



第一章 放大器

梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

2025.4.18





前情提要



- PN结
- BJT (α , β , $i_e = i_c + i_b$)
- MOSFET
- 3个电极, 3种组态 (放大电路)
- 小信号模型
- 交流通路, 直流通路
- 静态工作点, Q点 (V_{CE} , I_C , I_B)
- 相量分析法, 阻抗
- 电压振幅相量 $\dot{U}_m = U_m e^{j\theta} = U_m \angle \theta$
- 电压有效值相量 $\dot{U} = U \angle \theta_u$ $\dot{U}_m = \sqrt{2} \dot{U}$

§ 8-8 阻抗和导纳 相量模型

- 引入**阻抗**和**导纳**这两个重要的概念，不仅能将电阻电路的分析方法推广应用于分析正弦稳态电路，还能表征元件和电路在正弦稳态时的性能。
- 三种基本元件VCR的相量形式，在关联参考方向时：

$$\dot{U} = R \dot{I} \quad \dot{U} = \frac{1}{j\omega C} \dot{I} \quad \dot{U} = j\omega L \dot{I}$$

- 如果我们把元件在**正弦稳态**时**电压相量**与**电流相量**之比定义为该元件的**阻抗**，记为 Z ，则

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} \quad \dot{U} = Z \dot{I} \quad \text{欧姆定律的相量形式}$$

$$Z_R = R, \quad Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C}, \quad Z_L = j\omega L$$



阻抗和导纳



❖ 元件的阻抗也可定义为电压振幅相量与电流振幅相量之比。

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\sqrt{2} \dot{U}}{\sqrt{2} \dot{I}} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m}$$

❖ 把阻抗的倒数定义为导纳，记为 Y ，即

$$Y = \frac{1}{Z} \quad Y = \frac{\dot{I}}{\dot{U}}$$

❖ 导纳的单位为西门子(S)。电阻、电容和电感的导纳分别为

$$Y_R = \frac{1}{R} = G \quad Y_C = j\omega C \quad Y_L = \frac{1}{j\omega L} = -j \frac{1}{\omega L}$$



§ 1-2 放大电路的基本知识

- 放大是最基本的模拟信号处理功能，不同模拟电子系统应用不同类型的放大电路。
- 放大电路也是构成其他模拟电路的基本单元电路，如滤波、振荡、稳压等功能电路。

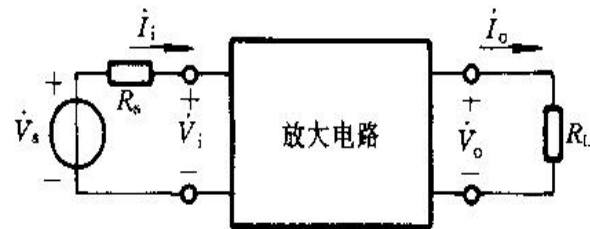


模拟信号放大

- 检测外部物理信号的传感器所输出的电信号通常是很微弱的，如高温计输出电压仅有毫伏量级，细胞电生理实验中所检测到的细胞膜离子单通道电流只有皮安(pA)量级。
- 对这些能量过于微弱的信号，通常必须把它们放大到数百毫伏量级，才能用数字式仪表或传统的指针式仪表显示出来。若对信号进行数字化处理，则须把信号放大到数伏量级才能被模数转换器所接受。



放大电路



- 只考虑电压增益的电路称为电压放大电路。

$$\dot{V}_o = \dot{A}_V \dot{V}_i$$

- 只考虑电流增益的电路称为电流放大电路。

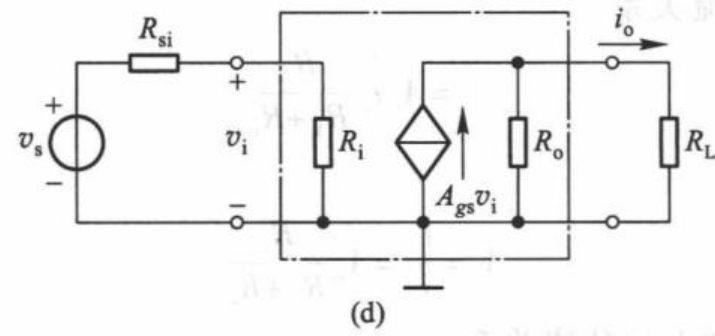
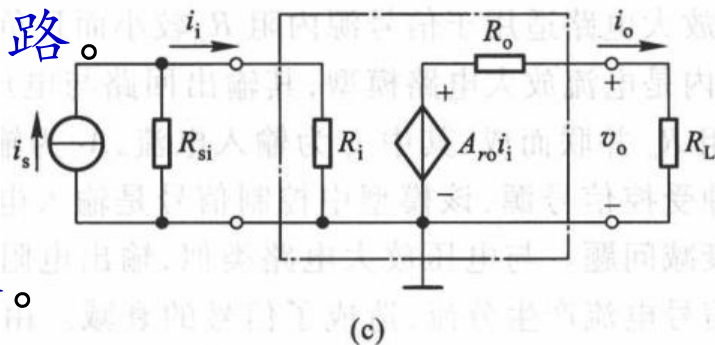
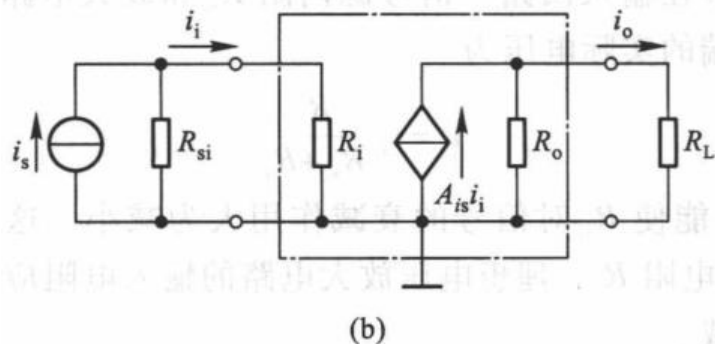
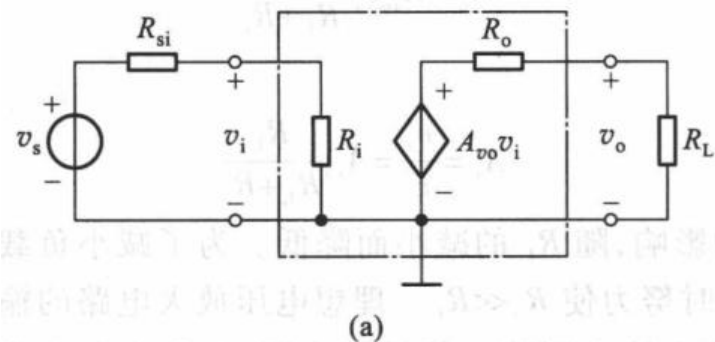
$$\dot{I}_o = \dot{A}_I \dot{I}_i$$

- 当需要把电流信号转换为电压信号，可利用互阻放大电路。

$$\dot{V}_o = \dot{A}_R \dot{I}_i$$

- 把电压信号转换为电流输出的电路，称为互导放大电路。

$$\dot{I}_o = \dot{A}_G \dot{V}_i$$





放大电路模型



- 根据输入信号和输出信号是电压或者电流，分类
 - 电压放大、电流放大、互阻放大和互导放大。
 - 四种不同的双口网络作为相应类型放大电路模型。
 - 模型给出了等效放大电路的输入和输出特性，而忽略各种实际放大电路的内部结构。
- 若将模型与实际电路相联系，其中各元件参数值可以通过对电路和元器件的分析来确定，也可以通过在实际电路的测量而得到。



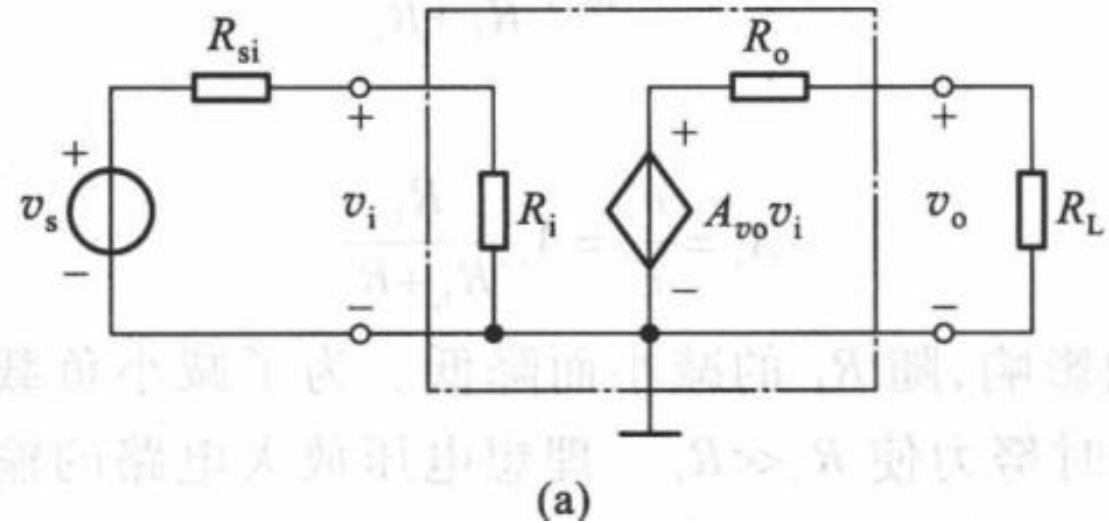
电压放大电路模型

- 由输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 和受控电压源 $A_{vo}\dot{V}_i$ 三个基本元件构成，其中 $\dot{V}_i$ 为输入电压， A_{vo} 为输出开路($R_L=\infty$)时的电压增益。

$$\dot{V}_o = A_{vo} \dot{V}_i \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$A_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$\dot{V}_i = \dot{V}_s \frac{R_i}{R_i + R_s}$$





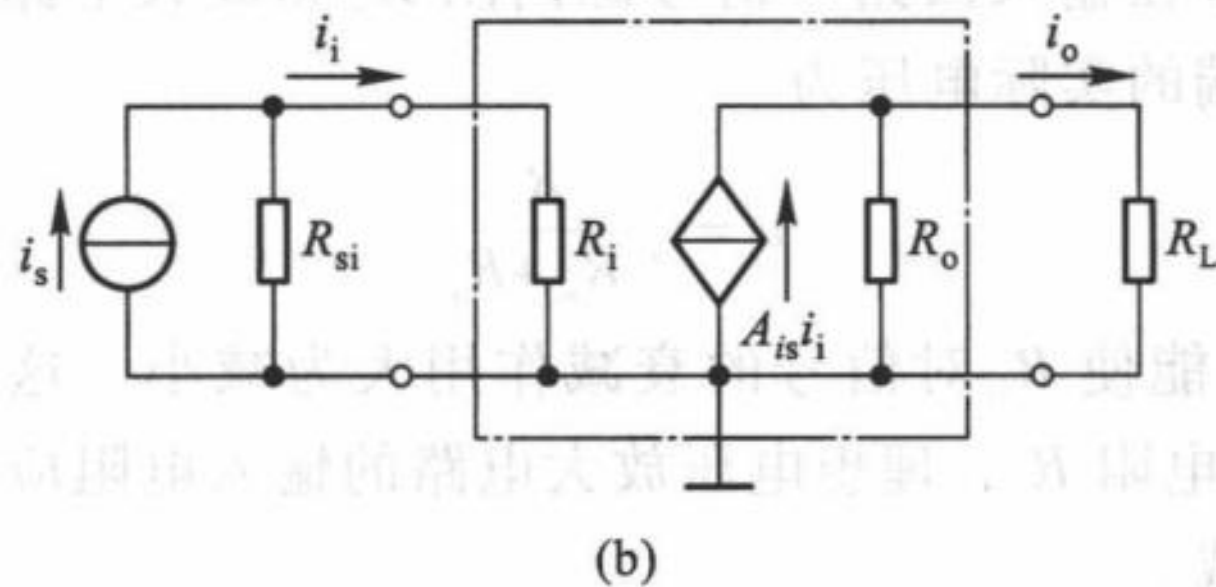
电流放大电路模型

- 由受控电流源 $\dot{A}_{IS} \dot{I}_i$ 和输出电阻 R_o 并联而成，其中 $\dot{I}_i$ 为输入电流。 $\dot{A}_{IS}$ 为输出短路 ($R_L=0$) 时的电流增益。

