



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

电子技术实验

实验二 一阶RC电路的研究

信息与计算机实验教学中心

2024年10月25日

实验主要内容



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

01

实验目的

02

实验原理

03

实验内容、步骤及注意事项

04

实验思考题

05

实验仪器与设备



- 1 掌握一阶电路的零输入响应和零状态响应曲线的测试方法。
- 2 掌握一阶电路时间常数的测试方法。
- 3 利用 RC 电路实现微分、积分运算及脉冲分压电路。
- 4 进一步熟悉信号源、示波器使用方法。



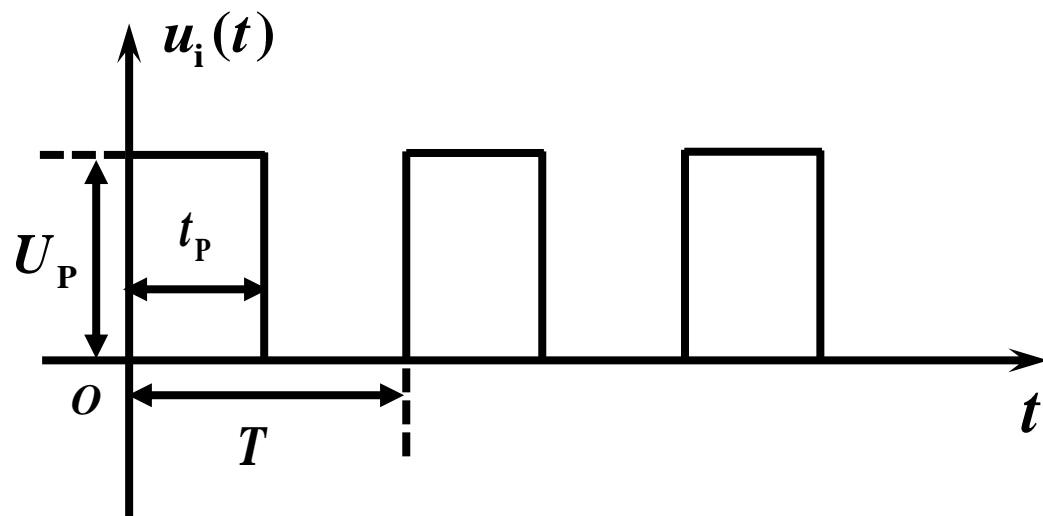
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

实验原理



实验原理

动态网络的过渡过程是十分短暂的单次变化过程，普通的示波器很难观察和测量有关的参数，必须使这种单次的过渡过程重复出现，就可以用普通示波器显示稳定的响应波形，便于观察和作定量计算。



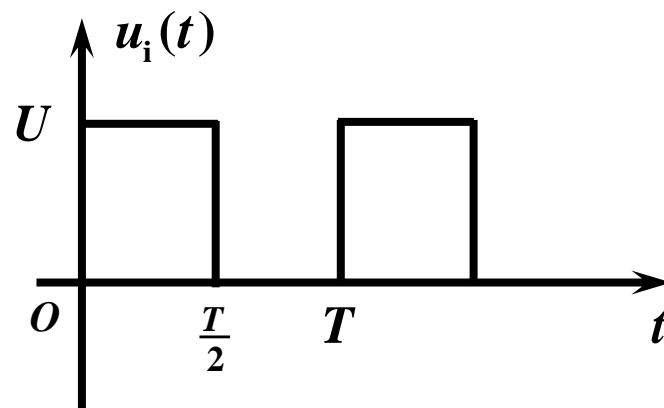
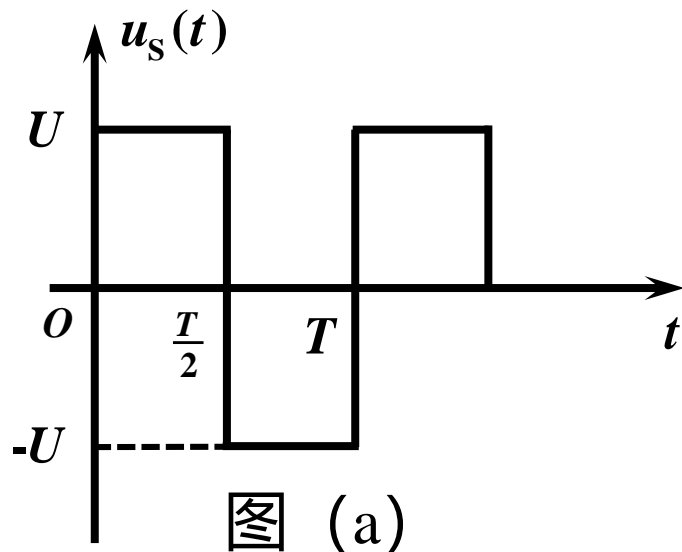
方波脉冲信号，其中 U_P 脉冲幅度， t_P 脉冲宽度， T 脉冲周期。

方波的上升沿相当于给电路一个阶跃输入，其响应就是零状态响应；方波的下降沿相当于在电容具有初始值时，把电源用短路置换，电路响应转换成零输入响应。

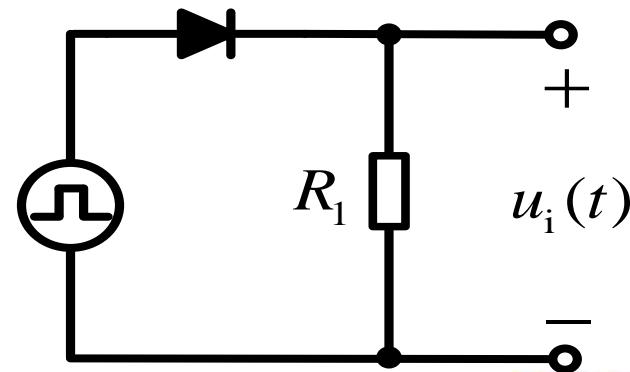


实验原理

函数信号发生器提供的方波信号如图 (a) 所示, 必须变成如图 (b) 所示的方波来作阶跃激励。



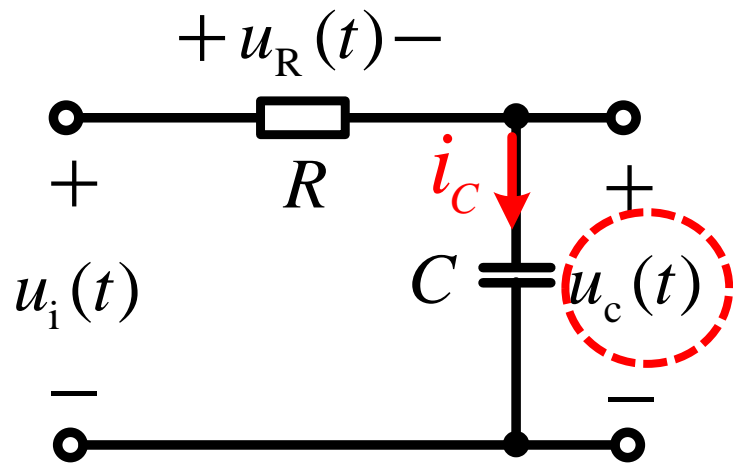
为了将函数信号发生器的输出方波如图 (a) 所示, 变成不过零的方波信号如图 (b) 所示, 采用右图所示电路。





实验原理—零状态响应

电路中储能元件的原始储能为零，仅由独立电源作用引起的响应。



零状态响应的微分方程为：

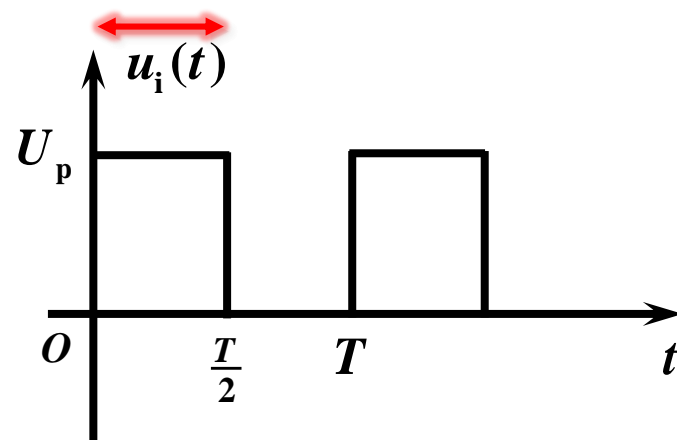
$$\begin{cases} RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = U_P \\ u_c(0^+) = 0 \end{cases}$$

解得，

$$u_c(t) = U_P (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

输入为一个阶跃电压

$$u_i(t) = U_P u(t)$$

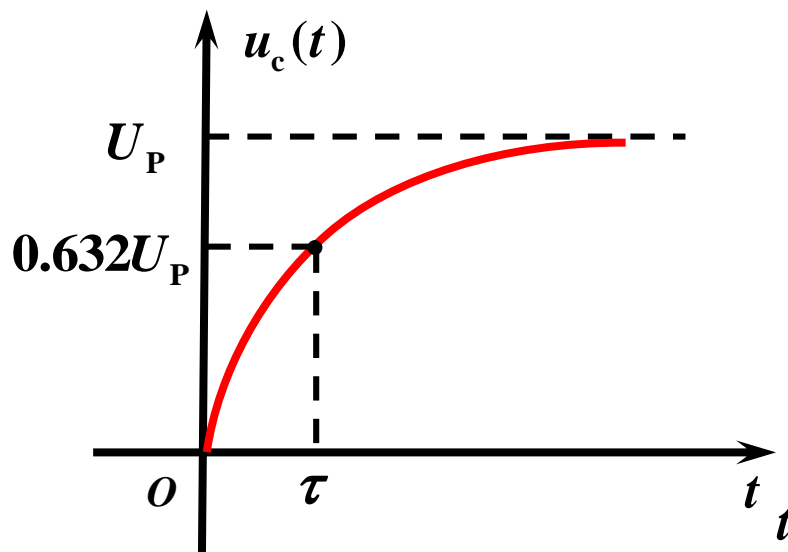




实验原理—零状态响应

■ 零状态响应的波形图

输出波形 $u_c(t)$ 随时间的变化是按指数规律由零逐渐上升到 U_P ，如下图所示。



当时间 $t = RC$ 时，由公式 $u_c(t) = U_P(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ 得，

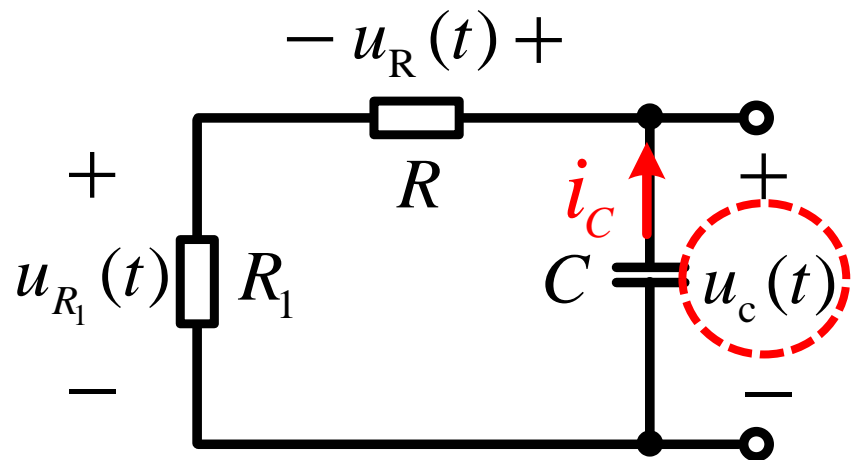
电容电压 $u_c(t) = 0.632U_P$ ，

令 $\tau = RC$ ，称为**此一阶电路时间常数**，反映一阶电路过渡过程的进展程度。

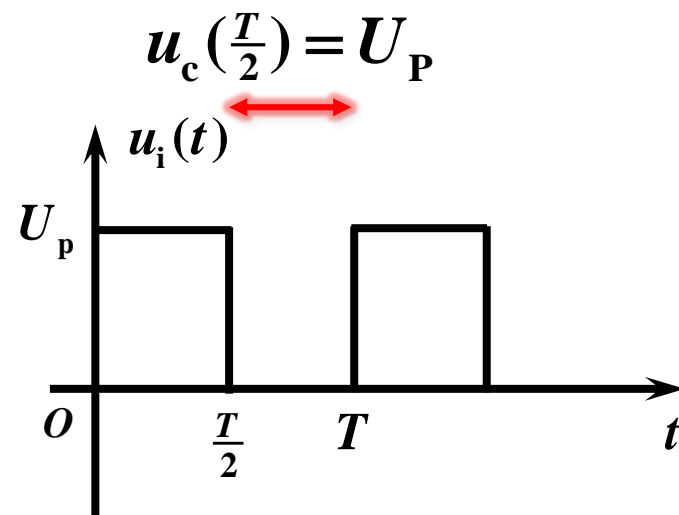


实验原理—零输入响应

换路后无独立电源的电路中，仅由储能元件原始储能引起的响应。



电容的初始储能为



零状态响应的微分方程为：

$$\begin{cases} (R_1 + R)C \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = 0 \\ u_c(\frac{T}{2}) = U_P \end{cases}$$

