南 昌 大 学 物 理 实 验 报 告

课程名称：普通物理实验（2）

实验名称：*RLC* 串联电路暂态特性的研究

学院：理学院 专业班级：物理学 151 班

学生姓名：黄泽豪 学号：5502115014

实验地点：B512 座位号：13

实验时间：第九周星期五下午三点四十五开始

【实验目的】

1.研究当方波电源加于 *RC* 串联电路时产生的暂态放电曲线及用示波器测量电路半衰期的方法，加深对电容充、放电规律的认识。

2.了解当方波电源加于 *RLC* 串联电路时产生的阻尼衰减震荡的特性及测量方法。

【实验仪器】

RLC 电路实验仪、存储示波器

【实验原理】

1.RC 串联电路暂态过程

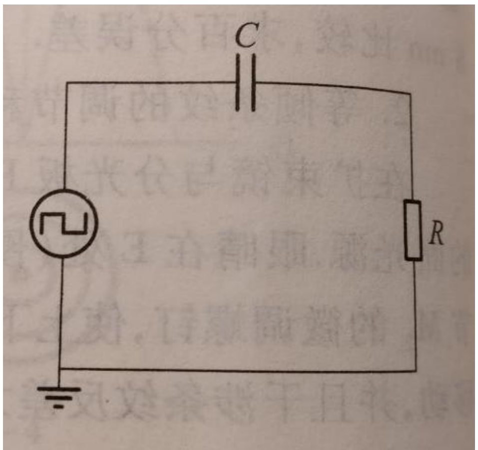


图 41-1　*RC* 串联电路

在由 *R*、*C* 组成的电路中，暂态过程是电容的充放电的过程。图 41-1 为 *RC* 串联电路。其中信号源用方波信号。在上半个周期内，方波电源（+*E*）对电容充电；在下半个周期内，方波电压为零，电容对地放电。充电过程中的回路方程为

$$RC\frac{\mathrm{d}U_C}{\mathrm{d}t}+U_C=E \tag{1}$$

由初始条件 *t*=0 时，$U_C=0$。得解为

$$\begin{gathered}U_C=E\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}\right)\\ U_R=iR=E\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}\end{gathered} \tag{2}$$

从U_C、U_R两式可见，U_C是随时间 *t* 按指数函数规律增长，而电阻电压U_R随时间 *t* 按指数函数规律衰减，如图 41-2 中$U-t$、U_C-t及U_R-t曲线所示。