$$\dot{I}_o = \dot{A}_{IS} \dot{I}_i \frac{R_o}{R_L + R_o}$$

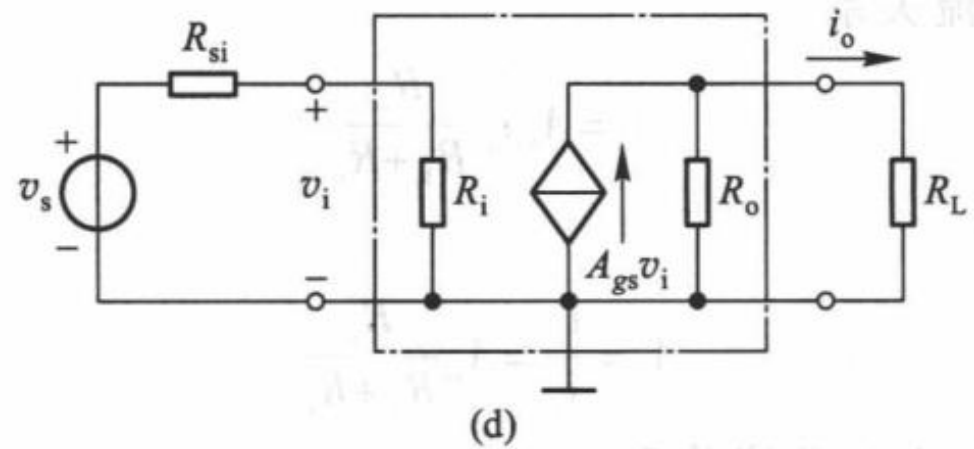
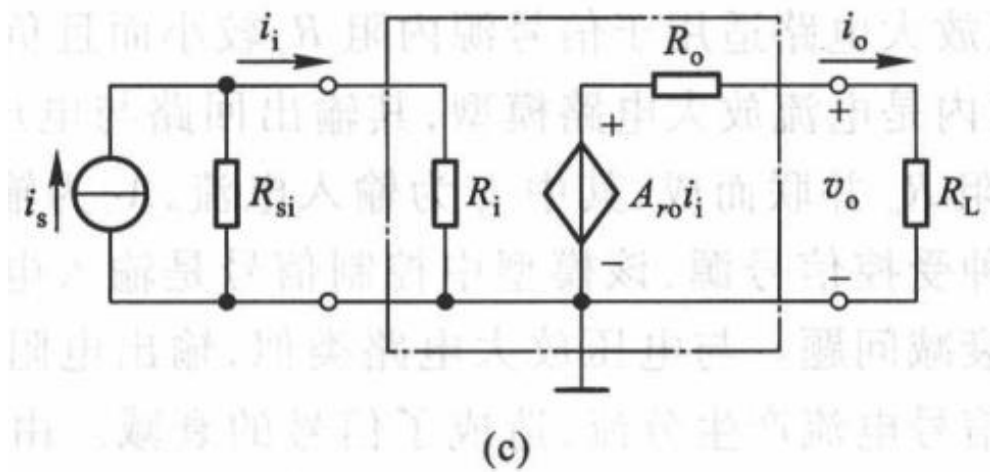
$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} = \dot{A}_{IS} \frac{R_o}{R_L + R_o}$$

$$\dot{I}_i = \dot{I}_s \frac{R_s}{R_s + R_i}$$



互阻放大和互导放大电路模型

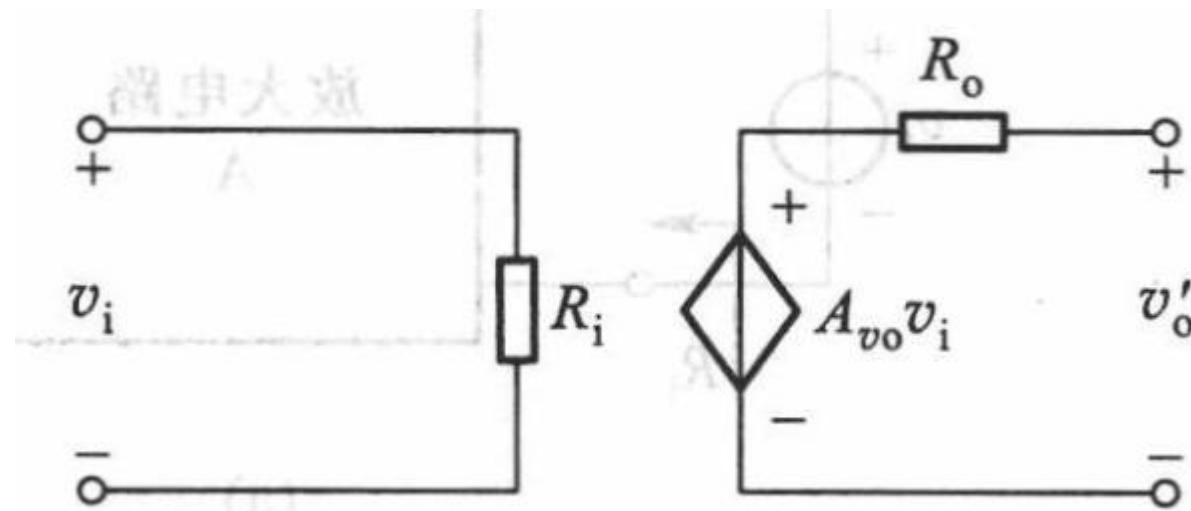
- 输出信号分别由受控电压源 $A_{GS} \dot{V}_i$ 和受控电流源 $A_{RO} \dot{I}_i$ 产生
- 互阻放大电路要求输入电阻 $R_i = 0$ 且输出电阻 $R_o = 0$;
- 互导放大电路则要求输入电阻 $R_i = \infty$, 输出电阻 $R_o = \infty$ 。
- 电路中的 A_{RO} 称为输出开路时的互阻增益, A_{GS} 称为输出短路时的互导增益。





隔离放大

- 许多工业控制设备及医疗设备，为了电子设备的提高安全性和抗干扰能力，在前级信号预放大中，普遍采用“隔离”放大，即放大电路的输入与输出电路(包括供电电源)相互绝缘，输入与输出信号之间不存在任何公共参考点。

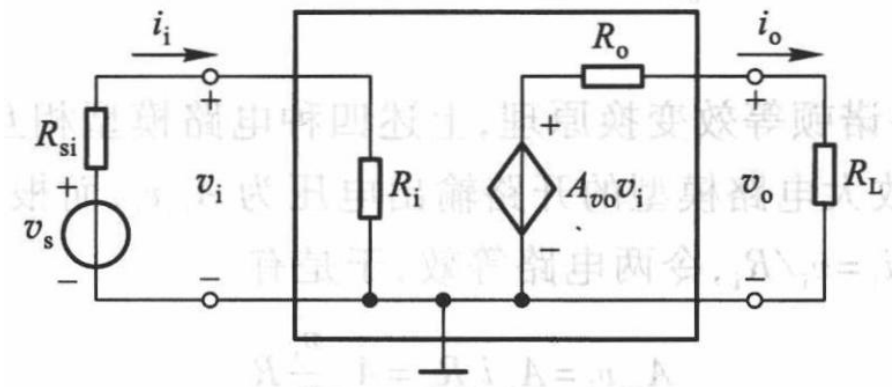


放大电路的主要性能指标-输入电阻

- 输入电阻等于输入电压 $\dot{V}_i$ 与输入电流 $\dot{I}_i$ 比值，即

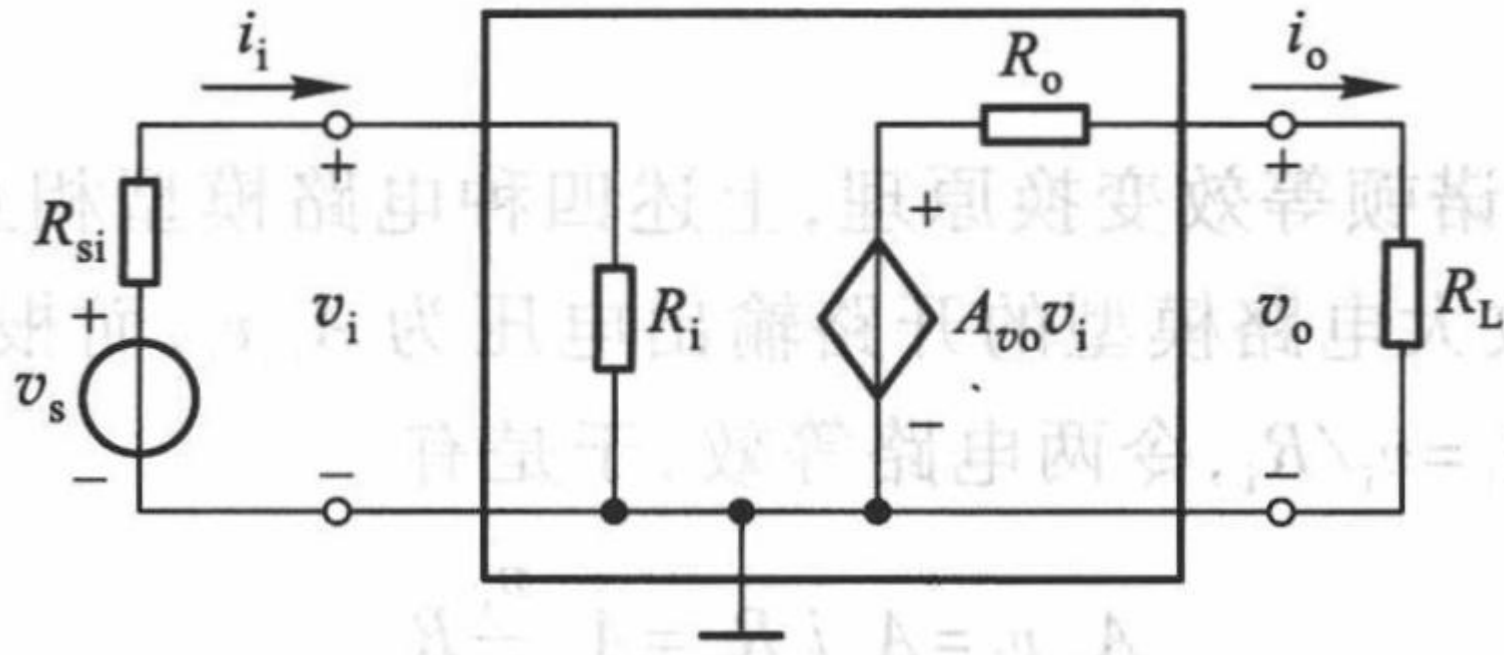
$$R_i = \dot{V}_i / \dot{I}_i$$

- 输入电阻 R_i 的大小决定了放大电路从信号源吸取信号幅值的大小。
- 对于输入为电压信号的放大电路(电压放大和互导放大)，输入电阻 R_i 愈大，则放大电路输入端的 $\dot{V}_i$ 值愈大。反之，输入为电流信号的放大电路(电流放大和互阻放大)， R_i 愈小，注入放大电路的输入电流 $\dot{I}_i$ 愈大。



放大电路的主要性能指标-输出电阻

- 放大电路输出电阻 R_o 的大小决定它带负载的能力。对输出为电压信号的放大电路， R_o 愈小，负载电阻 R_L 的变化对输出电压 v_o 的影响愈小。
- 对输出为电流信号的放大电路，与受控电流源并联的 R_o 愈大，负载电阻 R_L 的变化对输出电流 i_o 的影响愈小。



放大电路的主要性能指标-增益

- 四种放大电路分别具有不同的增益，如电压增益 $\dot{A}_V$ 电流增益 $\dot{A}_I$ 互阻增益 $\dot{A}_R$ 及互导增益 $\dot{A}_G$ 。它们实际反映了放大电路在输入信号控制下，将供电电源能量转换为信号能量的能力。
- 其中 $\dot{A}_V$ 和 $\dot{A}_I$ 两种无量纲增益，在工程上常用以10为底的对数增益表达，其基本单位为B(贝尔, Bel)，用它的十分之一单位dB(分贝)。

$$\text{电压增益} = 20 \lg \left| \dot{A}_V \right| \quad \text{dB}$$

$$\text{电流增益} = 20 \lg \left| \dot{A}_I \right| \quad \text{dB}$$

$$\text{功率增益} = 10 \lg \left| \dot{A}_P \right| \quad \text{dB}$$



第六章 频率响应

梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

2025.4.25





放大电路的主要性能指标-频率响应及带宽

- 实际的放大电路中总是存在一些电抗性元件，如电容、电感、电子器件的极间电容以及接线电容与接线电感等。因此，放大电路的输出和输入之间的关系必然和信号频率有关。

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} \quad \dot{U} = Z \dot{I}$$

$$Z_R = R, \quad Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}, \quad Z_L = j\omega L$$

- 放大电路的**频率响应**所指的是，在输入正弦信号情况下，输出随频率连续变化的**稳态响应**。



频率响应



- 若考虑电抗性元件的作用和信号角频率变量，则放大电路的电压增益可表达为

$$\dot{A}_V(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} \quad \dot{A}_V = A_V(\omega) \angle \varphi(\omega)$$

- ω 为信号的角频率，
- $A_V(\omega)$ 表示电压增益的模与角频率之间的关系，称为**幅频响应**；
- $\varphi(\omega)$ 表示放大电路的输出与输入正弦电压信号的相位差与角频率之间的关系，称为**相频响应**；
- 二者综合起来可全面表征放大电路的频率响应。

