

实验四 集成运放应用——模拟运算

范玥瑶 PB18000341

2020 年 6 月 26 日

1 实验目的

1. 掌握集成运放的基本特性和工作原理；
2. 熟悉集成运放在模拟运算方面的应用；
3. 了解集成运算放大器的正确使用方法。

2 实验原理

2.1 集成运放电路的组成

如图 2.1.1，集成运放电路由输入级、中间级、偏置电路、输出级组成。输入级又称前置级，一般是由晶体管/场效应管构成的差分放大电路，可以减小温漂、提高共模抑制比。中间级又称电压放大级，其作用为提高运放的电压放大倍数。输出级，作用为提供较高的 u_o 和较大的 i_o ，其输出电阻低，带负载能力强。输出级一般采用互补射极跟随器。偏置电路采用电流源电路，为各级提供合适的静态工作电流，从而确定合适的静态工作点。

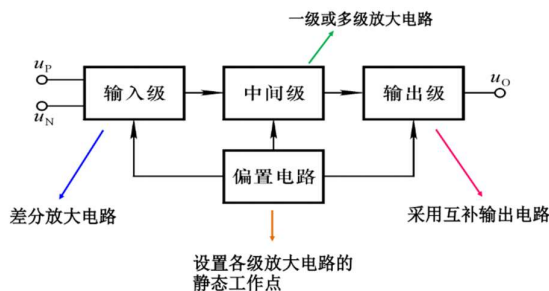


图 2.1.1 集成运放电路组成图

2.2 集成运放的电压传输特性

集成运放符号如图 2.2.1。集成运放有同相和反相两个输入端。输入信号加在同相输入端，输出信号与输入信号相位相同；加在反相输入端则输出信号与输入信号相位相反。

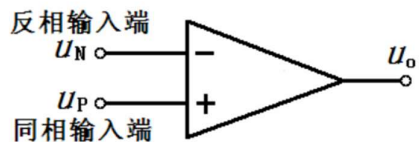


图 2.2.1 集成运放符号

集成运放的电压传输特性如图 2.2.2，输入量为 $U_P - U_N$ ，即同相输入端与反相输入端的电位差。在线性区，曲线的斜率为电压放大倍数，在非线性区，输出电压只有 $+U_{OM}$ 或 $-U_{OM}$ 两种可能。 $u_O = A_{od} (u_P - u_N)$ A_{od} 越大，线性区越小。理想运放 $A_{od} \rightarrow \infty$ ，线性区 $\rightarrow 0$ 。理想运放的电压传输特性如图 2.2.3 所示。

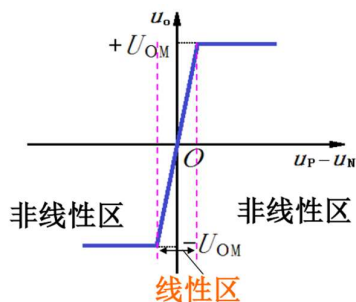


图 2.2.2 集成运放电压传输特性曲线

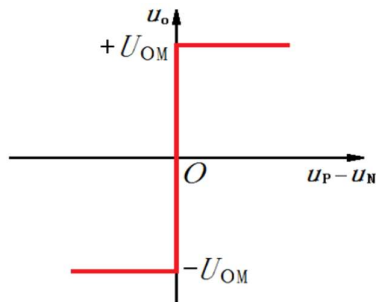


图 2.2.3 理想运放电压传输特性曲线

2.3 理想集成运算放大器

实际使用的运放有开环差模电压放大倍数 $A_{od} \approx \infty$ ，差模输入电阻 $r_{id} \approx \infty$ ，输出电阻 $r_o \approx 0$ 等特性，将其理想化。理想运放还有三个特征，共模抑制比约无穷大，带宽约无穷大，失调电压、失调电流约为 0。理想运放在线性区的两个重要特性：

(1) 输出电压与输入电压之间满足关系式 $u_o = A_{od} (u_P - u_N)$ 由于 $A_{od} \approx \infty$ ，而 u_o 为有限值，因此， $u_P - u_N = 0$ 。即 $u_P = u_N$ ，称为“虚短”。

