

第3章

场效应管及其放大电路

3.1 主要内容

3.1.1 结型场效应管

场效应管(FET)是一种电压控制型器件,它是利用电场效应来控制其电流的大小,从而实现放大。场效应管的种类很多,根据基本结构不同,主要分为两大类:结型场效应管(JFET)和金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)。结型场效应管简称 JFET,根据制造材料的不同又可分为 N 沟道和 P 沟道两种,它们都具有三个电极:栅极(G)、源极(S)和漏极(D),分别与三极管的基极、发射极和集电极相对应,如图 3.1 所示。在 JFET 中,源极和漏极是可以互换的。为实现场效应管栅源电压对漏极电流的控制作用,结型场效应管在工作时,栅极和源极之间的 PN 结必须反向偏置。

N 沟道 JFET 栅极、沟道之间的 PN 结是反向偏置的,因此,其 $i_G \approx 0$,输入电阻的阻值很高;JFET 的电流 i_D 受 u_{GS} 控制;预夹断前, i_D 与 u_{DS} 呈近似线性关系,预夹断后, i_D 趋于饱和。

P 沟道 JFET 工作时,其电源极性与 N 沟道 JFET 的电源极性相反。

JFET 的输出特性用 $i_D = f(u_{DS})|_{u_{GS}=\text{常数}}$ 表示,如果 FET 栅极与源极之间接一可调负电源,由于栅源

电压越负,耗尽层越宽,沟道电阻就越大,相应的 i_D 就越小。因此,改变栅源电压可得一族曲线,如图 3.2 所示。

JFET 工作区域分为三个区:

截止区(夹断区):当 $u_{GS} < U_{GS(\text{off})}$ 时,导电沟道被夹断, $i_D = 0$ 称为截止区。

可变电阻区:又称非饱和区,是预夹断前的区域。此时沟道尚未出现预夹断,管子可以看做一个由电压控制的可变电阻。

饱和区:又称恒流区或放大区,是预夹断后的区域,管子工作在局部出现预夹断的状态,漏极电流 i_D 几乎不随 u_{DS} 变化,主要由 u_{GS} 决定。在此区域,场效应管可以看做一个恒流源。利用场效应管做放大管时,管子在此区域工作。

当 u_{DS} 增大到一定程度时,栅漏极间 PN 结发生雪崩击穿, i_D 迅速增大。如果不加限制,

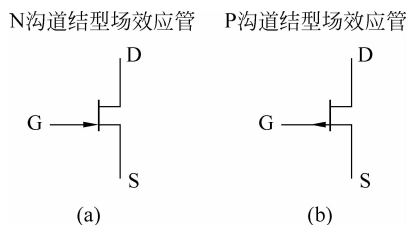


图 3.1 结型场效应管符号

管子将会电击穿。管子不允许在此区域工作。

电流控制器件 BJT 的工作性能,是通过它的输入特性和输出特性及一些参数来反映的。FET 是电压控制器件,它除了用输出特性及一些参数来描述其性能外,由于栅极输入端基本上没有电流,故讨论它的输入特性是没有意义的。JFET 的转移特性是指在一定漏源电压 u_{DS} 下,栅源电压 u_{GS} 对漏极电流 i_D 的控制特性,用 $i_D = f(u_{GS})|_{u_{DS}=\text{常数}}$ 表示,它反映了场效应管栅源电压对漏极电流的控制作用,如图 3.3 所示。当 $u_{GS} = 0$ 时,导电沟道电阻最小, i_D 最大; 当 $u_{GS} = U_{GS(\text{off})}$ 时,导电沟道被完全夹断,沟道电阻最大,此时 $i_D = 0$ 。

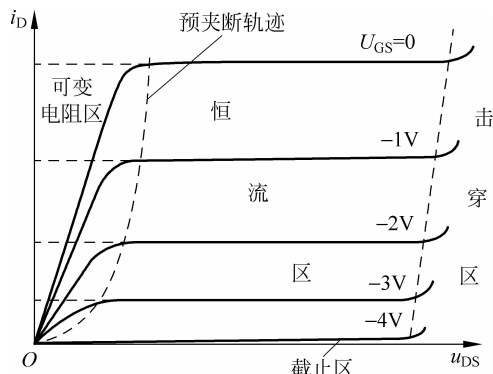


图 3.2 N 沟道结型场效应管的输出特性曲线

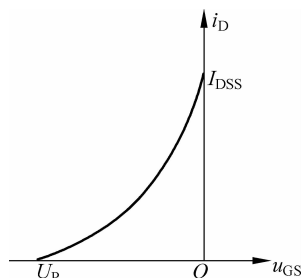


图 3.3 N 沟道结型场效应管的转移特性曲线

P 沟道结型场效应管与 N 沟道结型场效应管相比,除在结构上各部分半导体的类型相反,外电路所加的 u_{GS} 、 u_{DS} 的极性相反外,在特性和工作原理方面是相同的,只是电压的极性和电流的方向相反。

