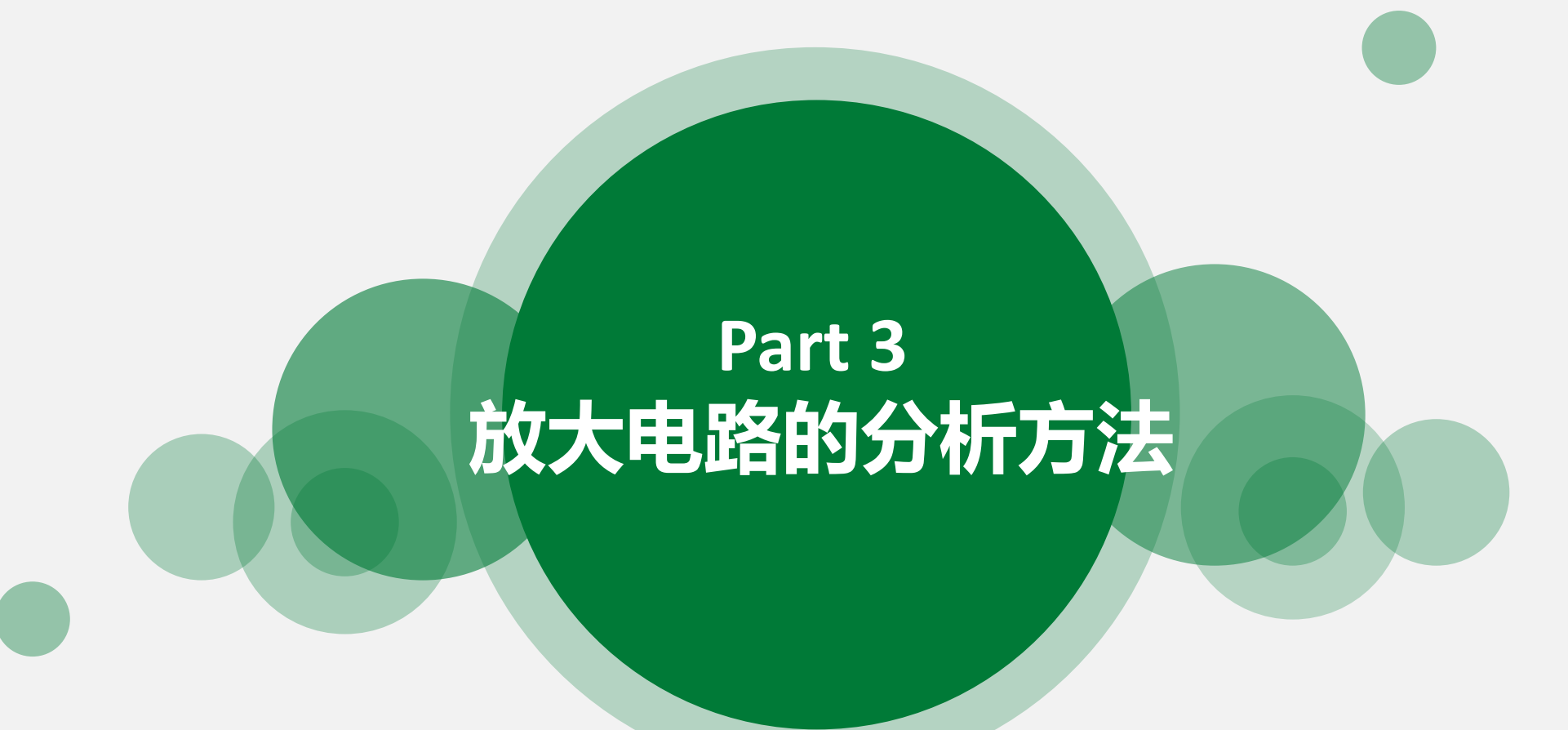


请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！



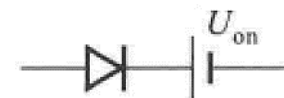
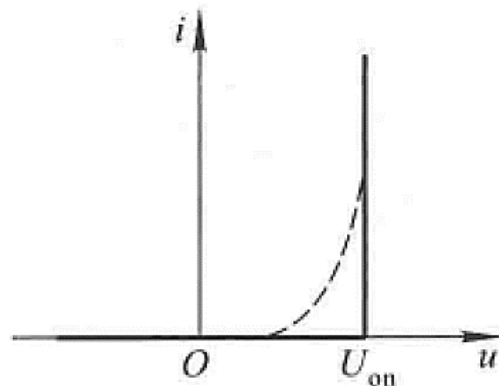
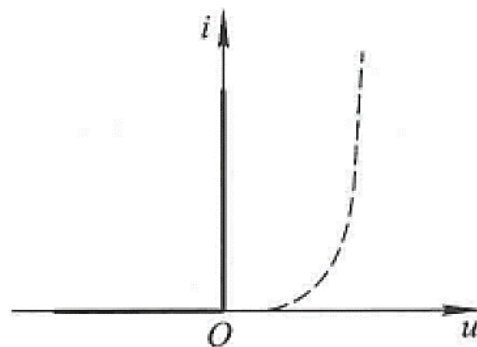
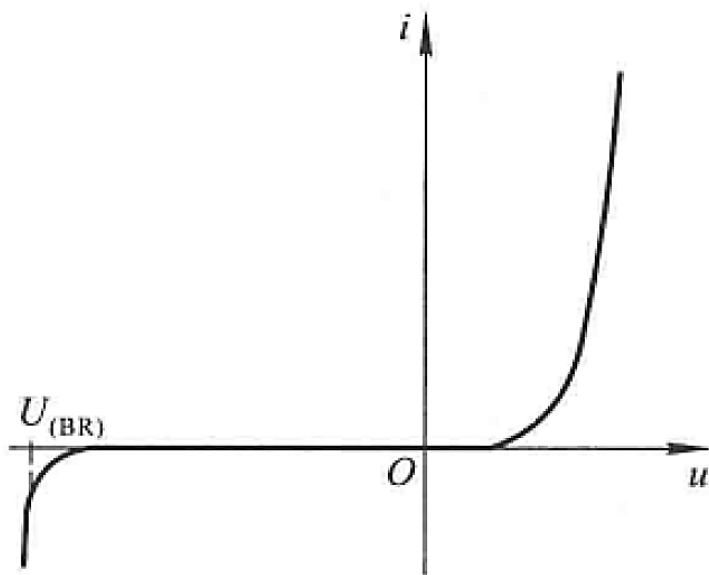
Part 3 放大电路的分析方法

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！

回顾：二极管

○ 二极管的工作特性



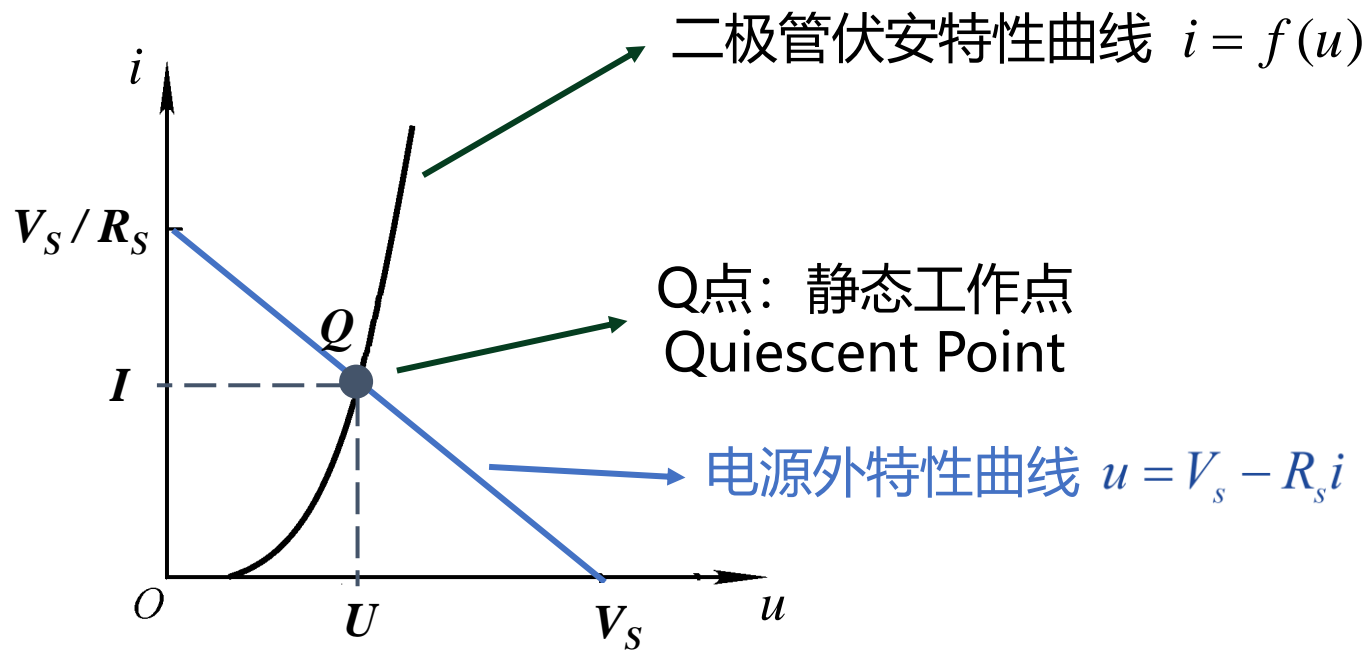
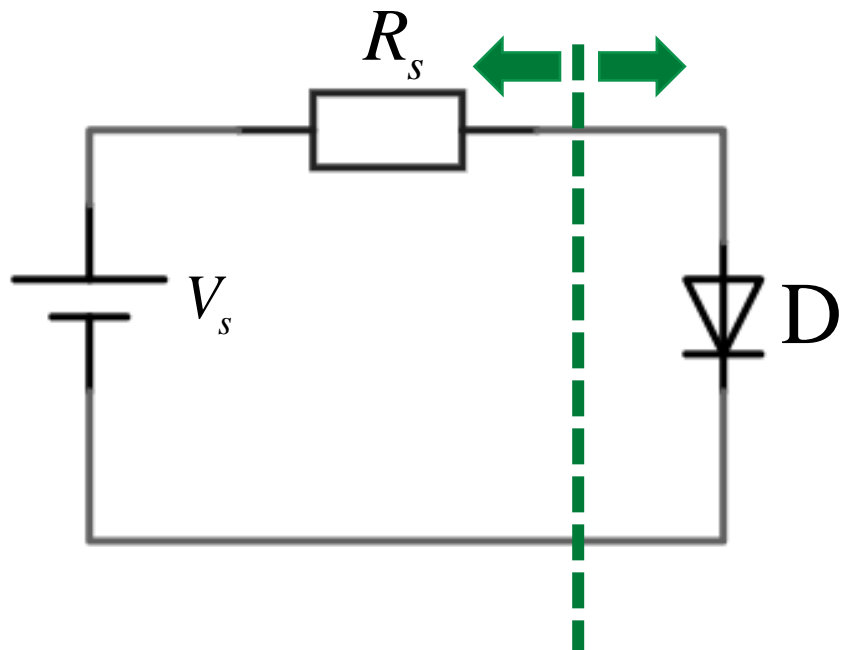
电流 - 电压不再满足线性的欧姆定律，为**非线性器件**

