

# 单管放大电路

- 直流（交流）通路；微变等效电路；
- 静态工作点；
- 增益（ $A_v$ ； $20\lg(A_v)$ ）； $R_i$ ； $R_o$ ；最大不失真输出幅度
- BJT和FET都要求。6种组态

# 多级

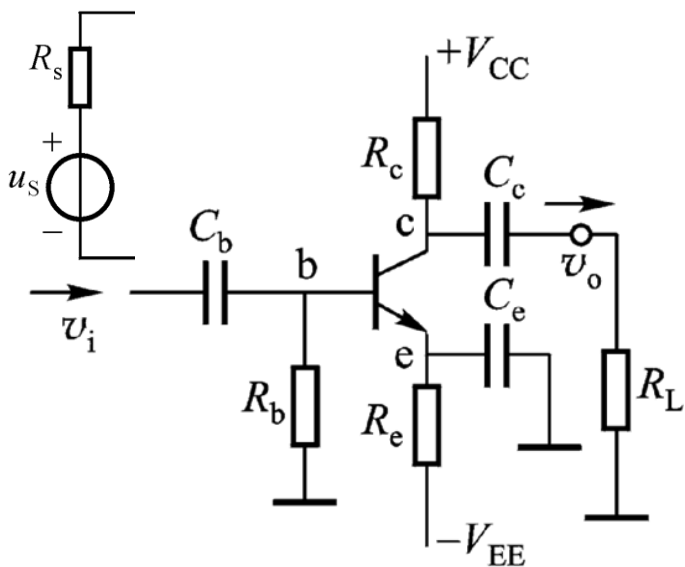
- 多级放大电路性能；分析方法
- 总增益与各级增益 ( $A_v$ ;  $20\lg(A_v)$ )
- $R_i$ ;  $R_o$

# 差分

- 基本概念
- 差分放大电路的分析计算（类同多级放大）：  
静态工作点、交流通路、微变等效电路、差（共）模增益、共模抑制比
- 掌握集成运放的特性和主要性能指标
- 综合性（恒流源+差分放大）

要熟练掌握差分放大电路的分析计算

掌握集成运放的特性和主要性能指标

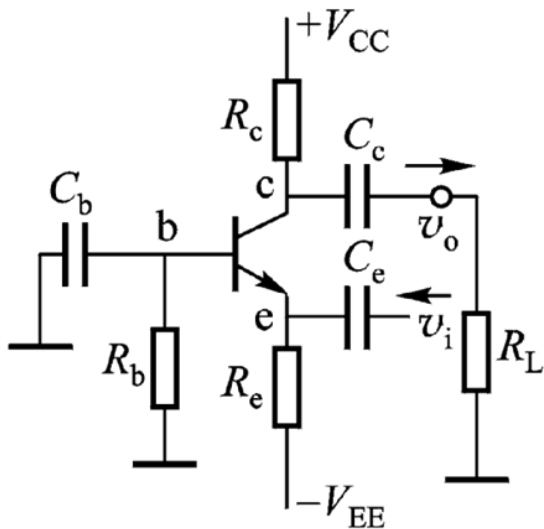


共射

$$A_v = -\frac{\beta R_L'}{r_{be}}$$

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

$$R_o = R_c$$

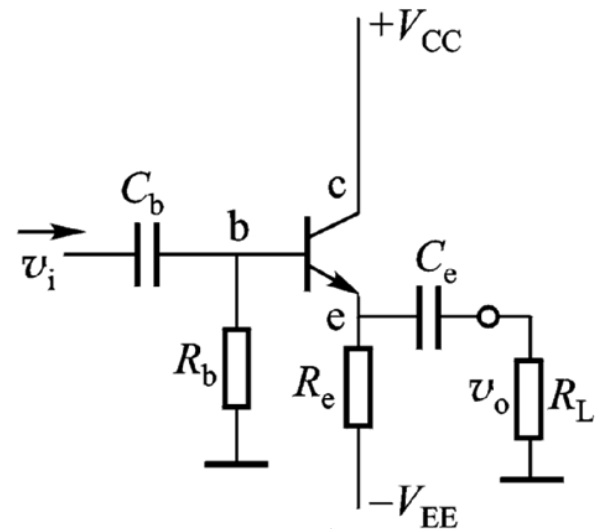


共基

$$A_v = \frac{\beta R_L'}{r_{be}}$$

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

$$R_o = R_c$$

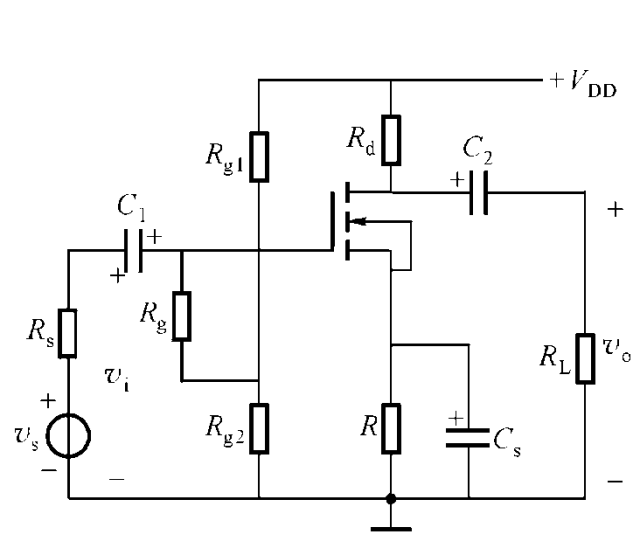


共集

$$A_v = -\frac{(1 + \beta)R_L'}{r_{be} + (1 + \beta)R_L'}$$

$$R_i = R_b // \{r_{be} + (1 + \beta)R_e // R_L'\}$$

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



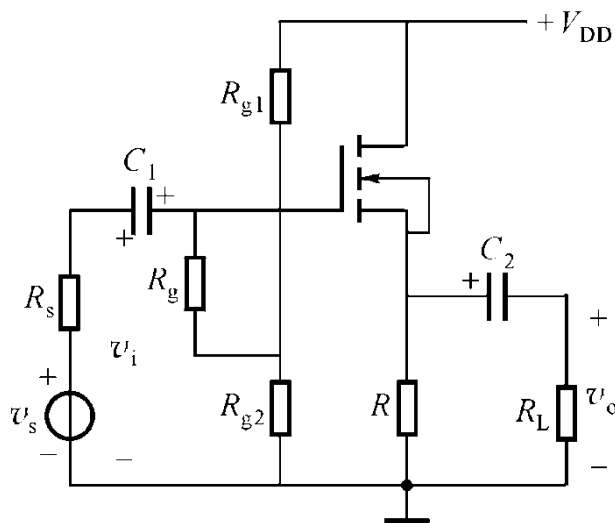
共源

$$A_v = \frac{-g_m \dot{V}_{gs} R'_L}{\dot{V}_{gs}} = -g_m R'_L$$

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

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_g + R_{g1} // R_{g2}$$

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}'_o}{\dot{I}'_o} \right|_{\substack{\dot{V}_s=0 \\ R_L=\infty}} = R_d$$

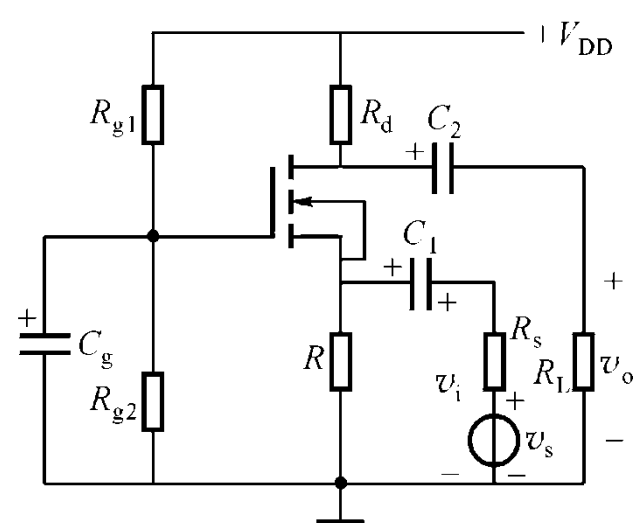


共漏

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

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

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



共栅

$$A_v = g_m R'_L$$

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

$$R_o = R_d$$

CE	CB	CC	CS	CG	CD
放大倍数					
$-\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$	$\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$	$\frac{(1+\beta)R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R'_L}$	$-g_m R'_L$	$g_m R'_L$	$\frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L}$

CE	CB	CC	CS	CG	CD
输入电阻					
$R_b // r_{be}$	$R_e // \frac{r_{be}}{1+\beta}$	$R_b // [r_{be} + (1+\beta)R'_L]$	$R_{g1} // R_{g2}$	$R // \frac{1}{g_m}$	$R_{g1} // R_{g2}$

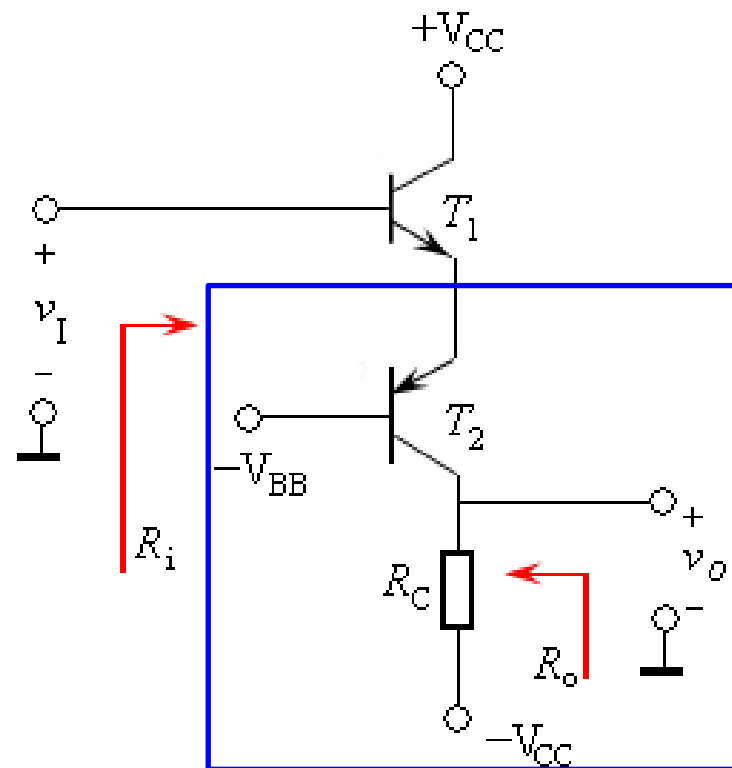
CC输入电阻与负载有关

CE	CB	CC	CS	CG	CD
输出电阻					
$R_c$	$R_c$	$R_e // \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1+\beta}$	$R_d$	$R_d$	$R // \frac{1}{g_m}$

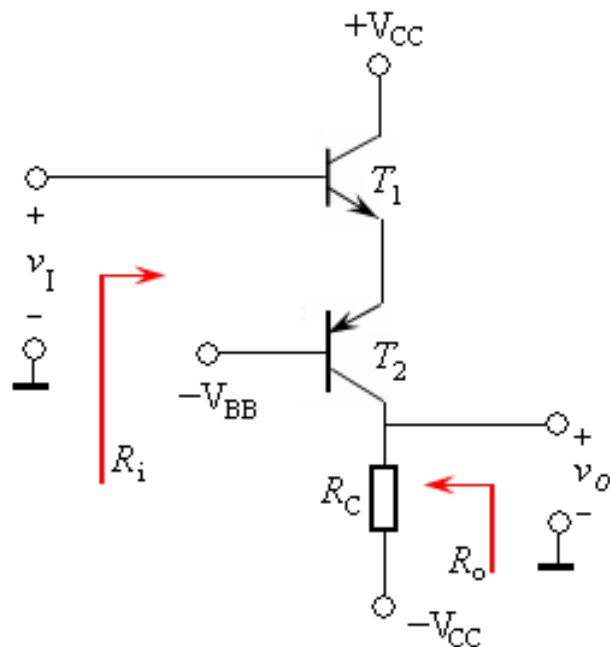
CC输出电阻与信号源内阻有关

**例1:**放大电路如图所示，设晶体管 $T_1$ 、 $T_2$ 为具有理想对称特性的两只晶体管，且电路中各元器件参数均为已知量。

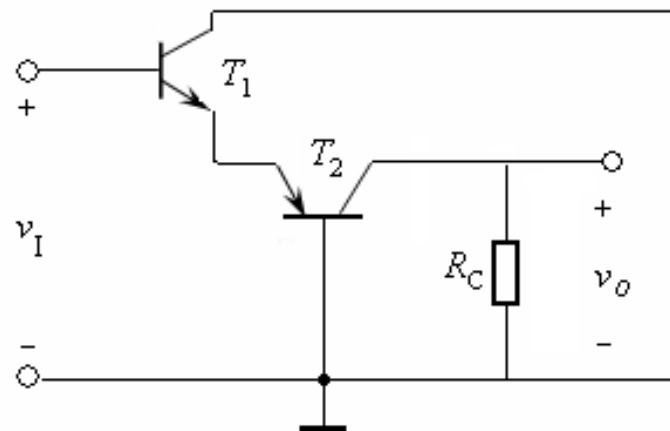
1.  $T_1$ 、 $T_2$ 各组成哪种基本接法（共射、共基、共集）的放大电路；
2. 求出电压放大倍数 $A_v$ 、输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$ 的表达式。



解:



交流通路



$T_1$ 是共集放大电路， $T_2$ 是共基放大电路，称CC—CB组合放大电路。

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_I} = \frac{\beta \times i_b \times R_C}{i_b [r_{be} + (1 + \beta) R_{i2}]} = \frac{\beta i_b R_C}{i_b [r_{be1} + (1 + \beta_2) \frac{r_{be2}}{1 + \beta_2}]} = \frac{\beta R_C}{2r_{be}}$$

$$R_i = r_{be1} + (1 + \beta_1) R_{i2} = r_{be1} + (1 + \beta_1) \frac{r_{be2}}{1 + \beta_2} = 2r_{be}$$

$$R_o \approx R_C$$



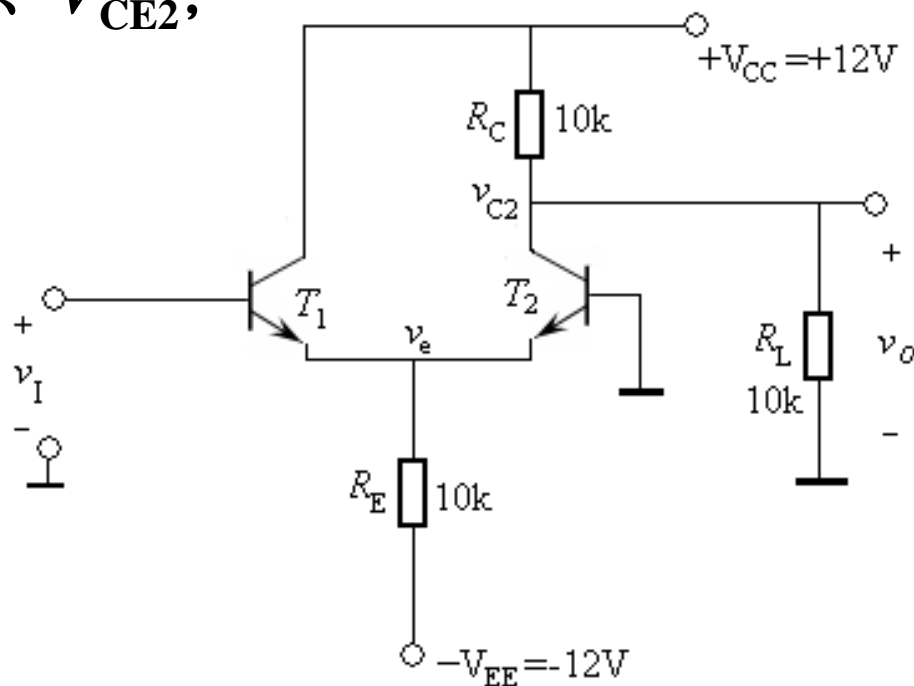
**例2:** 一个单端输入/单端输出的差分放大电路,  $\beta_1=\beta_2=60$ ,  
 $r_{be1}=r_{be2}=3\text{k}\Omega$ ,  $V_{BE1}=V_{BE2}=0.6\text{V}$ 。

