

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！



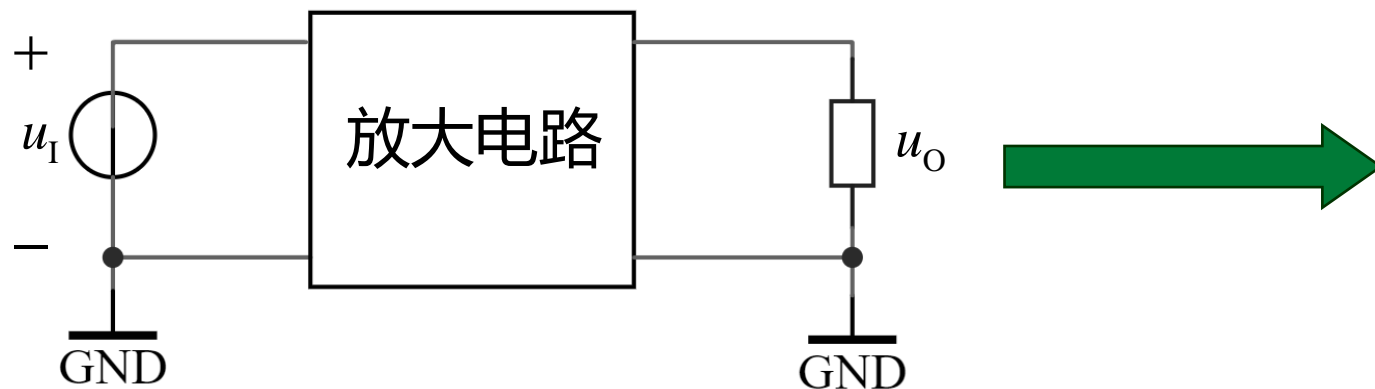
Part 8 差分放大电路

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

差分放大电路

○ 差分信号的概念



单端信号：信号线与地线

输入信号受到干扰，
输出信号受到干扰；

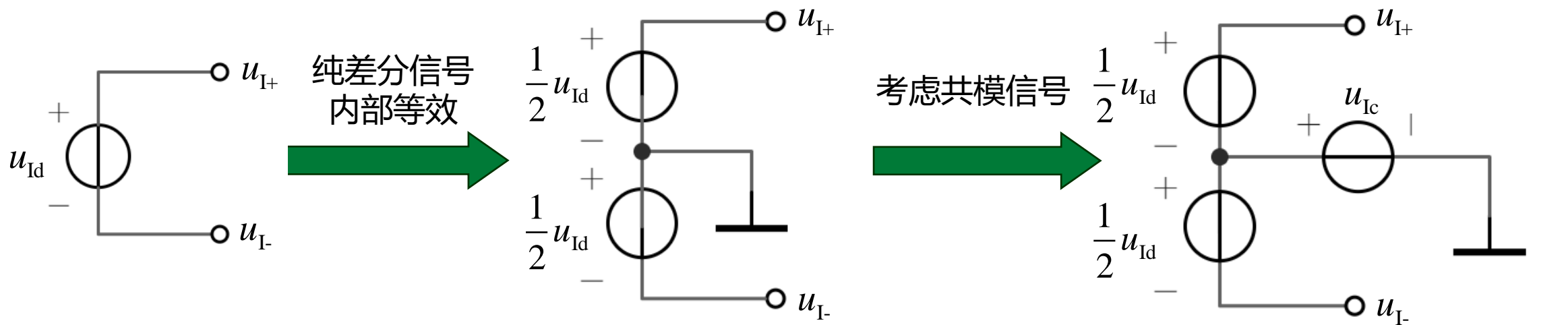


双端信号：正信号线与负信号线

假设正负输入信号受到相同的干扰，
则正负输出信号受到相同的干扰，
正负输出差值无干扰；

差分放大电路

○ 差分信号的概念



$$\begin{cases} u_{Id} = u_{I+} - u_{I-} \\ u_{Ic} = \frac{u_{I+} + u_{I-}}{2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} u_{I+} = u_{Ic} + \frac{u_{Id}}{2} \\ u_{I-} = u_{Ic} - \frac{u_{Id}}{2} \end{cases}$$

差模信号——两条信号线的信号差值； $u_{Id} = u_{I+} - u_{I-}$

共模信号——两条信号线共有的信号，即两条信号线的信号均值； $u_{Ic} = \frac{u_{I+} + u_{I-}}{2}$

差分放大电路

○ 差分信号的概念小结

任何一个双端信号都可以分解为差模信号与共模信号——差模信号为两个信号的差值，共模信号为两个信号的均值；

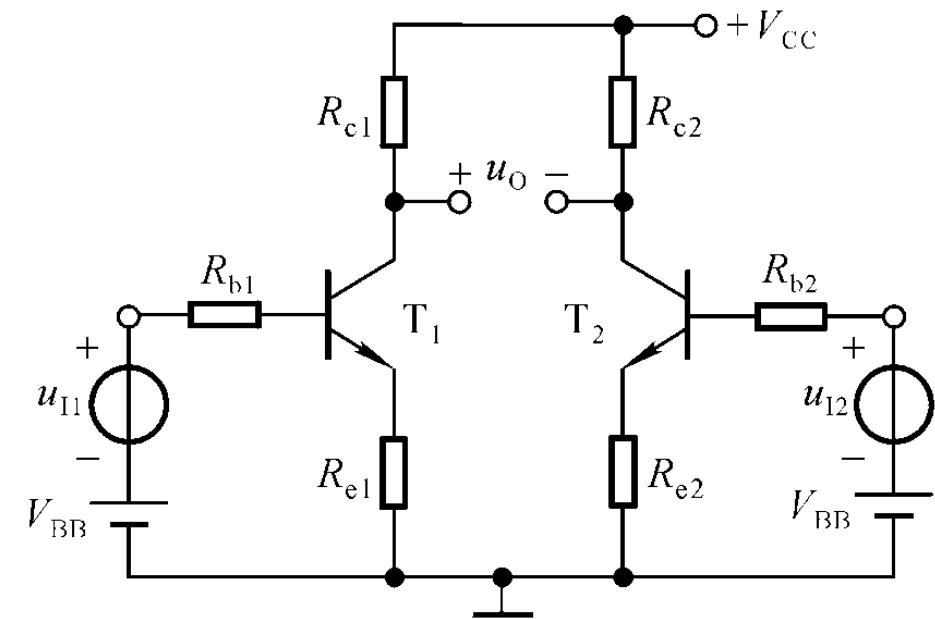
对于大多数的电路，有用的信号、需要放大的信号是差模信号，而由于外界例如温度、电磁场等引起的干扰是共模信号；放大电路的设计目标是对有用的信号即差模信号进行放大，而对干扰信号即共模信号进行衰减甚至消除；

在本教材中，统一双端信号下标分别为 1 和 2，差模信号与共模信号用 Δu_{Id} 和 Δu_{Ic} 表示， Δ 代表小信号、动态量（变化量）；

$$\begin{cases} \Delta u_{\text{Id}} = u_{\text{I1}} - u_{\text{I2}} \\ \Delta u_{\text{Ic}} = \frac{u_{\text{I1}} + u_{\text{I2}}}{2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} u_{\text{I1}} = \Delta u_{\text{Ic}} + \frac{\Delta u_{\text{Id}}}{2} \\ u_{\text{I2}} = \Delta u_{\text{Ic}} - \frac{\Delta u_{\text{Id}}}{2} \end{cases}$$

差分放大电路

差分放大电路的雏形



两个完全对称的静态工作点稳定式共射放大电路，假设放大倍数都是 A ：

$$u_{O1} = Au_{I1}, u_{O2} = Au_{I2}$$

$$u_O = u_{O1} - u_{O2} = A(u_{I1} - u_{I2}) = A\Delta u_{Id}$$

虽然这个电路消除了共模干扰，即输出不含有共模信号成分，但是有以下缺点：

(1) 两个电路分别都带有发射极电阻 R_e ，因此尽管消除了共模干扰，差模信号放大倍数大幅度减小甚至是衰减的；

(2) 共模信号与差模信号回路并没有完全分离，事实上放大电路对共模信号也产生了放大作用，只是由于输出方式为双端输出取电位差而抵消了，这是输出作减法的效果而非电路自身对共模信号的抑制；

