

第3章 集成运算放大电路

本章要求：

- 一、了解多级放大电路的耦合方式，掌握多级放大电路的动态分析方法，并会估算两级放大电路的性能指标；**
- 二、熟悉集成运放的结构特点、电路组成及电压传输特性；**
- 三、掌握集成运放中的单元电路的分析方法，包括双端输入差分放大电路、镜像电流源电路和OCL互补功率放大电路；**
- 四、了解集成运放电路的分析方法，了解集成运放的主要性能指标及低频等效电路。**

目 录

3. 1 多级放大电路的一般问题

3. 2 集成运算放大电路概述

3. 3 集成运放中的单元电路

3. 4 集成运放电路简介

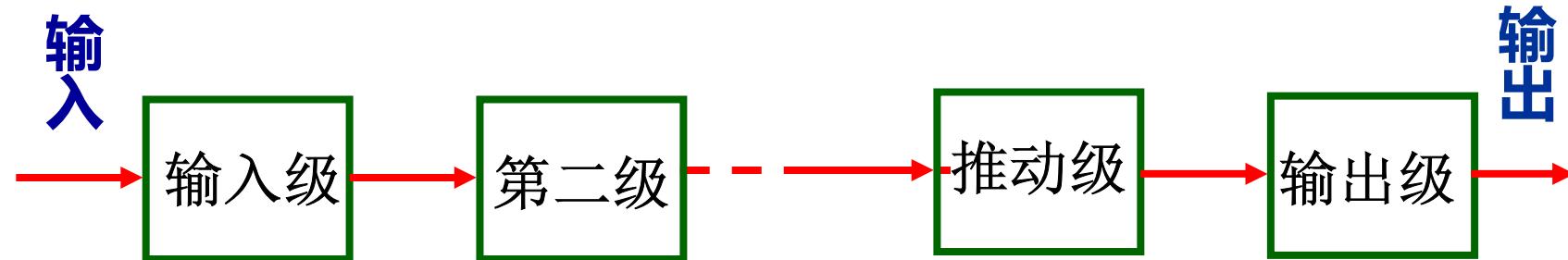
3. 5 集成运放的性能指标及低频等效电路

3. 6 集成运放的种类及选择

3. 7 集成运放的使用

3.1 多级放大电路的一般问题

3.1.1 多级放大电路的耦合方式



多级放大电路的框图

耦合方式即连接方式，常见耦合方式有：直接耦合、阻容耦合、变压器耦合和光电耦合。

对耦合电
路的要求

静态：保证各级有合适的Q点

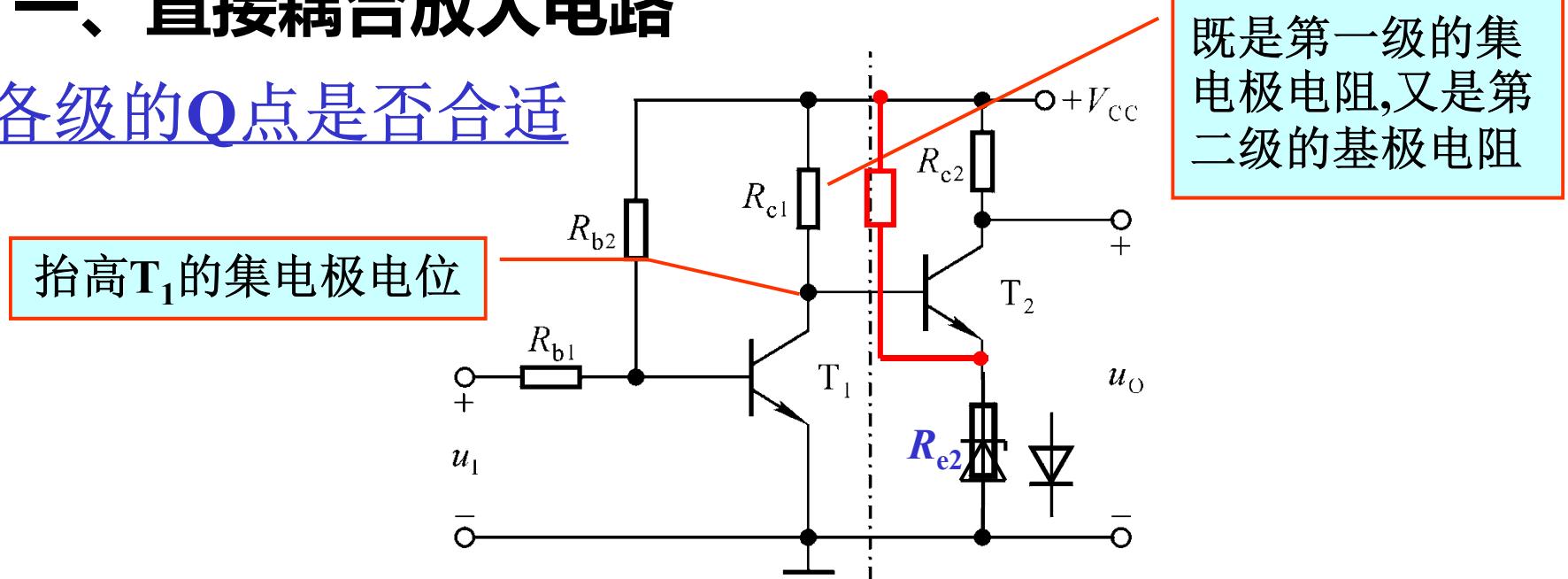
动态：传送信号

波形不失真

减少压降损失

一、直接耦合放大电路

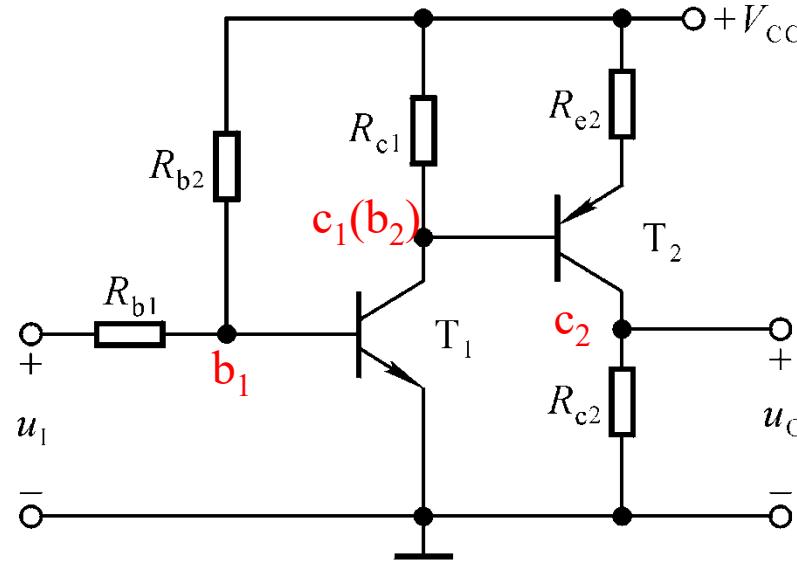
各级的Q点是否合适



R_{e2} 使Q点合适，但会使第二级的放大倍数大大下降，所以可以采用二极管或稳压管。

在用NPN型管组成多级共射放大电路中，集电极电位逐级升高，以致于接近电源电压。所以，采用NPN型和PNP型管混合使用的方法。

NPN型管和PNP型管混合使用



$$U_{C1Q} > U_{B1Q}$$

$$U_{C2Q} < U_{C1Q}$$

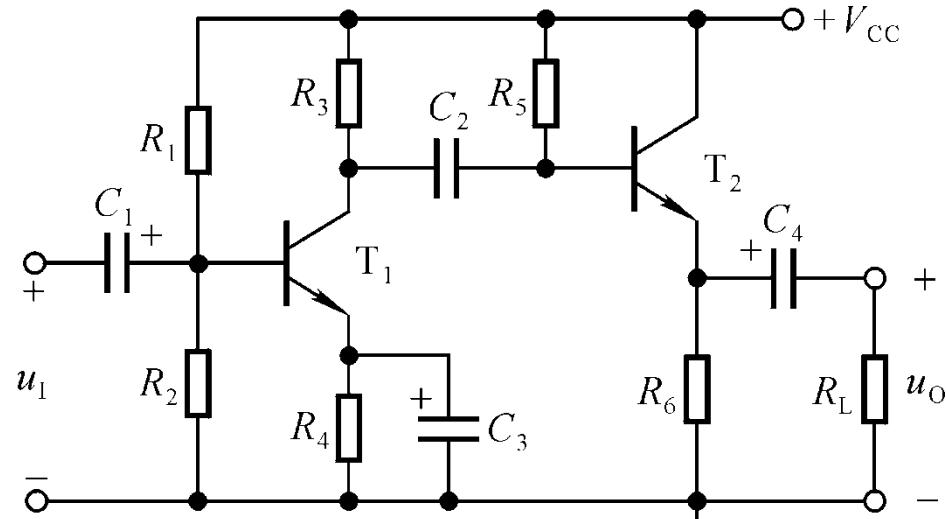
集电极电位不再逐级升高

直接耦合方式的优缺点

能够放大变化缓慢的信号，具有良好的低频特性；
便于集成，是集成放大电路的耦合方式。

各级Q点相互影响，所以使计算和调试Q点很困难。
存在零点漂移现象，要采用差分放大电路。

二、阻容耦合放大电路



共射电路

共集电路

阻容耦合方式的优缺点

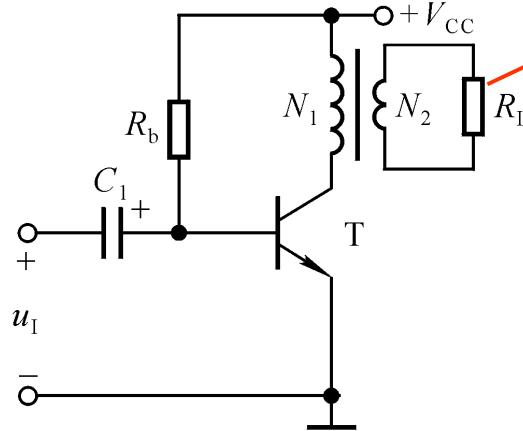
各级Q点相互独立，所以计算和调试Q点可按单级处理。

不能放大变化缓慢的信号，低频特性差；

不便于集成，是分立元件放大电路常采用的耦合方式。

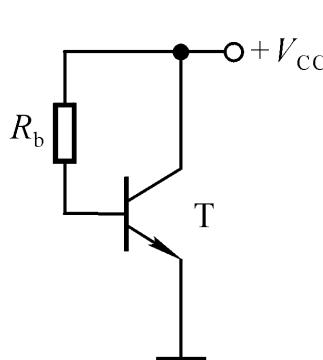
三、变压器耦合放大电路

可以是实际的负载，也可以代表后级放大电路

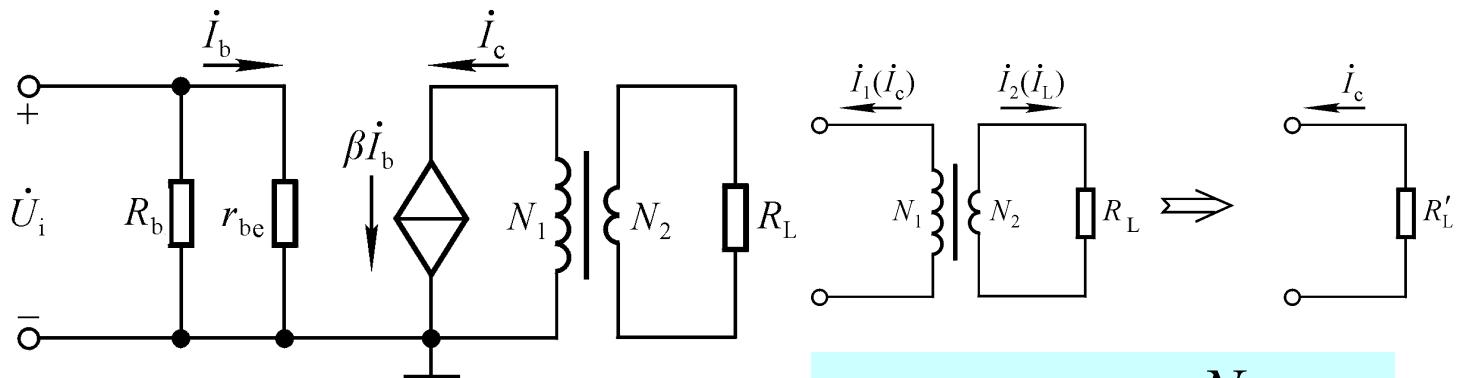


变压器耦合方式的优缺点

前后级靠磁路耦合，所以各级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；可以实现阻抗变换，所以常用于分立元件功率放大电路中。



直流通路

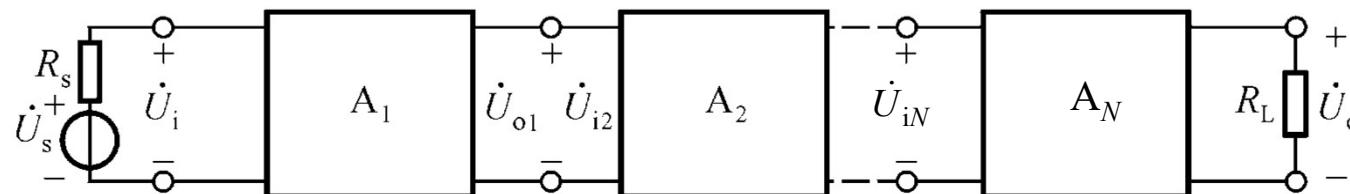


交流等效电路

$$P_1 = P_2, \quad R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L$$

3.1.2 多级放大电路的动态分析

一、电压放大倍数

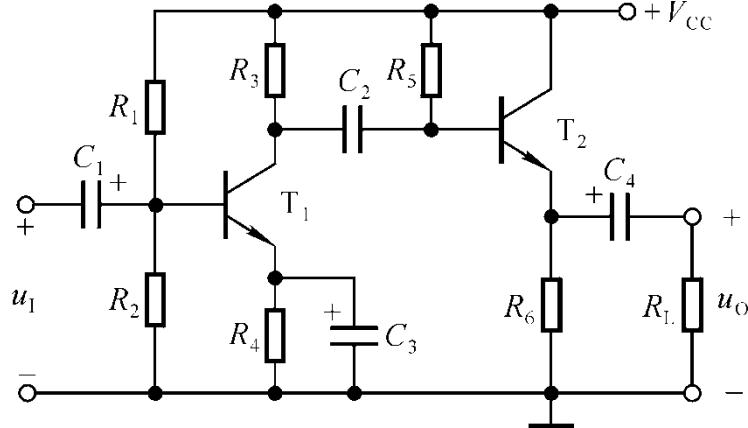


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_{i2}} \cdots \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{iN}} = \prod_{j=1}^N \dot{A}_{uj} \quad R_{Lj} = R_{i(j+1)}$$

二、输入电阻 $R_i = R_{i1}$

三、输出电阻 $R_o = R_{oN}$ $R_{sj} = R_{o(j-1)}$

例3.1.1

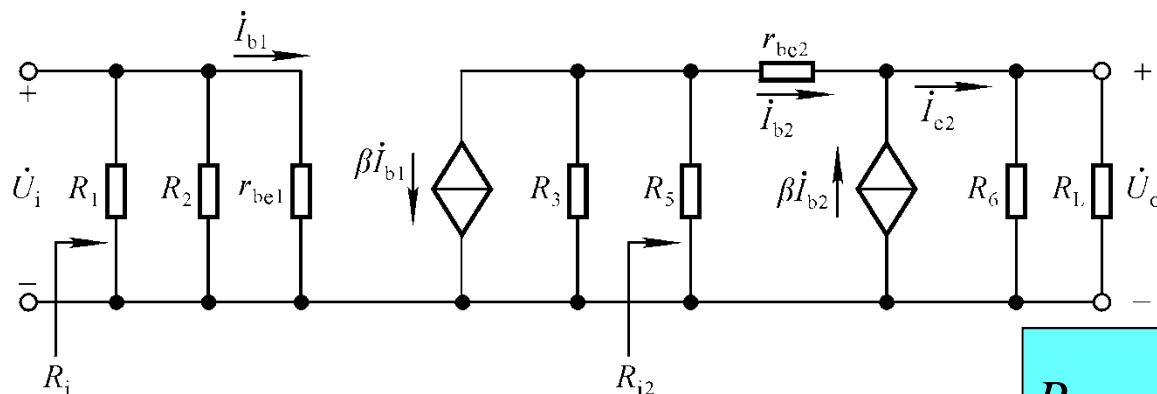


$$\dot{A}_{u1} = -\frac{\beta_1 (R_3 // R_{L1})}{r_{be1}}$$

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

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

$$R_{L1} = R_{i2} = R_5 // [r_{be2} + (1+\beta_2)(R_6 // R_L)]$$



$$R_i = R_{i1} = R_1 // R_2 // r_{be1}$$

$$R_o = R_{o2} = R_6 // \frac{R_{s2} // R_5 + r_{be2}}{1 + \beta_2}$$

$$R_{s2} = R_{o1} = R_3$$

3.2 集成运算放大电路概述

集成电路的特点

分立元件电路：由各种单个元件联接起来的电子电路。

集成电路：以半导体单晶硅为芯片，采用专门的制造工艺，把各个元件以及相互之间的连线所组成的完整电路制作在一起，使之具有特定的功能。

优点：体积小、重量轻、功耗低，可靠性高、价格便宜，实现了材料、元件和电路的统一。

集成电路的分类

**就集成度而言，有小规模、中规模、大规模和超大
规模之分；**

就导电类型而言，有双极型、单极型和两者兼容的；

就功能而言，有数字集成电路和模拟集成电路。

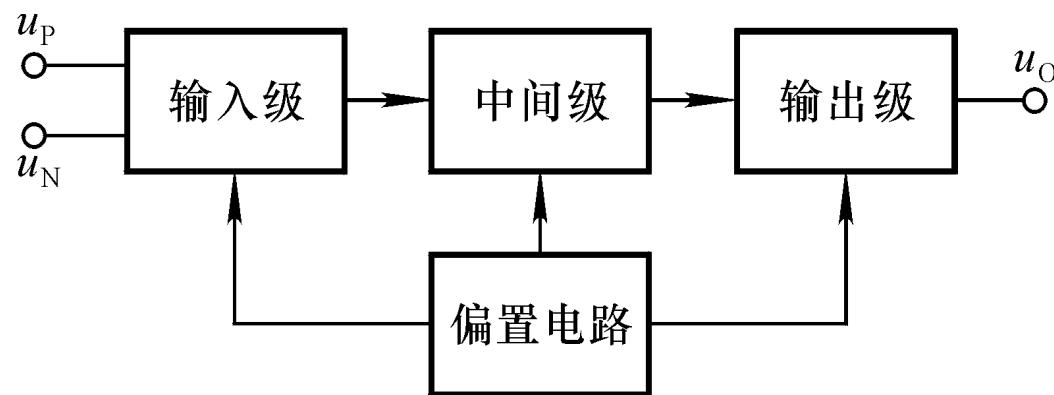
➤ **常用的模拟集成电路：**集成运算放大器、集成功率
放大器、集成稳压电源、集成数模和模数转换器等。

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。

3.2.1 集成运放的电路结构特点

- (1) 采用直接耦合方式，并大量采用各种差分放大电路和电流源电路，因为集成电路中相邻元件具有良好的对称性，而且受环境温度和干扰等影响后的变化也相同。
- (2) 允许采用复杂的电路形式以提高性能，因为增加元器件并不会增加制造工序。
- (3) 常用有源元件（晶体管或场效应管）取代电阻，因为硅片上不宜制作高阻值电阻。
- (4) 常采用复合管。

3.2.2 集成运放电路的组成及其各部分的作用

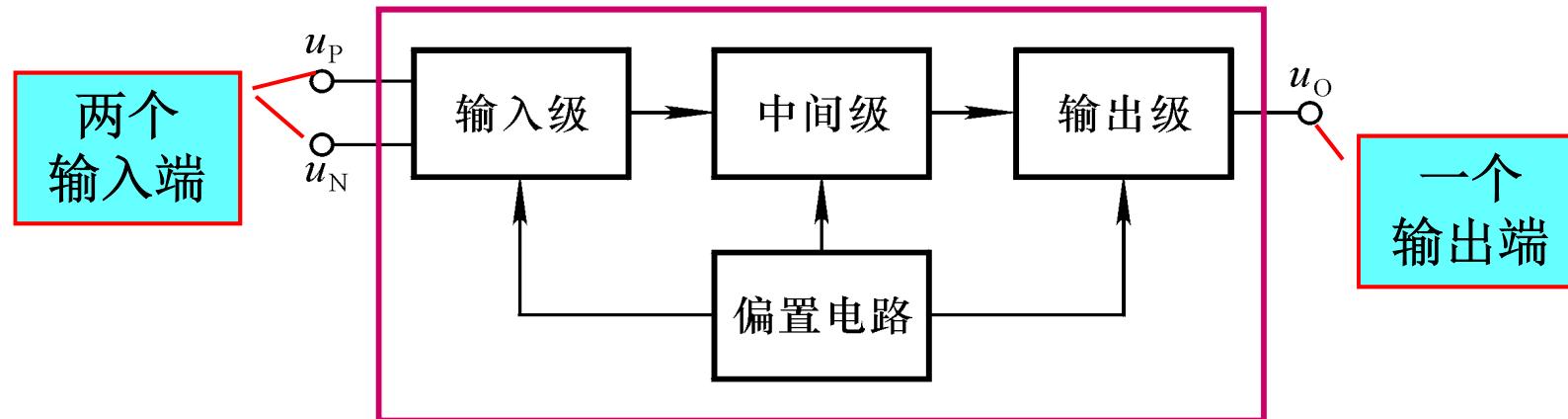


偏置电路：为各级放大电路设置合适的静态工作点。采用电流源电路。

输入级：前置级，要求 R_i 大，抑制温漂， A_d 大， A_c 小。
多采用差分放大电路。

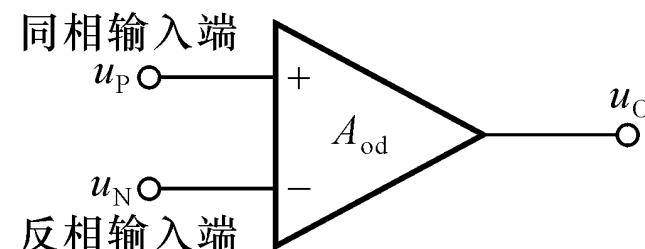
中间级：主放大级，要求有较强的放大能力。
多采用共射（或共源）放大电路，并常采用复合管作放大管，以电流源作集电极电阻。

