

浙江大学实验报告

专业： 机器人工程

姓名：

学号：

日期： 2023/12/08

地点： 紫金港东 3-211

课程名称： 电路与模拟电子技术实验 指导老师： 周晶 成绩：

实验名称： 波形发生电路的分析与设计 实验类型： 模拟电子技术实验 同组学生姓名：

一、实验目的和要求

A. RC 桥式正弦振荡电路设计

1. 掌握正弦波振荡电路的起振条件。
2. 掌握正弦波振荡电路稳幅环节的作用以及稳幅环节参数变化对输出波形的影响。
3. 掌握选频电路参数变化对输出波形频率的影响。
4. 学习正弦振荡电路的仿真分析与调试方法。

B. 用集成运放构成的方波、三角波发生电路设计

1. 掌握方波和三角波发生电路的设计方法。
2. 掌握主要性能指标的测试。
3. 学习方波和三角波的仿真与调试方法。

二、实验内容和原理

A. 实验原理：

1. RC 桥式正弦振荡电路原理：

RC 桥式正弦波振荡电路通常由放大环节、选频网络、稳幅环节等组成。

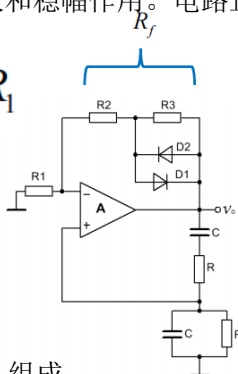
R1、Rf 和集成运放组成负反馈电路，起放大和稳幅作用。电路正常工作（振荡），要求：

$$A_f = 1 + \frac{R_f}{R_1} \geq 3$$

，即

$$R_f \geq 2R_1$$

$$\text{振荡频率: } f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$



正弦波振荡电路图如左

Rf 由固定电阻 R2 和 R3 以及二极管 D1、D2 组成

D1 和 D2 起自动稳幅作用，它们接入与否将影响输出波形的失真情况和振荡的稳定性

设计一个振荡频率 $f_o = 1.54\text{KHz}$ 的 RC 正弦波振荡电路：

（1）确定 RC 并联网络的参数

RC 串并联网络的参数应根据所要求的振荡频率 f_o 来确定。为了使 RC 串并联电路的选频特性尽量不受集成运算放大器输入电阻和输出电阻的影响，应按下列关系来初选电阻 R 的值： $R_{id} \gg R \gg R_o$

式中， R_{id} 为集成放大运算器的差模输入电阻，一般在几百千欧以上； R_o 为集成运算放大器的输出电阻，一般在几百欧以下。

$$C = \frac{1}{2\pi f_o R} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 1.54 \times 10^3 \times 10 \times 10^3} \text{F} = 0.01034 \mu\text{F}$$

初选 $R = 10\text{K}\Omega$ ，

取标称值 $C = 0.01 \mu\text{F}$ ，则重新计算可得： $R = 10.399\text{k}\Omega$ ，取标称值 $R = 10\text{k}\Omega$

注意选择稳定性较好的电阻和电容，否则将影响振荡频率的稳定性。

(2) 确定 R_1 和 R_f

因为 $R_f \geq 2R_1$ ，通常取 $R_f = 2.1R_1$ ，这样既能保证起振，又不至于引起严重的波形失真。此外，为了减小运算放大器输入失调电流及其温漂的影响，还应尽量满足 $R = R_1 // R_f$ ，即 $\frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f} = \frac{2.1}{3.1} R_1$

所以，有 $R = \frac{3.1}{2.1} R = \frac{3.1}{2.1} \times 10k\Omega \approx 15k\Omega$

(3) 稳幅元件及参数的确定

根据振荡幅度的变化，采用非线性元件来自动改变放大电路中负反馈的强弱，以实现稳幅目的。本实验中稳幅电路由两只反向并联的二极管和电阻 R_3 组成，利用二极管正向电阻的非线性特性实现稳幅作用。

