

电路分析与电子技术基础

分立元件放大电路

(1.2.2 ~ 1.5)

n 分立元件放大电路

ü 由分立元件构成的放大电路（区别于集成电路）。

✓ 三组态放大电路（动态）分析（1.2.2）

✓ 多级放大电路（1.4）

✓ 放大电路的频率特性（1.5）

✓ 三组态放大电路（动态）分析

ü 三组态：

三极管（共射、共集、共基）；

场效应管（共源、共漏、共栅）。

ü 放大电路的分析步骤：先静态，后动态。

ü 静态分析：直流通路，直流（区域）模型，静态工作点；

动态分析：交流通路，交流小信号模型，微变等效电路，动态参数。

Ø 动态分析

ü 在放大电路交流通路基础上，假定放大器件工作在线性放大区内，利用其小信号模型建立放大电路的微变等效电路，计算电压放大倍数、输入电阻、输出电阻等动态性能指标。

ü 分析的一般步骤：

求静态工作点，根据 Q 点计算小信号模型参数，如 r_{be} ；

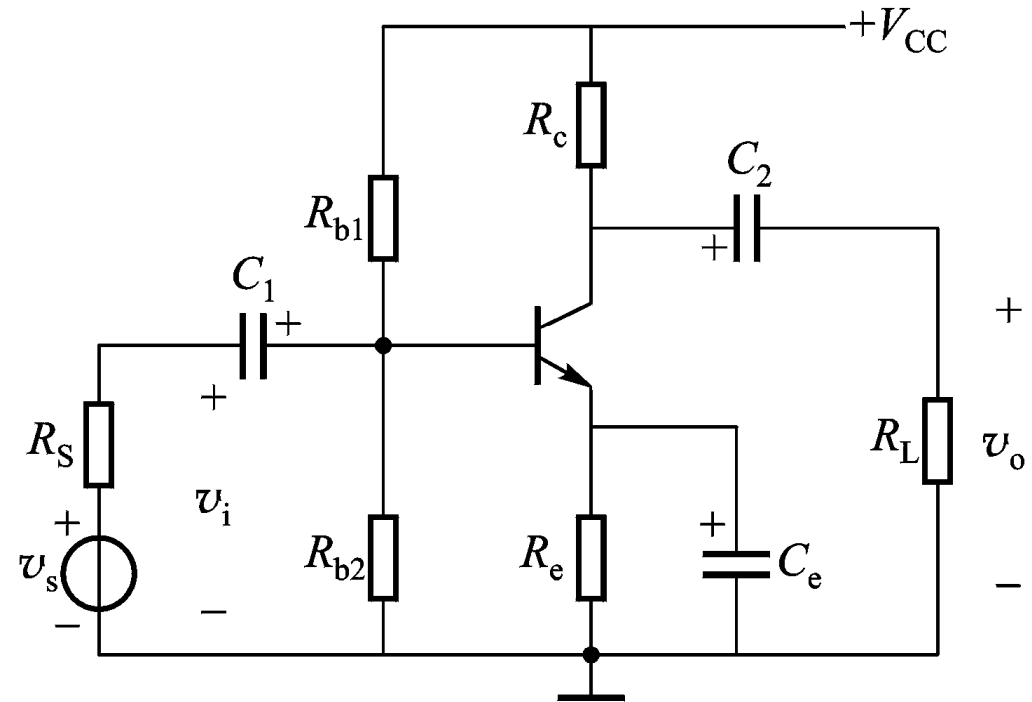
确定交流通路；

画出微变等效电路；

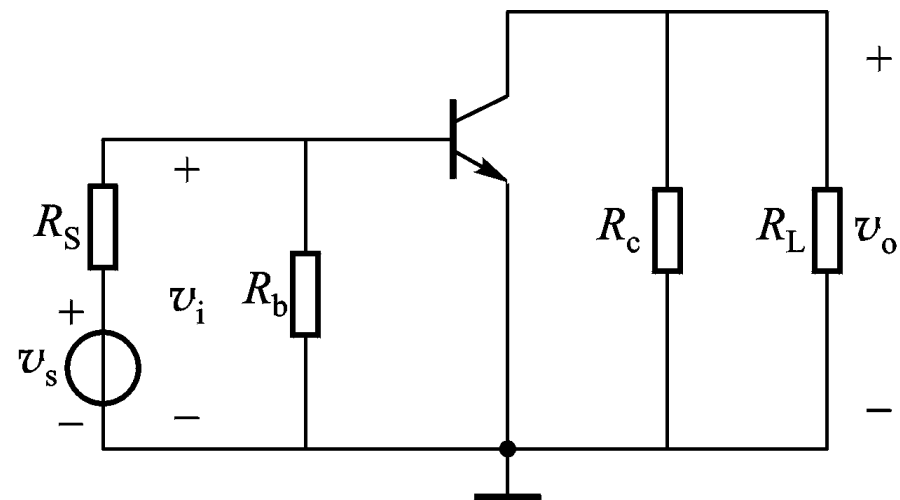
用电路原理法计算动态性能指标（如 A_v 、 R_i 、 R_o ）。

Ø 共射放大电路

ü 右图所示共射放大电路。

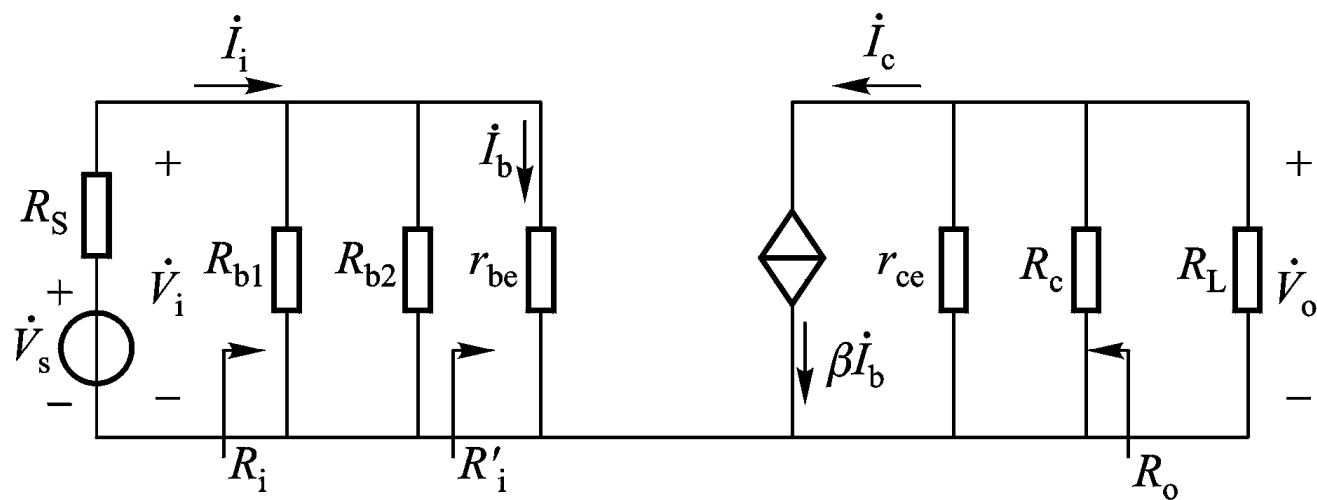


ü 对应的交流通路图。

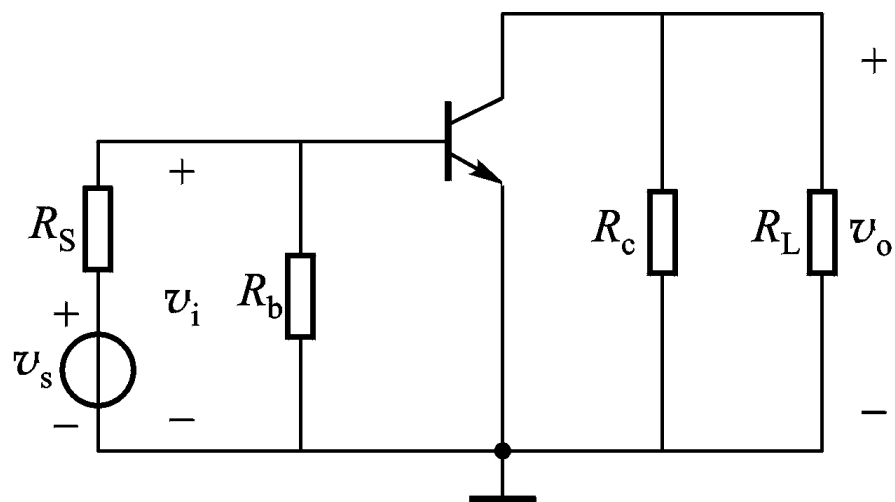


共射放大电路

对应的微变等效（小信号模型）电路图。

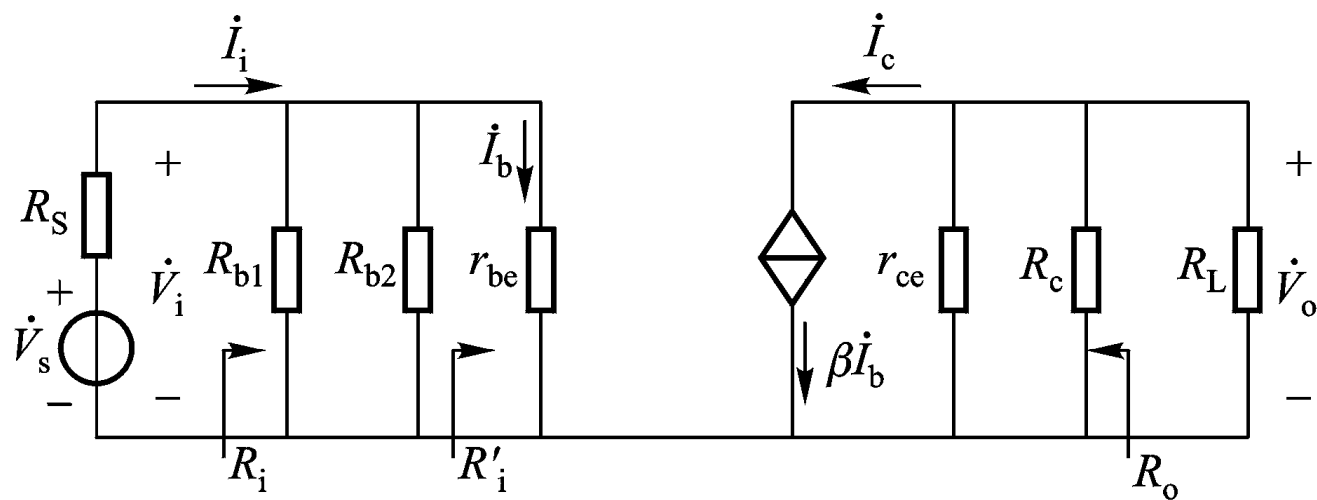


对应的交流通路图。



Ø 共射放大电路

ü 对应的微变等效（小信号模型）电路图。

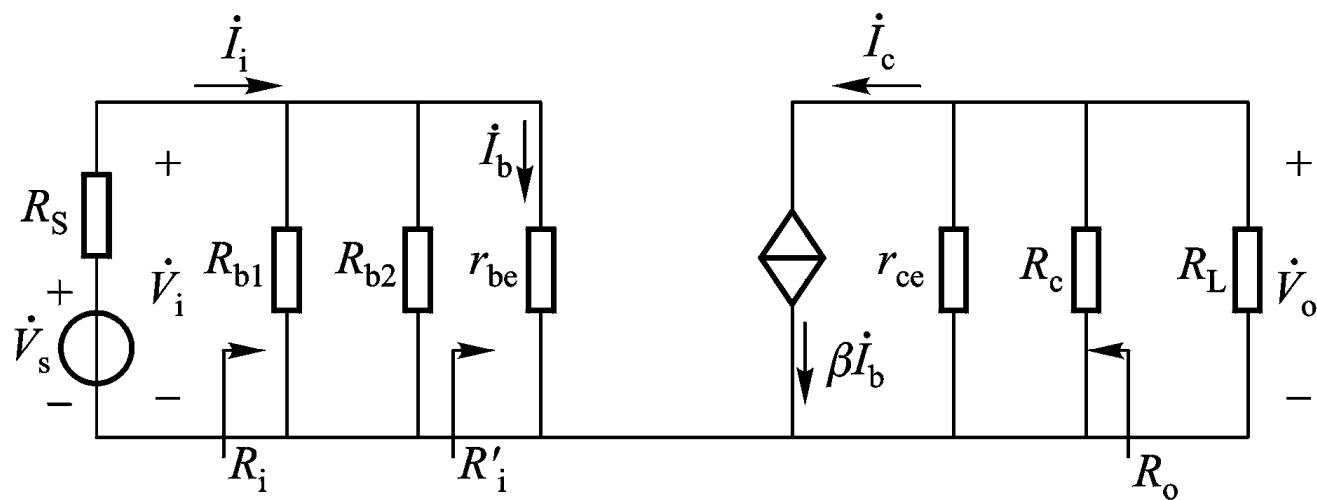


ü 电压放大倍数: $A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{b R'_L}{r_{be}}$

$$\begin{cases} V_o = -b A_b R'_L \\ V_i = A_b r_{be} \end{cases}$$

Ø 共射放大电路

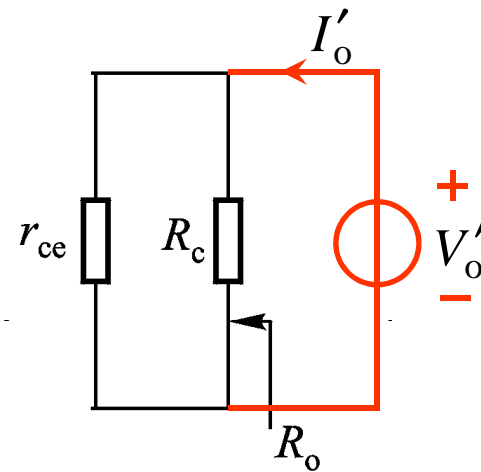
ü 对应的微变等效（小信号模型）电路图。



ü 输入电阻: $R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$

Ø 共射放大电路

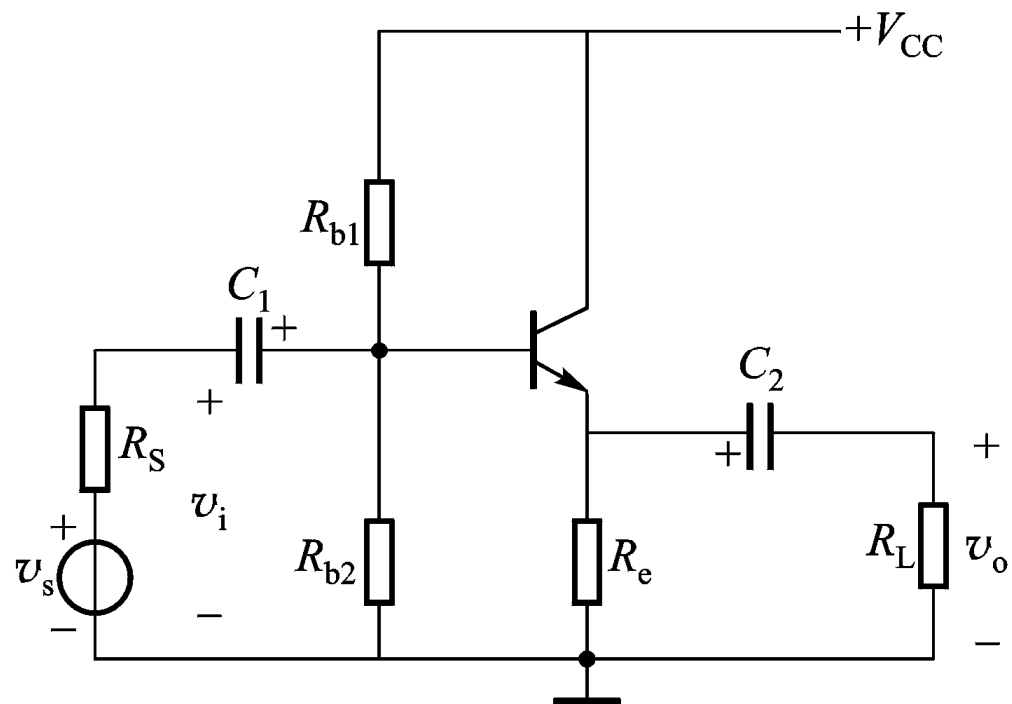
ü 对应的微变等效（小信号模型）电路图。



ü 输出电阻: $R_o = \left. \frac{V'_o}{I'_o} \right|_{V_s=0, R_L=\infty} = R_c$

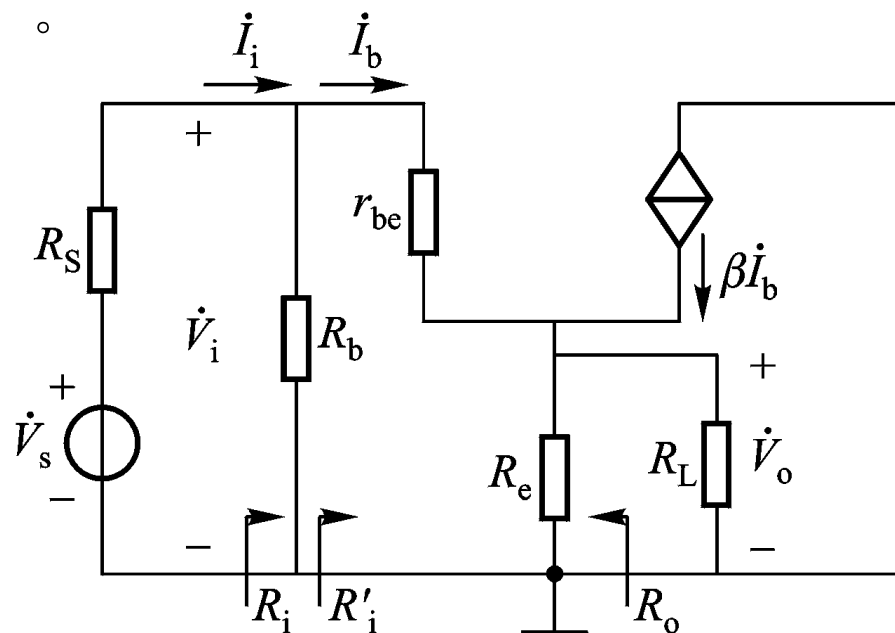
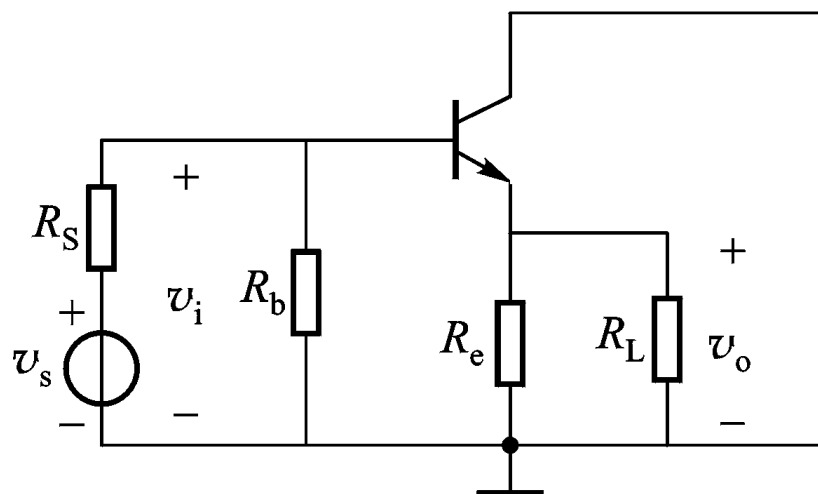
Ø 共集放大电路

ü 右图所示共集放大电路。



ü 对应的交流通路图（下）。

ü 对应的微变等效电路图（右下）。



Ø 共集放大电路

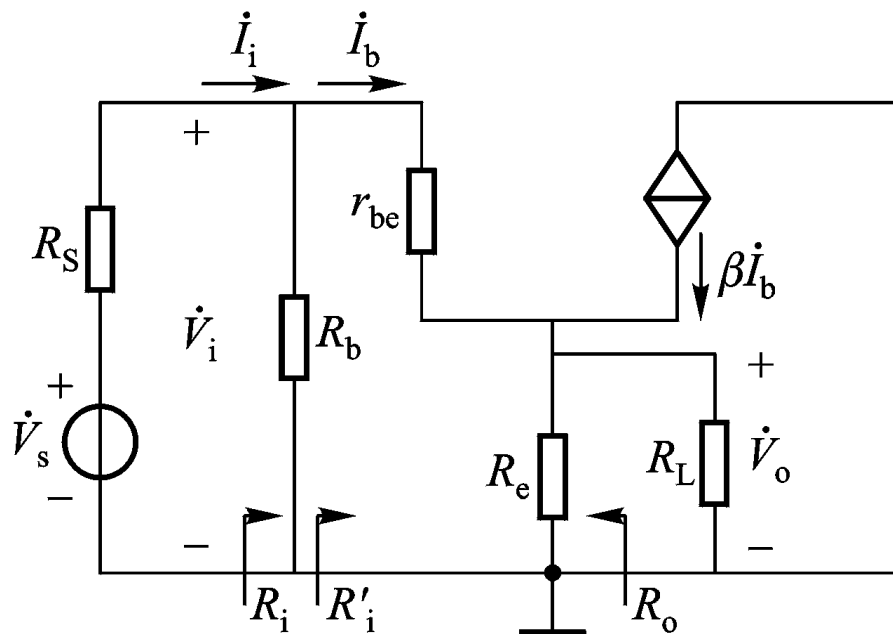
ü 电压放大倍数: $A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(1+b)R'_L}{r_{be} + (1+b)R'_L} \leq 1$ 且 ≈ 1

$$\begin{cases} V_o = A_e R'_L = (1+b)A_b R'_L \\ V_i = A_b r_{be} + A_e R'_L = A_b [r_{be} + (1+b)R'_L] \end{cases}$$

射极输出器
电压跟随器

ü 输入电阻:

$$\begin{aligned} R'_i &= \frac{V_i}{A_b} = r_{be} + (1+b)R'_L \\ R_i &= \frac{V_i}{A_i} = R_b // R'_i \\ &= R_b // [r_{be} + (1+b)R'_L] \end{aligned}$$

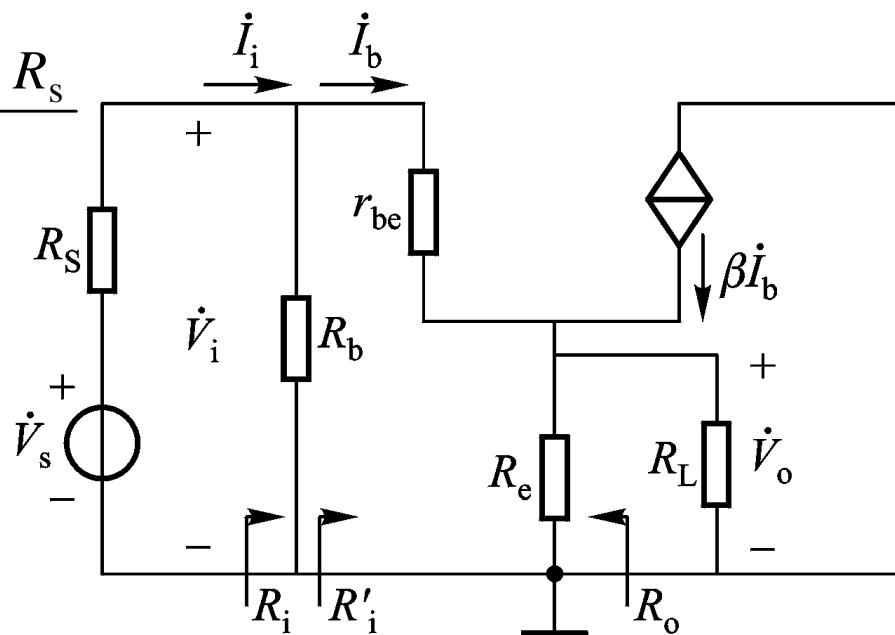
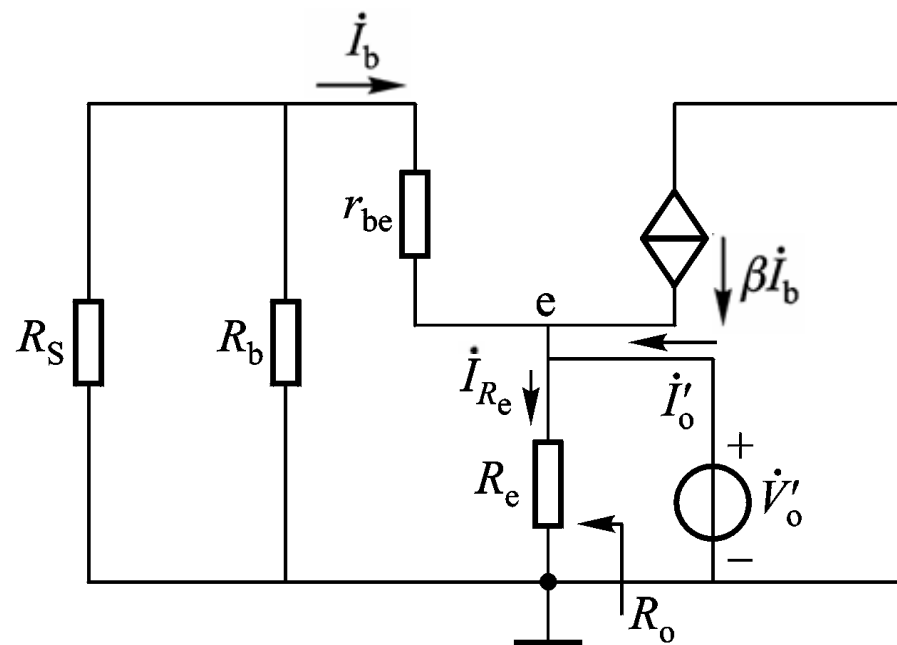


Ø 共集放大电路

$$\begin{aligned} \dot{A}_o &= \dot{A}_{R_e} - (1 + \beta) \dot{A}_b \\ &= \frac{\dot{V}_o}{R_e} + (1 + \beta) \frac{\dot{V}_o}{r_{be} + R_b // R_s} \end{aligned}$$