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！

二极管的微变等效电路

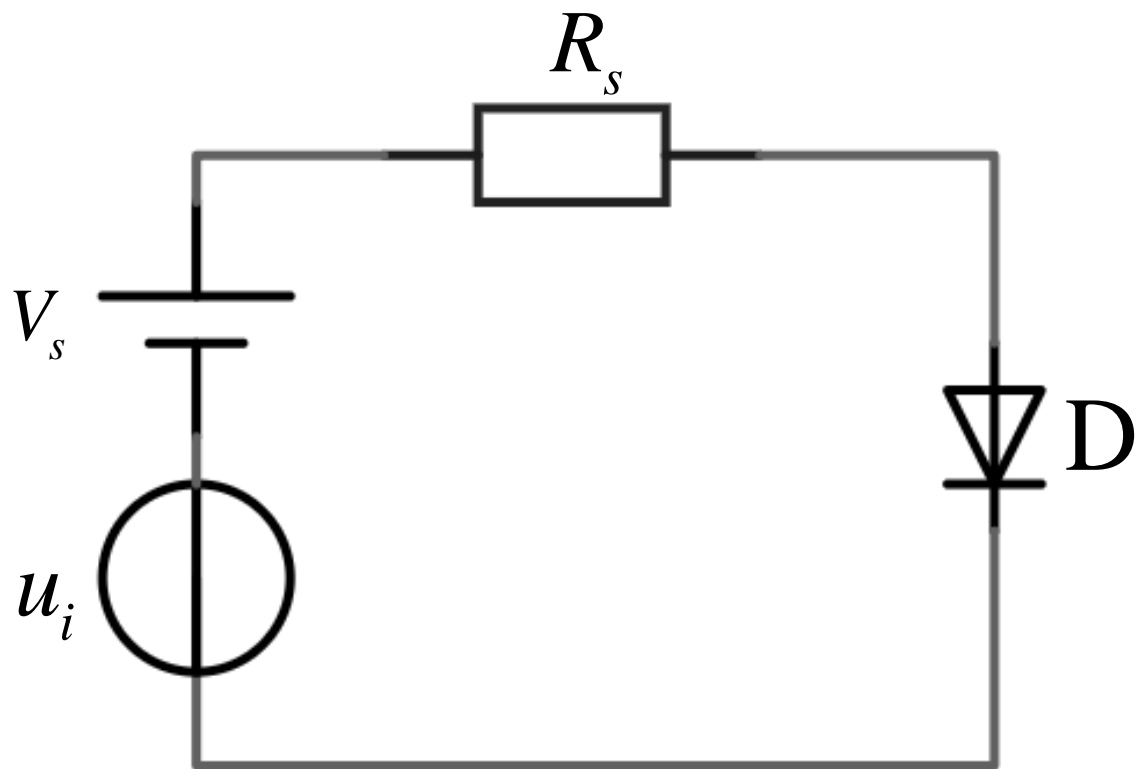
非线性电路的分析方法——图解法



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！

二极管的微变等效电路

○ 非线性电路的分析方法——小信号分析法



思考：
在分析此电路时，
能否直接应用电路理论中学习的叠加原理？

二极管的微变等效电路

○ 小信号分析法——静态与动态的概念

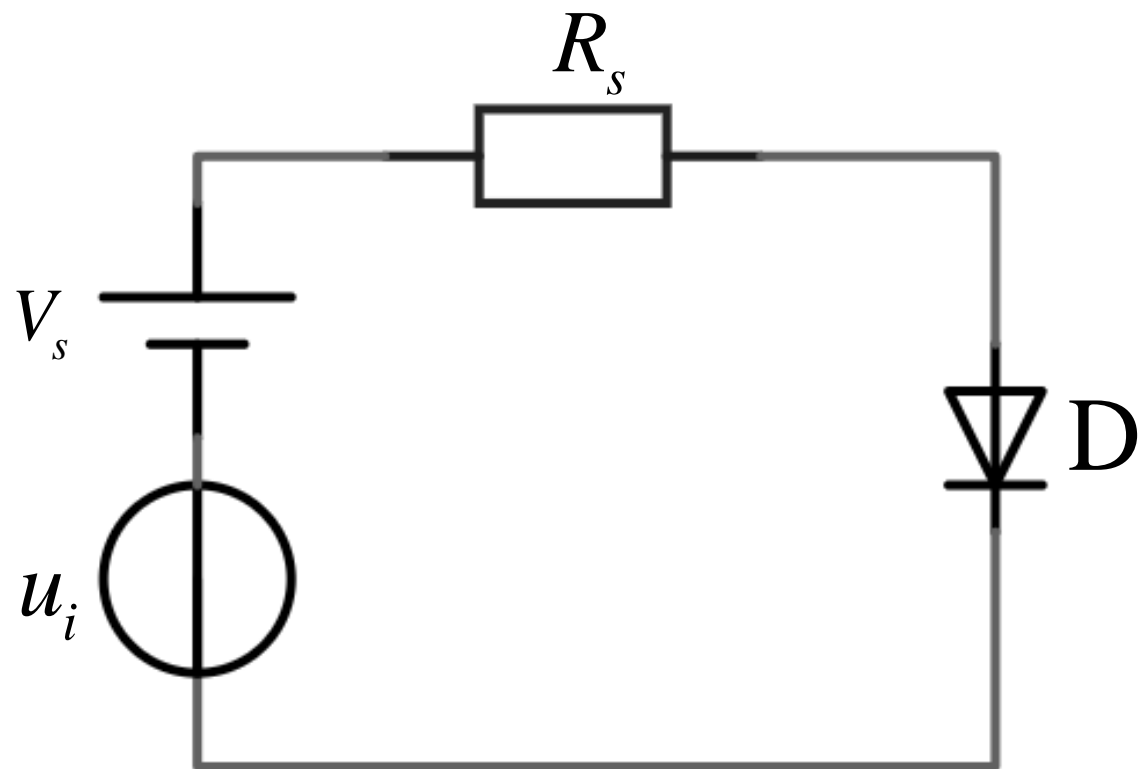
静态——特定的、不变化的状态；对一个电路系统，输入量恒定，则输出量恒定，这样一个特定的状态称作静态（稳态）；

