



差分放大电路

主讲教师：徐瑞东



差分放大电路

主要内容:

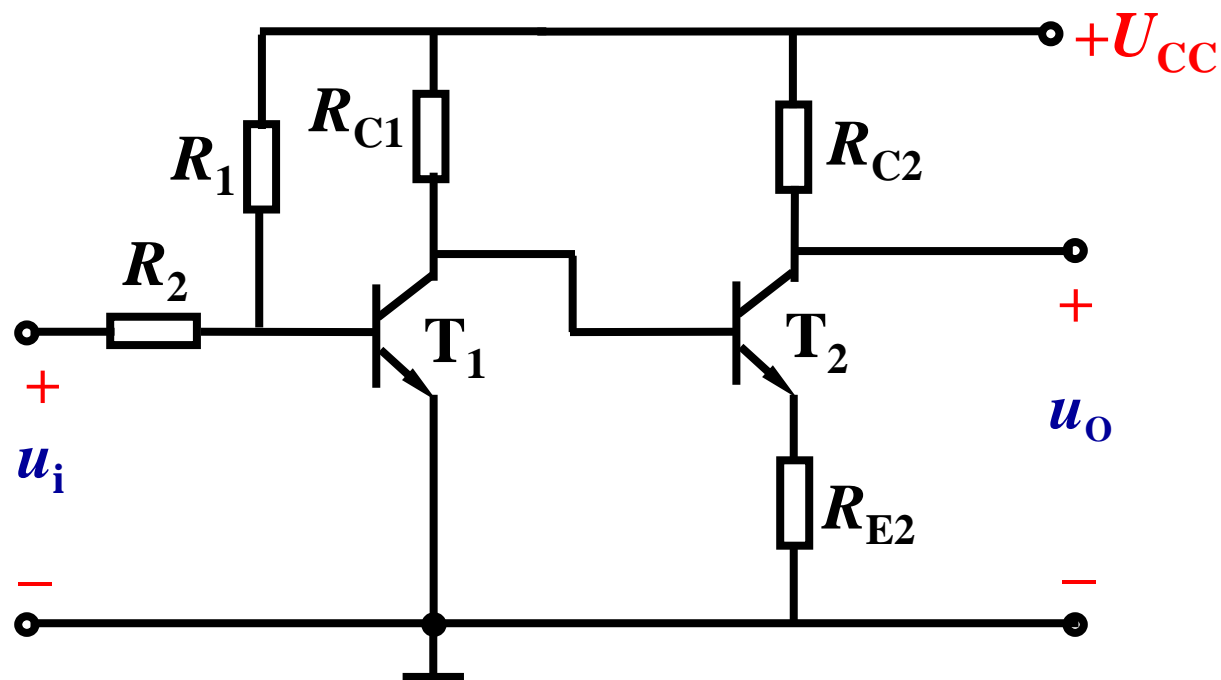
零点漂移及其抑制方法；差分放大电路的结构及其静态和动态分析；共模信号、差模信号以及共模抑制比。

重点难点:

零点漂移的抑制方法；共模信号、差模信号以及共模抑制比的概念。

差分放大电路

直接耦合：将前级的输出端直接接后级的输入端。可用来放大缓慢变化的信号或直流量变化的信号。

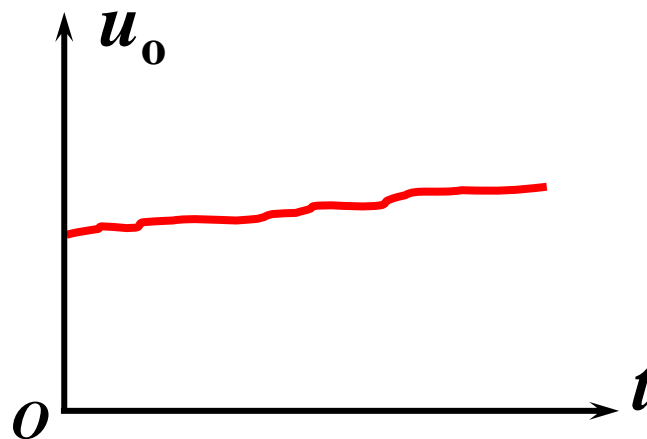


直接耦合存在的两个问题：

(1) 前后级静态工作点相互影响

(2) 零点漂移

零点漂移：指输入信号电压为零时，输出电压发生缓慢地、无规则地变化的现象。



产生的原因：晶体管参数随温度变化、电源电压波动、电路元件参数的变化。

零点漂移的危害:

直接影响对输入信号测量的准确程度和分辨能力。

严重时，可能淹没有效信号电压，无法分辨是有效信号电压还是漂移电压。

一般用输出漂移电压折合到输入端的等效漂移电压作为衡量零点漂移的指标。

$$u_{id} = \frac{u_{od}}{A_u}$$

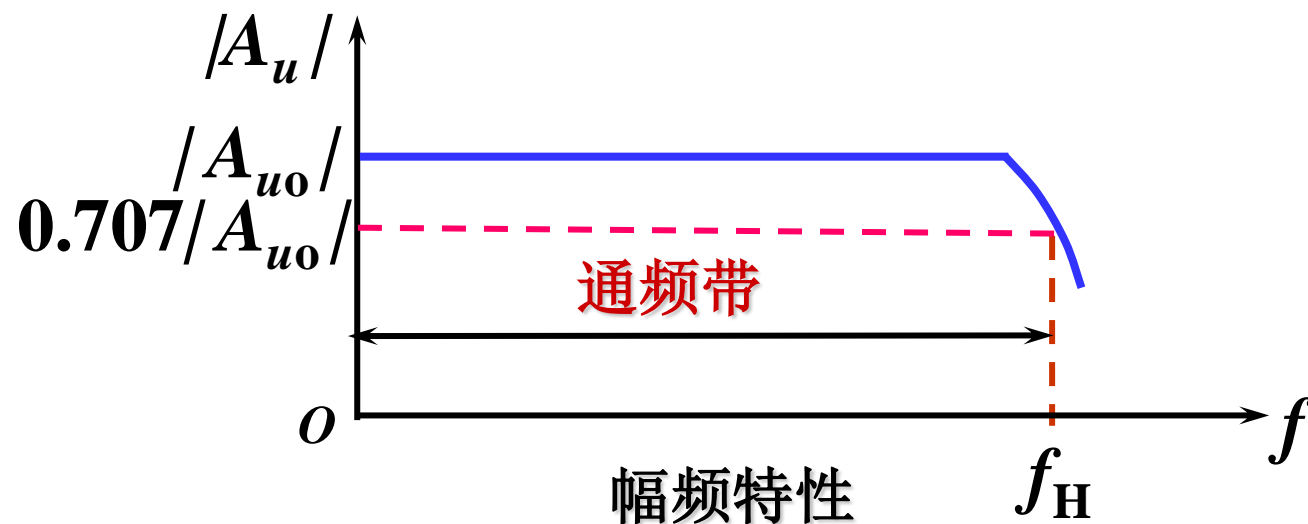
输入端等效漂移电压

输出端漂移电压

电压放大倍数

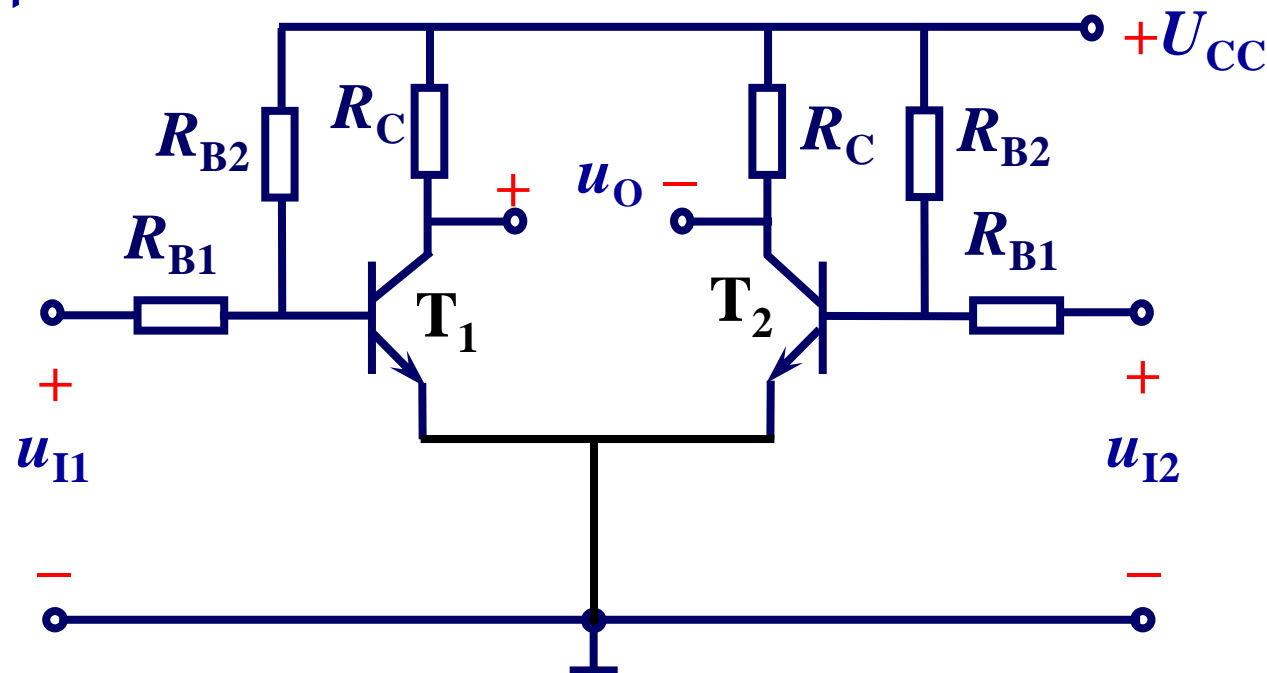
只有输入端的等效漂移电压比输入信号小许多时，放大后的有用信号才能被很好地区分出来。

