

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 5 次实验

实验名称: 一阶电路时域响应的研究

院（系）： 电子科学与工程

专 业： 电子信息大类（无锡）

姓 名: 孙寒石 学 号: D2219117

实 验 室: 104 实验组别: 17

同组人员： 张扬 实验时间： 2020 年 9 月 14 日

评定成绩: 审阅教师:

一、实验目的

1. 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。
2. 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；
3. 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）

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； τ 越大，过渡过程持续的时间越长。

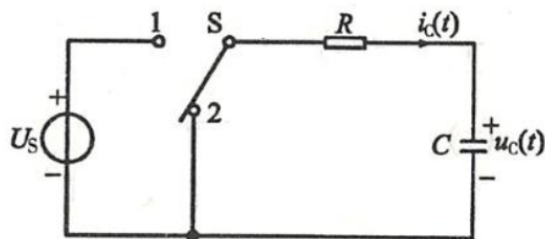


图 1 零状态响应和零输入响应

(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

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

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

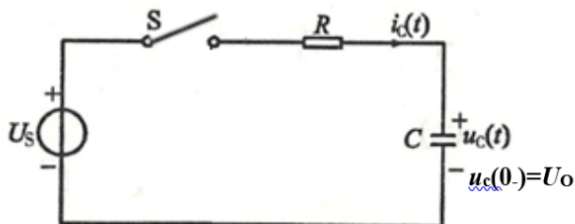


图 2 全响应

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 ∞ 时，自由分量趋于零，过度过程结束，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 τ 测量。

方波信号可以看成时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 τ 。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。

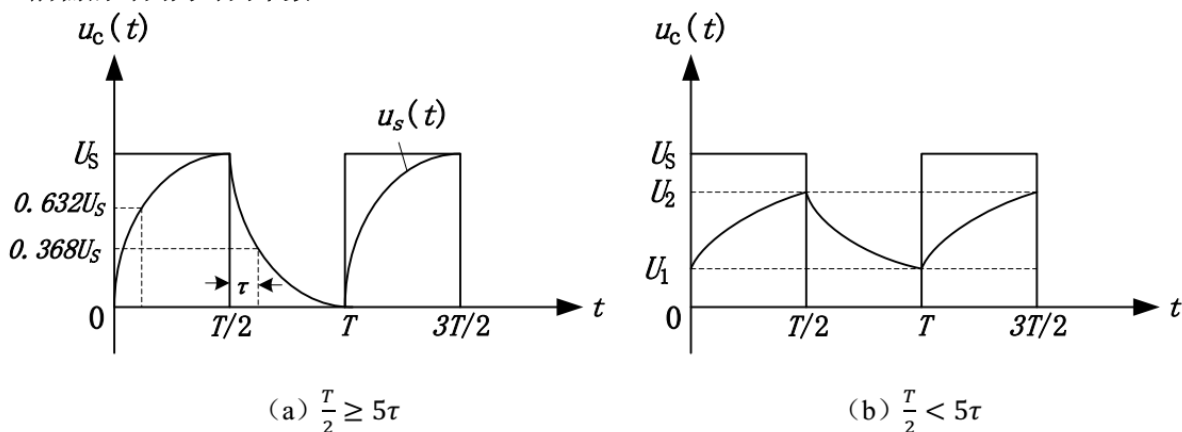


图 3 方波响应

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：

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

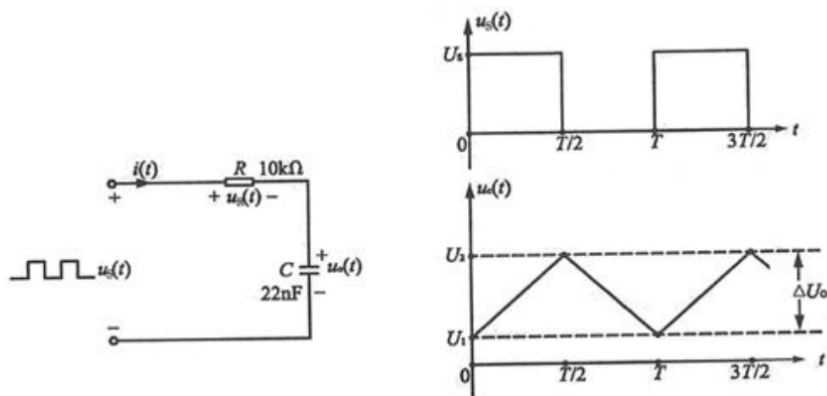
$$U_2 = \frac{U_s(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}})}{1 - e^{-T/\tau}}$$

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 ($\tau = 10 \cdot \frac{T}{2}$)

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



(a) 电路 $\tau \gg \frac{T}{2}$

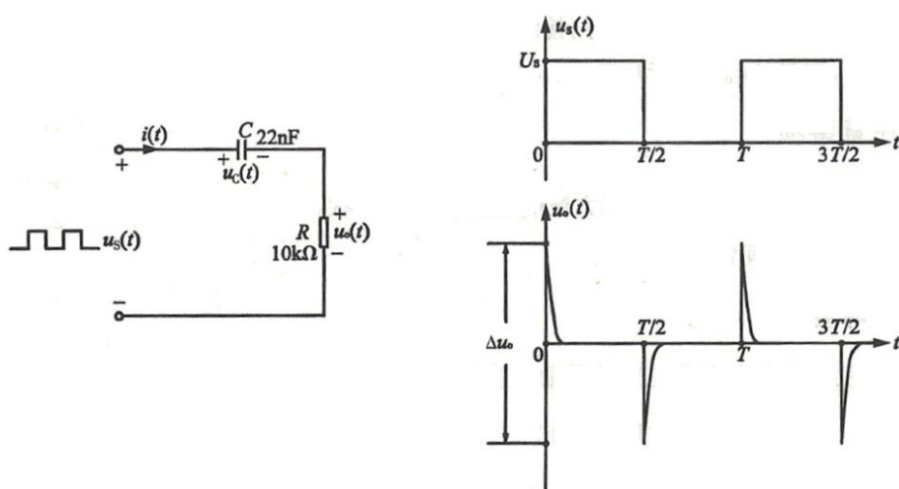
(b) 激励与响应波形

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 τ 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

