

实验报告

课程名称: _____ 电路实验 IB _____

实验名称: _____ RC 一阶电路响应研究及 RLC 二阶电路响应研究 _____

姓名: _____ psp _____

实验日期: _____ 2023 年 9 月 22 日 _____ 评分: _____

教师评语:

教师签字: _____

日 期: _____

一、实验目的

1. 学习使用示波器观察和分析一阶电路及二阶电路的暂态响应。
2. 学会测定 RC 电路的时间常数的方法，加深理解 RC 电路过渡过程的规律。
3. 观测 RC 充放电电路中电流和电容电压的波形图。
4. 观察二阶电路过阻尼、临界阻尼和欠阻尼三种情况下的响应波形。利用响应波形，计算二阶电路暂态过程的有关参数。

二、实验设备及元器件

序号	名称	数量	型号
1	信号发生器	1 台	TFG6960A
2	示波器	1 台	是德 DSOX2014A
3	三相空气开关	1 块	30121001
4	可调直流电源	1 块	30121046
5	直流电压电流表	1 块	30111047
6	电阻	若干	10Ω×1 51Ω×1 150Ω×1 1kΩ×1 2.4kΩ×1 15kΩ×1 33kΩ×1
7	电感	1 只	10mH×1
8	电容	若干	0.01μF×2 10μF×1 100μF×1 1000μF×1
9	开关	1 只	双刀双向
10	秒表	一块	可用手机秒表
11	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
12	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm

三、实验原理（重点简述实验原理，画出原理图）

1、RC 一阶电路

1. RC 电路的充电过程

在图 2-1 电路中，设电容器上的初始电压为零，当开关 S 向“2”闭合瞬间，由于电容电压不能跃变，电路中的电流为最大， $i = \frac{U_s}{R}$ ，此后，电容电压随时间逐渐升高，直至 $u_c = U_s$ ；电流随时间逐渐减小，最后 $i=0$ ；充电过程结束，充电过程中的电压 u_c 和电流 i 均随时间按指数规律变化。 u_c 和 i 的数学表达式为：

$$u_c(t) = U_s \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$
$$i = \frac{U_s}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

上式为其电路方程。用一阶微分方程描述的电路，为一阶电路。上述的暂态过程为电容充电过程，充电曲线如图 2-1 所示。

理论上要无限长的时间电容器充电才能完成，实际上当 $t = 5RC$ 时， u_c 已达到 $99.3\% U_s$ ，充电过程已近似结束。

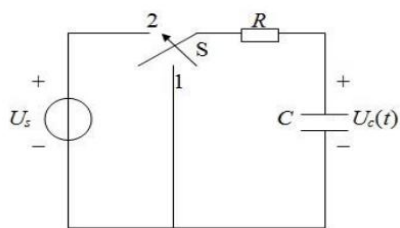


图 2-1 一阶 RC 电路

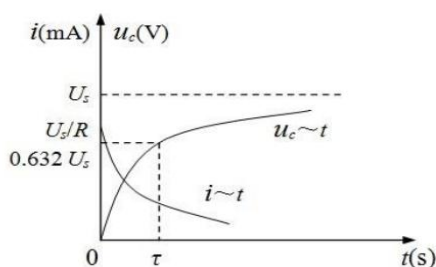


图 2-2 RC 充电时电压和电流的变化曲线

2. RC 电路的放电过程

在图 2-1 电路中，若电容 C 已充有电压 U_s ，将开关 S 向“1”闭合，电容器立即对电阻 R 进行放电，放电开始时的电流为 U_s/R ，放电电流的实际方向与充电时相反，放电时的电流 i 与电容电压 u_c 随时间均按指数规律衰减为零，电流和电压的数学表达式为：

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

$$i = -\frac{U_s}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

式中， U_s 为电容器的初始电压。这一暂态过程为电容放电过程，放电曲线如图 2-3 所示。

3. RC 电路的时间常数

RC 电路的时间常数用 τ 表示， $\tau = RC$ ， τ 的大小决定了电路充放电时间的快慢。对充电而言，时间常数 τ 是电容电压 u_c 从零增长到 $63.2\% U_s$ 所需的时间；对放电而言， τ 是电容电压 u_c 从 U_s 下降到 $36.8\% U_s$ 所需的时间。如图 2-3 所示。