(2) 由于输入电阻 $r_{id} = \infty$ ，故流进运放两个输入端的电流可视为零，即 $i_P = i_N = 0$ ，称为“虚断”。

2.4 集成运放工作在线性区的电路特征

集成运放工作在线性区的电路特征是电路引入负反馈。若要理想运放工作在线性区，必须 $u_P - u_N = 0$ 。因此运放在开环情况下无法进行线性工作，需要通过无源的反馈网络进行负反馈以保证运算放大器工作在线性区如图 2.4.1。对于单个集成运放，通过无源的反馈网络将集成运放的输出端与反相输入端连接起来，就表明电路引入了负反馈。同时，也可以通过电路是否引入了负反馈来判断电路是否工作在线性区。

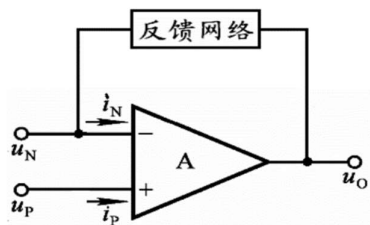


图 2.4.1. 集成运放及负反馈电路

2.5 理想运放的非线性工作区

若集成运放处于开环状态，或只引入了正反馈，则表明集成运放工作在线性区。理想运放工作在线性区的两个特点：

(1) 输出电压 u_o 只有两种可能的情况, 分别为 $\pm U_{OM}$, 即: $u_f > u_N$, $u_o = +U_{OM}$; $u_f < u_N$, $u_o = -U_{OM}$ 。

(2) 仍具有“虚断”的特点, 即: $i_f = i_N = 0$ 。

2.6 基本运算电路

运算电路中, 以输入电压作为自变量, 以输出电压作为函数, 当输入电压变化时, 输出电压将按一定的数学规律变化。运算电路的特点是:

1. 集成运放必须工作在线性区, 电路必须引入负反馈;

2. “虚短”和“虚断”是分析运算电路的基本出发点。

在运算电路中, 无论输入电压, 还是输出电压, 均是对“地”而言的。

2.7 比例运算电路

比例运算电路包括反比例运算电路和同比例运算电路。

反比例运算电路的电路图如图 2.7.1, 由“两虚”, 电压放大倍数

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (1)$$

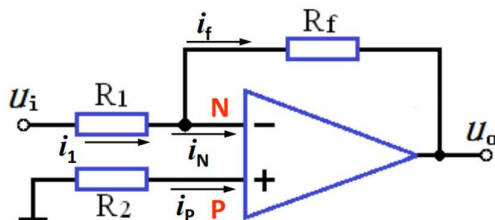


图 2.7.1 反比例运算电路

同比例运算电路的电路图如图 2.7.2, 由“两虚”, 电压放大倍数

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (2)$$

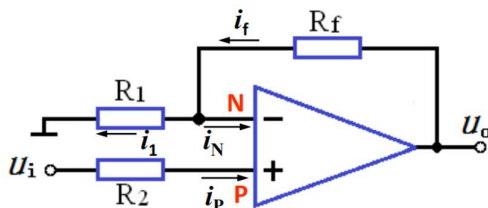


图 2.7.2 同比例运算电路

如图 2.7.3 和图 2.7.4, 当 $R_f = 0$ 或 $R_1 = \infty$ 即 N 与地开路时, $A_{uf} = 1$, 此时为电压跟随器。

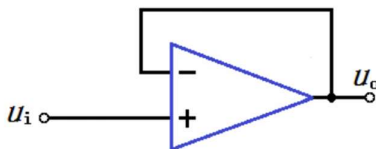


图 2.7.3 $R_f = 0$ 电压跟随器

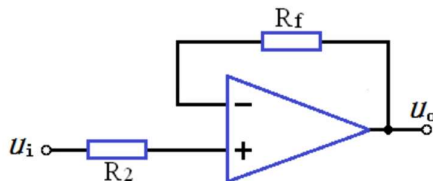


图 2.7.4 $R_1=\infty$ 电压跟随器

2.8 加减运算电路

实现多个输入信号按各自不同的比例求和或求差的电路统称为加减运算电路。

反向加法运算电路的电路图如图 2.8.1. 当 $R_1=R_2$ 时输出电压

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}(u_{i1} + u_{i2}) \quad (3)$$

