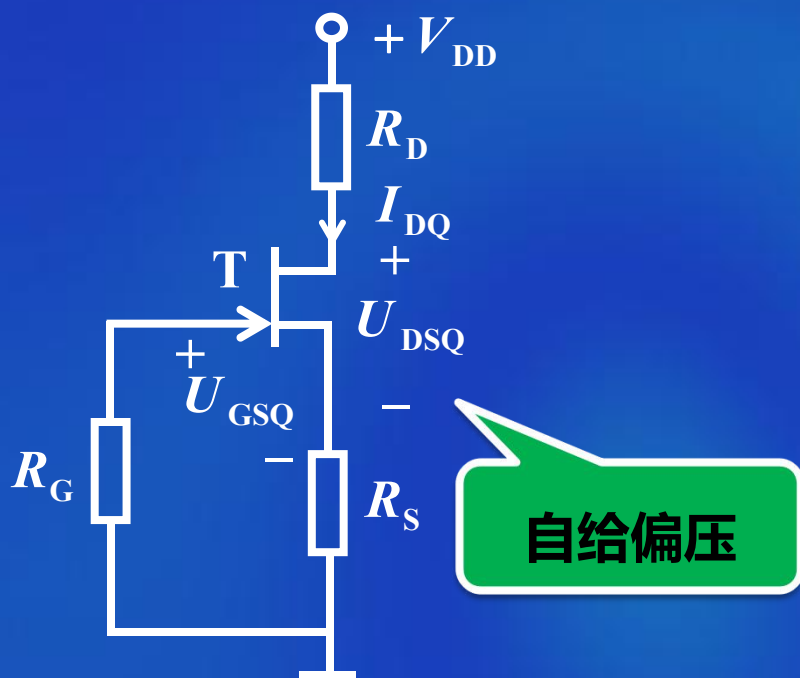


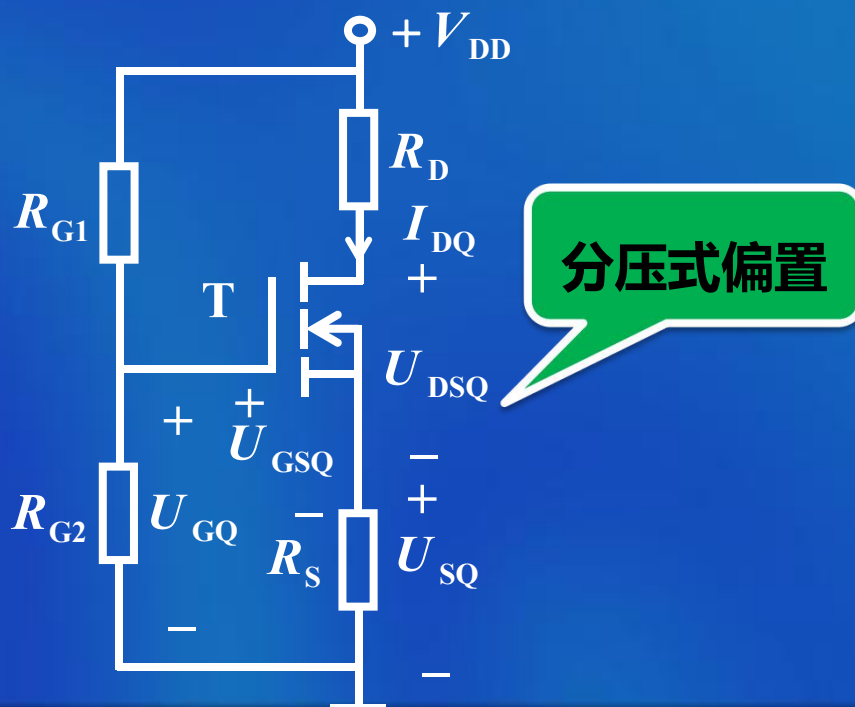
3.4 场效应管放大电路

3.4.1 场效应管的偏置及其电路的静态分析

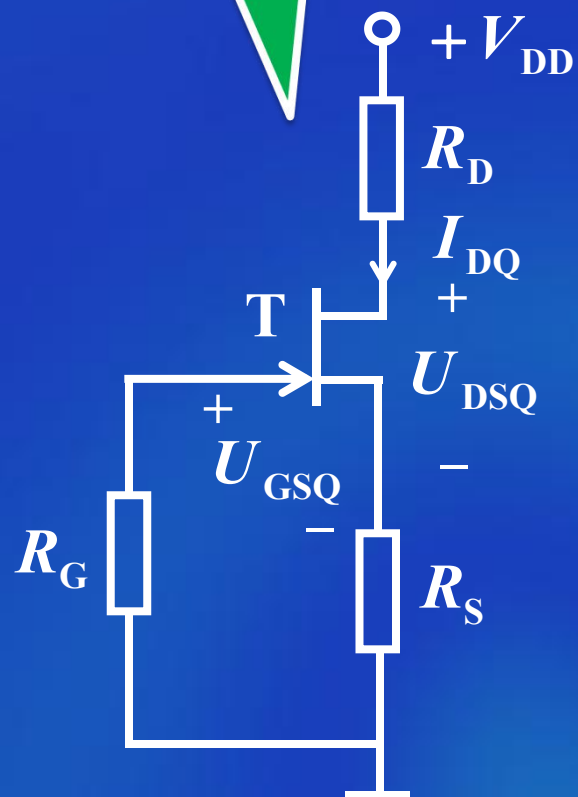
场效应管常用的偏置方式



自给偏压
分压式偏置

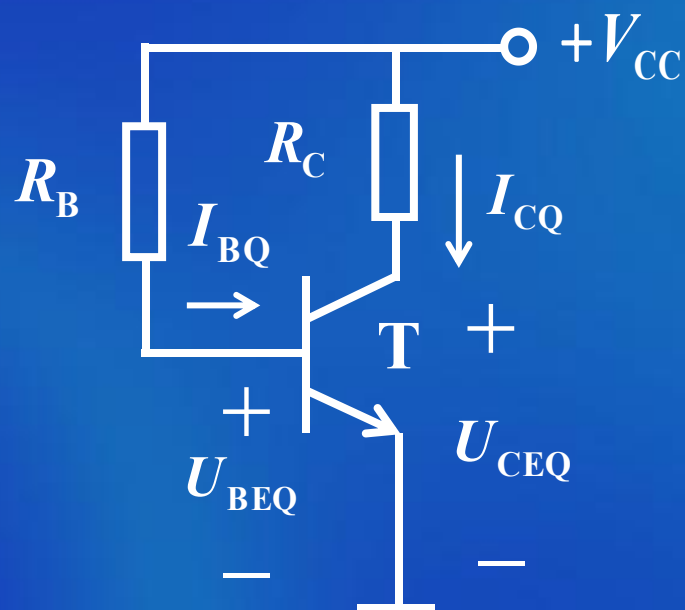


自给偏压



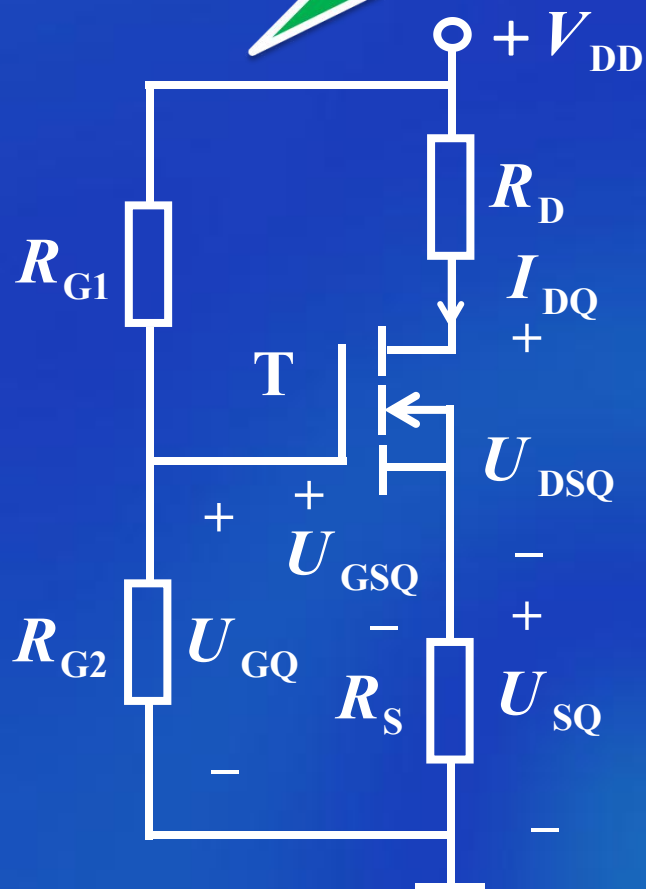
场效应管

分压式偏置



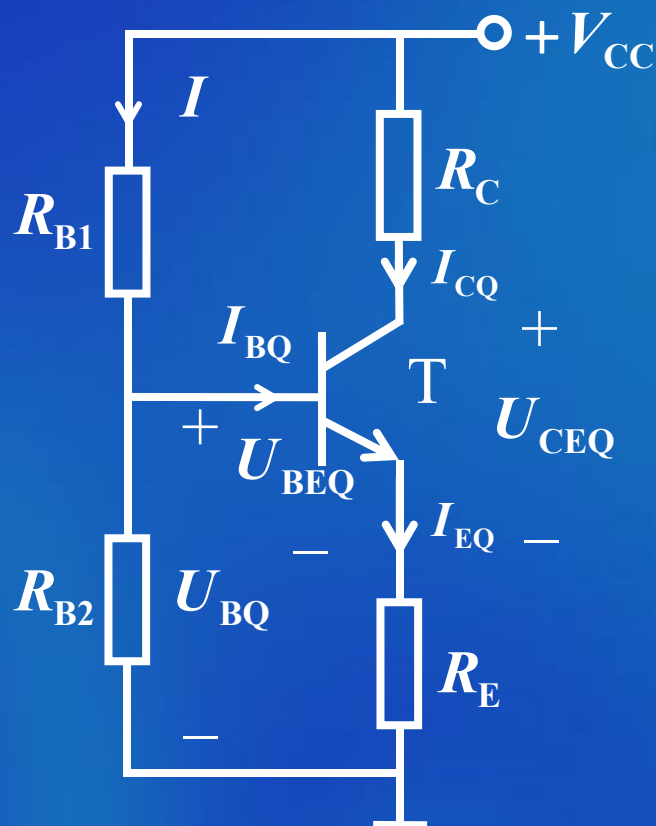
晶体管

分压式偏置



场效应管

分压式偏置



晶体管

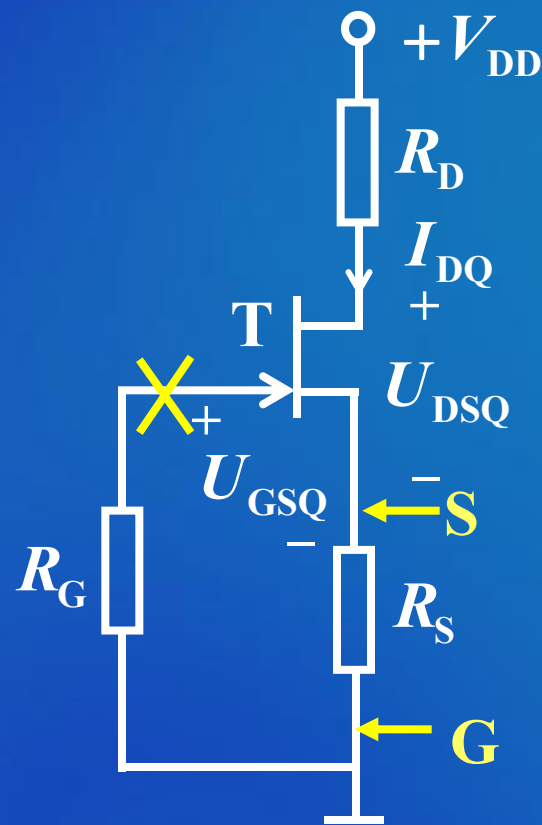
1. 自给偏压电路静态分析

(1) 电路

(2) 自给偏压原理

I_{DQ} 贯通源极与漏极

$$I_{DQ} \Rightarrow U_{SQ} = I_{DQ} R_S \Rightarrow U_{GSQ} = -I_{DQ} R_S$$



(3) 静态分析 方法：估算法

输入回路方程

$$U_{GSQ} = -I_{DQ} R_S \quad (1)$$

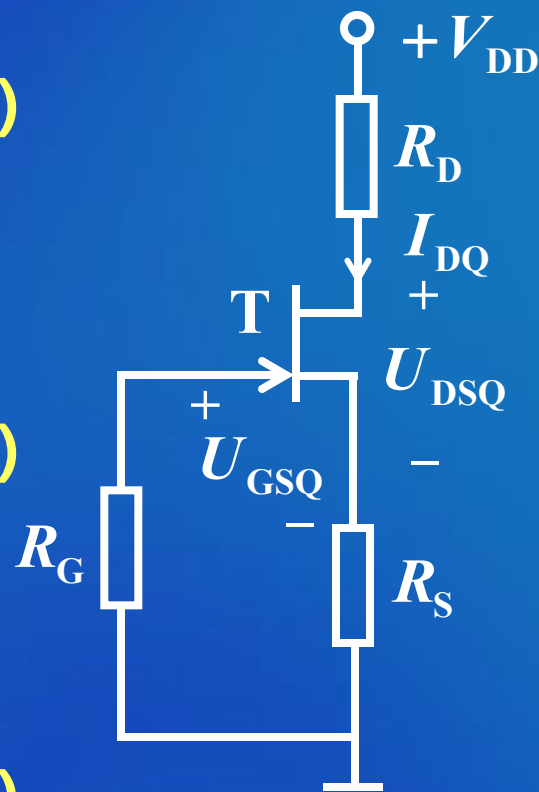
当管子工作于放大区时

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

两式联立可求得 I_{DQ} 和 U_{GSQ}

由此可得

$$U_{DSQ} = V_{DD} - (R_D + R_S) I_{DQ} \quad (3)$$



例 在图示电路其中, $V_{DD}=18V$ 、 $R_D=3k\Omega$ 、 $R_S=1k\Omega$ 、 $R_G=1M\Omega$, FET的 $I_{DSS}=7mA$ 、 $U_{GS(off)}=-8V$ 。试求 U_{GSQ} 、 I_{DQ} 和 U_{DSQ} 。

解

(1) 由
$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}\right)^2 = 7 \times \left(1 + \frac{U_{GSQ}}{8}\right)^2$$

