

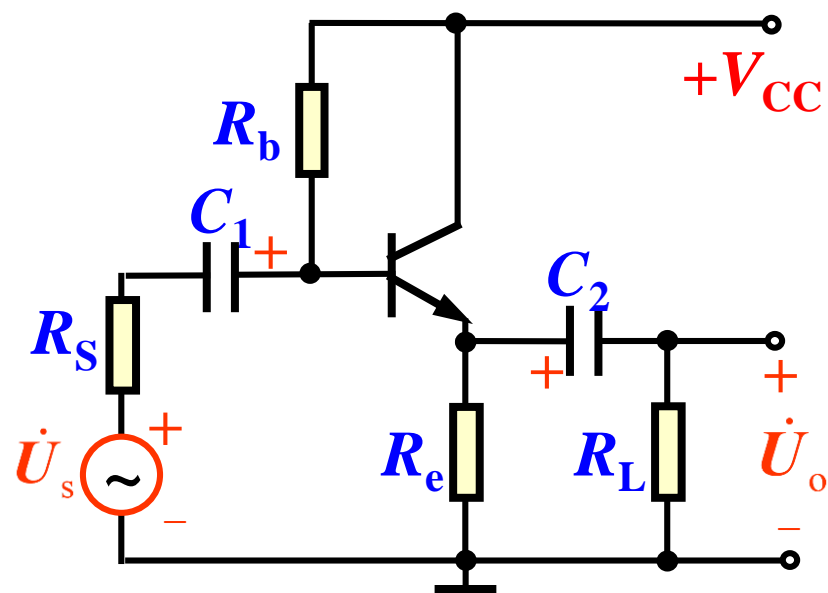
## 第二章 基本放大电路(3)

## 2.5 晶体管单管放大电路的三种基本接法

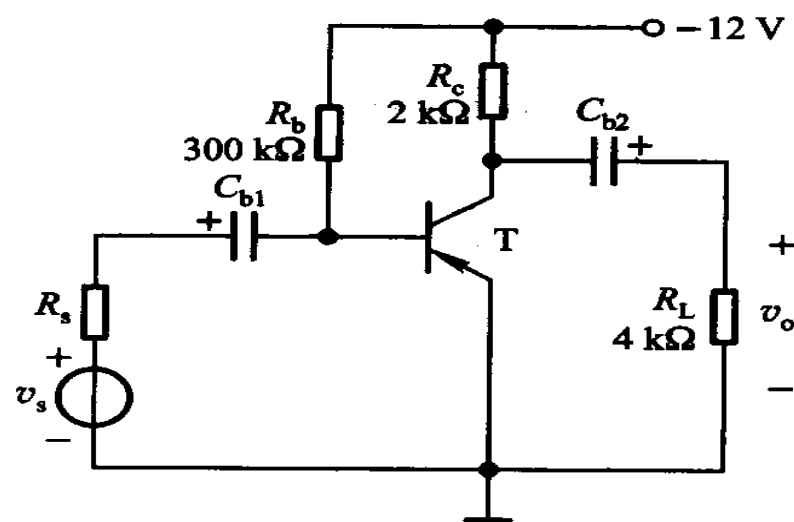
### 2.5.1 共集放大电路

#### 一、电路的组成

信号从基极输入，从发射极输出



基本共集放大电路



## 2.5.1 共集放大电路

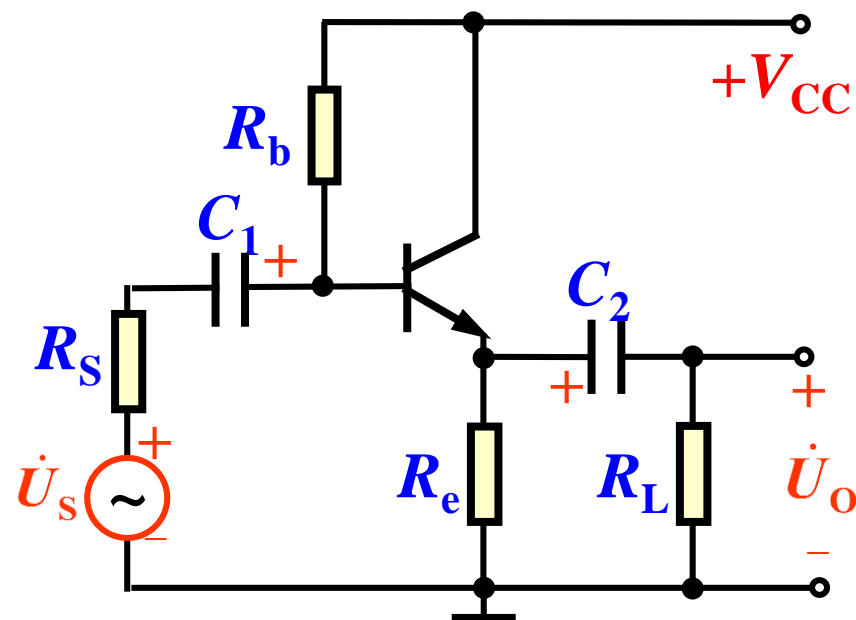
### 二、静态工作点

由基极回路求得静态基极电流

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

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

$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= V_{CC} - I_{EQ}R_e \\ &\approx V_{CC} - I_{CQ}R_e \end{aligned}$$



(a) 电路图

图 2.5.1 共集电极放大电路

## 2.5.1 共集放大电路

### 三、电流放大倍数

$$\dot{I}_i = \dot{I}_b \quad \dot{I}_o = -\dot{I}_e \quad \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} = -\frac{\dot{I}_e}{\dot{I}_b} = -(1 + \beta)$$

### 四、电压放大倍数

$$\dot{U}_o = \dot{I}_e R'_e = (1 + \beta) \dot{I}_b R'_e$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R'_e = \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_e$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta) R'_e}{r_{be} + (1 + \beta) R'_e}$$

$$R'_e = R_e // R_L$$

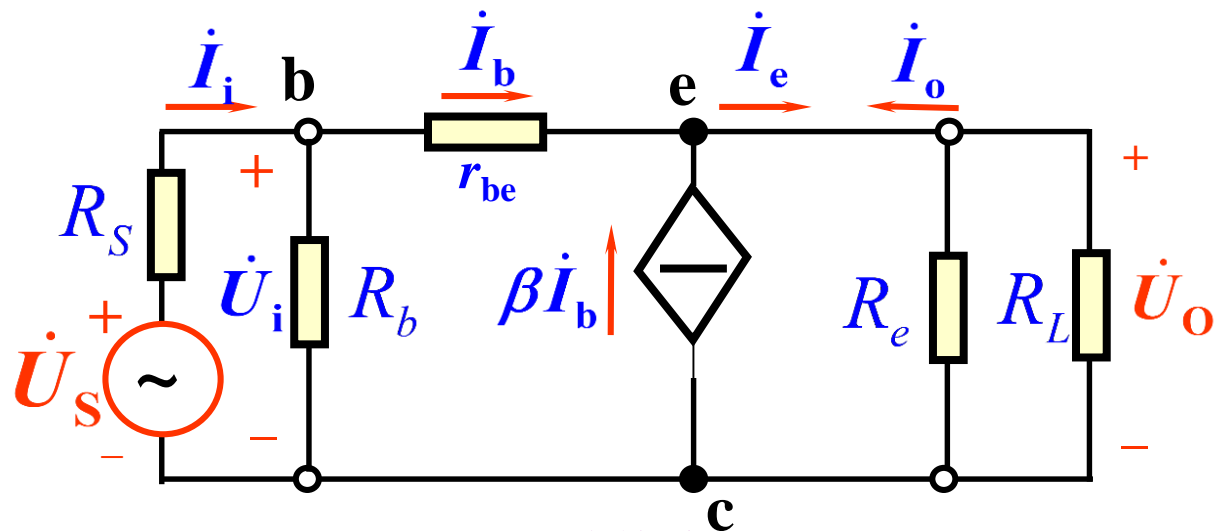
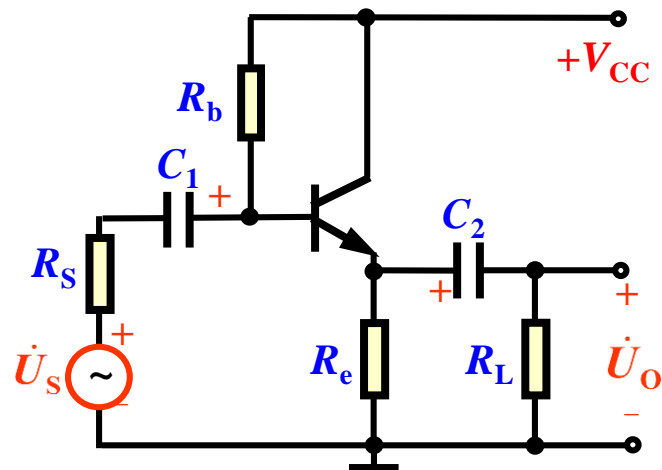
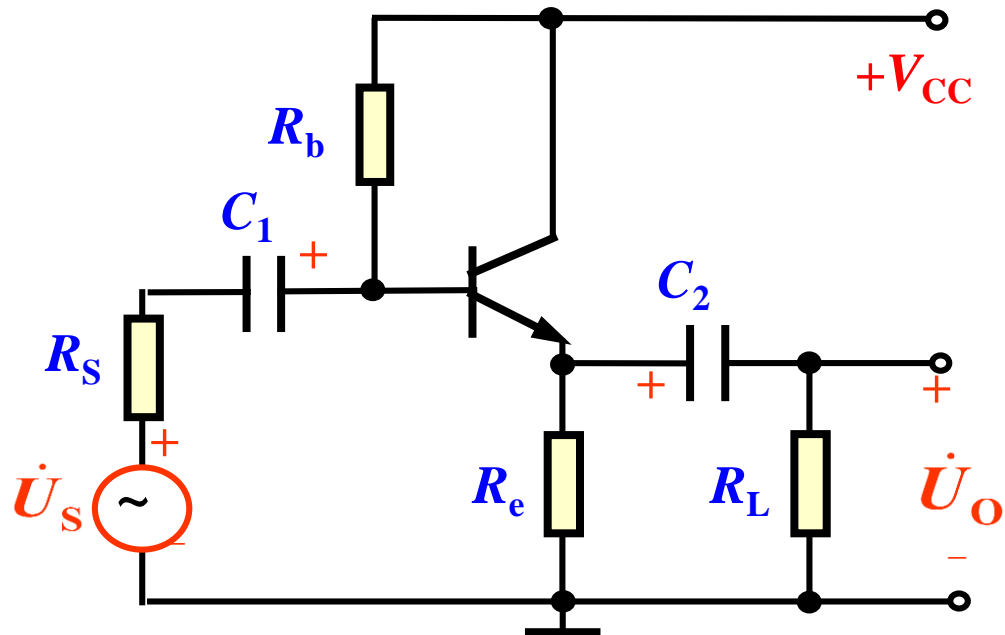


图2.5.2交流等效电路

## 2.5.1 共集放大电路



结论：电压放大倍数恒小于 1，而接近 1，且输出电压与输入电压同相，又称**射极跟随器**。

## 2.5.1 共集放大电路

### 五、输入电阻

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

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

输入电阻较大

### 六、输出电阻

$$R_o = R_e // \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta} \quad \text{其中} \quad R'_s = R_s // R_b$$

