
实验 1 基本元件伏安特性的测绘

一. 实验目的

1. 掌握线性、非线性电阻及理想、实际电压源的概念。
2. 掌握测试电压、电流的基本方法。
3. 掌握电阻元件及理想、实际电压源的伏安特性测试方法，学习利用逐点测试法绘制伏安特性曲线。
4. 掌握直流稳压电源、直流电流表、直流电压表的使用方法。

二. 实验设备

1. 电路分析综合实验箱
2. 直流稳压电源
3. 万用表
4. 变阻箱

三. 实验原理

一个二端元件的特性可以用该元件上的端电压 U 与通过该元件的电流 I 之间的关系来表示，即用 $U-I$ 平面上的一条曲线来表征，这条曲线称为该元件的伏安特性曲线。

1. 线性电阻元件

线性电阻元件的伏安特性服从欧姆定律，即在 $U-I$ 平面上定义的一条通过坐标原点且位于直角坐标平面中的 1、3 象限（正电阻）的直线，如图 3.1(a)所示，该直线的斜率表征了它的电阻值。伏安特性曲线为直线的电阻称为线性电阻。

在实验室里，我们常用的电阻器通常为碳膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻以及线绕电位器、薄膜电位器等，它们在直流或很低的频率下使用时，其线性度较好，伏安特性曲线近似为一条直线。

2. 非线性电阻元件

非线性电阻元件的伏安特性是在 $U-I$ 平面上通过坐标原点的一条曲线，其阻值不是常数。常见的非线性电阻有白炽灯丝、普通二极管、稳压二极管等，下面分别对其进行简单介绍：

1) 白炽灯丝

白炽灯灯丝是一种常见的非线性电阻，当其正常工作时，灯丝处于高温状态，灯丝电阻随温度升高而增大，而灯丝温度又与通过灯丝的电流有关，电流越大，温度越高，相应的阻值也越大。一般灯泡的“冷电阻”与“热电阻”的阻值可以相差几倍至十几倍，其伏安特性曲线如图 3.1(b)所示。

2) 普通二极管

普通的半导体二极管是目前使用最广泛的非线性电阻元件之一。当向二极管两端加正向电压时（一般锗管约为 $0.2 \sim 0.3V$ ，硅管约为 $0.5 \sim 0.7V$ ），其正向电流随电压的

升高而急速上升，而加反向电压时，当电压从零一直增加到几十伏，其反向电流增加的却很少，由此可见，二极管具有单向导电性。需要注意的是，反向电压如果加载的过高，超过二极管的极限值，会导致管子击穿损坏，其伏安特性曲线如图 3.1(c)所示。

3) 稳压二极管

稳压二极管是一种较为特殊的半导体二极管，其正向特性与普通二极管类似，我们主要说明其反向特性。当加在二极管两端的反向电压较小时，其反向电流几乎为零，但当反向电压增加到某一数值时（通常称为管子的稳压值，不同的稳压管对应不同的稳压值），其电流会急速增加，稳压管反向击穿，即当反向电流在较大范围内变化时，稳压管两端电压几乎保持不变，表现出稳压特性，其伏安特性曲线如图 3.1(d)所示。

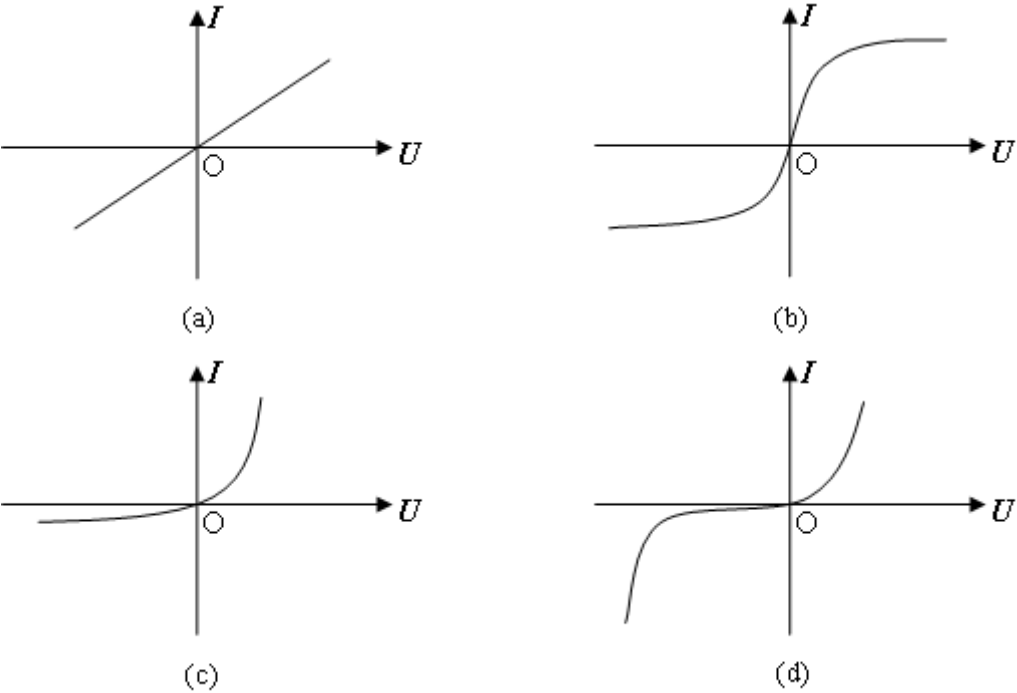


图 3.1

3.理想电压源与实际电压源的端口特性

理论上，理想电压源是一个二端理想元件，内阻 R_s 为零，其输出电压 $U_s(t)$ 与通过它的电流无关，总保持为给定的时间函数。当 $U_s(t)$ 不随时间变化（即为常数）时，称为直流理想电压源 U_s 。其端口特性为平行于电流轴的直线，如图 3.2(a)中实线所示。

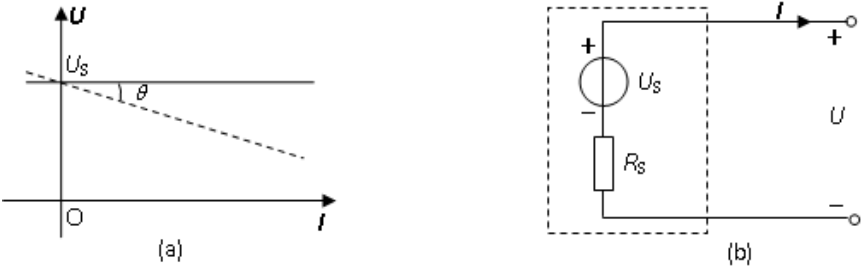


图 3.2

实际上，任何电源都存在内阻 R_s ，因此实际电压源可以用一个理想电压源 U_s 和电

阻 R_S 相串联的电路模型来表示, 如图 3.2(b)所示, 其端口特性如图 3.2(a)中虚线所示。图中 θ 越大, 说明实际电压源内阻 R_S 越大, 其正切值代表实际电压源的内阻值 R_S 。

四. 实验内容

1. 测绘线性电阻的伏安特性曲线

1)测试电路如图 3.3 所示, 图中 U_S 为直流稳压电源, R 为被测电阻, 阻值 $R = 200\Omega$ 。用万用表的直流电压档监测被测电阻两端的电压, 用毫安表测试通过被测电阻的电流。

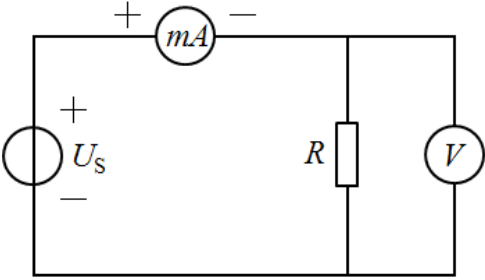


图 3.3

2) 调节直流稳压电源 U_S 的输出电压, 当伏特表的读数依次为表 3.1 中所列电压值时, 读毫安表的读数, 将相应的电流值记录在表格中。

3) 在坐标纸上绘制线性电阻的伏安特性曲线, 并测算电阻阻值。

表 3.1

V(V)	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
I(mA)						

