

# 东南大学电工电子实验中心

## 实 验 报 告

课程名称： 电路实验

### 第 4 次实验

实验名称： 一阶电路时域响应的研究

院（系）： 信息科学与工程学院 专 业： 信息工程

姓 名： 钟源 学 号： 04022212

实 验 室： 电子技术 7 室 实验组别：

同组人员：  实验时间： 2023 年 8 月 28 日

评定成绩：  审阅教师：

## 一、实验目的

- (1) 研究一阶电路的方波响应；
- (2) 掌握一阶电路时间常数的测量方法；进一步掌握示波器的使用。
- (3) 学习运用电路实现微分、积分的方法，并采用实验的方法验证理论；
- (4) 学习理论设计、实验测量、对比总结的研究方法。

## 二、实验原理（预习报告内容，如无，则简述相关的理论知识点。）

### 1、复习一阶电路的时域响应

#### (1) 零状态响应：所有储能元件的初始值为零的电路对外加激励的响应

对于图 1 所示 RC 一阶电路，开关 S 在位置 2， $u_c(0_-) = 0$ ，处于零状态，当  $t=0$  时，开关转到位置 1，直流电源通过 R 向 C 充电。

由方程  $u_c(t) + RC \frac{du_c(t)}{dt} = U_s \quad t \geq 0$  和初始条件  $u_c(0_-) = 0$

电容的电压和电流随时间变化的规律为：

$$u_c(t) = U_s(1 - e^{-t/\tau}) \quad t \geq 0$$

$$i_c(t) = \frac{U_s}{R} e^{-t/\tau} \quad t \geq 0$$

式中  $\tau = RC$  称为时间常数； $\tau$  越大，过渡过程持续的时间越长。

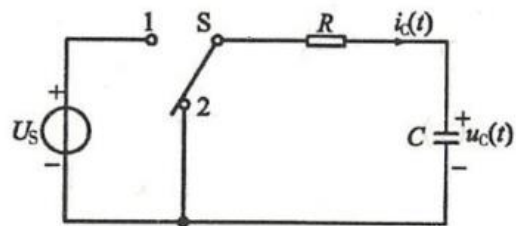


图 1 零状态响应和零输入响应

#### (2) 零输入响应：电路在无激励情况下，由储能元件的初始状态引起的响应。

图 1 中，当开关 S 置于位置 1，充电稳定后， $u_c(0_-) = U_o$  时，再将开关 S 转到位置 2，

电容的初始电压  $u_c(0_-)$  经 R 放电。

由方程  $u_c(t) + RC \frac{du_c(t)}{dt} = 0 \quad t \geq 0$  和初始条件  $u_c(0_-) = U_o$

电容上的电压和电流随时间变化的规律为：

$$u_c(t) = U_c(0_-) e^{-t/\tau} \quad t \geq 0$$

$$i_c(t) = \frac{U_c(0_-)}{R} e^{-t/\tau} \quad t \geq 0$$

(3) **全响应：**电路在输入激励和初始状态共同作用下引起的响应称为全响应。

如图 2 所示电路，当  $t=0$  时合上开关 S，则描述电路的微分方程为

$$u_c(t) + RC \frac{du_c(t)}{dt} = U_s$$

初始值为  $u_c(0_-) = U_0$

可以得出全响应

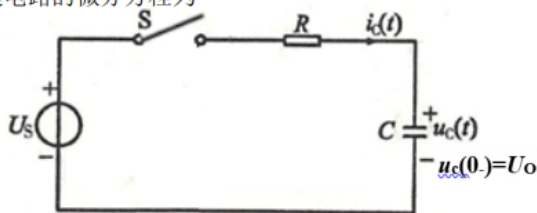


图 2 全响应

$$u_c(t) = U_s(1 - e^{-t/\tau}) + u_c(0_-)e^{-t/\tau} = [u_c(0_-) - U_s]e^{-t/\tau} + U_s \quad t \geq 0$$

零状态分量      零输入分量      自由分量      强制分量

$$i_c(t) = \frac{U_s}{R} e^{-t/\tau} - \frac{u_c(0_-)}{R} e^{-t/\tau} = \frac{U_s - u_c(0_-)}{R} e^{-t/\tau} \quad t \geq 0$$