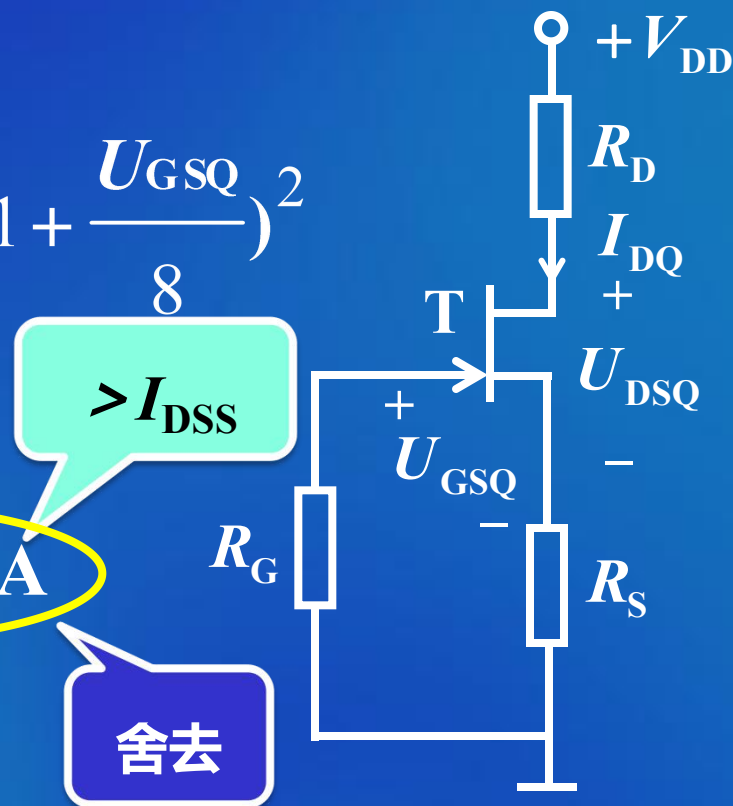
$$U_{GSQ} = -I_{DQ} R_S = -I_{DQ} \times 1$$

(2) 得 $I_{DQ1}=2.9 \text{ mA}$ $I_{DQ2}=22.3 \text{ mA}$

舍去伪值, 保留真值, 则

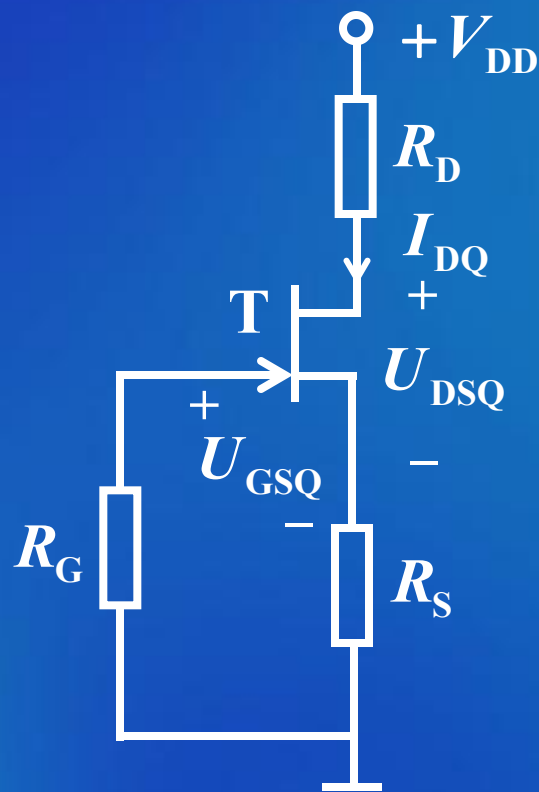
$$I_{DQ}=2.9 \text{ mA} \quad U_{GSQ} = -2.9V$$

(3)



根据 $I_{DQ}=2.9 \text{ mA}$ $U_{GSQ} = -2.9 \text{ V}$

$$\begin{aligned} (3) \quad U_{DSQ} &= V_{DD} - (R_D + R_S)I_{DQ} \\ &= 30 - 2.9 \times (3 + 1) \\ &= 18.4 \text{ V} \end{aligned}$$



2. 分压式偏置电路静态分析

(1) 电路

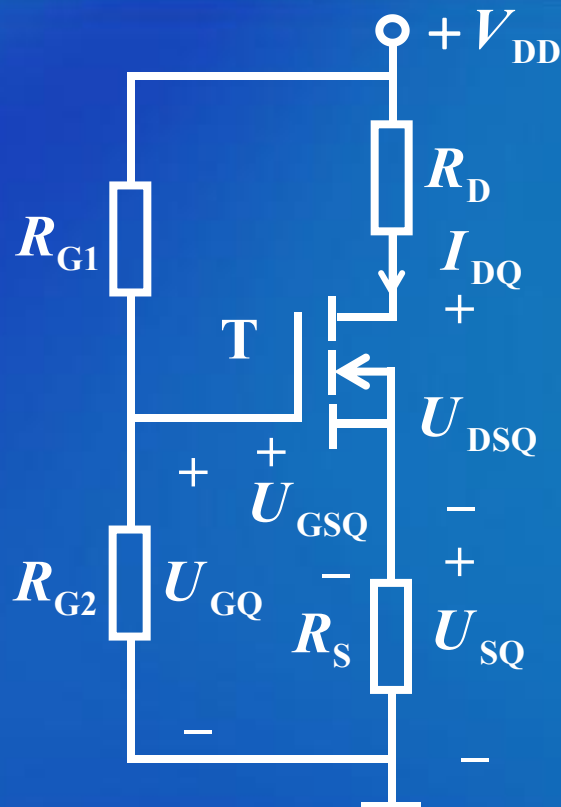
(2) 静态分析

图中
$$U_{GQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} \quad U_{SQ} = R_S I_{DQ}$$

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - R_S I_{DQ} \quad (1)$$

$$I_{DQ} = K[U_{GSQ} - U_{GS(th)}]^2 \quad (2)$$

故
$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}(R_D + R_S) \quad (3)$$



例 电路如图示, $V_{DD}=30\text{ V}$ 、 $R_S=1\text{k}\Omega$ 、 $R_{G1}=2\text{M}\Omega$,

$R_{G2}=500\text{k}\Omega$, $R_D=40\text{k}\Omega$ 。MOS管的 $K=0.2\text{mA/V}^2$ 、 $U_{GS(th)}=2\text{V}$ 。

试求 U_{GSQ} 、 I_{DQ} 和 U_{DSQ} 。

解 (1) $U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ}$

$$= \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - R_S I_{DQ}$$

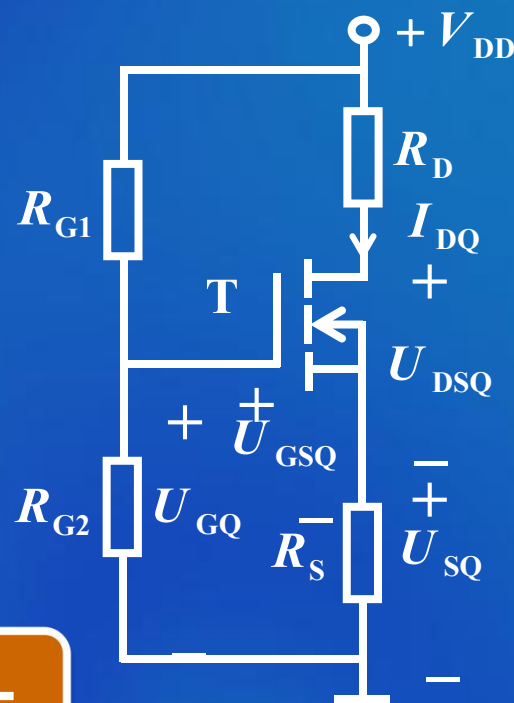
(2) $I_{DQ} = K[U_{GSQ} - U_{GS(th)}]^2$

得 $I_{DQ1} \approx 0.57\text{ mA}$ $U_{GSQ1} \approx 0.3\text{ V}$

$I_{DQ2} \approx 0.28\text{ mA}$ $U_{GSQ2} \approx 3.2\text{ V}$

$< U_{GS(th)}$

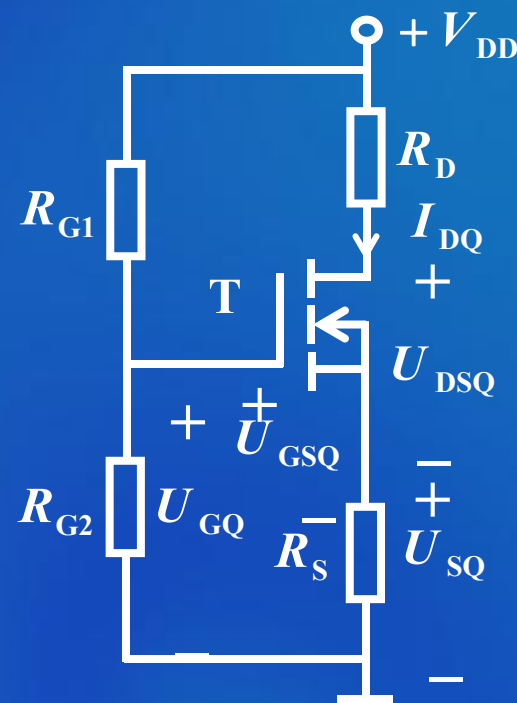
舍去

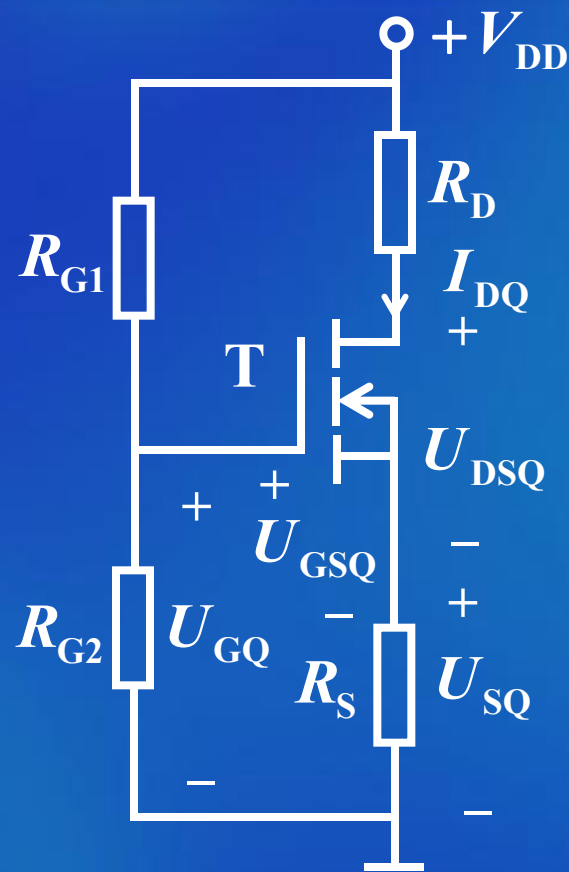
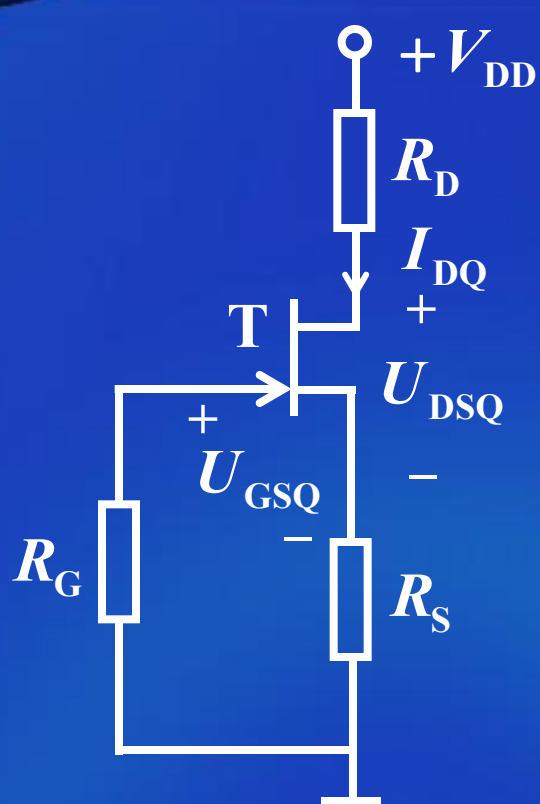


舍去伪值，保留真值，则

$$I_{DQ} \approx 0.28 \text{ mA}$$

$$(3) \quad U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}(R_D + R_S) \\ \approx 16 \text{ V}$$





