



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材



Analog Electronic Technology, 2nd Edition

模拟电子技术

(第二版)

郭业才 黄友锐 主编

Guo Yecai Huang Yourei

吴昭方 李秀娟 李良光 张宏群 副主编

Wu Zhaofang Li Xiujian Li Lianguang Zhang Hongqun



清华大学出版社

试讲内容

内容一：4.3 场效应管放大电路

4.3.1 场效应管放大电路组成

4.3.2 场效应管放大电路静态分析

内容二：

4.3.3 场效应管放大电路动态分析

4.2.4 FET 使用注意事项

- (1) 在 MOS 管中,某些产品的衬底引线可让使用者根据电路的需要而连接。一般来说,P 衬底接低电位,N 衬底接高电位。但在某些特殊的电路中,当源极的电位很高或很低时,为了减轻源衬间电压对管子导电性能的影响,可将源极与衬底连在一起。
- (2) 通常漏极与源极可以互换,而其伏安特性没有明显的变化。但有些产品在出厂时已将源极与衬底连在一起,这时源极与漏极不能对调。
- (3) 使用时 JFET 的栅源电压不能接反,不使用时三个电极可以开路存放。对于 MOSFET,由于它的输入电阻非常高,一旦有感应电荷就难以释放,因此存放时须将三电极短接,以免外电场作用而损坏管子。
- (4) 焊接时,电烙铁必须有接地线,以防漏电。特别是焊接 MOSFET 时,最好断电后进行。

4.2.5 FET 与 BJT 的比较

- (1) 虽然场效应管和晶体管放大电路工作原理不同,但两种器件之间存在电极对应关系,即栅极 g 对应基极 b ,源极 s 对应发射极 e ,漏极 d 对应集电极 c 。
- (2) FET 和 BJT 二者均是放大器件,场效应管是电压控制器件,而晶体三极管是电流控制器件。FET 通过栅源电压控制漏极电流,BJT 通过基极电流控制集电极电流。二者区别的具体表现为输出特性曲线上参变量的不同,场效应管的参变量是栅源电压,而晶体三极管的参变量是基极电流。
- (3) 因为 FET 的输入电流为零,所以其输入电阻比 BJT 的大得多。
- (4) FET 是单极型器件,只有多数载流子参与导电,而 BJT 是双极型器件,多数载流子和少数载流子都参与导电。因为少数载流子的数量受温度等外界因素的影响,所以 BJT 的热稳定性不如 FET。
- (5) β 是反映 BJT 放大作用的参数, g_m 是反映 FET 放大作用的参数。
- (6) N 沟道管类似 NPN 管,而 P 沟道管类似 PNP 管。

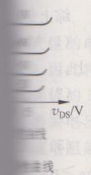
4.3 场效应管放大电路

双极型晶体管(BJT)是电流控制器件,而场效应管(FET)是电压控制器件。双极型晶体管通过基极电流 i_B 来控制集电极电流 i_C ,从其输出特性可见,各条特性曲线的参变量是 i_B ,在放大区 i_C 的值主要取决于 i_B ,而基本上与 v_{CE} 无关,因此,通常用电流放大倍数 β 来描述双极型晶体管的放大作用。场效应管的栅极电流近似为零,因此它是通过栅源电压 v_{GS} 来控制漏极电流 i_D ,从其输出特性可见,各条特性曲线的参变量是 v_{GS} ,在恒流区(放大区), i_D 的值主要取决于 v_{GS} ,而基本上与 v_{DS} 无关,并通过跨导 g_m 来描述场效应管的放大作用。本节将对场效应管放大电路的组成、场效应管放大电路的静态和动态分析加以介绍。

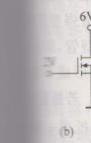
4.3.1 场效应管放大电路组成

与双极型晶体管相似,场效应管有三个电极,可接成三种基本放大电路,即共源极、共漏极和共栅极放大电路。它们分别与双极型晶体管的共发射极、共集电极和共基极放大电路相对应。

的符号如
能像增强型
与道管。
性与 N 沟
造方向也
重表达式与



与 JFET
之的是开
V),改变



子导通。
放大区)。

图 4.17 所示为共源极放大电路,信号输入到栅极,被放大后从漏极输出。FET 作为放大电路的核心器件,起着能量转换的作用,外围电阻 R_g 、 R 为放大电路的偏置电阻,外围电容起隔直/耦合或旁路作用。

