第 2 章 习题答案

2.1 假定题图 2.1 所示电路中的运放是理想的，求：

（1）如果 $V_a = 0.05\text{V}$，$V_b = 0.25\text{V}$，电路中的 V_o 是多大？

（2）如果 $V_a = 0.05\text{V}$，在运放饱和之前，V_b 可以到多大？

（3）如果 $V_b = 0.25\text{V}$，在运放饱和之前，V_a 可以到多大？

解：

（1）$V_o = -\left(\dfrac{R_f}{R_a}V_a + \dfrac{R_f}{R_b}V_b\right) = -\left(\dfrac{300}{6}\times 0.05 + \dfrac{300}{30}0.25\right) = -5\text{V}$

（2）$-10 = -\left(\dfrac{300}{6}\times 0.05 + \dfrac{300}{30}V_b\right) \to V_b = 0.75\text{V}$

（3）$-10 = -\left(\dfrac{300}{6}\times V_a + \dfrac{300}{30}\times 0.25\right) \to V_a = 0.15\text{V}$

2.2 假定题图 2.2 所示电路中的运放是理想的，求：

（1）当可变电阻 R_x 调到 60kΩ时的输出电压 V_o。

（2）如使放大器不饱和，R_x 可以到多大？

解：

（1）

$$\frac{0-V_a}{5} = \frac{V_a - V_o}{40} \qquad (1)$$

$$\frac{0.6-V_b}{20} = \frac{V_b}{R_x} \qquad (2)$$

$$V_a = V_b \qquad (3)$$

当 R_x=60kΩ的时候，由式(2)得

$$V_b = 0.45\text{V} \qquad (4)$$

式(4)、(3)代入式(1)，得 $\dfrac{0-0.45}{5} = \dfrac{0.45-V_o}{40} \to V_o = 4.05\text{V}$

（2）若放大器不饱和，则 V_o<5V，由式(1) $\dfrac{0-V_a}{5} = \dfrac{V_a-5}{40} \to V_a = \dfrac{5}{9}\text{V}$

将$V_{\mathrm{b}}=V_{\mathrm{a}}=\dfrac{5}{9}$V 代入式(2)得到 $\dfrac{0.6-\dfrac{5}{9}}{20}=\dfrac{\dfrac{5}{9}}{R_{\mathrm{x}}}\rightarrow R_{\mathrm{x}}=250\mathrm{k}\Omega$

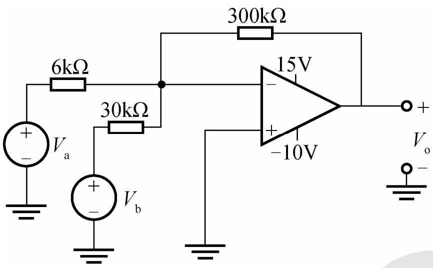
2.4　题图 2.4 所示运放，利用实际的运放电路模型，输入电阻是 500kΩ，输出电阻是 5kΩ，运放开环增益是 300 000，假定运放工作在线性区，求：

