

# 6 放大电路频率响应

## 6.1 $RC$ 电路的频率响应（教材6.2）

## 6.2 放大电路频率响应及简化等效模型

## 6.3 共源极放大电路的频率响应

（教材6.4.1， 6.4.2， 6.3.1）

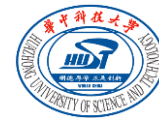
## 6.4 共射极放大电路的频率响应

（教材6.4.3， 6.4.4， 6.3.2）

## 6.5 三极管基本放大电路频率响应比较

## 6.6 多级放大电路的频率响应（教材6.7）

# 6.1 $RC$ 电路的频率响应



## 6.1.1 中频响应

## 6.1.2 高频响应

## 6.1.3 低频响应

## 6.1.4 全频响应

# 6.1.1 中频响应

对于二端口RC电路网络

设  $R_1 C_1 \gg R_2 C_2$ ,

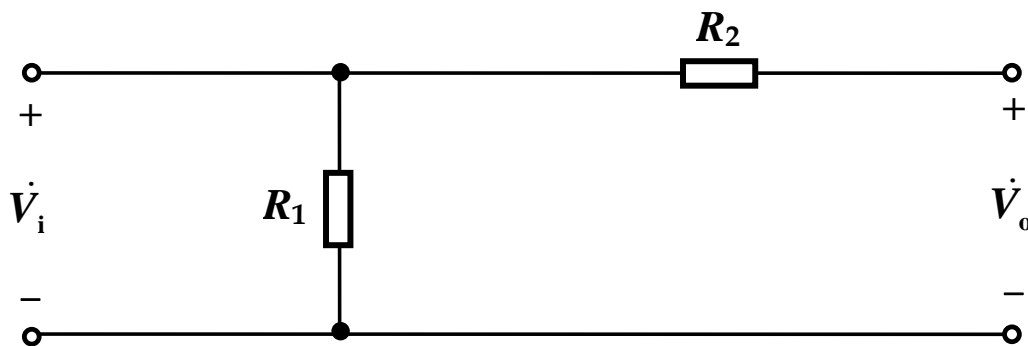
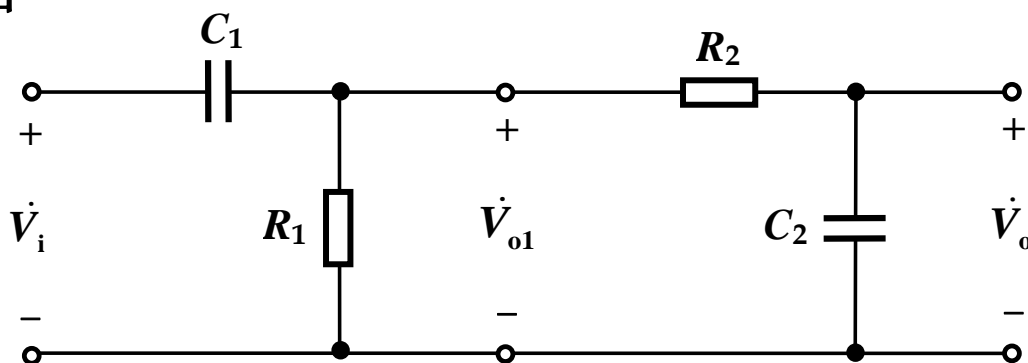
且  $C_1 \gg C_2$

在中频区

$$\frac{1}{R_1 C_1} \ll \omega \ll \frac{1}{R_2 C_2}$$

即  $\frac{1}{\omega C_1} \ll R_1$

$$\frac{1}{\omega C_2} \gg R_2$$



中频区等效电路

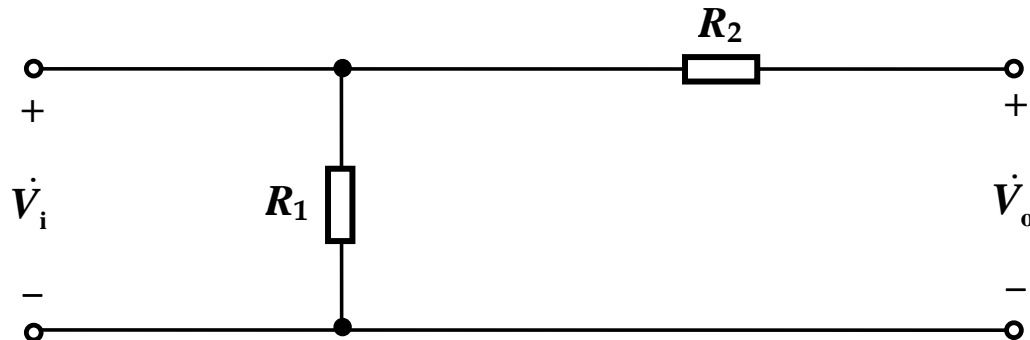
则  $C_1$  可近似看作短路,  $C_2$  可近似看作开路。

## 6.1.1 中频响应

电压增益  
(传递函数) :

$$\dot{A}_{vM} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = 1$$

与频率无关



中频区等效电路

电压增益的幅值 (模) :  $|\dot{A}_{vM}| = 1$

电压增益的相角:  $\varphi = \varphi_o - \varphi_i = 0^\circ$   $\dot{V}_o$  与  $\dot{V}_i$  同相

# 6.1 $RC$ 电路的频率响应

6.1.1 中频响应

6.1.2 高频响应

6.1.3 低频响应

6.1.4 全频响应

## 6.1.2 高频响应

当 $\omega$ 接近和大于

等于  $\frac{1}{R_2 C_2}$  时,

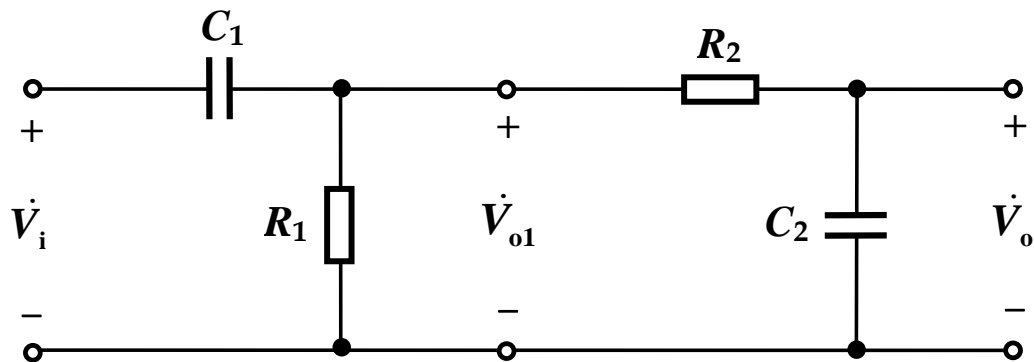
$\frac{1}{\omega C_2}$  接近  $R_2$

属于高频区,

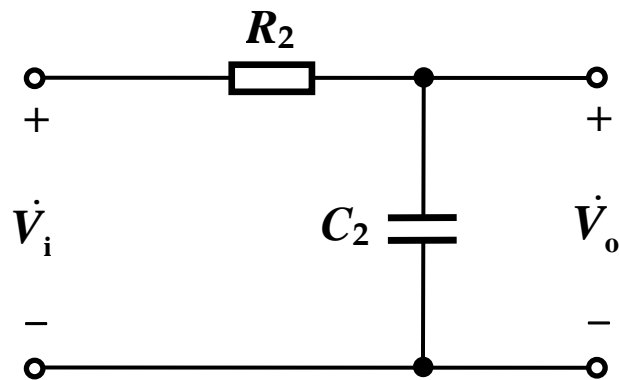
$C_2$ 的影响不能再忽略,

此时仍有  $\frac{1}{\omega C_1} \ll R_1$  ,

$C_1$ 仍可看作短路。



二端口RC电路



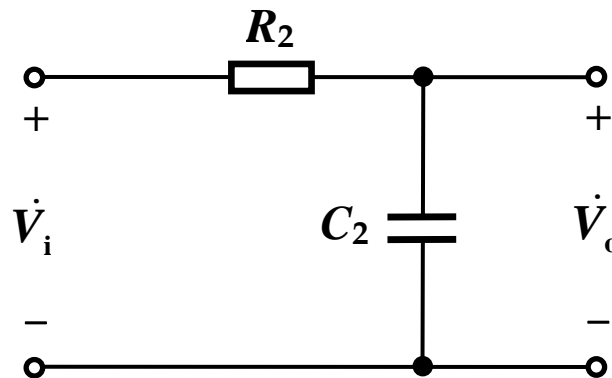
RC低通电路（高频区等效电路）

## 6.1.2 高频响应

### ①增益频率函数

电压增益（传递函数）：

$$\dot{A}_{vH} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{1}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_2}$$



RC低通电路（高频区等效电路）

令  $f_H = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$  上限截止频率 则

$$\dot{A}_{vH} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{1}{1 + j(f / f_H)}$$

电压增益的幅值（模）  $|\dot{A}_{vH}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}}$  （幅频响应）

电压增益的相角  $\varphi_H = \varphi_o - \varphi_i = -\arctan(f / f_H)$  （相频响应）

# 6.1.2 高频响应

## ②频率响应曲线描述

幅频响应

$$|\dot{A}_{vH}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}}$$

当  $f \ll f_H$  时

$$A_{vH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \approx 1$$

$$20\lg A_{vH} = 20\lg 1 \approx 0 \text{ dB}$$

0分贝水平线

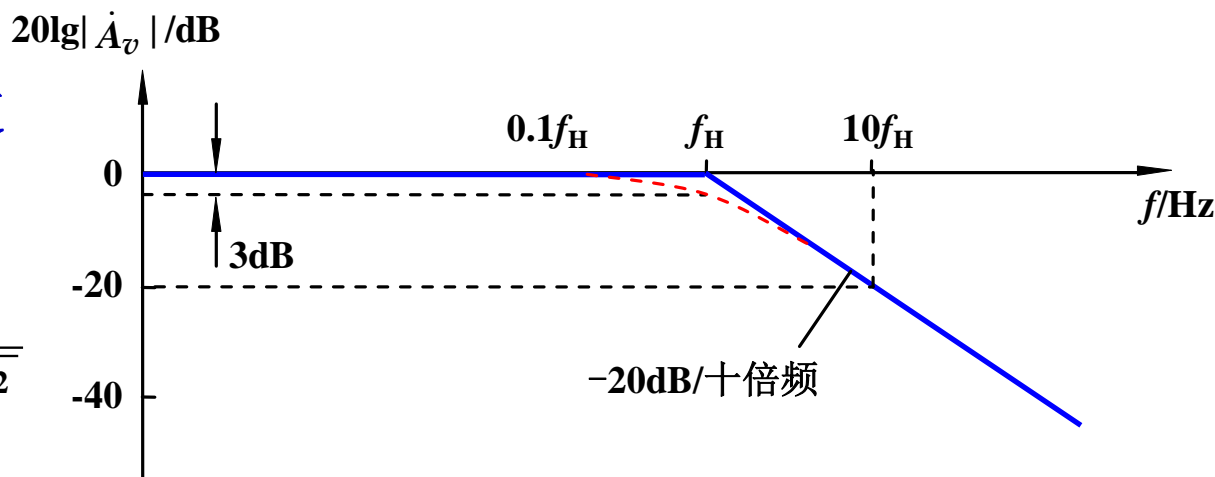
当  $f \gg f_H$  时

$$A_{vH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \approx f_H / f$$

$$20\lg A_{vH} = 20\lg(f_H / f) = 20\lg f_H - 20\lg f$$

最大误差 -3dB

$f_H$  也称为转折频率、3dB上限截止频率。





## 6.1.2 高频响应

### ②频率响应曲线描述

相频响应

$$\varphi_H = -\arctan(f / f_H)$$

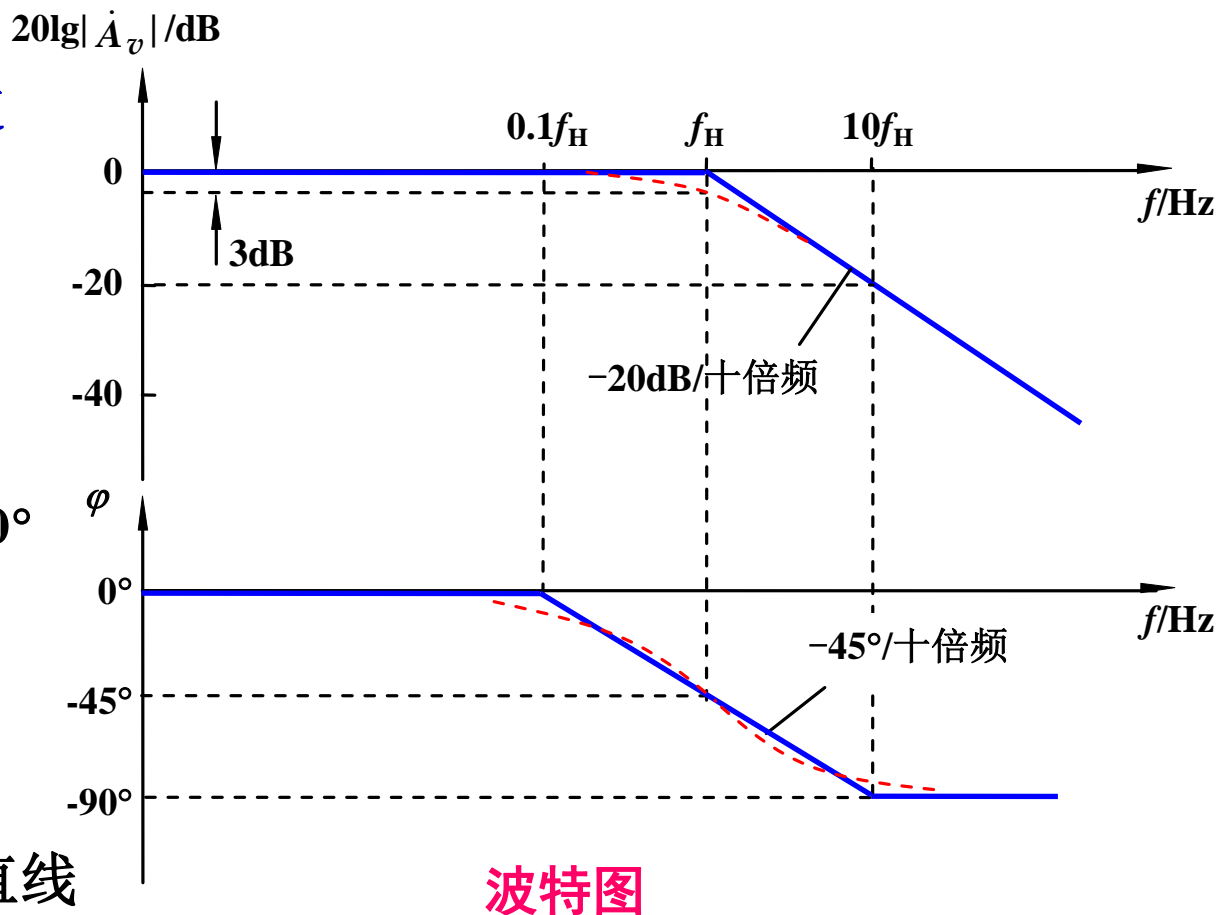
当  $f \ll f_H$  时,  $\varphi_H \rightarrow 0^\circ$

