

# 模拟与数字电路

## Analog and Digital Circuits



课程主页 扫一扫

第 十八讲： **MOSFET 及其小信号模型**

Lecture 18: **MOSFET & Small Signal Model**

主 讲： 陈 迟 晓

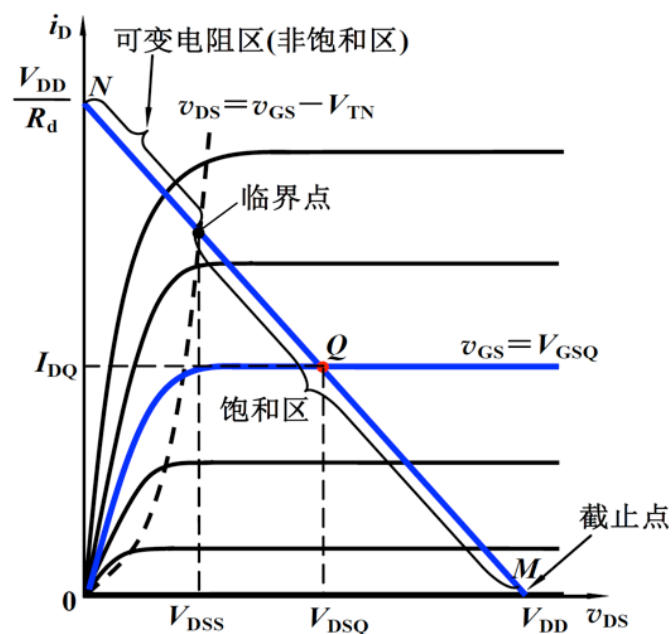
Instructor： Chixiao Chen

# 提纲

- 复习
  - BJT晶体管的小信号模型是什么？
- MOSFET电路原理与小信号模型
- MOSFET习题
- 晶体管放大电路



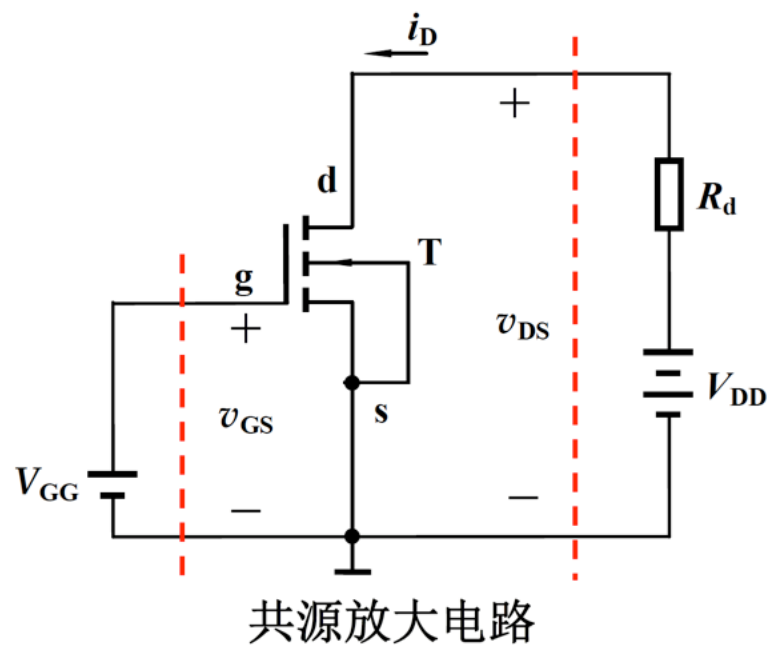
# 图解法确定静态工作点Q



$$v_{GS} = V_{GG} = V_{GSQ}$$

$$\text{直流负载线: } v_{DS} = V_{DD} - i_D R_c$$

得到静态工作点:  $V_{GSQ}$ 、 $I_{DQ}$ 、 $V_{DSQ}$



静态:  $v_i = 0$

• 输入回路

$$v_{GS} = V_{GG} = V_{GSQ}$$

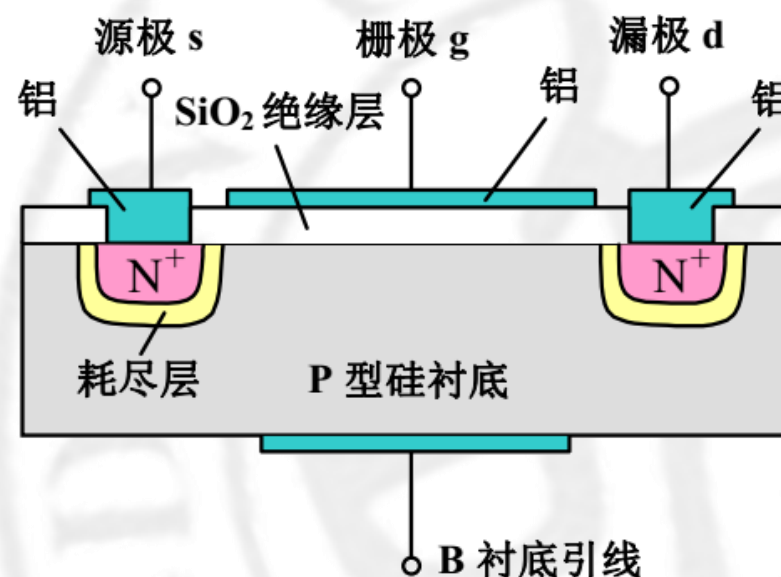
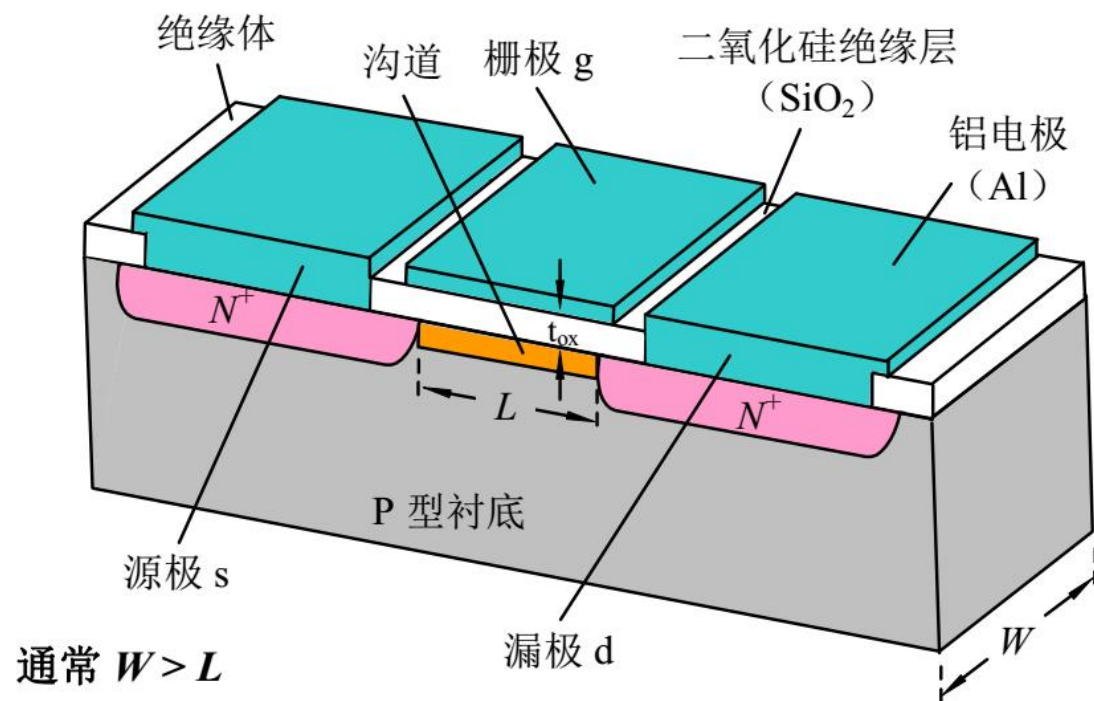
• 输出回路

$$v_{DS} = V_{DD} - i_D R_d$$

(直流负载线)

# 金属—氧化物—半导体 场效应管

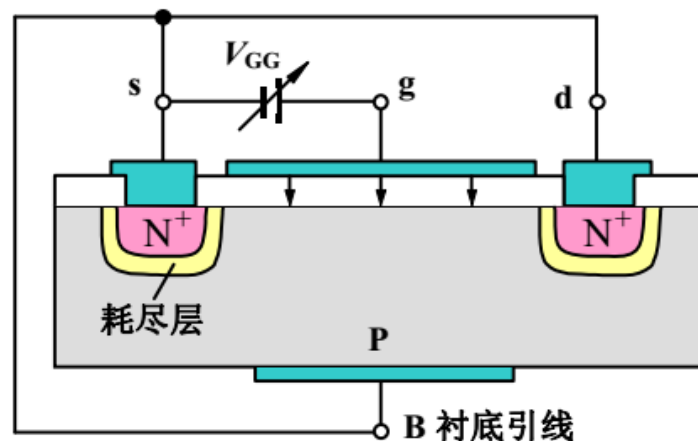
- Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) Field Effect Transistor (FET)