抑制零点漂移是制作高质量直接耦合放大电路的一个重要的问题。
由于不采用电容，所以直接耦合放大电路具有良好的低频特性。



适合于集成化的要求，在集成运放的内部，级间都是直接耦合。
差分放大电路是抑制零点漂移最有效的电路结构。

1. 静态分析

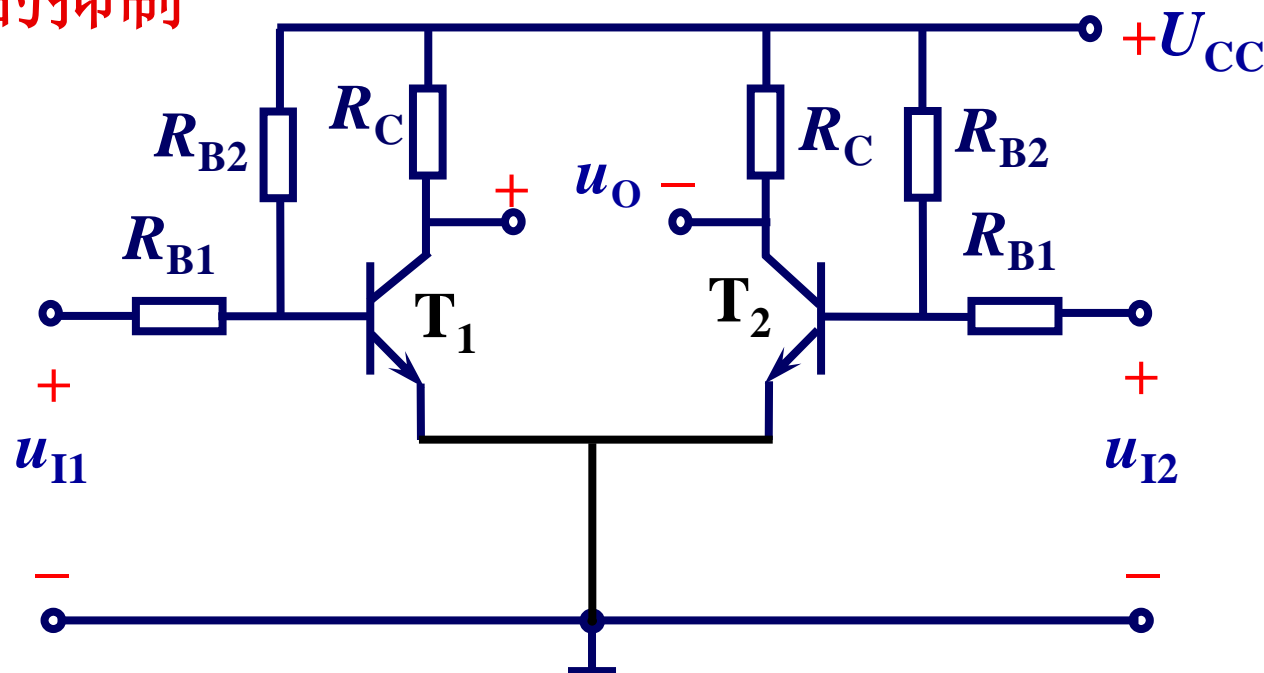


差分放大原理电路

两个输入、两个输出； 两管静态工作点相同。

