

实验 4 一阶 RC 电路的暂态响应

实验目的

1. 掌握电容器充电与放电过程中电流与电压的变化规律。
2. 了解电路参数对充放电过程的影响。
3. 了解微分电路与积分电路的功能及电路时间常数的选择方法。

实验原理

1. 电容器的充电、放电

电容器是一种贮能元件，在带有电容器的电路中发生通断换接时，由于电容器贮能状态不能突变所以在电路中就产生了过渡过程。在直流电路中，电容器接通电源，在极板上积累电荷的过程称为充电；已充电的电容器通过电阻构成闭合回路使电荷中和消失的过程称为放电。

根据电路理论，在单一贮能元件组成的一阶电路中，过渡过程中的暂态电流与电压是按指数规律变化的。这一规律可以用下面的数学式表示，即

$$i_c(t) = i_c(\infty) + [i_c(0_+) - i_c(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$u_c(t) = u_c(\infty) + [u_c(0_+) - u_c(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

式中 $i_c(0_+)$ 及 $u_c(0_+)$ 是起始瞬间的电容电流及电压， $i_c(\infty)$ 及 $u_c(\infty)$ 是电路稳定后的电容电流及电压。

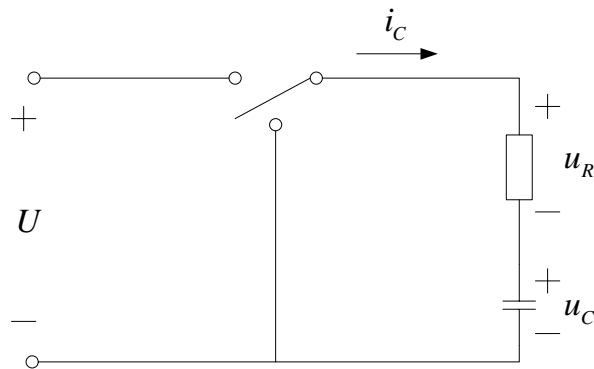


图 3.4a.1 电容器充放电电路

电容器充放电电路中电流、电压变化曲线分别如图 3.4a.2(a)及图 3.4a.2(b)所示。这曲线是由电路发生通断瞬间的起始状态向新的稳定状态过渡的指数曲线。其起始状态可根据换路定律确定，即在电路参数不变时，若电路发生换接，则电容器端电压不能突变，也就是在电路换接前后的瞬间 u_c 是相等的，即

$$u_c(0_+) = u_c(0_-)$$

电路的时间常数 τ ，可以根据 R 和 C 计算，即 $\tau = RC$ ， τ 用来表征过渡过程的长短。 τ 大过渡过程时间长，反之就短。若 R 的单位为 Ω ， C 的单位为 F ，则 τ 的单位为 s 。

τ 可以从 u_c 的变化曲线上求得。从曲线上任选一点起算，每经过 $t = \tau$ 的时间，电流或电压就变化了起算值与稳态值之差的 63.2%，即尚余 36.8% 需在以后过程中完成。或者可在起算点作指数曲线的切线，此切线与稳态值坐标线的交点与起算点之间的时间坐标差即为时