稳幅二极管的选择：

i. 温度 选用硅二极管

ii. 振幅上、下半波对称 配对选用二极管，使两只二极管的特性相同

R_3 的选择：与二极管的正向电阻 R_d 接近时，稳幅作用和波形失真都有较好的效果。 R_3 通常选几千欧，并通过实验来调整。

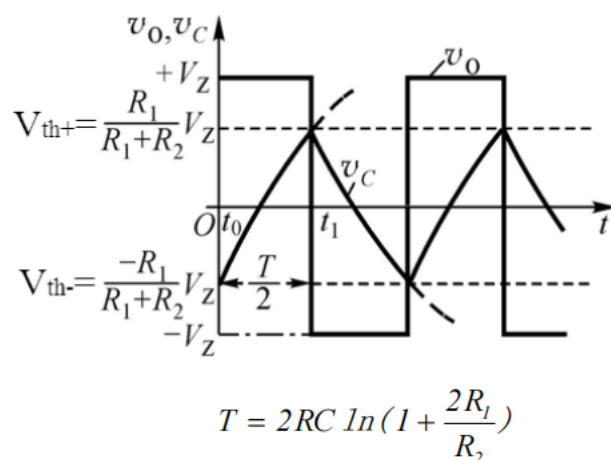
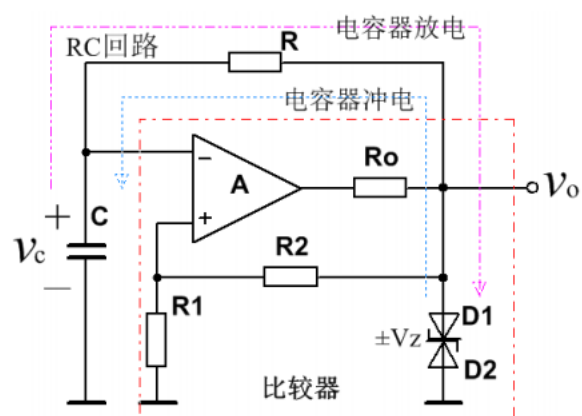
R_2 的阻值选定： $R_2 = R_f - (R_3 // R_d) \approx R_f - \frac{1}{2} R_3$

若取 $R_3 = 10k\Omega$ ，由 $R_f = 31.5k\Omega$ 可求得 $R_2 = 21.5k\Omega$

2. 方波发生电路设计原理

(用集成运放构成的方波发生电路设计之一)

方波发生电路由反向输入的滞回比较器和普通 RC 积分电路组成。RC 回路既作为延迟环节，又作为反馈网络，通过 RC 充、放电实现输出状态的自动转换。波形图中的 V_{th-} 和 V_{th+} 分别为滞回比较器负门限电压和正门限电压。该电路线路简单，但三角波的线性度较差，主要用于产生方波。



R_1 、 R_2 组成正反馈网络，当有输出电压 v_o 时，运放同相端的反馈电压为 $V_f(+) = R_1 / (R_1 + R_2) v_o$ 。

R 、 C 组成的充放电回路形成负反馈网络。

运放仅起到比较器的作用：利用电容两端电压 $V_f(-)$ 和 $V_f(+)$ 比较，决定 v_o 的正负， v_o 的正负又决定了通过电容的电流是充电（使 v_c 增加）还是放电（使 v_c 减小），如此不断反复，就在输出端产生了周期性的方波。