电路结构对称，在理想的情况下，两管的特性及对应电阻元件的参数值都相等。

(1) 零点漂移的抑制



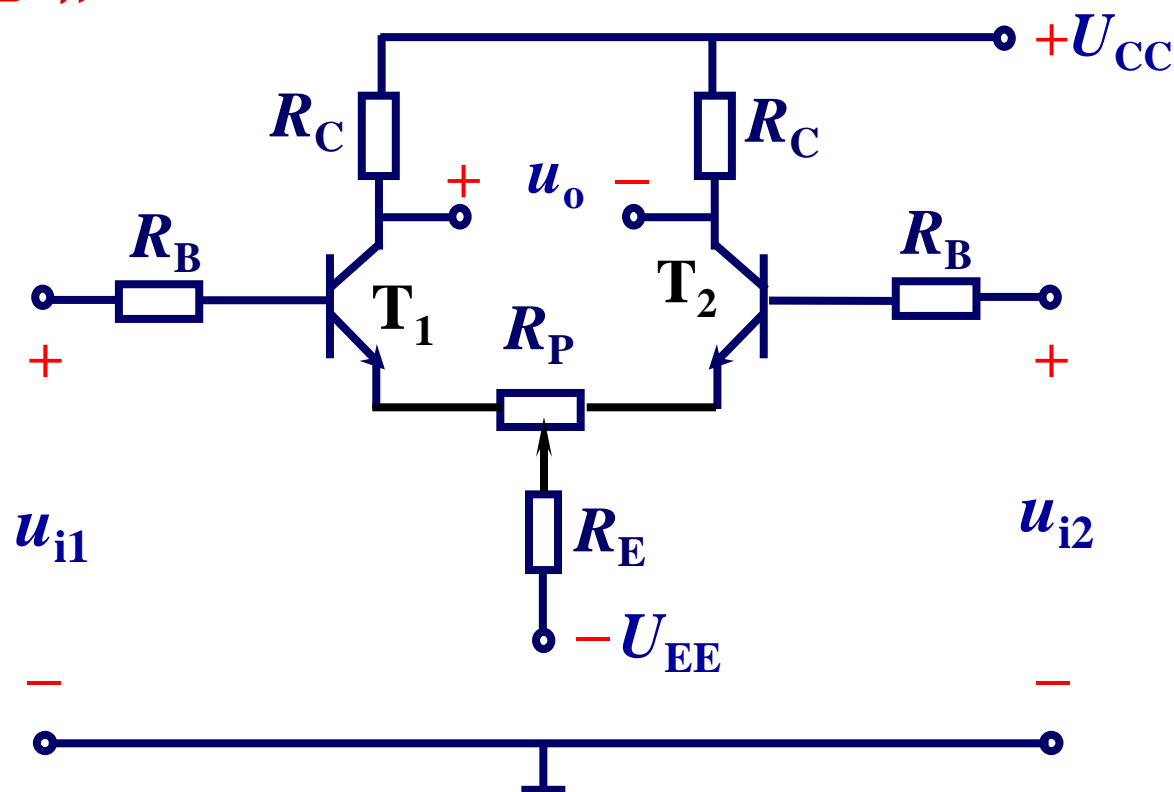
静态时, $u_{i1} = u_{i2} = 0$ $u_o = V_{C1} - V_{C2} = 0$

当温度升高时 $\rightarrow I_C \uparrow \rightarrow V_C \downarrow$ (两管变化量相等)