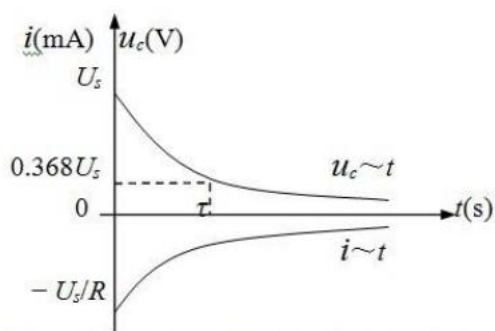


图 3 RC 放电时电压和电流的变化曲线

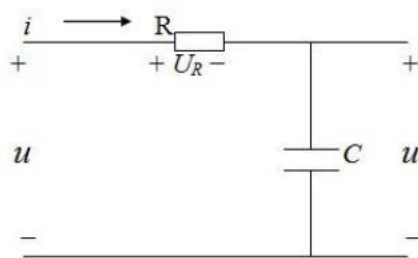


图 4 RC 充放电电路

图 2-3 RC 放电电压和电流变化曲线

图 2-4 RC 充放电电路

4. RC 充放电电路中电流和电容电压的波形图

在图 2-3 中，将周期性方波电压加于 RC 电路，当方波电压的幅度上升为 U 时，相当于一个直流电压源 U 对电容 C 充电，当方波电压下降为零时，相当于电容 C 通过电阻 R 放电，图 2-5(a)和(b)示出方波电压与电容电压的波形图，图 2-5(c)示出电流 i 的波形图，它与电阻电压的波形相似。

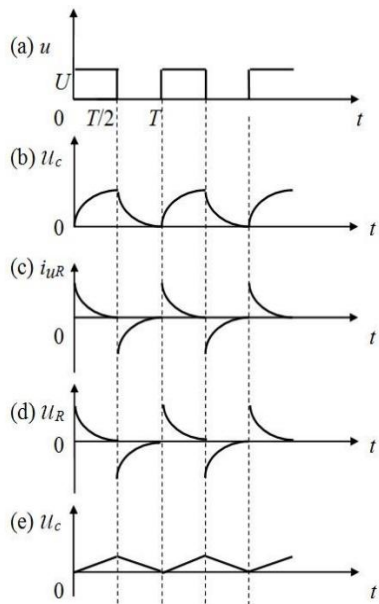


图 2-5 RC 充放电电路的电流和电压波形

5. 微分电路和积分电路

图 2-3 的 RC 充放电电路中，当电源方波电压的周期 $T \gg \tau$ 时，电容器充放电速度很快，若 $u_c \gg u_r$ ， $u_c \approx u$ ，在电阻两端的电压

$$u_r = R \cdot i \approx RC \frac{du_c}{dt} \approx RC \frac{du}{dt}$$

这就是说电阻两端的输出电压与输入电压的微分近似成正比，此电路即称为微分电路， u_r 波形如图 2-5(d) 所示。

当电源方波电压的周期 $T \ll \tau$ 时，电容器充放电速度很慢，又若 $u_c \ll u_r$ ， $u_r \approx u$ ，

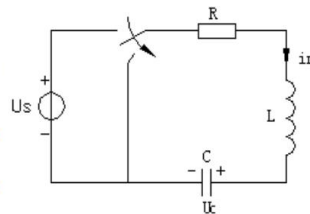
在电容两端的电压 $u_c = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int \frac{u_r}{R} dt \approx \frac{1}{RC} \int u dt$ ，这就是说电容两端的输出电压 u_c 与输入电压 u 的积分近似成正比，此电路称为积分电路， u_c 波形如图 2-5(e) 所示。

2、二阶电路

1. 用二阶微分方程来描述的电路称为二阶方程。如图 2-6 所示的 R、L、C 串联电路就是典型的二阶电路。

根据回路电压定律，当 $t=0+$ 时，电路存在：

$$\begin{cases} LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 & \text{----- (1)} \\ u_c(0+) = u_c(0-) = U_s & \text{----- (2)} \\ \frac{du_c(0+)}{dt} = \frac{i_L(0+)}{C} = \frac{i_L(0-)}{C} & \text{----- (3)} \end{cases}$$



