

图题 7.1.1

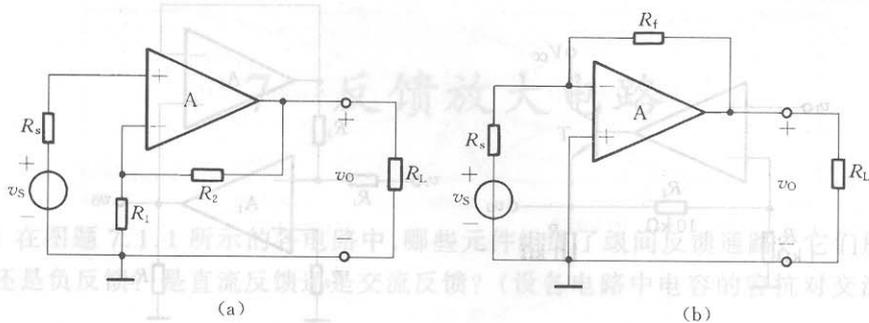
7.1.2 试判断图题 7.1.1 所示各电路的级间交流反馈的组态。

解 图题 7.1.1a 中, R_2 、 R_1 引入电压并联负反馈;
 图题 7.1.1b 图中, R_{e1} 引入电流串联负反馈;
 图题 7.1.1c 图中, R_1 、 R_2 引入电压并联负反馈;
 图题 7.1.1d 图中, R_2 、 R_1 引入电压串联负反馈;
 图题 7.1.1e 图中, A_2 、 R_3 引入电压并联负反馈;
 图题 7.1.1f 图中, R_6 引入电流串联负反馈;

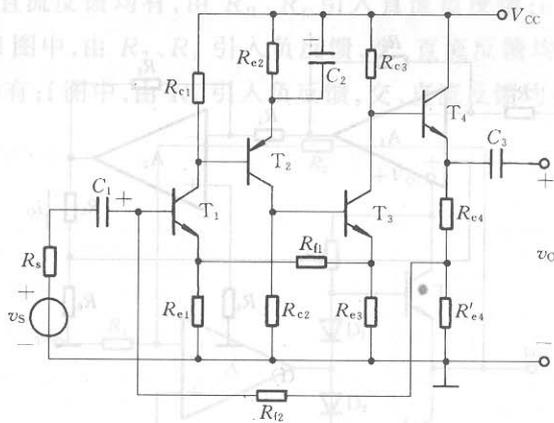
7.1.3 在图题 7.1.3 所示的两电路中, 从反馈的效果来考虑, 对信号源内阻 R_s 的大小有何要求?

解 图题 7.1.3a 中引入串联负反馈, 故从反馈效果考虑, 要求 R_s 越小越好。b 图中引入并联负反馈, 故从反馈效果考虑, 要求 R_s 越大越好。

7.1.4 电路如图题 7.1.4 所示。(1) 分别说明由 R_{11} 、 R_{12} 引入的两路反馈的类型及各自的主要作用;(2) 指出这两路反馈在影响该放大电路性能方面可能出现的矛盾是什么?(3) 为了消除上述可能出现的矛盾, 有人提出将 R_{12} 断开, 此办法是否可行? 为什么? 你认为怎样才能消除这个矛盾?



图题 7.1.3



图题 7.1.4

解 (1) R_{f1} 在第一、三级间引入交、直流负反馈, 此直流负反馈能稳定前三级的静态工作点, 其交流反馈为电流串联负反馈, 可稳定第三级的输出电流, 同时提高整个放大电路的输入电阻; R_{f2} 在第一、四级间引入交、直流负反馈, 其中直流负反馈为 T_1 提供直流偏置, 且稳定各级的静态工作点, 而其交流反馈为电压并联负反馈, 可稳定该电路的输出电压, 即降低电路的输出电阻, 另外也降低了整个电路的输入电阻。

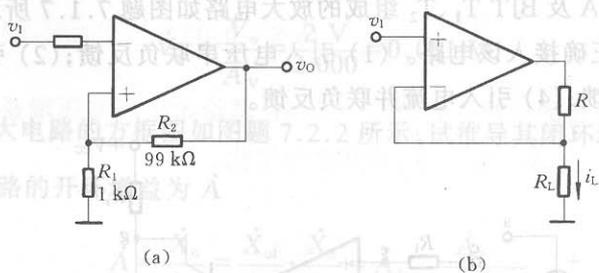
(2) R_{f1} 的引入使 R_{if} 上升, 而 R_{f2} 的引入使 R_{if} 下降, 产生矛盾。

(3) 不能断开 R_{f2} , 因 R_{f2} 是 T_1 的偏置电阻, 否则电路不能正常工作。消除上述矛盾的方法是在 R'_{e4} 的两端并一容量足够大的电容器, 去掉 R_{f2} 上的交流负反馈, 这对输出电压的稳定不会有很大影响, 因为 T_4 是射极输出器。

7.1.5 试指出图题 7.1.5a、b 所示电路能否实现规定的功能, 若不能, 应如何改正?

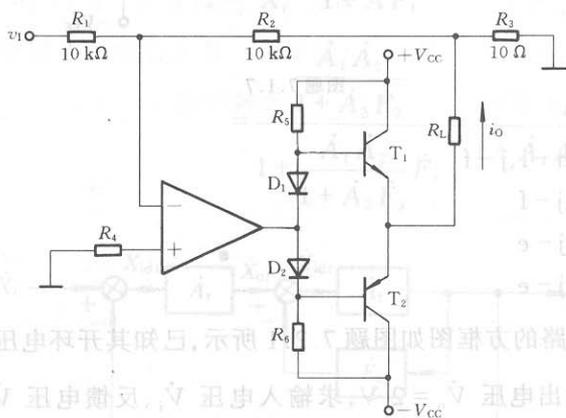
解 图题 7.1.5a 电路不能实现规定的功能, 因引入了正反馈。应将运放的同相端和反相端位置互换。图 b 电路也不能实现规定的功能。应将 R 与 R_L 位置互换。

7.1.6 设图题 7.1.6 所示电路中的开环增益 \dot{A} 很大。(1) 指出所引反馈的类型; (2) 写出输出电流 I_o 的表达式; (3) 说明该电路的功能。



图题 7.1.5

(a) $A_{VF} = 100$ 的直流放大电路 (b) $i_L = v_{o/R}$ 的压控电流源。



图题 7.1.6

解 (1) 由 R_2 、 R_3 引入了电流并联负反馈。

(2) 在深度负反馈条件下(因开环增益很大),由“虚短”、“虚断”可知

$$v_N \approx v_P \approx 0, \quad \dot{I}_1 \approx -\dot{I}_2 = -\frac{\dot{V}_i}{R_1},$$

又

$$\dot{I}_1 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \dot{I}_o$$

故

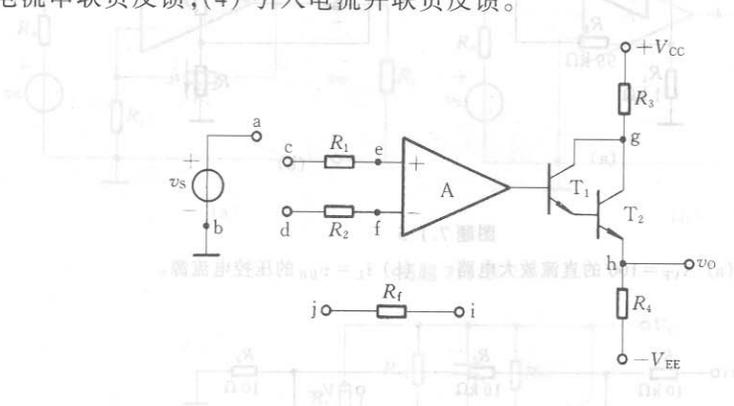
$$\dot{I}_o = -\frac{R_2 + R_3}{R_1 R_3} \dot{V}_i$$

已知 $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 10 \text{ }\Omega$, $R_2 \gg R_3$, 则

$$\dot{I}_o \approx -\frac{\dot{V}_i}{R_3} = -\frac{\dot{V}_i}{10 \text{ }\Omega}$$