两种偏置电路适用的FET：

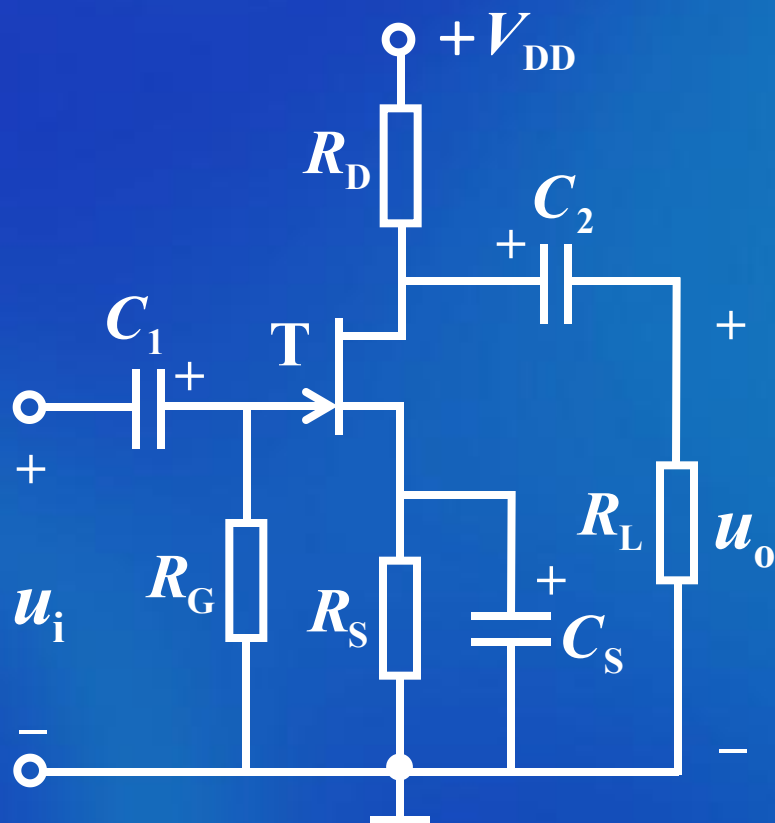
{ 自给偏压：耗尽型和结型
 分压式偏置：增强型、耗尽型

结型多采用自给偏压

3. 信号的输入和输出

常用的耦合方式

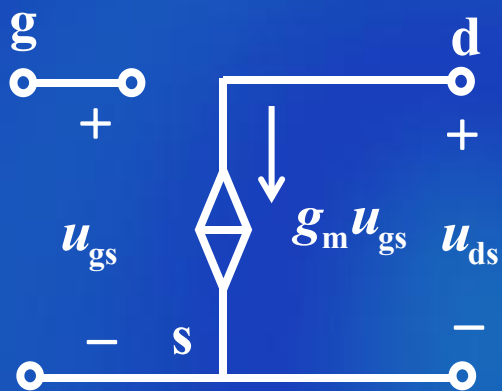
- 阻容耦合
- 变压器耦合
- 直接耦合



一种典型的阻容耦合共源极放大电路



当电路工作在小信号状态

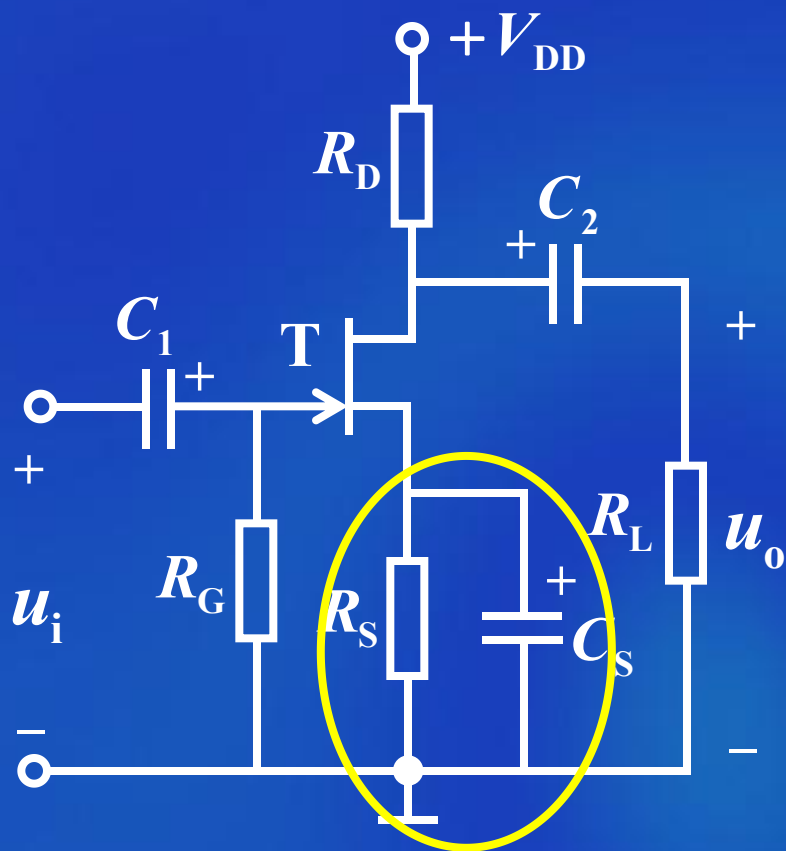


简化的微变等效电路

模型可以分析电路动态参数

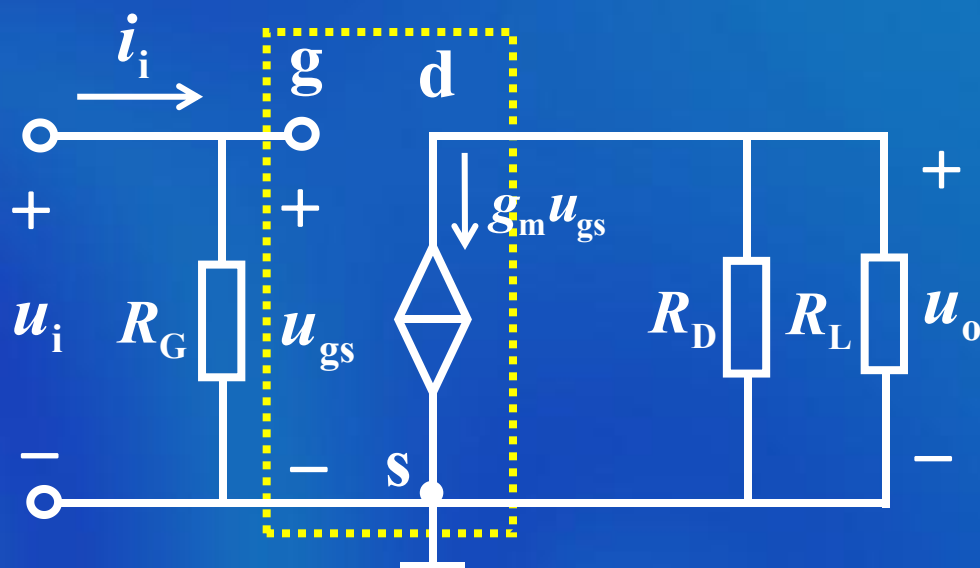
3.4.2 场效应管放大电路动态分析

1. 共源极放大电路

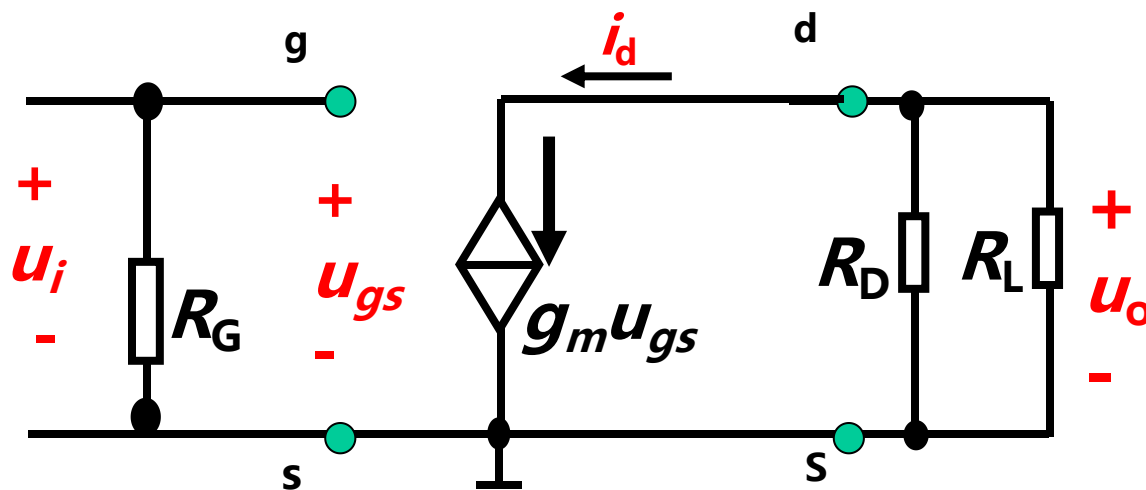


微变等效电路

先中间，后两边



场效应管微变等效电路画法：



a. 求电压放大倍数

由图可知

$$\dot{U}_o = -g_m \dot{U}_{gs} (R_D // R_L)$$

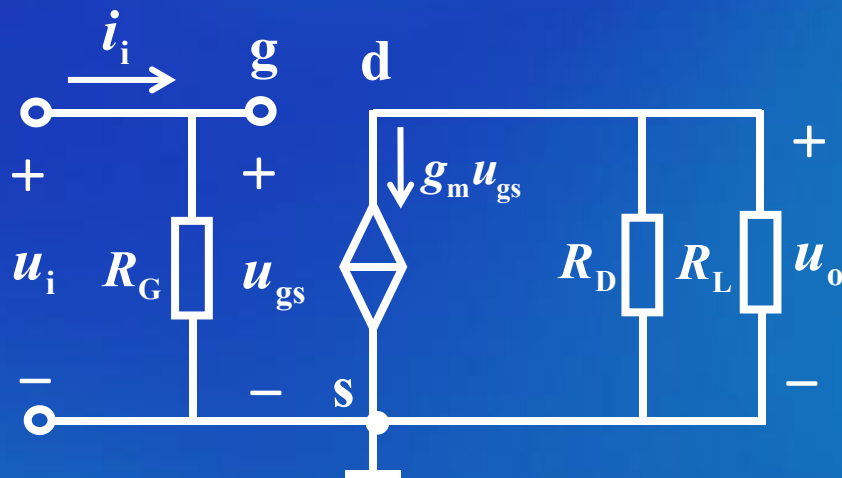
$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs}$$

故

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

$$= \frac{-g_m \dot{U}_{gs} (R_D // R_L)}{\dot{U}_{gs}}$$

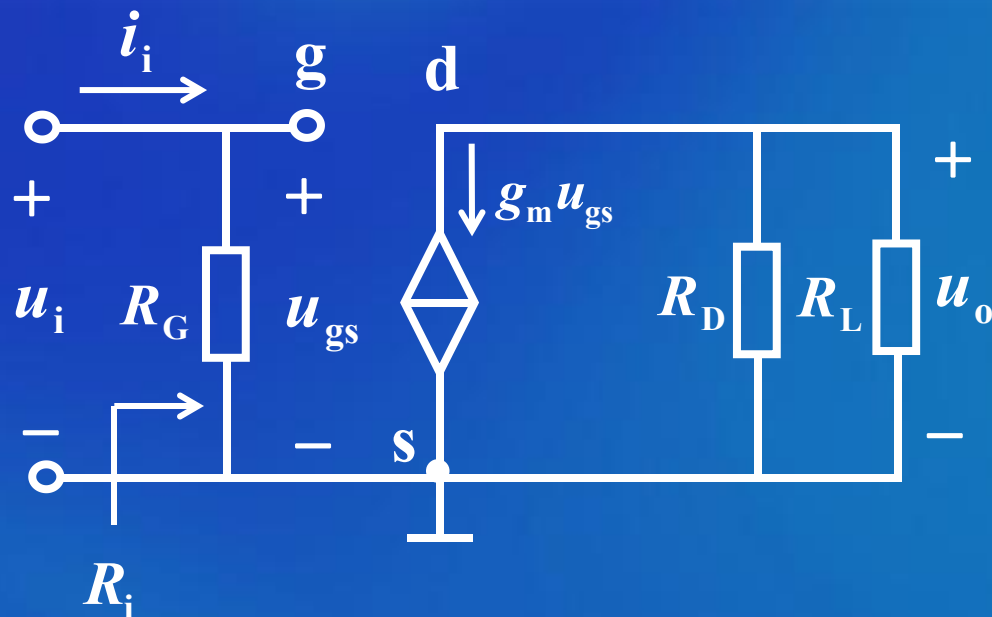
$$= -g_m R'_L$$



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

与共射电路比较

式中 $R'_L = R_L // R_D$

b. 求输入电阻 R_i 

由图可知

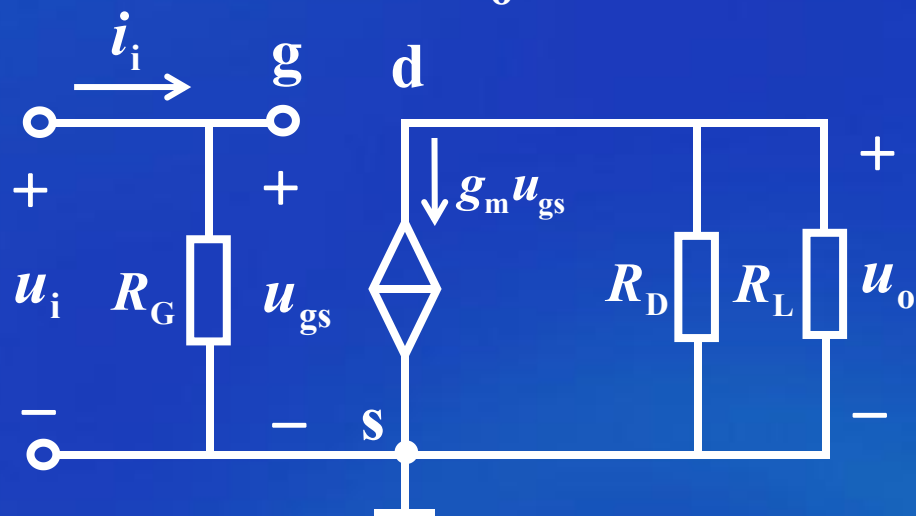
$$R_i = R_G$$

$$R_i = R_B // r_{be}$$

与共射电路比较

共射电路的输入电阻小，
而共源电路输入电阻大

c. 求输出电阻 R_o



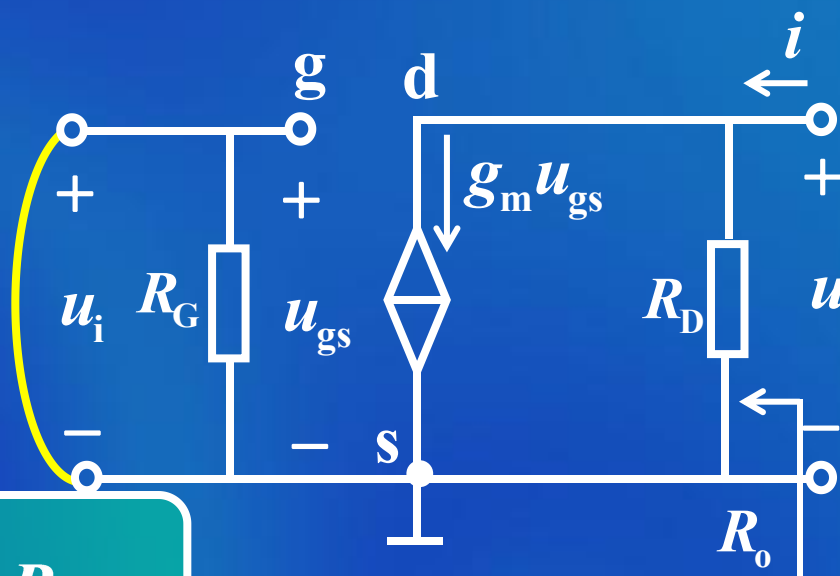
画出求输出电阻的等效电路

根据输出电阻的定义：

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_i=0 \\ R_L=\infty}}$$

由图可知

$$R_o = R_D$$



$$R_o = R_D$$

与共射电路比较

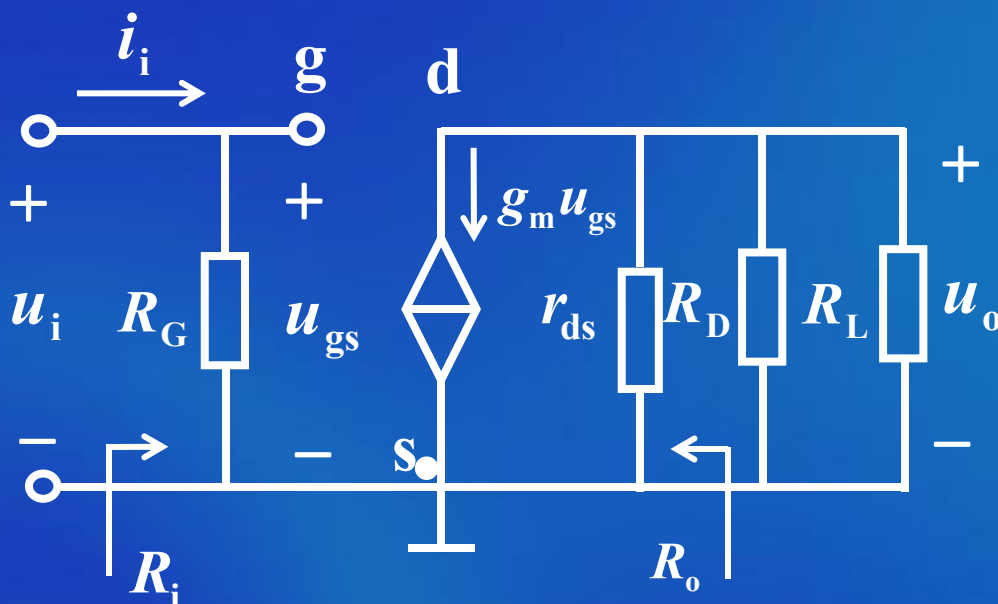
总结：共源极放大电路的动态分析

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -g_m R'_L$$

式中 $R'_L = R_D // R_L$

$$R_i = R_G$$

$$R_o = R_D$$



• 共源极放大电路特性

- 1) 与晶体管共射极电路类似，有电压放大能力；
- 2) 输入与输出信号反相；
- 3) 输出电阻 R_o 较大；
- 4) 输入电阻 R_i 远大于共射电路。