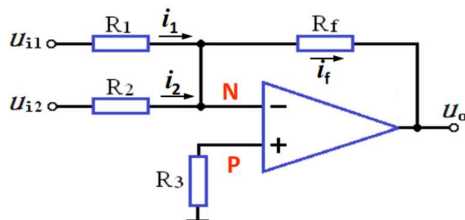


图 2.8.1 反向加法运算电路

减法运算电路的电路图如图 2.8.2, 由叠加原理得输出电压

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}u_{i1} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3}u_{i2} \quad (4)$$

当 $R_1=R_2$ 、 $R_3=R_f$ 时

$$u_o = \frac{R_f}{R_1}(u_{i2} - u_{i1}) \quad (5)$$

当 $R_1=R_2=R_3=R_f$ 时

$$u_o = u_{i2} - u_{i1} \quad (6)$$

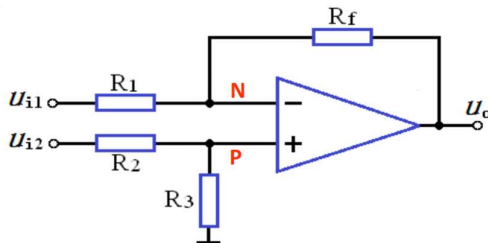


图 2.8.2 减法运算电路

2.9 积分、微分运算电路

积分运算电路的电路图如图 2.9.1, t_1 时刻输出电压

$$u_o = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^{t_1} u_i dt + u_c(0) \quad (7)$$

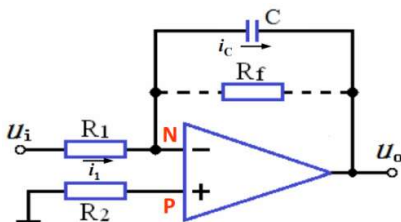


图 2.9.1 积分运算电路图

微分运算电路的电路图如图 2.9.2, 输出电压

$$u_o = -R_f C \frac{du_i}{dt} \quad (8)$$

2. 10 LM358

运放按性能指标分为通用型和特殊型。特殊型包括高阻型、高速型、高精度型、低功耗型等。对于无特殊要求的可使用通用性 LM358。运放按集成度即一个芯片上运放的个数分为单运放、双运放、四运放，LM358 是双运放。双电源供电 LM358 电源电压范围为 $\pm 1.5V \sim \pm 15V$ ，本次实验中选择 $\pm 12V$ 。 $V_{CC}=12V$ 。LM358 输出电压摆幅是 $V_{CC}-1.5V$ 。输出电压摆幅是指，运放的交流输出信号不出现非线性失真条件下，运放所能达到的最大输出电压的峰值，本实验中输出电压摆幅为 $10.5V$ ，即峰峰值 $21V$ ，线性输出范围 $21V$ 。实际值一般比这个大一些。

3 实验内容

本实验用到的设备与器件有：函数发生器，直流电源，示波器，万用表，（实验箱）集成运放 LM358（Analog→OPAMP→LM358P）。

电容、电阻若干

3.1 反相比例运算电路

连接反相比例运算电路如图 3.1.1， u_i 为正弦波， $f=1kHz$ ， $u_i=1V$ （峰峰值），通过示波器观察并记录输入、输出波形图，再用万用表 ACV 档测 u_i ， u_o ，记录和处理数据，填入表 1。

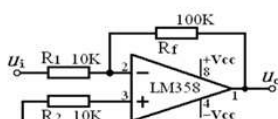


图 3.1.1 反相比例运算电路图

R_f / Ω	u_i / mV	u_o / V	A_u 实际值 (U_o / U_i)	A_u 理论值 ($-R_f / R_1$)
100k	353.574	3.535	-9.998	-10

表 1 反相比例运算电路实验数据

仿真电路图如图 3.1.2，输入输出波形图如图 3.1.3；其中红色的为 u_i ，橙色的为 u_o 。表 1 中 $u_o/u_i=9.998$ ，由图 3.1.3 u_o 与 u_i 反相，所以 A_u 还要一个负号。

