浙江大学实验报告

专业：
姓名：
学号：
日期：2026-05-19
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：比较器、波形发生及脉宽调制电路　实验类型：基础实验　学　期：2025-2026 秋冬

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) 掌握幅值比较器的电路组成及工作原理。

(2) 掌握用集成运放构成的方波、三角波发生器的工作原理和性能。

(3) 了解压控脉宽调制电路的组成和工作原理。

(4) 能够根据示波器波形和测量栏数据整理实验记录，并完成结果分析。

二、 实验内容和原理

1.同相输入电压比较器

比较器工作在开环状态，当输入电压 u_i 高于参考电压 U_R 时，输出翻转到高电平；当 $u_i < U_R$ 时，输出翻转到低电平。其本质是利用运放的高增益实现阈值比较，因此输出仅在两种饱和状态间切换。

当输入为正弦信号时，比较器可将输入波形转换为矩形波。实验中还需通过 XY 模式观察电压传输特性曲线，并记录转换点电压和输出高、低电平。

同相输入电压比较器的基本连接如图 1 所示。

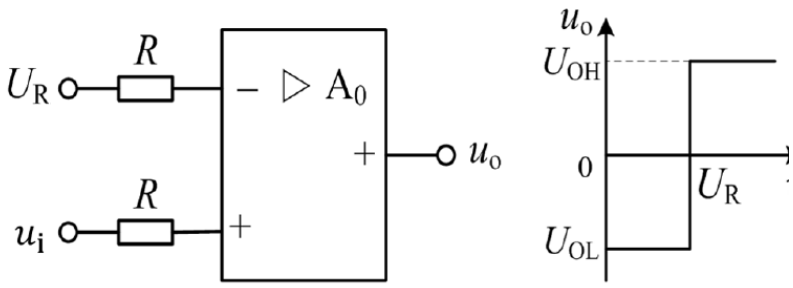
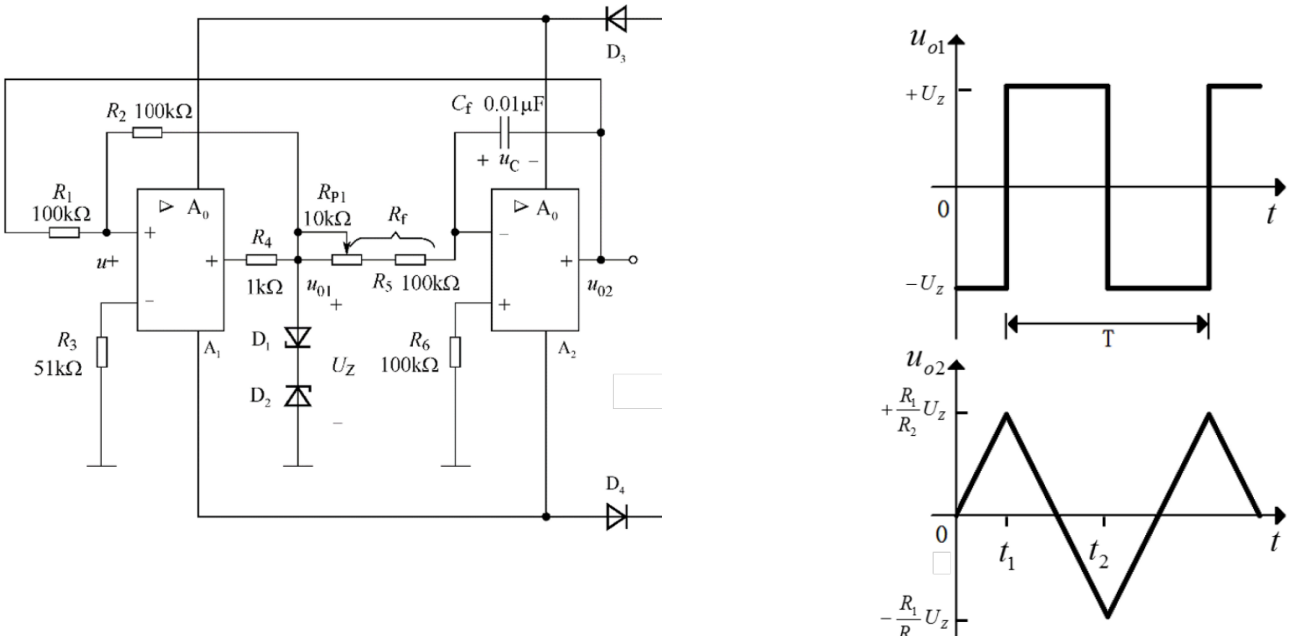