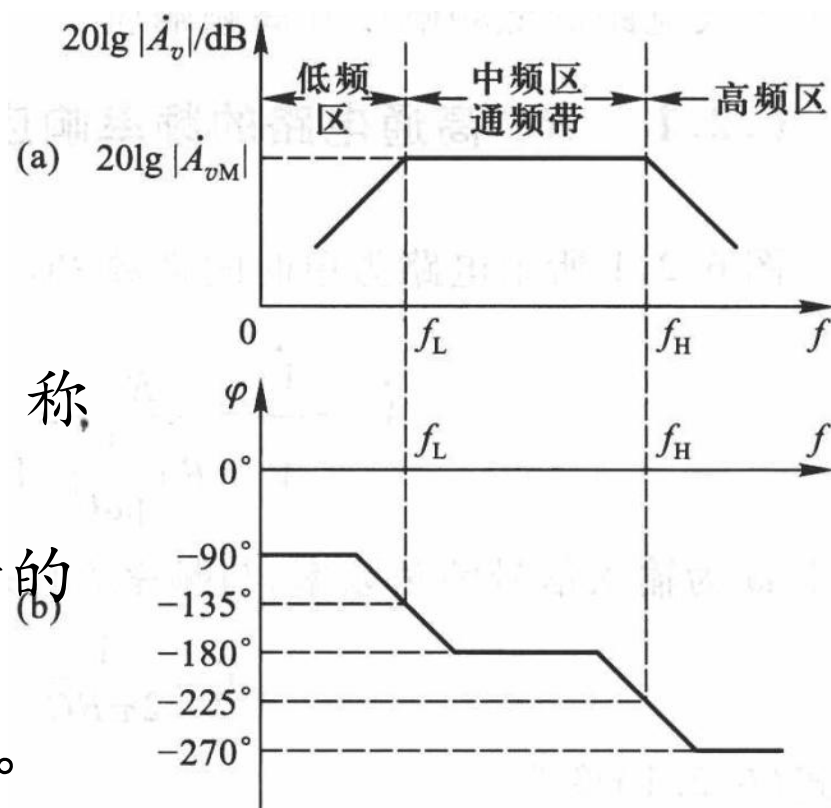


图 6.1.1 阻容耦合单级共源放大电路的频率响应

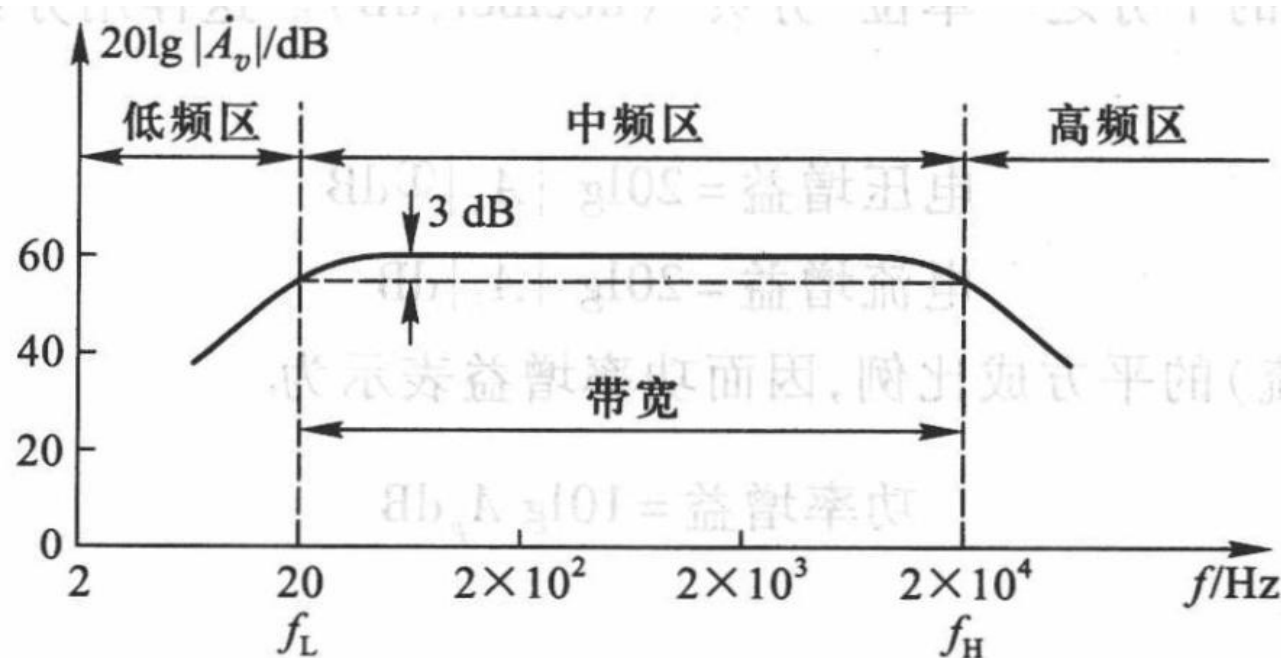


带宽



- 横坐标采用频率单位 $f = \omega / (2\pi)$ ，与角频率 ω 只存在标尺倍率之差。坐标采用对数刻度，称为**波特 (Bode) 图**。
- 幅频响应的中间一段是平坦的，称为**中频区**。

❖ 在20Hz和20kHz两点增益分别下降3dB，在低于20Hz和高于20kHz的两个区域，增益随频率远离这两点而下降。增益下降3dB的频率点，其输出功率约等于中频区输出功率的一半，通常称为**半功率点**。





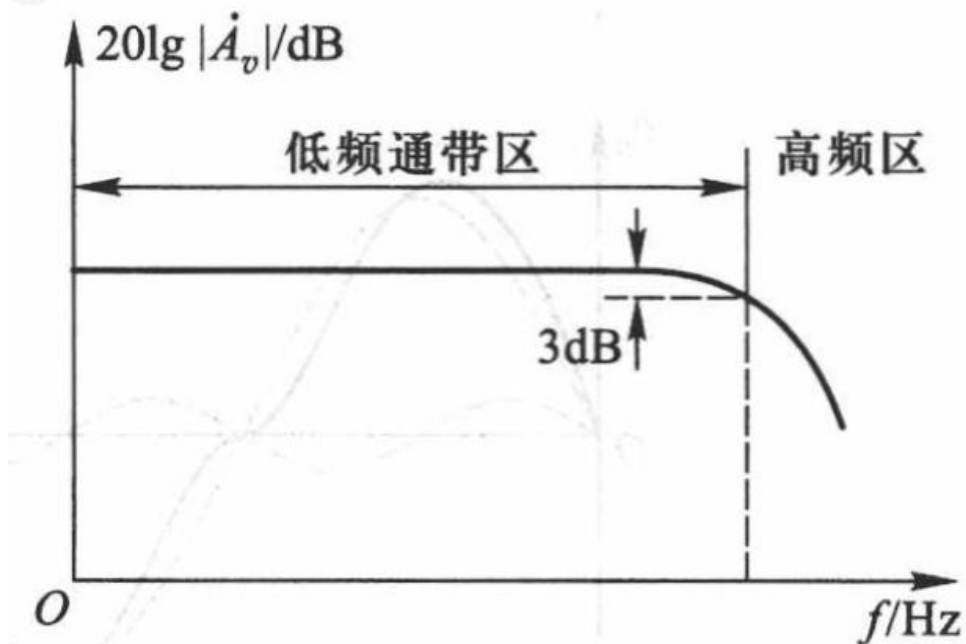
带宽



- 把幅频响应的高、低两个半功率点间的频率差定义为放大电路的**带宽**，即

$$BW = f_H - f_L$$

- f_H 是频率响应的高端半功率点，也称为上限频率，而 f_L 则称为下限频率。





失真



- 理论上许多非正弦信号的频率范围都延伸到无穷大，而放大电路的带宽却是有限的，并且相频响应也不能保持常数。
- 基波增益较大，而二次谐波增益较小，于是输出电压波形产生了失真，这叫作**幅度失真**。
- 当放大电路对不同频率的信号产生的相移不同时，也产生失真，称为**相位失真**。
- 幅度失真和相位失真总称为**频率失真**，它们都是由于线性电抗元件所引起的，所以又称为**线性失真**。

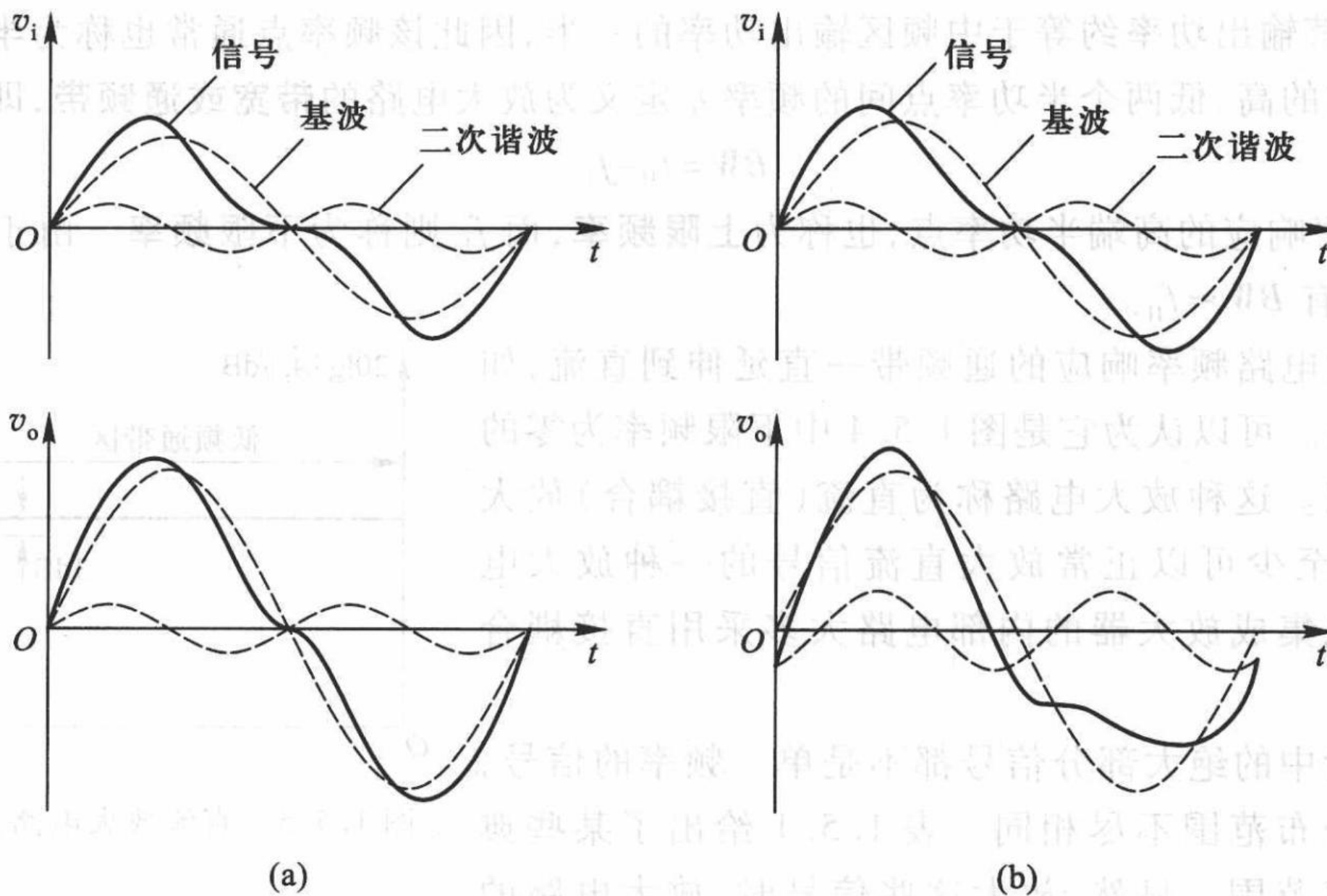


图 1.5.6 放大电路的输入输出波形

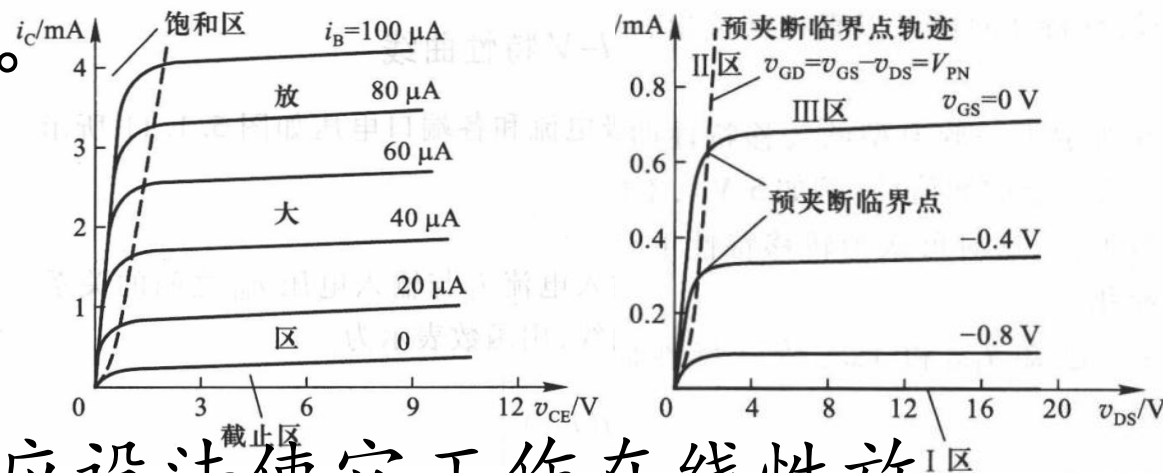
(a) 幅度失真 (b) 相位失真



非线性失真



- 信号的非线性失真是由放大器件的非线性特性所引起的，放大器件包括分立器件(如半导体三极管等)和集成电路器件(如集成运算放大器等)。



- 对于分立器件放大电路来说，应设法使它工作在线性放大区。但当要求信号的幅值较大，如多级放大电路的末级，特别是功率放大电路，非线性失真难以避免。
- 对于集成运算放大器，通常是由正、负双电源供电，当输出信号的幅值接近双电源值时，其输出将产生非线性失真，称为**饱和失真**。



