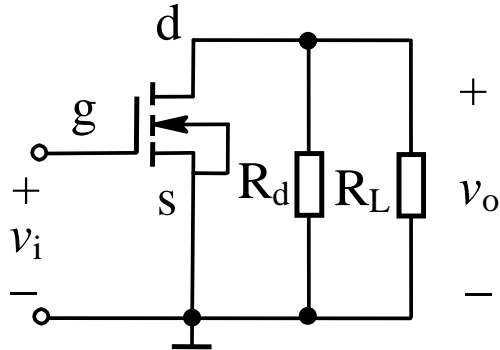


电路分析与电子线路

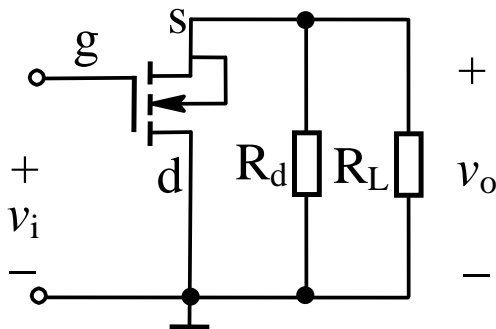
课程要点复习

MOSFET放大电路的组态

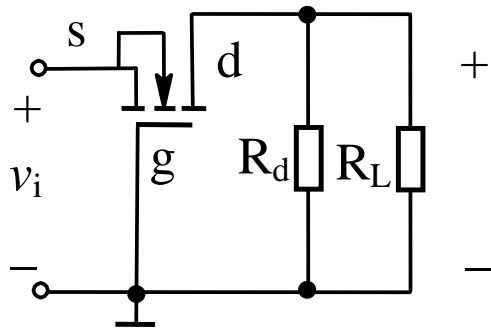
- MOS管通过栅源电压 v_{GS} 来控制漏极电流 i_D
- 构成放大电路的3种组态（共源CS、共漏CD、共栅CG）
- 放大电路：如何保证MOS管工作在饱和区？



(a) 共源极放大电路



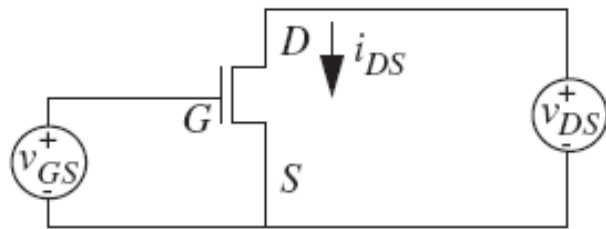
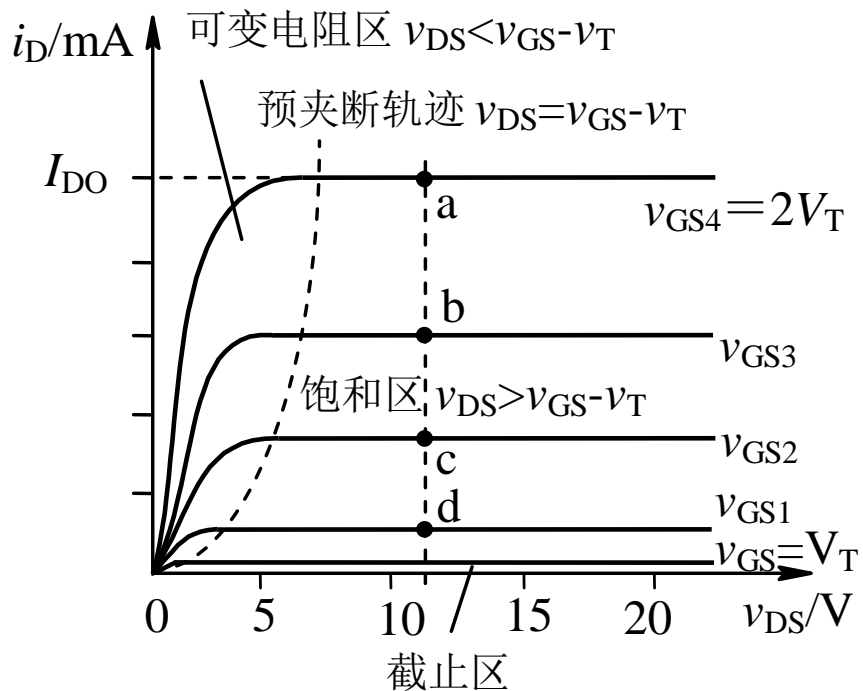
(b) 共漏极放大电路