输出级：功率级，要求 R_o 小（即带负载能力强），最大不失真输出电压尽可能大。
多采用OCL互补功率放大电路。

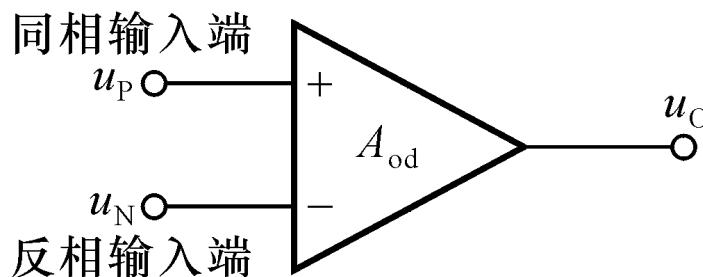


若将集成运放看成为一个“黑盒子”，则可等效为一个双端输入、单端输出，具有高差模放大倍数、高输入电阻、低输出电阻、能较好地抑制温漂的差分放大电路。

集成运放的符号：



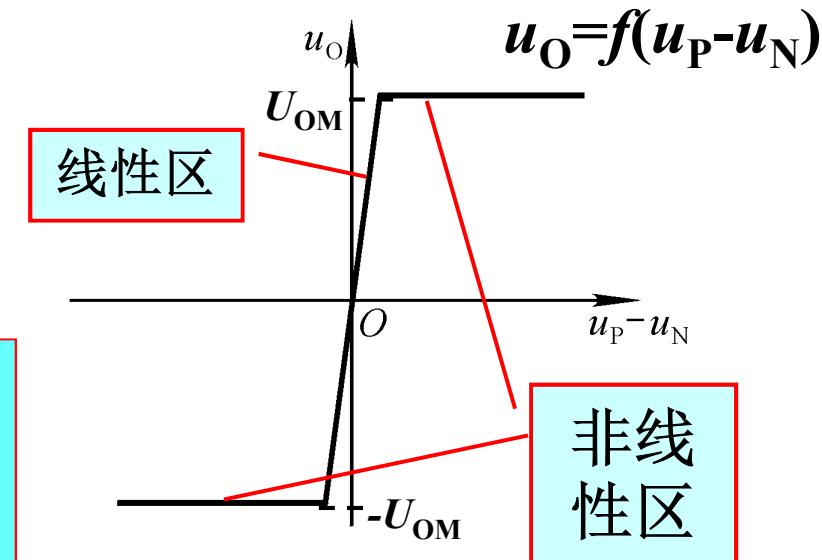
3.2.3 集成运放的电压传输特性



在线性区：

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

A_{od} 是差模开环放大倍数。



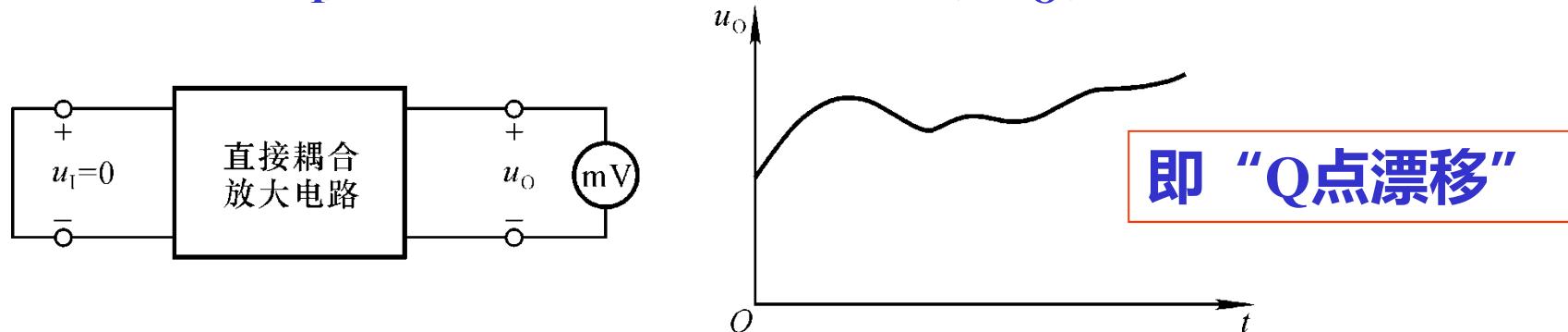
由于 A_{od} 高达几十万倍，因此线性区非常窄，输入电压 $|u_P - u_N|$ 的数值仅为几十~一百多微伏。

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

3.3 集成运放中的单元电路

3.3.1 直接耦合放大电路的零点漂移现象

输入电压(Δu_I)为零而输出电压的变化(Δu_O)不为零的现象。



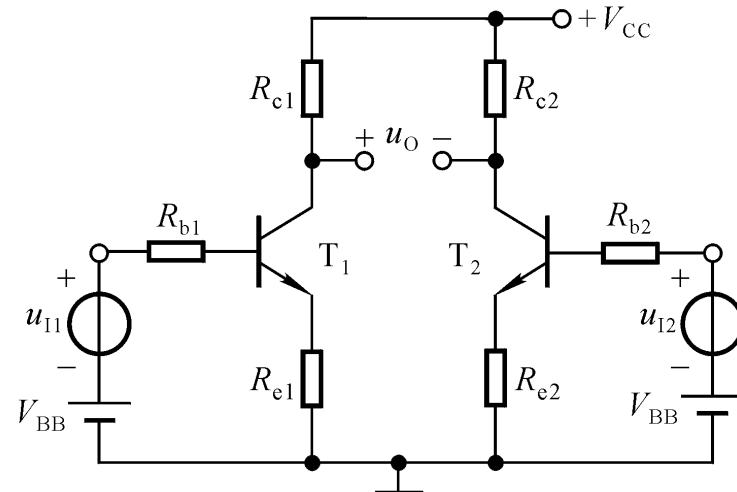
产生原因：温度变化，直流电源波动，元器件老化。其中半导体器件的参数随温度而变化是主要原因，故也称零漂为温漂。

在直接耦合电路中，零漂被逐级放大，以至于在输出端影响有用信号，所以零漂最严重。第一级零漂的影响最大。

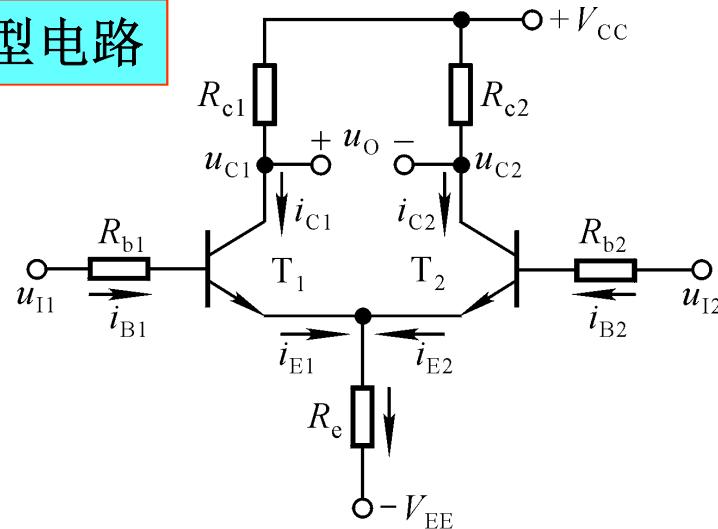
抑制温漂的方法：引入直流负反馈(如 Q 点稳定电路中的 R_e)；温度补偿(利用热敏元件)；采用特性相同的管子(如差分放大电路)。

3.3.2 差分放大电路

一、电路的组成



典型电路

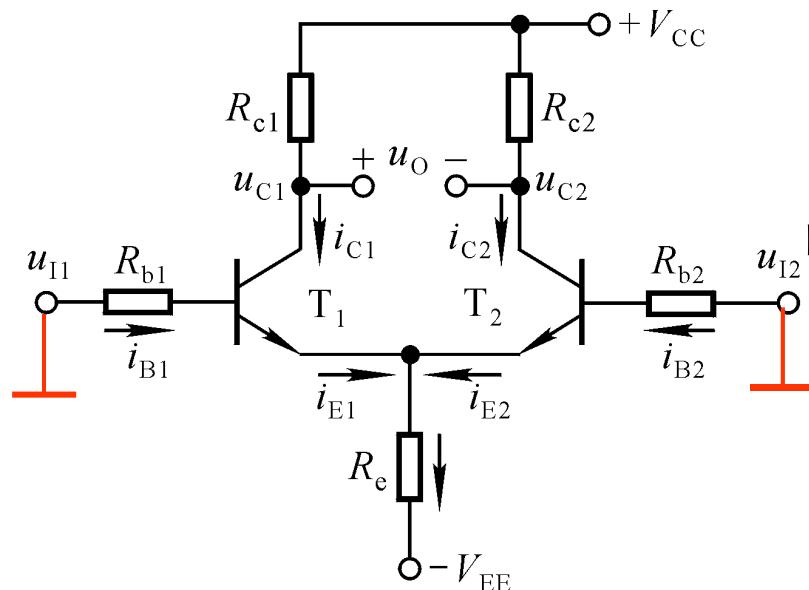


在多级放大电路的输入级采用差分放大电路来抑制温漂

为了抑制温漂，电路参数理想对称：元件参数相同 $R_{b1}=R_{b2}$ 、 $R_{c1}=R_{c2}$ 、 $R_{e1}=R_{e2}$ ；管子 T_1 、 T_2 特性相同。

二、长尾式差分放大电路

1. 静态分析：令 $u_{I1} = u_{I2} = 0$



两管有相同的 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 I_{EQ} ，

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

晶体管输入回路方程：

$$V_{EE} = I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_e$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R_b + 2(1 + \beta)R_e}$$

式中， $I_{BQ} R_b$ 较小，故

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

$$U_{EQ} \approx -U_{BEQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}, \quad U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}R_c + U_{BEQ}$$

2. 动态分析

抑制共模信号

共模信号：大小相等、极性相同的输入信号，即

$$\Delta u_{I1} = \Delta u_{I2}$$

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

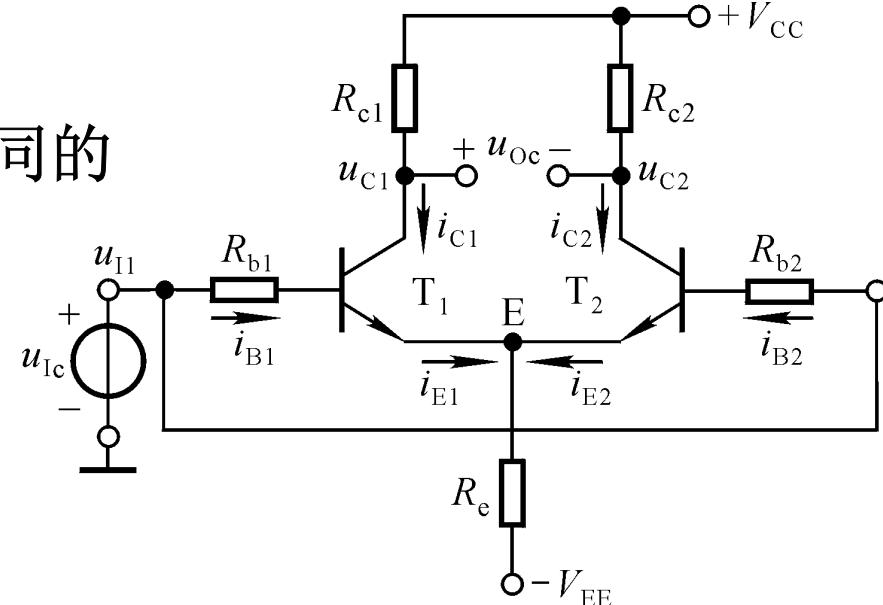
$$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}, \Delta i_{C1} = \Delta i_{C2}$$

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

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

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

电路参数理想对称时 $A_c = 0$ ，说明电路对共模信号有抑制作用



温漂就相当于共模信号，所以此电路能抑制温漂。

差分放大电路对共模信号（如温漂）的抑制，不仅利用了电路参数的对称性，还利用了 R_e 对共模信号的负反馈作用（使 A_c 下降）。

放大差模信号

差模信号：大小相等，极性相反的输入信号，即

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

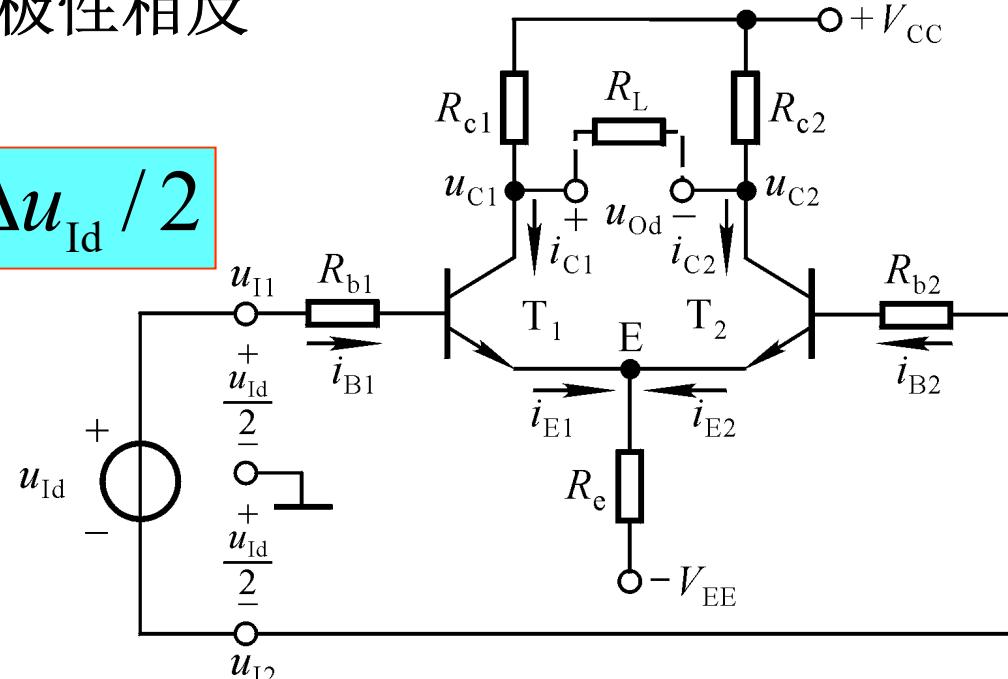
$$\Delta u_{Id} = \Delta u_{I1} - \Delta u_{I2}$$

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

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

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

$$\Delta u_{Od} = \Delta u_{C1} - \Delta u_{C2} = 2\Delta u_{C1}$$

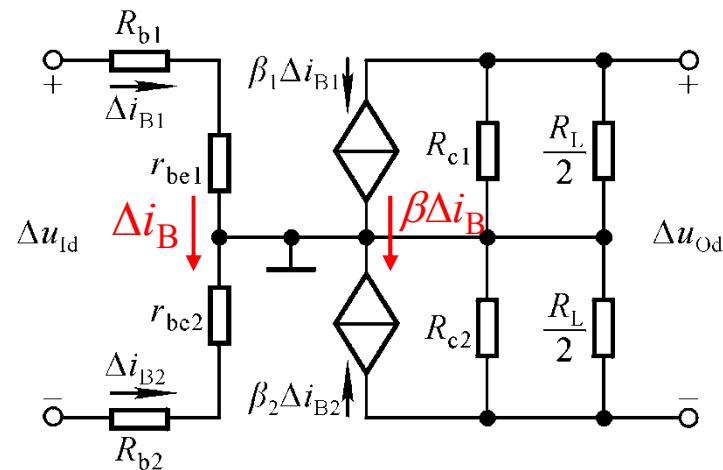
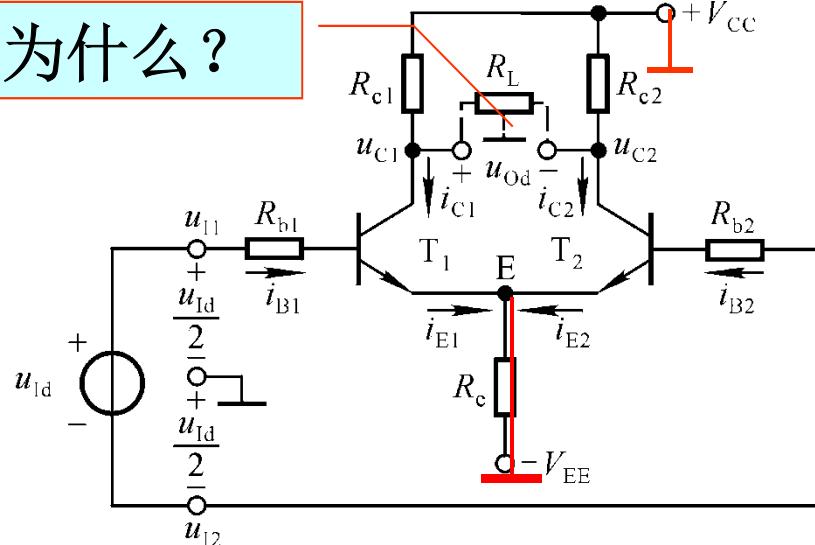


$\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$, R_e 中电流不变，即 R_e 对差模信号无反馈作用。

故称 R_e 为共模负反馈电阻

差模信号作用下的动态分析

为什么?



差模放大倍数

$$A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{2\Delta u_{C1}}{2\Delta u_{I1}} = A_{d1} = A_{d2}$$

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

说明电路对差模信号有放大作用，且 R_e 不影响 A_d 。

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

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

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

3. 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。

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

对于前面所述电路，在电路参数理想对称的情况下，

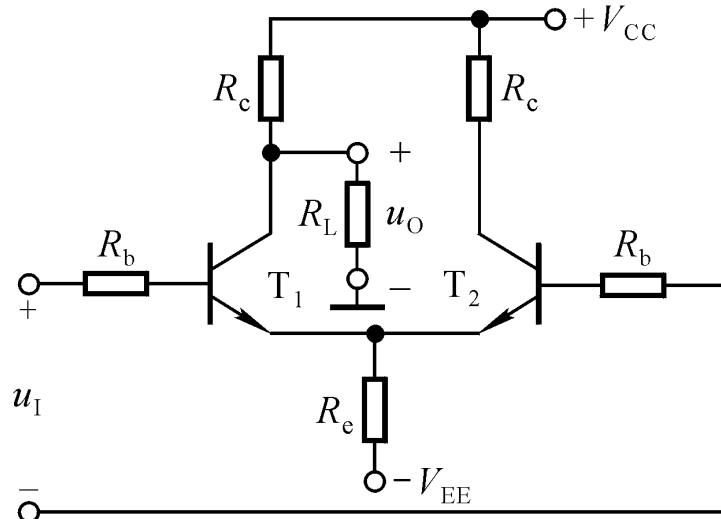
$$\because A_c = 0, \therefore K_{CMR} = \infty.$$

在实际应用时，为了防止干扰和满足负载的需要，常将信号源或负载电阻的一端“接地”。

根据输入端和输出端接地情况不同，差分放大电路除上述双端输入双端输出外，还有双端输入单端输出、单端输入双端输出和单端输入单端输出，共四种接法。

三、差分放大电路的四种接法

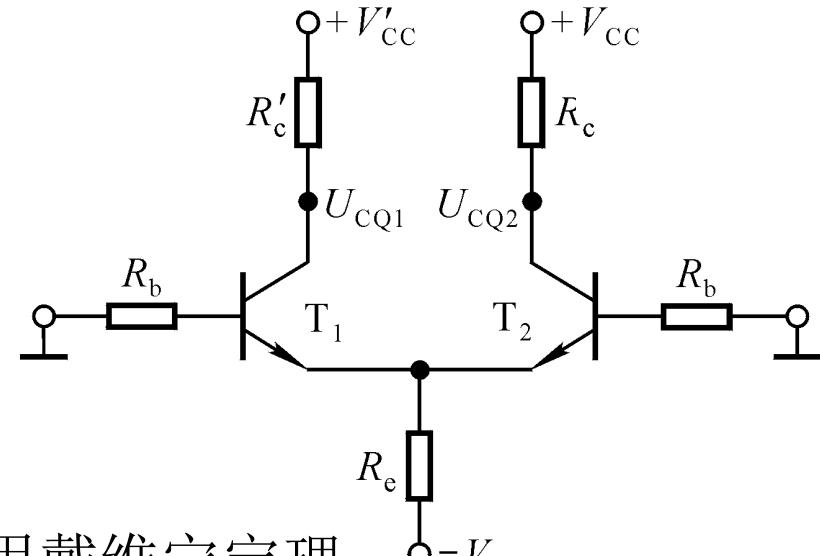
1. 双端输入单端输出电路：Q点分析



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 $U_{CEQ1} \neq U_{CEQ2}$ 。

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

$$U_{EQ} \approx -U_{BEQ}$$

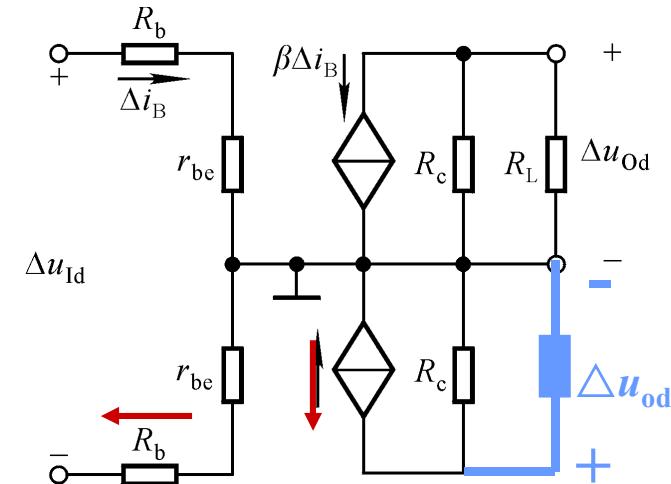
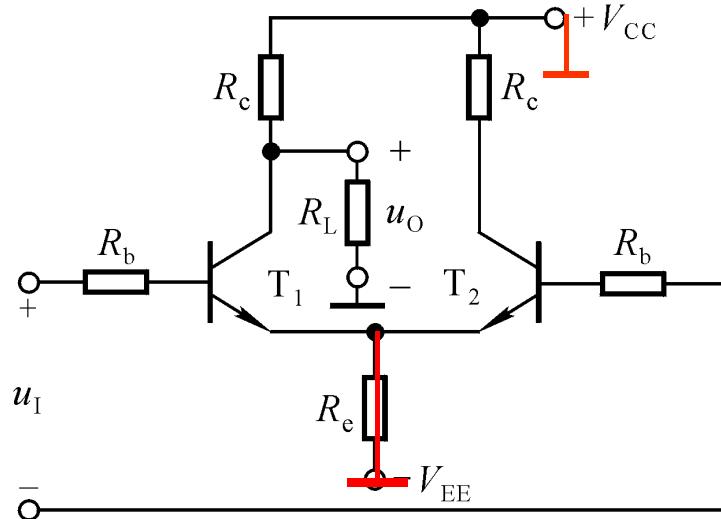