# MOSFET 原理

- $V_{gs} < V_{th}$

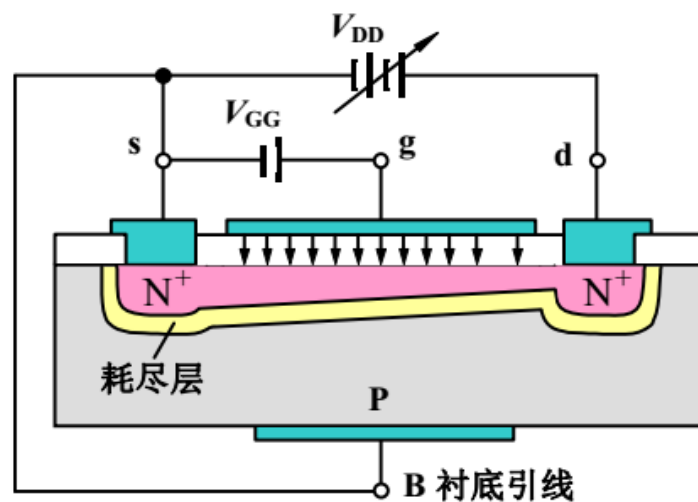
无导电沟道



- $V_{gs} > V_{th}$

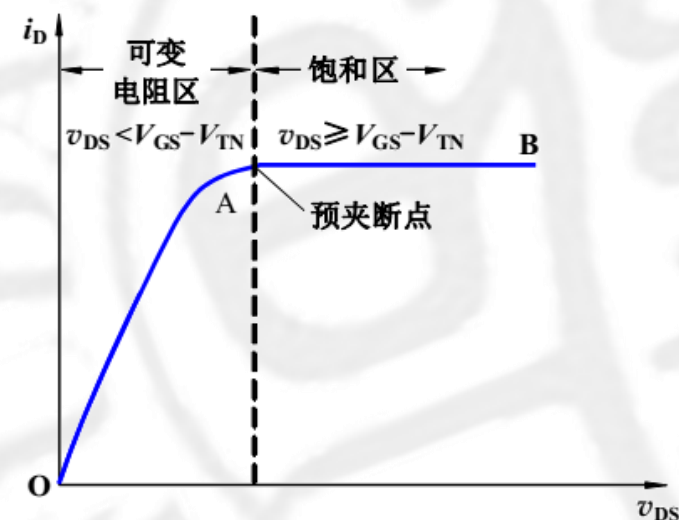
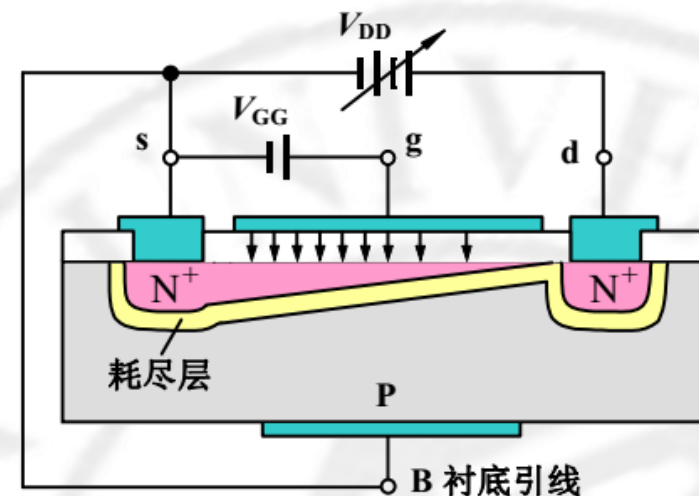
形成反型区

存在导电沟道



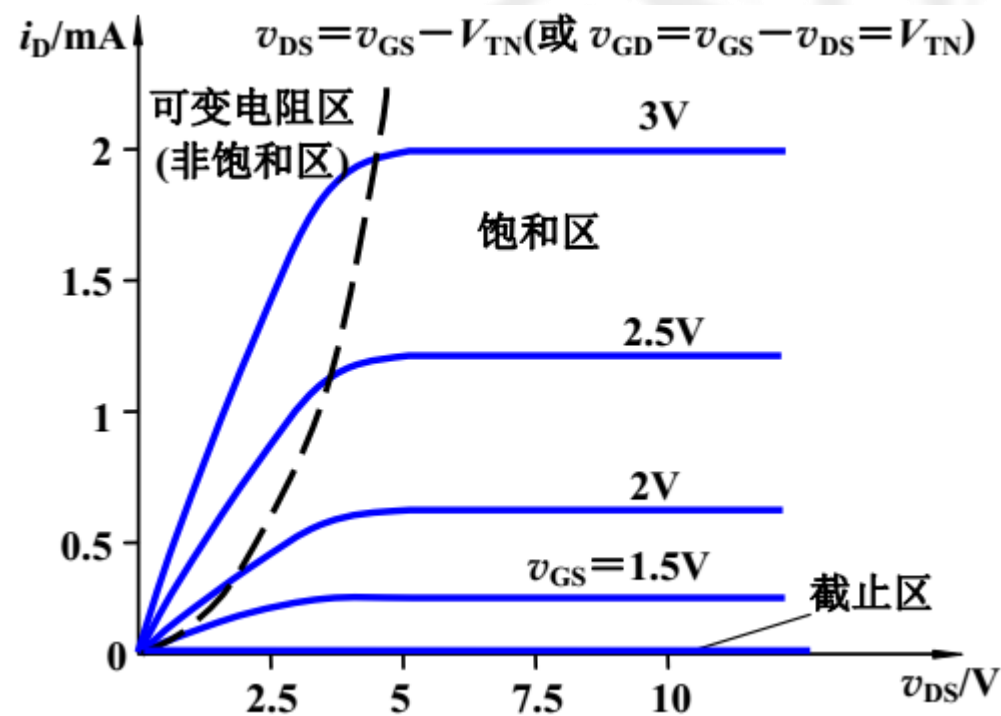
- $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$

沟道夹断



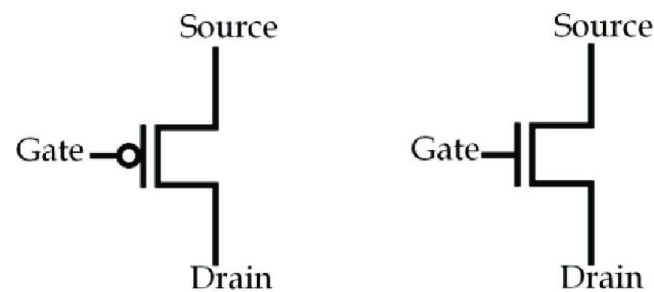
# MOSFET 工作区域

- 截止区  $i_D = 0$
- 可变电阻区  $v_{DS} < (v_{GS} - V_{TN})$   
$$i_D = K_n [2(v_{GS} - V_{TN})v_{DS} - v_{DS}^2]$$
- 饱和区  $v_{GS} > V_{TN}$  , 且  $v_{DS} \geq (v_{GS} - V_{TN})$   
$$i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$$

