

第六章 放大电路中的反馈

自测题

一、在括号内填入“√”或“×”，表明下列说法是否正确。

- (1) 若放大电路的放大倍数为负，则引入的反馈一定是负反馈。()
- (2) 负反馈放大电路的放大倍数与组成它的基本放大电路的放大倍数量纲相同。()
- (3) 若放大电路引入负反馈，则负载电阻变化时，输出电压基本不变。()
- (4) 阻容耦合放大电路的耦合电容、旁路电容越多，引入负反馈后，越容易产生低频振荡。()

解：(1) × (2) √ (3) × (4) √

二、已知交流负反馈有四种组态：

- A. 电压串联负反馈 B. 电压并联负反馈
C. 电流串联负反馈 D. 电流并联负反馈

选择合适的答案填入下列空格内，只填入 A、B、C 或 D。

- (1) 欲得到电流—电压转换电路，应在放大电路中引入 _____ ；
- (2) 欲将电压信号转换成与之成比例的电流信号，应在放大电路中引入 _____ ；
- (3) 欲减小电路从信号源索取的电流，增大带负载能力，应在放大电路中引入 _____ ；
- (4) 欲从信号源获得更大的电流，并稳定输出电流，应在放大电路中引入 _____ 。

解：(1) B (2) C (3) A (4) D

三、判断图 T6.3 所示各电路中是否引入了反馈；若引入了反馈，则判断是正反馈还是负反馈；若引入了交流负反馈，则判断是哪种组态的负反馈，并求出反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数 A_v 或 A_{v_s} 。设图中所有电容对交流信号均可视为短路。

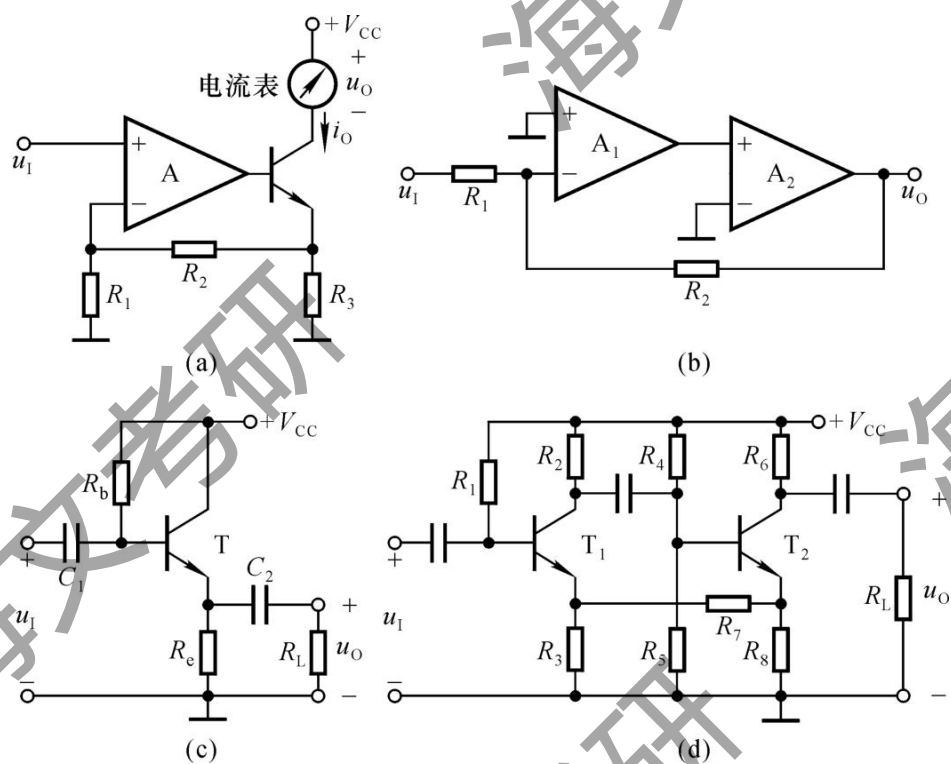


图 T6.3

解：图（a）所示电路中引入了电流串联负反馈。反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数 A_{uf} 分别为

$$F = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad A_{uf} \approx \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 R_3} \cdot R_L$$

式中 R_L 为电流表的等效电阻。

图（b）所示电路中引入了电压并联负反馈。反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数 A_{uf} 分别为

$$F = -\frac{1}{R_2} \quad A_{uf} \approx -\frac{R_2}{R_1}$$

图（c）所示电路中引入了电压串联负反馈。反馈系数和深度负反馈条件下的电压放大倍数 A_{uf} 分别为

$$F = 1 \quad A_{uf} \approx 1$$

图（d）所示电路中引入了正反馈。

四、电路如图 T6.4 所示。

(1) 合理连线，接入信号源和反馈，使电路的输入电阻增大，输出电阻减小；

(2) 若 $|A_u| = \frac{U_o}{U_i} = 20$ ，则 R_F 应取多少千欧？

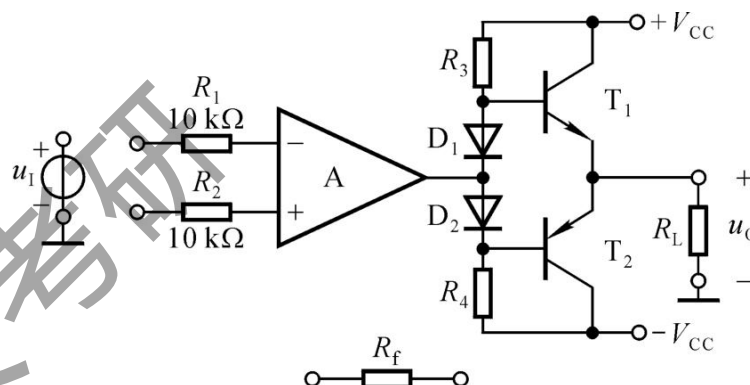
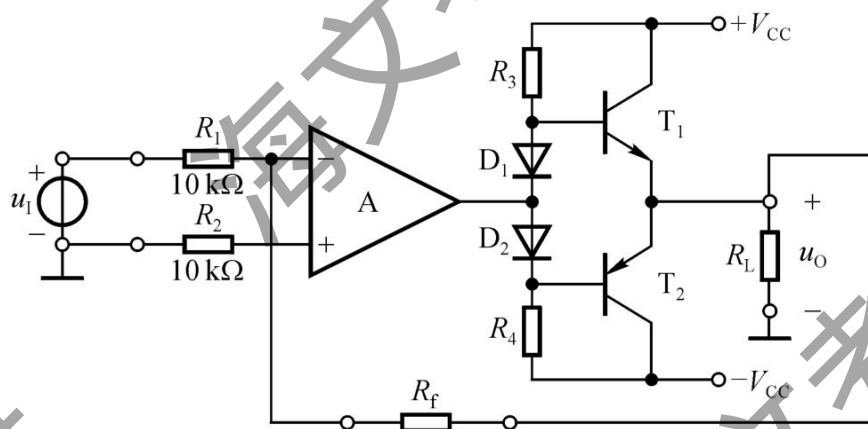


