

实验五 集成运算放大器的基本应用——模拟运算电路

19 组 朱云沁 PB20061372 赵明宇 PB19061383

实验题目：

集成运算放大器的基本应用——模拟运算电路

实验目的：

了解集成运放的外形结构及各引脚功能；掌握集成运放的三种输入方式，研究由集成运放组成的比例、加法、减法、积分和微分等基本运算电路的功能；了解集成运放在实际应用时应考虑的一些问题。

实验器材：

函数信号发生器、交流毫伏表、示波器、数字万用表、uA741 集成运放、电阻若干、电容、导线若干。

实验原理：

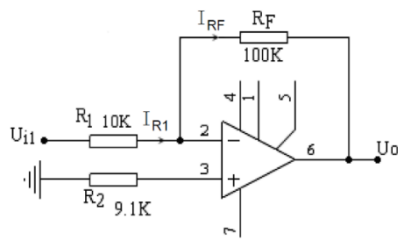


图 1 反相比例运算电路-实验电路图

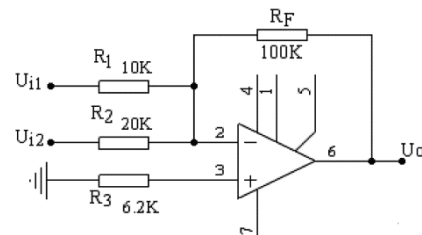


图 2 反相加法电路-实验电路图

1) 反相比例运算电路

图 1 所示电路为反相比例运算电路。由集成运放的虚短虚断和分压公式，立得输入、输出电压的关系为

$$U_o = -\frac{R_F}{R_1} U_i$$

2) 反相加法运算电路

图 2 所示电路为反相加法电路。由集成运放的虚短虚断、分压公式和叠加原理，立得输入、输出电压的关系为

$$U_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} U_{i1} + \frac{R_F}{R_2} U_{i2}\right)$$

3) 同相比例运算电路

图 3 所示电路为同相比例运算电路。由集成运放的虚短虚断和分压公式，立得输入、输出电压的关系为

$$U_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_i$$

4) 差动放大电路(减法器)

图 4 所示电路为差动放大电路。由集成运放的虚短虚断、分压公式和叠加原理，立得输入、输出电压的关系为

$$U_o = -\frac{R_F}{R_1} U_{i1} + \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) U_{i2}$$

