



1.6、7、8 集成运算放大器

§ 1.6.1 集成运算放大器概述

§ 1.6.2 差分放大电路

§ 1.6.3 集成运放的输出级

§ 1.6.4 集成运算放大器

§ 1.6.1 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

用在模拟信号的运算、放大、检测、变换、处理、信号产生等等

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。

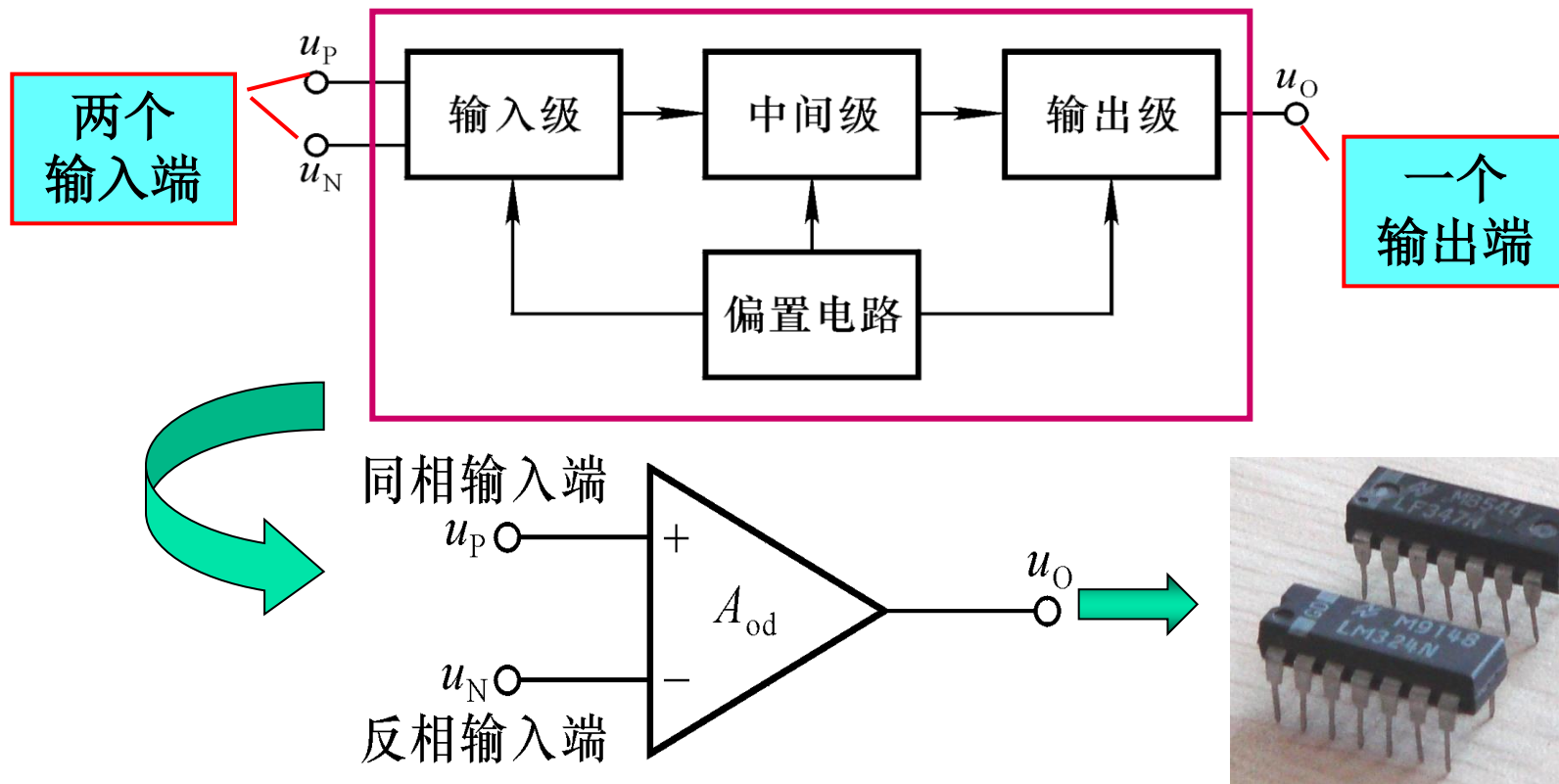
(2) 用复杂电路实现**高性能**的放大电路，因为电路的复杂化并不带来工艺的复杂性。

(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) **高增益**。采用复合管。

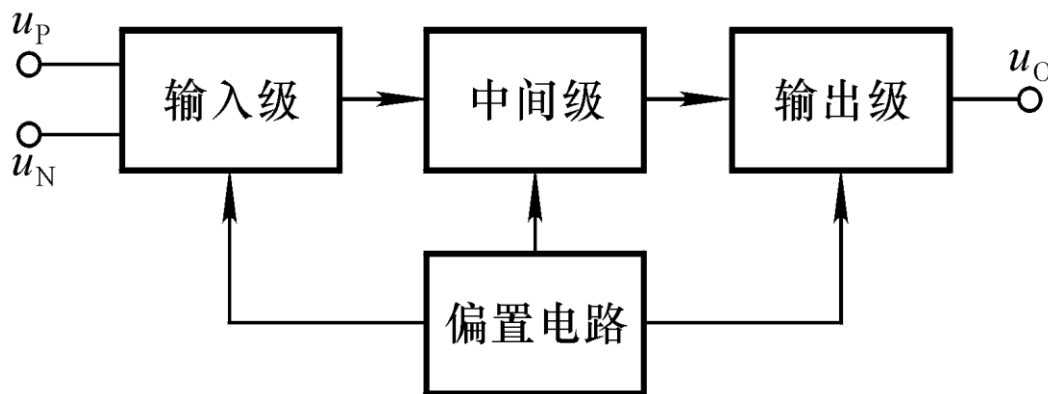
1. 高增益、高输入电阻、低输出电阻的多级直接耦合线性放大器
2. 采用**微电流源**作为偏置电路以降低功耗，放大电路负载采用**有源负载**以提高电压增益。

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。

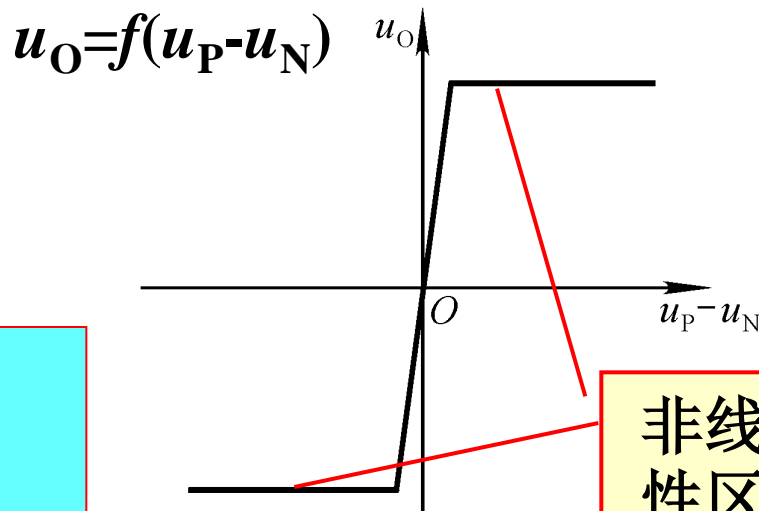
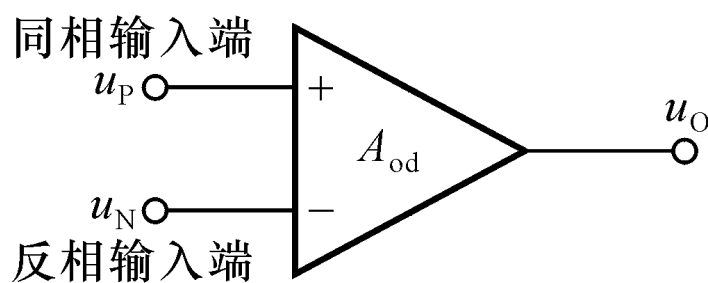
输入级：前置级，多采用差分放大电路。要求 R_i 大， A_d 大， A_c 小，输入端耐压高。

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



在线性区：

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

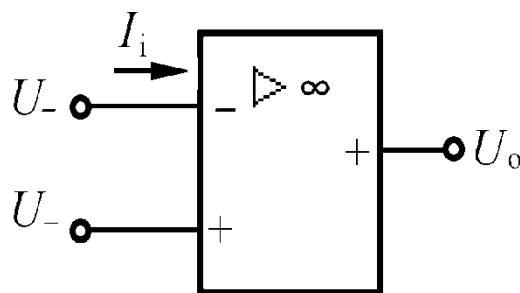
A_{od} 是开环差模放大倍数。

非线性区

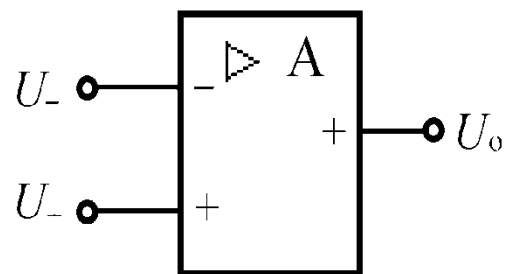
由于 A_{od} 高达几十万倍，所以集成运放工作在线性区时的最大输入电压($u_P - u_N$)的数值仅为几十~一百多微伏。

($u_P - u_N$)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。

四、集成运放的电路符号



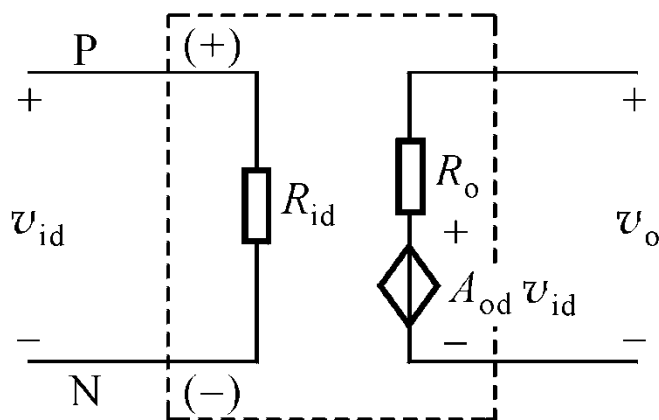
(a) 理想运放



(b) 实际运放

反相输入： 输出信号与该端输入信号反相位；

同相输入： 输出信号与该端输入信号同相位；



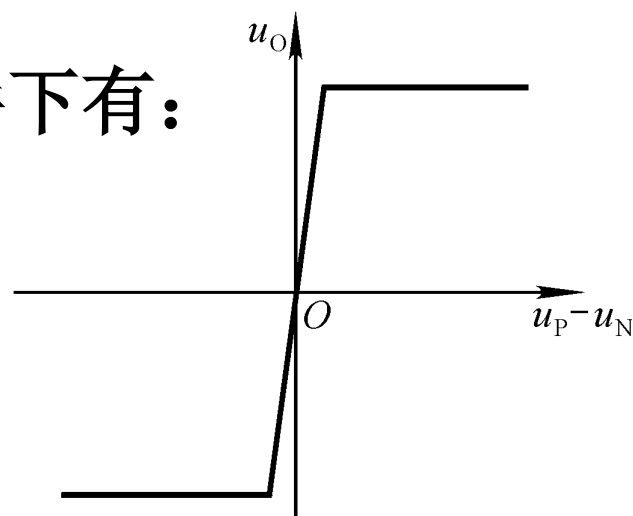
低频小信号模型

在理想条件下有：

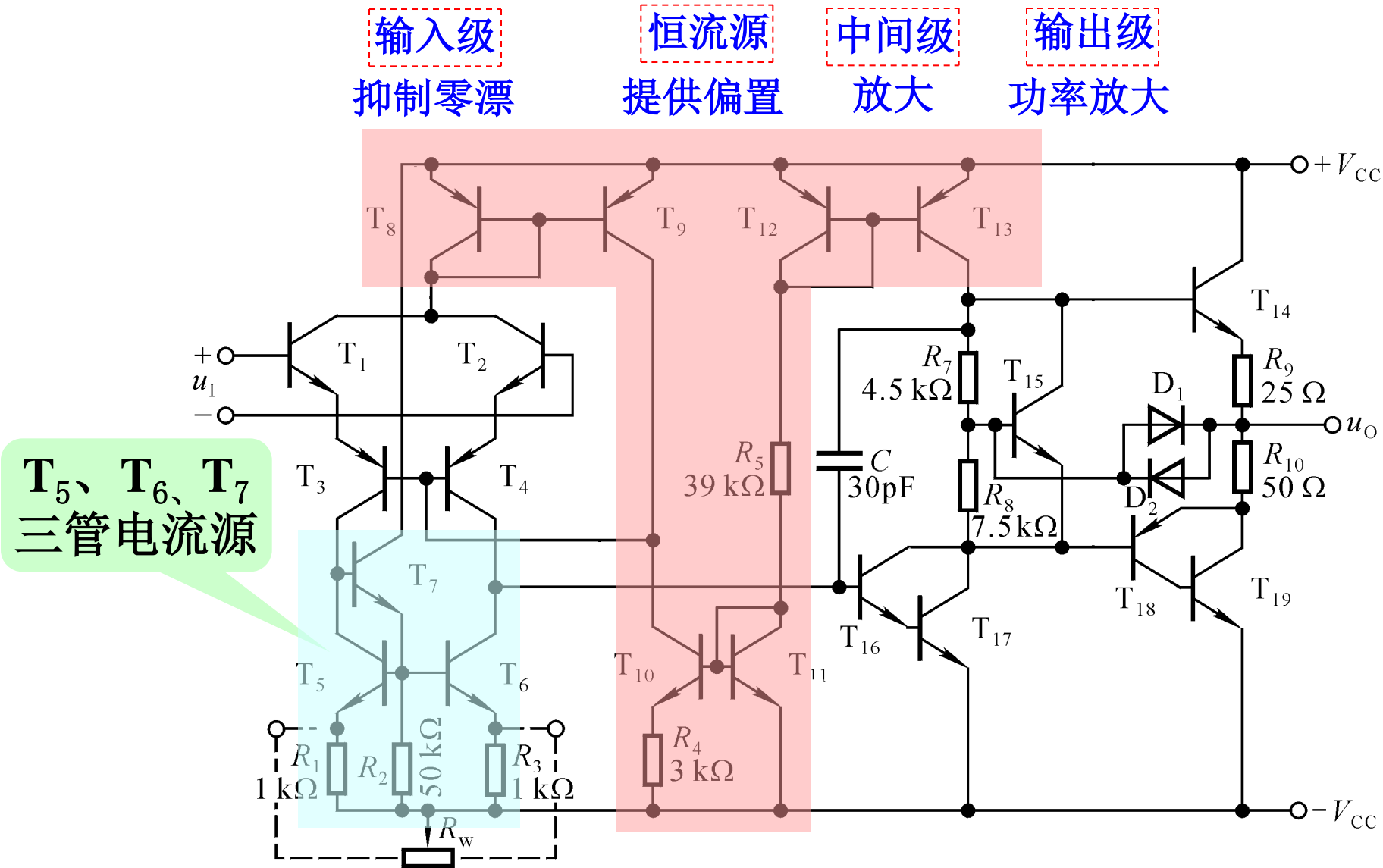
$$R_{id} \rightarrow \infty$$

$$R_{od} \rightarrow 0$$

$$A_{od} \rightarrow \infty$$



举例：F007——通用型集成运放内部电路

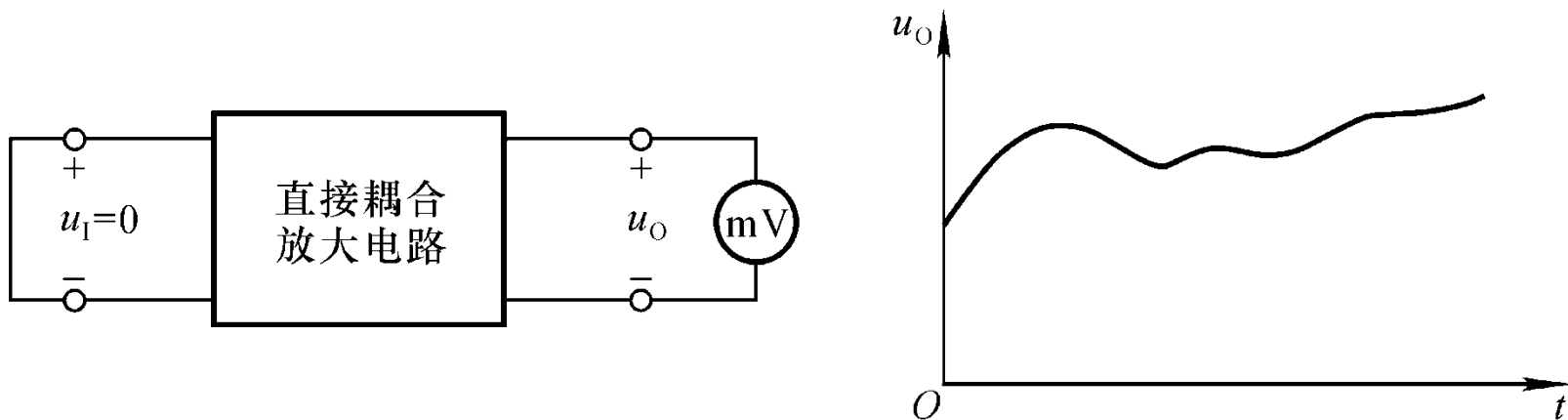


§ 1.6.2 差分放大电路

- 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。



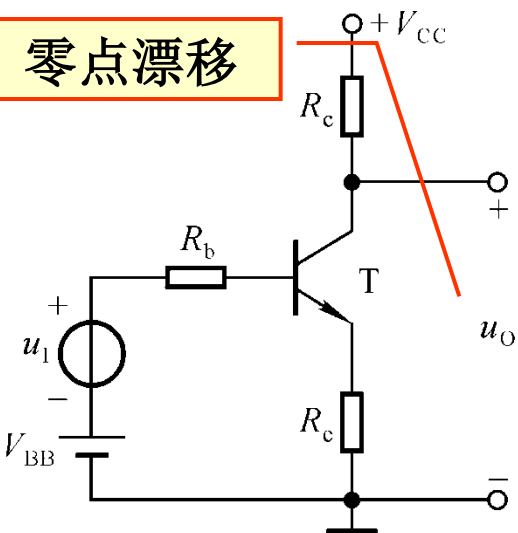
产生原因：温度变化，直流电源波动，元器件老化。其中晶体管的特性对温度敏感是主要原因，故也称零漂为温漂。

克服温漂的方法：引入直流负反馈，温度补偿。

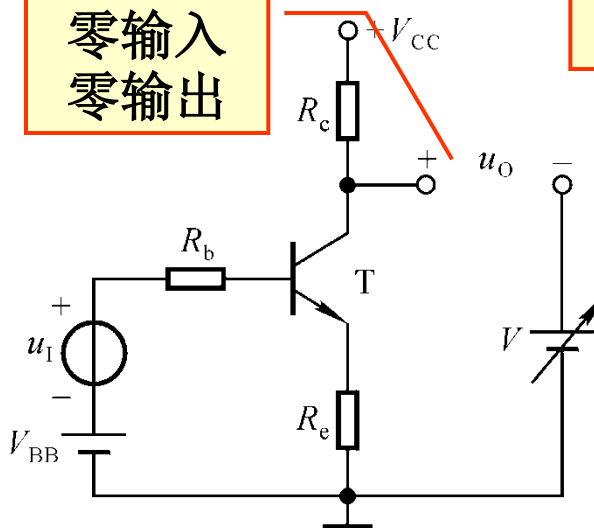
典型电路：差分放大电路

二、长尾式差分放大电路的组成

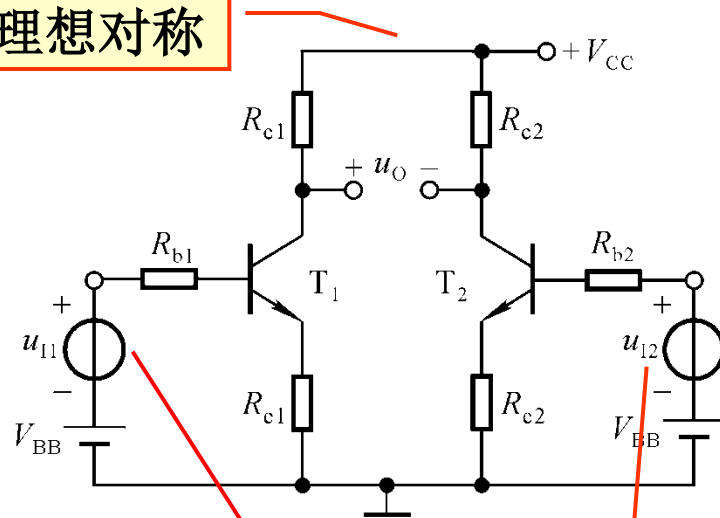
零点漂移



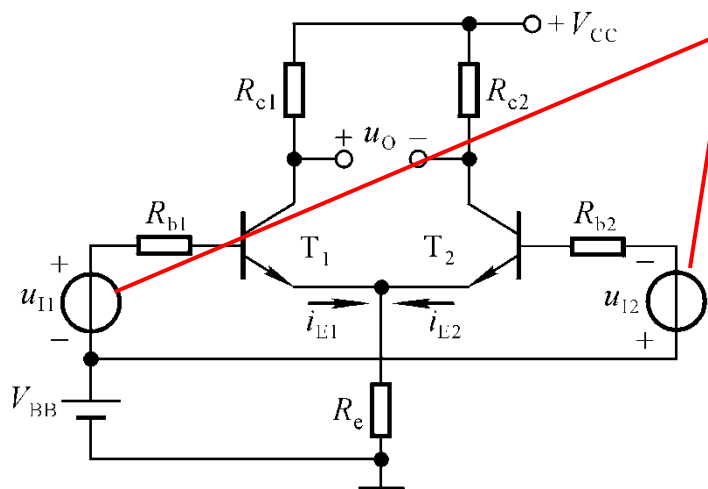
零输入
零输出



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。

几个基本概念

1. 差分放大电路一般有两个输入端：

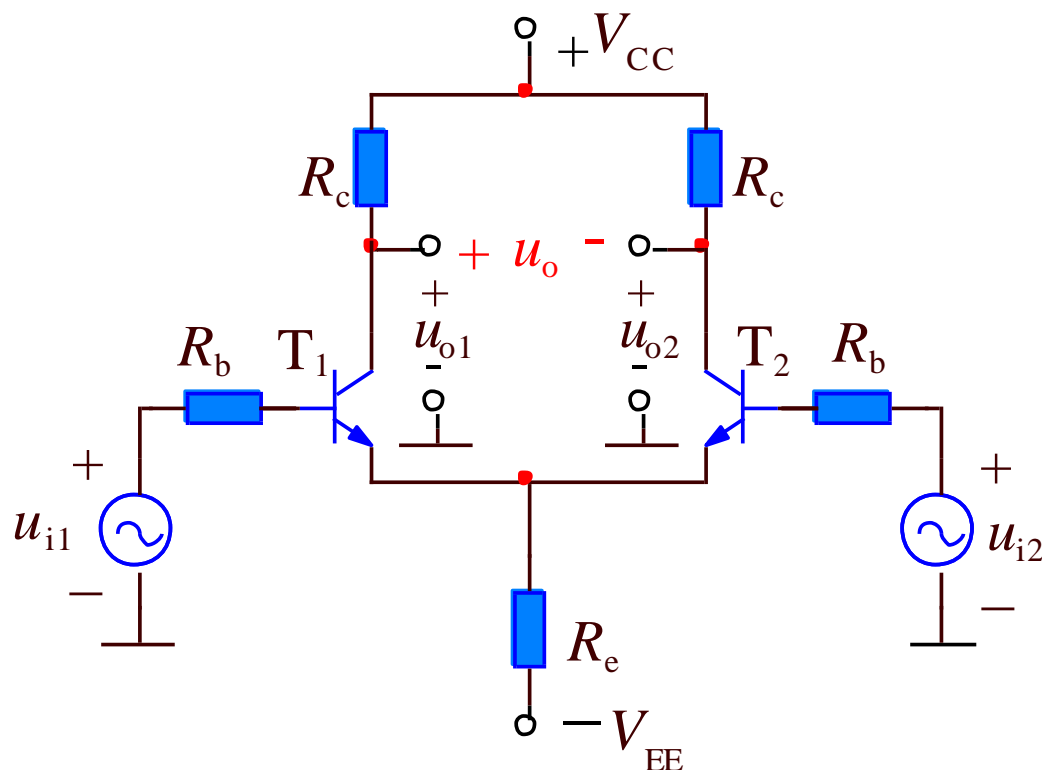
双端输入——从两输入端同时加信号。

单端输入——仅从一个输入端对地加信号。

2. 差分放大电路可以有两个输出端。

双端输出—— u_o
(两输出端之间)。

单端输出——对地输出。



3. 差模信号与共模信号

差模信号: $u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$

共模信号: $u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2})$

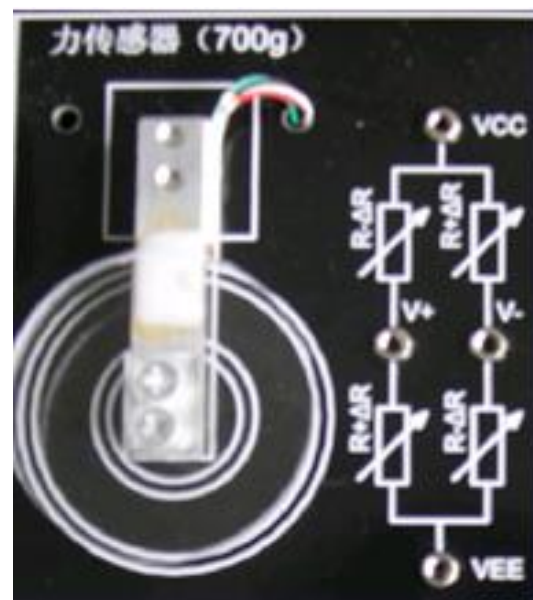
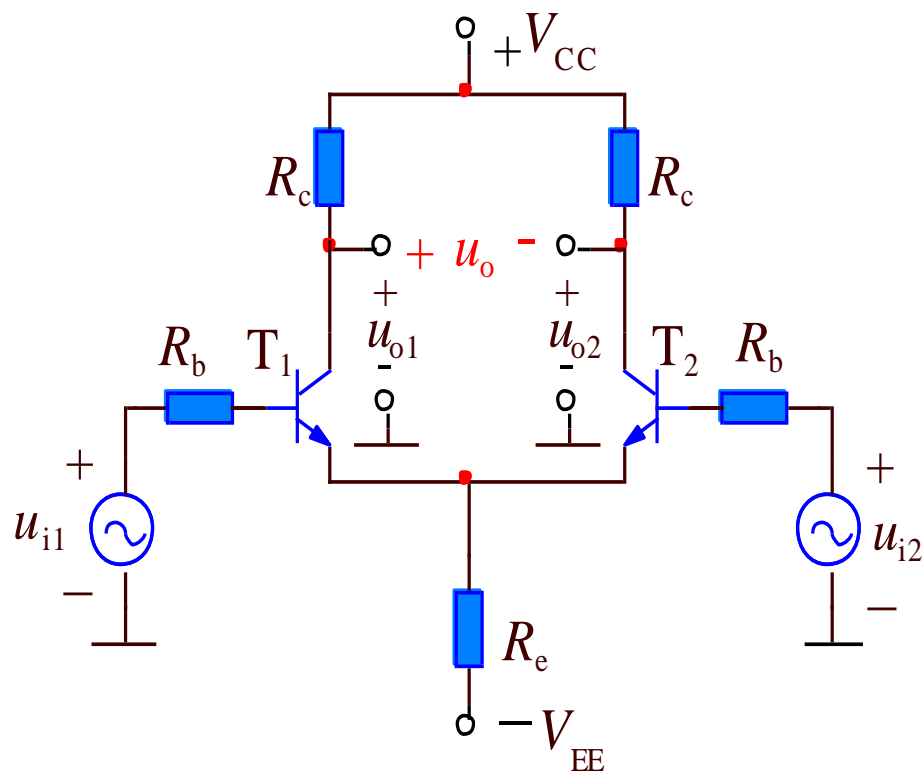
差模电压增益: $A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}}$

