

四、集成运放性能指标

1. 开环差模增益 A_{od} : $20\lg|A_{od}|$, 分贝(dB)

2. 共模抑制比 $K_{CMR}=|A_{od}/A_{oc}|$

3. 开环差模输入电阻 r_{id}

4. 输入失调电压 U_{IO} 、输入失调电流 I_{IO}

$$U_{IO} = -\frac{U_O|_{u_1=0}}{A_{od}}$$

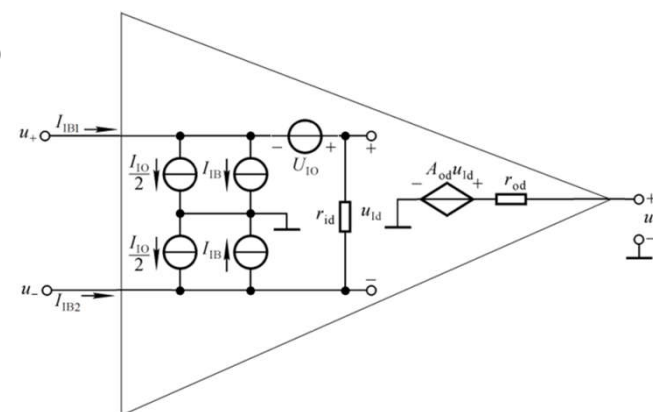
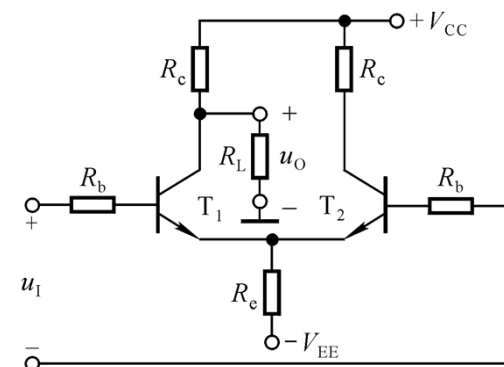
$$I_{IO} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

5. 输入偏置电流 I_{IB}

$$I_{IB} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

6. 最大差模输入电压 U_{Idmax} 、最大共模输入电压 U_{Icmax}

7. -3dB带宽 f_H (A_{od} 下降3dB), 单位增益带宽 f_c (A_{od} 下降到=1)



四、集成运放性能指标

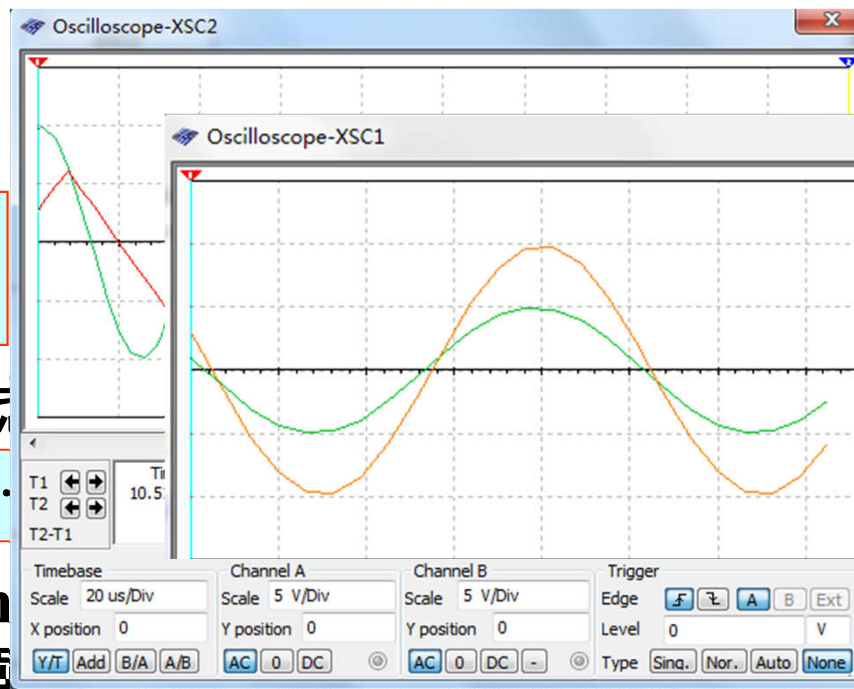
8. 转换速率 SR

(对大幅值输入
信号变化速度的
适应能力)

$$SR = \left| \frac{\Delta u_O}{\Delta t} \right|_{\max}$$

实际选用考虑

$$SR = 2\pi \cdot f_{\max} \cdot$$



9. 噪声 常见噪声：热噪声（thermal noise）、散粒噪声（shot noise）、闪烁噪声（flicker noise）、白噪声（white noise）、粉红噪声（pink noise）、黑噪声（black noise）



10. 总谐波失真THD（Total Harmonic Distortion）

$$THD = \sqrt{\sum_2^n \left(\frac{A_i}{A_1} \right)^2}$$



4.7 集成运放的发展概况及分类

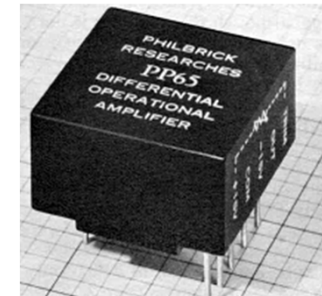
Operational Amplifier, Opamp: Direct-coupled multistage, high gain, high input resistor, low output resistor amplifier

1941: First (vacuum tube) op-amp "Summing Amplifier" by Karl D. Swartzel Jr. in Bell labs



1962: First solid-state (BJT) op-amps in potted modules

1963: First monolithic IC op-amp



1970: First high-speed, low-input current FET design



4.7 集成运放的发展概况及分类

集成运放发展概况

- 1964年第一代产品：按分立元件思路的设计思想制造；
- 1966年第二代产品：采用了有源负载，比第一代产品的 A_{od} 和等指标有明显提高，如F007；
- 1972年第三代产品：其主要特点是采用超 β 管作为输入级，并在版图设计中考虑热效应的影响，使得输入失调电压，输入失调电流，开环差模增益，共模抑制比等指标又有改善；
- 1973年第四代产品：以HA2900为代表，以斩波器稳零原理来抑制温漂，从根本上解决了运放的温漂和调零问题。