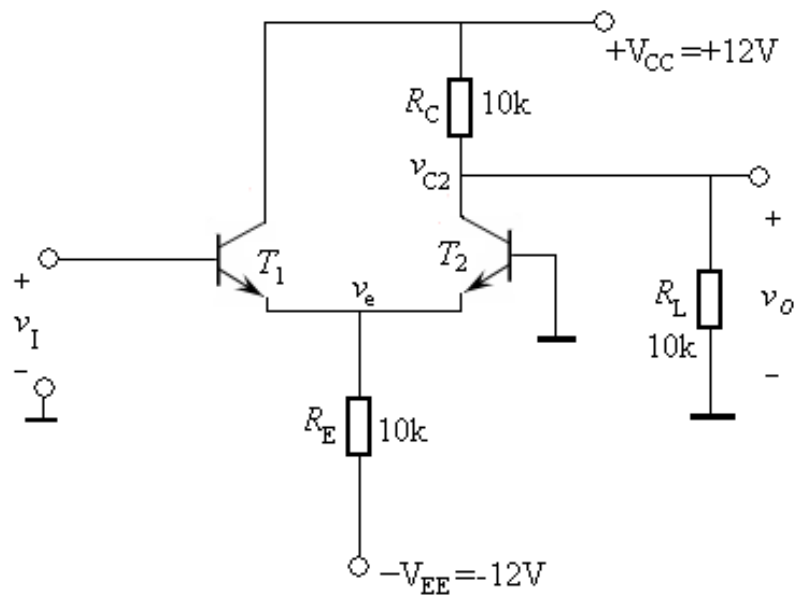
1. 计算静态时的  $I_{C1}$ 、 $I_{C2}$ 、 $V_{CE1}$ 、 $V_{CE2}$ ;

2. 计算  $A_{vd}$ 、 $R_{id}$ 、 $R_o$ ;

3. 计算  $A_{vc}$ 、 $K_{CMR}$ ;

4. 若输入正弦信号电压为  
 $v_i=20\sin\omega t(\text{mV})$ , 画出  $v_{c2}$  和  $v_e$   
中交流成分 ( $v_{c2}$  和  $v_e$ ) 的波形,  
并在图中标明幅值的大小。





解： 1. 
$$I_{C1} = I_{C2} \approx I_{E1} = I_{E2} = \frac{1}{2} \times \frac{-0.6 - (-12)}{10} = 0.57 \text{ mA}$$

$$V_{CE1} = 12 - (-0.6) = 12.6V$$

$$\begin{cases} V_{C2} = V_{CC} - I_{R_C} R_C \\ I_{R_C} = I_{C2} + I_L = I_{C2} + \frac{V_{C2}}{R_L} \end{cases}$$

解得：  $V_{C2} = 3.15V$

$$\therefore V_{CE2} = 3.75V$$

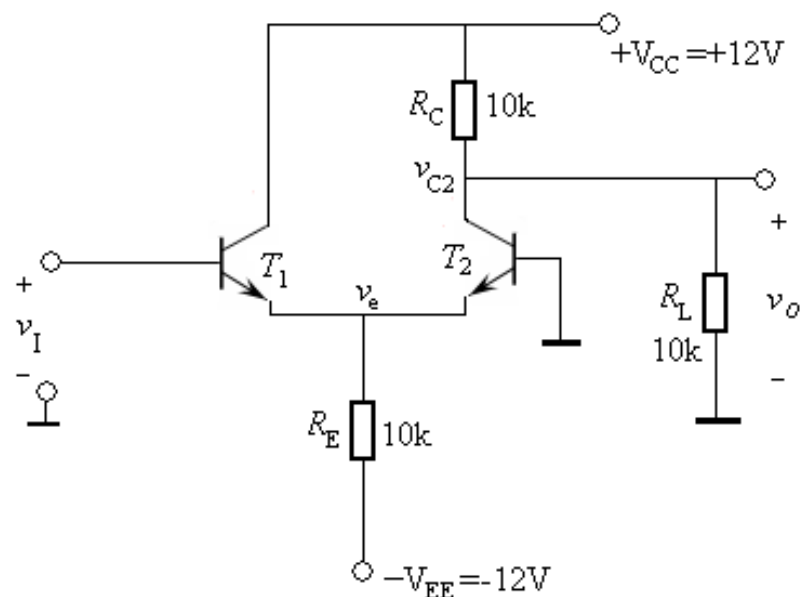
## 2. 差模增益，差模输入电阻和输出电阻

单入/单出电路

$$A_{vd} = \frac{1}{2} \times \frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be2}} = \frac{1}{2} \times \frac{60 \times 5}{3} = 50$$

$$R_{id} = 2 \times r_{be} = 6K\Omega$$

$$R_o \approx R_C = 10K\Omega$$



## 3. 共模放大倍数和共模抑制比

$$A_{vC} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta)2R_e} = -\frac{60 \times 5}{3 + 61 \times 20} \approx -0.25$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| = \frac{50}{0.25} = 200 (20 \lg \left| \frac{50}{0.25} \right| \approx 46dB)$$

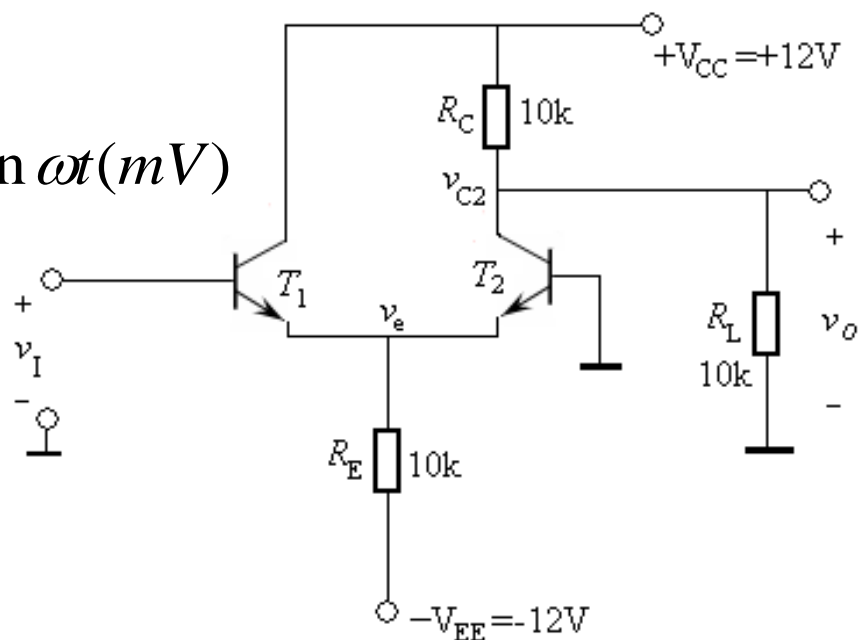
4. 由于是单端输入，而发射极电压仅含共模成份，而 $T_2$ 集电极既有差模成份又有共模成分，所以要分开计算。

差模信号：

$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2} = 20\sin\omega t - 0 = 20\sin\omega t(mV)$$

共模信号：

$$v_{ic} = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2} = 10\sin\omega t(mV)$$

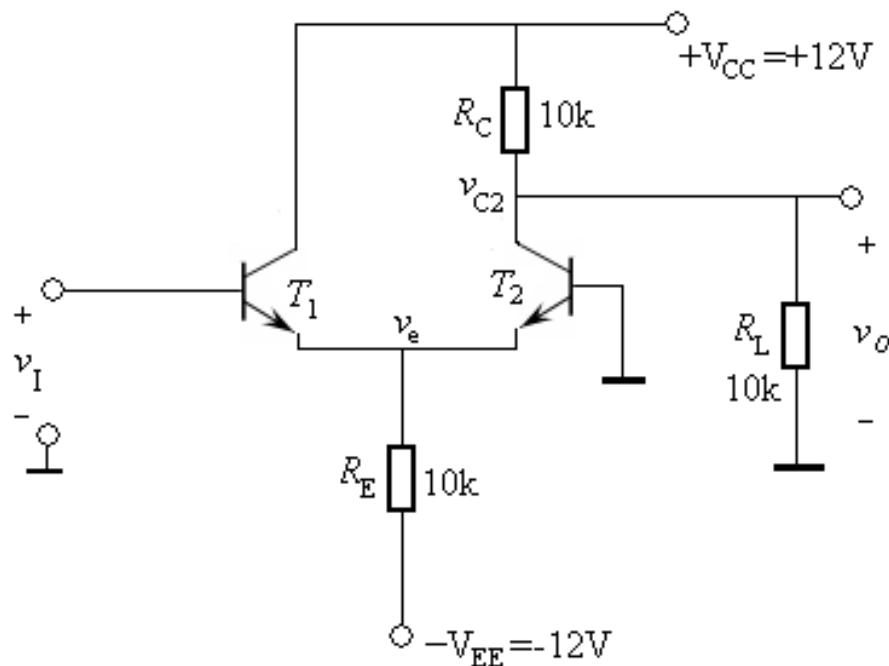


## $T_2$ 集电极信号

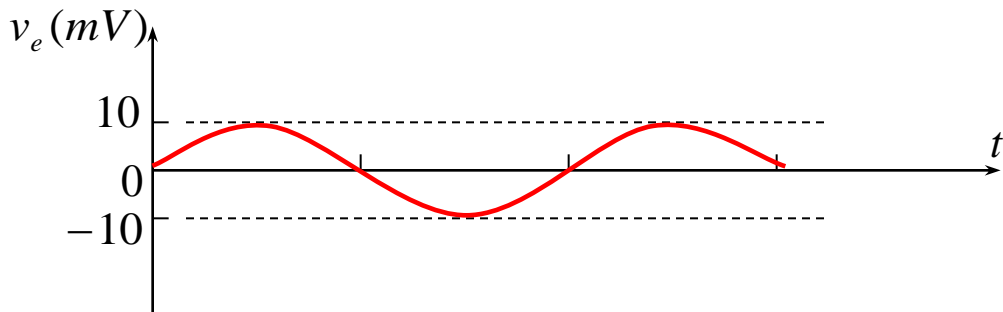
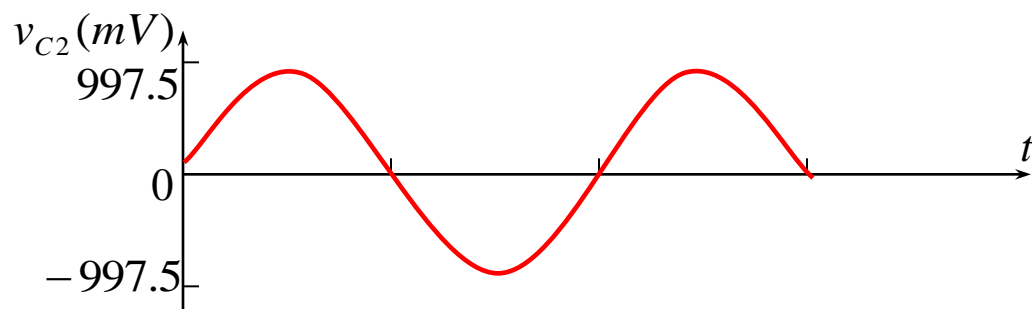
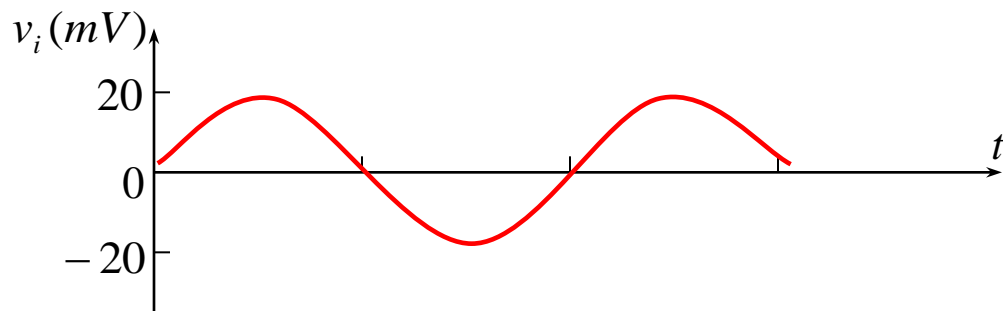
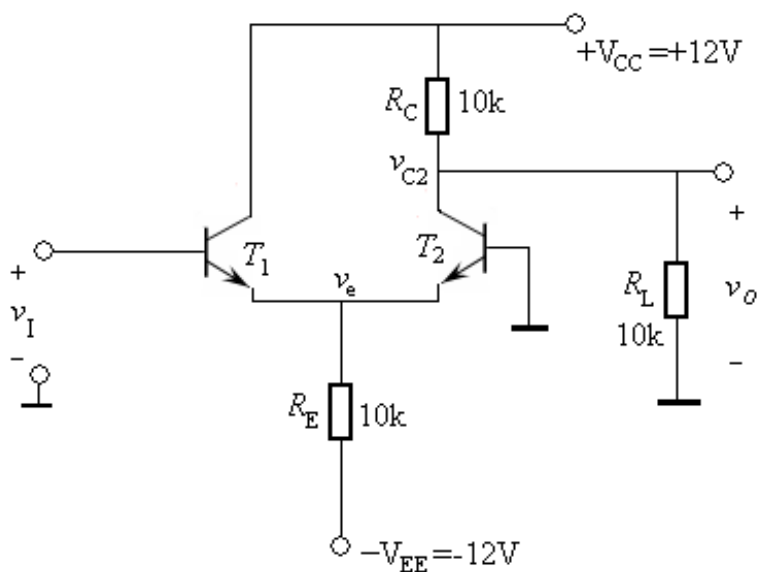
$$\begin{aligned}v_{C2} &= A_{vd} \times v_{id} + A_{vc} \times v_{ic} \\&= 50 \times 20 + (-0.25 \times 10) = 997.5 \sin \omega t (mV)\end{aligned}$$

发射极信号只有共模信号作用下的共模信号成份。

$$\begin{aligned}v_E &= v_{ic} \times \frac{(1 + \beta)2R_e}{r_{be} + (1 + \beta)2R_e} \\&= 10 \times \frac{61 \times 20}{3 + 61 \times 20} \approx 10 \sin \omega t (mV)\end{aligned}$$



由已知波形画出 $v_{c2}$ 和 $v_e$ 的波形



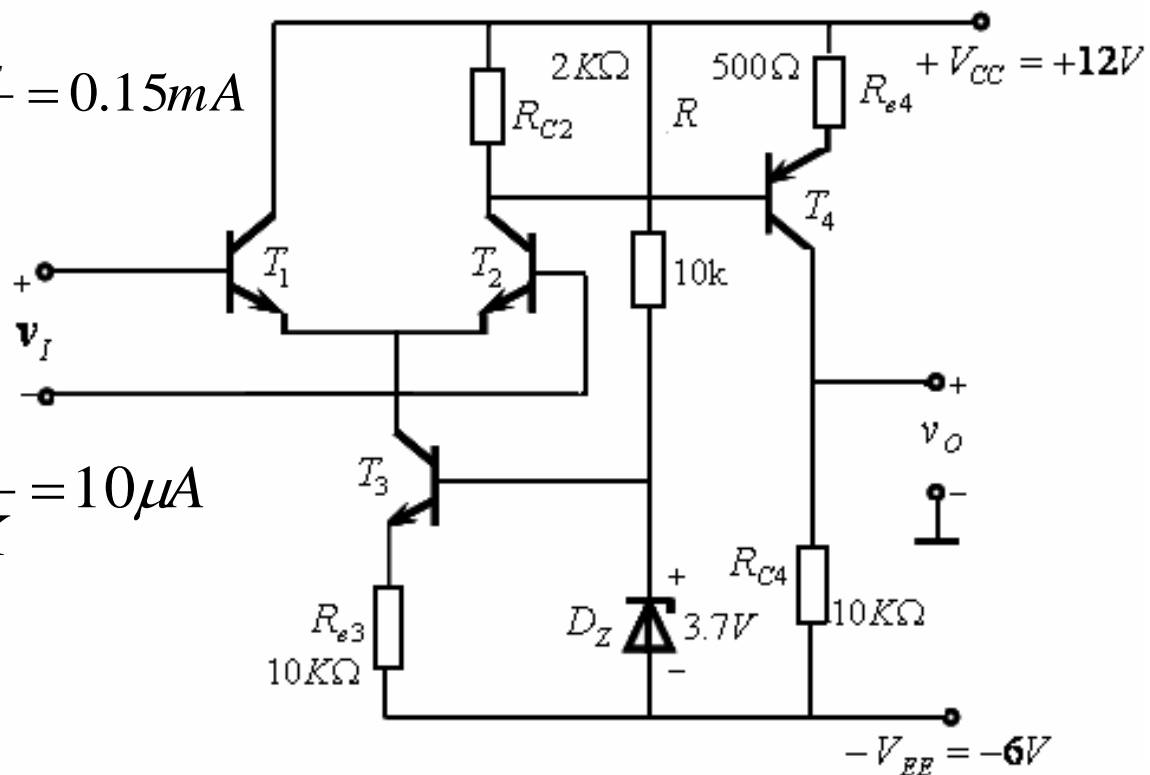
**例3:** 电路图中, 晶体管为硅管,  $\beta=60$ ,  $r_{bb'}=100\Omega$ , 静态时的  $|V_{BEQ}|\approx 0.7V$ 。试求:

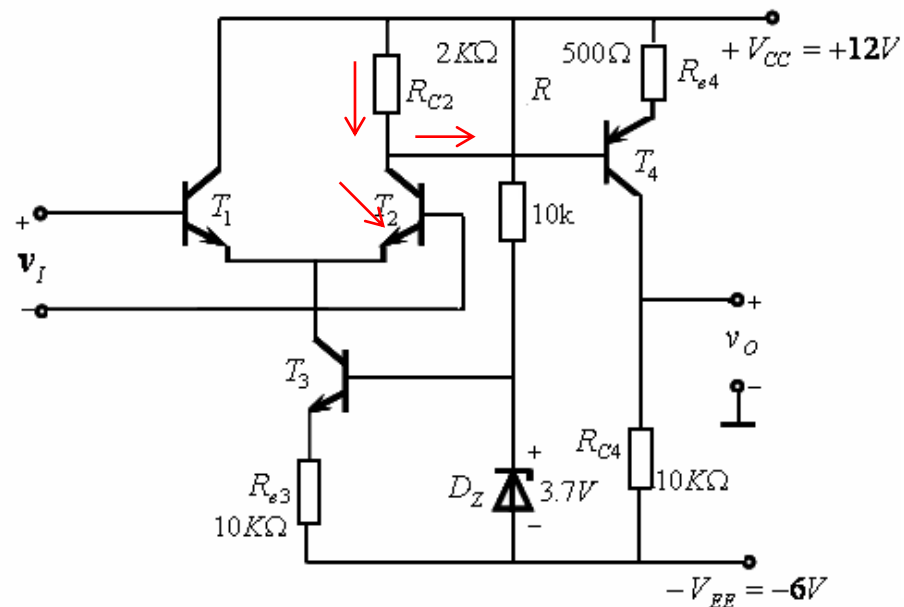
1. 静态时的  $T_1$  管和  $T_2$  管的发射极电流。
2. 若静态时  $V_O > 0$ , 则应如何调节  $R_{C2}$  的值, 使  $V_O = 0$ ? 若静态时  $V_O = 0$ , 则  $R_{C2} = ?$ , 电压放大倍数为多少?

$$I_{E1} = I_{E2} \approx \frac{1}{2} I_{E3} = \frac{1}{2} \times \frac{3.7 - V_{BE}}{10K} = 0.15mA$$

当静态输出为零时,

$$I_{B4} = \frac{I_{C4}}{\beta} = \frac{V_{EE}}{\beta R_{C4}} = \frac{6}{60 \times 10K} = 10\mu A$$





则流过 $R_{C2}$ 的电流为：

$$I_{R_{C2}} = I_{C2} - I_{B4} \approx I_{E2} - I_{B4} = 0.15 - 0.01 = 0.14mA$$

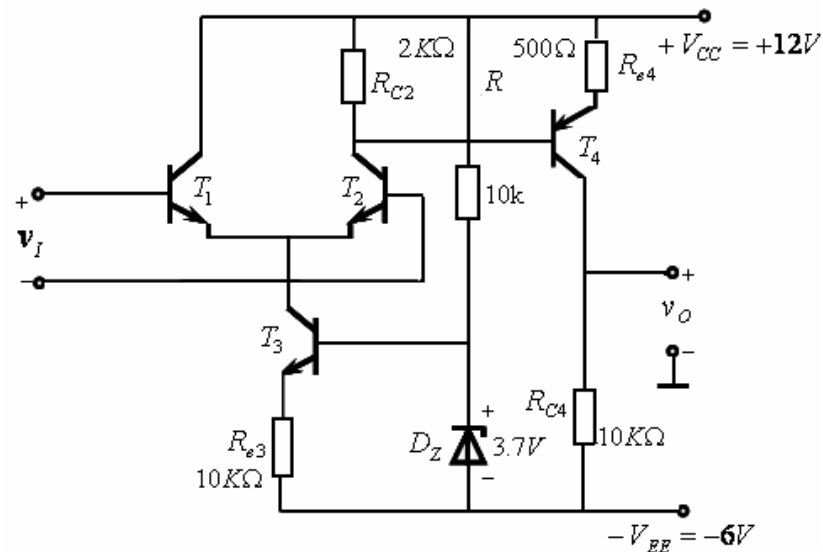
$R_{C2}$ 上的压降为：

$$V_{R_{C2}} = V_{EB4} + I_{C4} \times R_{e4} = 0.7 + 0.6 \times 0.5 = 1.0V$$

所以：

$$R_{C2} = \frac{V_{R_{C2}}}{I_{R_{C2}}} = \frac{1.0}{0.14} \approx 7.143K\Omega$$





$$A_{v1} = \frac{1}{2} \times \frac{\beta(R_{C2} // R_{i4})}{r_{be2}} = \frac{1}{2} \times \frac{60 \times (7.14 // 33.24)}{10.67} = 16.525$$

$$A_{v2} = -\frac{\beta R_{C4}}{r_{be4} + (1 + \beta)R_{e4}} = -\frac{60 \times 10}{2.74 + 61 \times 0.5} \approx -18.05$$

所以，总的电压放大倍数是：

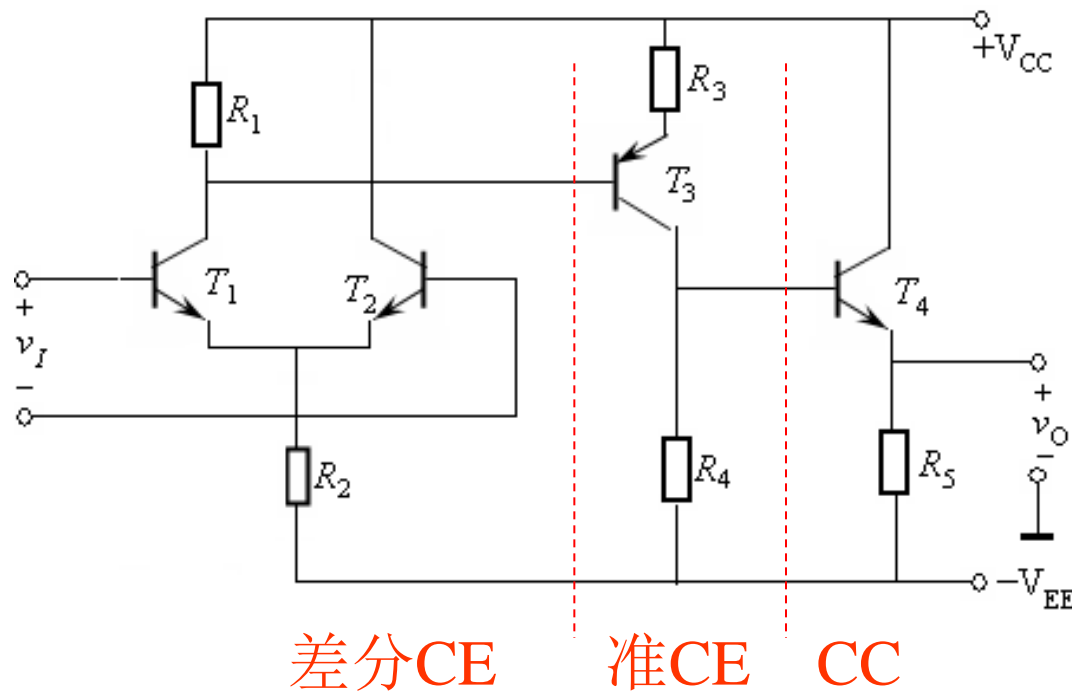
$$A_v = A_{v1} \times A_{v2} = 16.525 \times (-18.05) \approx -298.3$$

**例4:** 电路如图所示, 晶体管 $T_1 \sim T_4$ 的电流放大系数为 $\beta_1 \sim \beta_4$ ,  $b \sim e$ 间的动态电阻为 $r_{be1} \sim r_{be4}$ 。试求解电压放大倍数 $A_v$ 、输入电阻 $R_i$ 、输出电阻 $R_o$ 的表达式。

$$\begin{aligned} \dot{A}_{v1} &= \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_i} \\ &= -\frac{\beta_1 \{R_1 // [r_{be3} + (1 + \beta_3)R_3]\}}{2 \times r_{be1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_{v2} &= \frac{\dot{V}_{o2}}{\dot{V}_{i2}} \\ &= -\frac{\beta_3 \{R_4 // [r_{be4} + (1 + \beta_4)R_5]\}}{r_{be3} + (1 + \beta_3)R_3} \end{aligned}$$

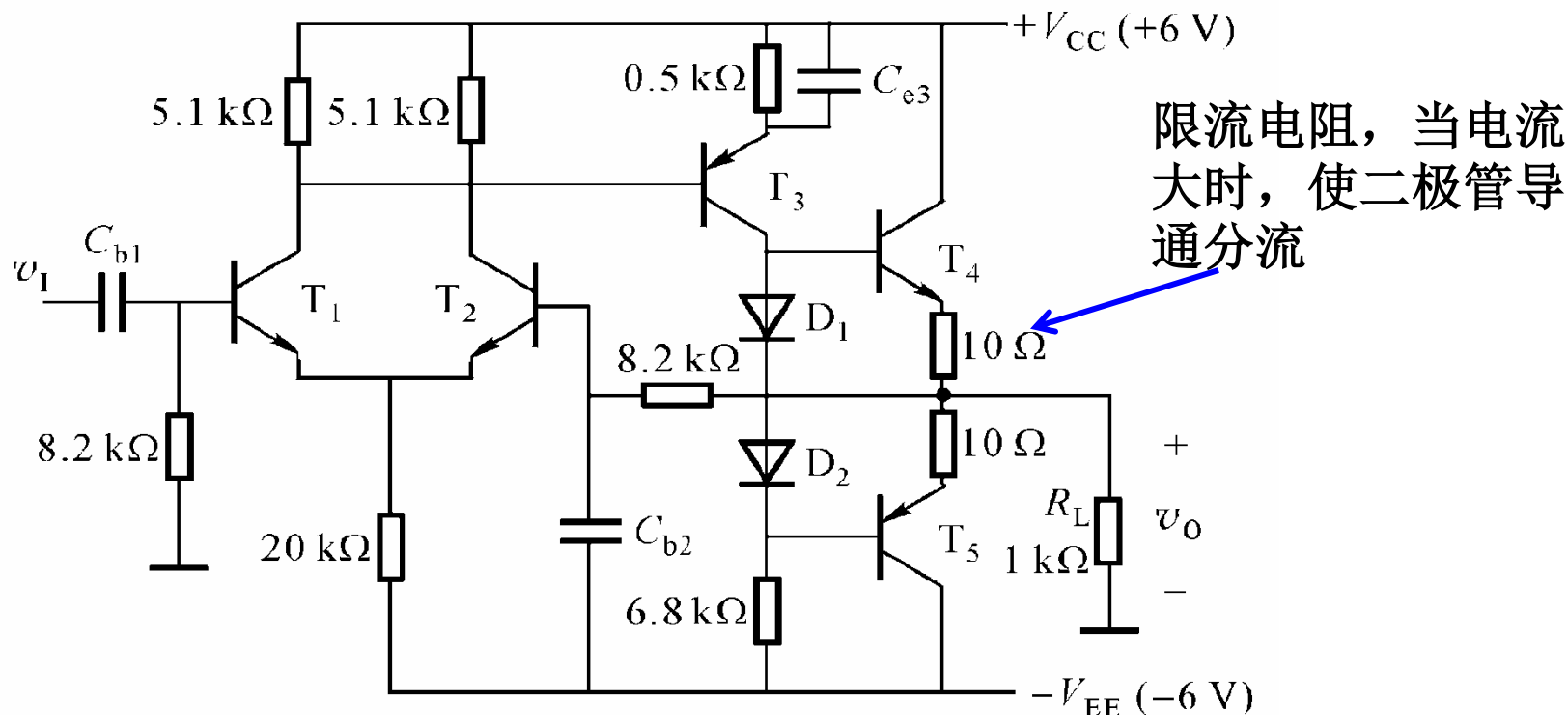
$$\dot{A}_{v3} = \frac{\dot{V}_{o3}}{\dot{V}_{i3}} = -\frac{(1 + \beta_4)R_5}{r_{be4} + (1 + \beta_4)R_5}$$



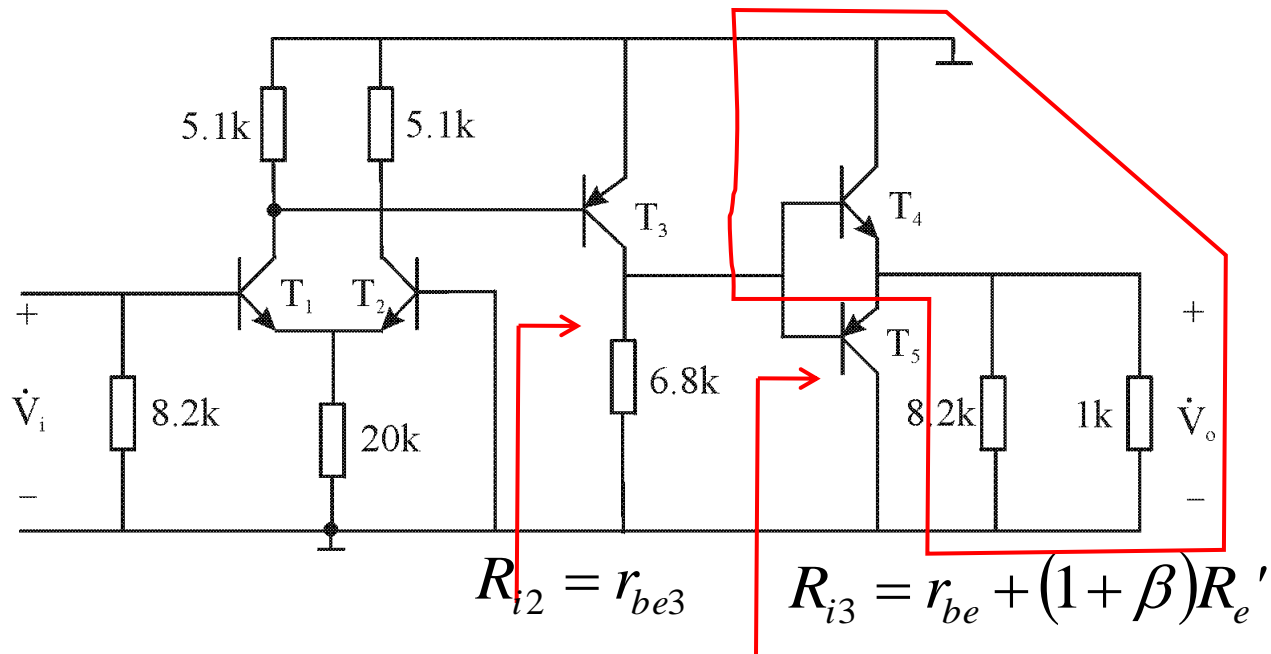
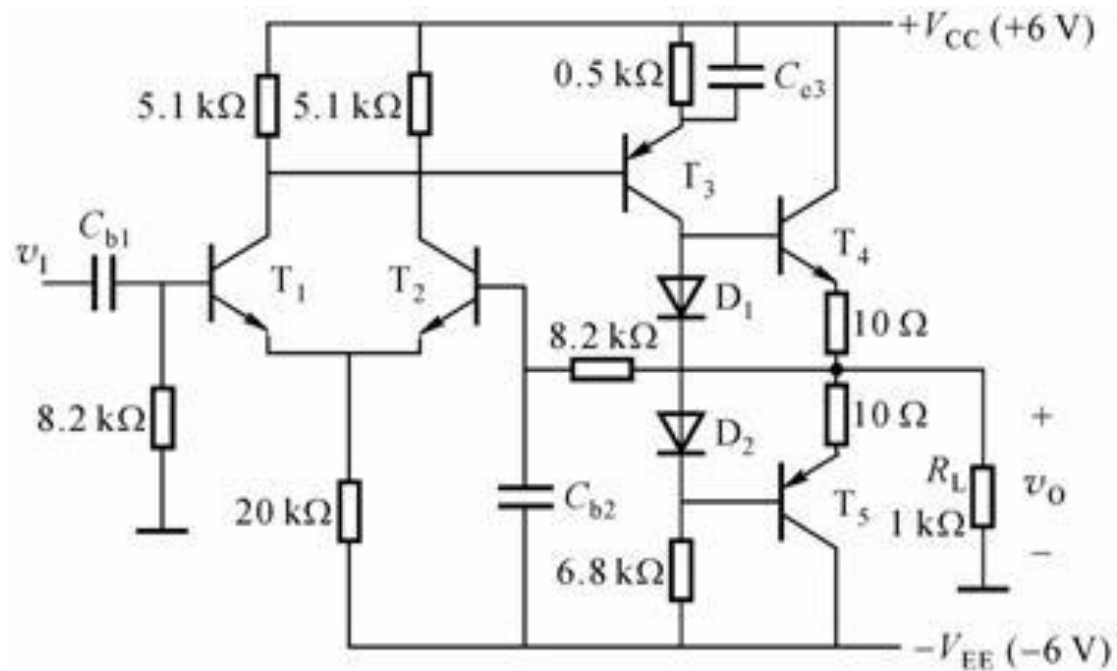
$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \times \dot{A}_{v2} \times \dot{A}_{v3}$$

$$R_i = 2r_{be} \quad R_o = R_5 // \frac{r_{be4} + R_4}{1 + \beta_4}$$

**例5：**三级放大电路如图，已知： $r_{be1}=r_{be2}=4\text{k}\Omega$ ， $r_{be3}=1.7\text{k}\Omega$ ， $r_{be4}=r_{be5}=0.2\text{k}\Omega$ ，各管的 $\beta=50$ 。图中所有电容在中频段均可视作短路。试画出放大电路的交流通路，计算中频电压放大倍数  $\dot{A}_{vm}$ ，输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$ 。