ü 输出电阻: $R_o = \left. \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} \right|_{V_s=0, R_L=\infty}$

$$= R_e // \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1 + \beta}$$



共基放大电路

右图所示共基放大电路。
右下图所示其微变等效电路图。

电压放大倍数：

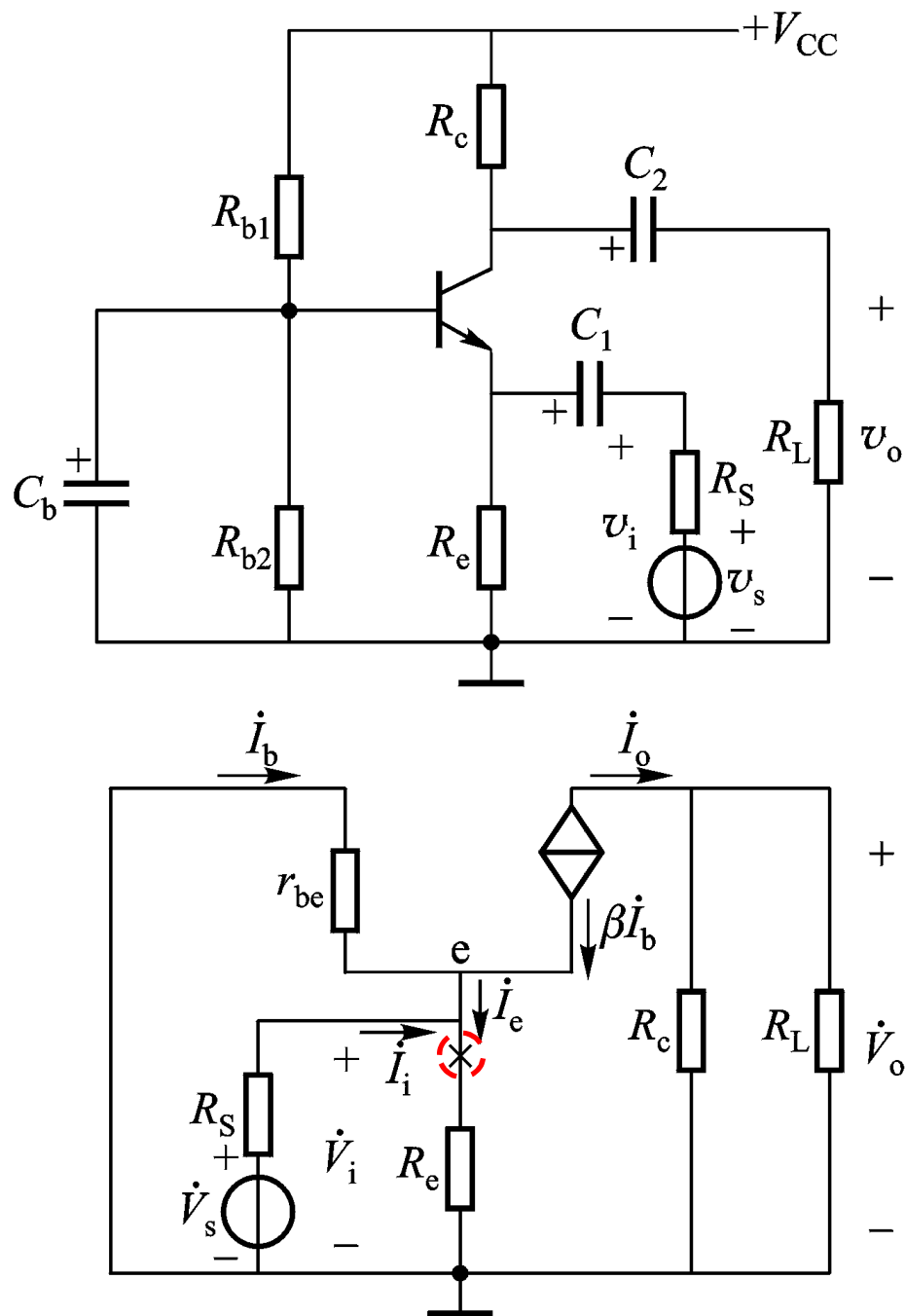
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-b \beta R'_L}{-r_{be}} = \frac{b \beta R'_L}{r_{be}}$$

输入电阻：

$$R'_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{-r_{be}}{-(1+\beta)I_b} = \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

$$R_i = R_e // R'_i = R_e // \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

输出电阻： $R_o = R_c$



Ø 三组态放大电路性能比较

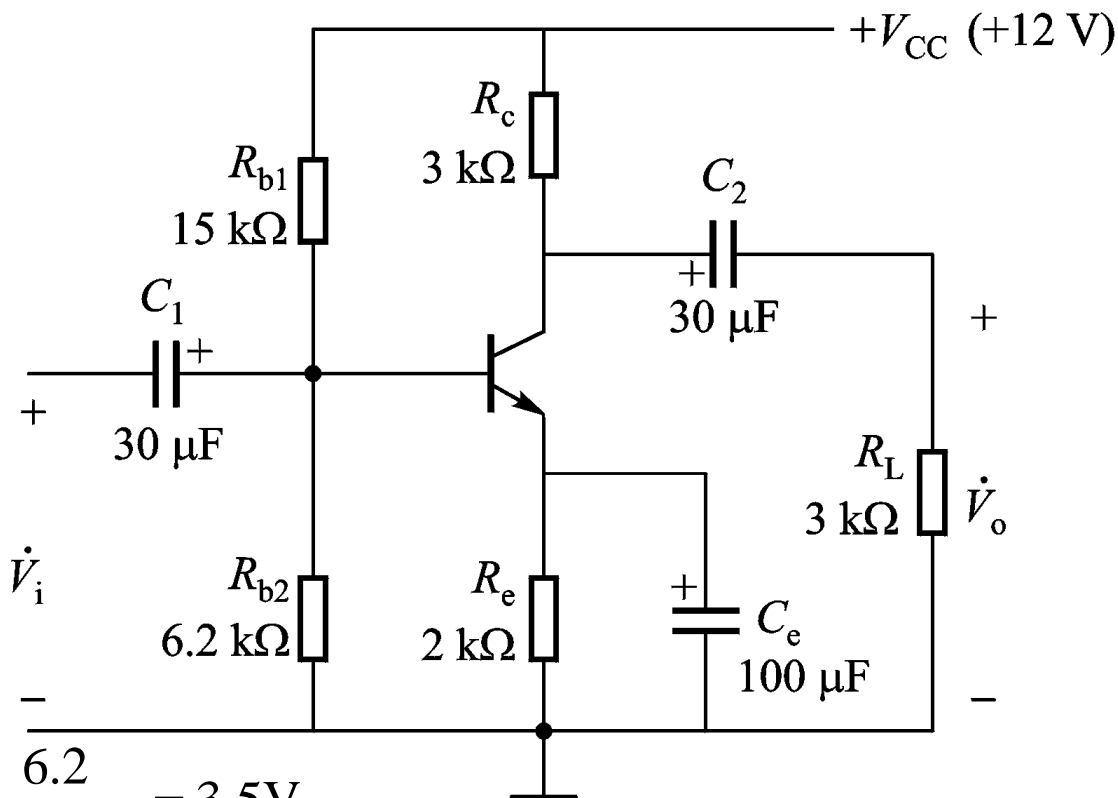
| | 电压增益 | 输入电阻 | 输出电阻 | 特点 | 用途 |
|------------|-------------|-------------|-----------------|----------------------|---------------|
| 共射 (CE) | 反相， 增益大 | 较大 (几千欧) | 较大 (R_C) | 既有电压放大作用 又有电流放大作用 | 应用广泛 中间级 |
| 共集 (CC) | 同相， 近似为1 | 大 | 最小 | 输入电阻高 输出电阻低 | 阻抗变换、 电流放大 |
| 共基 (CB) | 同相， 增益较大 | 最小 (几十欧) | 较大 (R_C) | 频率特性好 | 宽频或高频 放大电路 |

【例1.1】

右图所示共射放大电路。

已知： $\beta=50$ 。

求：（1） A_v 、 R_i 、 R_o 。



解：戴维南等效

$$V'_B = V_{CC} \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} = 12 \times \frac{6.2}{15 + 6.2} = 3.5 \text{ V}$$

$$R_b = R_{b1} // R_{b2} = 15 // 6.2 = 4.4 \text{ k}\Omega$$

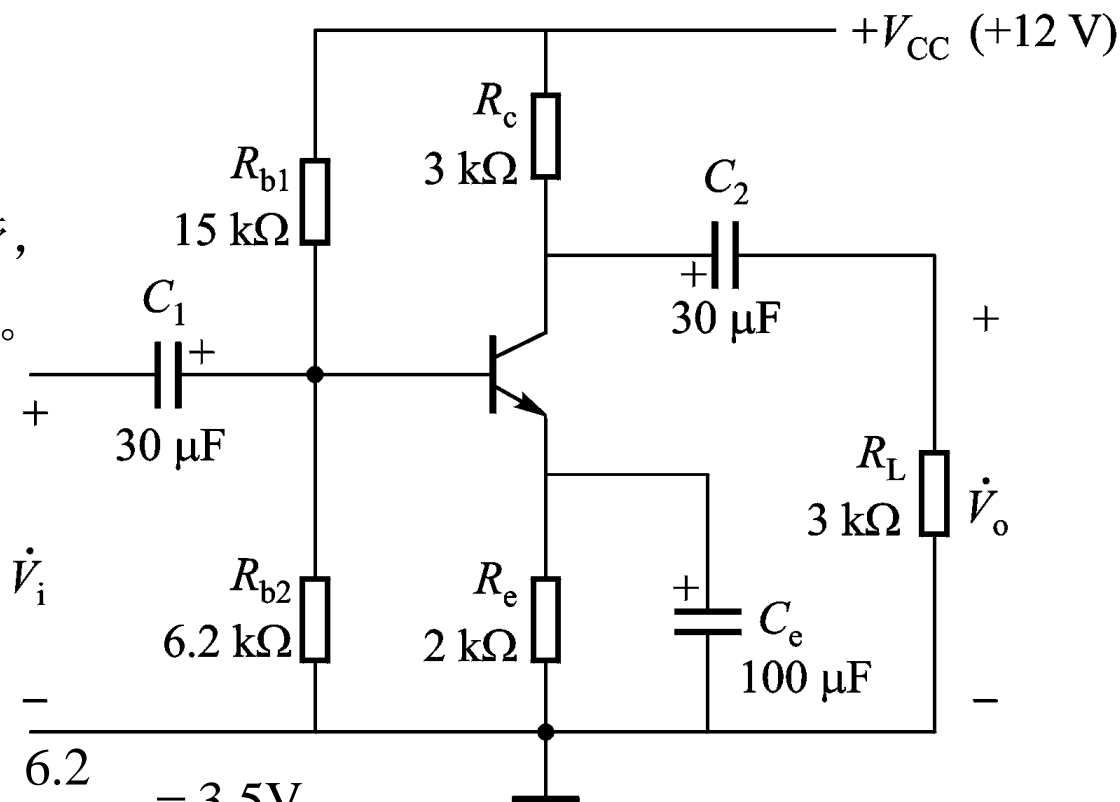
$$I_{EQ} = b \frac{V'_B - 0.7}{R_b + (1 + b)R_e} = 1.3 \text{ mA}$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + b) \frac{26 \text{ mV}}{I_{EQ}} = 200 + 51 \times \frac{26}{1.3} = 1.2 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow \begin{cases} A_v = -\frac{b(R_c // R_L)}{r_{be}} \approx -62.5 \\ R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} = 0.94 \text{ k}\Omega \\ R_o = R_c = 3 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

右图所示共射放大电路。

(2) 改用 $\beta=100$ 的三极管，
重新计算 A_v 、 R_i 、 R_o 。



解：戴维南等效

$$V'_B = V_{CC} \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} = 12 \times \frac{6.2}{15 + 6.2} = 3.5\text{V}$$

$$R_b = R_{b1} // R_{b2} = 15 // 6.2 = 4.4\text{k}\Omega$$

$$I_{EQ} = b \frac{V'_B - 0.7}{R_b + (1 + b)R_e} = 1.36\text{mA}$$

R_e 能抑制温漂，稳定静态工作点，还允许 β 在一定范围内选择。

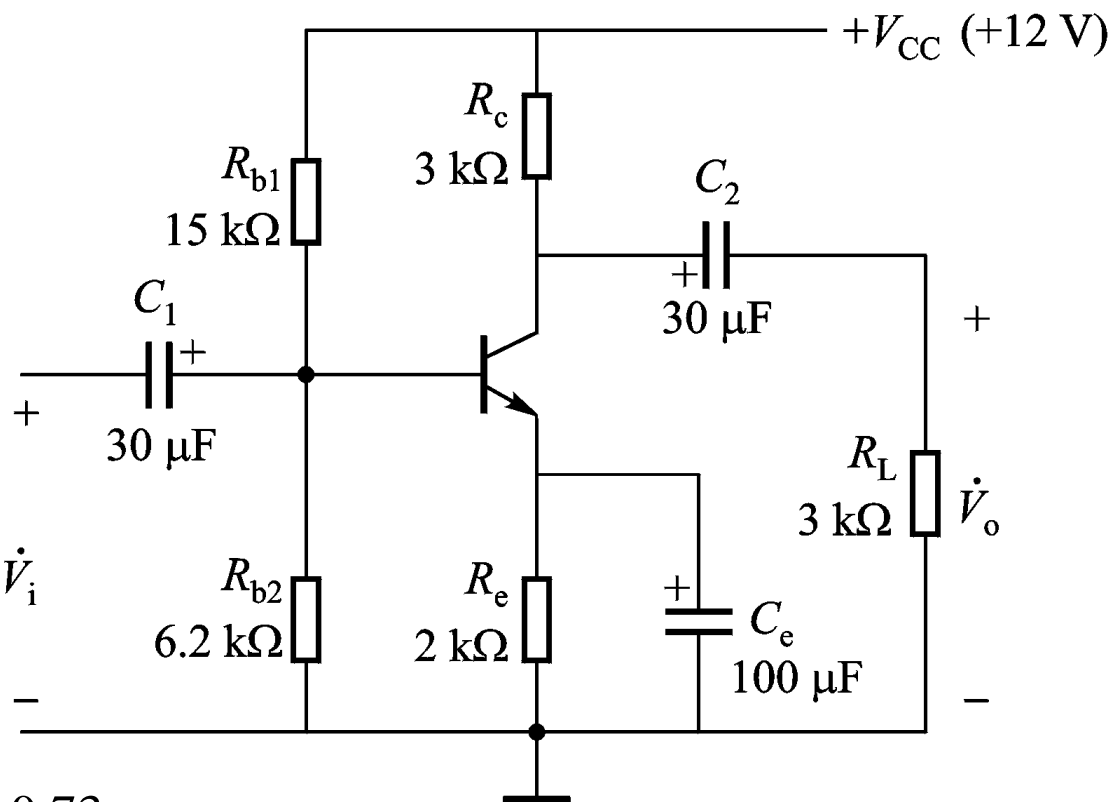
$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + b) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}} = 200 + 101 \frac{26}{1.3} = 2.2\text{k}\Omega$$

$$\Rightarrow \begin{cases} A_v = -\frac{b(R_c // R_L)}{r_{be}} \approx -71 \\ R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} = 1.4\text{k}\Omega \\ R_o = R_c = 3\text{k}\Omega \end{cases}$$

右图所示共射放大电路。

(3) 若不接 C_e ?

解：画出微变等效电路。

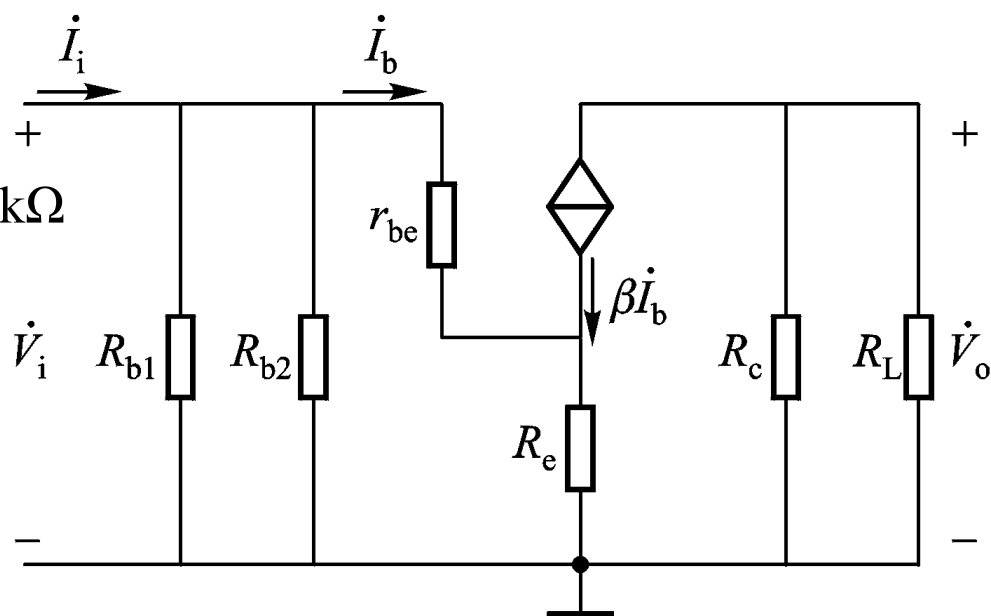


$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{b(R_c // R_L)}{r_{be} + (1+b)R_e} = -0.73$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1+b)R_e] \approx 4.2 \text{ k}\Omega$$

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

准共射放大电路



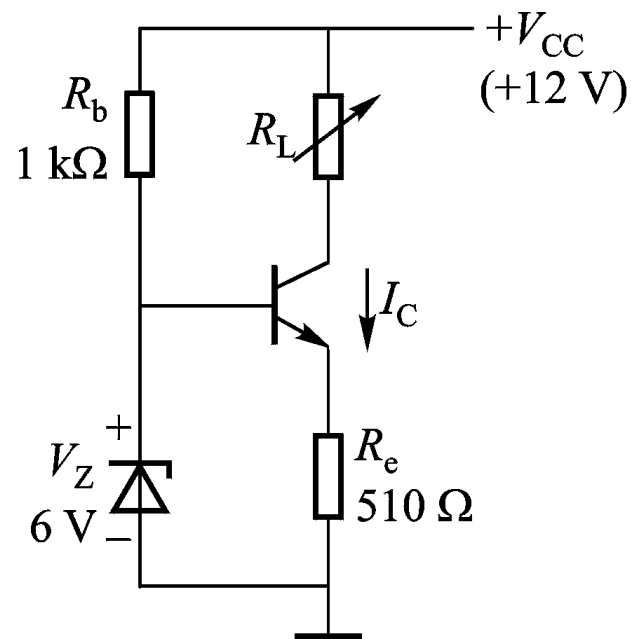
【例1.2】

右图所示电路。

已知： $\beta=50$, $r_{ce}=50\text{ k}\Omega$ 。

求： (1) I_C 与 V_Z 的关系式；
(2) 输出电阻 R_o 。

解： (1)
$$I_C = \frac{V_Z - 0.7\text{V}}{R_e} = 10.4\text{ mA}$$

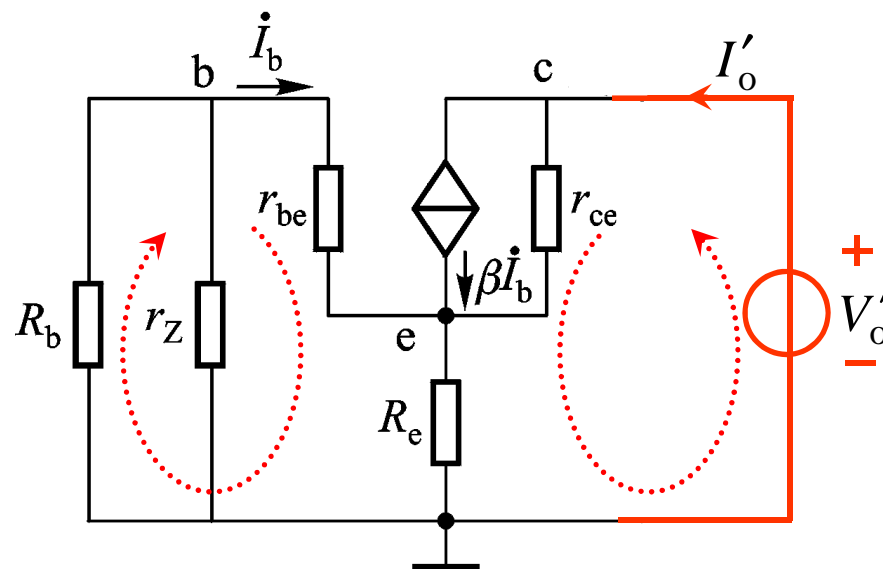


恒流源（电流源）电路

(2) 画出微变等效电路图。

$$\dot{I}_b(r_{be} + R_b // r_z) + (\dot{I}_o + \dot{I}_b)R_e = 0$$

$$(\dot{I}_o - \beta \dot{I}_b)r_{ce} + (\dot{I}_o + \dot{I}_b)R_e = \dot{V}_o$$



右图所示电路。

已知： $\beta=50$, $r_{ce}=50\text{ k}\Omega$ 。

求： (1) I_C 与 V_Z 的关系式；
(2) 输出电阻 R_o 。

解： $R_o = \frac{V_o}{I_o}$

$$= (1 + \frac{\beta R_e}{r_{be} + R_e + R_b // r_z}) r_{ce} + R_e // (r_{be} + R_b // r_z)$$

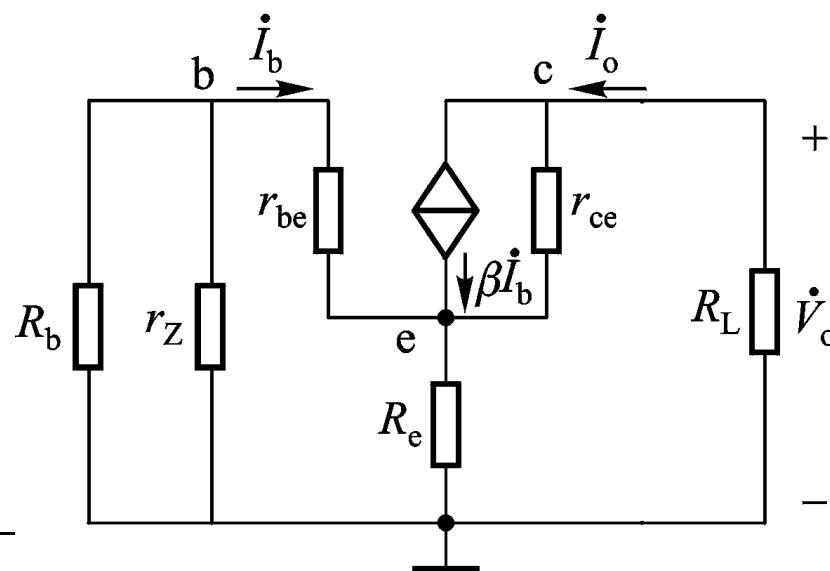
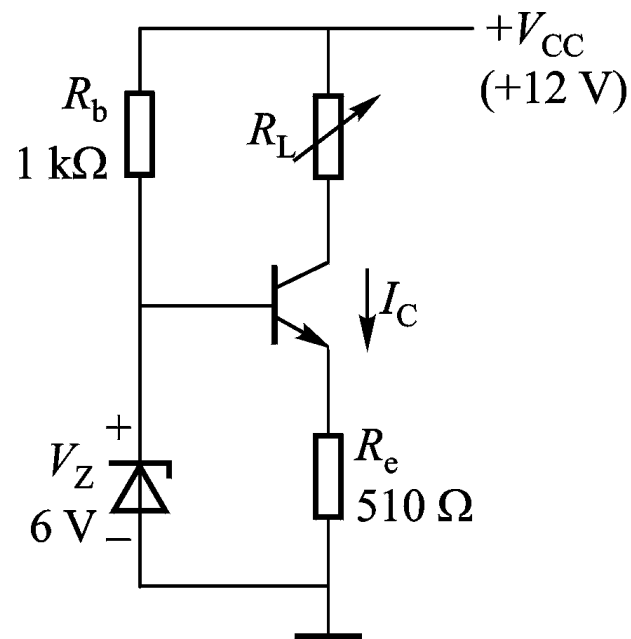
$$\approx (1 + \frac{\beta R_e}{r_{be} + R_e}) r_{ce} \approx \beta r_{ce}$$

$$= 1.78\text{M}\Omega \quad (r_{be} \approx 228\Omega)$$

$$I_o(r_{be} + R_b // r_z) + (I_o + I_b)R_e = 0$$

$$(I_o - \beta I_b)r_{ce} + (I_o + I_b)R_e = V_o$$

该电路有很高的输出电阻，
具有较理想的恒流源（电流源）特性。



右图所示电路。

已知： $\beta=50$, $r_{ce}=50\text{ k}\Omega$ 。

求：（3）分析当负载电阻 R_L 改变时，
电流源的静态工作条件。

解：若 R_L 增加，则 V_{CEQ} 减小。

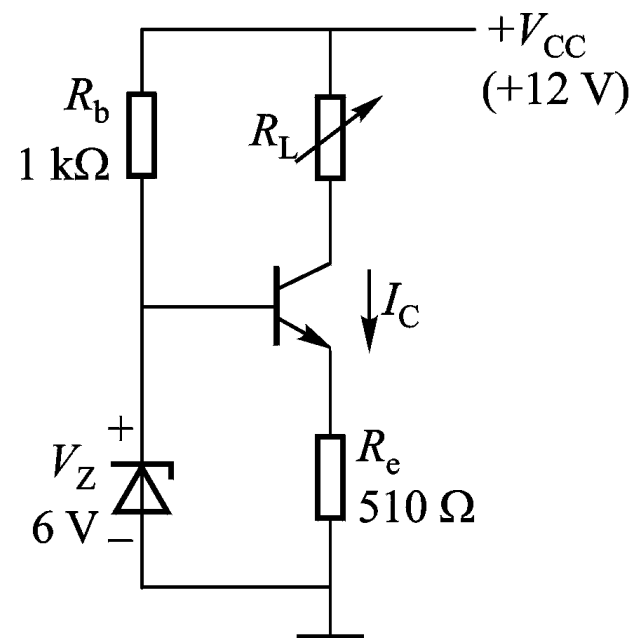
当 $V_{CEQ} < 0.7\text{V}$ 时，晶体管进入饱和区。

此时， $I_{CQ} \neq I_{EQ}$ ，因而 I_{CQ} 无法继续保持恒流。

所以： $V_{CEQ} = V_{CC} - (R_e + R_L)I_{CQ} \geq 0.7\text{V}$

$$R_L \leq \frac{V_{CC} - 0.7}{I_{CQ}} - R_e = \frac{12 - 0.7}{10.4} - 0.51 \approx 576\Omega$$