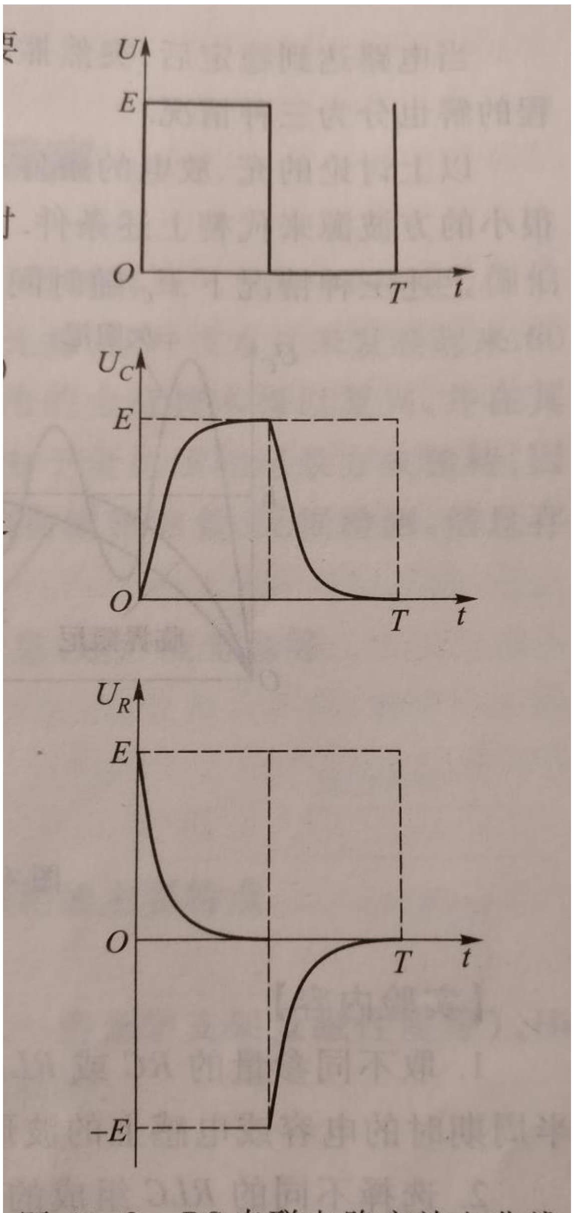


图 41-2　*RC* 串联电路充放电曲线

在放电过程中的回路方程为

$$RC\frac{\mathrm{d}U_C}{\mathrm{d}t}+U_C=0 \tag{3}$$

由初始条件 t=0 时，$U_C=E$，得解为

$$\begin{cases} U_C=E\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}} \\ U_R=iR=-E\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}} \end{cases} \tag{4}$$

从上式可见，他们都随时间 t 按指数函数规律衰减。式中的 $RC=\tau$ 具有时间的量纲。称为时间常量（或弛豫时间），是表征暂态过程进行的快慢的一个重要物理量。与时间常量 τ 有关的另一个在实验中较容易测定的特征值，称为半衰期 $T_{1/2}$，

即当$U_C(t)$下降到初值（或上升至终值）一半时所需要的时间，他同样反映了暂态过程的快慢程度，与τ的关系

$$T_{1/2} = \tau \ln 2 = 0.693\tau \tag{5}$$

一般从示波器上测量 RC 半衰期$T_{1/2}$比测弛豫时间要方便。

2.*RL* 串联电路暂态过程

与 *RC* 串联电路进行类似分析可得，*RL* 串联电路的时间常量及半衰期$T_{1/2}$分别为

$$\tau = \frac{L}{R}, T_{1/2} = 0.693\tau = 0.693\frac{L}{R} \tag{6}$$

3.*RLC* 串联电路

先讨论 *RLC* 电路中突然接入电源，电容器上电压满足的微分方程为

$$LC\frac{\mathrm{d}^2U_C}{\mathrm{d}t^2} + RC\frac{\mathrm{d}U_C}{\mathrm{d}t} + U_C = E \tag{7}$$

等式两边同时除以 *LC*，并令

$$\beta = R/2L, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{8}$$

则上式可化为

$$\frac{\mathrm{d}^2U_C}{\mathrm{d}t^2} + 2\beta\frac{\mathrm{d}U_C}{\mathrm{d}t} + \omega_0^2U_C = \omega_0^2E \tag{9}$$

式（9）为一阻尼振荡方程，β为阻尼系数，ω_0电路的固有频率。又由本过程的两个初始条件

$$U_C\big|_{t=0} = 0; \frac{dU_C}{dt}\bigg|_{t=0} = 0 \tag{10}$$

所以式（10）最终接的形式取决于β和ω_0的相对大小

下面就分三种情况给出结果。

（1）欠阻尼

当$\beta^2 - \omega_0^2 < 0$时，称为欠阻尼，其解为

$$U_C = E - E\mathrm{e}^{-\beta t}\left(\cos\omega t + \frac{\beta}{\omega}\sin\omega t\right) \tag{11}$$

式中，$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$，式（11）称为阻尼振荡解。

（2）过阻尼

当 $\beta^2-\omega_0^2>0$ 时，称为过阻尼。其解为

$$U_C=E-\frac{E}{2r}\mathrm{e}^{-\beta t}\left[(\beta+\gamma)e^{\gamma t}-(\beta-\gamma)e^{-\gamma t}\right] \tag{12}$$