间常数。根据上述两种方法可以在已知指数曲线上近似地确定时间常数数值，一般认为经过 $3\tau \sim 5\tau$ 的时间，过渡过程趋于结束。

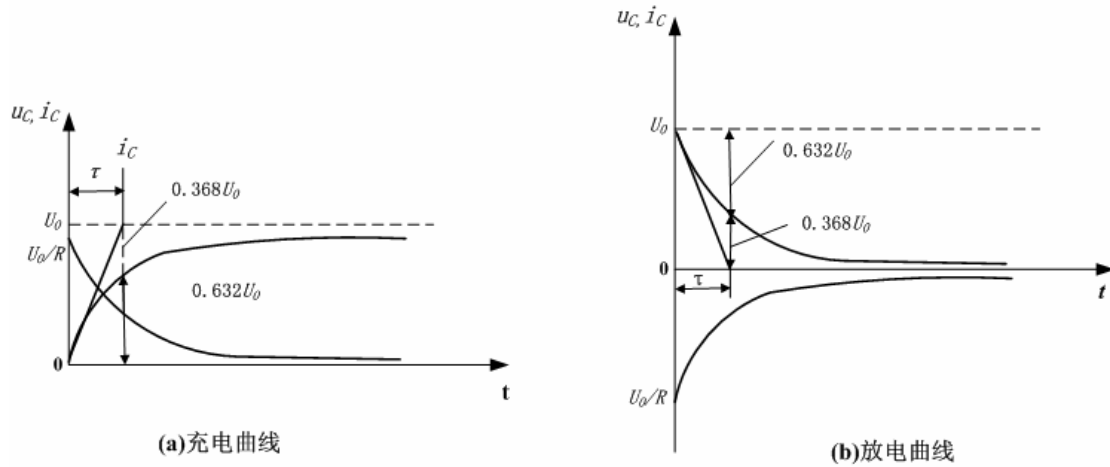


图3.4a.2 电容器充放电电流、电压变化曲线

2. 微分电路和积分电路

微分电路和积分电路是电容器充放电现象的一种应用，其电路图如图 3.4a.3 所示。

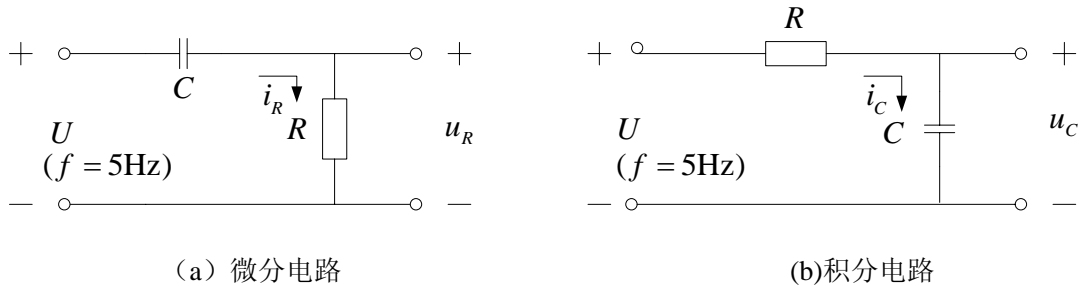


图 3.4a.3 微分电路与积分电路

微分电路中当时间常数很小时，输出电压 u_R 正比于输入电压 u 的微分，即

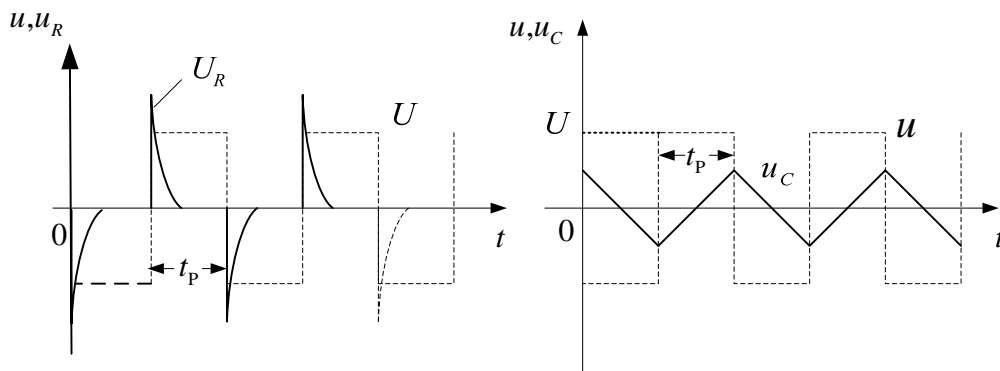
$$u_R = i_R R \approx RC \frac{du}{dt}$$

积分电路中当时间常数很大时，输出电压 u_C 正比于输入电压 u 的积分，即

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt \approx \frac{1}{RC} \int u dt$$

