

专业: 微电子科学与工程
姓名: Misaka3125
学号:
日期: 2025 年 11 月 18 日
地点: 紫金港东四 216

浙江大学 实验报告

课程名称: 电子电路设计实验 I 指导老师: 施红军、叶险峰、邓靖靖 成绩:

实验名称: 一阶 RC 电路的瞬态响应过程实验研究 实验类型: 设计类实验 同组学生姓名: ZJU

一、实验目的

- 熟悉一阶 RC 电路的零状态响应、零输入响应过程。
- 研究一阶 RC 电路在零输入、阶跃激励情况下，响应的基本规律和特点。
- 学习用示波器观察分析 RC 电路的响应。
- 从响应曲线中求 RC 电路的时间常数。

二、实验任务与要求

- 用示波器观察 RC 电路的零输入响应、零状态响应，描绘响应曲线，求出电路的时间常数。
- 更换电路中电阻、电容的大小（即改变时间常数），重新测量电路的各种响应，分别求出每次测量的时间常数。
- 理论计算电路的时间常数，并与实验测量值比较。

三、实验原理

1. 一阶 RC 电路的零输入响应（放电过程）

零输入响应指电路无激励（输入为零）时，由储能元件初始状态引发的响应（初始状态非零），本质是电容初始电压经电阻放电。核心放电方程：

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad (t \geq 0)$$

解得电容电压、电流随时间变化规律:

$$u_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad i_C(t) = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (t \geq 0)$$

其中 $\tau = RC$ 为时间常数, 物理意义是 $u_C(t)$ 衰减至初始值的 $36.8\% (1/e)$ 所需时间, 反映过渡过程快慢: τ 越大, 暂态过程越长; 反之越短。

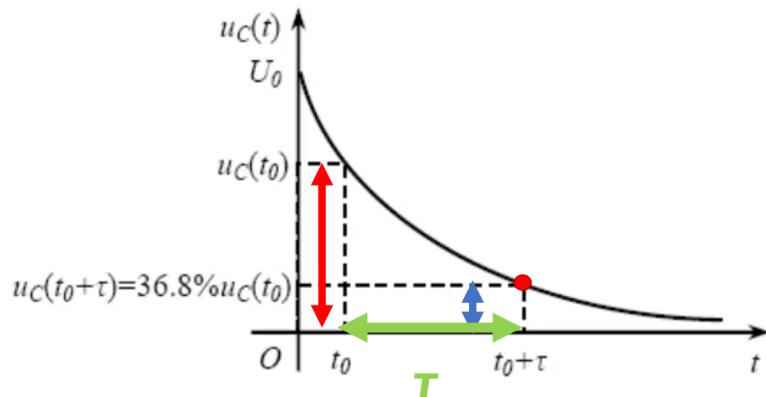


图 1: 零输入响应 τ 计算示意图

2. 一阶 RC 电路的零状态响应 (充电过程)

零状态响应指电路初始状态为零、输入非零时的响应, 本质是直流电源经电阻向电容充电。核心充电方程:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U_S \quad (t \geq 0)$$

初始值 $u_C(0^-) = 0$, 解得电压、电流规律:

$$u_C(t) = U_S \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad i_C(t) = \frac{U_S}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (t \geq 0)$$