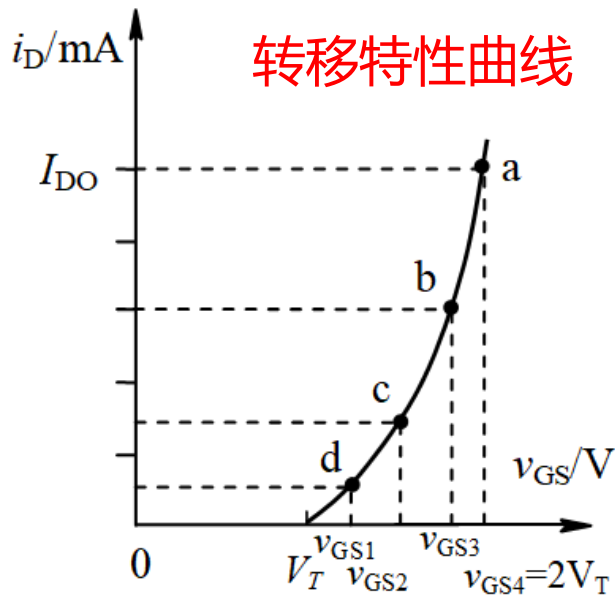
(c) 共栅极放大电路

MOSFET的三个工作区域

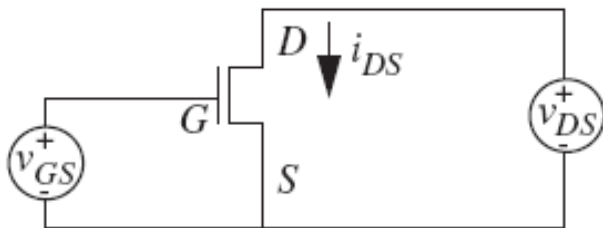
输出特性曲线 (预夹断轨迹)



转移特性曲线

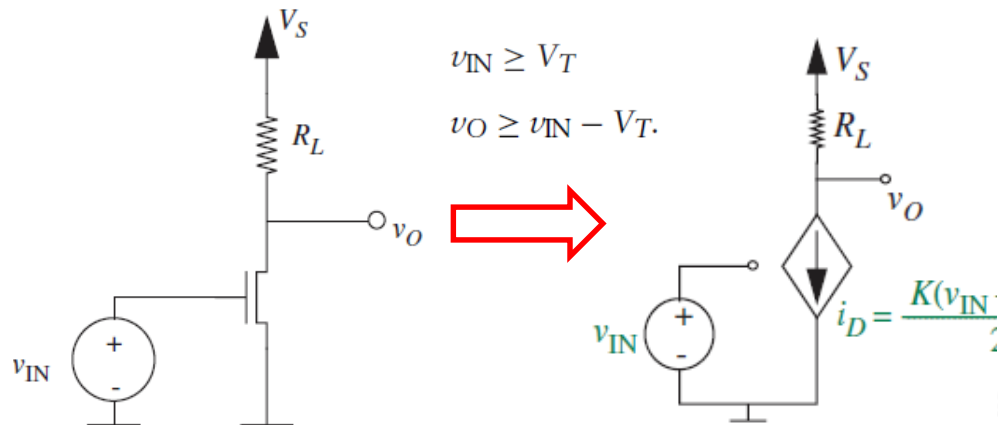


MOSFET的漏极电流 (I_{DS}) 计算



$$i_{DS} = \begin{cases} 0 & v_{GS} < V_T & \text{截止区} \\ K[(v_{GS} - V_T)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2] & v_{GS} > V_T, v_{DS} < v_{GS} - V_T & \text{可变电阻区} \\ \frac{K}{2}(v_{GS} - V_T)^2 & v_{GS} > V_T, v_{DS} > v_{GS} - V_T & \text{饱和区} \end{cases}$$

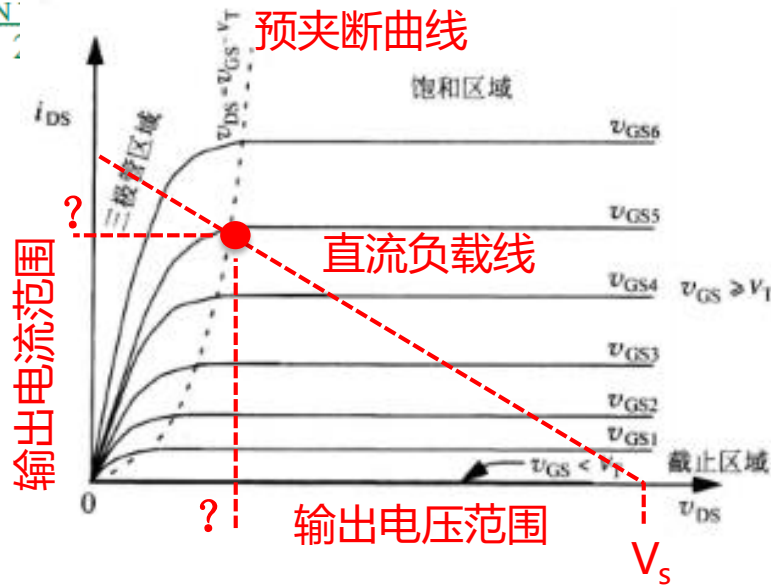
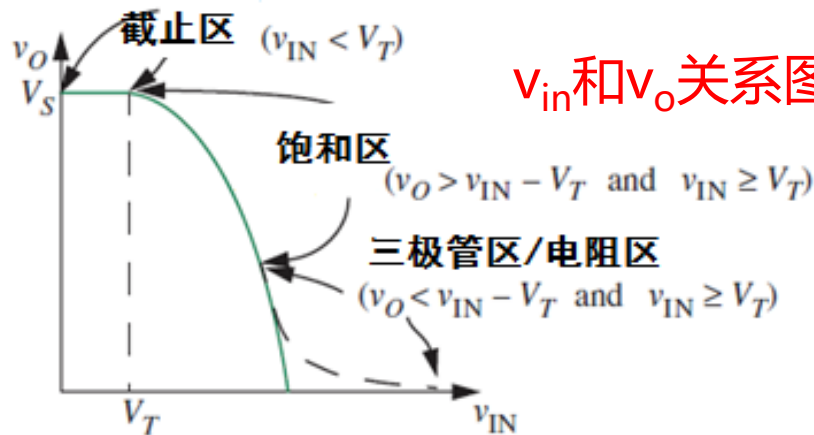
MOSFET的直流负载线



