浙江大学实验报告

专业：
姓名：
学号：
日期：2026 年 5 月 11 日
地点：东 3-308

课程名称：电工电子学实验　指导老师：　成　绩：
实验名称：模拟信号运算电路　实验类型：验证型　学　期：25-26 春夏

一、实验目的和要求　二、实验内容和原理
三、主要仪器设备　四、实验数据记录和处理
五、实验结果与分析　六、讨论、心得

一、 实验目的和要求

(1) 了解集成运算放大器的外引线、同相端、反相端和输出端的基本使用方法。

(2) 掌握由集成运算放大器构成的同相比例、反相加法、减法和积分运算电路的基本工作原理。

(3) 按实验箱实物电路完成接线，用函数信号发生器提供输入信号，用数字示波器观察输入、输出波形及电压传输特性。

(4) 根据示波器截图中的可见读数和波形形态判断电路功能是否正确，并分析限幅、相位关系和积分频率响应等现象。

二、 实验内容和原理

1.集成运算放大器的基本特性

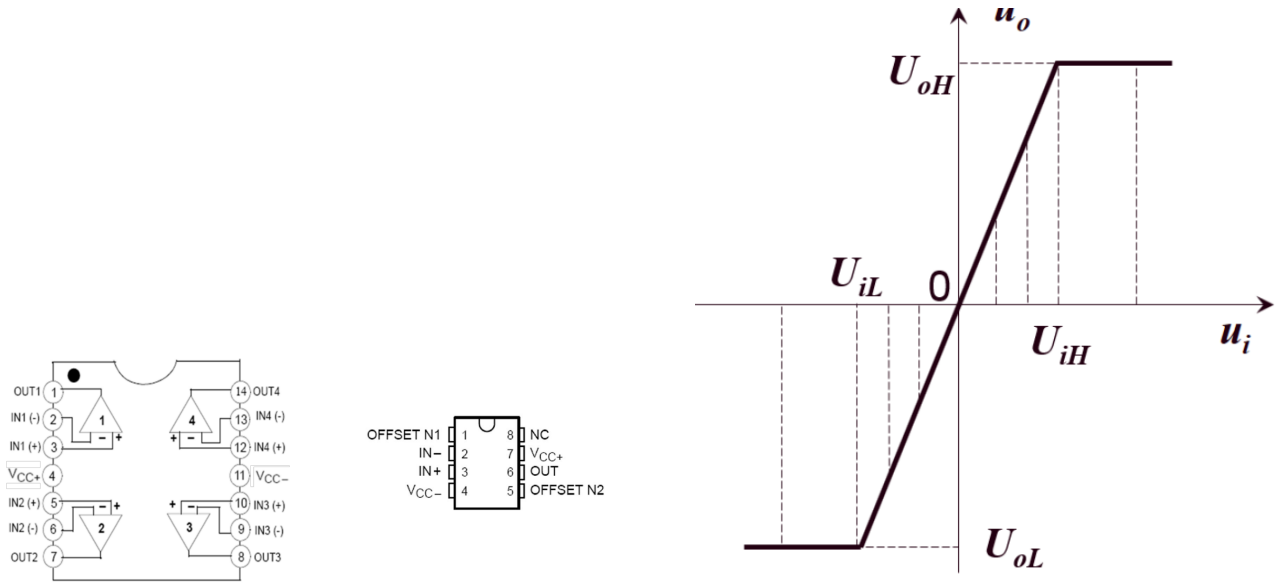
本实验使用集成运算放大器模块完成闭环运算电路。理想运算放大器的主要特性为

$$A_{od} \to \infty, \qquad R_{id} \to \infty, \qquad R_{od} \to 0, \qquad K_{CMR} \to \infty.$$

接入负反馈后，运放工作在线性区时可近似满足

$$u_+ \approx u_-, \qquad i_+ \approx i_- \approx 0.$$

当输出达到电源所允许的极限值时，输出进入正、负饱和区，输入输出关系不再保持线性。



(a) LM324 与 uA741 引脚示意

(b) 电压传输特性

Figure 1: 集成运算放大器基本原理

2.同相输入比例运算电路

同相输入比例运算电路中，输入信号加在同相端，输出经反馈电阻回到反相端。理想条件下，

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i, \qquad A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}.$$