2. 测绘非线性电阻的伏安特性曲线

1) 测试电路如图 3.4 所示, 图中 D 为二极管, 型号为 IN4007, 作为待测的非线性电阻, 观测其正向特性。 R_W 为可调电位器。

2) 将直流稳压电源的输出电压设置为 5V。

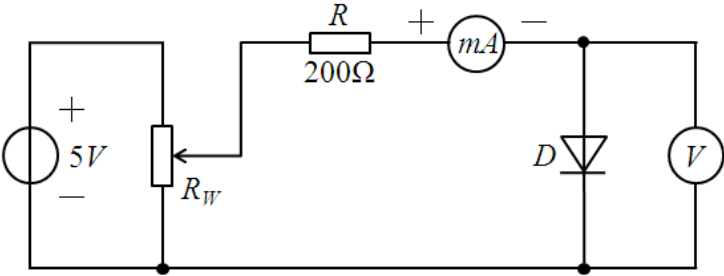


图 3.4

表 3.2

V(V)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.71
I(mA)										

3)缓慢调节 R_W , 使伏特表的读数依次为表 3.2 中所列电压值时, 读毫安表的读数, 将相应的电流值记录在表格中。**注意:** 测量时, 应时刻监测电流表读数, 使其不得超过 30mA。

4) 在坐标纸上绘制非线性电阻的伏安特性曲线。

3. 测绘理想电压源的伏安特性曲线

实验中，我们将直流稳压电源作为本次实验的被测对象，这是由于其内阻很小，在与外电路等效电阻相比可以忽略不计的条件下，可以视为理想电压源。

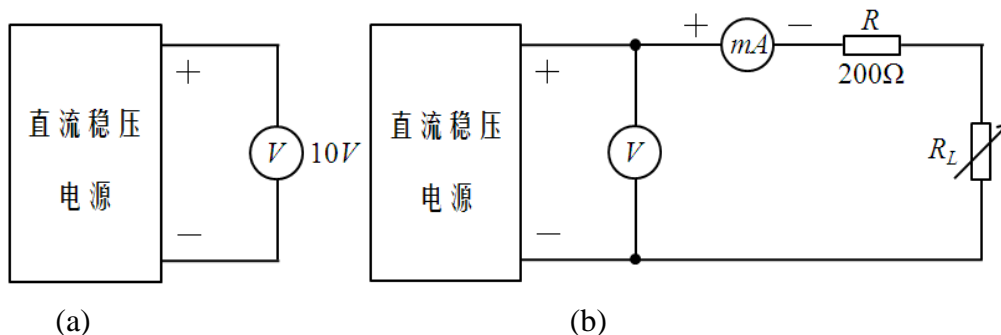


图 3.5

1) 首先，连接电路如图 3.5 (a) 所示，不加负载电路，直接用伏特表测试直流稳压电源的输出电压，将其设置为 10V。

2) 然后，测试电路如图 3.5 (b) 所示，其中 R_L 为变阻箱， R 为限流保护电阻。

3) 调节变阻箱 R_L ，使毫安表的读数依次为表 3.3 中所列电流值时，读伏特表的读数，将相应的电压值记录在表格中。

表 3.3

$I(mA)$	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
$V(V)$	10.0				

4) 在坐标纸上绘制理想电压源的伏安特性曲线。

4. 测绘实际电压源的伏安特性曲线

实验中，我们将直流稳压电源串联一个电阻 R_S 来模拟具有一定内阻的实际电压源。

1) 首先，连接电路如图 3.6 (a) 所示，不加负载电路，直接用伏特表测试实际电压源的输出电压，将其设置为 10V。其中 R_S 为实际电压源的内阻，阻值 $R_S = 51\Omega$ 。

2) 然后，测试电路如图 3.6 (b) 所示，其中 R_L 为变阻箱。

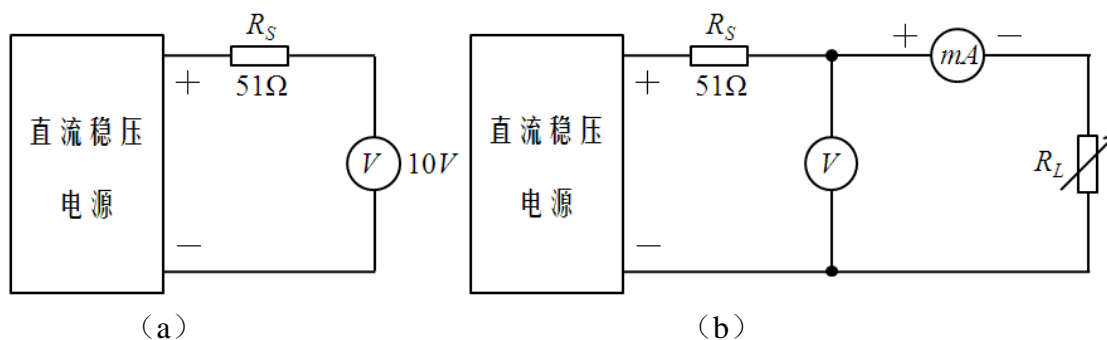


图 3.6

3) 调节变阻箱 R_L ，使毫安表的读数依次为表 3.4 中所列电流值时，读伏特表的读数，将相应的电压值记录在表格中。

4) 在坐标纸上绘制实际电压源的伏安特性曲线，**要求**理想电压源和实际电压源的伏安特性曲线画在同一坐标轴中

表 3.4

$I(\text{mA})$	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
$V(\text{V})$	10.0				

五. 注意事项

1. 实验操作中，直流稳压电源开关打开前一定要检查电路，确认没有短路，才能开启，以免损坏设备。
2. 使用各类仪表时，必须注意其量程的选择，量程选大了会增加测量误差，选小了则可能损坏仪表，故在无法估计合适量程时，采用从大到小的原则，先采用最大量程，然后根据测试结果，调节至适当量程。

六. 预习思考题

1. 线性电阻与非线性电阻的概念是什么？两者的伏安特性有何区别？
2. 仪表的内阻会影响测量的结果，根据书中 2.2 节讲述的电流表内接法和外接法分析图 3.3 选择的是哪种方法，试分析原因？
3. 根据实验中给定的相关参数，估算应选用功率为多大瓦数的电阻？

七. 实验报告要求

1. 记录实验数据，绘制伏安特性曲线，其中理想电压源和实际电压源的伏安特性曲线画在同一坐标轴中。
2. 依据绘制的线性电阻伏安特性曲线测算线性电阻阻值。
3. 伏安特性曲线必须用坐标纸绘制。
4. 测试的原始数据经指导教师签名后应附在实验报告中。
5. 心得体会及其它。

实验 2 含源线性单口网络等效电路及其参数测定

一. 实验目的

1. 验证戴维南定理和诺顿定理，加深对两个定理的理解。
2. 通过对含源线性单口网络外特性及其两种等效电路外特性的测试、比较，加深对等效电路概念的理解。
3. 学习测量等效电路参数的一些基本方法。

二. 实验设备

1. 电路分析综合实验箱
2. 直流稳压电源
3. 万用表
4. 变阻箱

三. 实验原理

包含电源和线性电阻、受控源的单口网络简称为含源线性单口网络。所谓等效，是指就含源线性单口网络的外部特性而言，该网络被等效电路替代后，不影响外电路（即负载电路）的伏安关系。