上式 (1) 中：每一项均为电压，第一项是电感上的电压 U_L ，第二项是电阻上的电压 U_R ，第三项是电容上的电压 U_C ，即回路中的电压之和为零。各项都是电容上电流 i_c 的函数。这里是二阶方程。
上式 (2) 中，由于电容两端电压不能突变，所以电容上电压 u_c 在开关接通前后瞬间都是相等的，都等于信号电压 u_s 。

上式 (3) 中, 电容上电压对时间的变化率等于电感上电流对时间的变化率, 都等于零, 即电容上电压不能突变, 电感上电流不能突变。

2. 由 R 、 L 、 C 串联形成的二阶电路在选择了不同的参数以后, 会产生三种不同的响应, 即过阻尼状态, 欠阻尼 (衰减振荡) 和临界阻尼三种情况。

1) 当电路中的电阻过大了: $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 称为过阻尼状态。响应中的电压, 电流呈现出非周期性变化的特点。其电压, 电流波形如图 2-7 (a) 所示。

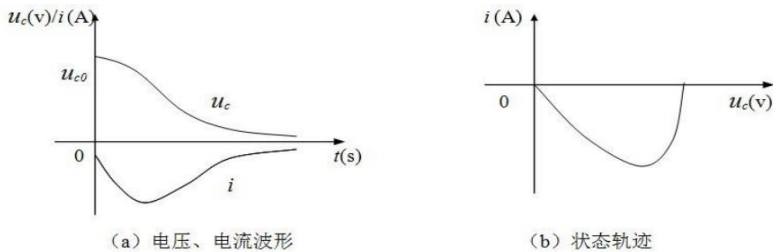


图 2-7 过阻尼状态 R 、 L 、 C 串联电路电压、电流波形及其状态轨迹

从图 2-7(a)中可以看出, 电流振荡不起来。图 2-7(b)中所示的状态轨迹, 就是伏安特性。电流由最大减小到零, 没有反方向的电流和电压, 是因为经过电阻, 能量全部给电阻吸收了

2) 当电路中的电阻过小了: $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 称为欠阻尼状态。响应中的电压, 电流具有衰减振荡的特点, 此时衰减系数 $\delta = \frac{R}{2L}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 是在 $R=0$ 的情况下的振荡频率, 称为无阻尼振荡电路的固有角频率。

在 $R \neq 0$ 时, R 、 L 、 C 串联电路的固有振荡角频率 $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ 将随 $\delta = \frac{R}{2L}$ 的增加而下降。其电压, 电流波形如图 2-8(a)所示。从图 2-8 (a)中可见, 有反方向的电压和电流, 这是因为电阻较小, 当过零后, 有反充电的现象。

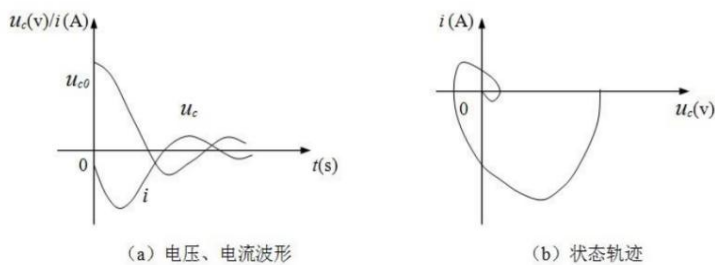


图 2-8 欠阻尼状态 R 、 L 、 C 串联电路电压、电流波形及其状态轨迹

3) 当电路中的电阻适中: $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 称为临界状态。此时, 衰减系数 $\delta = \omega_0$, $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = 0$, 暂态过程介于非周期与振荡之间, 其本质属于非周期暂态过程。

实验预习和实验过程原始数据记录

实验名称: RC 一阶电路响应研究及 RLC 二阶电路响应研究

学生姓名: psp 实验日期与时间: 2023.9.22 实验台号: 46

预习结果审核: _____ 原始数据审核: _____

(包括预习时, 计算的理论数据)

表 2-1 RC 一阶电路充放电实验数据 (一) $R=15\text{ k}\Omega$ $C=1000\mu\text{F}$ $U_s=10\text{V}$

