



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)

实验名称: 集成运算放大器的线性应用

学 院: 集成电路科学与工程学院
(产教融合学院)

班 级: B240305

学 号: B24030513

姓 名: 李宝宣

指导教师: 郑开来

学 期: 2025-2026 学年第 一 学期

实验名称

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、主要仪器设备及软件

硬件：1.示波器 2.函数信号发生器 3.直流稳压电源 4.实验箱 5.台式万用表 6.阻容元件及导线若干

软件：Multisim 14.3

三、实验原理（或设计过程）

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。

1.同相比例器

如图 1 所示的同相比例器，其闭环电压增益：

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_S} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

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，几乎不从信号源吸收电流；输出阻抗很小，可看成电压源。

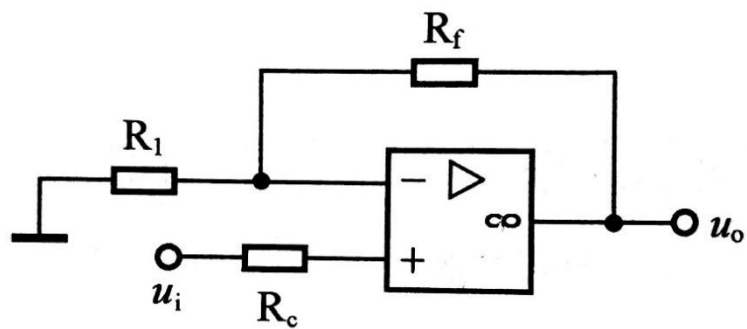


图 1 同相比例器

2.反相比例器

如图 2 所示，在理想条件下，电路的闭环增益为：

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_S} = -\frac{R_f}{R_1}$$

$$U_o = -\frac{R_f}{R_1} U_S$$

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 $U_S=-U_o$ ，即输入信号与输出反相，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。

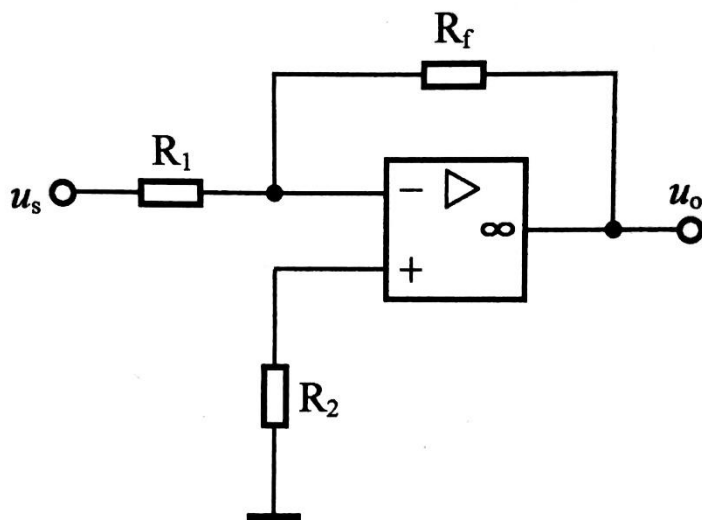


图 2 反相比例器

3.反相加法器

如图 3 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

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

$$R_3 = R_f // R_1 // R_2$$

故此电路称为反相加法器

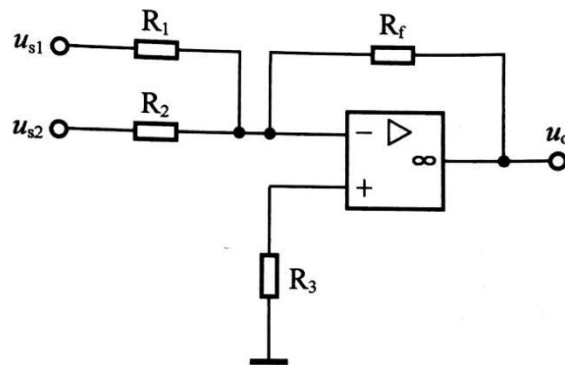


图 3 反相加法器

4.反相积分器

如图 4 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：

$$u_O = -\frac{1}{RC} \int u_S dt = -\frac{1}{\tau} \int u_S dt$$

当 u_S 为阶跃信号时，输出电压为

$$U_O = -\frac{1}{RC} U_{St} = -\frac{1}{\tau} U_{St}$$

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。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。