1. 戴维南定理

含源线性单口网络不论其电路结构如何复杂，就其端口的外部特性来说，可以等效为一个电压源和电阻的串联模式。电压源的电压等于该网络端口的开路电压 U_{OC} ，其电阻等于该网络中所有独立源为零值（电压源短接，电流源开路）时所得的网络等效电阻 R_0 。

这种电压源和电阻的串联模式称为戴维南等效电路，网络端口的开路电压和等效电阻是表征该单口网络特性的两个参数。

2. 诺顿定理

含源线性单口网络不论其电路结构如何复杂，就其端口的外部特性来说，可以等效为一个电流源和电阻的并联模式。电流源的电流等于该网络端口的短路电流 I_{SC} ，其电阻等于该网络中所有独立源为零值（电压源短接，电流源开路）时所得的网络等效电阻 R_0 。

这种电流源和电阻的并联模式称为诺顿等效电路，网络端口的短路电流和等效电阻是表征该单口网络特性的两个参数。

四. 实验内容

1. 含源线性单口网络端口外特性测定

1) 测量电路如图 3.7 所示，虚线所框中的部分为被测的含源线性单口网络，A、B 为网络端口。 R_L 为变阻箱，接入电路作为单口网络的外部负载，其中直流稳压电源的输出电压为 10V。

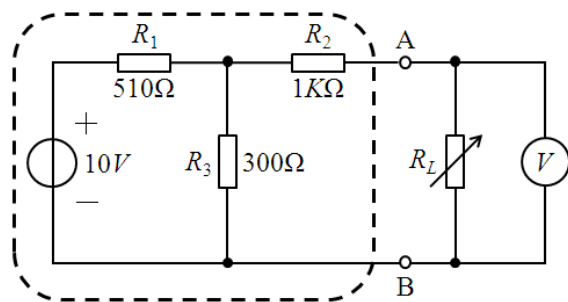


图 3.7

2) 调节变阻箱 R_L , 使其阻值依次为表 3.5 中所列电阻值时, 读伏特表的读数, 将相应的电压值记录在表格中, 并计算通过负载 R_L 的电流值填写在表格中。

表 3.5

$R_L(K\Omega)$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
$V_{AB}(V)$					
$I_{AB}(mA)$					

3) 在坐标纸上绘制含源线性单口网络的外特性曲线。

2. 等效电路参数测定

1) 测量含源线性单口网络开路电压 U_{OC}

测量开路电压的方法不只一种, 当含源线性单口网络的等效电阻较小, 与电压表内阻相比可忽略不计时, 直接用电压表测量其开路电压 U_{OC} 。

(1) 测量电路如图 3.8 所示, 其中直流稳压电源的输出电压为 10V。

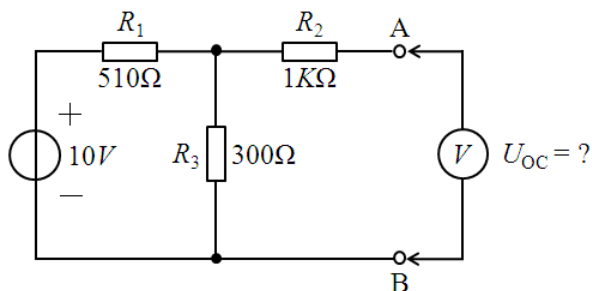


图 3.8

(2) 用伏特表测量含源线性单口网络两个端口 A、B 间的电压, 即为开路电压 U_{OC} 。

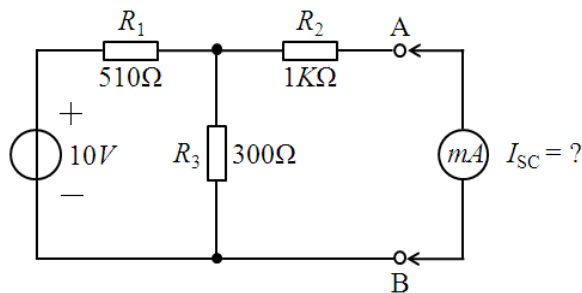


图 3.9

2) 测量含源线性单口网络短路电流 I_{SC}

(1) 测量电路如图 3.9 所示, 其中直流稳压电源电压为 10V。

(2) 用毫安表测量通过含源线性单口网络两个端口 A、B 间的电流, 即为短路电流 I_{SC} 。

3) 测量含源线性单口网络等效内阻 R_0

测量等效内阻的方法有很多种, 本书中列举两种常用的测量方法。

(1) 开路电压、短路电流法

由前面已经测得含源线性单口网络端口 A、B 间的开路电压 U_{OC} 和短路电流 I_{SC} , 可以直接求得等效内阻 R_0 。

$$R_0 = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$$

(2) 半压法

前面已经测得含源线性单口网络的开路电压 U_{OC} , 在 A、B 端口处接一个已知负载 R_L , 如图 3.10 (a) 所示, 图 3.10 (b) 给出了相应的等效电路, 由此可知:

$$\frac{U_{OC} - U_{AB}}{R_0} = \frac{U_{AB}}{R_L} \Rightarrow R_0 = \left(\frac{U_{OC}}{U_{AB}} - 1 \right) R_L$$

因此, 当 $U_{AB} = \frac{1}{2} U_{OC}$ 时, 则 $R_0 = R_L$ 。

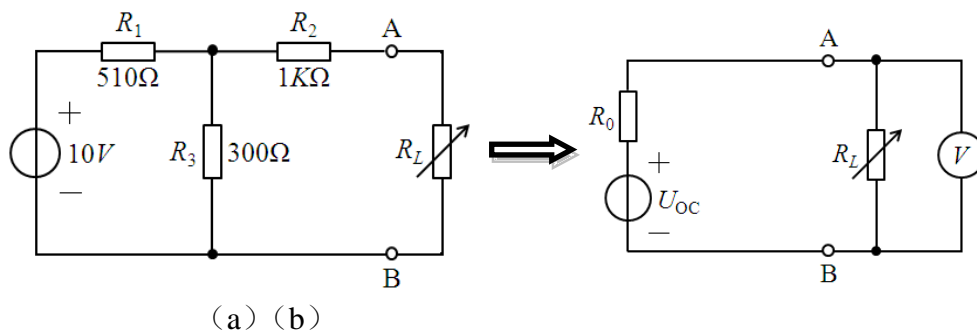


图 3.10

具体的测量电路如图 3.11 所示, 其中直流稳压电源的输出电压为 10V。调节变阻箱 R_L , 使其两端电压值 U_{AB} 为前面测得开路电压 U_{OC} 的一半时, 记录变阻箱的阻值, 此时, 该阻值即为所求的等效内阻, 即 $R_L = R_0$ 。

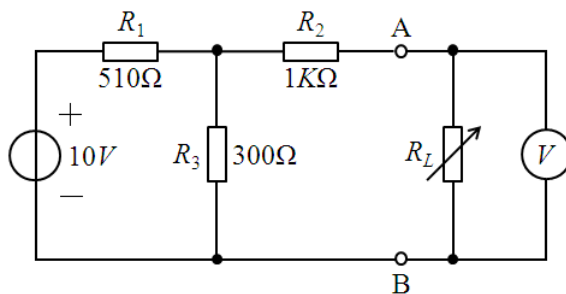


图 3.11

3. 验证戴维南等效电路

1) 测量电路如图 3.12 所示, 虚线所框中的部分为替代原含源线性单口网络的戴维南等效电路, R_L 为变阻箱, 接入电路作为单口网络的外部负载, 其中 U_{OC} 和 R_0 分别为前面测得的开路电压和等效内阻。

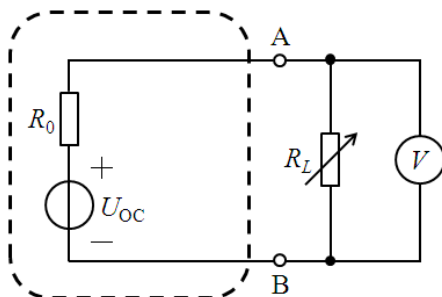


图 3.12

2) 调节变阻箱 R_L , 使其阻值依次为表 3.6 中所列电阻值时, 读伏特表的读数, 将相应的电压值记录在表格中, 并计算通过负载 R_L 的电流值填写在表格中。

