

7.1 一个电压-串联负反馈放大器，在闭环工作时，输入信号为 50mV，输出信号为 2V。在开环工作时，输入信号为 50mV，输出信号为 4V，试求电路的反馈深度和反馈系数。

$$\text{解: } A_f = \frac{v_o}{v_s} = \frac{2\text{V}}{50\text{mV}} = 40\text{V/V}$$

$$A = \frac{v_o}{v_i} = \frac{4\text{V}}{50\text{mV}} = 80\text{V/V}$$

$$A_f = \frac{A}{1+A\beta}, 40 = \frac{80}{1+80\times\beta}, \beta = 0.0125\text{V/V}$$

$$\text{反馈深度: } 1+A\beta = 1+80\times 0.0125 = 2$$

7.2 已知某反馈放大器的开路电压增益  $A_v=1000\text{V/V}$ ，反馈系数  $\beta=0.5\text{V/V}$ 。若输出电压  $V_o=2\text{V}$ ，求输入电压  $V_i$ 、净输入电压  $V_i'$  和反馈电压  $V_f$ 。

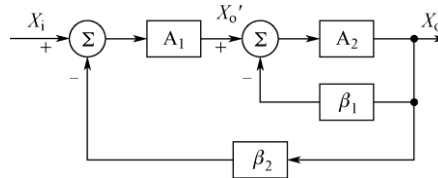
$$\text{解: } A_f = \frac{A_v}{1+A_v\beta} = \frac{1000}{1+1000\times 0.5} = 1.996\text{V/V}$$

$$v_s = \frac{v_o}{A_f} = \frac{2\text{V}}{1.996} = 1.002\text{V}$$

$$v_i = \frac{v_o}{A_v} = \frac{2\text{V}}{1000} = 0.002\text{V}$$

$$v_f = \beta v_o = 0.5 \times 2 = 1\text{V}$$

7.3 某反馈放大器的组成框图如图题 7.1 所示。试写出电路的总闭环增益  $A_f$  的表达式。



图题 7.1

$$\text{解: } x_o = \frac{A_2}{1+A_2\beta_1} x_o', A_{f1} = \frac{x_o'}{x_o} = \frac{A_2}{1+A_2\beta_1}$$

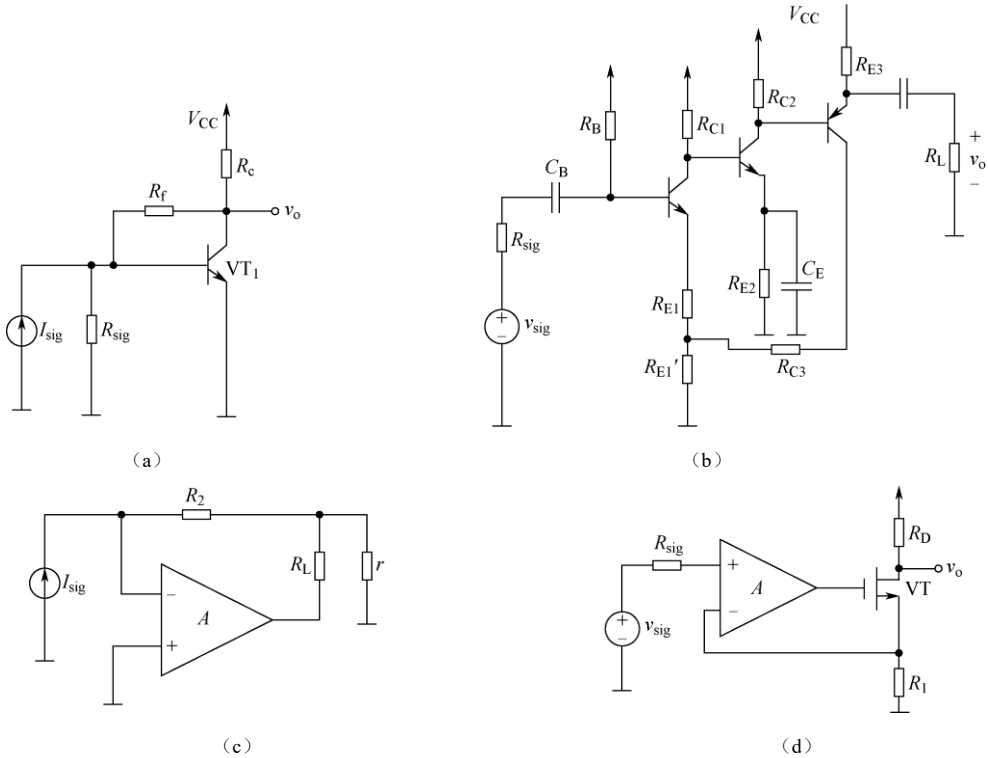
$$A_f = \frac{A_1 A_{f1}}{1+A_1 A_{f1} \beta_2} = \frac{A_1 A_2}{1+A_2\beta_1+A_1 A_2 \beta_2}$$

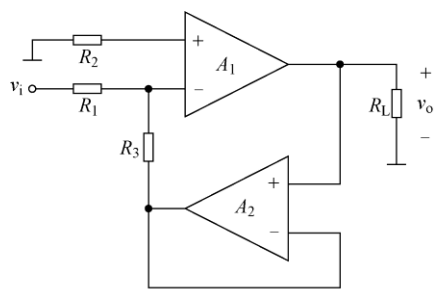
7.4 参照电压-串联反馈类型，分析其他三类反馈拓扑结构，完成表题 7.1，注意增益单位、电路参数及其下标。