静态的物理量通常用下标 Q 表示，代表 quiescent，静止；

动态——某一物理量发生一定变化时，导致其他参量随之发生一定的变化的状态；通常动态是对在静态基础上的变化量（扰动量）的描述；

二极管的微变等效电路

○ 非线性电路的分析方法——小信号分析法



小信号分析法的基本思想：

小信号输入单独作用时，
将小信号输入看作是静态工作点附近的扰动

对小信号响应**线性化处理**，
可以得到静态工作点处对应的动态电阻/电导
进而得到小信号等效电路（线性）

全响应即为静态工作点与小信号响应的叠加

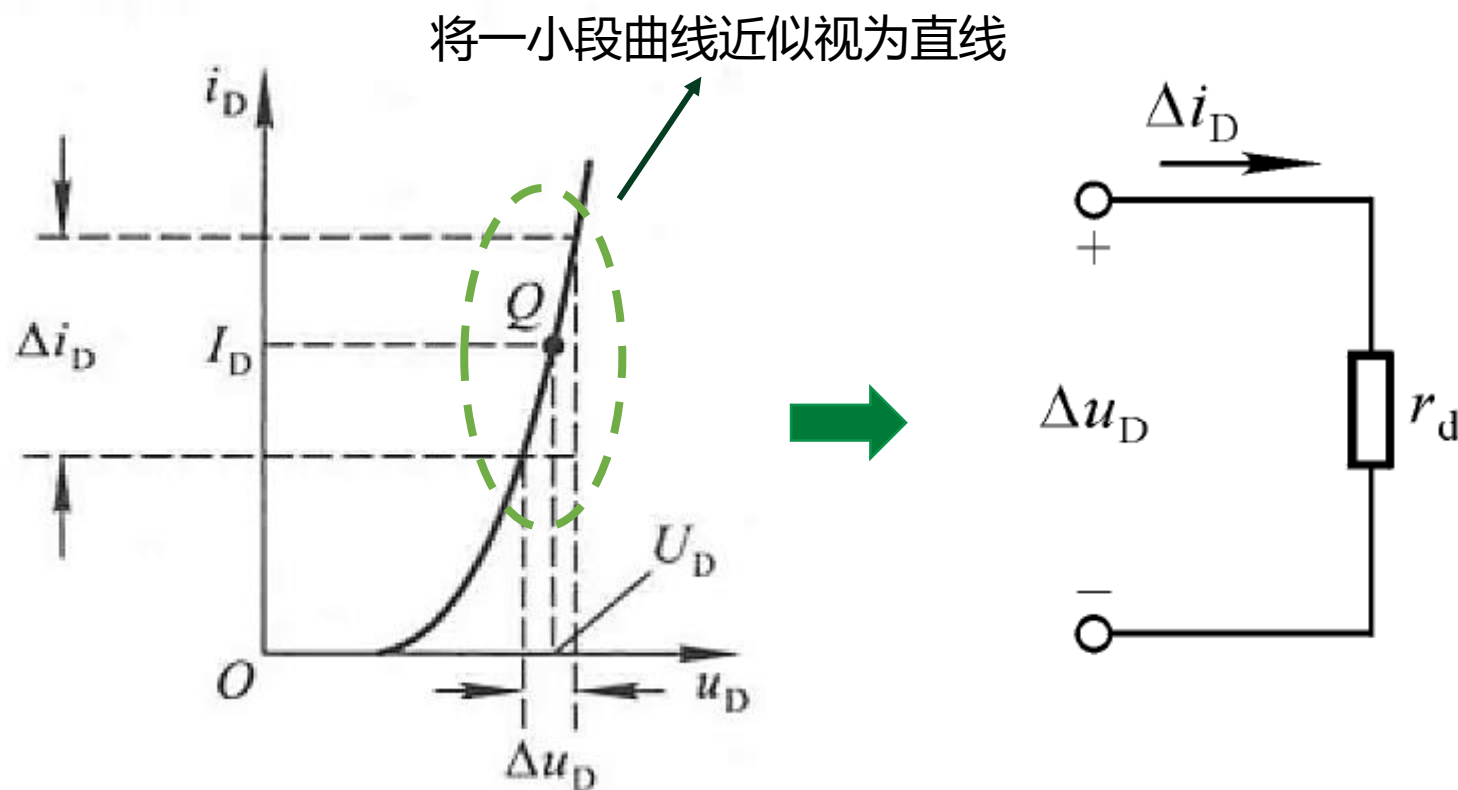
对小信号分析法的概括 —— 静态叠加动态

二极管的微变等效电路

○ 二极管的小信号等效电路模型（微变等效电路模型）

静态电阻 $R = \frac{U}{I}$

动态电阻 $r = \left. \frac{\Delta u}{\Delta i} \right|_{u=U, i=I}$

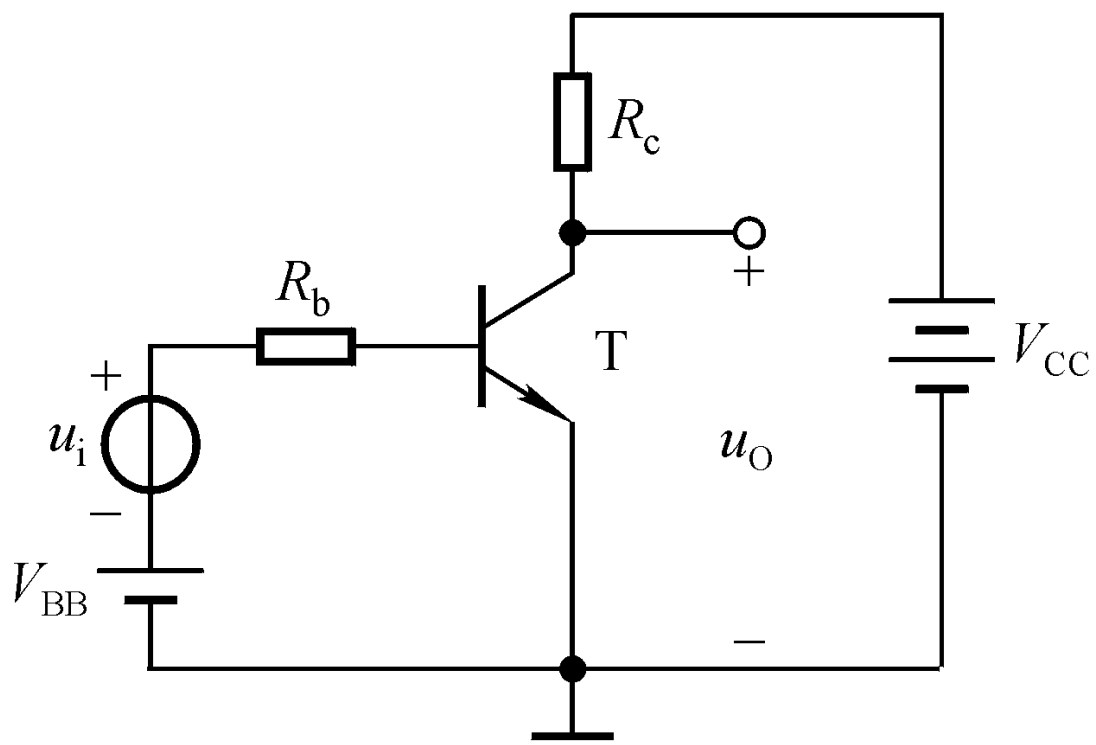


“静态决定动态” —— 动态等效电路的参数受静态工作点的位置影响

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！

基本共射放大电路

○ 如何用一只NPN晶体管构建一个放大电路？



基本共射放大电路

“共射”：

基极输入

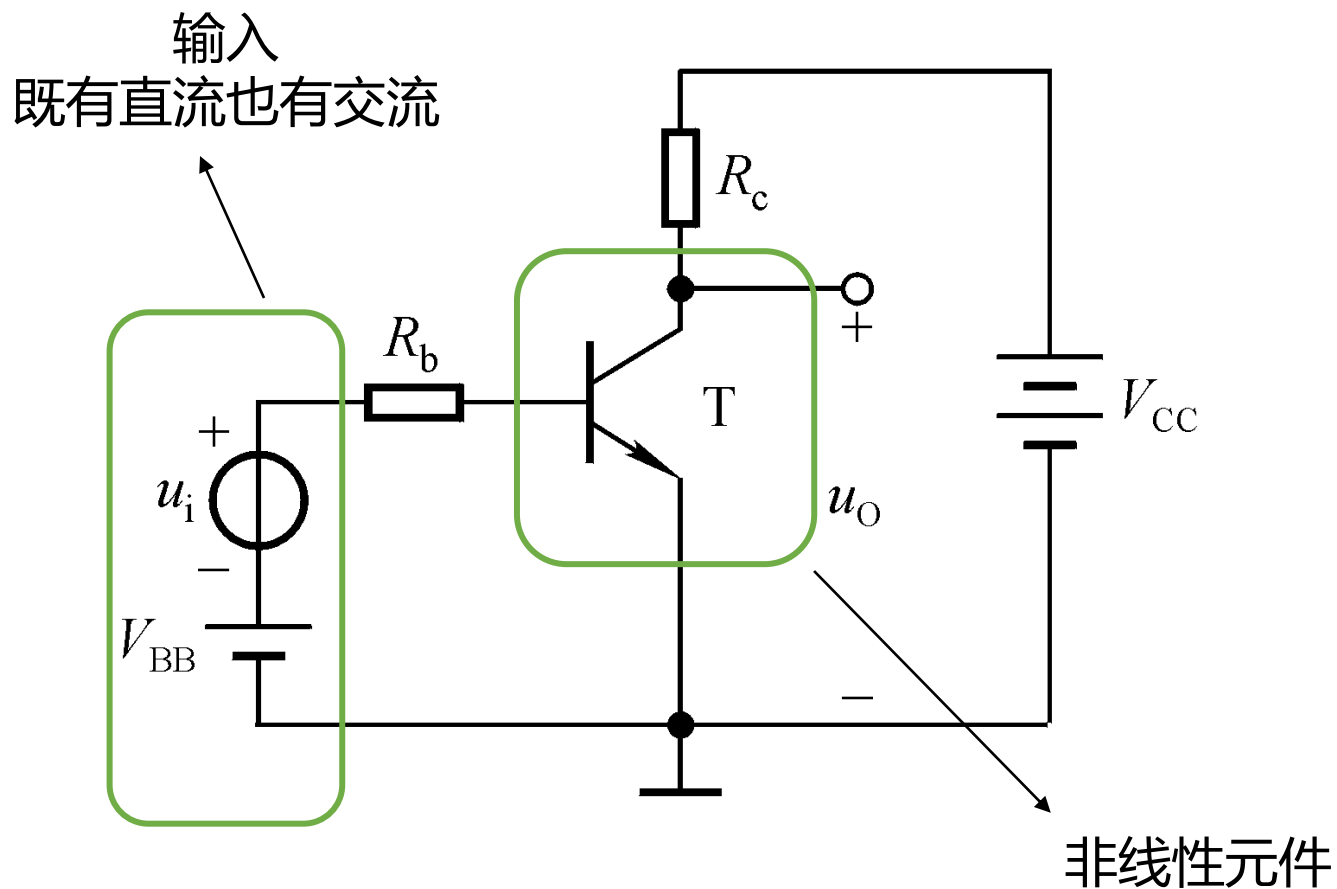
集电极输出

输入回路与输出回路公共端为发射极

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！

基本共射放大电路

基本共射放大电路的分析



非线性电路的分析方法：

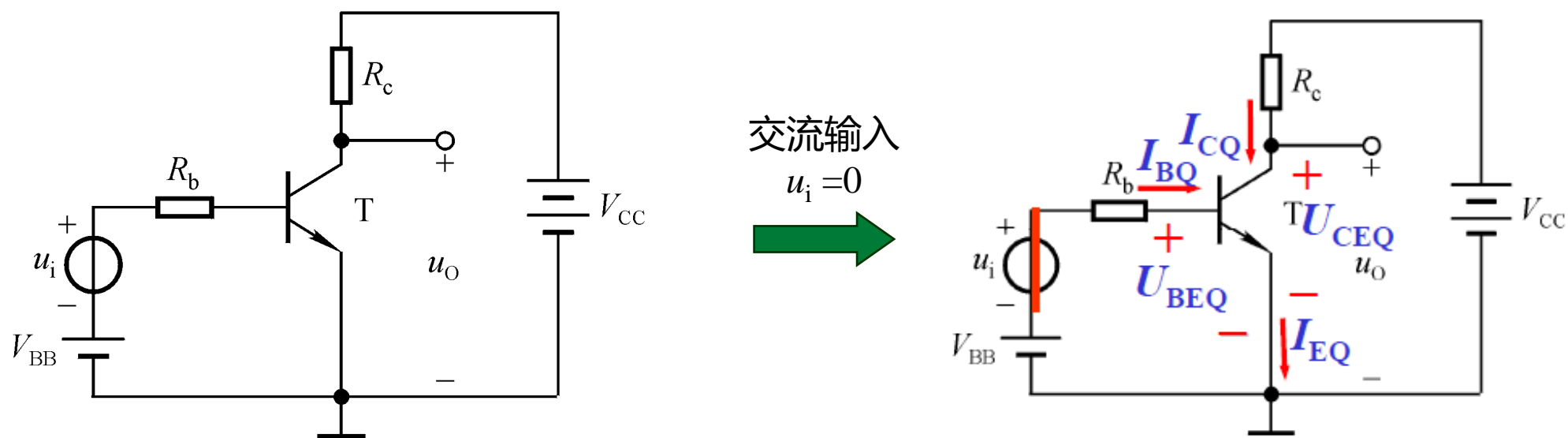
“小信号分析法”