表 3.6

$R_L(K\Omega)$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
$V_{AB}(V)$					
$I_{AB}(mA)$					

3) 在坐标纸上绘制戴维南等效电路的外特性曲线。

4. 验证诺顿等效电路

1) 测量电路如图 3.13 所示, 虚线所框中的部分为替代原含源线性单口网络的诺顿等效电路, R_L 为变阻箱, 接入电路作为单口网络的外部负载, 其中 I_{SC} 和 R_0 分别为前面测得的短路电流和等效内阻。

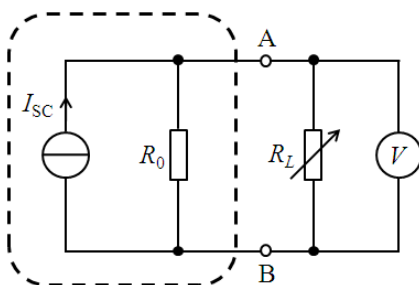


图 3.13

2) 调节变阻箱 R_L , 使其阻值依次为表 3.7 中所列电阻值时, 读伏特表的读数, 将相应的电压值记录在表格中, 并计算通过负载 R_L 的电流值填写在表格中。

表 3.7

$R_L(K\Omega)$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
$V_{AB}(V)$					
$I_{AB}(mA)$					

3) 在坐标纸上绘制诺顿等效电路的外特性曲线。**要求**将本实验 1、3、4 部分要求的含源线性单口网络、戴维南等效、诺顿等效三条外特性曲线画在同一坐标轴中。

五. 注意事项

1) 实验操作中, 打开直流稳压电源前一定要检查电路, 确认没有短路, 才能开启, 以免损坏设备。

2) 实验中, 测试仪表的连接比较容易出错, 需要利用实验箱上的转接插孔, 过程中必须严格按照导线连接规范来操作。

3) 使用各类仪表时, 必须注意其量程的选择, 量程选大了会增加测量误差, 选小了则可能损坏仪表, 故在无法估计合适量程时, 采用从大到小的原则, 先采用最大量程, 然后根据测试结果, 调节至适当量程。

六. 预习思考题

1. 如何测量含源线性单口网络的开路电压和短路电流? 什么情况下不适合用仪表直接测量开路电压和短路电流?

2. 理论计算图 3.7 中含源线性单口网络的开路电压、短路电流和等效内阻。

七. 实验报告要求

1. 记录实验数据, 绘制相应的外特性曲线, 其中实验内容 1、3、4 中三条外特性曲线要求画在同一坐标轴中。

2. 曲线必须用坐标纸绘制。

3. 测试的原始数据经指导教师签名后应附在实验报告中。

4. 心得体会及其它。

实验3 一阶电路响应的研究

一. 实验目的

1. 掌握 RC 一阶电路零状态响应、零输入响应的概念和基本规律。
2. 掌握 RC 一阶电路时间常数的测量方法。
3. 熟悉示波器的基本操作，初步掌握利用示波器监测电信号参数的方法。

二. 实验设备

1. 电路分析综合实验箱
2. 双踪示波器

三. 实验原理

电容元件和电感元件的电压电流关系都涉及对电流、电压的微分或积分，因而称为动态元件，至少包含一个动态元件的电路称为动态电路。在实际工作中常遇到只含一个动态元件的线性、时不变电路，这种电路可以用一阶微分方程来描述，此种用一阶微分方程描述的动态电路称为一阶电路。

一阶电路通常是由一个动态元件（储能元件）以及若干电阻元件组成，由于从动态元件两端看进去，若干电阻可以用一个等效电阻来表征，因此为研究方便，我们取简单的 RC 一阶电路形式作为本次实验的研究对象。

在一阶 RC 电路中，由于电容是一种储能元件，它在电路的通断时，其储能不可能突变，电路中的电压和电流随时间变化，这个过程通常称为瞬态过程，工程上也称为过渡过程。

1. 零状态响应

电路中所有储能元件初始状态均为零的情况下，由外加激励所引起的响应称为零状态响应。如图 3.14 所示的 RC 一阶电路中，在 $t < 0$ 时开关 S 置于位置 2 上（电路处于稳态），此时 $u_C(0_-) = 0V$ ，当 $t = 0$ 时开关 S 由 2 打到 1 的位置上，直流电源 U_S 经电阻 R 向电容 C 充电。从物理意义上说，零状态响应反映电容储能从无到有的增长过程，即电容的充电过程。

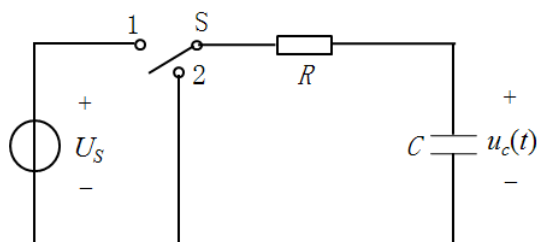


图 3.14

$t \geq 0$ 时，电容电压随时间变化的规律为： $U_C(t) = U_S(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$

由上式可以看出，式子的核心部分为指数函数 $e^{-\frac{t}{\tau}}$ ，它是随时间 t 按指数规律衰减

的。其中 $\tau = RC$ ，具有时间的量纲，称之为时间常数，是反映电路过渡过程快慢的物理量。 τ 越大，电容电压达到稳态值就越慢，反之则越快。

2. 零输入响应

电路在无外加激励的情况下，由储能元件的初始状态所引起的响应称为零输入响应。如图 3.14 所示的 RC 一阶电路中，在 $t < 0$ 时开关 S 置于位置 1 上（电路处于稳态），此时 $u_C(0_-) = U_s$ ，当 $t = 0$ 时开关 S 由 1 打到 2 的位置上，电容上的初始电压 $u_C(0_-) = u_C(0_+) = U_s$ ，电容经电阻 R 放电。

$t \geq 0$ 时，电容电压随时间变化的规律为： $U_C(t) = U_C(0)e^{-\frac{t}{\tau}}$

由上式可以看出，这是一个由 $U_C(0)$ 开始随时间衰减的指数函数。

四. 实验内容

1. RC 一阶电路的零状态响应

在实际测量电路中，我们并没有采用图 3.14 中直流电源加开关的设计，这是由于开关动作、直流输入等过程的持续时间相对于电路时间常数来说大得多，所以我们无法利用普通示波器去观察它的瞬态过程，而只能看到它的稳态，这显然不是我们观测的目的。要想在普通示波器上观测稳定的零状态响应波形，只有将这个响应波形变为周期性重复波形，这样我们只需要选择感兴趣的部分即可。为得到这种周期性的响应波形，在其输入端就要提供周期性的、具有足够幅度和脉宽的序列信号，实验中这些信号是由脉冲信号发生器提供的。

理论上，当 $t = \infty$ 时，充电才能达到稳态，但在实际应用上，一般当 $t = (4 \sim 5)\tau$ 时，就可以认为电容电压充电达到稳态值 $U_C(\infty)$ 。根据本实验所给定的参数计算时间常数 $\tau = RC = 20\mu s$ ，则达到稳态的时间约为 $100\mu s$ 左右。所以若想观察到完整的响应波形，只要脉宽大于 $100\mu s$ 的信号就可以了，故本实验的输入信号选用了脉宽为 $0.5ms$ 的方波信号。

1) 测试电路如图 3.15 所示，图中 u_i 为脉冲信号发生器提供的输入信号，电阻 $R = 2k\Omega$ ，电容 $C = 0.01\mu F$ 。用示波器的 1 通道(CH1)测输入信号，2 通道(CH2)测响应波形。