该恒流源（电流源）电路仅允许负载 R_L 在 $0 \sim 576\Omega$ 之间变化



共源放大电路

右图所示共源放大电路。

右下图所示其微变等效电路图。

电压放大倍数：

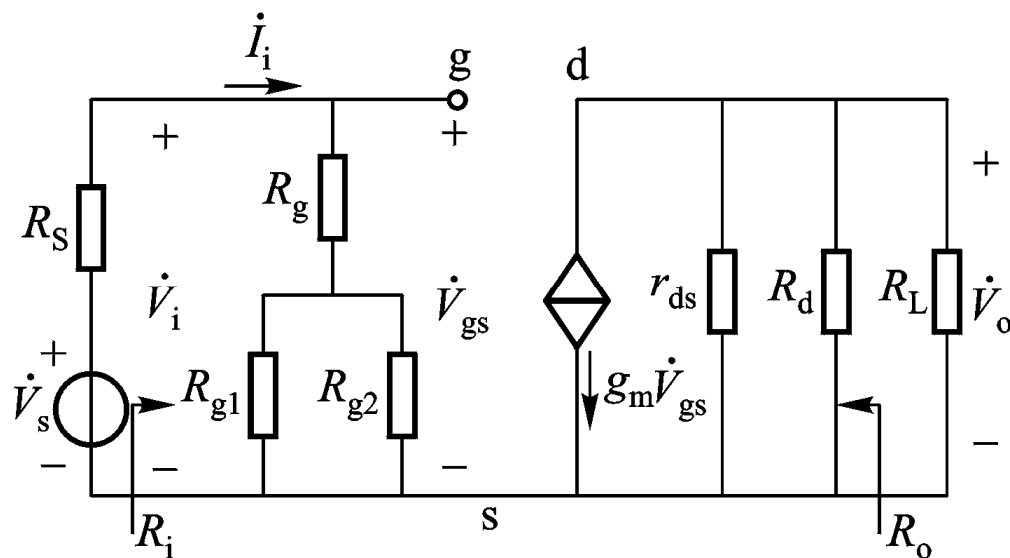
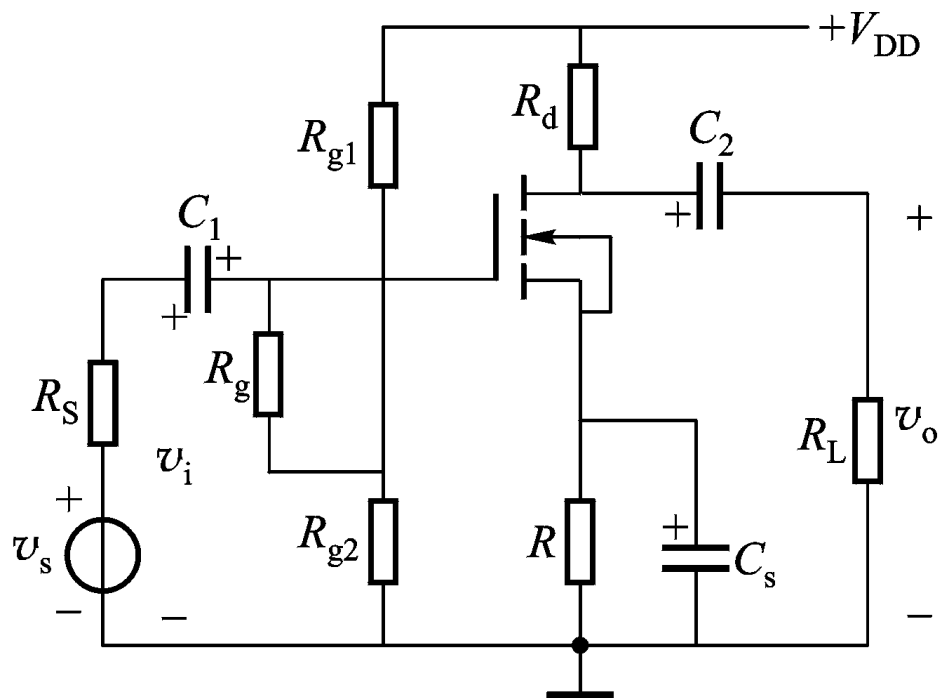
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v_{gs} R'_L}{v_{gs}} = -g_m R'_L$$

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

输入电阻：

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_g + R_{g1} // R_{g2}$$

输出电阻： $R_o = R_d$



共漏放大电路

右图所示共漏放大电路。
右下图所示其微变等效电路图。

电压放大倍数：

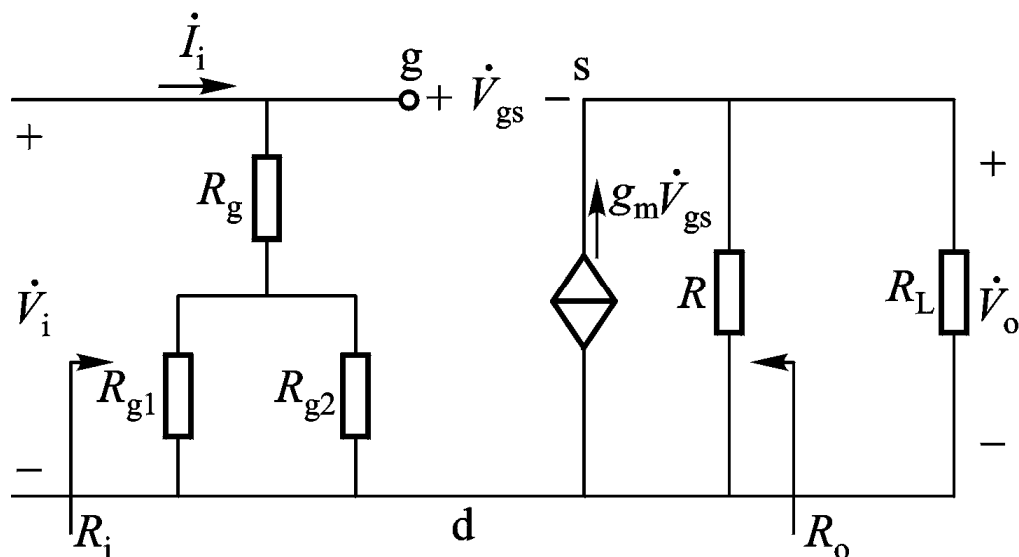
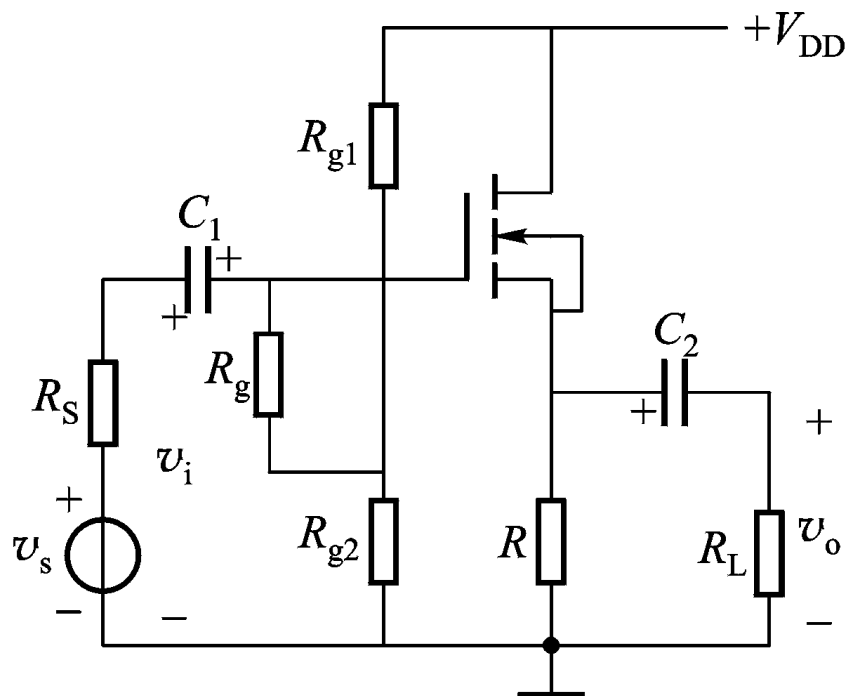
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{g_m V_{gs} R'_L}{V_{gs} + g_m V_{gs} R'_L}$$

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

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

输入电阻：

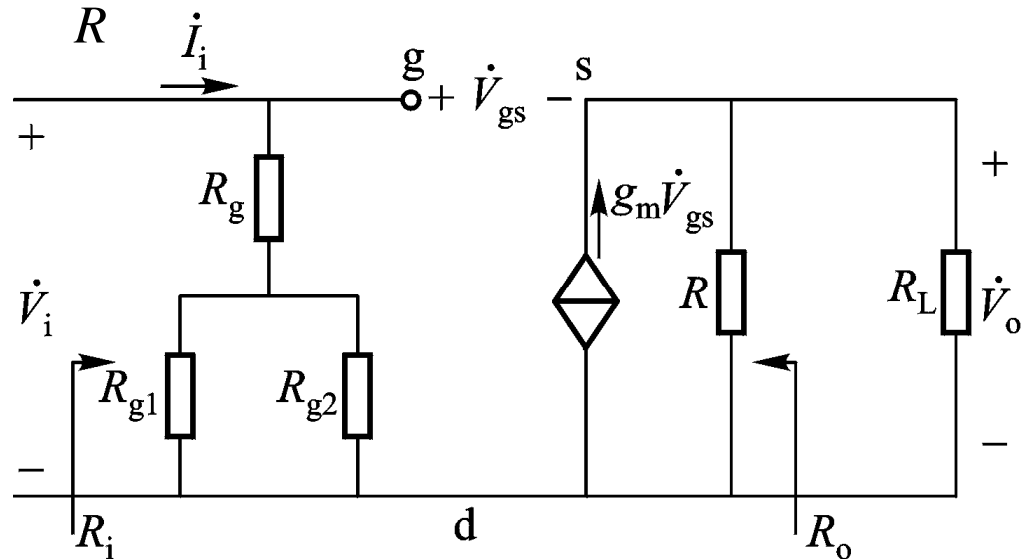
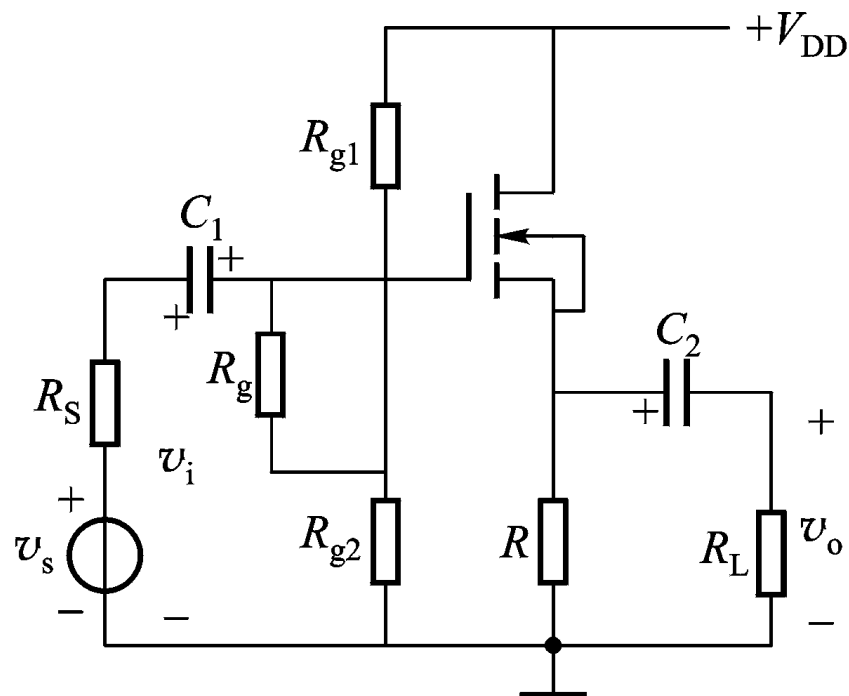
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_g + R_{g1} // R_{g2}$$



共漏放大电路

输出电阻:

$$\begin{aligned}
 R_o &= \left. \frac{V_o}{I_o} \right|_{V_s=0, R_L=\infty} \\
 &= \frac{V_o}{-g_m V_{gs} + \frac{V_o'}{R}} = \frac{-V_{gs}}{-g_m V_{gs} - \frac{V_{gs}}{R}} \\
 &= \frac{1}{g_m + \frac{1}{R}} = R // \frac{1}{g_m}
 \end{aligned}$$



❌ 共栅放大电路

右图所示共栅放大电路。

右下图所示其微变等效电路图。

电压放大倍数：

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-g_m V_{gs} R'_L}{-V_{gs}} = g_m R'_L$$

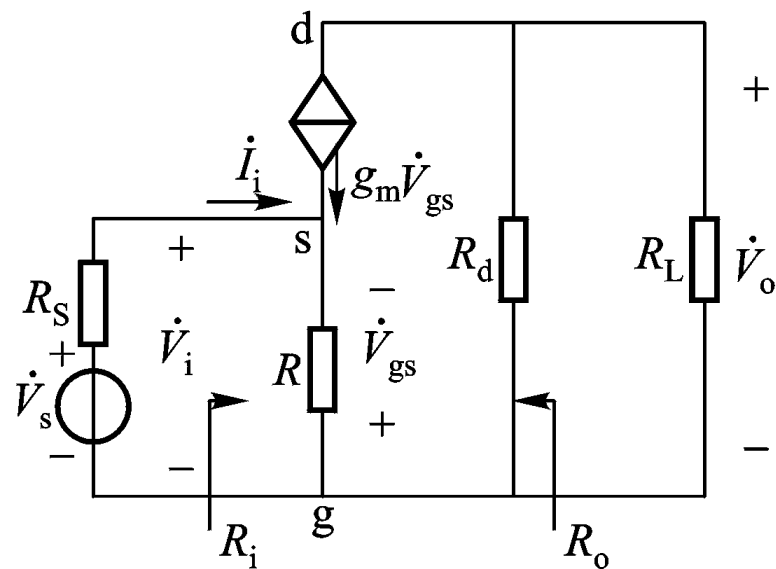
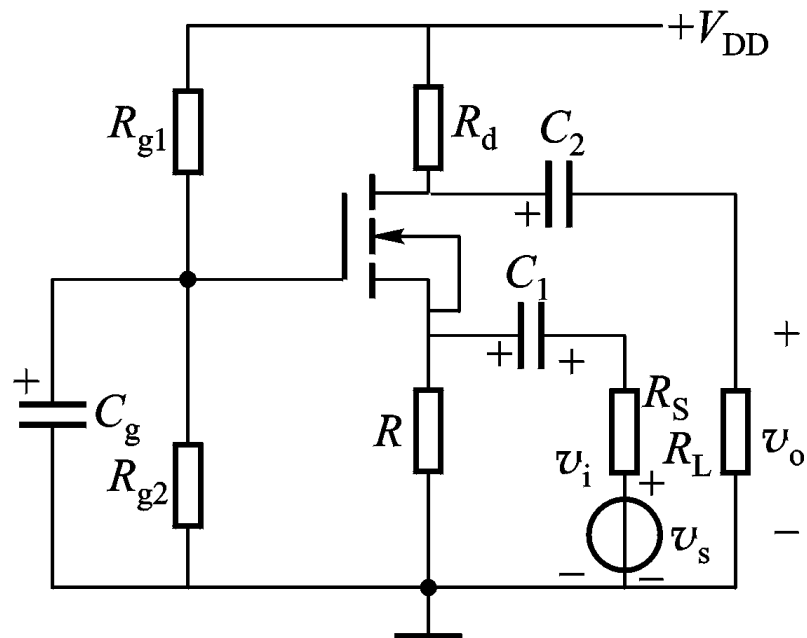
$$R'_L = R_d // R_L$$

输入电阻： $R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{-V_{gs}}{-\frac{V_{gs}}{R} - g_m V_{gs}}$

$$= \frac{1}{\frac{1}{R} + g_m} = R // \frac{1}{g_m}$$

输出电阻：

$$R_o = R_d$$



✓ 多级放大电路

ü 目的:

充分利用各单级放大电路的优点，满足各种不同要求。

Ø 级间耦合方式

ü 级间耦合原则：

各级均具有合适的静态工作点（注意级间影响）；
动态时，能保障不同频率的信号能在各级间无失真地传递。

ü 常见的级间耦合方式：

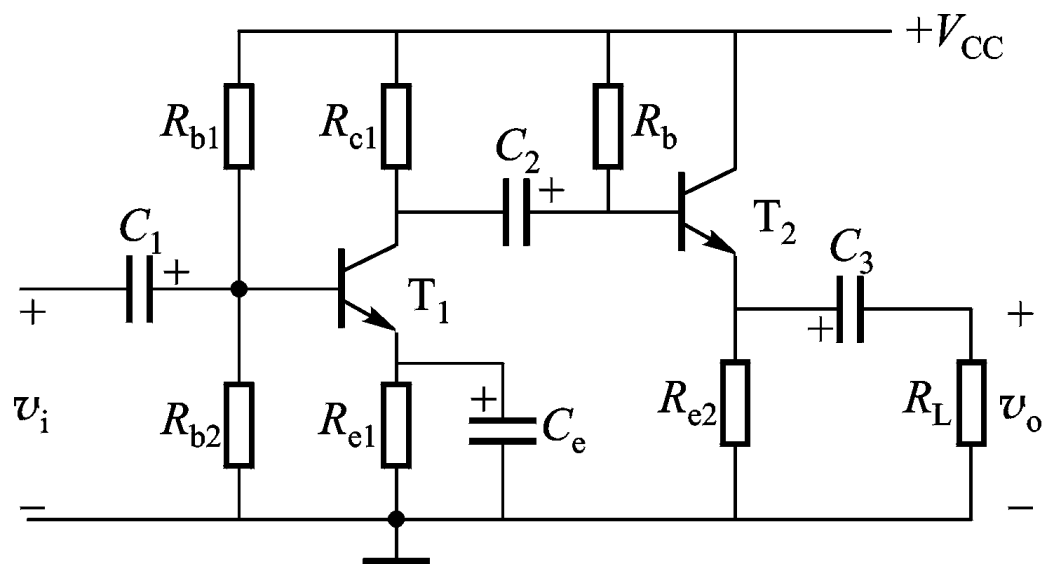
阻容、直接、变压器、光电耦合。

Ø 级间（阻容）耦合方式

ü 优点：电路简单、各级静态工作点独立；

缺点：不能放大低频、直流信号，不易集成化；

应用：分立元件电路。

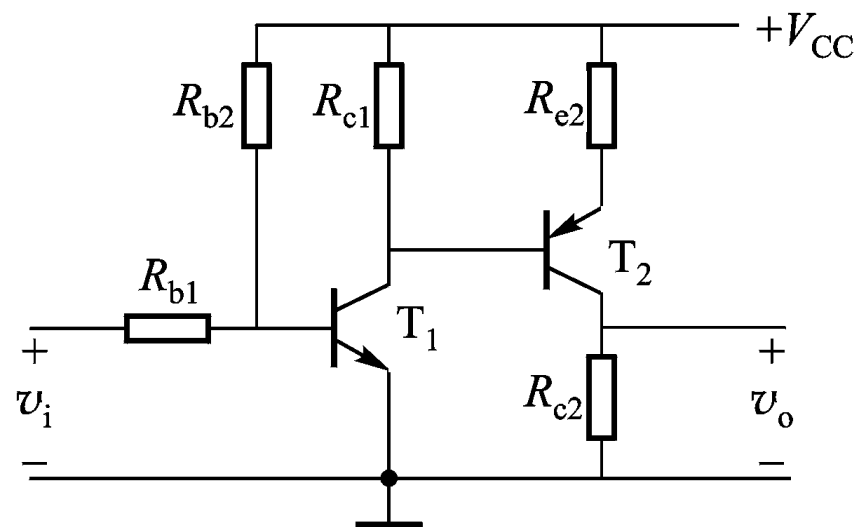


Ø 级间（直接）耦合方式

ü 优点：低频特性好，易于集成化；

缺点：各级静态工作点相互影响，有零点漂移；

应用：集成电路。

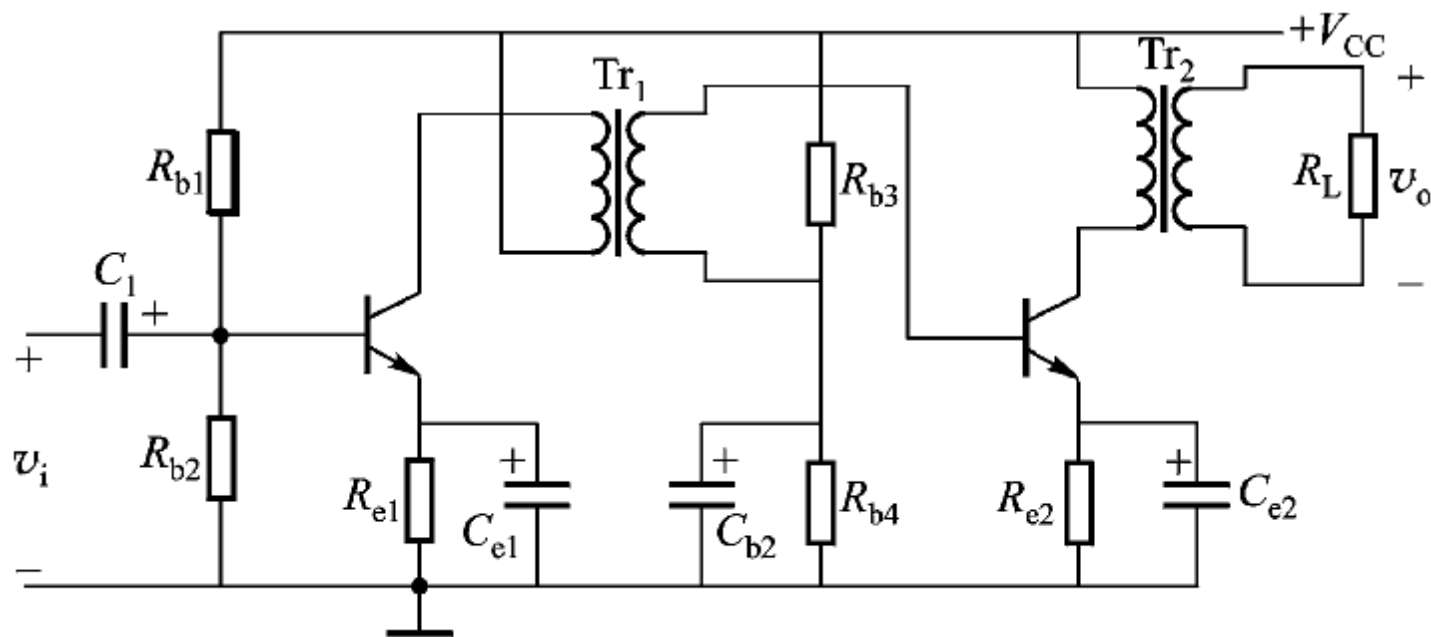


Ø 级间（变压器）耦合方式

ü 优点：各级静态工作点独立，能实现阻抗变换；

缺点：不能放大低频、直流信号，体积大；

应用：分立元件功率电路。

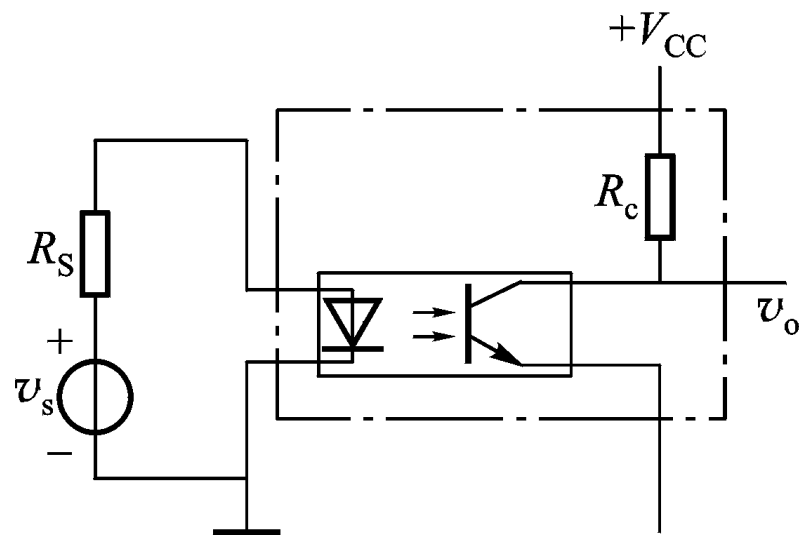


Ø 级间（光电）耦合方式

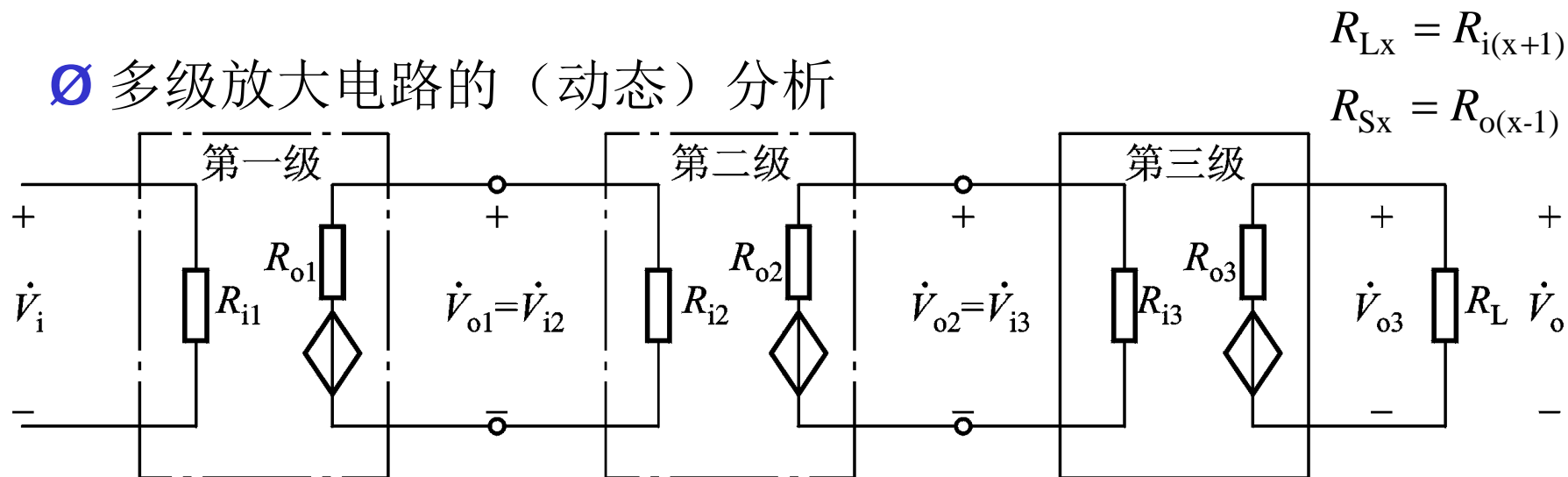
ü 优点：抗干扰能力强，体积小，使用方便；

缺点：信号传输为非线性；

应用：数字电路。



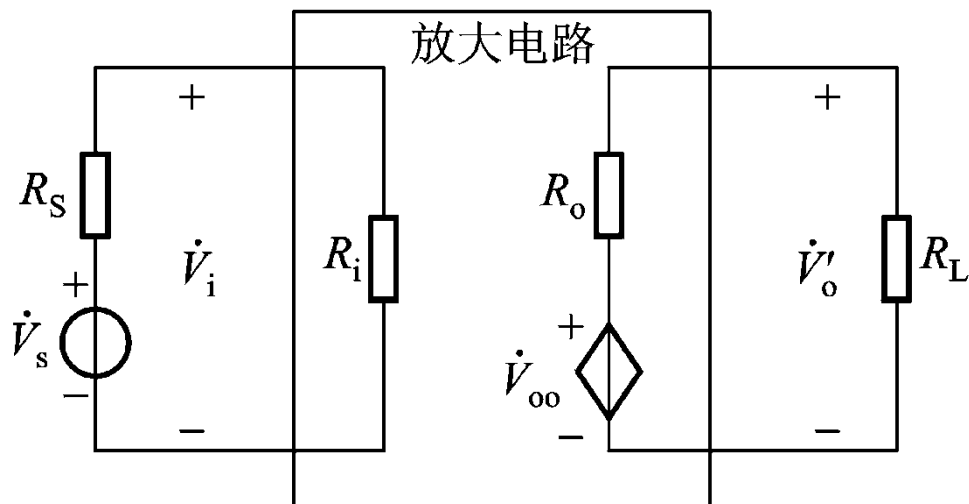
多级放大电路的（动态）分析



第 x 级的负载电阻 $R_{Lx} =$ 第 $(x+1)$ 级的输入电阻 $R_{i(x+1)}$

第 x 级的信号源内阻 $R_{Sx} =$ 第 $(x-1)$ 级的输出电阻 $R_{o(x-1)}$

多级、单级放大电路的框图



Ø 多级放大电路的（动态）分析

$$R_{Lx} = R_{i(x+1)}$$

$$R_{Sx} = R_{o(x-1)}$$

ü 电压放大倍数: $A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_{o1}}{V_i} \cdot \frac{V_{o2}}{V_{o1}} \cdots \frac{V_{o(n)}}{V_{o(n-1)}} = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdots A_{vn} = \prod_{k=1}^n A_{vk}$