直流叠加交流，静态叠加动态

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！

基本共射放大电路

基本共射放大电路的分析——静态分析



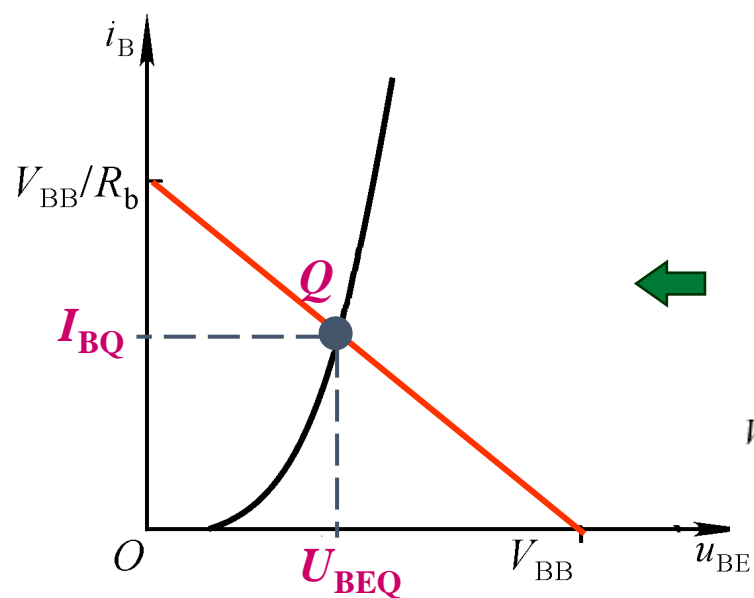
基于晶体管工作在放大区进行分析——前提条件

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！

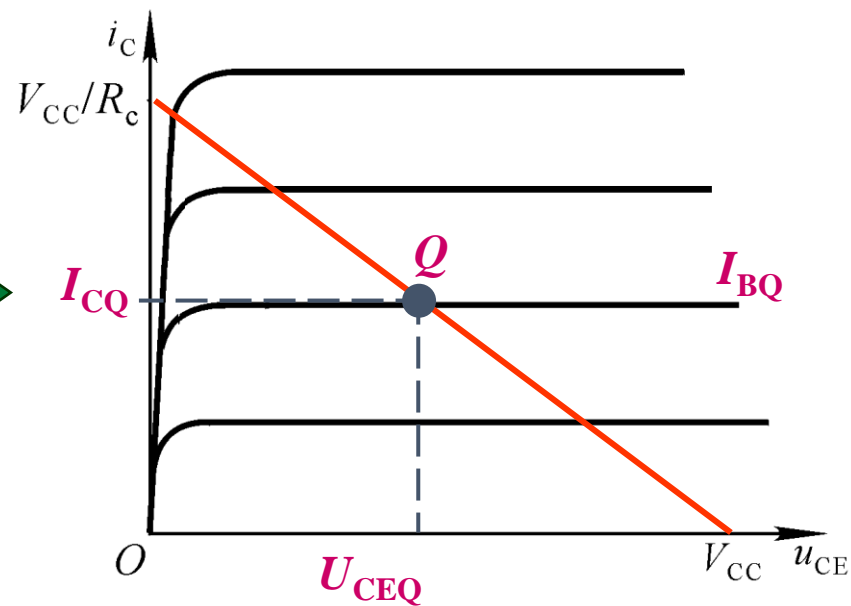
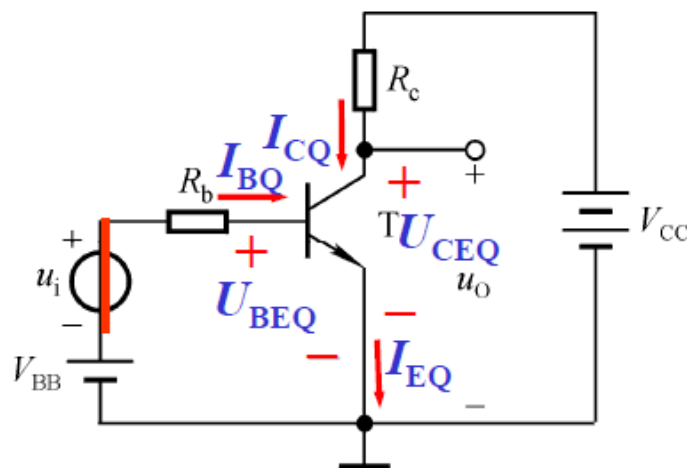
基本共射放大电路

