

TPE-DG2L 电路分析实验箱

实 验 指 导 书

清华大学科教仪器厂

目 录

实验一 元件的伏安特性的测试	(1)
实验二 基尔霍夫定律	(7)
实验三 叠加定理	(9)
实验四 戴维南定理	(12)
实验五 运算放大器和受控源	(17)
实验六 含有受控源电路的研究	(25)
实验七 简单万用表线路计算与校检	(29)
实验八 一阶、二阶动态电路研究	(39)
实验九 R、L、C 元件性能的研究	(44)
实验十 RLC 串联电路的幅频特性和谐振现象	(48)
实验十一 RC 电路频率特性的研究	(52)
实验十二 有源滤波器	(56)
实验十三 交流电路中的互感	

(65)

实验十四 二端口网络的研究

(69)

实验十五 负阻抗变换器

(73)

实验十六 回转器

(76)

实验一 元件伏安特性的测试

一、实验目的

1. 掌握线性电阻元件，非线性电阻元件及电源元件伏安特性的测量方法。
2. 学习直读式仪表和直流稳压电源等设备的使用方法。

二、实验说明

电阻性元件的特性可用其端电压 U 与通过它的电流 I 之间的函数关系来表示，这种 U 与 I 的关系称为电阻的伏安关系。如果将这种关系表示在 $U \sim I$ 平面上，则称为伏安特性曲线。

1. 线性电阻元件的伏安特性曲线是一条通过坐标原点的直线，该直线斜率的倒数就是电阻元件的电阻值。如图 1-1 所示。由图可知线性电阻的伏安特性对称于坐标原点，这种性质称为双向性，所有线性电阻元件都具有这种特性。

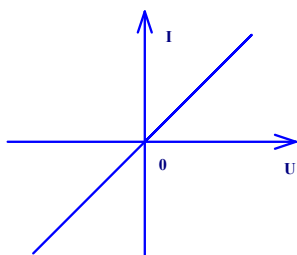


图 1-1

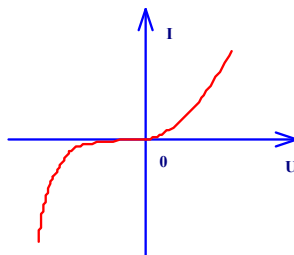


图 1-2

半导体二极管是一种非线性电阻元件，它的阻值随电流的变化而变化，电压、电流不服从欧姆定律。半导体二极管的电路符号用 $\text{—}\blacktriangleright\text{—}$ 表示，其伏安特性如图 1-2 所示。由图可见，半导体二极管的伏安特性曲线对于坐标原点是**不对称的，具有单向性特点**。因此，半导体二极管的电阻值随着端电压的大小和极性的不同而不同，当直流电源的正极加于二极管的阳极而负极与阴极联接时，二极管的电阻值很小，反之二极管的电阻值很大。

2. 电压源

能保持其端电压为恒定值且内部没有能量损失的电压源称为理想电压源。

实验一 元件的伏安特性的测试

理想电压源的符号和伏安特性曲线如图 1-3(a)所示。

理想电压源实际上是不存在的，实际电压源总具有一定的能量损失，这种实际电压源可以用理想电压源与电阻的串联组合来作为模型（见图 1-3b）。其端口的电压与电流的关系为：

$$U = U_s - IR_s$$

式中电阻 R_s 为实际电压源的内阻，上式的关系曲线如图 1-3b 所示。显然实际电压源的内阻越小，其特性越接近理想电压源。实验箱内直流稳压电源的内阻很小，当通过的电流在规定的范围内变化时，可以近似地当作理想电压源来处理。

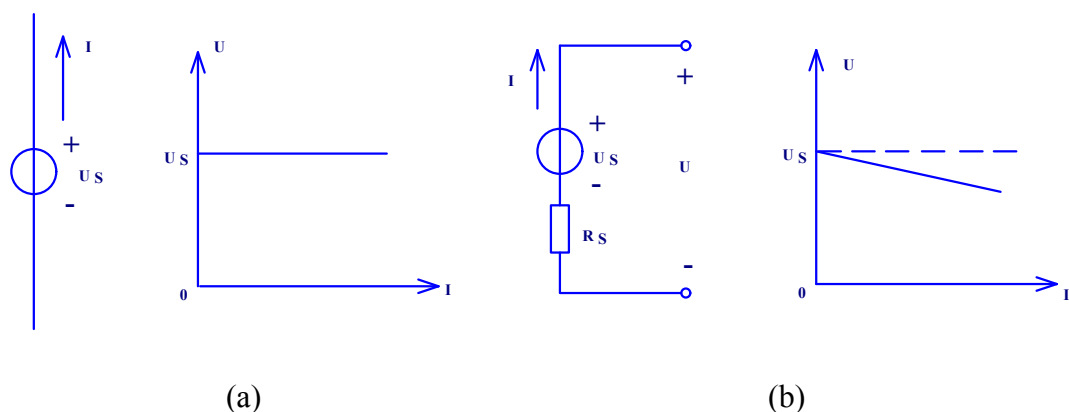


图 1-3

3. 电压、电流的测量

用电压表和电流表测量电阻时，由于电压表的内阻不是无穷大，电流表的内阻不是零。所以会给测量结果带来一定的方法误差。

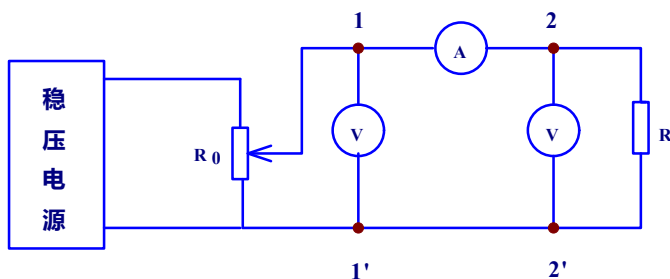


图 1-4

例如在测量图 1-4 中的 R 支路的电流和电压时，电压表在线路中的连接方

实验一 元件的伏安特性的测试

法有两种可供选择。如图中的 1-1' 点和 2-2' 点，在 1-1' 点时，电流表的读数为流过 R 的电流值，而电压表的读数不仅含有 R 上的电压降，而且含有电流表内阻上的电压降，因此电压表的读数较实际值为大，当电压表在 2-2' 处时，电压表的读数为 R 上的电压降，而电流表的读数除含有电阻 R 的电流外还含有流过电压表的电流值，因此电流表的读数较实际值为大。

显而易见，当 R 的阻值比电流表的内阻大得多时，电压表宜接在 1-1' 处，当电压表的内阻比 R 的阻值大得多时则电压表的测量位置应选择在 2-2' 处。实际测量时，某一支路的电阻常常是未知的，因此，电压表的位置可以用下面方法选定：先分别在 1-1' 和 2-2' 两处试一试，如果这两种接法电压表的读数差别很小，甚至无差别，即可接在 1-1' 处。如果两种接法电流表的读数差别很小或无甚区别，则电压表接于 1-1' 处或 2-2' 处均可。

三、仪器设备

- | | |
|------------|----|
| 1. 电路分析实验箱 | 一台 |
| 2. 直流毫安表 | 一只 |
| 3. 数字万用表 | 一只 |

四、实验内容与步骤

1. 测定线性电阻的伏安特性：

按图 1-5 接好线路，经检查无误后，接入直流稳压电源，调节输出电压依次为表 1-1 中所列数值，并将测量所得对应的电流值记录于表 1-1 中。

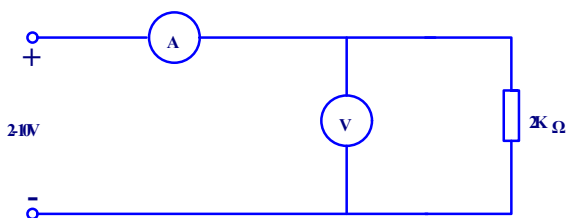


图 1-5

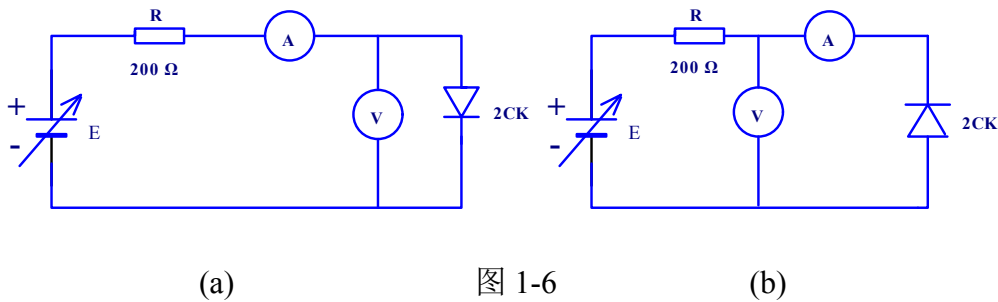
表 1-1

$U(V)$	0	2	4	6	8	10
$I(mA)$						

实验一 元件的伏安特性的测试

2. 测定半导体二极管的伏安特性：

选用 2CK 型普通半导体二极管作为被测元件，实验线路如图 1-6(a)(b)所示。图中电阻 R 为限流电阻，用以保护二极管。在测二极管反向特性时，由于二极管的反向电阻很大，流过它的电流很小，电流表应选用直流微安档。



1) 正向特性

按图 1-6(a)接线，经检查无误后，开启直流稳压源，调节输出电压，使电流表读数分别为表 1-2 中的数值，对于每一个电流值测量出对应的电压值，记入表 1-2 中，为了便于作图在曲线的弯曲部位可适当多取几个点。

表 1-2

$I(\text{mA})$	0	$1\mu\text{A}$	$10\mu\text{A}$	$100\mu\text{A}$	1	3	10	20	30	40	50...	...90	
$U(\text{V})$													

2) 反向特性

按图 1-6(b)接线，经检查无误后，接入直流稳压电源，调节输出电压为表 1-3 中所列数值，并将测量所得相应的电流值记入表 1-3 中。

表 1-3

$U(\text{V})$	0	5	10	15	20	
$I(\mu\text{A})$						

3. 测定理想电压源的伏安特性

实验采用直流稳压电源作为理想电压源，因其内阻在和外电路电阻相比可以忽略不计的情况下，其输出电压基本维持不变，可以把直流稳压电源视为理想电压源，按图 1-7 接线，其中 $R_1 = 200\Omega$ 为限流电阻， R_2 作为稳压电源的负

实验一 元件的伏安特性的测试

载。

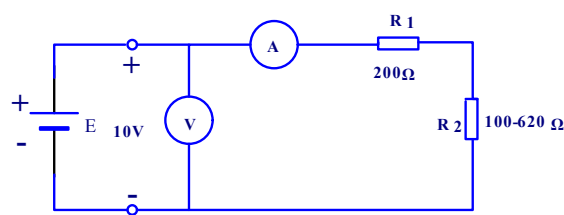


图 1-7

接入直流稳压电源，并调节输出电压 $E = 10\text{V}$ ，由大到小改变电阻 R_2 的阻值，使其分别等于 620Ω 、 510Ω 、 390Ω 、 300Ω 、 200Ω 、 100Ω ，将相应的电压、电流数值记入表 1-4 中。

表 1-4

$R_2(\Omega)$	620	510	390	300	200	100
$U(V)$						
$I(\text{mA})$						

4. 测定实际电压源的伏安特性

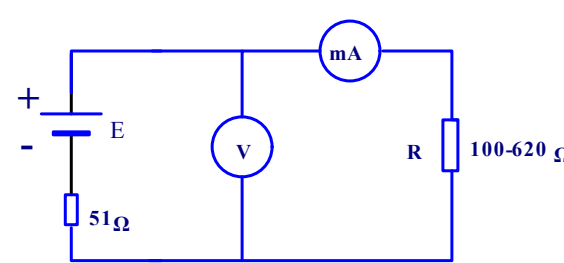


图 1-8

首先选取一个 51Ω 的电阻，作为直流稳压电源的内阻与稳压电源串联组成一个实际电压源模型，其实验线路如图 1-8 所示。其中负载电阻仍然取 620Ω 、 510Ω 、 390Ω 、 300Ω 、 200Ω 、 100Ω 各值。实验步骤与前项相同，测量所得数据填入表 1-5 中。

实验一 元件的伏安特性的测试

表 1-5

$R(\Omega)$	开路	620	510	390	300	200	100
$U(V)$	10						
$I(mA)$	0						

五、思考题

有一个线性电阻 $R=200\Omega$ ，用电压表、电流表测电阻 R ，已知电压表内阻 $R_V=10K\Omega$ ，电流表内阻 $R_A=0.2\Omega$ ，问电压表与电流表怎样接法其误差较小？

六、实验报告要求

1. 用坐标纸画出各元件的伏安特性曲线，并作出必要的分析。
2. 回答思考题，并画出测量电路图。

实验二 基尔霍夫定律

一、实验目的

1. 验证基尔霍夫电流、电压定律，加深对基尔霍夫定律的理解。
2. 加深对电流、电压参考方向的理解。

二、实验原理

基尔霍夫定律是集总电路的基本定律。它包括电流定律和电压定律。

基尔霍夫电流定律 (KCL): 在集总电路中, 任何时刻, 对任一节点, 所有支路电流的代数和恒等于零。

基尔霍夫电压定律 (KVL): 在集总电路中, 任何时刻, 沿任一回路所有支路电压的代数和恒等于零。

三、仪器设备

- | | |
|------------|----|
| 1. 电路分析实验箱 | 一台 |
| 2. 直流毫安表 | 二只 |
| 3. 数字万用表 | 一台 |

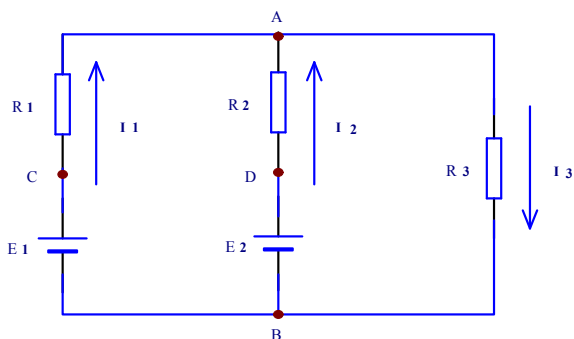


图 2-1

四、实验内容与步骤

1. 实验前先任意设定三条支路的电流参考方向, 可采用如图 2-1 中 I_1 、 I_2 、 I_3 所示。

实验二 基尔霍夫定律

- 按图 2-1 所示接线。
- 按图 2-1 分别将 E_1 、 E_2 两路直流稳压电源接入电路，令 $E_1=3\text{V}$ ， $E_2=6\text{V}$ ， $R_1=1\text{k}\Omega$ 、 $R_2=1\text{k}\Omega$ 、 $R_3=1\text{k}\Omega$ 。
- 将直流毫安表串联在 I_1 、 I_2 、 I_3 支路中（注意：直流毫安表的“+、-”极与电流的参考方向）
- 确认连线正确后，再通电，将直流毫安表的值记录在表 2-1 内。
- 用数字万用表分别测量两路电源及电阻元件上的电压值，记录在表 2-1 内

表 2-1

被测量	$I_1(\text{mA})$	$I_2(\text{mA})$	$I_3(\text{mA})$	$U_{R1}(\text{V})$	$U_{R2}(\text{V})$	$U_{R3}(\text{V})$
计算量						
测量值						
相对误差						

五、实验报告要求

- 选定实路电路中的任一个节点，将测量数据代入基尔霍夫电流定律加以验证。
- 选定实验电路中的任一闭合电路，将测量数据代入基尔霍夫电压定律，加以验证。
- 将计算值与测量值比较，分析误差原因。

实验三 叠加定理

一、实验目的

1. 验证叠加定理
2. 正确使用直流稳压电源和万用电表。

二、实验原理

叠加原理不仅适用于线性直流电路，也适用于线性交流电路，为了测量方便，我们用直流电路来验证它。叠加原理可简述如下：

在线性电路中，任一支路中的电流（或电压）等于电路中各个独立源分别单独作用时在该支路中产生的电流（或电压）的代数和，所谓一个电源单独作用是指除了该电源外其他所有电源的作用都去掉，即理想电压源所在处用短路代替，理想电流源所在处用开路代替，但保留它们的内阻，电路结构也不作改变。

由于功率是电压或电流的二次函数，因此叠加定理不能用来直接计算功率。例如在图 3-1 中

$$I_1 = I'_1 - I''_1$$

$$I_2 = -I'_2 + I''_2$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3$$

显然

$$P_{R1} \neq (I'_1)^2 R_1 + (I''_1)^2 R_1$$

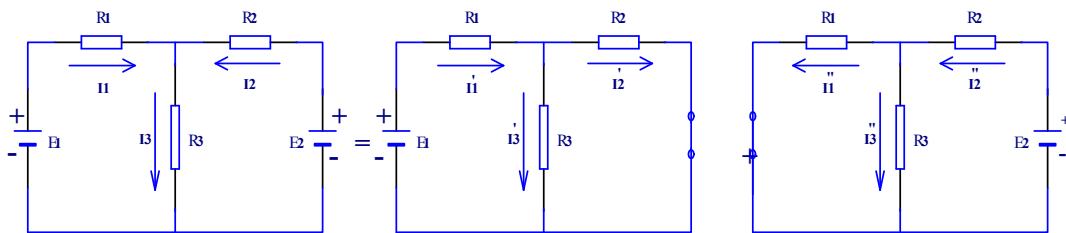


图 3-1

实验三 叠加定理

三、仪器设备

- | | |
|------------|----|
| 1. 电路分析实验箱 | 一台 |
| 2. 直流毫安表 | 二只 |
| 3. 数字万用表 | 一台 |

四、实验内容与步骤

实验线路如图 3-2 所示

表 3-1

	实验值				计算值			
	I_3 (mA)	U_{R1} (V))	U_{R2} (V))	U_{R3} (V))	I_3 (mA)	U_{R1} (V)	U_{R2} (V)	U_{R3} (V)
E_1 、 E_2 同时作用								
E_1 单独作用								
E_2 单独作用								

1. 实验箱电源接通 220V 电源，调节输出电压，使第一路输出端电压 $E_1=10V$ ；第二路输出端电压 $E_2=6V$ ，（须用万用表重新测定），断开电源开关待用。按图 3-2 接线， $R_4 + R_3$ 调到 1K，经教师检查线路后，再接通电源开关。

2. 测量 E_1 、 E_2 同时作用和分别单独作用时的支路电流 I_3 ，并将数据记入表格 3-1 中。

注意：一个电源单独作用时，另一个电源需从电路中取出，并将空出的两点用导线连起来。还要注意电流（或电压）的正、负极性。（注意：用指针表时，凡表针反偏的表示该量的实际方向与参考方向相反，应将表针反过来测量，

实验三 叠加定理

数值取为负值!)