CE

CB

CC

CS

CG

CD

$$-\frac{b R'_L}{r_{be}} \quad \frac{b R'_L}{r_{be}} \quad \frac{(1+b)R'_L}{r_{be} + (1+b)R'_L} \quad -g_m R'_L \quad g_m R'_L \quad \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L}$$

应考虑**后级**放大电路的输入电阻作为**前级**放大电路负载时的影响。

Ø 多级放大电路的（动态）分析

$$R_{Lx} = R_{i(x+1)}$$

$$R_{Sx} = R_{o(x-1)}$$

ü 输入电阻: $R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_{i1}$

CE

CB

CC

CS

CG

CD

$$R_b // r_{be} \quad R_e // \frac{r_{be}}{1+b} \quad R_b // [r_{be} + (1+b)R'_L] \quad R_{g1} // R_{g2} \quad R // \frac{1}{g_m} \quad R_{g1} // R_{g2}$$

当第一级为 CC 电路时，应考虑第二级输入电阻的影响。

Ø 多级放大电路的（动态）分析

$$R_{Lx} = R_{i(x+1)}$$

$$R_{Sx} = R_{o(x-1)}$$

Ü 输出电阻: $R_o = R_{on}$

| | | | | | |
|-------|-------|--|-------|-------|----------------------|
| CE | CB | CC | CS | CG | CD |
| R_c | R_c | $R_e // \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1 + b}$ | R_d | R_d | $R // \frac{1}{g_m}$ |

Ü 当末级为 CC 电路时，应考虑末前级输出电阻的影响。

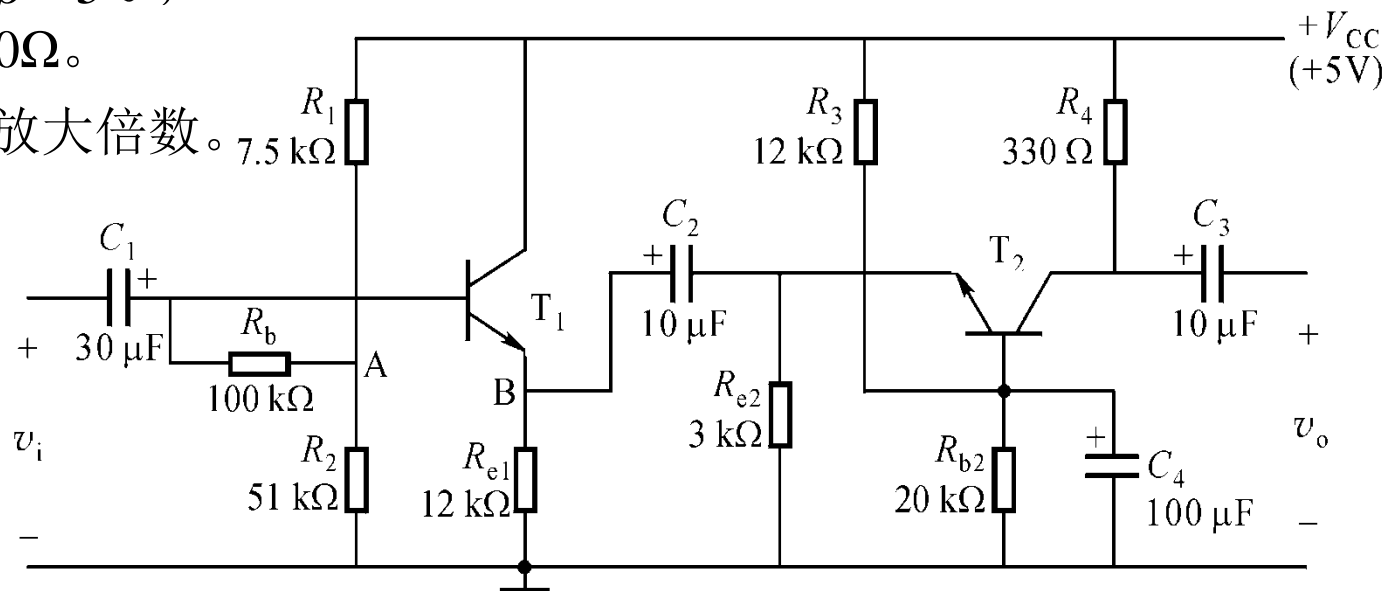
【例1.3】

右图所示电路。

已知： $\beta_1 = \beta_2 = \beta = 50$,
 $r_{bb'} = 300\Omega$ 。

求：（1）电压放大倍数。

解：静态



$$V_A = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4.36V$$

$$V_{B2} = V_{CC} \times \frac{R_{b2}}{R_3 + R_{b2}} = 3.125V$$

$$I_{EQ1} = (1 + \beta) \frac{V_A - 0.7}{R_b + (1 + \beta) R_{e1}} = 0.26mA$$

$$I_{EQ2} = \frac{V_{B2} - 0.7}{R_{e2}} = 0.81mA$$

$$r_{be1} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ1}} = 5.4k\Omega$$

$$r_{be2} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ2}} = 1.94k\Omega$$

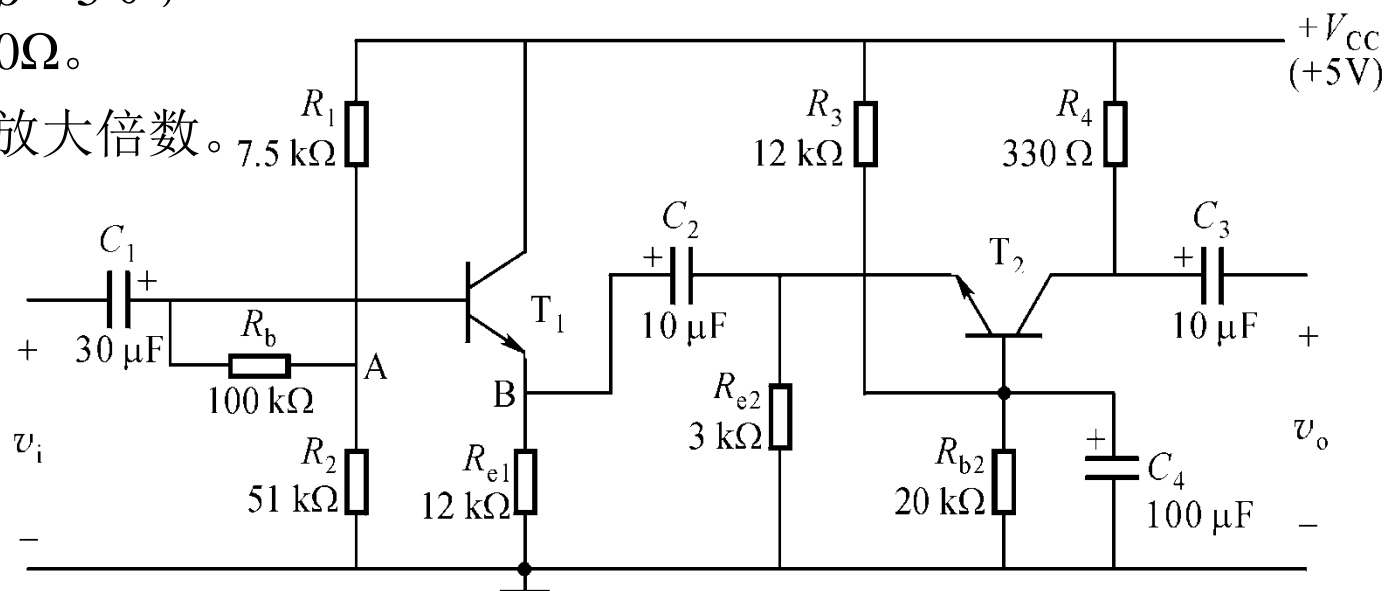
右图所示电路。

已知： $\beta_1 = \beta_2 = \beta = 50$,

$r_{bb'} = 300\Omega$ 。

求：（1）电压放大倍数。

解：动态



$$A_{v1} = \frac{(1 + \beta) R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta) R'_{L1}} \quad , \quad A_{v2} = b \frac{R'_{L2}}{r_{be2}}$$

$$R'_{L1} = R_{e1} // R_{i2} \quad , \quad R_{i2} = R_{e2} // \frac{r_{be2}}{1 + b} \quad , \quad R'_{L2} = R_4$$

$$A_v = A_{v1} \cdot A_{v2} = 2.254$$

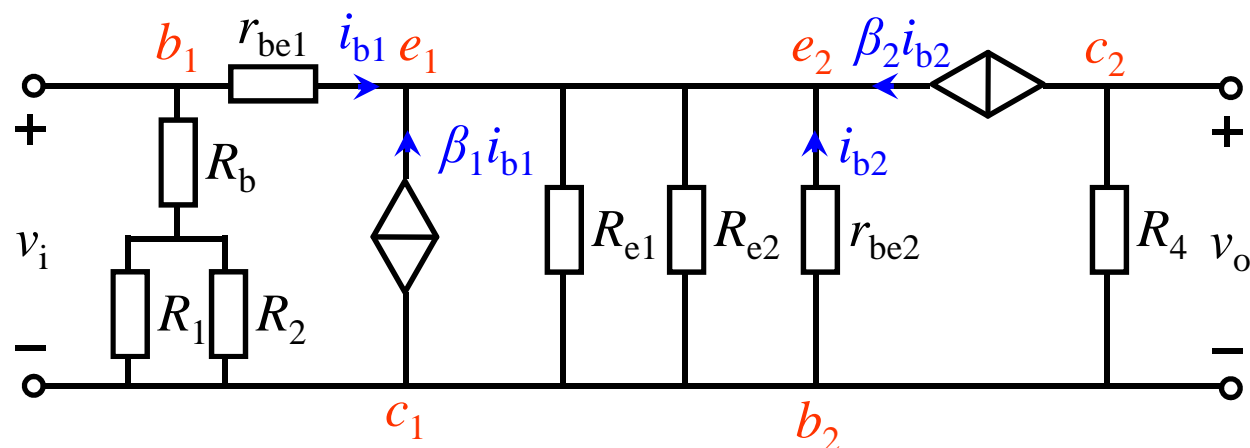
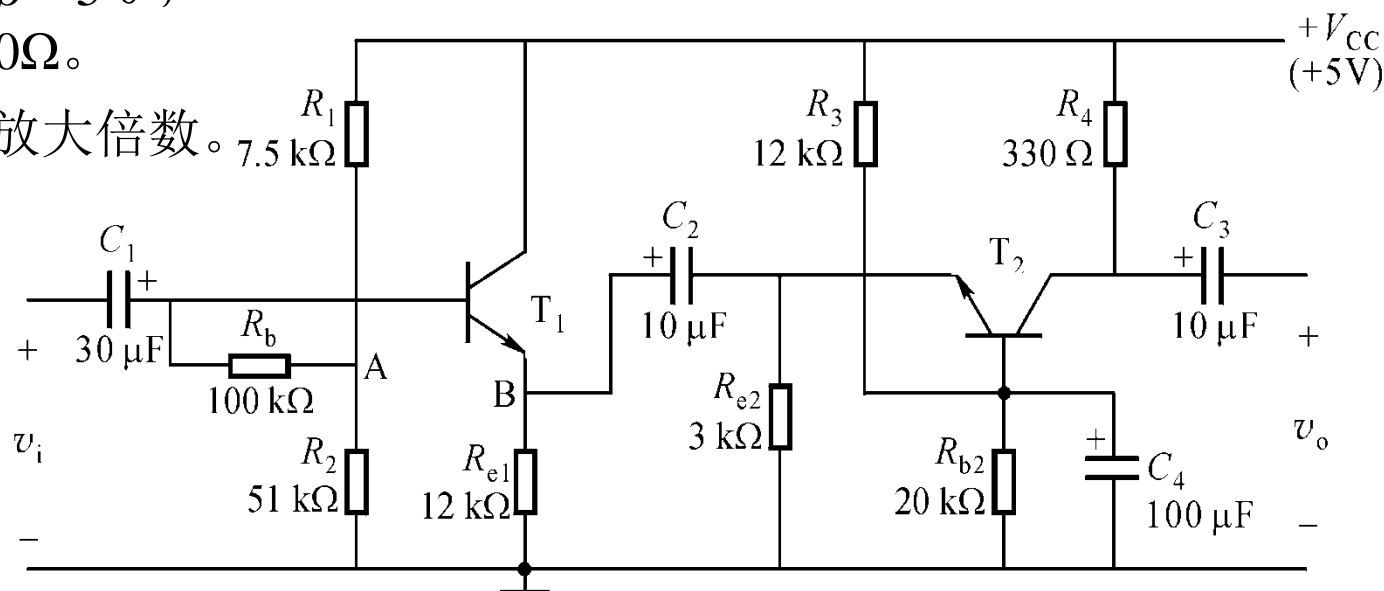
右图所示电路。

已知： $\beta_1 = \beta_2 = \beta = 50$,

$r_{bb'} = 300\Omega$ 。

求：（1）电压放大倍数。

解：动态



$$v_o = -b i_{b2} \cdot R_4$$

$$v_i = i_{b1} \cdot r_{be1} - i_{b2} \cdot r_{be2}$$

$$-i_{b2} \cdot r_{be2} = [(1 + b_1) i_{b1} + (1 + b_2) i_{b2}] \cdot (R_{e1} // R_{e2})$$

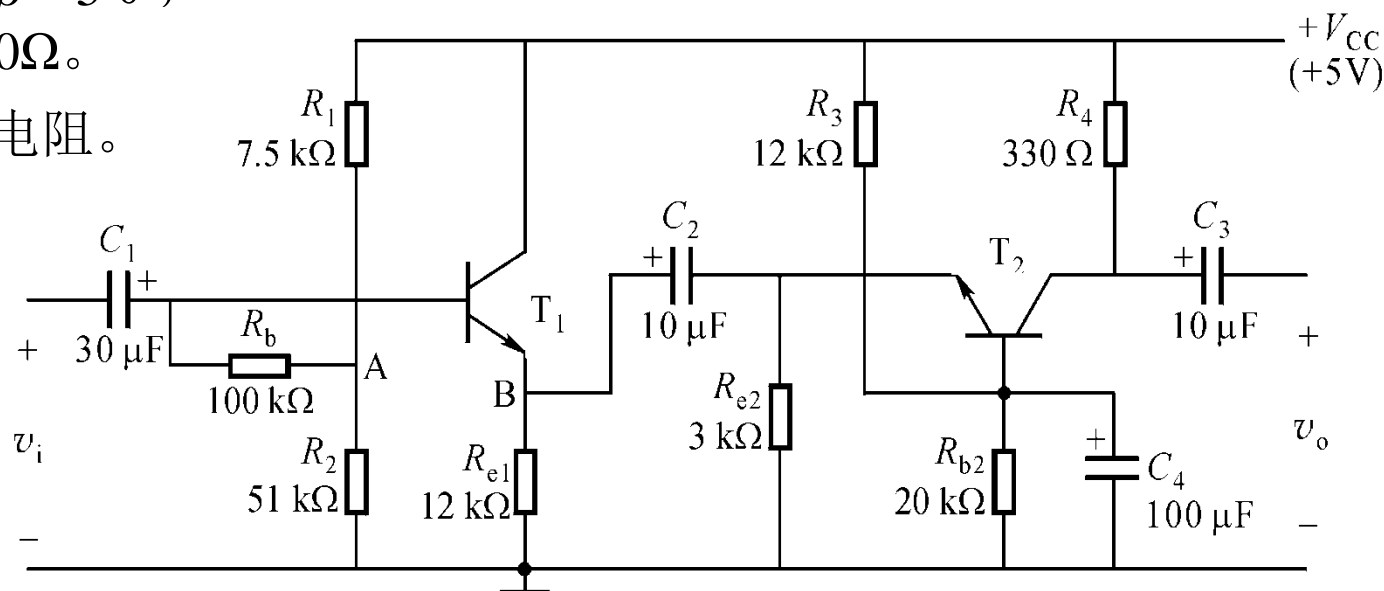
右图所示电路。

已知： $\beta_1 = \beta_2 = \beta = 50$,

$r_{bb'} = 300\Omega$ 。

求： (2) 输入电阻。

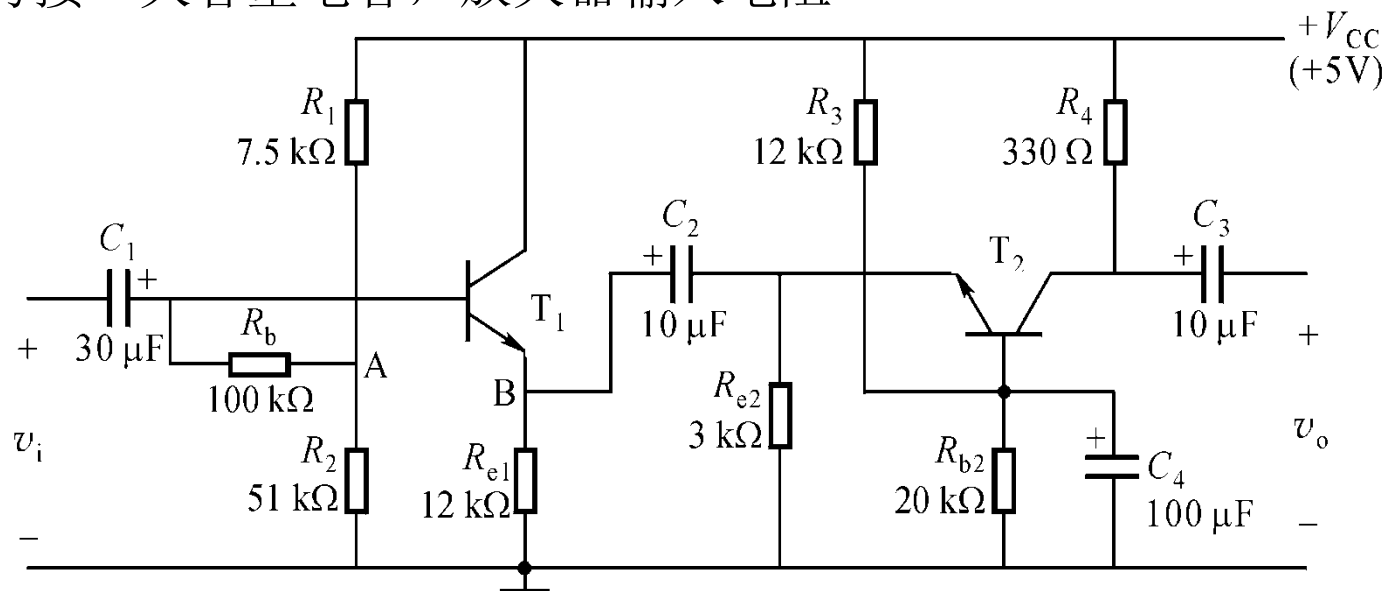
解：



$$R_i = [R_b + (R_1 // R_2)] // [r_{be1} + (1 + \beta)R'_{L1}] \approx 6.83k\Omega$$

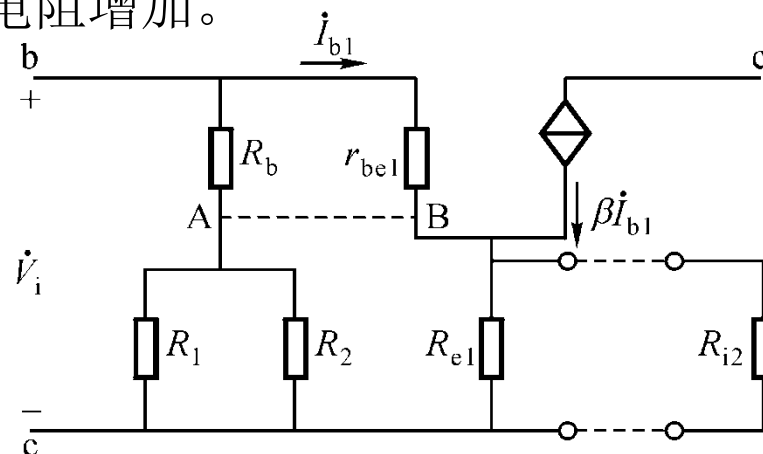
右图所示电路。

(3) 在 AB 间跨接一大容量电容，放大器输入电阻？



跨接后，A 点电位与发射极电位相同（电位被升高，称**自举电容**），流过 R_b 支路的电流减小， R_b 支路的等效电阻增加。

r_{be1} 支路电阻比 R_b 支路电阻小得多，所以自举电容对整个放大器的输入电阻增加不多。



【例1.4】

右图所示电路。

CE + CC

$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2}$$

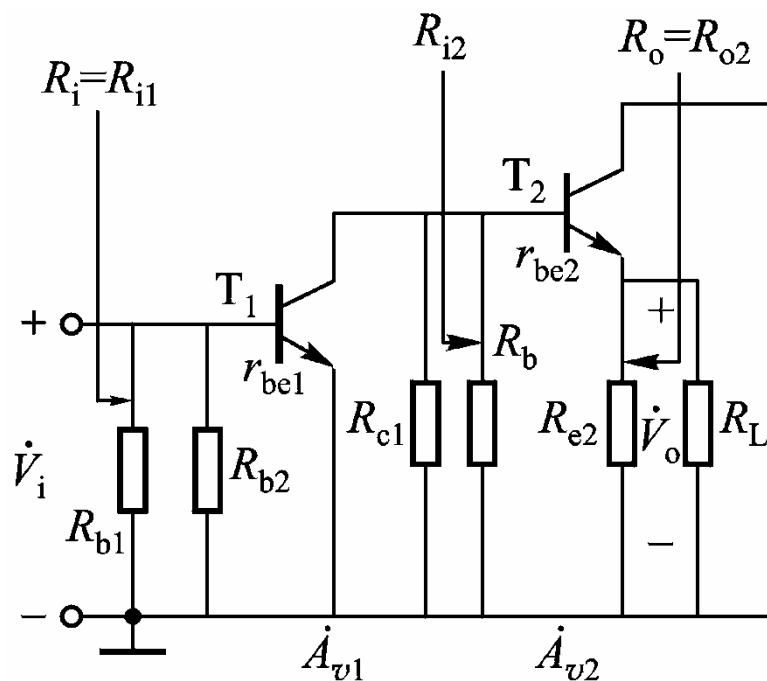
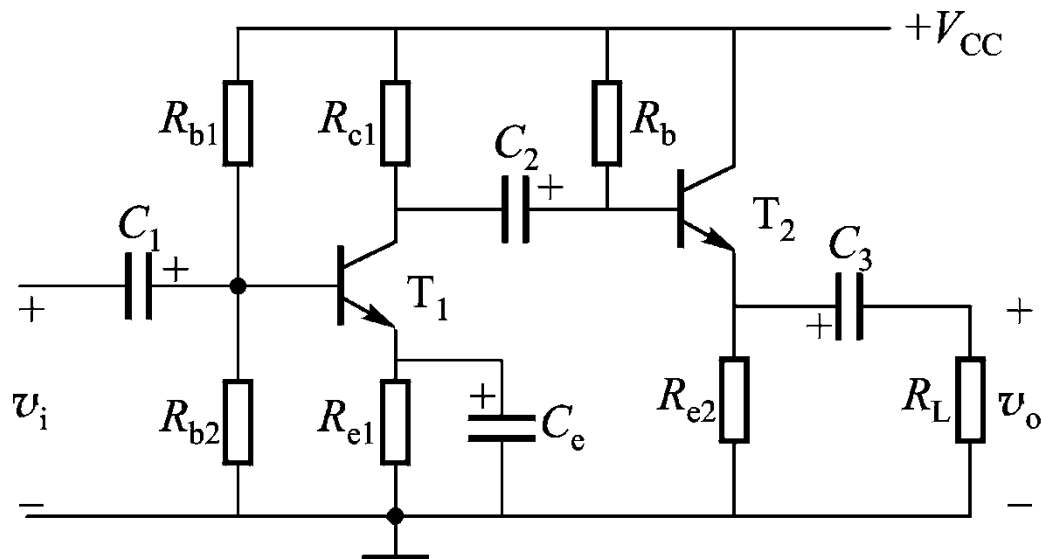
$$\dot{A}_{v1} = \frac{-\beta_1(R_{c1} // R_{i2})}{r_{be1}}$$

$$\dot{A}_{v2} = \frac{(1 + b_2)(R_{e2} // R_L)}{r_{be2} + (1 + b_2)(R_{e2} // R_L)}$$

$$R_{i2} = R_b // [r_{be2} + (1 + b_2)(R_{e2} // R_L)]$$

$$R_i = R_{i1} = R_{b1} // R_{b2} // r_{be1}$$

$$R_o = R_{o2} = R_{e2} // \frac{r_{be2} + R_b // R_{c1}}{1 + b_2}$$



【例1.5】

右图所示电路。

CE + CE

$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2}$$

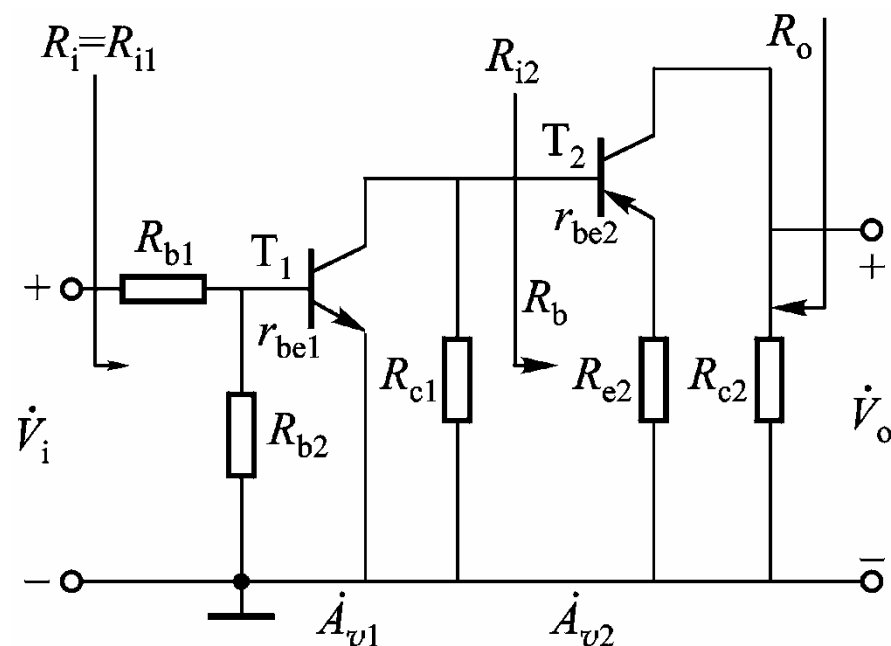
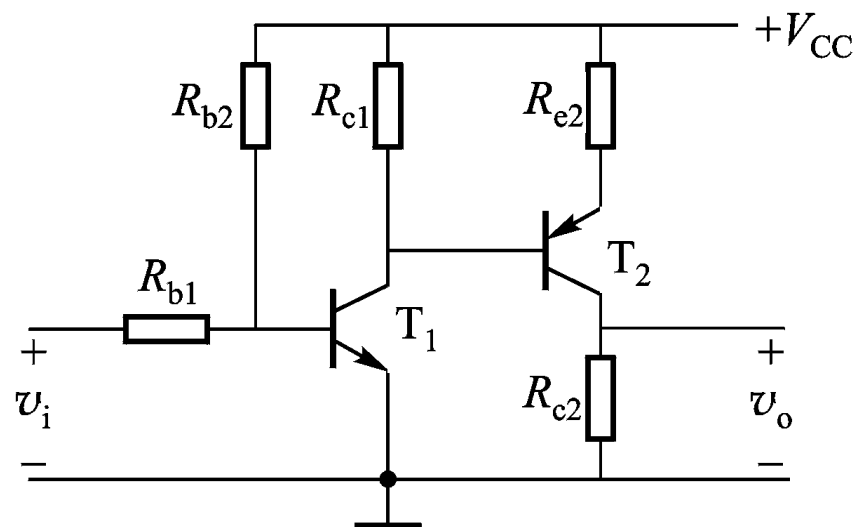
$$\dot{A}_{v1} = \frac{-\beta_1(R_{c1} // R_{i2})}{R_{b1} // R_{b2} // r_{be1}}$$