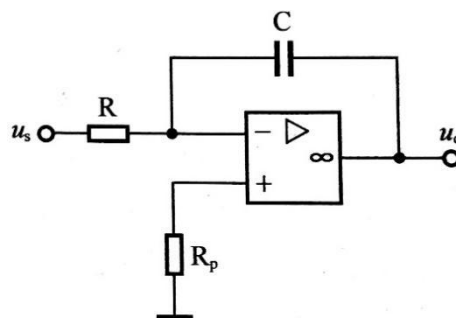


图 4 反相积分器

实际应用中，通常在积分电容两端并联一个电阻 R_f ，如图 5 所示， 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。

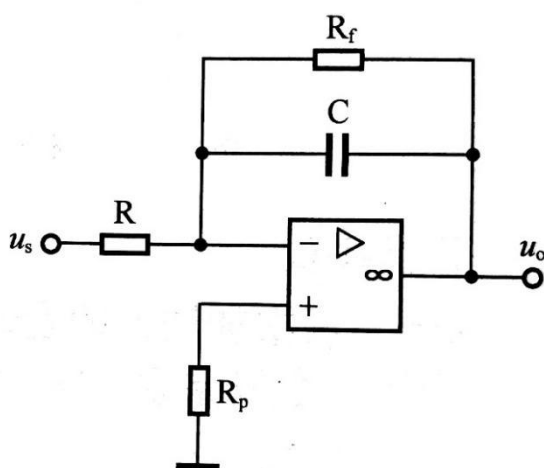


图 5 实际反相积分器

(1) 确定积分时间常数

积分时间常数 τ 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 τ 不允许取太小，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， τ 和 U_{omax} 之间必须满足

$$\tau \geq \frac{U_s}{U_{omax}} t$$

τ 越大，积分器的输出越小，相反 τ 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，

$$U_o = -\frac{1}{\tau} \int U_{im} \sin \omega t dt = -\frac{U_{im}}{\tau \omega} \cos \omega t$$

为了不产生波形失真，必须满足：

$$\tau \geq \frac{U_{im}}{U_{omax} \omega}$$

对于正弦输入信号的积分，时间常数 τ 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 τ 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 $0.01\sim 1\mu\text{F}$ 。