3. 选一个回路，测定各元件上的电压，将数据记入表格 3-1 中。

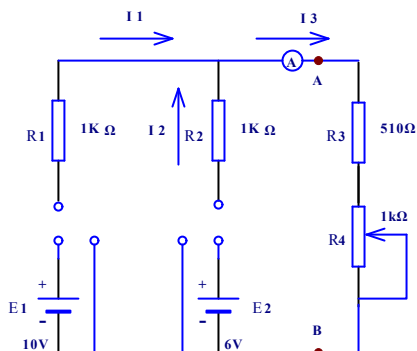


图 3-2

五、实验报告要求

1. 用实验数据验证支路的电流是否符合叠加原理，并对实验误差进行适当分析。
2. 用实测电流值、电阻值计算电阻 R_3 所消耗的功率为多少？能否直接用叠加原理计算？试用具体数值说明之。

实验四 戴维南定理

一、实验目的

1. 验证戴维南定理
2. 测定线性有源一端口网络的外特性和戴维南等效电路的外特性。

二、实验原理

戴维南定理指出：任何一个线性有源一端口网络，对于外电路而言，总可以用一个理想电压源和电阻的串联形式来代替，理想电压源的电压等于原一端口口的开路电压 U_{oc} ，其电阻（又称等效内阻）等于网络中所有独立源置零时的入端等效电阻 R_{eq} ，见图 4-1。

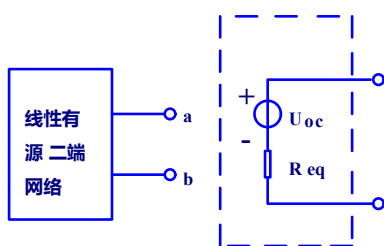


图 4-1

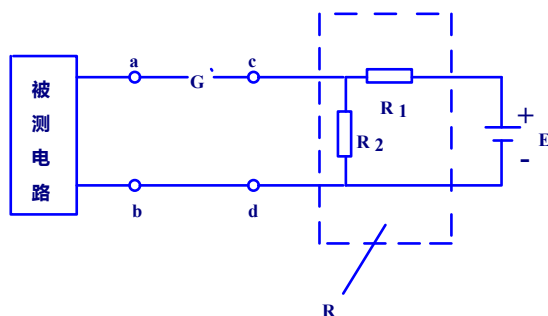


图 4-2

1. 开路电压的测量方法

方法一：直接测量法。当有源二端网络的等效内阻 R_{eq} 与电压表的内阻 R_v 相比可以忽略不计时，可以直接用电压表测量开路电压。

方法二：补偿法。其测量电路如图 4-2 所示， E 为高精度的标准电压源， R 为标准分压电阻箱， G 为高灵敏度的检流计。调节电阻箱的分压比， c 、 d 两端的电压随之改变，当 $U_{cd} = U_{ab}$ 时，流过检流计 G 的电流为零，因此

$$U_{ab} = U_{cd} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E = KE$$

实验四 戴维南定理

式中 $K = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 为电阻箱的分压比。根据标准电压 E 和分压比 K 就可求得开路电压 U_{ab} ，因为电路平衡时 $I_G = 0$ ，不消耗电能，所以此法测量精度较高。

2. 等效电阻 R_{eq} 的测量方法

对于已知的线性有源一端口网络，其入端等效电阻 R_{eq} 可以从原网络计算得出，也可以通过实验测出，下面介绍几种测量方法：

方法一：将有源二端网络中的独立源都去掉，在 ab 端外加一已知电压 U ，测量一端口的总电流 $I_{\text{总}}$ ，则等效电阻 $R_{eq} = \frac{U}{I_{\text{总}}}$ 。

实际的电压源和电流源都具有一定的内阻，它并不能与电源本身分开，因此在去掉电源的同时，也把电源的内阻去掉了，无法将电源内阻保留下来，这将影响测量精度，因而这种方法只适用于电压源内阻较小和电流源内阻较大的情况。

方法二：测量 ab 端的开路电压 U_{oc} 及短路电流 I_{sc} 则等效电阻

$$R_{eq} = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$$

这种方法适用于 ab 端等效电阻 R_{eq} 较大，而短路电流不超过额定值的情形，否则有损坏电源的危险。

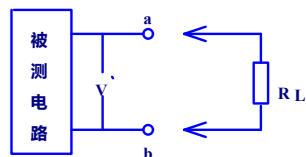


图 4-3

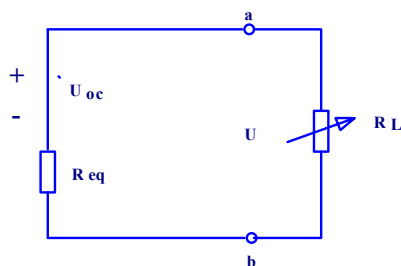


图 4-4

方法三：两次电压测量法

实验四 戴维南定理

测量电路如图 4-3 所示，第一次测量 ab 端的开路 U_{oc} ，第二次在 ab 端接一已知电阻 R_L （负载电阻），测量此时 a 、 b 端的负载电压 U ，则 a 、 b 端的等效电阻 R_{eq} 为：

$$R_{eq} = \left(\frac{U_{oc}}{U} - 1 \right) R_L$$

第三种方法克服了第一和第二种方法的缺点和局限性，在实际测量中常被采用。

3. 如果用电压等于开路电压 U_{oc} 的理想电压源与等效电阻 R_{eq} 相串联的电路（称为戴维南等效电路，参见图 4-4）来代替原有源二端网络，则它的外特性 $U = f(I)$ 应与有源二端网络的外特性完全相同。实验原理电路见图 4-5b。

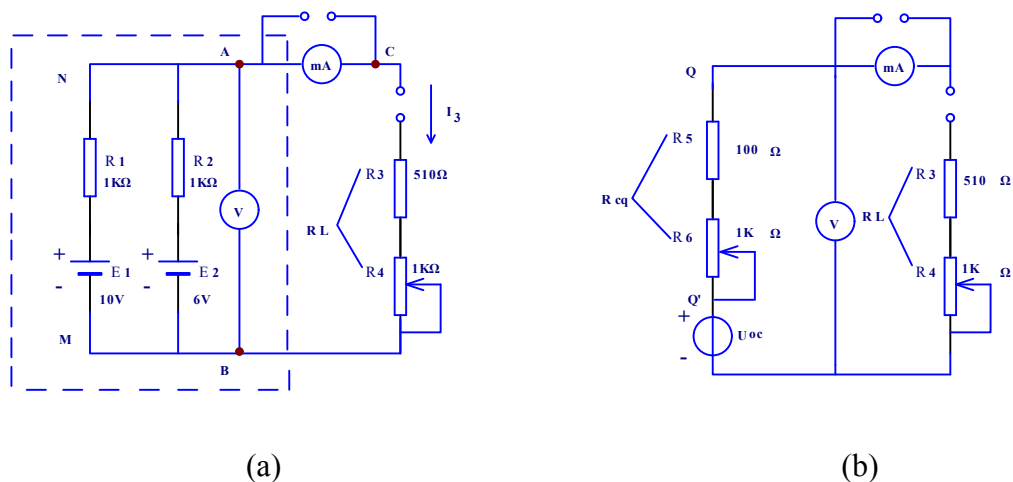


图 4-5

三、预习内容

在图 4-5(a)中设 $E_1=10V$ ， $E_2=6V$ ， $R_1=R_2=1K\Omega$ ，根据戴维南定理将 AB 以左的电路化简为戴维南等效电路。即计算图示虚线部分的开路电压 U_{oc} ，等效内阻 R_{eq} 及 A、B 直接短路时的短路电流 I_{sc} 之值，填入自拟的表格中。

四、仪器设备

- | | |
|------------|----|
| 1. 电路分析实验箱 | 一台 |
| 2. 直流毫安表 | 一只 |
| 3. 数字万用表 | 一台 |

五、实验内容与步骤

1. 用戴维南定理求支路电流 I_3

测定有源二端网络的开路电压 U_{oc} 和等效电阻 R_{eq}

按图 4-5(a)接线，经检查无误后，采用直接测量法测定有源二端网络的开路电压 U_{oc} 。电压表内阻应远大于二端网络的等效电阻 R_{eq} 。

用两种方法测定有源二端网络的等效电阻 R_{eq}

A. 采用原理中介绍的方法二测量：

首先利用上面测得的开路电压 U_{oc} 和预习中计算出的 R_{eq} 估算网络的短路电流 I_{sc} 大小，在 I_{sc} 之值不超过直流稳压电源电流的额定值和毫安表的最大量程的条件下，可直接测出短路电流，并将此短路电流 I_{sc} 数据记入表格 4-1 中。

B. 采用原理中介绍的方法三测量：

接通负载电阻 R_L ，调节电位器 R_4 ，使 $R_L = 1K\Omega$ ，使毫安表短接，测出此时的负载端电压 U ，并记入表格 4-1 中。

表 4-1

项目	U_{oc} (V)	U (V)	I_{sc} (mA)	R_{eq} (Ω)
数值				

取 A、B 两次测量的平均值作为 R_{eq} (I_3 的计算在实验报告中完成)

2. 测定有源二端网络的外特性

实验四 戴维南定理

调节电位器 R_4 即改变负载电阻 R_L 之值，在不同负载的情况下，测量相应的负载端电压和流过负载的电流，共取五个点将数据记入自拟的表格中。测量时注意，为了避免电表内阻的影响，测量电压 U 时，应将接在 AC 间的毫安表短路，测量电流 I 时，将电压表从 A、B 端拆除。若采用万用表进行测量，要特别注意换档。

3. 测定戴维南等效电路的外特性。

将另一路直流稳压电源的输出电压调节到等于实测的开路电压 U_{oc} 值，以此作为理想电压源，调节电位器 R_6 ，使 $R_5 + R_6 = R_{eq}$ ，并保持不变，以此作为等效内阻，将两者串联起来组成戴维南等效电路。按图 4-5(b)接线，经检查无误后，重复上述步骤测出负载电压和负载电流，并将数据记入自拟的表格中。

六、实验报告要求

1. 应用戴维南定理，根据实验数据计算 R_3 支路的电流 I_3 ，并与计算值进行比较。

2. 在同一坐标纸上作出两种情况下的外特性曲线，并作适当分析。判断戴维南定理的正确性。

实验五 运算放大器和受控源

一、实验目的

1. 获得运算放大器有源器件的感性认识。
2. 测试受控源特性，加深对它的理解，

二、实验说明

1. 运算放大器是一种有源三端元件，图 5-1(a)为运放的电路符号。

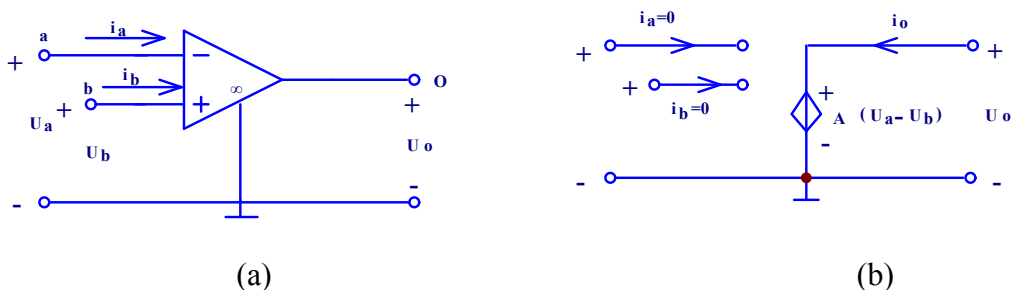


图 5-1

它有两个输入端，一个输出端和一个对输入和输出信号的参考地线端。“+”端称为非倒相输入端，信号从非倒相输入端输入时，输出信号与输入信号对参考地线端来说极性相同。“-”端称为倒相输入端，信号从倒相输入端输入时，输出信号与输入信号对参考地线端来说极性相反。运算放大器的输出端电压

$$u_o = A(u_b - u_a)$$

其中 A 是运算放大器的开环电压放大倍数。在理想情况下， A 和输入电阻 R_{in} 均为无穷大，因此有

$$u_b = u_a$$

$$i_b = \frac{u_b}{R_{in}} = 0, \quad i_a = \frac{u_a}{R_{in}} = 0$$

上述式子说明：

实验五 运算放大器和受控源

(1) 运算放大器的“+”端与“-”端之间等电位，通常称为“虚短路”。

(2) 运算放大器的输入端电流等于零。称为“虚断路”。

此外，理想运算放大器的输出电阻为零。这些重要性质是简化分析含运算放大器电路的依据。

除了两个输入端、一个输出端和一个参考地线端外，运算放大器还有相对地线端的电源正端和电源负端。运算放大器的工作特性是在接有正、负电源(工作电源)的情况下才具有的。

运算放大器的理想电路模型为一受控电源。如图 5-1(b)所示。在它的外部接入不同的电路元件可以实现信号的模拟运算或模拟变换，它的应用极其广泛。含有运算放大器的电路是一种有源网络，在电路实验中主要研究它的端口特性以了解其功能。本次实验将要研究由运算放大器组成的几种基本受控源电路。

2. 图 5-2 所示的电路是一个电压控制型电压源 (vcvs)。由于运算放大器的“+”和“-”端为虚短路，有

$$u_a = u_b = u_1$$

故

$$i_{R_2} = \frac{u_b}{R_2} = \frac{u_1}{R_2}$$

又因

$$i_{R_1} = i_{R_2}$$

所以

$$u_2 = i_{R_1} R_1 + i_{R_2} R_2$$

$$= i_{R_2} (R_1 + R_2)$$

$$= \frac{u_1}{R_2} (R_1 + R_2)$$

$$= \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) u_1$$

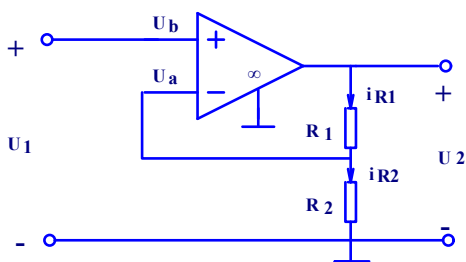


图 5-2

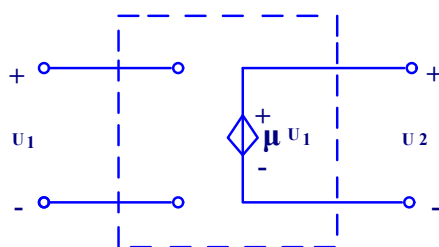


图 5-3

即运算放大器的输出电压 u_2 受输入电压 u_1 的控制，它的理想电路模型如图

5-3 所示。其电压比

$$\mu = \frac{u_2}{u_1} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

实验五 运算放大器和受控源

μ 无量纲，称为电压放大倍数。该电路是一个非倒相比比例放大器，其输入和输出端钮有公共接地点。这种联接方式称为共地联接。

3. 将图 5-2 电路中的 R_1 看作一个负载电阻，这个电路就成为一个电压控制型电流源(vccs)如图 5-4 所示，运算放大器的输出电流

$$i_s = i_R = \frac{u_a}{R} = \frac{u_1}{R}$$

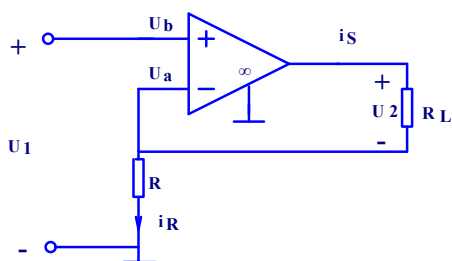


图 5-4

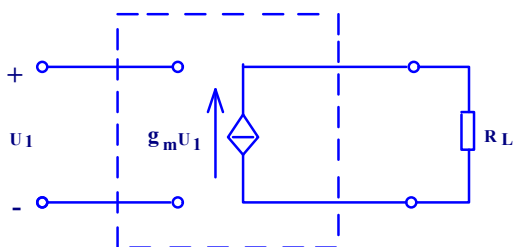


图 5-5

即 i_s 只受运算放大器输入电压 u_1 的控制，与负载电阻 R_L 无关。图 5-5 是它的理想电路模型。比例系数：

$$g_m = \frac{i_s}{u_1} = \frac{1}{R}$$

g_m 具有电导的量纲称为转移电导。图 5-4 所示电路中，输入、输出无公共接地点，这种联接方式称为浮地联接。

4. 一个简单的电流控制型电压源(ccvs)电路如图 5-6 所示。由于运算放大器的“+”端接地，即 $u_b = 0$ ，所以“-”端电压 u_a 也为零，在这种情况下，运算放大器的“-”端称为“虚地点”，显然流过电阻 R 的电流即为网络输入端口电流 i_1 ，运算放大器的输出电压 $u_2 = -i_1 R$ ，它受电流 i_1 所控制。图 5-7 是它的理想电路模型。其比例系数：

实验五 运算放大器和受控源

$$r_m = \frac{u_2}{i_1} = -R$$

r_m 具有电阻的量纲、称为转移电阻，联接方式为共地联接。

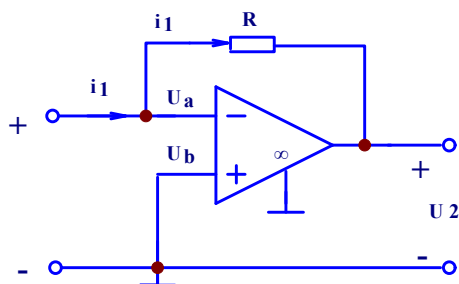


图 5-6

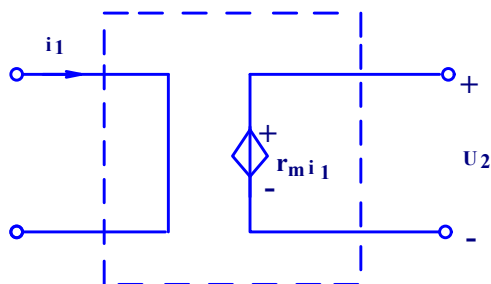


图 5-7

5. 运算放大器还可构成一个电流控制电流源(cccs)如图 5-8 所示，由于 $u_c = -i_{R_2} R_2 = -i_1 R_2$

\therefore

$$i_{R_3} = -\frac{u_c}{R_3} = i_1 \frac{R_2}{R_3}$$

\therefore

$$i_s = i_{R_2} + i_{R_3} = i_1 + i_1 \frac{R_2}{R_3}$$

$$= \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) i_1$$

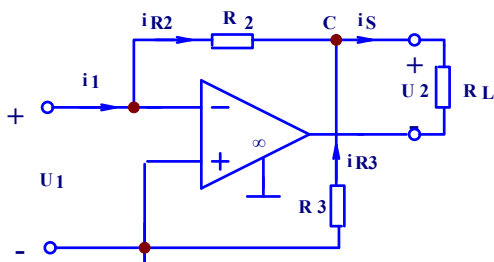


图 5-8

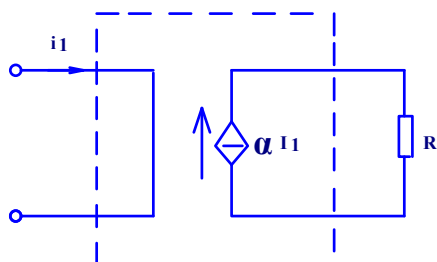


图 5-9

实验五 运算放大器和受控源

即输出电流 i_s 受输入端口电流 i_1 的控制，与负载电阻 R_L 无关。它的理想电路模型如图 5-9 所示。其电流比

$$\alpha = \frac{i_s}{i_1} = 1 + \frac{R_2}{R_3}$$

α 无量纲称为电流放大系数。这个电路实际上起着电流放大的作用，联接方式为浮地联接。

6. 本次实验中，受控源全部采用直流电源激励（输入），对于交流电源激励和其它电源激励，实验结果完全相同。由于运算放大器的输出电流较小，因此测量电压时必须用高内阻电压表，如用万用表等。

三、仪器设备

- | | |
|------------|----|
| 1. 电路分析实验箱 | 一台 |
| 2. 直流毫安表 | 二只 |
| 3. 数字万用表 | 一台 |

