

浙江大学实验报告

专业：微电子科学与工程

姓名：wcHikaru

学号：/

日期：2025 年 11 月 18 日

地点：东四 216

课程名称：电子电路设计实验 I

指导老师：施红军、叶险峰、邓婧婧 成绩：

实验名称：一阶 RC 电路的瞬态响应过程研究

实验类型：验证型实验

同组学生姓名：/

一、实验目的

- (1) 熟悉一阶 RC 电路的零状态响应、零输入响应过程。
- (2) 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。
- (3) 学习用示波器观察分析 RC 电路的响应。
- (4) 从响应曲线中求 RC 电路的时间常数。

二、实验任务和要求

- (1) 研究一阶 RC 电路零输入响应和零状态响应的基本规律和特点。
- (2) 学习使用示波器观察、分析一阶 RC 电路的响应。
- (3) 从响应曲线中求一阶 RC 电路的时间常数。

三、实验原理

1. 一阶 RC 电路的零输入响应（电容放电）

电路在无激励情况下，由储能元件的初始状态引起的响应称为零输入响应，即电路初始状态不为零，输入为零所引起的电路响应。实际上是电容器 C 的初始电压经电阻 R 放电过程。

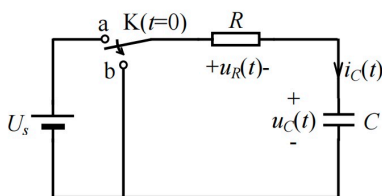


Figure 1: 一阶电路

- 初始状态下， $U_C(0^-) = U_0(\text{V})$
- $t = 0$ 时，将开关 K 转到位置 b，电容开始放电： $u_C(t) + RC \frac{du_C(t)}{dt} = 0, (t \geq 0)$
- 可以得出电容器上的电压和电流随时间变化的规律：

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

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

- 式中 $\tau = RC$ ，即为时间常数，其物理意义是 $u_C(t)$ 衰减到 $\frac{1}{e}$ (36.8%) $\cdot u_C(0)$ 所需要的时间，反映了电路过渡过程的快慢程度。 τ 越大，暂态响应所持续的时间越长，即过渡过程的时间越长；反之， τ 越小，过渡过程的时间越短。时间常数 τ 可通过相应的衰减曲线进行观察。

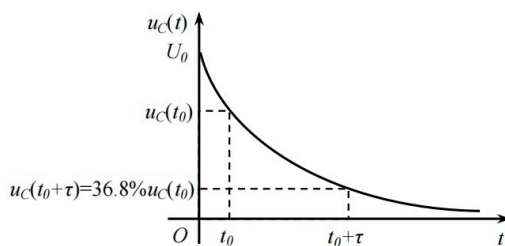


Figure 2: 一阶 RC 电路的零输入响应曲线

2. 一阶 RC 电路的零状态响应（电容充电）

零状态响应是指初始状态为零，而输入不为零所产生的电路响应。一阶 RC 电路在阶跃信号激励下的零状态响应实际上就是直流电源经电阻 R 向 C 充电的过程。在图 1 所示的一阶电路中，先让开关 K 合于位置 b，当 $t = 0$ 时，将开关 K 转到位置 a。电容器开始充电，充电方程为：

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

初始值： $u_C(0^-) = 0$ 可以得出电压和电流随时间变化的规律：

$$u_C(t) = U_S (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = U_S (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), (t \geq 0)$$

$$i_C(t) = \frac{U_S}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{U_S}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}, (t \geq 0)$$

$\tau = RC$ 为时间常数，其物理意义是由初始值上升至稳态值与初始值差值的 63.2% 处所需的时间。同样可以从响应曲线中求得时间常数 τ ，图像如下图所示。

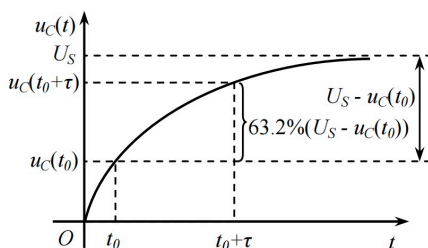


Figure 3: 一阶 RC 电路的零状态响应曲线

3. 方波响应

当方波信号激励加到 RC 两端时，在电路的时间常数远小于方波周期时，可以视为零状态响应和零输入响应的多次过程。方波的前沿相当于给电路一个阶跃输入，其响应就是零状态响应；方波的后沿相当于在电容具有初始值 $u_C(0)$ 时，把电源用短路置换，电路响应转换成零输入响应。