（1）放大器的电压增益 $V_{\mathrm{o}}/V_{\mathrm{g}}$；

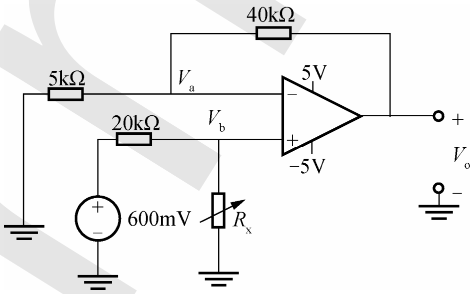
（2）如果 V_{g}=1V，求电压 V_{n}（用μV 表示）；

（3）计算从信号源（V_{g}）看进去的电阻；

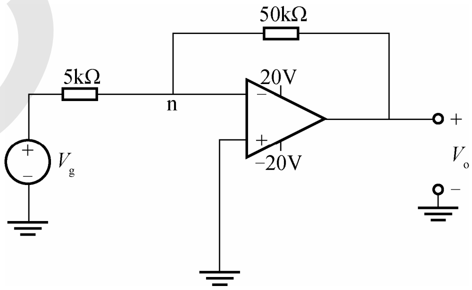
（4）运放在理想模式下，重复（1）～（3）。



题图 2.1



题图 2.2



题图 2.4

解：

（1）放大器的电压增益 $V_{\mathrm{o}}/V_{\mathrm{g}}$

（2）如果 V_{g}=1V，求电压 V_{n}（用μV 表示）

（3）计算从信号源（V_{g}）看进去的电阻

（4）运放在理想模式下，重复（1）～（3）

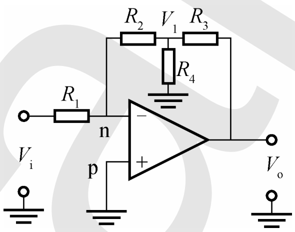
$$\frac{V_{\mathrm{o}}}{V_{\mathrm{g}}}=-\frac{R_{\mathrm{f}}}{R_{1}}=-\frac{50}{5}=-10$$

V_{n} =0V

从信号源(V_g)看进去的电阻为5kΩ

2.5　试证明题图 2.5 所示含有 T 形网络反相放大器的闭环增益

$$A_f=\frac{V_o}{V_i}=-\frac{R_2}{R_1}\left(1+\frac{R_3}{R_4}+\frac{R_3}{R_2}\right)$$



题图 2.5

解：

列定 KCL 方程：

节点 n：$-\dfrac{V_i}{R_1}-\dfrac{V_1}{R_2}=0$

节点 V_1：$\dfrac{V_1}{R_4}+\dfrac{V_1}{R_2}+\dfrac{V_1-V_o}{R_3}=0$

由以上两式可以得出

$$A_f=\frac{V_o}{V_i}=-\frac{R_2}{R_1}(1+\frac{R_3}{R_4}+\frac{R_3}{R_2})$$

2.6　设计一个如题图 2.5 所示含有 T 形网络的反相放大器，用作麦克风的前置放大器。麦克风的最大输出电压为 12mV，即题图 2.5 中输入电压 V_i 最大为 12mV。麦克风的输出电阻 R_s 为 1kΩ，此电阻必须包含在题图 2.5 的电阻 R_1 中。要求所设计的反相放大器最大输出电压为 1.2V，即电压增益为 1.2/0.012=100，但电路中每个电阻的阻值必须小于 500kΩ。

提示：此题的解决方案不是唯一的。根据经验，建议选择 $R_2=R_3$，R_1=51kΩ（包含 R_s 值在内）。

解：

$$A_f=\frac{V_o}{V_i}=-\frac{R_2}{R_1}(1+\frac{R_3}{R_4}+\frac{R_3}{R_2})\to-100=-\frac{R_2}{R_1}(1+\frac{R_3}{R_4})-\frac{R_3}{R_1}$$

如果选 $R_2/R_1=R_3/R_1=8$，则 $-100=-8(1+\dfrac{R_3}{R_4})-8\to\dfrac{R_3}{R_4}=10.5$

有效电阻 R_1 必须包含麦克风电阻 R_s，若选 R_1=49kΩ，从而 $R_{1,\text{eff}}$=50 kΩ，于是 $R_2=R_3$=400 kΩ，及 R_4=38.1 kΩ。

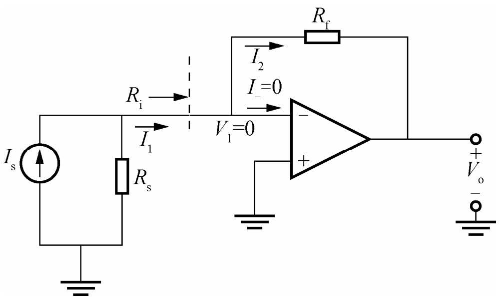
2.7　题图 2.7 为电流-电压转换器电路。电路中，$R_i=V_1/I_1\approx 0$，$R_s\gg R_i$。试证明输出电压 V_o 正比于输入信号的电流 I_s。