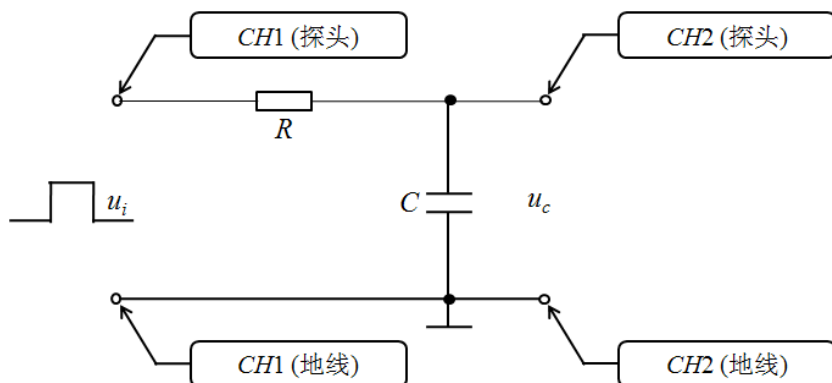


图 3.15

2) 零状态响应的输入信号如图 3.16 所示, 幅度为 5V, 周期为 1ms, 脉宽为 0.5ms。

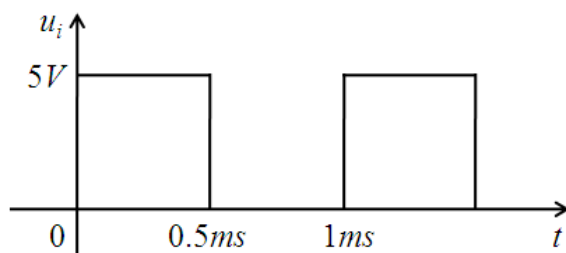


图 3.16

3) 利用示波器的自动测量功能测试 1 通道输入信号的相关参数: 幅度、周期和脉宽。调节脉冲信号发生器输出调节旋钮, 使输入信号满足实验参数要求。

4) 由零状态响应的函数式可知: $U_c(t) = U_c(\infty)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$

当 $t = \tau$ 时, $U_c(t) \approx 0.632U_c(\infty)$, 由此可知时间常数 τ 可用零状态响应波形增加到 $0.632U_c(\infty)$ 所对应的时间来测得, 见图 3.17。

利用示波器的光标测量功能测试 2 通道响应波形的稳态值 $u_c(\infty)$ 和时间常数 τ 。

5) 将观测到的输入信号、响应波形及测量时间常数的放大图存储到 U 盘, 课后打印附在实验报告上。

6) 将测量数据标记在打印的波形图上。

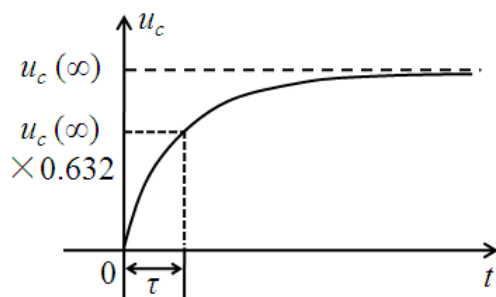


图 3.17

2.RC 一阶电路的零输入响应

在实际测量电路中, 要想在普通示波器上观测稳定的零输入响应波形, 电容器上要有连续不断重复出现的初始电压 $u_c(0)$ 。借助脉冲信号源提供的周期性窄脉冲序列信号, 可以在极短的时间内给电容充电, 使其具备一定的初始电压, 在一个窄脉冲消失, 下一个窄脉冲尚未到来的这段时间里, 其电路响应即为我们需要观测的零输入响应。

需要注意的是, 若想观察到完整的零输入响应波形, 作为输入信号的脉冲序列周期必须远大于 5 倍的电路时间常数。

1) 测试电路如图 3.18 所示, 图中 u_i 为脉冲信号发生器提供的输入信号, 电阻 $R = 2k\Omega$, 电容 $C = 0.01\mu F$ 。用示波器的 1 通道(CH1)测输入信号, 2 通道(CH2)测响

应波形。

2) 零输入响应的输入信号如图 3.19 所示, 幅度为 5V, 周期为 1ms, 脉宽为 3μs。此信号由脉冲信号发生器直接提供, 不需要手动调节相关参数。

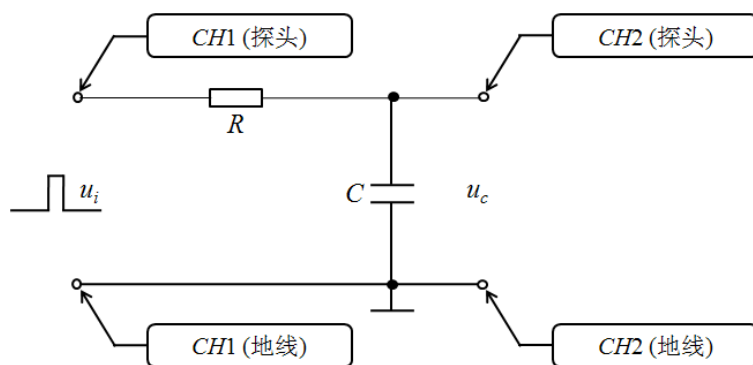


图 3.18

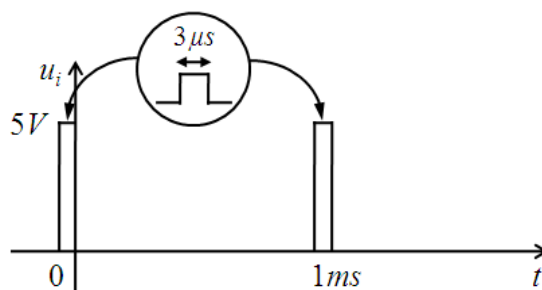


图 3.19

3) 利用示波器的自动测量功能测试 1 通道输入信号的相关参数: 幅度、周期和脉宽。

4) 由零输入响应的函数式可知: $U_c(t) = U_c(0)e^{-\frac{t}{\tau}}$,

当 $t = \tau$ 时, $U_c(t) \approx 0.368U_c(0)$, 由此可知当零输入响应的幅度衰减到初始值的 0.368 倍时所需要的时间即为时间常数 τ , 见图 3.20。

利用示波器的光标测量功能测试 2 通道响应波形的初始值 $u_c(0)$ 和时间常数 τ 。

5) 将观测到的输入信号、响应波形及测量时间常数的放大图存储到 U 盘, 课后打印附在实验报告上。

6) 将测量数据标记在打印的波形图上。

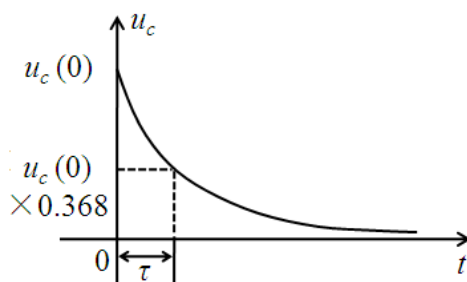


图 3.20

五. 注意事项

1. 开始实验操作前，务必先熟悉示波器的各项基本操作，调节仪器各旋钮、按钮时，不要过快、过猛。
2. 示波器测量参数时，需根据测量需要，选择适当的横纵坐标，以使信号以最好的形态显示，从而实现减少测量误差的目的。
3. 脉冲信号源的接地端必须与示波器的接地端连在一起（称共地），以防外界干扰而影响测量准确性。

六. 预习思考题

1. 改变输入信号的幅度，是否会改变电路过渡过程的快慢？为什么？
2. 已知 RC 一阶电路 $R = 10k\Omega$ ， $C = 0.1\mu F$ ，试计算时间常数 τ ，并拟定测量电路中输入信号的相关参数？