输出电阻低，故带载能力比较强

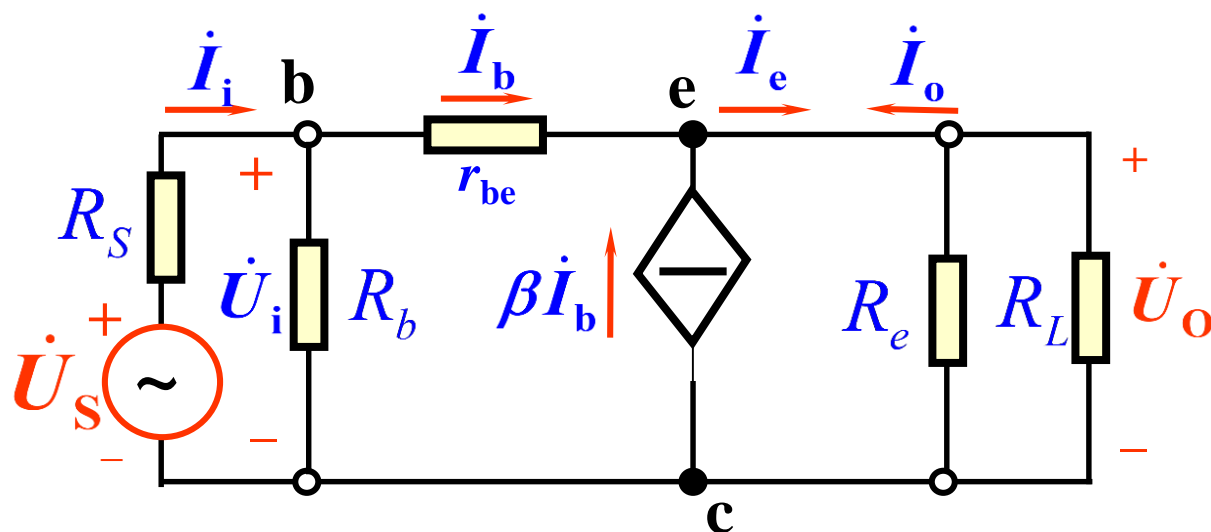


图2.5.2交流等效电路

$$R_o = R_e$$

## 2.5.2 共基放大电路

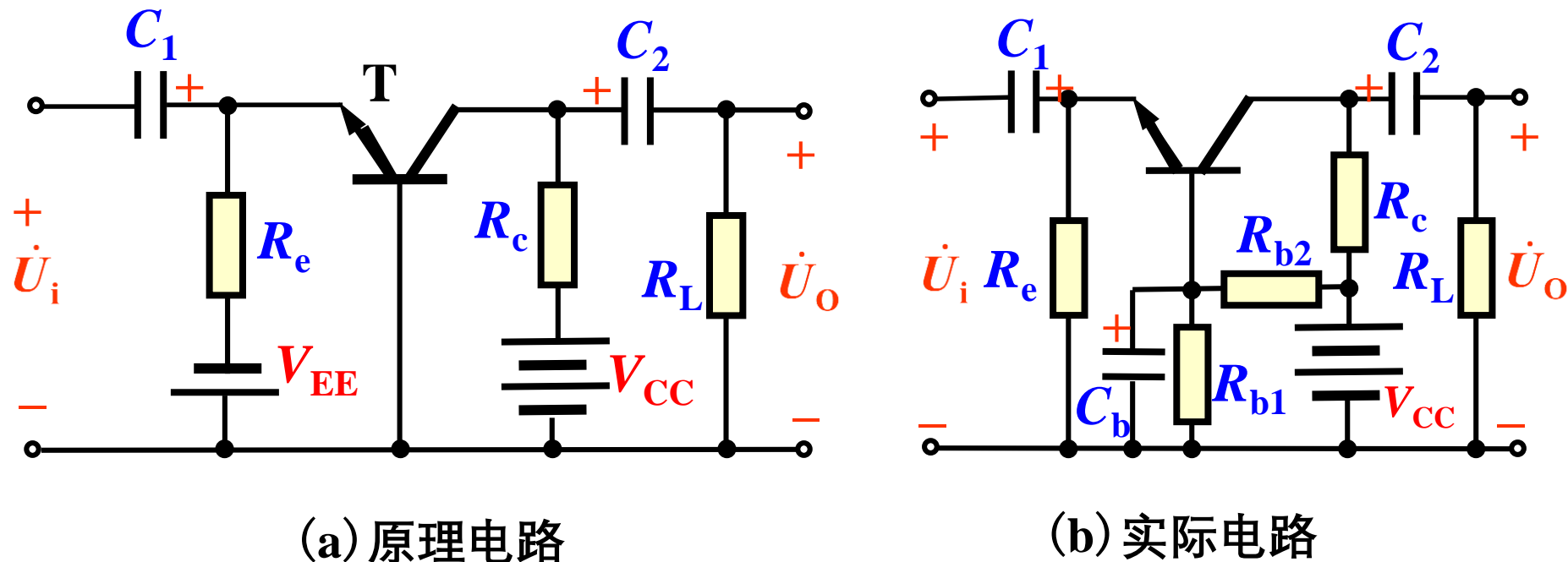


图 2.5.4 共基极放大电路

$V_{EE}$  保证发射结正偏；  
 $V_{CC}$  保证集电结反偏；三极管  
工作在放大区。

实际电路采用一个电  
源  $V_{CC}$ ，用  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  分  
压提供基极正偏电压。

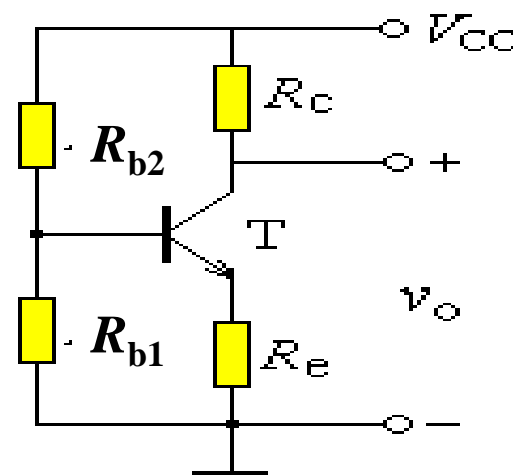
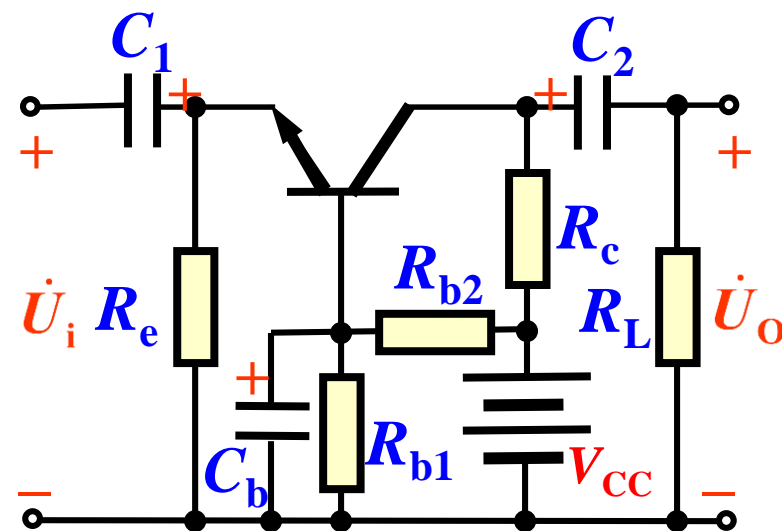
## 2.5.2 共基放大电路

### 一、静态工作点 ( $I_{BQ}, I_{CQ}, U_{CEQ}$ )

$$\begin{aligned} I_{EQ} &= \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e} \\ &= \frac{1}{R_e} \left( \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} - U_{BEQ} \right) \\ &\approx I_{CQ} \end{aligned}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= V_{CC} - I_{CQ} R_c - I_{EQ} R_e \\ &\approx V_{CC} - I_{CQ} (R_c + R_e) \end{aligned}$$





## 2.5.2 共基放大电路

### 二、电流放大倍数

#### 微变等效电路

由图可得：

$$\dot{I}_i = -\dot{I}_e, \quad \dot{I}_o = \dot{I}_c$$

所以

$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} = -\frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_e} = -\alpha$$

由于  $\alpha$  小于 1 而近似等于 1，所以共基极放大电路没有电流放大作用。

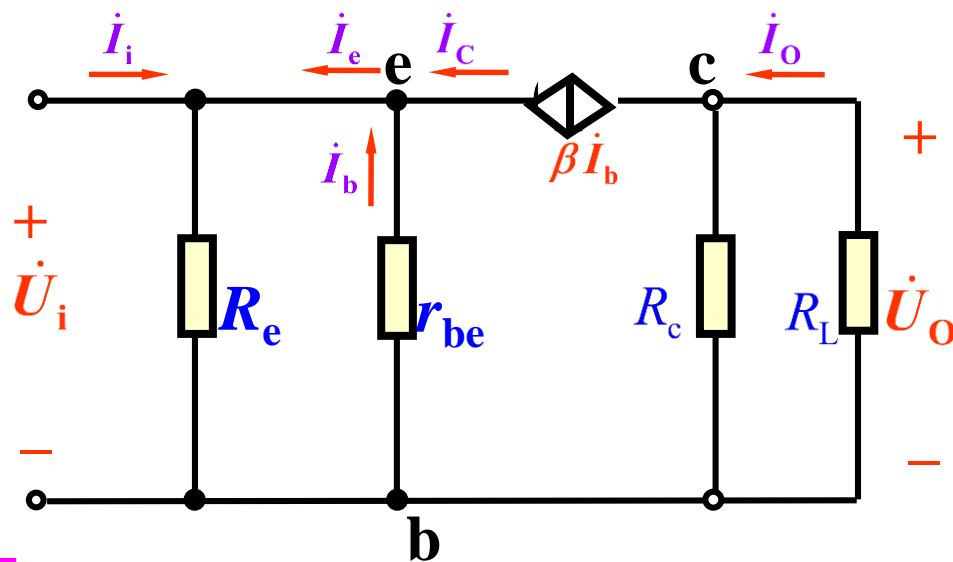
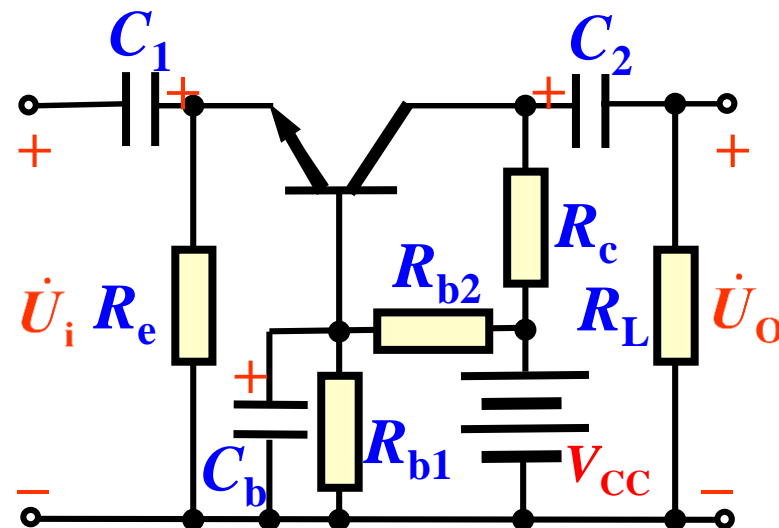


图 2.5.4(c) 共基极放大电路的等效电路

## 2.5.2 共基放大电路

### 三、电压放大倍数

由微变等效电路可得

$$\dot{U}_i = -\dot{I}_b r_{be}$$

$$\dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

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

$$R'_L = R_c // R_L$$

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

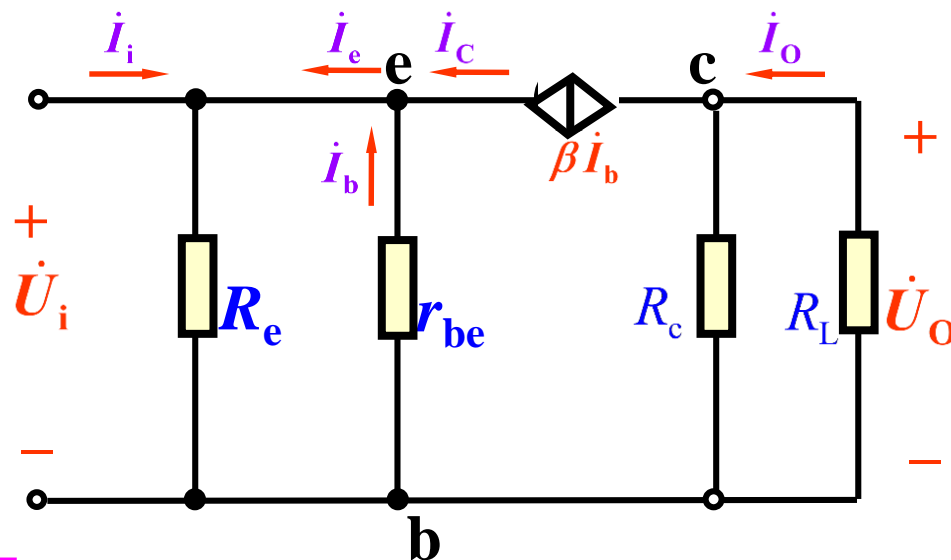


图 2.5.4(c) 共基极放大电路的等效电路

共基极放大电路没有电流放大作用，但是**具有电压放大作用**。

电压放大倍数与共射电路相等，但没有负号，说明该电路**输入、输出信号同相位**。

## 2.5.2 共基放大电路

### 四、输入电阻

暂不考虑电阻  $R_e$  的作用

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{-\dot{I}_b r_{be}}{-(1+\beta)\dot{I}_b} = \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