当输入电压 u 的波形为正负对称的矩形波时，微、积分电路输出电压波形如图 3.4a.4 所示。设矩形波脉冲宽度为 t_p ，改变 τ 和 t_p 的比值，电容元件充放电的快慢就不同，输出电压 u_R 的波形也就不同。当 $\tau \gg t_p$ ，电容器充电很慢，输出电压 u_R 和输入电压 u 的波形很相近，随着 τ 和 t_p 比值的减小，在电阻两端逐步形成正负尖脉冲输出如图 3.4a.4 (a) 所示，因此微分电路必须满足两个条件 (a) $\tau \ll t_p$ (一般 $\tau < 0.2 t_p$)，(b) 从电阻两端输出。而积

分电路应满足的条件是 (a) $\tau \gg t_p$ (一般 $\tau > 5t_p$), (b) 从电容两端输出。图 3.4a.4 (b) 是积分电路的输出电压 u_c 的波形, 由于 $\tau \gg t_p$, 电容器缓慢充电, 以后又经电阻缓慢放电, 形成图示的锯齿波。时间 τ 越大, 充放电越是缓慢, 所得锯齿波电压的线性就越好。



(a) 微分电路输出 u_R

(b) 积分电路输出 u_c

图 3.4a.4 脉冲波与锯齿波

实验仪器设备

- | | |
|-------------|-----|
| 1. 示波器 | 1 台 |
| 2. 稳压电源 | 1 台 |
| 3. 功率函数发生器 | 1 台 |
| 4. 电阻、电容接线板 | 1 块 |
| 5. 万用表 | 1 只 |

实验步骤

1. 熟悉电子仪器的使用及接线方法

熟悉示波器 X 轴、时标及 Y 轴电压幅度倍率的读数方法。熟悉接线板的接线(见图 3.4a.5) 并把不同数值 RC 相串联时的时间常数计算值填入表 3.4a.1 内。

表 3.4a.1 时间常数 τ 的计算

电阻值 \ 电容值	20k Ω	10k Ω	5.1k Ω
100 μ F			
10 μ F			
1 μ F			

2. 观察充放电电流波形

按图 3.4a.1 接线, 调节电源电压为 10V, 取时间常数为 1s ($R=10k\Omega$ $C=100\mu$ F), 把示波器 X 轴时标置于 0.5s/div, Y 轴倍率置于 2V/div, 输入选择开关置于“DC”, 把电阻两端电压接到 Y 轴输入端, 观察电容器充放电电流(即 R 端电压)波形。改变电路参数, 使时间常数为 0.5s, 0.2s, 重复上述步骤, 并将观察到的波形描在图 3.4a.6 中。

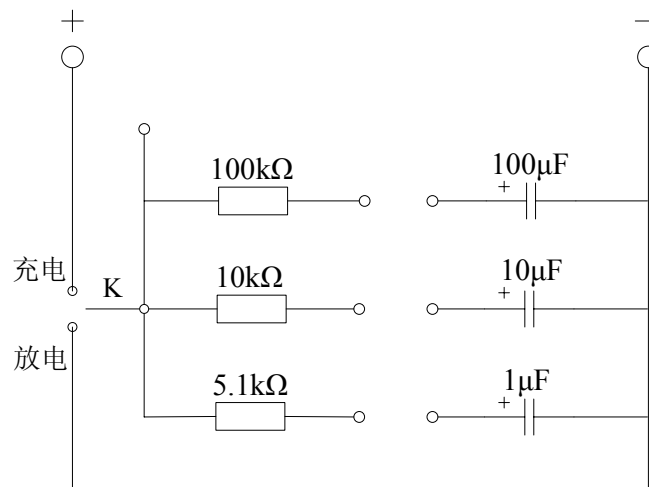
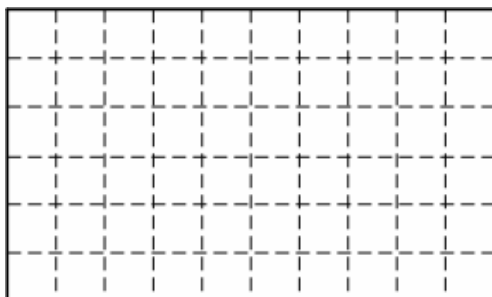
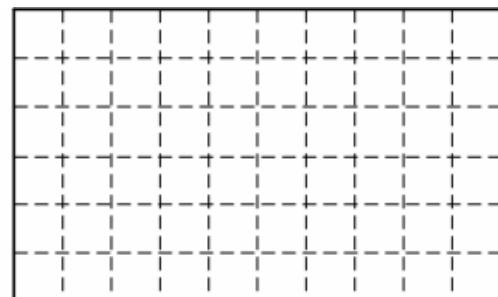


