

模拟与数字电路

Analog and Digital Circuits



课程主页 扫一扫

第 十六讲： 基尔霍夫定律与晶体管小信号模型

Lecture 16: **KCL/KVL, Small Signal Model**

主 讲： 陈 迟 晓

Instructor: Chixiao Chen

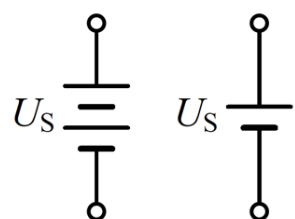
提纲

- 复习
 - 二极管 (Diode) 与电阻的差别?
- 源与负载
- 基尔霍夫定律
- 晶体管小信号模型



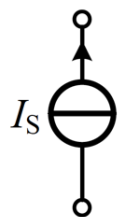
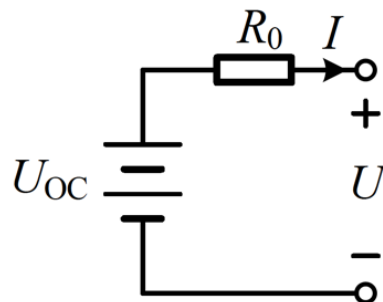
直流源 (DC) 伏安特性曲线

• 直流源



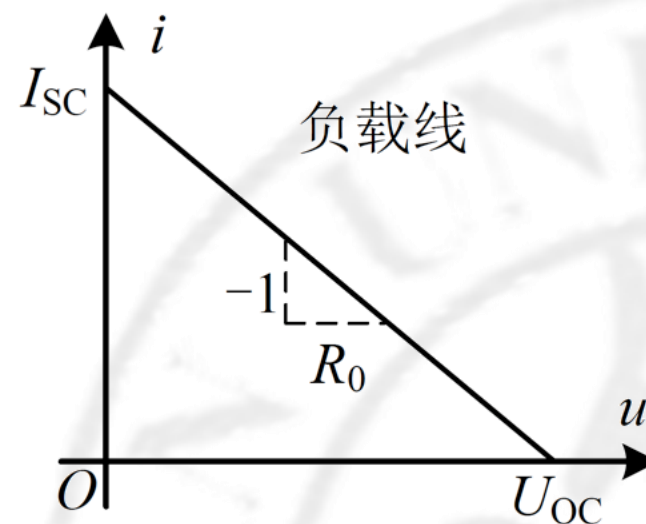
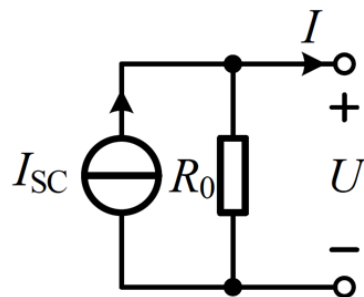
(a) 电压源

戴维宁等效



(b) 电流源

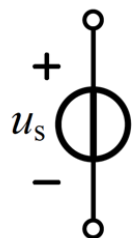
诺顿等效



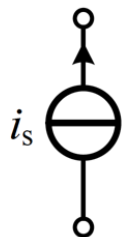
- R_0 的物理意义?
- R_0 越大越好, 还是越小越好?

交变信号源 (AC)

