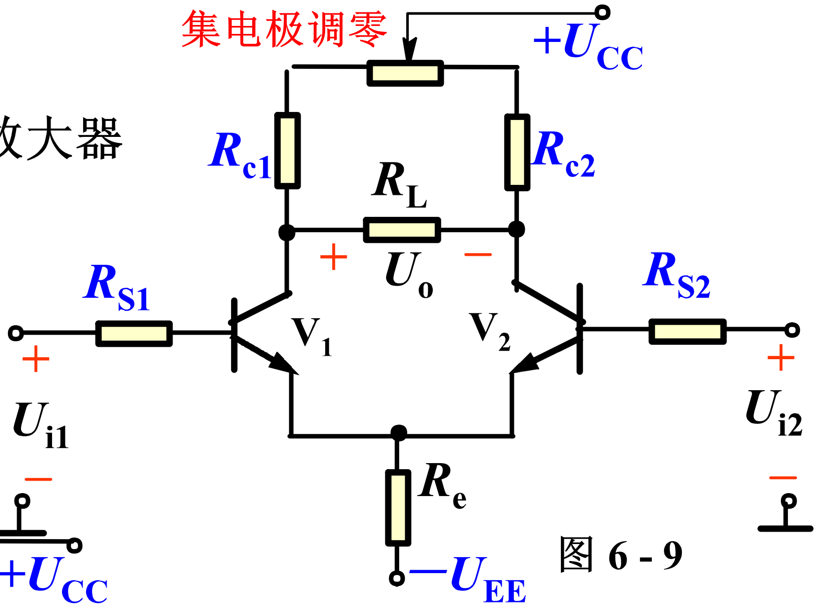
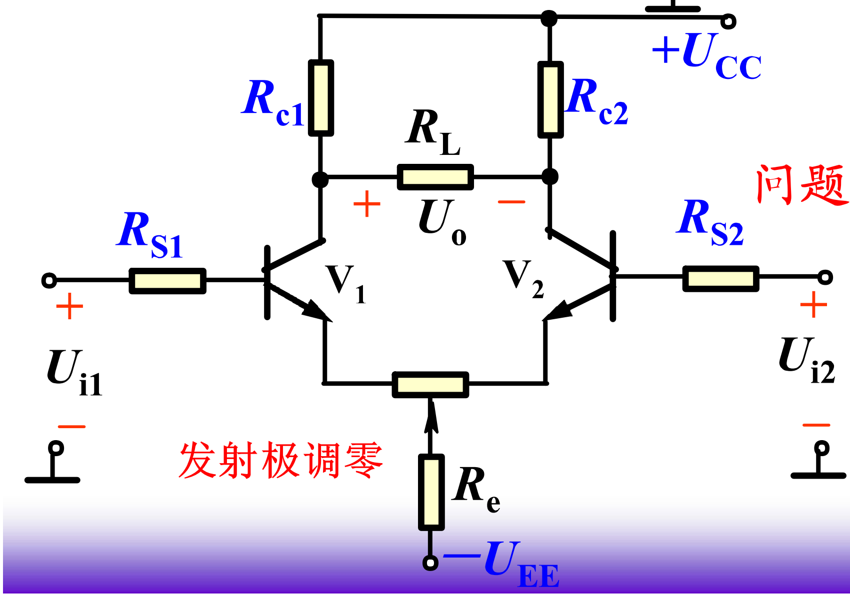


图 6 - 9



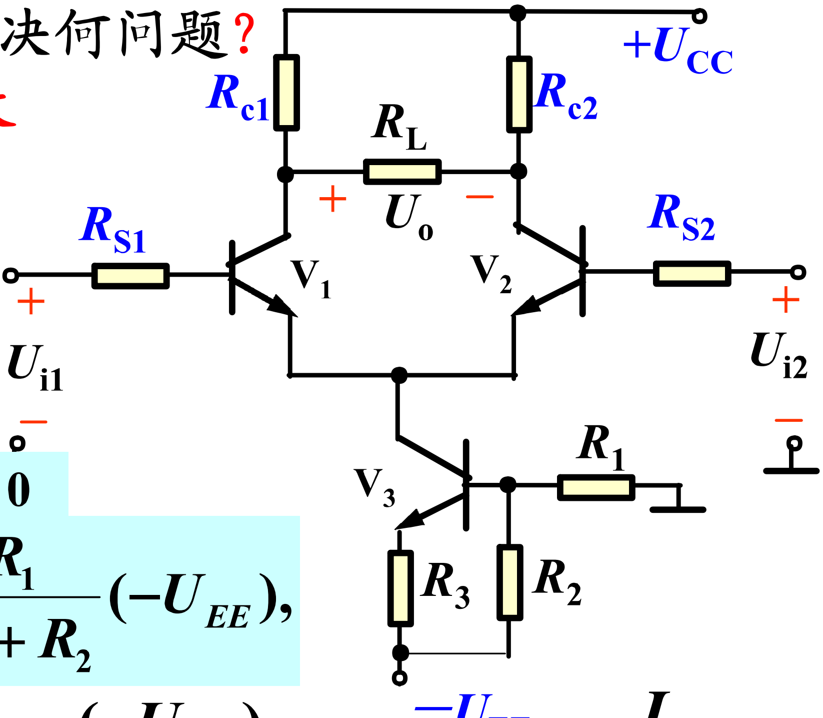
问题:差放电路怎样提高CMRR?