所以 (3) 此电路可视为压控电流源。

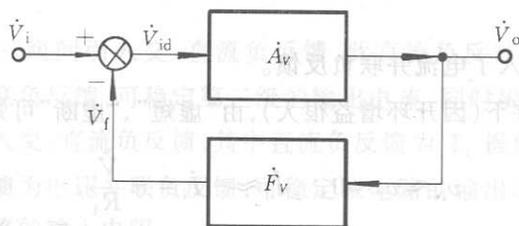
7.1.7 由集成运放 A 及 BJT T_1 、 T_2 组成的放大电路如图题 7.1.7 所示,试分别按下列要求将信号源 v_s 、电阻 R_f 正确接入该电路。(1) 引入电压串联负反馈;(2) 引入电压并联负反馈;(3) 引入电流串联负反馈;(4) 引入电流并联负反馈。



图题 7.1.7

- 解 (1) a-c、b-d、h-i、j-f
 (2) a-d、b-c、h-i、j-f
 (3) a-d、b-c、g-i、j-e
 (4) a-c、b-d、g-i、j-e

7.2.1 某反馈放大电路的方框图如图题 7.2.1 所示,已知其开环电压增益 $\dot{A}_v = 2000$, 反馈系数 $\dot{F}_v = 0.0495$ 。若输出电压 $\dot{V}_o = 2\text{V}$, 求输入电压 \dot{V}_i 、反馈电压 \dot{V}_f 及净输入电压 \dot{V}_{id} 的值。



图题 7.2.1

解

$$\dot{A}_{VF} = \frac{\dot{A}_v}{1 + \dot{A}_v \dot{F}_v} = \frac{2000}{1 + 2000 \times 0.0495} = 20$$

$$\dot{V}_i = \frac{\dot{V}_o}{\dot{A}_{VF}} = \frac{2\text{V}}{20} = 0.1\text{V}$$

$$\dot{V}_f = \dot{F}_v \dot{V}_o = 0.0495 \times 2\text{V} = 0.099\text{V}$$

$$\dot{V}_{id} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{A}_V} = \frac{2 \text{ V}}{2000} = 0.001 \text{ V}$$

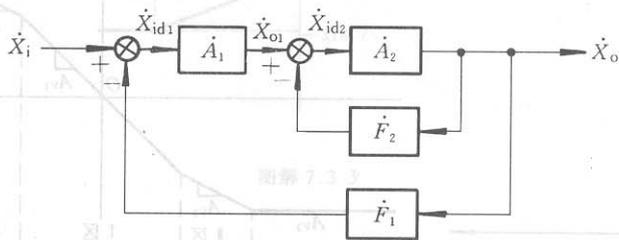
7.2.2 某反馈放大电路的方框图如图题 7.2.2 所示,试推导其闭环增益 \dot{X}_o/\dot{X}_i 的表达式。

解 设该放大电路的开环增益为 \dot{A}

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id1}} = \frac{\dot{X}_{o1}}{\dot{X}_{id1}} \cdot \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{o1}} = \dot{A}_1 \frac{\dot{A}_2}{1 + \dot{A}_2 \dot{F}_2}$$

则

$$\begin{aligned} \dot{A}_F &= \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A} \dot{F}_1} \\ &= \frac{\dot{A}_1 \dot{A}_2}{1 + \dot{A}_2 \dot{F}_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\dot{A}_1 \dot{A}_2}{1 + \dot{A}_2 \dot{F}_2} \dot{F}_1} \\ &= \frac{\dot{A}_1 \dot{A}_2}{1 + \dot{A}_1 \dot{A}_2 \dot{F}_1 + \dot{A}_2 \dot{F}_2} \end{aligned}$$



图题 7.2.2

7.2.3 由运放组成的同相放大电路中,运放的 $A_{VO} = 10^6$, $R_f = 47 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 5.1 \text{ k}\Omega$,求反馈系数 \dot{F}_V 和闭环电压增益 \dot{A}_{VF} 。

解 同相放大电路中引入了电压串联负反馈,则

$$\dot{F}_V = \frac{R_1}{R_1 + R_f} = \frac{5.1}{5.1 + 47} \approx 0.098$$

$$\dot{A}_{VF} = \frac{\dot{A}_{VO}}{1 + \dot{A}_{VO} \dot{F}_V} = \frac{10^6}{1 + 10^6 \times 0.098} \approx 10.2$$

7.3.1 一放大电路的开环电压增益为 $A_{VO} = 10^4$,当它接成负反馈放大电路时,其闭环电压增益为 $A_{VF} = 50$,若 A_{VO} 变化 10%,问 A_{VF} 变化多少?

解 因为

$$1 + A_{VO} F_V = \frac{A_{VO}}{A_{VF}} = \frac{10^4}{50} = 200$$

所以,当 A_{VO} 变化 10% 时, A_{VF} 变化

7.1.7 由集成运放 A 及电阻 R 组成的放大电路如图题 7.1.7 所示, 试分别按下列要求将信号源 v_s 、电阻 R 正确接入该电路: (1) 引入电压串联负反馈; (2) 引入电压并联负反馈; (3) 引入电流串联负反馈; (4) 引入电流并联负反馈。

$$\frac{dA_{VF}}{A_{VF}} = \frac{1}{200} \times 10\% = 0.05\%$$

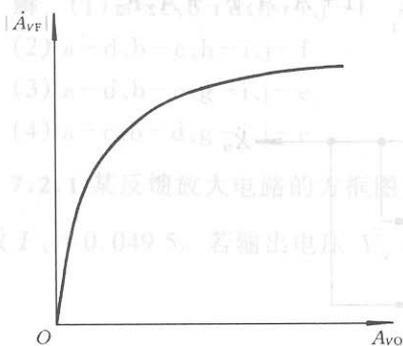
7.3.2 负反馈放大电路的反馈系数 $|\dot{F}_V| = 0.01$, 试绘出闭环电压增益 $|\dot{A}_{VF}|$ 与开环电压增益 A_{VO} 之间的关系曲线。设 A_{VO} 在 1 与 1 000 之间变化。

解 依据式

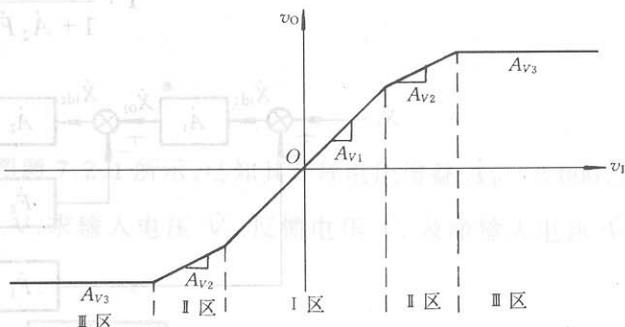
$$|\dot{A}_{VF}| = \frac{A_{VO}}{1 + A_{VO}|\dot{F}_V|}$$

及 $|\dot{F}_V| = 0.01$, 可画出 $|\dot{A}_{VF}|$ 与 A_{VO} 的关系曲线, 如图解 7.3.2 所示。

7.3.3 设一非线性放大电路的电压传输特性的示意图如图题 7.3.3 所示。为简明起见, 不考虑相位关系, 所有变量均用实数。其中一象限 I 区的斜率 $A_{V1} = 2 \times 10^3$ ($0 < v_O < 5$ V); II 区的斜率 $A_{V2} = 0.5 \times 10^3$ (5 V $< v_O < 12$ V); 三象限类似。若用此放大电路组成一负反馈放大电路, 其反馈系数 $F_V = 0.05$, 试描绘此放大电路的闭环传输特性 $v_i - v_{OF}$ 。



图解 7.3.2



图题 7.3.3

解

由已知条件可知, 用此非线性放大电路组成负反馈放大电路时, 其反馈深度分别为

$$1 + A_{V1}F_V = 1 + 2 \times 10^3 \times 0.05 = 101$$

$$1 + A_{V2}F_V = 1 + 0.5 \times 10^3 \times 0.05 = 26$$

当 $0 < v_O < 5$ V 时, 闭环输出电压为 $0 < v_{OF} < \frac{5}{101} \approx 0.05$ V = 50 mV

当 5 V $< v_O < 12$ V 时, 0.05 V $< v_{OF} < \left(0.05 + \frac{12-5}{26}\right)$ V ≈ 0.3187 V = 318.7 mV

