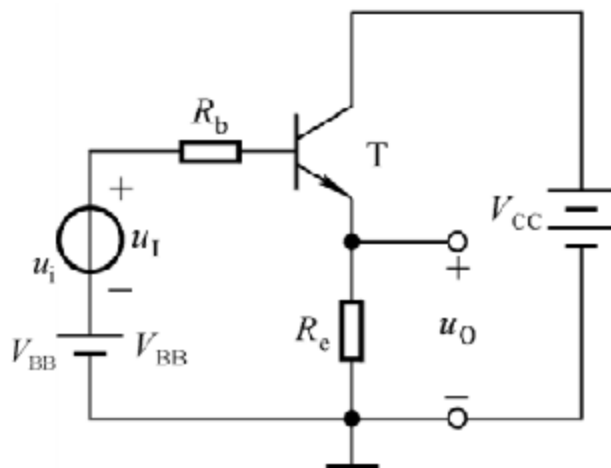


2.5 晶体管单管放大电路的三种基本接法

3 种基本接法：共射、共集、共基

它们的组成原则和分析方法完全相同，但是动态参数具有不同的特点。

2.5.1 基本共集放大电路



1. 求Q点：直流通路

• 输入回路

$$V_{BB} = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + I_{EQ} R_e$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$$

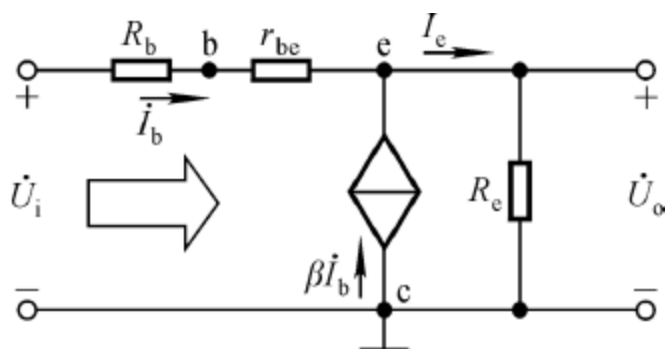
• 输出回路

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \approx I_{EQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ} R_e$$

动态分析：

将电路中的晶体管用 h 参数等效模型取代可得到放大电路的交流等效电路。



交流等效电路

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_e R_e}{\dot{I}_b (R_b + r_{be}) + \dot{I}_e R_e}$$

$$= \frac{(1 + \beta) R_e}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e} < 1$$

$$R_i = \frac{\dot{I}_b (R_b + r_{be}) + \dot{I}_e R_e}{\dot{I}_b}$$

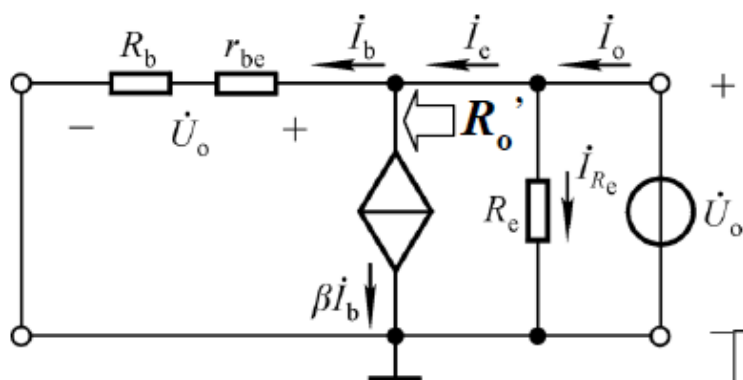
$$\boxed{R_i} = R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e$$

U_o 与 U_i 同相且 $U_o < U_i$; R_i 比较大, 可达到几十千欧到几百千欧。

**当 $(1 + \beta) R_e \gg (R_b + r_{be})$ 时, $A_u \approx 1$
称为射极跟随器(emitter follower)**

虽然没有电压放大能力, 但是输出电流 I_e 远远大于输入电流 I_b , 所以电路仍然具有功率放大作用。

计算输出电阻时, 采用加压求流法:



$$R_o = R_e // R_o'$$

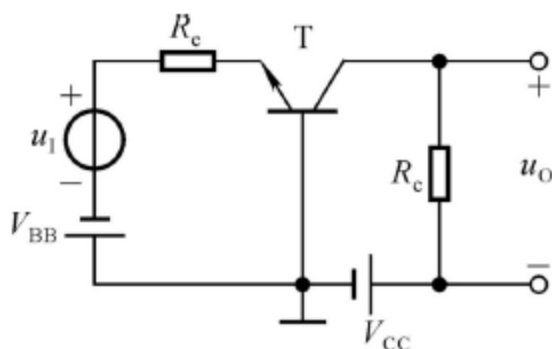
$$R_o' = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_e} = \frac{\dot{I}_b (R_b + r_{be})}{(1 + \beta) \dot{I}_b} = \frac{R_b + r_{be}}{(1 + \beta)}$$

$$R_o = R_e // \frac{R_b + r_{be}}{(1 + \beta)} \quad R_o \text{ 小!} \quad \text{基极电阻等效到射极回路除以}(1 + \beta)$$

