



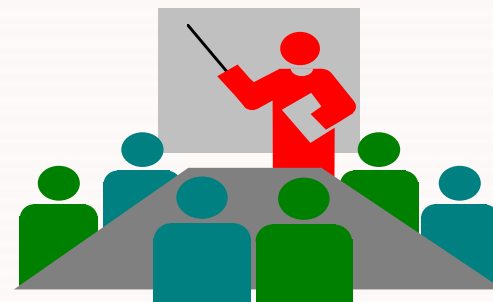
第3章 集成运算放大器

3.1 多级放大电路

* 3.2 差分放大电路

3.3 功率放大电路

3.4 集成运算放大器





学习指导

- 1、**多级放大电路的基本概念以及多级放大电路的耦合方式；**
- 2、**多级放大电路的动态分析；**
- 3、**直接耦合放大电路的零点漂移现象；**
- 4、**掌握差分放大电路的共模信号、差模信号、共模放大倍数、差模放大倍数、共模抑制比的概念。**
- 5、**差分放大电路的组成、抑制零点漂移的原理以及四种接线方式分析方法。**
- 6、**掌握互补输出级的正确接法和输入输出关系。**



3.1 多级放大电路

3.1.1 多级放大电路的级间耦合方式

3.1.2 多级放大电路的动态分析

3.1.3 多级放大电路的频率特性

• 3.1.4 多级直接耦合放大电路的零点漂移现象



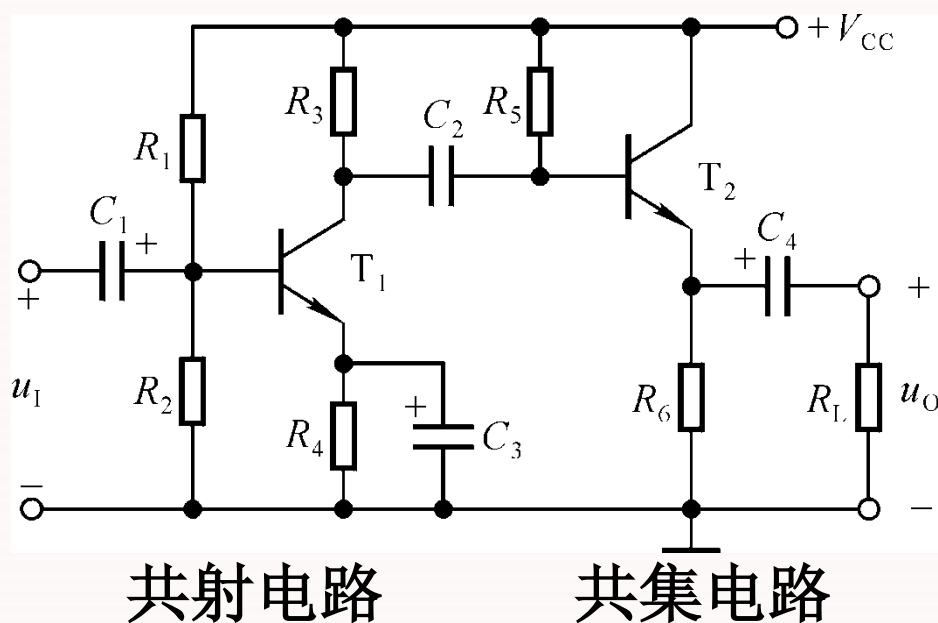
3.1.1 多级放大电路的极间耦合方式

当单级放大电路不能满足多方面的性能要求（如 $A_u=10^4$ 、 $R_i=2\text{M}\Omega$ 、 $R_o=100\Omega$ ）时，应考虑采用多级放大电路。组成多级放大电路时首先应考虑如何“连接”几个单级放大电路，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、光电耦合等。

放大电路的级间耦合必须要保证信号的传输，且保证各级的静态工作点正确。

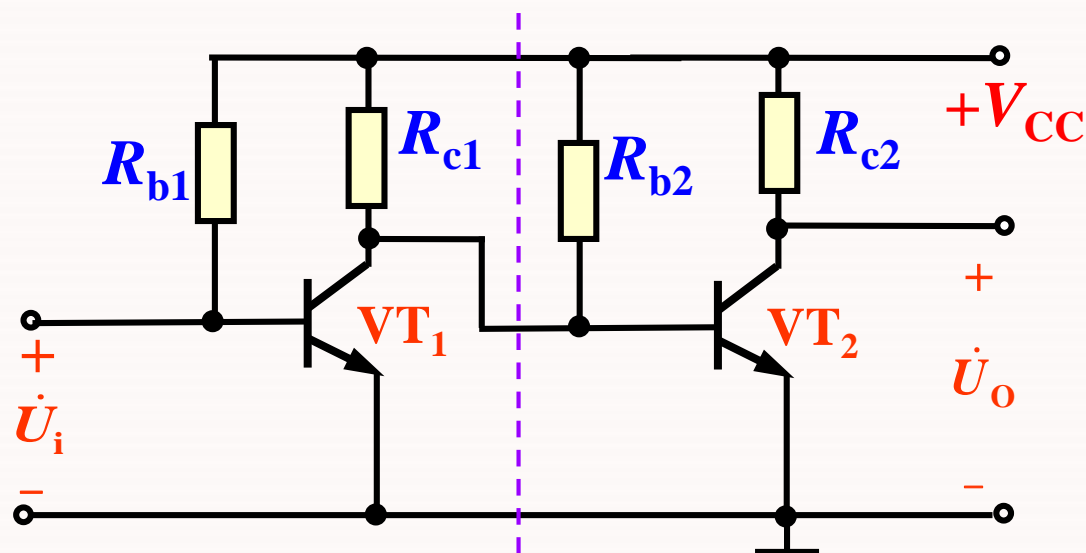
一. 阻容耦合



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

Q 点相互独立。不能放大变化缓慢的信号，低频特性差，不能集成化。

二、直接耦合



特点：

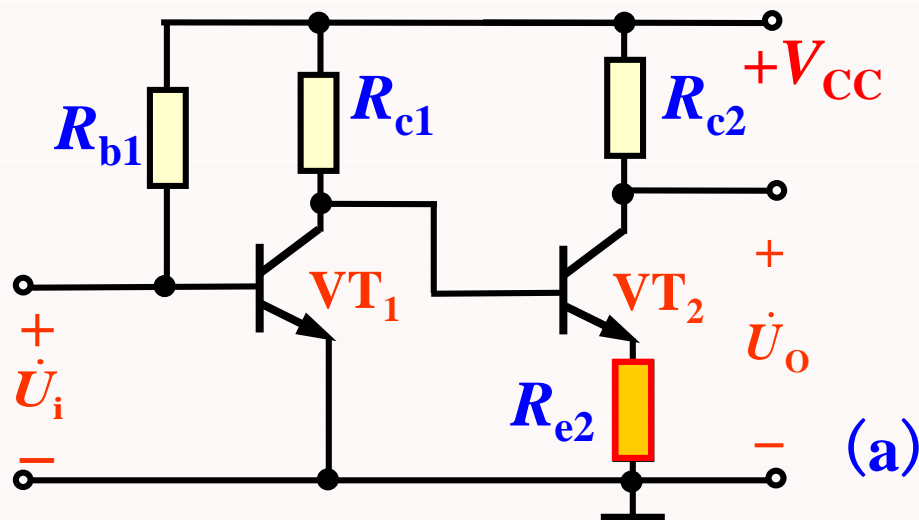
- (1) 可以放大交流和缓慢变化及直流信号；
- (2) 便于集成化。

- (3) 各级静态工作点互相影响；基极和集电极电位会随着级数增加而上升；
- (4) 零点漂移。

解决合适静态工作点的几种办法

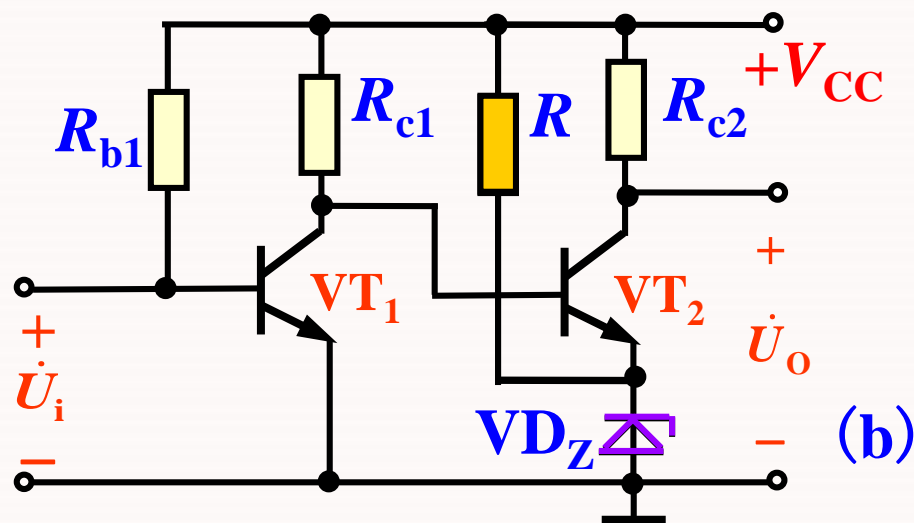
改进电路—(a)

电路中接入 R_{e2} ，
保证第一级集电极有
较高的静态电位，但
第二级放大倍数严重
下降。



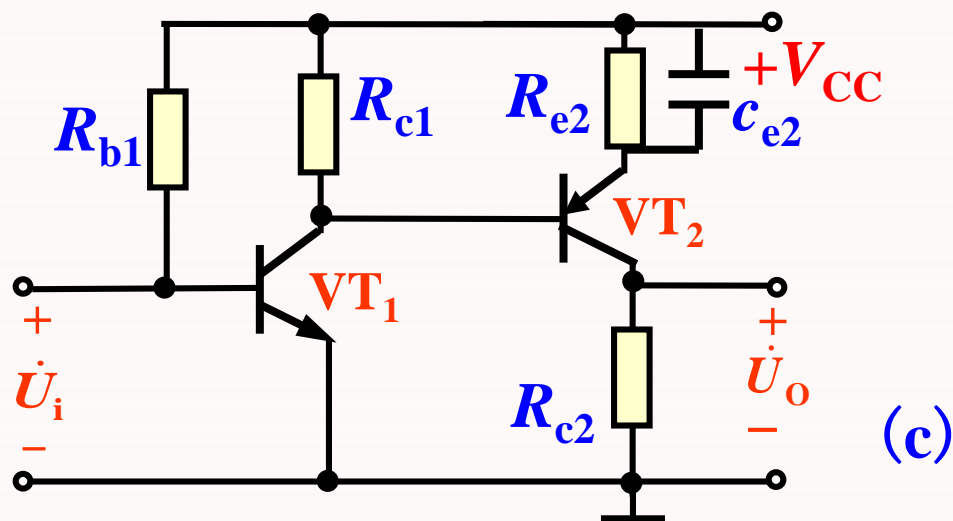
改进电路—(b)

稳压管动态电阻
很小，可以使第二级
的放大倍数损失小。
但集电极电压变化范
围减小。

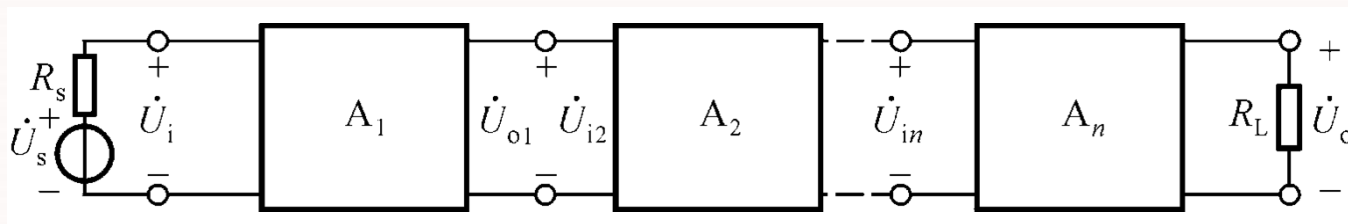


改进电路—(c)

可获得合适的工作点。为经常采用的方式。



3.1.2 多级放大电路的动态分析



- 1、前一级的输出电压是后一级的输入电压。
- 2、后一级的输入电阻是前一级的交流负载电阻。
- 3、总电压放大倍数=各级放大倍数的乘积

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_{i2}} \cdots \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{in}} = \prod_{j=1}^n \dot{A}_{uj}$$

$$R_i = R_{i1}$$

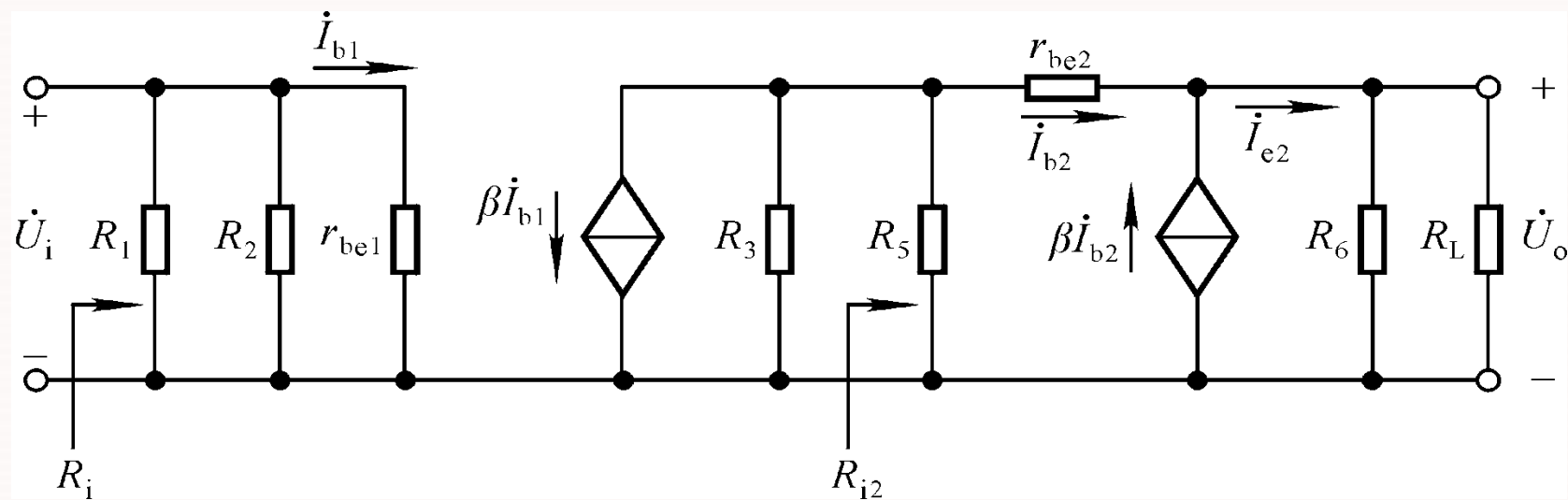
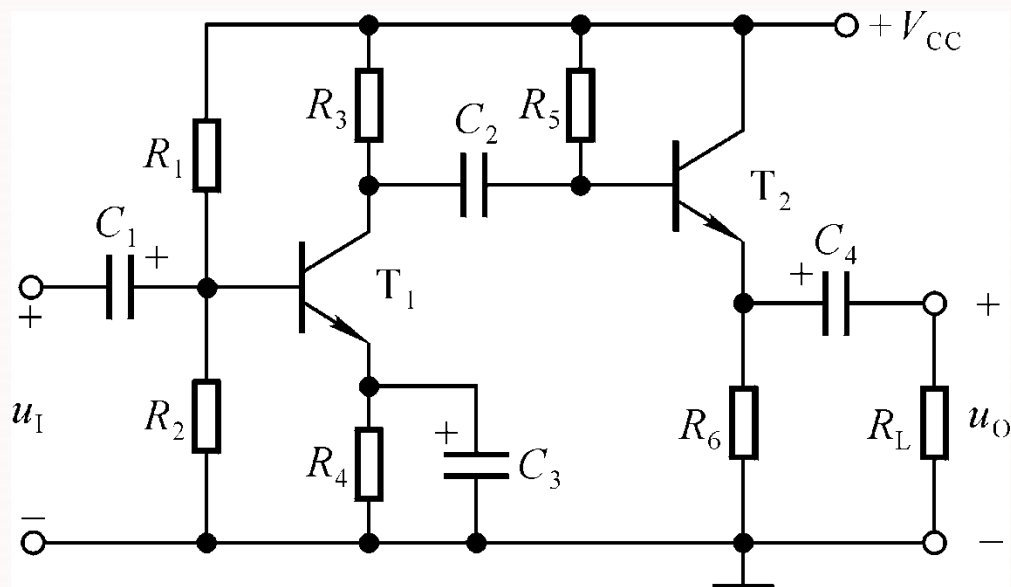
- 4、总输入电阻为第一级的输入电阻

- 5、总输出电阻为最后一级的输出电阻

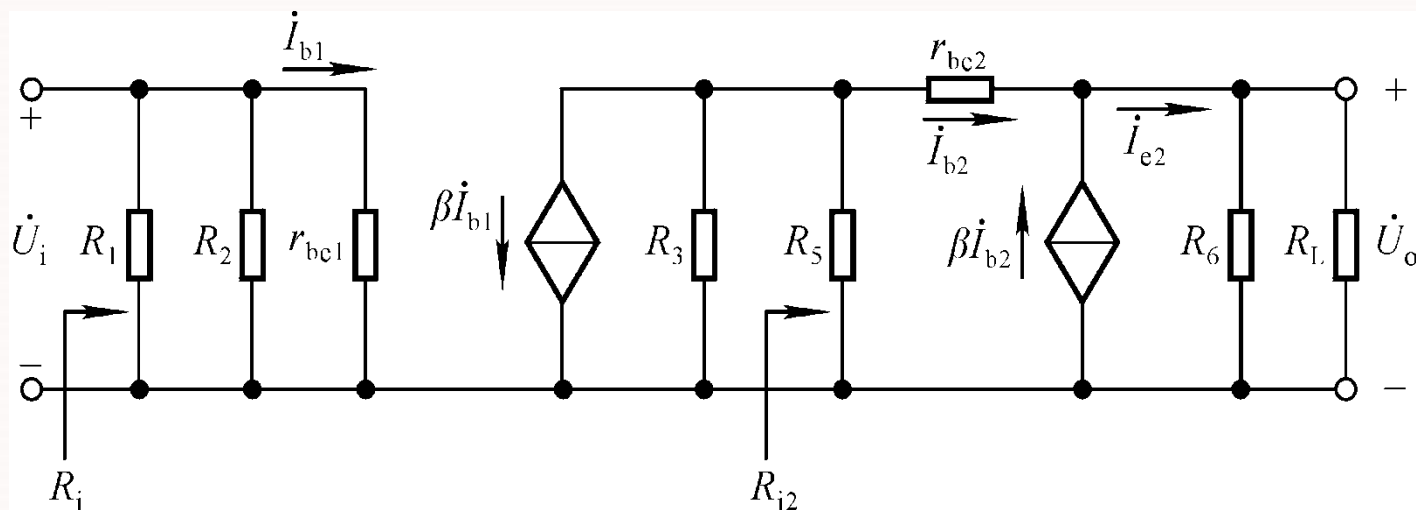
$$R_o = R_{on}$$

对电压放大电路的要求： R_i 大， R_o 小， A_u 的数值大，最大不失真输出电压大。

分析举例



分析举例



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

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

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

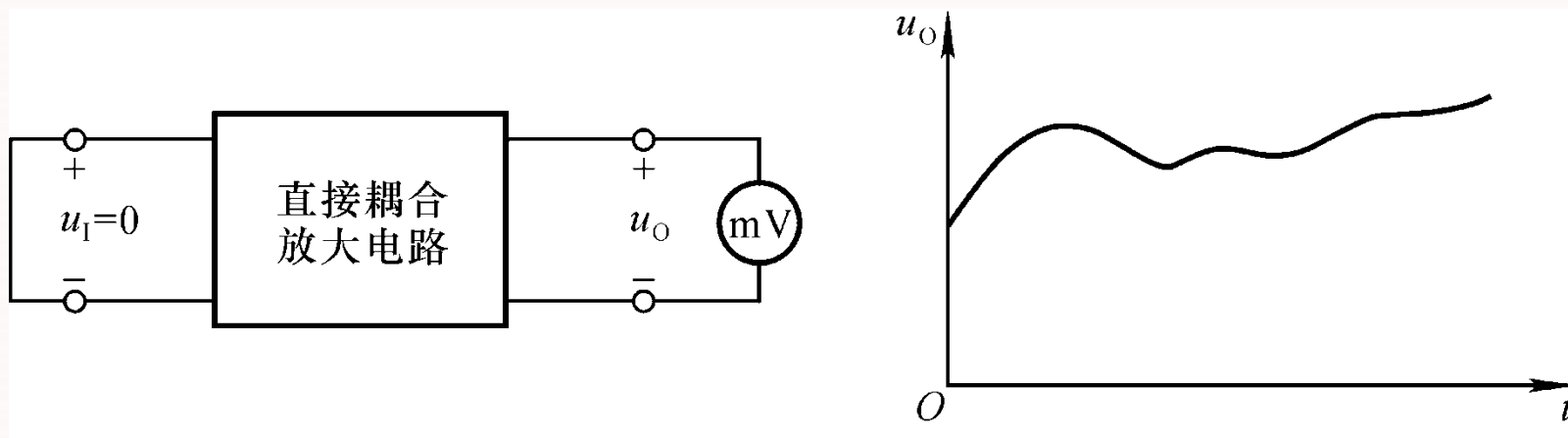
$$R_{i2} = R_5 // [r_{be2} + (1 + \beta_2) (R_6 // R_L)]$$

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

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

3.1.4 直接耦合放大电路的零点漂移现象

一. 什么是零点漂移现象: $\Delta u_I = 0$, $\Delta u_O \neq 0$ 的现象。



二、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。

温漂指标： 温度每升高1度时，输出漂移电压按电压增益折算到输入端的等效输入漂移电压值。

假设 $A_{u1} = 100$,
 $A_{u2} = 100$, $A_{u3} = 1$ 。
若第一级漂了 $100\text{ }\mu\text{V}$,
则输出漂移 1 V 。
若第二级也漂了 $100\text{ }\mu\text{V}$,
则输出漂移 10 mV 。