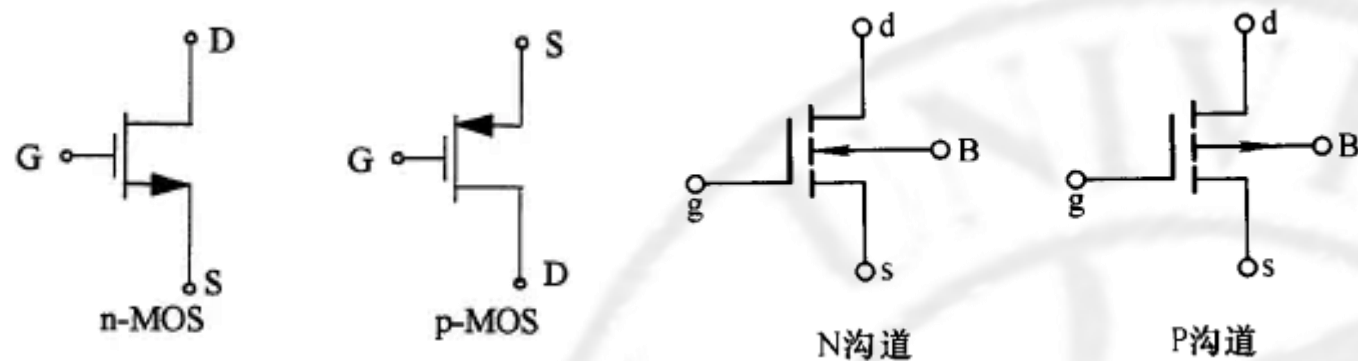


# BJT vs. MOSFET

- Complementary MOS

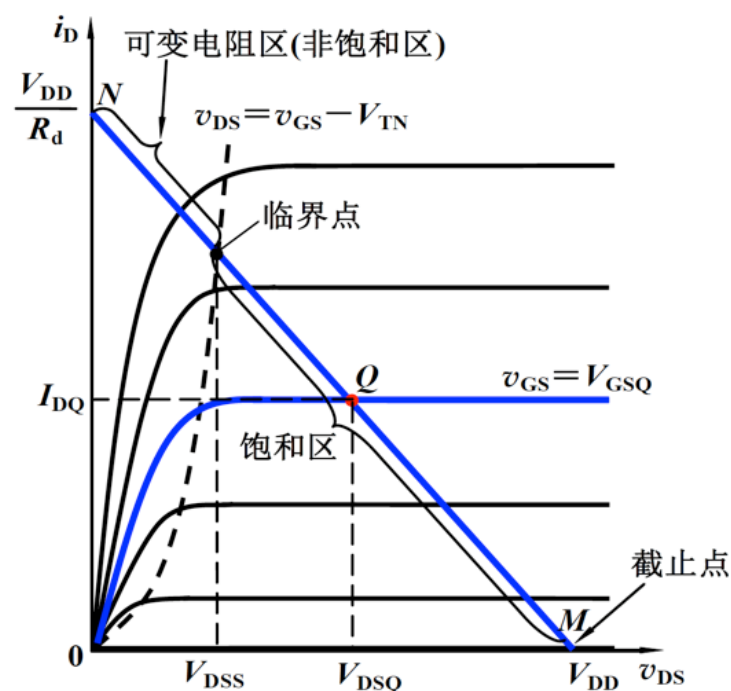


- BJT vs. MOSFET
  - 现代集成电路工艺多采用MOSFET



	BJT	E-MOSFET
相似	电极 (b、c、e)	电极 (g、d、s)
	工作区 (截止、放大、饱和)	工作区 (截止、恒流、可变电阻)
不同	双极性	单极性
	流控型	压控型

# 放大区与非放大区



## 增强型NMOS管

饱和区的条件:  $V_{GSQ} > V_{TN}$ ,

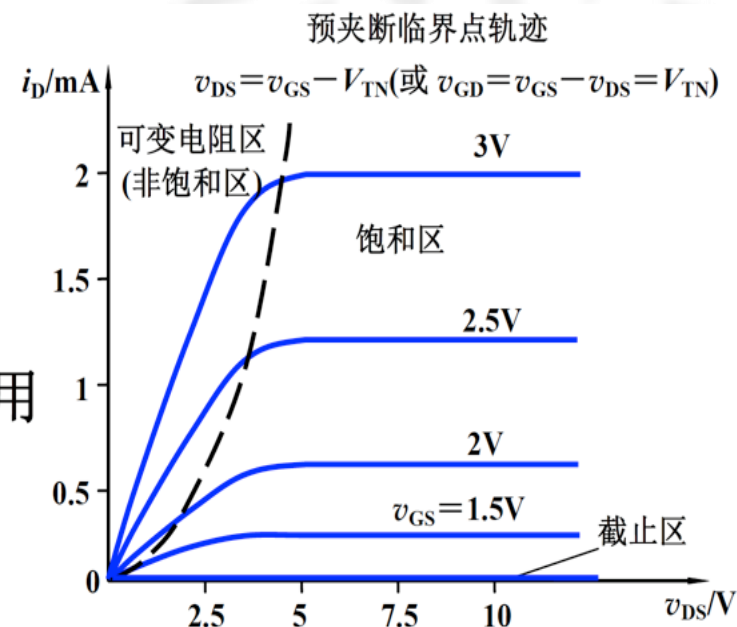
$$I_{DQ} > 0, \quad V_{DSQ} > V_{GSQ} - V_{TN}$$

假设NMOS管工作于饱和区, 利用

$$I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2 \text{ 计算 } Q \text{ 点。}$$

若:  $V_{GSQ} < V_{TN}$ , NMOS管截止。

若:  $V_{DSQ} < V_{GSQ} - V_{TN}$ , NMOS管可能工作在可变电阻区。

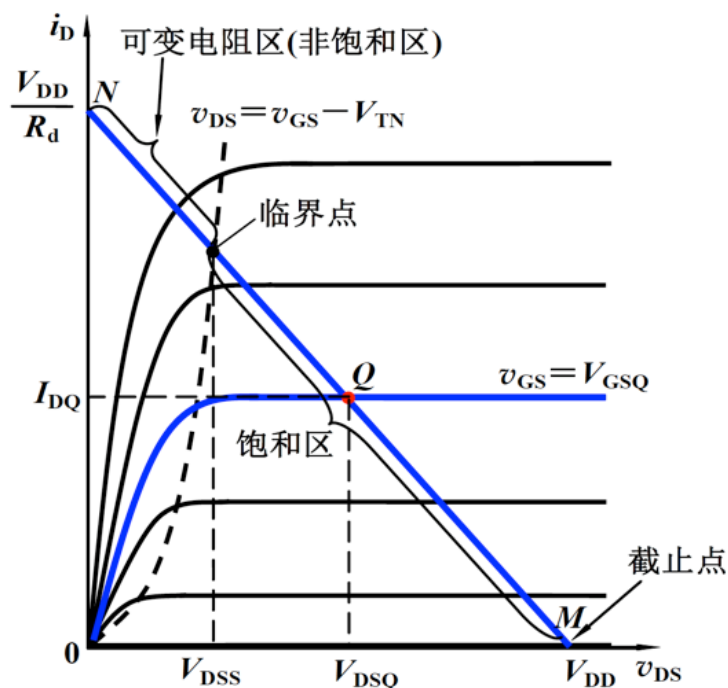


如果初始假设是错误的, 则必须作出新的假设, 同时重新分析电路。



# 小信号模型

$\lambda$  为沟道长度调制系数



## 1. $\lambda=0$ 时

(以增强型NMOS管为例)

在饱和区内有

$$\begin{aligned}
 i_D &= K_n (v_{GS} - V_T)^2 \\
 &= K_n (V_{GSQ} + v_{gs} - V_T)^2 \\
 &= K_n [(V_{GSQ} - V_T) + v_{gs}]^2 \\
 &= K_n (V_{GSQ} - V_T)^2 + 2K_n (V_{GSQ} - V_T)v_{gs} + K_n v_{gs}^2 \\
 &= I_{DQ} + g_m v_{gs} + K_n v_{gs}^2
 \end{aligned}$$

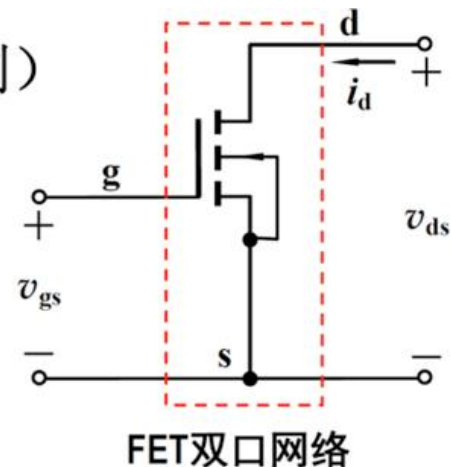
静态值  
(直流)

动态值  
(交流)

非线性失真项

其中

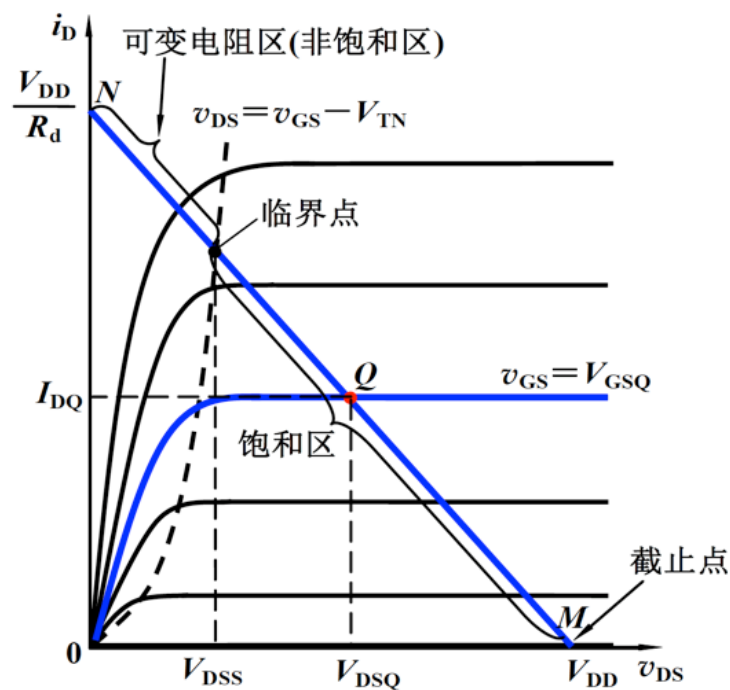
$$g_m = 2K_n (V_{GSQ} - V_{TN})$$



当,  $v_{gs} \ll 2(V_{GSQ} - V_{TN})$  时,  $i_D \approx I_{DQ} + g_m v_{gs} = I_{DQ} + i_d$