放大电路的频率响应

- 放大电路对不同频率的信号具有不同的放大能力
 - 增益大小与相移均会随着频率的改变而变化
 - 即增益和相移是信号频率的函数。
- 这种函数关系称为放大电路的**频率响应**或者**频率特性**。

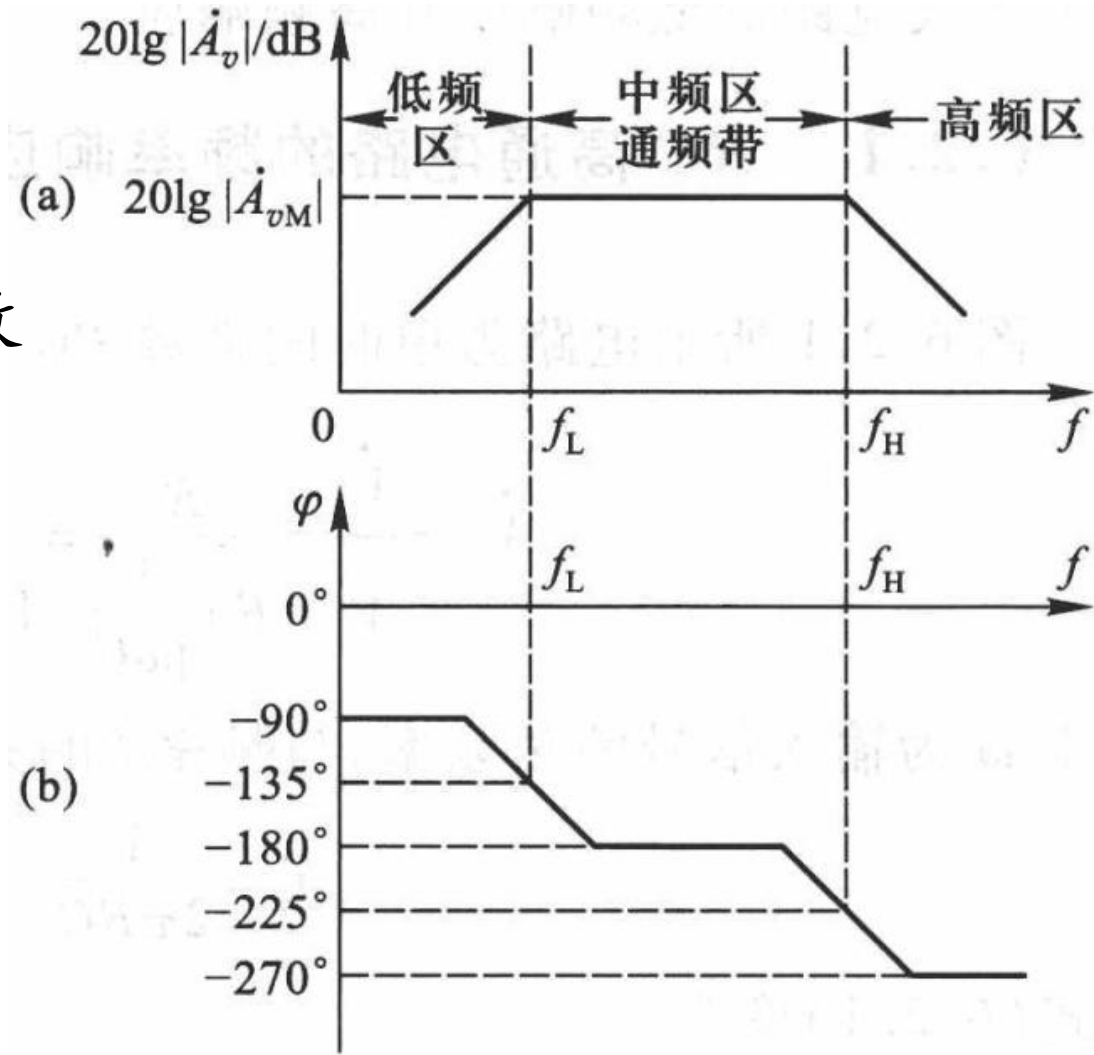


图 6.1.1 阻容耦合单级共源放大
电路的频率响应

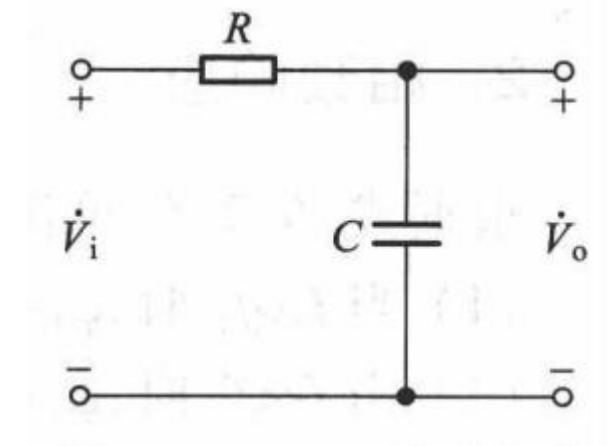
频率响应--RC低通电路的频率响应

- 在放大电路的高频区，影响频率响应的主要因素是管子的极间电容和接线电容等，它们在电路中与其他支路是并联的，因此这些电容对高频响应的影响可用RC低通电路来模拟。

$$A_{VH}(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{1/j\omega C_1}{R_1 + 1/j\omega C_1} = \frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1}$$

$$\text{设 } \omega = 2\pi f \quad f_H = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

$$A_{VH} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{1}{1 + j(f/f_H)}$$





幅频响应



- 高频区的电压增益的幅值 A_{VH} 和相角 φ_H 分别为

$$A_{VH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \quad \varphi_H = -\arctg(f / f_H)$$

(1) 当 $f \ll f_H$ 时

$$A_{VH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \approx 1 \quad 20 \lg A_{VH} \approx 20 \lg 1 = 0$$

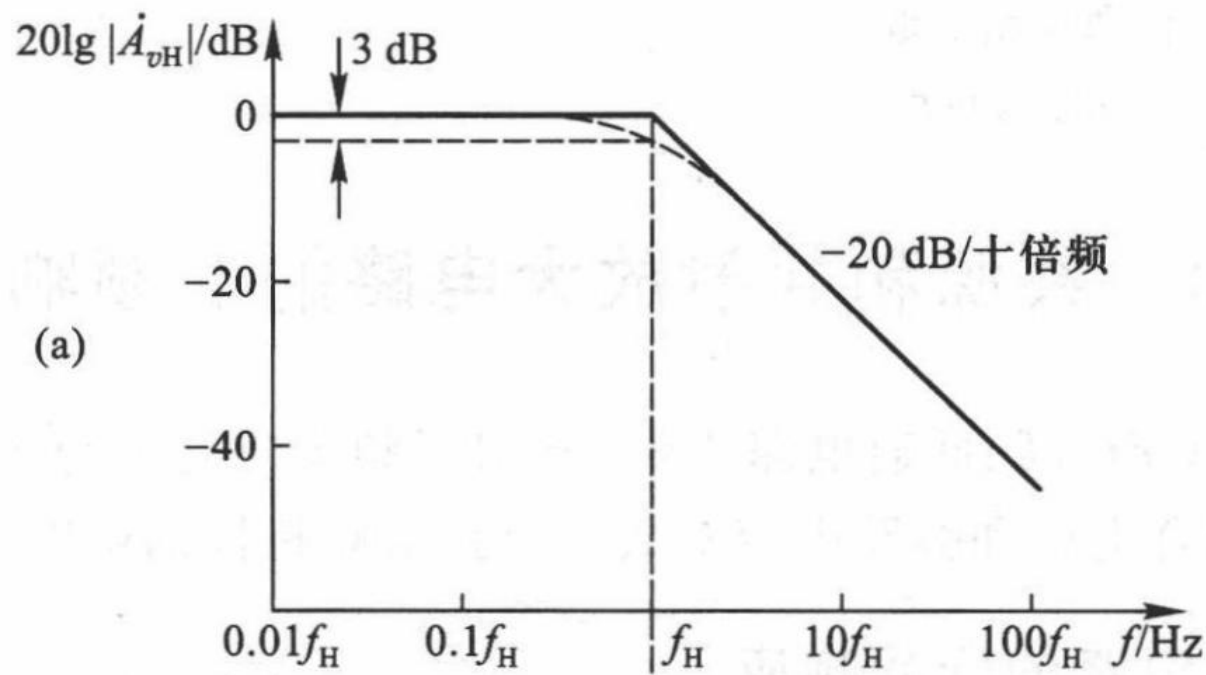
(2) 当 $f \gg f_H$ 时

$$A_{VH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \approx f_H / f \quad 20 \lg A_{VH} \approx 20 \lg f_H / f = -20 \lg f / f_H$$

在工程上常用以10为底的对数增益表达，其基本单位为B(贝尔，Bel)，用它的十分之一单位dB(分贝)。原本是为功率准备的单位， $10 \lg(P)$ ，此处为电压增益，而电压的平方正比与功率，所以变为 $20 \lg()$

幅频响应

- f_H 对应于两条直线的交点，称为**转折频率**。
- 当 $f=f_H$ 时， $A_{vH}=0.707$ ，即在 f_H 时，电压增益下降到中频值的 0.707 倍，所以 f_H 又是放大电路的上限频率。
- $f_H(\omega_H)$ 是 $A_{vH}(\omega)$ 的极点频率。
- -3dB，功率降低到一半。





相频响应

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

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



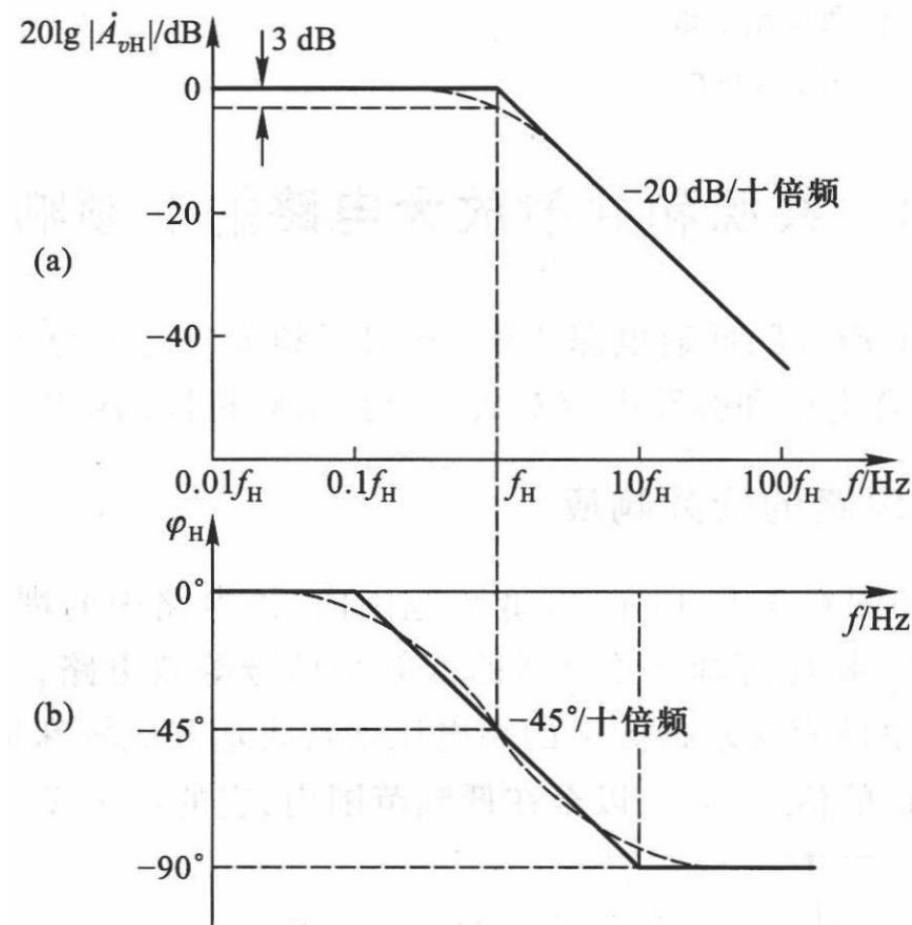
- 可用三条直线来近似描述：

$$f \ll f_H \quad \varphi_H \rightarrow 0^\circ$$

$$f \gg f_H \quad \varphi_H \rightarrow -90^\circ$$

$$f = f_H \quad \varphi_H = -45^\circ$$

- 在 $0.1 f_H$ 和 $10 f_H$ 之间，可用一条斜率为 -45° /十倍频程的直线来表示。



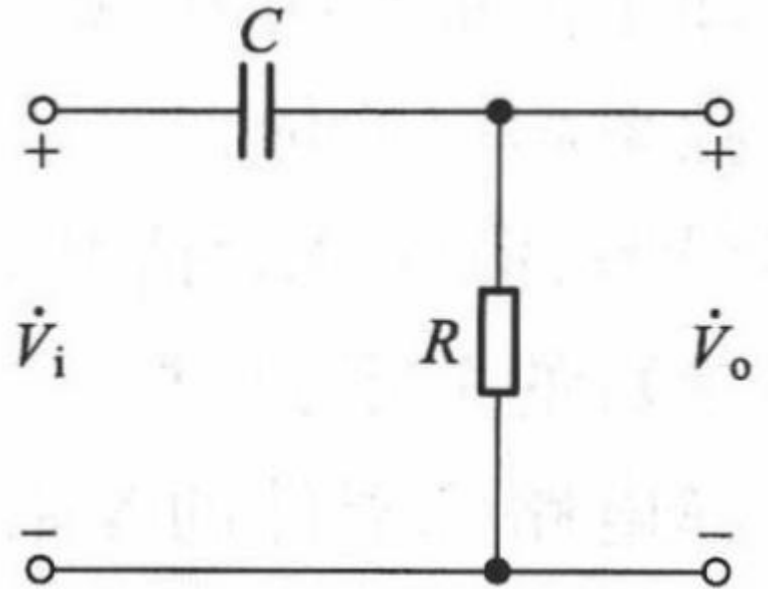
频率响应--RC高通电路的频率响应

- 在放大电路的低频区内，耦合电容和射极旁路电容对低频响应的影响，可用RC高通电路来模拟。

$$A_{VL}(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{R_2}{R_2 + 1/j\omega C_2} = \frac{j\omega R_2 C_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