利用戴维宁定理：

$$R'_c = R_c // R_L, V'_{CC} = \frac{R_L}{R_c + R_L} V_{CC}$$

$$U_{CEQ1} \approx V'_{CC} - I_{CQ} R'_c + U_{BEQ}$$

$$U_{CEQ2} \approx V_{CC} - I_{CQ} R_c + U_{BEQ}$$

差模信号作用下的动态分析

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

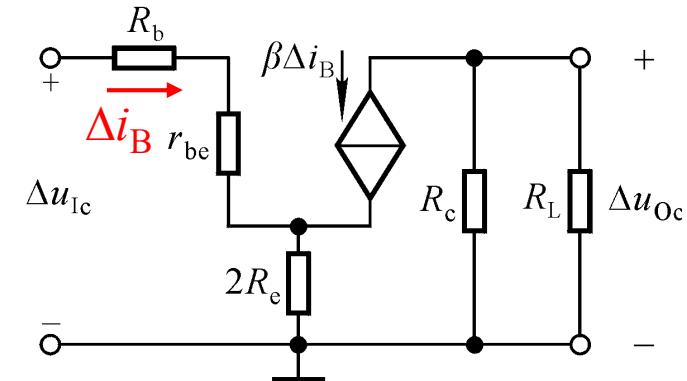
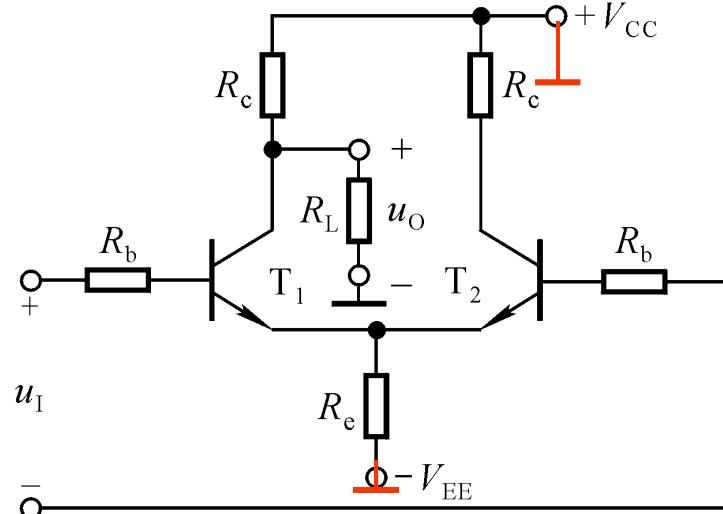
$$\Delta u_{Id} = \Delta u_{I1} - \Delta u_{I2}$$

$$A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{\Delta u_{C1}}{2\Delta u_{I1}} = \frac{1}{2} A_{d1} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

若从c₂输出, $A_d = \frac{\Delta u_{C2}}{-2\Delta u_{I2}} = -\frac{1}{2} A_{d2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$

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

共模信号作用下的动态分析



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

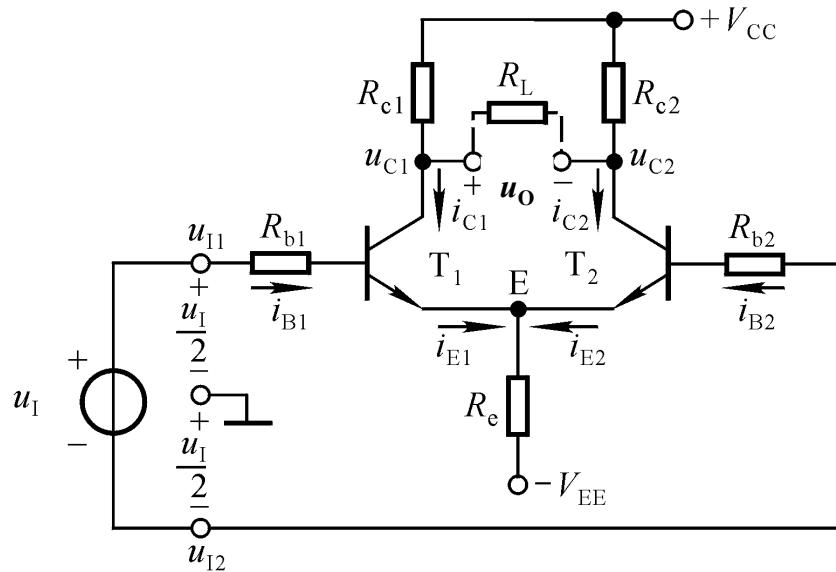
$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

$$A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}} = \frac{\Delta u_{C1}}{\Delta u_{I1}} = -\frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1+\beta)R_e}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{R_b + r_{be} + 2(1+\beta)R_e}{R_b + r_{be}}$$

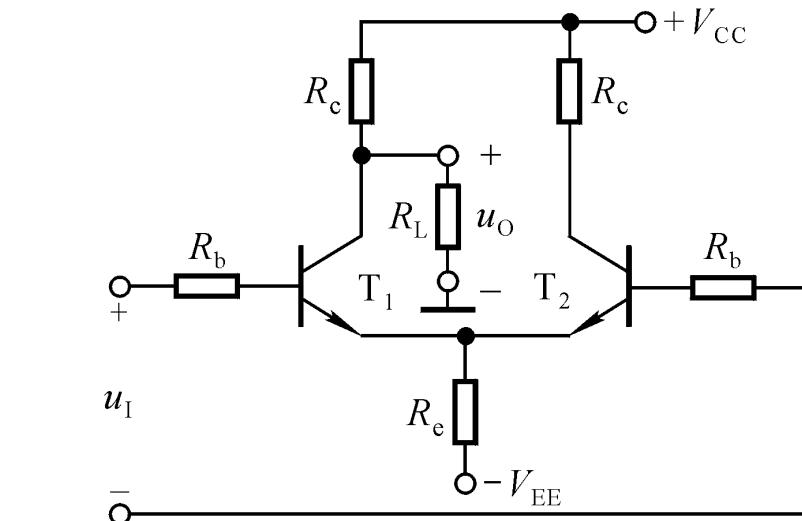
R_e越大，**K_{CMR}**就越大，虽然比不上双出电路，但这种长尾式差分放大电路比一般放大电路更能抑制共模信号。

3.3 集成运放中的单元电路



双端输入双端输出电路

由于电路参数的对称性，
双端输入就相当于差模输入：



双端输入单端输出电路

$$\Delta u_{Id} = \Delta u_I, \quad \Delta u_{Ic} = 0$$

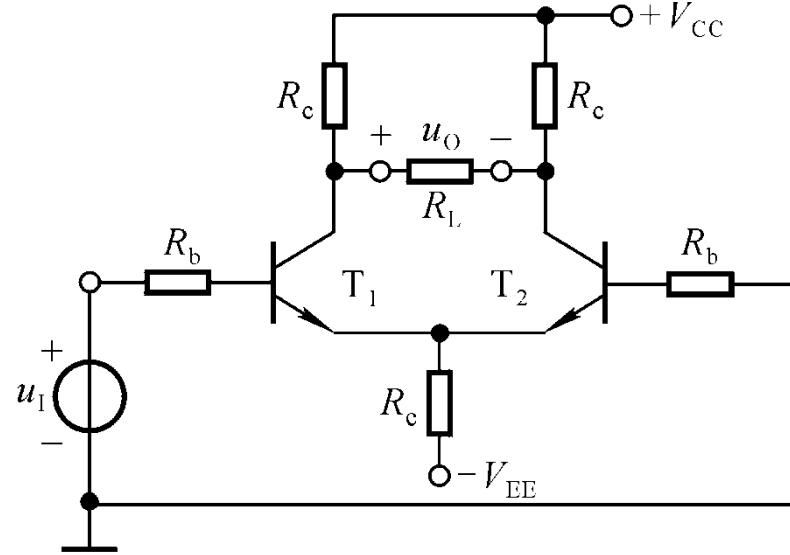
∴ 双入电路都有

$$\Delta u_O = \Delta u_{Od} + \Delta u_{Oc} = A_d \Delta u_{Id} + A_c \Delta u_{Ic} = A_d \Delta u_I$$

差模输出

共模输出

2. 单端输入双端输出电路



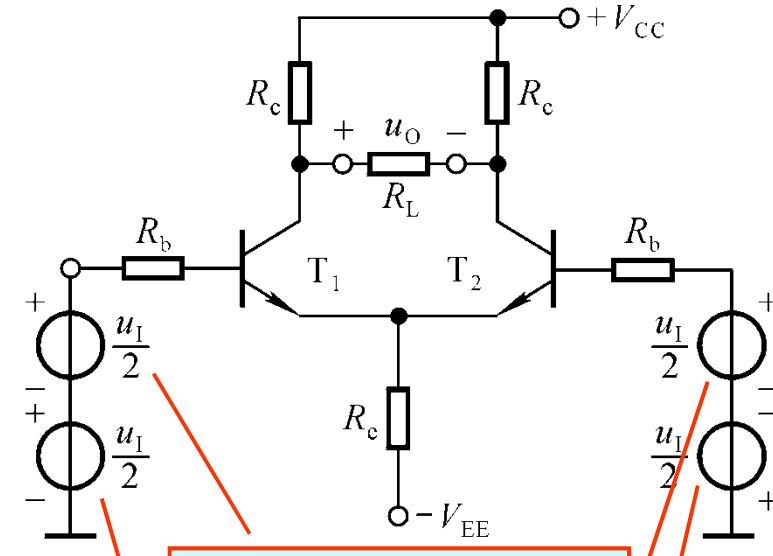
单端输入就相当于差模与共模同时输入： $\Delta u_{Id} = \Delta u_I, \Delta u_{Ic} = \Delta u_I / 2$

\therefore 单入电路都有

$$\Delta u_O = A_d \Delta u_{Id} + A_c \Delta u_{Ic} = A_d \Delta u_I + A_c \frac{\Delta u_I}{2}$$

差模输出

共模输出

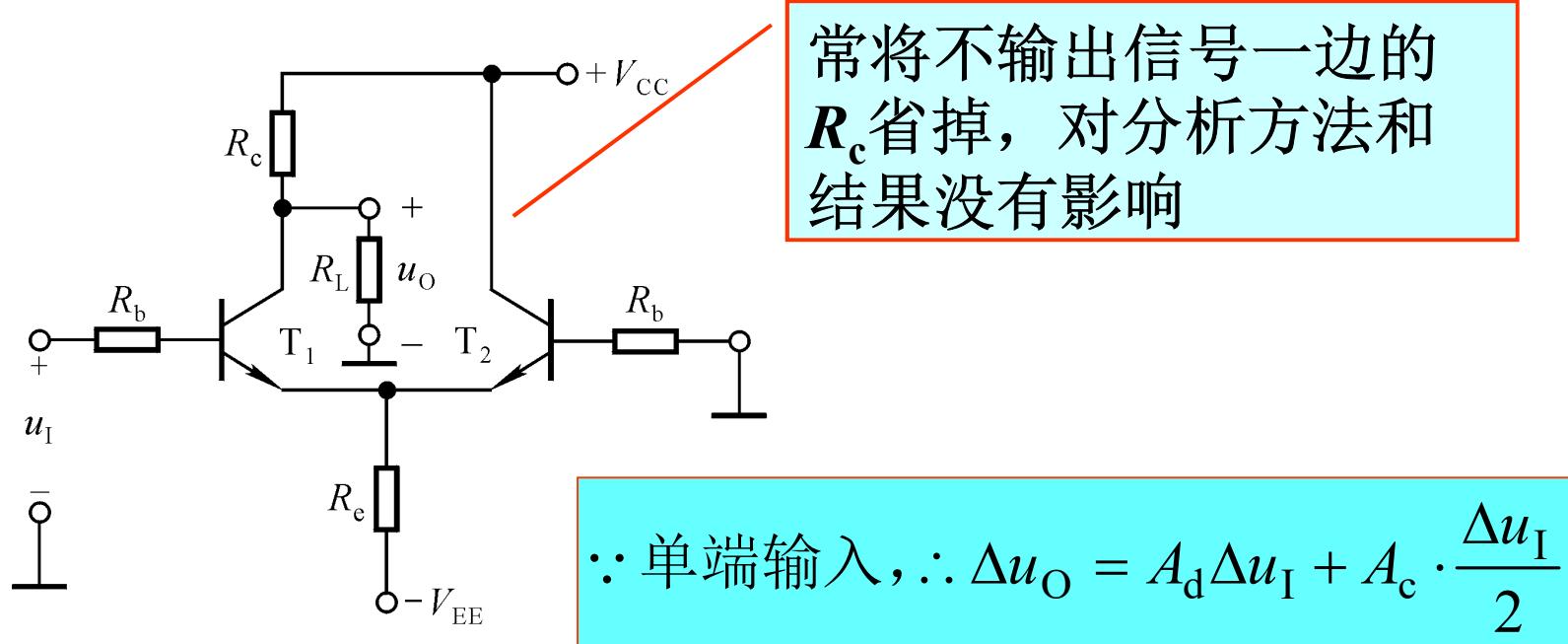


共模输入电压

差模输入电压

Q 点、 A_c 、 A_d 、 R_i 及 R_o 与双入双出电路相同

3. 单端输入单端输出电路



Q 点、 A_c 、 A_d 、 R_i 及 R_o
与双入单出电路相同

4. 四种接法的比较 (在电路参数理想对称条件下)

输入方式: 都有 $R_i = 2(R_b + r_{be})$; 都有 $\Delta u_O = A_d \Delta u_{Id} + A_c \Delta u_{Ic}$;

双端输入相当于差模输入,

有 $\Delta u_{Id} = \Delta u_I$, $\Delta u_{Ic} = 0$, $\therefore \Delta u_O = A_d \Delta u_I$;

单端输入相当于差模与共模同时输入,

有 $\Delta u_{Id} = \Delta u_I$, $\Delta u_{Ic} = \Delta u_I / 2$, $\therefore \Delta u_O = A_d \Delta u_I + A_c \cdot \frac{\Delta u_I}{2}$ 。

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

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

$$A_c = 0$$

$$K_{CMR} = \infty$$

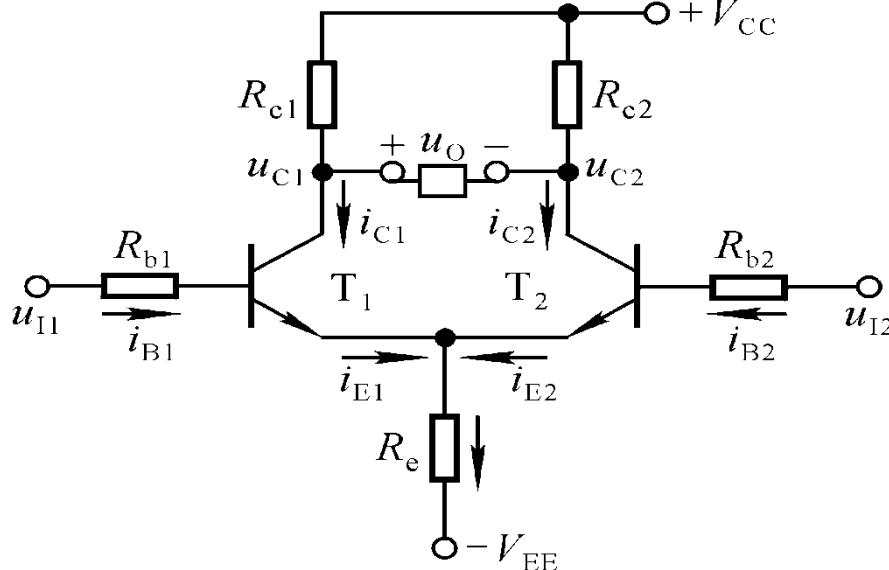
$$R_o = 2R_c$$

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	$= R_c$

例3.3.1(1)(2) 及补充

$$u_{Ic} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} = 7.5\text{mV}$$

$$u_{Id} = u_{I1} - u_{I2} = 5\text{mV}$$



1.接 R_L 时，求Q点；

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

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1+\beta}, \quad U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}R_c + U_{BEQ}$$

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

3.若 $u_{I1}=10\text{mV}$, $u_{I2}=5\text{mV}$, 并接 R_L , 求 u_o 、 R_i 和 R_o 。

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

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

$$A_c = 0$$

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

$$R_o = 2R_c$$

五、改进型差分放大电路

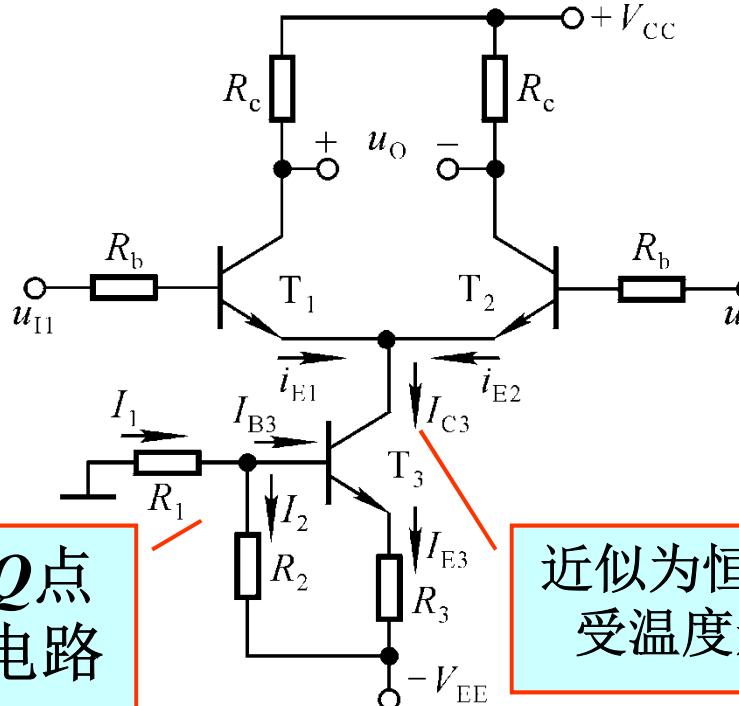
1. 具有恒流源的差分放大电路

R_e 越大，共模负反馈越强， A_c 越小， K_{CMR} 越大，差分放大电路的性能就越好。

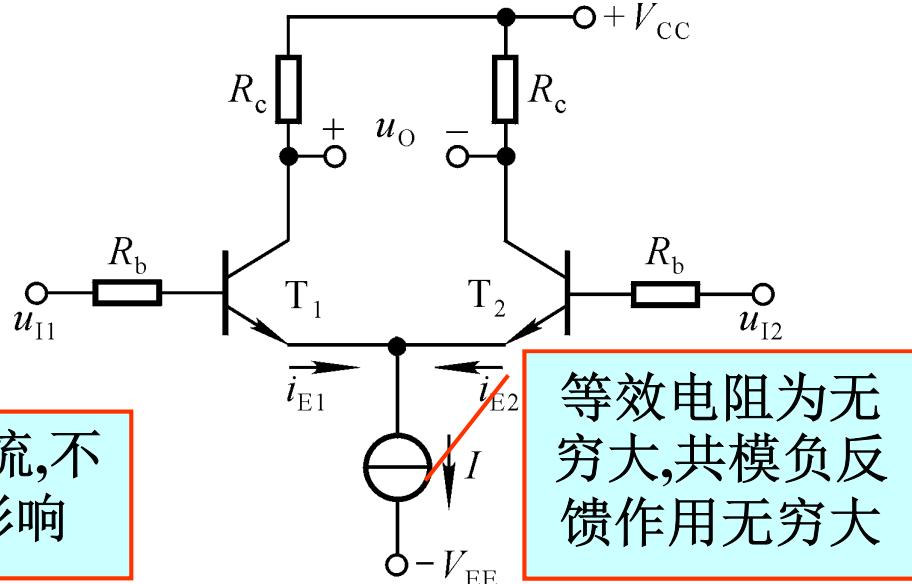
但为使静态电流不变， R_e 越大，就要不断增大电源电压 V_{EE} ，这显然不现实，也不合理。

所以需要在较低电源电压的条件下，得到趋于无穷大的 R_e 。

解决方法：采用恒流源！



恒流源电路的简化画法



当电路参数满足 $(1+\beta)R_3 \gg (R_1//R_2)$ 时, $I_2 \gg I_{B3}$,

$$A_c = 0$$

即 $I_1 \approx I_2$, 因此:

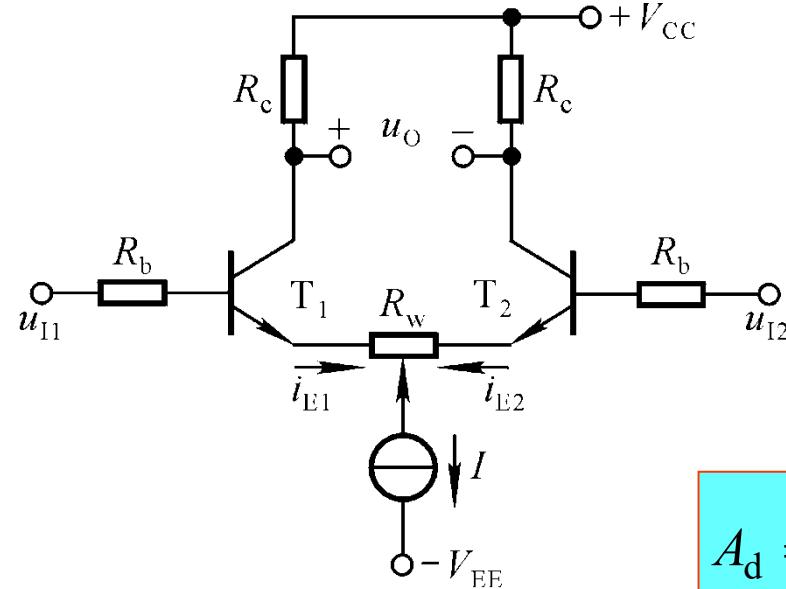
$$I_{C3} \approx I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{EE} - U_{BEQ}}{R_3}$$

$$A_d = -\frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}}, \quad R_o = 2R_c \text{ (双出)}$$

$$A_d = -\frac{1}{2} \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}}, \quad R_o = R_c \text{ (单出)}$$

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

2. 加调零电位器 R_W



R_W 对差模信号有负反馈，会减小 A_d ，所以不能太大。

为了弥补电路的不完全对称，可设置调零电位器 R_W 。调节 R_W 使 $u_{I1}=u_{I2}=0$ 时 $u_O=0$ 。

R_W 对 Q 点及动态参数会产生影响，若 R_W 滑动端在中点，写出 A_c 、 A_d 、 R_o 、 R_i 的表达式：

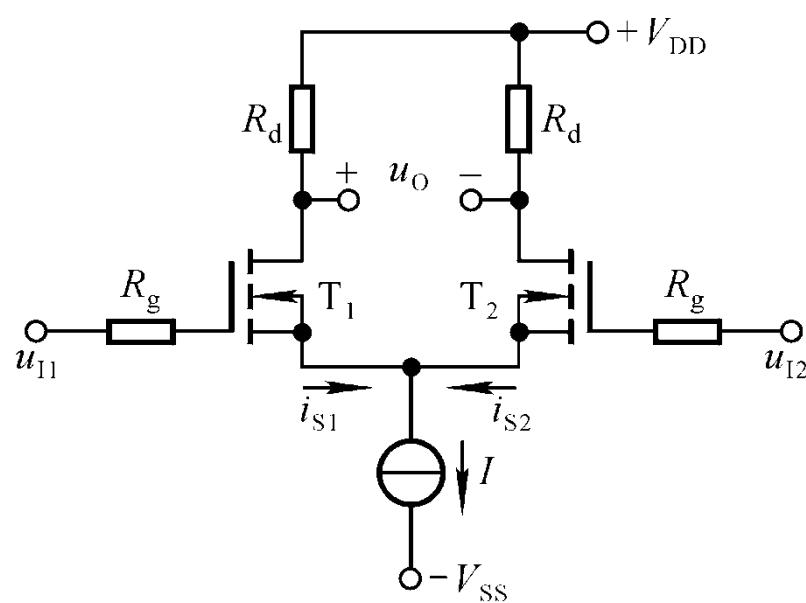
$$A_c = 0$$

$$A_d = -\frac{\beta R_c}{R_b + r_{be} + (1+\beta)\frac{R_w}{2}}, \quad R_o = 2R_c \text{(双出)}$$

$$A_d = -\frac{1}{2} \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be} + (1+\beta)\frac{R_w}{2}}, \quad R_o = R_c \text{(单出)}$$

$$R_i = 2[R_b + r_{be} + (1+\beta)\frac{R_w}{2}]$$

3.场效应管差分放大电路



写出 A_c 、 A_d 、 R_o 、 R_i 的表达式：

$$A_c = 0$$

$$A_d = -g_m R_d, \quad R_o = 2R_d \text{ (双出)}$$

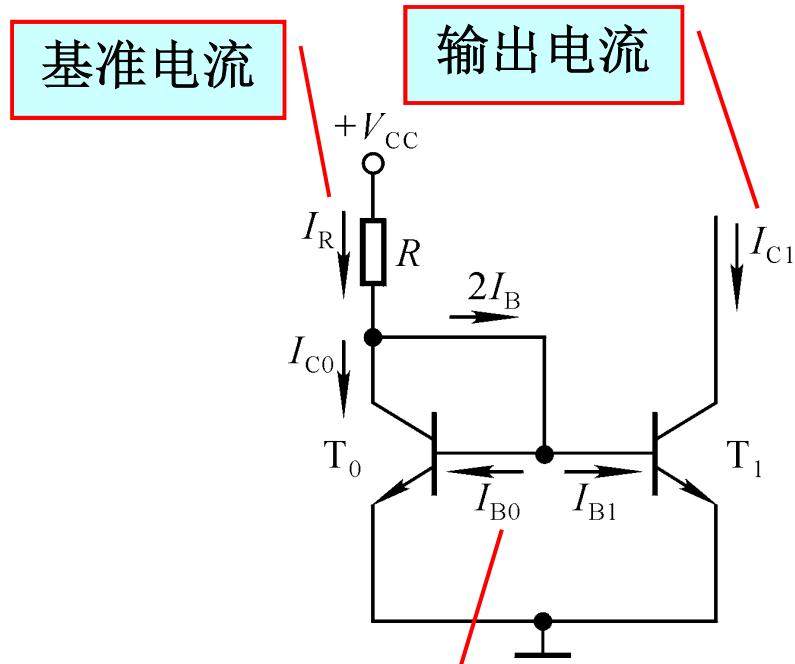
$$A_d = -\frac{g_m R_d}{2}, \quad R_o = R_d \text{ (单出)}$$

$$R_i = \infty$$

3.3.3 电流源电路

一、基本电流源电路

1. 镜像电流源



具有温度补偿作用，提高了输出电流的稳定性

电流源电路可以为各级提供合适的静态电流，还可以作为有源负载取代高阻值的电阻。

T_0 和 T_1 特性完全相同

$$\because U_{BE1} = U_{BE0} = U_{BE}, \therefore I_{B1} = I_{B0} = I_B$$

$I_{C1} = I_{C0} = I_C$ 呈镜像关系

$$I_R = I_{C0} + 2I_B = I_{C1} + \frac{2I_{C1}}{\beta} \quad I_{C1} = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I_R$$

当 $\beta \gg 2$ 时， $I_{C1} \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R}$

电路简单，应用广泛，但输出电流难以做到较大或很小。

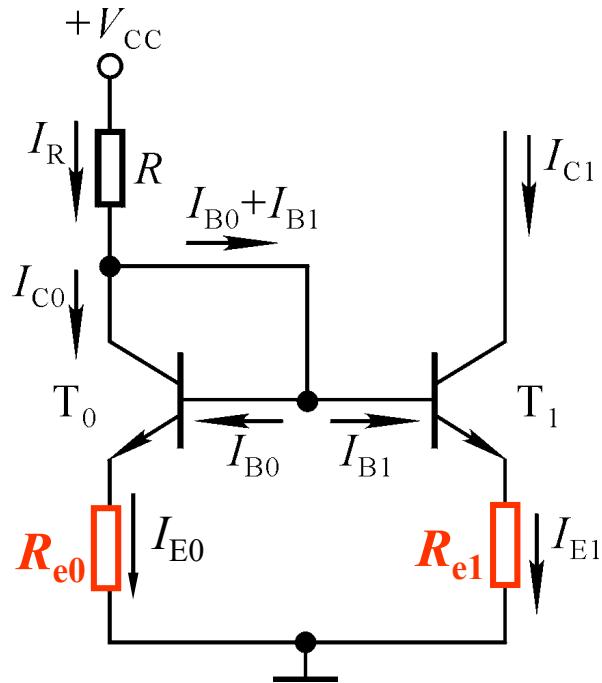
2. 比例电流源

输出电流与基准电流成比例关系，即输出电流可以大于或小于基准电流。

$$U_{BE1} + I_{E1}R_{e1} = U_{BE0} + I_{E0}R_{e0}$$

T_0 和 T_1 特性完全相同

$$I_{E1}R_{e1} = I_{E0}R_{e0} + (U_{BE0} - U_{BE1})$$



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

$$\text{当 } \beta \gg 1 \text{ 时, } I_{C1}R_{e1} = I_{C0}R_{e0} + U_T \ln \frac{I_{C0}}{I_{C1}}$$

$$\text{当 } \beta \gg 2 \text{ 时, } I_{C0} \approx I_R \approx \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R + R_{e0}}$$

与 I_R 成比例

$$\therefore I_{C1} \approx \frac{R_{e0}}{R_{e1}} I_R + \frac{U_T}{R_{e1}} \ln \frac{I_R}{I_{C1}}$$

$$I_{C1} \approx \frac{R_{e0}}{R_{e1}} I_R$$

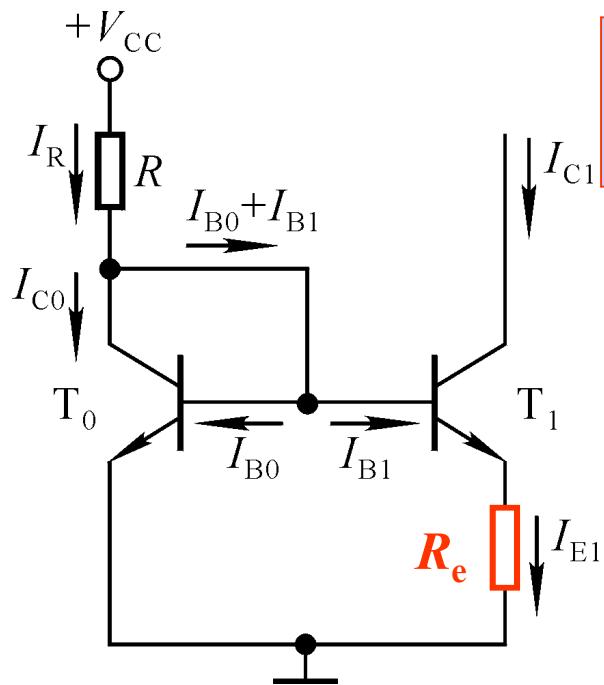
R_{e0} 和 R_{e1} 具有电流负反馈，所以比例电流源的输出电流具有更高的温度稳定性。

3.微电流源

能提供很小的静态电流，又不要用大电阻。

只要几千欧的
 R_e ,就可得到几
十微安的 I_{C1}

T_0 和 T_1 特性完全相同 当 $\beta \gg 1$ 时, $I_{C1} \approx I_{E1} = (U_{BE0} - U_{BE1})/R_e$



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

只有几十毫伏,甚至更小

由前面推导可知:

$$\text{当 } \beta \gg 2 \text{ 时, } I_{C1} \approx \frac{R_{e0}}{R_{e1}} I_R + \frac{U_T}{R_{e1}} \ln \frac{I_R}{I_{C1}}$$

$$\therefore I_{C1} \approx \frac{U_T}{R_e} \ln \frac{I_R}{I_{C1}}$$

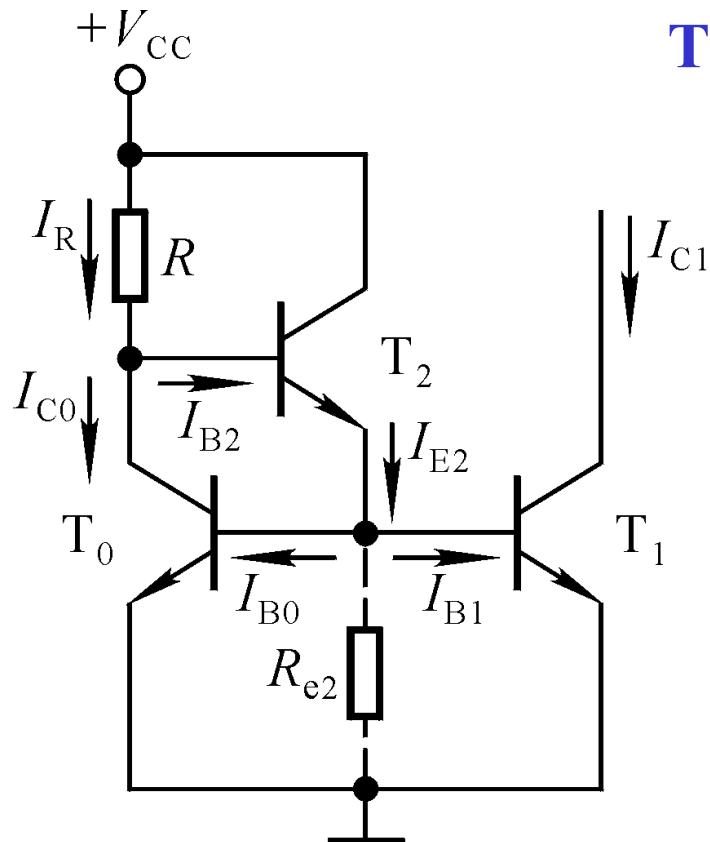
式中 $I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R}$

超越
方程

以上电路都需要 β 足够大, 而对于横向 PNP 管的 β 不大。

二、改进型电流源电路

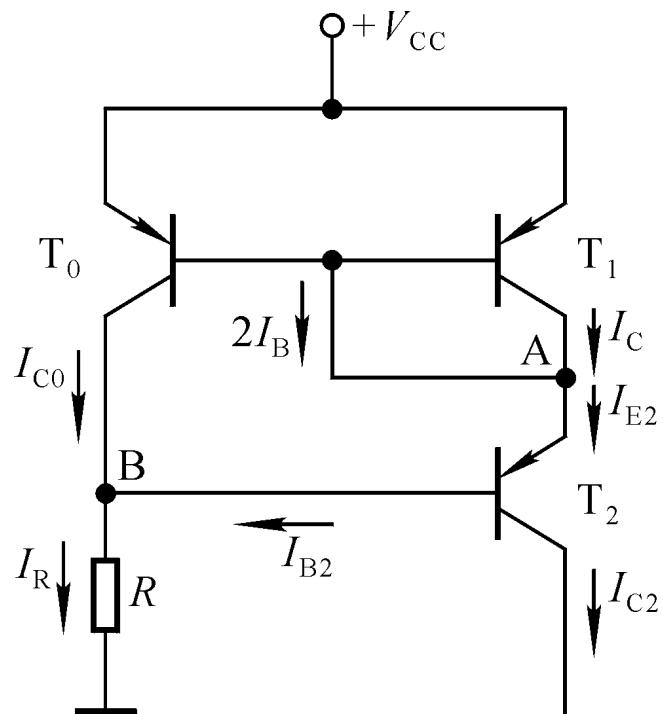
1. 加射极输出器的电流源



T_0 、 T_1 和 T_2 特性完全相同

$$I_{C1} = \frac{I_R}{1 + \frac{2}{(1 + \beta)\beta}} \approx I_R$$

2. 威尔逊电流源



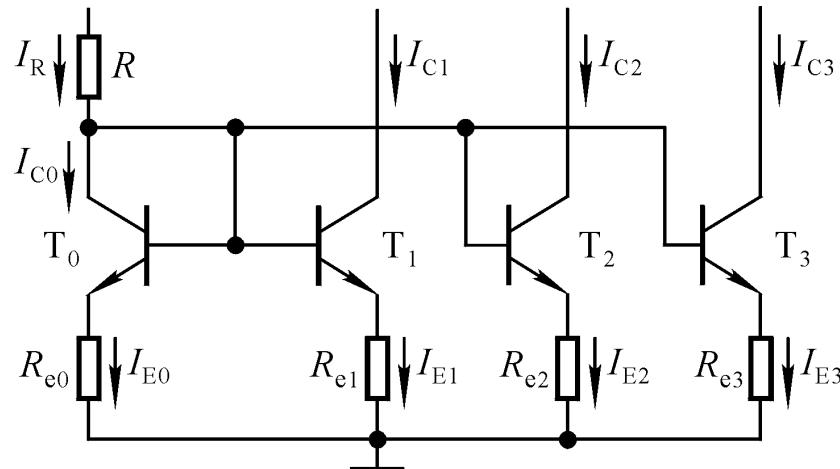
T₀、T₁和T₂特性完全相同

$$I_{C2} = \left(1 - \frac{2}{\beta^2 + 2\beta + 2}\right) I_R \approx I_R$$

三、多路电流源电路

1. 基于比例电流源的多路电流源

利用一个基准电流来获得多个不同的输出电流。

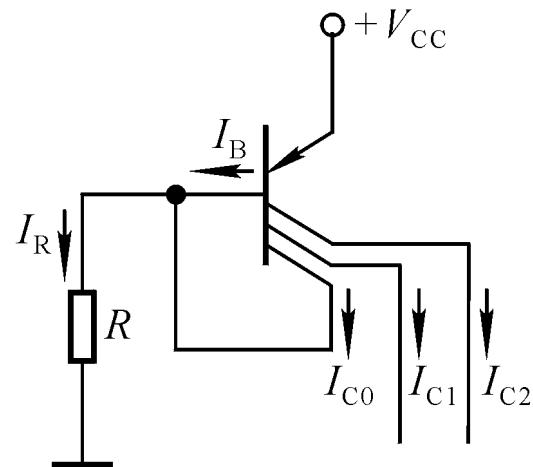


$$\begin{aligned} & U_{BE0} + I_{E0}R_{e0} \\ = & U_{BE1} + I_{E1}R_{e1} \\ = & U_{BE2} + I_{E2}R_{e2} \\ = & U_{BE3} + I_{E3}R_{e3} \end{aligned}$$

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

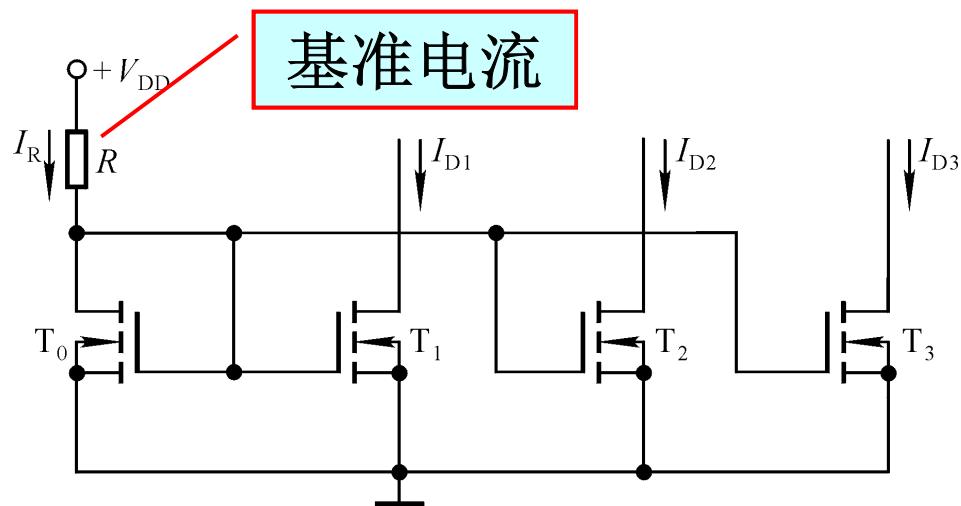


设三个集电区的面积分别为 S_0 、 S_1 、 S_2 ，则

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

多为横向PNP型管，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, 来确定沟道的几何尺寸。

四、以电流源为有源负载的放大电路

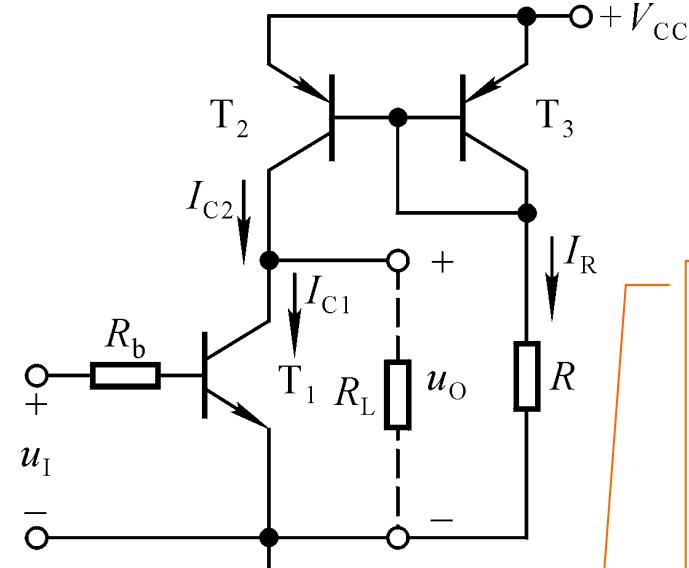
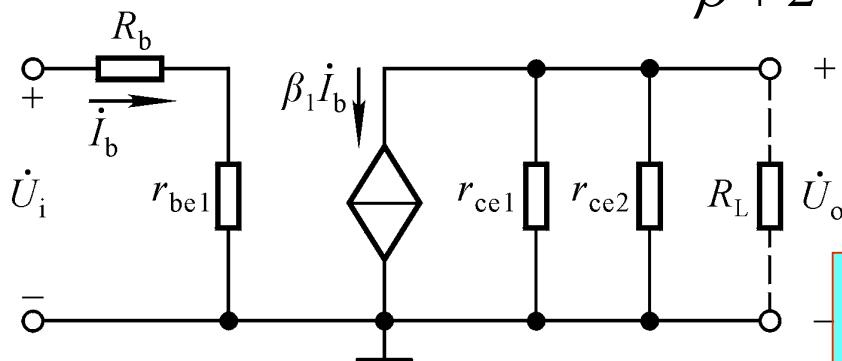
1. 有源负载共射放大电路