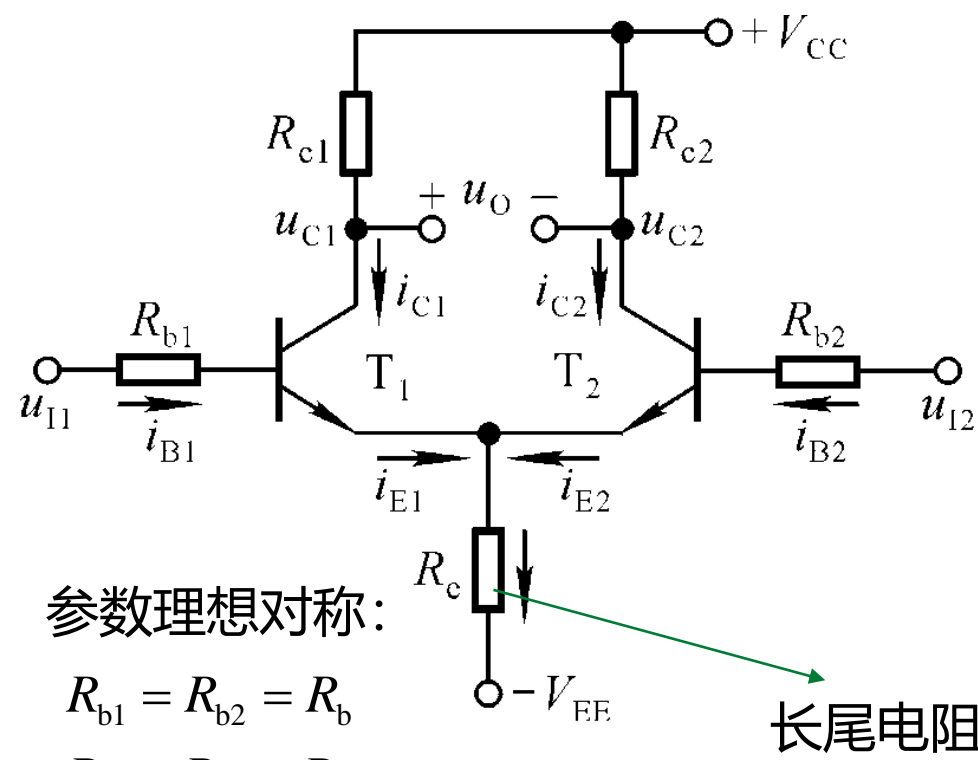


目标：差模信号回路与共模信号回路的分离

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

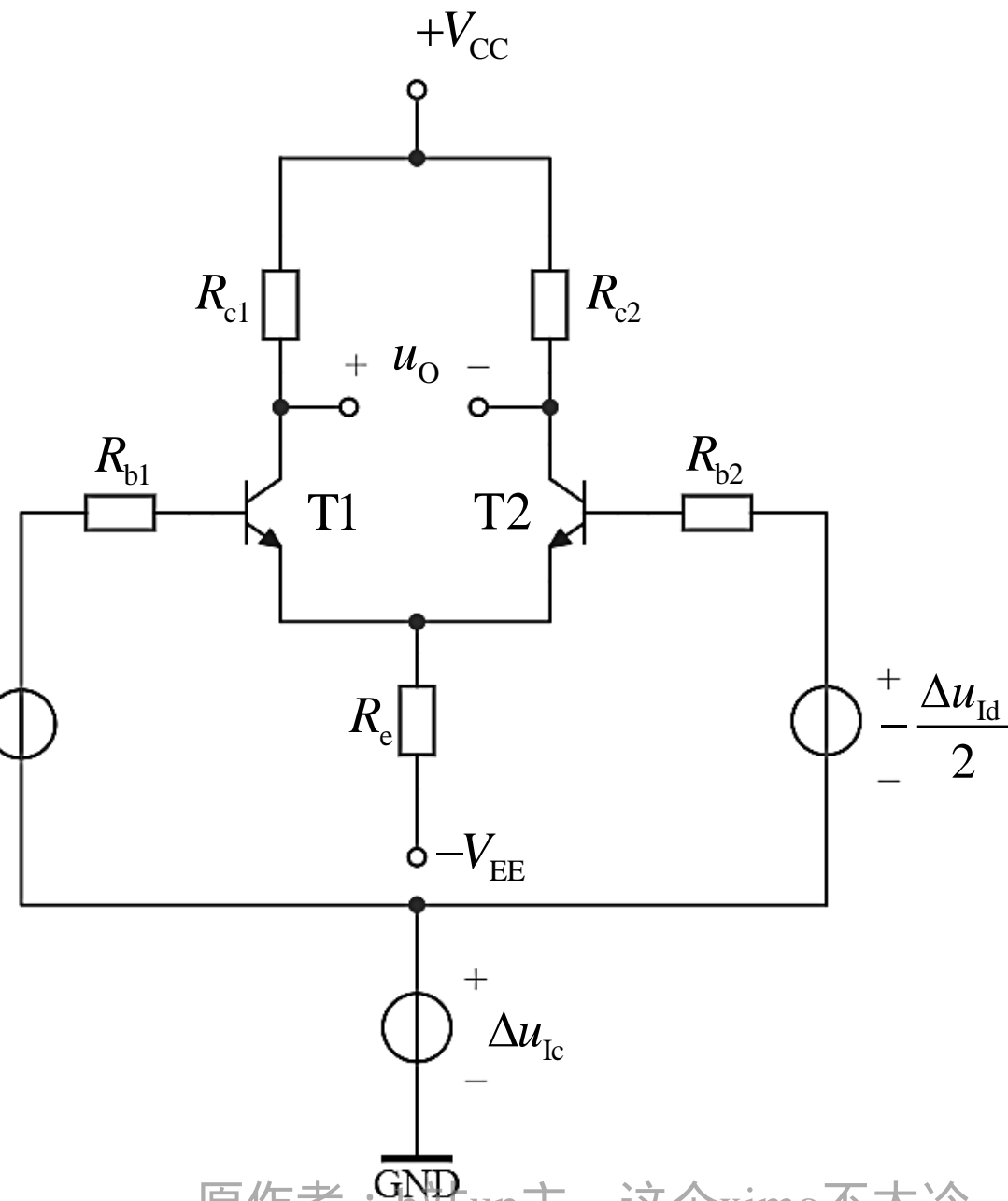
差分放大电路

长尾式差分放大电路



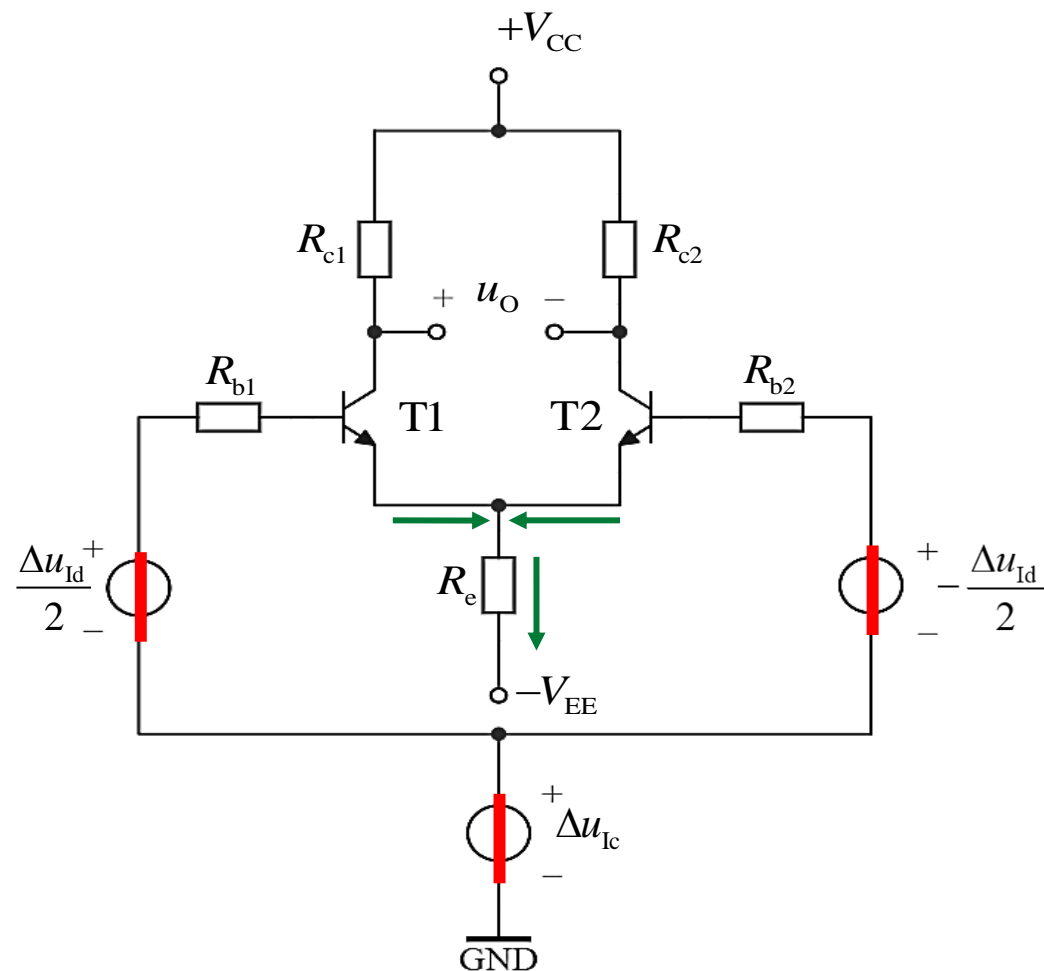
$$\begin{cases} u_{I1} = \Delta u_{Ic} + \frac{\Delta u_{Id}}{2} \\ u_{I2} = \Delta u_{Ic} - \frac{\Delta u_{Id}}{2} \end{cases}$$

$$\frac{\Delta u_{Id}}{2}$$



差分放大电路

长尾式差分放大电路——静态分析



假设两侧参数完全对称：

电阻 R_e 上流过的电流是 2 倍的发射极电流！

$$0 - (-V_{EE}) = I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_e$$

$$I_{BQ} : I_{CQ} : I_{EQ} = 1 : \beta : 1 + \beta$$

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

$$U_O = U_{C1Q} - U_{C2Q} = 0$$

计算过程也可以作以下近似，忽略基极电流即忽略 R_b 上压降：

$$I_{BQ} \approx 0, I_{CQ} \approx I_{EQ}$$

原作者：b站up主——这个ximo不太冷

差分放大电路

长尾式差分放大电路——共模信号输入

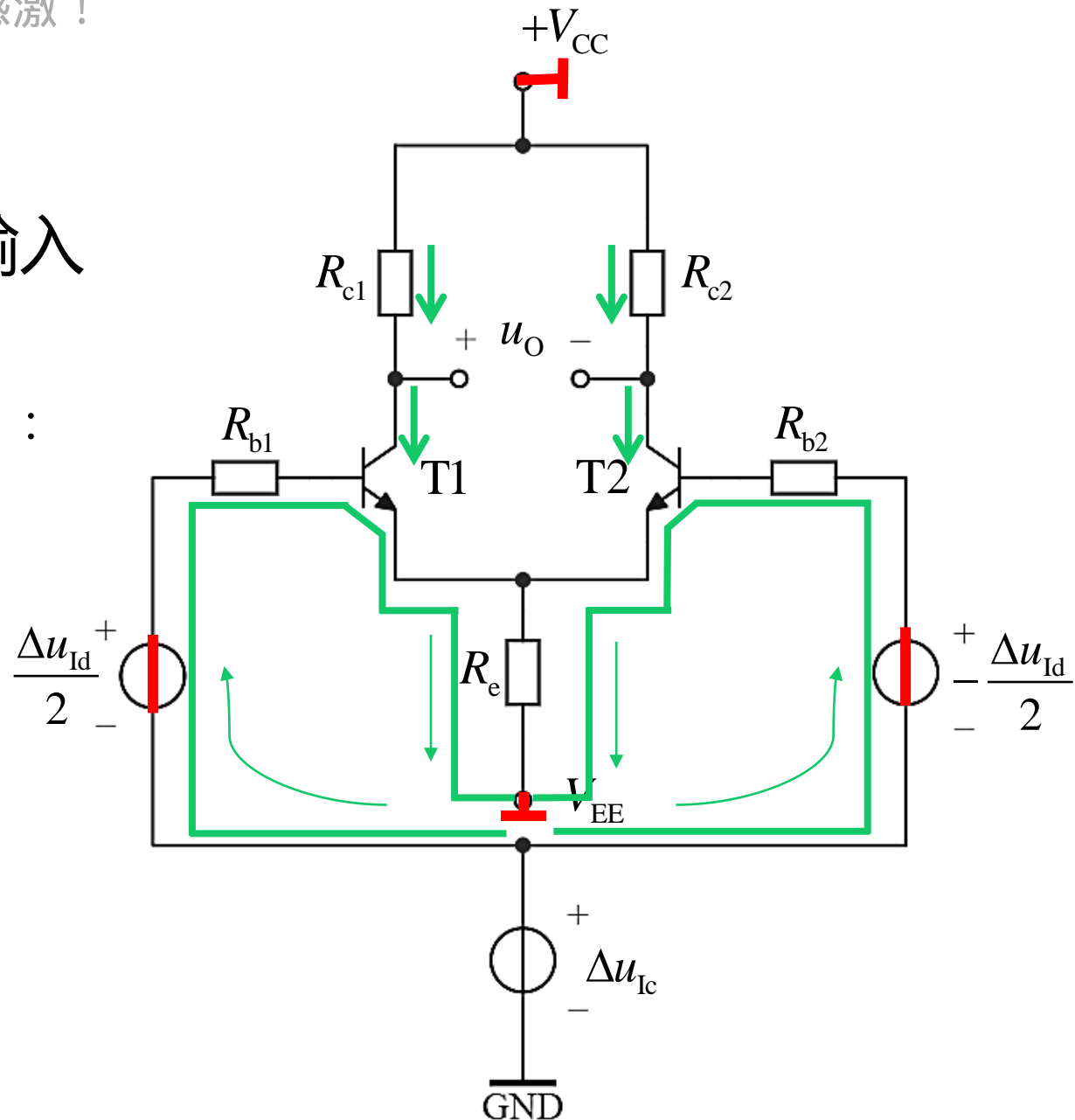
尝试先不画出交流等效电路（b-e之间为小电阻 r_{be} ）：

$$\Delta u_{Ic} = \Delta i_b R_b + \Delta i_b r_{be} + 2\Delta i_e R_e = \Delta i_b [R_b + r_{be} + 2(1+\beta)R_e]$$

$$\Delta i_c = \beta \Delta i_b$$

$$\Delta u_{o1} = -\Delta i_c R_c \quad \Delta u_{o2} = -\Delta i_c R_c$$

$$\Delta u_o = \Delta u_{o1} - \Delta u_{o2} = 0$$



差分放大电路

长尾式差分放大电路——共模信号的等效电路

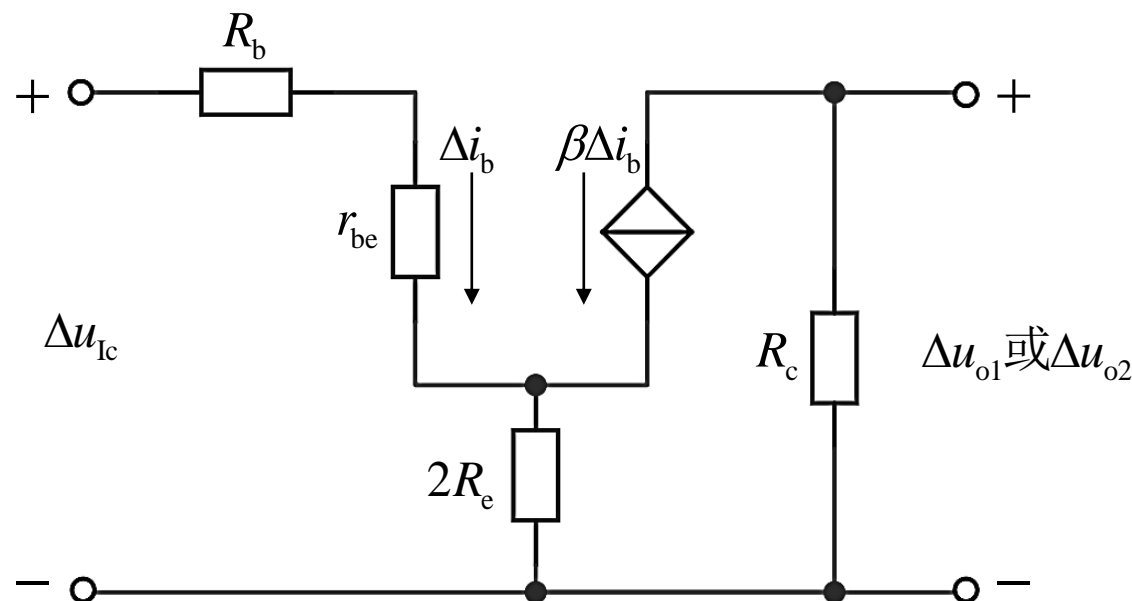
$$\Delta u_{Ic} = \Delta i_b R_b + \Delta i_b r_{be} + 2\Delta i_e R_e = \Delta i_b [R_b + r_{be} + 2(1+\beta)R_e]$$

$$\Delta i_c = \beta \Delta i_b$$

$$\Delta u_{o1} = \Delta u_{o2} = -\Delta i_c R_c$$

$$\frac{\Delta u_{o1}}{\Delta u_{Ic}} = \frac{\Delta u_{o2}}{\Delta u_{Ic}} = \frac{-\beta R_c}{R_b + r_{be} + 2(1+\beta)R_e}$$

$$\Delta u_o = \Delta u_{o1} - \Delta u_{o2} = 0$$



即使输出不采用双端输出方式（即不作减法），而采用单端输出方式（即输出接在 u_{o1} 或 u_{o2} 与地之间），共模信号的小信号等效电路是带有发射极电阻的共射类放大电路，放大电路也会对共模信号进行衰减；而且根据共模信号通路，发射极与地之间相当于是两倍的实际发射极电阻，衰减效果会更明显；