课件电路中 $R_f = 100\,\mathrm{k}$ 、$R_1 = 10\,\mathrm{k}$ ，故理论线性放大倍数为 $A_v = 11$。若输入幅度过大，理论输出将超过运放供电范围，实际波形会出现限幅或削顶。

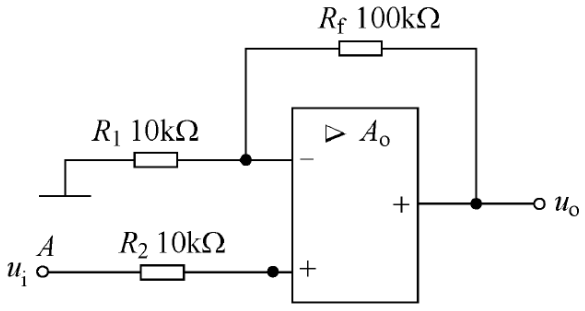


Figure 2: 同相输入比例运算电路

3.反相加法、减法和积分运算电路

反相加法电路将两个输入信号经电阻接入反相端，同相端接参考电位。理想条件下输出为

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}u_{i1} + \frac{R_f}{R_2}u_{i2}\right).$$

当 $R_f = 100\,\mathrm{k}$ 、$R_1 = R_2 = 10\,\mathrm{k}$ 时，两个输入均按 10 倍权重参与反相求和。

减法电路在 $R_1 = R_2$、$R_f = R_3$ 时可实现两个输入信号的差值放大：

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

课件电路中 $R_f = R_3 = 100\,\mathrm{k}$ 、$R_1 = R_2 = 10\,\mathrm{k}$ ，理论差模放大倍数为 10。

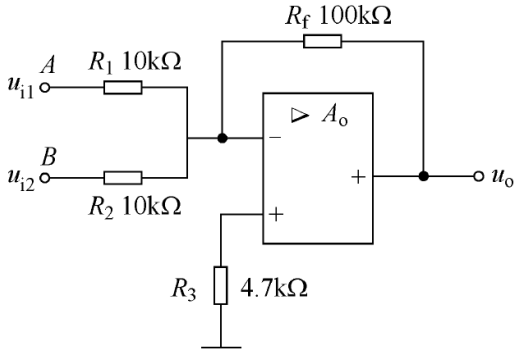
积分运算电路以电容作为反馈元件。开关 K 断开且初始电压为零时，

$$u_o = -\frac{1}{R_1 C}\int u_i\,dt.$$

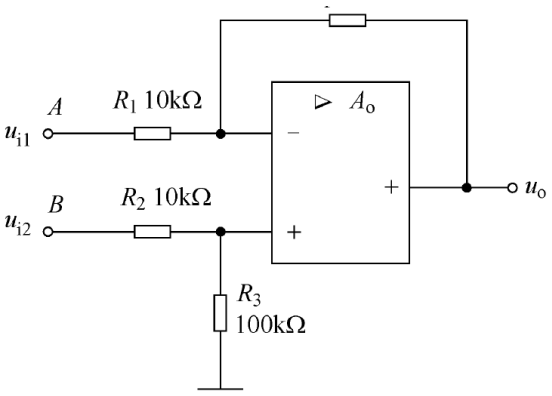
开关 K 闭合时，若输入角频率满足

$$\omega \gg \frac{1}{R_2 C},$$

电路仍近似为积分器；方波输入时输出应接近三角波，且输出幅值随频率升高而减小。



(a) 反相加法运算电路



(b) 减法运算电路

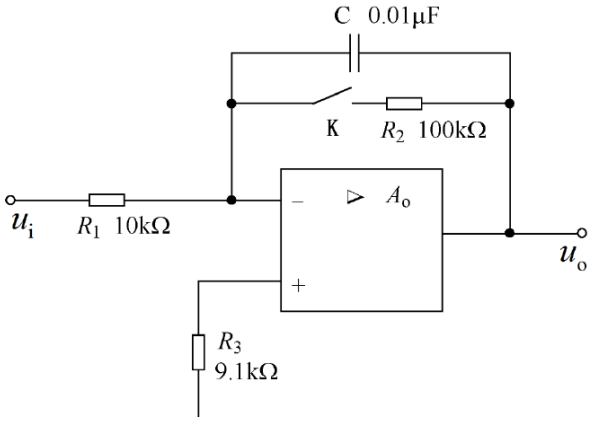


Figure 3: 加法、减法和积分运算电路原理图

三、 主要仪器设备

Table 1: 实验仪器与器件

序号	名称	数量
1	模拟电子技术实验箱，含集成运算放大器模块及直流电源	1
2	集成运算放大器芯片/模块	1
3	数字示波器	1
4	函数信号发生器	1
5	数字式万用表、连接导线及电阻、电容等元件	若干