第一代 电子管 模拟计算机 数学计算
长途电话 中继器 信号放大

第二代 晶体管 集成运放 用于各种需要放大信号的应用

- 广播、通信：电话、手机
- 工业控制：信号运算，PID调节
- 工业检测：信号放大
- 航空航天测量及通信
- 计算机网络：网卡，调制解调器，
路由器，交换机
- 各类图像采集：照相机、摄像机
- 汽车电子，生医电子
- 等等

发展方向：高精度、高速、宽带、低功耗

分类：

按工作原理分为 电压放大型、电流放大型、跨导型、互阻型

按可控性分为 可变增益型、选通控制型

按性能指标分为 通用型、高精度型、高速型、高阻型、高压型、低功耗型、宽带型

按工艺技术分类： BJT, JFET, MOS, BiMOS, BiFET

按用途分类： 前置放大器，音频放大器，仪用放大器，功率放大器， 轨-轨输入或输出型(Rail-to-Rail，输入或输出幅值接近电源幅度)

按电源范围分类： 宽电源范围型和窄电源范围型

第四章要求

- 1、熟悉集成运放的组成及各部分的作用，正确理解主要性能指标的物理意义，了解集成运放的分类；
- 2、掌握以下概念及定义：零点漂移，差模信号与差模放大倍数，共模信号与共模放大倍数，共模抑制比，互补，交越失真。
- 3、掌握双端输入差分放大电路静态工作点和放大倍数的计算方法，理解单端输入差分放大电路静态工作点和放大倍数的计算方法，理解差分放大电路采用参数相同的对管和 R_e （或者恒流源）的共模负反馈作用来抑制温漂的原理。
- 4、掌握互补输出级电路（OCL电路）的组成和工作原理。

第四章要求

- 5、掌握镜像电流源、微电流源、多路电流源电路的工作原理，掌握电流源作为有源负载的共射放大电路和差分放大电路的分析方法；
- 6、了解F007、C14573的工作原理。

第四章基本电路、基本分析方法总结

电路总结（请自己将电路特点列表对比细化）：

差分放大电路的四种基本接法；恒流源式差分放大电路；互补电路、消除交越失真的互补电路（二极管、 U_{BE} 倍增电路）、准互补电路、镜像电流源、微电流源、比例电流源、晶体管多路电流源、JFET恒流源、MOS管多路电流源、加射极输出器的电流源、有源负载共射放大电路、有源负载差分放大电路。

第四章基本电路、基本分析方法总结

方法总结:

- 差分放大电路输入信号的分解方法;
- 差分放大电路的四种基本接法 A_d 、 A_c 、 u_O 、 R_i 、 R_o 的分析方法;
- 互补电路消除交越失真的方法。
- 镜像电流源、微电流源、比例电流源、晶体管多路电流源的分析方法;
- 有源负载共射放大电路和差分放大电路的分析方法;
- 集成电路读图方法;
- 集成电路电流源参考电流的分析方法。

第四章常见题型

- (1) 差分放大电路的分析计算;
- (2) 互补输出级电路的分析计算;
- (3) 分析电流源电路及其应用电路;
- (4) 分析集成运放的结构特点、组成及各部分的作用;
- (5) 正确理解集成运放的主要参数及其物理意义;
- (6) 根据需求选择不同类型的集成运放;
- (7) 分析集成运放内部电路的主要部分。



第五章 放大电路的频率响应

(Frequency Response of Amplifier)

5.1 频率响应概述

5.2 晶体管的高频等效模型

5.3 场效应管的高频等效模型

5.4 单管放大电路的频率响应

5.5 多级放大电路的频率响应

研究的问题：放大电路对信号频率的适应程度，
即信号频率对放大倍数的影响。



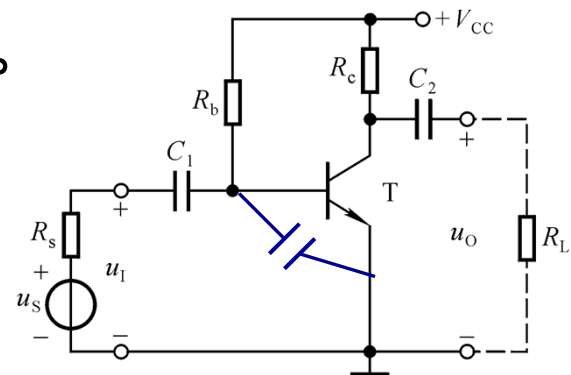
5.1 频率响应概述

一、频率响应 (Frequency Response) 的基本概念

1、定义

放大电路的放大倍数是信号频率的函数，这种函数关系称为频率响应或者频率特性。

当信号频率发生改变时，放大倍数会发生相应的幅值和相位变化。



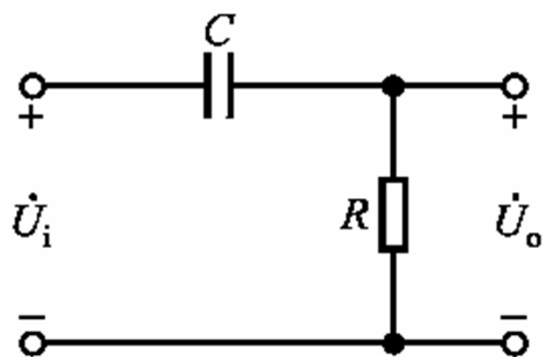
2、频率响应的本质

耦合、旁路电容：低频导致放大倍数下降并且产生相移；

半导体极间电容：高频导致放大倍数下降并且产生相移。

二、一阶RC电路的频率响应

1. 高通电路



$$Z_c = \frac{1}{j\omega C}$$

下限截止频率

➤ 传递函数 (Transfer Function)

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega RC}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j2\pi f RC}}$$

$$\text{令 } f_L = \frac{1}{2\pi RC} \quad \dot{A}_u = \frac{1}{1 + \frac{f_L}{jf}} = \frac{j \frac{f}{f_L}}{1 + j \frac{f}{f_L}}$$

