浙江大学实验报告

专业：
姓名：
学号：
日期：2026 年 4 月 12 日
地点：东 3-308

课程名称：电工电子学实验　指导老师：　成　绩：
实验名称：一阶 RC 电路的瞬态分析　实验类型：测量型　学　期：25-26 春夏

一、实验目的和要求　二、实验内容和原理
三、主要仪器设备　四、实验数据记录和处理
五、实验结果与分析　六、讨论、心得

一、 实验目的和要求

(1) 熟悉一阶 RC 电路零输入响应、零状态响应和全响应的基本概念，理解电容电压在换路瞬间不能突变的规律。

(2) 观察一阶 RC 电路的充电和放电波形，并根据响应曲线测定电路的时间常数。

(3) 理解时间常数 $\tau = RC$ 对瞬态过程变化快慢的影响，分析元件参数变化对波形的作用。

(4) 掌握 RC 电路在方波激励下形成微分电路和积分电路的条件，并结合实验波形分析其输出特性。

二、 实验内容和原理

1.一阶 RC 电路的瞬态响应

一阶 RC 电路是最基本的动态电路之一。换路发生时，由于电容两端电压不能突变，电路会从初始状态逐步过渡到新的稳态，从而形成暂态过程。课件中给出的带开关一阶 RC 电路如下图所示。

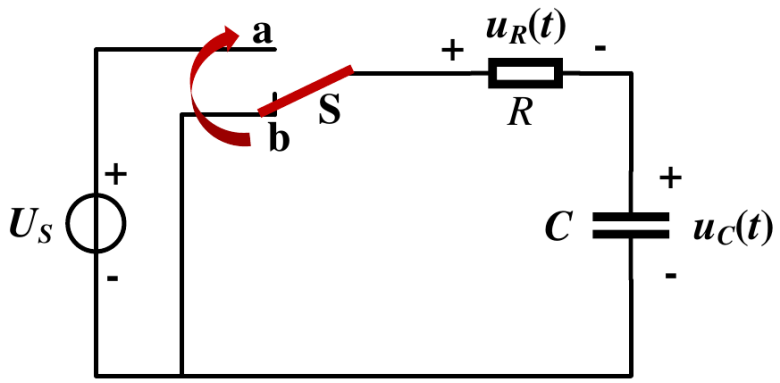
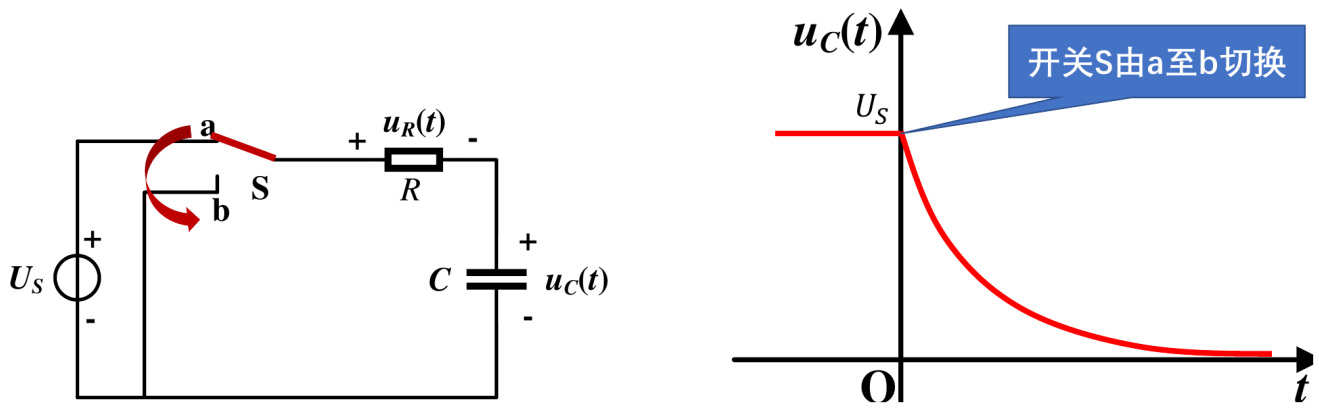