共模电压增益: $A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}}$

总输出电压:

$$u_o = u_{od} + u_{oc} = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic}$$

$$\text{共模抑制比 } K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$$



结论：任意输入的信号： u_{i1}, u_{i2} ，都可分解成差模分量和共模分量。

$$u_{i1} = 5.01V \quad u_{i2} = 4.99V$$

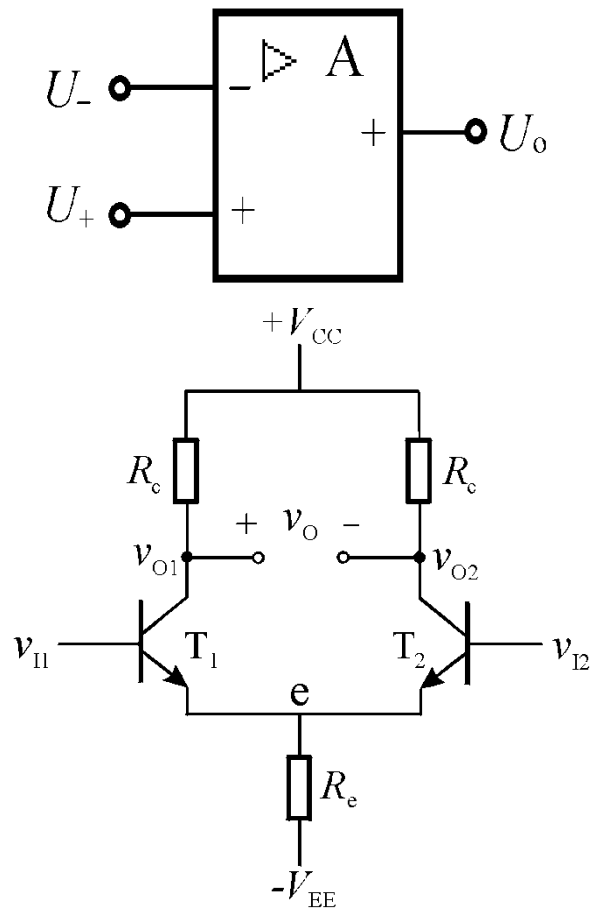
差模电压： $u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 0.02V$

共模电压： $u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) = 5V$

差模电压增益： $A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = 100$

共模电压增益： $A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} = 0.01$

总输出电压： $u_o = u_{od} + u_{oc} = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic} = 2.05V$



输入信号可分解为一对共模信号和一对差模信号后分别计算

三、长尾式差分放大电路的分析

1、直流分析

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C \quad I_{E1} = I_{E2} = I_E$$

$$I_{Re} = I_{E1} + I_{E2} = 2I_E$$

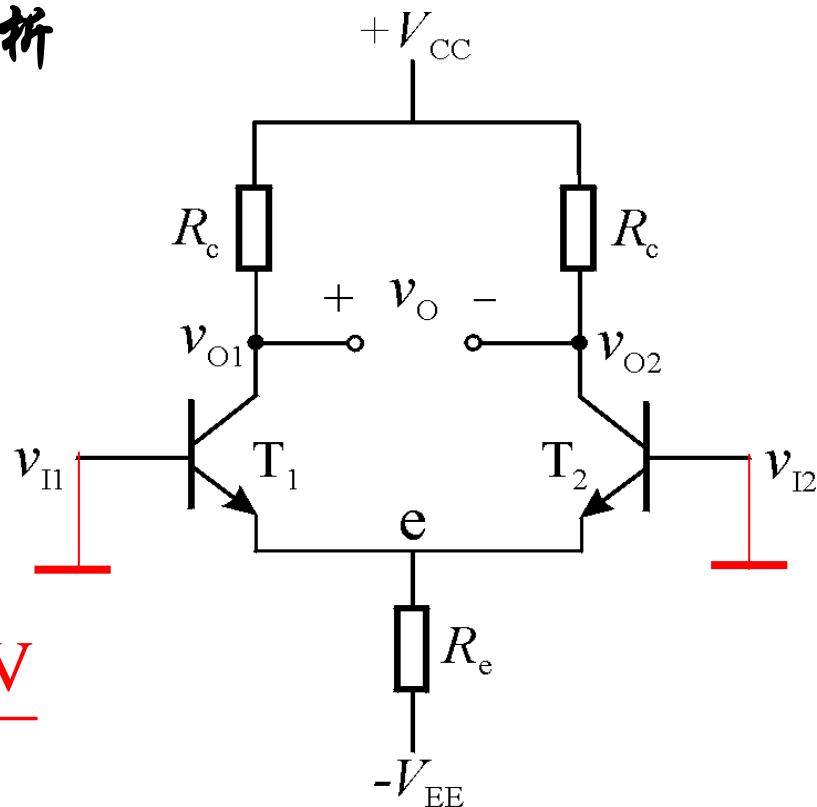
$$V_E = -V_{BE} = -0.7V$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_E - (-V_{EE})}{2R_e} = \frac{V_{EE} - 0.7V}{2R_e}$$

$$V_{o1Q} = V_{o2Q} = V_{CC} - I_{CQ}R_C \quad V_{oQ} = V_{o1Q} - V_{o2Q} = 0$$

电路结构对称，元件参数和特性相同，因而温度变化时 V_{C1Q} 、 V_{C2Q} 始终相等，使 $V_{oQ} = 0$ ，从而有效地抑制了温漂和零点漂移。

☺ 若 $R_{c1} \neq R_{c2}$ ，则 I_{CQ} 和 V_{CQ} 是否相等？



2、动态分析

(1) 对差模信号的放大能力

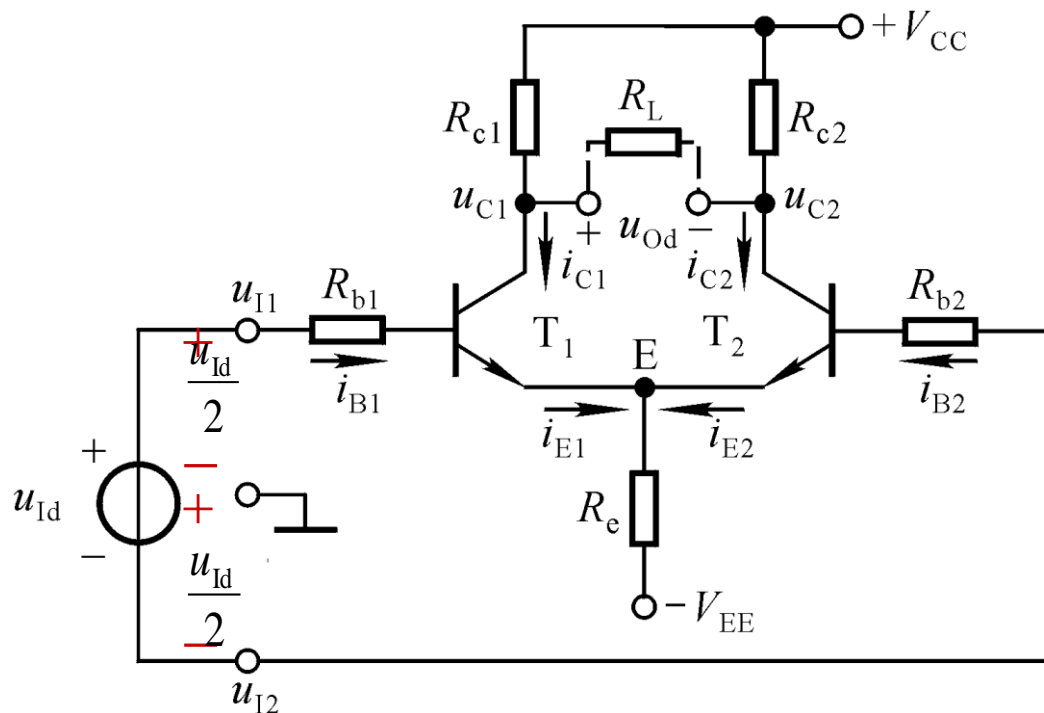
①端和②端的信号为大小相等，而极性相反。

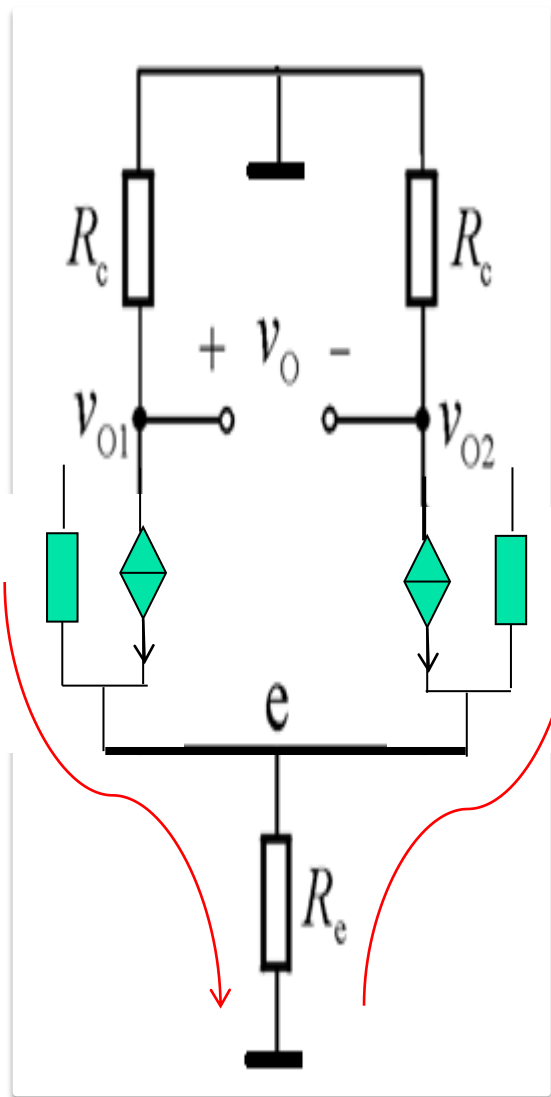
单端差模信号：

$$\Delta v_{I1} = -\Delta v_{I2} = \frac{\Delta v_{Id}}{2}$$

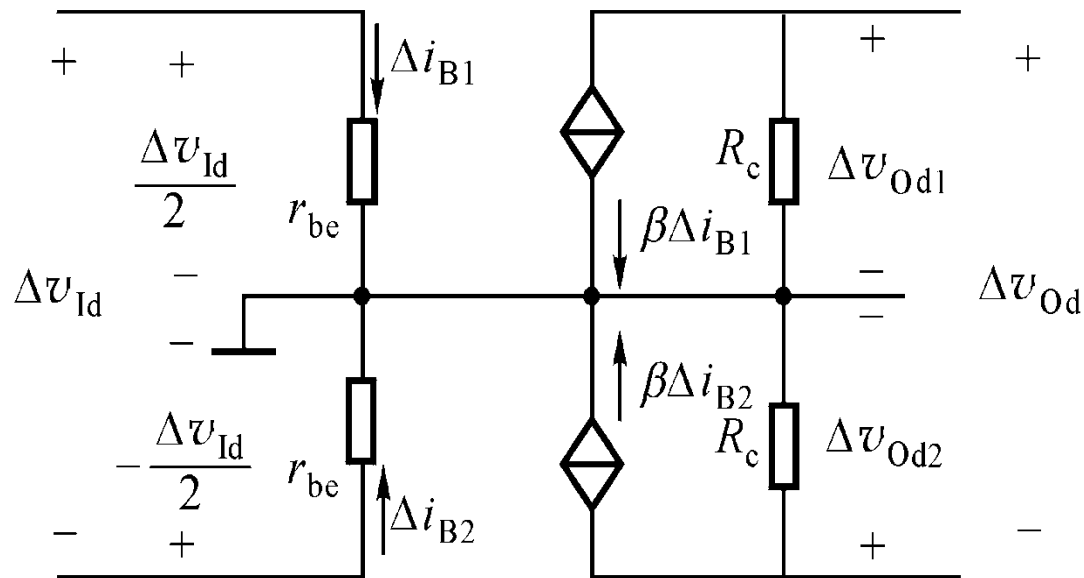
共模信号： $\Delta v_{IC} = 0$

差模信号分别加在①端和②端的方式称双端输入方式。



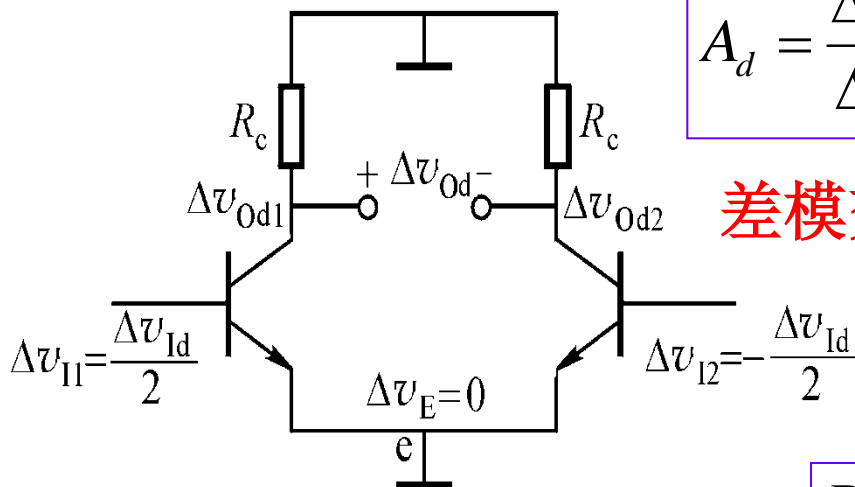


$$R_{od} = 2R_C$$



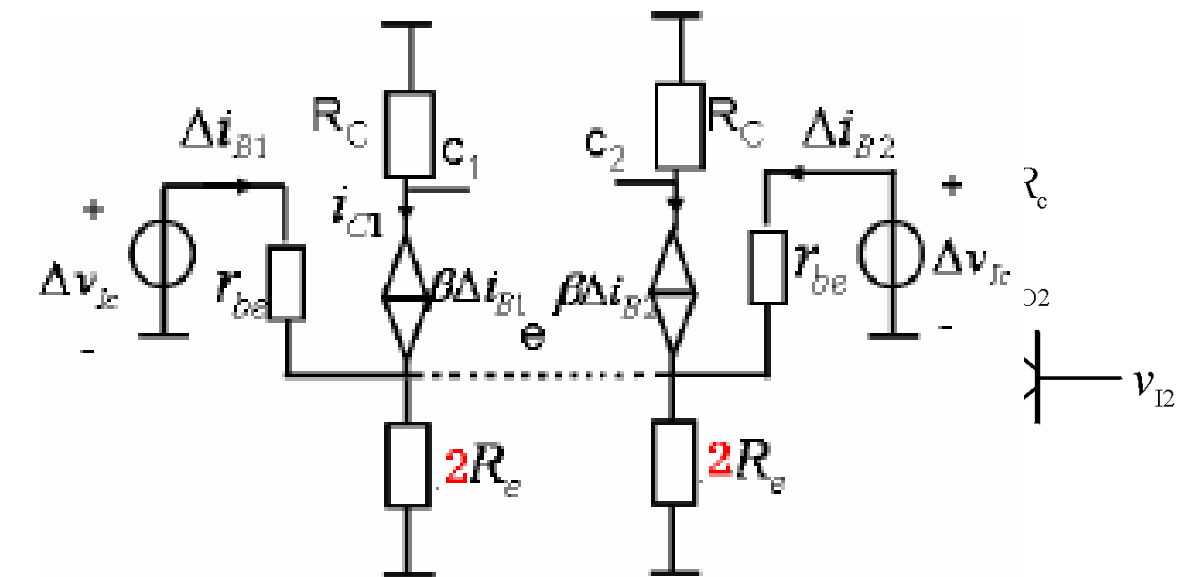
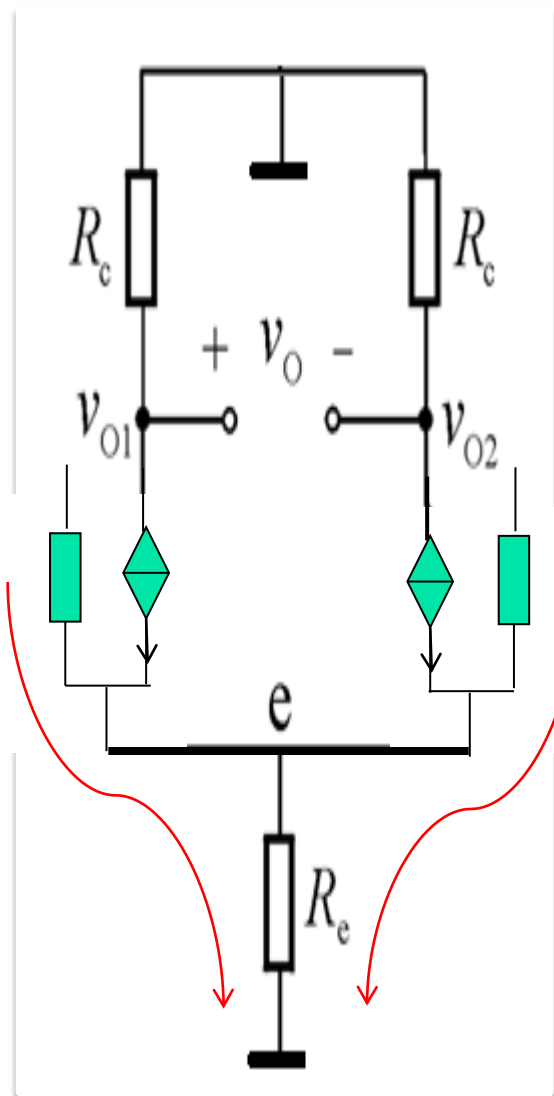
差模等效电路

$$A_d = \frac{\Delta v_{od}}{\Delta v_{id}} = -\frac{2\beta R_C}{2r_{be}}$$

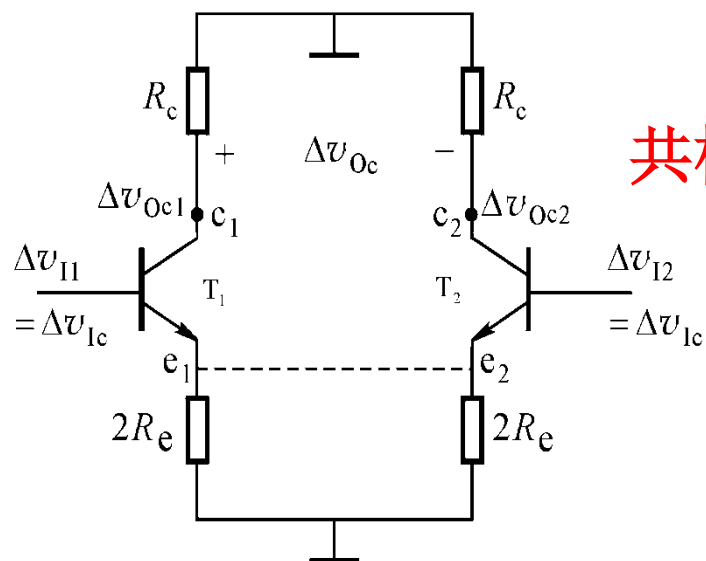


差模交流通路

$$R_{id} = 2r_{be}$$



共模等效电路



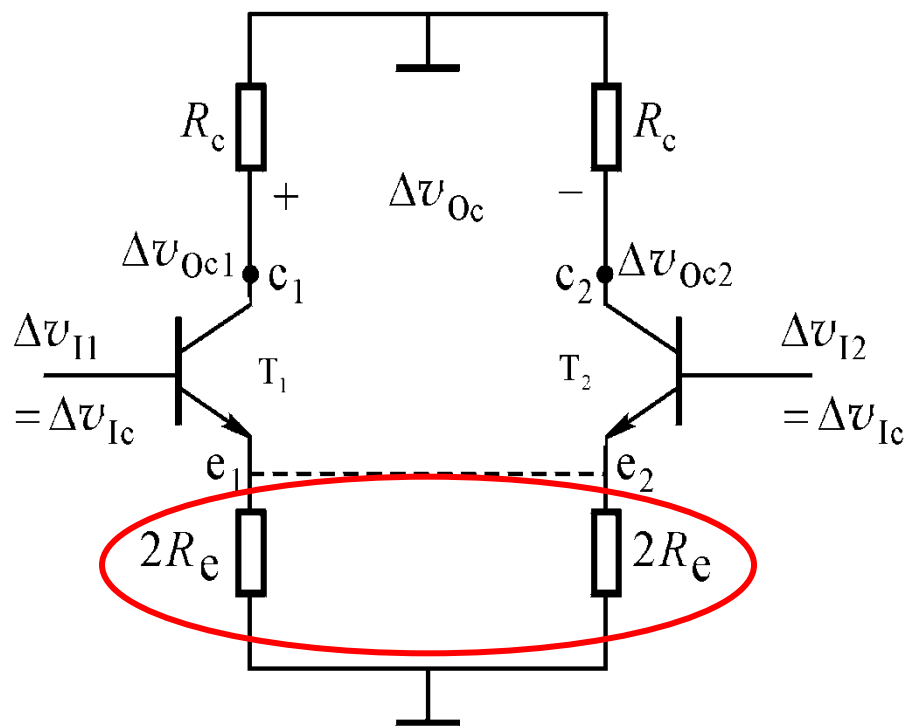
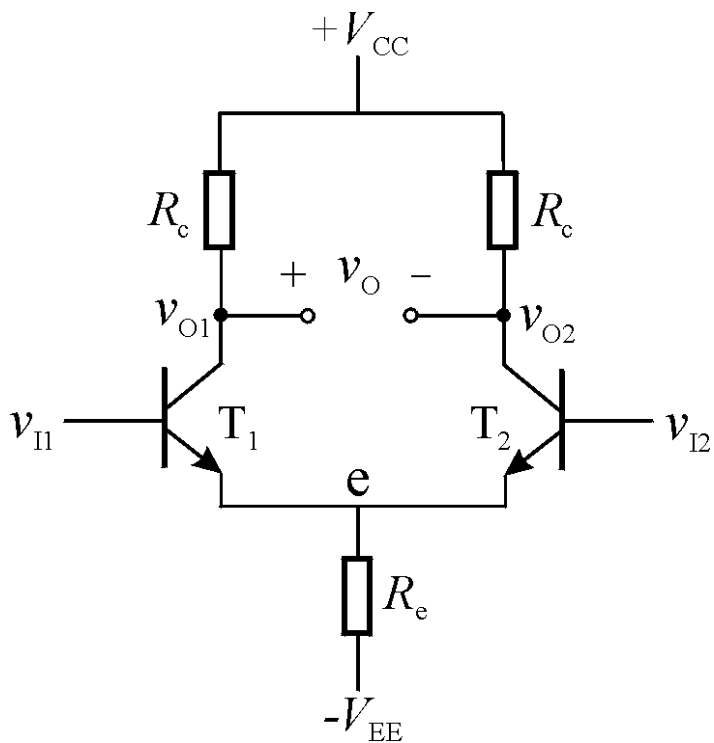
共模交流通路