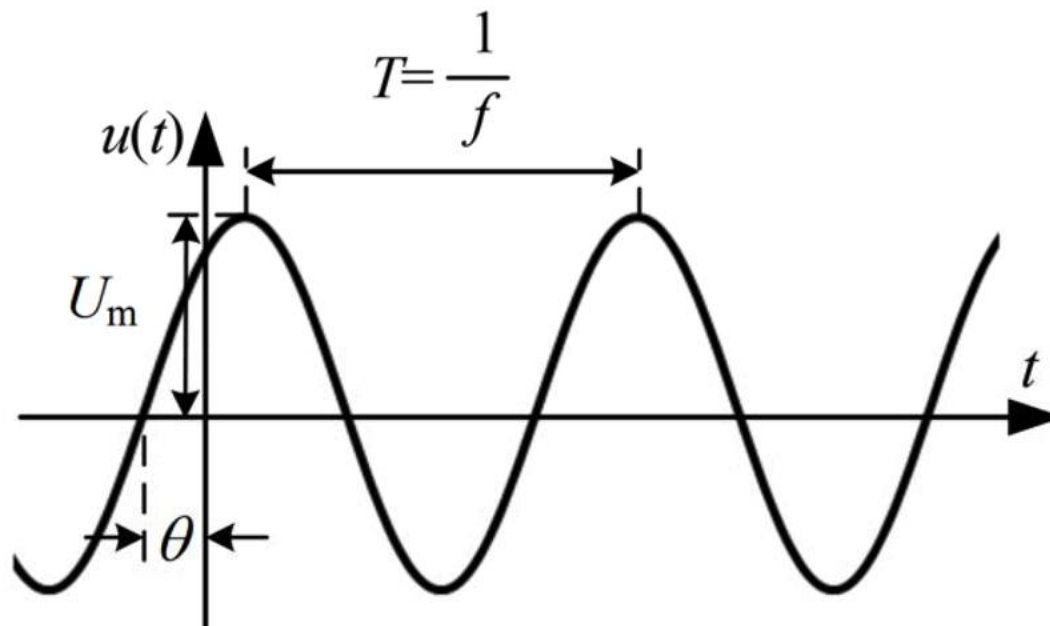
- 信号源



(a) 电压源

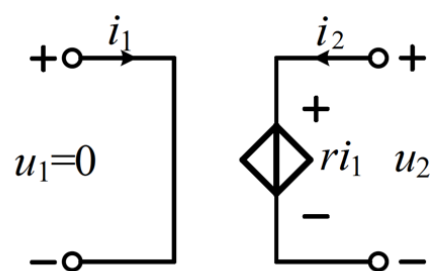


(b) 电流源

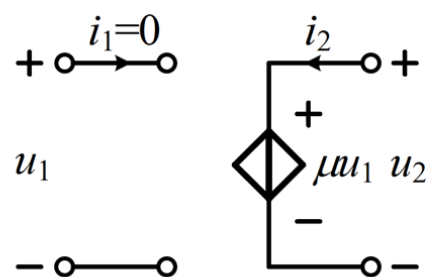


- 瞬时表达 $U_m \sin(2\pi ft + \theta)$
- 向量表达 $U_m \angle \theta$

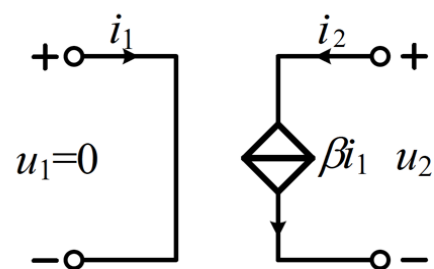
受控源



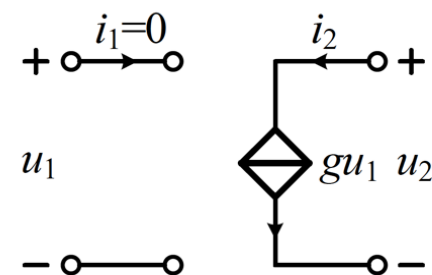
(a) CCVS



(b) VCVS



(c) CCCS

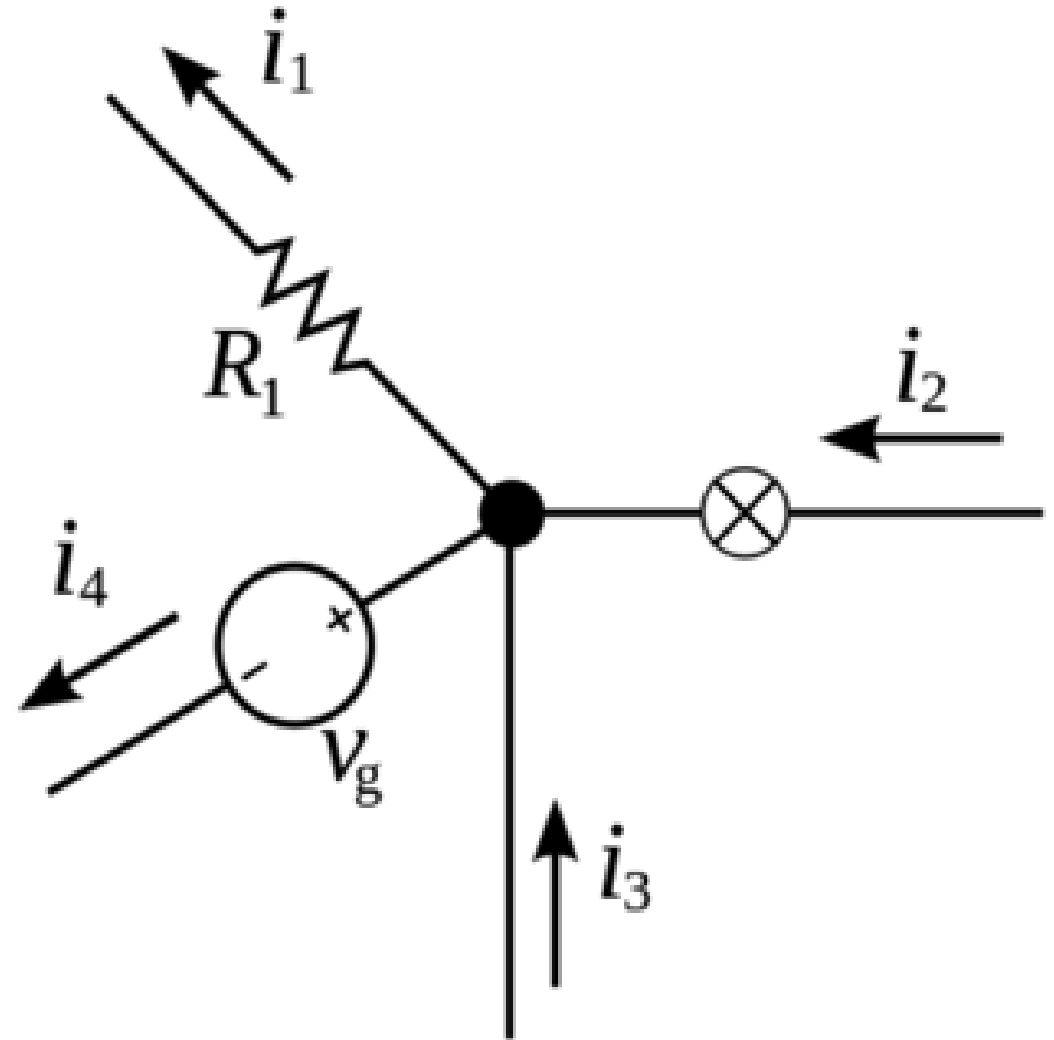


(d) VCCS

- CCVS 电流控制电压源
- VCVS 电压控制电压源
- CCCS 电流控制电流源
- VCCS 电压控制电流源

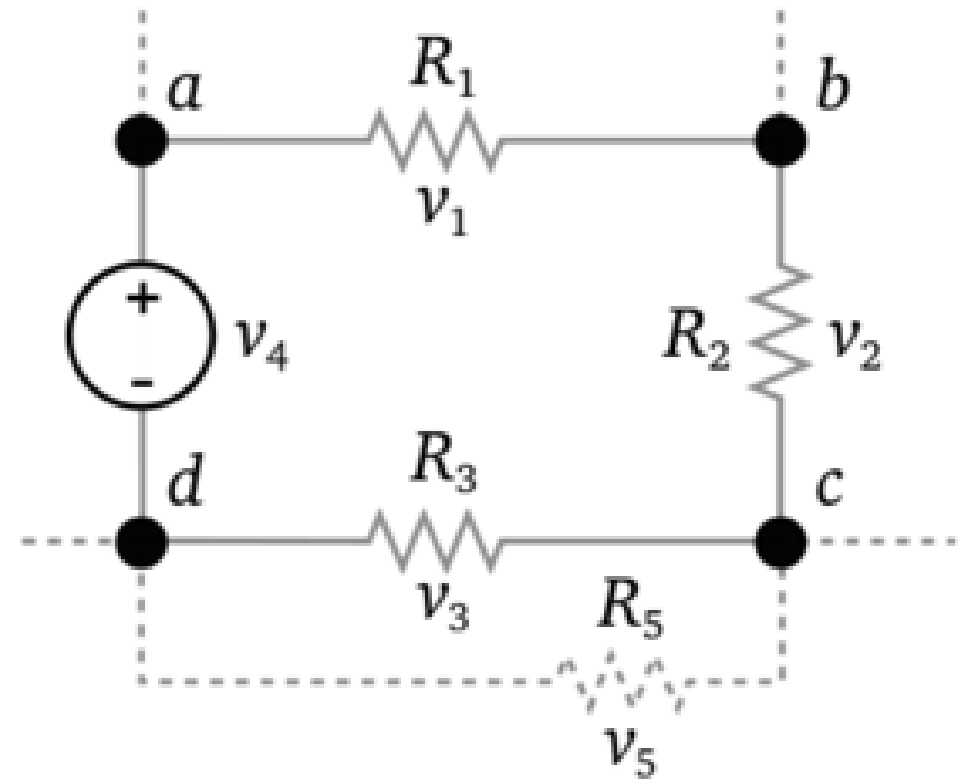
基尔霍夫定律

- 基尔霍夫电流定律 KCL
- The current entering any junction is equal to the current leaving that junction.
- $i_2 + i_3 = i_1 + i_4$

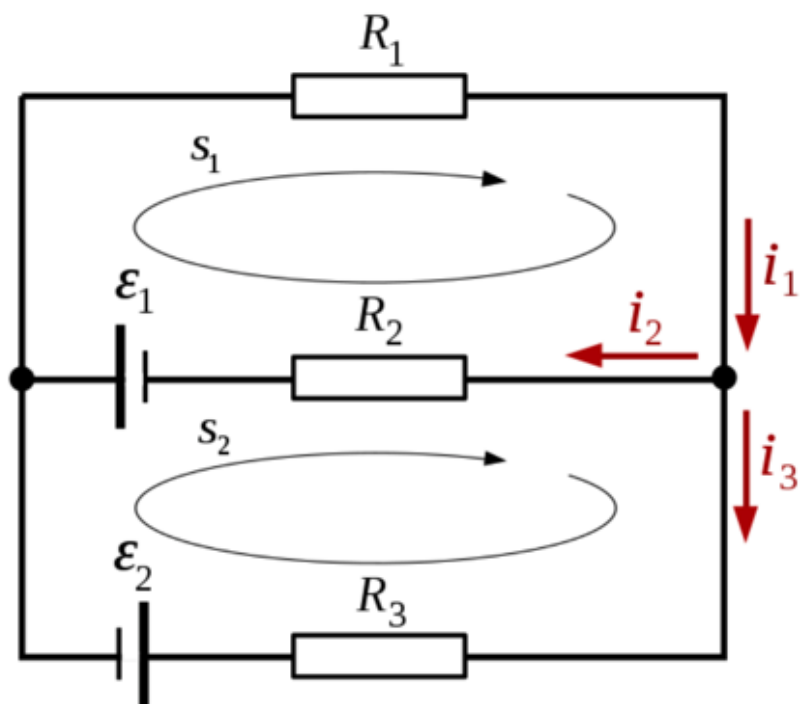


基尔霍夫定律

- 基尔霍夫电压定律 KVL
- The sum of all the voltages around a loop is equal to zero.
- $v_1 + v_2 + v_3 + v_4 = 0$



基尔霍夫定律



- 已知: $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 200\Omega$, $R_3 = 300\Omega$, $\varepsilon_1 = 3V$, $\varepsilon_2 = 4V$
求 i_1, i_2, i_3 ?

解: KCL: $i_1 - i_2 - i_3 = 0$

KVL(1): $-R_2 i_2 + \varepsilon_1 - R_1 i_1 = 0$

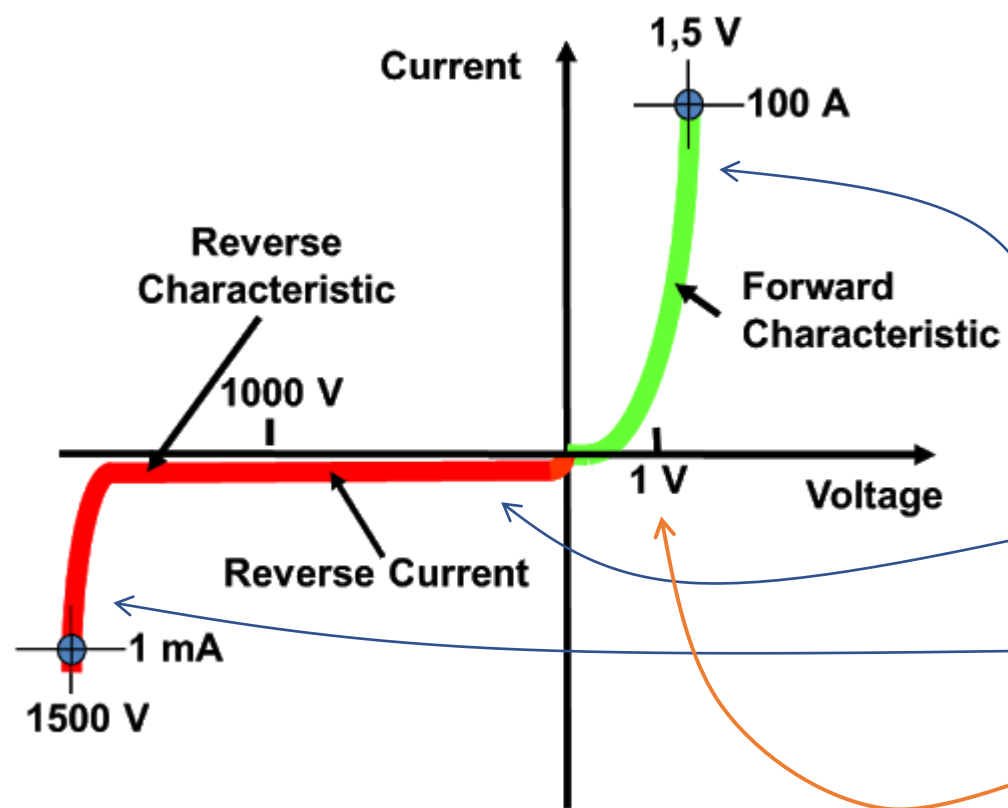
KVL(2): $-R_3 i_3 - \varepsilon_2 - \varepsilon_1 + R_2 i_2 = 0$

联立方程组求解

$$i_1 = \frac{1}{1100}A, \quad i_2 = \frac{4}{275}A, \quad i_3 = -\frac{3}{220}A$$

PN Junction (PN结)

- 电压-电流 特性曲线 (伏安特性曲线)