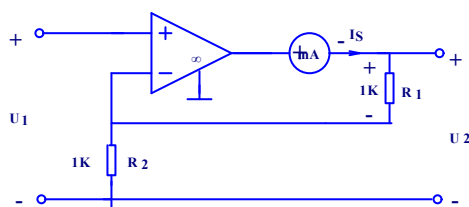


图 5-10

四、实验内容与步骤

1. 测试电压控制电压源和电压控制电流源特性。

实验线路及参数如图 5-10 所示。

表 5-1

给定值		U_1 (V)	0	0.5	1	1.5	2	2.5
VCVS	测量值	U_2 (V)						
	计算值	μ	/					
VCCS	测量值	I_s (mA)						
	计算值	g_m (s)	/					

①电路接好后，先不给激励电源 U_1 ，将运算放大器“+”端对地短路，接

实验五 运算放大器和受控源

通实验箱电源工作正常时，应有 $U_2=0$ 和 $I_s=0$ 。

②接入激励电源 U_1 ，取 U_1 分别为 0.5V、1V、1.5V、2V、2.5V（操作时每次都要注意测定一下），测量 U_2 及 I_s 值并逐一记入表 5-1 中

③保持 U_1 为 1.5 伏，改变 R_1 （即 R_L ）的阻值，分别测量 U_2 及 I_s 值并逐一记入表 5-2 中。

表 5-2

给定值		R_1 (K Ω)	1	2	3	4	5
VCVS	测量值	U_2 (V)					
	计算值	μ					
VCCS	测量值	I_s (mA)					
	计算值	g_m (s)					

④核算表 5-1 和表 5-2 中的各 μ 和 g_m 值，分析受控源特性。

2. 测试电流控制电压源特性

实验电路如图 5-11 所示，输入电流由电压源 U_s 与串联电阻 R_i 所提供。

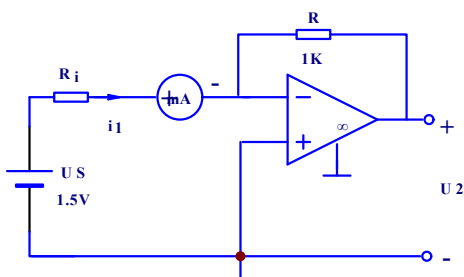


图 5-11

①给定 R 为 1K Ω ， U_s 为 1.5V，改变 R_i 的阻值，分别测量 I_1 和 U_2 的值，并逐一记录于表 5-3 中，注意 U_2 的实际方向。

实验五 运算放大器和受控源

表 5-3

给定值	R_i (K Ω)	1	2	3	4	5
测量值	I_1 (mA)					
	U_2 (V)					
计算值	r_m (Ω)					

②保持 U_s 为 1.5V，改变 R_i 为 1K Ω 的阻值，分别测量 I_1 和 U_2 的值，并逐一记录于表 5-4 中。

表 5-4

给定值	R (K Ω)	1	2	3	4	5
测量值	I_1 (mA)					
	U_2 (V)					
计算值	r_m (Ω)					

③核算表 5-3 和表 5-4 中的各 r_m 值，分析受控源特性。

3. 测试电流控制电流源特性，实验电路及参数如图 5-12 所示。

① 给定 U_s 为 1.5 伏， R_i 为 3 千欧， R_2 和 R_3 为 1 千欧，负载分别取 0.5 千欧、2 千欧、3 千欧逐一测量并记录 I_1 及 I_2 的数值。

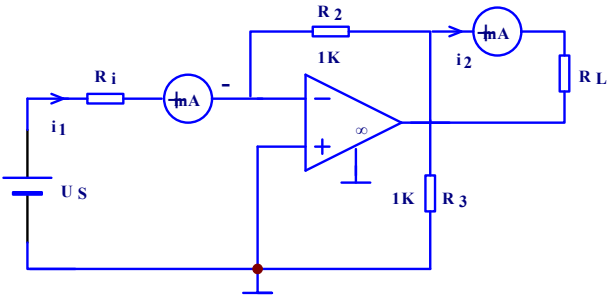


图 5-12

②保持 U_s 为 1.5 伏， R_L 为 1 千欧， R_2 和 R_3 为 1 千欧，分别取 R_i 为 3 千欧、2.5 千欧、2 千欧、1.5 千欧、1 千欧，逐一测量并记录 I_1 及 I_2 的数值。

③保持 U_s 为 1.5 伏， R_L 为 1 千欧、 R_i 为 3 千欧，分别取 R_2 （或 R_3 ）为 1

实验五 运算放大器和受控源

千欧、2 千欧、3 千欧、4 千欧、5 千欧，逐一测量并记录 I_1 及 I_2 的数值。以上各实验记录表格仿前自拟。

④核算各种电路参数下的 α 值，分析受控源特性。

五、注意事项

1. 实验电路确认无误后，方可接通电源，每次在运算放大器外部换接电路元件时，必须先断开电源。
2. 实验中，作受控源的运算放大器输出端不能与地端短接。
3. 做电流源实验时，不要使电流源负载开路。

六、实验报告要求

1. 整理各组实验数据，并从原理上加以讨论和说明。
2. 写出通过实验对实际受控源特性所加深的认识。
3. 试分析引起本次实验数据误差的原因。

实验六 含有受控源电路的研究

一、实验目的

1. 熟悉受控源的特性;
2. 通过理论分析和实验验证掌握含有受控源的线性电路的分析方法。

二、实验说明

在分析电子电路时将广泛地遇到非独立电源（电压源或电流源），这类电源有时也称为受控源。和独立电源不同地方是，它们中电压源的电压、电流源的电流不是独立的，而是受另一电压或电流的控制。按控制量与受控量的不同，非独立电源一般可以分为四种，即：电压控制的电压源、电流控制的电压源、电压控制的电流源和电流控制的电流源。它们的电路符号分别示于图 6-1a、b、c、d 中

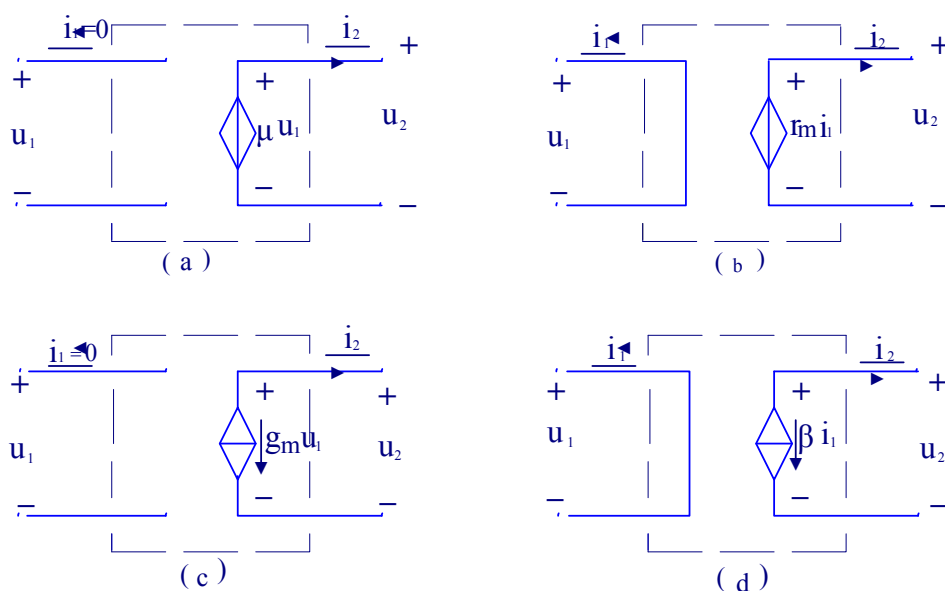


图 6-1

由图 6-1 可见，一个受控源可用一个含有两个支路的二端口网络来表示，其中支路 2 表示受控电源（电压源或电流源），支路 1 表示控制支路及控制量。在图 6-1a 中支路 1 是开路的，它的两端的电压为 u_1 ，支路 2 中有一电压源，其电压 $u_2 = \mu u_1$ ，即受控于电压 u_1 ，因此是一个电压控制的电压源。在图 6-1b 中支路 1 是短路的，流经其中的电流为 i_1 ，而支路 2 中的电压源，其电压 $u_2 = r_m i_1$ ，即受控于电流 i_1 ，因此是一个电流控制的电压源。与此类似，图 6-1c 和图 6-1d 分别

实验六 含有受控源电路的研究

是电压控制的电流源和电流控制的电流源，表示其特性的方程分别是 $i_2 = g_m u_1$ 和 $i_2 = \beta i_1$ 。

如果在表示受控源的控制量与受控量的关系式中，比例系数 μ 、 r_m 、 g_m 、 β 是常数，这样的受控源便是线性元件。由线性电阻 R 、电感 L 、电容 C 以及线性受控源组成的电路仍是线性电路。分析含有线性受控源的电路，可以先将受控源当作独立电源，写出电路的方程式，再将受控源的特性方程代入，用控制支路的电压(电流)表示受控源的电压(电流)，由此得出的方程便可解出电路中的各未知电流、电压。

对含有受控源的线性电路，叠加定理、戴维南定理也都是适用的。

在本实验中将通过对一个含有电压控制的电压源的线性电路的研究，掌握分析这类电路的方法。

本实验所用电压控制电压源是一个用运算放大器接成的比例器（图 6-2），在理想情况下（ $A \rightarrow \infty$ ），它的输入电压 u_1 与输出电压 u_2 有以下关系：

$$u_2 = -\frac{R_2}{R_1} u_1$$

如果 R_1 足够大，就可以将它看作图 6-1a 的电压控制的电压源， $\mu = -\frac{R_2}{R_1}$ 。应当注意，对于实际的运算放大器， u_2 的大小是有限制的，只有不超过规定的范围，上面的关系式才成立。

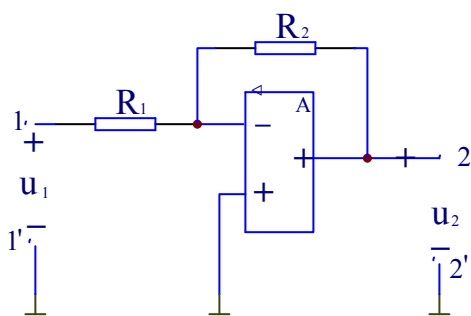


图 6-2

三、仪器设备

- | | |
|------------|----|
| 1. 电路分析实验箱 | 一台 |
| 2. 数字万用表 | 一只 |

四、预习内容

实验六 含有受控源电路的研究

将受控源接入图 6-3 的电路，应用以下指定的三个方法求出电路中的电压 U_{bc} 。

- a. 列写电路方程求解
- b. 应用叠加原理求解
- c. 用戴维南定理求解

将用以上方法解得的结果列写在表中：

求 解 方 法	求 解 结 果
列写电路方程	$U_{bc} =$
叠加定理	E_1 作用, $E_2=0$ $u'_{bc} =$
	$E_1=0$, E_2 作用时 $u''_{bc} =$
	E_1 、 E_2 共同作用时 $u_{bc} = u'_{bc} + u''_{bc} =$
戴维南定理	等效电势 $E_o =$
	等效内阻 $R_o =$
	$U_{bc} =$

预习时 μ 按 $\mu = -R_2/R_1 = -2$ 计算。

接线图 6-3 的等效电路如图 6-4 所示。预习按此图计算 u_{bc} 。

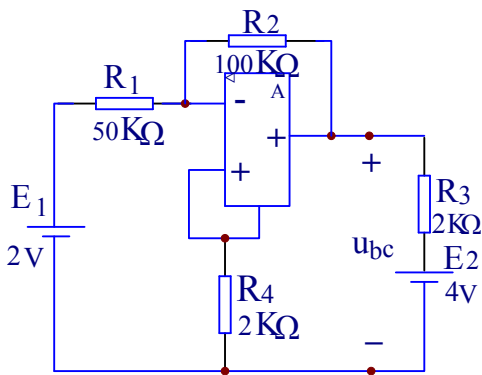


图 6-3

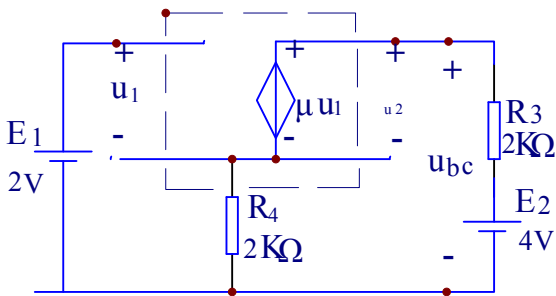


图 6-4

五、实验内容与步骤

1. 测定所用受控源的特性，即确定其比例系数及适用电压范围。测定线路如图 6-3 所示，其中 $R_1=50K\Omega$, $R_2=100K\Omega$ ，要求在不同的 u_1 情况下测量 u_2 。
 $\mu = -R_2 / R_1$ 应为一常数，但因测量所用电表有一定误差，所以实验所得 μ 有一

实验六 含有受控源电路的研究

定差异。在本实验条件下,如差异超过 2%就认为这个非独立源已经超出了线性范围。比例系数应取线性范围内的平均值。

实验记录表格由同学自己拟定。

2. 实验验证:按图 6-3 接成实验线路,测量上表中各数值,将结果列表加以比较。实验时电路参数取下列值:

$$E_1 = 2V, E_2 = 4V, R_3 = 2K\Omega$$

应用戴维南定理时,需要测出等效内阻 R_0 ,测 R_0 的方法可用加压求流或测出开路电压和短路电流然后计算。实验中这两种方法容易造成受控源过载以及超出线性范围,本实验可以在开路端 bc 处加一适当负载 R_L ,并测得这时的出口电压 U_L 。从等效电路图 6-5 看,有

$$U_L = E_0 \frac{R_L}{R_0 + R_L} \quad \therefore R_0 = R_L \frac{E_0 - U_L}{U_L}$$

当改变 R_L 使 $U_L = \frac{1}{2}E_0$ 时,此时的 R_L 值即等于等效电阻 R_0 ,而此时电压表的读数为端口开路电压的一半。这个方法还有一个好处,即测量用同一个电压表,由电压表带来的误差,计算时可以在很大程度上互相抵消。 R_L 大小要选合适,使 $E_0 - U_L$ 的差值不要太小。

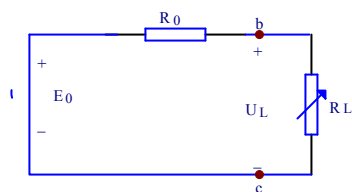


图 6-5

五、思考题

如果仔细观察,测量 bc 端开路电压

(戴维南定理中的 E_0)时,所得结果总比计算值略小,为什么?

六、实验报告要求

1. 用实测的 μ 值按图 6-4 计算 u_{bc} (三种方法)
2. 将上述计算结果与实验测量值进行比较,分析产生误差的原因。
3. 回答思考题。

实验七 简单万用表线路计算和校验

一、实验目的

1. 了解万用表电流档、电压档及欧姆档电路的原理与设计方法。
2. 了解欧姆档的使用方法。
3. 了解校验电表的方法。

二、实验说明

万用表是测量工作中最常见的电表之一，用它可以进行电压、电流和电阻等多种物理量的测量，每种测量还有几个不同的量程。

万用表的内部组成从原理上分为两部分：即表头和测量电路。表头通常是一个直流微安表，它的工作原理可归纳为：“表头指针的偏转角与流过表头的电流成正比”。在设计电路时，只考虑表头的“满偏电流 I_m ”和“内阻 R_i ”值就够了。满偏电流是指表针偏转满刻度时流过表头的电流值，内阻则是表头线圈的铜线电阻。表头与各种测量电路连接就可以进行多种电量的测量。通常借助于转换开关可以将表头与这些测量电路分别连接起来，就可以组成一个万用表。本实验分别研究这些实验。

1. 直流电流档

多量程的分流器有两种电路。图 7-1 的电路是利用转换开关分别接入不同阻值的分流器来改变它的电流量程。这种电路计算简单，缺点是可能由于开关接触不太好致使测量不准。最坏情况（在开关接触不通或带电转换量程时有可能发生）是开关断路，这时全部被测电流都流过表头造成严重过载（甚至损坏）。因此多量程分流器都采用图 7-2 的电路，以避免上述缺点。计算时按表头支路总电阻 $r'_0 = 2250\Omega$ 来设计，其中 r' 是一个“补足”电阻，数值视 r_0 大小而定。

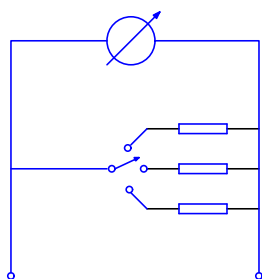


图 7-1

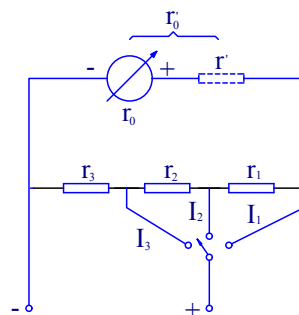


图 7-2

实验七 简单万用表线路计算与校检

图 7-3 为实验用万用表直流电流档电路,采用环形分流器。

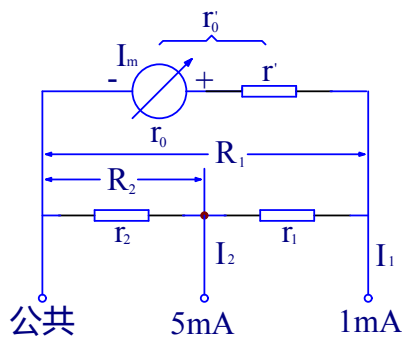


图 7-3

给定表头参数 $I_m=100\mu\text{A}$, $r'_0=2250\Omega$

由图 7-3 得知

$$I_m \cdot r'_0 = (I_1 - I_m)R_1$$

$$I_m(r'_0 + R_1) = I_1R_1$$

$$I_m = \frac{R_1}{(r'_0 + R_1)} I_1 \quad (5-1)$$

同理可推得

$$I_m = \frac{R_2}{(r'_0 + R_1)} I_2 \quad (5-2)$$

合并(5-1)和(5-2)得

$$\frac{R_1}{(r'_0 + R_1)} I_1 = \frac{R_2}{(r'_0 + R_1)} I_2$$

将 $r'_0 + R_1$ 消去有:

$$I_1R_1 = I_2R_2 \quad (5-3)$$

现将已知数据代入计算如下:

$$R_1 = \frac{I_m r'_0}{(I_1 - I_m)}$$

$$R_1 = \frac{100 \times 10^{-6} \times 2250}{10^{-3} - 10^{-4}}$$

$$= \frac{2250}{9} = 250 \Omega$$

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$R_2 = \frac{I_1}{I_2} R_1$$

$$R_2 = \frac{1}{5} \times 250 = 50 \Omega$$

$$r_1 = 200 \Omega$$

$$r_2 = R_2 = 50 \Omega$$

2. 直流电压档

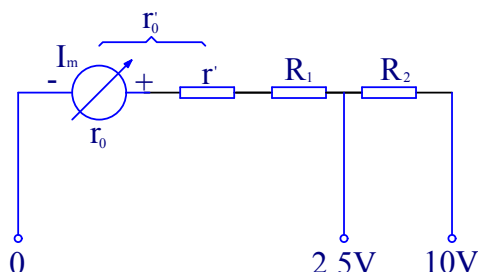


图 7-4

图 7-4 为实验用万用表直流电压档线路，给定表头参数同上

$$I_m = 100 \mu A, \quad r'_0 = 2250 \Omega$$

先根据表头的满偏电流，计算出 Ω/V (每伏欧姆数)

$$\Omega/V = \frac{1}{100 \mu A} = \frac{10^6}{100} = 10 K\Omega/V$$

下面计算 R_1 和 R_2

$$R_1 = 2.5V \times \frac{10 K\Omega}{V} - r'_0 = 25 K\Omega - 2250 \Omega = 22.75 K\Omega$$

$$R_2 = (10 - 2.5)V \times 10 K\Omega/V = 75 K\Omega$$

实验七 简单万用表线路计算与校检

3. 交流电压档

采用图 7-5 所示的半波或全波整流电路，整流器用晶体二极管。本实验采用半波整流，既省元件，线路又简单。

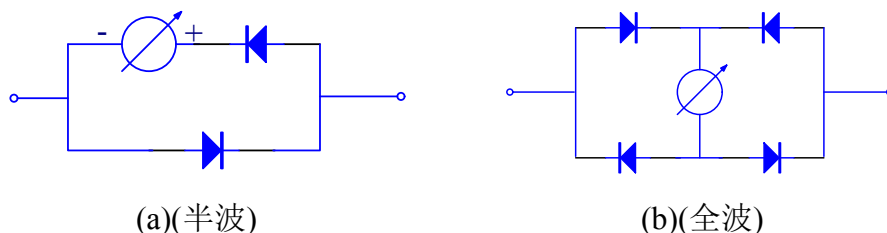


图 7-5

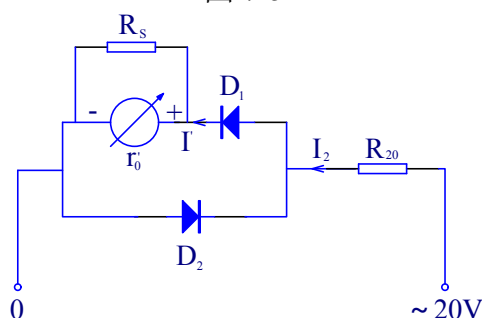


图 7-6

图 7-6 是一种交流电压档线路，并联在表头上的电阻 R_s 用来增大整流器的电流以减少整流元件的非线性影响； D_2 用来减小在 D_1 不导电的半个周期内加到 D_1 上的反向电压以防止它的击穿。