解得，

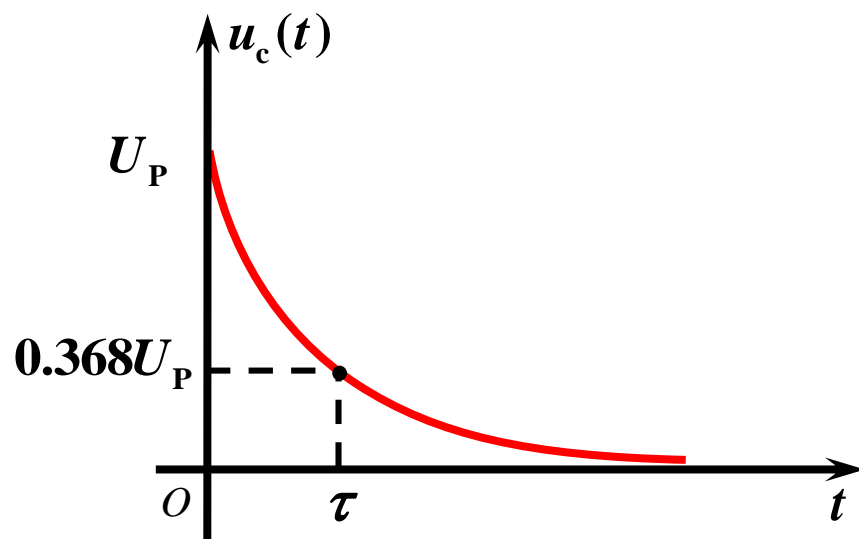
$$u_c(t) = U_P e^{-\frac{t}{(R_1+R)C}}$$



实验原理—零输入响应的波形

■ 零输入响应的波形图

输出波形 $u_c(t)$ 随时间的变化是按指数规律下降的，如下图所示。



当时间 $t = (R+R_1)C$ 时，由公式 $u_c(t) = U_P e^{-\frac{t}{(R_1+R)C}}$ 得，

电容电压 $u_c(t) = 0.368U_P$ ，

电路时间常数 $\tau = (R+R_1)C$ 。



实验原理—RC 积分电路

对于右图 (a) 的电路, 设输入 $u_i(t)$ 为一脉冲波形 $P(t)$, 脉冲宽度为 $t_p = \frac{T}{2}$, 如右图 (b) 所示。

当 $t_p \ll \tau = RC$ 时, 则有,

$$u_R(t) \approx P(t)$$

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt$$

$$\approx \frac{1}{RC} \int_0^t P(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^t P(t) dt$$

式中, $\tau = RC$

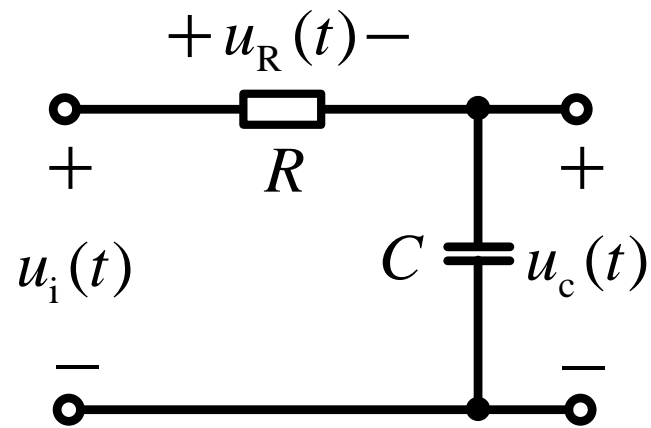


图 (a)

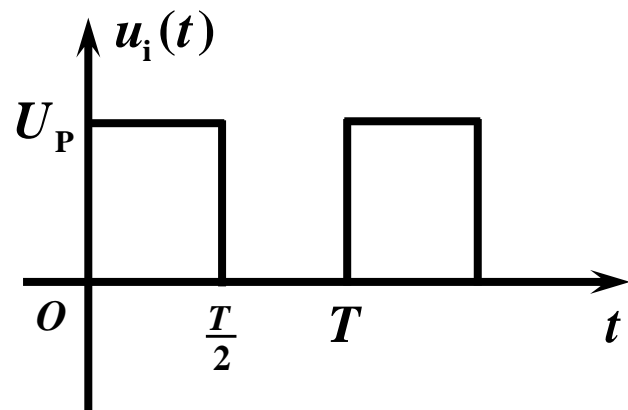


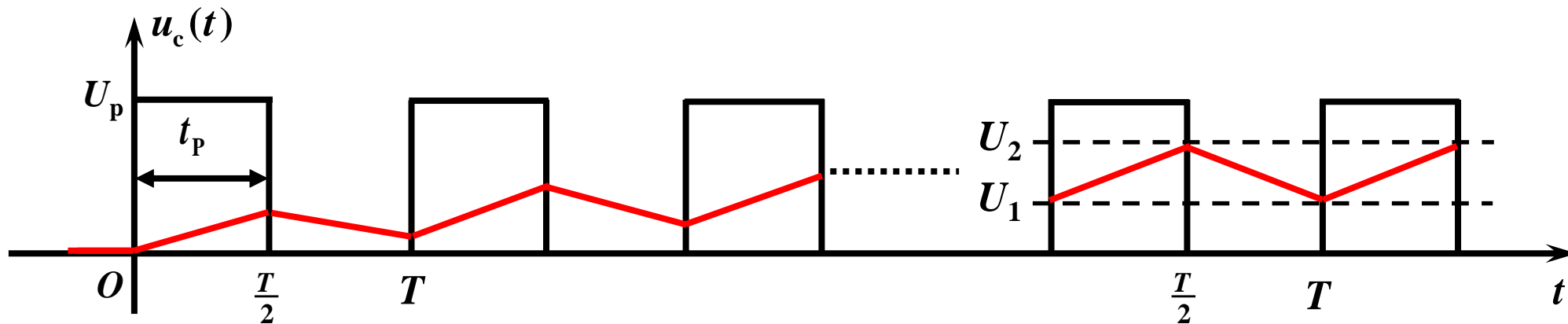
图 (b)

即：从电容上输出电压 $u_C(t)$ 为输入电压 $P(t)$ 的积分除以 τ 。



实验原理—RC 积分电路

RC 积分电路的波形图



$$\begin{cases} u_c(t) = U_P + (U_1 - U_P)e^{-\frac{t}{\tau_1}} & 0 \leq t \leq T/2 \\ u_c(t) = U_2 e^{-\frac{(t-T/2)}{\tau_2}} & T/2 \leq t \leq T \end{cases}$$

$$U_1 = \frac{U_P e^{-\frac{T/2}{\tau}}}{1 + e^{-\frac{T/2}{\tau}}}$$

$$\begin{cases} u_c(\frac{T}{2}) = U_2 = U_P + (U_1 - U_P)e^{-T/2\tau} & t = \frac{T}{2} \\ u_c(T) = U_1 = U_2 e^{-T/2\tau} & t = T \end{cases} \quad (1)$$

$$U_2 = \frac{U_P}{1 + e^{\frac{T/2}{\tau}}}$$



实验原理—RC 微分电路

对于右图 (a) 的电路, 设输入 $u_i(t)$ 为一脉冲波形 $P(t)$, 脉冲宽度为 $t_p = \frac{T}{2}$, 如右图 (b) 所示。

当 $t_p \gg \tau = RC$ 时, 则有,

$$u_c(t) \approx P(t)$$

$$\begin{aligned} u_R(t) &= R \cdot i_c \approx RC \frac{du_c(t)}{dt} \\ &= RC \frac{d}{dt} P(t) = \tau \frac{d}{dt} P(t) \end{aligned}$$

式中, $\tau = RC$

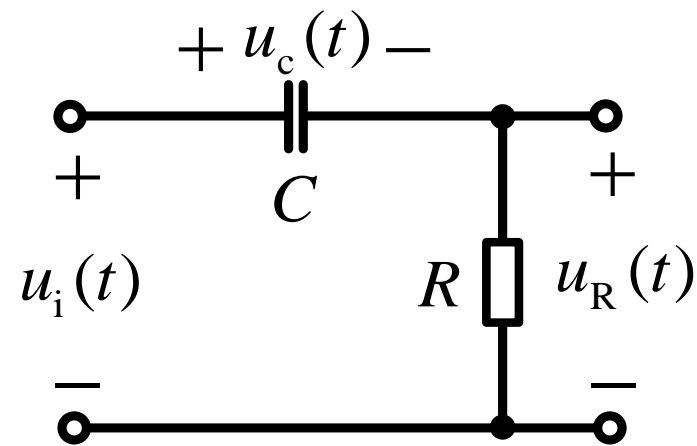


图 (a)

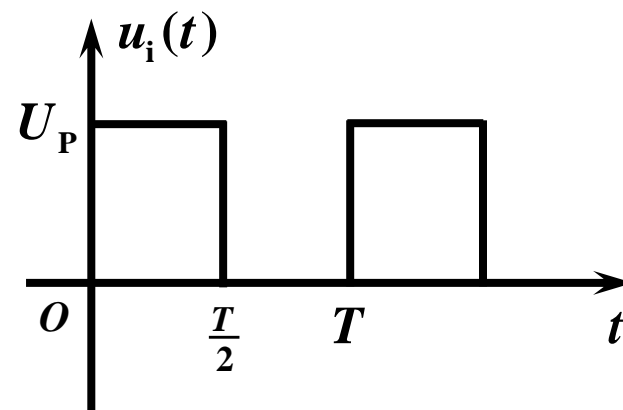


图 (b)