图 5 微分电路

3. 确定实验内容 1 电路电阻取值。

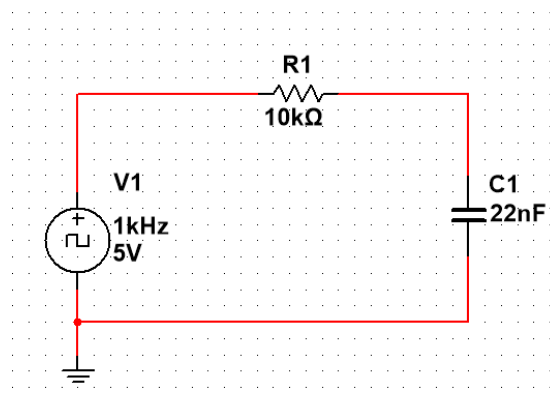
根据公式 $\tau = RC$ ，我们可以求得： $R = \frac{\tau}{C} = 2000\Omega$

3. 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。

积分电路的设计：

由于拥有的电容有限，故选择 22nF 的电容，根据公式 $\tau = RC$ ，我们可以求得：

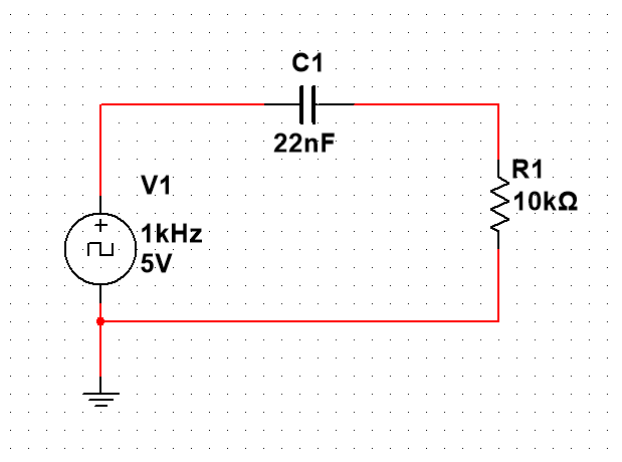
$R = \frac{\tau}{C} = 10000\Omega$ ，从而得到如下电路图：



微分电路的设计：

同上，选择 22nF 的电容，根据公式 $\tau = RC$ ，我们可以求得： $R = \frac{\tau}{C} = 10000\Omega$ ，

从而得到如下电路图：



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 $\tau = 0.044ms$ 。确定电路 R 参数。

根据公式 $\tau = RC$ ，我们可以求得： $R = \frac{\tau}{C} = 2000\Omega$

(1) 激励信号取频率为 1.5kHz，高电平电压为 5V，低电平电压为 0V 的方波。用示波器观察测量并记录

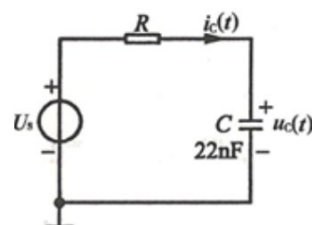
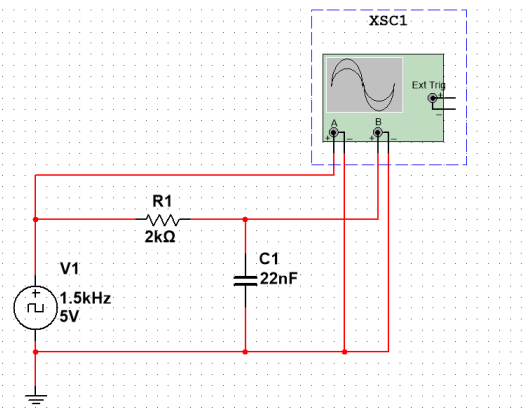
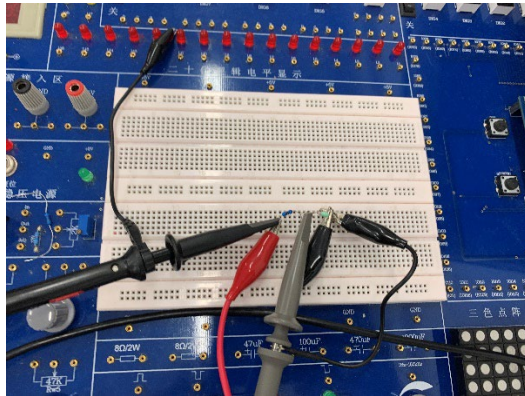


图 6 方波响应电路

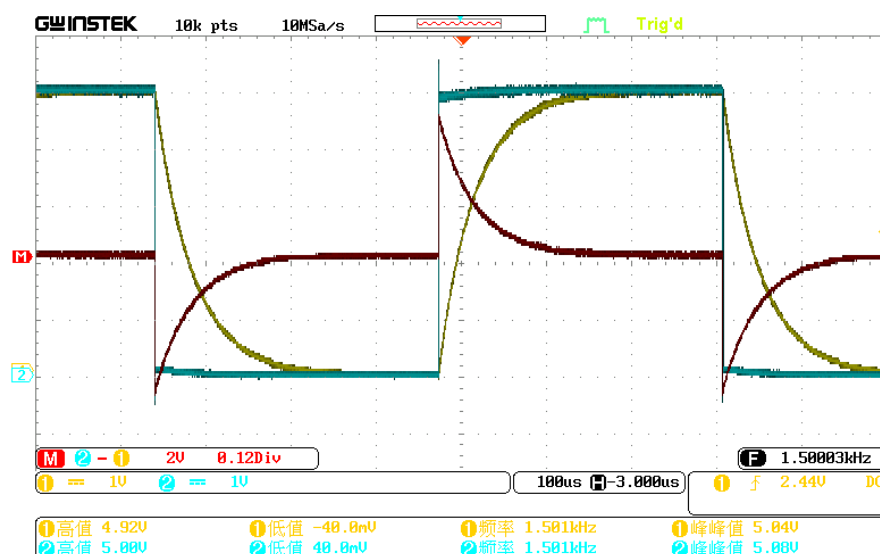
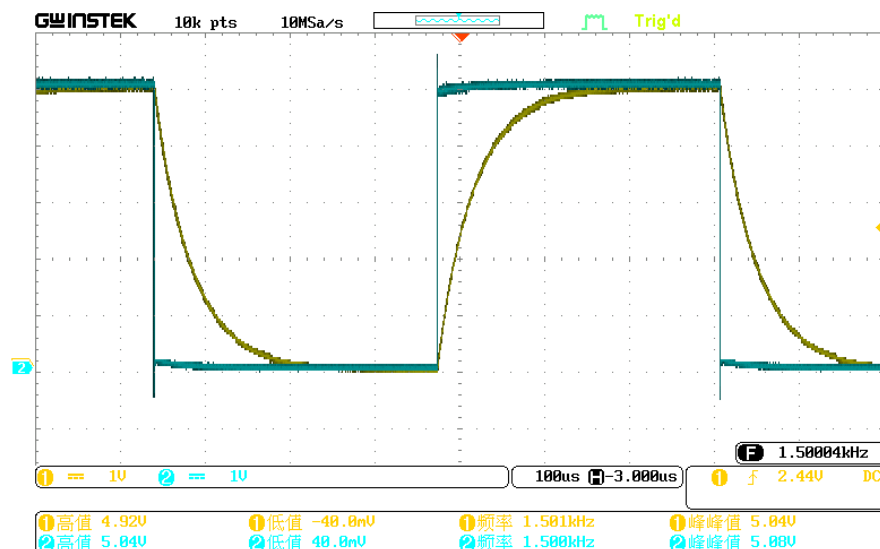
方波响应 $u_c(t)$ 和 $i_c(t)$ 波形，解释观察到的 $u_c(t)$ 波形现象。