漂移

$10\text{ mV} + 100\text{ }\mu\text{V}$

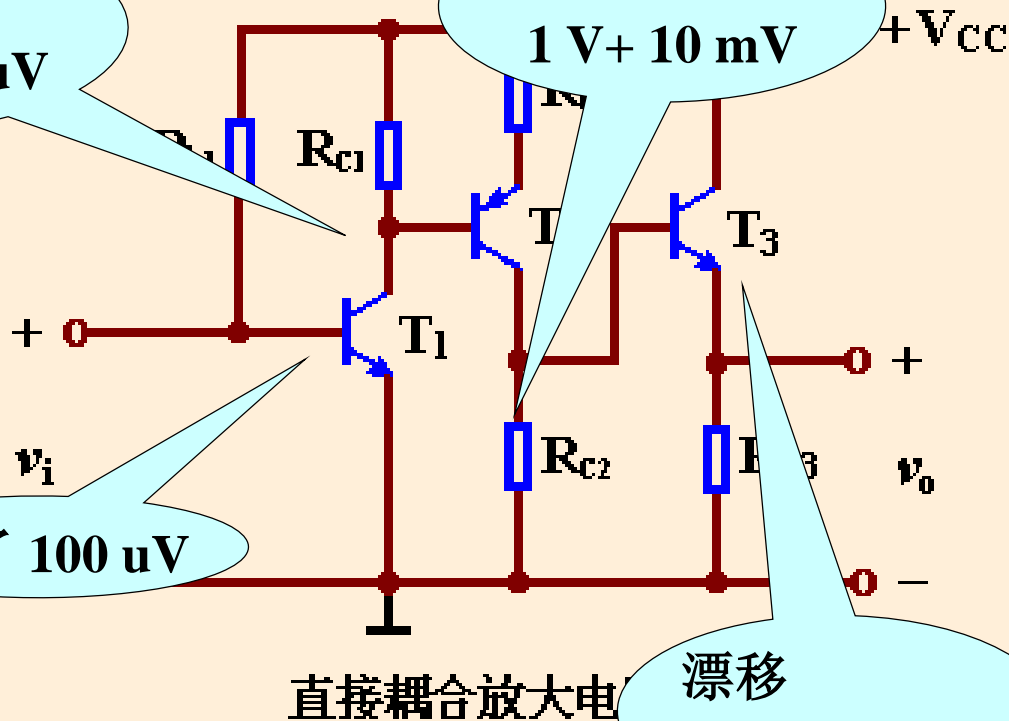
漂移

$1\text{ V} + 10\text{ mV}$

漂了 $100\text{ }\mu\text{V}$

漂移

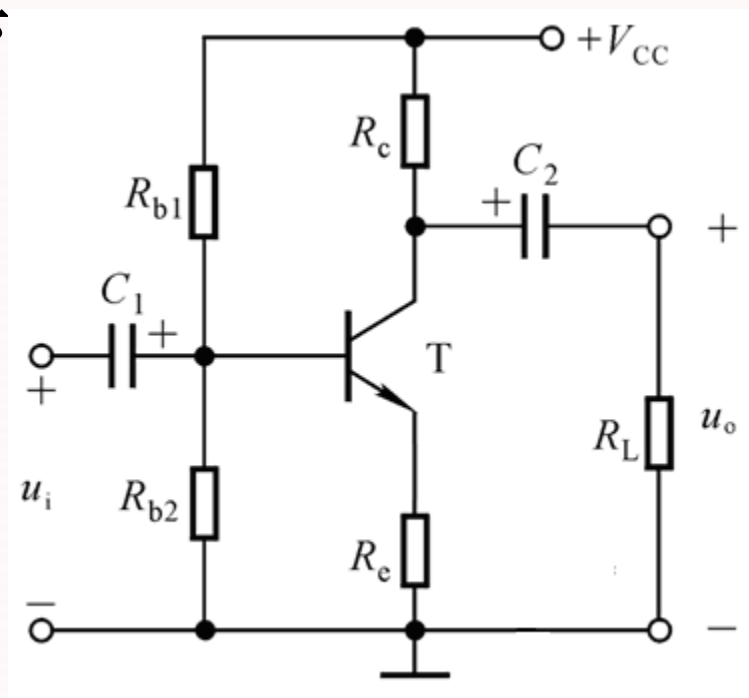
$1\text{ V} + 10\text{ mV}$



第一级是关键

三. 减小零漂的措施

- 在电路中引入直流负反馈
- 用非线性元件进行温度补偿
- 采用差分式放大电路





3.2 差分放大电路

* 3.2.1 典型长尾式差分放大电路

3.3.2 单端输入的差分放大电路

3.3.3 具有恒流源的差分放大电路

* 3.2.1 典型长尾式差分放大电路

一、电路的组成

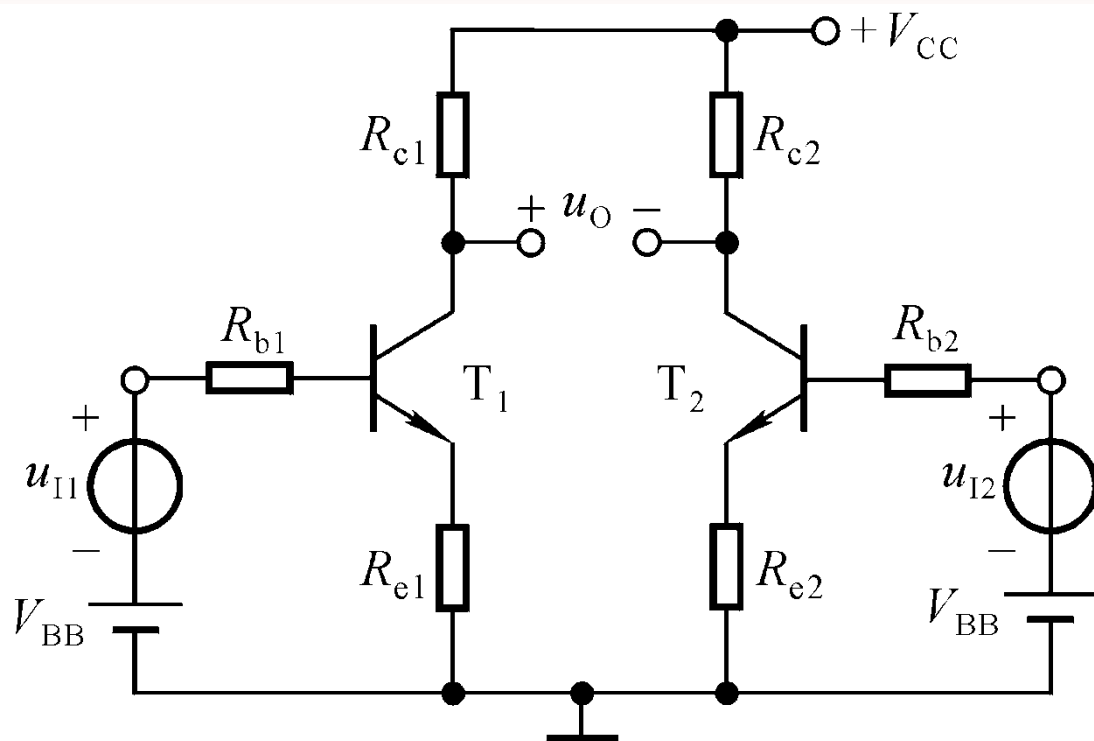
参数理想对称：

$$R_{b1} = R_{b2},$$

$$R_{c1} = R_{c2},$$

$$R_{e1} = R_{e2};$$

T_1 、 T_2 在任何温度下特性均相同。

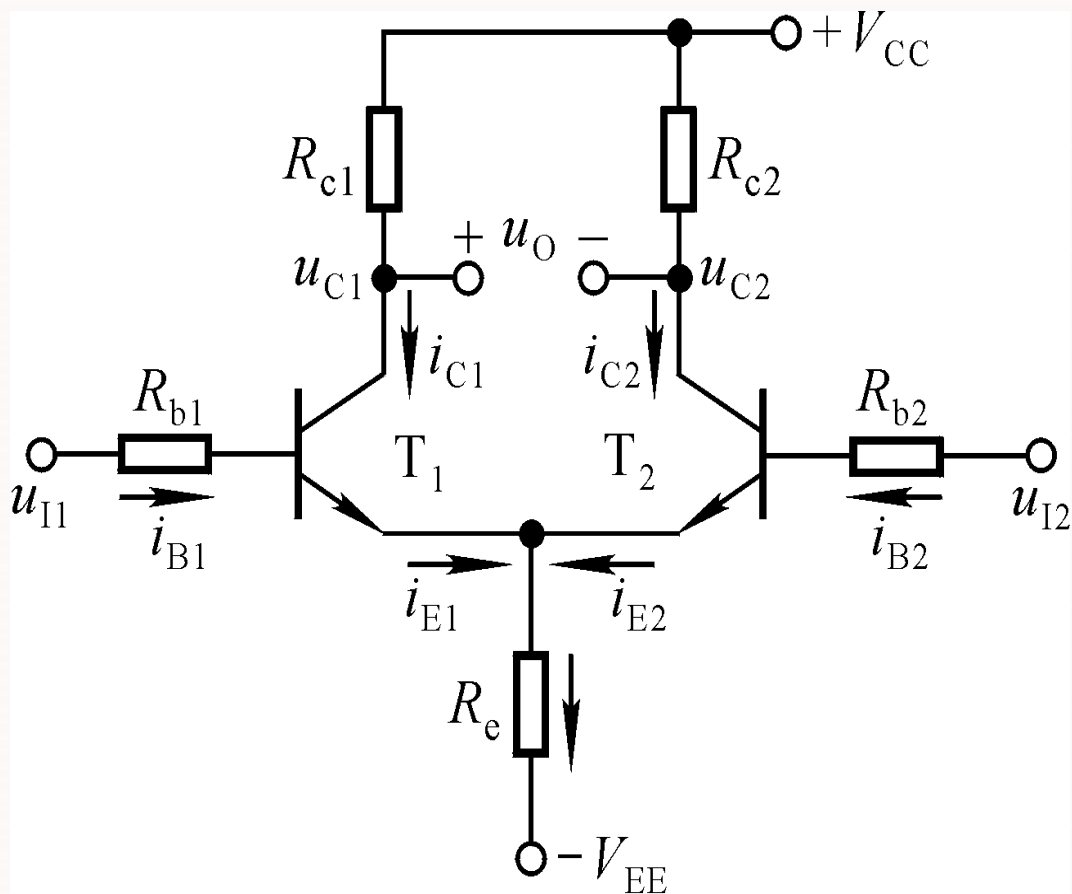


组成特点

典型电路

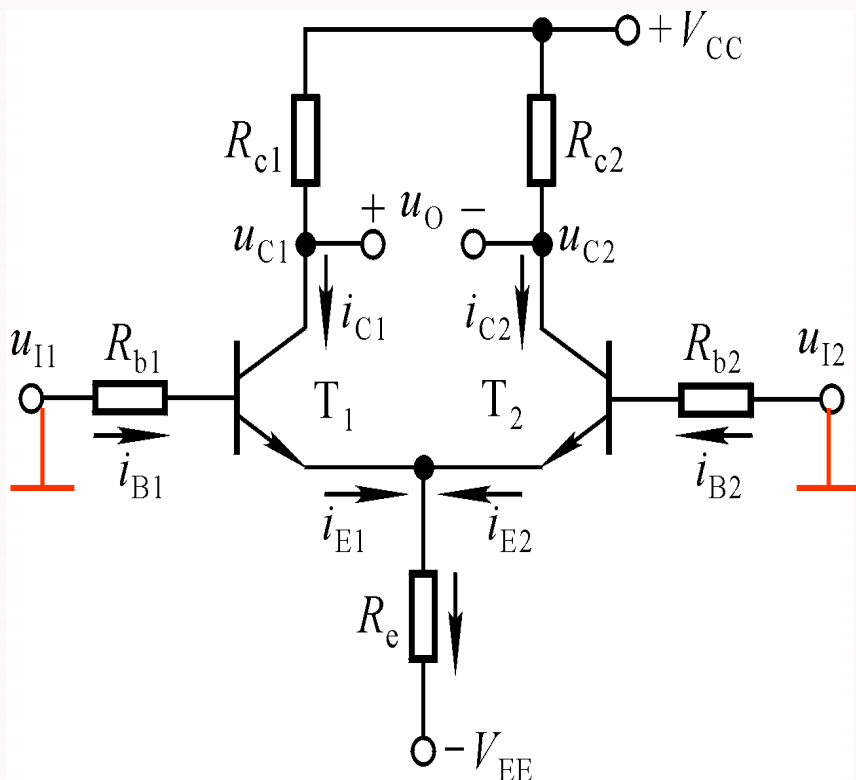
在理想对称的情况下：

1. 克服零点漂移；
2. 零输入零输出。



二、工作原理分析

1. Q 点: 令 $u_{I1} = u_{I2} = 0$



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

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

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

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

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

晶体管输入回路方程：

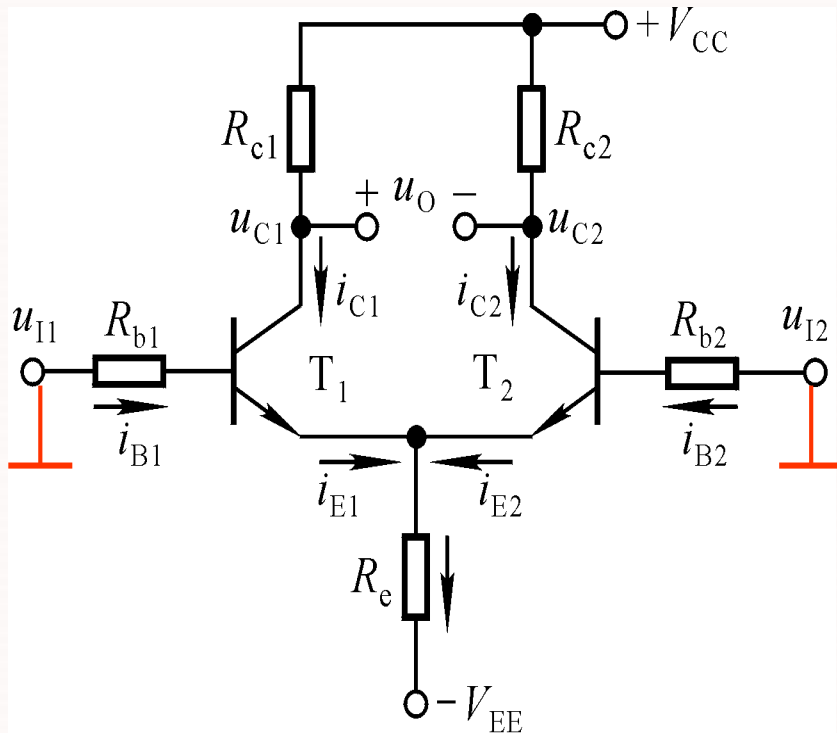
$$V_{EE} = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ} R_e$$

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

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

晶体管输出回路方程：

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



2. 动态分析:

1) 信号输入方式

- ① 共模输入: (common mode) ② 差模输入: (differential mode)
- u_{i1} 与 u_{i2} 大小等, 方向同 u_{i1} 与 u_{i2} 大小等, 方向反

$$u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$$

$$u_{i1} - u_{i2} = u_{id}$$

差分的温度漂移、电源电压波动和**50HZ**工频干扰都可看成是共模输入信号。

共模输入信号一般是无用的信号, 放大电路应抑制。

差模输入信号一般是有用的信号, 是要放大的信号。

③ 比较输入

u_{i1} 、 u_{i2} 大小和极性是任意的。

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: $u_{i1} = 20 \text{ mV}$, $u_{i2} = 16 \text{ mV}$

可分解成:

$$u_{i1} = 18 \text{ mV} + 2 \text{ mV}$$
$$u_{i2} = 18 \text{ mV} - 2 \text{ mV}$$

共模信号 差模信号

这种输入常作为比较放大来应用，在自动控制系统中是常见的。

$$u_o = A_c u_{ic} + A_d u_{id} = A_d u_{id}$$

放大器只放大两个输入信号的差值信号——差动放大电路。

2) 抑制共模信号

共模信号：数值相等、极性相同的输入信号，即

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

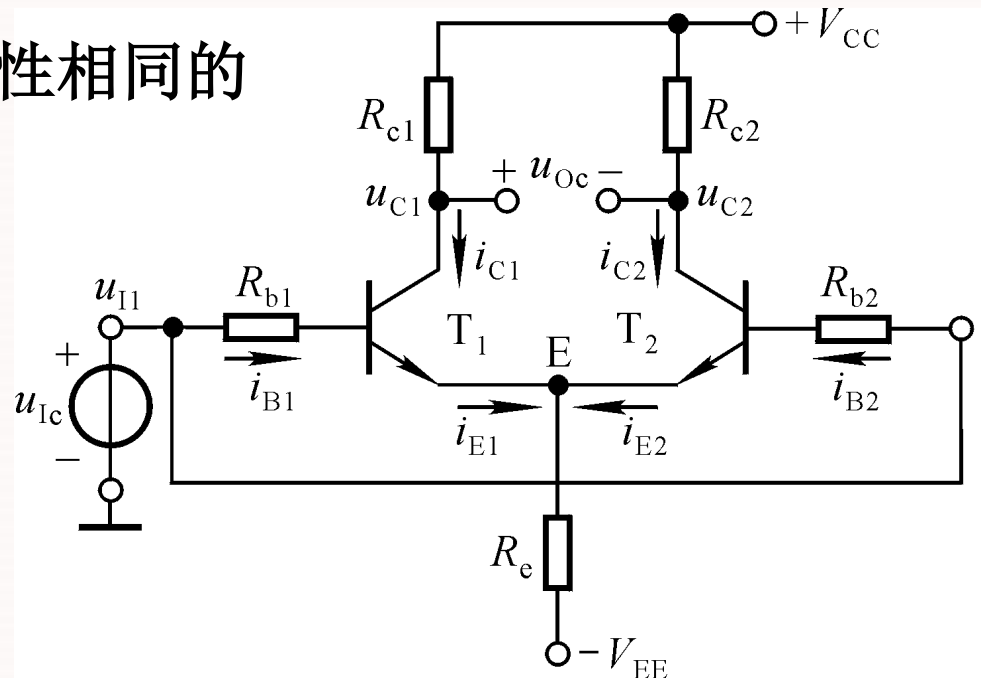
$$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}$$

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

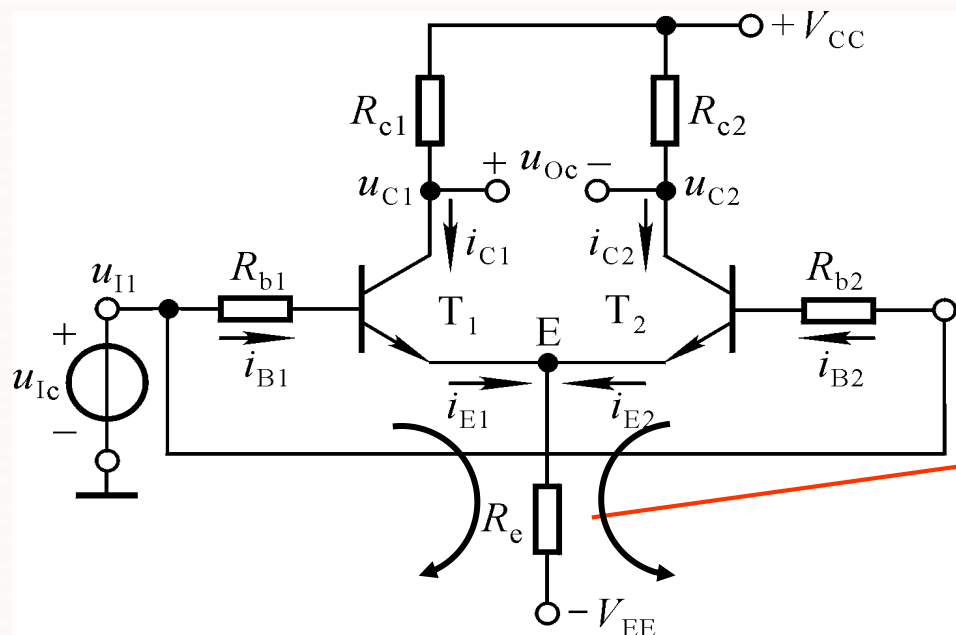
$$\Delta u_{C1} = \Delta u_{C2}$$

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

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



2) 抑制共模信号： R_e 的共模负反馈作用



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

参数理想对称时 $A_c = 0$

对于每一边
电路, $R_e = ?$

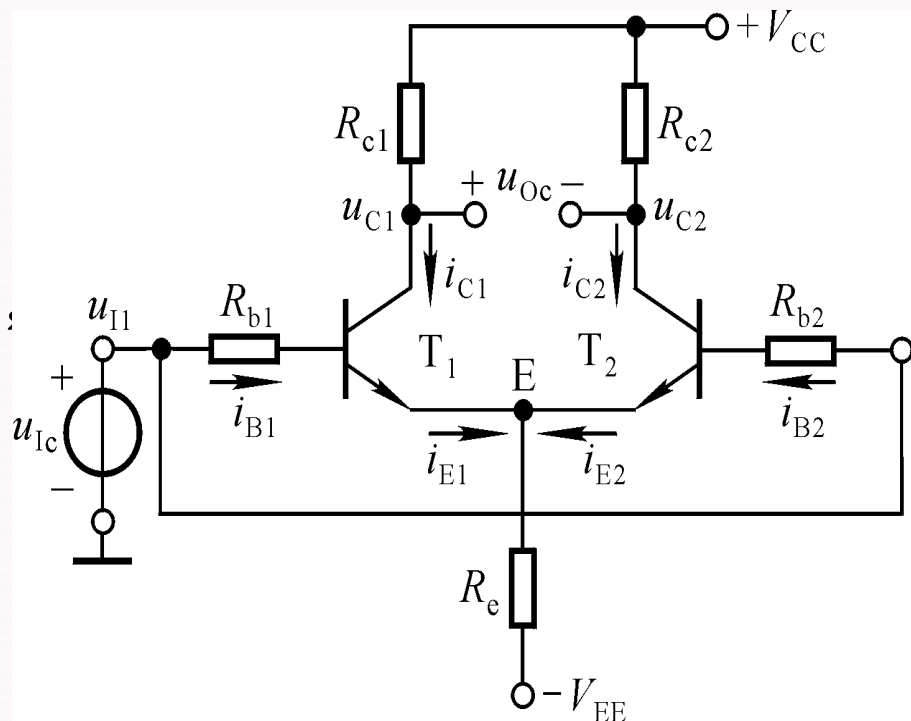
R_e 的共模负反馈作用：温度变化所引起的变化等效为共模信号

如 $T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow I_{C2} \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow I_{B1} \downarrow I_{B2} \downarrow \rightarrow I_{C1} \downarrow I_{C2} \downarrow$