图 1: 同相输入电压比较器原理图

2.方波、三角波发生电路

该电路由比较器 A1 和积分电路 A2 构成。A1 输出方波，A2 将方波积分为三角波。反馈电阻 R_f 与积分电容 C_f 决定振荡周期，电位器 R_{p1} 的调节会改变等效反馈电阻，从而改变振荡频率。

理论上，方波与三角波的周期、频率可由电路参数近似计算，输出峰峰值与稳压管限幅及反馈网络有关。该电路的组成及方波、三角波对应关系如图 2 所示。



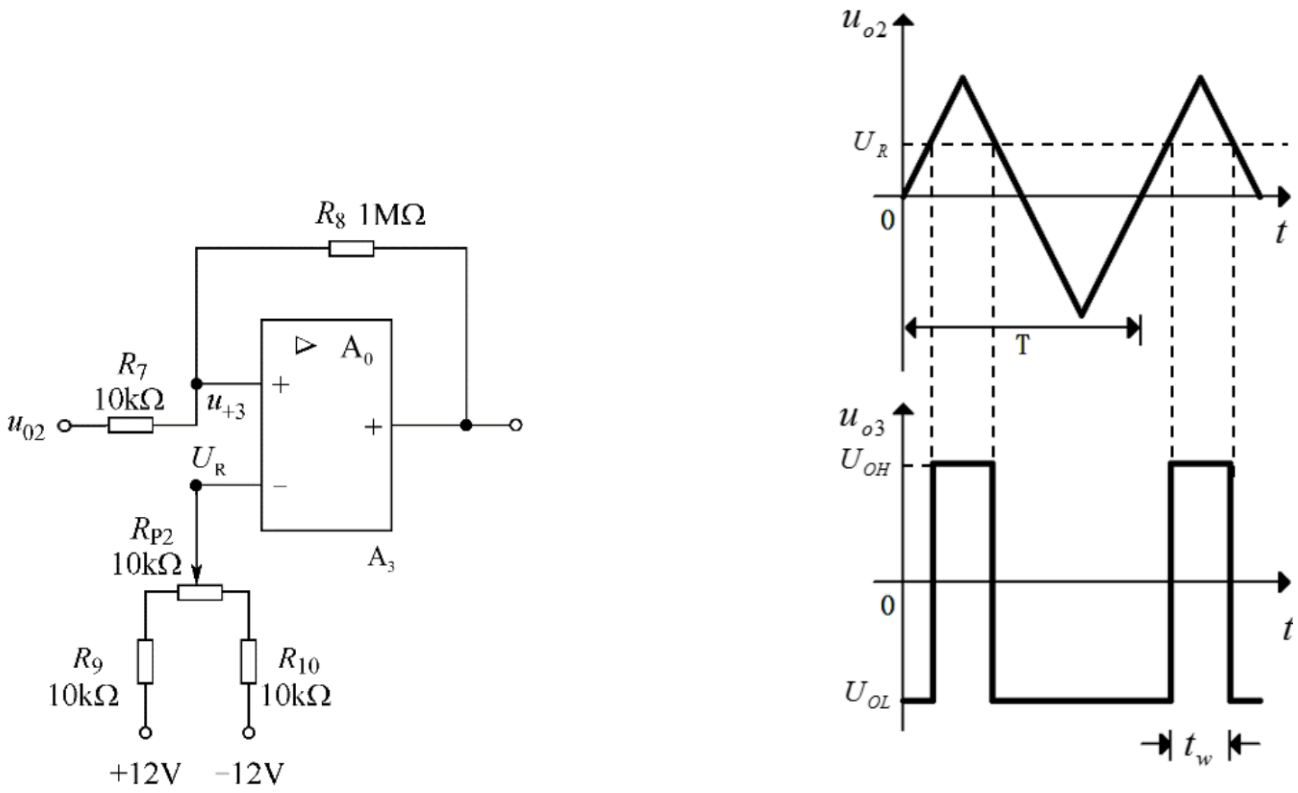
(a) 方波、三角波发生电路原理图　　(b) 方波、三角波发生电路波形关系

图 2: 方波、三角波发生电路

3.压控脉宽调制电路

在保持方波、三角波发生器稳定工作的基础上，加入 A3 构成脉宽调制电路。A3 将三角波与参考电压 U_R 比较，当三角波高于参考电压时输出高电平，否则输出低电平，因此改变 U_R 会直接改变输出脉冲占空比。占空比越大，输出平均值越高。

压控脉宽调制电路及波形关系如图 3 所示。



(a) 压控脉宽调制电路原理图　　(b) 压控脉宽调制波形关系

图 3: 压控脉宽调制电路

三、 主要仪器设备

序号	仪器设备	备注
1	模拟电子技术实验箱	电路搭建与供电
2	双踪数字示波器	波形与参数测量
3	函数信号发生器	正弦输入信号
4	直流电源	参考电压供给
5	数字式万用表	直流电压测量

表 1: 主要仪器设备

四、 实验数据记录和处理

1.同相输入电压比较器

实验条件：$U_R = 1\,\mathrm{V}$，输入正弦信号 $U_{pp} = 10\,\mathrm{V}$，$f = 100\,\mathrm{Hz}$。

首先令 U_R 接直流电压 1 V，输入 u_i 分别接 0.5 V 与 1.5 V 直流电压，并用万用表测量相应输出电压 u_o。随后保持 $U_R = 1\,\mathrm{V}$，输入 $U_{pp} = 10\,\mathrm{V}$、$f = 100\,\mathrm{Hz}$ 的正弦信号，使用示波器双踪同时显示 u_i 与 u_o 波形。最后将示波器切换到 XY 模式，观察电压传输特性曲线。