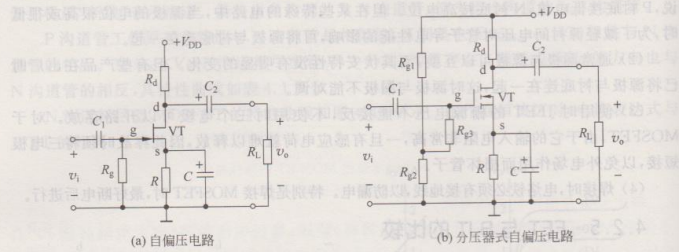


图 4.17 共源极放大电路

图 4.18 所示为共漏极放大电路,信号输入到栅极,被放大后从源极输出。共漏极放大电路相当于电压跟随器。

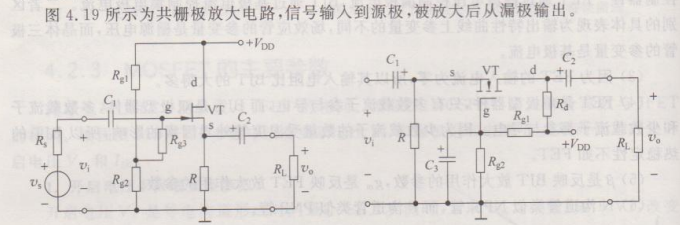


图 4.18 共漏极放大电路

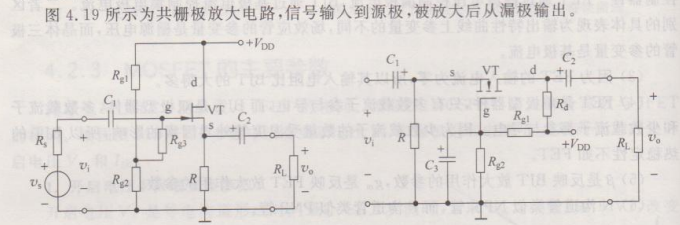


图 4.19 共栅极放大电路

4.3.2 场效应管放大电路的静态分析

1. 直流偏置电路

由 FET 组成的放大电路和 BJT 的一样,为了对小信号进行线性放大,必须采用适当的偏置电路,使管子工作在放大区,因此都需为管子建立合适的 Q 点。所不同的是,FET 是电压控制器件,因此它需要有合适的栅极电压。通常 FET 放大电路有两种形式的偏置电路,现以 N 沟道 FET 为例加以说明。

1) 自偏压电路

与 BJT 的射极偏置电路相似,通常在源极接入电阻 R ,就可组成图 4.20(a) 所示的自偏压电路,它是图 4.17(a) 所示的共源电路的直流通路。对于耗尽型 FET,即使在 $v_{GS}=0$ 时,也有漏极电流 i_D 流过 R ,所以 R 上存在压降,即 $I_D R$ 。栅极是经电阻 R_g 接地的,由于栅极电流 $i_G=0$, R_g 上的压降为零,所以在静态时栅源之间将有负栅压 $V_{GS}=-I_D R$ 。图 4.17 中

电容 C 对 R 起旁路作用,称为源极旁路电容。这样,电路自行产生了一个负的偏置电压,刚好满足电路中 N 沟道耗尽型场效应管工作于放大区时对 V_{GS} 的要求。

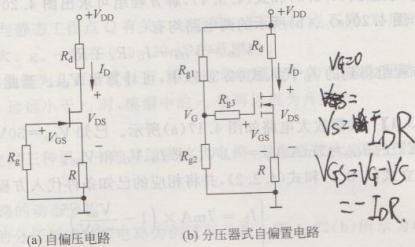


图 4.20 共源极放大电路

对于增强型 MOS 场效应管,只有当栅极与源极之间的电压达到开启电压 V_T 时才有漏极电流,而自偏压电路栅源电压 ($V_{GS} = -I_D R$) 的极性又刚好与管子的 V_T 极性相反,故自偏压方式不适用于增强型 FET 组成的放大电路。