抑制了每只差分管集电极电流、电位的变化。

研究共模输入信号的意义

当温度变化或电源电压波动时，都将使集电极电流产生变化，且变化趋势是相同的，其效果相当于在两个输入端加入了共模信号。



差分放大电路对共模信号有很强的抑制作用。

3) 放大差模信号

差模信号：数值相等，极性相反的输入信号，即

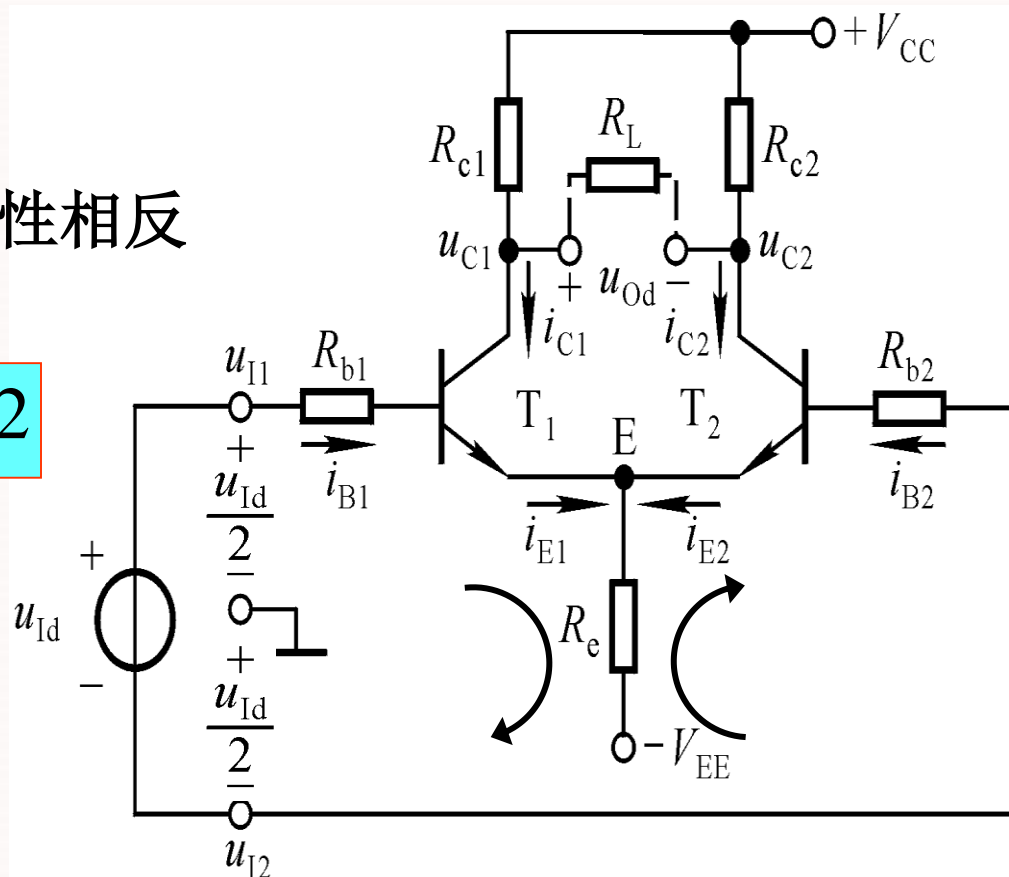
$$u_{I1} = -u_{I2} = u_{Id} / 2$$

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

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

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

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



$\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$, $i_E = i_{E1} + i_{E2} = 0 \rightarrow R_e$ 上交流压降为0。

Re 对差模信号无反馈作用。

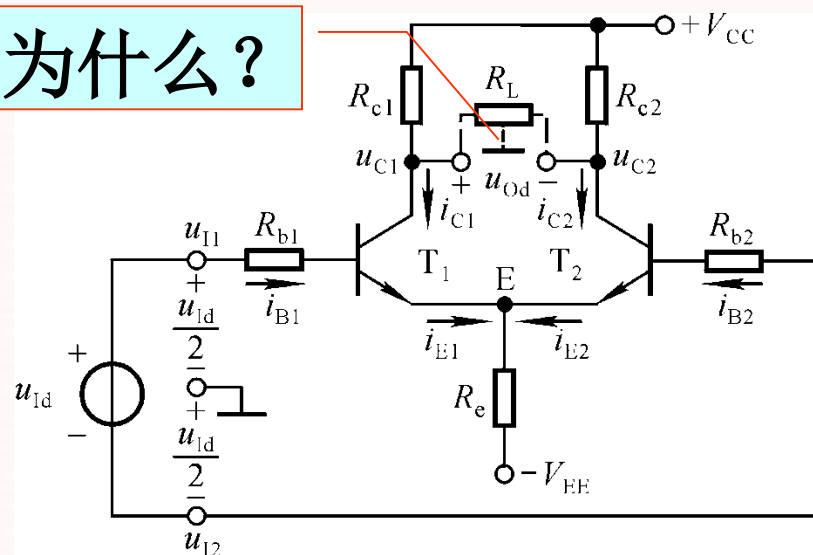
画交流通路时，**Re**可视为短路，即两管的发射极直接接地

差模信号作用时的动态分析



R_L 的中点应是地电位，即每管对地的负载电阻为 $R_L/2$ 。

为什么？



差模放大倍数

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

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

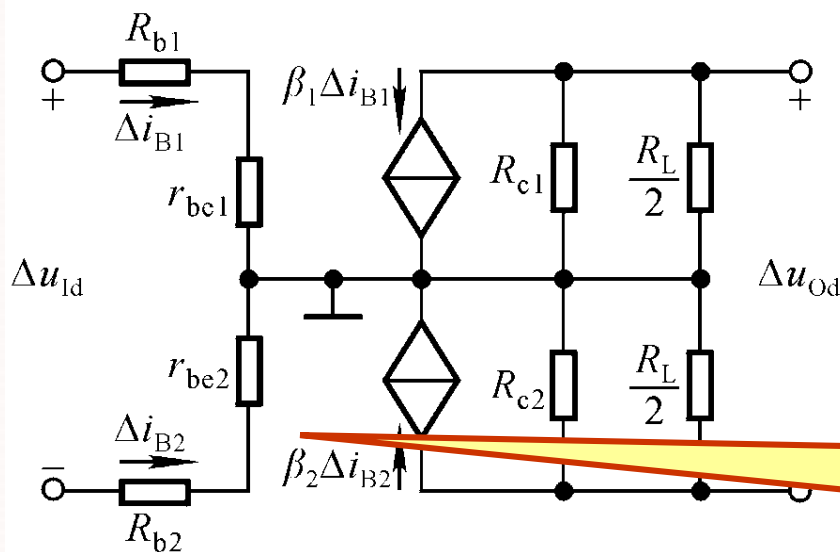
与单管
增益相
同

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

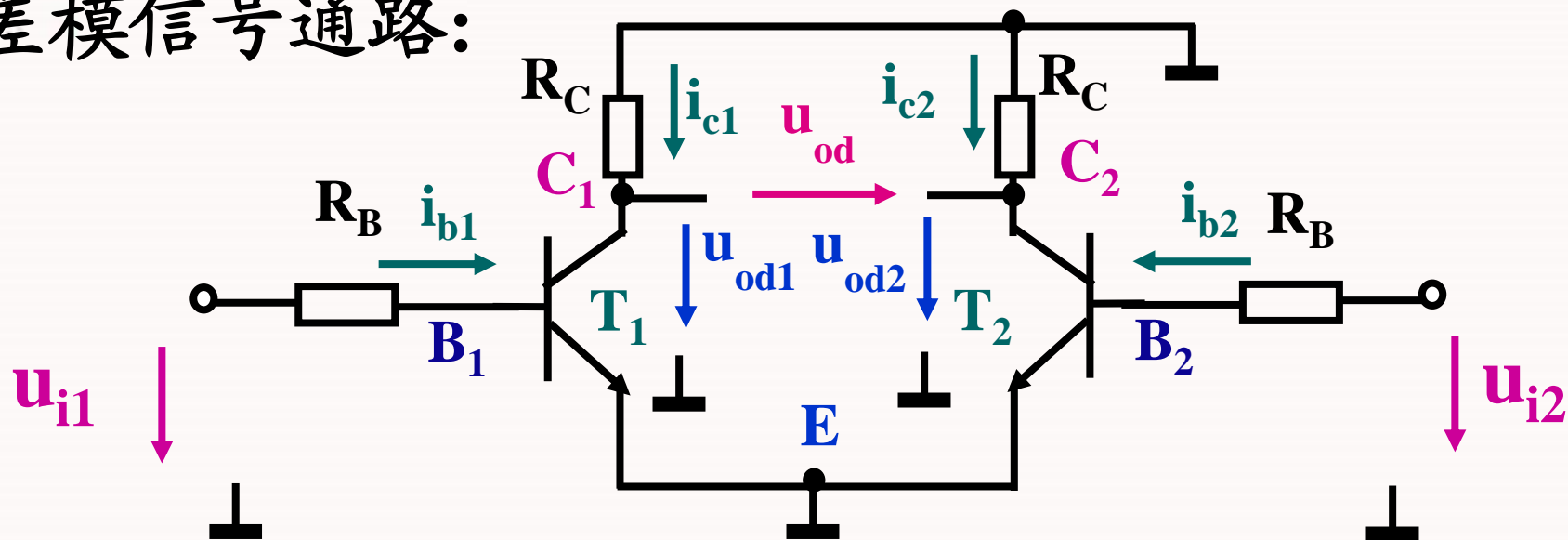
$$\Delta u_{Id} = \Delta i_B \cdot 2(R_b + r_{be})$$

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

差分电路不需画出整个电路微变等效电路，太复杂！



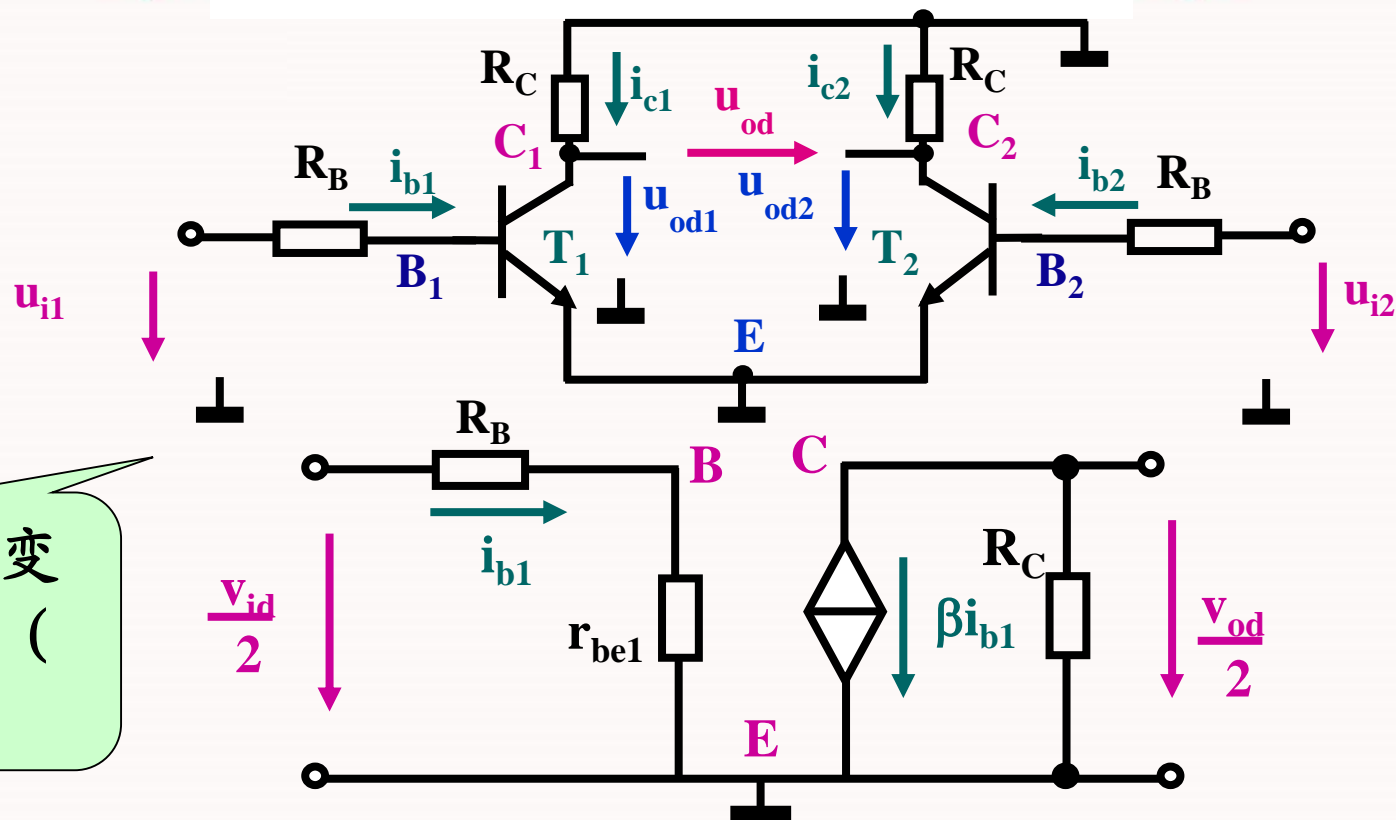
差模信号通路:



差模放大倍数 $A_d=?$ 转化为求单边电路的 A_d 。

$$A_d = \frac{u_{od}}{u_{id}} = \frac{u_{od1} - u_{od2}}{u_{i1} - u_{i2}} = \frac{2u_{od1}}{2u_{i1}} = A_{d1}, \quad \text{只需求解左半边电路的放大倍数。}$$

第2章 三极管放大电路



T_1 单边微变
等效电路 (R_L 开路)

差模电压放大倍数: $A_d = A_{d1} = -\frac{\beta i_{b1} R_C}{i_{b1} \times (R_B + r_{be1})} = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be1}}$

接 R_L 后, $A_d = -\frac{\beta R_C \parallel \frac{R_L}{2}}{R_B + r_{be1}}$

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。

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

在参数理想对称的情况下, $K_{\text{CMR}} = \infty$ 。

差放的特点: 输入无差别, 输出就不动;
输入有差别, 输出就变动。



4. 差分放大电路四种接法

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。

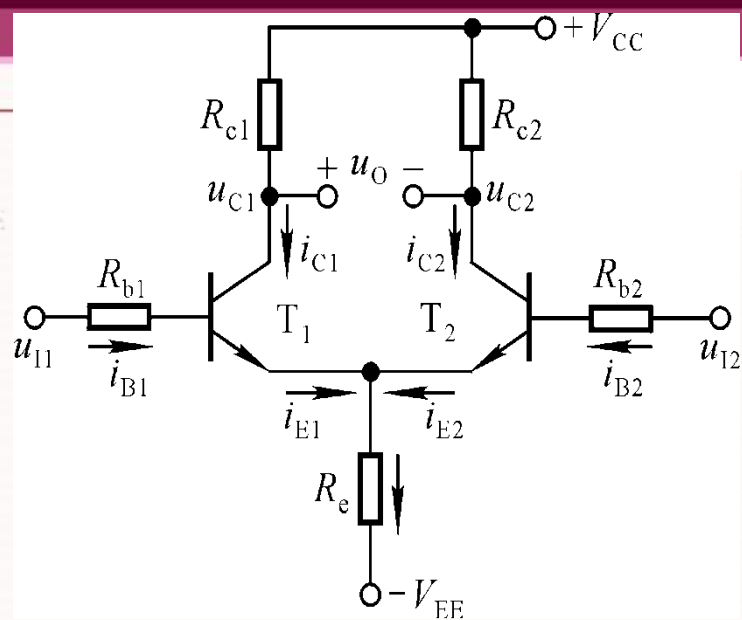
根据信号源和负载的接地情况，差分放大电路有四种接法：

- 双端输入双端输出

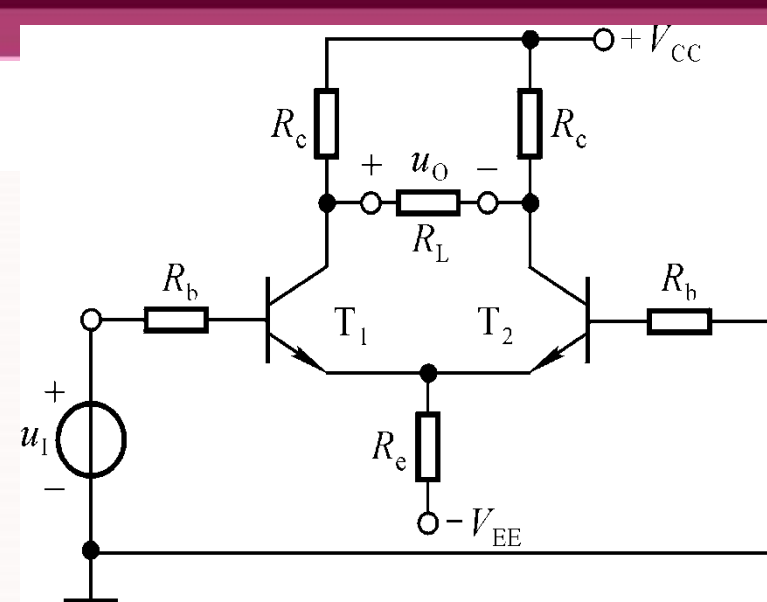
- 双端输入单端输出

- 单端输入双端输出

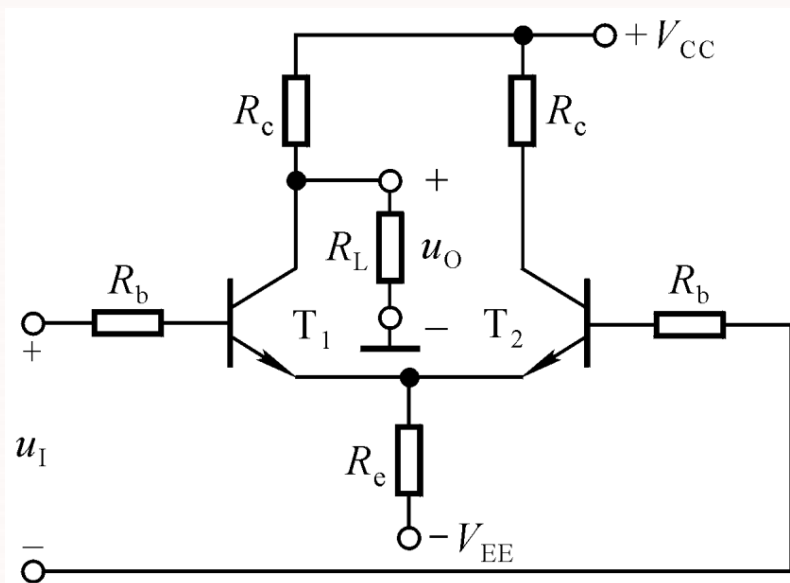
- 单端输入单端输出



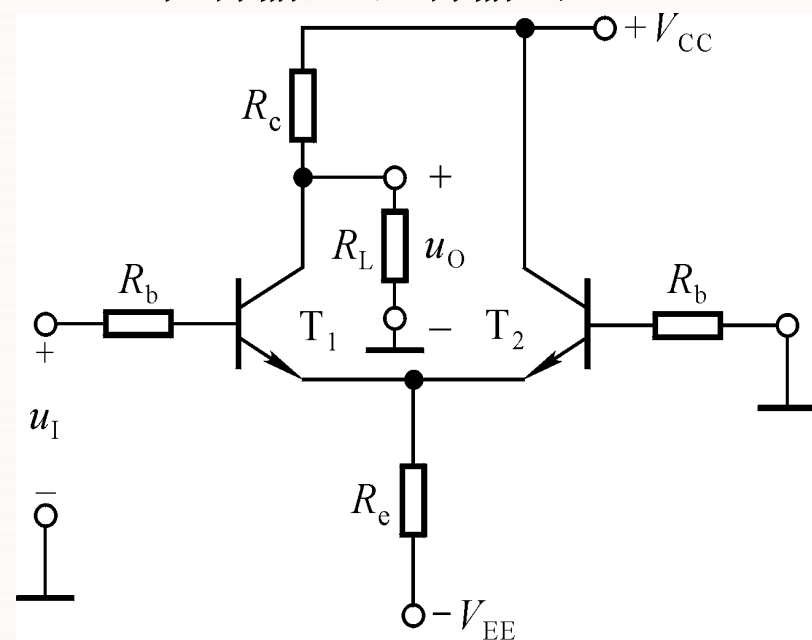
双端输入双端输出



单端输入双端输出



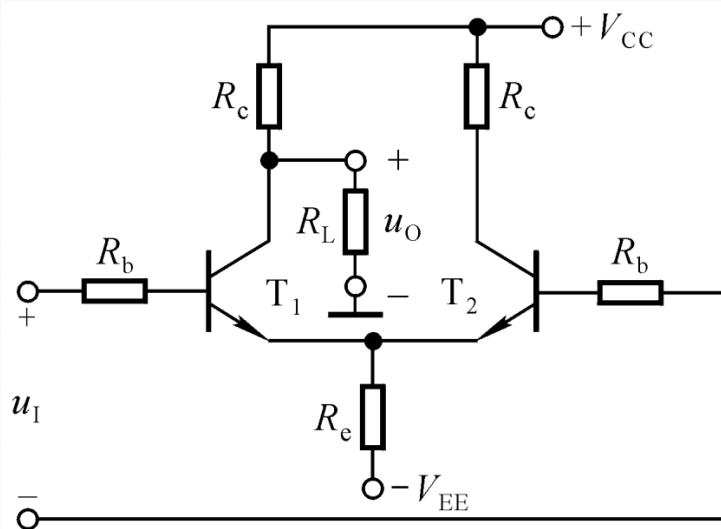
双端输入单端输出



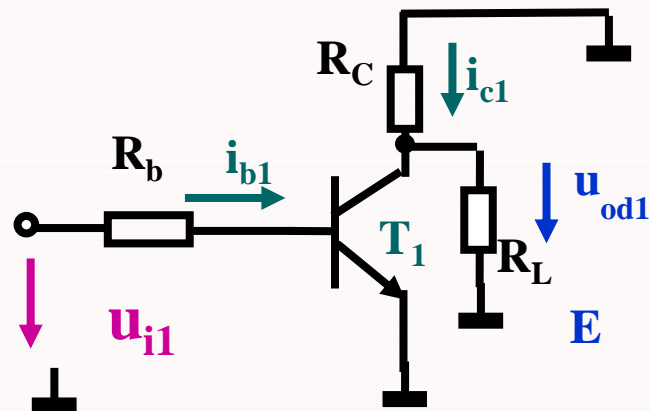
单端输入单端输出

双端输入单端输出

(1) 差模信号作用下的分析



$$A_{d1} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_{od1}}{2u_{i1}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$