零状态分量      零输入分量      自由分量

**总结：**

①全响应是零状态分量和零输入分量之和

②全响应也可以看成是自由分量和强制分量之和，自由分量的起始值与初始状态和输入有关，而随时间变化的规律仅仅决定于电路的 R、C 参数；强制分量则仅与激励有关。当  $t$  趋向于  $\infty$  时，自由分量趋于零，过渡过程结束，电路进入稳态。

对于上述零状态响应、零输入响应和全响应的一次过程， $u_c(t)$  和  $i_c(t)$  的波形可以用长余辉示波器直接显示出来。示波器工作在慢扫描状态，观察信号接在示波器的 DC 耦合输入端。

(4) 零状态电路对单位阶跃函数  $U(t)$  的响应称为**阶跃响应**。

工程上常用阶跃函数和阶跃响应来描述动态电路的激励和响应。例如图 1 所示电路，在  $t=0$  时开关 S 从位置 2 转到位置 1，等效为一个幅度为  $U_s$  的阶跃信号 ( $U_s U(t)$ ) 的作用；当  $t=t_0$  时，开关 S 由位置 1 转到位置 2，等效为阶跃信号 ( $U_s U(t)$ ) 与延时阶跃信号 ( $-U_s U(t-t_0)$ ) 的共同作用 ( $t \geq t_0$ )。对于线性定常电路，当电路的激励是一系列阶跃信号  $U(t)$  和延时阶跃信号  $U(t-t_0)$  的叠加时，电路的响应也是该电路的一系列阶跃响应和延时阶跃响应的叠加。

(5) **方波响应及时间常数  $\tau$  测量。**

方波信号可以看成是一系列阶跃信号和延时阶跃信号的叠加。设方波幅值为  $U_s$ ，则方波可以写成

$$u_s(t) = U_s U(t) - U_s U(t - \frac{T}{2}) + U_s U(t - T) - U_s U(t - \frac{3}{2}T) + \dots$$

①当方波的半个周期远大于电路的时间常数 ( $\frac{T}{2} \geq 5\tau$ ) 时，可使电容每次充、放电的暂态过程基本结束，再开始新一次的充、放电暂态过程。这时，一个周期方波信号作用的响应为

$$u_c(t) = U_s \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) U(t) - U_s \left(1 - e^{-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}}\right) U\left(t - \frac{T}{2}\right) =$$

$$\begin{cases} U_S \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ U_S e^{-(t-\frac{T}{2})/\tau} & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases}$$

从图 3 (a) 可以看出, 充电曲线对应电路的零状态响应, 放电曲线对应电路的零输入响应。方波响应是零状态响应和零输入响应的多次过程。因此, 可以用方波响应借助示波器来观察和分析零状态响应和零输入响应, 并从中测出时间常数  $\tau$ 。对于充电曲线, 幅值由零上升到终值的 63.2% 所需的时间为时间常数。对于放电曲线, 幅值下降到初值的 36.8% 所需的时间为时间常数。

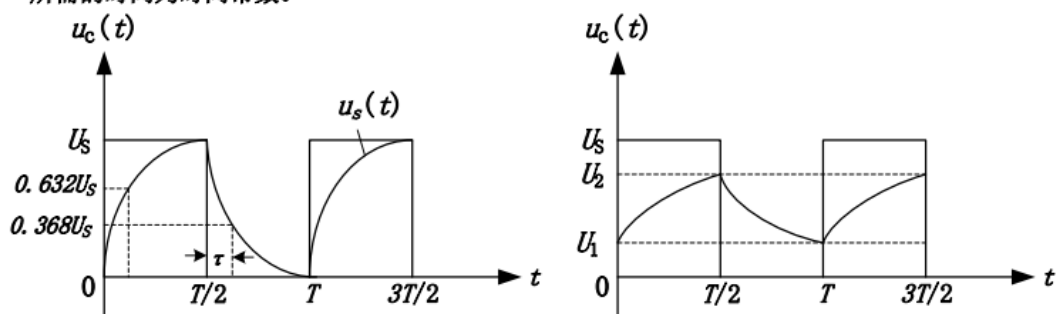


图 3 方波响应

②当方波的半个周期等于甚至小于电路的时间常数时, 电容每次充、放电的暂态过程尚未结束, 又开始新一次的充放电暂态过程。这样, 充放电过程都不可能完成, 如果 3 (b) 所示, 充放电的初始值可以用以下公式求出:

$$U_1 = \frac{U_S(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}})e^{-T/2\tau}}{1 - e^{-T/\tau}}$$