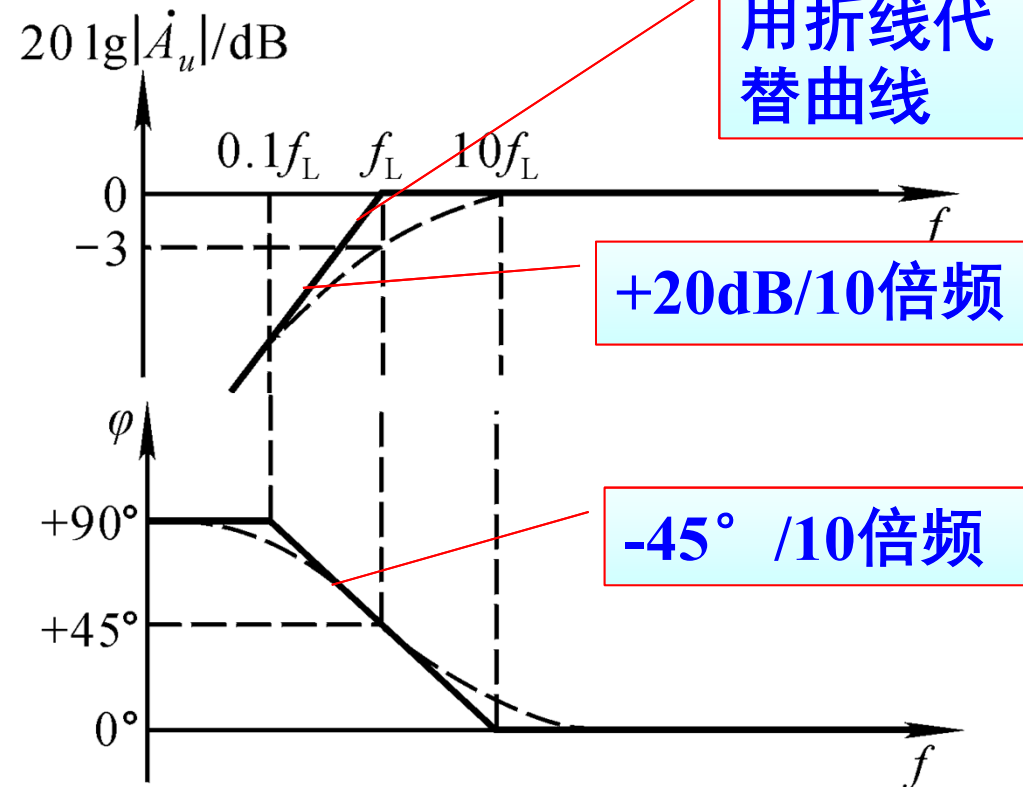
➤ 幅频特性和相频特性

$$\left\{ \begin{array}{l} |\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_L}{f}\right)^2}} \quad \text{幅频特性} \\ \varphi = 90^\circ - \arctan \frac{f}{f_L} \quad \text{相频特性} \end{array} \right.$$

➤ 波特图 (Bode Plots)

- 横轴用 $\lg f$ 表示
- 幅频特性纵轴用 $20\lg|A_u|$ 表示, 单位为分贝 (dB)

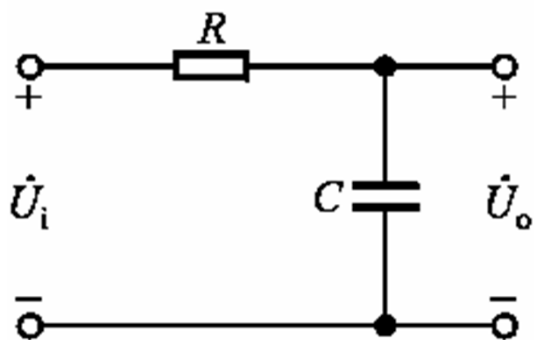
$$\begin{cases} 20\lg|\dot{A}_u| = -10\lg\left(1 + \left(\frac{f_L}{f}\right)^2\right) \\ \varphi = 90^\circ - \arctan\frac{f}{f_L} \end{cases}$$



要点:

- 幅频: f_L , -3dB, +20dB/10倍频
- 相频: f_L , +45°, -45°/10倍频, 超前0~+90°

2. 低通电路



➤ 传递函数

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j2\pi f RC}$$

上限截止频率

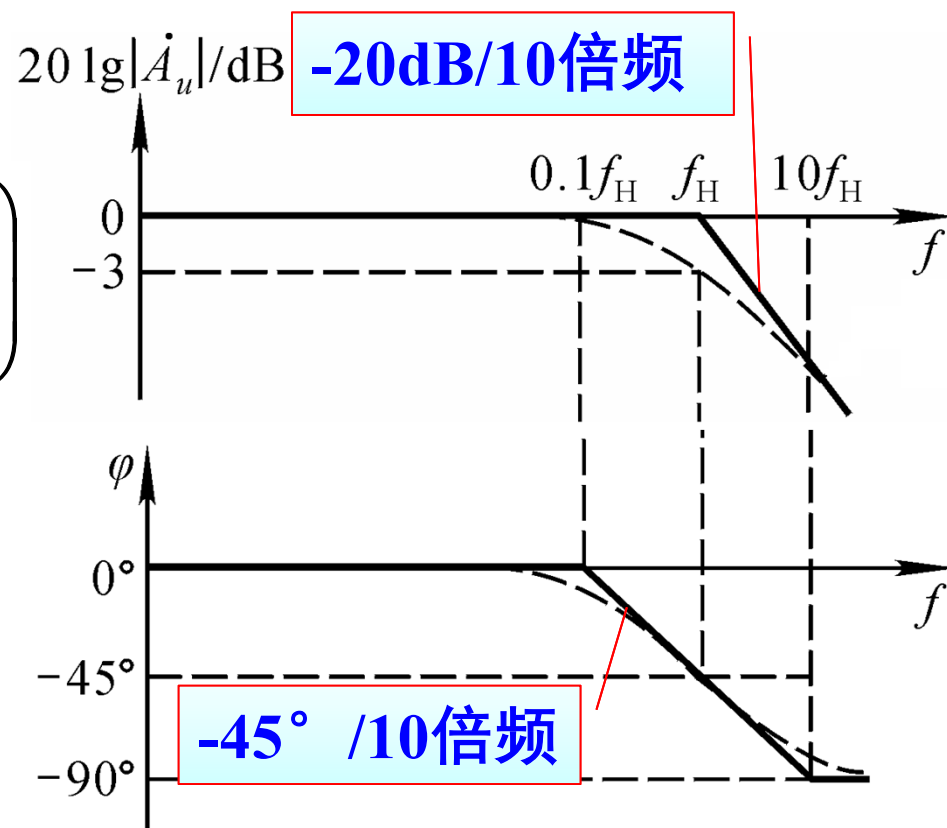
令 $f_H = \frac{1}{2\pi RC}$ $\dot{A}_u = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_H}}$