当方波的 1/2 周期小于电路的时间常数时，方波前后沿对应的是瞬态过程的其中一小部分。

由于方波是周期信号，可以用普通示波器显示出稳定的响应图形，便于观察和作定量分析。

四、实验方案设计与参数计算

1. 实验方案总体设计

RC 电路的响应是一个十分短暂的单次变化瞬态过程，一次激励引起电路一次响应。要在示波器上显示 RC 电路的响应曲线进而进行观察和测量有关参数，就必须周期性地重复进行激励，使这种单次变化的过程重复出现，而且要保证激励信号与示波器扫描的同步，只有这样，才能在示波器上显示稳定的电路响应曲线。为此，实验时必须设计一个实验方案，实现对 RC 电路的周期性重复激励和向示波器提供扫描同步信号。

本次试验选用图 4 所示的实验电路，选用 555 时基电路作激励脉冲信号发生电路，用 CD4066 电子开关实现电路中开关的切换，脉冲信号的前沿为示波器提供扫描同步触发信号。

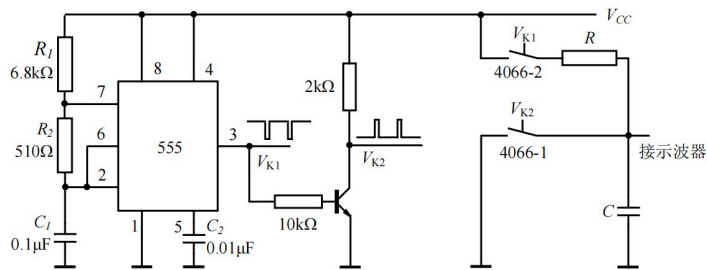


Figure 4: 重复激励的零状态响应观测实验电路

2. 实验电路板实物图

本次实验平台如下图所示

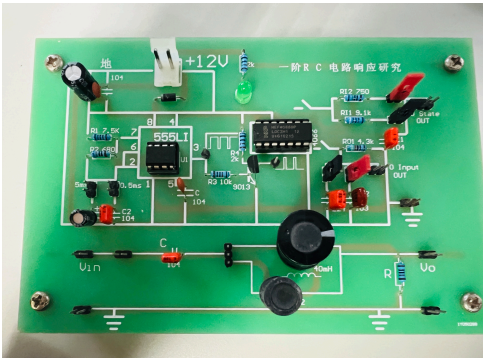


Figure 5: 一阶 RC 电路的瞬态响应研究实验平台

3. 参数计算

本实验中共有四组 RC 值，计算 τ 的结果如下：

$R(\Omega)$	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	2.2×10^4	0.0946	0.473

Table 1: 实验 τ 理论计算记录表

五、 实验仪器设备

- 万用表
- 示波器
- 实验电路板

六、 实验步骤与数据记录

1. 零状态响应： $C = 1 \times 10^5 \text{pF}$, $R = 9.1 \times 10^3 \Omega$

测量过程如下：

- (1) 取曲线上一点 $u(t_0) = 1.84\text{V}$
- (2) 根据公式， $u(t_0 + \tau) = 0.632 \times (3.9 - 1.84) + 1.84 = 3.142\text{V}$
- (3) 在示波器波形上取 $u = 3.142\text{V}$ 的点，找到 $\Delta x = \tau = 920\mu\text{s} = 0.92\text{ms}$

测得实验波形图如下图所示：



Figure 6: 零状态响应示波器观测结果 (1)

2. 零状态响应: $C = 1 \times 10^5 \text{pF}$, $R = 0.75 \times 10^3 \Omega$

测量过程如下:

- (1) 取曲线上一点 $u(t_0) = 1.643\text{V}$
- (2) 根据公式, $u(t_0 + \tau) = 0.632 \times (3.53 - 1.643) + 1.643 = 2.839\text{V}$
- (3) 在示波器波形上取 $u = 2.839\text{V}$ 的点, 找到 $\Delta x = \tau = 78\mu\text{s} = 0.078\text{ms}$

测得实验波形图如下图所示:



Figure 7: 零状态响应示波器观测结果 (2)