电路中两个稳压二极管 D_1 和 D_2 ，保证了方波的正负对称性。 R_o 为稳压二极管的限流电阻。

设计一个由滞回比较器和 RC 电路组成的 $f_o = 1kHz$ 的方波发生电路：

选择 $R_1 = 2R_2 = 15k\Omega$ ， $C = 0.022 \mu F$ 。

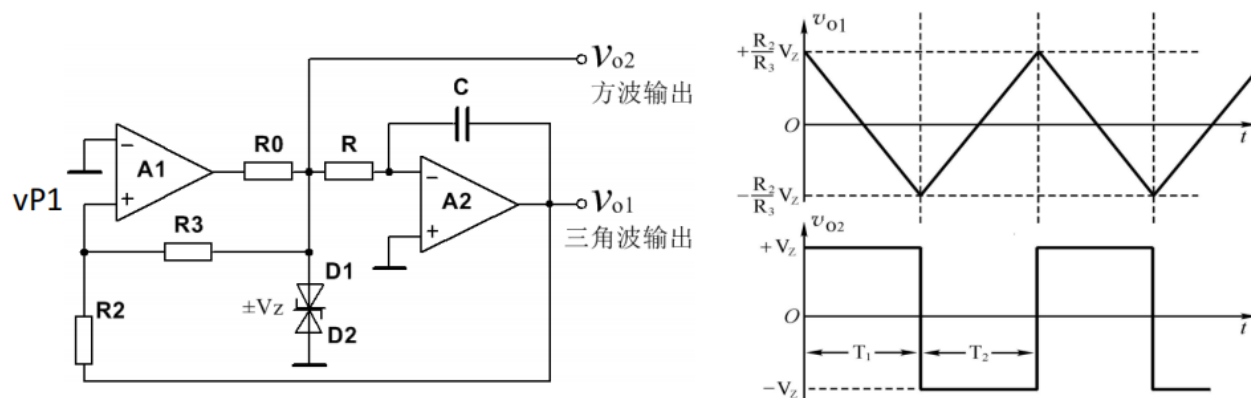
$$f = \frac{1}{2RC \ln(1 + \frac{2R_1}{R_2})}$$

根据 $f =$ ，得 $R = 32.78k\Omega$ 。

为了校准频率，通常 R 采用固定电阻与变阻器串联构成，取电阻器为 $30k\Omega$ ，变阻器为 $15k\Omega$ ，尽量满足 $R = R_1/R_2f$ 。

3. 方波三角波发生电路设计原理：

更常用的方波三角波发生电路是由集成运放组成的滞回比较器与积分器组成，由于采用了由集成运放组成的积分器，电容 C 始终处在恒流充、放电状态，使三角波的线性度大为改善，而且也便于调节振荡频率和幅度。



集成运放 A1 构成同相滞回比较器，A1 同相端电位 V_{P1} 由 V_{o1} 和 V_{o2} 确定。利用叠加定理可得：

$$V_{P1} = \frac{R_3}{R_3 + R_2} V_{o1} + \frac{R_2}{R_3 + R_2} V_{o2}$$

当 $V_{P1} > 0$ 时，即 $V_{o1} = +V_Z$ ；当 $V_{P1} < 0$ 时，即 $V_{o1} = -V_Z$ 。

集成运放 A2 构成反相积分器， V_{o2} 为正时， V_{o1} 向负向变化； V_{o2} 为负时， V_{o1} 向正向变化。设电源接通时 $V_{o2} = +V_Z$ ， V_{o1} 线性减小。当 V_{o1} 下降到 $-(R_2/R_3)V_Z$ 时，A1 的输出翻转到 $V_{o2} = -V_Z$ 。

$$\begin{aligned} V_{om1} = V_{TH} &= \frac{R_2}{R_3} V_Z & -V_{om1} = V_{TL} &= -\frac{R_2}{R_3} V_Z \end{aligned}$$

三角波输出幅度：

$$\begin{aligned} T &= 4RC \frac{V_{om1}}{V_Z} = 4RC \frac{R_2}{R_3} & f &= \frac{1}{T} = \frac{R_3}{4RR_2C} \end{aligned}$$

振荡周期：

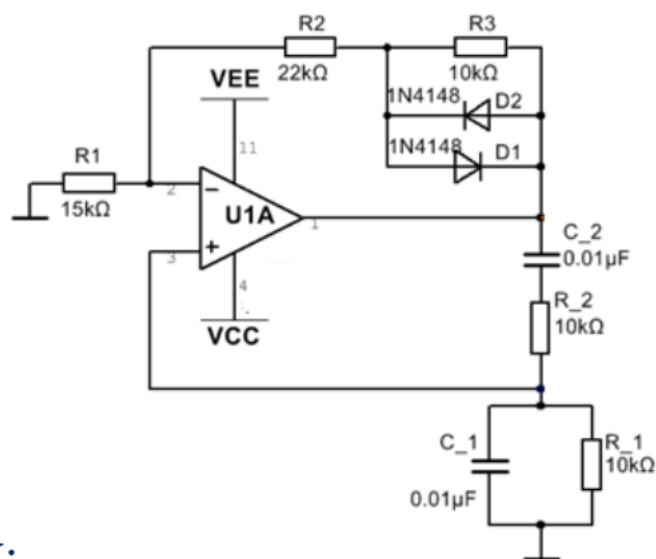
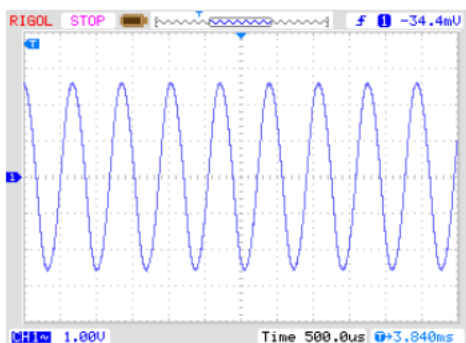
振荡频率：