实物电路如下左图：

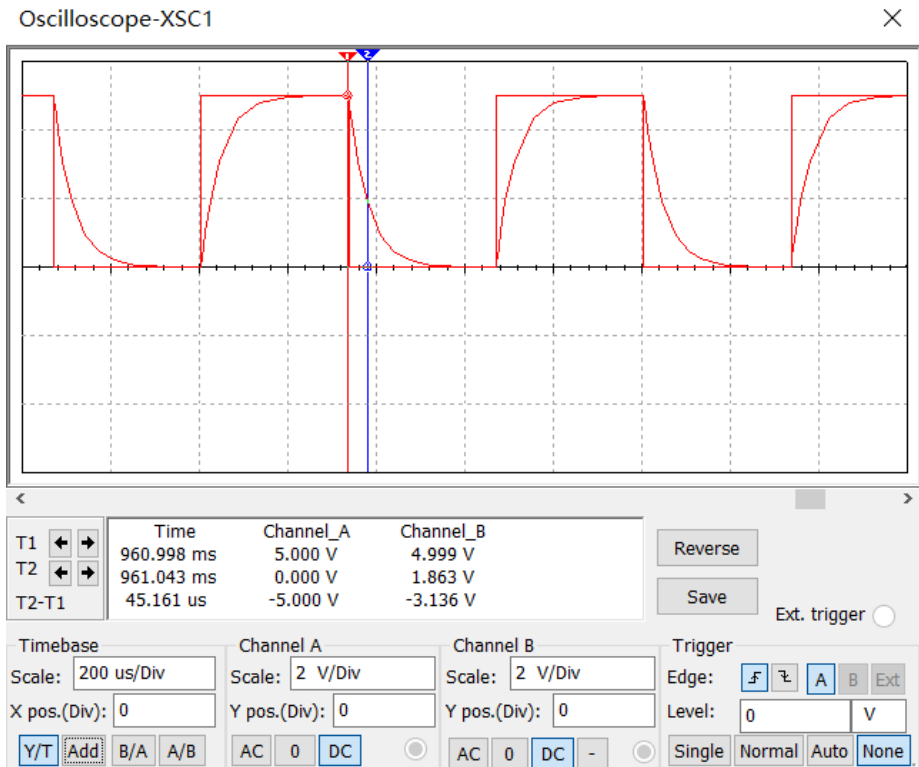
仿真电路图如下右图：



示波器观察到的方波响应 $u_c(t)$ 和 $i_c(t)$ 波形如下图：



仿真实验中示波器观察到的方波响应波形如下图：

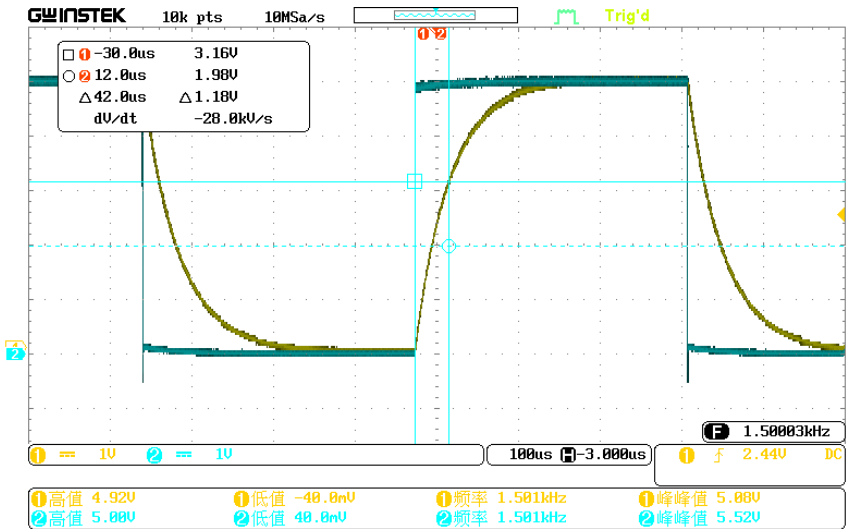


关于 $u_c(t)$ 波形现象的解释：

电容每次充放电的暂态过程基本结束后，再开始新一次的充、放电暂态过程。充电曲线对应了电路的零状态响应，放电曲线对应了电路的零输入响应。而方波响应正好是零状态响应和零输入响应的多次过程。所以 $u_c(t)$ 的波形现象为如图所示的情况。

