

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 10 多级放大电路

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

多级放大电路

○ 多级放大电路

在前面学习的各种放大电路中，每种电路都有各自的特点，性能具有各自的优点与缺点，例如共射放大电路（包括差分放大电路也是共射形式）具有较高的电压放大能力，但并不适合作功率放大电路，带负载能力不强；共集放大电路即射级输出器具有很大的输入电阻和很小的输出电阻，适合作为输出级驱动负载，但是其不具有电压放大能力；共基放大电路具有很宽的频带，然而其输入电阻非常小，导致其输入电压受信号源内阻影响很大；等等；因此单一的一级电路无法满足我们需要的很多综合性能，需要通过将不同的各级电路通过“级联”的形式，构成多级放大电路；

多级放大电路的级联即将每一级的输出信号作为下一级的输入信号，根据第二章放大电路有效放大的基本条件，除了各级的静态工作点要设置合适之外，要实现各级输入耦合和输出耦合，即信号的传递；因此，多级放大电路的一个重要问题是各级间的耦合方式；

多级放大电路

○ 多级放大电路的耦合方式

- 直接耦合 —— 各级直接相连； —————→ 实际应用中集成运放电路内部的耦合方式

低频特性好，能够传递缓慢的信号（甚至是直流信号）；易于集成，集成运放常用形式；

- 阻容耦合 —— 通过耦合电容相连； —————→ 练习题、考试题中常见形式（计算静态工作点独立）
- 变压器耦合 —— 通过变压器实现信号与能量传递；

阻容耦合和变压器耦合都无法传递缓慢的低频信号和直流信号，而且体积大，难以集成；

- 光电耦合 —— 以光信号为媒介实现信号与能量传递（光电转换）

实现电气隔离，抗干扰性能好，新型的集成运放；（了解即可）

多级放大电路

○ 直接耦合多级放大电路重点问题 —— 零点漂移（温漂）

- “温漂”的概念：

直接耦合放大电路各级是直接相连的，因此各级的静态工作点相互影响；因此，各级静态工作点的设置与稳定非常重要；

根据第二章静态工作点稳定部分的分析，影响静态工作点稳定最重要的因素是温度，当温度变化时，晶体管的特性参数会变化，温度的变化对于放大电路来说可以看作是一个缓慢的（低频的）干扰信号；由于直接耦合放大电路各级之间直接相连，低频的信号可以传递至下一级，干扰信号经过逐级放大作用，会对输出信号产生影响；

由于一般的情况是电路无动态输入量时输出为零，因此，由于温度引起的静态工作点的偏移即静态输出电压的偏移也称为“零点漂移”、“温漂”；解决温漂是直接耦合多级放大电路最重要的问题之一；

多级放大电路

○ 直接耦合多级放大电路重点问题 —— 零点漂移（温漂）

- 解决“温漂”的方法：

- ①引入直流负反馈，例如第二章的静态工作点稳定电路中的发射极电阻（与其旁路电容）；

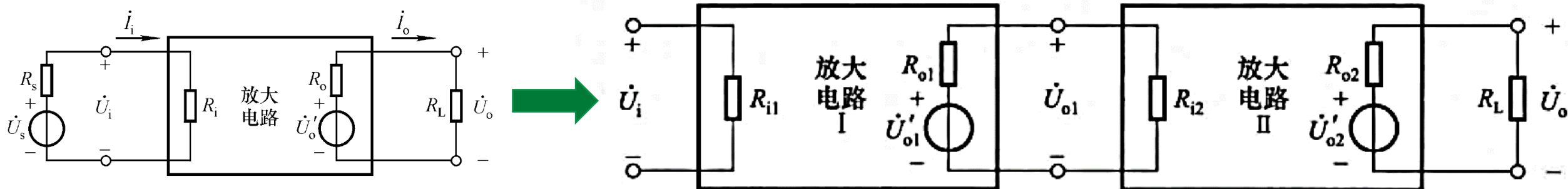
- ②利用差分放大电路“抑制共模，放大差模”，对于两个特性相同的晶体管，温度的变化对于两侧相当于大小极性相同的干扰信号，即共模信号；因此，常见的实用集成运放的第一级往往是差分放大电路，并往往采用电流源电路来提高其共模抑制比；

- ③利用温度补偿元件（如二极管、热敏电阻等）来进行补偿调节；（了解，教材 P88）

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！

多级放大电路

多级放大电路的动态分析 —— 前后级的相互关系



多级放大电路级联的特点是每一级的输出信号作为下一级的输入信号，只考虑电压信号的放大关系：

电压放大倍数：多级放大电路的电压放大倍数为各级电压放大倍数的相乘；

回顾第二章输入电阻、输出电阻的概念和理解：

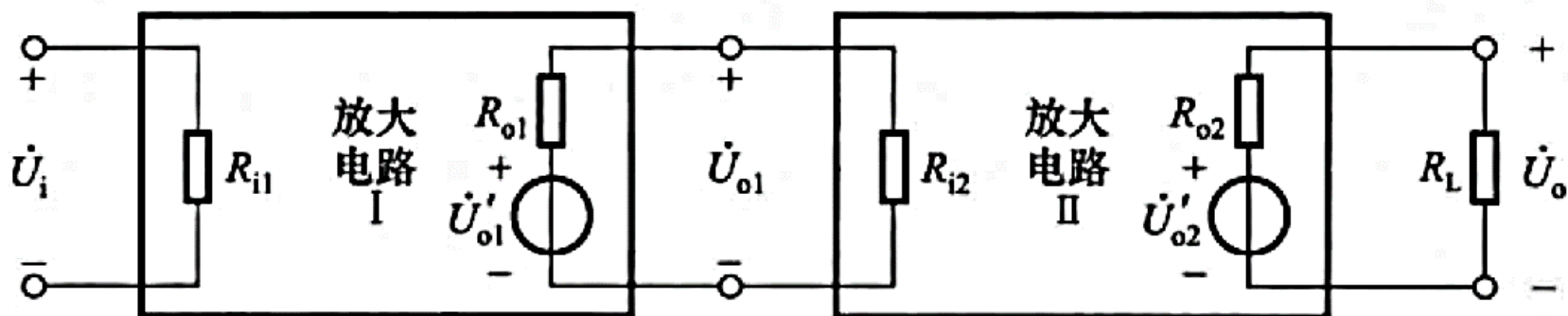
前级的输出电阻对后级来说相当于信号源内阻，后级的输入电阻对前级来说相当于负载；

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！

多级放大电路

多级放大电路的动态分析 —— 前后级的相互关系



再次理解“带负载能力”：

两个放大电路级联，实质上可以看作一个带有信号源内阻的电压源接一个负载；每个放大电路空载时的输出电压最高（对应理想电压源），当后级接有放大电路或者负载电阻时，其电压放大倍数一定会相对空载时有衰减，即输出电压是负载上的分压；前级的输出电阻越小（即信号源内阻越小），后级的输入电阻越大（即负载越大），那么输出电压越接近空载时电压，越稳定；