四、 实验数据记录和处理

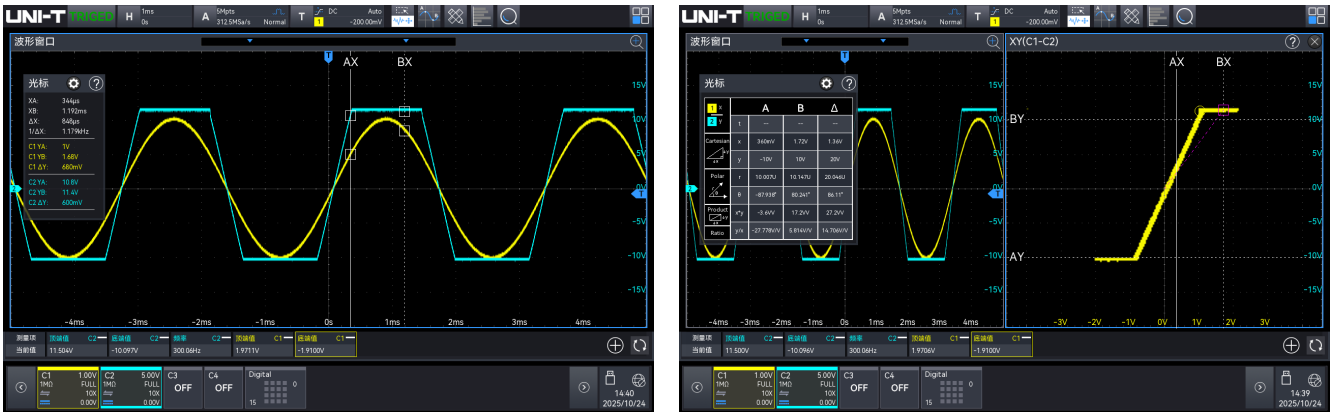
1.同相比例运算电路

按课件要求接好同相比例运算电路，输入峰值约为 2 V、频率约为 300 Hz 的正弦波。示波器 YT 模式下，CH1 接输入 u_i，CH2 接输出 u_o；再切换到 X-Y 模式观察电压传输特性。

Table 2: 同相比例运算电路示波器读数

项目	顶端值	底端值	峰峰值	频率
输入信号 C1	1.9706 V	−1.9100 V	3.8806 V	–
输出信号 C2	11.500 V	−10.096 V	21.596 V	300.06 Hz

由 X-Y 模式截图的光标读数可见 $\Delta x = 1.36\,\mathrm{V}$、$\Delta y = 20\,\mathrm{V}$，对应比例读数约为 $14.706\,\mathrm{V/V}$。实测比例约 14.7，与理论值 11 相比偏大约 34%。我认为主要原因可能是 X-Y 模式下选取光标时没有完全避开限幅边缘，读到的 Δy 接近输出平台附近，而这一区域已经不是理想线性段，等效斜率会被估得偏大；另外示波器探头补偿和零位校准也会带来一定误差，实验箱上的电阻实际值与标称值之间也可能有偏差。图中曲线两端出现平台，说明输出存在限幅现象。



(a) YT 模式输入与输出波形　　(b) XY 模式电压传输特性

Figure 4: 同相比例运算电路实验记录

2.反相加法运算电路

按课件要求，A 端输入峰值约为 0.5 V、频率为 1 kHz 的方波，B 端输入峰值约为 0.2 V、频率为 1 kHz 的三角波，方波超前三角波 90°。示波器中 CH1 为 u_{i1}，CH2 为 u_{i2}，CH3 为输出 u_o。记录波形如下。



Figure 5: 反相加法运算电路示波器波形

由电阻比可得本电路理论关系为 $u_o = -(10u_{i1} + 10u_{i2})$，因此输出应是两路输入的反相加权叠加。实验中一路为方波、一路为三角波，叠加后输出波形不是单纯的方波或三角波，而是在方波电平切换的基础上叠加了随三角波缓慢变化的斜边。由于前面带有负号，输出的主要跳变方向与输入方波相反，三角波分量也表现为反相后的斜率变化，这与示波器中 CH3 的形态基本一致。