增大R_e

6.2.5 恒流源差放

要解决何问题？

直流R_e小，交流r_e大



一、V_3的作用

直流电阻　　　交流电阻

$$R=\frac{U}{I},\quad r=\frac{\Delta U}{\Delta I}\to\infty$$

二、Q点的计算　$U_{B1Q}\approx 0$

$$U_{E1}=-0.7V,\quad U_{B3}=\frac{R_1}{R_1+R_2}(-U_{EE}),$$

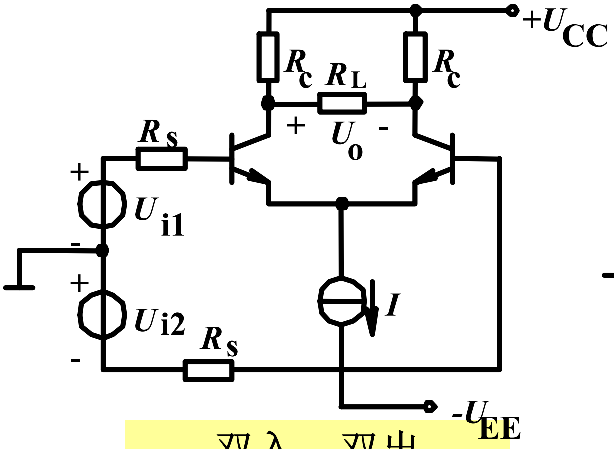
$$U_{E3}=U_{B3}-0.7,\quad I_{E3}\approx\frac{U_{E3}-(-U_{EE})}{R_3},\quad I_{E1}=I_{E2}=\frac{I_{E3}}{2},$$