输入级是差分放大电路，中间级为共射放大电路，输出级为互补对称电路。

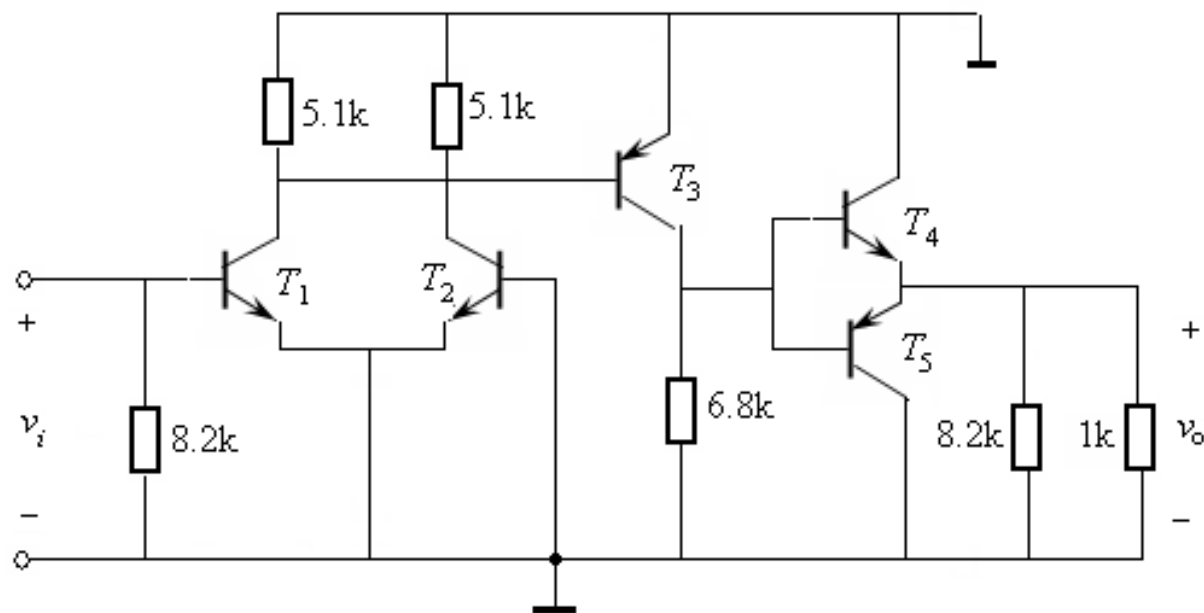


输入级  $\dot{A}_{v1} = -\frac{\beta R'_{L1}}{2r_{be1}} = -\frac{50 \times (5.1\text{k}\Omega // r_{be3})}{2 \times 4\text{k}\Omega} = -7.97$

$r_{be3}$  是中间级共射放大电路的输入电阻。

中间级  $\dot{A}_{v2} = -\frac{\beta R'_{L2}}{r_{be3}} = -\frac{50 \times (6.8\text{k}\Omega // R_{i3})}{1.7\text{k}\Omega} = -174$

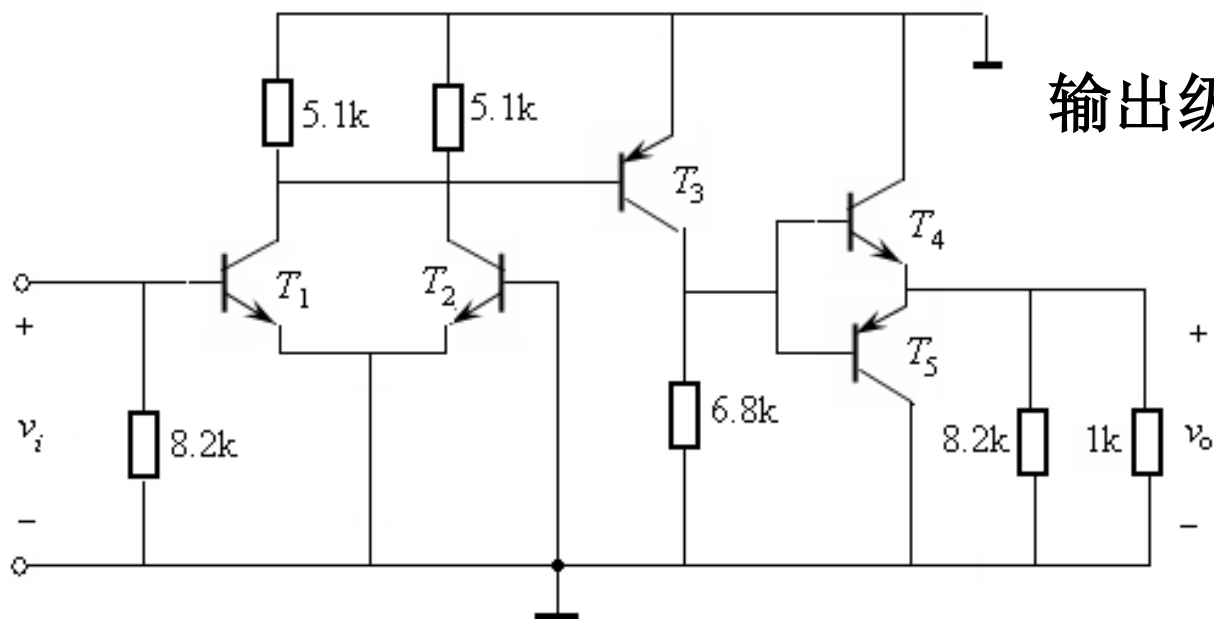
$R_{i3} = r_{be4} + (1 + \beta)(8.2\text{k}\Omega // R_L) = (0.2 + 51 \times \frac{8.2 \times 1}{8.2 + 1})\text{k}\Omega = 45.6\text{k}\Omega$



中间级共射放大电路的电压放大倍数为

$$\dot{A}_{v2} = -\frac{\beta R'_{L2}}{r_{be3}} = -\frac{50 \times (6.8\text{k}\Omega // R_{i3})}{1.7\text{k}\Omega} = -174$$

$$R_{i3} = r_{be4} + (1 + \beta)(8.2\text{k}\Omega // R_L) = (0.2 + 51 \times \frac{8.2 \times 1}{8.2 + 1})\text{k}\Omega = 45.6\text{k}\Omega$$

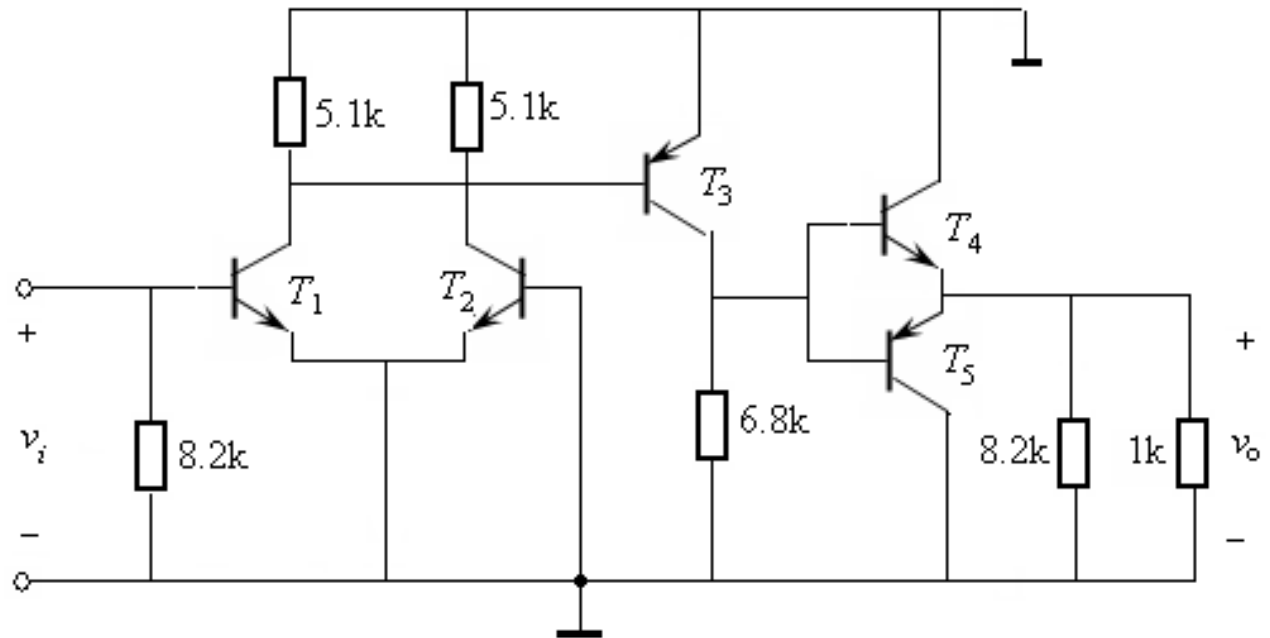


输出级  $\dot{A}_{v3} \approx 1$

总增益:  $\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2} \cdot \dot{A}_{v3} = 1387$

输入电阻  $R_i = 8.2\text{k}\Omega // (2r_{be1}) = \frac{8.2 \times 8}{8.2 + 8} \text{k}\Omega = 4\text{k}\Omega$

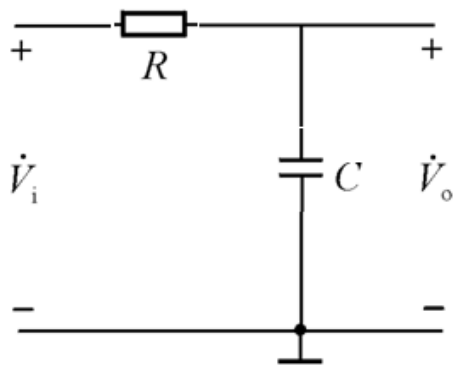
输出电阻  $R_o = 8.2\text{k}\Omega // \left( \frac{r_{be4} + 6.8\text{k}\Omega}{1 + \beta} \right) = 0.13\text{k}\Omega$



# 稳定性

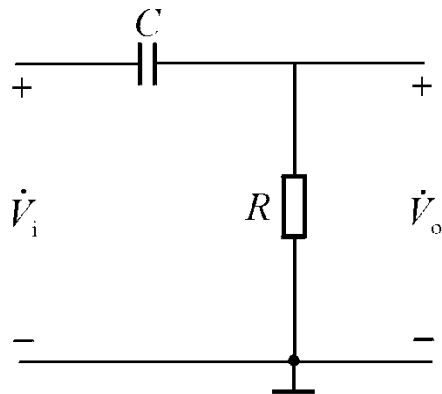
- 开环增益表达式  $\Leftrightarrow$  波特图  $\Leftrightarrow$  频率特性表达式  $\Leftrightarrow$  特性曲线
- 环路增益频率特性
- 判别稳定性；自激  $\Leftrightarrow F \Leftrightarrow$  裕度
- 开环增益
- 环路增益
- 临界自激
- 中频闭环增益
- 不自激振荡所允许的最大 $F$
- 能否稳定工作
- 若有一定的幅值裕度（相位裕度） .....



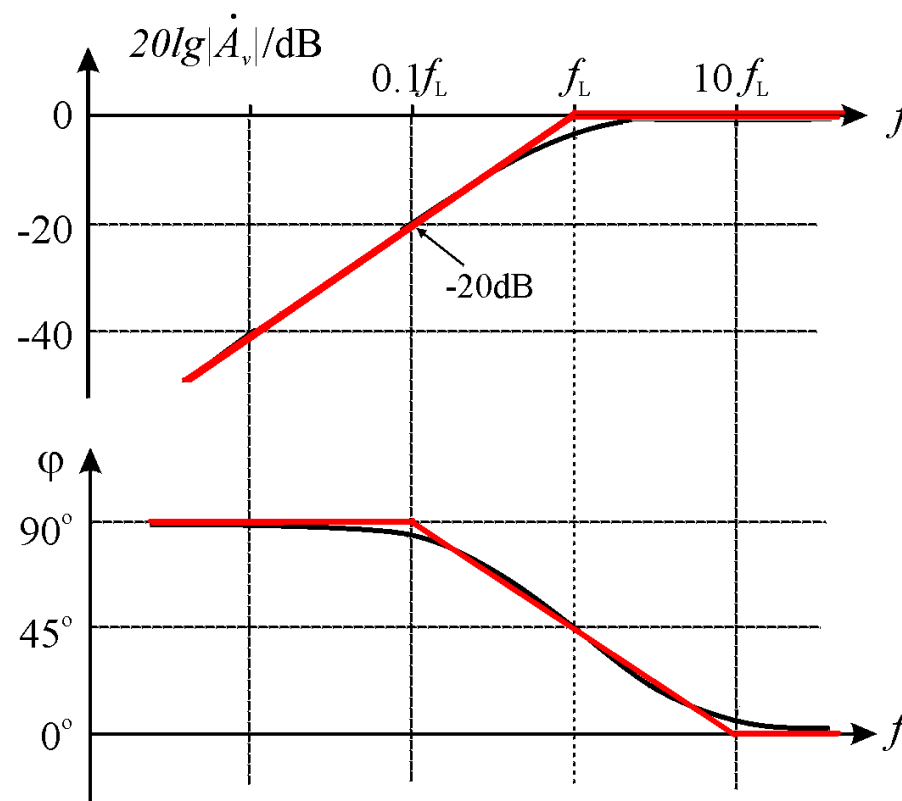
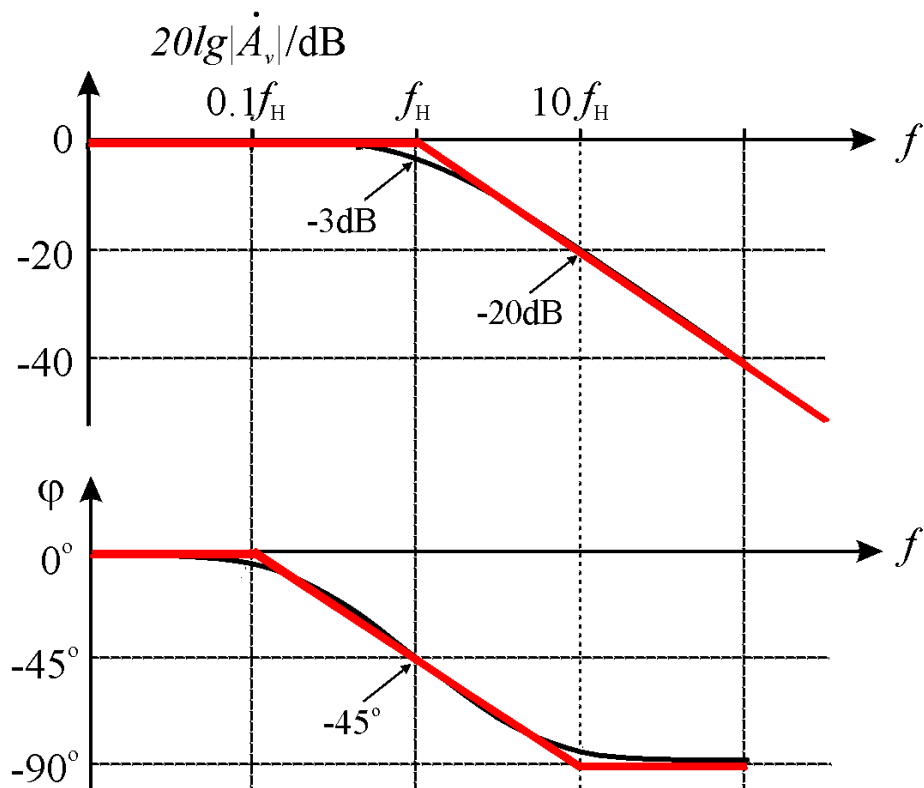


