

## 第3章习题

### 3.1 MOSFET 结构及工作原理

3.1 简述耗尽型和增强型 MOS 场效应管结构的区别；对于适当的电压偏置 ( $V_{DS} < 0V$ ,  $V_{GS} < V_t$ )，画出 P 沟道增强型 MOS 场效应管，简要说明沟道、电流方向和产生的耗尽区，并简述工作原理。

### 3.2 MOSFET 特性及建模分析

3.2 考虑一个 N 沟道增强型 MOSFET，其  $k'_n = 50\mu A/V^2$ ， $V_t = 1V$ ，以及  $W/L = 10$ 。求下列情况下的漏极电流：

- (1)  $V_{GS} = 5V$  且  $V_{DS} = 1V$ ；
- (2)  $V_{GS} = 2V$  且  $V_{DS} = 1.2V$ ；
- (3)  $V_{GS} = 0.5V$  且  $V_{DS} = 0.2V$ ；
- (4)  $V_{GS} = V_{DS} = 5V$ 。

**解：**(1) 根据条件  $v_{GS} \geq V_t$ ， $v_{DS} < (v_{GS} - V_t)$ ，该场效应管工作在变阻区。

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[ (v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right] = 1.75mA$$

- (2) 根据条件  $v_{GS} \geq V_t$ ， $v_{DS} > (v_{GS} - V_t)$ ，该场效应管工作在饱和区。

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 = 0.25mA$$

- (3) 根据条件  $v_{GS} < V_t$ ，该场效应管工作在截止区， $i_D = 0$

- (4) 根据条件  $v_{GS} \geq V_t$ ， $v_{DS} > (v_{GS} - V_t)$ ，该场效应管工作在饱和区

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 = 4mA$$

3.3 N 沟道增强型 MOSFET，已知  $V_t = 0.8V$ ， $k'_n = 80\mu A/V^2$ ， $W = 10\mu m$ ， $L = 1.2\mu m$ ，(1) 当  $V_{DS} = 0.1V$ ， $V_{GS}$  分别等于 0.1V, 2V, 3V 时，计算该 MOSFET 的漏极电流。(2) 当  $V_{DS} = 4V$  时，计算上述四种  $V_{GS}$  电压下的漏极电流。

**解：**(1)  $V_{DS} = 0.1V$

$V_{GS} = 0.1V < V_t$ ，截止区， $I_D = 0$

$V_{GS} = 2V > V_t$ ， $V_{DS} < V_{GS} - V_t$ ，饱和区

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 = 40 \times \frac{10}{1.2} (2 - 0.8)^2 = 48\mu A = 0.048mA$$

$$V_{GS} = 3V，饱和区，I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 = 0.161mA$$

- (2)  $V_{DS} = 4V$

$V_{GS} = 0.1V$ ，截止区， $I_D = 0$

$V_{GS} = 2V$ ， $V_{DS} > V_{GS} - V_t$ ，变阻区

$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \left[ (v_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] = 2.13mA$$

$V_{GS} = 3V$ ,  $V_{DS} > V_{GS} - V_t$ , 变阻区

$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \left[ (v_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] = 0.533mA$$

3.4 N 沟道增强型 MOSFET, 已知  $V_T = 1.2V$ ,  $k'_n = 80 \mu A/V^2$ ,  $L = 1.25 \mu m$ , 当晶体管偏置在饱和区和区时,  $V_{GS} = 5V$ ,  $I_D = 1.25mA$ , 求沟道宽度  $W$ 。

$$\text{解: } I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = 40 \times \frac{W}{1.25} (5 - 1.2)^2 \Rightarrow W = 2.7 \mu m$$

3.5 一个 NMOS 晶体管有  $V_t = 1V$ 。当工作在变阻区时,  $V_{GS} = 2V$ , 求得电阻  $r_{DS}$  为  $1k\Omega$ 。为了使  $r_{DS} = 500\Omega$ , 则  $V_{GS}$  为多少? 当晶体管的  $W$  为原  $W$  的二分之一时, 求其相应的电阻值。

解: 由题目可知, 该晶体管工作在变阻区, 则有  $i_D \approx k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t) v_{DS}$

$$r_{DS} = \frac{v_{DS}}{i_D} \approx \frac{1}{k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)}$$

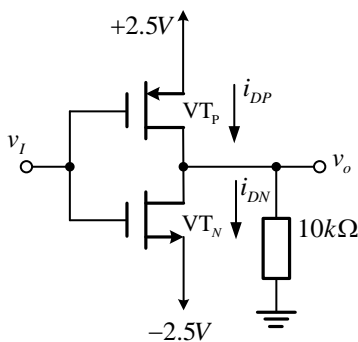
当  $r_{DS} = 1k\Omega$  时, 代入上式可得  $k'_n \frac{W}{L} = 1mA/V^2$

$$\text{则 } r_{DS} = 1k\Omega \text{ 时, } 0.5k\Omega = \frac{1}{1 \frac{mA}{V^2} (v_{GS} - V_t)} \Rightarrow (v_{GS} - V_t) = 2V \Rightarrow v_{GS} = 3V$$

当晶体管的  $W$  为原  $W$  的二分之一时, 当  $V_{GS} = 2V$  时,  $r_{DS} = 2k\Omega$

当晶体管的  $W$  为原  $W$  的二分之一时, 当  $V_{GS} = 3V$  时,  $r_{DS} = 1k\Omega$

3.6 如图题 3.1 所示的 NMOS 和 PMOS 晶体管有  $V_{tn} = -V_{tp} = 1V$ ,  $k'_n(W_n/L_n) = k'_p(W_p/L_p) = 1mA/V^2$ 。假设两个器件的  $\lambda = 0$ , 求当  $V_I = 0V$ ,  $+2.5V$  及  $-2.5V$  时的漏极电流  $i_{DN}$  和  $i_{DP}$  以及电压  $V_o$ 。



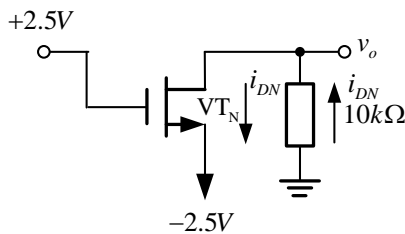
图题 3.1

解:

(1) 当  $V_I = 0$  时, 由于电路对称  $V_o = 0V$ , 由于  $|V_{GD}| = 0$ ,  $VT_p$  和  $VT_n$  工作在饱和区。

$$i_{DP} = i_{DN} = \frac{1}{2} \times 1mA \times (2.5 - 1)^2 = 1.125mA$$

(2) 当  $V_I = 2.5V$  时,  $VT_p$  截止,  $i_{DP} = 0$ , 电路如图 a 所示

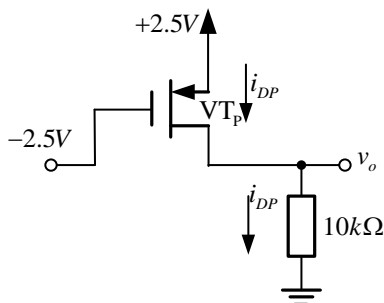


(a)

$$\therefore I_{DN} = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) V_{DS} = 1m \times [2.5 - (-2.5) - 1][V_o - (-2.5)]$$

由a图可知:  $I_{DN}(mA) = \frac{0 - V_o}{10k}$ , 联立方程组可得:  $I_{DN} = 0.244mA, V_o = -2.44V$ 。

(3) 当  $V_t = -2.5V$  时,  $VT_N$  截止,  $i_{DN} = 0$ , 电路如图 b 所示。



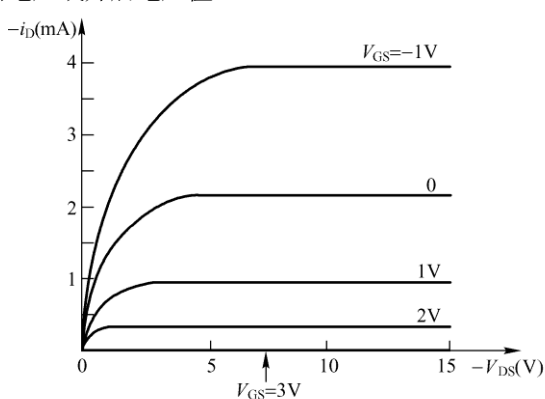
(b)

由于  $V_o > 0$ , 故  $V_{GD} < V_t$ ,  $VT_P$  工作在变阻区

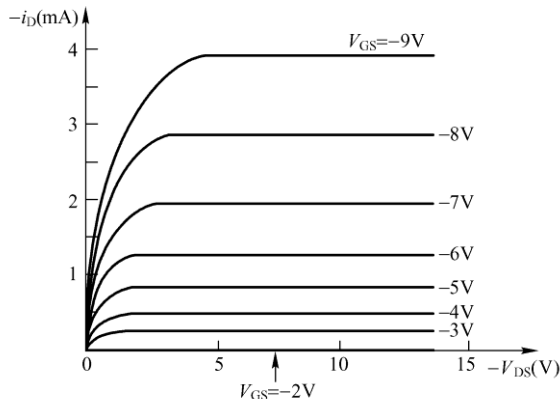
$$\therefore I_{DN} = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) V_{DS} = 1m \times [-2.5 - 2.5 - (-1)](V_o - 2.5)$$

由b图可知:  $I_{DP}(mA) = \frac{V_o - 0}{10k}$ , 联立方程组可得:  $I_{DP} = 0.244mA, V_o = 2.44V$

3.7 由实验测得两种场效应管具有如图题 3.2 所示的输出特性曲线, 试判断它们的类型, 并确定夹断电压或开启电压值。



(a)



(b)

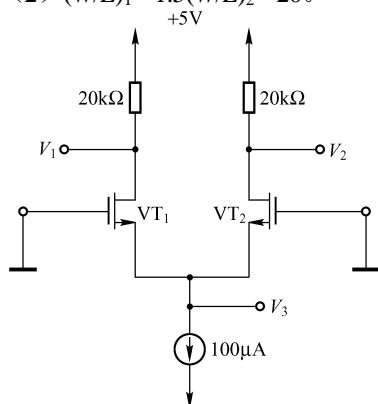
图题 3.2

**解:** 从开启电压或者夹断电压的正负判断, “+”为N沟道, “-”为P沟道; 当  $V_{GS}=0$  时是否有导电沟道存在知增强型或耗尽型, 存在则是耗尽型, 不存在则是增强型。(1) 图 a 为 P 沟道耗尽型; (2) 图 b 为 P 沟道增强型

3.8 在图题 3.3 所示电路中, 晶体管  $VT_1$  和  $VT_2$  有  $V_t=1V$ , 工艺互导参数  $k'_n=100\mu A/V^2$ 。假定  $\lambda=0$ , 求下列情况下  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$  的值:

(1)  $(W/L)_1=(W/L)_2=20$ ;

(2)  $(W/L)_1=1.5(W/L)_2=20$ 。



图题 3.3

**解:** (1) 因为  $(W/L)_1=(W/L)_2=20$ ; 电路左右完全对称, 则  $I_{D1}=I_{D2}=50\mu A$

则有  $V_1=V_2=5V-I_{D1}\times 20k\Omega=4V$

$\therefore V_{GD}=-4V < V_t$ , 可得该电路两管工作在饱和区。则有:

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS} = 1.2V$$

$$\therefore V_3 = V_s = 1.2V$$

(2) 因为  $(W/L)_1=1.5(W/L)_2=20$ ,  $\therefore \frac{I_{D1}}{I_{D2}}=1.5$ , 同时  $I_{D1}+I_{D2}=100\mu A$

可求得:  $I_{D1}=60\mu A, I_{D2}=40\mu A$

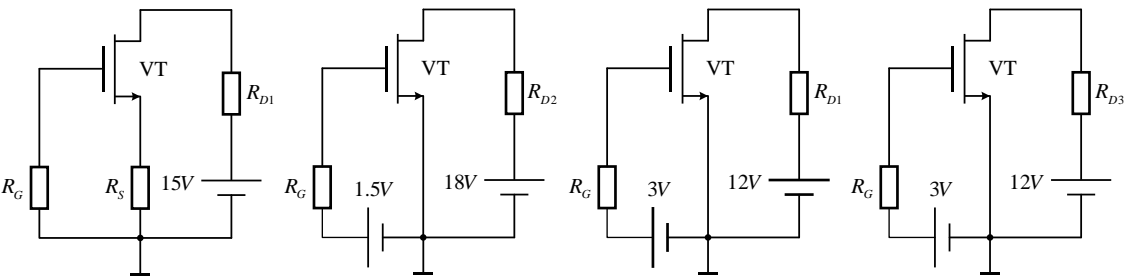
则有  $V_1=5V-I_{D1}\times 20k\Omega=3.8V$ ,  $V_2=5V-I_{D2}\times 20k\Omega=4.2V$

$\therefore V_{GD}=-3.8V < V_t$ ,  $\therefore V_{GD2}=-4.2V < V_t$  可得该电路两管工作在饱和区。则有:

$$I_{D1} = \frac{1}{2} k'_n \left( \frac{W}{L} \right)_1 (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS} = 1.245V$$

$$\therefore V_3 = V_s = 1.245V$$

3.9 如图题 3.4 所示, 已知某种场效应管的参数为  $V_T=2V$ ,  $V_{(BR)GS}=30V$ ,  $V_{(BR)DS}=15V$ , 当  $V_{GS}=4V$ 、 $V_{DS}=5V$  时, 管子的  $I_{DQ}=9mA$ 。现用这种管子接成如图题 3.4 所示的四种电路, 电路中的  $R_G=100k\Omega$ ,  $R_{D1}=5.1k\Omega$ ,  $R_{D2}=3.3k\Omega$ ,  $R_{D3}=2.2k\Omega$ ,  $R_S=1k\Omega$ 。试问各种电路中的管子各工作于放大、截至、可变电阻、击穿四种状态中的哪一种?