(2) 对共模信号的放大能力

由于共模信号相位相同，有： $i_{C1} = i_{C2}$

$$\rightarrow i_E = i_{C1} + i_{C2} = 2i_{C1}$$

\rightarrow 共模信号时的交流通路

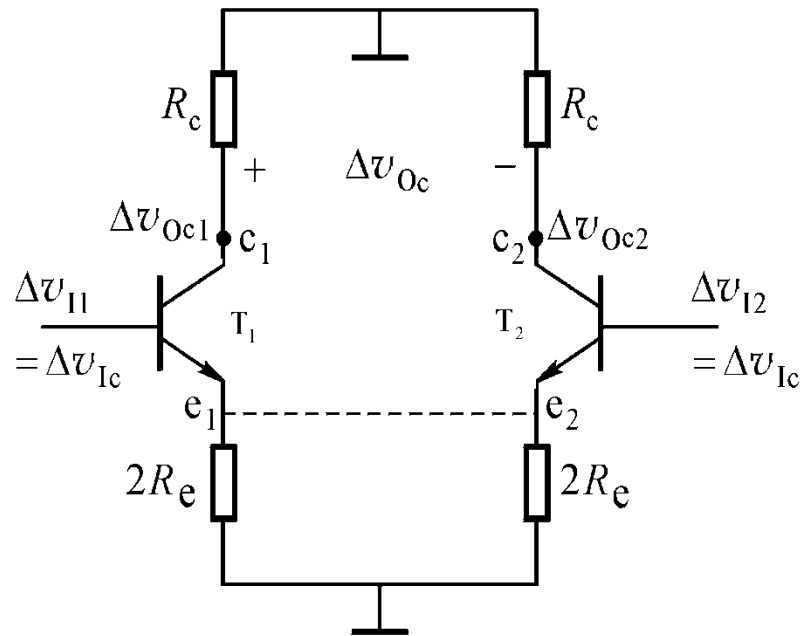


共模信号放大系数计算

共模信号 $\Delta v_{I1} = \Delta v_{I2} = \Delta v_{Ic}$

由于电路左右完全对称，取单边计算

单边电路为共射带 R_e 电路。



$$\Delta I_{B1} = \Delta I_{B2} = \frac{\Delta v_{Ic}}{r_{be} + (1 + \beta)2R_e}$$

$$\Delta v_{O1} = \Delta v_{Oc1} = -\Delta i_c R_c = -\frac{\beta R_c \Delta v_{Ic}}{r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

$$\Delta v_O = \Delta v_{Oc} = \Delta v_{O1} - \Delta v_{O2} = 0$$

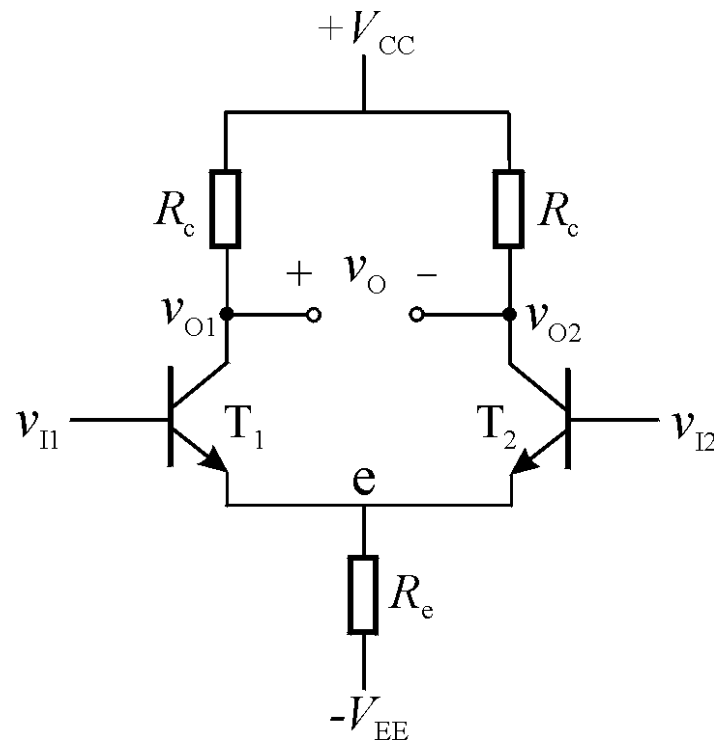
$$\text{放大系数: } A_{vc} = \frac{\Delta v_{Oc}}{\Delta v_{Ic}} = 0$$

共模抑制比 K_{CMR}

A_{vc} 在一定程度上反映差分放大电路抑制共模干扰和温漂的能力， A_{vc} 越小，则抑制温漂能力越强。

定义为差模电压放大倍数与共模电压放大倍数之比的绝对值。

用分贝表示：
$$K_{CMR} = 20\lg \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \text{ (dB)}$$



$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right|$$

差分放大电路的动态参数:

差分放大系数: A_d

输入电阻: R_i

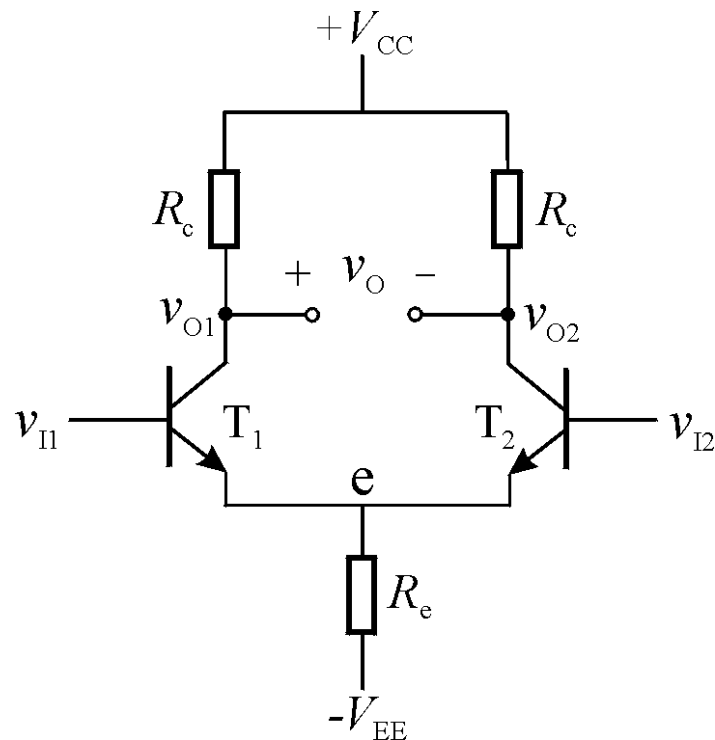
输出电阻: R_o

共模放大系数: A_c

共模抑制比: K_{CMR}

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. 双端输入双端输出:

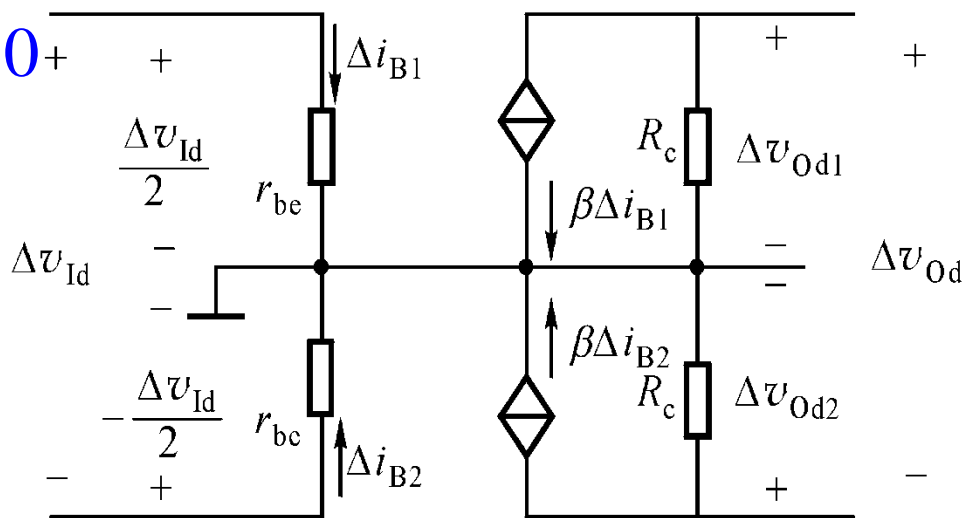
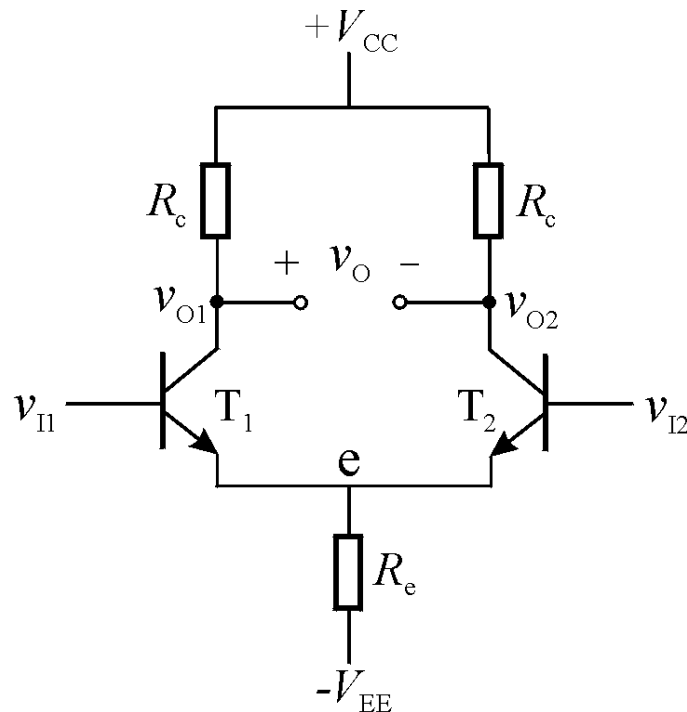
差模放大系数: $A_d = \frac{\Delta v_{Od}}{\Delta v_{Id}} = -\frac{\beta R_c}{r_{be}}$

差模输入电阻: $R_i = 2r_{be}$

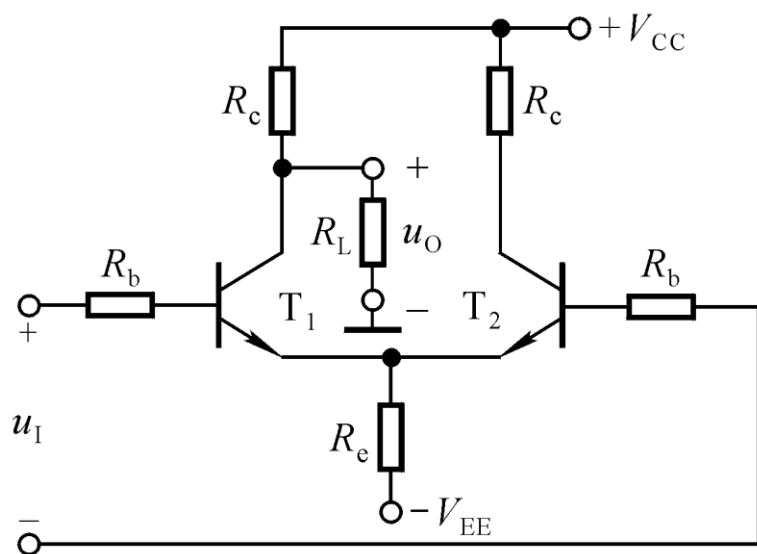
差模输出电阻: $R_o = 2R_c$

共模放大系数: $A_{vc} = \frac{\Delta v_{Oc}}{\Delta v_{Ic}} = 0$

$$\Delta v_{O1} = -\frac{\beta R_c \Delta v_{Ic}}{r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$



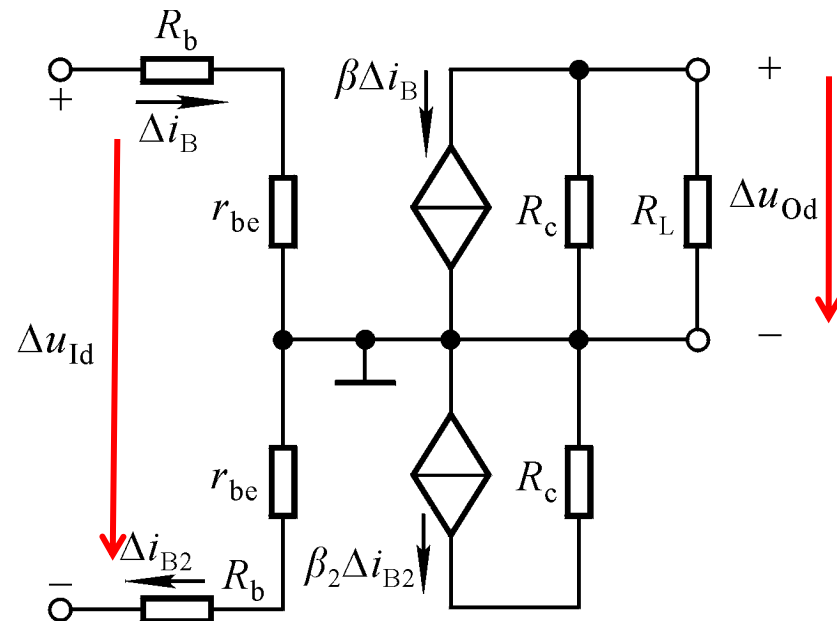
2. 双端输入单端输出：差模信号作用下的分析



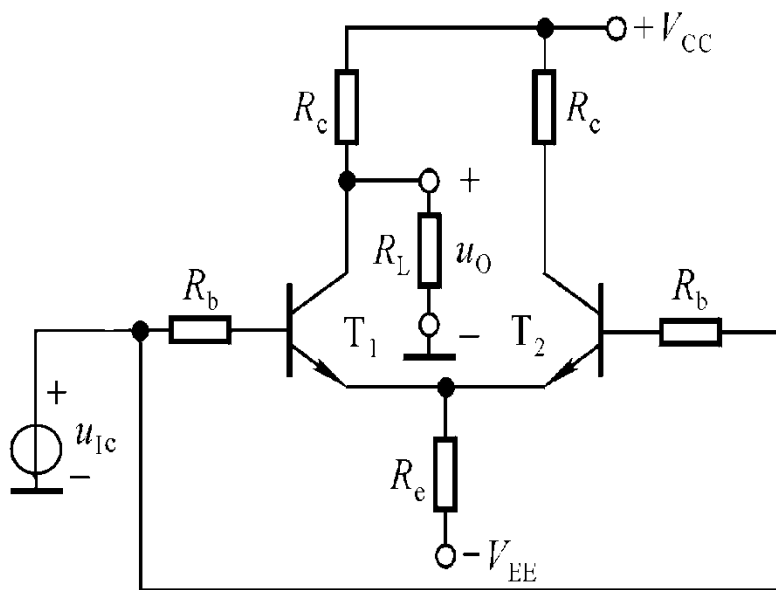
$$A_d = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

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

$$R_o = R_c$$



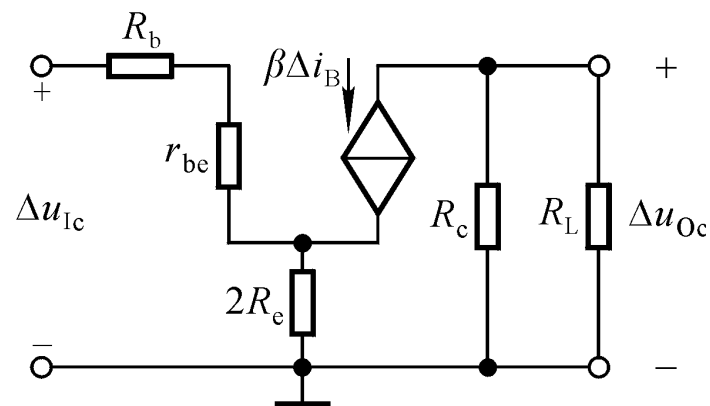
2. 双端输入单端输出：共模信号作用下的分析



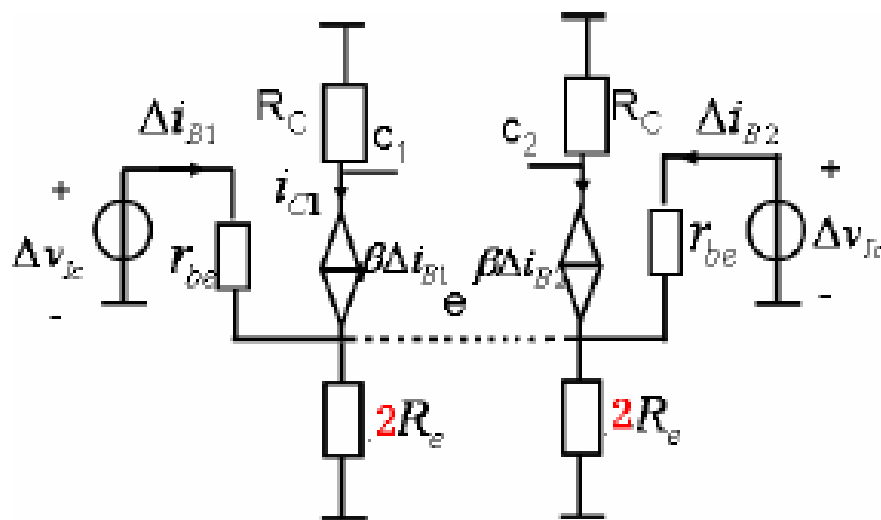
$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

有共模信号输出！

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

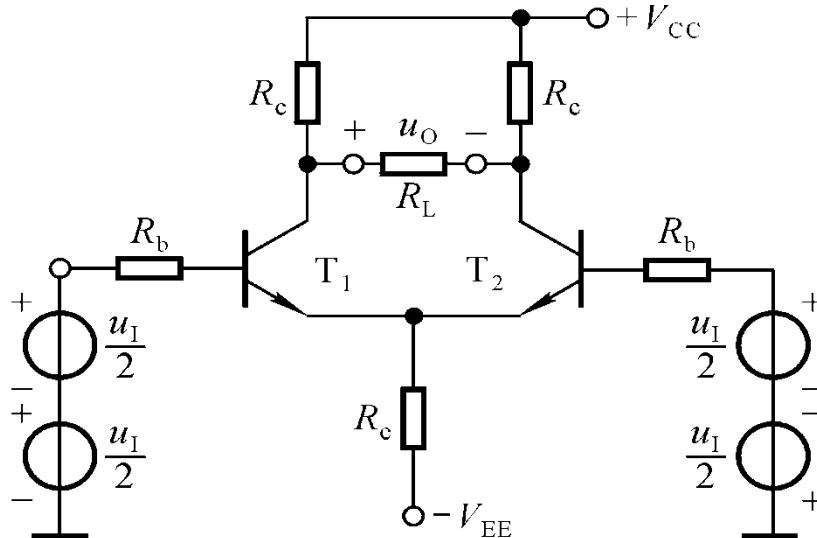
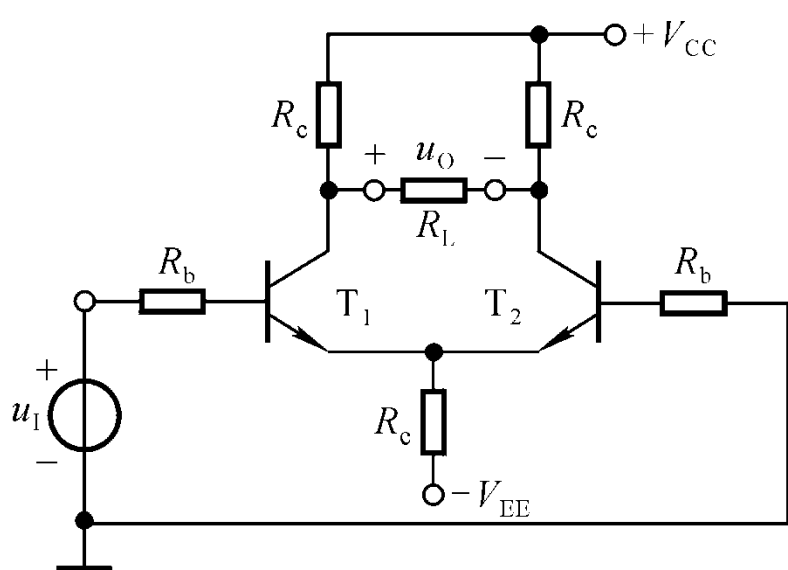


$$A_c = -\frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$



3. 单端输入双端输出

→ 输入信号分解为差模信号和共模信号



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

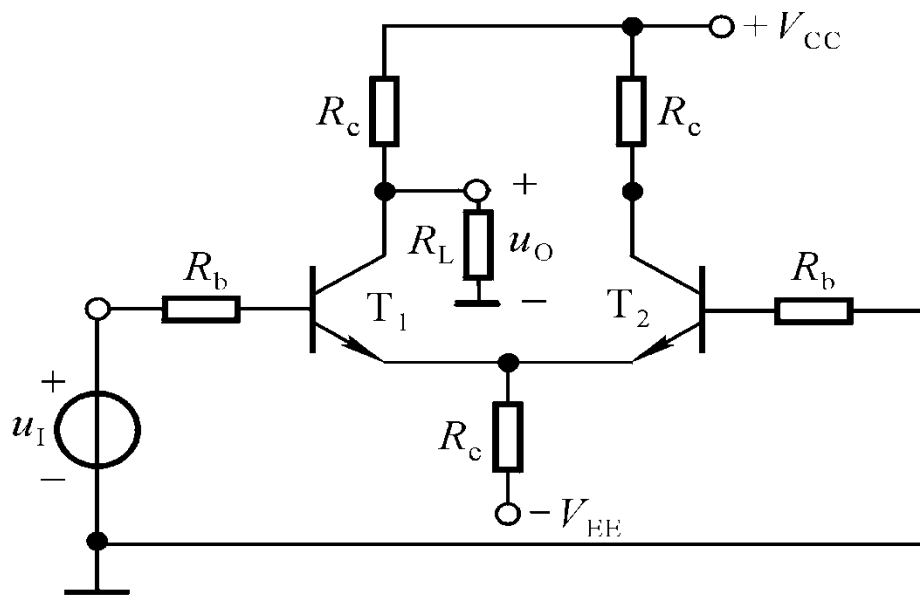
$$R_{id} = 2(R_b + r_{be})$$

$$R_o = 2R_c$$

$$A_{uc} = 0$$

单端输入时的电压放大倍数与差模输入
(双端输入) 时的电压放大倍数近似相同。

4. 单端输入单端输出



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

$$A_c \approx -\frac{(R_c // R_L)}{2R_e}$$

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

$$R_o = R_c$$

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。

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

$$A_c = 0$$

$$K_{CMR} = \infty$$

$$R_o = 2R_c$$

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

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

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

$$R_o = R_c$$

差分放大电路四种接法的性能比较

接法 性能	差分输入 双端输出	差分输入 单端输出	单端输入 双端输出	单端输入 单端输出
A_d	$-\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R + r_{be}}$	$-\frac{1}{2} \frac{\beta(R_c // R_L)}{R + r_{be}}$	$-\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R + r_{be}}$	$-\frac{1}{2} \frac{\beta(R_c // R_L)}{R + r_{be}}$
K_{CMR}	很高	较高	很高	较高
R_{id}	$2(R + r_{be})$	$2(R + r_{be})$	$\approx 2(R + r_{be})$	$\approx 2(R + r_{be})$
R_o	$2R_c$	R_c	$2R_c$	R_c

差分放大电路四种接法的性能比较

接法 性能	差分输入 双端输出	差分输入 单端输出	单端输入 双端输出	单端输入 单端输出
特 性	<p>1. A_d 与单管放大电路基本相同。</p> <p>2. 在理想情况下，$K_{CMR} \rightarrow \infty$。</p> <p>3. 适用于差分输入、双端输出，输入信号及负载的两端均不接地的情况。</p>	<p>1. A_d 约为双端输出时的一半。</p> <p>2. 由于引入共模负反馈，仍有较高的 K_{CMR}。</p> <p>3. 适用于将双端输入转换为单端输出。</p>	<p>1. A_d 与单管放大电路基本相同。</p> <p>2. 在理想情况下，$K_{CMR} \rightarrow \infty$。</p> <p>3. 适用于将单端输入转换为双端输出。</p>	<p>1. A_d 约为双端输出时的一半。</p> <p>2. 比单管放大电路具有较强的抑制零漂的能力。</p> <p>3. 适用于输入、输出均要求接地的情况。</p> <p>4. 选择不同管子输出，可使输出电压与输入电压反相或同相。</p>