图 T6.4

解：(1) 应引入电压串联负反馈，如解图 T6.4 所示。



解图 T6.4

(2) 因 $A_u \approx +\frac{R_f}{R_1} = 20$ ，故 $R_f = 190\text{k}\Omega$ 。

五、已知一个负反馈放大电路的基本放大电路的对数幅频特性如图 T6.5

所示，反馈网络由纯电阻组成。试问：若要求电路稳定工作，即不产生自激振荡，则反馈系数的上限值为多少分贝？简述理由。

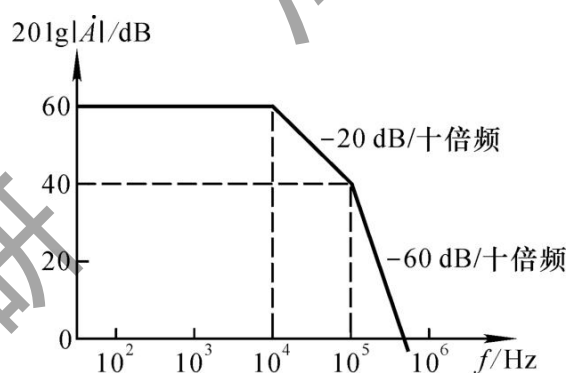


图 T6.5

解：因为 $f = 10^5$ Hz 时， $20\lg|A| = 40\text{dB}$ ， $\phi_A = -180^\circ$ ；为使此时

$20\lg|AF| < 0$ ，则需

$$20\lg|F| < -40\text{dB}, \text{ 即 } |F| < 10^{-2}$$

习 题

6.1 选择合适的答案填入空内。

(1) 对于放大电路，所谓开环是指_____。

- A. 无信号源
- B. 无反馈通路
- C. 无电源
- D. 无负载

而所谓闭环是指_____。

- A. 考虑信号源内阻
- B. 存在反馈通路
- C. 接入电源
- D. 接入负载

(2) 在输入量不变的情况下，若引入反馈后_____，则说明引入的反馈是负反馈。

- A. 输入电阻增大
- B. 输出量增大
- C. 净输入量增大
- D. 净输入量减小

(3) 直流负反馈是指_____。

- A. 直接耦合放大电路中所引入的负反馈
- B. 只有放大直流信号时才有的负反馈
- C. 在直流通路中的负反馈

(4) 交流负反馈是指_____。

- A. 阻容耦合放大电路中所引入的负反馈
- B. 只有放大交流信号时才有的负反馈
- C. 在交流通路中的负反馈

(5) 为了实现下列目的，应引入

- A. 直流负反馈
- B. 交流负反馈

① 为了稳定静态工作点，应引入_____；

② 为了稳定放大倍数，应引入_____；

③ 为了改变输入电阻和输出电阻，应引入_____；

④ 为了抑制温漂，应引入_____；

⑤ 为了展宽频带，应引入_____。

解：(1) B B (2) D (3) C (4) C

(5) A B B A B

6.2 选择合适答案填入空内。

A. 电压 B. 电流 C. 串联 D. 并联

(1) 为了稳定放大电路的输出电压, 应引入 _____ 负反馈; (2) 为了稳定放大电路的输出电流, 应引入 _____ 负反馈; (3) 为了增大放大电路的输入电阻, 应引入 _____ 负反馈; (4) 为了减小放大电路的输入电阻, 应引入 _____ 负反馈; (5) 为了增大放大电路的输出电阻, 应引入 _____ 负反馈; (6) 为了减小放大电路的输出电阻, 应引入 _____ 负反馈。 解: (1) A (2) B (3) C (4) D (5) B (6) A

6.3 判断下列说法的正误, 在括号内填入“√”或“×”来表明判断结果。

(1) 只要在放大电路中引入反馈, 就一定能使其性能得到改善。()

(2) 放大电路的级数越多, 引入的负反馈越强, 电路的放大倍数也就越稳定。()

(3) 反馈量仅仅决定于输出量。()

(4) 既然电流负反馈稳定输出电流, 那么必然稳定输出电压。()