$$\dot{A}_v = \frac{1}{1 + jf / f_H}$$

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



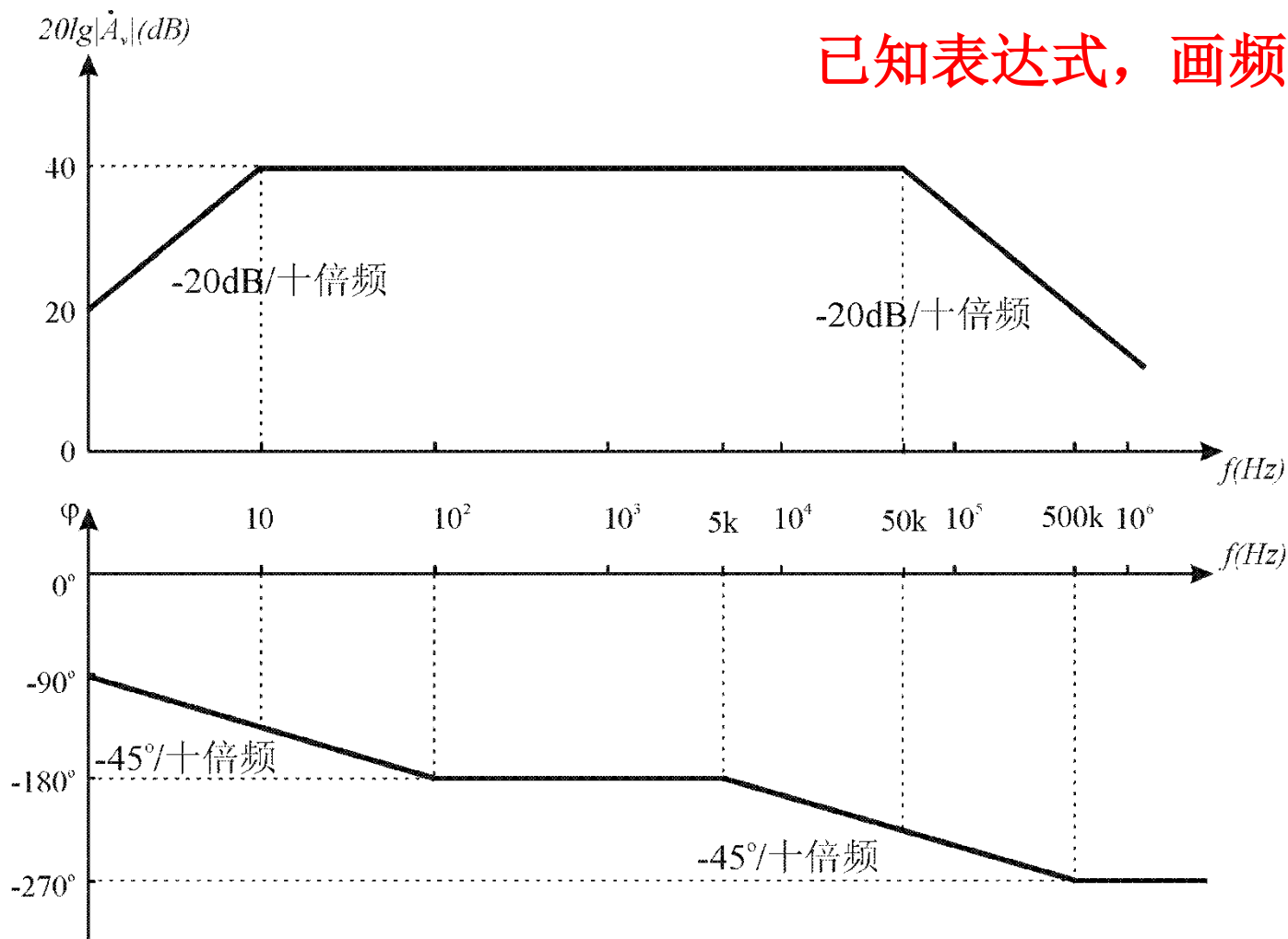
$$\dot{A}_v = \frac{jf / f_L}{1 + jf / f_L}$$



题2.5.2  $\dot{A}_v = \frac{-100(jf/10\text{Hz})}{(1+jf/10\text{Hz})(1+jf/50\text{kHz})}$

画出其波特图，求其下限截止频率 $f_L$ 和上限截止频率 $f_H$ 。

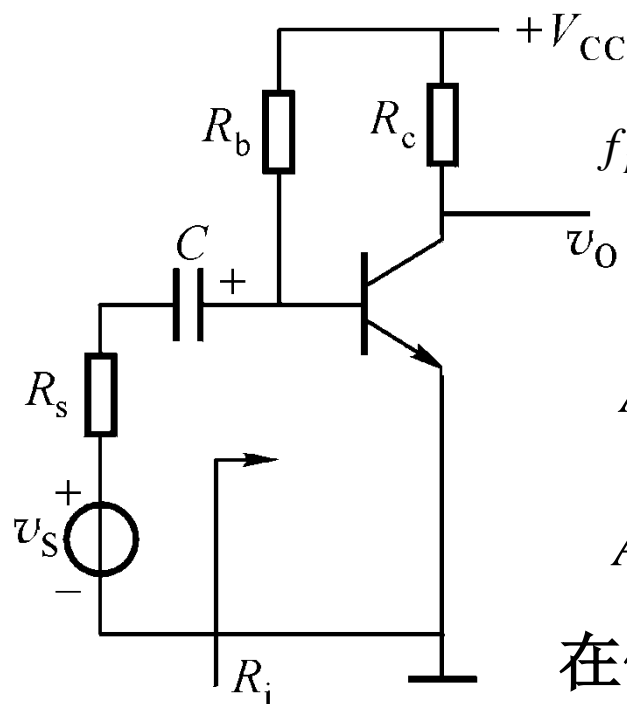
已知表达式，画频率特性曲线



题2.5.1 在图题2.5.1所示电路中，设电容 $C=1\mu\text{F}$ ， $R_b=100\text{ k}\Omega$ ， $r_{be}=1\text{ k}\Omega$ ， $R_c=2\text{ k}\Omega$ ， $\beta=100$ ， $R_s=0$ 。

(1) 求电路的下限频率 $f_L$ ；

(2) 当信号源频率下降到下限频率 $f_L$ 时，电压放大倍数为多少？输出电压与信号源电压的相位差为多少？



已知电路，求截止频率

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_i C} = \frac{1}{2\pi (R_b \parallel (r_{be} + R_s)) C} \approx \frac{1}{2\pi \times 10^3 \times 10^{-6}} = 159\text{ Hz}$$

$$\dot{A}_{vm} = -\frac{\beta R_c}{r_{be}} = -\frac{100 \times 2}{1} = -200$$

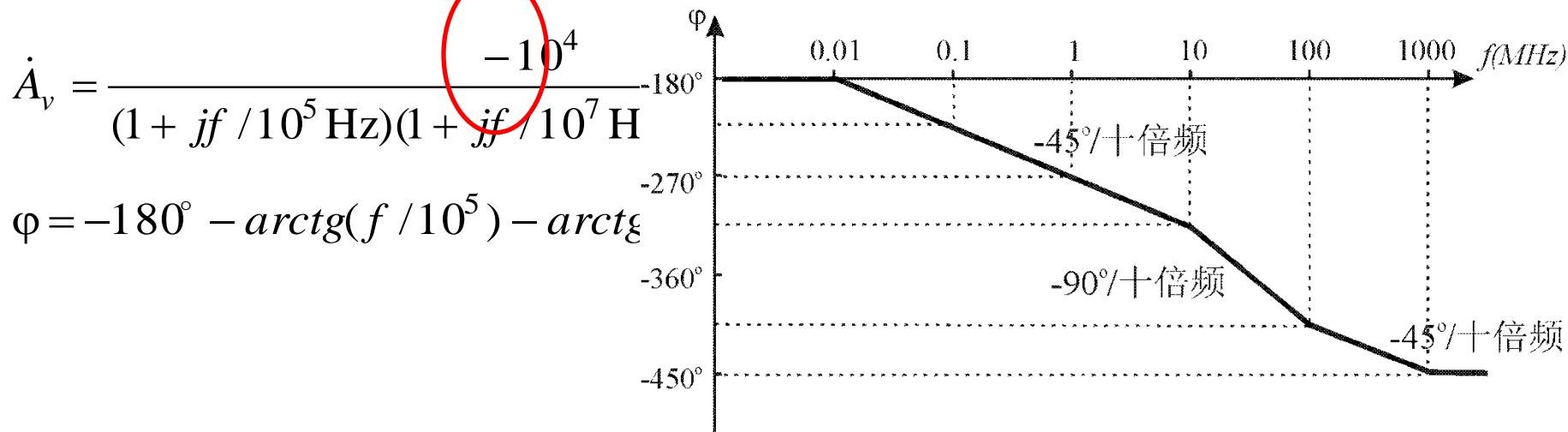
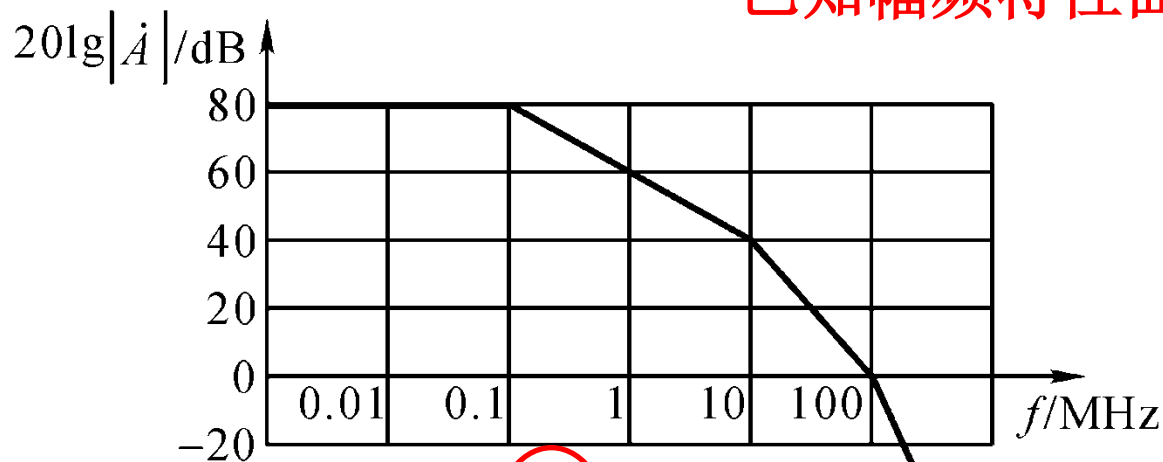
$$\dot{A}_{vL} = 0.707 \dot{A}_{vm} = -140$$

在低频段，输出电压是超前输入信号频率的，而在下限频率点上，正也超前 $+45^\circ$ 。所以，输出电压与输入电压的相位差为  
 $-180^\circ + 45^\circ = -135^\circ$

**题2.5.4** 已知某反相放大电路电压放大倍数的对数幅频特性曲线如图题2.5.4所示：

- (1) 写出该放大电路电压放大倍数的频率特性表达式；
- (2) 写出该放大电路电压放大倍数的相频特性表达式，画出对数相频特性曲线。

已知幅频特性曲线，画相频特性曲线



$$\dot{A}_v = \frac{-10^4}{(1 + jf / 10^5 \text{ Hz})(1 + jf / 10^7 \text{ Hz})}$$

$$\varphi = -180^\circ - \arctg(f / 10^5) - \arctg(f / 10^7)$$

# 1、已知一个负反馈放大电路的基本放大电路放大倍数为

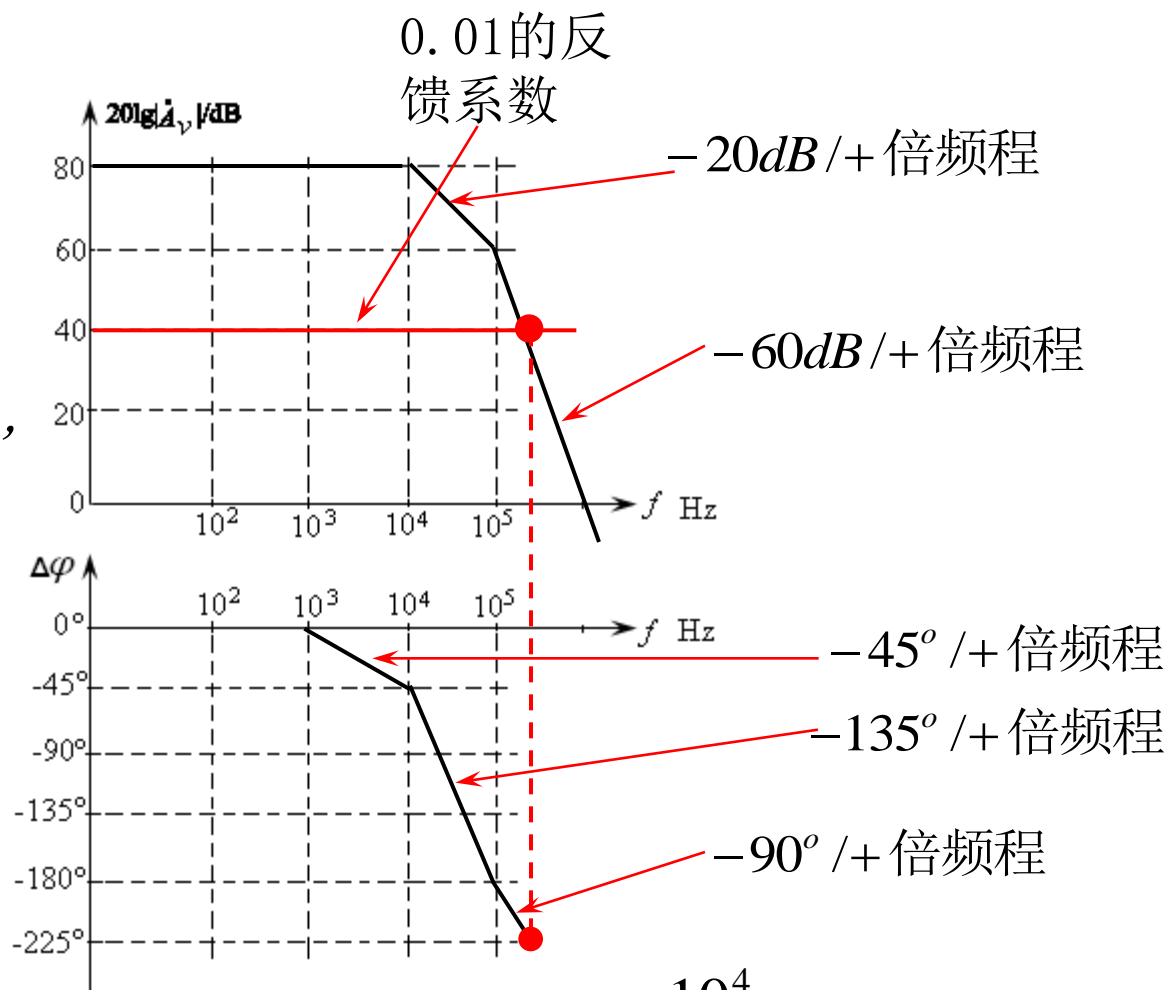
$$\dot{A} = \frac{10^4}{(1 + j\frac{f}{10^4})(1 + j\frac{f}{10^5})^2}$$

