

实验五 场效应管放大器

一、实验目的

- 1、学习场效应管放大电路设计和调试方法。
- 2、掌握场效应管基本放大电路的设计及调整、测试方法。

二、预习要求

- 1、查找有关参考书，根据本实验的设计范例，按要求进行电路设计。
- 2、对设计好的电路进行 Multism (EWB) 或 PSpice 仿真，并根据实验内容的要求，参考上次实验的测量表格，将静态工作点、输入、输出电阻和放大倍数等仿真结果列表填写（注意，输入电阻的测量方法和基本放大器的不一样，请认真阅读本实验输入电阻测量的相关内容）。
- 3、根据要求，将漏极电阻 R_D 改为恒流源负载后，重复步骤 2 的要求。

三、实验报告

- 1、写出设计思路，画出实验电路图。
- 2、设计表格列出仿真结果。
- 3、设计表格填写有关测量参数。
- 4、回答课后思考题

四、实验原理

1、场效应管的主要特点

场效应管是一种电压控制器件，由于它的输入阻抗极高（一般可达上百兆、甚至几千兆），动态范围大，热稳定性好，抗辐射能力强，制造工艺简单，便于大规模集成。因此，场效应管的使用越来越广泛。

场效应管按结构可分为 MOS 型和结型，按沟道分为 N 沟道和 P 沟道器件，按零栅压源、漏通断状态分为增强型和耗尽型器件，可根据需要选用。那么，场效应管由于结构上的特点源漏极可以互换，为了防止栅极感应电压击穿，要求一切测试仪器，都要有良好接地。

2、场效应管的特性

（1）转移特性（控制特性）反映了管子工作在饱和区时栅极电压 V_{GS} 对漏极电流 I_D 的控制作用。当满足 $|V_{DS}| > |V_{GS}| - |V_P|$ 时， I_D 对于 V_{GS} 的关系曲线即为转移特性曲线。如图 1 所示。由图可知，当 $V_{GS} = 0$ 时的漏极电流即为漏极饱和电流 I_{DSS} ，也称为零栅漏电流，使 $I_D = 0$ 时所对应的栅源电压，称为夹断电压 $V_{GS} = V_P$ 。

（2）转移特性可用如下近似公式表示：

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \quad (\text{当 } 0 \geq V_{GS} \geq V_P) \quad \text{式 1}$$

这样，只要 I_{DSS} 和 V_P 确定，就可以把转移特性上的其它点估算出来。转移特性的斜率为：

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \Big|_{V_{DS} = \text{常数}} \quad \text{式 2}$$

它反映了 V_{GS} 对 I_D 的控制能力，是表征场效应管放大主用的重要参数，称为跨导。一般为 $0.1 \sim 5 \text{mS (mA/V)}$ 。它可以由式 1 求得：

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{V_P} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) \quad \text{式 3}$$

输出特性（漏极特性）反映了漏源电压 V_{DS} 对漏极电流 I_D 的控制作用。

图 2 为 N 沟道场效应管的典型漏极特性曲线。

由图可见，曲线分为三个区域，即 I 区（可变电阻区）、II 区（饱和区）、III 区（击穿区）。饱和区的特点是 V_{DS} 增加时 I_D 不变（恒流），而 V_{GS} 变化时， I_D 随之变化（受控），管子相当于一个受控恒流源。实际曲线，对于确定的 V_{GS} 值，随着 V_{DS} 的增加， I_D 有很小的增加。 I_D 对 V_{DS} 的依赖程度，可以用动态电阻 r_{DS} 表示为：

$$r_{DS} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \quad (\Delta V_{DS}) / (\Delta I_D) |_{V_{GS} = \text{常数}} \quad \text{式 4}$$

