

### 电路典型实验项目一：一阶 RC 电路的零状态、零输入和全响应

**实验介绍：**利用 Multisim 软件提供的元件库、虚拟示波器及开关分别研究一阶 RC 串联电路的零输入、零状态和全响应的过渡过程。RC 一阶电路的零输入响应和零状态响应分别按指数规律衰减和增长，其变化的快慢决定于电路的时间常数。全响应指电路储能元件有初始储能且电路有输入情况下的响应，可理解为零状态和零输入的叠加。设计一个电路，通过开关的状态使电路产生上述三种不同响应过程，利用 multism 软件的仪器仪表观察测量动态过程。

**具体实验流程：**

1) 在 Multisim 环境下搭建以下一阶 RC 零输入、零状态、全响应仿真原理电路。

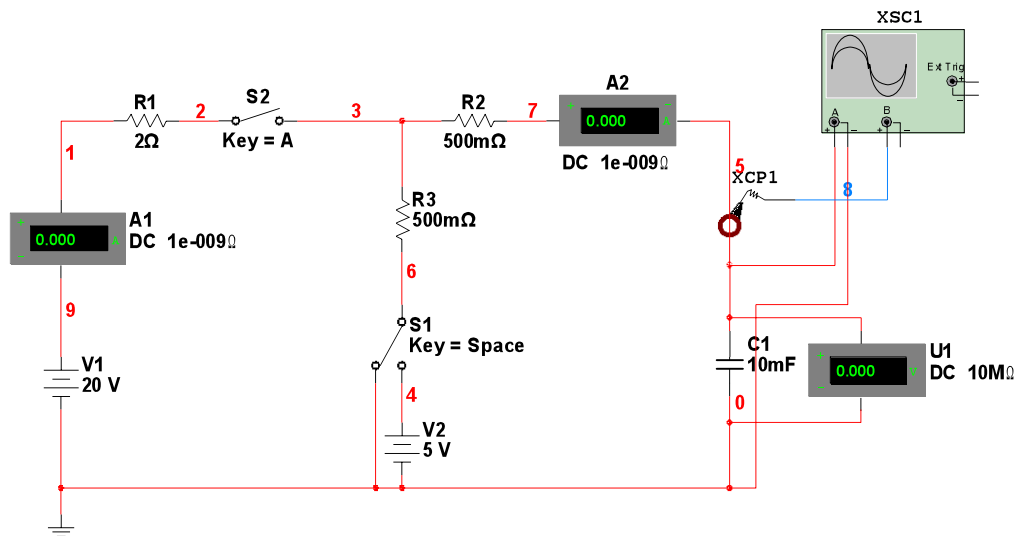


图 1-1 一阶 RC 零输入、零状态、全响应仿真原理电路图

#### ①零输入、零状态、全响应

(a) s2 断开，s1 在右侧足够长时间，则电容完成储能，s1 从右侧打向左侧接通时为零输入响应，电路中无电源输入。

(b) s2 断开，开关 s1 在左侧时，电路结构保证电容为零状态，未储能，s1 从左侧打向右侧闭合时，为一阶 RC 电路的零状态响应；

(c) s2 闭合，s1 在右侧足够长时间，电容完成储能，s1 从右侧打向左侧接通时为零输入响应，电路有电源输入。

#### ②数据测量

(a) 一阶 RC 电路换路前及换路若干时间常数后，电路中的电流电压为常数，需要观察并验证其数值，在电路中设置两个直流电流表和一个直流电压表测量，见图中的 A1，A2 及 U1。

(b) 一阶 RC 电路动态过程的电流电压响应为阶跃形式，通过示波器测量显示，测量方法见原理图，电流的测量通过电流探针取得。

## 2) 一阶 RC 动态响应分析

①零输入响应。电路开关 s2 断开, s1 在右侧, 点击仿真运行已设计好的电路, 打开示波器, s1 从右侧合向左侧, 此时示波器中显示电路电流电压动态变化过程。