3.1.2 绝缘栅型场效应管

绝缘栅型场效应管用 MOSFET 表示。绝缘栅型场效应管分为增强型和耗尽型两种,每一种又包括 N 沟道和 P 沟道两种类型。增强型和耗尽型的区别是:当 $u_{GS} = 0$ 时,存在导电沟道的称为耗尽型,不存在导电沟道的称为增强型。

MOSFET 的输出特性是指在栅源电压 u_{GS} 一定的条件下,漏极电流 i_D 与漏源电压 u_{DS} 之间的关系如图 3.4 所示。与结型场效应管相似,MOSFET 有三个工作区域:可变电阻区、饱和区、截止区。

N 沟道增强型 MOSFET 的工作区域如图 3.4(a)所示。

截止区:当 $u_{GS} < U_T$ 时,导电沟道尚未形成, $i_D = 0$,为截止工作状态。

可变电阻区:当 $u_{DS} \leq (u_{GS} - U_T)$ 时, u_{DS} 较小。

饱和区(又称恒流区或放大区):当 $u_{GS} > U_T$,且 $u_{DS} \geq (u_{GS} - U_T)$ 时,MOSFET 进入饱和区。

N 沟道耗尽型 MOSFET 可以在正或负的栅源电压下工作。N 沟道增强型 MOS 管的开启电压为 U_T 为正值,而 N 沟道耗尽型 MOS 管的夹断电压为 U_P 负值。

N 沟道耗尽型 MOSFET 的输出特性和转移特性如图 3.5 所示。

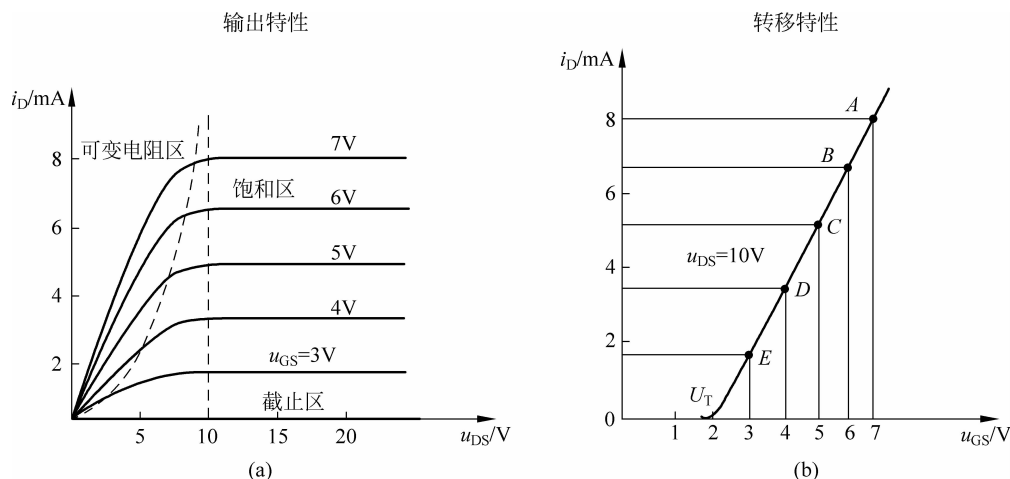


图 3.4 N 沟道增强型 MOS 管的特性

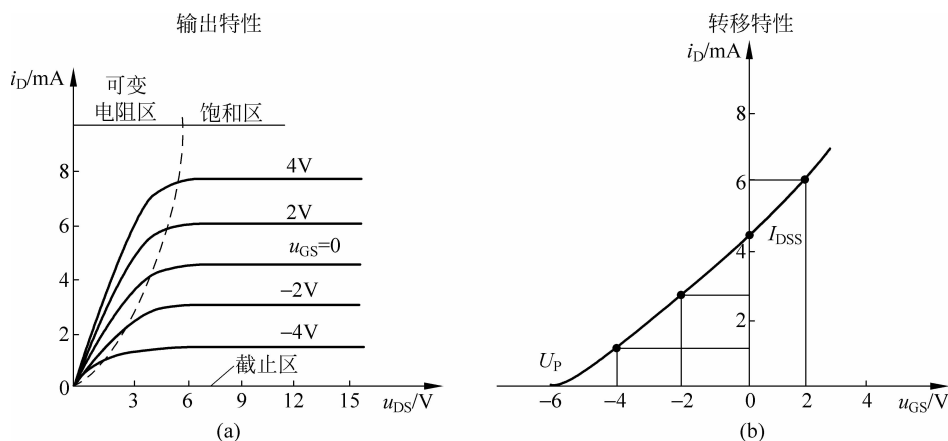


图 3.5 N 沟道耗尽型 MOS 管的特性

N 沟道耗尽型 MOS 管的工作区域同样可以分为截止区、可变电阻区和饱和区。所不同的是 N 沟道耗尽型 MOS 管的夹断电压为 U_P 负值, 而 N 沟道增强型 MOS 管的开启电压为 U_T 为正值。