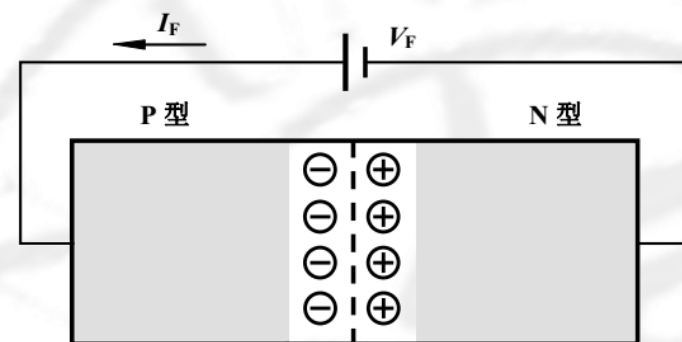


正向导通区

反向导通区

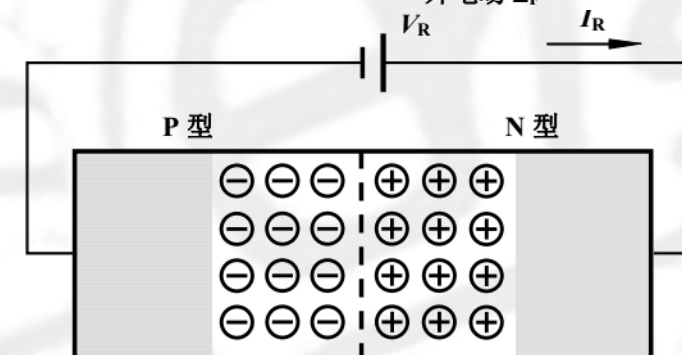
反向击穿区

导通电压 V_{on}



内电场 E_0

外电场 E_F



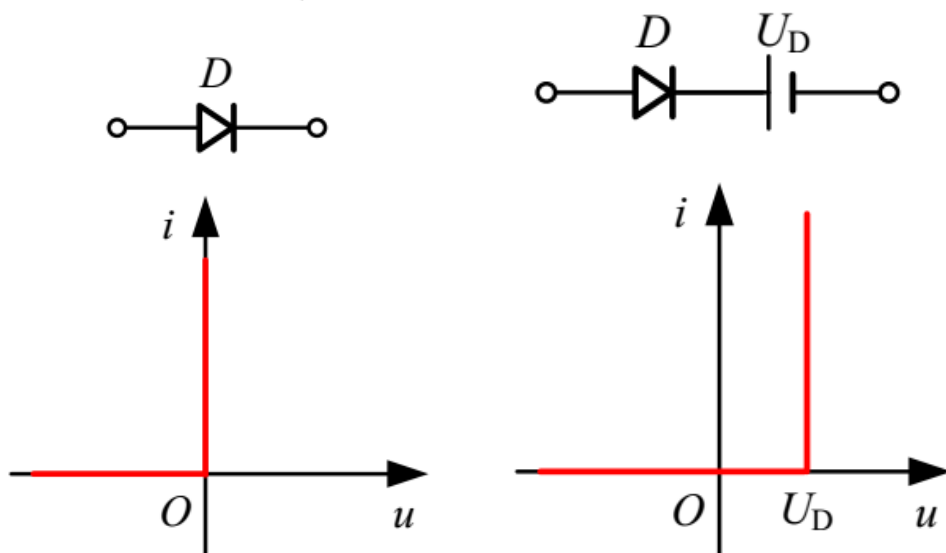
内电场 E_0

外电场 E_R

PN结 等效模型

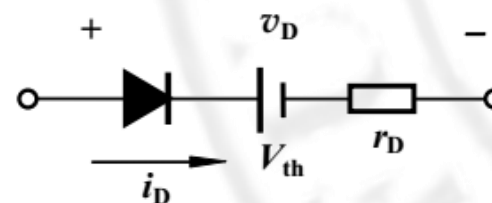
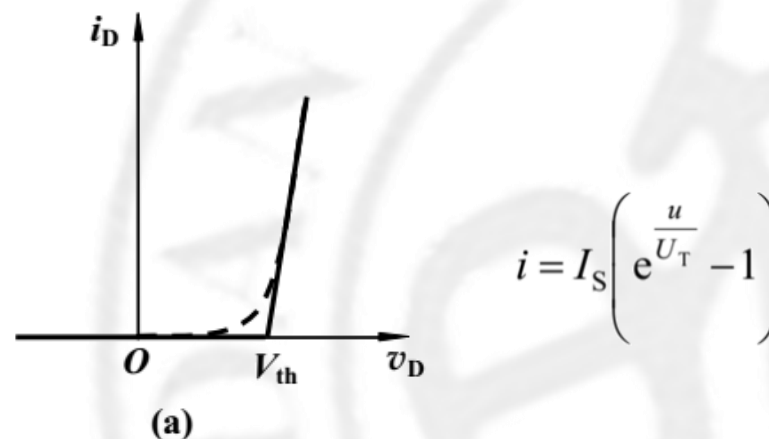
- 理想模型
 - 基于偏置电压的开关，二极管
 - 恒压模型

理想二极管



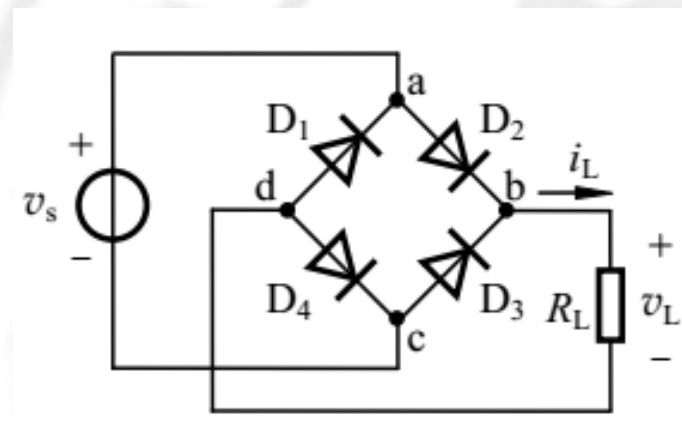
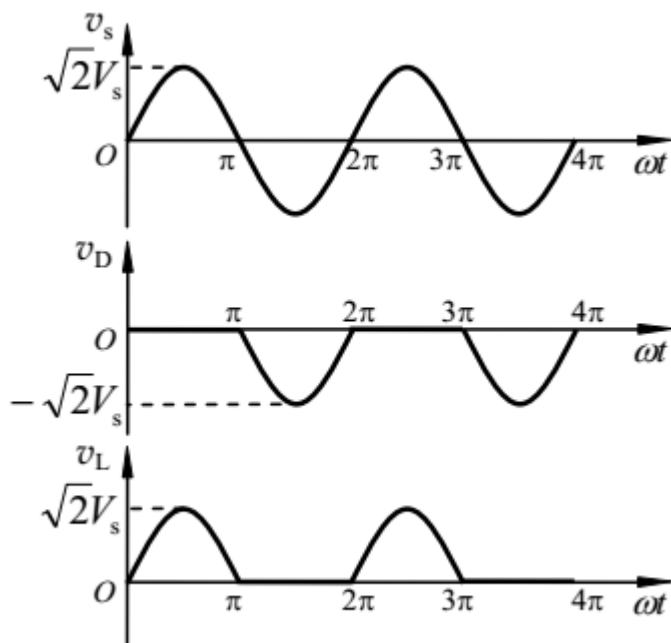
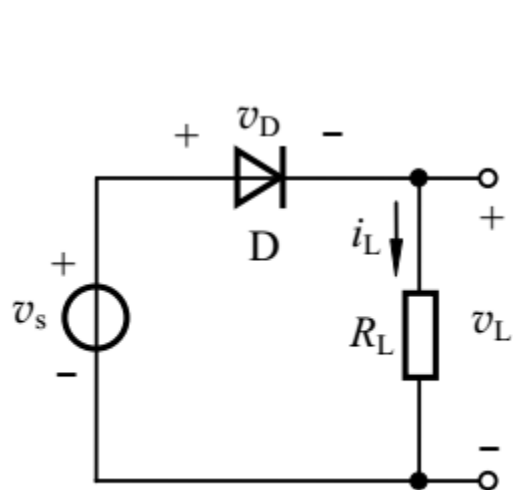
折线与指数模型