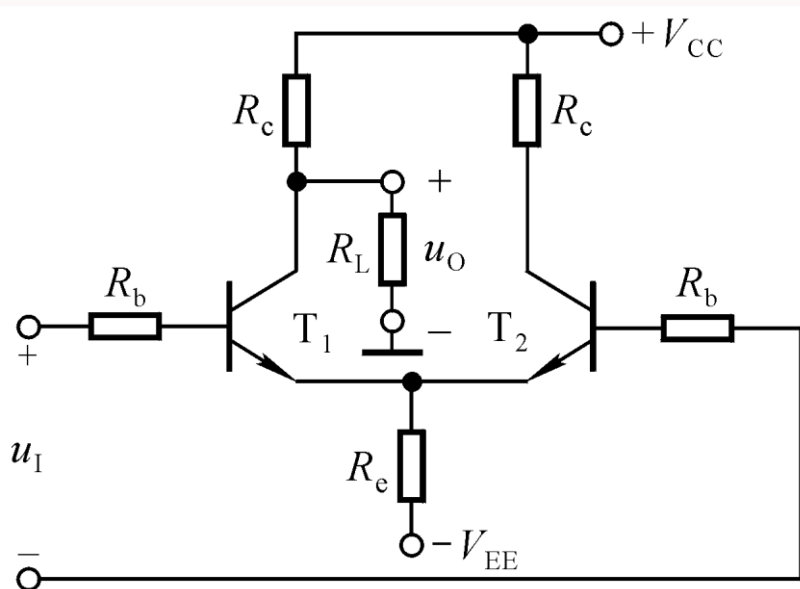
$$R_i = 2(R_b + r_{be}), \quad R_o = R_c$$

C1为反向输出端, **C2**为同向输出端

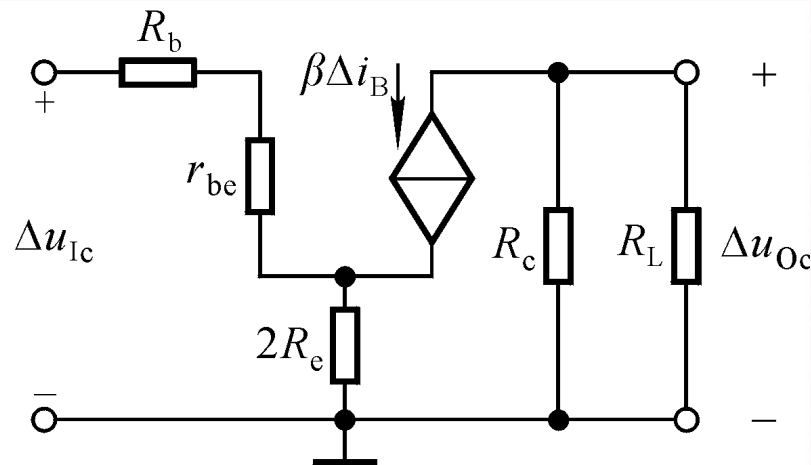
$$A_{d2}(\text{单}) = \frac{u_{od2}}{u_{id}} = \frac{-u_{od1}}{2u_{i1}} = +\frac{\beta(R_c // R_L)}{2(R_b + r_{be})}$$

双端输入单端输出

(2) 共模信号作用下的分析



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



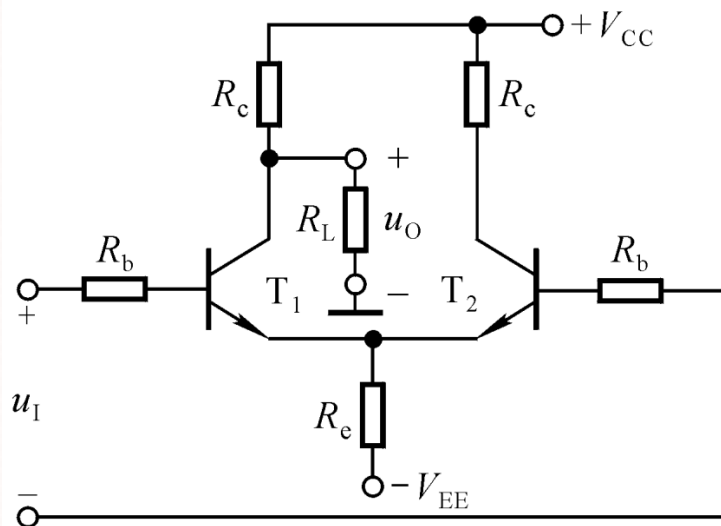
$$A_c = -\frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

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

为了提高共模抑制比应加大***Re***

双端输入单端输出

(3) 问题讨论



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

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

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

(1) T_2 的 R_c 可以短路吗？

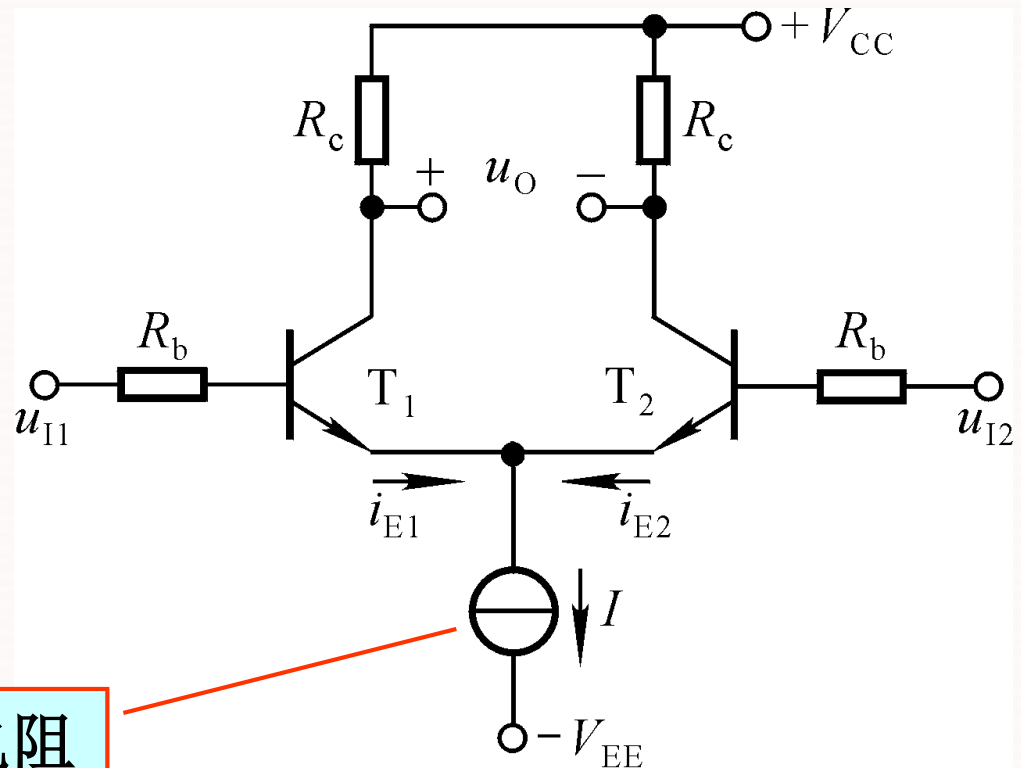
(2) 什么情况下 A_d 为“+”？

(3) 双端输出时的 A_d 是单端输出时的2倍吗？

C1为反向输出端,
C2为同向输出端

7. 具有恒流源的差分放大电路

R_e 越大，共模负反馈越强，差分放大电路的性能越好。



等效电阻
为无穷大



3.3 功率放大电路

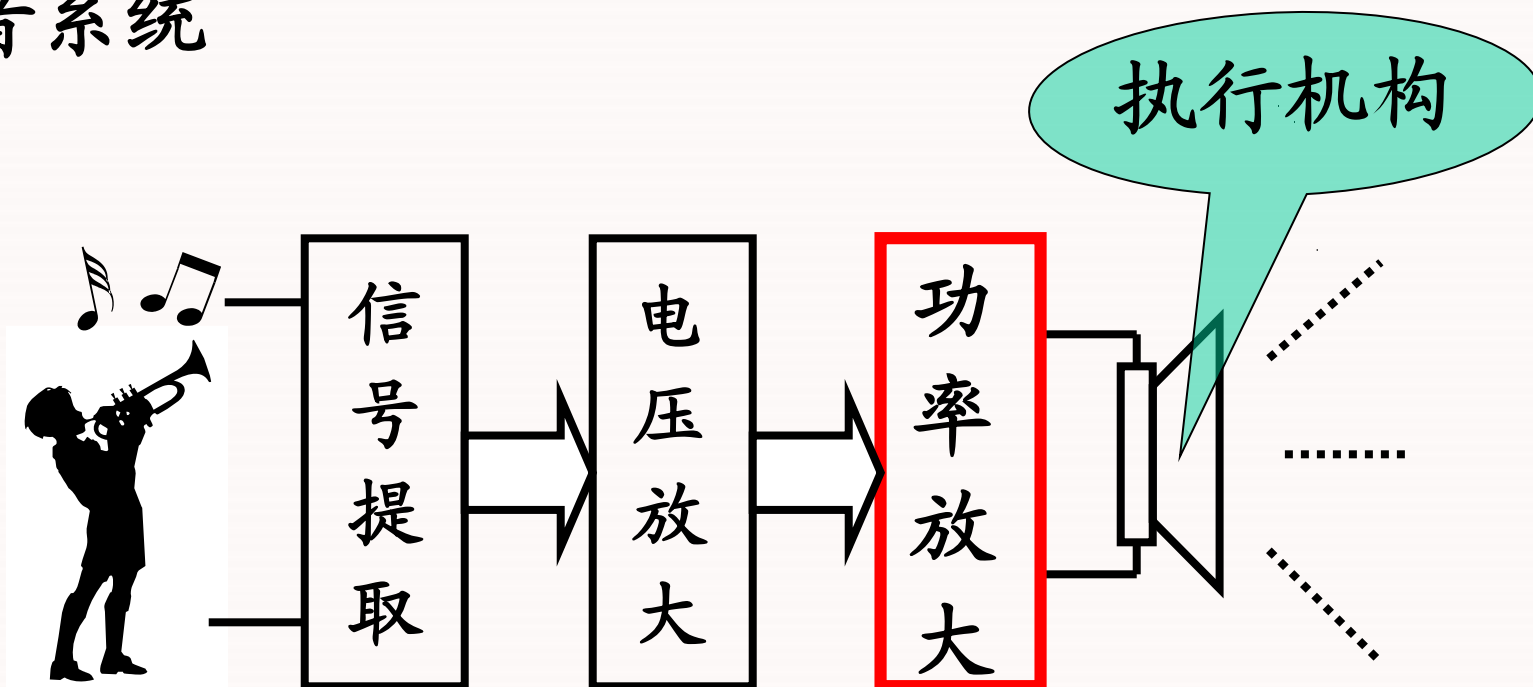
3.3.1 功率放大电路的特点

3.3.2 提高功率放大电路效率的方法

3.3.3 互补对称功率放大电路

功率放大器的作用：做放大电路的**输出级**，
以驱动执行机构。如使扬声器发声、继电器动作、仪表指针偏转等。

扩音系统



3.3.1 功率放大电路的主要特点

对功放的主要要求：（音响）声音大、省电、高保真

1. 根据负载要求，提供所需要的输出功率。

$$P_o = U_o I_o; U_o、I_o \text{ 足够大。}$$

2. 具有较高的效率 $\eta = \frac{P_o}{P_V}$

3. 尽量减小非线性失真。

分析方法：图解法

功放的电路形式：互补对称式电路

输出功率

直流电源
提供功率

3.3.2 提高功率放大电路效率的方法

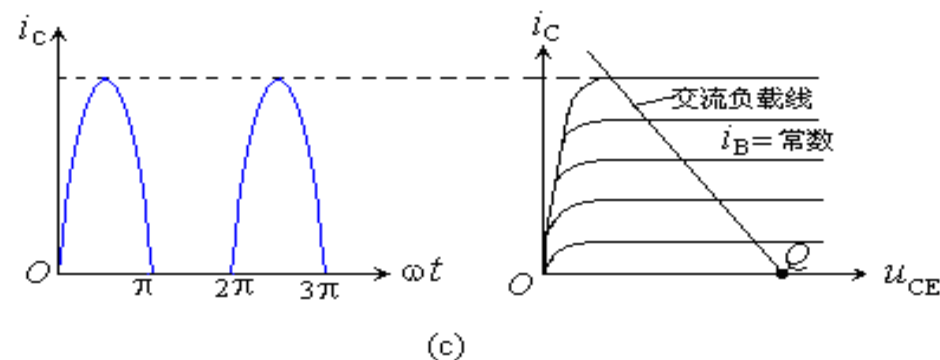
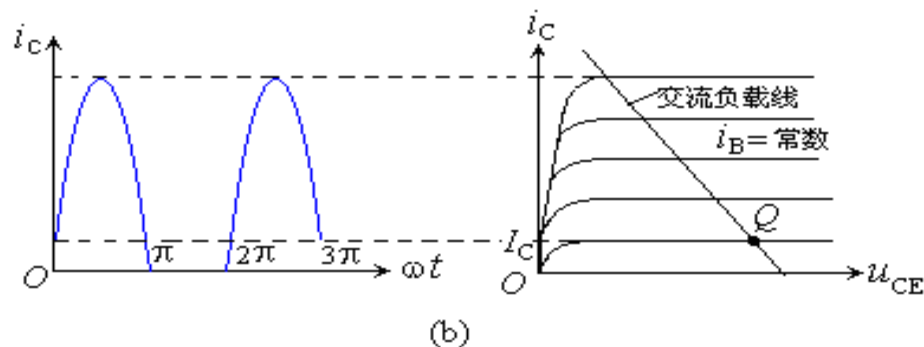
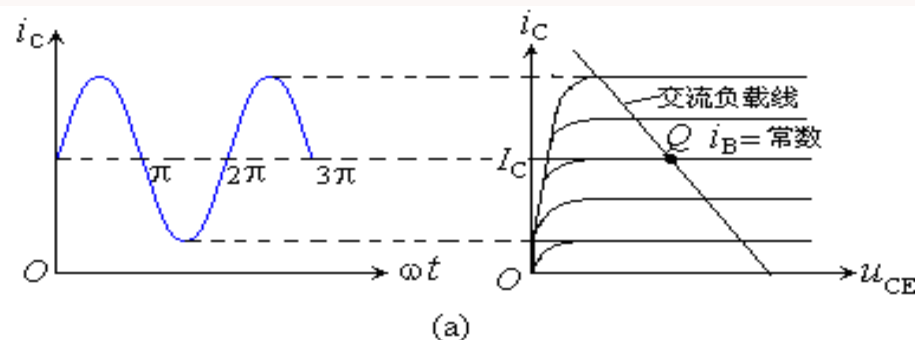
1. 静态工作点与放大电路工作状态的关系

三极管根据正弦信号整个周期内的导通情况，可分为以下几个工作状态：

甲类：一个周期内均导通

乙类：导通角等于 180°

甲乙类：导通角大于 180°



1. 静态工作点与放大电路工作状态的关系

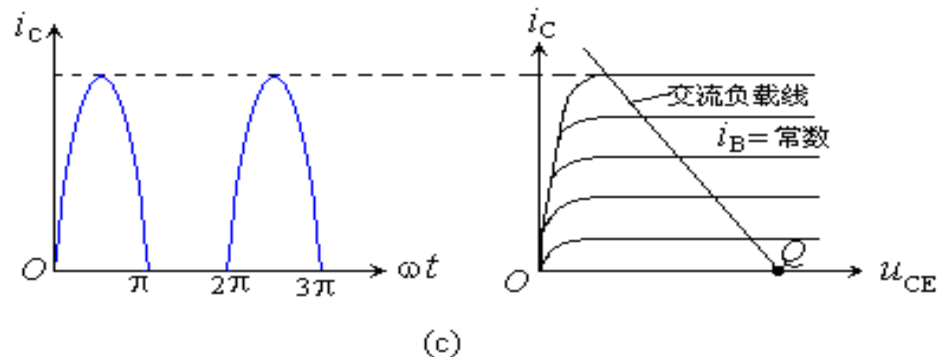
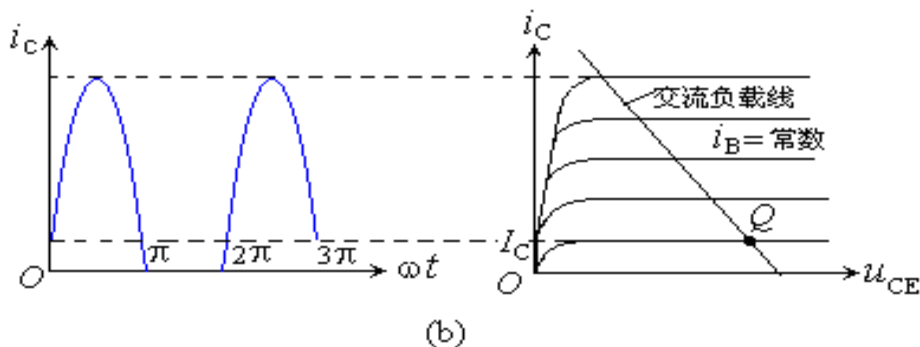
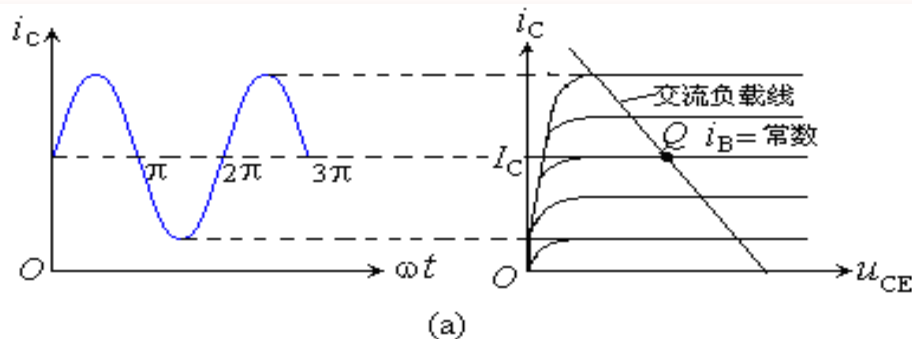
甲类:静态 I_C 最大

乙类: 静态 $I_C = 0$

甲乙类:静态 I_C 处于两者之间

2. 提高效率的途径

降低静态功耗,
即减小静态电流。



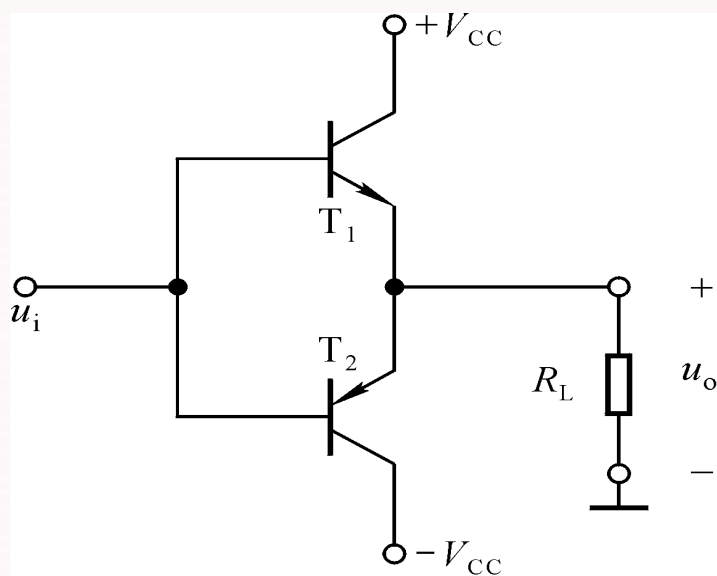
用哪种组态的电路作功率放大电路最合适?

3.3.3 互补对称功率放大电路

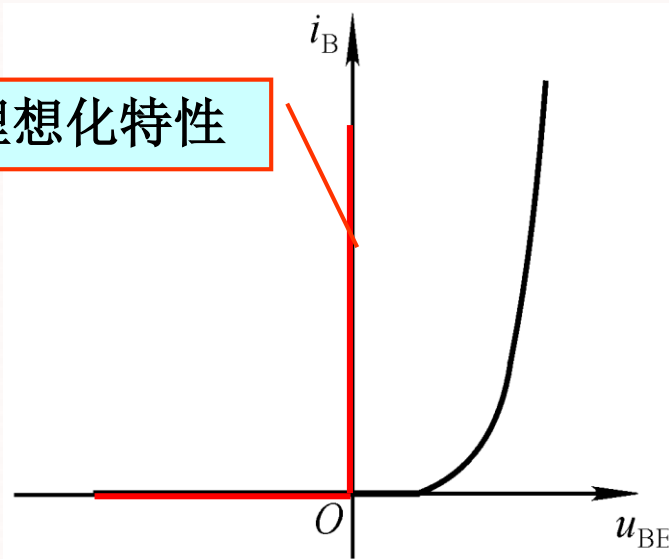
一、双电源乙类互补对称功率放大电路

1. **特征**：由一对**NPN**、**PNP**特性相同的互补三极管组成，采用正、负双电源供电(**OCL**电路)

2. 静态分析

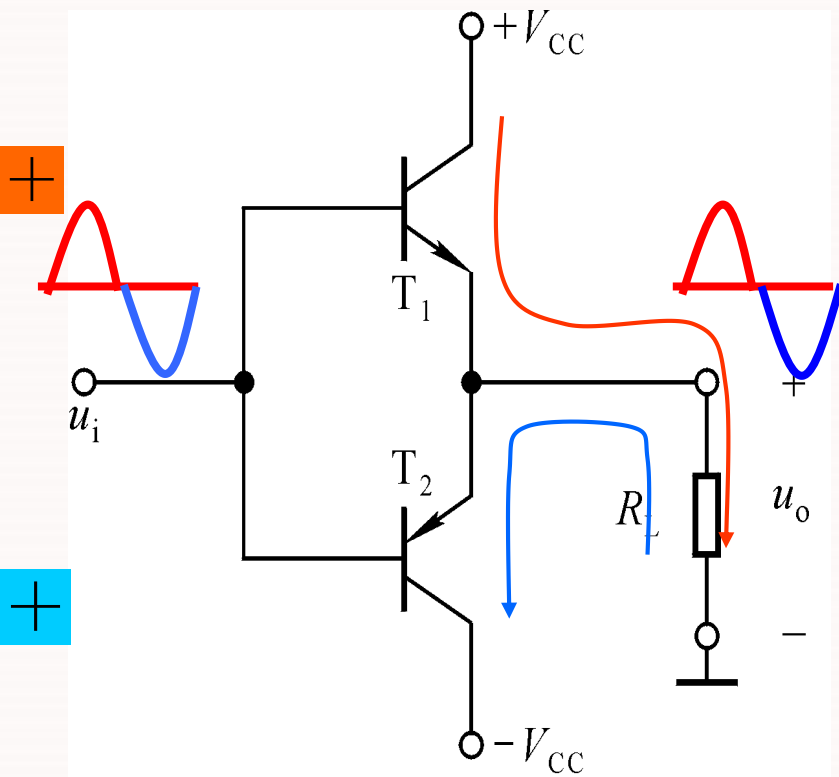


T_1 的输入特性



$u_i = 0V \rightarrow U_B = U_E = 0$, T_1 、 T_2 均截止, $u_o = 0V$

3. 动态分析



u_i 正半周, T_1 导通, T_2 截止,
电流通路为

$+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow R_L \rightarrow \text{地},$

$$u_o = u_i$$

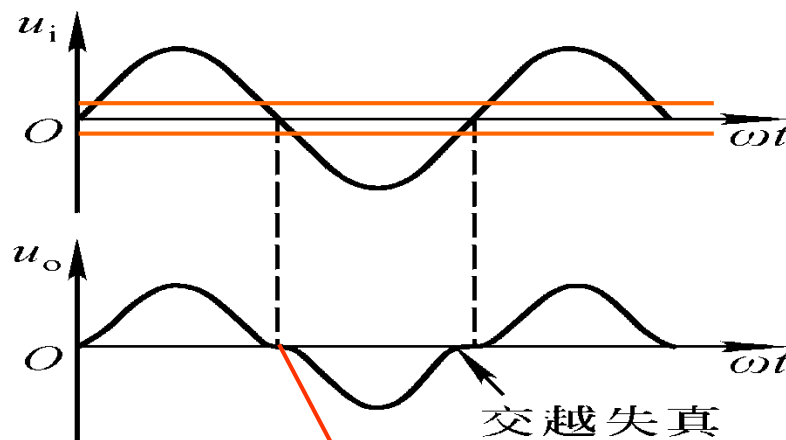
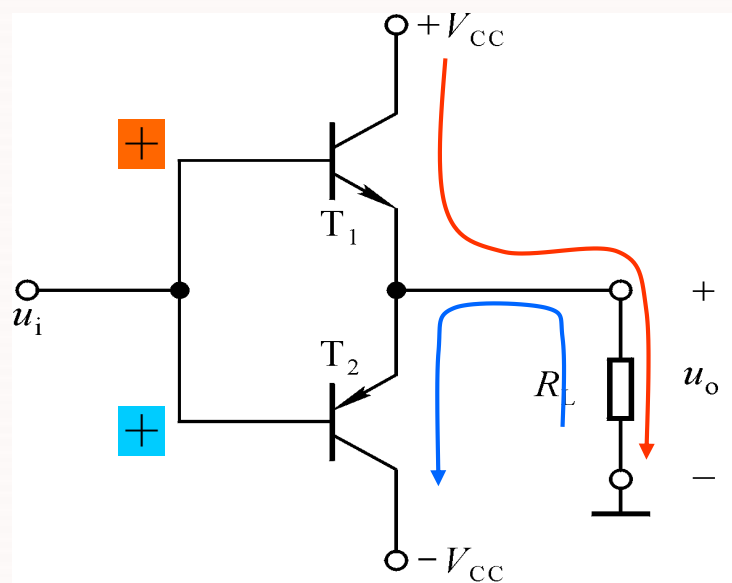
u_i 负半周, T_1 截止, T_2 导通,
电流通路为