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

多级放大电路

○ 多级放大电路的动态分析过程

多级放大电路的动态分析即动态参数计算是非常重要的题型与考点，也是难点和易错点，下面给出平时分析时的思路过程和一些细节习惯：

Step 1：初步判断级数与各级的类型（接法）；

Step 2：画出整个放大电路的交流等效电路（注意接地点），注意养成习惯标注每个晶体管的 b、c、e，绘制等效电路时 b-e 之间为小电阻 r_{be} ，c-e 之间为受控电流源；

Step 3：在交流等效电路中做出各级分割线；
(分割线也可以在第一步就划分好，个人习惯认为交流通路中更清晰)

Step 4：列写电压放大倍数、输入电阻、输出电阻的表达式；注意最后求解的参数是整体的；

多级放大电路

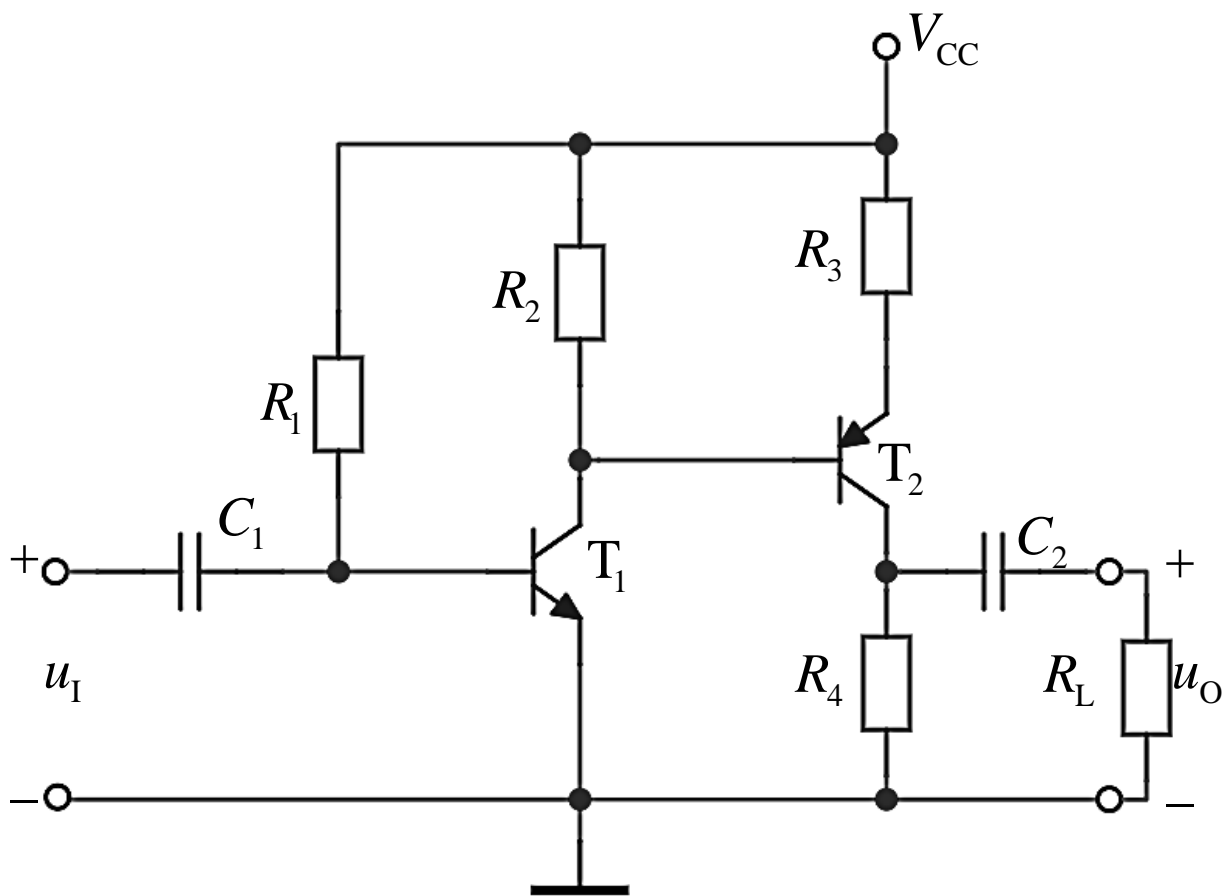
○ 多级放大电路的动态分析过程 —— 各级划分与判断

动态分析过程中的第一步非常关键，首先级数要判断正确，多级放大电路中并不是每个晶体管的作用都是作为放大电路，例如电流源电路中学习的作为恒流源偏置和有源负载等；另外，划分好各级后，要对各级的类型即接法判断正确，一方面回顾第二章学习的几种基本的单管放大电路的动态参数求解结果；另一个重要的方面是，判断类型能够对输入电阻、输出电阻的求解有了一个初步的把握：在第二章对三种基本接法的总结中，共射、共基的输入电阻与输出侧项无关、输出电阻与输入侧项无关，而共集的输入电阻与输出侧项有关、输出电阻与输入侧项有关；因此，例如，共射或共基作为第一级时，输入电阻一定与后级的电路无关；同理，共射或共基作为最后一级时，其输出电阻一定与前级的电路无关；再同理，存在共集放大电路时求解输入电阻与输出电阻要注意是否含有前后级的项；