特别地，当 $R_1 = R_2$ 且 $R_3 = R_F$ 时，

$$U_o = \frac{R_F}{R_1} (U_{i2} - U_{i1})$$

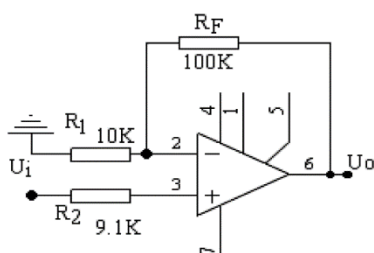


图 3 同相比例运算电路-实验电路图

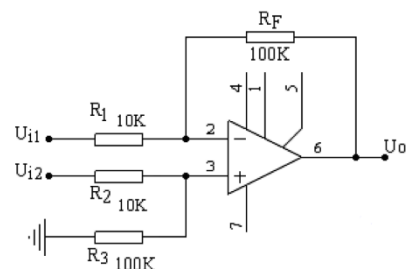


图 4 差动放大电路-实验电路图

5) 积分运算电路

图 5 所示电路为积分电路。由集成运放的虚短虚断和分压公式，得到复频域中输入、输出电压的关系为

$$U_o(s) = -\frac{R_f}{R_1(sR_fC + 1)}U_i(s)$$

特别地，当 $|sR_fC| \gg 1$ 时，有

$$U_o(s) \approx -\frac{1}{sR_1C}U_i(s)$$

设 $u_o(0_-) = 0$ ，则时域中输入、输出电压的关系为

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1C} \int_{0_-}^t u_i dt$$

6) 微分运算电路

图 6 所示电路为微分电路。由集成运放的虚短虚断和分压公式，得到复频域中输入、输出电压的关系为

$$U_o(s) = -\frac{sR_FC}{sR_1C + 1}U_i(s)$$

特别地，当 $|sR_1C| \ll 1$ 时，有

$$U_o(s) \approx -sR_FC U_i(s)$$

设 $u_o(0_-) = 0$ ，则时域中输入、输出电压的关系为

$$u_o(t) = -R_FC \frac{du_i}{dt}$$

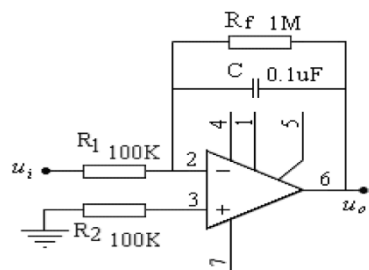


图 5 积分运算电路-实验电路图

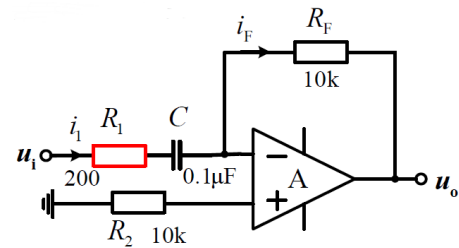


图 6 微分运算电路-实验电路图

实验内容：

1) 反相比例运算电路

按图 1 正确连线。函数信号发生器输入频率约为500Hz，电压大小约为 0.5Vrms 的正弦交流信号。用万用表测量电路中各电阻大小以及 U_i 、 U_o 有效值，并用示波器观察 u_o 和 u_i 的相位关系，结果如表 1 所示。

实验数据

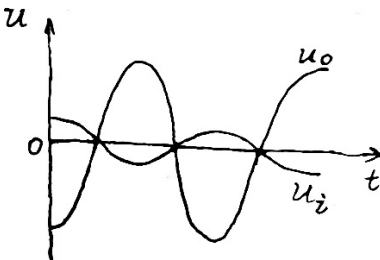
U_i	U_o	波形	A_u	
			实测值	计算值
0.49948V	-5.0883V		-10.1872	-10.1965
$R_1 = 9.8514k\Omega$		$R_2 = 9.0283k\Omega$	$R_F = 0.10045M\Omega$	
$f = 500.00Hz$				

表 1 反相比例运算电路-实验数据

数据处理

该电路的输出电压约为输入电压的 10 倍，且相位相反，具有反相比例运算的作用，与理论分析相符。

根据表 1 数据，算得电压增益 A_u 的实测值与计算值，填入表 1 中。

A_u 的实测值为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{5.0883}{0.49948} = -10.1872$$

A_u 的计算值为

$$A_{u\text{计算}} = -\frac{R_F}{R_1} = -\frac{100.45}{9.8514} = -10.1965$$

相对误差为

$$\left| \frac{A_u - A_{u\text{计算}}}{A_{u\text{计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-10.1872 + 10.1965}{-10.1965} \right| \times 100\% = 0.09\%$$

·误差分析

本实验测得电压增益 A_u 与理论计算值的相对误差控制在0.1%范围内，误差较小，可以认为，是由非理想集成运放的性能缺陷、仪器测量误差、电磁波干扰等因素造成。总体来说，该电路运算精度较高，具有实用性。

2) 反相加法运算电路

按图 2 正确连线。两输入电压由直流稳压电源提供。用万用表测量电路中各电阻大小。在运放未饱和的前提下，改变 U_{i1} 、 U_{i2} 的正负和大小，对每组 U_{i1} 、 U_{i2} ，用万用表 DCV 档测量 U_{i1} 、 U_{i2} 、 U_o ，结果如表 2 所示。

