

3.1 某电压放大器的输入电阻为 $10\text{k}\Omega$ ，输出电阻为 200Ω ，增益为 1000V/V 。它被连接在内阻为 $100\text{k}\Omega$ 、开路电压为 10mV 的信号源和 100Ω 负载之间，则

- (1) 输出电压为多少？
- (2) 从源到负载的电压增益为多少？
- (3) 从放大器输入端到负载的电压增益为多少？

(1) 输出电压为

$$v_o = A_v v_i = (A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}) (v_{sig} \frac{R_i}{R_i + R_{sig}}) = (1000 \times \frac{100}{100 + 200}) (10\text{mV} \times \frac{10\text{k}}{100\text{k} + 10\text{k}}) = 0.303\text{V}$$

$$(2) A_{vs} = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o} = 30.3\text{V/V} \text{ 或 } A_{vs} = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{0.303}{0.01} = 30.3\text{V/V}$$

$$(3) A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_L}{R_o + R_L} A_{vo} = 333.3\text{V/V}$$

3.2、某电流放大器有 $R_i = 1\text{k}\Omega$ ， $R_o = 10\text{k}\Omega$ ， $A_{is} = 100\text{A/A}$ ，它被连接在电阻为 $100\text{k}\Omega$ 的 100mV 信号源和 $1\text{k}\Omega$ 负载之间。整个放大电路的电流增益、电压增益和功率增益分别为多少？

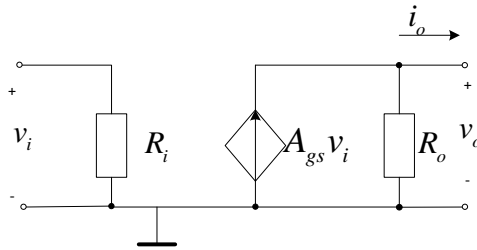
(1) 电流增益为

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{A_{is} i_i R_o / (R_o + R_L)}{i_i} = 100 \times \frac{10\text{k}}{10\text{k} + 1\text{k}} = 90.9\text{A/A} \text{ 或 } 20\lg A_i = 39.17\text{dB}$$

$$(2) \text{电压增益为 } A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o R_L}{i_i R_i} = A_i \frac{R_L}{R_i} = 90.9\text{V/V} \text{ 或 } 20\lg A_v = 39.17\text{dB}$$

$$(3) \text{功率增益为 } A_p = A_i A_v = 8262.81\text{W/W} \text{ 或 } 10\lg A_p = 39.17\text{dB}$$

3.3 如题图 3.1 所示，某互导放大器的 $R_i = 2\text{k}\Omega$ ， $A_{gs} = 40\text{mA/V}$ ， $R_o = 20\text{k}\Omega$ ，它由电阻为 $2\text{k}\Omega$ 的电压源激励，并接有 $1\text{k}\Omega$ 的电阻负载，求实际得到的电压增益。

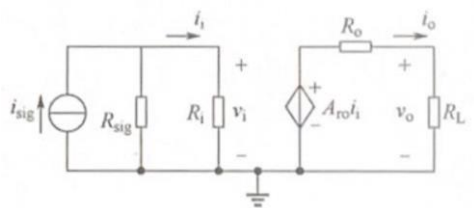


题图 3.1

$$\text{解: } A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_{gs} v_i (R_o // R_L)}{v_i} = A_{gs} (R_o // R_L) = 38.095\text{V/V}$$

3.4 如题图 3.2 所示，某互阻放大器由内阻为 R_{sig} 的电流信号源 i_{sig} 激励，输出端接 R_L 的负载

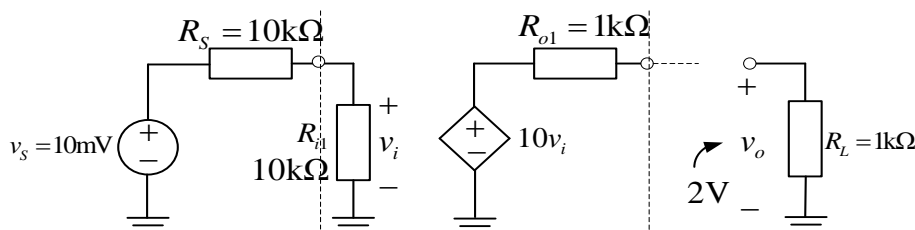
$$\text{电阻。证明下式给出的总增益: } \frac{v_o}{i_{sig}} = A_{ro} \frac{R_{sig}}{R_{sig} + R_i} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$