图 1: 课件中的换路电路示意

当电容原先带有电压，换路后仅靠电容释放能量时，电路表现为零输入响应，其电容电压满足

$$u_C(t) = U_S e^{-t/RC}, \quad t \geq 0$$



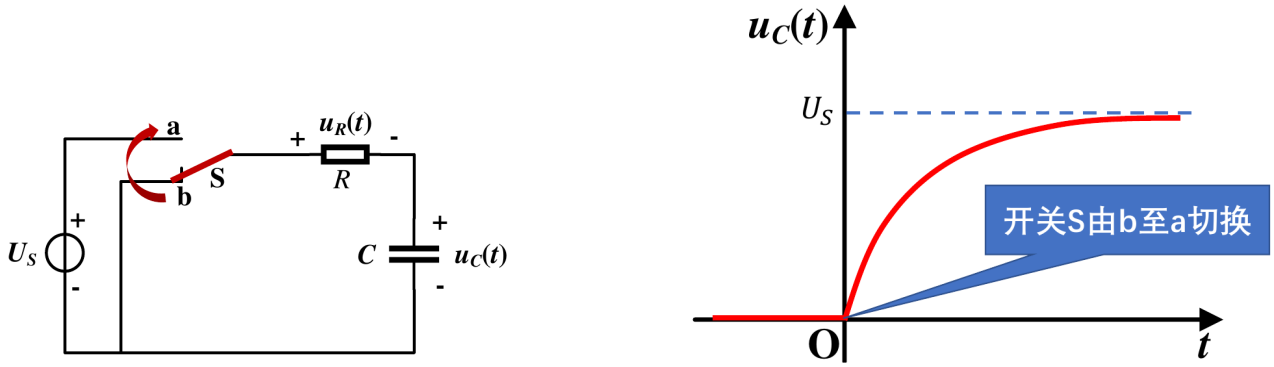
(a) 换路电路　　(b) 零输入响应波形

图 2: 课件中的零输入响应原理示意

此时开关由 a 切换到 b，外部电源退出电路，电容经电阻放电，电容电压随时间呈指数衰减。在 $t = \tau$ 时，电压衰减到初始值的约 0.368 倍。

当电容初始无储能，仅由外加电源激励产生响应时，电路表现为零状态响应，其电容电压满足

$$u_C(t) = U_S\left(1 - e^{-t/RC}\right), \quad t \geq 0$$



(a) 换路电路　　(b) 零状态响应波形

图 3: 课件中的零状态响应原理示意

此时开关由 b 切换到 a，电容经电阻充电，电容电压由零逐渐逼近稳态值 U_S。在 $t = \tau$ 时，电压上升到稳态值的约 0.632 倍。

若电容既有初始电压又受到外部激励，则得到全响应：

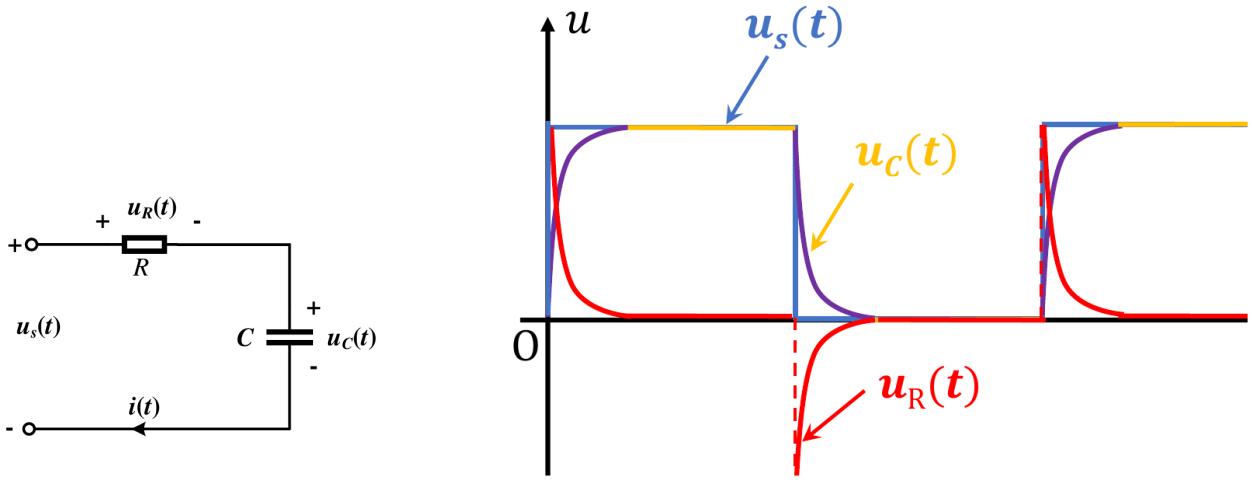
$$u_C(t) = U_S + \left[u_C(0^+) - U_S\right] e^{-t/RC}$$

本次实验实际重点是观测零输入响应和零状态响应，并由波形测定时间常数。

2.一阶 RC 电路的方波响应

当一阶 RC 电路输入方波信号时，输出波形由周期 T 与时间常数 τ 的相对大小决定。若输出取电阻两端电压，则当 $T \gg \tau$ 时更接近微分电路；若输出取电容两端电压，则当 $T \ll \tau$ 时更接近积分电路。