(1) R_s 的计算

若并联电阻 R_s 后流过 D_1 的电流为 $200\mu A$ ，此时 R_s 为：

$$R_s = \frac{I_m r'_0}{I' - I_m} = \frac{100 \times 2250}{200 - 100} = 2250 \Omega$$

(2) 由于流经表头的电流为直流，因此要换算成交流有效值 I_2 。原表头并上 R_s 以后可以整体看成一只 $200\mu A$ 的满偏的表头，再加上整流电路为半波整流电路，此时有效值与平均值之比为 2.22。因此有效值

$$I_2 = \frac{200 \times 10^{-6}}{0.45} = 444.4 \mu A$$

(3) 计算 R_{20}

$$R_{20} = \frac{20}{444.4} \times 10^6 - r_0 - R_{\text{正}}$$

其中 r_0 为 $200\mu\text{A}$ 表头的内阻 $=1125\Omega$

$R_{\text{正}}$ 为二极管 D_1 的正向导通电阻按 500Ω 计算。

则

$$\begin{aligned} R_{20} &= \frac{20}{444.4} \times 10^6 - 1125 - 500 \\ &= 45004.5 - 1125 - 500 \\ &= 43.38\text{K} \end{aligned}$$

4. 欧姆档

(1) 原理说明

电阻的测量是利用在固定电压下将被测电阻串联到电路时要引起电路中电流改变这一效应来实现的，图 7-7 是一种最简单的欧姆表线路。

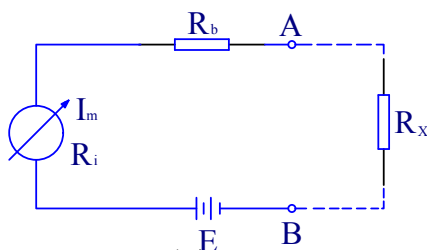


图 7-7

它是将一只磁电系测量机构（表头）配上限流电阻 R_b 和干电池(电势为 E) 组合而成的，若表头的满偏电流为 I_m ，内阻为 R_i ，接入被测电阻 R_x 后流过表头的电流 I_x 可用下式表达

$$I_x = \frac{E}{(R_i + R_b) + R_x}$$

从这个公式可以看出，被测电阻 R_x 越小，则电路的电流 I_x 越大，反之，则越小。因此通过表头的电流值即可间接反映 R_x 的大小。

当 $R_x=0$ 时(即仪表端钮短路)流过表头的电流有最大值。适当选择限流电阻 R_b 的数值，使流过表头的最大电流，刚好等于表头的满偏电流 I_m ，即

$$I_m = \frac{E}{R_i + R_b}$$

R_b 的数值为

$$R_b = \frac{E}{I_m} - R_i$$

这时, 指针的满偏转处刻度为 $R_x=0$ 。

当 $R_x=\infty$ (即仪表端钮开路 0 时, 表头没有电流通过, 仪表指针处在 0 处, 此处则刻以 $R_x=\infty$, 而从 $0\sim\infty$ 之间的任何 R_x 值, 都包括在这个刻度范围之内。即在这种线路中, 表头的刻度尺改按欧姆来刻度。它具有反向的不均匀的刻度特性。

当被测电阻等于欧姆表的内阻 (R_i+R_b) 时, 电表读数应恰好在刻度尺的中央, 这一电阻刻度称为“中值电阻”。用 R_m 来表示, 其大小可用下式计算

$$R_m = (R_i + R_b) = \frac{E}{I_m}$$

表面看来, 从 $0\sim\infty$ 之间的所有 R_x 值都包括在刻度范围以内。但实际上只有在 $1/5R_m$ 到 5 倍 R_m 这一个范围内的电阻值, 才能测得比较准确, 而靠近刻度尺两端(即 0 与 ∞), 测量准确度是很低的, 而且不易读准。因此在使用欧姆表时, 有必要选择合适的中值电阻(称为量程选择), 以得到较准确的测量值。所以欧姆表量程的选择实际上是中值电阻的选择。

为了改变欧姆表的量程(即改变中值电阻的数值), 通常的办法是给表头并联上一个分流电阻 R_s 。

电阻档可以单独设计自己的分流电路, 也可以和电流档共用一个环流分流电路, 这样不但节省元件还能简化电路计算, 不过这时要使用转换开关把“调零”电阻 R 接入电路, 就增加了电路设计上的困难。采用这种方法, 中值电阻值也不能任意选用了, 它决定于电流档量程数值和所用的电池电势 E 的大小。

(2) 电路的选择与计算

图 7-8 为本实验采用的欧姆档线路, 表头的参数同前, 即 $I_m = 100\mu A$,

$$r'_0 = 2250\Omega$$

实验七 简单万用表线路计算与校检

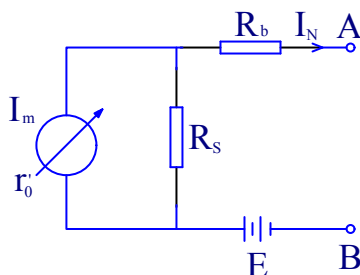


图 7-8

取 $E=1.5V$

① R_s 的并入, 使得表头电流满偏时, 仪表的灵敏度降低, 从 A 端流出口电流 I_N 增大了, I_N 的增大, 使得从 A、B 两点看进去, 仪表的总内阻较未并入 R_s 时降低了。

若取 $R_s=250\Omega$, 则测量机构部分变成为 $1mA$ 的电流表(见实验五中直流电流表的计算), 此时 $R_m = \frac{1.5}{1 \times 10^{-3}} = 1500\Omega$ 。

$$\textcircled{2} R_b = \frac{E}{I_N} - \frac{r'_0 R_s}{r'_0 + R_s} = \frac{1.5}{1 \times 10^{-3}} - \frac{2250 \times 250}{2250 + 250} = 1500 - 225 = 1275$$

(3) 计算欧姆刻度

欧姆表的刻度可以用计算的办法来刻度的, 即可将原表头的刻度盘改为按欧姆刻度。这时需要计算 R_x 的各个值应该刻度在哪些分格上, 计算公式为:

$$\alpha = \frac{R_m}{R_m + R_x} \alpha_m \text{ (格)}$$

其中 α_m —刻度盘上的满偏格数(设 $\alpha_m=50$ 格)

R_m —欧姆表的中值电阻值

R_x —被测电阻值

α —与 R_x 对应的刻度格数

本实验中 R_m 为 1500Ω , 下面列表以示分度格数与 R_x 的关系。

$R_x(\Omega)$	0	100	200	300	500	700	1200	1500	1700
$\alpha(\text{格})$	50.0	46.9	44.1	41.7	37.5	34.1	27.8	25	23.4
$R_x(\Omega)$	2000	3000	5000	10K	20K				
$\alpha(\text{格})$	21.4	16.7	11.5	6.5	3.5				

实验七 简单万用表线路计算与校检

5. 电表的校验

被校表的指示值 α_x 与标准表的“实际值” α 之间的差值称为绝对误差 Δ ,

$$\Delta = \alpha_x - \alpha$$

将绝对误差加一个负号, 就是所谓的校正值 c

$$c = -\Delta = \alpha - \alpha_x$$

在高准确度的电表中, 常附有校正曲线, 以便采取“加”校正值的方法来提高测量结果的准确度。

电表的准确度是由“准确级”来说明的。我国生产的电表的准确级分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七级。准确级 α 的定义是

$$\alpha \geq 100\Delta_m / \alpha_m$$

其中 Δ_m 是电表的最大绝对误差, α_m 是电表的量程。所以, α 值越小, 准确度越高。

校表时要求:

(1) 标准表的准确级要比被校表的准确度高两级, 例如必须用 0.2 级标准表去校 1.0 级表, 用 1.5 级标准表校 5.0 级等。

(2) 校验时要在指针偏转单向上升, 然后单向下降的条件下进行, 以便观察表头的摩擦情况。即上升时把被校表指针从零点调到正指主要分度 (指有数字的分度), 若指针调过了头, 应退回到零点重新上升。从最大值下降也一样, 若调过了头, 应退回到最大值点重新下降。在被校表的每一主要分度上读出标准表相应的度数, 计算出校正值, 即可制作校正曲线。以被校表读数为横坐标。以上升、下降两次校正值的平均值为纵坐标所作曲线即为校正曲线。曲线上各点间应以直线连接成一折线。坐标比例尺应合适, 以便应用。

三、仪器设备

- | | |
|------------|----|
| 1. 电路分析实验箱 | 一台 |
| 2. 数字万用表 | 一只 |

五、实验内容与步骤

(实验用电路已经在面板上基本连接好, 用虚线连接的元件需要同学自己

实验七 简单万用表线路计算与校检

动手连接。)

磁电系微安表头数据: 满偏电流 $100\mu\text{A}$, 内阻为 2250Ω , 内阻可直接用万用表测量。由于购得的 $100\mu\text{A}$ 的微安表其内阻不一定是我们所需的 2250Ω , 所以先在表头中串入一个可变电阻 (可用实验箱右边的 4.7K 的电位器), 调节可变电阻的数值使得加上微安表的内阻 r_0 后其总阻值等于 2250Ω 。然后将 $100\mu\text{A}$ 的表头连同所加的可变电阻作为一个整体接入电路内。

1. 直流电流档

组成直流电流量程为 $1/5\text{mA}$ 电流表, 并对其进行校验。

(1) 按图 7-3 搭接成直流电流表, 电阻 r_1 和 r_2 可在万用表电路区找到

$$r_1=200\Omega, \quad r_2=50\Omega=20\Omega+30\Omega$$

(2) 校验

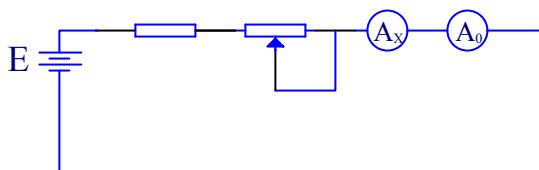


图 7-9

图 7-9 为直流电流表校验电路, 图中带下标 “0” 的是标准表, 带下标 “X” 的是被校表。(图中电源 E 用直流稳压电源, 电阻和电位器可用其它单元的元件)

2. 直流电压档

组成直流电压量程为 $2.5/10\text{V}$ 的电压表, 并对其进行校验。

(1) 按图 7-4 搭接, R_1 、 R_2 均可在实验箱中找到

$$R_1=22.75\text{K}(=22\text{K}+750\Omega), \quad R_2=75\text{K}\Omega$$

(2) 校验 (图 7-10 为直流电压档的校验电路, 图中电源 E 用直流稳压电源)

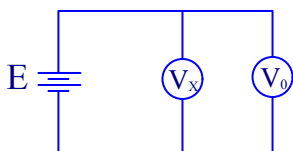


图 7-10

实验七 简单万用表线路计算与校检

校验时注意:

- ①先将指针的机械零点调准。
- ②校验时只在被校表的主要刻度点(即标有数字的点)上读数。

3. 交流电压档

组成交流电压量程为 20V 的电压表, 并对其进行校验。

(1) 按图 7-6 搭接

$$R_S=2250 \text{ } (=2.2\text{K}\Omega+30\Omega+20\Omega)$$

$$R_{20}=43.38\text{K}(=43\text{K}+360\Omega+20\Omega)$$

(2) 按图 7-11 校验

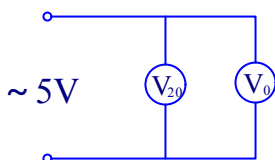


图 7-11

注: 由于实验箱中没有交流单相调压器故可直接用实验箱上互感电路区的交流电压加在标准表与被校表两端, 加以核对。

4. 欧姆档

组成中值电阻为 1500Ω 的欧姆表, 并对其进行校验。

(1) 按图 7-8 搭接线路, 并对该欧姆表进行刻度。

(2) 欧姆刻度的核对

用实验箱中的电阻核对计算出来的刻度视其接近程度。(更准确的核对要用准确度更高的电阻箱。

五、实验报告要求

1. 总结使用欧姆档的注意事项。
2. 作电流表的校验报告。
3. 作电压表的校验报告。

实验八 一阶、二阶动态电路

一、实验目的

1. 加深对 RC 微分电路和积分电路过渡过程的理解。
2. 研究 R 、 L 、 C 电路的过渡过程。

二、实验说明

1. 用示波器研究微分电路和积分电路。

(1) 微分电路

微分电路在脉冲技术中有广泛的应用。在图 8-1 电路中，

$$u_{sc} = Ri = RC \frac{du_c}{dt} \quad (1)$$

即输出电压 u_{sc} 与电容电压 u_c 对时间的导数成正比。当电路的时间常数 $\tau = RC$

很小， $u_c \gg u_{sc}$ 时，输入电压 u_{sr} 与电容电压 u_c 近似相等

$$u_{sr} \approx u_c \quad (2)$$

将(2)代入(1)得

$$u_{sc} \approx RC \frac{du_{sr}}{dt} \quad (3)$$

即：当 τ 很小时，输出电压 u_{sc} 近似与输入电压 u_{sr} 对时间的导数成正比，所以

称图 8-1 电路为“微分电路”。

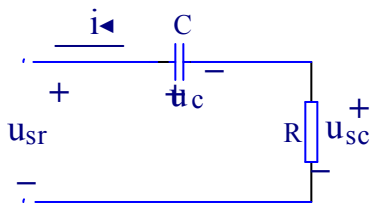


图 8-1

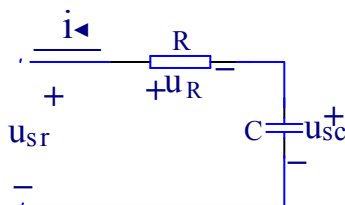


图 8-2

(2) 积分电路

将图 8-1 电路中的 R 、 C 位置对调，就得到图 8-2 电路。电路中

$$u_{sc} = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int \frac{u_R}{R} dt = \frac{1}{RC} \int u_R dt \quad (4)$$

即输出电压 u_{sc} 与电阻电压 u_R 对时间的积分成正比。

当电路的时间常数 $\tau = RC$ 很大、 $u_R \gg u_{sc}$ 时，输入电压 u_{sr} 与电阻电压 u_R 近似相等，

$$u_{sr} \approx u_R \quad (5)$$

将(5)代入(4)时

$$u_{sc} \approx \frac{1}{RC} \int u_{sr} dt \quad (6)$$

即：当 τ 很大时，输出电压 u_{sc} 近似与输入电压 u_{sr} 对时间的积分成正比，所以称图 8-2 电路为“积分电路”。

2. R 、 L 、 C 电路的过渡过程。

(1) 将图 8-3 电路接至直流电压，当电路参数不同时，电路的过渡过程有不同的特点：

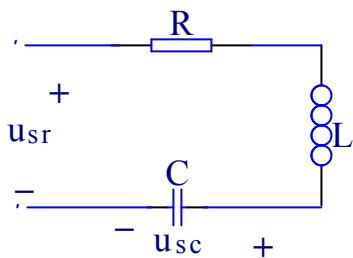


图 8-3

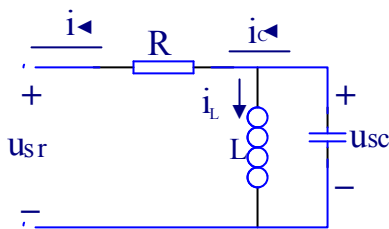


图 8-4

当 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，过渡过程中的电压、电流具有非周期振荡的特点。

当 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，过渡过程中的电压、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 $R = 0$ 情况下的振荡角频率，习惯上称为无阻

实验八 一阶、二阶动态电路研究

尼振荡电路的固有角频率，在 $R \neq 0$ 时，放电电路的固有振荡角频率 $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ 将随 $\delta = \frac{R}{2L}$ 增加而下降，

当电阻 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时， $\delta = \omega_0$ ， $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = 0$ 过程就变为非振荡性质了。

(2) 将图 8-4 电路接直流电压，当电路参数不同时，其过渡过程也有不同的特点：

当 $R < \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，响应是非振荡性质的。

当 $R > \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，响应将形成衰减振荡。这时电路的衰减系数 $\delta = \frac{1}{2RC}$ 。

3. 如何用示波器观察电路的过渡过程

电路中的过渡过程，一般经过一般时间后，便达到稳定。由于这一过程不是重复的，所以无法用普通的阴极示波器来观察（因为普通示波器只能显示重复出现的、即周期性的波形）。为了能利用普通示波器研究一个电路接到直流电压时的过渡过程，可以采用下面的方法。

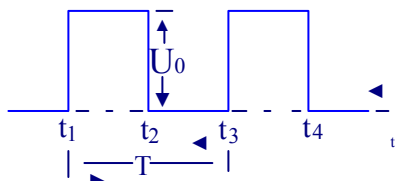


图 8-5

在电路上加一个周期性的“矩形波”电压(图 8-5)。它对电路的作用可以这样来理解：在 t_1 、 $t_3 \dots$ 等时刻，输入电压由零跳变为 U_0 ，这相当于使电路突然在与一个直流电压 U_0 接通；在 t_2 、 $t_4 \dots$ 等时刻，输入电压又由 U_0 跳变为零，这相当于使电路输入端突然短路。由于不断地使电路接通与短路，电路中出现重复性的过渡过程，这样就可以用普通示波器来观察了。如果要求在矩形波作用的半个周期内，电路的过渡过程趋于稳态，则矩形波的周期应足够大。

实验八 一阶、二阶动态电路研究

三、仪器设备

1. 双踪示波器 1 台
2. 方波发生器 1 台
3. 电路分析实验箱 1 台

四、预习内容

1. 图 8-6 电路中设 u_{λ} 为一阶跃电压，其幅度为 $U=3V$ ； $C=20\mu F$ 。试分别画出 $R=100K$ ， $R=10K$ ， $R=1K$ 时 $u_{\text{出}}$ 的曲线。