图题 3.4

解：先求场效应管的 K 值。

$$i_D = K[V_{GS} - V_{GS(th)}]^2$$

得  $K = 2.25 \text{ mA/V}^2$ 。

图 (a)  $V_{GSQ} = 0 < V_{GS(th)}$ ，管子不导通， $V_{DSQ} = 15\text{V} = V_{(BR)DS}$ ，管子击穿。

图 (b)  $V_{GSQ} = 1.5\text{V} < V_{GS(th)}$ ，管子截止， $V_{DSQ} = 18\text{V} > V_{(BR)DS}$ ，管子击穿。

图 (c)  $V_{GSQ} = 3\text{V} > V_{GS(th)}$ ，设管子工作于放大区，则

$$\begin{aligned} I_{DQ} &= K[V_{GSQ} - V_{GS(th)}]^2 = 2.25\text{mA} \\ V_{DSQ} &= V_{DD} - I_{DQ}R_{D1} \approx 0.5\text{V} \\ V_{GDQ} &= V_{GSQ} - V_{DSQ} = 2.5\text{V} \end{aligned}$$

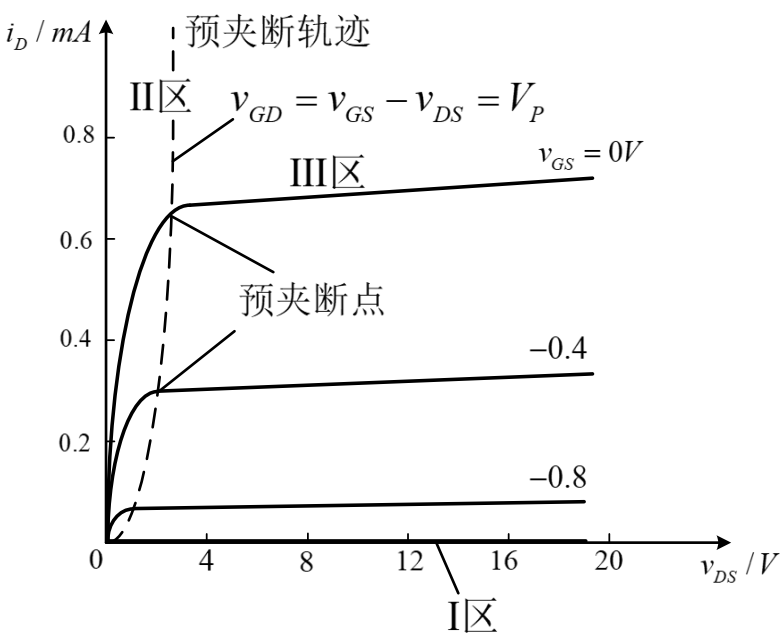
由于  $V_{GDQ} > V_{GS(th)}$ ，漏极附近得沟道尚未出现预夹断，故管子工作于可变电阻区。

图 (d)  $V_{GSQ} = 3\text{V} > V_{GS(th)}$ ，设管子工作于放大区，则

$$\begin{aligned} I_{DQ} &= K[V_{GSQ} - V_{GS(th)}]^2 = 2.25\text{mA} \\ V_{DSQ} &= V_{DD} - I_{DQ}R_{D1} \approx 7\text{V} \\ V_{GDQ} &= V_{GSQ} - V_{DSQ} = -4\text{V} \end{aligned}$$

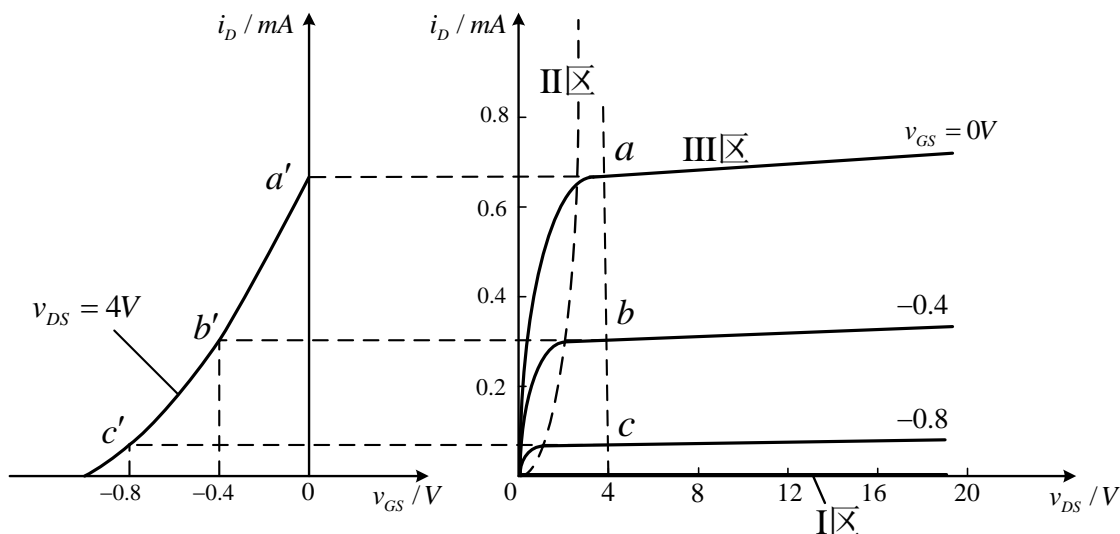
由于  $V_{GDQ} < V_{GS(th)}$ ，漏极附近得沟道出现预夹断，故管子工作于放大区。

3.10 从图题 3.5 所示的输出特性中，作出  $v_{DS} = 4\text{V}$  时的转移特性。

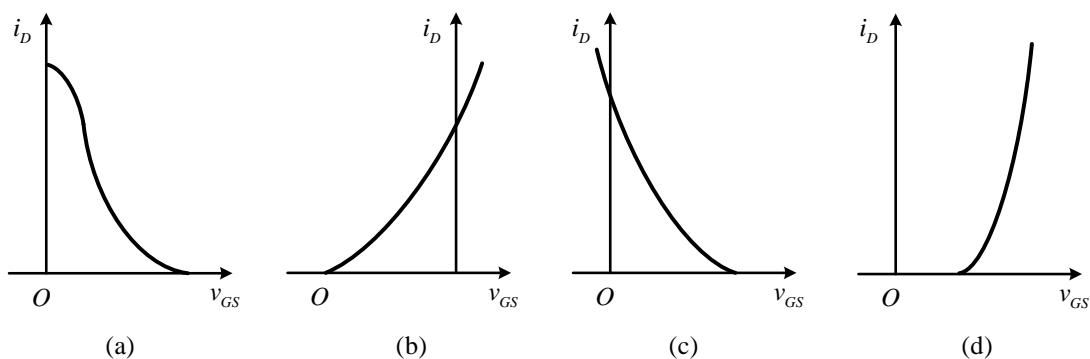


图题 3.5

**解：**在输出特性中作 $v_{DS} = 4V$ 的一条垂线，此垂线与各条输出特性曲线的交点分别为 a、b、c，将 a、b、c 各点所对应 $i_D$ 及 $v_{GS}$ 值画在直角坐标系中，得转移特性 $i_D = f(v_{GS})|_{v_{DS}=4V}$ ，如图所示。



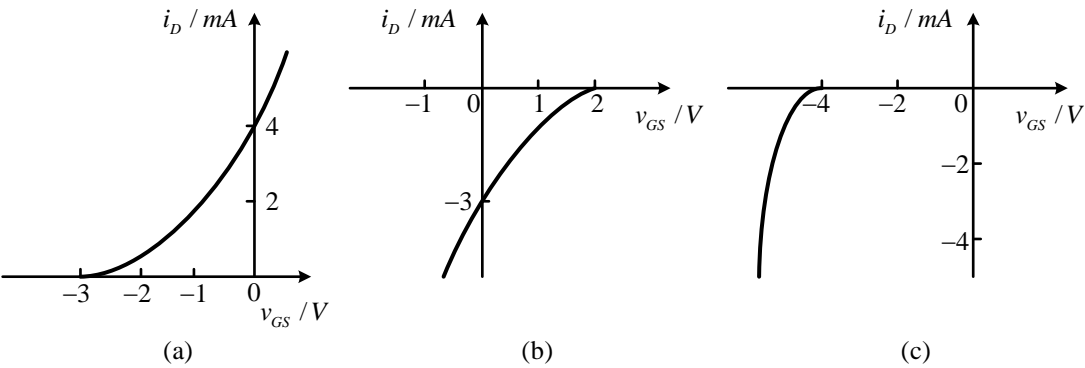
3.11 四个 FET 的转移特性分别如图题 3.6a、b、c、d 所示，其中漏极电流 $i_D$ 的假定正向是它的实际方向。试问它们各是哪种类型的 FET？



图题 3.6

**解：**由图可见：图 a 为 P 沟道 JFET；图 b 为 N 沟道耗尽型 MOSFET；图 c 为 P 沟道耗尽型 MOSFET；图 d 为 N 沟道增强型 MODFET。

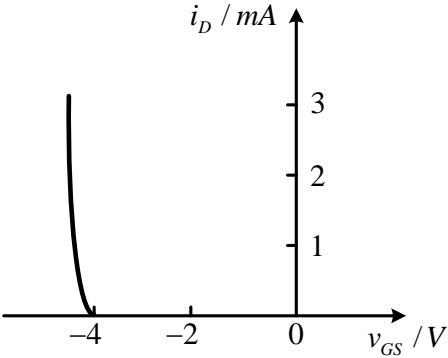
3.12 图题 3.7 所示为 MOSFET 的转移特性，请分别说明各属于何种沟道。如是增强型，说明它的开启电压 $V_T = ?$ 如是耗尽型，说明它的夹断电压 $V_P = ?$ （图中 $i_D$ 的假定正向为流进漏极）



图题 3.7

**解：**图 a 为 N 沟道耗尽型 MOSFET，其中  $V_P = -3\text{V}$ ；图 b 为 P 沟道耗尽型 MOSFET，其中  $V_P = 2\text{V}$ ；图 c 为 P 沟道增强型 MOSFET，其中  $V_T = -4\text{V}$ 。

3.13 一个 MOSFET 转移特性如图题 3.8 所示（其中漏极电流  $i_D$  的假定正向是它的实际方向）。试问：（1）该管是耗尽型还是增强型？（2）是 N 沟道还是 P 沟道 FET？（3）从这个转移特性上可求出该 FET 具有夹断电压  $V_P$  还是开启电压  $V_T$ ？其值等于多少？

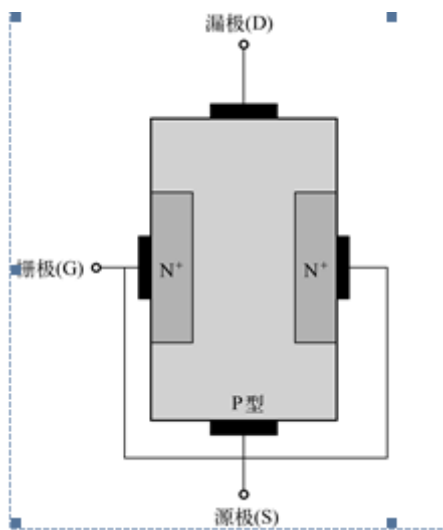


图题 3.8

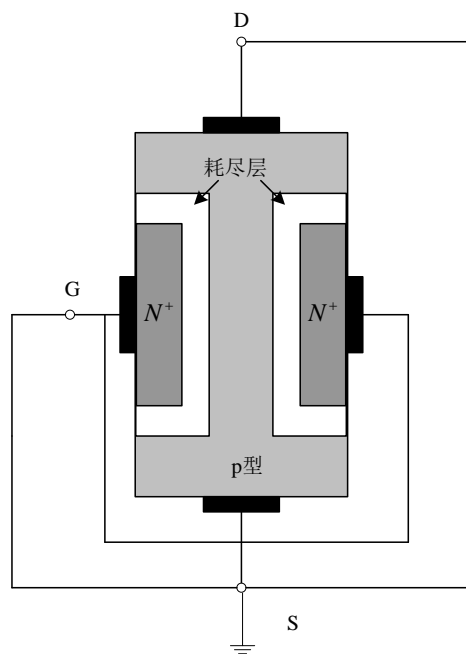
**解：**它是 P 沟道增强型 MOSFET，其  $V_T = -4\text{V}$ 。

- 3.14 （1）画出 P 沟道结型场效应管的基本结构。  
（2）漏极和源极之间加上适当的偏置，画出  $V_{GS}=0\text{V}$  时的耗尽区，并简述工作原理。

**解：**（1）

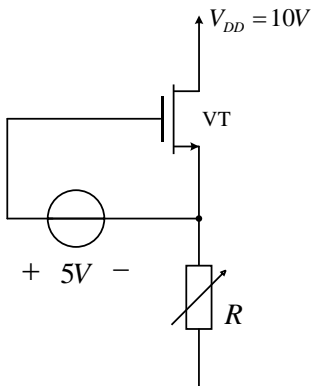


(2)



3.15 电路如图题 3.9 所示, 已知管子的开启电压为  $V_t = 2V$ , 器件工作在饱和模式时  $I_D = 1mA$ , 为维持器件工作在饱和模式, 试求电阻  $R$  的变化范围。





图题 3.9

**解：**为保持器件工作在饱和模式， $V_{GD} = V_G - V_D = 5 + I_D R - 10 \leq V_t$ ，故  $R \leq 1k\Omega$ 。

### 3.3 MOSFET 放大器直流偏置电路

3.16 设 N 沟道增强型 MOSFET 得参数为  $V_T = 1V$ ， $W = 100\mu m$ ， $L = 5\mu m$ ， $\mu_n = 650 cm^2/V \cdot s$ ， $C_{ox} = 76.7 \times 10^{-9} F/cm^2$ 。当  $V_{GS} = 2V_T$ ，MOSFET 工作在饱和区，试计算此时场效应管得工作电流  $I_D$ 。

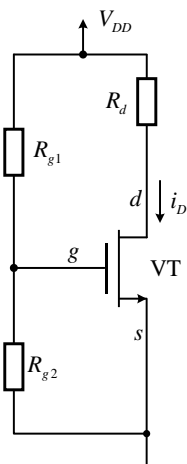
**解：**

$$K_n = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} \approx 0.499 \times 10^{-3} A/V^2 = 0.499 mA/V^2$$

当  $V_{GS} = 2V_T$  时，

$$I_D = K_n(V_{GS} - V_T)^2 = 0.499 mA$$

3.17 电路如图题 3.10 所示，设  $R_{g1} = 90k\Omega$ ， $R_{g2} = 60k\Omega$ ， $R_d = 30k\Omega$ ， $V_{DD} = 5V$ ， $V_T = 1V$ ， $k'_n \frac{W}{2L} = 0.1 mA/V^2$ 。试计算电路的栅源电压  $V_{GS}$  和漏源电压  $V_{DS}$ 。



图题 3.10

**解：**

$$V_{GS} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} V_{DD} = 2V$$

设场效应管工作在饱和区，则漏极电流为

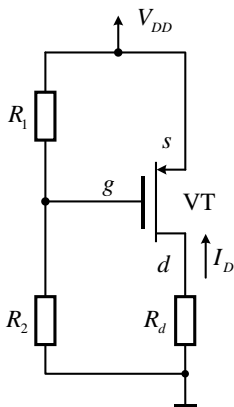
$$I_D = K_n (V_{GS} - V_T)^2 = 0.1mA$$

漏极电压为

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_d = 2V$$

因为  $V_{DS} = 2V > (V_{GS} - V_T) = 1V$ ，场效应管确实工作在饱和区，所以上面的分析是正确的。

3.18 电路如图题 3.11 所示，设  $R_1 = R_2 = 100k\Omega$ ， $V_{DD} = 5V$ ， $R_d = 7.5k\Omega$ ， $V_T = -1V$ ， $k'_p \frac{W}{2L} = 0.2mA/V^2$ 。试计算 P 沟道增强型 MOSFET 共源极电路的漏极电流  $I_D$  和漏源电压  $V_{DS}$ 。



图题 3.11

解：

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = 2.5V$$

栅源电压为

$$V_{GS} = V_G - V_{DD} = -2.5V$$

设场效应管工作于饱和区，漏极电流为

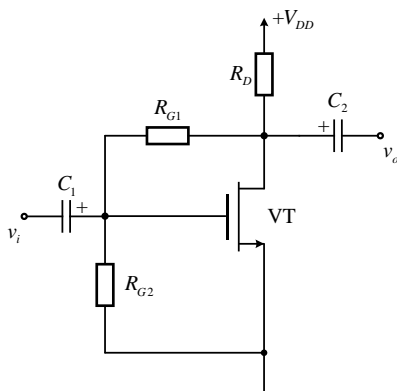
$$I_D = -K_P (V_{GS} - V_T)^2 = -0.45mA$$