解: (1) × (2) × (3) √ (4) ×

6.4 判断图 P6.4 所示各电路中是否引入了反馈，是直流反馈还是交流反馈，是正反馈还是负反馈。设图中所有电容对交流信号均可视为短路。

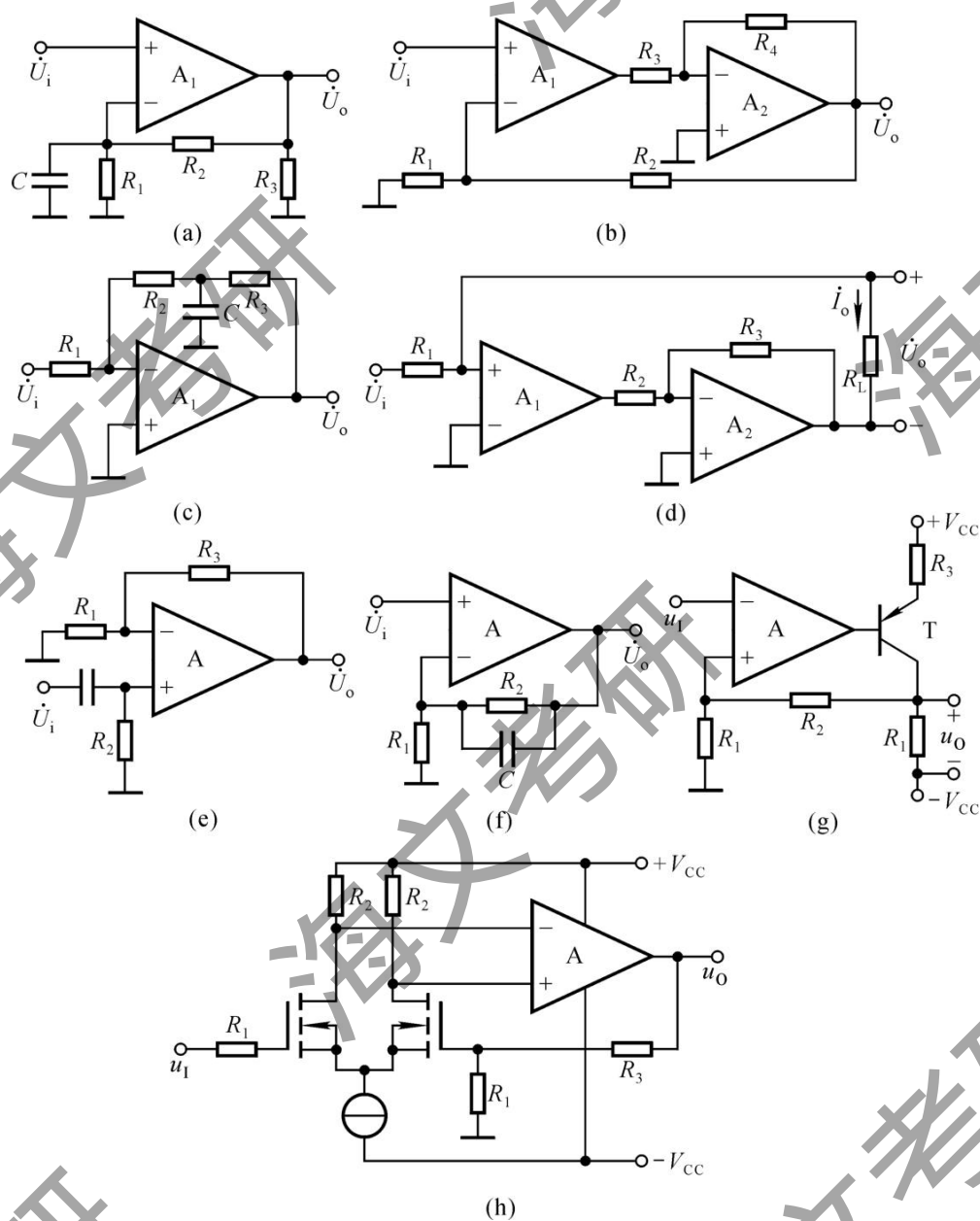


图 P6.4

解：图（a）所示电路中引入了直流负反馈。

图（b）所示电路中引入了交、直流正反馈。

图（c）所示电路中引入了直流负反馈

图（d）\（e）\（f）\（g）\（h）所示各电路中均引入了交、直流负反馈。

6.5 电路如图 6.5 所示，要求同题 6.4。

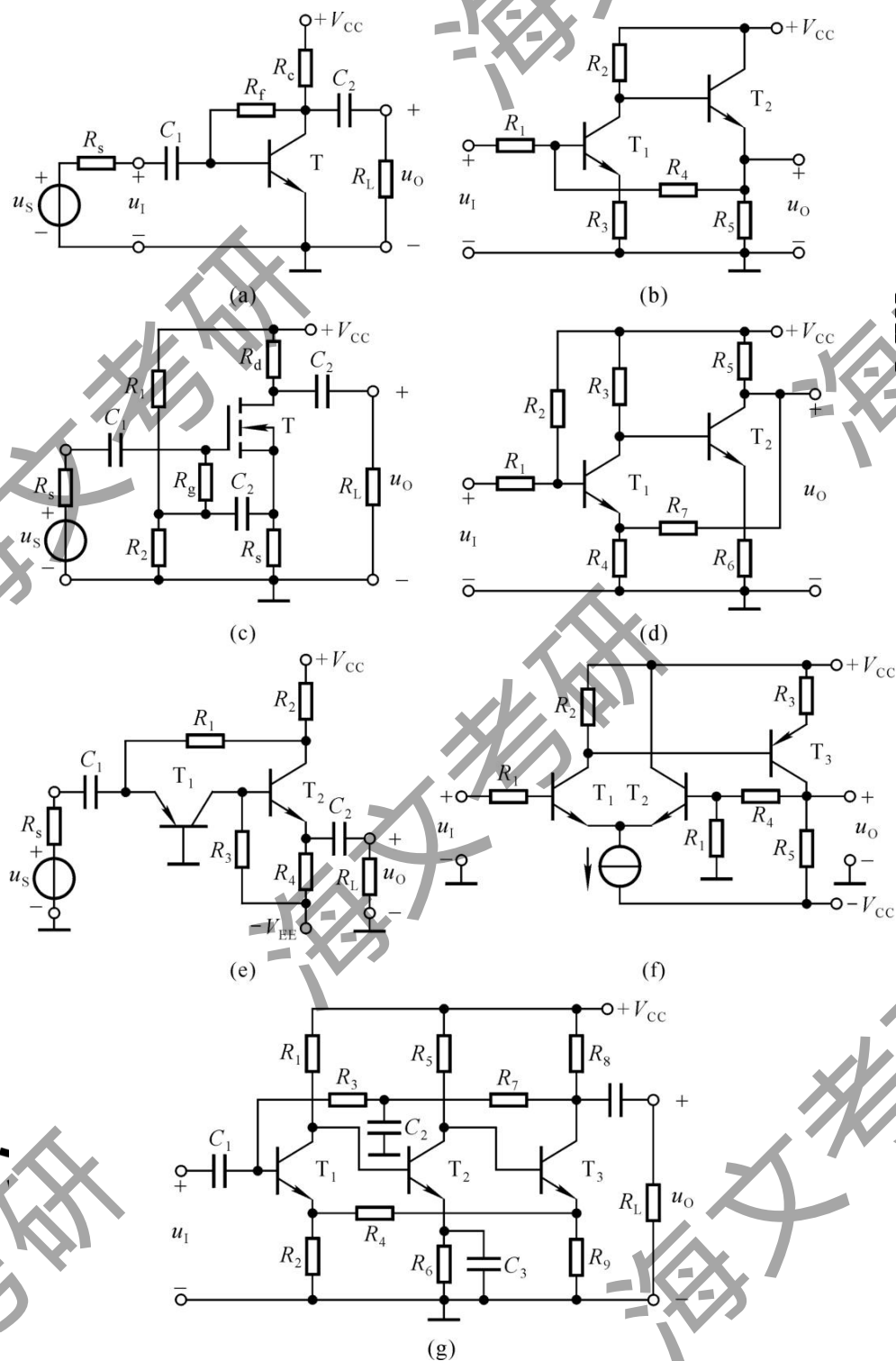


图 P6.5

解：图（a）所示电路中引入了交、直流负反馈

图（b）所示电路中引入了交、直流负反馈

图（c）所示电路中通过 R_s 引入直流负反馈，通过 R_s 、 R_1 、 R_2 并联引入交流负反馈，通过 C_2 、 R_g 引入交流正反馈。

图（d）（e）（f）所示各电路中均引入了交、直流负反馈。

图（g）所示电路中通过 R_3 和 R_7 引入直流负反馈，通过 R_4 引入交、直流负反馈。

6.6 分别判断图 6.4（d）～（h）所示各电路中引入了哪种组态的交流负反馈，并计算它们的反馈系数。

解：各电路中引入交流负反馈的组态及反馈系数分别如下：

（d）电流并联负反馈 $I = I_f / I_o = 1$

（e）电压串联负反馈 $F = U_f / U_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

（f）电压串联负反馈 $F = U_f / U_o = 1$

（g）电压串联负反馈 $I = U_f / U_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

（h）电压串联负反馈 $I = U_f / U_o = \frac{R_1}{R_1 + R_3}$

6.7 分别判断图 P6.5（a）（b）（e）（f）（g）所示各电路中引入了哪种组态的交流负反馈，并计算它们的反馈系数。

解：各电路中引入交流负反馈的组态及反馈系数分别如下：

（a）电压并联负反馈 $F = I_f / U_o = -1/R$

（b）电压并联负反馈 $F = I_f / U_o = -\frac{1}{R_4}$

（e）电流并联负反馈 $I = I_f / I_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

（f）电压串联负反馈 $F = U_f / U_o = \frac{R_1}{R_1 + R_4}$

（g）电流串联负反馈 $I = U_f / I_o = \frac{R_2 R_9}{R_2 + R_4 + R_9}$

6.8 估算图 6.4 (d) ~ (h) 所示各电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数。

解：各电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数如下：

$$(d) \quad A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{I}{R_{oL}} \approx \frac{I}{R_{oL}} = \frac{R_L}{R_1}$$

$$(e) \quad A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{U_o}{U_f} = + \frac{R_3}{R_1}$$

