

第三章 多级放大电路

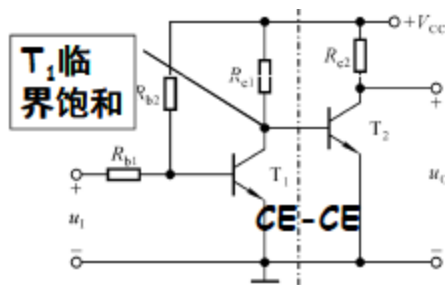
一、多级放大电路的耦合方式

直接耦合、阻容耦合、变压器耦合和光电耦合

1. 直接耦合

前一级的输出端与后一级的输入端直接连接

a. 直接耦合放大电路静态工作点的设置



优点:

- 低频特性好
- 便于集成

缺点:

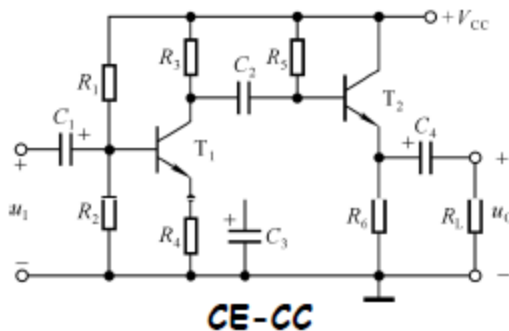
- Q 点互相影响, 不便于设计和调试
- 前级 Q 点变化会被后级放大

对于上述电路, 为使得第一级有合适的静态工作点, 就要抬高 T_2 管的基极电位。可采取如下方法:

在 T_2 管的发射级加电阻 (此时会使得第二级的放大倍数大大下降, 可换成二极管和稳压管, 对于直流量为一个电压源, 对于交流量而言是一个小电阻, 即动态电阻很小)

2. 阻容耦合

前一级的输出端通过电容接到后一级的输入端



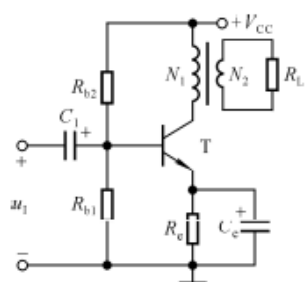
优点: 各级 Q 点相互独立

缺点: ①低频特性较差
②不便于集成

通常只有在频率很高、输出功率很大等特殊情况下才采用阻容耦合方式的分立元件放大电路

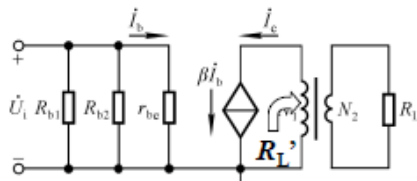
3. 变压器耦合

前一级的输出信号通过变压器接到后级的输入端或负载电阻上



缺点：①不适合集成
②低频特性差

优点：①Q点相互独立
②实现阻抗匹配



$$P_1 = P_2$$

$$I_1^2 R_L' = I_2^2 R_L$$

$$\therefore R_L' = \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 R_L$$

$$R_L' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_L$$

$$A_{u2} = - \frac{\beta R_L'}{r_{be}}$$

可提高 $|A_u|$

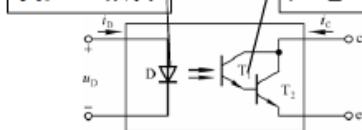
4. 光电耦合

以光信号为媒介实现电信号的耦合和传递

• 光电耦合器及其传输特性

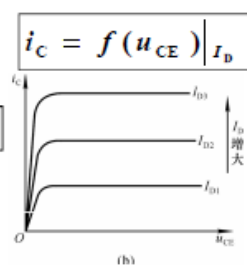
发光二极管

光电三极管

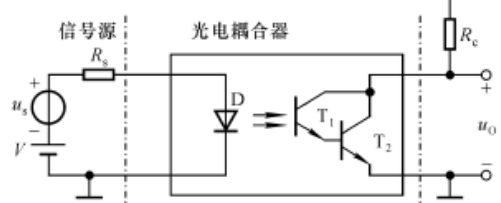


传输比: 0.1~1.5

$$CTR = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_D} \bigg|_{U_{CE}}$$

