

# 电子电路与系统基础I

《基础I---电阻电路》期末复习

李国林

清华大学电子工程系

# 一条主干 四个分支

电容器, 电感器  
一阶 RC/RL 滤波器,  
开关电容积分器, 整流器,  
张弛振荡器...

带宽, 延时, 移相...

一阶动态电路

电源, 电阻器  
分压器, 衰减器, 电桥,  
理想放大器,  
理想变压器,  
理想回转器,  
理想环形器...

增益, 阻抗, 噪声...

线性电阻电路

数字  
抽象  
开关, 非门, 与门,  
或门, 锁存器,  
触发器, 存储器...

状态, 状态转移...

基本元件  
电容, 电感  
(解析法, 相图,  
相量法(变换域方法)...)  
针对微分方程)

电路  
抽象

基本元件  
电源, 电阻  
(图解法, 解析解,  
线性化方法...)  
针对代数方程)

基本电路定律和电路定理  
基尔霍夫, 欧姆, 戴维南...

端口抽象  
电压, 电流, 功率,  
有源/无源...

LC 谐振腔, 负阻器件  
二阶 RLC 滤波器,  
阻抗匹配网络,  
正弦波振荡器,  
DC-AC, DC-DC 转换器...

谐振, 过冲, 振荡, 最大功率增益,  
匹配, 稳定性...

二阶动态电路

二极管, 晶体管  
整流器, 放大器,  
电流镜, 运放, 缓冲器,  
比较器, ADC/DAC...

失真, 线性度, 灵敏度,  
负反馈/正反馈...

非线性电阻电路

- 一条主干四个分支
- 定律、定理和方法

- 元件或器件
- 性能或基本电路概念

- 功能单元电路

# 第一学期上半学期重点内容

- 电路基本定律，基本定理及其运用
  - 第一重点：电路分析的基础
- 线性电阻电路
  - 可用线性代数方程描述的电路
  - 第二重点：线性电路分析是简单的矩阵运算
    - 网络参量：降维为二阶
- 电路基本概念
  - 第三重点：线性，传递函数（增益），阻抗，噪声，...

# 第一学期下半学期重点内容

- 非线性分析方法
  - 第一重点：对非线性进行线性化处理是工程惯例
- 基本单元电路
  - 重点是晶体管电路和运放电路
  - 第二重点：借助于晶体管的受控特性和能量转换能力实现各种功能
    - 受控源等效、开关等效、电流源等效、...
    - 放大器、振荡器及其他能量转换电路...
  - 运放是基本功能电路
    - 理想运放：虚短、虚断---负反馈连接即可假设线性区
    - 构造各种功能电路：负反馈、正反馈、开环应用
- 电路基本概念
  - 第三重点：非线性，失真，负反馈（重点），...

# 1. 非线性电路的分析方法

- 存在非线性元件的电路为非线性电路
  - 非线性电阻元件
    - 元件约束方程为非线性代数方程
  - 非线性动态元件
    - 元件约束方程为非线性的微积分关系
- 非线性电路方程求解比线性电路方程求解困难多多
  - 线性电路有成熟的分析方法，其数学求解过程本质就是矩阵运算过程，列方程矩阵求逆即可得解
    - 采用变换域方法、叠加定理、戴维南定理、电路抽象可以大大简化分析复杂度
  - 非线性电路没有成熟的统一的方法，一般是具体问题具体分析
    - 非线性的线性化是工程惯例，通过线性化实现对非线性的初级处理
    - 线性化方法可以给出足够简化的原理性足够强的近似解析解

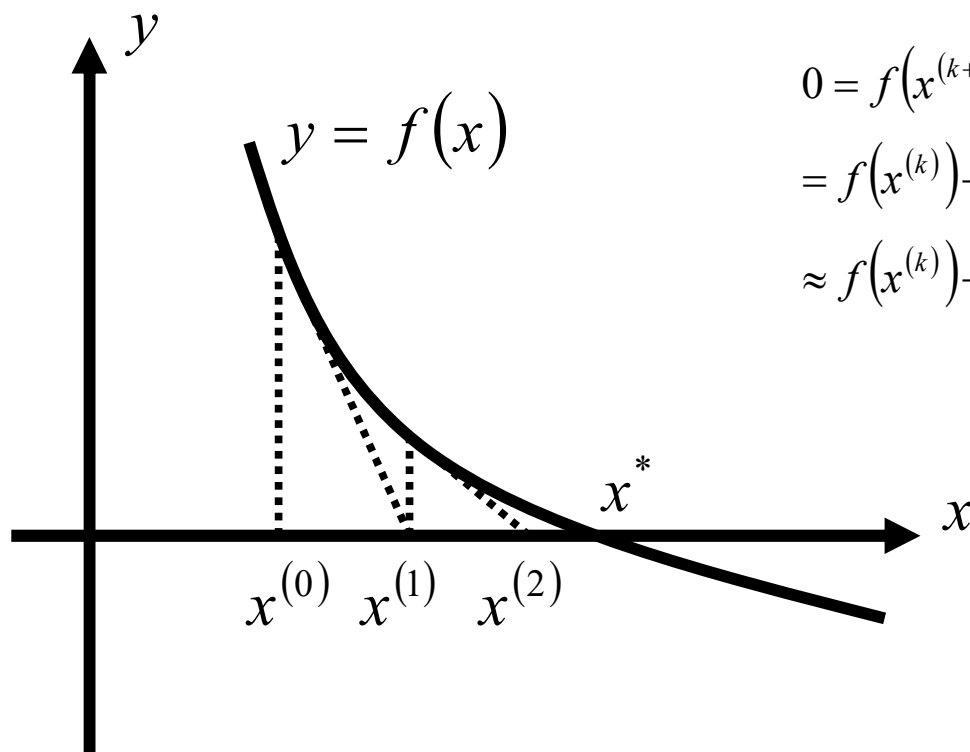
# 非线性电阻电路分析的基本方法

单MOS / BJT 晶体管电路为重点

- 解析法
  - 非线性元件数目少，描述方程简单
  - 具有某种对称结构，描述方程可化简
  - 第二章以反相器为例，第四章以差分对放大器为例（放到下学期讲）
- 数值法
  - 牛顿-拉夫逊迭代法，是一种线性化方法
  - 以非线性电阻保护电路为例
- 分段线性法
  - 将非线性曲线分割为数段折线，每段在各自范围内都可用线性约束
    - 折线化方法：可用某点切线、两点割线或者拟合直线替代包含该点的一个范围内的曲线
  - 以整流二极管、稳压二极管、MOSFET、BJT（电流镜、反相器）为例
- 局部线性法
  - 只要交流信号足够小，交流信号看不到曲线（非线性约束），它只能感受到局部的切线（线性约束）
  - 交直流分析法：确定直流工作点（非线性分析，分段折线分析），在直流工作点上进行交流小信号分析（局部线性分析）
  - 以负阻放大器、晶体管放大器为例
- 准线性法
  - 电路中存在滤波机制，使得非线性产生的高次谐波分量被滤除，外在看似线性，从而可以用线性方法进行处理（并非真线性，故称准线性）
  - 下学期内容：以正弦波振荡器为例

近似解析解  
解析解的线性项或近似线性项

## 2、牛顿-拉夫逊迭代法 以直代曲



$$\begin{aligned} 0 &= f(x^{(k+1)}) = f(x^{(k)} + \Delta x^{(k)}) \\ &= f(x^{(k)}) + f'(x^{(k)})\Delta x^{(k)} + \frac{1}{2}f''(x^{(k)})(\Delta x^{(k)})^2 + \dots \\ &\approx f(x^{(k)}) + f'(x^{(k)})\Delta x^{(k)} \end{aligned}$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})}$$

$$|f(x^{(n)})| < \varepsilon$$

迭代结束

$$x^{(n)} \approx x^{(n-1)}$$

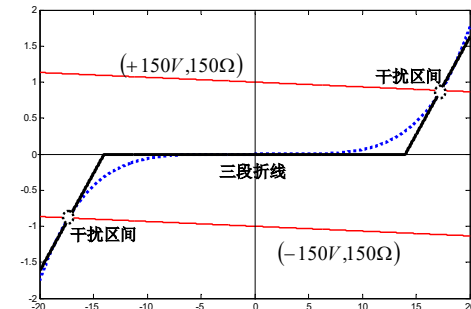
$$x^* \approx x^{(n)}$$

保留零阶项和一阶线性项：就是用切线替代原曲线：多次修正

牛顿-拉夫逊迭代法对实际晶体管电路一般线性修正次数（迭代次数）不会超过**10步**  
迭代是否收敛不是本课程研究内容，这里假设总是可以收敛到真实解

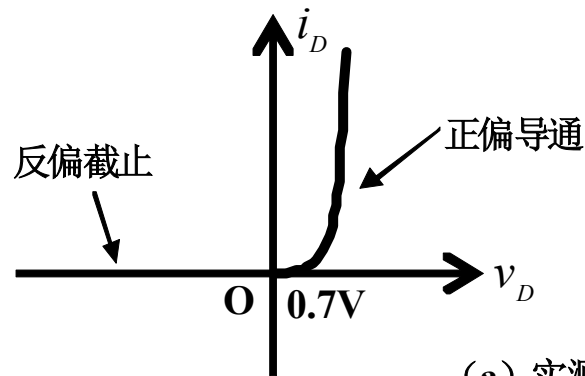
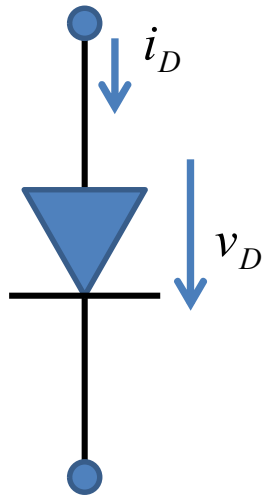
# 3、分段折线法：用直代曲

- 非线性特性中有明显分区特性的，均可分段折线处理
  - 二极管：正偏导通，反偏截止，反向击穿
  - 晶体管：截止区、恒流导通区、欧姆导通区
- 如果所处理的信号有明确的离散状态转换，对应于不同状态所处的非线性工作点位置，分别做局部线性化并拓展为分段折线
  - 处理方波信号、数字信号

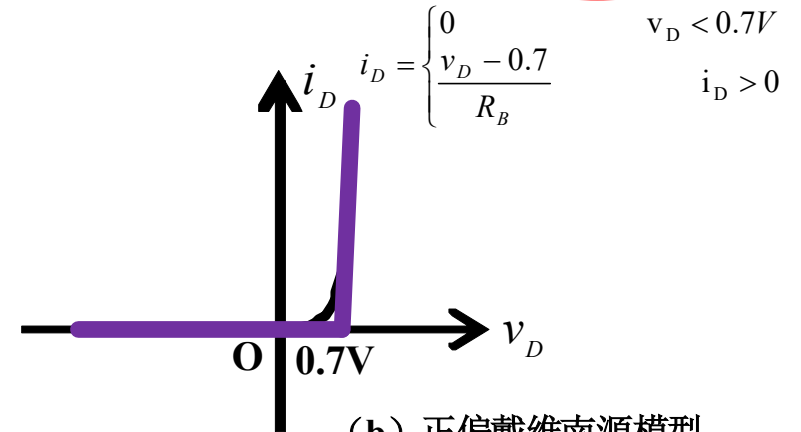




# 整流二极管分段折线

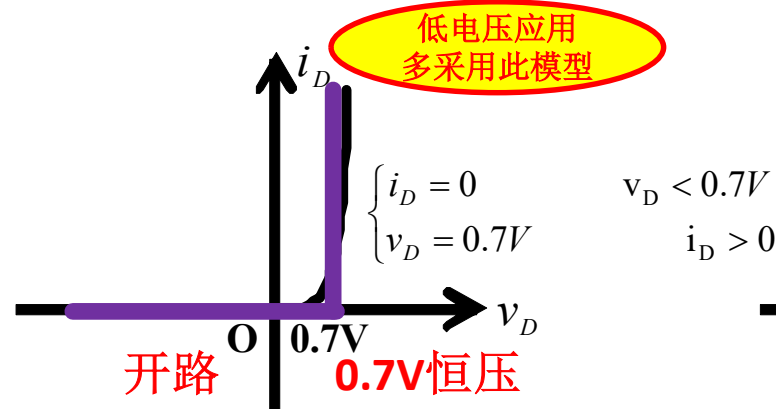


(a) 实测特性



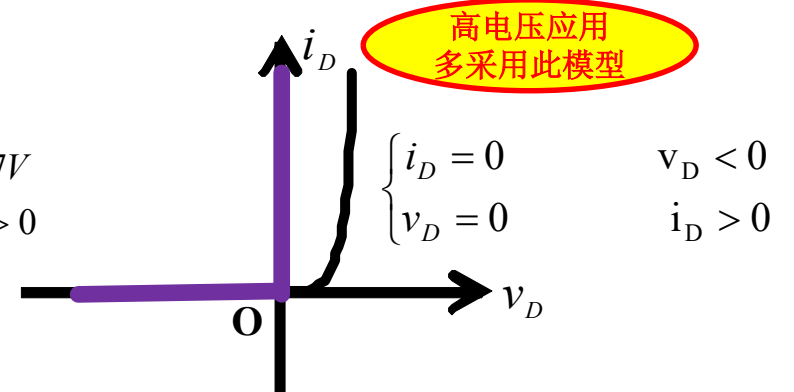
(b) 正偏戴维南源模型

应用很少



(c) 正偏恒压源模型

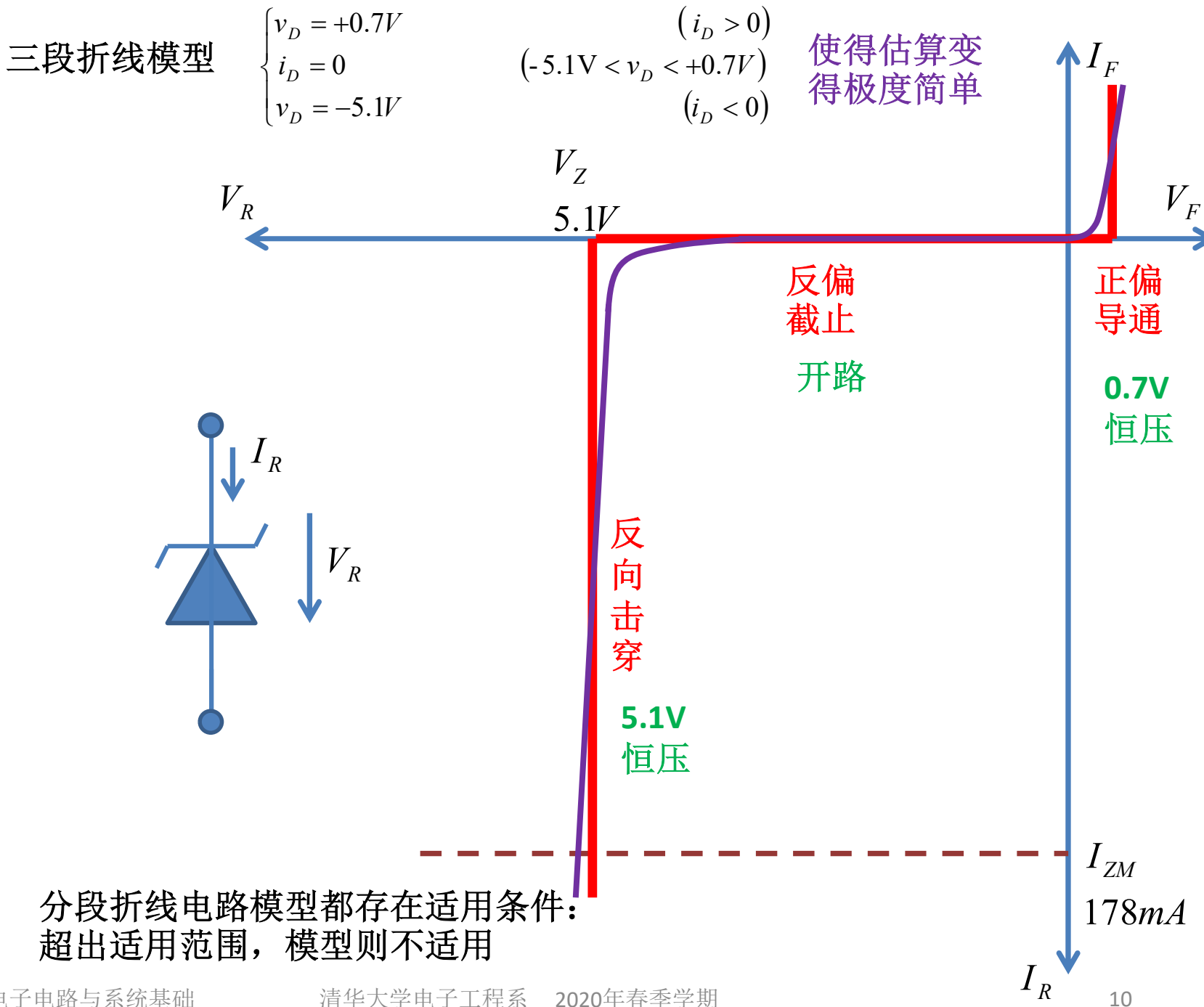
低电压应用  
多采用此模型



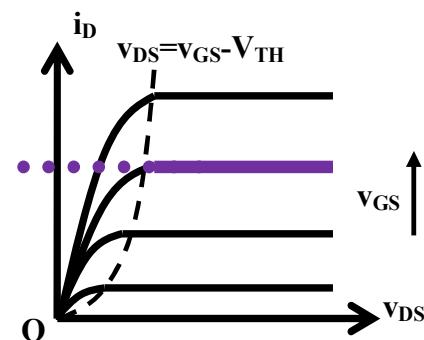
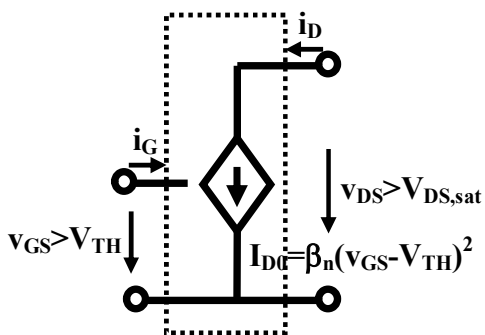
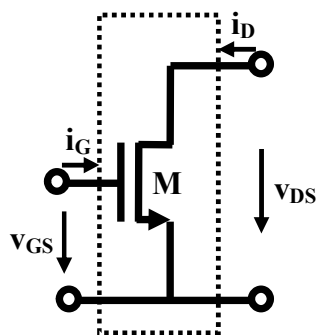
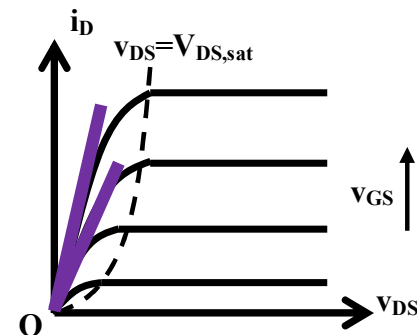
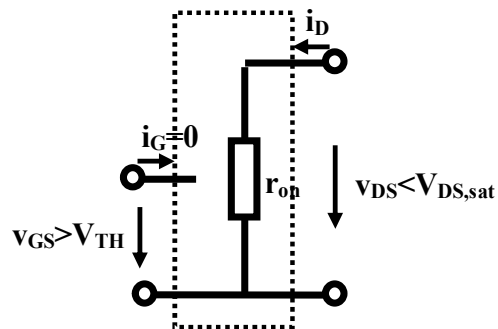
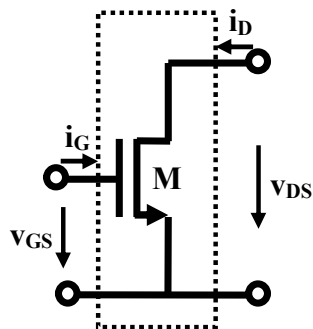
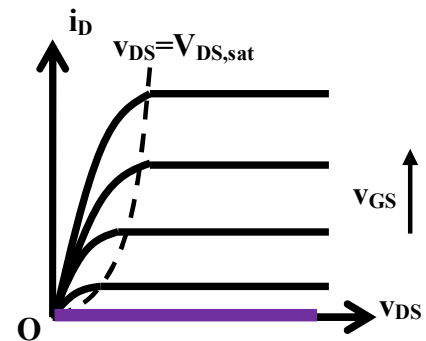
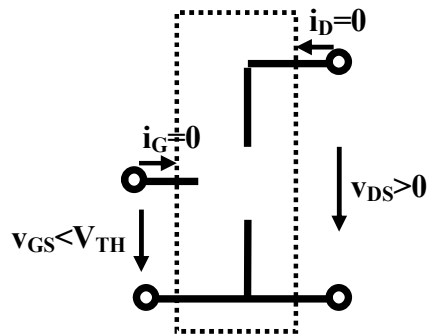
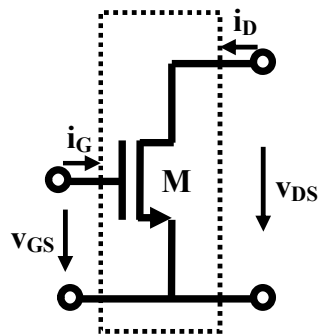
(d) 理想整流模型