例：图示共源极电路，其中 $V_{DD}=30\text{ V}$ 、 $R_D=3\text{ k}\Omega$ 、 $R_S=1\text{ k}\Omega$ 、 $R_G=1\text{ M}\Omega$ 、 $R_L=5.1\text{ k}\Omega$ ，各电容器容量足够大。FET的 $I_{DSS}=7\text{ mA}$ 、 $U_{GS(\text{off})}=-8\text{ V}$ 。试求 A_u 、 R_i 和 R_o 。

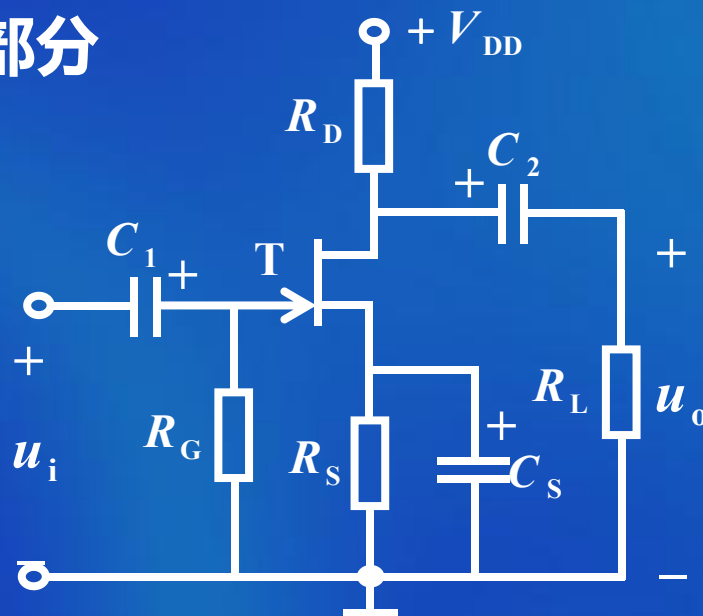
解：（1）静态分析见前课件部分

$$I_{DQ}=2.9\text{ mA} \quad U_{GSQ}=-2.9\text{ V}$$

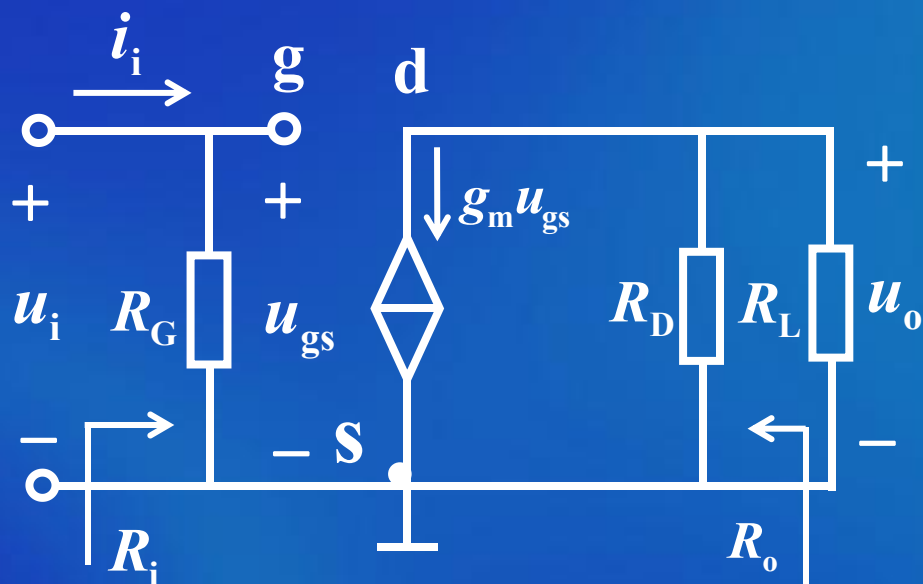
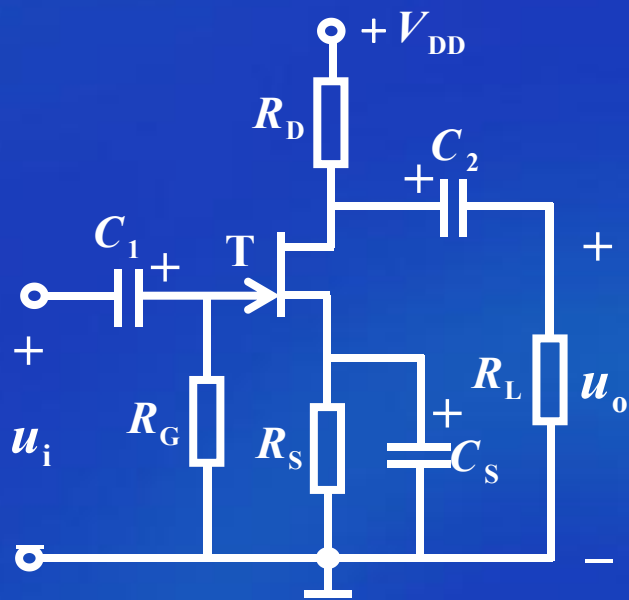
$$U_{DSQ}=18.4\text{ V}$$

（2）动态分析

画微变等效电路



微变等效电路



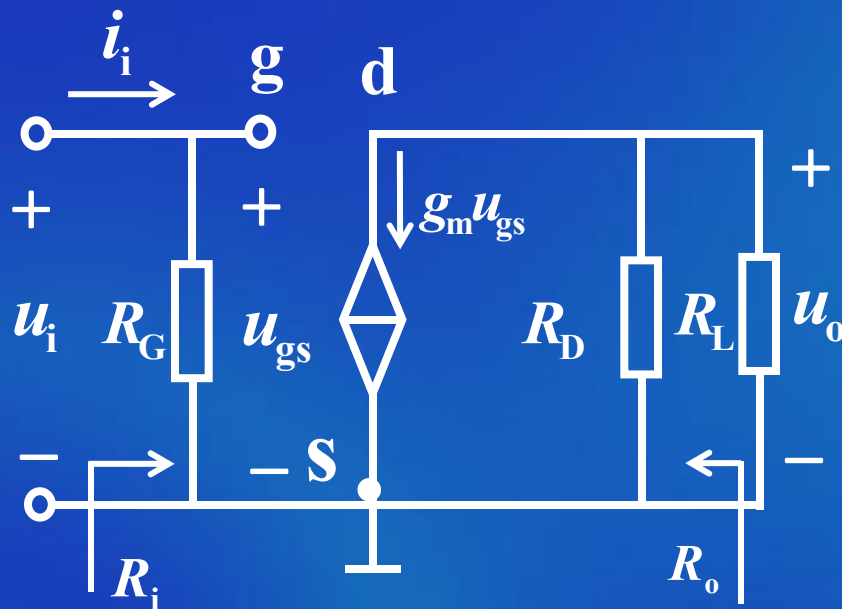
静态分析已知： $I_{DQ}=2.9 \text{ mA}$ $U_{GSQ}=-2.9\text{V}$

$$g_m = -\frac{2}{U_{GS(\text{off})}} \sqrt{I_{DQ} I_{DSS}} = 1.13 \text{ mS}$$

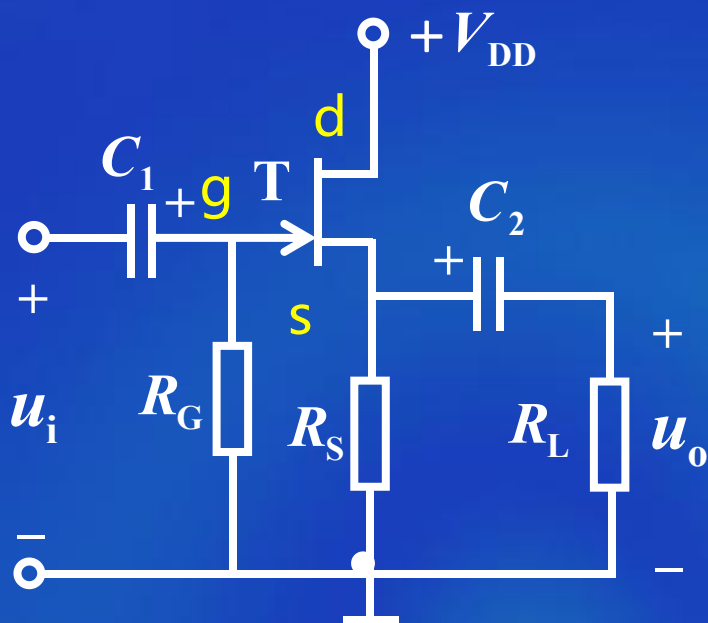
$$\begin{aligned} A_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \\ &= -g_m R_D // R_L \\ &= -2.1 \end{aligned}$$

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

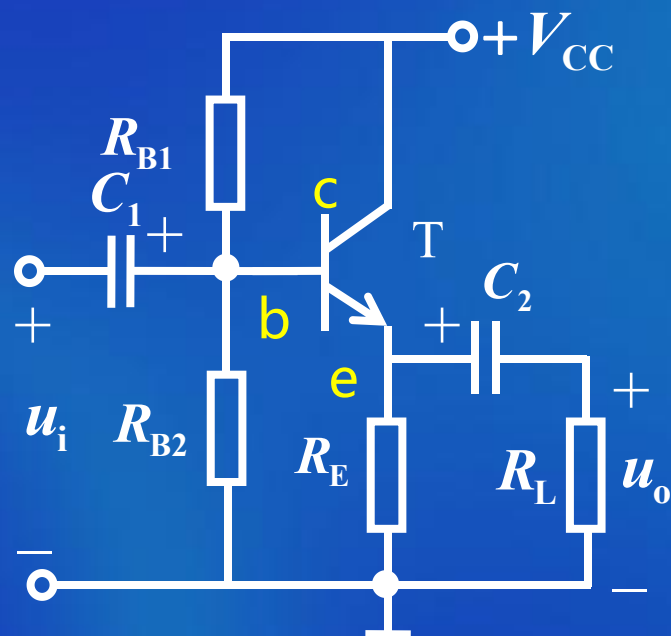
$$R_o = R_D = 3 \text{ k}\Omega$$



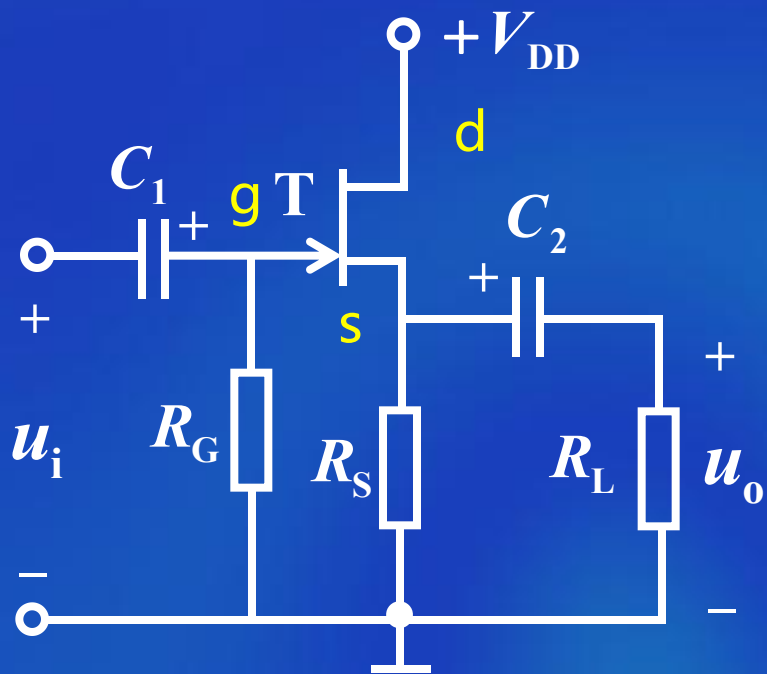
2. 共漏极放大电路



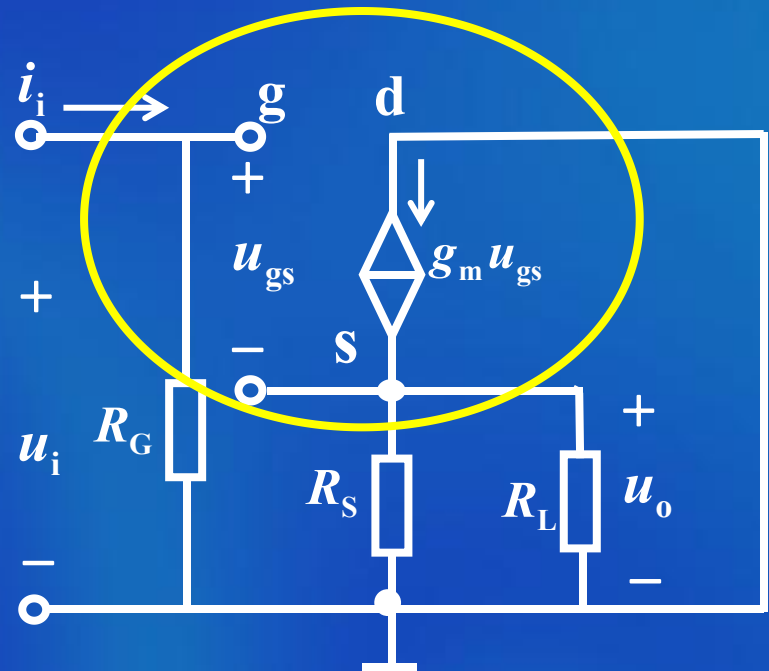
共漏极放大电路



共集电极放大电路



微变等效电路



a. 求电压放大倍数

由图可知

$$\dot{U}_o = g_m \dot{U}_{gs} (R_S // R_L)$$

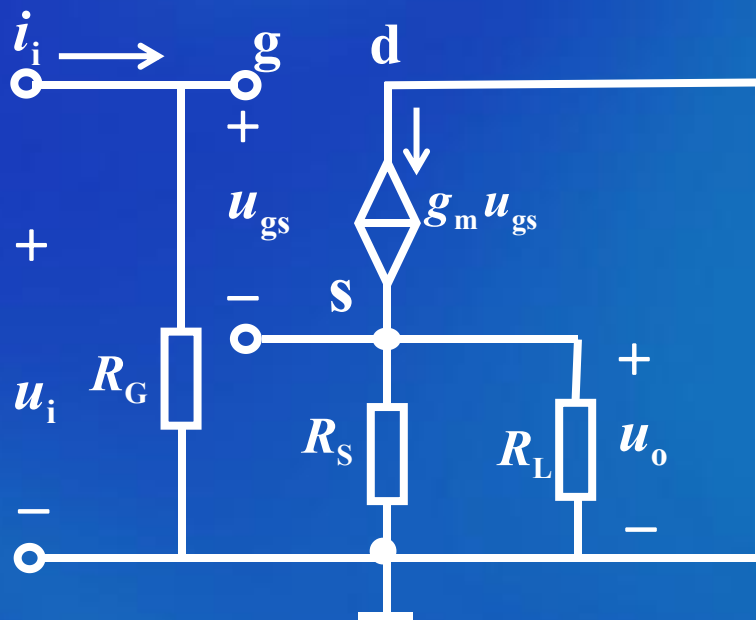
$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} + \dot{U}_o$$