(1)微分电路



(a) RC 串联电路　　(b) 微分响应波形

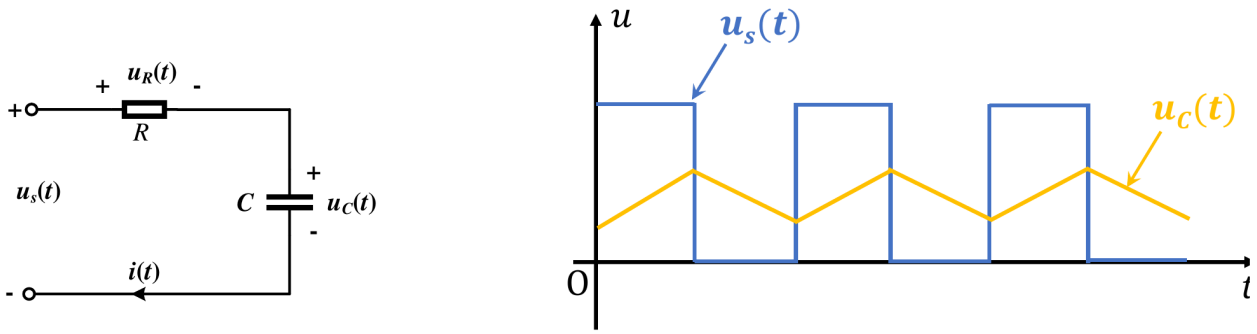
图 4: 课件中的微分电路原理示意

当方波周期远大于时间常数时，电容充放电过程相对于一个周期来说很短，电阻两端电压主要集中在上升沿和下降沿附近，满足近似关系

$$u_R(t) \approx RC\frac{du_S(t)}{dt}$$

因此输出主要体现输入信号的边沿变化，呈现正负尖脉冲。

(2)积分电路



(a) RC 串联电路　　(b) 积分响应波形

图 5: 课件中的积分电路原理示意

当方波周期远小于时间常数时，电容在单个周期内来不及充满和放空，电容两端电压只发生较小幅度的缓慢变化，满足近似关系

$$u_C(t) \approx \frac{1}{RC}\int u_S(t)\,dt$$

此时输出更接近三角波或斜坡波，表现出积分特性。

三、 主要仪器设备

表 1: 主要仪器设备

序号	仪器设备
1	电路实验板
2	双踪数字示波器
3	函数信号发生器
4	直流电源
5	数字式万用表

四、 实验数据记录和处理

1.零状态响应

按课件要求连接一阶 RC 电路，观察电容电压的充电过程。实验波形如下图所示。

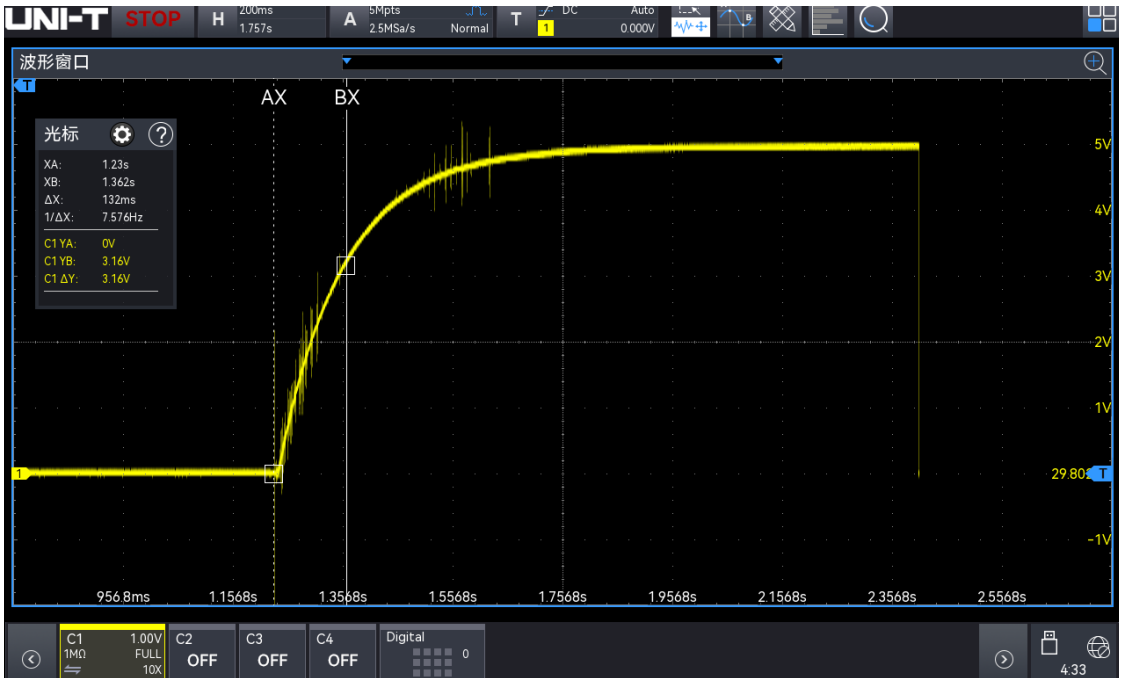


图 6: 零状态响应实测波形

从图中可以看出，电容电压在开关闭合后由接近 0 V 开始上升，最终逐渐逼近约 5 V 的稳态值，波形呈典型指数上升规律。根据图中光标读数，可整理如下。

表 2: 零状态响应关键读数

量	数值
X_A	1.23 s
X_B	1.362 s
ΔX	132 ms
Y_B	3.16 V

若稳态值近似取为 5 V，则

$$0.632 \times 5\,\mathrm{V} = 3.16\,\mathrm{V}$$

与图中光标读数基本一致，可取零状态响应的时间常数约为

$$\tau_{充电} \approx 132\,\mathrm{ms}$$

这说明实验波形与零状态响应理论规律基本一致，即电容在开始阶段充电较快，随后上升速度逐渐减小并接近稳态。若按工程上常用的 4τ 作为基本稳定判据，则该组数据对应的稳定时间约为

$$4\tau_{充电} \approx 528\,\mathrm{ms}$$

结合波形后段已明显变平，可以认为电容在约半秒后基本完成充电。此外，曲线起点接近 0 V，也说明实验前电容放电较充分，换路瞬间电容电压连续的特点在实测波形中得到了体现。