v_{in} 和 v_o 非线性关系

$$v_O = V_S - K \frac{(v_{IN} - V_T)^2}{2} R_L$$

v_{in} 和 v_o 关系图



MOSFET分析方法

大信号分析（输入信号幅度可与直流工作点比拟）

- 通过 V_{GS} 和 V_{DS} 判断MOSFET工作于哪个区域，建立大信号电路模型
- 计算直流工作点（ V_{GS} , V_{DS} , I_{DS} ）
- 计算直流工作点的可变化范围（计算饱和区）
- 选择 V_{GS} 范围中点为最佳直流工作点（使输入交流信号幅度最大）
- 理解输出特性曲线、转移特性曲线、预夹断曲线和直流负载线

小信号分析（输入信号幅度远小于直流工作点）

- 建立MOSFET的小信号电路模型
- 计算MOSFET对小信号的电压放大倍数

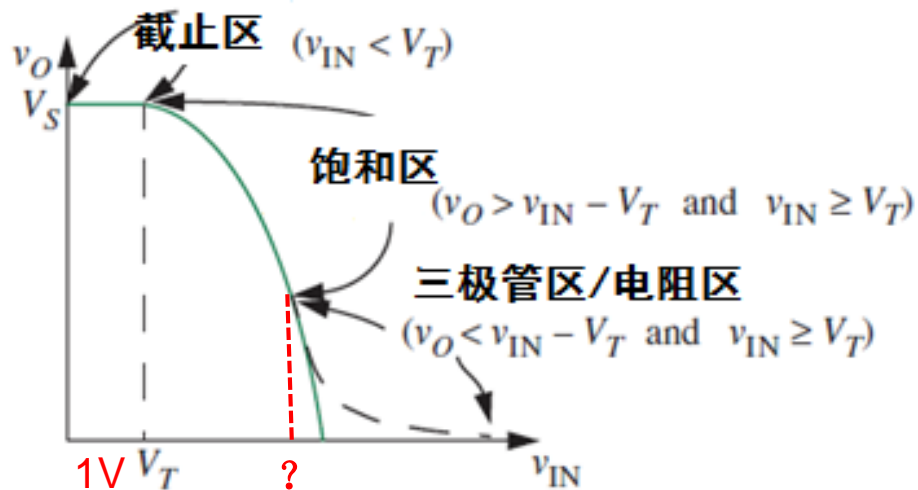
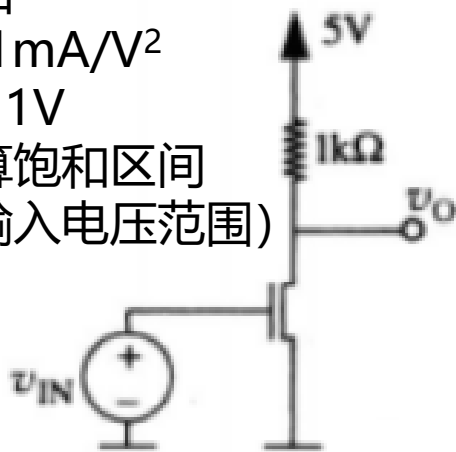
计算MOSFET放大电路的饱和区间