五、具有恒流源的差分放大电路

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

$$A_c \approx -\frac{(R_c // R_L)}{2R_e}$$

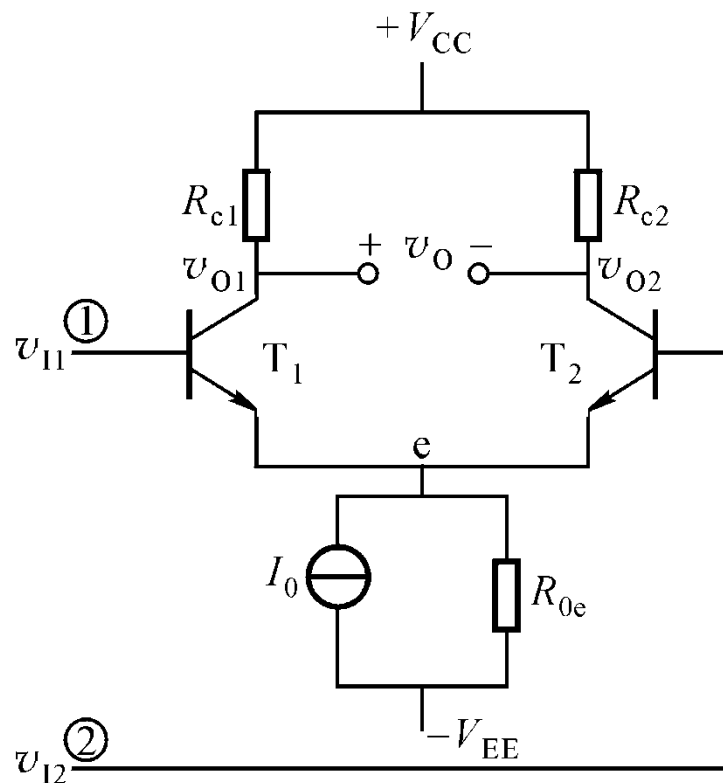
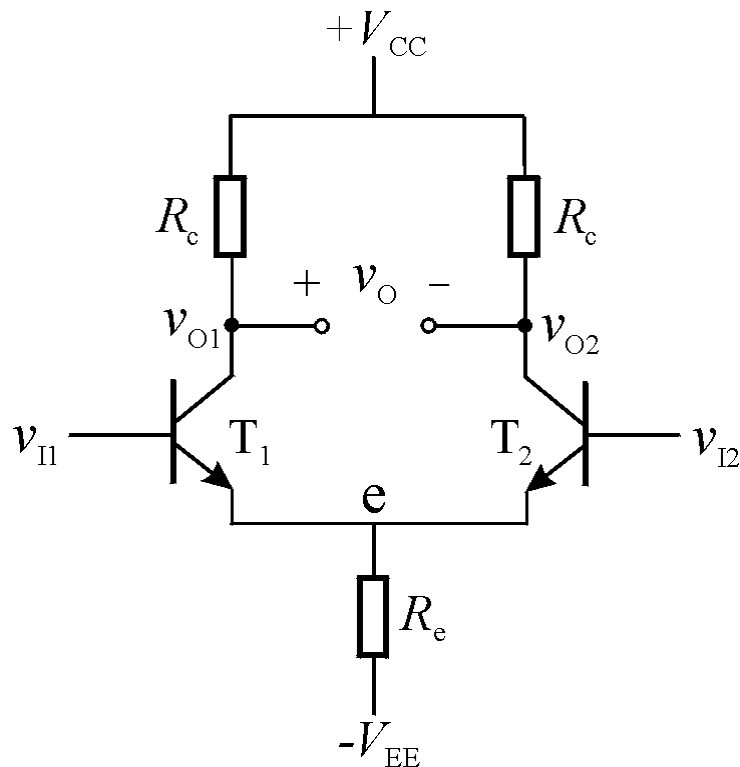
R_e 越大，每一边的漂移越小，共模负反馈越强，单端输出时的 A_c 越小， K_{CMR} 越大，差分放大电路的性能越好。

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 ！

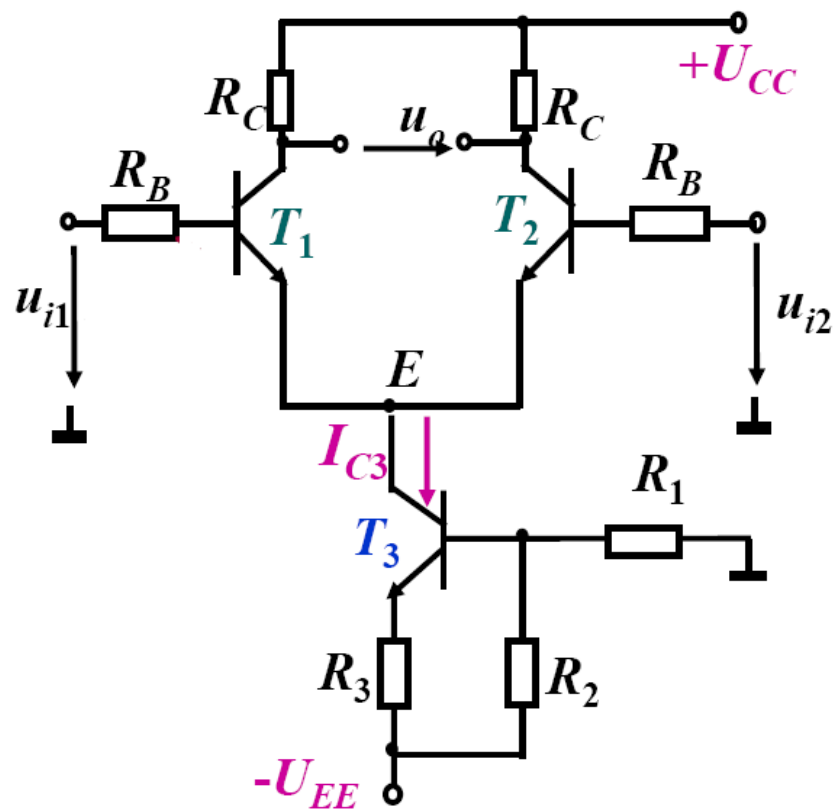
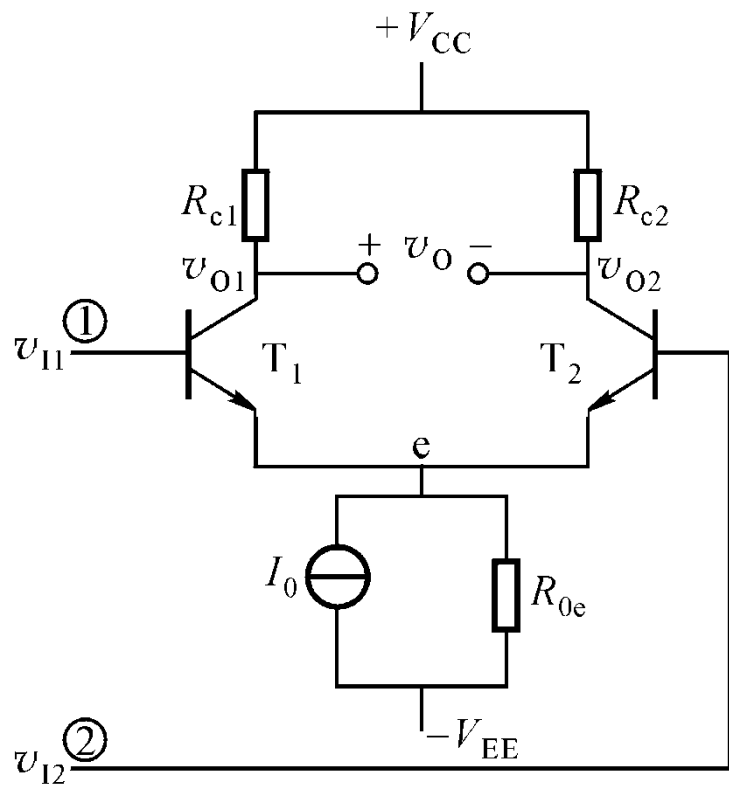
为提高共模抑制比，增大 R_e



$$A_{vc1} = \frac{\Delta v_{Oc1}}{\Delta v_{Ic}} = - \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) 2R_e}$$

引入恒流源概念！

实际电流源偏置电路

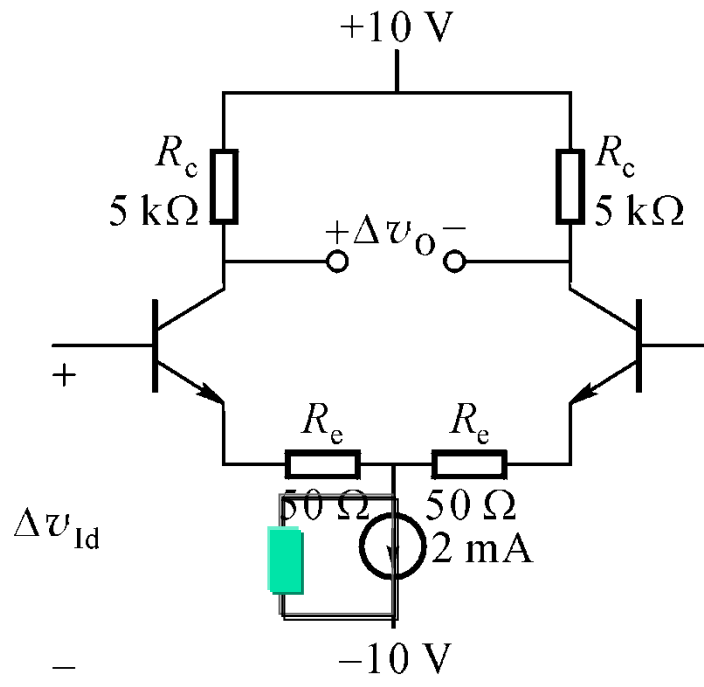


$$R_{oe} \approx \left(1 + \frac{\beta R_3}{r_{be3} + R_3} \right) r_{ce3}$$

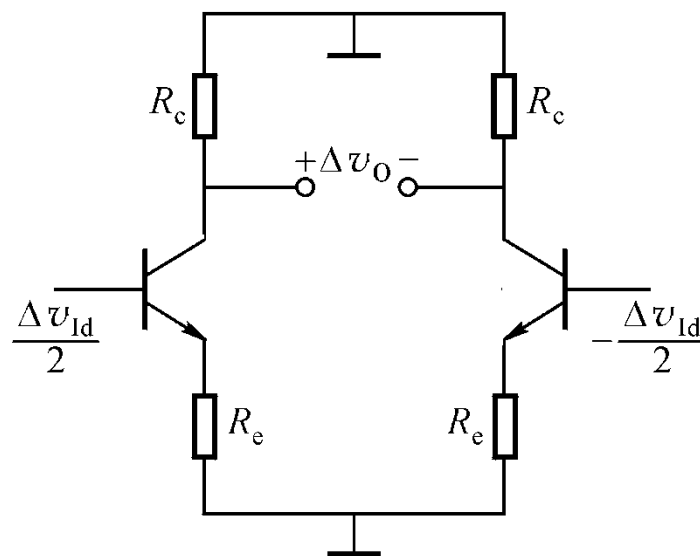
$$I_2 \gg I_{B3}, \quad I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{EE} - U_{BEQ}}{R_3}$$

【例1】

差分放大电路如图所示，已知 $\beta=80$ ， $r_{be}=2\text{k}\Omega$ 。求该电路的差模电压放大倍数 A_{vd} 、差模输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

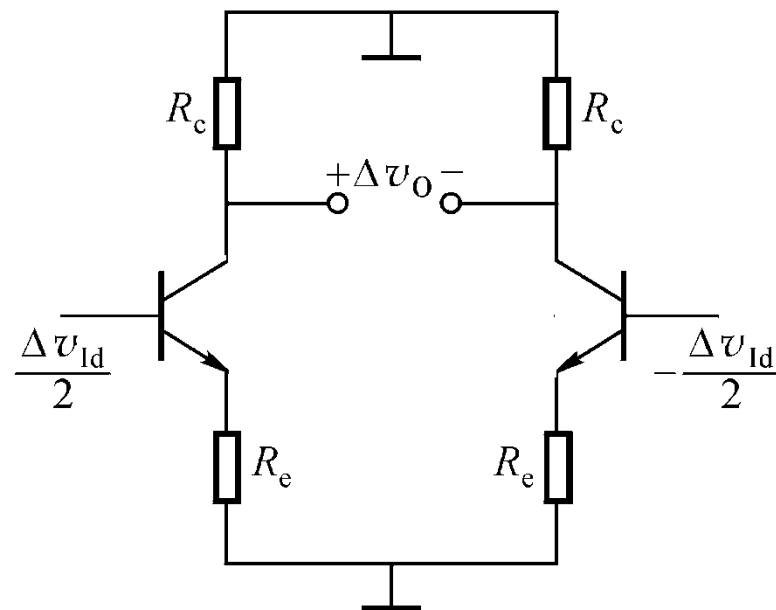


注意：电阻 R_e 串入射极回路，放大倍数计算相当于有 R_e 电阻的共射放大电路。



$$\begin{aligned}
 A_{vd} &= \frac{\Delta v_{Od}}{\Delta v_{Id}} = \frac{-2\Delta i_C R_c}{2[\Delta i_B r_{be} + \Delta i_C R_e]} \\
 &= \frac{-2\beta\Delta i_B R_c}{2[\Delta i_B r_{be} + (1 + \beta)\Delta i_B R_e]} \\
 &= -\frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \\
 &= -\frac{80 \times 5}{2 + 81 \times 0.05} = -66.1
 \end{aligned}$$

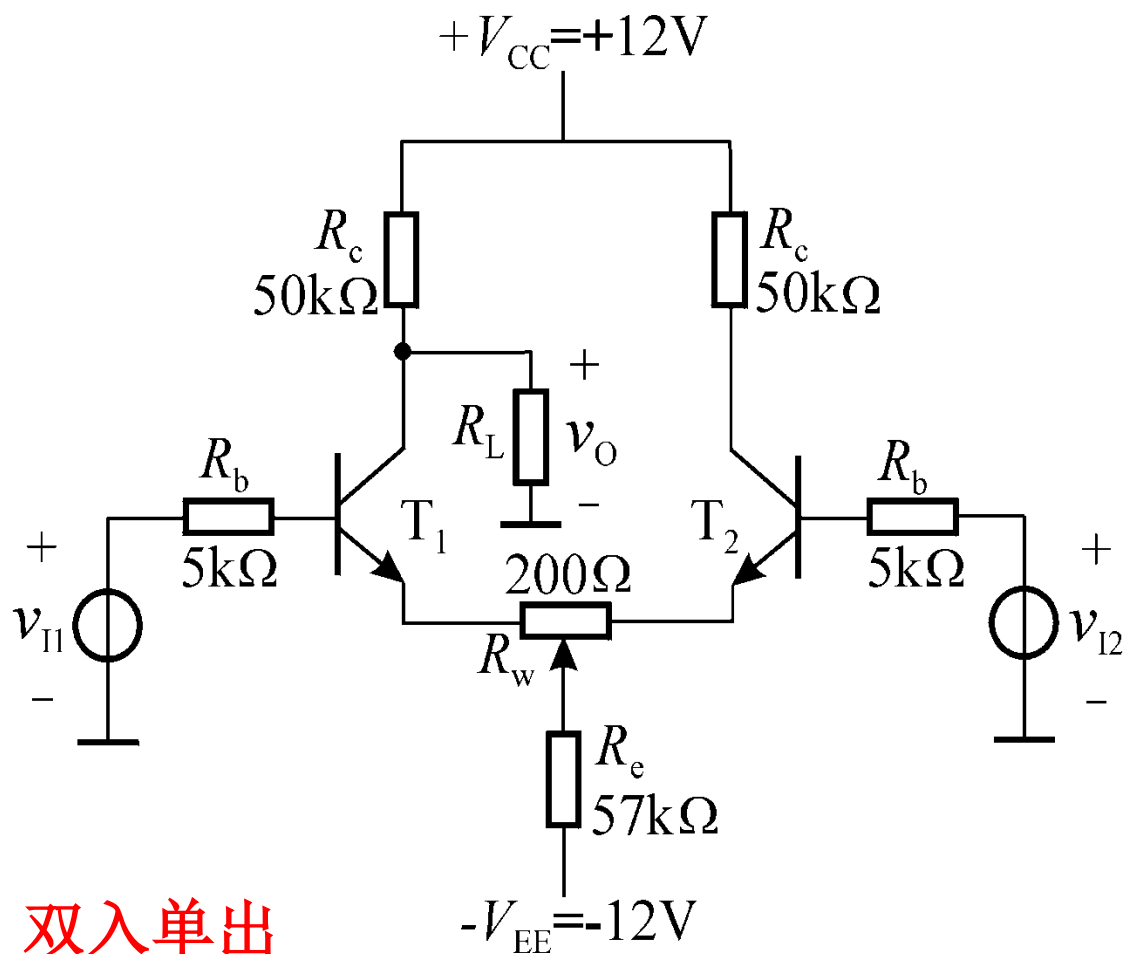
$$\begin{aligned}
 R_{id} &= \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = 2[r_{be} + (1 + \beta)R_e] \\
 &= 2 \times (2 + 81 \times 0.05) = 12.1k\Omega
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 R_o &= \left. \frac{\Delta v'_O}{\Delta i'_O} \right|_{\substack{R_L = \infty \\ \Delta v_{Id} = 0}} \\
 &= 2R_c = 10k\Omega
 \end{aligned}$$

【例2】 电路如图所示，已知 $\beta=80$ ， $r_{bb}'=100\Omega$ ， R_w 在中间位置， $R_L=50k\Omega$ ，求：

1. I_{CQ}, V_{OQ} ;
2. A_{vd}, R_{id}, R_o ;
3. K_{CMR}
4. 若 $\Delta v_{I1}=16mV$ ， $\Delta v_{I2}=10mV$ ，求 Δv_{O1} 。



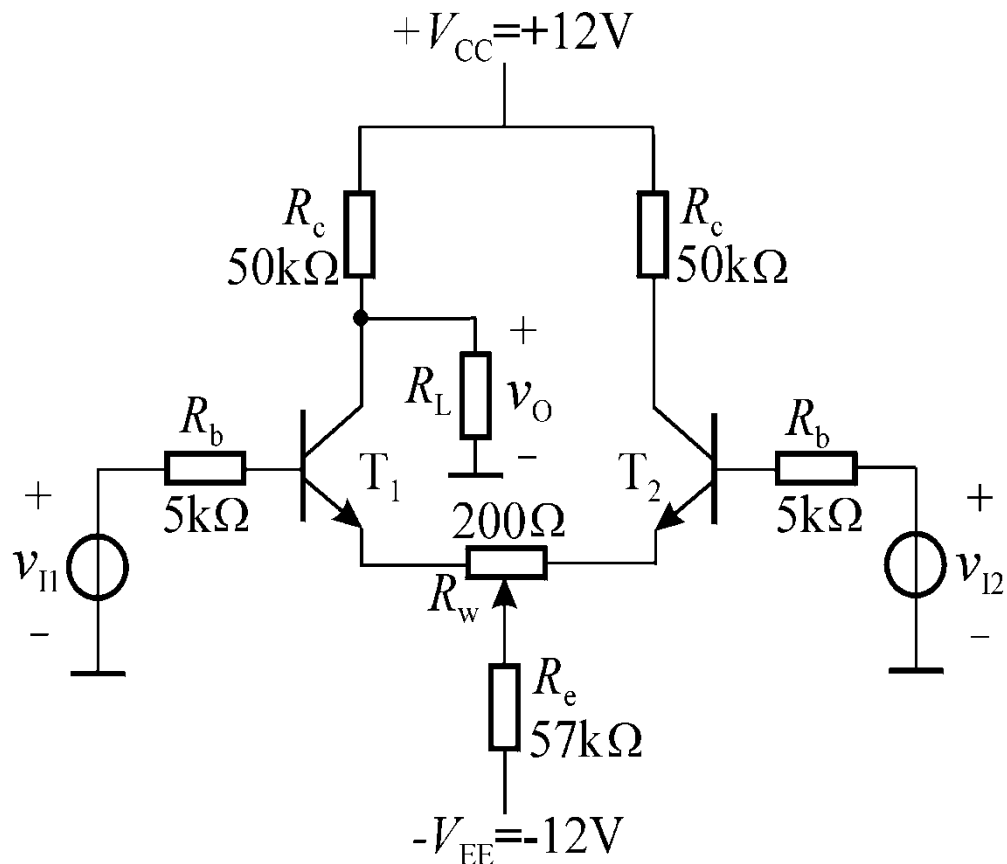
解： (1)静态分析：

$$I_{BQ}R_b + V_{BE} + I_{EQ} \frac{R_w}{2} + 2I_{EQ}R_e - V_{EE} = 0$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{\frac{R_b}{1+\beta} + \frac{R_w}{2} + 2R_e}$$

$$= \frac{12 - 0.7}{\frac{5}{81} + 0.1 + 2 \times 57} = 0.1 \text{mA}$$

$$V_{OQ} = \frac{R_L}{R_c + R_L} V_{CC} - I_{CQ}(R_c // R_L) = \frac{50}{50 + 50} \times 12 \text{V} - 0.1 \times 25 = 3.5 \text{V}$$



(2) 求 A_{vd} 、 R_i 和 R_o ;

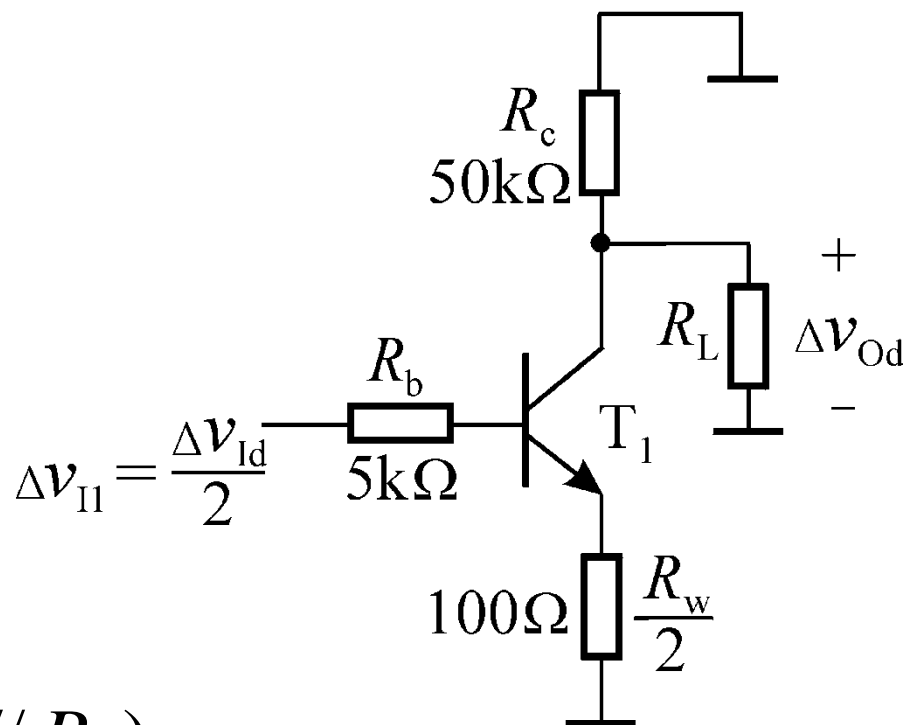
$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}}$$

$$= 100\Omega + 81 \times \frac{26}{0.1} \Omega$$

$$\approx 21.2\text{k}\Omega$$

$$A_{vd} = \frac{\Delta v_{Od}}{\Delta v_{Id}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{-\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta)R_w/2}$$

$$= -\frac{80 \times (50 // 50)}{2 \times (5 + 21.2 + 81 \times 0.1)} = -29.2$$

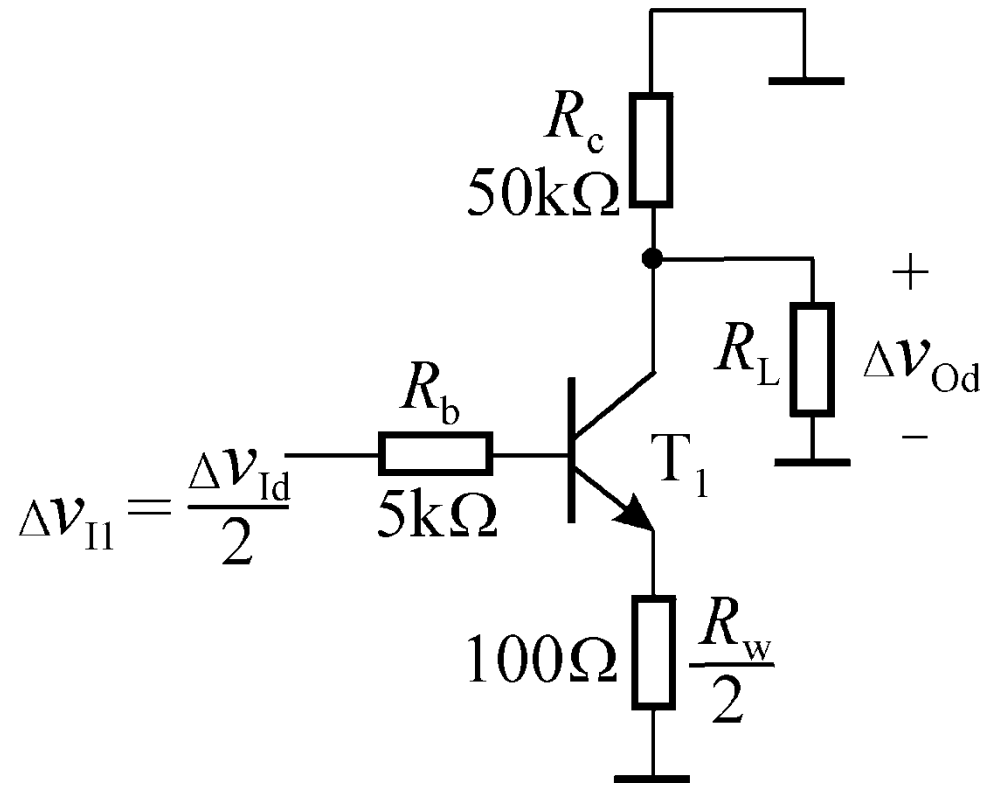


双入单出

$$\begin{aligned}
 R_{id} &= 2[R_b + r_{be} + (1 + \beta) \times R_w / 2] \\
 &= 2 \times (5 + 21.2 + 81 \times 0.1) \\
 &= 68.6 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