漏极电压为

$$V_{DS} = -V_{DD} - I_D R_d = -1.625V$$

因为  $V_{DS} = -1.625V < (V_{GS} - V_T) = -1.5V$ ，场效应管确实工作在饱和区，所以上面的分析是正确的。

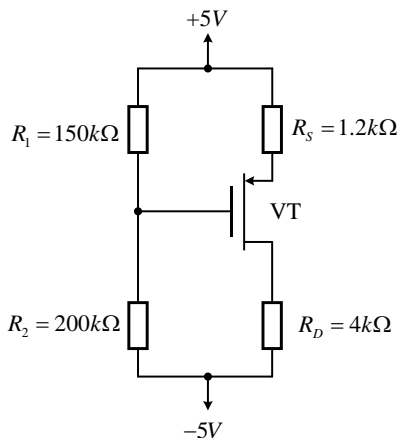
3.19 电路如图题 3.12 所示。已知  $V_{DD} = 30V$ ， $R_{G1} = R_{G2} = 1M\Omega$ ， $R_D = 10k\Omega$ ，管子的  $V_T = 3V$ ，且当  $V_{GS} = 5V$  时， $I_D = 0.8mA$ 。试求管子的  $V_{GS}$ 、 $I_D$ 、 $V_{DS}$ 。



图题 3.12

解:  $I_D = 1.8\text{mA}$ ,  $V_{DS} = 12\text{V}$ ,  $V_{GS} = 6\text{V}$

3.20 如图题 3.13 所示, 晶体管参数为  $V_T = -1\text{V}$ ,  $k'_p \frac{W}{2L} = 0.25\text{mA/V}^2$ , 计算  $V_{SG}$ ,  $I_D$ ,  $V_{SD}$ 。



图题 3.13

解: 假设场效应管工作在饱和区

$$\begin{cases} I_D = \frac{1}{2} k'_p \frac{W}{L} (V_{SG} + V_t)^2 \\ V_{SG} = 5 - I_D R_S - V_G \\ V_G = (5+5) \times \frac{200}{150+200} - 5 = 0.7\text{V} \end{cases}$$

$$\therefore V_{SG} = 4.3 - I_D R_S \Rightarrow I_D = \frac{4.3 - V_{SG}}{1.2\text{k}\Omega}$$

$$\text{联立得: } 4.3 - V_{SG} = 0.3(V_{SG} + V_t)^2 \Rightarrow 0.3V_{SG}^2 + 0.4V_{SG} - 4 = 0$$

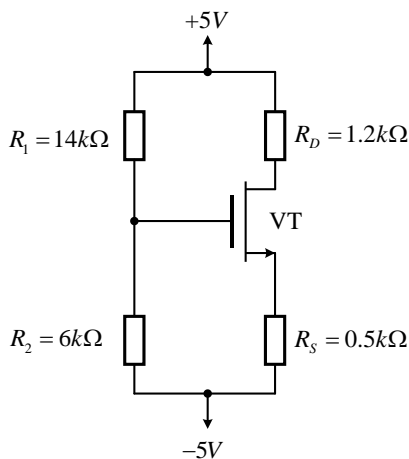
$$\text{解得 } V_{SG} = 3.1\text{V}, V_{SG} = -4.38\text{V} \text{ (舍去)}$$

$$\therefore I_D = 1\text{mA}$$

$$V_D = -5 + I_D R_D = -1\text{V}$$

$$V_S = 5 - I_D R_S = 3.8\text{V}, V_{SD} = V_S - V_D = 4.8\text{V}$$

3.21 如图题 3.14 所示, 晶体管参数为  $V_T = 1\text{V}$ ,  $k'_n = 75\mu\text{A/V}^2$ ,  $W/L = 25$ , 计算  $V_{GS}$ ,  $I_D$ ,  $V_{DS}$ 。



图题 3.14

解:  $V_G = (5+5) \frac{6}{14+6} - 5 = -2V$

$$\begin{cases} V_{GS} = V_G - V_S = -2V - (I_D R_S - 5V) = 3V - 0.5I_D \\ I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \end{cases}$$

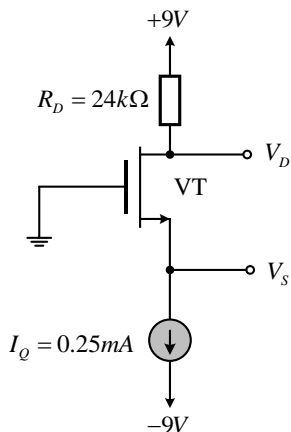
$$\frac{3 - V_{GS}}{0.5} = \frac{1}{2} \times 0.075 \times 25 \times (V_{GS} - 1)^2$$

$$\Rightarrow V_{GS1} = 2.65V, V_{GS2} = -2.8V \quad (\text{舍去})$$

$$I_D = \frac{3 - 2.65}{0.5} = 0.7mA$$

$$V_D = 5 - I_D R_D = 4.16V, \quad V_S = -5 + I_D R_S = -4.65V, \quad V_{DS} = 8.81V$$

3.22 图题 3.15 所示电路, 晶体管参数为  $V_T = 0.6V, k'_n \frac{W}{2L} = 200\mu A/V^2$ , 求  $V_S, V_D$ 。



图题 3.15

解:  $V_D = 9V - I_D R_D = 3V$

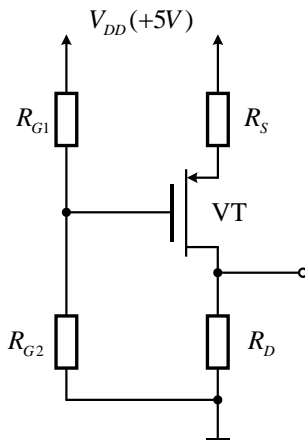
$$I_D = I_Q = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow 0.25 = 0.2 \times (V_{GS} - 0.6)^2$$

$$\Rightarrow V_{GS} = 1.718V$$

$$V_G = 0, \quad V_S = V_G - V_{GS} = -1.718V$$

3.23 (设计题) 设计如图题 3.16 所示 P 沟道 EMOSFET 电路中的  $R_S, R_D$ 。要求器件工作在饱和

区, 且  $I_D = 0.5\text{mA}$ ,  $V_{DS} = -1.5\text{V}$ ,  $V_G = 2\text{V}$ 。已知  $\mu_p C_{ox} W/(2L) = 0.5\text{mA/V}^2$ ,  $V_t = -1\text{V}$ , 设  $\lambda = 0$ 。



图题 3.16

解:

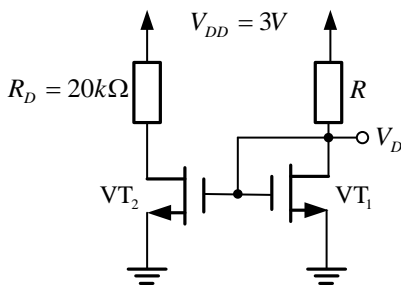
$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS} = -2\text{V}$$

$$V_S = V_G - V_{GS} = 4\text{V}$$

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{V_{DS} + V_S}{I_D} = 5\text{k}\Omega$$

$$R_S = \frac{V_{DD} - V_S}{I_D} = 2\text{k}\Omega$$

3.24 (设计题) 如图题 3.17 所示电路  $VT_1$  的电流  $I_{D1} = 80\mu\text{A}$ 。(1) 求所需要  $R$  值和直流电压  $V_D$ 。假设 NMOS 晶体管的  $V_t = 0.6\text{V}$ ,  $\mu_n C_{ox} = 200\mu\text{A/V}^2$ ,  $L = 0.8\mu\text{m}$ ,  $W = 4\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 0$ 。(2) 假设  $V_D$  加在  $VT_2$  的栅极, 且  $VT_1$  和  $VT_2$  相同, 求  $VT_2$  的漏极电流和电压。



图题 3.17

解:

(1)  $\because V_{GD1} = 0 < V_t = 0.6\text{V} \therefore$  晶体管  $VT_1$  工作在饱和区

$$\because I_{D1} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_t)^2 \therefore 80\mu = \frac{1}{2} \times 200\mu \times \frac{4\mu}{0.8\mu} \times (V_{GS} - 0.6)^2$$

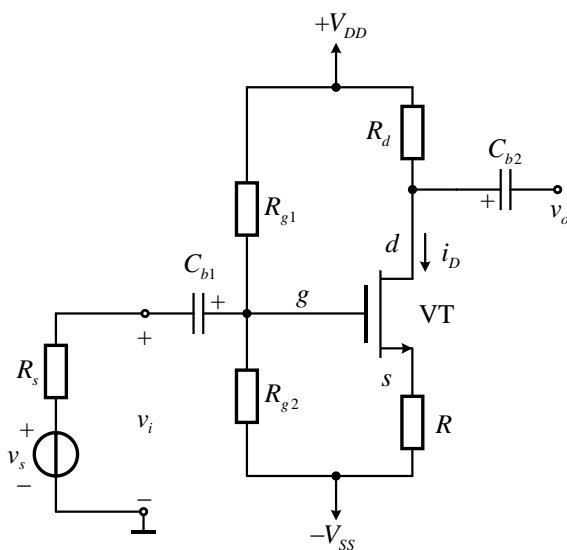
$$\therefore V_{GS1} = 1\text{V} \text{ 或 } V_{GS1} = 0.2\text{V} (\text{舍去}), V_D = V_{DS1} = V_{GS1} = 1\text{V}$$

$$R = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{3 - 1}{80\mu} = 25\text{k}\Omega$$

$$(2) \quad I_{D2} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS2} - V_t)^2, \quad \because V_{GS1} = V_{GS2} \therefore I_{D2} = I_{D1} = 80 \mu A$$

$$\therefore I_{D2} = \frac{V_{DD} - V_{D2}}{R_2} \therefore V_{D2} = 1.4V$$

3.25 (设计题) 电路如图题 3.18 所示, 设 MOS 管得参数为  $V_T = 1V$ ,  $k'_n \frac{W}{2L} = 500 \mu A/V^2$ 。电路参数为  $V_{DD} = 5V$ ,  $-V_{SS} = -5V$ ,  $R_d = 10k\Omega$ ,  $R = 0.5k\Omega$ ,  $I_D = 0.5mA$ 。若流过  $R_{g1}$ 、 $R_{g2}$  的电流是  $I_D$  的  $1/10$ , 试确定  $R_{g1}$ 、 $R_{g2}$  的值。



图题 3.18

**解:**

设 MOS 管工作于饱和区, 则

$$I_D = K_n (V_{GS} - V_T)^2$$

即

$$V_{GS} = 2V$$

流过  $R_{g1}$ 、 $R_{g2}$  的电流约为  $0.05mA$ , 即有

$$R_{g1} + R_{g2} = \frac{10}{0.05} = 200\Omega$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = \left( \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \times 2V_{DD} - V_{SS} \right) - (I_D R - V_{SS})$$

于是可得

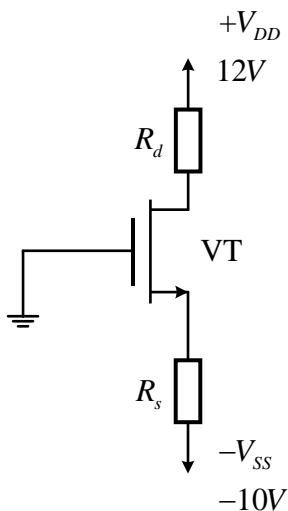
$$R_{g2} = 45k\Omega, \quad R_{g1} = 155k\Omega$$

取标准电阻值为  $R_{g1} = 150k\Omega$ ,  $R_{g2} = 47k\Omega$ 。

考虑到  $V_{DS} = (V_{DD} + V_{SS}) - I_D(R_d + R) = 4.75V$ , 有  $V_{DS} > (V_{GS} - V_T) = 1V$ , 说明 MOS 管的确工作于饱和区, 假设一致。

3.26 (设计题) 电路如图题 3.19 所示, 已知  $V_{DD} = 12V$ ,  $V_{SS} = 10V$ , 在  $V_{GS} = 5V$  时的  $I_D = 2.25mA$ , 在  $V_{GS} = 3V$  时的  $I_D = 0.25mA$ 。现要求该电路中 FET 的  $V_{DQ} = 2.4V$ ,  $I_{DQ} = 0.64mA$ , 试求:

- (1) 管子的  $k'_n \frac{W}{L}$  和  $V_T$  的值。
- (2)  $R_d$  和  $R_s$  的值应各取多大?



图题 3.19

解:

$$(1) I_D = K_n(V_{GS} - V_{th})^2$$

代入已知两组数据, 得到方程组, 解之得

$$V_{th1} = 3.5V \text{ (不合理, 舍去)} \quad V_{th2} = 2V$$

$$\text{求得 } V_{th} = 2V, K_n = 0.25mA/V^2$$

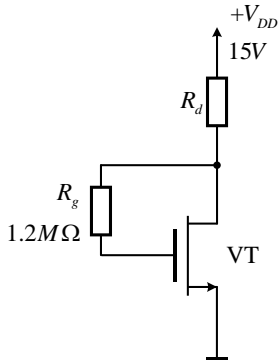
$$(2) V_{DQ} = V_{DD} - I_{DQ}R_d \text{ 代入得 } 2.4 = 12 - 0.64R_d, \text{ 即 } R_d = 15k\Omega$$

$$\text{又 } I_{DQ} = K_n(V_{GSQ} - V_{th})^2, \text{ 代入得 } 0.64 = 0.25(V_{GSQ} - 2)^2$$

$$\text{解得 } V_{GSQ1} = 0.4V \text{ (不合理, 舍去)}, V_{GSQ2} = 3.6V$$

$$\text{即 } V_{GSQ} = 3.6V, \text{ 又 } V_{GSQ} = 10 - 0.64R_s \text{ 解得 } R_s = 10k\Omega$$

3.27 (设计题) 电路如图题 3.20 所示,  $V_{DD} = 15V$ ,  $R_g = 1.2M\Omega$ , 已知 FET 的  $V_T = 3V$ ,  $k'_n \frac{W}{2L} = 0.1mA/V^2$ 。现要求该电路中 FET 的  $I_{DQ} = 1.6mA$ , 试求  $R_d$  的值应为多大?



图题 3.20

解:  $I_{DQ} = 1.6 = K_n(V_{GSQ} - V_{th})^2 = 0.1(V_{GSQ} - 3)^2$

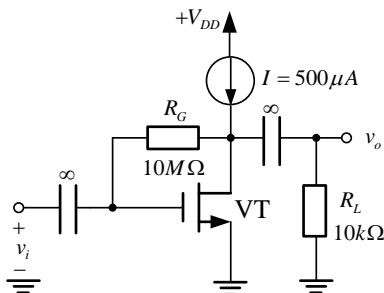
解得  $V_{GSQ1} = 7V$ ,  $V_{GSQ2} = -1V$  (不合理, 舍去)

又  $V_{DSQ} = V_{GSQ} = 7V$ ,  $V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}R_d$

代入后解得  $R_d = 5k\Omega$

### 3.4 场效应管放大电路分析

3.28 在如图题 3.21 所示的电路, NMOS 晶体管有  $|V_t| = 0.9V$ ,  $V_A = 50V$ , 并且工作在  $V_D = 2V$ 。电压增益  $v_o / v_i$  为多少? 如果  $I$  增加到  $1mA$ ,  $V_D$  和增益将变为多少?