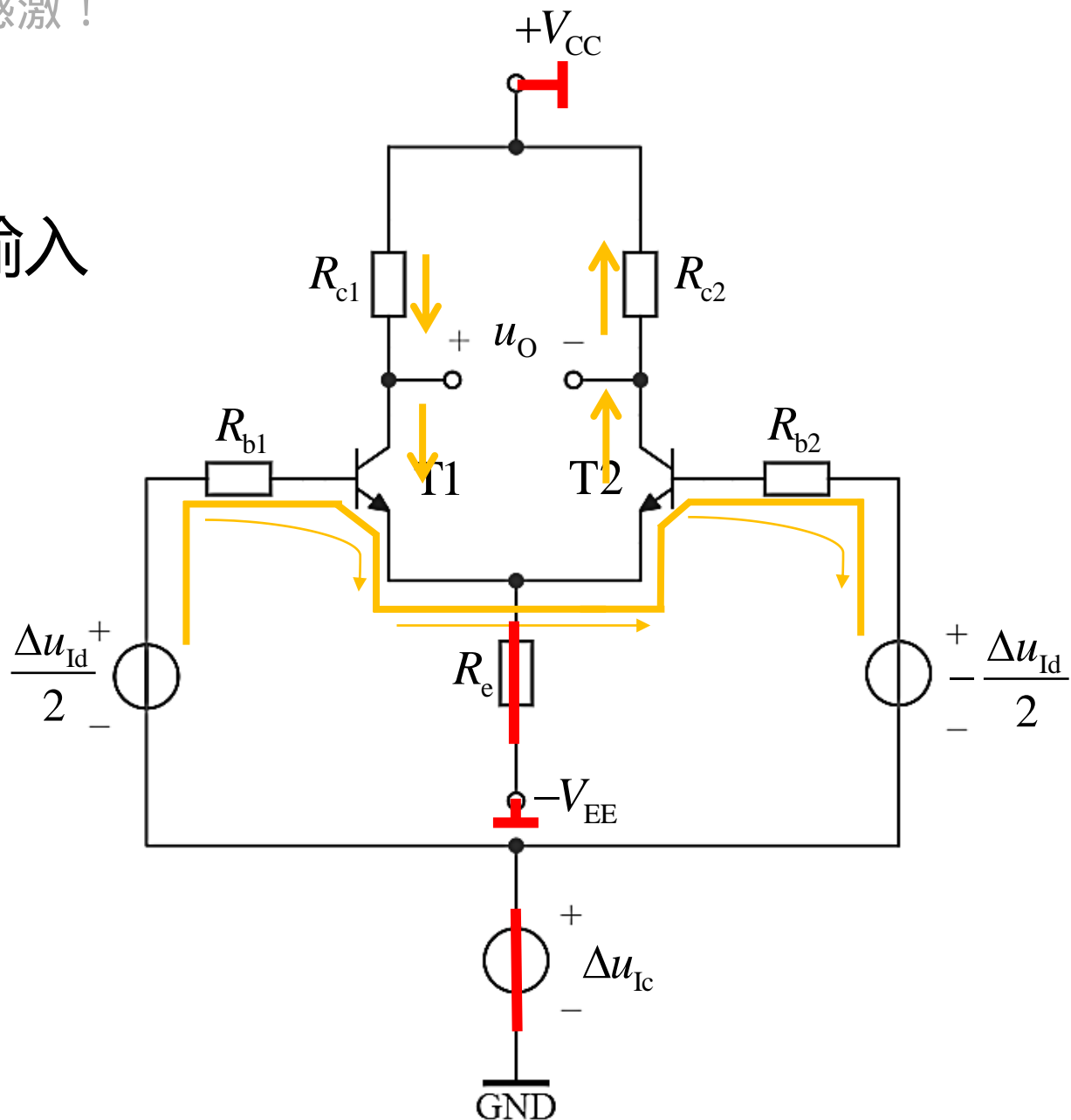
差分放大电路

长尾式差分放大电路——差模信号输入

两侧的信号源大小相同，极性相反（相位相反）；

当左侧信号源电压增量引起基极电流增量进而引起发射极的电流增量时，右侧会同时对应大小相同的减量：即左侧的电流增加多少，右侧的电流就减少多少，流过 R_e 的总电流保持不变，电流通路如图所示；

流过 R_e 的总电流保持不变，发射极电位也保持不变，对于电压不变点，动态分析可以作短路处理；



差分放大电路

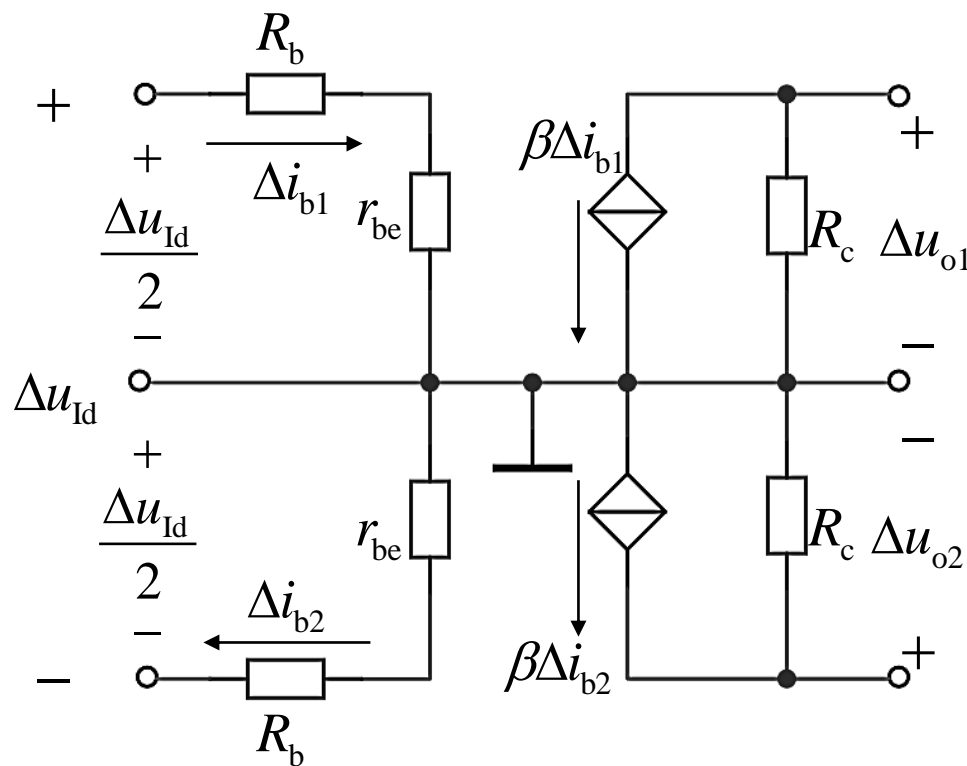
长尾式差分放大电路——差模信号的等效电路

如果定义 Δi_{b1} 方向为从正电源流向地， Δi_{b2} 方向为从地流向负电源，则 $\Delta i_{b1} = \Delta i_{b2}$ ；

因此，即使是单端输出，两个等效电路回路都是无发射极电阻具有一定放大能力的共射放大电路，T1 管为反相放大，T2 管为同相放大，如果是双端输出则两个极性相反的电位作减法，相当于增大 2 倍；

$$\frac{\Delta u_{o1}}{\frac{\Delta u_{Id}}{2}} = \frac{-\beta R_c}{R_b + r_{be}}, \quad \frac{\Delta u_{o2}}{\frac{\Delta u_{Id}}{2}} = \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}}$$

$$\Delta(u_{o1} - u_{o2}) = \frac{-\beta R_c}{R_b + r_{be}} \Delta u_{Id}$$



差分放大电路

○ 长尾式差分放大电路的特点

长尾式差分放大电路最巧妙之处在于其**实现了共模信号与差模信号回路的分离**；

对于共模信号，每个晶体管的动态等效电路都是具有发射极电阻即具有反馈效应的共射放大电路，在作减法之前每个晶体管的输出就已经实现了对共模信号的衰减；由于电路的对称性，两个输出电位极性（相位）相同，若采用双端输出时相减为零；

对于差模信号，两侧的内部差模信号源大小相同、极性相反，发射极电位保持不变，每个晶体管的动态等效电路都是没有发射极电阻即发射极直接接地的共射放大电路，保持了对差模信号的放大能力，两个输出电位极性（相位）相反，采用双端输出时相减为二倍的关系；

差分放大电路

思考：

差分放大电路只能对交流信号放大吗？
(直接耦合电路，直流交流信号均可)

○ 差分放大电路的分析方法

根据前面的分析思路，差分放大电路的分析方法相对于第二章的基本放大电路，可以分解成三部分：

①静态工作点求解——这里的静态工作点不特指直流量，而是代表外部电压源置零时的状态，即共模输入信号和差模输入信号均为零（短路）；

②共模信号回路求解——只考虑共模输入信号，将电路中的电位不变点置零短路、将差模信号源短路的回路；对应的动态等效电路称为共模等效电路；

③差模信号回路求解——只考虑差模输入信号，将电路中的电位不变点置零短路，将共模信号源短路的回路；对应的动态等效电路称为差模等效电路；

事实上，后面经过总结与练习可以发现，对于一些情况并不需要严格将三个状态全部分析，例如参数完全对称情况下的双端输出、恒流源代替长尾电阻时无需考虑共模信号回路；

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

思考：

输出电阻为什么不分共模输入和差模输入两种情况的呢？
(从电路基本原理分析，输出电阻与输入方式无关；
从计算的角度，根本不需要，因为独立源都置零处理)