$$\dot{A}_{v2} = \frac{-b_2 R_{c2}}{r_{be2} + (1 + b_2) R_{e2}}$$

$$R_{i2} = r_{be2} + (1 + b_2) R_{e2}$$

$$R_i = R_{i1} = R_{b1} + (R_{b2} // r_{be1})$$

$$R_o = R_{o2} = R_{c2}$$



【例1.6】

右图所示电路。

CE + CE

$$A_v = \frac{A_{v1} A_{v2}}{n_1 n_2}$$

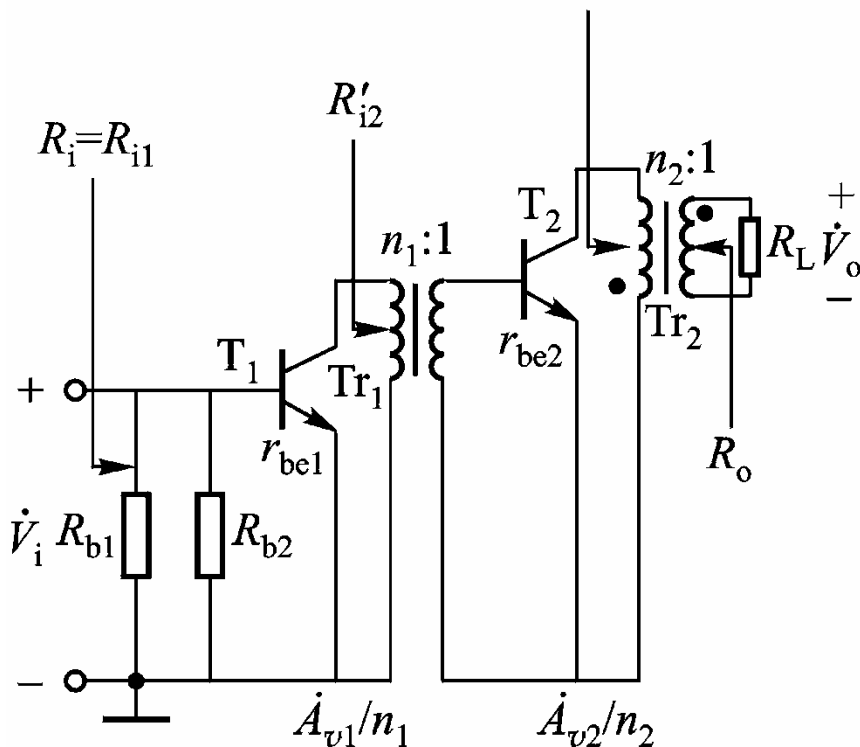
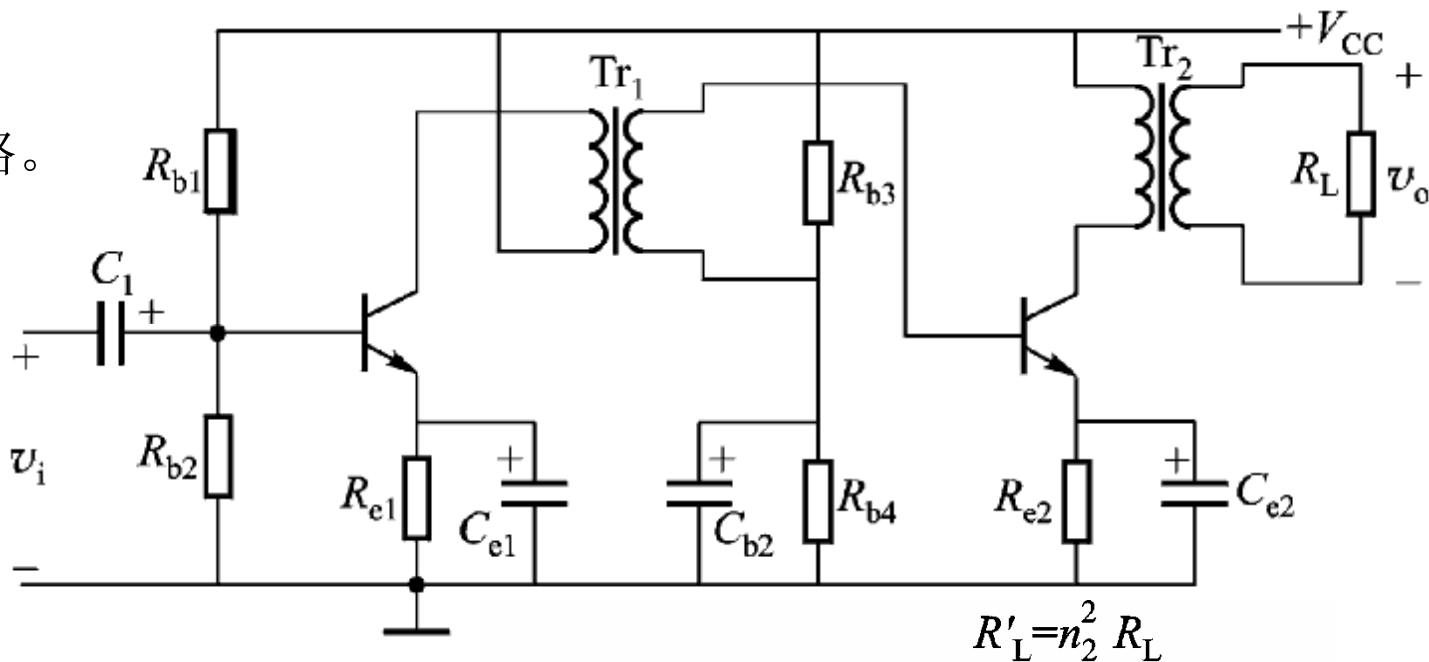
$$A_{v1} = \frac{-\beta_1 R'_{i2}}{r_{be1}}$$

$$A_{v2} = \frac{-b_2 (n_2^2 R_L)}{r_{be2}}$$

$$R'_{i2} = n_1^2 r_{be2}$$

$$R_i = R_{i1} = R_{b1} // R_{b2} // r_{be1}$$

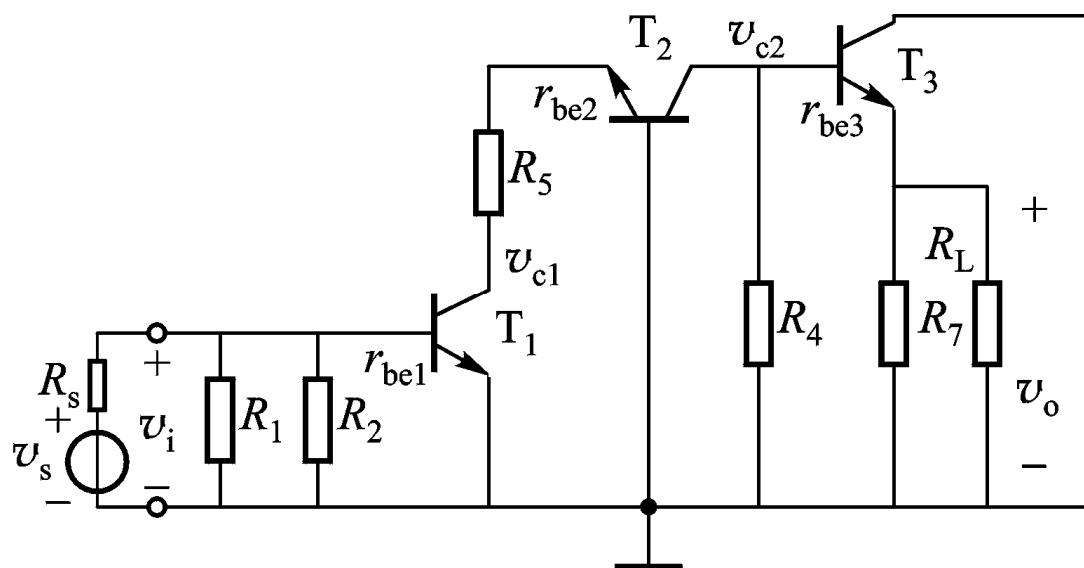
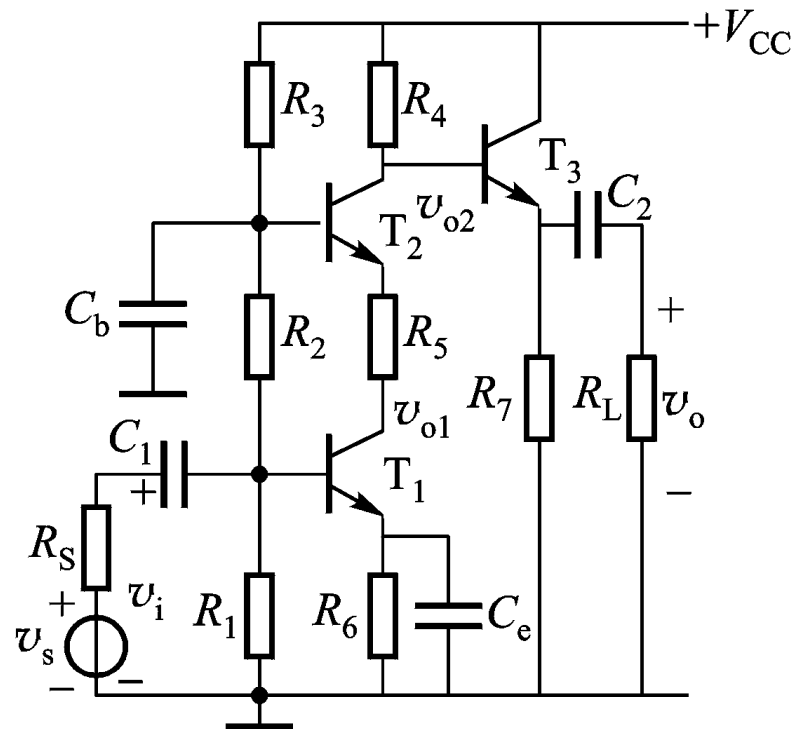
$$R_o = \frac{r_{ce2}}{n_2^2}$$



【例1.7】

右图所示电路。

CE + CB + CC

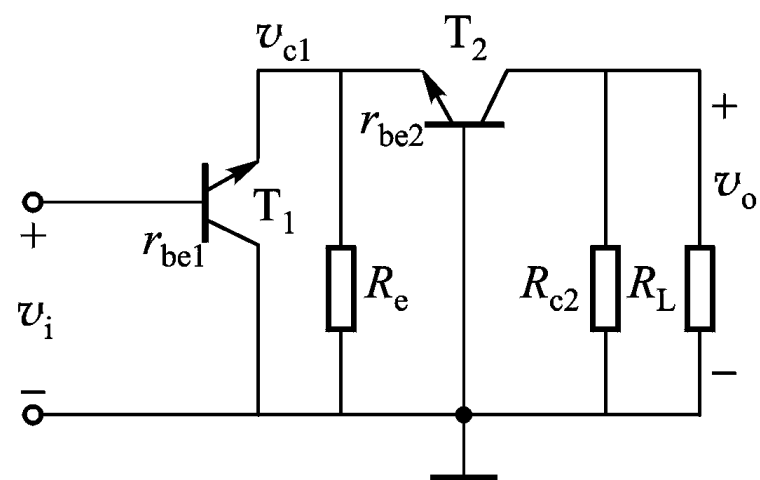
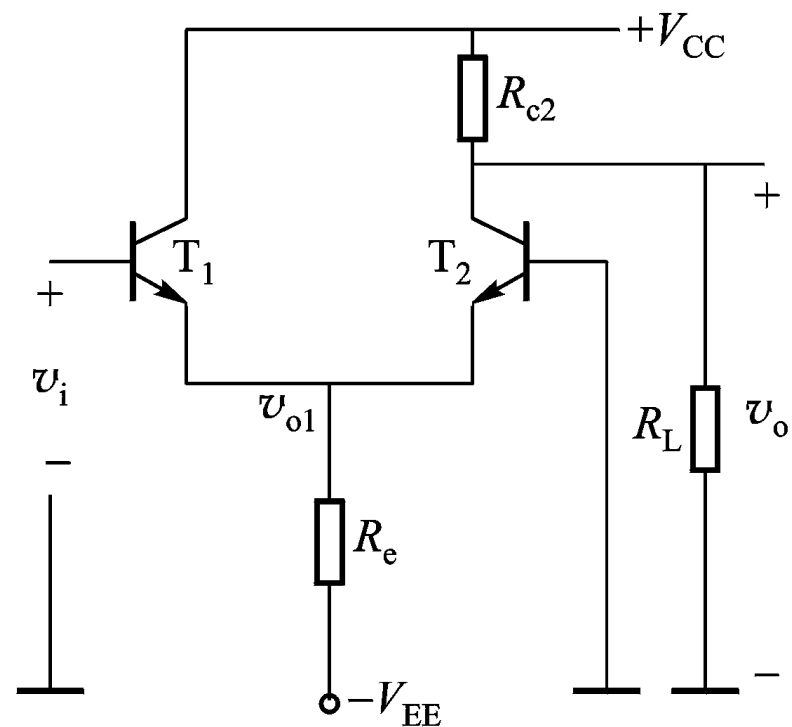


【例1.8】

右图所示电路。

CC + CB

差分放大电路

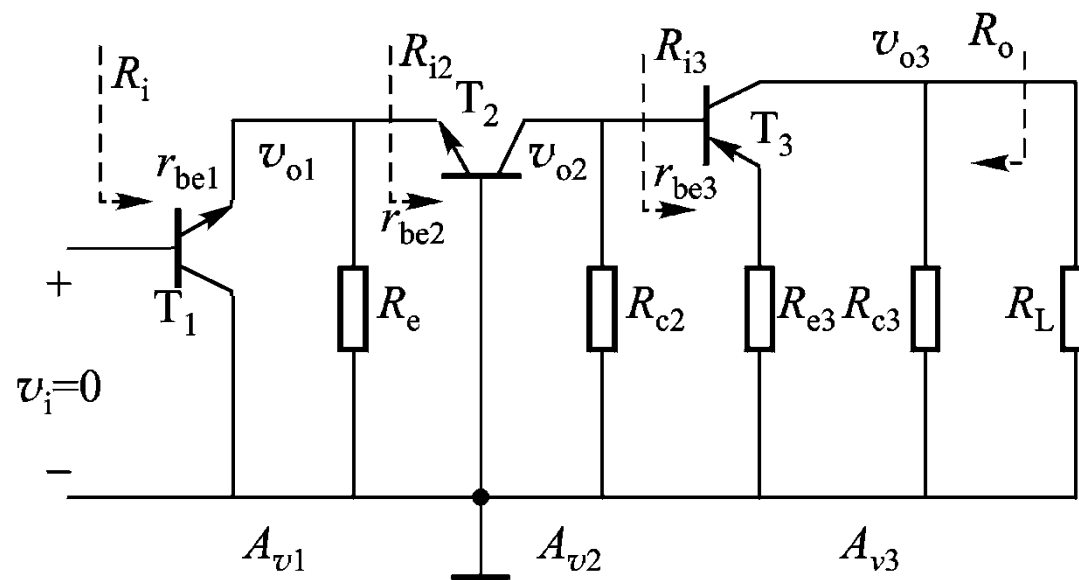
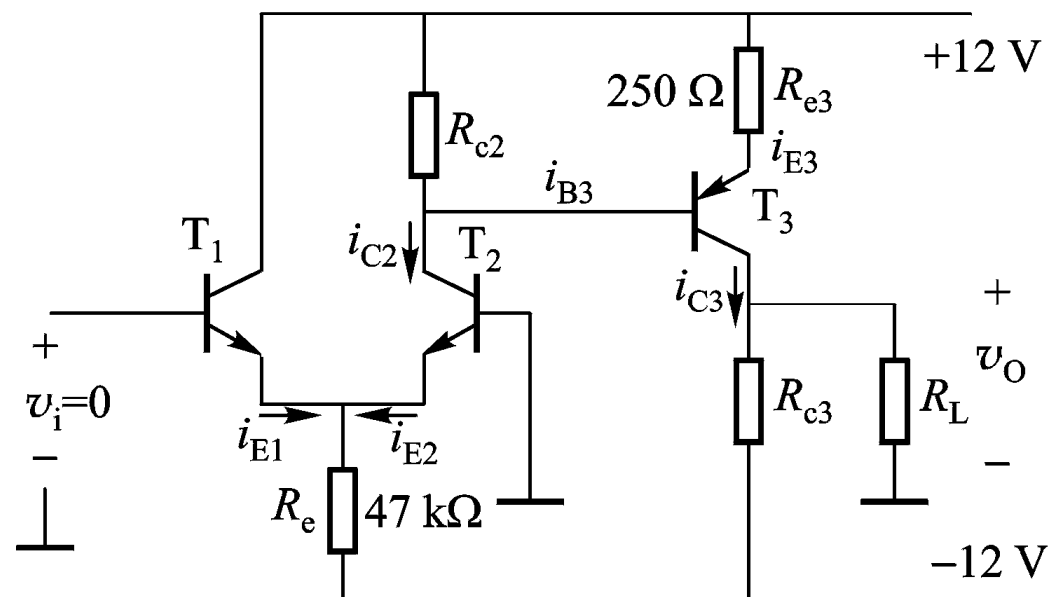


【例1.9】

右图所示电路。

CC + CB + CE

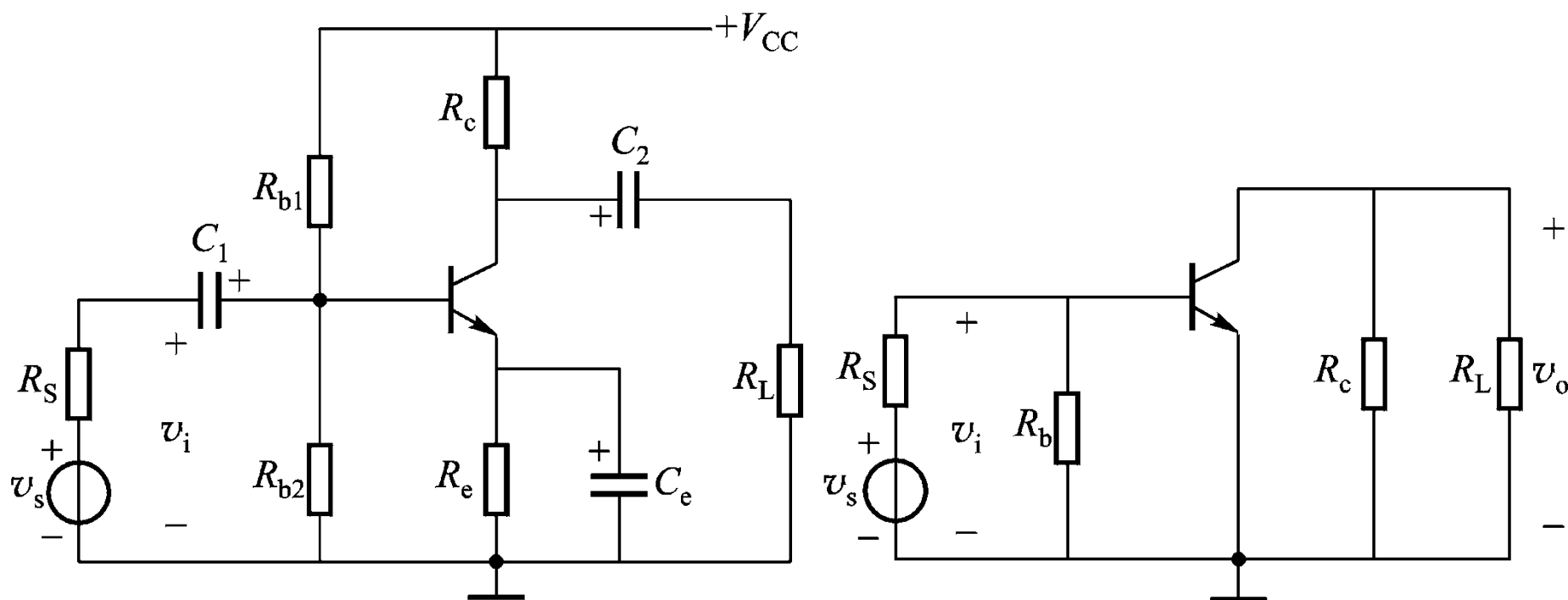
差分 + 共射



✓ 放大电路的频率特性

ü 前述放大电路：信号频率在音频（中频， $20\sim 20\text{kHz}$ ）范围；
动态分析时：外电路的耦合电容短路，器件内的结电容开路。

ü 若频率升高或降低，耦合电容、结电容不能作上述的理想化处理；
此时，需涉及对信号频率的响应问题。



Ø 频率响应

ü 波特图

ü （高频）小信号模型

ü 放大电路的分频段分析法

ü 多级放大电路的频域分析

通频带

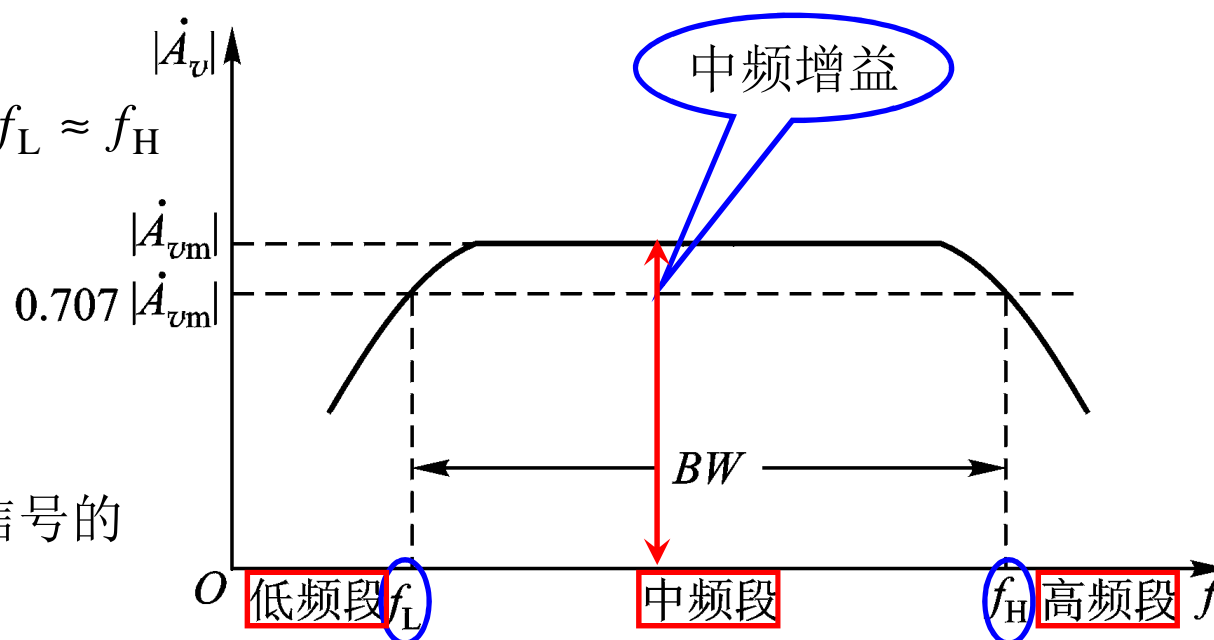
当放大电路的信号频率很低或很高时，由于电路中存在的电抗元件、晶体管结电容和极间电容的影响，放大电路的电压放大倍数都要降低；
只有在中频段范围内，放大倍数为常数。

通频带： $BW = f_H - f_L \approx f_H$

上限频率： f_H ；

下限频率： f_L ；

通频带越宽，表明放大电路对不同频率信号的适应能力越强。



例：扩音机电路，其通频带应大于音频（20～20 kHz）范围。

Ø 无源一阶 RC 高通滤波器

ü 电压传输比:

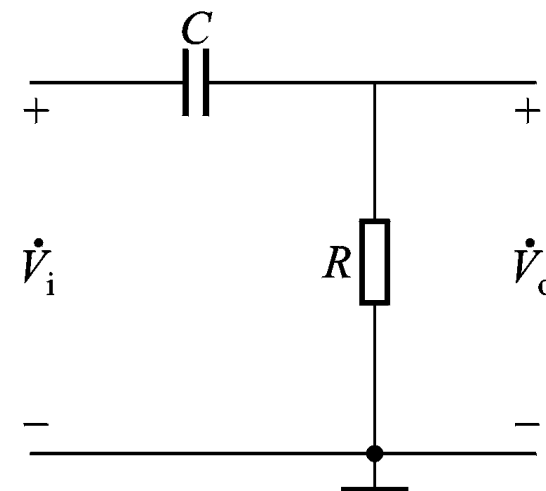
$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = \frac{jf/f_L}{1 + jf/f_L}$$