$$\text{设 } \omega = 2\pi f \quad f_L = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

$$A_{VL} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{1}{1 - j(f_L/f)}$$





幅频响应

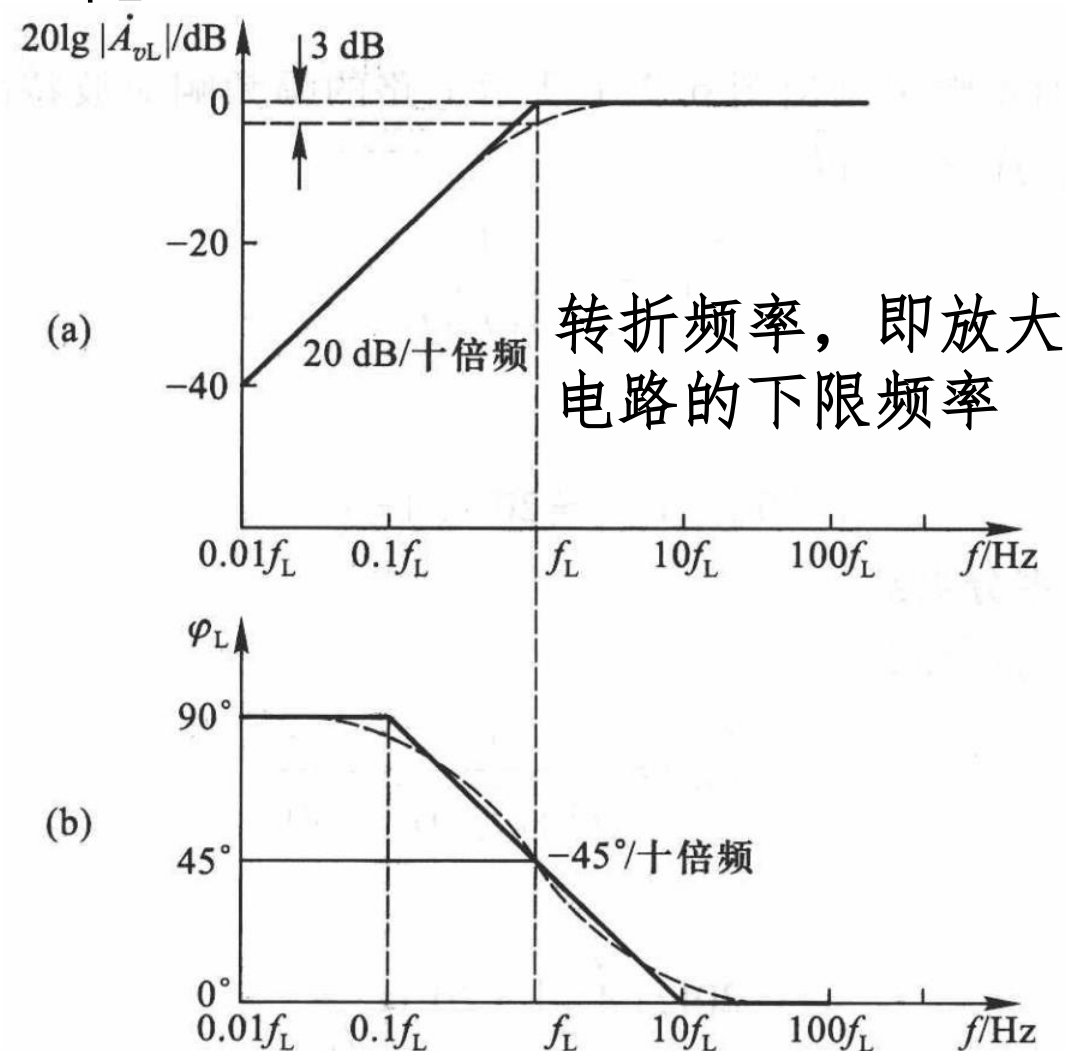


- 低频区的电压增益的幅值 A_{VL} 和相角 φ_L 分别为：

$$A_{VL} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L / f)^2}}$$

$$\varphi_H = \arctg(f_L / f)$$

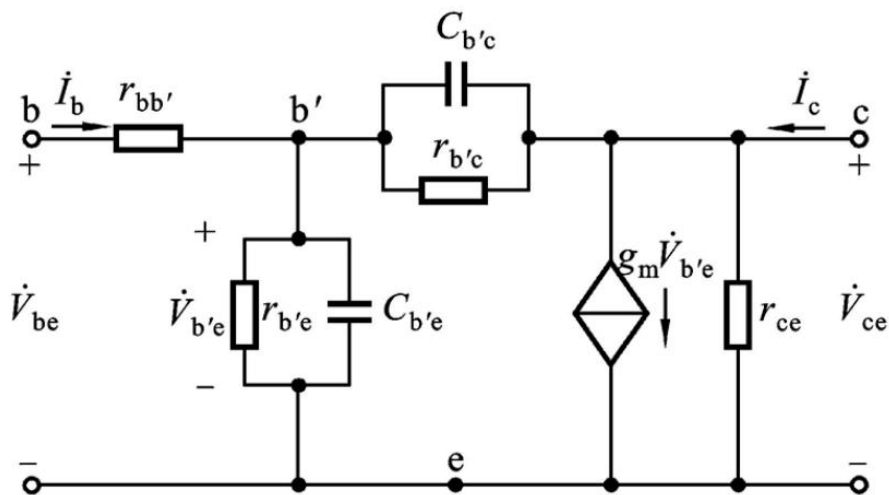
$$A_{VH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \quad \varphi_H = -\arctg(f / f_H)$$



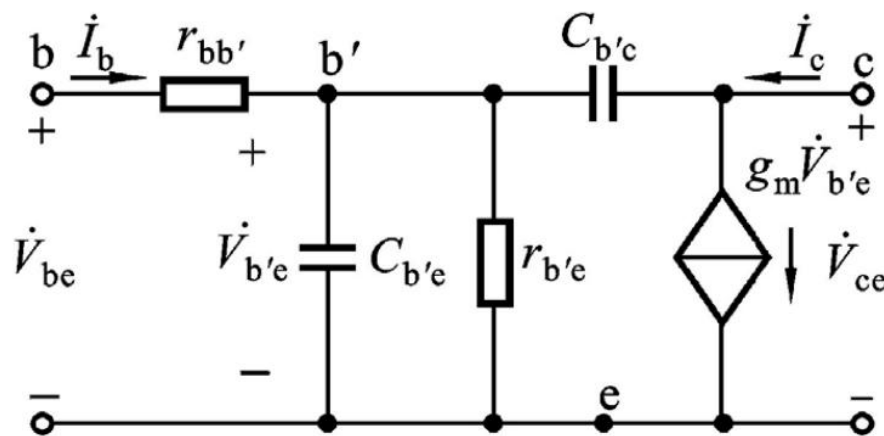


单级放大电路的高频响应

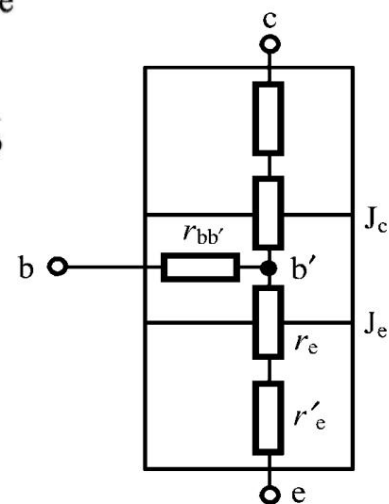
- 在高频运用的情况下，其物理过程与H参数低频小信号模型不同，主要表现在BJT的极间电容不可忽略，BJT的高频小信号模型如下：



实际模型



简化模型

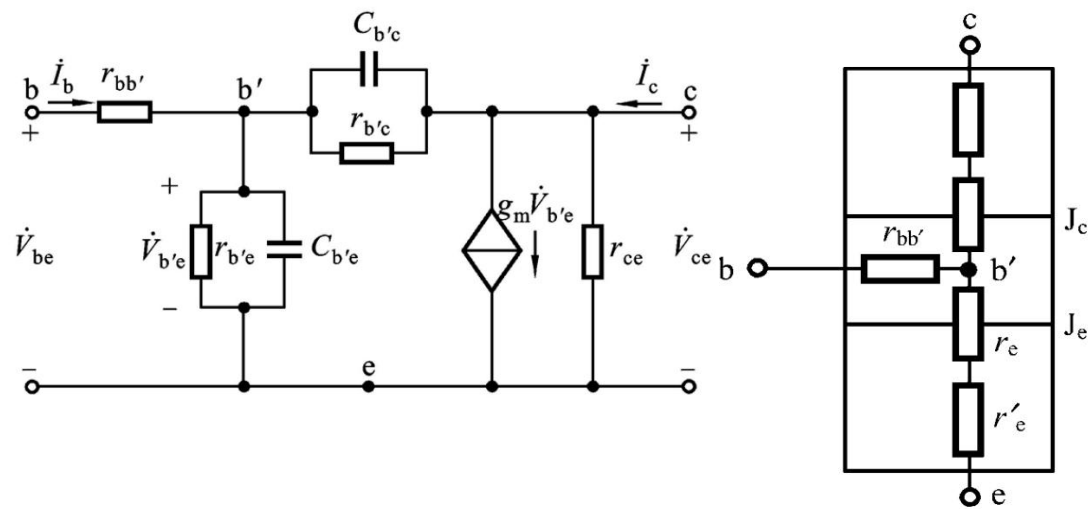




元件参数说明

- 基区电阻 $r_{bb'}$:
 - 表示基区体电阻，约在 $50-300\Omega$ 之间。
- 发射结参数 $r_{b'e}$ 和 $C_{b'e}$:
 - $r_{b'e}$ 是发射结的小信号电阻，对于小功率管 $r_{b'e}$ 的实际数值约为几十欧。
 - $C_{b'e}$ 为发射结电容，对于小功率管，约在几十-几百 pF 范围。
- 集电结参数 $r_{b'c}$ 和 $C_{b'c}$:
 - 由于集电结工作时处于反向偏置，故 $r_{b'c}$ 的值很大，一般在 $100\text{ k}\Omega-10\text{ M}\Omega$ 之间， $C_{b'c}$ 在 $2-10\text{ pF}$ 范围内。
- 受控电流源 $g_m \dot{V}_{b'e}$:
 - 由于结电容的影响， i_c 和 i_b 不能保持正比关系，因而用 $g_m \dot{V}_{b'e}$ 表示受控电流源，它是受直接加于基极 b' 和发射极之间的电压 $V_{b'e}$ 所控制的， g_m 称为互导，定义为

$$g_m = \left. \frac{\partial i_c}{\partial v_{B'E}} \right|_{V_{CE}} = \left. \frac{\Delta i_c}{\Delta v_{B'E}} \right|_{V_{CE}}$$