故

$$\begin{aligned} A_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \\ &= \frac{g_m \dot{U}_{gs} (R_S // R_L)}{\dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} (R_S // R_L)} \\ &= \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \end{aligned}$$

式中

$$R'_L = R_L // R_S$$



$$A_u = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$

与共集电极电路
比较

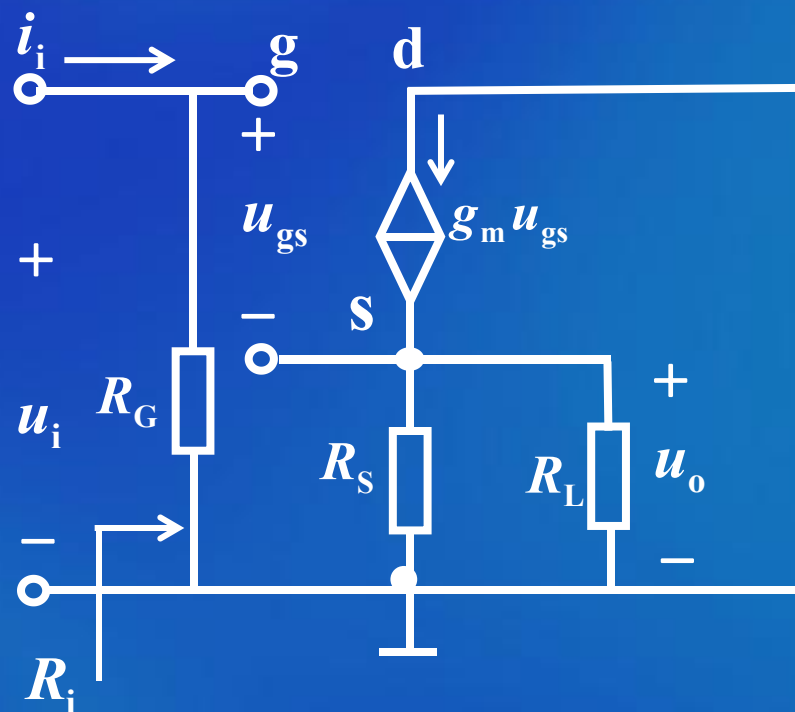
b. 求输入电阻 R_i

输入电阻

$$R_i = R_G$$

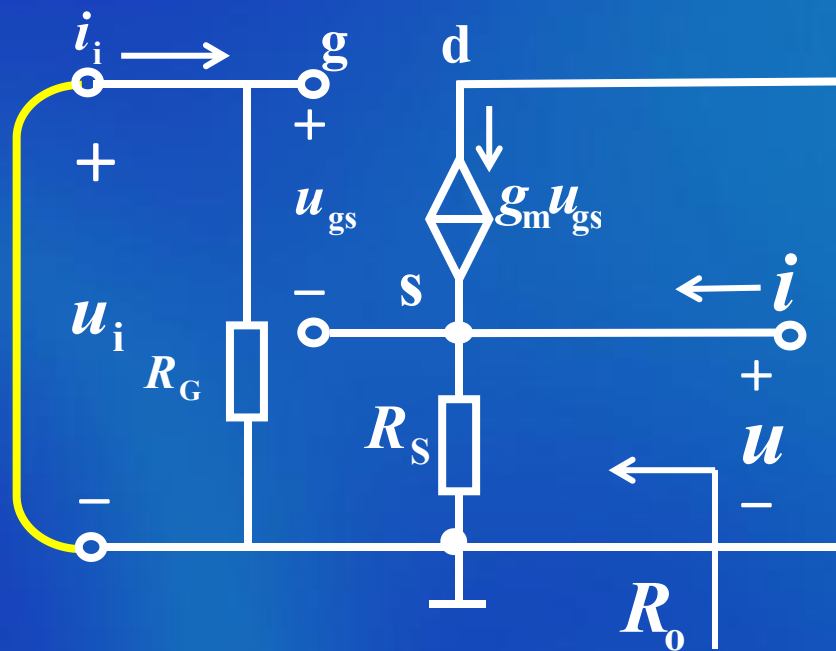
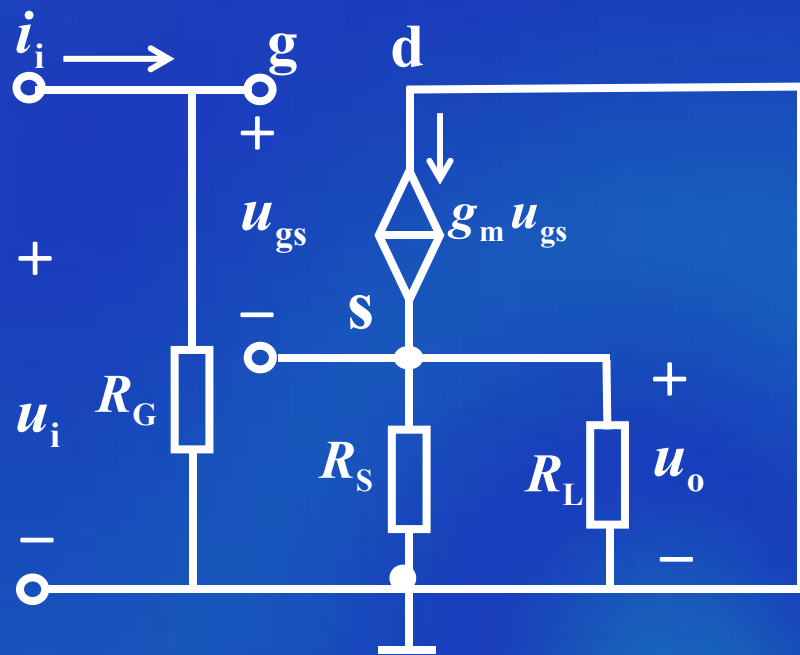
与共集电极电路比较

$$R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$$



c. 求输出电阻 R_o

求 R_o 等效电路



由图可知

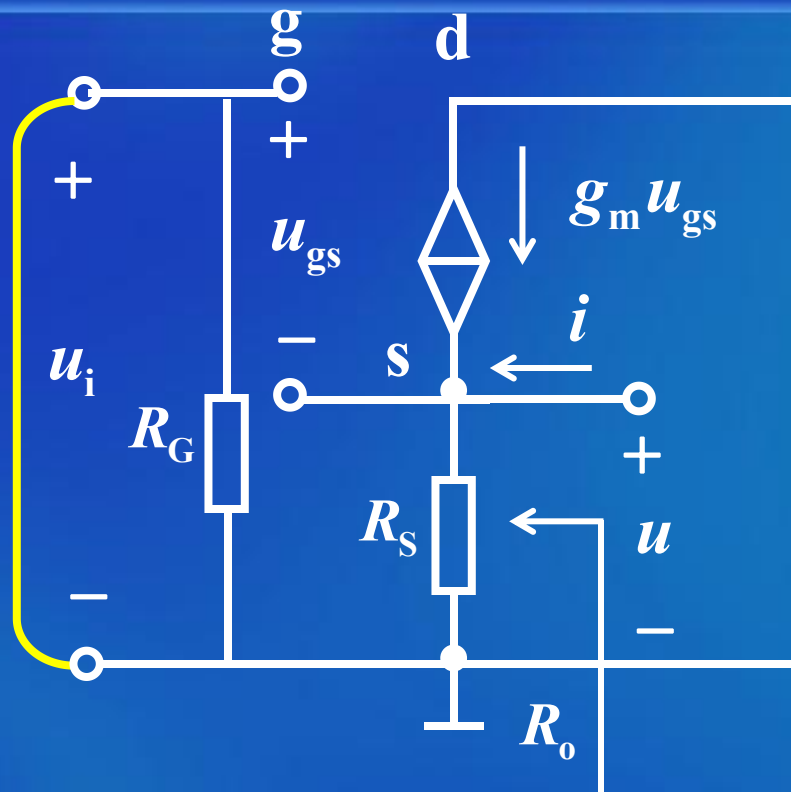
$$I + g_m U_{gs} = \frac{U}{R_s}$$

$$I = \frac{U}{R_s} - g_m U_{gs}$$

$$U_{gs} = -U$$

故电路的输出电阻

$$\begin{aligned} R_o &= \frac{U}{I} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{R_s} + g_m} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{\frac{1}{g_m}}} = R_s // \frac{1}{g_m} \end{aligned}$$



与共集电极电路比较

$$R_o = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

总结 共漏极放大电路的动态分析

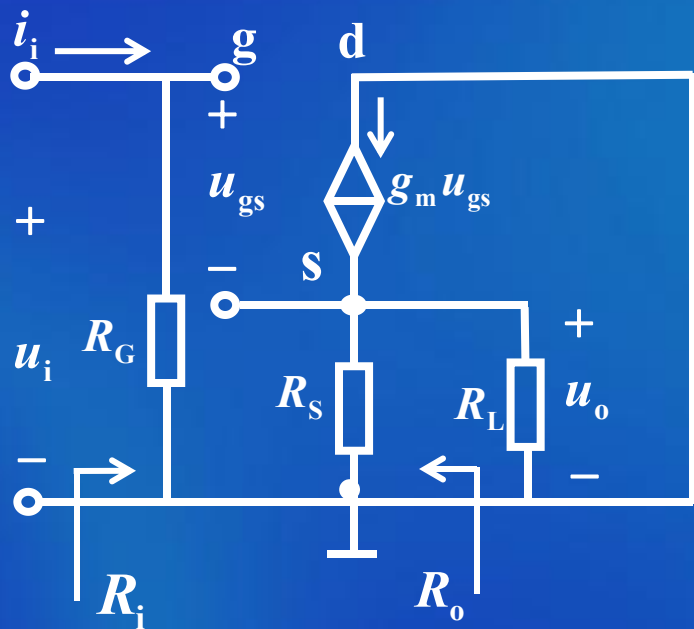
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L}$$

式中

$$R'_L = R_S // R_L$$

$$R_i = R_G$$

$$R_o = R_S // \frac{1}{g_m}$$



• 共漏极放大电路特性

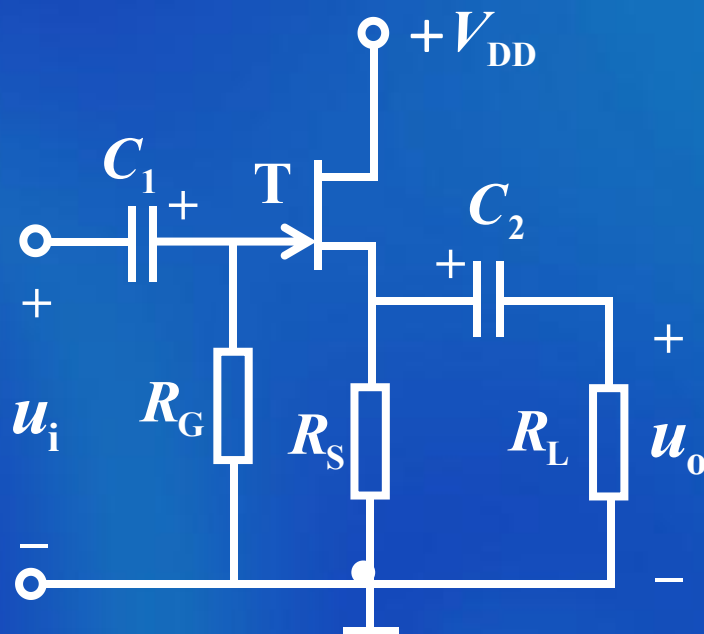
- 1) 与晶体管共集电极电路类似，**无电压放大能力**；
- 2) 输入与输出信号**同相**；
- 3) 输入电阻 R_i **大**；
- 4) 输出电阻 R_o **较小**。

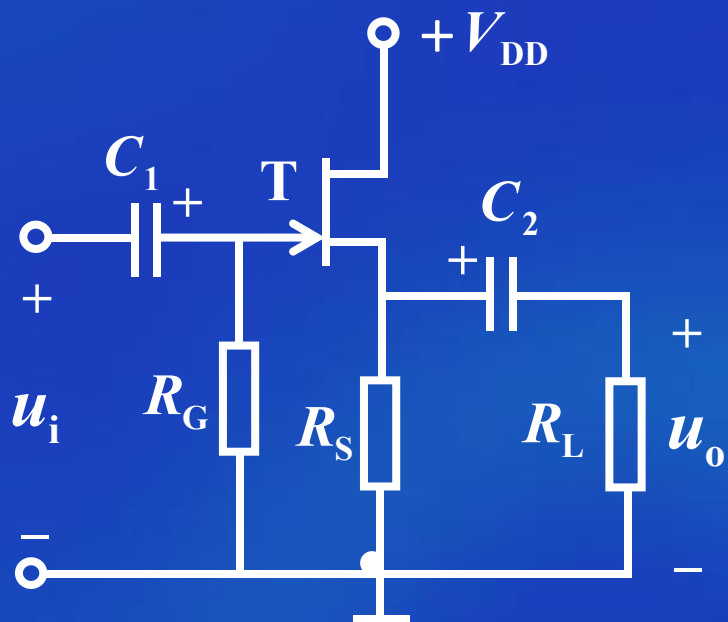
例： 图示共漏极电路，其中 $V_{DD}=30\text{ V}$ 、 $R_S=R_L=10\text{ k}\Omega$ 、 $R_G=1\text{ M}\Omega$ ， $g_m=3\text{ mS}$ ，各电容器容量足够大。