式中：$\gamma=\sqrt{\beta^2-\omega_0^2}$ 。

（3）临界阻尼

当 $\beta^2-\omega_0^2=0$ 时，称为临界阻尼，此时其解为

$$U_C=E-E(1+\beta t)\mathrm{e}^{-\beta t} \tag{13}$$

当电路达到稳定后，突然撤去电源电动势（即 *E*=0），电路的变化类似于充电过程。方程的解也分未三种情况。

以上讨论的充、放电的条件是加阶越波且源内阻 $r_s=0$ 。在实验中，我们可以用源内阻很小的方波源来代替上述条件，只要方波的周期远大于电路的时间常量就可以。

上述三种情况下 U_C 随时间 *t* 的变化如图 41-3 所示

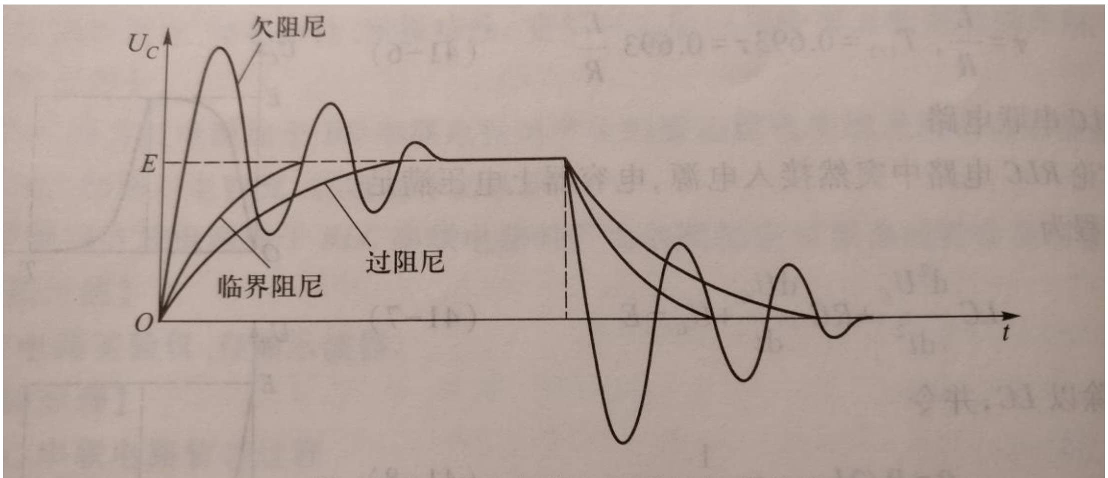


图 41-3 *RLC* 串联电路阻尼振荡曲线

【实验内容及步骤】

1.取不同参量的 *RC* 或 *RL* 组成串联电路，测量并描绘当时间常量小于方波半周期时的电容或电感上的波形，计算时间常量并与理论值比较。

2.选择不同的 *RLC* 组成的串联电路，测量并描绘欠阻尼过程、临界阻尼过程、过阻尼过程时电容上的波形，计算时间常量并与理论值比较。

注意：方波的周期应远大于 *RLC* 串联电路的时间常量。

【数据处理】

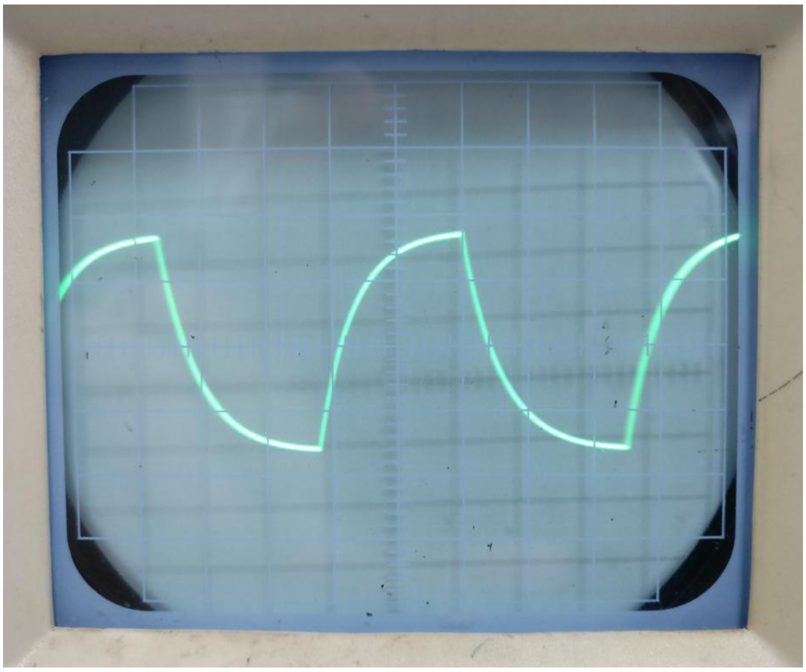
$$f=200\text{Hz}\quad C=0.1\mu\text{F}\quad L=0.1\text{H}\quad \tau<\frac{1}{2}T$$