差分放大电路

差分放大电路的动态参数

差模电压放大倍数 A_d : $A_d = \frac{\Delta u_{od}}{\Delta u_{Id}}$

Δu_{od} 指只有差模信号输入时的输出电压变化量；

共模电压放大倍数 A_c : $A_c = \frac{\Delta u_{oc}}{\Delta u_{Ic}}$

Δu_{oc} 指只有共模信号输入时的输出电压变化量；

差模输入电阻 R_{id} : $R_{id} = \frac{\Delta u_{Id}}{\Delta i_{Id}}$

Δi_{Id} 指只有差模信号输入时的输入电流变化量；

共模输入电阻 R_{ic} : $R_{ic} = \frac{\Delta u_{Ic}}{\Delta i_{Ic}}$

Δi_{Ic} 指只有共模信号输入时的输入电流变化量；

输出电阻 R_o : $R_o = \left. \frac{\Delta u_o}{\Delta i_o} \right|_{\text{独立源置零}}$

输出电阻只与电路的输出方式有关；

共模抑制比 K_{CMR} : $K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$

表征差分放大电路抑制共模信号放大差模信号的性能；

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

差分放大电路

○ 含负载的差分放大电路分析

前面的分析只是对电路的功能和特点进行了分析，下面考虑当带有负载时差分电路的分析过程，即负载对静态工作点、共模信号输入时、差模信号输入时的影响；

负载的接法即对应着电路的输出方式：

双端输出 —— “双端负载”，接在两个晶体管的输出端口之间；

单端输出 —— “单端负载”，接在其中一个晶体管的输出端口与地之间；

思考：

是否接负载，负载按照什么方式接，
对静态时、共模信号输入、差模信号输入时的输入回路有无影响？

差分放大电路

○ 差分放大电路的输入输出方式

差分放大电路除了普通的双端输入，也可以单端输入；所谓的单端输入本质上与双端输入并没有区别，只是两侧的电位一个是 u_I ，一个是 0；

因此单端输入相当于同时输入共模信号与差模信号：

$$\begin{cases} u_{I1} = u_I \\ u_{I2} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta u_{Id} = u_I \\ \Delta u_{Ic} = \frac{u_I}{2} \end{cases}$$

根据输入方式和输出方式的不同，差分放大电路可以分为“双入双出”、“双入单出”、“单入双出”、“单入单出”四种接法；**其实实质上只有输出方式的不同；**

差分放大电路

○ 差分放大电路的输入输出方式 —— 一个需要说明的问题

关于差分放大电路的输入方式，本教材分为双端输入和单端输入；

教材中的双端输入默认指的是对称式双端输入，两个输入端子大小相同极性相反，即未给定两个输入端口具体电位大小或者只在两个端口之间画了一个电压源时，默认无共模信号输入，纯差模输入；

单端输入即其中一个端口接地，一般都是右侧的输入接地，即 $u_{I2} = 0$ ；既有差模输入又有共模输入；

无论是对称式双端输入 ($u_{I1} + u_{I2} = 0$)、还是非对称式双端输入 ($u_{I1} + u_{I2} \neq 0$)、还是单端输入 ($u_{I2} = 0$)，差模信号输入量和共模信号输入量都符合下式：

$$\begin{cases} \Delta u_{Id} = u_{I1} - u_{I2} \\ \Delta u_{Ic} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} \end{cases}$$

差分放大电路

双端负载的差分放大电路

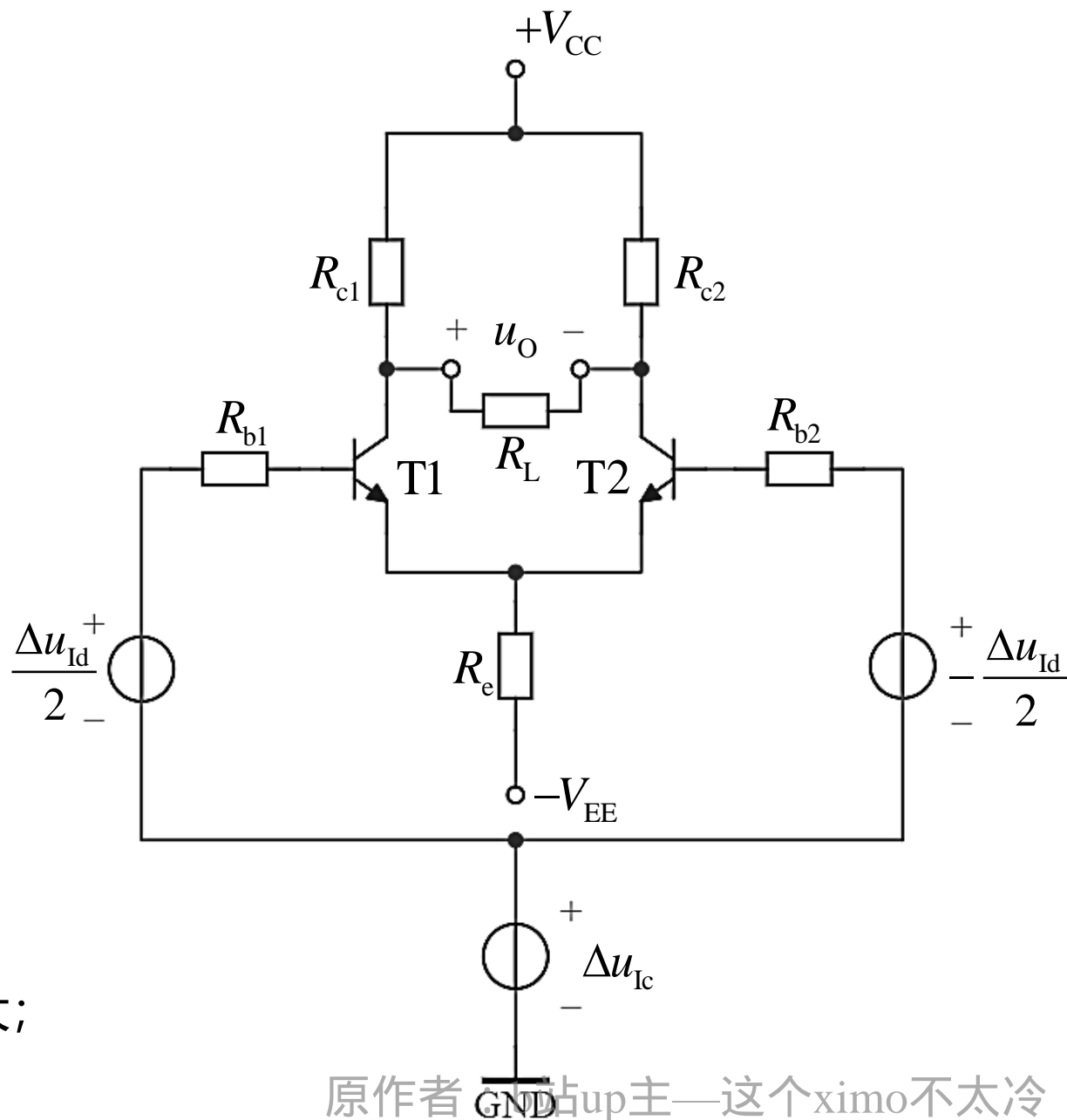
静态工作点：

由于两个集电极电位相等，即 $U_{O1} = U_{O2}$ ，所以接入负载后负载中无电流流过；静态工作点与空载时相同；

共模信号输入：

两个晶体管集电极电位变化量大小相同，相位相同，接入负载并无影响，共模信号输出响应仍为零；

因此共模电压放大倍数 A_c 为零；共模抑制比为无穷大；



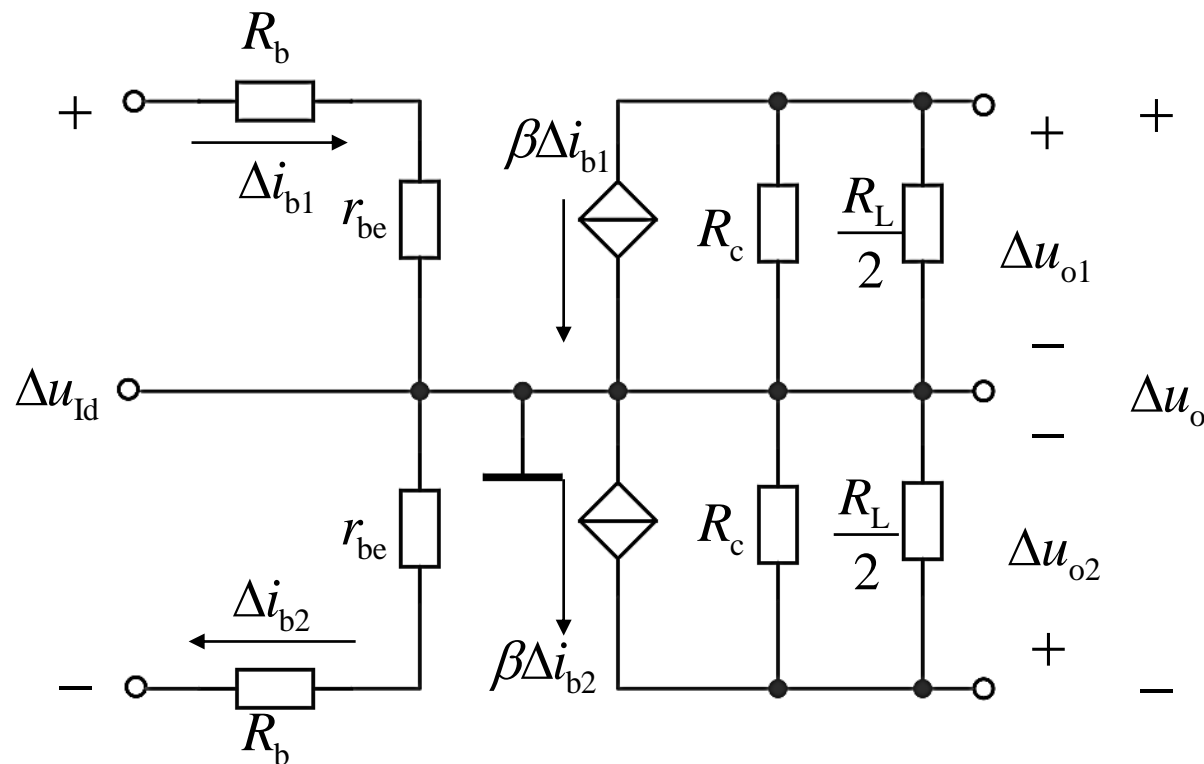
差分放大电路

注意：

这里的 R_i 实际上是 R_{id} ，
 本教材不要求掌握共模输入电阻，
 因此本教材差分放大电路的输入电阻
 默认为差模等效电路的输入电阻

双端负载的差分放大电路——差模等效电路

差模信号输入：



双端负载两侧电位变化大小相同，相位相反，
 因此负载的中点电位保持不变，电位不变点
 在动态等效电路中即可短路处理；

$$A_d = \frac{\Delta u_{od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{-\beta \Delta i_b (R_c // \frac{R_L}{2}) \times 2}{2 \Delta i_b (R_b + r_{be})} = \frac{-\beta (R_c // \frac{R_L}{2})}{(R_b + r_{be})}$$

$$R_i = \frac{\Delta u_{Id}}{\Delta i_{Id}} = \frac{\Delta u_{Id}}{\Delta i_b} = 2(R_b + r_{be})$$