高电压应用  
多采用此模型

# 稳压二极管分段折线

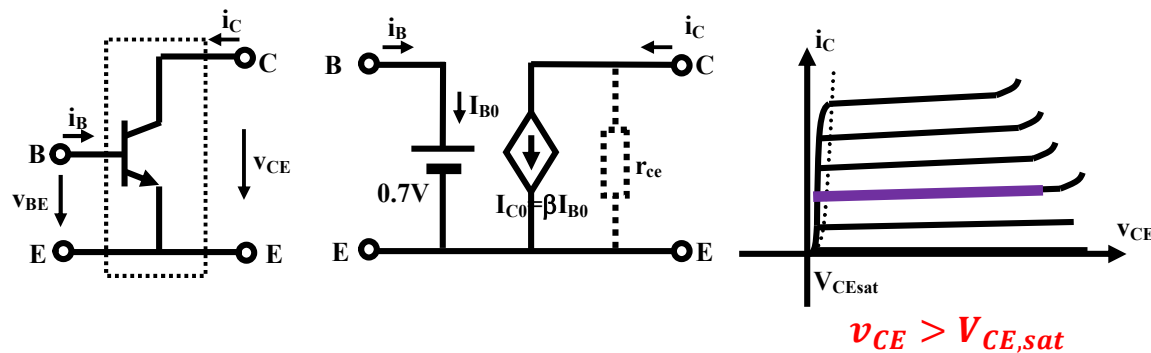
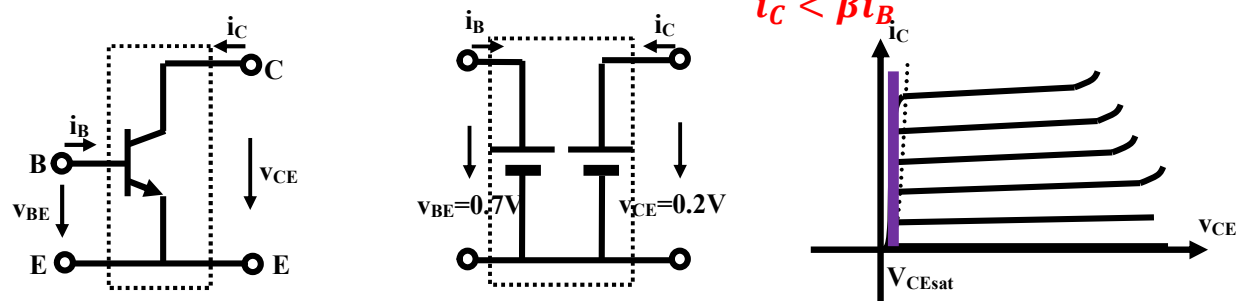
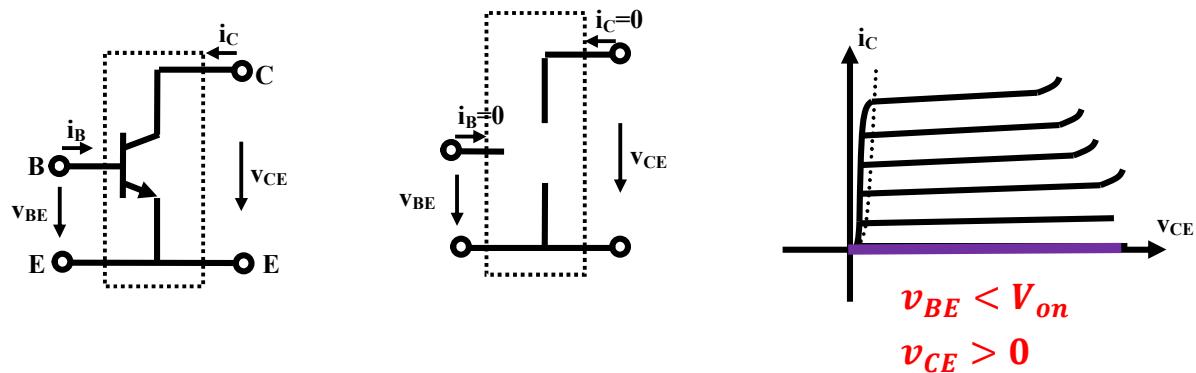


# MOS FET 分段 折线 模型



牢记：分区模型限定条件

# BJT 分段折线模型



牢记：分区模型限定条件

## 4、局部线性化：以直代曲

- 只要交流信号足够小，交流信号只能感受到局部线性特性
  - 对交流小信号而言，非线性元件对其实施的是微分线性处理

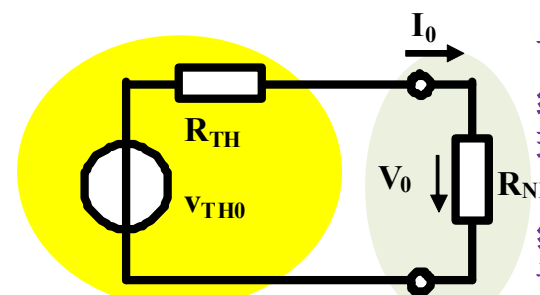
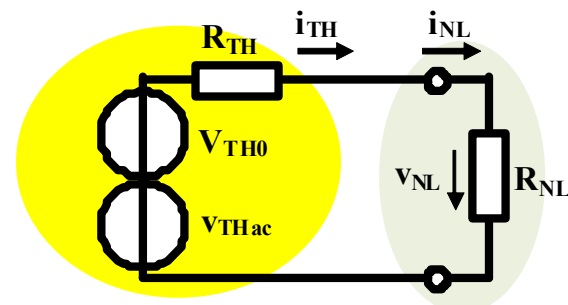
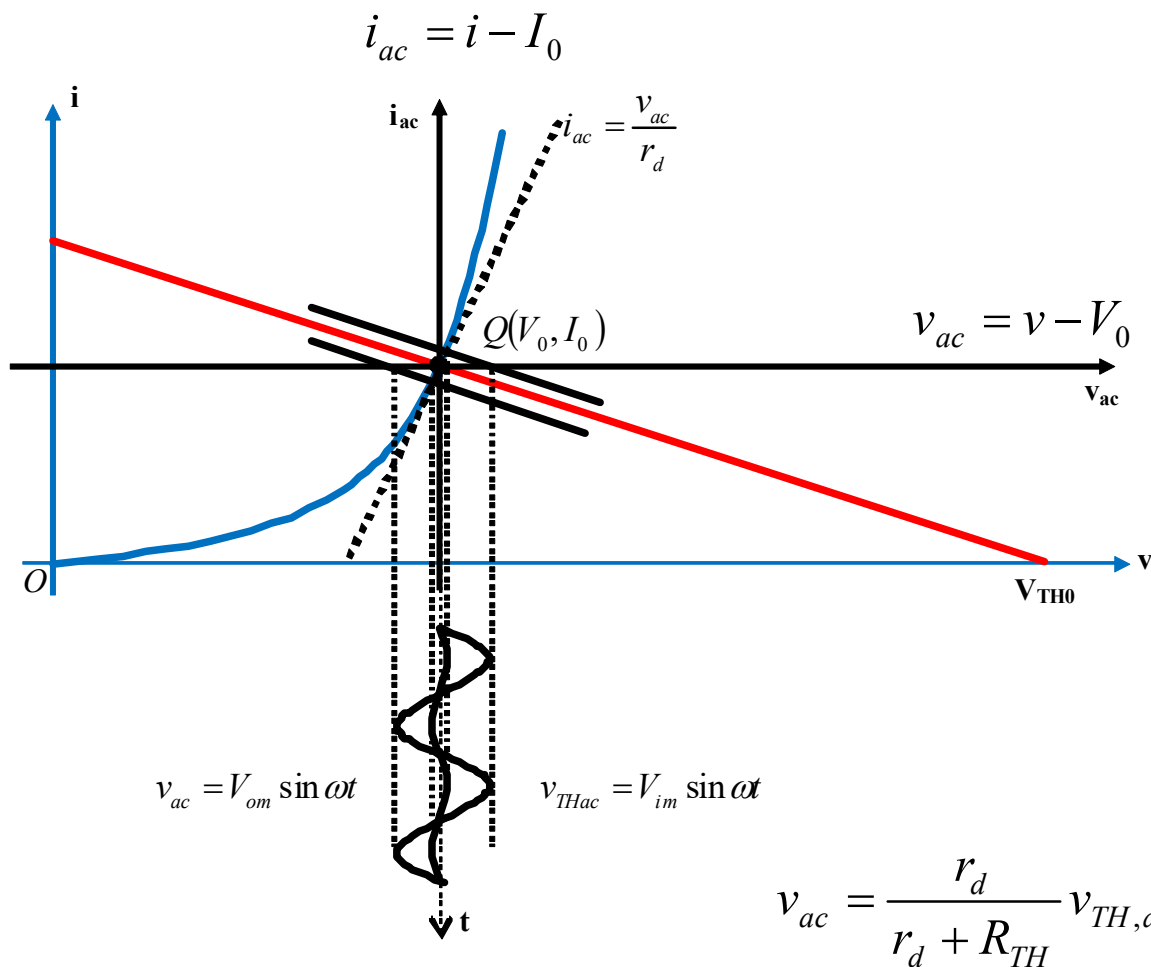
信号作用到元件上，得以处理：信号与系统

$$\begin{aligned} f(x(t)) &= f(X_{DC} + x_{ac}(t)) \\ &= f(X_{DC}) + f'(X_{DC}) \cdot x_{ac}(t) + \frac{1}{2} f''(X_{DC})(x_{ac}(t))^2 + \dots \\ &\approx f(X_{DC}) + f'(X_{DC}) \cdot x_{ac}(t) \end{aligned}$$

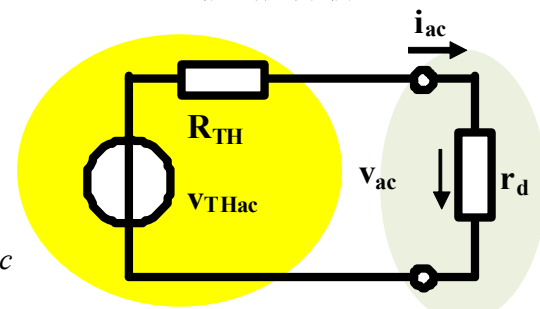
交流小信号感受到的是线性作用关系

交流信号足够小，高阶非线性项和线性项的影响力相比较，可以忽略不计

# 单端口非线性电阻局部线性化



直流非线性分析

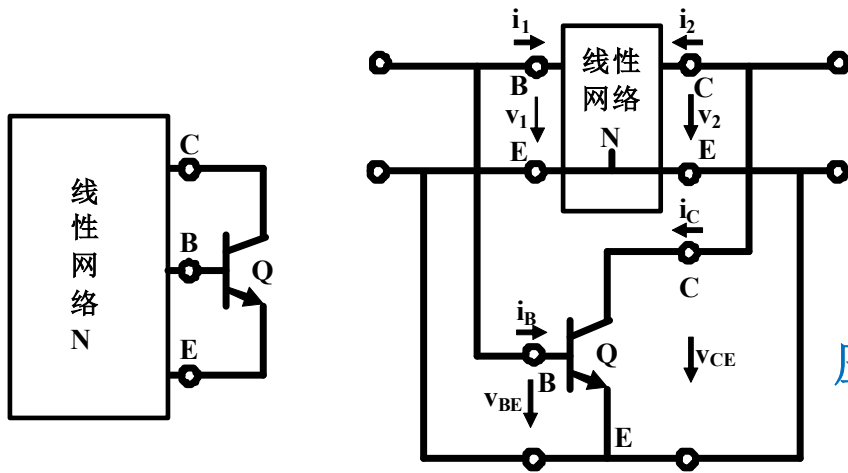


交流小信号线性分析

可以分段线性化处理：线性电阻，戴维南源，诺顿源等效替代

微分线性电阻替代

# 二端口非线性电阻 局部线性化方法



压控器件：以端口电压为变量列方程

线性网络中的直流偏置源二端口诺顿等效电流源

端口电压直流分量

线性网络直流y参量

$$\begin{bmatrix} f_B(V_{10}, V_{20}) \\ f_C(V_{10}, V_{20}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{N10} \\ I_{N20} \end{bmatrix} = 0$$

直流非线性分析

非线性压控网络  
端口直流电流

端口电压交流分量

线性网络中的交流激励源  
二端口诺顿等效电流源

$$\left( \begin{bmatrix} \frac{\partial f_B}{\partial v_1} & \frac{\partial f_B}{\partial v_2} \\ \frac{\partial f_C}{\partial v_1} & \frac{\partial f_C}{\partial v_2} \end{bmatrix}_{v_1=V_{10}, v_2=V_{20}} + \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta i_{N1} \\ \Delta i_{N2} \end{bmatrix} = 0$$

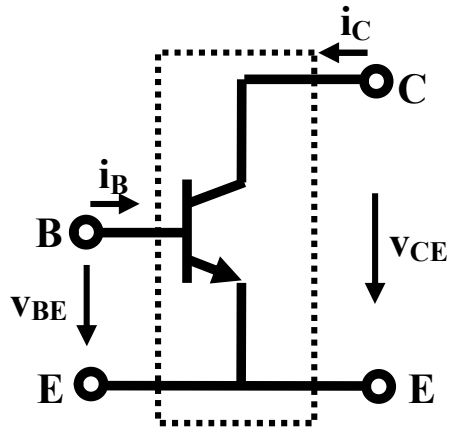
交流小信号线性分析

非线性二端口网络微分y参量

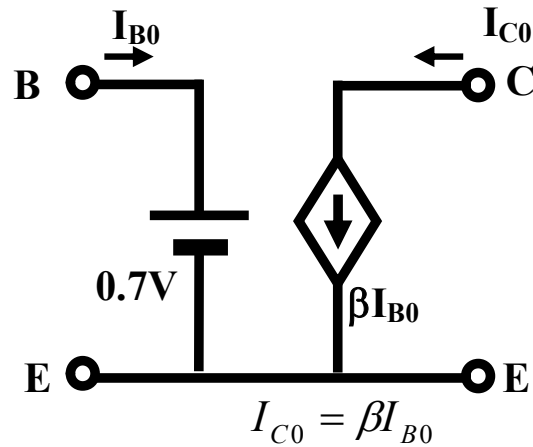
线性网络交流y参量

并并连接y相加

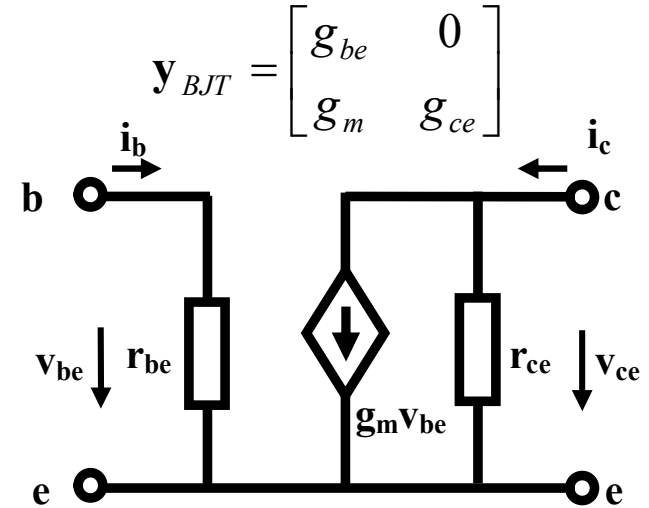
# 恒流区NPN-BJT交直流分析电路模型



(a) 二端口网络表述



(b) 直流分析电路模型



(c) 交流分析y参量等效电路

恒流区分段折线电路模型

恒流区微分元件电路模型

直流工作点上的微分元件

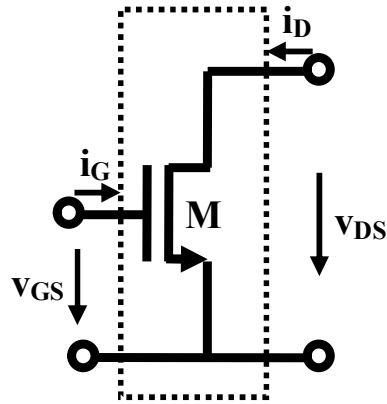
$$g_m \approx \frac{I_{C0}}{v_T}, r_{be} \approx \beta \frac{1}{g_m}, r_{ce} \approx \frac{V_A}{I_{C0}}$$

\*本页内容重点记忆

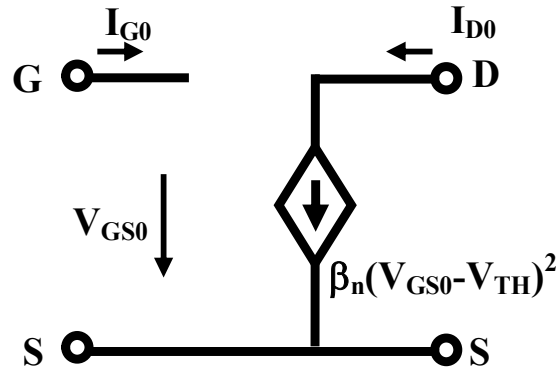
微分跨导增益    BE结微分电阻    厄利效应等效电阻



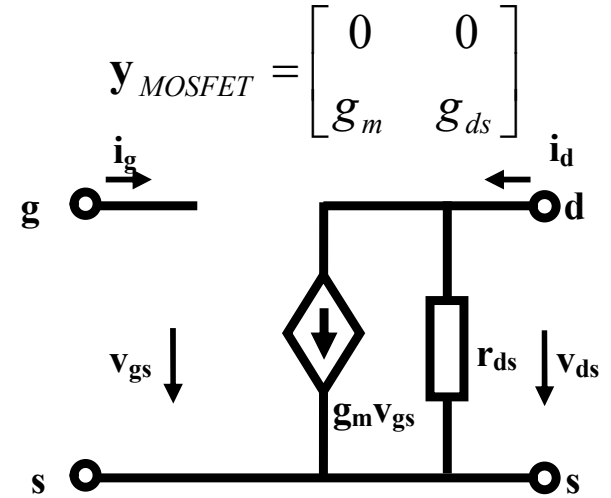
# 恒流区NMOSFET交直流分析电路模型



(a) 二端口网络表述



(b) 直流分析电路模型



(c) 交流分析y参量等效电路

$$y_{MOSFET} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ g_m & g_{ds} \end{bmatrix}$$

恒流区分段折线电路模型

$$g_m \approx \frac{2I_{D0}}{V_{od}}, r_{ds} \approx \frac{V_A}{I_{D0}}$$

微分跨导增益      厄利效应等效电阻

恒流区微分元件电路模型

直流工作点上的微分元件

$$I_{D0} \approx \beta_n (V_{GS0} - V_{TH})^2$$

\*本页内容重点记忆

# 非线性电阻电路的交直流分析

- 直流非线性分析

- 直流偏置源保留，交流激励源不起作用
- 耦合电容开路，高频扼流圈短路
- 非线性电阻处理
  - 简单则解析求解，复杂则数值求解
  - 具有分区特性则分段线性处理
    - 或其他近似法求解

电源不起作用

恒压源短路，恒流源开路

耦合电容、高频扼流圈是动态元件，本学期电阻电路分析中将其处理为频控开关，低频大电容开路，大电感短路，高频大电容短路，大电感开路，不考虑其动态效应

- 交流小信号线性分析

- 直流偏置源不起作用，交流激励源保留
- 耦合电容短路，高频扼流圈开路
- 非线性电阻用其微分元件电路模型替代
  - 根据非线性控制特性表述其微分元件电路模型
    - 初始模型：压控器件用 $y$ 参量电路模型，流控器件用 $z$ 参量电路模型，混控器件用 $h$ 、 $g$ 参量电路模型
    - 例：本讲义中，晶体管的元件约束是压控形式，故其初始微分元件电路模型是 $y$ 参量模型（跨导器模型），之后根据其组态，可将初始电路模型转换为其他形态的电路模型，如CB组态转化为 $h$ 参量电流缓冲器模型，CC组态转化为 $g$ 参量电压缓冲器模型，如是可简化分析
      - » 注意模型的适用范围

\*本页内容重点记忆

\*本页内容重点记忆

# 5、解析法

- 对于简单结构、对称结构，可以给出简单非线性方程描述的，则采用解析法描述

– 事实上，我们偏爱表述简单、物理意义明确的解析表达式，因为这类解析表达式给出的原理性结论，是数值法不能比拟的

- 不能直接给出解析表达式的，我们用近似法（分段线性、局部线性）给出近似的解析表达式，这些近似解析表达式往往具有十分明确的物理意义

– 记住它们有助于相关电路设计

$$i_G = 0$$

**MOSFET单管元件约束**

$$i_D = \begin{cases} 0 & v_{GS} < V_{TH} \\ 2\beta_n \left( (v_{GS} - V_{TH})v_{DS} - 0.5v_{DS}^2 \right) & v_{GS} > V_{TH}, v_{GD} > V_{TH} \\ \beta_n (v_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda v_{DS}) & v_{GS} > V_{TH}, v_{GD} < V_{TH} \end{cases}$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_{mf}R'_L = -\frac{g_m}{1 + g_m R_E} R'_L$$

**CE组态晶体管放大器电压增益**

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_m}{1 + g_m R'_S} R'_L = g_{mf}R'_L$$

**CB组态晶体管放大器电压增益**

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_m}{1 + g_m R'_L} R'_L = g_{mf}R'_L$$

**CC组态晶体管放大器电压增益**

$$r_{inf} = r_{in}(1 + G_{m0}R_F)$$

$$r_{ouf} = r_{out}(1 + G_{m0}R_F)$$

$$G_{mf} = \frac{G_{m0}}{1 + G_{m0}R_F}$$

**串串负反馈放大器形成接近理想的压控流源** 19

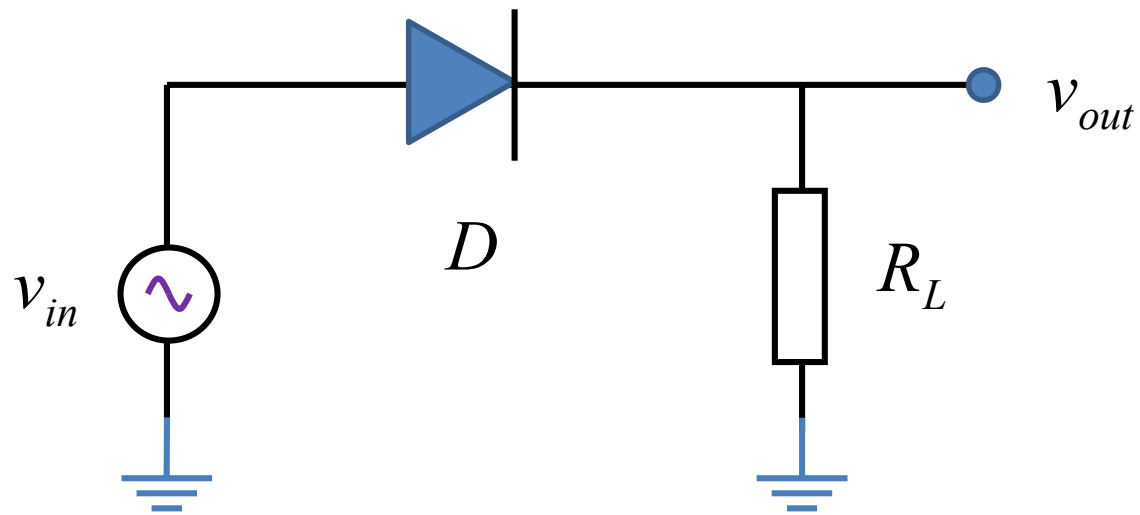
# 6、半导体器件形成的功能电路

- 信息处理单元
  - 放大器：本学期重点
  - 振荡器：下学期重点
  - 乘法器：用可变增益放大器原理性理解即可
  - 数字门电路：推到下学期讨论
- 能量处理单元
  - 整流器：二极管整流器，本学期考察
  - 逆变器：晶体管逆变器，原理性理解即可
  - 稳压器：二极管稳压器，本学期考察
    - DC-DC转换电路：下学期考察