如考虑电阻  $R_e$  的作用

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_e // \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

### 五、输出电阻

$$R_o = R_C$$

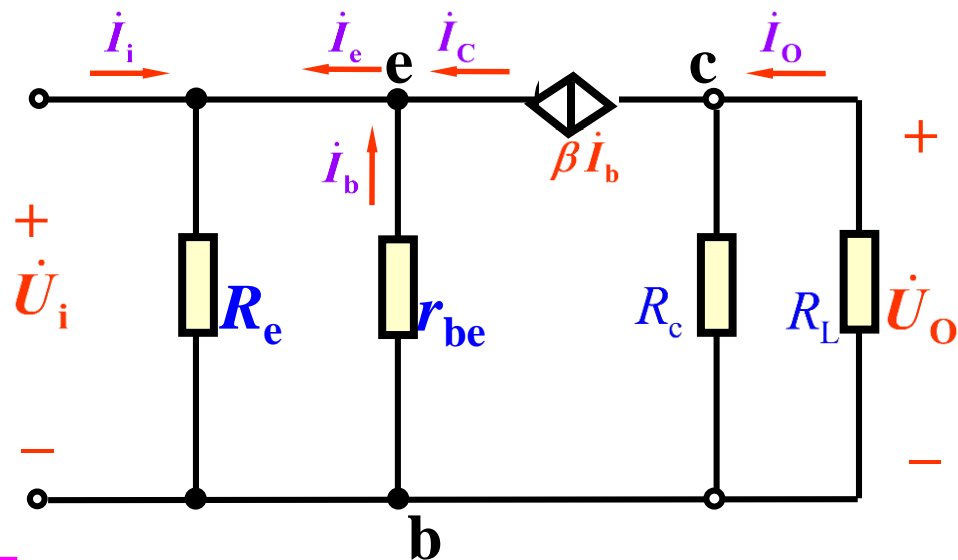


图 2.5.4(c) 共基极放大电路的等效电路

## 2.5.3 三种基本组态的比较

组态 性能	共射组态	共集组态	共基组态
电 路			
$\dot{A}_i$	大 $\beta$	大 $-(1 + \beta)$	小 $-\alpha$
$\dot{A}_u$	大 $-\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$	小 $\frac{(1 + \beta) R'_e}{r_{be} + (1 + \beta) R'_e}$	大 (数值同共射，但同相) $\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$

## 2.5.3 三种基本组态的比较

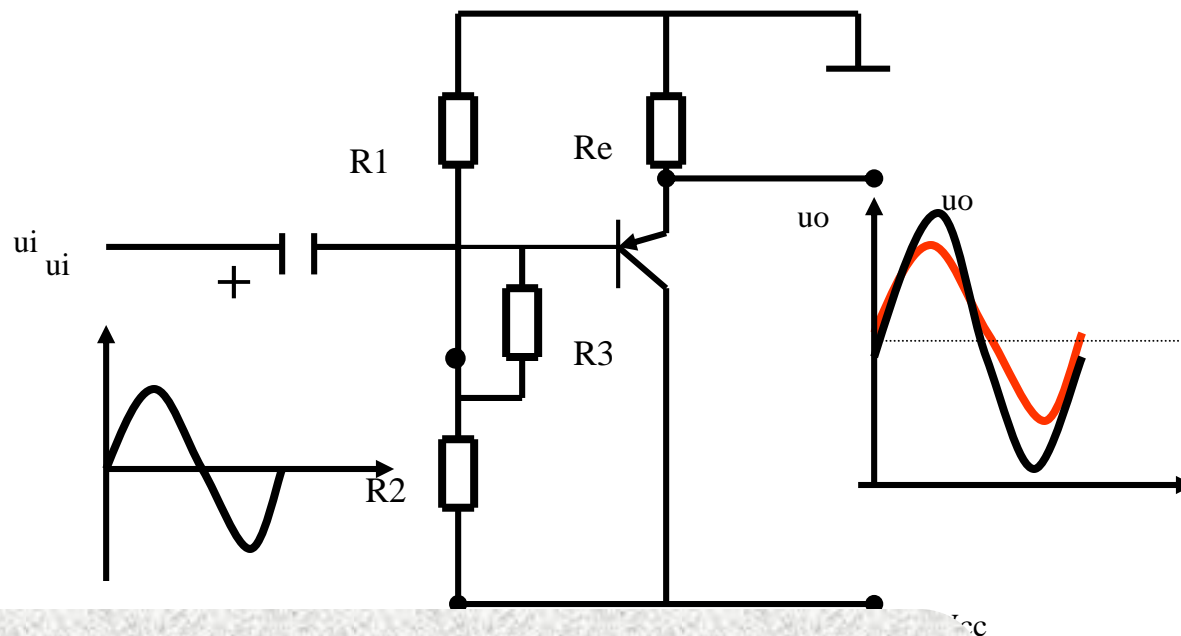
组态 性能	共 射 组 态	共 集 组 态	共 基 组 态
$R_i$	中 $r_{be}$	大 $r_{be} + (1 + \beta)R'_e$	小 $\frac{r_{be}}{1 + \beta}$
$R_o$	大 $R_c$	小 $R_e // \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}$	大 $R_c$
频率 响应	差	较好	好

## 2.5.3 三种基本组态的比较

**例** 如图属于何种组态？其输出电压的波形是否正确？若有错，请改正。

**解** 共集电极组态

不正确。



### 共集电极电路特点：

- ◆ 电压增益小于1但接近于1， $U_o$ 与 $U_i$ 同相。
- ◆ 输入电阻大，对电压信号源衰减小
- ◆ 输出电阻小，带负载能力强

## 2.5.3 三种基本组态的比较

例：电路如图所示，BJT的电流放大系数为 $\beta$ ，输入电阻为 $r_{be}$ ，略去了偏置电路。试求下列三种情况下的电压增益 $A_v$ 、输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$

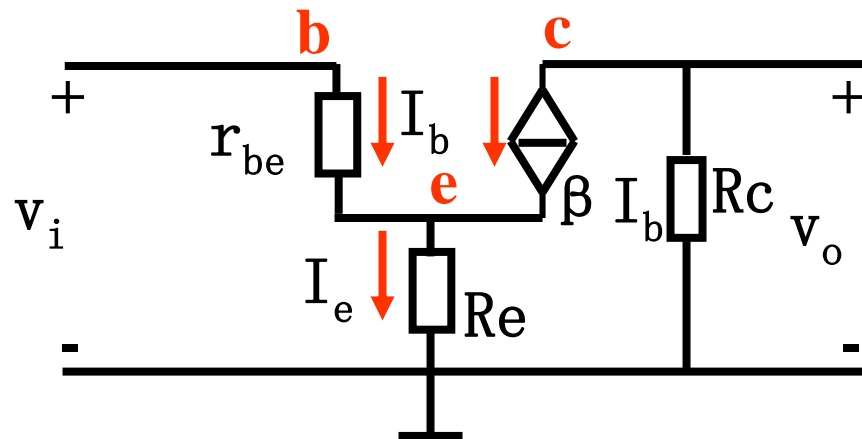
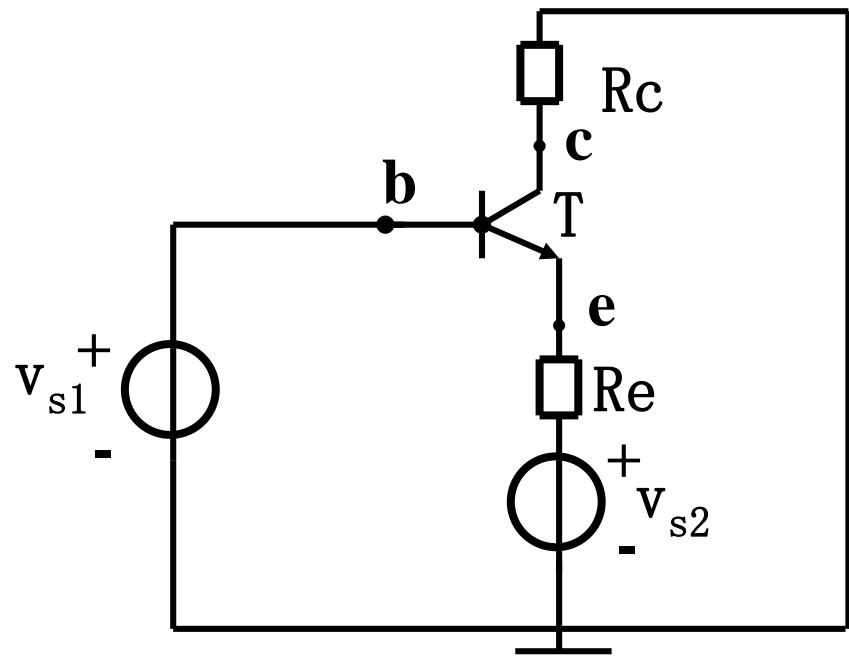
- ①  $v_{s2}=0$ ，从集电极输出；
- ②  $v_{s1}=0$ ，从集电极输出；
- ③  $v_{s2}=0$ ，从发射极输出。

解 ① 共发射极接法

$$\dot{A}_V = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\beta \cdot \dot{I}_b R_c}{\dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]} = -\frac{\beta \cdot R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = r_{be} + (1 + \beta) R_e$$

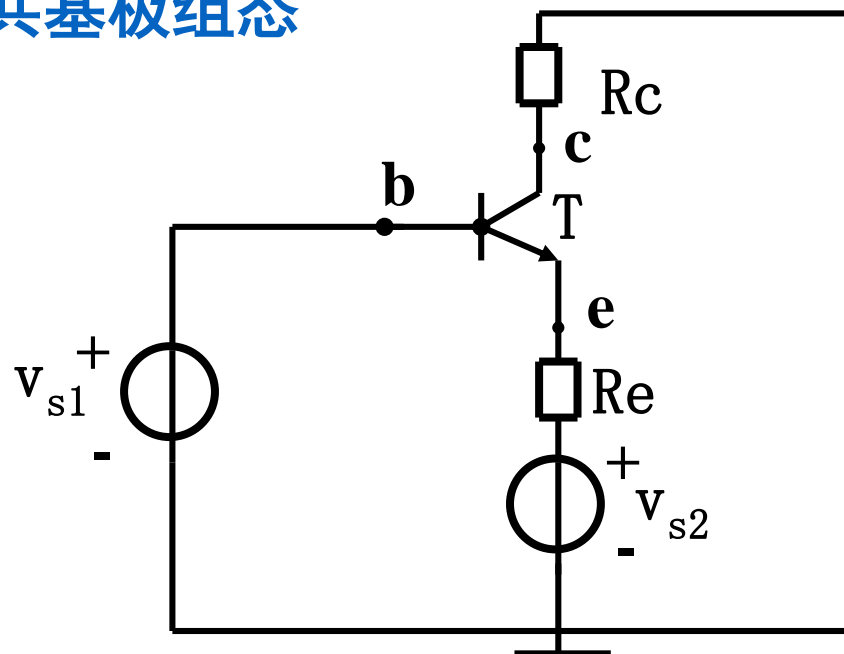
$$R_o \approx R_c$$



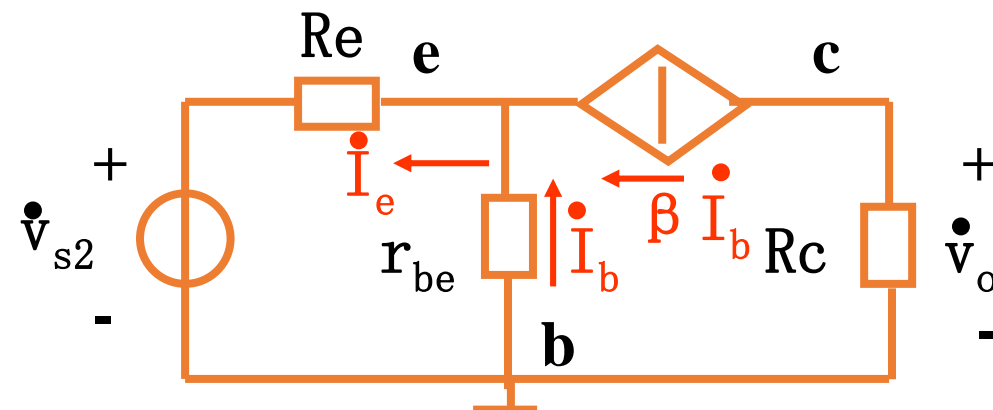
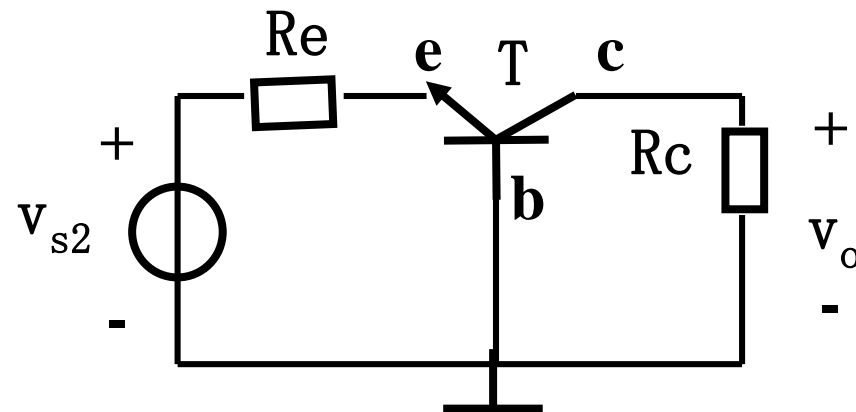
## 2.5.3 三种基本组态的比较