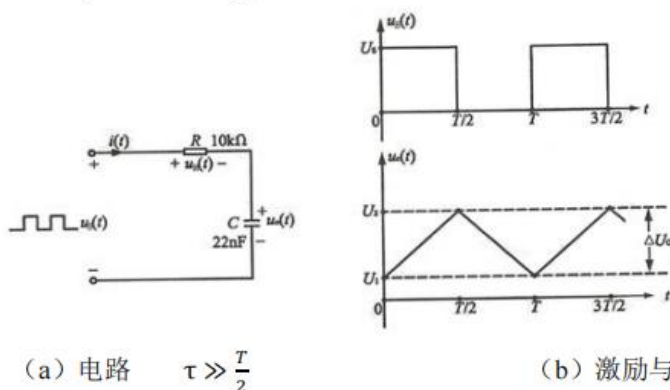
$$U_2 = \frac{U_S(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}})}{1 - e^{-T/\tau}}$$

## 2、复习积分电路和微分电路;

### (1) 积分电路:

如图 4 (a) 所示, 方波信号作用在 RC 电路中, 当时间常数  $\tau (=RC)$  很大 ( $\tau = 10 \cdot \frac{T}{2}$ )

时,  $u_o(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \approx \frac{1}{RC} \int_0^t u_s(t) dt$



(a) 电路  $\tau \gg \frac{T}{2}$

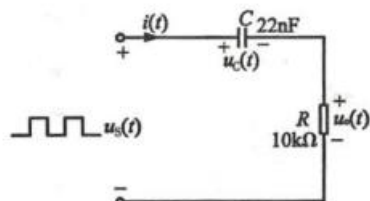
(b) 激励与响应波形

图 4 积分电路

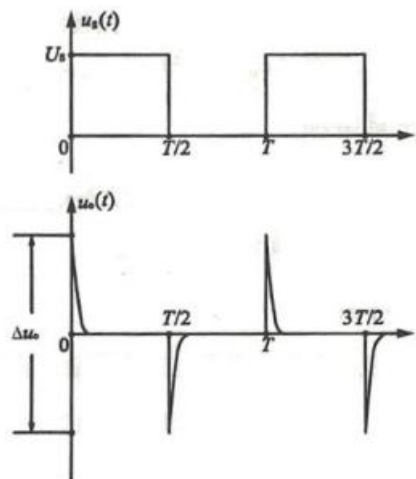
## (2) 微分电路:

如图 5 (a) 所示电路中, 当时间常数  $\tau$  很小 ( $\tau = \frac{1}{10} \cdot \frac{T}{2}$ ) 时,

$$u_o(t) = Ri(t) = R \cdot C \frac{du_c(t)}{dt} \approx RC \frac{du_s(t)}{dt}$$



(a) 电路  $\tau \ll \frac{T}{2}$



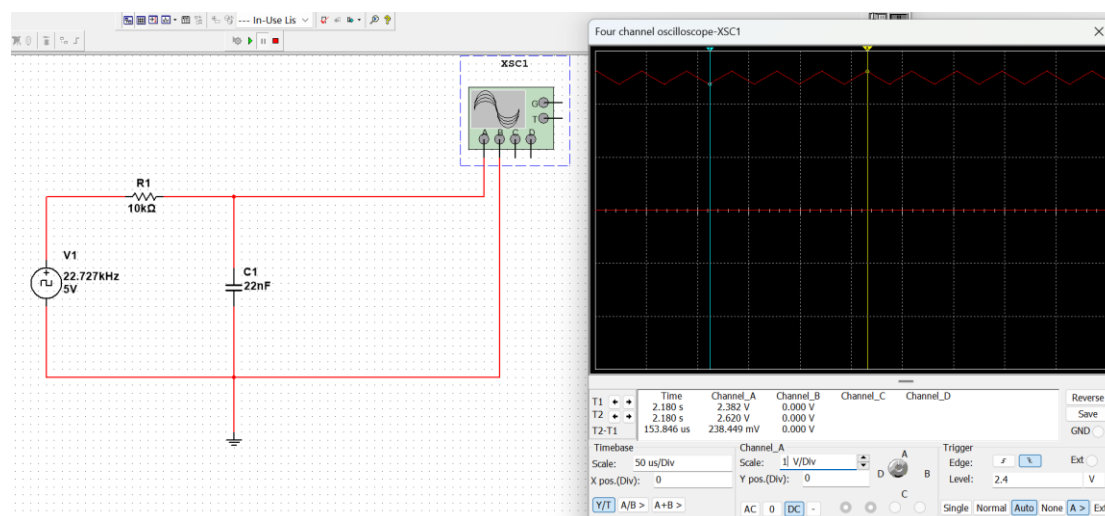
(b) 激励与响应波形

### 3. 确定实验内容 1 电路电阻取值。

由  $RC = \tau$ , 代入  $C = 2.2 \times 10^{-8} \text{ F}$ ,  $\tau = 6.6 \times 10^{-5} \text{ s}$   
 可得  $R = \frac{\tau}{C} = 3 \times 10^3 \Omega = 3 \text{ k}\Omega$