基本共射放大电路的静态分析——图解法



输入回路

晶体管的输入伏安特性曲线与
输入侧直流电源 V_{BB} 的输出特性曲线的交点；
可以求解得到 U_{BEQ} 与 I_{BQ} ；



输出回路

晶体管的输出伏安特性曲线与
输出侧直流电源 V_{CC} 的输出特性曲线的交点；
可以求解得到 U_{CEQ} 与 I_{CQ} ；

原作者：b站up主——这个ximo不太冷

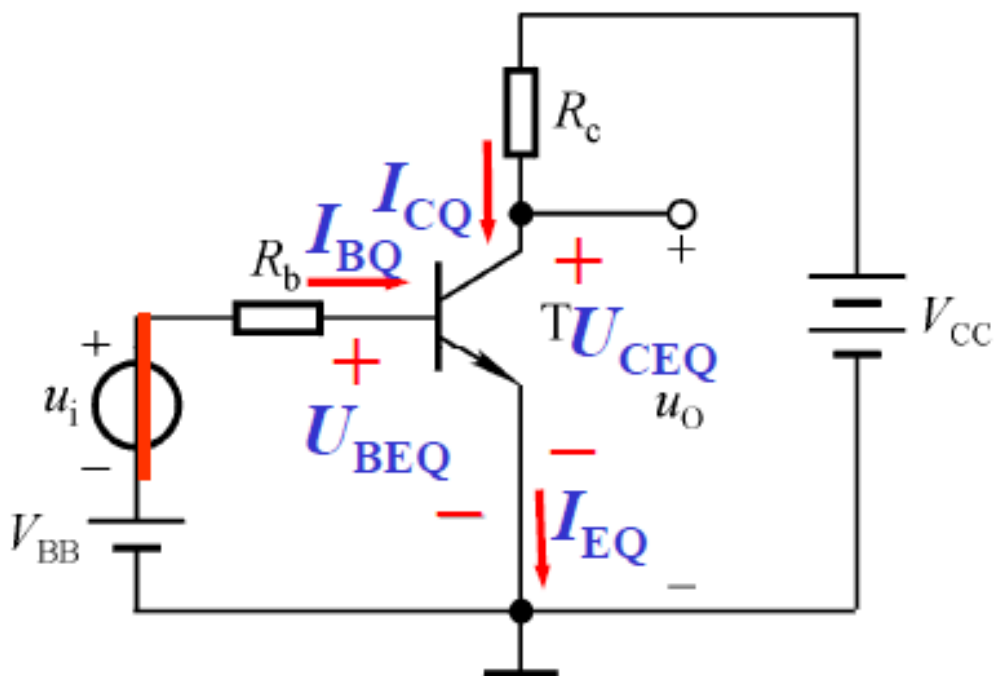
基本共射放大电路

思考：

估算法的本质是什么？

基本共射放大电路的静态分析——估算法

静态工作点Q



输入回路 —— 利用晶体管工作在放大区时
 $|U_{BEQ}| = 0.7 \text{ V}$ ，则输入回路KVL：

$$V_{BB} = R_b I_{BQ} + U_{BEQ}$$

晶体管工作在放大区的电流关系：

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

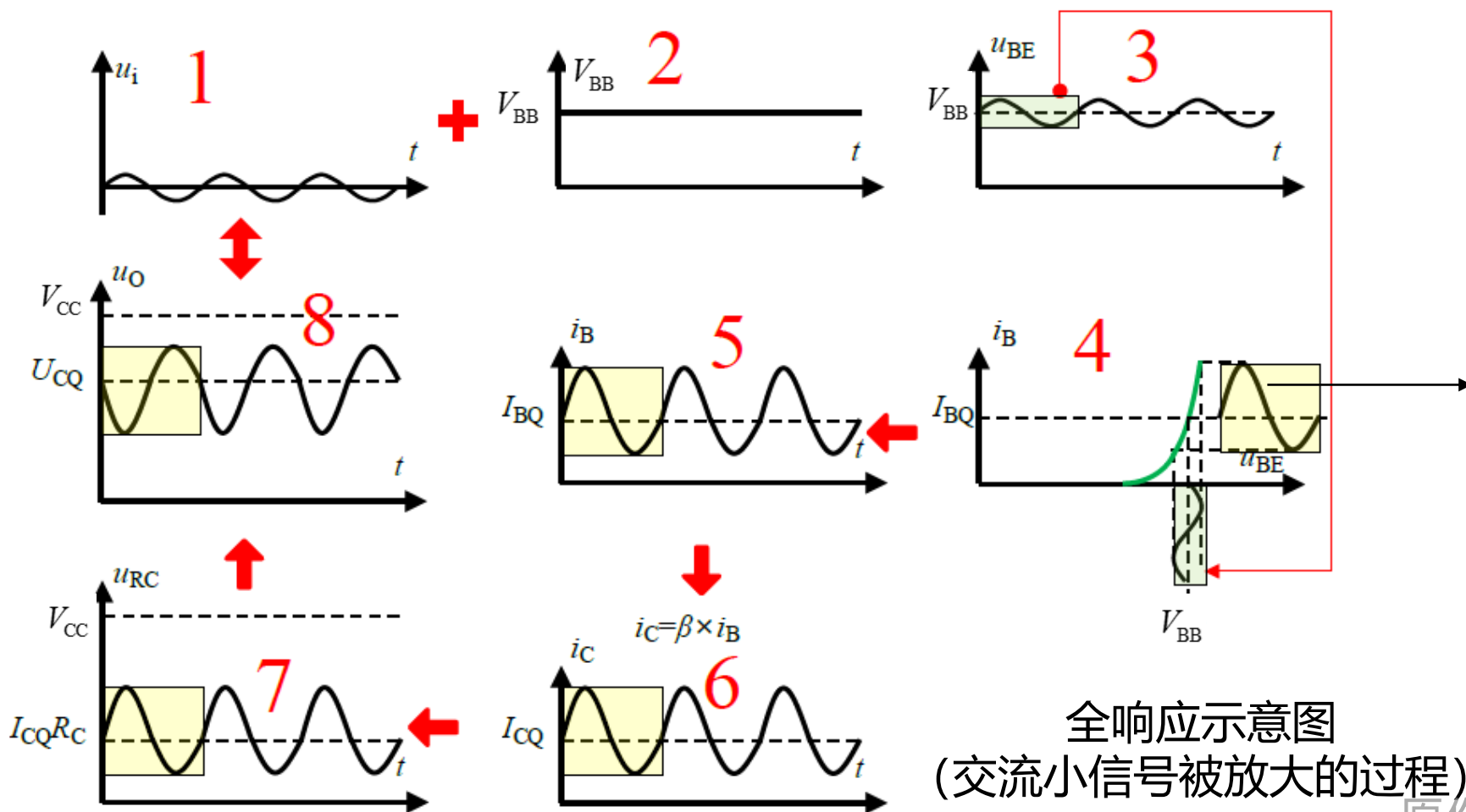
输出回路KVL：

$$U_{CQ} = V_{CC} - R_c I_{CQ} \quad U_{EQ} = 0$$

$$U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ}$$

基本共射放大电路

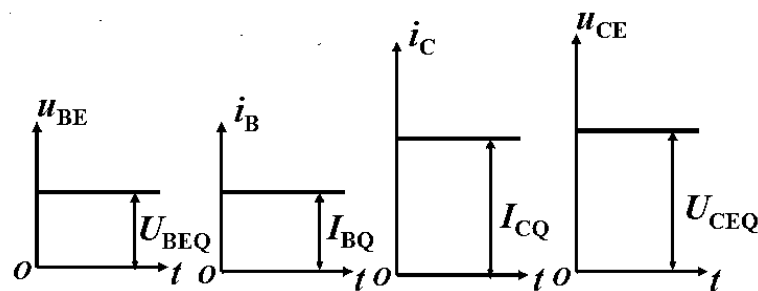
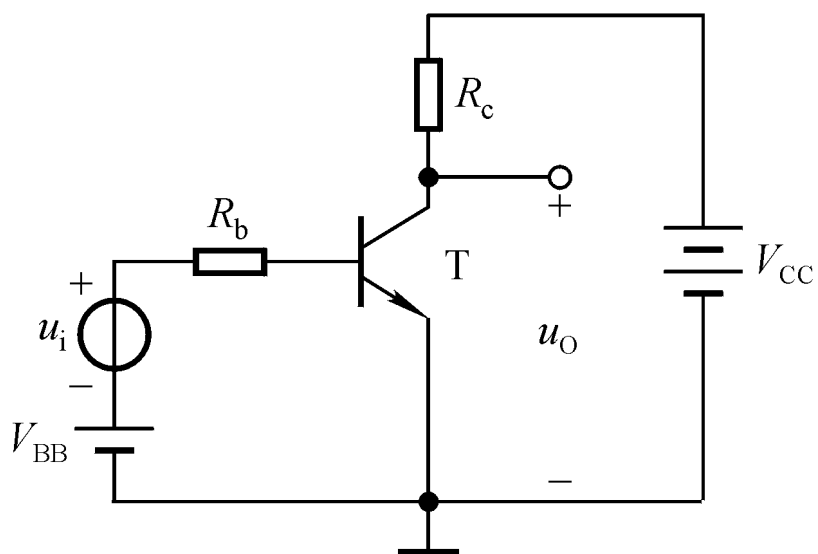
基本共射放大电路的分析——在静态工作点上叠加交流小信号响应



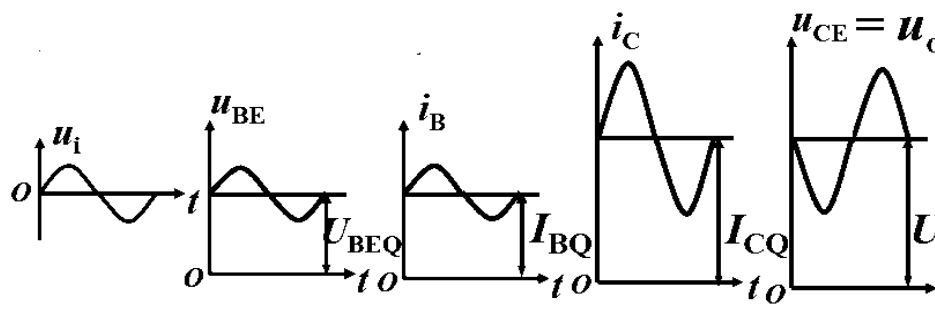
请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本共射放大电路

基本共射放大电路的分析



静态工作点Q
(直流输入响应)



静态工作点上叠加
交流小信号响应
(全响应)

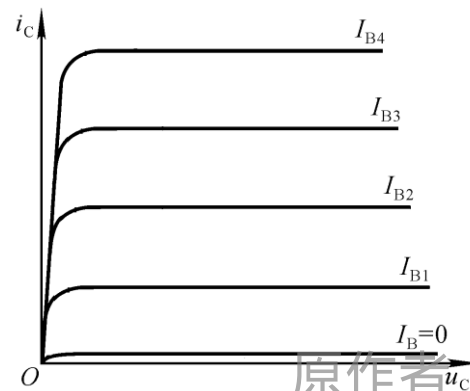
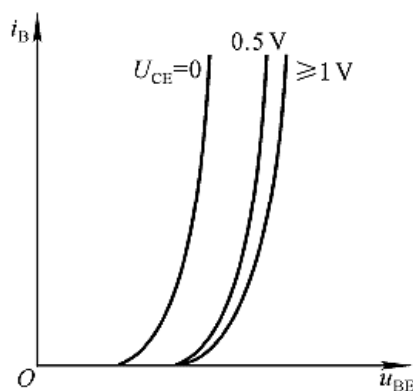
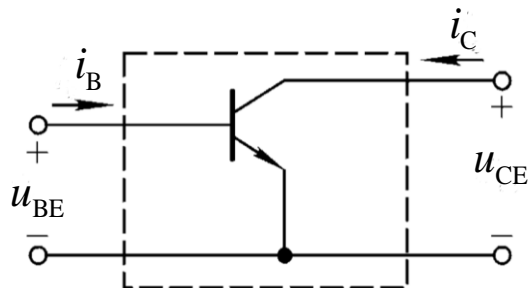
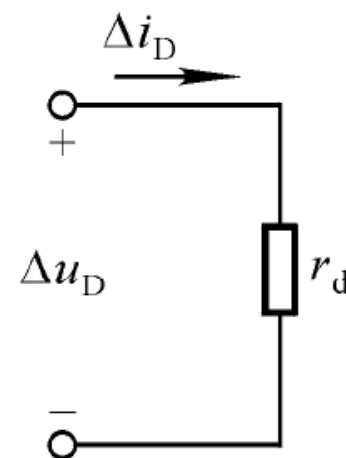
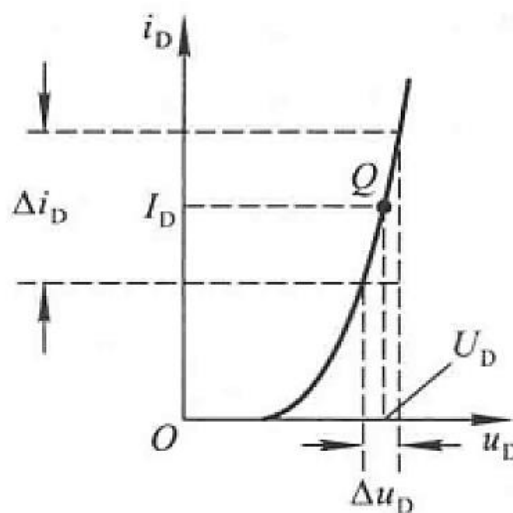
如何快速实现交流小信号响应的求解？
(只研究 Δu_i 与 Δi_b 、 Δi_c 、 Δu_o 之间的关系)

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！

基本共射放大电路

基本共射放大电路的动态分析——等效电路法



?

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！

基本共射放大电路

晶体管的小信号模型（微变等效电路）

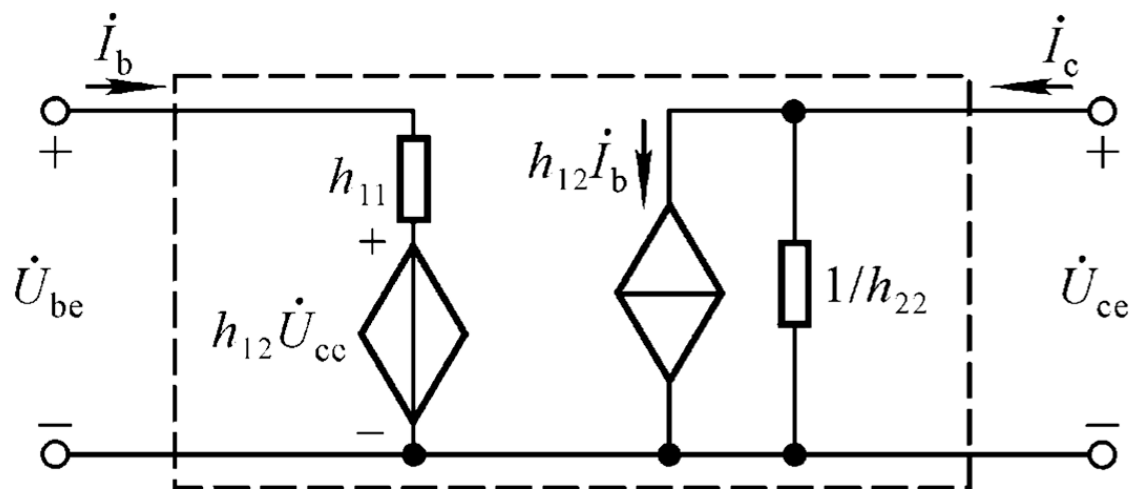
$$\begin{cases} u_{BE} = f(i_B, u_{CE}) \\ i_C = f(i_B, u_{CE}) \end{cases}$$