双入单出

$$R_o = R_c = 50 \text{ k}\Omega$$



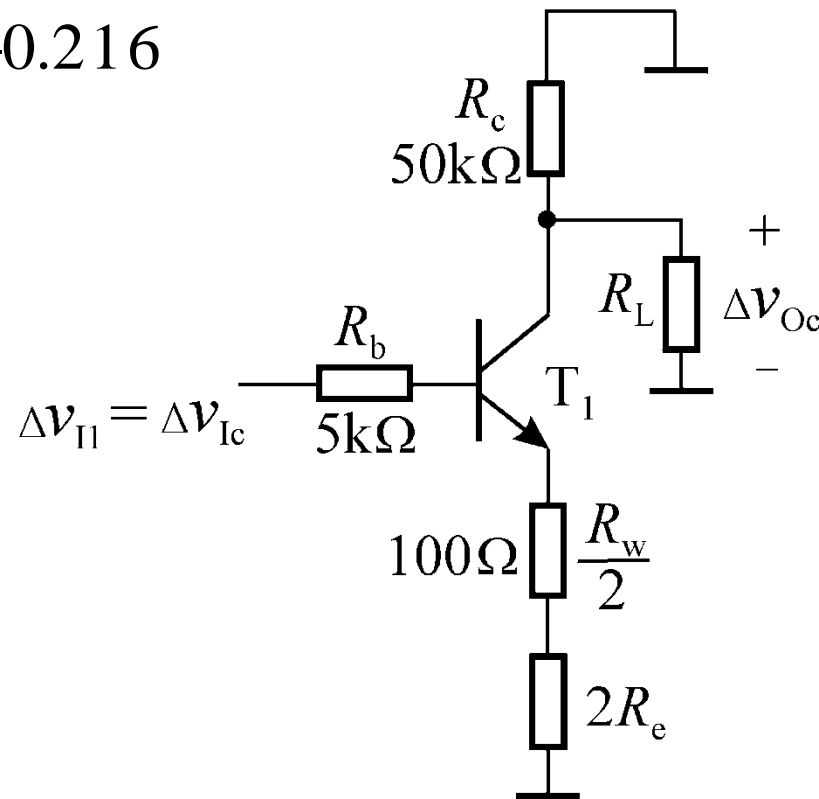
(3) 求共模抑制比 K_{CMR} ;

$$A_{vc} = \frac{\Delta v_{Oc}}{\Delta v_{Ic}} = - \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta)(R_w / 2 + 2R_e)}$$

$$= - \frac{80 \times 25}{5 + 21.2 + 81 \times (2 \times 57 + 0.1)} \approx -0.216$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| = \frac{29.2}{0.216} = 135 (\text{即 } 42.6\text{dB})$$

双入单出



(4) 若 $\Delta v_{I1}=16\text{mV}$, $\Delta v_{I2}=10\text{mV}$, 则

$$\Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2} = 6\text{mV}$$

$$\Delta v_{Ic} = \frac{\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}}{2} = 13\text{mV}$$

$$\Delta v_O = A_{vd} \cdot \Delta v_{Id} + A_{vc} \cdot \Delta v_{Ic}$$

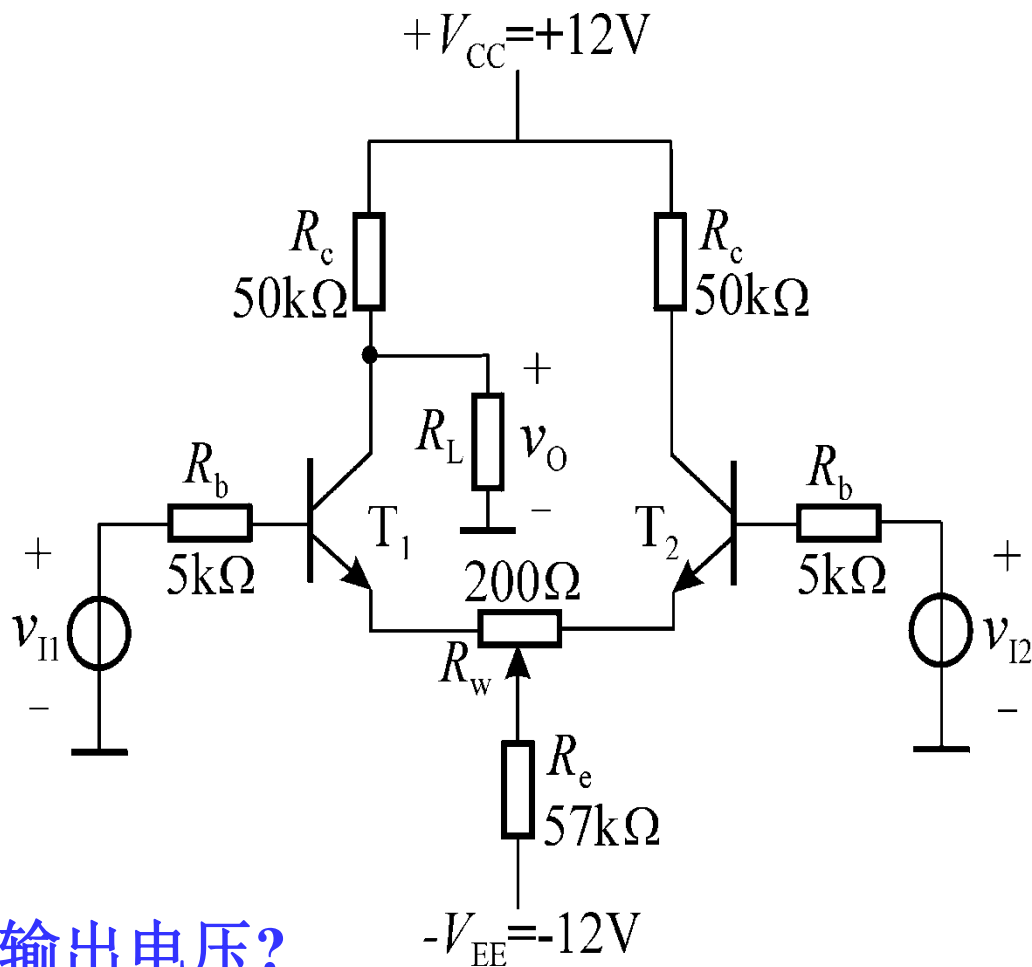
$$= -29.2 \times 6\text{mV} +$$

$$(-0.216) \times 13\text{mV}$$

$$\approx -178\text{mV}$$

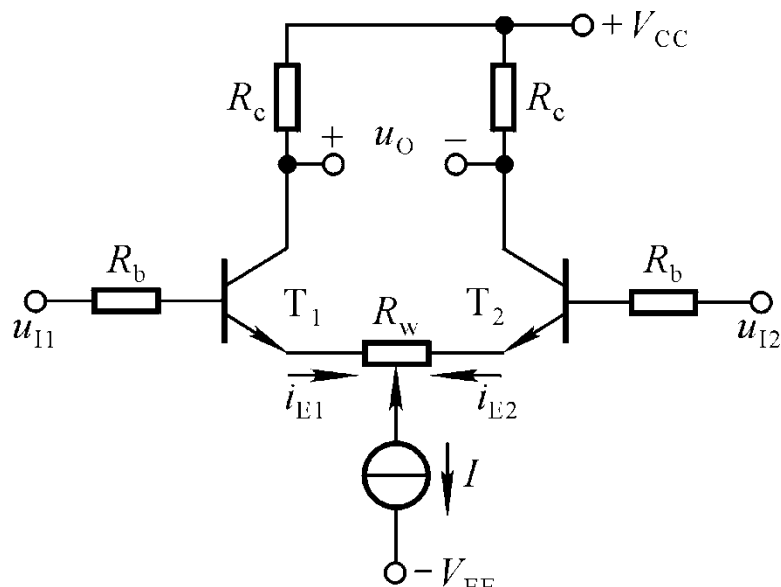
😊 注意相位!

若把 R_L 接在 T_2 端, 输出电压?



讨论一 差分放大电路的改进

1. 加调零电位器 R_W



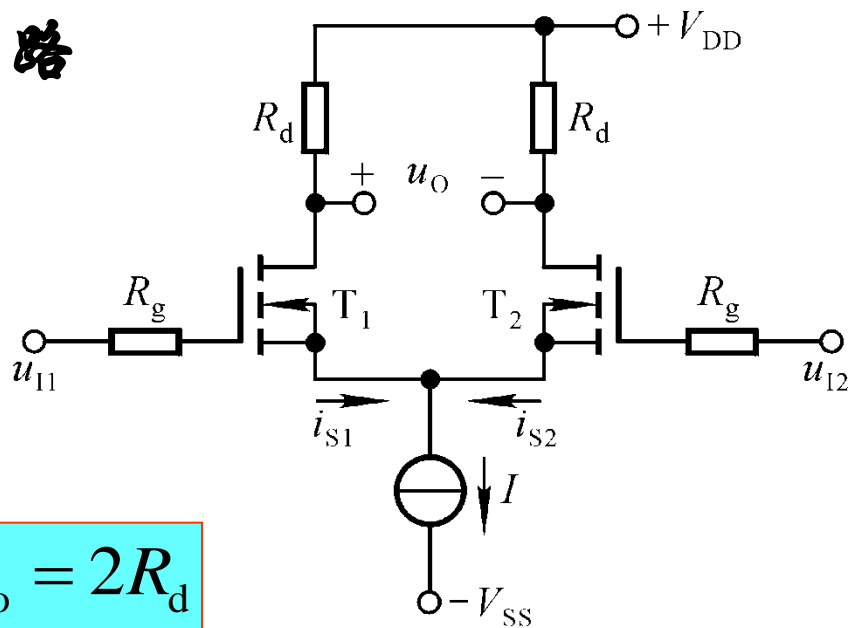
- 1) R_W 取值应大些？还是小些？
- 2) R_W 对动态参数的影响？
- 3) 若 R_W 滑动端在中点，写出 A_d 、 R_i 的表达式。

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

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

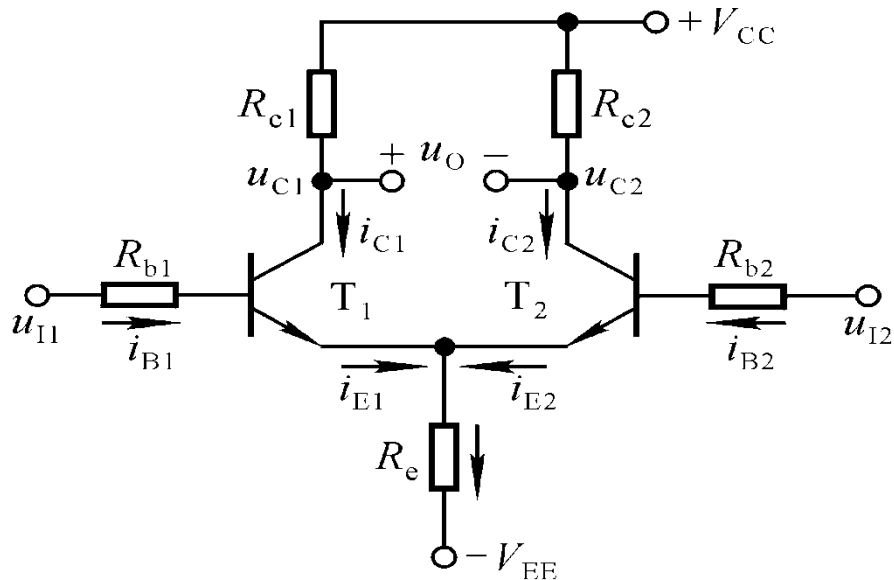
讨论一 差分放大电路的改进

2. 场效应管差分放大电路



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

讨论二

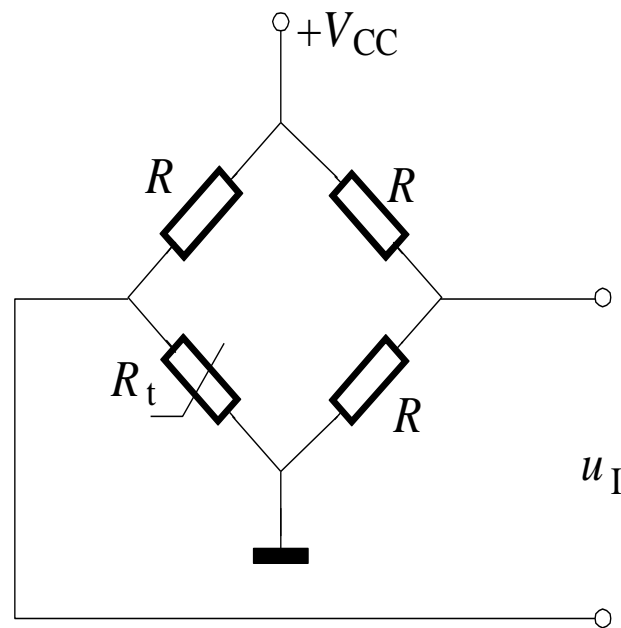


若 $u_{I1}=10\text{mV}$, $u_{I2}=5\text{mV}$, 则
 $u_{Id}=?$ $u_{Ic}=?$

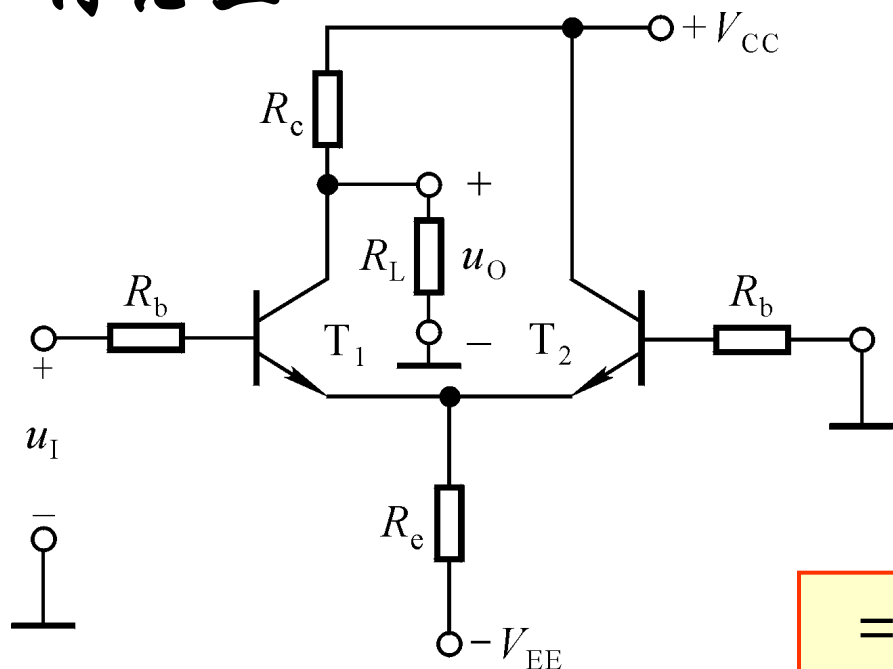
$u_{Id}=5\text{mV}$, $u_{Ic}=7.5\text{mV}$

若将电桥的输出作为差放的输入, 则其共模信号约为多少?

$$\left(\frac{R_t}{R + R_t} V_{CC} + \frac{V_{CC}}{2} \right) / 2$$



讨论三



- 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 ， $u_O=?$

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

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

=?

=?

=?

$$U_{CQ} = V_{CC} - \frac{V_{EE} - 0.7}{R_b + 2R_E(1 + \beta)} \beta R_C$$

$$u_o = -100 \times 10 - 0.1 \times 5 + U_{CQ} \quad \text{mV}$$

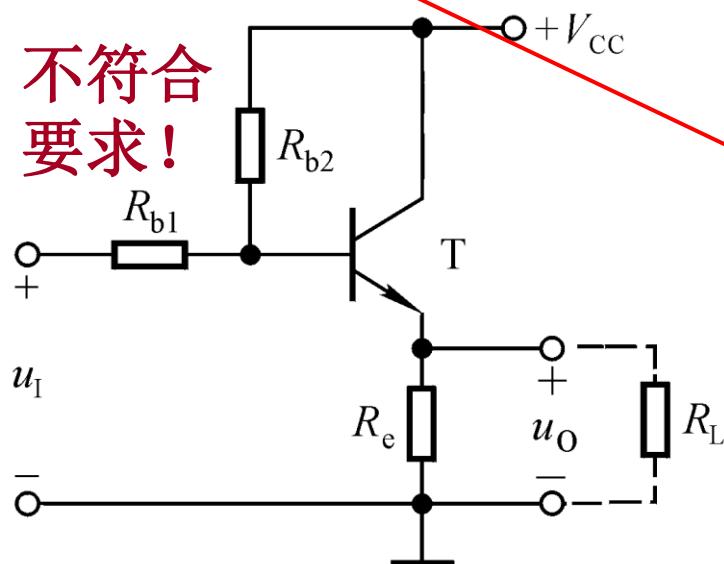
§ 1.6.3 集成运放的输出级

- 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

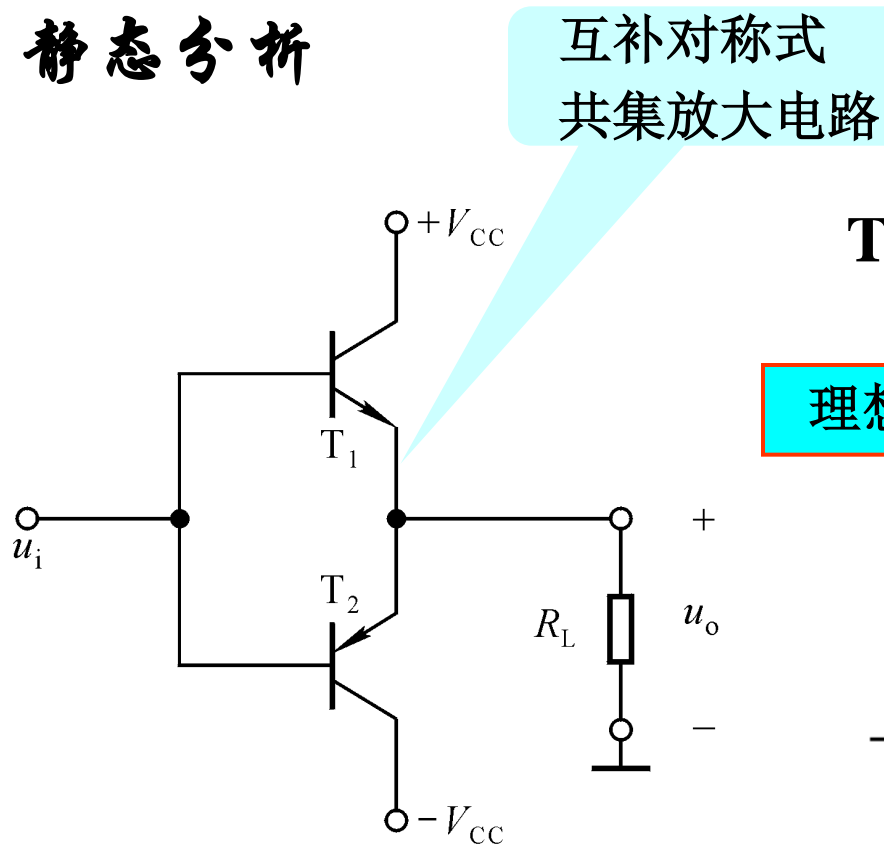
双电源供电时 U_{om} 的峰值接近电源电压。

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

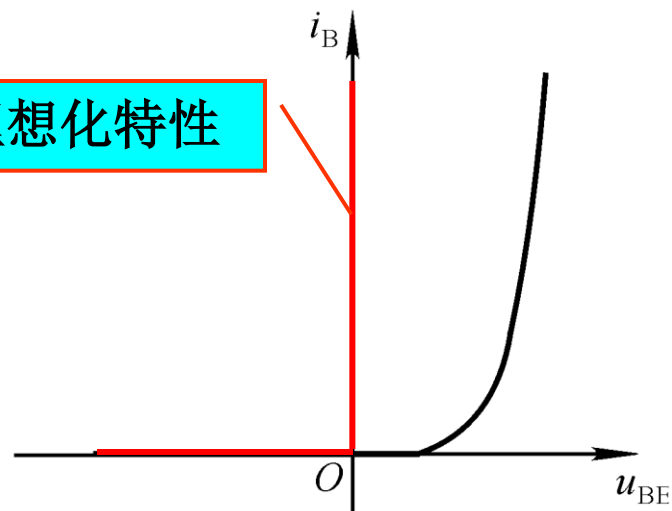
1. 特征：T₁、T₂特性理想对称。

2. 静态分析



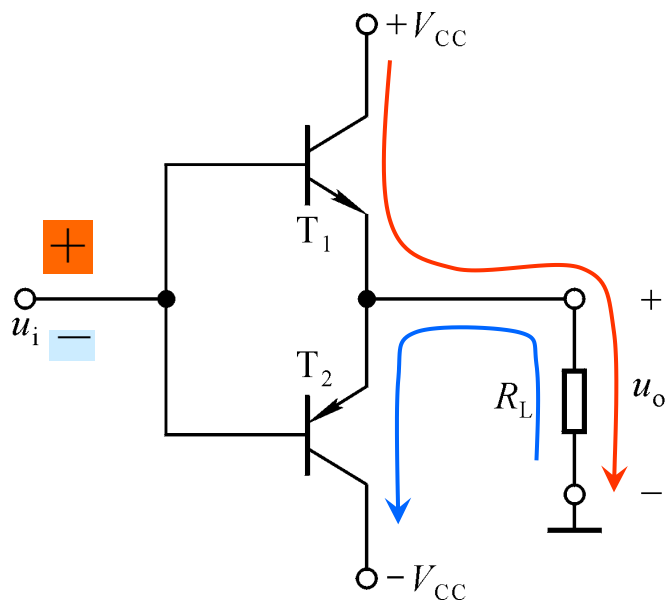
T₁的输入特性

理想化特性



静态时T₁、T₂均截止， $U_B = U_E = 0$

3. 动态分析



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

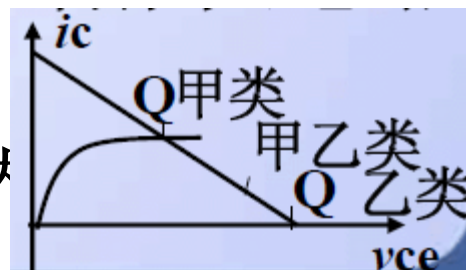
u_i 负半周，电流通路为
 $\text{地} \rightarrow R_L \rightarrow T_2 \rightarrow -V_{CC}$ ，
 $u_o = u_i$