试求 A_u 、 R_i 和 R_o 。

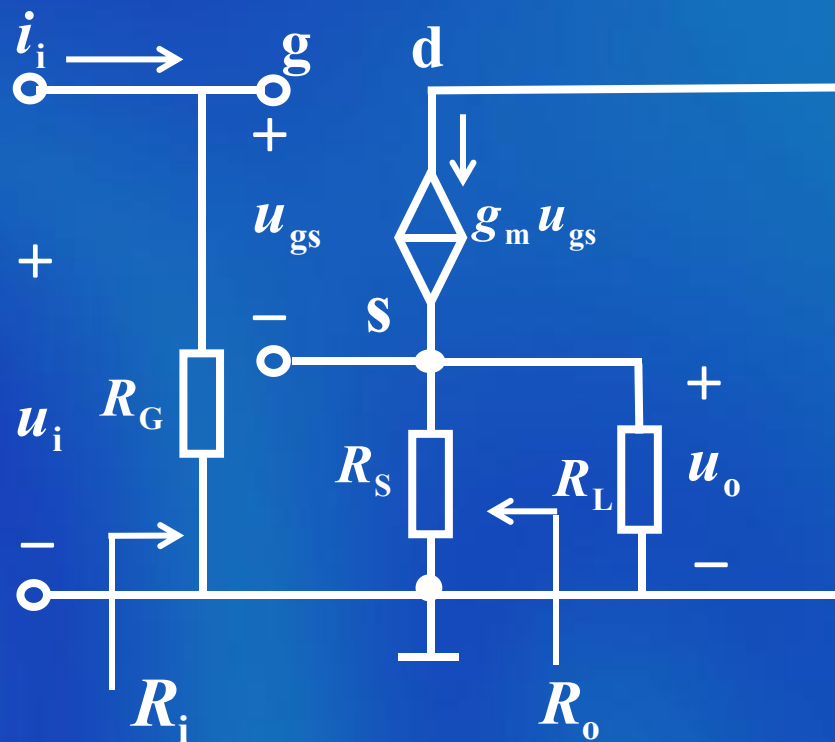
解： 已知 g_m 大小，不必求Q点

直接进行动态分析
画微变等效电路





微变等效电路

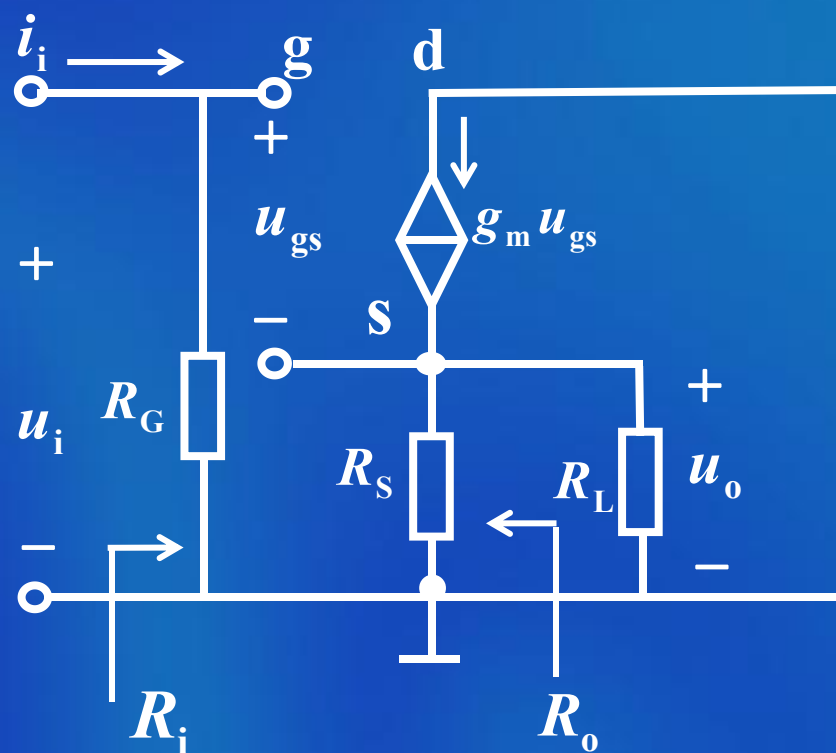


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

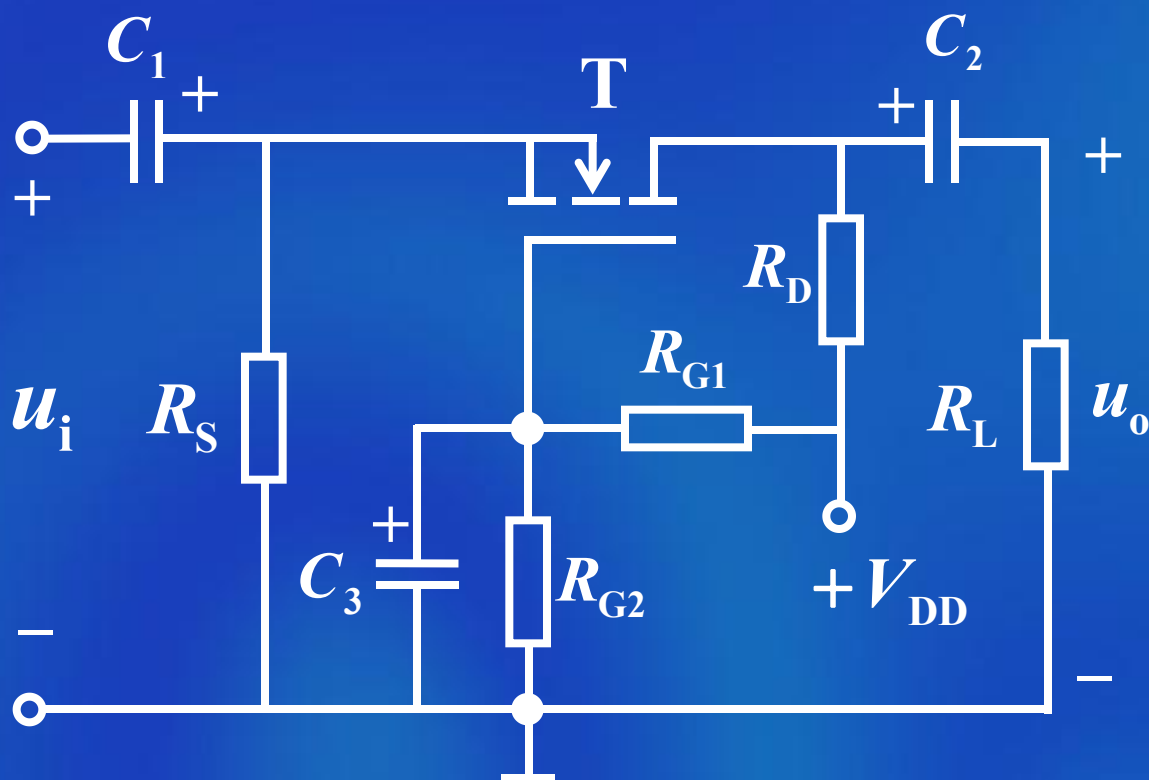
$$= \frac{g_m R_S // R_L}{1 + g_m R_S // R_L} = 0.94$$

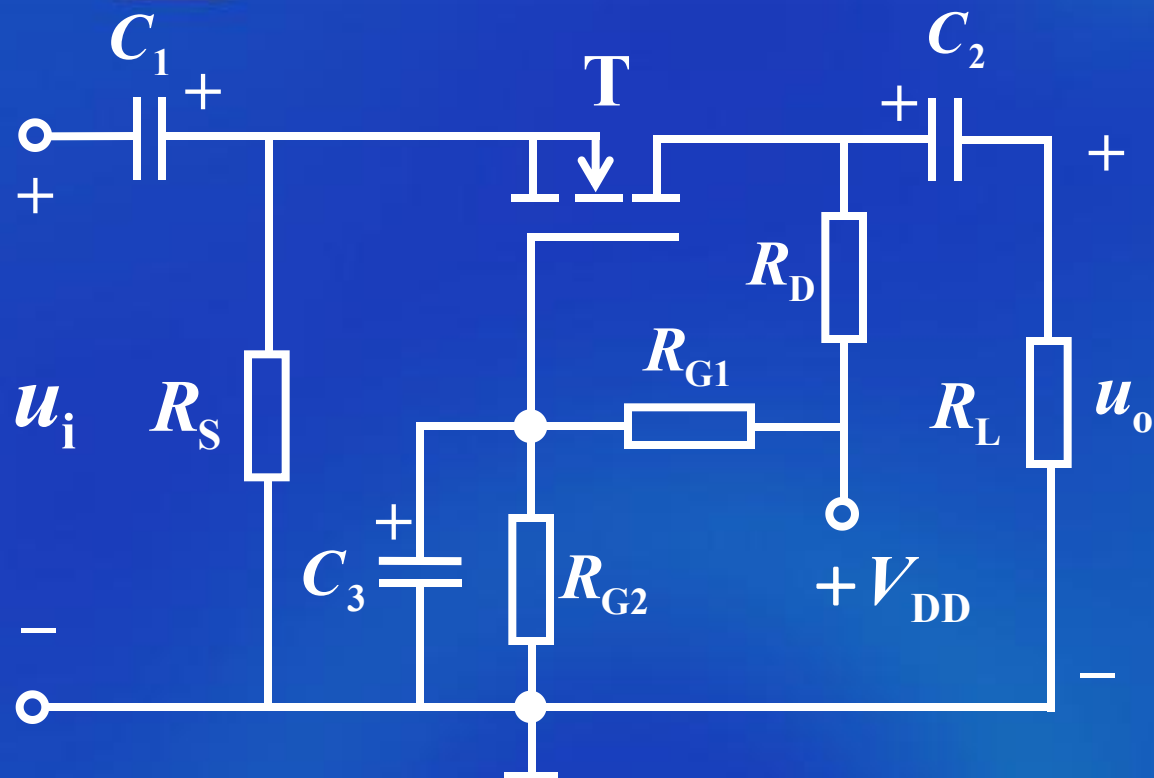
$$R_i = R_G = 1 \text{ M}\Omega$$

$$R_o \approx R_S // \frac{1}{g_m} = 0.33 \text{ k}\Omega$$

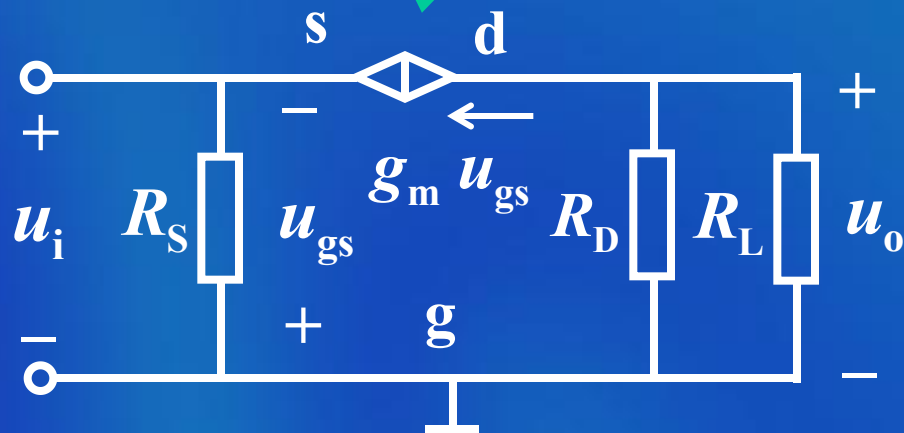


3. 共栅极放大电路 (自学)

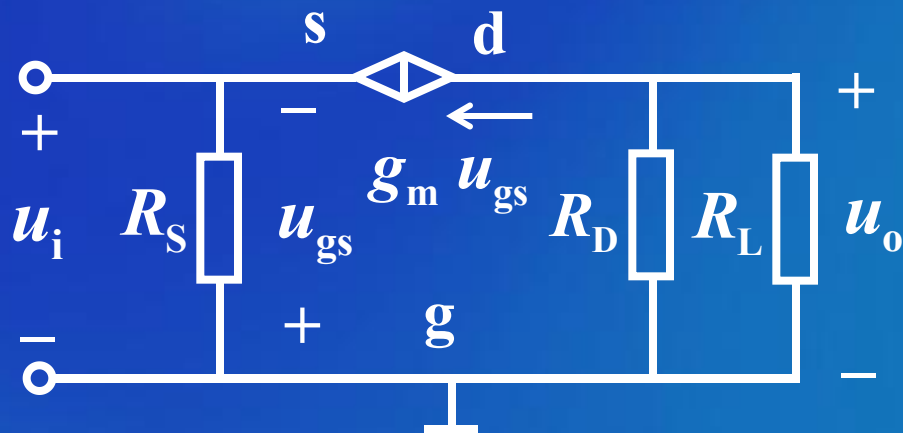




微变等效电路



a. 求电压放大倍数



由图可知

$$\dot{U}_o = -g_m \dot{U}_{gs} (R_D // R_L)$$

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

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = g_m (R_D // R_L)$$

b. 求输入电阻 R_i

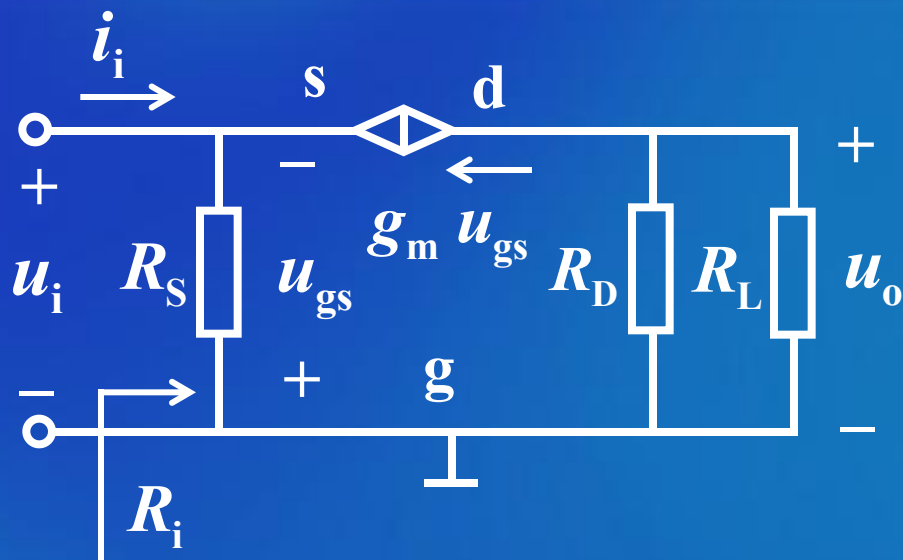
由于

$$I_i = \frac{U_i}{R_S} - g_m U_{gs}$$

$$= \frac{U_i}{R_S} + g_m U_i$$

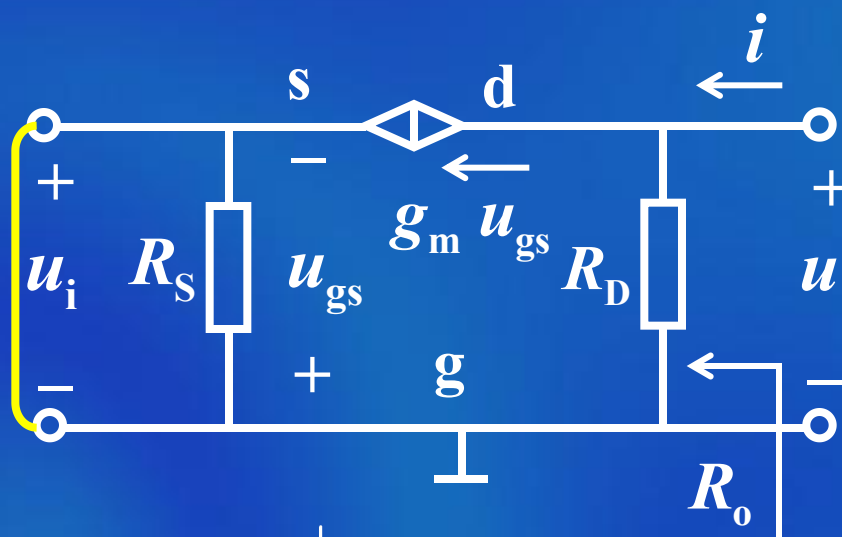
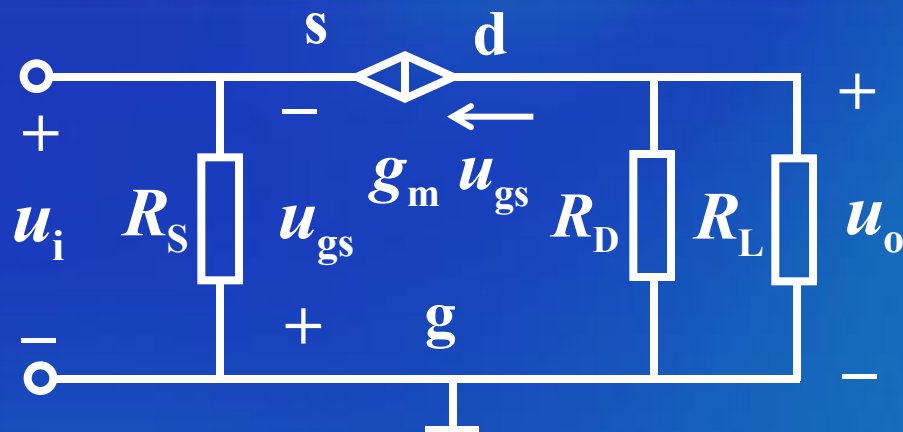
故