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！

多级放大电路

多级放大电路的动态分析实例 —— 共射+共射



T1：基极输入，集电极输出（NPN）
T2：基极输入，集电极输出（PNP）
因此两级电路，类型为“共射+共射”；

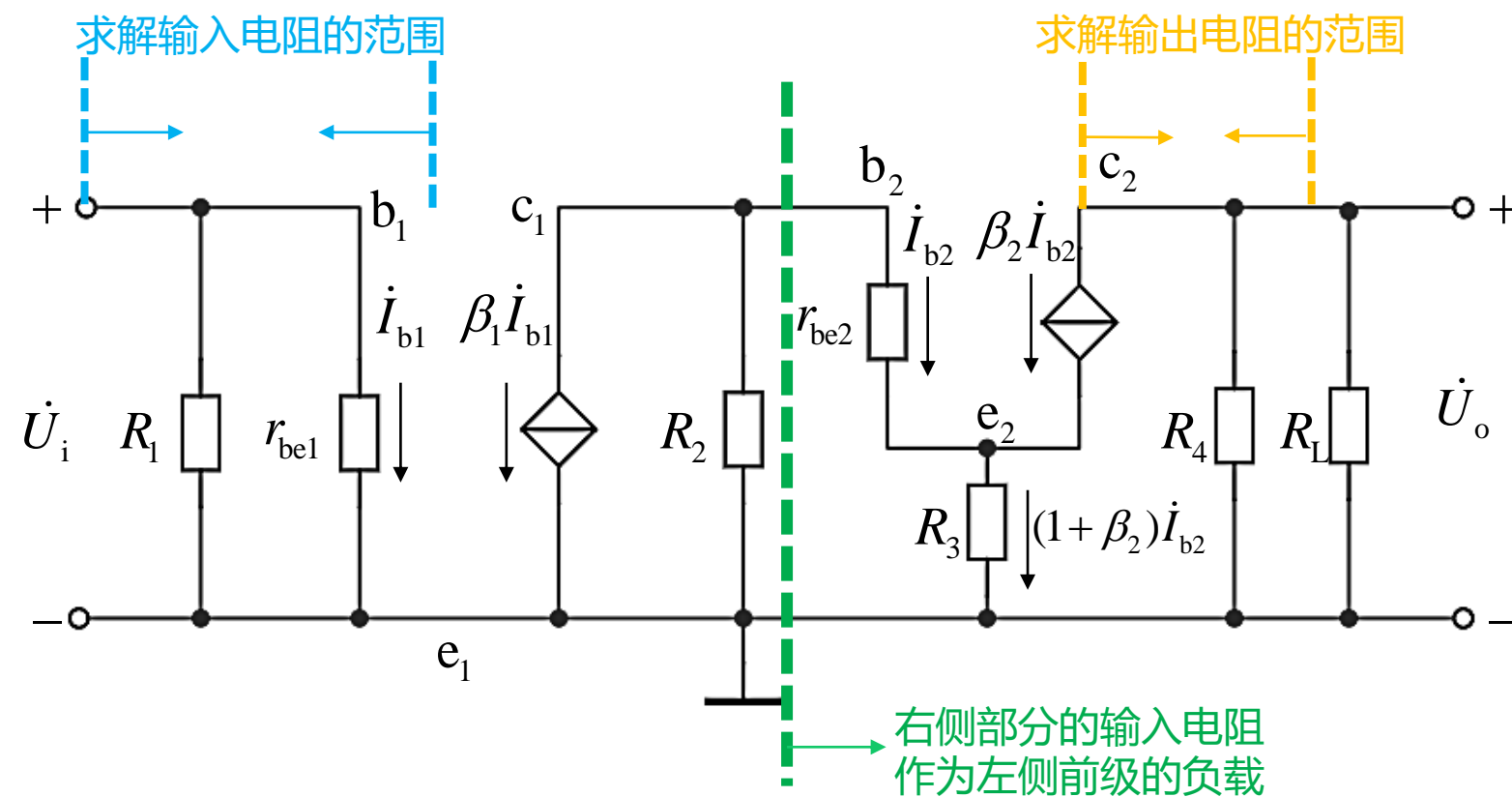
因此初步判断，后面求解输入电阻与输出电阻时，
求解输入电阻与 T1 c 侧往右的项无关；
求解输出电阻与 T2 c 侧往左的项无关；

寻找共地点：
 V_{CC} 接地，T1 发射极接地，T2 发射极通过发射极电阻 R_4 接地；

思考：
可不可以把两级划分线向左平移，把 R_2 归给第二级？
(可以，表达式与划分线对应即可，没有绝对的要求)

多级放大电路

多级放大电路的动态分析实例 —— 共射+共射



①电压放大倍数为各级乘积，
注意第一级的负载是第二级的输入电阻：

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = \frac{-\beta_1(R_2 // R_{L1})}{r_{be1}} \cdot \frac{-\beta_2(R_4 // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2)R_3}$$