表题 7.1 四类反馈拓扑结构相关参数分析表

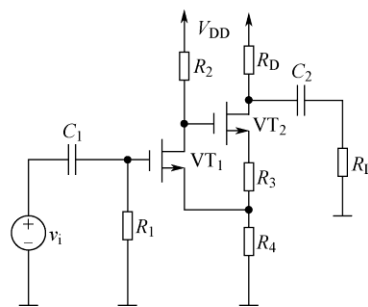
反 馈 类型	放 大 器 类 型	输 入 信 号 $X_i$	净 输 入 信 号 $X_i'$	反 馈 信 号 $X_f$	输 出 信 号 $X_o$	开 环 增 益 $A$ (单 位)	闭 环 增 益 $A_f$ (单 位)	反 馈 系 数 $\beta$ (单 位)	输 入 电 阻 $R_{if}$	输 出 电 阻 $R_{of}$
电 压 串 联	电 压	$v_i$	$v_i'$	$v_o$	$v_f$	$A_v(\text{V/V})$ $=v_o/v_i'$	$A_{vf}(\text{V/V})$ $=v_o/v_i$	$\beta_v(\text{V/V})$ $=v_f/v_o$	$(1+A_v\beta_v)R_i$	$R_o/(1+A_v\beta_v)$
电 流 串 联	互 导	$v_i$	$v_i'$	$i_o$	$v_f$	$A_g(\text{A/V})$ $=i_o/v_i'$	$A_{gf}(\text{A/V})$ $=i_o/v_i$	$\beta_r(\text{V/A})$ $=v_f/i_o$	$(1+A_g\beta_r)R_i$	$(1+A_g\beta_r)R_o$
电 压 并 联	互 阻	$i_i$	$i_i'$	$v_o$	$i_f$	$A_r(\text{V/A})$ $=v_o/i_i'$	$A_{rf}(\text{V/A})$ $=v_o/i_i$	$\beta_g(\text{A/V})$ $=i_f/v_o$	$R_i/(1+A_r\beta_g)$	$R_o/(1+A_r\beta_g)$
电 流 并 联	电 流	$i_i$	$i_i'$	$i_o$	$i_f$	$A_i(\text{A/A})$ $=i_o/i_i'$	$A_{if}(\text{A/A})$ $=i_o/i_i$	$\beta_i(\text{A/A})$ $=i_f/i_o$	$R_i/(1+A_i\beta_i)$	$(1+A_i\beta_i)R_o$

7.5 试判断图题 7.2 所示电路中反馈放大器的反馈极性、反馈元件和反馈类型。

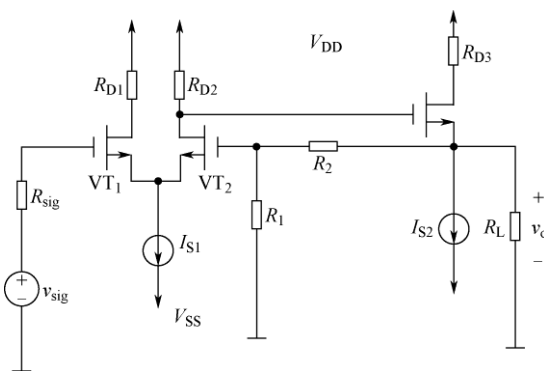




(e)



(f)



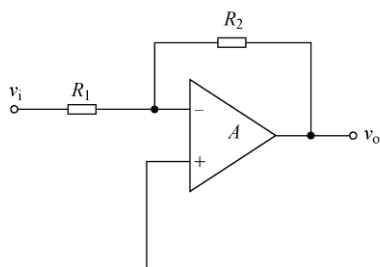
(g)

图题 7.2

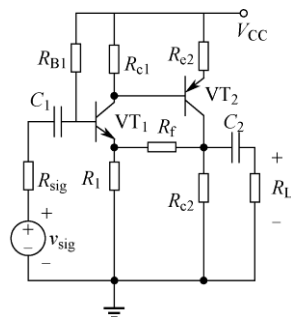
解:

- (a)、 $R_f$ , 电压并联负反馈;
- (b)、 $R_f$ 、 $R_{E2}$ , 电流串联正反馈;
- (c)、 $R_2$ 、 $r$ , 电流并联负反馈;
- (d)、 $R_1$ , 电流串联负反馈;
- (e)、 $R_3$ 、 $A_2$ , 电压并联负反馈;
- (f)、 $R_4$ , 电流串联正反馈;
- (g)、 $R_1$ 、 $R_2$ , 电压串联负反馈;

