

哈尔滨工业大学（深圳）

电路实验 IB 实验指导书

2019 年春

编者：赵飞、王丹丹

要求：请按“实验指导书”要求做实验。实验前，请预习，完成实验报告的预习部分，实验后，整理数据，完成实验报告的其他部分

目录

实验一 $R-L-C$ 元件的阻抗特性、谐振电路及 RC 选频网络特性	1
1.1 实验目的	1
1.2 实验预习要求	1
1.3 实验仪器与器件	1
1.4 实验原理	2
1.4.1 RLC 串联谐振	2
1.4.2 RC 选频网络	4
1.5 实验步骤	5
1.5.1 测量电阻的阻抗特性	6
1.5.2 测量电感元件的阻抗特性	6
1.5.3 测量电容的阻抗特性	7
1.5.4 谐振电路	7
1.5.5 RC 选频网络测试	10
1.6 实验注意事项	10
1.7 实验思考题	11
1.8 故障分析与检查排除	11
1.9 实验报告要求	11
实验二 RC 一阶电路响应研究及 RLC 二阶电路响应研究	12
2.1 实验目的	12
2.2 实验预习要求	12
2.3 实验仪器与器件	12
2.4 实验原理	13
2.4.1 RC 一阶电路	13
2.4.2 二阶电路	15
2.5 实验步骤	16
2.6 实验注意事项	20
2.7 实验思考题	20
2.8 故障分析与检查排除	20
2.9 实验报告要求	21
实验三 二端口网络	22
3.1 实验目的	22
3.2 实验预习要求	22
3.3 实验仪器与器件	22
3.4 实验原理	22
3.4.1 二端口网络参数的测量	22
3.4.2 二端口网络的级联	26
3.4.3 二端口网络互易对称特性的测量	27
3.4.4 二端口网络的等效电路	27
3.5 实验步骤	28
3.5.1 二端口网络参数的测量与级联	28

3.5.2 二端口网络互易对称性的测量.....	29
3.5.3 二端口网络等效电路	30
3.5.4 自主设计性小实验	30
3.6 实验注意事项	31
3.7 故障分析与检查排除	31
3.8 实验思考题	31
3.9 实验报告要求	31
实验四 PSpice 仿真实验 1（基础电路与动态电路时域分析）	33
4.1 实验目的	33
4.2 实验预习要求	33
4.3 实验仪器与器件	33
4.4 实验原理	33
4.5 实验步骤	34
4.5.1 直流电路	34
4.5.2 正弦电路	41
4.5.3 动态电路时域分析	42
4.5.4 仿真验证	44
4.6 实验思考题	44
4.7 实验注意事项	44
4.8 故障分析与检查排除	44
4.9 实验报告要求	44
实验五 PSpice 仿真实验 2（非线性电路和均匀传输线分析）	45
5.1 实验目的	45
5.2 实验预习要求	45
5.3 实验仪器与器件	45
5.4 实验原理	45
5.5 实验步骤	46
5.6 实验注意事项	49
5.7 故障分析与检查排除	49
5.8 实验报告要求	50
实验六 自主学习模式下探究型实验的研究	51
6.1 制定实验方案	51
6.2 实验器件和仪器设备的选择	52
6.3 实验要求	52

实验一 $R-L-C$ 元件的阻抗特性、谐振电路及 RC 选频网络特性

1.1 实验目的

1. 通过实验进一步理解 R, L, C 的阻抗特性，并且练习使用信号发生器和示波器。
2. 了解谐振现象，加深对谐振电路特性的认识，研究电路参数对串联谐振电路特性的影响。
3. 理解谐振电路的选频特性及应用，掌握测试通用谐振曲线的方法。
4. 加深理解 RC 选频网络的选频特性，测量 RC 网络的选频特性。

1.2 实验预习要求

1. 复习本实验中所涉及的串联谐振、频率特性及 RC 选频网络相关的理论知识；完成实验报告中的相关内容。预习本次实验的目的、意义、实验原理及实验电路。完成实验报告中的内容：实验的目的、实验原理，实验指导书要求的理论计算数据。
2. 预习实验中所用到的函数信号发生器、示波器、交流电压表等实验仪器的使用方法及注意事项。

1.3 实验仪器与器件

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	交流毫伏表	1 台	SM2030A
4	万用表	1 台	FLUKE 17B+
5	电阻	若干	$1\Omega \times 1$ $100\Omega \times 15$ $10\Omega \times 1$ $2k\Omega \times 1$ $15k\Omega \times 2$
6	电感	1 只	$10mH \times 1$
7	电容	若干	$1\mu F \times 1$ $2200pF \times 1$ $0.01\mu F \times 2$
8	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
9	实验用 9 孔插件方板	1 块	$300mm \times 298mm$

1.4 实验原理

1.4.1 RLC 串联谐振

1. 正弦交流电路中，电感的感抗 $X_L = \omega L = 2\pi fL$ ，空心电感线圈的电感在一定频率范围内可认为是线性电感，当其电阻值 r 较小，有 $r \ll X_L$ 时，可以忽略其电阻的影响。电容器的容抗 $X_C = 1 / \omega C = 1 / 2\pi fC$ 。

当电源频率变化时，感抗 X_L 和容抗 X_C 都是频率 f 的函数，称之为频率特性（或阻抗特性）。典型的电感元件和电容元件的阻抗特性如图 1-1。

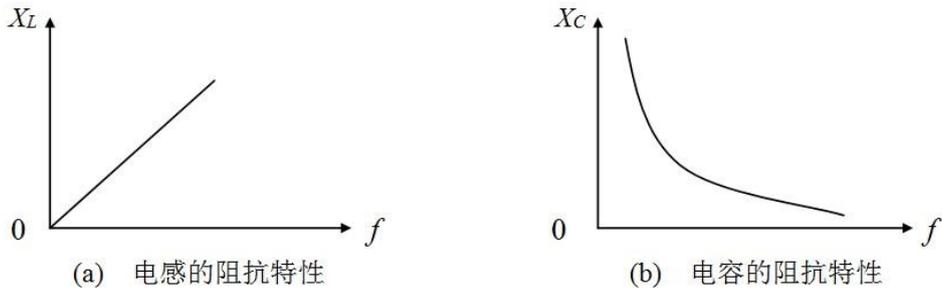


图 1-1 典型元件的频率特性曲线

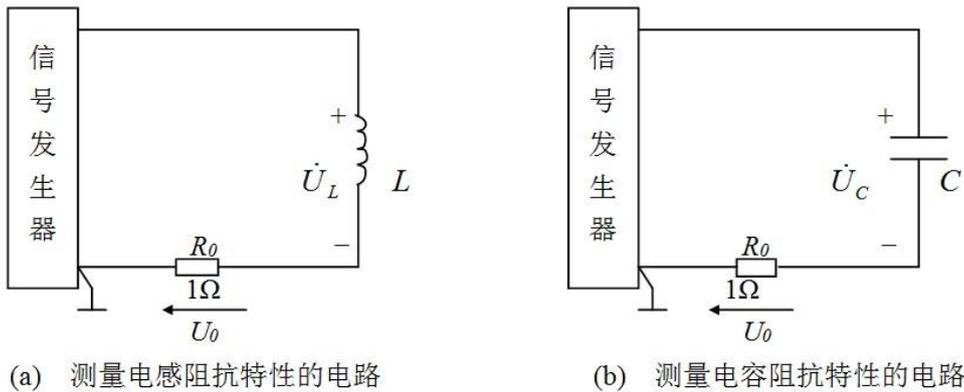


图 1-2 测量典型元件的电路图

2. 为了测量电感的感抗和电容的容抗，可以测量电感和电容两端的电压有效值及流过它们的电流有效值。则感抗 $X_L = U_L / I_L$ ，容抗 $X_C = U_C / I_C$ 。

当电源频率较高时，用普通的交流电流表测量电流会产生很大的误差，为此可以用交流毫伏表进行间接测量得出电流值。在图 1-2 的电感和电容电路中串入一个阻值较准确的取样电阻 R_0 ，先用毫伏表测量取样电阻两端的电压值，再换算成电流值。如果取样电阻取为 1Ω ，则毫伏表的读数即为电流的值，这样小的电阻在本次实验中对电路的影响是可以忽略的。

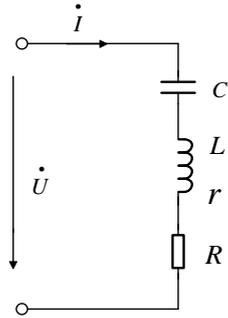


图 1-3 R、L、C 串联电路

在图 1-3 所示的 RLC 串联电路中，当外加角频率为 ω 的正弦电压 \dot{U} 时，电路中的电流为

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R' + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$

式中， $R' = R + r$ ， r 为线圈电阻。当 $\omega L = 1/\omega C$ 时，电路发生串联谐振，谐振频率为： $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。

此式即为产生串联谐振的条件。可见，改变 L 、 C 或电源频率 f 都可以实现谐振。本次实验是通过改变外加电压的频率使电路达到谐振的。

串联谐振有以下特征：

1) 谐振时电路的阻抗最小，而且是纯电阻性的，即

$$Z_0 = R' + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \Big|_{\omega=\omega_0} = R'$$

此时谐振电流 \dot{I} 与电压 \dot{U} 同相位，且 $I_0 = U/R'$ 为最大值。本次实验就是依据这种特征来找谐振点的。

2) 谐振时有 $U_L = U_C$ ，电路的品质因数 Q 为

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 L}{R'} = \frac{1}{\omega_0 C R'} = \frac{\sqrt{L/C}}{R'}$$

RLC 串联电路中的电流与外加电压角频率 ω 之间的关系称为电流的幅频特性，即

$$I(\omega) = \frac{U}{\sqrt{R'^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

为了便于比较，将上式中的电流及频率均以相对值 I/I_0 及 f/f_0 表示，则

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 (\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})^2}}$$

图 1-4 为 I/I_0 与 f/f_0 的关系曲线，又称通用串联谐振曲线。可见谐振时电流 I_0 的大小与 Q 值无关，而在其他频率下， Q 值越大，电流越小，串联谐振曲线的形状越尖，说明选择性越好。曲线中 $I/I_0 = 1/\sqrt{2}$ 时，对应的频率 f_2 （上限频率）和 f_1 （下限频率）之间的宽度为通频带 Δf ， $\Delta f = f_2 - f_1$ 。由图 1-4 可见， Q 值越大，通频带越窄，电路的选择性越好。

电路的阻抗角 φ 与频率的关系称为相频特性，特性曲线如图 1-4 所示。

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

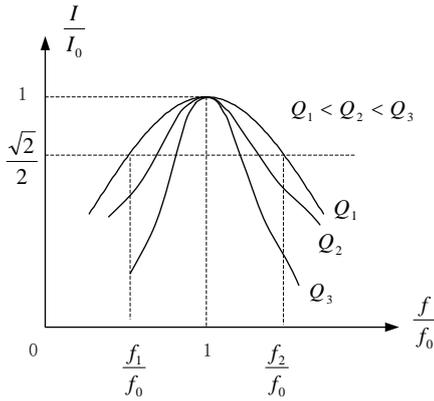


图 1-4 串联谐振曲线

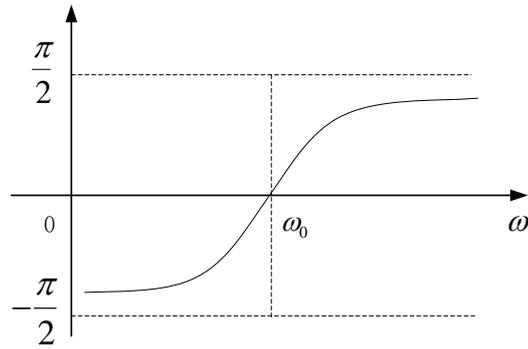


图 1-5 相频性曲线

1.4.2 RC 选频网络

如图 1-6 所示的 RC 串、并网络由 R_1C_1 串联及 R_2C_2 并网络组成，一般取 $R_1=R_2=R$ ， $C_1=C_2=C$ 。该电路输入信号 U_i 的频率变化时，其输出信号幅度 U_0 随着频率的变化而变化。

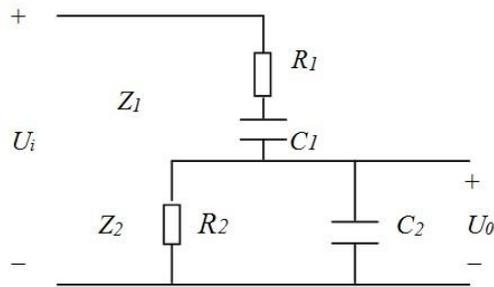


图 1-6 RC 选频网络

用 Z_1 表示串联网络的阻抗，用 Z_2 表示并联网络的阻抗，则有：
输出信号：

$$U_0 = U_i \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

可以得到：

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}\right) + j\left(\omega C_2 R_1 - \frac{1}{\omega C_1 R_2}\right)}$$

在实验中取 $R_1=R_2=R$ ， $C_1=C_2=C$ ，则上式变为：

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$$

代入 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ ，得到：

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{1}{3 + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})}$$

若用电压传递系数 K 表示 U_0 的模值，则：

$$K = \left| \frac{U_0}{U_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2}}$$

对应于不同的频率 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ，可以画出 RC 串、并联网路的选频特性曲线，如图 1-7 所示。

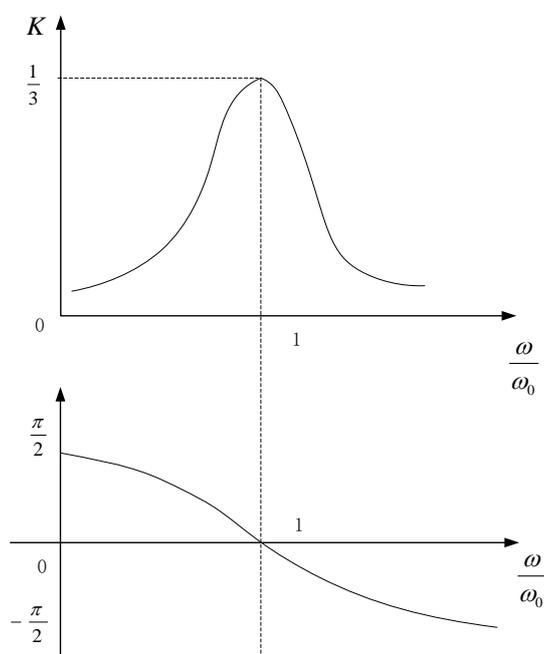


图 1-7 RC 选频网络的频率特性

可见，当频率为 ω_0 时，幅频特性有最大值 $\frac{1}{3}$ ，相频特性为 0。这正是称之为选频网络的原因所在。图 1-7 中，当 $\omega > \omega_0$ ($\omega/\omega_0 > 1$) 时，电路呈感性；当 $\omega < \omega_0$ ($\omega/\omega_0 < 1$) 时，电路呈容性；当 $\omega = \omega_0$ ($\omega/\omega_0 = 1$) 时， $K = K_0 = \frac{1}{3}$ ，达到最大值，所以 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 为谐振频率。

1.5 实验步骤

注意事项：为了使信号发生器有足够的拖动能力，本次实验将信号发生器接为放大模式，其输出电压幅值为设定的二倍，例如设置输出 $1V_{rms}$ ，实际输出电压为 $2V_{rms}$ 。

1.5.1 测量电阻的阻抗特性

按图 1-8 连线，按表 1-1 所示数据调节函数发生器输出正弦电压的频率（从低到高），使用交流毫伏表分别测量 U_R 、 U_0 ，计算出 I_R 的值记入表 1-1 中。注意每次改变信号源频率时，应保证信号发生器输出正弦电压保持在 $2V_{rms}$ （函数发生器的信号设置为 $1V_{rms}$ ），测试 I_R 是由测上面的电压 U_0 得到的，应正确选择量程。

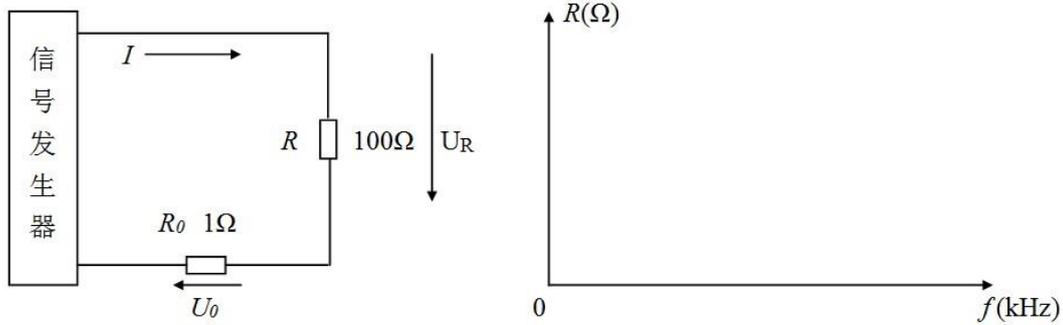


图 1-8 测量电阻阻抗特性的电路

绘制电阻阻抗特性曲线

表 1-1 测量电阻阻抗特性实验数据

频率 $f(\text{kHz})$		0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	8.0	10	12
测量值	$U_R(\text{V})$								
	$U_0(\text{mV})$								
计算值	$I_R(\text{mA})$								
	$R(\Omega)$								