ü 截止频率: $f_L = \frac{1}{2\pi RC}$

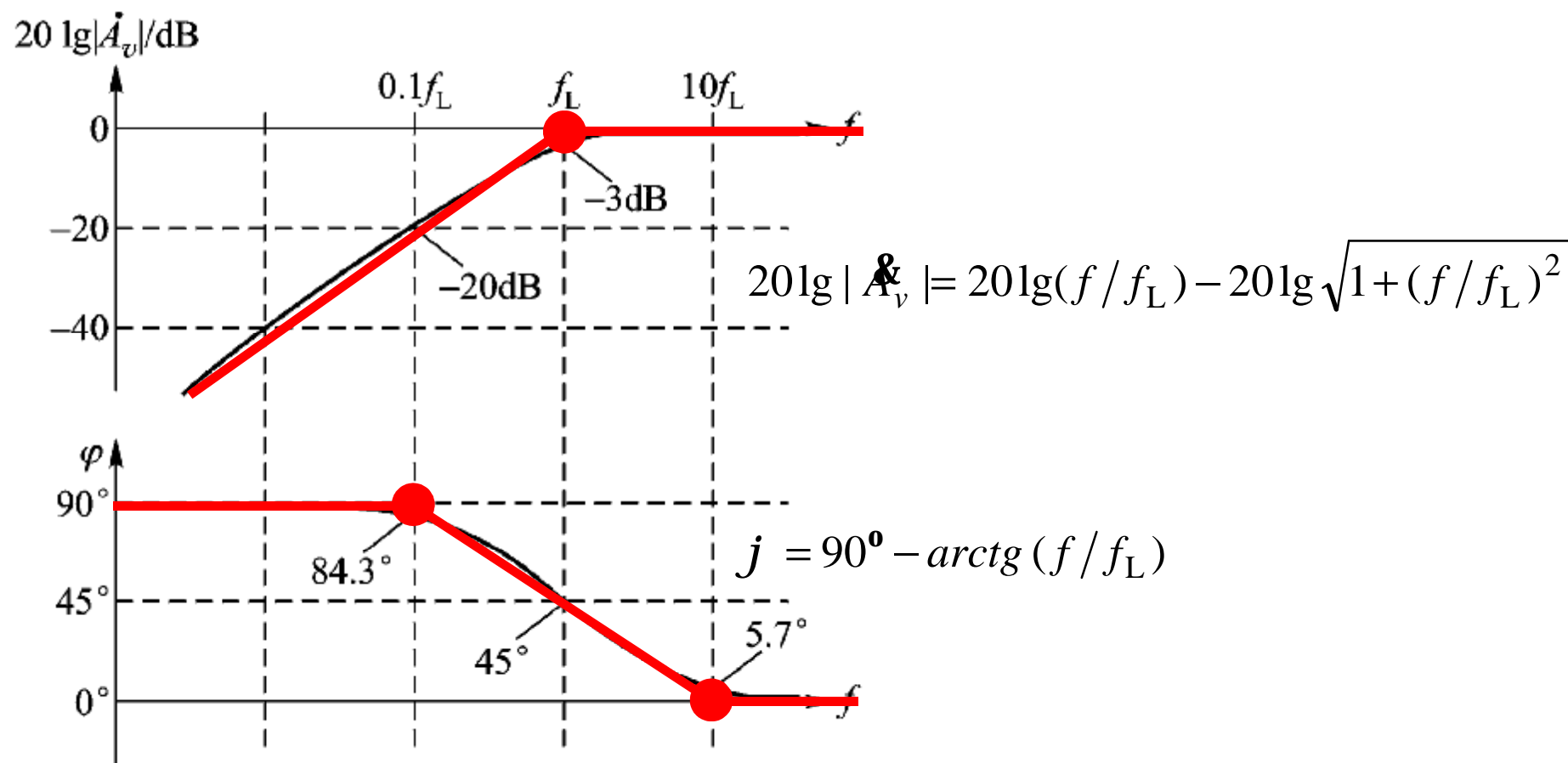
$$\text{对数幅频: } 20\lg |\dot{A}_v| = 20\lg(f/f_L) - 20\lg\sqrt{1 + (f/f_L)^2}$$

$$\text{相频: } \varphi = 90^\circ - \arctg(f/f_L)$$

微分电路



无源一阶 RC 高通滤波器



Ø 无源一阶 RC 低通滤波器

ü 电压传输比:

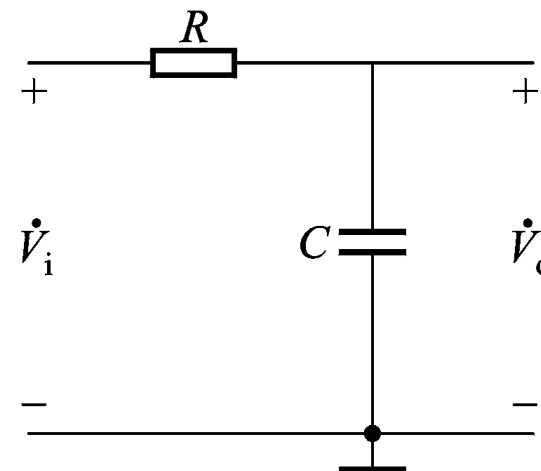
$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + jf/f_H}$$

ü 截止频率: $f_H = \frac{1}{2\pi RC}$

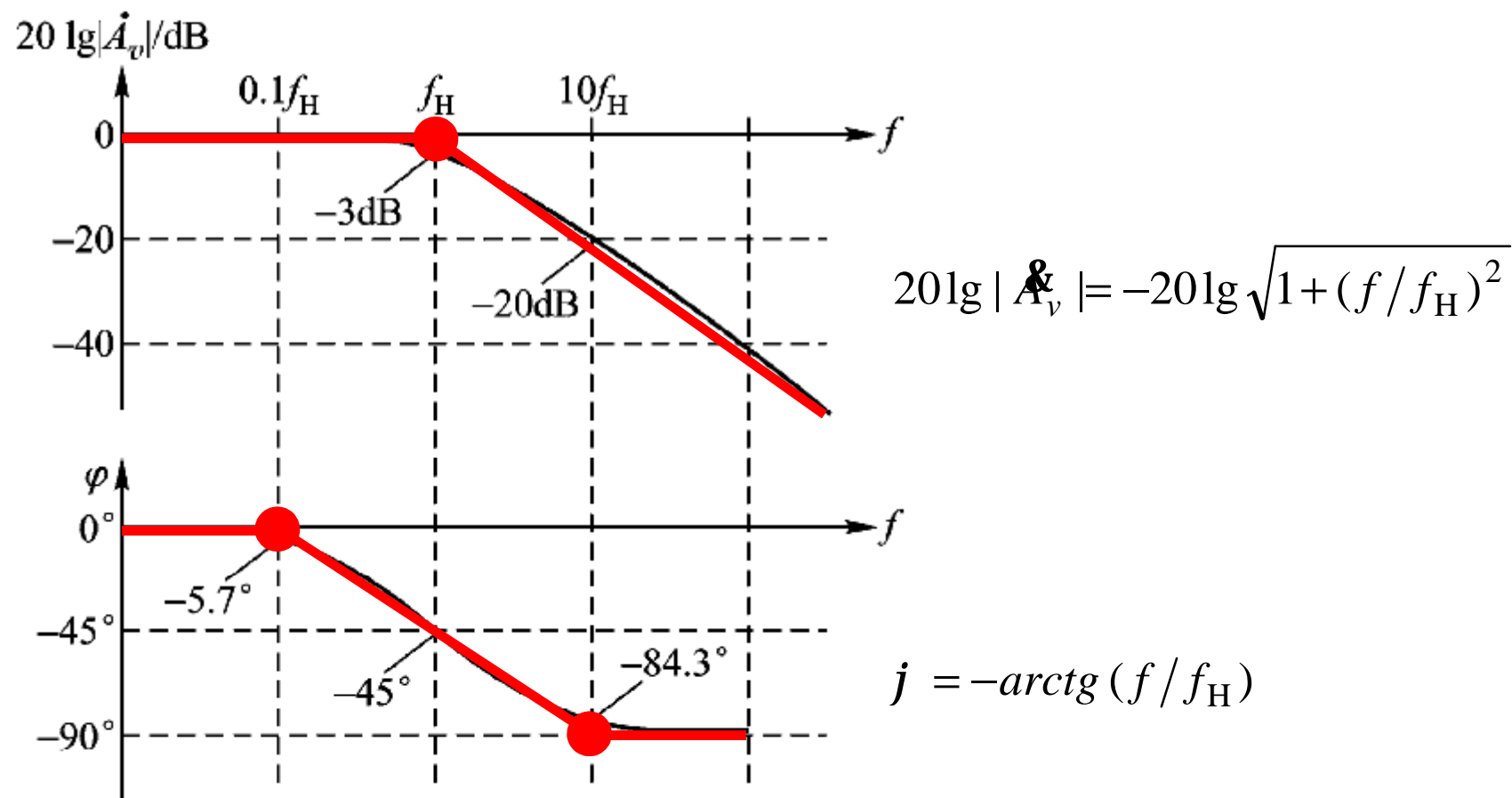
$$\text{对数幅频: } 20\lg |\dot{A}_v| = -20\lg \sqrt{1 + (f/f_H)^2}$$

$$\text{相频: } \varphi = -\arctg(f/f_H)$$

积分电路



无源一阶 RC 低通滤波器



Ø 波特图

ü 波特（频率响应）图：

幅频特性图：参量幅度与频率的函数关系；

相频特性图：参量相位与频率的函数关系。

ü 横坐标采用对数频率刻度；

幅频特性曲线的纵坐标采用分贝刻度；

相频特性曲线的纵坐标表示相角 j 。

ü 对数频率特性曲线的优势：

可以把很宽的频率变化范围压缩在较窄的频率坐标内；

增益的乘、除运算变成了加、减运算；

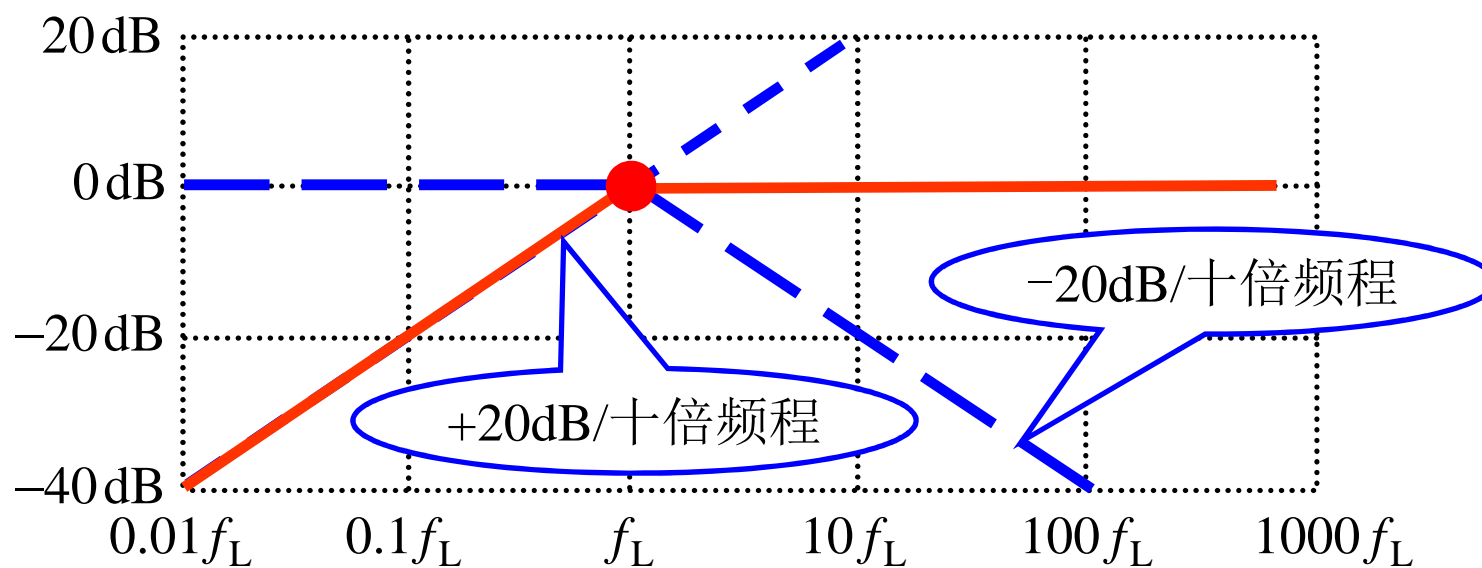
可以采用渐近折线来代替十分复杂的频率特性曲线。

波特图（低频段绘制）

通用低频段频率特性表达式： $A_v = A_{vm} \cdot \frac{jf/f_L}{1 + jf/f_L}$

对数幅频特性表达式：

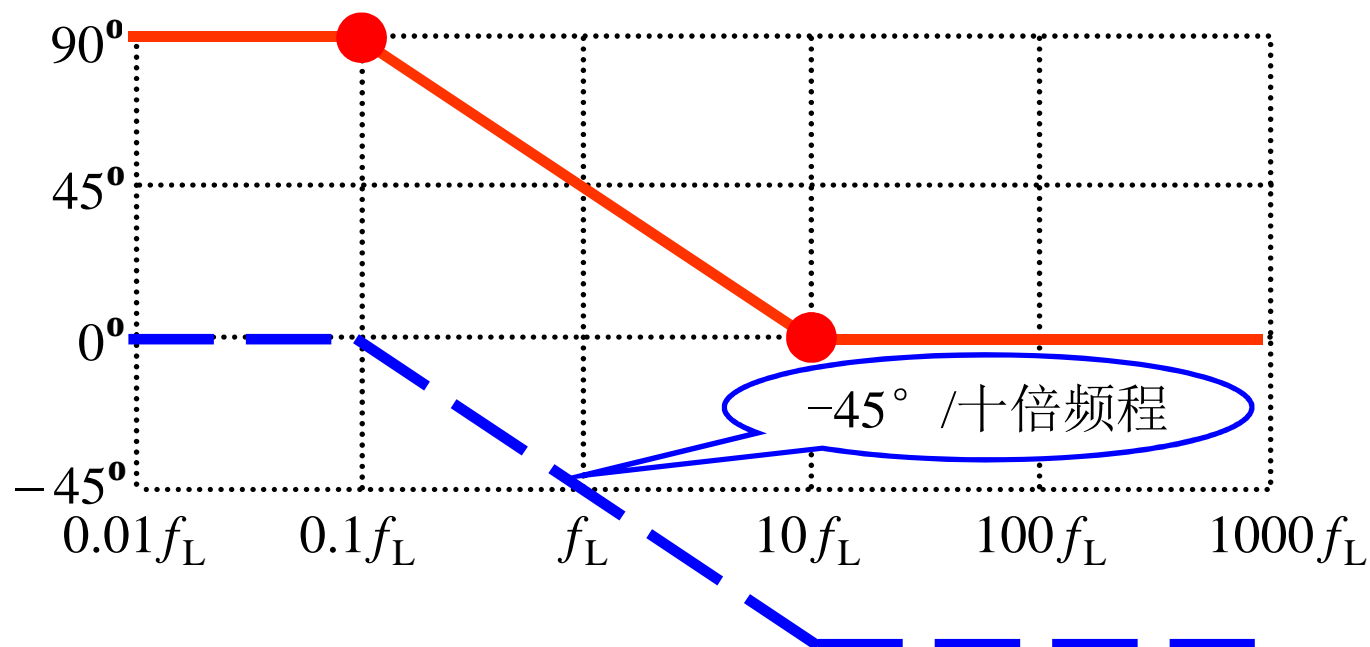
$$20\lg |A_v| = 20\lg |A_{vm}| + 20\lg(f/f_L) - 20\lg \sqrt{1 + (f/f_L)^2}$$



Ø 波特图（低频段绘制）

ü 通用低频段频率特性表达式: $A_v = A_{vm} \cdot \frac{j f / f_L}{1 + j f / f_L}$

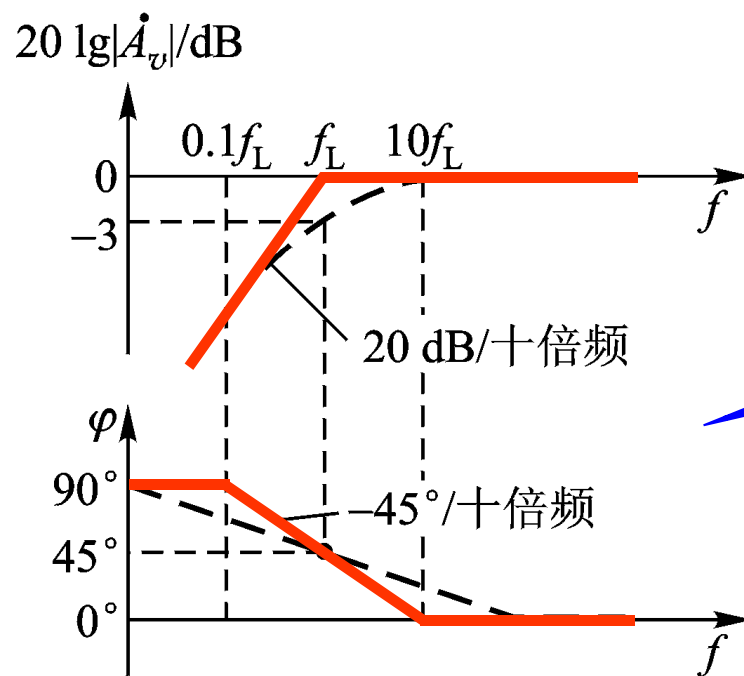
ü 相频特性表达式: $\varphi = (0^\circ \text{ 或 } \pm 180^\circ) + 90^\circ - \arctan(f / f_L)$



Ø 波特图（低频段绘制）

ü 通用低频段频率特性表达式： $\dot{A}_v = A_{vm} \cdot \frac{jf/f_L}{1 + jf/f_L}$

ü 误差？



以 $A_{vm} = 1$ 为例

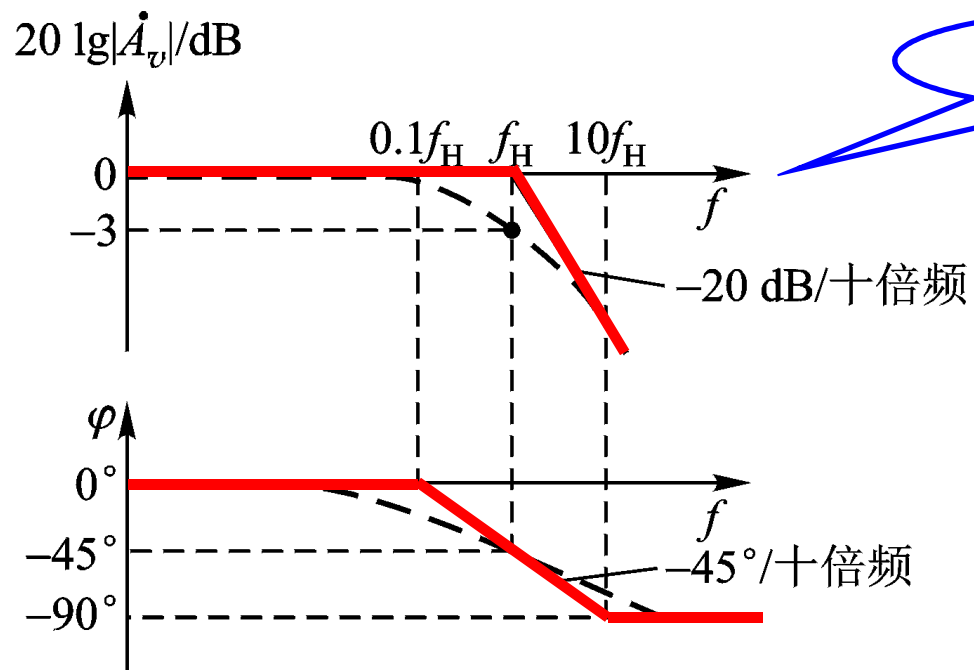
波特图（高频段绘制）

通用高频段频率特性表达式： $\dot{A}_v = A_{vm} \cdot \frac{1}{1 + jf/f_H}$

对数幅频特性表达式： $20\lg|\dot{A}_v| = 20\lg A_{vm} - 20\lg\sqrt{1 + (f/f_H)^2}$

相频特性表达式： $\varphi = (0^\circ \text{ 或 } \pm 180^\circ) - \arctan(f/f_H)$

误差？



【例1.10】

已知一放大电路的频率响应为 $\dot{A}_v = -46 \cdot \frac{jf/53\text{Hz}}{1+jf/53\text{Hz}} \cdot \frac{1}{1+jf/1.47 \times 10^6\text{Hz}}$
要求画出相应的波特图。

解：对数幅频和相频表达式分别为：

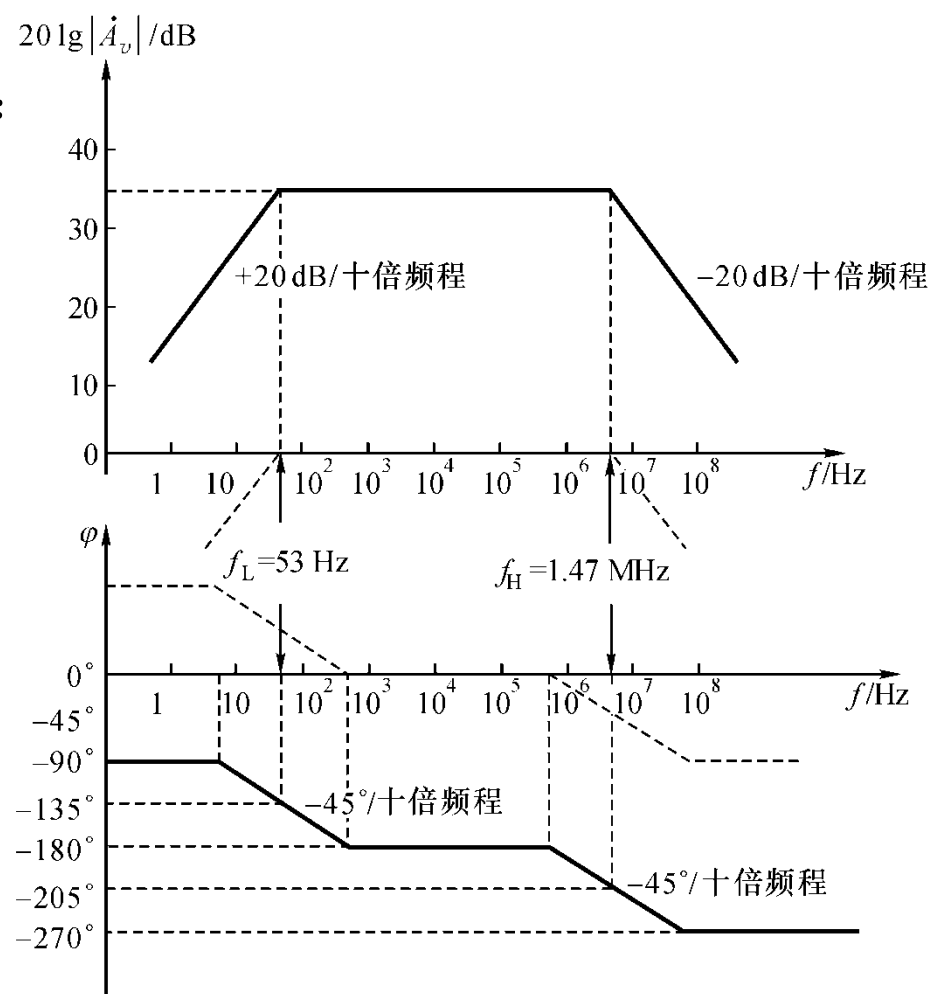
$$\begin{aligned} 20\lg |\dot{A}_v| &= 20\lg 46 + 20\lg(f/53) \\ &\quad - 20\lg \sqrt{1+(f/53)^2} \\ &\quad - 20\lg \sqrt{1+(f/1.47 \times 10^6)^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi &= -180^\circ + 90^\circ - \arctan(f/53) \\ &\quad - \arctan(f/1.47 \times 10^6) \end{aligned}$$

上限频率：1.47 MHz

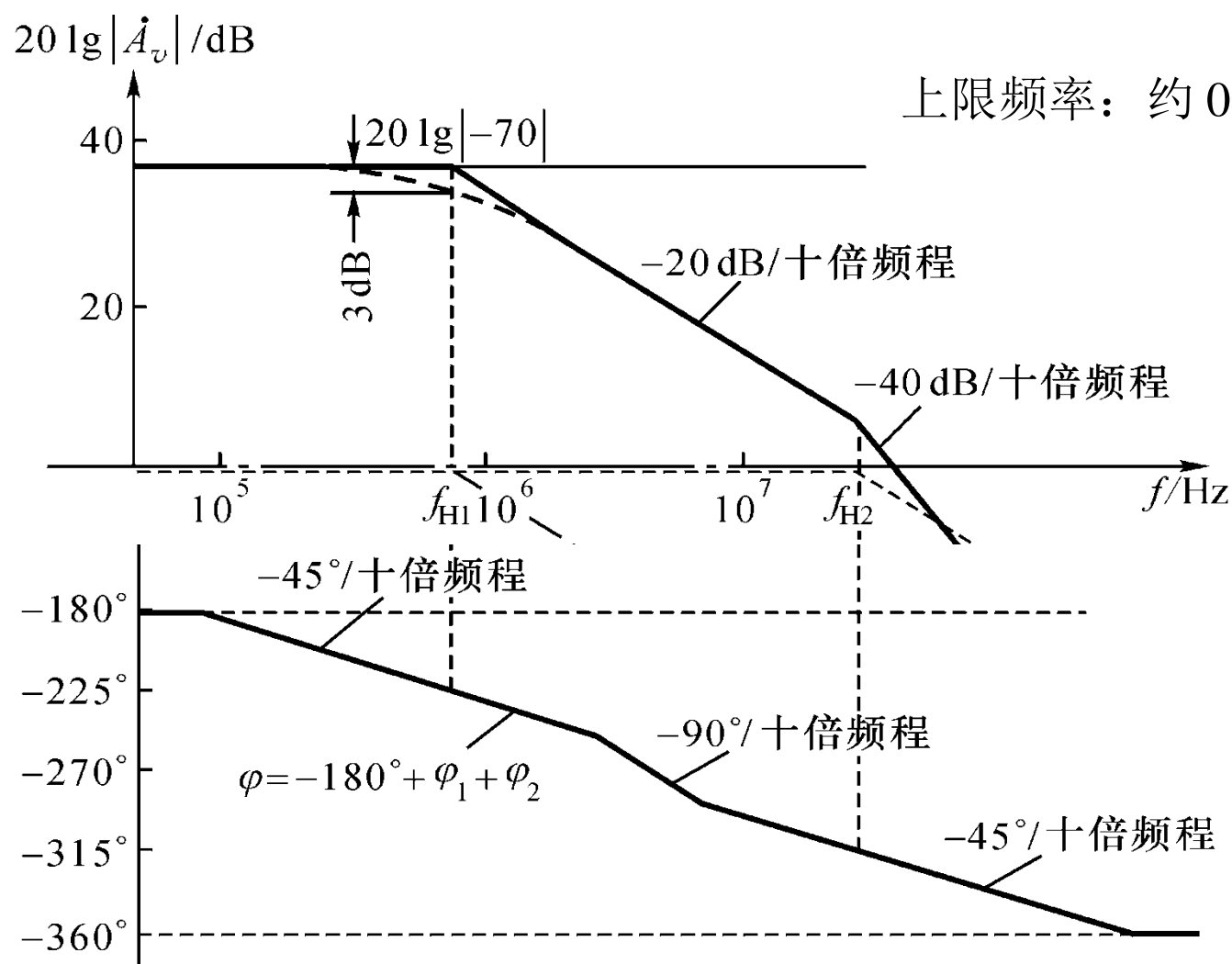
下限频率：53 Hz

带宽：约 1.47 MHz



【例1.11】

已知一放大电路的频率响应为 $\dot{A}_v = -70 \cdot \frac{1}{1 + jf/7.43 \times 10^5} \cdot \frac{1}{1 + jf/2.6 \times 10^7}$
要求画出相应的波特图。