即：从电阻上输出电压 $u_R(t)$ 为输入电压 $P(t)$ 的微分形式乘以 τ 。



实验原理—RC 微分电路

RC微分电路的波形图

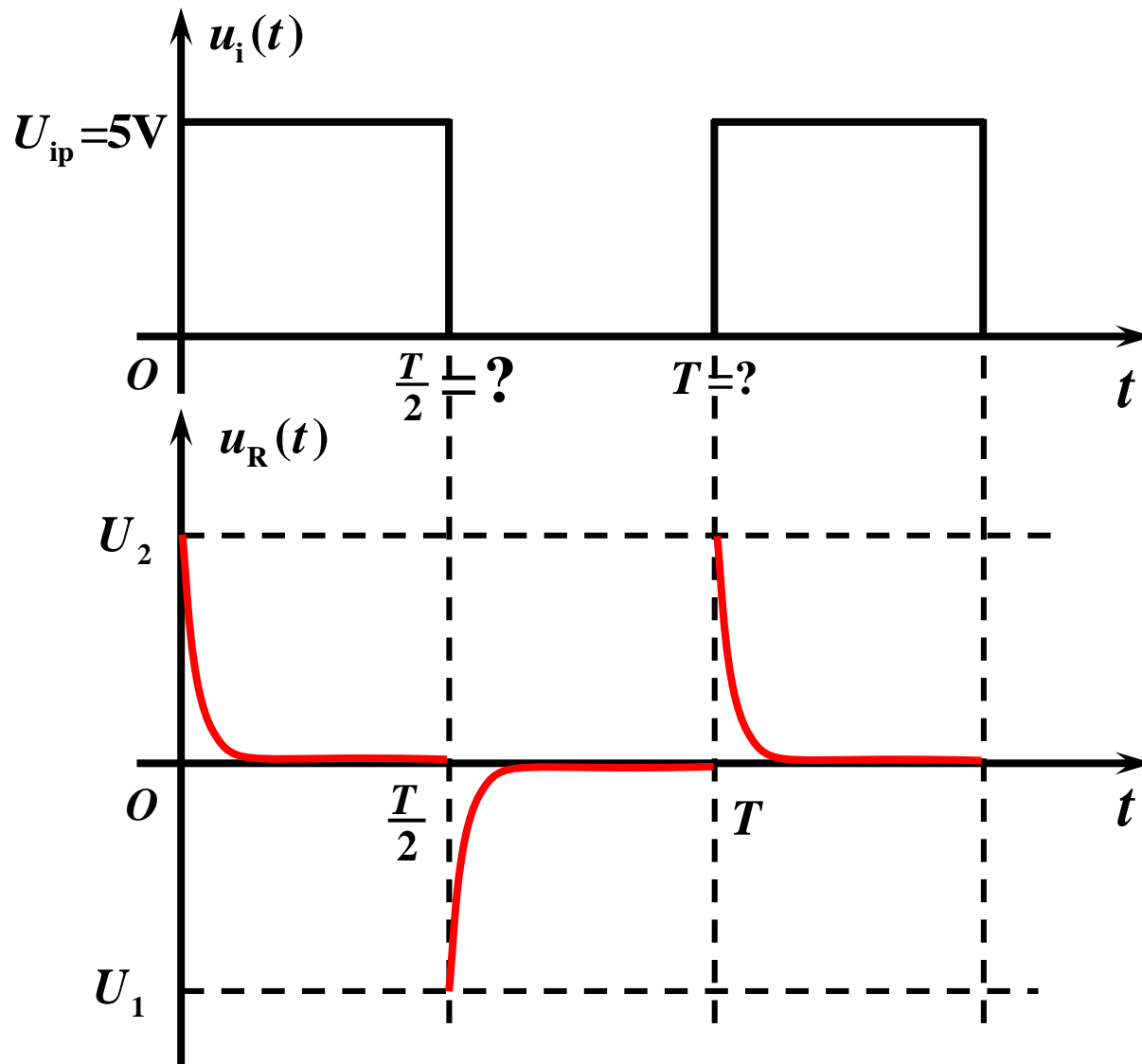
KVL方程: $u_i(t) = u_c(t) + u_R(t)$

当 $0 \leq t \leq \frac{T}{2}$ 内, 有,

$$u_R(t) = U_P - u_c(t) = U_P e^{-\frac{t}{RC}}$$

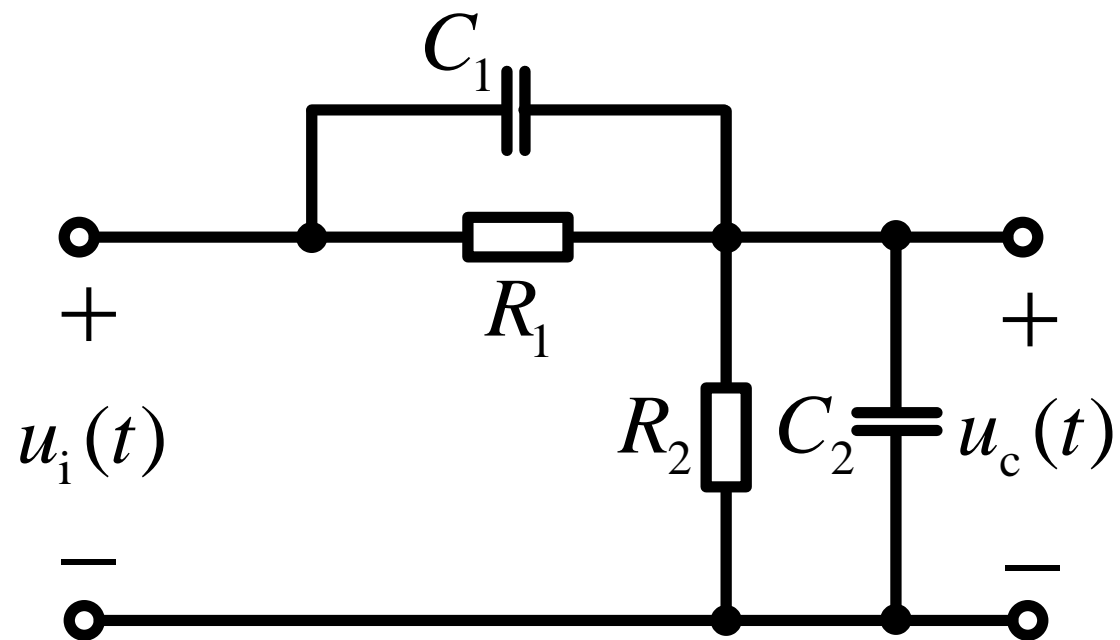
当 $\frac{T}{2} \leq t \leq T$ 内, 有,

$$\begin{aligned} u_R(t) &= -\frac{R}{R_1 + R} u_c(t) \\ &= -\frac{R}{R_1 + R} U_P e^{-\frac{(t-t_p)}{(R_1+R)C}} \end{aligned}$$





实验原理— RC 脉冲分压电路



脉冲分压电路实验电路图



实验原理— RC 脉冲分压电路

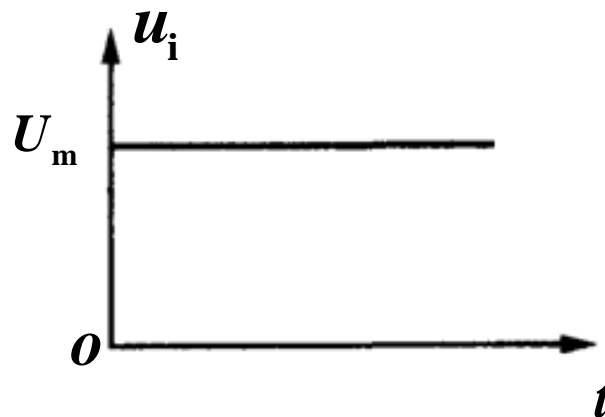
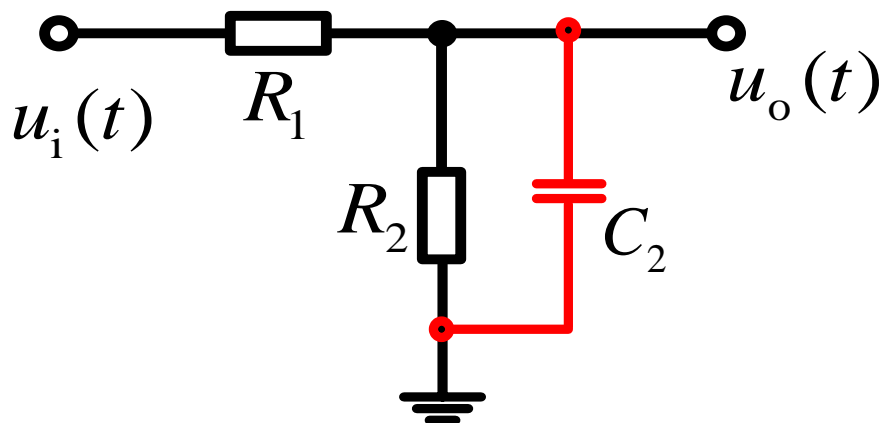


图 (a) 输入波形

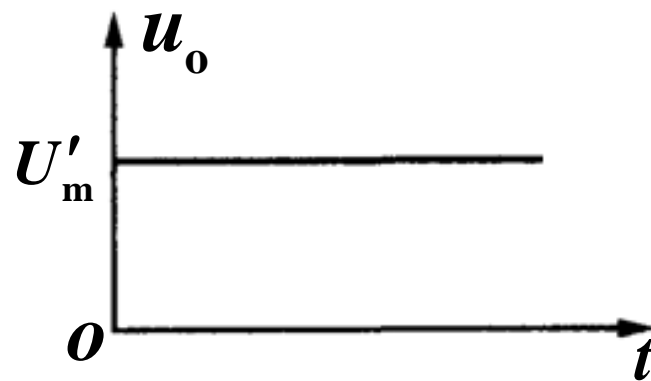


图 (b) 输出波形

在脉冲电路中，常常要将脉冲信号经过电阻分压后传输到下一级，而在下一级电路存在着各种形式的电容，这就相当于在输出端接上一个等效电容 C_2 ，如上图所示。



实验原理— RC 脉冲分压电路

电容 C_2 对输出波形的影响

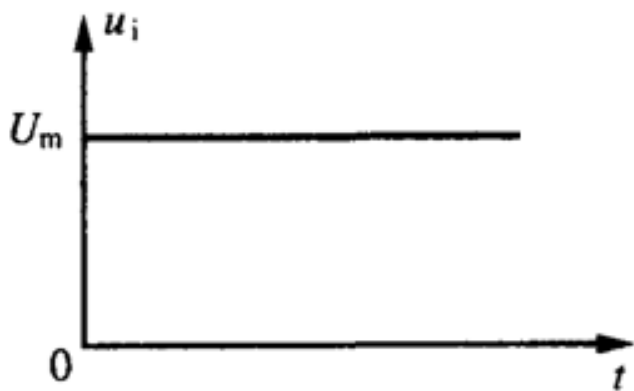


图 (a) 输入波形

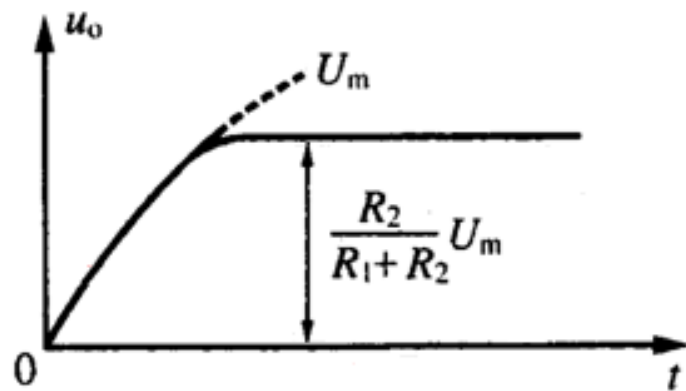
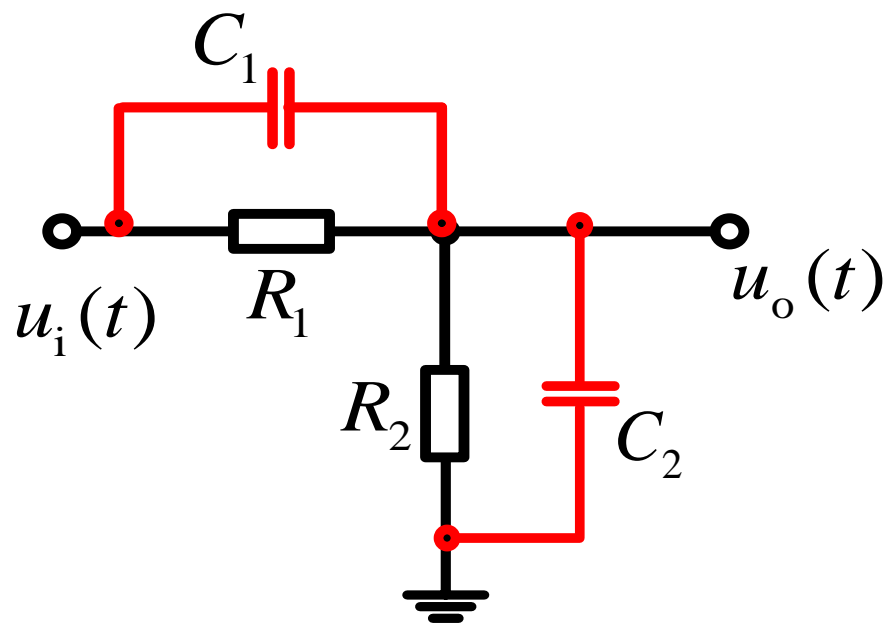


