

浙江大学实验报告

专业：信息工程
姓名：胡东东
学号：3240102873
日期：2025 年 12 月 22 日
地点：东 4-216

课程名称：电子电路设计实验 I 指导老师：施红军/叶险峰/邓靖靖 成绩：
实验名称：集成运算放大器应用电路研究 实验类型：设计性实验 同组学生姓名：赵皓翌

集成运算放大器基本运算电路研究

一、实验目的

学习和研究由集成运放构成的积分器、比较器、波形发生器等应用电路的组成与原理，掌握其设计方法。观察积分运算电路在实际应用时存在的积分漂移、积分误差等现象，并了解其解决方法。

二、实验方案设计

图 1 所示为反相积分器电路，本次实验利用该电路将输入的方波信号转变为三角波信号输出，分别测量有无反馈电阻 R_f 情况下的直流分量，了解实际应用中存在的积分漂移、积分误差等现象及其解决方法；图 2 所示为迟滞比较器电路，本次实验利用该电路将输入的三角波信号转变为方波信号输出，并研究其输入输出信号的幅值与相位关系；

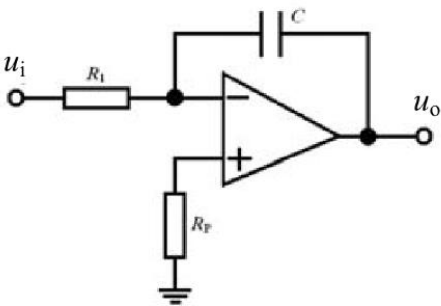


图 1 迟滞比较器电路

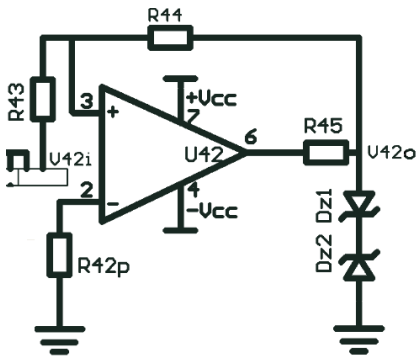


图 2 反相积分器电路

图 3 所示为方波-三角波发生器电路，该电路由反相积分器与迟滞比较器串联得到，用以产生不同频率方波、三角波，研究电压 $V_{42o'}$ 与输出信号频率的关系，测量并记录可调频率范围。

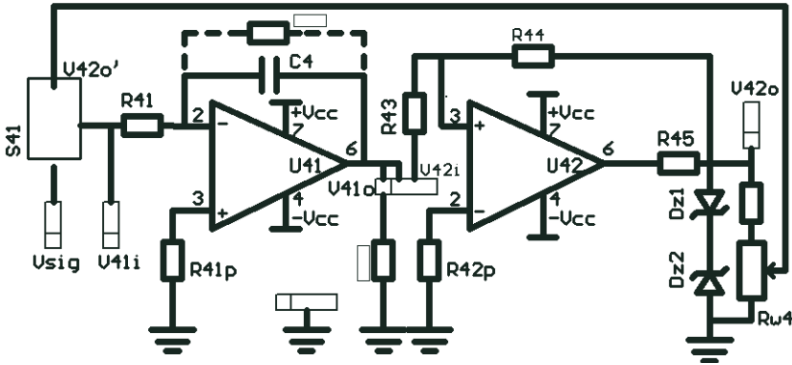


图 3 方波-三角波发生器电路

三、实验原理

(1) 反相积分器:

$$\text{输出电压 } V_o(t) = -\frac{1}{c} \int_0^t \frac{V_i(t)}{R_1} dt.$$

当输入信号为一阶阶跃信号时,

$$V_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ E, & t \geq 0 \end{cases} \quad V_o(t) = -\frac{E}{R_1 c} t.$$

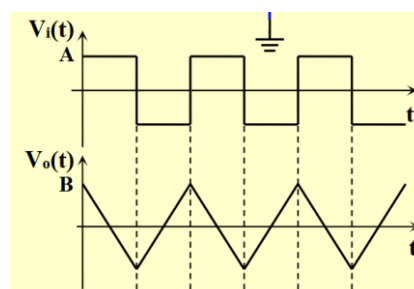


图 4 反相积分器输入方波信号输出三角波信号

由此可知当输入信号为方波时, 输出信号为三角波, 如图 4 所示。

(2) 迟滞比较器:

$$\text{①当 } V_6 = V_{OH} \text{ 时, } V'_+ = \frac{R_{43}}{R_{43} + R_{44}} (V_Z + V_D) + \frac{R_{44}}{R_{43} + R_{44}} V_{42i},$$