根据表 1-1 中的实验数据，在上面的坐标平面内绘制 $R=F(f)$ 阻抗特性曲线。

1.5.2 测量电感元件的阻抗特性

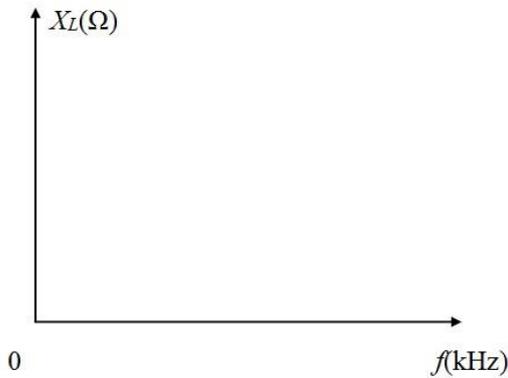
按图 1-2(a) 接线。调节信号发生器输出正弦电压为 $2V_{rms}$ ，选取 L 为 10mH ， R_0 仍取 1Ω 。按表 1-2 所示数据改变信号发生器的输出频率。分别测量 U_L 、 U_0 的值记入表 1-2 中，并注意每次改变电源频率时应调节信号发生器的输出电压保持不变。然后，根据 $I_L = U_0 / R_0$ ， $X_L = U_L / I_L$ 两式将计算结果填入表 1-2 中。

表 1-2 测量电感元件阻抗特性实验数据

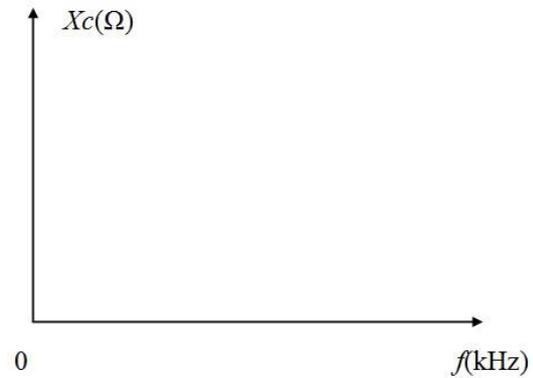
频率 $f(\text{kHz})$		0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	8.0	10	12
测量值	$U_L(\text{V})$								
	$U_0(\text{V})$								
计算值	$I_L(\text{mA})$								

	$X_L(\Omega)$								
--	---------------	--	--	--	--	--	--	--	--

根据表 1-2 中的实验数据，在下面的坐标平面内 $X_L=F(f)$ 阻抗特性曲线。



绘制电感阻抗特性曲线



绘制电容阻抗特性曲线

1.5.3 测量电容的阻抗特性

按图 1-2(b) 接线。调节信号发生器输出正弦电压为 $2V_{rms}$ ，选取 C 为 $1\mu F$ ， R_0 不变，取 1Ω 。按表 1-3 所示数据改变信号发生器的输出频率。分别测量 U_C ， U_0 的值记入表 1-3 中，相应调节信号源输出电压保持在 $2V_{rms}$ 。再根据 $I_C = U_0 / R_0$ ， $X_C = U_C / I_C$ 两式将计算结果填入表 1-3 中。根据表 1-3 中的实验数据，在上面的坐标平面内 $X_C=F(f)$ 阻抗特性曲线。

表 1-3 测量电容元件阻抗特性实验数据

频率 $f(\text{kHz})$		0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	8.0	10	12
测量值	$U_C(\text{V})$								
	$U_0(\text{V})$								
计算值	$I_C(\text{mA})$								
	$X_C(\Omega)$								

1.5.4 谐振电路

1. 寻找谐振频率，验证谐振电路的特点

按图 1-9 接线。 R 取 51Ω ， L 取 10 mH ， C 取 $0.022\mu F$ （谐振频率为 10kHz 左右），信号发生器的输出正弦电压保持在 1 V_{rms} （用交流毫伏表监测）。用毫伏表测量电阻 R 上的电压，因为 $U_R = RI$ ，当 R 一定时， U_R 与 I 成正比，电路谐振时的电流 I 最大，电阻电压 U_R 也最大。细心调节输出电压的频率，使 U_R 为最大，电路即达到谐振（调节前可先计算谐振频率作为参考），测量电路中的电压 U_R 、 U_L 、 U_C ，并读取谐振频率 f_0 ，记入表 1-4 中，同时记下元件参数 R 、 L 、 C 的实际数值。

注意：信号源不允许短路！！

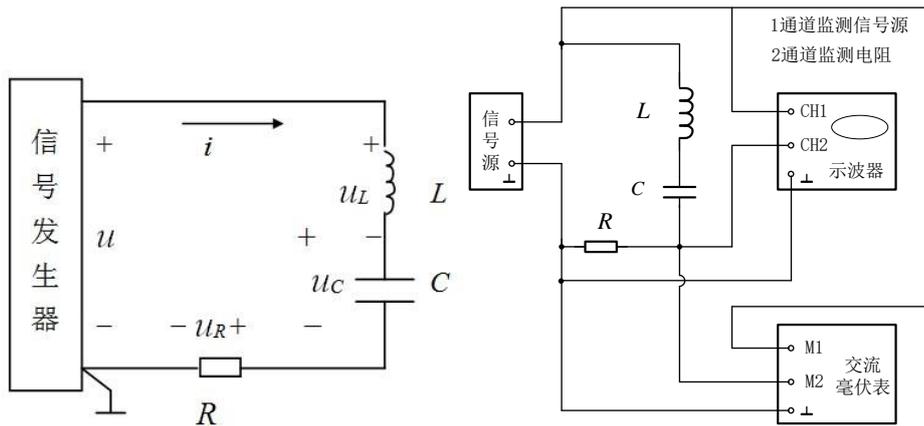


图 1-9 串联谐振实验线路

表 1-4 串联谐振实验数据表格

$R =$	$L =$	$C =$
$U_R =$	$U_L =$	$U_C =$
$f_0 =$	$I_0 = U_R/R =$	$Q =$

2. 测定谐振曲线

实验线路同图 1-9，使得信号发生器输出正弦电压 $1V_{rms}$ ，在谐振频率两侧调节输出电压的频率（每次改变频率后均应重新调整输出电压至 $1V_{rms}$ ），电路中 R 为 100Ω ，分别测量各频率点的 U_R 值，记录于表 1-5 中（在谐振点附近要多测几组数据）。在将图 1-9 实验电路中的电阻 R 更换为 510Ω ，重复上述的测量过程，记录于表 1-6 中。最后整理数据，用坐标纸画出其谐振曲线。

表 1-5 谐振曲线数据表格（一） $U = \underline{\hspace{2cm}} (V)$

$R=100\Omega$ 、 $L=$ 、 $C=$ 、 $Q=$													
f							$f_0=$						
U_R													
I													
I/I_0													
f/f_0													

表 1-6 谐振曲线数据表格（二） $U = \underline{\hspace{2cm}} (V)$

$R=510\Omega$ 、 $L=$ 、 $C=$ 、 $Q=$													
f							$f_0=$						
U_R													
I													
I/I_0													
f/f_0													

3. 用示波器观测 R-L-C 串联谐振电路中电流和电压的相位关系

按图 1-10 接线， R 取 510Ω ，电路中 A 点的电位送入双踪示波器的 Y_A (CH1) 通道，它显示出电路中总电压 u 的波形。将 B 点的电位送入双踪示波器的 Y_B (CH2) 通道，它显示出电阻 R 上的波形，此波形与电路中电流 i 的波形相似，因此可以直接把它看作电流 i 的波形。示波器和信号发生器的接地端必须连接在

一起。信号发生器的输出频率取谐振频率 f_0 ，输出电压取 $1V_{rms}$ ，调节示波器使屏幕上获得 2 至 3 个波形，将电流 i 和电压 u 的波形描绘下来。再在 f_0 左右各取一个频率点，信号发生器输出电压仍保持 $1V_{rms}$ ，观察并描绘 i 和 u 的波形。调节信号发生器的输出频率，在 f_0 左右缓慢变化，观察示波器屏幕上 i 和 u 波形的相位和幅度的变化，并分析其变化原因。

变化的原因：

注意：示波器的两个探头的负是通过示波器内部接在一起的，所以测试时也只能测试同一个电位点，注意测试时示波器的两个探头的两端不能碰在一起，短路。

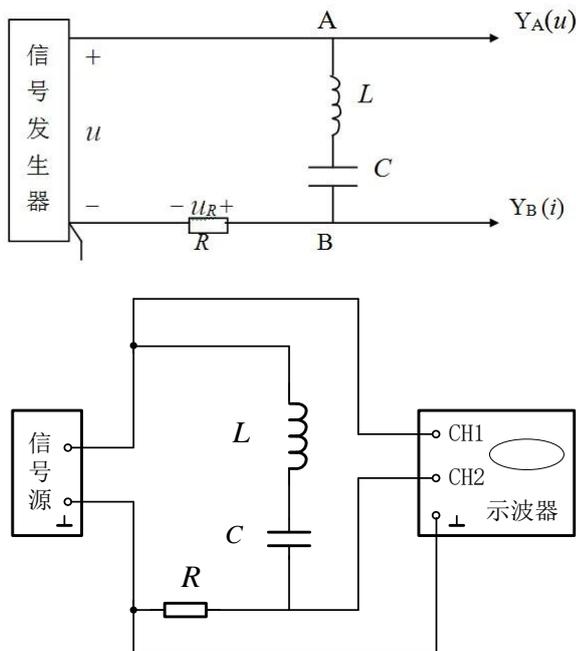
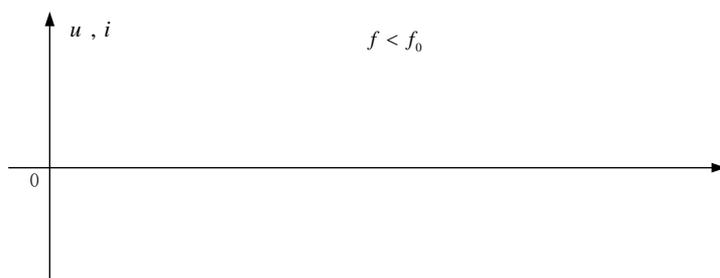
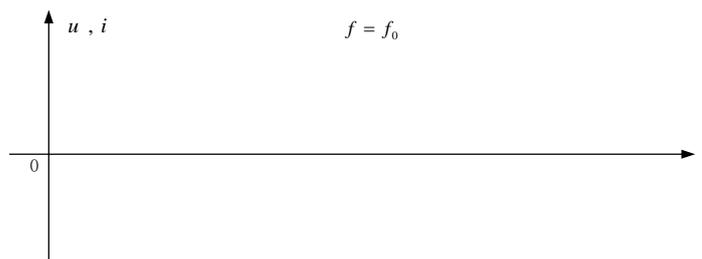
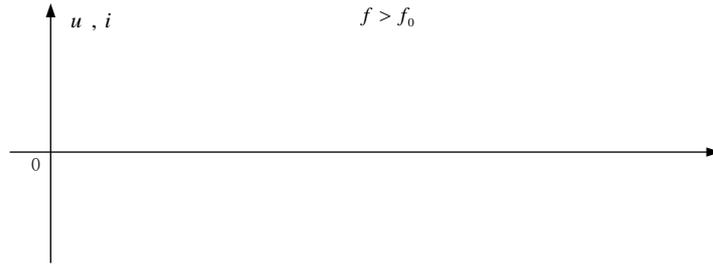


图 1-10 观测电流和电压间相位差实验线路图

i 和 u 的波形图：





1.5.5 RC 选频网络测试

按图 1- 11 接线，将低频信号源接到网络的输入端 AD，输出端 CD 接到毫伏表上。 R_1, R_2 取 $15k\Omega$ ， C_1, C_2 取 $0.01\mu F$ ($10nF$)。

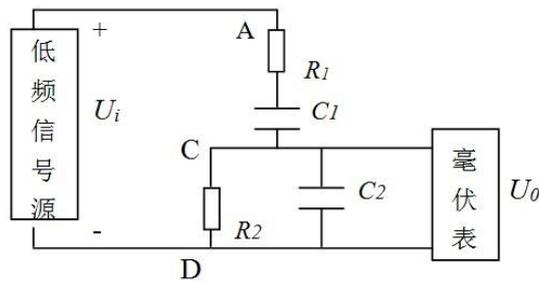


图 1- 11 测量选频特性实验线路

保持信号源输出电压 $U_S = 1V_{rms}$ ($V_{set} = 0.5V_{rms}$)，改变信号频率 f ，用毫伏表测量相应频率点的输出电压 U_0 ，记录数据并填入表 1- 7。根据电路参数计算出谐振频率 f_0 ，填入表中。自选频率 f ，测出其对应的电压 U_0 ，填入表 1- 8 中。最后整理数据，用坐标纸画出其幅频特性曲线。

表 1- 7 测量选频特性实验数据 (一) $U_i = \underline{\hspace{2cm}} (V)$

$f(Hz)$	100	500	800	900	1000	1200	1500	1800	2000
U_0									
$K = U_0 / U_i$									

表 1- 8 测量选频特性实验数据 (二) $U_i = \underline{\hspace{2cm}} (V)$

$f(Hz)$						f_0				
U_0										
$K = U_0 / U_i$										

1.6 实验注意事项

1. 遵守实验室的各项规章制度。
2. 在实验过程中不允许带电换线、换元件。
3. 做完每一项实验时要请指导老师检查数据，签字，方可进行下一步实验。
4. 全部实验做完后，关掉电源，拆线，整理实验台，物归原处，方可离开实验室。

5. 用交流毫伏表调好信号源的输出电压 $1V_{\text{rms}}$ ，信号源才能接入电路。
6. 谐振曲线的测定要在电源电压保持不变的条件下进行，因此，调节信号源频率时要保持信号幅度不变。
7. 为了使谐振曲线的顶点绘制精确，可以在谐振频率附近多选几组测量数据。
8. 对于 RC 选频网络，频率较低，调试时应选用低频信号源。
9. 由于元件参数均为标称值，所以由公式 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 所得的频率有误差。

1.7 实验思考题

1. 根据表 1-2，表 1-3 的实验数据计算 L 和 C 的值，结果与标称值是否一致，为什么？
2. 用实验数据或现象说明 $R-L-C$ 串联谐振的主要特征。
3. 总结 RC 选频网络的工作原理。

1.8 故障分析与检查排除

(1) 实验中常见故障

- ①连线：连线错，接触不良，断路或短路；
- ②元件：元件错或元件值错，包括电源输出错；
- ③参考点：电源、实验电路、测试仪器之间公共参考点连接错误等等。

(2) 故障检查

故障检查方法很多，一般是根据故障类型，确定部位、缩小范围，在小范围内逐点检查，最后找出故障点并给予排除。简单实用的方法是用万用表（电压档或电阻档）在通电或断电状态下检查电路故障。

①通电检查法：用万用表的电压档（或电压表），在接通电源情况下，根据实验原理，电路某两点应该有电压，万用表测不出电压；某两点不应该有电压，而万用表测出了电压；或所测电压值与电路原理不符，则故障即在此两点间。

②断电检查法：用万用表的电阻档（或欧姆表），在断开电源情况下，根据实验原理，电路某两点应该导通无电阻（或电阻极小），万用表测出开路（或电阻极大）；某两点应该开路（或电阻很大），但测得的结果为短路（或电阻极小），则故障即在此两点间。

1.9 实验报告要求

1. 实验步骤、过程需要写在实验报告上；
2. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，曲线等必须手写，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
3. 由数据得出的曲线在实验后完成，并画在坐标纸上，贴在报告中。
4. 实验结果分析及实验结论要根据实验结果给出。
5. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。
6. 实验思考题需要写在实验报告里面。

实验二 RC 一阶电路响应研究及 RLC 二阶电路响应研究

2.1 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。

2.2 实验预习要求

1. 复习一阶动态电路时域分析理论，了解时间常数 τ 与电路参数的关系。
2. 复习二阶动态电路时域分析理论，掌握二阶电路 3 种状态下的 RLC 的关系式及欠阻尼状态下衰减系数与振荡角频率表达式。完成实验报告中的内容：实验的目的、实验原理，实验指导书要求的理论计算数据
3. 预习实验中所用到的函数信号发生器、示波器等实验仪器的使用方法及注意事项。

2.3 实验仪器与器件

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	$10\Omega\times 1$ $51\Omega\times 1$ $150\Omega\times 1$ $1k\Omega\times 1$ $2.4k\Omega\times 1$ $15k\Omega\times 1$ $33k\Omega\times 1$
7	电感	1 只	$10mH\times 1$
8	电容	若干	$0.01\mu F\times 2$ $10\mu F\times 1$ $100\mu F\times 1$ $1000\mu F\times 1$
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	$300mm\times 298mm$

2.4 实验原理

2.4.1 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 u_c 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。