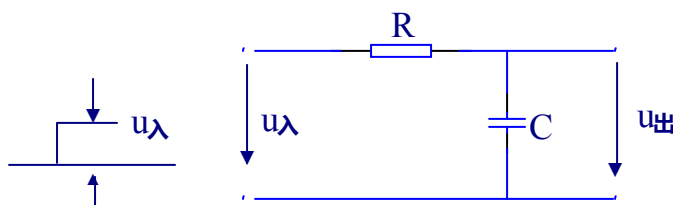


图 8-6

2. 图 8-7 电路中设 u_{λ} 为一矩形脉冲电压，其幅度为 $U=6$ 伏，频率为 $1KHZ$ ， $C=0.033\mu F$ ，试分别画出 $R=100K$ 及 $R=10K$ 时 $u_{\text{出}}$ 的波形。

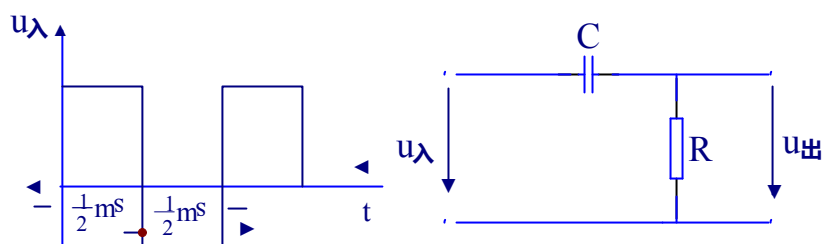


图 8-7

3. 图 8-8 电路中，设 u_{λ} 为一矩形脉冲电压，其幅度为 $U=6$ 伏，频率为 $1KHZ$ ， $C=0.033\mu F$ ， $R=10K$ 。试画出 $u_{\text{出}}$ 的波形。

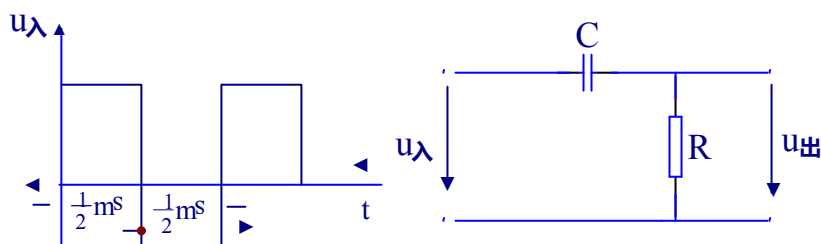


图 8-8

实验八 一阶、二阶动态电路研究

4. 已知图 8-3, R 、 L 、 C 串联电路中, $L = 0.2H$, $C = 0.02\mu f$, 定性判断 $R = 2K\Omega$ 及 $R = 11K\Omega$ 两种情况下 u_c 的波形是否振荡。

五、实验内容与步骤

1. 按图 8-9 接线, 用示波器观察作为电源的矩形脉冲电压。周期 $T=1ms$ 。
2. 按图 8-10 接线, 使 R 为 $10K$, 分别观察和记录 $C=0.01\mu$ 、 0.1μ 、 1μ 荧光屏上显示的波形。

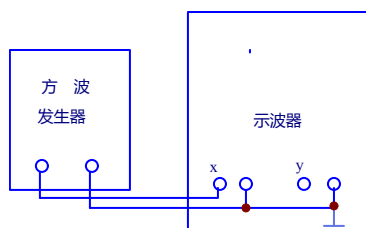


图 8-9

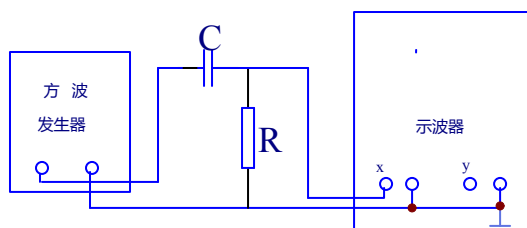


图 8-10

3. 按图 8-11 接线。使 R 为 $10K$, 分别观察和记录 $C=0.5\mu$ 、 0.01μ 两种情况下荧光屏上显示的波形。

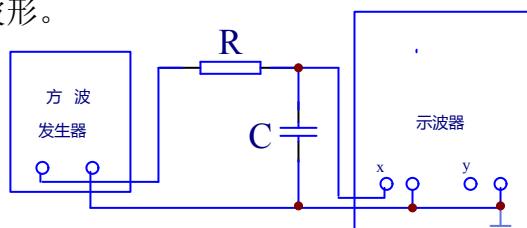


图 8-11

4. 按图 8-3 电路接线 $L=0.2H$, $C = 0.1\mu f$ 接入 $T = 10ms$ 的矩形脉冲观察并描绘 $R = 500\Omega$ 及 $R = 2K\Omega$ 两种情况下的 u_{sc} 波形。记录必要的参数。

5. 按图 8-4 接线 $L = 0.2H$, $C = 0.1\mu f$ 接入 $T = 10ms$ 的矩形脉冲观察并描绘 $R = 4K\Omega$ 及 $R = 500\Omega$, $R = 270\Omega$ 三种情况下的 u_{sc} 波形并记录必要的参数。

六、实验报告要求

1. 将实验任务 1、2、3、4、5 中记录的波形整理在坐标纸上。
2. 总结微分和积分电路区别。

实验九 R、L、C 元件性能的研究

一、实验目的

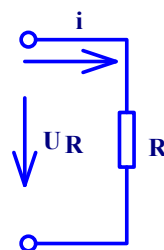
1. 用伏安法测定电阻、电感和电容元件的交流阻抗及其参数 R 、 L 、 C 之值。
2. 研究 R 、 L 、 C 元件阻抗随频率变化的关系。
3. 学会使用交流仪器。

二、实验说明

电阻、电感和电容元件都是指理想的线性二端元件。

1. 电阻元件：在任何时刻电阻两端的电压与通过它的电流都服从欧姆定律。即

$$u_R = Ri$$



式中 $R = u_R / i$ 是一个常数，称为线性非时变电阻，其大小与 u_R 、 i 的大小及方向无关，具有双向性。它的伏安特性是一条通过原点的直线。在正弦电路中，电阻元件的伏安关系可表示为：

$$U_R = RI$$

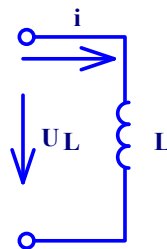
式中 $R = \frac{U_R}{I}$ 为常数，与频率无关，只要测量出电阻端电压和其中的电流便可

计算出电阻的阻值。电阻元件的一个重要特征是电流 I 与电压 U_R 同相。

2. 电感元件

电感元件是实际电感器的理想化模型。它只具有储存磁场能量的功能。它是磁链与电流相约束的二端元件。即：

$$\psi_L(t) = Li$$



式中 L 表示电感，对于线性非时变电感， L 是一个常数。电感电压在图示关联参考方向下为：

$$u_L = L \frac{di}{dt}$$

实验九 R、L、C 元件性能的研究

在正弦电路中： $U_L = jX_L I$

式中 $X_L = \omega L = 2\pi fL$ 称为感抗，其值可由电感电压、电流有效值之比求得。

即 $X_L = \frac{U_L}{I}$ 。当 $L = \text{常数}$ 时， X_L 与频率 f 成正比， f 越大， X_L 越大， f 越小，

X_L 越小，电感元件具有低通高阻的性质。若 f 为已知，则电感元件的电感为：

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (9-1)$$

理想电感的特征是电流 I 滞后于电压 $\frac{\pi}{2}$

3. 电容元件：

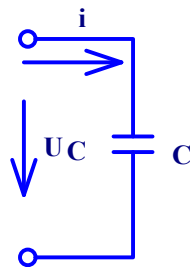
电容元件是实际电容器的理想化模型，它只具有储存电场能量的功能，它是电荷与电压相约束的元件。即：

$$q(t) = Cu_c$$

式中 C 表示电容，对于线性非时变电容， C 是一个常数。电容电流在关联参考方向下为：

$$i = C \frac{du_c}{dt}$$

在正弦电路中 $\dot{I} = \frac{\dot{U}_c}{-jX_c}$ 或 $U_c = -jX_c \dot{I}$



式中 $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ 称为容抗。其值为 $X_c = \frac{U_c}{I}$ ，可由实验测出。当 $C =$

常数时， X_c 与 f 成反比， f 越大， X_c 越小， $f = \infty$ ， $X_c = 0$ 电容元件具有高通低阻和隔断直流的作用。当 f 为已知时，电容元件的电容为：

$$C = \frac{1}{2\pi fX_c} \quad (9-2)$$

实验九 R、L、C 元件性能的研究

电容元件的特点是电流 I 的相位超前于电压 $\frac{\pi}{2}$ 。

三、仪器设备

1. 电路分析实验箱 一台

（用 RLC 串联与谐振电路部分的元件参数）

2. 功率信号发生器 一台

3. 交流毫伏表 一只

3. 数字万用表 一只

四、实验内容与步骤

（1）测定电阻、电感和电容元件的交流阻抗及其参数：

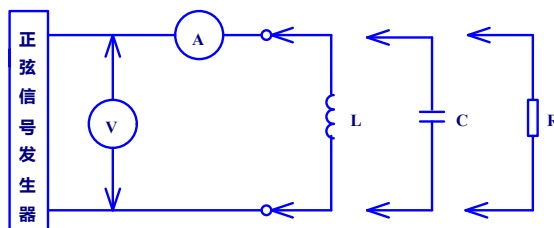


图 9-1

1. 按图 9-1 接线确认无误后，将信号发生器的频率调节到 50Hz，并保持不变，分别接通 R 、 L 、 C 元件的支路。改变信号发生器的电压（每一次都要用万用表进行测量），使之分别等于表 9-1 中的数值，再用万用表测出相应的电流值，并将数据记录于表 9-1 中。（注意：电感 L 本身还有一个电阻值）

$f = 50\text{Hz}$

表 9-1

信号发生器输出 元件电流 电压 被测元件	U (伏)	0	2	4	6	8	10
$R=1\text{K}\Omega$	I_R (毫安)						
$L=0.2\text{H}$	I_L (毫安)						
$C=2\mu\text{F}$	I_C (毫安)						

2. 以测得的电压为横坐标，电流为纵坐标，分别作出电阻、电感和电容元件的有效值的伏安特性曲线（均为直线），如图 9-2 所示。在直线上任取一点 A，过 A 点作横轴的垂线，交于 B 点，则 OB 代表电压，AB 代表电流，则

实验九 R、L、C 元件性能的研究

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{OB}{AB}$$

同理：

$$X_L = \frac{U_L}{I} = \frac{OB}{AB}$$

$$X_c = \frac{U_c}{I} = \frac{OB}{AB}$$

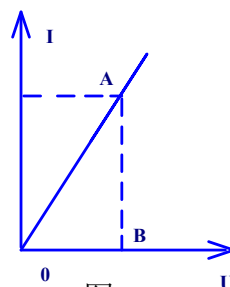


图 9-2

再按式 9-1, 9-2 计算出 L 和 C (此项可留到实验报告中完成)。

(2) 测定阻抗与频率的关系：

1. 按图 9-1 接线，经检查无误后，把信号发生器的输出电压调至 5 伏，分别测量在不同频率时，各元件上的电流值，将数据记入表 9-2 中。测量 L 、 C 元件上的电流值时，应在 L 、 C 元件支路中串联一个电阻 $R=100\Omega$ ，然后用交流毫伏表测量电阻上的电压，通过欧姆定律计算出电阻上的电流值，即 L 、 C 元件上的电流值。(注意：电感 L 本身还有一个电阻值)

$U=5$ 伏

表 9-2

被测元件	$R=1K\Omega$			$L=0.2H$			$C=2\mu F$		
信号源频率(Hz)	50	100	200	50	100	200	50	100	200
电流(A)									
阻抗(Ω)									

2. 把图 9-1 中， R 、 L 、 C 全部并联接入电路中，保持信号源频率 $f=50Hz$ ，输出电压 $U=5$ 伏，测量各支路电流及总电流，从而验证基尔霍夫电流定律的正确性。

五、思考题

1. 根据实验结果，说明各元件的阻抗与哪些因素有关？并比较 R 、 L 、 C 元件在交、直流电路中的性能。
2. 对实验内容 2 进行分析，从理论上说明总电流与各支路电流的关系。
3. 你能分析出产生本次实验误差的原因吗？

六、实验报告要求

1. 按要求计算各元件参数。
2. 回答思考题 1、2、3。

实验十 RLC 串联电路的幅频特性与谐振现象

一、实验目的

1. 测定 R 、 L 、 C 串联谐振电路的频率特性曲线。
2. 观察串联谐振现象，了解电路参数对谐振特性的影响。

二、实验原理

1. R 、 L 、 C 串联电路(图 10-1)的阻抗是电源频率的函数，即：

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = |Z|e^{j\varphi}$$

当 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时，电路呈现电阻性， U_s 一定时，电流达最大，这种现象称为串联谐振，谐振时的频率称为谐振频率，也称电路的固有频率。

即

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ 或 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

上式表明谐振频率仅与元件参数 L 、 C 有关，而与电阻 R 无关。

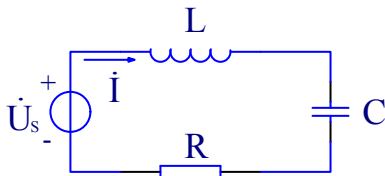


图 10-1

2. 电路处于谐振状态时的特征：

- ① 复阻抗 Z 达最小，电路呈现电阻性，电流与输入电压同相。
- ② 电感电压与电容电压数值相等，相位相反。此时电感电压(或电容电压)为电源电压的 Q 倍， Q 称为品质因数，即

$$Q = \frac{U_L}{U_s} = \frac{U_C}{U_s} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

在 L 和 C 为定值时， Q 值仅由回路电阻 R 的大小来决定。

- ③ 在激励电压有效值不变时，回路中的电流达最大值，即：

$$I = I_0 = \frac{U_s}{R}$$

3. 串联谐振电路的频率特性：

实验十 RLC 串联电路的幅频特性和谐振现象

① 回路的电流与电源角频率的关系称为电流的幅频特性，表明其关系的图形称为串联谐振曲线。电流与角频率的关系为：

$$I(\omega) = \frac{U_S}{\sqrt{R^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} = \frac{U_S}{R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

当 L 、 C 一定时，改变回路的电阻 R 值，即可得到不同 Q 值下的电流的幅频特性曲线(图 10-2)。显然 Q 值越大，曲线越尖锐。

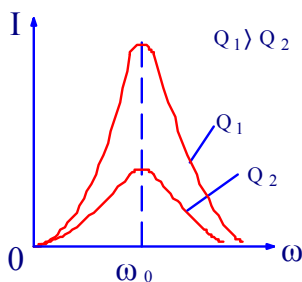


图 10-2

有时为了方便，常以 $\frac{\omega}{\omega_0}$ 为横坐标， $\frac{I}{I_0}$ 为纵坐标画电流的幅频特性曲线(这称为通用幅频特性)，图 10-3 画出了不同 Q 值下的通用幅频特性曲线。回路的品质因数 Q 越大，在一定的频率偏移下， $\frac{I}{I_0}$ 下降越厉害，电路的选择性就越好。

为了衡量谐振电路对不同频率的选择能力引进通频带概念，把通用幅频特性的幅值从峰值 1 下降到 0.707 时所对应的上、下频率之间的宽度称为通频带(以 BW 表示)即：

$$BW = \frac{\omega_2}{\omega_0} - \frac{\omega_1}{\omega_0}$$

由图 10-3 看出 Q 值越大，通频带越窄，电路的选择性越好。

③ 激励电压与响应电流的相位差 φ 角和激励电源角频率 ω 的关系称为相频特性，即：

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

显然，当电源频率 ω 从 0 变到 ω_0 时，电抗 X 由 $-\infty$ 变到 0 时， φ 角从 $-\frac{\pi}{2}$ 变

实验十 RLC 串联电路的幅频特性和谐振现象

到 0，电路为容性。当 ω 从 ω_0 增大到 ∞ 时，电抗 X 由 0 增到 ∞ ， φ 角从 0 增到 $\frac{\pi}{2}$ ，电路为感性。相角 φ 与 $\frac{\omega}{\omega_0}$ 的关系称为通用相频特性，如图 10-4 所示。

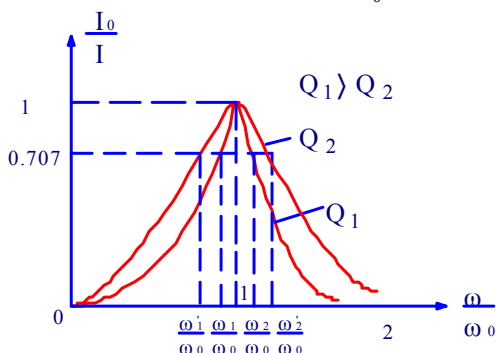


图 10-3

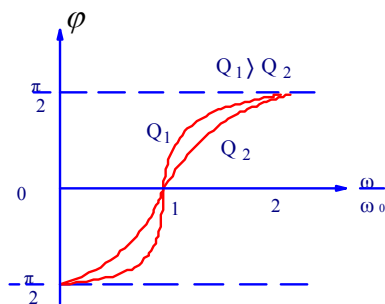


图 10-4

谐振电路的幅频特性和相频特性是衡量电路特性的重要标志。

三、仪器设备

- | | |
|------------|----|
| 1. 电路分析实验箱 | 一台 |
| 2. 信号发生器 | 一台 |
| 3. 交流毫伏表 | 一台 |
| 4. 双踪示波器 | 一台 |

四、实验内容及步骤

按图 10-5 连接线路，电源 \dot{U}_s 为低频信号发生器。将电源的输出电压接示波器的 Y_A 插座，输出电流从 R 两端取出，接到示波器的 Y_B 插座以观察信号波形，取 $L = 0.1\text{H}$ ， $C = 0.5\mu\text{F}$ ， $R = 10\Omega$ ，电源的输出电压 $U_s = 3\text{V}$ 。

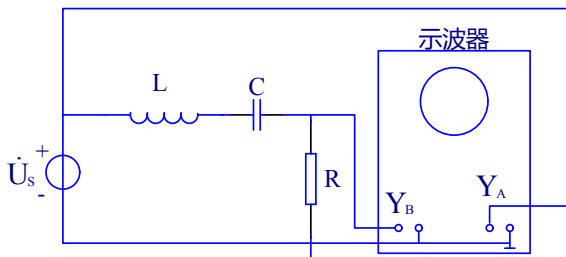


图 10-5

1. 计算和测试电路的谐振频率

① $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 用 L 、 C 之值代入式中计算出 f_0 。

实验十 RLC 串联电路的幅频特性和谐振现象

② 测试：用交流毫伏表接在 R 两端，观察 U_R 的大小，然后调整输入电源的频率，使电路达到串联谐振，当观察到 U_R 最大时电路即发生谐振，此时的频率即为 f_0 (最好用数字频率计测试一下)

2. 测定电路的幅频特性

① 以 f_0 为中心，调整输入电源的频率从 100Hz~2000Hz，在 f_0 附近，应多取些测试点。用交流毫伏表测试每个测试点的 U_R 值，然后计算出电流 I 的值，记入表格 10-1 中。

表 10-1

f (Hz)							f_0							
U_R (mV)														
I (mA)														

② 保持 $U_s=3V$ ， $L=0.1H$ ， $C=0.5\mu F$ ，改变 R ，使 $R=100\Omega$ ，即改变了回路 Q 值，重复步骤①。