➤ 幅频特性和相频特性

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \dot{A}_u \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H} \right)^2}} \quad \text{幅频特性} \\ \varphi = -\arctan \frac{f}{f_H} \quad \text{相频特性} \end{array} \right.$$

➤ 波特图

$$\begin{cases} 20\lg|\dot{A}_u| = -10\lg\left(1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2\right) \\ \varphi = -\arctan\frac{f}{f_H} \end{cases}$$



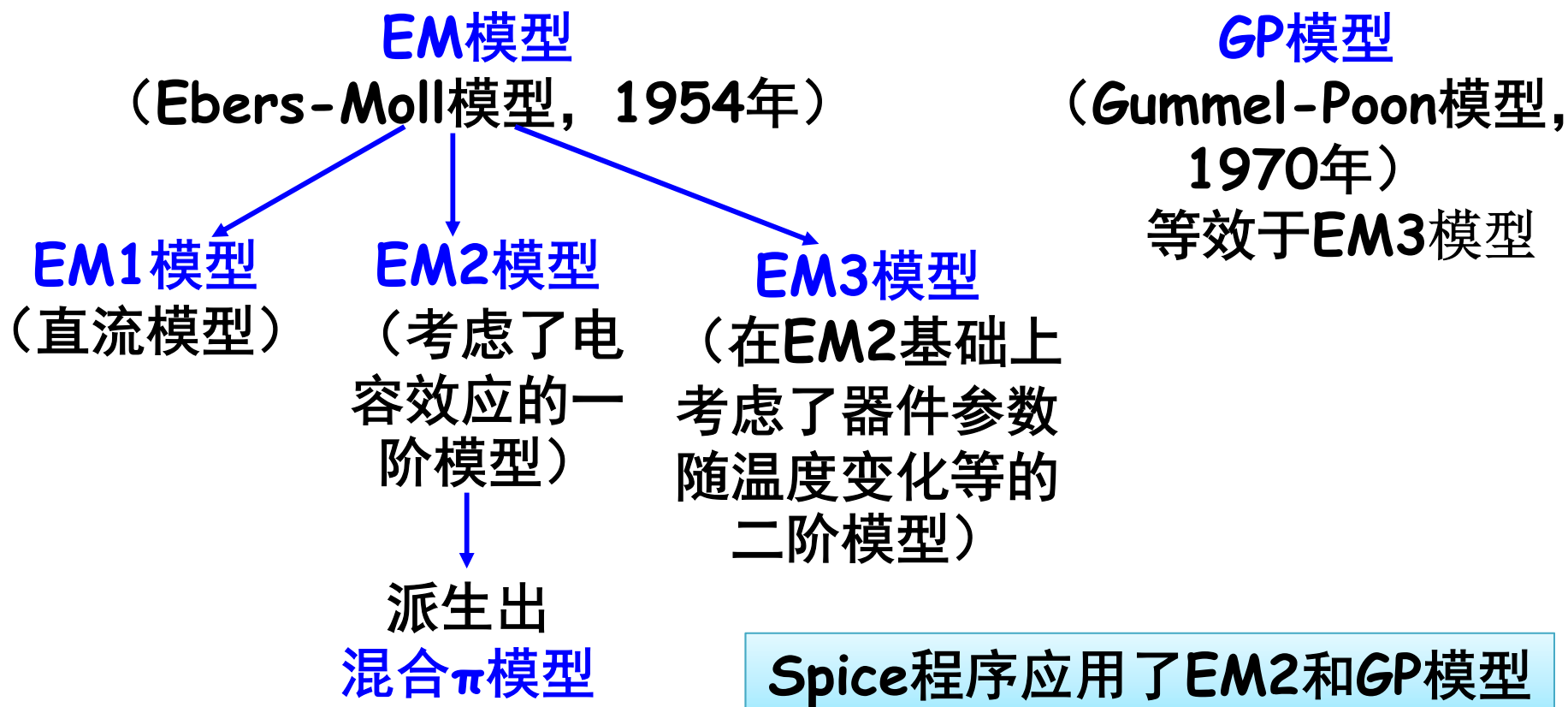
要点:

- 幅频: f_H , -3dB, -20dB/10倍频
- 相频: f_H , -45°, -45°/10倍频, 滞后0~-90°

低通和高通电路的截止频率取决于RC回路的时间常数

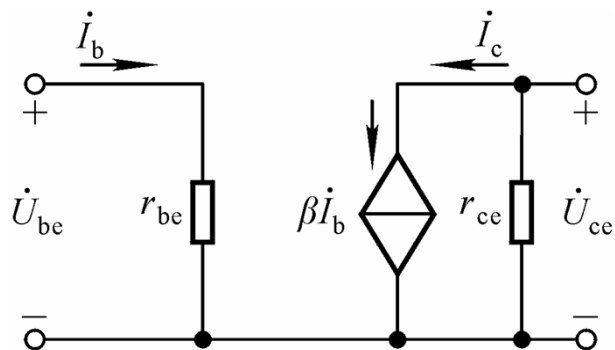


5.2 晶体管的高频等效模型

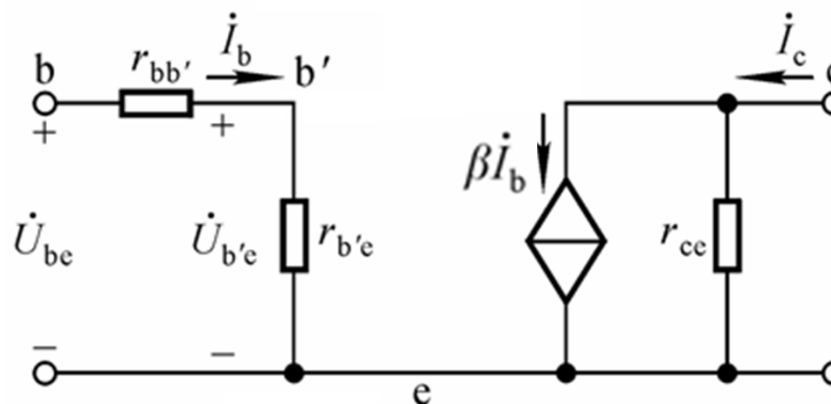


一、 晶体管的混合 π 模型 (Hybrid- π Equivalent Circuit)