### 4、按照实验内容 2 参数要求, 结合自身已有元件参数, 设计积分、微分电路。并用 Multisim 软件进行仿真, 预先测量相应值及波形。

#### A. 积分电路



积分电路电路图

$$\tau = 10 \times \frac{T}{2} = 5T$$

当  $\tau = 0.22\text{ms}$  时,  $T = 44\mu\text{s}$

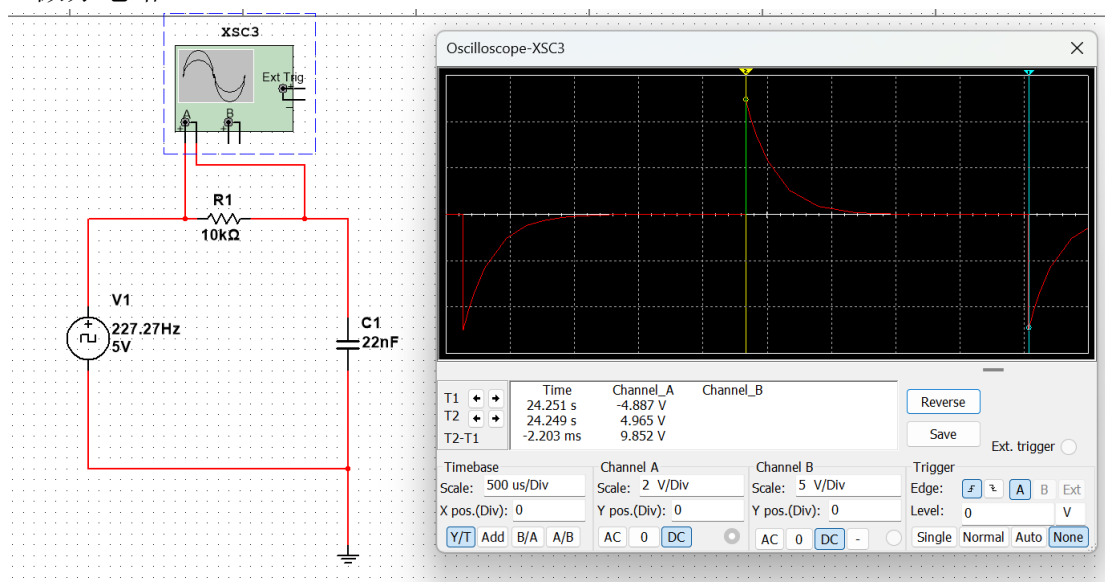
而  $f = \frac{1}{T} = 22.727\text{kHz}$

$$\Delta U_0 = 238.449\text{mV}$$

$$\frac{\Delta U_0}{U_s} = 0.0476898$$

计算  $\Delta U_0$ ,  $U_s$

## B. 微分电路



微分电路电路图

$$\tau = \frac{1}{10} \times \frac{T}{2} = \frac{T}{20}$$

当  $\tau = 0.22\text{ms}$  时,  $T = 4.4\text{ms}$

而  $f = \frac{1}{T} = 22.727\text{Hz}$

$$\Delta U_0 = 9.852\text{V}$$

$$\frac{\Delta U_0}{U_s} = 1.9704$$

计算  $\Delta U_0$ ,  $U_s$

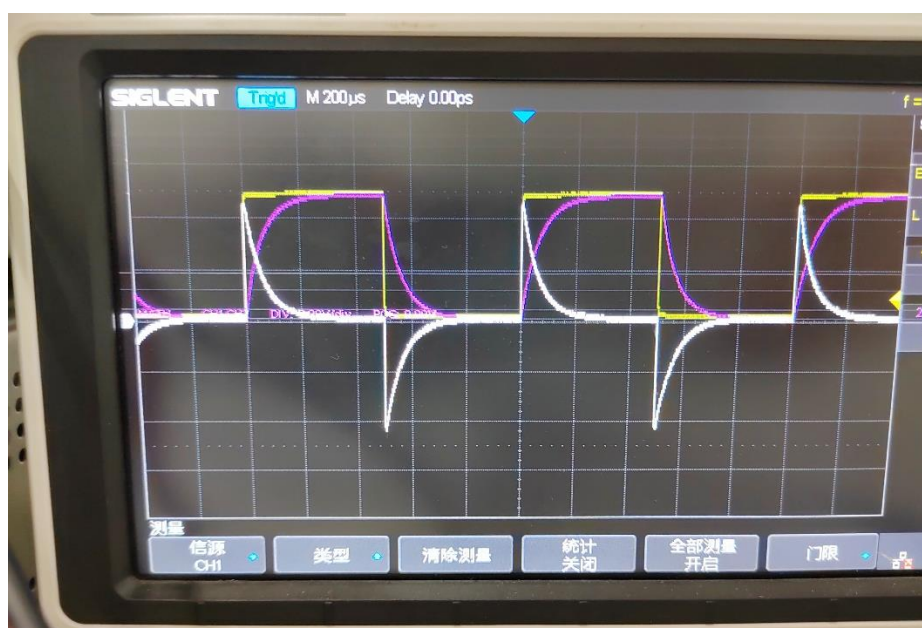


### 三、实验内容

#### 1、研究 RC 电路的方波响应

实验电路如图 6 所示: 要求电路时间常数  $\tau=0.066\text{ms}$ 。确定电路 R 参数。

(1) 激励信号取频率为  $1\text{kHz}$ , 高电平电压为  $5\text{V}$ , 低电平电压为  $0\text{V}$  的方波。用示波器观察测量并记录方波响应  $u_C(t)$  和  $i_C(t)$  波形, 解释观察到的  $u_C(t)$  波形现象。



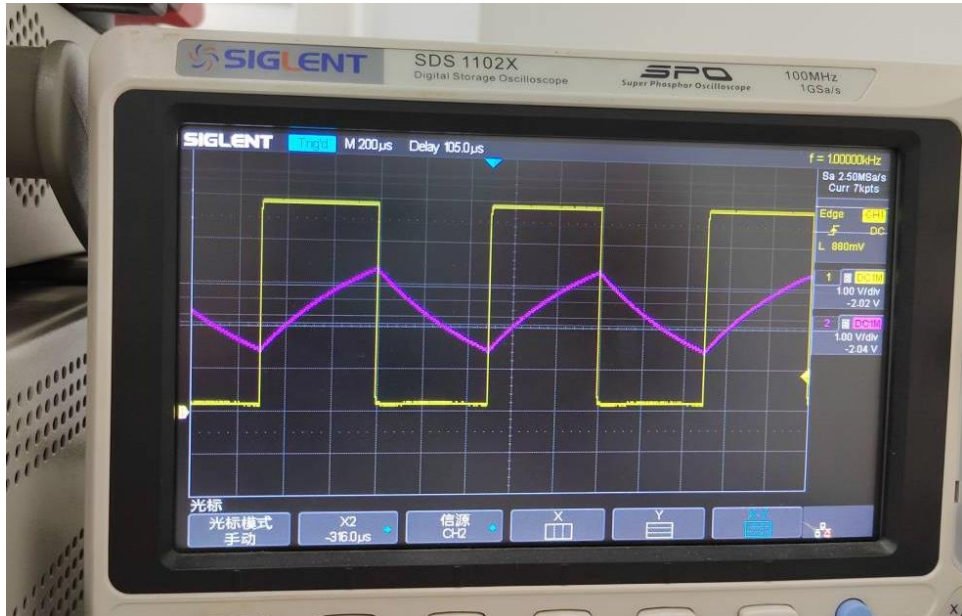
图像中 CH1 是信号源的波形, CH2 是  $U_C$  的波形, 则  $\text{MATH}=\text{CH1}-\text{CH2}$  为  $U_R$  的波形, 由于  $I_R=U_R/R$ , 故  $I_R$  与  $U_R$  的波形形状是一样的。本实验中, 电源的周期  $T=1\text{ms}$ , 电路的时间常数  $\tau=0.066\text{ms}$ ,  $T/2 \gg 5$ , 故电容每次充、放电的暂态基本结束, 过一段时间再开始新一次的充放电暂态过程。因此当波形到达最高点时, 会维持高位一段时间, 再下降。