R_o 可以小到几十欧姆。

共集放大电路的优点：输入电阻大、输出电阻小，因此从信号源索取的电流小而且带负载能力强，常用于多级放大电路的输入级和输出级；也可以用于连接两个电路，减少电路之间直接相连带来的影响，起到缓冲作用。

2.5.2 基本共基放大电路



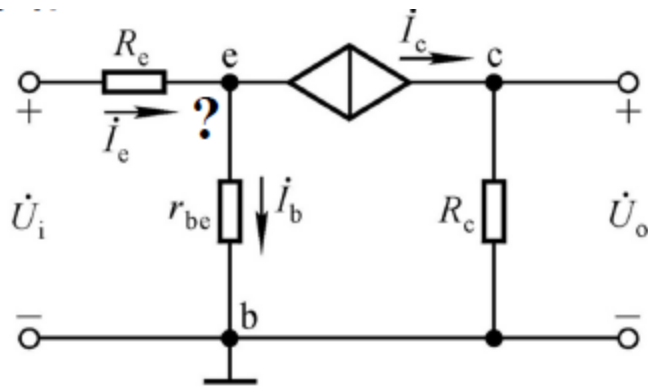
求Q点：直流通路

$$I_{EQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_e} \approx I_{CQ}$$

$$U_{CEQ} = U_C - U_E$$

$$= V_{CC} - I_{CQ} R_c + U_{BEQ}$$

交流等效电路：



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_c R_c}{\dot{I}_e R_e + \dot{I}_b r_{be}}$$

$$= \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e} \quad \boxed{U_o \text{ 与 } U_i \text{ 同相}}$$

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_e} = \frac{\dot{I}_e R_e + \dot{I}_b r_{be}}{\dot{I}_e}$$

$$= R_e + \frac{r_{be}}{1 + \beta} \quad R_i \text{ 小!} \quad \boxed{R_o = R_c}$$

共基放大电路的特点：

共基放大电路无电流放大能力，但是当 $R_e=0$ 的时候，电压放大倍数与阻容耦合共射放大电路的数值相同，均为 $\beta R_c / r_{be}$ ，所以有足够的电压放大能力，从而能实现功率放大。

输入电阻较共射电路小；输出电阻与共射电路相当，均为 R_c 。最大优点是频带宽。

2.5.3 三种放大电路的比较

基本接法	CE	CC	CB
$ A_u $	大(U_o 与 U_i 反相)	<1 (U_o 与 U_i 同相)	中(U_o 与 U_i 同相)
A_i	β	$1+\beta$	$\alpha=\beta/(1+\beta)<1$
R_i	中	大	小
R_o	R_c	小	R_c
f_w	窄	中	宽
主要用途	用于低频电压放大	输入级和输出级	宽频带放大电路

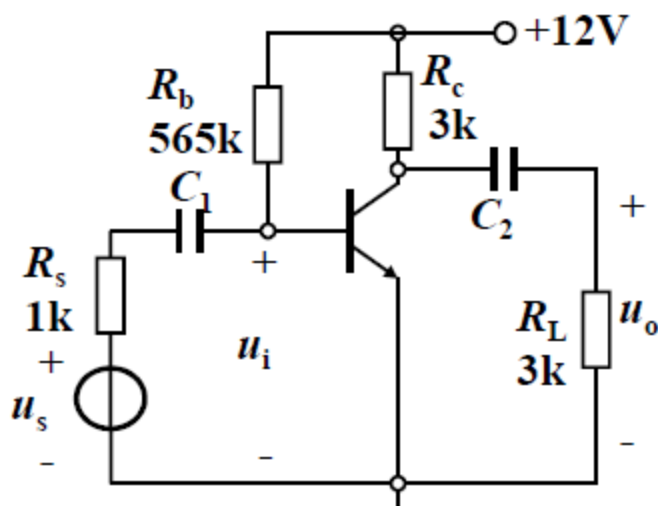
(1) 共射电路既能放大电流又能放大电压;

(2) 共集电路只能放大电流;

(3) 共基电路只能放大电压。

补充:

阻容耦合共射放大电路动态分析



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_c(R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}}$$

$$\dot{A}_u = \frac{-\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$$

1) $R_c \uparrow$, $|A_u|$ 如何变化?