七. 实验报告要求

1. 将示波器上观测到的输入信号、响应波形及测量时间常数的放大图存储到 U 盘，课后打印附在实验报告上。
2. 将实验中记录的相关测量数据标记在打印的波形图上。
3. 测试的原始数据经指导教师签名后应附在实验报告中。
4. 心得体会及其它。

实验4 二阶电路响应的研究

一. 实验目的

1. 观测二阶电路在过阻尼、临界阻尼和欠阻尼三种状态下的响应波形，加深对二阶电路响应的认识和理解。

2. 掌握振荡角频率和衰减系数的概念。

3. 进一步熟悉示波器的操作。

二. 实验设备

1. 电路分析综合实验箱

2. 双踪示波器

3. 变阻箱

三. 实验原理

1. 二阶电路的过渡过程

包含两个独立储能元件的动态电路称为二阶电路，这类电路通常可以用一个二阶微分方程来描述。本实验选用了电阻、电感、电容相串联的二阶电路作为研究对象，观测其在方波信号和窄带信号激励下的过渡过程。

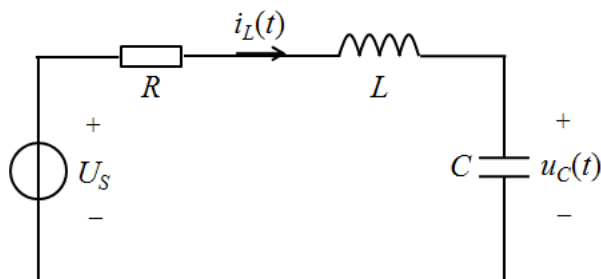


图 3.21

图 3.21 所示的 RLC 串联电路是一个典型的二阶电路，它可以用下述线性二阶常系数微分方程来描述：

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U_s$$

微分方程的解等于对应齐次方程的通解 u_C'' 和他的特解 u_C' 之和，

其中 $u_C'' = K_1 e^{s_1 t} + K_2 e^{s_2 t}$ ， $u_C' = U_s$ 即：

$$u_C(t) = K_1 e^{s_1 t} + K_2 e^{s_2 t} + U_s \quad t \geq 0$$

K_1 和 K_2 可以利用初始条件求出，即电路中电容的初始状态 $u_C(0)$ 和电感的初始状态 $i_L(0)$ 。

s_1 和 s_2 是特征方程的根，即： $s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$ ，取决于电路参数。

对于 RLC 串联二阶电路，无论是零状态响应，还是零输入响应，电路过渡过程的

性质完全由特征方程的特征根来决定，由于 R 、 L 、 C 数值不同，电路响应可以出现四种不同的状态：

1) 当 $(\frac{R}{2L})^2 > \frac{1}{LC}$ 时，即 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，响应为非振荡型，称为过阻尼状态。

2) 当 $(\frac{R}{2L})^2 = \frac{1}{LC}$ 时，即 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，响应处于临界状态，也是非振荡的，称为临界阻尼状态。

3) 当 $(\frac{R}{2L})^2 < \frac{1}{LC}$ 时，即 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，响应为衰减振荡，称为欠阻尼状态。

4) 当 $R = 0$ 时，形成无阻尼等幅振荡。实际电路中，由于有导线、电感器的直流电阻、电容器的介质损耗存在， R 不可能为零，如果要实现无阻尼等幅振荡就必须引入负阻元件，用以补偿电路中的总损耗。

2. 振荡角频率 ω_d 和衰减系数 α 的测量方法

图 3.22 所示的波形为零输入响应下的欠阻尼情况，图中相邻两个波谷的时间间距为振荡周期 T_d ，则 $\omega_d = \frac{2\pi}{T_d}$

当 $t = t_1$ 时， $u_C(t_1) = u_{1m} = Ke^{-\alpha t_1} \sin(\omega_d t_1 + \theta)$

当 $t = t_2$ 时， $u_C(t_2) = u_{2m} = Ke^{-\alpha t_2} \sin(\omega_d t_2 + \theta)$

由于 $t_2 = t_1 + T_d$ ，所以相邻两个峰值的比值为：

$$\frac{u_{1m}}{u_{2m}} = e^{-\alpha T_d} \text{ 即 } \alpha = \frac{1}{T_d} \ln \frac{u_{1m}}{u_{2m}}$$

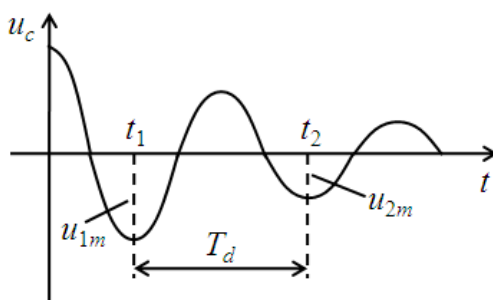


图 3.22

四. 实验内容

1. RLC 二阶电路的零状态响应

RLC 串联二阶电路在直流输入下的零状态响应，就其变化规律而言，与零输入响应相比没有本质上的区别，只是它的终值为一恒定常数，与外加直流电压密切相关，而零输入响应的终值为零。

1) 测试电路如图 3.23 所示, 图中 u_i 为脉冲信号发生器提供的输入信号, 其中 R 为变阻箱, 电容 $C = 0.01\mu F$, 电感 $L = 2.7mH$ 。用示波器的 1 通道(CH1)测输入信号, 2 通道(CH2)测响应波形。

2) 零状态响应的输入信号如图 3.24 所示, 幅度为 5V, 周期为 1ms, 脉宽为 0.5ms。

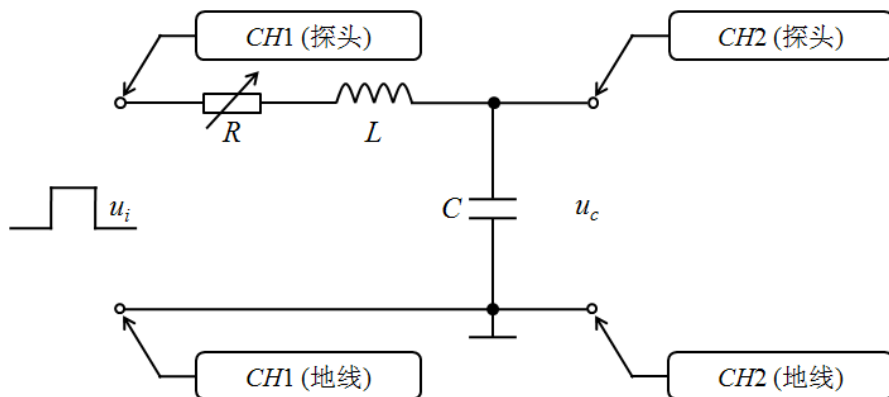


图 3.23

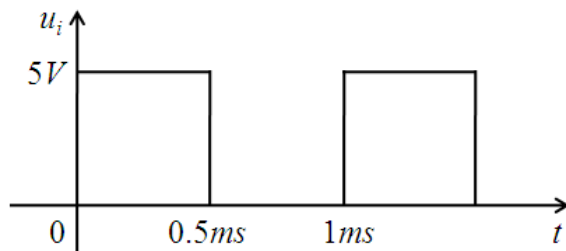


图 3.24

3) 利用示波器的自动测量功能测试 1 通道输入信号的相关参数: 幅度、周期和脉宽。调节脉冲信号发生器输出调节旋钮, 使输入信号满足实验参数要求。

4) 调节变阻箱 R , 利用示波器的 2 通道观察 RLC 二阶电路零状态响应的三种状态波形 (欠阻尼、临界阻尼和过阻尼), 将波形存储到 U 盘, 课后打印附在实验报告上, 并记录临界阻尼状态下的临界阻值。