·实验数据

U_{i1}		101.731mV	0.30080V	-101.748mV	-0.30080V
U_{i2}		0.20181V	0.60137V	-0.20181V	-0.60137V
U_o	实测值	-2.0073V	-5.9198V	1.9699V	5.8828V
	计算值	-1.9883V	-5.9009V	1.9884V	5.9009V
	相对误差	0.95%	0.32%	0.93%	0.31%
$R_1 = 9.8514\text{k}\Omega$			$R_2 = 21.317\text{k}\Omega$		
$R_3 = 6.2008\text{k}\Omega$			$R_F = 0.10045\text{M}\Omega$		

表 2 反相加法运算电路-实验数据

·数据处理

该电路的输出电压可近似为两输入线性放大后相加的结果，且符号（相位）相反，具有反相加法运算的作用，与理论分析相符。

根据表 2 数据，由 $U_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} U_{i1} + \frac{R_F}{R_2} U_{i2}\right)$ ，算得各组 U_o 的理论值和相对误差，填入表 2 中。

·误差分析

本实验测得各组输出电压 U_o 与理论计算值的相对误差控制在1%范围内，误差较小，可以认为，是由非理想集成运放的性能缺陷、仪器测量误差等因素造成。

各组输出电压 U_o 的实测值均略微偏小，可能的原因为：

输入失调电压 U_{i0S} 为负值，经比例运算后，导致输出端存在一失调电压 $U_{o0S} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1 || R_2}\right) U_{i0S} < 0$ 。

总体来说，该电路运算精度较高，具有实用性。

3) 同相比例运算电路

按图 3 正确连线。函数信号发生器输入频率约为500Hz，电压大小约为 0.5Vrms 的正弦交流信号。用万用表测量电路中各电阻大小以及 U_i 、 U_o 有效值，并用示波器观察 u_o 和 u_i 的相位关系，结果如表 3 所示。

实验数据

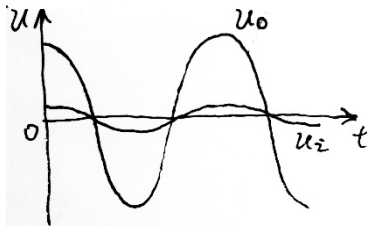
U_i	U_o	波形	A_u	
			实测值	计算值
0.50423V	5.6451V		11.1955	11.1965
$R_1 = 9.8514k\Omega$		$R_2 = 9.0283k\Omega$	$R_F = 0.10045M\Omega$	
$f = 500.00Hz$				

表 3 同相比例运算电路-实验数据

数据处理

该电路的输出电压约为输入电压的 11 倍，且相位相同，具有同相比例运算的作用，与理论分析相符。

根据表 3 数据，算得 A_u 的实测值与计算值，填入表 3 中。

A_u 的实测值为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{5.6451}{0.50423} = 11.1955$$

A_u 的计算值为

$$A_{u\text{计算}} = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 1 + \frac{100.45}{9.8514} = 11.1965$$

相对误差为

$$\left| \frac{A_u - A_{u\text{计算}}}{A_{u\text{计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{11.1955 - 11.1965}{11.1965} \right| \times 100\% = 0.009\%$$

误差分析

本实验测得电压增益 A_u 与理论计算值的相对误差控制在0.01%范围内，误差较小，可以认为，是由非理想集成运放的性能缺陷、仪器测量误差、电磁波干扰等因素造成。总体来说，该电路运算精度较高，具有实用性。

4) 差动放大电路（减法器）

按图 4 正确连线。两输入电压由直流稳压电源提供。用万用表测量电路中各电阻大小。在运放未饱和的前提下改变 U_{i1} 、 U_{i2} 的正负和大小，对每组 U_{i1} 、 U_{i2} ，用万用表 DCV 档测量 U_{i1} 、 U_{i2} 、 U_o ，结果如表 4 所示。

实验数据

U_{i1}		1.00114V	2.0013V	-1.00116V	-2.0013V
U_{i2}		0.50117V	1.7008V	-0.50114V	-1.7008V
U_o	实测值	-5.1126V	-3.0833V	5.0887V	3.0588V
	计算值	-5.1019V	-3.0773V	5.1024V	3.0773V
	相对误差	0.21%	0.20%	0.27%	0.60%
$R_1 = 9.8514k\Omega$		$R_2 = 9.8245k\Omega$			
$R_3 = 99.327k\Omega$		$R_F = 0.10045M\Omega$			