3.减法运算电路

按课件要求，A 端输入峰值约为 3 V、频率为 1 kHz 的正弦波，B 端输入峰值约为 2 V、频率为 1 kHz 的同相位正弦波。示波器中 CH1 为 u_{i1}，CH2 为 u_{i2}，CH3 为输出 u_o。记录波形如下。

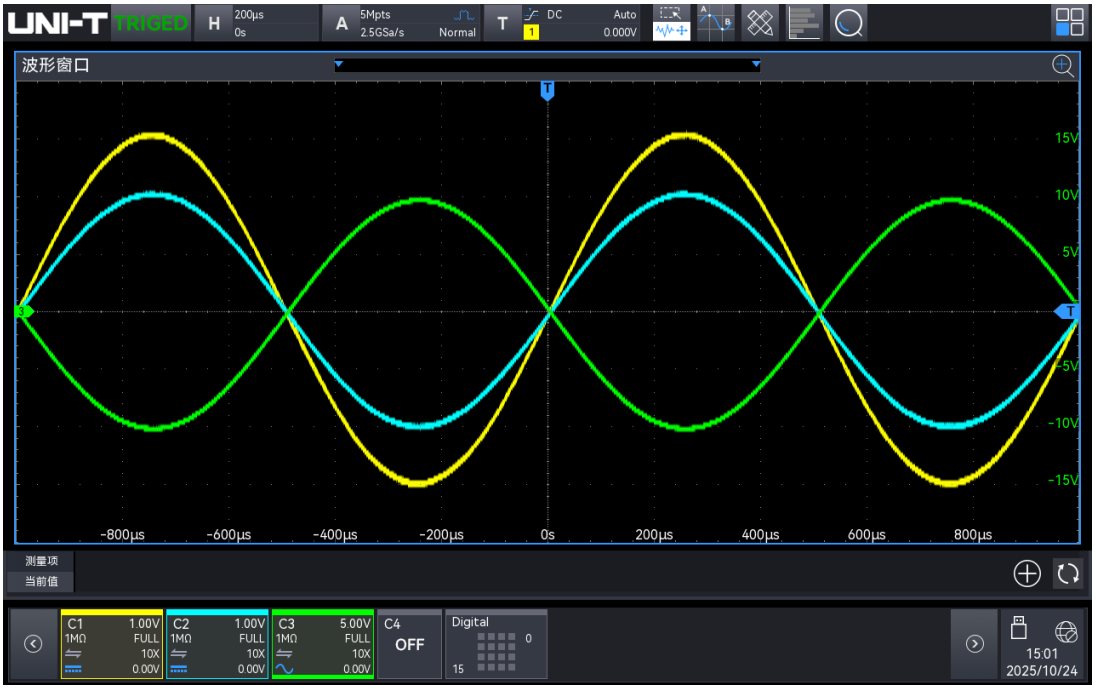
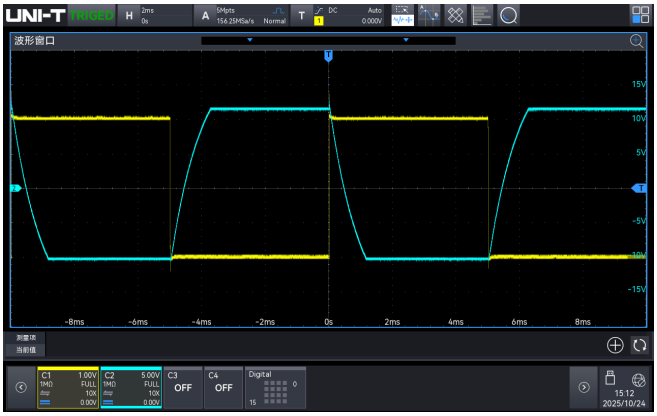