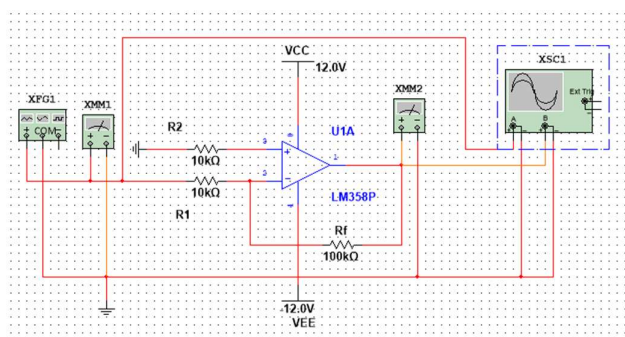


图 3.1.2 反相比例运算电路仿真电路图

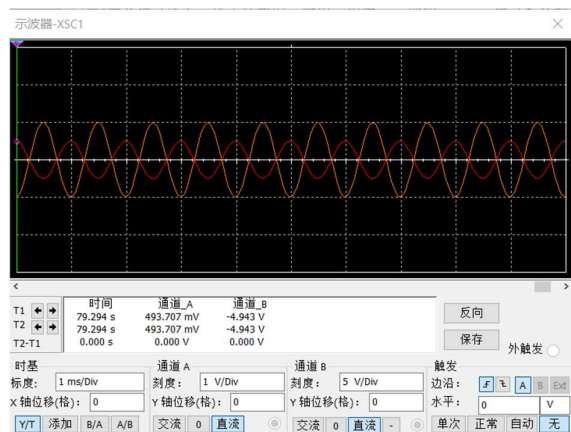


图 3.1.3 反比例运算电路输入输出波形图

3.2 同相比例运算电路

连接同相比例运算电路如图 3.2.1, u_i 为正弦波, $f=1\text{kHz}$, $u_i=1\text{V}$ (峰峰值), 通过示波器观察并记录输入、输出波形图, 再用万用表 ACV 档测 u_i, u_o , 记录和处理数据, 填入表 2.

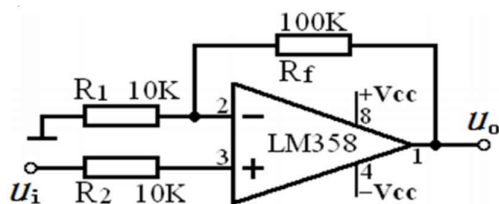


图 3.2.1 同相比例运算电路图

R_f/Ω	u_i/mV	u_o/V	A_u 实际值 (U_o/U_i)	A_u 理论值 ($1+R_f/R_1$)
100k	353.555	3.888	10.997	11

表 2 同相比例运算电路数据记录

仿真电路图如图 3.2.2, 输入输出波形图如图 3.2.3; 其中红色的为 u_i , 橙色的为 u_o 。

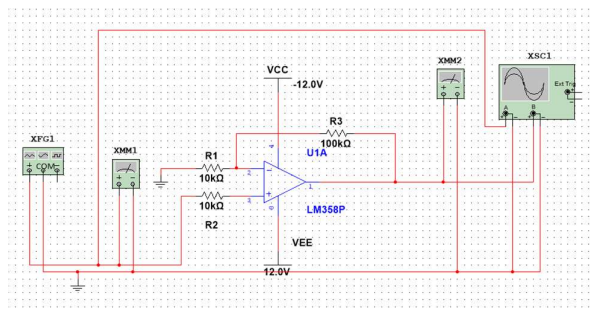


图 3.2.2 同相比例运算电路仿真电路图

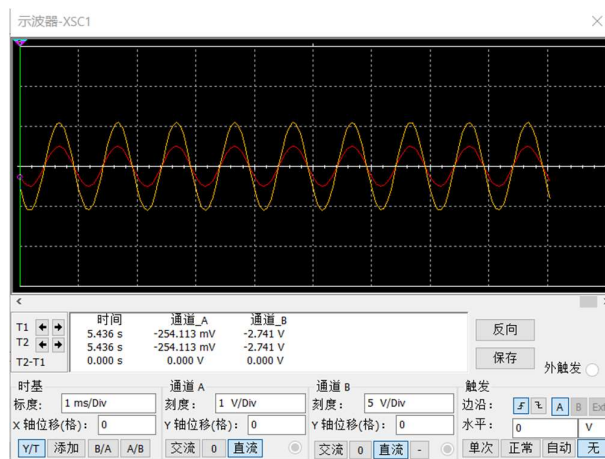


图 3.2.3 同相比例运算电路输入输出波形图

3.3 反相加法运算电路

按图 3.3.1 连接电路，从 u_{i1} , u_{i2} 输入直流信号，用万用表 DCV 档测量输出电压 U_o ，填写表 3。仿真电路图如图 3.3.2。

