

集成运算放大器的基本应用—模拟运算电路 实验报告

信息科学技术学院 神 PB22114514
信息科学技术学院 李 毅 PB22051031
教室：电四楼 112 室 座位号： 8

2023 年 12 月 6 日

第一部分 实验目的

1. 掌握集成运算放大器的基本特性及正确使用方法。
2. 掌握集成运算放大器的三种输入方式，研究由集成运算放大器组成的比例、加法、减法、积分和微分等基本运算电路的功能。
3. 了解运算放大器在实际应用时应考虑的一些问题。

第二部分 实验原理

集成运算放大器是一个具有两个输入端，一个输出端的多级直接耦合放大器。本实验使用的 $\mu A747$ 型集成运算放大器，具有高增益，低漂移，高输入阻抗，低输出阻抗，可靠性高的特点，因此可以视作理想器件。通过在输入和输出端加上反馈网络，可以实现不同的电路功能，如各种模拟运算。

第三部分 实验内容

先使用如图 1 所示的电压跟随器，检测运算放大器的好坏。测得 U_o 与 U_i 近似相等，故运算放大器正常工作。

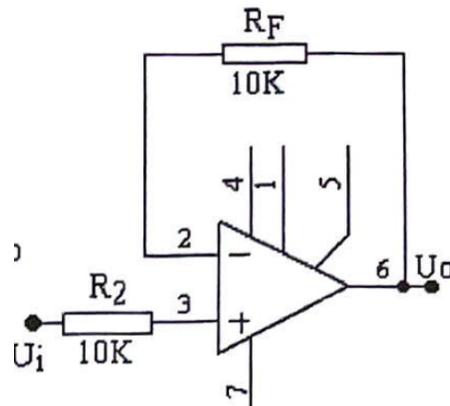


图 1 电压跟随器

一、反相比例运算电路

将加在反相输入端的信号按比例放大，称为反相比例运算电路，如图 2 所示。

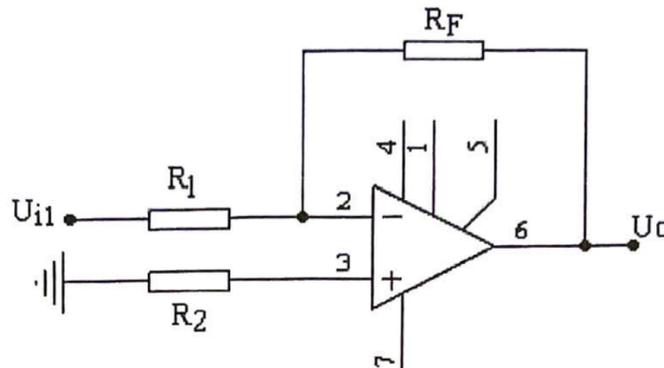


图 2 反相比例运算电路

理论分析表明，对于理想运放，输出电压与输入电压的关系为：

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

在输出电压不超过运算放大器最大输出电压时，输出电压与输入电压保持线性关系。

为确保运放的两个输入端处于平衡对称工作状态，以便减小输入即偏置电流引起的运算误差，在同相输入端接入平衡电阻 $R_2 = R_1 // R_F$ 。

取 $R_i = 10k\Omega$, $R_f = 100k\Omega$, $R_2 = 9.1k\Omega$, 输入电压频率 $f=500\text{Hz}$ 的正弦交流信号。