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

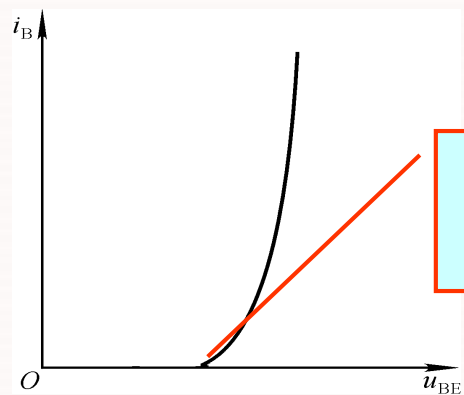
$$u_o = u_i$$

两只管子都只在半个周期内交替工作, 两路电源交替供电, 双向跟随。

4. 交越失真



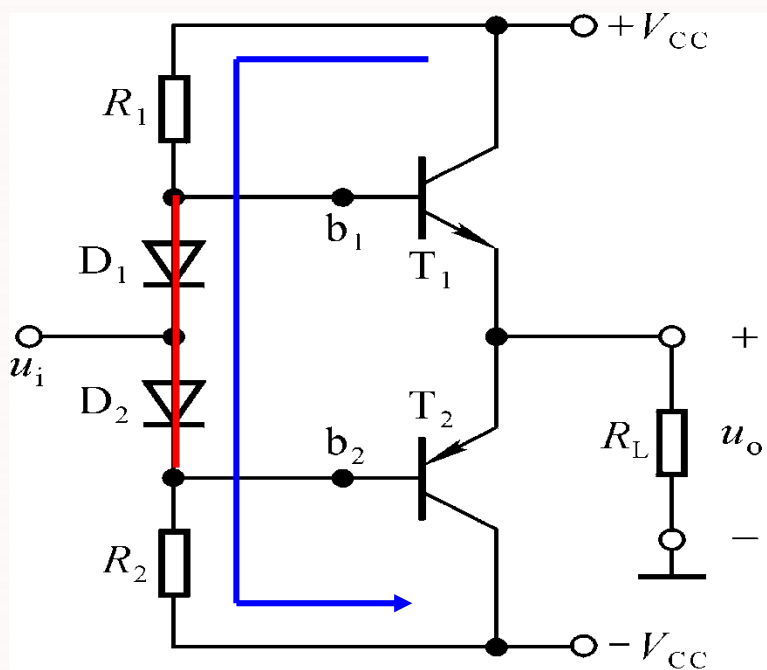
信号在零附近两
只管子均截止



开启
电压

消除失真的方法：
设置合适的静态工作点。

二、双电源甲乙类互补对称功率放大电路



使 T_1 和 T_2 均处于微导通
可克服交越失真

静态: $U_{B1B2} = U_{D1} + U_{D2}$

动态: $u_{b1} \text{ H } u_{b2} \text{ H } u_i$

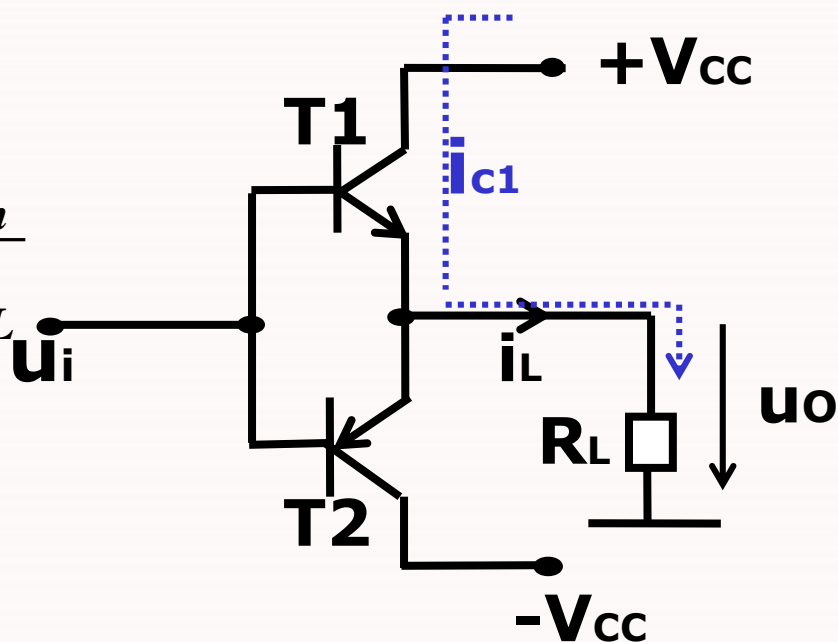
三、输出功率 P_O 和效率

$$P_O = U_O I_O = \frac{U_{om}}{\sqrt{2}} * \frac{U_{om}}{\sqrt{2}R_L} = \frac{U_{om}^2}{2R_L}$$

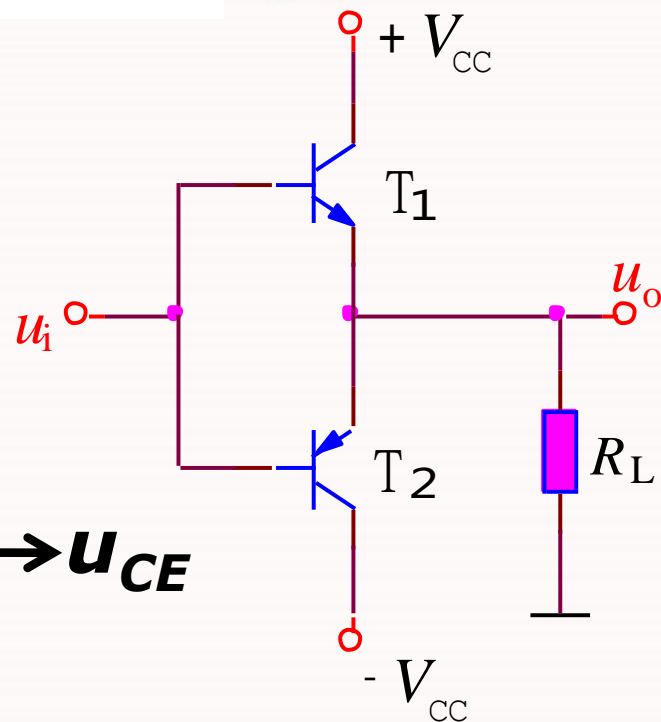
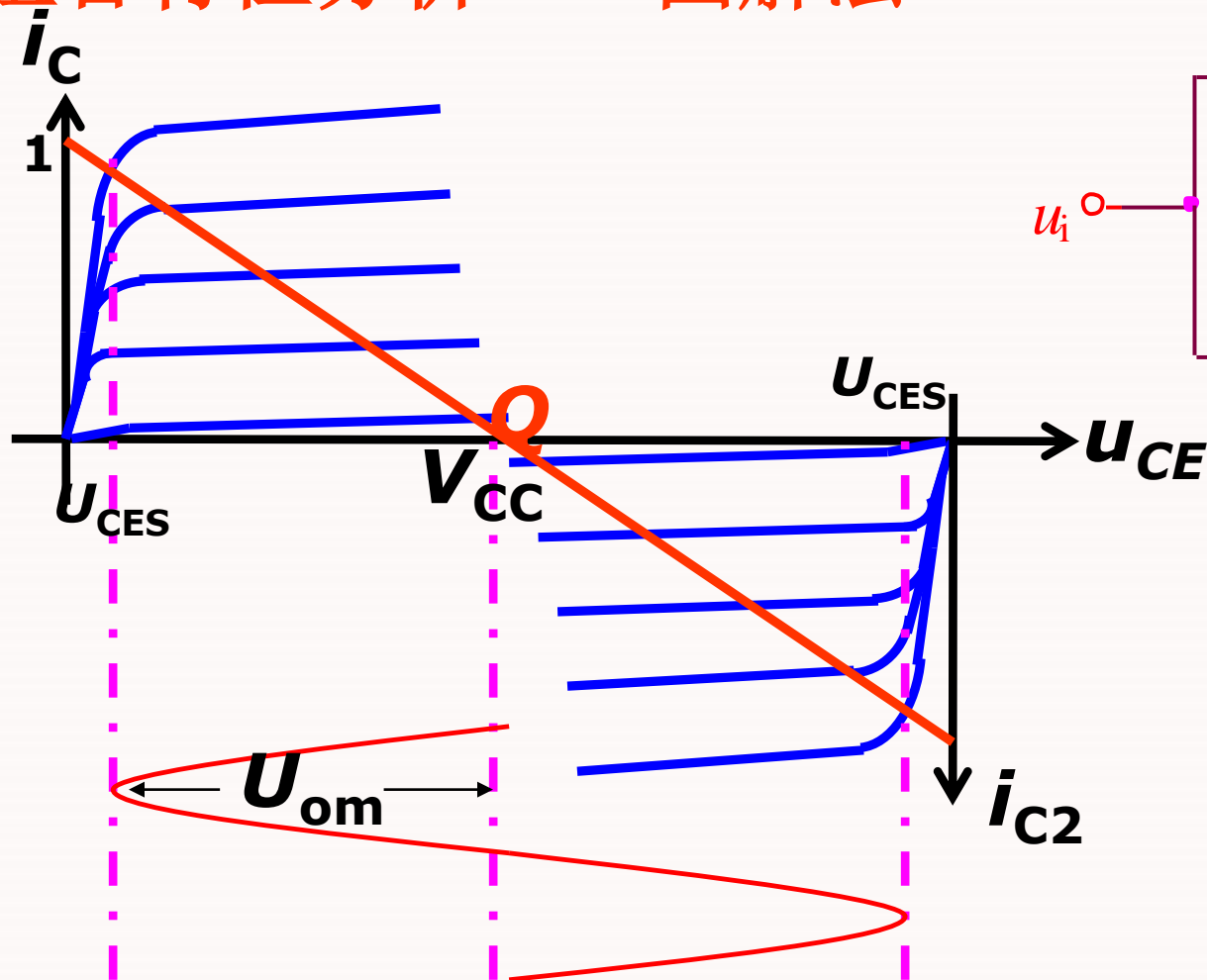
A、 u_i 幅度较小，**T1T2**处于放大状态时， $u_{om} \approx u_{im}$

$$P_O = \frac{U_{om}^2}{2R_L} = \frac{U_{im}^2}{2R_L}$$

B、 u_i 幅度足够大，**T1、T2**进入临界饱和，此时输出达到最大值。则负载 (**RL**) 上的电压为？



组合特性分析——图解法



负载上的最大不失真电压幅值为 $U_{om} = V_{CC} - U_{CES}$

$$U_{om} = V_{CC} - U_{CES}$$

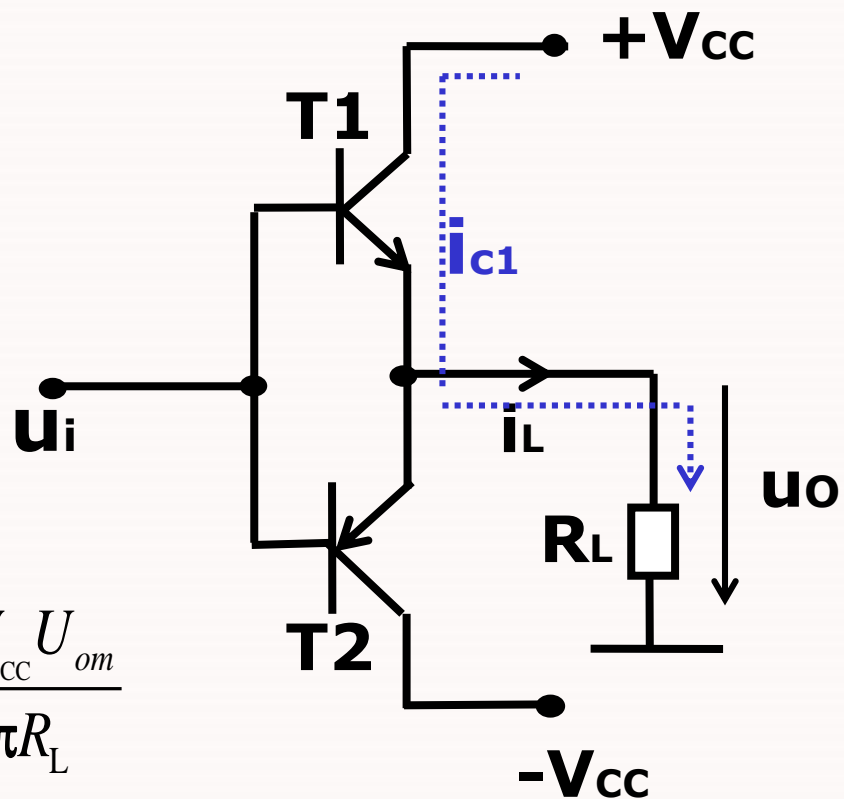
$$P_{om} = \frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$$

集电极电流幅值 I_{cm}

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

$$P_V = V_{CC} \times \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_{cm} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2V_{CC} I_{cm}}{\pi} = \frac{2V_{CC} U_{om}}{\pi R_L}$$

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V} = \frac{\frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L}}{\frac{2V_{CC} U_{om}}{\pi R_L}} = \frac{\pi U_{om}}{4V_{CC}} \approx \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

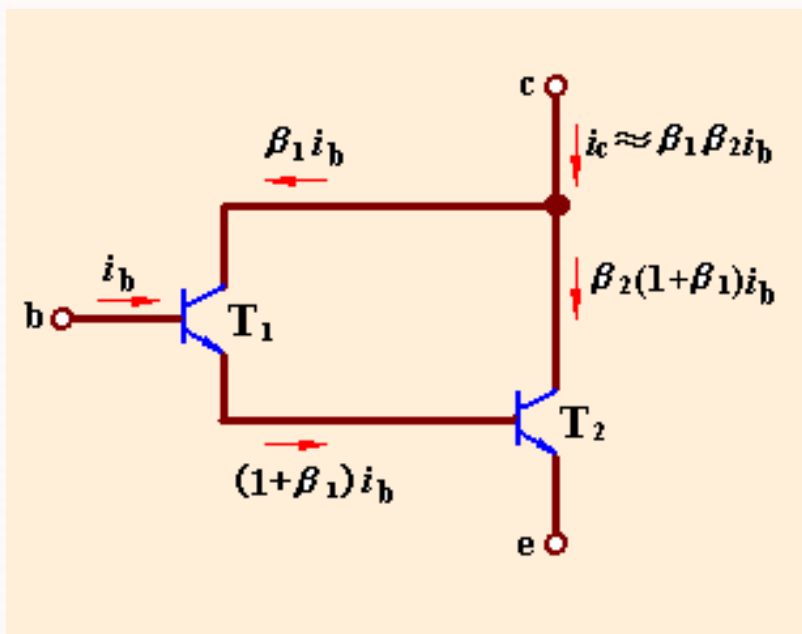


四、采用复合管的互补对称功率放大电路

复合管的组成：多只管子合理连接等效成一只管子。

目的：增大 β ，减小前级驱动电流，改变管子的类型。

1. 晶体管组成的复合管及其电流放大系数



$$\begin{cases} \beta = \beta_1 \beta_2 \\ r_{be} = r_{be1} + \beta_1 r_{be2} \end{cases}$$

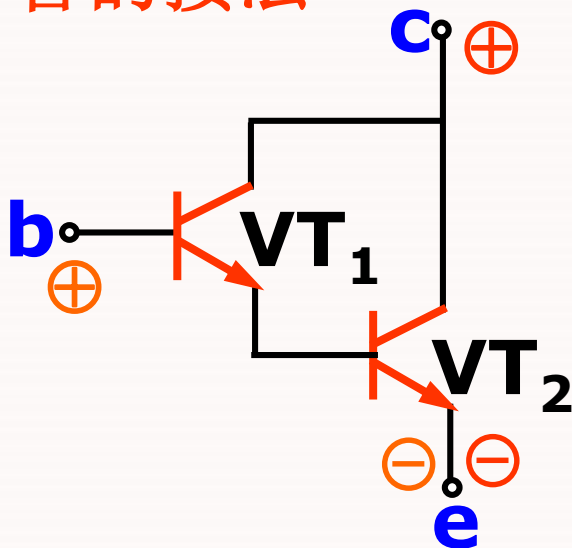
构成复合管时注意



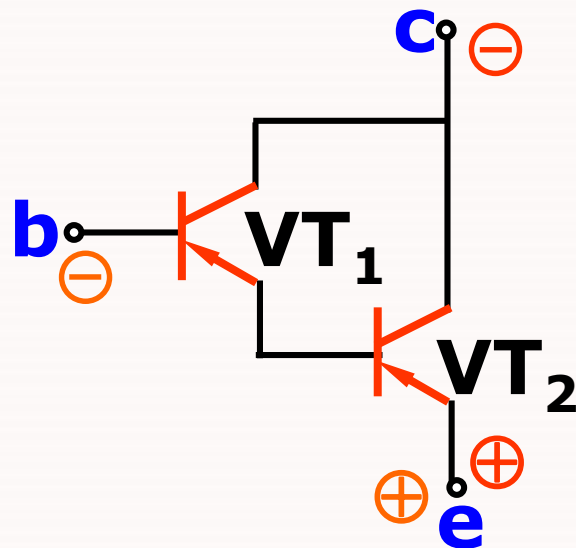
1. 前后两个三极管连接关系上，应保证前级输出电流与后级输入电流实际方向一致。

2. 外加电压的极性应保证前后两个管子均为发射结正偏，集电结反偏，使管子工作在放大区。

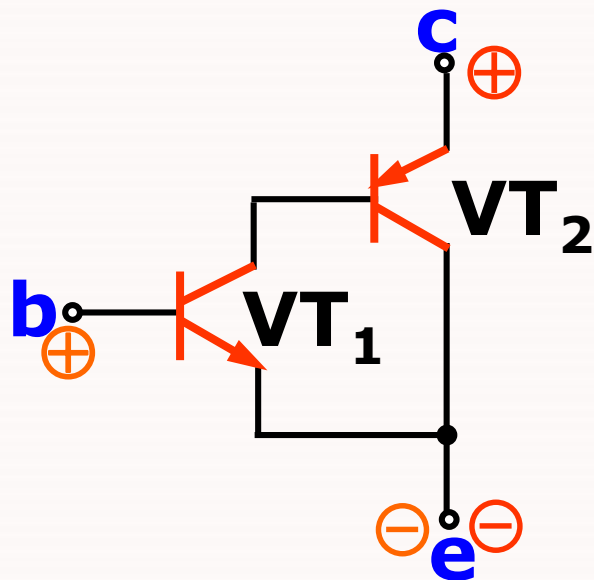
复合管的接法



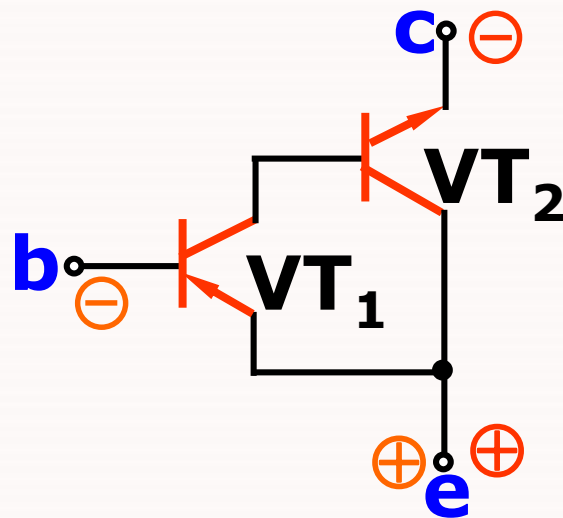
(a) NPN 型



(b) PNP 型



(c) **NPN 型**



(d) **PNP 型**

复合管的 $\beta \approx \beta_1 \beta_2$ ，复合管的 $r_{be} = r_{be1}$
 不同类型的管子复合后，其类型决定于 T_1 管。

2、结 论

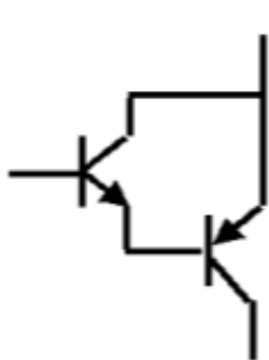
1. 两个同类型的三极管组成复合管，其类型与原来相同。复合管的 $\beta \approx \beta_1 \beta_2$ ，复合管的 $r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}$ 。

2. 两个不同类型的三极管组成复合管，其类型与前级三极管相同。复合管的 $\beta \approx \beta_1 \beta_2$ ，复合管的 $r_{be} = r_{be1}$ 。