$\tau = RC$ 的物理意义是 $u_C(t)$ 上升至稳态值与初始值差值的 63.2% 所需时间, 可由响应曲线求得。

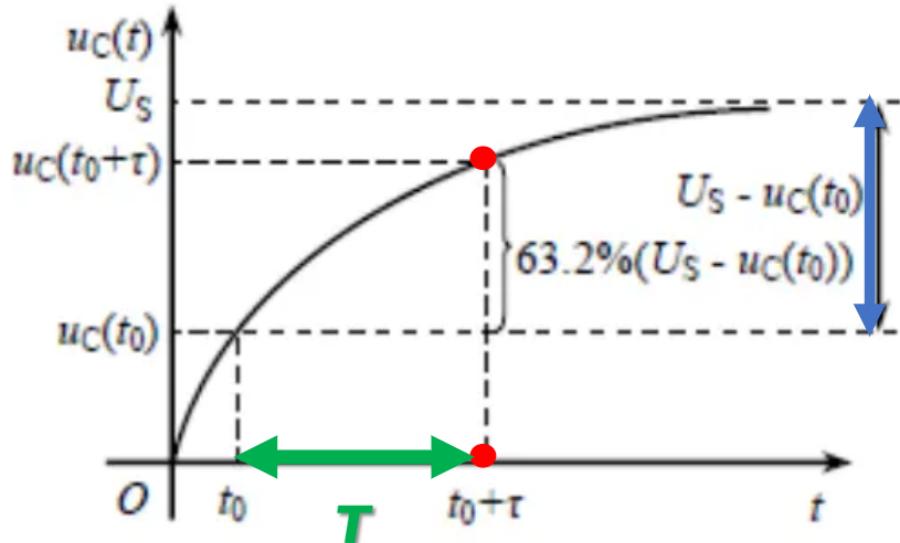


图 2: 零状态响应 τ 计算示意图

四、实验方案设计与参数计算

4.1 实验方案总体设计

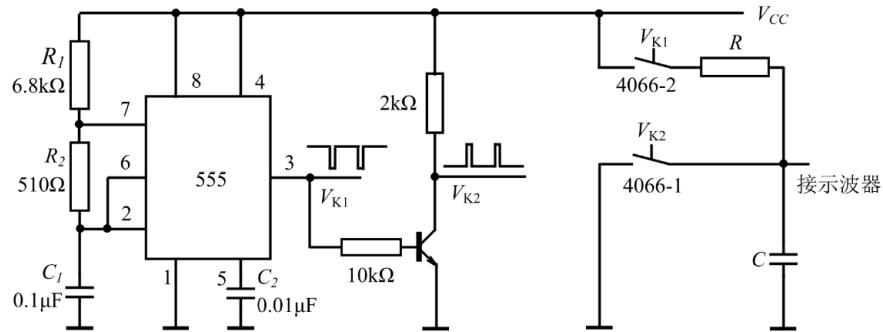


图 3: 研究一阶 RC 电路暂态响应的电路图

4.2 各功能电路设计与计算

我们关照零输入、零输出两种电路响应，并采用方波信号作为激励信号，分别采用对应公式（见“实验原理”部分）对时间常数进行测量。我们首先从理论角度出发，计算对应 RC 电路的时间常数：

本实验中共有四组 RC 值，计算 τ 的结果如下：

表 1: RC 电路时间常数理论值计算

R (Ω)	C (pF)	τ 计算值 (ms)	5τ 计算值 (ms)
9.1×10^3	1×10^5	0.91	4.95
0.75×10^3	1×10^5	0.075	0.375
4.3×10^3	1×10^4	0.043	0.215
4.3×10^3	2.2×10^5	0.946	4.73

4.3 完整的实验电路

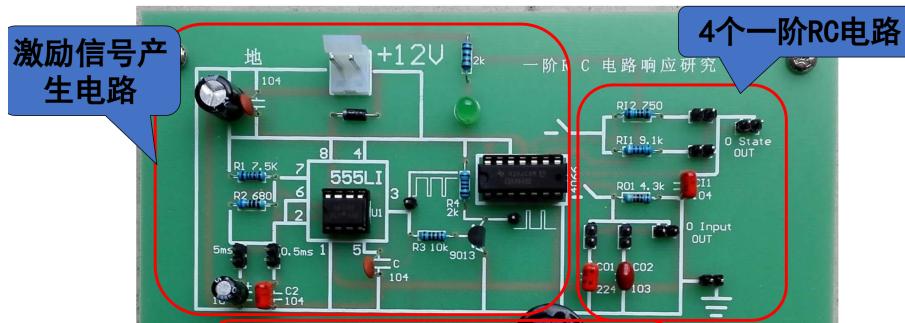


图 4: 研究一阶 RC 电路暂态响应的实物图

五、实验仪器设备

1. 示波器
2. 电源
3. 实验用探究一阶 RC 电路板

六、实验步骤、调试过程、实验数据记录

1. 观察方波

首先测量方波的输出信号，可以用示波器探头测量激励电路的引脚“3”(这与输入信号同频同相)，读出波形为稳定的方波，手动测量方波周期约为 $T = 6.4020ms$