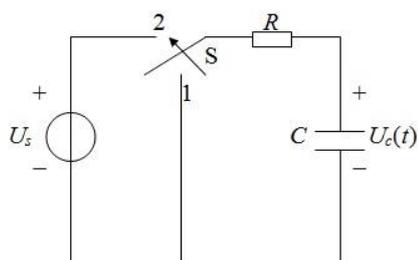


图 2-1 一阶 RC 电路

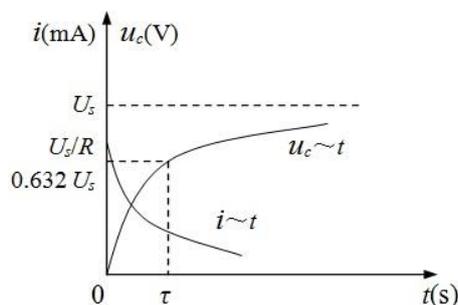


图 2-2 RC 充电时电压和电流的变化曲线

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。

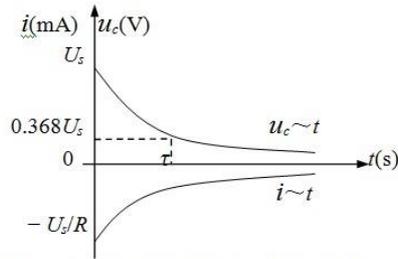


图3 RC 放电时电压和电流的变化曲线

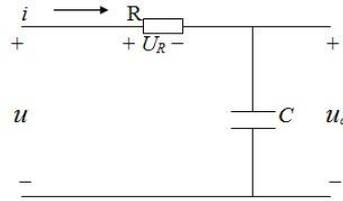


图4 RC 充放电电路

图 2-3 RC 放电电压和电流变化曲线

图 2-4 RC 充放电电路

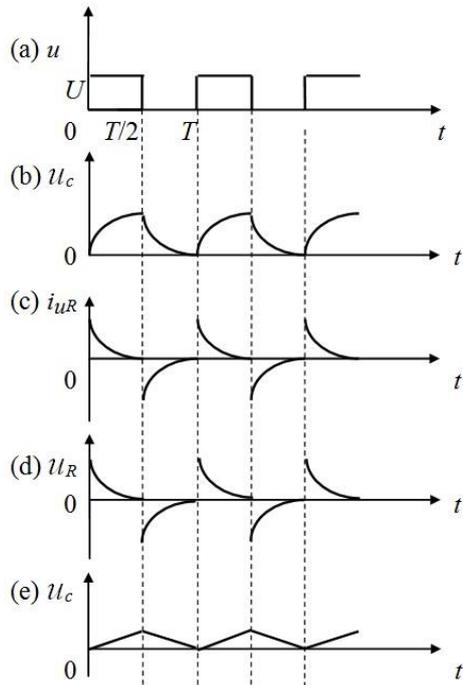


图 2-5 RC 充放电电路的电流和电压波形

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。

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。

2.4.2 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：

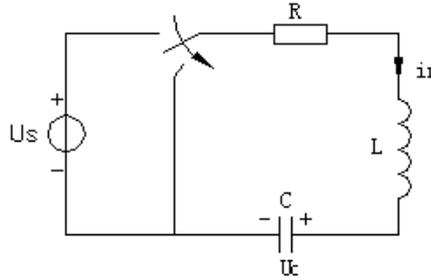


图 2-6 R 、 L 、 C 串联电路

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

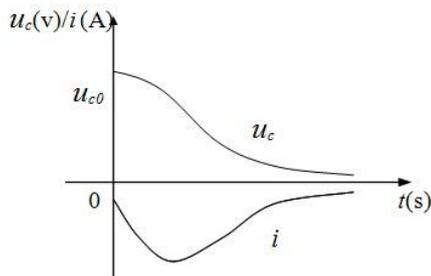
上式 (1) 中：每一项均为电压，第一项是电感上的电压 U_L ，第二项是电阻上的电压 U_R ，第三项是电容上的电压 U_C ，即回路中的电压之和为零。各项都是电容上电流 i_c 的函数。这里是二阶方程。

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 。

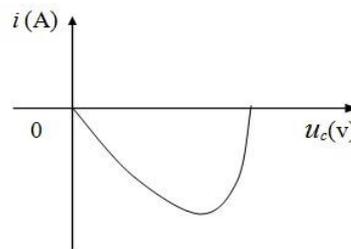
上式 (3) 中，电容上电压对时间的变化率等于电感上电流对时间的变化率，都等于零，即电容上电压不能突变，电感上电流不能突变。

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。



(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。

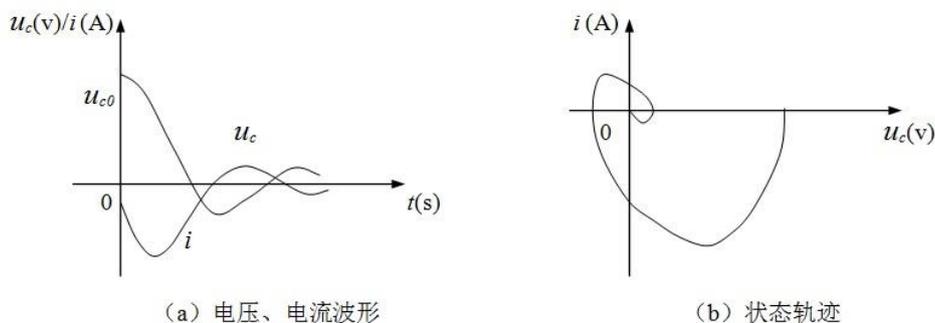


图 2-8 欠阻尼状态 R 、 L 、 C 串联电路电压、电流波形及其状态轨迹

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 $\delta = \omega_0$, $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = 0$, 暂态过程介于非周期与振荡之间, 其本质属于非周期暂态过程。

2.5 实验步骤

要求: 下面所有的波形, 都需要画 1-2 个周期。

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 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。

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 $u_c = f(t)$ 。

注意事项:

如果在充电过程中计数出错, 可以将开关打到 2 处, 将 R 更换为 100 欧姆电阻, 快速放电, 然后更换电阻, 重新测量。如果在放电过程中计数出错, 可以将开关打到 1 处, 将 R 更换为 100 欧姆电阻, 快速充电, 然后重新测量。

在更换电路参数时, 输入要断电!

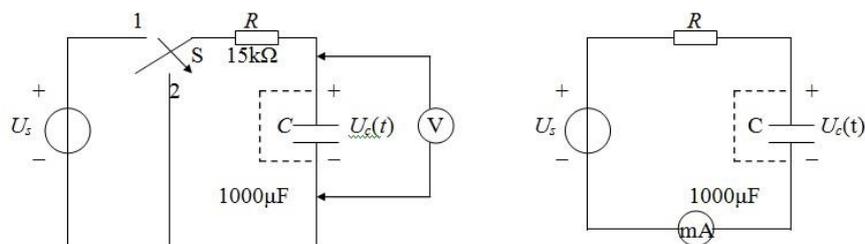


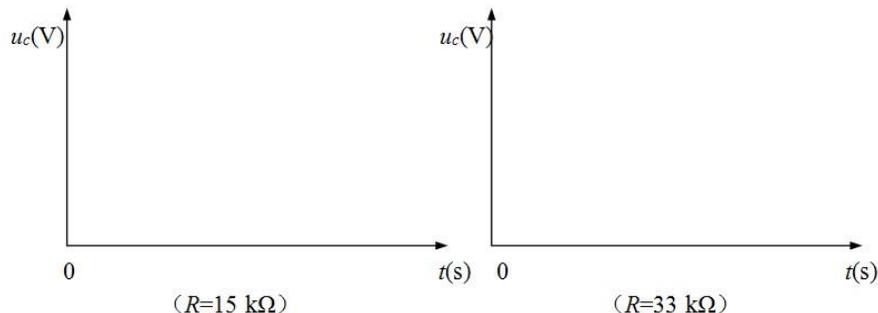
图 2-9 RC 充电电路（测 u_c 变化规律）实验线路 图 2-10 RC 充放电电路（测 i 变化规律）实验线路

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														
$u_c(\text{V})$ 放电														

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														
$u_c(\text{V})$ 放电														



2. *测定 RC 电路充电过程中电流的变化规律（选做）

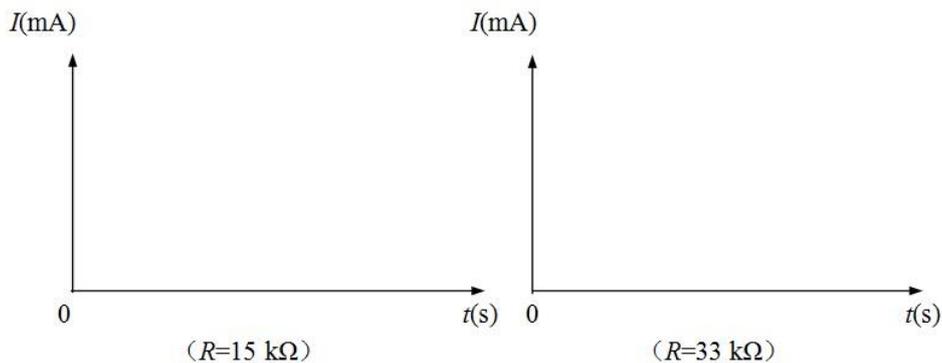
1) 实验线路如图 2-10，电阻 R 取 $15\text{ k}\Omega$ ，电容 C 取 $1000\mu\text{F}$ ，直流稳压电源的输出电压取 10V ，万用表置电流 mA 档（注意万用表的接线），将万用表串联于实验线路中。首先用导线将电容 C 短接，使电容内部的电放光，在拉开电容两端连接导线的一端同时计时，记录下充电时间分别为 5s ， 10s ， 20s ， 25s ， 30s ， 35s ， 40s ， 45s 时的电流值，将数据记录于表 2-3。

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。

表 2-3 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
$R=15\text{ k}\Omega \quad C=1000\mu\text{F}$										
$R=33\text{ k}\Omega \quad C=1000\mu\text{F}$										

(3) 根据表 2-3 中所列的数据，以充电电流 I 为纵坐标，充电时间为横坐标，绘制 RC 电路充电电流曲线 $I=f(t)$ 。



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 u_c 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。 ($U_s=10\text{V}$)

充电过程中: 计算: $63.2\%U_s=$ _____ ; 测量: $\tau_1=$ _____ ;

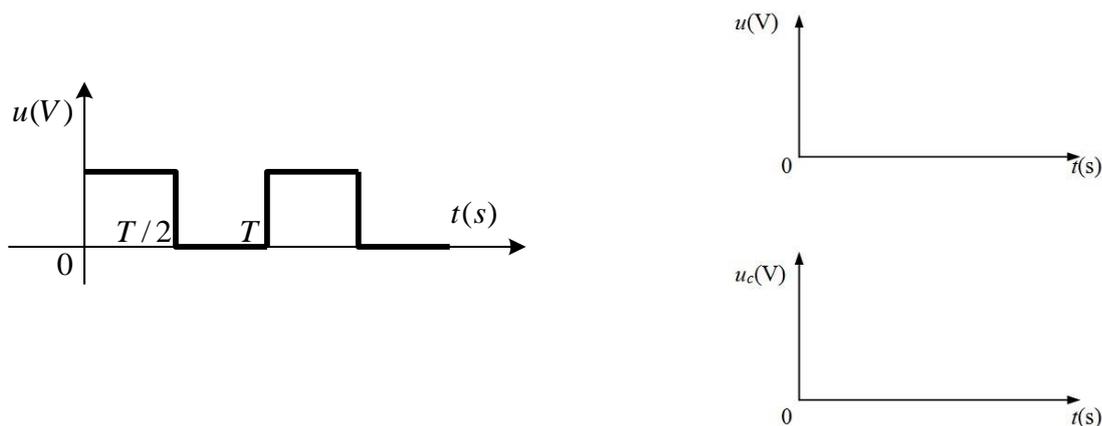
放电过程中: 计算: $36.8\%U_s=$ _____ ; 测量: $\tau_2=$ _____。

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。 $\tau_3=$ _____ ;
 $\tau_4=$ _____

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 $R=3\text{ k}\Omega$, 观察电压 u_c 波形的变化, 分析其原因。

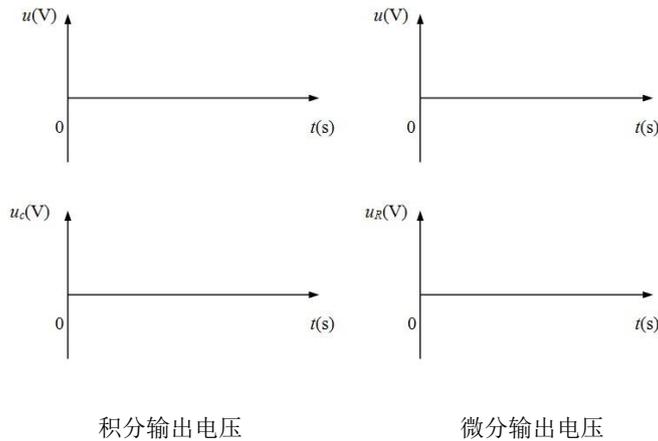
方波电压波形如下, 如下所示:



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 $U_S=1V_{p-p}$, $f=500Hz$, 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_{p-p} 和 V_{rms} 设置下，波形的区别

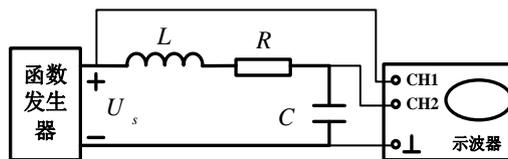


图 2-11 二阶电路实验接线图

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。

表 2-4 二阶电路实验数据 (一) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

	$L=10mH$ $C=0.02\mu F$ $f_0 =$		
	$R_1=51\Omega$	$R_2=1k\Omega$	$R_3=2.4k\Omega$
$\delta = \frac{R}{2L}$			
$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$			/
电路状态			
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 $U_S=1V_{p-p}$, $f=500Hz$, 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。

表 2-5 二阶电路实验数据 (二) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

	$L=10\text{mH}$	$C=0.02\mu\text{F}$	$f_0 =$
	$R_1=10\Omega$	$R_2=150\Omega$	$R_3=330\Omega$
$\delta = \frac{R}{2L}$			
$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$			
电路状态			
波形			

2.6 实验注意事项

1. 遵守实验室的各项规章制度。
2. 在实验过程中不允许带电换线、换元件。
3. 做完每一项实验时要请指导老师检查数据，签字，方可进行下一步实验。
4. 全部实验做完后，关掉电源，拆线，整理实验台，物归原处，方可离开实验室。
5. 当使用万用表测量变化中的电容电压时，不要换档，以保证电路的电阻值不变。
6. 秒表计时和电压/电流表读数要互相配合，尽量做到同步。
7. 电解电容器有正负极性，使用时切勿接错。
8. 每次做 RC 充电实验前，都要用导线短接电容器的两极，以保证其初始电压为零。

2.7 实验思考题

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？

2.8 故障分析与检查排除

(1) 实验中常见故障

- ①连线：连线错，接触不良，断路或短路；
- ②元件：元件错或元件值错，包括电源输出错；

③参考点：电源、实验电路、测试仪器之间公共参考点连接错误等等。

(2) 故障检查

方法很多，一般是根据故障类型，确定部位、缩小范围，在小范围内逐点检查，最后找出故障点并予以排除。简单实用的方法是用万用表（电压档或电阻档）在通电或断电状态下检查电路故障。

①通电检查法：用万用表的电压档（或电压表），在接通电源情况下，根据实验原理，电路某两点应该有电压，万用表测不出电压；某两点不应该有电压，而万用表测出了电压；或所测电压值与电路原理不符，则故障即在此两点间。

②断电检查法：用万用表的电阻档（或欧姆表），在断开电源情况下，根据实验原理，电路某两点应该导通无电阻（或电阻极小），万用表测出开路（或电阻极大）；某两点应该开路（或电阻很大），但测得的结果为短路（或电阻极小），则故障即在此两点间。

2.9 实验报告要求

1. 步骤、过程需要写在实验报告上；
2. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，曲线等必须手写，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
3. 由数据得出的曲线在实验后完成，并画在坐标纸上，贴在报告中。
4. 实验结果分析及实验结论要根据实验结果给出。
5. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。
6. 实验思考题需要写在实验报告里面。

实验三 二端口网络

3.1 实验目的

1. 掌握二端口参数测定的一般方法；
2. 理解交流参数测量的方法在二端口参数测量中的应用。

3.2 实验预习要求

1. 复习电路教材中二端口网络的定义、参数方程和等效电路等相关知识。
2. 预习二端口参数测定的方法，二端口网络互易对称特性，及二端口网络的等效电路等理论知识。
3. 完成实验报告中的内容：实验的目的、实验原理，实验指导书要求的理论计算数据；
4. 预习实验中所用到的实验仪器的使用方法及注意事项；
5. 根据实验电路计算所要求测试的理论数据，填入实验报告中。

3.3 实验仪器与器件

	名称	数量	型号
1	直流稳压电源	1 台	DP832A
2	手持万用表	1 台	Fluke17B+
3	直流电压电流表	1 块	30111047
4	电阻	若干	
5	函数发生器	1 台	TFG6960AW
7	测电流插孔	3 只	
8	电流插孔导线	3 条	
9	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
10	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm
11	直流恒流源	1 台	SL1500

3.4 实验原理

3.4.1 二端口网络参数的测量

对于一个线性网络，我们更多的关心的是其输入端口与输出端口的电压和电流之间的相互关系。如图 3-1 所示线性无独立电源二端口网络，其独立端口变量分别为两个端口电压 \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 、两个端口电流 \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 。对于这 4 个变量之间的关系，我们可以采用多种形式的参数方程来表示，如导纳参数方程、阻抗参数方程、