$$u_o = (V_{C1} + \Delta V_{C1}) - (V_{C2} + \Delta V_{C2}) = 0$$

对称差分放大电路对两管所产生的同向漂移都有抑制作用。若采用单端输出, 无法抑制零点漂移。

典型差分放大电路



R_E 的作用： 稳定静态工作点，限制每个管子的漂移。

U_{EE} ： 用于补偿 R_E 上的压降，以获得合适的工作点。

电位器 R_P ： 起调零作用。

(2) 分析计算

在静态时，设 $I_{B1} = I_{B2} = I_B$ ， $I_{C1} = I_{C2} = I_C$ ，忽略阻值很小的 R_P 可列出

$$R_{B1}I_B + U_{BE} + 2R_E I_E = U_{EE}$$

上式中前两项较第三项小得多略去，
则每管的集电极电流

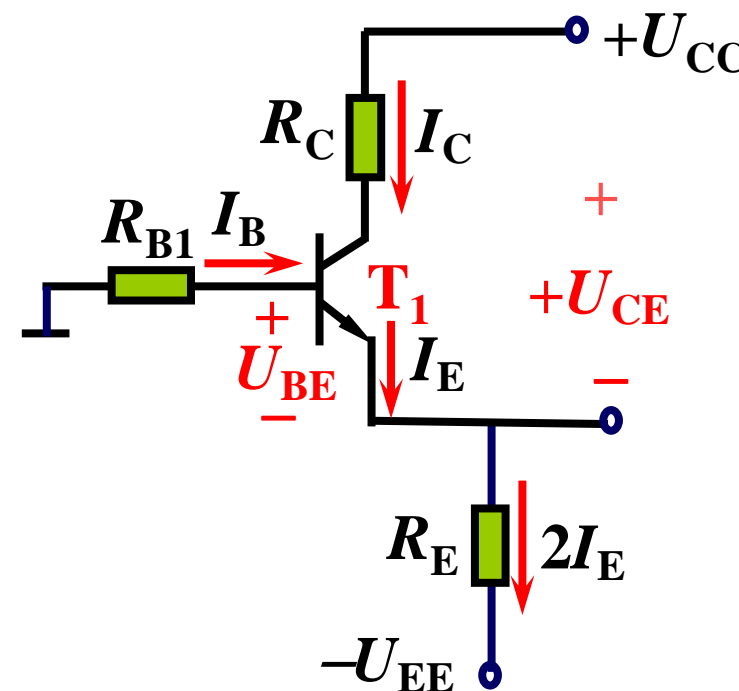
$$I_C \approx I_E \approx \frac{U_{EE}}{2R_E}$$

发射极电位 $V_E \approx 0$

每管的基极电流 $I_B = \frac{I_C}{\beta} \approx \frac{U_{EE}}{2\beta R_E}$

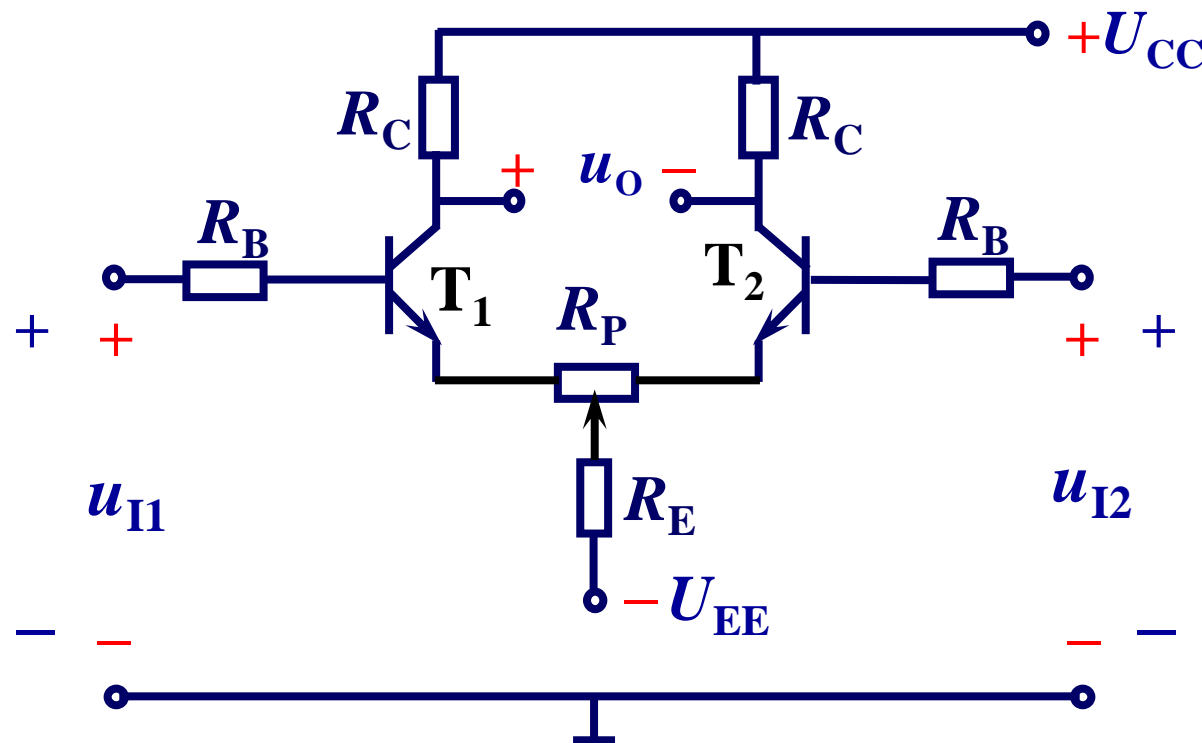
每管的集 — 射极电压

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C \approx U_{CC} - \frac{U_{EE} R_C}{2R_E}$$



