

浙江大学实验报告

专业：微电子科学与工程
姓名：wcHikaru
学号：/
日期：2025 年 12 月 23 日
地点：东四 216

课程名称：电子电路设计实验 I 指导老师：施红军、叶险峰、邓婧婧 成绩：
实验名称：集成运算放大器应用电路研究 II 实验类型：设计型实验 同组学生姓名：/

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，了解解决方法。

二、实验原理

1. 反相积分器

1.1) 基本原理

电路如下图所示。数值关系：

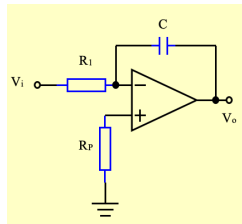


Figure 1: 积分器电路

- 输出电压： $V_o(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t \frac{V_i(t)}{R_1} dt = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t V_i(t) dt$
- 当输入信号为阶跃信号时， $V_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ E, & t \geq 0 \end{cases}$ ；输出电压： $V_o(t) = -\frac{E}{R_1 C} t$

1.2) 积分漂移及误差

- 输入信号的直流分量、输入失调电压等会形成积分漂移。
- 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。

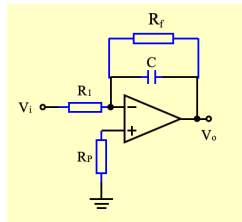


Figure 2: 修正积分漂移，对电路的改进

- 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。
- 为了减小积分误差，一般要求 $R_f \gg \frac{1}{j\omega C}$ ，或 $f \gg \frac{1}{2\pi R_f C}$ ，此时 R_f 可认为开路（理想积分器）。由 $R_f \gg \frac{1}{2\pi f C}$ 以及 $2B = \frac{A}{R_1} C \cdot \frac{T}{2} \Rightarrow R_f \gg \frac{2B}{\pi A} R_1$ ，通常取 $R_f > 10R_1$ 。

2. 迟滞比较器

2.1) 基本原理

电路如图 3 所示。

1. 当 $V_6 = V_{OH}$ 时, $V'_+ = \frac{R_{43}}{R_{43}+R_{44}}(V_{Z2} + V_{D1}) + \frac{R_{44}}{R_{43}+R_{44}}V_{42i}$
2. 当 $V_6 = V_{OL}$ 时, $V''_+ = -\frac{R_{43}}{R_{43}+R_{44}}(V_{Z1} + V_{D2}) + \frac{R_{44}}{R_{43}+R_{44}}V_{42i}$
3. 当 $V_6 = V_{OH}$ 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} , $V'_+ > 0$, $V_{42i} > -\frac{R_{43}}{R_{44}}(V_Z + V_D) = -V_{TH}$
 - 要使输出翻转为 V_{OL} , $V'_+ < 0$, $V_{42i} < -V_{TH}$
4. 当 $V_6 = V_{OL}$ 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} , $V''_+ < 0$, $V_{42i} < V_{TH}$
 - 要使输出翻转为 V_{OH} , $V''_+ > 0$, $V_{42i} > V_{TH}$

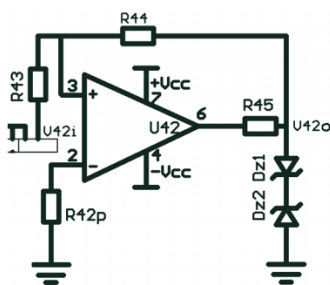


Figure 3: 迟滞比较器

$V_{TH} = \frac{R_{43}}{R_{44}}(V_Z + V_D)$ 理论的传输特性曲线:

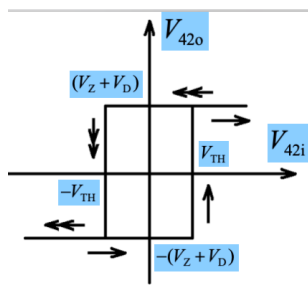


Figure 4: 迟滞比较器的传输特性曲线

理论波形图如下:

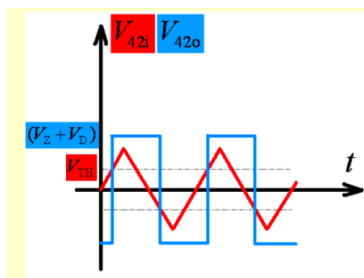


Figure 5: 迟滞比较器的理论波形图

3. 方波、三角波发生器

- 实验电路

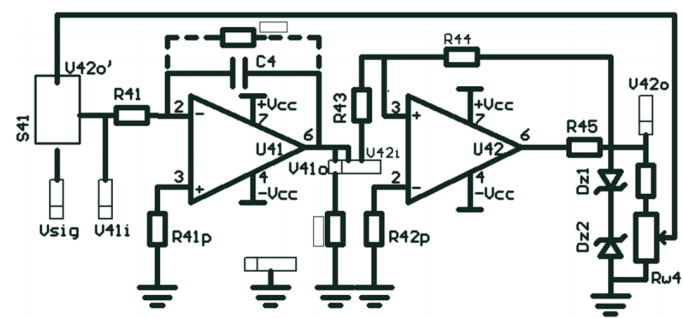


Figure 6: 方波、三角波发生器实验电路

- 实验理论波形

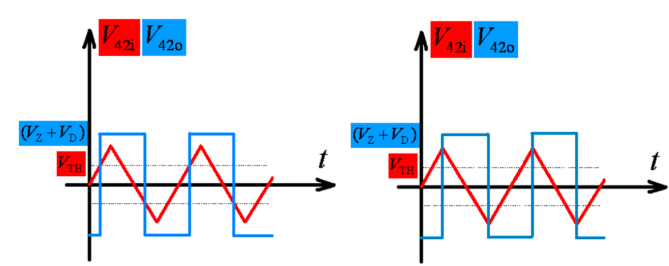


Figure 7: 方波、三角波发生器理论波形图

三、实验仪器与设备

- 万用表、示波器、信号发生器、直流电源、杜邦线
- 实验电路平台

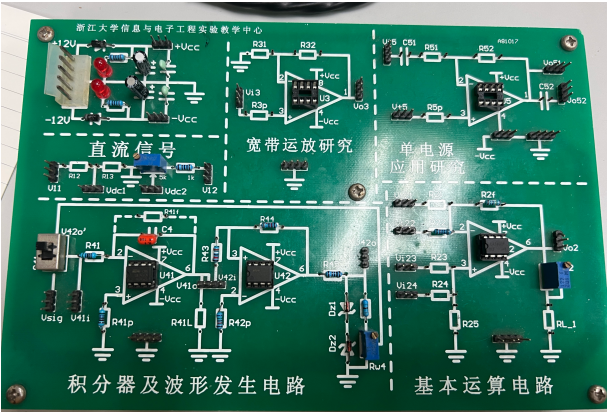


Figure 8: 实验电路平台

四、实验步骤与记录

1. 反相积分器设计研究

1.1) 设计要求

- 设计反相积分电路，将方波转换为三角波。
- 方波：幅度 2.2V、频率 500Hz
 - 三角波：幅度 2V 左右

1.2) 实验内容

- (1) 设计反相积分电路，方波 → 三角波。
- (2) 安装该电路，输入方波，用示波器双踪显示输入、输出波形，测量并记录波形，标示出各实测参数。

1.3) 设计计算

计算过程

- (1) 由理论部分，此处 $B = 2, A = 2.2, T = \frac{1}{500}$ ，取 $C = 0.022\mu F \Rightarrow R_1 = \frac{AT}{4BC} = 25\text{ K}\Omega$ ；对比标称值，取 $R_1 = 24\text{ k}\Omega$
- (2) 由 $R_f \gg \frac{2B}{\pi A}R_1 \Rightarrow R_f \gg 13.890\text{ k}\Omega$ 。且 $R_f > 10R_1 = 240\text{ k}\Omega$ ，对比标称值可取 $R_f = 270\text{ k}\Omega$