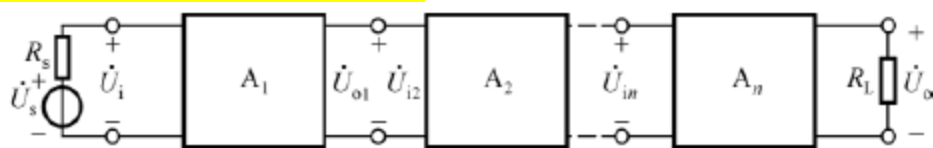


• 光电耦合放大电路



作用：
实现电气隔离，
抗干扰能力强

二、多级放大电路的动态分析



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_{i2}} \cdots \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{in}} = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdots \dot{A}_{un}$$

$$\dot{A}_u = \prod_{j=1}^n \dot{A}_{uj}$$

电压放大倍数=各级电压放大倍数的乘积

将后一级电路看
作前一级的负载

应当注意，当共集放大电路作为输入级时，它的输入电阻与其负载即与第二级的输入电阻有关，而当共集放大电路作为输出级时，它的输出电阻与其信号源内阻，也就是倒数第二级的输出电阻有关。

三、直接耦合放大电路

1. 直接耦合放大电路的零点漂移现象

- 零点漂移现象及其产生的原因：温漂
- 抑制温度漂移的办法：

在电路中引入直流负反馈

采用温度补偿的方法，利用热敏元件来抵消放大管的变化

差分放大电路

2. 差分放大电路

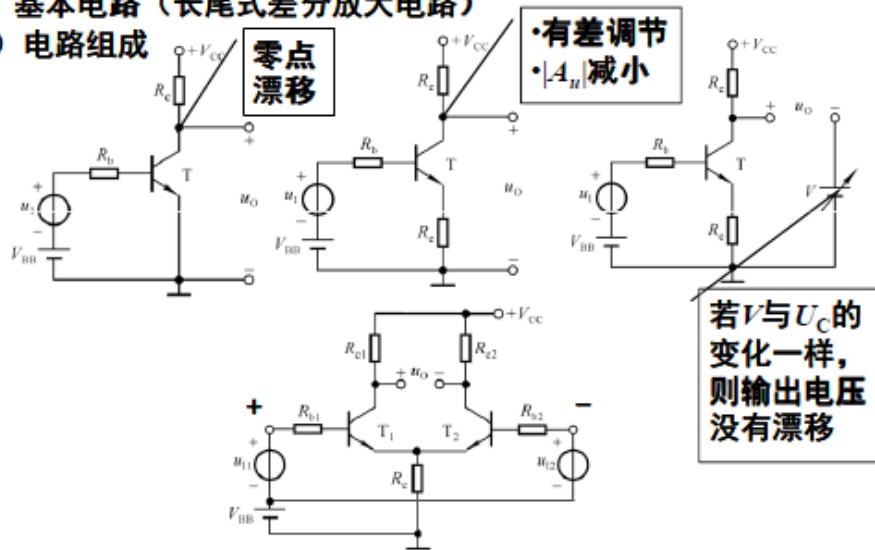
a. 电路组成

共模信号：大小相等极性相同

差模信号：大小相等极性相反

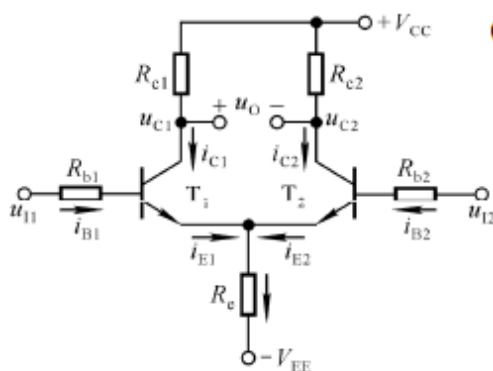
1. 基本电路（长尾式差分放大电路）

(1) 电路组成



b. 长尾式差分放大电路

差分放大电路：作为直接耦合放大电路的第一级，利用参数相同的一对晶体管来进行补偿，从而有效地抑制温漂。



(2) 电路特点

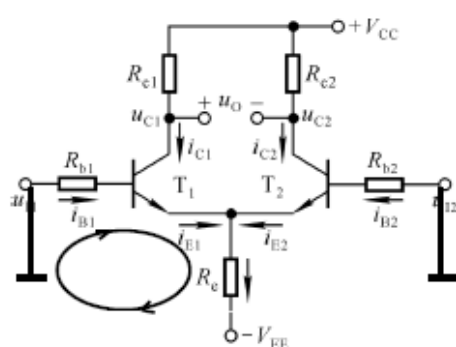
- 对称性
 - 电路结构对称
 - 电路参数对称：
 - T_1 和 T_2 特性完全相同
 - $R_{b1}=R_{b2}=R_b$
 - $R_{c1}=R_{c2}=R_c$
- 两个输入端、两个输出端
- 双电源