图题 3.21

解: 由偏置电路结构可知, 该电路工作在饱和模式且  $V_G = V_D = 2V$ ,  $I = I_D = 500\mu A$  (直流忽略沟道长效应)

又  $\because R_G = 10M\Omega$ , 其上交流分流很小, 视为开路。  $\therefore v_o / v_i = -g_m(r_o // R_L)$

而  $g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}} = \frac{2 \times 500\mu A}{2 - 0.9} = 0.91mA/V$ ,  $r_o = \frac{V_A}{I_D} = 100k\Omega$ ,  $\therefore v_o / v_i = -8.27$

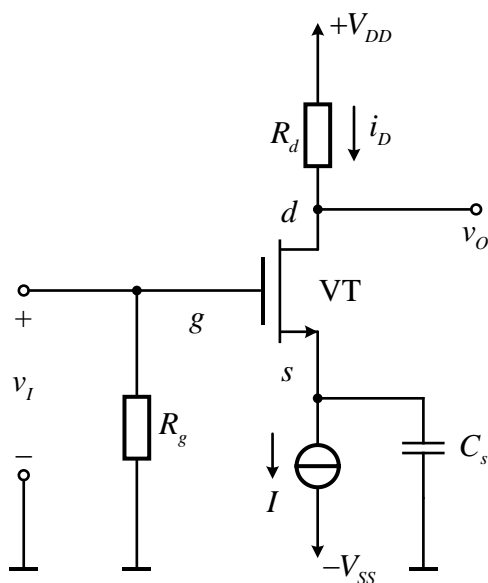
若电流增加到  $1mA$ , 则  $I_D' = 1mA$ ,

$\therefore V_{GS}' = \sqrt{\frac{I_D'}{I_D}}(V_{GS} - V_t)^2 + V_t = 2.456V$ , 即  $V_D' = V_G' = 2.456V$

$g_m' = \frac{2I_D'}{V_{OV}'} = 1.285mA/V$ ,  $r_o = \frac{V_A}{I_D'} = 50k\Omega$   $\therefore v_o / v_i = -10.7$

3.29 电路如图题 3.22 所示。设电流源电流  $I = 0.5mA$ ,  $V_{DD} = V_{SS} = 5V$ ,  $R_d = 9k\Omega$ ,  $C_s$  很大, 对信号可视为短路。场效应管的  $V_T = 0.8V$ ,  $K_n = 1mA/V^2$ , 输出电阻  $r_{ds} = \infty$ 。试求该电路的小信号电压增益  $A_v$ 。





图题 3.22

解:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_d$$

由于栅极直流电流为零, 所以源极的直流电压  $V_s = -V_{GSQ}$ , 栅极电压可由下式求得

$$I_{DQ} = I = K_n (V_{GSQ} - V_T)^2$$

即

$$0.5 = 1 \times (V_{GSQ} - 0.8)^2$$

从而可得

$$V_{GSQ} = -V_s \approx 1.51V$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d - V_s = 2.01V$$

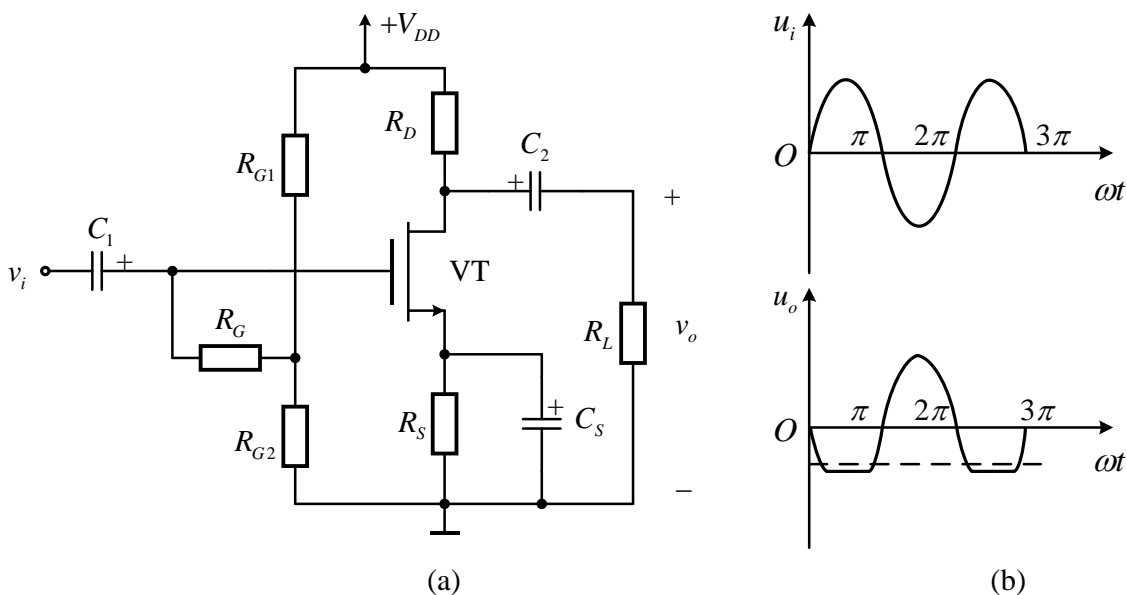
可以证明场效应管的确工作在饱和区

$$g_m = 2K_n (V_{GSQ} - V_T) = 1.42mS$$

故

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_d = -12.78$$

3.30 一 N 型沟道增强 MOS 场效应管放大电路如图题 3.23(a) 所示。(1) 设场效应管漏极特性曲线得间隔是均匀得, 现用示波器观察电路得输入、输出电压, 出现如图题 3.23(b) 所示得失真波形。试问, 该电路得静态工作点 Q 可能处于或靠近哪个区? (2) 已知漏极电流可以表示为  $i_D = K(v_{gs} - V_T)^2$ , 其中  $V_T$  为增强型 MOS 场效应管得开启电压, K 为常数。为了得到符合求得静态工作电流  $I_{DQ}$ , 在  $R_{G1}$  和  $R_{G2}$  不变得条件下, 求电阻  $R_S$ ; (3) 在线性放大条件下, 求出电压增益  $A_v$ 、输入电阻  $R_i$  和输出电阻  $R_o$  表达式。



图题 3.25

**解:** (1) 由于电路得输出波形负半周出现了失真, 故该电路得静态工作点  $Q$  靠近可变电阻区。

(2) 已知

$$I_{DQ} = K(V_{GSQ} - V_{GS(th)})^2$$

而

$$V_{GSQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - I_{DQ} R_S$$

将以上两式联立求解得

$$R_S = \left( \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - \sqrt{\frac{I_{DQ}}{K}} - V_{GS(th)} \right) \frac{1}{I_{DQ}}$$

(3)

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_D || R_L$$

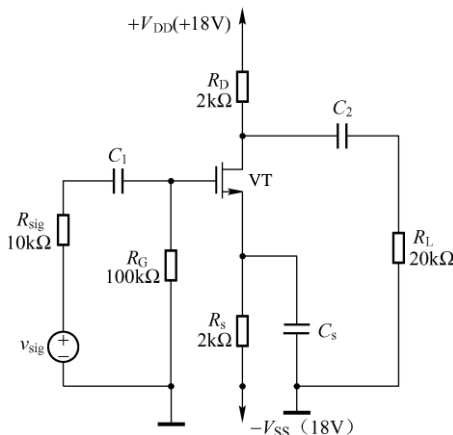
$$R_i = R_G + R_{G1} || R_{G2}$$

$$R_o = R_D$$

3.31 场效应管放大器如图题 3.24 所示。设  $k'_n (W/L) = 0.5 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_t = 2 \text{ V}$ 。

(1) 计算静态工作点  $Q$ ;

(2) 求  $A_v$ 、 $A_{vs}$ 、 $R_i$  和  $R_o$ 。



图题 3.24

解: (1)  $\because V_G = 0$ ,  $\therefore V_{GS} = -V_S = 18 - I_D R_S = 18 - 2I_D$

考虑到放大器应用中, 场效应管应工作在饱和区, 则有:

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

代入上式可得:  $I_D^2 - 17I_D + 64 = 0$

解得  $I_{D1} = 11.35\text{mA}$ ,  $I_{D2} = 5.65\text{mA}$ , 当  $I_{D1} = 11.35\text{mA}$  时场效应管截止。

因此  $I_D = I_{D2} = 5.65\text{mA}$ ,  $V_{GS} = 18 - 11.3 = 6.7\text{V}$ ,

$V_D = 18 - 2 \times 5.65 = 6.7\text{V}$ ,  $V_{DS} = 6.7 - (-6.7) = 13.4\text{V}$

(2)  $g_m \equiv \frac{2I_D}{V_{OV}} = \frac{11.3}{4.7} = 2.4\text{ms}$ , 忽略厄尔利效应

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (R_D // R_L) = -4.36$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_G = 100\text{k}\Omega$$

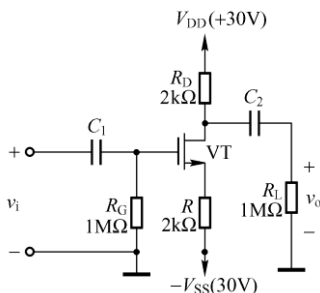
$$A_{vs} = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} A_v = -3.96$$

$$R_o \approx R_D = 2\text{k}\Omega$$

3.32 共源放大电路如图题 3.25 所示, 已知 MOSFET 的  $\mu_n C_{ox} W/2L = 0.25\text{mA/V}^2$ ,  $V_t = 2\text{V}$ ,  $r_o = 80\text{k}\Omega$ , 各电容对信号可视为短路, 试求:

(1) 静态  $I_{DQ}$ 、 $V_{GSQ}$  和  $V_{DSQ}$ ;

(2)  $A_v$ 、 $R_i$  和  $R_o$ 。



图题 3.25

解: (1)  $\because V_G = 0$ ,  $\therefore V_{GS} = -V_S = 30 - I_D R_S = 30 - 2I_D$

考虑到放大器应用中, 场效应管应工作在饱和区, 则有:

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

代入上式可得:  $I_D^2 - 29I_D + 196 = 0$

解得  $I_{D1} = 18.25\text{mA}$ ,  $I_{D2} = 10.75\text{mA}$ , 当  $I_{D1} = 18.25\text{mA}$  时场效应管截止。

因此  $I_D = I_{D2} = 10.75\text{mA}$ ,  $V_{GS} = 30 - 2 \times 10.75 = 8.5\text{V}$ ,

$V_D = 30 - 2 \times 10.75 = 8.5\text{V}$ ,  $V_{DS} = 8.5 - (-8.5) = 17\text{V}$

(2)  $g_m \equiv \frac{2I_D}{V_{OV}} = \frac{11.3}{4.7} = 3.3\text{ms}$ , 忽略厄尔利效应

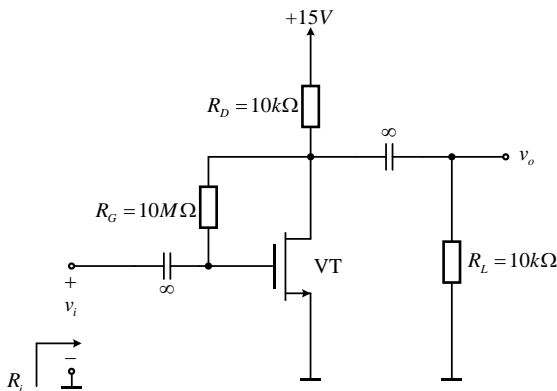
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m (R_D // R_L)}{1 + g_m R} = 0.87$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_G = 1\text{M}\Omega$$

$$R_o \approx R_D = 2\text{k}\Omega$$

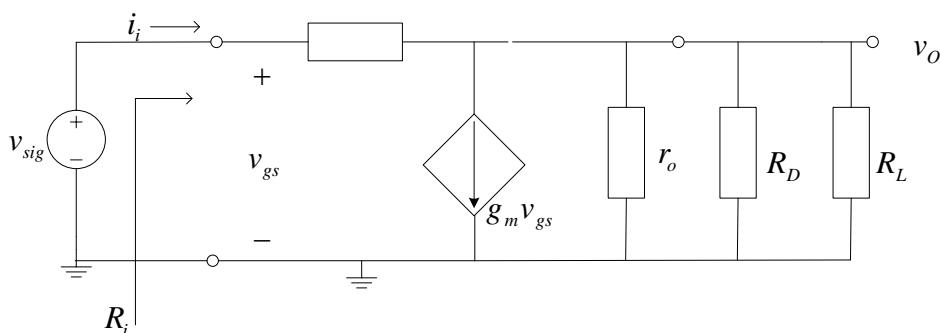
3.33 如图题 3.26 所示, 求该放大器电路的小信号电压增益、输入电阻和最大允许输入信号。该

晶体管有  $V_t = 1.5\text{V}$ ,  $k'_n (W/L) = 0.25\text{mA/V}^2$ ,  $V_A = 50\text{A}$ 。假定耦合电容足够大使得在所关注的信号频率上相当于短路。



图题 3.26

解:



等效电路如图所示  $V_{GS} = V_{DS} = V_D = 15 - 10I_D$

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow I_D = 1.06\text{mA} \text{ 或 } 1.72\text{mA} (\text{舍去})$$

则  $V_{GS} = V_D = 4.4\text{V}$

$$g_m \equiv \frac{2I_D}{V_{OV}} = 0.725\text{ms}$$

因  $R_G = 10\text{M}\Omega$ ，其上的交流电流可以忽略，则

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (r_o // R_D // R_L) = -3.3$$

为了计算输入电阻，先考虑输入电流（此处也可用密勒定理），

$$i_i = \frac{v_o - v_i}{R_G} = \frac{v_i}{R_G} \left( 1 - \frac{v_o}{v_i} \right) = 4.3 \frac{v_i}{R_G}$$

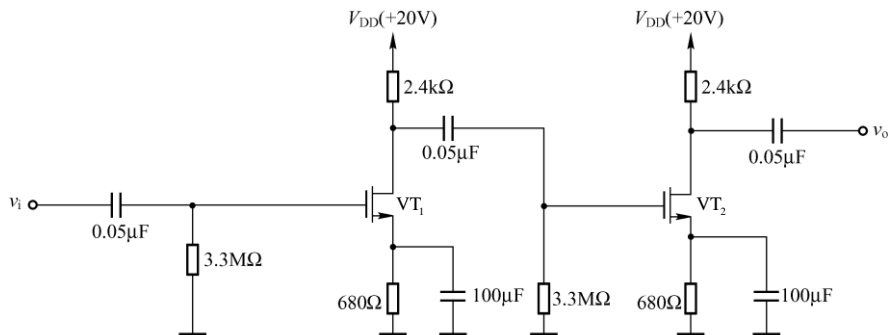
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_G}{4.3} = 2.33\text{M}\Omega$$

最大允许输入信号需根据场效应管工作在饱和区条件来确定，

即  $v_{DS} \geq v_{GS} - V_t$ ，即  $v_{DS(\min)} = v_{GS(\max)} - V_t$

$$V_{DS} - A_v v_i = V_{GS} + v_i - V_t \Rightarrow v_i = 0.34\text{V}$$

3.34 计算图题 3.27 所示的级联放大器的直流偏置、输入电阻、输出电阻及输出电压。如果输出端负载为  $10\text{k}\Omega$ ，计算其负载电压。已知结型场效应管  $I_{DSS} = 10\text{mA}$ ， $V_t = -4\text{V}$ ，输入信号电压有效值为  $10\text{mV}$ 。



图题 3.27

解: (1) 两级放大器具有相同的直流偏置。∵  $V_G = 0$ , ∴  $V_{GS} = -V_S = -I_D R_S = -0.68 I_D$

考虑到放大器应用中, 场效应管应工作在饱和区, 则有:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_t} \right)^2 \Rightarrow I_D = 3.31 \text{mA} \text{ 或 } 8.01 \text{mA} (\text{舍去})$$

代入上式可得:  $0.289 I_D^2 - 4.4 I_D + 10 = 0$

解得  $I_D = 2.8 \text{mA}$ ,  $V_{GS} = -0.68 \times 2.8 = -1.9 \text{V}$ ,

$$(2) \quad g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}} = \frac{5.6}{2.1} = 2.6 \text{ms},$$