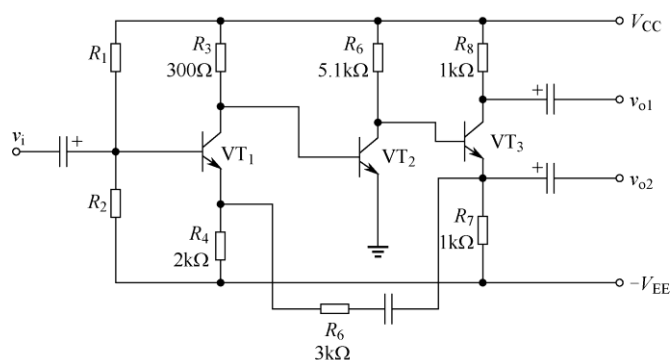
7.6 判断图题 7.3 所示反馈放大器反馈类型和极性。



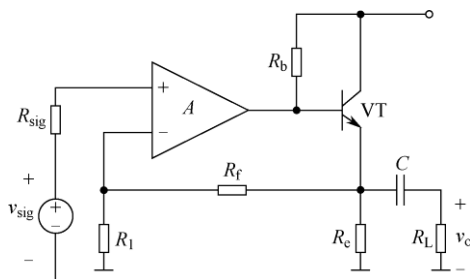
(a)



(b)



(c)



(d)

图题 7.3

解: (a)电压并联负反馈;

(b)电压串联负反馈;

(c) 若  $V_{o1}$  输出, 电流串联负反馈; 若  $V_{o2}$  输出, 电压串联负反馈;

(d) 电压串联负反馈

7.7 某负反馈放大器的闭环增益  $A_f=100$ , 开环增益  $A=10^5$ , 其反馈系数  $\beta$  为多少? 若由于制造误差导致  $A$  减小为  $10^3$ , 则相应的闭环增益为多少? 与减小 100 倍的  $A$  相对应的  $A_f$  的相对变化数值为多少?

$$\text{解: } A_f = \frac{A}{1+A\beta}, 100 = \frac{10^5}{1+10^5 \times \beta}, \beta = 0.00999$$

$$A'_f = \frac{A'}{1+A'\beta} = \frac{10^3}{1+10^3 \times 0.00999} = 90.99$$

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{100-90.99}{100} = 9.01\%$$

7.8 由集成运放构成的反馈放大器如图题 7.4 所示,

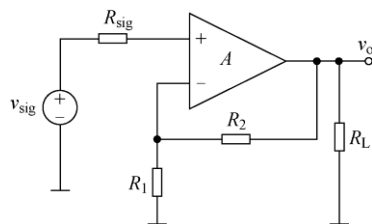
(1) 假设集成运放的输入电阻为无穷大, 输出电阻为零。求反馈系数  $\beta$  的大小。

(2) 如果开环增益  $A=10^4$ , 求当闭环电压增益  $A_f=10$  时的  $R_2/R_1$ 。

(3) 求反馈深度分贝大小。

(4) 若  $v_i=1V$ , 求  $v_o$ 、 $v_f$  和  $v_i'$  大小。

(5) 若  $A$  下降了 20%, 相应的  $A_f$  下降了多少?



图题 7.4

解: (1)、  $\beta = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

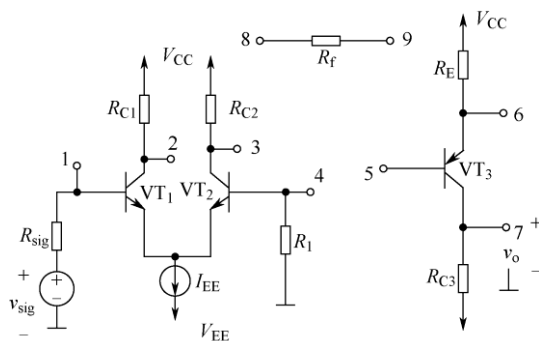
(2)、  $A_f = \frac{A}{1 + A\beta}, 10 = \frac{10^4}{1 + 10^4 \beta}, \beta = 0.0999, \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.0999, \frac{R_2}{R_1} = 9$

(3)、  $20 \lg(1 + A\beta) = 20 \lg \frac{A}{A_f} = 20 \lg \frac{10^4}{10} = 60 \text{dB}$

(4)、  $v_o = A_f v_s = 10 \times 1 = 10 \text{V}, v_f = \beta v_o = 0.0999 \times 10 = 0.999 \text{V}, v_i = \frac{v_o}{A} = \frac{10}{10^4} = 1 \text{mV}$

(5)、  $\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + A\beta} \frac{dA}{A} = \frac{1}{10^3} \times 20\% = 0.2\%$

7.9 在图题 7.5 所示电路中, 按以下要求连接两级反馈放大器。(1) 具有稳定的源电流增益;  
(2) 具有较高的输入阻抗和较低的输出阻抗;(3) 具有较低的输入阻抗和稳定的输出电压。



图题 7.5

解:

(1)、电流并联负反馈, 2-5, 1-6;

(2)、电压串联负反馈, 2-5, 4-7;

(3)、电压并联负反馈, 3-5, 1-7。

7.10 以集成运放作为基本放大器引入合适的负反馈, 以实现以下的目的。要求设计具体的负反馈放大电路。

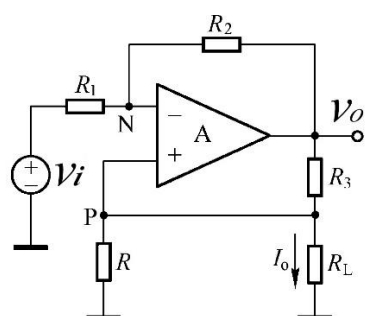
(1) 实现电压-电流的转换电路;

(2) 实现电流-电压的转换电路;