$$R_o = \frac{\Delta u_o}{\Delta i_o} \Big|_{\text{独立源置零}} = 2R_c$$

注意此时为双端输出！
 端口位置要找对！

差分放大电路

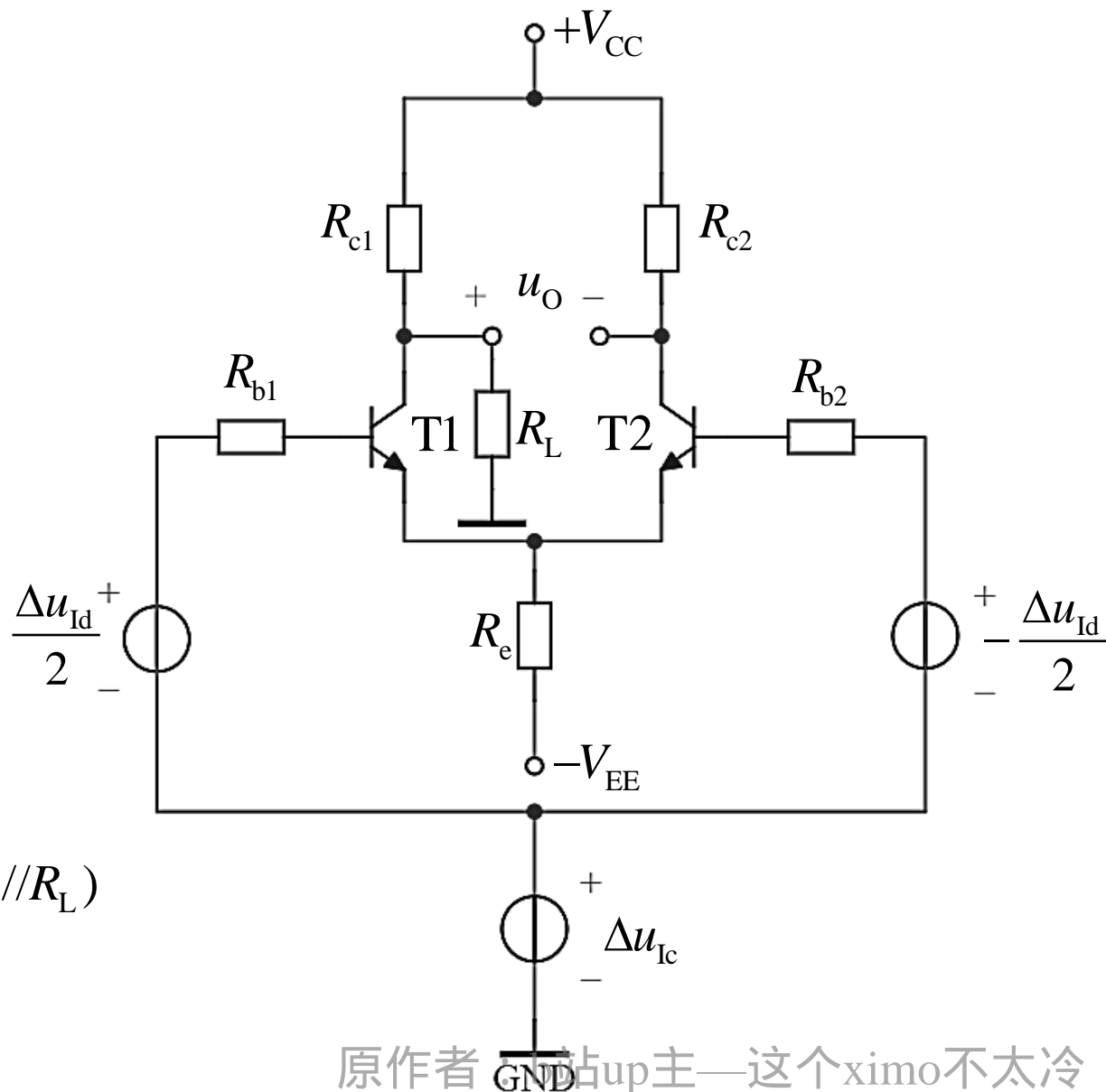
单端负载的差分放大电路

静态工作点：

此时输入回路方程不变（负载只会影响输出回路的方程），因此发射极电位、发射极电流以及集电极电流均与空载时相同；对输出回路，T1 的集电极电位应该用戴维南等效定理求解，T2 的集电极电位没有变化；

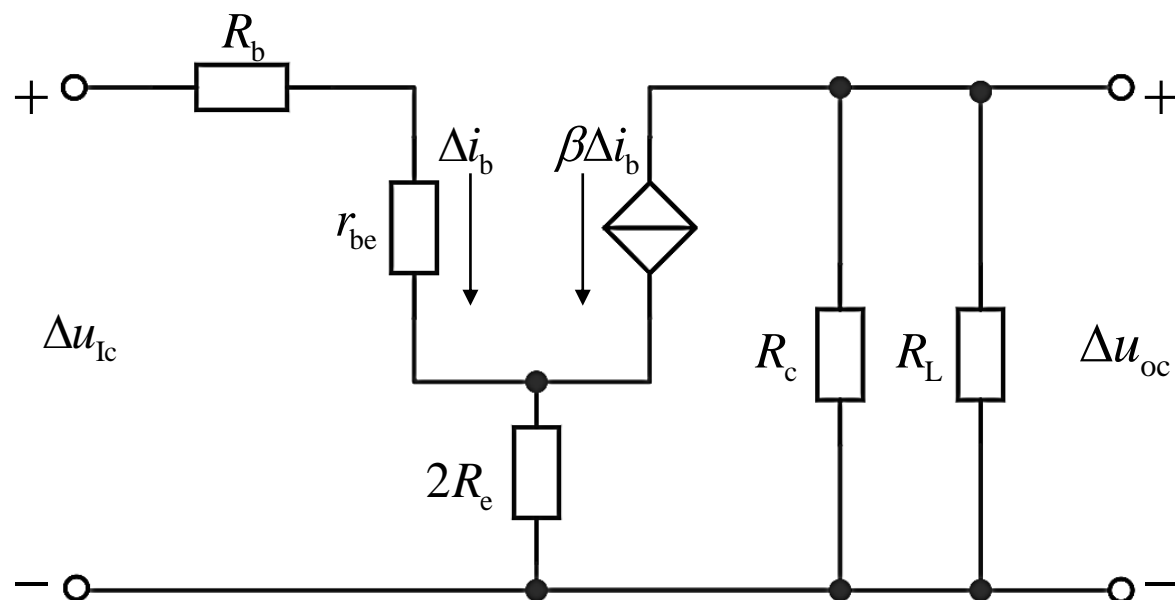
$$U_O = U_{C1Q} = V'_{CC} - R'_c I_{CQ}, \quad V'_{CC} = V_{CC} \frac{R_L}{R_c + R_L}, \quad R'_c = (R_c // R_L)$$

$$U_{C2Q} = V_{CC} - R_c I_{CQ}$$



差分放大电路

单端负载的差分放大电路——共模等效电路



单端输出在 T1 的集电极，因此求解共模电压放大倍数
没有必要画出 T2 的共模等效电路（事实上 T2 的共模
动态等效电路与 T1 只相差一个负载）

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

可见单端输出时能对共模信号的干扰大幅度衰减（已经
优于普通的放大电路），但是并未完全消除；

思考（拓展）：
共模输入电阻 R_{ic} 等于多少？（并联）

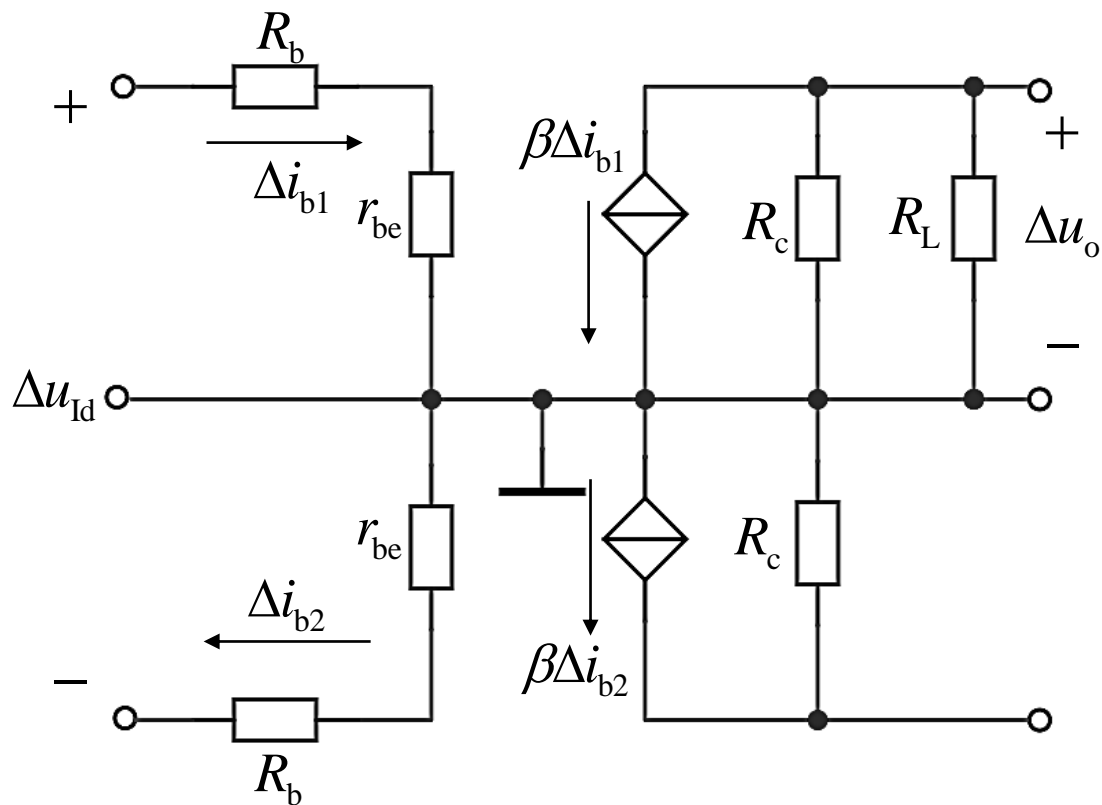
$$R_{ic} = \frac{\Delta u_{ic}}{\Delta i_{ic}} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2}$$

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
 课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

差分放大电路

思考：
 如果单端输出在 T2 管集电极，
 差模电压放大倍数为多少？
 (同相放大)

单端负载的差分放大电路——差模等效电路



$$A_d = \frac{\Delta u_{od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{-\beta \Delta i_b (R_c // R_L)}{2 \Delta i_b (R_b + r_{be})} = \frac{-\beta (R_c // R_L)}{2 (R_b + r_{be})}$$

$$R_i = \frac{\Delta u_{Id}}{\Delta i_{Id}} = \frac{\Delta u_{Id}}{\Delta i_b} = 2 (R_b + r_{be})$$

$$R_o = \left. \frac{\Delta u_o}{\Delta i_o} \right|_{\text{独立源置零}} = R_c$$

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

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

思考：

双端输出和单端输出抑制共模信号的原理是否相同？

差分放大电路

差分放大电路小结

$$u_O = U_O + A_c \Delta u_{Ic} + A_d \Delta u_{Id}$$

静态 共模 差模
↑ ↑ ↑

输入侧决定了共模输入信号、差模输入信号的大小：

$$\begin{cases} \Delta u_{Id} = u_{I1} - u_{I2} \\ \Delta u_{Ic} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} \end{cases}$$

在参数理想对称的前提下：

输出侧决定了 A_d 与 A_c 的大小；

双端输出，共模电压放大倍数为 0，差模电压放大倍数相当于单管共射放大电路的电压放大倍数

（负载为 $R_L / 2$ ），输出电阻为两倍的集电极电阻；

单端输出，共模电压放大倍数不为 0，差模电压放大倍数相当于单管共射放大电路电压放大倍数的一半，输出电阻为一个集电极电阻；

输出方式不影响输入电阻（差模等效电路的输入电阻）（因为输出方式不影响输入回路的电路方程），

不同输出方式的输入电阻均为 $2(R_b + r_{be})$ ；

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

差分放大电路

○ 差分放大电路的优化

根据我们对“抑制共模、放大差模”的性能要求，差分放大电路最重要的性能指标是共模抑制比 K_{CMR} ，共模抑制比越大越好，理想的共模抑制比应达到无穷大；在前面的分析中，双端输出时共模抑制比为无穷大，然而：

①实际应用场合并不完全都是双端输出，例如集成运放电路内部大多是单端输出；

②双端输出的共模电压放大倍数为零的机制是两个输出作减法，而重要的假设与前提是电路参数理想对称；而且，双端负载情况下实际上 u_{o1} 和 u_{o2} 对共模信号的电压放大倍数分别都相当于单端输出时的共模电压放大倍数，因此，想要提高共模抑制比，最重要的是要提高电路本身对共模信号的抑制能力，最根本的改善方法还是从共模信号回路入手，而不能仅靠减法实现；