由于第二级没有负载, 则

$$A_{v2} = -g_m R_D = -6.24$$

对于第一级放大器,  $2.4 \text{k}\Omega / 3.3 \text{M}\Omega \approx 2.4 \text{k}\Omega$ , 可得到相同的增益

则级联放大器的增益为  $A_v = A_{v1} A_{v2} = 38.4$

输出电压为  $v_o = A_v v_i = 38.4 \times 10 = 384 \text{mV}$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_G = 3.3 \text{M}\Omega$$

$$R_o \approx R_D = 2.4 \text{k}\Omega$$

负载  $10 \text{k}\Omega$  两端的输出电压为

$$v_L = \frac{R_L}{R_o + R_L} v_o = \frac{10}{2.4 + 10} 384 = 310 \text{mV}$$

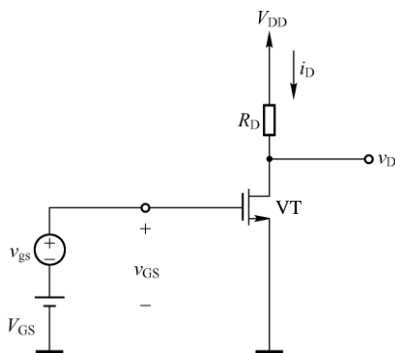
3.35 考虑图题 3.28 所示的 FET 放大器, 其中,  $V_t = 2 \text{V}$ ,  $k'_n (W/L) = 1 \text{mA/V}^2$ ,  $V_{GS} = 4 \text{V}$ ,  $V_{DD} = 10 \text{V}$ , 以及  $R_D = 3.6 \text{k}\Omega$ 。

(1) 求直流分量  $I_D$  和  $V_D$ ;

(2) 计算偏置点处的  $g_m$  值;

(3) 计算电压增益值  $A_v$ ;

(4) 如果该 MOSFET 有  $\lambda = 0.01 \text{V}^{-1}$ , 求偏置点处的  $r_o$  以及计算源电压增益  $A_{vs}$ 。



图题 3.28

$$\text{解: (1) } I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow I_D = 2 \text{mA}$$

$$\text{则 } V_D = V_{DD} - I_D R_D = 2.8 \text{V}$$

$$(2) \quad g_m \equiv \frac{2I_D}{V_{OV}} = 2\text{ms}$$

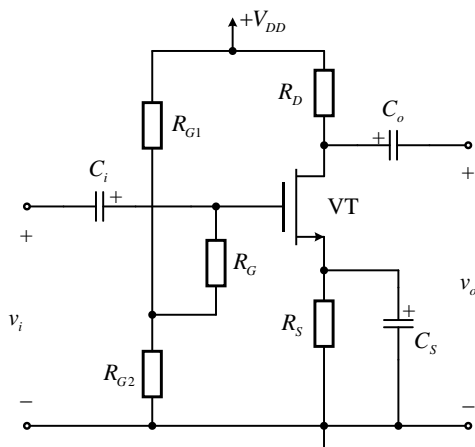
$$(3) \quad A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_D = -7.2$$

$$(4) \quad r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = 50\text{k}\Omega$$

$$A_{vs} = \frac{R_i}{R_i + R_{\text{sig}}} A_v = -g_m (R_D // r_o) \approx 7.2$$

3.36 电路如图题 3.29 所示,  $V_{DD} = 18\text{V}$ , 所用场效应管为 N 沟道耗尽型, 其跨导  $g_m = 2\text{mA/V}$ 。电路参数  $R_{G1} = 2.2\text{M}\Omega$ ,  $R_{G2} = 51\text{M}\Omega$ ,  $R_G = 10\text{M}\Omega$ ,  $R_S = 2\text{k}\Omega$ ,  $R_D = 33\text{k}\Omega$ 。试求:

- (1) 电压增益  $A_v$ 。
- (2) 若接上负载电阻  $R_L = 100\text{k}\Omega$ , 求电压放大倍数。
- (3) 输入输出电阻。
- (4) 若源极电阻的旁路电容  $C_S$  开路, 接负载时的电压增益下降到原来的百分之几?



题图 3.29

**解:** (1) 无负载时, 电压放大倍数

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_D = -2 \times 33 = -66$$

(2) 有负载时, 电压放大倍数为

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (R_D // R_L) = -2 \times (33 // 100) = -50$$

(3) 输入电阻

$$r_i = R_G + R_{G1} // R_{G2} = 10 + 2.2 // 0.051 \approx 10\text{M}\Omega$$

输出电阻

$$r_o = R_D = 33\text{k}\Omega$$

(4) 若源极电阻的旁路电容  $C_S$  开路, 接负载  $R_L$  时的电压增益为

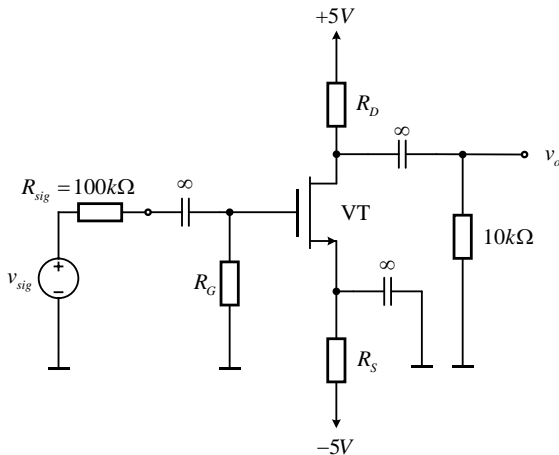
$$A_v' = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m (R_D // R_L)}{1 + g_m R_S} = \frac{A_v}{1 + g_m R_S} = \frac{A_v}{5}$$

即  $A_v' / A_v = 20\%$ , 输出增益下降到原来的 20%。

3.37 (设计题) 图题 3.30 中 MOSFET 有  $V_t = 1\text{V}$ ,  $k_n' (W/L) = 1\text{mA/V}^2$ 。

(1) 求  $R_D$ 、 $R_S$ 、 $R_G$  的值是  $I_D = 0.5\text{mA}$ ，当漏级最大的信号幅度为  $\pm 2\text{V}$  时，求最大可能的  $R_D$  值，栅极输入电阻为  $15\text{M}\Omega$ 。

(2) 若  $V_A = 40\text{V}$ ，求  $v_o / v_{sig}$ 。



图题 3.30

**解：**(1) 假设 MOSFET 工作在饱和区

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2, \quad 0.5\text{mA} = \frac{1}{2} \times 1\text{mA} \times (V_{GS} - 1)^2,$$

$$V_{GS} = 2\text{V} \text{ 或 } V_{GS} = 0\text{V} \text{ (舍去)}. \quad V_S = V_G - V_{GS}, \quad V_S = 0 - 2 = -2\text{V}$$

$$R_S = \frac{V_S - (-5)}{I_D} = \frac{-2 - (-5)}{0.5\text{mA}} = 6\text{k}\Omega, \quad R_i = R_G = 15\text{M}\Omega$$

$$\because V_{GD} \leq V_t, \quad \therefore 0 - v_D \leq V_t, \quad \therefore v_D \geq -V_t = -1\text{V}$$

由于漏级最大的信号幅度为  $\pm 2\text{V}$ ，故  $V_D \geq 1\text{V}$ 。

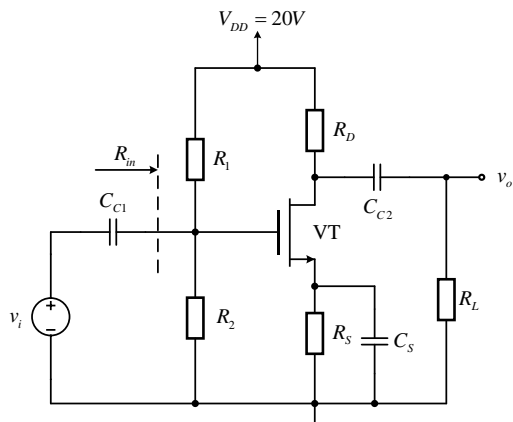
$$\text{当 } V_D = V_{D\min} = 1\text{V} \text{ 时, } R_{D\max} = \frac{5 - V_{D\min}}{I_D} = \frac{5 - 1}{0.5\text{mA}} = 8\text{k}\Omega$$

$$(2) \quad g_m = \frac{2I_D}{V_{ov}} = \frac{2 \times 0.5\text{mA}}{2 - 1} = 1\text{mA/V}, \quad r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{40}{0.5\text{mA}} = 80\text{k}\Omega$$

$$\frac{v_o}{v_{sig}} = -g_m (R_D // r_o // R_L) \times \frac{R_i}{R_{sig} + R_i} = -4.17\text{V/V}$$

3.38 (设计题) 如图题 3.31 所示，已知静态工作点为  $I_{DQ} = 1\text{mA}$ ,  $V_{DSQ} = 10\text{V}$ ,  $V_T = 2\text{V}$ ,  $R_L = 20\text{k}\Omega$ ,  $A_v = -10$ ,  $R_i = 200\text{k}\Omega$ 。假设  $\lambda = 0$ ，设计该电路的电阻。





题图 3.31

解:  $V_{DSQ} = V_D - V_S = V_{DD} - I_D R_D - I_D R_S$

$$\Rightarrow 10 = 20 - 1 \times (R_D + R_S) \Rightarrow R_D + R_S = 10k\Omega$$

取  $R_D = R_S = 5k\Omega$

$$A_v = -g_m (R_D // R_L) \Rightarrow -10 = -g_m (5k\Omega // 20k\Omega)$$

$$\Rightarrow g_m = 2.5mS$$

$$g_m = 2\sqrt{k'_n \frac{W}{L} I_{DQ}} \Rightarrow k'_n \frac{W}{L} = 25mA/V^2$$

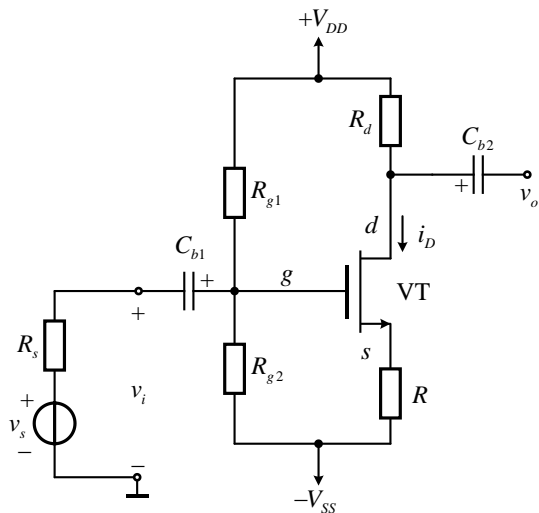
$$I_{DQ} = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 1mA = \frac{1}{2} \times 25 (V_{GS} - 2V)^2 \Rightarrow V_{GS} = 2.28V$$

$$V_G = V_{GS} + I_D R_S = 2.28 + 1 \times 5 = 7.28V$$

$$\begin{cases} V_G = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_2 = 0.572R_1 \\ \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 200k\Omega \end{cases}$$

$$\Rightarrow R_1 = 550k\Omega, R_2 = 315k\Omega$$

3.39 电路如图题 3.32 所示。已知  $R_d = 10k\Omega$ ,  $R_s = R = 0.5k\Omega$ ,  $R_{g1} = 165k\Omega$ ,  $R_{g2} = 35k\Omega$ ,  $V_T = 0.8V$ ,  $k'_n \frac{W}{2L} = 1mA/V^2$ , 场效应管的输出电阻  $r_o = \infty (\lambda = 0)$ , 电路静态工作点处  $V_{GS} = 1.5V$ 。试求图所示共源极电路的小信号电压增益  $A_v$  和源电压增益  $A_{vs}$ 。

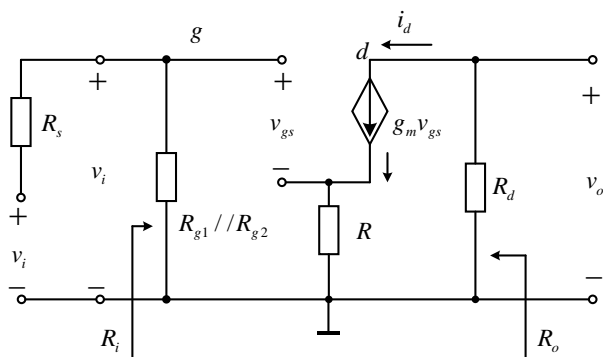


图题 3.32

解:

$$g_m = 2K_n(V_{GS} - V_T) = 1.4\text{mS}$$

小信号模型电路图如下



可求出

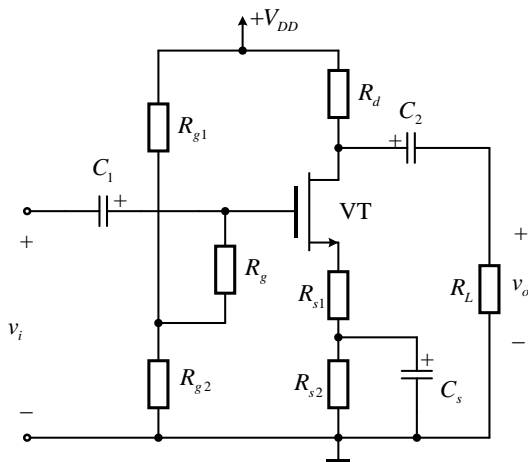
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m R_d}{1 + g_m R} \approx -8.24$$

$$R_i = R_{g1} || R_{g2} \approx 28.9\text{k}\Omega$$

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = A_v \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} \approx -8.1$$

3.40 在图题 3.33 所示的场效应管放大电路中, 设  $V_T = 4\text{V}$ ,  $I_D = 10\text{mA}$ ,  $V_{DD} = 18\text{V}$ ,  $R_g = 2\text{M}\Omega$ ,  $R_{g1} = 150\text{k}\Omega$ ,  $R_{g2} = 160\text{k}\Omega$ ,  $R_d = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_{s1} = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_{s2} = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_L = 10\text{k}\Omega$ 。

试计算: (1) 静态工作点  $I_{DQ}$ 、 $V_{GS}$ 、 $V_{DS}$ ; (2)  $R_i$ ,  $R_o$ ; (3)  $A_v$ 。



图题 3.33

解: (1)

$$V_{GSQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} V_{DD} - I_{DQ}(R_{s1} + R_{s2}) = \frac{160}{150 + 160} \times 18 - 11I_{DQ} \approx 9.29 - 11I_{DQ}$$

$$I_{DQ} = I_{D0} \left( \frac{V_{GSQ}}{V_T} - 1 \right)^2 = 10 \times \left( \frac{V_{GSQ}}{V_T} - 1 \right)^2$$

解得:  $I_{DQ1} \approx 0.57\text{mA}$ ,  $I_{DQ2} \approx 0.41\text{mA}$ ,  $V_{GSQ1} \approx 3.02\text{V}$  (舍去),  $V_{GSQ2} \approx 4.78\text{V}$ , 故静态漏极电流  $I_{DQ} \approx 0.41\text{mA}$ ,  $V_{GSQ} \approx 4.78\text{V}$ 。