表 4 差动放大电路-实验数据

数据处理

该电路的输出电压约为两输入电压之差，具有差动放大（减法器）的作用，与理论分析相符。

根据表 4 数据，由 $U_o = -\frac{R_F}{R_1}U_{i1} + \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)\left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right)U_{i2}$ ，算得各组 U_o 的理论值和相对误差，填入表 2 中。

误差分析

本实验测得各组输出电压 U_o 与理论计算值的相对误差控制在1%范围内，误差较小，可以认为，是由非理想集成运放的性能缺陷、仪器测量误差等因素造成。

各组输出电压 U_o 的实测值均略微偏小，可能的原因为：

输入失调电压 U_{i0S} 为负值，经比例运算后，导致输出端存在一失调电压 $U_{o0S} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_{i0S} < 0$ 。

总体来说，该电路运算精度较高，具有实用性。

5) 积分运算电路

按图 5 正确连线。函数信号发生器输入频率约 100Hz，大小约 2V_{pp} 的方波信号。用万用表测量电路中各电阻、电容大小。用示波器观察 u_i 、 u_o 的波形，并用光标测量 U_i 、 U_o 的峰值，结果如表 5 所示。

实验数据

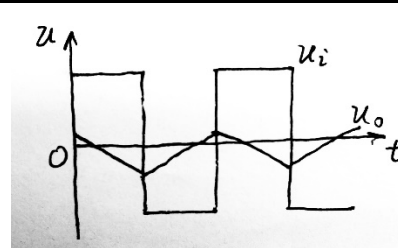
输入信号			输出信号			波形
U_{ip+}	U_{ip-}	U_{ipp}	U_{op+}	U_{op-}	U_{opp}	
987.50mV	-1.00625V	1.99375V	143.75mV	-362.50mV	506.25mV	
$R_1 = 0.10045M\Omega$				$R_2 = 99.327k\Omega$		
$R_F = 1.01533M\Omega$				$C = 0.101\mu F$		
$f = 100.00Hz$						

表 5 积分运算电路-实验数据

数据处理

根据表 5 数据，由输入信号 u_i 计算得输出信号 u_o 的理论形式。

令 $\omega_1 = 2\pi f$ ，对输入方波信号 u_i 的交流成分作奇延拓，其傅里叶级数为

$$\tilde{u}_i(t) = \frac{2U_{ipp}}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin[(2n+1)\omega_1 t]$$

在 $U_o(s) = -\frac{R_f}{R_1(sR_fC+1)} U_i(s)$ 中，令 $s = j\omega$ ，得频域中输入、输出电压关系

$$\dot{U}_o(j\omega) = -\frac{R_f}{R_1(1+j\omega R_fC)} \dot{U}_i(j\omega)$$

ω_1 的 $2n+1$ 次谐波（含基波）分量为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{o2n+1} &= -\frac{R_f}{R_1(1+j(2n+1)\omega_1 R_fC)} \cdot \frac{2U_{ipp}}{\pi} \cdot \frac{1}{2n+1} \\ &= \frac{2R_f U_{ipp}}{\pi(2n+1)R_1 \sqrt{(2n+1)^2 \omega_1^2 R_f^2 C^2 + 1}} \angle \varphi_{2n+1} \\ &\approx \frac{2U_{ipp}}{\pi(2n+1)^2 \omega_1 R_1 C} \angle \frac{\pi}{2} \quad \left(\omega_1 \gg \frac{1}{R_f C}\right) \end{aligned}$$