传输参数方程和混合参数方程。以下称端子 1、1'为端口 1，称端子 2、2'为端口 2。

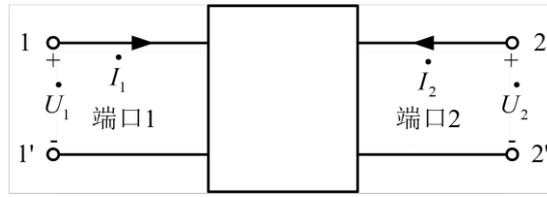


图 3-1 二端口网络端口变量的参考方向

3.4.1.1 导纳参数 (Y 参数)

1) 导纳参数方程。用端口电压表示端口电流时，可得：

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= Y_{11} \dot{U}_1 + Y_{12} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= Y_{21} \dot{U}_1 + Y_{22} \dot{U}_2 \end{aligned} \quad \text{式 (3-1)}$$

式中系数 Y_{11} 、 Y_{12} 、 Y_{21} 、 Y_{22} 具有导纳的量纲，称为二端口的导纳参数，简称 Y 参数，即

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix}$$

2) 测量方法。对于未给出其内部电路结构和元件参数的二端口网络，可通过实验测定其等效 Y 参数。

在端口 1 外施电压 \dot{U}_1 ，将端口 2 短路，即 $\dot{U}_2 = 0$ ，如图 3-2 (a) 所示。由式 (3-1) 可得：

$$Y_{11} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad Y_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$$

同理，在端口 2 外施电压 \dot{U}_2 ，将端口 1 短路，即 $\dot{U}_1 = 0$ ，如图 3-2 (b) 所示。由式 (3-1) 可得：

$$Y_{12} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} \quad Y_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0}$$

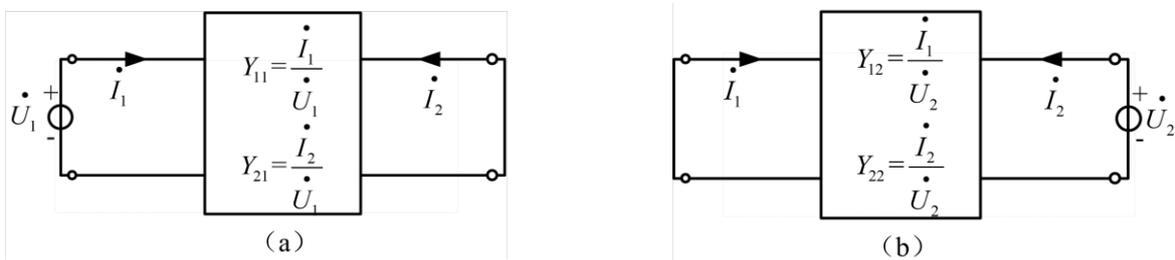


图 3-2 导纳参数的测定

3.4.1.2 阻抗参数 (Z 参数)

1) 阻抗参数方程。用端口电流表示端口电压时，可得：

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= Z_{11} \dot{I}_1 + Z_{12} \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= Z_{21} \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}_2\end{aligned}\quad \text{式 (3-2)}$$

式中系数 Z_{11} 、 Z_{12} 、 Z_{21} 、 Z_{22} 具有阻抗的量纲，称为二端口的阻抗参数，简称 Z 参数，即

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix}$$

2) 测量方法。对于未给出其内部电路结构和元件参数的二端口网络，可通过实验测定其等效 Z 参数。

在端口 1 外施电流 \dot{I}_1 ，将端口 2 开路，即 $\dot{I}_2=0$ ，如图 3-3 (a) 所示。由式 (3-2) 可得：

$$Z_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0} \quad Z_{21} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0}$$

同理，在端口 2 外施电流 \dot{I}_2 ，将端口 1 开路，即 $\dot{I}_1=0$ ，如图 3-3 (b) 所示。由式 (3-2) 可得：

$$Z_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1=0} \quad Z_{22} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1=0}$$

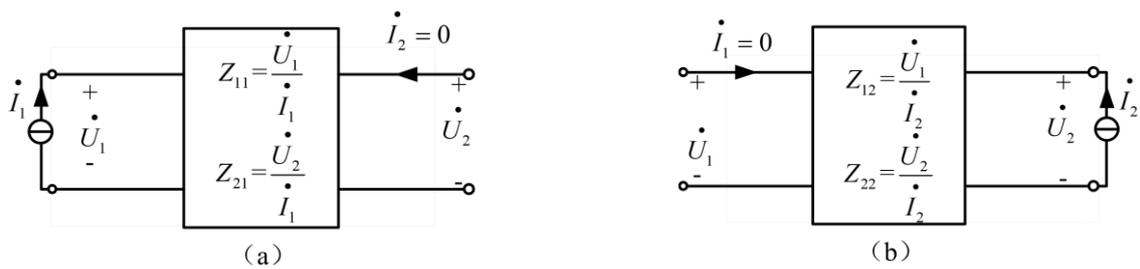


图 3-3 阻抗参数的测定

3.4.1.3 传输参数 (A 参数)

1) 传输参数方程。用输出端口的电压 \dot{U}_2 和电流 \dot{I}_2 表示输入端口的电压 \dot{U}_1 和电流 \dot{I}_1 时，可得：

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= A_{11} \dot{U}_2 + A_{12} (-\dot{I}_2) \\ \dot{I}_1 &= A_{21} \dot{U}_2 + A_{22} (-\dot{I}_2)\end{aligned}\quad \text{式 (3-3)}$$

上式为二端口的传输参数方程，简称 A 参数方程，其中 A 参数矩阵为：

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$$

2) 测量方法。对于未给出其内部电路结构和元件参数的二端口网络，可通过实验测定其等效 A 参数。

在端口 1 外施电压 \dot{U}_1 ，将端口 2 开路，即 $\dot{I}_2=0$ ，如图 3-4 (a) 所示。由式 (3-3) 可得：

$$A_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{i}_2=0} \quad A_{21} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{i}_2=0}$$

同理，在端口 1 外施电压 \dot{U}_1 ，将端口 2 短路，即 $\dot{U}_2=0$ ，如图 3-4 (b) 所示。由式 (3-3) 可得：

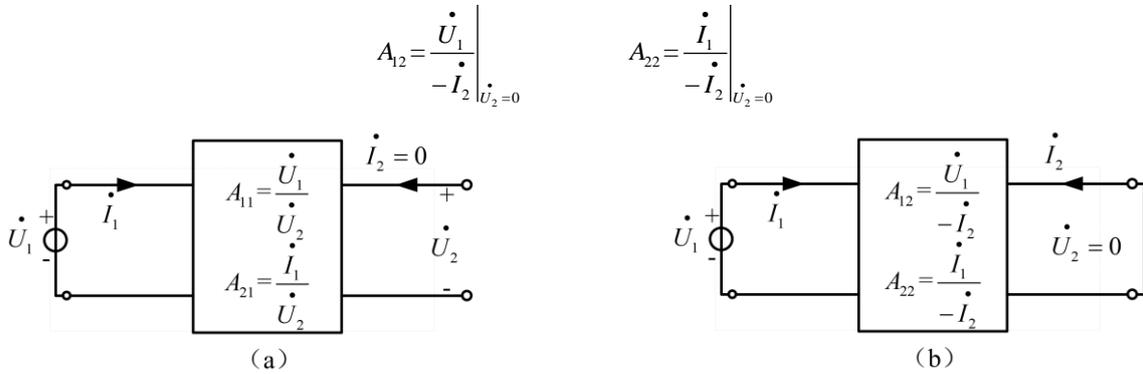


图 3-4 传输参数的测定

3.4.1.4 混合参数 (H 参数)

1) 混合参数方程。用端口 1 的电流和端口 2 的电压作为自变量，表示端口 1 的电压和端口 2 的电流，可得：

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= H_{11} \dot{I}_1 + H_{12} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= H_{21} \dot{I}_1 + H_{22} \dot{U}_2 \end{aligned} \quad \text{式 (3-4)}$$

上式为二端口的混合参数方程，简称 H 参数方程，其中 H 参数矩阵为：

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix}$$

2) 测量方法。对于未给出其内部电路结构和元件参数的二端口网络，可通过实验测定其等效 H 参数。

在端口 1 外施电流 \dot{I}_1 ，将端口 2 短路，即 $\dot{U}_2=0$ ，如图 3-5 (a) 所示。由式 (3-4) 可得：

$$H_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad H_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$$

同理，在端口 2 外施电压 \dot{U}_2 ，将端口 1 开路，即 $\dot{I}_1=0$ ，如图 3-5 (b) 所示。由式 (3-4) 可得：

$$H_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1=0} \quad H_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1=0}$$

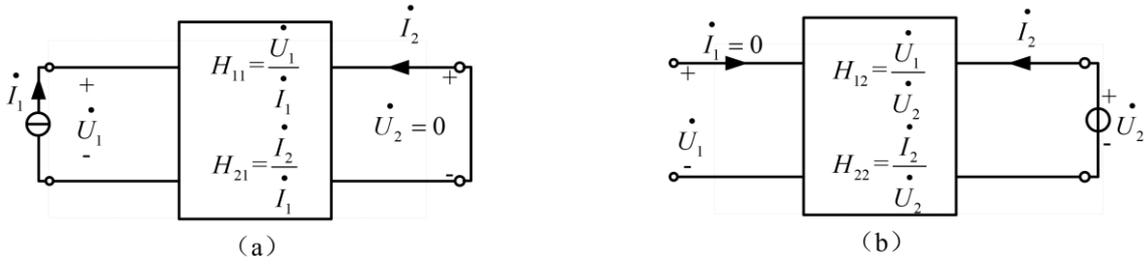


图 3-5 混合参数的测定

3.4.2 二端口网络的级联

当几个二端口按一定方式连接起来，且不破坏端口条件，就组成一个复合二端口。这种二端口之间的连接成为级联，即前一个二端口的输出端口与后一个二端口的输入端口相连，如若图 3-8 所示。分析级联组成的复合二端口与两个二端口间的关系时，采用传输参数较方便。

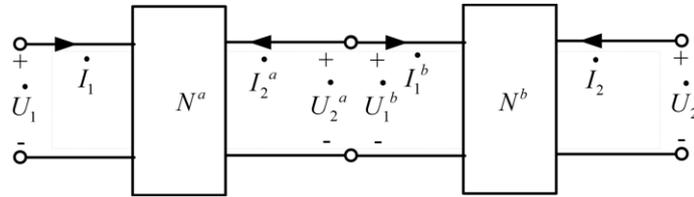


图 3-8 二端口网络的级联

根据图 3-8 可得二端口 N^a 和 N^b 的传输参数方程为：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^a & A_{12}^a \\ A_{21}^a & A_{22}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2^a \\ -\dot{I}_2^a \end{bmatrix} \quad \text{式 (3-11)}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1^b \\ \dot{I}_1^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^b & A_{12}^b \\ A_{21}^b & A_{22}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2^b \\ -\dot{I}_2^b \end{bmatrix} \quad \text{式 (3-12)}$$

二端口 N^a 输出端口和 N^b 的输入端口存在如下关系：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2^a \\ -\dot{I}_2^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1^b \\ \dot{I}_1^b \end{bmatrix} \quad \text{式 (3-13)}$$

将式 (3-13) 代入式 (3-12)，再代入式 (3-11)，得到

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^a & A_{12}^a \\ A_{21}^a & A_{22}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11}^b & A_{12}^b \\ A_{21}^b & A_{22}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

其中

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^a & A_{12}^a \\ A_{21}^a & A_{22}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11}^b & A_{12}^b \\ A_{21}^b & A_{22}^b \end{bmatrix} \quad \text{式(3-14)}$$

即级联二端口的传输参数矩阵，等于各级联的二端口的传输参数矩阵的乘积。

3.4.3 二端口网络互易对称特性的测量

二端口互易指的是二端口满足互易定理。若一个端口的激励电压源 \dot{U}_s 与另一端口的响应电流互易位置后，电流满足 $\dot{i}_2 = \dot{i}_1$ ，则称该二端口是互易的，如图 3-6 所示。若一个端口是互易的，则 Y 、 Z 、 A 、 H 参数矩阵中的 4 个参数将只有 3 个独立参数。

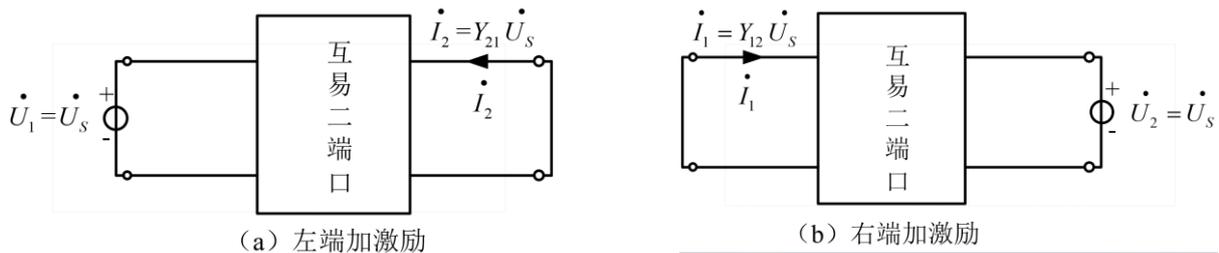


图 3-6 互易二端口的说明

根据导纳参数方程可知： $\dot{i}_1 = Y_{12} \dot{U}_s$ $\dot{i}_2 = Y_{21} \dot{U}_s$ ，因此具有互易性的二端口有 $Y_{12} = Y_{21}$ 。反之，若 $Y_{12} = Y_{21}$ ，则称此二端口为互易二端口。

若二端口 Y 参数同时满足 $Y_{12} = Y_{21}$ 和 $Y_{11} = Y_{22}$ ，则成为对称二端口。对称二端口仅含两个独立参数。所谓对称二端口，是指二端口与外电路互联时，将二端口的输入端口与输出端口对换后，二端口的特性保持不变。

根据 Y 参数表示的二端口互易对称条件，推导出 Z 、 A 、 H 参数的互易条件 and 对称条件如下：

	互易条件	对称条件
Z 参数	$Z_{12} = Z_{21}$	$Z_{12} = Z_{21}$ 和 $Z_{11} = Z_{22}$
A 参数	$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$	$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$ 和 $A_{11} = A_{22}$
H 参数	$H_{12} = -H_{21}$	$H_{11}H_{22} - H_{12}H_{21} = 1$ 和 $H_{12} = -H_{21}$

3.4.4 二端口网络的等效电路

互易二端口参数矩阵中仅有三个独立参数，因此互易性二端口的等效电路可由三个阻抗或导纳元件来组成。这三个元件可连成 T 形电路或 π 形电路，如图 3-7 所示。



图 3-7 互易二端口网络的 T 形和 π 形等效电路

1) 若给定二端口的 Z 参数，宜选用 T 形等效电路，根据阻抗参数方程分别求得三个阻抗 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 ，如式 (3-15) ~ 式 (3-17)。

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (Z_1 + Z_3)\dot{I}_1 + Z_3\dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= Z_3\dot{I}_1 + (Z_2 + Z_3)\dot{I}_2 \end{aligned} \quad \text{式 (3-15)}$$

则与 Z 参数的对应关系为: $Z_{11} = Z_1 + Z_3$ $Z_{12} = Z_{21} = Z_3$ $Z_{22} = Z_2 + Z_3$ 式 (3-16)

T 形等效电路各阻抗值为: $Z_1 = Z_{11} - Z_{12}$ $Z_2 = Z_{22} - Z_{12}$ $Z_3 = Z_{12}$ 式 (3-17)

若要进一步求得 π 形等效电路, 可根据无源星形网络与三角形网络的等效关系, 由 T 形等效电路参数值得 π 形等效电路各参数值。

2) 若给定二端口的 Y 参数, 宜选用 π 形等效电路, 根据阻抗参数方程分别求得三个阻抗 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 , 如式 (3-18) ~ 式 (3-20)。

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= (Y_1 + Y_3)\dot{U}_1 - Y_3\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= -Y_3\dot{U}_1 + (Y_2 + Y_3)\dot{U}_2 \end{aligned} \quad \text{式 (3-18)}$$

则与 Y 参数的对应关系为: $Y_{11} = Y_1 + Y_3$ $Y_{12} = Y_{21} = -Y_3$ $Y_{22} = Y_2 + Y_3$ 式 (3-19)

T 形等效电路各阻抗值为: $Y_1 = Y_{11} + Y_{12}$ $Y_2 = Y_{22} + Y_{12}$ $Y_3 = -Y_{12}$ 式 (3-20)

3.5 实验步骤

在进行实验操作之前, 请对实验仪器及元件进行检测, 确保仪器仪表工作正常, 元件参数值和电路图所标参数吻合。

检测内容包括:

- 1、直流电压源, 直流电流源, 直流电压电流表板工作是否正常;
- 2、用万用表检测电流插头的通断;
- 3、根据电路图从元件盒中找到对应电阻, 并用万用表的电阻测试端 (Ω 档), 测量电阻值, 确保阻值正确; 完成上述工作后, 才能进行实验。

3.5.1 二端口网络参数的测量与级联

1、 (1) 二端口网络的实验线路如图 3-9 所示, 结合图 3-3 所示测量方法, 将直流恒流源的输出电流调至 30mA, 作为二端口网络的输入。其中 $R_1=510\Omega$, $R_2=100\Omega$, $R_3=150\Omega$ 。