$t(\text{s})$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
$u_c(\text{V})$ 充电	0.001	3.084	5.11	6.32	7.31	8.02	8.59	8.94	9.22	9.55	9.73	9.83	9.89	9.91
$u_c(\text{V})$ 放电	9.96	7.09	5.10	3.96	2.581	1.841	1.372	0.967	0.712	0.409	0.217	0.122	0.075	0.046

表 2-2 RC 一阶电路充放电实验数据 (二) $R=33\text{ k}\Omega$ $C=1000\mu\text{F}$ $U_s=10\text{V}$

$t(\text{s})$	0	5	10	15	20	25	30	40	60	80	100	120	150	180
$u_c(\text{V})$ 充电	0.005	1.600	2.893	3.810	4.55	5.31	5.94	6.96	8.30	9.05	9.25	9.57	9.79	9.80
$u_c(\text{V})$ 放电	9.89	8.66	7.46	6.26	5.40	4.66	3.95	2.889	1.564	0.929	0.499	0.282	0.128	0.059

*表 2-3 (选做) RC 充电过程中电流 I 变化数据记录

充电时间 (s)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$R=15\text{ k}\Omega$ $C=1000\mu\text{F}$										
$R=33\text{ k}\Omega$ $C=1000\mu\text{F}$										

3、时间常数的测定

1) R 取 $3\text{ k}\Omega$, 电容 C 取 $100\mu\text{F}$,

充电过程中: 计算: $63.2\%U_s = 6.32\text{V}$; 测量: $\tau_1 = 354\text{ms}$;

放电过程中: 计算: $36.8\%U_s = 3.68\text{V}$; 测量: $\tau_2 = 360\text{ms}$ 。

2) R 取 $10\text{ k}\Omega$, 电容 C 取 $100\mu\text{F}$ 。测试:

$\tau_3 = 1.22\text{s}$; $\tau_4 = 1.23\text{s}$

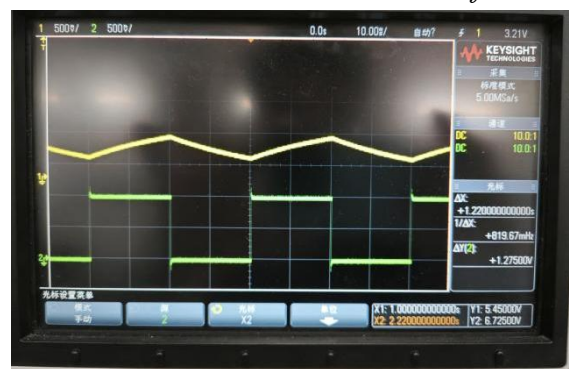
试用时间常数的概念, 比较说明 R 、 C 对充放电过程的影响与作用。

$T=RC$, R 和 C 越大, 时间常数越大, 电路充放电越慢

4、记录 RC 电路充放电时电源电压 u 和电容电压 u_c 的变化波形, 电源信号频率 $f=25\text{HZ}$

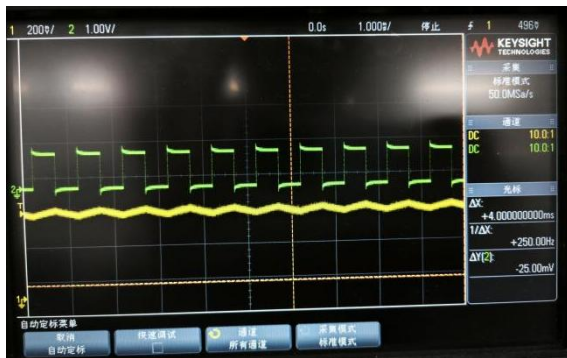


$R=510\Omega$, $C=10\mu\text{F}$

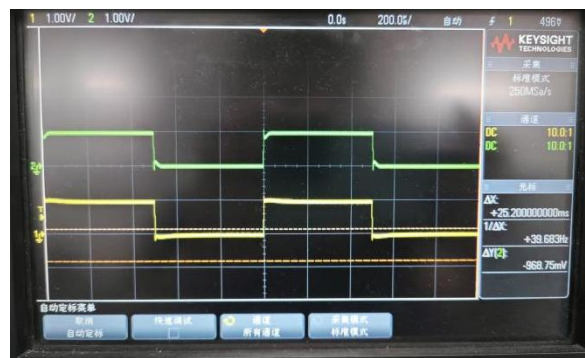


$R=3\text{k}\Omega$, $C=10\mu\text{F}$

5、观测微分和积分电路输出电压的波形



积分输出电压 ($R=1k\Omega$, $C=10\mu F$)