B. 实验内容：

1. 正弦波发生电路：

(1) 正弦波发生电路设计：

正弦波发生电路的实现方案 LM358



- 1、振荡频率 $f_0=1.462\text{kHz}$;
- 2、输出正弦波幅值 $V_{om}=2.80\text{V}$;
- 3、谐波失真度 $\gamma=2.42\%$ 。

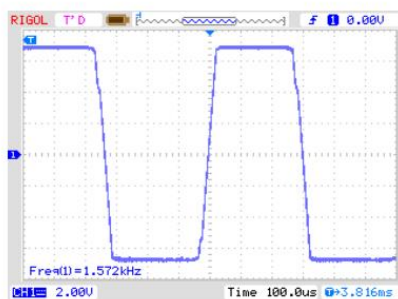
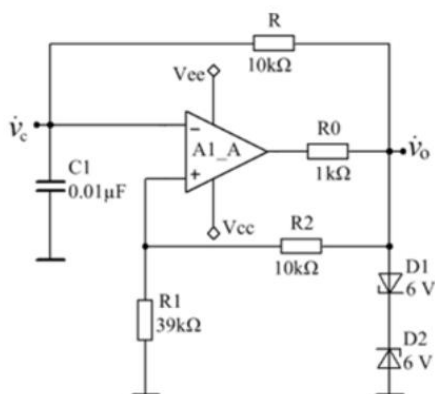
(2) 正弦波发生电路的调试:

- i. 调整反馈电阻 R_f , 使电路起振, 且波形失真最小。如不能起振, 说明负反馈太强, 应适当增大 R_f 。如波形失真严重, 则应适当减小 R_f 。
- ii. R_3 的取值需兼顾稳幅作用和波形失真, 可通过实验来调整。
- iii. 改变选频网络的 R 或 C , 即可调节振荡频率。一般采用改变 C 作频率量程的切换, 改变 R 作频率量程内的细调。
- iv. 若要改变正弦波输出幅度, 可将 R_1 或 R_2 用电位器替换, 调节电位器阻值可改变输出正弦波的幅度, 频率保持不变。

2. 方波发生电路:

(1) 方波发生电路的设计:

方波发生电路的实现方案 LM358



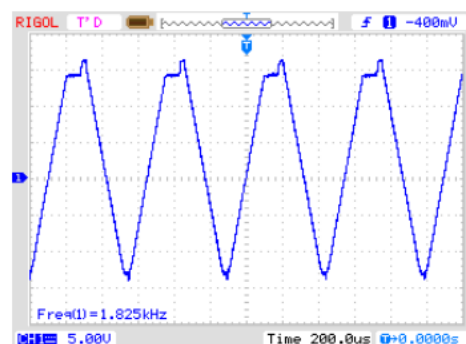
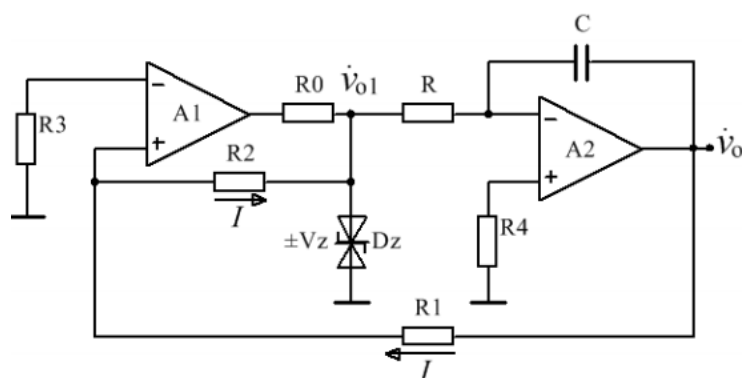
- 1、方波频率 $f_0=1.572\text{kHz}$;
- 2、输出方波幅值 $V_{om}=\pm 6.4\text{V}$;
- 3、上升时间 $t_r=56.0\mu\text{s}$ 。