(2) 测出电路实际时间常数  $\tau$ 。



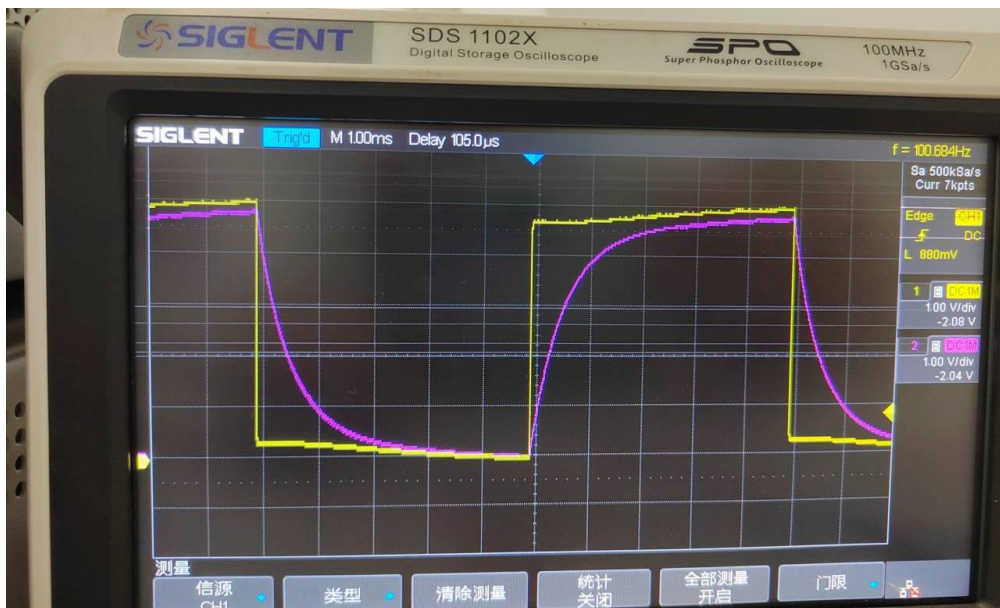
由图可见， $\tau=64\mu\text{s}$ 。

(3) 将  $R$  值增至 10 倍值，输入激励信号不变，观察响应  $u_c(t)$  波形现象做如何变化，并作记录分析。



$R$  增大至原来的 10 倍时，时间常数  $\tau$  增大至原来的 10 倍，此时信号源的周期  $T$  约为  $\tau$  的 0.75 倍  $< 5$  倍，因此电容每次充、放电的暂态过程尚未结束，又开始新一次的充、放电暂态过程，所以  $u_c$  还没达到信号源输出值的峰值就开始减小，还没达到信号源输出值的谷值就开始增大。