题图 3.2

$$\text{解: } \frac{v_o}{i_{sig}} = \frac{\frac{A_{ro}i_i}{R_o + R_L} R_L}{i_i \frac{R_{sig} + R_i}{R_{sig}}} = A_{ro} \frac{R_{sig}}{R_{sig} + R_i} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

3.5 如题图 3.3 所示，设计者可以利用输入电阻为 $10\text{k}\Omega$ 、输出电阻为 $1\text{k}\Omega$ 、开路电压增益为 10 的电压放大器进行电路设计。信号源的内阻为 $10\text{k}\Omega$ ，提供 RMS 值为 10mV 的信号。现在要求至少能够向 $1\text{k}\Omega$ 的负载提供 RMS 值为 2V 的信号，需要多少级放大器？实际得到的输出电压为多少？



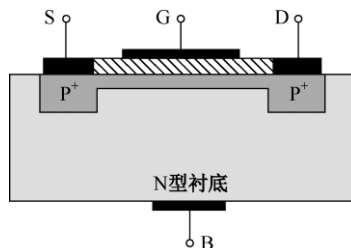
$$\text{解: 理论: } \frac{v_o}{v_s} = \frac{2\text{V}}{10\text{mV}} = 200\text{V/V}$$

$$\text{实际: } \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_{i1}}{v_s} \frac{v_{i2}}{v_{i1}} \frac{v_{i3}}{v_{i2}} \frac{v_o}{v_{i3}} = \frac{R_{i1}}{R_{i1} + R_s} \times 10 \times \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_{o1}} \times 10 \times \frac{R_{i3}}{R_{i3} + R_{o2}} \times 10 \times \frac{R_L}{R_L + R_{o3}} = 206.6\text{V/V}$$

$v_o = v_s \times 206.6 = 2.066\text{V/V}$, 至少需要 3 级放大器。

3.6 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 ($V_{DS} < 0\text{V}$, $V_{GS} < V_t$)，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。

解：耗尽型场效应管与增强型场效应管的主要区别在于沟道是否提前做好，增强型场效应管需要外加电压形成沟道，而耗尽型场效应管的沟道在加工器件时已提前加工好，可以通过外加电压关闭沟道或加宽沟道。



P 沟道增强型 MOS 场效应管如图所示，其沟道如图中的阴影部分，其电流方向是由源极流向漏极，，当 v_{GS} 增大为一定值时，导电沟道消失，此时负的 v_{GS} 称为夹断电压，也用 V_t 表示。

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

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

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。

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

(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。

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

(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

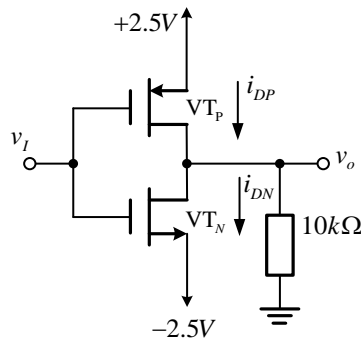
$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 = 4\text{mA}$$

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

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

3.9 如图题 3.4 所示的 NMOS 和 PMOS 晶体管有 $V_m = -V_{tp} = 1\text{V}$ ，

$k'_n(W_n/L_n) = k'_p(W_p/L_p) = 1\text{mA}/\text{V}^2$ 。假设两个器件的 $\lambda = 0$ ，求当 $V_i = 0\text{V}$ ， $+2.5\text{V}$ 及 -2.5V 时的漏极电流 i_{DN} 和 i_{DP} 以及电压 V_o 。