- 不考虑反向击穿
- 折线模型更便于计算
- 指数模型接近物理本质



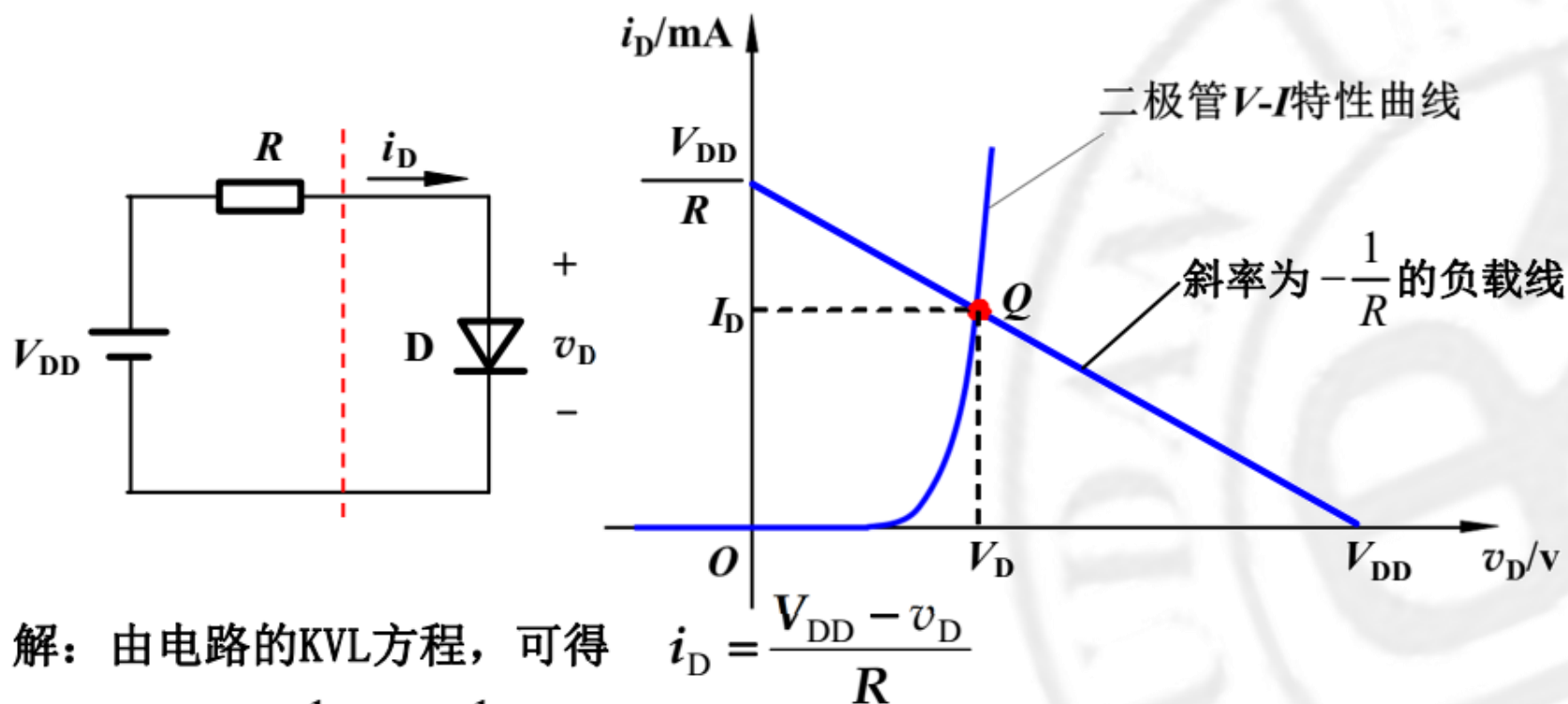
二极管的应用

- 整流电路
 - 基于理想模型



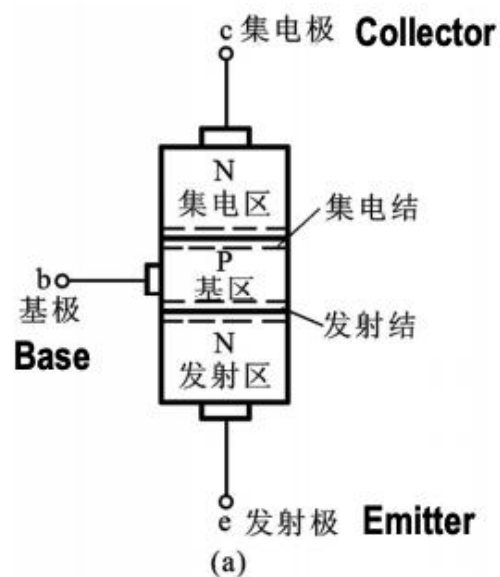
二极管的计算

例3.4.1 电路如图所示，已知二极管的 V - I 特性曲线、电源 V_{DD} 和电阻 R ，求二极管两端电压 v_D 和流过二极管的电流 i_D 。

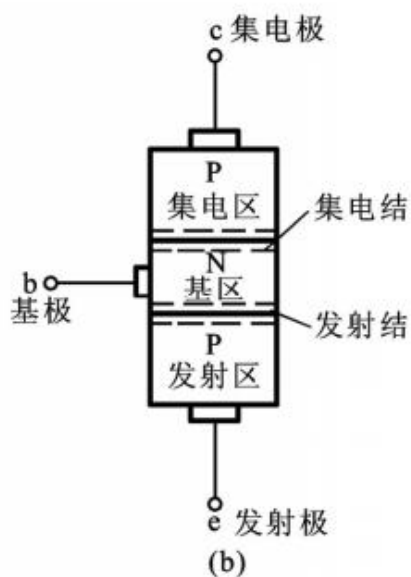


双极性晶体管回顾 —— BJT

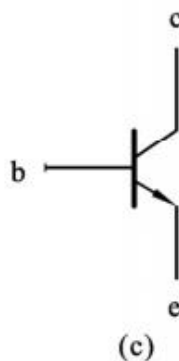
半导体三极管的结构示意图如下图所示。它有两种类型：**NPN**型和**PNP**型。



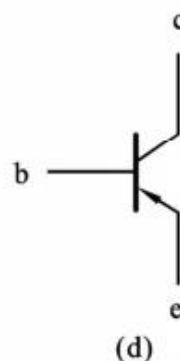
NPN型管结构示意图



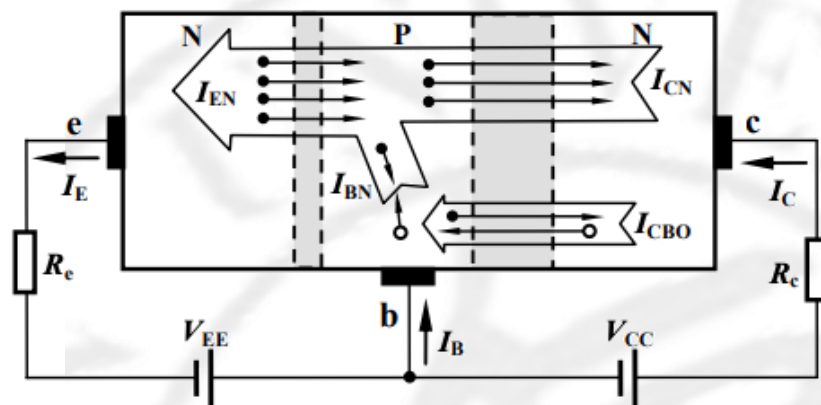
PNP型管结构示意图



NPN型管
电路符号



PNP型管
电路符号



$$I_E = I_B + I_C \quad I_C = I_{CN} + I_{CBO} \quad \alpha = \frac{I_{nC}}{I_E}$$

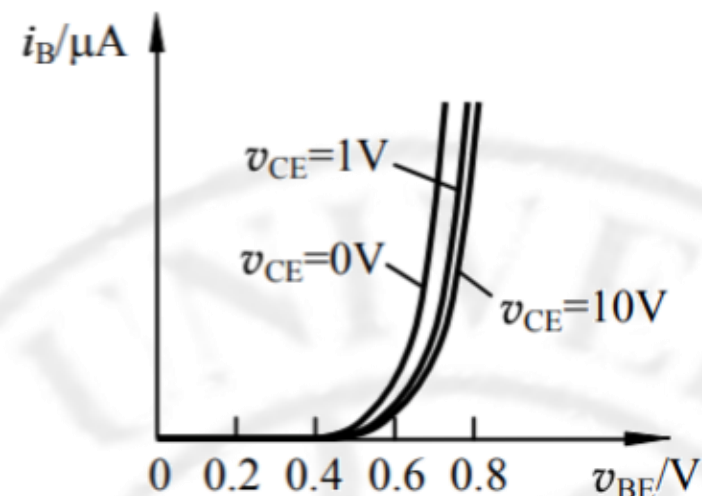
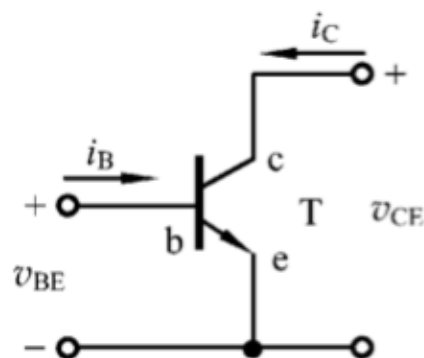
$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO} \quad (\text{穿透电流})$$

$$\beta = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \quad \text{当 } I_C \gg I_{CEO} \text{ 时, } \beta \approx \frac{I_C}{I_B}$$

BJT的IV特性曲线

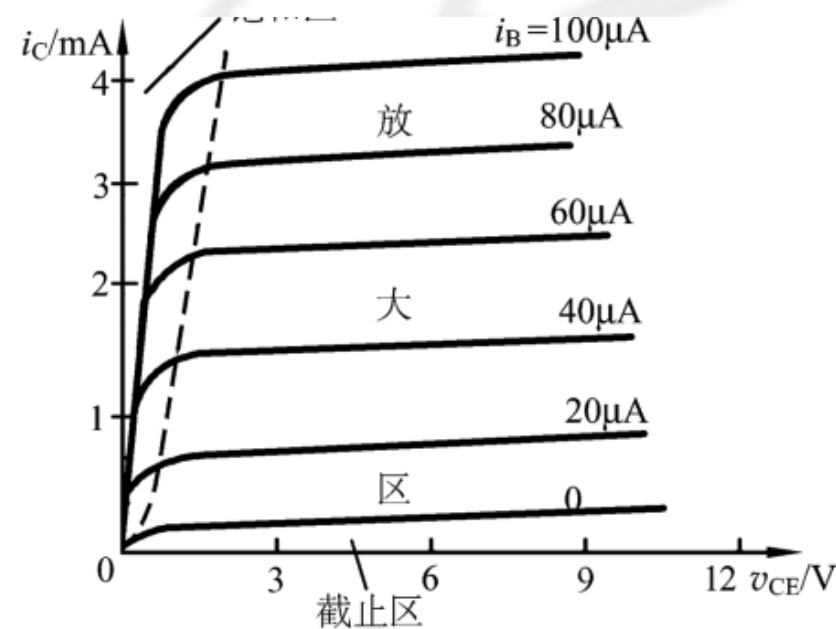
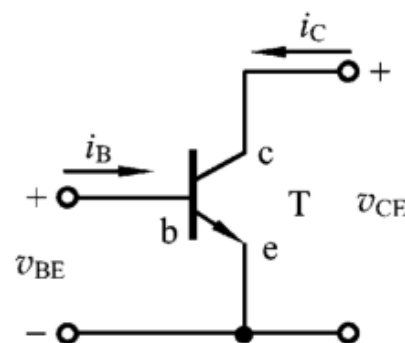
2. 共射极连接时的*I-V*特性曲线 输入特性曲线