其中， $R_{L1} = R_{i2} = r_{be2} + (1 + \beta_2)R_3$

②根据前面的分析，
输入电阻只需求解第一级共射的输入电阻：

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

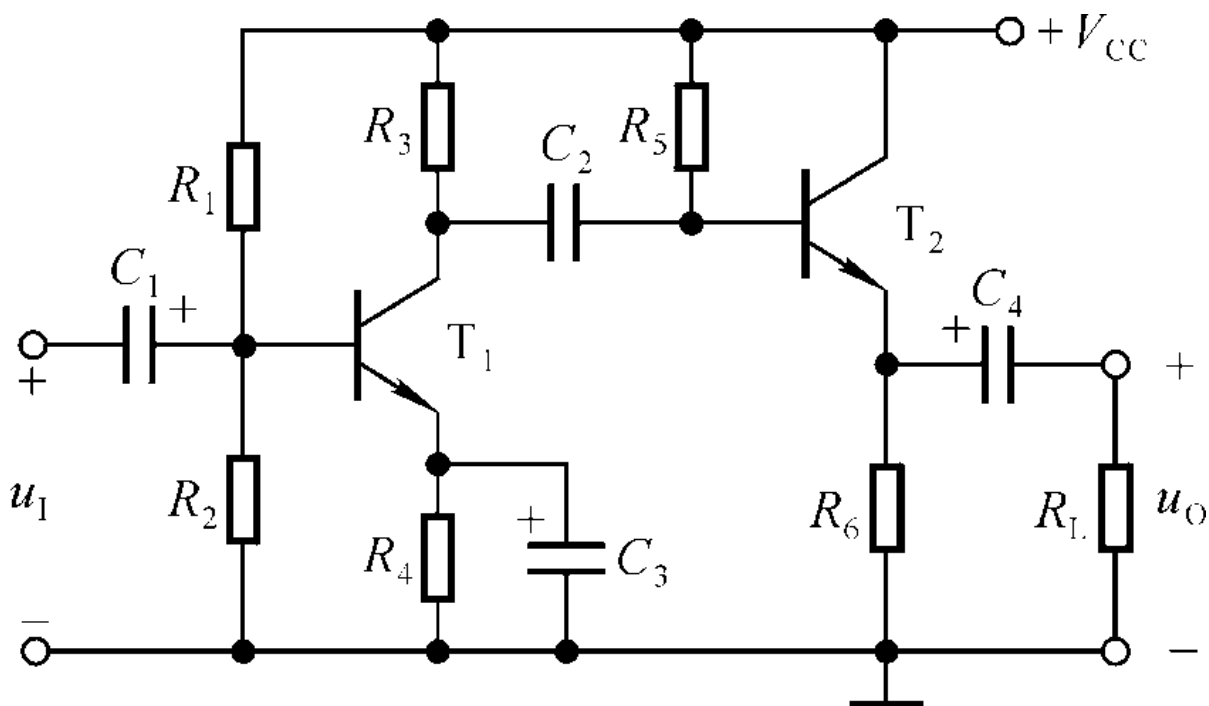
③根据前面的分析，
输出电阻只需求解第二级共射的输出电阻：

原作者：b站up主 $R_o = R_4$ 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！

多级放大电路

多级放大电路的动态分析实例 —— 共射+共集



T1：基极输入，集电极输出

T2：基极输入，发射极输出

因此两级电路，类型为“共射+共集”；

因此初步判断，后面求解输入电阻与输出电阻时，
求解输入电阻与 T1 c 侧往右的项无关；

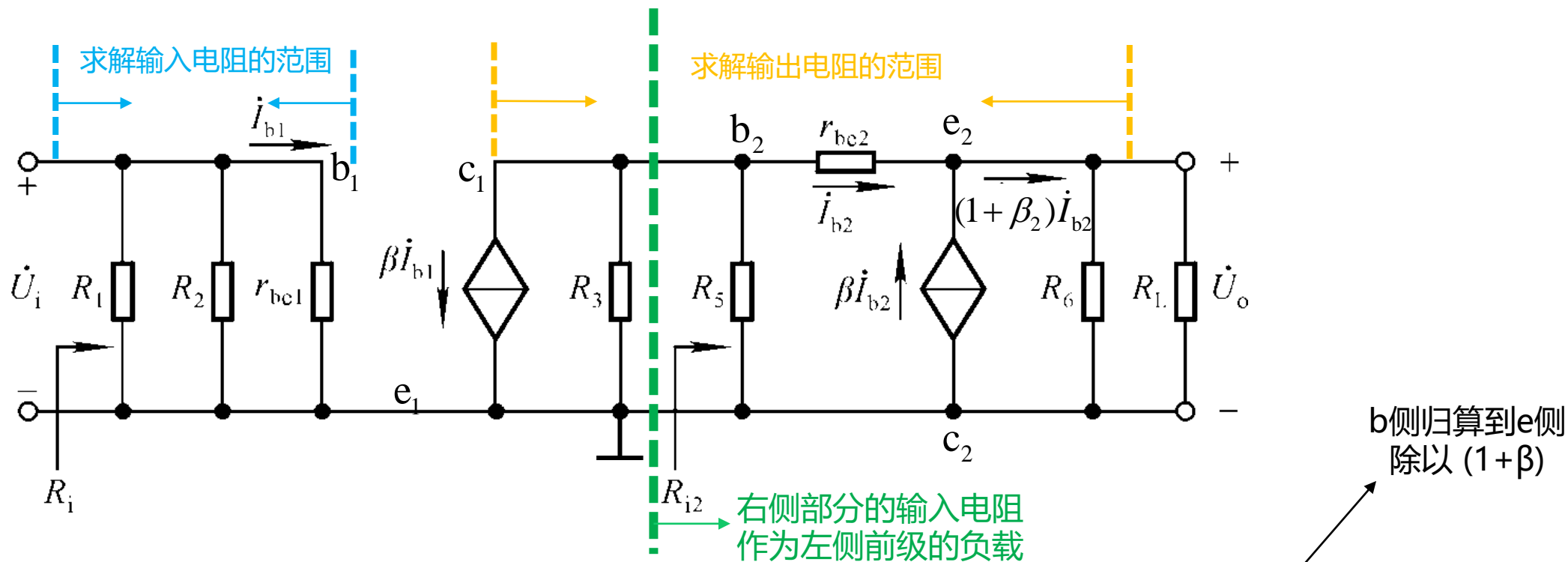
求解输出电阻与 T2 e 侧往左的项有关，即与第一级的电阻有关；

寻找共地点：

V_{CC} 接地，T1 发射极接地，T2 集电极接地；

多级放大电路

多级放大电路的动态分析实例 —— 共射+共集



$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = \frac{-\beta_1 (R_3 // R_{L1})}{r_{be1}} \cdot \frac{(1 + \beta_2) (R_6 // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2) (R_6 // R_L)}$$