图 3.4a.5 电阻、电容接线板



(a) 充电电流波形

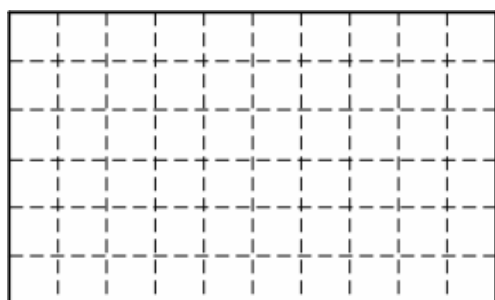


(b) 放电电流波形

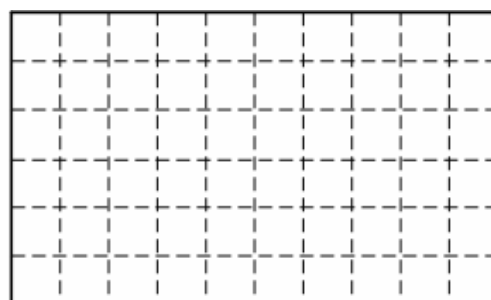
图3.4a.6 电容器充放电电流波形

3. 观察电容器端电压波形

把电容器两端电压接 Y 轴输入端，在电路时间常数为 1s、0.5s、0.2s 时，观察电容器端电压波形并描在图 3.4a.7 中。



(a) 充电电压波形



(b) 放电电压波形

图3.4a.7 电容器充放电电压波形

4. 微分电路

按图 3.4a.3 (a) 把接线板接成微分电路，取 $R = 10k\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ ，输入信号接功率函数发生器矩形波输出，调节信号频率 $f = 5Hz$ 的信号幅度为最大。把示波器 X 轴时标置于 $50ms/div$ ，将输入信号及电阻两端电压分别输入 Y 轴，观察输入及输出电压波形。改变电路的时间常数，在时间常数为 0.005s、0.05s 时，观察输出电压波形有何变化，并画入直角坐标图 3.4a.8 中。

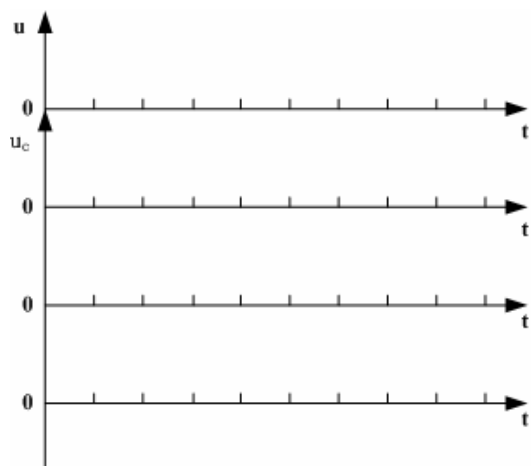


图 3.4a.8 微分电路输出电压波形

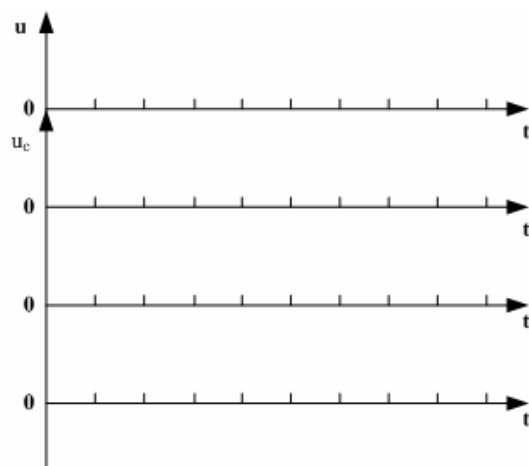


图 3.4a.9 积分电路输出电压波形

5. 积分电路

按图 3.4a.3 (b) 接成积分电路，输入信号为 $f = 5Hz$ ，矩形波，观察输入及输出波形。改变电路时间常数，在时间常数为 2s、1s、0.2s 时，观察输出电压波形有何变化。并画入直角坐标图 3.4a.9 中。