2.零输入响应

在电容充电后切断外加激励，观察电容经电阻放电的过程。实验波形如下图所示。

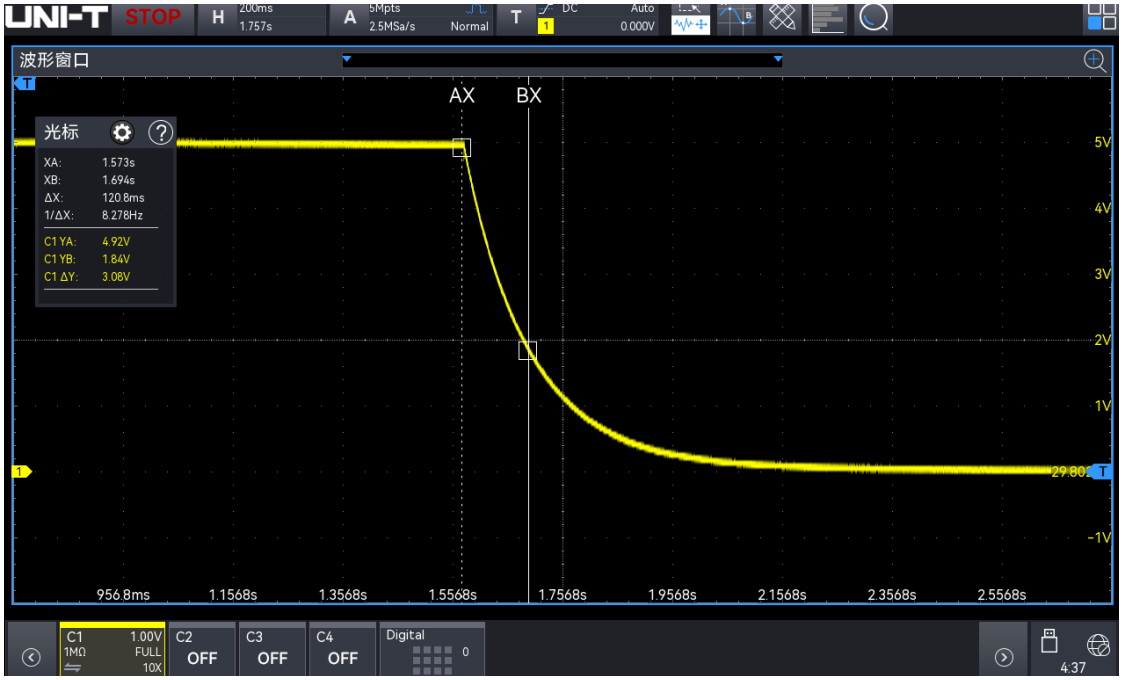


图 7: 零输入响应实测波形

从图中可见，电容电压由约 4.92 V 开始下降，并最终趋近于 0 V，整体呈指数衰减。根据图中光标读数，可整理如下。

表 3: 零输入响应关键读数

量	数值
X_A	1.573 s
X_B	1.694 s
ΔX	120.8 ms
Y_A	4.92 V
Y_B	1.84 V

按零输入响应理论，在 $t = \tau$ 时应满足

$$u_C(t) = 0.368U_0$$

更严格地说，零输入响应应满足

$$u_C(t) = u_C(\infty) + \left[u_C(0^+) - u_C(\infty)\right] e^{-t/RC}$$

本实验中末值已经接近 0 V，因此可以近似写成 $0.368U_0$ 来判定时间常数。由图中数据可得

$$0.368 \times 4.92\,\mathrm{V} \approx 1.81\,\mathrm{V}$$

与光标读数 1.84 V 较为接近，可取零输入响应的时间常数约为

$$\tau_{\text{放电}} \approx 120.8\,\mathrm{ms}$$

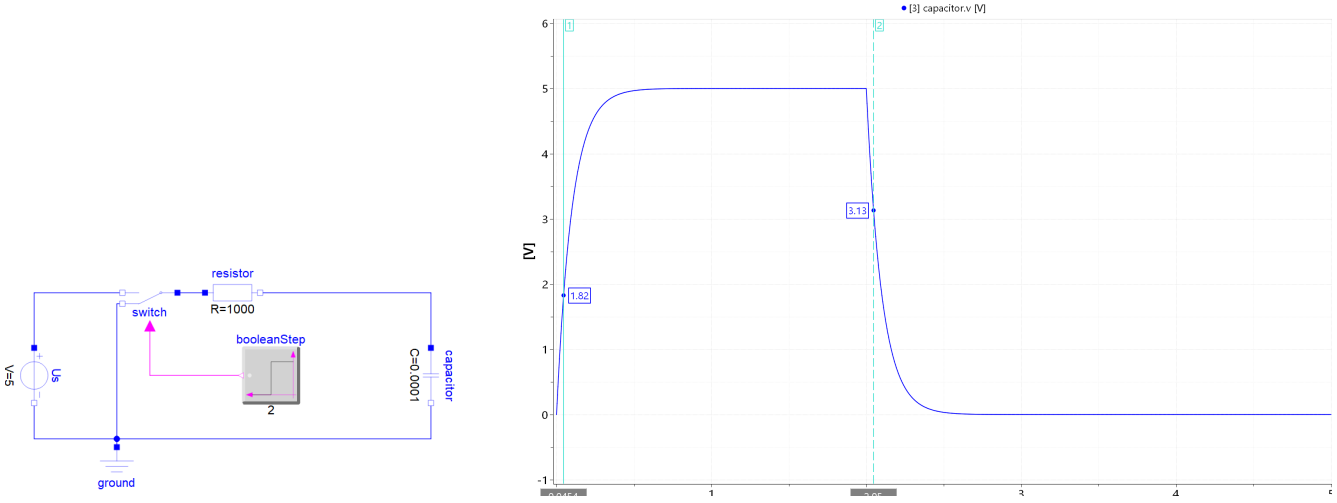
由波形还可以看出，开关切换后电容电压并未突变，而是从约 4.92 V 连续开始下降，说明电容保留了换路前的储能，符合电容电压连续变化规律。放电初期曲线斜率较大，随后逐渐减小；按 4τ 判据估算，约经过

$$4\tau_{\text{放电}} \approx 483.2\,\mathrm{ms}$$

后波形应基本贴近 0 V 附近，这与实测曲线后段逐步趋于平坦的现象一致。将其与零状态响应比较可见，两组时间常数都在 0.1 s 数量级，说明在相同 RC 参数下，充电与放电的快慢本应基本一致；两者的差别主要来自触发位置、光标选点以及初末值读数误差。

3.一阶 RC 电路仿真结果与实测对照

为便于与实测波形比较，采用与课件思路一致的换路结构建立一阶 RC 电路仿真模型。仿真电路与电容电压波形如下。



仿真电路　　仿真波形

图 8: 一阶 RC 电路仿真结果

从仿真结果可以看出，电容电压在充电阶段由 0 V 附近按指数规律上升至约 5 V，在开关切换后又按指数规律衰减至 0 V 附近，整个过程中充放电交界处电容电压保持连续，没有出现突变，这与一阶 RC 电路的理论分析相符。与实测波形相比，仿真曲线更加光滑，几乎不受噪声、触发抖动和元件参数离散性的影响，但充电上升、放电衰减以及约经过若干个时间常数后逐步稳定的总体趋势与实测结果接近。由此看出，本次实验虽然存在一定读数误差，但对响应类型和时间常数量级的判断仍然比较可靠。

4.时间常数理论值计算及相对误差分析

根据课件中一阶 RC 电路实验参数，取

$$R = 1\,\mathrm{k\Omega}, \qquad C = 100\,\mu\mathrm{F}$$

则理论时间常数为

$$\tau_{\text{理论}} = RC = 1 \times 10^{3} \times 100 \times 10^{-6}\,\mathrm{s} = 0.10\,\mathrm{s} = 100\,\mathrm{ms}$$

相对误差按下式计算：

$$\delta = \frac{|\tau_{\text{实测}} - \tau_{\text{理论}}|}{\tau_{\text{理论}}} \times 100\%$$

代入实验测得结果，可得：

表 4: 时间常数理论值与相对误差

响应类型	实测时间常数	理论时间常数	相对误差
零状态响应	132 ms	100 ms	32.0%
零输入响应	120.8 ms	100 ms	20.8%

从结果看，两组实验值均大于理论值，其中零状态响应的相对误差更大。这说明在利用示波器光标法读数时，响应起点和特征点的选取会对结果产生明显影响。除此之外，电阻和电容元件本身的标称误差、开关动作不够理想、示波器触发位置偏差以及实验过程中存在的噪声，都会使测得时间常数偏离理论值。