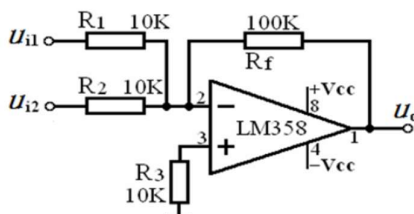


图 3.3.1 反向加法运算电路图

U_{i1}/V	0.4	-2.3	5
U_{i2}/V	0.1	2.7	-4.5
U_o/V	-4.997	-3.998	-4.997

表 3 反相加法运算电路实验数据记录

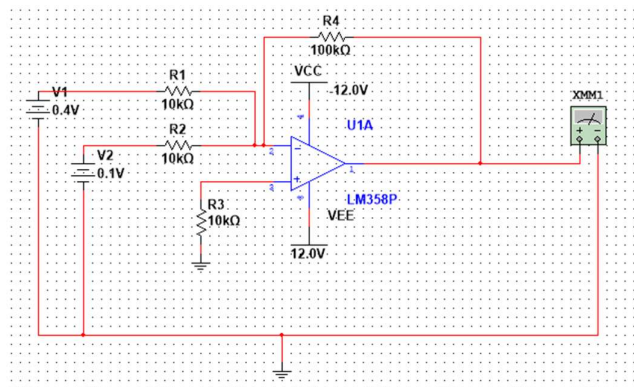


图 3.3.2 反相加法运算电路仿真电路图

3.4 减法运算电路

连接电路如图 3.4.1，从 u_{i1} , u_{i2} 输入直流信号，用万用表 DCV 档测量输出电压 U_o ，填写表 4。仿真电路图如图 3.4.2。

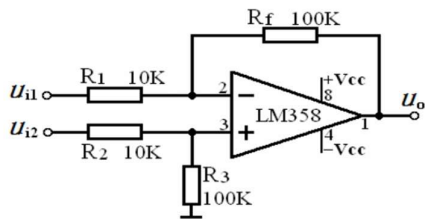


图 3.4.1 减法运算电路图

U_{i1}/V	0.4	3.8	-5.3
U_{i2}/V	0.1	4.6	-4.6
U_o/V	-3.000	7.996	7.001

表 4 减法运算电路实验数据记录

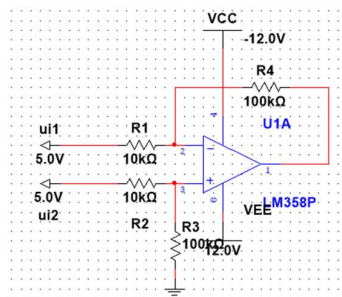


图 3.4.2 减法运算电路仿真电路图

3.5 积分运算电路

连接电路如图 3.5.1，信号 u_i 从反相端输入 ($f=300\text{Hz}$, $u_{ipp}=1\text{V}$ 的方波)，用示波器观察并记录输入、输出波形图。仿真电路图如图 3.5.2，输入输出波形图如图 3.5.3，其中红色的为 u_i ，橙色的为 u_o 。