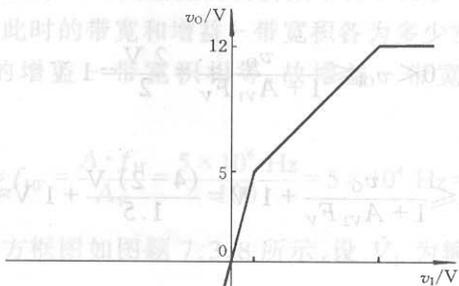
闭环电压传输特性如图解 7.3.3 所示。

7.3.4 放大电路的传输特性如图题 7.3.3 所示。设 $A_{V1} = 1\,200$, $A_{V2} = 400$ 。将此放大电路构成负反馈放大电路, 试选择一反馈网络的反馈系数 F_V , 使得闭环增益 A_{VF} 下降不多于 5%, 设此时放大电路工作在 II 区内, 求出对应于所选定的 F_V 时的 A_{VF} 。

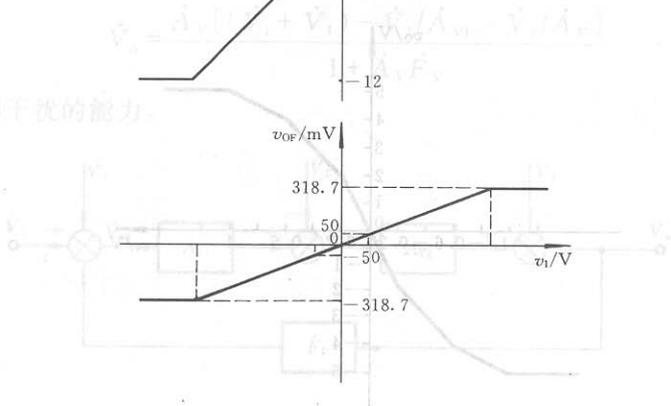
解 依题意可知, 在 II 区内, 闭环电压增益

7.3.7 一运放的开环增益为 10^5 ，其最低的转折频率为 5 Hz 。若将该运放组成一闭环放大电路，并使它的增益为 100 ，问此时的带宽和增益带宽积各为多少？

解 因开环与闭环时的增益 $A = \frac{v_o}{v_i}$ 与带宽 f 的关系为 $A \cdot f = A_o \cdot f_o = 5 \times 10^5 \text{ Hz}$ ，闭环时的带宽



7.3.8 反馈放大电路的方框图如图题 7.3.8 所示，设该电路输入端引入的干扰电压增益为 $A_1 = A_2$ ，并说明负反馈抑制干扰的能力。



图解 7.3.3

解 由图题 7.3.8 可知

$$A_{VF} = 400 - 400 \times \frac{5}{100} = 380$$

又

$$A_{VF} = \frac{A_{V2}}{1 + A_{V2} F_V}$$

故

$$F_V = \frac{1}{400 \times 19} \approx 1.32 \times 10^{-4}$$

7.3.5 设某电压放大电路的开环传输特性 $v_i - v_o$ 具有四个区域，其斜率各不相同。从原点起，当 $v_i = 0.2 \text{ V}$ 时， $v_o = 2 \text{ V}$ ； $v_i = 0.6 \text{ V}$ 时， $v_o = 4 \text{ V}$ ；而当 $v_i \geq 1 \text{ V}$ 时， v_o 达到 5 V 。由此放大电路组成一负反馈放大电路，并设 $F_V = 0.1$ ，试描绘 $v_i - v_{oF}$ 的关系曲线，并令 $0 < v_o < 5 \text{ V}$ 。

解 由已知条件可画出开环时的传输特性，如图解 7.3.5 a 所示，同时可求得对应的开环电压增益分别为

$$A_{V1} = \frac{2 \text{ V}}{0.2 \text{ V}} = 10, A_{V2} = \frac{(4-2) \text{ V}}{(0.6-0.2) \text{ V}} = 5, A_{V3} = \frac{(5-4) \text{ V}}{(1-0.6) \text{ V}} = 2.5$$

反馈深度分别为

$$1 + A_{V1} F_V = 2, \quad 1 + A_{V2} F_V = 1.5, \quad 1 + A_{V3} F_V = 1.25$$

故当 $0 < v_o \leq 2 \text{ V}$ 时,有

$$0 < v_{\text{OF}} \leq \frac{v_o}{1 + A_{V1} F_V} = \frac{2 \text{ V}}{2} = 1 \text{ V}$$

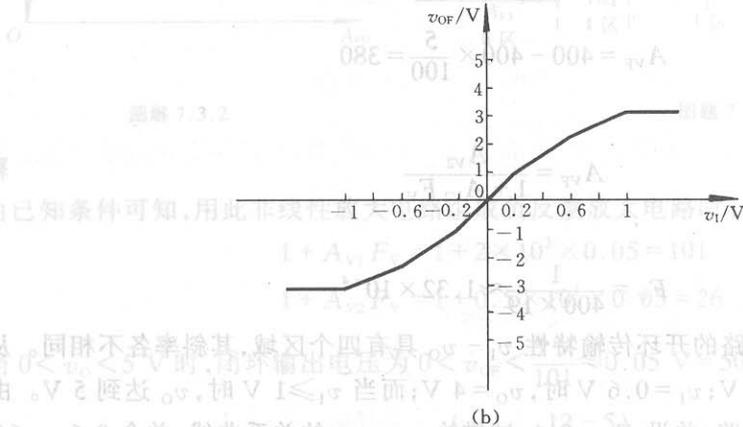
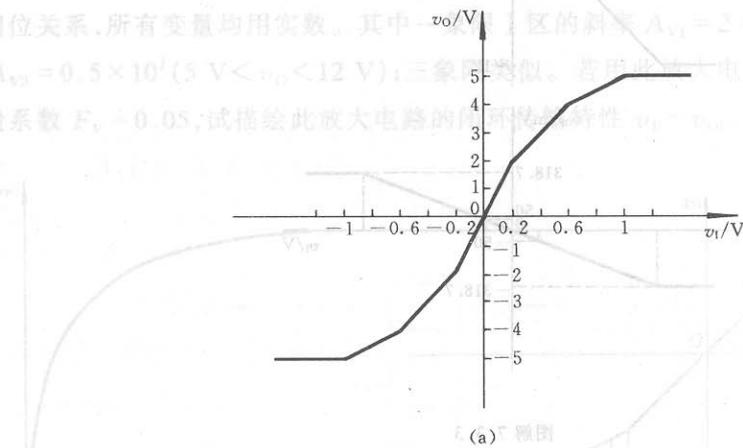
当 $2 \text{ V} < v_o \leq 4 \text{ V}$ 时,有

解. 依据式 $1 \text{ V} < v_{\text{OF}} \leq \frac{v_o}{1 + A_{V2} F_V} + 1 \text{ V} = \frac{(4-2) \text{ V}}{1.5} + 1 \text{ V} \approx 2.3 \text{ V}$

当 $4 \text{ V} < v_o \leq 5 \text{ V}$ 时,有

$$2.3 \text{ V} < v_{\text{OF}} \leq \frac{v_o}{1 + A_{V3} F_V} + 2.3 \text{ V} = \frac{(5-4) \text{ V}}{1.25} + 2.3 \text{ V} = 3.1 \text{ V}$$

由以上分析计算可绘出 $v_i - v_{\text{OF}}$ 的关系曲线,如图解 7.3.5 b 所示。



图解 7.3.5

7.3.6 设某运算放大器的增益-带宽积为 $4 \times 10^5 \text{ Hz}$,若将它组成一同相放大电路时,其闭环增益为 50,问它的闭环带宽为多少?

解 闭环带宽 $BW = \frac{\text{增益-带宽积}}{A_F} = \frac{4 \times 10^5 \text{ Hz}}{50} = 8\,000 \text{ Hz} = 8 \text{ kHz}$

7.3.7 一运放的开环增益为 10^6 , 其最低的转折频率为 5 Hz 。若将该运放组成一同相放大电路, 并使它的增益为 100 , 问此时的带宽和增益-带宽积各为多少?