(2) 方波发生电路的调试

- 在考虑正反馈支路 R_1 和 R_2 的取值时，必须注意不能使输出电压 v_o 反馈到同相端的电压 $V_f(+)$ 峰峰值超过运算放大器的共模输入电压 V_{ICR} 范围，否则会损坏运放。
 - 输出电压的高电平时间 T_1 与输出电压周期 T 之比称为占空比。通过改变电容器 C 的充放电时间常数，就可以获得占空比可调的矩形波电路。
 - 调节 R 参数，可改变方波的输出频率。
 - 调节比较电压值 (R_2/R_1) 也可改变方波频率，但同时三角波的幅值也随之变化。如要互不影响，仍需通过调节 R 或者 C 的参数来改变频率。
3. 方波三角波发生电路：

(1) 方波三角波发生电路设计：

三角波发生电路的实现方案 LM358



1、方波频率 $f_o = 1.825\text{kHz}$;

2、输出方波幅值 $V_{om} = \pm 15\text{V}$;

$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_2}{4RR_1C}$$

三、主要仪器设备

示波器、万用表、模电实验箱

四、操作方法和实验步骤

A. 正弦振荡电路：

- 画出所设计的桥式正弦波振荡电路，记录仿真分析波形。
- 实验室做实验验证。整理实验数据，记录示波器显示波形，并和理论设计值相比较。
- 分析调节 R_2 时，输出电压 v_o 从无到有，从正弦波直至削顶，出现这三种情况的原因和条件。
- 探讨二极管 D_1 和 D_2 开路时输出波形的变化。
- 探讨 R_3 开路时输出波形的变化。

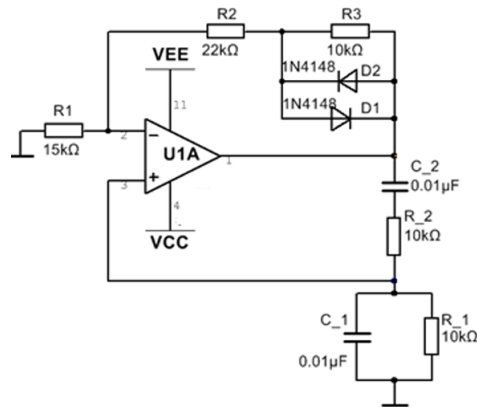
B. 方波、三角波电路：

- 写出设计过程和仿真结果，画出电路图。
- 实验室做实验验证。整理实验数据，并与理论设计值相比较。
- 画出所记录的方波和三角波波形，并标明幅度和周期。

五、实验数据记录和处理

1. 正弦波发生电路：

1.1 实验参数：（用滑动变阻器代替 R_2 可以改变增益，实验波形变化记录于六）

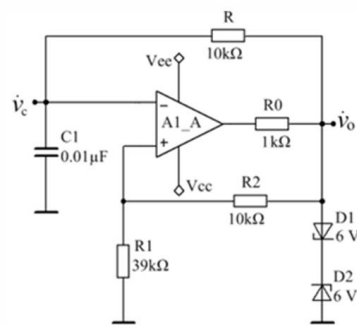


1.2 实验数据记录：

反馈电阻 $R_f=R_2+R_3$	振荡频率/Hz	正弦波幅值/V
32k Ω	1515	2.875

2. 方波发生电路：

2.1 实验参数：

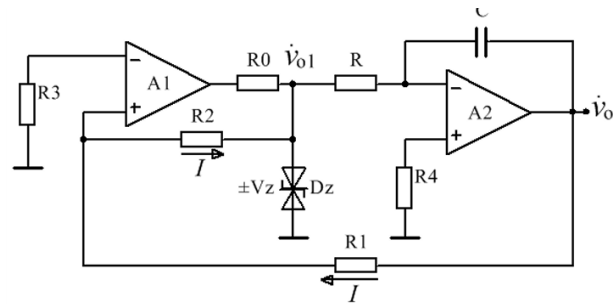


2.2 实验数据记录：

振荡频率/Hz	方波幅值/V
1623	6.12

3. 方波三角波发生电路：

3.1 实验参数：



其中： $R_0 = 1k\Omega$, $R = 15k\Omega$, $R_1 = 15k\Omega$, $R_2 = 20k\Omega$, $C = 0.01\mu F$