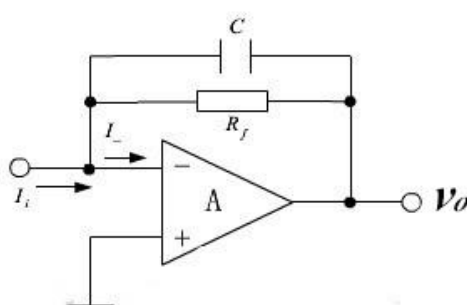
(3) 实现具有高输入阻抗、能稳定电压增益的放大电路;

(4) 实现具有低输入阻抗、能稳定输出电流的放大电路。

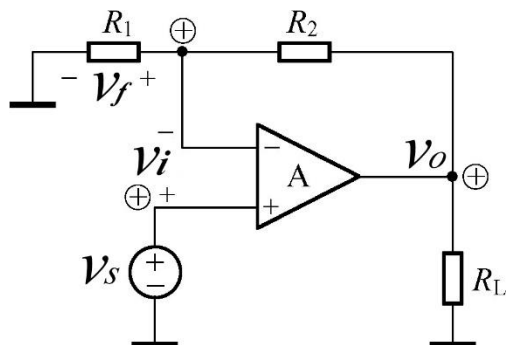
解：(1) 电压电流转换电路



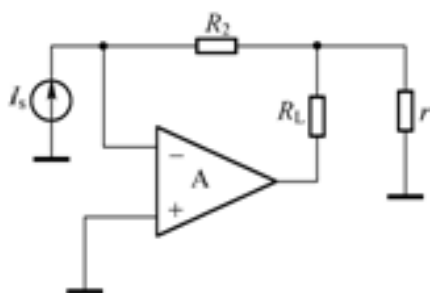
(2) 电流电压转换电路



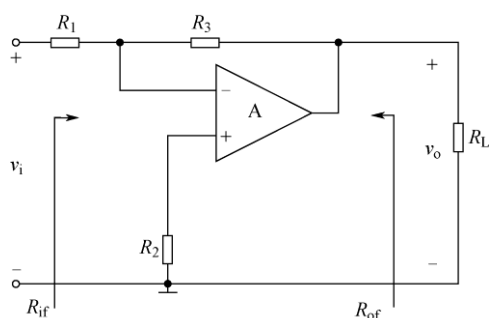
(3) 高输入阻抗、能稳定电压增益的放大器



(4) 低输入阻抗、能稳定输出电流的放大电路



7.11 在图题 7.6 所示的反馈电路中，集成运放都具有理想的特性，



图题 7.6

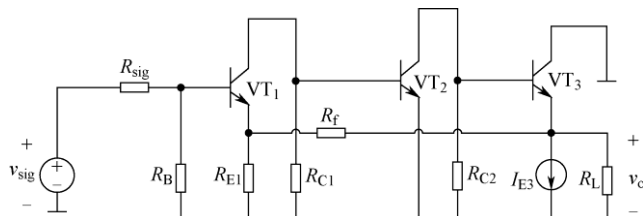
- 1) 判断电路中的反馈是正反馈还是负反馈，并指出是何种反馈类型；
- 2) 说明这种反馈类型对电路的输入、输出电阻有何影响（增大或减小），并求出  $R_{if}$  和  $R_{of}$  的大小；
- 3) 写出电路闭环放大倍数的表达式。

解：(1) 电压并联负反馈；

(2) 能够减小输出电阻, 减小输入电阻;  $R_{if} = R_1, R_o = 0$

$$(3) A_{vf} = -\frac{R_3}{R_1}$$

7.12 反馈放大器如图题 7.7 所示, 已知 BJT 参数  $g_m=77\text{mS}$ ,  $\beta=100$ ,  $A_v=500$ ,  $R_{E1}=51\Omega$ ,  $R_f=1.2\text{k}\Omega$ ,  $R_B=10\text{k}\Omega$ 。在满足深度负反馈的条件下, 求  $A_{vf}$ 。

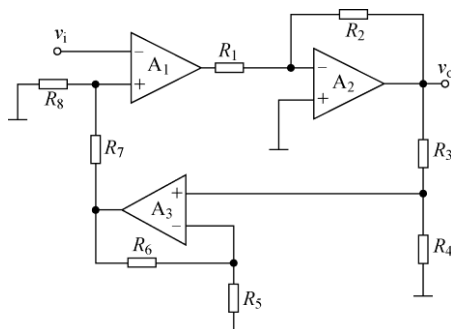


图题 7.7

$$\text{解: } A_{vf} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_f}{R_{E1}} = 1 + \frac{1.2\text{k}\Omega}{51\Omega} = 24.53\text{V/V}$$

7.13 如图题 7.8 所示的深度负反馈放大器。(1) 判断其反馈类型及极性;