式中， $\varphi_{2n+1} = \arg[-1+j(2n+1)\omega_1 R_fC]$ 。由叠加原理，得输出信号 u_o 的交流成分为

$$\begin{aligned} \tilde{u}_o(t) &= \frac{2R_f U_{ipp}}{\pi R_1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1) \sqrt{(2n+1)^2 \omega_1^2 R_f^2 C^2 + 1}} \sin[(2n+1)\omega_1 t + \varphi_{2n+1}] \\ &\approx \frac{2U_{ipp}}{\pi \omega_1 R_1 C} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \sin\left[(2n+1)\omega_1 t + \frac{\pi}{2}\right] \\ &= \frac{2U_{ipp}}{\pi \omega_1 R_1 C} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cos[(2n+1)\omega_1 t] = -\frac{1}{R_1 C} \int_{\frac{1}{4f}}^t \tilde{u}_i(t) dt \end{aligned}$$

故输出信号的理论形式可近似为三角波，其峰峰值为

$$U_{opp \text{ 计算}} = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^{\frac{1}{2f}} \tilde{u}_i(t) dt = \frac{1}{4f R_1 C} U_{ipp}$$

$$= \frac{1.99375}{4 \times 100.00 \times 0.10045 \times 0.101} = 0.49129V = 491.29mV$$

相对误差为

$$\left| \frac{U_{opp} - U_{opp \text{ 计算}}}{U_{opp \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{506.25 - 491.29}{491.29} \right| \times 100\% = 3.05\%$$

误差分析

本实验测得峰峰值 U_{opp} 与理论计算值相比，存在一定误差。 U_{opp} 的测量值偏大，可能的原因为：

- 用示波器光标测量输出电压时，实验者未准确判断输出波形的高值与低值对应亮线的中心位置，导致测得高值偏大或低值偏小；
- 用示波器光标测量输入电压时，实验者未准确判断输入波形的高值与低值对应亮线的中心位置，导致测得高值偏小或低值偏大，从而 U_{ipp} 的测量值偏小。
- 由于导线老化、接触不良等原因，万用表测得 R_1 偏大或 C 偏大。

本实验输出波形，相较于理论形式，存在一定的直流偏置，可能的原因为：

输入电压的直流成分 $U_1 = \frac{U_{ip+} + U_{ip-}}{2}$ 经直流通路反相放大，导致输出端存在直流电压 $-\frac{R_f}{R_1} \cdot \frac{U_{ip+} + U_{ip-}}{2} > 0$ ；输入失

调电压 U_{ios} （为负值）经直流通路同相放大，导致输出端存在失调电压 $\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_{ios} < 0$ ；输入失调电流 I_{ios} （由输出负管脚流向输出端子）使得 R_f 两端存在电压降 $-I_{ios} R_f < 0$ 。此三者叠加，使输出波形存在为负值的直流偏置。

6) 微分运算电路

按图 6 正确连线。函数信号发生器输入频率约 1000Hz，峰峰值约 2V 的三角波信号。用万用表测量电路中各电阻、电容大小。用示波器观察 u_i 、 u_o 的波形，并用光标测量 U_1 、 U_o 的峰值，结果如表 6 所示。

实验数据

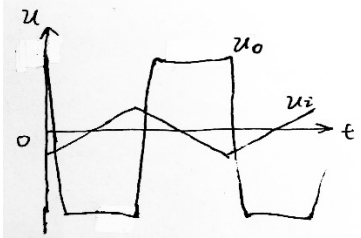
输入信号			输出信号			波形
U_{ip+}	U_{ip-}	U_{ipp}	U_{op+}	U_{op-}	U_{opp}	
954.50mV	-1.01200V	1.96650V	3.77400V	-3.97800V	7.75200V	
$R_1 = 0.15632k\Omega$				$R_2 = 9.8245k\Omega$		
$R_F = 9.8514k\Omega$				$C = 0.101\mu F$		
$f = 1000.00Hz$						

表 6 微分运算电路-实验数据

数据处理

根据表 6 数据，由输入信号 u_i 计算得输出信号 u_o 的理论形式。

令 $\omega_1 = 2\pi f$ ，对输入三角波信号 u_i 的交流成分作偶延拓，其傅里叶级数为

$$\tilde{u}_i(t) = \frac{4U_{ipp}}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cos[(2n+1)\omega_1 t]$$