$v_{s1}=0$ ，从集电极输出

②共基极组态



$$\dot{A}_V = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\beta \cdot \dot{I}_b R_c}{-\dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]} = \frac{\beta \cdot R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$



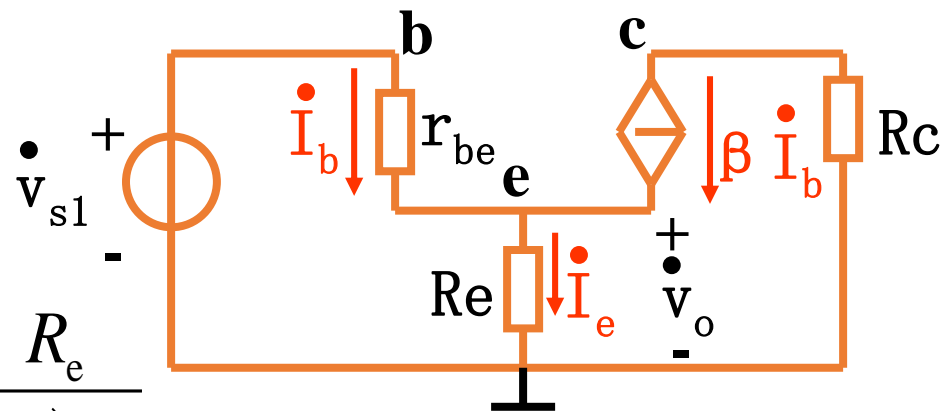
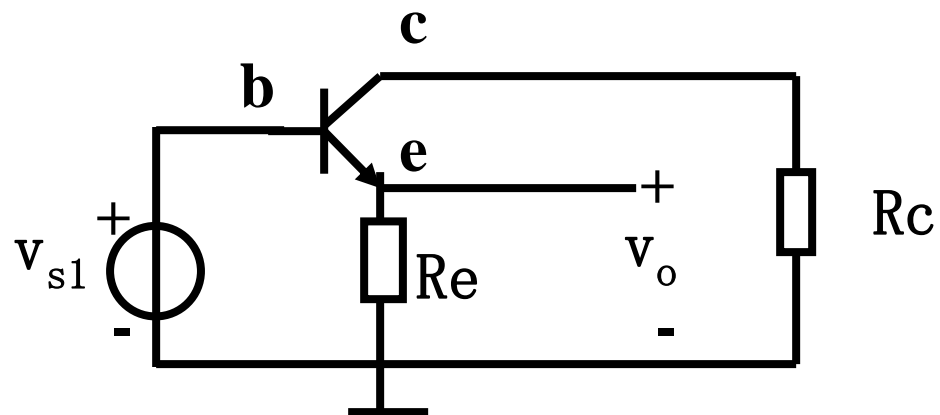
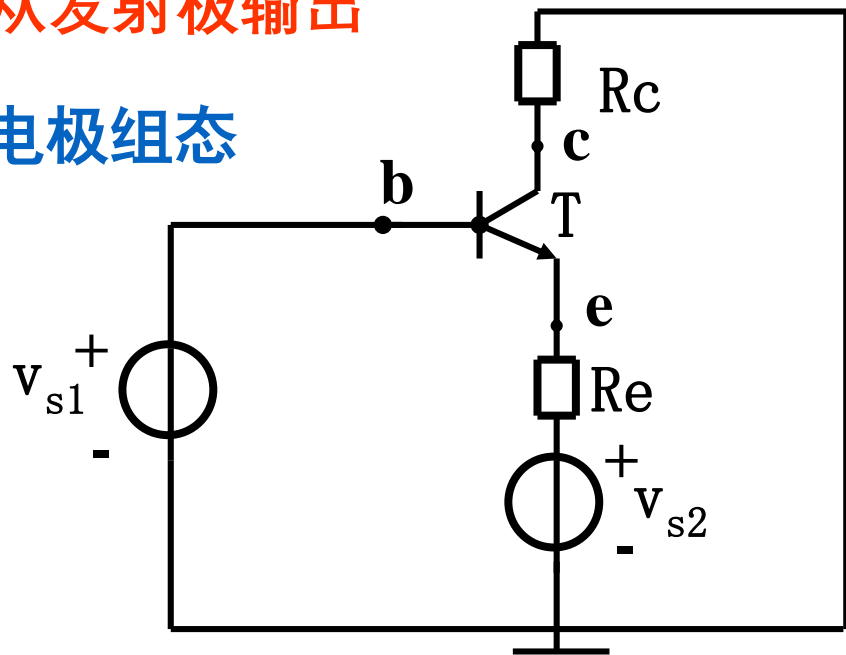
$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_e + \frac{r_{be}}{1 + \beta} \quad R_o \approx R_C$$



## 2.5.3 三种基本组态的比较

$v_{s2}=0$ ，从发射极输出

### ③共集电极组态



$$\dot{A}_V = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{(1 + \beta) \cdot \dot{I}_b R_e}{\dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]} = \frac{(1 + \beta) \cdot R_e}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

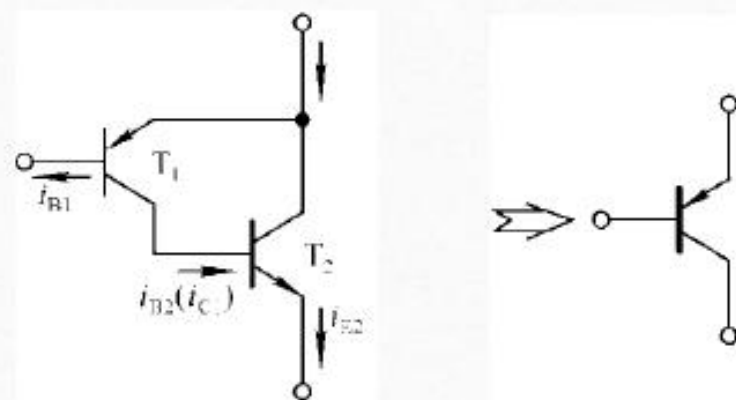
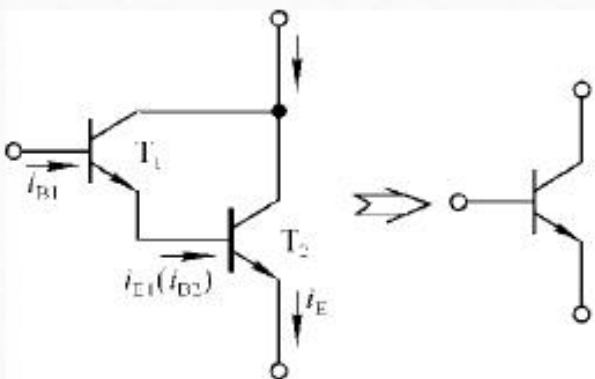
$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = r_{be} + (1 + \beta) R_e \quad R_o = R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

## 2.6 晶体管基本放大电路的派生电路

### 2.6.1 复合管放大电路

复合管的组成：多只管子合理连接等效成一只管子。

目的：增大 $\beta$ ，减小前级驱动电流，改变管子的类型。

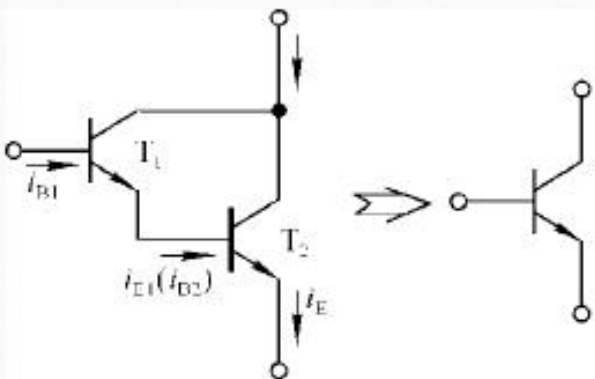


## 2.6 晶体管基本放大电路的派生电路

### 2.6.1 复合管放大电路

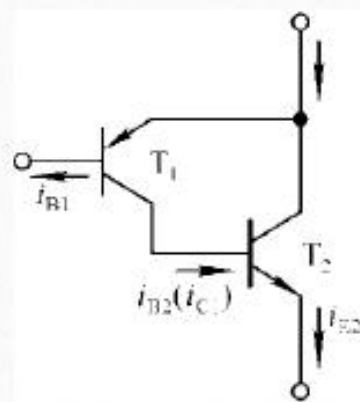
复合管的组成：多只管子合理连接等效成一只管子。

目的：增大 $\beta$ ，减小前级驱动电流，改变管子的类型。



$$i_E = i_{B1}(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)$$

$$\beta \approx \beta_1 \beta_2$$



$i_B$  方向决定复合管的类型。

## 2.6.1 复合管放大电路

### 构成复合管时注意事项

- (1) 前后两个三极管连接关系上，应保证前级输出电流与后级输入电流实际方向一致。
- (2) 外加电压的极性应保证前后两个管子均为发射结正偏，集电结反偏，使管子工作在放大区。

### 复合管的接法

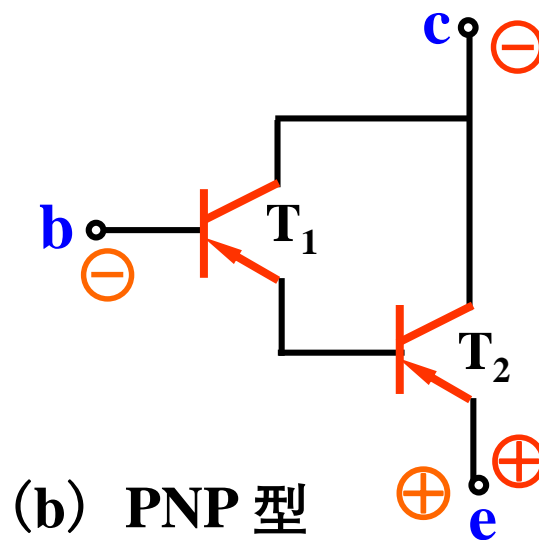
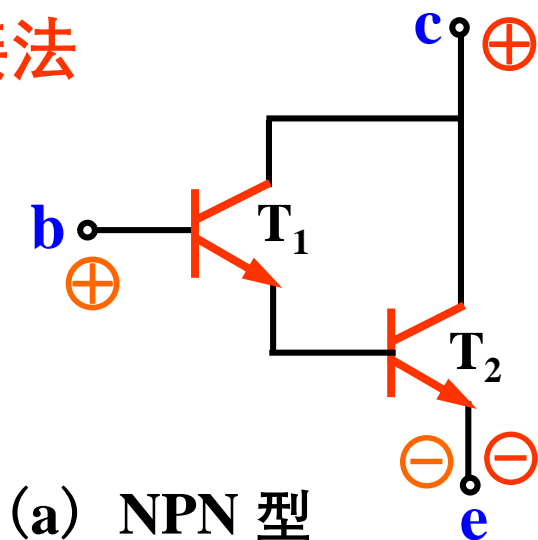