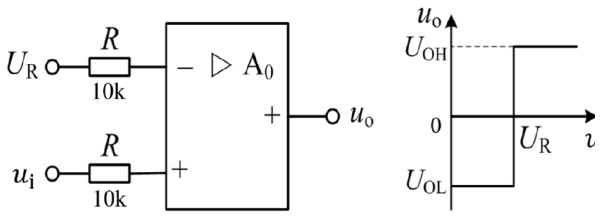


图 4: 比较器实验电路图

比较器实验电路如图 4 所示。直流输入测量结果见表 2，波形变换测量结果见表 3。

输入直流电压 /V	输出电压 /V	判定
0.5	-12.1634	低电平
1.5	10.9780	高电平

表 2: 比较器直流输入测量结果

信号	峰峰值 /V	周期 /ms	说明
u_i	9.758	9.982	输入正弦波
u_o	23.221	10.000	输出矩形波

表 3: 比较器波形变换测量结果

由示波器光标估读，图 5 中输入正弦波的波形变换门限约为 0.88 V。

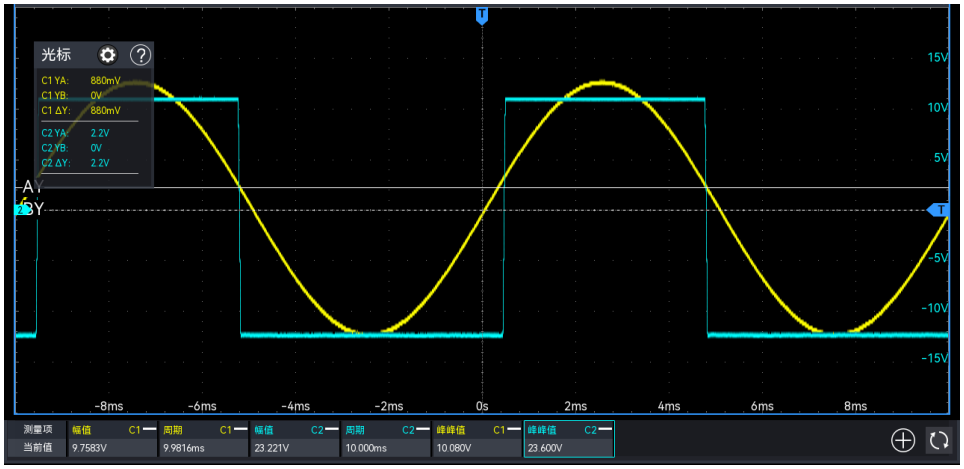


图 5: 比较器波形变换

示波器切换到 XY 模式后得到图 6 所示的电压传输特性曲线，对应读数整理于表 4。

转换点电压 /V	输出高电平 /V	输出低电平 /V
1.20	11.2	-12.2

表 4: 比较器传输特性测量结果

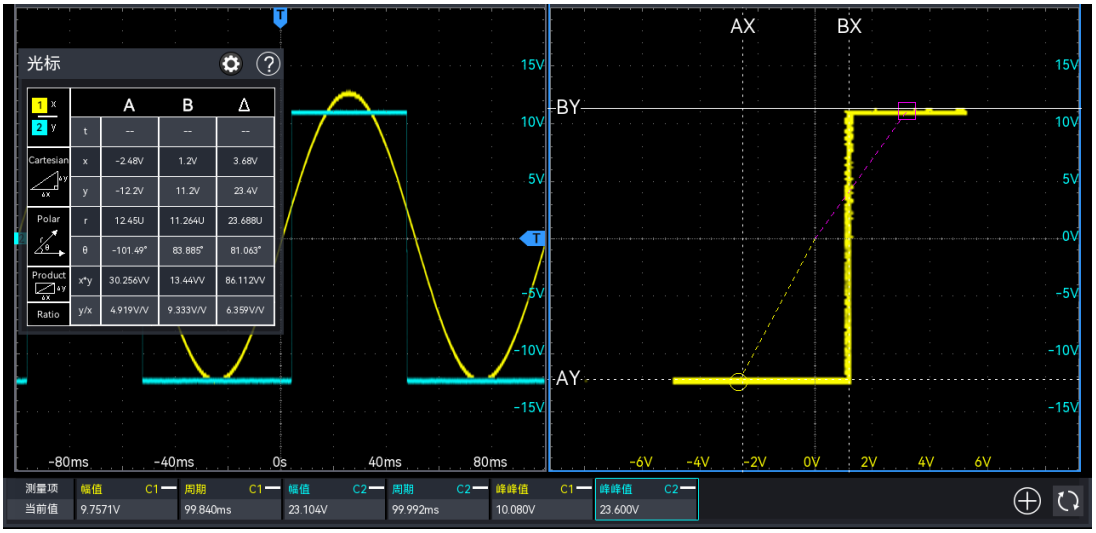


图 6: 比较器电压传输特性曲线（XY 模式）

2.方波、三角波发生电路

当 $R_{p1}=0$ 时，记录输出波形如下。先连接 A1、A2 两级电路，A3 级电路暂时不接入。将电位器 R_{p1} 的滑动头右旋到底，即 $R_{p1}=0$，用示波器同时观察 u_{o1} 和 u_{o2} 波形，并记录两波形的频率和峰峰值。随后保持 $R_1=R_2=100\,\mathrm{k\Omega}$，调节 R_{p1}，再次记录 u_{o1} 和 u_{o2} 波形参数，并根据频率反算 R_{p1}。