当  $f \gg f_H$  时,  $\varphi_H \rightarrow -90^\circ$

当  $f = f_H$  时,  $\varphi_H = -45^\circ$

当  $0.1f_H < f < 10f_H$  时,

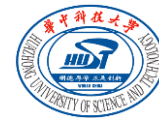
斜率为 $-45^\circ$ /十倍频的直线



$\varphi = \varphi_o - \varphi_i$  表示输出与输入的相位差

表明高频时, 输出滞后输入

# 6.1 $RC$ 电路的频率响应



6.1.1 中频响应

6.1.2 高频响应

6.1.3 低频响应

6.1.4 全频响应

## 6.1.3 低频响应

当 $\omega$ 接近和小于

等于  $\frac{1}{R_1 C_1}$  时,

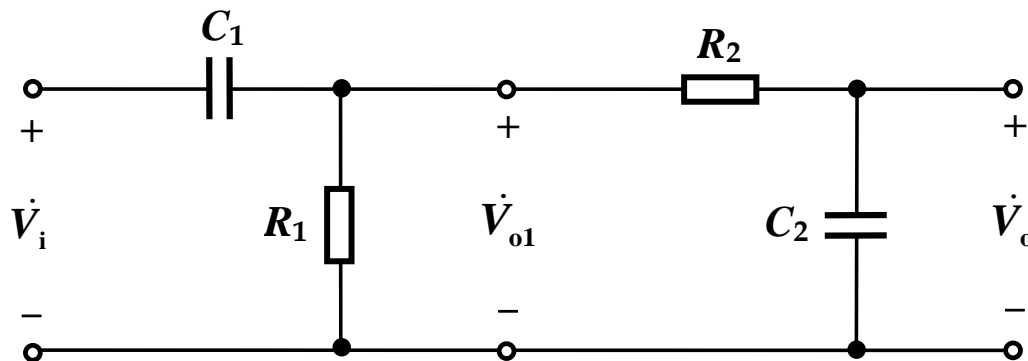
$\frac{1}{\omega C_1}$  接近  $R_1$

属于低频区

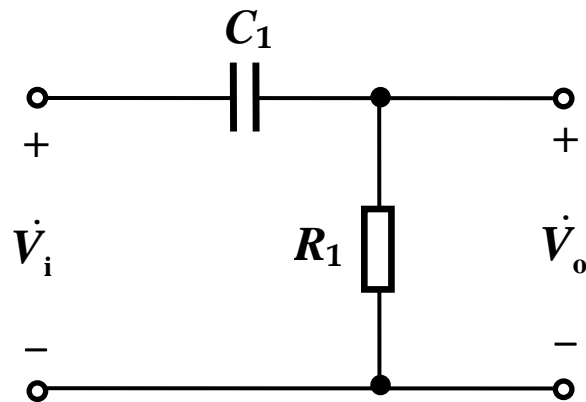
$C_1$ 的影响不能再忽略

此时有  $\frac{1}{\omega C_2} \gg R_2$

$C_2$ 可看作开路



二端口RC电路



RC高通电路（低频区等效电路）

## 6.1.3 低频响应

电压增益（传递函数）：

$$\dot{A}_{vL} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega R_1 C_1}}$$

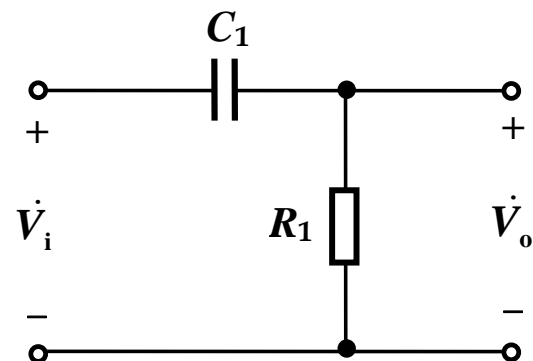
令  $f_L = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$  下限截止频率

则  $\dot{A}_{vL} = \frac{1}{1 - j(f_L / f)}$

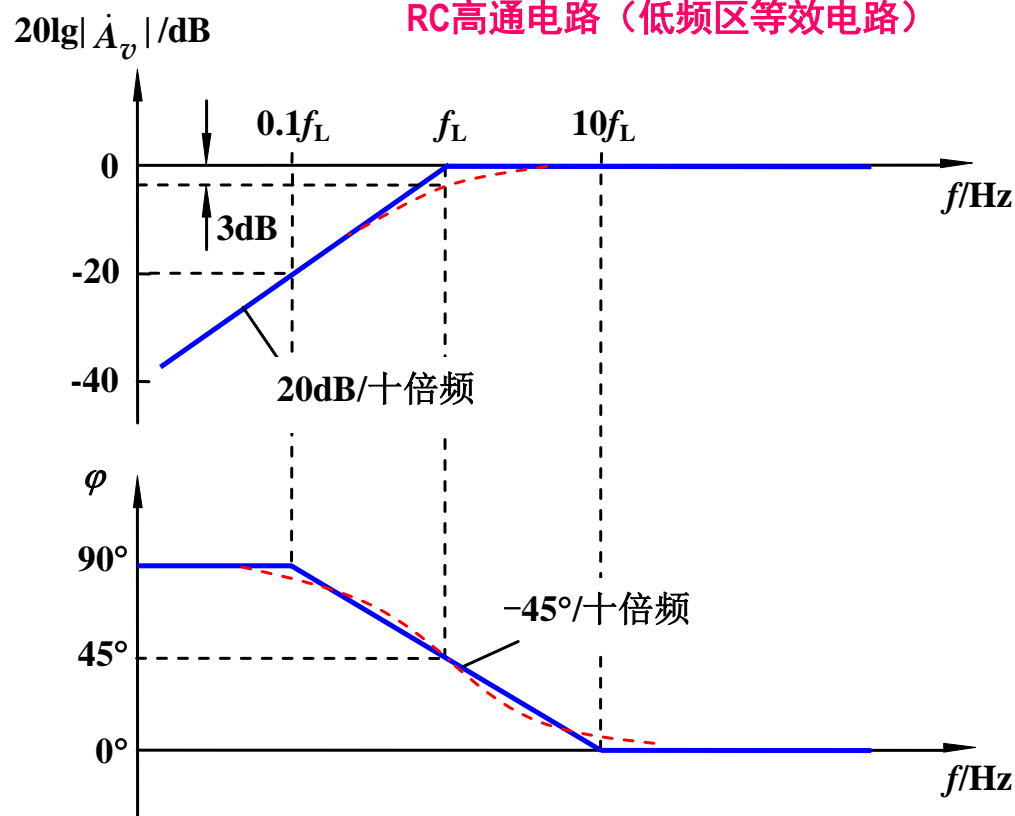
幅频响应  $|\dot{A}_{vL}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L / f)^2}}$

相频响应  $\varphi_L = \arctan(f_L / f)$

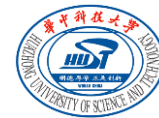
输出超前输入



RC高通电路（低频区等效电路）



# 6.1 $RC$ 电路的频率响应



6.1.1 中频响应

6.1.2 高频响应

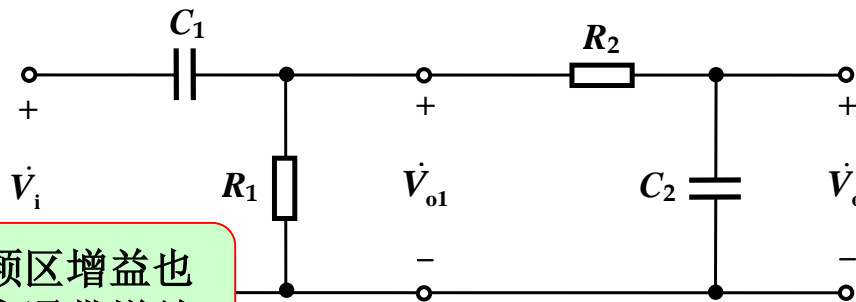
6.1.3 低频响应

6.1.4 全频响应

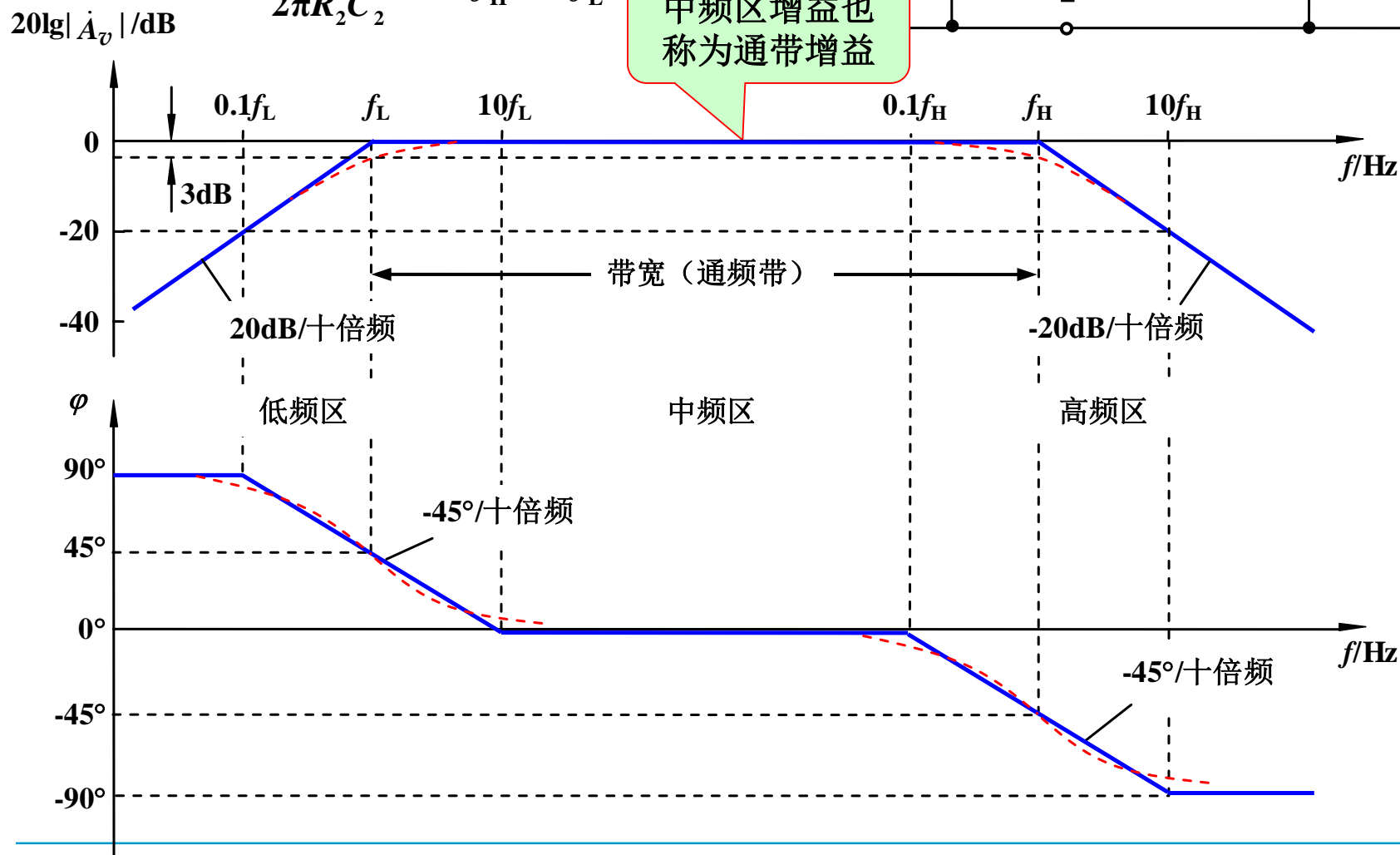
# 6.1.4 全频响应

$$\because R_1 C_1 \gg R_2 C_2 \quad f_L = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad \therefore f_H \gg f_L$$



中频区增益也称为通带增益



# 6 放大电路频率响应

6.1  $RC$ 电路的频率响应（教材6.2）

6.2 放大电路频率响应及简化等效模型

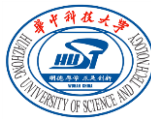
6.3 共源极放大电路的频率响应  
（教材6.4.1， 6.4.2， 6.3.1）

6.4 共射极放大电路的频率响应  
（教材6.4.3， 6.4.4， 6.3.2）

6.5 三极管基本放大电路频率响应比较

6.6 多级放大电路的频率响应（教材6.7）

## 6.2 放大电路频率响应及简化等效模型



### 1. 放大电路频率响应概述

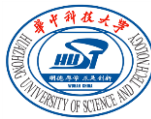
(1) 需要放大的信号通常都包含许多频率成份。如话筒输出的语音信号（20Hz~20kHz），卫星电视信号（3.7~4.2GHz）等。

(2) 放大电路中有耦合电容、旁路电容和负载电容，FET或BJT也存在PN结电容，此外实际电路中还有分布电容等，导致对不同频率的信号放大倍数和时延不同。若信号中不同的频率成份不能被放大电路同等地放大（包括时延），则会出现失真现象（称为线性失真或频率失真）。