H参数的确定

- β 一般用测试仪测出;
- r_{be} 与 Q 点有关, 可用图示仪测出。

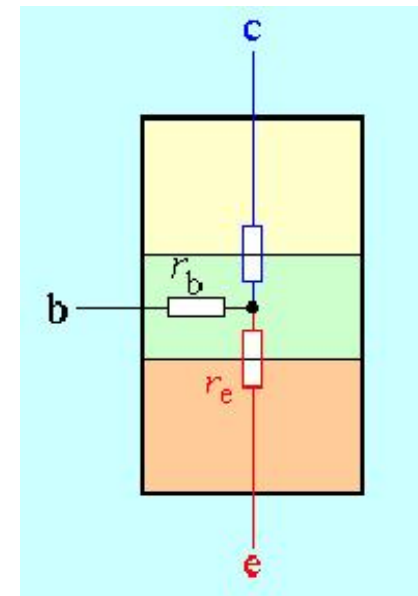
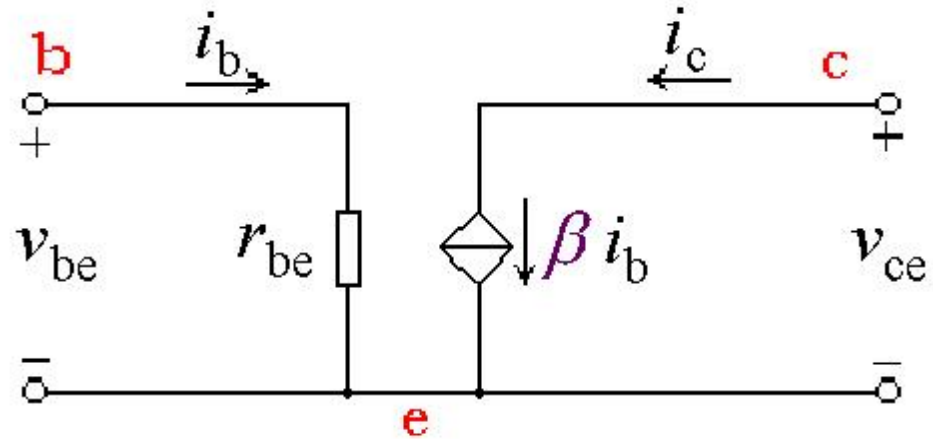
一般也用公式估算 r_{be}

$$r_{be} = r_b + (1 + \beta) r_e$$

其中对于低频小功率管 $r_b \approx 200\Omega$

而
$$r_e = \frac{V_T(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} \quad (T=300\text{K})$$

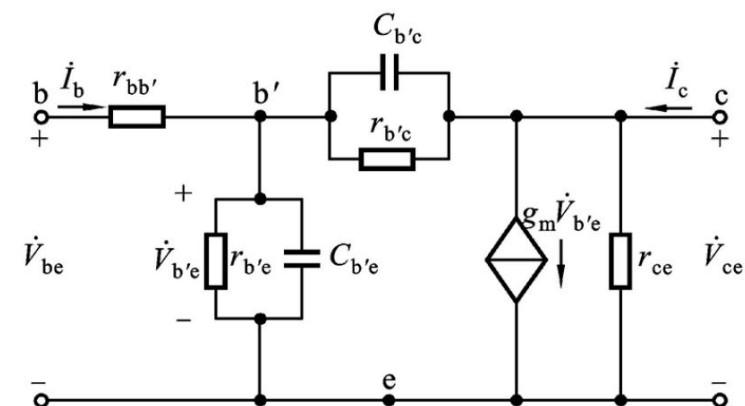
则
$$r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$



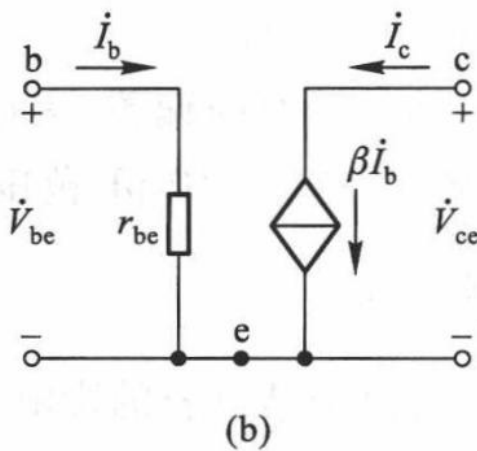
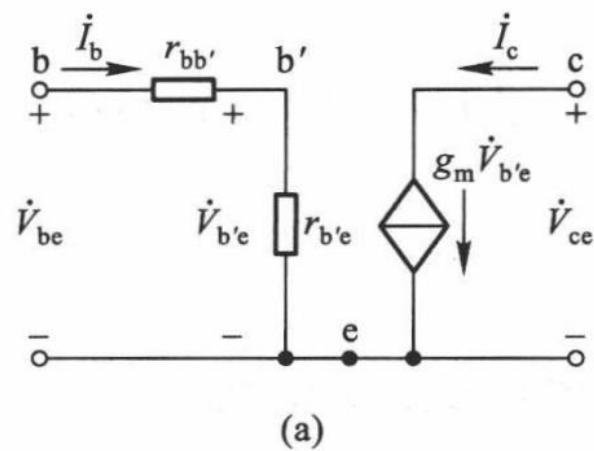


模型中参数的获得

- 由于高频小信号模型中的元件参数，在很宽的频率范围内与频率无关，所以模型中的电阻参数和互导 g_m 都可以通过低频小信号模型参数得到。



发射结电阻



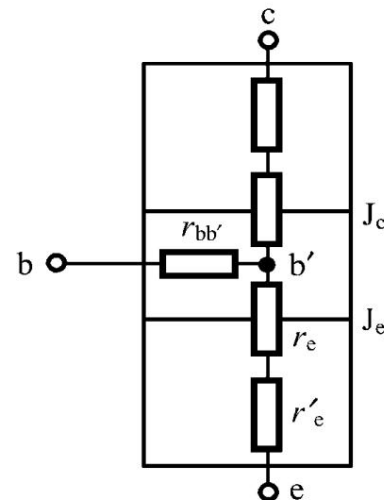
$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e}$$

$$r_{b'e} = (1 + \beta_0) \frac{V_T}{I_E}$$

$$g_m \dot{V}_{b'e} = \beta_0 \dot{I}_b \quad \dot{V}_{b'e} = \dot{I}_b r_{b'e}$$

$$g_m = \frac{\beta_0}{r_{b'e}} = \frac{\beta_0}{(1 + \beta_0) \frac{V_T}{I_E}} \approx \frac{I_E}{V_T}$$

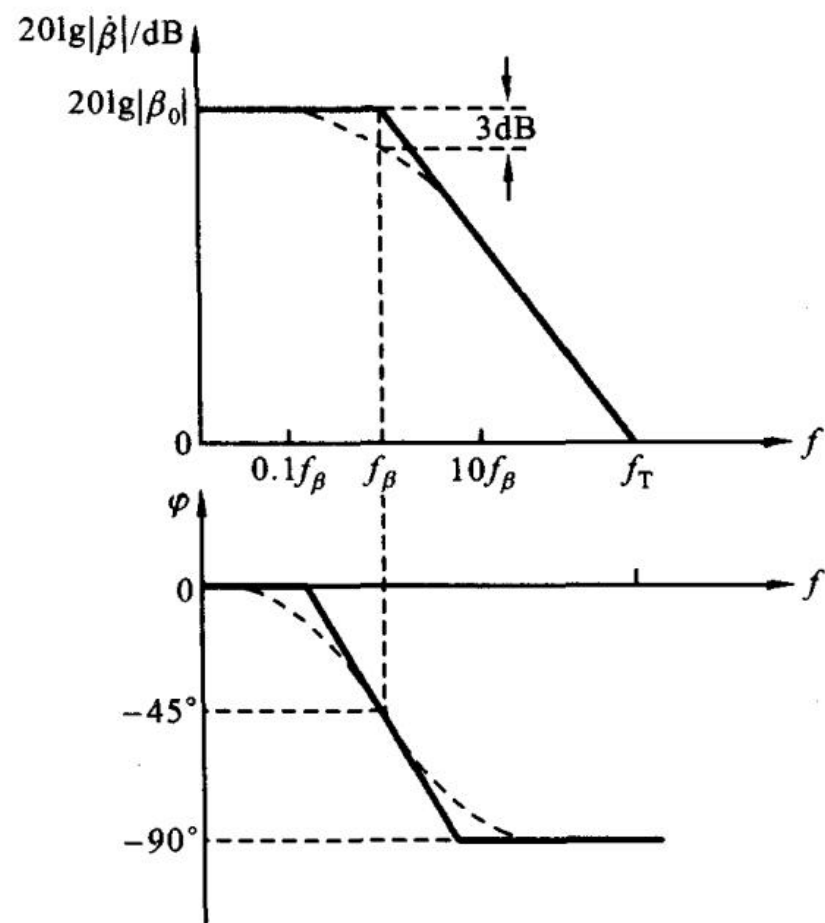
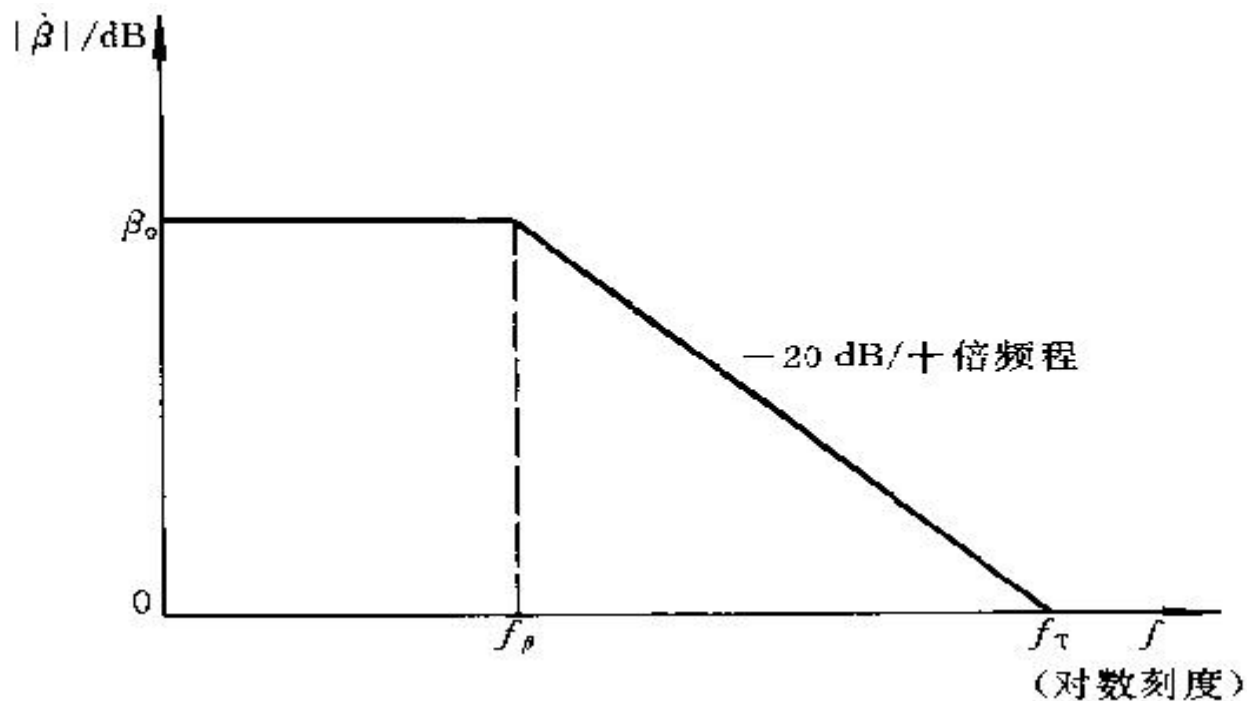
$$C_{b'e} = \frac{g_m}{2\pi f_T}$$





BJT的频率参数-共发射极截止频率 f_β

- β 有一个转折频率 f_β 的频响曲线，其值主要决定于管子的结构。





BJT的频率参数-特征频率 f_T

- 当 β 的频响曲线以-20dB/十倍频程的斜率下降，直至增益为0dB时（增益为1）的某一频率 f_T 称为特征频率。

$$A_{vH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \quad \varphi_H = -\arctg(f / f_H)$$

$$|\dot{\beta}| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + (f/f_\beta)^2}}$$

$$\varphi = -\arctan \frac{f}{f_\beta}$$

$$\begin{aligned} f_T &= \beta_0 f_\beta \\ &= \frac{g_m}{2\pi(C_{b'e} + C_{b'c})} \approx \frac{g_m}{2\pi C_{b'e}} \end{aligned}$$



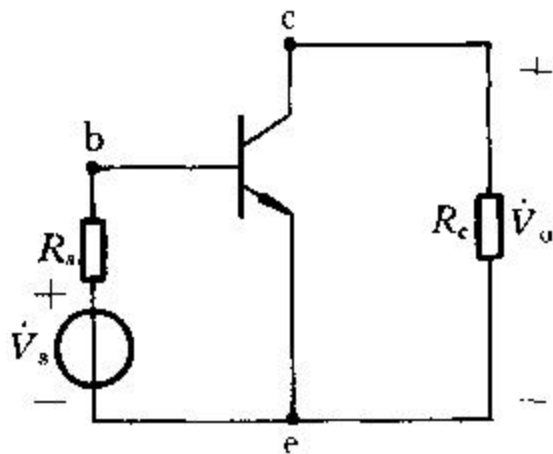
密勒电容



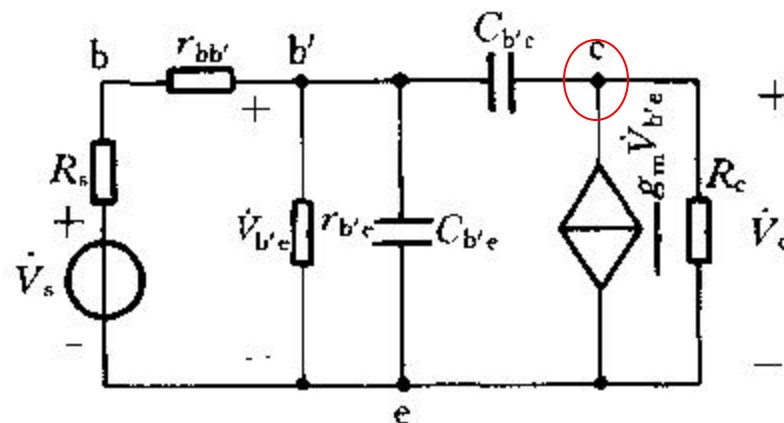
- 对于集电极节点，按照KCL得

$$g_m \dot{V}_{b'e} + \frac{\dot{V}_o}{R_c} + \left(\dot{V}_o - \dot{V}_{b'e} \right) j\omega C_{b'c} = 0$$

$$\dot{V}_o \approx -g_m R_c \dot{V}_{b'e} \quad \text{忽略最后一项}$$



(a)