(4) 要能保持 (1) 中响应  $u_c(t)$  波形现象，如何调整输入信号？观察记录调整后的  $u_c(t)$  波形。



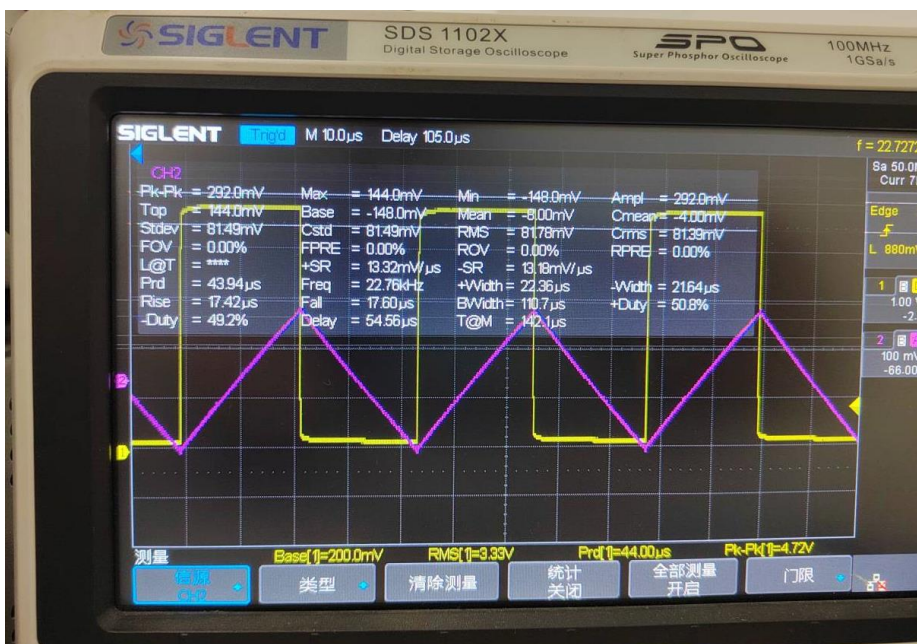


由于时间常数变为原来的 10 倍，所以若想让 UC 的波形与原先相同，电源的周期应当也变为原来的 10 倍，故其频率应当变为原来的十分之一（100Hz，如上图）。

## 2、积分电路和微分电路

设计并搭试积分、微分电路，要求 $\tau = 0.22\text{ms}$ ，选取合适的输入方波频率，用示波器观察记录各输出电压 $u_o$ 波形，测量 $\Delta u_o$ 、 $U_S$ 并计算 $\Delta u_o/U_S$ 比值。与 Multisim 软件仿真结果对比分析。（注意测量方法，当交流信号叠加直流信号，交流信号很小，直流信号相对于交流信号较大时，要精确测量交流信号，示波器通道耦合方式须用交流耦合。）