3. 测定电路的相频特性

仍保持 $U_s=3V$ ， $L=0.1H$ ， $C=0.5\mu F$ ， $R=10\Omega$ 。以 f_0 为中心，调整输入电源的频率从 100Hz~2000Hz。在 f_0 的两旁各选择几个测试点，从示波器上显示的电压、电流波形上测量出每个测试点电压与电流之间的相位差 $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ ，数据表格自拟。

五、思考题

1. 用哪些实验方法可以判断电路处于谐振状态？

2. 实验中，当 R 、 L 、 C 串联电路发生谐振时，是否有 $U_c = U_L$ 及 $U_R = U_s$ ？若关系不成立，试分析其原因。

六、实验报告要求

1. 根据实验数据，在坐标纸上绘出两条不同 Q 值下的幅频特性曲线和相频特性曲线，并作扼要分析。(计算电流 I_0 注意： L 不是理想电感，本身含有电阻，而且当信号的频率较高时电感线圈有肌肤效应，电阻值会有增加，可先测量出的 U_c 、 U_s 求出 Q 值，然后根据已知的 L 、 C 算出总电阻。)

2. 通过实验总结 R 、 L 、 C 串联谐振电路的主要特点。

3. 回答思考题 2。

实验十一 RC 电路频率特性的研究

一、实验目的

1. 研究 RC 电路的频率特性。
2. 初步了解文氏电路的应用，组成正弦波振荡器。

二、实验说明

1. 文氏电路

在谐振实验里，研究了 RLC 电路的频率特性。本实验研究 RC 串并联选频电路(文氏电路)的频率特性。图 11-1(a)为文氏电路。在输入端输入幅度恒定的正弦电压 \dot{U}_i ，在输出端得到输出电压 \dot{U}_0 ，分别表示为：

$$\dot{U}_i = U_i / \underline{\varphi}_i, \quad \dot{U}_0 = U_0 / \underline{\varphi}_0$$

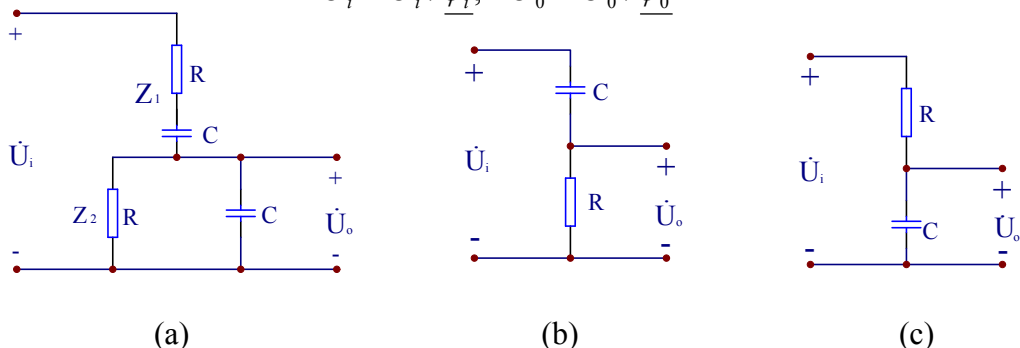


图 11-1 文氏电路及在低频、高频下的近似等效电路

当正弦电压 \dot{U}_i 的频率变化时， \dot{U}_0 的变化可从两方面来看。在频率较低的情况下，即当时， $\frac{1}{\omega C} \gg R$ 图 11-1(a)电路可近似成如图 11-1(b)所示的低频等效电路。 ω 愈低， \dot{U}_0 的幅度愈小，其相位愈超前于 \dot{U}_i 。当 ω 趋近于 0 时， $|\dot{U}_0|$ 趋近于 0， $\varphi_0 - \varphi_i$ 接近 $+90^\circ$ 。而当频率较高时，即当 $\frac{1}{\omega C} \ll R$ 时，图 11-1(a)电路可近似成如图 11-1(c)所示的高频等效电路。 ω 愈高， \dot{U}_0 幅度也愈小，其相位愈滞后于 \dot{U}_i 。当 ω 趋近于 ∞ 时， $|\dot{U}_0|$ 趋近于 0， $\varphi_0 - \varphi_i$ 接近 -90° 。由此可见，当频率为某一中间值 f_0 时， \dot{U}_0 不为零，且 \dot{U}_0 与 \dot{U}_i 同相。

我们把输出电压和输入电压的比称为网络函数，记作 $H(j\omega) = |H(j\omega)| / \underline{\varphi}$ 。其中 $|H(j\omega)| = \frac{U_0}{U_i}$ ， $\varphi = \varphi_0 - \varphi_i$ 。 $|H(j\omega)|$ 和 φ 分别为电路的幅频特性和相频特性，它们的曲线见图 11-2。当频率 $f = f_0 = 1/2\pi RC$ 时， $|H(j\omega)|$ 有极大值， $\varphi = 0$ ，经过计算， $|H(j\omega)|$ 的最大值为 $1/3$ 。因此，这种电路具有选择频率的特点。它被广

实验十一 RC 电路频率特性的研究

泛地用于 RC 振荡器的选频网络。

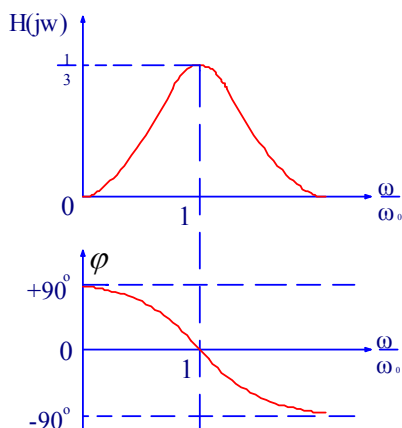


图 11-2 文氏电路的幅频特性和相频特性

2. 文氏电路 f_0 的测定

前面提到，当文氏电路的电源频率 $f = f_0 = 1/2\pi RC$ 时，其输入电压和输出电压之间的相位差为零，即 $\varphi = 0$ ，因此 f_0 的测定就转化为输入电压和输出电压相位差的测定。

用示波器观察李萨育图形的方法定 f_0

我们知道，如果在示波器的垂直和水平偏转板上分别加上频率、振幅和相位相同的正弦电压，则在示波器的荧光屏上将得到一条与 X 轴成 45° 的直线。

实验线路如图 11-3 所示，给定 U_i 为某一数值，改变电源频率，并逐渐改变 X、Y 轴增益，使荧光屏上出现一条直线，此时的电源频率即为 f_0 。

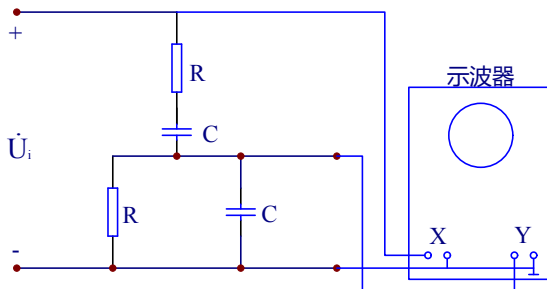


图 11-3 用示波器观察李萨育图形

3. 双 T 网络频率特性

图 11-4 所示双 T 网络的频率特性正好与 RC 串并联电路相反。在 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时， $\beta = 0$ ，输出电压为零，因此可用来滤去频率为 f_0 的谐波。 f_0 也

实验十一 RC 电路频率特性的研究

称为该网络的“截止频率”。双 T 电路的幅频特性曲线见图 11-5。

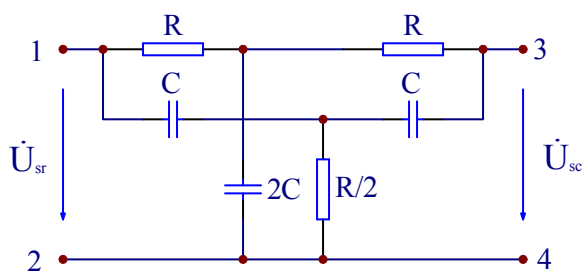


图 11-4

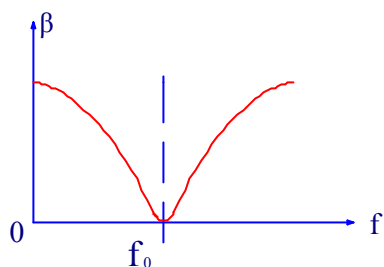
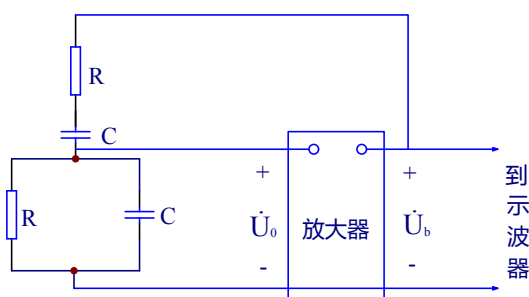


图 11-5

4. 利用文氏电路组成正弦波振荡器

RC 正弦波振荡器一般由选频网络、反馈网络和放大器组成。图 11-6 是由文氏电路和运算放大器构成的正弦波振荡器示意图。



$$\dot{U}_b = K\dot{U}_0 \quad (K \text{ 为正实数})$$

图 11-6

在电路满足相位平衡条件(反馈信号与输入信号同相), 幅度平衡条件 $|\dot{A}\dot{F}| \geq 1$ (其中 \dot{A} 为放大器的放大倍数, \dot{F} 为反馈网络的反馈系数), 而放大器的工作点又正常的情况下, 即能产生正弦波振荡。

正弦波振荡器的起振是依靠电路中的选频网络, 从电路元件中的噪声电压或电源接通瞬时的过渡过程中选出符合相位平衡条件的振荡频率, 在满足起振条件 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$ 的情况下, 振荡幅度由小到大而建立起来的。振荡建立起来以后, 在 RC 串并联选频网络振荡电路中, 用负反馈电路来实现稳幅。即 $|\dot{A}\dot{F}|$ 由大于 1 变成等于 1, 使振荡稳定下来。通过理论计算, RC 串并网络振荡电路中放大器的放大倍数为 $|\dot{A}| \geq 3$ 。

三、预习要求

1. 根据给定参数 $C=22\text{n}$ 和 $R=10\text{k}\Omega$, 计算文氏电路的 f_0 及此频率时的 $|H(j\omega)|$ 及 φ 。
2. 根据给定参数 $C=22\text{n}$ 和 $R=10\text{k}\Omega$, 计算双 T 网络的 f_0 及此频率时的 $|H(j\omega)|$ 及 φ 。

四、实验设备

信号发生器	一台
交流毫伏表	一只
数字频率计	一只
双踪示波器	一台

五、实验任务与步骤

1. 用示波器观察李萨育图形的方法测定文氏电路的 f_0 。用频率计测 f_0 , 并用交流毫伏表测 f_0 时的 U_i 、 U_0 。
2. 测文氏电路的幅频特性 $|H(j\omega)|$ 及相频特性 φ 。建议测 10~15 个点, 频率由 $0.1 f_0$ 到 $10 f_0$ 。
3. 利用文氏桥组成图 11-6 所示的正弦波振荡器。放大器的放大倍数 K 可以稍加调节。调节放大倍数 K , 使示波器上出现正弦波形。用频率计测量此正弦波的频率。用交流毫伏表测量放大器输入、输出电压。
4. 测双 T 网络的幅频特性 $|H(j\omega)|$ 及相频特性 φ 。建议测 10~15 个点, 频率由 $0.1 f_0$ 到 $10 f_0$ 。

六、实验报告要求

1. 用半对数坐标纸画 $|H(j\omega)| \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 及 $\varphi \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线。
2. 说明由文氏桥组成的正弦波振荡器中, 振荡频率与电路参数的关系。

实验十二 有源滤波器

一、实验目的

1. 了解运算放大器的一个用途——组成有源滤波器;
2. 对比有源、无源滤波器的滤波特性, 并初步分析两种特性的不同。

二、实验说明

通常滤波器大多是一个二端口网络。在某一段频率范围内, 输入电压 U_i 可以通过这个网络, 在输出电压 U_o 中显现出来, 对于一个理想的滤波器来讲, 在这一段频率内, $U_o \approx U_i$; 在其它频率下, 输入电压被网络衰减; 输出电压 U_o 很小, 在理想情况下, $U_o \approx 0$ 。

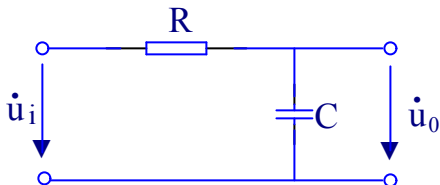


图 12-1

(1) 图 12-1 的线路是一低通滤波器, 它的幅频特性是:

$$h = \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \right| = \left| \frac{1}{1 + j\omega RC} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_0)^2}} \quad (1)$$

其中

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

由于 f 的变化范围很大, 作图不方便, 工程上常取它的对数来研究。例如当 f 变化 1000 倍时, $\lg f$ 的变化仅为 3。按工程习惯, 令

$$H = 20 \lg h$$

H 的单位叫做分贝, 写作 db。 H 的 db 值与 h 的关系如下表:

h	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$
$H(\text{db})$	0	-6	-20	-40	-60
	$U_o = U_i$	$U_o = \frac{1}{2} U_i$	$U_o = \frac{1}{10} U_i$	$U_o = \frac{1}{100} U_i$	$U_o = \frac{1}{1000} U_i$

实验十二 有源滤波器

低通滤波器的对数幅频特性是

$$H = 20 \lg h = 20 \lg \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (2)$$

在半对数坐标纸上, 用 H 作纵坐标, 用 f/f_0 作横坐标, 画出式(2)的图形如图 12-2。由曲线可见这个滤波器只允许较低频率的电压通过, 是一个最简单的低通滤波器。

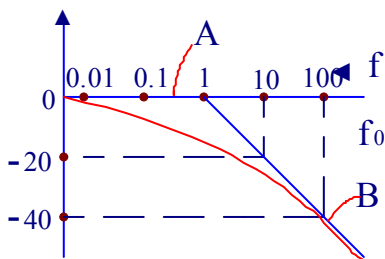


图 12-2

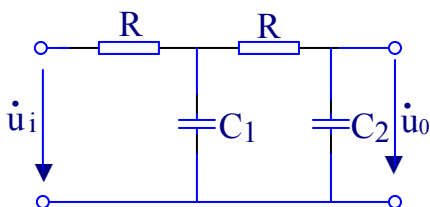


图 12-3

这个图形有一个近似的画法: 作水平线 A, 到 $f=f_0$ (即 $f/f_0=1$) 时, 作直线 B, 它的斜率为 $-20\text{dB}/\text{十倍频}$ (即 f 每增加 10 倍时, B 线的下降为 20dB)。这样作图的理由, 可从式(2)看出:

a. 当 $f < f_0$ 时, $H \approx 20 \lg 1 = 0$, 即水平线。

b. 当 $f > f_0$ 时, $H \approx 20 \lg \frac{1}{\sqrt{(f/f_0)^2}} = -20 \lg x$ (其中 $x = f/f_0$), 由此可作出直

线 B, 它的斜率为 $-20/\text{十倍频}$, 而且通过 $H=0$ 、 $\frac{f}{f_0}=1$ 的一点。

c. 直线 B 与横轴相交点的频率是 f_0 , 它是折线拐角处的频率, 所以 f_0 称为拐角频率。

2. 为了改善滤波特性, 可用二节 R-C 网络构成图 12-3 线路。这次实验选用二个相同的 R, 以便于计算。

这个电路的幅频特性是

$$h = \left| \frac{1}{1 + j\omega RC_1 + j2\omega RC_2 + j^2\omega^2 R^2 C_1 C_2} \right| \quad (3)$$

经过推导,

$$h = \left| \frac{1}{(1 + j\omega RC')(1 + j\omega RC'')} \right|$$

其中

$$C' = \frac{C_1 + 2C_2 + \sqrt{C_1^2 + 4C_2^2}}{2}$$

$$C'' = \frac{C_1 + 2C_2 - \sqrt{C_1^2 + 4C_2^2}}{2}$$

令

$$f' = \frac{1}{2\pi RC'}, \quad f'' = \frac{1}{2\pi RC''}, \quad f' < f''$$

则

$$h = \left| \frac{1}{(1 + j\frac{f}{f'})(1 + j\frac{f}{f''})} \right|$$

对数幅频特性为:

$$\begin{aligned} H = 20 \lg h &= -20 \lg \sqrt{\left[1 + \left(\frac{f}{f'} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{f}{f''} \right)^2 \right]} \\ &= -20 \lg \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f'} \right)^2} - 20 \lg \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f''} \right)^2} \\ &= H_1 + H_2 \end{aligned} \quad (4)$$

用前面的折线分析方法, 很容易画出式(4)的特性。先分别近似画出代表 H_1 、 H_2 的两组折线, 再将它们相加, 即得到近似代表 H 的三段折线, 其中 f' 、

实验十二 有源滤波器

f'' 为拐角频率(图 12-4), 实际特性也画在图中。

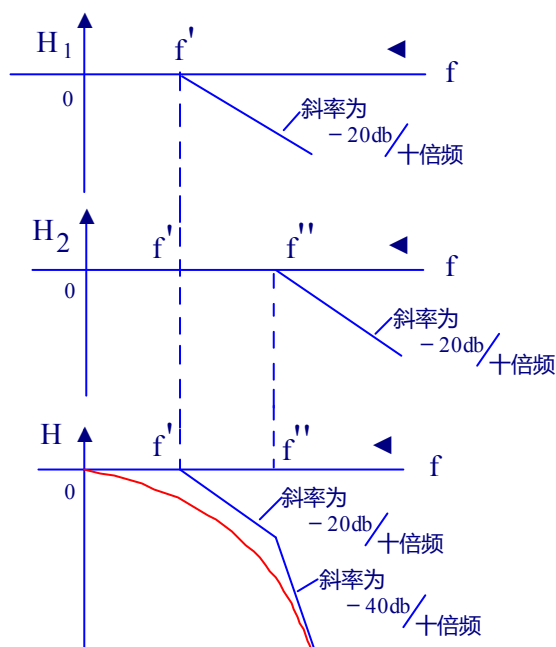


图 12-4

这个滤波器的特性在高频部分显然有所改善, 因为特性的斜率为 $-40\text{dB}/十倍频$, 即频率每增加十倍时, 衰减不是 20dB , 而是 40dB 了。

3. 为了获得更好的滤波效果, 可在线路中加入有源器件, 形成有源滤波器(图 12-5)

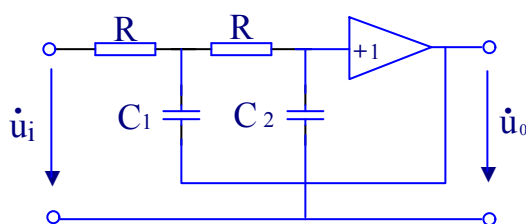


图 12-5

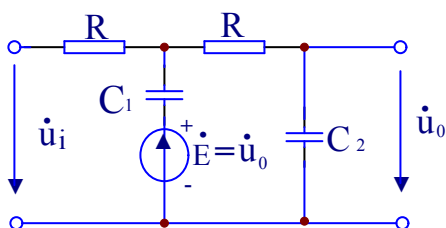


图 12-6

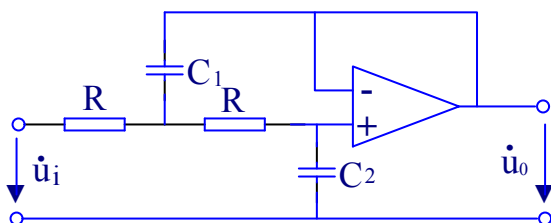


图 12-7

实验十二 有源滤波器

这个线路可等效为图 12-6, 即相当于在 C_1 支路中串联一个电压源, 电动势的大小等于 U_0 。例如当 $U_i=1V$ 时, 如果不串入 E , 设 $U_0=0.9V$ (低频时), 由于串入 $E=0.9V$ 电源, U_0 显然会增高一些, 这样便改善了低频下的特性。