图 (b) 输出波形

输入信号如图 (a) 所示, 由零跳变到最大值 U_m 的瞬间, 输出端电容 C_2 上的电压将按指数规律上升, 最后达到 U_m , 即输出电压 u_o 具有一定的上升时间, 不能紧跟随输入电压同步跳变。使输出波形的边沿变坏, 如图 (b) 所示。



实验原理— RC 脉冲分压电路



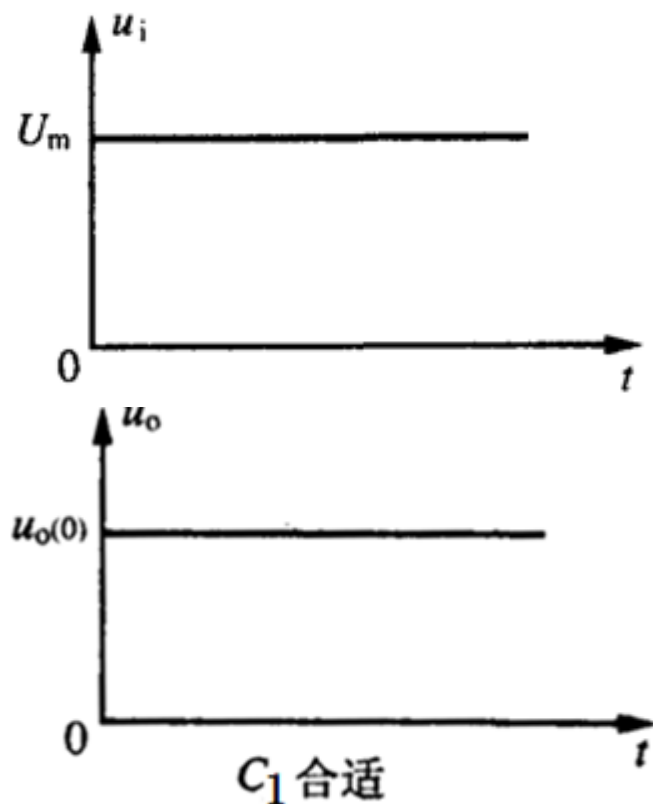
为了克服这一缺点，改善输出波形，使输出电压能紧跟随输入电压一起上跳变。所采取的措施是在电阻 R_1 上并联一个电容 C_1 ，构成上图所示的电路。

此电路称为 RC 分压电路，亦称脉冲分压电路。



实验原理— RC 脉冲分压电路

如果选择合适的 C_1 值，就可以克服等效电容 C_2 的影响，使输出波形紧跟输入波形一起跳变。



输出端就能得到按分压关系确定的部分输入电压。



实验原理—RC 脉冲分压电路

◆三要素法求解脉冲分压电路

$$U_i = u_{C1}(0_+) + u_{C2}(0_+) \quad (a) \quad (\text{电容电压发生跃变})$$

$$C_1[u_{C1}(0_+) - u_{C1}(0_-)] = C_2[u_{C2}(0_+) - u_{C2}(0_-)] \quad (b) \quad (\text{根据电荷守恒})$$

$$u_{C2}(0_+) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_i - \frac{C_1}{C_1 + C_2} u_{C1}(0_-) + \frac{C_1}{C_1 + C_2} u_{C2}(0_-) \quad (c)$$

◆当 $u_{C1}(0_-) = u_{C2}(0_-) = 0$ 时, 则

$$u_{C2}(0_+) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_i \quad (d)$$

◆稳态时, 两电容均可看作开路, 则

$$u_{C2}(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_i \quad (e)$$

◆输出电压为

$$u_o(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_i - \left(\frac{R_2 U_i}{R_1 + R_2} - \frac{C_1 U_i}{C_1 + C_2} \right) e^{-t/\tau} \quad (f)$$



实验原理—*RC* 脉冲分压电路

- ◆ 当输入电压 U_i 突然上跳时，输出电压由 C_1 和 C_2 的分压决定。输出电压为：

$$U_o = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_i$$

- ◆ 当电容充电结束后，输出电压将由 R_1 和 R_2 分压决定，即：

$$U'_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_i$$

- ◆ 当 C_1 选择合适时，输出波形的起始值 U_o 等于终止值 U'_o ，即：

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

得， $C_1 R_1 = C_2 R_2$

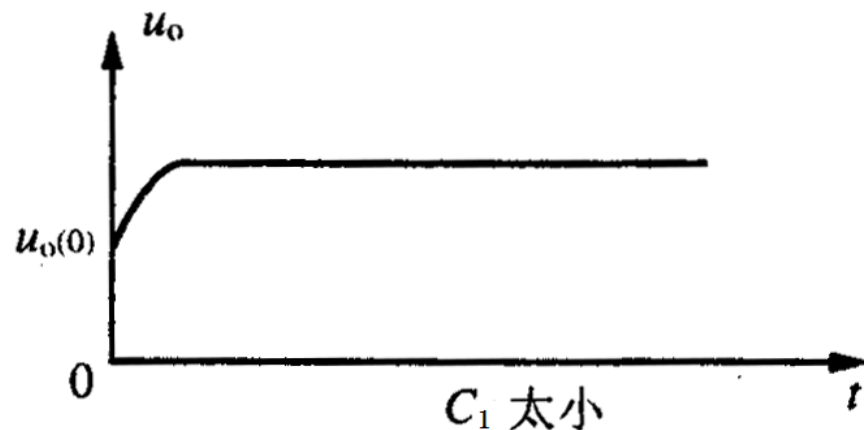
获得最佳补偿的条件



实验原理—RC脉冲分压电路

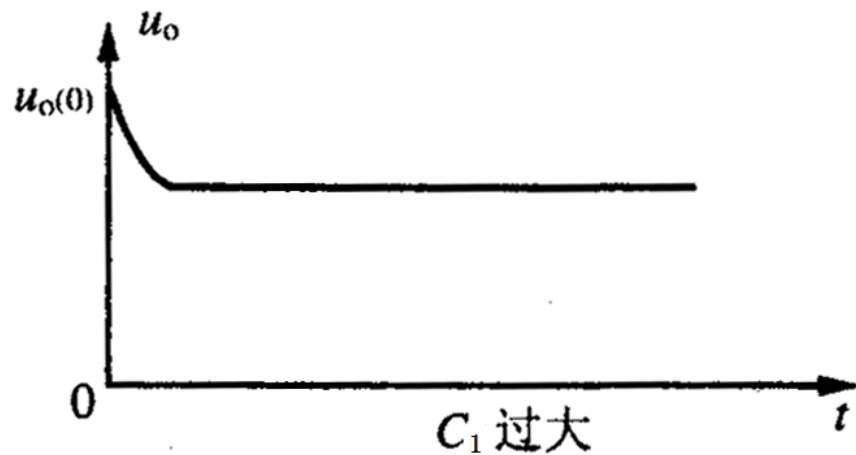
若 C_1 太小，加速作用不足，输出波形的边沿仍不好；如下图所示。

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} < \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$
$$C_2 R_2 > C_1 R_1 \quad \text{欠补偿}$$



若 C_1 过大，加速作用过强，压倒了 C_2 的延缓作用，输出波形出现超过稳态值的尖顶过冲，如下图所示。

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} > \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$
$$C_2 R_2 < C_1 R_1 \quad \text{过补偿}$$