P 沟道 MOSFET 工作时, 其电源极性与 N 沟道 MOSFET 的电源极性相反。与 N 沟道 MOS 管相似, P 沟道 MOS 管也有增强型和耗尽型两种。为了能正常工作, P 沟道 MOS 管外加的 u_{DS} 必须是负值, 开启电压 U_T 也是负值。而实际的电流方向为流出漏极。

3.1.3 场效应管放大电路

场效应管是一个电压控制器件, 不需要偏置电流, 需要一个合适的栅源极偏置电压 U_{GS} 。场效应管放大电路常用的偏置电路主要有两种: 自偏压电路和分压式自偏压电路(见图 3.6)。自偏压的偏置方式不适用于增强型 FET 组成的放大电路。分压式偏置方式既适用于增强型 FET, 也适用于耗尽型 FET。画出场效应管放大电路的微变等效电路可求电路

的电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。场效应管组成的三种基本放大电路,即共源极放大电路、共漏极放大电路、有共栅极放大电路,分别与晶体管的共射极放大电路、共集电极放大电路和共基极放大电路相对应。

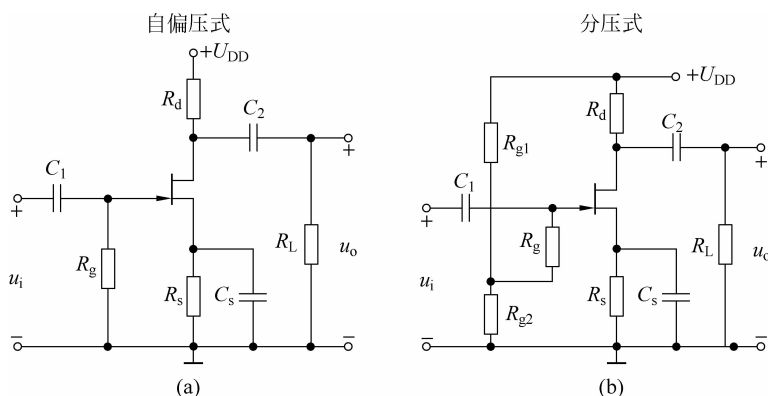


图 3.6 场效应管放大电路

求解 FET 的静态工作点时,将 i_D 与 u_{GS} 的关系式和 i_D 与 u_{DS} 的关系式联立求解, FET 工作于放大区时,所求得的 Q 点值为电路的静态工作点;否则所求得的 Q 点值没有意义。

图 3.7 为两种场效应管放大电路的微变等效电路图,由此可求电路的电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。

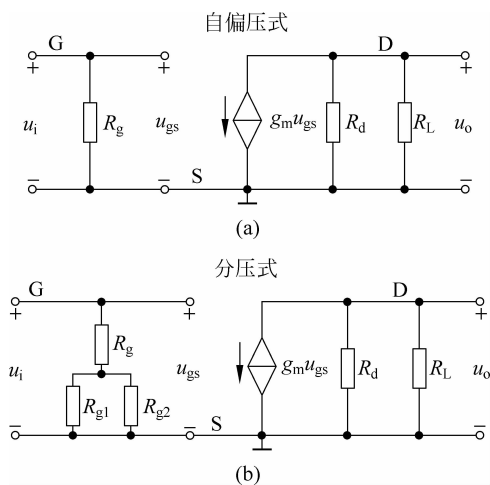


图 3.7 效应管放大电路对应的微变等效电路

3.2 基本概念自检

选择适当的答案填空

(1) 场效应管是用_____控制漏极电流的。

- (2) 结型场效应管发生预夹断后,管子_____。
- (3) 增强型 PMOS 管的开启电压_____。
- (4) 当场效应管的漏极直流电流 I_D 从 2mA 变为 4mA 时,它的低频跨导 g_m 将_____。
- (5) $U_{GS}=0$ 时,能够工作在恒流区的场效应管有_____、_____。
- (6) FET 有两种主要类型即_____和_____,FET 是利用_____来控制其电流大小的半导体器件。
- (7) 在 MOSFET 中,从导电载流子的带电极性来看,有_____管和_____管之分;而按照导电沟道形成机理不同 NMOS 管和 PMOS 管又各有_____型和_____型两种。因此,MOSFET 有四种:_____、_____、_____和_____。
- (8) 四个 FET 的转移特性分别如图 3.8 所示,其中漏极电流 i_D 的假定正方向是它的实际方向。试问它们各是哪类型的 FET?