$R_{p1}=0$ 时的波形见图 7，对应读数见表 5。

信号	峰峰值 /V	周期 /ms	频率 /Hz
u_{o1}	13.851	4.8052	208.11
u_{o2}	15.200	4.8054	208.10

表 5: $R_{p1}=0$ 时方波、三角波发生电路的测量结果

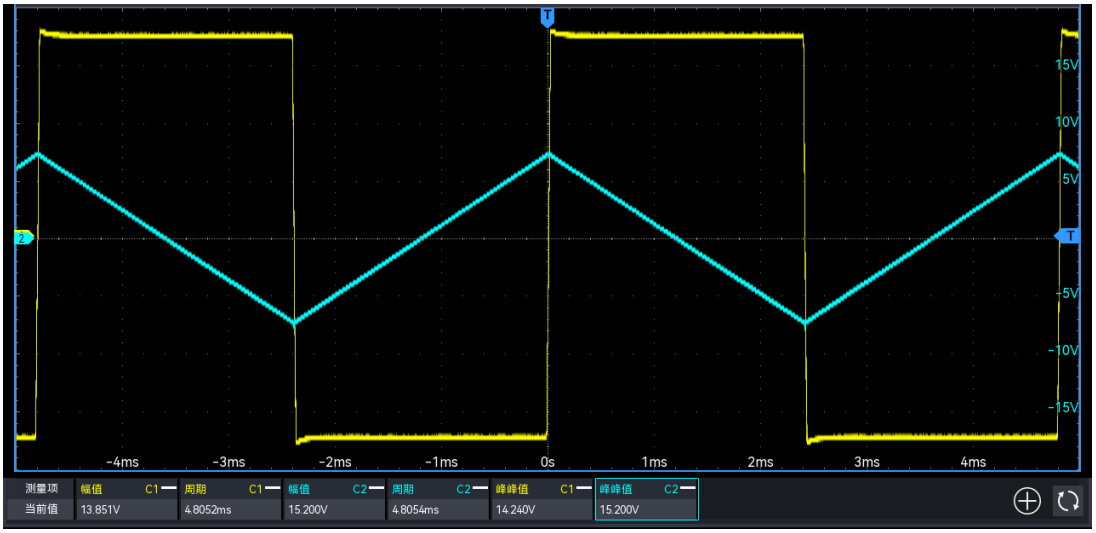


图 7: $R_{p1}=0$ 时方波、三角波波形

当保持 $R_1 = R_2 = 100\,\mathrm{k\Omega}$ 并调节 R_{p1} 后，波形见图 8，记录数据见表 6。

信号	峰峰值 /V	周期 /ms	频率 /Hz
u_{o1}	13.851	4.3760	228.52
u_{o2}	15.400	4.3742	228.61

表 6: R_{p1} 调节后方波、三角波发生电路的测量结果

由频率反推调节后的反馈电阻，得到 $R_f \approx 109.38\,\mathrm{k\Omega}$。若按理论电路模型并取标称 $R_5 = 100\,\mathrm{k\Omega}$，则