两只管子交替工作，两路电源交替供电，双向跟随。

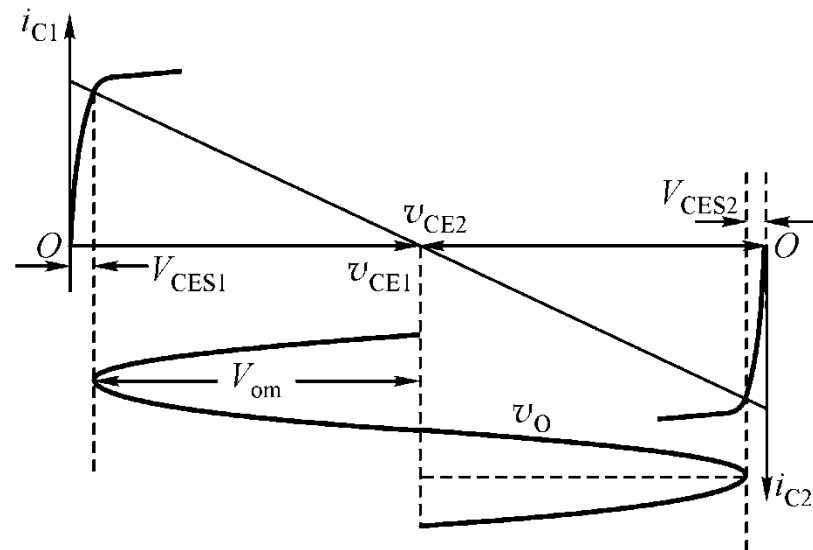
乙类放大：导通角为 $\theta = \pi$ ，或静态时管子截止；

甲类放大：导通角为 $\theta = 2\pi$ ，晶体管在整个周期内时，晶体管也完全导电；

甲乙类放大：导通角介于 π 和 2π 之间，静态时，晶体管微弱导电

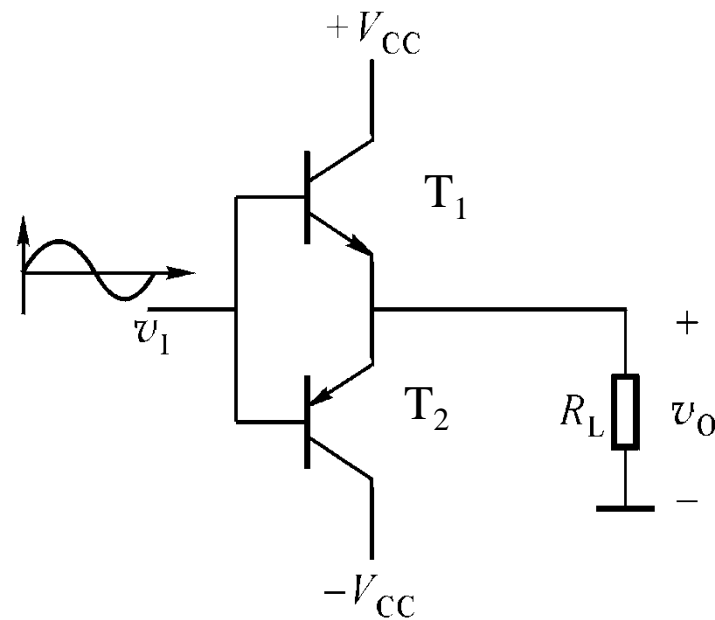


最大输出电压为 $V_{CC} - V_{CES}$ 。
 当电源电压为 $\pm 15V$ 时，
 最大不失真输出电压幅度
 一般为 $\pm (12 \sim 14)V$ 。

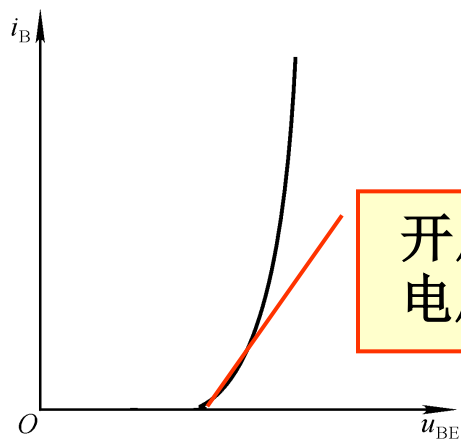
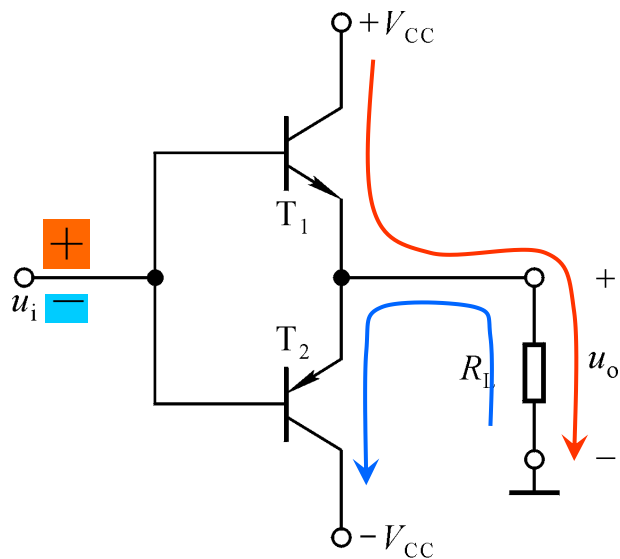


输入电阻较高

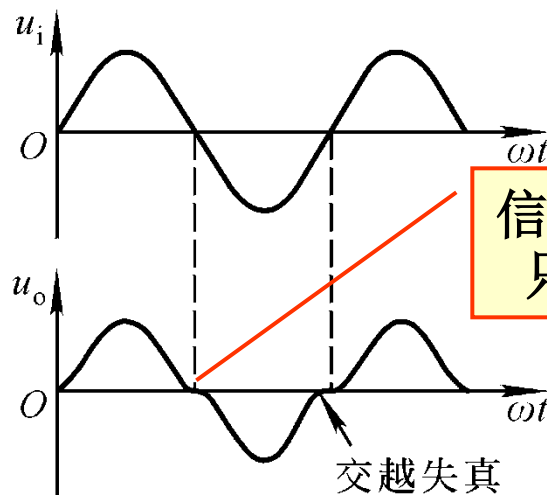
$$R_i = r_{be} + (1 + \beta)R_L$$



4. 交越失真



开启
电压



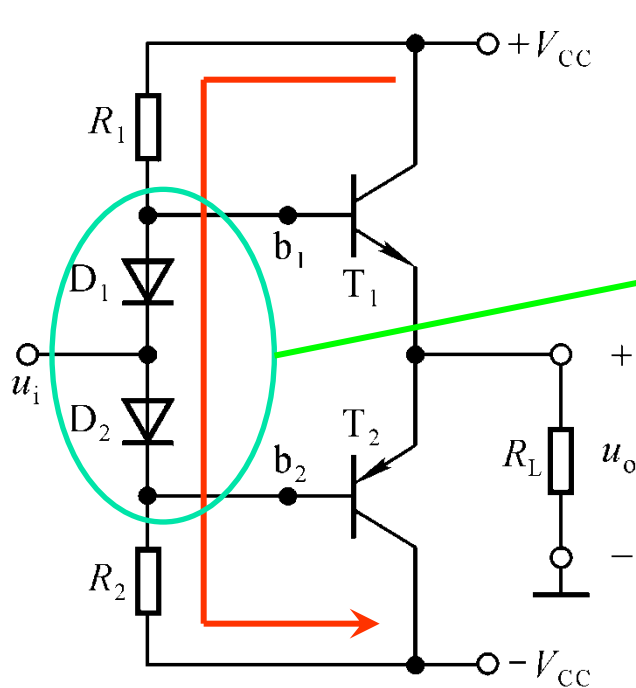
信号在零附近两
只管子均截止

交越失真

消除失真的方法：
设置合适的静态工作点。

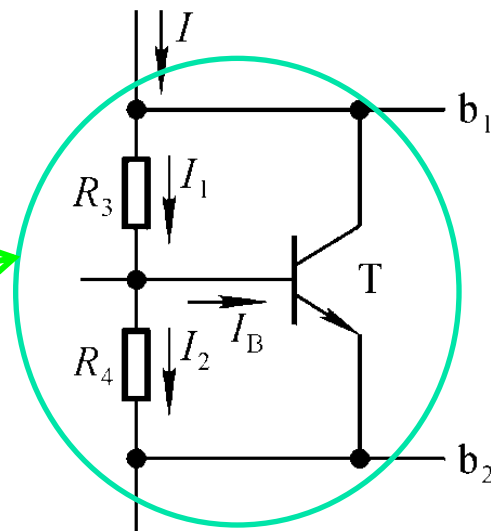
- ① 静态时 T_1 、 T_2 处于临界导通状态，有信号时至少有一只导通；
- ② 偏置电路对动态性能影响要小。

三、消除交越失真的互补输出级



静态: $U_{B1B2} = U_{D1} + U_{D2}$

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



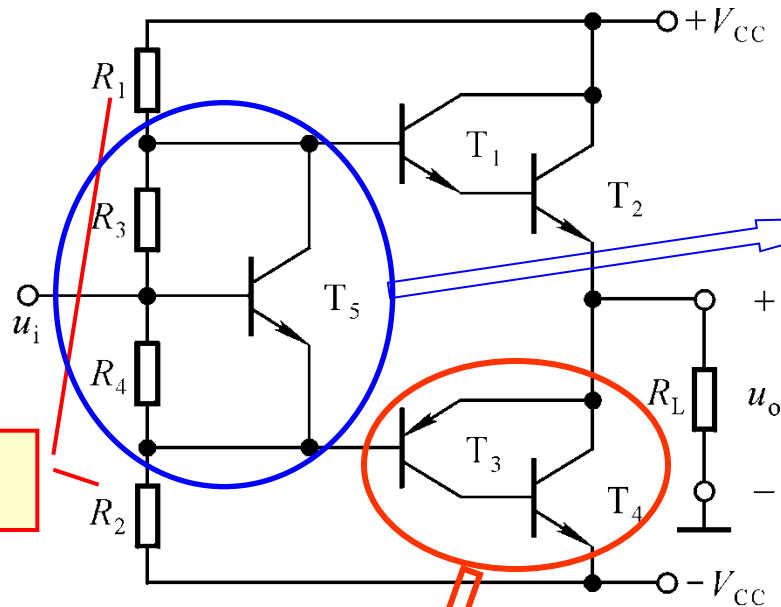
若 $I_{R2} \gg I_B$, 则

$$U_{B1B2} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot U_{BE}$$

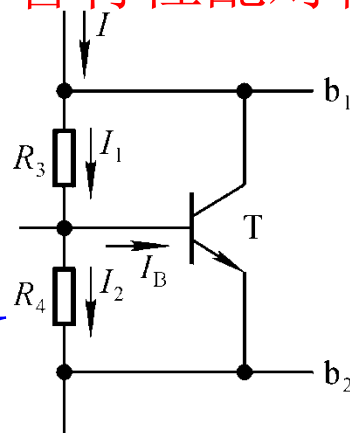
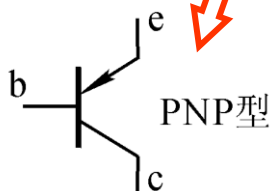
故称之为 U_{BE} 倍增电路

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。
对于大功率管，要求两只互补的功率管特性配对很困难。
T1T3小功率，T2T4大功率



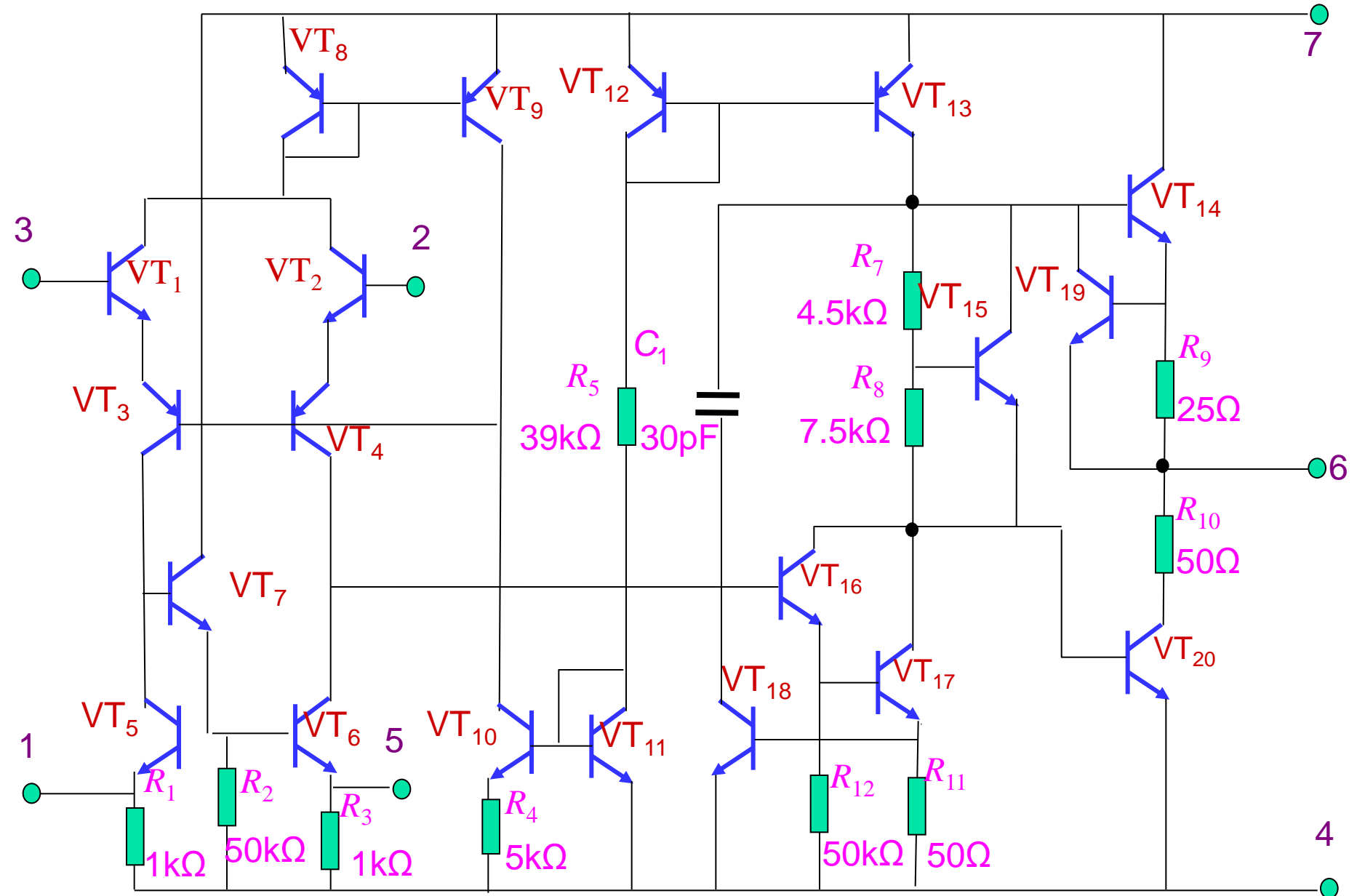
大!



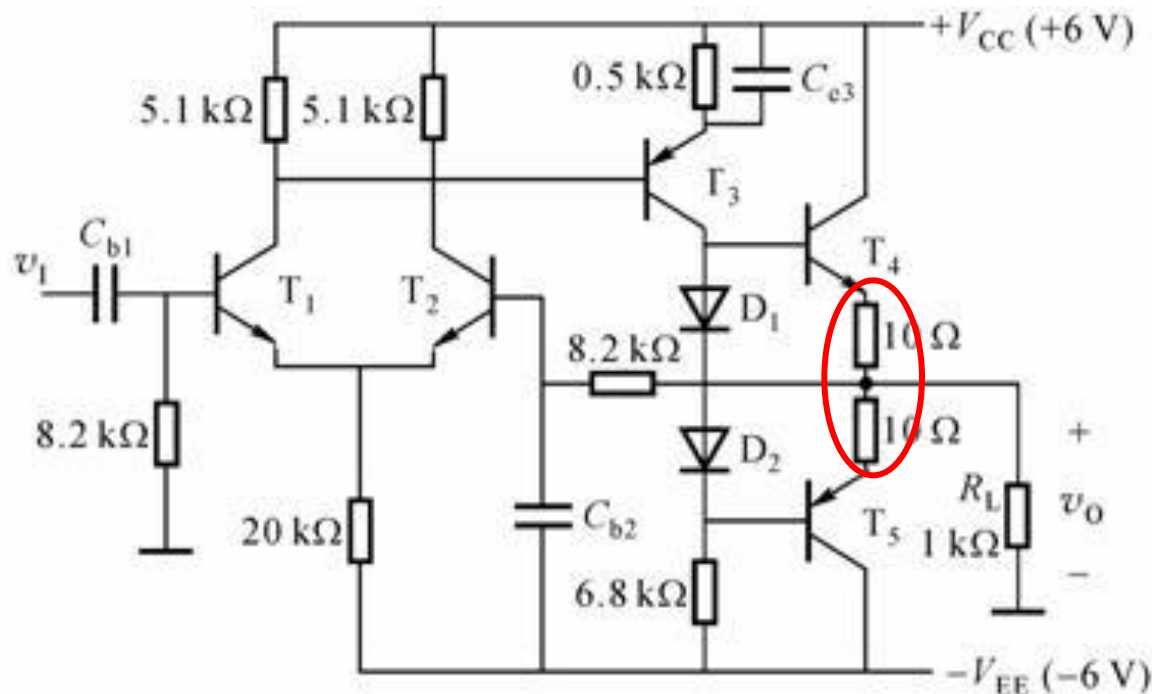
静态时: $U_{BE1} + U_{BE2} + U_{EB3}$
 $\approx (1 + \frac{R_5}{R_4}) U_{BE5}$

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

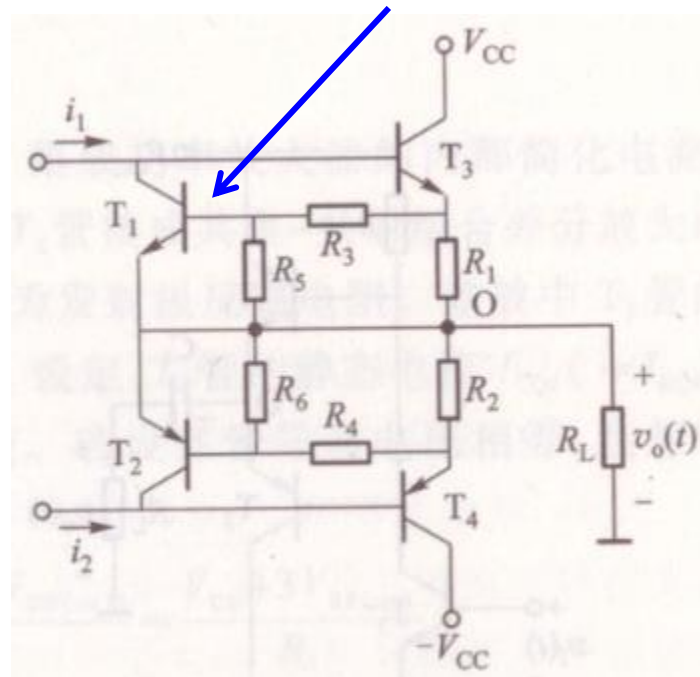
双极型集成运放LM741



1.25 三级放大电路如题图6.25所示，已知： $r_{be1} = r_{be2} = 4 \text{ k}\Omega$ ， $r_{be3} = 1.7 \text{ k}\Omega$ ， $r_{be4} = r_{be5} = 0.2 \text{ k}\Omega$ ，各管的 $\beta = 50$ 。图中所有电容在中频段均可视作短路。试画出放大电路的交流通路，计算中频电压放大倍数 \dot{A}_v ，输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。



限流电阻，当电流大时，使T1和T2管导通分流



§ 1.6.4 集成运算放大器

- 一、集成运算放大器结构与特点
- 二、集成运放基本参数
- 三、集成运放的频率特性
- 四、集成运放应用时注意事项
- 五、集成运放中电流源电路
- 六、集成运放的输入级与中间级电路
- 七*、直接耦合多级放大电路读图

一、集成运放大器结构与特点

- ▶ 通过半导体集成工艺，在很小的硅片上制成的一种高增益、直接耦合式、多级放大器。
- ▶ 最早应用于模拟信号的运算。
- ▶ 目前广泛应用于信号测量、信号处理、信号产生和变换中，是现代电子电路中最基本的组成单元。
- ▶ 技术指标有：
电压增益、输入/输出电阻、共模抑制能力、
温度/噪声系数、频率效应等。
- ▶ 在理想条件下，集成运算放大器可以等效成一个电压控制电压源（VCVS）。

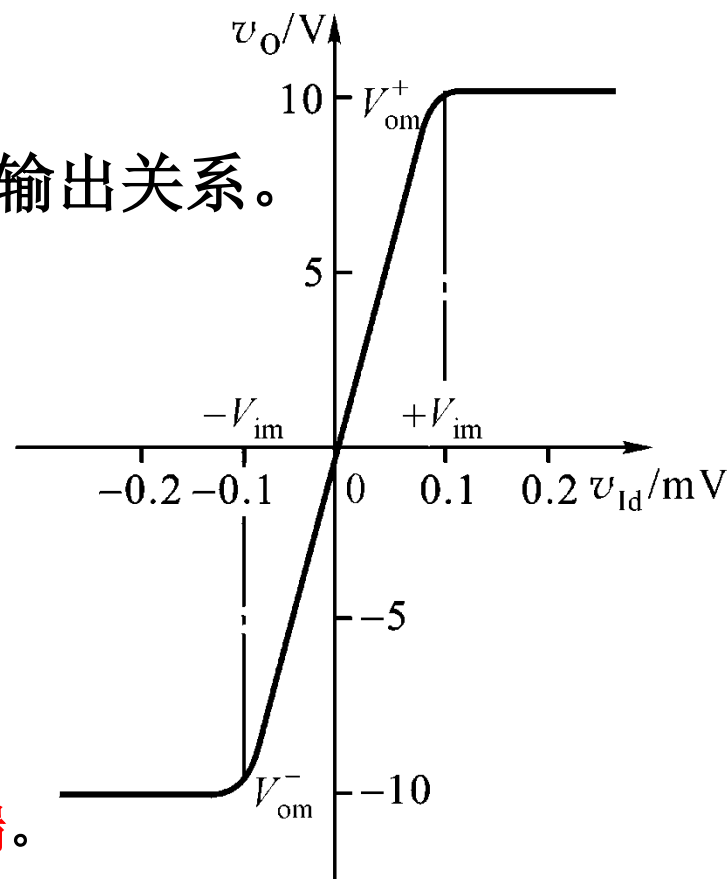
二、集成运放的主要性能指标

■ 1、集成运放的电压传输特性和三项基本参数

❖ 集成运放的电压传输曲线：

在直流或低频条件下运放的输入、输出关系。

- ✓ 在理想条件下，集成运放的电压传输特性曲线通过坐标原点。运放的电压既可以用增量（或交流量）表示，也可以用瞬时量表示。
- ✓ 实际运放的传输特性曲线不通过坐标原点，称为输出失调。为了弥补输出失调电压，通常在运放输入级电路中设置了调零端。



❖ 开环差模电压放大倍数: $A_{od} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_{Id}} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_P - \Delta v_N}$

A_{od} 一般为 $10^4 \sim 10^6$ (即80~120dB)。在手册中 A_{od} 常以/mV作单位, 如100V/mV即为 10^5 。

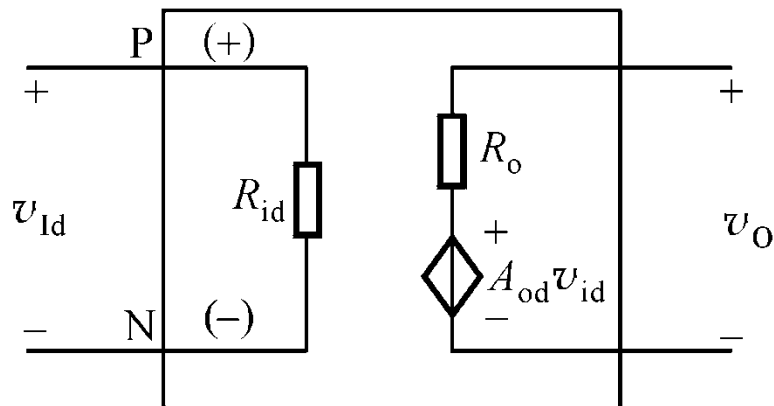
❖ 差模输入电阻: $R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = \frac{\Delta v_P - \Delta v_N}{\Delta i_{Id}}$

如CF741的 $R_{id} \approx 1\text{M}\Omega$, 高阻型运放的 R_{id} 可达104M Ω 以上。

❖ 输出电阻:

集成运放的 R_o 。通常为100 Ω 至1k Ω 之间。

❖ 集成运放的低频小信号模型:



■ 2、集成运放的失调参数

❖ 输入失调电压 V_{IO} :

集成运放在 $v_{Id} = 0$ 时的输出电压称作**输出失调电压**，记作 V_{OO} 。
为使输出电压回零，需在输入端加**反向补偿电压**，称为**输入失调电压**。

❖ 输入失调电压温漂 dV_{IO}/dT :

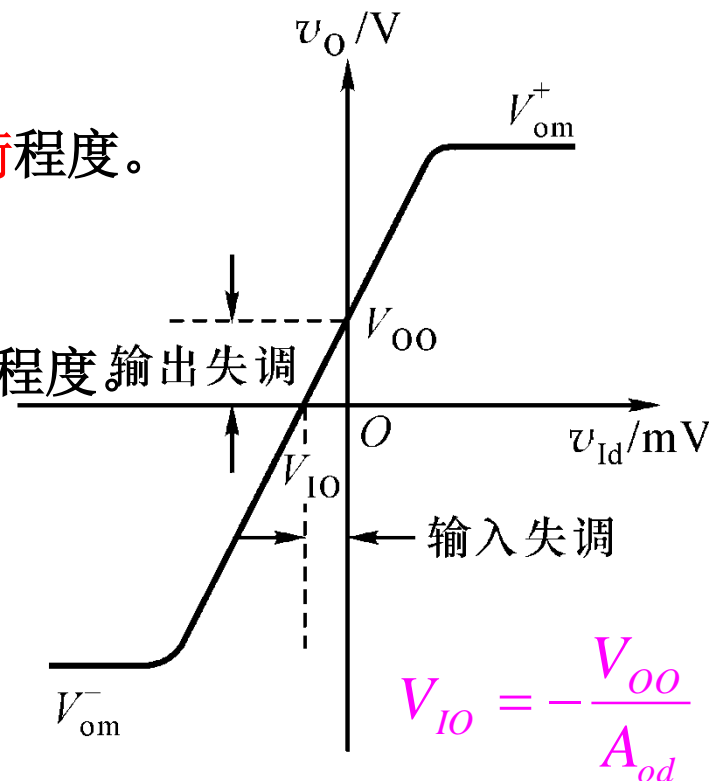
输入失调电压的温度系数，反映输入失调电压随温度而变化的程度。

❖ 输入失调电流 I_{IO} :