四、实验电路图

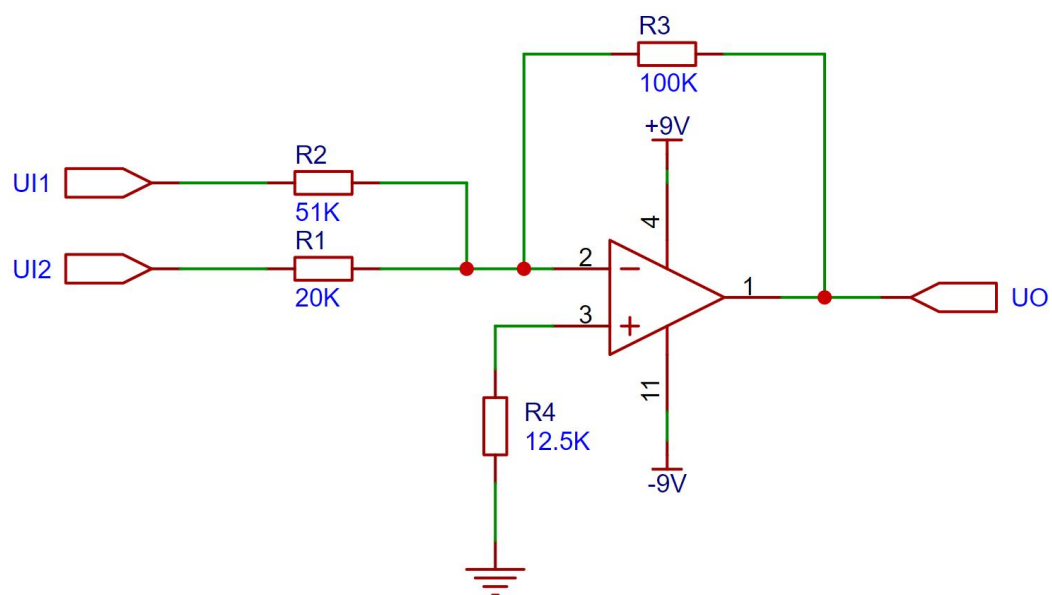


图 6 反相加法器实验电路图

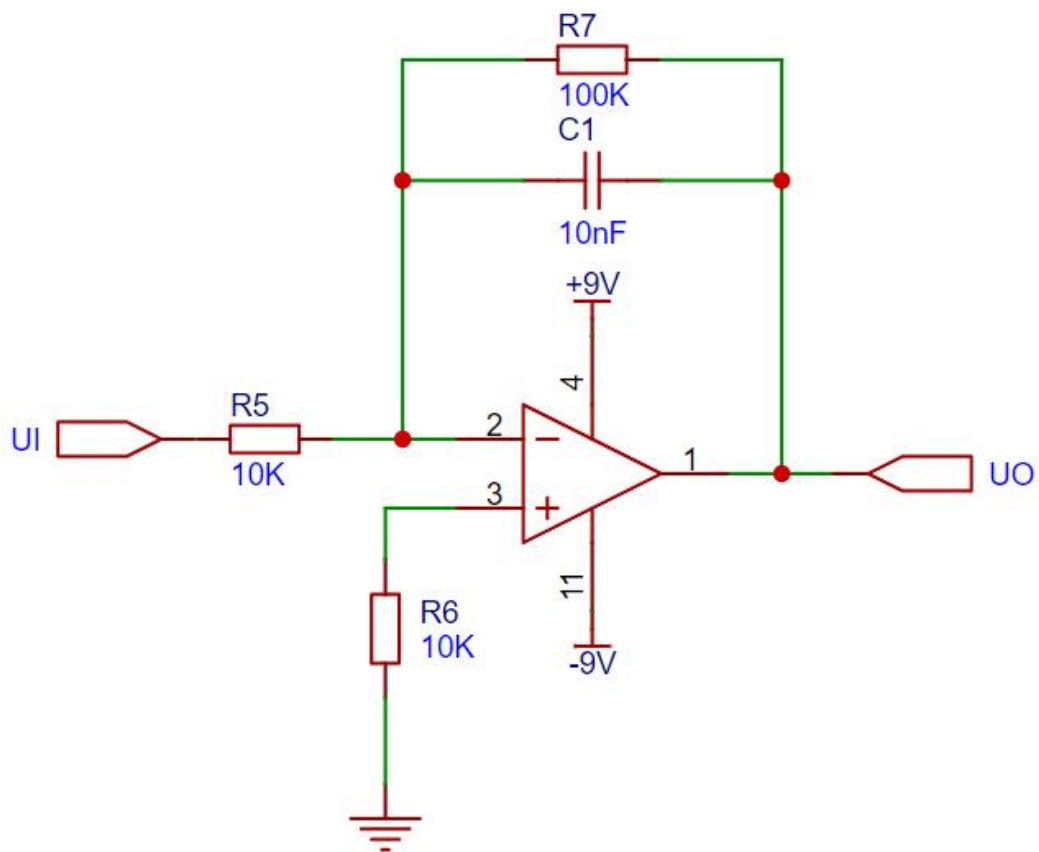


图 7 反相积分器实验电路图

五、实验内容和实验结果

1. 运算放大器的好坏检测方法。

TL084 运算放大器接成射级跟随器电路，如果在动态范围以内，输出电压 U_o 随着 U_i 的变化而变化，则运放是好的，否则运放是坏的。

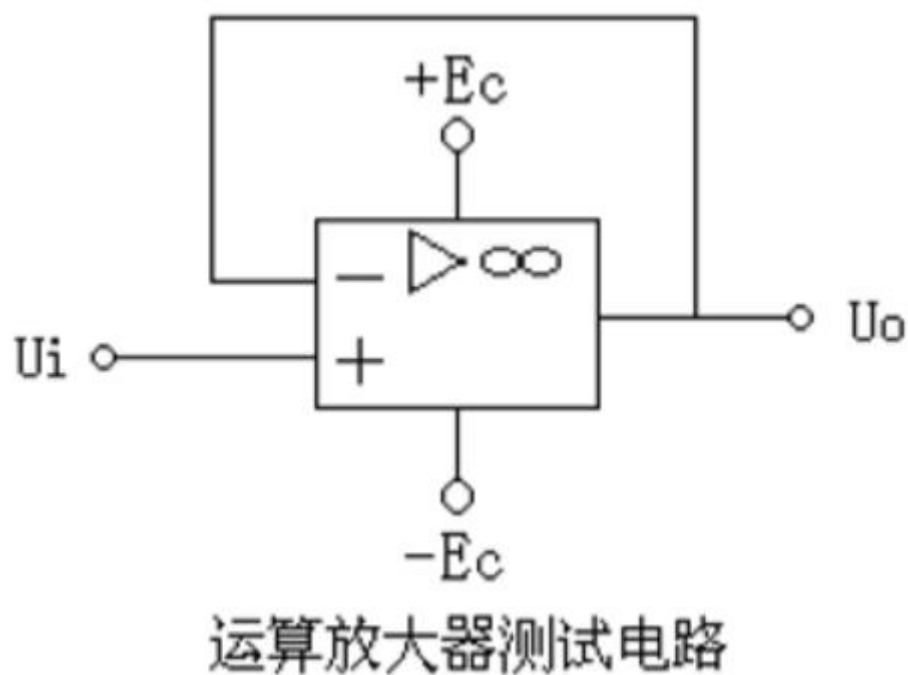


图 8 运算放大器测试电路

2.要求设计一个满足下列条件的反相加法器： $U_o=-(2U_{s1}+5U_{s2})$ ，输入阻抗 $R_{i1} \geq 5k\Omega$ ， $R_{i2} \geq 5k\Omega$ 。

根据设计要求，电路中的电阻应满足：

$$\frac{R_f}{R_1}=2$$

$$\frac{R_f}{R_2}=5$$