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \cdot \frac{dA}{A}$$

其反馈网络为纯电阻网络。若输出信号变化10%，引入负反馈后仅变化0.1%，则环路放大倍数 $AF$  100， $F$  0.01；当 $f=10^5\text{Hz}$ 时，放大电路的附加相移 $-180^\circ$ ，电路引入负反馈后 会产生 （填入会产生或不会产生）自激振荡。

在 $20\lg|\dot{A}\dot{F}|=0\text{dB}$ 处,  
相移大于 $180^\circ$

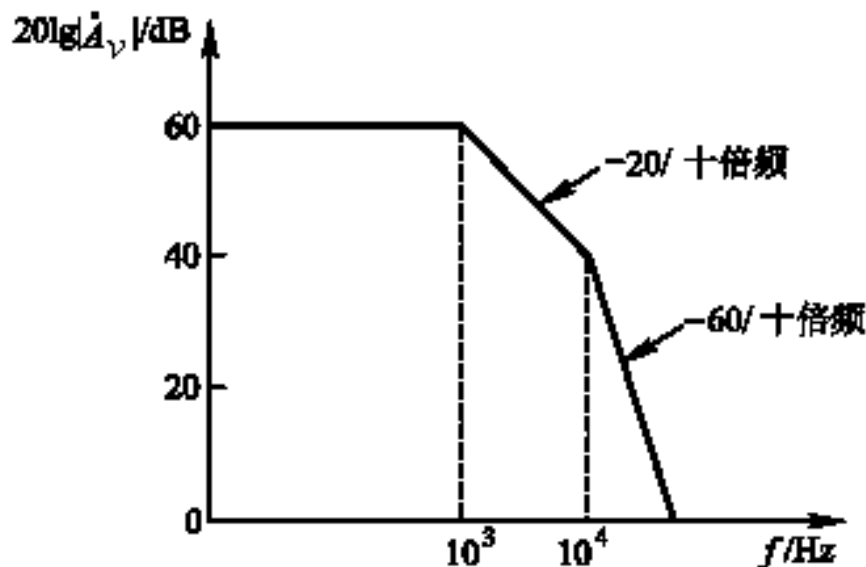
所以会自激



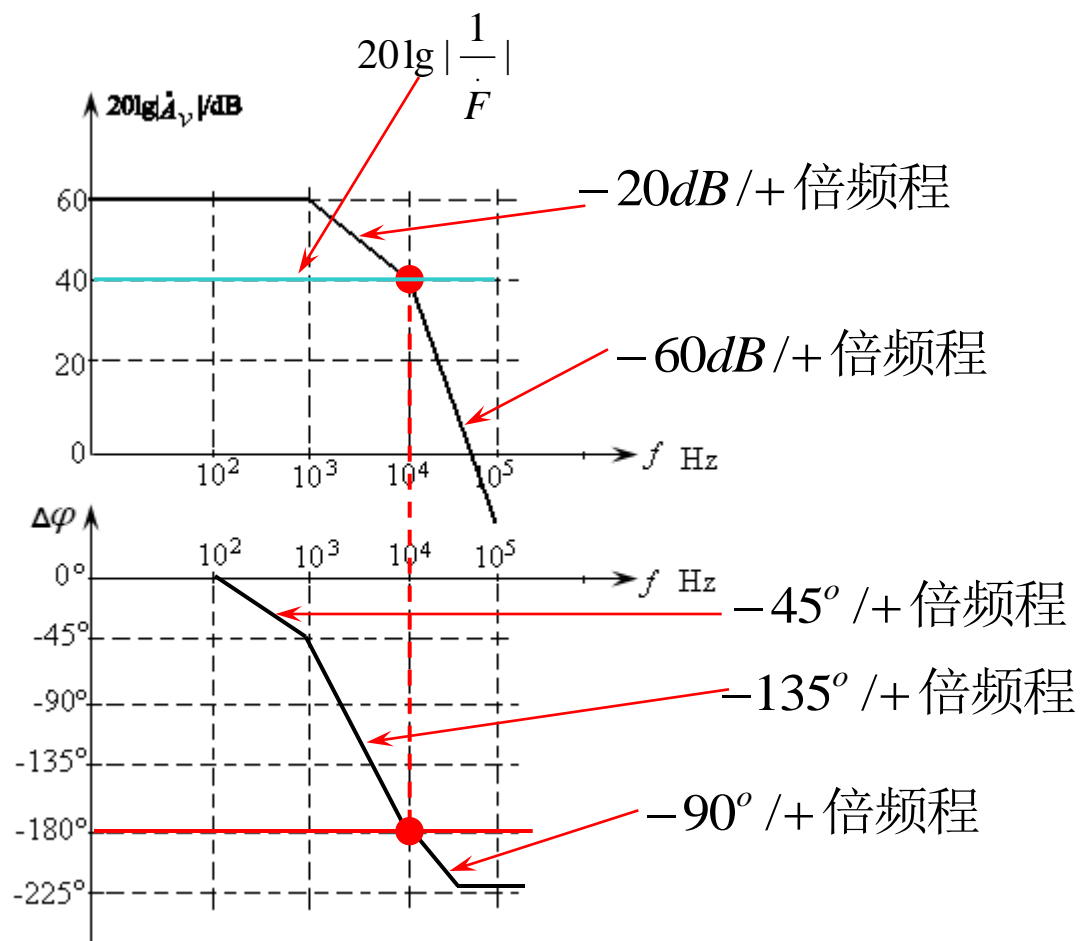
$$\dot{A} = \frac{10^4}{(1 + j\frac{f}{10^4})(1 + j\frac{f}{10^5})^2}$$

2、已知一个负反馈放大电路的基本放大电路放大倍数的对数幅频特性如图所示，其反馈网络为纯电阻网络。若要电路稳定工作，即不产生自激振荡，反馈系数的上限值为多少？此时的中频闭环增益等于多少？若要电路稳定工作，并有 $45^\circ$ 的相位裕度时，问 $F=?$

**方法1:** 
$$\dot{A}_v = \frac{10^3}{(1 + j\frac{f}{10^3})(1 + j\frac{f}{10^4})(1 + j\frac{f}{10^4})}$$



**方法2:** 直接画相频特性



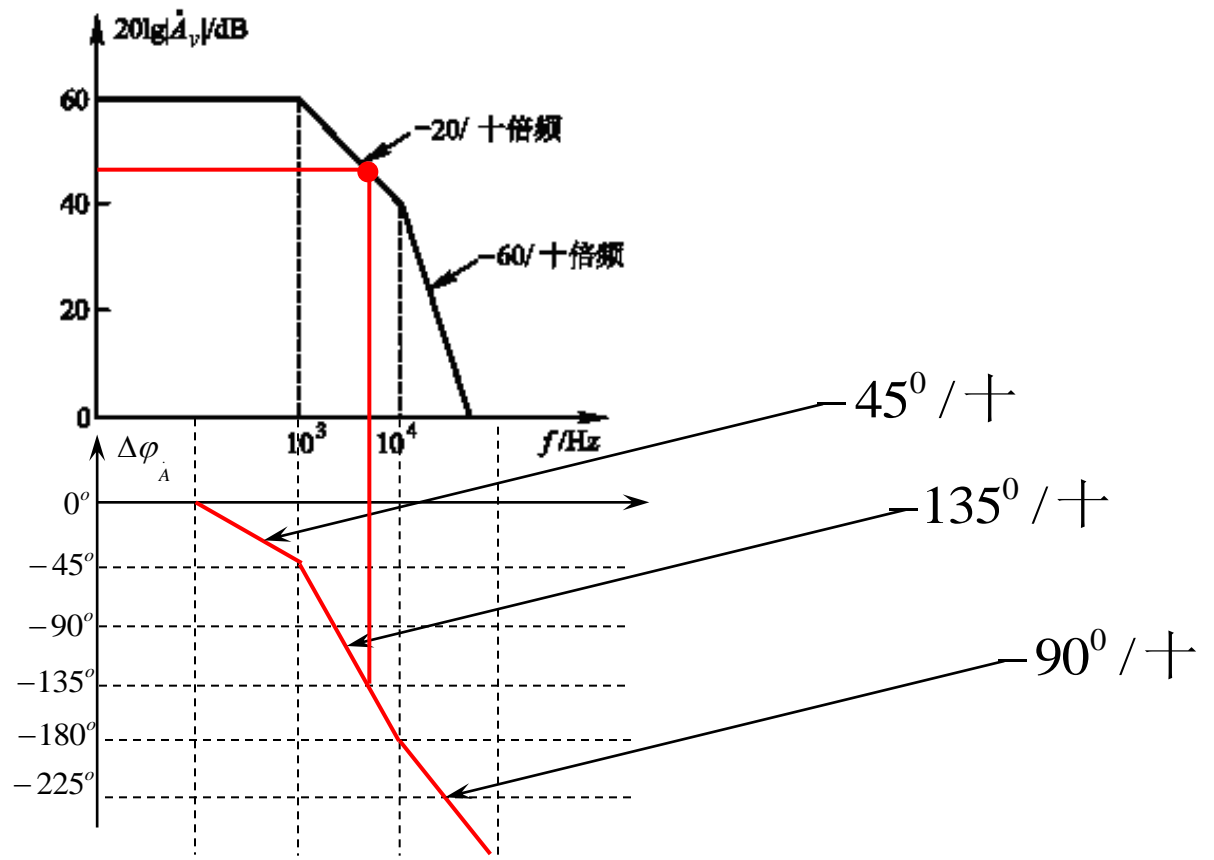
$$F \leq 0.01$$

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F}$$



$$20\lg |F| = 47 \text{ dB}$$

$$F = 10^{-2.35}$$



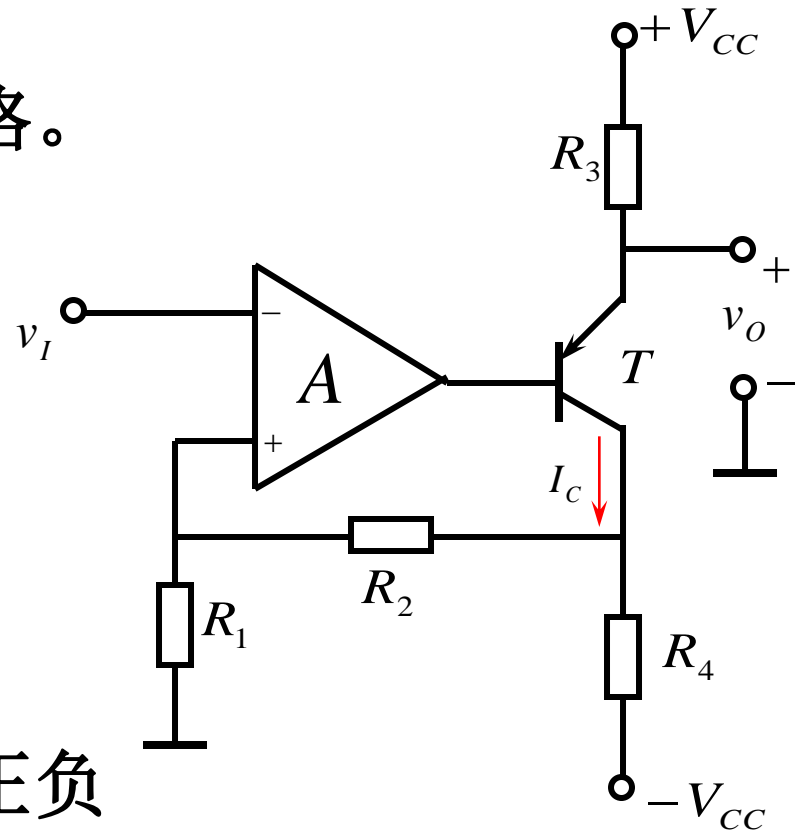
# 负反馈与运算电路

- 判别反馈的类型（集成+分立元件）
- 指明反馈量和瞬时极性
- 深度负反馈时的闭环增益
- 深度负反馈时的 $R_i$ 、 $R_o$
- 基本运算电路（跟随、比例、加、减、差分、积分、...）
- 组合运算电路（无反馈、有反馈）

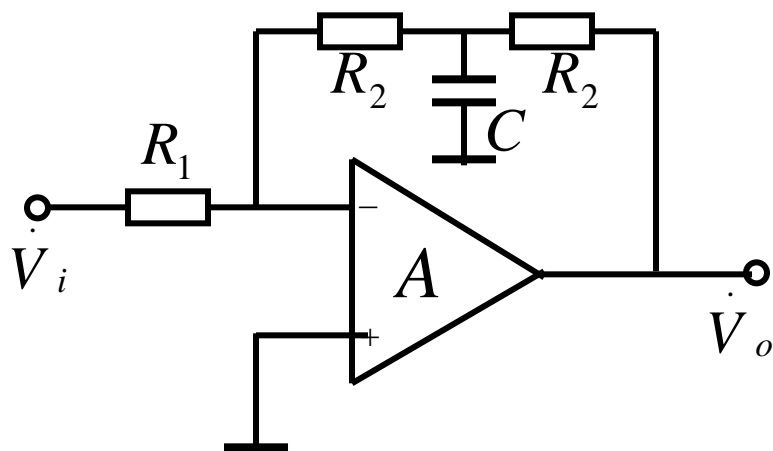
**例1：**分析下面电路，说说电路中是否存在反馈，要说明道理。

### 电流串联负反馈组态

- (1) 是否存在反馈
- (2) 哪些元件组成反馈网络。
- (3) 反馈电量与输出电量间的关系如何？
- (4) 是交流反馈还是直流反馈？
- (5) 是哪一种反馈组态？
- (6) 请用瞬时极性法判断正负反馈（有过程描述）。
- (7) 该反馈能稳定哪一个输出电量？

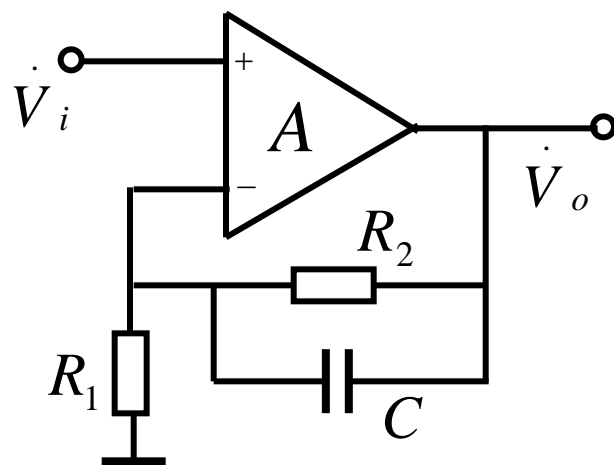


**例2：**判断下列电路是否引入了反馈；若有，则判断是正反馈还是负反馈，是直流反馈还是交流反馈；若是交流反馈，则是何种组态的反馈。各图中电容容量足够大，对交流信号可视为短路。



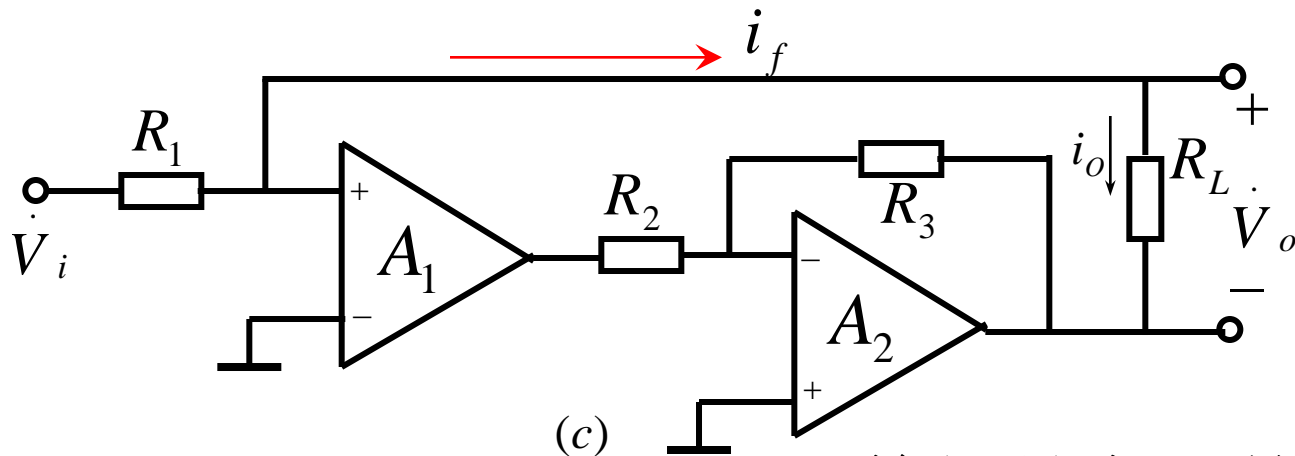
(a)