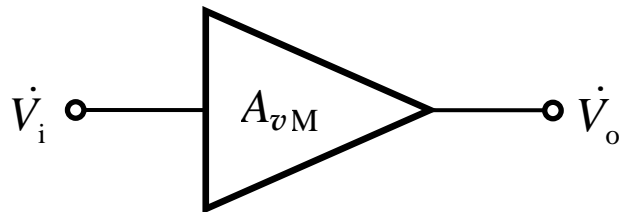
(3) 前两章分析放大电路的性能指标时，是假设电路中所有耦合电容和旁路电容对信号频率来说都呈现非常小的阻抗而视为短路；FET或BJT的极间电容、电路中的负载电容及分布电容对信号频率来说都呈现非常大的阻抗而视为开路。



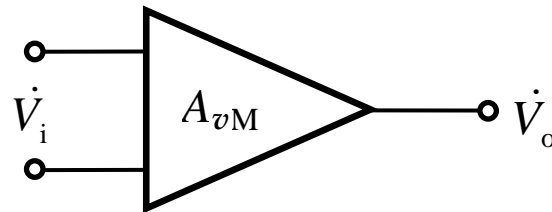
## 6.2 放大电路频率响应及简化等效模型



### 2. 放大电路中频区（通带内）的简化模型



单端输入方式



差分式输入方式

$A_{vM}$ ——通带增益，不含电抗元件

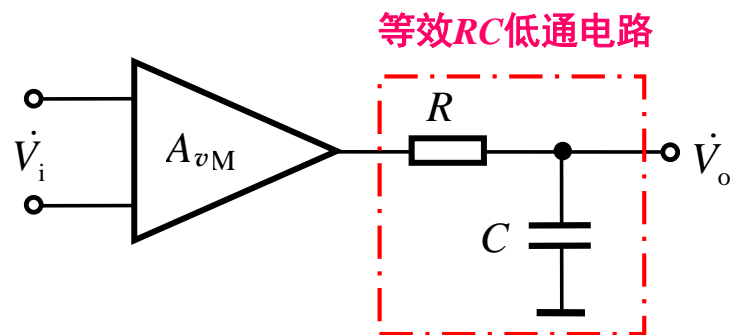
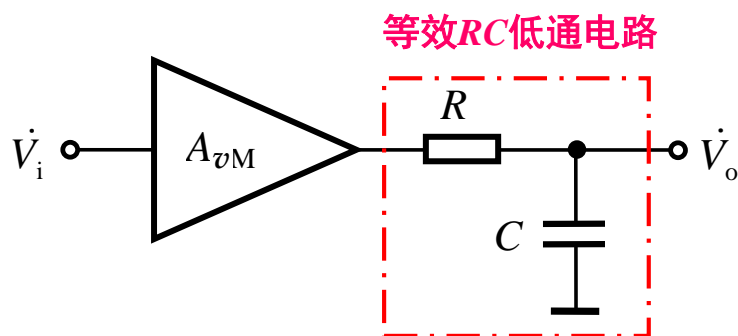
——假设其输入电阻为无穷大，输出电阻为零

——输出与输入的相位可以是同相，也可以是反相

## 6.2 放大电路频率响应及简化等效模型



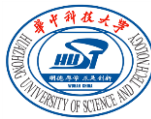
### 3. 直接耦合放大电路的等效模型



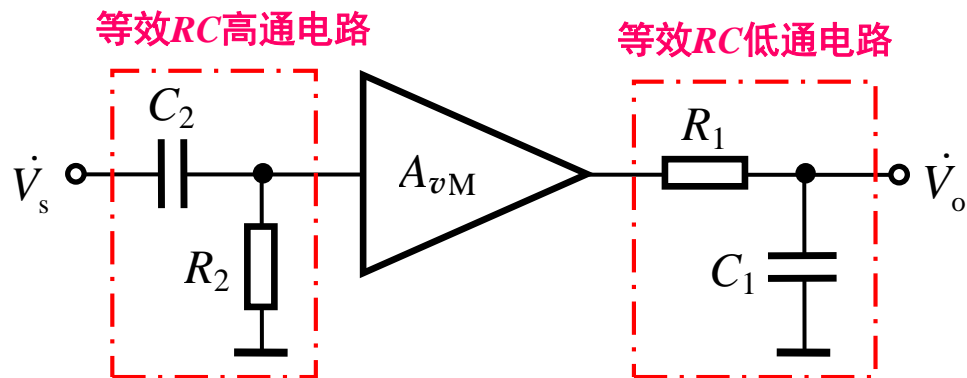
其中 $C$ 包含三极管的PN结电容、极间电容、电路分布电容、负载电容的影响。

假设这些影响最终可以等效为单时间常数 $RC$ 电路，或只有一个起决定作用的 $RC$ 电路。

## 6.2 放大电路频率响应及简化等效模型



### 4. 阻容耦合放大电路的等效模型

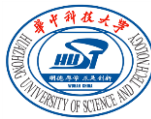


高频区：PN结等电容同样对增益产生影响。

低频区：耦合电容和旁路电容产生影响，它们的影响可以等效为RC高通电路。

假设这些影响最终都可以等效为单时间常数RC电路。

## 6.2 放大电路频率响应及简化等效模型



采用等效模型分析放大电路频率影响时，仅需要完成两项任务：

- (1) 求得通带增益 $A_{vM}$ ，前续相关章节对此已进行了介绍；
- (2) 求得等效的 $RC$ 电路。这一过程较复杂，本章后续内容将做重点讨论。

一旦获得了等效模型，就可以利用6.1节的结论，直接得到放大电路的频率响应结果。

# 6 放大电路频率响应

6.1  $RC$ 电路的频率响应（教材6.2）

6.2 放大电路频率响应及简化等效模型

6.3 共源极放大电路的频率响应

（教材6.4.1， 6.4.2， 6.3.1）

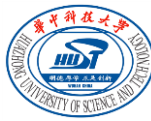
6.4 共射极放大电路的频率响应

（教材6.4.3， 6.4.4， 6.3.2）

6.5 三极管基本放大电路频率响应比较

6.6 多级放大电路的频率响应（教材6.7）

# 6.3 共源极放大电路的频率响应



## 6.3.1 简化模型下的频率响应

## 6.3.2 MOSFET高频小信号模型

## 6.3.3 共源极放大电路的等效 $RC$ 低通电路

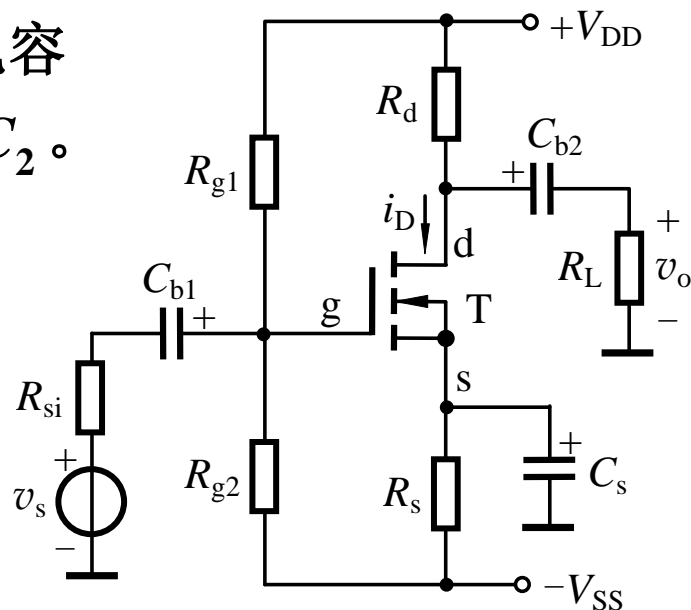
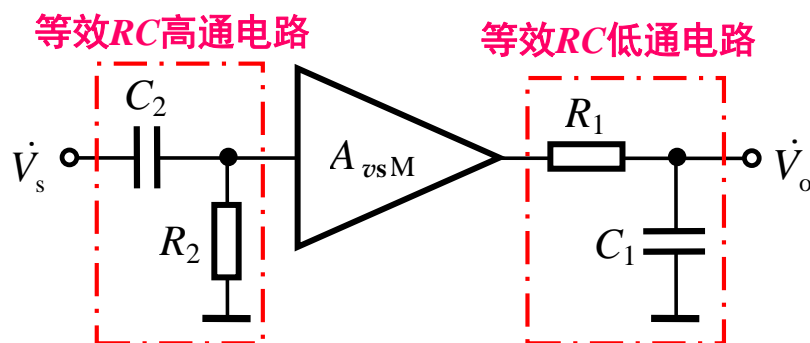
## 6.3.4 增益-带宽积

## 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效 $RC$ 高通电路

## 6.3.1 简化模型下的频率响应

可以将电路中FET极间电容在高频区产生的影响等效为 $R_1C_1$ 低通电路；而将耦合电容和旁路电容在低频区产生的影响等效为 $R_2C_2$ 高通电路。

一般FET极间电容远小于耦合电容和旁路电容，所以通常有 $R_1C_1 \ll R_2C_2$ 。



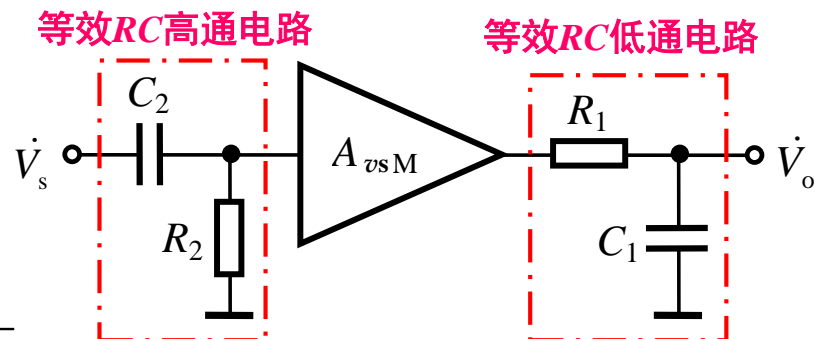
$A_{vsM}$  —— 共源极放大电路的通带源电压增益，式中的负号表示输出与输入反相，即通带内增益的相频响应为 $-180^\circ$ 。

## 6.3.1 简化模型下的频率响应

增益的频率响应

$$\dot{A}_{vs} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s}$$

$$= A_{vsM} \cdot \frac{1}{1 - j(f_L / f)} \cdot \frac{1}{1 + j(f / f_H)}$$



上限频率  $f_H = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$

下限频率  $f_L = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$

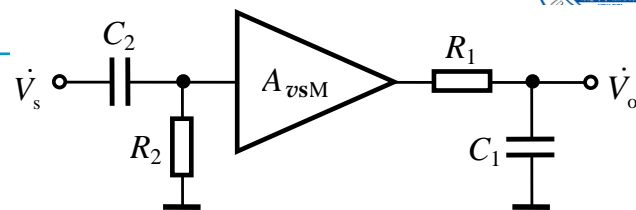
幅频响应  $|\dot{A}_{vs}| = \frac{|A_{vsM}|}{\sqrt{1 + (f_L / f)^2} \cdot \sqrt{1 + (f / f_H)^2}}$

相频响应  $\varphi = -180^\circ + \arctan(f_L / f) - \arctan(f / f_H)$

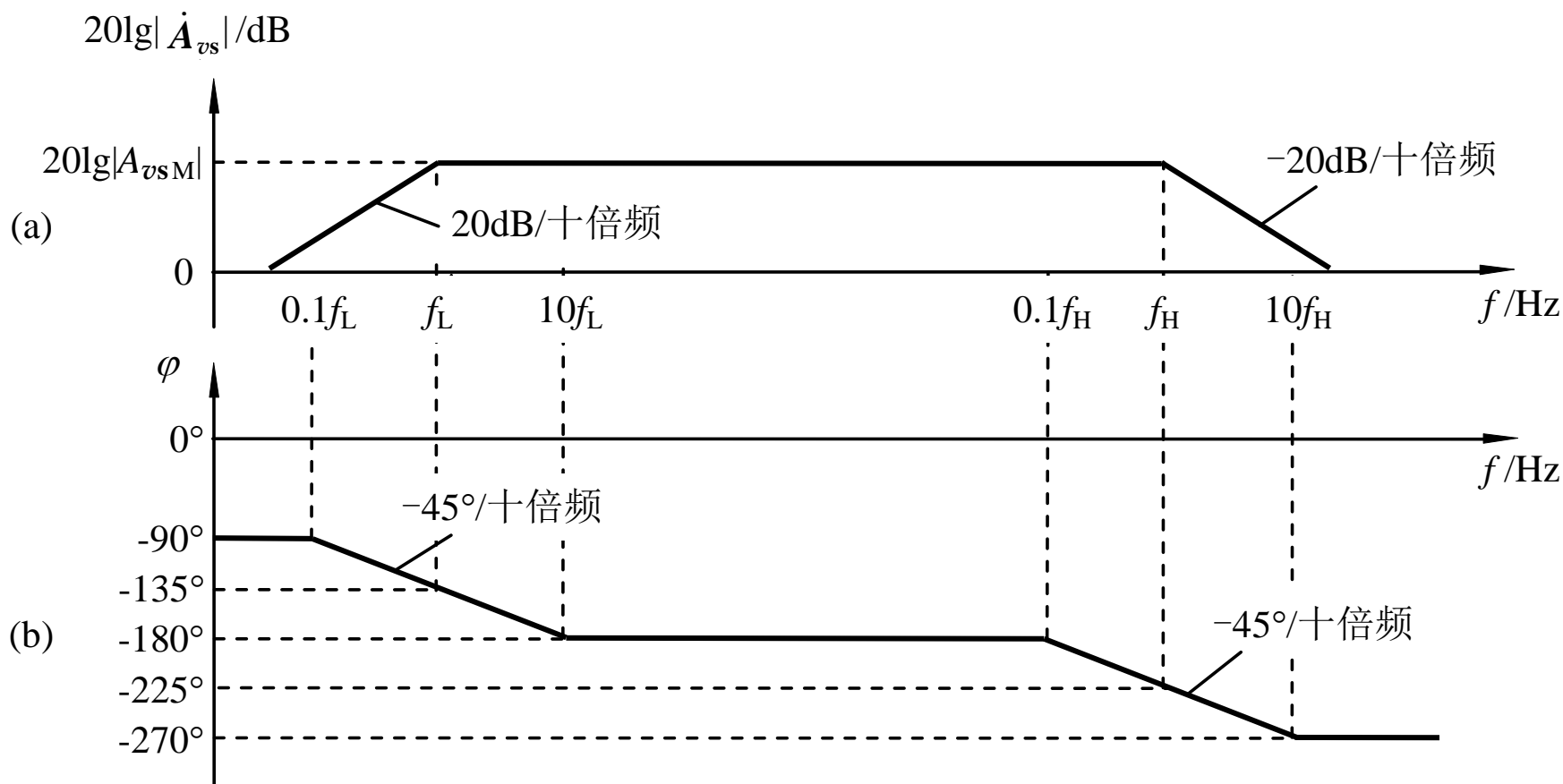


## 6.3.1 简化模型下的频率响应

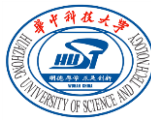
幅频响应  $|\dot{A}_{vs}| = \frac{|A_{vsM}|}{\sqrt{1 + (f_L / f)^2} \cdot \sqrt{1 + (f / f_H)^2}}$