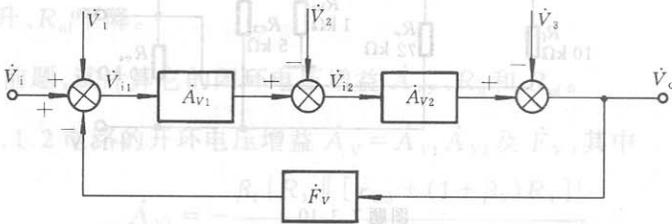
解 因开环与闭环时的增益-带宽积相等, 故增益-带宽积为 $A \cdot BW \approx A \cdot f_H = 5 \times 10^6 \text{ Hz}$, 闭环时的带宽

$$BW \approx f_{HF} = \frac{A \cdot f_H}{A_F} = \frac{5 \times 10^6 \text{ Hz}}{100} = 5 \times 10^4 \text{ Hz} = 50 \text{ kHz}$$

7.3.8 反馈放大电路的方框图如图题 7.3.8 所示, 设 \dot{V}_1 为输入端引入的噪声, \dot{V}_2 为基本放大电路内引入的干扰(例如电源干扰), \dot{V}_3 为放大电路输出端引入的干扰。放大电路的开环电压增益为 $\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \dot{A}_{v2}$ 。证明

$$\dot{V}_o = \frac{\dot{A}_v [(\dot{V}_i + \dot{V}_1) - \dot{V}_2 / \dot{A}_{v1} - \dot{V}_3 / \dot{A}_v]}{1 + \dot{A}_v \dot{F}_v}$$

并说明负反馈抑制干扰的能力。



图题 7.3.8

解 由图题 7.3.8 可知

$$\dot{V}_{i1} = \dot{V}_i + \dot{V}_1 - \dot{F}_v \dot{V}_o$$

$$\dot{V}_{i2} = \dot{A}_{v1} \dot{V}_{i1} - \dot{V}_2 = \dot{A}_{v1} (\dot{V}_i + \dot{V}_1 - \dot{F}_v \dot{V}_o) - \dot{V}_2$$

$$\dot{V}_o = \dot{A}_{v2} \dot{V}_{i2} - \dot{V}_3 = \dot{A}_{v1} \dot{A}_{v2} (\dot{V}_i + \dot{V}_1 - \dot{F}_v \dot{V}_o) - \dot{A}_{v2} \dot{V}_2 - \dot{V}_3$$

又已知 $\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \dot{A}_{v2}$, 故

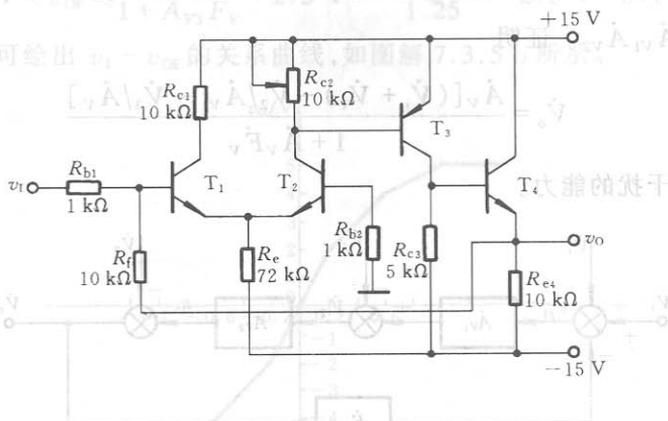
$$\dot{V}_o = \frac{\dot{A}_v [(\dot{V}_i + \dot{V}_1) - \dot{V}_2 / \dot{A}_{v1} - \dot{V}_3 / \dot{A}_v]}{1 + \dot{A}_v \dot{F}_v}$$

由 \dot{V}_o 的表达式可见, 干扰从放大电路的前级混入比从后级混入造成的影响更为严重。因此, 在设计制造多级反馈放大电路时, 要特别注意采取措施防止噪声或干扰从前级混入。如果干扰信号在反馈环内出现(例如在 \dot{V}_2 处), 由于有效信号可人为地提高, 引入负反馈后, 则可提高信噪比。反之, 如噪声随同有效信号一同混入, 则即使引入负反馈也是无效的。

7.3.9 图题 7.1.1 所示各电路中, 哪些电路能稳定输出电压? 哪些电路能稳定输出电流? 哪些电路能提高输入电阻? 哪些电路能降低输出电阻?

解 图题 7.1.1 所示电路中: H_2 式率... 稳定输出电压的有 a、d、e
 稳定输出电流的有 b、c、f
 提高输入电阻的有 b、d、f
 降低输出电阻的有 a、d、e

7.3.10 电路如图题 7.3.10 所示。(1) 指出由 R_f 引入了什么类型的反馈;(2) 若要求既提高该电路的输入电阻又降低输出电阻, 图中的连线应作哪些变动?(3) 连线变动前后的闭环电压增益 \dot{A}_{VF} 是否相同? 估算其数值。



图题 7.3.10

解 (1) R_f 引入了电压并联负反馈。

(2) 要使引入的负反馈既能提高电路的输入电阻又能降低输出电阻, 则需引入电压串联负反馈。连线可按以下两种方案变动。

① 将 T_3 的基极与 T_1 的集电极相连, 同时将 R_f 的一端从 T_1 的基极移至 T_2 的基极。

② 将 T_2 的基极通过 R_{b2} 接于 v_i , T_1 的基极通过 R_{b1} 接地。

(3) 改接前

$$\dot{A}_{VF} = -\frac{R_f}{R_{b1}} = -10$$

改接后

$$\dot{A}_{VF} = 1 + \frac{R_f}{R_{b2}} = 11$$

故不相同。

7.4.1 电路如图 7.1.2 所示, 试近似计算它的闭环电压增益并定性地分析它的输入电阻和输出电阻。

解 图 7.1.2 所示电路中引入了电压串联负反馈。设为深度负反馈, 根据“虚短”概念有

$$\Delta v_i \approx \Delta v_F = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \Delta v_o$$

则闭环电压增益

7.4.6 利用小信号模型分析法, 求图 7.1.8 所示的 JFET 互导放大电路的 $\dot{A}_{v_{GS}}$ 和 R_{of} 的表达式, 包括 JFET 的漏极电阻 r_{ds} 。

解 图 7.1.8 所示电路的小信号模型如图 7.4.6a 所示, 故

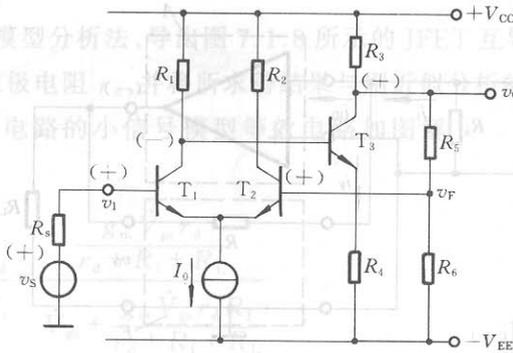


图 7.1.2

当 $r_{ds} \gg R_L, r_{ds} \gg R_1$, 且 $1 + \beta_{n2} R_2 \gg 1$ 时, 有 $\dot{A}_{v_{GS}} \approx \dot{A}_{v_{GS}} \dot{A}_{v_{GS}}$

$$A_{v_{VF}} = \frac{\Delta v_{O_1}}{\Delta v_{I_1}} = 1 + \frac{R_5}{R_6}$$

此负反馈使 R_{if} 上升、 R_{of} 下降。

7.4.2 电路同前题, 试计算它的闭环电压增益 $\dot{A}_{v_{VF}}$ 、 R_{if} 和 R_{of} 。

解 先求图 7.1.2 电路的开环电压增益 $\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \dot{A}_{v2}$ 及 \dot{F}_v , 其中

$$\dot{A}_{v1} = - \frac{\beta_1 \{ R_1 \parallel [r_{be3} + (1 + \beta_3) R_4] \}}{2r_{be1} + R_5 \parallel R_6}$$

$$\dot{A}_{v2} = - \frac{\beta_3 [R_3 \parallel (R_5 + R_6)]}{r_{be3} + (1 + \beta_3) R_4}$$

$$\dot{F}_v = \frac{R_6}{R_5 + R_6}$$

而
则

$$\dot{A}_{v_{VF}} = \frac{\dot{A}_v}{1 + \dot{A}_v \dot{F}_v}$$

闭环输入电阻 $R_{if} = (1 + \dot{A}_v \dot{F}_v) R_i$, 其中 $R_i = 2r_{be} + R_5 \parallel R_6$ 。