引入直流反馈，无交流反馈  
电压并联负反馈



(b)

交直流并存  
电压串联负反馈

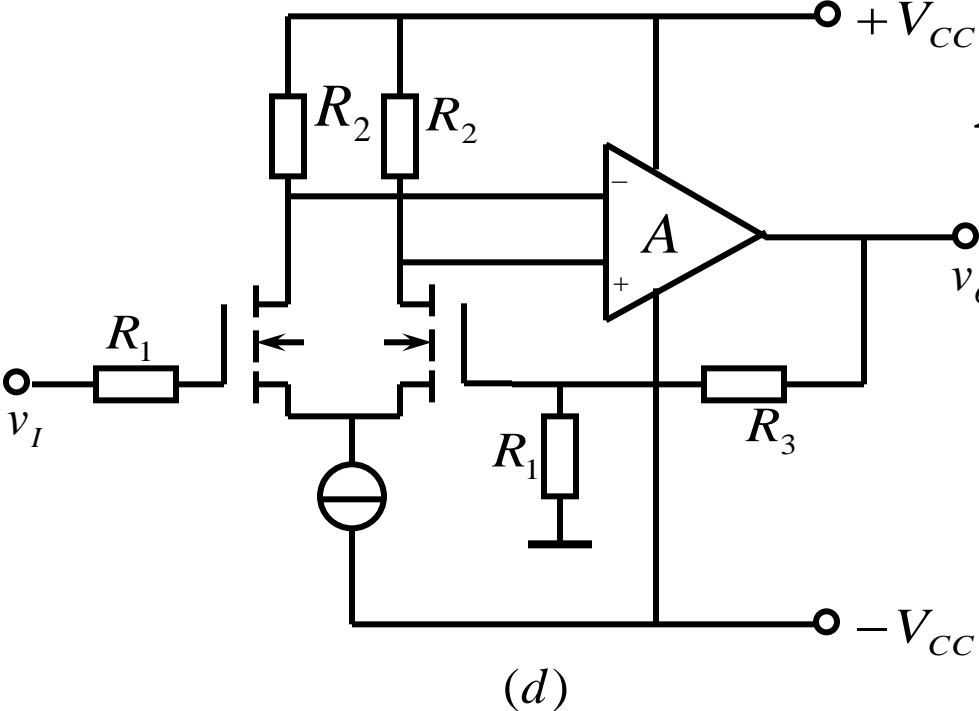


(c)

$A_2$ 单级是电压并联负反馈

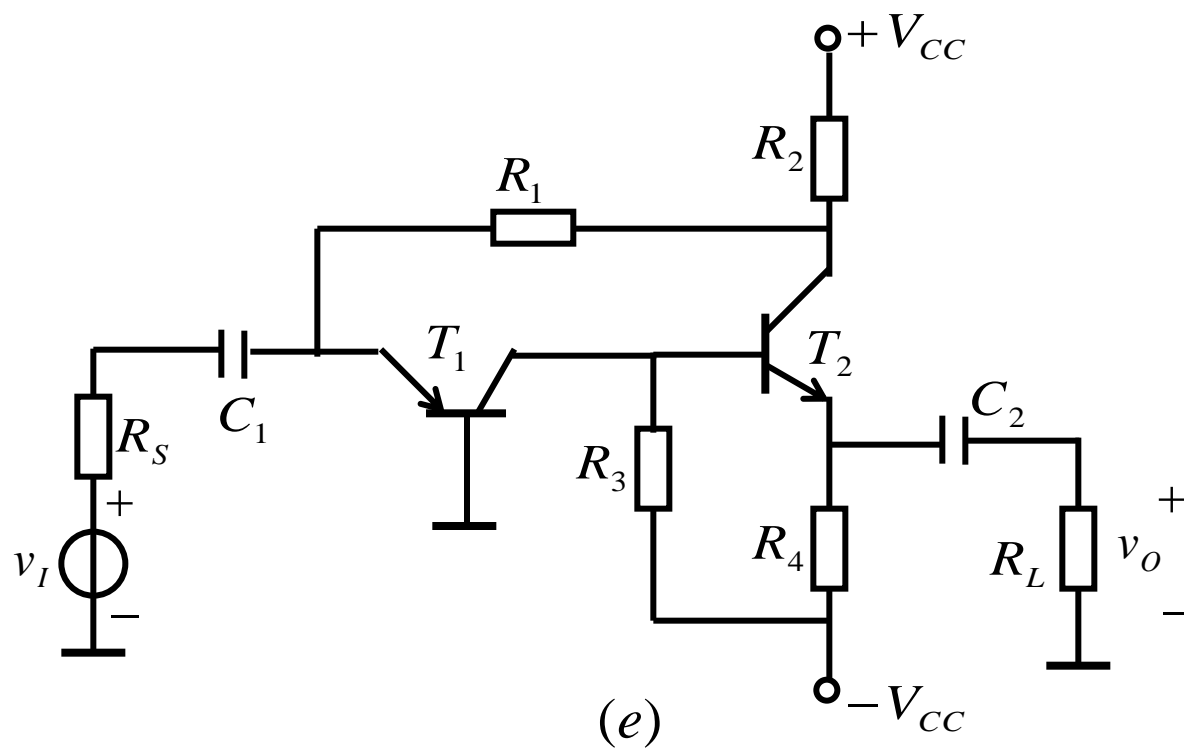
$A_1$ 和 $A_2$ 间交、直流反馈并存

电流并联负反馈

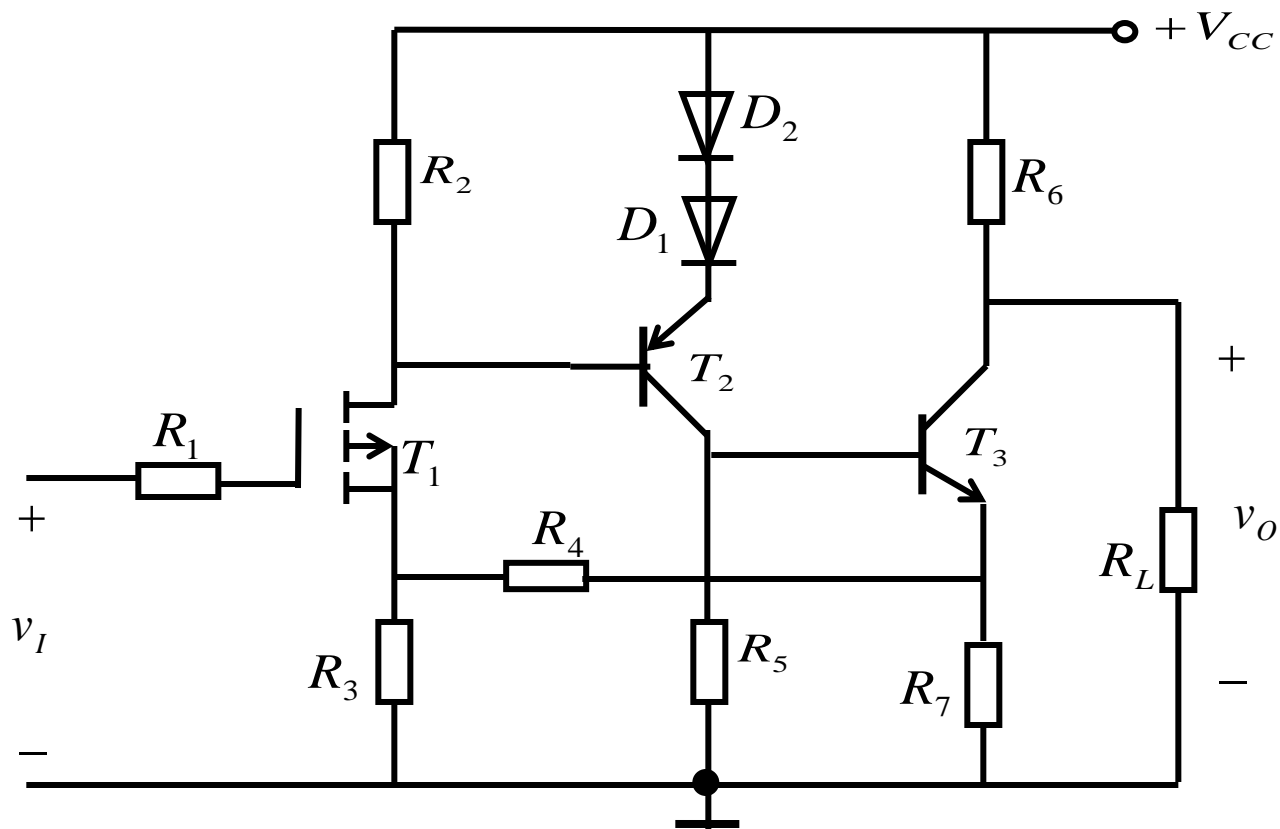


(d)

交直流并存，电压串联  
负反馈



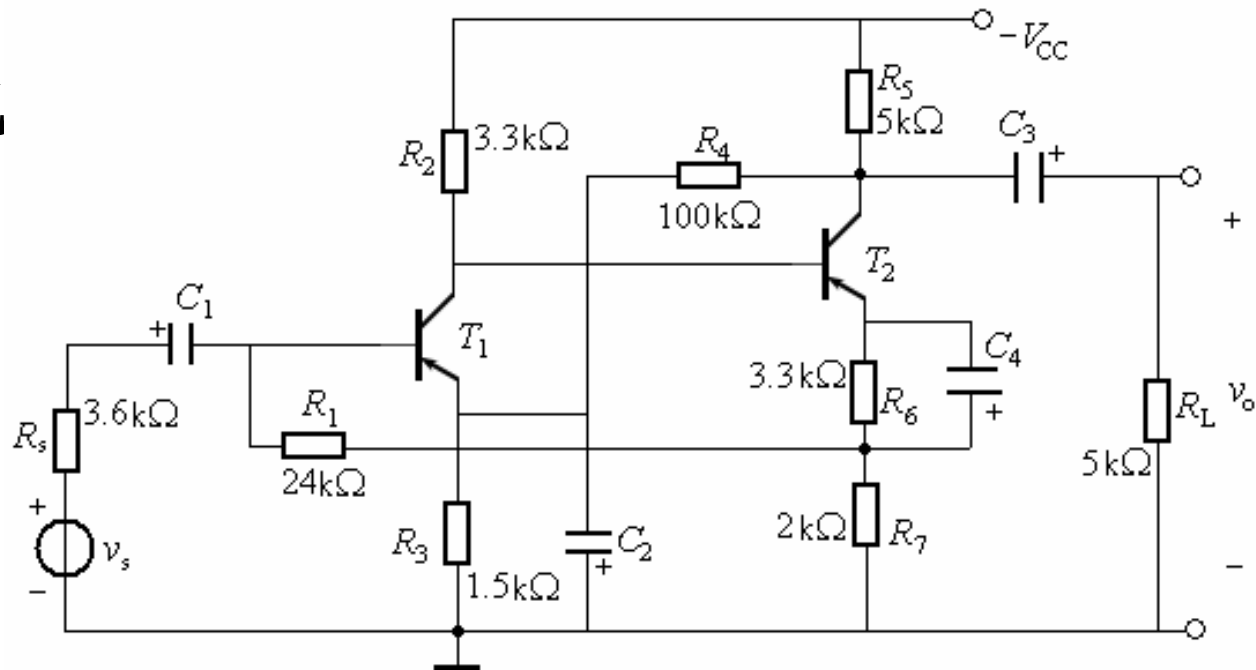
电流并联负反馈



(f)

电流串联负反馈

**例5、**反馈放大电路如图所示，设所有的电容器对交流均可视为短路，并满足深度负反馈。填空：

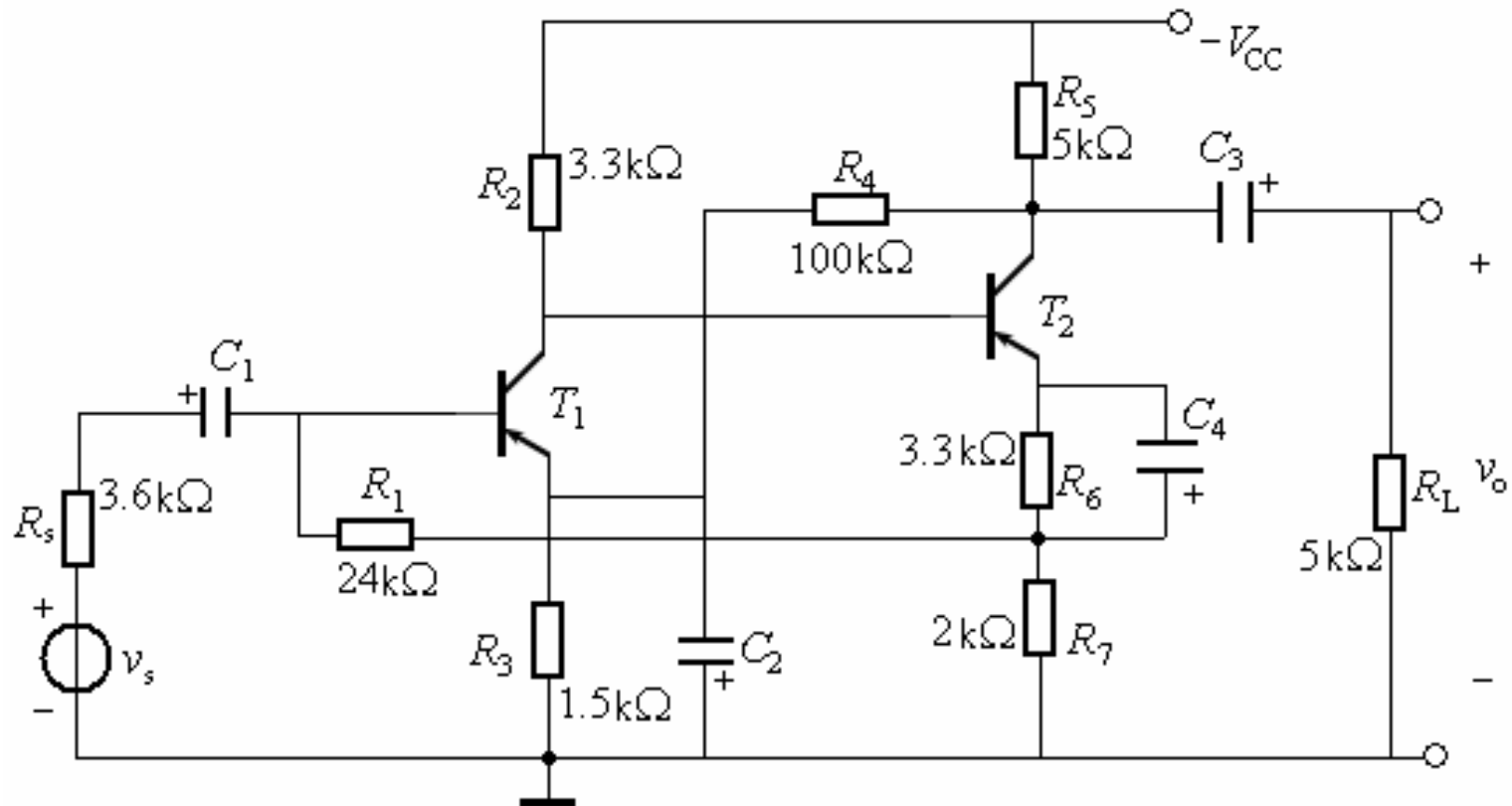


1. 电路中通过  $R_1$ 、 $R_4$  引入直流负反馈；通过  $R_1$  引入交流负反馈，其反馈组态是 电流并联，反馈系数的表达式 =  $-\frac{R_7}{R_1 + R_7}$ ；