1. *RC* 串联

$$R = 6\text{k}\Omega$$

$$\tau_{理论} = R \cdot C = 5\text{k}\Omega \times 0.1\mu\text{F} = 0.0006\text{s}$$

u_C 波形为



观察图像可得，当半周期共 25 小格时，半衰期共 4 格

$$\therefore T_{1/2} = \frac{4}{25} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{200} = 0.0004s$$

$$\tau_{实验} = \sqrt{3} \times T_{1/2} = 0.00058s$$

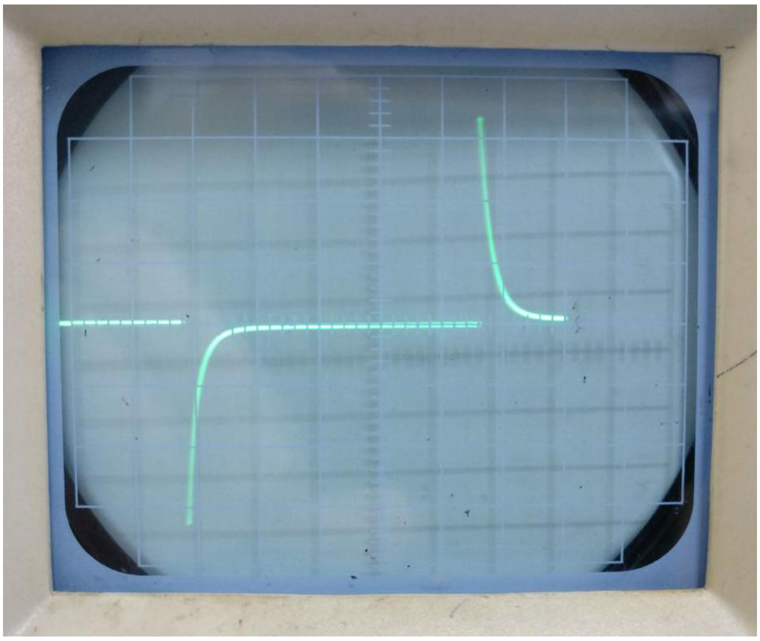
$$u_r = \frac{\left|\tau_{理论} - \tau_{实验}\right|}{\tau_{理论}} = \frac{0.0006\text{-}0.00058}{0.0006} = 3.33\%$$

2. *RL* 串联

$$R = 1\text{k}\Omega$$

$$\tau_{理论} = \frac{L}{R} = \frac{0.1\text{H}}{1\text{k}\Omega} = 0.0001s$$

u_L 波形为



观察图像可得，当半周期共 39 小格时，半衰期共 1.2 格

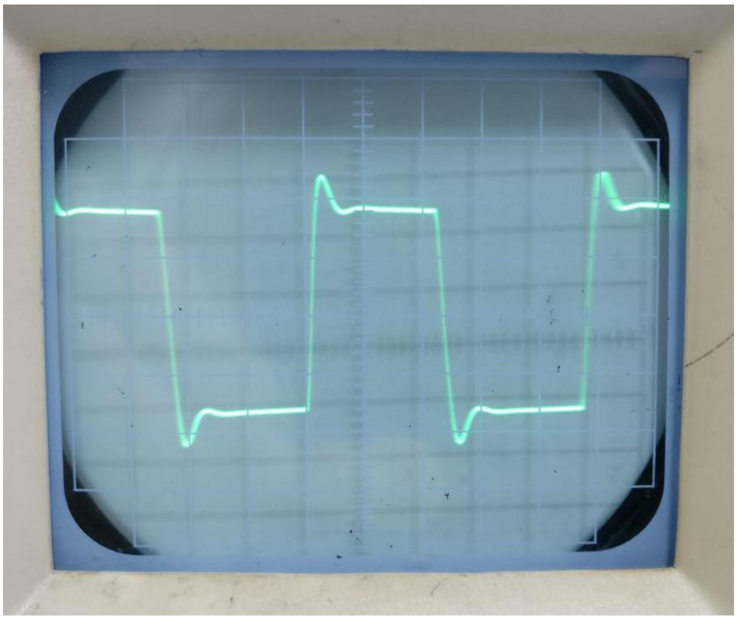
$$\therefore T_{1/2} = \frac{1.2}{39} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{200} = 0.000077s$$