$$i_B = f(v_{BE})|_{v_{CE}=\text{常数}}$$



输出特性曲线

$$i_C = f(v_{CE})|_{i_B=\text{常数}}$$



BJT的IV特性曲线

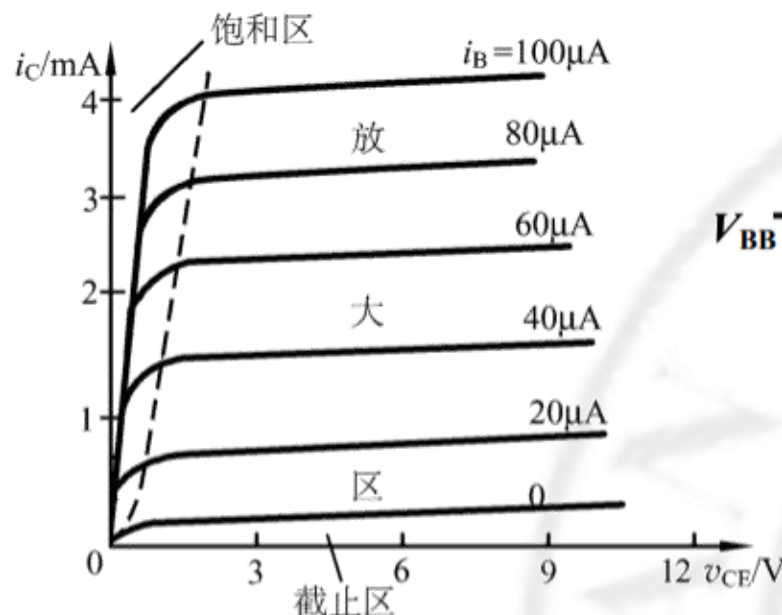
输出特性曲线

$$i_C = f(v_{CE}) |_{i_B = \text{常数}}$$

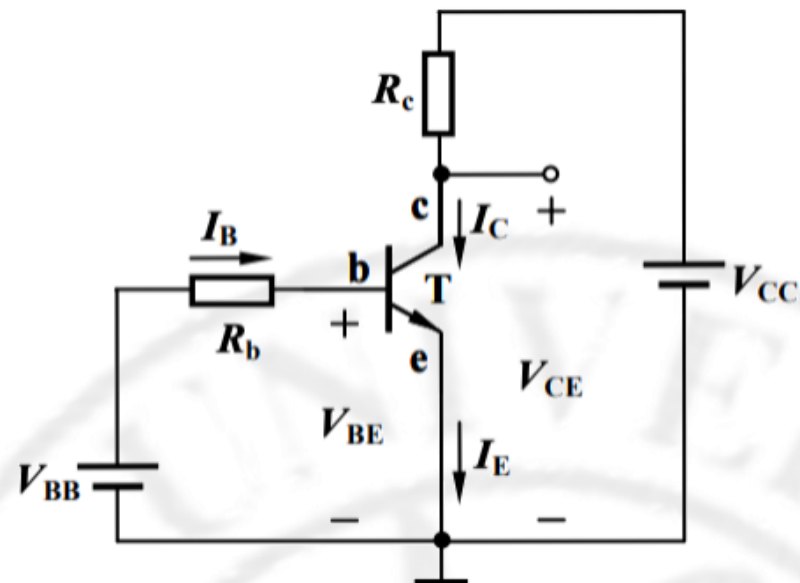
输出特性曲线的三个区域:

饱和区: i_C 明显受 v_{CE} 控制的区域, 该区域内, 一般 $v_{CE} < 0.7V$ (硅管)。此时, **发射结正偏, 集电结正偏或反偏电压很小。**

截止区: i_C 接近零的区域, 相当 $i_B = 0$ 的曲线的下方。此时, v_{BE} **小于死区电压。**



放大区: i_C 平行于 v_{CE} 轴的区域, 曲线基本平行等距。此时, **发射结正偏, 集电结反偏。**



$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_b}$$

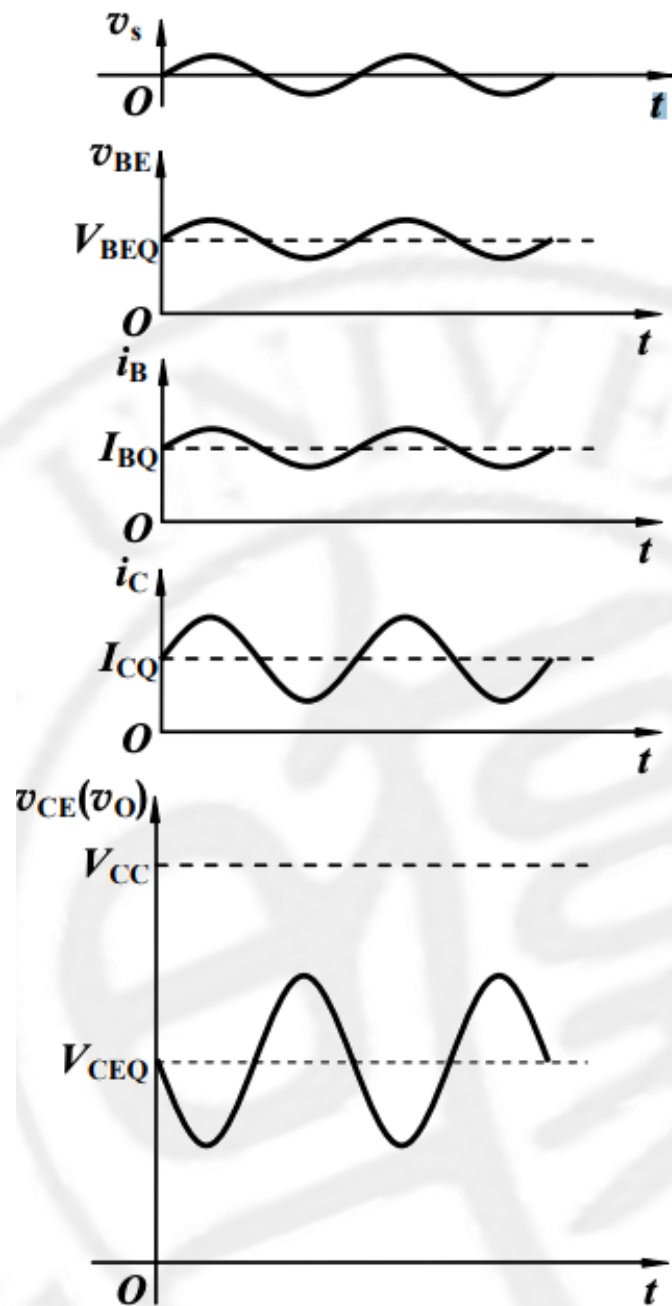
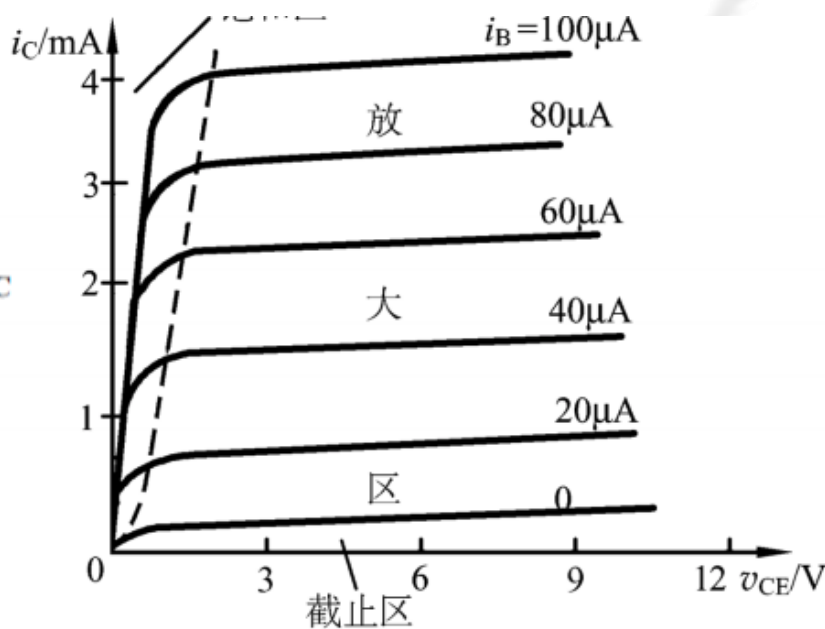
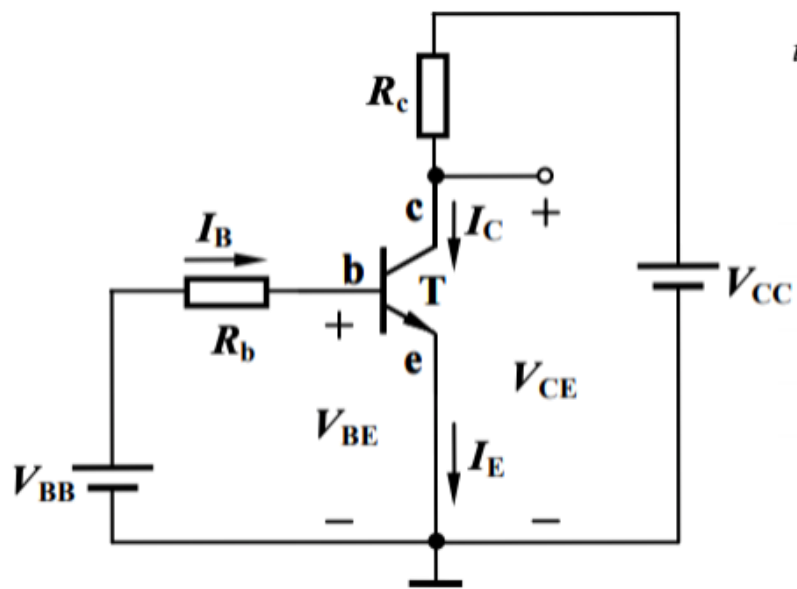
$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ}$$

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

一般硅管 $V_{BEQ} = 0.7V$,

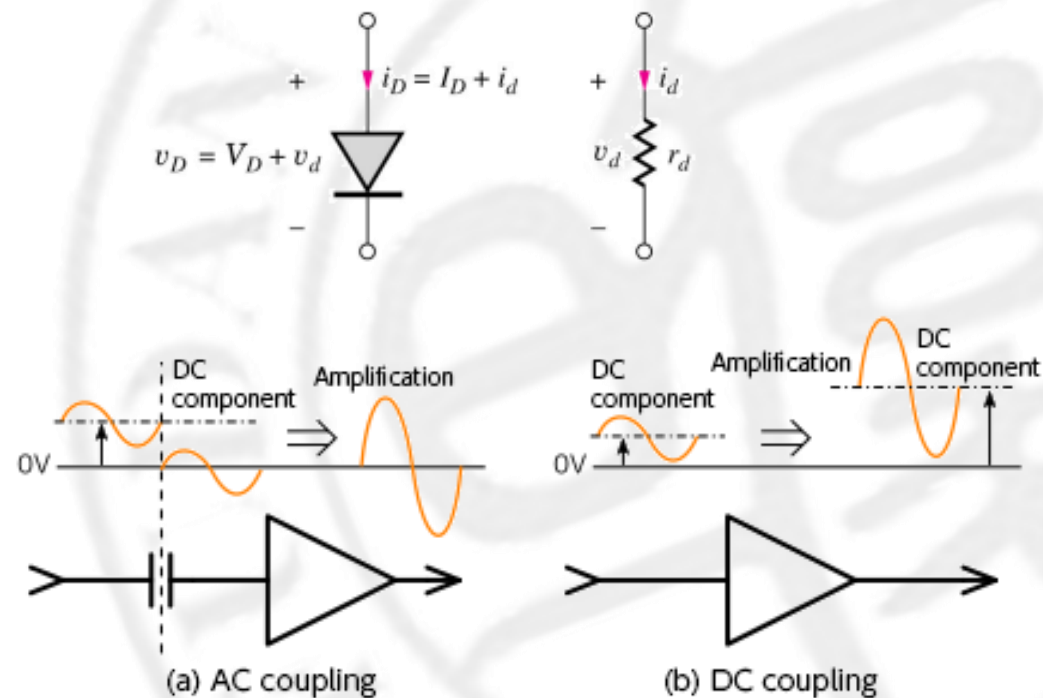
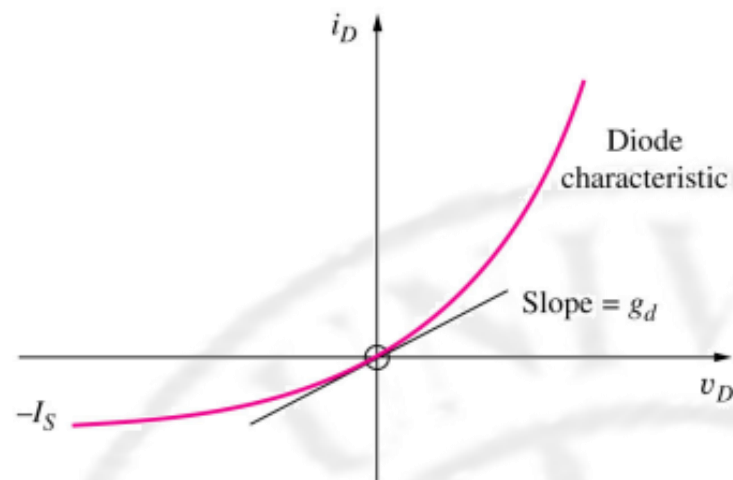
图解法分析放大电路