图 2.6.1 复合管

## 2.6.1 复合管放大电路

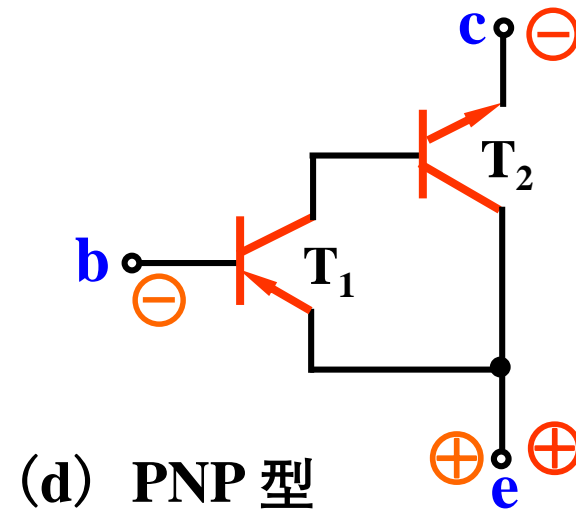
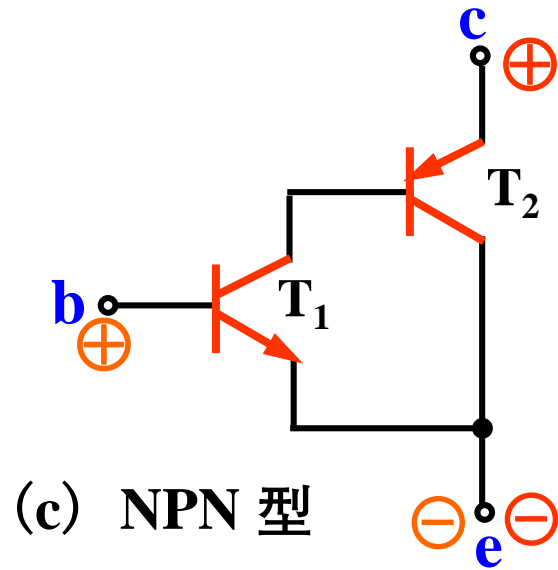


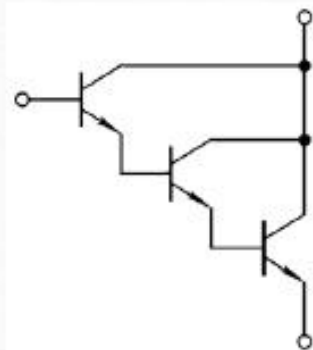
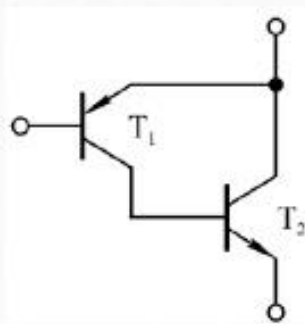
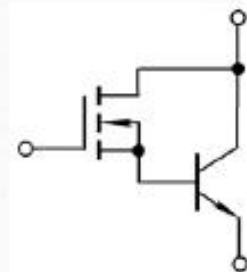
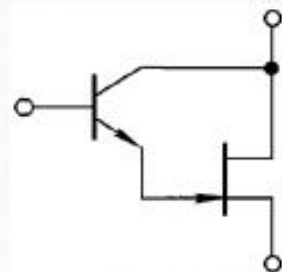
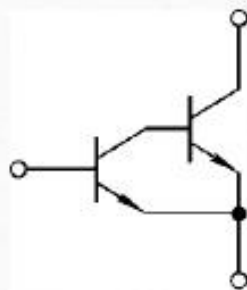
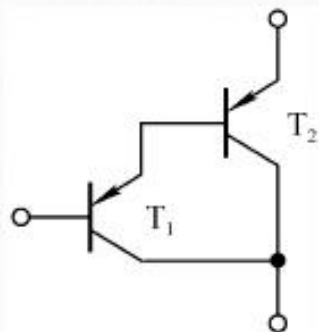
图 2.6.1 复合管

## 2.6 晶体管基本放大电路的派生电路

### 2.6.1 复合管放大电路



讨论一：判断下列各图是否能组成复合



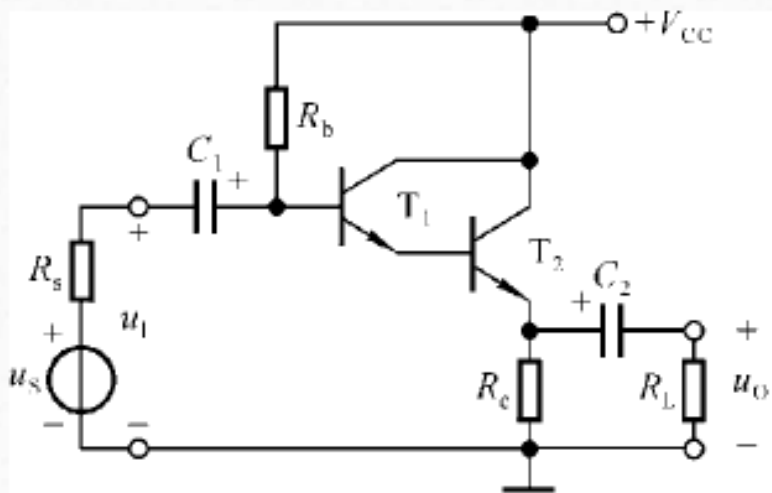
在合适的外加电压下，每只管子的电流都有合适的通路，才能组成复合管。

## 2.6 晶体管基本放大电路的派生电路

### 2.6.1 复合管放大电路



讨论二：图示电路的  $R_i = ?$   $R_o = ?$



$$R_o = R_e \parallel \frac{r_{be2} + \frac{r_{be1} + R_b \parallel R_s}{1 + \beta_1}}{1 + \beta_2}$$

$$R_i = R_b \parallel \{r_{be1} + (1 + \beta_1)[r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_e \parallel R_L)]\}$$

## 2.6.1 复合管放大电路

1. 两个同类型的三极管组成复合管，其类型与原来相同。复合管的  $\beta \approx \beta_1 \beta_2$ ，复合管的  $r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}$ 。
2. 两个不同类型的三极管组成复合管，其类型与前级三极管相同。复合管的  $\beta \approx \beta_1 \beta_2$ ，复合管的  $r_{be} = r_{be1}$ 。
3. 在集成运放中，复合管不仅用于中间级，也常用于输入级 和输出级。

优点

- 可以获得很高的电流放大系数  $\beta$ ；
- 提高中间级的输入电阻；
- 提高了集成运放总的电压放大倍数。



## 2.7 场效应管放大电路

场效应管是电压控制电流元件，具有高输入阻抗。

### 2.7.1 场效应管放大电路的三种接法

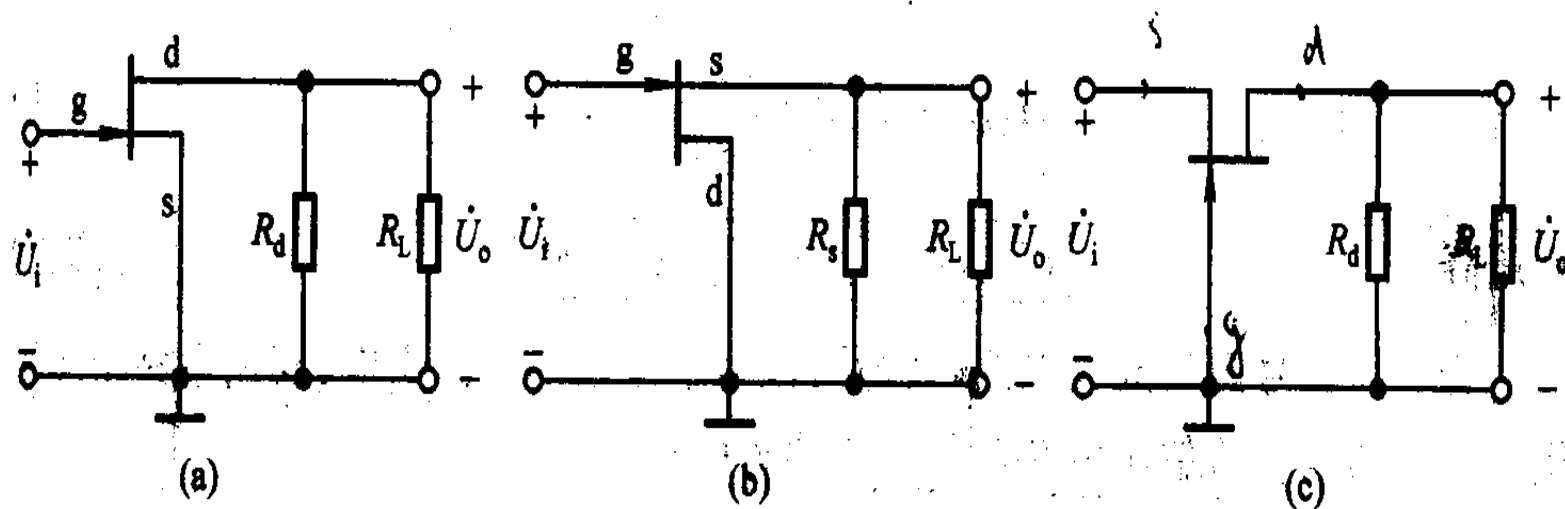


图2.7.1场效应管放大电路的三种接法（以N沟道结型场效应管为例）

(a) 共源电路

(b) 共漏电路

(c) 共栅电路

## 2.7.2 场效应管放大电路的静态工作点设置方法

### 一、基本共源放大电路

与双极型三极管对应关系

$b \rightarrow G, e \rightarrow S, c \rightarrow D$

为了使场效应管工作在恒流区实现放大作用，应满足：

$$u_{GS} > U_T$$

$$u_{DS} > u_{GS} - U_T$$

( $U_T$ : 开启电压)

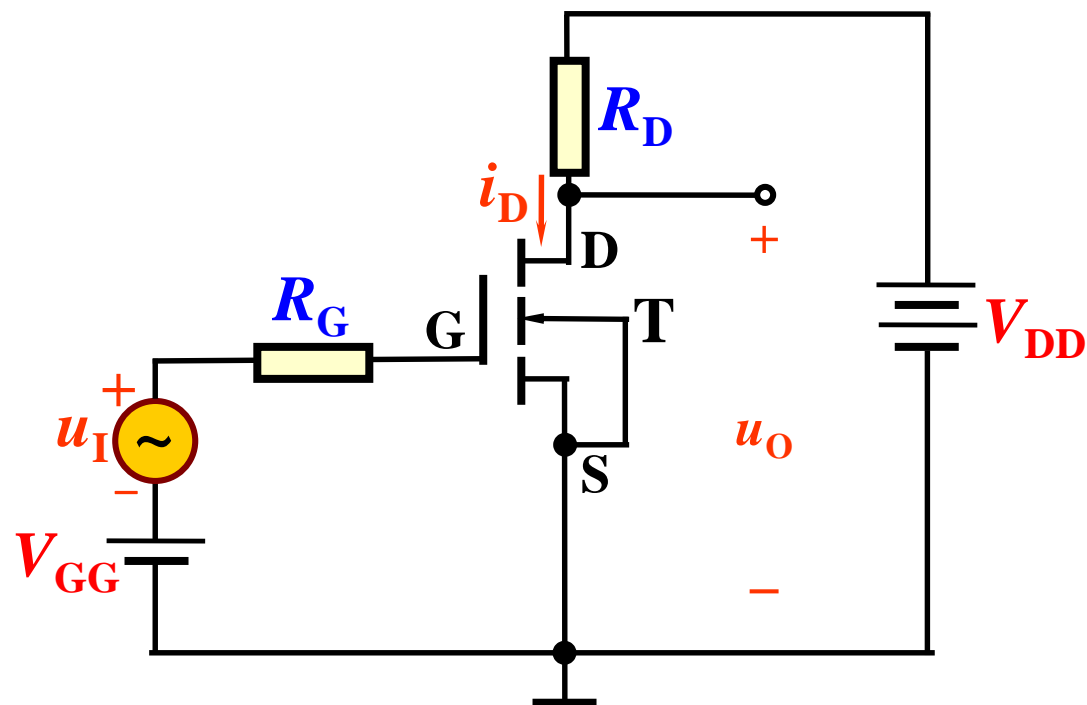


图 2.7.2 基本共源放大电路

(N 沟道增强型 MOS 管组成的放大电路)