在一般情况下， r_{DS} 在几千欧到几百千欧之间。

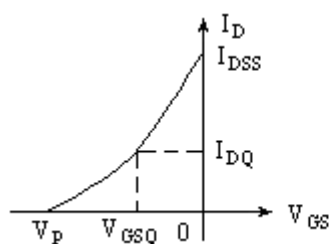


图 1 N 沟道场效应管转移特性

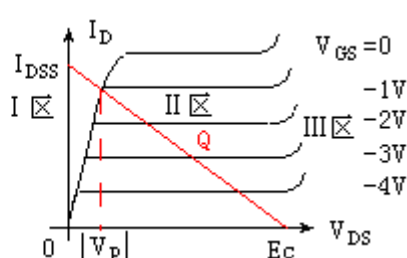


图 2 N 沟道场效应管输出特性

3、自给偏置场效应管放大器

自给偏置 N 沟道场效应管共源基本放大器如图 3 所示，该电路与普通双极型晶体管放大器的偏置不同，它利用漏极电流 I_D 在源极电阻 R_S 上的电压降 $I_D R_S$ 产生栅极偏压，即： $V_{GSQ} = -I_D R_S$ 。由于 N 沟道场效应管工作在负压，故此称为自给偏置，同时 R_S 具有稳定工作点的作用。该电路主要参数为：

电压放大倍数： $A_v = V_o / V_i = -g_m R_L'$

式中： $R_L' = R_D \parallel R_L \parallel r_{DS}$

输入电阻： $R_i \approx R_G$

输出电阻： $R_o = R_D \parallel r_{DS}$

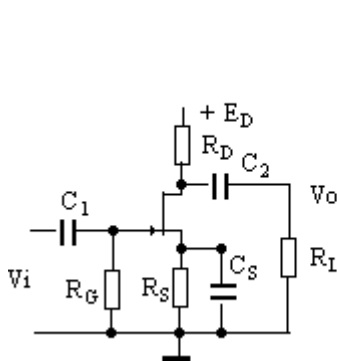


图 (3) 自给偏置场效应管放大器

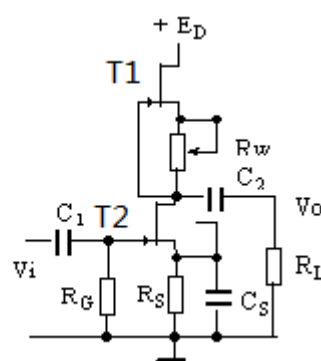


图 (4) 恒流源负载的场效应管放大器

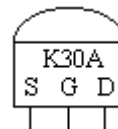
4、恒流源负载的场效应管放大器

由于场效应管的 g_m 较小，与双极型晶体管相比，场效应管放大器的电压放大倍数较小。提高其放大倍数的一种方法是：采用恒流源负载，即在图 3 中将 R_D 用一个恒流源代替，如图 4 所示。它利用场效应管工作在饱和区时，静态电阻小、动态电阻较大的特性，在不提高电源电压的情况下可获得较大的放大倍数。

5、设计举例

试设计一个场效应管放大器，场效应管选用 K30A；管脚排列为：

要求：电源电压为： $+12V$ 负载为 R_L 为 $10K\Omega$ ； $A_v \geq 5$ 、 $R_i \geq 500K\Omega$ 、 $R_o \leq 10K\Omega$ 、 $f_L \leq 50Hz$ ；若要求电压放大倍数提高为 50, 电路如何改变？



- (1) 电路模型选择：自给偏置场效应管放大器；
- (2) 场效应管特性参数测试：按上述方法测试（工作点为： $V_{DSQ}=5V$ 、 $I_{DQ}=1mA$ ）；
- (3) 确定 R_D 、 R_S 和 R_G ；

$$R_D = \frac{E_D - (V_{DSQ} + |V_{GSQ}|)}{I_{DQ}} = \frac{12 - (5 + 0.5)}{1} = \frac{12 - 5.5}{1} = 6.5 \text{ (K}\Omega\text{)}$$

按 E24 标称系列取 $R_D=6.8K\Omega$

$$R_S = \frac{|V_{GSQ}|}{I_{DQ}} = \frac{0.5}{1} = 0.5 \text{ (K}\Omega\text{)} \text{ 按 E24 标称系列取 } R_S=510\Omega$$

按 E24 标称系列取 $R_G=620K\Omega$ ，确保 $R_i > 500K\Omega$

- (4) 确定 C_1 、 C_2 、 C_S

$$C_1 \geq (3 \sim 10) \frac{1}{2\pi f_L R_G}, \quad C_2 \geq (3 \sim 5) \frac{1}{2\pi f_L (R_D + R_L)}, \quad C_S \geq (1 \sim 3) \frac{1 + g_m R_S}{2\pi f_L R_S}$$