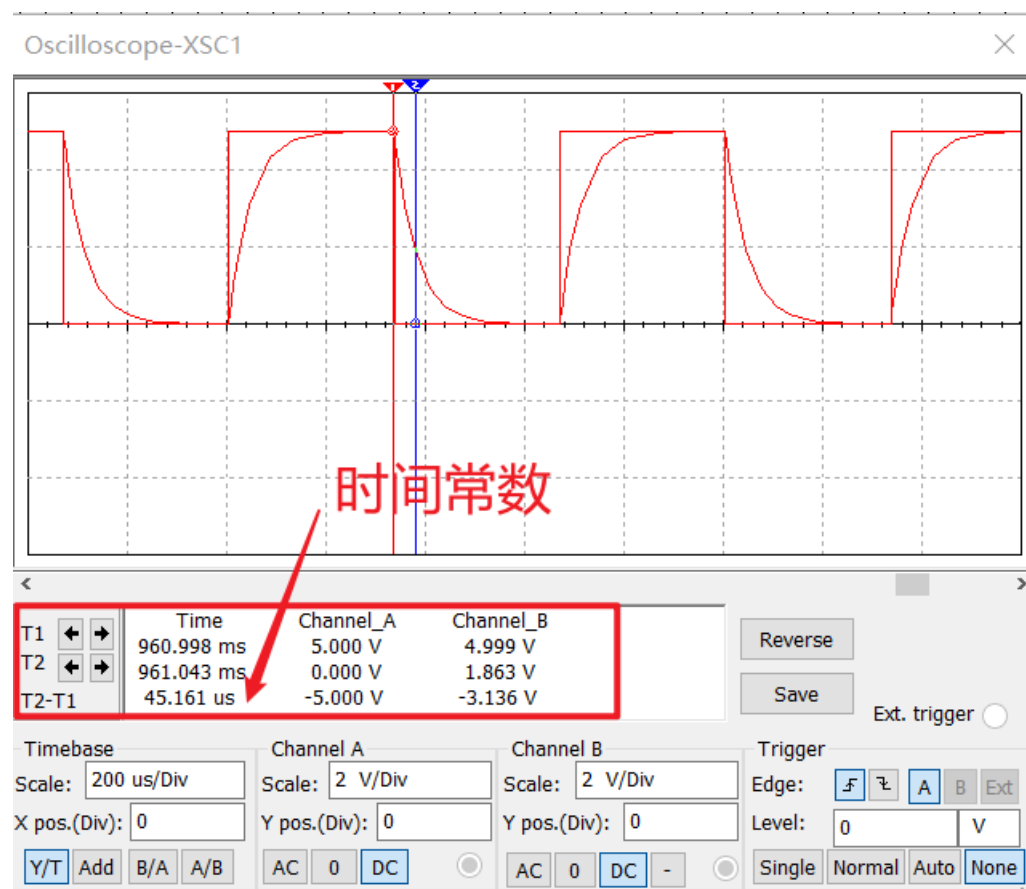
(2) 测出电路实际时间常数 τ 。

用示波器的光标来进行测量，读出 $\Delta t = 42 \text{ us}$ ，误差可以接受。



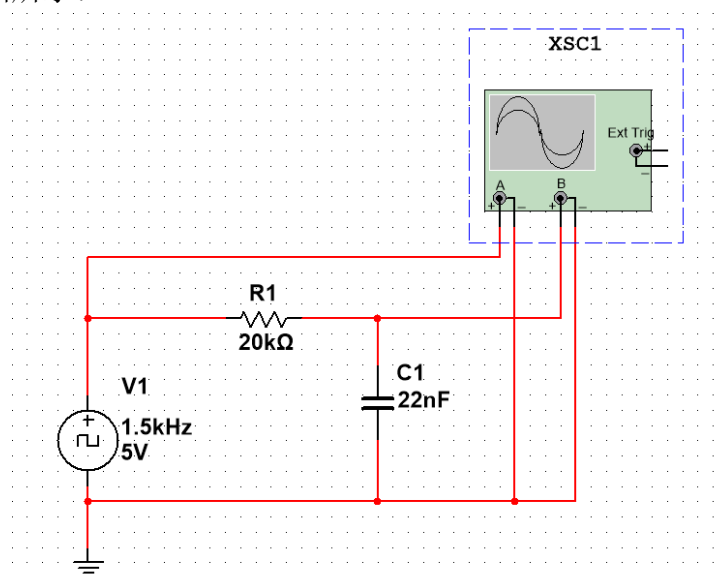
在仿真实验中，利用示波器自带的 T1, T2 进行移动，

测得： $\tau = 45.161\mu s$ ，误差可以接受。

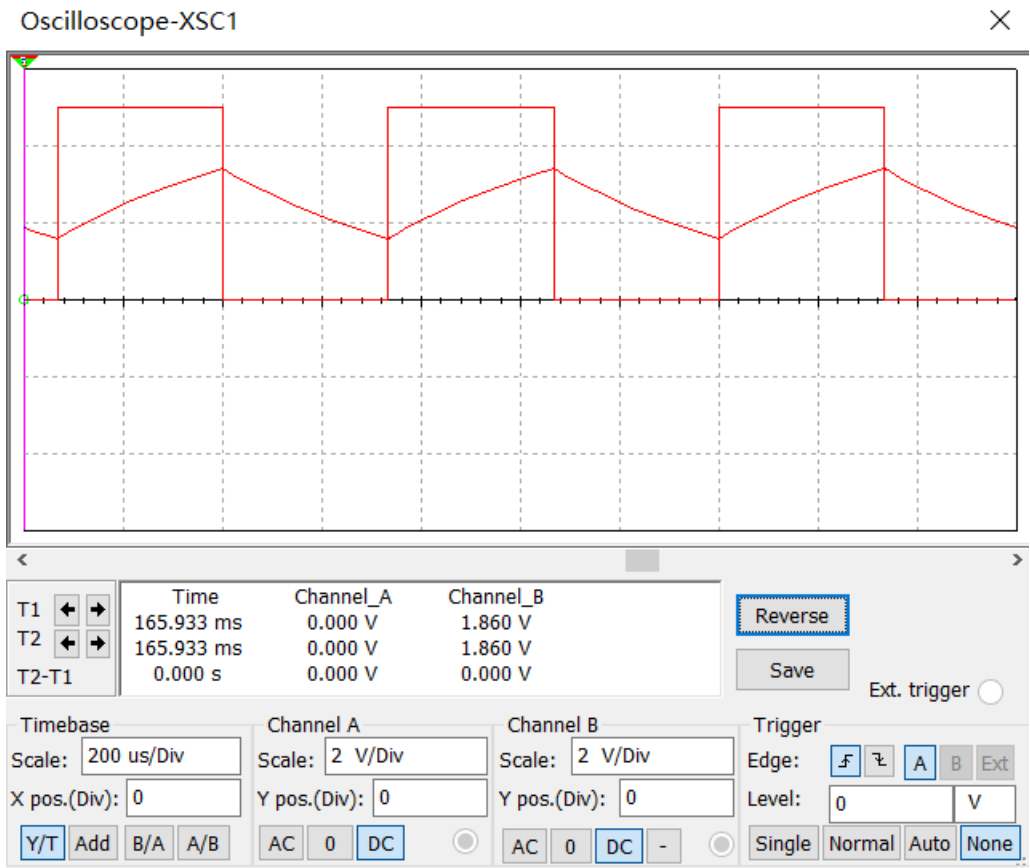


(3) 将 R 值增至10倍值，输入激励信号不变，观察响应 $u_c(t)$ 波形现象做如何变化，并作记录分析。