在 $U_o(s) = -\frac{sR_F C}{sR_1 C + 1} U_i(s)$ 中，令 $s = j\omega$ ，得频域中输入、输出电压关系

$$\dot{U}_o(j\omega) = -\frac{j\omega R_F C}{1 + j\omega R_1 C} \dot{U}_i(j\omega)$$

ω_1 的 $2n+1$ 次谐波（含基波）分量为

$$\begin{aligned}\dot{U}_{o2n+1} &= -\frac{j(2n+1)\omega_1 R_F C}{1 + j(2n+1)\omega_1 R_1 C} \cdot \frac{4U_{ipp}}{\pi^2} \cdot \frac{1}{(2n+1)^2} \\ &= \frac{4\omega_1 R_F C U_{ipp}}{\pi^2 (2n+1) \sqrt{(2n+1)^2 \omega_1^2 R_1^2 C^2 + 1}} \angle \varphi_{2n+1} \\ &\approx \frac{4\omega_1 R_F C U_{ipp}}{\pi^2 (2n+1)} \angle -\frac{\pi}{2} \quad \left(\omega_1 \ll \frac{1}{R_1 C} \right)\end{aligned}$$

式中， $\varphi_{2n+1} = \text{Arg}[-(2n+1)\omega_1 R_1 C - j]$ 。由叠加原理，得输出信号 u_o 的交流成分为

$$\begin{aligned}\tilde{u}_o(t) &= \frac{4U_{ipp}}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\omega_1 R_F C}{(2n+1) \sqrt{(2n+1)^2 \omega_1^2 R_1^2 C^2 + 1}} \cos[(2n+1)\omega_1 t + \varphi_{2n+1}] \\ &\approx \frac{4\omega_1 R_F C U_{ipp}}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cos\left[(2n+1)\omega_1 t - \frac{\pi}{2}\right] \\ &= \frac{4\omega_1 R_F C U_{ipp}}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin[(2n+1)\omega_1 t] = -R_F C \frac{d\tilde{u}_i(t)}{dt}\end{aligned}$$

故输出信号的理论形式可近似为方波，其峰峰值为

$$\begin{aligned}U_{opp \text{ 计算}} &= 2R_F C \left| \frac{d\tilde{u}_i(t)}{dt} \right| = 4fR_F C U_{ipp} \\ &= 4 \times 1000.00 \times 9.8514 \times 0.101 \times 10^{-3} \times 1.96650 = 0.78266\text{V} = 782.66\text{mV}\end{aligned}$$

相对误差为

$$\left| \frac{U_{opp} - U_{opp \text{ 计算}}}{U_{opp \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{775.200 - 782.66}{782.66} \right| \times 100\% = 0.95\%$$

误差分析

本实验测得峰峰值 U_{opp} 与理论计算值相比，相对误差控制在 1% 范围内，可以认为，是由非理想集成运放的性能缺陷、仪器测量误差等因素造成。 U_{opp} 的测量值偏小，可能的原因为：

- 用示波器光标测量输出电压时，实验者未准确判断输出波形的高值与低值对应亮线的中心位置，导致测得高值偏小或低值偏大；
- 用示波器光标测量输入电压时，实验者未准确判断输入波形的高值与低值对应亮线的中心位置，导致测得高值偏大或低值偏小，从而 U_{ipp} 的测量值偏大。
- 由于导线老化、接触不良等原因，万用表测得 R_F 偏大或 C 偏大。

补充思考题：

设计一个能实现下列运算关系的运算电路。已知条件如下：

$$1) \quad U_o = 2U_{i1} + 2U_{i2} - 4U_{i3}$$

电路如图 7 所示。

由集成运放的虚短虚断、分压公式和叠加原理，写出输出、输入电压的关系式为

$$\begin{aligned}U_o &= \left(1 + \frac{R_F}{R_3}\right) \left(\frac{R_2 || R_4}{R_1 + R_2 || R_4}\right) U_{i1} \\ &\quad + \left(1 + \frac{R_F}{R_3}\right) \left(\frac{R_1 || R_4}{R_2 + R_1 || R_4}\right) U_{i2} \\ &\quad - \frac{R_F}{R_3} U_{i3}\end{aligned}$$