# 小信号模型

- $\lambda = 0$



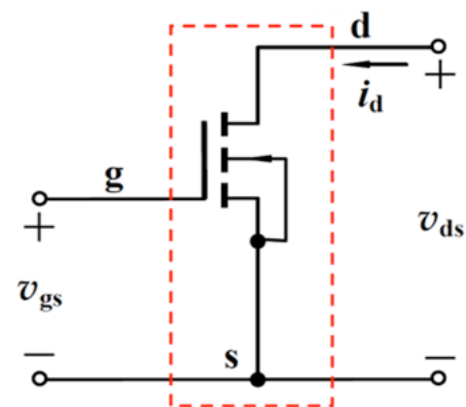
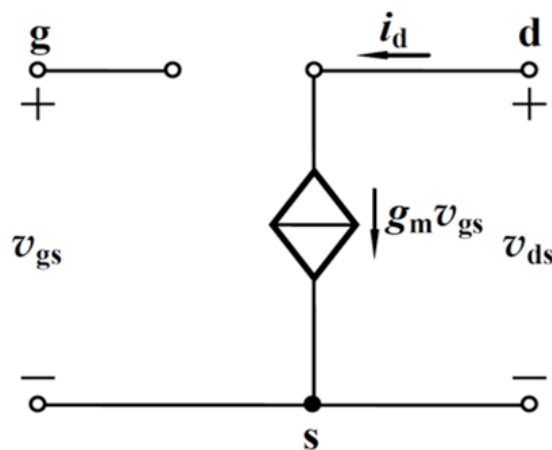
## 1. $\lambda = 0$ 时

$$i_D = I_{DQ} + g_m v_{gs} = I_{DQ} + i_d$$

纯交流

$$i_d = g_m v_{gs}$$

电路模型



FET双口网络

- $g_m v_{gs}$  是受控源，且为电压控制电流源(VCCS)。
- 电流方向与  $v_{gs}$  的极性是关联的。

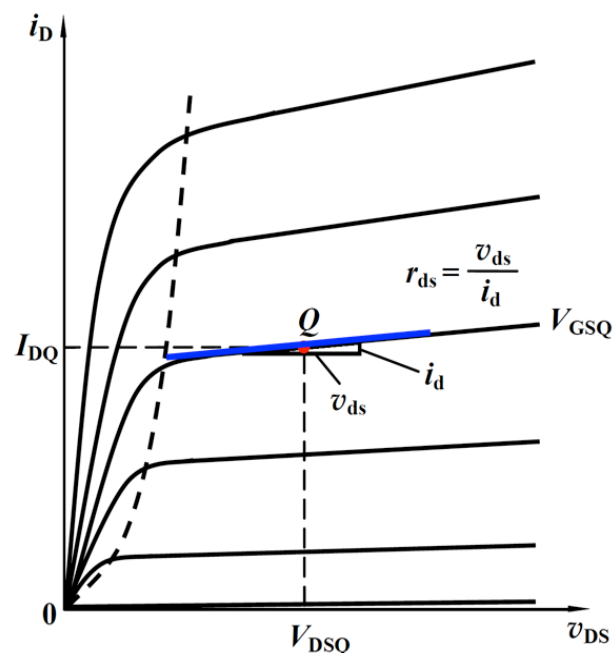
# 小信号模型

•  $\lambda \neq 0$

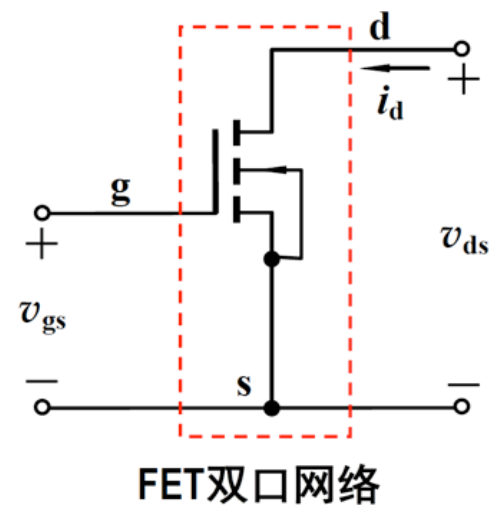
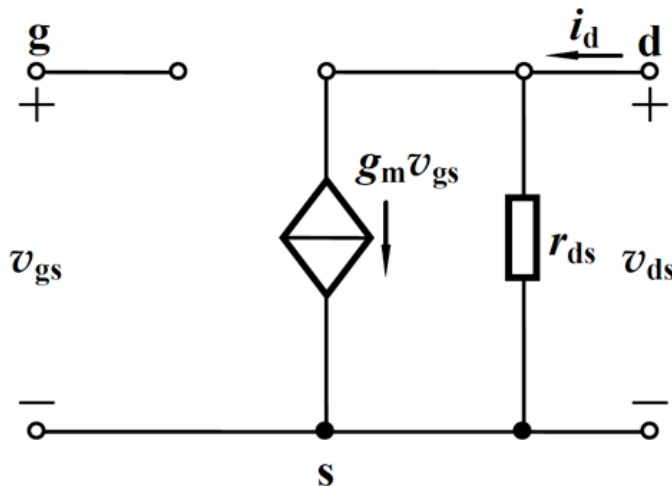
## 2. $\lambda \neq 0$ 时

d、s端口看入有一电阻 $r_{ds}$

$$r_{ds} = \left. \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D} \right|_{V_{GSQ}} = \frac{1}{\lambda K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2} \approx \frac{1}{\lambda I_{DQ}} = \frac{V_A}{I_{DQ}}$$