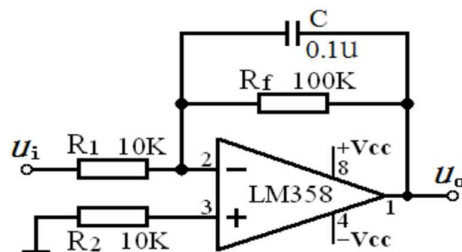


图 3.5.1 积分运算电路图

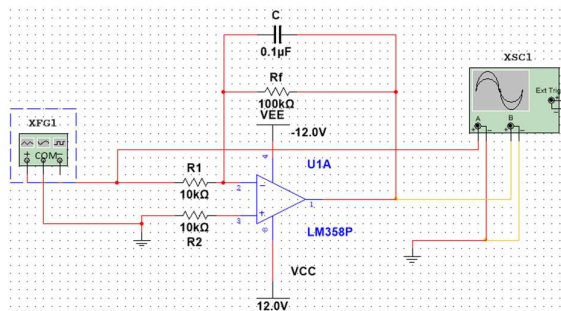


图 3.5.2 积分运算仿真电路图

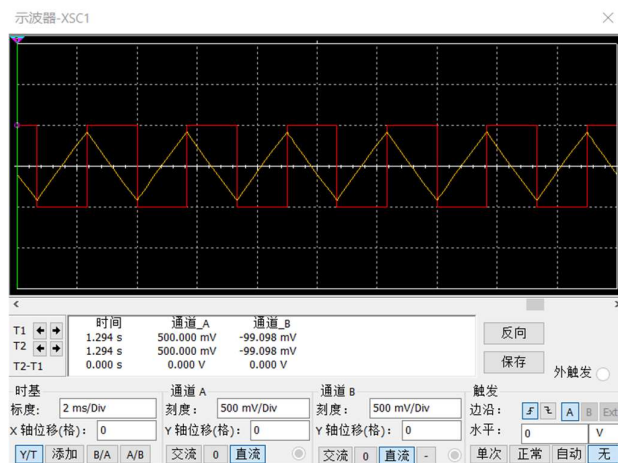


图 3.5.3 积分运算电路输入输出波形图

3.6 微分运算电路

连接电路如图 3.6.1，信号 u_i 从反相端输入 ($f=200\text{Hz}$, $u_{ip}=3\text{V}$ 的三角波)，用示波器观察并记录输入、输出波形图。仿真电路图如图 3.6.2，输入输出波形图如图 3.6.3，其中红色的为 u_i , 橙色的为 u_o 。

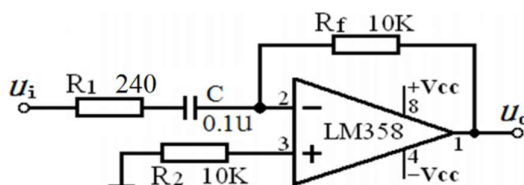


图 3.6.1 微分运算电路图

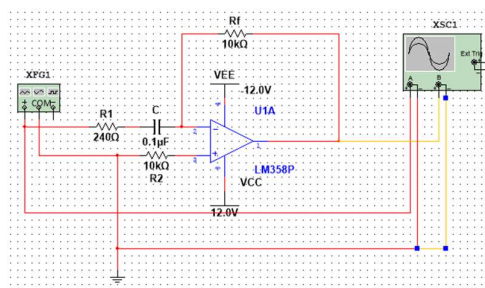


图 3.6.2 微分运算仿真电路图

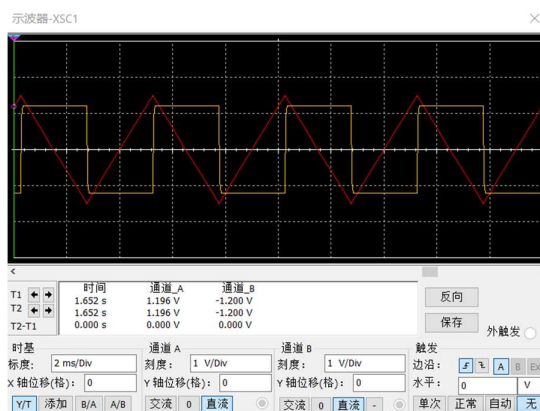


图 3.6.3 微分运算电路输入输出波形图

4 实验分析

4.1 反相比例运算电路

A_u 的实验值与理论值误差为

$$\frac{A_{u_{\text{实验}}} - A_{u_{\text{理论}}}}{A_{u_{\text{理论}}}} \times 100\% = \frac{-9.998 + 10}{10} * 100\% = 0.02\%$$

由图 3.1.3, 输出电压和输入电压的相位差为 π , 和理论上 A_u 为负实数相符。输出电压的幅值大于输入电压幅值。

4.2 同相比例运算电路

A_u 的实验值与理论值误差为

$$\frac{A_{u_{\text{实验}}} - A_{u_{\text{理论}}}}{A_{u_{\text{理论}}}} \times 100\% = \frac{10.997 - 11}{11} * 100\% = -0.027\%$$