$$U_{CE}=?$$

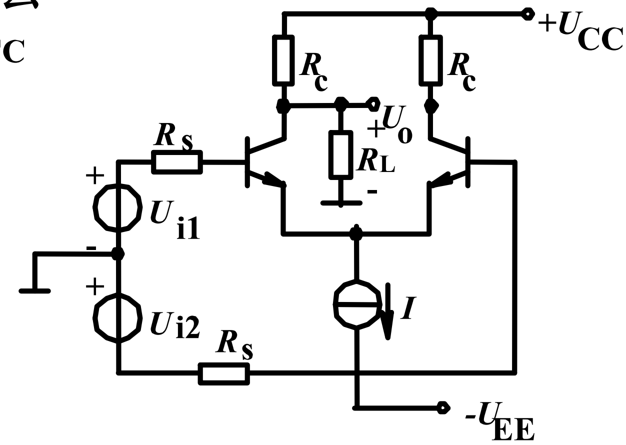
三、Au、ri、ro的计算

方法同前，只是用恒流源的等效r（高阻）代替R_e计算。

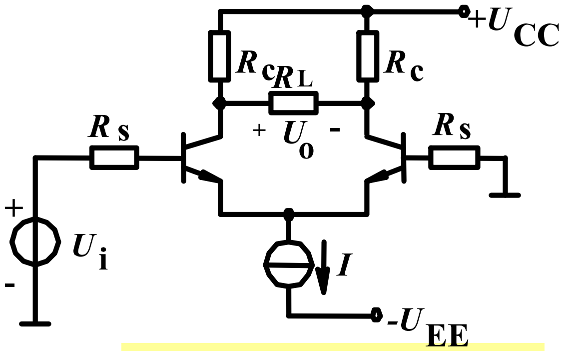
6.2.7 差动放大电路四种接法



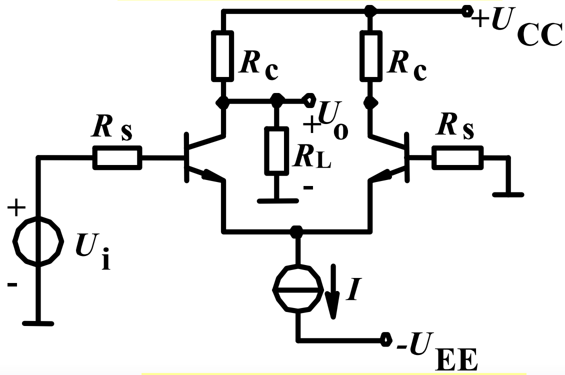
双入、双出



双入、单出



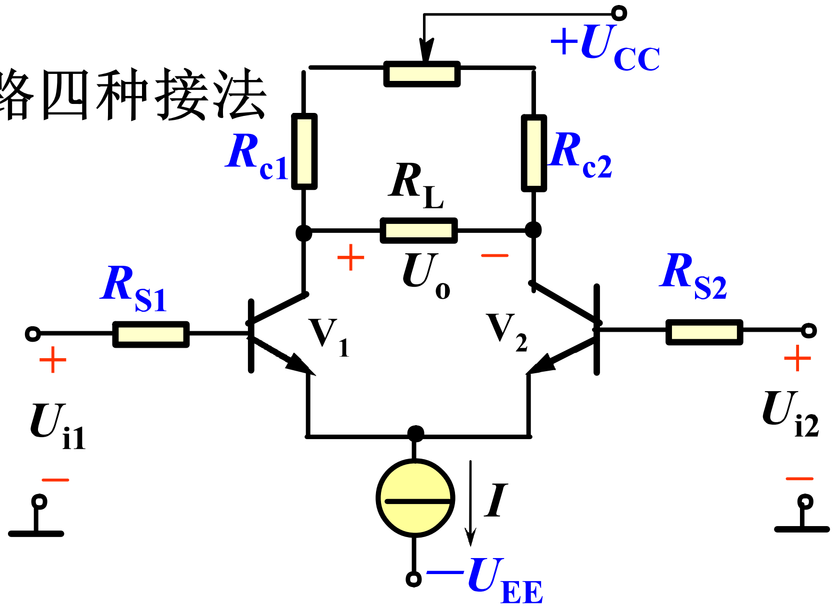
单入、双出



单入、单出

6.2.7 差动放大电路四种接法

1. 双入、双出



$$A_{ud} = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{\beta R_L'}{R_s + r_{be}},$$