# 7、二极管整流器

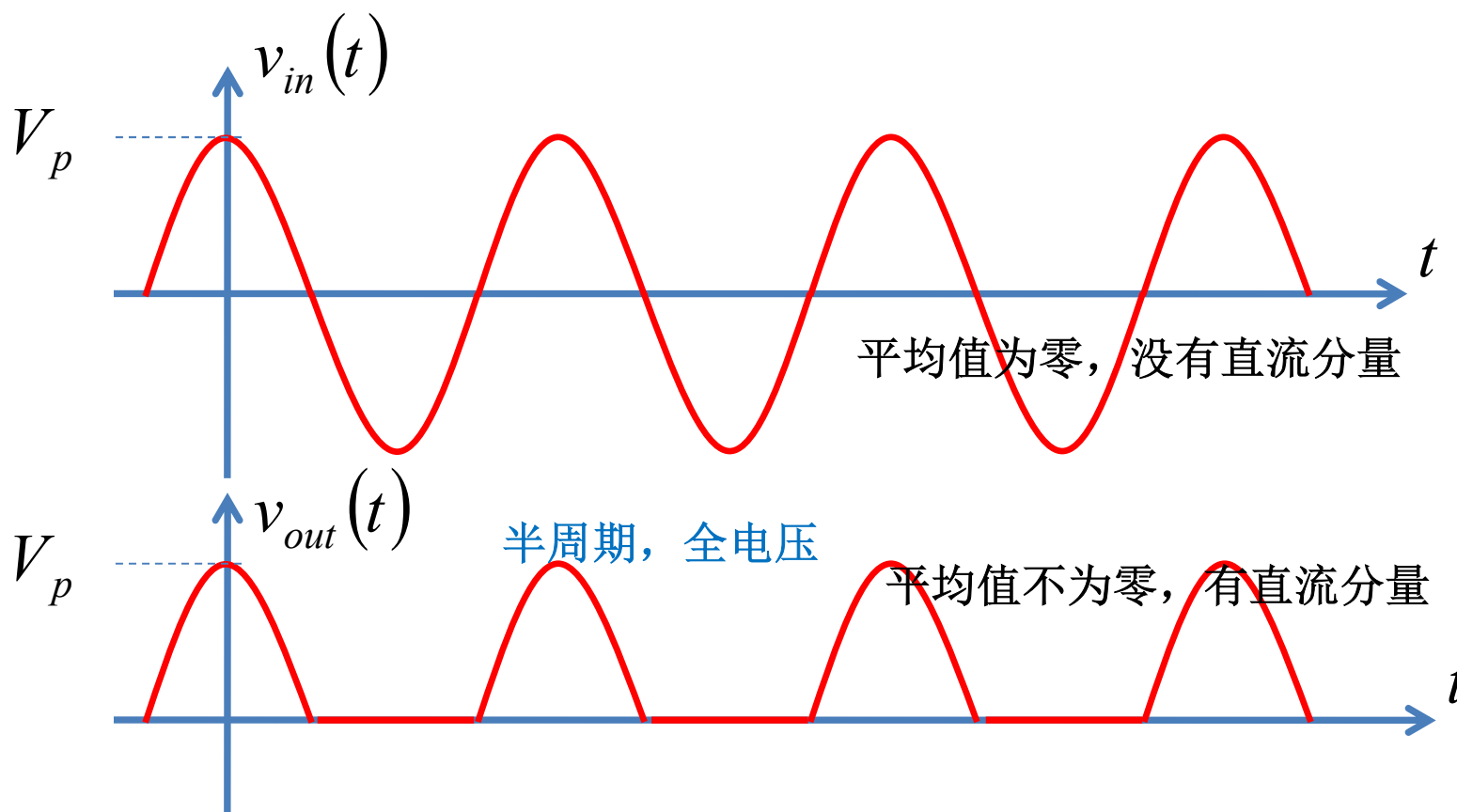
利用二极管正偏导通、反偏截止的开关‘整流特性’，将交流能量转换为直流能量

- 半波整流
  - 只利用了正弦波的半个周期、全电压利用
- 全波整流
  - 利用了正弦波的整个周期，半电压利用
- 桥式整流
  - 利用了正弦波的整个周期，全电压利用

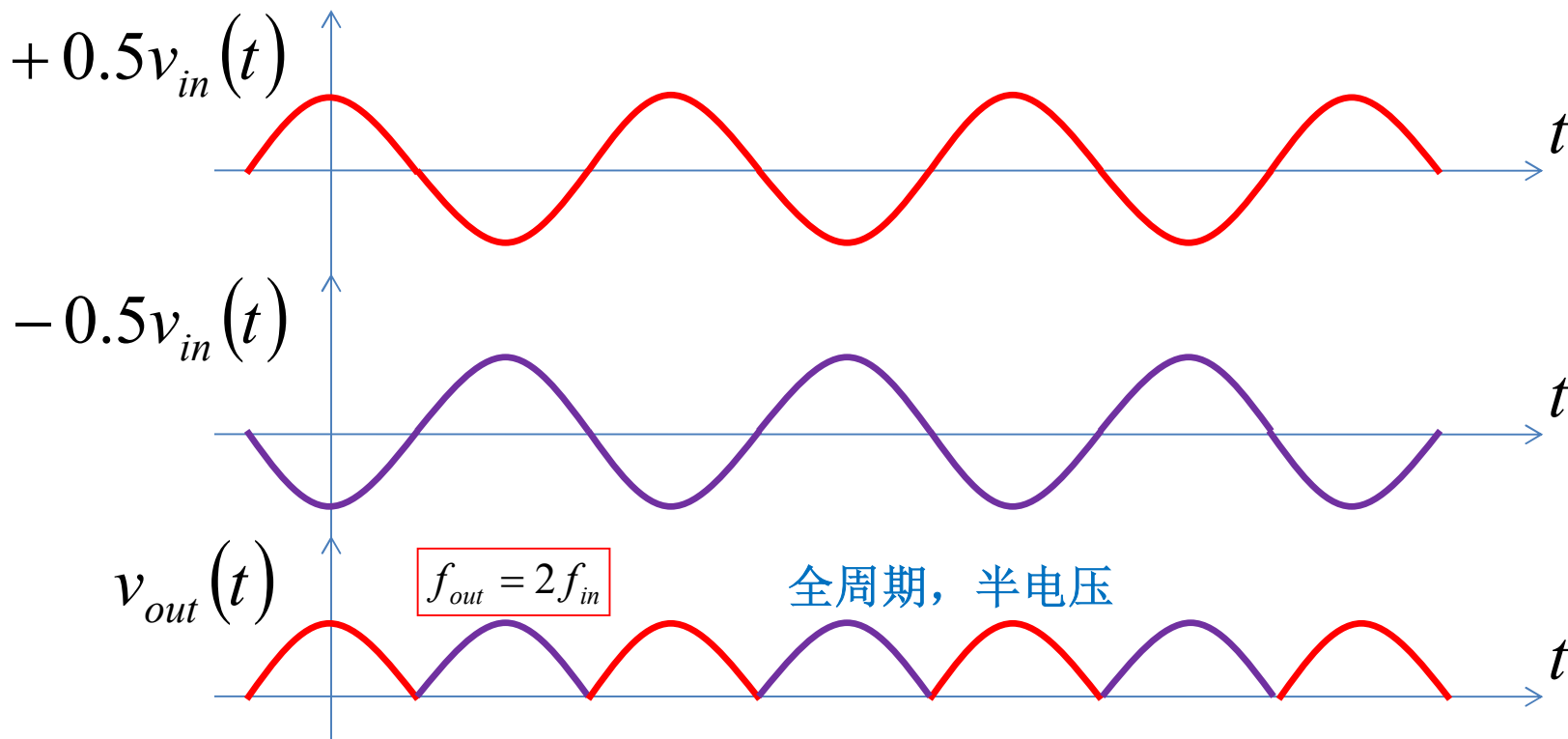
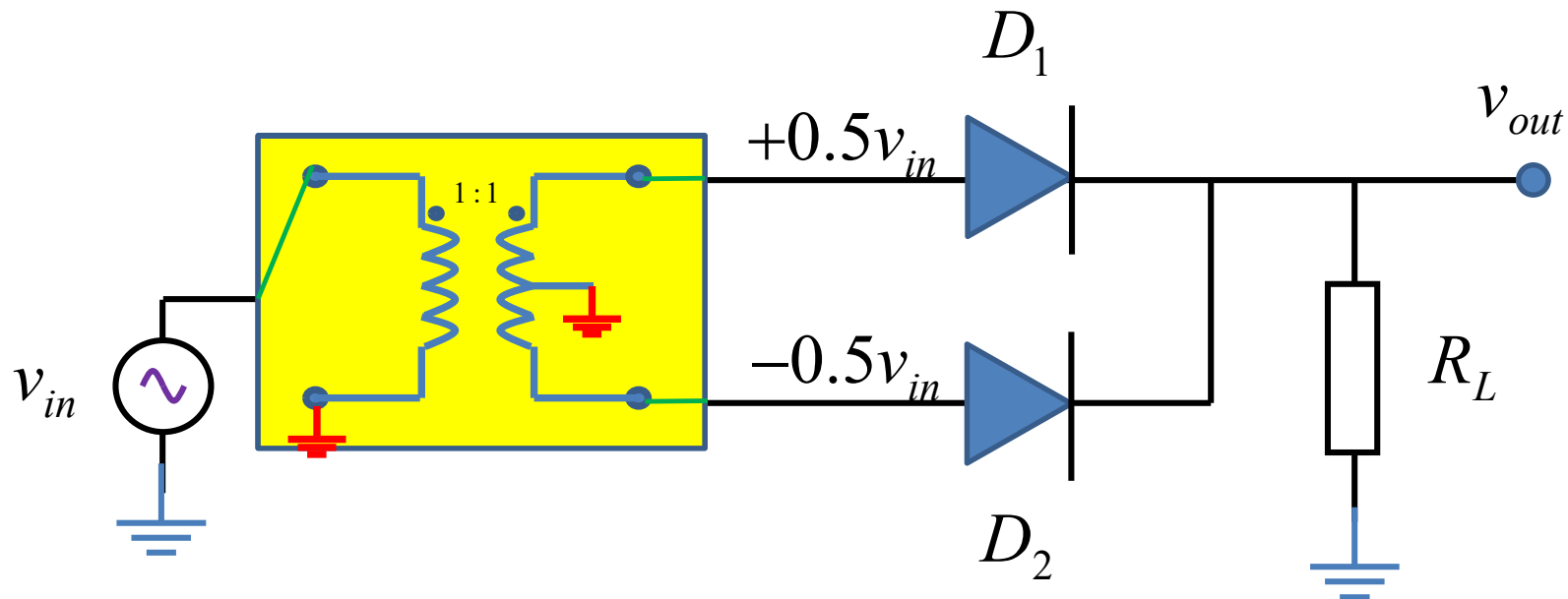


# 半波整流

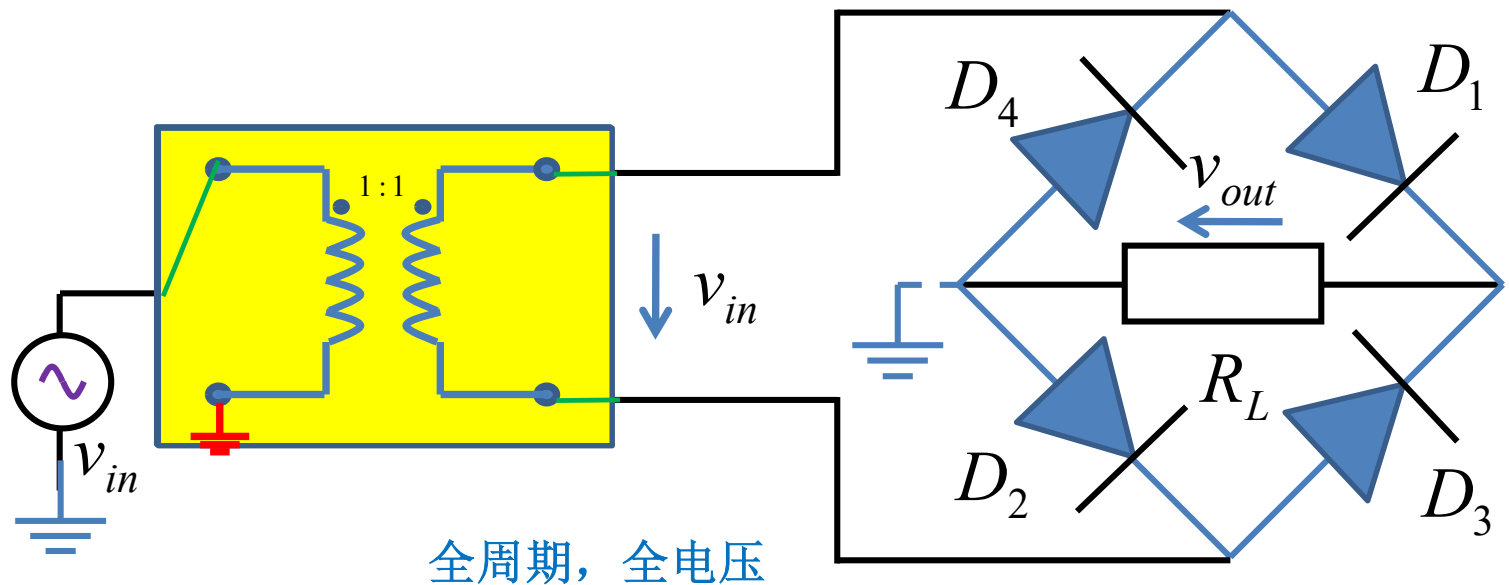
$$V_p < V_{RRM}$$



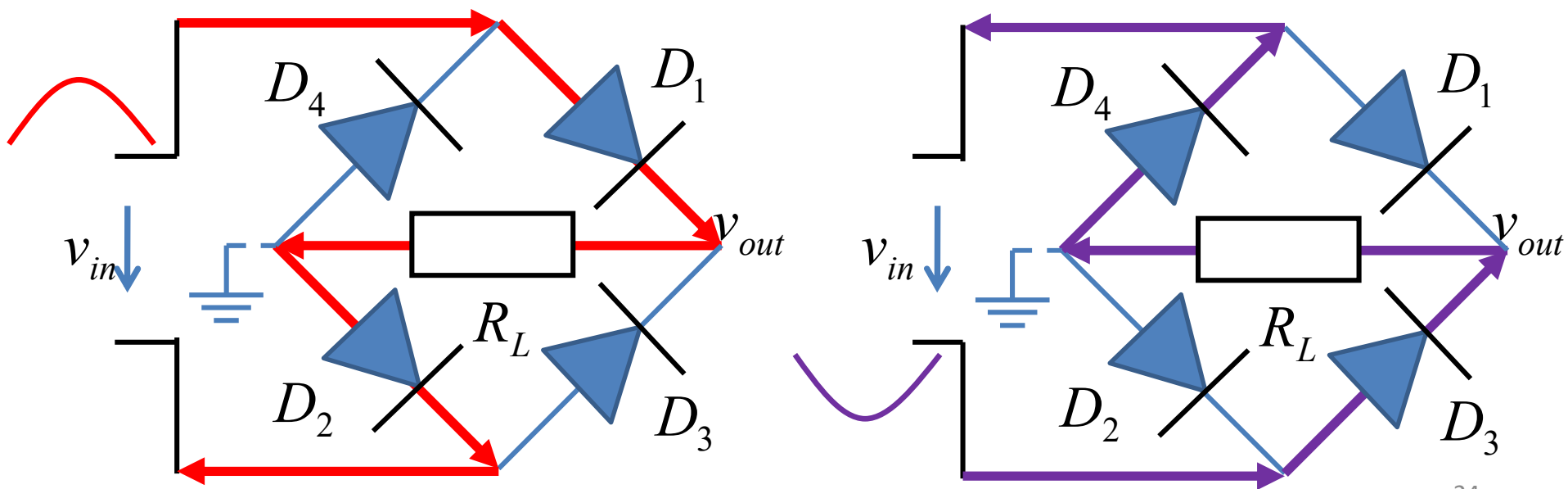
# 全波整流



# 桥式整流



不平衡电桥：总是可以见到源





# 分析要点：开关

整流器功能：将交流能量转换为直流能量

- 正弦信号幅度较大

要求：能够计算平均值（直流分量）、有效值和各频率分量大小

- 百V量级，正偏导通**0.7V**分压可以忽略不计

- 二极管采用开关模型

- 正偏导通：短路处理

- 反偏截止：开路处理

波形上的理解：半波、全波信号，正负不对称，平均值不为零，有直流分量

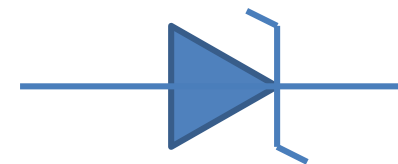
- 数学分析要点

- 开关函数

数学上的理解：开关函数和输入余弦函数相乘，出现直流分量

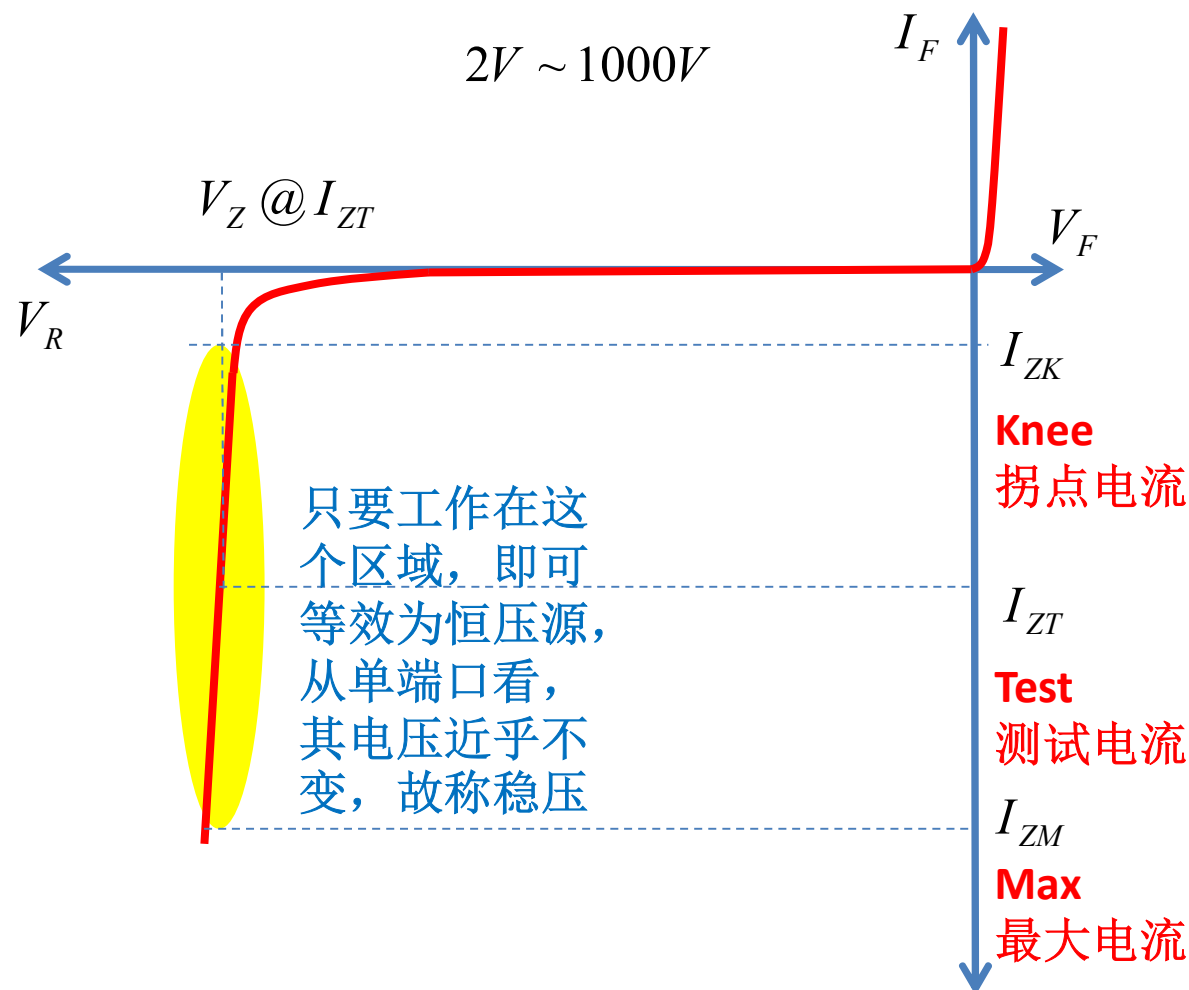
$$\begin{aligned} S_2(\omega t) &= \begin{cases} +1 & \cos \omega t > 0 \\ -1 & \cos \omega t < 0 \end{cases} \\ &= 2S_1(\omega t) - 1 \\ &= \frac{4}{\pi} \cos \omega t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega t + \frac{4}{5\pi} \cos 5\omega t - \dots \end{aligned}$$