1. 低、中频混合 π 模型



i_c 是受 i_b 控制的电流源



i_c 是受 $u_{b'e}$ 控制的电流源

$$i_c = \beta i_b = \frac{\beta}{r_{b'e}} U_{b'e} = g_m U_{b'e}$$

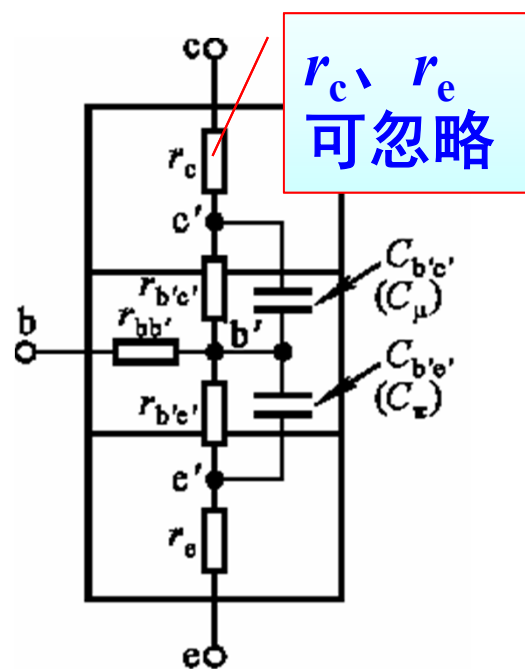
$$g_m = \frac{\beta}{r_{b'e}}$$

$$g_m \approx \frac{I_{EQ}}{U_T}$$

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

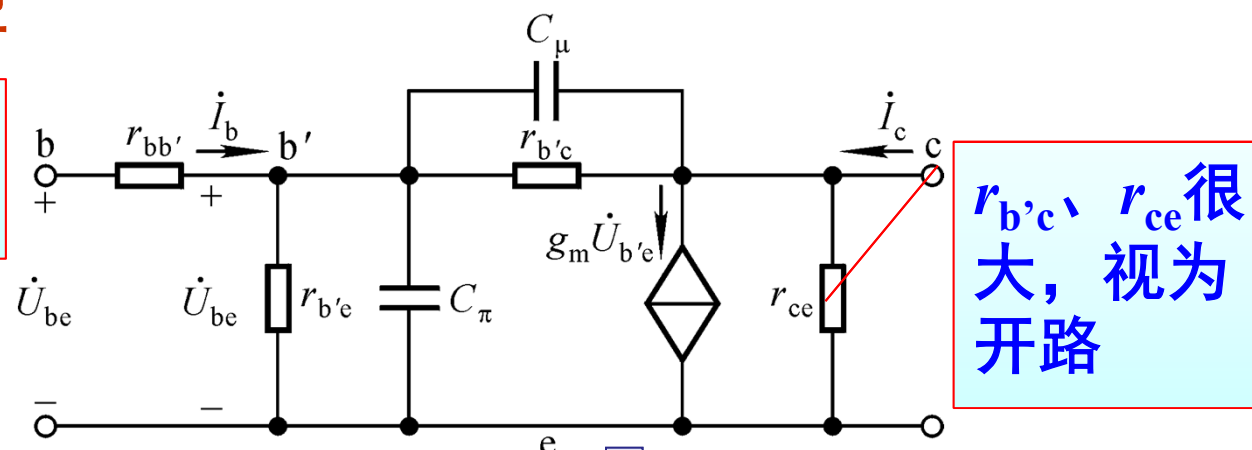
两个模型均没有考虑极间电容

2. 高频混合 π 模型

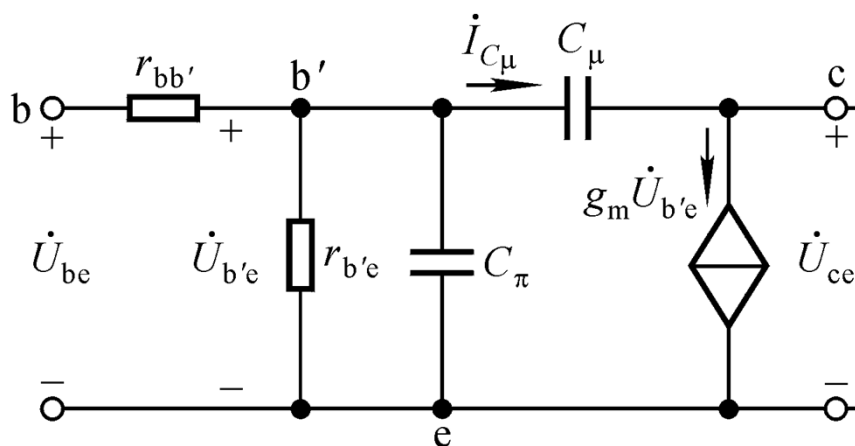


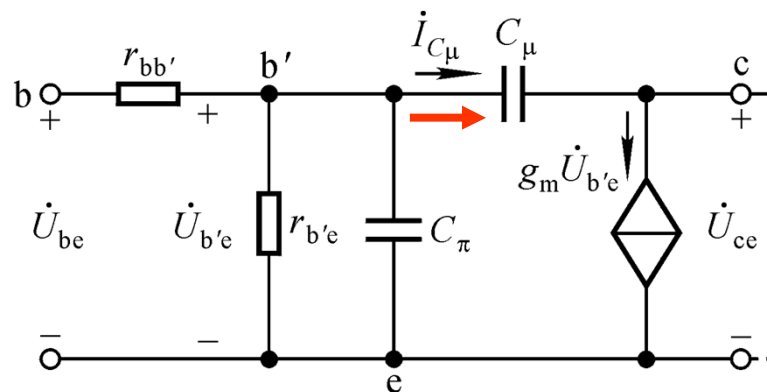
C_{π} : 发射结电容
几~几十pF

C_{μ} : 集电结电容
0.1~几pF



混合 π 高频模型 考虑了极间电容

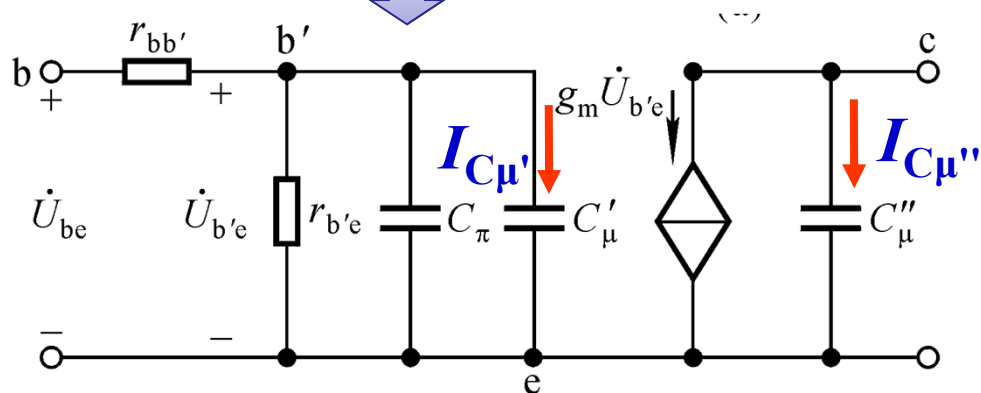




密勒等效变换：使信号传输单向化
(Miller Effect)