哪只管子为放放大管？

其集电结静态电流约为多少？

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{EB3}}{R}$$

$$\text{空载时, } I_{C1} = I_{C2} = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I_R$$

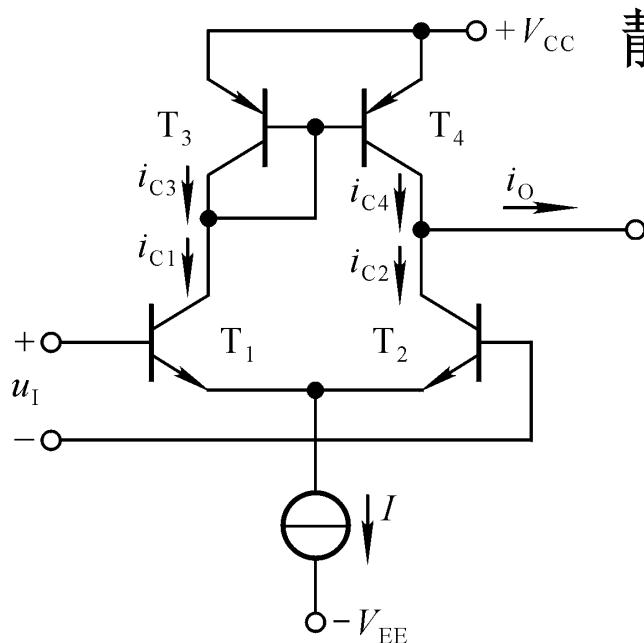


提高了共射电路的电压放大倍数

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

若 $R_L \ll (r_{ce1} // r_{ce2})$, 则 $\dot{A}_u \approx -\frac{\beta_1 R_L}{R_b + r_{be1}}$

2. 有源负载差分放大电路



静态: $I_{C2} = I_{C1}$, $I_{C1} \approx I_{C3}$, $I_{C3} = I_{C4}$, $\therefore I_{C4} \approx I_{C2}$

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

说明共模输入时的
A_c接近于0,比单端
输出差分电路更好

动态(差模输入时):

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

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

$$\begin{aligned} A_d &= \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I} = \frac{2\Delta i_{C1}(r_{ce2} // r_{ce4} // R_L)}{2\Delta i_{B1}r_{be1}} \\ &= \frac{\beta_1(r_{ce2} // r_{ce4} // R_L)}{r_{be1}} \end{aligned}$$

利用镜像电流源使单端输出差分放大电路的差模放大倍数提高到双端输出时的情况。

若 $R_L \ll (r_{ce2} // r_{ce4})$, 则 $A_d \approx \frac{\beta_1 R_L}{r_{be1}}$

3.3.4 直接耦合互补输出级（第8章 功率放大电路）

能够向负载提供足够信号功率的放大电路，简称功放。

一般放在输出级以驱动负载。

一、功率放大电路概述

1. 主要技术指标

最大输出功率 P_{om} ：在不失真的条件下负载上可能获得的最大交流功率（平均功率）。

∵ 输出信号为正弦波且纯阻性负载，

$$\therefore P_{om} = U_{om} I_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

U_{om} ：最大不失真输出电压，是交流有效值

转换效率 η ：是最大输出功率 P_{om} 与此时直流电源提供的功率 P_V 之比。

P_V ：直流电源所提供的功率（平均功率），等于直流电源输出电流的平均值与其电压之积

2. 对功率放大电路的基本要求

- (1) 在电源电压一定的情况下，不失真时输出功率尽可能大，即最大不失真输出电压最大。
- (2) 效率尽可能高，因而在一定的输出功率下，减小直流电源的功耗，就可以提高电路的效率。

3. 功率放大电路中的晶体管（功放管）的选用

功放管通常是大功率管，为使输出功率尽可能大，要求功放管工作在尽限应用状态。

根据极限参数选择功放管，最大管压降接近 $U_{(BR)CEO}$ ，集电极最大电流接近 I_{CM} ，集电极最大功耗接近 P_{CM} 。

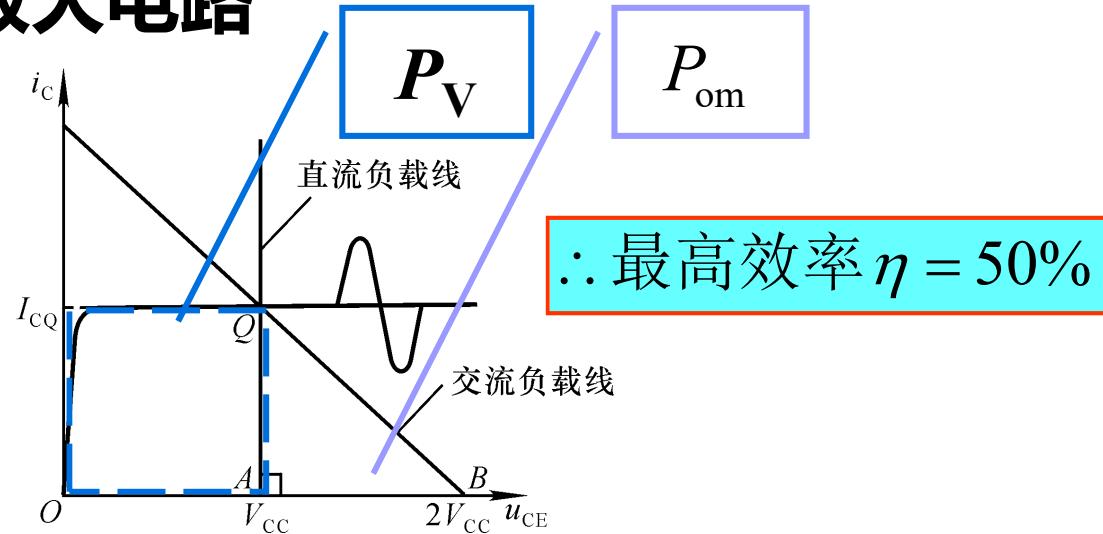
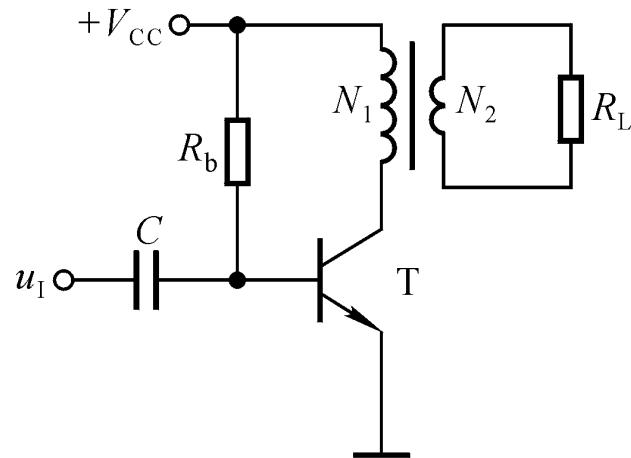
4. 功率放大电路的分析方法

因输出电压和电流的幅值均很大，故不能采用适用于小信号的交流等效电路法，而应采用图解法。

5. 晶体管的工作状态

- (1) 甲类状态：晶体管在信号的整个周期内均处于导通状态 → 效率低
- (2) 乙类状态：晶体管仅在信号的半个周期处于导通状态 → 效率提高，但波形容易失真
- (3) 甲乙类状态：晶体管的导通时间大于半个周期且小于一个周期 → 效率提高，波形基本不失真

二、变压器耦合功率放大电路



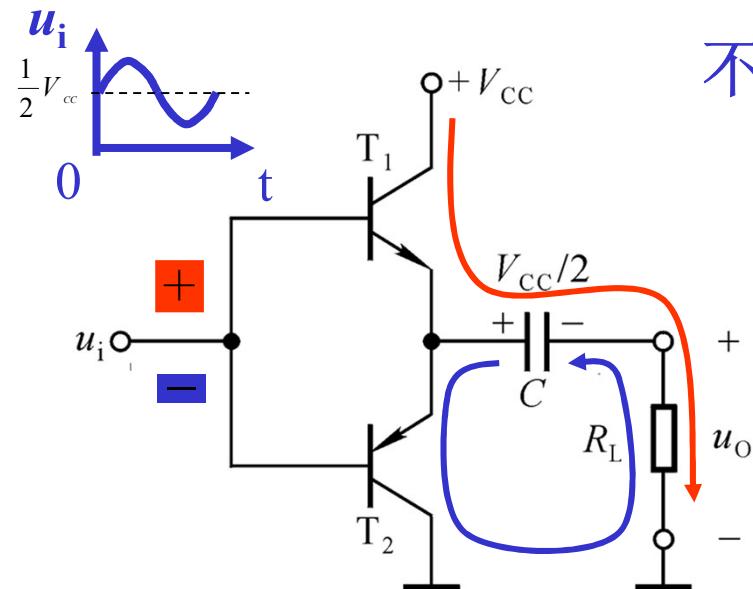
若忽略晶体管的基极电流，
 $P_V = I_{C(AV)}V_{CC} = I_{CQ}V_{CC}$

$$P_{om} = \frac{I_{CQ}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} I_{CQ} V_{CC}$$

特点：共射电路，单电源供电，
 有变压器，**低频特性差**，属于**甲类状态**，效率低。

为了提高效率，通常希望**输入信号为零时**电源不提供功率（即静态时管子截止），也就是**乙类状态**。

三、无输出变压器功率放大电路 (OTL电路)



不同类型的晶体管 T_1 、 T_2 特性理想对称

静态时，两管截止， $u_i = U_B = U_E = +\frac{V_{CC}}{2}$

电容 C 足够大，对交流信号可视为短路

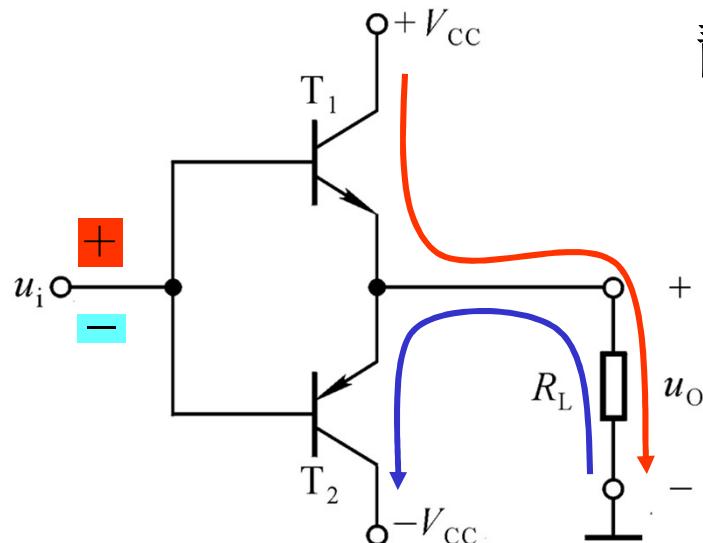
正负半周都组成射级输出器， $\therefore u_o \approx u_i$

射级输出器更适于作输出级，可以提高带负载能力。

特点：射极输出，单电源供电，有电容，
低频特性差，属于乙类状态，效率较高。

四、无输出电容功率放大电路 (OCL电路)

即直接耦合互补输出级(第3章中)



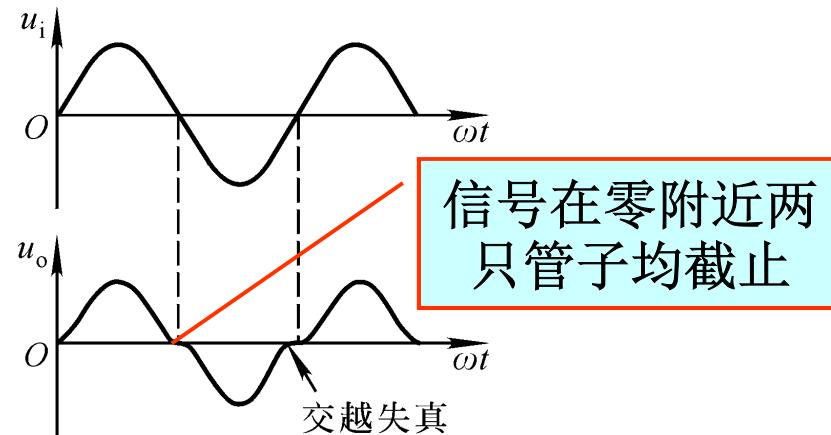
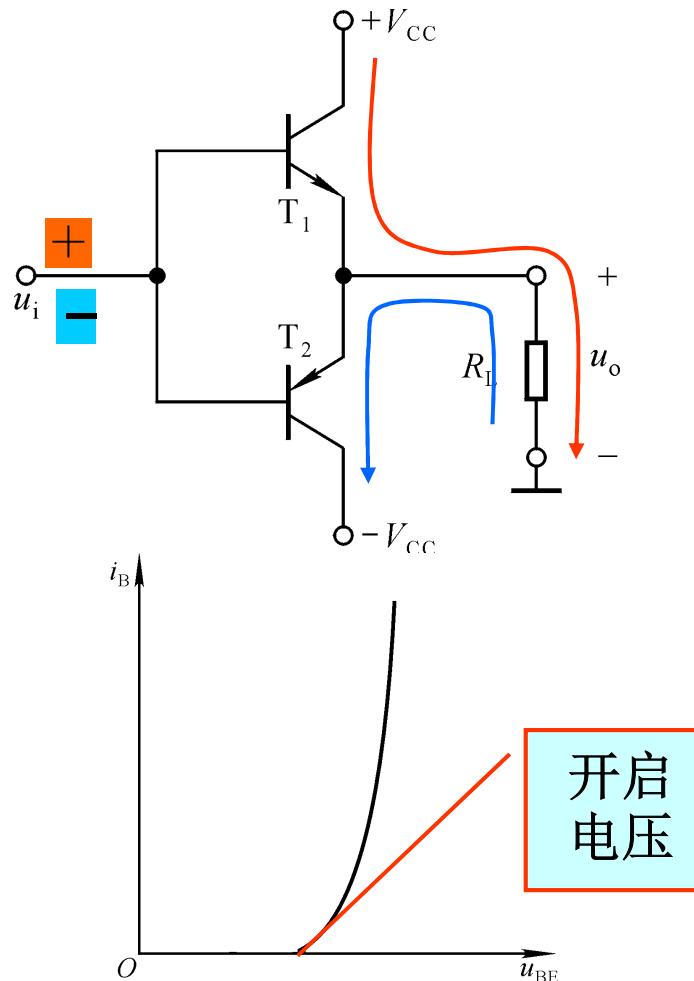
静态时，两管截止， $u_o = U_E = U_B = 0$ 。

u_i 正半周， $u_o = u_i$

u_i 负半周， $u_o = u_i$

正负电源交替供电，输出与输入之间双向跟随；不同类型的两只晶体管交替工作，且均组成射极输出形式，称为互补。

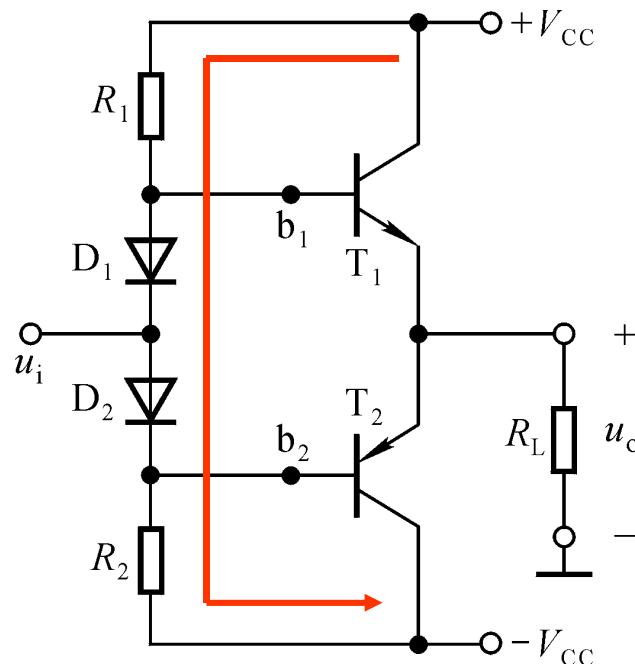
特点：射极输出，双电源供电，无电容，
低频特性好，属于乙类状态，效率较高。

乙类状态都存在交越失真

消除交越失真的方法：
设置合适的静态工作点，静态时两管均处于临界导通或微导通，即处于**甲乙类**状态。

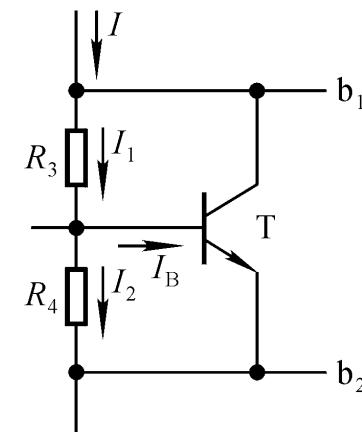
五、消除交越失真的OCL电路

1. 消除交越失真的互补输出级(第3章中)



处于甲乙类状态

静态： $U_{B1B2} = U_{D1} + U_{D2}$, 两管微导通, $U_E = 0, u_o = 0$
 动态：二极管的动态电阻很小, $\therefore u_o \approx u_{b1} \approx u_{b2} \approx u_i$

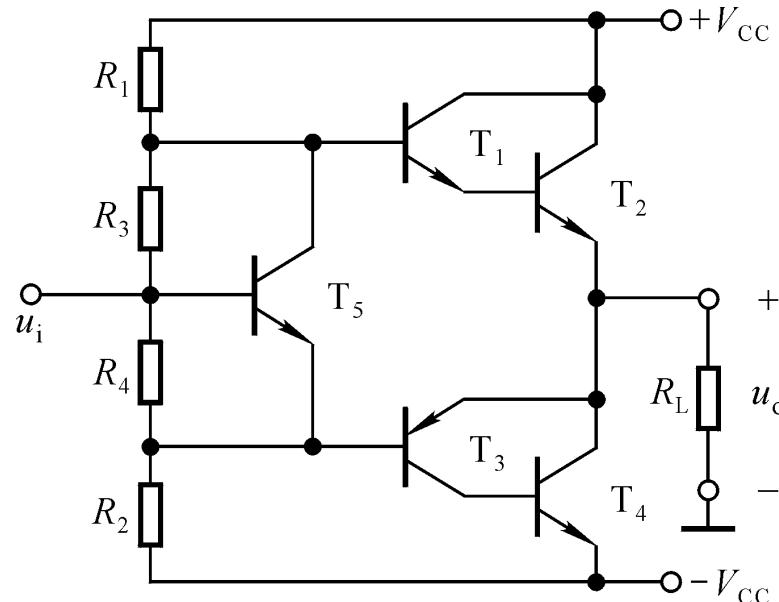


若 $I_2 \gg I_B$, 则

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

故称之为 U_{BE} 倍增电路

2.采用复合管的准互补输出级(第3章中)

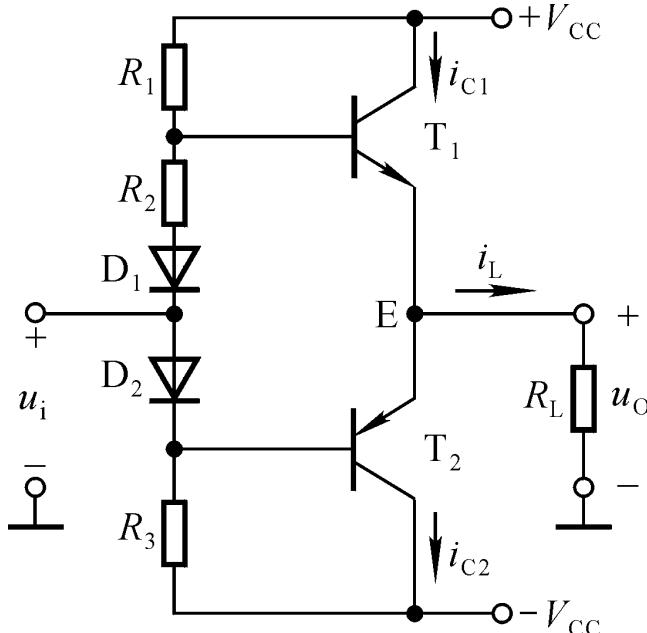


处于甲乙类状态

不同类型的晶体管要做到特性完全对称是比较困难的，所以，在实用电路中常采用复合管来替代，输出管2、4采用同类型晶体管，较容易做到特性相同，这种电路称为准互补电路。

3. OCL电路的分析方法

处于甲乙类状态



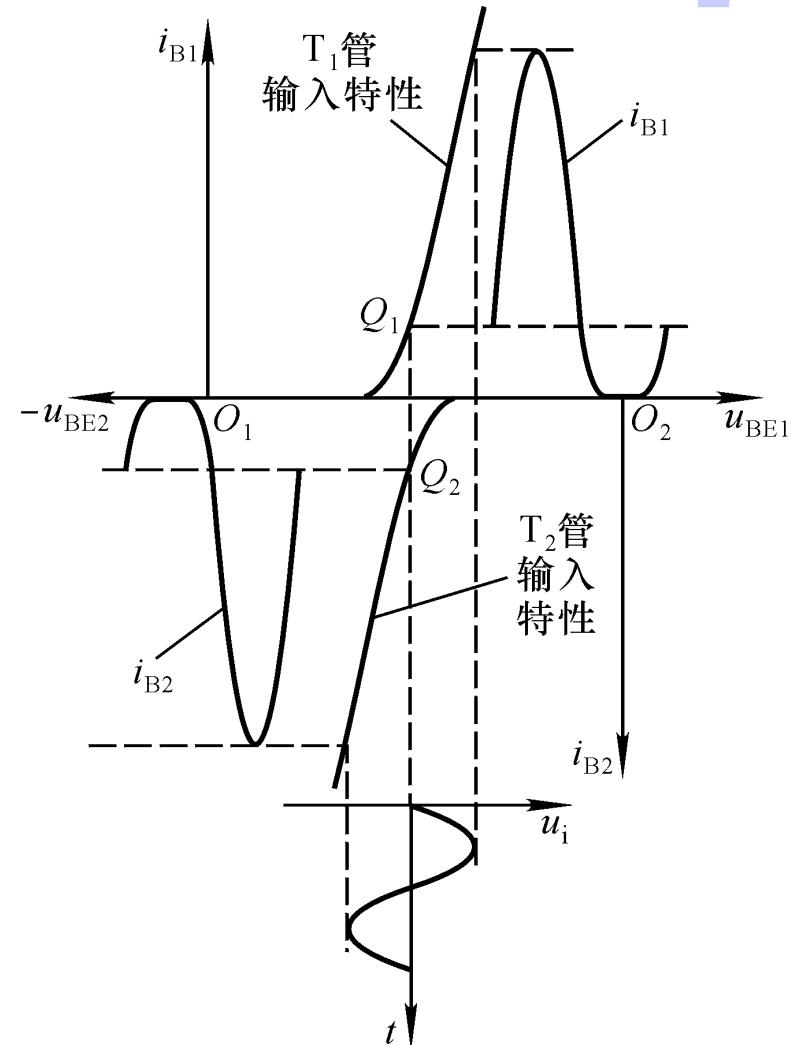
静态: $U_{B1B2} = U_{R2} + U_{D1} + U_{D2}$,