↓ 小信号线性化

$$\begin{cases} du_{BE} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} di_B + \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B} du_{CE} \\ di_C = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} di_B + \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B} du_{CE} \end{cases}$$

↓ 交流相量形式

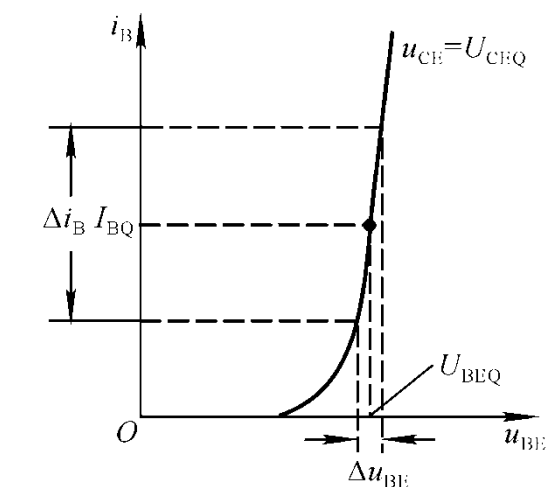
$$\begin{cases} \dot{U}_{be} = h_{11} \dot{I}_b + h_{12} \dot{U}_{ce} \\ \dot{I}_c = h_{21} \dot{I}_b + h_{22} \dot{U}_{ce} \end{cases}$$



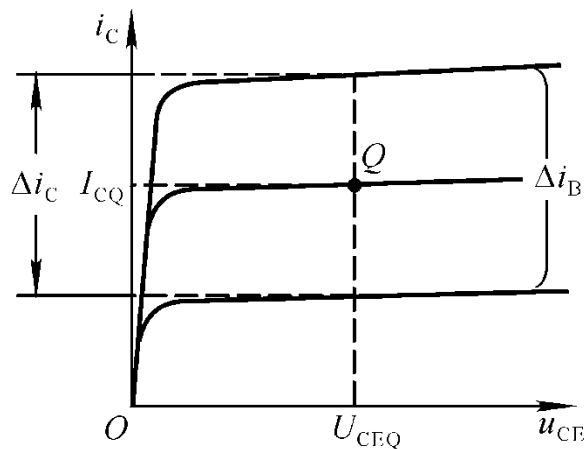
基本共射放大电路

这四张图体现了
“静态决定动态”

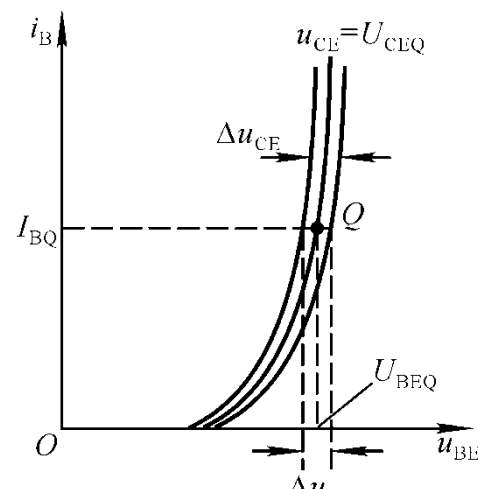
晶体管的小信号等效电路参数求解



$$h_{11} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{u_{CE}} = r_{be}$$

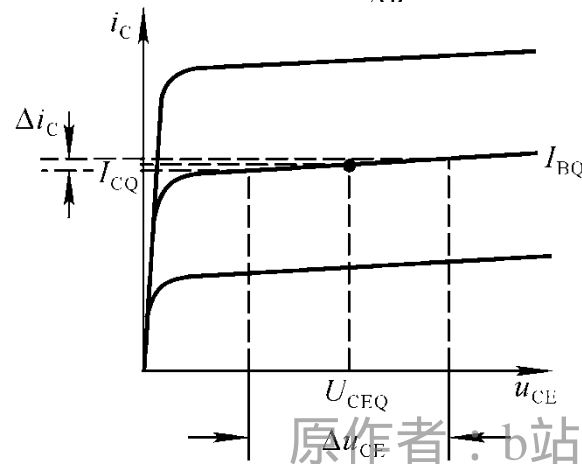


$$h_{21} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{u_{CE}} = \beta$$



$$h_{12} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B}$$

约等于0



$$h_{22} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{i_B} = \frac{1}{r_{ce}}$$

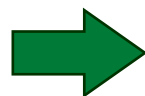
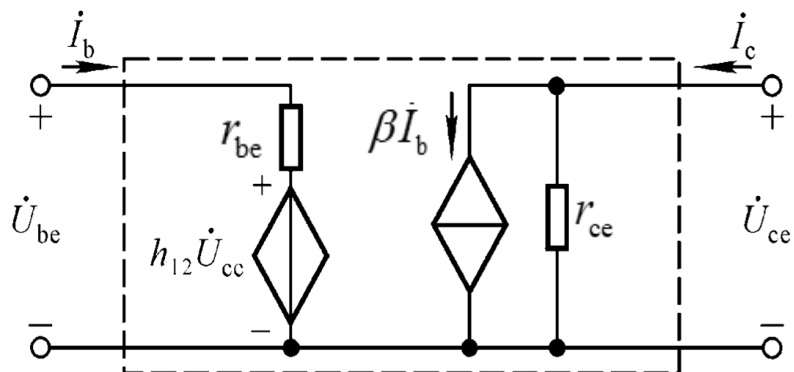
约等于0 (即 $r_{ce} \approx \infty$)

原作者：b站up主——这个ximo不太冷

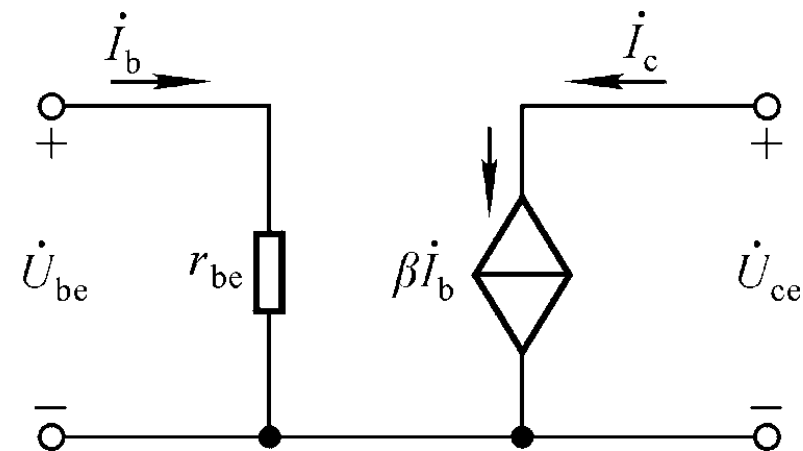
请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本共射放大电路

晶体管的简化小信号等效电路



必须记下来的内容



简化的交流小信号等效电路模型
(实际分析常用)

其中：

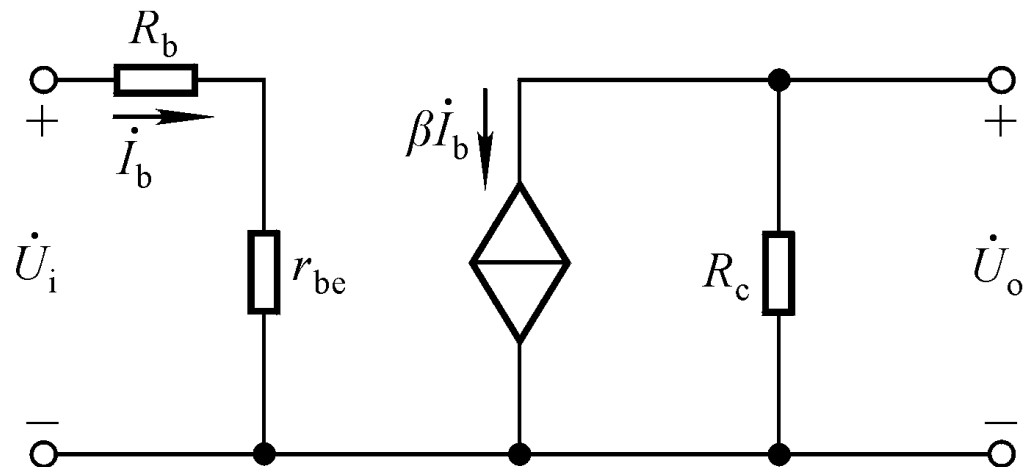
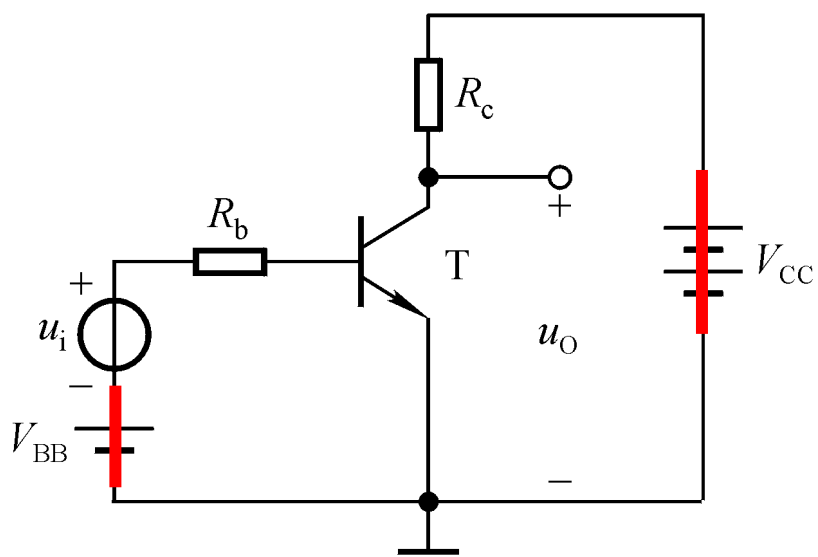
$$r_{be} = \frac{U_{be}}{I_b} = r_{bb'} + r_{b'e} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

$r_{bb'}$ 和放大系数 β 可查阅手册 (题目已知条件)

基本共射放大电路

基本共射放大电路的动态分析——等效电路法

只考虑变化量输入（小信号输入），将静态量置零（即相当于直流电压源短路接地），利用晶体管的小信号等效电路模型，得到整个放大电路的交流小信号等效电路，即“交流通路”；