思路：等效变换前后使 $I_{c\mu} = I_{c\mu'} = -I_{c\mu''}$

单向化



$$\text{令 } \dot{K} = \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}}$$

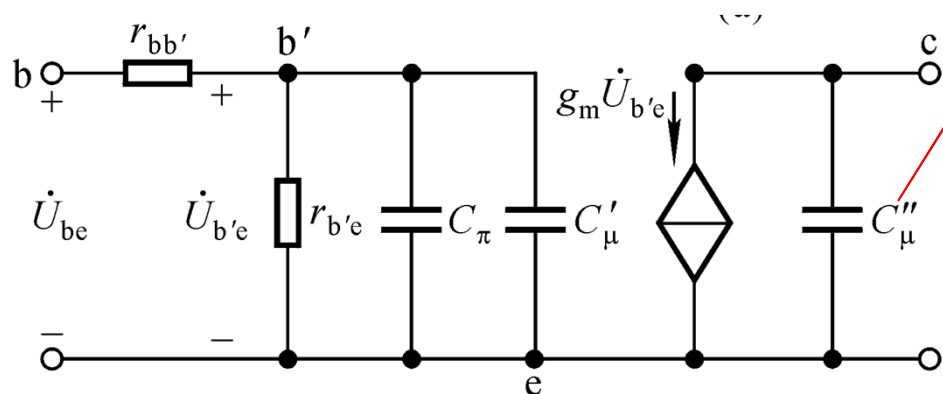
一般用中频值
近似, $K < 0$

$$C'_\mu = (1 - \dot{K})C_\mu \approx (1 + |\dot{K}|)C_\mu$$

$$C''_\mu = \frac{\dot{K} - 1}{\dot{K}} \cdot C_\mu$$

$b' - e$ 间总电容为

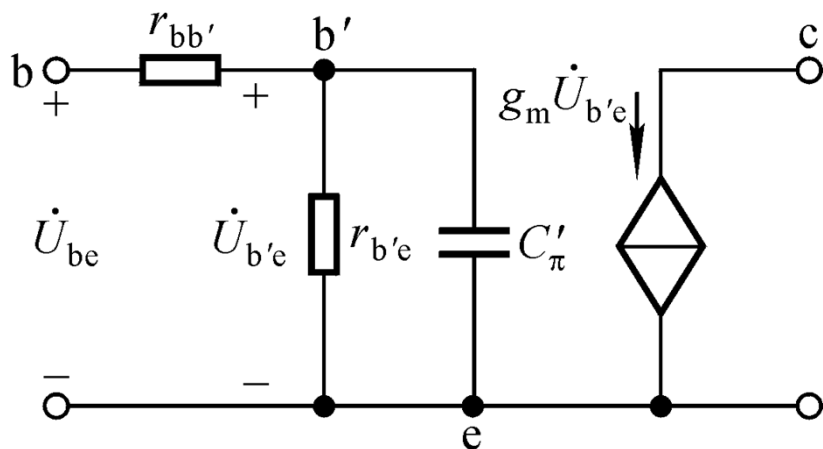
$$C'_\pi = C_\pi + C'_\mu \approx C_\pi + (1 + |\dot{K}|)C_\mu$$



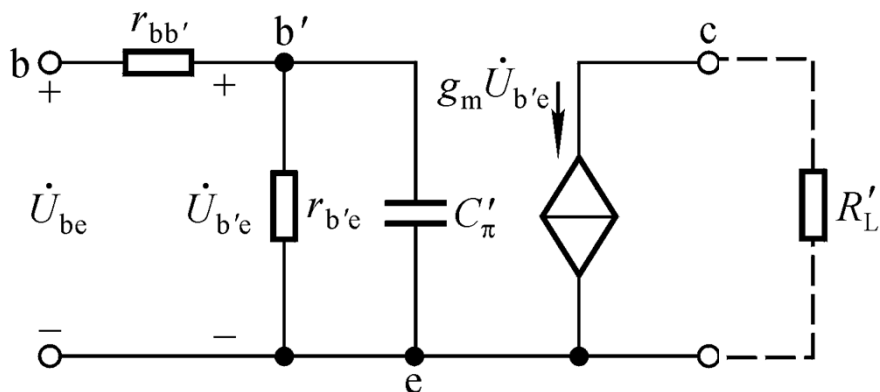
一般 $C'_\pi \gg C''_\mu$, 且 $Z_{C''_\mu} \gg R'_L$

$$C'_\pi = C_\pi + C'_\mu = C_\pi + (1 + |\dot{K}|)C_\mu$$

↓ 简化的高频混合 π 模型



3、混合 π 模型的参数



a. 从手册可查得 $r_{bb'}$,

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

$$g_m \approx \frac{I_{EQ}}{U_T}$$

b. 从低、中频模型求 K

$$K = \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}} = \frac{-g_m \dot{U}_{b'e} R'_L}{\dot{U}_{b'e}} = -g_m R'_L$$