2) $R_L \uparrow$, $|A_u|$ 如何变化?

3) $R_b \uparrow$, $|A_u|$ 如何变化?

4) β 增大能使 $|A_u|$ 增大吗?

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

静态影响动态!

1) 增大 2) 增大 3) 减小, 因为影响了静态工作点的设置 4) 影响并不大, 详细解答见课本 P131

R_i 与 R_s 无关

R_o 与负载 R_L 无关

2.6 场效应管放大电路

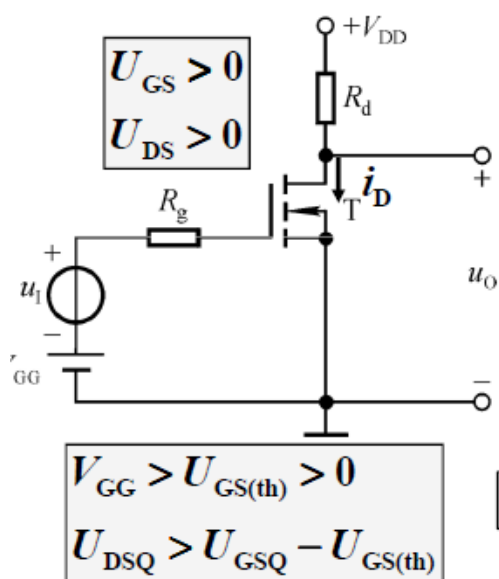
2.6.1 场效应管放大电路的三种接法

3 种接法: 共源放大电路、共漏放大电路、共栅放大电路
其中共栅电路很少用。

2.6.2 静态工作点的设置及其分析估算

一、基本共源放大电路

N 沟道增强型 MOS 管



分析要点:

- 场效应管能否工作在恒流区;
- 栅极不取电流;
- 利用电流方程或者特性曲线。

在输出回路增加漏极电源 VDD, 一方面使得漏-源电压大于预夹断电压以保证管子工作在恒流区, 另一方面作为负载的能源; R_d 与共射电路中的 R_c 具有相同的作用, 将漏极电流 i_D 的变化转换为电压 u_{DS} 的变化, 从而实现电压放大。

栅极和源极之间是绝缘的, 所以栅极电流为 0。

利用电流方程求解

$$U_{GSQ} = V_{GG}$$

$$I_{DQ} = I_{DO} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

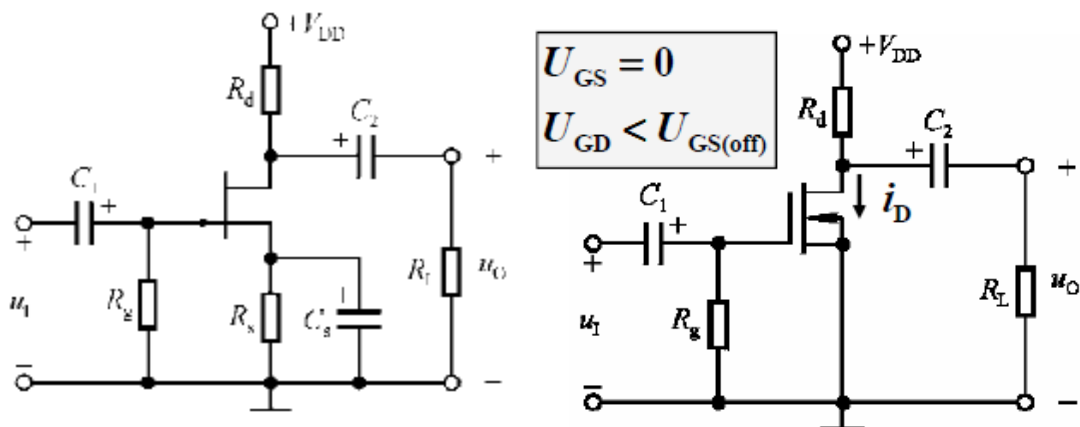
$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d$$