已知

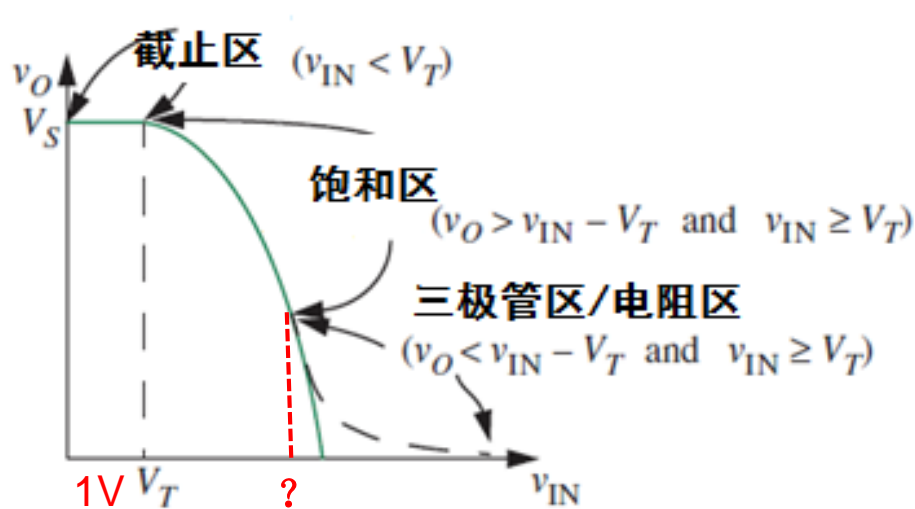
$$K=1\text{mA/V}^2$$

$$V_T=1\text{V}$$

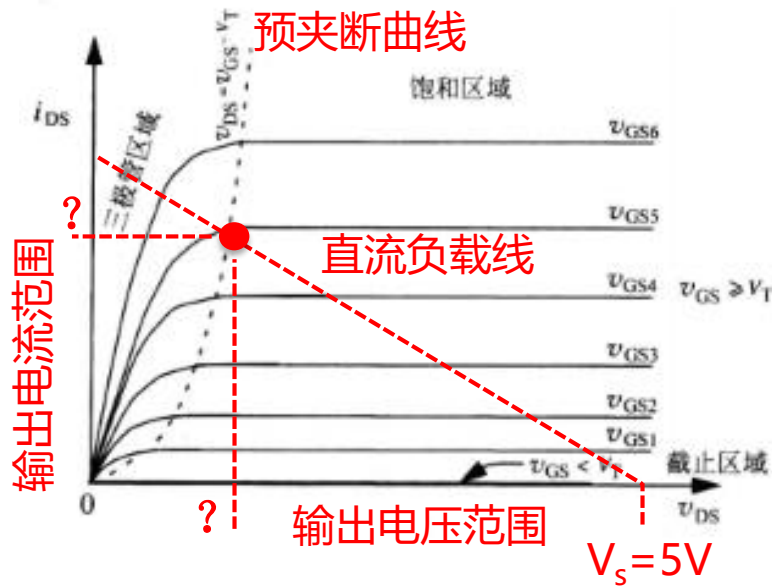
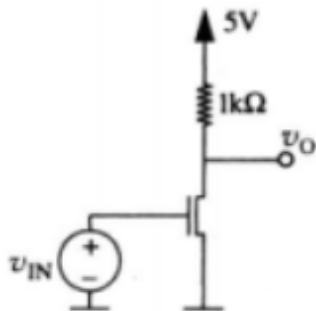
计算饱和区间
(输入电压范围)



计算MOSFET放大电路的饱和区间



输入电压范围



$$v_o = V_s - i_D R_L$$

$$v_o = v_{DS} = 5 - 1000 i_D$$

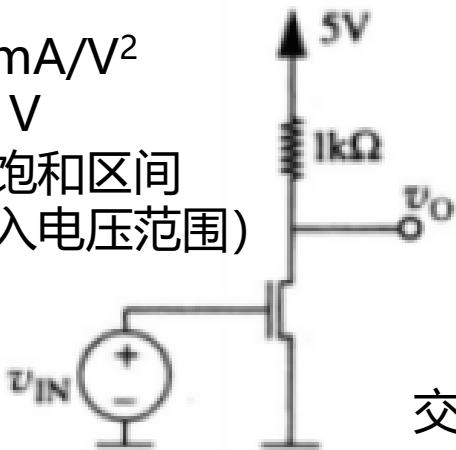
MOS管放大器

已知

$$K=1\text{mA/V}^2$$

$$V_T=1\text{V}$$

计算饱和区间
(输入电压范围)



预夹断曲线方程

$$v_{GS} = V_{in}$$

$$v_o = v_{DS} = v_{GS} - V_T = V_{in} - 1$$

直流负载线方程

$$v_o = 5 - i_D R_L$$

交点方程

$$5 - \frac{K}{2} (V_{in} - 1)^2 R_L = (V_{in} - 1)$$

$$5 - \frac{1}{2} (V_{in} - 1)^2 = (V_{in} - 1)$$

$$V_{in} = 3.32\text{V} \quad (V_{in} \text{取正值})$$

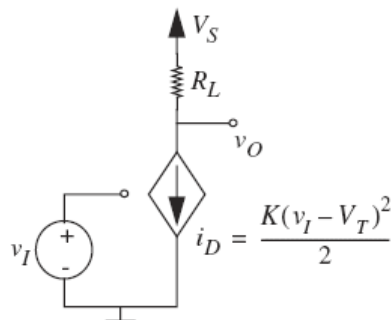
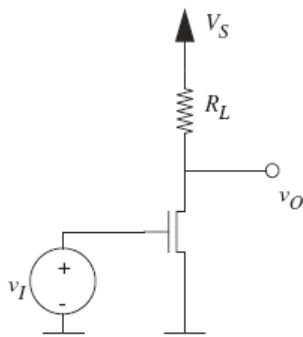
$$i_D = \frac{1}{2} (3.32 - 1)^2 = 2.69\text{mA}$$

输入电压: 1 ~ 3.32V

输出电压: 5 ~ 2.32V

输出电流: 0 ~ 2.69mA

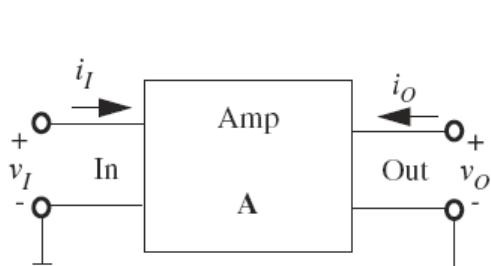
MOSFET小信号模型



$$v_O = V_S - i_D R_L.$$

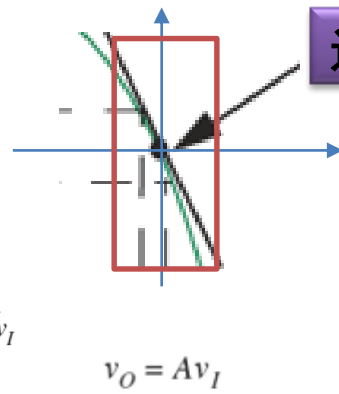
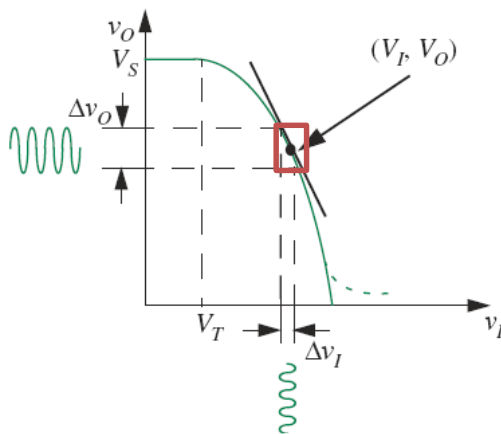
$$v_O = V_S - K \frac{(v_I - V_T)^2}{2} R_L$$