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

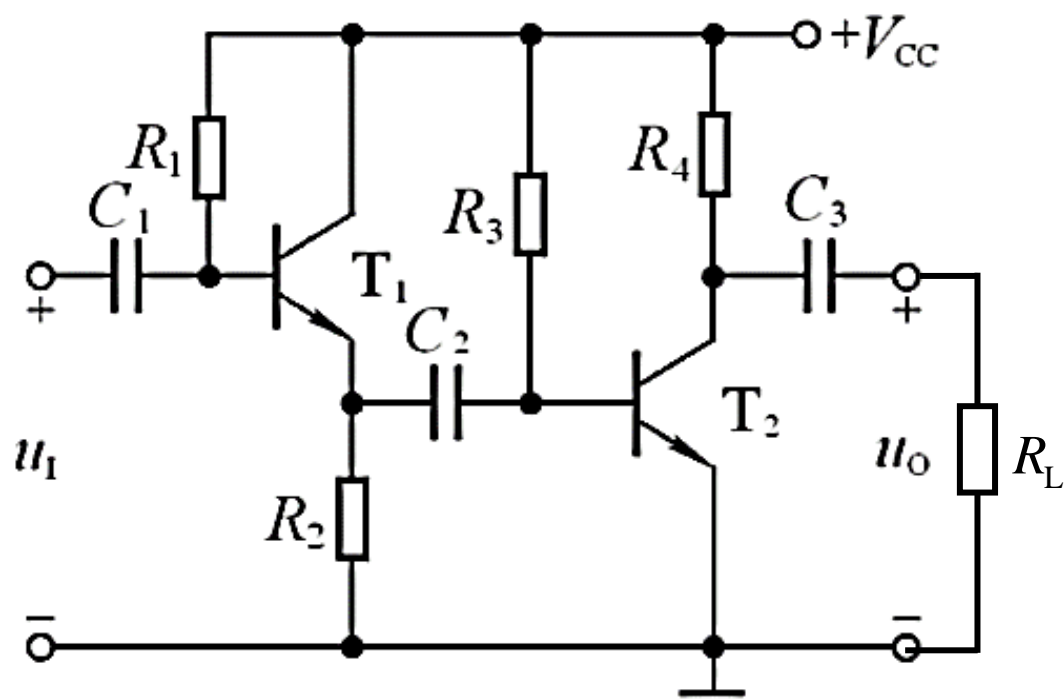
$$R_i = R_1 // R_2 // r_{be1}$$

$$R_o = \frac{(R_3 // R_5) + r_{be2}}{1 + \beta_2} // R_6$$

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！

多级放大电路

○ 多级放大电路的动态分析实例 —— 共集+共射



T1：基极输入，发射极输出

T2：基极输入，集电极输出

因此两级电路，类型为“共集+共射”；

因此初步判断，后面求解输入电阻与输出电阻时，
求解输入电阻与 T1 e 侧往右的项有关，即与第
二级的电阻有关；

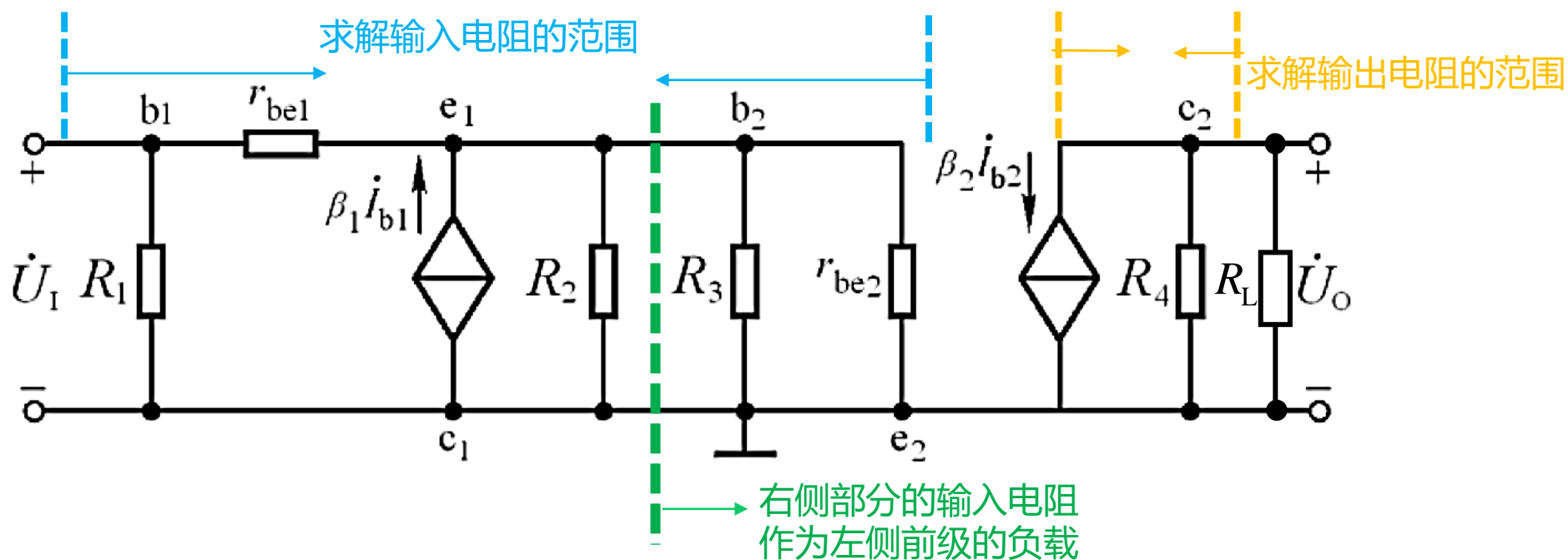
求解输出电阻与 T2 c 侧往左的项无关；

寻找共地点：

V_{CC} 接地，T1 集电极接地，T2 发射极接地；

多级放大电路

多级放大电路的动态分析实例 —— 共集+共射



$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = \frac{(1 + \beta_1)(R_2 // R_{L1})}{r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_2 // R_{L1})} \cdot \frac{-\beta_2(R_4 // R_L)}{r_{be2}}$$

其中， $R_{L1} = R_{i2} = R_3 // r_{be2}$

$$R_i = [(1 + \beta_1)(R_2 // R_3 // r_{be2}) + r_{be1}] // R_1$$

$$R_o = R_4$$

e侧归算到b侧
乘以 $(1 + \beta)$

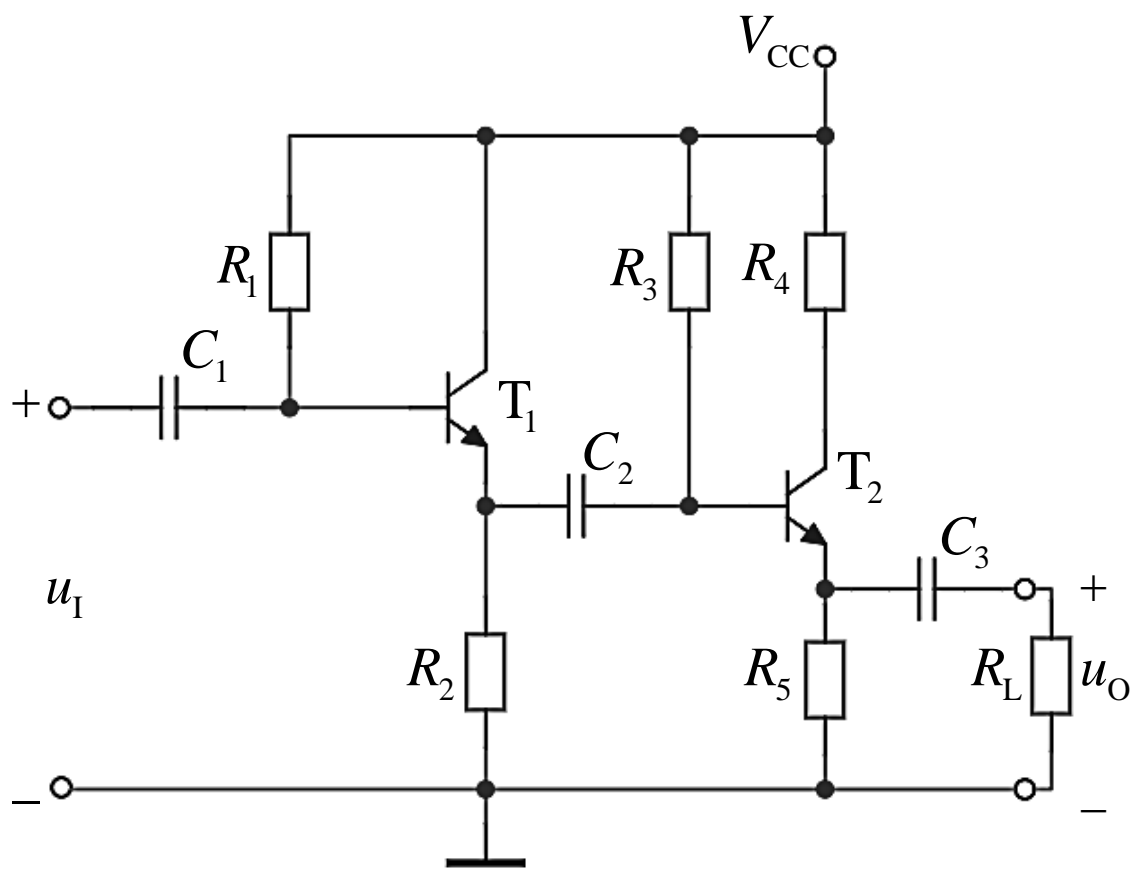
请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