中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

实验内容、步骤及注意事项

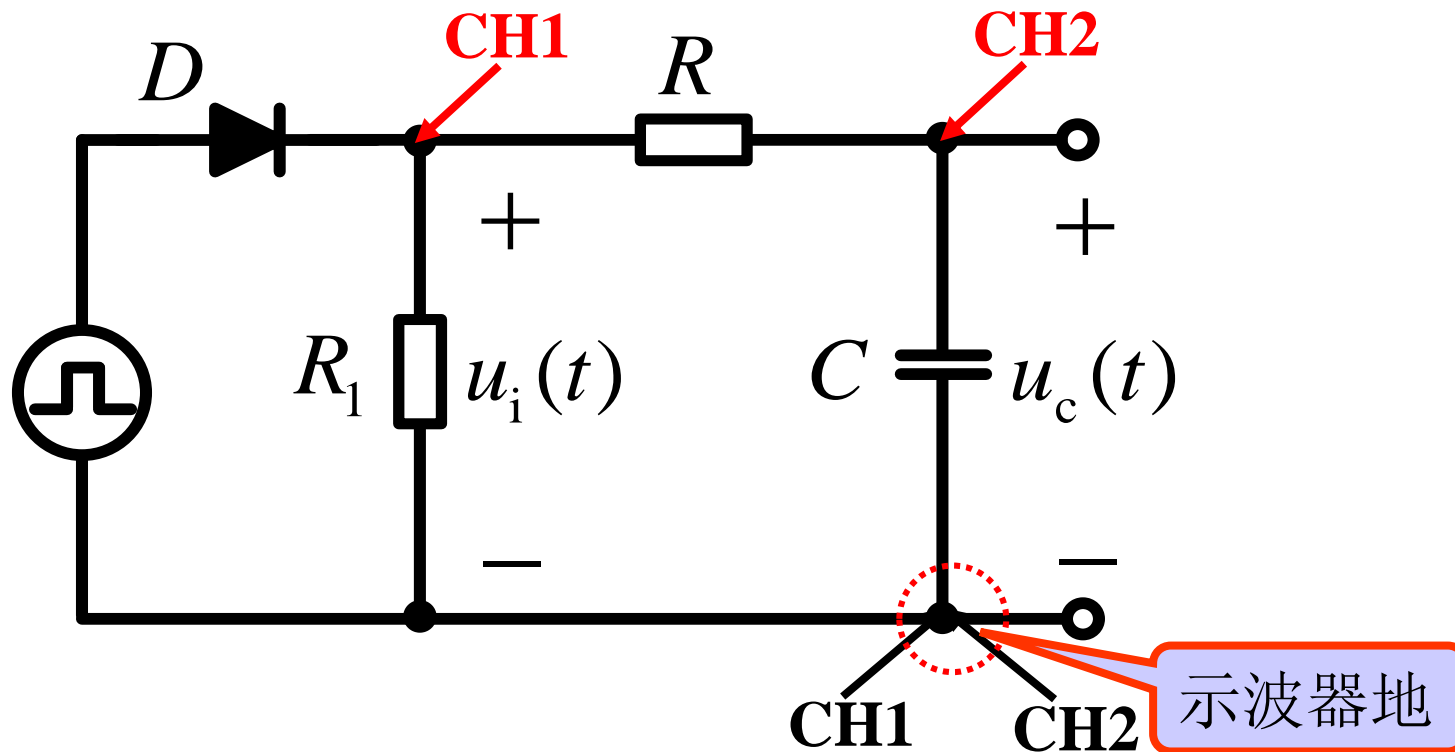


实验内容—零状态和零输入响应

零状态和零输入响应的实验电路图



信号源方波输出：
频率 $f=500\text{Hz}$

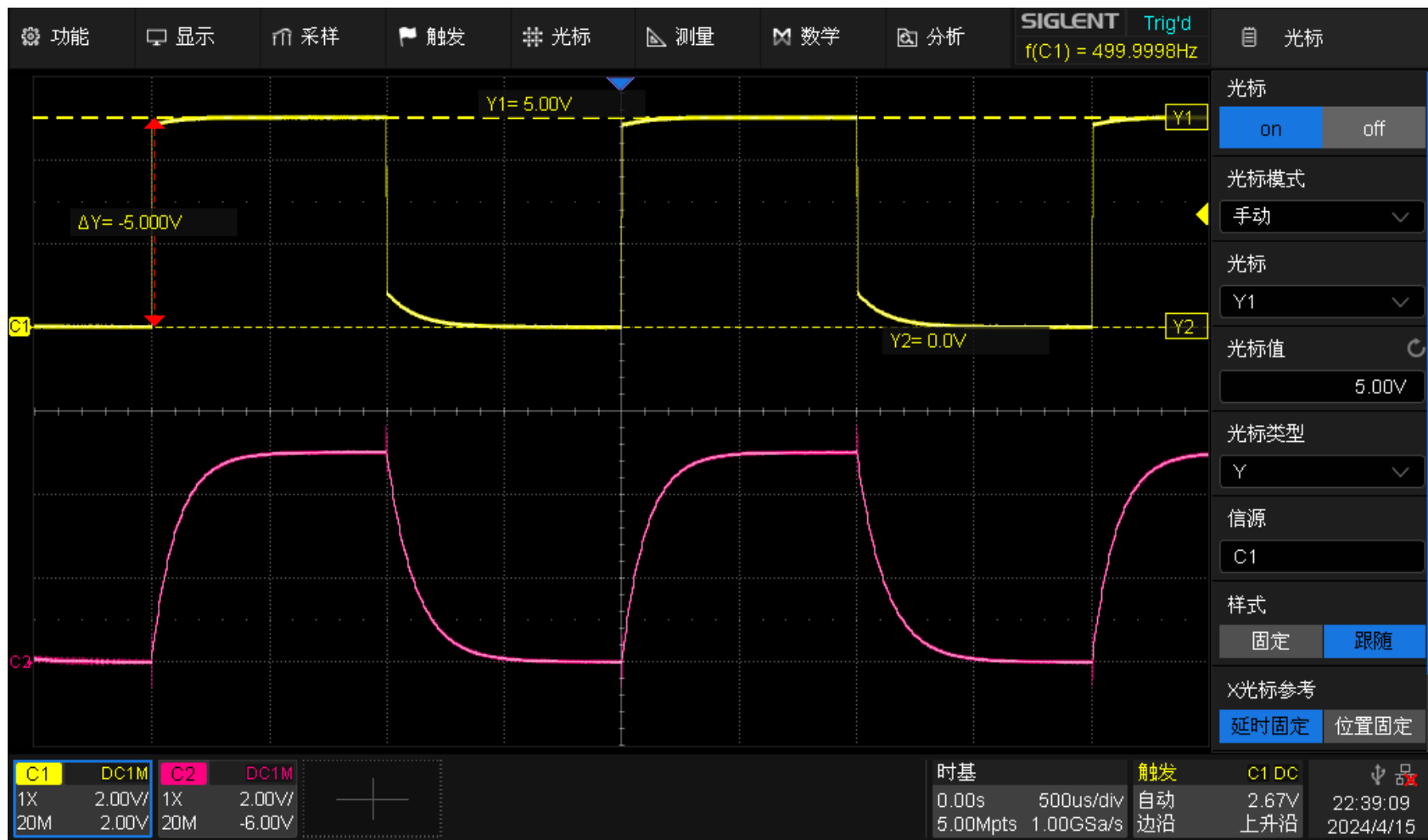


$$R_1=200\Omega, R=1\text{k}\Omega, C=0.1\mu\text{F}$$



实验内容—零状态和零输入响应

零状态和零输入响应的波形图



示波器垂直方向DC耦合方式



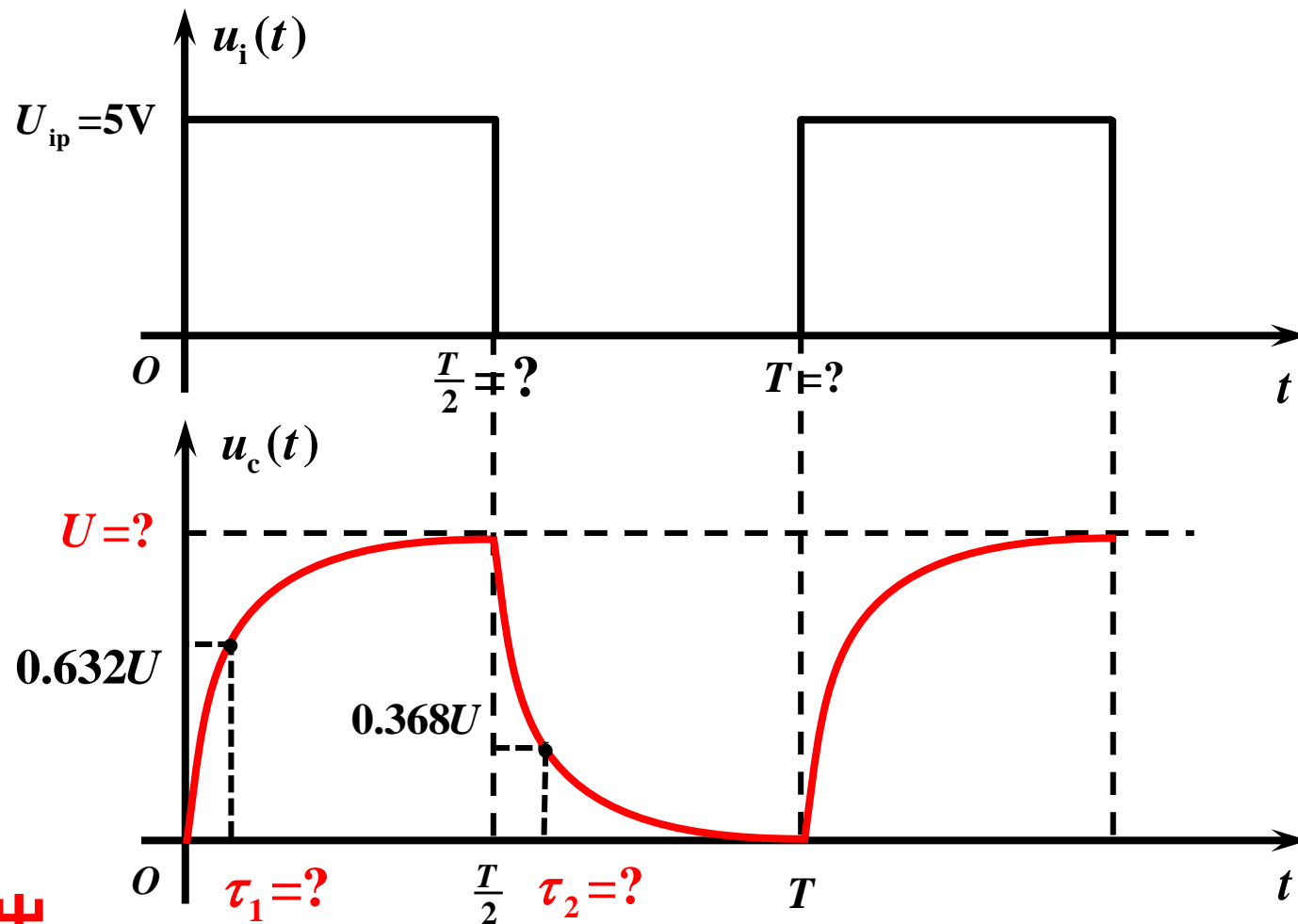
实验内容—零状态和零输入响应

零状态和零输入响应的波形图

电阻 R_1 端的波形

$$U_{ip}=5V, f=500Hz$$

输出端电容 C 的波形



用示波器分别观测并对应画出
输入 $U_i(t)$ 和输出 $U_o(t)$ 波形。

零状态响应

零输入响应

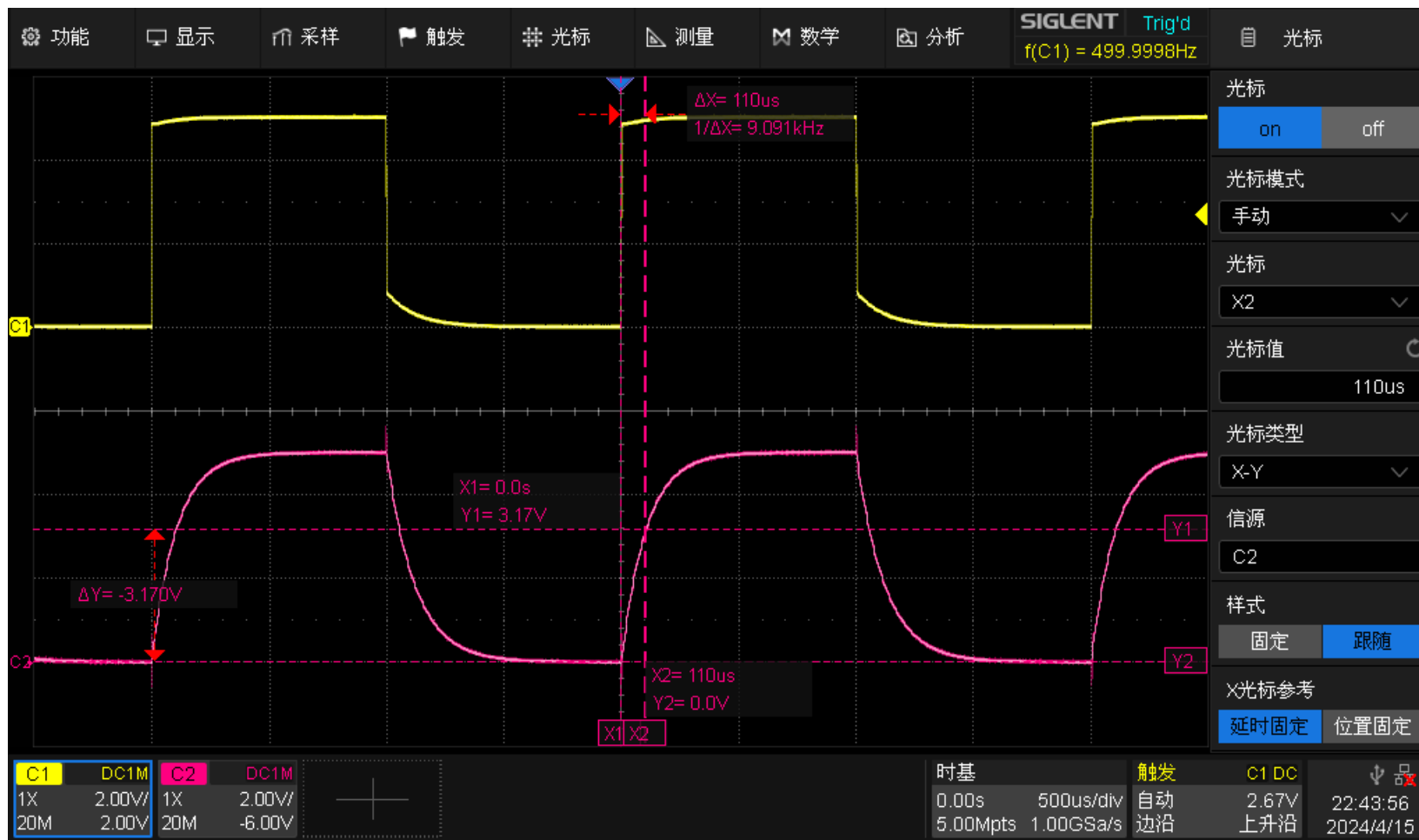
零状态响应



实验内容—零状态和零输入响应

返回

零状态和零输入响应的波形图



记录时间常数的 τ_1 大小

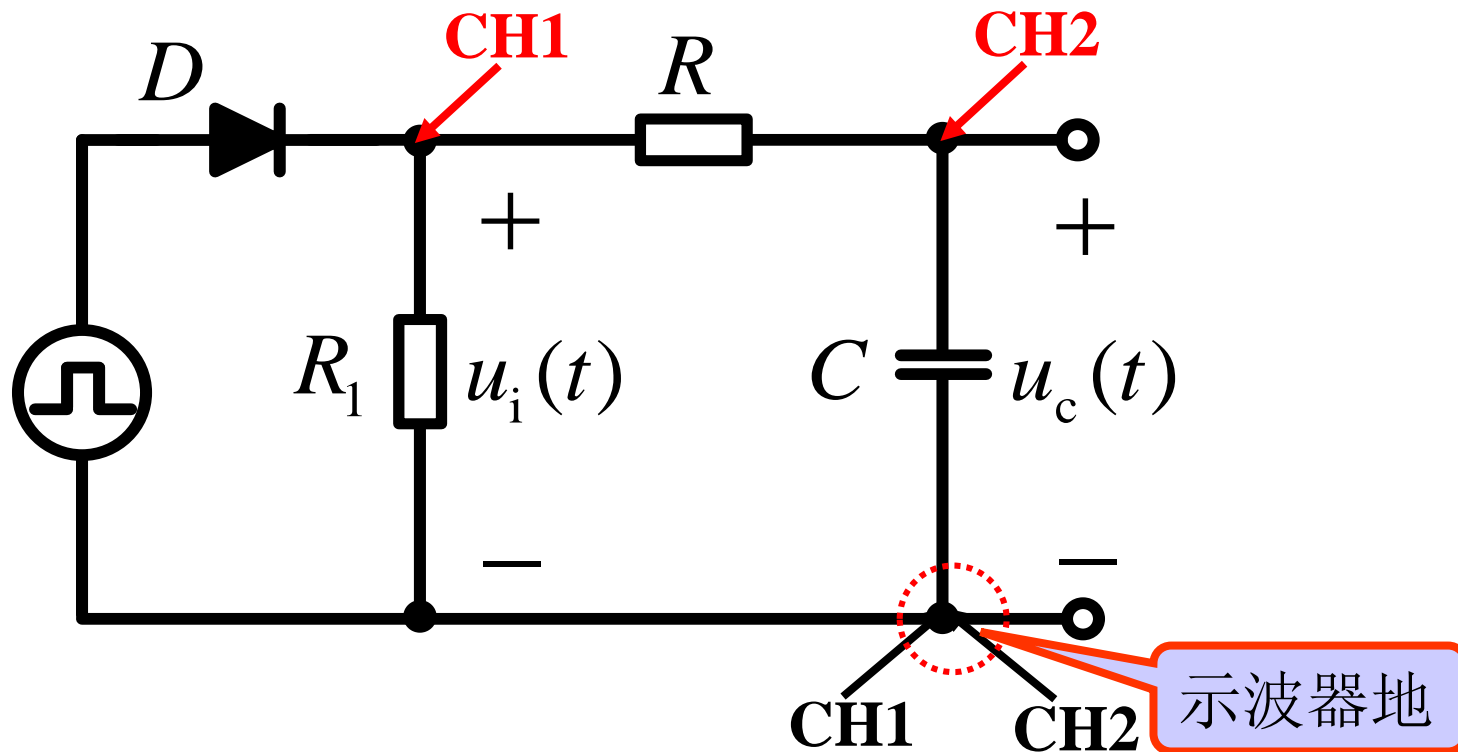


实验内容— RC 积分电路

 RC 积分电路实验电路图



信号源方波输出：
频率 $f=1\text{kHz}$