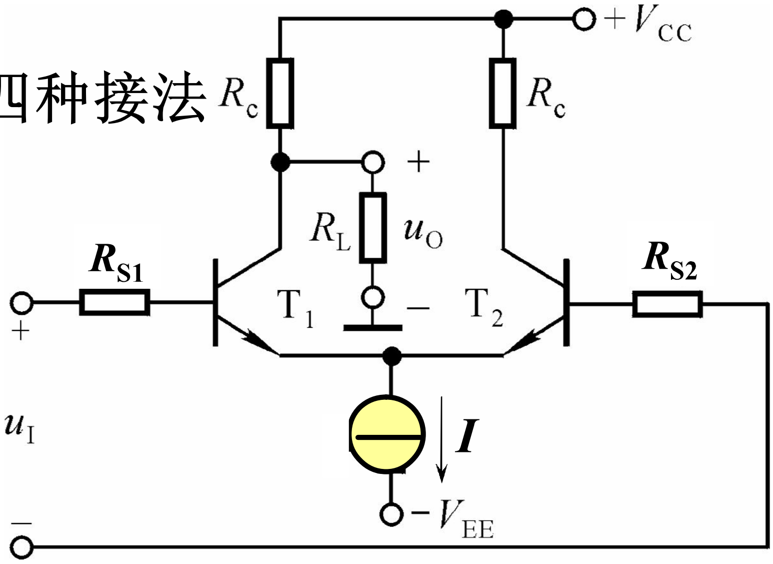
$$R_L' = R_c // \frac{R_L}{2}$$

$$A_{uc} = 0 \qquad CMRR \to \infty$$

$$r_{id} = 2(R_s + r_{be}),$$

$$r_{od} \approx 2R_c$$

6.2.7 差动放大电路四种接法



1. 双入、双出
2. 双入、单出

$$A_{ud单} = -\frac{1}{2}\frac{\beta R'_L}{R_s + r_{be}},$$

$$R'_L = R_c // R_L$$

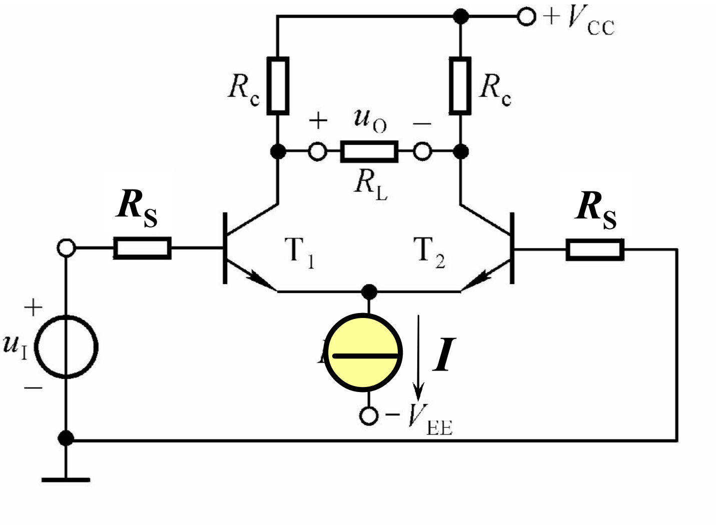
$$A_{uc单} = -\frac{\beta R'_L}{R_s + r_{be} + (1+\beta)2R_e}$$

$$CMRR = \left|\frac{A_{ud}}{A_{uc}}\right| = \frac{R_s + r_{be} + (1+\beta)2R_e}{2(R_s + r_{be})} \approx \frac{\beta R_e}{R_s + r_{be}}$$

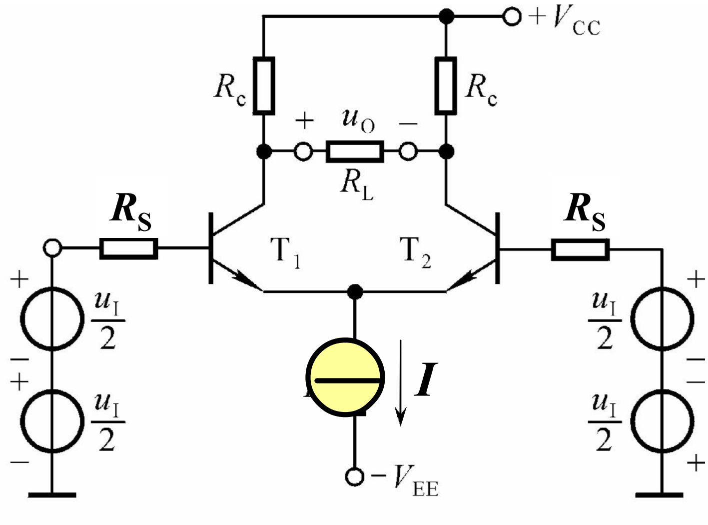
$$r_{id} = 2(R_s + r_{be}) \qquad r_{od} \approx R_c$$

6.2.7 差动放大电路四种接法

1. 双入、双出
2. 双入、单出
3. 单入、双出



(a)



(b)

结论:

Auc、Aud、CMRR、ri、ro与双入、双出相同

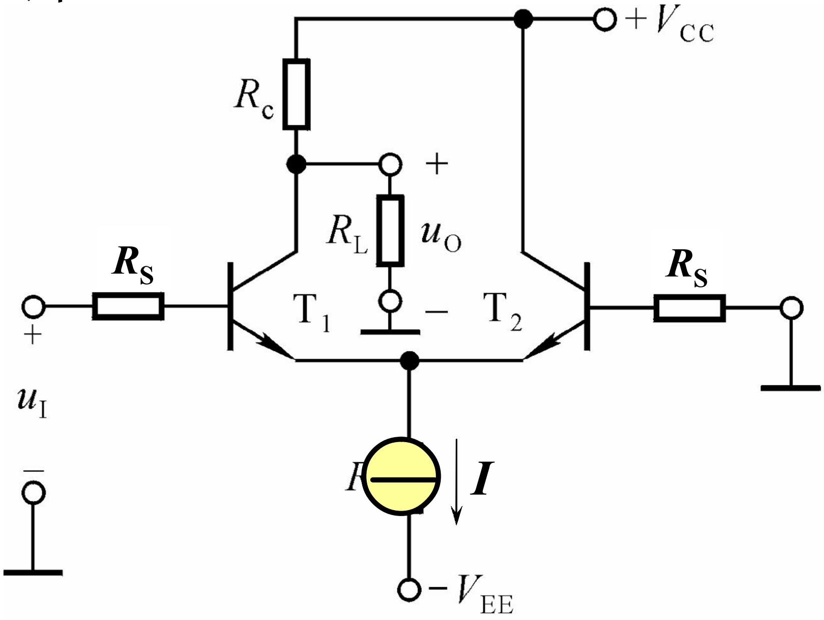
6.2.7 差动放大电路四种接法

1. 双入、双出

2. 双入、单出

3. 单入、双出

4. 单入、单出



结论:

Auc、Aud、CMRR、ri、ro与双入、单出相同

差动放大电路四种接法的性能比较

接法 / 性能	双入双出	双入单出	单入双出	单入单出
A_d	$-\dfrac{\beta(R_C // \frac{R_L}{2})}{R_S + r_{be}}$	$\pm\dfrac{1}{2}\dfrac{\beta(R_c // R_L)}{R_S + r_{be}}$	$-\dfrac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_S + r_{be}}$	$\pm\dfrac{1}{2}\dfrac{\beta(R_c // R_L)}{R_S + r_{be}}$
KCMR	很高	较高	很高	较高
r_{id}	$2(R_S + r_{be})$	$2(R_S + r_{be})$	$2(R_S + r_{be})$	$2(R_S + r_{be})$
r_o	$2R_c$	R_c	$2R_c$	R_c

单端输出要注意相位！！

【例3】电路如图6-13所示, (1) 求Q点 (2) 求Aud (3) 求R_L=100kΩ时的Aud

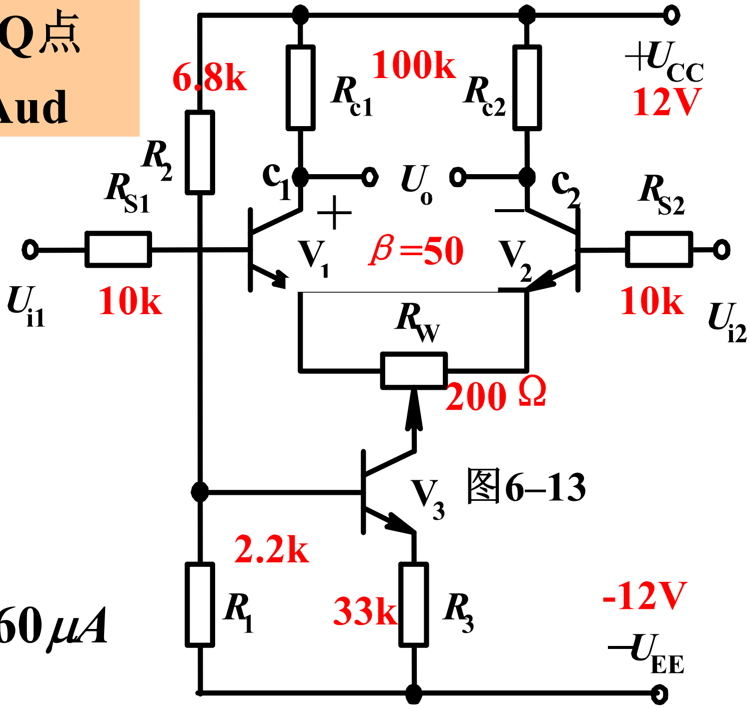


图6-13

解 (1)