相频响应  $\varphi = -180^\circ + \arctan(f_L / f) - \arctan(f / f_H)$



# 6.3 共源极放大电路的频率响应



## 6.3.1 简化模型下的频率响应

## 6.3.2 MOSFET高频小信号模型

## 6.3.3 共源极放大电路的等效 $RC$ 低通电路

## 6.3.4 增益-带宽积

## 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效 $RC$ 高通电路

## 6.3.2 MOSFET高频小信号模型

当信号频率处于高频区时，FET极间电容的阻抗将减小，不能再视为开路，需考虑它们带来的影响。

$C_{gs}$ ——栅源电容

$C_{gd}$ ——栅漏电容

$C_{sb}$ ——源衬电容

$C_{db}$ ——漏衬电容

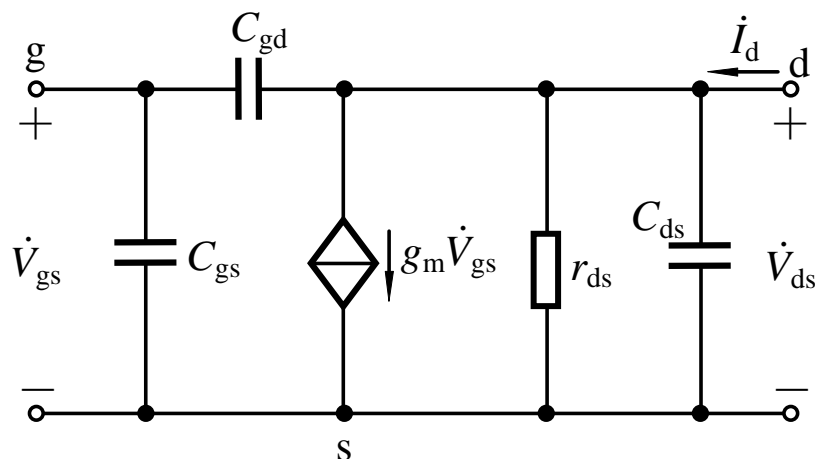
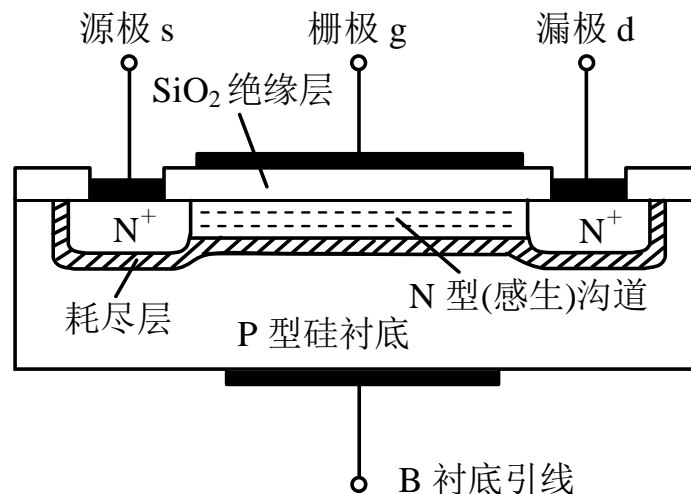
多数情况下，MOS管的源极和衬底连在一起，此时 $C_{sb}$ 被短路，而 $C_{db}$ 变为漏源电容 $C_{ds}$ 。

典型值

$C_{gs}$ : 0.1~0.5pF;  $C_{gd}$ : 0.01~0.04pF

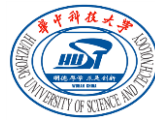
$C_{ds}$ 更小，往往将其忽略

$r_{ds}$ :  $10^4 \sim 10^6 \Omega$ 。



衬底与源极并接时的高频小信号模型（也称为 $\pi$ 模型）

# 6.3 共源极放大电路的频率响应



## 6.3.1 简化模型下的频率响应

## 6.3.2 MOSFET高频小信号模型

## 6.3.3 共源极放大电路的等效RC低通电路

## 6.3.4 增益-带宽积

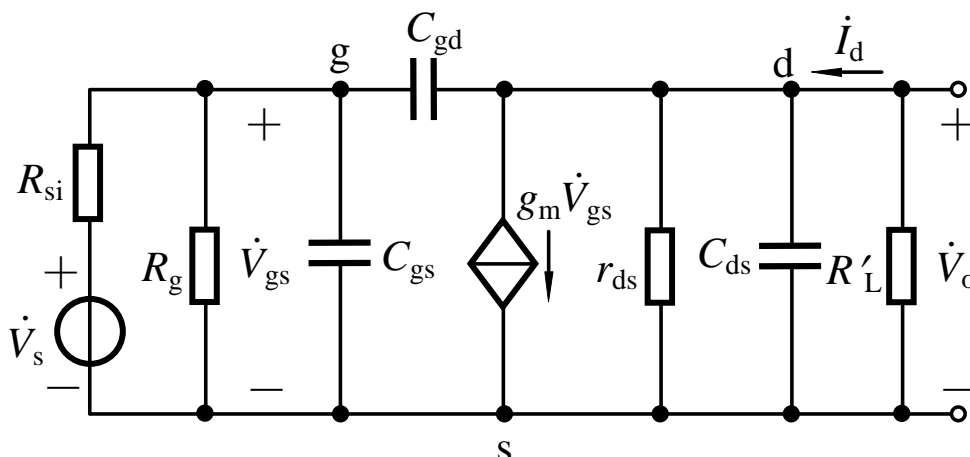
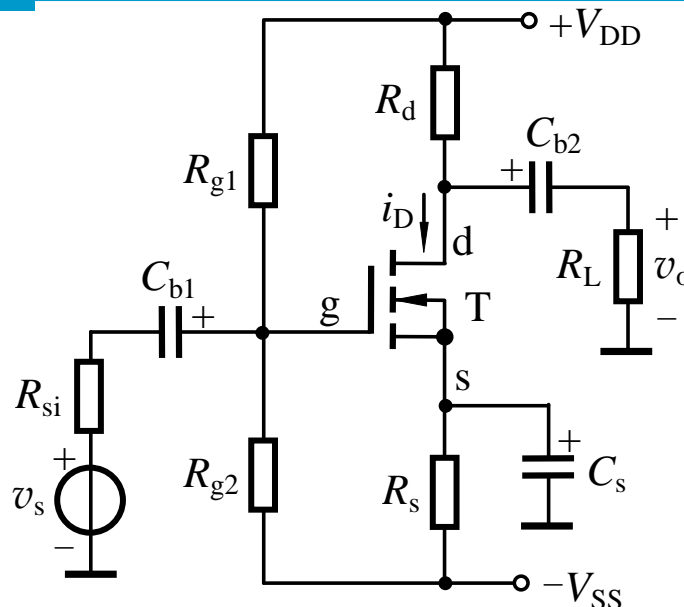
## 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效RC高通电路

## 6.3.3 共源极放大电路的等效RC低通电路

在高频区，电路中的耦合电容 $C_{b1}$ 、 $C_{b2}$ 和旁路电容 $C_s$ 的容抗都很小，可视为短路，而MOSFET的极间电容则不能再看作开路。

其中  $R_g = R_{g1} // R_{g2}$

$R'_L = R_d // R_L$

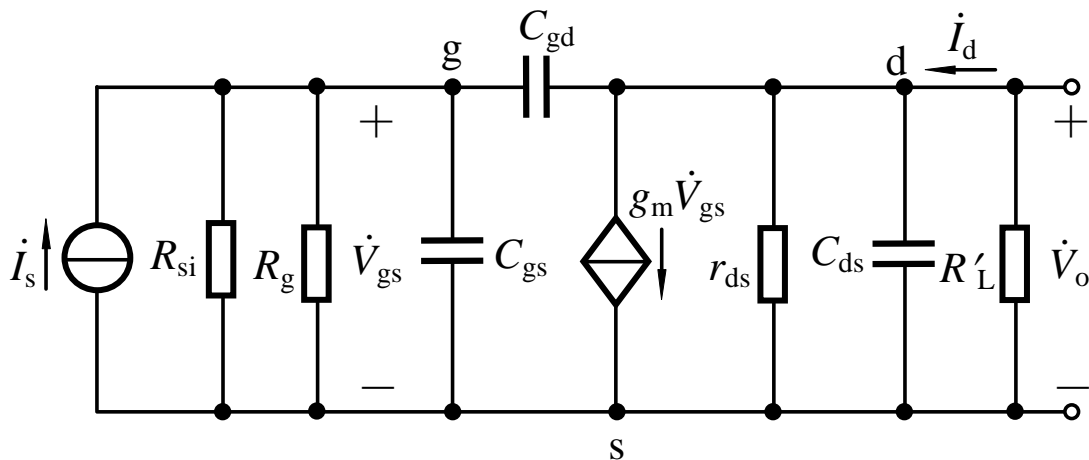
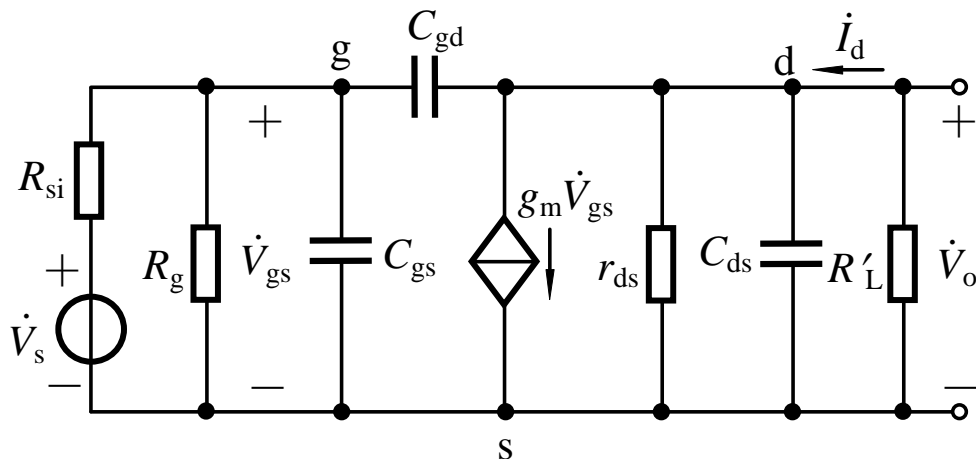


高频小信号等效电路

## 6.3.3 共源极放大电路的等效RC低通电路

将信号源及内阻支路变换为诺顿等效电路

$$\dot{I}_s = \frac{\dot{V}_s}{R_{si}}$$



## 6.3.3 共源极放大电路的等效RC低通电路

为简单起见，作如下假设：

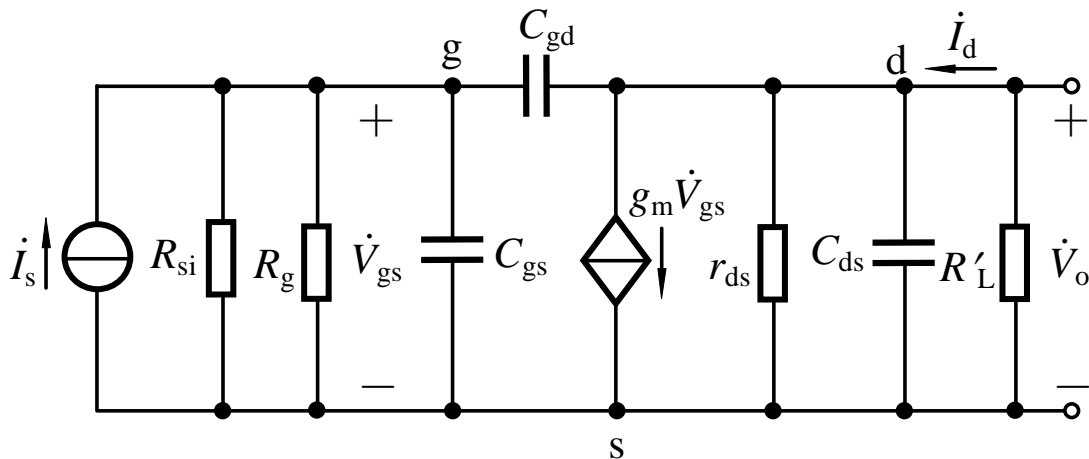
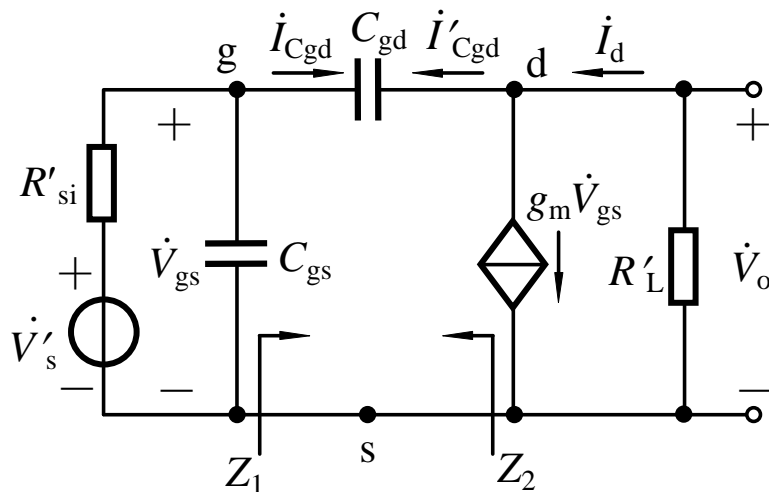
$$r_{ds} \gg R'_L, \quad \frac{1}{\omega C_{ds}} \gg R'_L$$

