



南京邮电大学  
Nanjing University of Posts and Telecommunications

# 电工电子实验报告

课程名称： 电工电子实验（一）  
实验项目： 集成运算放大器的线性运用

学 院： 贝尔英才学院  
班 级：  
学 号：  
姓 名：  
学 期： 2021-2022学年第1学期

## 集成运算放大器的线性运用

### 一、实验目的

- 1.熟悉用集成运算放大器构成基本运算电路的方法;
- 2.掌握比例放大器、加法器、减法器、积分器和微分器的设计方法;
- 3.掌握集成运放的正确使用方法;
- 4.掌握比例放大器、加法器、减法器、积分器和微分器的测试方法。

### 二、主要仪器设备

- 1.双踪示波器;
- 2.函数信号发生器;
- 3.直流稳压电源;
- 4.交流毫伏表;
- 5.实验箱;
- 6.万用表;
- 7.阻容元件及导线若干。

### 三、实验原理

集成运算放大器具有增益范围大,通用性强,灵活性大,体积小,寿命长,耗电省,使用方便等特点,因此应用非常广泛,由运算放大器构成的数学运算电路是运放线性应用电路之一。

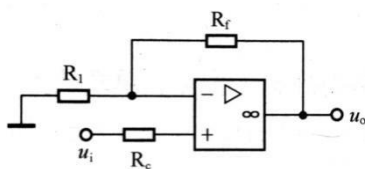


图 5.21 同相比例器

#### 1.同相比例器

如图5.21所示的同相比例器,其闭环电压增益

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_s} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (5.6.1)$$

输入电阻

$$R_i \approx \infty$$

输出电阻

$$R_o \approx 0$$

同相比例器具有输入阻抗非常高,输出阻抗很低的特点,广泛用于前置放大级,该电路的缺点是易受干扰和精度低。若 $R_f=0$ , $R_1$ 开路,则为电压跟随器,其特点是输入阻抗很高,几乎不从信号源吸取电流;输出阻抗很小,可看成电压源。

#### 2.反相比例器

如图5.22所示,在理想条件下,电路的闭环增益为

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_s} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (5.6.2)$$

$$U_o = -\frac{R_f}{R_1} U_s \quad (5.6.3)$$

输入电阻

$$R_i = R_1$$

输出电阻

$$R_o \approx 0$$

由上式可见 $R_f/R_1$ 为比例系数,若当 $R_f=R_1$ 时,则 $U_o=-U_i$ ,即输入信号与输出信号反相,所以称此电路为反相器。 $R_2=R_f//R_1$ ,用来减小输入偏置电流引起的误差。反相比例器的优点是性能稳定,缺点是输入阻抗较低。

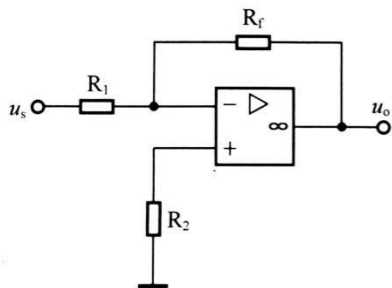


图 5.22 反相比例器

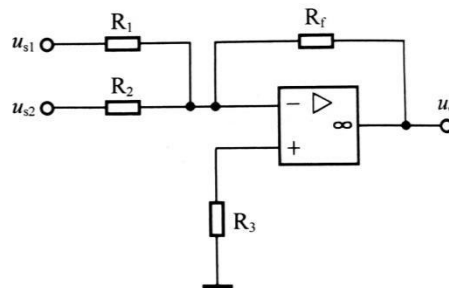


图 5.23 反相加法器

### 3.反相加法器

如图5.23所示,当运放反相输入端同时加入2个输入信号时,在理想条件下,输出电压

$$U_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}U_{S1} + \frac{R_f}{R_2}U_{S2}\right) = -\left(\frac{U_{S1}}{R_1} + \frac{U_{S2}}{R_2}\right)R_f \quad (5.6.4)$$

$$R_3 = R_f // R_1 // R_2 \quad (5.6.5)$$

故此电路称为反相加法器。

### 4.反相减法器

如图5.24所示,在运放的反相端和同相端同时分别输入 $u_{S1}$ 和 $u_{S2}$ 信号;在理想条件下

$$U_o = \frac{R_1 + R_f}{R_1} \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{S2} - \frac{R_f}{R_1} U_{S1} \quad (5.6.6)$$

$$\text{若令 } \frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \text{ 时, } U_o = \frac{R_f}{R_1} (U_{S2} - U_{S1})$$