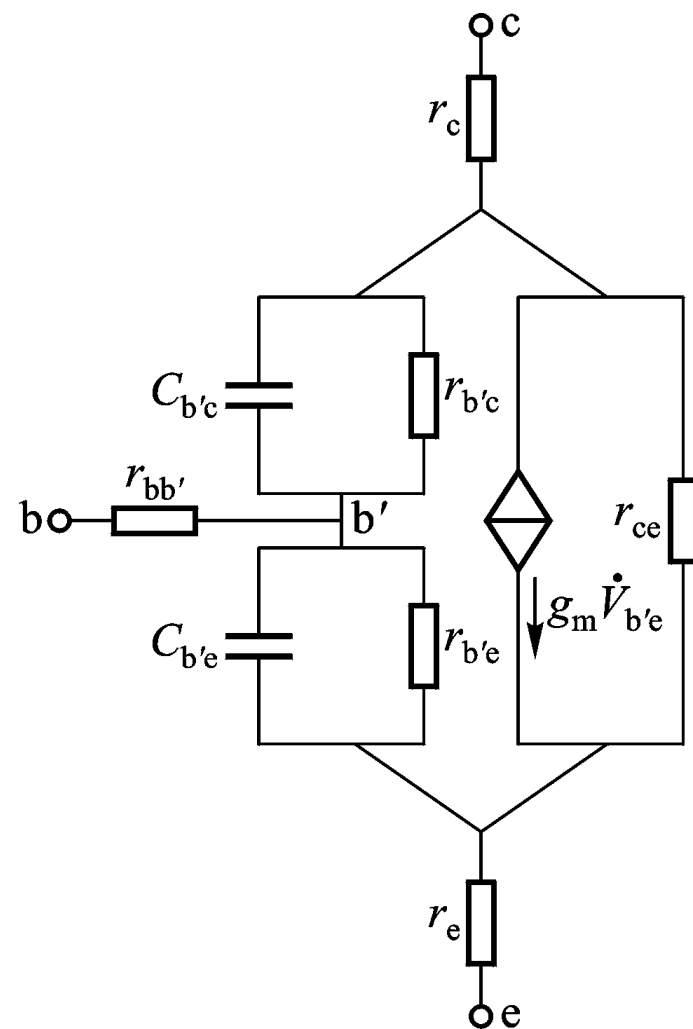
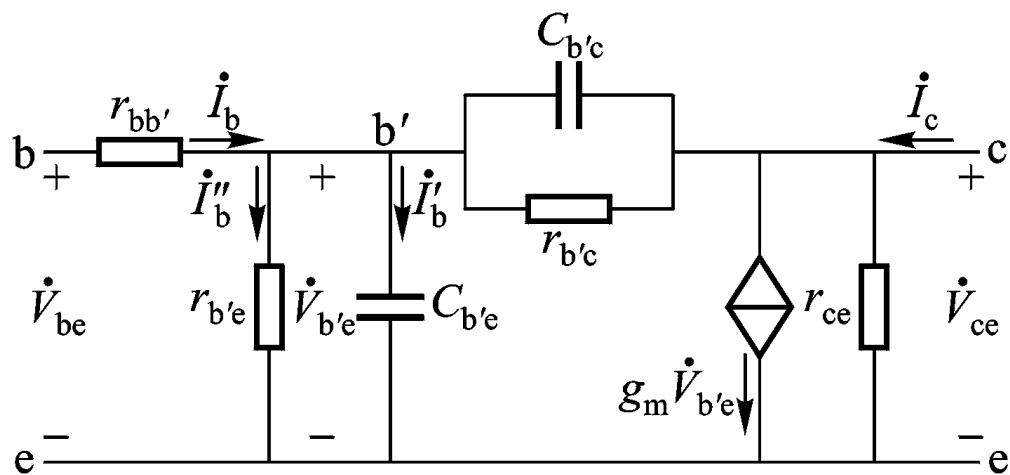
三极管（高频）小信号模型

三极管的物理模型

发射结正偏，结电容由扩散电容决定；
（约几十至一百皮法）

集电结反偏，结电容由势垒电容决定。
（几个皮法）

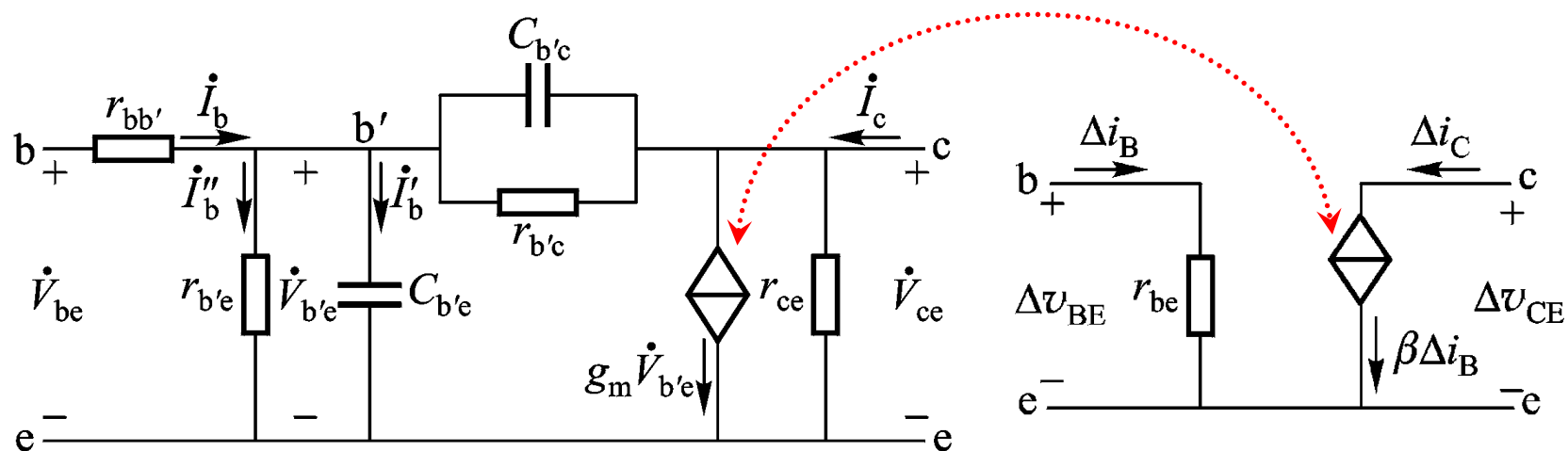
三极管的混合 π 模型（略去 r_e 和 r_c ）



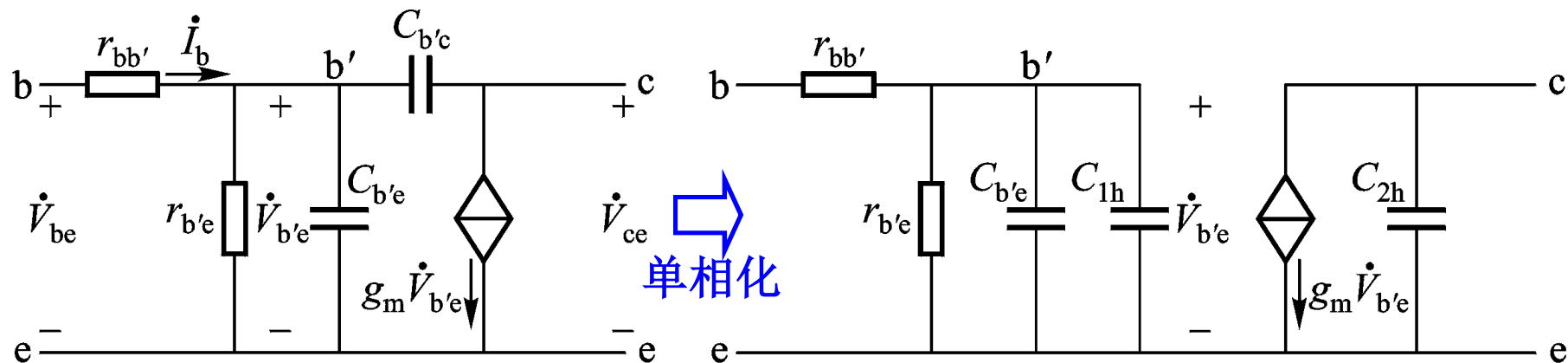
三极管（高频）小信号模型

三极管的混合 π 模型（略去 r_e 和 r_c ）

$$g_m \dot{V}_{b'e} = g_m r_{b'e} \dot{I}_b' \Rightarrow \text{定义 } b_0 = g_m r_{b'e} \Rightarrow g_m = \frac{b_0}{r_{b'e}}$$

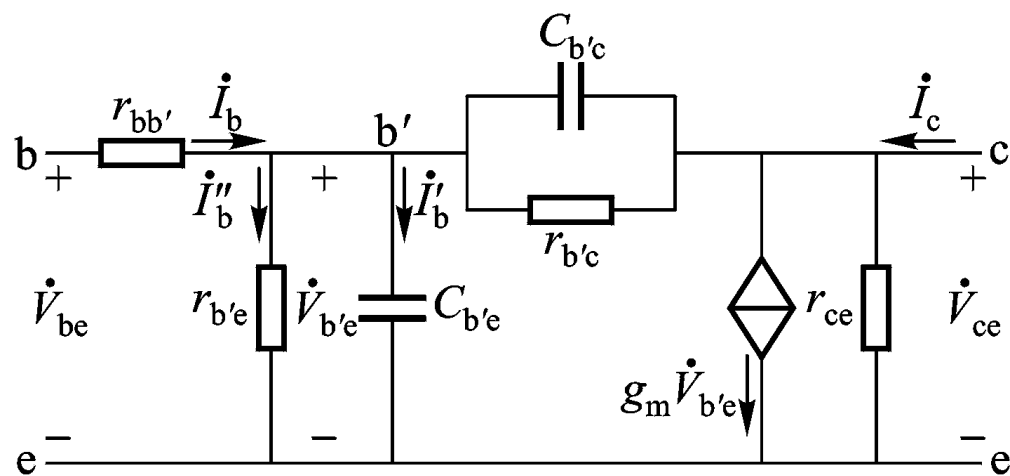


三极管（高频）小信号模型

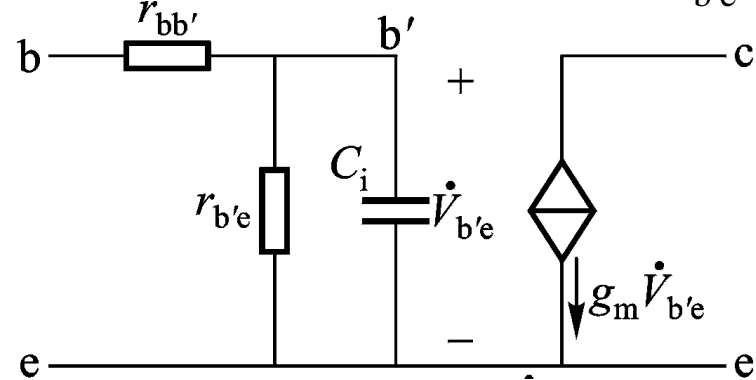


简化

近似

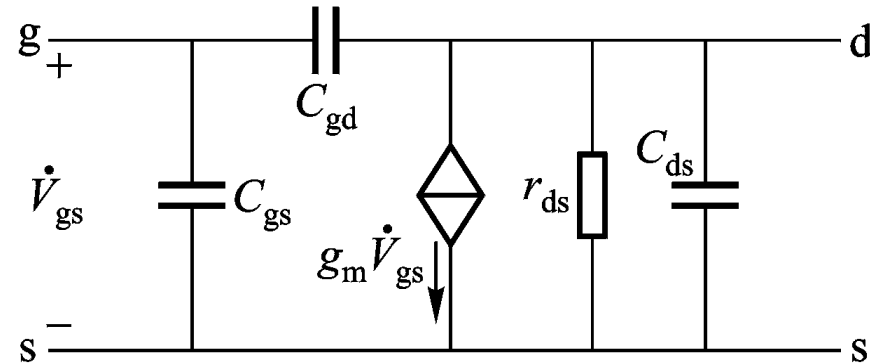


$$C_i = C_{b'e} + (1 - K)C_{b'c}, \quad K = \frac{V_{ce}}{V_{b'e}}$$



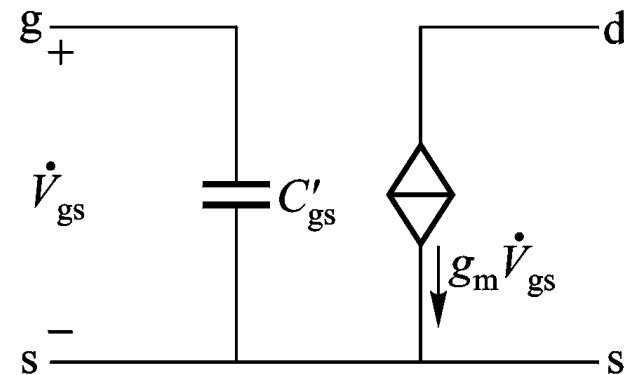
场效应管（高频）小信号模型

高频等效模型



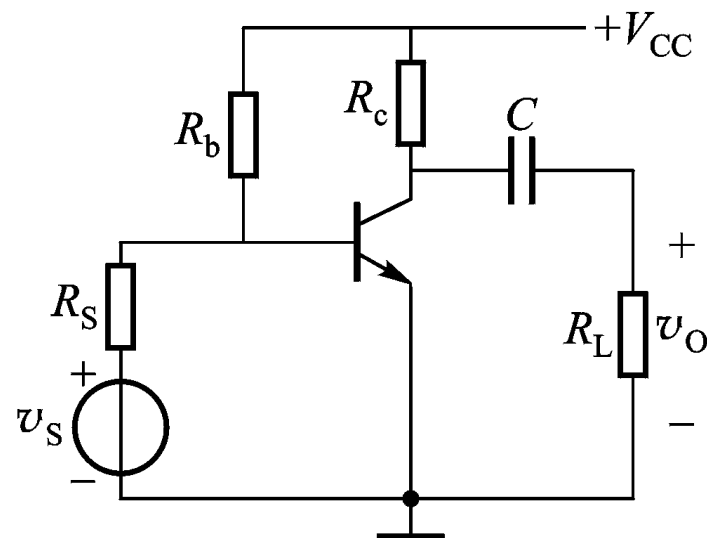
$$C'_{gs} = C_{gs} + (1 - K)C_{gd}$$

简化模型

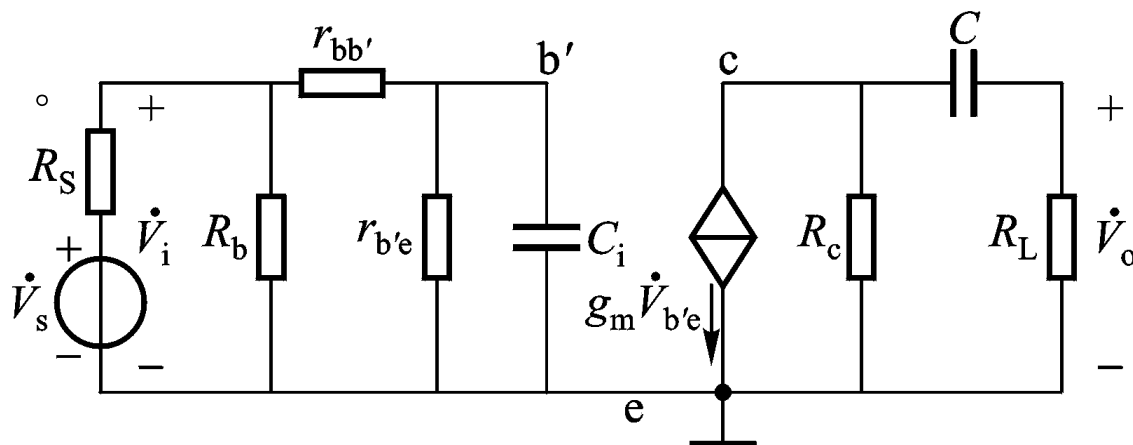


放大电路的分频段分析法

右图所示（共射放大）电路。



全频段微变等效（右图）。



分频段分析法：

利用放大电路中不同类型电容容值相差悬殊的特点，对电路简化；

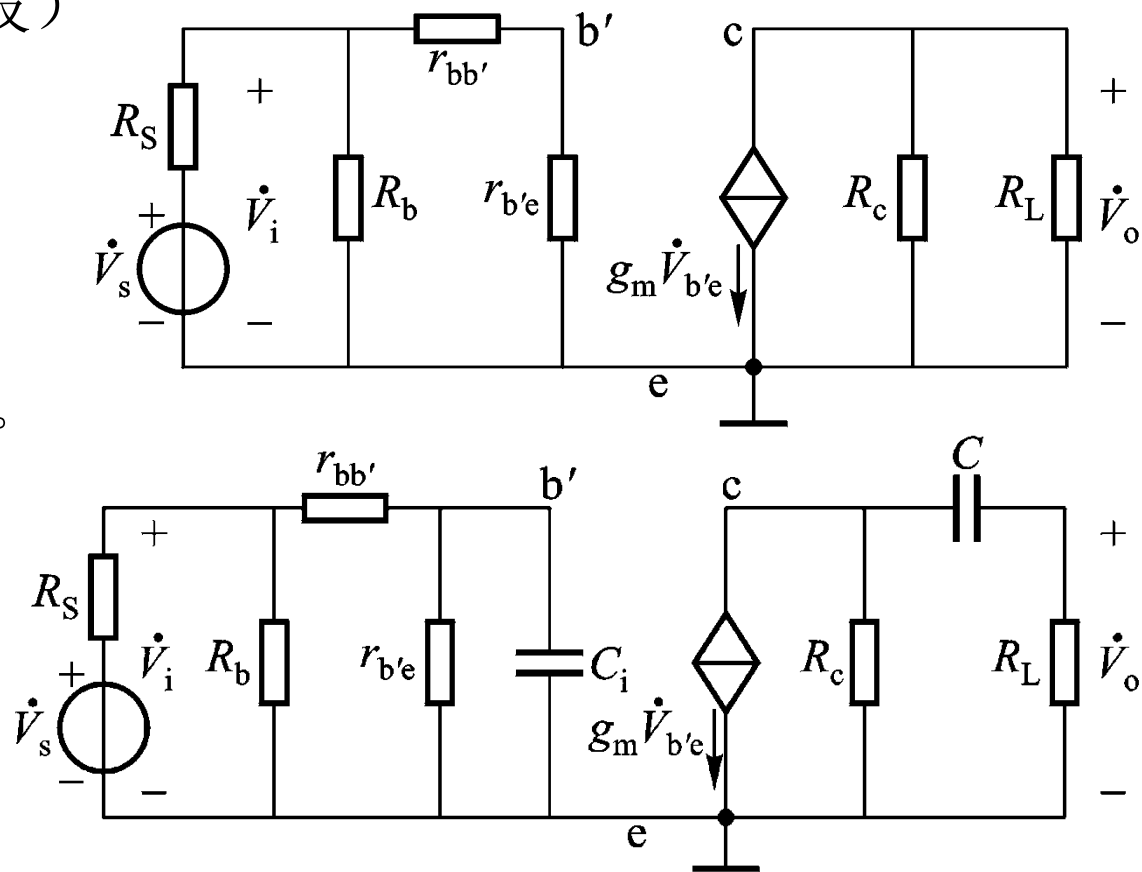
回避了直接利用电路理论求解不同信号频率作用下电路响应时的计算复杂性。

三个频段：中频段、低频段、高频段。

分频段分析（中频段）

中频段等效电路。

C 容抗很小，交流短路；
 C_i 容抗很大，交流开路。



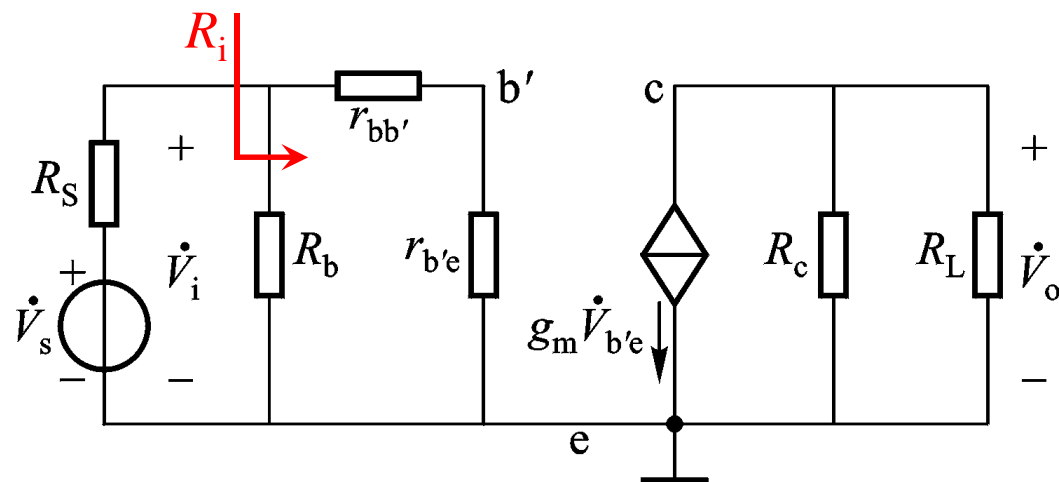
分频段分析（中频段）

源电压增益：

$$\dot{V}_o = -g_m \dot{V}_{b'e} \cdot R'_L$$

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

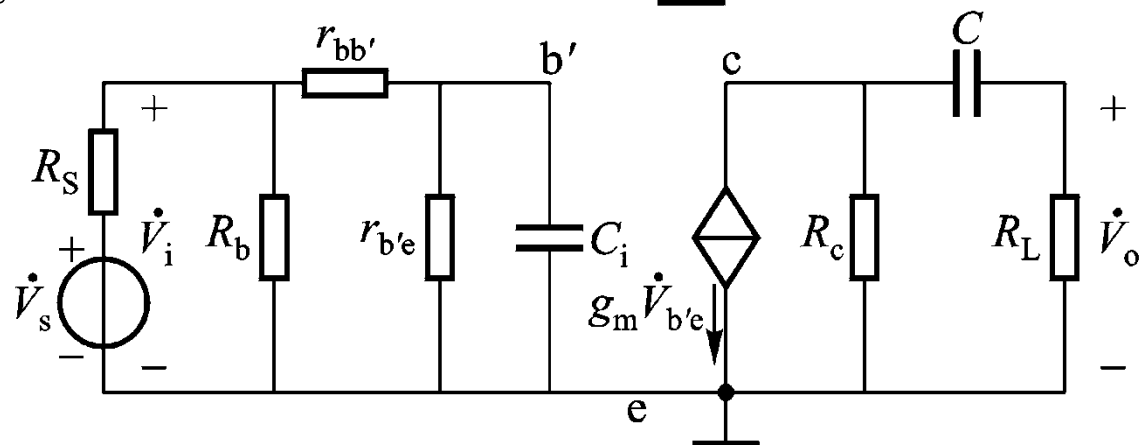
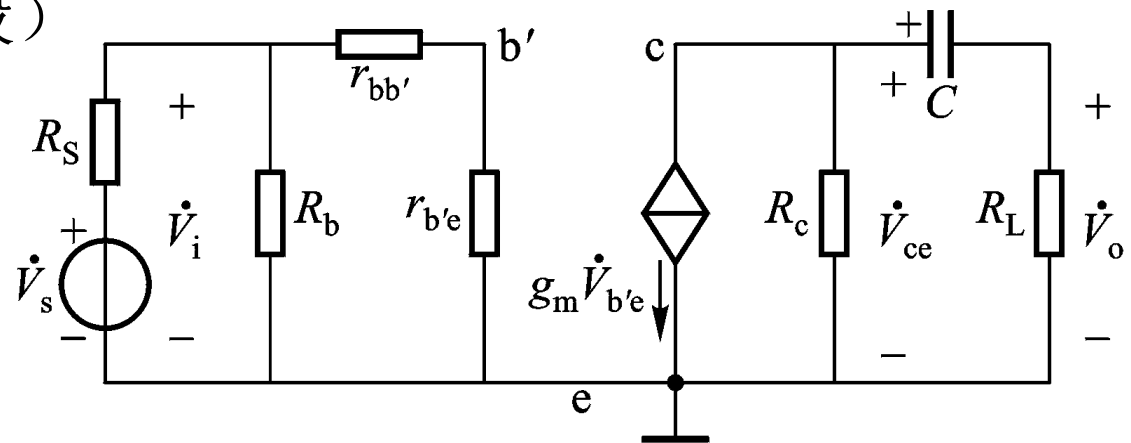
$$A_{vsm} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = -g_m R'_L \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i}$$



分频段分析（低频段）

低频段等效电路。

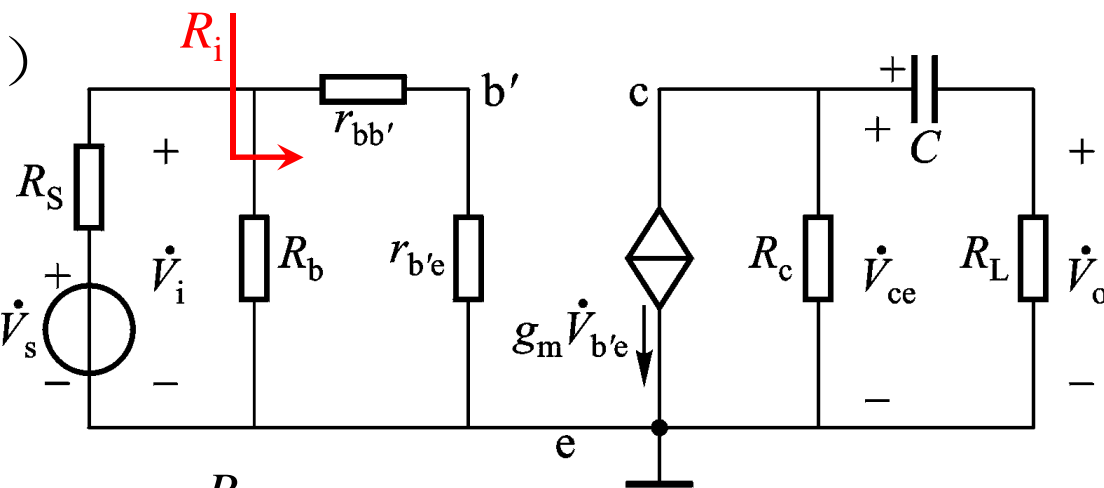
C 容抗增大，不能忽略；
 C_i 容抗更大，交流开路。



分频段分析（低频段）

源电压增益：

$$\begin{cases} \dot{V}_s = \dot{V}_{b'e} \cdot \frac{r_{bb'} + r_{b'e}}{r_{b'e}} \cdot \frac{R_s + R_i}{R_i} \\ \dot{V}_o = -g_m \dot{V}_{b'e} \cdot [R_c // (R_L + \frac{1}{j\omega C})] \cdot \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{j\omega C}} \end{cases}$$



$$A_{vsL} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot (-g_m R'_L) \cdot \frac{j\omega(R_c + R_L)C}{1 + j\omega(R_c + R_L)C} = A_{vsm} \cdot \frac{j\omega(R_c + R_L)C}{1 + j\omega(R_c + R_L)C}$$