$$R_{p1} \approx R_f - R_5 \approx 9.38\,\mathrm{k\Omega}.$$

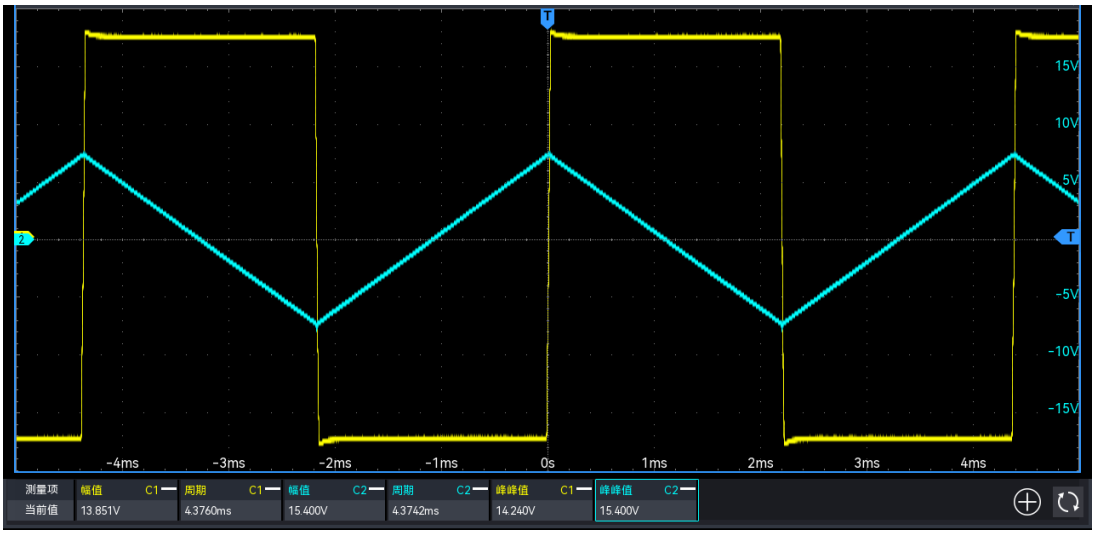


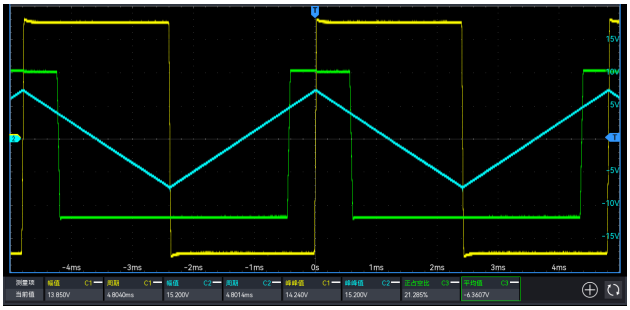
图 8: R_{p1} 调节后波形

3.压控脉宽调制电路

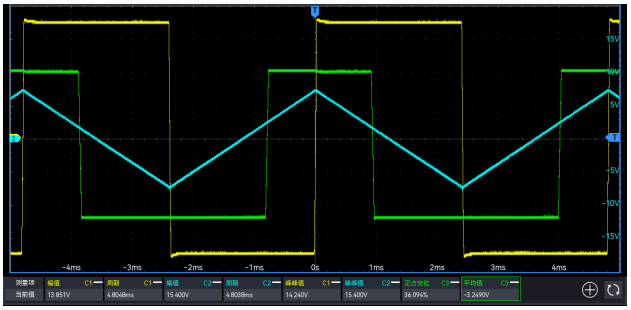
在 $R_1 = R_2 = 100\,\mathrm{k\Omega}$、$R_{p1} = 0$ 条件下，改变参考电压 U_R，记录输出占空比与平均值。连接 A3 级电路后，将 u_{o2} 作为脉宽调制电路输入电压，按 $U_{R\max}$、2 V、1 V、0 V、−1 V、−2 V 的顺序改变参考电压，分别记录 u_{o3} 波形、占空比 t_w/T 和平均值 U_{o3}。各组读数列于表 7，对应波形见图 9 至图 11。

U_R /V	占空比 t_w/T	u_{o3} 平均值 /V	说明
4.1179	21.285%	-6.3607	接近 $U_{R\max}$
2.0082	36.094%	-3.2490	正偏置较大
1.0015	43.147%	-1.7627	
0.003978	50.162%	-0.28898	接近 0 V
-1.00858	57.209%	1.1936	
-2.00204	64.169%	2.6697	