$$(f) \quad A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{l_o}{l_f} = 1$$

$$(g) \quad A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{U_o}{U_f} = + \frac{R_2}{R_1}$$

$$(h) \quad A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{U_o}{U_f} = + \frac{R_3}{R_1}$$

6.9 估算图 6.5 (e)(f)(g) 所示各电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数。

解：各电路在深度负反馈条件下的电压放大倍数如下：

$$(e) \quad A_{usf} = \frac{l_o}{l_i} \approx \frac{I_o(R_{oL})}{R_1 \parallel R_4} = (1 + \frac{R_1}{R_2}) \cdot \frac{R'_L}{R_s}$$

$$(f) \quad A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{U_o}{U_f} = + \frac{R_4}{R_1}$$

$$(g) \quad A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{I_o(R_7 \parallel R_8 \parallel R_L)}{U_f} \\ = - \frac{(R_2 + R_4 + R_9)(R_7 \parallel R_8 \parallel R_L)}{R_2 R_9}$$

6.10 分别说明图 6.4 (d) ~ (h) 所示各电路因引入交流负反馈使得放大电路输入电阻和输出电阻所产生的变化。只需说明是增大还是减小即可。

解：图 (d) 所示电路因引入负反馈而使输入电阻减小，输出电阻增大。

图 (e) ~ (h) 所示各电路均因引入负反馈而使输入电阻增大，输出电阻减小。

6.11 分别说明图 6.5 (a)(b)(c)(e)(f)(g) 所示各电路因引入交流负反馈使得放大电路输入电阻和输出电阻所产生的变化。只需说明是增大还是减小即可。

解：图 6.5 (a)(b)(c)(e)(f)(g) 所示各电路因引入交流负反馈使得放大电路输入电阻和输出电阻所产生的变化如下：

(a) 输入电阻减小，输出电阻减小。

(b) 输入电阻减小，输出电阻减小。

(c) 输入电阻增大，输出电阻增大。

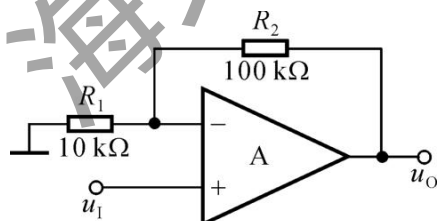
(e) 输入电阻减小，输出电阻增大。

(f) 输入电阻增大，输出电阻减小。

(g) 输入电阻增大，输出电阻增大。

6.12 电路如图 P6.12 所示，已知集成运放的开环差模增益和差模输入电阻均近于无穷大，最大输出电压幅值为 $\pm 14\text{V}$ 。填空：

电路引入了 _____ (填入反馈组态) 交流负反馈，电路的输入电阻趋近于 _____，电压放大倍数 $A_{uf} = \Delta u_o / \Delta u_i \approx$ _____。设 $u_i = 1\text{V}$ ，则 $u_o \approx$ _____ V；若 R_1 开路，则 u_o 变为 _____ V；若 R_1 短路，则 u_o 变为 _____ V；若 R_2 开路，则 u_o 变为 _____ V；若 R_2 短路，则 u_o 变为 _____ V。