进一步比较可知，零输入响应的相对误差小于零状态响应。这是因为零输入响应中的初值 4.92 V 和特征点 1.84 V 都可以直接从图中读取，而零状态响应中稳态值采用了约 5 V 的近似，$0.632U_S$ 的特征点对稳态估计和光标落点更加敏感，因此误差相对更大。结合前述仿真结果可以看出，在理想参数条件下电路响应规律与理论公式是一致的，因此本次偏差主要还是来源于实测环境和读数过程，而不是分析模型本身。

5.微分电路实验及仿真对照

课件中微分实验采用单极性方波输入，取 $R = 1\,\mathrm{k\Omega}$、$C = 0.1\,\mu\mathrm{F}$，因此

$$\tau = RC = 100\,\mu\mathrm{s}$$

在保持 R、C 不变时，改变输入频率，观察电阻两端输出波形。

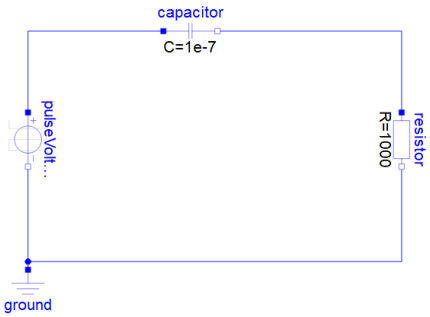
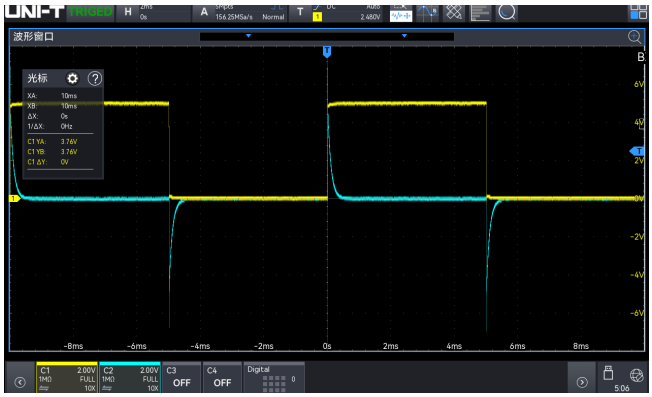
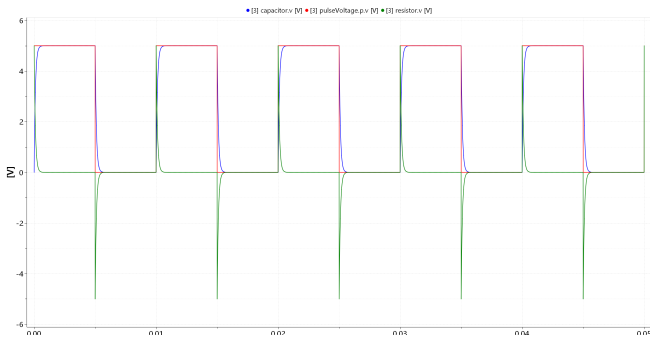


图 9: 微分电路仿真电路图

(1)100 Hz



实测波形



仿真波形

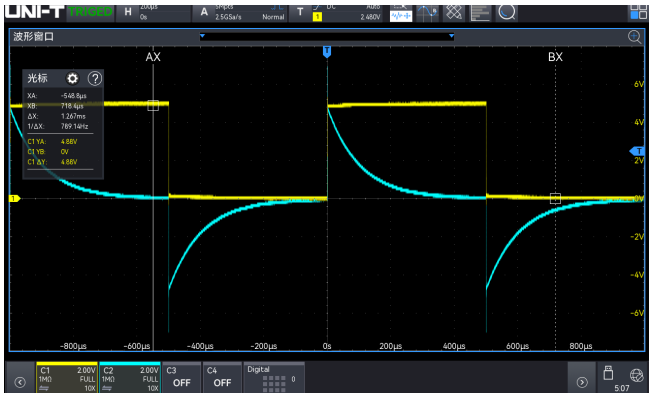
图 10: 100 Hz 时微分电路的实测与仿真对照

此时周期 $T = 10\,\mathrm{ms}$，时间常数 $\tau = 100\,\mu\mathrm{s}$，有

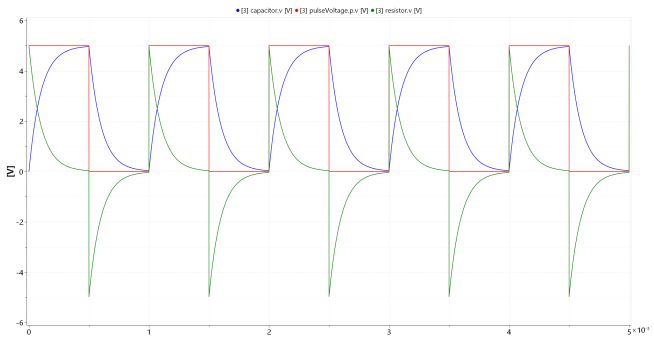
$$\frac{T}{\tau} = \frac{10\,\mathrm{ms}}{100\,\mu\mathrm{s}} = 100$$

若按相邻跳变边沿之间的半周期估算，则 $T/(2\tau) = 50$。也就是说，在下一次跳变到来前，电容已经有几十个时间常数完成充放电恢复，满足 $T \gg \tau$ 的微分条件。图中可见，黄色方波为输入信号，蓝色输出主要集中在上升沿和下降沿附近，表现为正负尖脉冲，随后迅速衰减到零附近。这说明此时微分特性最明显。仿真图中红色曲线为输入方波，绿色曲线为电阻两端输出，蓝色曲线为电容两端电压。可以看到绿色输出同样集中在边沿附近，呈现较尖锐的脉冲形态，与实测结果在变化趋势上保持一致，只是仿真波形更加理想、对称。