闭环输出电阻 $R_{of} = \frac{R_o}{1 + \dot{A}_v \dot{F}_v}$, 其中 $R_o = R_3 \parallel (R_5 + R_6)$ 。

7.4.3 电路如图 7.1.5 所示, 试用虚短的概念近似计算它的互阻增益 A_{RF} , 并定性分析它的输入电阻和输出电阻。

解 图 7.1.5 电路中引入了电压并联负反馈, 根据“虚短”的概念有

$$v_N \approx v_P = 0, i_{ID} \approx 0, i_1 \approx i_F \approx - \frac{v_O}{R_f}$$

故

解 图题 7.1.1 所示电路中。

稳定输出电压的有 a、d、e

稳定输出电流的有 a、d、e

提高输入电阻的有 a、d、e

降低输出电阻的有 a、d、e

7.3.10 电路如图题 7.3.10 所示。

高该电路的输入电阻又降低输出电阻。问：(1) 若要求既提高电压增益 A_{vF} 是否相同？估算其数值。

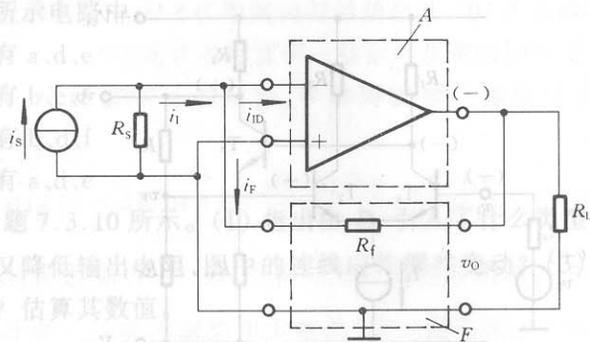


图 7.1.5

$$A_{RF} = \frac{v_o}{i_i} = -R_f$$

并联负反馈使 R_{if} 下降,电压负反馈使 R_{of} 下降。

7.4.4 在图题 7.1.1a、b、c、e 所示各电路中,在深度负反馈的条件下,试近似计算它的闭环增益。

解 图题 7.1.1a 中引入电压并联负反馈,在深度负反馈下,有 $i_i \approx i_f$,故

$$\dot{A}_{RF} = \frac{v_o}{i_i} \approx \frac{-i_f R_2}{i_i} = -R_2$$

b 图中引入电流串联负反馈,在深度负反馈条件下,有 $v_i \approx v_f$,故

$$\dot{A}_{GF} = \frac{i_o}{v_i} \approx \frac{i_o}{i_o R_{e1}} = \frac{1}{R_{e1}} \quad (\text{式中 } i_o \text{ 的假定正向与实际方向相同})。$$

c 图中引入电流并联负反馈,在深度负反馈条件下,有 $i_i \approx i_f$,故

$$\dot{A}_{IF} = \frac{i_o}{i_i} \approx \frac{i_o}{-\frac{R_{e2}}{R_1 + R_{e2}} i_o} = -\frac{R_1 + R_{e2}}{R_{e2}}$$

e 图中引入电压并联负反馈,在深度负反馈条件下,有 $i_i \approx i_f$ (流过 R_3 的电流),故

$$\dot{A}_{RF} = \frac{v_o}{i_i} \approx \frac{-i_f R_3}{i_i} = -R_3$$

7.4.5 试近似计算图题 7.1.4 所示电路的闭环互阻增益 \dot{A}_{RF} , 设 R_s 的值很高,已略去。

解 图题 7.1.4 所示电路中, R_{f2} 引入了电压并联负反馈,根据“虚短”概念有 $\dot{V}_{id} \approx 0$, $\dot{I}_F \approx \dot{I}_i$, 又

$$\dot{I}_F = \frac{R'_{e4}}{R_{f2} + R'_{e4}} \dot{I}_o, \quad \dot{I}_{R'_{e4}} = \frac{R_{f2}}{R_{f2} + R'_{e4}} \dot{I}_o$$

故 $\dot{A}_{RF} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i} = -\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i} = -\frac{\dot{I}_o R_{e4} + \frac{R_{f2}}{R_{f2} + R'_{e4}} \dot{I}_o R'_{e4}}{\frac{R'_{e4}}{R_{f2} + R'_{e4}} \dot{I}_o} = -\frac{R_{e4}(R_{f2} + R'_{e4}) + R_{f2} R'_{e4}}{R'_{e4}}$

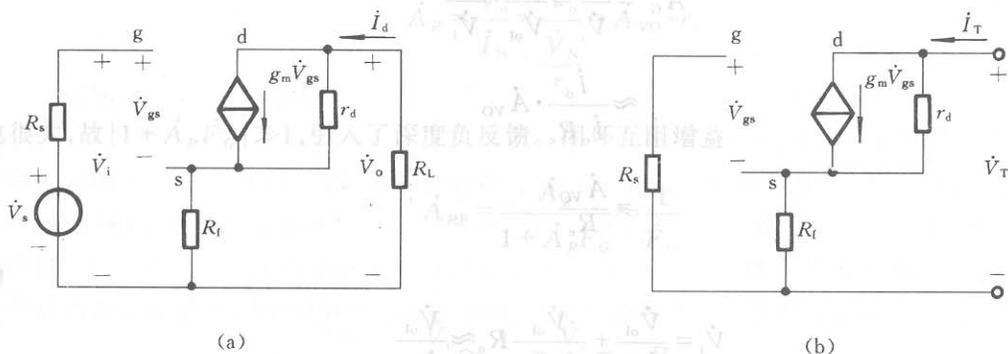
7.4.6 利用小信号模型分析法,导出图 7.1.8 所示的 JFET 互导放大电路的 \dot{A}_{GF} 和 R_{of} 的表达式,包括 JFET 的漏源极电阻 r_d ,并将所求得结果与用近似分析的方法所得的结果进行比较。

解 图 7.1.8 所示电路的小信号模型等效电路如图解 7.4.6a 所示,故

$$\dot{A}_{GF} = \frac{\dot{I}_d}{\dot{V}_i} = \frac{\frac{g_m \dot{V}_{gs} r_d}{r_d + R_f + R_L}}{\dot{V}_{gs} + \frac{g_m \dot{V}_{gs} r_d R_f}{r_d + R_f + R_L}} = \frac{g_m r_d}{r_d + R_f + R_L + g_m R_f r_d}$$

当 $r_d \gg R_L, r_d \gg R_f$, 且 $1 + g_m R_f \gg 1$ 时,有 $\dot{A}_{GF} \approx \frac{1}{R_f}$ 。

求 R_{of} 的等效电路如图解 7.4.6b 所示,则



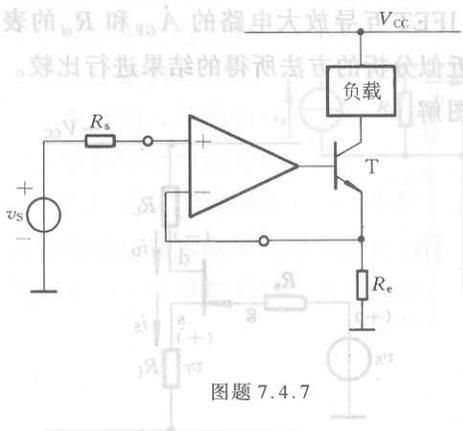
图解 7.4.6

$$R_{of} = \frac{\dot{V}_T}{\dot{I}_T} = \frac{\dot{I}_T R_f + (\dot{I}_T - g_m \dot{V}_{gs}) r_d}{\dot{I}_T} = \frac{\dot{I}_T R_f + \dot{I}_T r_d + \dot{I}_T R_f g_m r_d}{\dot{I}_T} = R_f + r_d + g_m R_f r_d$$