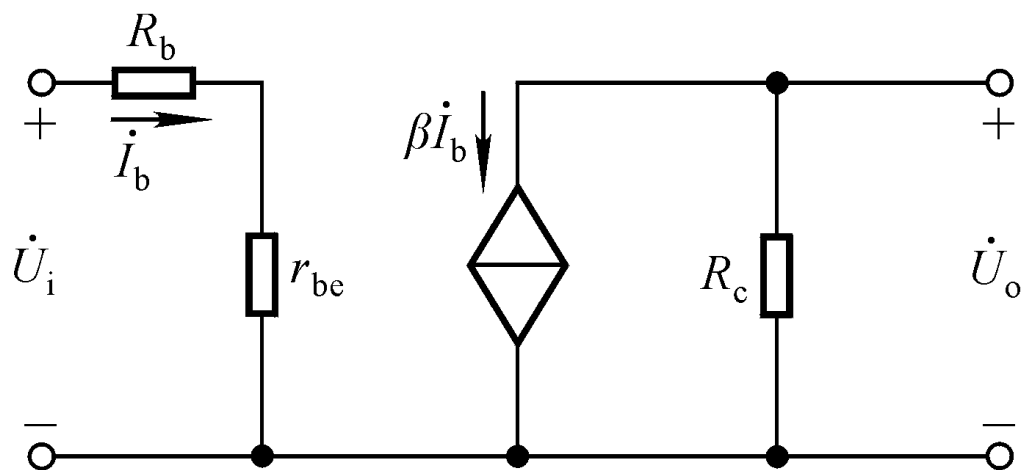


如果是直流电流源即开路

思考：动态等效电路分析法是否完全脱离了静态工作点？

基本共射放大电路

基本共射放大电路的动态分析——放大电路的动态参数



电压放大倍数

输入电阻

输出电阻

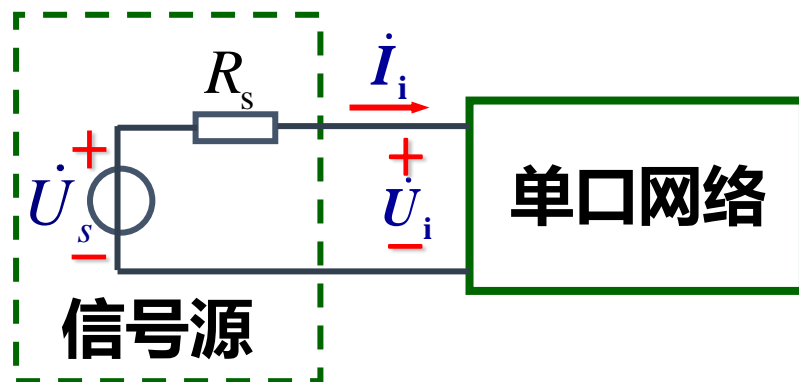
$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\text{独立源置零}}$$

电路理论基础知识复习

○ 输入电阻的概念



任何一个电路都可以视为一个单口网络，从电路的输入端看进去，整个电路即单口网络可以看成是一个物理元件，对于信号源来说相当于一个负载；

输入电压有效值与输入电流有效值的比值即为输入电阻；

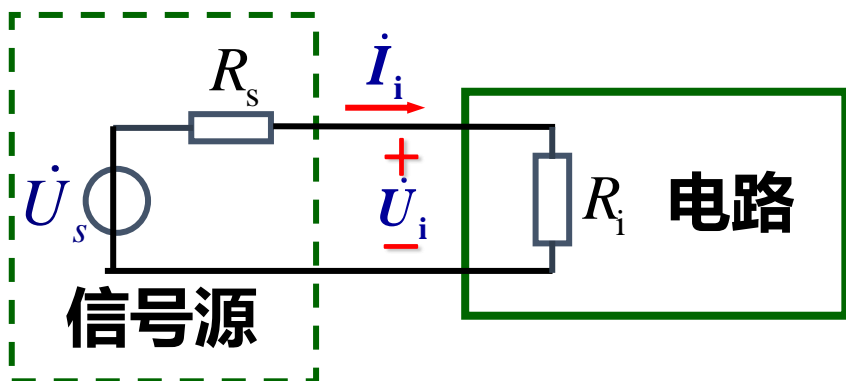
$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

$$Z_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \quad \text{广义上输入电压与输入电流相量之比应为输入阻抗,}$$

当前的分析不考虑电感电容效应，即纯阻性网络；

电路理论基础知识复习

○ 对输入电阻的理解



既可以表示电压源也可以表示电流源
(戴维南定理与诺顿定理的一致性)

电压源——内阻较小
电流源——内阻较大

输入电阻体现了电路从信号源索取电流的能力：

输入电阻越大，电路从信号源索取的电流越小，
信号源内阻的压降越小，输入电压越接近理想
信号源电压；（从稳定输入电压的角度）

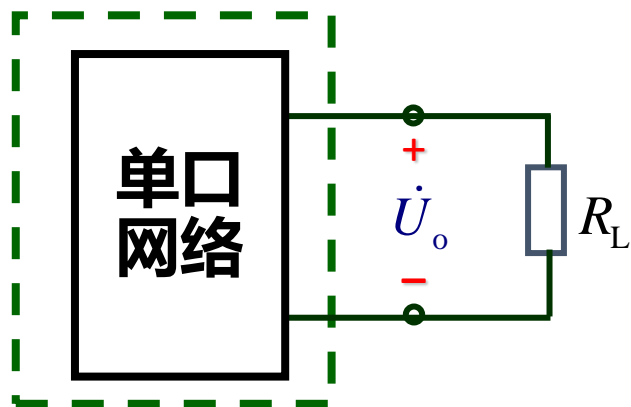
输入电阻越小，电路从信号源索取的电流越大，
在信号源内阻一定的情况下输入电流越接近理
想信号源电流；（从稳定输入电流的角度）



输入电阻相当于前级信号源的负载
输入电阻与信号源内阻无关

电路理论基础知识复习

输出电阻的概念

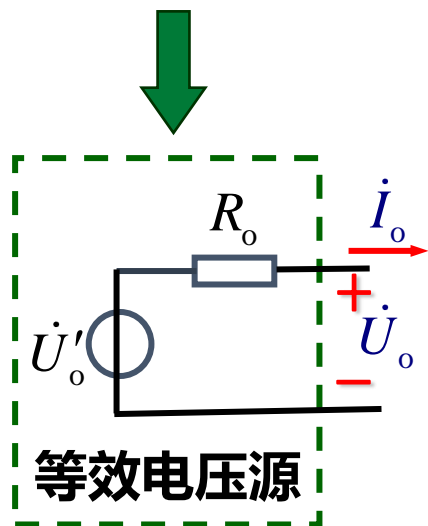


将电路视为一个向外输出的单口网络，根据戴维南等效定理，对于任何含独立电源的线性电阻单口网络，就端口特性而言，可以等效为一个理想电压源和电阻串联的单口网络。

理想电压源为输出端口开路时的电压，即空载时的输出电压 \dot{U}'_o ；

电压源的等效内阻即为输出电阻 R_o ；

R_o 的求解方法是，将电路内部的独立源置零（独立电压源短路，独立电流源开路）（注意：受控源仍然保留），从电路的输出端向里看的等效“输入”电阻；



$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{i}_o} \right|_{\text{独立源置零}}$$

