

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 _____

专业-班级：_____ 学号：_____

姓名：_____

实验日期：_____ 2023 _____ 年 _____ 9 _____ 月 _____ 20 _____ 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	10 Ω ×1 51 Ω ×1 150 Ω ×1 1k Ω ×1 2.4k Ω ×1 15k Ω ×1 33k Ω ×1
7	电感	1 只	10mH×1
8	电容	若干	0.01 μ F×2 10 μ F×1 100 μ F×1 1000 μ F×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 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 u_c 不能跃变，电路中的电流为最大，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 和电流 i 均随时间按指数规律变化。 u 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。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。

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。

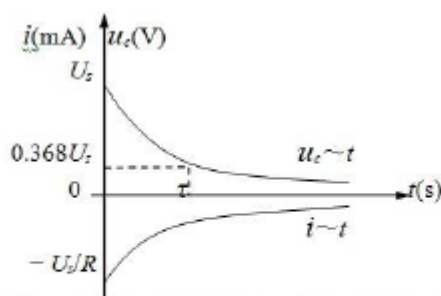


图3 RC放电时电压和电流的变化曲线

图 2-3 RC 放电电压和电流变化曲线

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 $63.2\% U_i$ 所需的时间; 对放电而言, τ 是电容电压 u_c 从 U_i 下降到 $36.8\%U_i$ 所需的时间。如图 2-3 所示。

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 u_R 的波形相似。

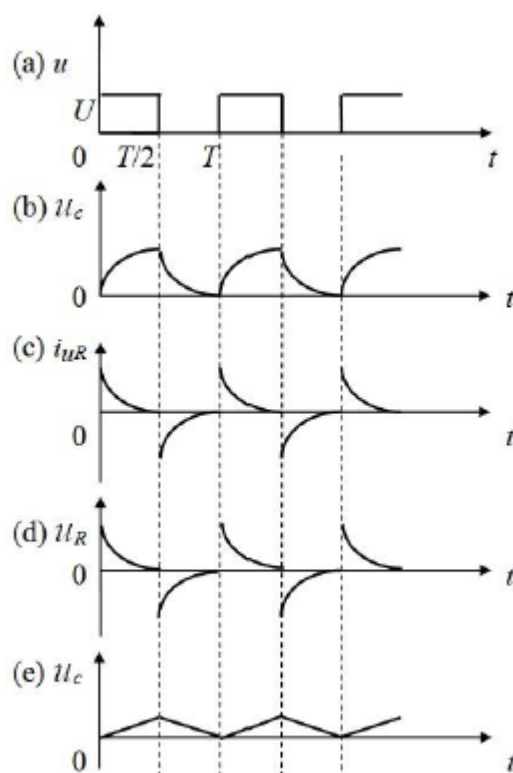


图 2-5 RC 充放电电路的电流和电压波形

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 u_R 与输入电压 u 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。

6. 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：

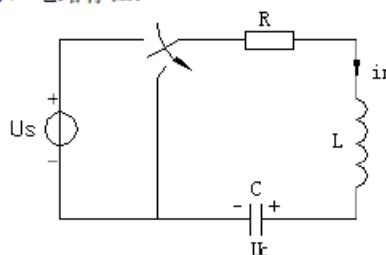


图 2-6 R 、 L 、 C 串联电路

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

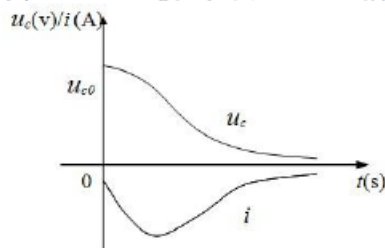
上式 (1) 中：每一项均为电压，第一项是电感上的电压 U_L ，第二项是电阻上的电压 U_R ，第三项是电容上的电压 U_C ，即回路中的电压之和为零。各项都是电容上电压 u_c 的函数。这里是二阶方程。

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 。

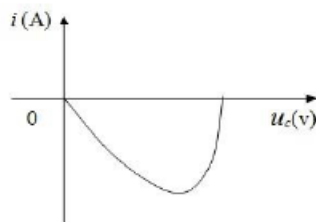
上式 (3) 中，电容上电压对时间的变化率等于电感上电流对时间的变化率，都等于零，即电容上电压不能突变，电感上电流不能突变。