将 $C_{gs}$ 左侧电路进行电源等效变换

得简化后的电路

$$\text{其中 } \dot{V}'_s = \frac{R'_{si}}{R_{si}} \cdot \dot{V}_s$$

$$\begin{aligned} R'_{si} &= R_{si} // R_g \\ &= R_{si} // R_{g1} // R_{g2} \end{aligned}$$



## 6.3.3 共源极放大电路的等效RC低通电路

对节点 d 列KCL得

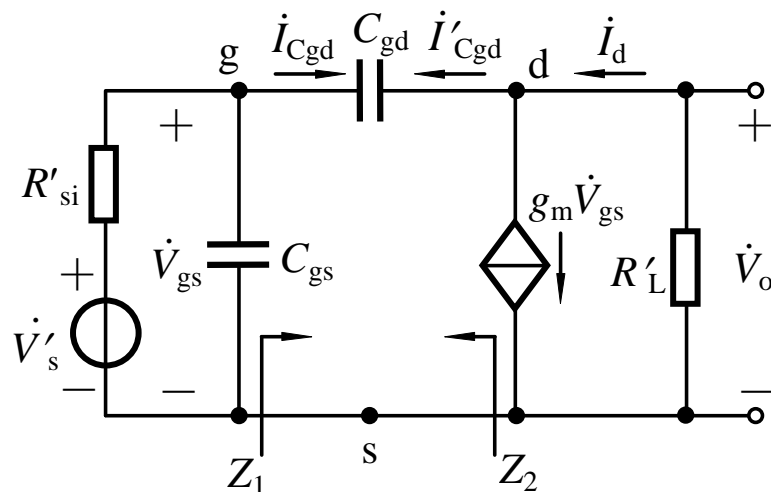
$$g_m \dot{V}_{gs} + \frac{\dot{V}_o}{R'_L} + (\dot{V}_o - \dot{V}_{gs}) j\omega C_{gd} = 0$$

由于输出回路电流比较大，所以可以忽略的  $C_{gd}$  分流，得

$$\dot{V}_o \approx -g_m R'_L \dot{V}_{gs}$$

而输入回路电流比较小，所以不能忽略的  $C_{gd}$  分流

$$\begin{aligned} \dot{I}_{C_{gd}} &= (\dot{V}_{gs} - \dot{V}_o) j\omega C_{gd} \\ &= \dot{V}_{gs} (1 + g_m R'_L) j\omega C_{gd} \end{aligned}$$



$$Z_1 = \frac{\dot{V}_{gs}}{\dot{I}_{C_{gd}}} = \frac{1}{(1 + g_m R'_L) j\omega C_{gd}}$$

相当于g和s之间存在一个电容，若用  $C_{M1}$  表示，则  $C_{M1} = (1 + g_m R'_L) C_{gd}$

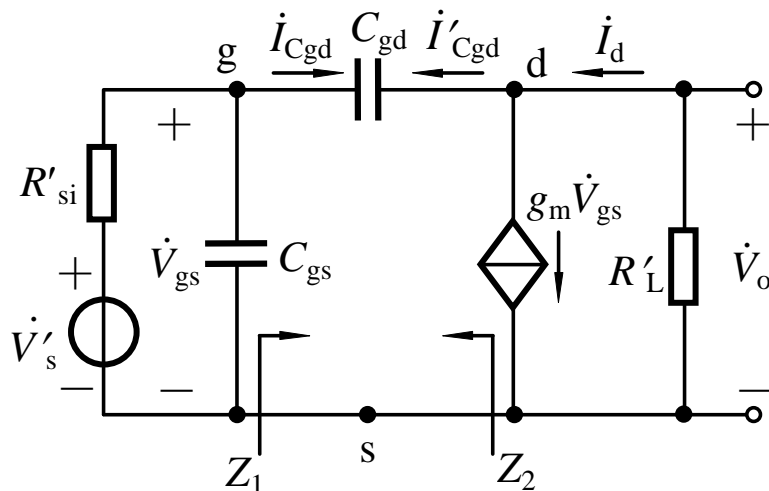
$C_{M1}$  称为密勒电容



## 6.3.3 共源极放大电路的等效RC低通电路

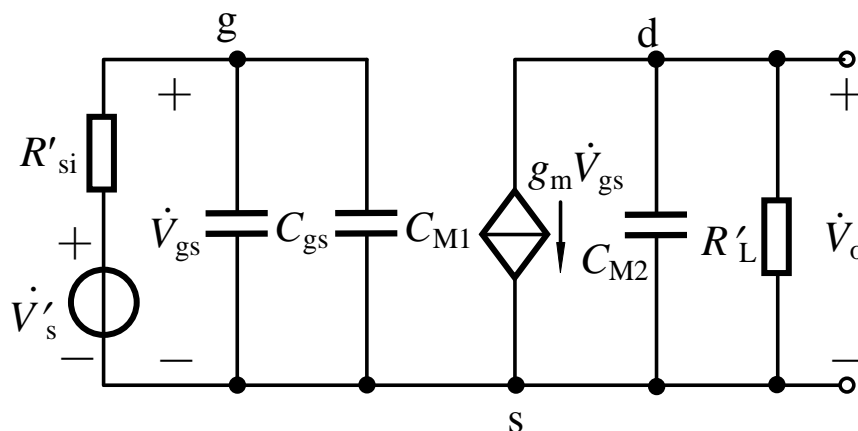
$$C_{M1} = (1 + g_m R'_L) C_{gd} \quad \text{密勒电容}$$

同理，在d、s之间也可以求得一个等效电容 $C_{M2}$ ，且  $C_{M2} \approx C_{gd}$   
得等效后的电路



当 $g_m R'_L \gg 1$ 时，有 $C_{M1} \gg C_{gd}$ ，  
 $C_{M2} \approx C_{gd}$ ，可以忽略 $C_{M2}$ 的影响。

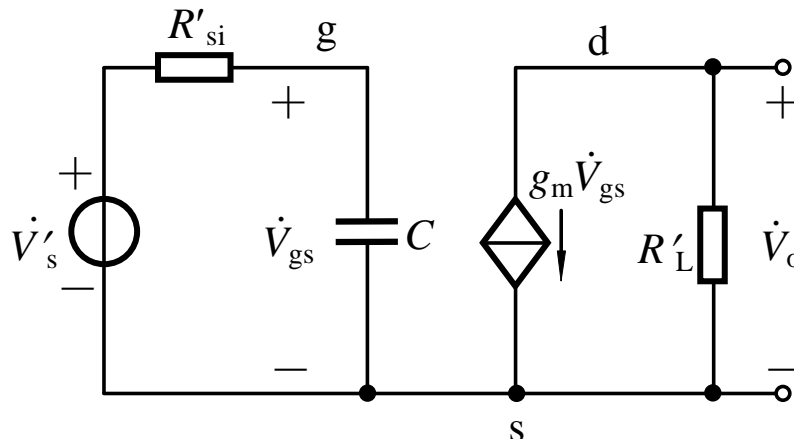
$$\text{且 } C = C_{gs} + C_{M1}$$



## 6.3.3 共源极放大电路的等效RC低通电路

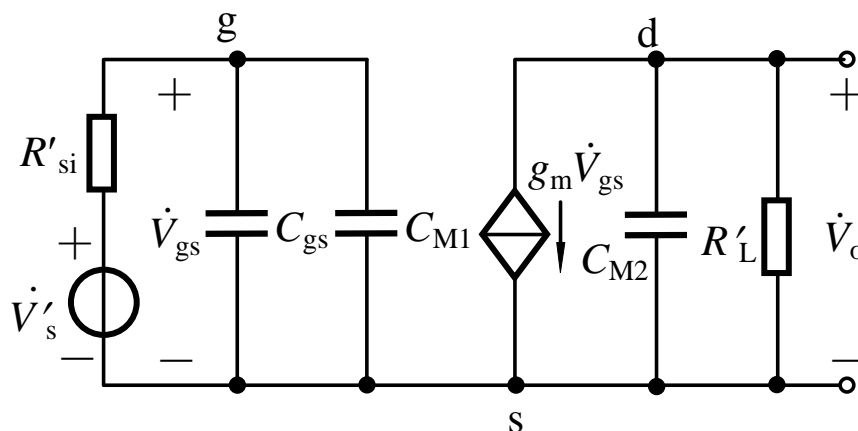
$$C_{M1} = (1 + g_m R'_L) C_{gd} \quad \text{密勒电容}$$

同理，在d、s之间也可以求得一个等效电容 $C_{M2}$ ，且  $C_{M2} \approx C_{gd}$   
得等效后的电路



当 $g_m R'_L \gg 1$ 时，有 $C_{M1} \gg C_{gd}$ ，  
 $C_{M2} \approx C_{gd}$ ，可以忽略 $C_{M2}$ 的影响。

$$\text{且 } C = C_{gs} + C_{M1}$$



## 6.3.3 共源极放大电路的等效RC低通电路

$\dot{V}'_s$  为输入、 $\dot{V}_{gs}$  为输出时，

RC电路就是一个低通电路

等效电阻

$$R_1 = R'_{si} = R_{si} // R_{g1} // R_{g2}$$

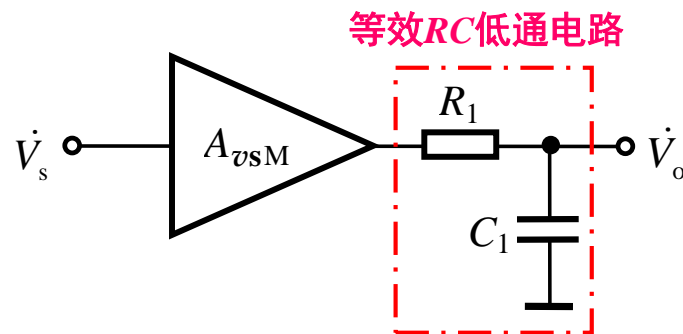
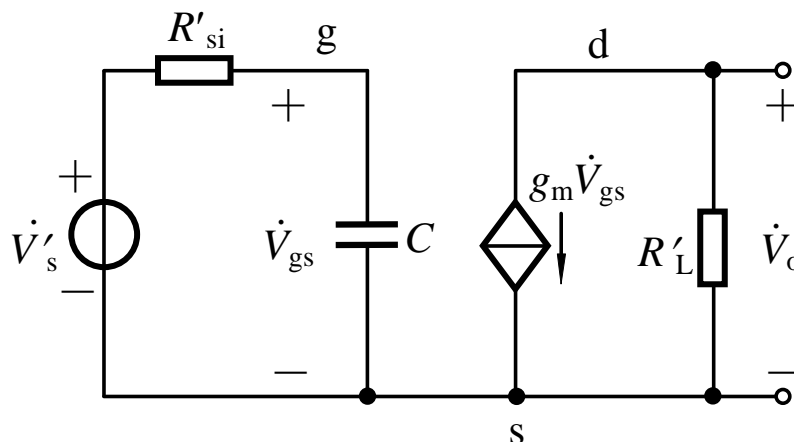
等效电容

$$\begin{aligned} C_1 &= C = C_{gs} + C_{M1} \\ &= C_{gs} + (1 + g_m R'_L) C_{gd} \end{aligned}$$

通带源电压增益

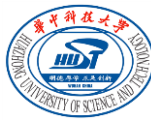
$$A_{vsM} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{gs}} \cdot \frac{\dot{V}_{gs}}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{gs}} \cdot \frac{\dot{V}'_s}{\dot{V}_s}$$

$$= -g_m R'_L \cdot \frac{R_g}{R_{si} + R_g} = -g_m R'_L \cdot \frac{R_{g1} // R_{g2}}{R_{si} + (R_{g1} // R_{g2})}$$



(也可以采用4.4节的方法求得 $A_{vsM}$ )

# 6.3 共源极放大电路的频率响应



## 6.3.1 简化模型下的频率响应

## 6.3.2 MOSFET高频小信号模型

## 6.3.3 共源极放大电路的等效RC低通电路

## 6.3.4 增益-带宽积

## 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效RC高通电路

## 6.3.4 增益-带宽积

一般放大电路有  $f_H \gg f_L$ ，则带宽  $BW = f_H - f_L \approx f_H$

$$\begin{aligned}
 |A_{vsM} \cdot f_H| &= g_m R'_L \cdot \frac{R_g}{R_{si} + R_g} \cdot \frac{1}{2\pi R'_{si} C} \\
 &= g_m R'_L \cdot \frac{R_g}{R_{si} + R_g} \cdot \frac{R_{si} + R_g}{2\pi R_{si} R_g [C_{gs} + (1 + g_m R'_L) C_{gd}]} \\
 &= \frac{g_m R'_L}{2\pi R_{si} [C_{gs} + (1 + g_m R'_L) C_{gd}]}
 \end{aligned}$$

$$C = C_{gs} + (1 + g_m R'_L) C_{gd}$$

$$R'_{si} = R_{si} // R_g$$

$$R'_L = R_d // R_L$$

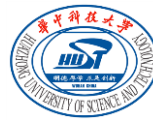
若有  $(1 + g_m R'_L) C_{gd} \gg C_{gs}$ ， $g_m R'_L \gg 1$