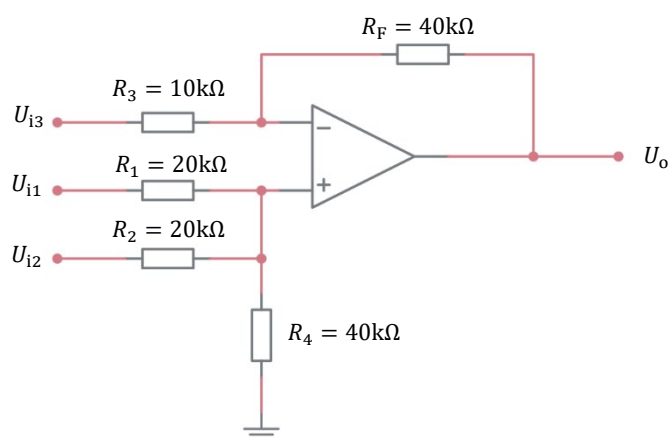


图 7 补充思考题 1 电路图

代入系数得

$$\frac{R_F}{R_3} = 4, \quad \frac{R_1 || R_4}{R_2 + R_1 || R_4} = \frac{R_2 || R_4}{R_1 + R_2 || R_4} = \frac{2}{5}$$

为抑制共模增益，还需有

$$R_1 || R_2 || R_4 = R_3 || R_F$$

联立以上各式，解得

$$R_1 = R_2 = 20k\Omega, \quad R_3 = 10k\Omega, \quad R_4 = R_F = 40k\Omega$$

2) $U_o = 2U_{i1} - 3U_{i2}$

电路如图 8 所示。

由集成运放的虚短虚断、分压公式和叠加原理，写出输出、输入电压的关系式为

$$U_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_2}\right) \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3}\right) U_{i1} - \frac{R_F}{R_2} U_{i2}$$

代入系数得

$$\frac{R_F}{R_2} = 3, \quad \frac{R_3}{R_1 + R_3} = \frac{3}{4}$$

为抑制共模增益，还需有

$$R_1 || R_3 = R_2 || R_F$$

联立以上各式，解得

$$R_1 = R_3 = 15k\Omega, \quad R_2 = 10k\Omega, \quad R_F = 30k\Omega$$

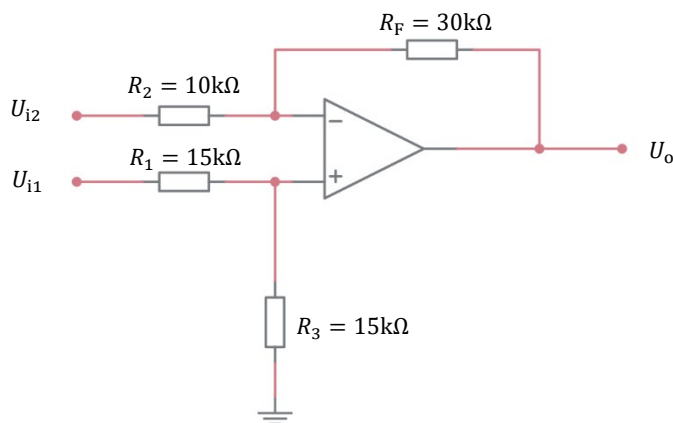


图 8 补充思考题 2 电路图

思考题:

1) 如何判断集成运算放大器的好坏？为了不损坏集成运算放大器，实验中应注意什么问题？

为了判断集成运算放大器的好坏，将待测的集成运放接成图 9 所示电路（电压跟随器），电阻 R_1 、 R_F 近似相等，输入合适的直流电压 u_1 （保证工作在线性区），若输出电压 u_2 与 u_1 近似相等，证明该电路有电压跟随作用，可初步判断集成运放为好；若 u_2 与 u_1 相差较大，则集成运放为坏。