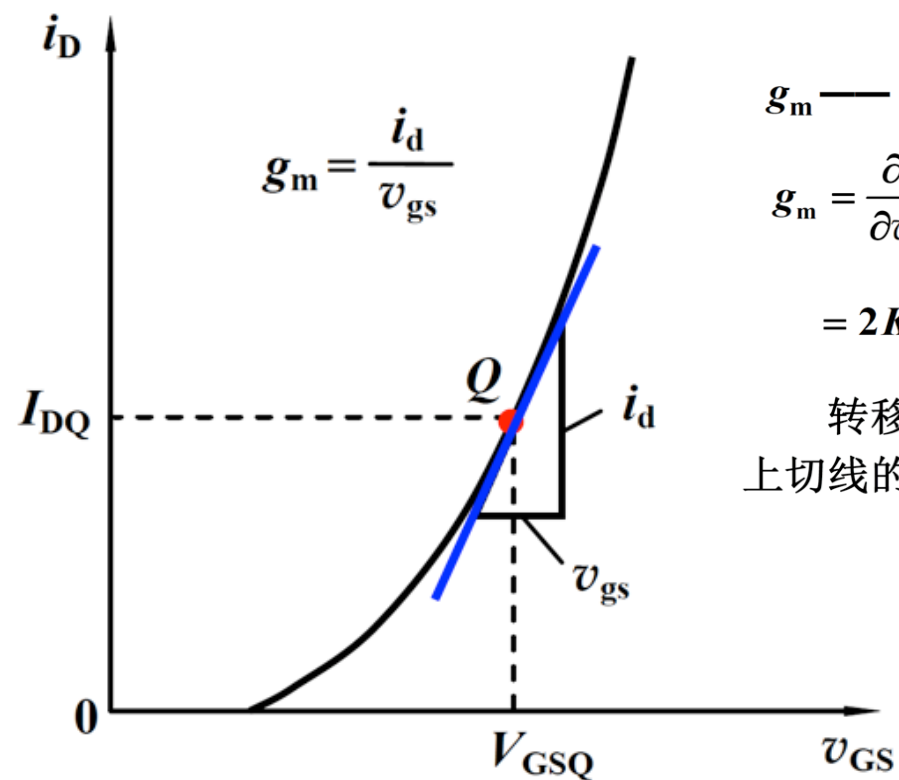


电路模型



# 小信号模型 对应 晶体管特性曲线

$g_m$  物理意义



$$g_m = \frac{i_d}{v_{gs}}$$

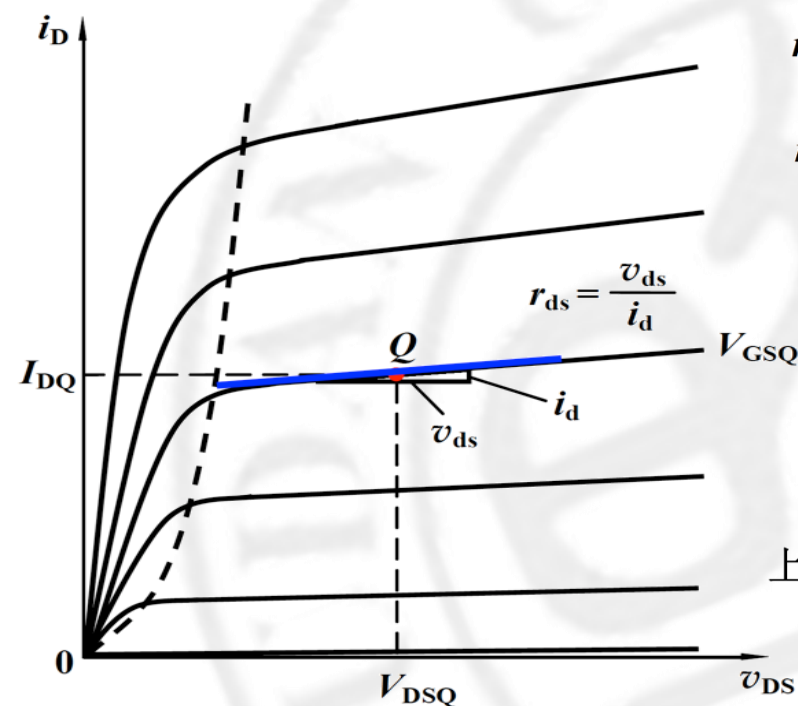
$g_m$  —— 低频互导

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{V_{DSQ}}$$

$$= 2K_n(V_{GSQ} - V_{TN})$$

转移特性曲线Q点  
上切线的斜率

$r_{ds}$  物理意义



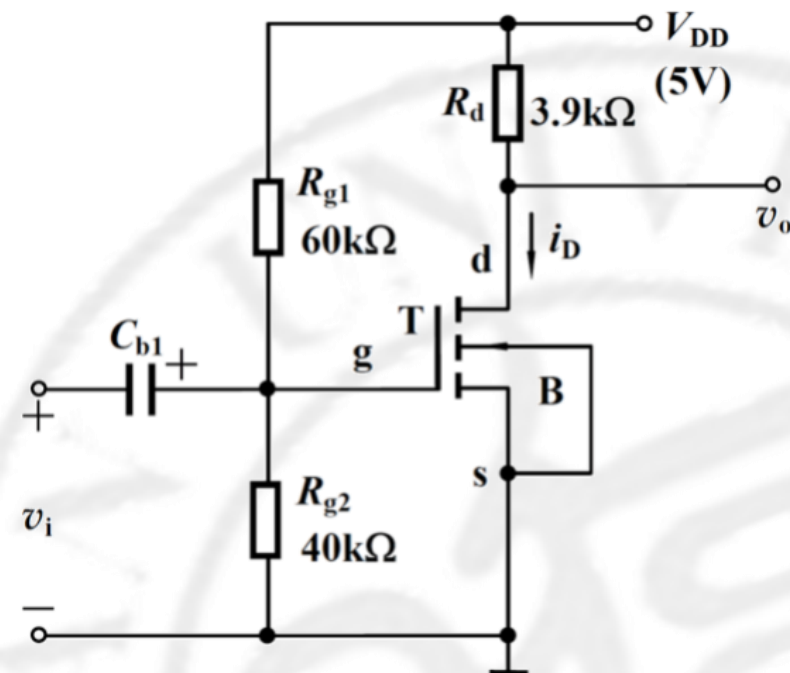
$r_{ds}$  —— 输出电阻

$$r_{ds} = \left. \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D} \right|_{V_{GSQ}} = \frac{1}{\lambda K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2} \approx \frac{1}{\lambda I_{DQ}} = \frac{V_A}{I_{DQ}}$$

输出特性曲线Q点  
上切线斜率的倒数

例题：在右图电路中，已知如下参数  
 $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA/V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

- 求：
- (1) 该电路的输入静态工作点  
(包括 $V_g$ ,  $V_d$ , 及工作区域)
  - (2) 画出该电路的小信号等效电路
  - (3) 该电路的动态指标  
(包括：增益，高频输入阻抗，输出阻抗)



**例1**  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA/V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

解：（1）静态工作点

$$V_{GSQ} = \left( \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \right) V_{DD} = \frac{40}{60 + 40} \times 5V = 2V$$

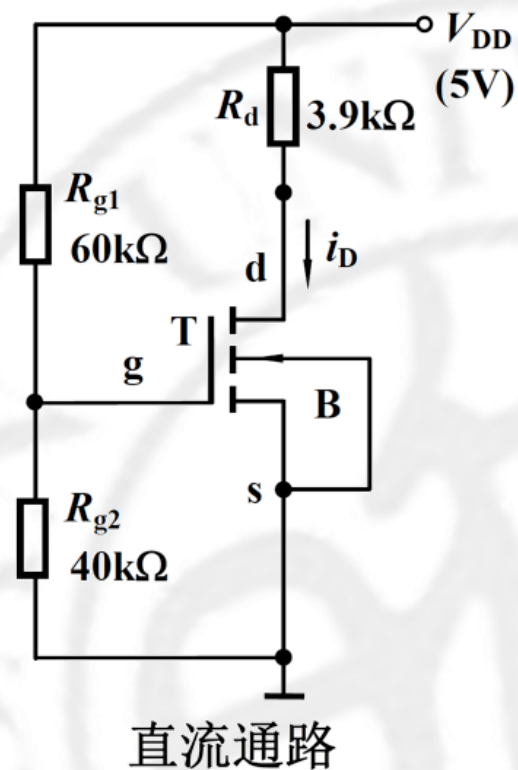
假设工作在饱和区

$$I_{DQ} = K_n (V_{GS} - V_{TN})^2 = (0.8)(2 - 1)^2 mA = 0.8mA$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_D R_d = [5 - (0.8)(3.9)]V = 1.88V$$

满足  $V_{DSQ} > (V_{GSQ} - V_{TN})$

假设成立，结果即为所求。

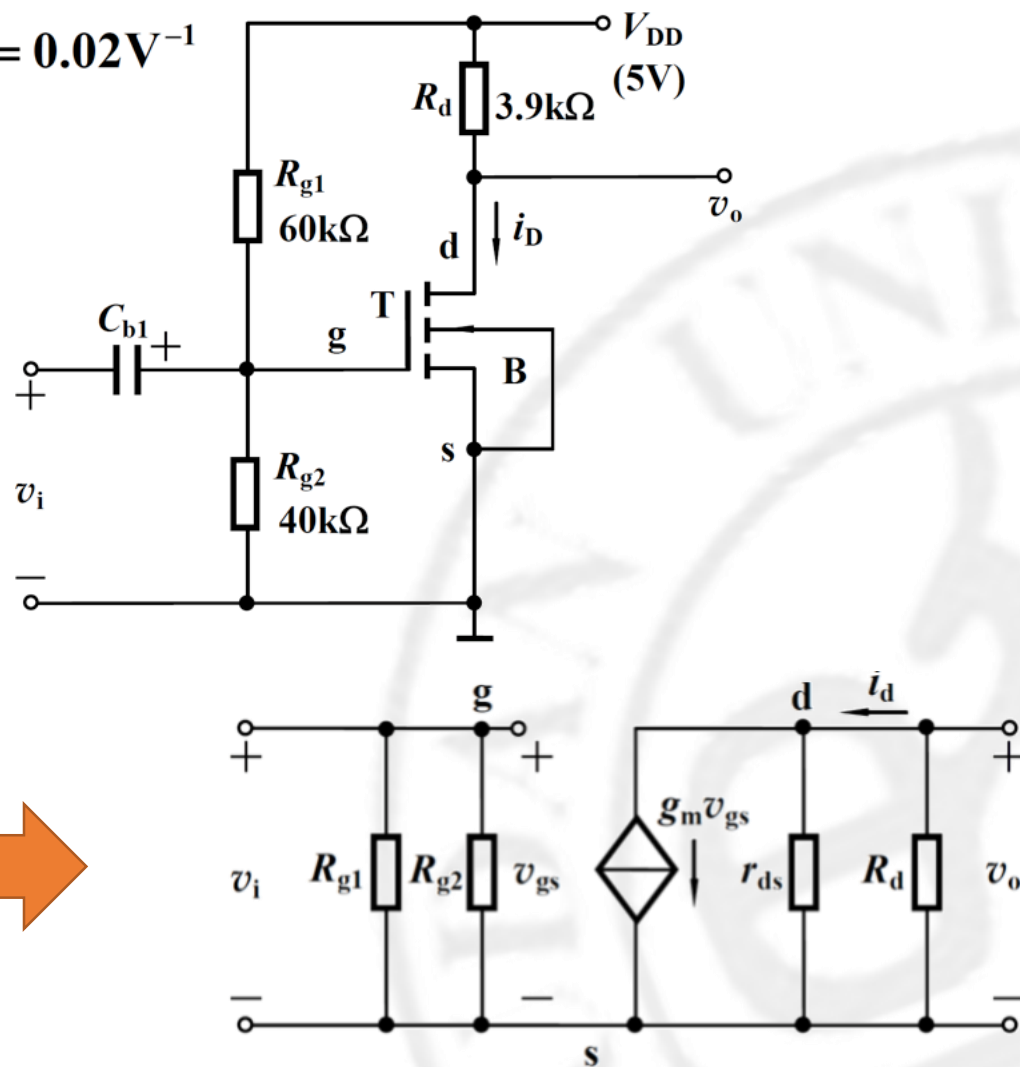
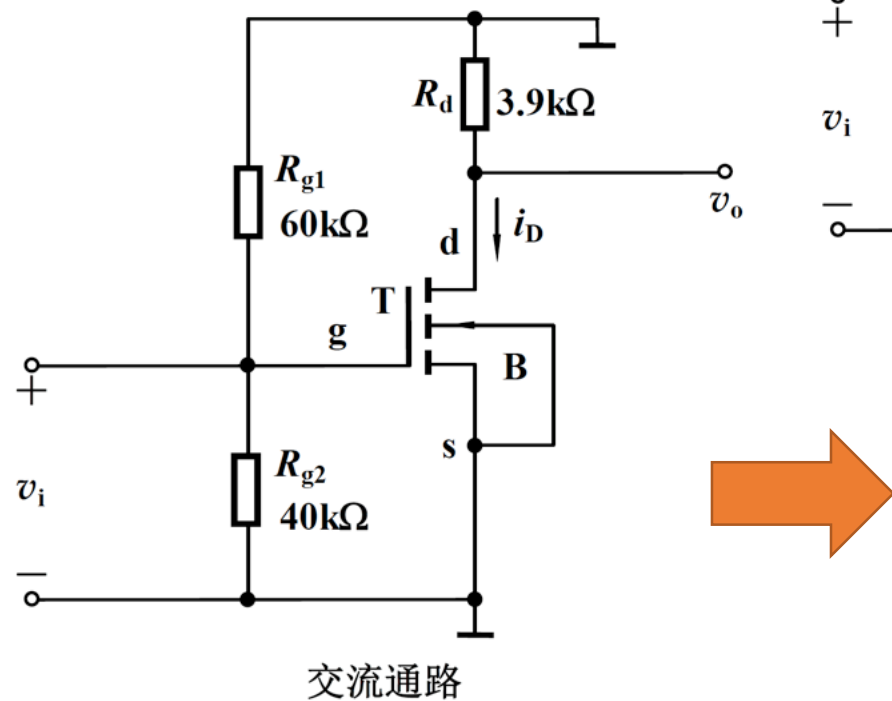