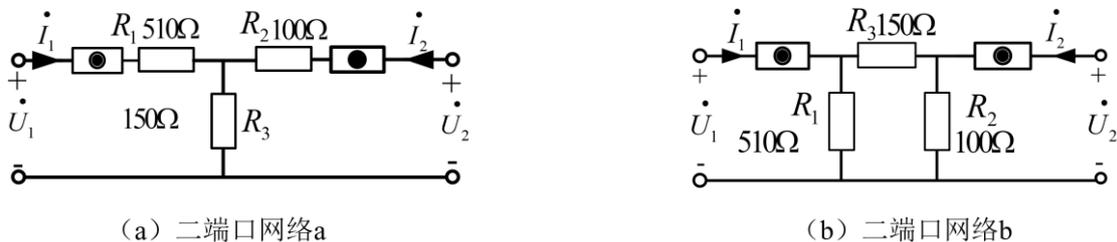


图 3-9 二端口网络实验线路

按照图 3-3 所示测量方法测定相关数据, 填入表 3-1 中, 并分别计算两个二端口网络的阻抗参数 Z 。

表 3-1 二端口网络 Z 参数测量

二端口网络 a	输出端开路 $I_2=0$	测量值			计算值	
		$U_{10}(V)$	$U_{20}(V)$	$I_{10}(mA)$	Z_{11}^a	Z_{21}^a

	输入端开路 $I_1=0$	$U_{10}(\text{V})$	$U_{20}(\text{V})$	$I_{20}(\text{mA})$	Z_{12}^a	Z_{22}^a
二端口网络 b		测量值			计算值	
	输出端开路 $I_2=0$	$U_{10}(\text{V})$	$U_{20}(\text{V})$	$I_{10}(\text{mA})$	Z_{11}^b	Z_{21}^b
	输入端开路 $I_1=0$	$U_{10}(\text{V})$	$U_{20}(\text{V})$	$I_{20}(\text{mA})$	Z_{12}^b	Z_{22}^b

(2) 仍然按图 3-9 接线, 将直流恒流源的输出电流调至 50mA, 作为二端口网络的输入, 记录测量数据于表 3-2 中。

表 3-2 二端口网络 Z 参数测量

二端口网络 a		测量值			计算值	
	输出端开路 $I_2=0$	$U_{10}(\text{V})$	$U_{20}(\text{V})$	$I_{10}(\text{mA})$	Z_{11}^a	Z_{21}^a
	输入端开路 $I_1=0$	$U_{10}(\text{V})$	$U_{20}(\text{V})$	$I_{20}(\text{mA})$	Z_{12}^a	Z_{22}^a
二端口网络 b		测量值			计算值	
	输出端开路 $I_2=0$	$U_{10}(\text{V})$	$U_{20}(\text{V})$	$I_{10}(\text{mA})$	Z_{11}^b	Z_{21}^b
	输入端开路 $I_1=0$	$U_{10}(\text{V})$	$U_{20}(\text{V})$	$I_{20}(\text{mA})$	Z_{12}^b	Z_{22}^b

2、按照图 3-8 所示原理, 将图 3-9 的(a)、(b)两图级联后构成一个新的二端口网络, 画出电路图。结合图 3-4 所示测量方法, 将直流恒流源的输出电流调至 50mA, 作为二端口网络的输入, 填入表 3-3 中, 计算新二端口网络的传输参数 A, 并验证式 (3-14) 是否成立。

表 3-3 级联二端口网络 A 参数测量

新二端口网络		测量值			计算值	
	输出端开路 $I_2=0$	$U_1(\text{V})$	$U_2(\text{V})$	$I_1(\text{mA})$	A_{11}	A_{21}
	输出端短路 $U_2=0$	$U_1(\text{V})$	$I_1(\text{mA})$	$I_2(\text{mA})$	A_{12}	A_{22}

3.5.2 二端口网络互易对称性的测量

1、二端口互易对称性实验线路如图 3-9 所示 (其中电阻更改为 $R_1=220\Omega$, $R_2=330\Omega$, $R_3=510\Omega$), 结合实验原理, 将直流稳压电源的输出电压调至 15V, 作为二端口网络的输入。按照图 3-2、图 3-4 所示测量方法测定相关数据, 填入表 3-4 中, 并验证网络 a、b 是否为互易或对称性网络。

表 3-4 二端口网络 Y、A 参数测量

二端口网络 a		测量值			计算值	
	输出端短路	$U_{10}(\text{V})$	$I_{10}(\text{mA})$	$I_{20}(\text{mA})$	Y_{11}^a	Y_{21}^a

	$U_2=0$					
	输入端短路	$U_{20}(\text{V})$	$I_{10}(\text{mA})$	$I_{20}(\text{mA})$	Y_{12}^a	Y_{22}^a
	$U_1=0$					
二端口网络 b		测量值			计算值	
	输出端开路	$U_{10}(\text{V})$	$U_{20}(\text{V})$	$I_{10}(\text{mA})$	A_{11}^b	A_{21}^b
	$I_2=0$					
	输出端短路	$U_{10}(\text{V})$	$I_{10}(\text{mA})$	$I_{20}(\text{mA})$	A_{12}^b	A_{22}^b
	$U_2=0$					

3.5.3 二端口网络等效电路

1、根据二端口等效电路的原理，按照图 3-10，将直流恒流源的输出调至 30mA 作为 a 的输入，直流稳压电源的输出调至 15V 作为 b 的输入，测量相关数据并记录数据于表 3-5，验证二端口网络的 T 形和 π 形等效电路。

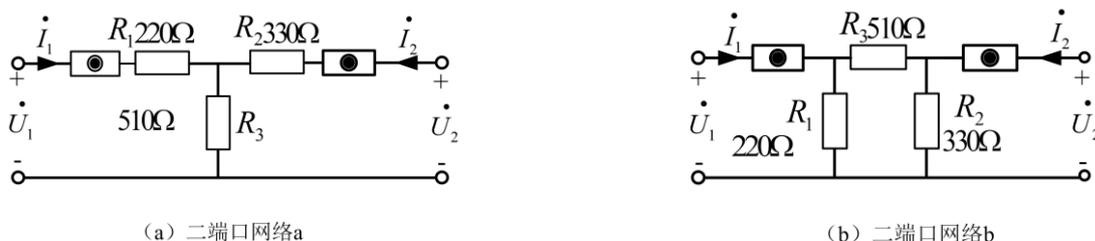


图 3-10 二端口网络实验线路

表 3-5 二端口网络等效电路参数测量

		测量值			计算值	
二端口网络 a	输出端开路	$U_{10}(\text{V})$	$U_{20}(\text{V})$	$I_{10}(\text{mA})$	Z_{11}^a	Z_{21}^a
	$I_2=0$					
	输入端开路	$U_{10}(\text{V})$	$U_{20}(\text{V})$	$I_{20}(\text{mA})$	Z_{12}^a	Z_{22}^a
	$I_1=0$					
二端口网络 b		测量值			计算值	
	输出端短路	$U_{10}(\text{V})$	$I_{10}(\text{mA})$	$I_{20}(\text{mA})$	Y_{11}^b	Y_{21}^b
	$U_2=0$					
	输入端短路	$U_{20}(\text{V})$	$I_{10}(\text{mA})$	$I_{20}(\text{mA})$	Y_{12}^b	Y_{22}^b
	$U_1=0$					

3.5.4 自主设计性小实验

参考阻抗参数 Z 的测试方法，及图 3-5 和式 (3-4)，设计混合参数 H 测试的方案，并进行数据测量及计算。

3.6 实验注意事项

1. 不允许带电接线。
2. 用电压表和电流表调好电压源和电流源的数值，电源才能接入电路。
3. 在实验过程中，不允许带电换线、换元件。
4. 在实验过程中，电压源不允许短路，电流源不允许开路。
5. 测量电压、电流时，电压表要与被测元件并联，电流表要与被测支路串联。
6. 做完每一项实验时要请指导老师检查数据，方可进行下一步实验。
7. 全部实验做完后，关掉电源，拆线，整理实验台，物归原处，方可离开实验室。
8. 遵守实验室的各项规章制度。

3.7 故障分析与检查排除

(1) 实验中常见故障

- ①连线：连线错，接触不良，断路或短路；
- ②元件：元件错或元件值错，包括电源输出错；
- ③参考点：电源、实验电路、测试仪器之间公共参考点连接错误等等。

(2) 故障检查

故障检查方法很多，一般是根据故障类型，确定部位、缩小范围，在小范围内逐点检查，最后找出故障点并给予排除。简单实用的方法是用万用表（电压档或电阻档）在通电或断电状态下检查电路故障。

①通电检查法：用万用表的电压档（或电压表），在接通电源情况下，根据实验原理，电路某两点应该有电压，万用表测不出电压；某两点不应该有电压，而万用表测出了电压；或所测电压值与电路原理不符，则故障即在此两点间。

②断电检查法：用万用表的电阻档（或欧姆表），在断开电源情况下，根据实验原理，电路某两点应该导通无电阻（或电阻极小），万用表测出开路（或电阻极大）；某两点应该开路（或电阻很大），但测得的结果为短路（或电阻极小），则故障即在此两点间。

3.8 实验思考题

1. 二端口网络的传输函数有哪些，它们有何物理意义？
2. 互易定理的适用范围是哪些？
3. 二端口网络的参数为什么与外加电压或流过网络的电流无关？

3.9 实验报告要求

1. 实验步骤、过程需要写在实验报告上；
2. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，曲线等必须手写，原始测量数据在课堂上需要老师确认。

3. 由曲线得出的数据在实验后完成，并填入相应的数据记录表中。
4. 实验结果分析及实验结论要根据实验结果给出。
5. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。
6. 实验思考题需要写在实验报告里面。

实验四 PSpice 仿真实验 1 (基础电路与动态电路时域分析)

4.1 实验目的

1. 正确掌握 PSpice 仿真软件的使用方法；
2. 掌握运用 PSpice 仿真软件分析直流电路、正弦电路的仿真方法；
3. 掌握运用 PSpice 仿真软件分析暂态电路的仿真方法；
4. 进一步理解直流电路、正弦电路和暂态电路的原理。

4.2 实验预习要求

1. 预习 OrCAD 的使用方法，熟悉 PSpice 软件进行电路仿真的基本过程。
2. 预习用 Capture 软件绘制电路图的有关内容；
3. 预习 PSpice 软件对线性直流电路进行仿真分析的方法，包括直流工作点及直流扫描分析的设置、观察仿真输出结果的方法；
4. 预习 PSpice 软件对交流频率分析参数的设置方法，观测 AC 分析仿真输出结果的方法；
5. 预习 PSpice 软件对动态电路进行时域分析的方法及扫描类型的设置。

4.3 实验仪器与器件

	名称	数量	型号
1	计算机	1 台	—
2	PSpice 仿真软件	—	OrCAD PSPICE SPB 16.6

4.4 实验原理

1. Pspice 简介

Pspice 是由 SPICE (Simulation Program with Intergrated Circuit Emphasis) 发展而来的用于微机系列的通用电路分析程序。Pspice 软件是一个通用的电路分析程序，它可以仿真和计算电路的性能。由于该软件提供了丰富的元件库，使得各种常用元器件随手可得，在软件上我们可以搭建任何模拟和数字或者数模混合电路。该软件使用的编程语言简单易学，对电路的计算和仿真快速而准确，强大的图形后处理程序可以将电路中的各电量以图形的方式显示在计算机的屏幕上，就像一个多功能、多窗口的示波器一样。PSPICE 软件具有强大的电路图绘制功能、电路模拟仿真功能、图形后处理功能和元器件符号制作功能，以图形方式输入，自动进行电路检查，生成图表，模拟和计算电路。它的用途非常广泛，不仅可以用于电路分析和优化设计，还可用于电子线路、电路和信号与系统等课程的计算机辅助教学。与印制板设计软件配合使用，还可实现电子设计自动化。被公认是通用电路模拟程序中优秀

的软件，具有广阔的应用前景。

2. 线性直流电路分析：

(1) PSpice 对线性直流电路进行分析时，常用的分析类型有直流扫描分析 (DC) 和直流工作点分析。直流工作点分析中电路的电源参数值是固定的，分析结束后，PSpice 会自动显示节点电压、支路电流和功率的数据形式输出结果，没有波形输出。DC 分析时，电源可在一定范围内按扫描变量的变化规律进行变化，这种分析方法为后续的设计工作提供了有效的手段；为了得到节点电压或支路电流数据形式输出结果，还必须在节点或支路上放置输出标志符，否则只有波形输出，实验中应特别注意。

(2) 实验中如何正确解读电压和电流的方向是分析 DC 仿真结果的关键。PSpice 可根据输入的电路图为元件自动设定电压和电流的参考方向。例如，电阻元件 R 电流参考方向规定是从 1 号脚流进，2 号脚流出。电阻元件引脚定义为初始水平位置的电阻左侧引脚号成为“1”，右侧引脚号为“2”。所以，若电流通过引脚 2 流入 R，则 $I(R)$ 就是负值。放置输出标志符时也应注意标志符上面的方向。

(3) 如果需要分析电路中某一电阻或其他参数值变化对电路特性的影响，往往将此参数设置为 Global 参数，即通用参数，然后再进行 DC 分析。实验中测量直流电路的最大输出功率时，即可运用此方法得到功率随扫描变量的变化曲线，然后从曲线上求出最大功率值。

3. 正弦电流电路分析：

(1) PSpice 可用 AC 分析方法对正弦电流进行相量计算和分析。AC 分析是在频域中进行的，当输入信号的频率变化时，它能够计算出电路的幅频响应和相频响应。AC 分析时，所有的变量都被认为是复数变量，而且电路中必须设置一个交流电源，电源的幅度常用有效值表示。

(2) 用 PSpice 测量交流信号幅值和相位的方法：①在电路中放置输出标识符，从数据形式结果输出文件中确定幅值或相位。②做出幅频或相频特性曲线，利用标尺测量出所求频率点对应的电压幅值或相位。

4. 动态电路的时域分析：

(1) 在电路理论中，电容电压 $u_C(t)$ 和电感电流 $i_L(t)$ 称为电路的状态变量。对 RLC 二阶电路，状态变量 $u_C(t)$ 、 $i_L(t)$ 看作是 $u-i$ 平面上的坐标点，这种平面就成为状态平面，其中 t 作为参变量。由状态变量在状态平面上所确定的点的集合，叫做状态轨迹。

(2) 利用 PSpice 观察状态轨迹，可采用 Probe 提供的改变坐标轴变量设置的方法，使 X 轴、Y 轴坐标变量分别为电容电压和流过电感的电流。

4.5 实验步骤

参照实验指导书内容，完成下述实验例题的仿真，通过例题学习 PSpice 的使用和分析方法。

4.5.1 直流电路

例 1: 电路如图 4-1 所示，试求：各节点电压、各支路电流和电阻消耗的功率。

注意：文件路径、文件名字、电路中的电信号命名用英文，且电信号命名不能使用空格，需使用下划线。

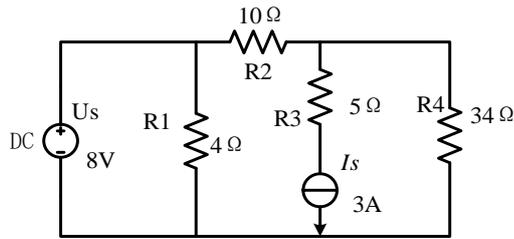


图 4-1 直流电路原理图

1 绘制电路图

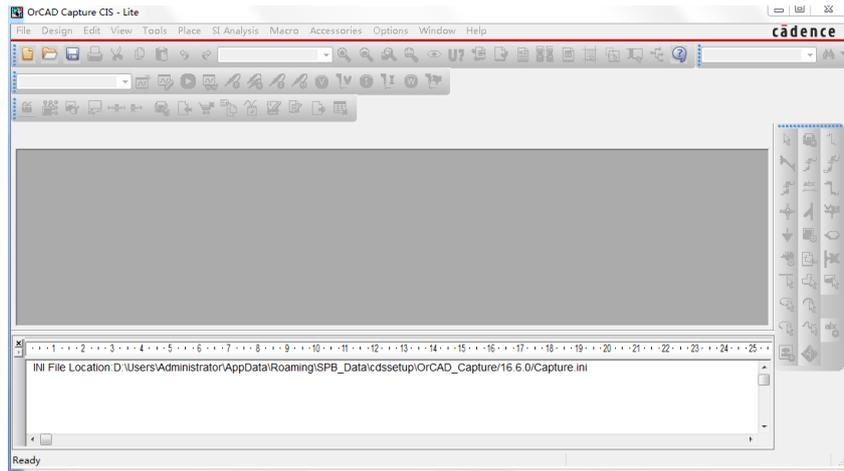


图 4-2 OrCAD Capture CIS 主界面

1) 进入绘制电路图窗口

在桌面上双击 OrCAD 图标，即可进入 OrCAD Capture CIS 主界面，如图 4-2 所示。

打开菜单 File/New/Project，则出现 New Project 对话框，如图 4-3 所示。

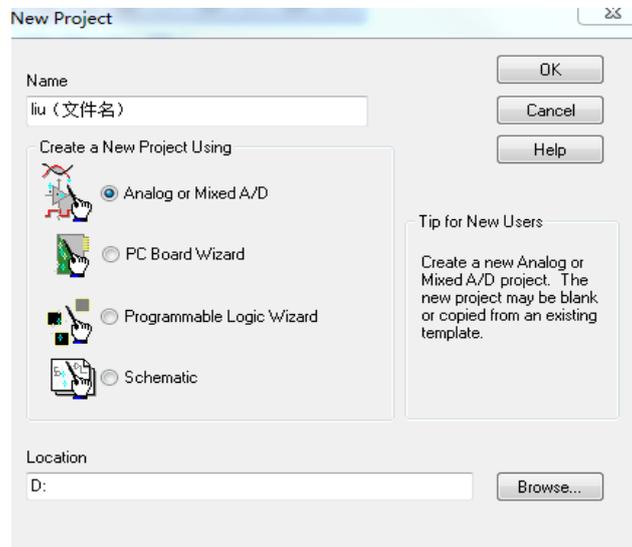


图 4-3 New Project 对话框

图 4-3 对话框中，需在 Name 中输入绘制电路图名称（例：liu），电路图名称可由英文字符串和数字组成，不能有汉字；Create a New Project Using 中有 4 个选项，实验中选择“Analog or Mixed A/D”，表示绘制电路图后直接进行电路仿真；Location 项中应填入存储路径。点击“OK”按钮，出现绘图窗口选择对话框，如图 4-4 所示。