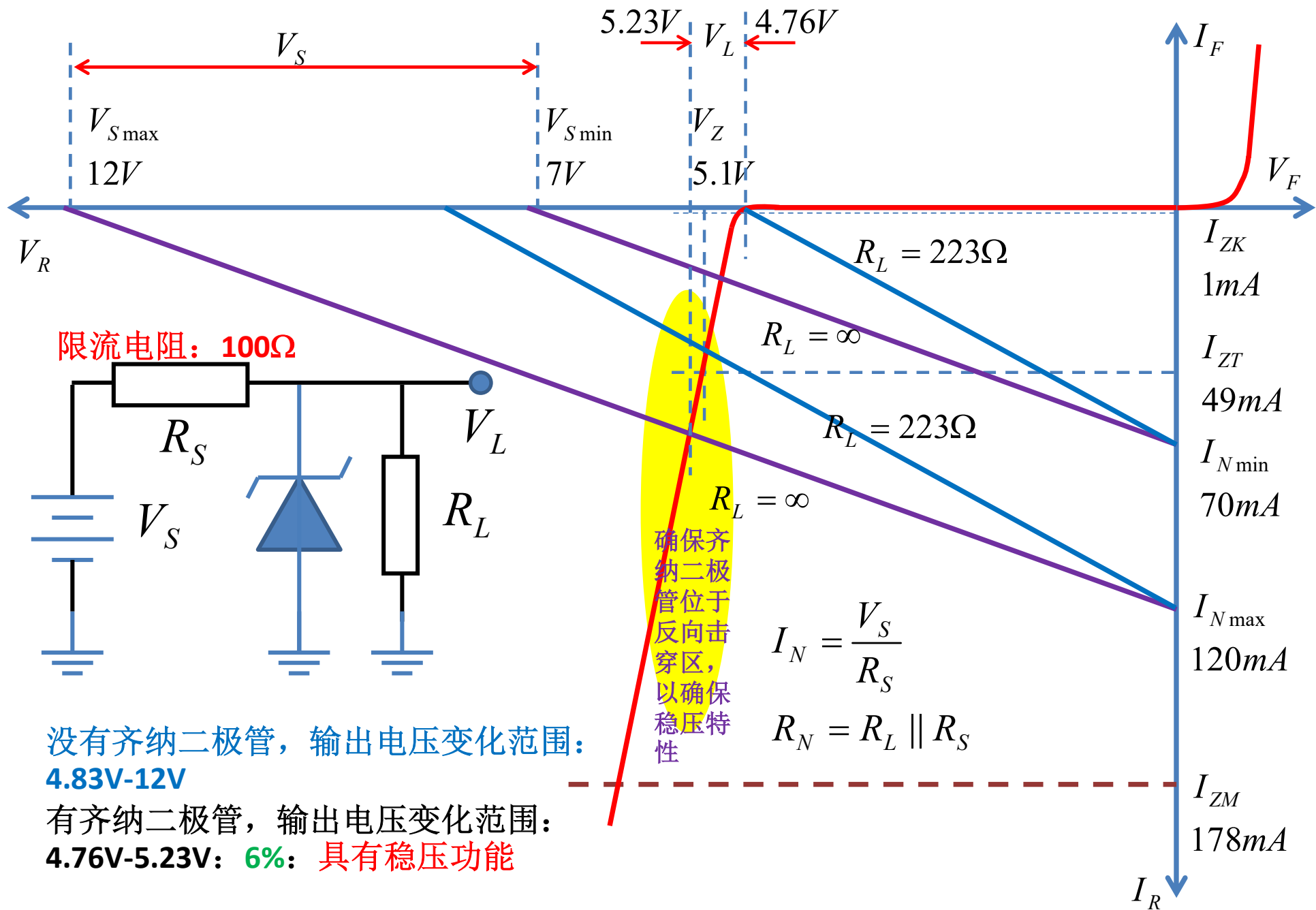
# 8、二极管稳压器



Zener diode

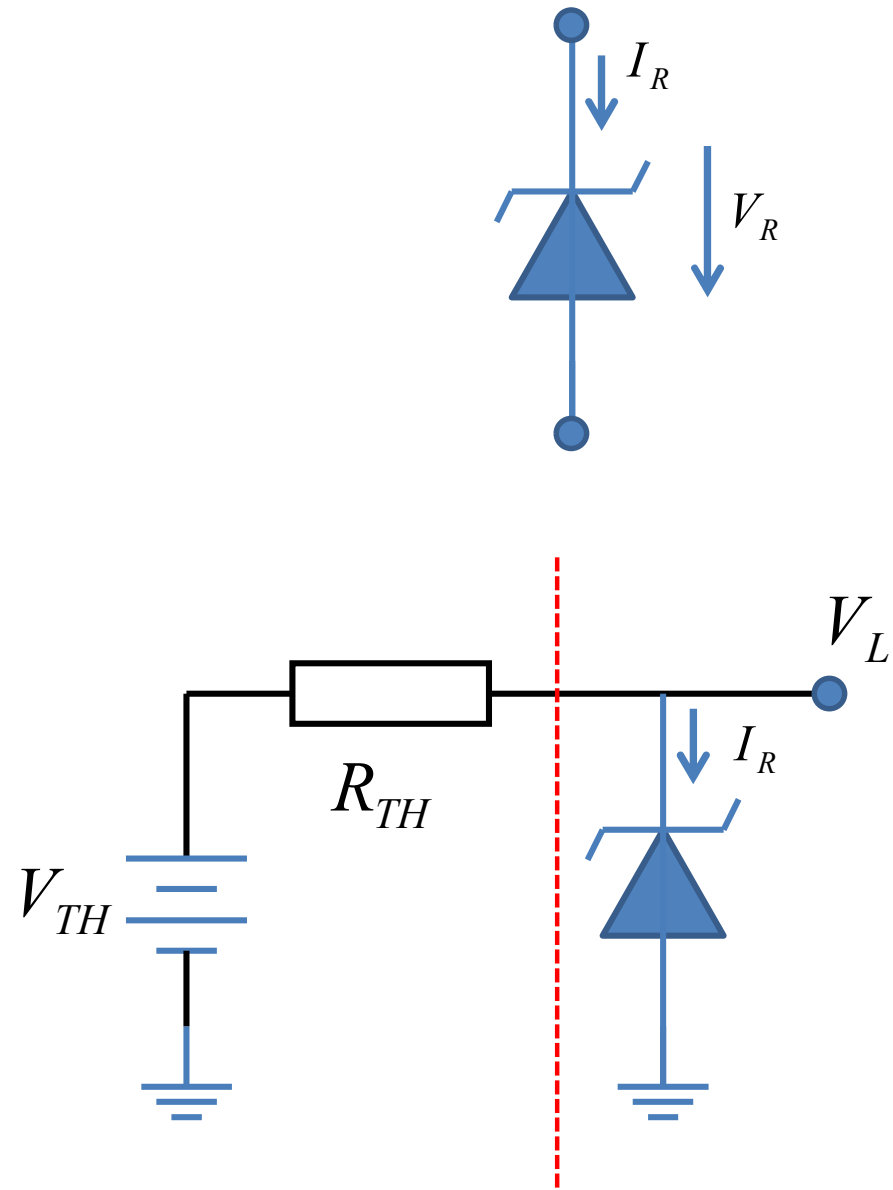
- 利用二极管反向击穿恒压特性等效为恒压源，在端口看获得稳压效果





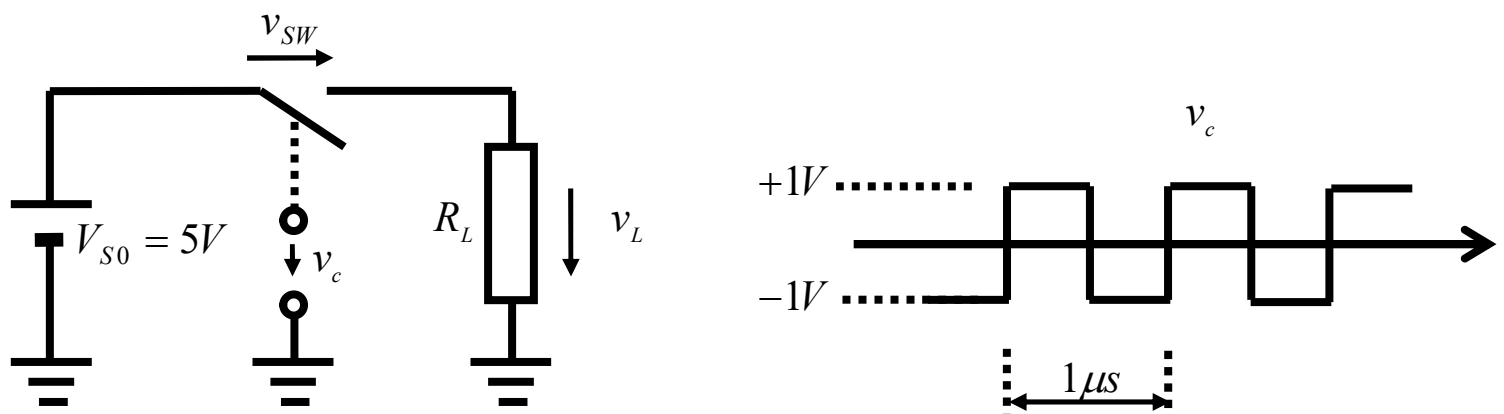
# 分析要点

- 齐纳二极管必须反偏，存在一定程度的反向电流 ( $I_R > I_{knee}$ ) 时，才具有稳压效果
  - 确保齐纳二极管位于反向击穿区
    - 确保  $I_R > I_{knee}$ 
      - 高度抽象为  $I_R > 0$
      - $V_{TH} > V_Z$
    - 确保  $I_R < I_{MAX}$
  - 确保  $I_L$  满足要求
    - 负载同时有一定的电流要求



# 9、逆变器

- 只需原理性理解即可
  - 理想开关不消耗能量，利用开关特性将直流能量转换为交流能量，效率很高



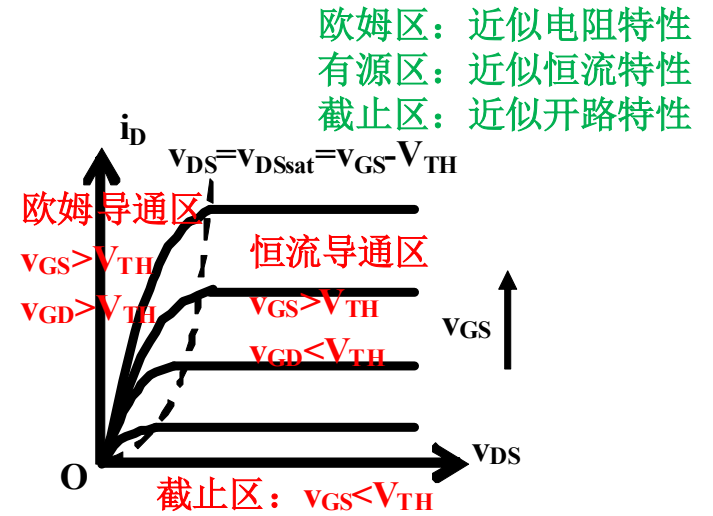
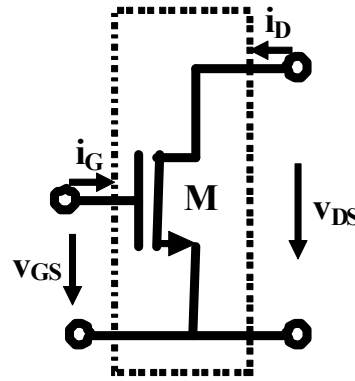
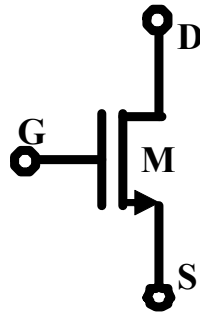
# 10、晶体管放大器

- 小信号放大器
  - 三种组态
    - CE组态、CB组态、CC组态
  - 双管组合
    - cascode, ...
- 大信号放大器
  - 功率放大器
    - A类、AB类：A、B、C、D、E、F类放大器专业课程进一步理解学习
- 既可大信号，又可小信号处理的
  - 差分对（下学期讨论）
    - 小信号差分放大器，大信号单刀双掷开关
  - 反相器
    - 小信号反相电压放大器，大信号数字非门
  - 电流镜
    - （直流）偏置电流源，（交流）有源负载，（交直流）电流放大器

红色：应充分理解  
任何时候，都是晶体管电路的核心内容

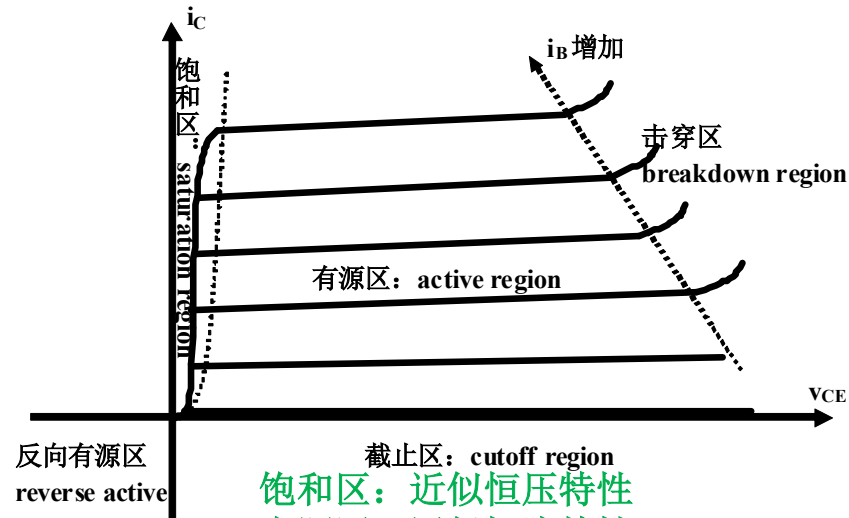
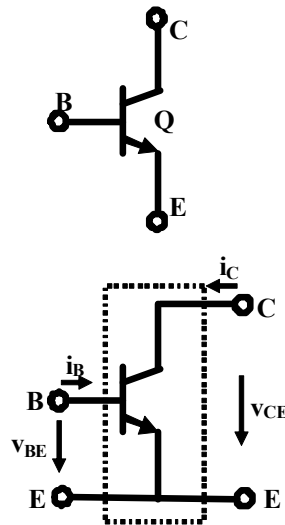
# 11

# 晶体管特性



输入端口为开路：输出端口为输入端口电压控制的非线性电阻

输入端口为二极管：输出端口为输入端口电压或端口电流控制的非线性电阻：伏安特性曲线过原点、位于一三象限



饱和区：近似恒压特性  
有源区：近似恒流特性  
截止区：近似开路特性

# 对晶体管特性的利用

- **工作点偏置于恒流区，晶体管CE端口则等效为电流源**
  - 如果BE端口电压为和输入无关的恒压源，CE端口则可视为独立电流源
    - 直流控制电压作用下，可作为：偏置电流源，有源负载
  - 如果BE端口电压随输入电压而改变，则视为受控电流源
    - 受控源可实现：放大器、振荡器
  - 无论哪种等效，其等效电流源的有源性均来自于直流偏置电压源
- **工作在欧姆区和截止区，CE端口则等效为通断开关**
  - 输入回路电压或电流的变化使得晶体管在欧姆区和截止区之间来回切换，输出回路对外可视为通断开关，或通或断
    - 开关可实现数字门电路、能量转换电路（如逆变器）、混频器（完成两个信号的乘法功能：开关信号与另外一个信号的相乘）



# 12、小信号放大器：有源性

- 有源才能实现放大

只要存在某种负载使得

$$\overline{p} = \overline{v_1 i_1} + \overline{v_2 i_2} < 0$$

二端口网络则有源

有源意味着可向外输出纯功率

换句话说

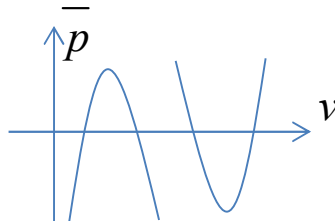
端口释放的功率大于吸收的功率

故而存在功率增益

$$G_{11} < 0 \quad G_{22} < 0$$

存在等效负阻，必向外释放功率

三者满足其一则有源



$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

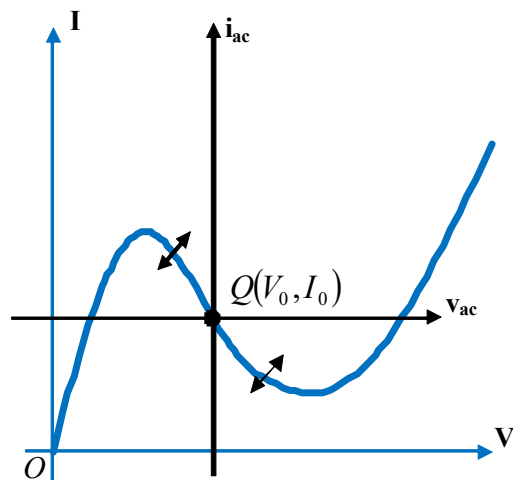
电阻电路， $y$ 参量全部是电导参量

$$(G_{12} + G_{21})^2 > 4G_{11}G_{22}$$

等效跨导提供的能量除了自身损耗外还有多余，可额外向外输出

$$G_{11} > 0 \quad G_{22} > 0$$

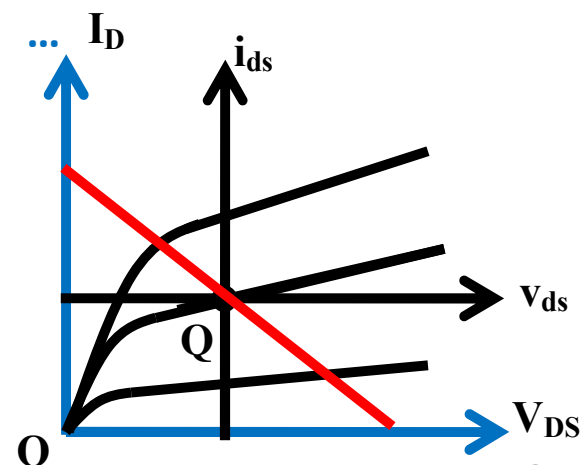
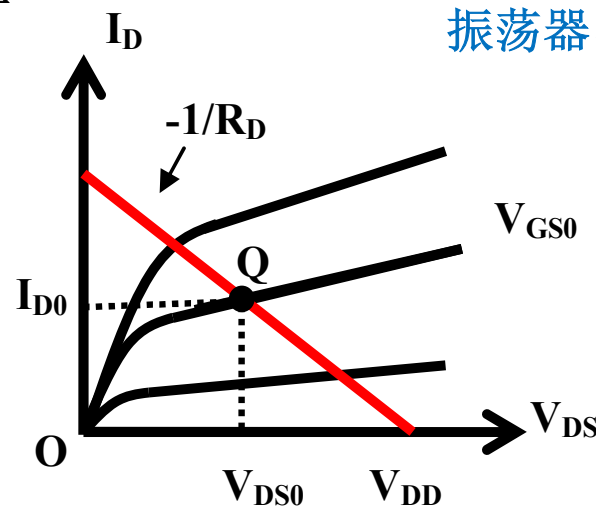
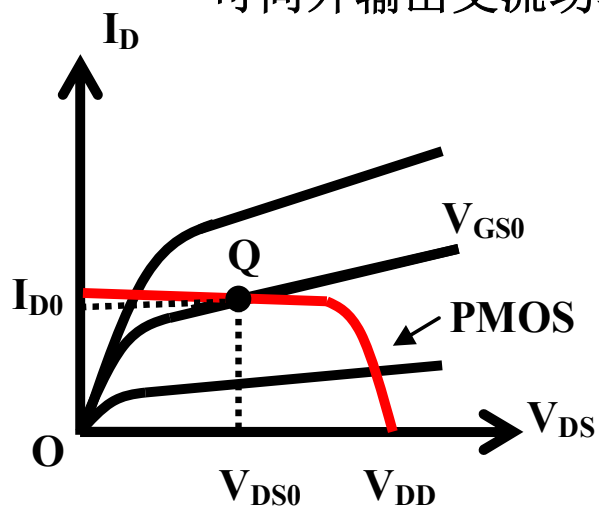
# 有源性来源



将直流工作点偏置在负阻区，伏安特性曲线则进入交流小信号坐标系2、4象限，可向外输出交流功率

无论是隧道二极管，还是晶体管，其伏安特性都位于1、3象限，是吸收能量的电阻，但是工作点确定在负阻区和有源区后，伏安特性则进入交流小信号坐标系的2、4象限，从而可向外输出交流能量，前提是直流偏置源将其偏置在正确的工作点上，因而有源性来自直流偏置源。负阻区隧道二极管和有源区晶体管是能量转换器件，具有将直流能量转换为交流能量的能力：放大器、振荡器、...