**例1**  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA/V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

解：（2）动态指标

小信号等效电路

电容和直流电压源对交流相当于短路





**例1**  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA/V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

解：（2）动态指标

模型参数  $V_{GSQ} = 2V$

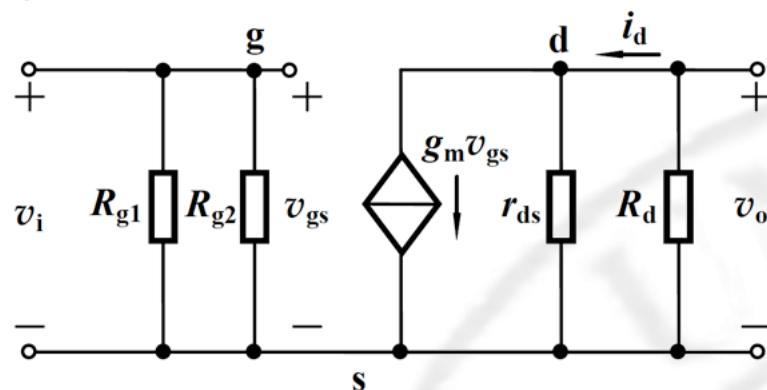
$$\begin{aligned} g_m &= 2K_n(V_{GSQ} - V_{TN}) \\ &= 2 \times 0.8 \times (2 - 1) mA/V \\ &= 1.6 mA/V \end{aligned}$$

$$r_{ds} = \frac{1}{\lambda K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2} = \frac{1}{0.02 \times 0.8 \times (2 - 1)^2} = 62.5 k\Omega$$

电压增益  $v_i = v_{gs}$   $v_o = -g_m v_{gs} (r_{ds} \parallel R_d)$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m v_{gs} (r_{ds} \parallel R_d)}{v_{gs}} = -g_m (r_{ds} \parallel R_d) \approx -g_m R_d = -6.24$$

$A_v = -g_m (r_{ds} \parallel R_d)$  经常当作公式使用





**例1**  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA/V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

解：（2）动态指标

输入电阻

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_{gs1} \parallel R_{gs2} = 24 \text{ k}\Omega$$

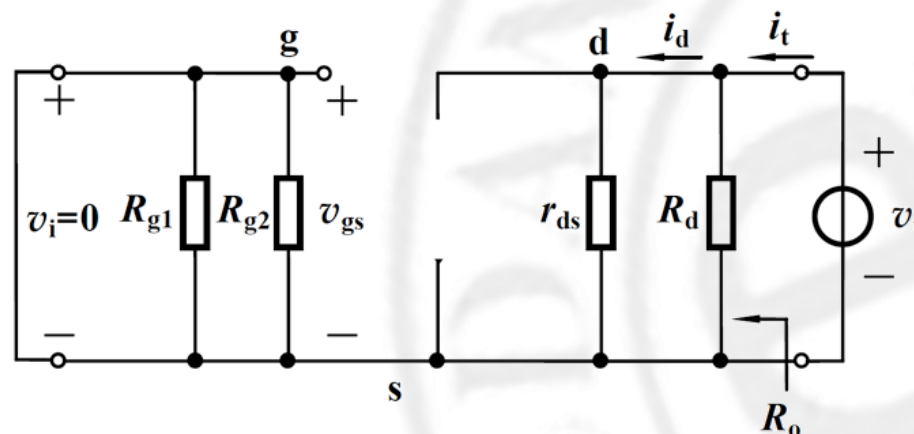
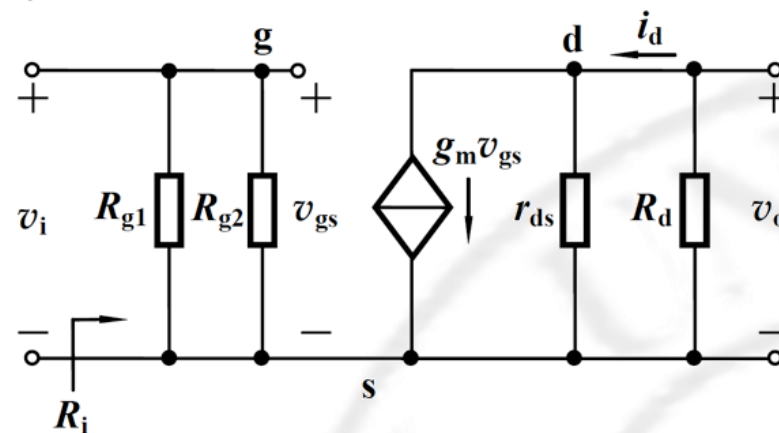
受静态偏置电路的影响，  
栅极绝缘的特性并未充分表现  
出来

输出电阻

$$v_{gs} = 0$$

$$R_o = \frac{v_t}{i_t} = r_{ds} \parallel R_d \approx R_d$$

$$= 3.9 \text{ k}\Omega$$



# 小信号的使用条件

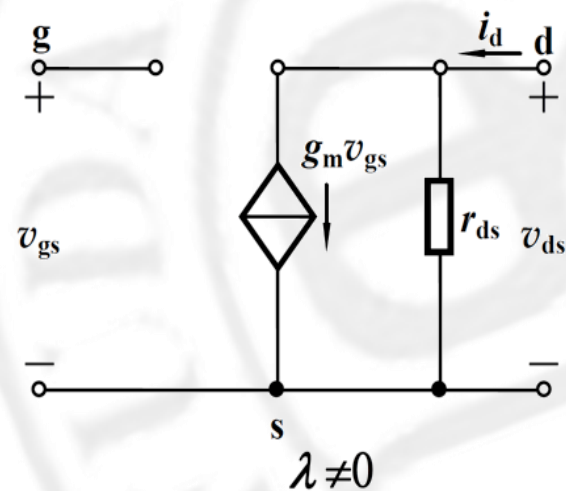
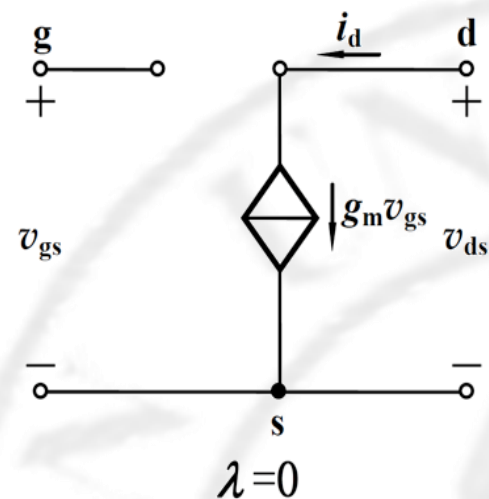
$$v_{gs} \ll 2(V_{GSQ} - V_{TN})$$