3. 零输入响应: $C = 1 \times 10^4 \text{pF}$, $R = 4.3 \times 10^3 \Omega$

测量过程如下:

- (1) 取曲线上一点 $u(t_0) = 2.034\text{V}$
- (2) 根据公式, $u(t_0 + \tau) = 0.368u(t_0) = 0.748\text{V}$
- (3) 在示波器波形上取 $u = 0.748\text{V}$ 的点, 找到 $\Delta x = \tau = 45\mu\text{s} = 0.045\text{ms}$

测得实验波形图如下图所示:

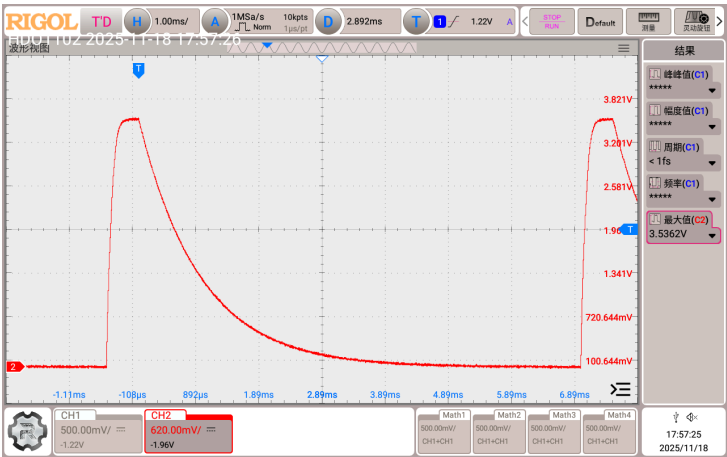


Figure 8: 零输入响应示波器观测结果（1）

4. 零输入响应： $C = 2.2 \times 10^4 \text{pF}$, $R = 4.3 \times 10^3 \Omega$

测量过程如下：

- (1) 取曲线上一点 $u(t_0) = 1.765\text{V}$
- (2) 根据公式， $u(t_0 + \tau) = 0.368u(t_0) = 0.649\text{V}$
- (3) 在示波器波形上取 $u = 0.649\text{V}$ 的点，找到 $\Delta x = \tau = 94\mu\text{s} = 0.094\text{ms}$

测得实验波形图如下图所示：

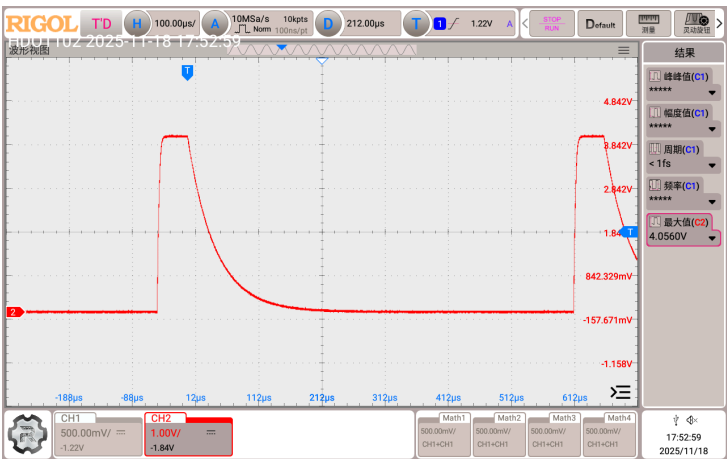


Figure 9: 零输入响应示波器观测结果（2）

七、数据分析与讨论

将上述四组数据整合如下：

$R(\Omega)$	$C(\text{pF})$	τ 测量值 (ms)	τ 计算值 (ms)	5τ 计算值 (ms)
9.1×10^3	1×10^5	0.92	0.91	4.95
0.75×10^3	1×10^5	0.078	0.075	0.375
4.3×10^3	1×10^4	0.045	0.043	0.215
4.3×10^3	2.2×10^4	0.094	0.0946	0.473

Table 2: 实验 τ 数据记录表

根据表 2 数据对比分析，四组实验（涵盖零状态与零输入响应）的时间常数测量值 τ_{meas} 与理论计算值 $\tau_{\text{calc}} = RC$ 均高度吻合，相对误差较小。例如第一组测量值为 0.92ms，与理论值 0.91ms 极为接近。