	振荡频率/Hz	输出幅值/V
方波	892.8	14.37
三角波	892.8	11.56

1. 正弦波发生电路:

1.1 理论值、实验值比较 ($R_f=R_2+R_3=32k\Omega$ 时)

	理论值/仿真值	实验值
振荡频率/kHz	1.462	1515
输出电压幅值/V	2.80	2.88

[illegible]

图 1 R_2 最小时 5V 量程下观察不到正弦波形



图 2 可以看见幅值较小的正弦波形

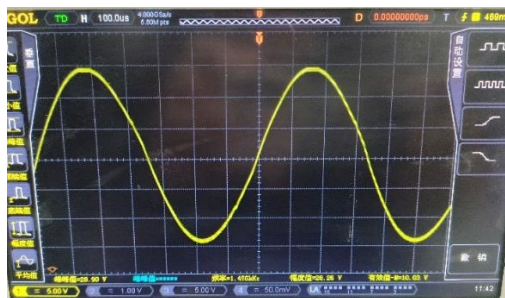


图 3 已经可以发现顶端已经产生一定的失真

1.3 验证 R_3 以及 D_1 、 D_2 的稳幅作用



图 4 断开 D_1 、 D_2 时的输出波形，发生削顶

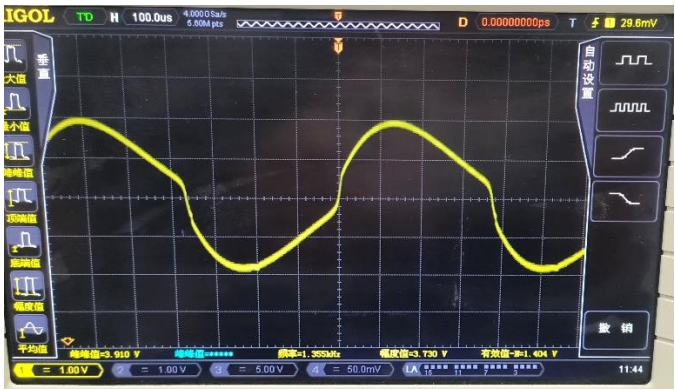


图 5 R_3 开路时的输出波形，失真严重

分析：本电路一旦起振，因为 $A_{vf}>1$ ，所以输出幅度会不断增大并最终出现严重的波顶失真（见图 4）所以需要随着 V_O 增大而减小反馈系数 A_v 。本电路使用 D_1 、 D_2 组成的稳幅电路。当振幅升高时，二极管的等效电阻将会减小，所以 D_1 、 D_2 、 R_3 并联支路的电阻将会减小，将会减小 A_v ，从而达到稳幅的目的。对于 R_3 ，它兼顾稳幅和调节负反馈：选值不能太大（对削弱波形失真不利，见图 5），不能太小（稳幅效果差）。

2. 方波发生电路：

2.1 理论值、实验值对比：

	理论值/仿真值	实验值	相对误差
振荡频率/kHz	1.572	1.623	3.2%
输出电压幅值/V	5.10	14.06	175.7%

- 振荡频率的相对误差小于 5%，可以认为实验符合理论计算。
- 然而方波的输出幅度却完全不是稳压值。原因可能是：实验时由于没有找到 6V 的稳压二极管，故使用 5.1V 的进行代替，然而使用前没有检查稳压管是否可以正常工作。由于对方波输出电路的原理不熟悉（上周实验时还没有学到），发现波形正确后便记录波形继续下一个实验。方波的形状良好、失真较少、正负半周对称，可以证明方波发生没有问题，所以有很大可能性是稳压管损坏/开路等原因造成的输出幅值远大于稳压值。