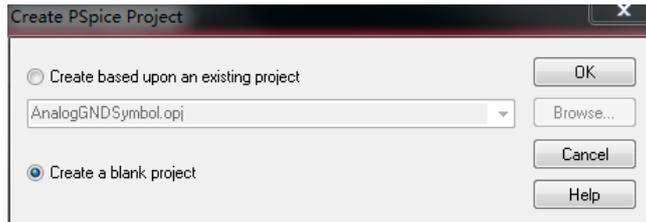


图 4-4 绘图窗口选择对话框

选择“Create a blank project”，表示建立一个新的绘图窗口。点击“OK”后，出现电路原理图输入界面，如图 4-5 所示。

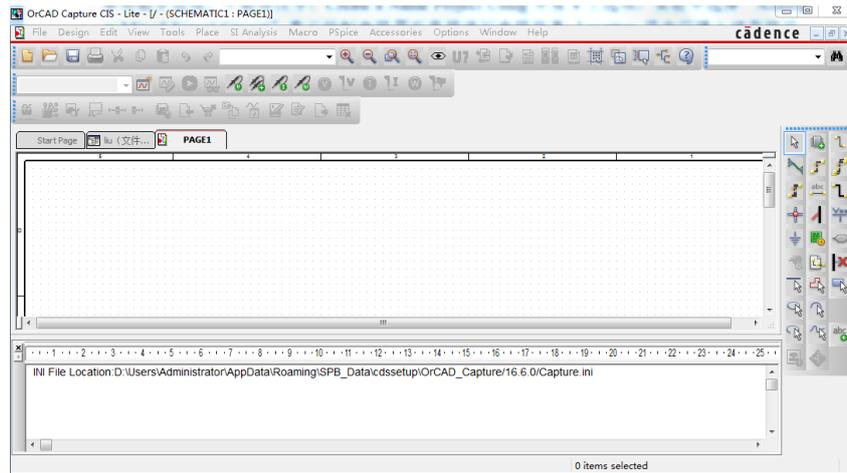


图 4-5 电路原理图输入界面

2) 放置元器件 启动 Place/Part 主菜单下的各对应子命令，打开元件放置窗口，如图 4-6 所示。

①添加元器件库。点击图 4-6 中间“Library”小窗中红色叉号左侧的“Add Library”选项，弹出库文件添加窗口，如图 4-7 所示，选择相应的库进行添加。**注意：选择库的时候，需要在 Library/Pspice 文件夹下选择器件库。**

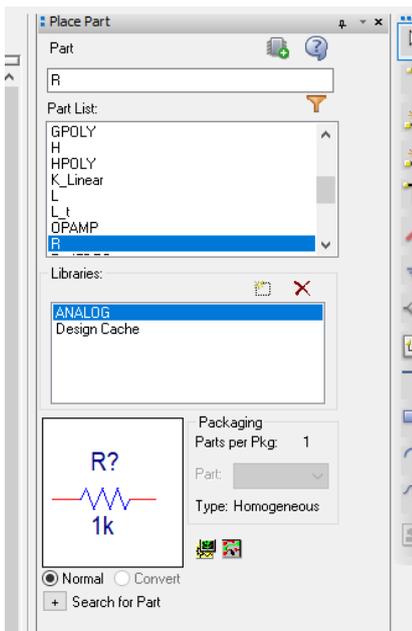


图 4-6 元件放置窗口

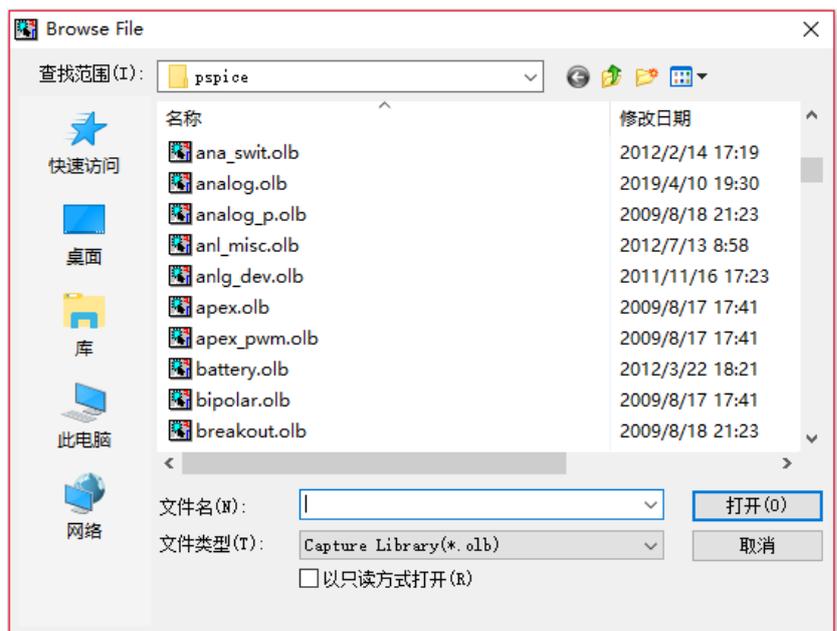


图 4-7 库文件选取对话框

对于新建绘图而言，此时 Libraries 库文件选择区里只有 Design Cache 项，因而，在放置元器件前，需

要添加所用到的元器件库。实验中常用元器件库的位置如表 4-1 所示。

表 4-1 绘图工具按钮功能简表

元件符号库	包含内容
ANALOG 库	常用无源器件，如电阻、电容、电感等
BREAKOUT 库	在 PSpice 进行蒙特卡罗分析时使用
EVAL 库	运算放大器、二极管、三极管符号
SOURCE 库	各种电压源、电流源符号
SOURCSTM 库	数字电路中的激励信号源符号
SPECIAL 库	特殊用途符号，如输出电流标识符及参数符号等

②放置/删除元器件。在元件放置窗口找到电阻 R，双击鼠标左键或点击键盘回车键，该元件即被调至绘制电路界面中。用鼠标拖动元件，点击左键可将元件放在合适位置，这时继续移动光标，还可放在其他位置。选中器件，可根据表 4-2 中说明翻转器件。

结束元器件放置，有如下方法可供选择：

- a) 按 ESC 键。
- b) 点击绘图工具按钮 。
- c) 点击鼠标右键，出现放置元器件快捷菜单，快捷菜单说明如表 4-2 所示。选择 End Mode。

表 4-2 放置元器件快捷菜单说明

菜单名称	含义
End Mode	结束取用命令
Mirror Horizontally	将该元件符号左右翻转
Mirror Vertically	将该元件符号上下翻转
Rotate	将该元件符号逆时针旋转 90 度
Edit Properties	编辑修改该元件属性参数
Zoom In	放大显示
Zoom Out	缩小显示
Go to	将光标快速移至某处

如果想删除某个元件，用鼠标左键点击该元件，使其处于选中状态（元件颜色变成粉红色），按“Delete”键可删除，也可点击鼠标右键选择 Cut 或 Delete 命令。

根据以上方法，在器件库中分别提取直流电压源 VDC、直流电流源 IDC（source 库）。放置接地符号：执行 Place/Ground 命令，或点击专用绘图工具中的  按钮，屏幕上弹出 Place Ground 对话框。在 SOURCE 库中选取“0”符号。

3) 连接线路与布图

执行 Plcae/Wire 命令，或点击专用绘图工具中的  按钮，光标由箭头变为十字型。将光标指向需要连线的一个端点单击鼠标左键，移动光标，即可拉出一条线，到达另一端点时，接点出现一红色实心圆，再次单击鼠标左键，便可完成一段接线。

点击工具按钮  或选择菜单 Place/Net Alias，则屏幕出现 Place Net Alias（节点别名设置）对话框，如图 4-8 所示。在 Alias 栏中键入节点名（例如 N2），按“OK”按钮。设置完成后，光标箭头处有一矩形框。

光标移至节点后，点击鼠标左键，节点名即被放在电路节点处；光标移至下一节点，再点击鼠标左键，另一节点名又被放置在该处。

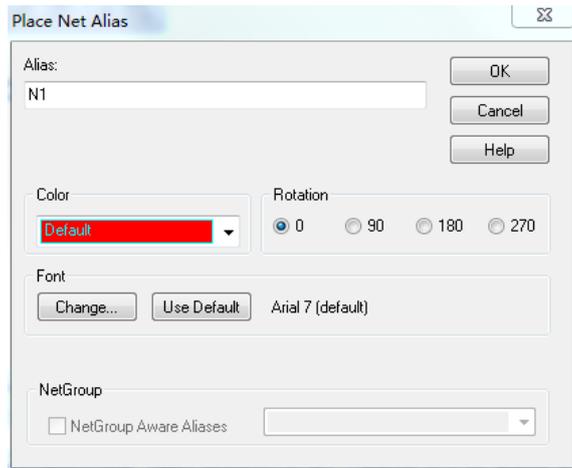


图 4-8 Place Net Alias 对话框

2 改变电路元器件的属性参数

如果仅对电路图中某一元素参数进行修改，例如欲将电阻 R 的阻值由 $1k\Omega$ 改为 10Ω ，其操作步骤如下：双击 $1k$ 而非 R，进入 Display Properties，如图 4-9 所示；在 Value 项将 $1k$ 改为 10 ，按“OK”按钮即可。

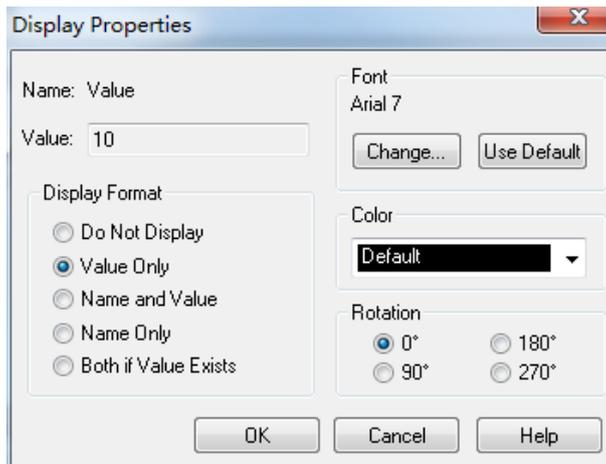


图 4-9 单项参数编辑修改对话框

元器件的属性参数还可在属性编辑器中进行。调用属性参数编辑器方法有两种：

- 选中一个电路元件（用鼠标左键点击元件中心）或多个电路元件后，执行 Edit/Properties 命令或点击鼠标右键选 Edit Properties 命令
- 双击待修改的电路元件。

元件属性参数编辑器对话框如图 4-10 所示。

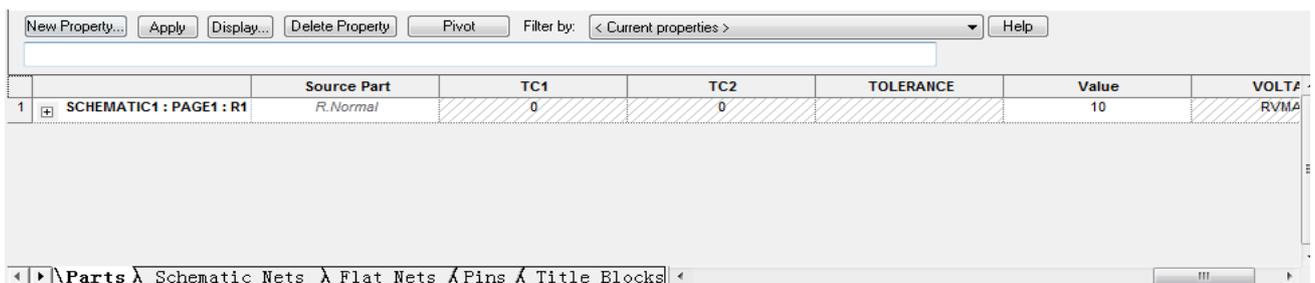


图 4-10 元件属性参数编辑器

无源元件属性参数修改：点击图 4-10 屏幕左下方的“Parts”标签，在更改为“Reference（元器件序号）”或“Value（元件值）”列下的元器件参数即可修改。点击图 4-10 中的“Pivot”可将视图显示方式由水平变为垂直。

电源属性参数可根据不同类型电源描述进行修改。例如：AC 电源需修改幅值和相位。绘好的电路图如图 4-11 所示：

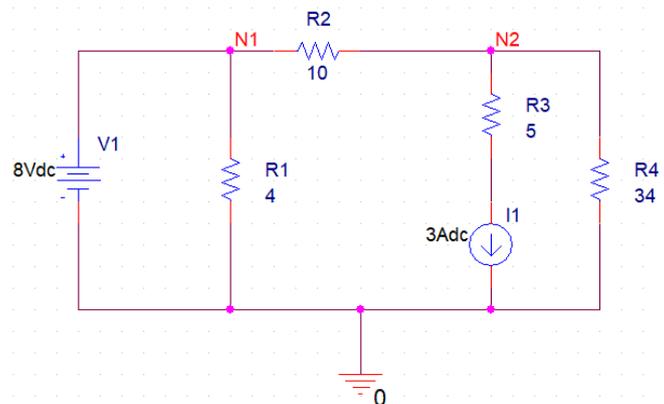


图 4-11 直流电路仿真电路图

3 设置电路特性分析类型及参数

执行菜单命令 PSpice/New Simulation Profile，在 New Simulation 对话框中键入项目名称，按“Create”按钮，进入 Simulation Settings 对话框，如图 4-12 所示。

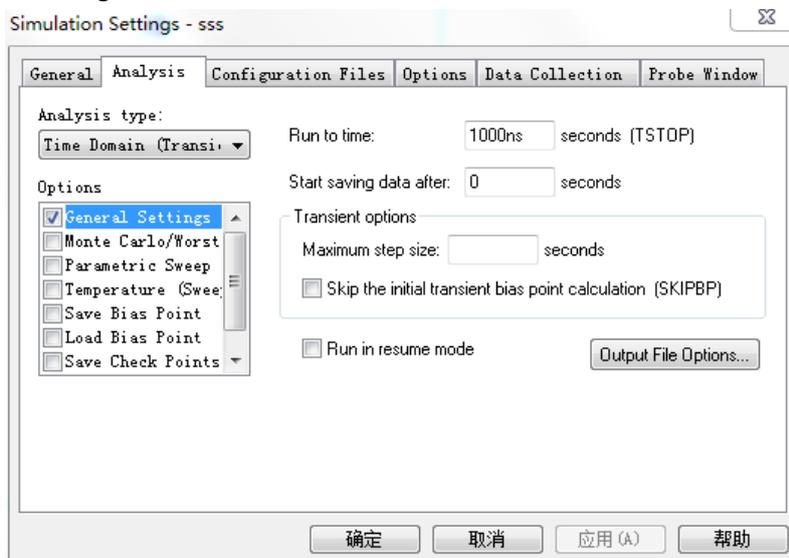


图 4-12 仿真设置界面-静态工作点分析

在 Analysis type 栏中选择“Bias Point”，Options 栏中选择“General Setting”，在 Output File Options 栏中选择“Include detailed bias point information for nonlinear controlled sources and semiconductors”，按“确定”，即完成直流工作点分析设置。

4 仿真并记录

设置分析参数后，选择 PSpice/Run 命令或图标，运行 PSpice 仿真程序。若电路检查正确，则出现

PSpice 执行窗口。在 Capture 窗口分别点击工具图标，则电路各个节点电压、支路电流和各元器件

件上的直流功率损耗可在电路图相应位置自动显示。

例 2: 仿真电路如图 4-13 所示，当 U_s 从 1V 连续变化到 10V 时，求 U_{N2} 的变化曲线。

1 绘制电路图

- 1) 按如前所述方法绘制电路图。
- 2) 放置探针：执行 Capture 窗口中的菜单命令 PSpice/Markers/Voltage Level，或点击工具按钮，光标即可携带节点电压探针符号。在节点 N2 上单击鼠标左键，即可在该处放置探针符号。点击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择执行 End Mode 命令，结束放置探针符号的命令。完成的电路图如图 4-13 所示。