由图 3.2.3, 输出电压和输入电压的相位差为 0, 和理论上 A_u 为正实数相符。输出电压的幅值大于输入电压幅值。

4.3 反相加法运算电路

整理输入电压之和与输出电压如表 5。

$U_{i1}+U_{i2}/V$	0.5	0.4	0.5
U_o/V	-4.997	-3.998	-4.997
$U_o/ U_{i1}+U_{i2}$	-9.994	-9.995	-9.994

表 5 反向加法运算电路数据处理

由表 5 得输出电压基本为输入电压之和的 $\frac{-9.994-9.995-9.994}{3} = -9.994$ 倍, 说明反向加法运算电路有对输入电压按照一定的权重相加并输出一个放大一定倍数信号的电压的作用。

误差分析:

由 (3),

$$\frac{u_o}{u_{i1} + u_{i2}} = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{100k\Omega}{10k\Omega} = -10$$

误差率

$$\frac{-9.994 + 10}{-10} * 100\% = -0.06\%$$

4.4 减法运算电路

整理输入电压之差 ($U_{i1}-U_{i2}$) 与输出电压如表 6。

$U_{i1}-U_{i2}/V$	0.3	-0.8	-0.7
U_o/V	-3.000	7.996	7.001
$U_o/ U_{i1}-U_{i2}$	-10	-9.995	-10.001

表 6 减法运算电路数据处理

由表 6 得输出电压为 ($U_{i1}-U_{i2}$) 的 $\frac{-10-9.995-.001}{3} = -9.999$ 倍, 说明反向加法运算电路的作用是对两输入信号的差放大特定倍数。

误差分析:

由 (5)

$$\frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}} = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{100k\Omega}{10k\Omega} = -10$$

误差率

$$\frac{-9.999 + 10}{-10} * 100\% = -0.01\%$$

4.5 积分运算电路

由图 3.5.3, 积分运算电路的输出波形是一个和输入信号频率相同的三角波, 和输入电压函数的原函数成正比, 说明积分运算电路的输出电压是输入电压的积分。

4.6 微分运算电路

由图 3.6.3, 微分运算电路的输出波形是一个与输入三角波通频的方波, 与输入电压的变化率成正比, 说明微分运算电路的输出电压是输入电压的微分。

5 实验思考题

1. 运算放大器在同相比例运算电路和反相比例运算电路的接法上有什么异同点? 同相比例运算电路若把反馈电路也接到同相端行不行? 为什么?

答: 差异在反相比例运算电路同相输入端接地, 同相比例运算电路反相输入端接地。其余接法完全相同。不能将同相比例运算电路的反馈电路也接到同相端, 因为只有接在反相端才能引入负反馈, 稳定输出电压。

2. 在反相加法运算电路中, 若 U_{i1} 和 U_{i2} 均采用直流信号, 并选定 $U_{i2} = -1V$, 当考虑到运算放大器的最大输出幅度 $\pm 12V$ 时, $|U_{i1}|$ 的大小不应超过多少伏?

答: 联立

$$\begin{aligned} u_o &= -\frac{R_f}{R_1}(u_{i1} + u_{i2}) \\ |u_o| &< 12V \\ u_{i2} &= -1V \\ R_f &= 100k\Omega \\ R_1 &= 10k\Omega \end{aligned}$$

得

$$-0.2V < u_{i1} < 2.2V$$

所以

$$|u_{i1}| < 0.2V$$

6 实验总结

本实验中实验者掌握了集成运放的基本特性和工作原理; 熟悉了集成运放在模拟运算方面的应用; 了解了集成运算放大器的正确使用方法。实验者通过进行比例运算电路、加减运算电路、微分运算电路、积分运算电路的实验及误差分析, 对理想运放模型有了进一步认知, 学习“虚短”、“虚断在”分析中的便利与准确性, 也发现了理想运放和实际实验的微小差异。通过对反相比例运算电路和同相比例运算电路进行对比得出了电路设计思路, 即通过同相输入端与反相输入端控制电压加权正负, 通过电阻阻值控制加权, 通过反相输入端进行负反馈, 稳定输出电压。