c. 从手册上可查到 C_{ob} ,
 $C_\mu \approx C_{ob}$

d. C_π 的数值可通过手册上的 f_T 、 C_μ 和 $r_{b'e}$ 求得

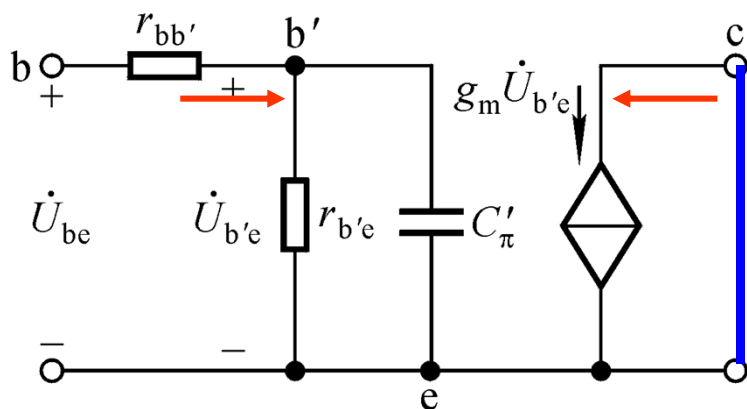
$$C_\pi = \frac{\beta_0}{2\pi r_{b'e} f_T} - C_\mu$$

$$C'_\pi = C_\pi + C'_\mu = C_\pi + (1 + |K|) C_\mu$$

二、晶体管电流放大倍数 β 的频率响应

$$\dot{\beta} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} \bigg|_{U_{CE}}$$

c-e间动态电压 $u_{ce}=0$



当 $u_{ce}=0$ 时: $K = \frac{U_{ce}}{U_{b'e}} = 0$

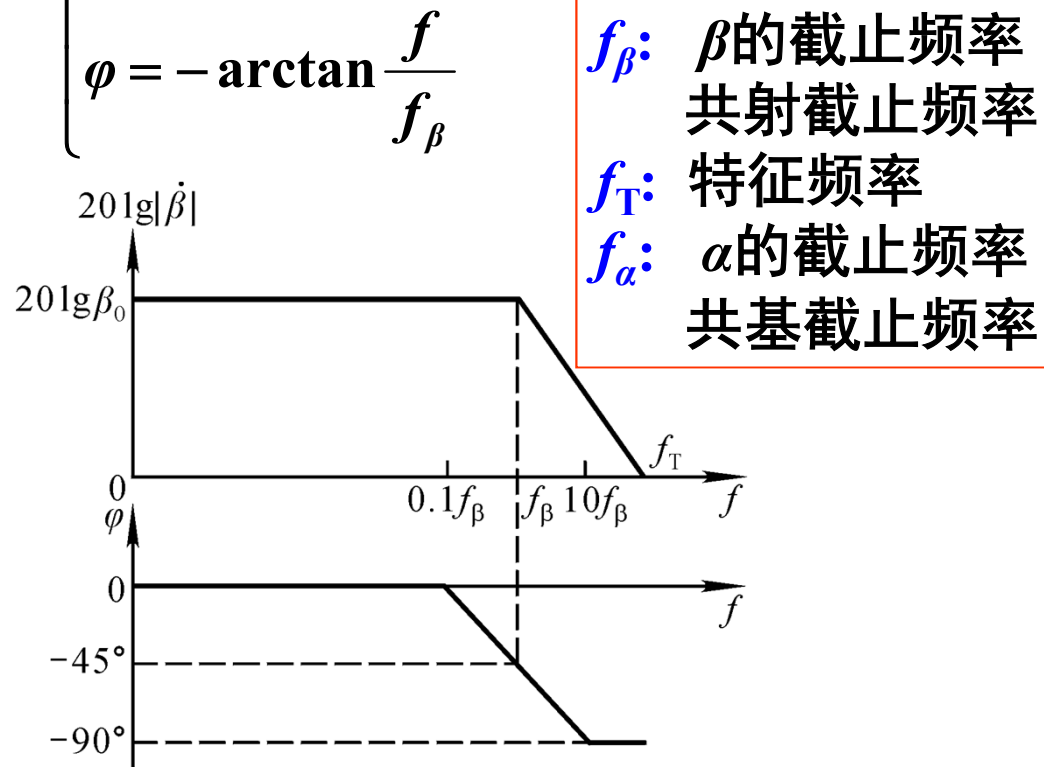
$$C'_\pi = C_\pi + (1 + |\dot{K}|)C_\mu = C_\pi + C_\mu$$

$$\begin{aligned} \dot{\beta} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} &= \frac{g_m \dot{U}_{b'e}}{\dot{U}_{b'e} \left(\frac{1}{r_{b'e}} + j\omega C'_\pi \right)} = \frac{g_m r_{b'e}}{1 + j\omega r_{b'e} C'_\pi} \\ &= \frac{\beta_0}{1 + j\omega r_{b'e} C'_\pi} \end{aligned}$$

$$g_m = \frac{\beta_0}{r_{b'e}} \approx \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1 + j\omega r_{b'e} C'_\pi} = \frac{\beta_0}{1 + jf 2\pi r_{b'e} C'_\pi} = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{f}{f_\beta}} \quad \text{令 } f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e} C'_\pi}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 20\lg|\dot{\beta}| = 20\lg\beta_0 - 20\lg\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2} \\ \varphi = -\arctan\frac{f}{f_\beta} \end{array} \right. \quad \text{令 } 20\lg|\dot{\beta}| = 0 \text{ 求得 } f_T \approx \beta_0 f_\beta$$