解：

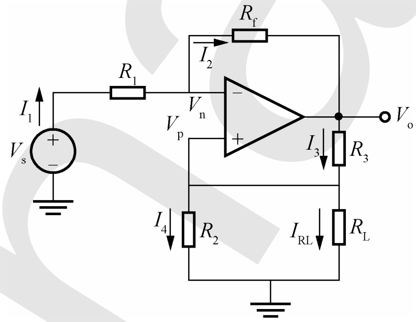
因为 $R_i=V_1/I_1\approx0$，$R_s\gg R_i$，所以 $I_s\approx I_2$，$V_o=-I_2R_f=-I_sR_f$。

2.8　题图 2.8 所示电压−电流转换器电路，设运放是理想的，试证明当 $\dfrac{R_f}{R_1R_3}=\dfrac{1}{R_2}$ 时，$I_{RL}=-\dfrac{V_s}{R_2}$，即流过负载 R_L 的电流与负载 R_L 无关，而与输入电压信号 V_s 成正比。

提示：围绕同相端、反相端列写 KCL 方程，同时利用“虚短”条件：$V_n=V_p=I_{RL}R_L$，联立求解以上三式，即可得出问题的解。



题图 2.7



题图 2.8

解：

列写电路方程

$$V_n=V_p=I_{RL}R_L$$

$$\frac{V_s-V_n}{R_1}=\frac{V_n-V_o}{R_f}$$

$$\frac{V_o-V_p}{R_3}=I_{RL}+\frac{V_p}{R_2}$$

当 $\dfrac{R_f}{R_1R_3}=\dfrac{1}{R_2}$ 时，可求得 $I_{RL}=-\dfrac{V_s}{R_2}$。

2.9　基于题 2.8 结果，设 R_L=100Ω，R_1=10kΩ，R_2=1kΩ，R_3=1kΩ，R_f=10kΩ。若 V_s=−10V，求负载电流 I_{RL} 与输出电压 V_o。

提示：先验证是否满足条件 $\dfrac{R_f}{R_1R_3}=\dfrac{1}{R_2}$，如此就好利用题 2.8 的结果。

解：

电路满足条件 $\dfrac{R_f}{R_1R_3}=\dfrac{1}{R_2}$，所以负载电流 $I_{RL}=-\dfrac{V_s}{R_2}=-\dfrac{-10}{1\text{k}\Omega}=10\text{mA}$，负载上的电压 $V_L=I_{RL}R_L=10\times10^{-3}\times100=1\text{V}$，电流 I_3 和 I_4 分别为

$$I_4=\frac{V_L}{R_2}=\frac{1}{1\times10^3}=1\text{mA}$$

$$I_3 = I_{RL} + I_4 = 10 + 1 = 11\text{mA}$$

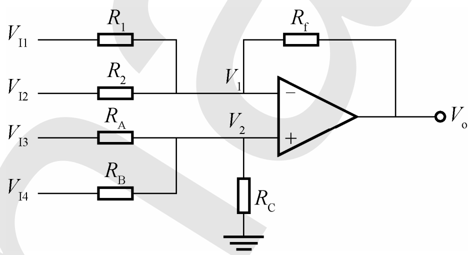
输出电压为

$$V_o = I_3R_3 + V_L = 11\times10^{-3}\times10^3 + 1 = 12\text{V}$$

2.10 题图 2.10 是通用加法器电路，试利用叠加原理证明其输出可表示为

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1}V_{I1} - \frac{R_f}{R_2}V_{I2} + \left(1+\frac{R_f}{R_n}\right)\left(\frac{R_p}{R_A}V_{I3} + \frac{R_p}{R_B}V_{I4}\right)$$