原作者：b站up主——这个ximo不太冷

电路理论基础知识复习

对输出电阻的理解

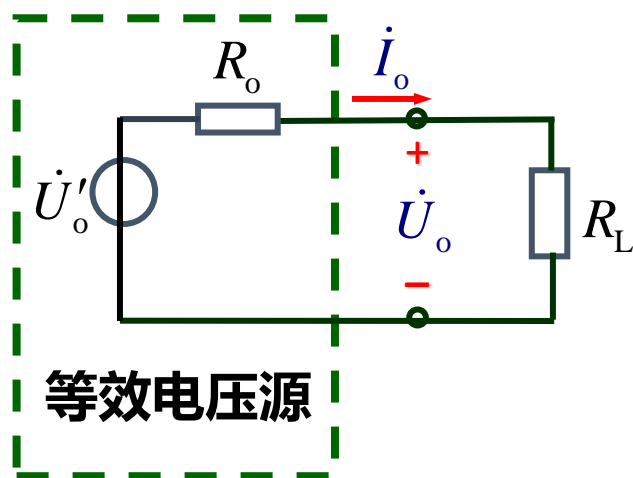
输出电阻体现了电路带负载的能力：

输出电阻越小，负载变化时（即负载电流变化时），输出电压的变化越小，即输出电压越接近空载电压（等效的理想电压源），输出电压越稳定；

输出电阻越大，负载变化时输出电流的变化越小，即此时电路对外相当于一个内阻很大的电压源，相当于电流源，输出电流越稳定；

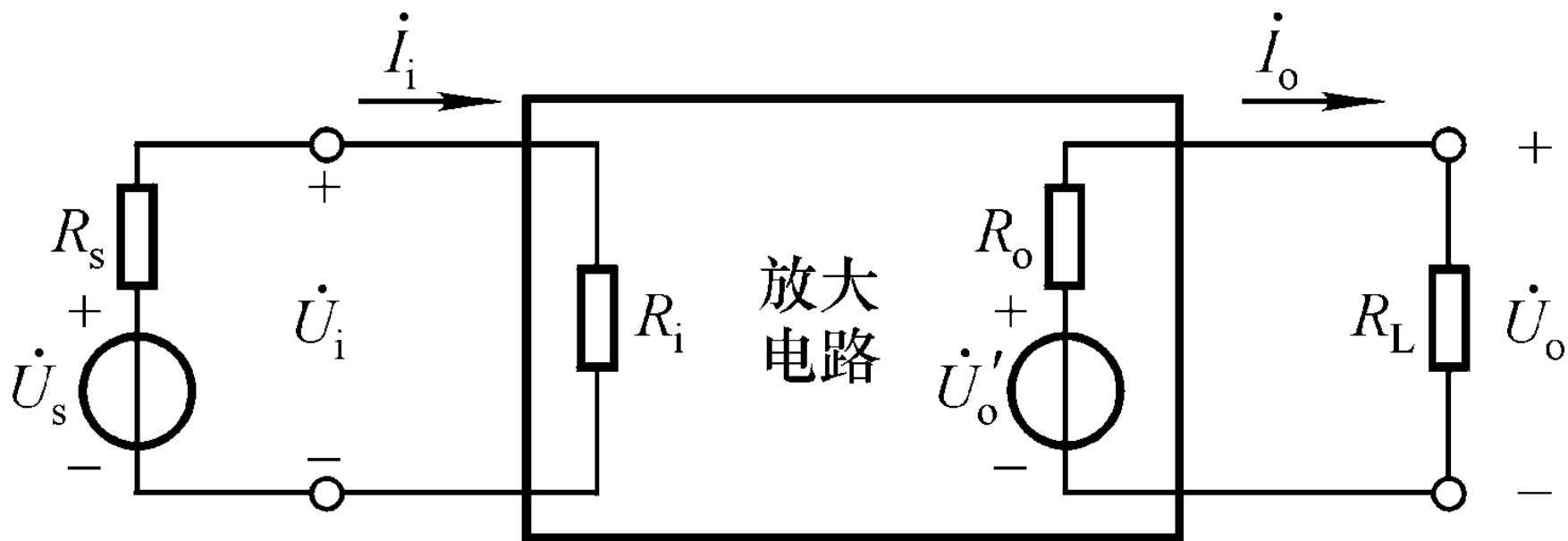


输出电阻相当于等效电压源的内阻
输出电阻与负载无关



放大电路的动态分析

○ 放大电路的动态参数小结



电压放大倍数

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

$$A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$$

输入电阻

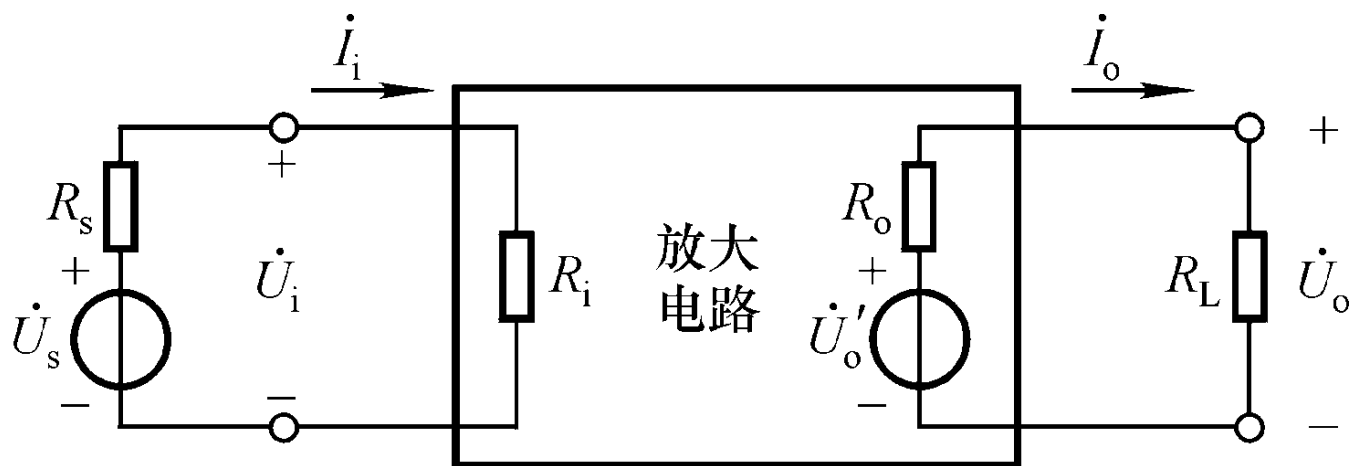
$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

输出电阻

$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\text{独立源置零}}$$

放大电路的动态分析

○ 输入电阻与输出电阻小结



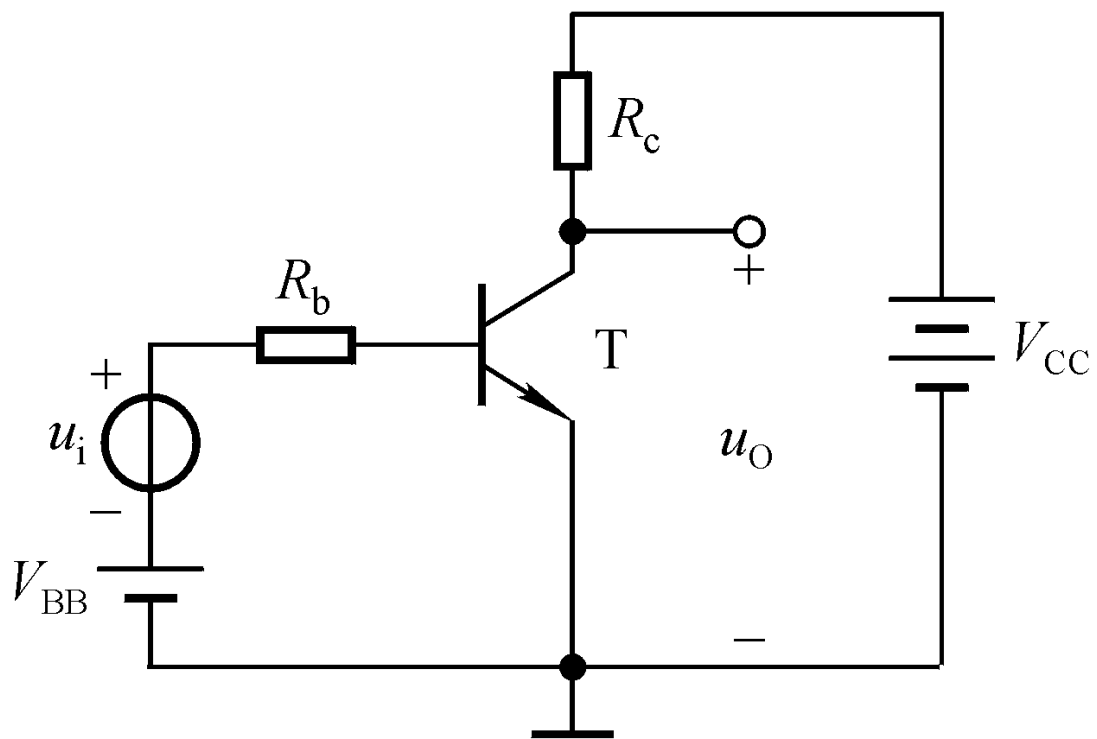
输入电阻相当于信号源的负载，输入电阻与信号源内阻为串联分压的关系；
输入电阻越大，电路从信号源索取的电流越小，信号源内阻的压降越小，输入电压恒定；
输入电阻越小，电路从信号源索取的电流越大，由于电压源的信号源内阻一般较大，输入电压恒定；

输出电阻相当于等效电压源的内阻，输出电阻与负载为串联分压的关系；
输出电阻越小，输出电压即负载上的电压就越接近等效理想电压源即空载时的电压，输出电压恒定；
输出电阻越大，输出电阻上的分压越大，即输出端相当于一个电压源（大内阻信号源），输出电压恒定；

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！

放大电路的分析方法

○ 分析方法总结



基本共射放大电路

小信号分析法：

“静态叠加动态”，“静态决定动态”

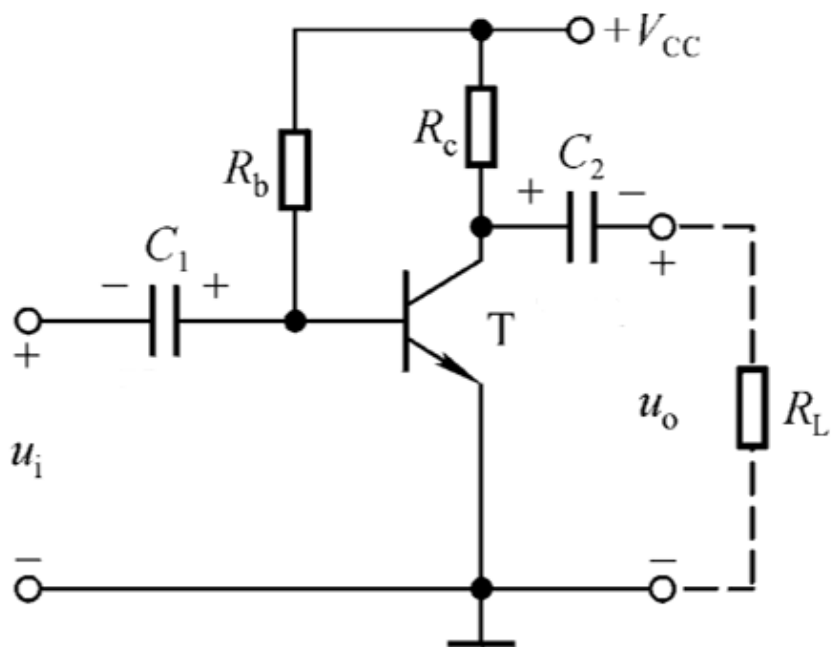
全响应 —— 图解法；

静态工作点分析 —— 直流通路，将交流输入信号置零，电感短路，电容开路——估算法（输入回路KVL，电流放大关系，输出回路KVL）

动态分析 —— 交流通路，将直流量置零，电容短路，电感开路 —— 等效电路法——求解动态参数（电压放大倍数，输入电阻，输出电阻）

放大电路的分析方法

例：



已知放大电路如图所示，假设电路参数合理，晶体管工作在放大区：

- (1) 使用图解法求解静态工作点；（请在作图时标注出关键的参数如横轴交点、直线斜率等）
- (2) 使用估算法求解静态工作点；
- (3) 求解此放大电路的电压放大倍数、输入电阻、输出电阻；
- (4) 如果想稳定此电路的输入电压，可以调节电路中的哪个参数，如何调整？如果想稳定此电路的输出电压，可以调节电路中的哪个参数，如何调整？

小结

- 理解小信号分析法的概念 —— “静态叠加动态”， “静态决定动态”
- 掌握放大电路的分析过程
 - 先静态分析（直流通路），再动态分析（交流通路）；
 - 静态分析需要求解哪些物理量？如何用估算法快速进行静态分析？
 - 动态分析需要求解哪些动态参数？如何求解这些动态参数？
- 理解输入电阻与输出电阻的概念