故此电路又称减法器,其设计计算方法和反相加法器相同。

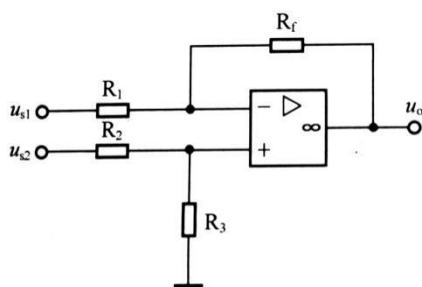


图 5.24 减法器

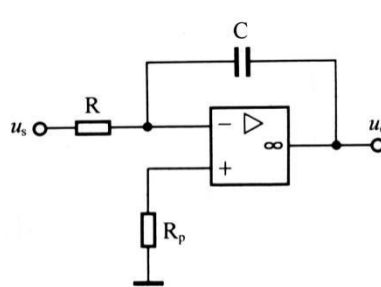


图 5.25 反相积分器

### 5.反相积分器

如图5.25所示,将积分信号输入运放的反相端,在理想条件下,如果电容的初始电压为零,则:

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_S dt = -\frac{1}{\tau} \int u_S dt \quad (5.6.7)$$

$$\text{当 } u_S \text{ 为阶跃信号时,输出电压为 } U_o = -\frac{1}{RC} U_S t = -\frac{1}{\tau} U_S t \quad (5.6.8)$$

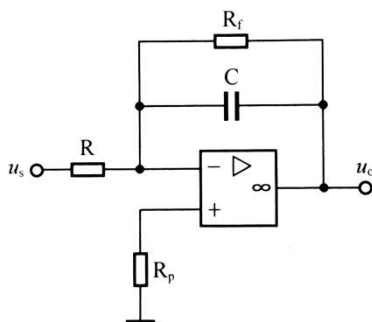


图 5.26 实际反相积分器

由上式可以看出输出电压与输入电压成正比,与积分电路的时间常数成反比。应用图5.25作积分运算时,应尽量减少由于集成运算放大器的非理想特性而引起的积分误差,使偏置电流引起的失调电压最小,为此在同相端接入平衡电阻 $R_p$ ,用于补偿偏置电流所产生的失调电流。

实际应用中,通常在积分电容两端并联一个电阻 $R_f$ (见图5.26),  $R_f$ 称分流电阻,用于稳定直流增益,以避免直流失调电压在积分周期内积累导致运放饱和,一般取 $R_f=10R$ ,  $R_p=R/R_f$

积分运算电路的积分误差除了与积分电容的质量有关,主要是集成运算放大器的参数非理想性所致。为了减少积分误差,应选用输入失调参数小、开环增益高、输入电阻高、开环带宽较宽的运算放大器。

#### (1) 确定积分时间常数

积分时间常数 $\tau$ 是决定积分器工作速度的主要参数,时间常数越小,工作速度越高,但不允许 $\tau$ 取太小,它受到运放最大输出电压 $U_{omax}$ 的限制,当输入信号为阶跃信号时,  $\tau$ 和 $U_{omax}$ 之间必须满足

$$\tau \geq \frac{U_s}{U_{omax}} t \quad (5.6.9)$$

由式(5.6.7)、(5.6.8)可知,  $\tau$ 越大,积分器的输出越小,相反 $\tau$ 越小,集成运放的输出在不到积分时间 $t$ 时将可能出现饱和现象。

当输入信号为正弦信号时:

$$U_o = -\frac{1}{\tau} \int U_{im} \sin \omega t dt = -\frac{U_{im}}{\tau \omega} \cos \omega T \quad (5.6.10)$$

为了不产生波形失真, 必须满足:  $\tau \geq \frac{U_{im}}{U_{omax} \omega}$  (5.6.11)

由式(5.6.11)可知,对于正弦输入信号的积分,时间常数 $\tau$ 的选择不仅受到集成运放最大输出电压 $U_{omax}$ 的限制,而且与信号的频率有关。