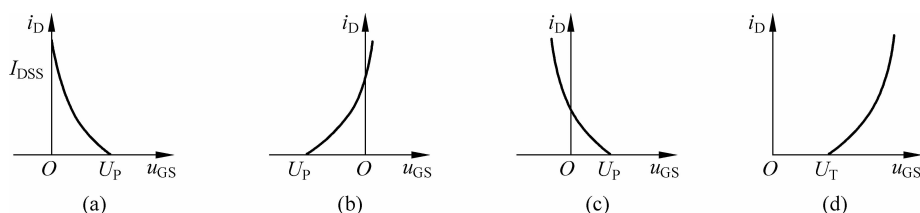


图 3.8 题(8)图

答案:

- (1) 栅源电压; (2) 进入恒流区; (3) 小于零; (4) 增大; (5) 结型管耗尽型 MOS 管; (6) MOSFET、JFET、电场效应; (7) N 沟道、P 沟道; 增强、耗尽; 增强型 N 沟道管、增强型 P 沟道管、耗尽型 N 沟道管、耗尽型 P 沟道管; (8) 图 3.8(a) 为 P 沟道 JFET; 图 3.8(b) 为 N 沟道耗尽型 FET; 图 3.8(c) 为 P 沟道耗尽型 FET; 图 3.8(d) 为 N 沟道增强型 FET。

3.3 典型例题

例 3.1 改正图 3.9 所示的各电路中的错误,使它们有可能放大正弦波电压,要求保留电路的共漏接法。

解:

对于图 3.9(a)应在源极加电阻 R_s 。

对于图 3.9(b)应在漏极加电阻 R_d 。

对于图 3.9(c)应在输入端加耦合电容。

对于图 3.9(d)应在 R_g 支路加 $-U_{GG}$, $+U_{DD}$ 改为 $-U_{DD}$ 。

改正电路如图 3.10 所示。

例 3.2 已知图 3.11(a)所示电路中场效应管的转移特性和输出特性分别如图 3.11(b)和图 3.11(c)所示。

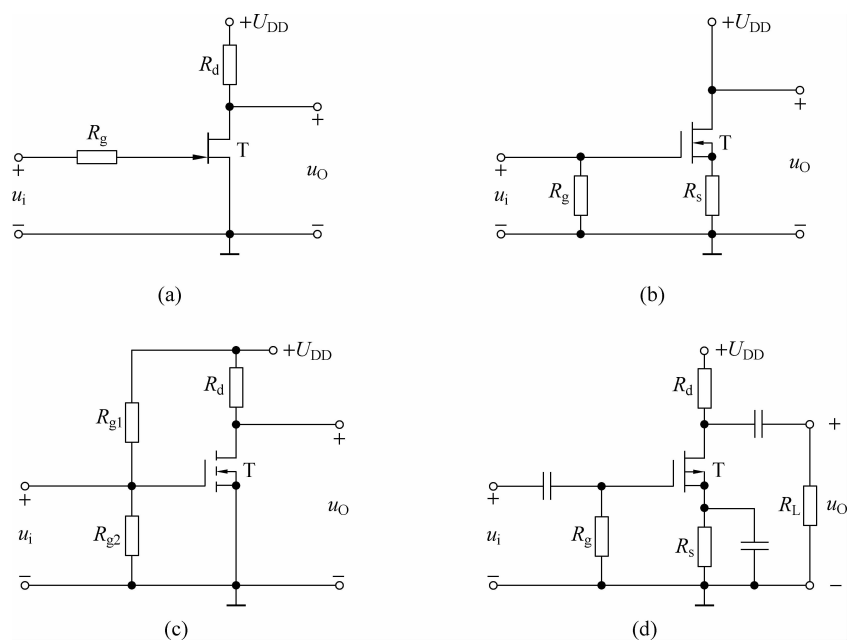


图 3.9 例 3.1 图

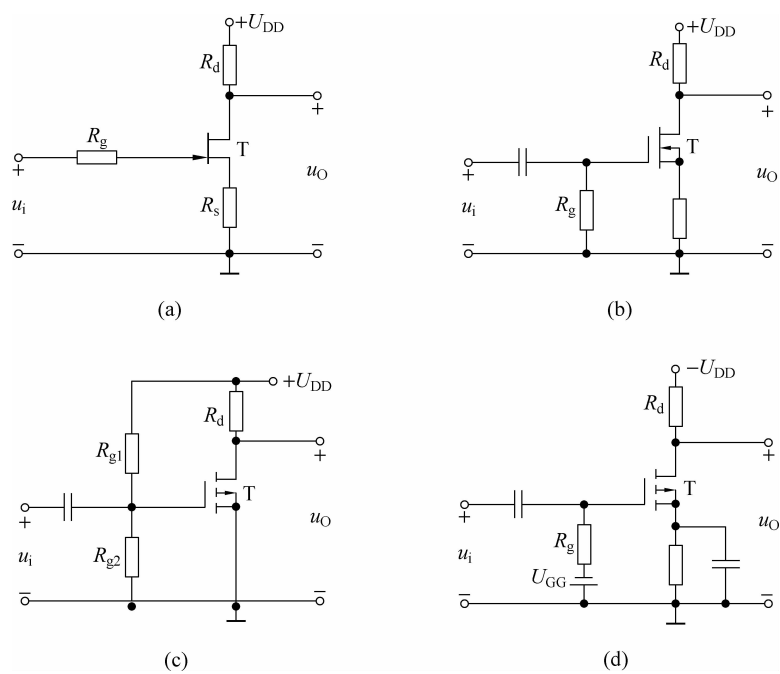


图 3.10 解例 3.1 图

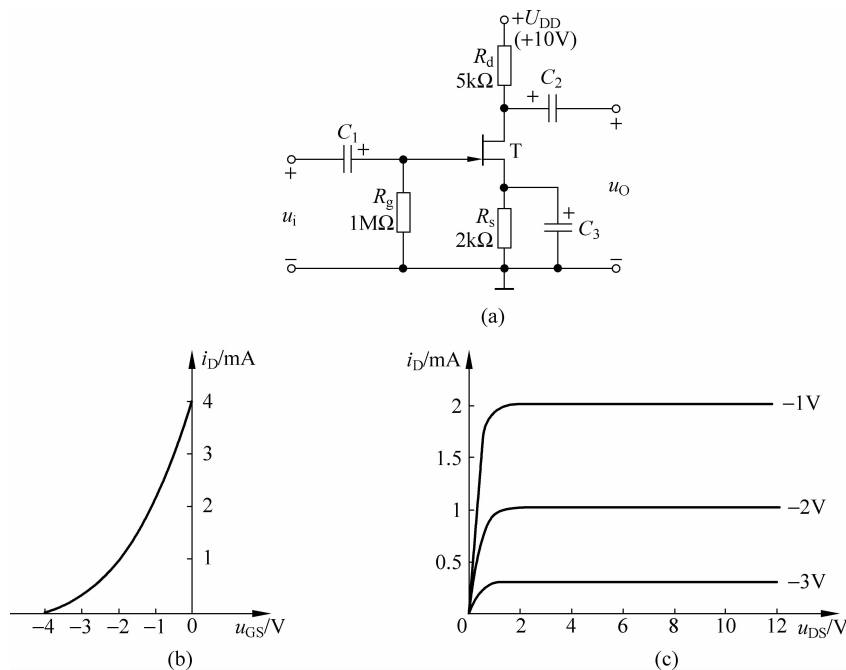


图 3.11 例 3.2 图

(1) 利用图解法求解 Q 点(见图 3.12);

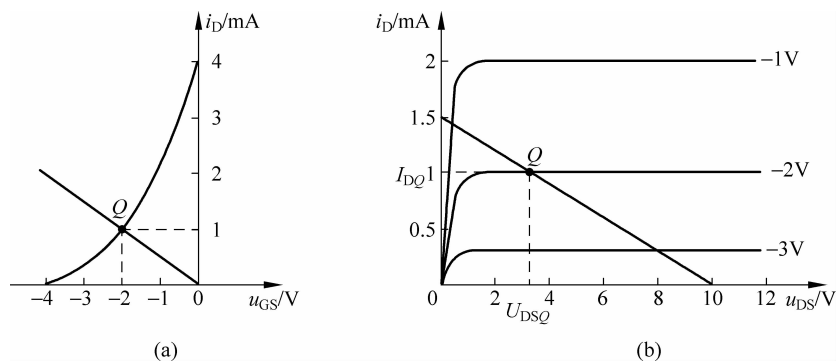


图 3.12 解例 3.2 图

(2) 利用等效电路法求解 $\dot{A}_u$ 、 R_i 和 R_o 。

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}} = \frac{-2}{U_{GS(off)}} \sqrt{I_{DS} I_{DQ}} = 1 \text{ mA/V}$$