2. RLC 二阶电路的零输入响应

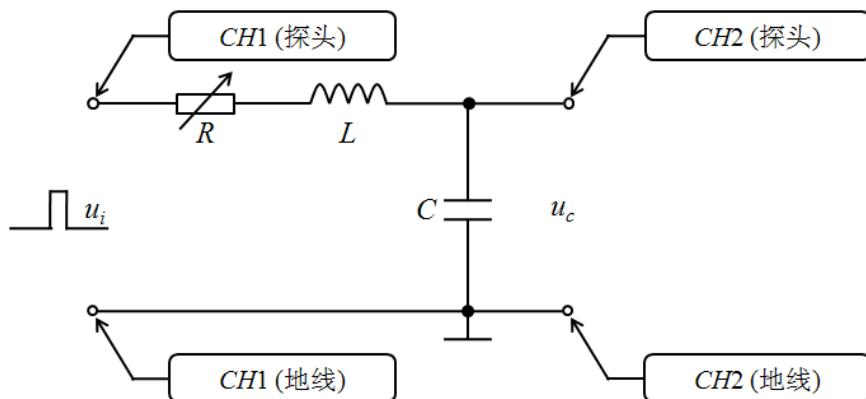


图 3.25

1) 测试电路如图 3.25 所示, 图中 u_i 为脉冲信号发生器提供的输入信号, 其中 R 为变阻箱, 电容 $C = 0.01\mu F$, 电感 $L = 2.7mH$ 。用示波器的 1 通道(CH1)测输入信号, 2 通道(CH2)测响应波形。

2) 零输入响应的输入信号如图 3.26 所示, 幅度为 $5V$, 周期为 $1ms$, 脉宽为 $3\mu s$ 。此信号由脉冲信号发生器直接提供, 不需要手动调节相关参数。

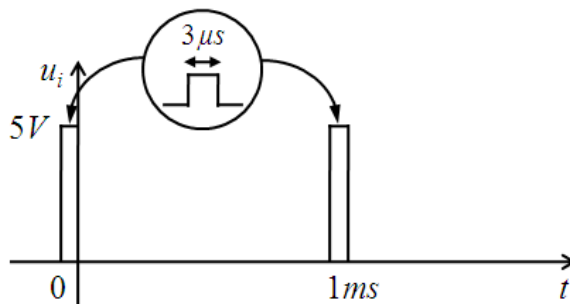


图 3.26

3) 利用示波器的自动测量功能测试 1 通道输入信号的相关参数: 幅度、周期和脉宽。

4) 调节变阻箱 R , 利用示波器 2 通道观察 RLC 二阶电路零输入响应的三种状态波形(欠阻尼、临界阻尼和过阻尼), 将波形存储到 U 盘, 课后打印附在实验报告上, 并记录临界阻尼状态下的临界阻值。

5) 取 $R = 100\Omega$, 利用示波器的光标测量功能观测波形相邻两个波峰或波谷的电压值 u_{1m} 、 u_{2m} 和振荡周期 T_d , 计算振荡角频率 ω_d 和衰减系数 α 。

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T_d} \quad \alpha = \frac{1}{T_d} \ln \frac{u_{1m}}{u_{2m}}$$

五. 注意事项

1. 开始实验操作前, 务必先熟悉示波器的各项基本操作, 调节仪器各旋钮、按钮时, 不要过快、过猛。
2. 示波器测量参数时, 需根据测量需要, 选择适当的横纵坐标, 以使信号以最好的形态显示, 从而实现减少测量误差的目的。
3. 脉冲信号源的接地端必须与示波器的接地端连在一起(称共地), 以防外界干扰而影响测量准确性。

六. 预习思考题

1. 依据实验中给定的相关参数计算处于临界阻尼状态下的临界阻值。
2. 当 RLC 二阶电路处于过阻尼状态下, 若增加回路中的电阻 R , 对过渡过程有何影响? 当电路处于欠阻尼状态下, 若减少回路中的电阻 R , 对过渡过程有何影响? 为什么? 在什么情况下电路达到稳态的时间最短?

七. 实验报告要求

-
1. 将示波器上观测到的零输入及零状态响应下，欠阻尼、过阻尼、临界阻尼三种状态波形保存到 U 盘，课后打印附在实验报告上。
 2. 将实验中记录的相关测量数据标记在打印的波形图上，并计算振荡角频率 ω_d 和衰减系数 α 。
 3. 测试的原始数据经指导教师签名后应附在实验报告中。
 4. 心得体会及其它。

实验5 R 、 L 、 C 单个元件阻抗频率特性测试

一. 实验目的

1. 掌握交流电路中 R 、 L 、 C 单个元件阻抗与频率间的关系，测绘 R - f 、 X_L - f 、 X_C - f 特性曲线。
2. 掌握交流电路中 R 、 L 、 C 元件各自的端电压和电流间的相位关系。
3. 观察在正弦激励下， R 、 L 、 C 三元件各自的伏安关系。

二. 实验设备

1. 电路分析综合实验箱
2. 低频信号发生器
3. 双踪示波器

三. 实验原理

1. R 、 L 、 C 单个元件的阻抗频率特性

在正弦激励下， R 、 L 、 C 元件的阻抗与信号的频率有关，其端电压和电流的伏安关系可以表示为：

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I} \angle \phi_u - \phi_i$$

由上式可知，阻抗是复数，其模为端电压和电流有效值（或最大值）之比，其阻抗角为端电压和电流的相位差。

1) 电阻元件

电阻元件在频率较低的情况下，通常可以忽略元件上电感和分布电容的影响，将其看做纯电阻。

则有 $|Z_R| = \frac{U}{I} = R$ ，其阻抗角 $\theta = \angle \phi_u - \phi_i = 0^\circ$ ，因此 $Z_R = R$ 。

2) 电感元件

电感元件是由导线绕制而成的，在频率较低的情况下可以忽略其分布电容的影响，当实验中精度要求不高时，也可以忽略导线的电阻。

则有 $|Z_L| = \frac{U}{I} = \omega L$ ，其阻抗角 $\theta = \angle \phi_u - \phi_i = 90^\circ$ ，因此 $Z_L = j\omega L$ 。

3) 电容元件

电容元件在频率较低的情况下，可以忽略其附加的电感和电容极间介质的功率损耗。

则有 $|Z_C| = \frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C}$ ，其阻抗角 $\theta = \angle \phi_u - \phi_i = -90^\circ$ ，因此 $Z_C = -j\frac{1}{\omega C}$ 。

阻抗频率特性既包含幅频特性，也包含相频特性。由于 R 、 L 、 C 单个元件的端电压和电流间的相位差是固定的，所以，在某一特定频率下可以测其相位差。

2. R 、 L 、 C 单个元件的伏安关系轨迹线

在动态电路中，我们曾经在 $q-u$ 平面上定义线性、时不变电容 C ，而在 $i-\Psi$ 平面上定义线性、时不变电感 L ，它们的伏安关系满足微分和积分关系，因此，对于不同的函数电压（电流），它们的伏安关系不是唯一确定的。下面我们研究在正弦激励下 R 、 L 、 C 单个元件在 $u-i$ 平面上符合什么样的关系。

以电容元件为例，假设加在某电容上的电压为： $u_c = U_m \sin \omega t$

$$\text{则有 } i_c = C \frac{du_c}{dt} = CU_m \omega \cos \omega t = I_m \cos \omega t$$

$$\text{可以得到 } \frac{u_c^2}{U_m^2} + \frac{i_c^2}{I_m^2} = \sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$$

由上式可知，这是一个椭圆方程（特殊情况下是圆），其长、短轴分别表示了电压、电流的最大值，通过示波器的 X-Y 工作方式可以观测这一关系。

四. 实验内容

R 、 L 、 C 单个元件阻抗的测量实际上就是元件端电压与电流的测量。由于阻抗上电压和电流都为向量，因此一般采用双踪示波器来测量。端电压的有效值可以用示波器直接测得，而电流的有效值却无法通过示波器直接测得。因此我们在测量回路中串接一个阻值很小的采样电阻，通过示波器测得其端电压，则流过回路的电流即为采样电阻的端电压与其阻值的比值。需要注意的是采样电阻的阻值应该远远小于回路中的阻抗值，以避免产生较大误差。