- 合理的静态工作点 (Q) 保障电路处于放大区
- I_{BQ} 过大或者过小将导致怎样的情况?



大信号 与 小信号

- 问题：晶体管电路的工作区域均为非线性，如何使用线性电路的量化分析方法？
- - 根据非线性关系推导 直流/静态工作点
- - 将不带直流信息的交流信号称为交流 **小信号 (AC)**，小信号由于幅度小，我均视为 线性电路进行分析计算



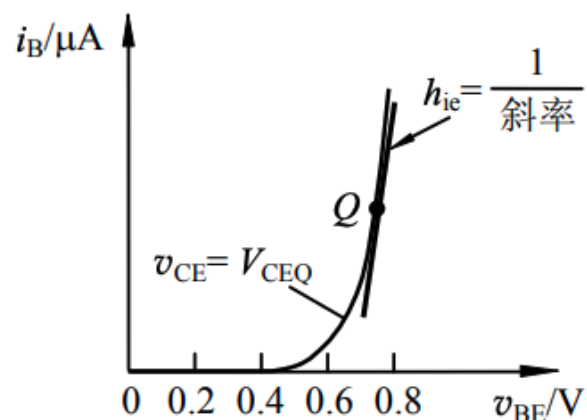
从IV曲线对BJT进行小信号线性建模

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}}$$

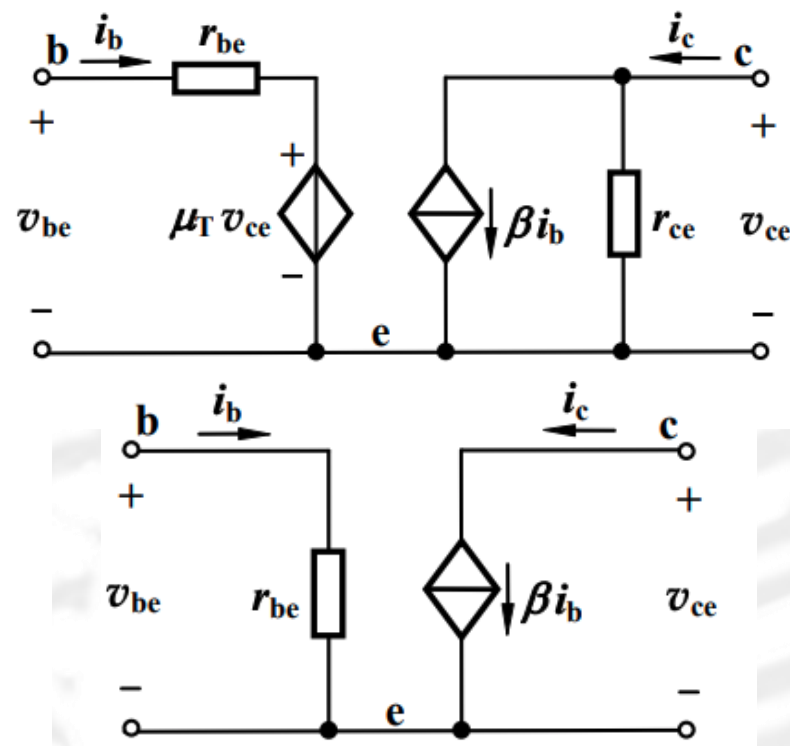
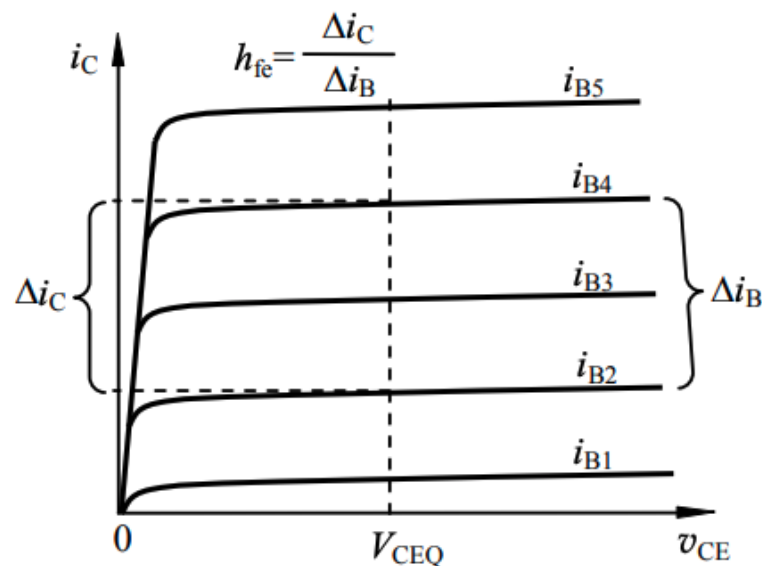
输出端交流短路时的输入电阻;

$$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_c}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}}$$

输出端交流短路时的正向电流传输比或电流放大系数;



$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} = r_{bb'} + \frac{U_T}{I_{BQ}}$$

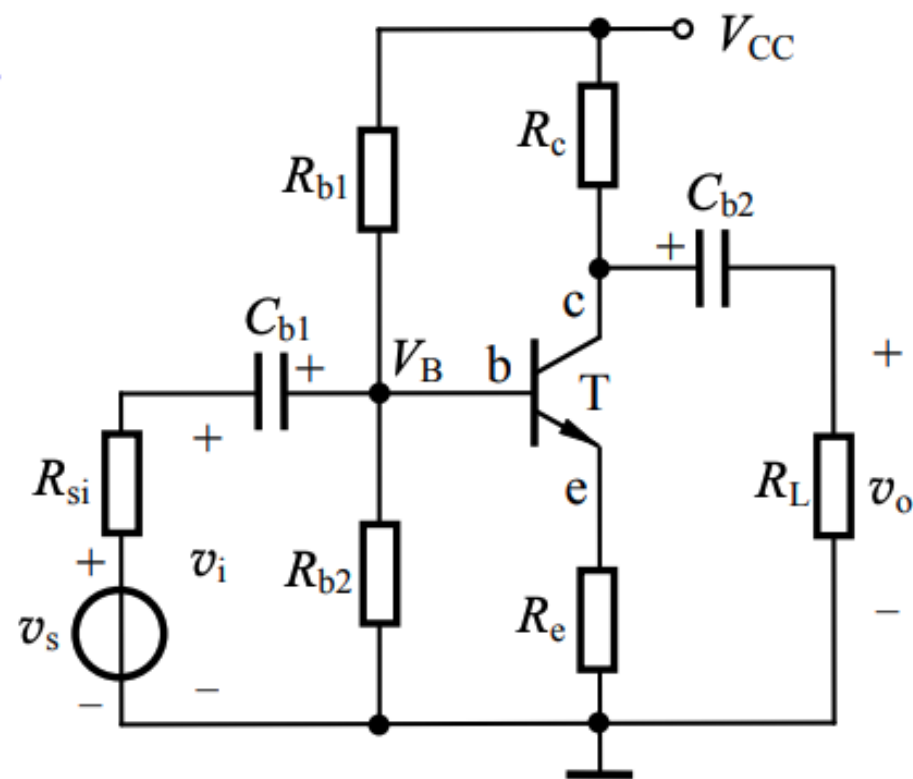
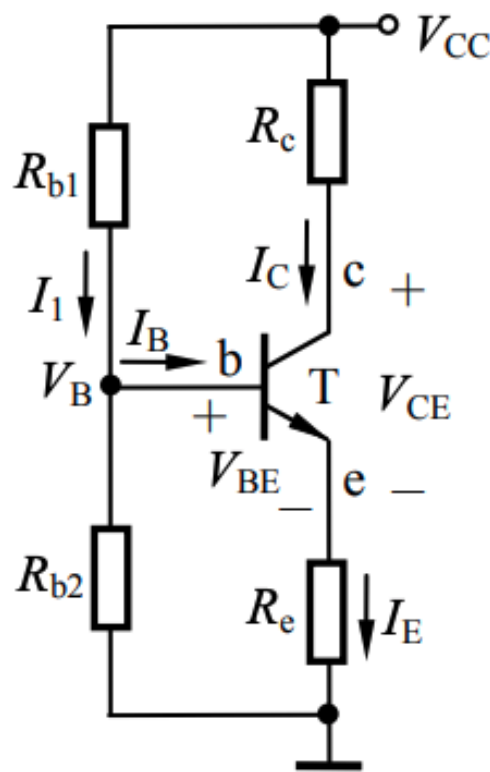