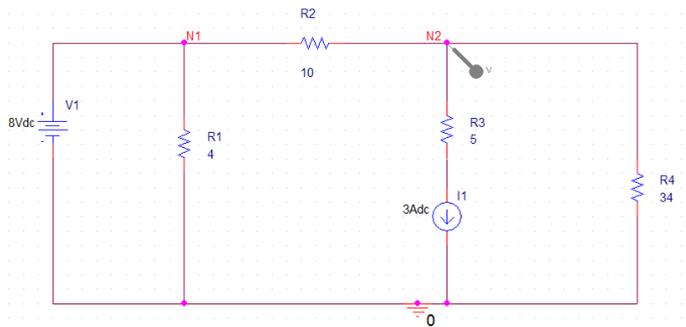


图 4-13 直流分析仿真电路图

2 设置电路特性分析类型及参数

执行菜单命令 PSpice/Edit Simulation Profile，或点击工具按钮，进入 Simulation Settings 对话框，如图 4-14 所示。

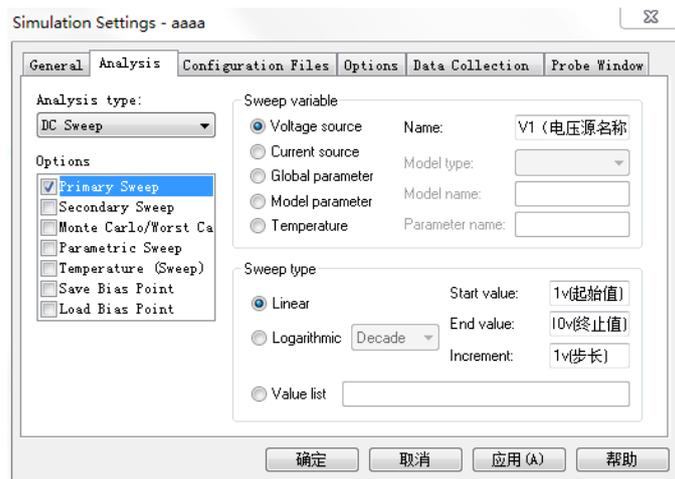


图 4-14 仿真设置界面-DC 分析设置

Analysis type 下拉菜单选中“DC Sweep”；

Options 下拉菜单选中“Primary Sweep”；

Sweep variable 项选中“Voltage source”，并在 Name 栏中键入“V1”；

Sweep type 项中选中“Linear”，并在 Start 栏键入“1”、End 栏键入“10”及 Increment 栏键入“1”。

以上各项填完之后，按“确定按钮”，即可完成仿真分析类型及分析参数的设置。

3 电路仿真分析及分析结果的输出

执行 Capture 窗口中的菜单命令 PSpice/Run, 即可在启动的 PSpice A/D 视窗中自动显示探针符号放置处的电压波形。

保存波形: 在 PSpice A/D 视窗中, 选择菜单 Window, 点击 “Copy to Clipboard”, 在弹出的对话框里面点击 background, 让背景呈现透明, 单击 OK, 即可将波形复制到其他 Word 文档, 如图 4-15 所示。

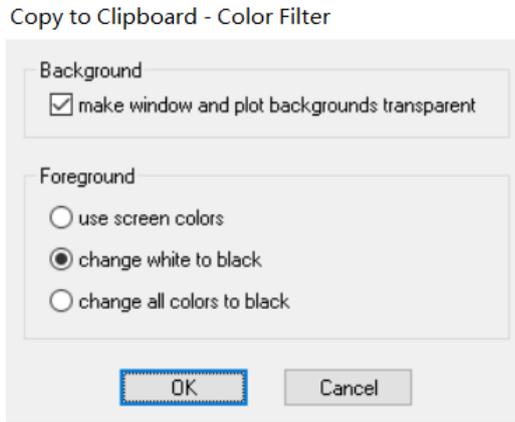


图 4-15 电路仿真结果波形保存

4.5.2 正弦电路

例 3: 电路如图 4-16 所示, $I_s=1\angle 0^\circ\text{A}$, $R_1=1\text{k}\Omega$ 。利用 PSpice 求频率从 1kHz 到 100kHz 的 U_R 的频率特性。

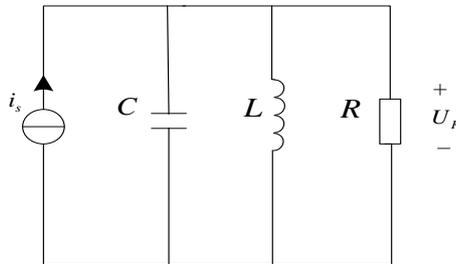


图 4-16 正弦电路原理图

1 绘制电路图

- 1) 在 ANALOG 库中选取电容 C、电感 L、电阻 R 符号; 在 SOURCE 库中选取交流电流源 IAC 符号。
- 2) 连线, 放置节点、接地符号。
- 3) 按图 4-17 设置各元件和电源参数。
- 4) 放置节点电压探针。

绘好的电路如图 4-17 所示。

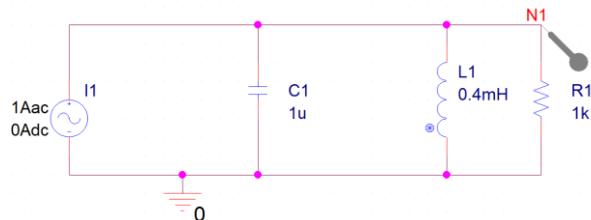


图 4-17 正弦电路仿真电路图

2 设置电路特性分析类型及参数

选择 PSpice/New Simulation Profile(或点击工具按钮)，在 New Simulation 对话框中键入项目名称，按“Create”按钮，进入 AC 分析参数设置框。

Analysis type 选择“AC Sweep/Noise”，Option 选择“General Settings”，AC Sweep Type 选择“Logarithmic/Decade”，并在 Start 栏键入“1k”、End 栏键入“100k”、Points/Decade 栏键入“50”，如图 4-18 所示。设置完毕，点击确定按钮。

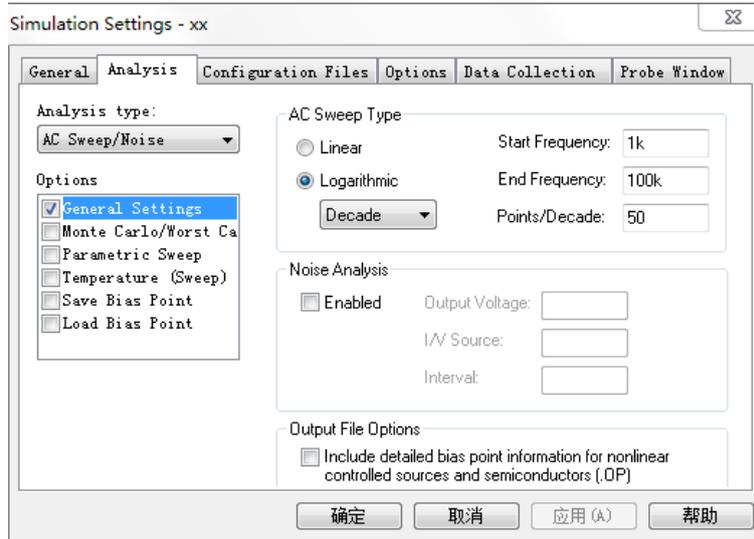


图 4-18 AC 分析参数设置

3 电路仿真分析及分析结果的输出

执行 Capture 窗口中的菜单命令 PSpice/Run，即可在启动的 PSpice A/D 视窗中自动显示探针符号放置处的输出电压波形（幅值特性）。

在 Pspice A/D 窗口中选择 Plot/Add plot to Window，在当前屏幕上添加一个新的波形显示窗口。在新增的窗口中，在 Trace/Add Trace 对话框中先点击右侧的函数 P（），再点击左侧的基本变量 V（N1），绘制相频特性曲线（其中 d 表示度）。

4.5.3 动态电路时域分析

例 4： 电路如图 4-19 所示， $R_1 = 2k\Omega$ ， $C_1 = 0.1\mu F$ 。当电源为如图 4-20 所示波形时，观察电容的充放电过程。

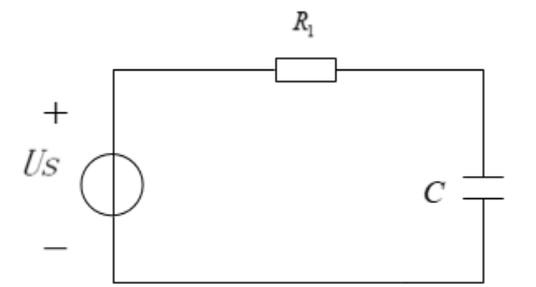


图 4-19 RC 电路原理图

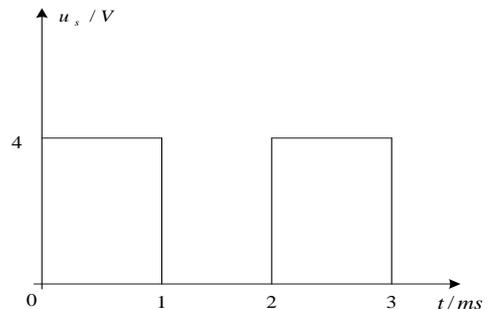


图 4-20 电压源波形

1 绘制电路图

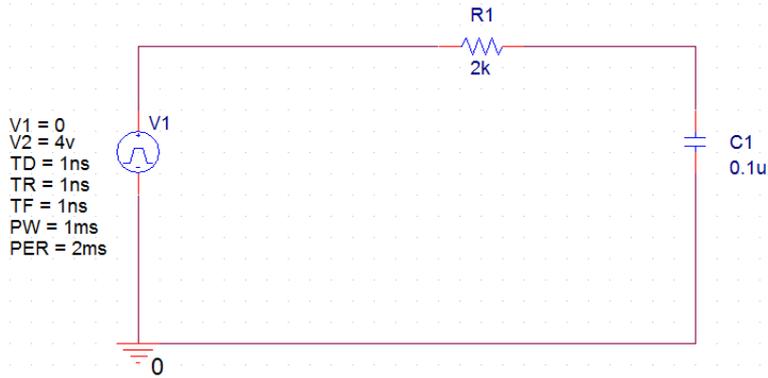


图 4-21 RC 电路仿真电路图

电源选用脉冲源 VPULSE，电源参数设置如图 4-22，各参数含义如表 4-3 所示，

	PW	Reference	Source Library	Source Package	Source Part	TD	TF	TR	V1	V2
1 SCHEMATIC1: PAGE1	1m	V1	D:\USERS\ADMINISTR...	VPULSE	VPULSE.Normal	1ns	1ns	1ns	0	4v

图 4-22 电源参数设置界面

表 4-3 脉冲源参数定义

参数	含义	单位
V1	起始值	V
V2	脉冲值	V
PER	脉冲周期	S
PW	脉冲宽度	S
TD	延迟时间	S
TR	上升时间	S
TF	下降时间	S

2 确定分析类型及设置分析参数

瞬态分析类型及参数设置如图 4-23 所示。

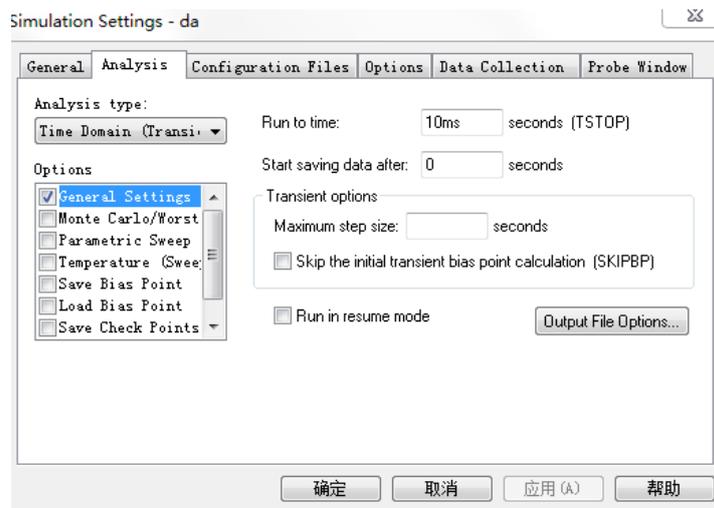


图 4-23 暂态分析参数设置界面

3 电路仿真分析及分析结果的输出

根据以上设置进行仿真，得出电容充放电电压波形。

4.5.4 仿真验证

根据本节课所学仿真分析方法，验证实验二中 RLC 二阶电路响应波形，电路图见图 4-24。其中电源为方波 $U_S=1V_{p-p}$ ， $f=2kHz$ ，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，记录分析输入电压和电容电压波形。（ $L=10mH$ ， $C=0.02\mu F$ ， R 可取 50Ω 、 $1k\Omega$ 、 $2.4k\Omega$ 等）

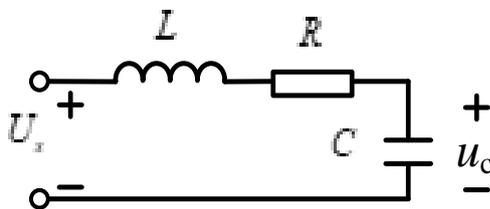


图 4-24 二阶电路原理图

4.6 实验思考题

1. 比较虚拟仿真实验方法与操作性实验方法的不同。

4.7 实验注意事项

2. 遵守实验室的各项规章制度。
3. 例 4 中应确保冲击源输出的准确性。
4. 全部实验做完后，整理实验台，方可离开实验室。

4.8 故障分析与检查排除

(1) 仿真实验中常见故障

- ①连线：连线错，断路或短路；
- ②元件：元件错或元件值错，包括电源输出错；
- ③仿真条件设置不对等等。

(2) 故障检查

一般是根据软件报错和仿真结果的问题，确定部位、缩小范围，在小范围内逐点检查，最后找出故障点并给予排除。

4.9 实验报告要求

1. 原始仿真结果在课堂上需要老师确认，每个仿真要求有仿真电路图、仿真波形图以及结果分析。
2. 实验思考题需要写在实验报告里面。
3. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。

实验五 PSpice 仿真实验 2（非线性电路和均匀传输线分析）

5.1 实验目的

1. 掌握 PSpice 中非线性电路元件的参数设置。
2. 掌握使用 PSpice 进行非线性电路仿真分析的方法。
3. 掌握无损耗均匀传输线正弦稳态和暂态过程的电压分布规律。
4. 加深对入射波、反射波的认识。
5. 进一步理解非线性电路和均匀传输线的工作模型及原理。

5.2 实验预习要求

1. 了解使用 PSpice 软件进行非线性元件参数和无损线元件参数的设置及电路搭建。
2. 了解非线性器件、无损线的电路模型工作原理。
3. 了解本次实验中对非线性电路、无损线仿真分析的基本过程。

5.3 实验仪器与器件

	名称	数量	型号
1	计算机	1 台	—
2	PSpice 仿真软件	—	—

5.4 实验原理

1、非线性电阻元件的特性用端口电压和端口电流的关系并通过函数、曲线或表格来表征。通常分为压控、流控和单调三种形式。在近似分析时，非线性电阻的伏安特性可用折线逼近，即在一定的工作区段里，分别用线性电路近似等效，分为分段线性法。在 PSpice 软件中，非线性电阻元件可以用受控源来表示。

PSpice 容许被分析出来的电路包含 4 种方程所表征的非线性受控源，它们是 $i = f(u)$ 、 $u = f(u)$ 、 $i = f(i)$ 、 $u = f(i)$ 。这里所列各函数必须是多项式函数，用关键字 POLY 说明。假设多项式函数是一维的，则函数值 f 与自变量 x 的函数关系由下式给出：

$$f = p_0 + p_1x + p_2x^2 + p_3x^3 + \dots$$

假设受控源端口电流与电压关系方程式为：

$$i = 10^{-3} \times u + 1.5 \times 10^{-3}u^2$$

即该受控源模拟了一个非线性电阻。

2、状态平面法是分析二阶非线性电路的一种有效方法。对于不同的初始值和电路参数，在状态平面上讲描述出不同的状态轨迹。用经典的图解法求状态轨迹相当麻烦，而用 PSpice 仿真分析，可迅速、准确地

绘出状态轨迹。通过对这些轨迹的集合性质的研究，可定性了解电路的某些特性。

3、当无损耗传输线接通激励源后，电压电流正向行波由始端向终端推进。当正向行波传播到线路的不均匀处时，都会产生波的反射。上述使行波受到反射之处成为波的反射点。只要传输线的终端与始端不满足匹配条件，反射过程一般会无休止往复进行下去，这就是波的多次反射。由于电磁波的波速较高，在很短时间内，传输线即可完成多次反射进而达到稳态。

5.5 实验步骤

仿真实验中，使用 OrCAD 的方法已在实验四中介绍过，本次实验仿真方法基本与前述实验相同。需注意的一点是仿真中，非线性电阻元件用非线性受控源来表示，受控源在 Analog 库中，选取元件时注意非线性受控源与线性受控源的区别，非线性受控源含有关键字 POLY。Analog 库中，“E”表示电压控制电压源，“F”表示电流控制电流源，“G”表示电压控制电流源，“H”表示电流控制电压源。使用 PSpice 进行如下例题的仿真，并记录仿真结果。