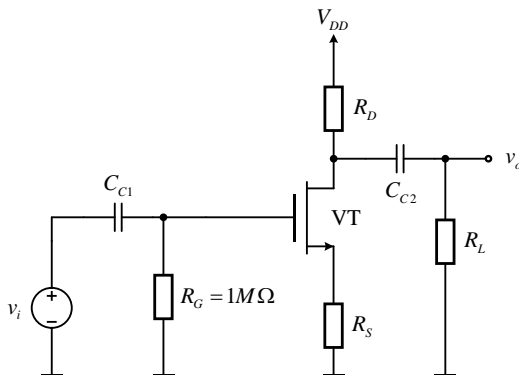
$$(2) R_i = R_g + R_{g1} // R_{g2} = 2 + 150 \times 10^{-3} // 160 \times 10^{-3} \approx 2.08\text{M}\Omega$$

$$R_o = R_d = 10\text{k}\Omega$$

$$(3) g_m = \frac{2I_{DQ}}{V_T} \left( \frac{V_{GSQ}}{V_T} - 1 \right) = \frac{2 \times 10}{4} \left( \frac{4.78}{4} - 1 \right) = 0.98\text{mA/V}$$

$$A_v = \frac{-g_m(R_d // R_L)}{1 + g_m R_{s1}} = \frac{-0.98 \times (10 // 10)}{1 + 0.98} \approx -2.47$$

3.41 (设计题) 图题 3.34 所示的共源放大器, 已知  $V_T = -1\text{V}$ ,  $k'_n \frac{W}{2L} = 4\text{mA/V}^2$ ,  $V_{DD} = 10\text{V}$ ,  $R_L = 2\text{k}\Omega$

假设  $\lambda = 0$ 。(1) 设计该电路, 使得  $I_D = 2\text{mA}$ ,  $V_{DS} = 6\text{V}$ 。(2) 求电压增益  $A_v$ (3) 设  $v_i = V_i \sin \omega t$ , 求使得  $v_o$  不失真的  $V_i$  的最大值。

图题 3.34

解: (1)  $I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow 2\text{mA} = 4(V_{GS} + 1)^2$

$$\Rightarrow V_{GS} = -0.293\text{V} \approx -0.3\text{V}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D - I_D R_S \Rightarrow R_D + R_S = 2\text{k}\Omega$$

$$V_G = V_{GS} + I_D R_S \Rightarrow 0 = -0.3 + 2 \times R_S \Rightarrow R_S = 0.15\text{k}\Omega$$

$$\therefore R_D = 1.85\text{k}\Omega$$

$$(2) A_v = -g_m \frac{R_D // R_L}{1 + g_m R_S} = -5.7 \times \frac{0.96}{1 + 0.855} = -2.9$$

$$g_m = \sqrt{2k'_n \frac{W}{L} I_D} = \sqrt{16 \times 2} = 5.7\text{mS}$$

(3) 场效应管进入变阻区条件

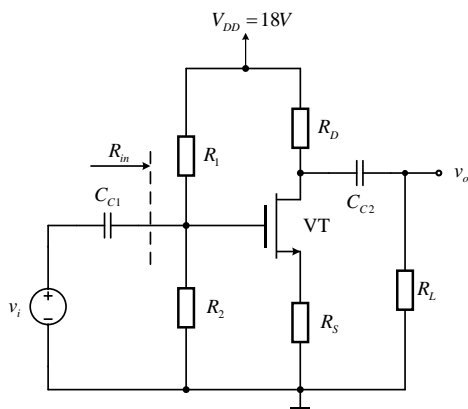
$$v_{DS} = V_{GS} - V_t = 0.7\text{V}$$

$$v_{DS} = V_{DS} - |v_{ds}| \Rightarrow |v_{ds}| = 5.3\text{V}$$

$$|v_{ds}| = v_o - g_m v_{gs} R_S = 2.9v_i - 5.7 \frac{v_i}{1.86} \times 0.15 = 2.45v_i$$

$$\Rightarrow v_i = 2.16\text{V}, \therefore v_i \text{ 的最大值为 } 2.16\text{V}$$

3.42 (设计题) 如图题 3.35 所示, 已知静态工作点为  $I_{DQ} = 6\text{mA}$ ,  $V_{GSQ} = 2.8\text{V}$ ,  $V_{DSQ} = 10\text{V}$ ,  $g_m = 2.2\text{mA/V}$ ,  $R_L = 1\text{k}\Omega$ ,  $A_v = -1$ ,  $R_i = 100\text{k}\Omega$ 。假设  $\lambda = 0$ , 设计该电路的电阻, 及确定场效应管的参数  $V_T$  和  $k'_n \frac{W}{L}$ 。



图题 3.35

解:

$$\begin{cases} A_v = -\frac{g_m (R_D // R_S)}{1 + g_m R_S} \\ V_{DSQ} = V_D - V_S = 18 - 6R_D - 6R_S = 10\text{V} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} g_m \frac{R_D}{1 + R_D} = 1 + g_m R_S \Rightarrow R_S = 0.098\text{k}\Omega, R_D = 1.232\text{k}\Omega \\ R_D + R_S = 1.33\text{k}\Omega \end{cases}$$

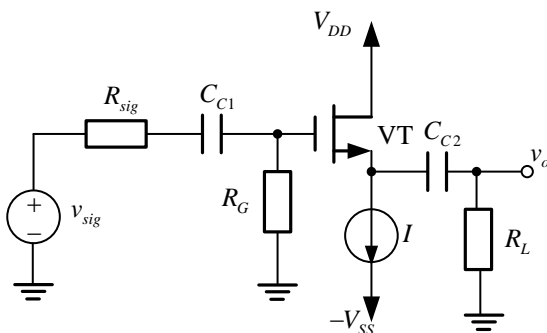
$$\begin{cases} I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \\ g_m = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) \end{cases} \Rightarrow I_D = \frac{g_m^2}{2 \left( k'_n \frac{W}{L} \right)} \Rightarrow k'_n \frac{W}{L} = \frac{g_m^2}{2I_D} = 0.4\text{mA/V}^2$$

$$\begin{cases} R_1 // R_2 = 100k\Omega \\ V_{GS} = V_G - V_S = \frac{R_2}{R_1 + R_2} 18 - 6 \times 0.098 = 2.8V \end{cases}$$

$$\Rightarrow R_1 = 527k\Omega, R_2 = 123k\Omega$$

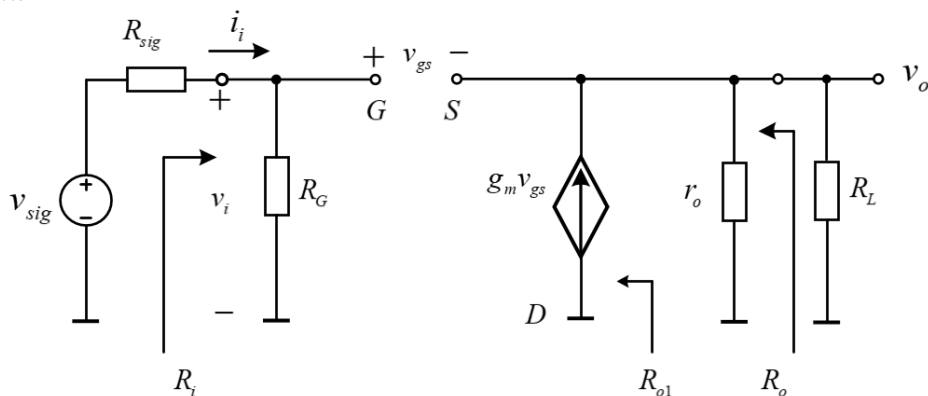
3.43 放大电路如图题 3.36 所示, 已知  $I = 1mA$ ,  $g_m = 2mA/V$ ,  $R_G = 10M\Omega$ ,  $R_L = 10k\Omega$ ,  $R_{sig} = 100k\Omega$ ,  $V_A = 10V$ , 试求:

- (1) 画出该电路的信号等效电路;
- (2) 求输入电阻  $R_{in}$ , 输出电阻  $R_{out}$ ;
- (3) 电压增益  $A_v$ ; 总电压增益  $A_{vs}$ 。

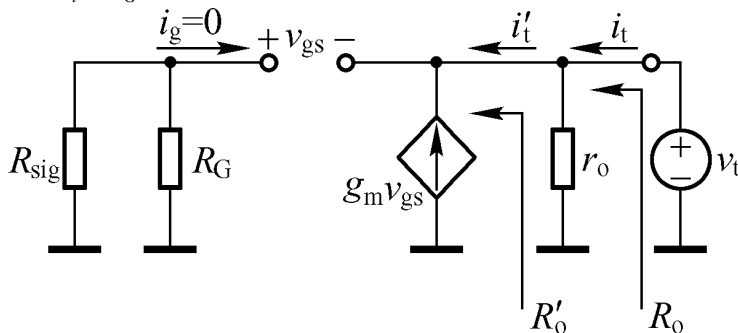


图题 3.36

解: (1)



(2)  $R_i = R_G = 10M\Omega$



$$R'_o = \frac{v_t}{i'_t} \bigg|_{\substack{v_{\text{sig}}=0 \\ R_t=\infty}} = \frac{-v_{\text{gs}}}{-g_m v_{\text{gs}}} = \frac{1}{g_m}, \quad R_o = r_o // \frac{1}{g_m} \approx \frac{1}{g_m} = 500\Omega$$

$$(3) \quad r_o = \frac{V_A}{I} = \frac{10V}{1mA} = 10k\Omega$$

$$\therefore A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m v_{\text{gs}} (r_o // R_L)}{v_{\text{gs}} + g_m v_{\text{gs}} (r_o // R_L)} = \frac{r_o // R_L}{r_o // R_L + \frac{1}{g_m}} = 0.909V/V$$

$$A_{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_{\text{sig}}} A_v = \frac{R_G}{R_G + R_{\text{sig}}} \frac{r_o // R_L}{r_o // R_L + \frac{1}{g_m}} = 0.9V/V$$

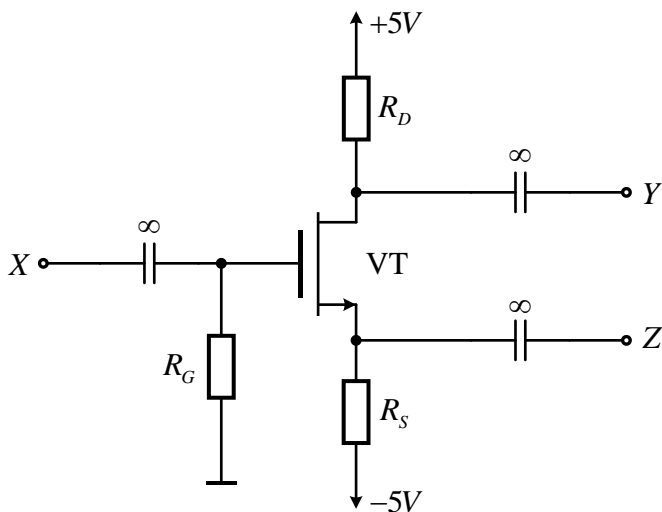
3.44 图题 3.37 所示电路中的 MOSFET 有  $V_t = 1V$ ,  $k'_n(W/L) = 0.8mA/V^2$ ,  $V_A = 40V$ ,  $R_G = 10M\Omega$ ,  $R_S = 35k\Omega$ ,  $R_D = 35k\Omega$ 。

(1) 求静态工作点  $I_{DQ}$ 、 $V_{GSQ}$ ;

(2) 求偏置点的  $g_m$  和  $r_o$  值;

(3) 如果节点 Z 接地, 节点 X 接到内阻为  $500k\Omega$  的信号源, 节点 Y 接到  $40k\Omega$  的负载电阻, 求从信号源到负载的电压增益、 $R_i$ 、 $R_o$ 。

(4) 如果节点 Y 接地, 求 Z 开路时从 X 到 Z 的电压增益。该源极跟随器的输出电阻为多少?



图题 3.37

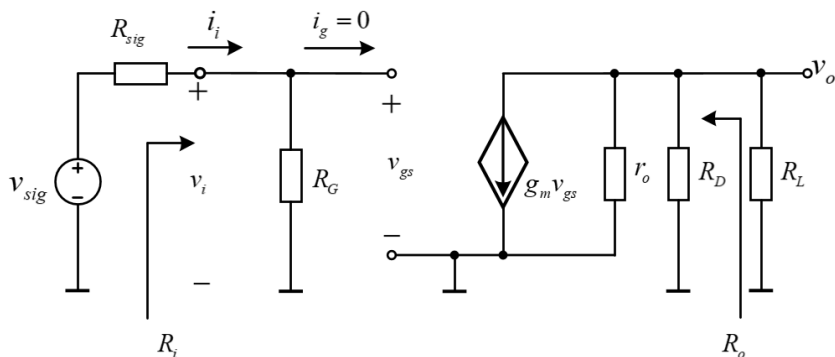
**解:** (1) 该电路工作在饱和区, 则有

$$V_G = 0V, \quad V_{GS} = V_G - V_S = -V_S = 5 - 35I_D$$

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow I_D = 0.1mA, \quad \text{则 } V_{GS} = V_G - V_S = 5 - 35I_D = 1.5V$$

$$(2) \quad g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}} = 0.4ms, \quad r_o = \frac{V_A}{I_D} = 400k\Omega$$

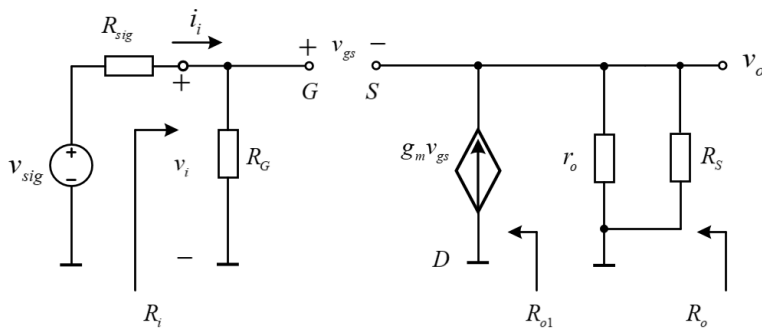
(3) 为共源电路, 交流小信号等效电路如下:



$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_G = 10M\Omega, \quad R_o = \frac{v_o}{i_o} \bigg|_{\substack{v_{sig}=0 \\ R_L=\infty}} = r_o // R_D = 32k\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (r_o // R_D // R_L) = -7.13, \quad G_v = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} A_v = -\frac{10000}{10000 + 500} 7.13 = -6.79$$

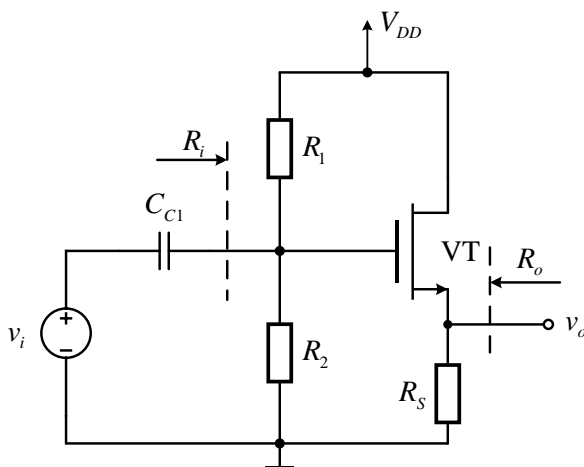
(4)、为共漏放大器，等效电路如下



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{r_o // R_S}{r_o // R_S + \frac{1}{g_m}} = 0.93, \quad R_o = r_o // R_S // \frac{1}{g_m} = 2.32k\Omega$$

3.45 (设计题) 图题 3.38 所示的放大电路，已知晶体管参数  $V_T = 0.4V$ ,  $k'_n \frac{W}{2L} = 0.5mA/V^2$ , 且假设  $\lambda = 0$ 。已知电路参数  $V_{DD} = 3V$ ,  $R_i = 300k\Omega$ 。