- βi_b 是受控源，且为电流控制电流源(CCCS);
- 电流方向与 i_b 的方向是关联的。

例题

例5.4.1 已知图示基极分压式射极偏置共射极放大电路中， $V_{CC}=16V$ ， $R_{b1}=56k\Omega$ ， $R_{b2}=20k\Omega$ ， $R_e=2k\Omega$ ， $R_c=3.3k\Omega$ ， $R_L=6.2k\Omega$ ， $R_{si}=500\Omega$ ，BJT的 $\beta=80$ ， $r_{ce}=100k\Omega$ ， $V_{BEQ}=0.7V$ 。设电容 C_{b1} 、 C_{b2} 对交流信号可视为短路。试计算 A_v 、 R_i 、 $A_{vs}=v_o/v_s$ 、 R_o 。

解：①由直流通路求静态工作点



例题

例5.4.1 已知图示基极分压式射极偏置共射极放大电路中, $V_{CC}=16V$, $R_{b1}=56k\Omega$, $R_{b2}=20k\Omega$, $R_e=2k\Omega$, $R_c=3.3k\Omega$, $R_L=6.2k\Omega$, $R_{si}=500\Omega$, BJT的 $\beta=80$, $r_{ce}=100k\Omega$, $V_{BEQ}=0.7V$ 。设电容 C_{b1} 、 C_{b2} 对交流信号可视为短路。试计算 A_v 、 R_i 、 $A_{vs}=v_o/v_s$ 、 R_o 。

解: ①由直流通路求静态工作点

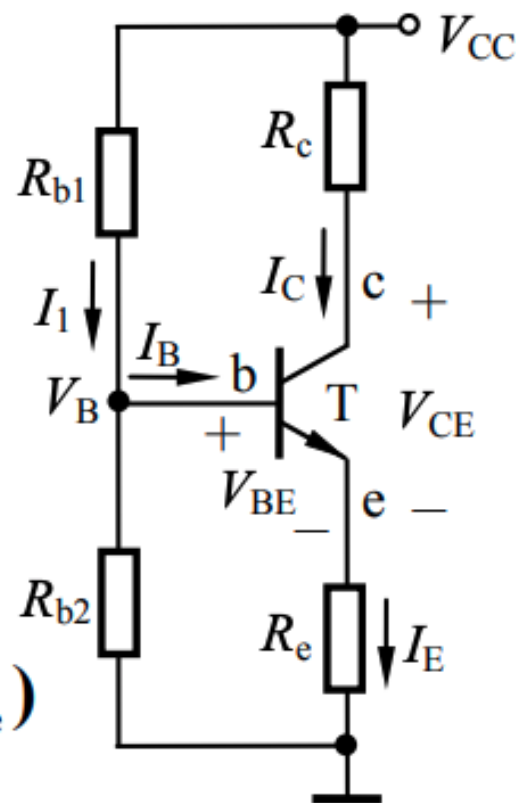
$$V_{BQ} \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - V_{BEQ}}{R_e}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c - I_{EQ}R_e \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

$$I_{BQ} = \frac{I_C}{\beta}$$

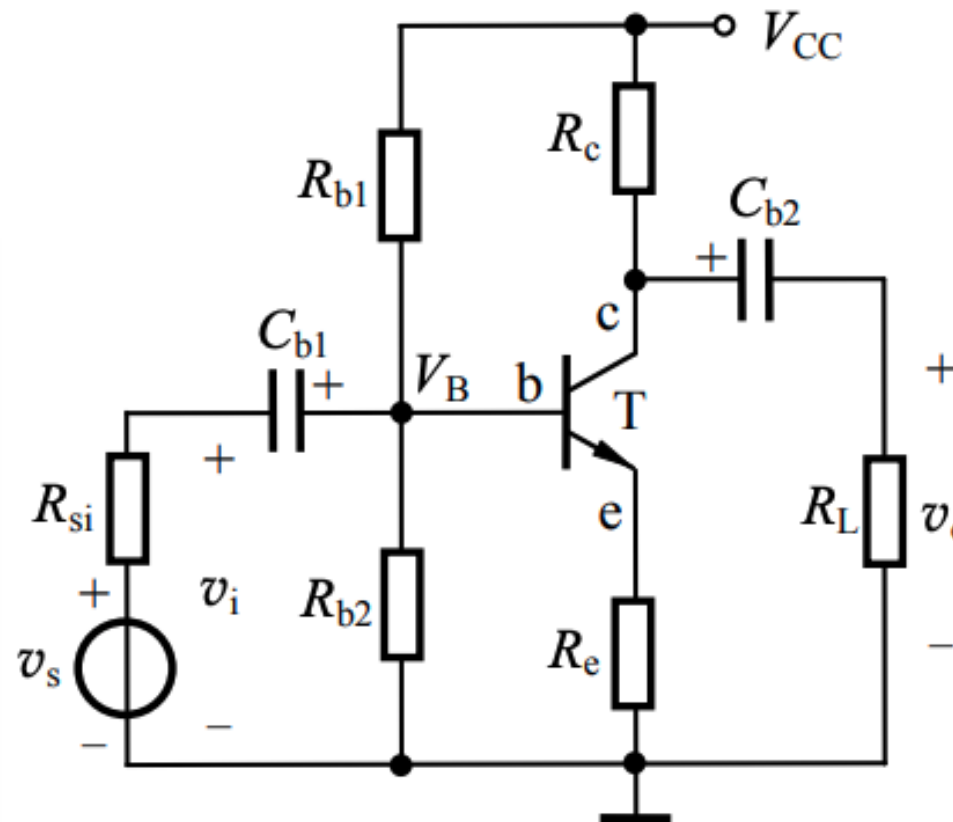
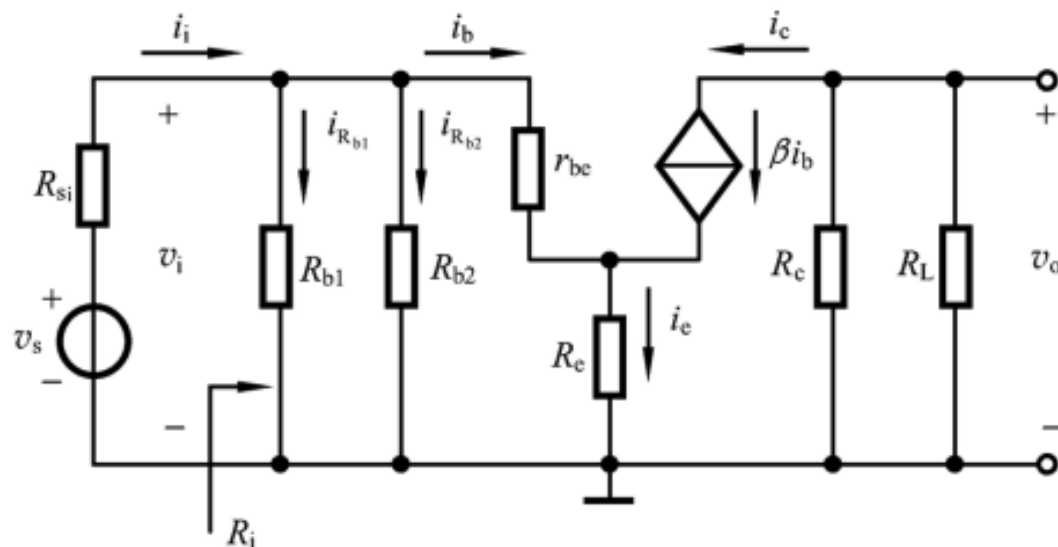
$$\text{求得 } I_{EQ} \approx 1.76 \text{ mA}$$



例题

解：②动态指标分析

画小信号等效电路



H参数 r_{be}

$$r_{be} = 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}(\text{mA})} = 200\Omega + (1 + 80) \frac{26\text{mV}}{1.76\text{mA}} \approx 1.4\text{k}\Omega$$

例题

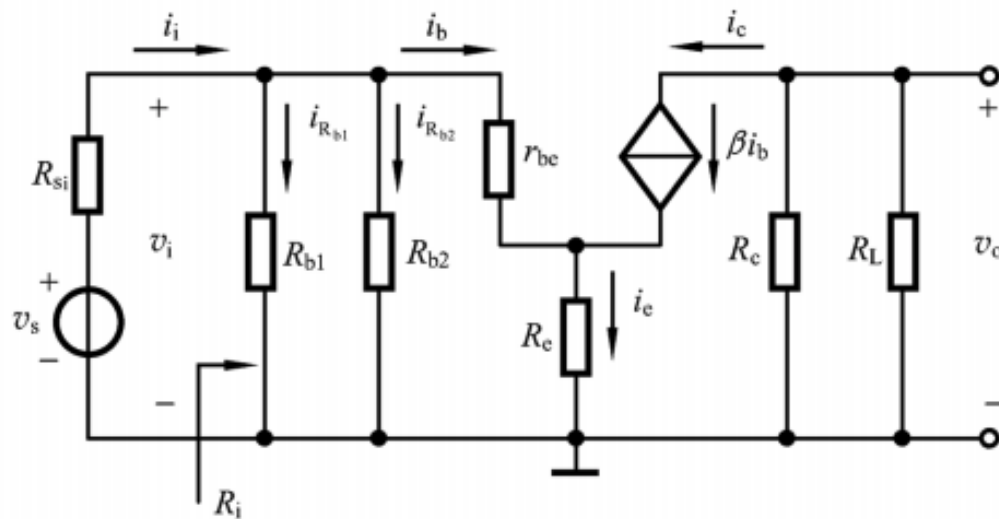
解：②动态指标分析

电压增益 A_v

$$v_o = -\beta i_b (R_c // R_L)$$

$$\begin{aligned} v_i &= i_b r_{be} + i_e R_e \\ &= i_b r_{be} + (1 + \beta) i_b R_e \end{aligned}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} = \frac{-80 \times \frac{3.3 \times 6.2}{3.3 + 6.2} \text{ k}\Omega}{(1.4 + 81 \times 2) \text{ k}\Omega} \approx -1.05$$