## 2.7.2 场效应管放大电路的静态工作点设置方法

静态分析—— $U_{GSQ}$ 、 $I_{DQ}$   $U_{DSQ}$

两种方法 { 近似估算法  
图解法

(一) 近似估算法

MOS 管栅极电流

为零，当  $u_I = 0$  时

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

而  $i_D$  与  $u_{GS}$  之间近似满足

$$i_D = I_{DO} \left( \frac{u_{GS}}{U_T} - 1 \right)^2$$

(当  $u_{GS} > U_T$ )

式中  $I_{DO}$  为  $u_{GS} = 2U_T$  时的值。

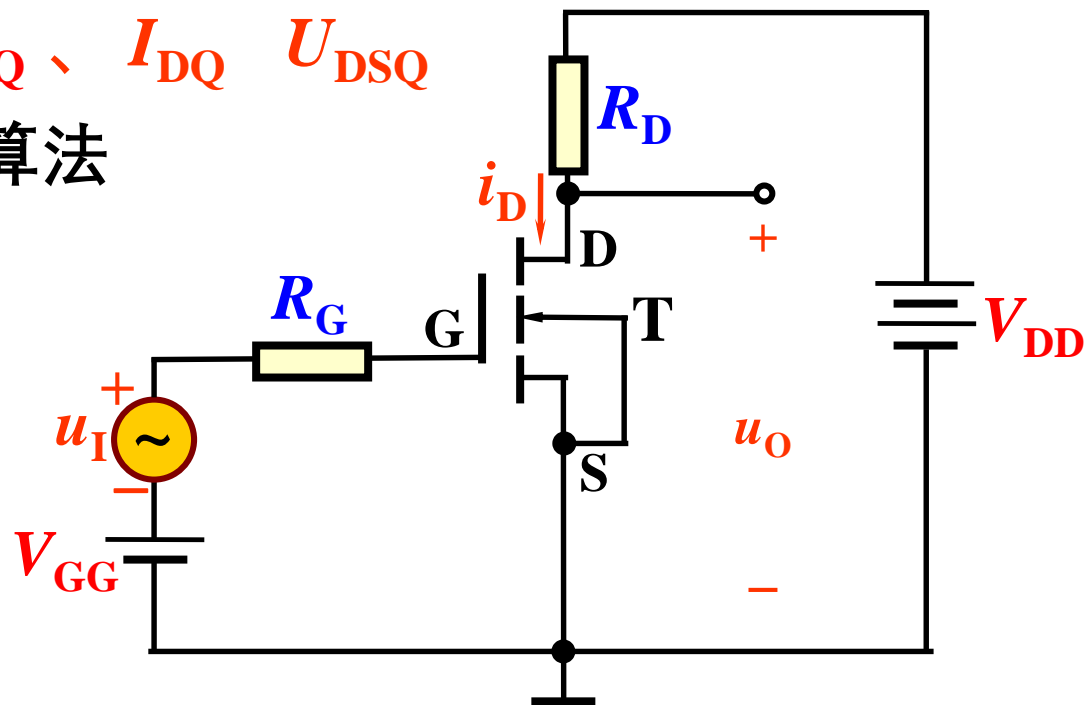


图 2.7.2 基本共源放大电路

则静态漏极电流为

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

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

## 2.7.2 场效应管放大电路的静态工作点设置方法

### (二) 图解法

利用式  $u_{DS} = V_{DD} - i_D R_D$  画出直流负载线。

图中  $I_{DQ}$ 、 $U_{DSQ}$  即为静态值。

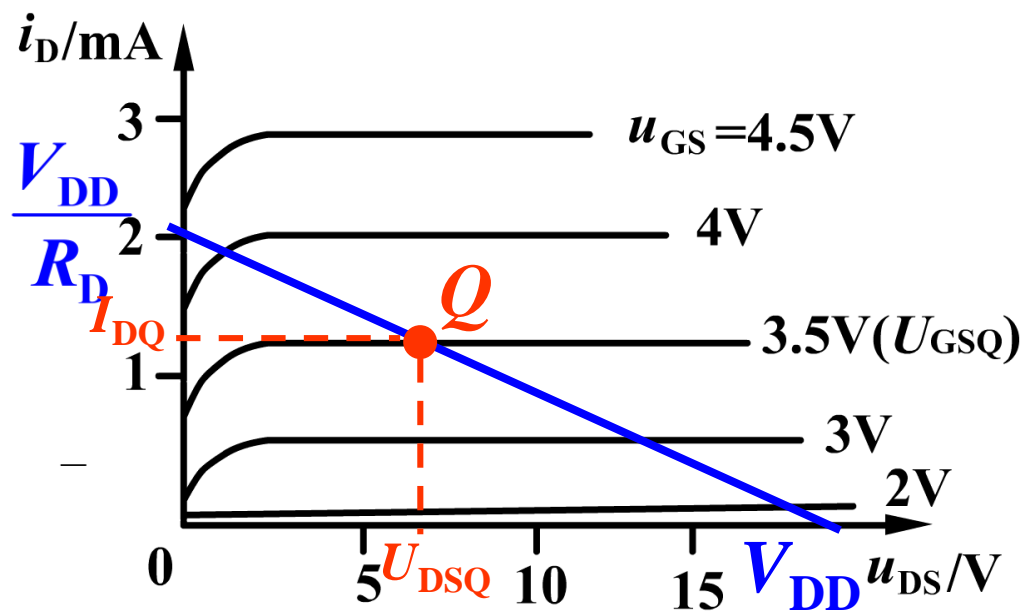


图 2.7.3 图解法求基本共源放大电路的静态工作点

## 2.7.2 场效应管放大电路的静态工作点设置方法

### 二、自给偏压电路

Q点:  $U_{GSQ}$ 、 $I_{DQ}$ 、 $U_{DSQ}$

已知  $U_P$  或  $U_{GS}(\text{Off})$

$$\begin{cases} U_{GSQ} = -I_{DQ}R \\ U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}(R_d + R) \\ I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_P}\right)^2 \end{cases}$$

可解出Q点的  $U_{GSQ}$ 、 $I_{DQ}$ 、 $U_{DSQ}$

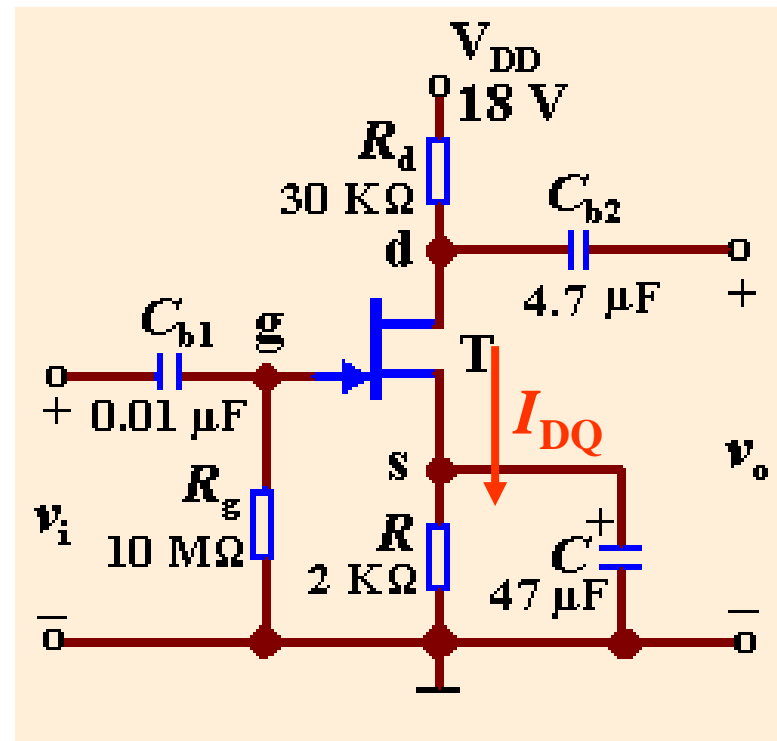


图2.7.4(a) JFET自给偏压共源电路

如知道FET的特性曲线，也可采用图解法。

耗尽型MOS管自给偏压共源电路的分析方法相同。

## 2.7.2 场效应管放大电路的静态工作点设置方法

### 三、分压式偏置电路

#### (一) Q点近似估算法

根据输入回路列方程

$$\begin{cases} U_{GSQ} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{DD} - I_{DQ} R_S \\ I_{DQ} = I_{DO} \left( \frac{U_{GSQ}}{U_T} - 1 \right)^2 \end{cases}$$