(2) 写出电压增益  $A_{vf} = \frac{v_o}{v_i}$  的表达式。



图题 7.8

解: (1) 电压串联负反馈

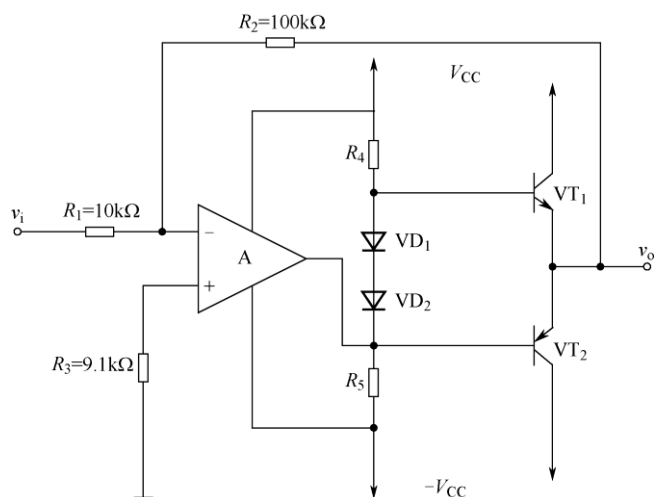
$$(2) v_o \frac{R_4}{R_3 + R_4} = v_{o3} \frac{R_5}{R_5 + R_6}, v_f = v_{o3} \frac{R_8}{R_8 + R_7}$$

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_s} \approx \frac{v_o}{v_f} = \frac{v_o}{v_{o3}} \frac{v_{o3}}{v_f} = \frac{R_5}{R_5 + R_6} \frac{R_3 + R_4}{R_4} \frac{R_8 + R_7}{R_8}$$

7.14 如图题 7.9 所示的反馈放大器。

(1) 判断反馈极性和反馈类型;

(2) 假设反馈放大器满足深度负反馈条件, 估算闭环增益、输入阻抗  $R_{if}$  和输出阻抗  $R_{of}$ 。



图题 7.9

解：(1) 电压并联负反馈；

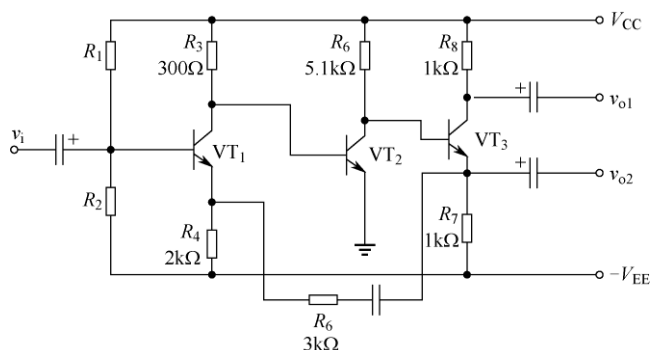
$$(2) A_{vf} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{100\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} = -10\text{V/V}, R_{if} \rightarrow R_1, R_{of} \rightarrow 0$$

7.15 电路如图题 7.10 所示，问：

采用  $v_{o1}$  输出时，该电路属于何种类型与极性的反馈放大电路？

采用  $v_{o2}$  输出时，该电路属于何种类型与极性的反馈放大电路？

假设满足深度负反馈条件，试求第 2 种情况下的电压增益  $A_{vf} = v_{o2} / v_i$ 。



图题 7.10

解：(1)  $v_{o1}$  输出时，电流串联负反馈

(2)  $v_{o2}$  输出时，电压串联负反馈

$$(3) \text{ 假设满足深度负反馈条件，第 2 种情况下 } A_{vf} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_6}{R_4} = 2.5\text{V/V}$$

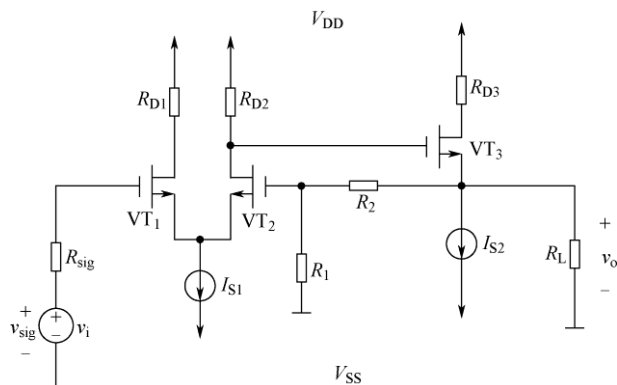
7.16 反馈放大电路如图题 7.11 所示，试：

(1) 指明级间反馈元件，并判别反馈类型；

(2) 若电路满足深度负反馈的条件，求电压增益  $A_{vf} = v_o / v_i$  的表达式。

(3) 若信号源内阻很大，问反馈是否合理？简单说明理由。若不合理，输出不变的情况下，如何修改反馈电路？请在图中标出修改的情况。





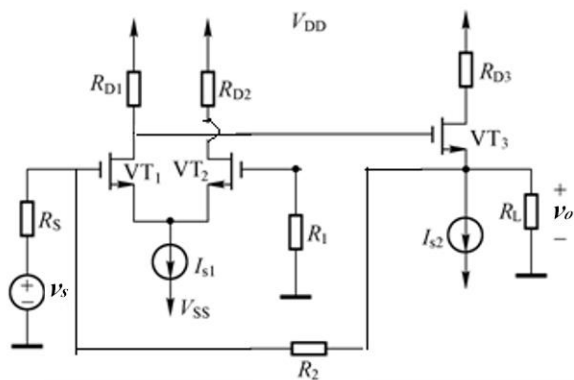
图题 7.11

解：(1)、反馈元件为  $R_1$  和  $R_2$ ，电压串联负反馈；

$$(2)、A_{vfs} = \frac{v_o}{v_s} \approx \frac{v_o}{v_f} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