图解法求解

二、静态工作点的设置

可以有三种电路：自给偏压电路、分压式偏置电路、反馈式偏置电路

➤ 自给偏压电路



$$U_{GSQ} = -I_{DQ} R_s$$

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

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s)$$

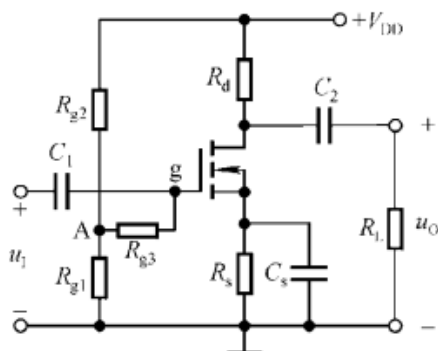
• 调节 R_s 保证 $U_{GS(off)} < U_{GS} < 0$

• 调节 R_d 保证 $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS(off)}$

右侧电路的 $U_{GSQ}=0$ ，采用耗尽型 N

沟道 MOS 管，因此其栅-源之间电压在小于零、等于零和大于零的一定范围内均能正常工作。求解 Q 点时，可以先在转移特性上求得 $U_{GS}=0$ 时的 i_D ，即 I_{DQ} ，然后利用 $U_{DSQ}=V_{DD}-I_{DQ}R_d$ 求出管压降 U_{DSQ} 。

➤ 分压式偏置电路



$$U_{GQ} = \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot V_{DD}$$

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - I_{DQ} R_s$$

$$I_{DQ} = I_{D0} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s)$$

• 调节 U_G 和 R_s 保证 $U_{GS} > U_{GS(th)} > 0$

• 调节 R_d 保证 $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS(th)}$

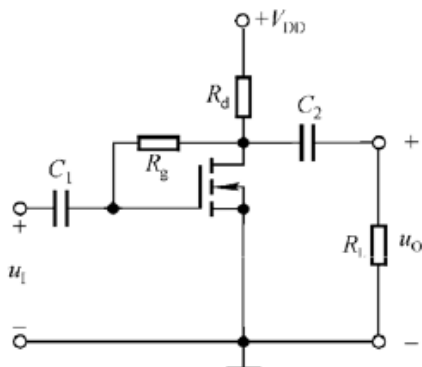
R_{g3} 可以取几兆欧，以增大输入电阻。

问题： R_{g3} 必须有吗？

有 R_{g3} 会好一点，因为这样可以增大输入电阻，

使得输入端获得的输入信号更大，能够提高输出信号的放大倍数。

➤ 反馈式偏置电路



$$U_{GSQ} = U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d$$

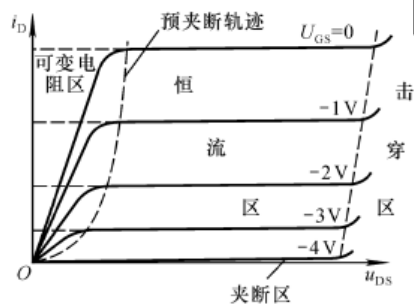
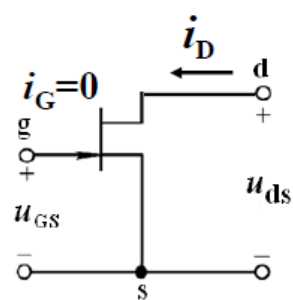
$$I_{DQ} = I_{D0} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{GD} = 0 < U_{GS(th)}$$

调节 R_d 保证 $U_{GS} > U_{GS(th)} > 0$

2.6.3 场效应管放大电路的动态分析

➤ JFET中、低频小信号等效模型



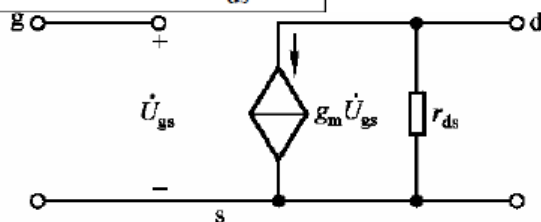
$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS})$$

低频跨导 g_m

漏源电导 $1/r_{ds}$

$$di_D = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}} \times du_{GS} + \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{u_{GS}} \times du_{DS}$$

$$\dot{I}_d = g_m \dot{U}_{gs} + \frac{1}{r_{ds}} \dot{U}_{ds}$$



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

$$r_{ds} = \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_{u_{GS}} \approx \frac{|V_A|}{I_{DQ}} = \frac{1}{\lambda I_{DQ}}$$