非线性



$$v_O = A v_I$$

$$v_I = V_I + v_i$$



近似线性

放大器在给定偏置点（工作点）上的扰动表现出线性

解析法：泰勒级数展开

$$y = f(x) = f(X_o) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{X_o} (x - X_o) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2f}{dx^2} \right|_{X_o} (x - X_o)^2 + \dots$$

$$\begin{aligned} i_D = f(V_I + v_i) &= \frac{K[V_I + v_i] - V_T]^2}{2} \\ &= \frac{K(V_I - V_T)^2}{2} + K(V_I - V_T)v_i + \frac{K}{2}v_i^2. \end{aligned}$$

$$i_D \approx \frac{K(V_I - V_T)^2}{2} + K(V_I - V_T)v_i$$

$$i_D = \boxed{I_D} + i_d = \boxed{\frac{K(V_I - V_T)^2}{2}} + K(V_I - V_T)v_i$$

$$I_D = \frac{K(V_I - V_T)^2}{2}$$

$$\boxed{i_d = K(V_I - V_T)v_i.}$$

偏置电流

增量电流

$$\begin{aligned} V_O + v_o &= V_S - (I_D + i_d)R_L \\ &= V_S - I_D R_L - i_d R_L \end{aligned}$$

$$V_O = V_S - I_D R_L$$

$$\begin{aligned} v_o &= -i_d R_L \\ &= -g_m v_i R_L. \end{aligned}$$

$$\boxed{g_m = K(V_{GS} - V_T).}$$

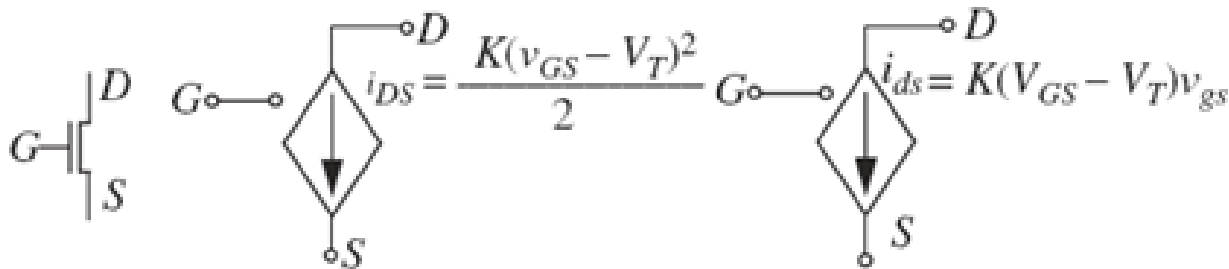
$$i_d = g_m v_i$$

增益取决于静态工作点

MOSFET小信号模型建立步骤

大信号模型

小信号模型



1. 确定直流工作点（输入信号 v_i 包含直流分量 V_i 和交流分量 v_i ）
2. 确定交流小信号变量之间的线性关系
3. 利用线性关系找到对应线性元件，建立小信号电路模型

独立直流电压源和直流电流源的小信号模型

- 独立直流 (DC) **电压源**小信号模型是**短路**

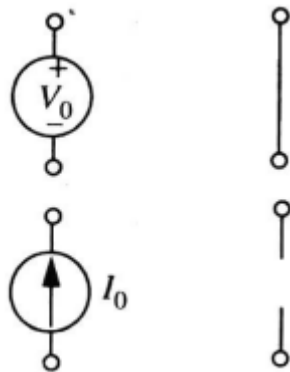
(原因: 输出电压没有交流分量)

- 独立直流 (DC) **电流源**小信号模型是**开路**

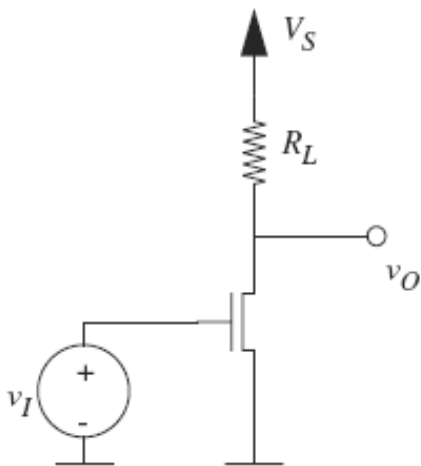
(原因: 输出电流没有交流分量)

- 电阻的小信号模型还是电阻

- 受控电压源? 受控电流源?