误差主要来源分析：

1. 元件误差：实验所用的电阻和电容存在标称容差（通常电容误差较大），导致实际 RC 值与理论计算不同。
2. 读数误差：在示波器上移动光标定位特征电压点（如上升至 63.2% 或衰减至 36.8% 处）时，存在手动操作与估读偏差。
3. 分布参数：导线电阻及探头寄生电容引入了微小干扰。

实验数据均在允许误差范围内，成功验证了一阶 RC 电路时间常数的理论公式及瞬态响应规律。

八、实验结论

一阶 RC 电路零输入响应、零状态响应中 $\tau = RC$ 。

九、心得体会

通过本次一阶 RC 电路瞬态响应实验，我不仅在技能层面更加娴熟地掌握了示波器的使用技巧，更在思维层面完成了从理论到实践的跨越。

当看到书本上抽象的微分方程解，在示波器屏幕上具象化为一条条平滑的充放电曲线时，我对电路“动态行为”的理解变得前所未有的直观与深刻。特别是在测量时间常数 τ 的过程中，我需要先计算出 63.2% 或 36.8% 的特征电压值，再小心翼翼地调节光标进行定位。这一过程让我深刻体会到，实验不仅仅是机械的操作，更是一次对耐心的考验。

面对测量值与计算值的微小差异，我学会了去思考背后的误差来源，而非视而不见。这种对细节的“斤斤计较”和严谨的科学态度，才是我作为一名工科学生在实验中最宝贵的收获。

十、思考题

1. 什么是零输入响应、零状态响应？

零输入响应 (Zero-Input Response, ZIR) 是指在电路没有外加激励电源（输入信号为零）的情况下，仅由电路内部动态元件（如电容、电感）的初始储能所引起的电路响应。

- 物理意义：本质上是电路内部储存的能量释放的过程。在一阶 RC 电路中，表现为电容作为“临时电源”，通过电阻释放其初始时刻储存的电荷（即 $u_C(0_-) \neq 0$ ），直至电能完全消耗，电压降为零。
- 数学特征：对应于微分方程的齐次解，其变化规律仅取决于电路本身的参数（如时间常数 $\tau = RC$ ）和初始状态。

零状态响应 (Zero-State Response, ZSR) 是指电路中动态元件的初始储能为零（即初始状态为零， $u_C(0_-) = 0$ ）时，仅由外加激励电源的作用所引起的电路响应。

- 物理意义：本质上是外部能量输入电路并建立新稳态的过程。在一阶 RC 电路中，表现为电源通过电阻向未带电的电容充电，电容电压从零开始按指数规律上升，直到达到稳态值。
- 叠加原理：对于线性电路，电路的全响应等于零输入响应与零状态响应的叠加。这反映了电路响应可以分解为“内在历史影响”与“外在当前激励”两部分。

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？

在观察瞬态响应（如 RC 充放电）时，由于这是一个随时间快速变化的过程，要获得稳定清晰的波形，核心在于正确设置示波器的触发 (Trigger) 功能，使示波器的扫描起始点与电路激励信号的特定时刻（如阶跃发生的 $t = 0$ 时刻）严格对齐。具体操作步骤及原理如下：

1. 选择正确的触发源 (Source)：

必须将触发源设置为电路的激励信号（即输入端的方波信号）。因为激励信号的变化时刻（上升沿或下降沿）即为电路瞬态过程的起点 ($t = 0$)，以此为基准可以确保每次扫描都从响应开始的瞬间画起。

2. 设置触发模式与边沿 (Slope)：

采用边沿触发 (Edge Trigger) 模式。若观察零状态响应（充电过程），应选择上升沿触发；若观察零输入响应（放电过程），应选择下降沿触发。这样示波器就能精准捕捉到信号跳变的瞬间作为扫描起点。

3. 调节触发电平 (Level)：

调整触发电平旋钮，确保触发电平值位于激励信号的高、低电平之间（例如，若方波为 0V~5V，触发电平可设为

2.5V)。只有当信号电压穿越该电平值时，示波器才会启动扫描。如果电平设置超出信号范围，示波器将无法捕获信号，导致波形在屏幕上无序滚动或消失。

4. 匹配扫描速率 (Time/Div):

虽然这不属于“同步”机制，但为了完整观察响应，需调整水平时基，使扫描周期略大于电路的时间常数 τ (通常观察 5τ 左右的时间)，这样既能看到完整的瞬态变化，又能看到趋于稳定的部分。