两管微导通, 调节 R_2 使 $I_{B1} = I_{B2}$,

则 $U_E = 0$, $u_o = 0$

动态: 二极管的动态电阻和 R_2 都很小,

$u_o \approx u_{b1} \approx u_{b2} \approx u_i$



T₁和T₂管在 u_i 作用下输入
特性中的图解分析

(1) OCL电路的输出功率及效率

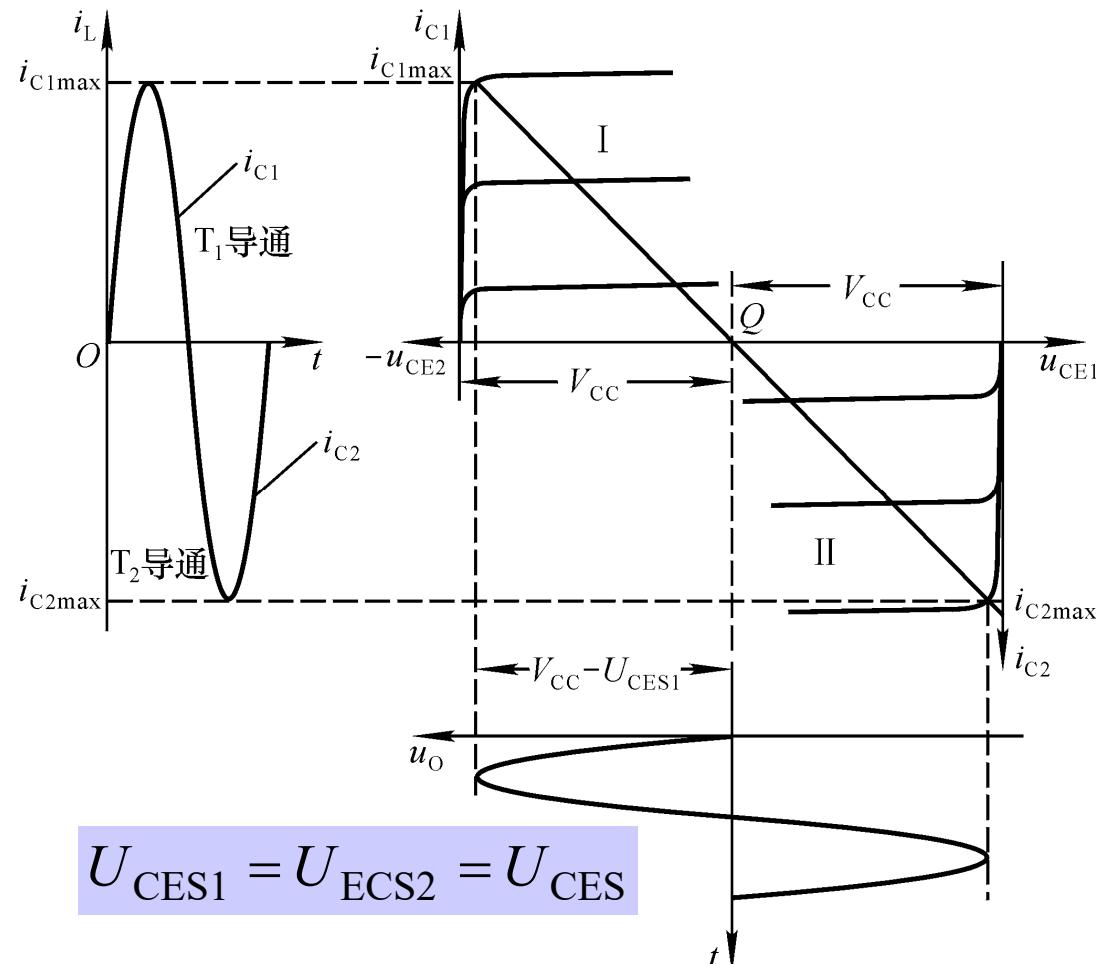
a. 先求出最大不失真输出电压 U_{om}

$$U_{om} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\sqrt{2}}$$

b. 在已知 R_L 的情况下，再求出最大输出功率

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$$



OCL电路的图解分析（忽略两管的静态电流）

3.3 集成运放中的单元电路

模拟电子技术

c. 然后求出负载上输出最大功率时直流电源的平均功率 P_V

若忽略基极电流，

$$P_V = 2 \times \frac{1}{T} \int_0^T i_C \cdot V_{CC} dt$$

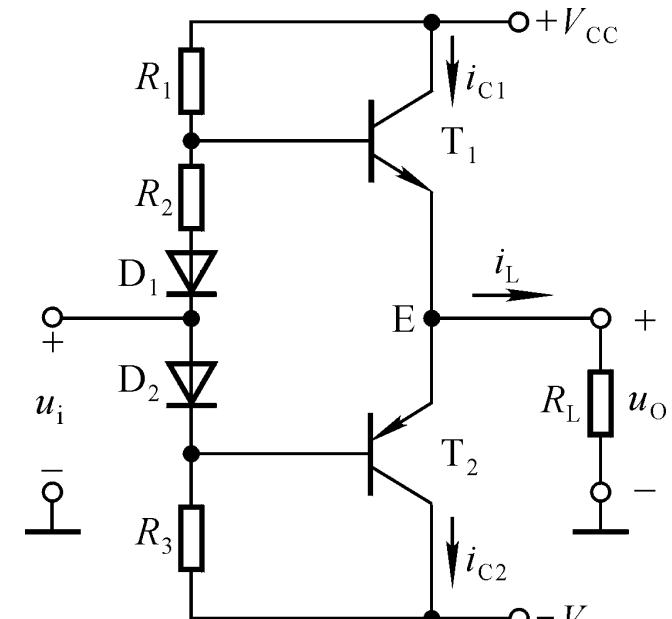
$$= 2 \times \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_L} \cdot \sin \omega t \cdot V_{CC} d(\omega t)$$

$$= \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_{CC}(V_{CC} - U_{CES})}{R_L}$$

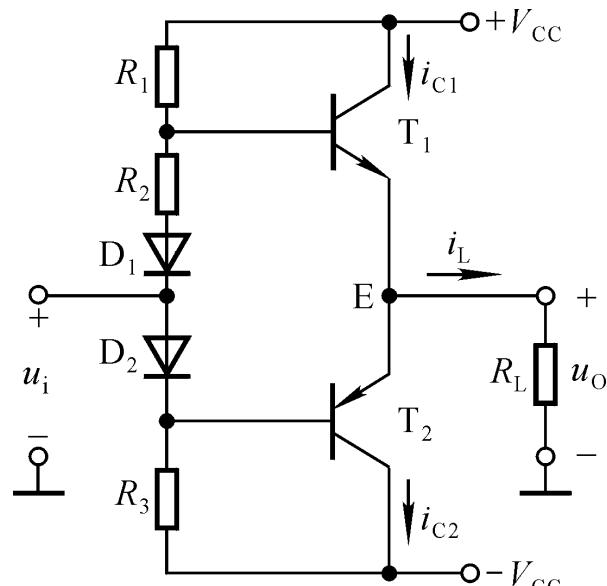
d. 最后求出效率 $\eta = P_{om}/P_V$

$$\boxed{\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}}}$$

在理想情况（即 $U_{CES} = 0$ ）下，效率最高， $\eta = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$



(2) OCL电路中晶体管的选择



c.集电极最大功耗

a.最大管压降

$$|U_{CE\max}| = 2V_{CC} - U_{CES}$$

若考虑留有一定的余量，则

$$|U_{CE\max}| = 2V_{CC}$$

b.集电极最大电流

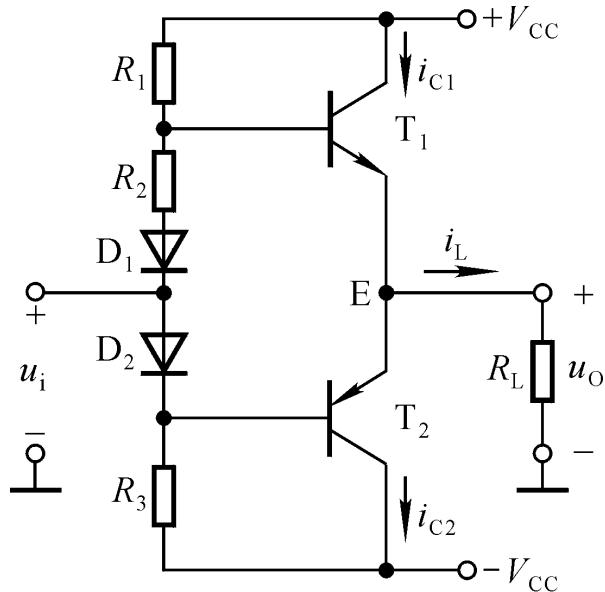
$$I_{C\max} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_L}$$

若考虑留有一定的余量，则

$$I_{C\max} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

管子损耗什么时候最大呢？

当输入电压为零，即输出功率最小时，因集电极电流很小，故管耗很小；当输入电压最大，即输出功率最大时，因管压降很小，故管耗也很小。



每只晶体管的集电极功耗 P_T (平均功率) 与输出电压峰值 U_{OM} 的关系为:

$$\begin{aligned} P_T &= \frac{1}{T} \int_0^T u_{CE} \cdot i_C dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_{CC} - U_{OM} \sin \omega t) \cdot \frac{U_{OM}}{R_L} \cdot \sin \omega t d\omega t \\ &= \frac{1}{R_L} \left(\frac{V_{CC} U_{OM}}{\pi} - \frac{U_{OM}^2}{4} \right) \end{aligned}$$

令 $\frac{dP_T}{dU_{OM}} = 0$, 可得, 当 $U_{OM} = \frac{2}{\pi} \cdot V_{CC} \approx 0.6 V_{CC}$ 时, $P_T = P_{Tmax}$ 。

将此时的 U_{OM} 代入 P_T 的表达式, 可得:

$$P_{Tmax} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L}$$

若理想情况 ($U_{CES} = 0$),

$$\text{则 } P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}, \quad P_{Tmax} = \frac{2}{\pi^2} \cdot P_{om} \approx 0.2 P_{om}$$

可见, 晶体管集电极最大功耗仅为理想时最大输出功率的五分之一。

结论

最大不失真输出电压: 最大输出功率:

$$U_{om} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\sqrt{2}}$$

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$$

转换效率:

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}}$$

最大管压降: $|U_{CEmax}| = 2V_{CC} - U_{CES}$

若考虑留有一定的余量, 则

$$|U_{CEmax}| = 2V_{CC}$$

集电极最大电流:

$$I_{Cmax} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_L}$$

例8.2.1

若考虑留有一定的余量, 则

$$I_{Cmax} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

例8.2.2

集电极最大功耗:

$$P_{Tmax} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} = 0.2 P_{om} \Big|_{U_{CES}=0}$$

选择晶体管时,
其极限参数应满
足:

$$\begin{cases} U_{(BR)CEO} > |U_{CEmax}| \\ I_{CM} > I_{Cmax} \\ P_{CM} > P_{Tmax} \end{cases}$$

这些公式适用于各种
乙类或甲乙类OCL电路

3.4 集成运放电路简介

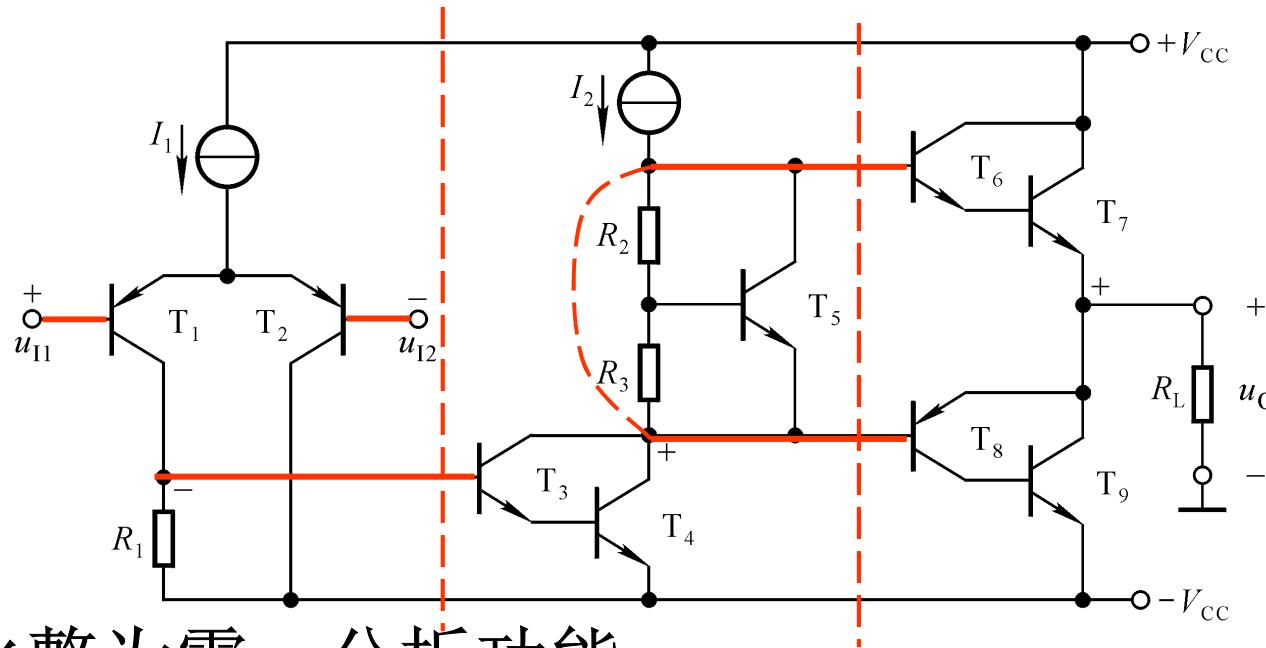
3.4.1 双极型集成运放电路

一、运放电路的分析方法

已知电路图，分析其原理和功能、性能。

- (1) **化整为零：**将整个电路图分为各自具有一定功能的几个部分。
- (2) **分析功能：**定性分析每部分电路的结构形式和性能特点。
- (3) **统观整体：**研究各部分相互间的联系，从而分析整个电路所具有的功能。
- (4) **定量计算：**必要时可估算或利用计算机计算电路的主要参数和性能指标。

二、分析双极型集成运放的原理电路



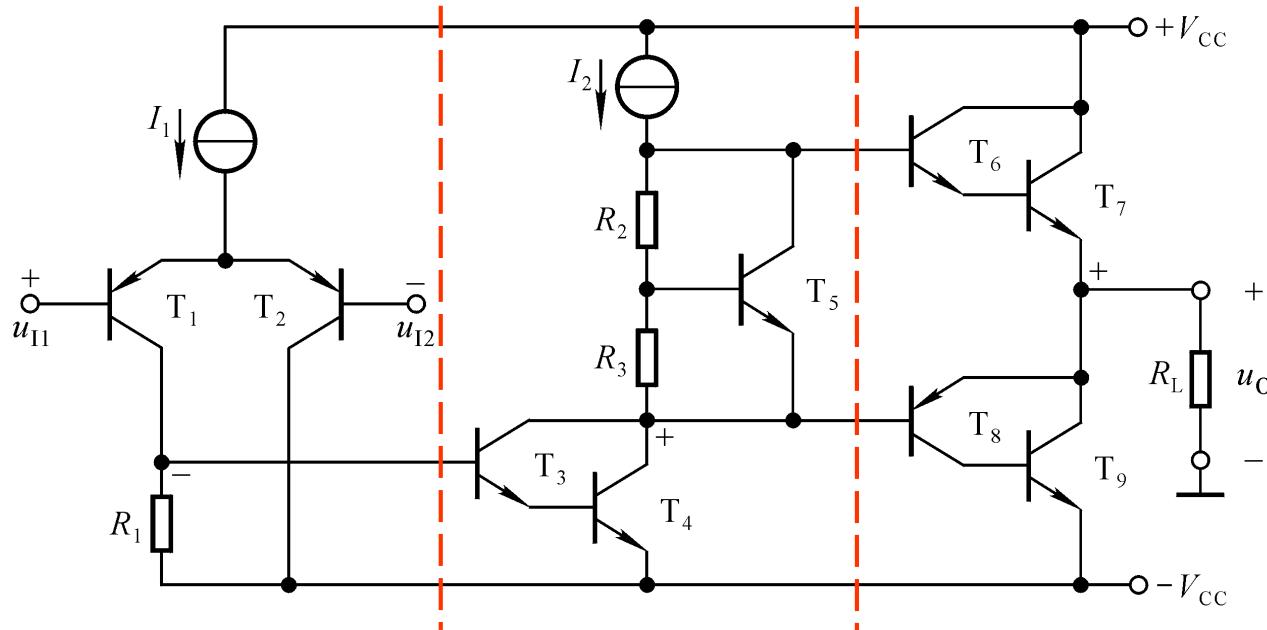
(1) 化整为零，分析功能

第一级：双端输入单端输出的差分放大电路

第二级：以复合管为放大管的共射放大电路(以恒流源作为集电极电阻)

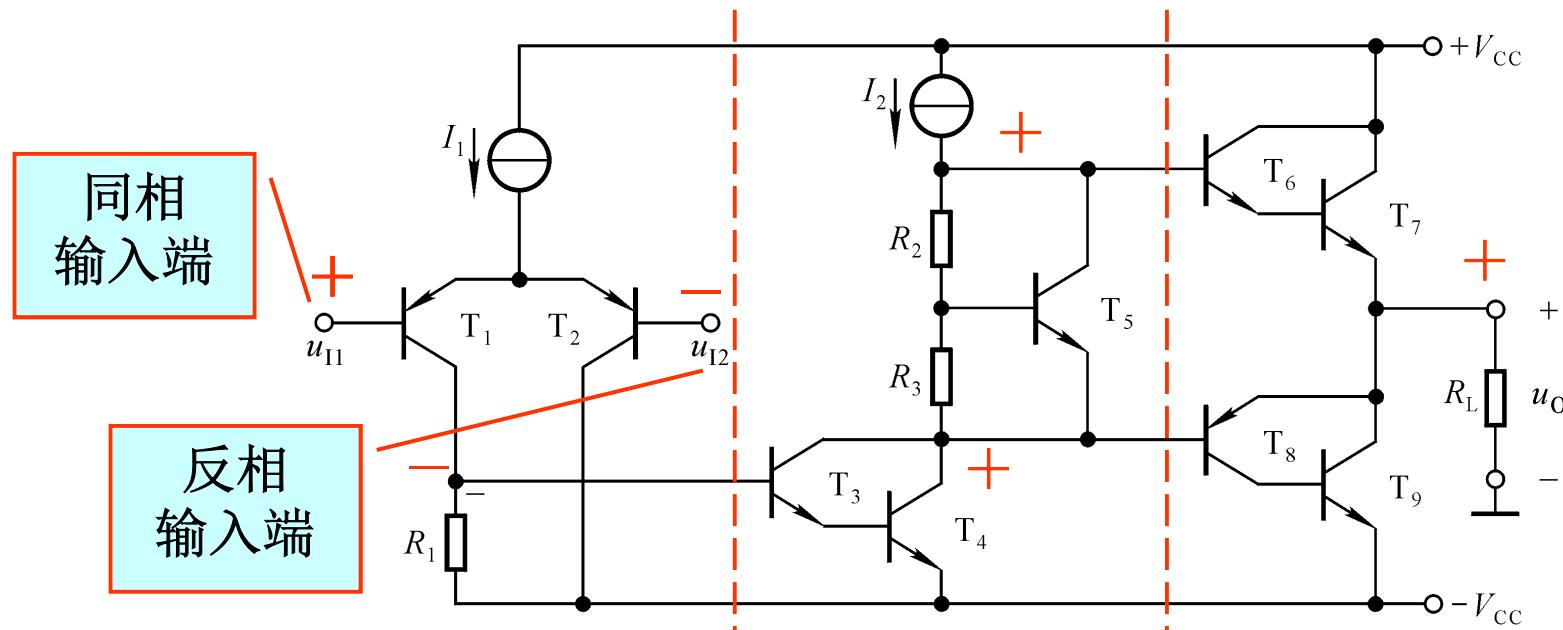
第三级：准互补输出级(属于消除交越失真的OCL电路)