则  $|A_{vsM} \cdot f_H| \approx \frac{1}{2\pi R_{si} C_{gd}}$

减低增益可以增加带宽，提高增益将使带宽变窄。选择电路参数时，必须兼顾  $A_{vsM}$  和  $f_H$  的要求。

MOS管一旦确定，对相同的信号源 增益-带宽积基本为常数

## 6.3 共源极放大电路的频率响应



### 6.3.1 简化模型下的频率响应

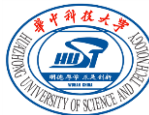
### 6.3.2 MOSFET高频小信号模型

### 6.3.3 共源极放大电路的等效RC低通电路

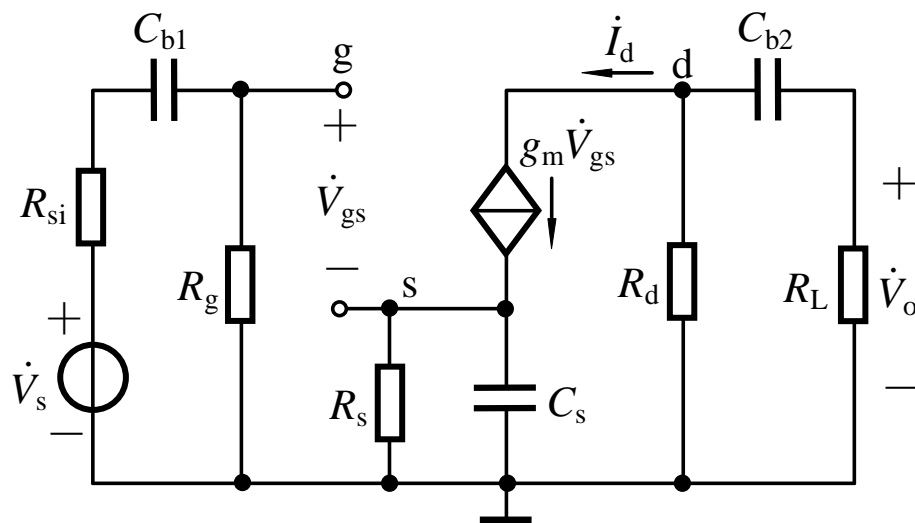
### 6.3.4 增益-带宽积

### 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效RC高通电路

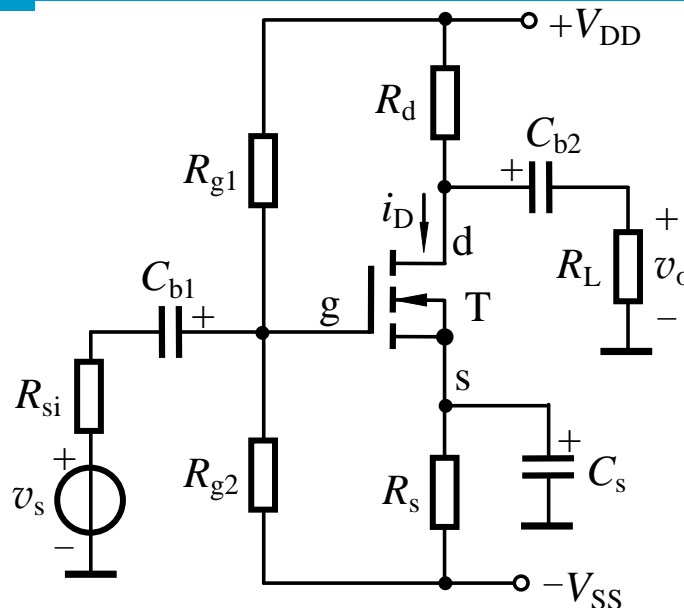
## 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效RC高通电路



低频区内，电路中的耦合电容、旁路电容的阻抗增大，不能再视为短路。而FET极间电容的阻抗比中频区还要大，仍可看作开路。



低频小信号等效电路



$$R_g = R_{g1} // R_{g2}$$

忽略了 $r_{ds}$ 的影响

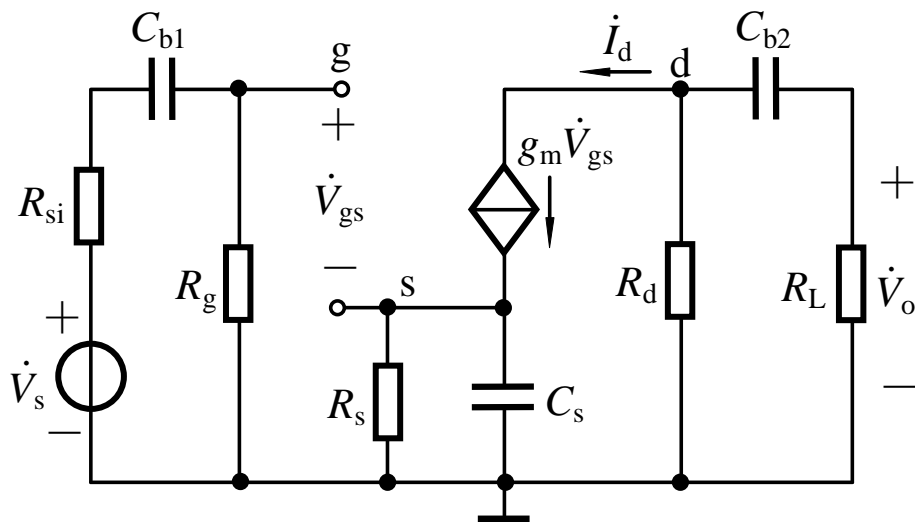
## 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效RC高通电路



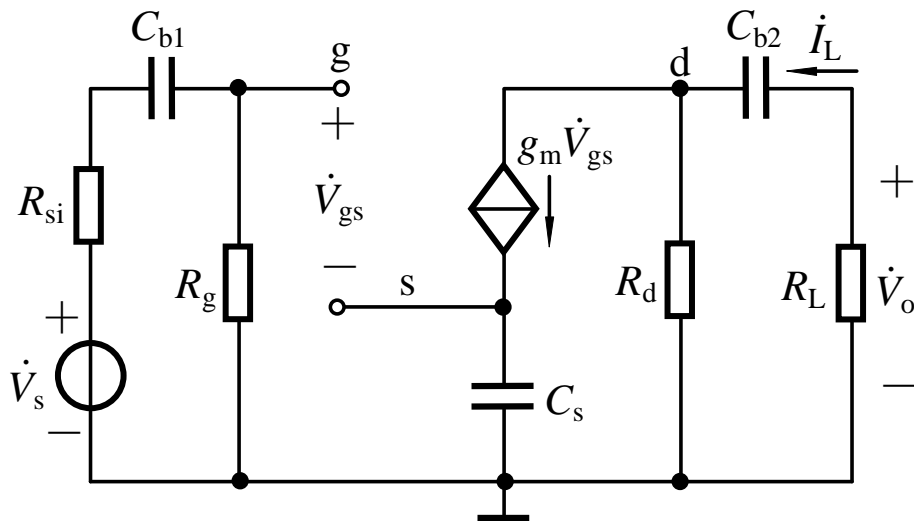
为简化分析，设低频区内，有

$$\frac{1}{\omega C_s} \ll R_s$$

则 $R_s$ 可作开路处理



低频小信号等效电路





## 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效RC高通电路



源电压增益

$$\dot{A}_{vsL} = A_{vsM} \cdot \frac{1}{1 - j(f_{L1} / f)} \cdot \frac{1}{1 - j(f_{L2} / f)} \cdot \frac{1}{1 - j(f_{L3} / f)}$$

通带源电压增益

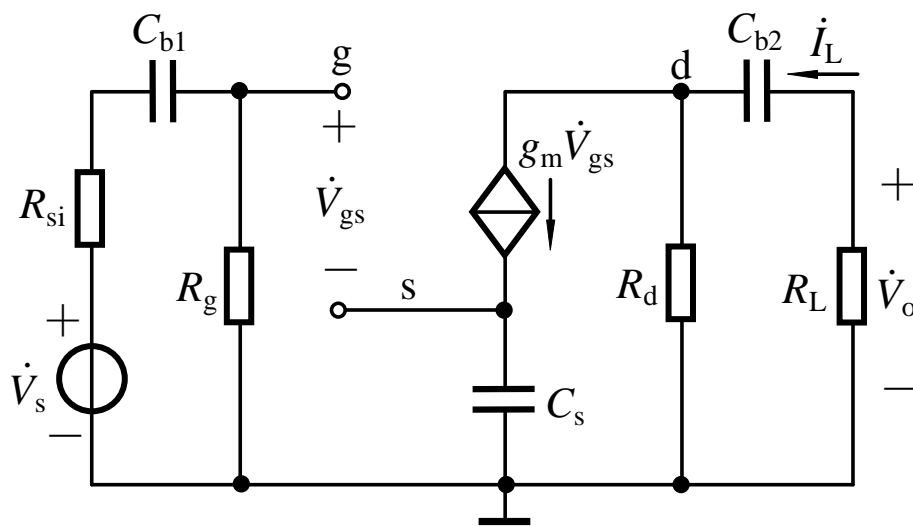
$$A_{vsM} = -g_m (R_d // R_L) \cdot \frac{R_g}{R_{si} + R_g}$$

3个下限频率（转折频率）

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi(R_{si} + R_g)C_{b1}}$$

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi(1/g_m)C_s}$$

$$f_{L3} = \frac{1}{2\pi(R_d + R_L)C_{b2}}$$



## 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效RC高通电路



通带源电压增益

$$A_{vsM} = -g_m (R_d // R_L) \cdot \frac{R_g}{R_{si} + R_g}$$

3个下限频率（转折频率）

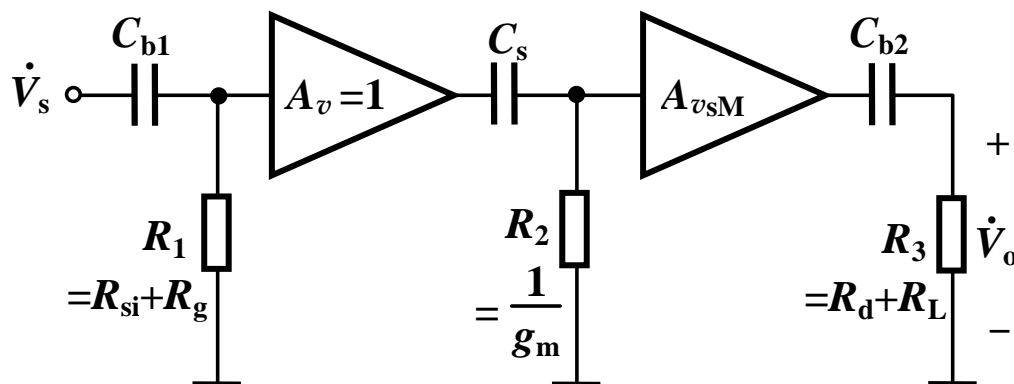
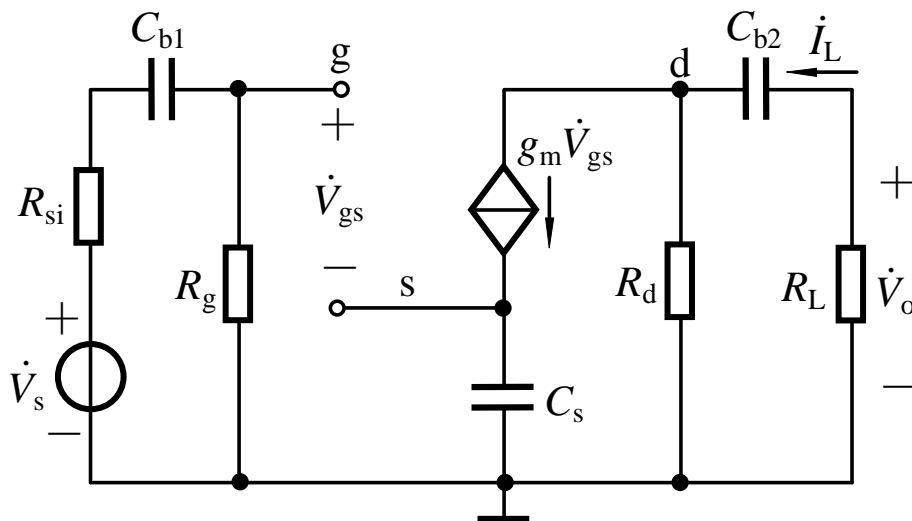
$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi(R_{si} + R_g)C_{b1}}$$

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi(1/g_m)C_s}$$

$$f_{L3} = \frac{1}{2\pi(R_d + R_L)C_{b2}}$$

最终的等效电路包

含3个RC高通电路



## 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效RC高通电路



$$A_{vsM} = -g_m (R_d // R_L) \cdot \frac{R_g}{R_{si} + R_g}$$

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi(R_{si} + R_g)C_{b1}}$$

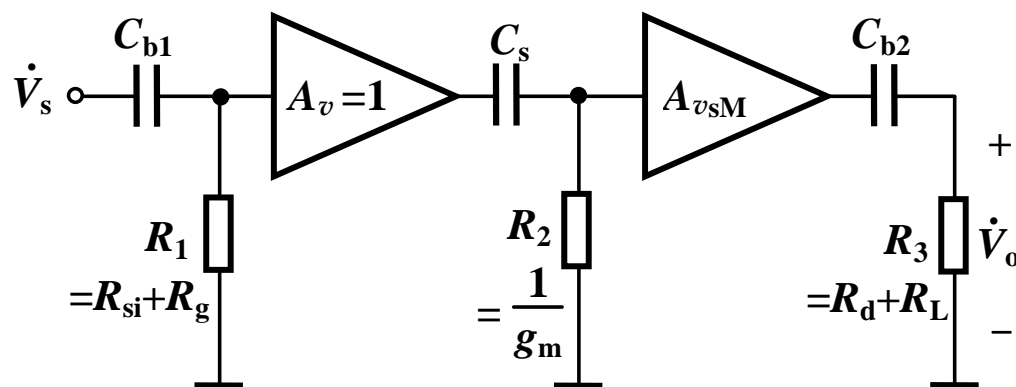
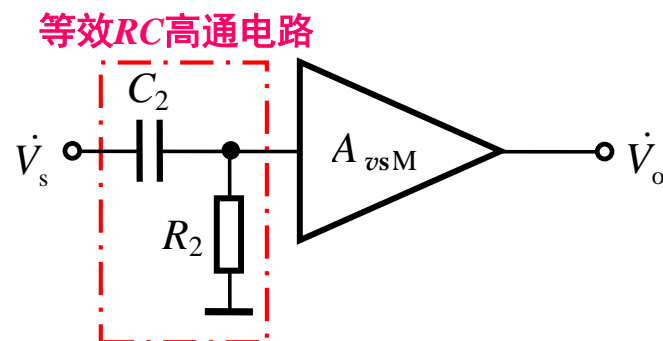
$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi(1/g_m)C_s}$$

$$f_{L3} = \frac{1}{2\pi(R_d + R_L)C_{b2}}$$

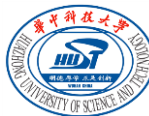
通常  $(1/g_m)$  的阻值小于  $(R_{si} + R_g)$  和  $(R_d + R_L)$ 。如果  $f_{L2}$  大于  $f_{L1}$ 、 $f_{L3}$  4倍以上, 则  $f_{L2}$  是起决定作用的转折频率, 即  $f_L$  取决于  $f_{L2}$ 。