反映集成运放**输入端输入电流的不平衡**程度。

❖ 输入失调电流温漂 dI_{IO}/dT :

反映输入失调电流 I_{IO} 随温度而变化的程度



❖ 分析输出失调模型

❖ 输入失调电流

$$I_{IO} = (|I_{BP} - I_{BN}|)$$

❖ 输入偏置电流

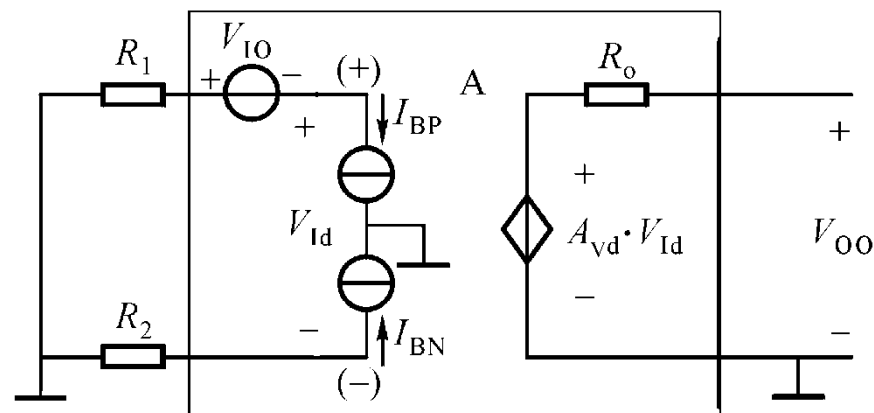
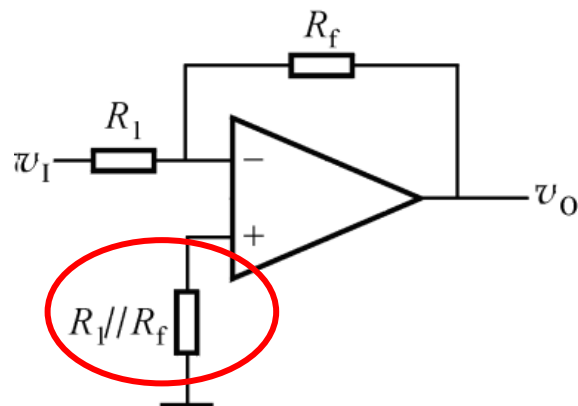
$$I_{IO} = 0.5 (|I_{BP} + I_{BN}|)$$

消除输入偏置电流



$$R_1 = R_2$$

$$V_{OO} = A_{vd} \cdot V_{Id}$$



$$V_{Id} = I_{BN} R_2 + I_{BP} R_1 - V_{IO}$$

$$= -V_{IO} - \left[(R_1 - R_2) I_{IB} + (R_1 + R_2) \frac{I_{IO}}{2} \right]$$

$$= -A_{vd} V_{IO} - A_{vd} \left[(R_1 - R_2) I_{IB} + (R_1 + R_2) \frac{I_{IO}}{2} \right]$$

输入端短路，运放也会工作在饱和

■ 3、集成运放的共模参数

❖ 共模抑制比: $K_{CMR} = \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right|$

正常放大差模情况下，
允许的最大共模输入

❖ 最大共模输入电压 V_{Icmax} :

当共模输入电压超出 V_{Icmax} 时，将影响运放电路中相关晶体管的工作状态。
运放失去正常的差模放大能力。

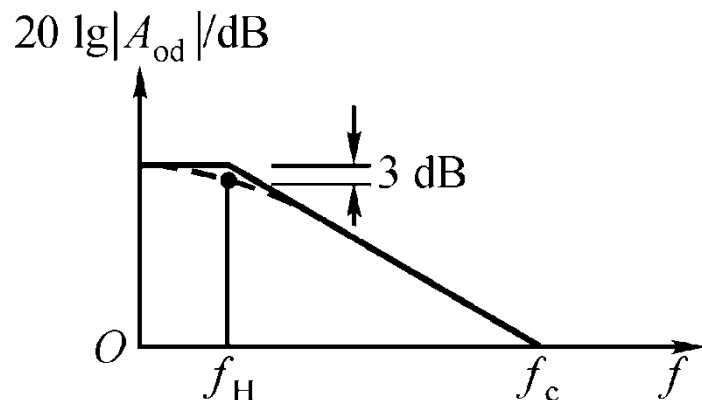
❖ 共模输入电阻: $R_{ic} = \left| \frac{\Delta v_{ic}}{\Delta i_{ic}} \right|$

■ 4、集成运放的频域和时域参数

❖ -3dB带宽 f_H : $BW = f_H - f_L = f_H$

❖ 单位增益带宽 : $f_c \approx A_{od} \cdot f_H$

指运放差模开环电压增益 A_{od} 下降至**0 dB**时的频率。



❖ 转换速率 SR (也称压摆率) : $SR = \left| \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max}$

是衡量运放在大幅度信号作用下**工作速度**的参数。

❖ 全功率带宽 f_p :

表示当运放输出较大幅度电压时，
为保证输出波形不产生因 SR 为有限值而引起的波形失真，
运放所能工作的最高频率。

例：集成运放的主要性能指标

指标参数	20lg A _{od}	741典型值	理想值
■ 开环差模增益 A _{od}		106dB	∞
■ 差模输入电阻 r _{id}	使u _O 为0在输入端所加的补偿电压		
■ 共模抑制比 K _{CMR}		90dB	∞
■ 输入失调电压 U _{IO}		1mV	0
■ U _{IO} 的温漂 d U _{IO} /dT(°C)		几μV/°C	0
■ 输入失调电流 I _{IO} (I _{BP} - I _{BN})		超过此值不能正常放大差模信号	
■ 输入偏置电流 I _{IB} =0.5 (I _{BP} + I _{BN})		超过此值输入级放大管击穿	
■ 最大共模输入电压 U _{Icmax}		±30V	
■ 最大差模输入电压 U _{Idmax}			
■ -3dB带宽 f _H		10Hz	∞
■ 转换速率 SR(=du _O /dt _{max})		0.5V/μS	∞

四、集成运放应用时注意事项

❖ 运放类型：

- ① **通用型**：其性能指标适合于一般性使用，产品量大面广；
- ② **低功耗型**：静态功耗在 1mw 左右，可用于便携设备；
- ③ **高精度型**：失调电压温漂在 $1\mu\text{V}$ 以下；
- ④ **高速型**：转换速率在 $10\text{V}/\mu\text{s}$ 左右；
- ⑤ **高阻型**：输入电阻在 $10^{12}\Omega$ 左右；
- ⑥ **宽带型**：单位增益带宽在 10MHz 左右；
- ⑦ **高压型**：允许供电电压在 $\pm 30\text{V}$ 以上；
- ⑧ **功率型**：允许的供电电压较高可输出电流较大；
- ⑨ **跨导型**：输入量为电压，输出为电流；
- ⑩ **差动电流型**：输入为差分电流，输出为电压；
- ⑪ **其它**：如**程控型**、**电压跟随型**等。

❖ 选择集成运放时需要注意的问题：

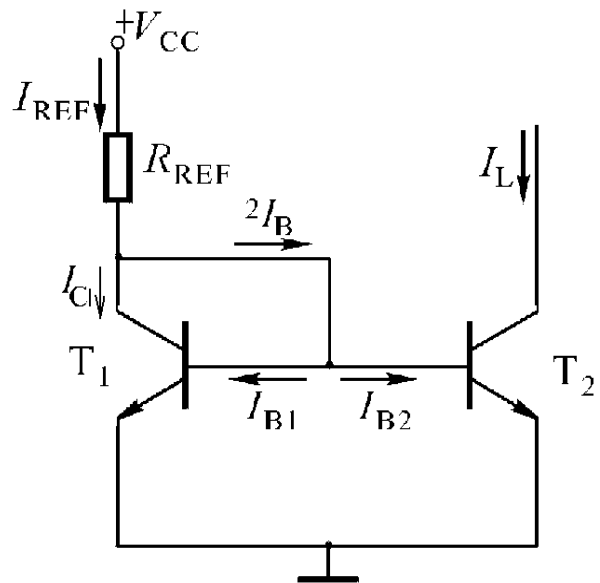
应根据输入信号的性质、负载的性质、
对运放精度的要求、环境条件等情况选择。

- ✓ 不要盲目追求指标先进；
- ✓ 应尽量选择通用型运放；
- ✓ 应考虑能避免冲击电压和电流的保护措施；
- ✓ 要注意单元之间的输出电平配合问题；
- ✓ 要注意性能指标的测量条件；
- ✓ 在弱信号条件下使用时，应注意噪声系数不能太大。

五、集成运放中的电流源

1、基本镜像电流源

当 $\beta \geq 50$ 时, I_L 与 I_{REF} 的误差 $< 5\%$ 。



该电路具有一定的温度补偿作用

T_1 和 T_2 参数和特性完全相同, T_1 管的 $V_{CE} = V_{BE} = 0.7V$, 保证不进入饱和区。

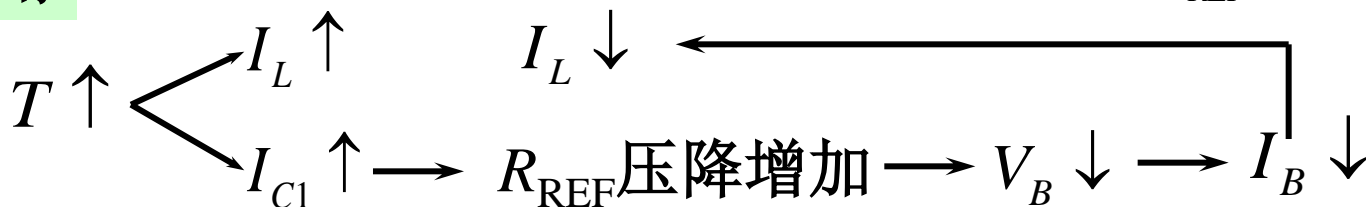
有: $I_{C1} = I_L = \beta I_B$

使 I_{C1} 和 I_L 呈镜像关系——镜像电流源

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{REF}} = I_{C1} + 2I_B = I_{C1} + 2 \times \frac{I_{C1}}{\beta}$$

$$I_{C1} = \frac{\beta}{2 + \beta} \times I_{REF}$$

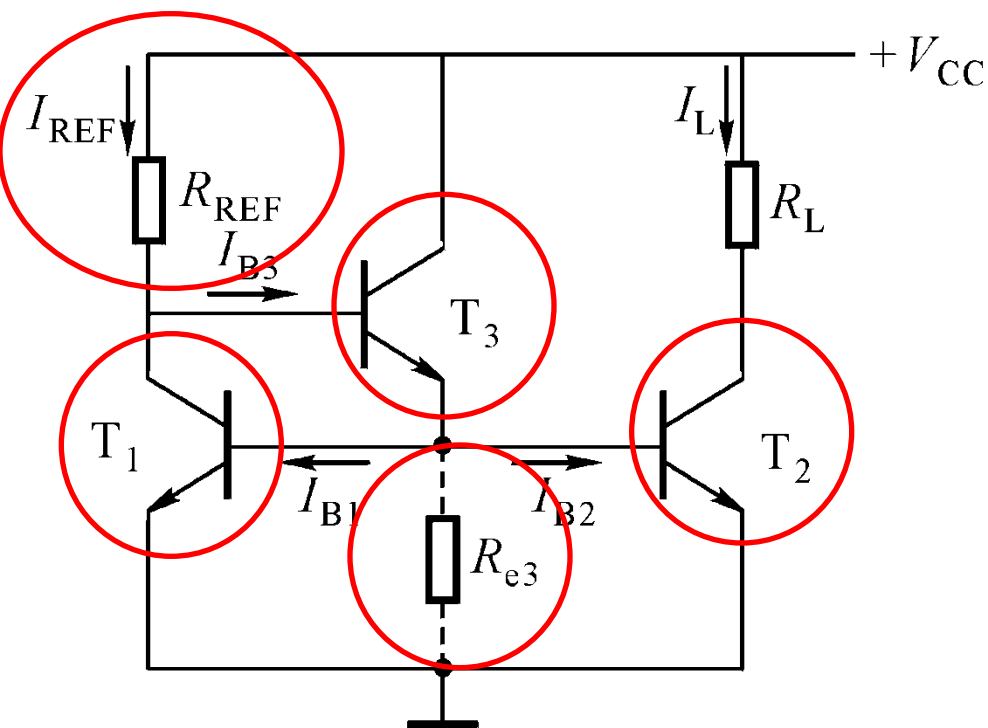
$$\text{当 } \beta \gg 2 \quad I_L = I_{C1} \approx I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{REF}}$$



$$T \uparrow \rightarrow I_{C1} (I_L) \uparrow \rightarrow I_{REF} \uparrow \rightarrow V_{REF} \uparrow$$

$$I_{C1} (I_L) \downarrow \leftarrow I_B \downarrow \leftarrow V_{BE} \downarrow$$

2、跟随型镜像电流源电路



- ✓ 由电阻 R_{REF} 确定参考电流 I_{REF} ;
- ✓ 两只特性完全相同的晶体管 T_1 、 T_2 组成镜像电流源;
- ✓ T_3 管作为射极跟随器, 减小输出电流与参考电流的误差;
- ✓ R_{e3} 用来增大 T_3 管的工作电流, 提高 T_3 管的电流放大系数;
- ✓ 温度补偿作用。

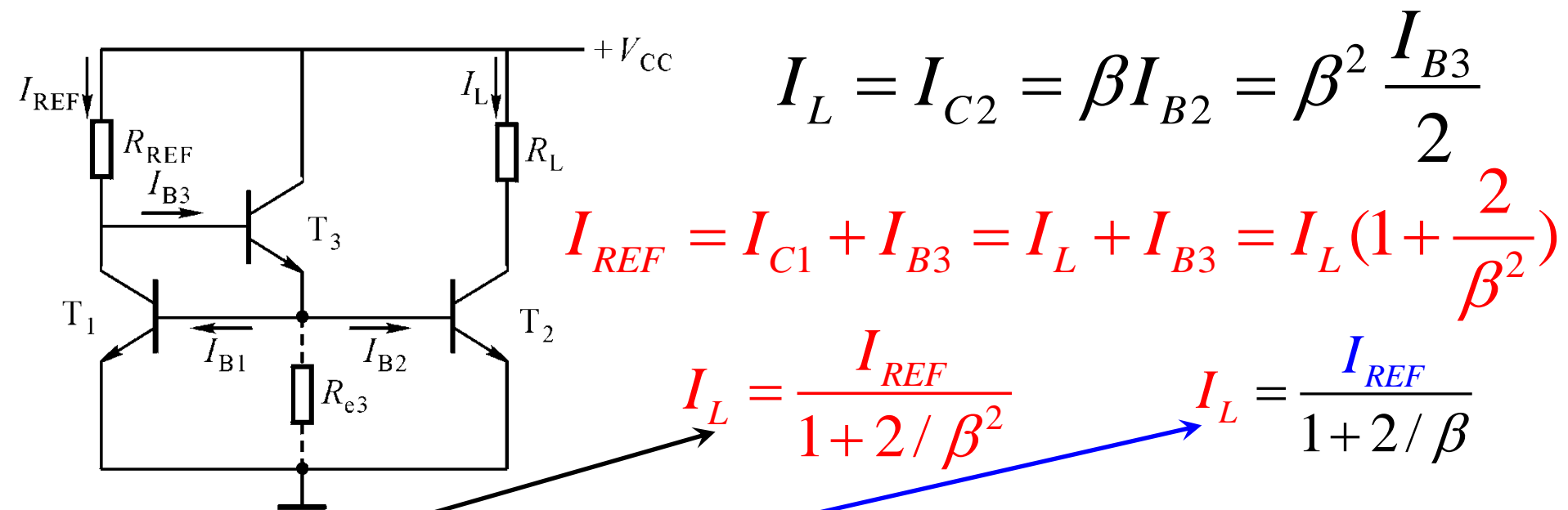
$$I_L = I_{C2} = I_{C1} \approx I_{REF} = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{R_{REF}} \approx \frac{V_{CC}}{R_{REF}}$$

$$I_L = I_{C2} = \beta I_{B2} = \beta^2 \frac{I_{B3}}{2}$$

$$I_{REF} = I_{C1} - I_{B3} = I_L - I_{B3} = I_L \left(1 - \frac{2}{\beta^2}\right)$$

2、跟随型镜像电流源电路

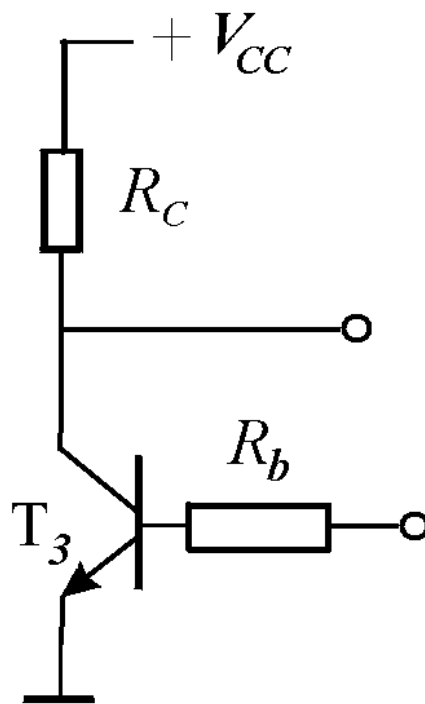
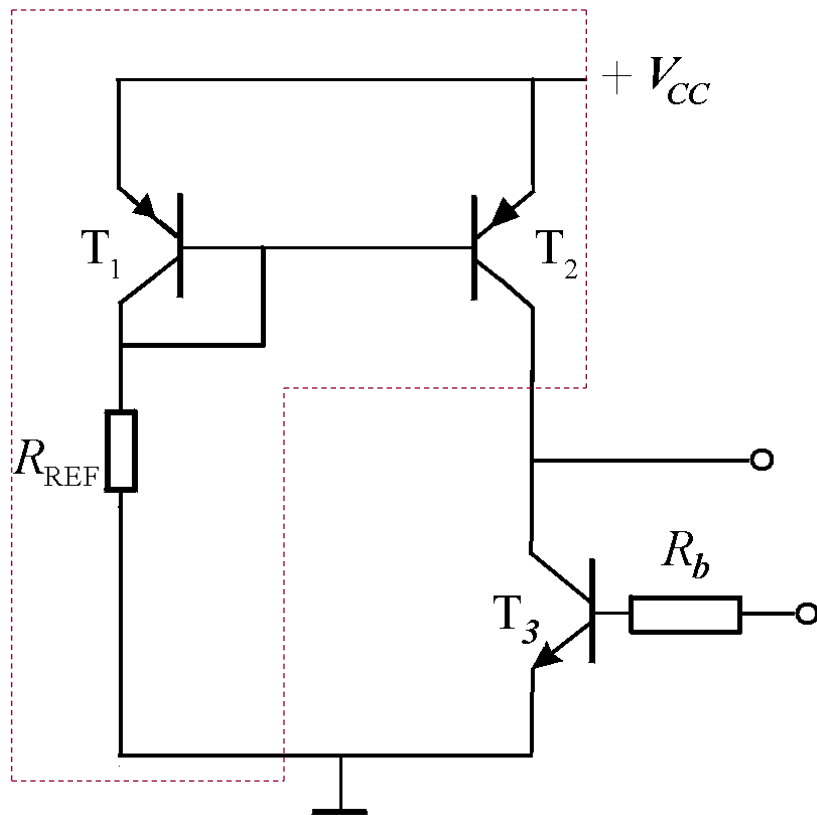
减少输出电流 I_L 与参考电流 I_{REF} 的相对误差



当 $\beta \geq 50$ 时，输出电流 I_L 与参考电流 I_{REF} 的相对误差小于 0.1%

当三极管的 $\beta \geq 50$ 时，基本镜像电流源输出电流 I_L 与参考电流 I_{REF} 的误差 $< 5\%$ 。

镜像电流源用作负载（电阻）

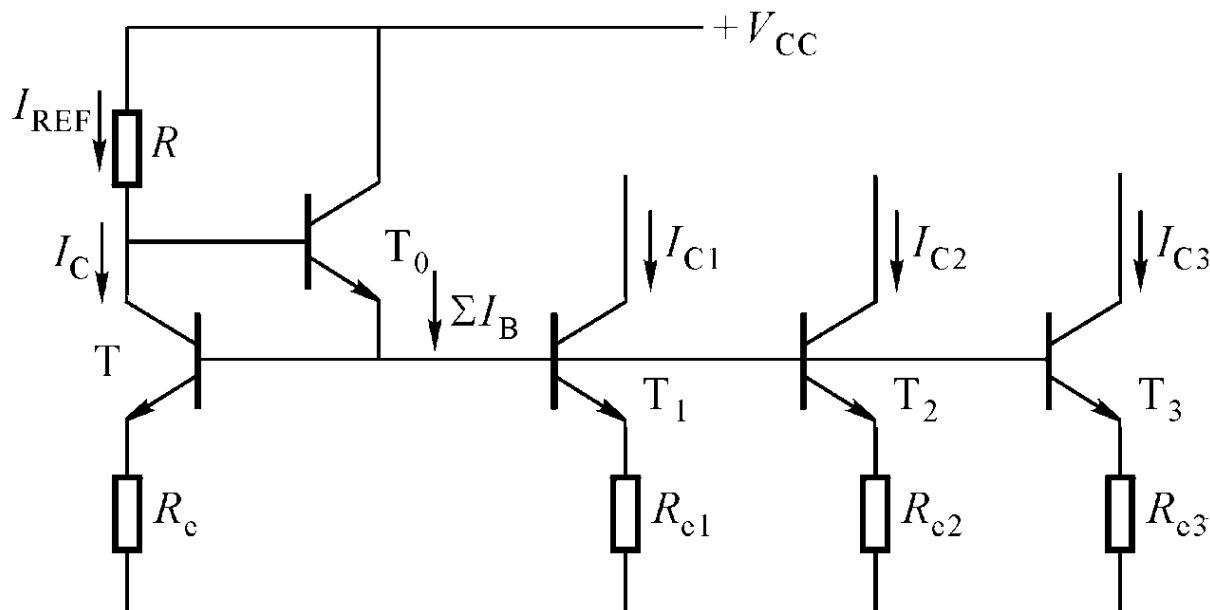


等效电阻大 $R_C \approx r_{ce2}$

集成电路易实现！

3、多路电流源电路

当参考电流 I_{REF} 确定后，在各支路串入**不同的射极电阻**，可得到不同的输出电流。



$$V_{BE} + I_E R_e = V_{BE1} + I_{E1} R_{e1} = V_{BE2} + I_{E2} R_{e2} = V_{BE3} + I_{E3} R_{e3}$$

$$I_E R_e \approx I_{E1} R_{e1} \approx I_{E2} R_{e2} \approx I_{E3} R_{e3}$$

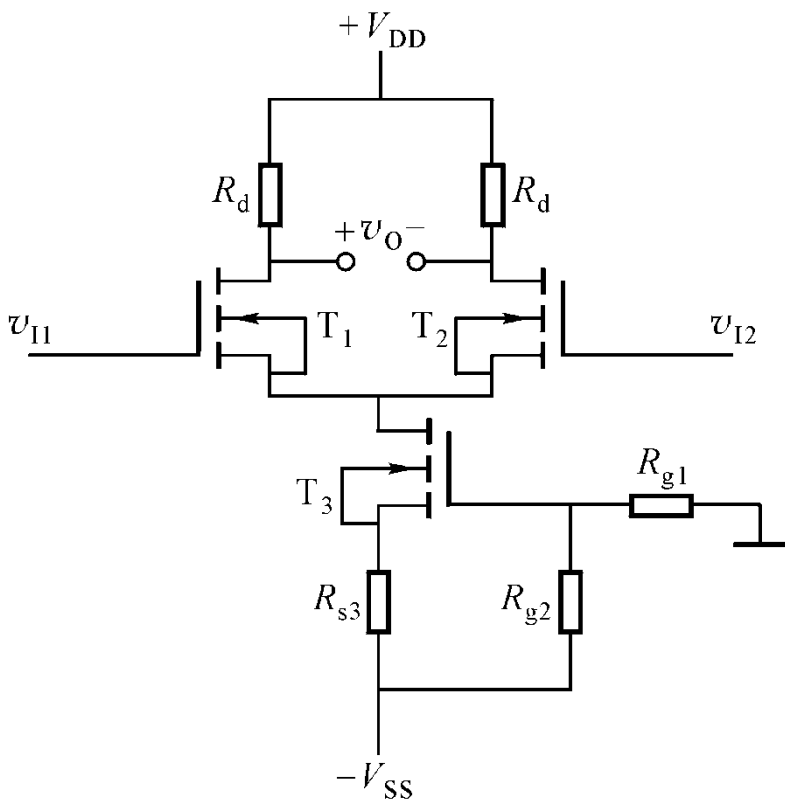
$$I_{\text{REF}} R_e \approx I_{C1} R_{e1} \approx I_{C2} R_{e2} \approx I_{C3} R_{e3}$$