单管直流通路

2. 动态分析



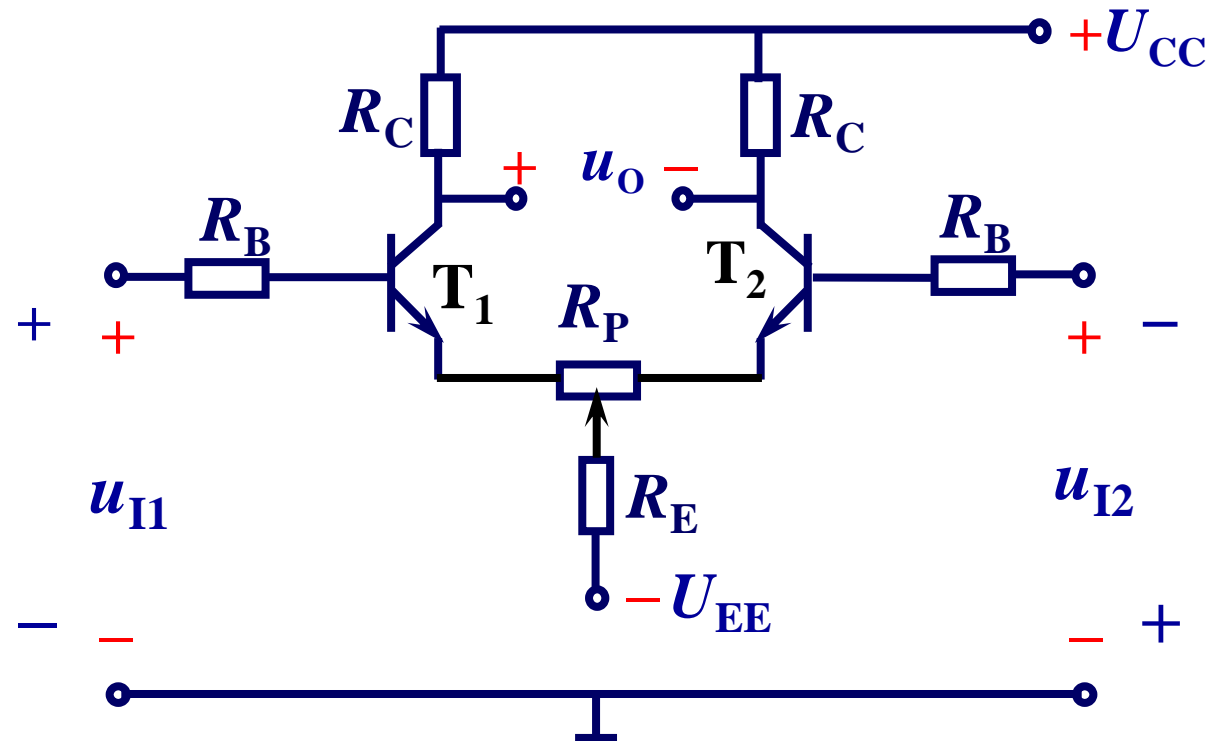
共模信号
需要抑制

(1) 共模信号 $u_{I1} = u_{I2}$ 大小相等、极性相同。

两管集电极电位呈等量同向变化，所以输出电压为零，即对共模信号没有放大能力。

差分电路抑制共模信号能力的大小，反映了它对零点漂移的抑制水平。

(2) 差模信号



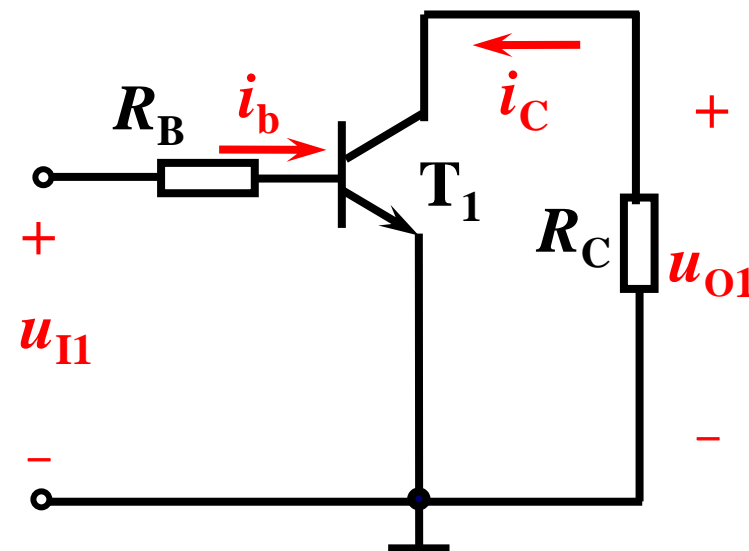
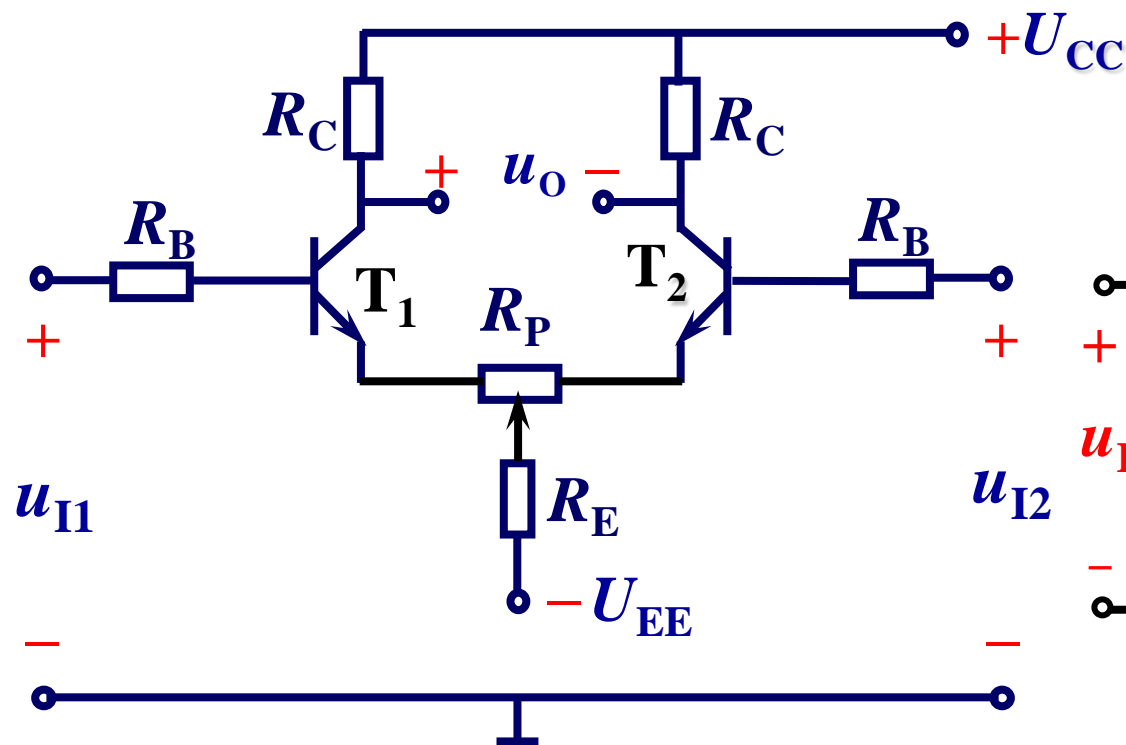
差模信号
是有用信号

$u_{I1} = -u_{I2}$ 大小相等、极性相反

两管集电极电位一减一增，呈等量异向变化，

$$u_O = (V_{C1} - \Delta V_{C1}) - (V_{C2} + \Delta V_{C1}) = -2 \Delta V_{C1}$$