#### (2) 确定R、C

输入信号周期 $T$ 确定后,根据积分器对输入电阻的要求,先确定 $R$ ,然后计算满足 $\tau$ 的电容 $C$ ,要注意积分电容不宜过大,过大则泄漏电阻相应增大,积分误差增大,但电容过小积分漂移显著,所以积分电容取 $0.01 \sim 1 \mu F$ 。

### 6. 反相微分器

微分运算是积分运算的逆运算,反相微分器如图5.27所示,分析方法与积分运算相似,在理想条件下,如果电容的初始电压为零,则:

$$U_o = -i_{R_f} R_f = -R_f C \frac{dU_s}{dt} \quad (5.6.12)$$

可见,输出电压与输入电压对时间的微分成正比。在线性系统中,微分电路除了可以做微分运算外,还可以用作波形变换。如图5.28所示是实际的微分运算电路,为限制电路的高频电压增益,在输入端与电容 $C$ 之间接入一个小电阻 $R$

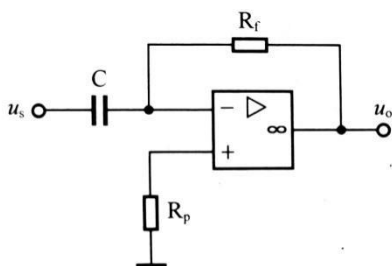


图 5.27 反相微分器

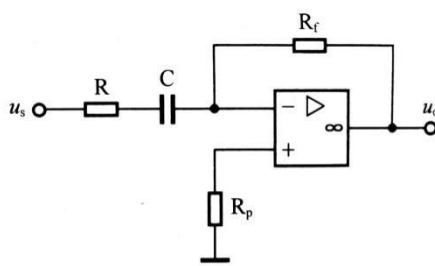


图 5.28 实际反相微分器

## 设计举例

### (一)反相加法器的设计

设计一个能完成 $U_o = -(2U_{s1} + 3U_{s2})$ 的运算电路,要求输出失调电压 $U_{OS} \leq \pm 5\text{mV}$ ,试计算各元件参数值。

根据设计要求,选择如图5.23所示的反相加法器电路。

#### 1.确定 $R_f$ 的值

查手册TL084的输入失调电流 $I_{OS} \leq 200\text{nA}$ ,取 $I_{OS} \leq 100\text{nA}$ ,则:

$$R_f = \frac{U_{OS}}{I_{OS}} = \frac{0.005}{100 \times 10^{-9}} = 50\text{k}\Omega \text{ 取 } 51\text{k}\Omega$$

#### 2.确定 $R_1$ 、 $R_2$ 的值

按式(5.6.4)计算 $R_1 = \frac{R_f}{A_{uf1}} = \frac{51}{2} = 25.5\text{k}\Omega$ , 取标称值 $24\text{k}\Omega$

$R_2 = \frac{R_f}{A_{uf2}} = \frac{51}{3} = 17\text{k}\Omega$ , 取标称值 $18\text{k}\Omega$

#### 3.确定 $R_3$ 的值

按式(5.6.5)计算 $R_3 = R_f // R_1 // R_2 = 8.56\text{k}\Omega$ ,取标称值 $8.2\text{k}\Omega$ 。

### (二)反相积分器设计

设计一个反相积分器,电路如图5.26所示,已知输入脉冲方波的幅度为 $2\text{V}$ ,周期 $T$ 为 $5\text{ms}$ ,积分输入电阻 $R_i > 10\text{k}\Omega$ ,要求设计计算元件参数。

查手册TL084运放的最大输出电压可取 $\pm 10\text{V}$ ,积分时间 $t = T/2 = 2.5\text{ms}$

由式(5.6.9),确定积分时间常数为:

$$\tau \geq \frac{U_s}{U_{Omax}} t = \frac{2\text{V}}{10\text{V}} \times 2.5 = 0.5\text{ms}$$

取 $\tau = 1\text{ms}$

为满足输入电阻 $R_i > 10\text{k}\Omega$ ,取 $R_i = 10\text{k}\Omega$ ,取标称值 $10\text{k}\Omega$ ,