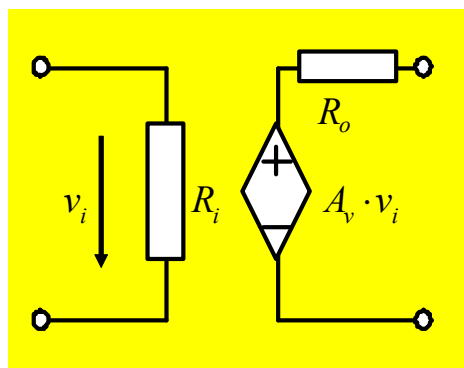
将直流工作点偏置在有源区，伏安特性曲线则进入交流小信号坐标系2、4象限，负载线牵引下在2、4象限运动，可向外输出交流功率



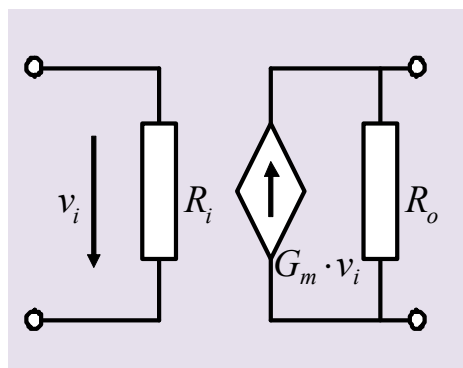
# 13、小信号放大器分类

- 以负阻为核心的放大器
  - 负阻放大器：应用面窄，原理性了解即可
- 以受控源为核心的放大器
  - 晶体管放大器，**重点理解和掌握**
    - 基本参量：增益，输入电阻，输出电阻
    - 辅助参量：**噪声系数**，线性范围，**带宽**
      - 噪声：专业课；带宽：下学期
    - 基本放大器是单向放大器
      - 电压放大器：以压控压源为核心
      - 电流放大器：以流控流源为核心
      - 跨导放大器：以压控流源为核心
      - 跨阻放大器：以流控压源为核心

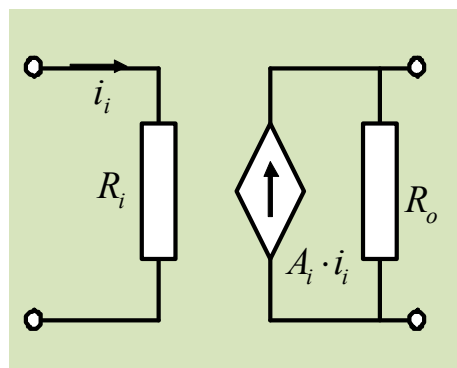
# 基本放大器及其最适参量



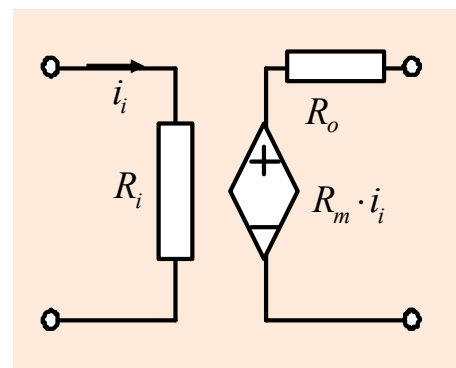
**VCVS**  
电压放大器



**VCCS**  
跨导放大器



**CCCS**  
电流放大器



**CCVS**  
跨阻放大器

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} R_i^{-1} & 0 \\ A_v & R_o \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} R_i^{-1} & 0 \\ -G_m & R_o^{-1} \end{bmatrix}$$

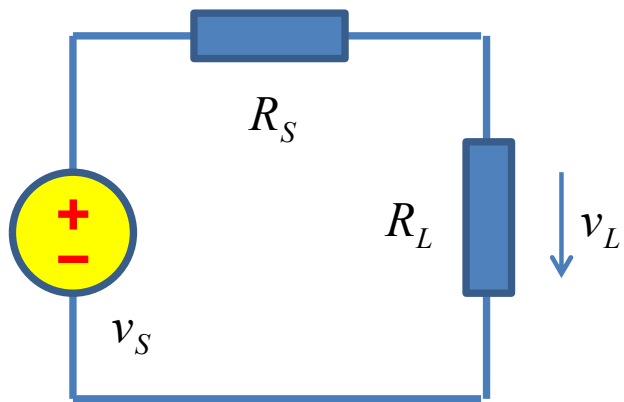
$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} R_i & 0 \\ -A_i & R_o^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} R_i & 0 \\ R_m & R_o \end{bmatrix}$$

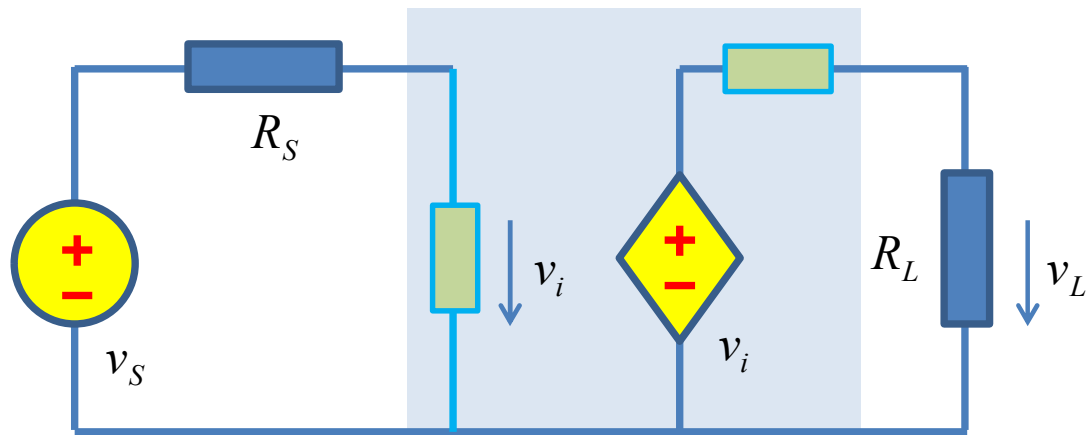
有输入电阻、输出电阻，四种基本放大器可以相互转换，最适参量和端口所接负载有关

# 放大器的基本功用

- 信号放大：有源性
    - 电压、电流、功率等放大
      - 从有源性上考察： $P_{\Sigma} < 0$ 或 $G_{p,max} > 1$ 
        - 器件具有将直流能量转换为交流能量的能力
  - 信号缓冲：单向性
    - 利用其单向性或近单向性，实施对源和负载的隔离
      - 电压缓冲器：电压增益为1的压控压源：电压跟随器
      - 电流缓冲器：电流增益为1的流控流源：电流跟随器
  - 信号线性转换：线性
    - 电压转电流
      - 压控流源
    - 电流转电压
      - 流控压源
- Amplifier**  
**Voltage Amplifier**  
**Current Amplifier**  
**Power Amplifier**
- Follower**
- Buffer** 缓冲器默认其增益为1；增益不为1，也称缓冲放大器，因为起到缓冲和放大作用
- linear VI converter**      **Trans-conductance Amplifier**
- linear IV converter**      **Trans-impedance Amplifier**



分压，非线性失真



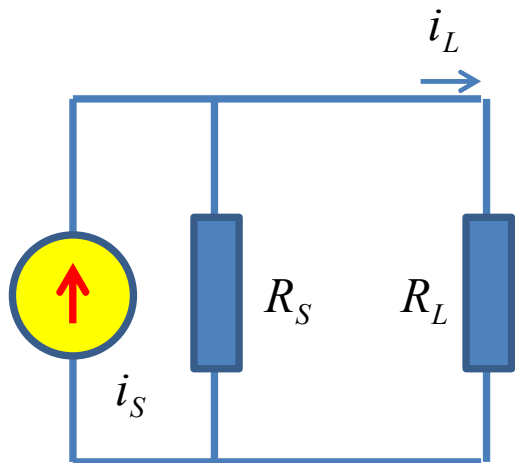
全压，非线性失真很小

$$R_i \gg R_S, R_o \ll R_L \quad v_L \approx v_S$$

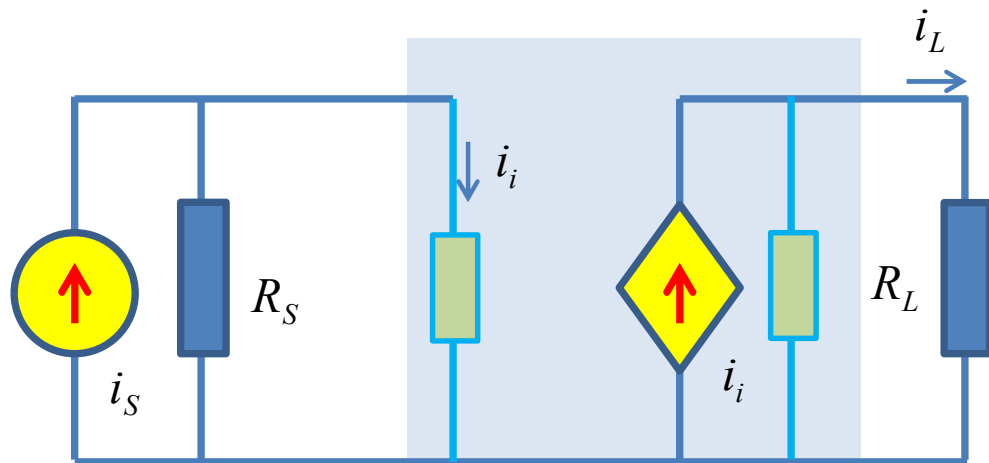
$$\mathbf{g} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

# 缓冲器

电压缓冲器：电压增益为1的接近理想压控压源的电压放大器  
 电流缓冲器：电流增益为1的接近理想流控流源的电流放大器



分流，非线性失真



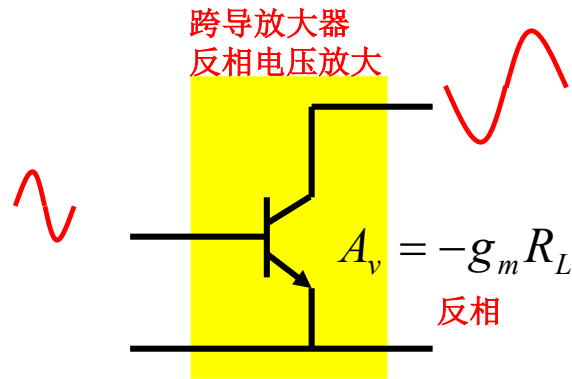
全流，非线性失真很小

$$R_i \ll R_S, R_o \gg R_L \quad i_L \approx i_S$$

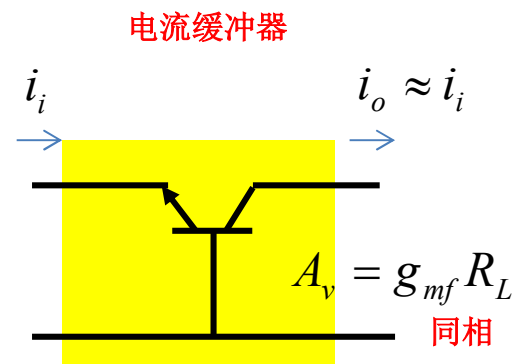
$$\mathbf{h} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

# 14、小信号放大器

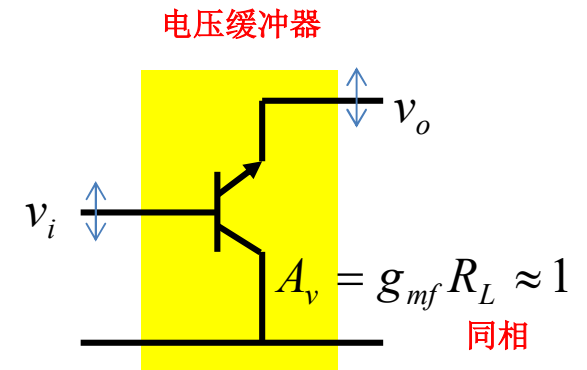
## 晶体管三种组态



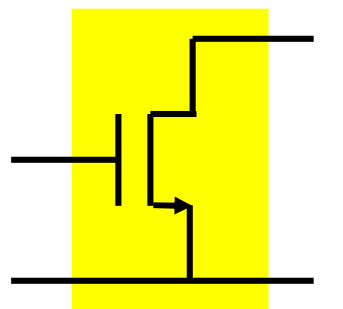
**Common Emitter**  
CE: 共射组态



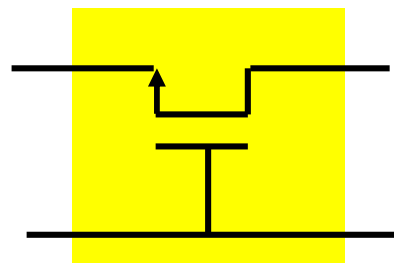
**Common Base**  
CB: 共基组态



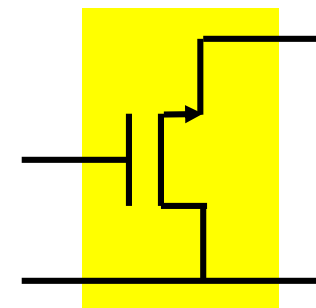
**Common Collector**  
CC: 共集组态



**Common Source**  
CS: 共源组态

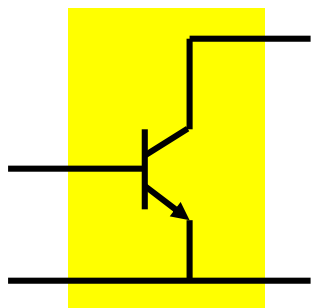


**Common Gate**  
CG: 共栅组态



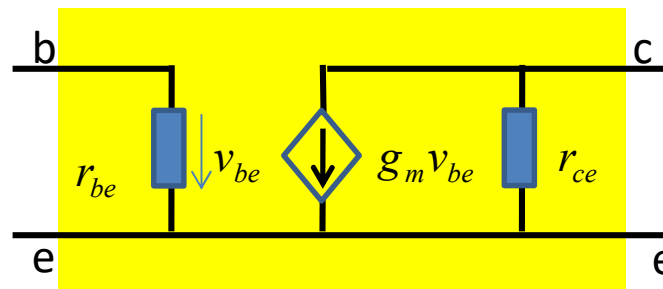
**Common Drain**  
CD: 共漏组态

# 跨导器模型

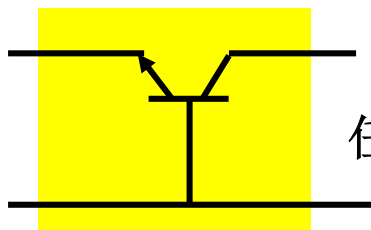


Common Emitter

压控器件的  
y参量等效电路

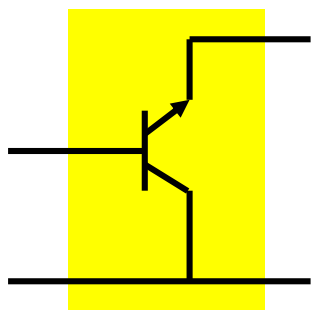
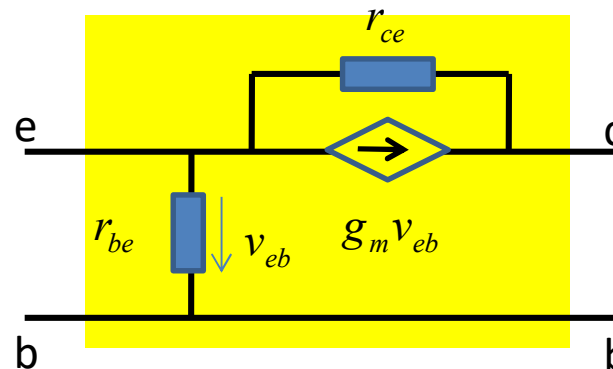


\*至少记忆这个模型，下面两个和此等同



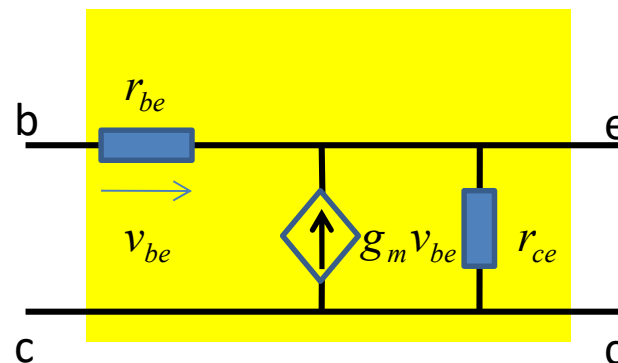
Common Base

任意组态都可用



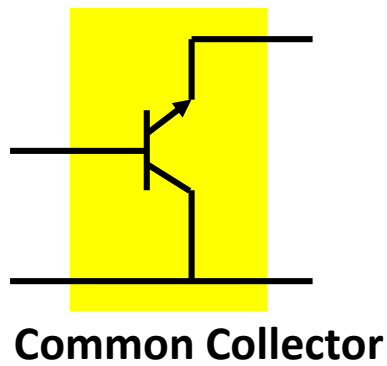
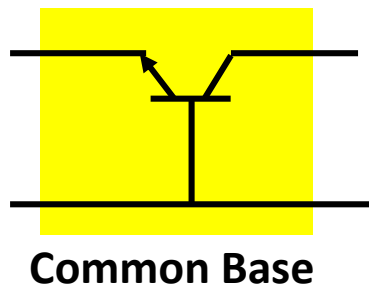
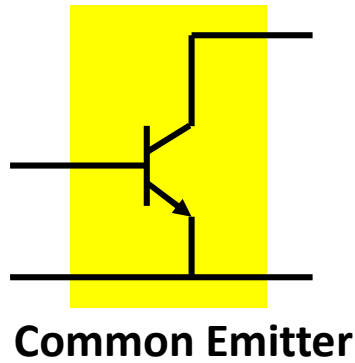
Common Collector

压控特性不分组态

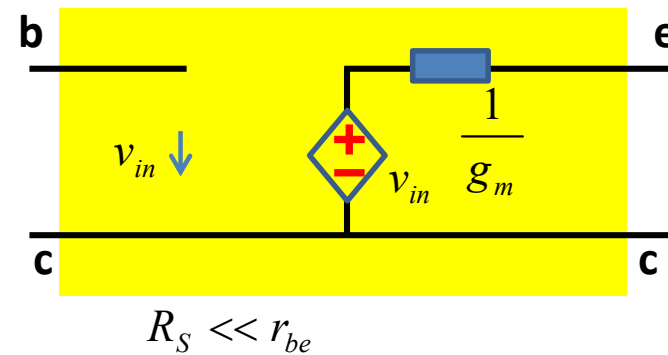
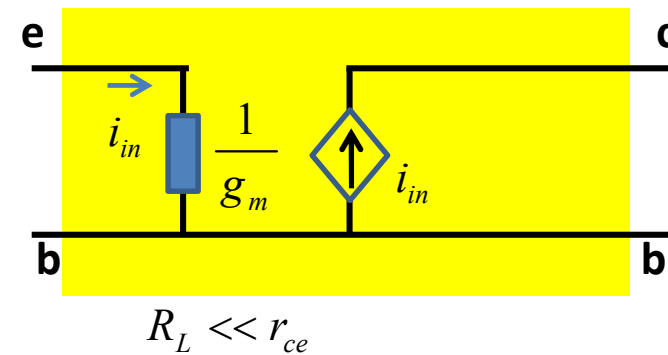
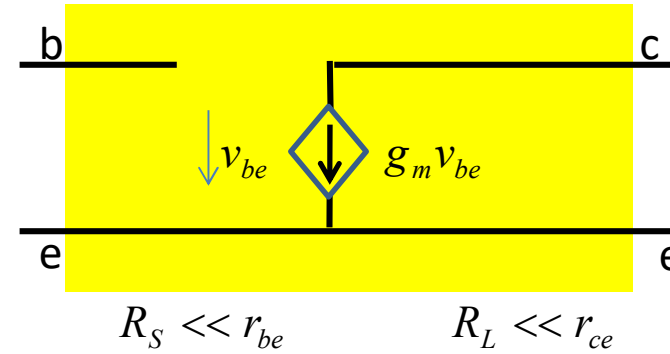




# 理想受控源模型



只要负载满足限定性条件，用理想受控源模型分析将大大简化分析过程，原理性阐述大多采用理想受控源模型

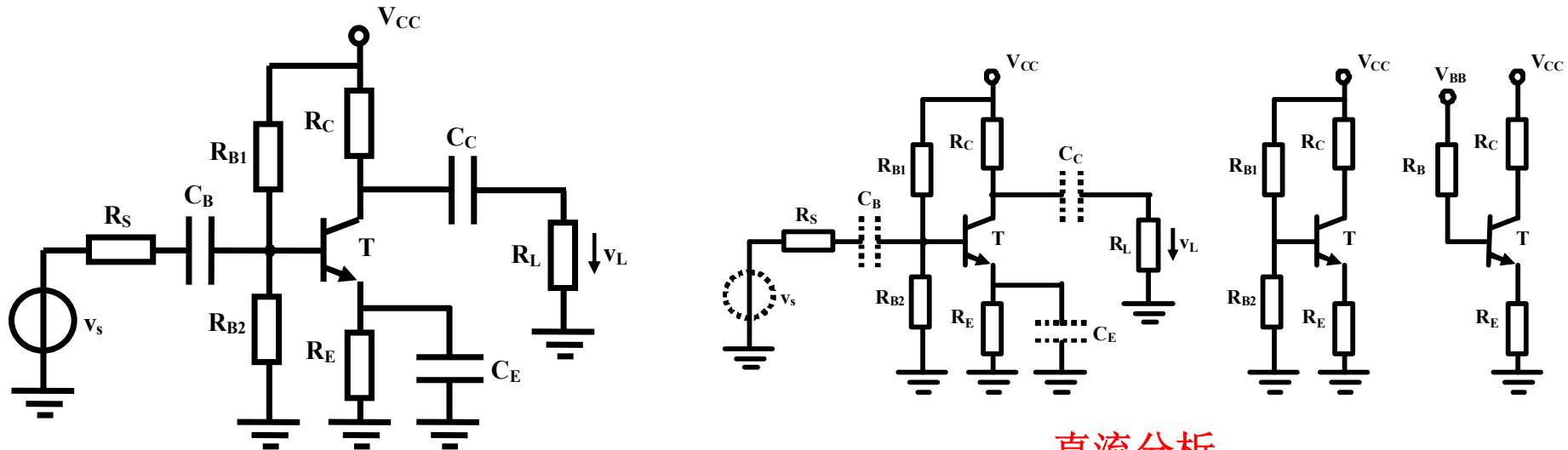


# BJT组态总结

\*能记住最好，记不住应能推导

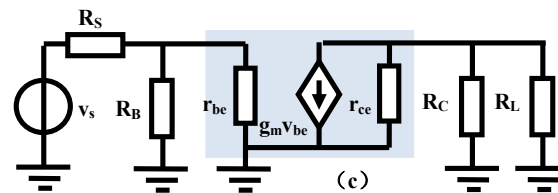
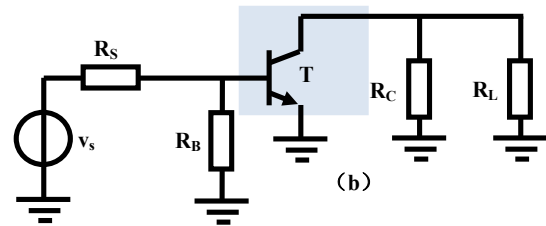
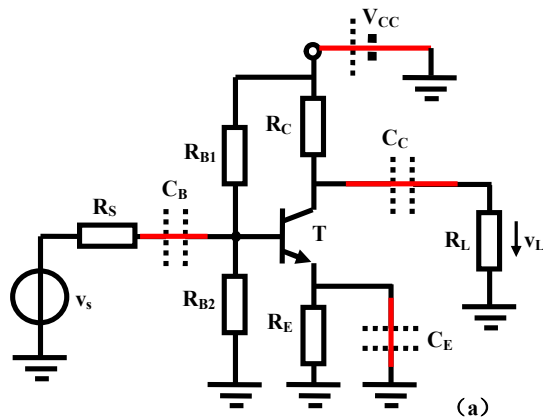
	CE	CB	CC
输入阻抗	$r_{be}$	$r_{be} \parallel \frac{R_L + r_{ce}}{1 + g_m r_{ce}}$	$r_{be} + r_{ce} \parallel R_L + g_m r_{be} (r_{ce} \parallel R_L)$ bc端口阻抗通用公式
输出阻抗	$r_{ce}$	$r_{be} \parallel R_S + r_{ce} + g_m (r_{be} \parallel R_S) r_{ce}$ bc端口阻抗通用公式	$r_{ce} \parallel \frac{r_{be} + R_S}{1 + g_m r_{be}}$
最大功率增益	$\frac{1}{4} g_m r_{ce} \cdot \beta$	$\sim \sphericalangle g_m r_{ce}$	$\sim \sphericalangle \beta = g_m r_{be}$
理想模型	反相跨导 $G_{m0} = -g_m$	电流缓冲 $A_{i0} = 1$	电压缓冲 $A_{v0} = 1$
输入输出阻抗	$r_{be}$ $r_{ce}$	$r_{in} \approx 1/g_m$	$r_{out} \approx 1/g_m$
单向化条件		发射极看入电阻通用公式: bc端外接阻抗足够小 $R_L \ll r_{ce}$ 充分非必要 $R_S \ll r_{be}$	