(2)1 kHz



实测波形



仿真波形

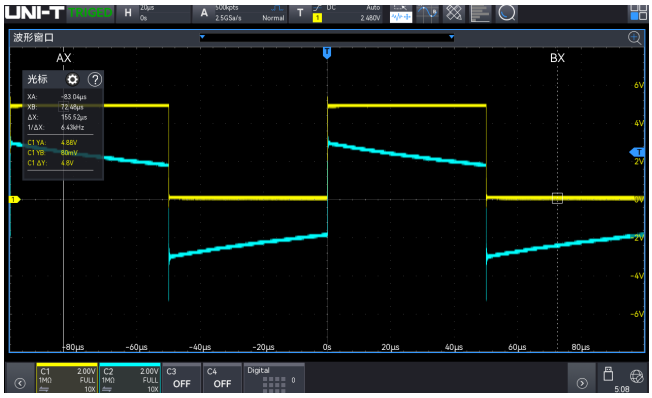
图 11: 1 kHz 时微分电路的实测与仿真对照

此时周期 $T = 1\,\mathrm{ms}$，仍取 $\tau = 100\,\mu\mathrm{s}$，有

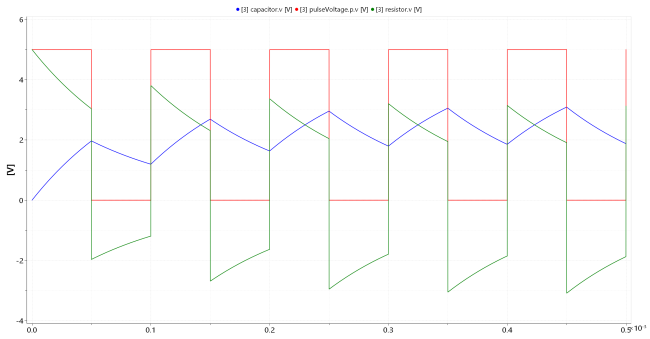
$$\frac{T}{\tau} = \frac{1\,\mathrm{ms}}{100\,\mu\mathrm{s}} = 10, \qquad \frac{T}{2\tau} = 5$$

从数量上看，周期仍大于时间常数，但已经从 100 Hz 时的 100τ 降到 10τ，相邻边沿间隔也只剩约 5τ。输出仍然在边沿附近有明显响应，不过脉冲宽度相对周期所占比例增大，且脉冲尚未完全回到零，下一个周期已经开始。因此微分效果相较于 100 Hz 已有所减弱。仿真结果也显示，绿色输出波形虽然仍以边沿响应为主，但脉冲已明显展宽，说明当周期减小时，电容来不及在每个周期内完全恢复，微分特性开始下降。

(3)10 kHz



实测波形



仿真波形

图 12: 10 kHz 时微分电路的实测与仿真对照

此时周期 $T = 100\,\mu$s，与时间常数 $\tau = 100\,\mu$s 相同，故

$$\frac{T}{\tau} = 1, \qquad \frac{T}{2\tau} = 0.5$$

半个周期甚至小于一个时间常数，电容尚未完成明显充放电过程时，下一次跳变已经到来，因此不再满足理想微分条件。图中可见，输出不再是窄而尖的脉冲，而是出现较明显的连续变化，相邻周期之间的充放电过程彼此重叠，说明电路已经偏离理想微分状态。仿真图中绿色输出也已不再表现为边沿附近的窄脉冲，而是变成持续起伏的连续曲线，与实测现象一致。

综合三组微分实验及仿真结果可见，随着频率由 100 Hz 提高到 10 kHz，周期 T 从 10 ms 逐步减小到 100 μs，而 T/τ 也由 100 降低到 10，最后降到 1；相邻边沿间隔对应的 $T/(2\tau)$ 则由 50 降到 5 和 0.5。输出波形因此由边沿处的尖脉冲逐渐过渡为较宽的连续变化曲线，说明频率越高，电容越来不及在每个周期内完成充分充放电，微分条件会逐步被破坏。实测和仿真在这一趋势上的一致性，也进一步说明实验观察是可信的。

6.积分电路实验及仿真对照

积分实验中固定 $C = 0.1\,\mu$F，改变电阻值，观察电容两端输出波形。由实测图片命名可知，本组波形采用 $f = 3$ kHz 的单极性方波输入，其周期约为

$$T \approx 333\,\mu\text{s}$$

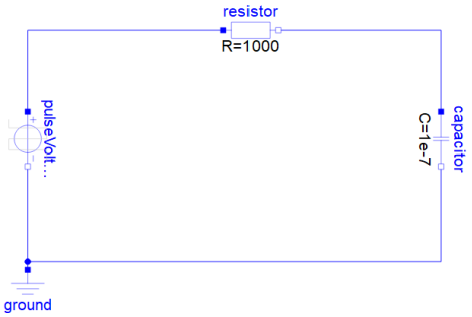
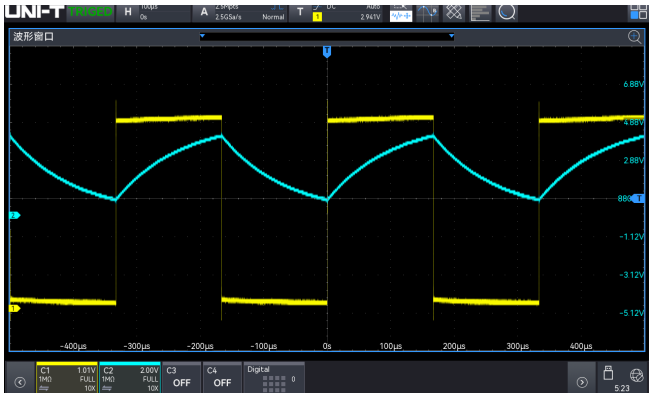
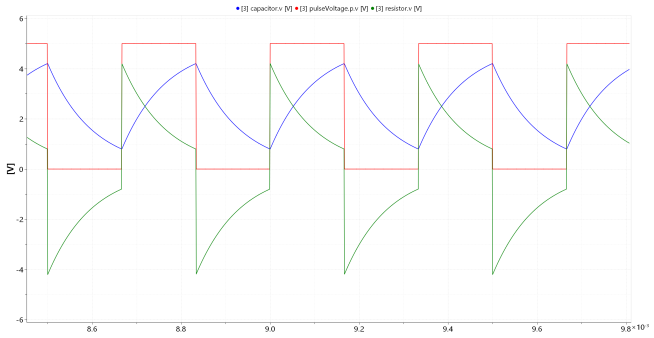