则积分电容 $C = \tau/R = 0.1\mu\text{F}$

$R_f = 10R_i = 100\text{k}\Omega$ ,取标称值 $100\text{k}\Omega$

平衡电阻 $R_p = R // R_f = 9\text{k}\Omega$ ,取标称值 $9.3\text{k}\Omega$ 。

## 四、实验内容

按下列表达式设计计算电路元件参数。

### 3. 反相加法器:

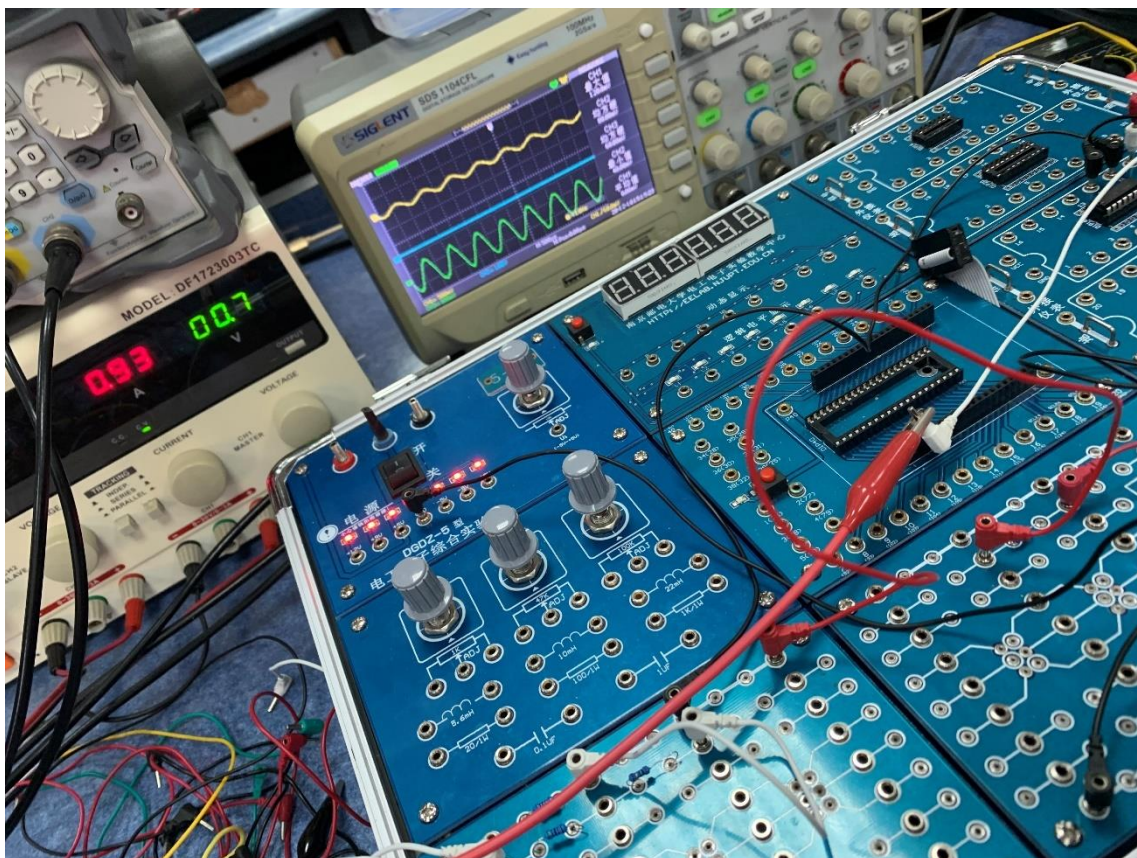
$U_o = -(2U_{s1} + 5U_{s2})$ , 输入阻抗 $R_i = 1\text{k}\Omega$ 。

5. 设计一个满足下列要求的基本积分电路:输入为 $U_{sp-p} = 1\text{V}$ 、 $f = 10\text{kHz}$ 的方波(占空比为50%), 积分输入电阻 $R_i > 10\text{k}\Omega$ 。