例 1：图 5-1 所示电路，已知 $U = I^2 + 2I$ （单位：V，A）。试用 PSpice 求电压 U ，记录仿真结果。

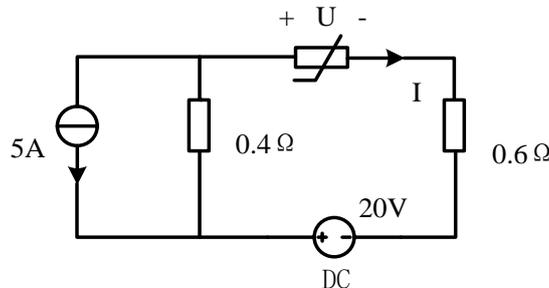


图 5-1

电路图的绘制方法在此不再赘述，绘制完成的电路图如图 5-2 所示，其中非线性电阻用非线性电流控制电压源 HPOLY 表示。放置受控源器件之后，双击元件进入参数设置界面，将元件“COEFF”项下的参数修改为“0 2 1”。在此对非线性受控源参数的设置原理进行简单讲解：

$$f = p_0 + p_1x + p_2x^2 + p_3x^3 + \dots$$

对于非线性电流控制电压源 HPOLY，“0 2 1”表示 $p_0 = 0$ ， $p_1 = 2$ ， $p_2 = 1$ ，按照多项式各项指数由低到高排列，各系数之间用空格隔开，若多项式之中仍含有更高次幂的项，则将各项系数依次往后排，要注意系数为零的项要写“0”，不能略过不写。

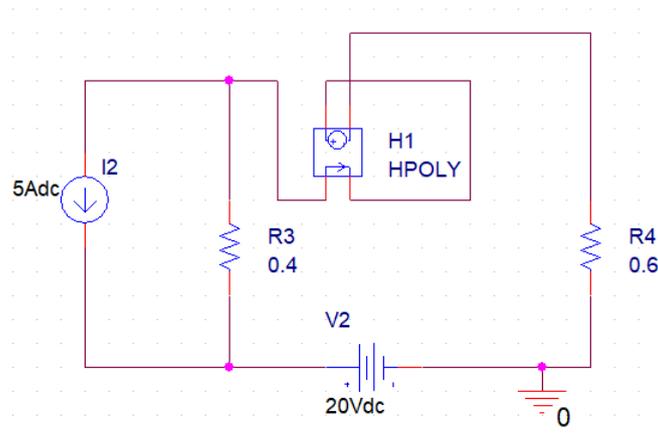


图 5-2

电路绘制完成后，点击 PSpice/New Simulation Profile，创建一个新的仿真，在 Analysis type 栏中选择

“Bias Point”, Options 栏中选择“General Setting”, 在 Output File Options 栏中选择“Include detailed bias point information for nonlinear controlled sources and semiconductors”, 按“确定”, 完成直流工作点分析设置。

用菜单栏快捷键的 Bias voltage display 显示各节点电压, 根据各数据可求得电压 U。

例 2: 非线性电阻电路如图 5-3 所示, 其中非线性电阻 R_5 的伏安特性为: $i_5 = u + 2u^2 + 3u^3$, 若 $u_s = 5\sin(2000\pi t)$, i_s 为脉冲电流源 ($I1=20A$, $I2=-20A$, $td=1ns$, $tr=1ns$, $tf=1ns$, $pw=1ms$, $per=2ms$), 试仿真分析流过电阻 R_2 、 R_3 、和非线性电阻 R_5 的电流瞬态特性。将正弦电源频率改为 10kHz, 进行仿真并记录仿真波形。

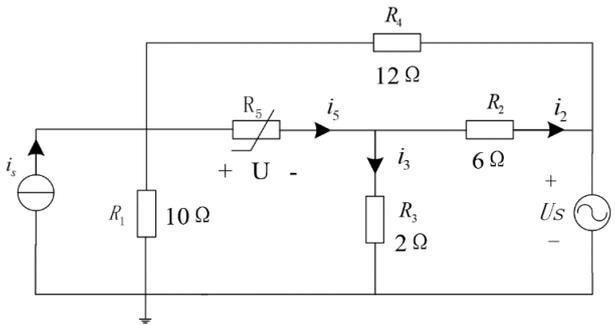


图 5-3

根据题目绘制电路图如图 5-4:

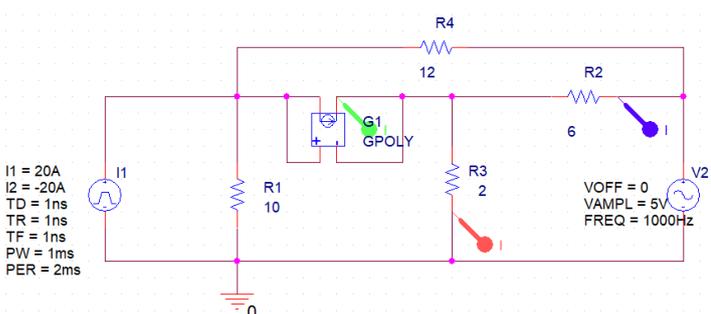


图 5-4

对于非线性电压控制电流源 GPOLY, 设置 G1 的 COEFF 参数为 “1 2 3”, 表示多项式 $f = p_0 + p_1x + p_2x^2 + p_3x^3 + \dots$, $p_1 = 1$, $p_2 = 2$, p_0 不需要填写。在电路的相应位置放置电流探头, 从 source 库中选择 VSIN 正弦电压源, 正弦电压源各参数: VOFF 表示电压偏置, 这里设为 0; VAMPL 表示电压峰值, 本例为 5V; FREQ 表示频率, 本例为 1000Hz; 若带有 AC 参数, 可将 AC 参数删掉, 本例不需设置。

创建新的 PSpice 仿真文件, 设置如下:

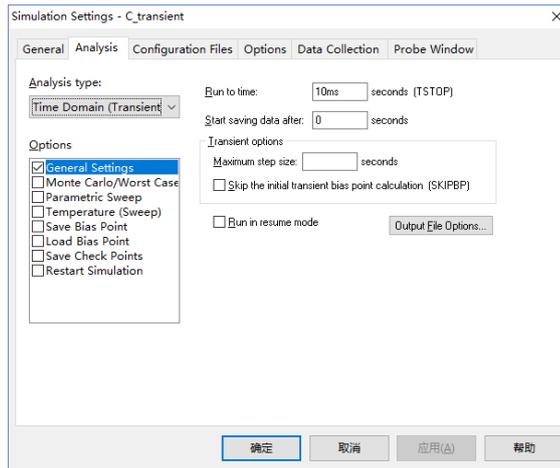


图 5-5

将正弦电源频率改为 10kHz，进行仿真并记录仿真波形。

例 3: 如图 5-6 所示电路中，已知 $R=20\Omega$ ， $C_1=C_2=10\mu\text{F}$ ， $u_s=10\text{V}$ ，非线性电阻的伏安特性为： $i=\frac{1}{2}u+\frac{1}{6}u^2$ ，若 $t=0$ 时开关闭合，求 $t>0$ 时的零状态响应 $u(t)$ 的仿真波形。

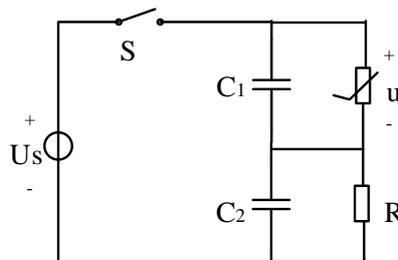


图 5-6

本题请自行绘制电路，设置仿真参数，记录仿真结果，要求仿真时间合适，波形尽可能完整。

例 4: 如图 5-7 所示电路中，波阻抗 $Z_c=200\Omega$ 的无损耗均匀线，始端接电压源 $u_s=10 \varepsilon(t)\text{V}$ ， $l/v=t_d$ ， $R_1=50\Omega$ ， $R_2=200\Omega$ ， 800Ω ， $10\text{k}\Omega$ 时，求 $u_2(t)$ ($t>0$)，并分析结果产生原因。

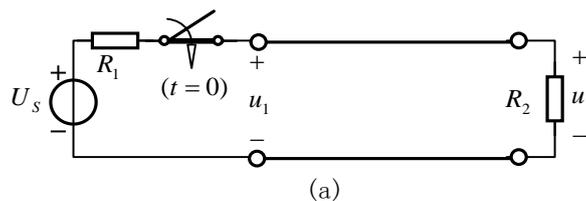


图 5-7

在 Analog 库中取出电阻 R 和无损线 T，开关可近似用脉冲电压源等效。双击无损线 T1，在属性中设置 TD 为 100ns 表示延迟时间，Z0 栏设置为 200 表示波阻抗。保存电路图，如图 5-8 所示。

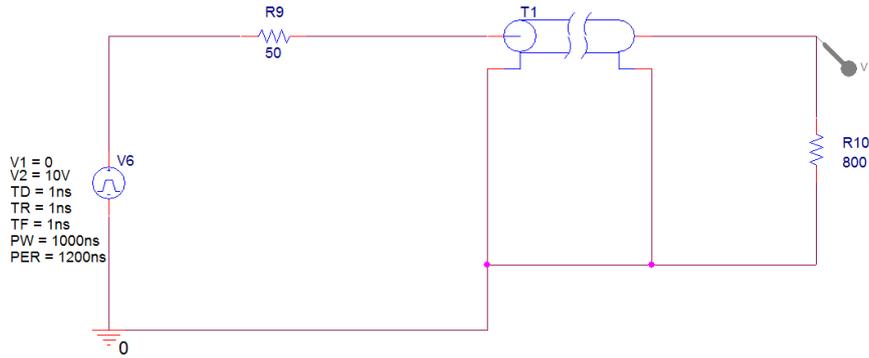


图 5-8

创建新的 PSpice 仿真文件，设置如下，可自行选取适当的仿真范围：

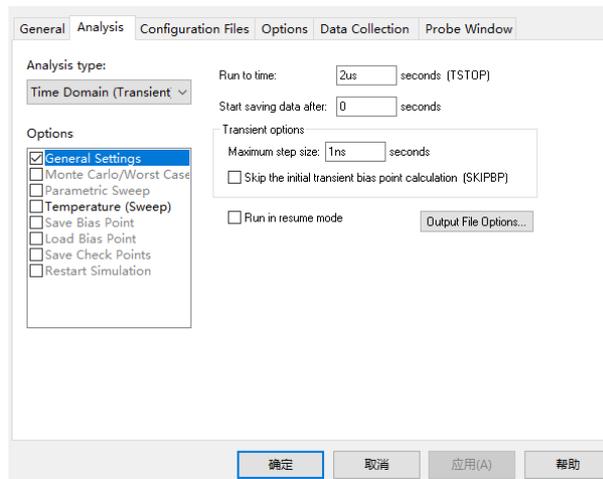


图 5-9

将 $R_2=200\Omega$, $10k\Omega$ ，分别进行仿真并记录仿真波形并分析结果产生原因。

5.6 实验注意事项

1. 遵守实验室的各项规章制度。
2. 仿真中，非线性电阻元件用非线性受控源来表示，选取元件时注意非线性受控源与线性受控源的区别，非线性受控源含有关键字 POLY。
3. 做完每一项仿真实验时要请指导老师检查数据，签字，方可进行下一步实验。
4. 全部实验做完后，整理实验台，方可离开实验室。

5.7 故障分析与检查排除

(1) 仿真实验中常见故障

- ①连线：连线错，断路或短路；
- ②元件：元件错或元件值错，包括电源输出错；
- ③仿真条件设置不对等等。

(2) 故障检查

一般是根据软件报错和仿真结果的问题，确定部位、缩小范围，在小范围内逐点检查，最后找出故障点并予以排除。

5.8 实验报告要求

1. 实验步骤、过程需要写在实验报告上；
2. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，曲线等必须手写，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
3. 由曲线得出的数据在实验后完成，并填入相应的数据记录表中。
4. 实验结果分析及实验结论要根据实验结果给出。
5. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。
6. 实验思考题需要写在实验报告里面。

实验六 自主学习模式下探究型实验的研究

自主设计型实验是在基本实验项目型实验的基础上进行的综合性实验训练。它要求学生深入理解所拟实验题目的实验任务与要求，了解完成实验任务所依据的基本原理和方法，通过查阅资料、设计性能优异的实施方案、把实施方案转变为实际电路、组织实验、撰写报告、实验总结等过程，获取新的知识和经验，使得实践能力、电路设计和电路实现能力得到系统的提高和锻炼。

完成自主设计型实验，需要综合考虑和研究因素很多，如何借鉴他人的经验，结合自己的知识、能力和实验室现有的条件，研究出具有创意的实验方案；如何从繁多的器件中正确选择和使用元器件；如何正确选择和使用实验仪器仪表；都是自主设计型实验需要研究和考虑的问题。本实验旨在使学生逐步养成良好的研究习惯，通过实验培养学生的研究型思维和综合运用所学知识解决实际问题的能力。

6.1 制定实验方案

自主设计型实验要运用所学的电路理论基础知识和实验操作技能，选择和设计电路。自主设计型实验是综合运用电路理论知识和实验技能的过程，只有全面考虑获得准确测量结果的各种因素，才能很好地完成实验任务。**要求实验方案课前设计好框架，报告内容必须包含前期设计线图与计算、仿真验证、测试步骤描述、测试结果记录、分析与讨论。**按所设计的实验电路进行测试过程中，由于经验不足或考虑不全面，可能会出现各种实际问题。诊断与排除故障、使电路能正常工作，是自主设计型实验的重要环节。制定实验方案应考虑以下因素：

(1) 实验结果的准确度要求

基于一定原理和方法的测量，其仪表误差限和方法误差是可以估算的，因此制定实验方案主要考虑被测量的大小、仪表的基本误差和仪表内阻的影响、量程等。

(2) 实验设备和元器件的制约

制定实验方案要充分考虑实验中仪器设备的能力、元器件的实际规格和精度，以及它们在使用中的限制条件。

(3) 实验和数据处理方便与否

同一实验要求可以直接测量也可以间接测量，可以单次测量也可以多次测量，还可以根据这个量与其他量的关系测量曲线来获得这个量，因此，操作是否方便，数据量多少是选择实验方案的重要因素。

(4) 灵活运用基本实验项目型实验的内容，设计性能优异的实验方案

范例 1：变压器参数及特性测试

变压器的特性和工作原理部分相关的实验研究题目如下，可参考制订相应的实验方案：

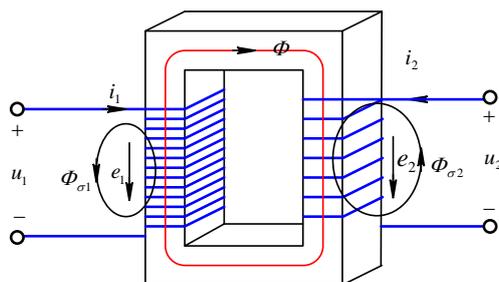


图 6-1 变压器示意图

- (1) 空载特性测试 $U_1=f(I_1)$
注意为保证安全，空载实验一般选低压侧进行，即低压绕组加电压，高压绕组开路。
- (2) 外特性测试 $U_2=f(I_2)$
负载外特性一般高压绕组加电压，低压绕组加负载。当变压器带负载时，其输出电压将随负载电流增加而降低。
- (3) 变压器阻抗变换作用
变压器二次侧分别接入量值合理的电阻、电容、电感 3 种元器件，测量一次侧二次侧的电压峰值、电流峰值和相位，分析变压器变换阻抗的作用。
- (4) 铁心磁饱和对磁化电流的影响
将一端线圈接至正弦电压源，调整励磁电压大小，观察记录其磁化电流的变化，分析铁心磁饱和对磁化电流的畸变影响。

范例 2: 耦合谐振电路特性研究

耦合谐振电路比普通的 RLC 串联电路具有更宽的通频带，为研究耦合电路的特性，可配合 OrCAD PSpice 仿真软件先进行结果分析和参数优化。最终通过实验将耦合谐振电路的幅频特性曲线与 RLC 串联电路的幅频特性曲线做对比分析。

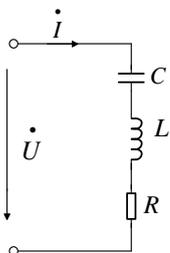


图 6-2 RLC 串联电路

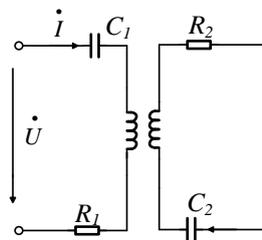


图 6-3 耦合谐振电路

6.2 实验器件和仪器设备的选择

(1) 在实验中要合理的选用仪器仪表，应该对仪器设备的规格、精度，记录其技术指标。只有在满足仪器仪表技术条件的情况下，才可能获得较高精度的测量结果。

(2) 仪器仪表内阻对测量结果的影响

仪器仪表内阻是指仪器仪表在工作状态下，在其两个端子间所呈现的等效电阻或阻抗。在精确测量时，由于内阻会改变被测电路的工作状态，必须考虑仪器仪表所引起的测量误差，并修正测量值。

(3) 元器件的耐压值、允许最大功率等指标可参考实验台的仪器元件使用手册进行选择。

6.3 实验要求

- (1) 根据电路所学知识和实验室现有硬件设备及元器件，自主设计实验题目、实验目的、实验方案、实验步骤（具体），并记录和分析实验结果；
- (2) 实验方案拟定后，可先通过计算分析或仿真优化得到大致结果（记录报告中），淘汰不合理方案，调整实验参数和实验条件，减轻操作工作量；
- (3) 同一实验要求可以直接测量也可以间接测量，可以单次测量也可以多次测量，还可根据量值直接的关系测量曲线来获得最终结果；
- (4) 具有创意的实验方案有加分，操作时间不局限于最后一次实验课（与实验老师协商），**实验报告在考试前一周提交。**