测得 $U_i = 500.4\text{mV}$, $U_o = 5.042\text{V}$ (有效值)。 U_i 与 U_o 波形如图 3 所示：

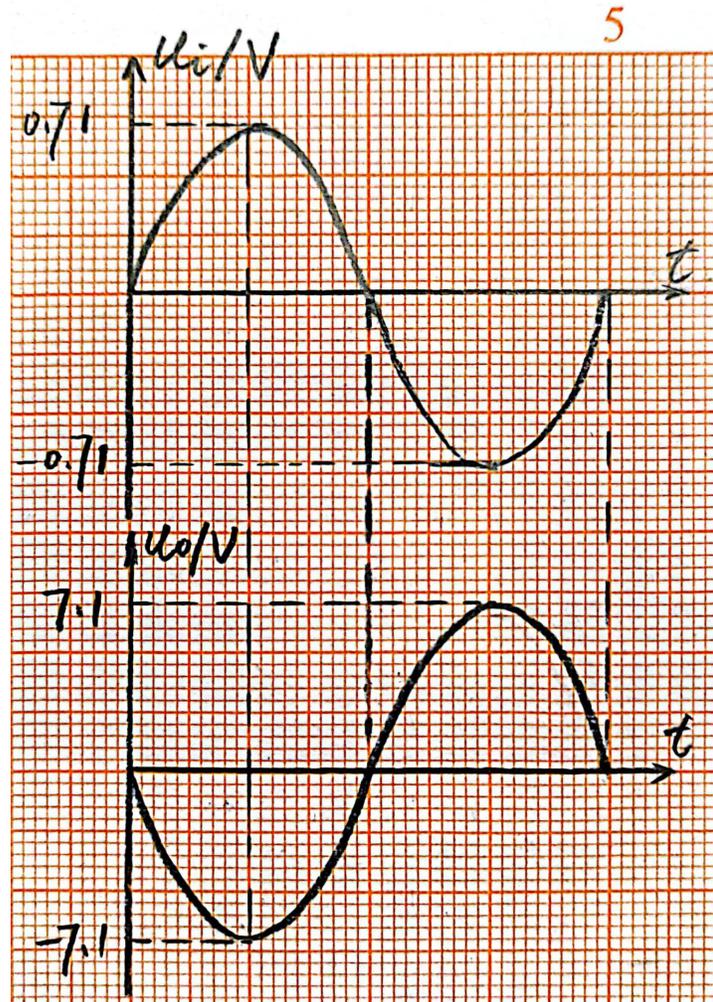


图 3 反比例运算电路 U_i 与 U_o 波形

实际测得的电压放大倍数 $A_u = -\frac{U_o}{U_i} = -10.076$, 理论 $A'_u = -\frac{R_F}{R_1} = -10$, 相对误差 $\delta_{A_u} = \frac{|A_u - A'_u|}{A'_u} = 0.76\%$ 。误差在合理范围内。

二、反相加法电路

反相加法电路如图 4 所示。此电路可以通过改变某一支路的输入电阻，来改变电路的比例关系，而不影响其他电路的比例关系。

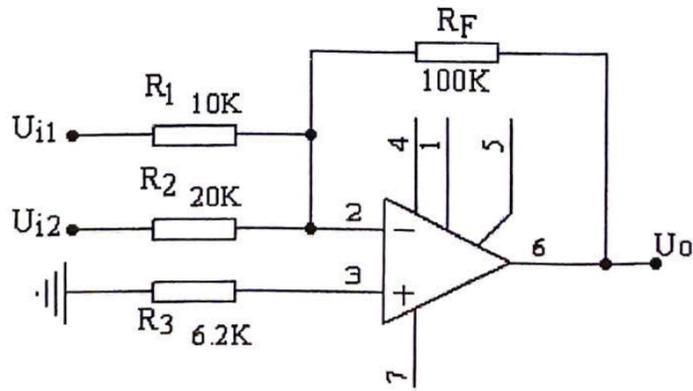


图 4 反向加法电路

输入电压与输出电压之间的关系为：

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

使用直流稳压电源输入 U_{i1} , U_{i2} , 使用万用表测量 U_{i1} , U_{i2} , U_o , 得到表 1 如下：

表 1 反向加法电路电压测量记录表

$U_{i1}(V)$	0.0996	0.300	-0.301	-0.101
$U_{i2}(V)$	0.200	0.600	-0.602	-0.201
$U_o(V)$	-2.008	-6.029	6.046	2.022