### 实验内容:

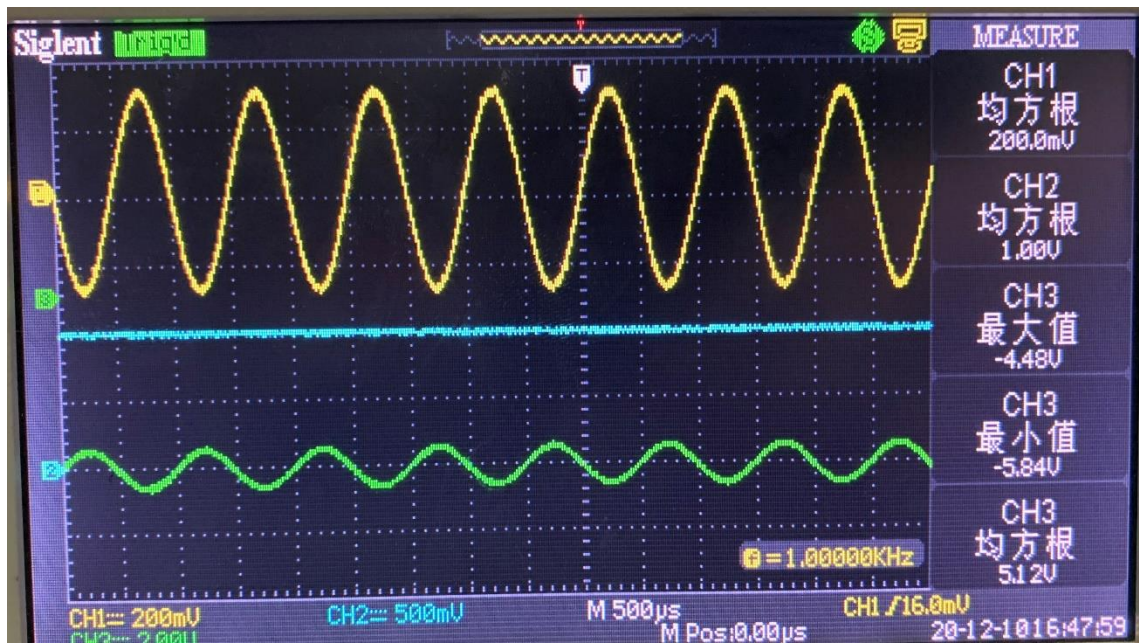
1. 根据设计任务3、5的要求, 选定电路方案, 计算并选取元件参数, 画出电路图。
2. 根据所设计的电路图用仿真软件进行仿真并记录仿真结果, 如果仿真结果不满足设计要求, 须适当调整电路参数。
3. 反相比例器的调测要求: 输入信号是频率为1kHz、有效值为0.1V的正弦信号, 用示波器观测并记录输入和输出波形, 标出其幅值、周期和相位关系, 将测试结果与设计要求进行比较。
4. 反向加、减法器的调测要求: 输入信号us1是频率为1000Hz、有效值为0.2V的正弦信号, 输入信号US2是幅值为1V的直流信号, 用示波器观察并记录输入和输出波形, 标出其幅值、周期和相位关系, 将测试结果与设计要求进行比较。
5. 积分器的调测要求: 输入信号是频率为10kHz、峰峰值为1V的方波信号, 用示波器观测并记录输入和输出波形, 标出其幅值、周期和相位关系, 将测试结果与设计要求进行比较。