多级放大电路

思考：

其实这个例子的第二级电路并不合理，这里只是为了计算练习，
回顾第二章，这样的三电阻电路静态工作点有什么缺陷？
(静态管压降小，靠近饱和区)

多级放大电路的动态分析实例 —— 共集+共集



T1：基极输入，发射极输出

T2：基极输入，发射极输出

因此两级电路，类型为“共集+共集”；

因此初步判断，后面求解输入电阻与输出电阻时，
求解输入电阻与 T1 e 侧往右的项有关；即与第二级
的电阻有关；

求解输出电阻与 T2 e 侧往左的项有关，即与第一级
的电阻有关；

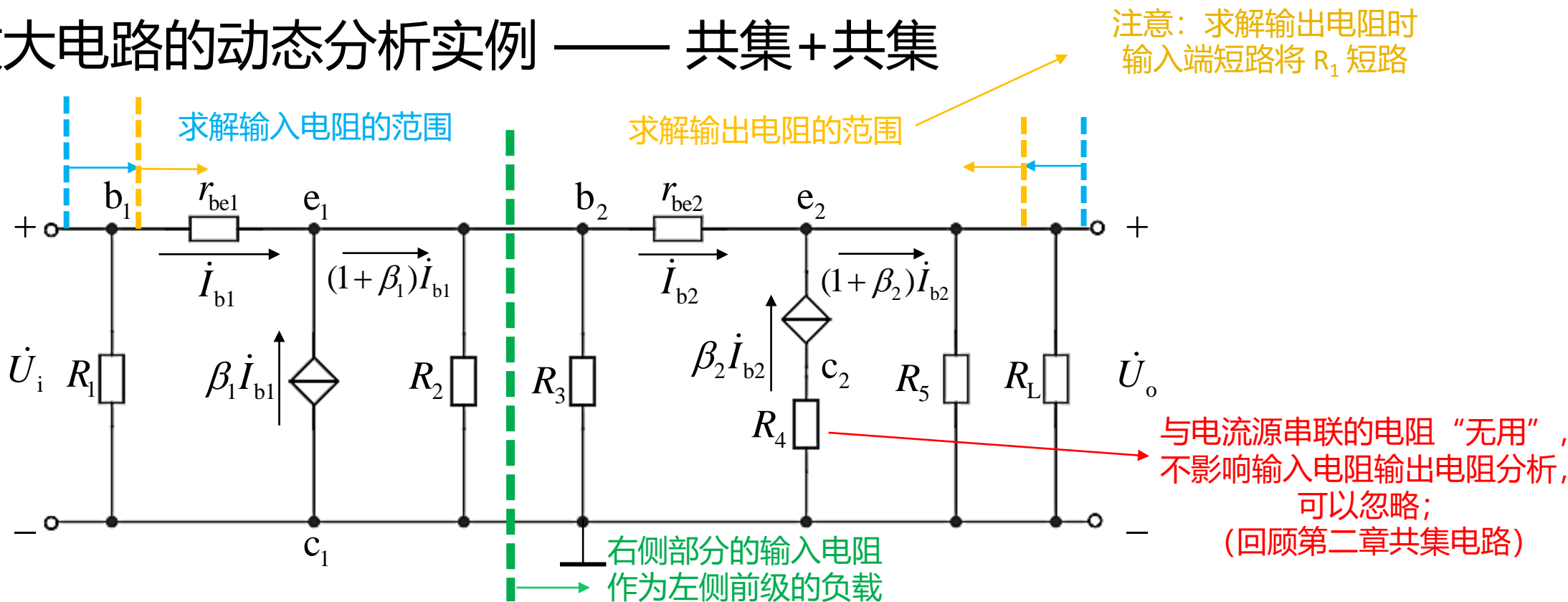
寻找共地点：

V_{CC} 接地，T1 集电极接地，T2 集电极经集电极电阻 R_4 接地；

原作者：b站up主——这个ximo不太冷

多级放大电路

多级放大电路的动态分析实例 —— 共集+共集



$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = \frac{(1 + \beta_1)(R_2 // R_{L1})}{r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_2 // R_{L1})} \cdot \frac{(1 + \beta_2)(R_5 // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_5 // R_L)}$$

其中， $R_{L1} = R_{i2} = R_3 // [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_5 // R_L)]$

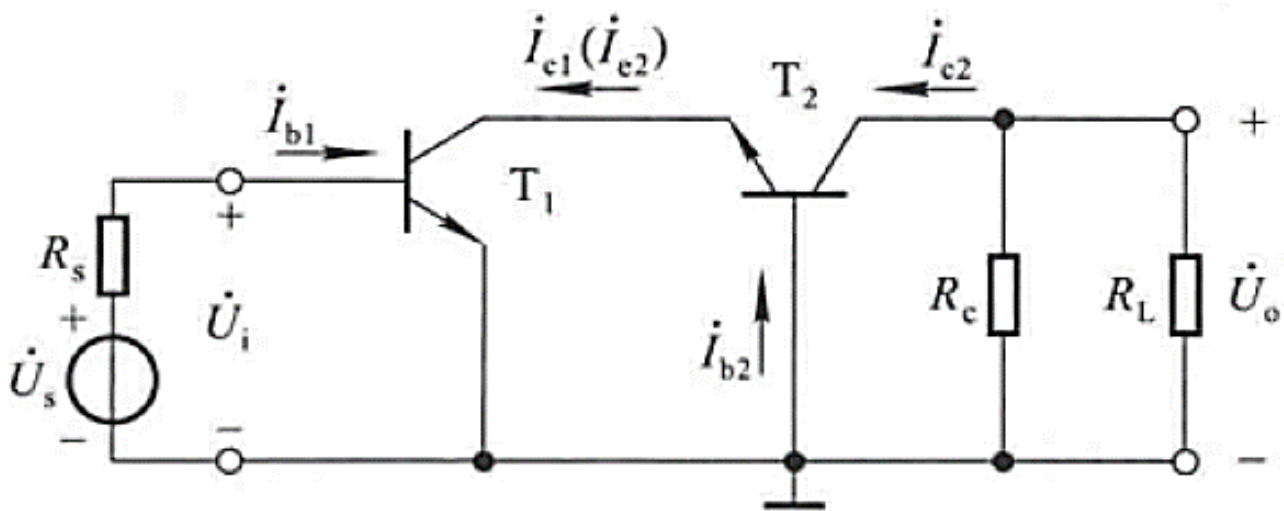
$$R_i = ((1 + \beta_1)((1 + \beta_2)(R_5 // R_L) + r_{be2}) // R_3 // R_2) + r_{be1} // R_1$$