在高频下, 当 $U_i=1V$ 时, 如不串入 E , 设 $U_0=0.005V$, 串入 $E=0.005V$ 后, 由于 $E \ll U_i$, E 经过 RC_2 那一级的衰减, 不会对输出电压产生显著的影响。这样可以定性地看出, 采用这种线路会改善低频特性。

图 12-5 中放大倍数为 +1 的放大器可采用运算放大器, 联接如图 12-7。

这个电路的幅频特性为:

$$h = \left| \frac{1}{1 - \omega^2 R^2 C_1 C_2 + j2\omega RC_2} \right| \quad (5)$$

令

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R \sqrt{C_1 C_2}}, \quad f_2 = \frac{1}{4\pi RC_2}$$

则

$$h = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_1}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{f}{f_2}\right)^2}}$$

对数幅频特性为:

$$H = 20 \lg h = -20 \lg \sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_1}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{f}{f_2}\right)^2} \quad (6)$$

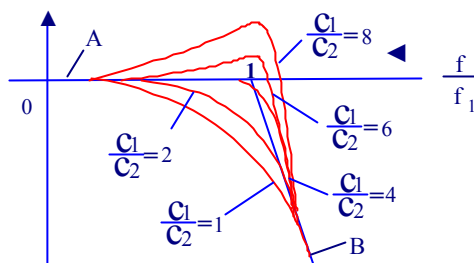
由(6)式, 可作出近似代表 H 的折线:

- a. 当 $f < f_1$ 时, 且 $f_1 \approx f_2$ 时, $H \approx -20 \lg 1 = 0$, 可作水平线 A(见图 12-8);
- b. 当 $f > f_1$ 时, 且 $f_1 \approx f_2$ 时,

$$H \approx -20 \lg \sqrt{\left(\frac{f}{f_1}\right)^4 + \left(\frac{f}{f_2}\right)^2} \approx -20 \lg \sqrt{\left(\frac{f}{f_1}\right)^4} = -40 \lg \frac{f}{f_1}$$

实验十二 有源滤波器

由此可作出直线 B，它的斜率为-40/十倍率，且通过 $H=0$ 、 $f/f_1=1$ 的一点(见图 12-8)。



斜率为-40db/十倍频

图 12-8

在拐角频率 f_1 的左右，可以把 f_1 代入(6)式作一般观察，此时

$$H|_{f_1} = -10 \lg 4 \frac{C_2}{C_1}$$

出口电压的大小决定于 C_1/C_2 的值。当 $C_1/C_2 > 4$ 时， $H|_{f_1} > 0$ ，即幅频特性可以有一个局部的隆起，见图 12-8 适当选择 C_1 与 C_2 的比值，即可得到相当逼近于折线的滤波特性。

本次实验中，我们选 $C_1/C_2=2$ 。当 $f=f_1$ 时，有源滤波器的 H 值为

$$H|_{f_1} = -10 \lg 4 \frac{C_2}{C_1} = -10 \lg 2 \approx -3 \text{db}$$

如不采用有源滤波器，把 $\omega = \omega_1 = \frac{1}{R\sqrt{C_1 C_2}}$ 代入(3)式，滤波器的 H 值为

$$H|_{f_1} = -20 \lg \left(\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} + 2\sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \right) = -20 \lg 2.8 = -9 \text{db}$$

后者衰减更多，所以前者的滤波性能比后者显著改善。这一点在实验结果里是可以明显看到的。

实验十二 有源滤波器

4. 用运算放大器组成的有源高通滤波器，如图 12-9 所示。

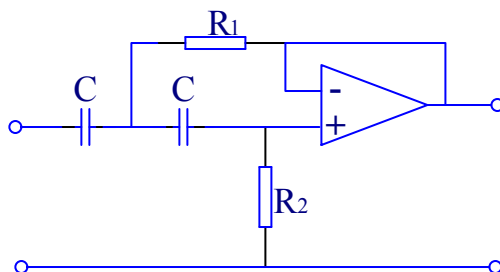


图 12-9

这个电路的幅频特性为:

$$h = \left| \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega^2 R_1 R_2 C^2} + j \frac{2}{\omega R_2 C}} \right| \quad (7)$$

令

$$f_1 = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_1 R_2}}, \quad f_2 = \frac{1}{\pi R_2 C}$$

则

$$h = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_1}{f}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{f_2}{f}\right)^2}}$$

对数幅频特性为:

$$H = 20 \lg h = -20 \lg \sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_1}{f}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{f_2}{f}\right)^2} \quad (8)$$

由(8)式，可作出近似代表 H 的折线:

a. 当 $f > f_1$ 时，且 $f_1 \approx f_2$ 时， $H \approx -20 \lg 1 = 0$ ，可作水平线 A;

b. 当 $f < f_1$ 时，且 $f_1 \approx f_2$ 时，

实验十二 有源滤波器

$$H \approx -20 \lg \sqrt{\left(\frac{f_1}{f}\right)^2} = -40 \lg \frac{f_1}{f} = 40 \lg \frac{f}{f_1}$$

由此可作出直线 B，它是一条斜率为 40/十倍频的直线，而且通过 $H=0$ 、 $\frac{f}{f_1}=1$ 的一点。H 的折线特性见图 12-10，可见 f_1 为拐角频率，图上还画出了

$R_2=4R_1$ 时的实际特性。由图可见，采用运算放大器后，可使滤波器的实际特性十分逼近理想特性。

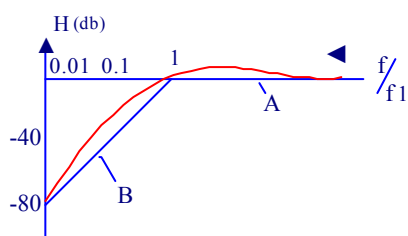


图 12-10

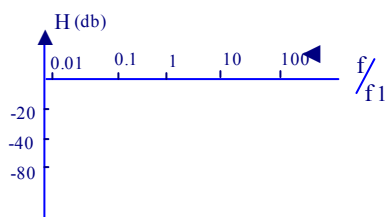


图 12-11

三、仪器设备

功率信号发生器	一台
交流毫伏表	一个
电路分析实验箱	一台

四、预习任务

1. 已知图 12-3 无源低通滤波器电路的参数是： $R=10K\Omega$ ， $C_1=0.15\mu f$ ， $C_2=0.075\mu f$ ，计算拐角频率 f' 及 f'' ；并在半对数坐标纸上，以 f/f_1 为横座标，H 为纵座标(见图 12-11)画出此滤波器的折线特性。画图时，取 $f_1=150Hz$ ，以便于与有源低通滤波器的特性相比较。以后该滤波器的实验结果也画在这张图上。

2. 已知图 12-7 有源低通滤波器电路的参数同上，计算拐角频率 f_1 ，并画出此滤波器的折线特性(座标的取法与前相同)。

3. 已知图 12-9 有源高通滤波器电路的参数是： $C=0.2\mu f$ ， $R_1=2.5K\Omega$ ， $R_2=10K\Omega$ ，计算拐角频率 f_1 ，并画出折线特性(坐标的取法与前相同)。

4. 拟出测量以上三个电路的对数幅频特性的记录表格。给定 $f/f_1=0.02, 0.05,$

实验十二 有源滤波器

0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0。

五、实验任务

1. 分别测量图 12-3, 12-7 电路的对数幅频特性, 各电路的参数见预习任务。
2. (选作)测量图 12-9 电路的对数幅频特性, 电路的参数见预习任务。

六、实验报告要求

1. 在半对数坐标纸上分别画出图 12-3, 12-7, 12-9 电路的对数幅频特性(与各自的折线特性画在同一张图上)。
2. 比较有源、无源低通滤波器的特性, 说明有源滤波器的滤波效果较好。
3. 定性分析图 12-9 电路, 说明它是个高通滤波器。

实验十三 交流电路中的互感

一、实验目的

1. 用实验方法测定两个感应耦合线圈的同名端，互感系数和耦合系数。
2. 研究两个感应耦合线圈正向串联和反向串联时互感的作用。

二、实验说明

1. 同名端

图 13-1(a) 示出两个有磁耦合的线圈，设电流 i_1 从 1 号线圈的 a 端流入，电流 i_2 从 2 号线圈的 c 端流入。由 i_1 产生而交链于 2 号线圈的互感磁通链为 ψ_{21} ， i_2 的自感磁链为 ψ_{22} ，当 ψ_{21} 与 ψ_{22} 方向一致时，互感系数(互感) M_{21} 为正，则称 1 号线圈的 a 端与 2 号线圈的 c 端为同名端。(显然 b、d 也是同名端)；若 ψ_{21} 与 ψ_{22} 方向相反如图 13-1(b) 所示，则 a、c 端称为异名端(即 a、d 或 b、c 为同名端)，同名端常用符号 “•” 或 “*” 表示。

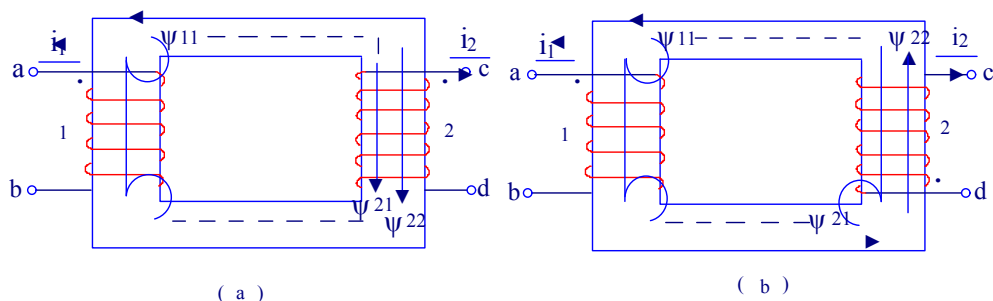


图 13-1

同名端取决于两个线圈各自的实际绕向以及它们之间的相对位置。

在实际中，对于具有耦合关系的线圈，若其绕向和相互位置无法判别时，可以根据同名端的定义，用实验方法加以确定。下面介绍几种常用的判别方法：

(1) 直流通断法

如图 13-2 所示，把线圈 1 接到直流电源，把一个指针式万用表(使用微安档)接在线圈 2 的两端。在电路接通瞬间，线圈 2 的两端将产生一个互感电动势，电表的指针就会偏转。若指针正向摆动，则与直流电源正极相联的端钮 a

实验十三 交流电路中的互感

与万用表正极相联的端钮 c 为同名端；若指针反向摆动，则 a、c 为异名端。

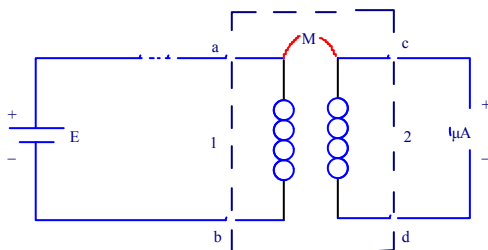


图 13-2

(2) 等效电感法

设两个耦合线圈的自感分为 L_1 和 L_2 ，它们之间的互感为 M 。若将两个线圈的异名端相连如图 13-3(a)所示，称为正向串联，其等效电感为：

$$L_{\text{正}} = L_1 + L_2 + 2M$$

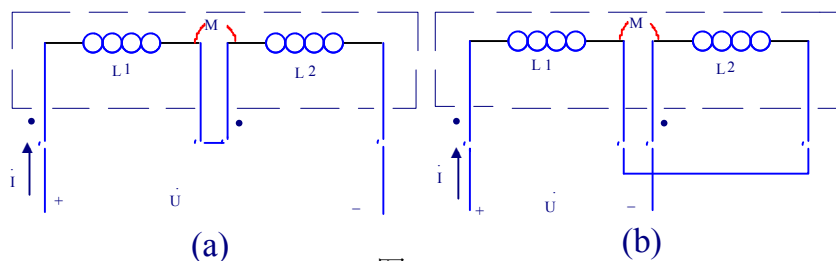


图 13-3

若将两个线圈的同名端相连如图 13-3(b)所示，则称为反向串联，其等效电感为：

$$L_{\text{反}} = L_1 + L_2 - 2M$$

显然等效电抗 $\omega L_{\text{正}} > \omega L_{\text{反}}$ 。

利用这种关系，在两个线圈串联方式不同时，加上相同的正弦电压，则正向串联时电流小，反向串联时电流大。同样地，若流过相同的电流，则正向串联时端口电压高，反向串联时端口电压低。据此即可判断出两线圈的同名端。

2. 互感 M 有多种测量方法，如：

(1) 等效电感法

用数字电感表，分别测出两个耦合线圈正向串联和反向串联时的等效电感，则互感：

$$M = \frac{L_{\text{正}} - L_{\text{反}}}{4}$$

实验十三 交流电路中的互感

用这种方法测得的互感一般来说准确度不高,特别是当 $L_{\text{正}}$ 和 $L_{\text{反}}$ 的数值比较接近时,误差更大。

(2) 互感电势法

在图 13-4(a)所示电路中,若电压表内阻无穷大,则有

$$U_2 \approx E_2 = \omega M_{21} I_1$$

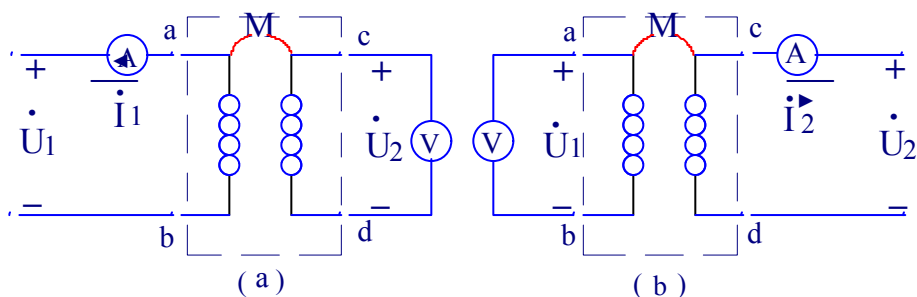


图 13-4

所以互感

$$M_{21} \approx \frac{U_2}{\omega I_1}$$

同理,在图 13-4(b)所示电路中有

$$M_{12} \approx \frac{U_1}{\omega I_2}$$

可以证明 $M_{12} = M_{21}$, 统一用 M 表示。

互感 M 测得以后,耦合系数可由下式计算:

$$K \approx \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

三、仪器设备

- | | |
|------------|----|
| 1. 电路分析实验箱 | 一台 |
| 2. 功率信号发生器 | 一台 |
| 3. 数字电感表 | 一只 |
| 4. 指针式万用表 | 一只 |
| 5. 数字万用表 | 一只 |
| 6. 交流毫伏表 | 一只 |

四、实验内容及步骤

1. 用直流通断法测定耦合线圈的同名端, 接线图如图 13-2 所示, 直流电源电压 $E=1.5\text{V}$ 。

2. 用等效电感法测定耦合线圈的同名端, 接线图如图 13-3 所示, 用数字电感表分别测量出两个耦合线圈正向串联和反向串联时的等效电感 $L_{\text{正}}$ 和 $L_{\text{反}}$, 即可判断出两线圈的同名端。

3. 用步骤 2 测量出的等效电感 $L_{\text{正}}$ 和 $L_{\text{反}}$ 值, 代入下式:

$$M = \frac{L_{\text{正}} - L_{\text{反}}}{4}$$

得出互感 M 的值。

4. 用互感电势法测定两个耦合线圈的互感 M_{12} 和 M_{21} , 并验证 $M_{12} = M_{21}$, 用功率信号发生器作为交流电源(注意: 功率信号发生器的输出应先调到最小, 然后逐渐加大), 接线图如图 13-4 所示。测量电路的 I_1 、 I_2 、 U_1 、 U_2 值, 再用公式 $M_{21} \approx \frac{U_2}{\omega I_1}$ 与 $M_{12} \approx \frac{U_1}{\omega I_2}$ 分别计算出 M_{21} 和 M_{12} 。

① 将功率信号发生器设为 50Hz

② 使用实验箱内互感电路部分的交流电源, 也可测出互感 M_{12} 和 M_{21} , 实验时要在电路中串上限流电阻 R , 限流电阻 R 可借用其它电路部分的可调电位器。

五、思考题

除了在实验原理中介绍的测定同名端的方法外, 还有没有其他方法?

六、实验报告要求

1. 根据实验步骤 3 所得数据计算耦合线圈的互感 M 和耦合系数 K 。

2. 将上述计算所得互感 M 与步骤 4 测得的互感 M 相比较, 并进行分析。

回答思考题。

实验十四 二端口网络的研究

一、实验目的

1. 学习测定无源线性二端口网络的参数。
2. 了解二端口网络特性及等值电路。

二、实验说明

1. 对于无源线性二端口（图 14-1）可以用网络参数来表征它的特征，这些参数只决定于二端口网络内部的元件和结构，而与输入（激励）无关。网络参数确定后，两个端口处的电压、电流关系即网络的特征方程就唯一的确定了。

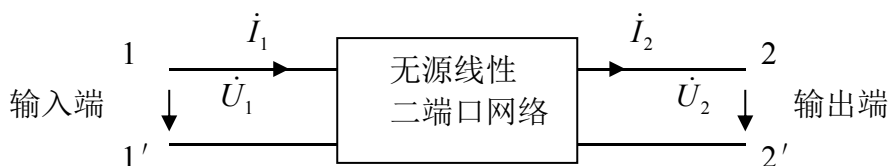


图 14-1

2. 若将二端口网络的输出电压 \dot{U}_2 和电流 $-i_2$ 作为自变量，输入端电压 \dot{U}_1 和电流 \dot{I}_1 作因变量，则有方程

$$\dot{U}_1 = A_{11}\dot{U}_2 + A_{12}(-\dot{I}_2)$$

$$\dot{I}_1 = A_{21}\dot{U}_2 + A_{22}(-\dot{I}_2)$$

式中 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{21} 、 A_{22} 称为传输参数，分别表示为

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

A_{11} 是输出端开路时两个电压的比值，是一个无量纲的量。

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

A_{21} 是输出端开路时开路转移导纳。

$$A_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{-\dot{I}_2} \right|_{\dot{U}_2 = 0}$$

A_{12} 是输出端短路时短路转移阻抗。

实验十四 二端口网络的研究

$A_{22} = \frac{\dot{I}_1}{-\dot{I}_2} \Big|_{\dot{U}_2 = 0}$ A_{22} 是输出端短路时两个电流的比值，是一个无量纲的量。