- 小信号

$$g_m = 2K_n(V_{GSQ} - V_{TN})$$

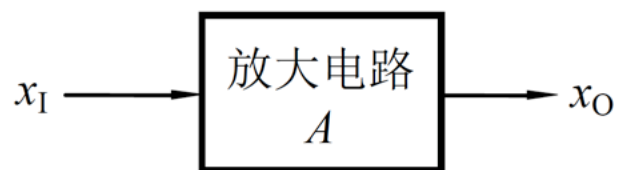
$$r_{ds} = \frac{1}{\lambda K_n(V_{GSQ} - V_{TN})^2}$$

- 参数都是小信号参数，即微变参数或交流参数。
- 与静态工作点有关。
- 只适合对交流信号（变化量）的分析。
- 未包含结电容的影响，不能用于分析高频情况。



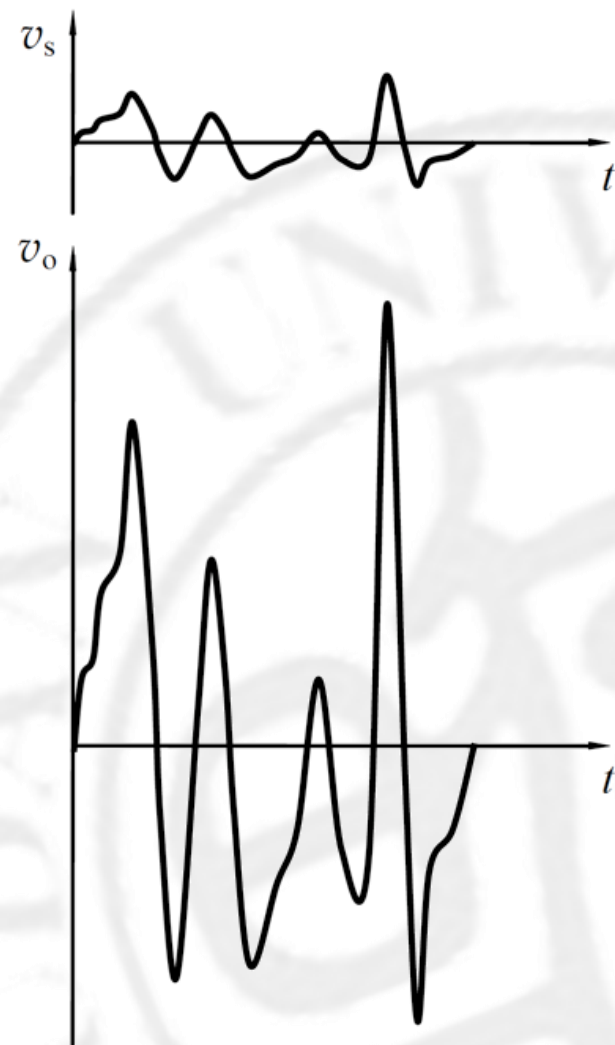
# 信号的线性放大

- 抽象层面的理解
- 线性放大的条件



当 $x_I = v_s$ ,  $x_O = v_o$ ,  $A > 1$ 时

线性放大的特点表现为任何一点的电压幅值被放大的程度完全相同，也反映了输入对输出的控制。



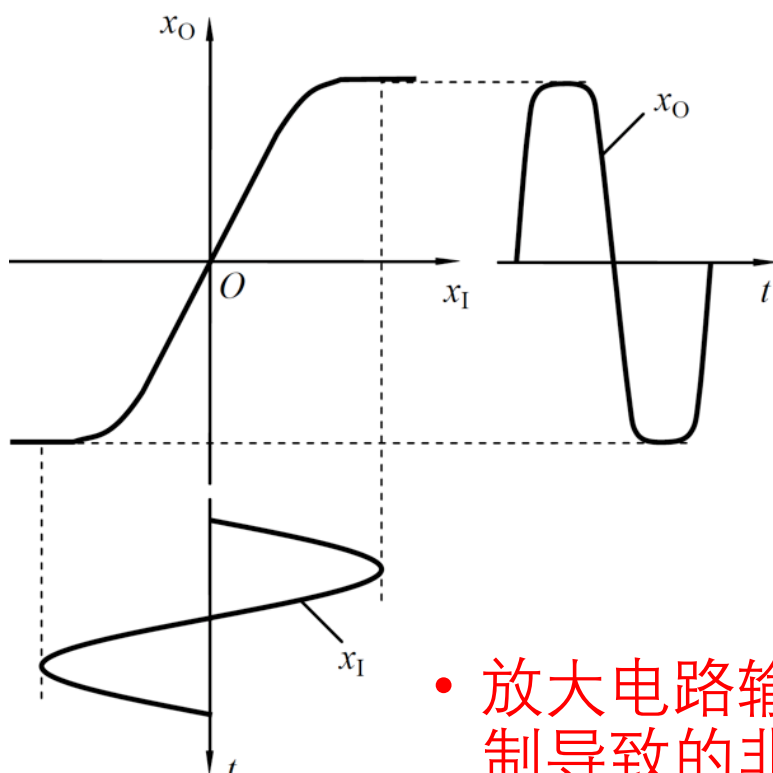
话筒电压信号的线性放大

放大电路需要能量供给

$|A| > 1$ ，且保持常数

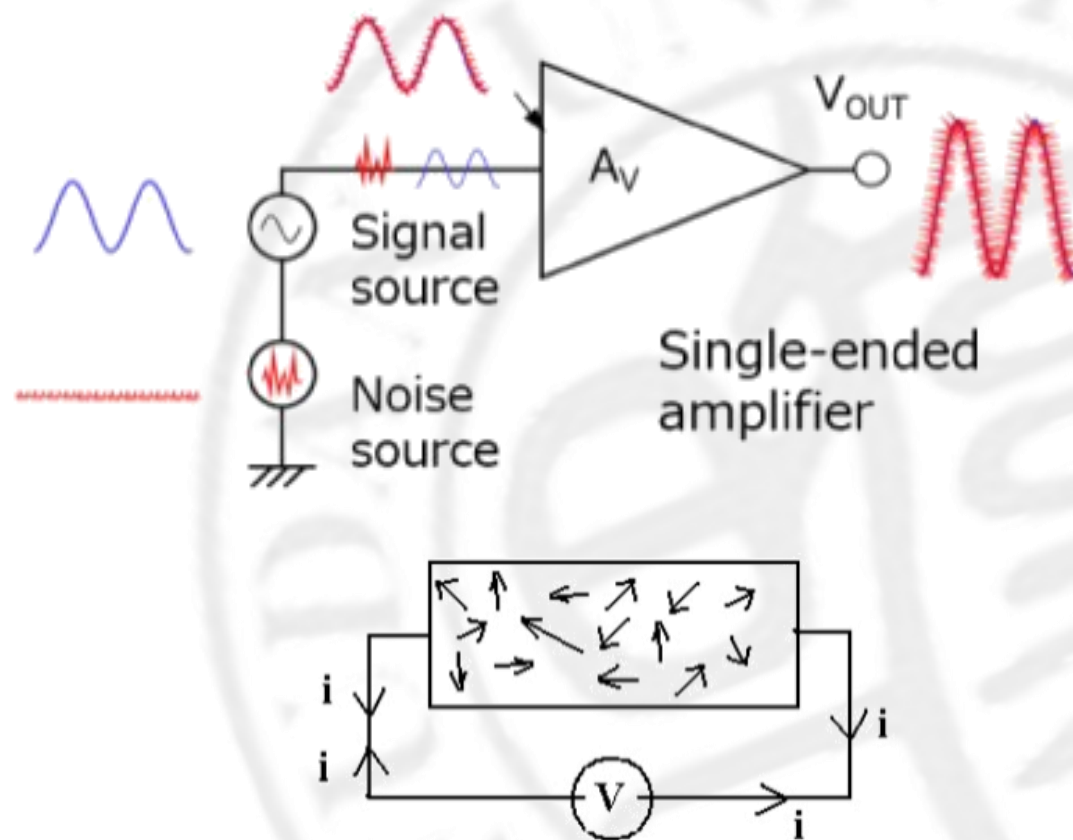
# 实际放大信号的非理想因素

- 放大器的非线性失真



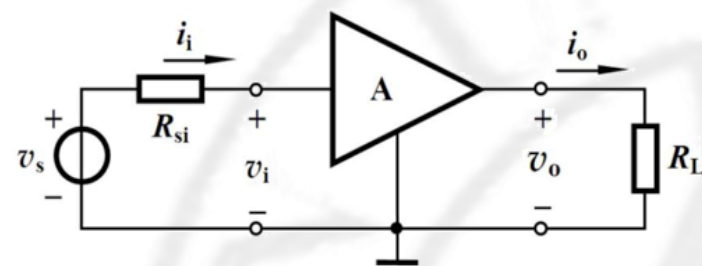
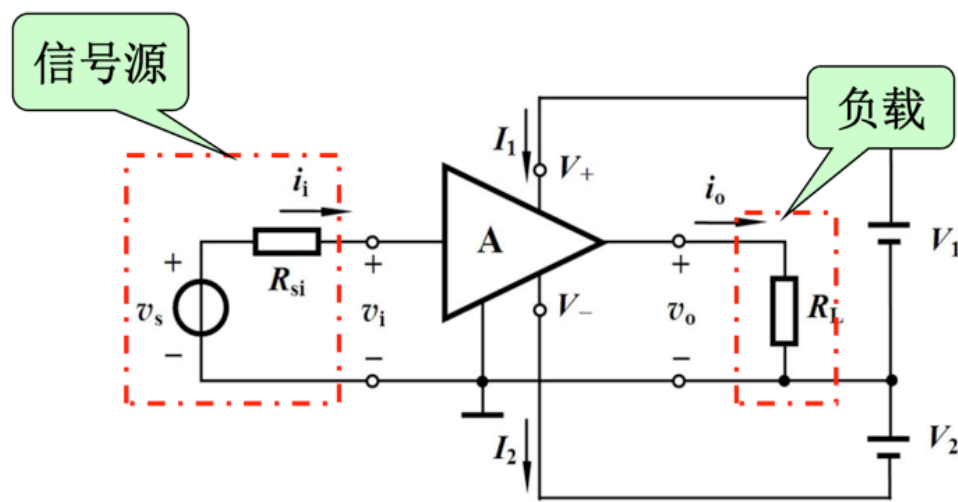
- 放大电路输出摆幅限制导致的非线性失真

- 放大器过程中的噪声耦合



# 放大电路模型

## 1. 信号放大时电路的一般构成



简化形式

需要供电电源；是双口网络。

➤ 接地符号“ $\perp$ ”的含义

电路中的电位参考基准点，定义为零电位。

也是输入、输出和电源的“共同端”。

# 放大电路的直流传递函数

## 2. 放大电路增益形式

电压增益（电压放大倍数）

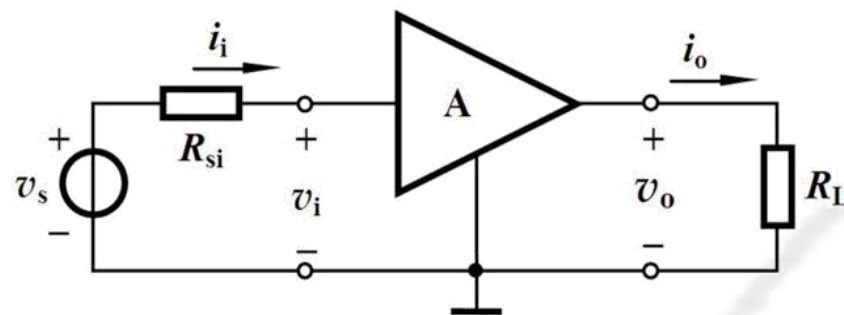
$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

电流增益  $A_i = \frac{i_o}{i_i}$