MOSFET小信号模型



$$K=1\text{mA/V}^2$$

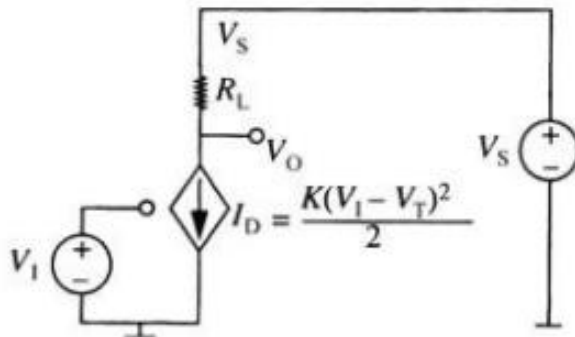
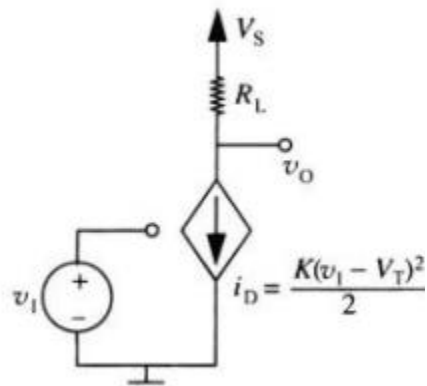
$$V_T=1\text{V}$$

$$R_L=8\text{K}\Omega$$

$$V_S=5\text{V}$$

小信号模型及增益？

课堂练习：MOSFET小信号模型



$$K=1\text{mA/V}^2$$

$$V_T=1\text{V}$$

$$R_L=8\text{K}\Omega$$

$$V_S=5\text{V}$$

$$u_O = 5 - \frac{K}{2}(u_{IN} - V_T)^2 R_L$$

$$u_O = u_{IN} - V_T$$

饱和区: (饱和原则)

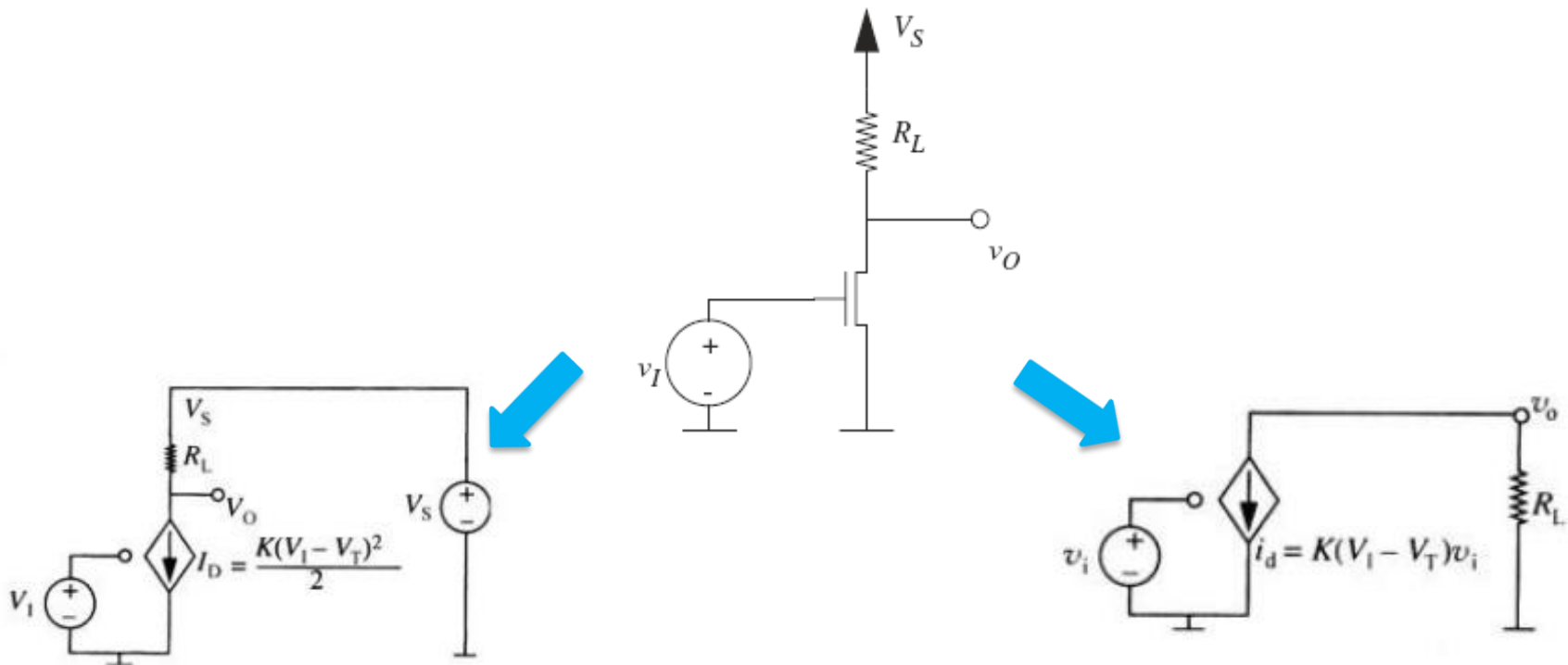
输入电压 1 ~ 2 V

输出电压 1 ~ 5 V

确定输入电压偏置工作点

$$u_{in_DC}=1.5\text{V}$$

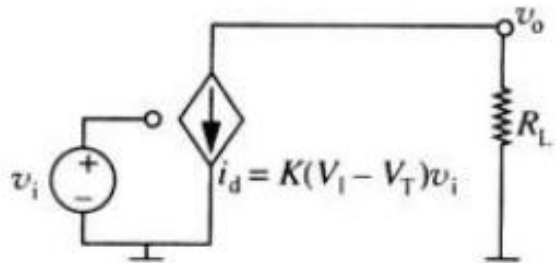
大信号模型和小信号模型



大信号电路模型 (平方律关系)