$$U_{R1}=\frac{R_1}{R_1+R_2}(U_{CC}+U_{EE})=\frac{2.2}{2.2+6.8}\times 24=5.87V$$

设各管U_{BE}=0.6V, 则

$$U_{R3}=5.87-0.6=5.27V$$

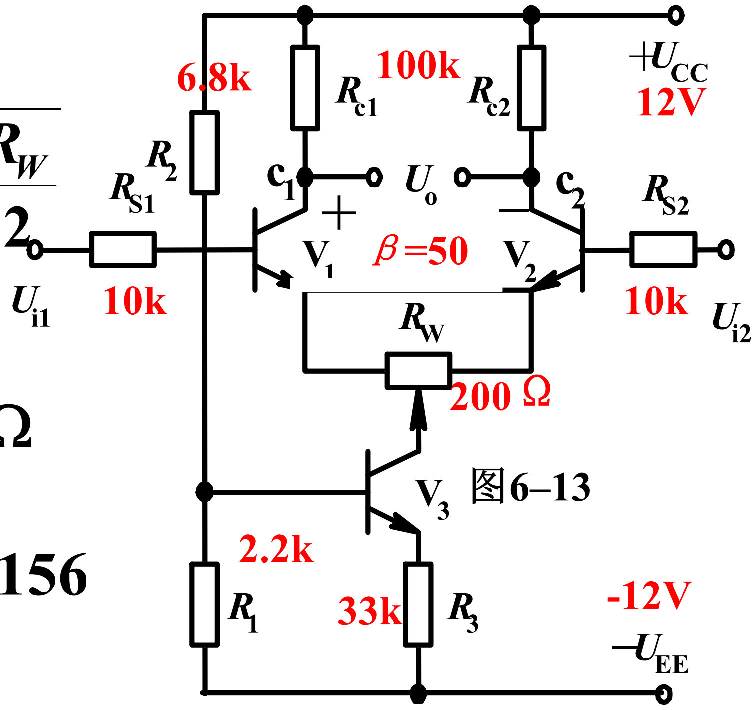
$$I_{E3}=\frac{U_{R3}}{R_3}=\frac{5.27}{33}\approx 0.16mA=160\mu A$$

$$I_{E1}=I_{E2}=\frac{1}{2}I_{E3}=80\mu A,$$

$$U_{c1}=U_{c2}=U_{CC}-I_{c1}R_{c1}=12-0.08\times 100=4V$$

$$U_{CE1}=U_{c1}-U_{E1}=4-(-0.6)=4.6V$$

改书上错



(2) $A_{ud}=-\dfrac{\beta_1 R_{C1}}{R_{S1}+r_{be1}+(1+\beta_1)\dfrac{R_W}{2}}$

$$r_{be1}=r_{bb'}+(1+\beta_1)\frac{26mV}{I_{E1}}$$

$$=300+51\times\frac{26}{0.08}\approx 16.9k\Omega$$

$$A_{ud}=-\frac{50\times 100}{10+16.9+51\times 0.1}\approx -156$$

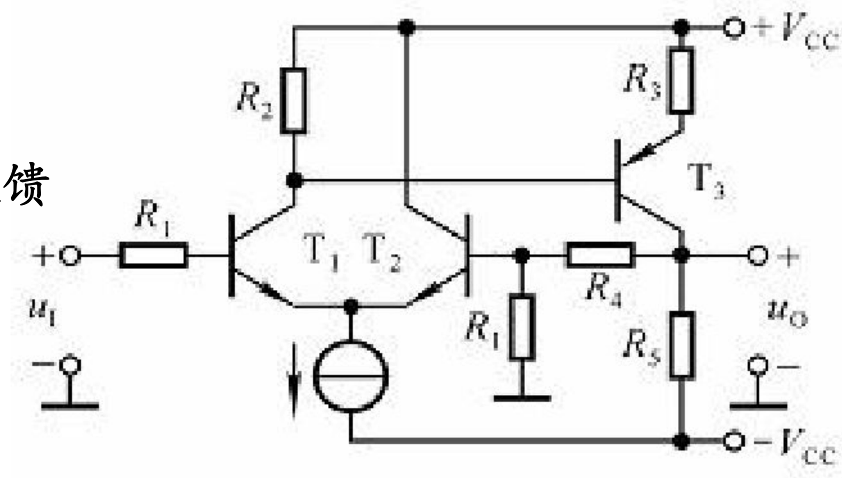
(3) 当R_L=100 kΩ时：

$$R_L' = R_{C1} // \frac{R_L}{2} = 100//50 \approx 33.3k\Omega$$

$$A_{ud}=-\frac{50\times 33.3}{10+16.9+51\times 0.1}\approx -52$$

带载后,放大倍数减小。

练习：求*A*uf



解： 判断：串联电压负反馈

$$\dot{U}_f \approx \dot{U}_i, \dot{U}_i' \approx 0$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = \frac{\dot{U}_o}{\frac{R_1}{R_1 + R_4}\dot{U}_o} = 1 + \frac{R_4}{R_1}$$

要求：

1. 了解差放电路抑制温漂的原理

2. 了解Re的作用（为什么越大越好）

3. 会分析计算长尾电路的Q点、Aud、ri、ro等

4.会分析计算恒流源电路的Q点、Aud、ri、ro等

作业

P151 5，6， 10 预习:6.3，6.4