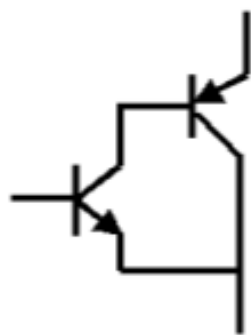
3. 在集成运放中，复合管不仅用于中间级，也常用于输入级和输出级。



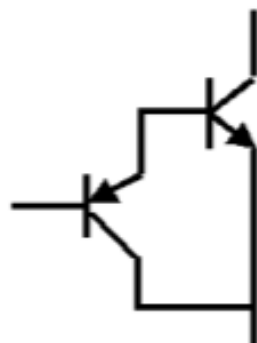
例：为获得一只**PNP**型复合管，可选用下图中的第()
电路。



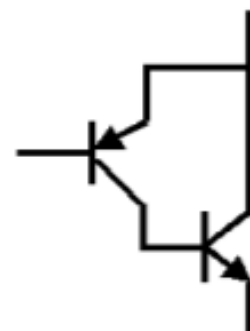
(1)



(2)



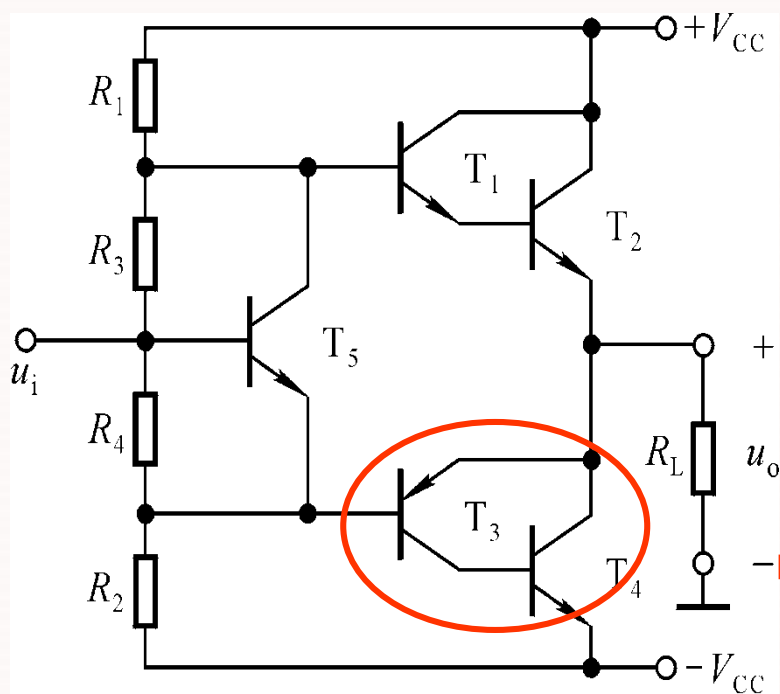
(3)



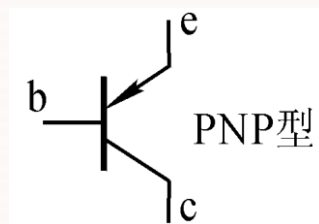
(4)

3.采用复合管的互补对称功率放大电路

为了增大**T1**管和**T2**管的电流放大系数，以减小前级驱动电流，常采用复合管结构。为保持输出管的良好对称性，输出管应为同类型晶体管。



T2和**T4**类型相同，特性相同，这种输出管为同一类型管的电路称为准互补电路。



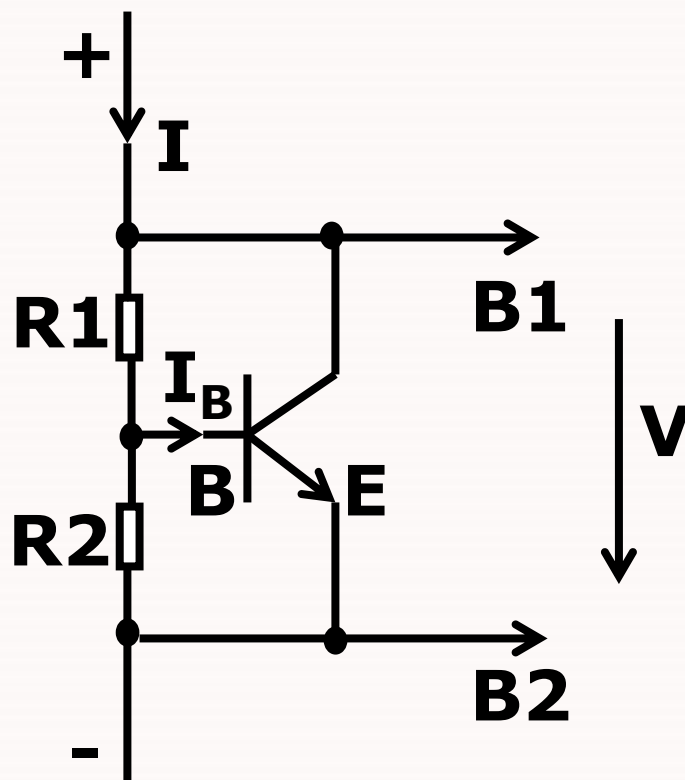
V_{BE} 电压扩大电路

为更换好地和T1、T2两发射结电位配合，克服交越失真电路中的D1、D2两二极管可以用 V_{BE} 电压扩大电路替代。

图中 B_1 、 B_2 分别接T1、T2的基极。假设 $I \gg I_B$ ，则

$$V \approx V_{BE} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

合理选择 R_1 、 R_2 大小， B_1 、 B_2 间便可得到 V_{BE} 任意倍数的电压。



4. OTL 互补对称电路

(1) 特点:

- * 单电源供电;
- * 输出加有大电容。

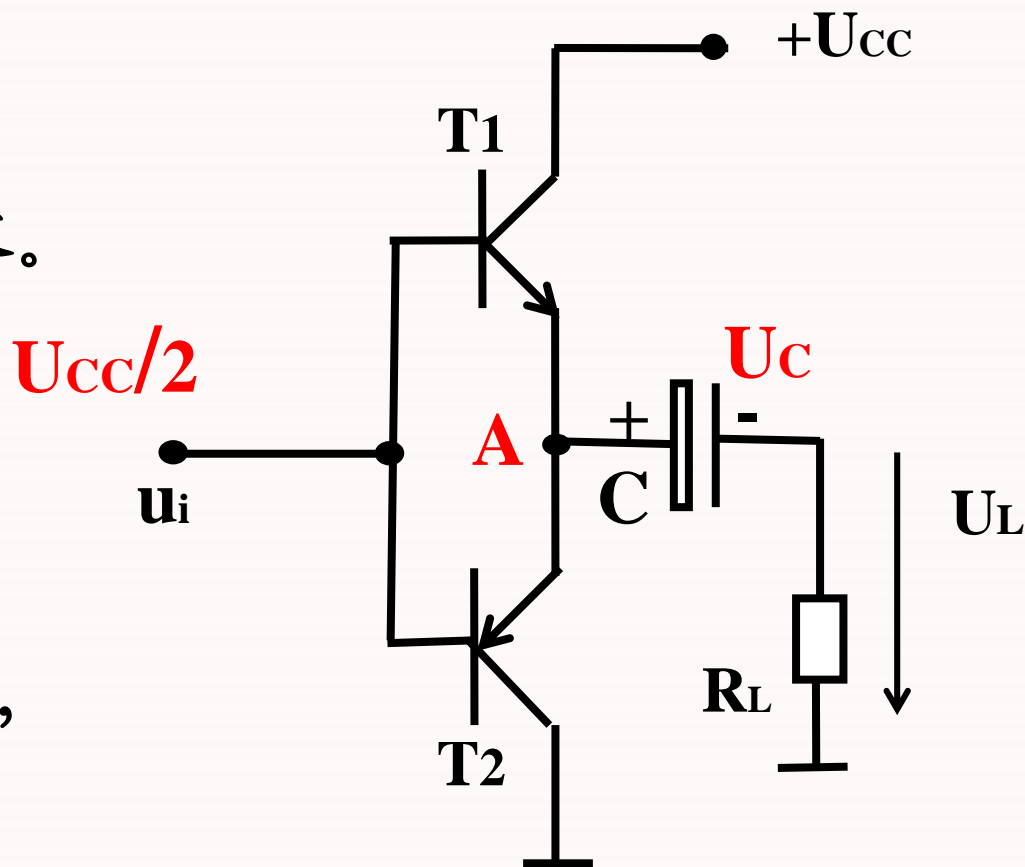
(2) 静态时:

$$\text{令: } u_i = \frac{U_{CC}}{2}$$

T_1 、 T_2 特性对称,

$$\therefore U_A = \frac{U_{CC}}{2}$$

$$U_C = \frac{U_{CC}}{2}。$$

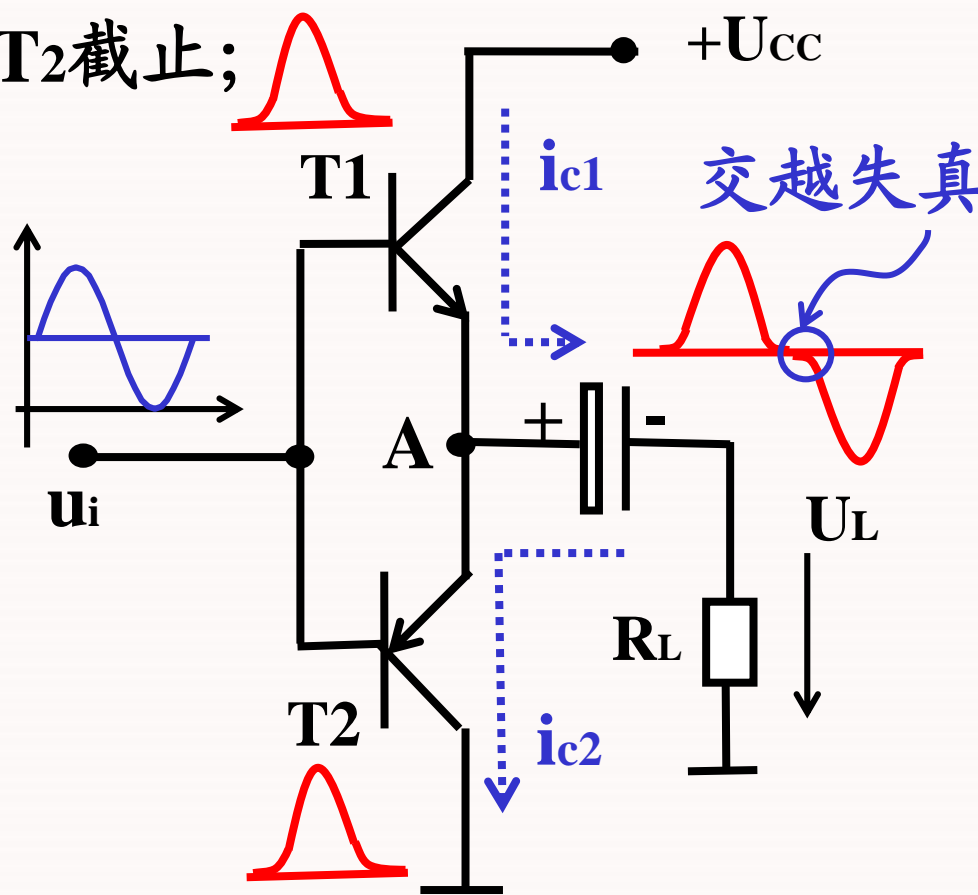


(3) 动态时:

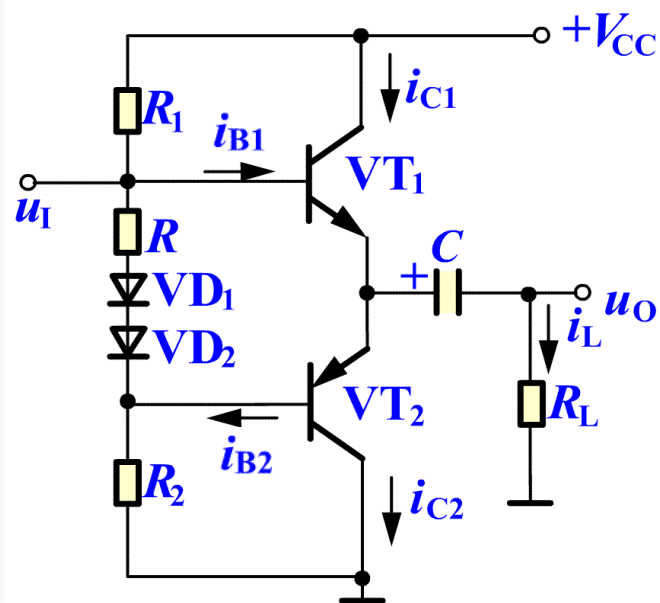
设输入端在 $U_{CC}/2$ 直流电平基础上加入正弦信号。

$u_i > \frac{U_{CC}}{2}$ 时, T_1 导通、 T_2 截止;

$u_i < \frac{U_{CC}}{2}$ 时, T_1 截止、
 T_2 导通。
(U_C 相当于电源)



OTL 甲乙类互补对称电路



R 、 VD_1 、 VD_2 为两管提供一小的静态偏置电压，使得在输入信号等于零时，管子微导通，以克服交越失真

OCL计算

$$U_{om} = V_{CC} - U_{CES}$$

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

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

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

OTL计算

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

$$I_{cm} = \frac{\frac{V_{CC}}{2} - U_{CES}}{R_L}$$

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

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\frac{V_{CC}}{2} - U_{CES}}{\frac{V_{CC}}{2}}$$



3.4 集成运算放大器

3.4.1 集成运算放大器的组成和特点

3.4.2 通用型集成运算放大器

3.4.3 集成运算放大器的电压传输特性和主要参数

3.4.4 集成运算放大器的使用

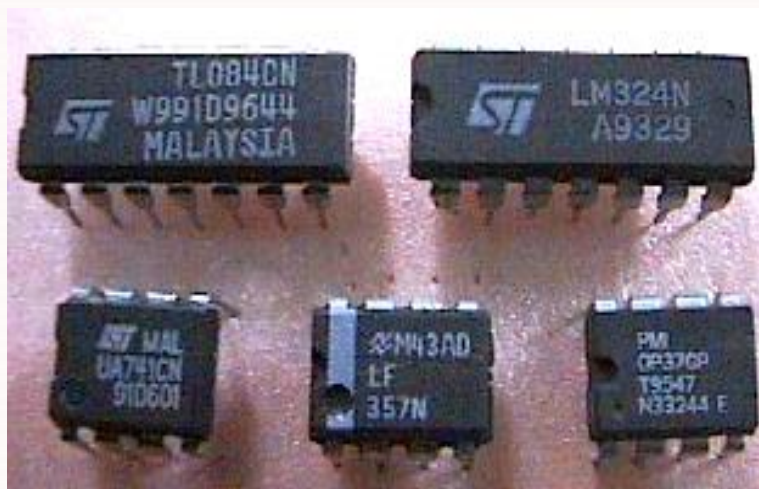


在半导体制造工艺的基础上，将整个电路中的元器件制作在一块硅基片上，构成特定功能的电子电路，称为**集成电路**。其体积小，而性能却很好。

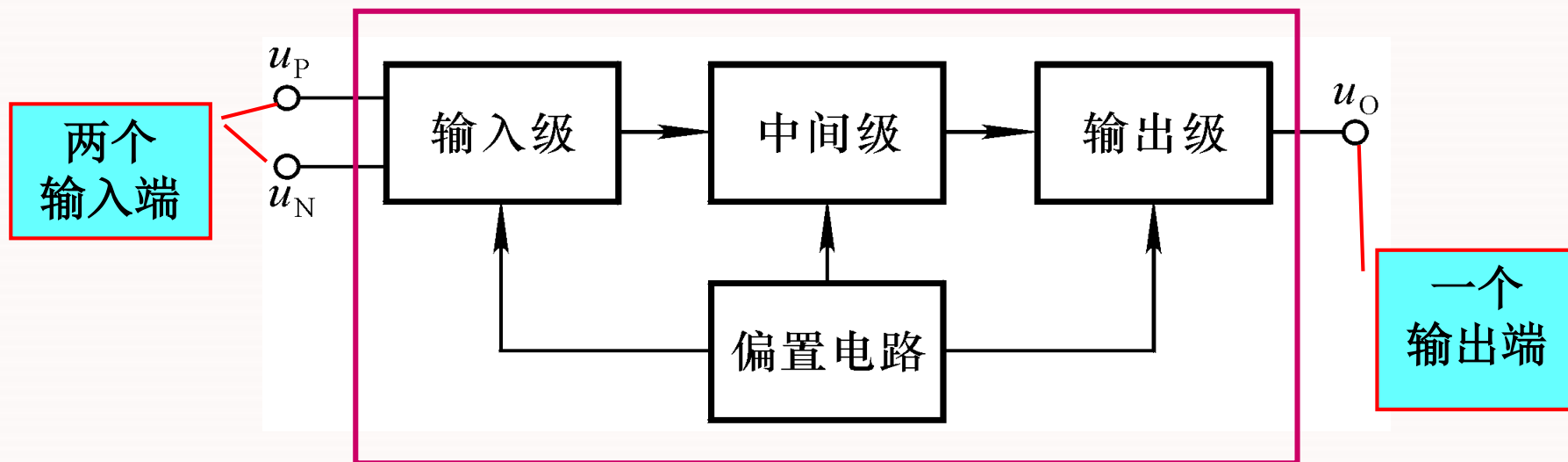
集成电路按其功能分，有模拟集成电路和数字集成电路。模拟集成电路的种类繁多，其中集成运算放大器（简称集成运放）是应用极为广泛的一种。

3.4.1 集成运算放大器的组成和特点

集成运算放大电路，简称集成运放，是一个高性能的直接耦合多级放大电路。因首先用于信号的运算，故而得名。



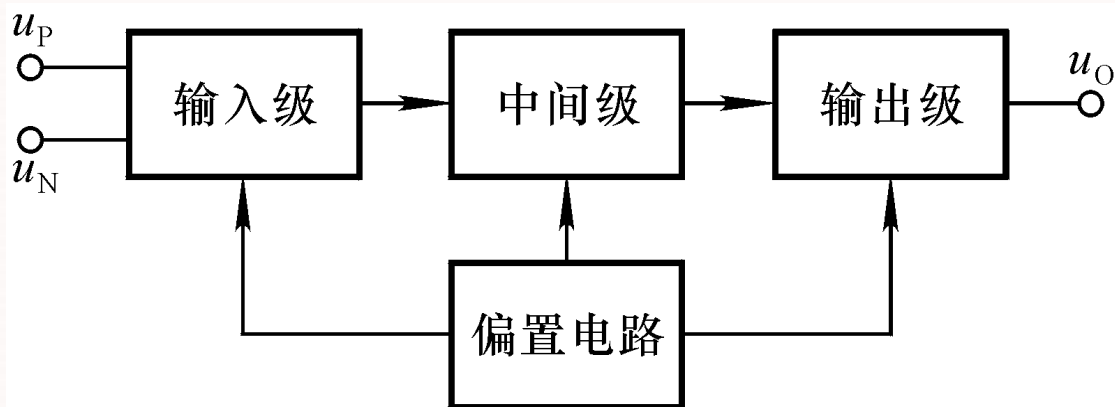
1. 集成运算放大器的组成



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。

差动输入级有两个输入 u_P 、 u_N ，当信号从 u_N 输入，输出 u_O 与 u_N 极性相反，称 u_N 为反相输入端；当信号从 u_P 输入，输出 u_O 与 u_P 极性相同，称 u_P 为同相输入端。

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。

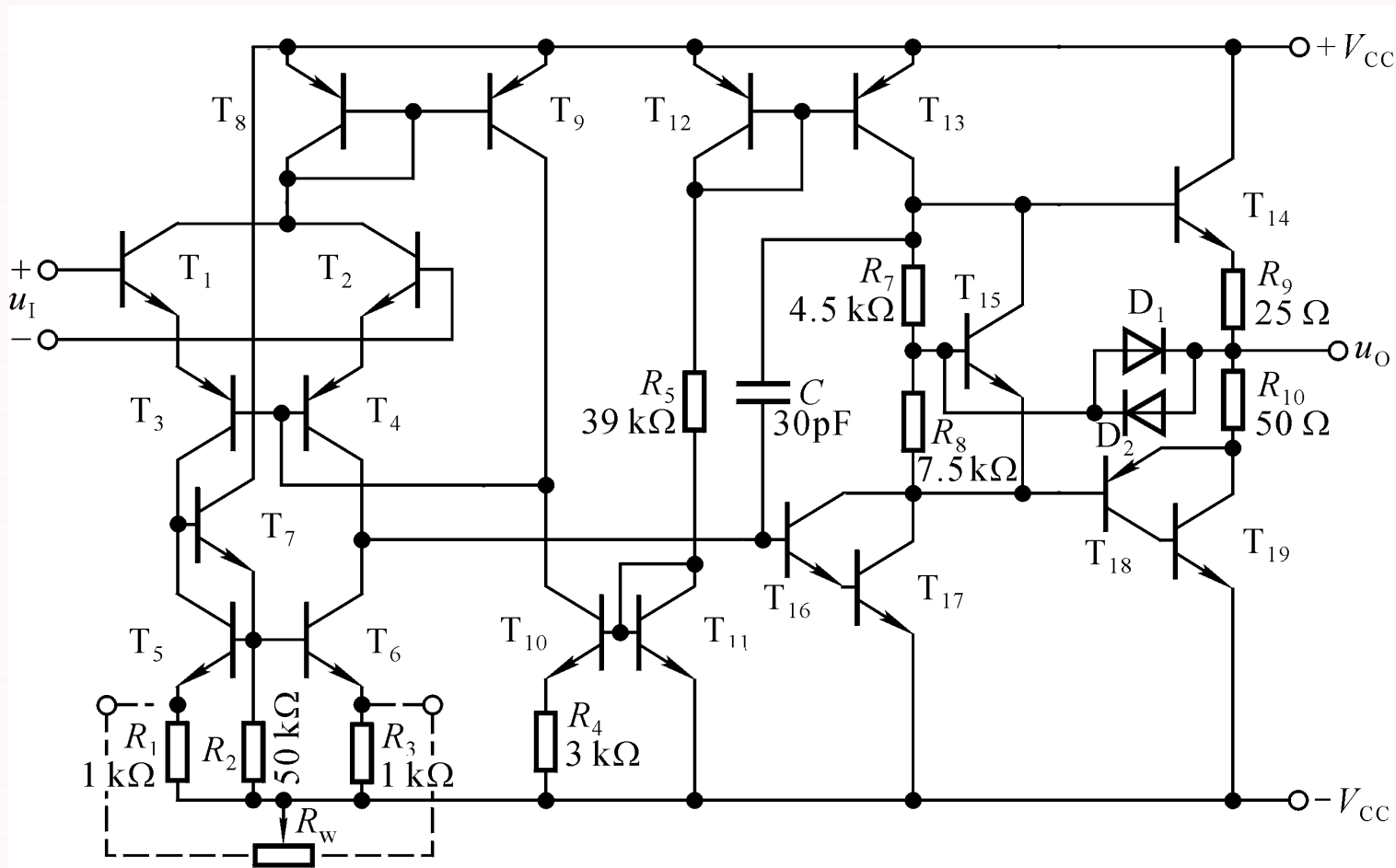
输出级：功率级，多采用准互补输出级。要求 R_o 小，最大不失真输出电压尽可能大。