式中，$R_n = R_1 \parallel R_2$，$R_p = R_A \parallel R_B \parallel R_C$。



题图 2.10

提示：用叠加原理确定电路输出电压，先研究单独一个输入电压源作用，将其他 3 个输入电压源置零（即短路），求输出电压，如此重复 4 次，然后将 4 次结果相加，即得 4 个输入源共同作用时的输出电压。

解：

输入电压 V_{I1}、V_{I2} 产生的输出电压为

$$V_o(V_{I1}) = -\frac{R_f}{R_1}V_{I1},\quad V_o(V_{I2}) = -\frac{R_f}{R_2}V_{I2}$$

输入电压 V_{I3}、V_{I4} 产生的输出电压为

$$V_2(V_{I3}) = -\frac{R_B \| R_C}{R_A + R_B \| R_C}V_{I3} = V_1(V_{I3})$$

由于 $V_{I1}=V_{I2}=0$，因此 $V_2(V_{I3})$是同相运算放大器输入信号，此时 R_1、R_2 为并联关系，故有

$$V_o(V_{I3}) = (1+\frac{R_f}{R_1\|R_2})V_1(V_{I3}) = (1+\frac{R_f}{R_1\|R_2})(\frac{R_B\|R_C}{R_A+R_B\|R_C})V_{I3} = (1+\frac{R_f}{R_n})(\frac{R_P}{R_A})V_{I3}$$

式中 $R_N = R_1\|R_2$，$R_P = R_A\|R_B\|R_C$

同样可求得 V_{I4} 对应的输出电压 $V_o(V_{I4}) = (1+\frac{R_f}{R_n})(\frac{R_P}{R_B})V_{I4}$

故总的输出电压为 $V_o = -\frac{R_f}{R_1}V_{I1} - \frac{R_f}{R_2}V_{I2} + (1+\frac{R_f}{R_n})\left[\frac{R_p}{R_A}V_{I3} + \frac{R_p}{R_B}V_{I4}\right]$

2.11　在题 2.10 基础上，设计一个加法器，使其输出为

$$V_{\mathrm{o}} = -10V_{\mathrm{I1}} - 4V_{\mathrm{I2}} + 5V_{\mathrm{I3}} + 2V_{\mathrm{I4}}$$

允许使用电阻最小值为 20kΩ。

提示：按题 2.10 结果，可知 $R_{\mathrm{f}} / R_1 = 10$， $R_{\mathrm{f}} / R_2 = 4$，最小电阻为 20kΩ，先确定 R_1、R_2 与 R_{f}，然后由关系 $\left(1+\dfrac{R_{\mathrm{f}}}{R_{\mathrm{n}}}\right)\dfrac{R_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{A}}}=5$，$\left(1+\dfrac{R_{\mathrm{f}}}{R_{\mathrm{n}}}\right)\dfrac{R_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{B}}}=2$ 确定同相端各项。

解：

按题已知 $\dfrac{R_{\mathrm{f}}}{R_1}=10$, $\dfrac{R_{\mathrm{f}}}{R_2}=4$，电阻 R_1 将最小。取 R_1=20kΩ，则 $R_{\mathrm{f}} = 200\mathrm{k\Omega}$，$R_2 = 50\mathrm{k\Omega}$。同相端各项倍增因子变为 $(1+\dfrac{R_{\mathrm{f}}}{R_1 \| R_2}) = (1+\dfrac{200}{20\|50}) = 15$

我们需要 $(15)(\dfrac{R_{\mathrm{P}}}{R_{\mathrm{A}}}) = 5$, $(15)(\dfrac{R_{\mathrm{P}}}{R_{\mathrm{B}}}) = 2$，将两个表达式相比，可得 $\dfrac{R_{\mathrm{B}}}{R_{\mathrm{A}}} = \dfrac{5}{2}$

如果取 R_{A}=80kΩ，则 R_{B}=200kΩ，R_{p}=26.67 kΩ，则 R_{C} 为 50kΩ。