测量值 U_o 与理论值 U'_o 相对误差如表 2 所示：

表 2 反向加法电路误差分析表

$U_o(V)$	-2.008	-6.029	6.046	2.022
$U'_o(V)$	-1.996	-6.000	6.020	2.015
δ_{U_o}	0.60%	0.48%	0.43%	0.35%

平均误差为 0.47%，误差在合理范围内。

三、同相比例运算电路

同相比例运算电路如图 5 所示，输入信号加在同相端。

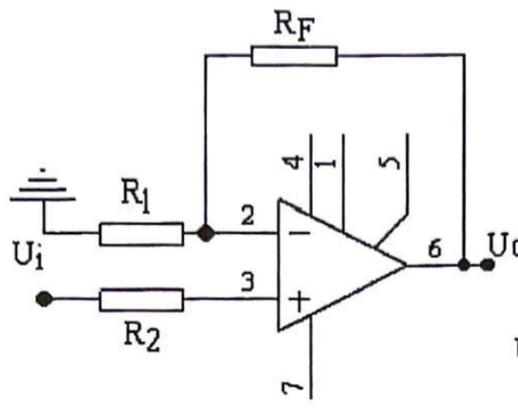


图 5 同相比例运算电路

理论分析表明，对于理想运放，输出电压与输入电压的关系为：

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

同样的，为确保运放的两个输入端处于平衡对称工作状态，以便减小输入即偏置电流引起的运算误差，在同相输入端接入平衡电阻 $R_2 = R_1 // R_F$ 。

取 $R_i = 10k\Omega$, $R_f = 100k\Omega$, $R_2 = 9.1k\Omega$, 输入电压频率 $f=500Hz$ 的正弦交流信号。

测得 $U_i = 500.3mV$, $U_o = 5.516V$ (有效值)。 U_i 与 U_o 波形如图 6 所示：

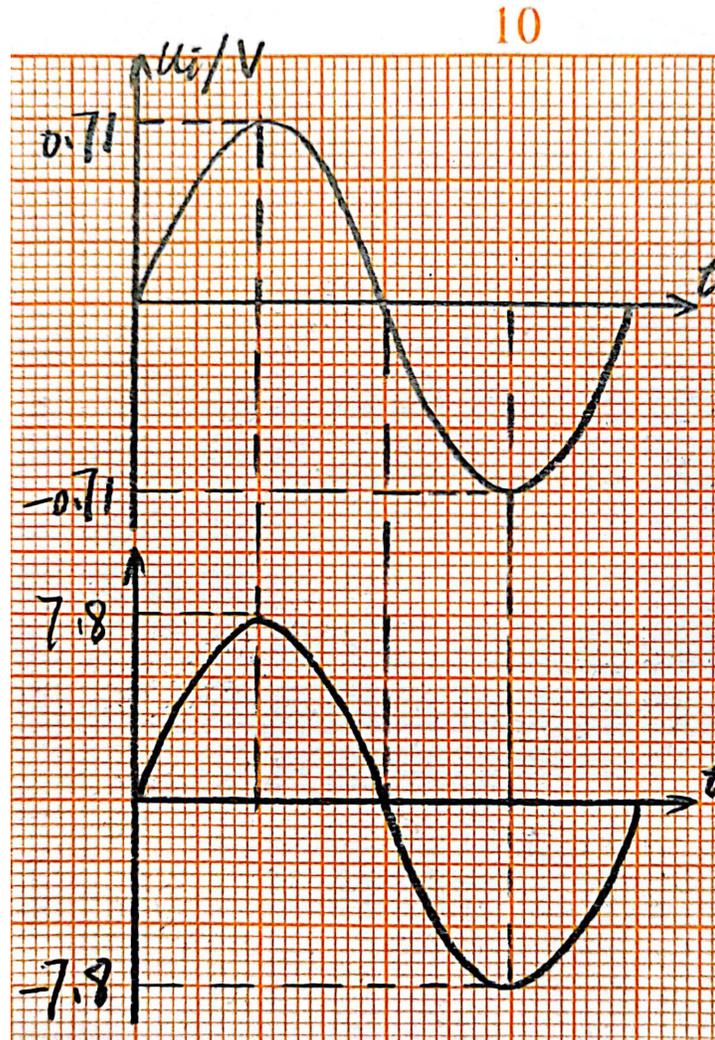


图 6 同相比例运算电路 U_i 与 U_o 波形

实际测得的电压放大倍数 $A_u = \frac{U_o}{U_i} = 11.025$, 理论 $A'_u = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 11$, 相对误差 $\delta_{A_u} = \frac{|A_u - A'_u|}{A'_u} = 0.23\%$ 。误差在合理范围内。