2) 分压器式自偏压电路

图 4.20(b)所示的分压器式自偏压电路是在自偏置电路的基础上增加了分压电阻,该电路是图 4.17(b)所示的共源电路及图 4.18 所示的共漏电路的直流通路。 R_{G1} 、 R_{G2} 组成串联分压电路。 V_{DD} 经分压后通过 R_{G1} 供给栅极电压 V_G ,漏极电流在 R 上压降 $V_S = I_D R$,栅源之间电压 $V_{GS} = V_G - I_D R$ 。可见,设置不同的分压电阻,既可以使 V_{GS} 为正值,也可以使 V_{GS} 为负值,因此分压器式自偏压电路适用于任何类型 FET 组成的放大电路。因为流过 R_{G2} 的栅极电流为零,所以 R_{G2} 上没有压降,串入 R_{G2} 的目的是提高输入电阻。

2. 静态工作点的确定

静态分析的主要目的是要求出 FET 的静态工作点,即确定 $Q(I_D, V_{GS}, V_{DS})$ 。与 BJT 类似,静态工作点的确定也有图解法和估算法两种,图解法的过程与 BJT 相似,这里略去。下面用估算法求解 FET 的静态工作点。

图 4.20(a)所示电路中的 FET 为耗尽型管,由式(4.1.2),有

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \quad (4.3.1)$$

由图 4.20(a)所示电路可得

$$V_{GS} = -I_D R \quad (4.3.2)$$

联立式(4.3.1)和式(4.3.2),解方程组可求出图 4.20(a)所示电路中 FET 的 I_D 和 V_{GS} 。

图 4.20(b)所示电路中的 FET 为增强型管,由式(4.2.1),有

$$I_D = I_{D0} \left(\frac{V_{GS}}{V_T} - 1\right)^2 \quad (4.3.3)$$

由图 4.20(b)所示电路可得

$$V_{GS} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} V_{DD} - I_D R \quad (4.3.4)$$

同样地,联立式(4.3.3)和式(4.3.4),解方程组可求出图 4.20(b)所示电路中 FET 的 I_D 和 V_{GS} 。图 4.20(a)、(b)所示的两电路均有

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R) \quad (4.3.5)$$

将解方程组得到的 I_D 代入式(4.3.5)中,可计算出 V_{DS} 。至此,便得到了 FET 的静态工作点 Q。

【例 4.3.1】 共源放大电路如图 4.17(a)所示。已知 $V_{DD}=30\text{V}$ 、 $R_D=3\text{k}\Omega$ 、 $R_g=1\text{M}\Omega$ 、 $R=1\text{k}\Omega$ 、FET 的 $I_{DSS}=7\text{mA}$ 、 $V_P=-8\text{V}$ 。求 I_D 、 V_{GS} 和 V_{DS} 。

解:联立式(4.3.1)和式(4.3.2),并将相应的已知条件代入方程组中,得

$$\begin{cases} I_D = 7\text{mA} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{-8\text{V}}\right)^2 \\ V_{GS} = -I_D \times 1\text{k}\Omega \end{cases}$$

解上述二次方程组可得

$$I_D = \begin{cases} 2.9\text{mA} \\ 22.4\text{mA} \end{cases}$$

因为 $I_D=22.4\text{mA} > I_{DSS}$,所以舍去此根,得

$$\begin{aligned} I_D &= 2.9\text{mA} \\ V_{GS} &= -2.9\text{V} \end{aligned}$$

再将 I_D 的值代入式(4.3.5),计算得

$$V_{DS} = 18.4\text{V}$$

4.3.3 场效应管放大电路的动态分析

动态分析是利用 FET 小信号模型求 FET 放大电路的主要性能指标。

1. FET 的小信号模型

FET 的静态工作点设置在放大区后,如果输入小信号,则 FET 对信号进行线性放大,此时,可以将 FET 等效为一个两端口的线性网络,这个线性网络就是它的小信号模型。与 BJT 的做法类似,可以推导出 FET 共源接法的低频小信号模型,如图 4.21(b)所示。

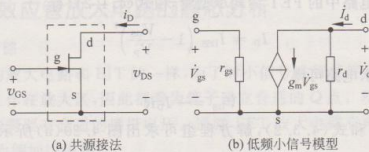


图 4.21 FET 的低频小信号模型

模型中 g_m 为 FET 的跨导,单位为 mS 。

对于耗尽型管, g_m 的值可以利用式(4.1.4)直接求出。

4.3.4)
FET 的
4.3.5)
的静态
1MΩ、

增强型管可以利用式(4.2.1)推导出 g_m 的公式,即

$$g_m = \frac{2}{V_T} \sqrt{I_{DQ} I_D} \quad (4.3.6)$$

可见,跨导 g_m 的值与静态工作点 Q 有关。对于同一 FET, Q 点不同,对应的跨导值不同, Q 点越高,跨导值越大。 g_m 一般在 $0.1 \sim 20\text{mS}$ 的范围内。