差分放大电路

○ 差分放大电路的优化 —— 用恒流源提高共模抑制比

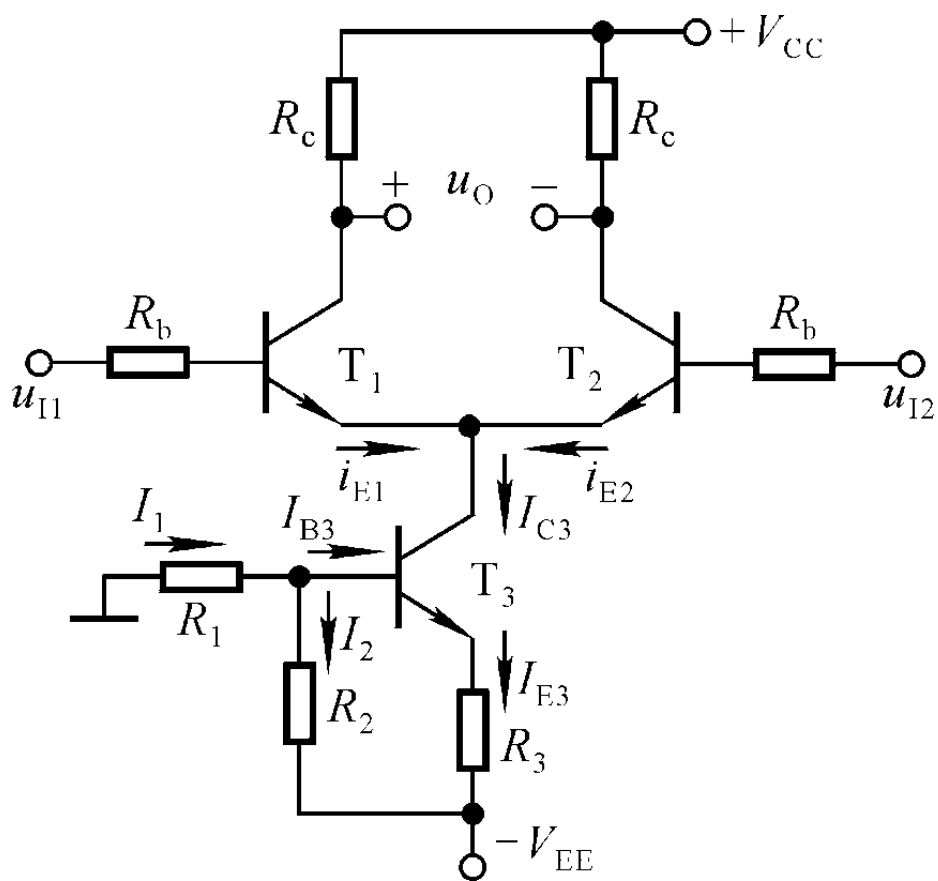
基于我们“抑制共模、放大差模”的思想，我们的优化目标是提高对共模信号的抑制能力同时尽量不影响差模放大能力与静态工作点；差分放大电路的特点是共模信号回路通过发射极反馈电阻而差模信号回路不通过发射极反馈电阻，因此，最原始的想法便是增大发射极电阻 R_e ； R_e 越大，每个晶体管对共模信号输入的衰减越明显，这样即使单端输出也能实现共模电压放大倍数足够小，理想的情况是 R_e 无穷大；

而 R_e 的无穷大会影响静态工作点的设置，由于电源电压与发射极电流（集电极电流）的限制，不能单纯地无限增加发射极电阻阻值；理想的情况是保持静态工作点设置的要求同时对于共模信号回路其等效电阻无穷大，为此，恒流源能够满足此条件；

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

差分放大电路

带有恒流源的差分放大电路

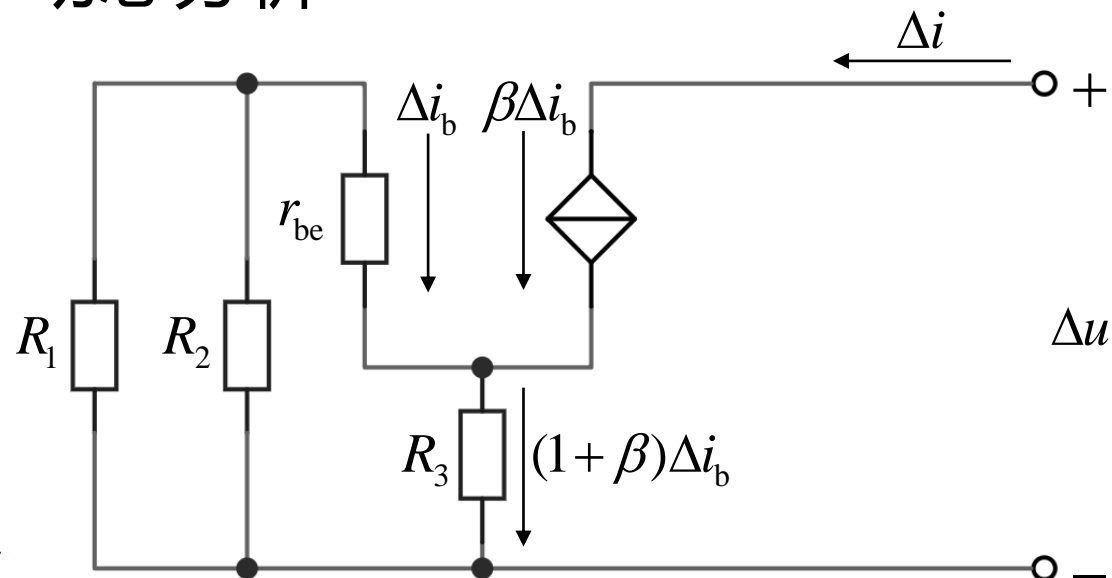
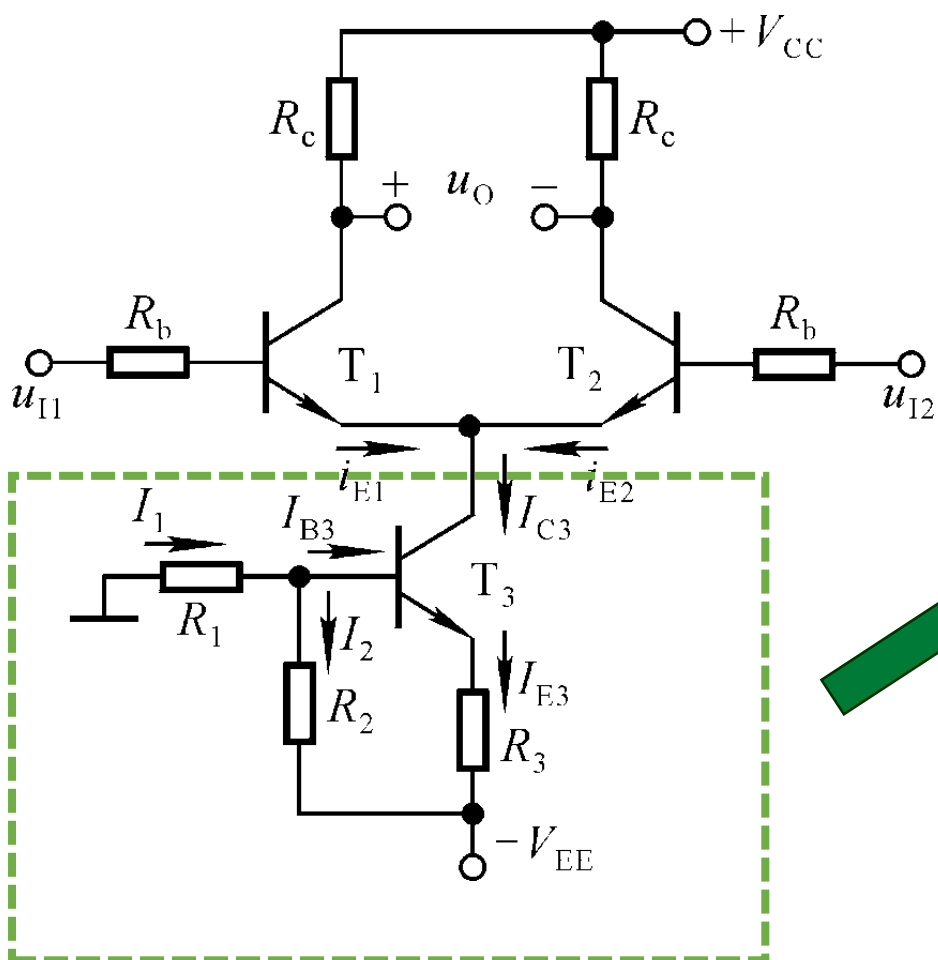


如图所示，用一个静态工作点稳定放大电路代替传统的电阻 R_e ，用固定的偏置电阻使该放大电路的基极电流确定，其集电极电流即能保持恒定；

静态时，通过设定 R_1 、 R_2 、 R_3 的阻值可以设定 T_3 的集电极电流大小， T_3 的集电极电流等于 2 倍的差分放大电路中两个晶体管的发射极电流，同时 T_3 的管压降也可以确定差分放大电路两个晶体管的发射极电位，因此建立了差分放大电路合适的静态工作点；静态时 T_3 的恒流源电路相当于一个普通的电阻；

差分放大电路

带有恒流源的差分放大电路 —— 动态分析



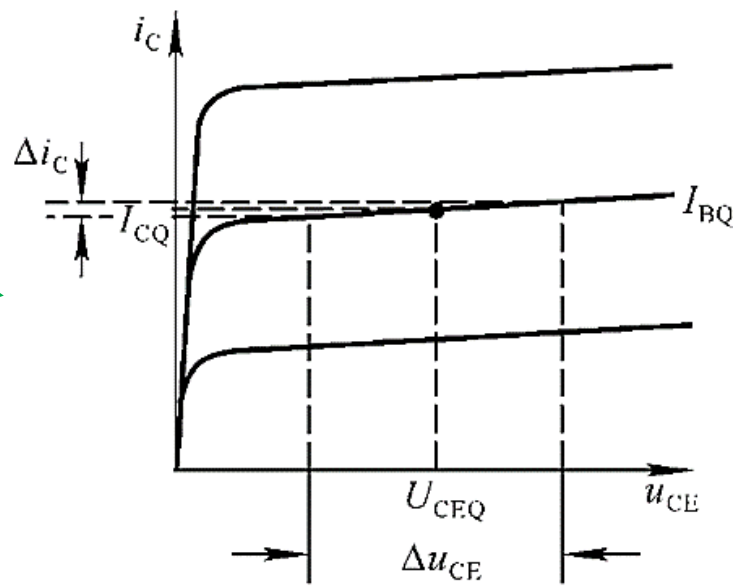
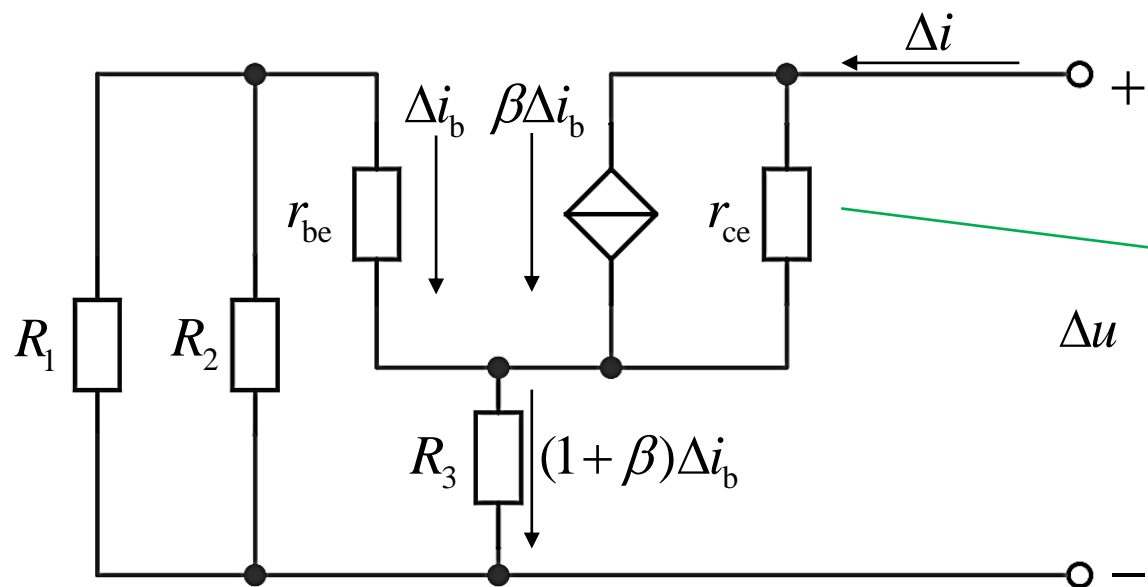
$$\text{KVL} : r_{be} \Delta i_b + (R_1 // R_2) \Delta i_b + R_3 (1 + \beta) \Delta i_b = 0$$

$$\Delta i_b = 0, \Delta i = 0, R_o = \frac{\Delta u}{\Delta i} = \infty$$

对外相当于一个无穷大的动态电阻

差分放大电路

带有恒流源的差分放大电路 —— 动态分析的进一步解释



事实上，第二章分析晶体管小信号动态等效模型时提到过，
 c 和 e 之间并非完全是开路的，而是存在一个阻值很大的
 动态电阻 r_{ce} ，大小对应输出伏安特性曲线的切线斜率的
 倒数，因为电流曲线在放大区很平坦，因此此动态电阻与
 集电极电阻和负载电阻相比非常大可以忽略；