(2) 统观整体



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。

判断电路的同相输入端和反相输入端



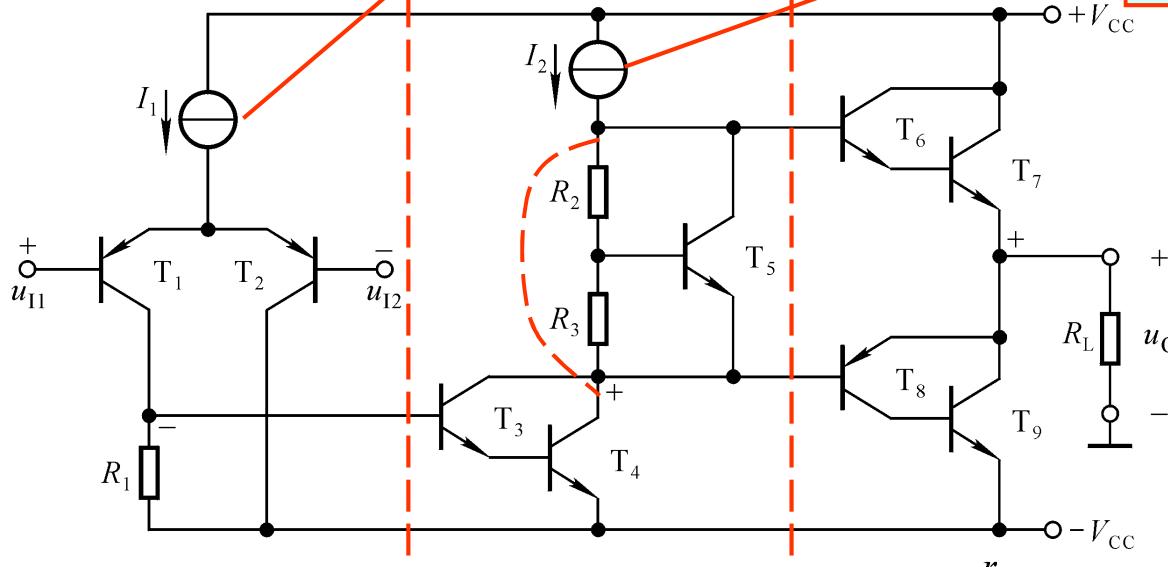
接法	输入	输出	相位
共射(共源)	b (g)	c (d)	反相
共集(共漏)	b (g)	e (s)	同相
共基(共栅)	e (s)	c (d)	同相

整个电路可等效为一个双端输入单端输出的高性能差分放大电路（相当于运放）。

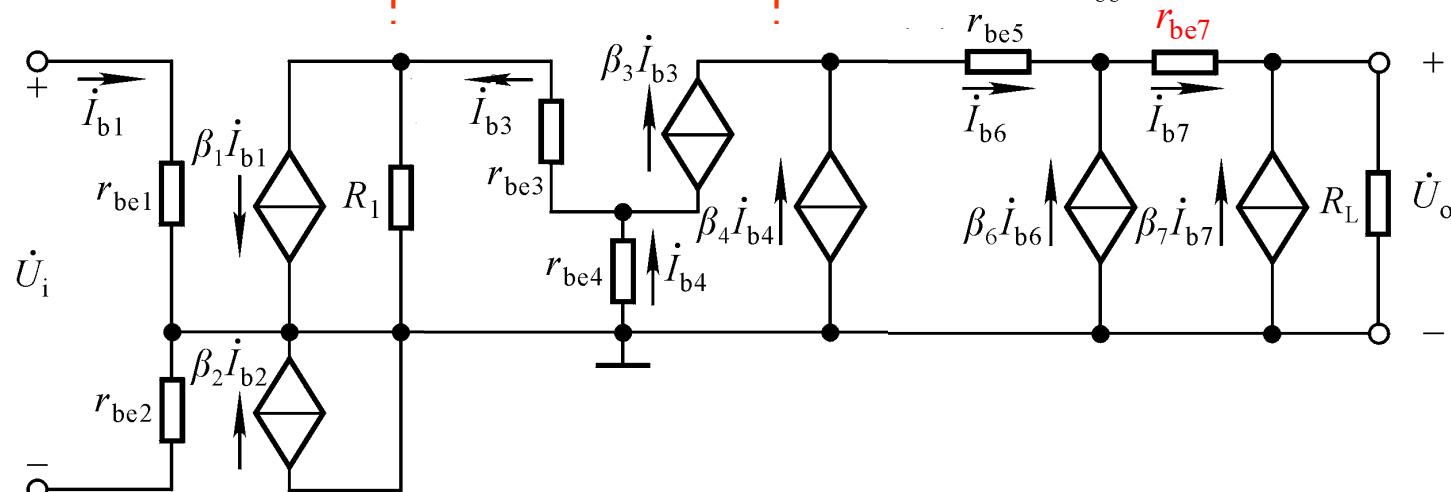
(3) 定量计算

没有动态电流
相当于短路

动态电阻无穷大
相当于开路



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。



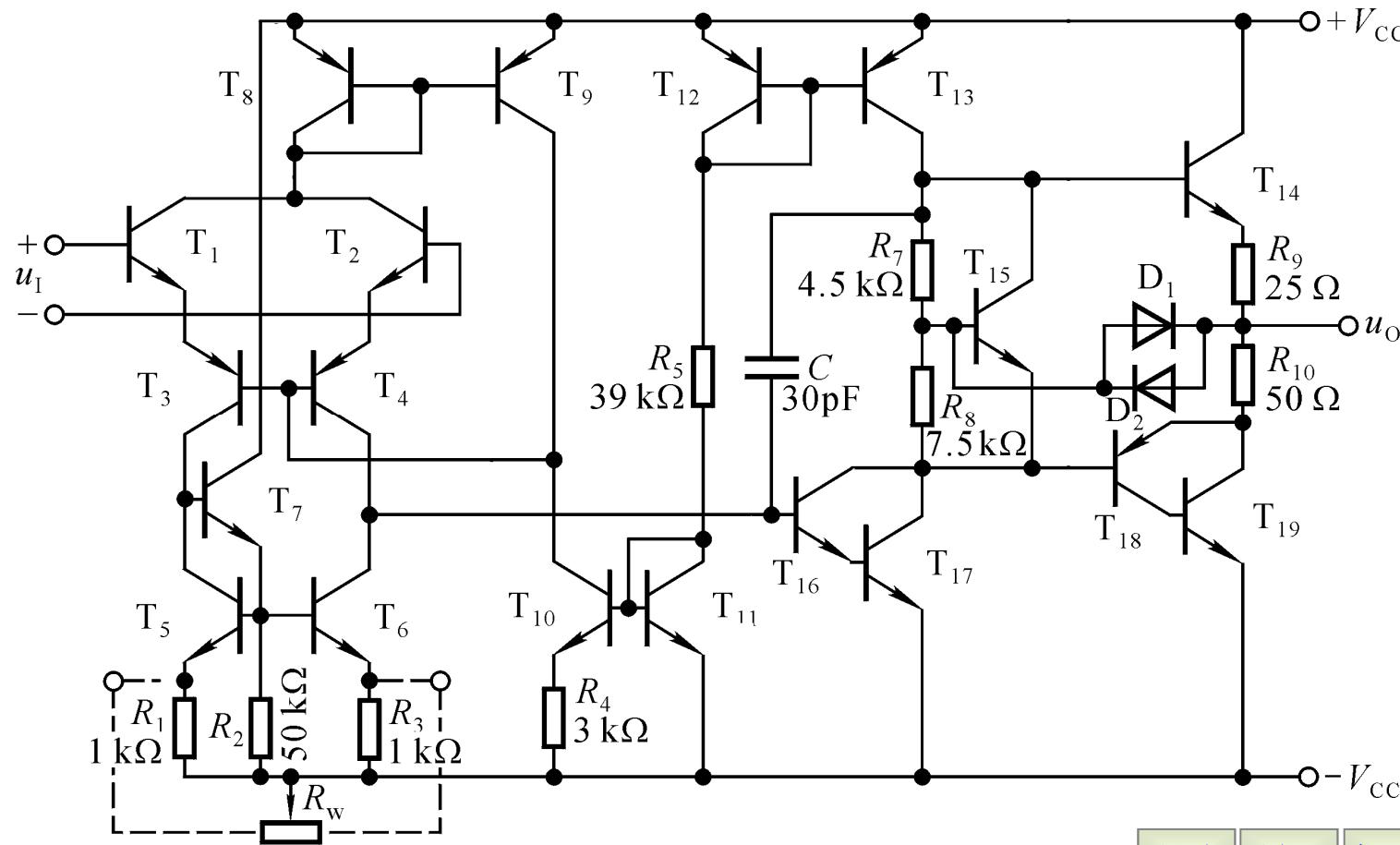
输入级

中间级

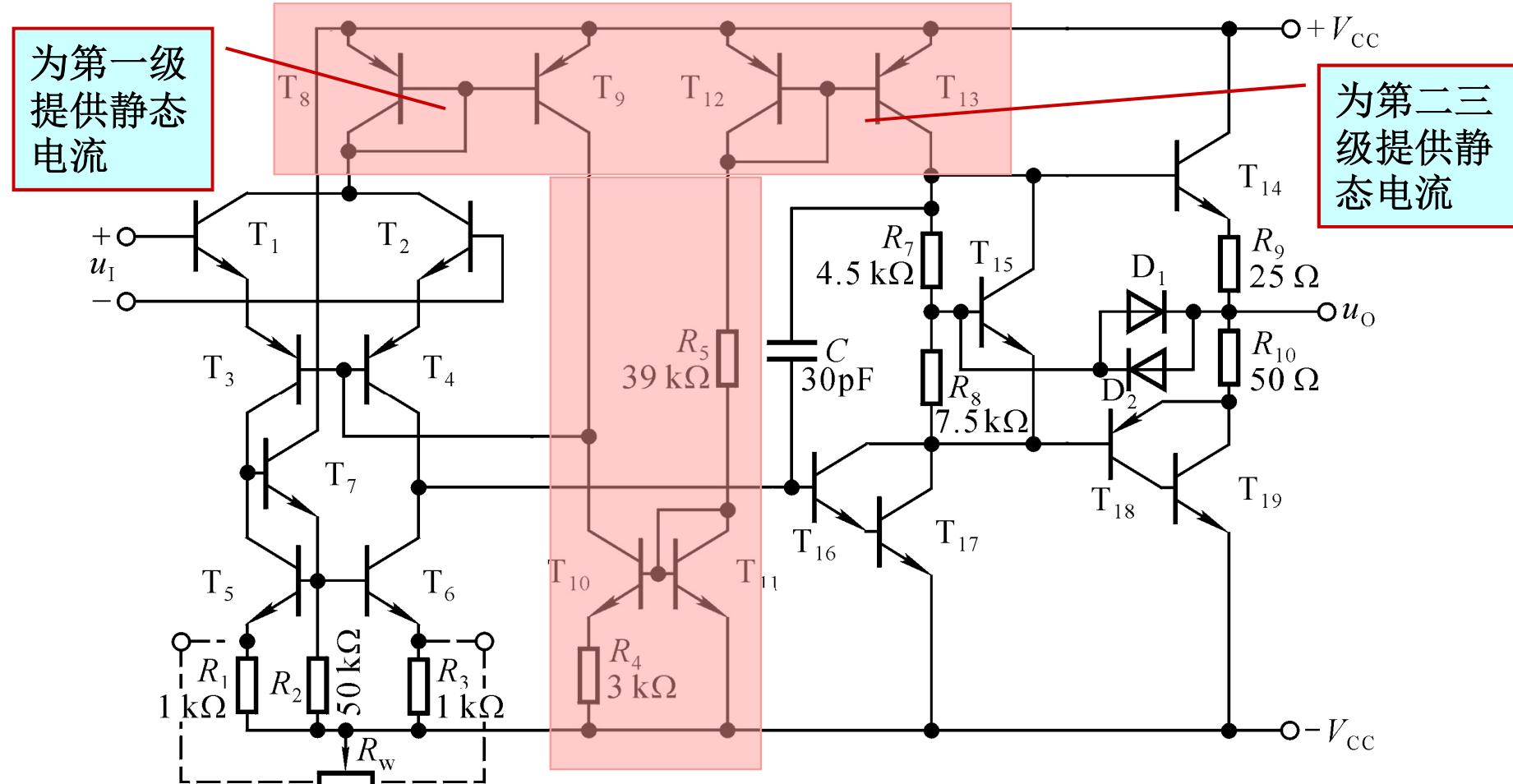
输出级

三、分析型号为F007的通用型集成运放

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。

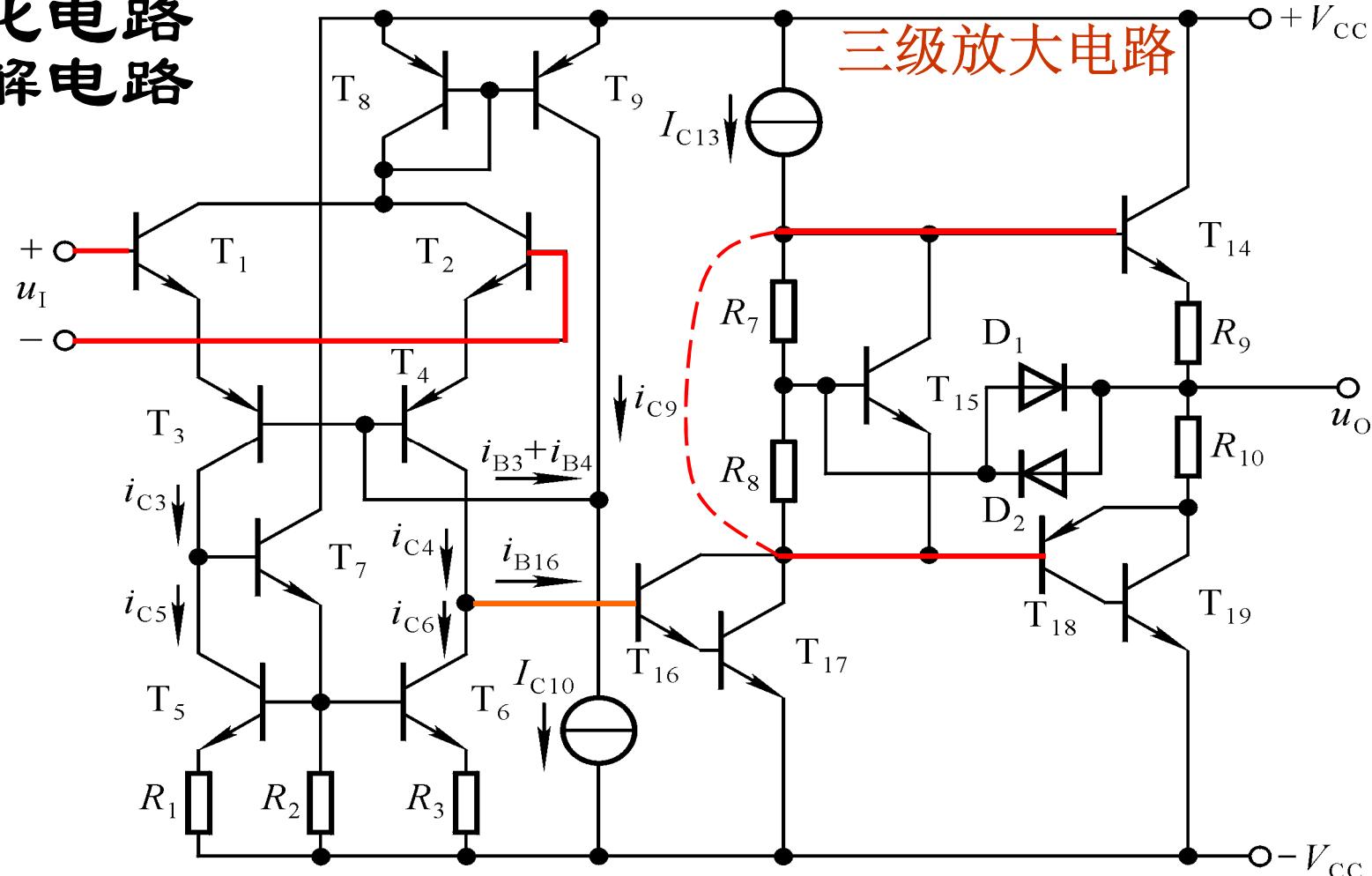


找出偏置电路



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，如R₅中的电流。

简化电路 分解电路



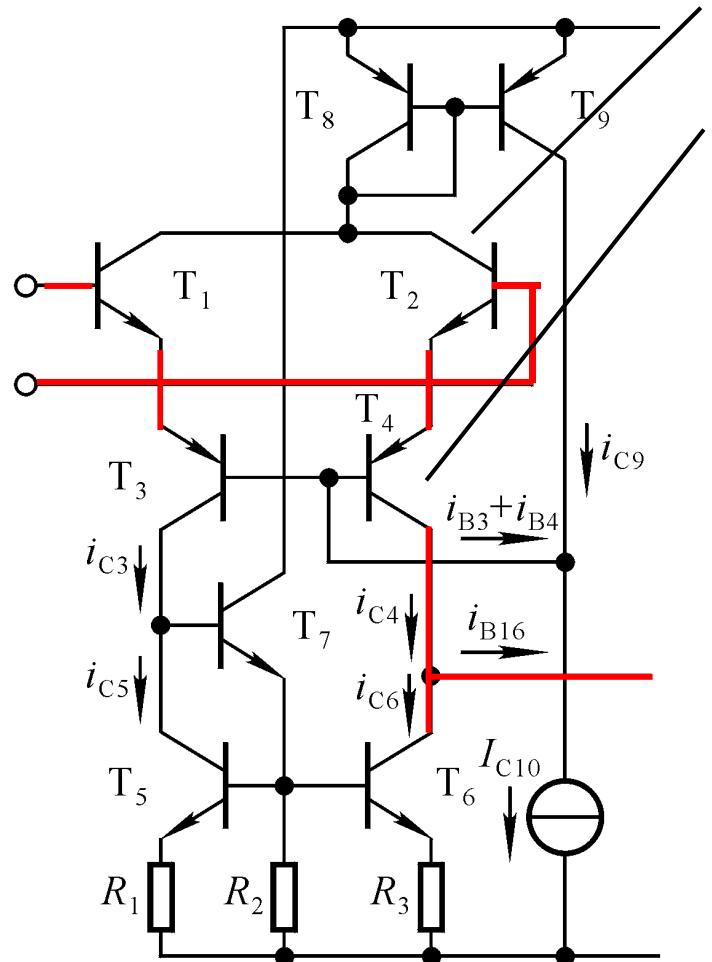
双端输入、单端输出差分放大电路

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(OCL电路)

输入级的分析

共集-共基形式

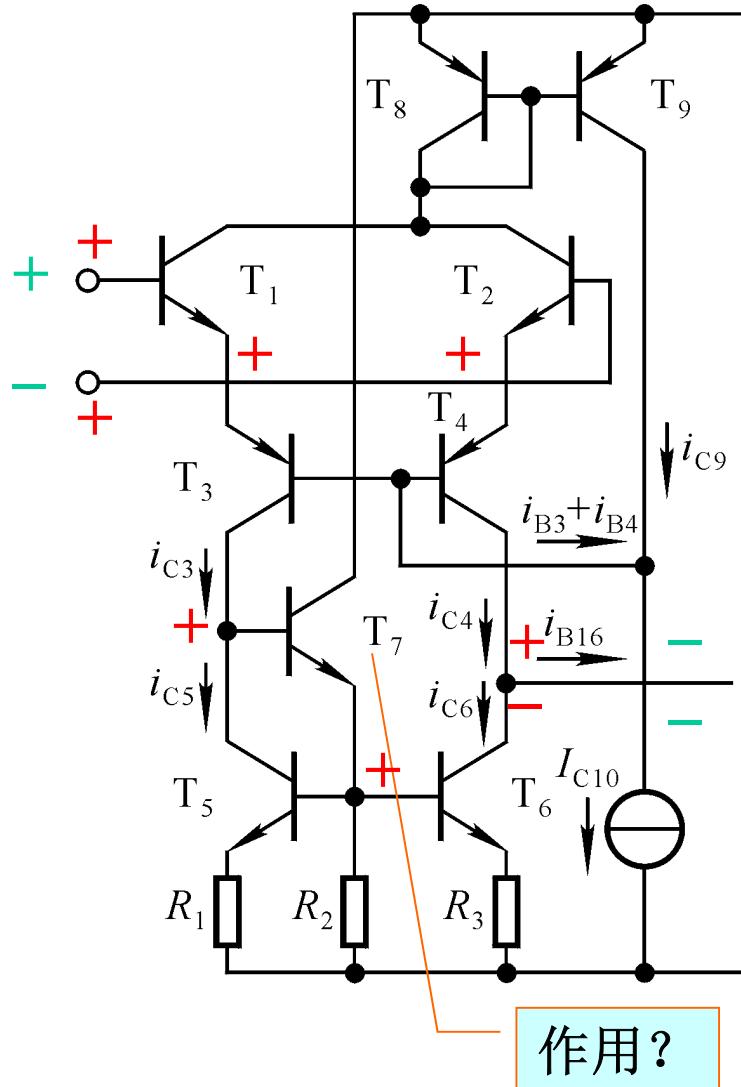
**T₁和T₂从基极输入、射极输出****T₃和T₄从射极输入、集电极输出**

T₃、T₄为横向管，输入端耐压高。共集形式，输入电阻大。共基形式频带宽。

 Q 点的稳定： $T\ (^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow I_{C2} \uparrow \rightarrow I_{C8} \uparrow$ I_{C9} 与 I_{C8} 为镜像关系 $\rightarrow I_{C9} \uparrow$

因为 I_{C10} 不变 $\rightarrow I_{B3} \downarrow I_{B4} \downarrow \rightarrow I_{C3} \downarrow I_{C4} \downarrow \rightarrow I_{C1} \downarrow I_{C2} \downarrow$