由于 r_{gs} 、 r_{gd} 很大,数量级为几百千欧以上,因此通常将模型中的 r_{gs} 视为开路,并且当放大电路中的漏极电阻 R_d 远远小于 r_d 时,模型中的 r_d 也可以视为开路。

2. 动态分析

下面对 FET 放大电路三种组态中的共源极放大电路、共漏极放大电路进行分析,略去共栅极放大电路的分析。

(1) 共源极放大电路的动态分析

以图 4.22(a) 所示的分压器式共源电路为例进行分析。图 4.22(b) 所示为电路的小信号等效电路。

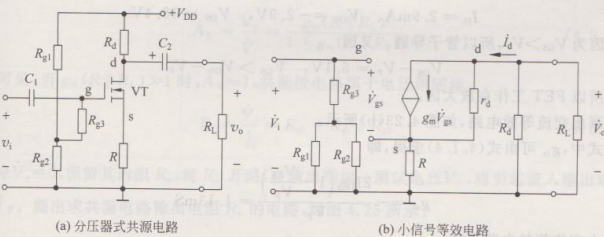


图 4.22 分压器式共源电路及其小信号等效电路

由等效电路可以进行以下推导,即

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \dot{V}_{gs} + g_m \dot{V}_{gs} R = \dot{V}_{gs} (1 + g_m R) \\ \dot{V}_o &= -g_m \dot{V}_{gs} (R_d \parallel R_L) \\ \dot{A}_v &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = -\frac{g_m (R_d \parallel R_L)}{1 + g_m R} \quad (4.3.7) \end{aligned}$$

式(4.3.7)中的“-”号表示输出电压与输入电压相位相反。

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_{g3} + R_{g1} \parallel R_{g2} \quad (4.3.8)$$

$$R_o \approx R_d \quad (4.3.9)$$

若在图 4.22(a) 所示电路中增加旁路电容 C , 并与 R 并联, 则等效电路中的 R 被旁路电容短路, 此时

$$\dot{A}_v = -g_m (R_d \parallel R_L)$$

【例 4.3.2】 电路及已知条件与例 4.3.1 的相同, 即电路如图 4.23(a) 所示, 且已知

$V_{DD}=30\text{V}$, $R_d=3\text{k}\Omega$, $R_g=1\text{M}\Omega$, $R=1\text{k}\Omega$, $R_L=5\text{k}\Omega$, FET 的 $I_{DSS}=7\text{mA}$, $V_P=-8\text{V}$ 。求放大电路的电压增益 \dot{A}_v 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

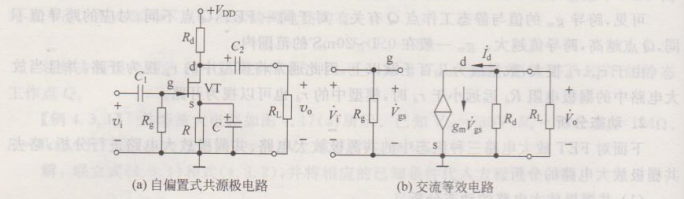


图 4.23 自偏置式共源极电路及其小信号等效电路

解：由例 4.3.1 的解可知
 $I_D = 2.9\text{mA}$, $V_{GS} = -2.9\text{V}$, $V_{DS} = 18.4\text{V}$
 因为 $V_{GS} > V_P$, 所以管子导通。又因
 $V_{GS} - V_P = 5.1\text{V}$, $V_{DS} > V_{GS} - V_P$
 所以 FET 工作在放大区。
 画出交流等效电路, 如图 4.23(b) 所示。
 式中, g_m 可由式(4.1.4)求得, 即

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)}{V_P} = 1.13\text{mS}$$

由交流等效电路可得

$$\dot{V}_i = \dot{V}_{gs}$$

$$\dot{V}_o = -g_m \dot{V}_{gs} (R_d \parallel R_L)$$

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = -g_m (R_d \parallel R_L) = -2.1\text{mS}$$