Figure 6: 减法运算电路示波器波形

本次减法电路中 u_{i1} 峰值约为 3 V，u_{i2} 峰值约为 2 V，且两路输入同相位，理论输出峰值为 $10\times(2-3)=-10\,\mathrm{V}$，即峰峰值约为 20 V。从示波器截图看，CH3 的量程为 5.00 V/div，输出波形大约跨越四个大格，估读峰峰值接近 20 V，与理论计算基本吻合。两路输入同相位时，电路先取差值再放大，所以输出只对应两者幅值差；同时输出相对于较大的 u_{i1} 呈反相，这也符合减法电路的特性。

4.积分运算电路

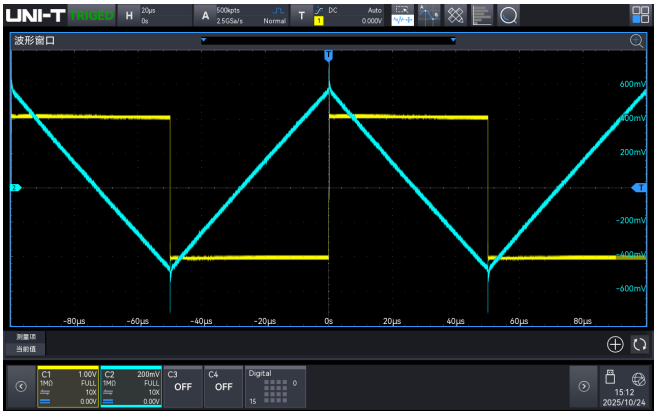
按课件要求，开关 K 闭合，输入峰值约为 2 V 的方波。先取频率 1 kHz 观察输入、输出波形，再改为 100 Hz 和 10 kHz 进行比较。示波器中 CH1 为输入 u_i，CH2 为输出 u_o。记录波形如下。



(a) 100 Hz



(b) 1 kHz



(c) 10 kHz

Figure 7: 积分运算电路不同频率下的波形

由图中 10 kHz 子图可见，输出仍接近三角波，不过幅值比 100 Hz 和 1 kHz 时明显减小。由 $R_1 = 10\,\mathrm{k}$、$C = 0.01\,\mu\mathrm{F}$ 可得积分时间常数 $\tau = R_1 C = 0.1\,\mathrm{ms}$，而 10 kHz 对应周期 $T = 0.1\,\mathrm{ms}$，二者已经在同一量级，单个周期内电容充放电时间有限，所以输出摆幅变小，这一点和我调高频率时看到的变化一致。

五、 实验结果与分析

Table 3: 各运算电路实验结果

电路	理论关系	实验现象
同相比例运算电路	$u_o = \left(1 + \dfrac{R_f}{R_1}\right) u_i$，理论 $A_v = 11$	输入峰峰值 3.8806 V，输出峰峰值 21.596 V；X-Y 图读得约 14.706 V/V，输出端有一定限幅。
反相加法运算电路	$u_o = -\left(\dfrac{R_f}{R_1}u_{i1} + \dfrac{R_f}{R_2}u_{i2}\right)$	0.5 V 方波与 0.2 V 三角波均按约 10 倍权重参与叠加，输出呈反相后的方波跳变并叠加三角波斜边。
减法运算电路	$u_o = \dfrac{R_f}{R_1}(u_{i2} - u_{i1})$	u_{i1}、u_{i2} 峰值分别约为 3 V、2 V 且同相位，理论输出峰峰值约 20 V；CH3 按 5.00 V/div 估读与之接近。
积分运算电路	$u_o = -\dfrac{1}{R_1 C}\int u_i\, dt$	$C = 0.01\,\mu$F、$R_1 = 10$ k，方波输入时输出近似三角波；由 100 Hz 升至 1 kHz、10 kHz 时，输出幅值逐渐减小。

误差主要来自运放非理想特性、元件标称值偏差、示波器读数误差以及接线接触不良等因素。总体来看，各电路的输出波形与课件中要求观察的功能相符。

六、 讨论、心得

本次实验中我对运放电路的接线顺序有了更具体的体会。实际搭电路时，如果先接输入信号而忽略正负电源和反馈支路，示波器上很容易出现一直贴在上、下限附近的异常波形，所以后面我基本按电源、地线、反馈网络、输入端的顺序检查。做同相比例电路时，X-Y 模式下光标放在限幅边缘会明显影响斜率估计，这一点在读数后才发现。积分电路调到不同频率时，三角波幅值随频率升高而变小的现象比较直观，也让我意识到实际电容充放电时间会直接影响运算结果，不能只看理想公式。