P6.12

解：电压串联负反馈，无穷大，11。11；1；14；14；1。

6.13 电路如图 P6.13 所示，试说明电路引入的是共模负反馈，即反馈仅对共模信号起作用。

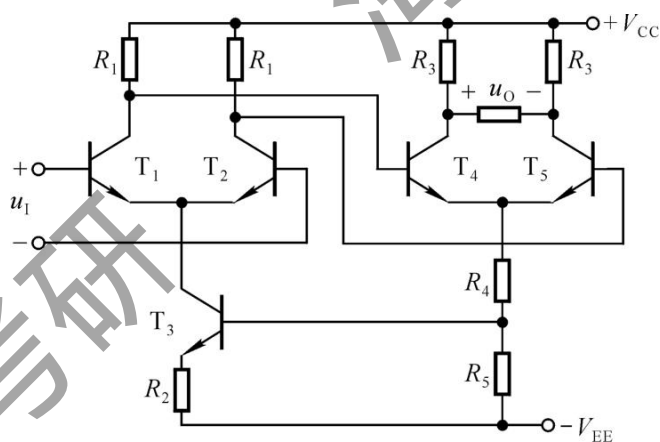


图 P6.13

解：若 $u_{B1} = u_{B2}$ 增大，则产生下列过程：

$$u_{B1} = u_{B2} \uparrow \rightarrow u_{C1} = u_{C2} \downarrow (u_{B4} = u_{B5} \downarrow) \rightarrow i_{E4} = i_{E5} \downarrow \rightarrow u_{R5} \downarrow (u_{B3} \downarrow) \rightarrow i_{C3} \downarrow \rightarrow u_{R1} \downarrow$$

$$u_{C1} = u_{C2} \uparrow \leftarrow$$

说明电路对共模信号有负反馈作用。

6.14 已知一个负反馈放大电路的 $A = 10^5$ ， $F = 2 \times 10^{-3}$ 。

(1) $A_f = ?$

(2) 若 A 的相对变化率为 20%，则 A_f 的相对变化率为多少？

解：(1) 因为 $AF = 200 \gg 1$ ，所以

$$A_f \approx 1/F = 500$$

(2) 根据题目所给数据，可知

$$\frac{1}{1 + AF} = \frac{1}{1 + 2 \times 10^2} \approx 0.005$$

A_f 相对变化率为 A 的相对变化率的 $\frac{1}{1 + AF}$ ，故 A_f 的相对变化率约为

0.1%。

6.15 已知一个电压串联负反馈放大电路的电压放大倍数 $A_{uf}=20$ ，其基本放大电路的电压放大倍数 A_u 的相对变化率为 10%， A_{uf} 的相对变化率小于 0.1%，试问 F 和 A_u 各为多少？

解：先求解 AF ，再根据深度负反馈的特点求解 A 。

$$AF \approx \frac{10\%}{0.1\%} = 100$$

$$AF \gg 1$$

所以

$$F \approx \frac{1}{A_f} = \frac{1}{20} = 0.05$$

$$A_u = A = \frac{AF}{F} \approx 2000$$

6.16 电路如图 P6.16 所示。试问：若以稳压管的稳定电压 U_Z 作为输入电压，则当 R_2 的滑动端位置变化时，输出电压 U_o 的调节范围为多少？

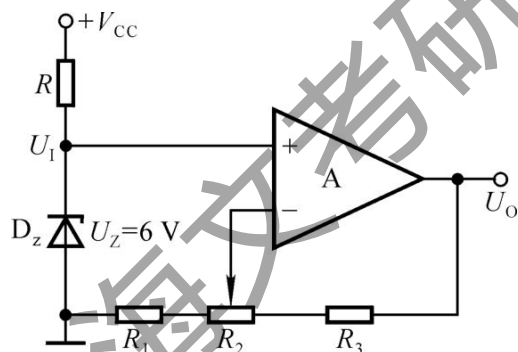


图 P6.16

解： U_o 的调节范围约为

$$\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2} \cdot U_Z \sim \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \cdot U_Z, \text{ 即 } \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2} \cdot 6V \sim \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \cdot 6V$$