表 7: 压控脉宽调制电路测试结果

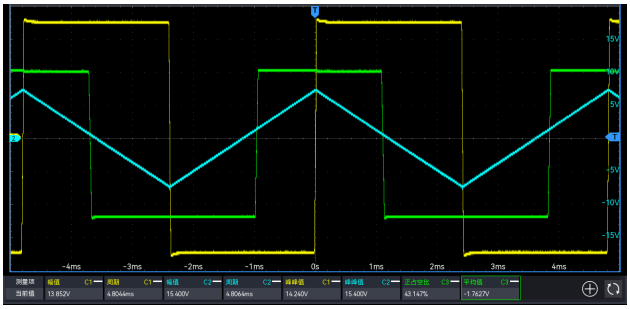


(a) $U_R = 4.1179\,\mathrm{V}$

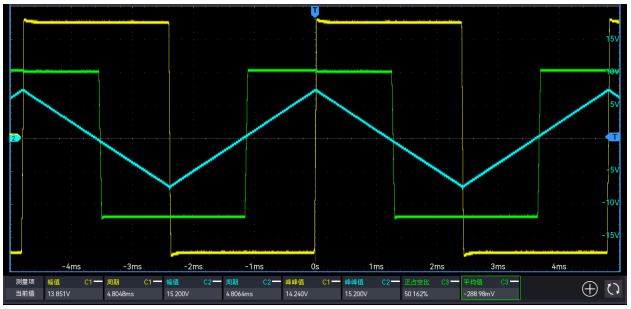


(b) $U_R = 2.0082\,\mathrm{V}$

图 9: 脉宽调制波形一组

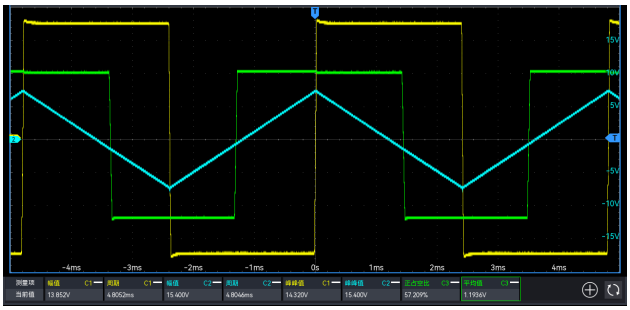


(a) $U_R = 1.0015\,\mathrm{V}$

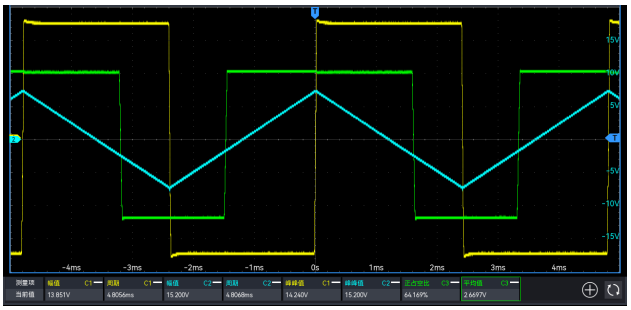


(b) $U_R = 0.003978\,\mathrm{V}$

图 10: 脉宽调制波形二组



(a) $U_R = -1.00858\,\mathrm{V}$



(b) $U_R = -2.00204\,\mathrm{V}$

图 11: 脉宽调制波形三组

五、 实验结果与分析

1.比较器

由表 2 可见，输入电压从 0.5 V 增加到 1.5 V 后，输出由 −12.1634 V 翻转到 10.9780 V，说明比较器输出已经进入饱和区，且翻转发生在参考电压 $U_R = 1.00\,\mathrm{V}$ 附近。

本实验中出现了两个与门限有关的读数。图 5 中的 0.88 V 来自波形变换截图的光标估读，它对应在时域波形上观察到的输入电压翻转位置；表 4 中的 1.20 V 来自 XY 模式传输特性曲线读数，它对应传输曲线上输出状态突变附近的转换点。两者来源不同，不能混作同一个测量值。由于 XY 模式直接反映 $u_o - u_i$ 的关系，因此本文把

1.20 V 作为主要门限读数进行误差分析：

$$\delta_U = \left|\frac{1.20 - 1.00}{1.00}\right| \times 100\% = 20\%.$$

时域波形截图中的 0.88 V 作为辅助参考时，对应相对误差为