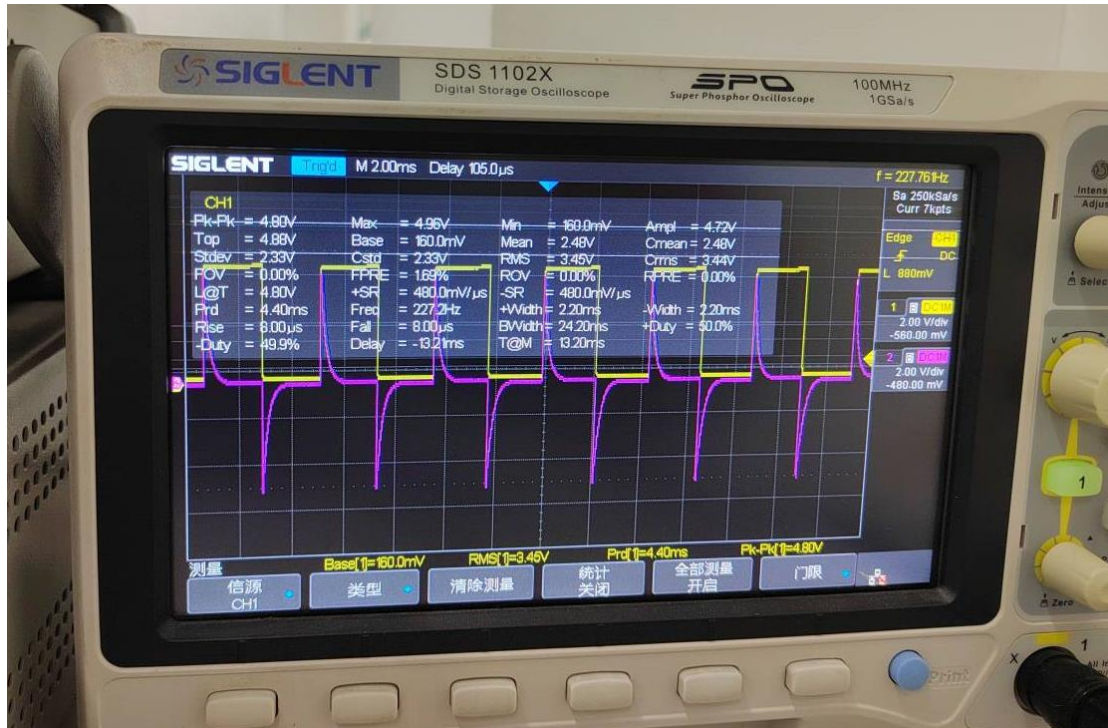
### A. 积分电路



### $\Delta U_o$ 波形图

由以上结果可知,  $\Delta U_o=292\text{mV}$ ,  $U_s=4.64\text{V}$ ,  $\Delta U_o/U_s=0.0629$ , 在 Multisim 软件的仿真电路中  $\Delta u_o/U_s=0.0477$ , 与实验的结果近似, 由于输出源的频率较大, 周期较小, 故电容电压未达到理论上可达到的极值时就反向变化, 所以理论上的结果成立。

### B. 微分电路





### $\Delta U_o$ 波形图

由以上结果可知,  $\Delta U_o=9.20V$ ,  $U_s=4.72V$ ,  $\Delta U_o/U_s=1.949$ , 在 Multisim 软件的仿真电路中  $\Delta u_o/U_s=1.9704$ , 与实验的结果近似相同, 由于电容的充放电过程都可以完全进行, 故 UC 可以达到它的最大值和最小值, 并且和理论值接近。

## 四、实验使用仪器设备（名称、型号、规格、编号、使用状况）

示波器：鼎阳 SDS1202X 示波器 良好

信号源：SDG1062X 信号源 良好

数字万用表：LINI-T UT803 良好

稳压电源：SPD3303C 系列可编程线性直流电源 良好

## 五、实验总结

（实验误差分析、实验出现的问题及解决方法、思考题（如有）、收获体会等）

### 实验误差分析：

- ①. 由于无论输出源电压的高平值和低平值如何设置, 在示波器上显示的波形都是关于 x 轴对称的, 所以在读取电容电压将至原来的 36.8% 的点时, 应当选取与最低点的差值达到最大值的 36.8% 的点。
- ②. 在读取时间常数以及  $\Delta U_o$ ,  $U_s$  时, 可以选择 Measure 菜单下的 X-Y 档, 此时可以用 X2-X1,Y2-Y1 直接读出这些值的数值, 而不必多次设置坐标并读取, 在同一图中。减小读取次数可以有效减小误差。

### 实验出现的问题及解决方法：

- ①. 当示波器上显示的波形不稳定时, 可能是接地端没有接在一起, 此时将输出端的接地端以及电源负极接在一起即可, 或者触发值已经调节至波形区以外, 此时调节触发值至波形区域即可;
- ②. 当示波器上的波形稳定显示但是一个周期内波形出现了不正常的弯曲, 此时可能是电源的频率过小或者幅值过低, 此时适当增大电源的频率、增大信号源的输出值即可。
- ③. 在积分电路中, 如果  $U_c$  的波形不是标准的三角波形, 此时可能是因为输出源的频率不够高, 可以持续增大输出源的频率直到  $U_c$  的每一段波形呈现出直线段状。
- ④. 示波器无法直接显示电阻电流  $I_R$  的波形, 由于  $U_R=I_R R$ , 则电阻电压与电流的相位相同, 只是幅值有差异, 可以通过观察电阻电压  $U_R$  的波形间接得出电流  $I_R$  的波形。

## 六、参考资料（预习、实验中参考阅读的资料）

电路实验 2023 教学计划（2023-2024 第一学期）（学生版）