同时为了保证输入、输出阻抗符合需求，不妨取 $R_1=50k\Omega$ （取标称值 $51k\Omega$ ）， $R_2=20k\Omega$ ， $R_f=100k\Omega$ ， $R_p=R_f//R_1//R_2=12.5k\Omega$ （取标称值 $10k\Omega$ ）。

输入信号 u_{s1} 为频率为 $1kHz$ ，有效值为 $0.2V$ 的正弦信号，输入信号 U_{s2} 为幅值为 $0.5V$ 的直流信号，波形和数据记录如下：

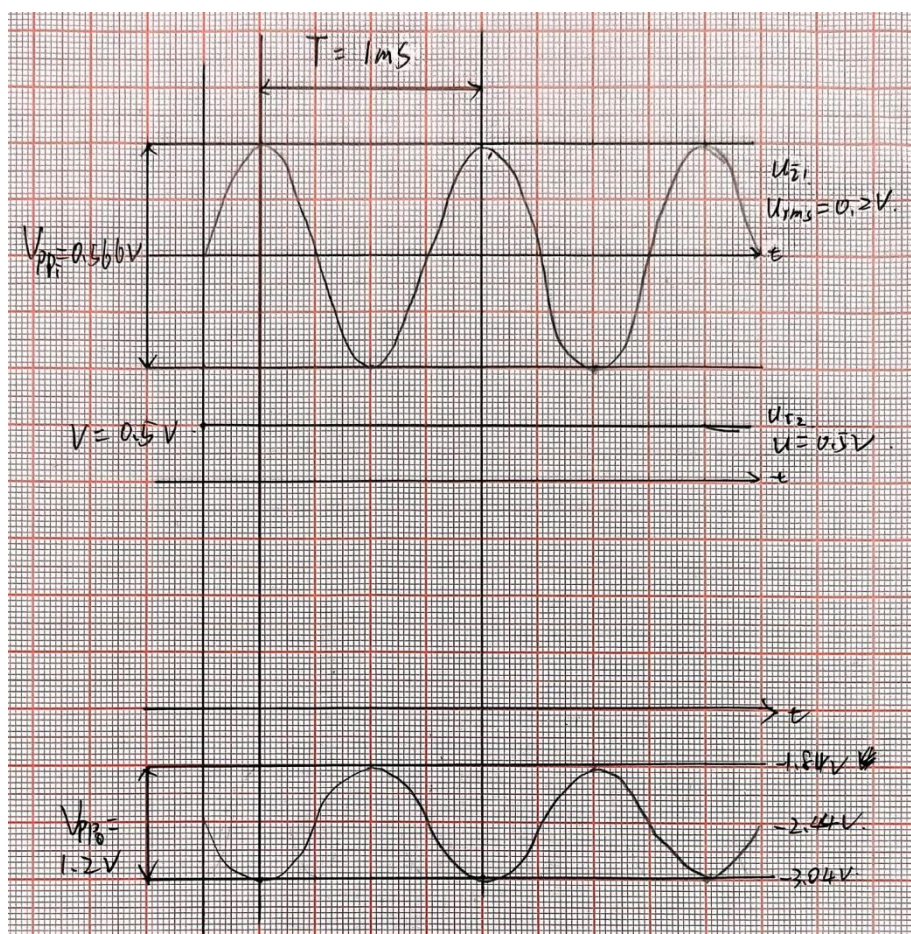


图 9 反相加法器实验波形与数据

输出波形理论计算如下：

已知：

$R_3=100\text{k}\Omega$ 、 $R_2=51\text{k}\Omega$ 、 $R_1=20\text{k}\Omega$

U_{i1} : 1 kHz 正弦, 有效值 0.2 V

U_{i2} : 直流, 幅值 0.5 V (即 +0.5 V)