$$R_o = \frac{(\frac{r_{be1}}{1 + \beta_1} // R_2 // R_3) + r_{be2}}{1 + \beta_2} // R_5$$

e侧归算到b侧乘以 $(1 + \beta)$
 b侧归算到e侧除以 $(1 + \beta)$

多级放大电路

○ 多级放大电路的动态分析实例 —— 共射—共基电路



事实上共射—共基电路在本教材中被归到第二章单管放大电路的派生电路，因为是两个晶体管直接相连，视为一级电路；

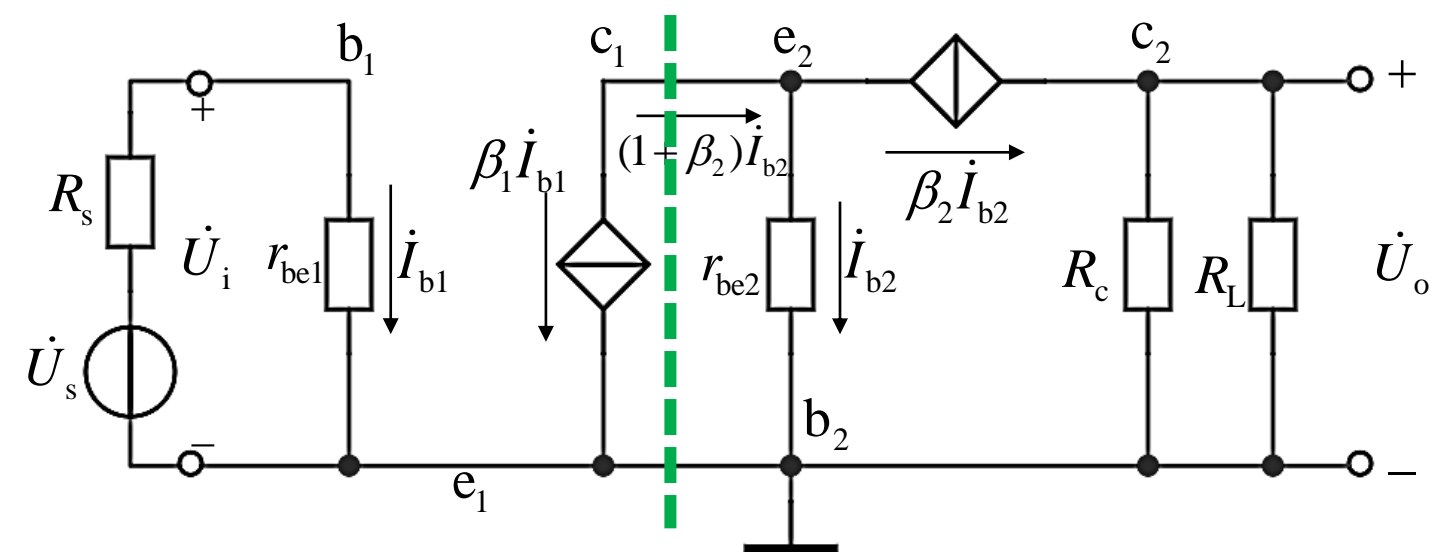
而分析的思路和方法与多级放大电路一致，因此归到本章来分析；

如图，T1 基极输入，集电极输出，T1 的集电极输出直接连接 T2 的发射极输入，T2 集电极输出，因此为共射—共基接法；

共基与共射类似，有着输入电阻与输出侧无关，输出电阻与输入侧无关的特点；

多级放大电路

多级放大电路的动态分析实例 —— 共射—共基电路



$$A_u = \frac{-\beta_1 R_{L1}}{r_{be1}} \cdot \frac{\beta_2 (R_c // R_L)}{r_{be2}}$$

其中， $R_{L1} = R_{i2} = \frac{r_{be2}}{1 + \beta_2}$

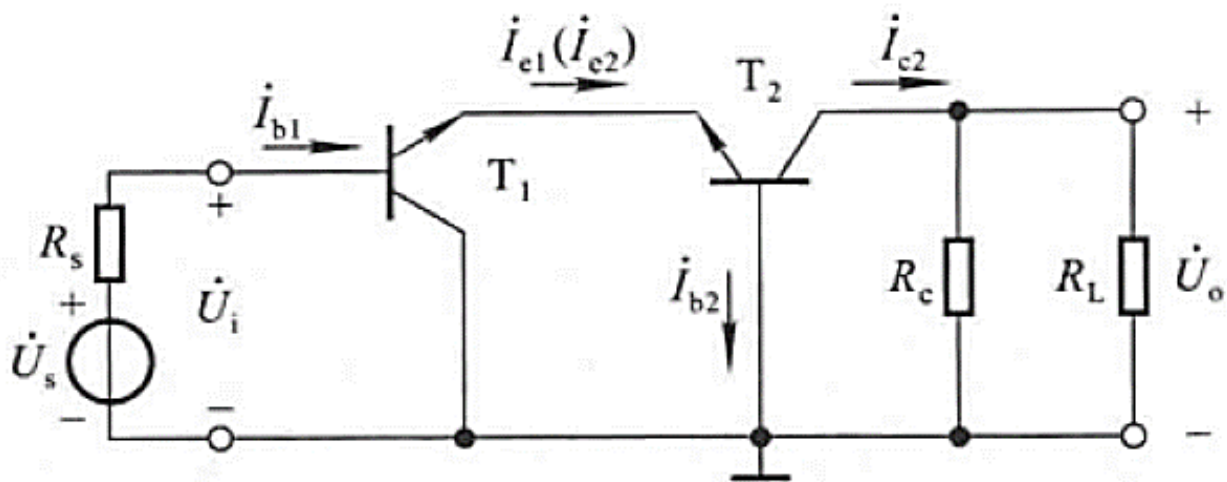
因此， $A_u = \frac{-\beta_1 (R_c // R_L)}{r_{be1}} \cdot \frac{\beta_2}{1 + \beta_2} \approx \frac{-\beta_1 (R_c // R_L)}{r_{be1}}$

$$R_i = r_{be1} \quad R_o = R_c$$

可以看到，虽然共射与共基都有一定的电压放大能力，但是共射—共基两级的电压放大倍数却只相当于单管的电压放大倍数，从级联的角度，第二级共基的输入电阻很小，而第二级的输入电阻是第一级的负载，因此很大程度衰减了电压放大倍数；