6.17 已知负反馈放大电路 $A = \frac{10^4}{(1+j10\frac{f}{4})(1+j10\frac{f}{5})^2}$ 的

试分析：为了使放大电路能够稳定工作（即不产生自激振荡），反馈系数的上限值为多少？

解：根据放大倍数表达式可知，放大电路高频段有三个截止频率，分别为

$$f_{L1} = 104\text{Hz} \quad f_{L2} = f_{L3} = 105\text{Hz}$$

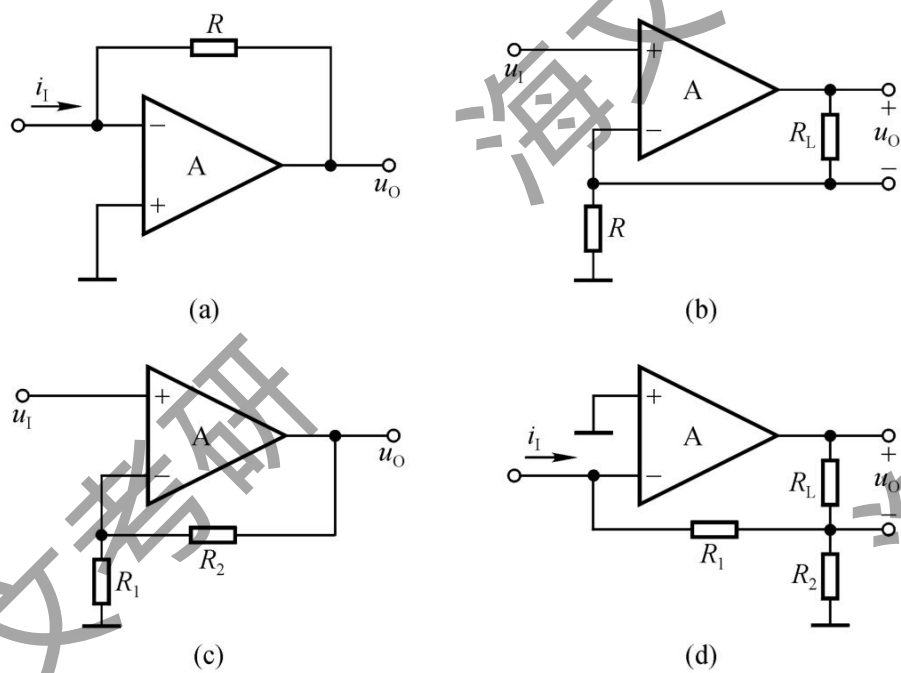
因为 $f_{L2} = f_{L3} = 10 f_{L1}$ ，所以，在 $f = f_{L2} = f_{L3}$ 时， $|A|$ 约为 60dB，附加相移约为 -180° 。为了使 $f = f_{L2} = f_{L3}$ 时的 $20\lg \left| \frac{A}{F} \right|$ 小于 0dB，即不满足自激振荡

的幅值条件，反馈系数 $20\lg |F|$ 的上限值应为 -60dB，即 F 的上限值为 -3 。

6.18 以集成运放作为放大电路，引入合适的负反馈，分别达到下列目的，要求画出电路图来。

- (1) 实现电流—电压转换电路；
- (2) 实现电压—电流转换电路；
- (3) 实现输入电阻高、输出电压稳定的电压放大电路；
- (4) 实现输入电阻低、输出电流稳定的电流放大电路。

解：可实现题目 (1)(2)(3)(4) 要求的参考电路分别如解图 P6.18 (a)(b)(c)(d) 所示。



解图 P6.18

6.19 电路如图 P6.19 所示。

(1) 试通过电阻引入合适的交流负反馈，使输入电压 u_I 转换成稳定的输出电流 i_L ；

(2) 若 $u_I = 0 \sim 5\text{V}$ 时， $i_L = 0 \sim 10\text{mA}$ ，则反馈电阻 R_F 应取多少？

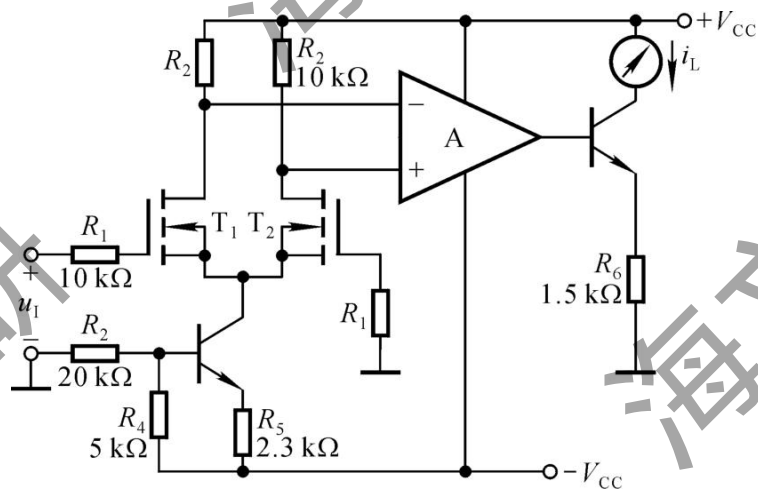
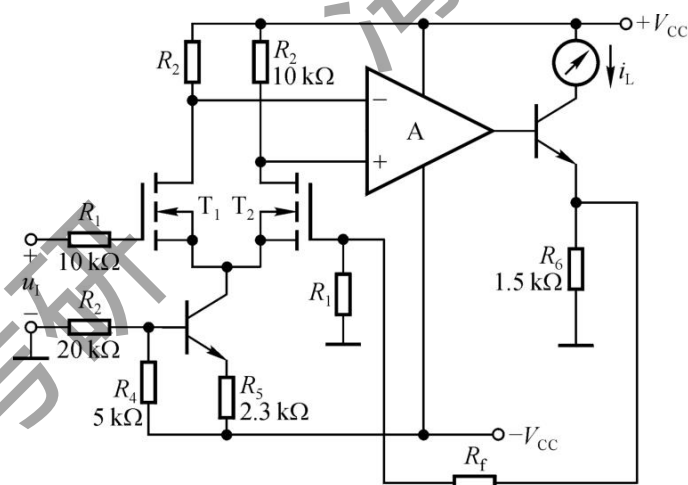


图 P6.19

解：(1) 引入电流串联负反馈，通过电阻 R_f 将三极管的发射极与 T_2 管的栅极连接起来，如解图 P6.19 所示。



解图 P6.19

(2) 首先求解 F ，再根 A_f / i 求解 R_f 。

$$F = \frac{R R_f}{R + R_f + R_6}$$

$$A_f \approx \frac{R + R_f + R_6}{R R_f}$$

代入数据

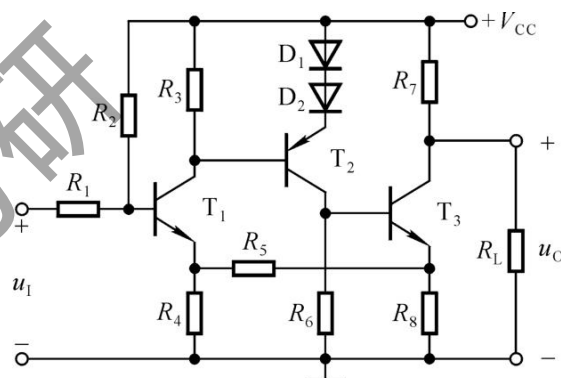
$$\frac{10 + R_f + 5}{1 \times 5} = \frac{10}{5}$$