为了不损坏集成运算放大器，实验中应做到：

- 不将输出端管脚短路；
- 不将正负电源管脚接反（与本实验无关）；
- 预先计算输入信号、电阻（分流、分压等）、电容等参考值，再进行接线，避免输入端信号过大；
- 避免用不洁净的手触摸集成运放芯片。

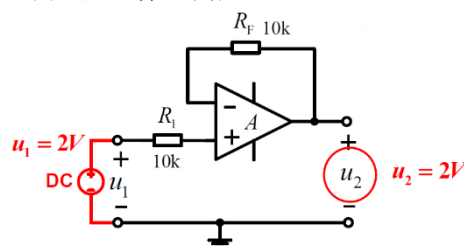


图 9 电压跟随器

2) 在反相加法运算电路（图 2）中，如果 U_{i1} 和 U_{i2} 均采用直流信号，并选定 $U_{i2} = -1V$ ，考虑到运算放大器的最大输出幅度为 $\pm 12V$ ， U_{i1} 的绝对值不应超过多少伏？

由 $U_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} U_{i1} + \frac{R_F}{R_2} U_{i2}\right)$ 知

$$U_{i1} = -\left(\frac{R_1}{R_F} U_o + \frac{R_1}{R_2} U_{i2}\right)$$

将 $-12V < U_o < 12V$ ， $U_{i2} = -1V$ 代入得

$$\left(\frac{R_1}{R_2} - 12 \frac{R_1}{R_F}\right)V < U_{i1} < \left(\frac{R_1}{R_2} + 12 \frac{R_1}{R_F}\right)V$$

将 $R_1 = 10k\Omega$ ， $R_2 = 20k\Omega$ ， $R_F = 100k\Omega$ 代入得

$$-0.7V < U_{i1} < 1.7V$$

故当 U_{i1} 为正时， U_{i1} 不应超过 1.7V；当 U_{i1} 为负时， U_{i1} 的绝对值不应超过 0.7 伏。

3) 在积分运算电路（图 5）中，分析电阻 R_f 的作用，说明 R_f 的精度对积分电路的精度有何影响？

由 $U_o(s) = -\frac{R_f}{R_1(sR_fC+1)}U_i(s)$ 知，该电路的电压增益为

$$A_u(s) = -\frac{1}{R_1(sC + \frac{1}{R_f})}$$

写为频域形式

$$A_u(j\omega) = -\frac{1}{R_1(\frac{1}{R_f} + j\omega C)}$$

若不存在 R_f ($R_f = \infty$)，则 $A_u(j\omega) = -\frac{1}{j\omega R_1 C}$ ，当 $\omega \rightarrow 0$ 时， $|A_u(j\omega)| \rightarrow \infty$ ，运放将进入饱和状态，电路不能

正常工作。因此，设置分流电阻 R_f ，作用如下：

- a) 提供放电回路（负反馈），避免直流失调电压或输入的直流成分在积分周期内积累导致运放饱和；
- b) 限制低频增益，避免低频信号放大后幅值超过线性区导致运放饱和。

修正后，积分电路的电压增益模和相角为

$$|A_u(j\omega)| = \frac{R_f}{R_1 \sqrt{1 + \omega^2 R_f^2 C^2}} < \frac{1}{\omega R_1 C}$$

$$\varphi(\omega) = \pi + \arctan(-\omega R_1 C) \neq \frac{\pi}{2}$$

故输出波形的幅值、相位、形状均可能受到影响。对于高频信号或输入信号的高频成分 ($\omega \gg \frac{1}{R_f C}$)，精度

影响较小，近似有 $A_u(j\omega) \approx -\frac{1}{j\omega R_1 C}$ ；对于低频信号或输入信号的低频成分，精度影响较大。