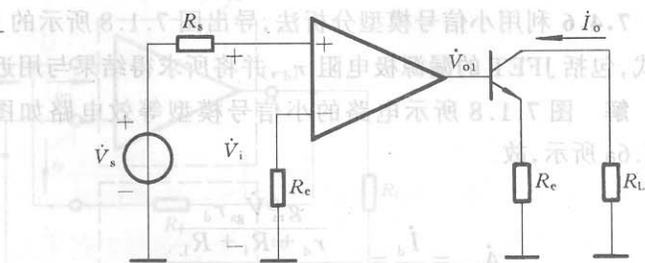
用近似分析法(由“虚短”概念求)得

$$\dot{A}_{GF} = \frac{\dot{I}_d}{\dot{V}_i} \approx \frac{\dot{I}_d}{\dot{V}_f} = \frac{\dot{I}_d}{\dot{I}_d R_f} = \frac{1}{R_f}$$

7.4.7 电路如图题 7.4.7 所示,它可以将信号电压源 v_s 转换为电流源输出。(1) 求出由运放-BJT-电阻所构成的组合电路的开环互导增益 \dot{A}_G ; (2) 求反馈系数 $\dot{F}_R = \dot{V}_f / \dot{I}_o$ 。(设 $\dot{I}_e \approx \dot{I}_o$, 并将运放视为理想的); (3) 选择 R_e 的值使得 $\dot{A}_G = 100 \text{ mS}$; (4) 设运放的参数为 $A_{VO} = 10^4, r_o = 200 \Omega, r_i = 500 \text{ k}\Omega$, 若 $R_e = 1 \text{ k}\Omega$, \dot{A}_{GF} 的值将为多少?



图题 7.4.7



图解 7.4.7

解 (1) 求开环互导增益 \dot{A}_G

图题 7.4.7 所示电路的基本放大电路如图解 7.4.7 所示。

$$\dot{A}_G = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_{ol}} \cdot \frac{\dot{V}_{ol}}{\dot{V}_i}$$

$$\approx \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_o R_e} \cdot \dot{A}_{VO}$$

$$= \frac{\dot{A}_{VO}}{R_e}$$

其中

$$\dot{V}_i = \frac{\dot{V}_{ol}}{\dot{A}_{VO}} + \frac{\dot{V}_{ol}}{\dot{A}_{VO} r_i} R_e \approx \frac{\dot{V}_{ol}}{\dot{A}_{VO}} \quad (a)$$

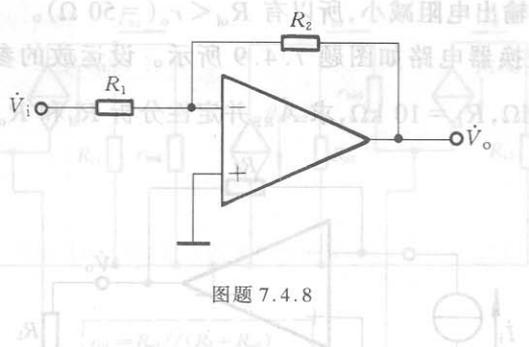
$$(2) \text{ 反馈系数 } \dot{F}_R = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_o} \approx R_e$$

$$(3) R_e = \frac{\dot{A}_{VO}}{\dot{A}_G} = \frac{10^4}{0.1 \text{ S}} = 10^5 \Omega = 100 \text{ k}\Omega$$

$$(4) \dot{A}_{GF} = \frac{\dot{A}_G}{1 + \dot{A}_G \dot{F}_R} = \frac{\frac{\dot{A}_{VO}}{R_e}}{1 + \frac{\dot{A}_{VO}}{R_e} \cdot R_e} = \frac{\dot{A}_{VO}}{R_e (1 + \dot{A}_{VO})} \approx \frac{1}{R_e} = 0.001 \text{ S}$$

7.4.8 试应用反馈原理分析图题 7.4.8 所示的电路。设运放的 $A_{VO} = 10^6$, $r_i = 10 \text{ M}\Omega$, $r_o = 50 \Omega$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ 。求电路的闭环电压增益 $\dot{A}_{VF} = \dot{V}_o / \dot{V}_i$ 和 R_{if} , 对 R_{of} 亦作定性的分析。

解 (1) 求 \dot{A}_{VF}



图题 7.4.8

图题 7.4.8 中引入了电压并联负反馈, 反馈系数

$$\dot{F}_G = \frac{\dot{I}_f}{\dot{V}_o} = \frac{\dot{V}_N - \dot{V}_o}{R_2 \dot{V}_o} \approx -\frac{1}{R_2} \quad (\text{因 } A_{VO} = 10^6 \text{ 很大, 使 } \dot{V}_o \gg \dot{V}_N)$$

开环互阻增益

$$\dot{A}_R = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_N} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_N} = \dot{A}_{VO} \cdot r_i$$

由图题 7.4.10 所示电路可知, 其开环互阻增益 \dot{A}_R 也很大, 故 $|1 + \dot{A}_R \dot{F}_G| \gg 1$, 引入了深度负反馈。闭环互阻增益

$$\dot{A}_{RF} = \frac{\dot{A}_R}{1 + \dot{A}_R \dot{F}_G} \approx \frac{1}{\dot{F}_G}$$

即 $\dot{V}_o \approx \frac{1}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_f} = -R_2$

$$\dot{A}_{VF} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \approx -\frac{R_2}{R_1}$$

故

(2) 求 R_{if}

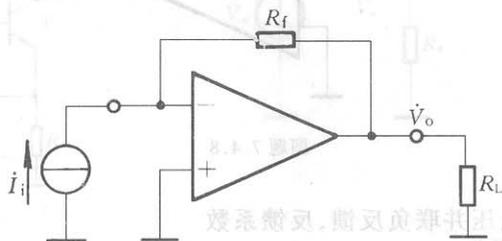
因 $\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$, 故 $\dot{I}_N \approx 0, \dot{V}_N \approx 0$

$$R_{if} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} \approx \frac{\dot{V}_i}{\left(\frac{\dot{V}_i}{R_1}\right)} = R_1$$

(3) 定性分析 R_{of}

引入电压负反馈后使输出电阻减小, 所以有 $R_{of} < r_o (= 50 \Omega)$ 。

7.4.9 电流 - 电压变换器电路如图题 7.4.9 所示。设运放的参数为 $A_{VO} = 2 \times 10^5$, $r_i = 2 \text{ M}\Omega$, $r_o = 75 \Omega$, $R_f = 1 \text{ M}\Omega$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$, 求 \dot{A}_{RF} 并定性分析 R_{if} 和 R_{of} 。



图题 7.4.9

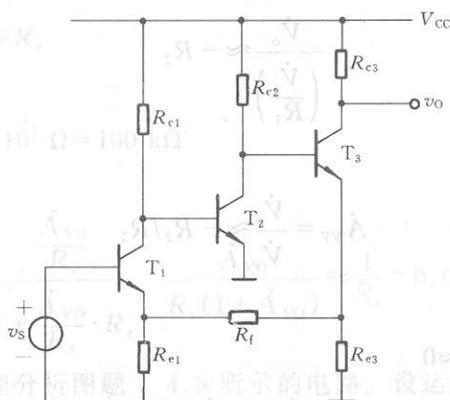
解 因图题 7.4.9 所示电路中引入电压并联负反馈后使 $v_N \approx v_P = 0 \text{ V}$, 且 $r_i = 2 \text{ M}\Omega$, 很大, 故使 $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$, 则有

$$\dot{A}_{RF} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i} = \frac{-\dot{I}_f R_f}{\dot{I}_i} \approx -R_f$$