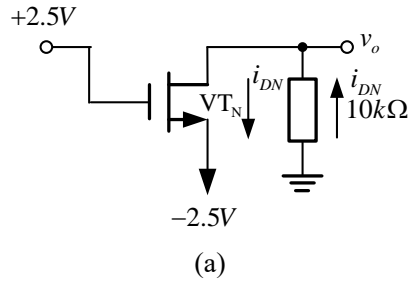


图题 3.4

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

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

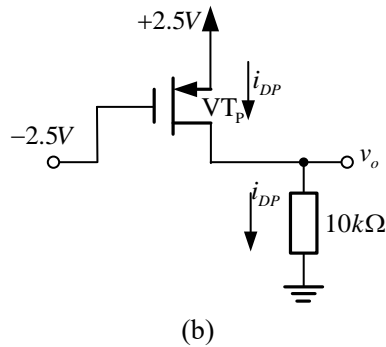
(2) 当 $V_i = 2.5\text{V}$ 时， VT_p 截止， $i_{DP} = 0$ ，电路如图 a 所示



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

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 $V_i = -2.5V$ 时, VT_N 截止, $i_{DN} = 0$, 电路如图 b 所示。



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

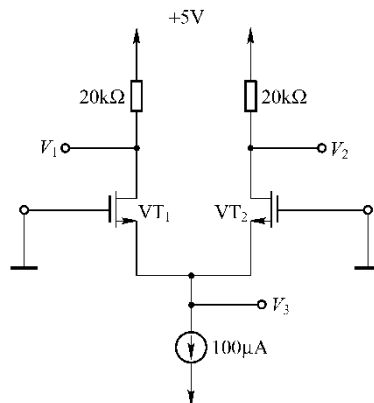
$$\therefore I_{DN} = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) V_{DS} = 1m \times [-2.5 - 2.5 - (-1)](V_o - 2.5)$$

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

3.10 在图题 3.5 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 3.5

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:

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS} = 1.22V$$

$$\therefore V_3 = V_s = -1.22V$$

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

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

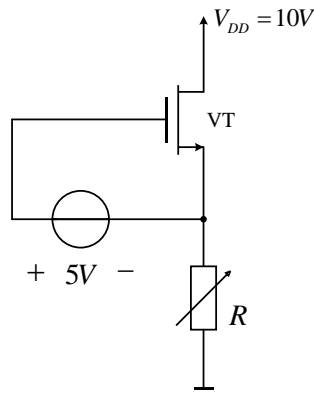
$$\text{则有 } V_1 = 5V - I_{D1} \times 20k\Omega = 3.8V, \quad V_2 = 5V - I_{D2} \times 20k\Omega = 4.2V$$

$\therefore V_{GD1} = -3.8V < V_t, \quad \therefore V_{GD2} = -4.2V < V_t$ 可得该电路两管工作在饱和区。则有:

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

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

3.11 电路如题图 3.6 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。



题图 3.6

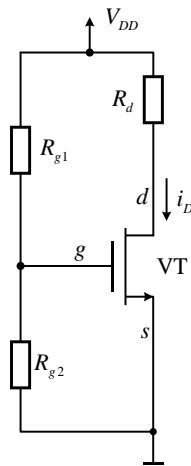
解: 为保持器件工作在饱和模式,

$$V_{GD} = V_G - V_D = 5 + I_D R - 10 \leq V_t,$$

故 $R \leq 1k\Omega$ 。

3.12 电路如题图 3.7 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} 。



解:

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

假设场效应管工作在饱和区, 则漏极电流为

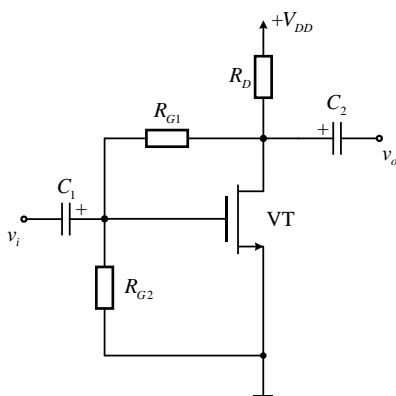
$$I_D = K_n(V_{GS} - V_T)^2 = 0.1mA$$

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, 所以假设正确的。

3.13 电路如图题 3.8 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 3.8

解: 当 $V_{GS} = 5V$ 时, $I_D = 0.8mA$ 时, 由 $I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$ 可得

$$\frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} = 0.2mA / V^2$$

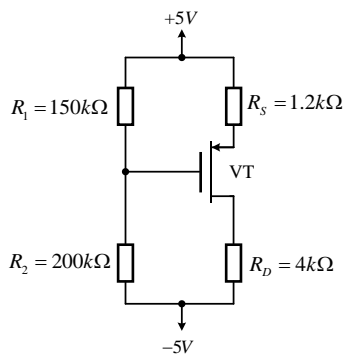
由图可得 $V_{GS} = V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} (V_{DD} - I_D R_D)$