图 13: 积分电路仿真电路图

(1)R=1 kΩ



实测波形



仿真波形

图 14: $R = 1\,\mathrm{k\Omega}$ 时积分电路的实测与仿真对照

此时

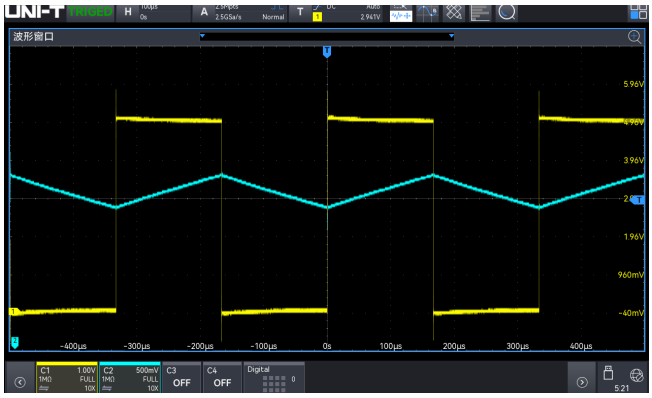
$$\tau = RC = 1\,\mathrm{k\Omega} \times 0.1\,\mu\mathrm{F} = 100\,\mu\mathrm{s}$$

由 $T \approx 333\,\mu\mathrm{s}$ 可得

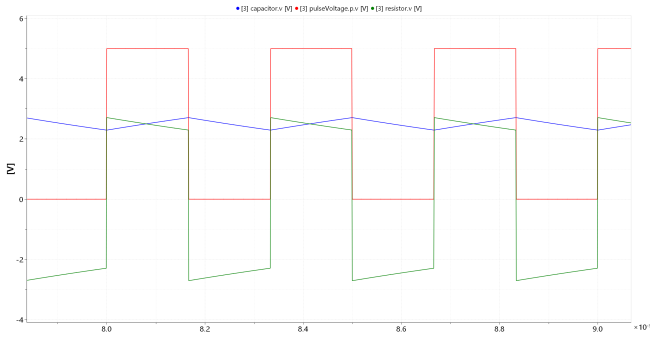
$$\frac{T}{\tau} \approx \frac{333\,\mu\mathrm{s}}{100\,\mu\mathrm{s}} \approx 3.33, \qquad \frac{T}{2\tau} \approx 1.67$$

半个周期已经超过一个时间常数，电容在每个高、低电平期间都会完成较大比例的充放电，不能满足理想积分条件 $T \ll \tau$。从波形来看，蓝色输出在高、低电平切换时仍表现出明显的指数充放电特征，虽然已经出现一定的斜率变化，但整体更接近非线性充放电曲线，而不是理想三角波，因此积分作用并不明显。仿真结果同样显示，电容电压虽然开始出现上升和下降的缓坡，但曲线仍保留较明显的弯曲特征，说明此时只能说有一定积分趋势，还不能认为积分特性理想形成。

(2)R=10 kΩ



实测波形



仿真波形

图 15: $R = 10\,\mathrm{k\Omega}$ 时积分电路的实测与仿真对照

此时

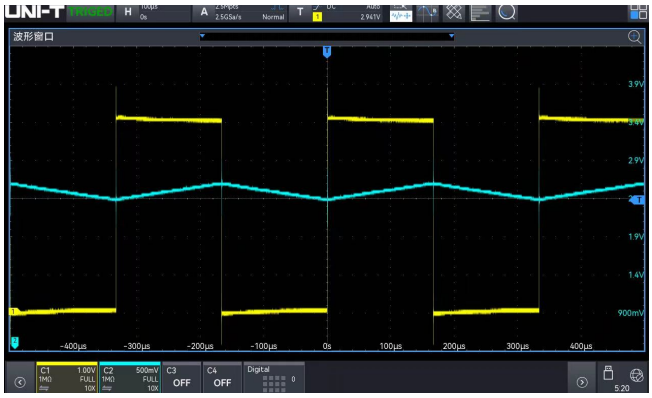
$$\tau = RC = 10\,\mathrm{k\Omega} \times 0.1\,\mu\mathrm{F} = 1\,\mathrm{ms}$$

由此可得

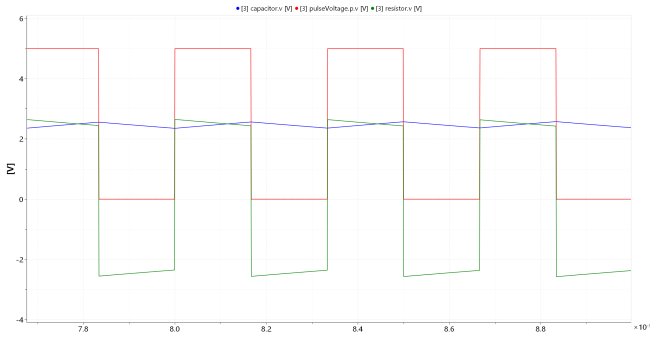
$$\frac{T}{\tau} \approx \frac{333\,\mu\mathrm{s}}{1\,\mathrm{ms}} \approx 0.333, \qquad \frac{T}{2\tau} \approx 0.167$$

此时一个周期约为 0.33τ，半周期约为 0.17τ，电容电压在单个半周期内只发生较小幅度变化，已经更接近积分条件。图中可见，蓝色输出波形近似线性上升和线性下降，整体更接近三角波，说明随着时间常数增大，积分特性明显增强。仿真波形中蓝色电容电压也表现出更接近线性分段的变化规律，与实测图的趋势一致，说明增大电阻确实能够有效增强积分特性。

(3)R=20 kΩ



实测波形



仿真波形

图 16: $R = 20\,\mathrm{k\Omega}$ 时积分电路的实测与仿真对照

此时

$$\tau = RC = 20\,\mathrm{k\Omega} \times 0.1\,\mu\mathrm{F} = 2\,\mathrm{ms}$$

由此可得

$$\frac{T}{\tau} \approx \frac{333\,\mu\mathrm{s}}{2\,\mathrm{ms}} \approx 0.167, \qquad \frac{T}{2\tau} \approx 0.083$$