解联立方程求出  $U_{GSQ}$  和  $I_{DQ}$ 。

列输出回路方程求  $U_{DSQ}$

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

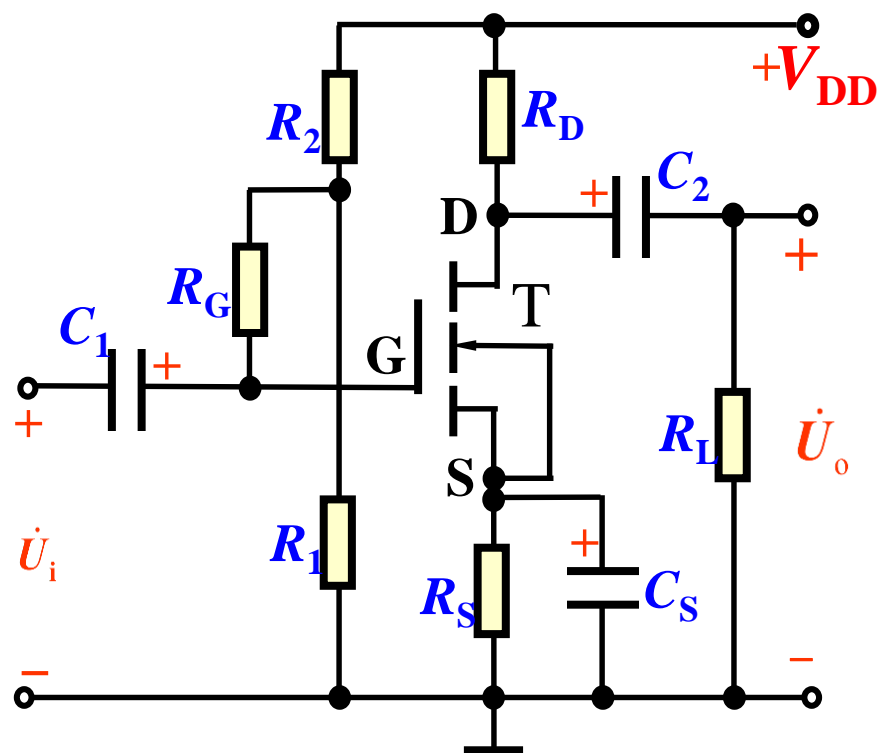


图2.7.5分压式偏置电路

将  $I_{DQ}$  代入，求出  $U_{DSQ}$

## 2.7.2 场效应管放大电路的静态工作点设置方法

### (二) 图解法

由式  $u_{GS} = U_{GQ} - i_D R_S$

$$= \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{DD} - i_D R_S$$

可做出一条直线，

另外， $i_D$  与  $u_{GS}$  之间满足转移特性曲线的规律，二者之间交点为静态工作点，确定  $U_{GSQ}$ ， $I_{DQ}$ 。

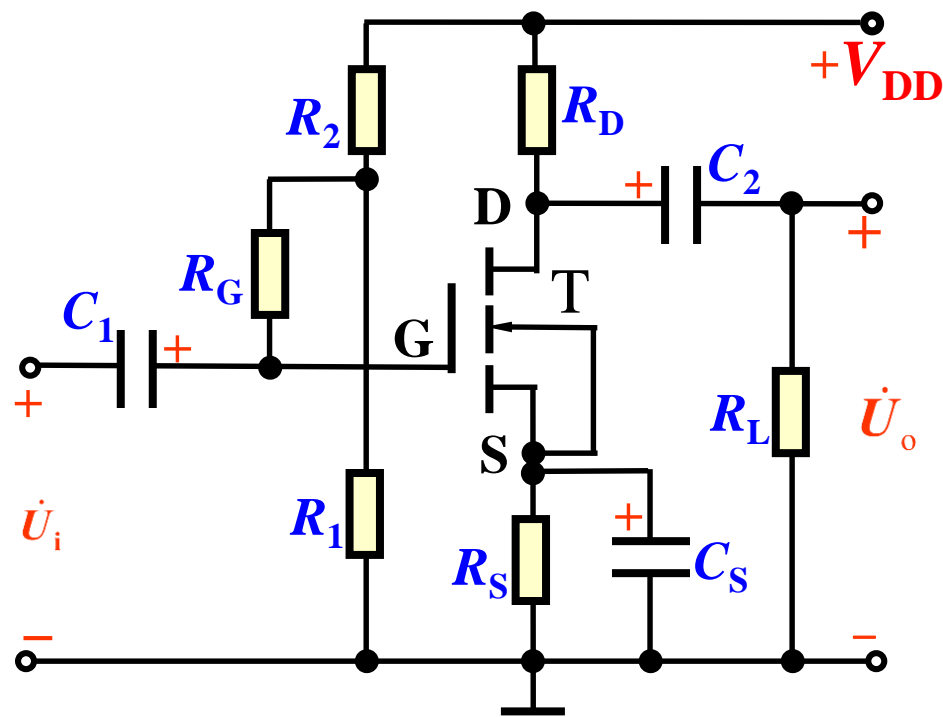
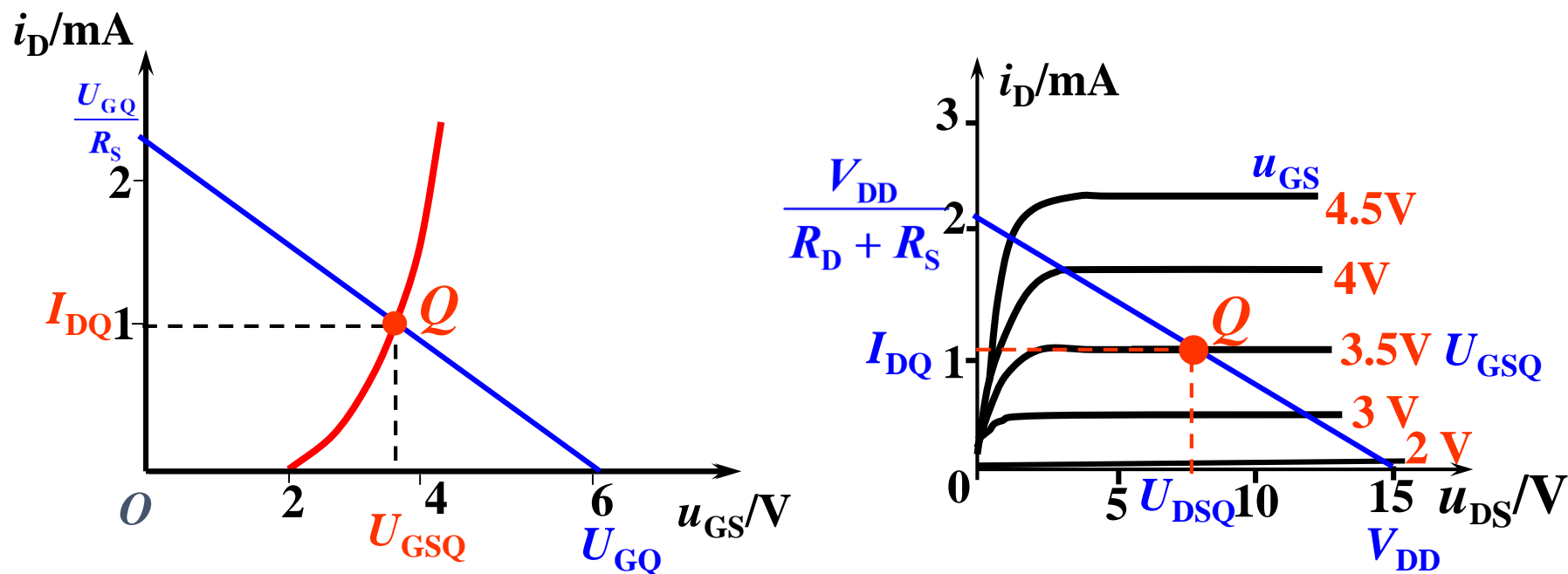


图 2.7.5 分压式偏置电路

## 2.7.2 场效应管放大电路的静态工作点设置方法



根据漏极回路方程

$$u_{DS} = V_{DD} - i_D(R_D + R_S)$$

在漏极特性曲线上做直流负载线，与  $u_{GS} = U_{GSQ}$  的交点确定  $Q$ ，由  $Q$  确定  $U_{DSQ}$  和  $I_{DQ}$  值。



## 2.7.3 场效应管放大电路的动态分析

### 一、场效应管的低频小信号等效模型

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

$i_D$  的全微分为

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

上式中定义：

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}}$$

—— 场效应管的跨导(毫西门子 mS)。

$$\frac{1}{r_{DS}} = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{U_{GS}}$$

—— 场效应管漏源之间等效电阻。

## 2.7.3 场效应管放大电路的动态分析

如果输入正弦信号，则可用相量代替上式中的变量。

成为：

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

根据上式做等效电路如图所示。

{ 由于没有栅极电流，所以栅源是悬空的。  
 $g_m \dot{U}_{gs}$  是一个受控源。

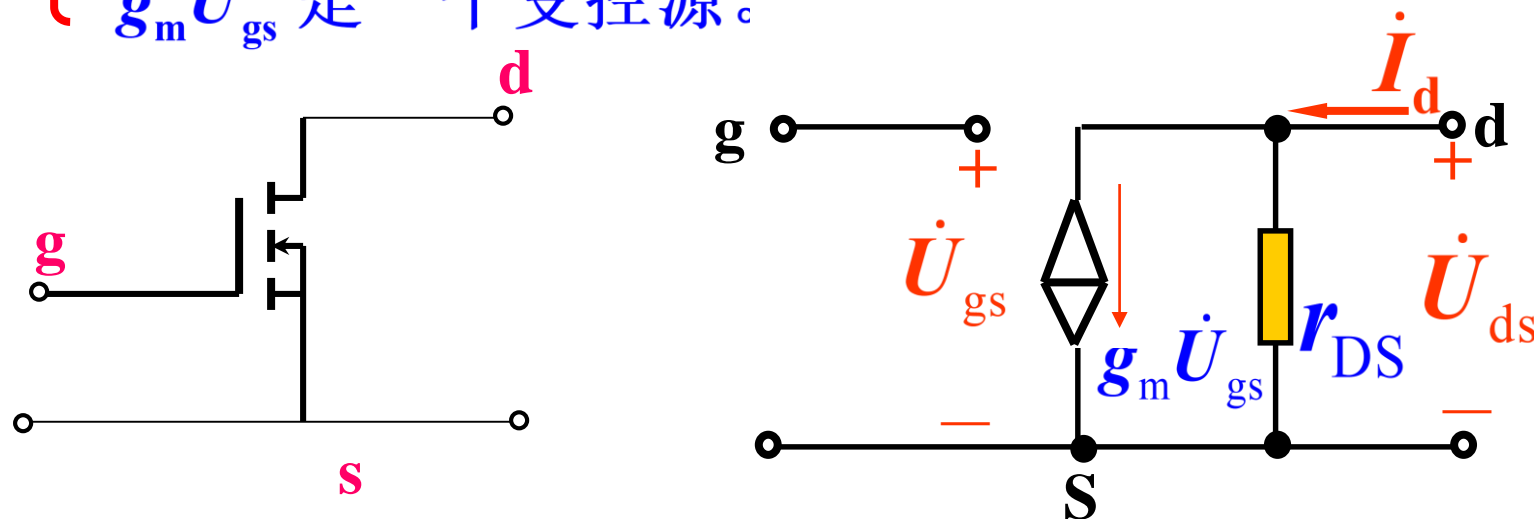


图 2.7.6 MOS管的低频小信号等效模型

微变参数  $g_m$  和  $r_{DS}$

(1) 根据定义通过在特性曲线上作图方法中求得

(2) 用求导的方法计算  $g_m$

$$g_m = \frac{di_D}{du_{GS}} = \frac{2I_{DO}}{U_T} \left( \frac{u_{GS}}{U_T} - 1 \right) = \frac{2}{U_T} \sqrt{I_{DO} i_D} \quad i_D = I_{DO} \left( \frac{u_{GS}}{U_T} - 1 \right)^2$$

在  $Q$  点附近, 可用  $I_{DQ}$  表示上式中  $i_D$ , 则

$$g_m = \frac{2}{U_T} \sqrt{I_{DO} I_{DQ}}$$

一般  $g_m$  约为 0.1 至 20 mS。  $r_{DS}$  为几百千欧的数量级。

当  $R_D$  比  $r_{DS}$  小得多时, 可认为等效电路的  $r_{DS}$  开路。

## 二、基本共源放大电路的动态分析

### 1. 基本共源放大电路动态分析

将  $r_{DS}$  开路  $\dot{U}_i = \dot{U}_{gs}$

而

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_d R_D = -g_m \dot{U}_{gs} R_D$$

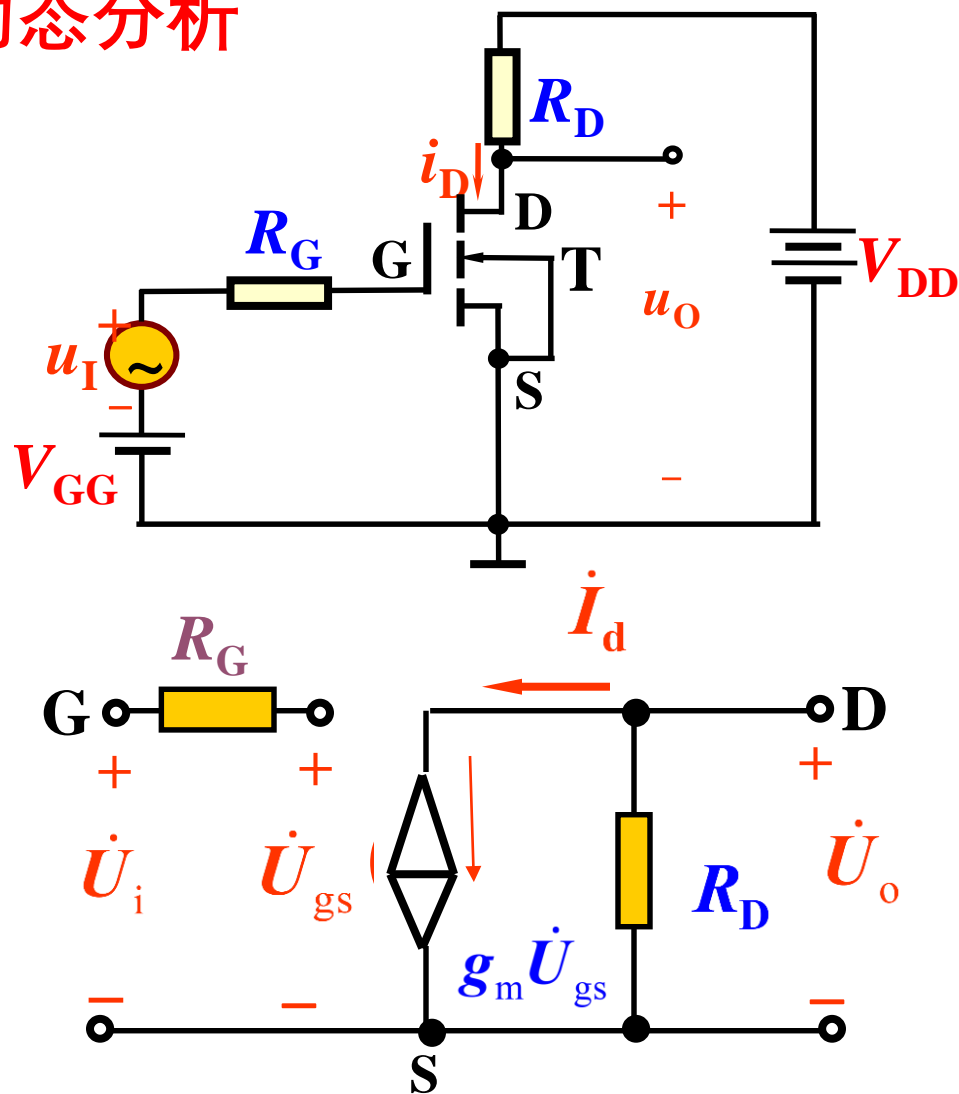
所以

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

输出电阻

$$R_o = R_D$$

MOS 管输入电阻高达  $10^9 \Omega$ 。



基本共源放大电路的等效电路

## 2.分压式偏置电路的动态分析

等效电路入图所示

由图可知

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_d R'_D = -g_m \dot{U}_{gs} R'_D$$