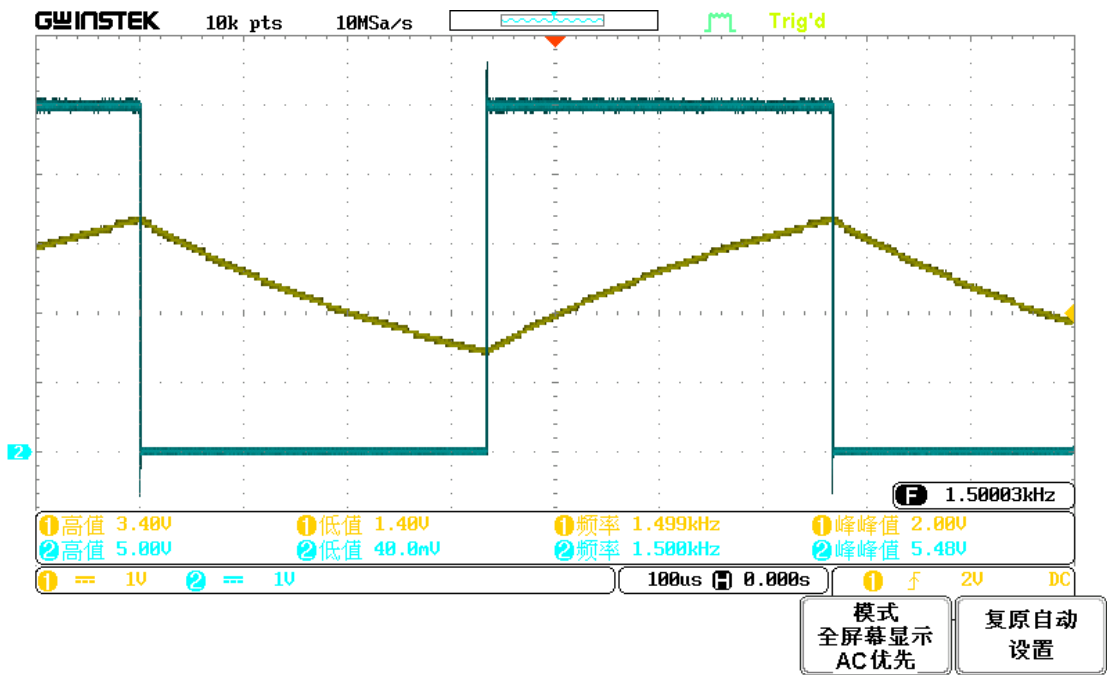
电路图如下图所示：



仿真实验所得的响应 $u_c(t)$ 波形如下图所示：



实物示波器所得的响应 $u_c(t)$ 波形如下图所示：



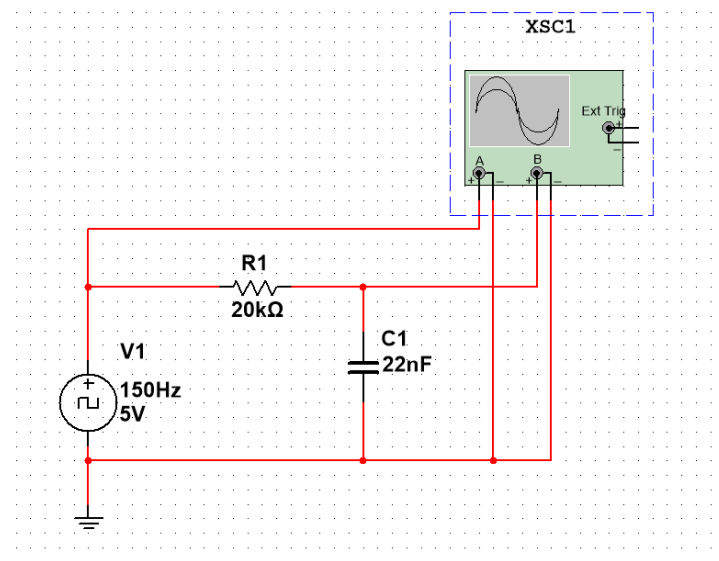
分析：

由于将 R 值增至10倍值，输入激励信号不变，且时间常数 $\tau = RC$ ，所以时间常数是原来的十倍。从而导致了电容每次充、放电的暂态过程尚未结束，又开始了新一次的充放电暂态过程。就这样，充放电过程都无法完成，就会呈现这样的波形曲线。