要使输出稳定为 V_{OH} , 则 $V'_+ > 0$ 且 $V_{42i} > -V_{TH}$

要使输出稳定为 V_{OL} , 则 $V'_+ < 0$ 且 $V_{42i} < -V_{TH}$

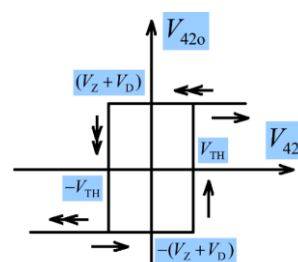


图 5 迟滞比较器的传输特性曲线

$$\text{②当 } V_6 = V_{OL} \text{ 时, } V''_+ = -\frac{R_{43}}{R_{43} + R_{44}} (V_Z + V_D) + \frac{R_{44}}{R_{43} + R_{44}} V_{42i},$$

要使输出稳定为 V_{OL} , 则 $V''_+ < 0$ 且 $V_{42i} < V_{TH}$

要使输出稳定为 V_{OH} , 则 $V''_+ > 0$ 且 $V_{42i} > V_{TH}$

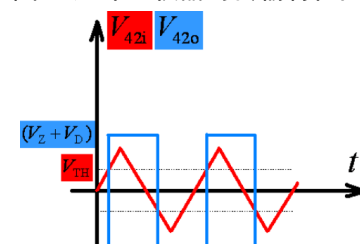


图 6 迟滞比较器的输入输出波形

由此可知迟滞比较器的传输特性曲线和输入输出波形分别如图 5、6 所示。

(3) 积分漂移与积分误差:

①输入信号的直流分量、输入失调电压等会形成积分漂移。

②实际使用时, 常在积分电容的两端并联一个电阻 R_f , 形成直流负反馈, 用以限制电路的直流电压增益。

③ R_f 的接入将对积分电容产生分流作用, 从而导致积分误差。

④为了减小积分误差, 通常取 $R_f \geq 10R_1$, 但不能太大。

四、实验任务要求

(1) 反相积分器设计研究

- ①设计反相积分电路，将输入的方波信号转化为三角波信号输出；
- ②安装电路，输入方波，用示波器双踪显示输入输出波形，记录波形，并标示出各实测参数；

(2) 迟滞比较器设计研究

- ①设计一迟滞比较器，使得 $V_{TH} \approx \frac{1}{2}(V_Z + V_D)$ ，允许使用电阻值在 20kΩ~400kΩ 之间；
- ②安装电路，输入 500Hz 三角波，研究输入输出信号的幅度与相位关系；

(3) 方波-三角波发生器研究

断开迟滞比较器信号输入，搭建方波-三角波发生电路，调节电位器 Rw4，可产生不同频率方波、三角波。观察电压 V42o'与输出信号频率的关系，测量并记录可调频率范围。

五、实验步骤与实验数据记录

(1) 反相积分器设计研究

- ①根据 $R_f \geq 10R_1$ ，但不能太大的要求，取 $R_f=300k\Omega$ ， $R_1=24k\Omega$ ， $R_p=22k\Omega$ ，安装电路；
- ②信号源输入幅度 2.2V、频率 500Hz 的方波信号，利用示波器双踪显示输入输出信号波形如图 7 所示，并分别测量插入 R_f 和不插入 R_f 情况下输入输出波形的峰峰值与输出信号直流分量,测量过程如图 8 所示，实验数据记录在表 1 中；



图 7 反相积分器输入输出波形

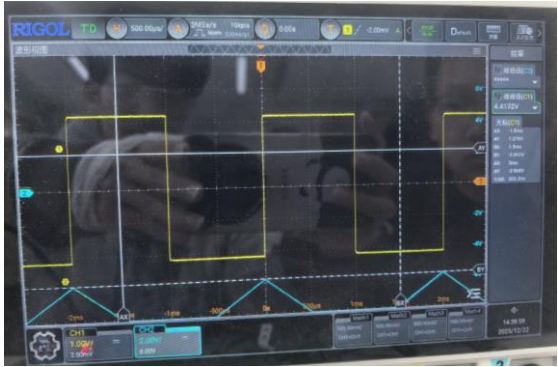


图 8 测量输出信号直流分量

表 1 反相积分器设计研究实验数据

实验组别	输入信号波形	输入信号峰峰值	输出信号波形	输出信号峰峰值	输出信号直流分量
插入 R_f	方波	4.4V	三角波	4.2V	62.5mV
不插入 R_f	方波	4.4V	三角波	4.1V	3.968V