### 测量电路及测量结果

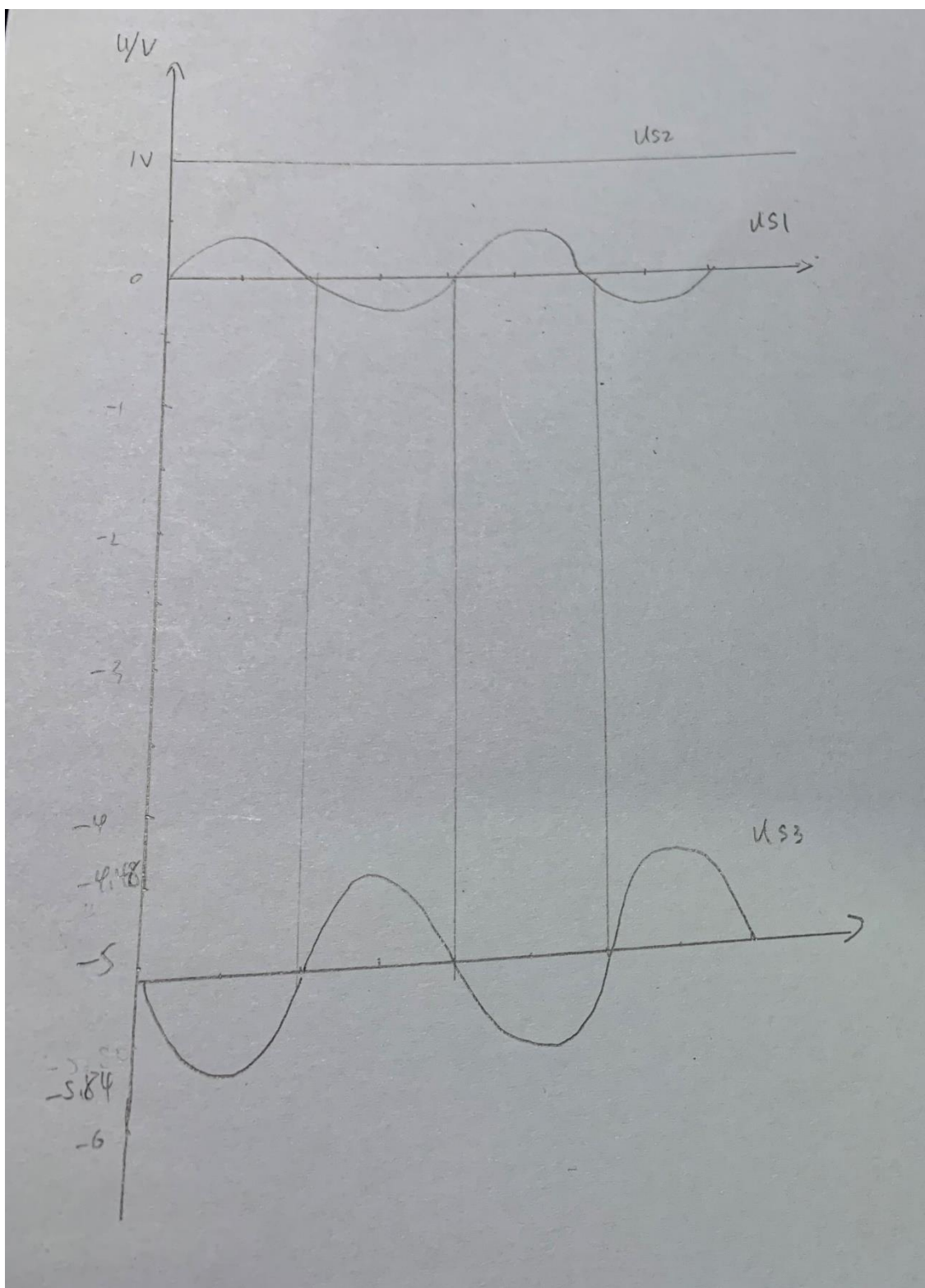


现场操作图



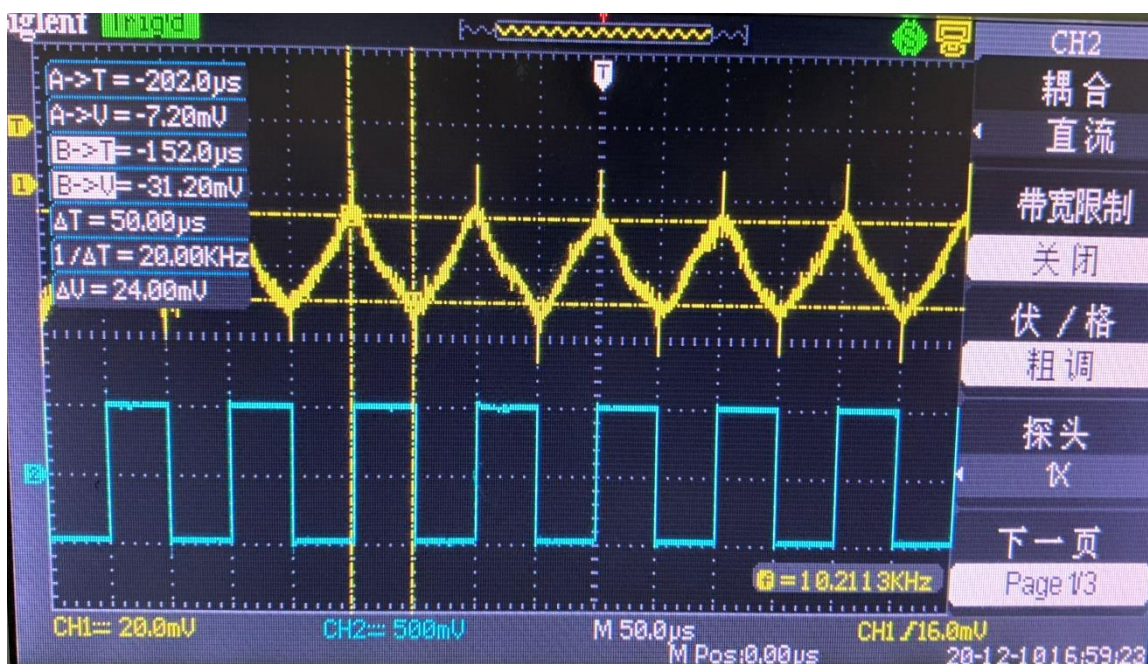


反向加法器示波图