集成电路容易做到

(3) 抑制温漂原理

静态 $U_{C1}=U_{C2}$, $U_O=0$
从而抑制了温漂

静态分析：



$$U_{BEQ1} = U_{BEQ2} = U_{BEQ}$$

$$I_{B1} = I_{B2} = I_{BQ}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{CQ}$$

$$I_{E1} = I_{E2} = I_{EQ}$$

输入回路:

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

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

输出回路:

$$U_{C1} = U_{C2} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$$

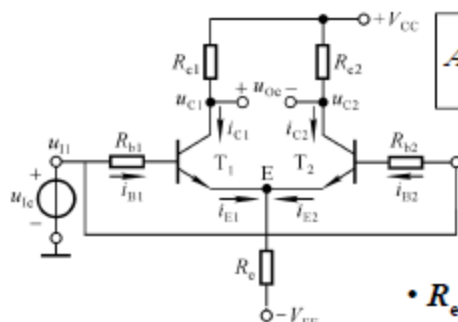
$$U_{CEQ} = (V_{CC} - I_{CQ}R_c) - (-I_{BQ}R_b - U_{BEQ})$$

$$U_O = U_{C1} - U_{C2} = 0$$

b. 对共模信号的抑制作用

不但利用了电路参数对称性所起的补偿作用,而且还利用了发射极电阻 R_e 对共模信号的负反馈作用。

共模电压放大倍数: 输入共模信号时的电压放大倍数 (理想情况下为零)



$$A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}$$

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

$$\Delta u_{Oc} = 0$$

$$A_c = 0 \quad \text{抑制 } u_O \text{ 变化}$$

依靠电路对称性和 R_e 的负反馈作用抑制温漂

• R_e 的共模负反馈作用 抑制 u_c 、 i_c 变化

$$u_{Ic} \uparrow \rightarrow i_{B1} (i_{B2}) \uparrow \rightarrow i_{C1} (i_{C2}) \uparrow \rightarrow u_{C1} (u_{C2}) \downarrow$$

$$\rightarrow i_{E1} (i_{E2}) \uparrow \rightarrow u_E \uparrow \rightarrow u_{BE1} (u_{BE2}) \downarrow \rightarrow i_{C1} (i_{C2}) \downarrow \rightarrow u_{C1} (u_{C2}) \uparrow$$

• 共模抑制比 K_{CMR} (Common Mode Rejection Ratio)

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

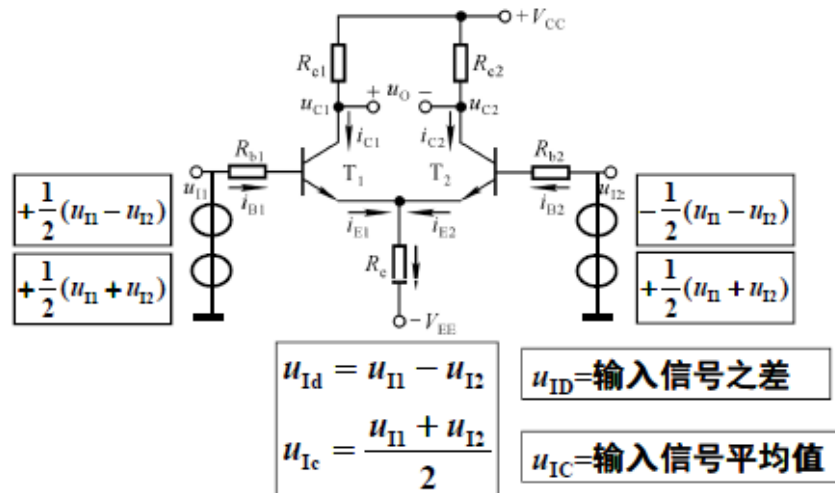
K_{CMR} : 衡量放大电路放大差模信号、抑制共模信号 (抑制温漂) 的能力。