- (1) 设计电路使得静态工作点为  $I_{DQ} = 0.25mA$ ,  $V_{DSQ} = 1.5V$ ;
- (2) 求放大电路的电压增益及输出电阻。



图题 3.38

解: (1)  $V_{DS} = V_D - V_S = 3 - 0.25R_S = 1.5V \Rightarrow R_S = 6k\Omega$

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS} = 1.107V$$

$$\begin{cases} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 300k\Omega \\ \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 3 - 1.5 = 1.1V \end{cases} \Rightarrow R_1 = 346k\Omega, R_2 = 2250k\Omega$$

$$(2) g_m = \sqrt{2k'_n \frac{W}{L} I_D} = 0.707mA/V$$

$$A_v = \frac{R_S}{R_S + \frac{1}{g_m}} = 0.81$$

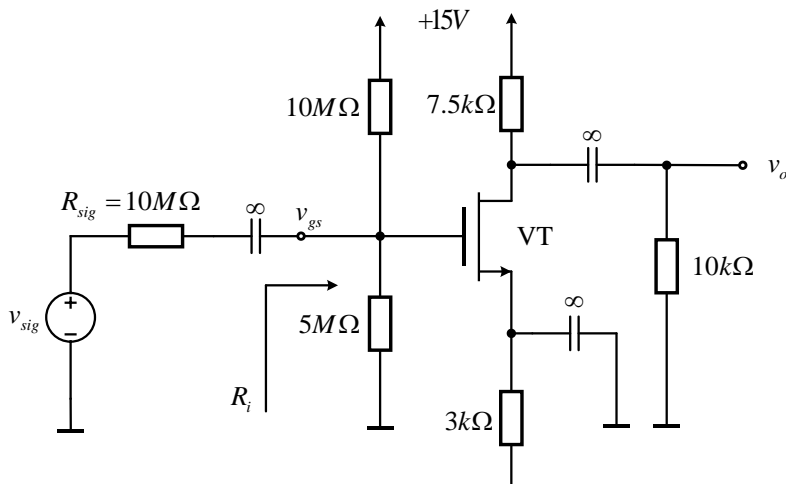
$$R_o \approx \frac{1}{g_m} = 1.414k\Omega$$

### 3.5 MOSFET 放大电路的频率响应

3.46 图题 3.39 所示为分压式偏置电路, 该晶体管有  $V_t = 1V$ ,  $k'_n(W/L) = 2mA/V^2$ 。

- (1) 求  $I_D$ 、 $V_{GS}$ ;
- (2) 如果  $V_A = 100V$ , 求  $g_m$  和  $r_o$ ;
- (3) 假设对于信号频率所有的电容相当于短路, 画出该放大器完整的小信号等效电路;
- (4) 求  $R_i$ 、 $R_o$ 、 $v_o/v_{gs}$  以及  $v_o/v_{sig}$ 。
- (5) 单独画出 MOS 管的高频小信号等效电路模型, 并写出  $f_T$  表达式。





图题 3.39

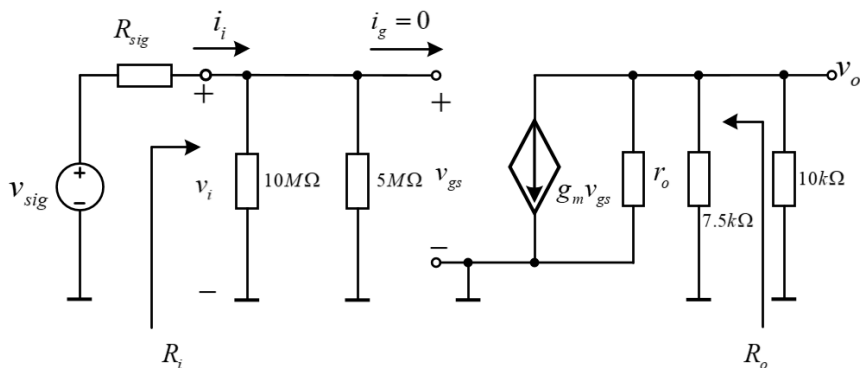
解: (1) 假设该电路工作在饱和区, 则有

$$V_G = 15 \times \frac{5}{10+5} = +5V, \quad V_{GS} = V_G - V_S = 5 - 3I_D$$

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow I_D = 1mA, \quad \text{则 } V_{GS} = V_G - V_S = 5 - 3I_D = 2V$$

$$(2) \quad g_m \equiv \frac{2I_D}{V_{OV}} = 2ms, \quad r_o = \frac{V_A}{I_D} = 100k\Omega$$

(3)



(4)

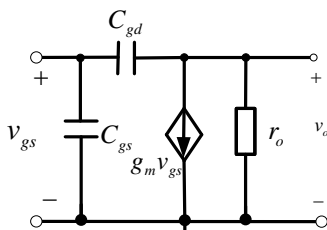
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_{G1} // R_{G2} = R_G = 3.33M\Omega$$

$$R_o = \frac{v_t}{i_t} \Big|_{\substack{v_{sig}=0 \\ R_L=\infty}} = r_o // R_D = 100k\Omega // 7.5k\Omega = 7k\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{gs}} = -g_m (r_o // R_D // R_L) = -8.2$$

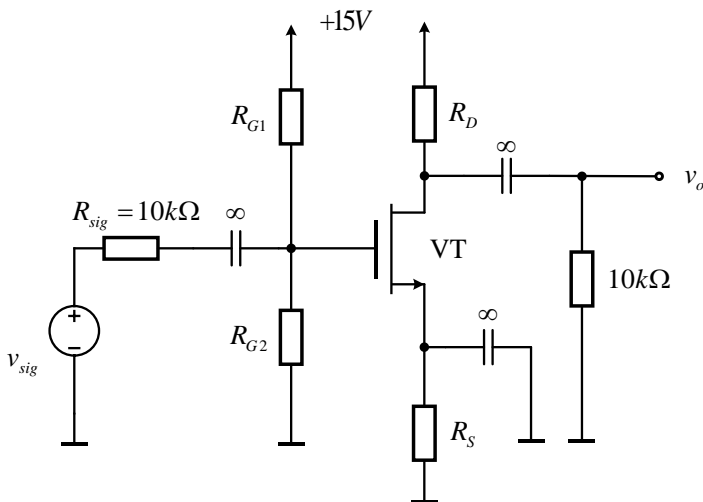
$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} A_v = -\frac{R_G}{R_G + R_{sig}} g_m (r_o // R_D // R_L) = -2.03$$

(5)



$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

3.47 (设计题) 采用分压式偏置电路的 CS 放大器, 如图题 3.40 所示, 该晶体管有  $V_t = 1V$ ,  $k'_n W/L = 2mA/V^2$ ,  $V_G = 5V$ ,  $R_i = \frac{2}{3}M\Omega$ ,  $I_D = 1mA$  以及  $V_D = 7.5V$ 。(1) 设计  $R_{G1}$ 、 $R_{G2}$ 、 $R_D$  和  $R_S$  的值;(2) 若  $|V_A| = 10V$ , 求  $g_m$  和  $r_o$ ; (3) 求  $R_o$  和  $v_o/v_{sig}$ ; (4) 单独画出 MOS 管高频小信号等效电路模型, 并列  $f_T$  的表达式。



题图 3.40

解: (1)

$$R_D = \frac{15 - V_D}{I_D} = \frac{15 - 7.5}{1mA} = 7.5k\Omega$$

$$\because V_G = 15 \times \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} = 5, R_i = R_{G1} // R_{G2} = \frac{2}{3}M\Omega$$

$$\therefore R_{G1} = 2M\Omega, R_{G2} = 1M\Omega$$

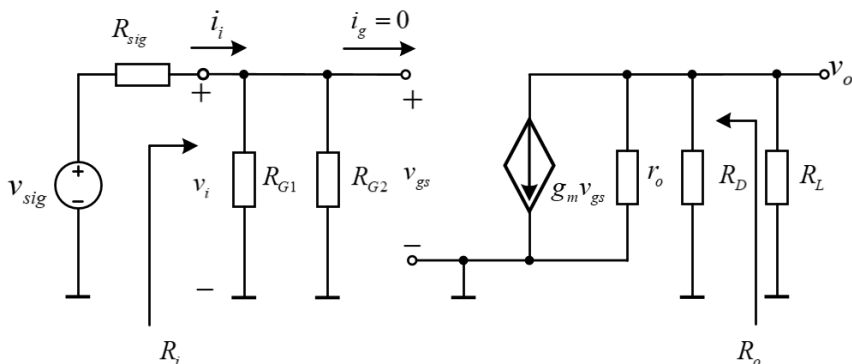
$$\because I_D = \frac{1}{2}k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2, 1mA = \frac{1}{2} \times 2mA \times (V_{GS} - 1)^2$$

$$V_{GS} = 2V \text{ 或 } V_{GS} = 0 \text{ (舍去)}, \text{ 故 } V_S = V_G - V_{GS} = 5 - 2 = 3V, R_S = \frac{V_S}{I_D} = \frac{3}{1mA} = 3k\Omega。$$

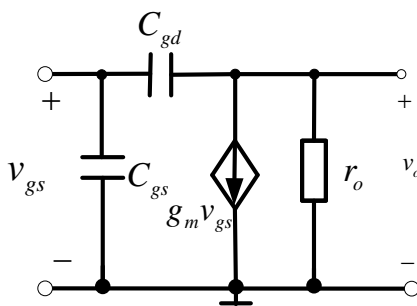
$$(2) g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}} = \frac{2 \times 1mA}{2} = 1mA/V, r_o = \frac{|V_A|}{I_D} = \frac{10}{1mA} = 10k\Omega$$

$$(3) R_o = r_o // R_D = 10k // 7.5k = 4.29k\Omega$$

$$\frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{v_o}{v_i} \frac{v_i}{v_{sig}} = -g_m (r_o // R_D // R_L) \times \frac{R_{G1} // R_{G2}}{R_{sig} + R_{G1} // R_{G2}} = -2.96V/V$$



(4)



$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

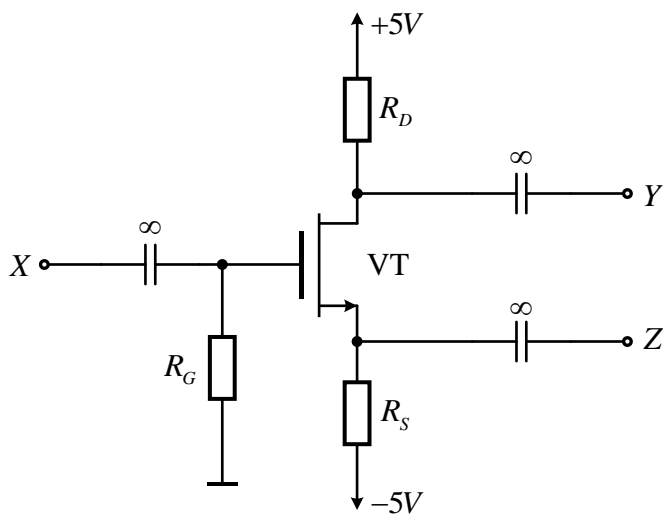
3.48 (设计题) 如图题 3.41 所示电路中的 MOSFET 有  $V_t = 1V$ ,  $k'_n W/L = 0.8mA/V^2$ ,  $V_A = 40V$ 。

(1) 求  $R_D$ 、 $R_S$  和  $R_G$  的值使  $I_D = 0.1mA$ , 当漏极最大的信号幅度为  $\pm 1V$  时, 求最大可能的  $R_D$  值, 栅极输入电阻为  $10M\Omega$ 。

(2) 求偏置点的  $g_m$  和  $r_o$  值。

(3) 如果节点 Z 接地, 节点 X 接到内阻为  $1M\Omega$  的信号源, 节点 Y 接到  $40k\Omega$  的负载电阻, 请画出完整的小信号等效电路模型, 并求从信号源到负载的电压增益。

(4) 若按 (3) 接法, 当  $C_{gs} = 1pF$ ,  $C_{gd} = 0.2pF$  时, 求  $f_T$ 。



图题 3.41

解: (1)

$$R_i = R_G = 10M\Omega, \quad I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2,$$

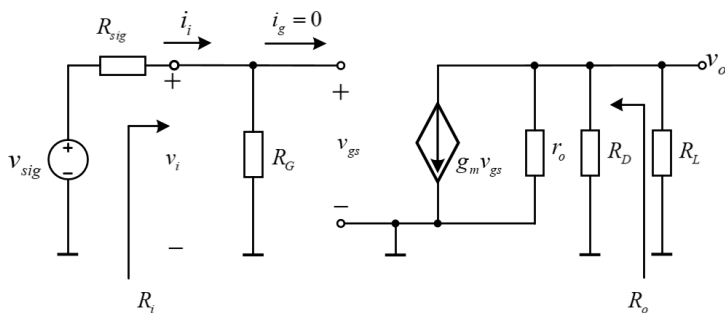
$$0.1m = \frac{1}{2} \times 0.8m/V^2 [0 - (-5 + 0.1m \times R_S) - 1]^2, \quad R_S = 35k\Omega.$$

$\therefore$  NMOS 工作在饱和区,  $\therefore v_{GD} \leq V_t, \quad v_D \geq -V_t = -1V$ 。

又因漏极最大的信号幅度为  $\pm 1V$ , 故  $V_{Dmin} = 0V, \quad R_{Dmax} = \frac{5 - V_{Dmin}}{0.1m} = 50k\Omega$ 。

$$(2) \quad g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}} = \frac{2 \times 0.1m}{0.5} = 0.4ms, \quad r_o = \frac{V_A}{I_D} = 400k\Omega$$

(3)



$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_G = 10M\Omega, \quad R_o = \frac{v_o}{i_o} \bigg|_{\substack{v_{sig}=0 \\ R_L=\infty}} = r_o // R_D = 44.4k\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (r_o // R_D // R_L) = -8.42, \quad A_{vs} = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} A_v = -\frac{10^7}{10^7 + 10^6} \times 8.42 = -7.65V/V$$

$$(4) \quad f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} = \frac{0.4m}{2\pi \times (10^{-12} + 0.2 \times 10^{-12})} = 53MHz$$

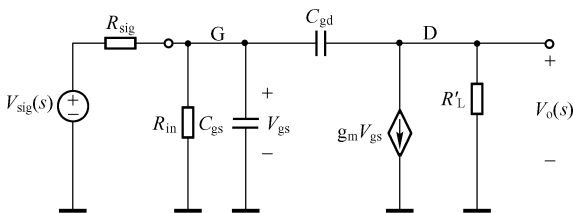
3.49 求 MOSFET 工作在  $I_D=100\mu A$  和  $V_{OV}=0.25V$  时的  $f_T$  值。已知该 MOSFET 的  $C_{gs}=20fF$ ,

$C_{gd}=5\text{fF}$ 。

$$\text{解: } g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}} = \frac{2 \times 100 \times 10^{-6}}{0.25} = 0.8\text{mS}$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} = \frac{0.8 \times 10^{-3}}{2\pi \times (20+5) \times 10^{-15}} = 5.09 \times 10^9 = 5.09\text{GHz}$$

3.50 一个 MOS 共源放大器的等效电路如图题 3.42 所示, 分析其高频响应。在这个设计中,  $R_{sig} = 1\text{M}\Omega$ ,  $R_{in} = 5\text{M}\Omega$ ,  $R'_L = 100\text{k}\Omega$ ,  $C_{gs} = 0.2\text{pF}$ ,  $C_{gd} = 0.1\text{pF}$ ,  $g_m = 0.3\text{mA/V}$ 。试估算中频增益和 3dB 频率。