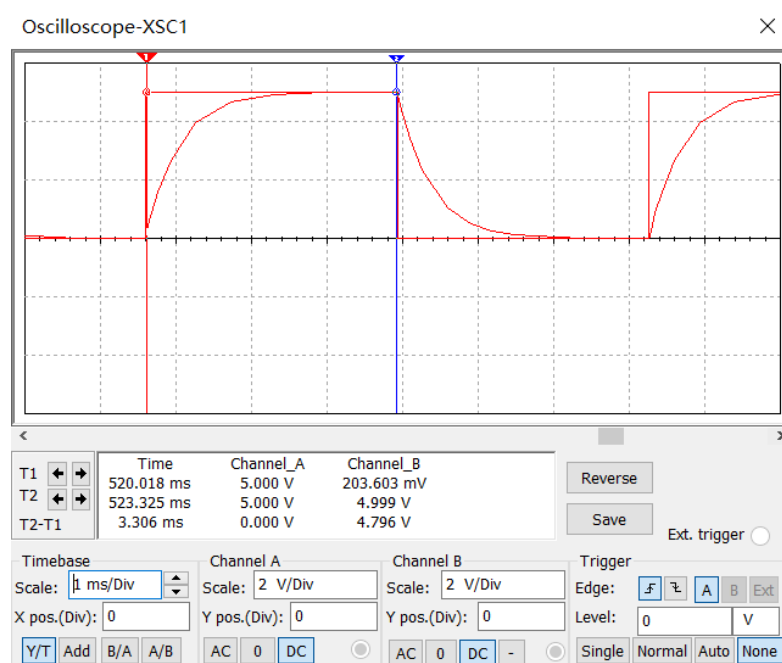
(4) 要能保持(1)中响应 $u_c(t)$ 波形现象，如何调整输入信号？观察记录调整后的 $u_c(t)$ 波形。

显然，根据公式，只要满足频率 f 是原来的十分之一即可，即 $f = 150\text{Hz}$ 。

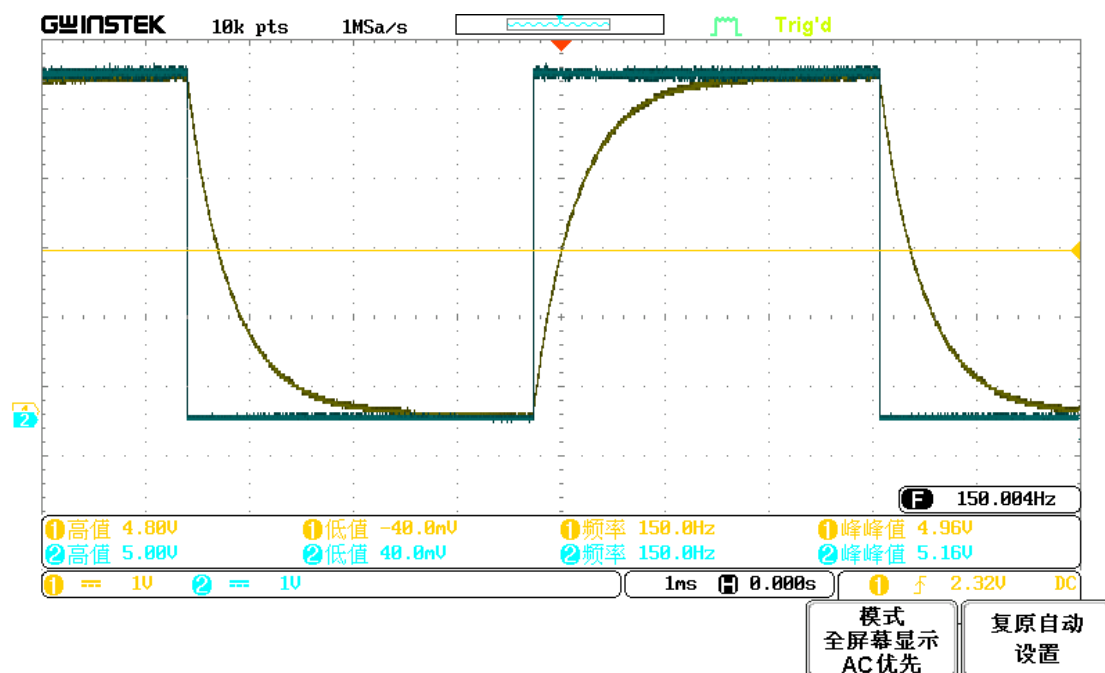
电路图如下图所示：



仿真实验所得的响应 $u_c(t)$ 波形如下图所示：



实物示波器所得的响应 $u_c(t)$ 波形如下图所示：



分析：

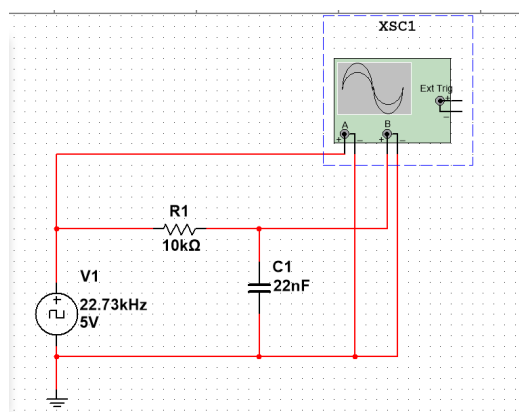
由于将频率 f 调整为了原来的十分之一，导致方波信号的周期增大了十倍，正好满足了时间常数增大十倍的条件，完成了电容每次充放电的暂态过程基本结束后，可以再开始新一次的充、放电暂态过程。

2. 积分电路和微分电路。

设计积分、微分电路，要求 $\tau = 0.22ms$ ，选取合适的输入方波频率，用示波器观察各输出电压 u_o 波形，测量 Δu_o 、 U_s 并计算 $\Delta u_o/U_s$ 比值。