即对差模信号有放大能力。



单管差模信号通路

由于差模信号使两管的集电极电流一增一减，其变化量相等，图示电路中，通过 R_E 的电流近于不变， R_E 上没有差模信号压降，故 R_E 对差模信号不起作用，可得单管差模信号通路。

单管差模电压放大倍数

$$A_{d1} = \frac{u_{o1}}{u_{I1}} = \frac{-\beta i_b R_C}{i_b (R_B + r_{be})} = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}}$$

同理可得

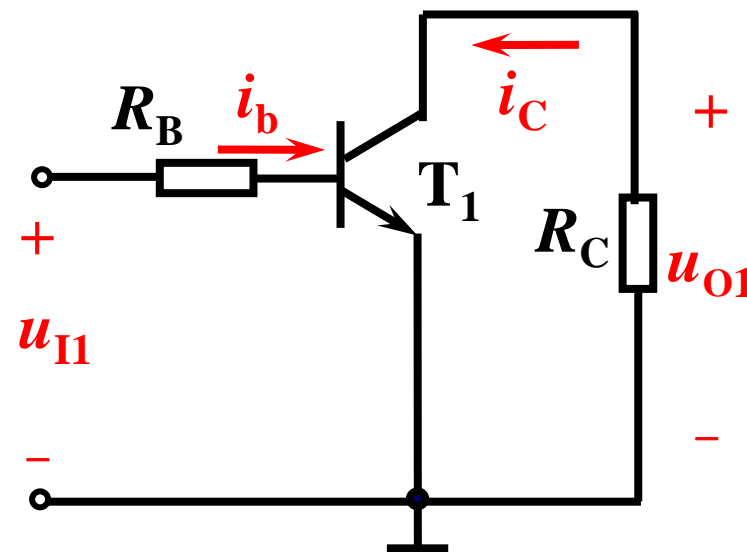
$$A_{d2} = \frac{u_{o2}}{u_{I2}} = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}} = A_{d1}$$