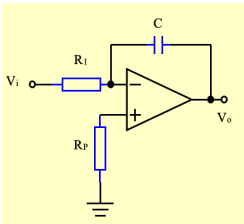


Figure 9: 积分器电路

1.4) 电路测试

根据理论计算结果，搭建反相积分器电路。在 ui 处接入方波信号，测得的输入输出波形如下图所示：

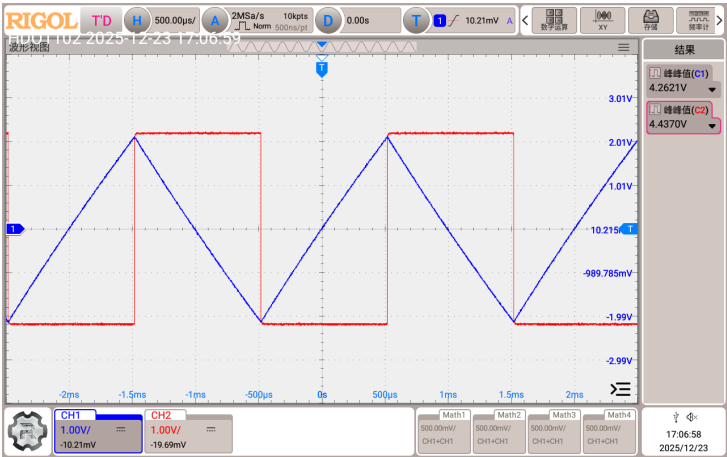


Figure 10: 反相积分器电路波形测量

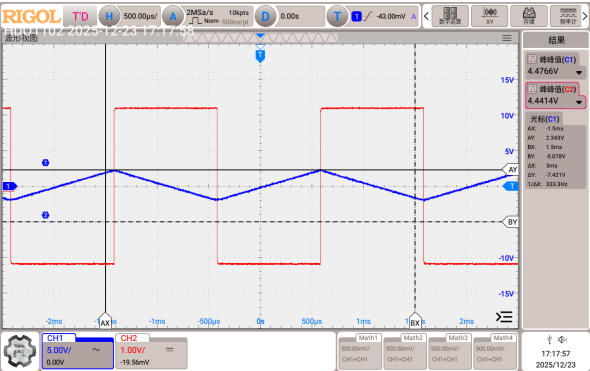


Figure 11: 测量直流分量 (1)

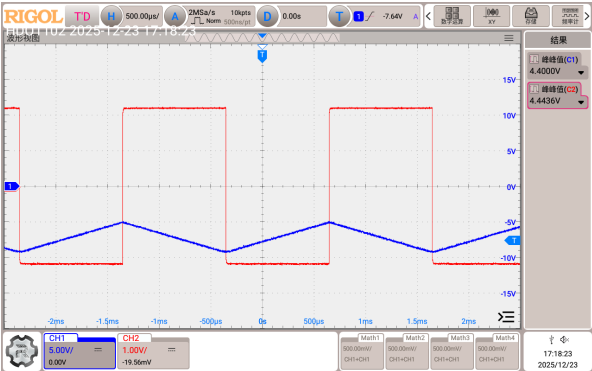


Figure 12: 测量直流分量 (2)

记录的结果如下：

u_{ipp}	u_{opp}	输出直流分量(有 R_f)	输出直流分量(无 R_f)
4, 442V	4.20V	31.25mV	7.421V

Table 1: 数据测量

观察到输出波形为理想三角波形, 且幅度接近预期值。通过调整示波器的耦合方式 (AC/DC), 测量了输出波形的直流分量。记录的结果显示, 加入反馈电阻 R_f 后, 输出直流分量显著减小, 验证了理论中关于积分漂移修正的分析。

2. 迟滞比较器设计研究

2.1) 设计要求

设计一迟滞比较器, 使 $V_{TH} \approx \frac{1}{2}(V_Z + V_D)$, 允许使用电阻值在 $20k\Omega \sim 400k\Omega$ 之间。

2.2) 实验内容

- (1) 设计一迟滞比较器, 使 $V_{TH} \approx \frac{1}{2}(V_Z + V_D)$, 允许使用电阻值在 $20k\Omega \sim 400k\Omega$ 之间。
- (2) 安装电路, 输入 500Hz 三角波 (幅度合理自定), 研究输入、输出信号的幅度、相位关系。

2.3) 设计计算

由迟滞比较器原理: $V_{TH} = \frac{R_{43}}{R_{44}}(V_Z + V_D)$
要使 $V_{TH} \approx \frac{1}{2}(V_Z + V_D)$, 则需 $\frac{R_{43}}{R_{44}} = \frac{1}{2}$, 即 $R_{44} = 2R_{43}$
取 $R_{43} = 100\text{ k}\Omega$, $R_{44} = 200\text{ k}\Omega$

2.4) 电路测试

根据理论计算结果, 搭建迟滞比较器电路。输入 500Hz 三角波信号, 测得的输入输出波形如下图所示:

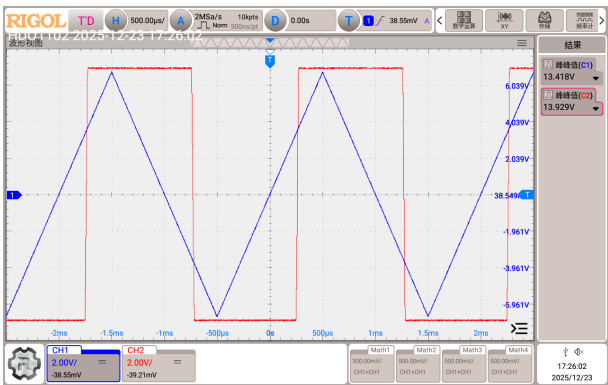


Figure 13: 迟滞比较器电路测量

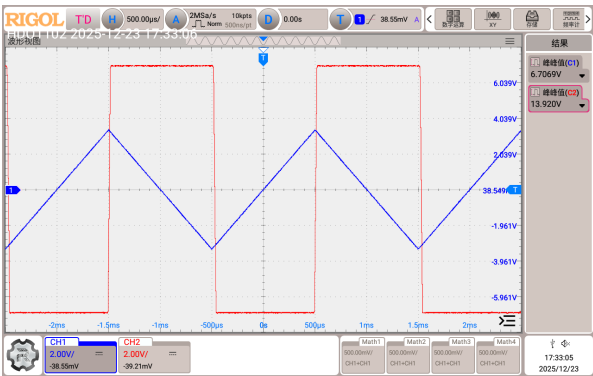


Figure 14: 测量阈值电压——输出波形改变点 (1)

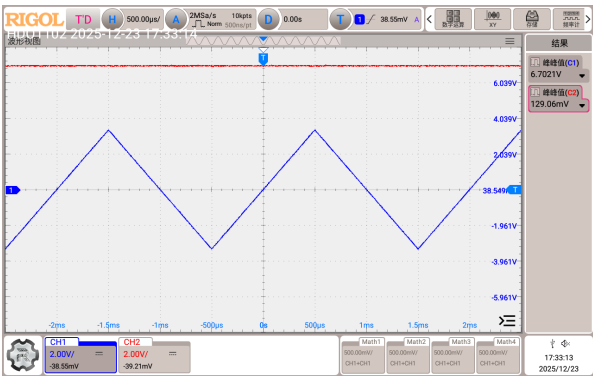


Figure 15: 测量阈值电压——输出波形改变点 (2)

记录的结果如下:

V_{ipp}	V_{opp}	V_{TH} (上升沿)	V_{TH} (下降沿)
13.418V	13.929V	3.350V	-3.569V

Table 2: 迟滞比较器测量结果

观察到输出波形为理想方波形，且幅度接近预期值。通过测量输入三角波在上升沿和下降沿时的阈值电压，结果显示 V_{TH} (上升沿) 和 V_{TH} (下降沿) 分别为 3.350V 和 -3.569V，符合设计要求，验证了迟滞比较器的基本工作原理。

3. 方波-三角波发生器研究

3.1) 实验内容

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。观察电压 $V_{42o'}$ 与输出信号频率的关系，测量并记录可调频率范围。

3.2) 电路测试

根据实验要求，搭建方波-三角波发生器电路。波形如下： 绘制电路图如下

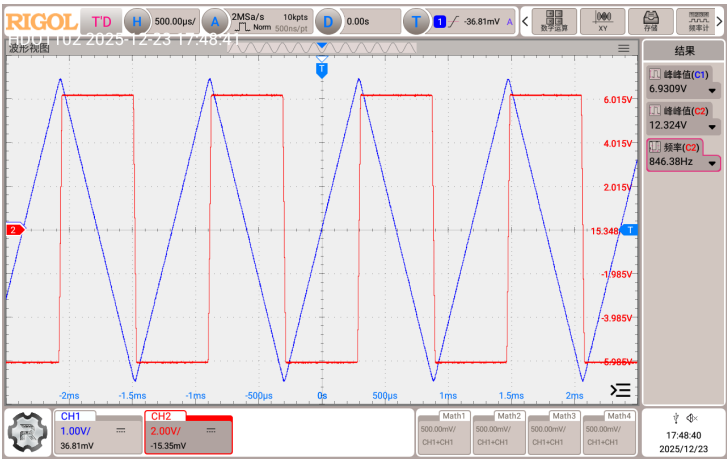


Figure 16: 方波-三角波发生器测量图

调节电位器 R_{w4} ，可产生不同频率方波、三角波

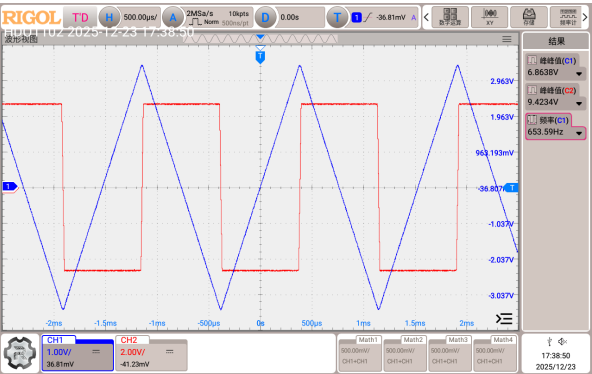


Figure 17: 方调节电位器 R_{w4} ，可产生不同频率方波、三角波 (1)