小信号电路模型 (线性关系)

MOSFET小信号模型 (令直流分量为0)



$$g_m = K(V_{GS} - V_T).$$



$$i_d = g_m u_i$$

为什么是负号?

$$u_o = -g_m R_L u_i$$

$$= -0.5 \times 10^{-3} \times 8 \times 10^3 u_i = -4u_i$$

小信号电压增益

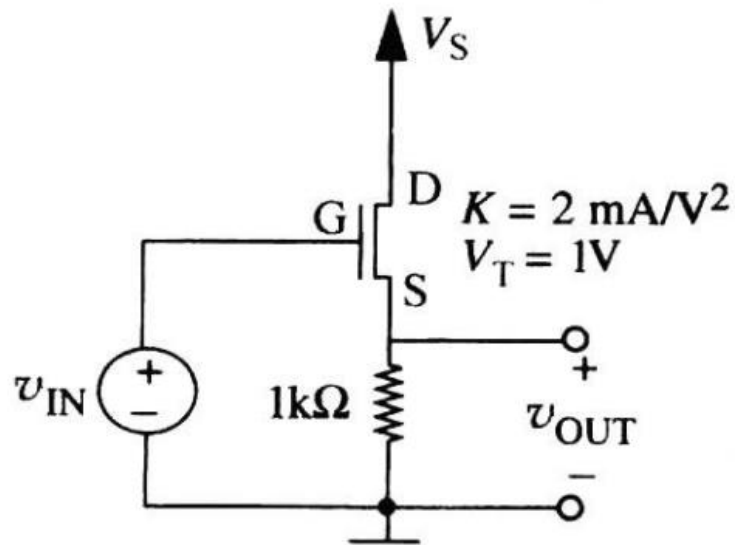
$$\frac{di_D}{du_{GS}} = \frac{d}{du_{IN}} \left[\frac{K}{2} (u_{IN} - V_T)^2 \right]$$

$$\frac{di_D}{du_{GS}} = K(u_{IN} - V_T) \Big|_{u_{GS}=1.5}$$

$$g_m = K(u_{IN} - V_T)$$

$$= 1\text{mA/V}^2 (1.5 - 1)\text{V} = 0.5\text{mS}$$

MOSFET源极跟随器



若 $v_{in}=2\text{V}$ ，求输出电压 v_{out} 和 i_D

$$i_D = \frac{v_{OUT}}{1k\Omega}$$

$$2 \times 10^{-3} \frac{(2\text{V} - 1\text{V} - v_{OUT})^2}{2} = \frac{v_{OUT}}{1 \times 10^{-3}}$$

$$v_{OUT}^2 - 3v_{OUT} + 1 = 0$$

这个方程的两个根约为 2.6 和 0.4

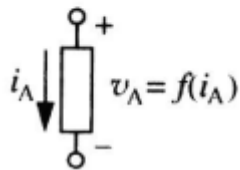
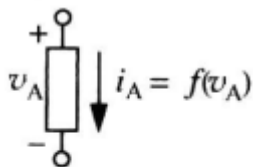
$$2\text{V} - v_{OUT} \geq 1\text{V}$$

$$v_{OUT} = 0.4\text{V}$$

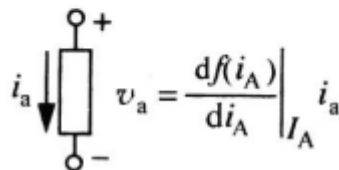
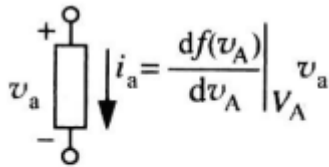
$$i_D = 0.4\text{mA}$$