微分输出电压 ($C=10\mu F$, $R=10\Omega$)

表 2-4 二阶电路实验数据 (一) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 方波频率 $f=500\text{Hz}$

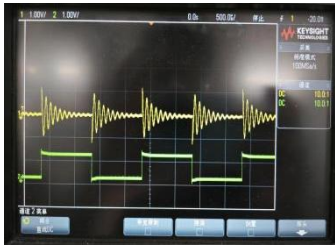


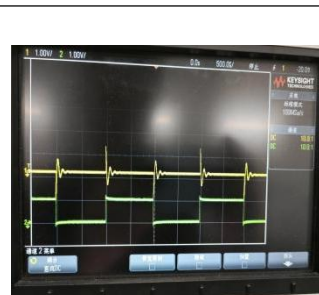
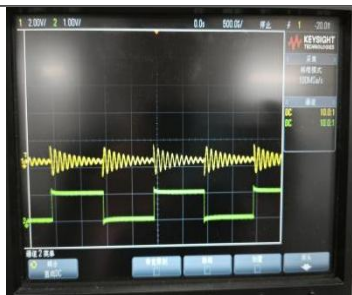
	$L=10\text{mH}$ $C=0.02\mu\text{F}$ $f_0=75000\text{Hz}$		
	$R_1=51\Omega$	$R_2=1k\Omega$	$R_3=2.4k\Omega$
$\delta = \frac{R}{2L}$	2550	50000	120000
$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$	70664.684	50000	/
电路状态	欠阻尼	临界阻尼	过阻尼
波形			

表 2-5 二阶电路实验数据 (二) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 方波频率 $f=500\text{Hz}$

	$L=10\text{mH}$ $C=0.02\mu\text{F}$ $f_0=11.25\text{kHz}$		
	$R_1=10\Omega$	$R_2=150\Omega$	$R_3=330\Omega$
$\delta = \frac{R}{2L}$	500	7500	16500
$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$	70708.910	703111.81	68758.64
电路状态	欠阻尼	欠阻尼	欠阻尼

波形



四、实验过程

(叙述具体实验过程的步骤和方法,记录实验数据在原始数据表格,如需要引用原始数据表格,请标注出表头,如“实验数据见表 1-1”)

1. 测定 RC 电路充电和放电过程中电容电压的变化规律

1) 实验线路如图 2-9 所示电阻 R 取 $15\text{k}\Omega$, 电容 C 取 $1000\mu\text{F}$, 直流稳压电源 U_s 输出电压取 10V , 万用表置直流电压 V 档, 将万用表并接在电容 C 的两端, 首先用导线将电容 C 短接放电, 以保证电容的初始电压为零, 然后, 将开关 S 打向位置“1”, 电容器开始充电, 同时立即用秒表计时, 读取不同时刻的电容电压, 直至时间 $t=5\tau$ 时结束, 将 t 和 (t) 记入表 1 中。(注: 实验所用电解电容有极性, 接线时注意不要接反, 电解电容接反后会发生爆炸, 电解电容侧面写着“-”的一面对应的管脚为负极, 另一端为正极。) 充电结束后, 记下值, 在将开关 S 打向位置“2”处, 电容器开始放电, 同时立即用秒表重新计时, 读取不同时刻的电容电压, 也记入表 2-1 中。

2) 将图 2-9 电路中的电阻 R 换为 $33\text{k}\Omega$, 重复上述测量, 测量结果记入表 2-2 中。

3) 根据表 2-1, 和表 2-2 所测得的数据, 以 u_c 为纵坐标, 时间 t 为横坐标, 画 RC 电路中电容电压充放电曲线 $u_c=f(t)$ 。

2. *测定 RC 电路充电过程中电流的变化规律 (选做)