所以

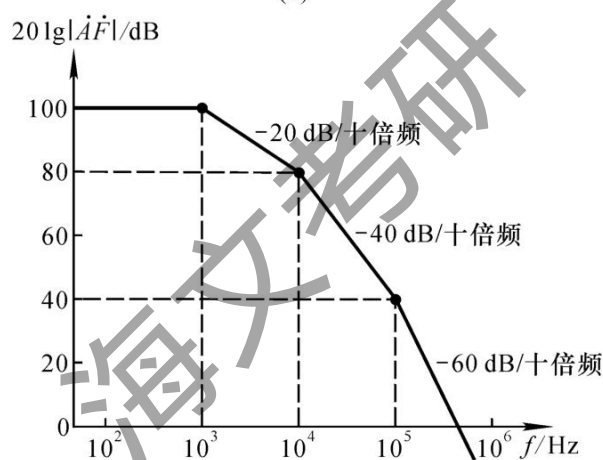
$$R_f = 18.5 \text{ k}\Omega$$

6.20 图 P6.20 (a) 所示放大电路 A_F 的波特图如图 (b) 所示。

- (1) 判断该电路是否会产生自激振荡？简述理由。
- (2) 若电路产生了自激振荡，则应采取什么措施消振？要求在图 (a) 中画出来。
- (3) 若仅有一个 50pF 电容，分别接在三个三极管的基极和地之间均未能消振，则将其接在何处有可能消振？为什么？



(a)



(b)

图 P6.20

解：(1) 电路一定会产生自激振荡。因为在 $f = 10^3\text{Hz}$ 时附加相移为 -45° ，在 $f = 10^4\text{Hz}$ 时附加相移约为 -135° ，在 $f = 10^5\text{Hz}$ 时附加相移约为 -225° ，因此附加相移为 -180° 的频率在 $10^4\text{Hz} \sim 10^5\text{Hz}$ 之间，此时 $|A_F| > 1$ ，故一定会产生自激振荡。

(2) 可在晶体管 T_2 的基极与地之间加消振电容。

注：方法不唯一。

(3) 可在晶体管 T_2 基极和集电极之间加消振电容。因为根据密勒定理，

等效在基极与地之间的电容比实际电容大得多，因此容易消振。

6.21 试分析如图 P6.21 所示各电路中是否引入了正反馈（即构成自举电路），如有，则在电路中标出，并简述正反馈起什么作用。设电路中所有电容对交流信号均可视为短路。

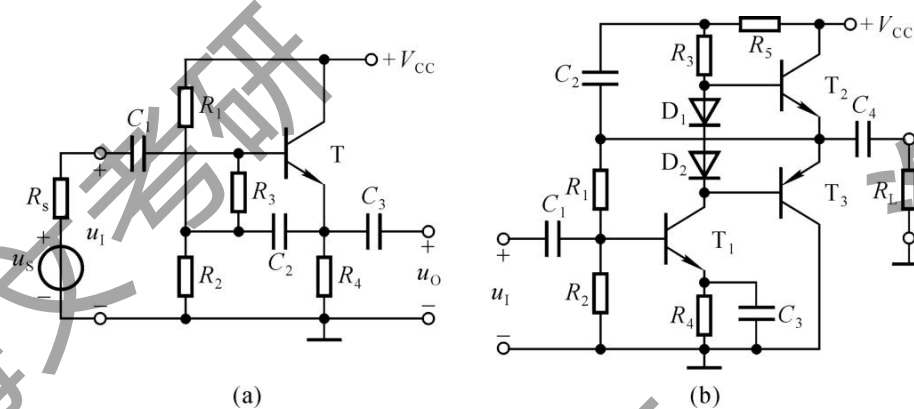


图 P6.21

解：图（a）所示电路中通过 C_2 、 R_3 引入了正反馈，作用是提高输入电阻，改善跟随特性。

图（b）所示电路中通过 C_2 、 R_3 引入了正反馈，作用是提高第二级跟随范围，增大放大倍数，使输出的正方向电压有可能高于电源电压。

6.22 在图 P6.22 所示电路中，已知 A 为电流反馈型集成运放，试问：

（1）中频电压放大倍数；

（2）上限截止频率。

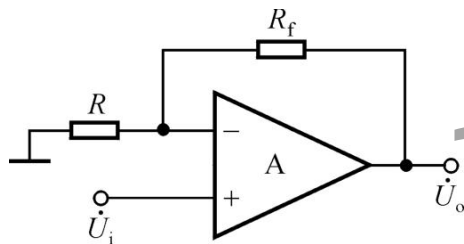
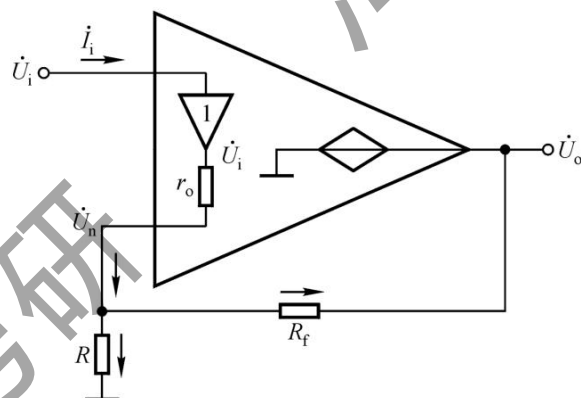


图 P6.22

解：(1) $A_u \approx 1 + \frac{R_f}{R}$



解图 P6.22

(2) 画出图 P6.22 所示电路中集成运放的等效电路如解图 P6.22 所示。

因为 r_o 很小，反相输入端电位为

$$U_n = U_i - I_r \approx U_i$$

将集成运放的内部电路替换为图 6.7.6 所示电路 (参阅 P297~P298)，可得

$$\begin{aligned} I_i &= j\omega C U_o \\ I_i &\approx \frac{U_i}{R} + \frac{U_i - U_o}{R_f} = \frac{U_i(R + R_f)}{RR_f} - \frac{U_o}{R_f} = j\omega C U_o \\ U_o \left(\frac{1 + j\omega C R_f}{R_f} \right) &\approx \frac{U_i(R + R_f)}{RR_f} \\ A_u = \frac{U_o}{U_i} &\approx \left(1 + \frac{R_f}{R} \right) \frac{1}{1 + j\omega C R_f} \end{aligned}$$