举一反三：小信号模型建立

大信号模型



小信号模型



- 一般来说,如果一个元件变量 x_B 依赖于某个其他变量 x_A ,即

$$x_B = f(x_A)$$

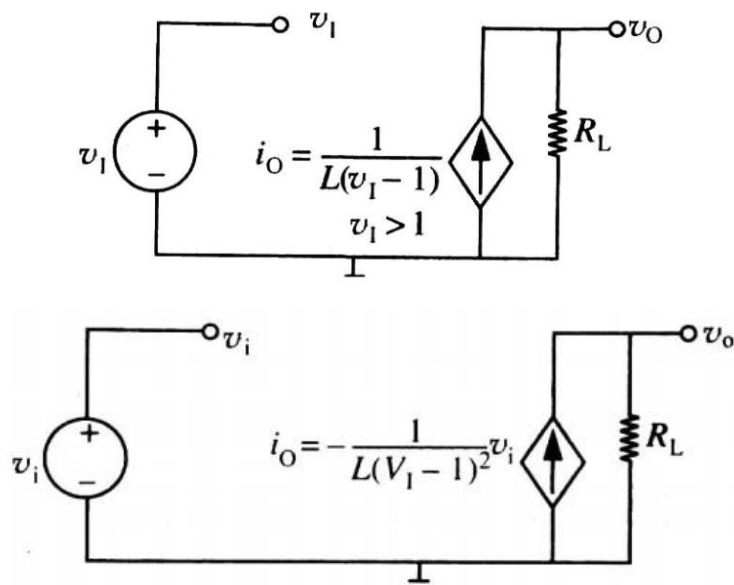
则 x_A 中小变化对应的增量变化为

$$x_b = \left. \frac{df(x_A)}{dx_A} \right|_{x_A=X_A} x_a$$

其中 X_A 是 x_A 的工作点值。

小信号模型建立

已知大信号模型和直流工作点 (V_I 和 V_O)，求小信号模型和电压增益



小信号模型

大信号分析

$$v_O = i_O R_L$$

$$= R_L \frac{1}{L(v_I - 1)}$$

直流工作点

$$V_O = R_L \frac{1}{L(V_I - 1)}$$

小信号分析

$$i_o = \left. \frac{di_O}{dv_I} \right|_{V_I} v_i$$

$$v_o = i_o R_L = -\frac{1}{L(V_I - 1)^2} v_i R_L$$

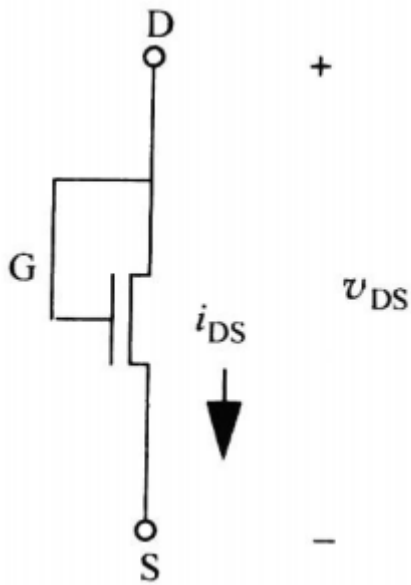
$$= -\frac{1}{L(V_I - 1)^2} v_i$$

$$v_o = \left. \frac{dv_O}{dv_I} \right|_{V_I} v_i = -\frac{1}{L(V_I - 1)^2} v_i R_L$$

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{1}{L(V_I - 1)^2} R_L$$

课堂练习

MOSFET电路如下图所示，求其大信号模型和小信号模型



栅极和漏极相连，变为二端元件，器件工作在哪个区域？

$$i_{DS} = K \frac{(v_{GS} - V_T)^2}{2} \longrightarrow i_{DS} = K \frac{(v_{DS} - V_T)^2}{2}$$

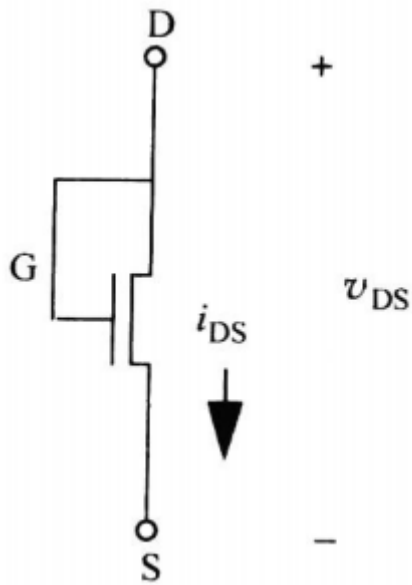
$$i_{ds} = \left. \frac{di_{DS}}{dv_{DS}} \right|_{V_{DS}} \quad v_{ds} = K(v_{DS} - V_T) \Big|_{V_{DS}} \quad v_{ds} = K(V_{DS} - V_T) v_{ds}$$

$$v_{ds} = \frac{i_{ds}}{K(V_{DS} - V_T)}$$

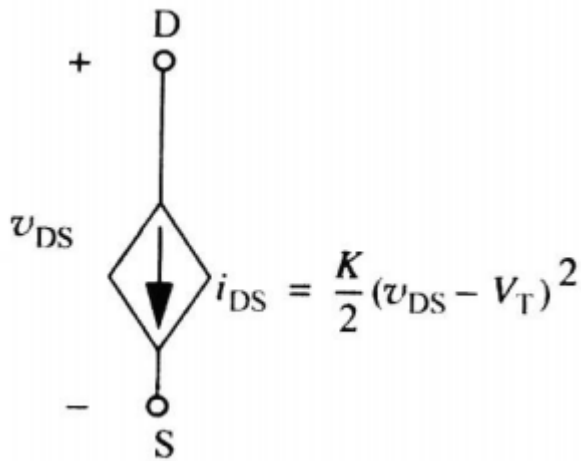
该二端器件等效为一个电阻

课堂练习

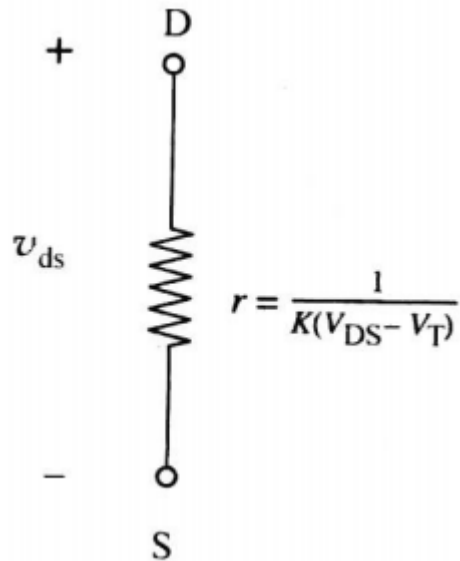
MOSFET电路如下图所示，求其大信号模型和小信号模型



大信号模型



小信号模型



重点：大信号模型和小信号模型

1. 确定直流工作点（输入信号 v_i 包含直流分量 V_I 和交流分量 v_i ）
2. 确定交流小信号变量之间的线性关系
3. 利用线性关系找到对应线性元件，建立小信号电路模型