$$f_\alpha = (1 + \beta_0) f_\beta \approx f_T$$

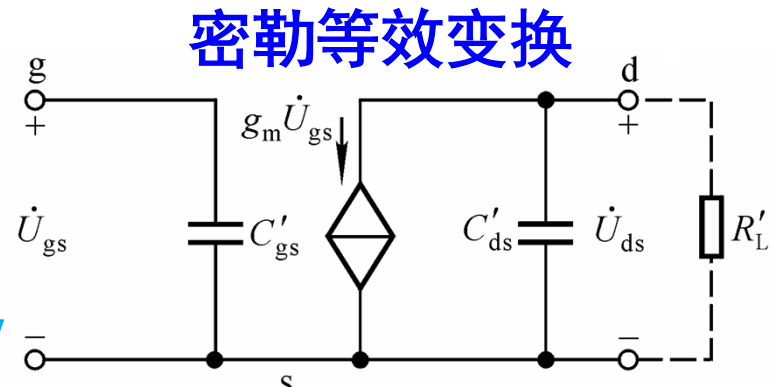
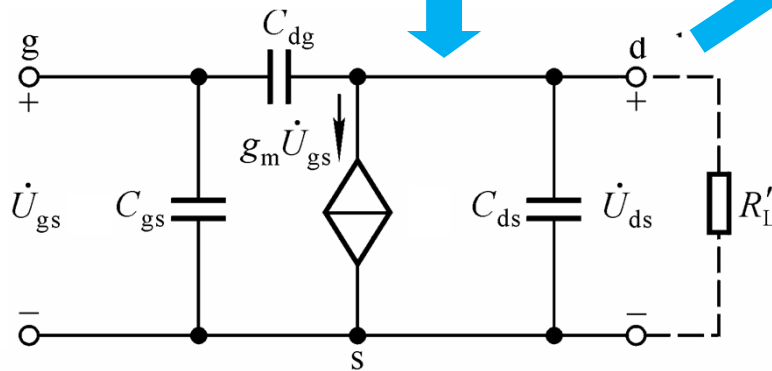
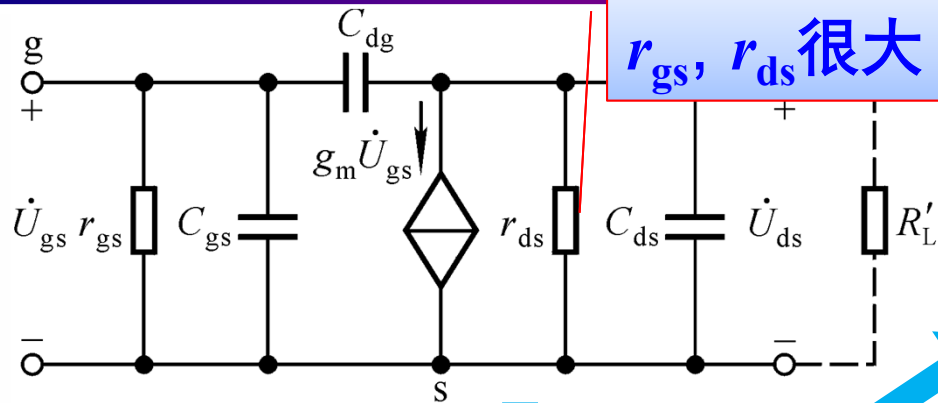
一般手册上可查到 f_T 和 β_0 , 求得 f_β , 进而求得 C'_π 和 C_π

$$C'_\pi = C_\pi + C_\mu$$

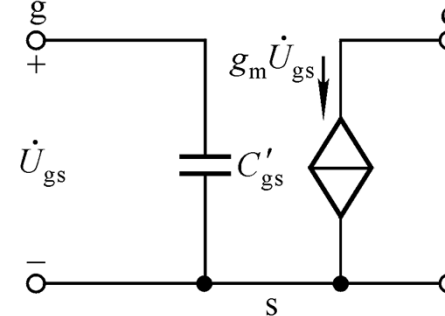
$$C_\pi = \frac{\beta_0}{2\pi r_{b'e} f_T} - C_\mu$$



5.3 场效应管的高频等效模型



通常 C'_ds 阻抗很大

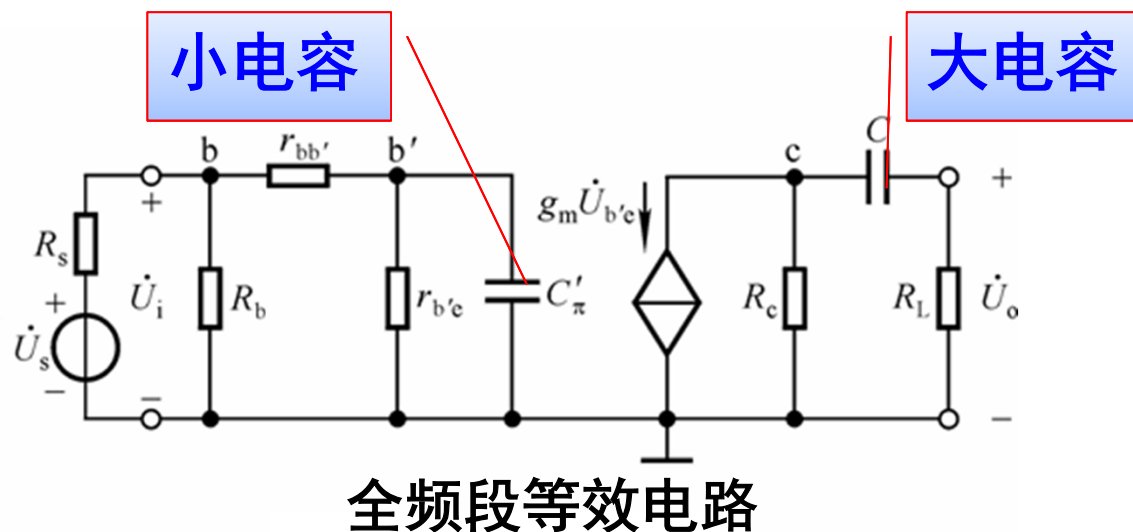
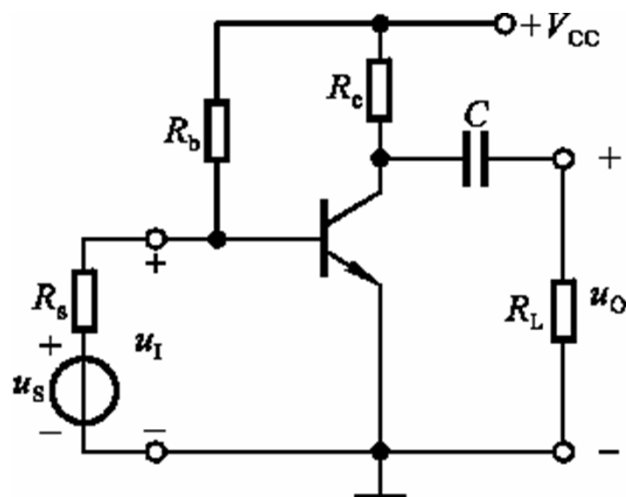


$$C'_{gs} = C_{gs} + C'_{gd} = C_{gs} + (1 + |K|)C_{gd}$$

$$K = \frac{\dot{U}_{ds}}{\dot{U}_{gs}} = \frac{-g_m \dot{U}_{gs} R'_L}{\dot{U}_{gs}} = -g_m R'_L$$



5.4 单管共射放大电路的频率响应



	低频段(<1kHz)	中频段(>1kHz)	高频段(>1MHz)
$ Z_{C'\pi} $ (pF)	很大	大	较小
$ Z_C $ (uF)	大	较小	很小
等效电路	保留C, C'_π 开路	C短路, C'_π 开路	保留 C'_π , C短路