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。



(a) 电压、电流波形



(b) 状态轨迹

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。

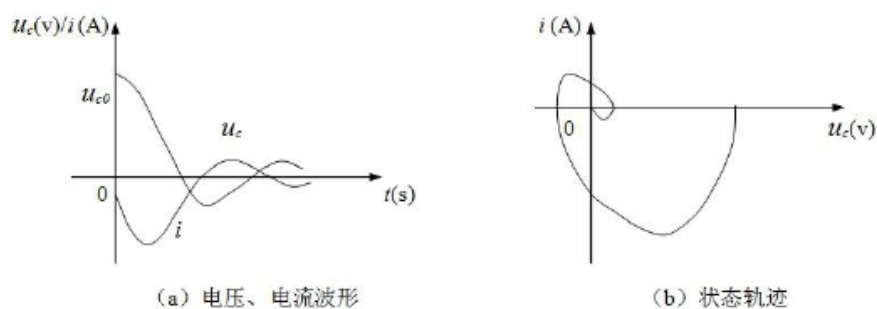


图 2-8 欠阻尼状态 R 、 L 、 C 串联电路电压、电流波形及其状态轨迹

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 $\delta = \omega_0$, $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = 0$, 暂态过程界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: _____

实验日期与时间: 2023. 9. 20 实验台号: _____

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 (V) 充电	0.002	3.120	4.96	6.22	7.25	8.11	8.64	8.97	9.27	9.59	9.77	9.87	9.91	9.95
u_c (V) 放电	9.96	7.02	5.07	3.94	2.652	1.851	1.296	0.947	0.603	0.386	0.205	0.113	0.066	0.039

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 (V) 充电	0.002	1.60	2.69	3.74	4.55	5.31	5.94	7.01	8.33	9.07	9.45	9.68	9.84	9.91
u_c (V) 放电	9.91	8.52	7.22	6.34	5.37	4.68	3.97	2.88	1.55	0.89	0.50	0.28	0.13	0.06

*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: $63.2\%U_s = \underline{6.32\text{V}}$; 测量: $\tau_1 = \underline{0.28\text{s}}$;

放电过程中: 计算: $36.8\%U_s = \underline{3.68\text{V}}$; 测量: $\tau_2 = \underline{0.29\text{s}}$ 。

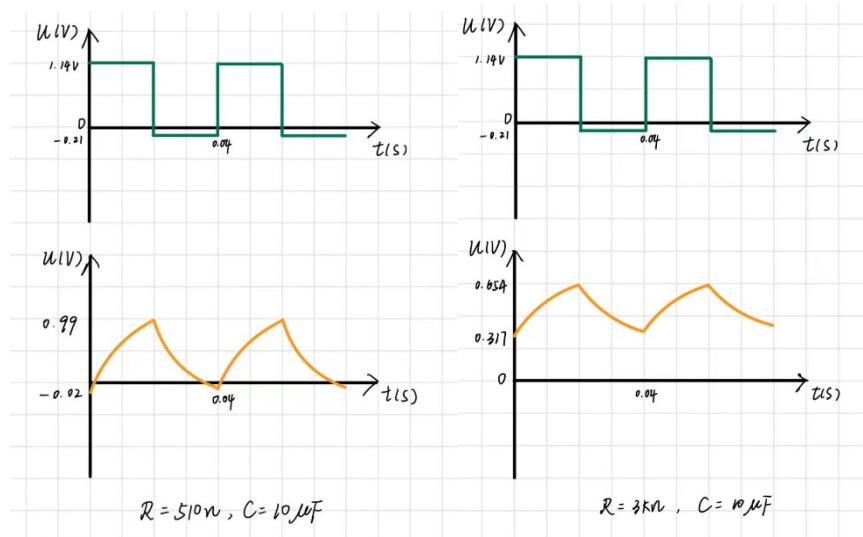
2) R 取 $10\text{ k}\Omega$, 电容 C 取 $100\mu\text{F}$ 。测试:

$\tau_3 = \underline{0.93\text{s}}$; $\tau_4 = \underline{0.94\text{s}}$

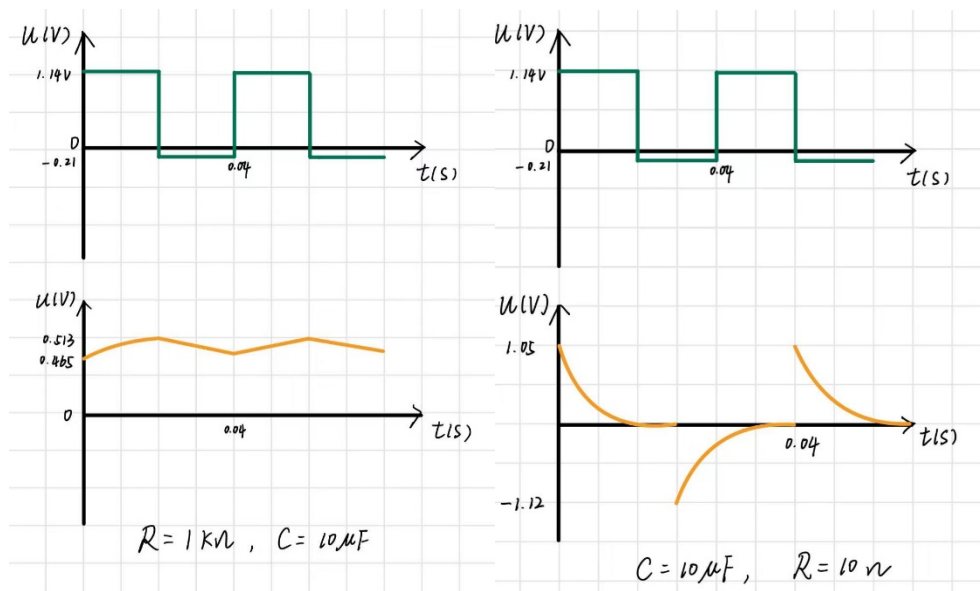
试用时间常数的概念, 比较说明 R 、 C 对充放电过程的影响与作用。

R 、 C 越大, 电路充放电所需时间越长

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 $f=25\text{HZ}$



5、观测微分和积分电路输出电压的波形



积分输出电压 ($R=1\text{k}\Omega$, $C=10\mu\text{F}$) 微分输出电压 ($C=10\mu\text{F}$, $R=10\Omega$)

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

	$L=10\text{mH}$ $C=0.02\mu\text{F}$ $f_0=11253.95\text{Hz}$		
	$R_1=51\Omega$	$R_2=1\text{k}\Omega$	$R_3=2.4\text{k}\Omega$
$\delta = \frac{R}{2L}$	2550	50000	120000
$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$	70664.68	50000	/
电路状态	欠阻尼	欠阻尼	过阻尼

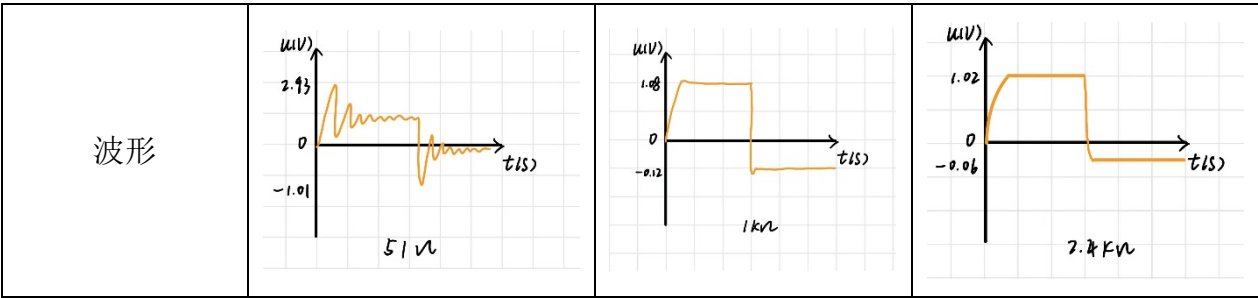


表 2-5 二阶电路实验数据（二） $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 方波频率 $f=500\text{Hz}$

	$L=10\text{mH}$ $C=0.02\mu\text{F}$ $f_0=28209.48\text{Hz}$		
	$R_1=10\Omega$	$R_2=150\Omega$	$R_3=330\Omega$
$\delta = \frac{R}{2L}$	500	2550	7500
$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$	70708.91	70664.68	70311.81
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”）

- 测定 RC 电路充电和放电过程中电容电压的变化规律
 - 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 u_c ，直至时间 $t=5\tau$ 时结束，将 t 和 $u_c(t)$ 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 u_c 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 u_c ，也记入表 2-1 中。
 - 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。
 - 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 $u_c=f(t)$ 。

- 时间常数的测定
 - 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 c_u 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 c_u 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;