$$\delta'_U = \left|\frac{0.88 - 1.00}{1.00}\right| \times 100\% \approx 12\%.$$

两个读数有差异，可能来自示波器光标定位、通道零点偏移、边沿判断位置不同，以及 XY 模式和时域模式读数方式不同等因素。传输特性图中可确认的输出高、低电平约为 11.2 V 和 −12.2 V，说明输出电平受运放饱和特性和限幅网络共同影响。

2.方波、三角波发生电路

方波、三角波发生电路中，$R_{p1} = 0$ 时两路测得频率分别是 208.11 Hz 和 208.10 Hz，取平均值为

$$f_0 = \frac{208.11 + 208.10}{2} = 208.105\,\text{Hz}.$$

课件给出的频率关系为

$$f = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{4R_f C_f}.$$

在 $R_1 = R_2 = 100\,\text{k}\Omega$、$C_f = 0.01\,\mu\text{F}$ 的条件下，按标称值 $R_f = 100\,\text{k}\Omega$ 估算，理论频率为

$$f_{\text{th}} = 250\,\text{Hz}.$$

因此 $R_{p1} = 0$ 时相对误差为

$$\delta_f = \left|\frac{208.105 - 250}{250}\right| \times 100\% \approx 16.76\%.$$

按实测频率反推初始状态下的等效反馈电阻，有

$$R_{f0} = \frac{1}{4f_0 C_f} \approx 120.13\,\text{k}\Omega.$$

这个值高于标称 $R_5 = 100\,\text{k}\Omega$，说明它更适合理解为实验条件下的等效反馈电阻，而不是某一个单独电阻的直接测量值。造成差异的因素可能包括电容实际容量偏差、电阻容差、电位器端点残余阻值、接触电阻以及运放非理想特性等。