(b)



密勒电容



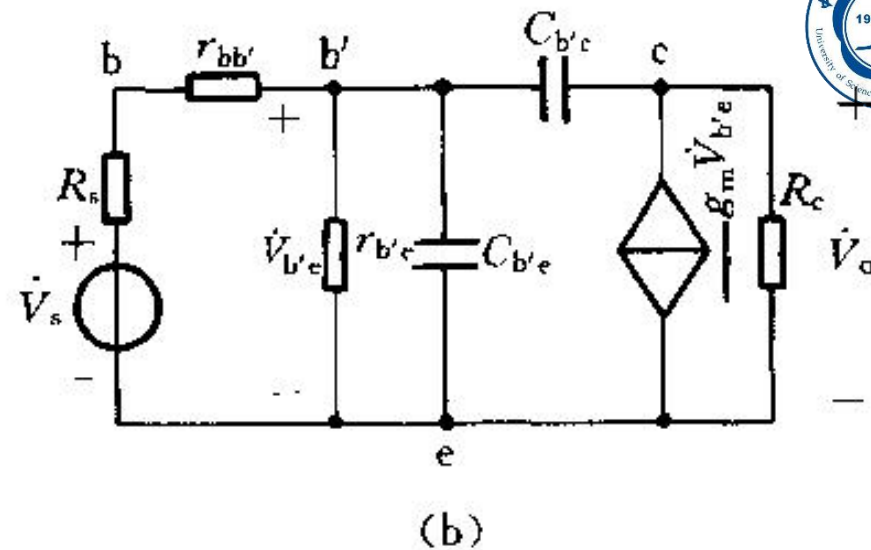
$$\dot{I}_{C_{b'c}} = \left(\dot{V}_{b'e} - \dot{V}_o \right) j\omega C_{b'c} \quad \dot{V}_o \approx -g_m R_c \dot{V}_{b'e}$$

$$\dot{I}_{C_{b'c}} = (1 + g_m R_c) j\omega C_{b'c} \dot{V}_{b'e}$$

$$\frac{\dot{I}_{C_{b'c}}}{\dot{V}_{b'e}} = j\omega (1 + g_m R_c) C_{b'c}$$

$$C_M = (1 + g_m R_c) C_{b'c} = \left(1 - \dot{A}_V' \right) C_{b'c}$$

- C_M 称为密勒电容，由于 $C_{b'c}$ 的存在，相当于在输入端接入一个比 $C_{b'c}$ 大 A_V 倍的电容。



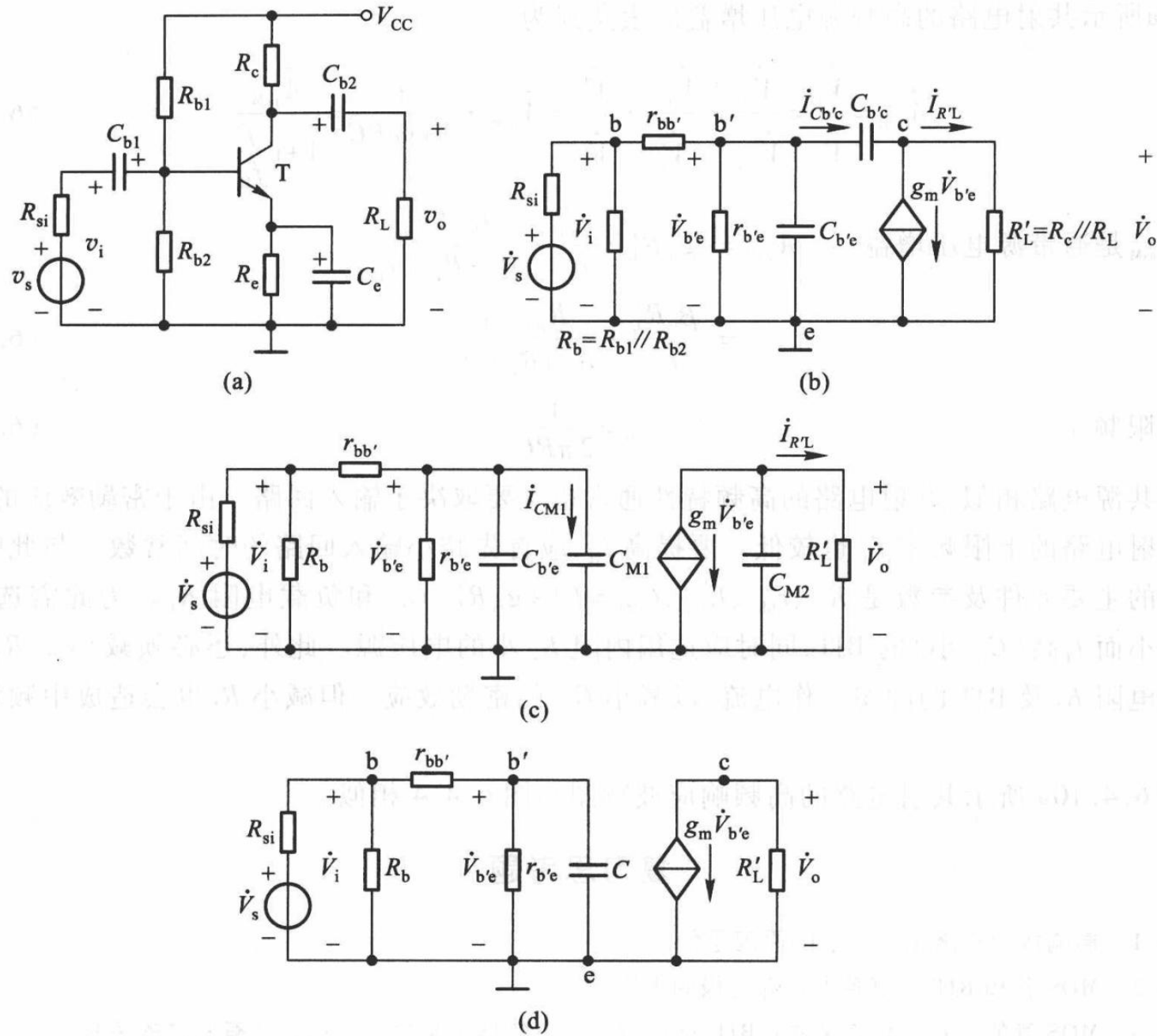


图 6.4.10 共射电路及其高频小信号等效电路

(a) 共射电路原理图 (b) 图 a 的高频小信号等效电路 (c) 图 b 的密勒等效电路 (d) 图 c 的简化电路



高频响应与上限频率

- 将密勒效应图简化，令

$$C = C_{b'e} + C_M \quad R = (R_s + r_{bb'}) \parallel r_{b'e}$$

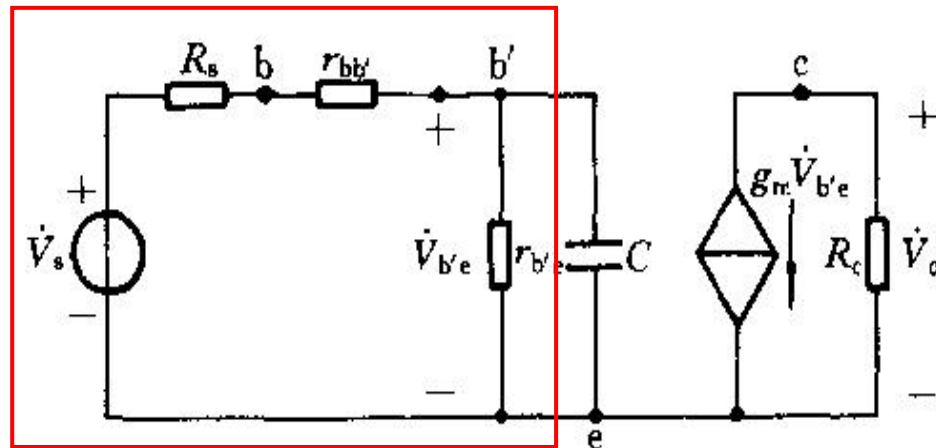
$$\dot{V}_s' = \frac{\dot{V}_s r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}}$$

$$\dot{V}_{b'e} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \dot{V}_s' \quad \dot{V}_o = -g_m \dot{V}_{b'e} R_c$$

$$A_{VH} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{-g_m R_c}{1 + j\omega RC} \cdot \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}}$$

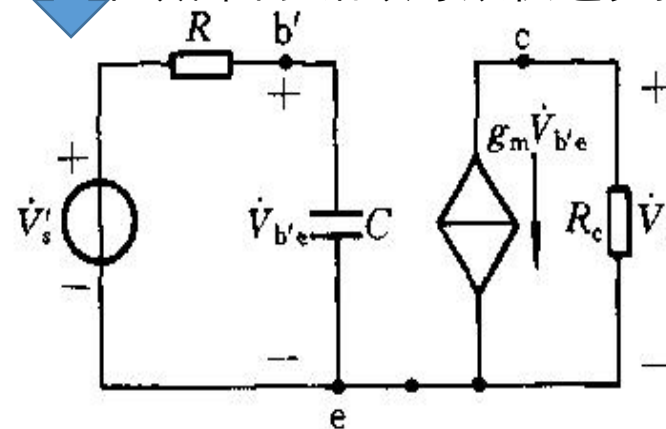
$$= \frac{A_{V0}}{1 + j(f/f_H)}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC}$$



(a)

由戴维南/诺顿等效快速变换得到化简



(b)