假设 MOS 管工作在饱和区, 则

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

联立可得 $I_D = 1.8mA$, 则 $V_{DS} = 12V$, $V_{GS} = 6V$

3.14 如图题 3.9 所示, 晶体管参数为 $V_t = -1V$, $k'_p W/L = 25mA/V^2$, 计算 V_{SG} , I_D , V_{SD} 。



图题 3.9

解: 假设场效应管工作在饱和区

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

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

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

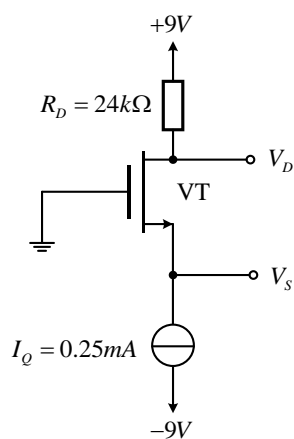
$$\text{解得 } V_{SG} = 3.1V, \quad V_{SG} = -4.38V \quad (\text{舍去})$$

$$\therefore I_D = 1mA$$

$$V_D = -5 + I_D R_D = -1V$$

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

3.15 如题图 3.10 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 3.10

解:

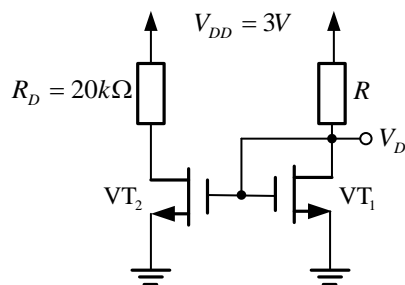
$$V_D = 9V - I_D R_D = 3V$$

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

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

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

3.16 (设计题) 如图题 3.11 所示电路 VT_1 的电流 $I_{D1} = 80\mu A$ 。(1) 求所需要 R 值和直流电压 V_D 。假设 NMOS 晶体管的 $V_t = 0.6V$, $\mu_n C_{ox} = 200\mu A/V^2$, $L = 0.8\mu m$, $W = 4\mu m$, $\lambda = 0$ 。(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 3.11

解:

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

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

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

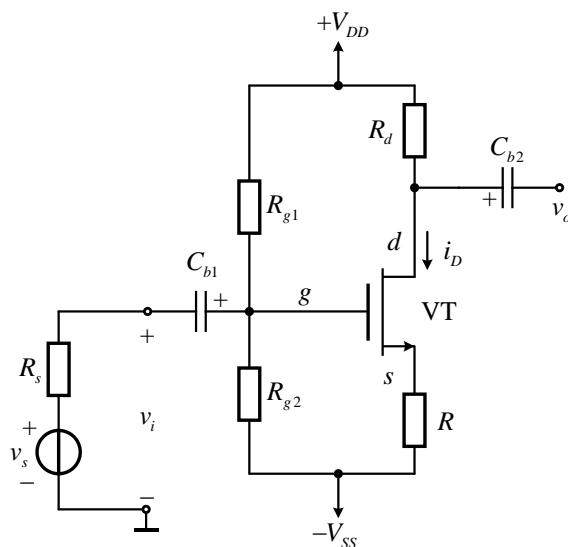
$$R = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{3-1}{80\mu} = 25k\Omega$$

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

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

3.17 (设计题) 电路如图题 3.12 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 3.12

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

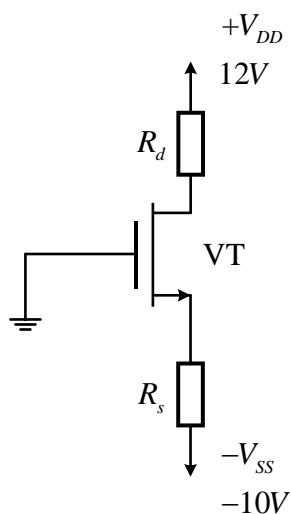
$$R_{g2} = 45k\Omega, R_{g1} = 155k\Omega$$