1) 实验线路如图 2-10, 电阻 R 取 $15\text{k}\Omega$, 电容 C 取 $1000\mu\text{F}$, 直流稳压电源的输出电压取 10V , 万用表置电流 mA 档(注意万用表的接线), 将万用表串联于实验线路中。首先用导线将电容 C 短接, 使电容内部的电放光, 在拉开电容两端连接导线的一端同时计时, 记录下充电时间分别为 5s , 10s , 20s , 25s , 30s , 35s , 40s , 45s 时的电流值, 将数据记录于表 2-3。

2) 将图 2-10 电路中的电阻 R 换为 $33\text{k}\Omega$, 重复上述过程, 测量结束记录表 2-3 中

3. 时间常数的测定 1) 实验线路见图 2-9, R 取 $3\text{k}\Omega$, C 取 $100\mu\text{F}$, 使用示波器的 cursor 测量功能, 测量 u_c 从零上升到 $63.2\%U_s$ 所需的时间, 亦即测量充电时间常数 τ_1 ; 再测量从 U_s 下降到 $36.8\%U_s$ 所需的时间, 亦即测量放电时间常数 τ_2 ; 将 τ_1 , τ_2 记入下面空格处。($U_s=10\text{V}$)

4. 观测 RC 电路充放电时电流 i 和电容电压 u_c 的变化波形实验线路如图 2-9, 阻值为 510Ω , C 取 $10\mu\text{F}$, 电源信号为频率 $f=25\text{Hz}$, 幅度为 1Vp-p , 占空比为 50% , 偏置电压为 0.5V 的方波电压。用示波器观看电压波形, 电容电压由示波器的 YA 通道输入, 方波电压由 YB 通道输入, 调整示波器各旋钮, 观察 i 与 u_c 的波形, 并描下波形图。改变电阻阻值, 使 $R=3\text{k}\Omega$, 观察电压波形的变化, 分析其原因。

5. 观测微分和积分电路输出电压的波形

按图 2- 9 接线，取 $R=1\text{ k}\Omega$ ， $C=10\text{ }\mu\text{F}$ ($\tau = RC = 10\text{ms}$)，电源方波电压 u 的频率为 1kHz ，幅值为 1Vp-p ($T=1/1000=1\text{ ms} \ll \tau$)，占空比为 50% ，偏置电压为 0.5V 。在电容两端的电压 u_c 即为积分输出电压，将方波电压 u 输入示波器的 YB 通道， u_c 输入示波器的 YA 通道，观察并描绘 u 和 u_c 的波形图。再将图 2- 9 中 R 和 C 的位置互换，取 $C=10\text{ }\mu\text{F}$ ， $R=10\text{ }\Omega$ ($\tau = RC = 0.1\text{ms}$)，电源方波电压 u 同上 ($T=1/1000=1\text{ ms} \gg \tau$)，在电阻两端的电压 U_R 即为微分输出电压，将 u 输入示波器的 YB 通道， U_R 输入示波器的 YA 通道，观察并描绘 u 和 U_R 的波形图。

6. 观察二阶电路的响应波形

将电阻，电容，电感串联成如图 2-11 所示的接线图，函数发生器输出方波 $U_S=1\text{Vp-p}$ ， $f=500\text{Hz}$ ，占空比 50% ，偏置电压为 0.5V ，改变电阻 R ，分别使电路工作在过阻尼，欠阻尼和临界振荡状态，测量输入电压和电容电压波形。