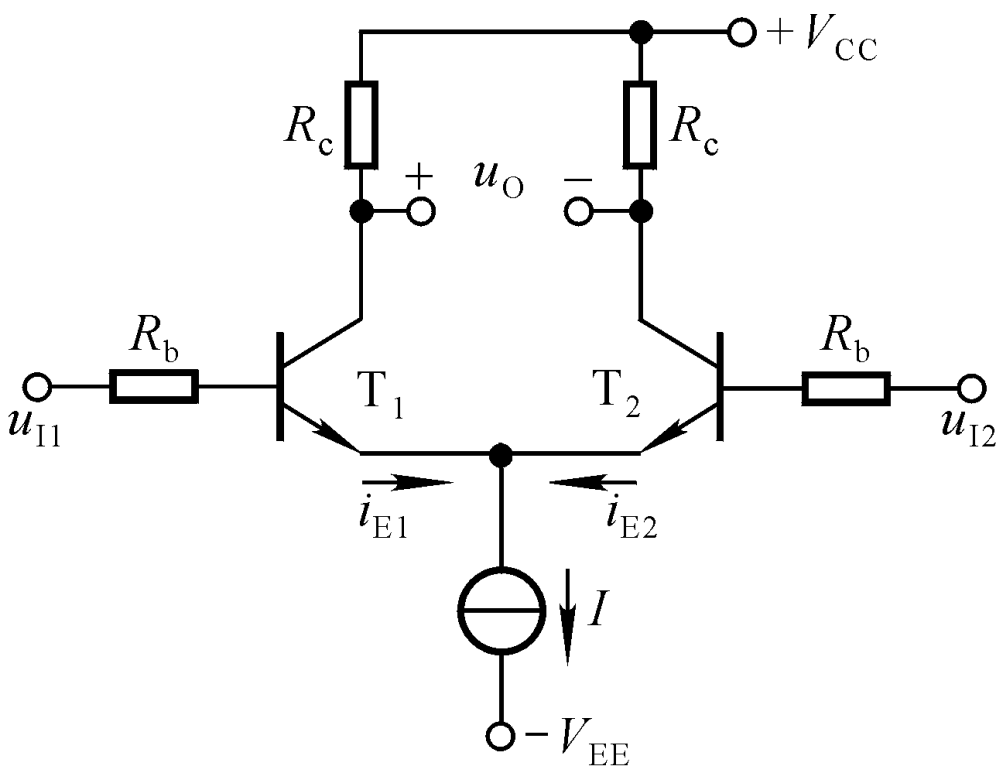
实际动态输出电阻：
$$R_o = \frac{\Delta u}{\Delta i} = R_3 + r_{ce} \left[1 + \frac{(1 + \beta)R_3}{r_{be} + (R_1 // R_2)} \right]$$

 (不需要记下来)

非常大，近似无穷；

差分放大电路

带有恒流源的差分放大电路的特点



根据前面的分析，这个**恒流源的特点是静态时等效为一个相对较小的静态电阻，能够设置合适的静态工作点；而动态时等效为一个阻值近似无穷大的动态电阻；**

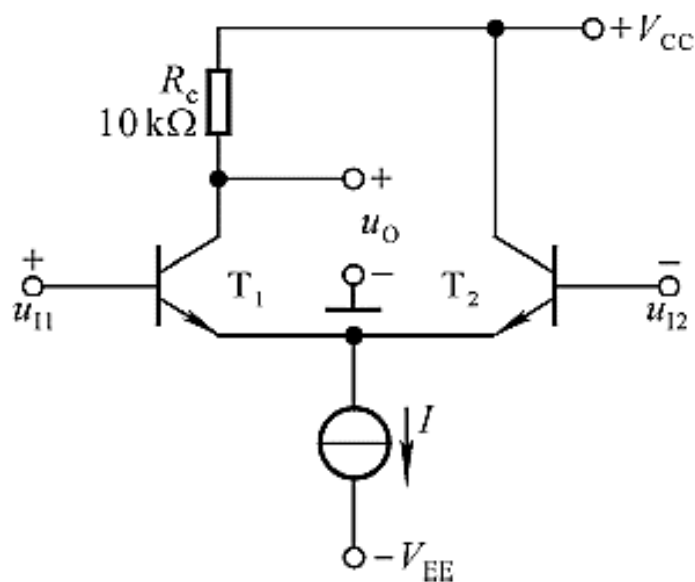
由于共模输入时共模信号是通过这个恒流源所在的支路的，因此这个无穷大的动态电阻的负反馈效应也近似无穷大，每个晶体管对共模信号的放大倍数均为零，因此无论是单端输出还是双端输出共模电压放大倍数 A_c 均为 0；提高了共模抑制能力；

由于差模输入时差模信号根本不通过这个恒流源所在的支路，发射极为电位不变点，差模等效电路直接短路处理，因此这个恒流源不会影响差模等效电路的参数，即不会影响电路的差模放大能力；

差分放大电路

例 1

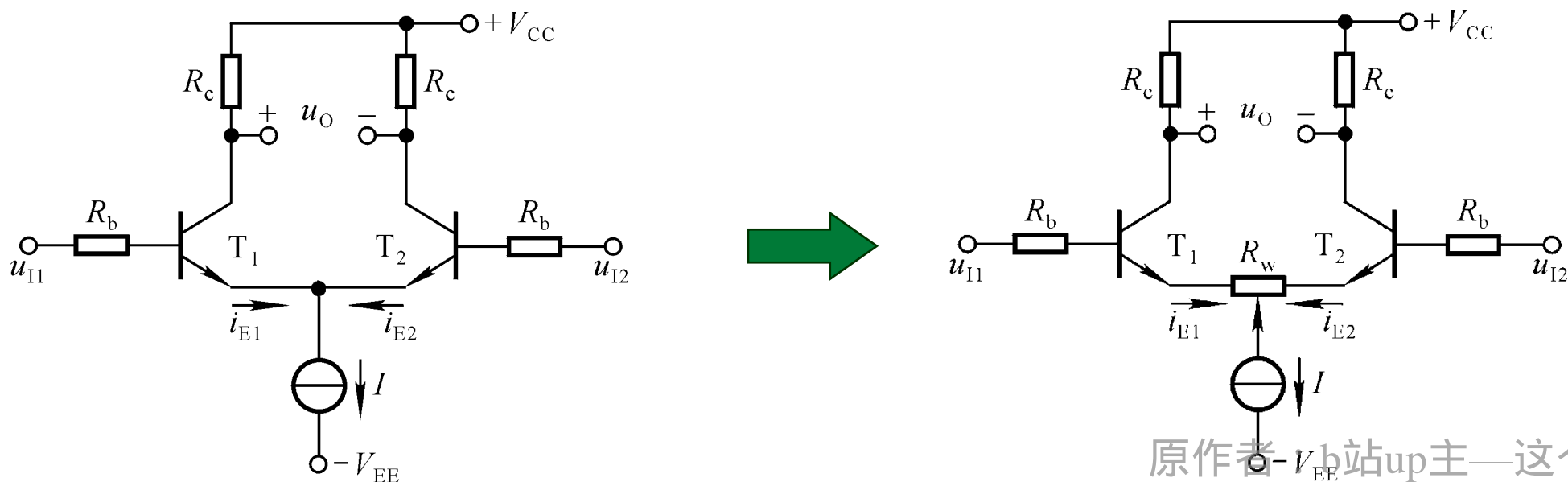
电路如图所示， T_1 管和 T_2 管的 β 均为40， r_{be} 均为 $3\text{k}\Omega$ 。
若输入直流信号 $u_{I1}=20\text{mV}$ ， $u_{I2}=10\text{mV}$ ，则电路的共模输入电压 $u_{IC}=?$ 差模输入电压 $u_{Id}=?$ 输出动态电压 $\Delta u_O=?$



差分放大电路

差分放大电路的优化 —— 用电位器来保证电路对称性

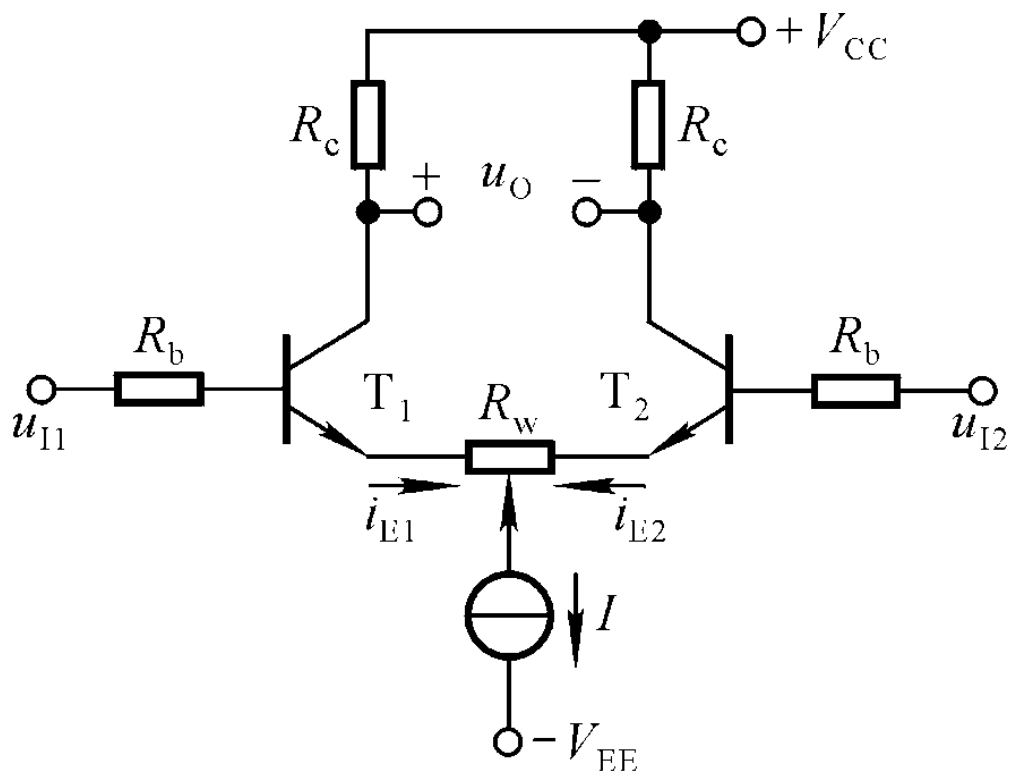
根据我们前面的分析，差分放大电路之所以能够实现“抑制共模、放大差模”是因为在共模等效电路中存在的负反馈效应的发射极电阻并不出现于差模等效电路中；因为两侧参数完全对称的情况下，没有电流流经 R_e 所在的支路；而如果输入回路的参数并不是完全对称，那么 R_e 中就会有动态电流流过，换句话说， R_e 的反馈效应对差模信号也起作用，会削弱其差模放大能力；而且参数的不对称也会导致静态工作点的偏移；



请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

差分放大电路

带有调零电位器的差分放大电路



思考：

如果本题公共回路并不是恒流源，
仍然是基本的长尾电阻 R_e ，
双端输出的差模电压放大倍数为多少？
单端输出的差模电压放大倍数为多少？
(双端输出做减法，因此 $A_c = 0$ ；
单端输出 $A_c \neq 0$ ，注意每侧的等效电路中
发射极与地间是 $R_w / 2$ 和 $2R_e$ 串联；)

静态工作点：

假设 R_w 滑片位置在中点处，则输入回路 KVL 应为：

$$0 - (-V_{EE}) = U_{BEQ} + I_{EQ} \frac{R_w}{2} + 2I_{EQ} R_e \quad (\text{忽略基极电流})$$