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

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

3.18 (设计题) 电路如图题 3.13 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 3.13

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

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

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

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

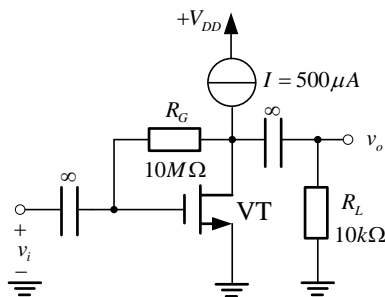
$$\text{又 } I_{DQ} = K_n(V_{GSQ} - V_{th})^2, \text{ 代入得 } 0.64 = 0.25(V_{GSQ} - 2)^2$$

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

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

3.19 在如图题 3.14 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 3.14

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

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

若电流增加到 1 mA ，则 $I_D' = 1 \text{ mA}$ ，

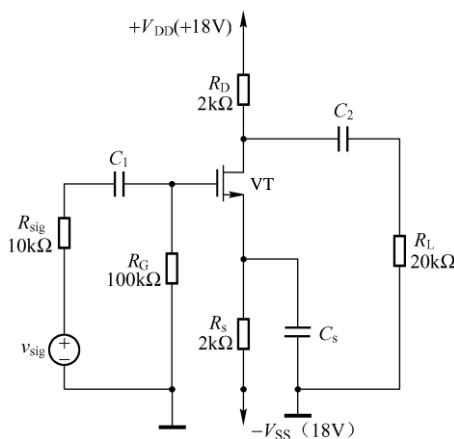
$$\therefore V_{GS}' = \sqrt{\frac{I_D'}{I_D}} (V_{GS} - V_t) + V_t = 2.456 \text{ V}, \quad \text{即 } V_D' = V_G' = 2.456 \text{ V}$$

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

3.20 场效应管放大器如图题 3.15 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 3.15

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

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

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

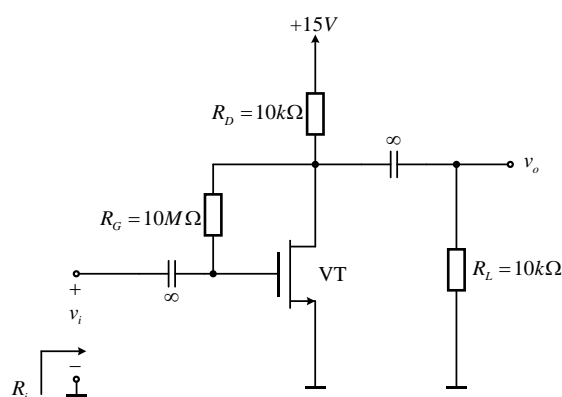
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (R_D // R_L) = -4.36$$

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

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

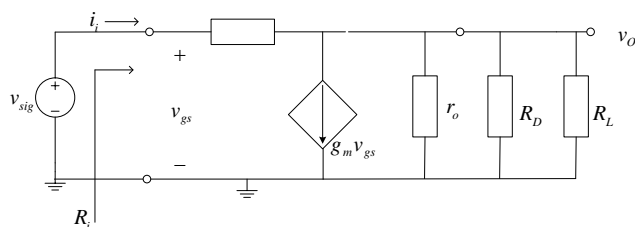
$$R_o \approx R_D = 2k\Omega$$

3.21 如图题 3.16 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 $V_t = 1.5V$, $k'_n (W/L) = 0.25mA/V^2$, $I_A = 50A$ 。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 3.16

解:



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

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

$$\text{则 } V_{GS} = V_D = 4.4V$$

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

因 $R_G = 10M\Omega$, 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),

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

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

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，

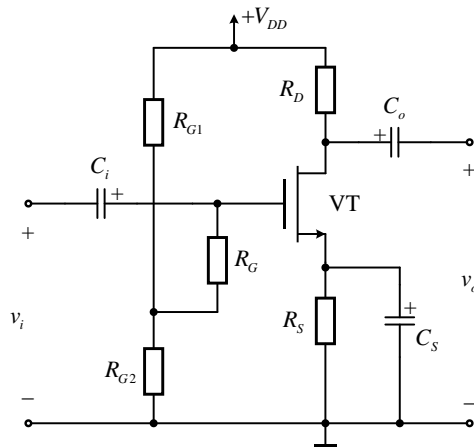
$$\text{即 } v_{DS} \geq v_{GS} - V_t, \quad \text{即 } v_{DS(\min)} = v_{GS(\max)} - V_t$$