题图 3.42

**解:** 共源放大电路高频响应分析引入密勒等效方法

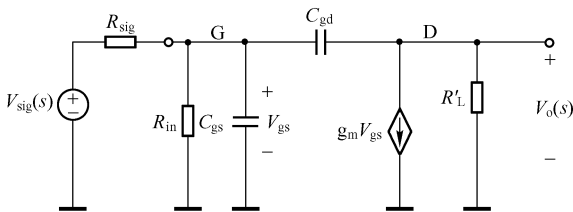
$$A_M = \frac{-g_m R'_L R_{in}}{R_{sig} + R_{in}} = \frac{-0.3 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^3 \times 5 \times 10^6}{(1+5) \times 10^6} = -25$$

$$\text{等效电容 } C_{eq} = (1 + g_m R'_L) C_{gd} = 31 \times 0.5 = 15.5\text{pF}$$

$$C_{in} = C_{eq} + C_{gs} = 15.5 + 2 = 17.5\text{pF}$$

$$3\text{dB 频率 } f_H = \frac{1}{2\pi \cdot \frac{1}{R_{sig} \parallel R_{in} \cdot C_{in}}} = \frac{1}{2\pi \cdot \frac{1}{(5 \parallel 1) \times 10^6 \times 17.5 \times 10^{-12}}} = 11\text{kHz}$$

3.51 放大器的模型如图题 3.43 所示, 已知  $g_m = 5\text{mA/V}$ ,  $R_{sig} = 150\text{k}\Omega$ ,  $R_{in} = 0.65\text{M}\Omega$ ,  $R'_L = 10\text{k}\Omega$ ,  $C_{gs} = 2\text{pF}$ ,  $C_{gd} = 0.5\text{pF}$ 。电路中还有一个输出引线电容为  $3\text{pF}$ 。试求对应的中频电压增益、开路时间常数和 3dB 频率的估计值。



图题 3.43

$$\text{解: } 1. A_{vM} = -g_m R'_L \frac{R_{in}}{R_{sig} + R_{in}} = -5 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^3 \frac{0.65 \times 10^6}{150 \times 10^3 + 0.65 \times 10^6} = -40.6$$

2. 由于有 3 个电容  $C_{gs}$ 、 $C_{gd}$  和  $C_L$ , 故有 3 个对应的开路时间常数

(a)  $C_{gs}$  对应的等效电阻  $R_{eq1} = R_{sig} \parallel R_{in} = 122\text{k}\Omega$

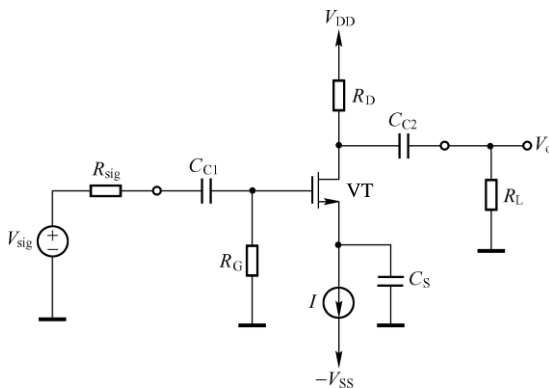
$$\tau_{gs} = C_{gs} \cdot R_{eq1} = 2 \times 10^{-12} \times 122 \times 10^3 = 244 \times 10^{-9} = 0.244 \times 10^{-6}\text{s}$$

(b)  $C_L$  对应的等效电阻  $R_{eq2} = R'_L$

$$\tau_L = 3 \times 10^{-12} \times 10 \times 10^4 = 0.3 \times 10^{-6} \text{s}$$

3.52 一个分立 MOSFET 共源放大器如图题 3.44 所示, 图中  $R_G = 2\text{M}\Omega$ ,  $g_m = 4\text{mA/V}$ ,  $r_o = 100\text{k}\Omega$ ,  $R_D = 10\text{k}\Omega$ ,  $C_{gs} = 2\text{pF}$ ,  $C_{gd} = 0.5\text{pF}$ 。该放大器由内阻为  $500\text{k}\Omega$  的电压源激励, 并连接到一个  $10\text{k}\Omega$  的负载。求:

- (1) 总中频增益  $A_M$ ;
- (2) 上限 3dB 频率  $f_H$ 。



图题 3.44

解: 1.  $A_{VMS} = \frac{V_o}{V_{sig}} = -g_m R_D \parallel R_L \parallel r_o \cdot \frac{R_G}{R_{sig} + R_G} = \frac{-4 \times 10^{-3} (10 \parallel 10 \parallel 100) \times 10^3 \times 2 \times 10^6}{500 + 2000} = -16.0$

2. 根据密勒等效的方法

$$C_{eq} = C_{gd}(1 + g_m R'_L) = 0.5 \times 21 \times 10^{-12} = 10.5\text{pF}$$

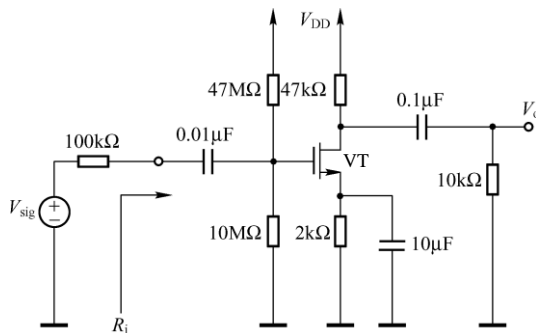
$$C_{in} = C_{eq} + C_{gs} = 12.5\text{pF}$$

$$R_{eq} = R_G \parallel R_{sig} = \frac{2 \times 0.5}{2.5} \times 10^6 = 400\text{k}\Omega$$

$$\omega_H = \frac{1}{R_{eq} C_{in}} = \frac{1}{400 \times 10^3 \times 12.5 \times 10^{-12}} = 0.2 \times 10^6 \text{rad/s}$$

$$\therefore f_H = \frac{\omega_H}{2\pi} = 31.8\text{kHz}$$

3.53 在图题 3.45 所示的分立 CS 放大器电路中, NMOS 晶体管被偏置在  $g_m = 1\text{mA/V}$  上。求  $A_M$ 、 $f_{p1}$ 、 $f_{p2}$ 、 $f_{p3}$  和  $f_L$ 。



图题 3.45

解:  $R'_L = R_D \parallel R_L = 8.25\text{k}\Omega$ ,  $g_m = 1\text{mA/V}$ ,  $R_G = R_{G1} \parallel R_{G2} = 8.25\text{M}\Omega$

$$A_{VM} = -g_m R'_L \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} = -8.15\text{V/V}$$

输入耦合电容引起的极点频率

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi(R_{sig} + R_G)C_1} = \frac{1}{0.01 \times 10^{-6} \times 2\pi \times (100 \times 10^3 + 8.25 \times 10^6)} = 1.9\text{Hz}$$

输出耦合电容引起的极点频率

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi(R_D + R_L)C_2} = \frac{1}{2\pi \times (47 \times 10^3 + 10 \times 10^3) \times 10^{-8}} = 27.9\text{Hz}$$

由源极旁路电容  $C_S$  引起的极点频率

$$f_{p3} = \frac{1}{\left(\frac{1}{g_m} \parallel R_S\right) C_S \cdot 2\pi} = \frac{1}{(1 \times 10^3 \parallel 2 \times 10^3) \times 2\pi \times 10 \times 10^{-6}} = 23.9\text{Hz}$$

由于  $f_{p2}$  和  $f_{p3}$  相近, 不适合用主极点法估算而用修正的公式。

$$\therefore f_L = 1.1 \sqrt{f_{p2}^2 + f_{p3}^2} = 40.4\text{Hz}$$

### 3.6 结型场效应管简介

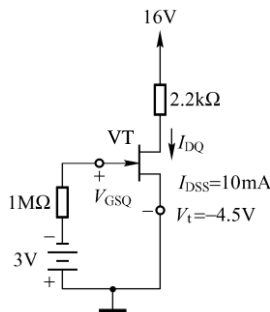
3.54 用欧姆表的两测试棒分别连接 JFET 的漏极和源极, 测得阻值为  $R_1$ , 然后将红棒 (接负电压) 同时与栅极相连, 发现欧姆表上阻值仍近似为  $R_1$ , 再将黑棒 (接正电压) 同时与栅极相连, 得欧姆表上阻值为  $R_2$ , 且  $R_2 \gg R_1$ , 试确定该场效应管为 N 沟道还是 P 沟道。

解: 该场效应管为 P 沟道:  $v_{GS} < 0$  时, 低阻抗;  $v_{GS} > 0$  时, 高阻抗; 显然  $v_{GS} < 0$  时, 管子导通, 可知其为 P 沟道。

3.55 对于图题 3.46 所示的固定偏置电路:

(1) 用数学方法确定  $I_{DQ}$  和  $V_{GSQ}$ ;

(2) 求  $V_S$ 、 $V_D$ 、 $V_G$  的值



图题 3.46

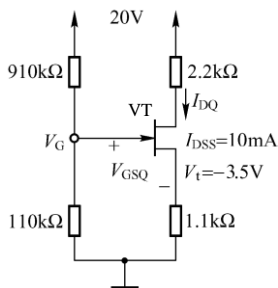
解: (1)  $V_{GS} = -3\text{V}$

假设该 JFET 工作在饱和区, 则有  $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_t}\right)^2 \Rightarrow I_D = 1.1\text{mA}$

(2)  $V_S = 0\text{V}$ ,  $V_D = 16 - 2.2 \times I_D = 13.58\text{V}$ ,  $V_G = -3\text{V}$

3.56 对于图题 3.47 所示的分压偏置电路, 求:

- (1)  $I_D$ ;  
 (2)  $V_S$  和  $V_{DS}$ ;  
 (3)  $V_G$  和  $V_{GS}$ 。



图题 3.47

**解：**假设其工作在饱和区

$$V_G = 20 \times \frac{110k}{110k + 910k} = 2.16V, \quad V_{GS} = V_G - V_S = 2.16 - 1.1k\Omega \times I_D$$

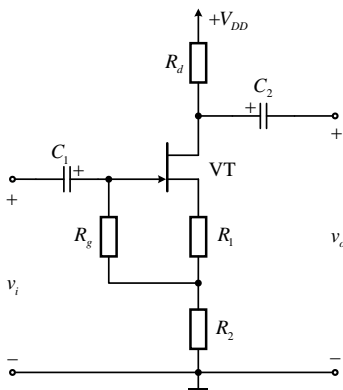
$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_t} \right)^2 \Rightarrow I_D = 3.31mA \text{ 或 } 8.01mA \text{ (舍去)}$$

$$\text{则 } V_{GS} = V_G - V_S = 2.16 - 1.1I_D = -1.48V, \text{ 则 } V_S = 1.1I_D = 3.64V$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = (20 - 2.2I_D) - 3.64 = 9.07V$$

3.57 在图题 3.48 所示的场效应管放大电路中，设  $V_{GSQ} = -2V$ ， $V_{DD} = 20V$ ， $R_g = 1M\Omega$ ， $R_d = 10k\Omega$ ；管子参数： $I_{DSS} = 4mA$ ， $V_P = -4V$ 。

求：(1) 电阻  $R_1$  和静态电流  $I_{DQ}$ ；(2) 保证静态  $V_{DSQ} = 4V$  时  $R_2$  的值；(3)  $A_v$ 。



图题 3.48

**解：**(1) 由转移曲线方程  $i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$  得

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P} \right)^2 = 4 \times \left( 1 - \frac{-2}{-4} \right)^2 = 1mA,$$

$$\text{由 } V_{GSQ} = -I_{DQ}R_1 \text{ 得 } R_1 = \frac{-V_{GSQ}}{I_{DQ}} = 2k\Omega$$

(2) 由

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}(R_d + R_1 + R_2)$$



得

$$R_2 = \frac{V_{DD} - V_{DSQ}}{I_{DQ}} - R_d - R_1 = \frac{20 - 4}{1} - 10 - 2 = 4k\Omega$$

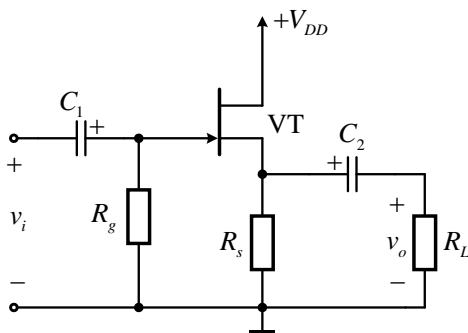
(3)

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P}\right) = -\frac{2 \times 4}{4} \left(1 - \frac{-2}{-4}\right) = 1mA/V$$

$$A_v = -\frac{g_m R_d}{1 + g_m(R_1 + R_2)} = -\frac{1 \times 10}{1 + 1 \times (2 + 4)} \approx -1.4$$

3.58 在图题 3.49 所示的场效应管放大电路中, 设  $V_P = -4V$ ,  $I_{DSS} = 2mA$ ,  $V_{DD} = 15V$ ,  $R_g = 1M\Omega$ ,  $R_s = 8k\Omega$ ,  $R_L = 1M\Omega$ 。

试计算: (1) 静态工作点; (2)  $R_i$  和  $R_o$ ; (3)  $A_v$ 。



图题 3.49

解: (1)

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P}\right)^2 = 2 \times \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{-4}\right)^2$$

$$V_{GSQ} = -I_{DQ} R_s = -I_{DQ} \times 8$$

解方程得  $I_{DQ1} \approx 0.82mA$ ,  $I_{DQ2} \approx 0.31mA$

$$V_{GSQ1} = -I_{DQ1} R_s = -0.82 \times 8 = -6.56V \text{ (舍去)}$$

$$V_{GSQ2} = -I_{DQ2} R_s = -0.31 \times 8 = -2.48V$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_s = 15 - 0.31 \times 8 = 12.52V$$

所以静态工作点为  $I_{DQ} \approx 0.31mA$ ,  $V_{GSQ} = -2.48V$ ,  $V_{DSQ} = 12.52V$ 。

(2)

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P}\right) = -\frac{2 \times 2}{-4} \left(1 - \frac{-2.48}{-4}\right) \approx 0.38mA/V$$

$$R_i = R_g = 1M\Omega$$

$$R_o = R_s // \frac{1}{g_m} \approx 1.98k\Omega$$

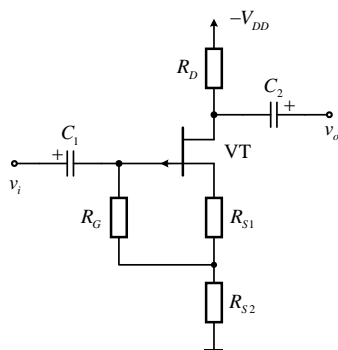
(3)

$$A_v = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s} = \frac{0.38 \times 8}{1 + 0.38 \times 8} \approx 0.75$$

3.59 电路如图题 3.50 所示, 其中  $-V_{DD} = -20V$ ,  $R_G = 1M\Omega$ ,  $R_D = 10k\Omega$ ,  $V_{GSQ} = 2V$ , 管子的  $I_{DSS} = -2mA$ ,  $V_T = 4V$ , 各电容器的电容量均足够大。试求:

(a)  $I_{DQ}$  及  $R_{s1}$  的数值;

(b) 为使管子能工作于恒流区,  $R_{s2}$  不能超过什么值。



图题 3.50

解:

(a)  $I_{DQ} = -0.5\text{mA}$ ,  $R_{S1} = 4\text{k}\Omega$

(b)  $R_{S2} < 22\text{k}\Omega$