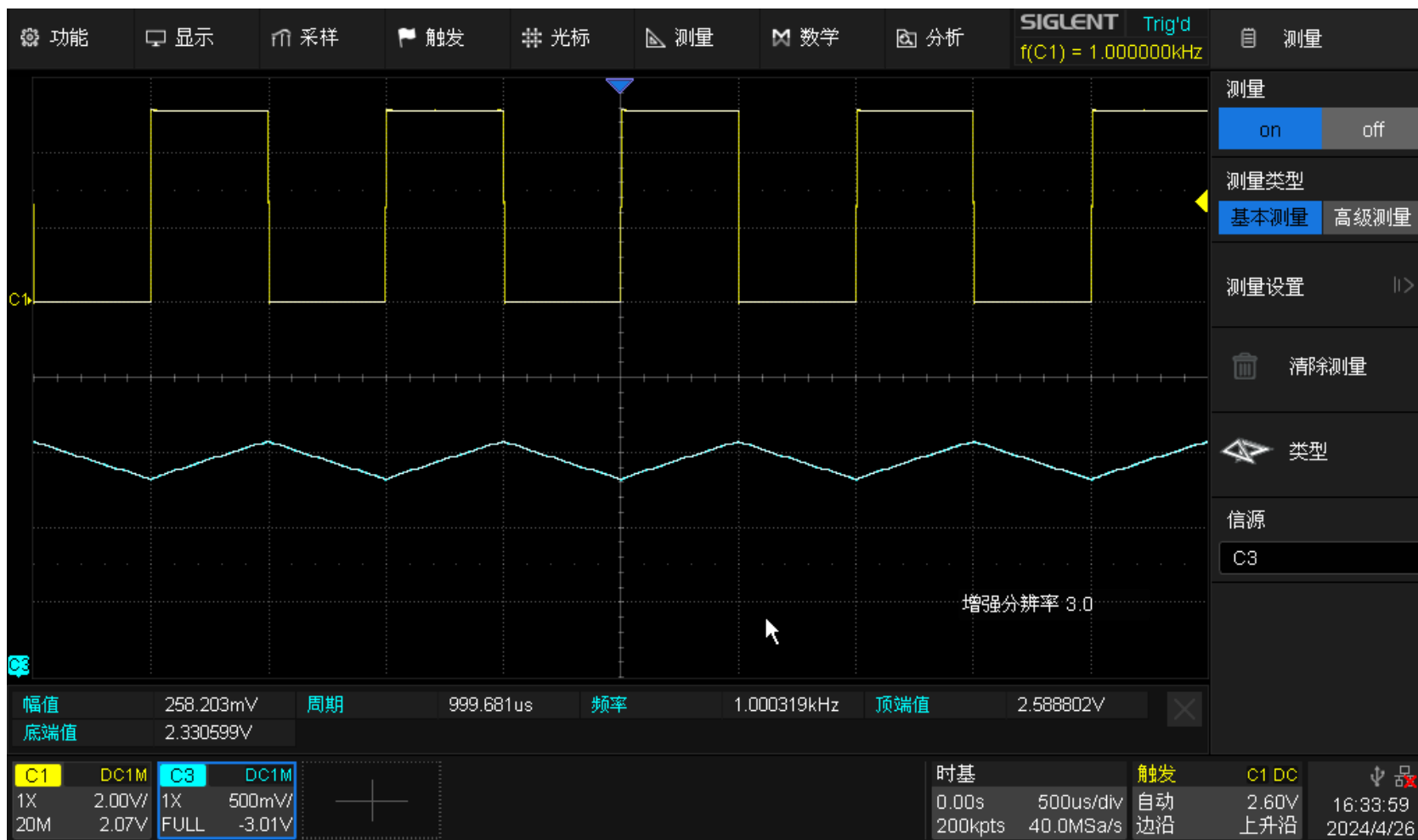


$$R_1=200\Omega, \quad R=5\text{k}\Omega, \quad C=1\mu\text{F}$$



实验内容— RC 积分电路

RC 积分电路的波形图



示波器垂直方向DC耦合方式



实验内容— RC 积分电路

BACK

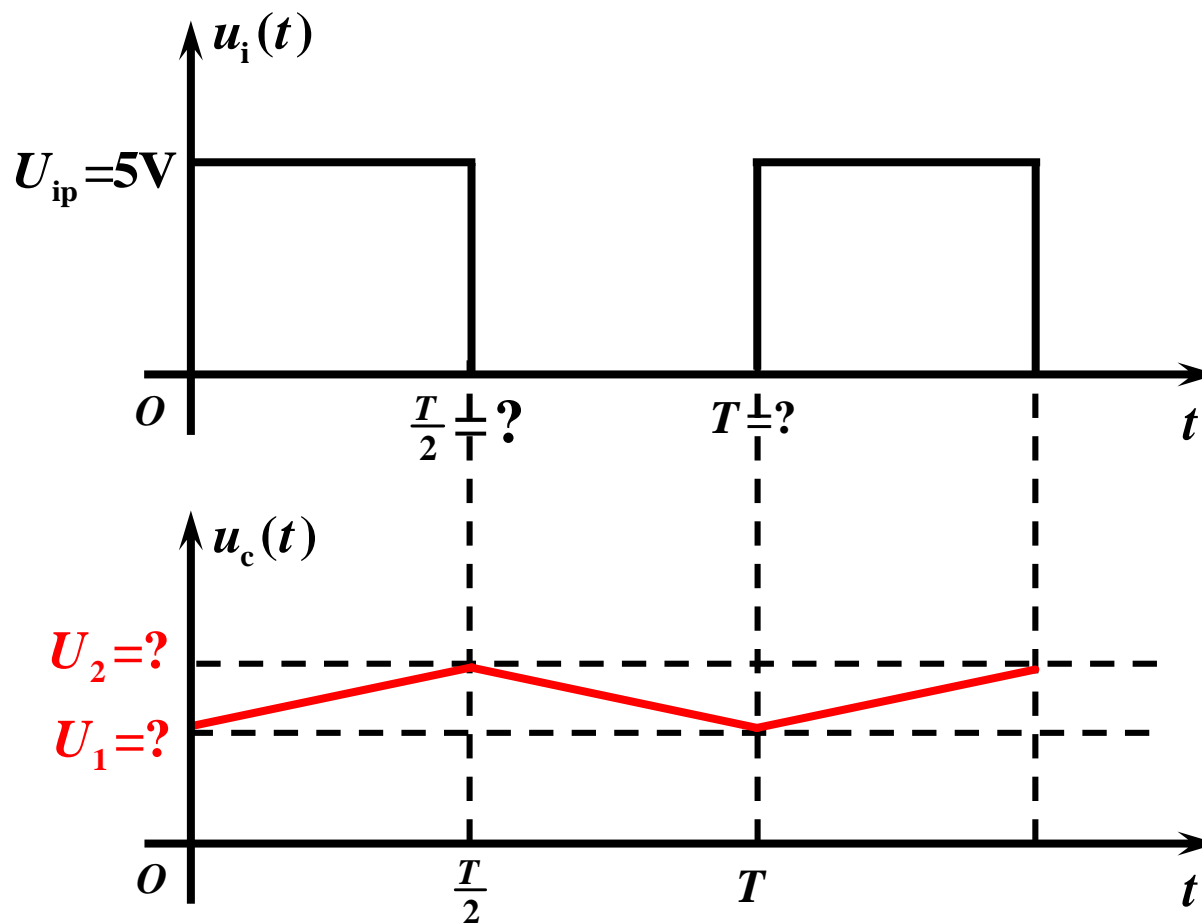
RC 积分电路的波形图

电阻 R_1 端的波形

$$U_{ip}=5V, f=1kHz$$

输出端电容 C 的波形

用示波器分别观测并对应画出
输入 $U_i(t)$ 和输出 $U_o(t)$ 波形。



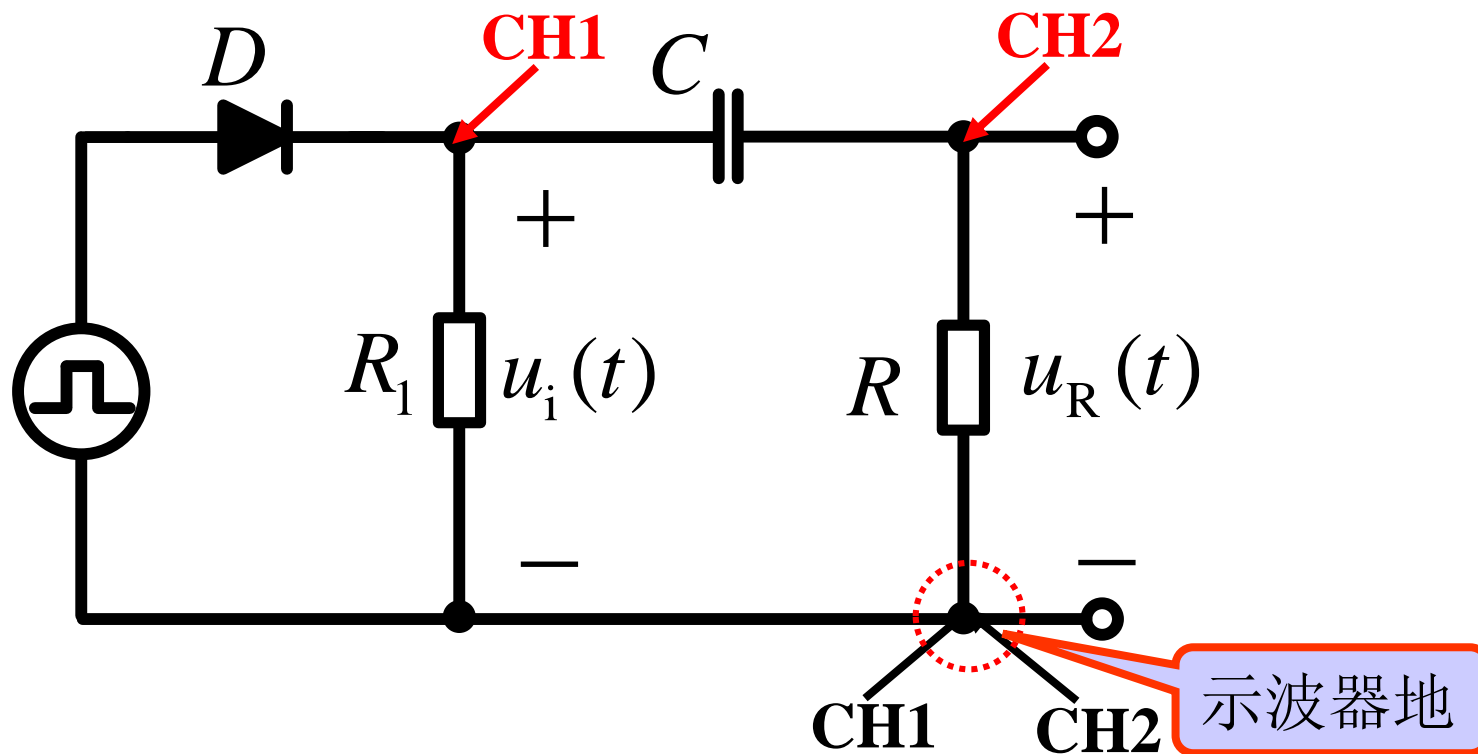


实验内容—RC 微分电路

RC 微分电路实验电路图



信号源方波输出：
频率 $f=1\text{kHz}$

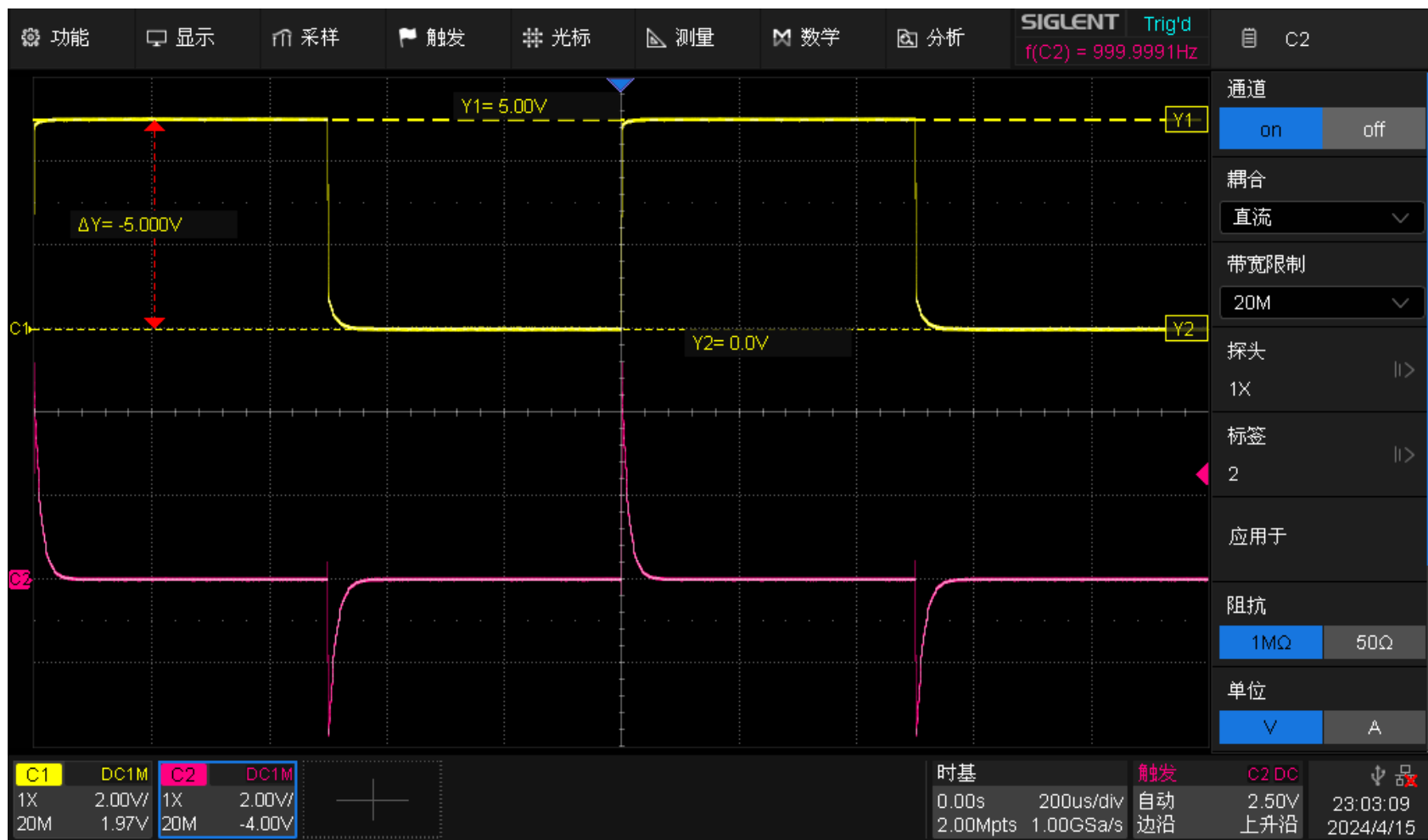


$$R_1=200\Omega, R=1\text{k}\Omega, C=0.05\mu\text{F}$$



实验内容— RC 微分电路

RC 微分电路波形图



示波器垂直方向DC耦合方式



实验内容— RC 微分电路

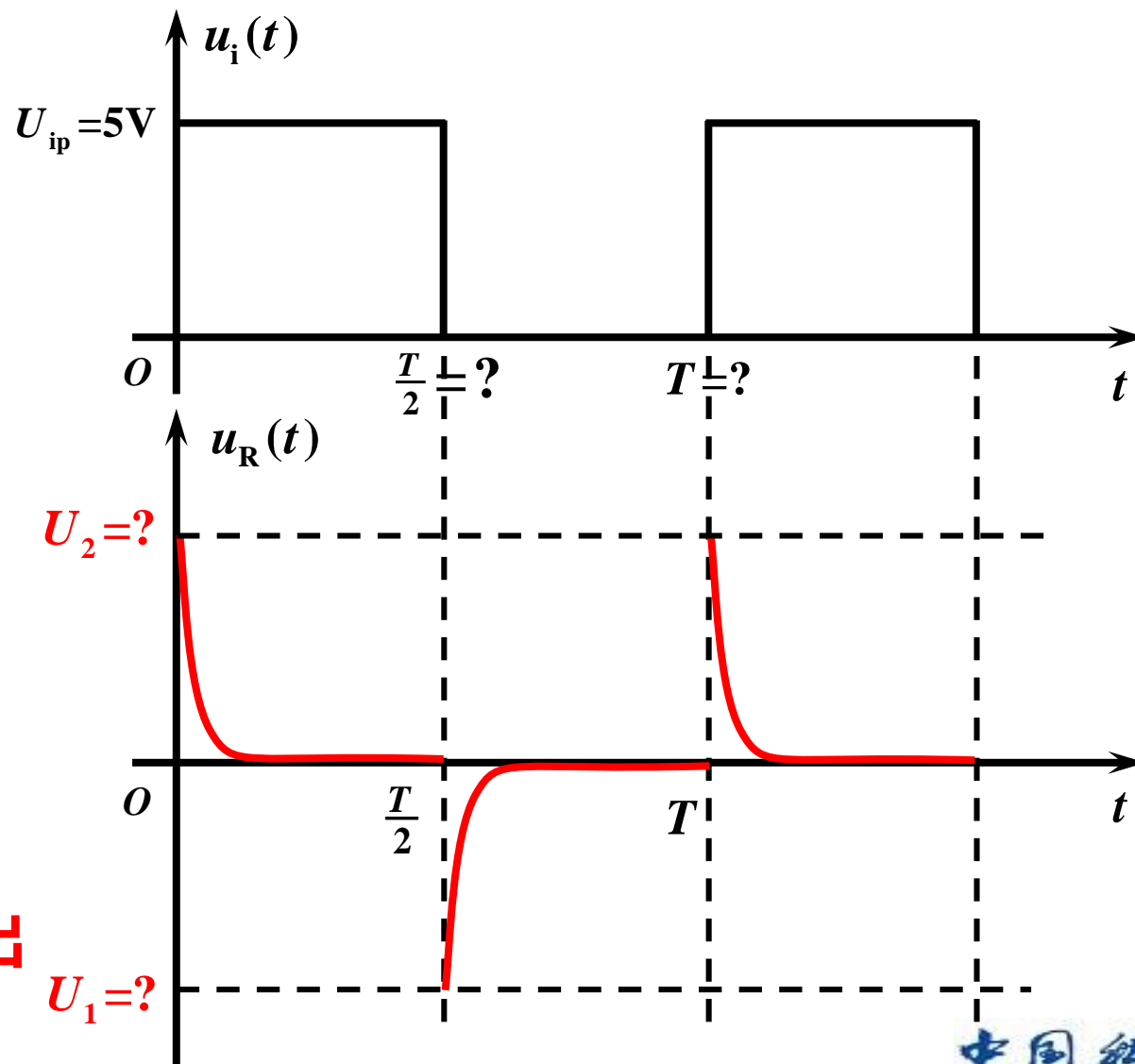
BACK

RC 微分电路波形图

电阻 R_1 端的波形

$$U_{ip} = 5V, f = 1kHz$$

输出端电阻 R 的波形