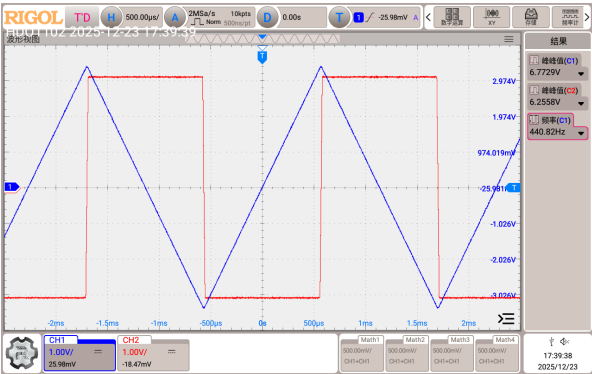


Figure 18: 调节电位器 R_{w4} ，可产生不同频率方波、三角波 (2)

实验测得的对应关系如下：

V_{pp}	f
12.323V	846.38Hz
9.42V	654.8Hz
6.2481V	440.82Hz
/	950Hz(最大)

Table 3: 电压与频率对应关系

观察到通过调节电位器 R_{w4} ，可以在一定范围内调整输出方波和三角波的频率。实验测得的电压与频率对应关系显示，随着输出电压幅度的变化，频率也相应变化，验证了方波-三角波发生器的基本工作原理。

五、心得体会

通过本次实验，我深入理解了反相积分器、迟滞比较器以及方波-三角波发生器的工作原理和设计方法。在实际搭建电路和测量过程中，遇到了一些挑战，例如调整电阻值以满足设计要求，以及准确测量输出波形的直流分量等。通过反复调试和测量，我不仅掌握了相关电路的设计技巧，还提高了使用示波器和其他实验仪器的能力。此外，实验结果与理论分析基本一致，验证了所学知识正确性。这次实验不仅加深了我对集成运算放大器应用电路的理解，也培养了我的动手能力和解决问题的能力，为今后的学习和研究打下了坚实的基础。

本次实验不仅是对集成运放应用电路理论知识的一次全面检验，更是一次充满挑战与收获的实践探索。

首先，在反相积分器的设计与调试中，我深刻体会到了理论模型与实际电路之间的微妙差异。虽然理论上积分器能够完美地将方波转换为三角波，但在实际操作中，积分漂移现象让我一度感到困惑。看着示波器上波形逐渐偏离零点，我才真正理解了反馈电阻 R_f 存在的必要性。当我接入 R_f 并观察到输出直流分量从 7V 多骤降至 30mV 左右时，那种“理论照进现实”的成就感油然而生。这一过程让我明白，工程设计往往是在理想性能与非理想因素之间寻找平衡的艺术。

其次，迟滞比较器的实验让我对正反馈机制有了更直观的认识。通过调节电阻参数来设定阈值电压，我亲眼见证了电路如何在两个稳态之间翻转。捕捉上升沿和下降沿阈值的过程需要极大的耐心，示波器光标的每一次微调都不仅是对数据的记录，更是对电路特性的深度对话。当实测的阈值电压与计算值高度吻合时，我感受到了严谨计算带来的确定性之美。

最后，方波-三角波发生器的联调则是对前两个实验的综合运用。看着两个运放相互配合，自激振荡产生稳定的波形，我惊叹于电子电路设计的精妙。调节电位器改变频率时，波形的动态变化让我直观地感受到了电路参数对系统行为的控制作用。

回顾整个实验过程，从最初的电路搭建到中间的故障排查，再到最后的数据记录与分析，每一步都充满了挑战。面对波形失真、频率不稳等问题，我学会了冷静分析，从电源、接线、元件参数等多个角度排查原因。这不仅锻炼了我的动手能力，更培养了我面对工程问题时严谨务实、锲而不舍的科学态度。这次实验经历将成为我未来电子电路设计道路上宝贵的财富。