# 常见分立的小信号放大器：CE组态



## 直流分析：

保留直流偏置源  
交流激励源不起作用  
耦合电容开路  
晶体管可采用分段折线模型



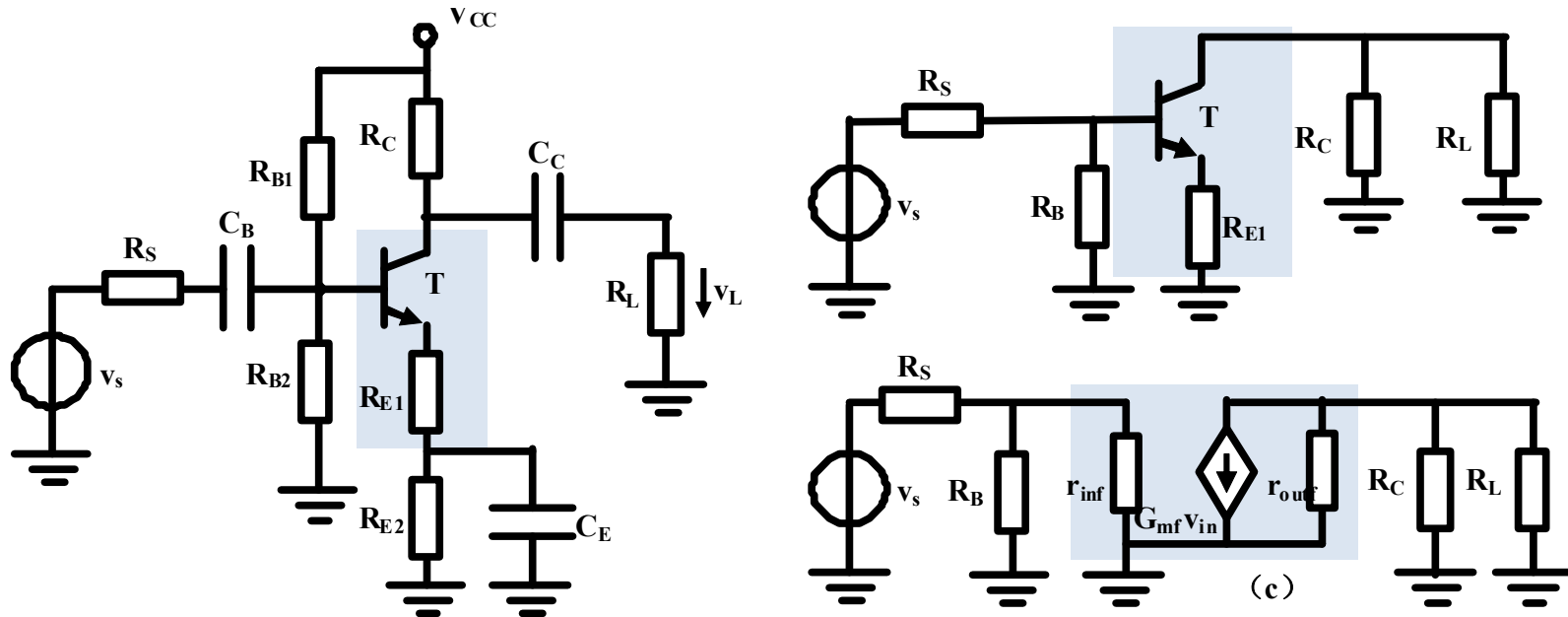
## 交流分析：

保留交流激励源  
直流偏置源不起作用  
耦合电容短路  
晶体管采用微分y参量模型

$$A_v \approx -g_m R'_L$$

# 常见分立的小信号放大器

## CE组态（负反馈）



交流分析:

保留交流激励源

直流偏置源不起作用

耦合电容短路

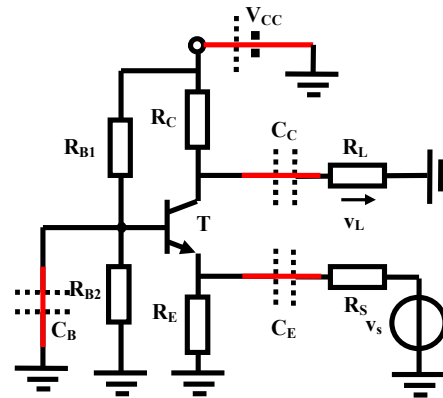
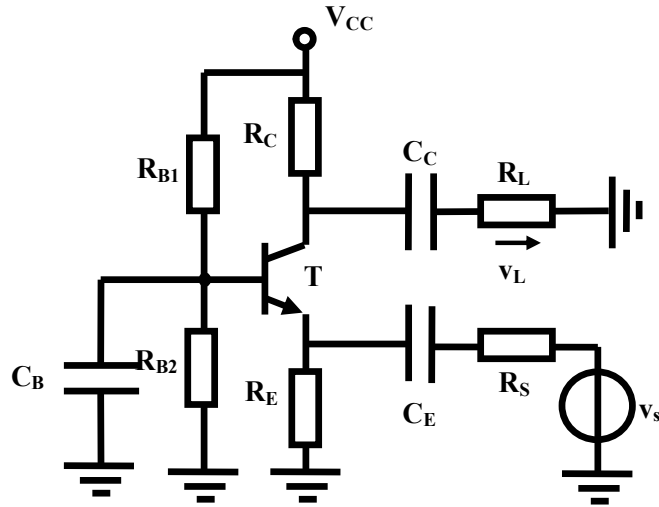
晶体管采用微分y参量模型（串串负反馈理想跨导器模型）

$$A_v \approx -g_{mf} R'_L = -\frac{g_m}{1 + g_m R_{E1}} R'_L \approx -\frac{R'_L}{R_{E1}}$$

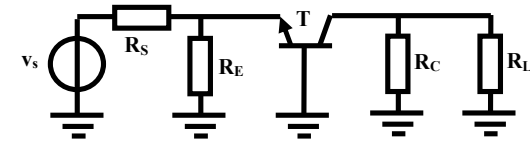
\*记忆

# 常见分立的小信号放大器

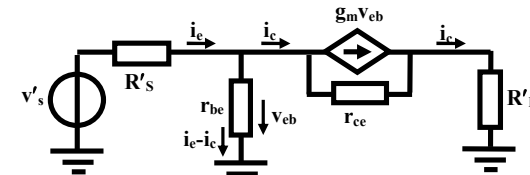
## CB/CC组态



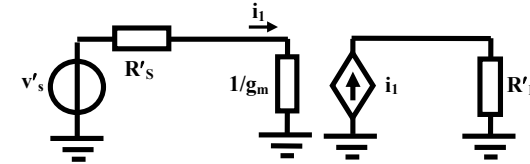
(a) 耦合电容、直流偏置电压源交流短路



(b) 交流小信号分析电路



(c) 晶体管采用通用跨导器模型



(d) 晶体管采用 CB 组态电流缓冲器模型

### 直流分析:

- 保留直流偏置源
- 交流激励源不起作用
- 耦合电容开路
- 晶体管可采用分段折线模型

$$A_{v,CB} \approx g_{mf} R'_L = \frac{g_m}{1 + g_m R'_S} R'_L$$

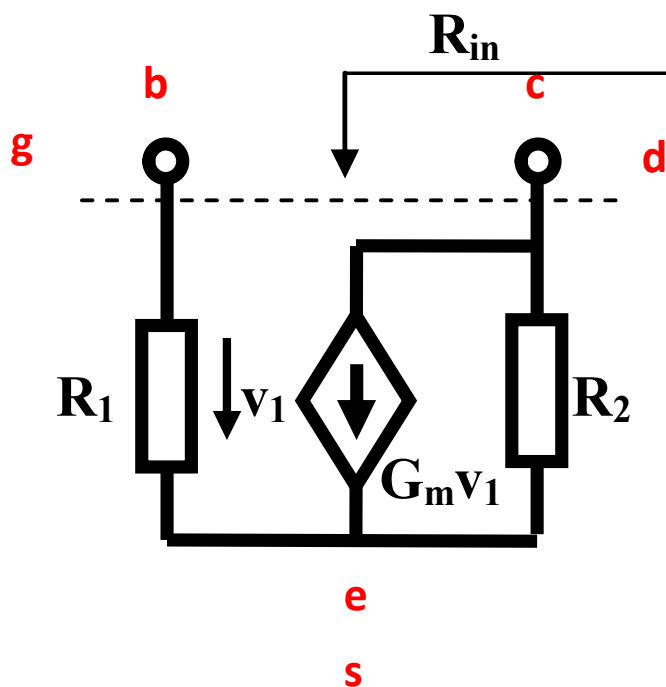
### 交流分析:

- 保留交流激励源
- 直流偏置源不起作用
- 耦合电容短路
- 晶体管采用微分y参量模型, 或电流缓冲器模型

(CC组态: 电压缓冲器模型)

$$A_{v,CC} \approx g_{mf} R'_L = \frac{g_m}{1 + g_m R'_L} R'_L \approx 1$$

# bc、gd阻抗

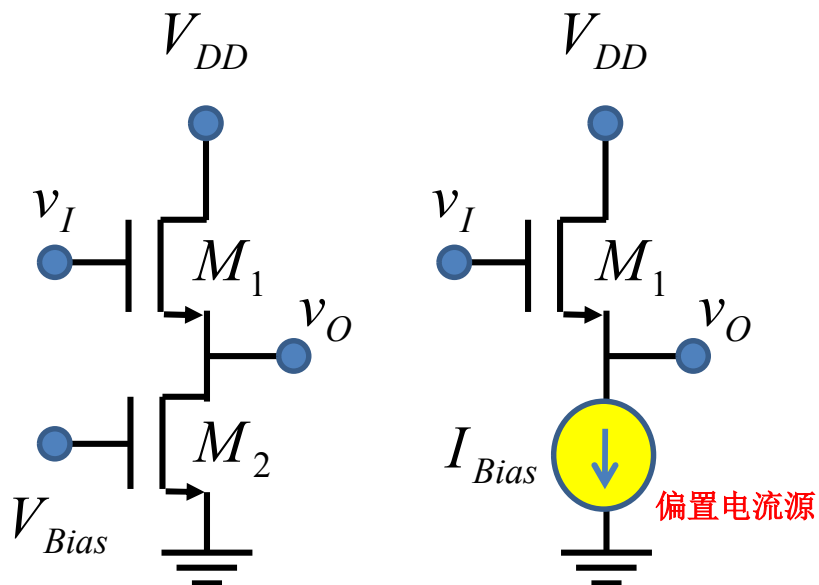


$$R_{in} = R_1 \langle G_m \rangle R_2 = R_1 + R_2 + G_m R_1 R_2$$

对于BJT晶体管，则有

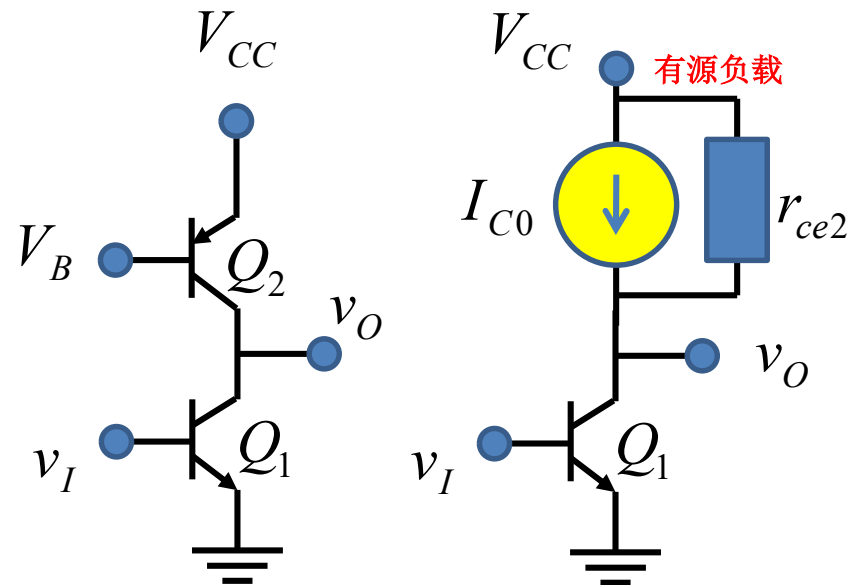
$$\begin{aligned} r_{bc,in} &= r_{be} \langle g_m \rangle r_{ce} \\ &= r_{be} + r_{ce} + g_m r_{be} r_{ce} \\ &\approx g_m r_{be} r_{ce} \end{aligned}$$

# 常见集成小信号放大基本结构



源极跟随器  
CD组态：电压缓冲器

$$A_v \approx 1$$



反相电压放大器  
CE组态：跨导放大器

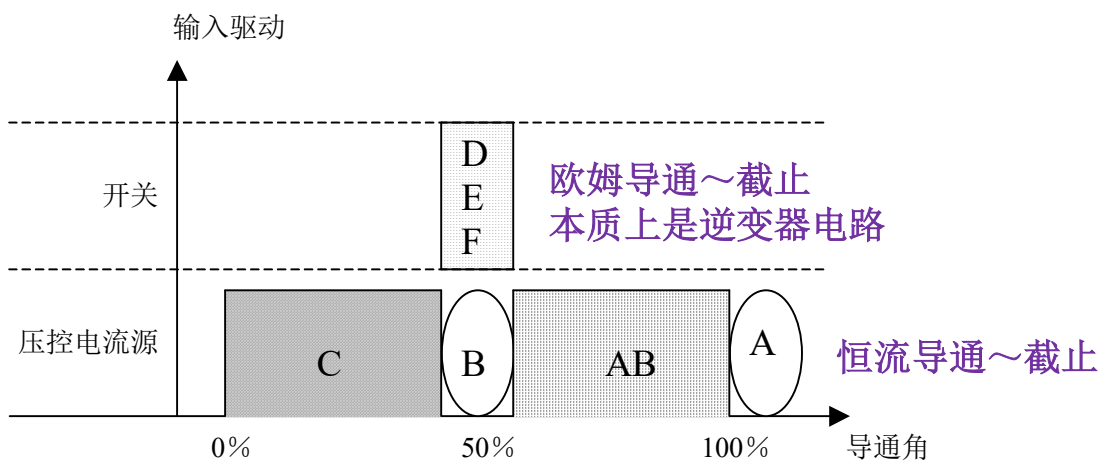
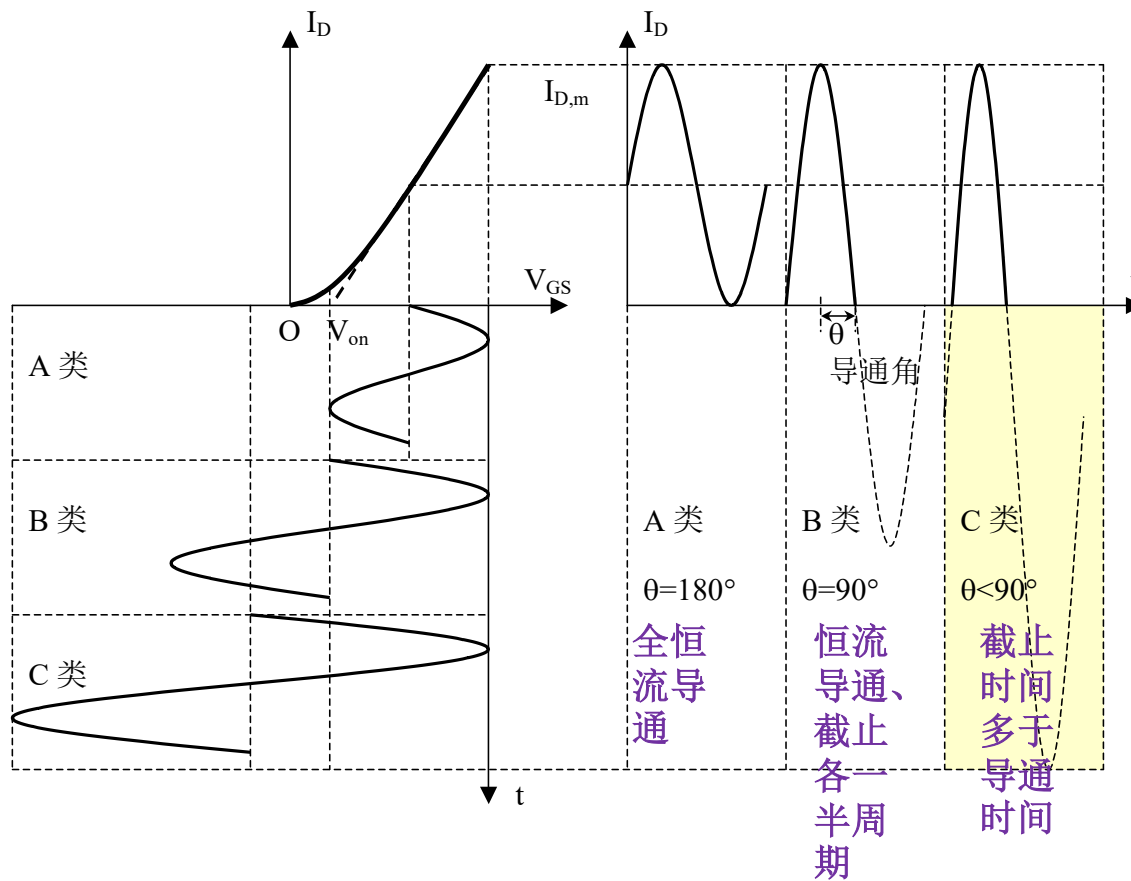
$$A_v = -g_{m1} (r_{ce1} \parallel r_{ce2})$$

# 15、大信号放大器

- 输出信号幅度很大，有可能占满或超出晶体管的线性放大区（有源区）
- 是电子信息处理系统的最后一级，用于驱动激励器，使得激励器足以对外发布信息
  - 功率放大器： **Power Amplifier**
    - 强调效率：有多少百分比的直流能量被转换为交流能量？
    - **A类理论效率50%， B类理论效率78%**
      - 本学期可以理解：视为线性放大器
    - **C类理论效率<100%， D、E、F类理论效率100%**
      - 非线性严重，需要滤波，专业课考察
  - 输出缓冲器： **Output Buffer**
    - 一般指**A类或AB类放大器**：强调驱动能力，如果是电压缓冲器则要求很小的输出阻抗