$$\tau_{\text{实验}} = \sqrt{3} \times T_{1/2} = 0.000133s$$

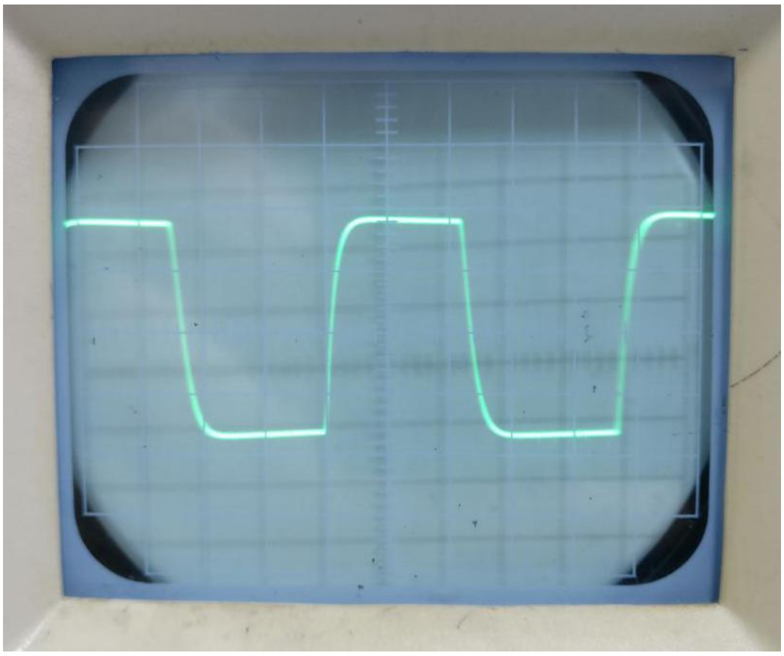
$$u_r = \frac{\left|\tau_{\text{理论}} - \tau_{\text{实验}}\right|}{\tau_{\text{理论}}} = \frac{0.000133 - 0.0001}{0.0001} = 33\%$$