四、差动放大电路（减法器）

差动放大电路如图 7 所示，输入信号分别加在反相输入端和同相输入端。

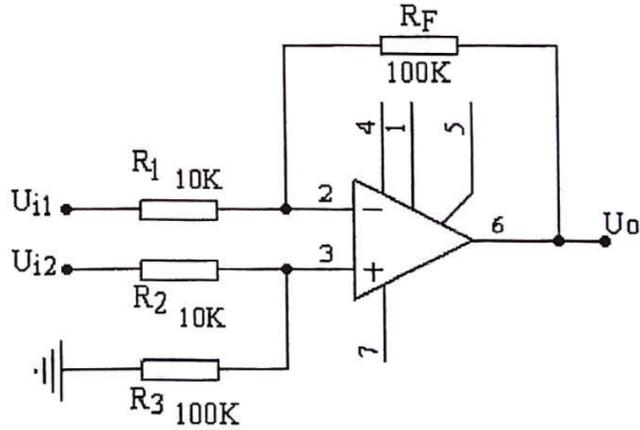


图 7 差动放大电路

输入电压与输出电压之间的关系为：

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

使用直流稳压电源输入 U_{i1} , U_{i2} , 使用万用表测量 U_{i1} , U_{i2} , U_o , 得到表 3 如下：

表 3 差动放大电路电压测量记录表

$U_{i1}(V)$	1.000	2.001	-2.001	-1.000
$U_{i2}(V)$	0.499	1.700	-1.700	-0.499
$U_o(V)$	-5.024	-3.002	2.997	5.020

测量值 U_o 与理论值 U'_o 相对误差如表 4 所示：

表 4 差动放大电路误差分析表

$U_o(V)$	-5.024	-3.002	2.997	5.020
$U'_o(V)$	-5.010	-3.010	3.010	5.010
δ_{U_o}	0.28%	0.27%	0.43%	0.20%