c. 对差模信号的放大作用

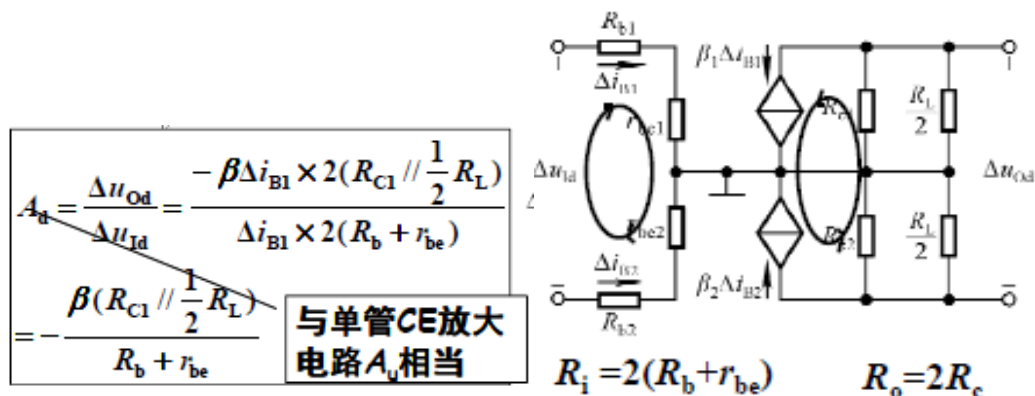
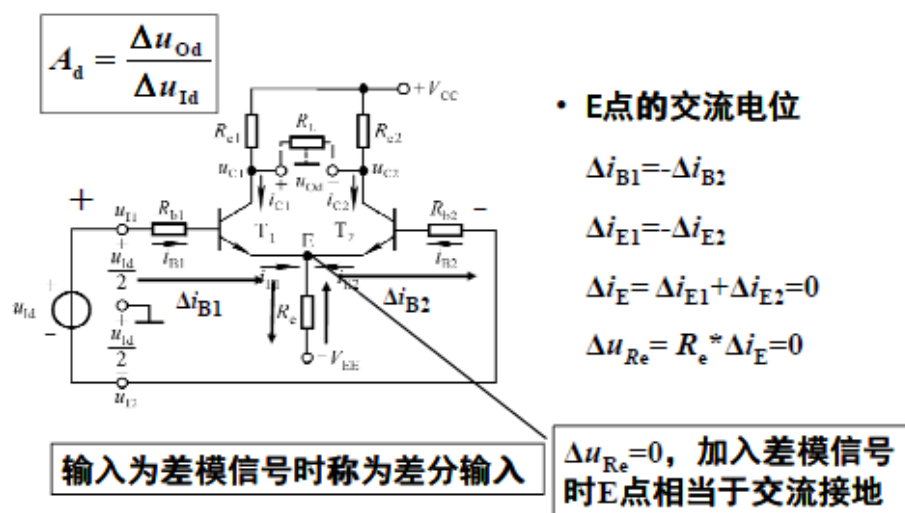
差模信号: 两个输入信号之差, 用 u_{Id} 表示。可分解为一对大小相等, 极性相反的输入信号, 用 $\pm u_{Id}/2$ 表示;

共模信号: 一对大小相等, 极性相同的输入信号, 用 u_{Ic} 表示。

输入信号的分解:



差模电压放大倍数:



共模抑制比:

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

K_{CMR} : 衡量放大电路放大差模信号、抑制共模信号（抑制温漂）的能力。

电压传输特性

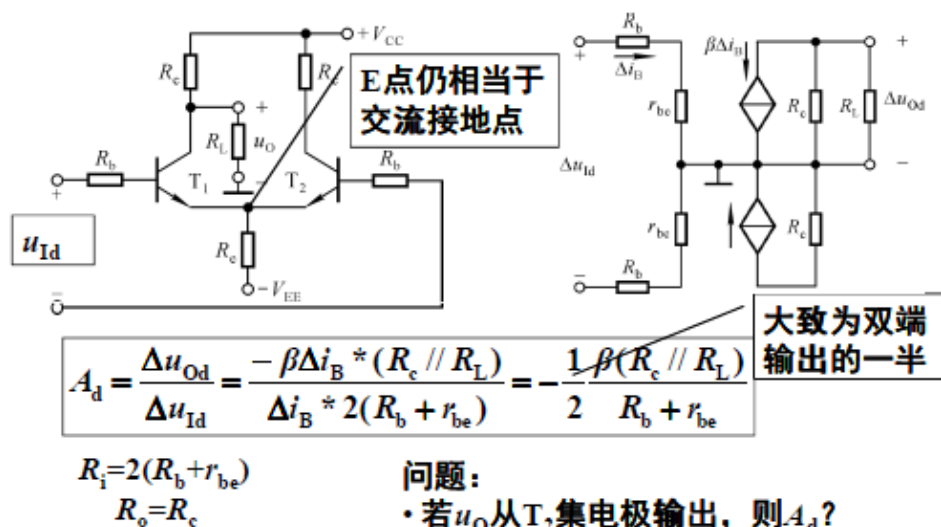
3. 差分放大电路的四种接法:

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

戴维南定理: 含独立电源的线性电阻单口网络 N , 就端口特性而言, 可以等效为一个电压源和电阻串联的单口网络。电压源的电压等于单口网络在负载开路时的电压 u_{oc} ; 电阻 R_0 是单口网络内全部独立电源为零值时所得单口网络 N_0 的等效电阻。

a. 双端输入、单端输出

静态工作点: 通过戴维南等效, 此时 R_e 上端电压仍相当于为零
动态参数:



问题:

- 若 u_O 从 T_2 集电极输出, 则 A_d ?
- 既然失去对称性, 静态 $U_O \neq 0$, 为何还用差分电路?

个人理解: 差分电路使得 R_e 上端电压为零可增大放大倍数

注意 T_1 、 T_2 管分别作为输出端时, 前者反相, 后者同相

$$A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}} = \frac{-\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta)2R_e}$$
$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \approx \frac{\beta R_e}{R_b + r_{be}}$$

增大 R_e 是改善共模抑制比的基本措施

“长尾”式差分电路: R_e 对共模信号具有负反馈的作用, 能抑制共模信号, 同时又不影响差模信号的放大

思考: R_e 是否越大越好? 否 考虑电路安全应当采用较低的电源电压

b. 单端输入双端输出

静态: 同双端输入双端输出

动态: 将输入信号分解为一对差模信号和一对共模信号

因为电路对于差模信号是通过发射极相连的方式将 T_1 管的发射极电流传递到 T_2 管的发射极的, 故称这种电路为射极耦合电路

缺点: 人为输入了共模信号

电路分析:

$A_d = -\frac{\beta(R_c // \frac{1}{2}R_L)}{R_b + r_{be}}$ $A_c = 0$	$\Delta u_o = \Delta u_{id} A_d + \Delta u_{ic} A_c = u_i A_d$ $\Delta u_o = -\frac{\beta R_L'}{R_b + r_{be}} u_i$
--	--

c. 单端输入单端输出

对于单端输出电路，常将不输入信号一边的 R_c 省掉

归纳总结

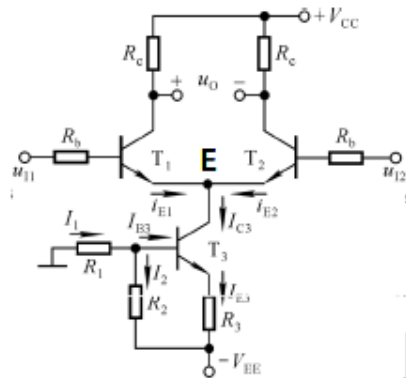
等效为双端输入，但有共模输入信号	双端输出		单端输出	
	双端输入	单端输入	双端输入	单端输入
差模放大倍数 A_d	$-\beta \frac{R_c // \frac{1}{2} R_L}{R_b + r_{be}}$		$-\frac{1}{2} \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$	
输入电阻 R_i	$2(R_b + r_{be})$		$2(R_b + r_{be})$	
输出电阻 R_o	$2R_c$		R_c	
共模放大倍数 A_c	0 (主要靠电路的对称性)		$\approx -\frac{R_c // R_L}{2 R_e}$	
共模抑制比 K_{CMR}	∞		$\approx \frac{\beta R_e}{R_b + r_{be}}$	