多级放大电路

○ 多级放大电路的动态分析实例 —— 共集—共基电路



如图，T1 基极输入，发射极输出，T1 的发射极输出直接连接 T2 的发射极输入，T2 集电极输出，因此为共射—共基接法；

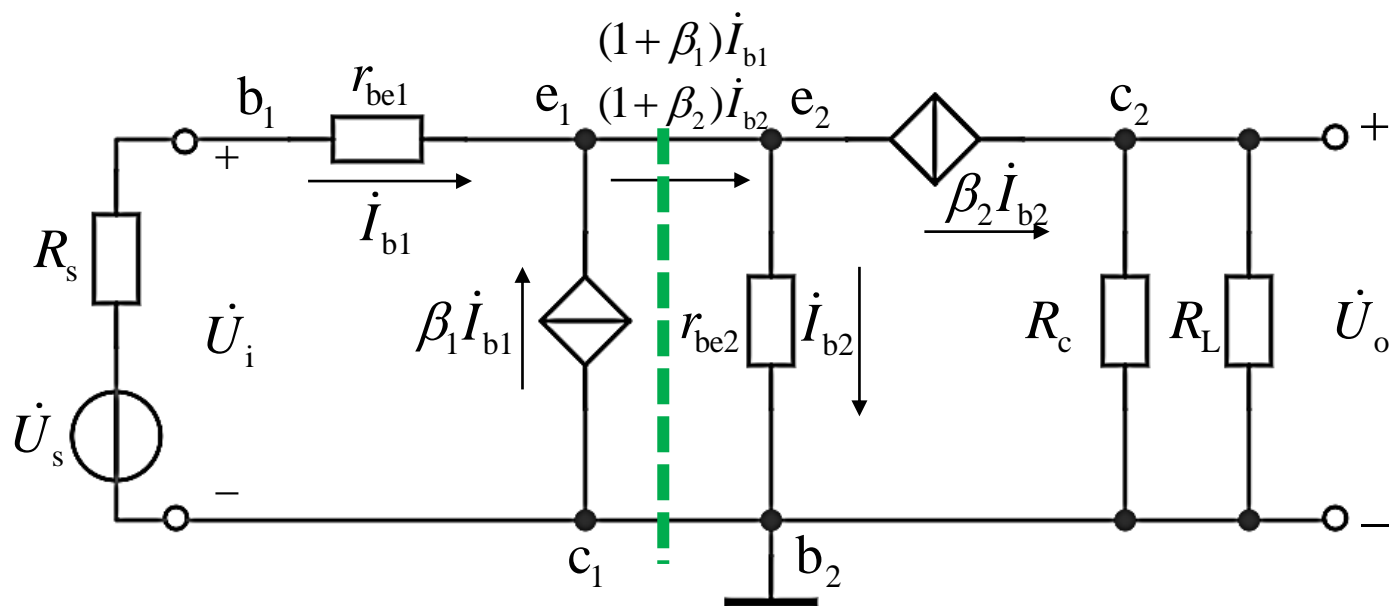
共基与共射类似，有着输入电阻与输出侧无关，输出电阻与输入侧无关的特点；

采用复合接法能够结合共集电路输入电阻大和共基频带宽的优点；

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！

多级放大电路

多级放大电路的动态分析实例 —— 共集—共基电路



$$A_u = \frac{(1+\beta_1)R_{L1}}{r_{be1} + (1+\beta_1)R_{L1}} \cdot \frac{\beta_2(R_c // R_L)}{r_{be2}}$$

其中， $R_{L1} = R_{i2} = \frac{r_{be2}}{1+\beta_2}$

$$R_i = r_{be1} + (1+\beta_1)R_{L1} = r_{be1} + \frac{1+\beta_1}{1+\beta_2}r_{be2}$$

$$R_o = R_c$$

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！

注意：

复习时一定要不要直接背前面例子的结果，
而是要自己独立地过一遍！

多级放大电路

○ 多级放大电路的动态分析小结

对于典型考察形式——两级放大电路，判断好放大电路各级类型后，回顾第二章的内容，把握每一级的特点；注意列写前级的电压放大倍数时，其负载用后级的输入电阻代替；

求解输入电阻，在输入端口处从左往右看（不包括信号源内阻），看到哪里？看到共射或共基的输入-输出侧分界线处，把电阻逐个从右向左等效；

求解输出电阻，将电压源短路（保留信号源内阻），外施电源，保留受控电流源，在输出端口处从右往左看（不包括负载），看到哪里？看到共射或共基的输入-输出侧分界线处，把电阻逐个从左向右等效；

电阻等效时注意 e 侧归算到 b 侧乘以 $(1 + \beta)$ ；b 侧归算到 e 侧除以 $(1 + \beta)$ ；

多级放大电路

例

电路如图所示，已知晶体管 $T_1 \sim T_7$ 的电流放大系数为 $\beta_1 \sim \beta_7$ ，且 $\beta_1 = \beta_2$ 、 $\beta_4 = \beta_6$ 、 $\beta_5 = \beta_7$ ； $T_1 \sim T_7$ 的b-e间动态电阻为 $r_{be1} \sim r_{be7}$ ，且 $r_{be1} = r_{be2}$ 、 $r_{be4} = r_{be6}$ 、 $r_{be5} = r_{be7}$ ；静态时设 $T_1 \sim T_7$ 的 U_{BEQ} 和二极管的导通电压 U_D 均为 $0.7V$ ，输出电压为 0 。回答下列问题：

- (1) 图示电路是几级放大电路？各级分别是哪种基本放大电路？ R_3 、 D_1 、 D_2 的作用是什么？
- (2) 静态时 U_{CQ3} 和 U_{BQ6} 各为多少？
- (3) 若 $R_3 = 200\Omega$ ， $R_4 = 15k\Omega$ ， $V_{CC} = 24V$ ，则 T_3 的静态集电极电流约为多少？
- (4) 若静态时输出电压稍微偏离 $0V$ ，则应调整哪个元件参数？若静态时输出电压远离了 $0V$ ，则应调整哪个元件参数？
- (5) 此电路的电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的表达式。