反相加法器输出：

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

(1) 由 U_{i1} 产生的交流分量

$$A_{v1} = -\frac{R_3}{R_2} = -\frac{100}{51} \approx -1.9608$$

U_{i1} 的峰值：

$$U_{i1,pk} = 0.2\sqrt{2} \approx 0.2828 \text{ V}$$

输出交流峰值：

$$U_{o,pk(ac)} = |A_{v1}|, U_{i1,pk} \approx 1.9608 \times 0.2828 \approx 0.554 \text{ V}$$

所以交流峰峰值:

$$U_{o,pp} = 2U_{o,pk(ac)} \approx 2 \times 0.554 = 1.108 \text{ V}$$

(2)由 U_{i2} 产生的直流分量 (平均值)

$$U_{o,dc} = -\frac{R_3}{R_1} U_{i2} = -\frac{100}{20} \times 0.5 = -2.5 \text{ V}$$

正弦平均值为 0, 因此输出平均值就是直流分量:

$$\overline{U_o} = -2.5 \text{ V}$$

(3)输出波形

$$U_o(t) = -2.5 - 0.554 \sin(2\pi \cdot 1000t) \text{ V}$$

因此:

最高值

$$U_{o,\max} = -2.5 + 0.554 = -1.946 \text{ V}$$

最低值

$$U_{o,\min} = -2.5 - 0.554 = -3.054 \text{ V}$$

结论:

输出峰峰值: $U_{opp} \approx 1.11 \text{ V}$

输出平均值: $\overline{U_o} \approx -2.50 \text{ V}$

实验数据表格如下:

	u_{i1}	u_{i2}	u_o
顶端值(V)	0.283		-1.839
底端值(V)	-0.283		-3.045
平均值(V)		0.500	-2.438
峰峰值(V)	0.566		1.206

表 1 反相加法器实验数据表格

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

根据设计要求, 时间常数 τ 应满足:

$$\tau \geq \frac{U_s}{U_{omax}} t \approx \frac{1}{10} \times 50 \mu s = 5 \mu s$$

当取 $R=10k\Omega$, $\tau=5\mu s$ 时, 由 $\tau=RC$ 可得, $C=0.0005\mu F$, 取标称值 $0.01\mu F$ 。 $R_f=10R=100k\Omega$ 。

$R_p=R/R_f=9.09k\Omega$ (取标称值 $10k\Omega$) 。

波形记录如下:

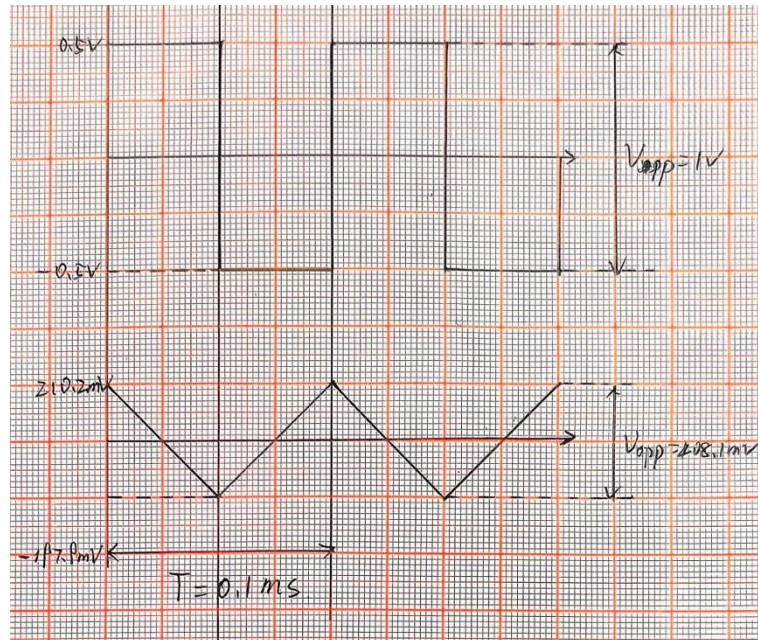


图 10 反相积分器的实验波形

输出波形理论计算如下:

输入电阻 $R_5 = 10 k\Omega$

反馈电容 $C_1 = 10 nF$

并联泄放电阻 $R_7 = 100 k\Omega$ (用于直流稳定)

输入信号为对称方波

峰峰值 $V_{pp} = 1 V$

频率 $f = 10 kHz$

因此输入电压幅值 $V_{in} = \pm 0.5 V$

周期 $T = 1 / f = 100 \mu s$

半周期 $T / 2 = 50 \mu s$

电路的时间常数为:

$$\tau = R_7 \times C_1 = 100 k\Omega \times 10 nF = 1 ms$$

由于 $\tau = 1 ms$ 远大于信号周期 $T = 100 \mu s$,

因此在 $10 kHz$ 时, 该电路可以近似看作理想反相积分器。

理想反相积分器的输出斜率为：

$$dV_o / dt = - V_{in} / (R_5 \times C_1)$$

$$R_5 \times C_1 = 10\text{ k}\Omega \times 10\text{ nF} = 1 \times 10^{-4}\text{ s}$$

输出电压变化斜率的绝对值为：

$$|dV_o / dt| = 0.5 / (1 \times 10^{-4}) = 5000\text{ V/s}$$

在一个半周期 $T / 2 = 50\text{ }\mu\text{s}$ 内，

输出电压变化量为：

$$\Delta V_o = 5000 \times 50 \times 10^{-6} = 0.25\text{ V}$$

输出波形为以 0 V 为中心的对称三角波。

输出峰峰值为：

$$V_{o,pp} \approx 0.25\text{ V}$$

输出最大值：

$$V_{o,max} = + V_{o,pp} / 2 = +0.125\text{ V}$$

输出最小值：

$$V_{o,min} = - V_{o,pp} / 2 = -0.125\text{ V}$$

	顶端值	底端值	峰峰值
u_o	128mV	-123mV	251mV

表 2 反相积分器实验数据记录表格

六、结果分析

(1) 反相加法器结果分析

根据设计要求，反相加法器需满足

$$U_o = - (2U_{s1} + 5U_{s2})$$

实验中选取的电阻参数满足理论比例关系，保证了输入阻抗和输出幅度的要求。

从实验结果可以看出：

- 输出波形形态与理论分析一致，为叠加了直流分量的反相正弦波；
- 实测输出的最大值、最小值、平均值和峰峰值与理论计算值较为接近；
- 输出存在一定偏差，主要原因包括：
 - 运算放大器存在输入失调电压和偏置电流；
 - 电阻元件存在标称误差；

- 示波器读数及实验环境噪声的影响。

总体来看，反相加法器实现了预期的加权求和功能，实验结果验证了设计的正确性。

(2) 反相积分器结果分析

反相积分器以峰峰值为 1 V、频率为 10 kHz 的对称方波作为输入信号，理论分析表明在所选参数下，电路工作在良好的积分状态，输出应为对称三角波。

实验结果表明：

- 输出波形确实为以 0 V 为中心的三角波，符合积分器特性；
- 实测输出峰峰值约为 251 mV，与理论计算的 0.25 V 基本一致；
- 实测最大值约为 +128 mV，最小值约为 -123 mV，与理论值 ± 0.125 V 非常接近。
- 输出幅值存在微小不对称，主要原因可能是运放失调电压、器件参数误差以及实验中供电电压波动等因素的影响。但总体误差较小，说明积分器参数设计合理，电路工作稳定。

七、实验小结

通过本次集成运算放大器线性应用实验，加深了对运算放大器基本工作原理及其典型应用电路的理解，取得了以下收获：掌握了同相比值器、反相比值器、反相加法器和反相积分器的基本设计方法和参数选择原则；熟悉了运算放大器在实际应用中偏置电流、失调电压等非理想因素对电路性能的影响；学会了利用示波器和信号发生器对运放电路进行测试和波形分析；理论计算结果与实验测量结果基本一致，验证了所学理论的正确性。同时，实验中也发现了一些问题，例如元件误差和运放非理想特性会对输出造成一定影响在今后的实验中，可以通过选用精度更高的电阻、性能更优的运算放大器以及合理调整参数来进一步减小误差，提高实验结果的准确性。总体而言，本次实验达到了预期目的，提高了对运算放大器线性应用电路的分析能力和实际动手能力，为后续电子电路课程和实验奠定了良好基础。