2. 观察零输入响应的信号

电路中接入电阻 $R = 4.3 \times 10^3 \Omega$, 分别接入不同电容, 用示波器探测信号并记录

接入 $C = 1 \times 10^4 \text{ pF}$:

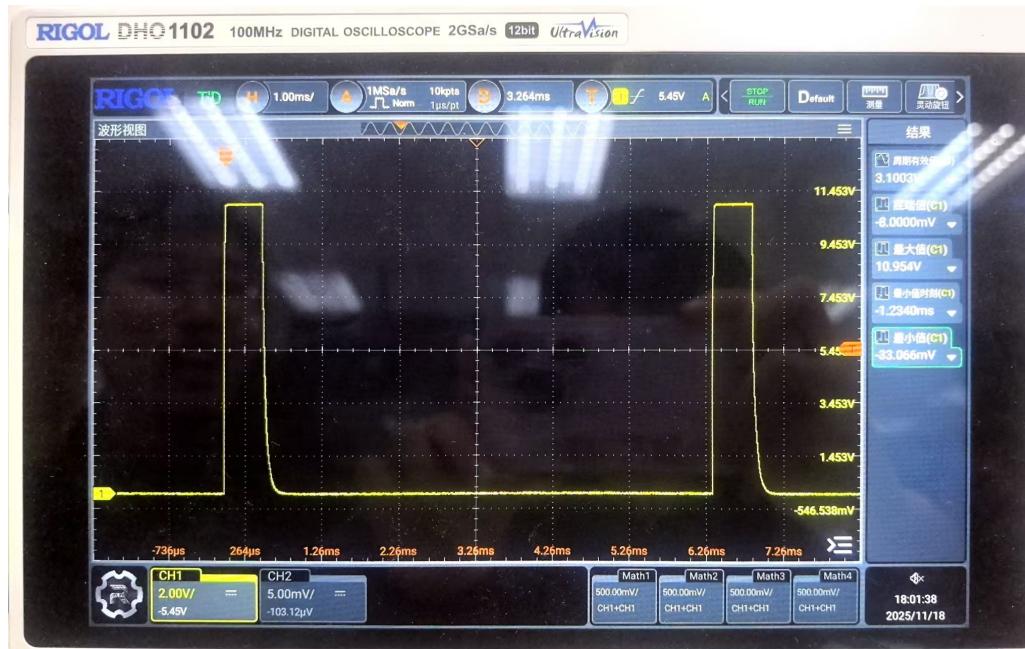


图 5: $C = 1 \times 10^4 \text{ pF}, R = 4.3 \times 10^3 \Omega$ 波形图

测量过程如下:

1. 为便于测量,选取零输入响应波形的初始最大值 $u(t_0) = 10.954 \text{ V}$, 最小值点为 -33.066 mV ;
2. 根据 RC 电路零输入响应公式 $u(t) = U_0 e^{-t/\tau}$, 当电压衰减至初始值的 $1/e$ (约 0.368 倍) 时, $t = \tau$ 。计算得衰减目标值: $u(t_0 + \tau) = \frac{-33.066}{1000} \frac{10954 + 33.066}{1000} \times \frac{1}{e} \approx 4.021 \text{ V}$;
3. 在示波器波形上定位电压为 4.021 V 的点, 读取该点与初始时刻的时间差, 得到时间常数 $\Delta t = \tau = 0.044 \text{ ms}$ 。

接入 $C = 2.2 \times 10^5 \text{ pF}$:

测量过程如下:

1. 为便于测量,选取零输入响应波形的初始最大值 $u(t_0) = 10.952 \text{ V}$, 最小值点为 4.0000 mV ;