并联负反馈使 $R_{if} \downarrow$, $R_{if} < r_i (2 \text{ M}\Omega)$ 。

电压负反馈使 $R_{of} \downarrow$, $R_{of} < r_o (75 \Omega)$ 。

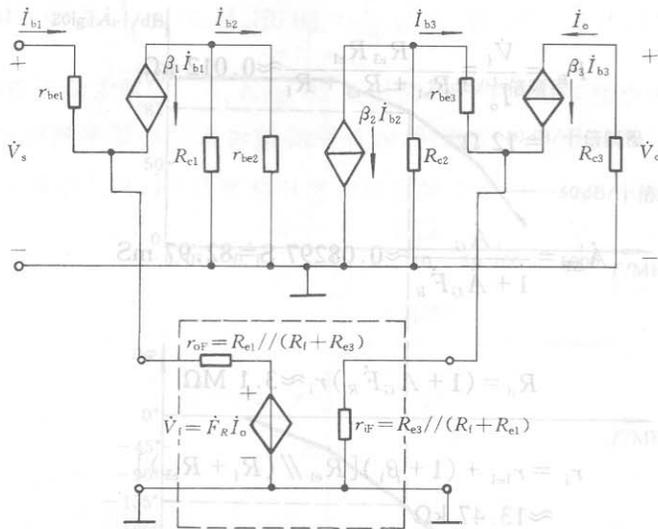
7.4.10 图题 7.4.10 是宽频带放大器 MC1553 的部分电路, 设三只 BJT 的 $\beta = 100$, 电路参数为 $R_{c1} = 9 \text{ k}\Omega$, $R_{c2} = 5 \text{ k}\Omega$, $R_{c3} = 600 \Omega$, $R_{e1} = R_{e3} = 100 \Omega$, $R_f = 640 \Omega$ 。偏置电路(图中未示出)使各管的静态集电极电流的值分别为: $I_{C1} = 0.6 \text{ mA}$, $I_{C2} = 1 \text{ mA}$ 和 $I_{C3} = 4 \text{ mA}$ 。(1) 判断电路的反馈组态;(2) 画出电路的小信号等效电路, 包括基本放大电路的小信号等效电路和反馈网络的等效电路(含 r_{if} 、 r_{of} 和 $\dot{F}_R \dot{I}_o$);(3) 求闭环互导增益 \dot{A}_{GF} 、 R_{if} 和 R_{of} 。



图题 7.4.10

解 (1) 图题 7.4.10 所示电路中引入了电流串联负反馈。

(2) 电路的小信号等效电路如图解 7.4.10 所示。



图解 7.4.10

(3) 求 \dot{A}_{GF} 、 R_{if} 、 R_{of}

由图解 7.4.10 所示电路可知,其开环互导增益

$$\dot{A}_G = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_s} = \frac{-\dot{A}_V}{R_{c3}}$$

其中 $\dot{A}_V = \dot{A}_{V1} \cdot \dot{A}_{V2} \cdot \dot{A}_{V3}$

$$\dot{A}_{V1} = \frac{-\beta_1 (R_{c1} // r_{be2})}{r_{be1} + (1 + \beta_1) [R_{e1} // (R_f + R_{e3})]}$$

$$\dot{A}_{V2} = \frac{-\beta_2 \{ R_{c2} // [r_{be3} + (1 + \beta_3) r_{if}] \}}{r_{be2}}$$

其中 $r_{if} = R_{e3} // (R_f + R_{e1})$

$$\dot{A}_{V3} = \frac{-\beta_3 R_{c3}}{r_{be3} + (1 + \beta_3) [R_{e3} // (R_f + R_{e1})]}$$

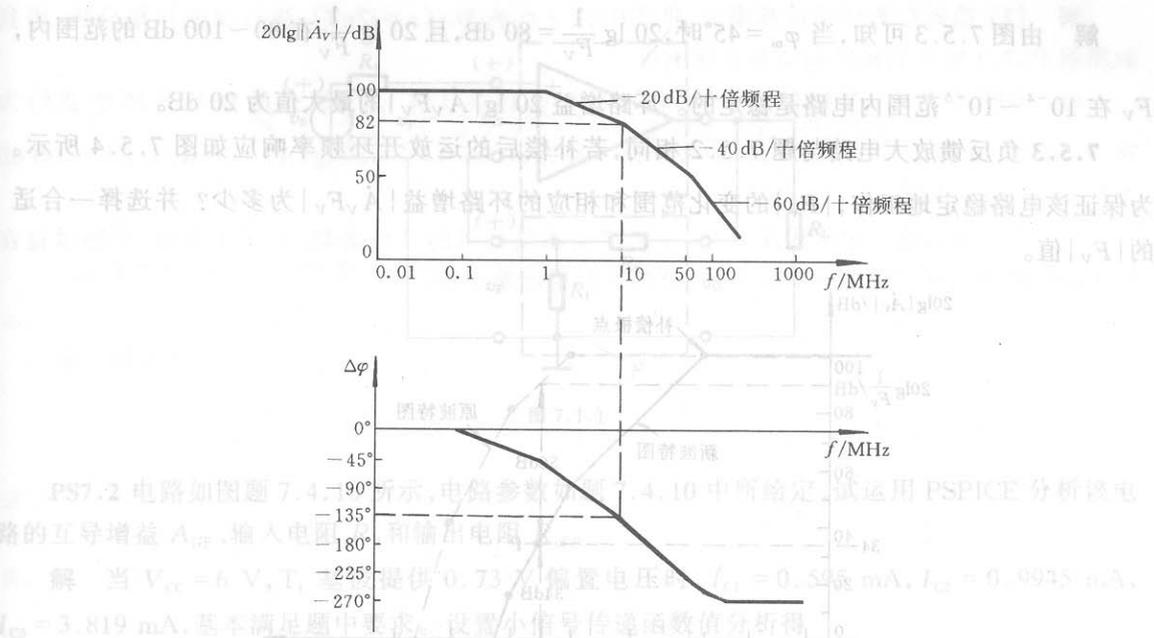
代入 $r_{be1} = 200 \Omega + (100 + 1) \frac{26 \text{ mV}}{0.6 \text{ mA}} = 4577 \Omega$

$$r_{be2} = 200 \Omega + 101 \times \frac{26 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 2826 \Omega$$

$$r_{be3} = 200 \Omega + 101 \times \frac{26 \text{ mV}}{4 \text{ mA}} = 856.5 \Omega$$

得 $\dot{A}_V = -15.97 \times (-116.79) \times (-6.15) \approx -11470.59$

$$\dot{A}_G \approx 19.12 \text{ S}$$



图解 7.5.1

7.5.2 设某运放开环频率响应如图 7.5.3 所示。若将它接成一电压串联负反馈电路, 其反馈系数 $F_v = R_1/(R_1 + R_2)$ 。为保证该电路具有 45° 的相位裕度, 试问 F_v 的变化范围为多少? 环路增益的范围为多少?

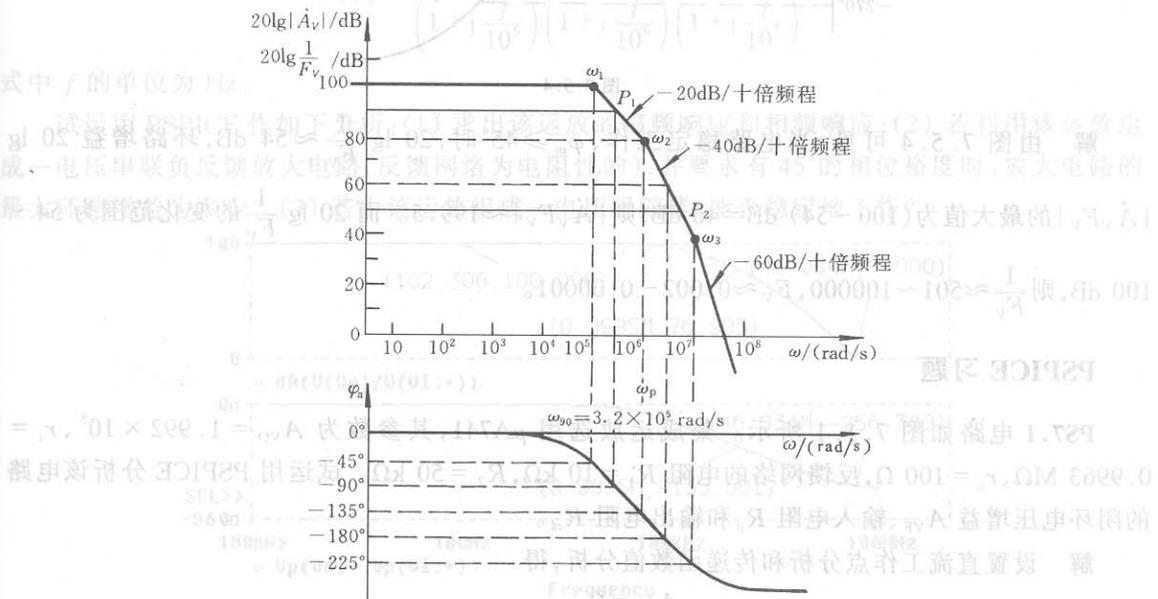


图 7.5.3

解 由图 7.5.3 可知,当 $\varphi_m = 45^\circ$ 时, $20 \lg \frac{1}{F_V} = 80 \text{ dB}$, 且 $20 \lg \frac{1}{F_V}$ 在 $80 \sim 100 \text{ dB}$ 的范围内, F_V 在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 范围内电路是稳定的。环路增益 $20 \lg |\dot{A}_V F_V|$ 的最大值为 20 dB 。