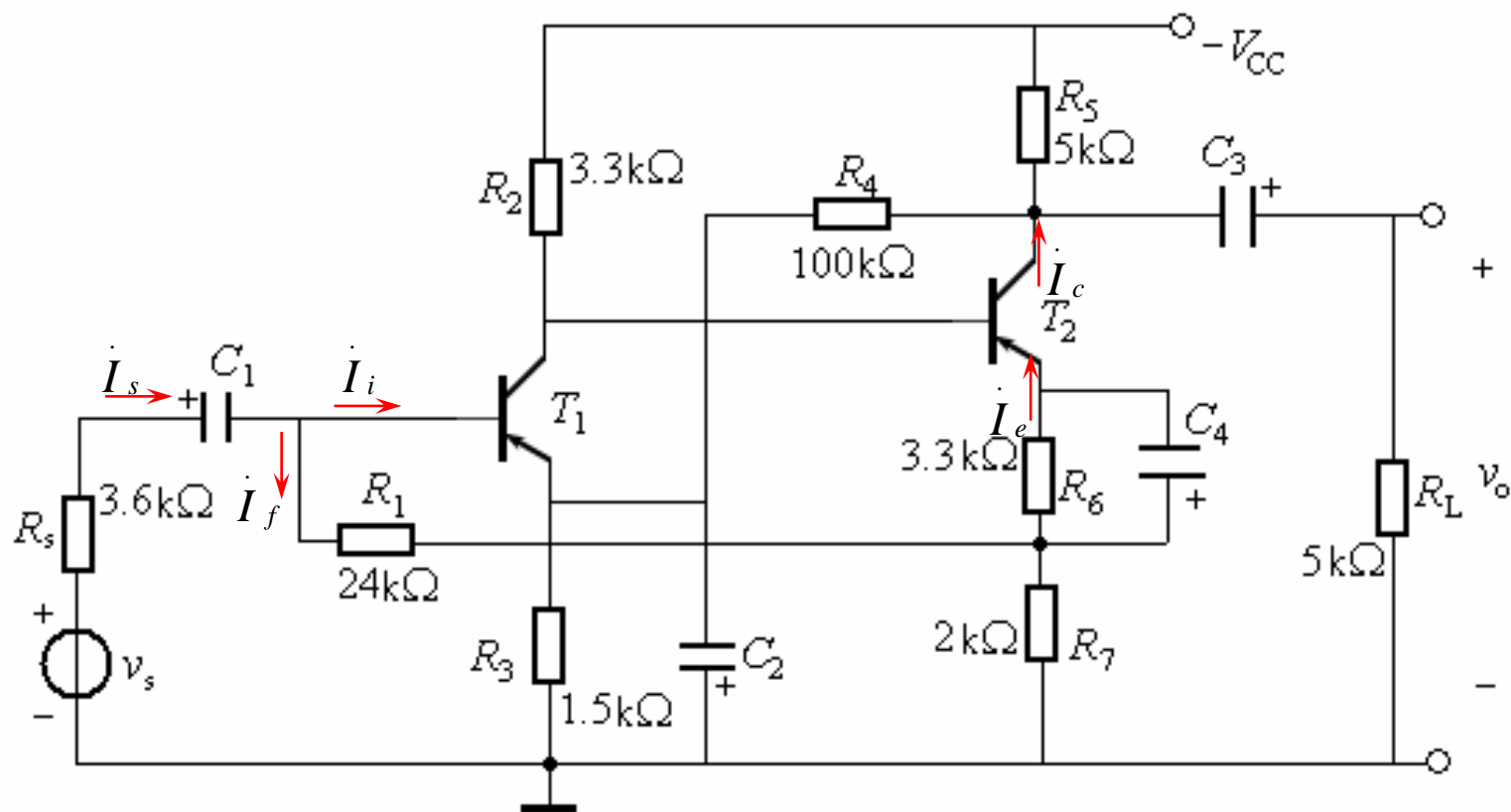
2. 在深度负反馈的情况下，电压放大

倍数  $\dot{A}_{vsf} = \dot{V}_o / \dot{V}_s \approx \frac{R_1 + R_7}{R_7} \times \frac{R_4 // R_5 // R_L}{R_s}$   
 $\approx \underline{9}$ 。要求先写表达式，后填得数。



# 闭环电压增益说明： 几个电流关系如图

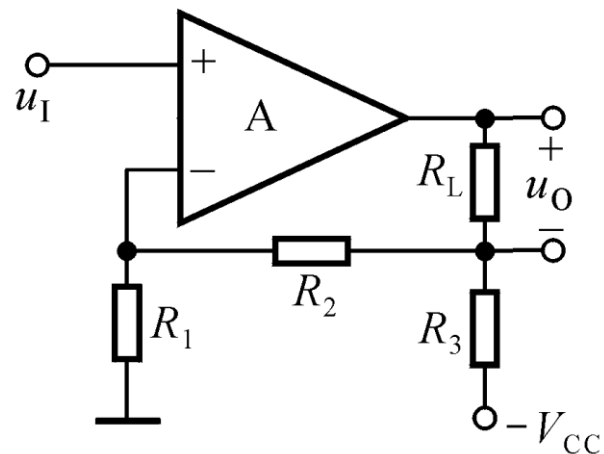
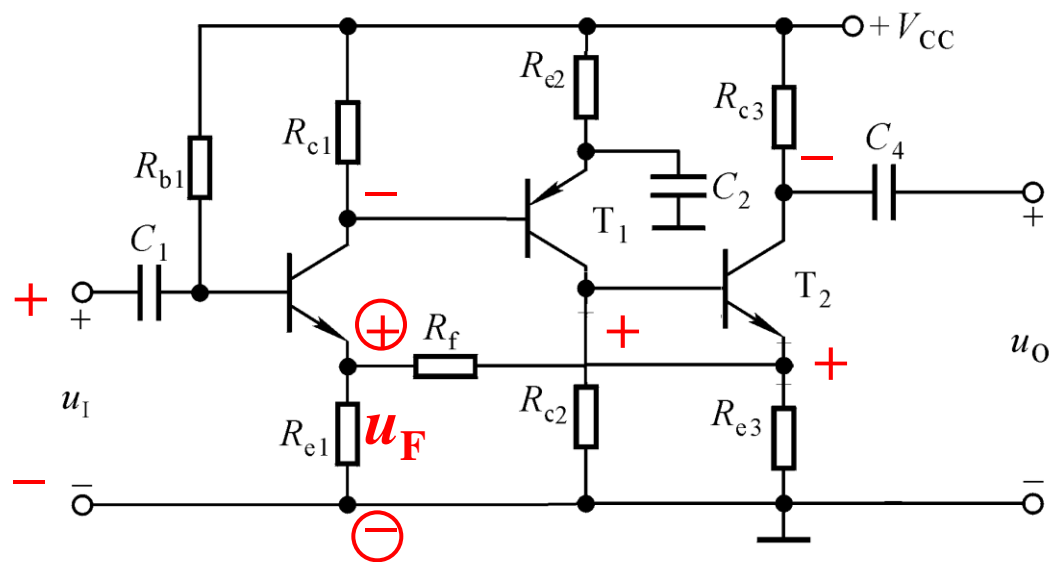
$$A_{vsf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{I}_C \times R'_L}{\dot{I}_S \times R_S} \approx \frac{\dot{I}_e}{\dot{I}_S} \times \frac{R'_L}{R_S} \approx \frac{\dot{I}_e}{\dot{I}_f} \times \frac{R_4 // R_5 // R_L}{R_S} = \frac{R_1 + R_7}{R_7} \times \frac{R_4 // R_5 // R_L}{R_S}$$



# 讨论一

求解在深度负反馈条件下电路的电压放大倍数和

$$A_{gf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_I}$$



比较两电路

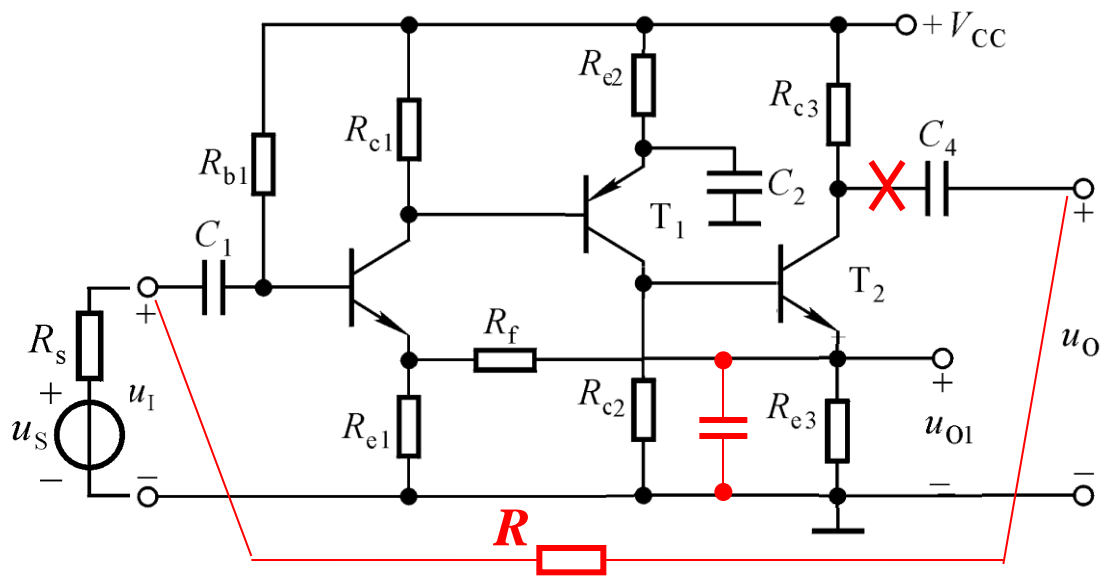
$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} = -\frac{R_{e1}R_{e3}}{R_{e1} + R_f + R_{e3}}$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{R_{e1} + R_f + R_{e3}}{R_{e1}R_{e3}} \cdot (R_{c3} // R_L)$$

$$A_{gf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_I} = \frac{1}{F}$$

## 讨论二

求解在深度负反馈条件下电路的电压放大倍数。

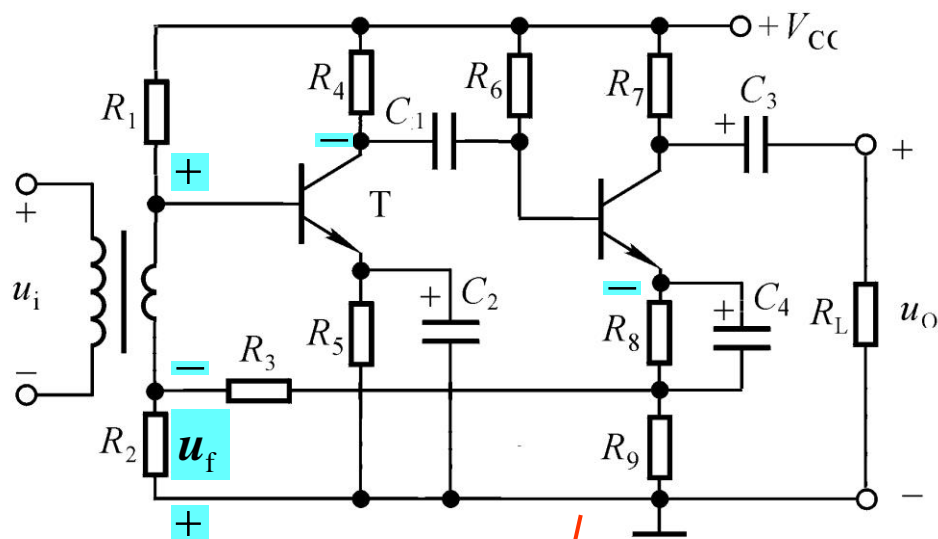


$$\dot{A}_{uf} = 1 + \frac{R_f}{R_{e1}}$$

$$\dot{A}_{uf} = -\frac{R}{R_s}$$

1. 第三级从射极输出；
2. 若在第三级的射极加旁路电容，且在输出端和输入端跨接一电阻。

# 讨论三

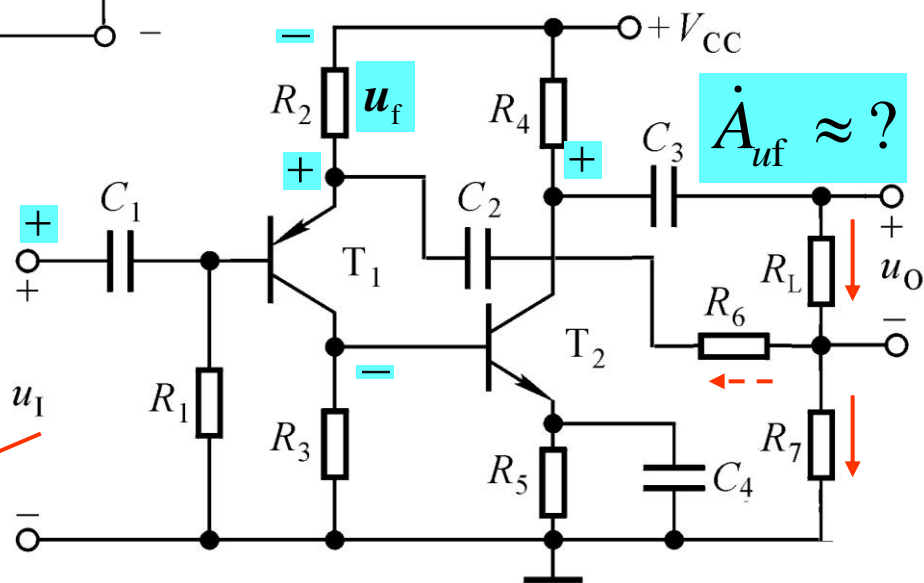


设所有的电容对交流信号均可视为短路。试说明电路中是否引入了交流负反馈；如引入了，则说明其组态。

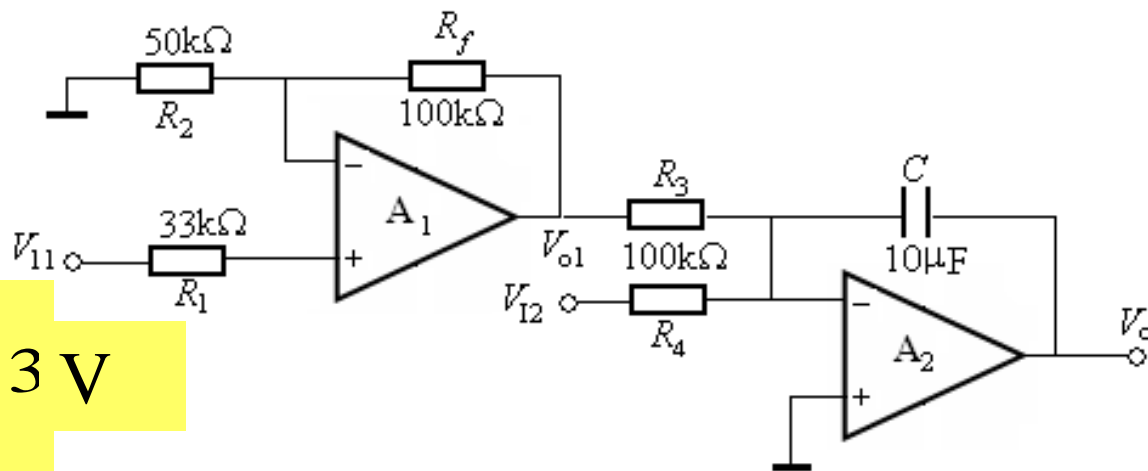
电流串联负反馈

$$\dot{A}_{uf}' \approx \frac{(R_2 + R_3 + R_7)(R_7 // R_L)}{R_2 R_9}$$

电流串联负反馈



**例：**在图示电路中，运放为理想：



$$V_{O1} = \left(1 + \frac{R_f}{R_2}\right) \times V_{I1} = 3 \text{ V}$$

(1) 当  $V_{I1}=1\text{V}$  时， $V_{O1}=?$

(2) 要使  $V_{I1}=1\text{V}$  时， $V_O$  维持在  $0\text{V}$ ，则  $V_{I2}=?$ （设电容器两端的初始电压  $V_C=0\text{V}$ ）

(3) 设  $t=0$  时， $V_{I1}=1\text{V}$ ， $V_{I2}=0\text{V}$ ， $V_C=0\text{V}$ ，求  $t=2\text{S}$  时  $V_O=?$

解(2) 若流过  $R_3$  和  $R_4$  的电流相等，则电容上无电流，即可保持输出  $V_O=0\text{V}$ 。所以  $V_{I2}=-3\text{V}$ 。

$$V_O = -\frac{V_{O1}}{R_3 C} \times t = -6 \text{ V}$$