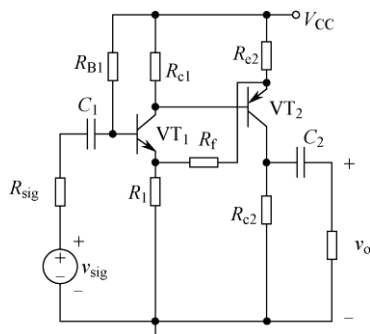
(3)、若信号源内阻很大，反馈不合理。当输入端为串联结构时，反馈的是电压信号。此时若电压源的内阻较大，反馈的自动调节作用就不明显。

电路修改如图所示：



7.17 反馈放大电路如图题 7.12 所示，试：

- 1) 指明级间反馈元件，并判别反馈类型和性质；
- 2) 若电路满足深度负反馈的条件， $R_{sig} \ll R_{B1}$ ，求其电压放大倍数  $A_{vf} = v_o/v_i$  的表达式；
- 3) 若要求放大电路有稳定的输出电压，问如何改接  $R_f$ ？请在电路图中画出改接后的反馈路径，并说明反馈类型。

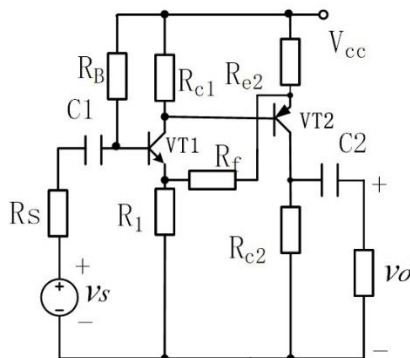


图题 7.12

解：(1) 反馈元件为  $R_f$  和  $R_E$ ，电压串联负反馈。

(2) 深度负反馈条件下,  $A_f = \frac{1}{\beta} = \frac{v_o}{v_f} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$

(3) 要求放大电路有稳定的输出电流, 应采用电流采样方式。接法如下:



7.18 考虑某反馈放大器, 开环增益  $A(s) = \frac{1000}{(1+s/10^3)(1+s/10^4)^2}$ 。若反馈系数与  $\beta$  无关, 确定相移为  $180^\circ$  时的频率, 并确定  $\beta$  值, 使  $\beta$  为该值时系统开始自激振荡。

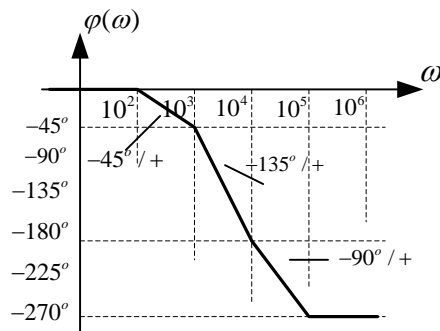
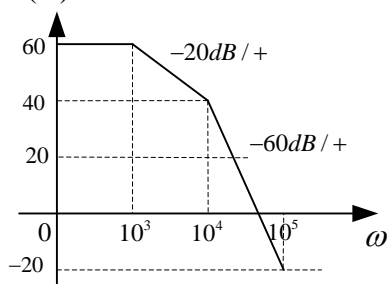
解:  $A(s) = \frac{1000}{(1+s/10^3)(1+s/10^4)^2}$

令  $s=j\omega$ ,  $A(j\omega) = \frac{1000}{(1+j\omega/10^3)(1+j\omega/10^4)(1+j\omega/10^4)}$

$20\lg A(\omega) = 60 - 20\lg \sqrt{1+(\omega/10^3)^2} - 20\lg \sqrt{1+(\omega/10^4)^2} - 20\lg \sqrt{1+(\omega/10^4)^2}$

$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega/10^3) - \arctan(\omega/10^4) - \arctan(\omega/10^4)$

$20\lg A(\omega) / \text{dB}$



$\varphi(\omega) = 180^\circ$  时,  $\omega = 10^4$ ,  $20\lg \frac{1}{\beta} = 40$ ,  $\beta = 0.01$

7.19 已知一负反馈放大器的  $\beta = 0.001$ , 开环增益为

$$A(f) = \frac{10^5}{\left(1 + j\frac{f}{10^3}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^4}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^5}\right)}$$

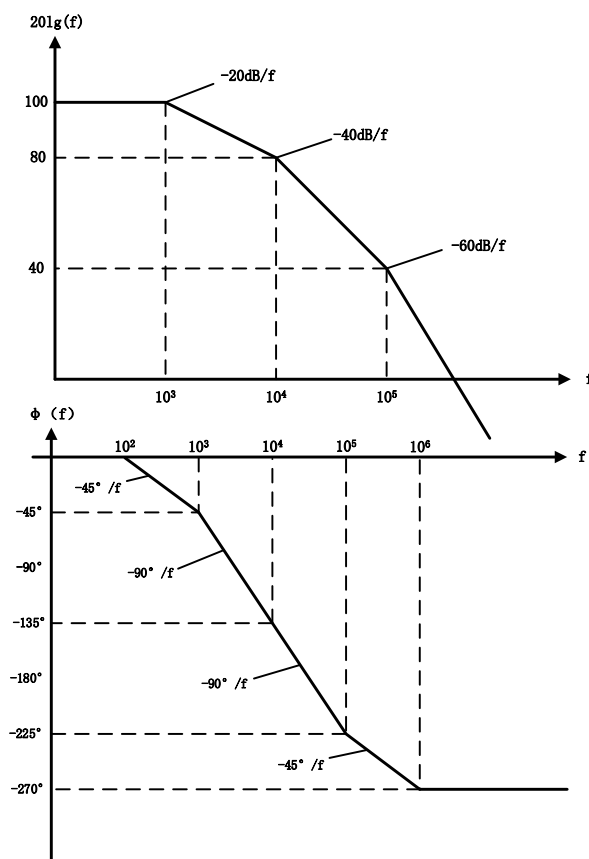
(1) 画出渐近波特图;