7.5.3 负反馈放大电路与题 7.5.2 相同,若补偿后的运放开环频率响应如图 7.5.4 所示。为保证该电路稳定地工作, $|F_V|$ 的变化范围和相应的环路增益 $|\dot{A}_V F_V|$ 为多少? 并选择一合适的 $|F_V|$ 值。

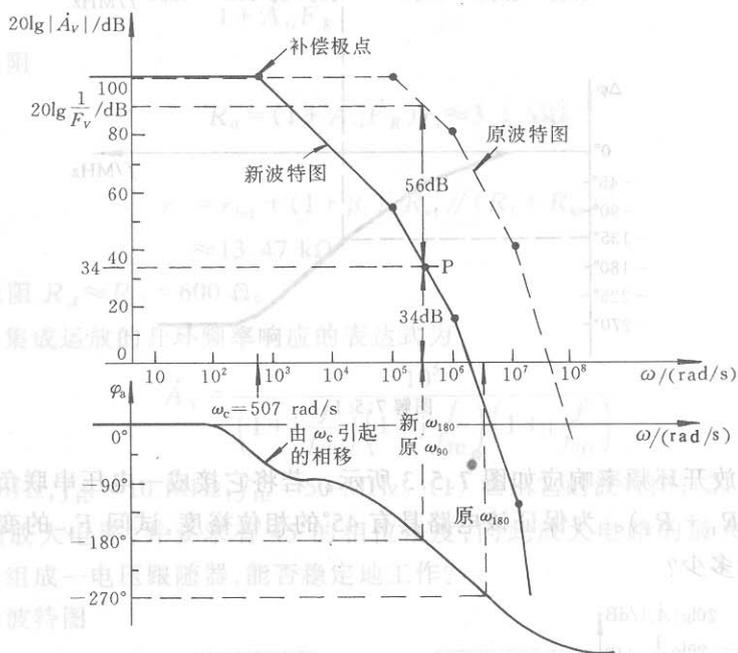


图 7.5.4

解 由图 7.5.4 可见,当电路稳定工作、 $\varphi_m \geq 45^\circ$ 时, $20 \lg \frac{1}{F_V} \approx 54 \text{ dB}$, 环路增益 $20 \lg |\dot{A}_V F_V|$ 的最大值为 $(100 - 54) \text{ dB} = 46 \text{ dB}$, 则 $|\dot{A}_V F_V| \approx 199.5$ 。而 $20 \lg \frac{1}{F_V}$ 的变化范围为 $54 \sim 100 \text{ dB}$, 则 $\frac{1}{F_V} \approx 501 \sim 100000$, $F_V \approx 0.002 \sim 0.00001$ 。

PSPICE 习题

PS7.1 电路如图 7.1.1 所示。集成运放选用 $\mu A741$, 其参数为 $A_{VO} = 1.992 \times 10^5$ 、 $r_i = 0.9963 \text{ M}\Omega$ 、 $r_o = 100 \Omega$, 反馈网络的电阻 $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$ 。试运用 PSPICE 分析该电路的闭环电压增益 A_{VF} 、输入电阻 R_{if} 和输出电阻 R_{of} 。

解 设置直流工作点分析和传递函数值分析, 得

$$A_{VF} = 6$$

$$R_{if} = 2159 \text{ M}\Omega$$

$$R_{of} = 0.004606 \Omega$$

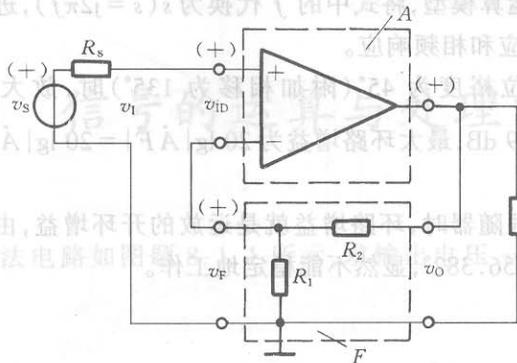


图 7.1.1

PS7.2 电路如图题 7.4.10 所示,电路参数如题 7.4.10 中所给定,试运用 PSPICE 分析该电路的互导增益 A_{GF} 、输入电阻 R_{if} 和输出电阻 R_{of} 。

解 当 $V_{CC} = 6\text{ V}$, T_1 基极提供 0.73 V 偏置电压时, $I_{C1} = 0.595\text{ mA}$, $I_{C2} = 0.9945\text{ mA}$, $I_{C3} = 3.819\text{ mA}$, 基本满足题中要求。设置小信号传递函数值分析得

$$A_{GF} = 82.53\text{ mS}, R_{if} = 1.620\text{ M}\Omega, R_{of} = 599.8\ \Omega$$

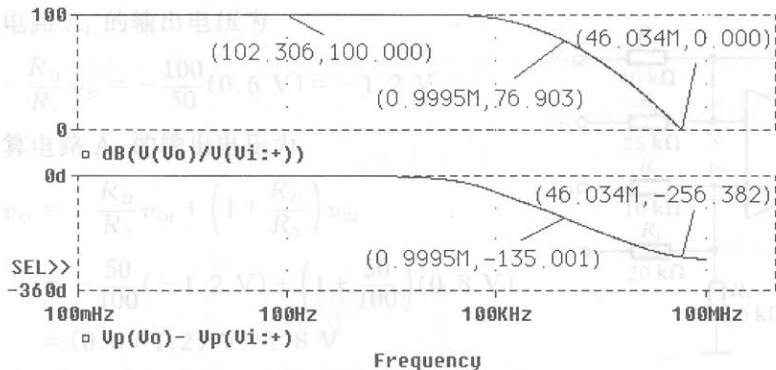
(提示:分析互导增益时,要在 T_3 集电极串接一个电压源,且令电压为 0,取其中的电流为输出变量。)

PS7.3 设某集成运放的开环频率响应的表达式为

$$\dot{A}_v = \frac{10^5}{\left(1 + j\frac{f}{10^5}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^6}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^7}\right)}$$

式中 f 的单位为 Hz。

试运用 PSPICE 作如下分析:(1) 求出该运放的幅频响应和相频响应;(2) 若利用该运放组成一电压串联负反馈放大电路(反馈网络为电阻性的),并要求有 45° 的相位裕度时,放大电路的最大环路增益为多少?(3) 若由该运放组成一电压跟随器,能否稳定地工作?



图解 PS7.3

解 (1) 选择拉普拉斯运算模型, 将式中的 f 代换为 s ($s = j2\pi f$), 进行交流扫描分析, 得到如图解 PS7.3 所示的幅频响应和相频响应。

(2) 由图中看出, 当相位裕度为 45° (附加相移为 135°) 时, 放大电路的开环增益约为 76.9 dB , 即 $20 \lg |1/\dot{F}| = 76.9 \text{ dB}$, 最大环路增益为 $20 \lg |\dot{A}\dot{F}| = 20 \lg |\dot{A}| - 20 \lg |1/\dot{F}| = 100 \text{ dB} - 76.9 \text{ dB} = 23.1 \text{ dB}$ 。

(3) 当运放组成一电压跟随器时, 环路增益就是运放的开环增益, 由图中看出, 环路增益在 0 dB 处的附加相移已达到 -256.382° , 显然不能稳定地工作。