$$\dot{A}_u = -g_m R_D = -5$$

$$R_i = R_g = 1 \text{ M}\Omega$$

$$R_o = R_d = 5 \text{ k}\Omega$$

例 3.3 分别判断图 3.13 所示的各电路中的场效应管是否有可能工作在恒流区。

解：图 3.13(a)所示的电路：可能。图 3.13(b)所示的电路：不能。图 3.13(c)所示的

电路：不能。图 3.13(d)所示的电路：可能。

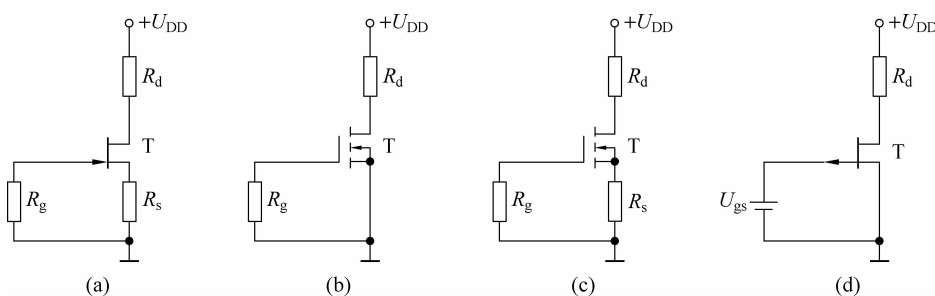


图 3.13 例 3.3 图

3.4 课后习题及解答

3.1 绝缘栅场效应管漏极特性曲线如图题 3.14(a)~图 3.14(d)所示。

说明图 3.14 中各曲线对应何种类型的场效应管。

根据图中曲线粗略地估计：开启电压 U_T 、夹断电压 U_P 和饱和漏极电流 I_{DSS} 或 I_{DO} 的数值。

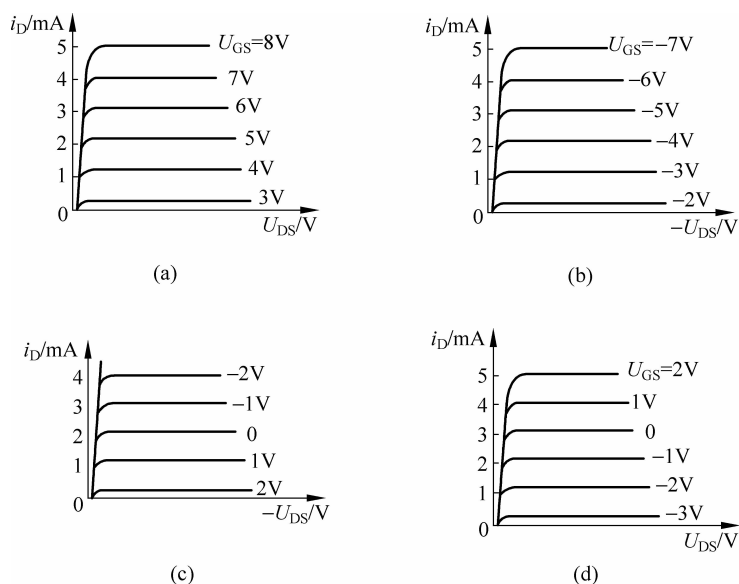


图 3.14 题 3.1 图

解：

图 3.14(a)：增强型 N 沟道 MOS 管， $U_{GS(th)} \approx 3V$ ， $I_{DO} \approx 3mA$ ；

图 3.14(b)：增强型 P 沟道 MOS 管， $U_{GS(th)} \approx -2V$ ， $I_{DO} \approx 2mA$ ；

图 3.14(c)：耗尽型 P 沟道 MOS 管， $U_{GS(off)} \approx 2V$ ， $I_{DSS} \approx 2mA$ ；

图 3.14(d)：耗尽型 N 沟道 MOS 管， $U_{GS(off)} \approx -3V$ ， $I_{DSS} \approx 3mA$ 。

3.2 场效应管漏极特性曲线同图 3.14 所示。分别画出各种管子对应的转移特性曲线

$i_D = f(U_{GS})$ 。

解：在漏极特性上某一 U_{DS} 下画一条直线，该直线与每条输出特性的交点决定了 U_{GS} 和 I_D 的大小，逐点画出，连接成曲线，就是管子的转移特性了，分别如图 3.15 的各分图所示。