分析：根据输入输出波形图可知，当方波信号输入反相积分器时，输出波形为三角波信号，且输出信号的幅值略有降低；插入 R_f 时输出信号的直流分量很小，不插入 R_f 时输出信号的直流分量较大，由此可见在积分电容的两端并联一个电阻 R_f ，形成直流负反馈，可以有效限制电路的直流电压增益。

(2) 迟滞比较器设计研究

①由于 $V_{TH} = \frac{R_{43}}{R_{44}}(V_Z + V_D)$ ，要实现 $V_{TH} \approx \frac{1}{2}(V_Z + V_D)$ ，取 $R_{44}=100k\Omega$ ， $R_{43}=51k\Omega$ ，安装电路；

②信号源输入幅度 7.2V、频率 500Hz 的三角波信号，利用示波器双踪显示输入输出信号波形如图 9 所示，并分别输入输出信号的峰峰值，并观察其相位关系；

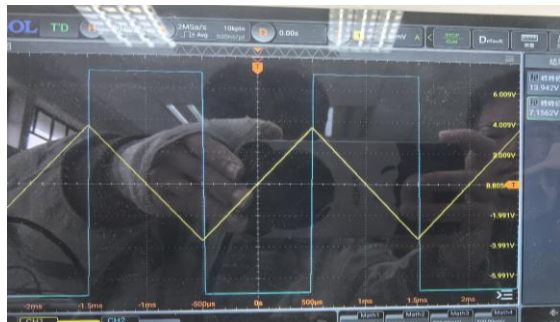


图 9 迟滞比较器输入输出波形

分析：实验测得输入方波信号峰峰值为 7.16V，输出三角波信号峰峰值为 13.94V，两者比值接近 0.5，满足设计要求；同时可以观察到输出方波的边沿相对于输入波形的过零点存在延迟，即输出翻转滞后于输入翻转变化的，但实验中测得的 V_{TH} 不太明显。

(3) 方波-三角波发生器研究

断开迟滞比较器信号输入，搭建方波-三角波发生电路，调节电位器 R_{w4} ，可产生不同频率方波三角波。

实验现象：实验中调节电位器 R_{w4} ，逐渐增大输出信号频率，观察到方波信号的幅值逐渐增大，而三角波信号的幅值基本不变，同时当输出信号频率达到 900.9Hz 时，信号频率无法继续提高。

分析：随着输出信号的频率提高，电压 V_{420} 也逐渐增大直至不变，输出信号的上限频率为 900.9Hz。

六、结论

本实验通过设计、搭建并测试反相积分器、迟滞比较器以及方波-三角波发生器，得出以下实验结论：

(1) 反相积分器可将输入的方波信号有效地转换为三角波信号，验证了其积分运算功能。实际积分器存在积分漂移现象，表现为无直流负反馈时（不并联 R_f 时），输出直流分量显著增大。通过在积分电容两端并联反馈电阻 R_f ，形成直流负反馈，可有效限制电路的直流增益，从而解决积分漂移问题。

(2) 实验搭建的迟滞比较器能够将输入的三角波转换为方波，其输出方波峰峰值与输入三角波峰峰值之比符合设计要求。观测到的输入输出波形关系验证了迟滞比较器输出状态的翻转滞后于输入信号的变化特点，即输出方波的边沿并非在输入三角波过零点时立即跳变，而是需要在输入信号上升至上限阈值或下降至下限阈值时才发生。

(3) 将反相积分器与迟滞比较器串联构成环路，实现了无需外部输入信号即可生成频率可调的方波与三角波的信号发生器。通过调节电路中的电位器，可以改变输出信号的频率。实验中发现，随着频率升高，输出的方波信号幅值逐渐上升并趋于稳定，且信号频率存在一个上限 900.9Hz。