可见，A 参数可以用实验的方法求得。当二端口网络为互易网络时，有

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$$

因此，四个参数中只有三个是独立的。如果是对称的二端口网络，则有

$$A_{11} = A_{22}$$

3. 无源二端口网络的外特性可以用三个阻抗（或导纳）元件组成的 T 型或 π 型等效电路来代替，其 T 型等效电路如图 14-2 所示。若已知网络的 A 参数，则阻抗 r_1 、 r_2 、 r_3 分别为：

$$r_1 = \frac{A_{11} - 1}{A_{21}}$$

$$r_2 = \frac{A_{22} - 1}{A_{21}}$$

$$r_3 = \frac{1}{A_{21}}$$

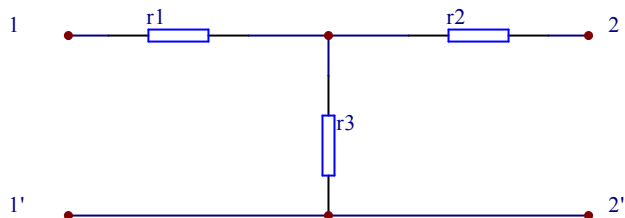


图 14-2

因此，求出二端口网络的 A 参数之后，网络的 T 型（或 π ）等效电路的参数也就可以求得。

4. 由二端口网络的基本方程可以看出，如果在输出端 1-1' 接电源，而输出端 2-2' 处于开路 and 短路两种状态时，分别测出 \dot{U}_{10} 、 \dot{U}_{20} 、 \dot{I}_{10} 、 \dot{U}_{1S} 、 \dot{I}_{1S} 、 \dot{I}_{2S} 则就可以得出上述四个参数。但这种方法实验测试时需要在网络两端，即输入端和输出端同时进行测量电压和电流，这在某种实际情况下是不方便的。

在一般情况下，我们常用在二端口网络的输入端及输出端分别进行测量的方法来测定这四个参数，把二端口网络的 1-1' 端接电源，在 2-2' 端开路与短路的情况下，分别得到开路阻抗和短路阻抗。

$$R_{01} = \frac{\dot{U}_{10}}{\dot{I}_{10}} \Big|_{\dot{I}_2 = 0} = \frac{A_{11}}{A_{21}}, \quad R_{S1} = \frac{\dot{U}_{1S}}{\dot{I}_{1S}} \Big|_{\dot{U}_2 = 0} = \frac{A_{12}}{A_{22}}$$

实验十四 二端口网络的研究

再将电源接至 2-2' 端，在 1-1' 端开路 and 短路的情况下，又可得到：

$$R_{02} = \left. \frac{\dot{U}_{20}}{\dot{I}_{20}} \right|_{\dot{I}_1 = 0} = \frac{A_{22}}{A_{21}}, \quad R_{S2} = \left. \frac{\dot{U}_{2S}}{\dot{I}_{2S}} \right|_{\dot{U}_1 = 0} = \frac{A_{12}}{A_{11}}$$

同时由上四式可见：

$$\frac{R_{01}}{R_{02}} = \frac{R_{S1}}{R_{S2}} = \frac{A_{11}}{A_{22}}$$

因此， R_{01} 、 R_{02} 、 R_{S1} 、 R_{S2} 中只有三个独立变量，如果是对称二端口网络就只有二个独立变量，此时

$$R_{01} = R_{02}, R_{S1} = R_{S2}$$

如果由实验已经求得开路和短路阻抗则可很方便地算出二端口网络的 A 参数。

三、仪器设备

1. 电路分析实验箱 一台
2. 数字万用表 一只

四、实验任务

1. 如图 16-3 接线

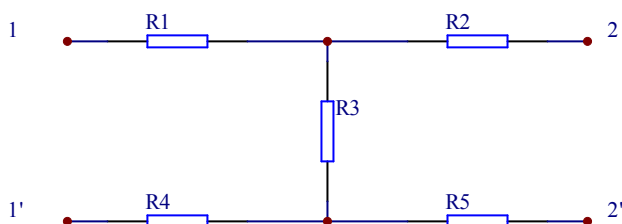


图 16-3

$R_1 = 100\Omega$ ， $R_2 = R_5 = 300\Omega$ ， $R_3 = R_4 = 200\Omega$ ， $U_1 = 10\text{V}$ 。将端口 2-2' 处开路测量 \dot{U}_{20} 、 \dot{I}_{10} ，将 2-2' 短路处测量 \dot{I}_{1S} 、 \dot{I}_{2S} ，并将结果填入表 14-1 中。

表 14-1

2-2' 开路	\dot{U}_{20}	\dot{I}_{10}
$\dot{I}_2 = 0$		
2-2' 短路	\dot{I}_{1S}	\dot{I}_{2S}
$\dot{U}_2 = 0$		

实验十四 二端口网络的研究

2. 计算出 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{21} 、 A_{22} 。

$$A_{11} = \left. \frac{\dot{U}_{10}}{\dot{U}_{20}} \right|_{\dot{I}_2 = 0}, \quad A_{21} = \left. \frac{\dot{I}_{10}}{\dot{U}_{20}} \right|_{\dot{I}_2 = 0}$$

$$A_{12} = \left. \frac{\dot{U}_{1S}}{-\dot{I}_{2S}} \right|_{\dot{U}_2 = 0}, \quad A_{22} = \left. \frac{\dot{I}_{1S}}{-\dot{I}_{2S}} \right|_{\dot{U}_2 = 0}$$

验证： $A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$

3. 计算 T 型等值电路中的电阻 r_1 、 r_2 、 r_3 ，并组成 T 型等值电路。

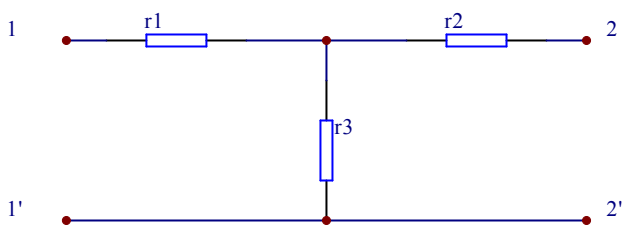


图 16-4

在 1-1' 处加入 $U_1 = 10\text{ V}$ ，分别将端口 2-2' 处开路 and 短路测量并将结果填入表 14-2 中。

表 14-2

2-2' 开路	\dot{U}_{20}	\dot{I}_{10}
$\dot{I}_2 = 0$		
2-2' 短路	\dot{I}_{1S}	\dot{I}_{2S}
$\dot{U}_2 = 0$		

$$r_1 = \frac{A_{11} - 1}{A_{21}} \quad r_2 = \frac{A_{22} - 1}{A_{21}} \quad r_3 = \frac{1}{A_{21}}$$

比较二表中的数据，验证电路的等效性。

实验十五 负阻抗变换器

一、实验目的

1. 加深对负阻抗概念的认识，掌握对含有负阻电路的分析研究方法。
2. 了解负阻抗变换器的组成原理及其应用。
3. 掌握负阻抗变换器的各种测试方法。

二、实验说明

1. 负阻抗是电路理论中的一个重要基本概念，在工程实践中也有广泛的应用。负阻的产生除了某些非线性元件在某个电压或电流的范围内具有负阻特性外，一般都由一个有源双口网络来形成一个等值的线性负阻抗。该网络由线性集成电路或晶体管等元件组成，这样的网络称作负阻抗变换器。

按有源网络输入电压和电流与输出电压和电流的关系，可分为电流倒置型和电压倒置型两种（INIC 及 VNIC）。

2. 实验用线性运算放大器组成如图 15-1 所示的电路，在一定的电压、电流范围内可获得良好的线性度。

（1）图中虚线框所示电路是一个用运算放大器组成的电流倒置型负阻抗变换器（INIC）。设运算放大器是理想的，由于它的正输入端（“+”）与负输入端（“-”）之间为虚短路，输入阻抗为无限大，故有

$$\dot{U}_p = \dot{U}_a$$

即

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2$$

运算放大器输出端电压

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_1 - \dot{I}_3 R = \dot{U}_2 - \dot{I}_4 R$$

∴

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_4$$

$$\text{又} \because \dot{I}_1 = \dot{I}_3 \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_4$$

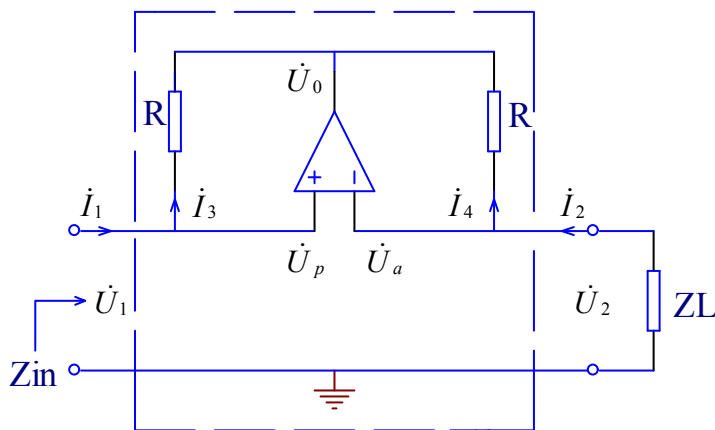


图 15-1

∴

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2$$

又由负载端电压和电流的参考方向，有

$$\dot{I}_2 = -\frac{\dot{U}_2}{Z_L}$$

即

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = -Z_L$$

因此，整个电路的激励端的输入阻抗

$$Z_{in} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = -Z_L$$

可见，这个电路的输入阻抗为负载阻抗的负值，也就是说，当负载端接入任意一个无源阻抗元件时，在激励端就等效为一个负的阻抗元件，简称负阻元件。

(2) 负阻抗变换器元件 $-Z$ 和普通的无源 R 、 L 、 C 元件 Z' 作串、并联连接时，等值阻抗的计算方法与无源元件的串、并联计算公式相同，即对于串联连接，有

$$Z_{串} = -Z + Z'$$

对于并联连接，有

$$Z_{并} = \frac{-Z \cdot Z'}{-Z + Z'}$$

三、仪器设备

- | | |
|------------|-----|
| 1. 电路分析实验箱 | 1 台 |
| 4. 数字万用表 | 1 只 |

四、实验内容与步骤

1. 测量负电阻的伏安特性，实验线路如图 15-2 所示。
 - (1) 按实验线路接线，断开开关 S。
 - (2) 测出对应的 U、I 值，计算负电阻阻值，将数据记录于表 15-1 中。

实验十五 负阻抗变换器

(3) 画出等效阻抗的伏安特性。

表 15-1 $R_L=2K\ \Omega$

U (V)		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1.5	0	1.5	2	3	4	5	6	7
I (mA)																
等效 阻抗 (Ω)	测量值															
	理论值															

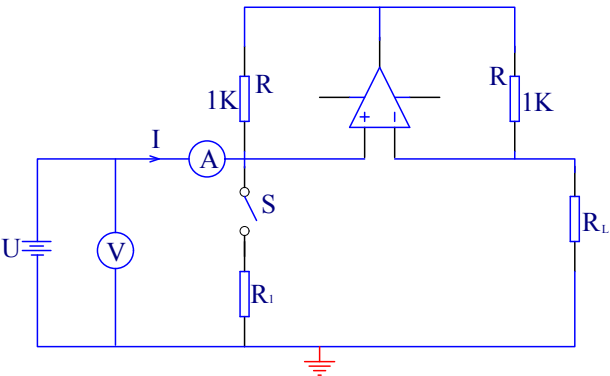


图 15-2

2. 负阻抗元件与普通无源元件的并联连接

- (1) 按实验线路接线，闭合开关 S。
- (2) 测出对应的 U、I 值，并计算并联后的总阻抗，将数据记录于表 15-2。
- (3) 验证负阻元件—Z 和普通的无源 R、L、C 元件 Z' 作串、并联连接时，等值阻抗的计算方法与无源元件的串、并联计算公式相同，。

表 15-2 $R_L=400\ \Omega$

R1		∞	5k	1k	700 Ω	400 Ω	200 Ω	100 Ω
U (V)		2	2	2	2	2	2	2
I (mA)								
等效 阻 抗 (Ω)	测量值							
	理论值							

五、注意事项

整个实验中激励电源不得超过实验给定值。

实验十六 回转器

一、实验目的

1. 掌握回转器的基本特性。
2. 测量回转器的基本参数。
3. 了解回转器的应用。

二、实验原理

1. 回转器是一种有源非互易的新型二端口网络元件，电路符号及其等值电路如图 16-1 (a)、(b) 所示。

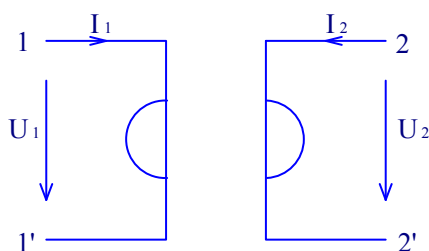


图 16-1 (a)

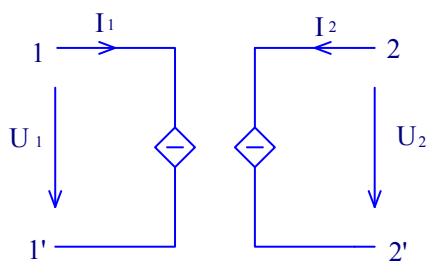


图 16-1 (b)

理想回转器的导纳方程如下：

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & +G \\ -G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

或写成

$$I_1 = GU_2 \quad I_2 = -GU_1$$

也可写成电阻方程：

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -R \\ +R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

或写成

$$U_1 = -RI_2 \quad U_2 = RI_1$$

式中 G 和 R 分别称为回转电导和回转电阻，简称为回转常数。

2. 若在 2—2' 端接一负载电容 C ，则从 1—1' 端看进去就相当于一个电

实验十六 回转器

感，即回转器能把一个电容元件“回转”成一个电感元件，所以也称为阻抗逆变器。2—2' 端接有 C 后，从 1—1' 端看进去的导纳 Y_i 为

$$Y_i = \frac{I_1}{U_1} = \frac{GU_2}{-I_2/G} = \frac{-G^2 U_2}{I_2}$$

又 ∵

$$\frac{U_2}{U_1} = -\frac{I_1}{I_2} = -\frac{-\lambda C}{I}$$

∴

$$Y_i = \frac{G^2}{j\omega C} = \frac{1}{j\omega L} \quad L = \frac{C}{G^2}$$

3. 由于回转器有阻抗逆变作用，在集成电路中得到重要的应用。因为在集成电路制造中，制造一个电容元件比制造电感元件容易得多，我们可以用一个带有电容负载的回转器来获得数值较大的电感。

有关回转器的结构与电路原理见图 16-2

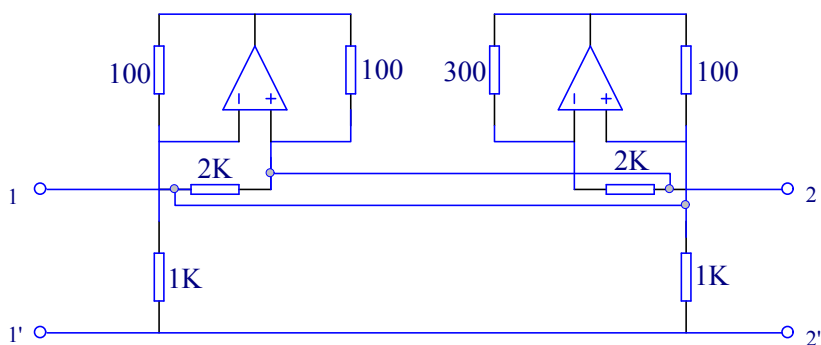


图 16-2

三、仪器设备

- | | |
|------------|-----|
| 1. 电路分析实验箱 | 1 台 |
| 2. 双踪示波器 | 1 台 |
| 3. 交流毫伏表 | 1 台 |

四、实验内容与步骤

1. 在图 16-3 的 2—2' 端接纯电阻负载，信号源频率固定在 1KHZ，信号

实验十六 回转器

电压 2V。用交流毫伏表测量不同负载电阻 R_L 时 U_1 、 U_2 和 U_{RL} 、 U_{RS} ，并计算相应的电流 I_1 、 I_2 和回转常数 G ，将数据记录表 16-1 内。

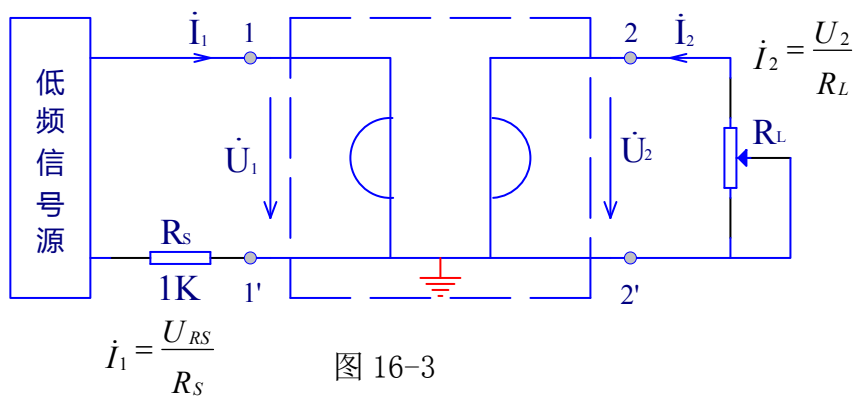


表 16-1

R (Ω)	测 量 值		计 算 值				
	U1 (V)	U2 (V)	I1(mA)	I2(mA)	$G' = I_1/U_2$	$G'' = I_2/U_1$	G 平均= $G' + G'' / 2$
500							
1K							
1.5K							
2K							
3K							
4K							
5K							

2. 用双踪示波器观察回转器输入电压和输入电流之间的相位关系，按图 16-4 接线。

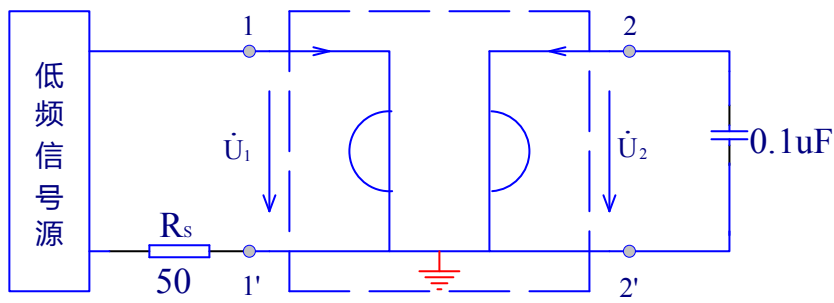


图 16-4

实验十六 回转器

(1) 2—2' 端接电容负载, $C=0.1\ \mu\text{F}$ 观察 I_1 与 U_1 之间的相位关系, 图中的 R_s 为电流取样电阻, 因为电阻两端的电压波形与通过电阻的电流波形同相, 所以用示波器观察 U_{R_s} 上的电压波形就反映了电流 I_1 的相位。

(2) (选做实验) 测量谐振特性

用回转器做电感, 与 $C=1\ \mu\text{F}$ 构成并联谐振电路。如图 16-5 所示

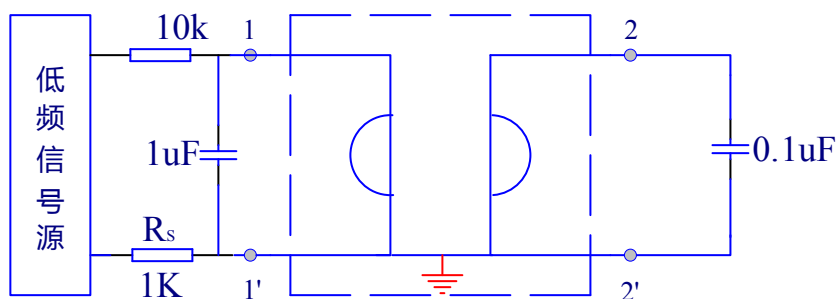


图 16-5

低频信号源输出电压恒定 $U=2\text{V}$, 在不同频率时用交流毫伏表测量 1—1' 端的电压, 并找出峰值。将数值记录于表 18—2。

表 18—2

频率 $f(\text{HZ})$	200	300	400	430	460	485	520	560	600	700	800
$U_1(\text{V})$											

五、注意事项

回转器的正常工作条件是 U 、 I 的波形必须是正弦波, 为避免运算放大器进入饱和状态使波形失真, 所以输入电压应以不超过 2V 为宜。