调节 R_{p1} 后，两路频率读数分别为 228.52 Hz 和 228.61 Hz，平均值为

$$f_1 = \frac{228.52 + 228.61}{2} = 228.565\,\text{Hz}.$$

相对 250 Hz 的差异为

$$\delta'_f = \left|\frac{228.565 - 250}{250}\right| \times 100\% \approx 8.57\%.$$

按调节后的频率反推等效反馈电阻，有

$$R_{f1} = \frac{1}{4 f_1 C_f} \approx 109.38\,\mathrm{k\Omega}.$$

由 $f = (R_2/R_1)/(4R_fC_f)$ 可知，频率与等效反馈电阻 R_f 成反比。实测数据中，调节后平均频率由 208.105 Hz 升高到 228.565 Hz，反推得到的等效 R_f 由约 120.13 kΩ 减小到约 109.38 kΩ，因此频率升高与理论关系一致。若按理论电路模型并取标称 $R_5 = 100\,\mathrm{k\Omega}$，则调节后可估算

$$R_{p1} \approx R_{f1} - R_5 \approx 9.38\,\mathrm{k\Omega}.$$

这个 R_{p1} 是基于标称电阻和理想模型反推得到的等效值，不代表电位器实际机械位置的直接测量值。

另外，表 5 和表 6 中 u_{o2} 的峰峰值均略大于 u_{o1}。理想情况下，方波和三角波的峰峰值应比较接近，但实测中三角波峰峰值比方波高约 1.35–1.55 V。这一现象不一定表示电路连接错误，可能与示波器自动测量方式、通道零点和量程设置、方波边沿瞬态、稳压管限幅非理想以及元件实际参数有关。

3.脉宽调制电路

由表 7 可见，当 U_R 从 4.1179 V 降到 −2.00204 V 时，占空比从 21.285% 增加到 64.169%，u_{o3} 平均值从 −6.3607 V 增加到 2.6697 V。这是因为 A3 比较的是三角波 u_{o2} 与参考电压 U_R：参考电压越低，一个周期内三角波高于 U_R 的时间越长，输出高电平持续时间增加，占空比随之增大。

输出平均值可以看作高、低电平按持续时间加权后的结果。若令 $D = t_w/T$，则有近似关系

$$U_{\mathrm{avg}} \approx DU_H + (1-D)U_L.$$

因此，在输出高、低电平变化不大的情况下，U_{avg} 与占空比 D 应近似线性相关。用表 7 中记录的数据估算，可得到

$$U_{\mathrm{avg}} \approx 21.05D - 10.84,$$

其中 D 取小数形式。理论上若取比较器输出高电平 $U_{OH} = 11.2\,\mathrm{V}$、低电平 $U_{OL} = -12.2\,\mathrm{V}$，则

$$U_{\mathrm{avg}} = DU_{OH} + (1-D)U_{OL} \approx 23.4D - 12.2.$$

实测拟合得到的斜率 21.05、截距 −10.84 与理论值有一定偏差，说明 PWM 级实际输出高、低电平可能并非完全恒定，占空比和平均值测量也存在一定系统误差。总体上，当占空比增大时，高电平在一个周期内所占时间变长，平均输出电压随之上升。

六、 讨论、心得

本次实验把比较器、方波和三角波发生器、脉宽调制电路联系起来观察。比较器部分给我的一个直接体会是，时域截图和 XY 模式截图会给出不同的门限读数，整理报告时必须注明读数来自哪一种显示方式。本报告中主要采用 XY 模式的 1.20 V 作为传输特性的门限读数，而把时域光标估读的 0.88 V 作为参考，这样前后分析会更清楚。

方波、三角波发生电路中，实测频率低于按标称参数计算的 250 Hz，说明实际电路中的等效 R_f 不能简单等同于标称电阻。调节 R_{p1} 后，频率升高，按公式反推得到的等效 R_f 减小，与频率和反馈电阻成反比的关系一致。PWM 部分需要连续记录多组波形，如果只保存截图而没有在文件名或记录表中标出 U_R、占空比和平均值，后期很容易把不同工况混在一起。因此这类实验记录最好在测量时就把关键读数和截图一一对应起来。