靠 R_e 的负反馈

4. 改进型差分放大电路

a. 恒流源式差分放大电路

电流源所具备的要求的特点：采用较低的电源电压、又能有很大的等效电阻



长尾式差分放大电路缺点：

- 单端输出时 $A_c \neq 0$ ； $A_c \approx -\frac{R_c \parallel R_L}{2R_e}$
- 增大 R_e 影响静态，影响集成。

恒流源优点：

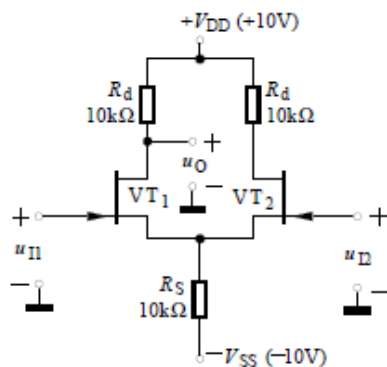
- 能设置好静态；
- 动态阻抗 $\approx \infty$ ，对双端输出和单端输出方式均有 $A_c \approx 0$ ， $K_{CMR} \approx \infty$ 。抑制共模能力强

$$I_E \approx I_{E3}$$

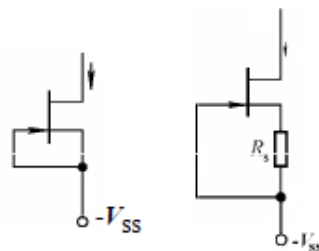
$$\approx \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{EE} - U_{BEQ} \right) / R_3$$

思考：如何设置静态？
如何分析静态、动态？

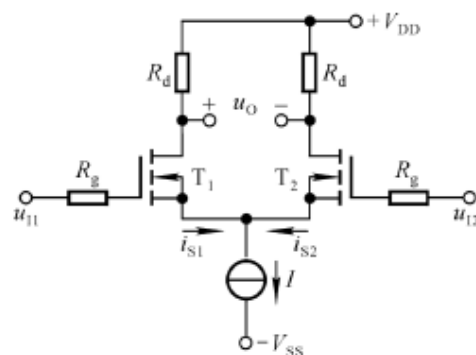
b. JFET 组成的差分放大电路



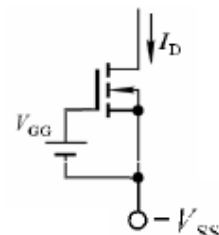
JFET恒流源



c. MOSFET 组成的恒流源式差分放大电路



MOSFET恒流源



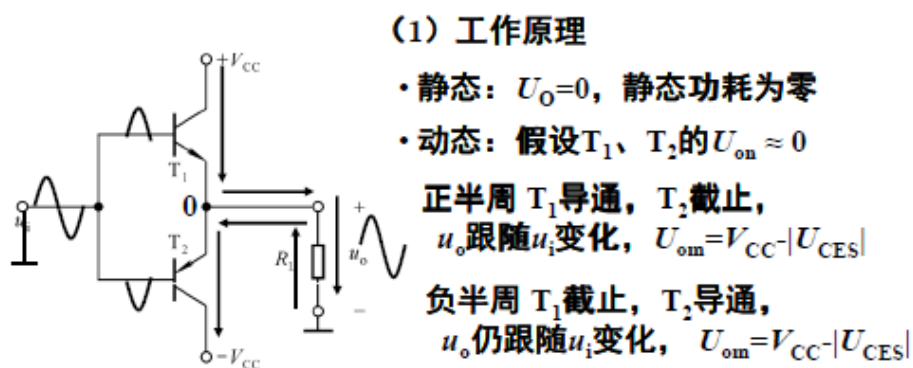
四、直接耦合互补输出级

1. 对直接耦合输出级的要求：

- 带负载能力强
- 负载上无静态功耗
- 输出功率大：最大不失真输出幅度尽可能大，且正、负向最大不失真输出幅度尽可能对称

常采用带负载能力强的射极跟随器来实现：但它带上负载后静态工作点会产生变化

2. 基本电路:



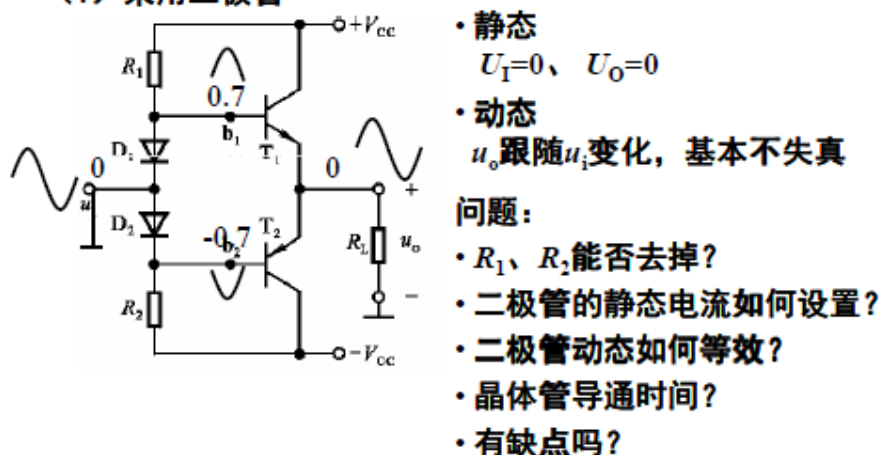
T_1 、 T_2 以互补的方式交替工作, 分别在信号的半周内处于导通状态, 称为互补电路

交越失真: 静态时 $U_{BE1}=U_{BE2}=0$, 当输入信号较小时不足以使 T_1 、 T_2 导通, 使得 u_o 不能跟随 u_i 变化。

3. 消除交越失真的互补输出级:

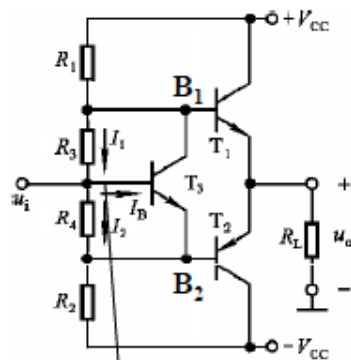
思路: 给 T_1 、 T_2 的基极设置一定的静态电压, 使 T_1 、 T_2 处于微导通状态。

(1) 采用二极管



R_1 、 R_2 保护电阻 二极管的动态电阻很小, 可以认为 T_1 和 T_2 管的基极动态电位近似相等

(2) 采用 U_{BE} 倍增电路



$$I_1 \approx I_2 = \frac{U_{BE3}}{R_4}$$

$$U_{B1B2} \approx (R_3 + R_4)I_1 \approx (1 + \frac{R_3}{R_4})U_{BE}$$

利用晶体管电路消除交越失真，通过合理选择 R_3 、 R_4 ，即可得到 U_{BE} 任意倍数的直流电压。

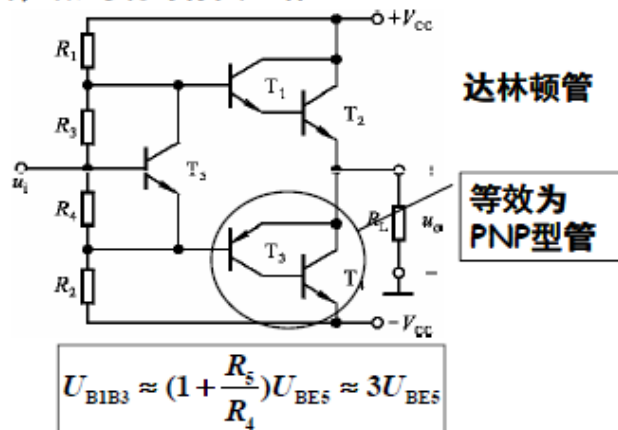
问题：

U_{BE} 倍增电路动态时如何等效？

U_{BE} 倍增电路近似等效为恒压源

准互补输出级：

为了增大输出电流，常采用复合管。在集成电路中不易做到NPN与PNP管完全对称，因而常用PNP与NPN的复合管代替PNP管，做到既对称又互补。



$$U_{B1B3} \approx (1 + \frac{R_3}{R_4})U_{BE5} \approx 3U_{BE5}$$