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_g = 1\text{M}\Omega$$

$$R_o \approx R_d = 3\text{k}\Omega$$

从例 4.3.2 可见, 场效应管共源极放大电路与晶体管共射极放大电路的性能相似: 有电压放大能力; 输出电压与输入电压的相位相反; 输出电阻较高。但共源极放大电路的电压放大能力通常低于共射极放大电路; 而共源极放大电路的输入电阻高于共射极放大电路的输入电阻。

(2) 共漏极放大电路的动态分析。

图 4.24(a) 所示为共漏极放大电路, 图 4.24(b) 所示为其小信号等效电路, 由等效电路可以进行以下推导, 即

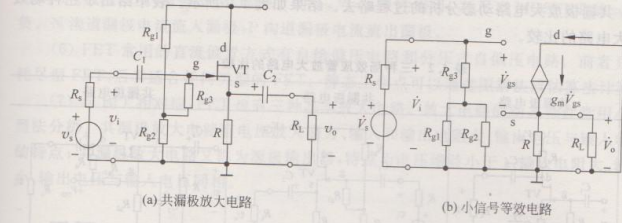


图 4.24 共漏极放大电路及其等效电路

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \dot{V}_{gs} + g_m \dot{V}_{gs} (R \parallel R_L) \\ \dot{V}_o &= g_m \dot{V}_{gs} (R \parallel R_L) \\ \dot{A}_v &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{g_m (R \parallel R_L)}{1 + g_m (R \parallel R_L)} \end{aligned} \quad (4.3.10)$$

可见,当 $g_m (R \parallel R_L) \gg 1$ 时, $\dot{A}_v \approx 1$, 共漏极电路属于电压跟随器。

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_{g1} + R_{g2} \parallel R_{g3} \quad (4.3.11)$$

令 $\dot{V}_o = 0$, 保留其内阻 R_s , 将 R_L 开路, 在输出端加一测试电压 \dot{V}_T , 将引起流入输出端的电流 \dot{I}_T 。画出求共漏电路输出电阻 R_o 的电路, 如图 4.25 所示。

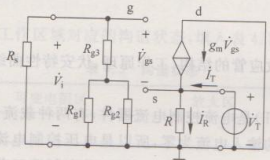


图 4.25 求共漏极放大电路输出电阻的电路

由图 4.25 可得

$$\begin{aligned} \dot{I}_T &= \dot{I}_R - g_m \dot{V}_{gs} \\ \dot{V}_{gs} &= -\dot{V}_T \end{aligned}$$

由上述两式可以求出

$$R_o = \frac{\dot{V}_T}{\dot{I}_T} = R \parallel \frac{1}{g_m} \quad (4.3.12)$$

可见,共漏极放大电路与晶体管共集电极放大电路相似, $\dot{A}_v < 1$, 没有电压放大能力; 输出电压与输入电压的相位相同; 输入电阻高(高于共集电极放大电路的输入电阻); 输出电阻低。

V_o 求放

相似; 有
电路的电
放大电路
等效电路

(3) 共栅极放大电路动态分析的过程略去。结果如表 4.2 所示。表中给出了三种场效应管放大电路的比较。

表 4.2 三种场效应管放大电路的比较

	共源极电路	共漏极电路	共栅极电路
电路			
\dot{A}_v	$-g_m(R_D \parallel R_L)$	$\frac{g_m(R \parallel R_L)}{1+g_m(R \parallel R_L)}$	$g_m(R_D \parallel R_L)$
R_i	R_g	$R_{gs} + R_{g1} \parallel R_{g2}$	$R \parallel \frac{1}{g_m}$
R_o	R_D	$R \parallel \frac{1}{g_m}$	R_D
特点	反相放大器 $ \dot{A}_v > 1, \dot{A}_i > 1$ R_i 很大, R_o 较大	同相放大器 $ \dot{A}_v \leq 1, \dot{A}_i > 1$ R_i 很大, R_o 较小	同相放大器 $ \dot{A}_v > 1, \dot{A}_i < 1$ R_i 很小, R_o 较大
类比	共射极放大电路	共集电极放大电路	共基极放大电路

v_{GS} 与 v_{DS} 极
负。N 沟道
(6) FE
耗尽型 FET
(7) 与
型法分析。
的特点: 共
小、输出电压

习题

- A.1
- (1) 它
- (2) 它
- 4.2 图