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{1}{\frac{1}{R_S} + g_m} = R_S // \frac{1}{g_m}$$



c. 求输出电阻 R_o

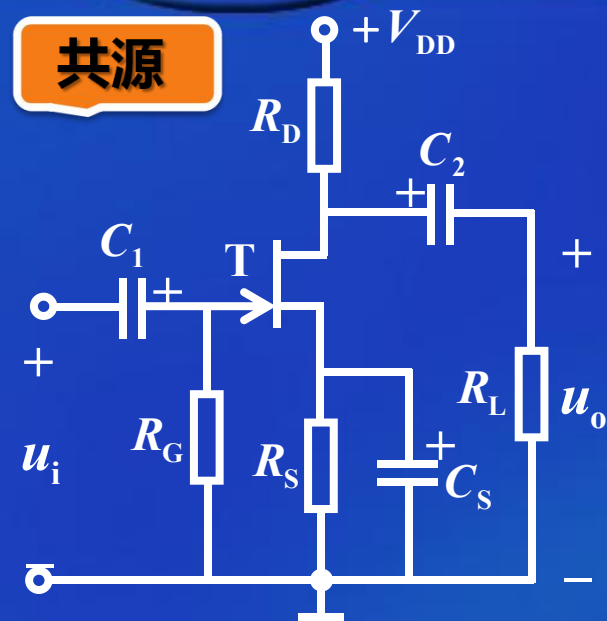
画出求 R_o 的
等效电路



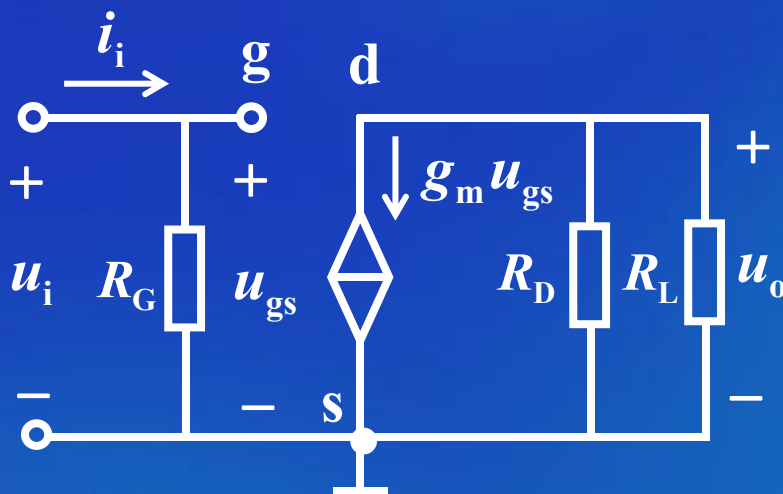
故

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_s=0 \\ R_L=\infty}} = R_D$$

共源



总 结

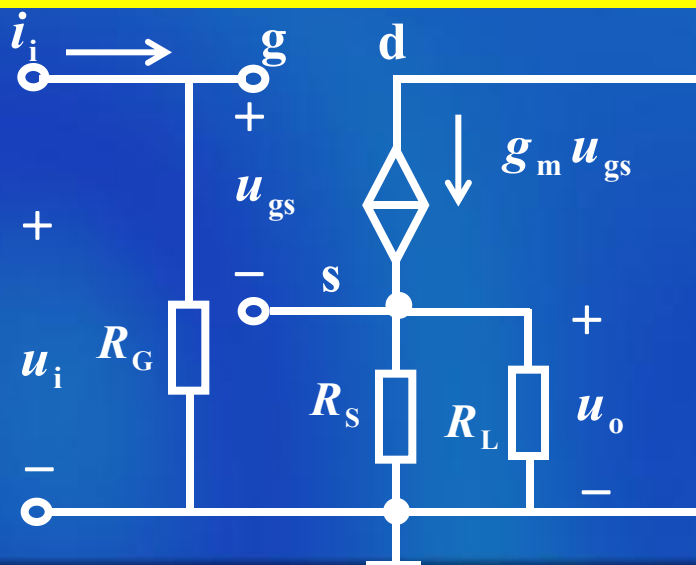
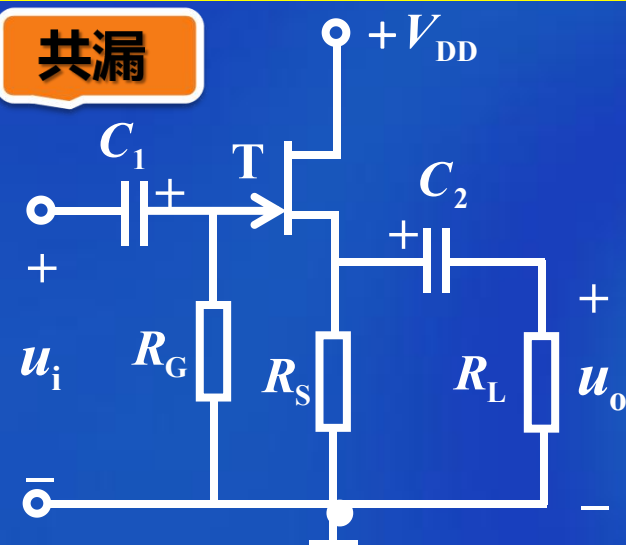


$$A_u = -g_m R'_L$$

$$R_i = R_G$$

$$R_o = R_D$$

共漏



$$A_u = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L}$$

$$R_i = R_G$$

$$R_o = R_S // \frac{1}{g_m}$$

双极性三极管与单极性（场效应）三极管

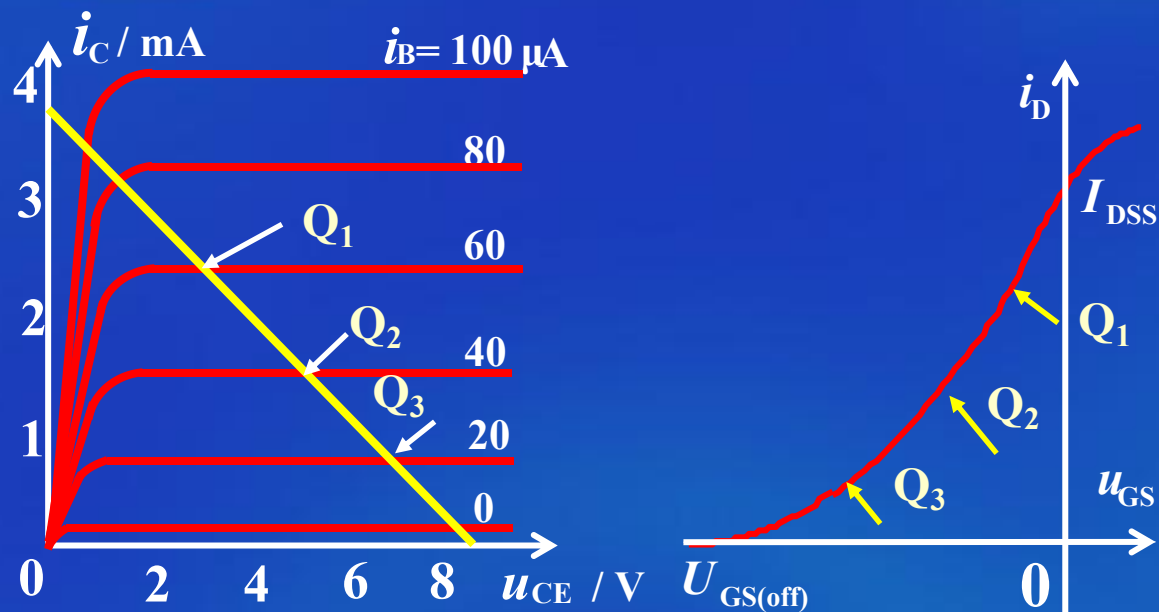
放大电路交直流分析特点：

相同点：

1. 分析思路相同：先静态，后动态；
2. 分析方法相同：静态 — 估算法
动态 — 微变等效电路法

不同点： 1. 静态与动态参数联系：

双: r_{be}	} 与Q点有关
单: g_m	



双: $---r_{be}$

单: $---g_m$

2. 表征管子放大能力参数：

双： β 与Q点无关---已知的

单： g_m 与Q点有关---求解的

本章小结

场效应晶体管及放大电路

场效应管的结构、
参数和伏安特性

场效应管组成的基本放
大电路和分析方法

共源极放大电路

共漏极放大电路

静态 — 估算法

动态 — 微变等效电路法

自给偏压/分压式偏置

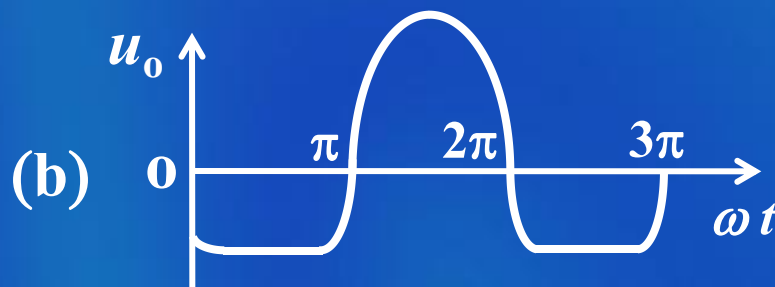
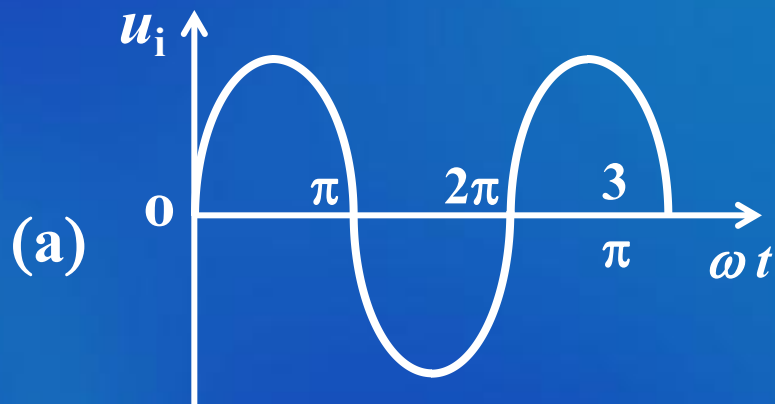
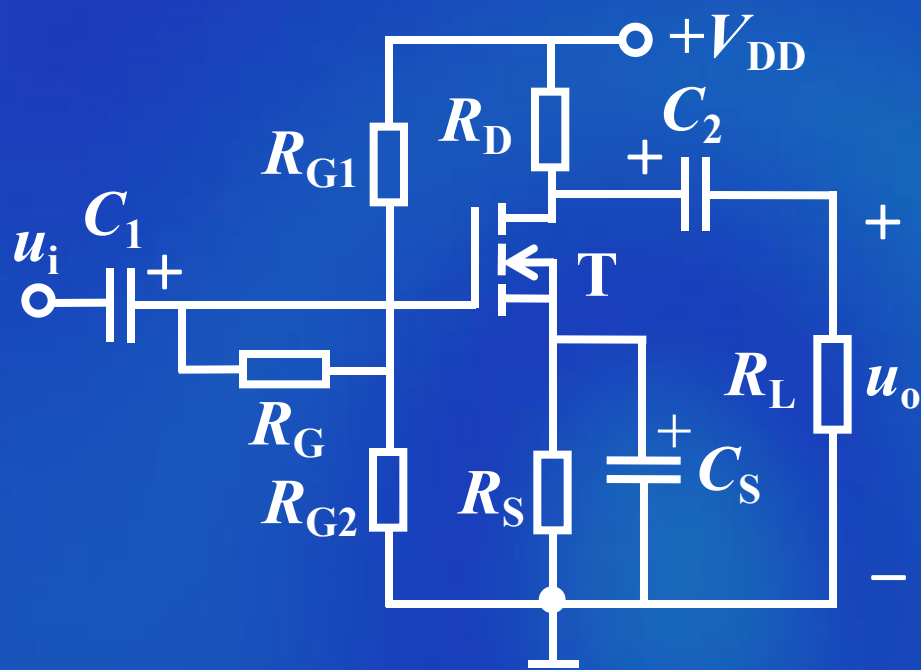
思考题

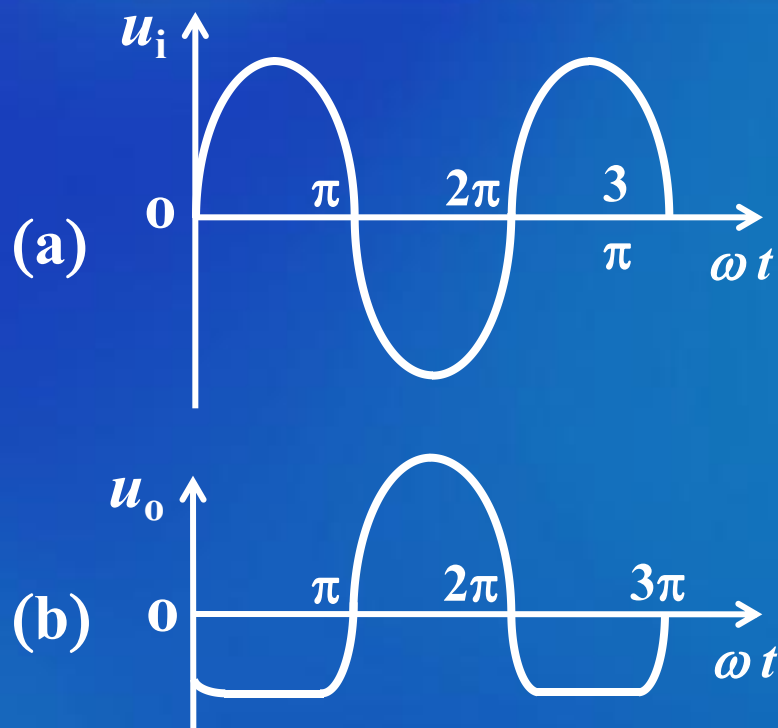
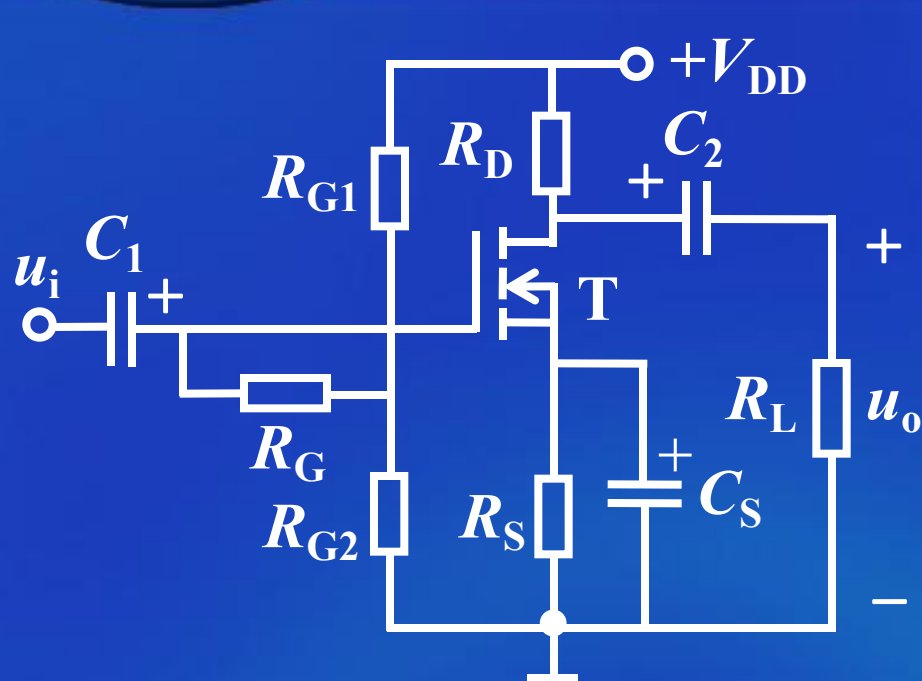
1. 比较共源极场效应管放大电路和共发射极晶体管放大电路，在电路结构上有何相似之处？为什么前者的输入电阻较高？
2. 为什么增强型绝缘栅场效应管放大电路无法采用自给偏置？