用示波器分别观测并对应画出
输入 $U_i(t)$ 和输出 $U_o(t)$ 波形。



实验内容—RC 脉冲分压电路

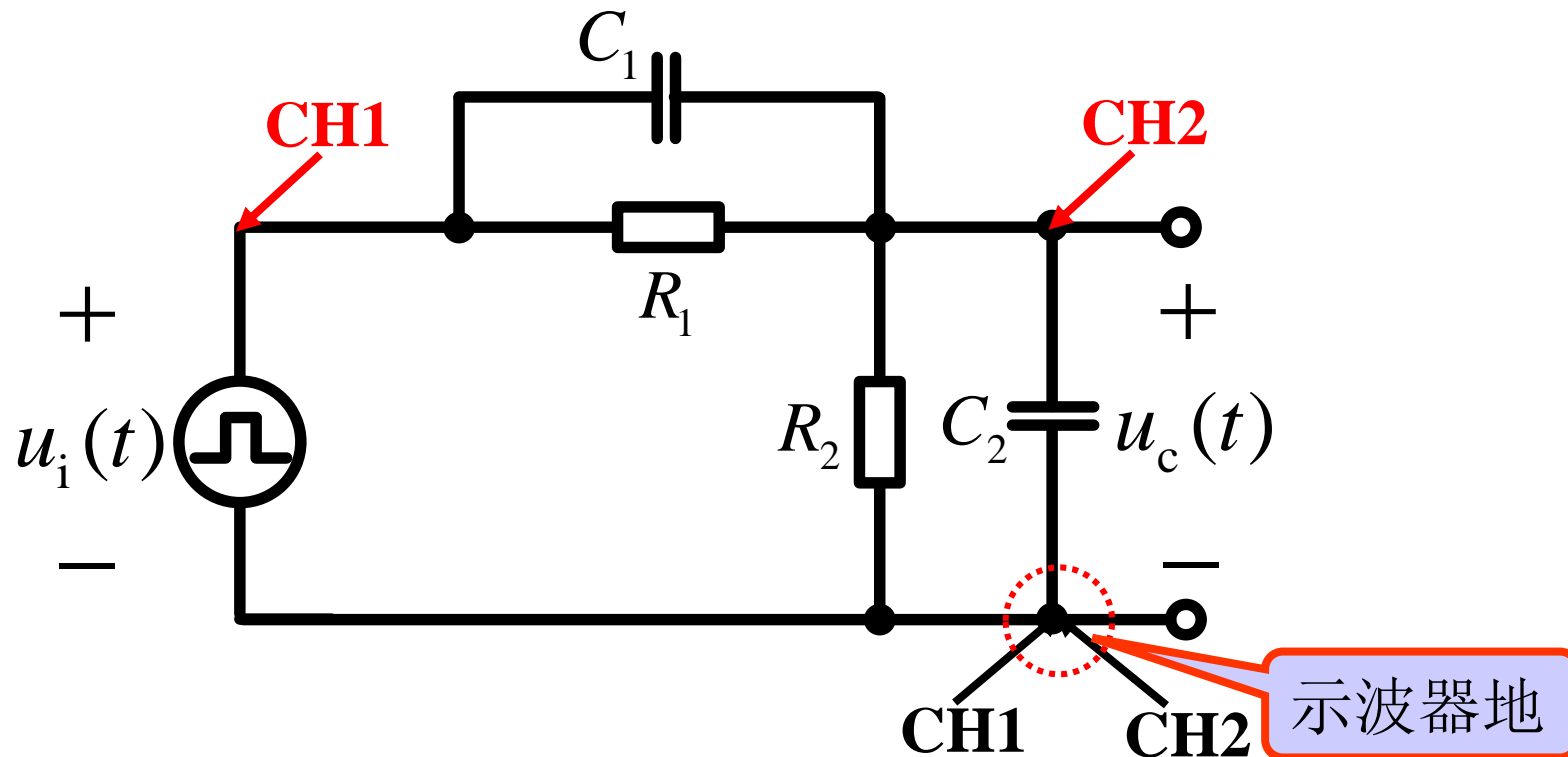
RC 脉冲分压电路实验图



信号源方波输出:

频率 $f=1\text{kHz}$

幅值 $U_{ip-p}=6\text{V}$



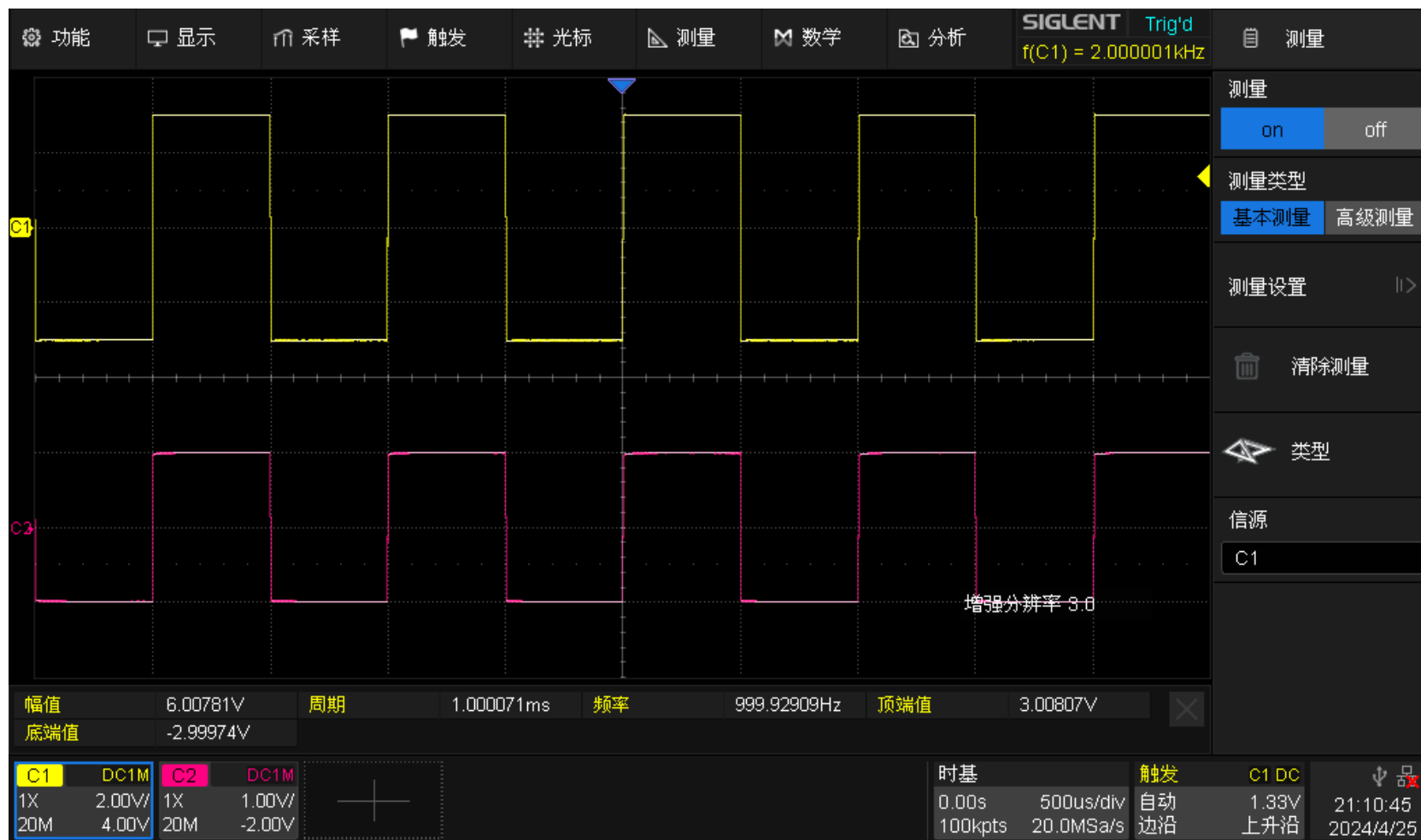
$$R_1=20\text{K}\Omega, C_1=0.005\mu\text{F}$$

$$R_2=10\text{K}\Omega, C_2=0.01\mu\text{F}$$



实验内容— RC 脉冲分压电路

RC 脉冲分压电路波形图



示波器垂直方向DC耦合方式



实验内容—RC 脉冲分压电路

RC 脉冲分压电路波形图

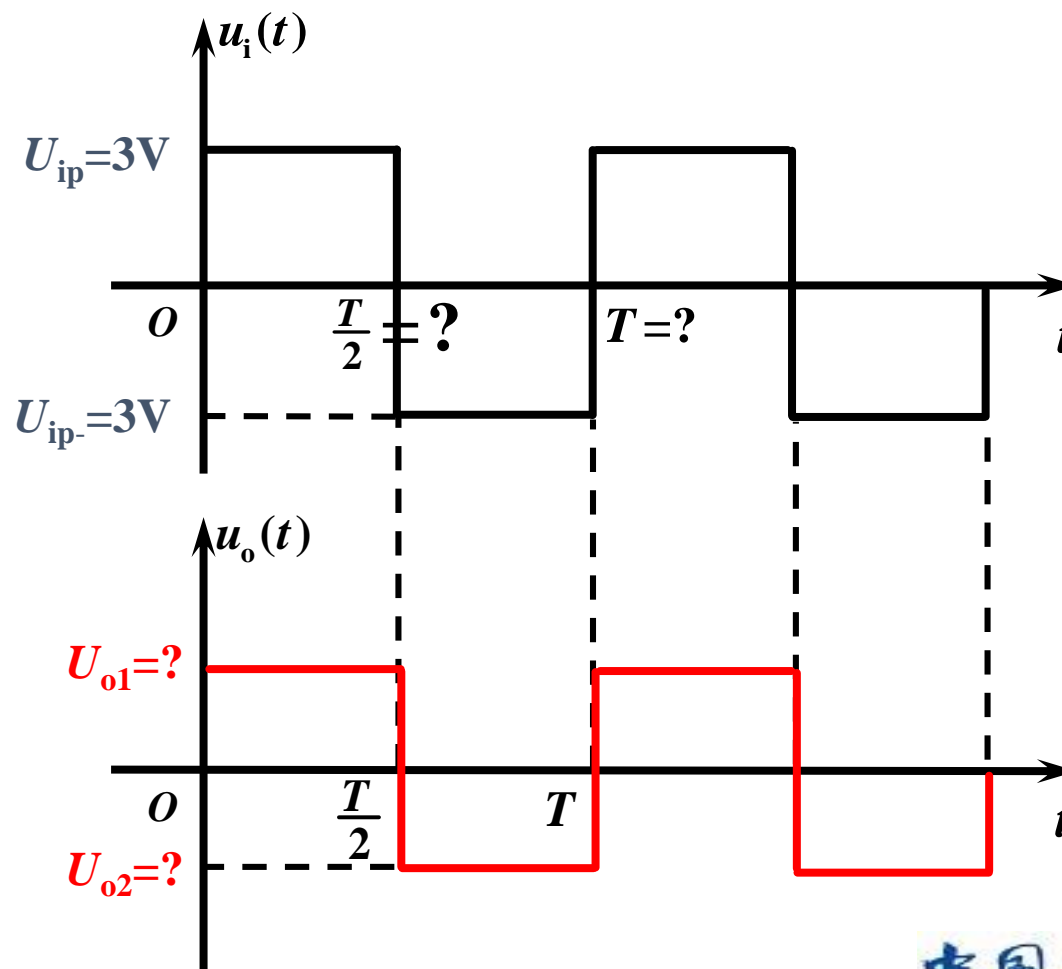
■ 完全补偿: $R_1=20\text{K}\Omega$, $C_1=0.005\mu\text{F}$, $R_2=10\text{K}\Omega$, $C_2=0.01\mu\text{F}$

输入端的波形

$$U_{\text{ip-p}}=6\text{V}, f=1\text{kHz}$$

输出端电阻 R_2 的波形

用示波器分别观测并对应画出
输入 $U_i(t)$ 和输出 $U_o(t)$ 波形。





实验内容— RC 脉冲分压电路

RC 脉冲分压电路波形图

- 欠补偿: (画示意图) (不做)