2.2 实验波形记录



图 6 单独的方波发生电路 V_O

3. 方波、三角波发生电路：

3.1 理论值、实验值对比：

- 实验参数： $R_0 = 1\text{k}\Omega$, $R = 40\text{k}\Omega$, $R_1 = 15\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $C = 0.01\mu\text{F}$
- 振荡频率： $f = 1/T = 15\text{k}\Omega / (40\text{k}\Omega * 15\text{k}\Omega * 0.01\mu\text{F}) = 833\text{Hz}$
- 方波输出电压幅值
- 三角波输出输出电压幅值：

	理论值/仿真值	实验值	相对误差
方波振荡频率/Hz	833.3	892.8	7.1%
方波输出电压幅值/V	5.1	14.37	181.8%
三角波振荡频率/Hz	833.3	892.8	7.1%
三角波输出电压幅值/V	3.8	11.56	204.2%

- 方波与三角波应同周期，实验数据满足条件，且相对误差只有 7.1%。考虑到振荡频率与 R 、 C 的大小有关，而 R 、 C 与温度、器件老化等因素有关，故认为实验数据符合理论计算。
- 对于方波、三角波的输出频率，可以发现依然是远大于稳压值。原因同 2.1 中分析（方波与三角波对称性良好、失真小）。另外，理论上，三角波的输出幅度是 $V_O * R_1/R_2$ ，其中 V_O 是方波的输出电压，即 $V_{O\text{三角}} = V_O * 3/4$ ，使用实验数据进行计算发现 $V_O * 3/4 = 10.78\text{V}$ ，与三角波幅值 11.56V 的相对误差为 6.7%，考虑到电阻的误差、示波器读数的误差，可以认为三角波和方波的幅值关系正确。问题出在稳压模块未正常工作。

3.2 波形记录

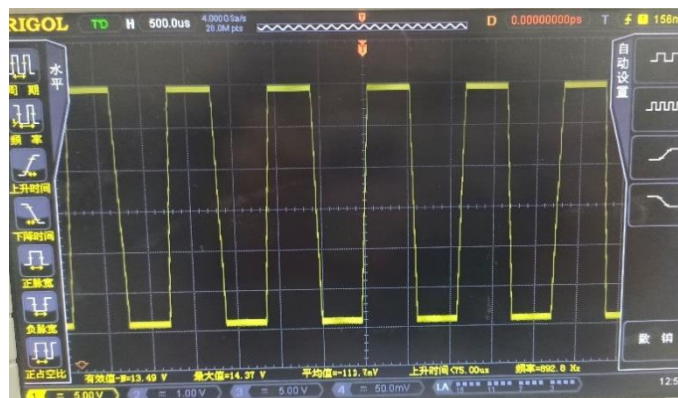


图 7 方波、三角波发生电路的方波输出

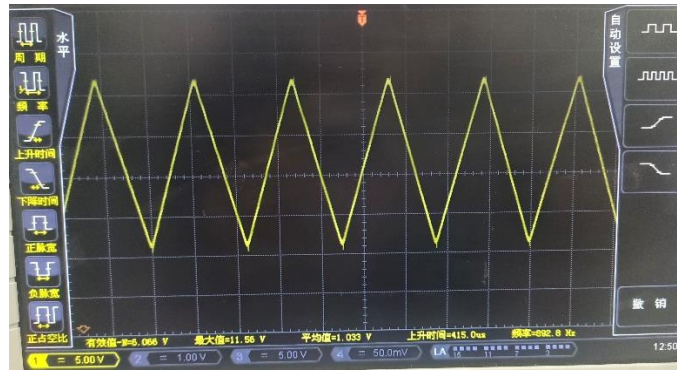


图 8 方波、三角波发生电路的三角波输出

七、讨论、心得

这是最后一次模电实验了，学习了 RC 正弦振荡电路、方波、三角波发生电路的原理、参数计算，上手实践，自行配置参数。但是上次实验模电理论课和实验课有些脱节，做实验的时候懵懵懂懂，所以配电阻、电容参数也不太会，实验波形正确但是输出幅值不对也没及时发现。总之，做模电实验应该要先把理论知识弄扎实，这样做实验的时候才能更得心应手。