练习题

例1 在图示电路中:

- (1) 如果电路输入、输出电压的波形分别如图(a)、(b)所示。试问该电路的静态工作点可能处于或靠近哪个区?
- (2) 已知T工作于放大区及 I_{DQ} , R_{G1} 和 R_{G2} , 求 R_S 。
- (3) 在线性放大条件下, 写出电路的 A_u 、 R_i 及 R_o 的表达式。





解：由图可知，该电路是由N型沟道增强型MOS场效应管组成的共源极放大电路。

(1) 由于电路的输出波形负半周出现了失真，故该电路的静态工作点 Q 靠近可变电阻。

(2) 已知T工作于放大区

故

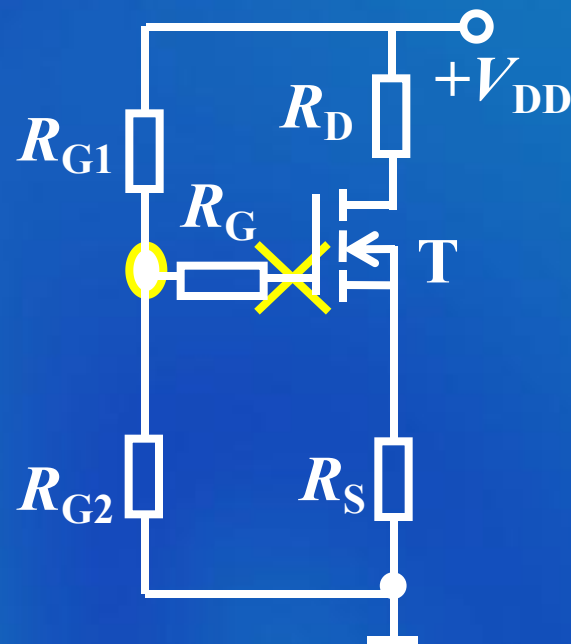
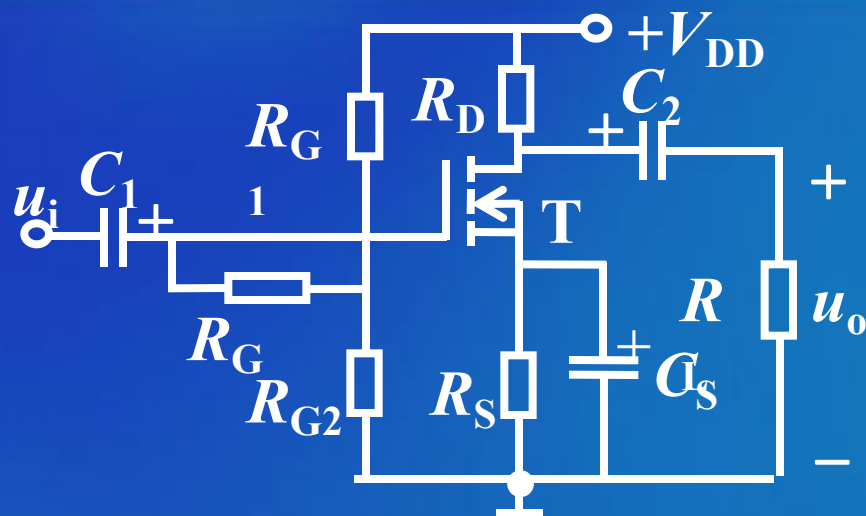
$$I_{DQ} = k[U_{GSQ} - U_{GS(th)}]^2$$

而

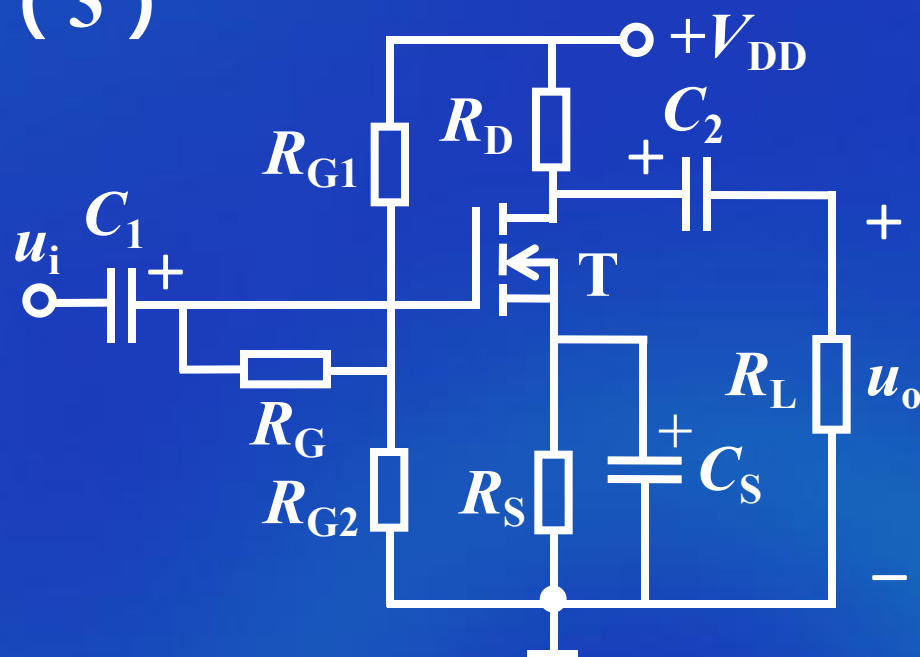
$$U_{GSQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - I_{DQ} R_S$$

将以上两式联立求解得：

$$R_S = \frac{1}{I_{DQ}} \left[\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - \sqrt{\frac{I_{DQ}}{k}} - U_{GS(th)} \right]$$



(3)

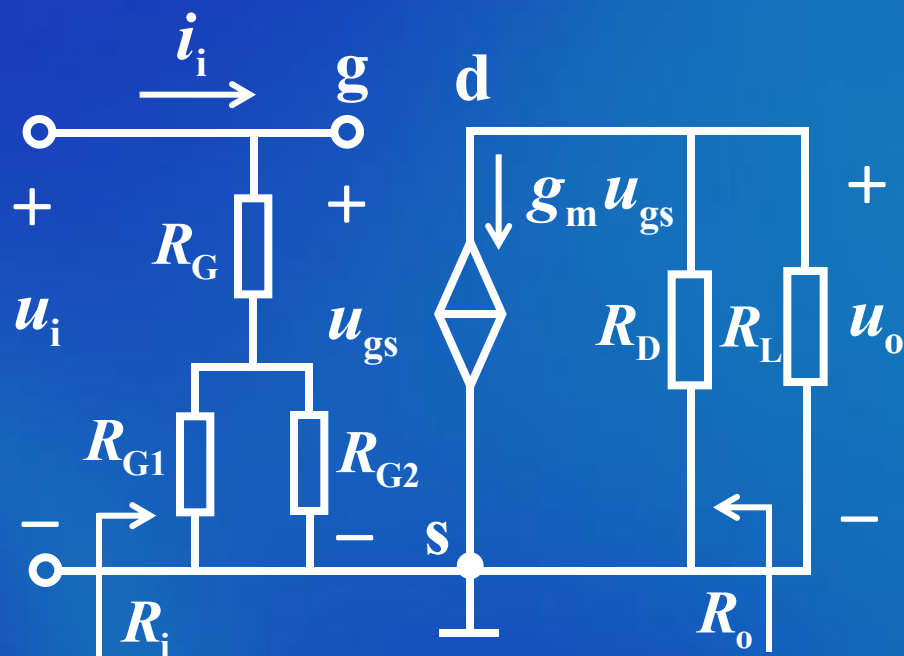


$$\dot{A}_u = -g_m R_D // R_L$$

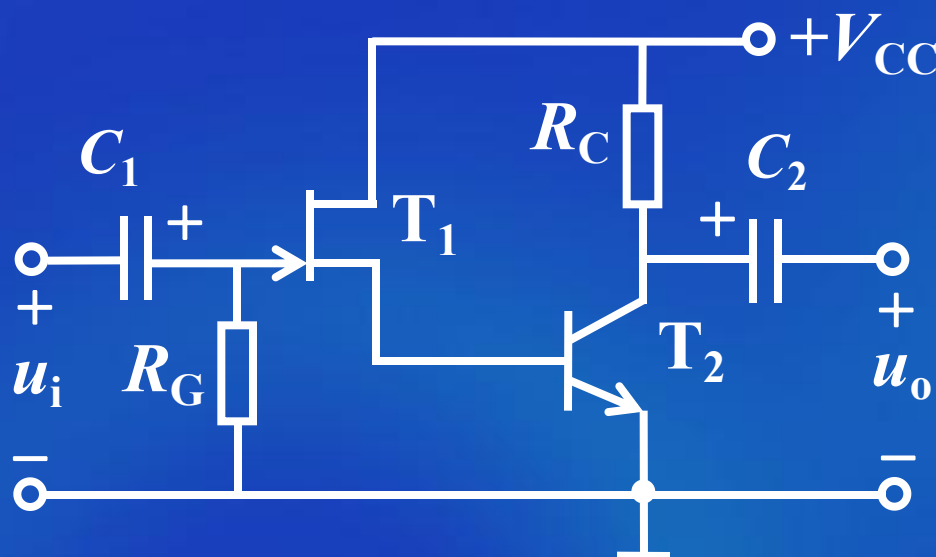
$$R_i = R_G + R_{G1} // R_{G2}$$

$$R_o = R_D$$

微变等效电路

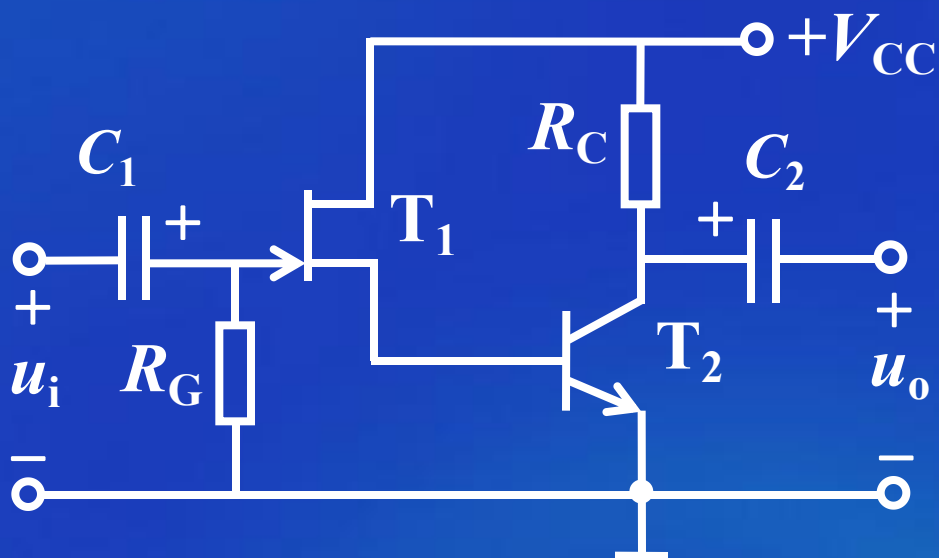


例2 电路如图所示，已知 T_1 的 g_m 和 T_2 的 β 与 r_{be} 。试写出电压放大倍数 A_u 的表达式。

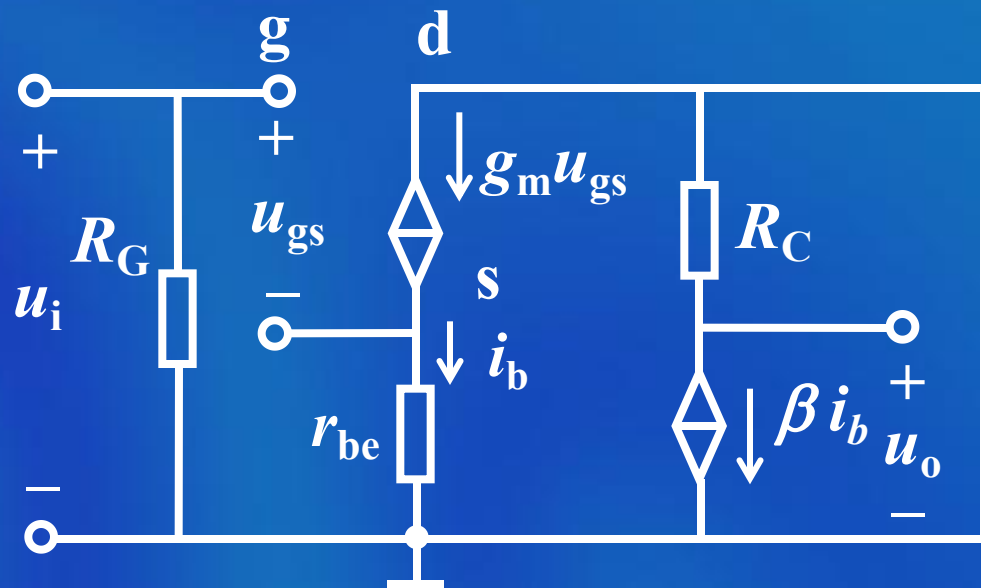


解 该电路是场效应管和晶体管组成的放大器。

画出该电路的微变等效电路。



微变等效电路



由图可知

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} r_{be}$$

$$\dot{I}_b = g_m \dot{U}_{gs}$$

$$\dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b R_C = -\beta g_m \dot{U}_{gs} R_C$$

故电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta g_m R_C}{1 + g_m r_{be}}$$