平均误差为 0.30%，误差在合理范围内。

五、积分运算电路

积分运算电路如图 8 所示：

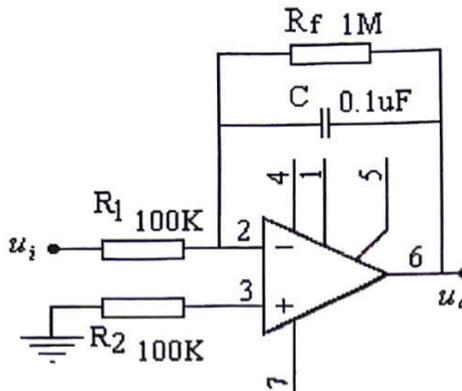


图 8 积分运算电路

输出电压与输入电压呈积分关系，在理想情况下有

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_i dt + u_C(0)$$

$U_C(0)$ 是 $t=0$ 时刻电容 C 两端的电压值。

图中 R_f 为分流电阻，用于稳定电流增益，以免直流失调电压在积分周期内积累导致运放饱和。

取频率为 100Hz 的，峰峰值为 2V 的方波信号作为输入信号 U_i ，实验电容实际值 $C = 98.2nF$ ，得到波形图如图 9 所示：

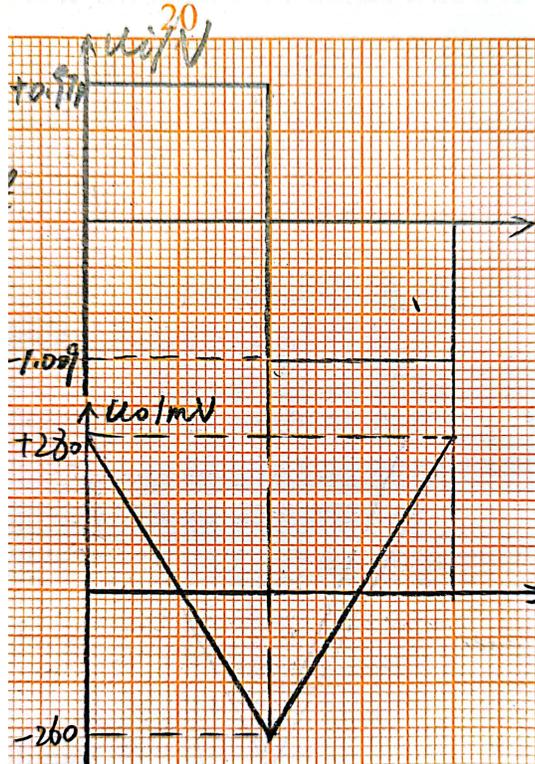


图 9 积分运算电路输入与输出波形

测得 U_i 峰峰值为 1.980V， U_o 峰峰值为 540mV。

理论计算的 U_o 峰峰值为 $\frac{1}{RC} \int_0^{\frac{T}{2}} U_i dt = 504.1mV$ 。

相对误差为 7.12%。

六、微分运算电路

微分运算电路如图 10 所示：

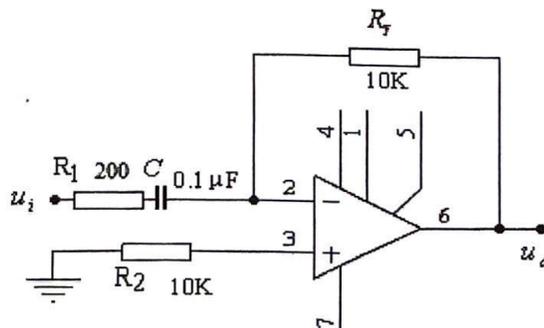


图 10 微分运算电路

输出电压与输入电压呈微分关系，在理想情况下有

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

取频率为 1kHz 的，峰峰值为 2V 的三角波信号作为输入信号 U_i ，实验电容实际值 $C = 98.2nF$ ，调节 R_1 使得输出波形稳定，得到波形图如图 11 所示：

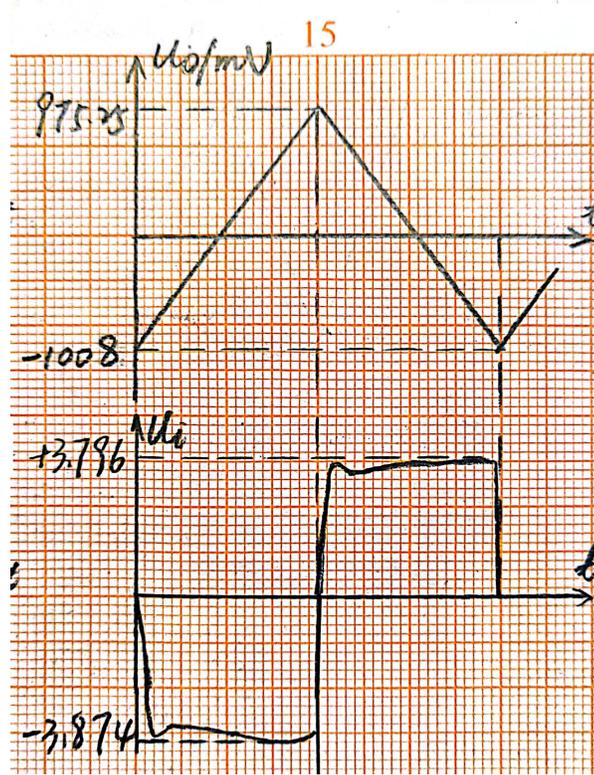


图 11 微分运算电路输入与输出波形

测得 U_i 峰峰值为 1.98V， U_o 峰峰值为 7.67V。

理论计算的 U_o 峰峰值为 $2R_F C \frac{U_{opp}}{T/2} = 7.78V$ 。

相对误差为 1.43%。

第四部分 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?