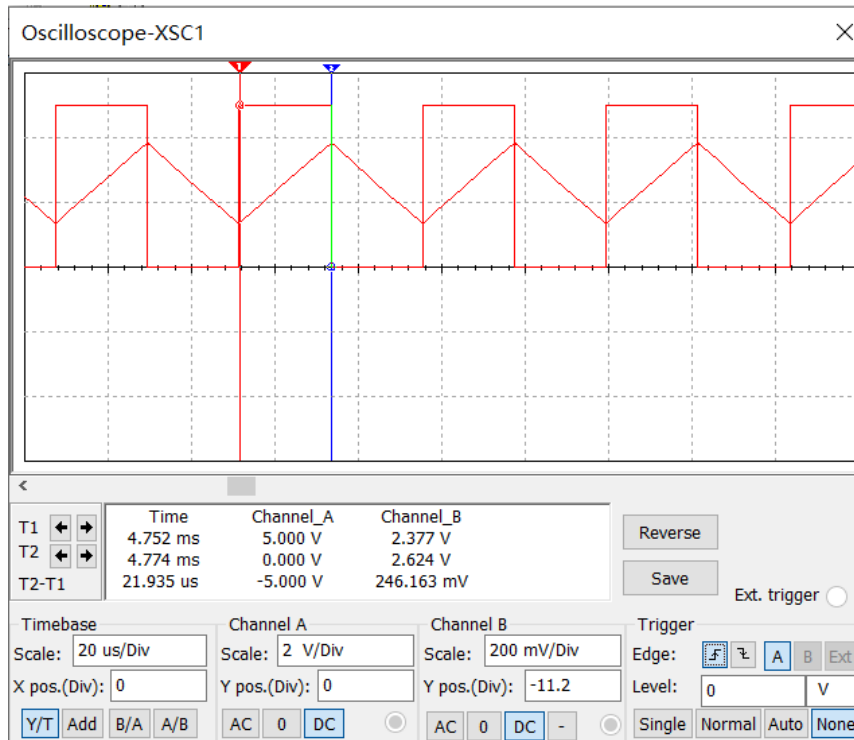
积分电路：

由于拥有的电容有限，故选择 22nF 的电容，根据公式 $\tau = RC$ ，我们可以求得： $R = \frac{\tau}{C} = 10000\Omega$ ，进一步依照积分电路的要求计算频率大小后得到如下电路图：



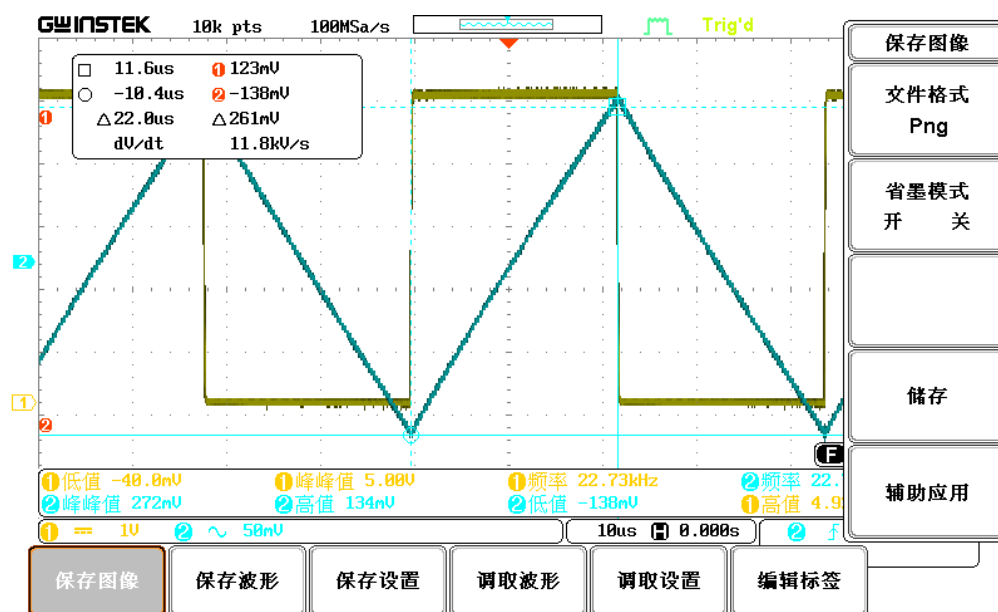
软件仿真的结果： $\Delta u_0 = 246\text{mV}$ （理论值 250mV ），