$$R'_D = R_D // R_L$$

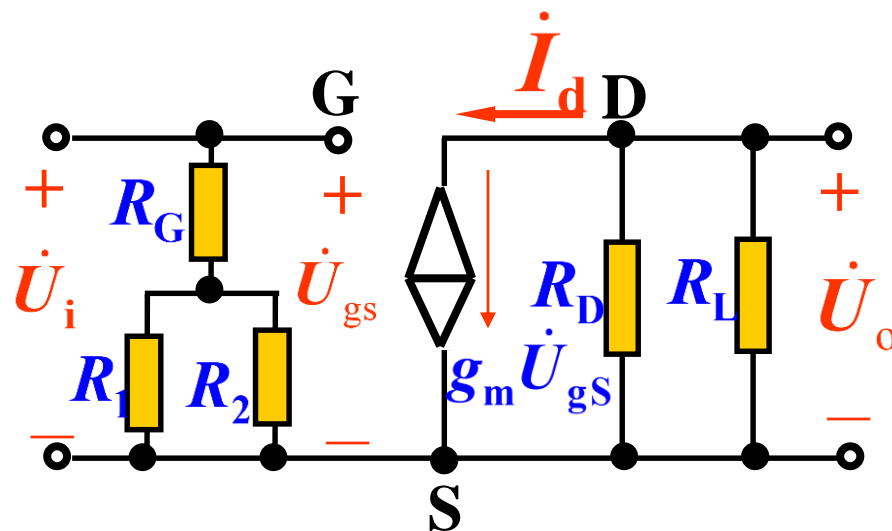
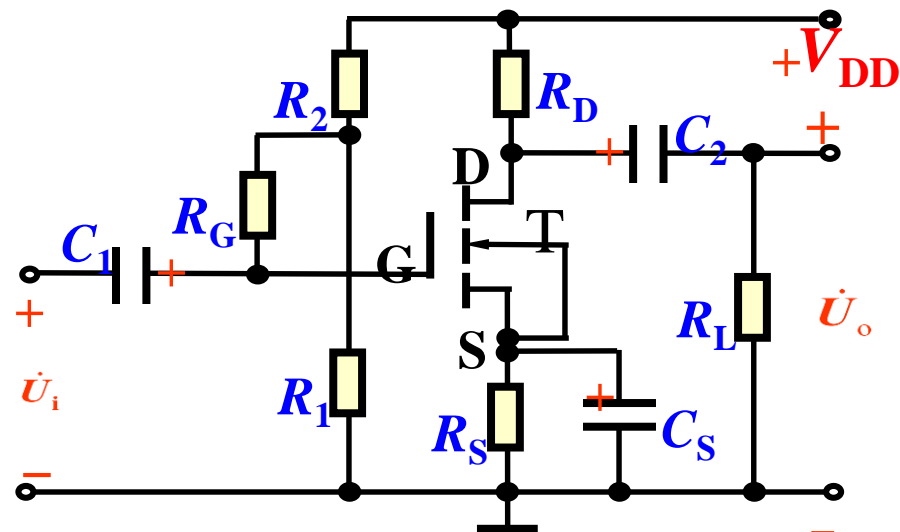
电压放大倍数

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

输入、输出电阻分别为

$$R_i = R_G + (R_1 // R_2)$$

$$R_o = R_D$$



分压式偏置电路等效电路

### 三、基本共漏放大电路

#### ——源极输出器或源极跟随器

典型电路如右图所示。

#### 1. 静态分析

分析方法与“分压-自偏压式共源电路”类似，可采用估算法和图解法。

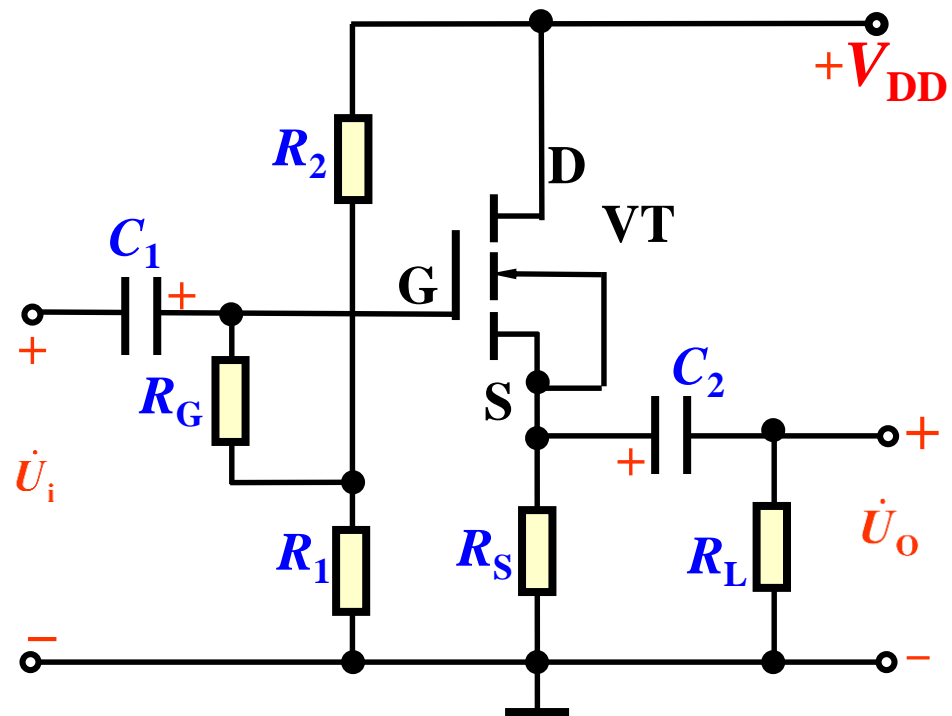


图 2.7.9 基本共漏放大电路

## 2.动态分析

### (1) 电压放大倍数

$$\dot{U}_o = g_m \dot{U}_{gs} R'_s$$

$$R'_s = R_s // R_L$$

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} + \dot{U}_o = (1 + g_m R'_s) \dot{U}_{gs}$$

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

可见,  $A_u < 1$ , 当  $g_m R'_s \gg 1$  时,  $A_u \approx 1$ .

### (2) 输入电阻

$$R_i = R_G + (R_1 // R_2)$$

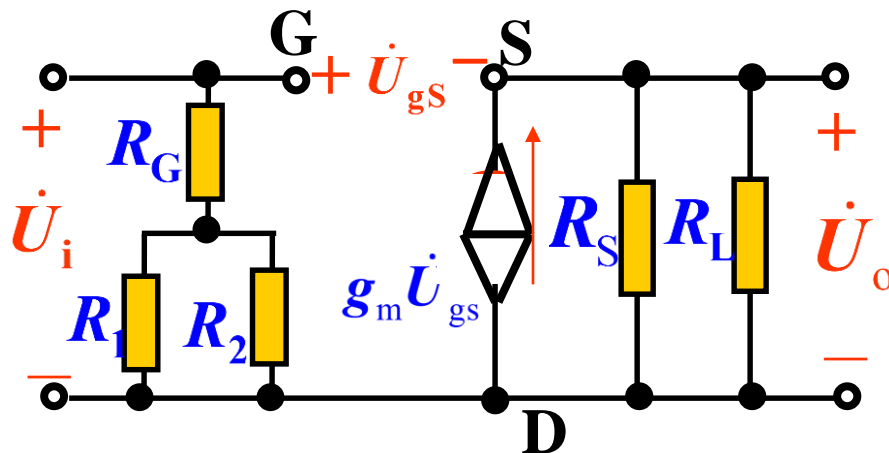
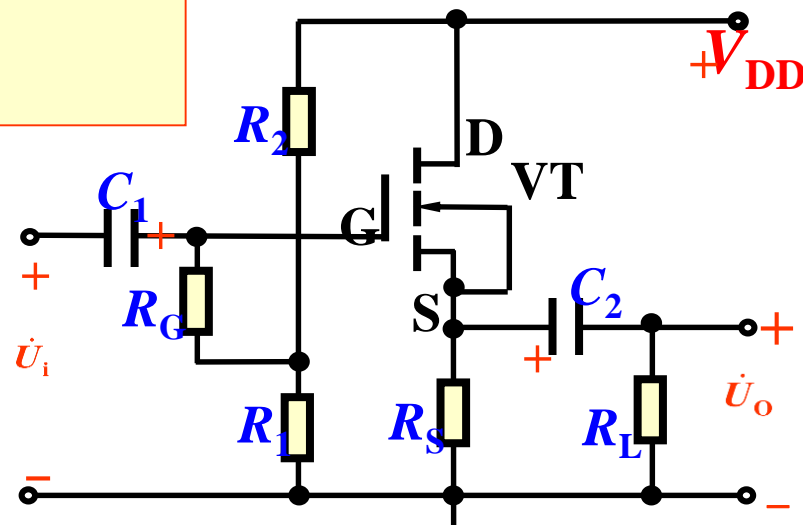


图 2.7.10 微变等效电路



### (3) 输出电阻

在电路中，外加  $\dot{U}_o$ ，令  $\dot{U}_i = 0$ ，并使  $R_L$  开路

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{U}_o}{R_S} - g_m \dot{U}_{gs}$$

因输入端短路，故

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

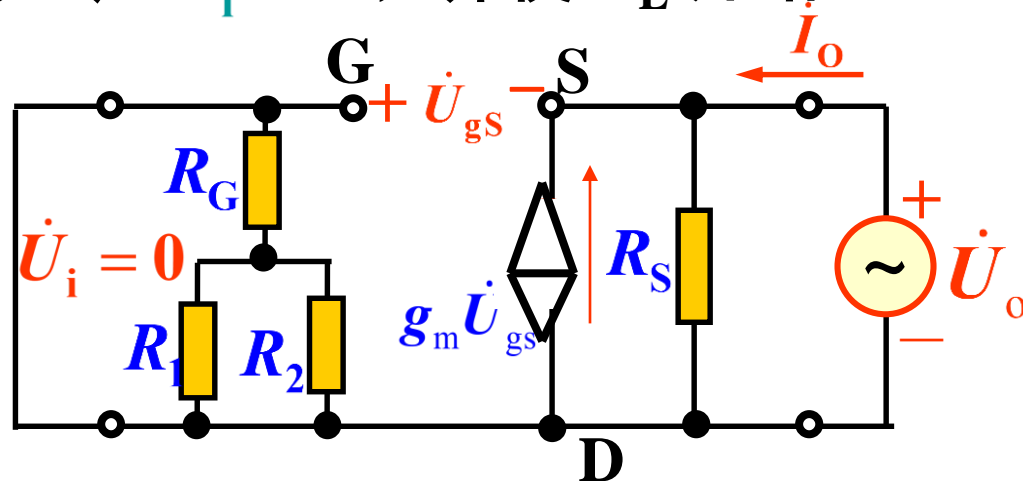


图 2.7.11 微变等效电路

则

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{U}_o}{R_S} + g_m \dot{U}_o = \left( \frac{1}{R_S} + g_m \right) \dot{U}_o$$

所以

$$R_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{R_S}} = \frac{1}{g_m} // R_S$$

实际工作中经常使用的是共源、共漏组态。



## 2.7.4 场效应管放大电路

1. 场效应管是电压控制元件；
2. 栅极几乎不取用电流，输入电阻非常高；
3. 一种极性的载流子导电，噪声小，受外界温度及辐射影响小；
4. 制造工艺简单，有利于大规模集成；
5. 存放管子应将栅源极短路，焊接时烙铁外壳应接地良好，防止漏电击穿管子；
6. 跨导较小，电压放大倍数一般比三极管低。