互阻增益  $A_r = \frac{v_o}{i_i} \text{ (}\Omega\text{)}$

互导增益  $A_g = \frac{i_o}{v_i} \text{ (S)}$

功率增益  $A_p = \frac{P_o}{P_i}$



增益分贝数表示

$$\text{电压增益} = 20\lg|A_v| \text{ dB}$$

$$\text{电流增益} = 20\lg|A_i| \text{ dB}$$

$$\text{功率增益} = 10\lg A_p \text{ dB}$$

“甲放大电路的增益为-20倍”和“乙放大电路的增益为-20dB”，问哪个电路的增益大？



# 放大电路输入、输出特性

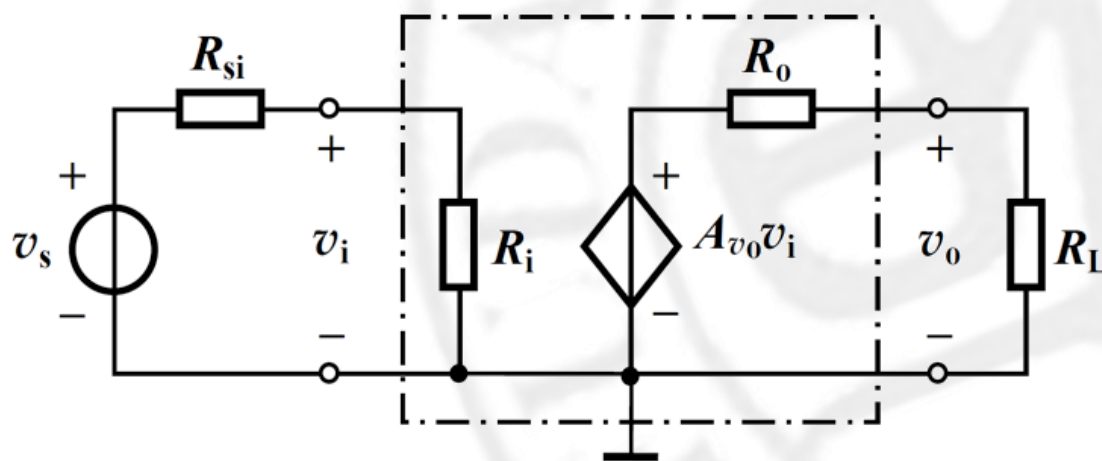
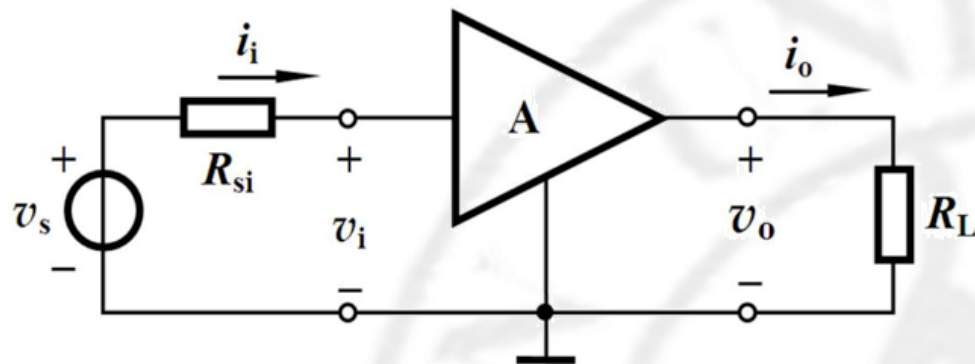
## 3. 放大电路模型

### 电压放大模型

$A_{v0}$  —— 负载开路时的  
电压增益

$R_i$  —— 放大电路的  
输入电阻

$R_o$  —— 放大电路的  
输出电阻



# 放大电路输入、输出特性

## 3. 放大电路模型

### 电压放大模型

由输出回路得

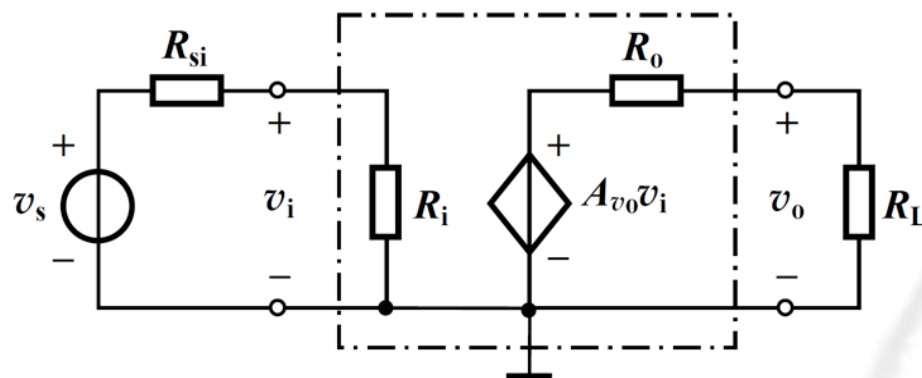
$$v_o = A_{vo} v_i \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

则电压增益为

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

由此可见

$$R_L \downarrow \longrightarrow A_v \downarrow$$



在输入回路

$$\text{有 } v_i = \frac{R_i}{R_{si} + R_i} v_s$$

即信号源内阻会导致输入信号衰减

要想减小衰减，则希望

$$R_i \gg R_s$$

理想情况  $R_i = \infty$

即负载的大小会影响增益的大小

要想减小负载的影响，则希望

$$R_o \ll R_L$$

理想情况  $R_o = 0$