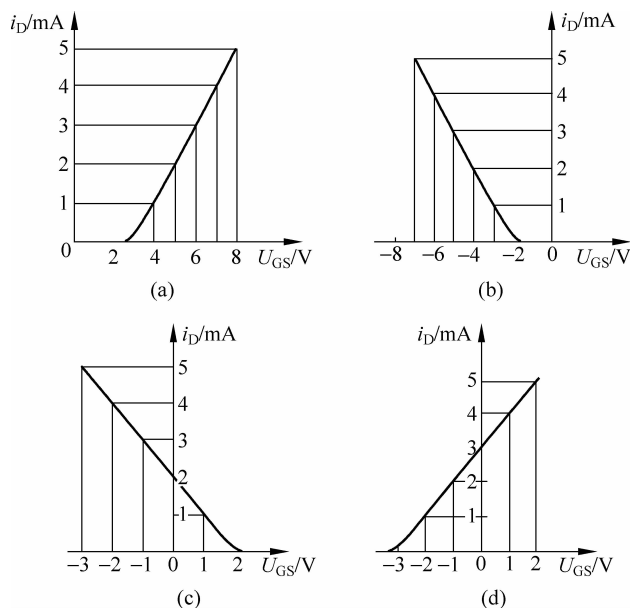


图 3.15 解题 3.2 图

3.3 图 3.16 所示为场效应管的转移特性曲线。试问：

- (1) I_{DSS} 、 U_P 值为多大？
- (2) 根据给定曲线，估算当 $i_D = 1.5\text{mA}$ 和 $i_D = 3.9\text{mA}$ 时， g_m 约为多少？
- (3) 根据 g_m 的定义： $g_m = \frac{di_D}{du_{GS}}$ ，计算 $u_{GS} = -1\text{V}$ 和 $u_{GS} = -3\text{V}$ 时相对应的 g_m 值。

解：

- (1) $I_{DSS} = 5.5\text{mA}$ ， $u_{GS(off)} = -5\text{V}$ ；
- (2) $I_D = 1.5\text{mA}$ 时， $g_m \approx 0.88\text{ms}$ ， $I_D = 3.9\text{mA}$ 时， $g_m \approx 1.76\text{ms}$ ；
- (3) $u_{GS} = -1\text{V}$ 时， $g_m \approx 0.88\text{ms}$ ， $u_{GS} = -3\text{V}$ 时， $g_m \approx 1.76\text{ms}$ 。

3.4 某 MOS 场效应的漏极特性如图 3.17 所示，试画出 $u_{DS} = 9\text{V}$ 时的转移特性曲线，并定性分析跨导 g_m 与 I_D 的关系。

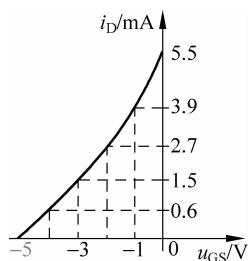


图 3.16 题 3.3 图

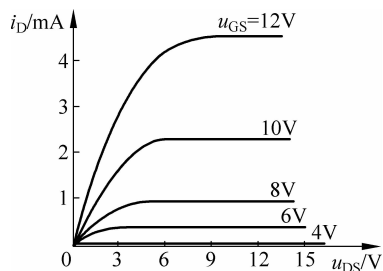


图 3.17 题 3.4 图

解：在 $u_{DS}=9\text{V}$ 处作一垂直线，与各 u_{GS} 下的输出特性曲线相交，各交点决定了 U_{GS} 和 I_D ，从而逐点描绘转移特性曲线，如图 3.18 所示。从转移特性曲线的某一点作切线，可得 g_m 的大小。

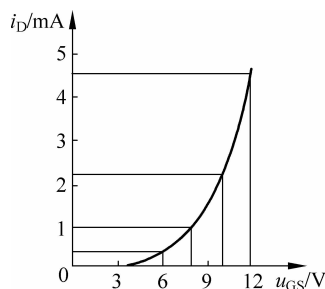


图 3.18 解题 3.4 图

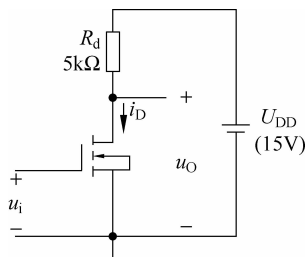


图 3.19 题 3.5 图

3.5 由 MOS 管组成的共源电路如图 3.19 所示，其漏极特性曲线同图 3.18。分析：

- (1) 当 $u_i=2\text{V}$ 、 4V 、 8V 、 10V 、 12V 时，该 MOS 管分别处于什么工作区？
- (2) 若 $u_i=8+6\sin\omega t(\text{V})$ ，试画出 i_D 和 $u_O(u_{DS})$ 的波形。

解：

- (1) $u_i=2\text{V}$ 、 4V 时，MOS 管工作在截止区；
 $u_i=6\text{V}$ 、 8V 时，MOS 管工作在恒流区(放大区)；
 $u_i=10\text{V}$ 、 12V 时，MOS 管工作在可变电阻区。
- (2) i_D 和 $u_O(u_{DS})$ 的波形如图 3.20 所示。