2) 实验线路见图2-9, R 取 $10\text{ k}\Omega$, 电容 C 取 $100\mu\text{F}$ 。实验方法同上, 观测电容充电过程中电流变化情况, 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

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 $1\text{V}_{\text{p-p}}$, 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 u_c 由示波器的 Y_A 通道输入, 方波电压 u 由 Y_B 通道输入, 调整示波器各旋钮, 观察 u 与 u_c 的波形, 并描下波形图。改变电阻阻值, 使 $R=3\text{ k}\Omega$, 观察电容电压 u_c 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 $R=1\text{ k}\Omega$, $C=10\mu\text{F}$ ($\tau=RC=10\text{ms}$), 电源方波电压 u 的频率为 1kHz , 幅值为 $1\text{V}_{\text{p-p}}$ ($T=1/1000=1\text{ ms} \ll \tau$), 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 Y_B 通道, u_c 输入示波器的 Y_A 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 $C=10\mu\text{F}$, $R=10\Omega$ ($\tau=RC=0.1\text{ms}$), 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 Y_B 通道, U_R 输入示波器的 Y_A 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 $U_s=1\text{V}_{\text{p-p}}$, $f=500\text{Hz}$, 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。

注意: $V_{\text{p-p}}$ 和 V_{rms} 设置下, 波形的区别

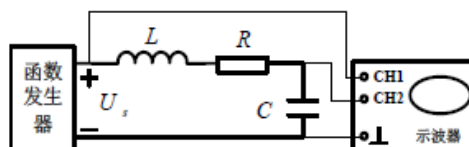


图 2-11 二阶电路实验接线图

数据计算, 求出衰减系数 δ 、振荡频率 ω , 并用示波器测量其电容上电压的波形将波形及数据处理, 结果填入下表 2-4。

7. 测量不同参数下的衰减系数和波形

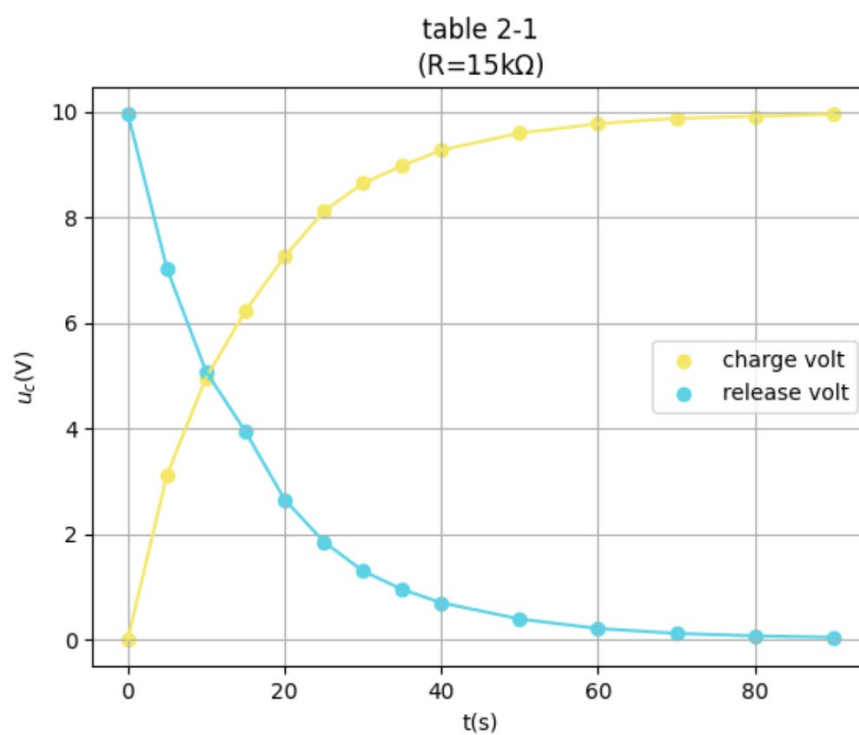
将电阻, 电容, 电感串联成如图 2-11 所示的接线图, 函数发生器输出方波 $U_s=1\text{V}_{\text{p-p}}$, $f=500\text{Hz}$, 占空比 50%, 偏置电压为 0.5V 。保证电路一直处于欠阻尼状态, 取三个不同阻值的电阻, 用示波器测量输出波形,