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

3.22 电路如图题 3.17 所示, $V_{DD} = 18V$, 所用场效应管为 N 沟道耗尽型, 其跨导 $g_m = 2mA/V$ 。

电路参数 $R_{G1} = 2.2M\Omega$, $R_{G2} = 51M\Omega$, $R_G = 10M\Omega$, $R_S = 2k\Omega$, $R_D = 33k\Omega$ 。试求:

- (1) 电压增益 A_V 。
- (2) 若接上负载电阻 $R_L = 100k\Omega$, 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 3.17

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

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

输出电阻

$$r_o = R_D = 33k\Omega$$

(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

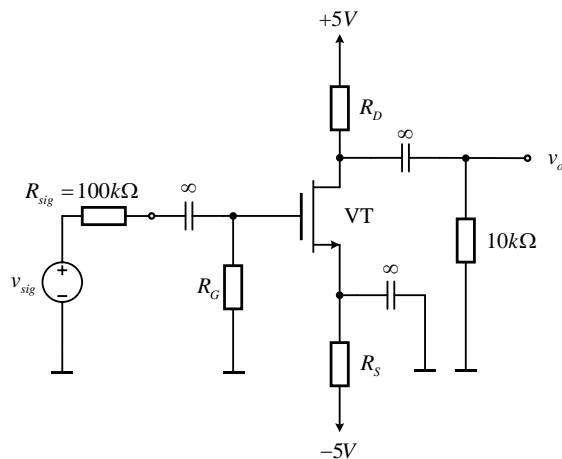
$$A_V' = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m (R_D // R_L)}{1 + g_m R_S} = \frac{A_V}{1 + g_m R_S} = \frac{A_V}{5}$$

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

3.23 (设计题) 图题 3.18 中 MOSFET 有 $V_t = 1V$, $k_n'(W/L) = 1mA/V^2$ 。

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

(2) 若 $V_A = 40V$, 求 v_o / v_{sig} 。



图题 3.18

解: (1) 假设 MOSFET 工作在饱和区

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

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

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

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

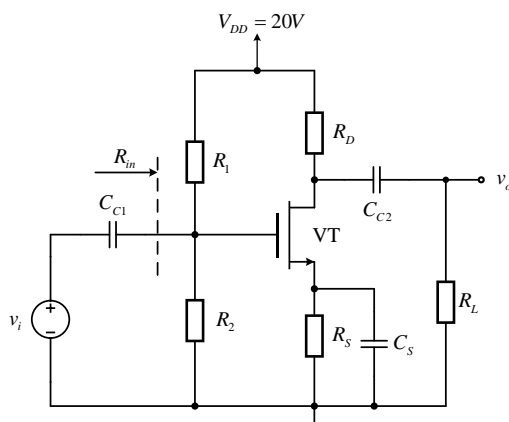
由于漏级最大的信号幅度为 $\pm 2\text{V}$, 故 $V_D \geq 1\text{V}$ 。

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

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

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

3.24 (设计题) 如图题 3.24 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 3.24

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

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

$$\text{取 } R_D = R_S = 5k\Omega$$

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

$$\Rightarrow g_m = 2.5mS$$

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

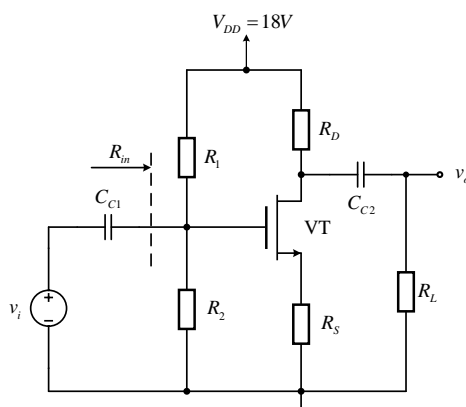
$$I_{DQ} = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow 1mA = \frac{1}{2} \times 25 (V_{GS} - 2V)^2 \Rightarrow V_{GS} = 2.28V$$