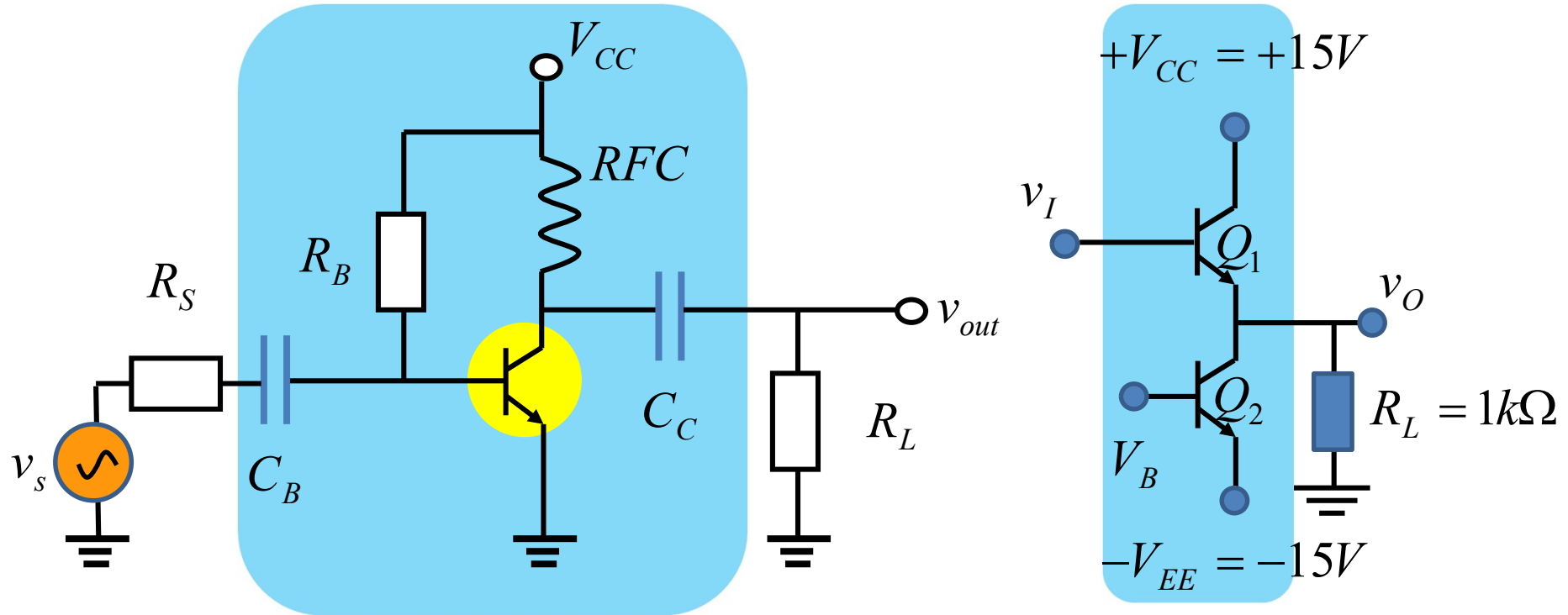


# A B C 类放大器



# A类放大器：晶体管始终位于有源区

正弦波**100%**的周期位于有源区

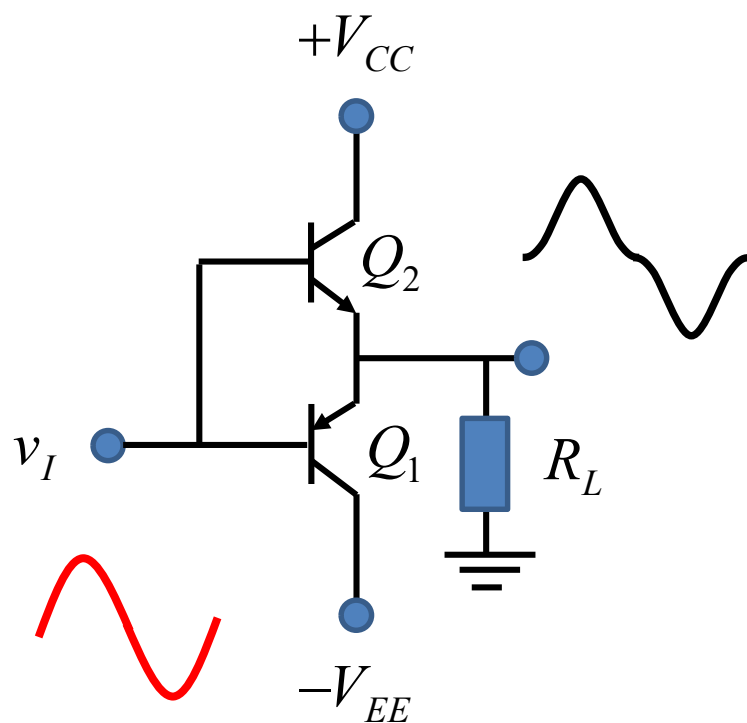


**A类功率放大器：**理论最大**50%**效率  
晶体管吸收的直流功率，**50%**转换为负载可吸收的交流功率，剩余**50%**自身消耗。

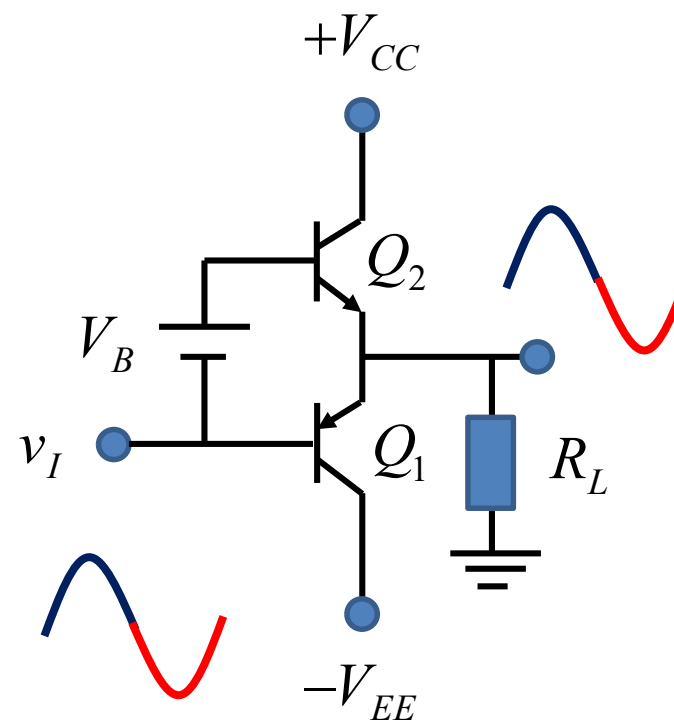
**A类输出缓冲器：**理论最大**25%**效率  
两个晶体管吸收的直流功率， $Q_2$ 占**50%**， $Q_1$ 则将其吸收的**50%**直流能量中的一半转换为交流能量为负载电阻所吸收，剩余的一半自身吸收

# B类放大器

晶体管半个周期有源区，半周期位于截止区



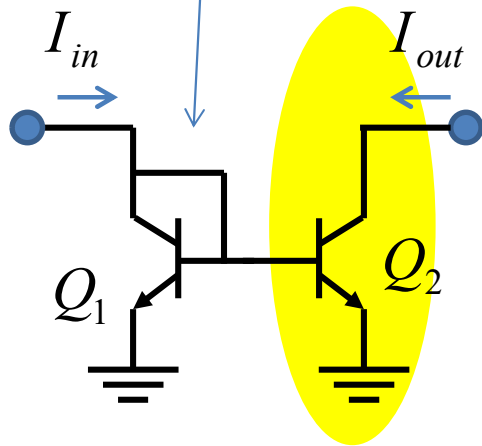
**B类放大：理论效率最大78%**  
二极管导通电压**0.7V**导致交越失真



**AB类放大：理论效率50%-78%**  
二极管微微导通，消除交越失真

# 16、电流镜

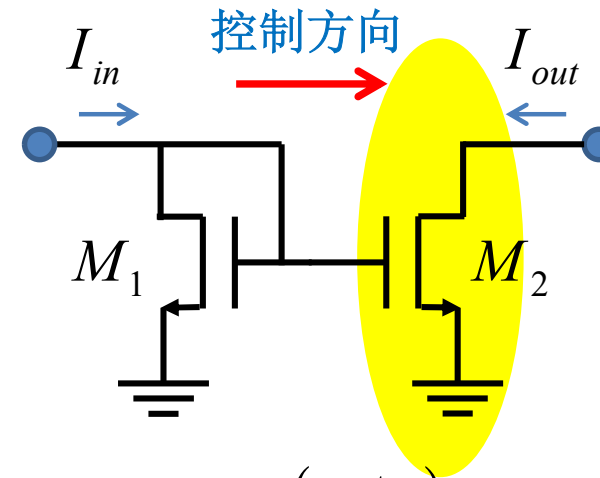
获得偏置电压  
 $V_{BE}$ : 电流流过  
 非线性电阻获  
 得电压



$$\frac{I_{out}}{I_{in}} \approx \frac{A_{J2}}{A_{J1}}$$

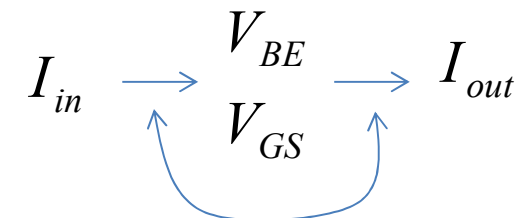
偏置在恒流  
 区的晶体管  
 可等效为电  
 流源

如何获得偏  
 置电压: 电  
 流流过二极  
 管建立偏置  
 电压, 偏置  
 电压控制晶  
 体管输出恒  
 流



$$\frac{I_{out}}{I_{in}} \approx \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}$$

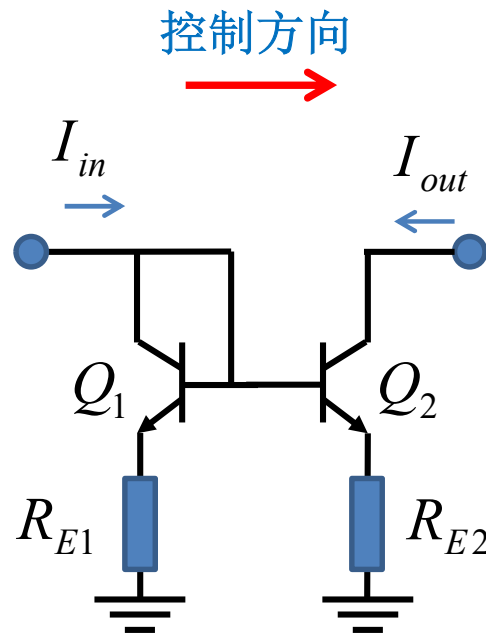
电流镜通过对称的结构, 一致的工艺参量, 使得输出电流与输入电流之比由晶体管尺寸决定, 和工艺参量、环境温度均无关



非线性: 互逆: 线性<sub>52</sub>

# 负反馈提高输出电阻

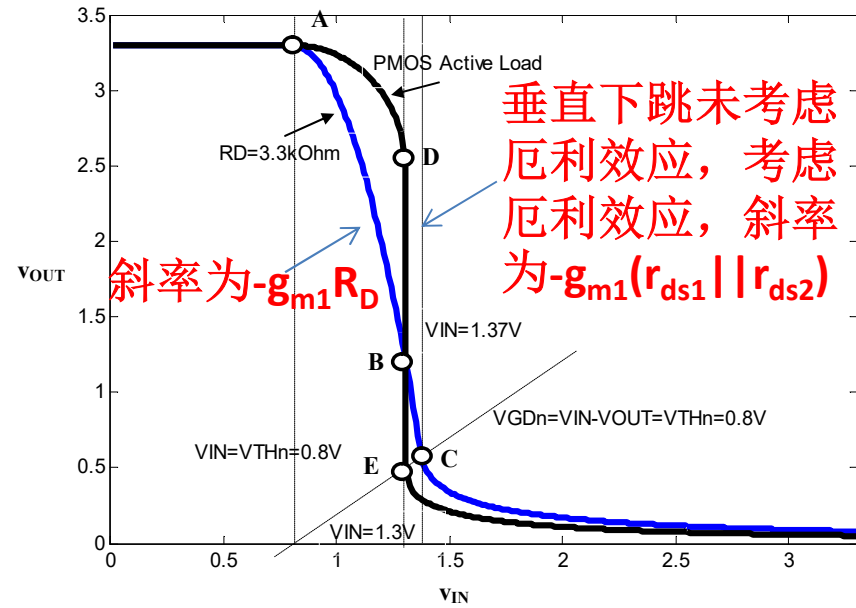
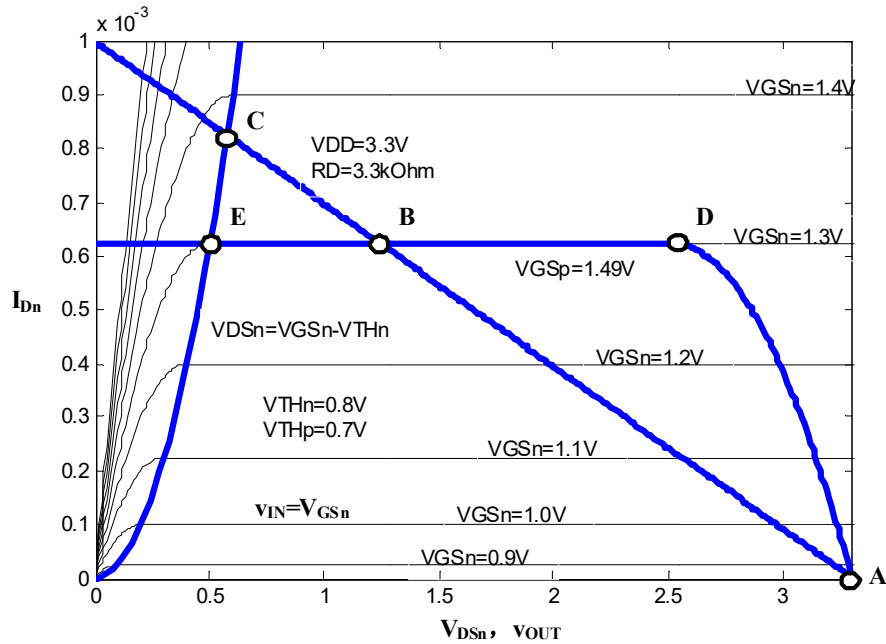
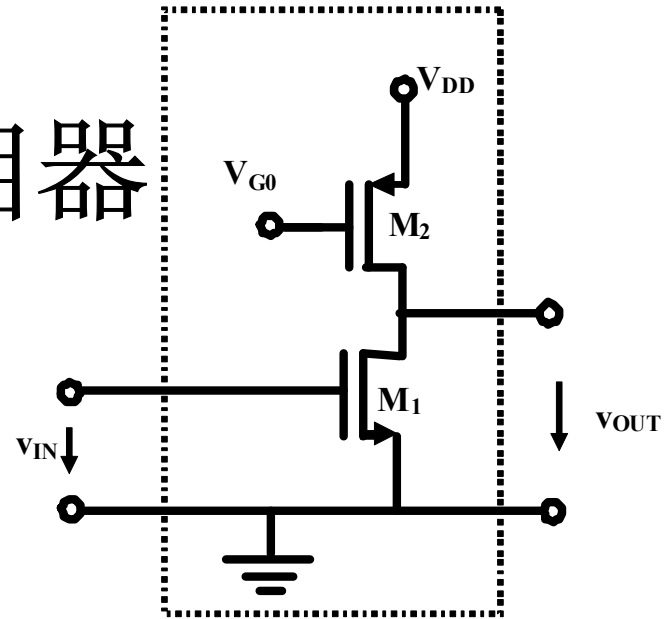
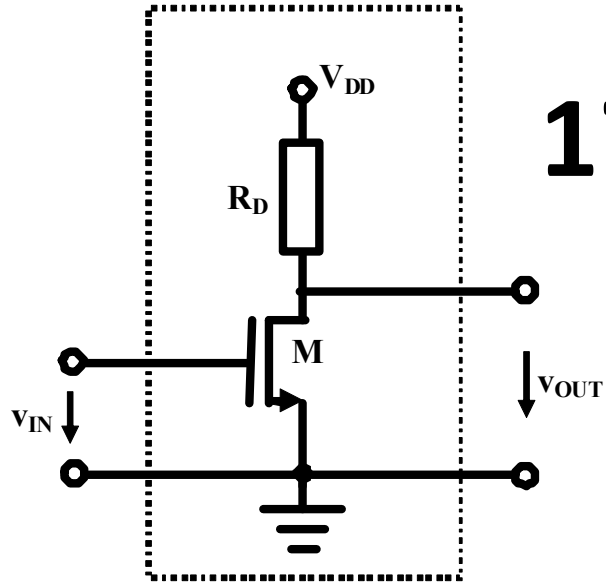
## 理想电流源内阻无穷大



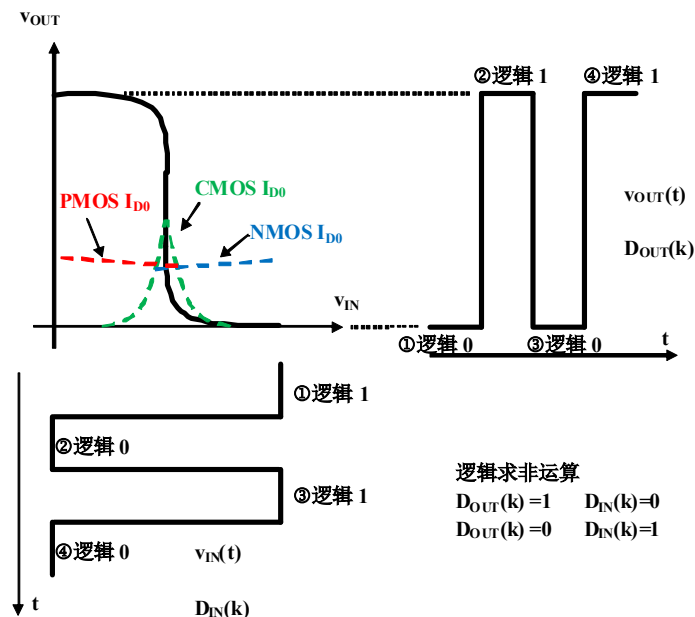
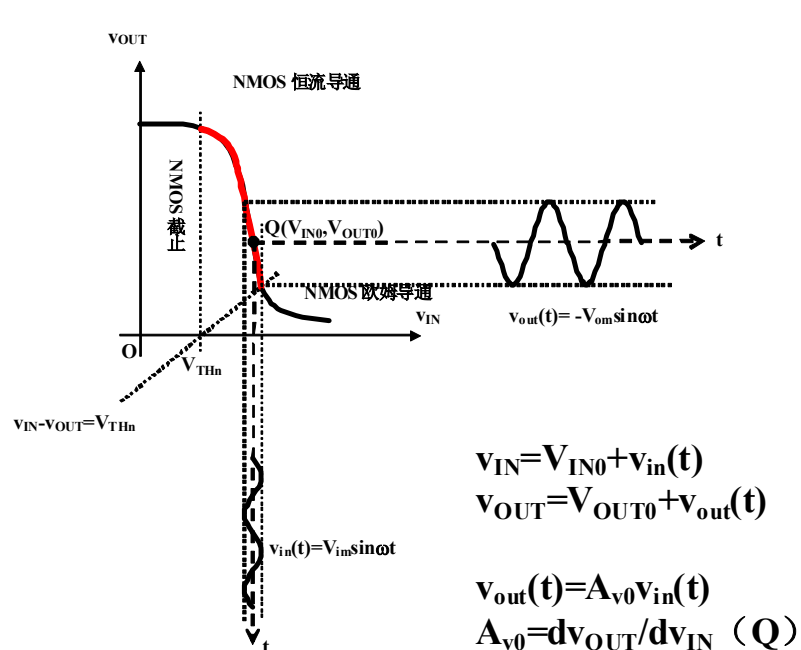
因果关系  
谁控制谁

$$r_{out} \approx (1 + g_{m2} R_{E2}) r_{ce2}$$

# 17、反相器



# 小信号放大器，大信号数字非门



晶体管位于有源区，有最大的斜率，具有最大的电压增益

晶体管在欧姆区和截止区来回转换，晶体管等效为开关，实现逻辑非运算

$$A_{v0} = -g_m (R_D \parallel r_{ds}) \approx -g_m R_D$$

$$A_{v0} = -g_m (r_{ds1} \parallel r_{ds2})$$

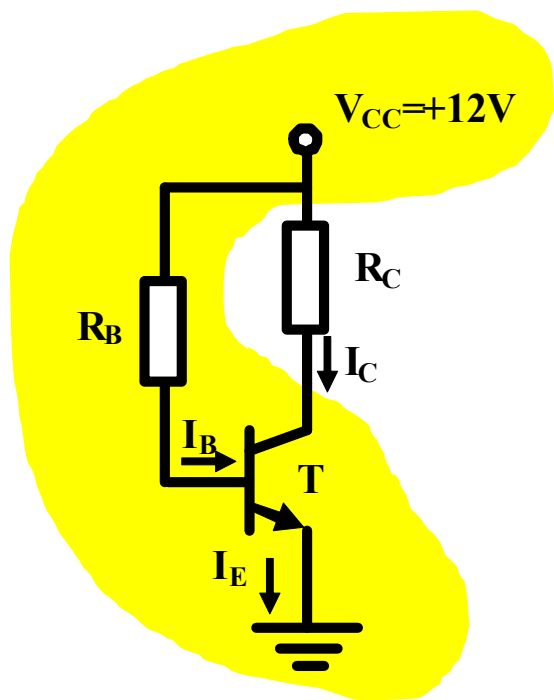
# 18、负反馈

本学期重点中的重点\*\*

- 负反馈的作用是通过具有优良性能的反馈网络的闭环反馈作用，使得晶体管网络的相应性能得以改善
  - 常见的负反馈网络是稳定的线性电阻网络，在深度负反馈条件下，晶体管网络的不稳定性被屏蔽，闭环放大器特性几乎由电阻网络决定
    - 工作点、增益等性能参量变得稳定，对工艺参量、环境参量不敏感
    - 放大器线性度提高，带宽提高
    - 放大器更加接近于理想受控源
      - 输入电阻、输出电阻，根据负反馈连接关系，串联则变大，并联则变小



# 晶体管电流源中的负反馈



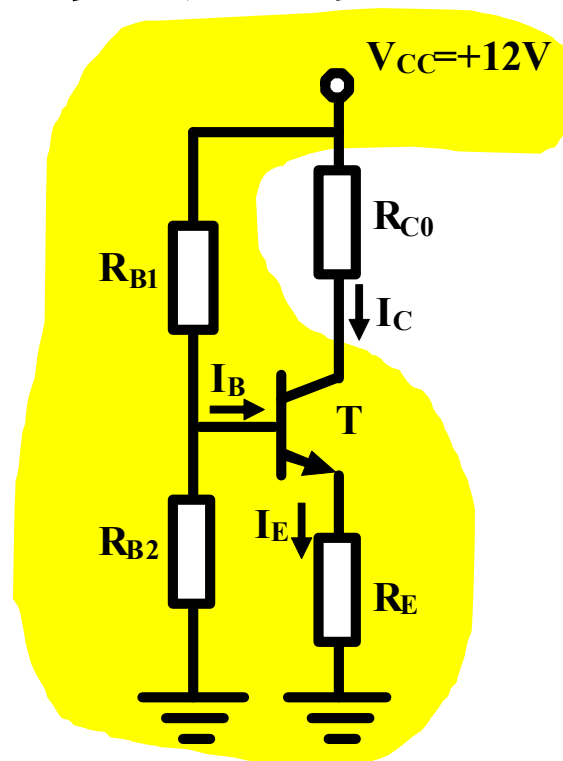
恒流区工作的晶体管可等效为电流源

串串负反馈使得电流源输出电阻变大，输出电流变得稳定

$$I_C = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = 1.03mA$$

$$S_{\beta}^{I_C} = \frac{\beta}{I_C} \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = 1$$

$$r_{out} = r_{ce} = 97k\Omega$$



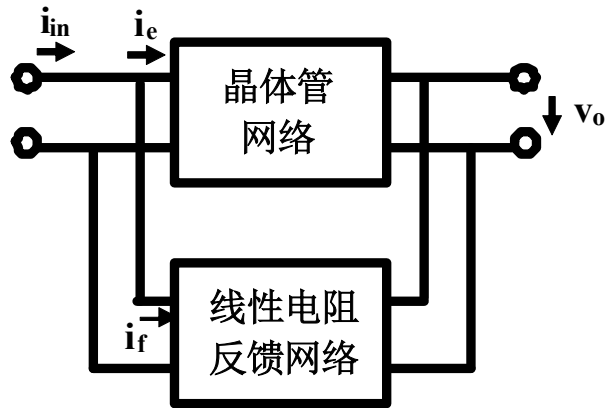
$$I_C = \frac{\eta V_{CC} - V_{BE}}{R_E + (R_{BB} + R_E)/\beta} = 1.03mA$$

$$S_{\beta}^{I_C} = \frac{\beta}{I_C} \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = \frac{(R_{BB} + R_E)/\beta}{R_E + (R_{BB} + R_E)/\beta} = 0.0167$$