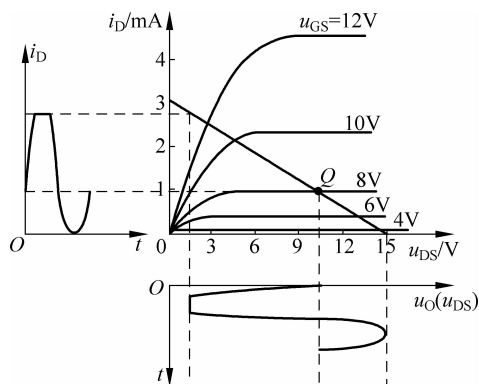


图 3.20 解题 3.5 图

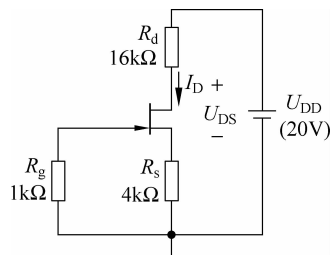


图 3.21 题 3.6 图

3.6 在图 3.21 所示的电路中，设 N 沟道 JFET 的 $I_{DSS}=2\text{mA}$ ， $U_P=-4\text{V}$ 。试求 I_D 和 U_{DS} 。

解：由

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D(R_d + R_s)$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(\text{off})}} \right)^2$$

$$U_{GS} = I_D R_s$$

求得: $I_D = 0.5\text{mA}$ $U_{GS} = 10\text{V}$

3.7 在图 3.22 所示的 FET 基本放大电路中, 设耗尽型 FET 的 $I_{DS} = 2\text{mA}$, $U_P = -4\text{V}$; 增强型 FET 的 $U_T = 2\text{V}$, $I_{D0} = 2\text{mA}$ 。

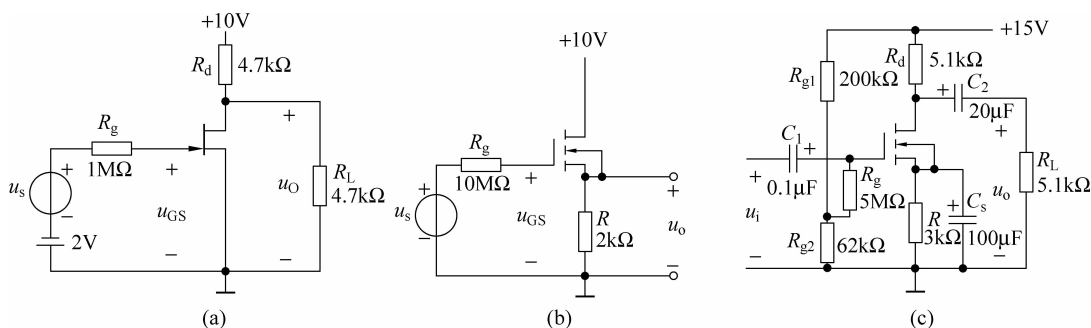


图 3.22 题 3.7 图

- (1) 计算各电路的静态工作点;
- (2) 画出交流通路并说明各放大电路的组态。

解:

(1) 对于图 3.22(a): $I_{DQ} \approx 0.5\text{mA}$, $U_{GSQ} = -2\text{V}$, $U_{DSQ} \approx 3.8\text{V}$;

对于图 3.22(b): $I_{DQ} \approx 0.76\text{mA}$, $U_{GSQ} \approx -1.5\text{V}$, $U_{DSQ} \approx 8.5\text{V}$;

对于图 3.22(c): $I_{DQ} \approx 0.25\text{mA}$, $U_{GSQ} = 2.8\text{V}$, $U_{DSQ} \approx 13\text{V}$ 。

(2) 交流通路如图 3.23 所示。

图 3.23(a) 为共源极放大电路(CS);

图 3.23(b) 为共漏极放大电路(CD);

图 3.23(c) 为共源极放大电路(CS)。

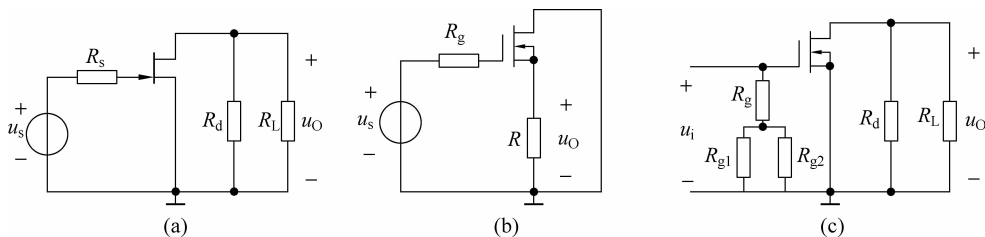


图 3.23 解题 3.7 图