例题

解：②动态指标分析

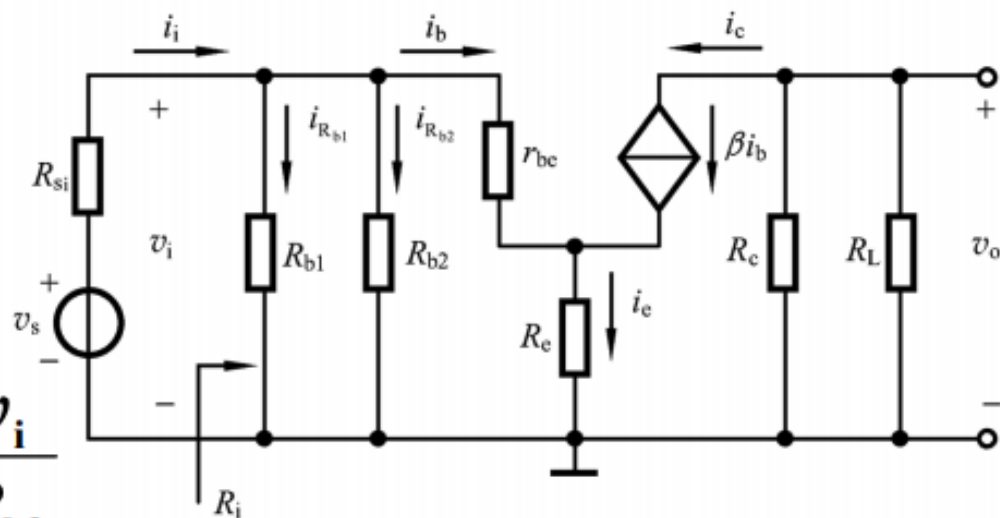
输入电阻 R_i

$$i_i = i_b + i_{R_b}$$

$$= \frac{v_i}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} + \frac{v_i}{R_{b1}} + \frac{v_i}{R_{b2}}$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{1}{\frac{1}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} + \frac{1}{R_{b1}} + \frac{1}{R_{b2}}}$$

$$= R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_e] \approx 13.52\text{k}\Omega$$



例题

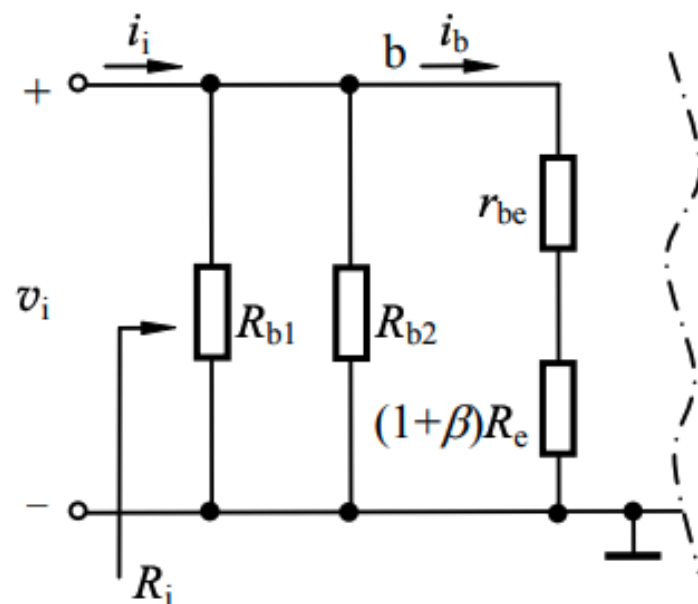
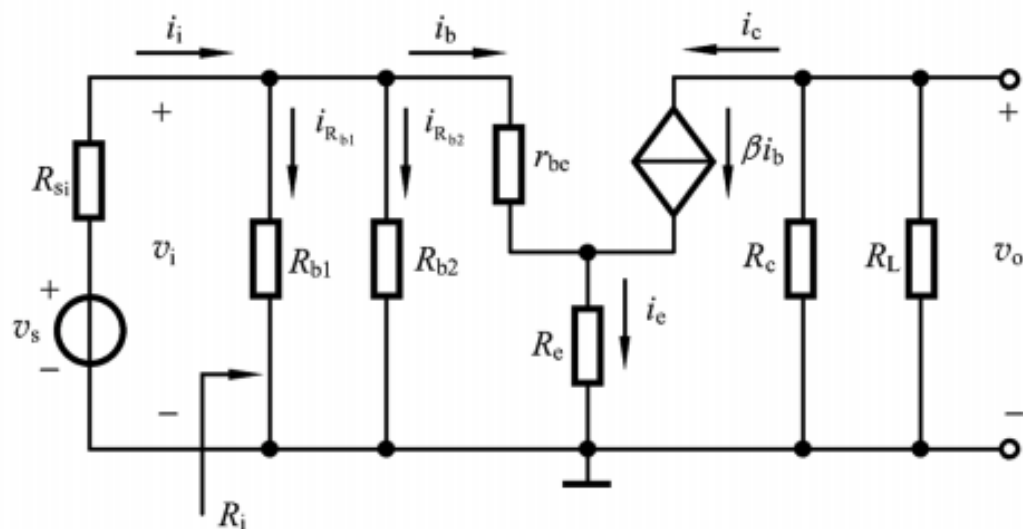
解：②动态指标分析

输入电阻 R_i

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_e]$$

式中 $(1 + \beta)R_e$ 是发射极支路电阻 R_e 折算到基极支路时的等效电阻。

发射极支路电阻折算到基极支路需要将电阻扩大 $(1 + \beta)$ 倍；反之，基极支路电阻折算到发射极支路需要将电阻缩小 $(1 + \beta)$ 倍。



例题

解：②动态指标分析

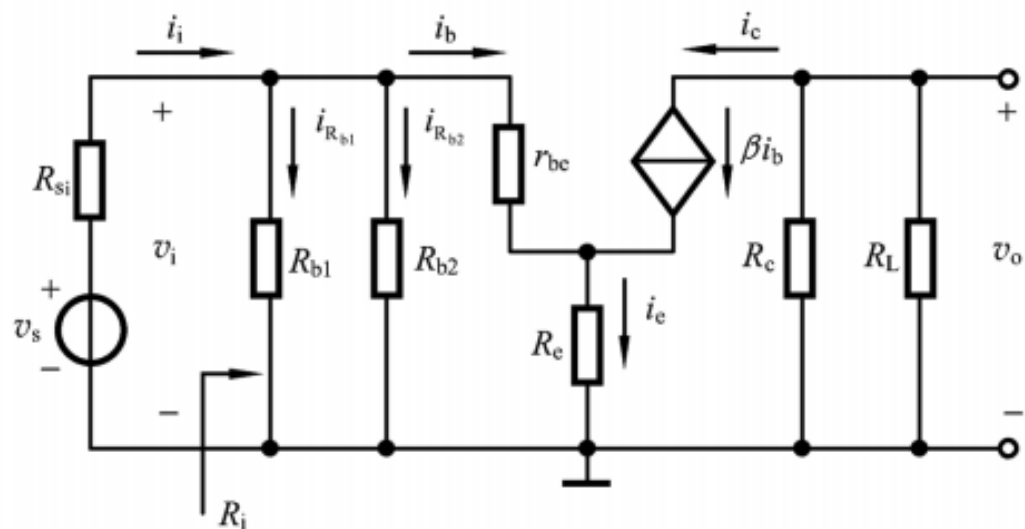
源电压增益 A_{vs}

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s}$$

$$= A_v \cdot \frac{R_i}{R_{si} + R_i}$$

$$= -1.05 \times \frac{13.52\text{k}\Omega}{(0.5 + 13.52)\text{k}\Omega}$$

$$\approx -1.01$$



思考：若 R_e 减小，那么增益会如何变化？

例题

解：②动态指标分析

输出电阻 R_o

基极回路根据KVL得：

$$i_b(r_{be} + R'_{si}) + (i_b + i_c)R_e = 0$$

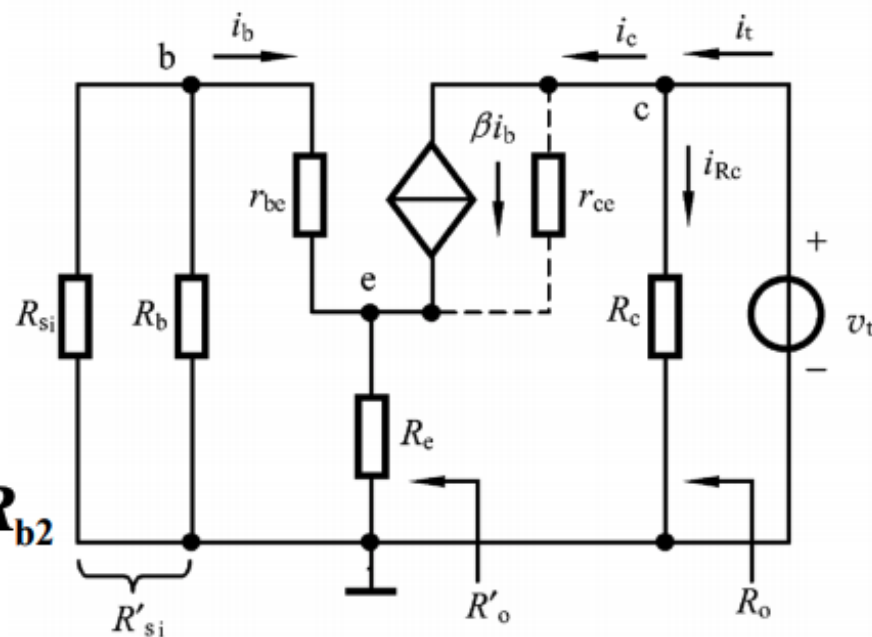
其中 $R'_{si} = R_{si} // R_b$ $R_b = R_{b1} // R_{b2}$

集电极回路根据KVL得：

$$v_t - (i_c - \beta i_b)r_{ce} - (i_b + i_c)R_e = 0$$

$$\text{得 } v_t = i_c \left[r_{ce} + R_e + \frac{R_e}{r_{be} + R'_{si} + R_e} (\beta r_{ce} - R_e) \right]$$

$$\text{所以 } R'_o = \frac{v_t}{i_c} = r_{ce} \left(1 + \frac{\beta R_e}{r_{be} + R'_{si} + R_e} \right) \quad (r_{ce} \gg R_e)$$



通常 $R'_o \gg R_c$

所以 $R_o \approx R_c = 3.3 \text{ k}\Omega$