双端输出电压

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = A_{d1} u_{I1} - A_{d2} u_{I2} = A_{d1} (u_{I1} - u_{I2})$$

双端输入—双端输出差分电路的差模电压放大倍数为

$$A_d = \frac{u_o}{u_{I1} - u_{I2}} = A_{d1} = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}}$$



单管差模信号通路

差分放大电路是为了能抑制零点漂移

差模电压放大倍数与单管放大电路的电压放大倍数相等



当在两管的集电极之间接入负载电阻时

$$A_d = - \frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}}$$

式中 $R'_L = R_C // \frac{1}{2} R_L$

两输入端之间的差模输入电阻为

$$r_i = 2(R_B + r_{be})$$

两集电极之间的差模输出电阻为

$$r_o \approx 2R_C$$



例1:在前图所示的差分放大电路中,已知 $U_{CC}=12V$, $E_E = 12V$, $\beta = 50$, $R_C = 10\text{ k}\Omega$, $R_E = 10\text{ k}\Omega$, $R_B = 20\text{ k}\Omega$, $R_P = 100\text{ }\Omega$, 并在输出端接负载电阻 $R_L = 20\text{ k}\Omega$, 试求电路的静态值和差模电压放大倍数。

$$\text{解: } I_C \approx \frac{E_E}{2R_E} = \frac{12}{2 \times 10 \times 10^3} \text{ A} = 0.6 \text{ mA}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0.6}{50} \text{ mA} = 0.012 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C = (12 - 10 \times 10^3 \times 0.6 \times 10^{-3}) \text{ V} = 6 \text{ V}$$

$$A_d = -\frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}} = -\frac{50 \times 5}{20 + 2.41} = -11$$

$$\text{式中 } R'_L = R_C // \frac{1}{2} R_L = 5 \text{ k}\Omega$$

$$r_{be} \approx 200(\Omega) + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = (200 + \frac{26}{0.6}) \Omega = 2.41 \text{ k}\Omega$$

单端输出时差分电路的差模电压放大倍数为

$$A_d = \frac{u_{o1}}{u_{I1} - u_{I2}} = \frac{u_{o1}}{2u_{I1}} = -\frac{1}{2} \frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}} \quad \text{反相输出}$$

$$A_d = \frac{u_{o2}}{u_{I1} - u_{I2}} = \frac{u_{o2}}{2u_{I1}} = \frac{1}{2} \frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}} \quad \text{同相输出}$$

即：单端输出差分电路的电压放大倍数只有双端输出差分电路的一半。

双端输入分双端输出和单端输出两种。此外，还有单端输入的，即将 T_1 输入端或 T_2 输入端接“地”，而另一端接输入信号 u_i 。同样单端输入也分为双端输出和单端输出两种。

(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。

放大器只放大两个输入信号的差值信号——差分放大电路。

3. 共模抑制比 (Common Mode Rejection Ratio)

全面衡量差分放大电路放大差模信号和抑制共模信号的能力。

共模抑制比

差模放大倍数

$$K_{\text{CMRR}} = \frac{A_d}{A_c} \quad K_{\text{CMR}} (\text{dB}) = 20 \lg \frac{A_d}{A_c} (\text{分贝})$$

共模放大倍数

K_{CMR} 越大，说明差放分辨差模信号的能力越强，而抑制共模信号的能力越强。



对于双端输出差分放大电路，若电路完全对称,理想情况下共模放大倍数

$$A_c = 0, \quad K_{CMRR} \rightarrow \infty$$

输出电压 $u_o = A_d (u_{i1} - u_{i2}) = A_d u_{id}$

若电路不完全对称，则 $A_c \neq 0$ ，实际输出电压 $u_o = A_c u_{ic} + A_d u_{id}$
即共模信号对输出有影响。





小 结

1. 直接耦合存在的问题

(1) 前后级静态工作点相互影响

(2) 零点漂移

2. 差分放大电路的分析

(1) 静态分析

(2) 动态分析

3. 共模抑制比