简化模型中的等效RC电路

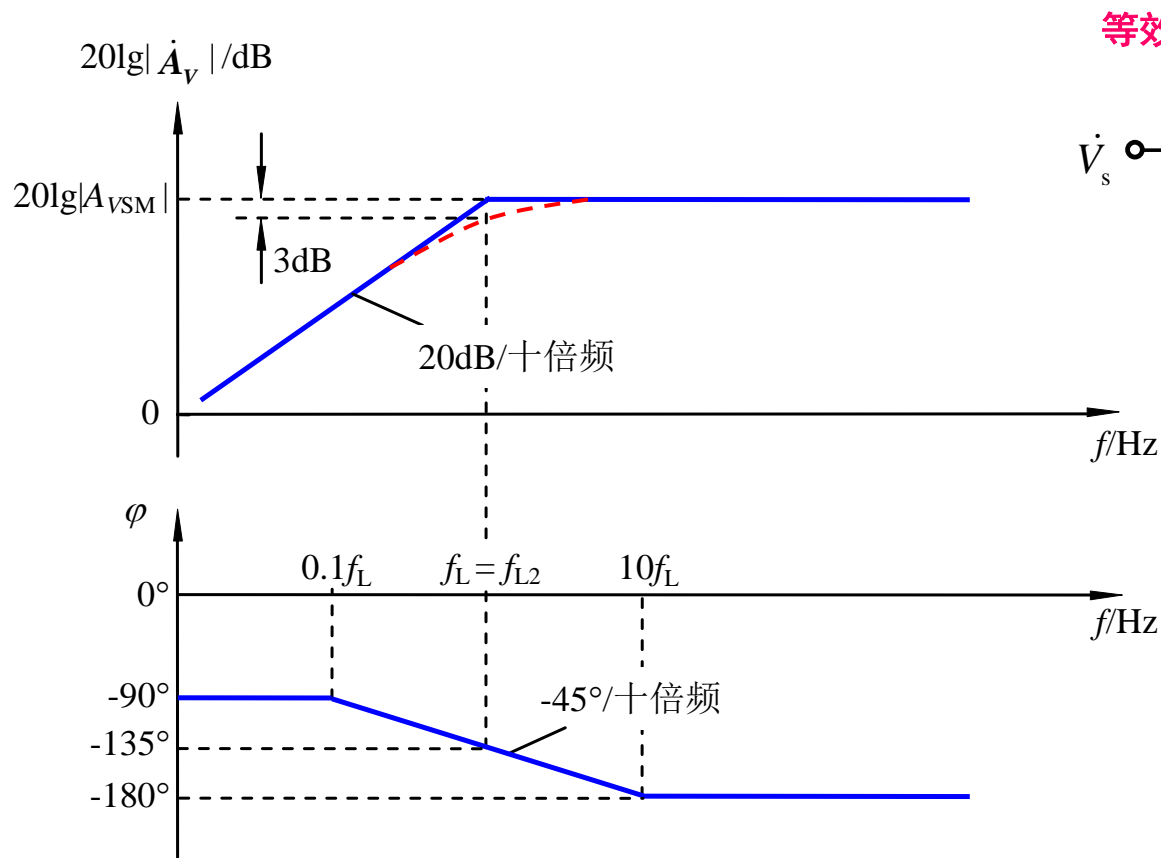
$$R_2 = 1/g_m \quad C_2 = C_s$$



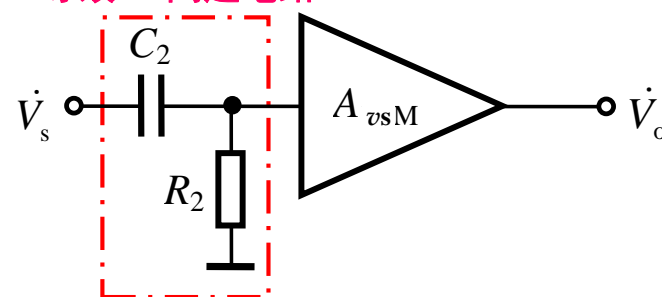
## 6.3.5 阻容耦合共源极放大电路的等效RC高通电路



$$A_{vsM} = -g_m (R_d // R_L) \cdot \frac{R_g}{R_{si} + R_g} \quad R_2 = 1/g_m \quad C_2 = C_s$$

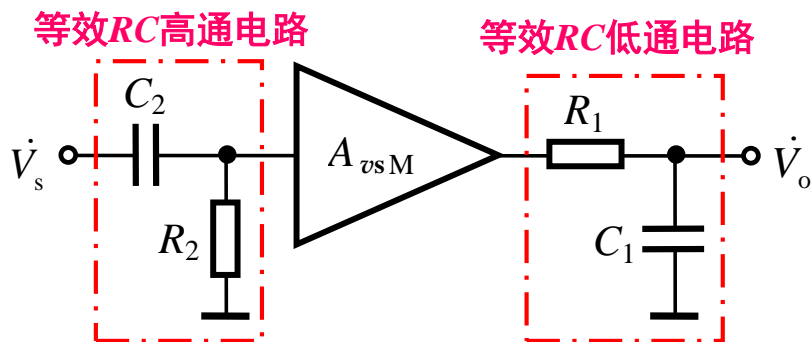


等效RC高通电路



共源极放大电路的低频响应波特图（忽略了  $f_{L1}$  和  $f_{L3}$  的影响）

# 6.3 共源极放大电路的频率响应



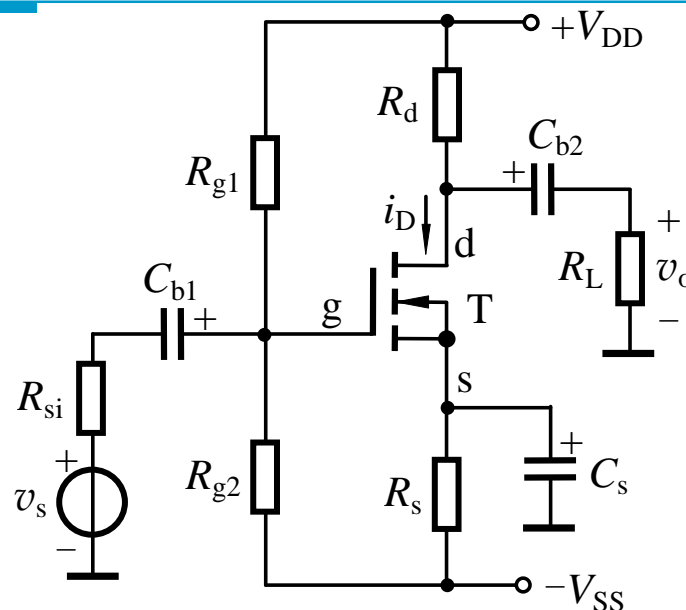
$$A_{vSM} = -g_m (R_d // R_L) \cdot \frac{R_g}{R_{si} + R_g}$$

$$R_1 = R_{si} // R_{g1} // R_{g2}$$

$$C_1 = C_{gs} + (1 + g_m R'_L) C_{gd}$$

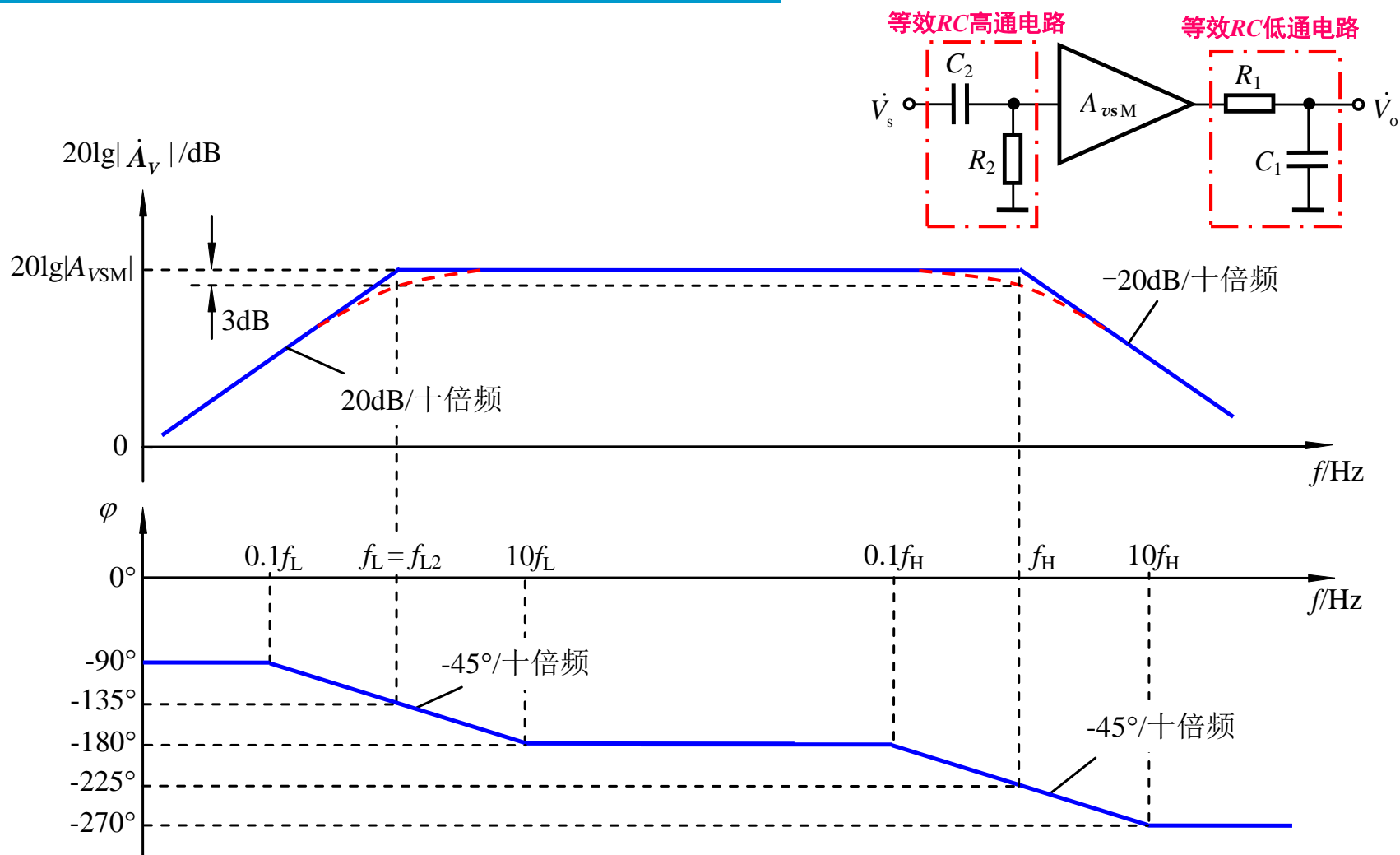
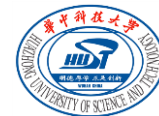
$$R_2 = 1/g_m$$

$$C_2 = C_s$$



为简化分析，上述过程做了很多近似处理，因此与实际情况误差较大。目前工程上更多地是采用计算机仿真软件（如SPICE）进行放大电路的频率响应分析，其结果包含几乎所有影响因素。

## 6.3 共源极放大电路的频率响应



共源极放大电路的低频响应波特图（忽略了  $f_{L1}$  和  $f_{L3}$  的影响）

# 6 放大电路频率响应

6.1  $RC$ 电路的频率响应（教材6.2）

6.2 放大电路频率响应及简化等效模型

6.3 共源极放大电路的频率响应  
（教材6.4.1， 6.4.2， 6.3.1）

6.4 共射极放大电路的频率响应  
（教材6.4.3， 6.4.4， 6.3.2）

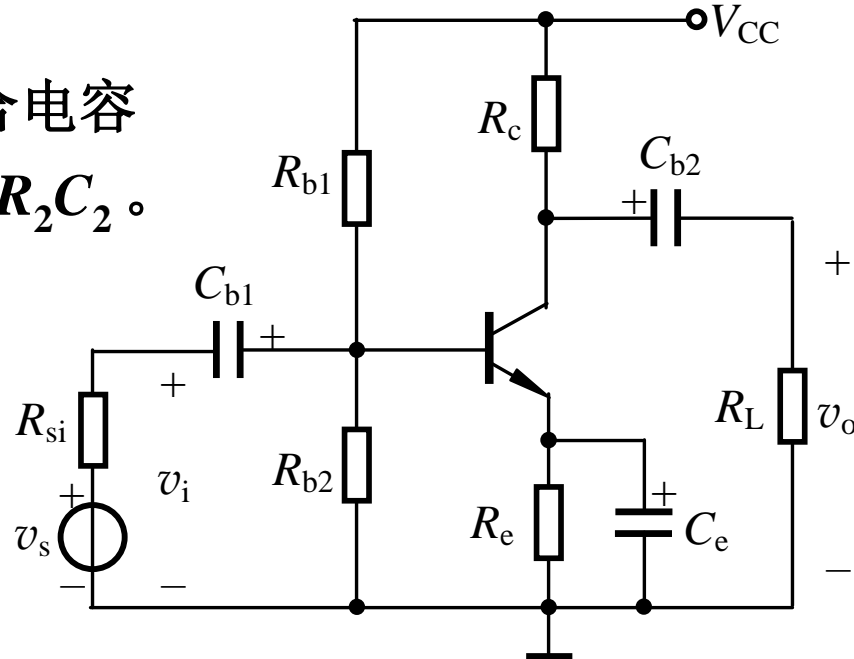
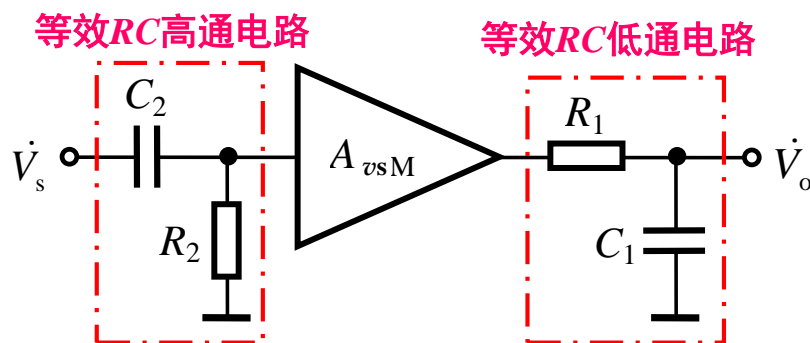
6.5 三极管基本放大电路频率响应比较