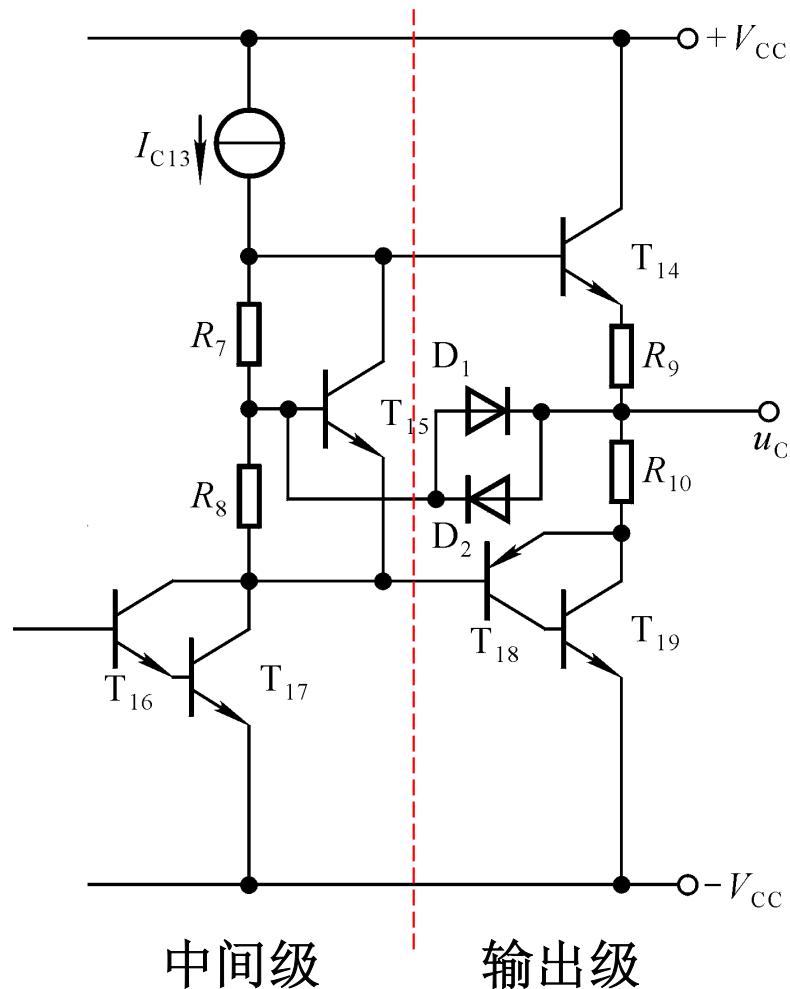
输入级的分析



T_7 的作用：抑制共模信号
放大差模信号
 T_5 、 T_6 与 T_7 构成的电流源电
路作为 T_3 、 T_4 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）。

中间级的分析

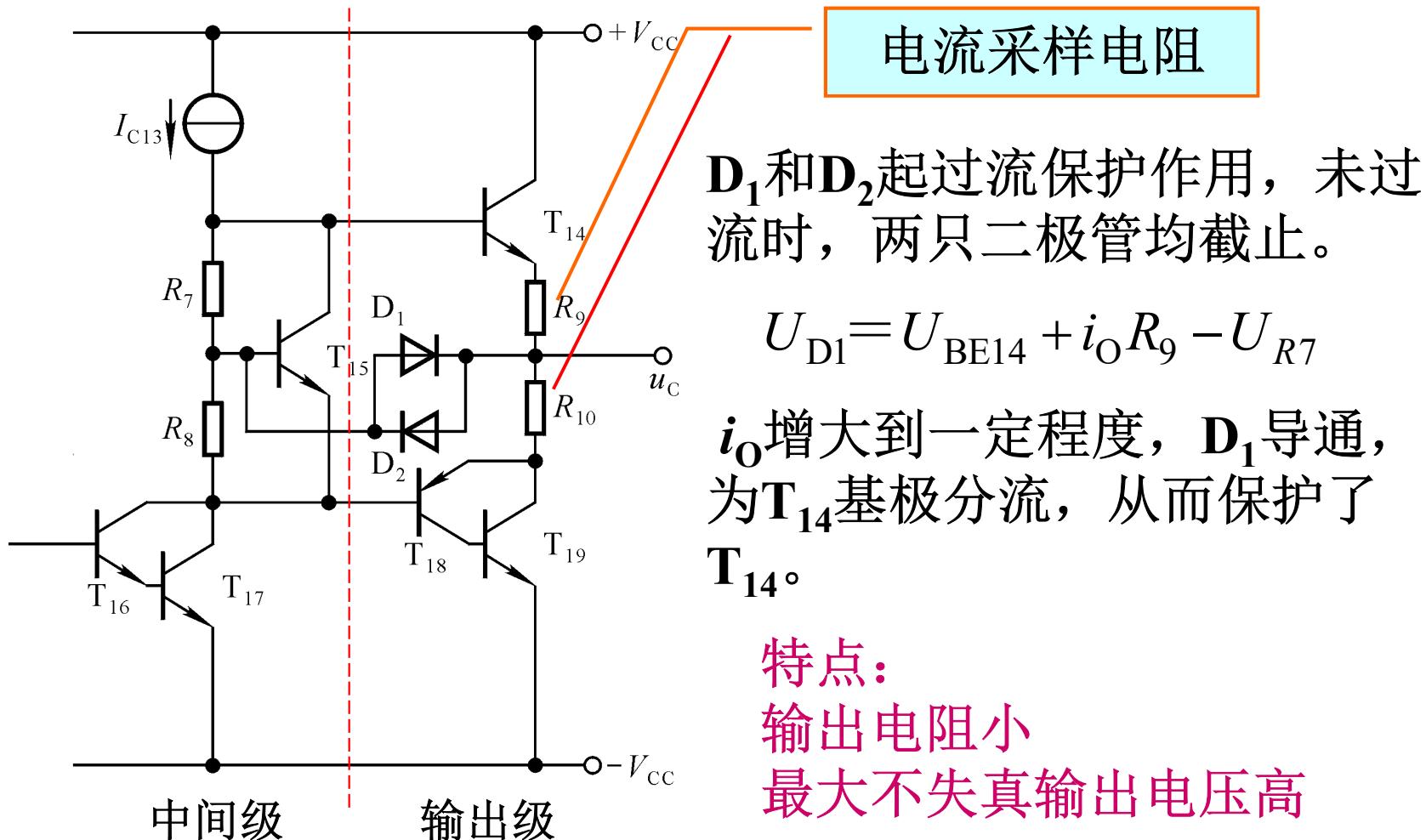


中间级是以复合管为放大管、以电流源为集电极负载的共射放大电路。

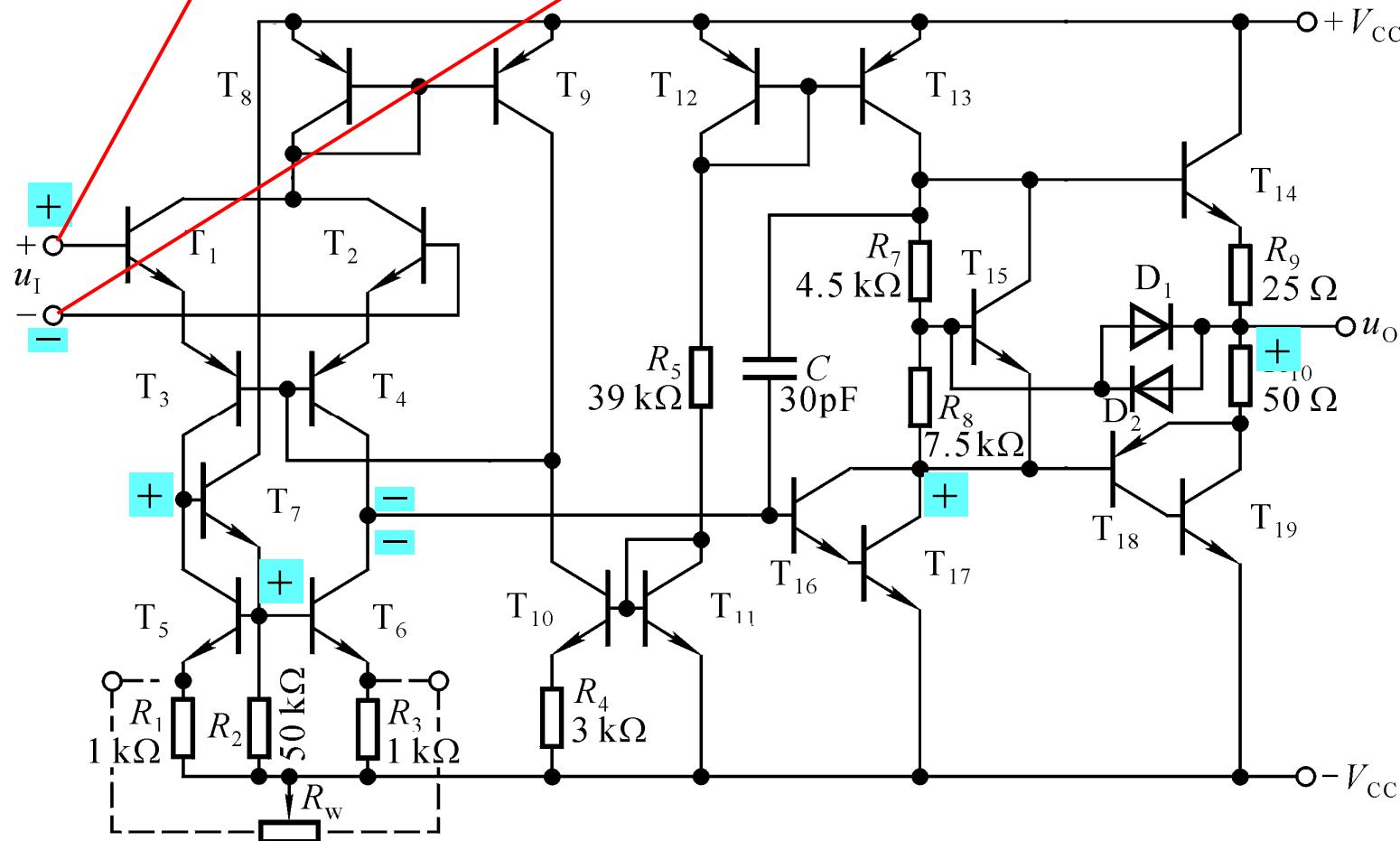
特点：
具有很强的放大能力

输出级的分析

准互补输出级， U_{BE} 倍增电路消除交越失真。



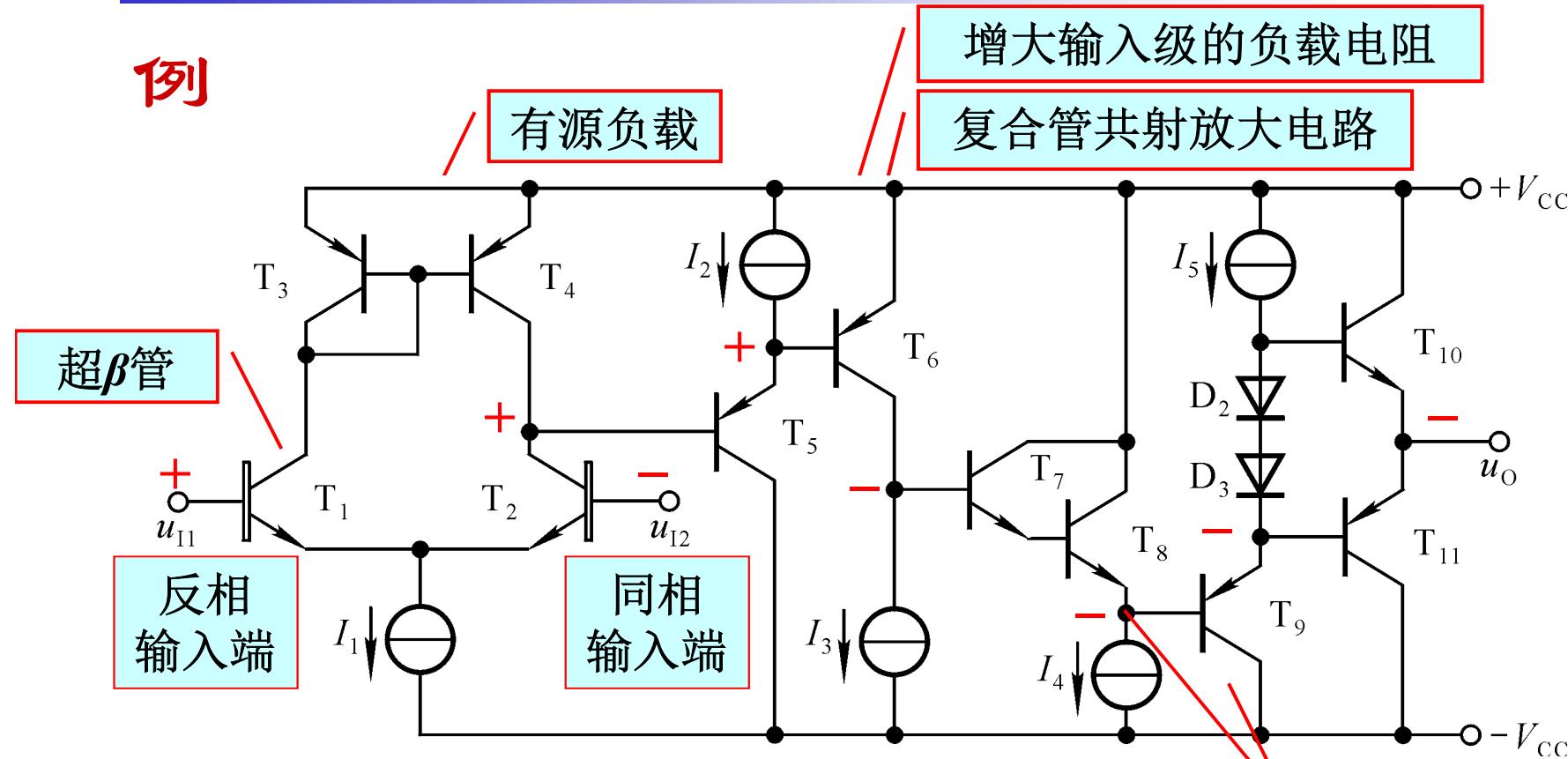
判断同相输入端和反相输入端



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_i 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。
- 共模输入电压大：接近电源电压

例



1. 输入级采用什么措施增大放大倍数?
2. 中间级采用什么措施增大电压放大倍数?
3. 如何消除交越失真?
4. u_{I1} 、 u_{I3} 哪个是同相输入端? 哪个是反相输入端?

3.5 集成运放的性能指标及低频等效电路

3.5.1 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}	>94dB	∞
	$20\lg A_{\text{od}} = 20\lg \left \frac{\Delta u_o}{\Delta(u_p - u_n)} \right $	
共模抑制比 K_{CMR}	>80dB	∞
	$K_{\text{CMR}} = 20\lg \left \frac{A_{\text{od}}}{A_{\text{oc}}} \right $	
差模输入电阻 r_{id}	>2MΩ	∞
-3dB带宽 f_H	7Hz	

使 A_{od} 下降3dB(即下降到0.707倍)时的信号频率

在实用电路中，因为引入负反馈，展宽了频带，所以带宽可达数百千赫以上，理想值为 ∞ 。

指标参数	F007典型值	理想值
U_{IO} 及其温漂 dU_{IO}/dT	<2mV,<20μV/ °C	0,0

输入失调电压 U_{IO} : 使输出电压为零时在输入端所加的补偿电压, 愈小则表明电路参数对称性愈好

I_{IO} 及其温漂 dI_{IO}/dT	<10nA,<几nA/ °C	0,0
----------------------------	----------------	-----

输入失调电流 $I_{IO} = |I_{B1} - I_{B2}|$,

反映输入级差放管输入电流的不对称性,
愈小则运放的质量愈好

输入偏置电流 I_{IB}	<80nA	0
-----------------	-------	---

$$I_{IB} = \frac{1}{2}(I_{B1} + I_{B2}),$$

是输入级差放管的基极或栅极偏置电流的平均值,
愈小则信号源内阻对 Q 点的影响愈小

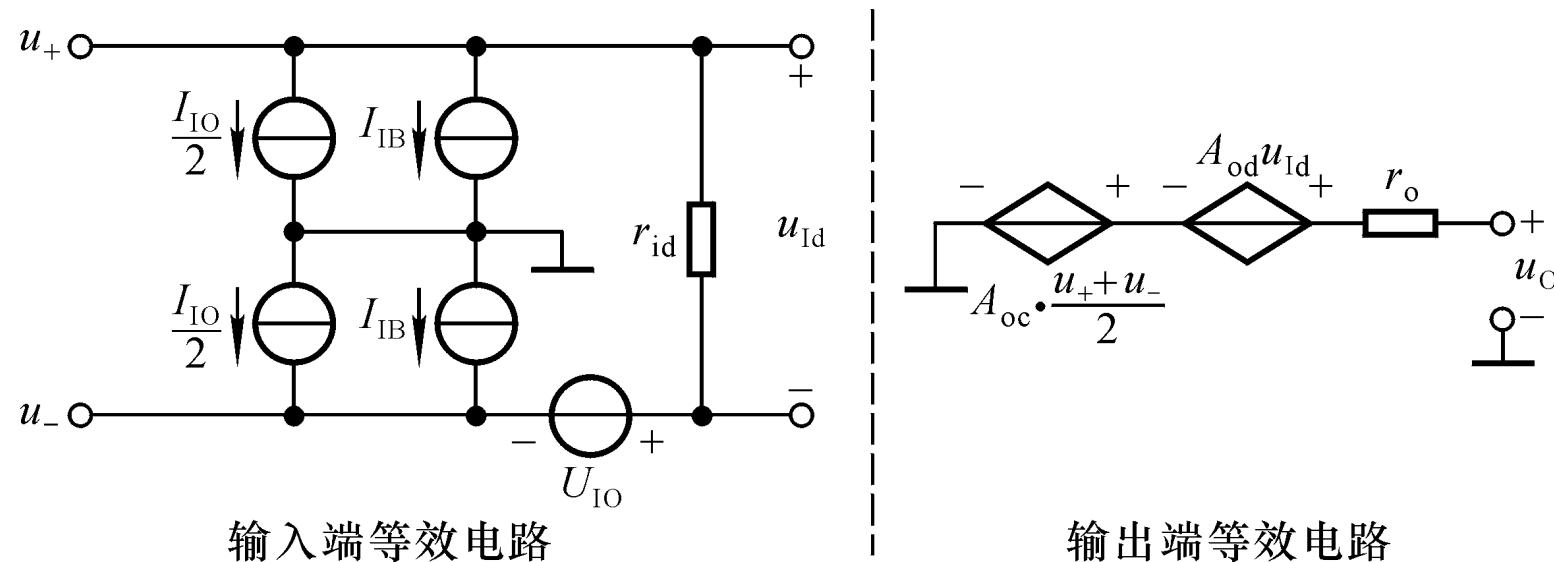
指标参数	F007典型值	理想值
最大共模输入电压 U_{Icmax}	$\pm 13V$	输入级能正常放大差模信号时允许输入的最大共模电压
最大差模输入电压 U_{Idmax}	$\pm 30V$	超过此值输入级中的一个PN结反向击穿而损坏

理想运放的主要性能指标：

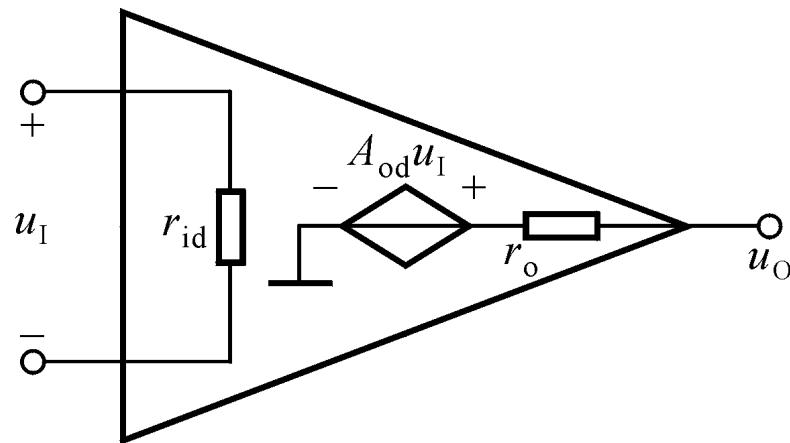
$$A_{od} = \infty, \quad r_{id} = \infty, \quad r_o = 0,$$
$$K_{CMR} = \infty, \quad f_H \text{ (或 } f_{bw}) = \infty.$$

3.5.2 集成运放的低频等效电路

构造集成运放的宏模型，即在一定的精度范围内，构造一个等效电路，使之与运放的输入端口和输出端口的特性相同或相似。



简化的集成运放低频等效电路



若将集成运放理想化，则 $r_{id}=\infty$, $r_o=0$ 。

3.6 集成运放的种类及选择

- 按工作原理分类 {
- 电压放大型：输入量与输出量均为电压
 - 电流放大型：输入量与输出量均为电流
 - 跨导型：输入量为电压，输出量均为电流
 - 互阻型：输入量为电流，输出量均为电压
- 按可控性分类 {
- 可控增益：利用外加控制电压控制增益的大小
 - 选通控制：输入为多通道，利用输入的逻辑信号控制那个通道的信号放大
- 按性能指标分类 {
- 通用型
 - 特殊型

F007是我国第二代产品，属于通用型运放，应用非常广泛。

通常情况下用通用型运放，特殊情况下才用下列特殊型运放。

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，转换速率SR可达 $10^3V/\mu S$ 。

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105dB。

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 $100\sim200\mu W$ 。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 ①。
2. 作宽频带放大器，应选用 ③。
3. 作幅值为 $1\mu V$ 以下微弱信号的测量放大器，应选用 ⑦。
4. 作内阻为 $100K\Omega$ 信号源的放大器，应选用 ②。
5. 负载需 $5A$ 电流驱动的放大器，应选用 ⑥。
6. 要求输出电压幅值为 ± 80 的放大器，应选用 ⑤。
7. 宇航仪器中所用的放大器，应选用 ④。

第 3 章

结 束