半周期仅约为 0.083τ，电容在每个半周期内只来得及发生很小的电压变化，因此积分条件满足得更加充分。实测图中蓝色输出已经表现为较平滑的近似线性上升和下降，整体围绕中间电平缓慢变化，较 $R = 10\,\mathrm{k\Omega}$ 时更接近理想积分波形。同时也可以看到，随着时间常数继续增大，单个周期内的输出摆幅进一步减小，因此波形虽然更“像积分”，但视觉上反而没有小电阻时那样起伏明显。

仿真结果给出的趋势与实测一致。蓝色电容电压继续围绕中间电平作近似线性变化，且波动幅度相较于 $10\,\mathrm{k\Omega}$ 更小。这说明增大电阻一方面会增强积分特性，另一方面也会减小输出纹波幅度。因此在实验观察中，需要在“更接近理想积分条件”和“波形足够明显”之间做平衡。

对比积分部分三组实测和仿真结果，当电阻由 $1\,\mathrm{k\Omega}$ 增大到 $10\,\mathrm{k\Omega}$，再到 $20\,\mathrm{k\Omega}$ 时，时间常数持续增大，T/τ 从约 3.33 降到 0.333，再降到 0.167。输出波形也由明显的指数充放电曲线逐步过渡为更接近线性分段的变化形式，同时输出摆幅逐渐减小。说明增大 RC 参数能够显著增强积分特性，但时间常数过大时波形变化会变缓，实验上不一定最便于直接观察。三组对应的 T/τ 分别约为 3.3、0.33 和 0.17，随 τ 增大逐渐趋向理想积分条件。

五、 实验结果与分析

从零状态响应和零输入响应两组波形看，本次实验中最直接的现象是电容电压在换路瞬间没有突变。零状态响应由接近 $0\,\mathrm{V}$ 开始向 $5\,\mathrm{V}$ 附近上升，零输入响应则从约 $4.92\,\mathrm{V}$ 向 $0\,\mathrm{V}$ 衰减，两条曲线都呈现出开始变化较快、后段逐渐变缓的指数特征。仿真波形中也能看到相同的充放电方向和连续变化过程，只是曲线更平滑、边界更理想。由此可见，实测结果和一阶 RC 电路的理论模型在响应类型上吻合较好。

按照课件给出的参数 $R = 1\,\mathrm{k\Omega}$、$C = 100\,\mu\mathrm{F}$ 计算，理论时间常数为 $100\,\mathrm{ms}$。实验中由光标读得的零状态响应时间常数约为 $132\,\mathrm{ms}$，相对误差约为 32.0%；零输入响应时间常数约为 $120.8\,\mathrm{ms}$，相对误差约为 20.8%。两组实测值都比理论值偏大，说明误差并不是偶然只出现在某一种响应中，而与实际元件参数、开关动作、触发稳定性和读数方式都有关系。相比之下，零输入响应的初值 $4.92\,\mathrm{V}$ 和特征点 $1.84\,\mathrm{V}$ 在图上更容易直接定位，而零状态响应需要先把稳态值近似为 $5\,\mathrm{V}$，再去找 $0.632U_S$ 对应位置，所以充电过程的误差更容易被放大。

实际读数时，最明显的困难是示波器光标并不是只要套公式就能放准。尤其在零状态响应后半段，曲线已经开始变平，光标横向稍微移动一点，读出的 ΔX 就会有比较明显的变化；而放电曲线虽然也有噪声和触发偏差，但起点和 $0.368U_0$ 附近的参考关系更直观一些。因此，表中时间常数的差异不能简单理解为理论公式失效，更合理的解释是实验读数和实际元件参数共同造成了偏差。

微分实验中，频率从 $100\,\mathrm{Hz}$ 提高到 $10\,\mathrm{kHz}$ 后，T/τ 由 100 降到 10 和 1，输出由集中在方波边沿附近的尖脉冲逐渐变成展宽的连续变化曲线。这一变化对应的是周期 T 逐渐接近时间常数 τ，电容来不及在每个周期内充分充放电，微分条件被削弱。积分实验则体现了相反的调节过程：当 $R = 1\,\mathrm{k\Omega}$ 时，$T/\tau \approx 3.33$，输出仍保留较明显的指数充放电形状；当电阻增大到 $10\,\mathrm{k\Omega}$ 和 $20\,\mathrm{k\Omega}$ 后，T/τ 分别降为约 0.333 和 0.167，输出更接近三角波，但摆幅也随之减小，观察时反而需要更注意示波器量程和触发稳定性。

综合这些结果可以看出，微分电路和积分电路并不是脱离一阶 RC 暂态过程的两类独立现象，而是同一 RC 电路在不同 T/τ 条件下表现出的不同工作状态。实验中改变频率或电阻后，波形并不是突然从一种理想形态跳到另一种理想形态，而是有一个逐步过渡的过程，这一点在实测和仿真对照中比较明显。

六、 讨论、心得

本次实验中，我对时间常数的理解比课前更具体一些。课前看公式时，$\tau = RC$ 只是决定指数曲线快慢的参数；实际操作时，需要在示波器上找 $0.632U_S$ 或 $0.368U_0$ 的位置，才发现这个参数和光标读数、波形稳定程度联系得很紧。零状态响应的读数比预想中更不好取，因为稳态值只能近似取 $5\,\mathrm{V}$，曲线后段又比较平，光标放置稍有偏差就会影响最终的 ΔX。

做微分和积分部分时，比较容易产生困惑的是“像不像理想波形”的判断。比如 $R = 20\,\mathrm{k\Omega}$ 时积分特性更明显，但输出摆幅变小，刚观察时反而不如 $R = 10\,\mathrm{k\Omega}$ 的波形直观；微分电路在 $1\,\mathrm{kHz}$ 时仍然有尖脉冲，但已经能看到脉冲展宽，不能再简单地当作理想微分。把这几组波形和仿真结果放在一起比较后，可以看出实验现象不是只由电路连接决定，还受到 T 和 τ 相对大小的连续影响。

这次实验也提醒我，电路实验中的“误差分析”不能只在最后机械列几项原因。像触发是否稳定、光标落点选在哪里、稳态值是否取整，这些操作细节都会进入最后的时间常数结果。后续类似实验中，我需要在记录波形时同时记下量程、触发和光标选点依据，这样分析误差时会更有根据。