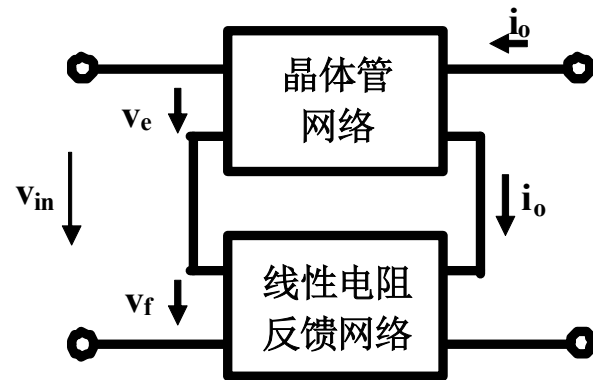
$$r_{out} = (1 + g_m R_E) r_{ce} = 8.56M\Omega$$

# 负反馈放大器

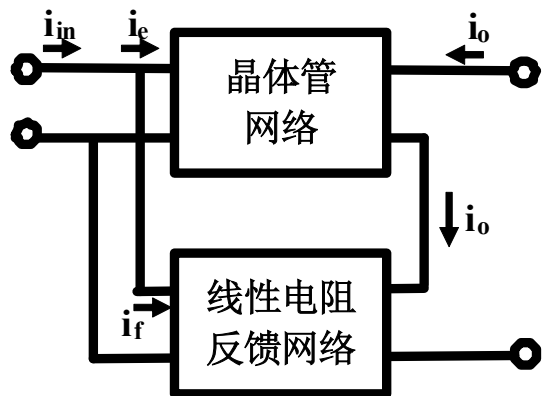
## 四种负反馈连接方式



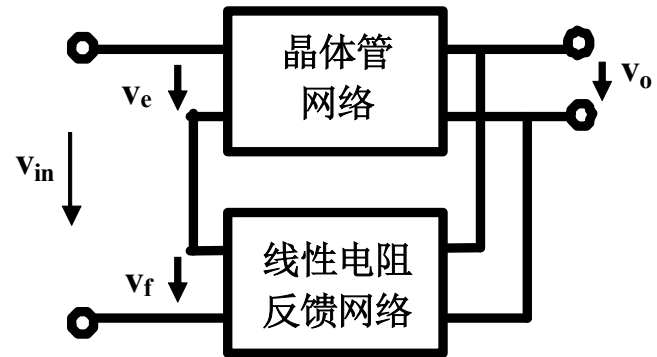
并并负反馈



串串负反馈



并串负反馈



串并负反馈

四种连接方式，对应四种理想受控源，四种基本放大器

# 记忆要点

- 串联：相同电流下电压相加
  - 输出端口串联，检测输出电流                      受控电流源
    - 同一电流流过晶体管网络和反馈网络端口2
  - 输入端口串联，形成反馈电压                      压控源
    - 端口1：输入电压扣除反馈电压形成误差电压，串联电压相加
  - 串联电阻变大，为原来的  $(1+T)$  倍
- 并联：相同电压下电流相加
  - 输出端口并联，检测输出电压                      受控电压源
    - 同一电压加载在晶体管网络和反馈网络端口2
  - 输入端口并联，形成反馈电流                      流控源
    - 端口1：输入电流扣除反馈电流形成误差电流，并联电流相加
  - 并联电阻变小，为原来的  $1/(1+T)$  倍

# 深度负反馈

$$T = G_{m0}R_F, R_{m0}G_F, A_{v0}F_v, A_{i0}F_i$$

环路增益 = 开环放大倍数 × 反馈系数

- 如何获得稳定的接近理想的受控源？
  - 深度负反馈
  - 首先获得高增益放大网络，配合稳定的反馈网络，由于增益为反馈系数的倒数，故而闭环增益稳定
    - 开环高增益可以是任意一种增益，如运放高增益为高电压增益
    - 只需计算反馈系数，即可确定闭环放大倍数
    - 运放深度负反馈，直接用虚短、虚断分析

$$T \gg 1$$

$$\text{串串负反馈: } G_{m0}R_F \gg 1$$

$$\text{并并负反馈: } R_{m0}G_F \gg 1$$

$$\text{串并负反馈: } A_{v0}F_v \gg 1$$

$$\text{并串负反馈: } A_{i0}F_i \gg 1$$

$$\text{串串负反馈: } G_{mf} = \frac{G_{m0}}{1 + G_{m0}R_F} \approx \frac{1}{R_F}$$

$$\text{并并负反馈: } R_{mf} = \frac{R_{m0}}{1 + R_{m0}G_F} \approx \frac{1}{G_F}$$

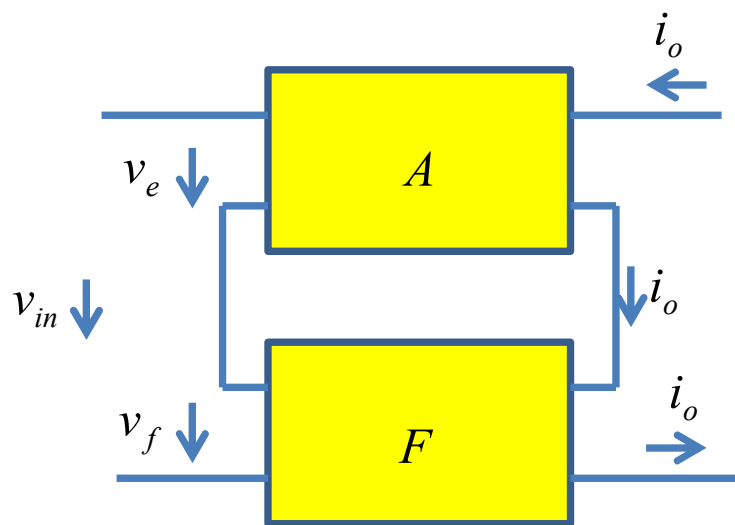
$$\text{串并负反馈: } A_{vf} = \frac{A_{v0}}{1 + A_{v0}F_v} \approx \frac{1}{F_v}$$

$$\text{并串负反馈: } A_{if} = \frac{A_{i0}}{1 + A_{i0}F_i} \approx \frac{1}{F_i}$$

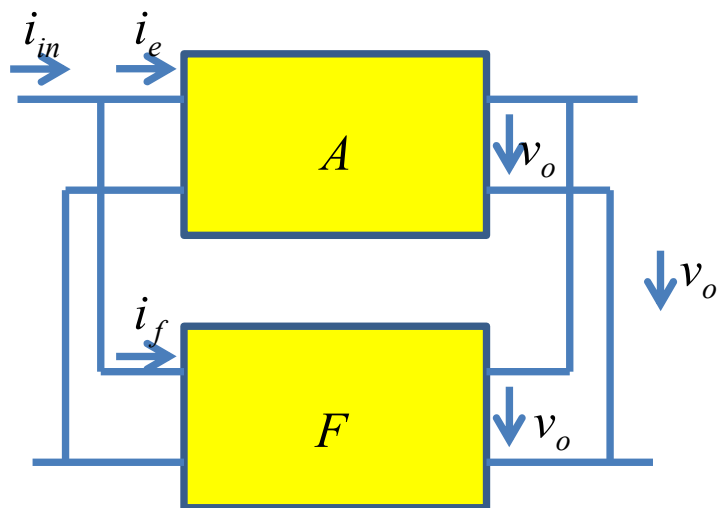
# 负反馈系数计算

- 我们只对增益感兴趣
  - 只需计算反馈系数即可
    - 串串负反馈
      - 反馈网络输入端加电流源激励，反馈网络输出端测开路电压，获得跨阻反馈系数
    - 并并负反馈
      - 反馈网络输入端加电压源激励，反馈网络输出端测短路电流，获得跨导反馈系数
    - 串并负反馈
      - 反馈网络输入端加电压源激励，反馈网络输出端测开路电压，获得电压反馈系数
    - 并串负反馈
      - 反馈网络输入端加电流源激励，反馈网络输出端测短路电流，获得电流反馈系数
  - 反馈系数的倒数就是闭环增益

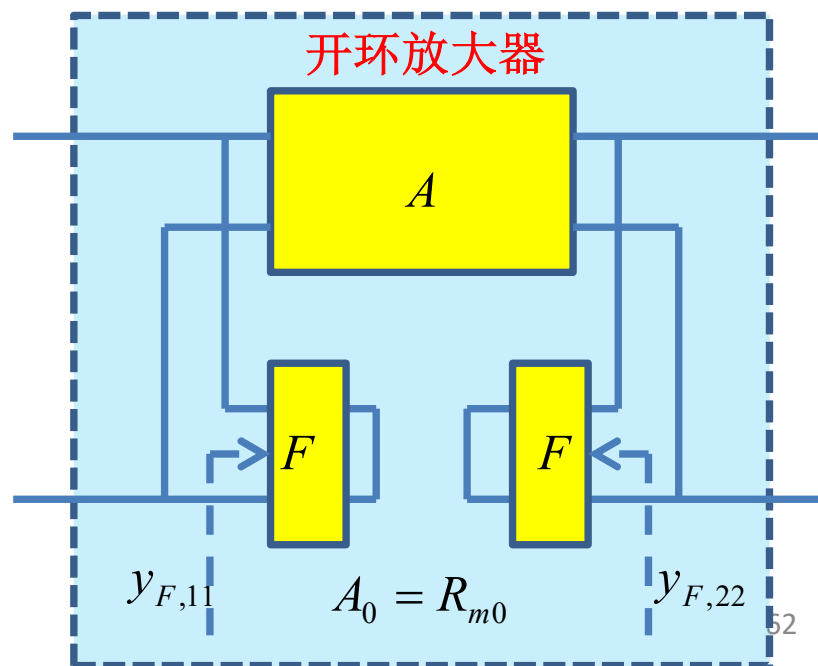
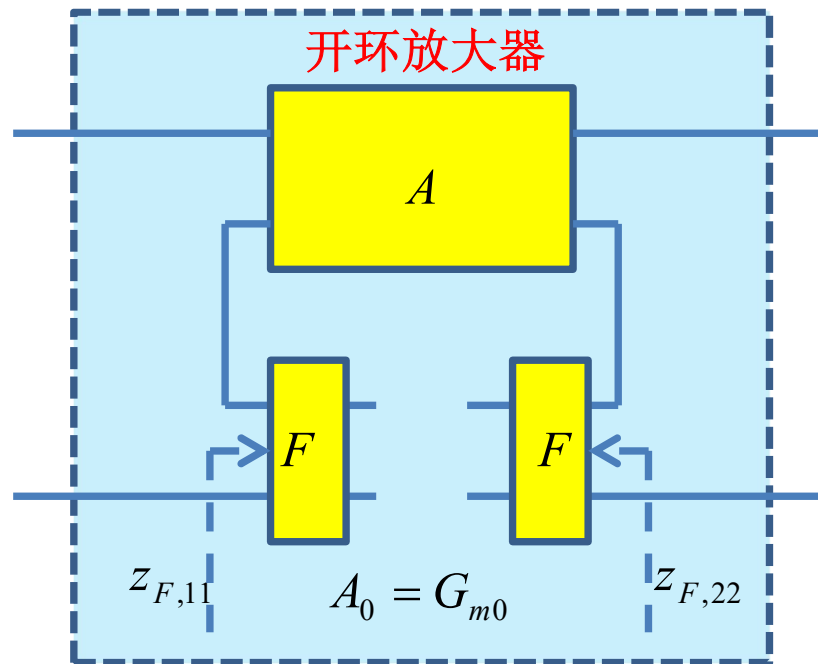
# 开环放大器



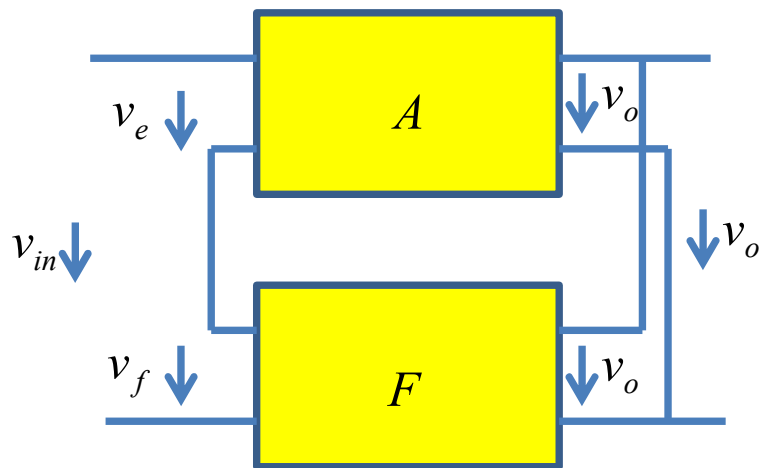
$$\mathbf{z}_{A,openloop} \approx \begin{bmatrix} z_{A,11} & 0 \\ z_{A,21} & z_{A,22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{F,11} & 0 \\ 0 & z_{F,22} \end{bmatrix}$$



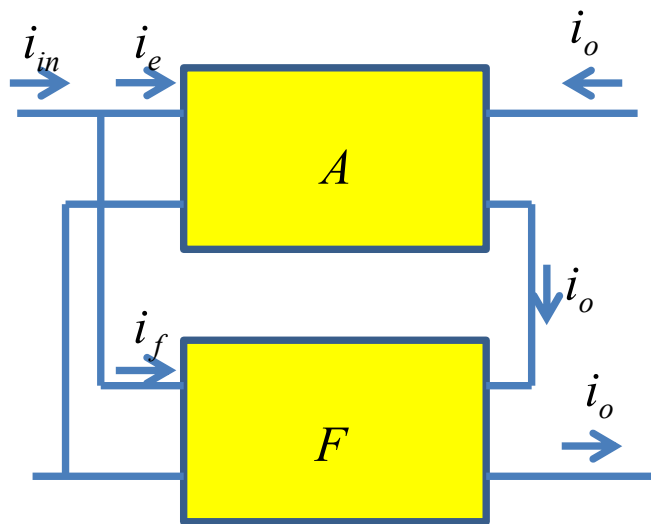
$$\mathbf{y}_{A,openloop} \approx \begin{bmatrix} y_{A,11} & 0 \\ y_{A,21} & y_{A,22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_{F,11} & 0 \\ 0 & y_{F,22} \end{bmatrix}$$



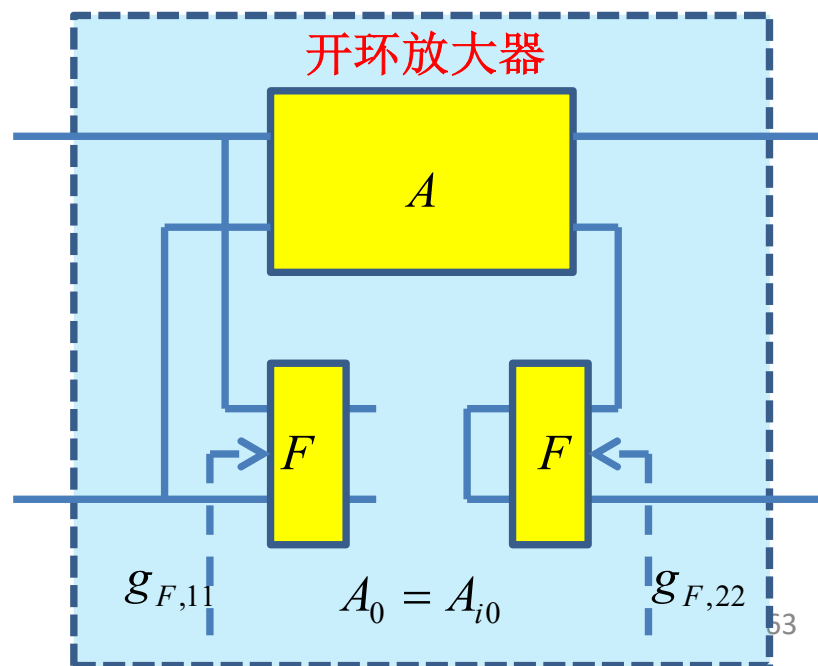
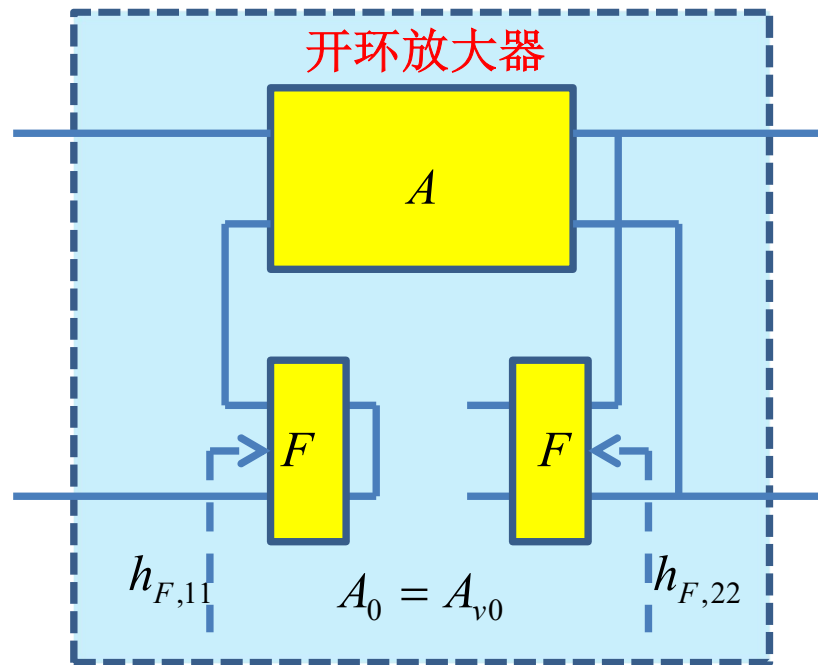
# 开环放大器



$$\mathbf{h}_{A,openloop} \approx \begin{bmatrix} h_{A,11} & 0 \\ h_{A,21} & h_{A,22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{F,11} & 0 \\ 0 & h_{F,22} \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{g}_{A,openloop} \approx \begin{bmatrix} g_{A,11} & 0 \\ g_{A,21} & g_{A,22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{F,11} & 0 \\ 0 & g_{F,22} \end{bmatrix}$$



# 19、近似处理方法：极致化原则

- 基本形态：留大弃小

–  $A+B \approx A$

$|B| \ll |A|, |B| < 0.1|A|$

- 最常用公式

$$f(X_0 + x) = f(X_0) + f'(X_0) \cdot x + \frac{1}{2} f''(X_0) x^2 + \dots$$

- 泰勒展开

$$\approx f(X_0) + f'(X_0) \cdot x$$

- 牛顿拉夫逊迭代法
- 局部线性化方法
- 灵敏度分析
- 差分对失配分析

- 大电阻极致化为无穷大，小电阻极致化为0

- 开关、运放、耦合电容、高频扼流圈、...



## 20、线性范围

$$f(X_0 + x) = f(X_0) + f'(X_0) \cdot x + \frac{1}{2} f''(X_0) x^2 + \dots \\ \approx f(X_0) + f'(X_0) \cdot x$$

- 什么时候可以忽略高次非线性项？
  - 人为地认为：在线性范围内，线性是成立的，高次非线性项可以忽略不计
- **1dB线性范围**
  - 在此范围内，微分斜率的最大值与最小值之间差别小于**1dB**；超出此范围，微分斜率差别则超过**1dB**
    - 理想线性的微分斜率是常数，差别越小，越接近理想线性

$$20 \log \left| \frac{f'_{\max}(x)}{f'_{\min}(x)} \right| = 1dB \quad x \in [x_1, x_2]$$

没有绝对线性，信号大了必有非线性失真

# 非线性失真描述

$$y = f(x)$$

$$x = X_p \cos \omega t$$

$$y = Y_0 + Y_1 \cos \omega t + Y_2 \cos 2\omega t + Y_3 \cos 3\omega t + \dots$$

- 总谐波失真

- 谐波失真

$$HD_2 = 20 \log \left| \frac{Y_2}{Y_1} \right|$$

$$HD_3 = 20 \log \left| \frac{Y_3}{Y_1} \right|$$

$$THD = 10 \log \frac{Y_2^2 + Y_3^2 + \dots}{Y_1^2}$$

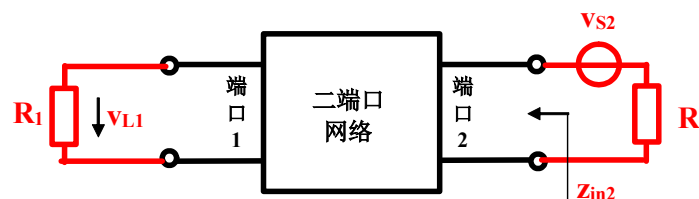
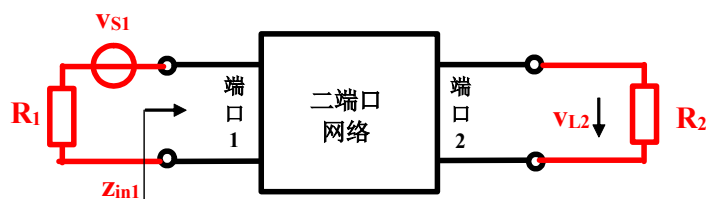
- 也可定义**40dB**总谐波失真线性范围
  - 只要信号幅度落在此范围内，总谐波失真则小于**40dB**，可认为这个范围为线性范围：线性可保持的范围

高线性度要求往往采用线性负反馈网络实现

# 21 线性系统网络参量

- 二端口要求掌握网络参量定义和相关计算
  - **zyhg, ABCD, S**

**S参量本质就是求输入阻抗和传输函数  
换了个名字而已**



$$S_{11} = \frac{Z_{in1} - R_1}{Z_{in1} + R_1}$$

$$S_{21} = 2 \sqrt{\frac{R_1 v_{L2}}{R_2 v_{S1}}}$$

$$S_{12} = 2 \sqrt{\frac{R_2 v_{L1}}{R_1 v_{S2}}}$$

$$S_{22} = \frac{Z_{in2} - R_2}{Z_{in2} + R_2}$$

# 22、运算放大器

- 习题课讲
  - 和第**15**次习题课内容一并考察

重点内容，需要充分理解理想运放\*\*