$$\Delta u_0/U_S=0.0492$$



实物电路示波器的结果：用光标测得， $\Delta u_0 = 261\text{mV}$

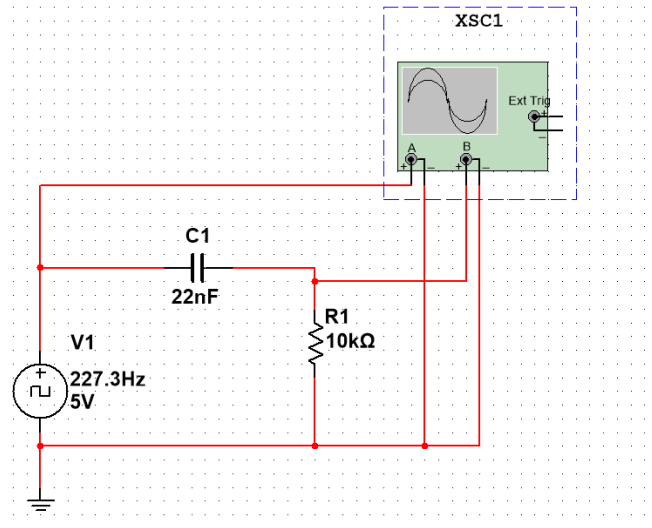
$$\Delta u_0/U_S=0.0522$$



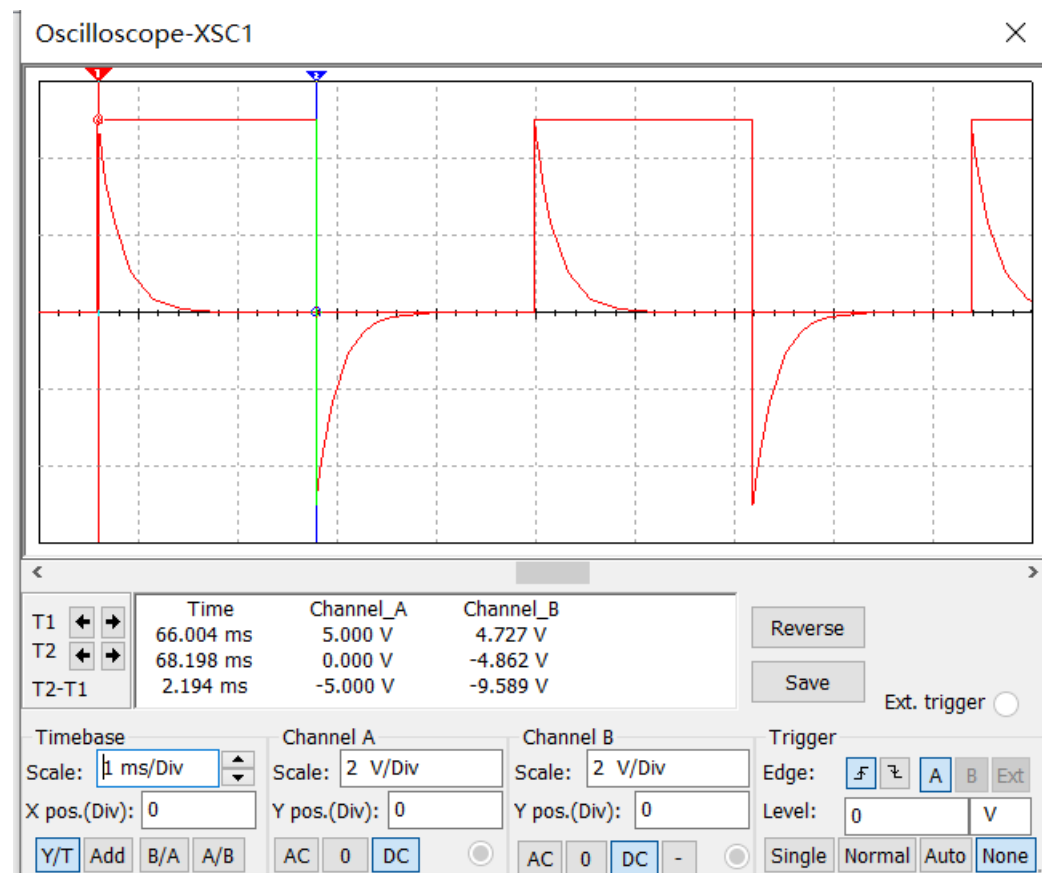
微分电路：

同上，选择 22nF 的电容，根据公式 $\tau = RC$ ，我们可以求得： $R = \frac{\tau}{C} = 10000\Omega$ ，

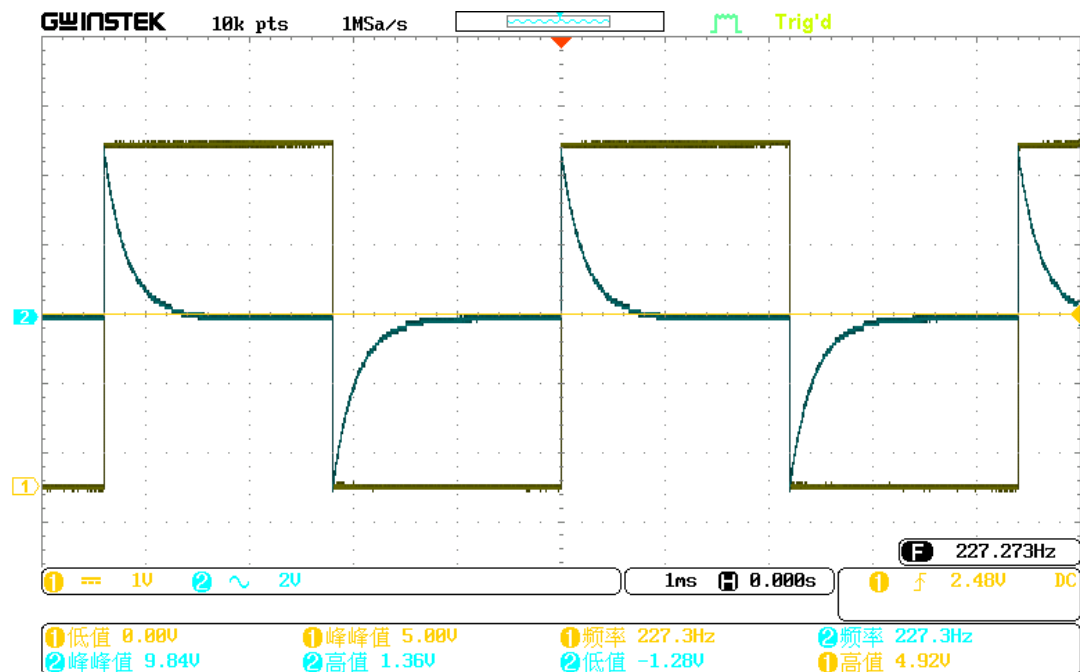
进一步依照积分电路的要求计算频率大小后得到如下电路图：



软件仿真的结果： $\Delta u_0 = 9.589V$ ， $\Delta u_0/U_S = 1.9178$



实物电路示波器的结果： $\Delta u_0 = 9.84V$ ， $\Delta u_0/U_S = 1.968$



四、实验使用仪器设备（名称、型号、规格、编号、使用状况）

Multisim 软件：

名称：Multisim 13.0 使用状况：顺利。

示波器：

名称：数字存储示波器 GDS-1000B 系列、型号：GDS-1102B、使用状况：正常

信号源：

名称：SDG1000X 系列函数/任意波形发生器、型号：SIGLENT SDG 1032X、编号：UM0201X-C01A、使用状况：正常

数字万用表：

名称：5 1/2 位台式 SDM305 数字万用表、型号：SDM305 UM06035-C02A、使用状况：正常

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:

仿真实验由于元器件引起的误差比较小,但是在交流扫描分析时,由于光标并不能完全定位在需要的数值点上,往往会有细微的差距,导致了实验的结果存在一定的误差。

在实物实验中,实物搭建验证时,由于实物元件不能当成理想器件,电容具有一定的内阻,会产生一些阻抗;同时,在实物搭建的接触过程中,会产生一些不可避免的误差,比如说地线接的不是很牢固,示波器的波形也有抖动情况,导致实验的结果不准确。

出现的问题以及解决方法:

仿真实验中,在交流扫描分析时,可以放大图片尺度,使得光标尽量定位在需要的数值点上,减小误差。

在实物操作时,应该将各元件连接完全,特别是地线,避免示波器所得波形的不准确。

收获体会:

通过本次研究一阶电路时域响应的电路实验,我掌握了一阶电路时间常数的测量方法;并且进一步掌握了示波器的使用。同时,我学习到了运用电路实现微分、积分的方法,并成功采用实验的方法验证理论;最后,比较重要的,这次课教会了我学习理论设计、实验测量、对比总结的研究方法。让我对积分电路,微分电路和方波响应有了更深层次的理解。