实验报告要求

1. 画出所记录的电容器充放电电流、电压波形及微分、积分电路输出电压波形
2. 当电路时间常数计算值为 1s、0.5s、0.2s 时，根据实验所得的充放电电压曲线，用作图方法求出相应的时间常数，记入表 3.4a.2 中。

表 3.4a.2 根据实验所得曲线求取时间常数

计算值	1s	0.5s	0.2s
实测（充电）			
实测（放电）			

3. 回答下列思考题：
 - (1) 根据实验所记录的波形及曲线，说明电容器充放电时电流电压变化规律及电路参数的影响。
 - (2) 根据实验结果说明 RC 串联电路用作微分电路及积分电路时的参数条件。

实验现象

1. 观察充电电流波形时, $U_R(0_-) = 0\text{V}$ 、 $U_R(0_+) = 10\text{V}$, 经 5τ 后过渡过程趋于结束。
2. 观察放电电流波形时, $U_R(0_-) = 0\text{V}$ 、 $U_R(0_+) = -10\text{V}$, 经 5τ 后过渡过程趋于结束。
3. 观察电容器充放电电压波形时, $U_C(0_-) = U_C(0_+)$, 经 5τ 后过渡过程趋于结束。

实验结果分析

1. 根据实验所记录的波形及曲线，说明电容器充放电时电流电压变化规律及电路参数的影响。

答：电容器充放电时电流电压变化规律都是指数曲线，曲线衰减快慢可以用电路的时间常数 τ 来表示， τ 可以根据 R 和 C 计算，即 $\tau = RC$ ，若 R 的单位为欧姆， C 的单位为法拉，则 τ 的单位为秒。 τ 越大，过渡过程就越长。一般经过 $3\sim 5\tau$ 的时间后，过渡过程趋于结束。

2. 根据实验结果说明 RC 串联电路用作微分电路及积分电路时的参数条件。

答： RC 串联电路用作微分电路时的参数条件为：（a） $\tau \ll t_p$ （一般 $\tau < 0.2t_p$ ），（b）从电阻两端输出；此时的输出电压 u_R 为正向和负向的尖脉冲。 RC 串联电路用作积分电路时的参数条件为：（a） $\tau \gg t_p$ （一般 $\tau > 5t_p$ ），（b）从电容两端输出，此时的输出电压 u_C 为锯齿波。（见实验标准报告）

实验相关知识

预习要求

1. 了解阶跃电压信号作用于一阶 RC 电路时，电路中电流、电压变化过程。
2. 学习功率函数发生器的使用，及示波器使用与读数的方法。
3. 了解微分电路与积分电路的工作原理。
4. 完成下列填空题：

(1) 一阶 RC 电路时间常数 $\tau =$ _____，用以表征过渡过程的长短， τ 越大，过渡过程就_____。一般认为经过_____ τ 的时间后，过渡过程趋于结束。

(2) 由 RC 元件构成微分电路必须满足两个条件 (a) _____；(b) _____。积分电路也要满足两个条件 (a) _____；(b) _____。

相关知识点

电路暂态的概念	E5020601
零输入响应	E502060101
零状态响应	E502060102
全响应	E502060103
换路定律	E5020602
储能元件的充放电	E5020603
时间常数的概念	E5020604
一阶 (RC 、 RL) 电路暂态分析三要素法	E5020605

注意事项

1. 本实验中是通过观察电阻 R 的端电压波形来间接地观察充放电电流波形的, 充电时电阻端电压变化趋势为 $10V \rightarrow 0V$; 放电时电阻端电压变化趋势为 $-10V \rightarrow 0V$ 。
2. 观察充电电流波形时, 示波器扫描基准线应置于显示屏下方; 观察放电电流波形时, 示波器扫描基准线应置于显示屏上方。
3. 观察电容器充放电电压波形时, 示波器扫描基准线都应置于显示屏下方。