定义 C 所在回路的时间常数： $t_L = (R_c + R_L)C$

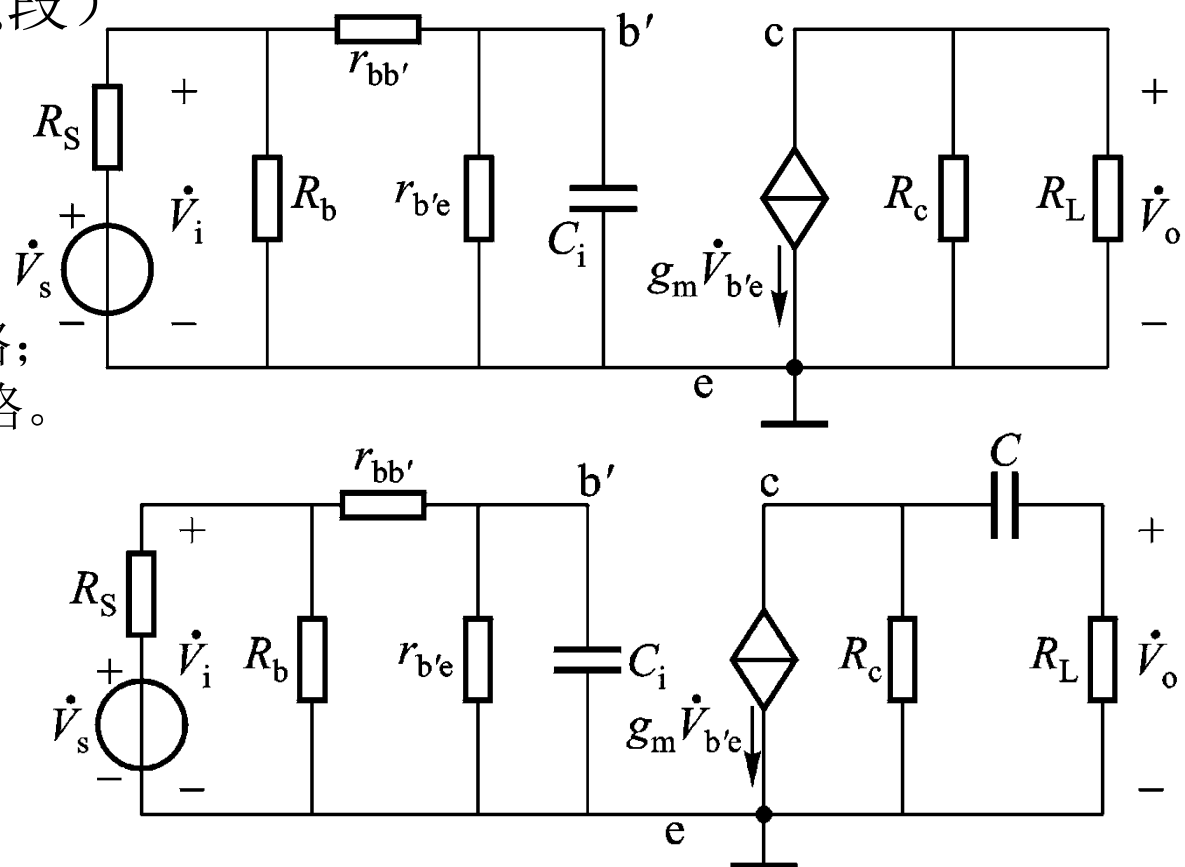
对应的低频转折频率： $f_L = \frac{1}{2\pi t_L} = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C}$

则： $A_{vsL} = A_{vsm} \cdot \frac{jf / f_L}{1 + jf / f_L}$

分频段分析（高频段）

高频段等效电路。

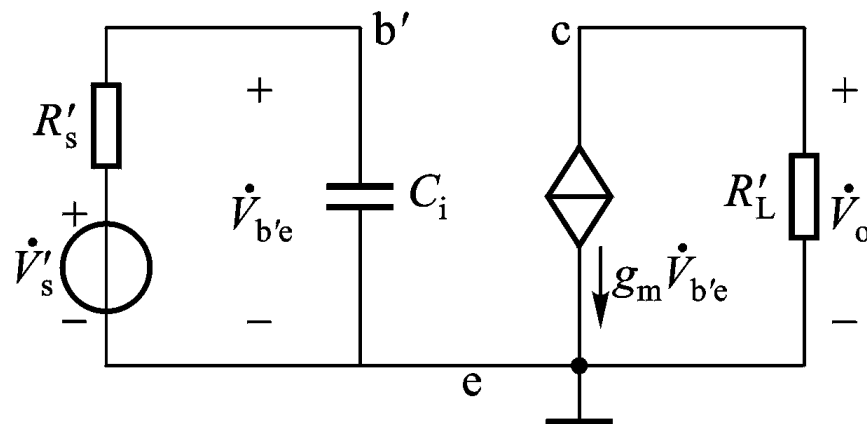
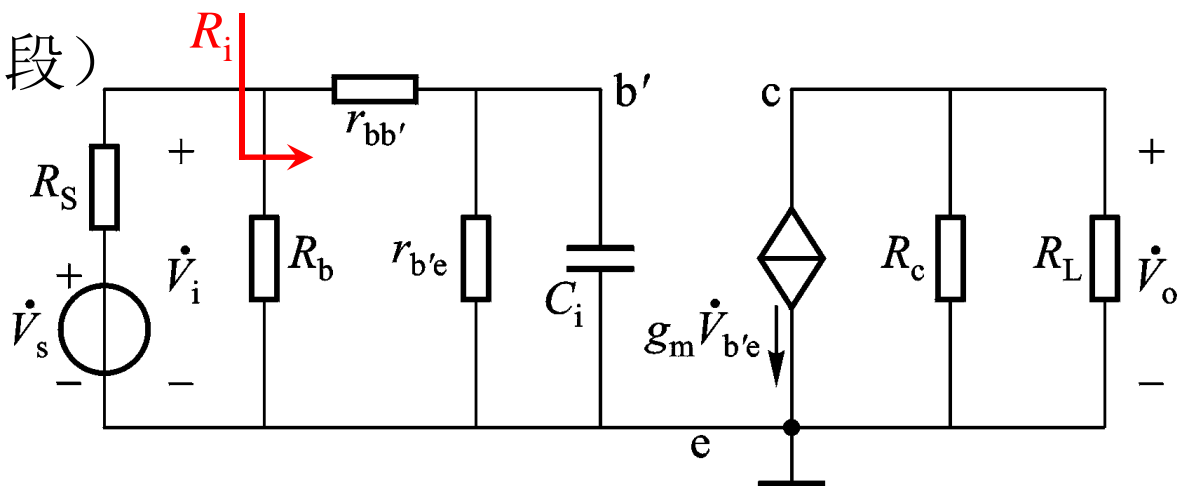
C 容抗更小，交流短路；
 C_i 容抗减小，不能忽略。



分频段分析（高频段）

源电压增益：

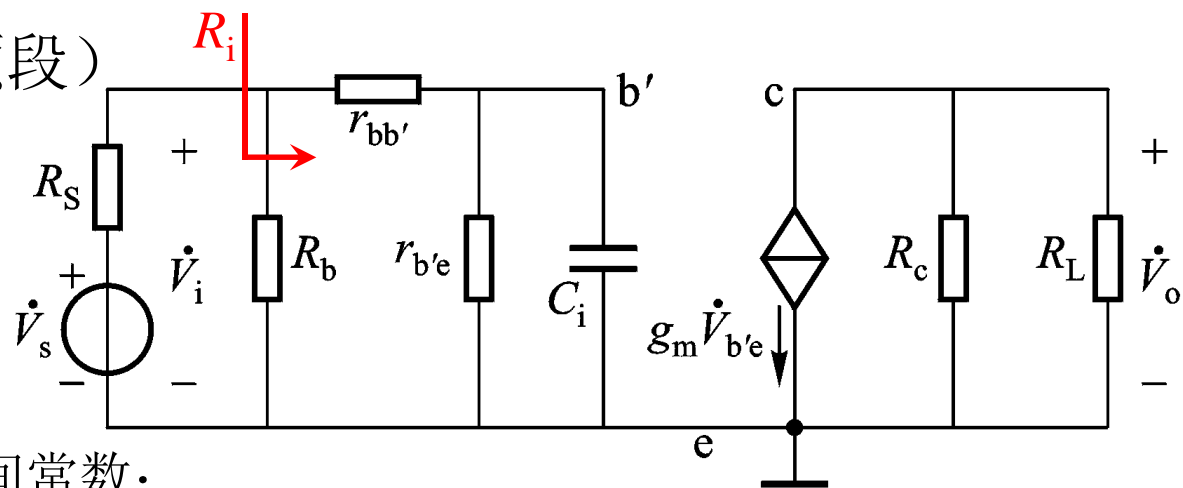
$$\begin{cases} \dot{V}_o = -g_m \dot{V}_{b'e} \cdot R'_L \\ \dot{V}_{b'e} = \dot{V}_s' \cdot \frac{j\omega C_i}{R'_s + \frac{1}{j\omega C_i}} \\ \dot{V}_s' = \dot{V}_s \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{bb'} + r_{b'e}} \\ R'_s = r_{b'e} // [r_{bb'} + R_s // R_b] \end{cases}$$



$$A_{vsH} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot (-g_m R'_L) \cdot \frac{1}{R'_s + \frac{1}{j\omega C_i}} = A_{vsm} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R'_s C_i}$$

分频段分析（高频段）

源电压增益：



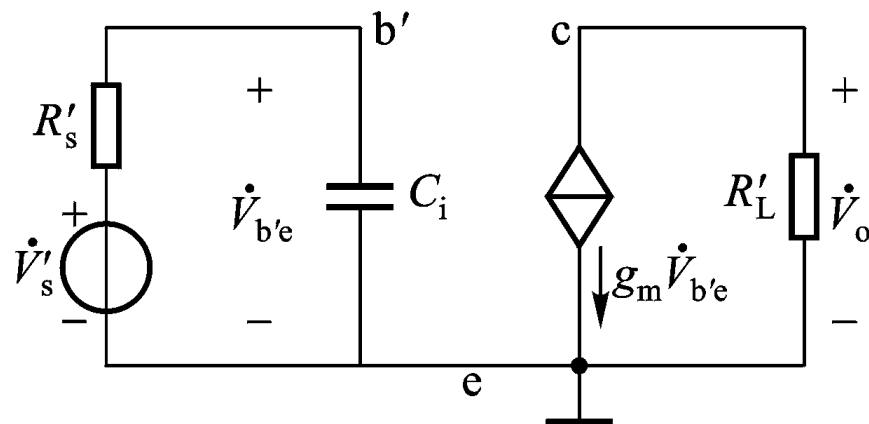
定义 C 所在回路的时间常数：

$$\tau_H = R'_s C_i$$

对应的高频转折频率：

$$f_H = \frac{1}{2\pi \tau_H} = \frac{1}{2\pi R'_s C_i}$$

$$\text{则：} \mathbf{A}_{vsH} = \mathbf{A}_{vsm} \cdot \frac{1}{1 + jf/f_H}$$



$$\mathbf{A}_{vsH} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot (-g_m R'_L) \cdot \frac{1}{R'_s + \frac{1}{j\omega C_i}} = \mathbf{A}_{vsm} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R'_s C_i}$$

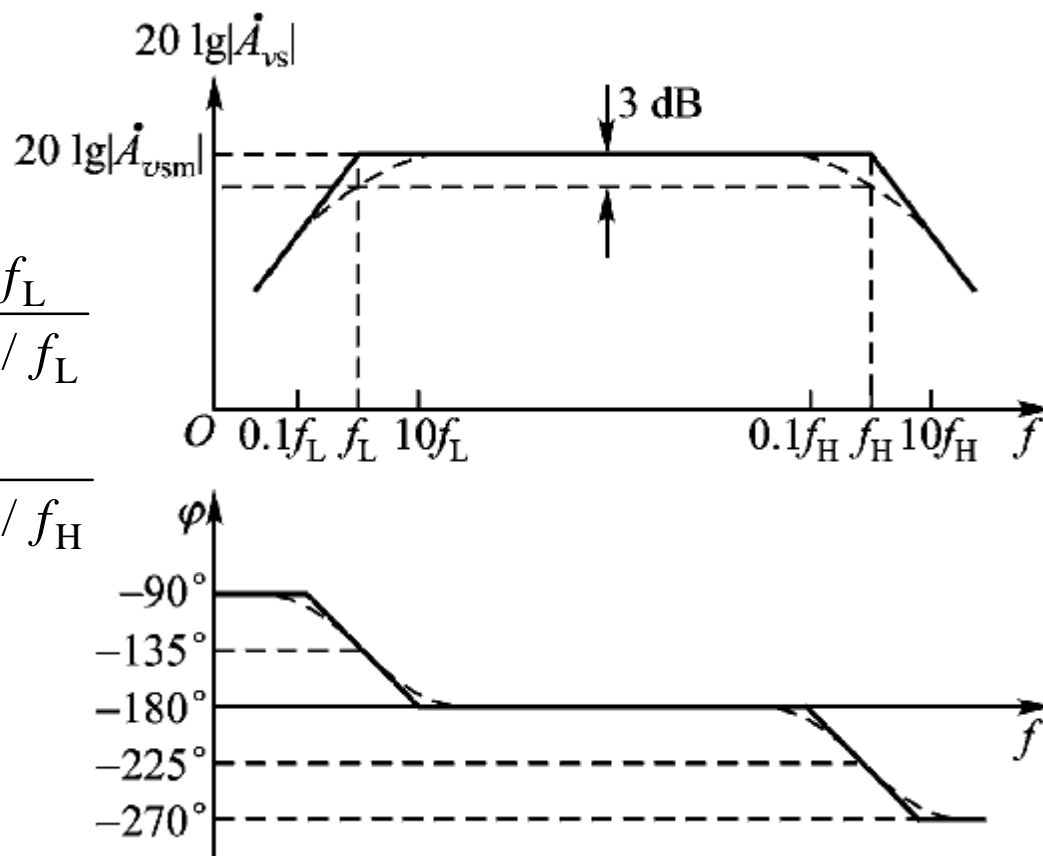
分频段分析（全频段）

全频段源电压增益： $\dot{A}_{vs} = \dot{A}_{vsm} \cdot \frac{jf/f_L}{1+jf/f_L} \cdot \frac{1}{1+jf/f_H}$

中频段： $\dot{A}_{vs} = \dot{A}_{vsm}$

低频段： $\dot{A}_{vs} = \dot{A}_{vsm} \cdot \frac{jf/f_L}{1+jf/f_L}$

高频段： $\dot{A}_{vs} = \dot{A}_{vsm} \cdot \frac{1}{1+jf/f_H}$



整体波特图

【复例1.10】

已知一放大电路的频率响应为 $\dot{A}_v = -46 \cdot \frac{jf/53\text{Hz}}{1+jf/53\text{Hz}} \cdot \frac{1}{1+jf/1.47 \times 10^6\text{Hz}}$
要求画出相应的波特图。

解：对数幅频和相频表达式分别为：

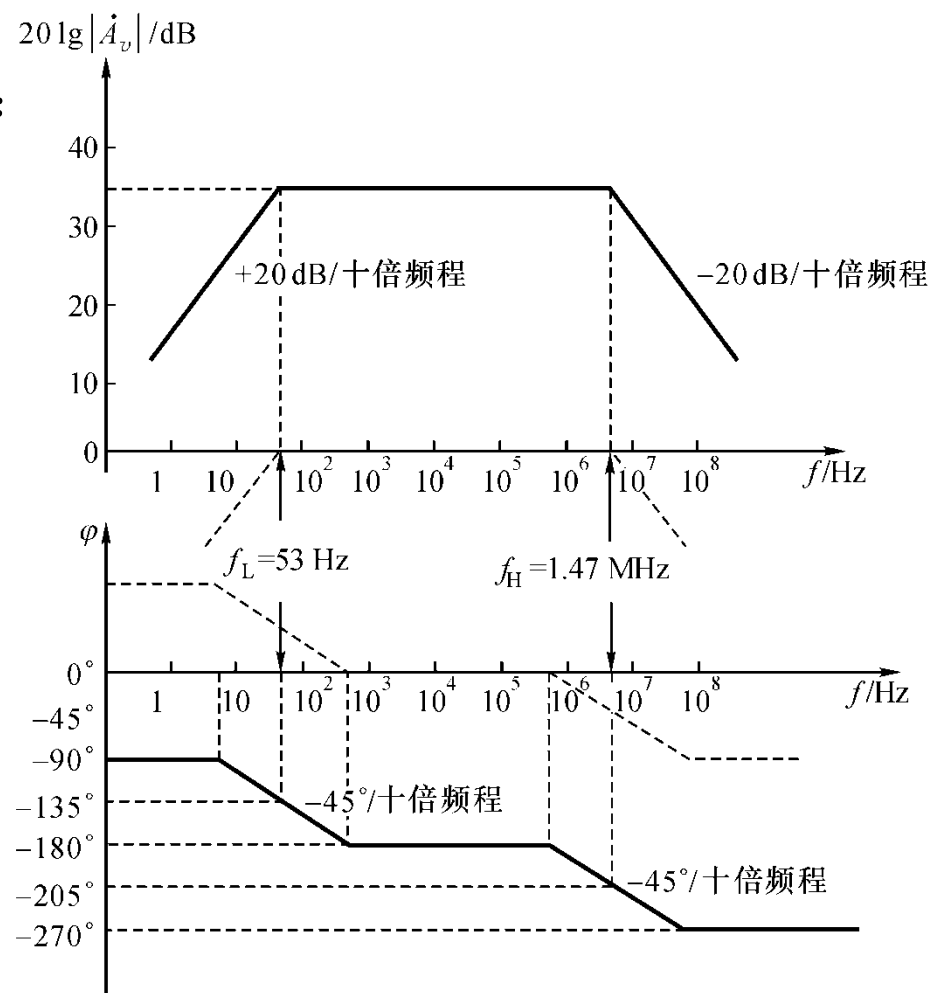
$$\begin{aligned} 20\lg |\dot{A}_v| &= 20\lg 46 + 20\lg(f/53) \\ &\quad - 20\lg \sqrt{1+(f/53)^2} \\ &\quad - 20\lg \sqrt{1+(f/1.47 \times 10^6)^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi &= -180^\circ + 90^\circ - \arctan(f/53) \\ &\quad - \arctan(f/1.47 \times 10^6) \end{aligned}$$

上限频率：1.47 MHz

下限频率：53 Hz

带宽：约 1.47 MHz



Ø 多级放大电路的频域分析

ü 多级放大电路的频响表达式: $A_v \approx \prod_k A_{vmk} \prod_k \frac{jf/f_{Lk}}{1+jf/f_{Lk}} \prod_i \frac{1}{1+jf/f_{Hi}}$

ü 多级放大电路由单级放大器组成;

每级有独立的上、下限转折频率 f_H 、 f_L ;

转折频率的个数由放大电路中的电容数决定, 数值与电容所在回路的时间常数相关。

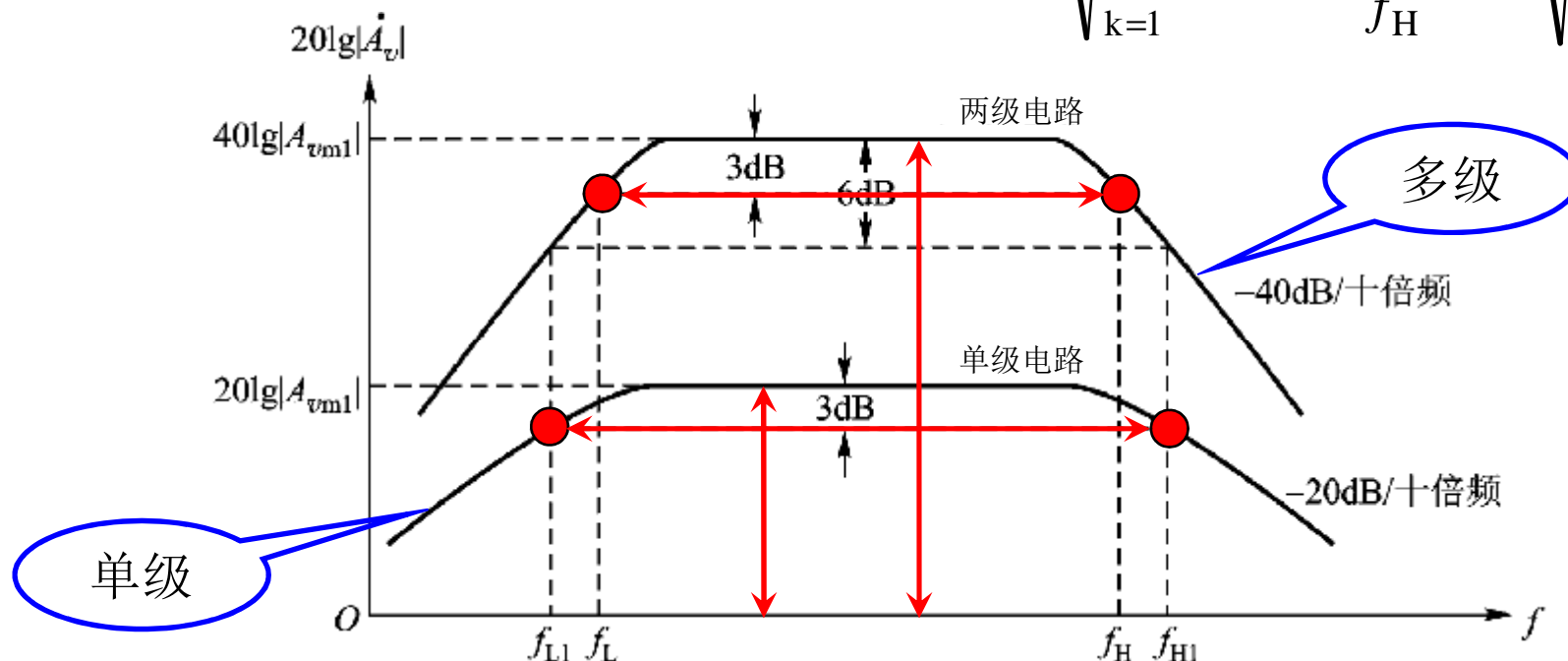
❖ 多级放大电路的频域分析

ü 例：用两级频率特性相同的共射放大电路组成多级放大电路。

$$A_v = A_{v1} \times A_{v2} = (A_{v1})^2 = A_{vm1}^2 \times \left(\frac{j f / f_{L1}}{1 + j f / f_{L1}} \right)^2 \times \left(\frac{1}{1 + j f / f_{H1}} \right)^2$$

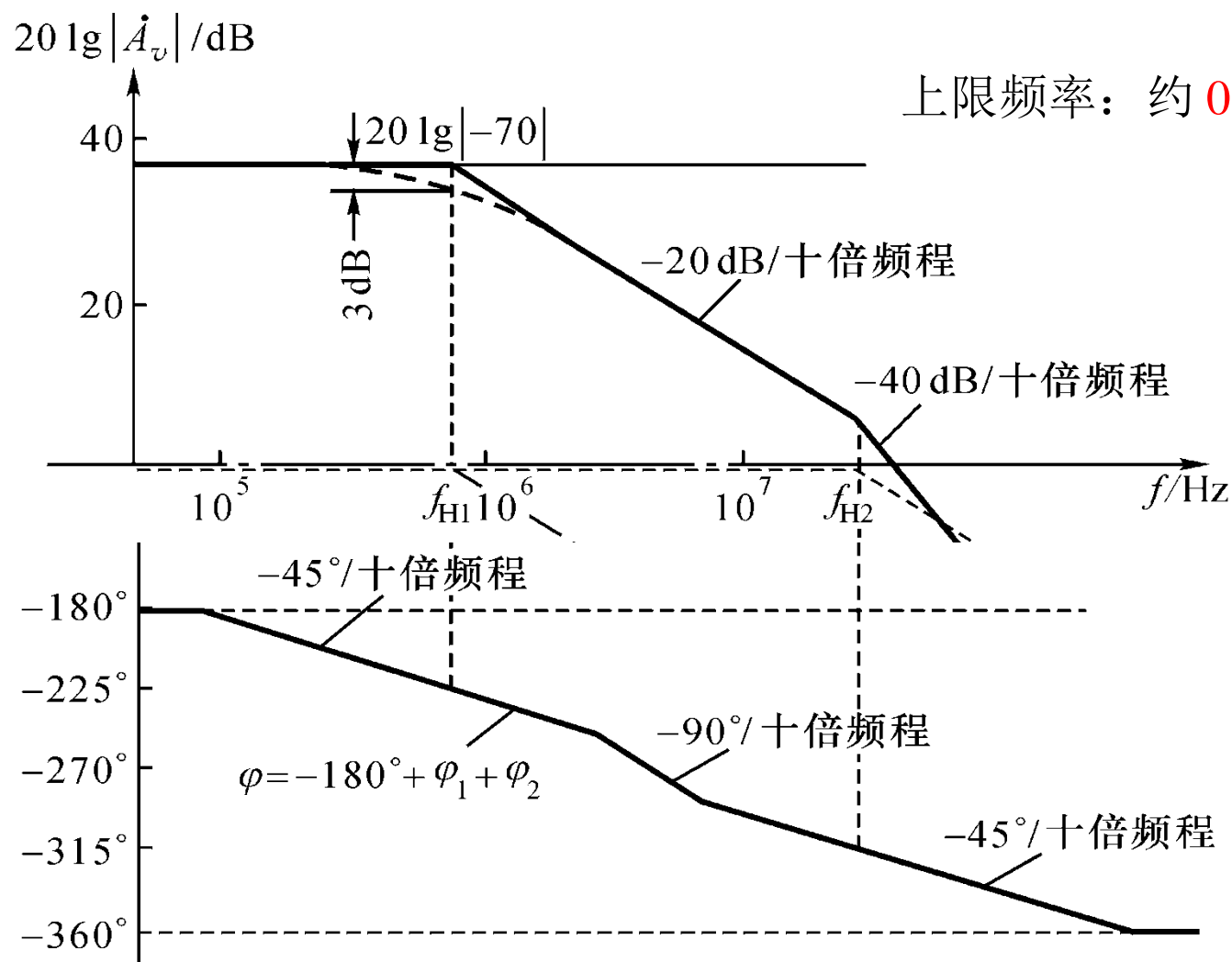
ü 放大电路级数越多，增益愈高，频带越窄。

多级放大电路上、下限频率的估算： $f_L \approx 1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^N f_{Lk}^2}$, $\frac{1}{f_H} \approx 1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{1}{f_{Hk}^2}}$



【复例1.11】

已知一放大电路的频率响应为 $\dot{A}_v = -70 \cdot \frac{1}{1 + jf/7.43 \times 10^5} \cdot \frac{1}{1 + jf/2.6 \times 10^7}$
要求画出相应的波特图。



✓ 本节作业

📌 习题 1 (P95)

7c、9b (三极管)

📌 题 1.7c 与 1.9b : 实际上是同一个电路图;

题 1.9b : 第一小题、第二小题 (电路组态) 不用做。

📌 题 1.7c 与 1.9b : 包括静态、动态分析;

(可根据已知内容先做部分, 或等待动态分析讲解完后再做题)

所有的题目, 需要有解题过程 (不是给一个答案即可)。

✓ 本节作业

📌 习题 1 (P93)

5c、12a (场效应管)

📌 题 1.5c 与 1.12a : 实际上是同一个电路图;

题 1.12a : 第一小题 (电路组态) 不用做。

📌 题 1.5c 与 1.12a : 包括静态、动态分析;

(可根据已知内容先做部分, 或等待动态分析讲解完后再做题)

所有的题目, 需要有解题过程 (不是给一个答案即可)。

✓ 本节作业

ü 习题 1 (P98)

13 (电流源分析)

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。

✓ 本节作业

☺ 习题 1 (P98)

15、17 (多级电路)

☺ 题 1.15：第二小题， T_1 管要求的是：静态电流 I_{DQ} 、静态电压 V_{DSQ} 。

题 1.17：第一小题，不用做；

第三、四小题，写出表达式即可。

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。

✓ 本节作业

🟡 习题 1 (P105)

30 (波特图)

🟡 补充题 1：画出题 1.17 所示电路的全频段微变等效电路图。

🟡 补充题 2：设放大电路的电压增益表达式如下：

$$\dot{A}_{vs} = \frac{-100 \times (jf / 10\text{Hz})}{(1 + jf / 10\text{Hz}) \times (1 + jf / 10\text{kHz})^2 \times (1 + jf / 100\text{kHz})}$$

- (1) 写出其对数幅频、相频表达式；
- (2) 画出波特图；
- (3) 求 f_L 、 f_H 的近似值。

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。