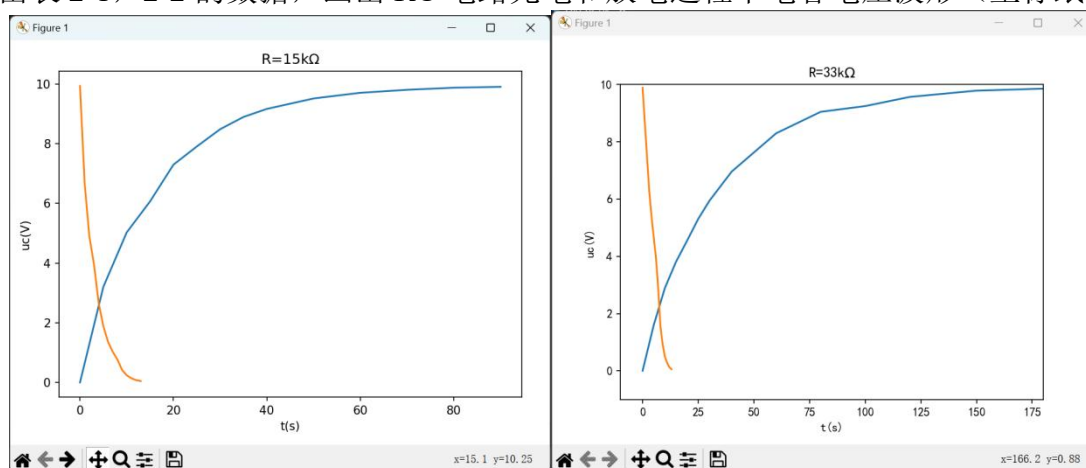
7. 测量不同参数下的衰减系数和波形

将电阻，电容，电感串联成如图 2-11 所示的接线图，函数发生器输出方波 $U_S=1\text{Vp-p}$ ， $f=500\text{Hz}$ ，占空比 50% ，偏置电压为 0.5V 。保证电路一直处于欠阻尼状态，取三个不同阻值的电阻，用示波器测量输出波形，并计算出衰减系数，将波形和数据填入表 2- 5。

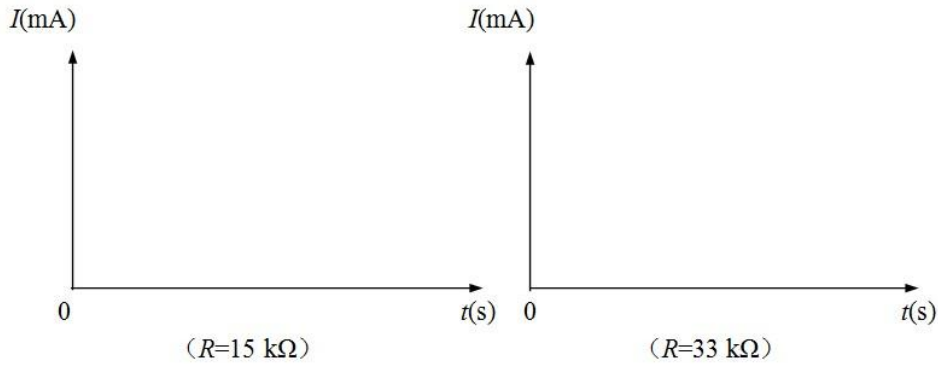
五、实验数据分析

（按指导书中实验报告的要求用图表或曲线对实验数据进行分析 and 处理，并对实验结果做出判断，如需绘制曲线请在坐标纸中进行）

1、由表 2-1, 2-2 的数据，画出 RC 电路充电和放电过程中电容电压波形（坐标纸绘图）



*2、（选做）由表 2-3 的数据，画出 RC 电路充电和放电过程中电流的波形（坐标纸绘图）



六、问题思考

(回答指导书中的思考题)

1. 根据实验结果, 分析 RC 电路中充放电时间的长短与电路中 RC 元件参数的关系。
2. 说明 RC 串联电路在什么条件下构成微分电路, 积分电路。
3. L 、 C 串联电路的暂态过程为什么会出现三种不同的工作状态? 试从能量转换角度对其做出解释。
4. 电路产生振荡的条件, 振荡波形如何? 与电路参数 R 、 L 、 C 有何关系?

答:

(1) $\tau=RC$, 元件 R 与 C 乘积越大, 电路的时间常数越大, 充放电越慢; 反之则充放电越快。

(2) 电路时间常数大于输入信号周期时, 电容不会被真正充满或放完电, 形成积分电路, 输出信号的幅度要小于输入信号; 电路时间常数小于输入信号周期时, 电容极快充满或放完电, 形成微分电路

(3) 从能量转换角度分析:

过阻尼状态: 能量全被电阻消耗, 电流不振荡;

临界状态: 电路电流不会振荡, 电阻仍会消耗全部能量;

欠阻尼状态: 能量部分被电阻消耗, 部分在电感电容间传递, 电流振荡;

(4) 欠阻尼状态即电阻过小时, $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 电路会振荡

七、实验体会与建议

好