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

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

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

3.25 (设计题) 如图题 3.20 所示, 已知静态工作点为 $I_{DQ} = 6mA$, $V_{GSQ} = 2.8V$, $V_{DSQ} = 10V$, $g_m = 2.2mA/V$, $R_L = 1k\Omega$, $A_v = -1$, $R_i = 100k\Omega$ 。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 3.20

解:

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

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

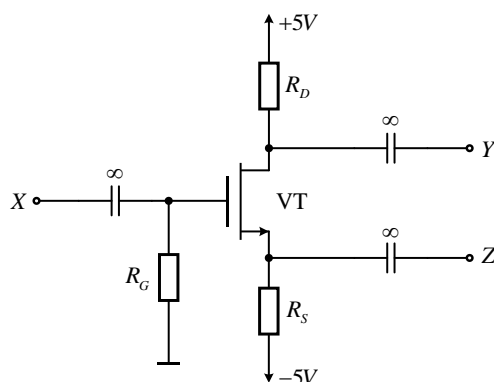
$$\begin{cases} I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \\ g_m = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) \end{cases} \Rightarrow I_D = \frac{g_m^2}{2 \left(k'_n \frac{W}{L} \right)} \Rightarrow k'_n \frac{W}{L} = \frac{g_m^2}{2I_D} = 0.4mA/V^2$$

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

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

3.26 图题 3.21 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 3.21

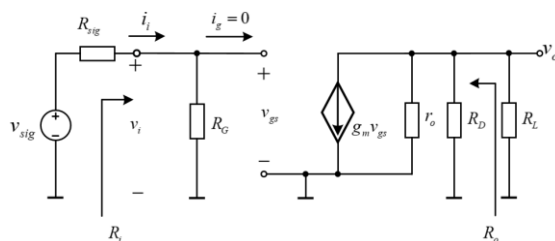
解: (1) 该电路工作在饱和区, 则有

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

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

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

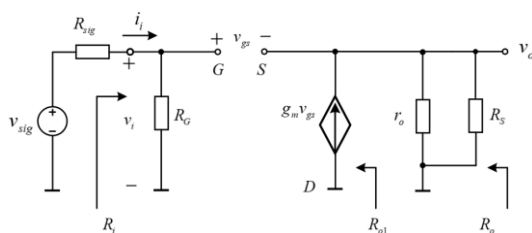
(3) 为共源电路, 交流小信号等效电路如下:



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

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

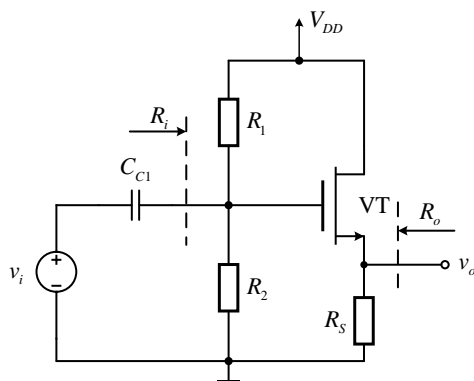
(4)、为共漏放大器, 等效电路如下



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

3.27 (设计题) 图题 3.22 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 3.22

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

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

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

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

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

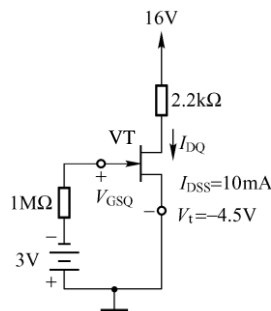
$$R_o \approx \frac{1}{g_m} = 1.414k\Omega$$

3.28 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。

3.29 对于图题 3.23 所示的固定偏置电路:

- (1) 确定 I_{DQ} 和 V_{GSQ} ;
- (2) 求 V_S 、 V_D 、 V_G 的值



图题 3.23

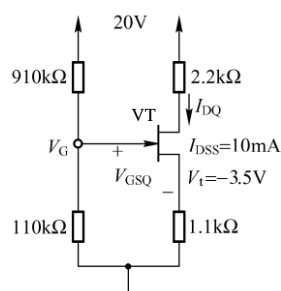
解: (1) $V_{GS} = -3V$

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

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

3.30 对于图题 3.24 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 3.24

解: 假设其工作在饱和区

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

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

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

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