所以上限截止频率为

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_f C}$$

6.23 已知集成运放的开环差模增益 $A_{od}=2\times 10^5$ ，差模输入电阻 $r_{id}=2\text{M}\Omega$ ，输出电阻 $r_o=200\Omega$ 。试用方块图法分别求解图 P6.23 所示各电路的

A_v 、 R_i 、 R_o 、 R_{if} 、 R_{of} 。

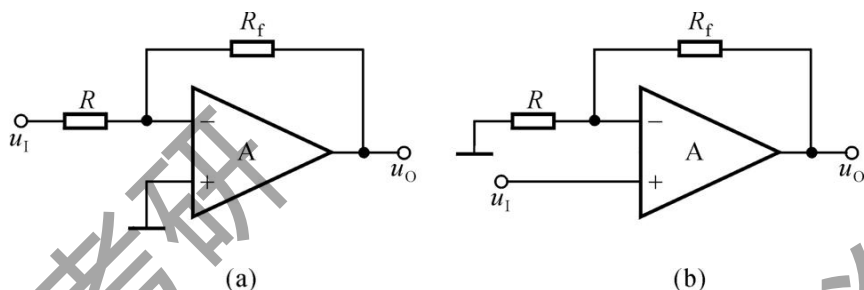


图 P6.23

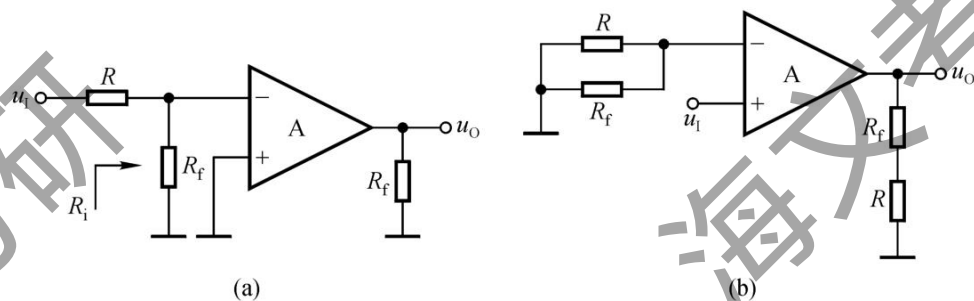
解：图 P6.23 (a) 所示反馈放大电路的基本放大电路如解图 P6.23 (a) 所示，因此 A_v 、 R_i 、 R_o 分析如下：

$$A_v = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} = A_{od}(r_{id} // R_f)$$

$$F = \frac{\Delta I_F}{\Delta u_o} = -\frac{1}{R_f}$$

$$1 + AF = 1 + A_{od}(r_{id} // R_f) \cdot \frac{1}{R_f} \approx A_{od} \cdot (r_{id} // R_f) \cdot \frac{1}{R_f}$$

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + AF} = \frac{A_{od}(r_{id} // R_f)}{1 + A_{od} \cdot (r_{id} // R_f) \cdot \frac{1}{R_f}}$$



解图 P6.23

R_i 、 R_o 、 R_{if} 、 R_{of} 分别为

$$R_i = r_{id} // R_f$$

$$R_o = r_o // R_f$$

$$R_{if} \approx \frac{r_{id} // R_f}{A_{od} \cdot (r_{id} // R_f) \cdot \frac{1}{R_f}} = \frac{R_f}{A_{od}}$$

$$R_{of} \approx \frac{r_o // R_f}{A_{od} \cdot (r_{id} // R_f) \cdot \frac{1}{R_f}} = \frac{(r_o // R_f)(r_{id} + R_f)}{A_{od} r_{id}}$$

若 $r_{id} \gg R$, $r_o \ll R$, 则

$$A \approx -A_{od} R_f, R_i \approx R_f, R_o \approx r_o$$

$$A_f = \frac{-A_{od} R_f}{1 + A_{od}}$$

$$R_{if} \approx R_f / A_{od}$$

$$R_{of} \approx r_o / A_{od}$$

整个电路的输入电阻约为 $(R + R_f / A_{od})$ 。

图 P6.23 (b) 所示反馈放大电路的基本放大电路如解图 P6.23 (b) 所示, 因此 A 、 R_i 、 A_f 、 R_{if} 、 R_{of} 分析如下:

$$R_i = r_{id} + R // R_f \quad R_o = r_o // (R + R_f)$$

$$u_i = u_{id} \cdot \frac{r_{id} + R // R_f}{r_{id}}$$

$$A = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_{id} \cdot \frac{r_{id} + R // R_f}{r_{id}}} = A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f}$$

$$F = \frac{\Delta u_f}{\Delta u_o} = \frac{R}{R + R_f}$$

$$1 + AF = 1 + A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f} \approx A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f}$$

$$A_f = \frac{A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f}}{1 + A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f}}$$

$$R_{if} \approx (r_{id} + R // R_f) A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f}$$

$$= A_{od} \cdot \frac{r_{id} R}{R + R_f}$$

$$R_{of} \approx \frac{r_o // (R + R_f)}{A_{od} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R // R_f} \cdot \frac{R}{R + R_f}}$$

$$= \frac{r_o // (R + R_f)}{A_{od}} \cdot \frac{r_{id} + R // R_f}{r_{id}} \cdot \frac{R + R_f}{R}$$

若 $r_{id} \gg R // R_f$, $r_o \ll (R + R_f)$, 则

$$R_i \approx r_{id} \quad R_o \approx r_o$$

$$A \approx A_{od} \quad AF \approx A_{od} \cdot \frac{R}{R + R_f}$$

$$A_f \approx \frac{A_{od}}{1 + A_{od} \cdot \frac{R}{R + R_f}}$$

$$R_{if} \approx r_{id} (1 + A_{od} \cdot \frac{R}{R + R_f}) \approx \frac{A_{od} r_{id} R}{R + R_f}$$

$$R_{of} \approx \frac{r_o}{1 + A_{od} \cdot \frac{R}{R + R_f}} \approx \frac{r_o}{A_{od}} \cdot \frac{R + R_f}{R}$$