答: 可以将电路接成图 1 所示的电压跟随器, 给定输入 U_i , 测量输出 U_o , 在两者相等或相差很小时, 可以认为运算放大器正常工作。

2. 当反相或者同相放大器的输入 u_i 固定时, 如果负反馈电阻 R_F 选择过大, u_o 可能不再随 R_F 的增加而增大, 且输出的交流波形限幅, 试说明原因?

答:

由反相放大器的输入电压与输出电压的关系 $U_o = -\frac{R_F}{R_1}U_i$, 以及同相放大器的输入电压与输出电压的关系 $U_o = \frac{R_F}{R_1}U_i$, 当输入电压 U_i 和 R_1 保持不变时, 理论输出电压 U_o 幅值随反馈电阻 R_F 单调上升。如果 R_F 过大, 造成理论 U_o 超过运放供电电压 V_{cc} 时, U_o 幅值将不再增大而近似等于供电电压 V_{cc} , 此时输出的交流波形出现限幅。

3. 在积分运算电路图中, 分析电阻 R_f 的作用, 说明 R_f 的大小对积分电路的精度有何影响?

R_f 是积分漂移泄漏电阻, 能够提供放电回路, 防止积分漂移造成的饱和或截止现象。但是 R_f 的存在会对总电流和电容的充放电电流起到分流, 从而产生误差, 为减小这一误差, 实际电路中通常使 $R_f \gg R_1$, 从而使得总电路时间常数远小于 C 和 R_f 构成回路的时间常数。

4. 设计一个能实现下列运算关系的电路, 运放数 ≤ 2 , 已知条件如下:

(1) $U_o = 2U_{i1} - 3U_{i2}$, 初步设计电路如图 12(a) 所示。

根据电压关系可得方程

$$U_{i1} \frac{R_{F1}}{R_{F1} + R_1} = U_{i2} \frac{R_{F2}}{R_{F2} + R_2} + U_o \frac{R_2}{R_{F2} + R_2}$$

整理可得

$$U_o = \frac{R_{F2} + R_2}{R_{F1} + R_1} \cdot \frac{R_{F1}}{R_2} U_{i1} - \frac{R_{F2}}{R_2} U_{i2}$$

比较系数可知 $\frac{R_{F2}}{R_2} = 3$, 故取 $R_{F2} = 120k\Omega, R_2 = 40k\Omega$, 可得 $\frac{R_{F1}}{R_{F1} + R_1} = \frac{1}{2}$, 故取 $R_{F1} = 60k\Omega, R_1 = 60k\Omega$, 最终电路如图 12(b) 所示

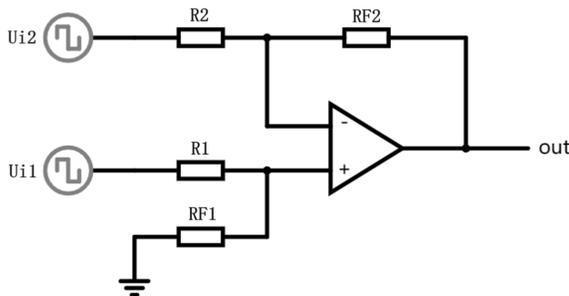


图 12(a)

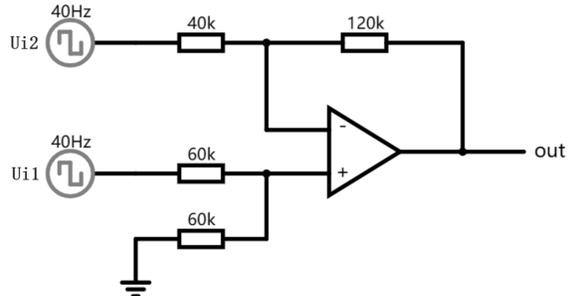


图 12(b)