图 3.7.9

(a) 图 3.7.8b 的密勒近似电路 (b) 简化等效电路





增益-带宽积

$$C = C_{b'e} + C_M \quad R = (R_s + r_{bb'}) \parallel r_{b'e}$$



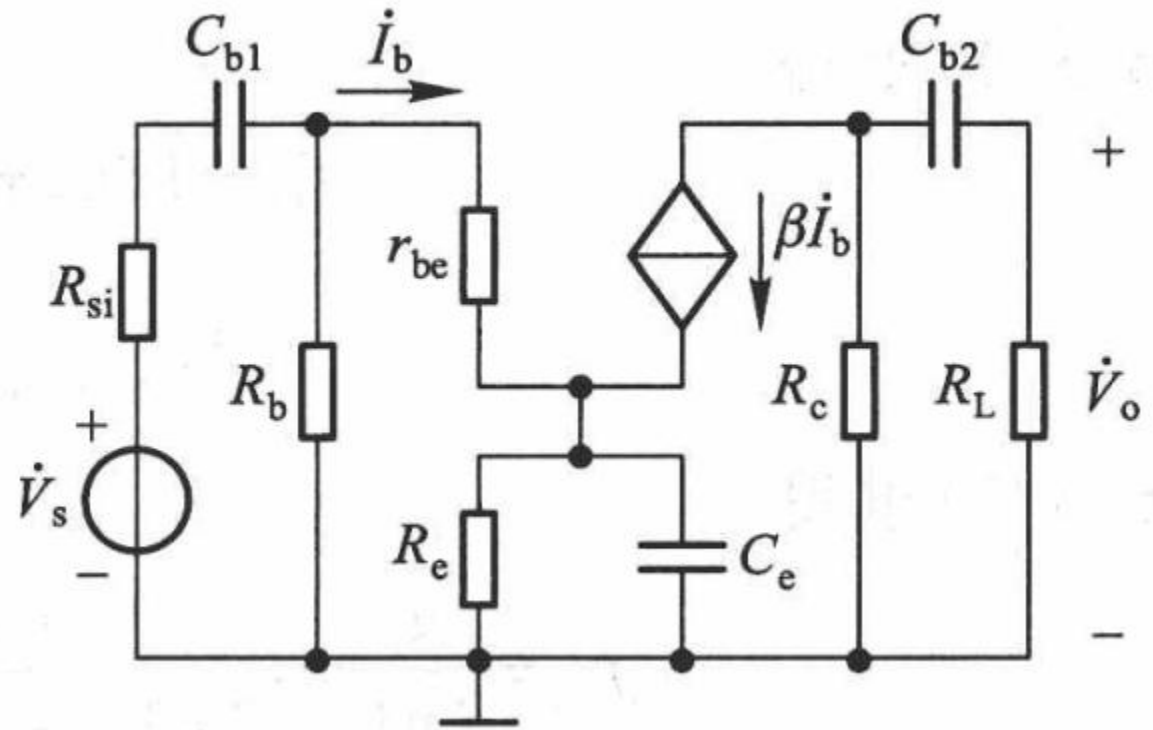
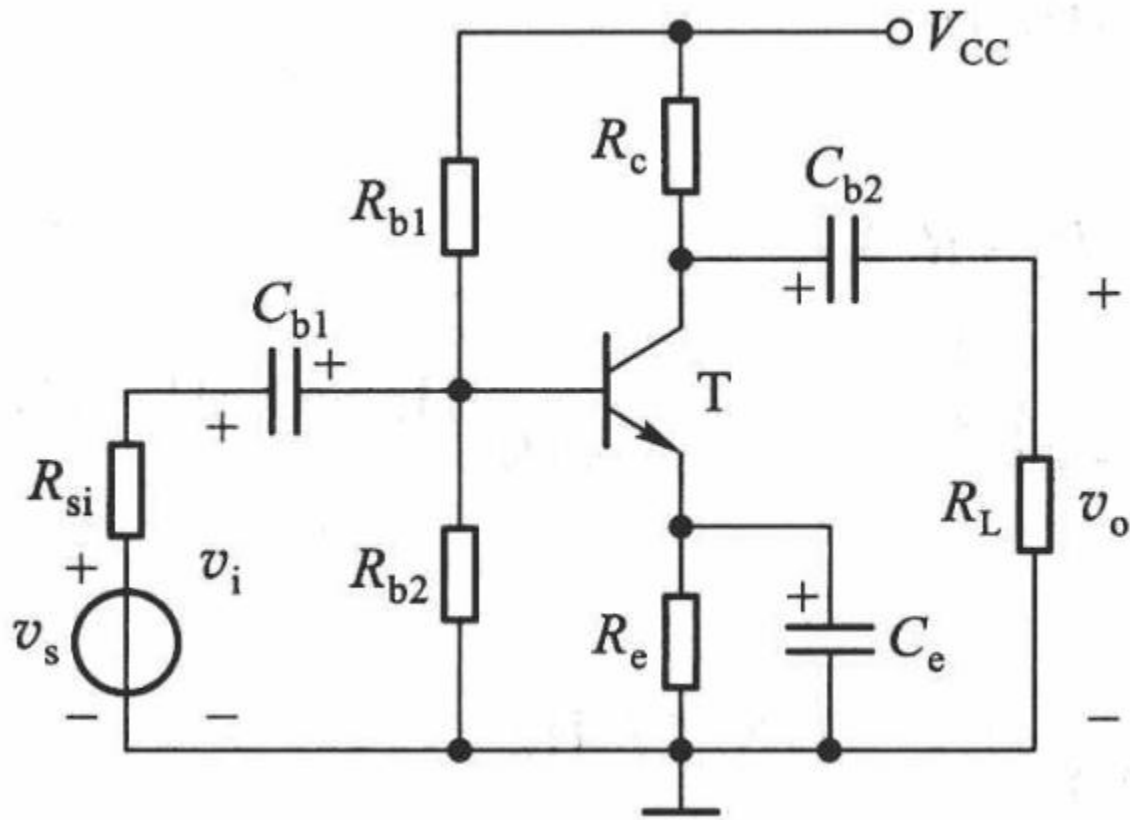
- 将低频电压增益与通频带相乘所得的乘积称为增益-带宽积。
- 当电路参数及BJT都选定后，**增益-带宽积是个常数**，因此放大电路的低频电压增益与通频带存在矛盾。
- 要提高低频电压增益，可增加 R_c ，但 R_c 增加后，密勒效应显著，密勒电容的作用将使 $\dot{V}_o$ 随频率增加而急剧减小，引起通频带变窄。

$$\begin{aligned} \left| \dot{A}_{V0} \cdot f_H \right| &= g_m R_c \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \cdot \frac{1}{2\pi R C} \\ &= \frac{g_m R_c}{2\pi (R_s + r_{bb'}) [C_{b'e} + C_{b'c} (1 + g_m R_c)]} \end{aligned}$$



单级放大电路的低频响应

- 放大电路的低频响应主要取决于外接的电容器，如隔直(耦合)电容和射极旁路电容。



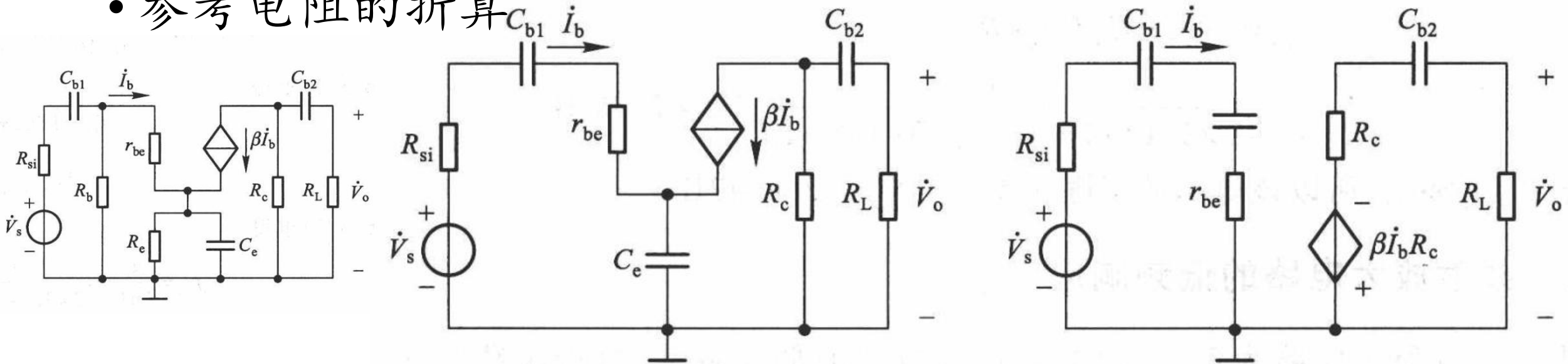


低频等效电路的简化

- 假设 R_b 远大于放大电路本身的输入阻抗，它的影响可以忽略。
- 假设 C_e 的值足够大，在信号频率范围内，它的容抗 X_{C_e} 远小于 R_e 的值， R_e 可以除去。
- 把 C_e 折算到基极电路，折算后的容抗为
- 参考电阻的折算

$$X_{C_e} = (1 + \beta) \frac{1}{\omega C_e} = \frac{1}{\omega C'_e}$$

$$C'_e = \frac{C_e}{1 + \beta}$$



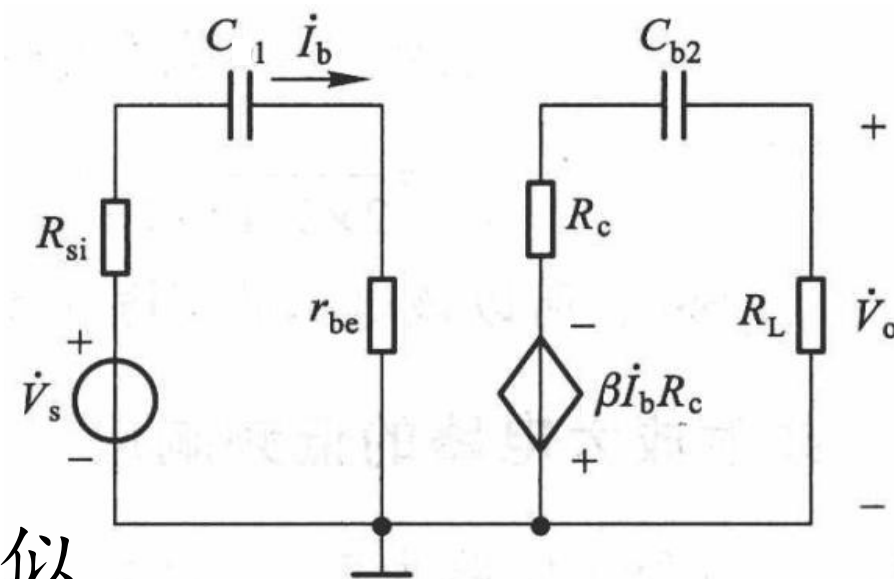


低频等效电路的简化

- 基极回路中的总电容 C_1 可按下式计算

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_{b1}} + \frac{1+\beta}{C_e}$$

- 低频响应及下限频率
- 输入回路和输出回路和RC高通电路相似



$$\dot{A}_{VL} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = -\frac{\beta R'_L}{R_s + r_{be}} \cdot \frac{1}{1 - j/\omega C_1 (R_s + r_{be})} \cdot \frac{1}{1 - j/\omega C_{b2} (R_c + R_L)}$$

$$\dot{A}_{VM} = -\frac{\beta R'_L}{R_s + r_{be}}$$

中频区电压增益



转折频率



$$\frac{\dot{A}_{VL}}{\dot{A}_{VM}} = \frac{1}{[1 - j(f_{L1} / f)][1 - j(f_{L2} / f)]}$$

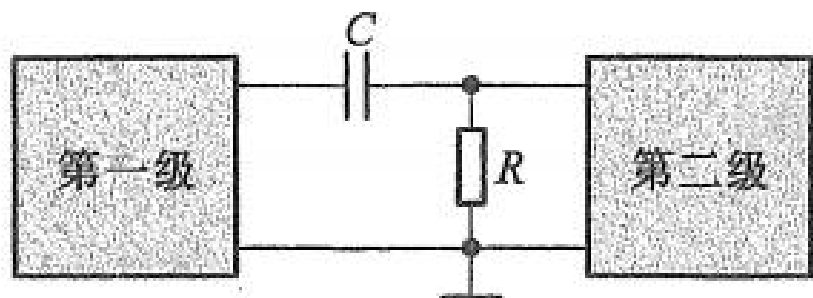
$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi C_1(R_s + r_{be})}$$

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi C_{b2}(R_c + R_L)}$$

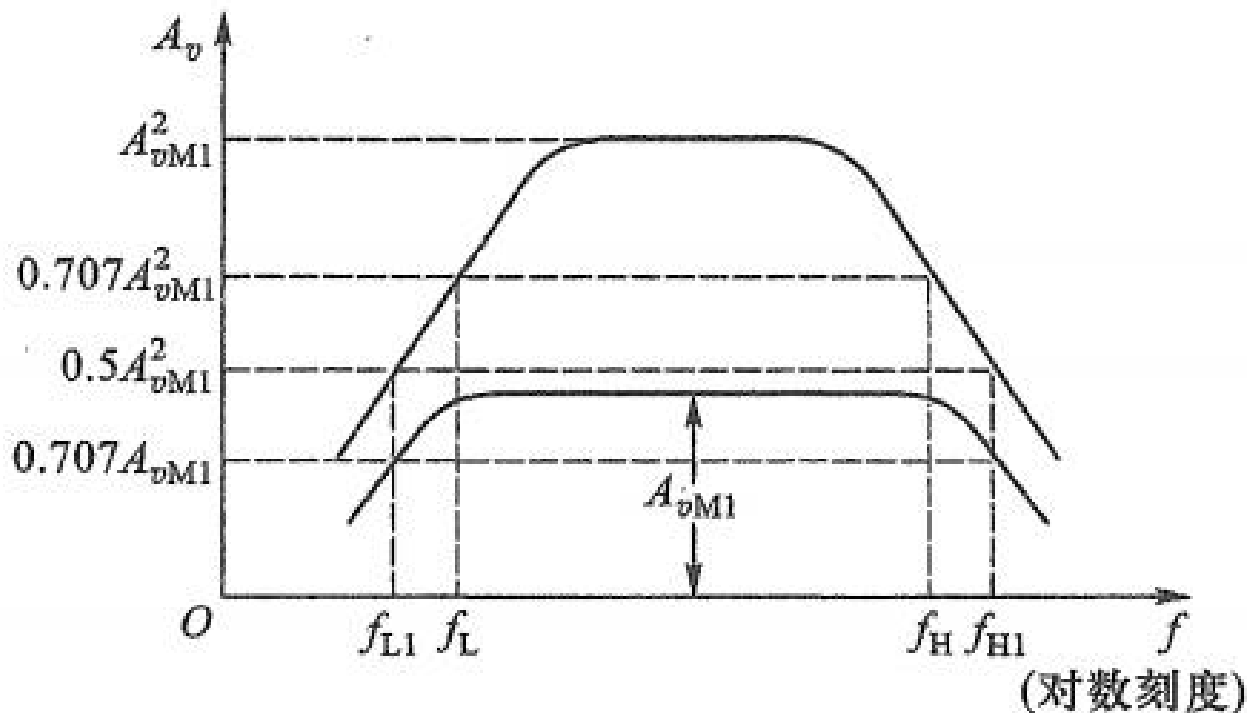
- RC耦合单级放大电路低频响应具有两个转折频率 f_{L1} 和 f_{L2} 。如果二者之间的比值在四倍以上，则可取较大的值作为放大电路的下限频率。
- 由于 C_e 在射极电路里，其电流 I_e 是基极电流 I_b 的 $(1+\beta)$ 倍，它的大小对电压增益的影响较大，因此 C_e 是决定低频响应的主要因素。



多级放大电路的频率响应



(a)



(b)

图 6.5.1 两级放大电路

(a) 两级放大电路的结构示意图 (b) 单级和两级放大电路的幅频响应



作业

- 第七版 习题六
- 6.1.6, 6.2.4, 6.3.7