一般取： $C_1=0.01\mu F$ ， $C_2=1\mu F$ ， $C_S=47\mu F$ ；

- (5) 设计参数验算：

$$A_v = -g_m R_L' = 1.8 \times 6.8 / 10 \approx 7.3; \quad R_i \approx R_G = 620K; \quad R_o \approx R_L = 10K;$$

- (6) 根据上述设计，符合设计要求；

6、场效应管放大器参数测试方法

- (1) 静态工作点调试：同单极放大器调试方法；
- (2) 电压放大倍数测量：同单极放大器调试方法；
- (3) 放大器频率特性测量：同单极放大器调试方法；
- (4) 输入阻抗测量：放大器输入阻抗为从输入端向放大器看进去的等效电阻，即： $R_i = V_i / I_i$ 该电阻为动态电阻，不能用万用表测量。输入阻抗 R_i 测量装置图如图 5 所示。

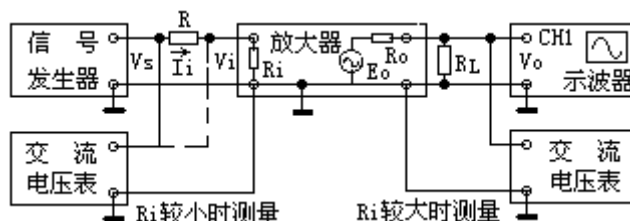


图 5 输入阻抗测量装置图

测量图中， R 为测量 R_i 所串接在输入回路的已知电阻（该电阻可根据理论计算 R_i 选

择，为减少测量误差，一般选择与 R_i 同数量级)，其目的是避免测量输入电路中电流，而改由测量电压进行换算，即：

$$I_i = \frac{V_R}{R} = \frac{V_S - V_i}{R}, \text{ 则: } R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{V_S - V_i} R$$

上述测量方法仅适用于放大器输入阻抗远远小于毫伏表输入阻抗条件下，然而，场效应管放大器输入阻抗非常大，上述设计放大器要求： $R_i > 500 \text{ K}\Omega$ ，而毫伏表 $R_i > 1 \text{ M}\Omega$ ，故，毫伏表测量将产生较大的误差，同时将引入干扰。故，不能用毫伏表测量 V_i 。然而，由于放大器输出阻抗较小，毫伏表可直接测量。因而采用测量输出电压换算求 R_i 。

当电路不串入 R 时， $V_{i1} = V_S$ ，输出测量值为：

$$V_{o1} = A_v * V_{i1} = A_v * V_S;$$

当电路串入 R 时， $V_{i2} = \frac{R_i}{R_i + R} V_S$ ，输出测量值为：

$$V_{o2} = A_v * V_{i2} = A_v * \frac{R_i}{R_i + R} V_S$$

由于同一放大电路，其放大倍数相同，故：令上述两式相除并进行整理可得：

$$R_i = \frac{V_{o2}}{V_{o1} - V_{o2}} R$$

(5) 输出阻抗测量：

输出阻抗测量装置如图 5 所示，在输入回路不串接 R 情况下：

若输出回路不并接负载 R_L ，则输出测量值为： $V_{O\infty}$ ；

若输出回路并接负载 R_L ，则输出测量值为： V_{OL} ；则可按下式求 R_o 。

$$R_o = \frac{V_{O\infty} - V_{OL}}{I_o} = \frac{V_{O\infty} - V_{OL}}{V_{OL} / R} = \left(\frac{V_{O\infty}}{V_{OL}} - 1 \right) R_L$$

在上述输入阻抗、输出阻抗测量时，应保证输出波形不失真。

五、实验仪器

| | |
|------------|-----|
| 1、示波器 | 1 台 |
| 2、函数信号发生器 | 1 台 |
| 3、数字万用表 | 1 台 |
| 4、多功能电路实验箱 | 1 台 |