$$R_1=20\text{K}\Omega, C_1=0.002\mu\text{F}, R_2=10\text{K}\Omega, C_2=0.01\mu\text{F};$$

- 过补偿: (画示意图) (不做)

$$R_1=20\text{K}\Omega, C_1=0.02\mu\text{F}, R_2=10\text{K}\Omega, C_2=0.01\mu\text{F};$$

用示波器分别观测并对应画出输入 $U_i(t)$ 和输出 $U_o(t)$ 波形。

实验注意事项



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

1. 在做零状态和零输入、积分、微分电路实验时，输入信号选定为方波输出，输出幅度是电阻 R_1 两端的电压为规定的值，即为输入电压 u_i 的大小。
2. 本次实验中，示波器垂直方向耦合方式选定为DC。
3. 做脉冲分压器实验时，记得去掉二极管D，信号源输出的方波信号直接加到被测电路两端。

实验思考题



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

1. 一阶电路零输入和零状态响应电路中，电阻 R_1 在电路中起何作用？
2. 本次实验中，能用毫伏表测量电阻 R_1 两端的矩形波电压么，为什么？
3. 脉冲分压器电路中，有两个储能元件电容 C_1 和 C_2 ，为何是一阶电路？
4. 根据本次实验说明 RC 电路分别用作积分电路和微分电路时，必须具备的条件？

下次实验112实验室： 2组 电路基本定律研
1组 集成运算放大器的应用