3. *RLC* 串联

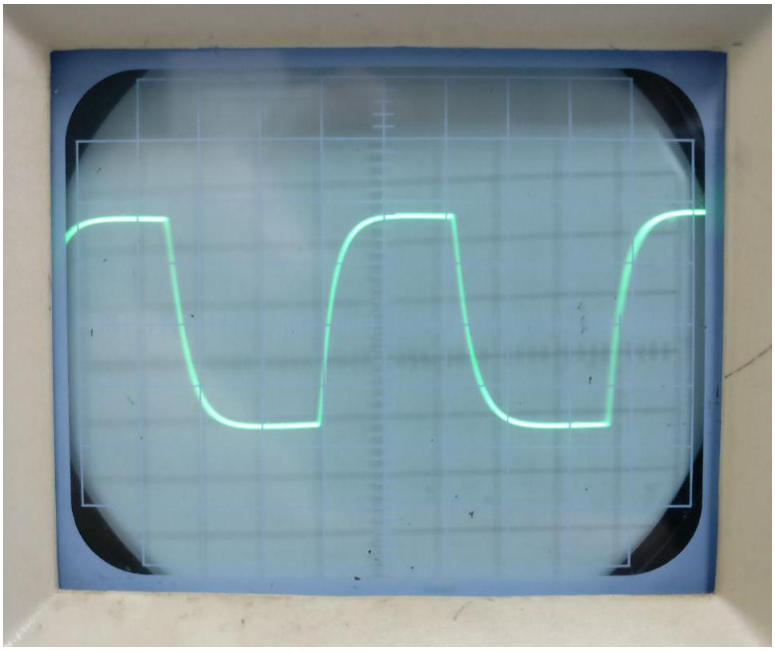
（1）欠阻尼 $R = 1\text{k}\Omega$ u_C 波形为



（2）临界阻尼 $R=2\text{k}\Omega$ u_C 波形为



（3）过阻尼 $R=3\text{k}\Omega$ u_C 波形为



【思考题】

1. 在 RC 暂态过程中，固定方波的频率，而改变电阻的阻值，为什么会有不同的波形？而改变方波的频率，会得到类似的波形吗？

答：因为$U_C=E\left(1-\text{e}^{-\frac{t}{\tau}}\right)$，而$\tau=R\cdot C$，改变电阻的阻值就会改变时间常数$\tau$，

进而改变U_C的波形，而如果改变频率，只是改变了自变量 t 的取值范围，

只会改变波形的长度，不会改变波形的形状。

2. 在 *RLC* 暂态过程中，若方波的频率很高或很低，能观察到阻尼振荡的波形吗？如何由阻尼振荡的波形来测量 *RLC* 电路的时间常量？

答：方波频率很低时可以看到，很高时就不一定能看到了。阻尼振荡的时间常数可通过公式 $\tau = \dfrac{T_d}{\ln \dfrac{U_{m1}}{U_{m2}}}$ 测得。其中，T_d 为震荡到达两个波峰的时间差，U_{m1} 和 U_{m2} 分别为第一次、第二次波峰做对应的电压值。

3. 在 *RC*、*RL* 电路中，当 *C* 或 *L* 的损耗电路不能忽略不计时，能否用本实验测量电路中时间常量？

答：不能，*C 或 L* 的损耗电路不能忽略不计，则电路中的阻抗需要考虑容抗或感抗，不能只考虑电阻。

【实验结果分析与小结】

1.在示波器上读数时，需要尽量将半个周期的图像布满整个屏幕后再进行读数，使读数更加精确，进而减小时间常数实验值与理论值之间的相对误差。

2.实验时要避免触碰信号线，否则会干扰示波器上图像的稳定性。

【原始数据】（见下页）

南昌大学物理实验报告

学生姓名：黄泽豪　学号：5502115014　专业班级：物理151　班级编号：______

实验时间：___时___分 第___周 星期____ 座位号：____ 教师编号：____ 成绩：____

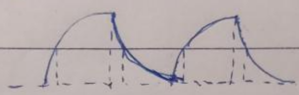
$f=200\,Hz$　　$C=0.1\,\mu F$　　$L=0.1\,H$.

~~电容~~电路参数　　$\tau < \frac{1}{2}T$

RC串联

R值　$\tau = R\cdot C = 6k\Omega \times 0.1\mu F = 0.0006\,S$

U_C波形



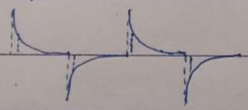
半周期 4 格. 半周期共25格

$T_{\frac{1}{2}}$　$\frac{4.5}{25} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{200} = 0.00045$　$\tau_{实验} = 0.00058\,S$

RL串联

R值　$1k\Omega$　$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.1H}{1k\Omega} = 0.0001\,S$

U_L波形



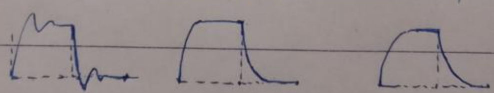
半周期 1 格　半周期共 25 格
1.2　3.9

$T_{\frac{1}{2}}$　$\frac{1}{25} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{200} = 0.0001\,S$　$\tau_{实验} = 0.00015\,S$

$\frac{1.2}{3.9} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{200} =$

RLC串联　欠阻尼　临界阻尼　过阻尼

U_C波形

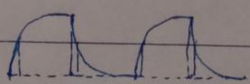


R值　$1000\,\Omega$　$2000\,\Omega$　$3000\,\Omega$

RC串联

R值　$\tau = R\cdot C = 3k\Omega \times 0.1\mu F = 0.0003\,S$

U_C波形



半周期 2 格　半周期共 18 格
2.5　3.2

$T_{\frac{1}{2}}$　$\frac{2}{18} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{200} = 0.00028\,S$　$\tau_{实验} = 0.0004\,S$