六、实验内容

1、搭接场效应管放大电路：

根据实验原理中的设计参数，在多孔实验板上搭接实验电路，检查电路连接无误后，方可将+12V 直流电源接入电路。其中 R_s 采用实验箱上的 $1 \text{ K}\Omega$ 电位器。

注意事项：

1. 场效应管的源极（S）和漏极（D）可以互换使用，为搭接规范，本实验中规定：场效应 K30A 平面朝向实验者，从左到右分别为 S、G、D。
2. 电路搭接之前，请检查滑动变阻器是否接触良好，如已经坏掉，请找老师更换。

3. 其余注意事项，请参看基本放大器的相关部分提示。

2、静态工作点的调试测量

根据设计理论值，通过调整电位器 R_S ，使静态工作点 $V_{DQ}=6V$ ，测量其余值并填入下表 2，下表中 I_{DQ} 、 V_{DS} 和 V_{GS} 根据左边的三个测量值进行计算得出。

表 2：静态工作点设计、测量值

| 静态工作点 | $V_{DQ}(V)$ | $V_{GQ}(V)$ | $V_{SQ}(V)$ | $I_{DQ}(mA)$ | $V_{DS}(V)$ | $V_{GS}(V)$ |
|-------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| 测 量 值 | | | | | | |

3、场效应管放大器参数测试

- (1) 参照单极放大器参数测试方法，选择合适的输入信号，自拟实验步骤测量放大倍数；
- (2) 参照输入阻抗测试方法，选择合适的串接电阻，自拟实验步骤测量输入阻抗；
- (3) 参照输出阻抗测试方法，选择合适的负载，自拟实验步骤测量输出阻抗；

注意：

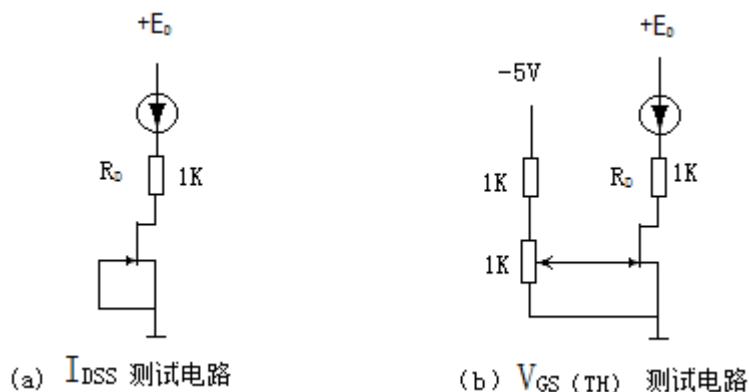
1、测量输入电阻的方法和基本放大电路不一样，测量输出端时，请不要在输入端挂接示波器探头。

4、采用恒流源负载的场效应管放大器

在上述电路基础上，按图 4 更改电路，其中 R_S 改为 510Ω 电阻， R_W 采用实验箱上 $1K\Omega$ 电位器，通过调整 R_W ，使静态工作点与上述电路基本想符合，以便进行比较。

自拟实验步骤，测量放大器放大倍数和输出阻抗，并与上述电路参数进行比较，说明恒流源负载的作用。

5、场效应管参数测试：



图（6） 场效应管参数测量电路

按图 6 搭接电路，测量相关参数。

表 1：场效应管主要参数测量

| $I_{DSS} (mA)$ | $V_P (V)$ | $V_{GSQ} (V)$ | $I_{DQ} (mA)$ | $r_{DS} (K)$ | $g_m (mA/V)$ |
|----------------|-----------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| | | | | | |

注意：

1. 测量 I_{DSS} 时，

$$I_{DSS} = \frac{E_D - V_{DQ}}{R_D}$$

2.测量 $V_{GS(th)}$ 是，调节 R_w ，尽可能使得 V_{DQ} 为最大值，此时：

$$V_{DQ} = V_{DQ_{max}} ; I_{DQ} \approx 0 ; V_{GS} = V_{GS(off)}$$

七、思考题

1.试简单说明，为什么场效应管基本放大电路的输入电阻的测量方法不能使用三极管基本放大电路的那种测试方法？（注意查看示波器探头的相关参数）