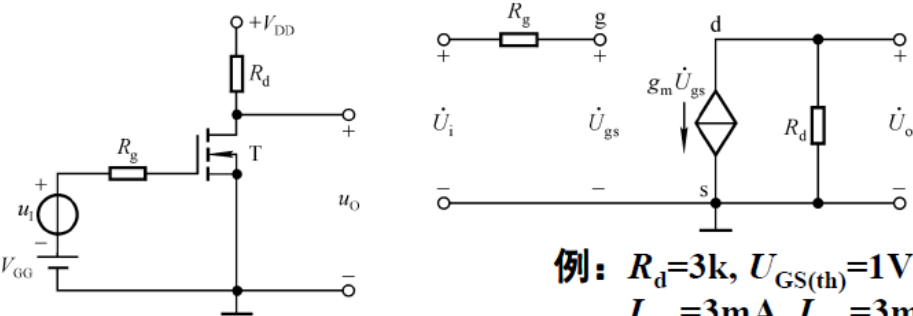
r_{ds} 是 $U_{GS}=U_{GSQ}$ 这条输出特性曲线上 Q 点处斜率的倒数， r_{ds} 与 r_{ce} 一样，描述曲线的上翘程度， r_{ds} 越大，曲线越平。通常， r_{ds} 在几十千欧到几百千欧之间，如果外电路的电阻较小时，也可以忽略 r_{ds} 的电流，将输出回路只等效成一个受控电流源。

$$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{D0} I_{DQ}}$$

g_m 与 Q 点紧密相关，Q 点越高， g_m 越大。

基本共源放大电路的动态分析

➤ 基本共源放大电路动态分析



例: $R_d=3k, U_{GS(th)}=1V$
 $I_{DQ}=3mA, I_{DO}=3mA$

$$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{DO} I_{DQ}} = 6mS$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m \dot{U}_{gs} \cdot R_d}{\dot{U}} = -g_m R_d$$

相对于CE放大电路较小

$R_i \approx \infty$
 $R_o = R_d$

$\dot{A}_u = -18$
 $R_i = \infty, R_o = 3k\Omega$

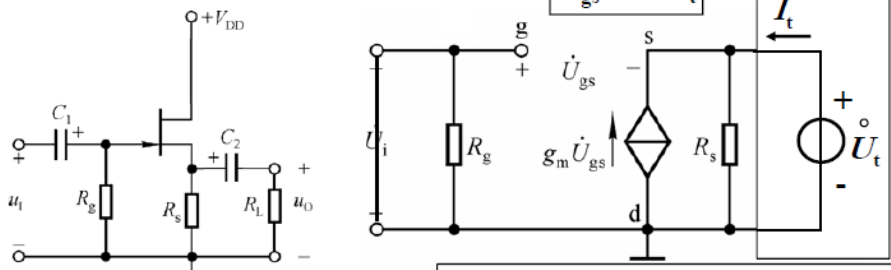
基本共源放大电路特点：输入电阻大，电压放大倍数较小

图中电路采用了 MOS 管的简化模型，认为 $r_{ds}=\infty$

基本共源放大电路的特点：与共射放大电路类似，**共源放大电路具有一定的电压放大能力，且输出电压与输入电压反相**，只是共源放大电路比共射电路的输入电阻大得多。

基本共漏放大电路的动态分析

➤ 共漏放大电路动态分析



$$\dot{U}_{gs} = -\dot{U}_t$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m \dot{U}_{gs} \cdot (R_s // R_L)}{\dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} \cdot (R_s // R_L)} = \frac{g_m (R_s // R_L)}{1 + g_m (R_s // R_L)}$$

$$R_o = \frac{\dot{U}_t}{\dot{I}_t} = \frac{\dot{U}_t}{\frac{\dot{U}_t}{R_s} - g_m (-\dot{U}_t)} = R_s // \frac{1}{g_m}$$

$R_i \approx R_g$

基本共漏放大电路特点：

- 具有电压跟随作用
- 输入电阻大
- 输出电阻小

场效应管与晶体管的比较，最突出的特点是**可以组成高输入电阻的放大电路**。另外还有**噪声低、温度稳定性好**、抗辐射能力强等特点，**便于集成化**，构成**低功耗**电路。

2.7 基本放大电路的派生电路

2.7.1 复合管放大电路

一、复合管组成原则

- 保证每个管子工作在放大状态时各极电流方向正确；
- 保证每个管子工作在放大状态时各极电位关系正确。
- **复合管的等效管型取决于第一个管**
- **采用复合管的目的：**
提高 R_i 、提高 β 、改变管型

1. 由晶体管组成的复合管的电流放大倍数约为两个管子的放大倍数之积。

2. 场效应管与晶体管组成的复合管的跨导 $g_m \approx \frac{\beta_2 g_{m1}}{1 + g_{m1} r_{be}}$

建议大家看一看这一章最后的两个仿真操作，结论部分有一些分析。