(2) 判断电路是否产生自激振荡, 如不自激, 求相位裕度。

解: (1)  $A(f) = \frac{10^5}{(1 + jf/10^3)(1 + jf/10^4)(1 + jf/10^5)}$

$$20\lg A(f) = 100 - 20\lg \sqrt{1 + (f/10^3)^2} - 20\lg \sqrt{1 + (f/10^4)^2} - 20\lg \sqrt{1 + (f/10^5)^2}$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan(f/10^3) - \arctan(f/10^4) - \arctan(f/10^5)$$



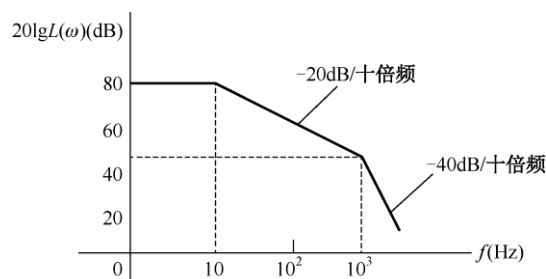
(2)、 $\beta=0.001$ ,  $20\lg \frac{1}{\beta} = 80\text{dB}$ , 不产生自激振荡, 相位裕度  $\gamma_\varphi = 45^\circ$

7.20 一个反馈放大器在  $\beta=0.1$  的幅频特性曲线如图题 7.13 所示。

(1) 写出基本放大器开环增益  $A$  的幅频特性表达式。

(2) 求基本放大器的开环增益  $|A|$  以及闭环增益  $|A_f|$ 。

(3) 已知  $A\beta$  在  $f < 10^4\text{Hz}$  时为正数, 当电路按负反馈连接时, 若不加补偿环节是否会产生自激现象? 原因是什么?



图题 7.13

解：(1)  $20\lg L(\omega)=80\text{dB}$ ,  $L(\omega)=10^4$ ,  $L(\omega)=A(\omega)\beta$ ,  $A(\omega)=\frac{10^4}{0.1}=10^5$

$$A(j\omega)=\frac{10^5}{(1+j\omega/2\pi\times 10)(1+j\omega/2\pi\times 10^3)}$$

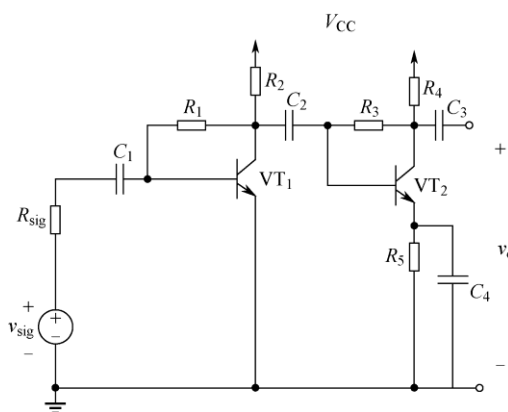
$$(2)、|A|=\frac{10^5}{\sqrt{1+(\omega/20\pi)^2}\sqrt{1+(\omega/2000\pi)^2}}, |A_f|=\left|\frac{A}{1+A\beta}\right|$$

(3)、若不加补偿环节会产生自激现象，因为：

$$20\lg\frac{1}{\beta}=20\text{dB水平线交在}A(\omega)\text{幅频特性曲线的}-40\text{dB十倍频斜线上，}$$

放大器是不稳定的，故需要添加频率补偿环节。

7.21 图题 7.14 中信号源内阻很小，电容 C 对信号均可视作短路，试问反馈电路是否合理（单级或两级）？为什么？



图题 7.14

解：不合理。信号源内阻较小，而第一级输入端采用并联反馈，无法从信号源获取较大的信号幅度。 $R_1$ 和 $R_3$ 分别为本级引入电压并联负反馈，显然，第一级电压反馈输出，不适于作为第二级并联反馈电路的激励信号源。

7.22 要求设计增益为 100、增益相对变化率为 $\pm 1\%$ 的放大器。可选用的放大级增益为 1000，增益相对变化率为 $\pm 30\%$ 。在设计中运用多个放大级级联，并在每级施加适当的负反馈。当然，在达到设计要求的前提下，应使用尽可能少的放大级。

$$\text{解：}\frac{dA_f}{A_f}=\frac{1}{1+A\beta}\frac{dA}{A}, A_f=100\pm 1\%, A=1000\pm 30\%$$

$$\therefore \frac{1}{1+A\beta}=\frac{1\%}{30\%}=\frac{1}{30}$$

(1)如果采用一级放大，则： $\frac{1}{1+A\beta}=\frac{A_f}{A}=\frac{100}{1000}=\frac{1}{10}$ ，故一级放大不够，至少两级

$$(2)\text{如果采用两级放大，则：}A_f=\left(\frac{A}{1+A\beta}\right)^2\Rightarrow\frac{1}{1+A\beta}=\sqrt{\frac{A_f}{A^2}}=\sqrt{\frac{100}{1000^2}}=\frac{1}{100}$$