输出回路根据输出方式不同而不同；

共模信号回路：

由于本例带有恒流源，所以无论是双端输出还是单端输出，
共模电压放大倍数均为 0；

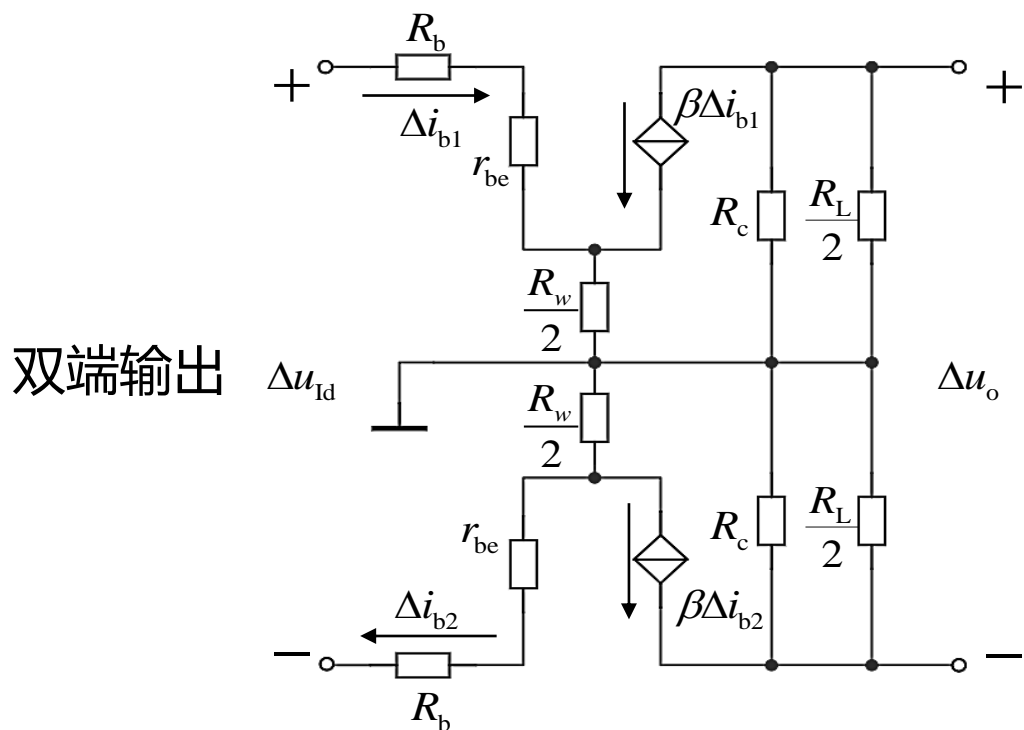
原作者：b站up主—这个ximo不太冷

差分放大电路

思考：

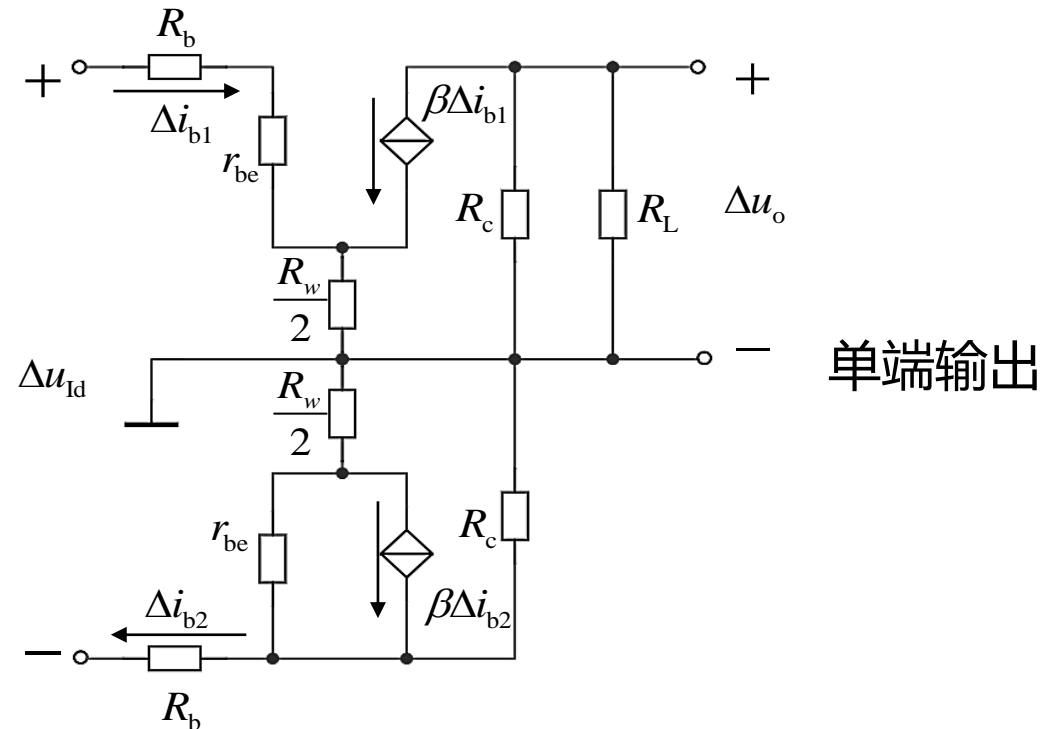
R_w 的阻值能不能较大？
 (不能, R_w 会衰减差模放大倍数)

带有调零电位器的差分放大电路 —— 差模等效电路



$$A_d = \frac{\Delta u_{od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{-\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_w}{2}} \quad R_o = 2R_c$$

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



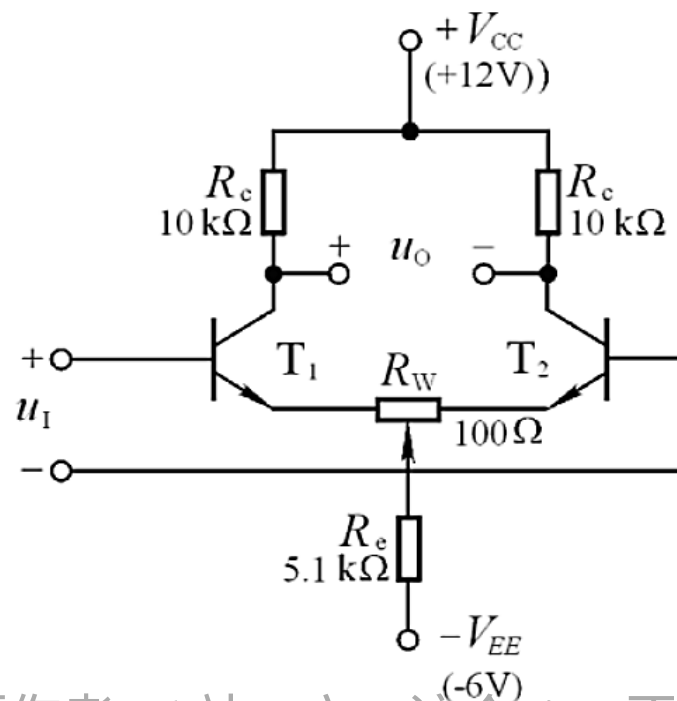
$$A_d = \frac{\Delta u_{od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{-\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_w}{2}} \quad R_o = R_c$$

原作者：b站up主——这个ximo不太冷

差分放大电路

例 2

如图所示，电路参数理想对称，晶体管的 β 均为80， $r_{bb'}=100\Omega$ ， $U_{BEQ}=0.7V$ ；试求解 R_w 的滑动端在中点时， T_1 管和 T_2 管的发射极静态电流以及动态参数 A_d 和 R_i 。



差分放大电路

○ 优化的差分放大电路小结

对于用恒流源代替长尾电阻 R_e 的差分放大电路，其共模电压放大倍数无论是单端输出还是双端输出都为零，共模抑制比为无穷大，不影响差模信号动态等效电路的分析；

对于带有调零电位器的差分放大电路，其电位器电阻同时会出现在差模信号动态等效电路中，相当于牺牲了一部分差模放大的能力来换取电路的对称性；

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

不要只是背下来!!!
根据前面讲的原理梳理一遍!!!

差分放大电路

差分放大电路总结

$$\begin{cases} \Delta u_{Id} = u_{I1} - u_{I2} \\ \Delta u_{Ic} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2} \end{cases} \quad u_O = U_O + A_c \Delta u_{Ic} + A_d \Delta u_{Id}$$

- ①静态工作点求解 —— 与一般的放大电路基本一致，注意每个电阻上流过的电流；
- ②根据两个端口的电位计算出共模输入量和差模输入量：
- ③对于共模电压放大倍数 A_c ，如果是双端输出，一定为 0；如果是单端输出，则绘制共模动态等效电路（注意共模信号的回路流过长尾电阻的动态电流是 2 倍，电阻等效为 $2R_e$ ）；如果是带有恒流源的差分放大电路，则无论双端输出还是单端输出均为 0；
- ④对于差模电压放大倍数 A_d ，双端输出时相当于单管共射放大倍数（负载中心点接地， $R_L / 2$ ）；单端输出时相当于单管共射放大倍数的一半，T1 侧输出反相放大，T2 侧输出同相放大；
- ⑤输入电阻与输出方式无关，只与输入回路有关；
- ⑥输出电阻双端输出为 2 倍集电极电阻，单端输出为 1 倍集电极电阻；
- ⑦对于带有调零电位器的差分放大电路，将电位器“拆分”为两部分分配给两侧，其余的分析思路均一致；

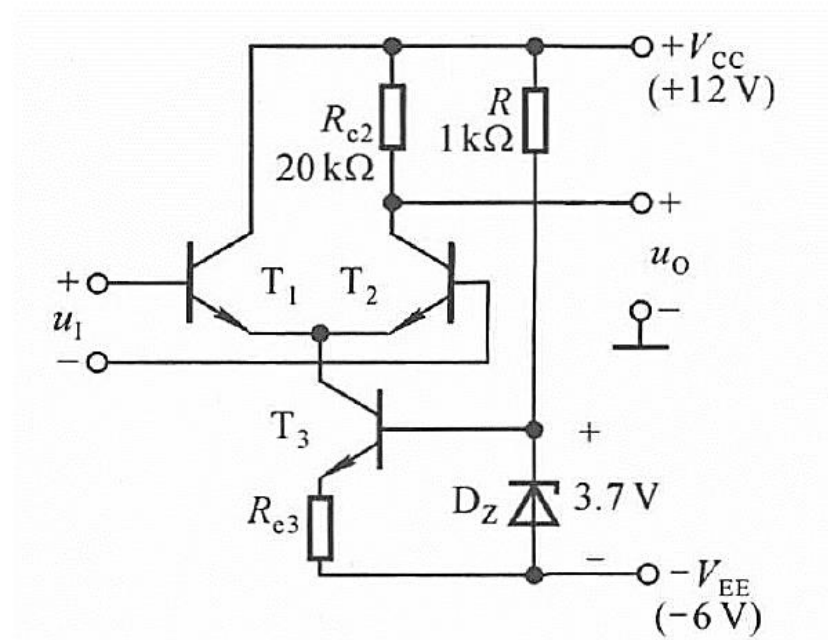
原作者：b站up主—这个ximo不太冷

差分放大电路

例 3

如图所示，电路参数理想对称，晶体管的 β 均为 80， $r_{be} \approx 7 \text{ k}\Omega$ ， $U_{BEQ} = 0.7 \text{ V}$ ； T_1 管和 T_2 管的发射极静态电流均为 0.3 mA ；假设电流源电路等效动态电阻（输出电阻）无穷大，试计算：

- (1) 电阻 R_{e3} 的大小；
- (2) 集电极静态电位 U_{CQ1} 和 U_{CQ2} ；
- (3) 动态参数 A_d ， A_c ， R_i ， R_o ；
- (4) 若直流信号 $u_I = 10 \text{ mV}$ ，则 $u_O = ?$



差分放大电路

例 4

电路如图所示， $V_{CC} = 12V$ ， $V_{EE} = 6V$ ， $R_{E1} = R_{E2} = 300\Omega$ ， $R_{C1} = R_{C2} = 5k\Omega$ ，晶体管 T_1 和 T_2 参数一致， $\beta = 100$ ， $r_{bb'} = 100\Omega$ ， $U_{BEQ} = 0.7V$ ；电流源的电流 I_0 为 $2mA$ ，试问：

- (1) 电流源的静态功耗；
- (2) 求解此电路的差模电压放大倍数 A_d ，共模电压放大倍数 A_c ，共模抑制比 K_{CMR} ，差模输入电阻 R_{id} ，输出电阻 R_o ；
- (3) 若此电路改为从 v_{O2} 侧单端输出，假设电流源的动态输出电阻无穷大，求解此电路的差模电压放大倍数 A_d ，共模电压放大倍数 A_c ，共模抑制比 K_{CMR} ，差模输入电阻 R_{id} ，输出电阻 R_o ；
- (4) (选做) 若此电路改为从 v_{O2} 侧单端输出，假设电流源的动态输出电阻 $r_o = 100k\Omega$ ，求解此电路的差模电压放大倍数 A_d ，共模电压放大倍数 A_c ，共模抑制比 K_{CMR} ，差模输入电阻 R_{id} ，输出电阻 R_o ；