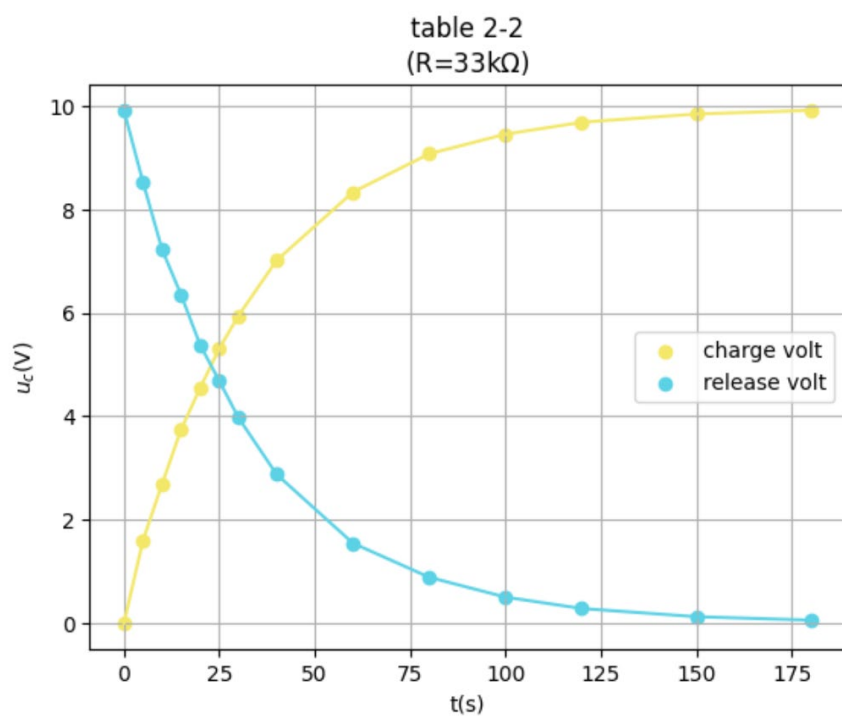
并计算出衰减系数, 将波形和数据填入表 2-5。

五、实验数据分析

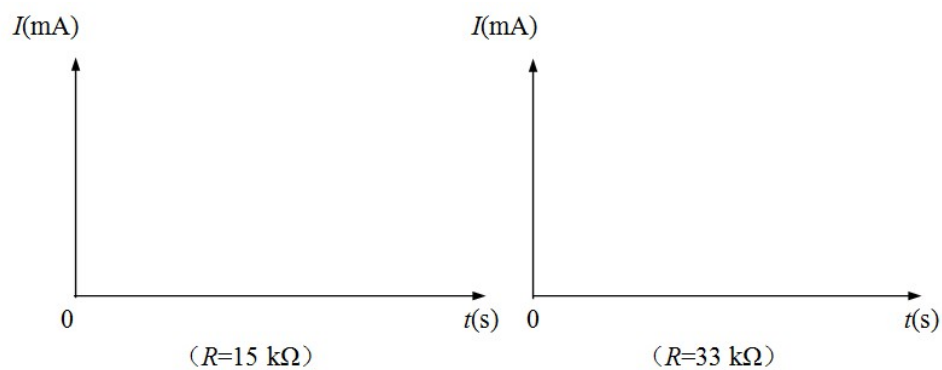
（按指导书中实验报告的要求用图表或曲线对实验数据进行处理，并对实验结果做出判断，如需绘制曲线请在坐标纸中进行）

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) RC 越大，电路的充放电时间越长。
- (2) 当电源方波的周期 $T \gg t$ 时，若 $U_c \gg U_a$ ，则 U_R 与 U 的微分近似成正比，此电路为微分电路。当电源方波的周期 $T \ll t$ 时，若 $U_c \ll U_a$ ，则 U_c 与 U 的积分近似成正比，此电路为积分电路。
- (3) 当电路中的电阻过大， $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ，电流有最大减小到 0 时，经过电阻的能量全部给电阻吸收了，没有反方向的电流和电压。当电路中的电阻过小， $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ，电阻吸收能量较少，C 中电场能与 L 中的磁能相互转换，电路出现振荡。当电路中的电阻恰好适中， $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ，暂态过程便处在非周期与振荡之间。
- (4) 振荡条件是 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ，振荡波形为周期固定，振幅按指数形式衰减的类正弦曲线。

$$U_c = \frac{\omega_0}{\omega_d} U_{c0} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t + \theta)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\theta = \arctan \frac{\omega_d}{\alpha}$$

七、实验体会与建议

太难画图了 🤖