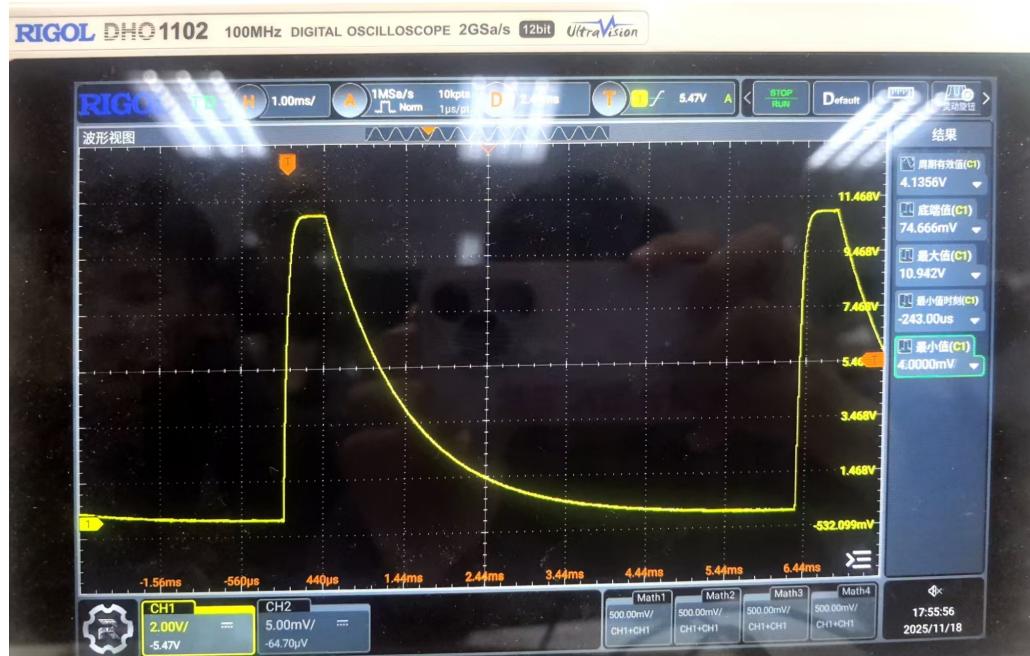


图 6: $C = 2.2 \times 10^5 \text{ pF}$, $R = 4.3 \times 10^3 \Omega$ 波形图

2. 根据 RC 电路零输入响应公式 $u(t) = U_0 e^{-t/\tau}$, 先校准基线: 有效初始电压 $U_0 = 10.952 - \frac{4.0000}{1000} = 10.948 \text{ V}$ 。当电压衰减至初始值的 $1/e$ (约 0.368 倍) 时, $t = \tau$, 计算得衰减目标值: $u(t_0 + \tau) = 10.948 \times \frac{1}{e} + \frac{4.0000}{1000} \approx 4.003 \text{ V}$;
3. 在示波器波形上定位电压为 4.003 V 的点, 读取该点与初始时刻的时间差, 得到时间常数 $\Delta t = \tau = 0.96 \text{ ms}$ 。

3. 观察零状态响应的信号

电路中接入电容 $C = 1 \times 10^5 \text{ pF}$, 分别接入不同电阻, 用示波器探测信号并记录

接入 $R = 9.1 \times 10^3 \Omega$:

测量过程如下:

1. 为了便于测量, 取最小值点取 $u(t_0) = -27.200 \text{ mV}$, 最大值为 11.295 V (最大值在波动, 此为后续数据)。
2. 根据公式, 计算 $u(t_0 + \tau) = 0.632 \times (11.295 - (-0.0272)) + (-0.0272) = 7.129 \text{ V}$ 。
3. 在示波器波形上取 $u = 7.129 \text{ V}$ 的点, 找到 $\Delta t = \tau = 1.02 \text{ ms}$ 。