(2) $U_o = U_{i1} - 2U_{i2} + 3U_{i3}$, 初步设计电路如图 13(a) 所示。

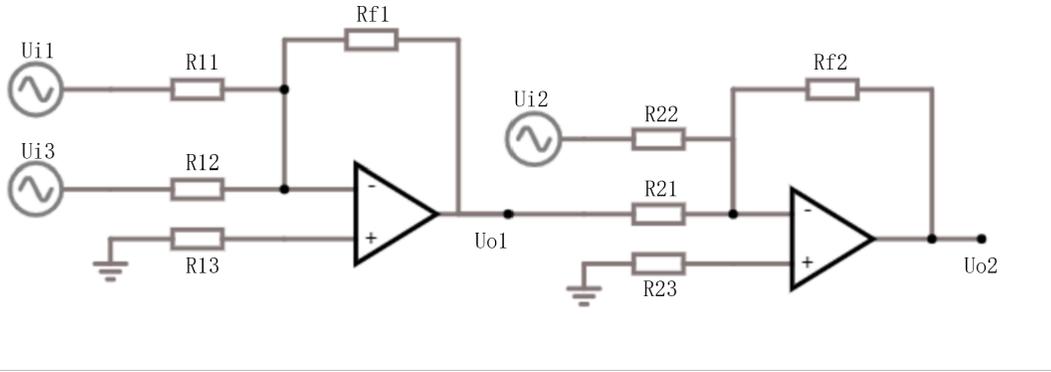


图 13(a)

由反相加法电路性质得知, $U_{o1} = -(\frac{R_{F1}}{R_{11}}U_{i1} + \frac{R_{F1}}{R_{12}}U_{i3})$, $U_{o2} = -(\frac{R_{f2}}{R_{22}}U_{i2} + \frac{R_{f2}}{R_{21}}U_{o1})$ 。

令 $\frac{R_{F1}}{R_{11}} = \frac{1}{2}$, $\frac{R_{F1}}{R_{12}} = \frac{3}{2}$, $\frac{R_{f2}}{R_{22}} = 2$, $\frac{R_{f2}}{R_{21}} = 2$, 即有:

$$U_{o2} = -2U_{o1} - 2U_{i2} = -2(-\frac{1}{2}U_{i1} - \frac{3}{2}U_{i3}) - 2U_{i2} = U_{i1} - 2U_{i2} + 3U_{i3}$$

得到所需设计。

取 $R_{F1} = R_{F2} = 120k\Omega$, 即有 $R_{11} = 240k\Omega$, $R_{12} = 80k\Omega$, $R_{21} = R_{22} = 240k\Omega$ 。

平衡电阻 $R_{13} = R_{11} // R_{12} // R_{f1} = 40k\Omega$, $R_{23} = R_{21} // R_{22} // R_{f2} = 24k\Omega$ 。

最终电路如图 13(b) 所示

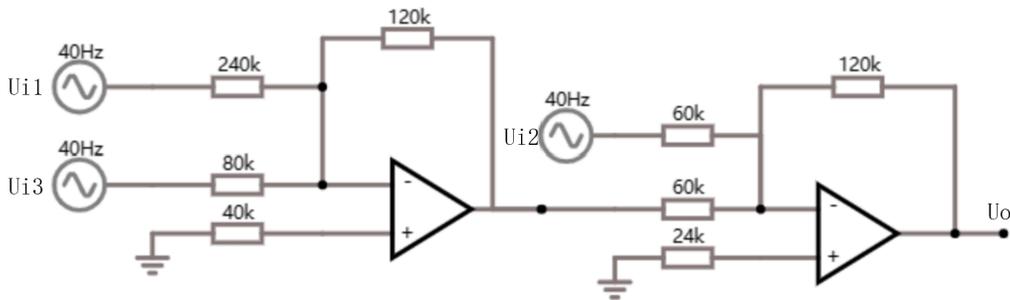


图 13(b)