六、集成运放输入级的电路形式

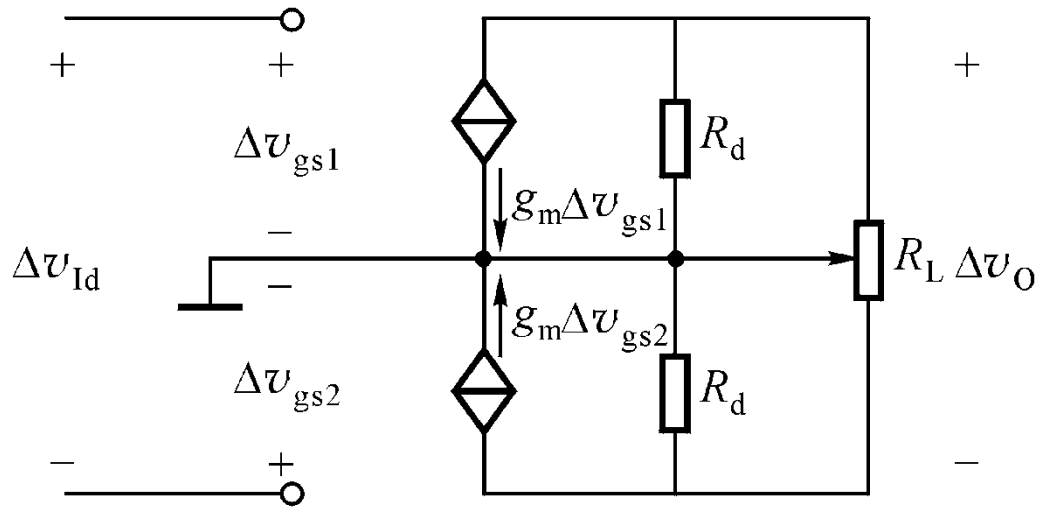
通用型集成运放的具体电路多种多样，但其输入级电路的组成原理基本相似，均以差分放大电路为基础，通常采用**双端输入、单端输出方式**，并由电流源提供偏置电流及作为有源负载，从而可以达到有效地抑制共模信号、放大差模信号的目的。

1) 场效应管差分放大电路

FET差分放大电路差模输入电阻很高，减小了输入偏置电流的不对称性。



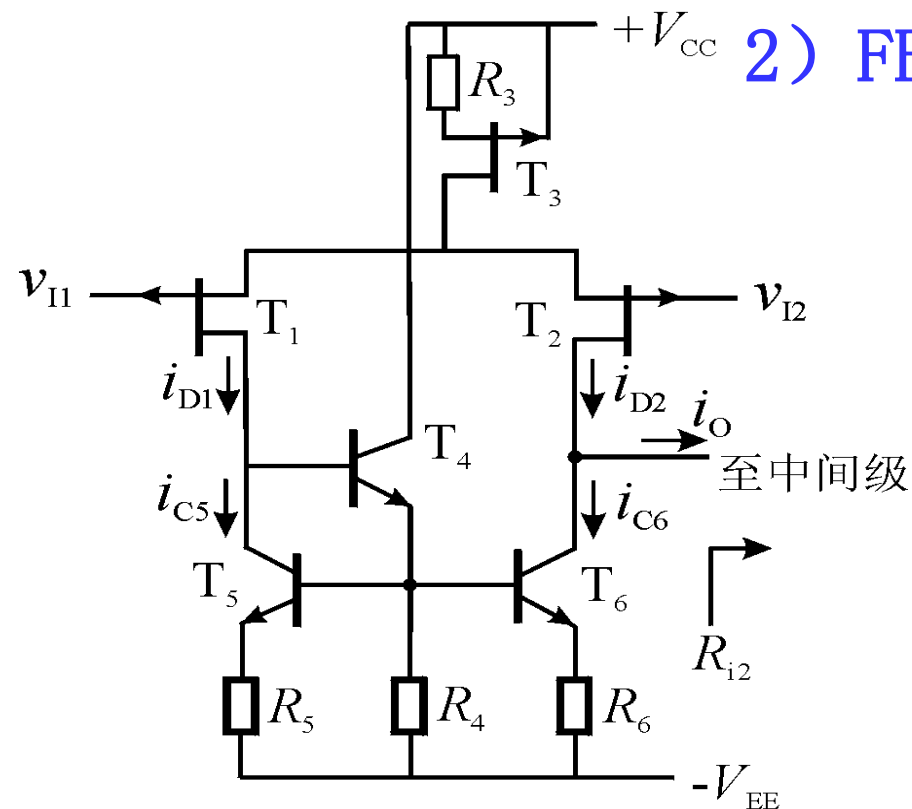
$$R'_L = R_d // \frac{R_L}{2}$$



$$A_{vd} = \frac{\Delta v_{Od}}{\Delta v_{Id}} = -\frac{2g_m \Delta v_{gs1} R'_L}{2\Delta v_{gs1}} = -g_m R'_L$$

$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} \rightarrow \infty \quad R_o = 2R_d$$

2) FET-BJT混合型差分放大电路



$$\Delta i_{C5} = \Delta i_{C6} \quad \text{镜像电流}$$

$$\Delta i_{D1} = -\Delta i_{D2} \quad \text{差分放大}$$

差模增益=?

$$\text{共模增益=?} \quad \Delta i_{oc} = \Delta i_{D2} - \Delta i_{c6} \approx 0$$

$$\Delta i_o = \Delta i_{D2} - \Delta i_{C6} = \Delta i_{D2} - \Delta i_{C5} = \Delta i_{D2} - \Delta i_{D1} = 2\Delta i_{D2}$$

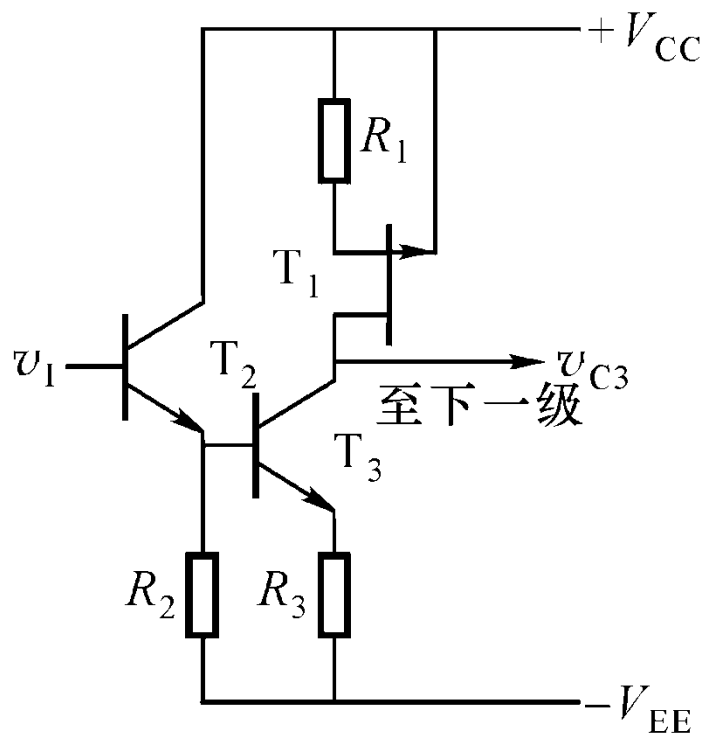
输出电流倍增,单端输出达到双端输出的效果.

$$A_{vd} = \frac{\Delta i_{od}(R_{i2} \parallel r_{ds2} \parallel R_{o6})}{\Delta v_{Id}} = \frac{2\Delta i_{D2}R'_{i2}}{2\Delta v_{GS}} = \frac{2g_m\Delta v_{GS}R'_{i2}}{2\Delta v_{GS}} = g_mR'_{i2}$$

集成运放的中间级——电压放大电路

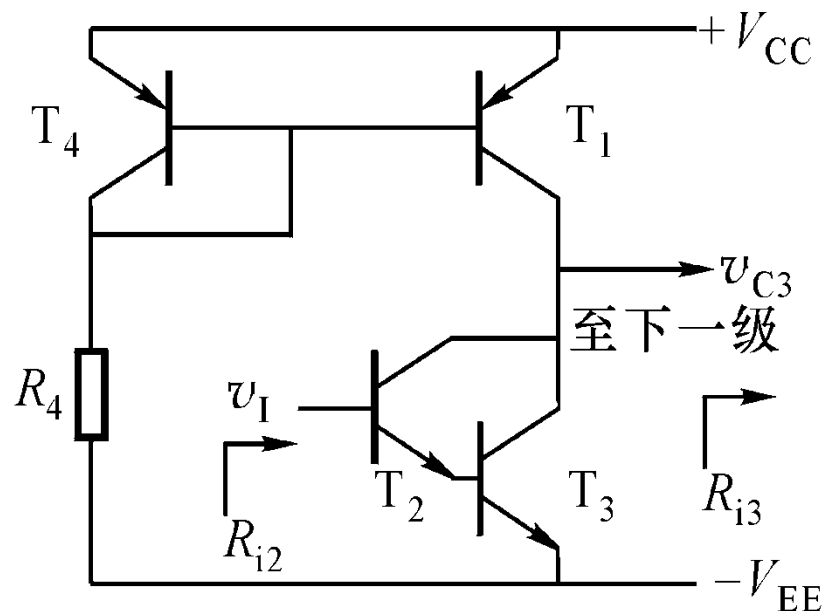
- 主要任务：具备高电压增益。
- 常用电路：共射/共源放大电路。
- 电压增益：
$$A_v = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$$
- 提高电压增益的措施：
 - ✓ R_c 以恒流源代替；
 - ✓ 采用达林顿复合管，提高 β ；
 - ✓ 在输入级与中间级之间，增加一级CC电路进行阻抗变换。

❖ 恒流源+射级跟随器



$$R_{o1} \approx (1 + g_m R_1) r_{ds}$$

❖ 恒流源+复合管



$$A_v = \frac{\Delta v_o}{\Delta v_i} \approx - \frac{\beta_2 \beta_3 (r_{ce1} // r_{ce3} // R_{i3})}{R_{i2}}$$

$$R_{i2} = r_{be2} + (1 + \beta_2) r_{be3}$$

作业

- **1.5, 6, 7; 10, 11, 13** 单管
- **1.14, 15, 16, 17** 多级
- **1.22, 23, 24, 25** 差分
- **1.28, 29, 30** 频率特性
- **1.25, 补充, 26** 集成运放
- **仿真 1.18**

七、直接耦合多级放大电路读图

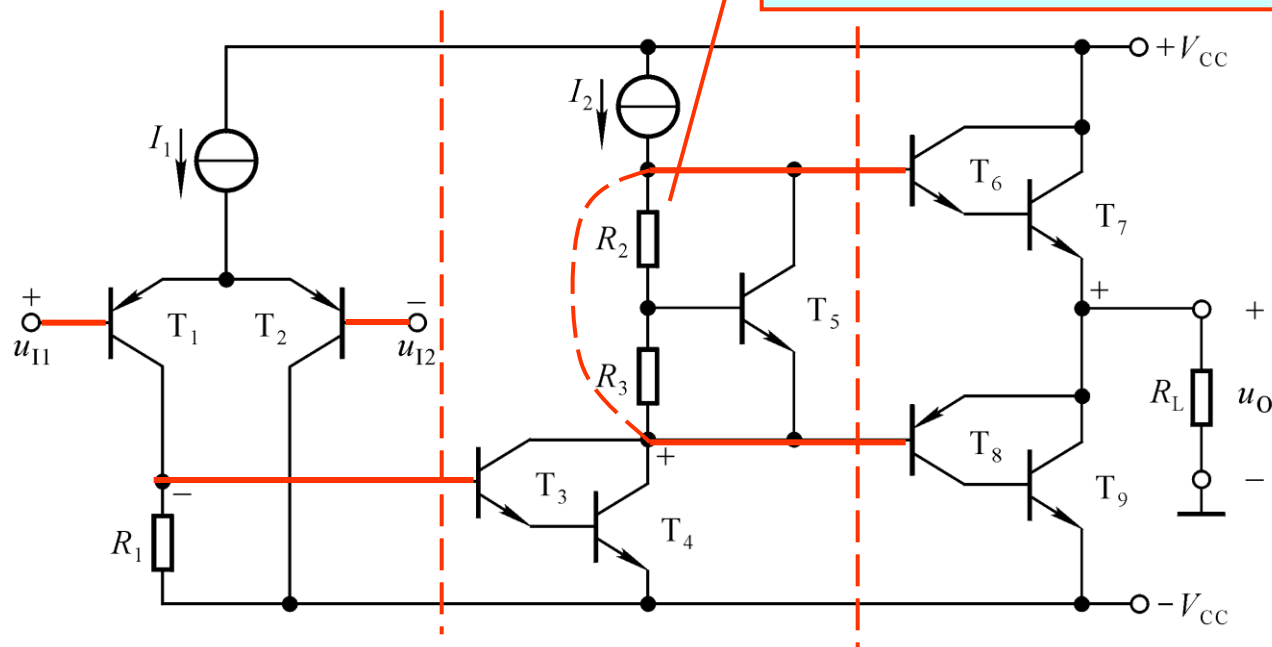
1、放大电路的读图方法

- 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?

2、例题

动态电阻无穷大



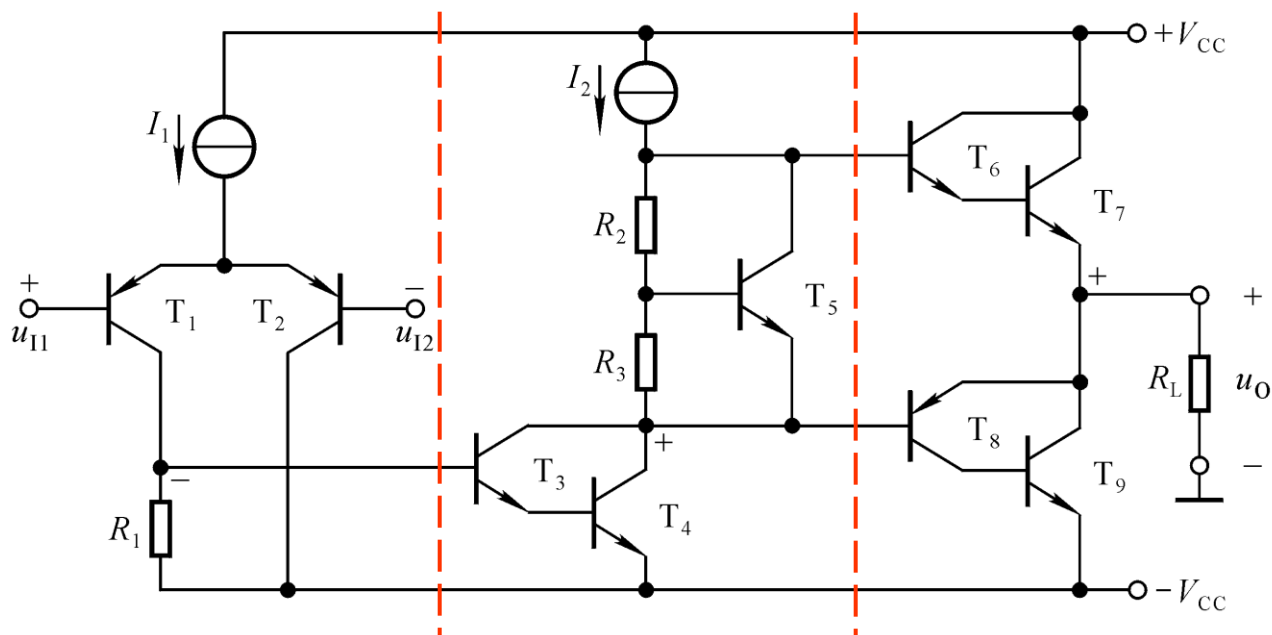
1) 化整为零，识别电路

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

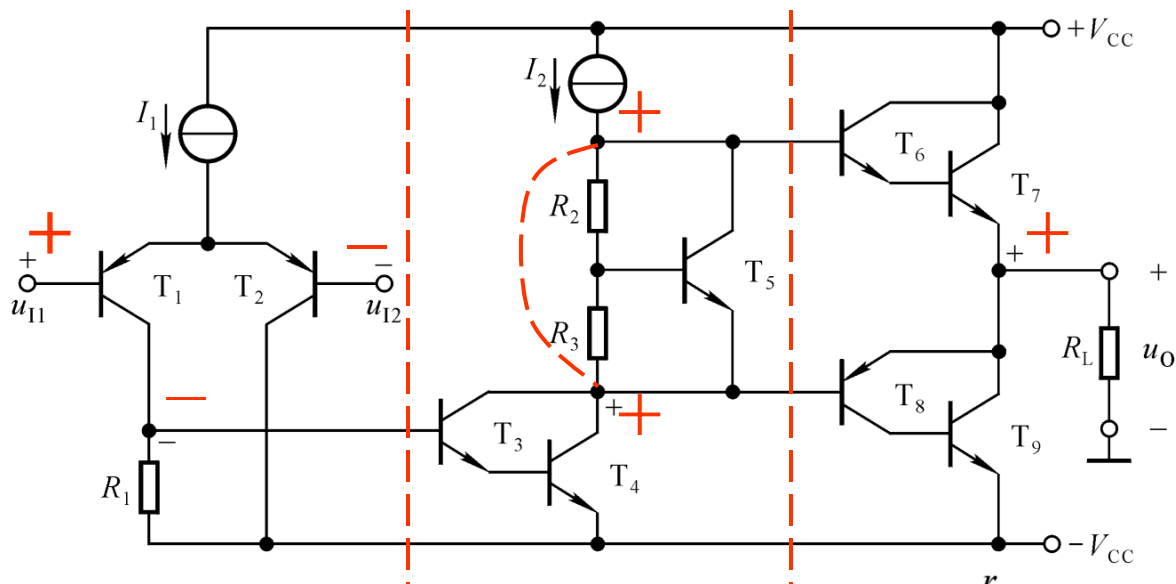
2) 基本性能分析



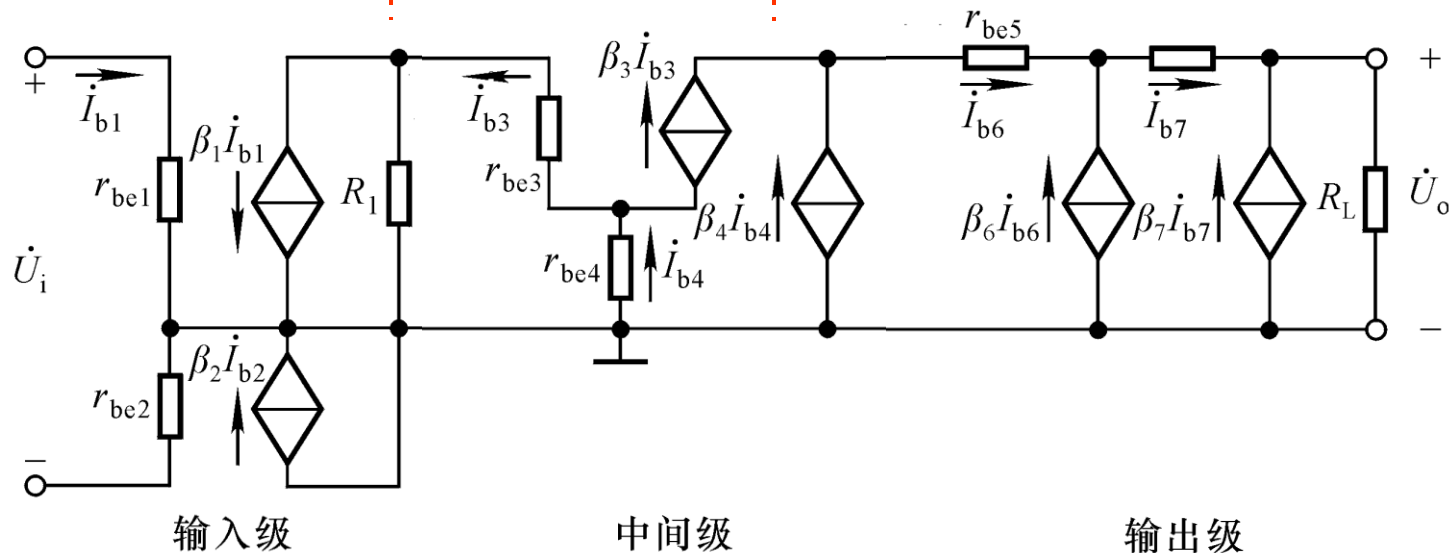
输入电阻为 $2r_{be}$ 、电压放大倍数较大、输出电阻很小、最大不失真输出电压的峰值接近电源电压。

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

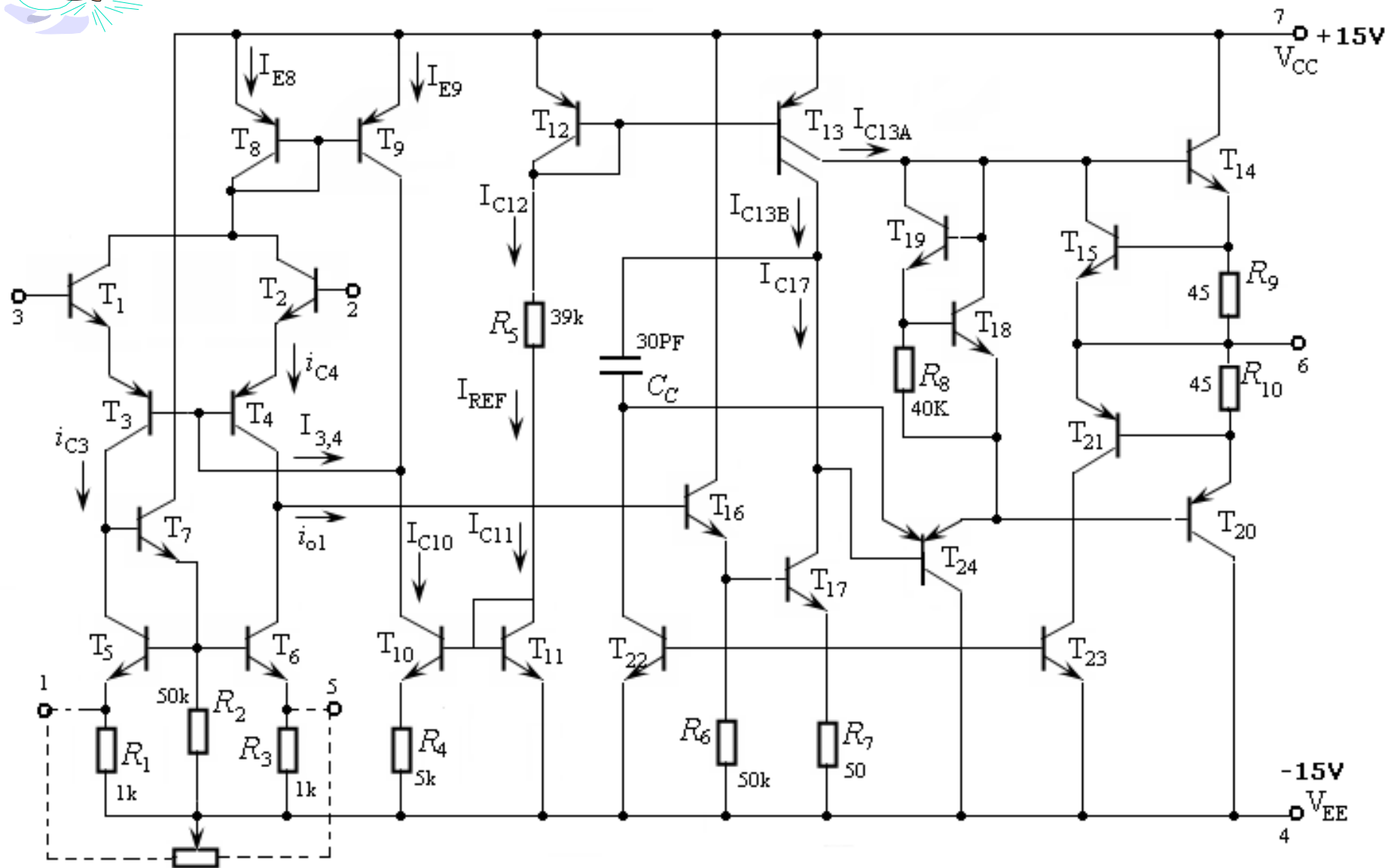


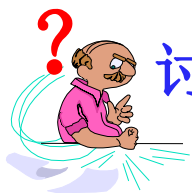
可估算低频小信号下的电压放大倍数、输入电阻、输出电阻等。





能认出功能电路模块吗？能读懂和分析该电路吗？





讨论

F007——通用型集成运放（定性分析）

提示：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。