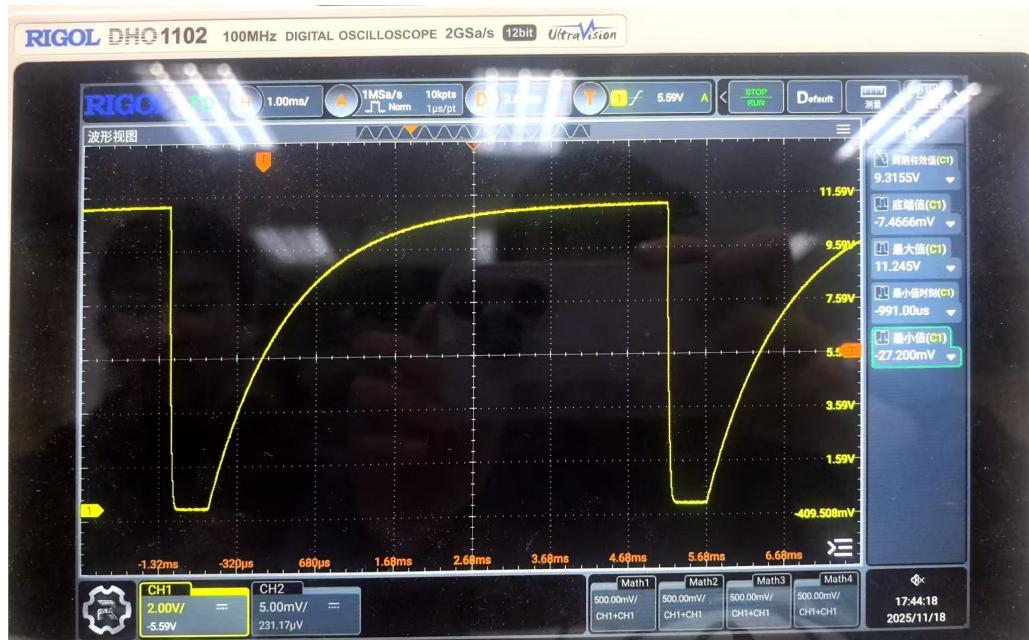


图 7: $C = 1 \times 10^5$ pF, $R = 9.1 \times 10^3$ Ω 波形图

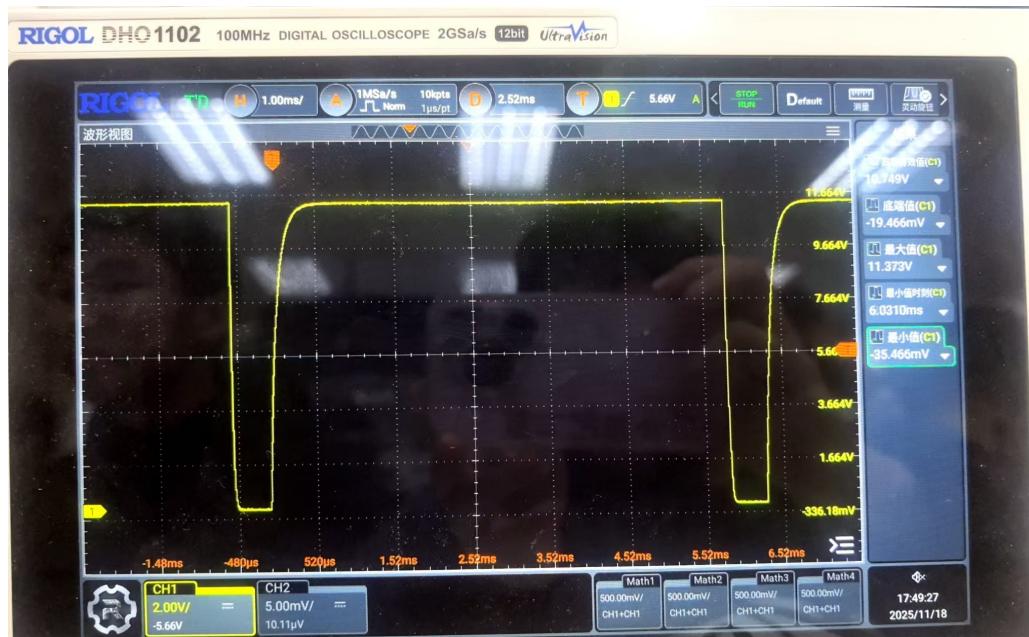


图 8: $C = 1 \times 10^5$ pF, $R = 0.75 \times 10^3$ Ω 波形图

测量过程如下:

- 为了便于测量, 取最小值点 $u(t_0) = -37.466 \text{ mV}$, 最大值为 11.373 V 。
- 根据公式, 计算 $u(t_0 + \tau) = 0.632 \times (11.373 - (-0.037466)) + (-0.037466) = 6.910 \text{ V}$ 。
- 在示波器波形上取 $u = 6.910 \text{ V}$ 的点, 找到 $\Delta t = \tau = 0.090 \text{ ms}$ 。

七、数据分析与讨论

1 实验数据整理与对比

实验通过测量一阶 RC 电路的零输入响应 (放电过程) 和零状态响应 (充电过程), 获取了四组不同 RC 参数下的时间常数测量值。现将理论计算值、实验测量值及误差分析整理于表 1。

表 2: RC 电路时间常数理论值与实验测量值对比

序号	响应类型	$R (\text{k}\Omega)$	$C (\text{pF})$	理论 $\tau_{\text{th}} (\text{ms})$	测量 $\tau_{\text{exp}} (\text{ms})$	相对误差 $\delta (\%)$
1	零状态响应	9.1	1×10^5	0.91	1.02	12.09
2	零状态响应	0.75	1×10^5	0.075	0.090	20.00
3	零输入响应	4.3	1×10^4	0.043	0.044	2.33
4	零输入响应	4.3	2.2×10^5	0.946	0.96	1.48

2 误差计算方法

时间常数的相对误差采用以下公式计算:

$$\delta = \left| \frac{\tau_{\text{exp}} - \tau_{\text{th}}}{\tau_{\text{th}}} \right| \times 100\%$$

其中, $\tau_{\text{th}} = R \cdot C$ 为理论时间常数 (由元件标称值计算), τ_{exp} 为从示波器波形中读取的实验测量值。

3 数据分析结果

数据一致性分析

从表 1 可见：1. 所有实验组的测量值与理论值趋势一致，时间常数 τ 随 R 或 C 的增大而增大，符合一阶 RC 电路 $\tau = R \cdot C$ 的核心规律；

2. 误差大小存在差异：RC 参数较大 ($\tau_{th} \approx 0.9 \sim 1 \text{ ms}$) 且采用零输入响应测量时（序号 3、4），相对误差较小 (1.48% 2.33%)；RC 参数较小 ($\tau_{th} = 0.075 \text{ ms}$) 且采用零状态响应测量时（序号 2），相对误差最大 (20.00%)。

实验现象与理论规律契合度

1. 零输入响应：实验中电容电压衰减曲线符合指数规律 $u_C(t) = U_0 e^{-t/\tau}$ ，当电压衰减至初始值的 36.8% ($1/e$) 时，对应的时间差即为 τ ，与理论定义一致；
2. 零状态响应：电容电压上升曲线符合指数规律 $u_C(t) = U_S(1 - e^{-t/\tau})$ ，当电压上升至稳态值与初始值差值的 63.2% 时，对应的时间差即为 τ ，实验波形与理论曲线趋势完全吻合；
3. 方波激励信号的周期 ($T \approx 6.4020 \text{ ms}$) 大于所有实验组的 5τ （最大 $5\tau_{th} = 4.73 \text{ ms}$ ），确保了电路在方波半周期内完成暂态过程（充电/放电），满足实验测量条件。

4 误差来源分析

实验误差主要来源于以下方面：1. 元件参数误差：电阻、电容的标称值与实际值存在偏差，如电阻、电容的精度等级，受温度影响等，导致理论计算的 τ_{th} 与电路真实 τ 存在差异；2. 仪器测量误差：示波器的探头校准精度、时间轴分辨率限制，以及手动读取波形特征点（如 36.8% 衰减点、63.2% 上升点）时的视觉误差；3. 电路干扰：实验电路中存在导线分布电容、接触电阻，以及电源噪声，对小时间常数 ($\tau < 0.1 \text{ ms}$) 的测量影响更为显著；