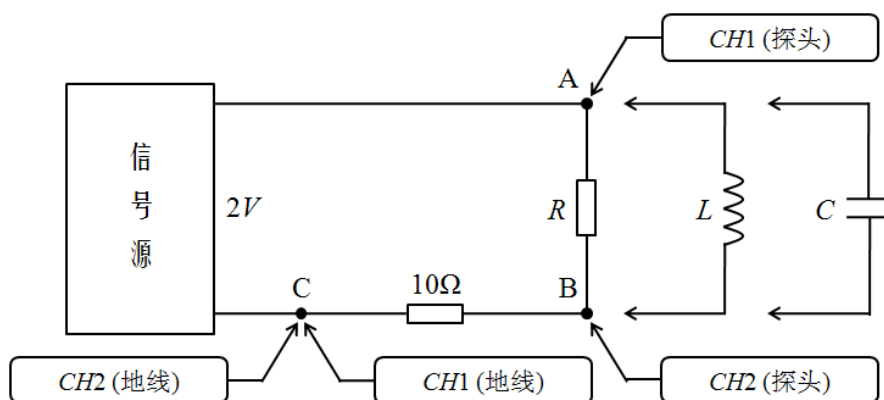


图 3.27

测量 R 、 L 、 C 单个元件端电压与电流的相位差，可以通过测量两个通道上波形的延时时间 Δt 来实现，则两个波形的相位差 $\Delta \phi = \frac{\Delta t}{T} \times 360^\circ$ 。

测试电路如图 3.27 所示， R 、 L 、 C 三个元件分别作为被测元件与 10Ω 采样电阻相串联，其中电阻 $R = 2k\Omega$ ，电感 $L = 2.7mH$ ，电容 $C = 0.1\mu F$ ，信号源输出电压的有效值为 $2V$ 。忽略采样电阻对电路的影响，用示波器的 1 通道 (CH1) 测 AC 间的电压信号，将其视为被测元件的电压信号；用示波器的 2 通道 (CH2) 测 BC 间的电压信号，该信

号与通过被测元件的电流信号只在幅度上相差 10 倍，而相位相等，因此，在相位测量时可以代替被测元件的电流信号。

1. 测绘 R 、 L 、 C 单个元件阻抗频率特性曲线

1) 按照图 3.27 接好线路，利用示波器的自动测量功能监测 1 通道信号源输出电压的幅度。**注意：**信号源输出电压的幅度须始终保持 2V 有效值，即每改变一次输出电压的频率，均须监测其幅度是否为 2V 有效值。

2) 改变信号源的输出频率 f 如表 3.8 所示，利用示波器的自动测量功能监测 2 通道信号的电压有效值，并将测量数据填入表中相应位置。

3) 计算通过被测元件的电流值 I_{AB} 以及阻抗的模 $|Z|$ ，并填入表 3.8 中相应位置。

$$I_{AB} = I_{BC} = \frac{U_{BC}}{10} |Z| = \frac{U_S}{I_{AB}} = \frac{2}{I_{AB}}$$

表 3.8

$f(\text{KHz})$		10	20	30	40	50
$U_S(\text{V})$		2				
$U_{BC}(\text{mV})$	R					
	L					
	C					
$I_{AB}(\text{mA})$	R					
	L					
	C					
$ Z (\text{K}\Omega)$	R					
	L					
	C					

4) 在坐标纸上绘制 R 、 L 、 C 单个元件阻抗频率特性曲线，并将三条曲线画在同一坐标轴中。

2. R 、 L 、 C 单个元件的相位测量

1) 测试电路不变，将信号源输出频率设置为 10kHz，信号源的输出电压有效值仍然保持 2V。

2) 在示波器上观察 R 、 L 、 C 三个元件各自端电压和电流的相位关系，将波形存储到 U 盘，课后打印附在实验报告上，并用文字描述这三个元件各自电压、电流的超前、滞后关系。

3) 利用示波器的光标测量功能测算被测元件端电压和电流的相位差 $\Delta\phi$ ，课后将数据标记在打印的波形图上。

以图 3.28 为例，图中波形表明 CH1 超前 CH2，其相位差 $\Delta\phi = \frac{CD}{AB} \times 360^\circ$ 。

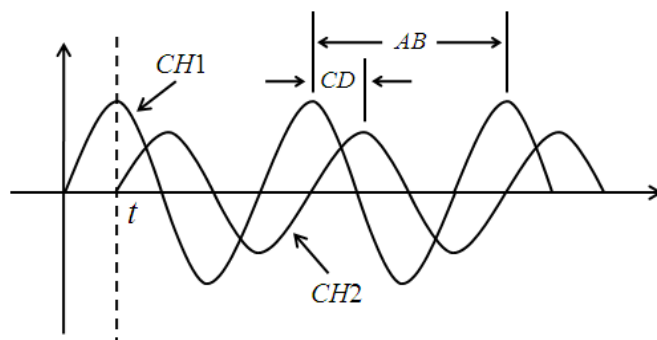


图 3.28

3. R 、 L 、 C 单个元件的伏安关系轨迹线

- 1) 测试电路不变，将信号源输出频率设置为 10kHz，信号源的输出电压有效值仍然保持 2V。
- 2) 将示波器置于 X-Y 工作方式下，直接观察 R 、 L 、 C 单个元件的伏安关系轨迹线，将波形存储到 U 盘，课后打印附在实验报告上。
- 3) 利用示波器的光标测量功能，依据观测到的状态轨迹线，记录图 3.29 中标记的 a、b 的数值，课后将数据标记在打印的波形图上。

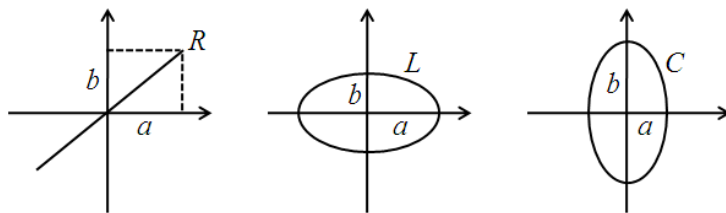


图 3.29

五. 注意事项

1. 开始实验操作前，务必先熟悉示波器的各项基本操作，调节仪器各旋钮、按钮时，不要过快、过猛。
2. 测量参数时，在需要监测的时间周期内，应尽量将被测波形放大，以减少测量误差。示波器测量参数时，需根据测量需要，选择适当的横纵坐标，以使信号以最好的形态显示，从而实现减少测量误差的目的。
3. 在示波器的操作过程中，当没有外接信号时，不要将示波器长时间置于 X-Y 工作方式下，这样会使光点聚集在一点，即电子束长时间轰击屏幕上一点，容易在荧光屏上形成暗斑，损坏荧光屏。
3. 正弦信号发生器的接地端必须与示波器的接地端连在一起（称共地），以防外界干扰而影响测量准确性。

六. 预习思考题

1. R 、 L 、 C 单个元件阻抗与频率的变化特点是什么？

-
2. 为什么测量电路中要串联一个采样电阻，其作用是什么？
 3. 依据给定的参数，计算图 3.29 中 a、b 的理论值？

七. 实验报告要求

1. 将示波器上观测到的波形存储到 U 盘，课后打印附在实验报告上。
2. 将实验中记录的相关测量数据标记在打印的波形图上。
3. 阻抗频率特性曲线必须用坐标纸绘制
4. 测试的原始数据经指导教师签名后应附在实验报告中。
5. 心得体会及其它。