故两级放大反馈深度已满足要求，此时单级放大器增益相对变化率为

$$\frac{1}{1+A\beta}\frac{dA}{A}=\pm\frac{1}{100}\times 30\%=\pm 0.3\%$$

则两级级联最坏情况相对变化率为 $\pm 0.6\%$ ，故两级放大器级联即可满足设计。

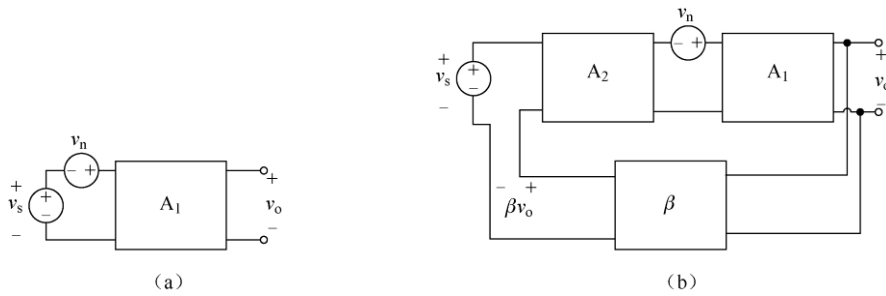
7.23 要求通过在一个两级放大器两端连接反馈回路设计一个反馈放大器。放大器第一级是一个具有很高的 3dB 上限频率的直流耦合的小信号放大器，第二级是中频增益为 10V/V 的功率输出级，其上限频率为 8kHz、下限频率为 80Hz。反馈放大器要求具有 100V/V 的中频增益和 40kHz 的 3dB 上限频率，则小信号放大器的增益为多少？反馈网络  $\beta$  的系数为多少？反馈放大器的 3dB 下限频率为多少？

$$\text{解： } A_f = \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} = 100 \text{ V/V}, \quad f_{Hf} = f_{H2} (1 + A_1 A_2 \beta) = 40 \text{ kHz}$$

$$\therefore 1 + A_1 A_2 \beta = 5, \quad \therefore A_1 A_2 = 500, \quad \therefore A_1 = 50 \text{ V/V}, \quad \therefore \beta = 0.008 \text{ V/V}$$

$$f_{fL} = \frac{f_{L2}}{1 + A_1 A_2 \beta} = 16 \text{ Hz}$$

7.23 要求设计一个减弱电源纹波的功率放大器，如图题 7.14 所示，其输出级增益为 0.9V/V，并存在  $\pm 1\text{V}$  的输出信号纹波。要求放大器的闭环增益为 10V/V。若需要将输出纹波降低到  $\pm 100\text{mV}$ ，则其前置低纹波放大级的增益应为多少？若要求降低到  $\pm 10\text{mV}$  又是多少？降低到  $\pm 1\text{mV}$  又是多少？对于每种情况，确定其反馈系数  $\beta$  的数值。



图题 7.14

$$\text{解： (1) } V_o = V_s \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} + V_n \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}, \quad V_{on1} = A_1 V_n, \quad V_{on2} = V_n \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}$$

纹波从  $\pm 1\text{V}$  降到  $\pm 100\text{mV}$ ，则  $\therefore 1 + A_1 A_2 \beta = 10$

$$\text{又 } A_{vf} = \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} = 10 \text{ V/V}, \quad \therefore A_1 A_2 = 100$$

$$\therefore A_2 = \frac{100}{0.9} = 111.11 \text{ V/V} \quad \beta = \frac{10-1}{A_1 A_2} = 0.09 \text{ V/V}$$

$$(2)、 \quad V_o = V_s \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} + V_n \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}, \quad V_{on1} = A_1 V_n, \quad V_{on2} = V_n \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}$$

纹波从  $\pm 1\text{V}$  降到  $\pm 10\text{mV}$ ，则  $\therefore 1 + A_1 A_2 \beta = 100$ ，

$$\text{又 } A_{vf} = \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} = 10 \text{ V/V}, \quad \therefore A_1 A_2 = 1000,$$

$$\therefore A_2 = \frac{1000}{0.9} = 1111.11 \text{ V/V} \quad \beta = \frac{10-1}{A_1 A_2} = 0.009 \text{ V/V}$$

$$(3)、V_o = V_s \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} + V_n \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}, \quad V_{on1} = A_1 V_n, \quad V_{on2} = V_n \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}$$

纹波从 $\pm 1\text{V}$  降到 $\pm 1\text{mV}$ , 则  $\therefore 1 + A_1 A_2 \beta = 1000$

$$\text{又 } A_{vf} = \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} = 10 \text{ V/V}, \quad \therefore A_1 A_2 = 10000$$

$$\therefore A_2 = \frac{10000}{0.9} = 11111.11 \text{ V/V} \quad \beta = \frac{10-1}{A_1 A_2} = 0.0009 \text{ V/V}$$