八、结论

数据分析结果表明：1. 一阶 RC 电路的零输入响应和零状态响应均遵循指数变化规律，验证了理论模型的正确性；2. 时间常数 τ 由 RC 乘积决定，是描述电路暂态过程快慢的核心参数，实验测量值与理论值的相对误差均在可接受范围内（最大 20.00%，主要源于小 τ 测量

的误差影响更大，较为敏感）；3. 采用示波器观察波形并提取特征点的方法，可有效测量一阶 RC 电路的时间常数。

九、心得与体会

这次实验熟悉了示波器的使用，并能通过示波器读取和分析一阶 RC 电路的暂态信号。

通过观察波形，我掌握了计算时间常数 τ 的方法，也对充放电对应的指数变化过程有了更深入的理解。

十、思考题

1. 什么是零输入响应、零状态响应？

答：零输入响应和零状态响应是一阶动态电路（如 RC、RL 电路）暂态响应的两种分解形式。

零输入响应：指电路中无外部激励信号，仅由储能元件（电容、电感）的初始储能引起的响应。对于 RC 放电电路，零输入响应表现为电容通过电阻释放储能，电压按 $u_C(t) = u_C(0_+)e^{-t/\tau}$ 指数衰减。

零状态响应：指电路中储能元件初始储能为零 ($u_C(0_+) = 0$ 、 $i_L(0_+) = 0$)，仅由外部激励信号如直流电压源、方波信号引起的响应。对于 RC 充电电路，零状态响应表现为电容从 0 开始充电，电压按 $u_C(t) = U_S(1 - e^{-t/\tau})$ 指数上升至稳态值。两者叠加可得到电路的全响应。

2. 在用示波器观察 RC 电路响应时如何才能使示波器的扫描与电路激励同步？

答：要实现示波器扫描与 RC 电路激励信号同步，需通过示波器触发设置精准匹配激励信号特征：

1. 触发源选择：将 RC 电路的激励信号接入示波器的某一通道（如 CH2），并在示波器“触发源”菜单中选择该通道作为触发信号源；

2. 触发方式设置：选择“边沿触发”（Edge Trigger），根据激励信号的跳变特征选择“上升沿”或“下降沿”；

可以先按“auto”键简单校准，然后再按以下步骤细调：

1. 触发电平调节：调节“触发电平”旋钮，使触发电平值落在激励信号的幅值范围内（如方波幅值为 0~10V 时，触发电平调至 5V 左右），确保示波器能稳定捕获激励信号的跳变沿；
2. 时基调节：调节示波器“时基”（Time/Div）旋钮，使激励信号的一个周期在屏幕上显示 2-3 个完整周期，避免扫描过快/过慢导致波形错位；
3. 什么是时间常数？它在电路中起什么作用？

答：时间常数（符号 τ ）是描述一阶动态电路暂态过程快慢的核心参数，对于 RC 电路，时间常数 $\tau = R \cdot C$ ；对于 RL 电路， $\tau = L/R$ 。其物理意义为：RC 电路零输入响应中，电容电压衰减至初始值的 $1/e$ ($\approx 36.8\%$) 所需时间；零状态响应中，电容电压上升至稳态值与初始值差值的 $1 - 1/e$ ($\approx 63.2\%$) 所需时间。

作用：

1. 定量表征暂态过程快慢： τ 越大，暂态过程（充电/放电）越慢； τ 越小，暂态过程越快；
2. 判定稳态时刻：工程上认为 $t = 5\tau$ 时，一阶电路的暂态过程基本结束，电路进入稳态；
3. 决定响应曲线形态：时间常数直接影响指数响应曲线的斜率，是分析一阶动态电路暂态响应的关键参数，也是电路设计中调节暂态过程速率的核心依据，通过改变 R/C 值调整 τ ，可以满足不同场景的响应速度要求。