6.6 多级放大电路的频率响应（教材6.7）

# 6.4 共射极放大电路的频率响应

可以将电路中BJT极间电容在高频区产生的影响等效为 $R_1C_1$ 低通电路；而将耦合电容和旁路电容在低频区产生的影响等效为 $R_2C_2$ 高通电路。

一般BJT极间电容远小于耦合电容和旁路电容，所以通常有 $R_1C_1 \ll R_2C_2$ 。



分析方法与FET放大电路类似



# 6 放大电路频率响应

6.1  $RC$ 电路的频率响应（教材6.2）

6.2 放大电路频率响应及简化等效模型

6.3 共源极放大电路的频率响应  
（教材6.4.1， 6.4.2， 6.3.1）

6.4 共射极放大电路的频率响应  
（教材6.4.3， 6.4.4， 6.3.2）

6.5 三极管基本放大电路频率响应比较

6.6 多级放大电路的频率响应（教材6.7）

# 6.5 三极管基本放大电路频率响应比较

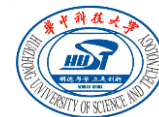


表 7.6.1 FET 和 BJT 基本放大电路的频率响应特点

	反相电压放大电路	电流跟随器	电压跟随器
通用 组态 电路 示意 图			
电路 名称	共源极电路 共射极电路	共栅极电路 共基极电路	共漏极电路 共集电极电路
特点	密勒等效电容较大，上限频率较低，通带源电压增益最高。	基本上不存在密勒电容，上限频率较高，有较高的通带源电压增益。	虽然有密勒效应，但等效的密勒电容小于原电容，所以上限频率最高，但通带源电压增益最低，约为 1。

# 6 放大电路频率响应

6.1  $RC$ 电路的频率响应（教材6.2）

6.2 放大电路频率响应及简化等效模型

6.3 共源极放大电路的频率响应  
（教材6.4.1， 6.4.2， 6.3.1）

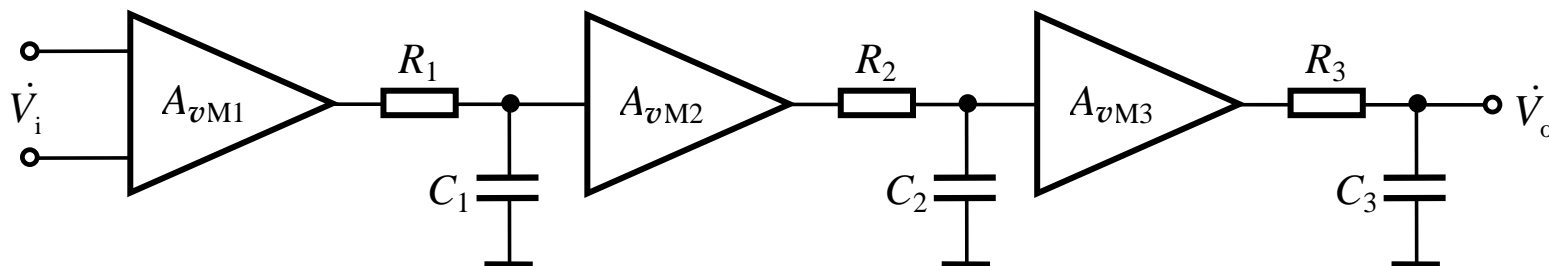
6.4 共射极放大电路的频率响应  
（教材6.4.3， 6.4.4， 6.3.2）

6.5 三极管基本放大电路频率响应比较

6.6 多级放大电路的频率响应（教材6.7）

# 6.6 多级放大电路的频率响应

若多级放大器中的每一级都有一个起主要作用的 $RC$ 电路，则由多个 $RC$ 时间常数构成运放的频率响应（以3级为例）。



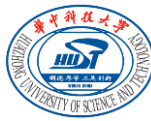
电压增益的频率响应为

$$\dot{A}_{vH} = \frac{A_{vM1}}{1 + j(f / f_{H1})} \cdot \frac{A_{vM2}}{1 + j(f / f_{H2})} \cdot \frac{A_{vM3}}{1 + j(f / f_{H3})}$$

3个转折频率

$$f_{H1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad f_{H2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad f_{H3} = \frac{1}{2\pi R_3 C_3}$$

## 6.6 多级放大电路的频率响应



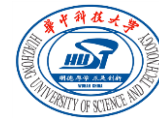
幅频响应

$$|\dot{A}_{vH}| = \frac{|A_{vM1}|}{\sqrt{1 + (f / f_{H1})^2}} \cdot \frac{|A_{vM2}|}{\sqrt{1 + (f / f_{H2})^2}} \cdot \frac{|A_{vM3}|}{\sqrt{1 + (f / f_{H3})^2}}$$

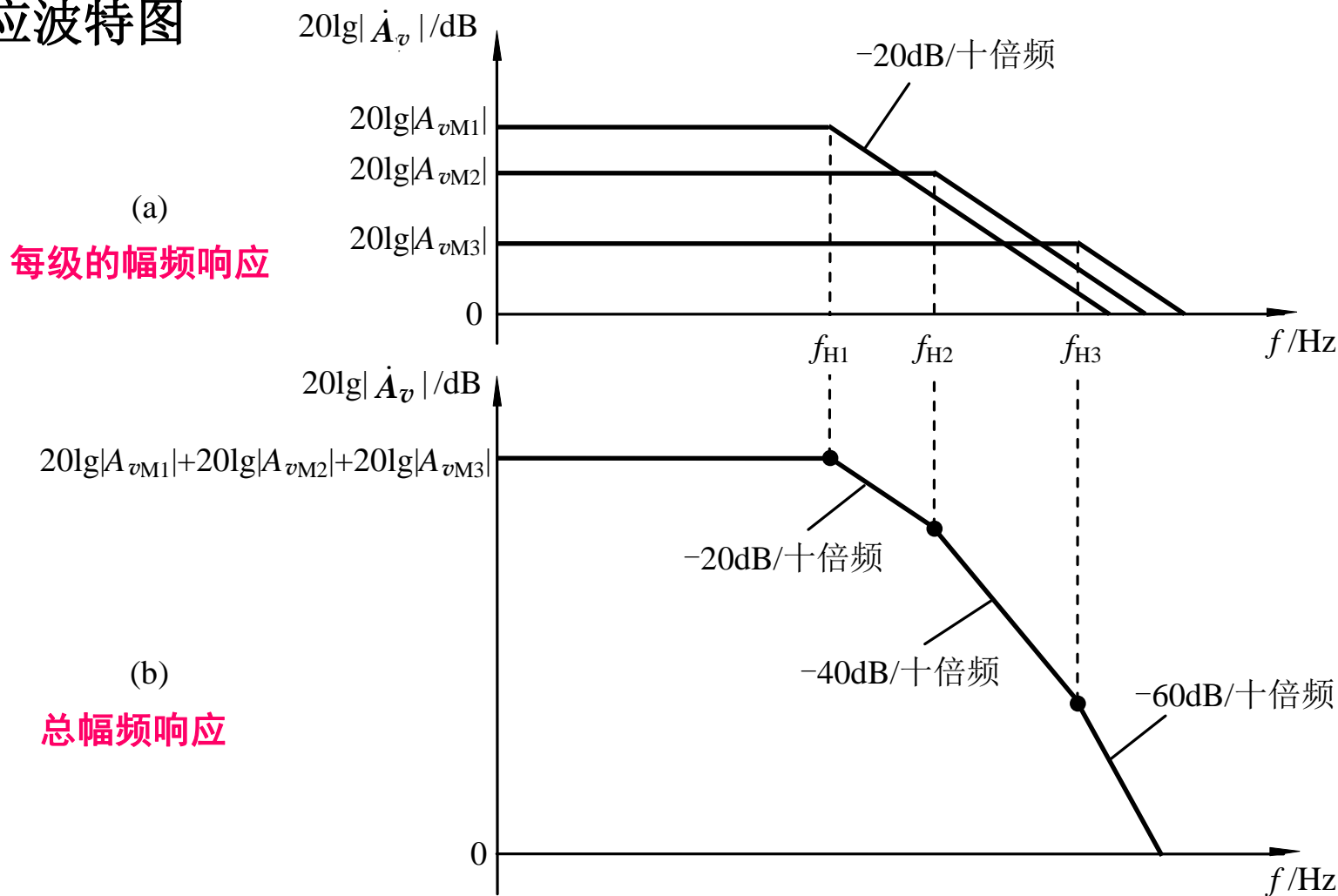
相频响应（假设通带内无反相）

$$\varphi_H = -\arctan(f / f_{H1}) - \arctan(f / f_{H2}) - \arctan(f / f_{H3})$$

# 6.6 多级放大电路的频率响应

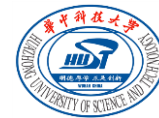


## 幅频响应波特图



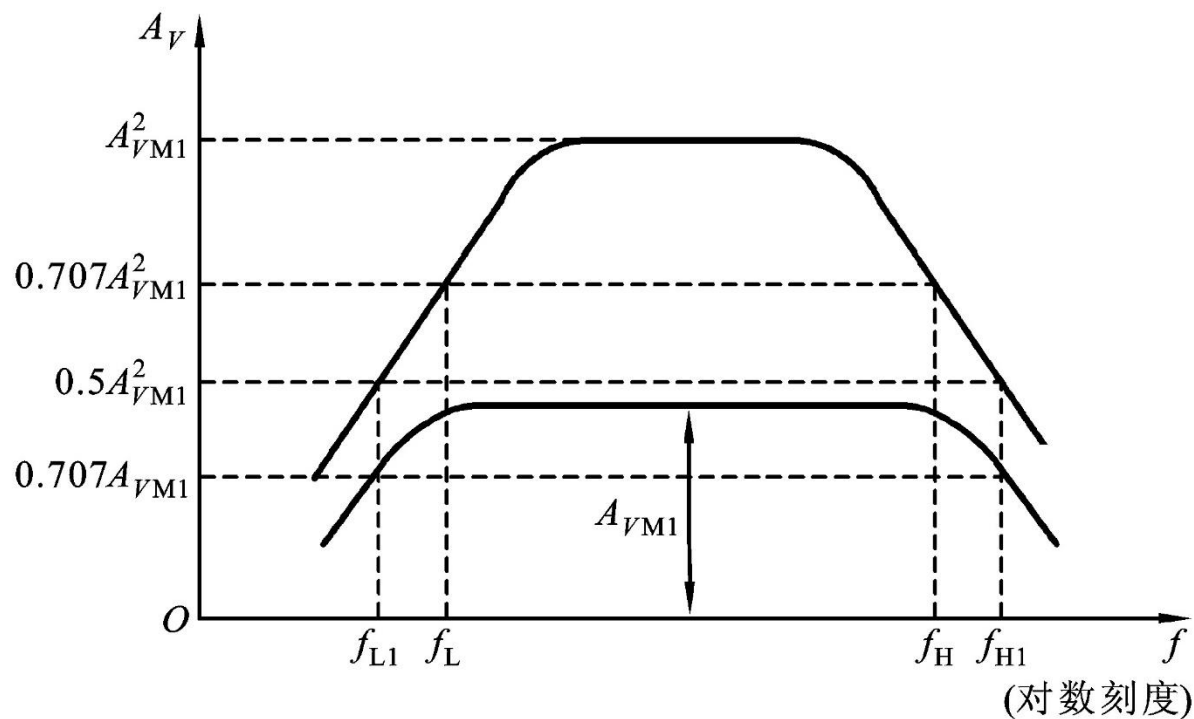
相频响应会怎样?

## 6.6 多级放大电路的频率响应



当两级增益和频带均相同时，则单级的上下限频率处的增益为  $0.707 \dot{A}_{VM1}$ 。  
两级的增益为  $(0.707 \dot{A}_{VM1})^2 \approx 0.5 \dot{A}_{VM1}^2$ 。即两级的带宽小于单级带宽。

- 多级放大电路的通频带比构成它的任何一级都窄。



## 本章讨论的主要内容

研究放大电路的动态指标（主要是增益）随信号频率变化时的响应。具体包括：

- 1、频率响应的分析方法
- 2、影响放大电路频率响应的主要因素
- 3、如何设计出满足信号频带要求的放大电路
- 4、各种组态放大电路频率响应特点



## 思考：

1. 放大电路频率响应的物理含义是什么？为什么要分析放大电路的频率响应？
2. 影响放大电路频率响应的主要因素是什么？
3. 在分析放大电路频率响应时，三极管的小信号模型需要补充哪些影响因素？
4. 等效的密勒电容在哪种组态（共源、共栅、共漏、共射、共基、共集）中对频率响应影响最大？
5. 三极管的极间电容对其构成的放大电路的哪个区域（低频、通带、高频）的频率响应产生明显影响？电容的大小会产生怎样的影响？
6. 影响放大电路低频响应的主要因素是什么？怎样才能实现直流信号放大？
7. “增益-带宽积基本为常数”对放大电路设计有什么指导意义？
8. 若想放大电路不出现频率失真或尽量减少频率失真（线性失真），电路的幅频响应和相频响应应该满足怎样的条件？