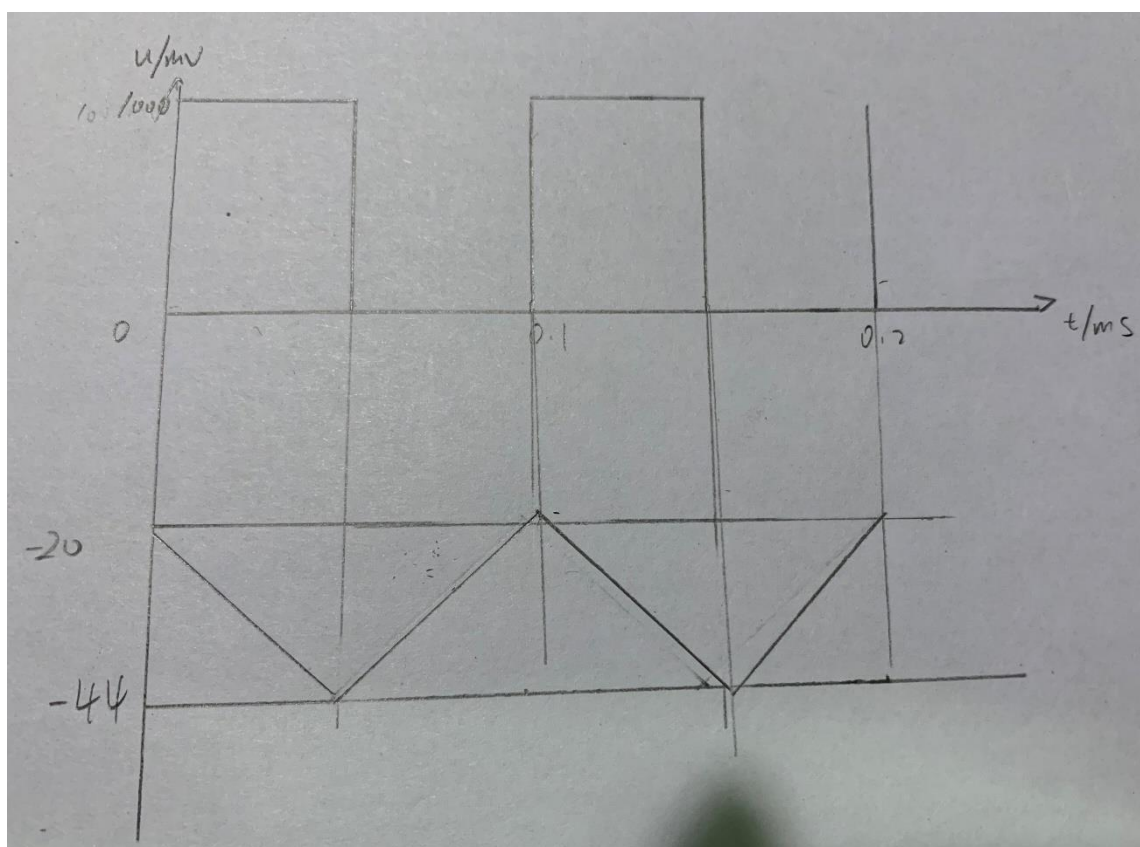


反向加法器手绘图





反向积分器示波图



反向积分器手绘图

## 五、实验小结

自己利用集成运算放大器构建反向放大器和反向积分器，对集成运放有了更深的认识。