2. 集成运算放大器的特点

- (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，因为电路复杂并不增加制作工序。
- (3) 用有源元件替代无源元件，如用晶体管取代难于制作的大电阻。
- (4) 采用复合管。

3.4.2 型号为F007的通用型集成运放



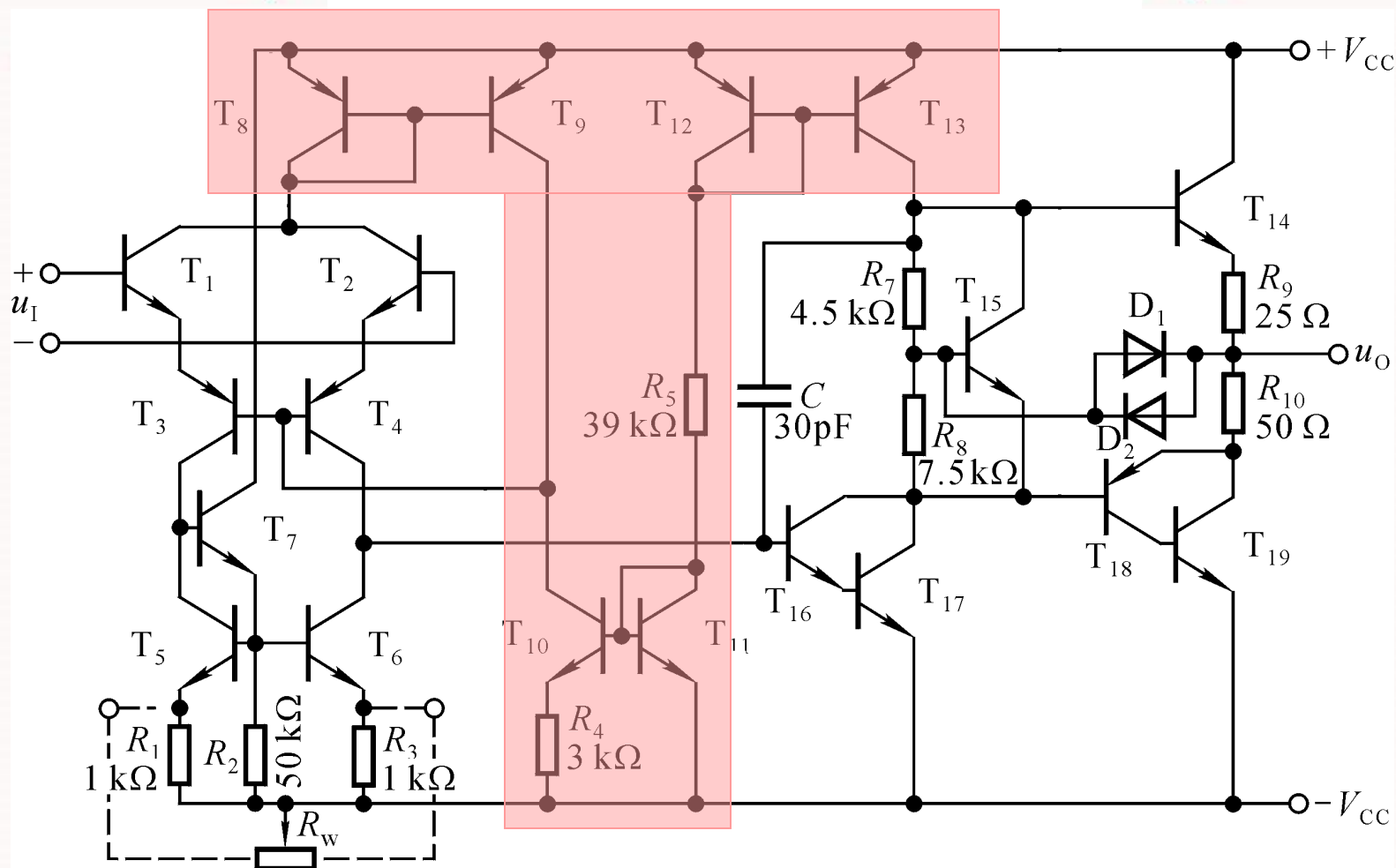
一、集成运放电路分析

1. 读图方法

已知电路图，分析其原理和功能、性能。

- (1) **了解用途：**了解要分析的电路的应用场合、用途和技术指标。
- (2) **化整为零：**将整个电路图分为各自具有一定功能的基本电路。
- (3) **分析功能：**定性分析每一部分电路的基本功能和性能。
- (4) **统观整体：**电路相互连接关系以及连接后电路实现的功能和性能。
- (5) **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。

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。

偏置电路

一、镜像电流源 (电流镜 **Current Mirror**)

基准电流
$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - U_{BE1}}{R}$$

由于 VT_1 与 VT_2 参数基本相同, 则

$$I_{C2} = I_{C1} = I_{REF} - 2I_B = I_{REF} - 2\frac{I_{C2}}{\beta}$$

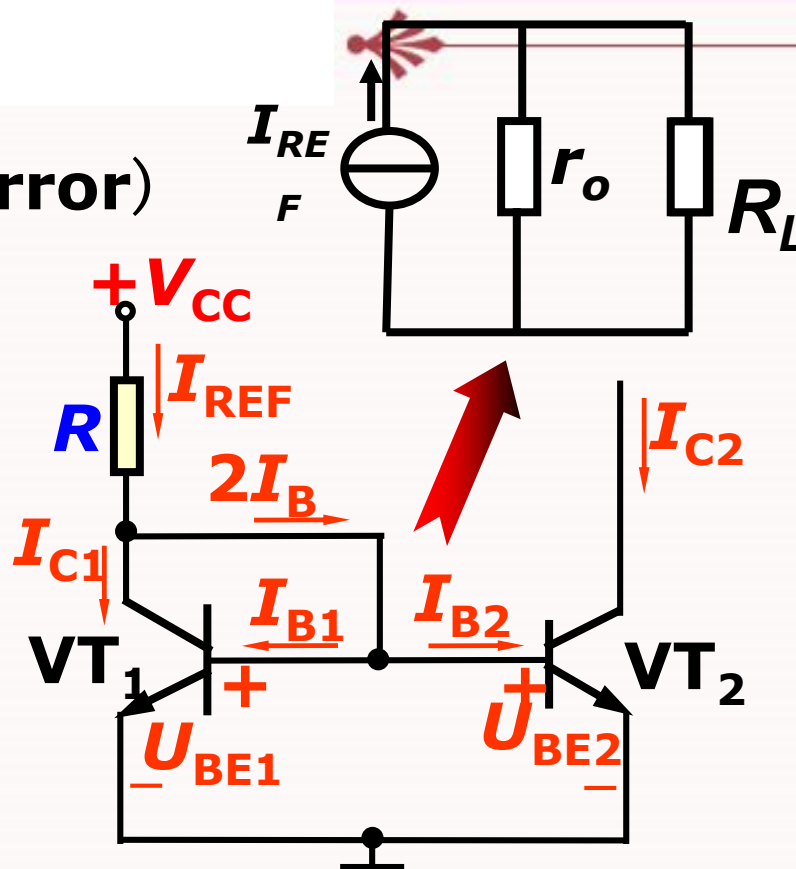
所以
$$I_{C2} = I_{REF} \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

当满足 $\beta \gg 2$ 时, 则

$$I_{C2} = I_{REF} = \frac{V_{CC} - U_{BE1}}{R}$$

电路特点: **1**、是单口网络, 没有信号输入端。

2、 I_{C2} 基本恒定, 与负载 R_L 的大小无关。



二、比例电流源

由图可得

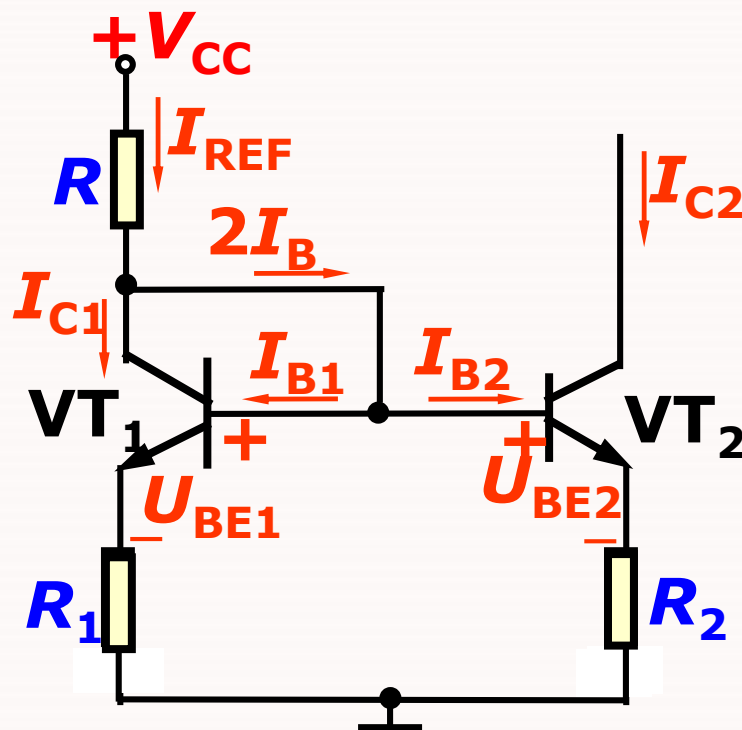
$$U_{BE1} + I_{E1}R_1 = U_{BE2} + I_{E2}R_2$$

由于 $U_{BE1} \approx U_{BE2}$ ，则

$$I_{E1}R_1 \approx I_{E2}R_2$$

$$\therefore I_{C2} \approx \frac{R_1}{R_2} I_{C1} \approx \frac{R_1}{R_2} I_{REF}$$

两个三极管的集电极电流之比近似与发射极电阻的阻值成反比，故称为比例电流源。

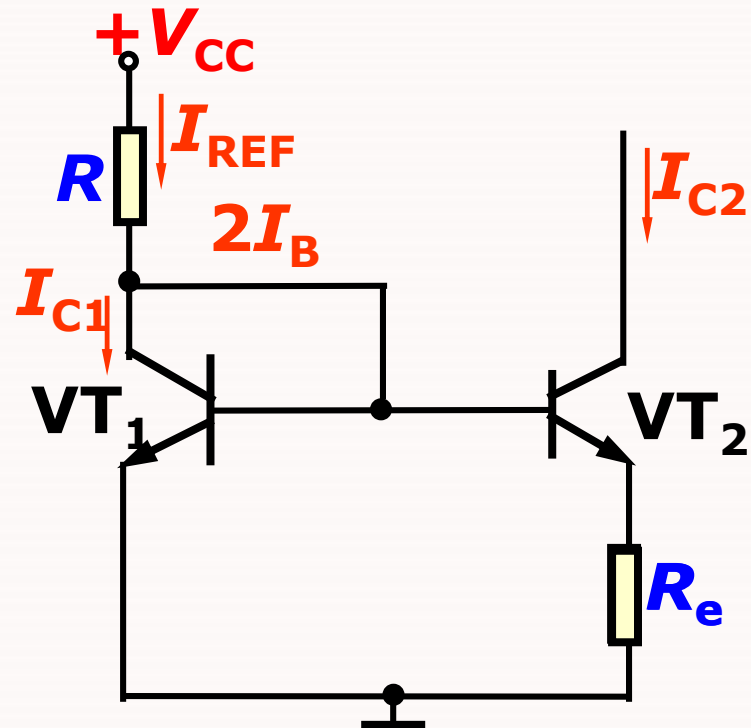


三、微电流源

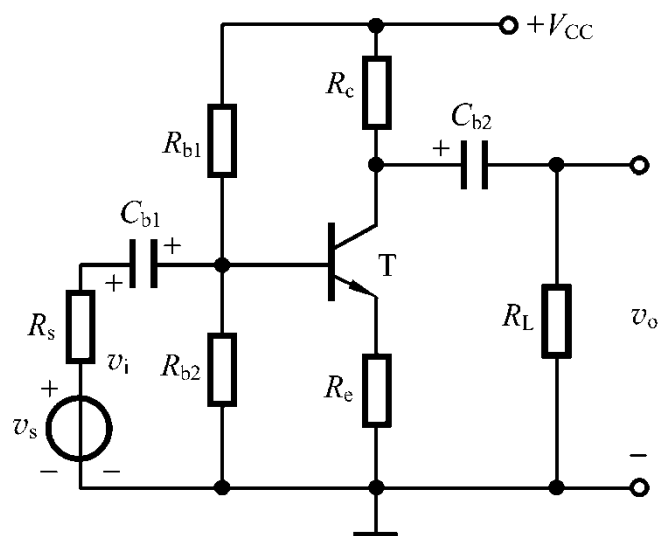
$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_{e2}} = \frac{\Delta V_{BE}}{R_{e2}}$$

$\therefore \Delta V_{BE}$ 值较小,

\therefore 用不大的 R_{e2} 就可得到微小的 I_{c2}

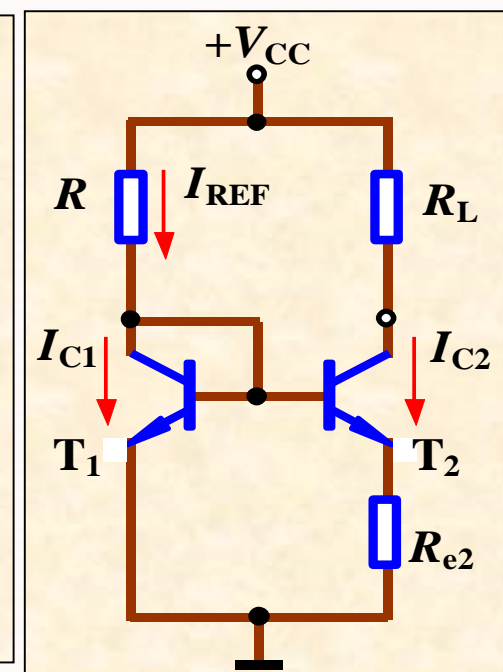
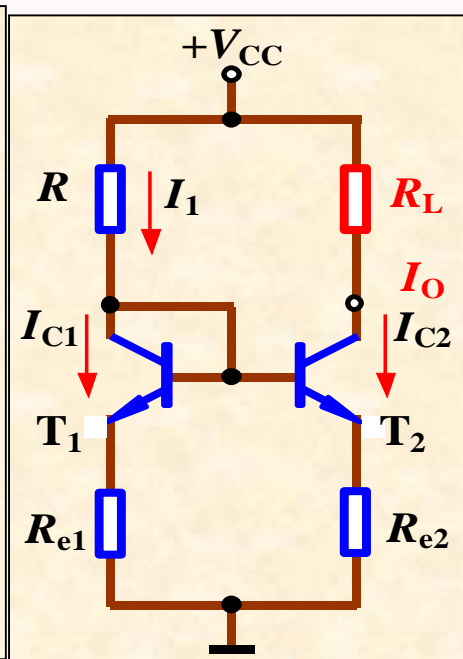
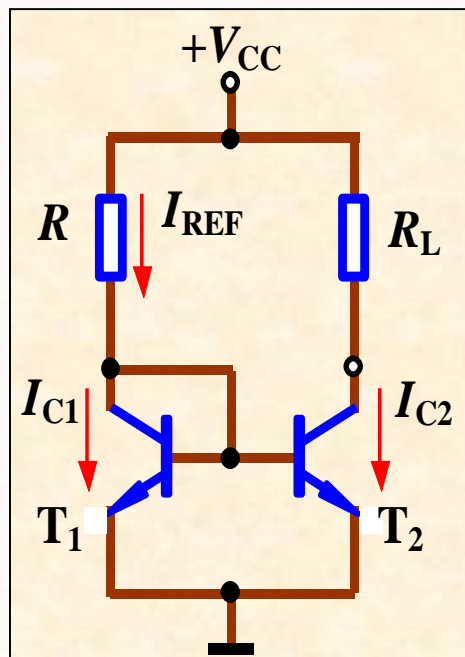
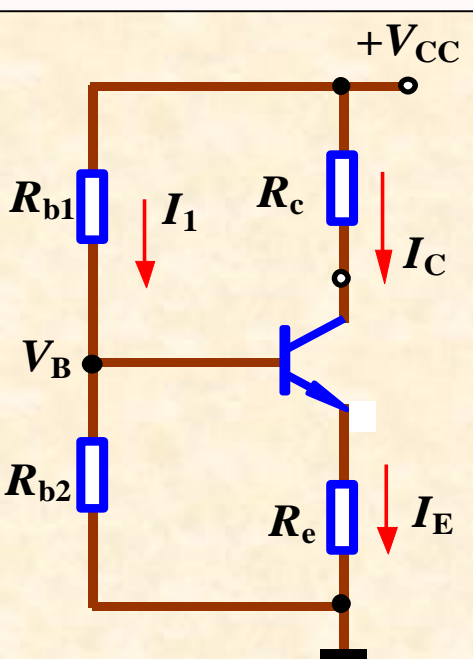


- 特点:
- (1) I_{C2} 与 R_L 无关, 相当于向 R_L 提供恒定的电流。
 - (2) T_1 管对 T_2 管具有温度补偿作用, 热稳定性好。



共射极电路

电流源

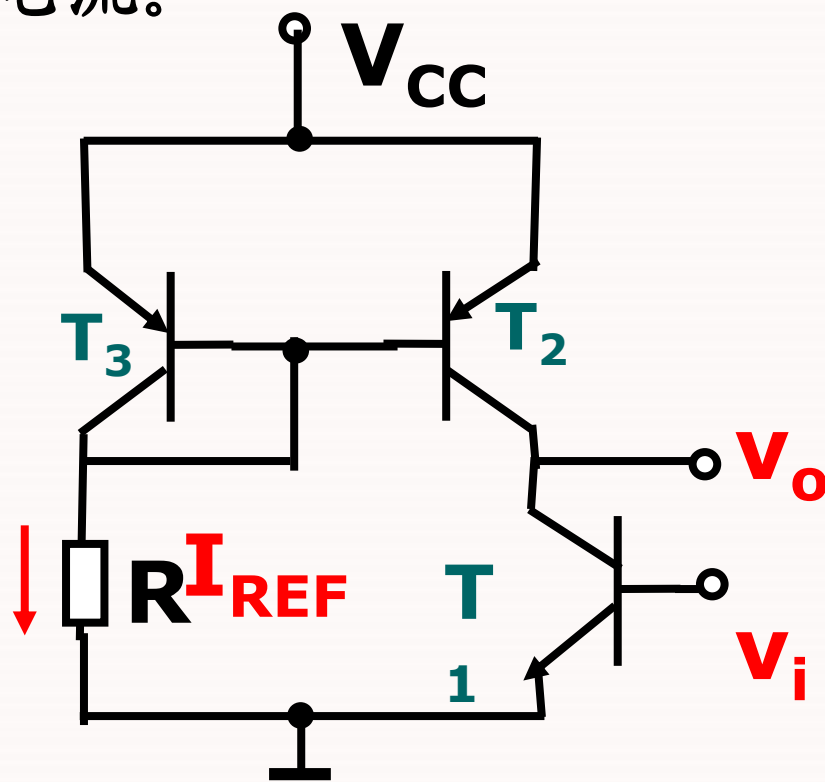


电流源的作用

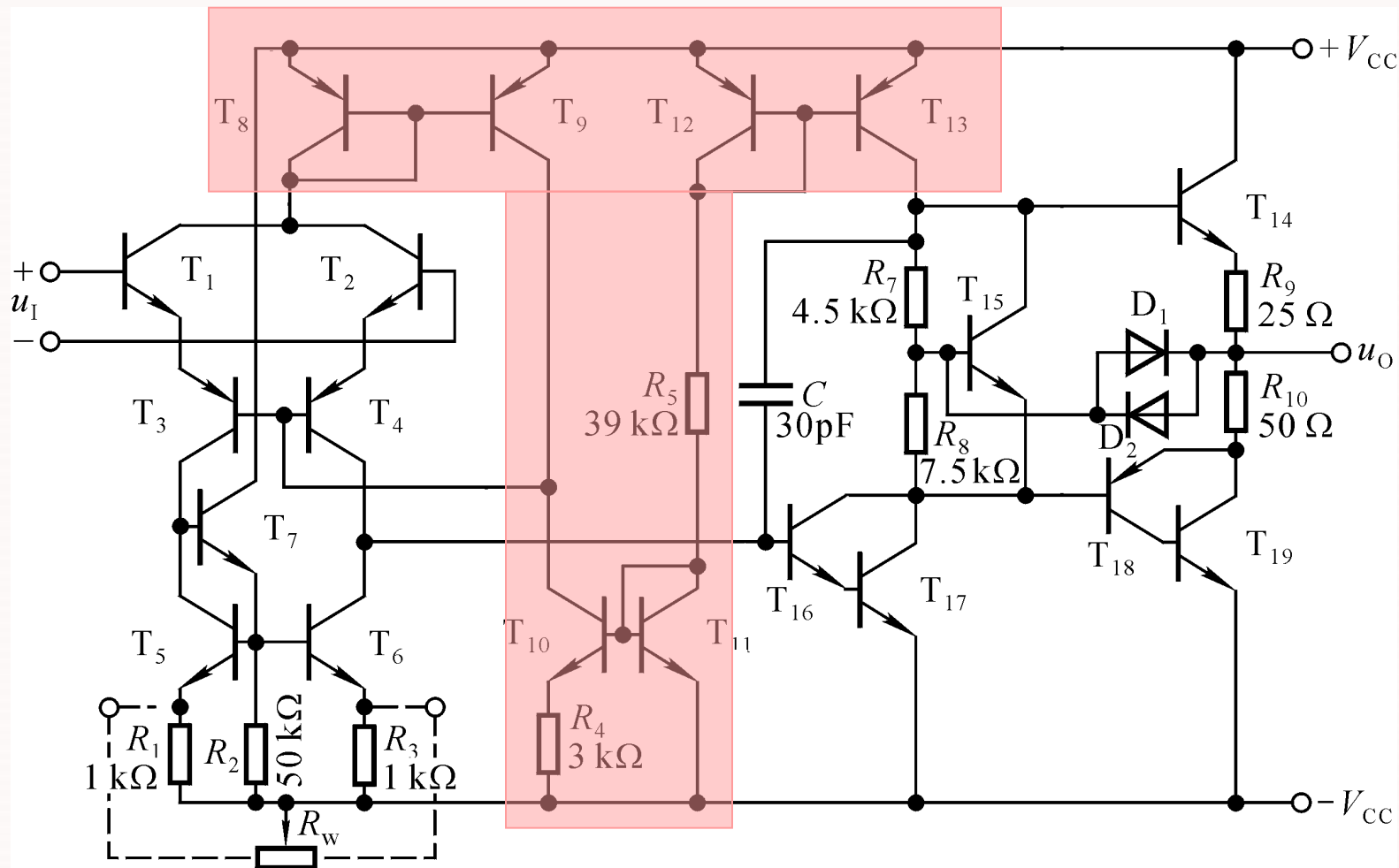
- 一、为放大电路提供稳定的偏置电流。
- 二、作放大电路有源负载。

特点:

T_2T_3 组成镜象电流源 ($R_{\text{直流}}$ 小, $R_{\text{交流}}$ 大) 作为 T_1 的集电极电阻。

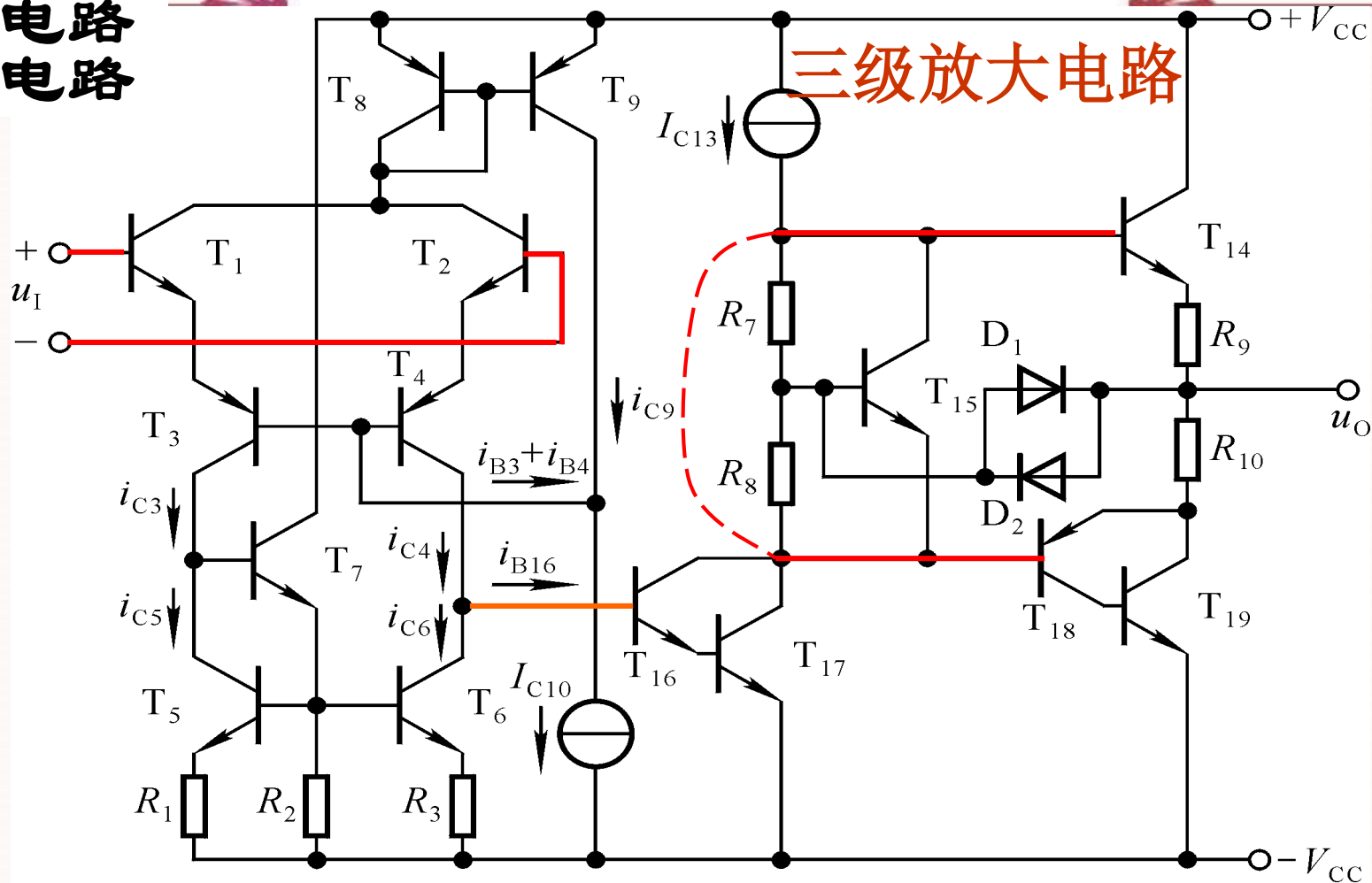


找出偏置电路



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

简化电路 分解电路

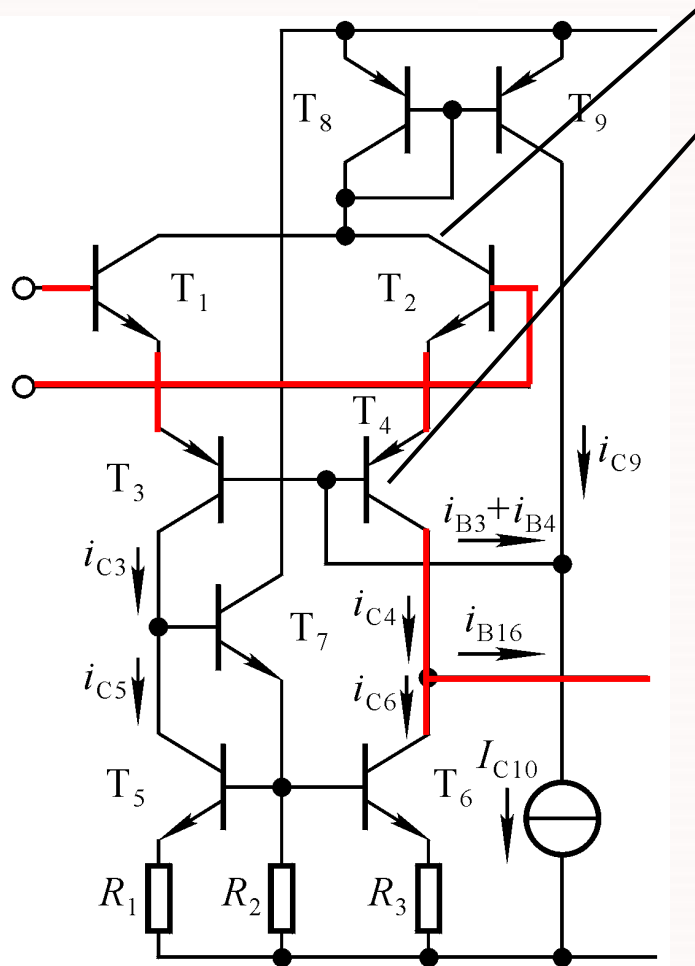


双端输入、单端
输出差分放大电
路

以复合管为放大管
、恒流源作负载的
共射放大电路

用 U_{BE} 倍增电路消
除交越失真的准
互补输出级

输入级的分析



共集-共基形式

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

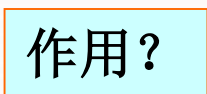
T₃、T₄为横向PNP型管，
输入端耐压高。共集形式，输入电阻大，允许的共模输入电压幅值大。共基形式频带宽。

Q点的稳定：

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

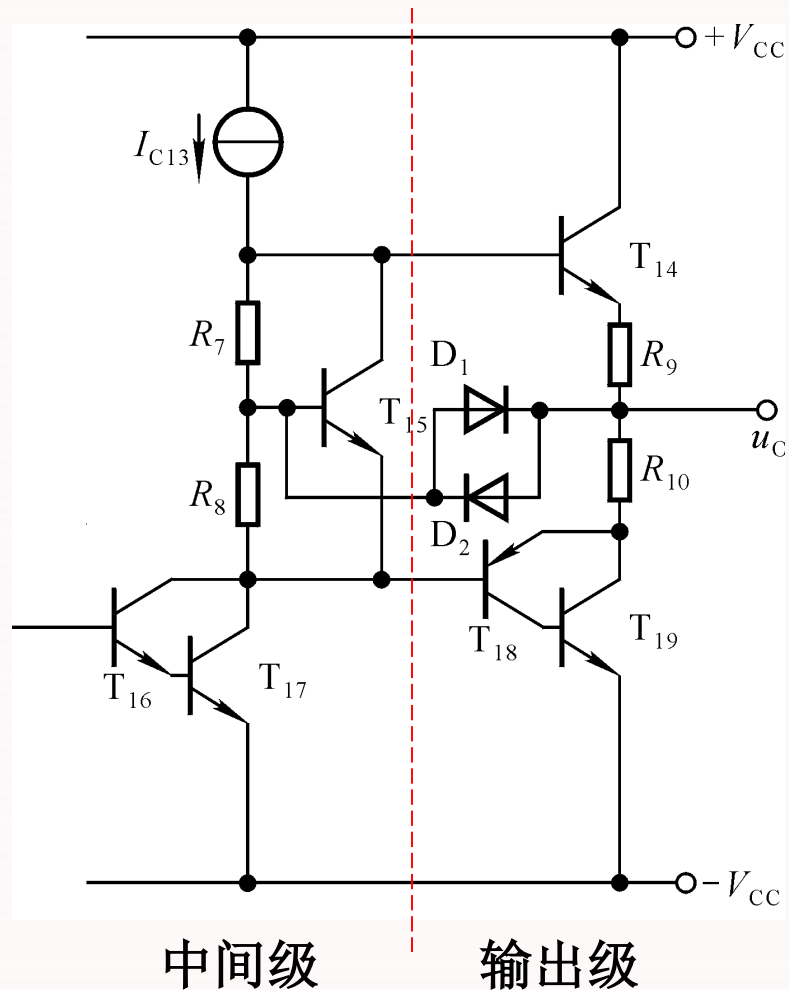
I_{C9} 与 I_{C8} 为镜像关系 $\rightarrow I_{C9} \uparrow$

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



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

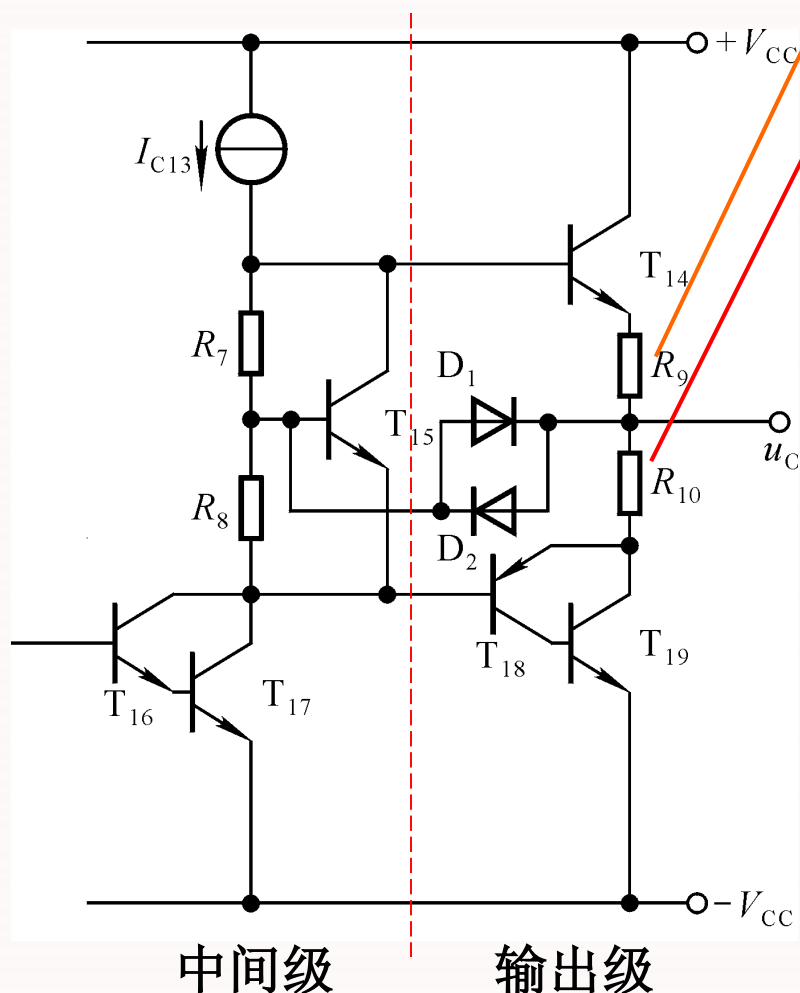


中间级是主放大器，它所采取的一切措施都是为了增大放大倍数。

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

输出级的分析

准互补输出级， U_{BE} 倍增电路消除交越失真。



电流采样电阻

D_1 和 D_2 起过流保护作用，未过流时，两只二极管均截止。

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

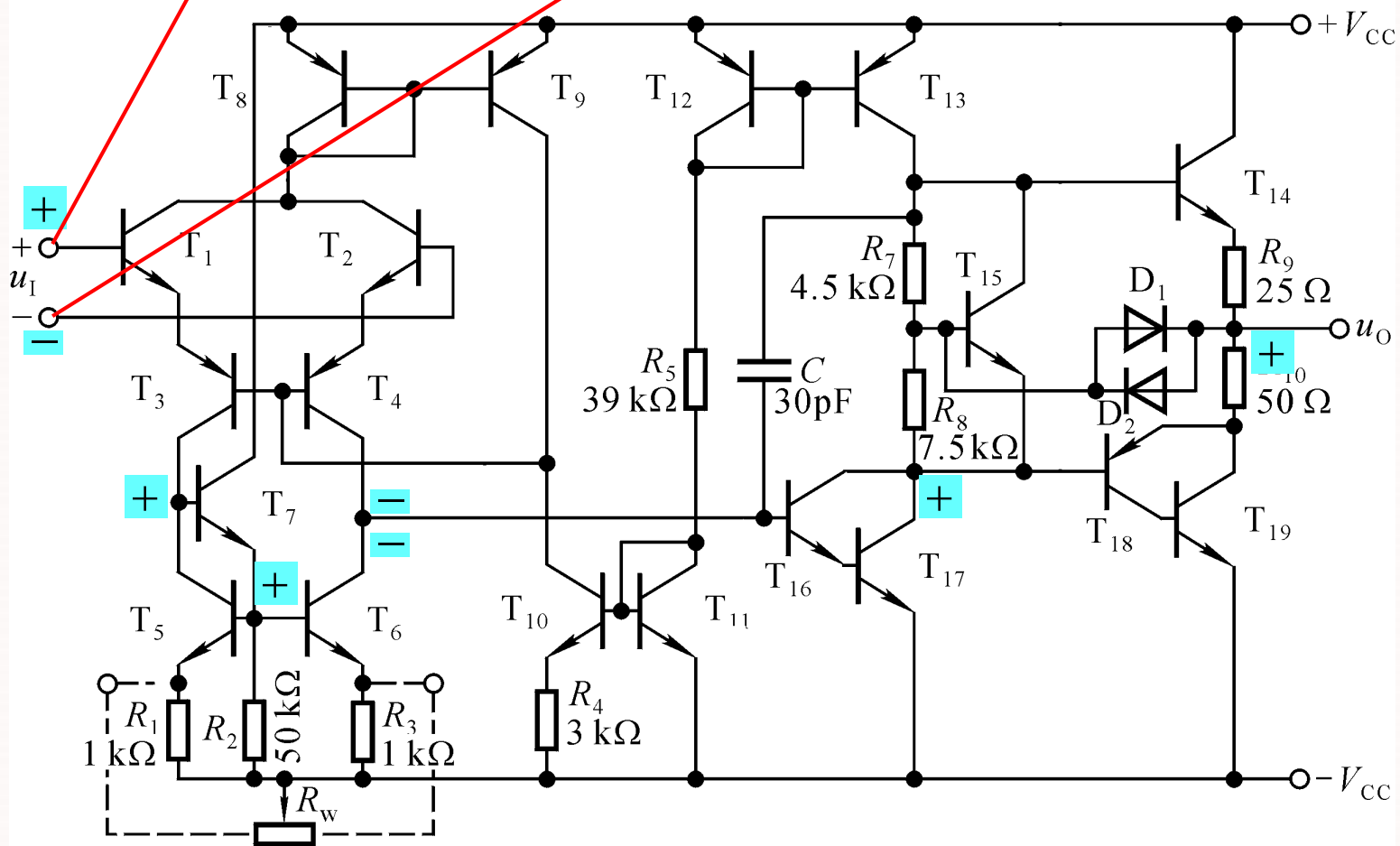
i_O 增大到一定程度， D_1 导通，为 T_{14} 分流，从而保护了 T_{14} 。

特点：

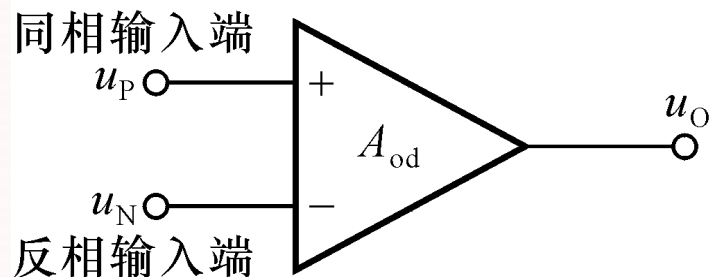
输出电阻小

最大不失真输出电压高

判断同相输入端和反相输入端



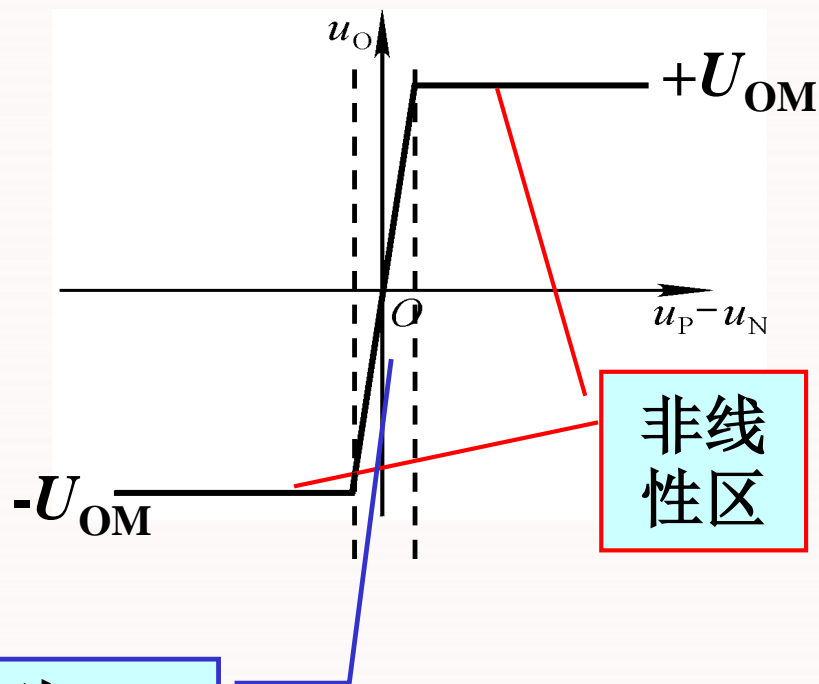
3.4.3 集成运放的符号和电压传输特性 $u_O=f(u_P-u_N)$



在线性区:

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

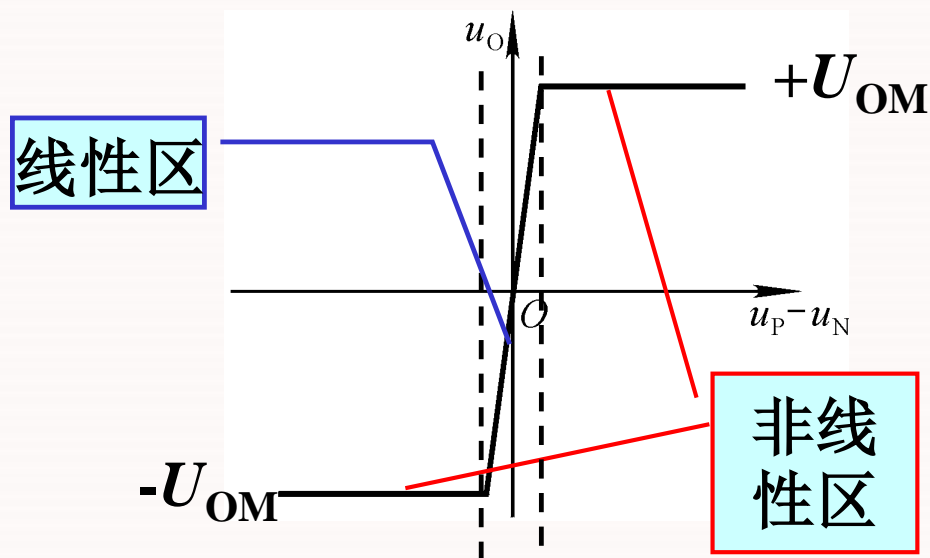
A_{od} 是开环差模放大倍数。



线性区，曲线斜率为 A_{od}

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。

分析应用电路的工作原理时，首先要分清运放工作在线性区还是非线性区。



$(u_P - u_N)$ 的数值大于一定值时，集成运放的输出不是 $+U_{OM}$ ，就是一 $-U_{OM}$ ，即集成运放工作在非线性区。

$+U_{OM}$ 为正向输出饱和电压 $-U_{OM}$ 为负向输出饱和电压
其数值接近运放的正负电源电压

集成运放的主要性能指标

指标参数

F007典型值

理想值

1.开环差模增益 A_{od}

106dB

∞

$$20\lg|A_{od}| = 20\lg\left|\frac{\Delta u_O}{\Delta(u_P - u_N)}\right|$$

2.差模输入电阻 r_{id}

2M Ω

∞

$$r_{id} = \frac{\Delta(u_P - u_N)}{\Delta i_P}$$

3.共模抑制比 K_{CMR}

90dB

∞

$$K_{CMR} = 20\lg\left|\frac{A_{od}}{A_c}\right|$$

集成运放的主要性能指标

指标参数	F007典型值	理想值
• 开环差模增益 A_{od}	106dB	∞
• 差模输入电阻 r_{id}	2M Ω	∞
• 共模抑制比 K_{CMR}	90dB	∞
• 输入失调电压 U_{IO}	1mV	0
• U_{IO} 的温漂 $d U_{IO}/dT(^{\circ}C)$	几 $\mu V/^{\circ}C$	0
• 输入失调电流 $I_{IO} (I_{B1} - I_{B2})$	20nA	0
• U_{IO} 的温漂 $d U_{IO}/dT(^{\circ}C)$	几nA/ $^{\circ}C$	0
• 最大共模输入电压 U_{Icmax}	$\pm 13V$	
• 最大差模输入电压 U_{Idmax}	$\pm 30V$	
• -3dB带宽 f_H	10Hz	∞
• 转换速率 $SR(=du_O/dt _{max})$	0.5V/ μS	∞