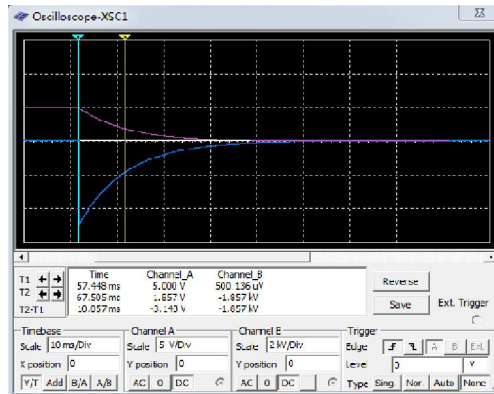


图 1-2 零输入响应及时间常数分析

(a) 蓝色曲线为电流动态响应, 紫红色为电压动态响应。从曲线可以看出, 换路前后电容电压不变, 曲线连续, 但是电容电流不满足换路定理, 产生突变。电压电路中的电流电压为常数, 需要观察并验证其数值, 在电路中设置两个直流电流表和一个直流电压表测量, 见图中的 A1, A2 及 U1。

(b) 根据电路换路后稳态电路, 可分析计算电容电压和电流都衰减为 0, 与仿真曲线中的参数比较, 数值一致。

(c) 电路中时间常数为  $R \cdot C = 10\text{ms}$ , 即经过一个时间常数时间 10ms 后, 电容电压按指数衰减为初始值 5V 的  $e^{-1}$  倍, 即 1.84V, 可在示波器上测量验证, 见图 1-2, 当换路后 10.057ms 后, 电压响应值为 1.857V, 与理论分析一致。

②零状态响应。电路开关 s2 断开, s1 在左侧, 点击仿真运行已搭建完成的电路, 打开示波器, 开关 s1 合向右侧, 此时示波器中显示电容支路中电流电压动态变化过程。

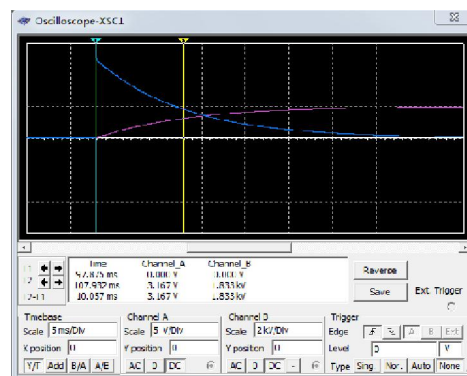


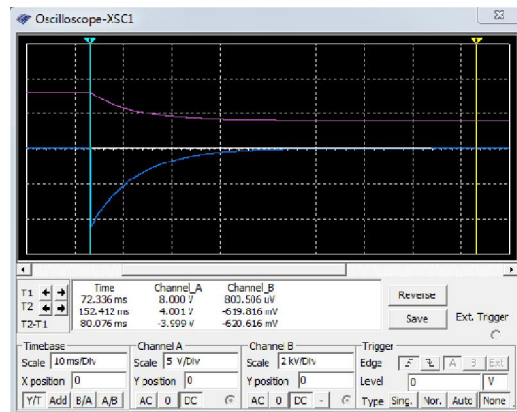
图 1-3 零状态响应及时间常数分析

(a) 蓝色曲线为电流动态响应，紫红色为电压动态响应。从曲线可以看出，换路前后电容电压不变，曲线连续，验证了电容电压的换路定理，但是电容电流不满足换路定理。

(b) 根据电路换路后稳态电路，可分析计算电容电压值为 5V，电流值为 0A，与仿真曲线中的参数比较，数值一致。

(c) 电路中时间常数为  $R \cdot C = 10\text{ms}$ ，即经过一个时间常数时间 10ms 后，电容电压按指数上升为稳态值 5V 的  $1 - e^{-1}$  倍，3.16V，可在示波器上测量验证，见图 1-3，当换路后 10.057ms 后，电压响应值为 3.167V，与理论分析一致。

③全响应。s2 闭合，s1 在右侧足够长时间，电容完成储能，s1 从右侧打向左侧接通时为全响应，换路后电路有电源输入。

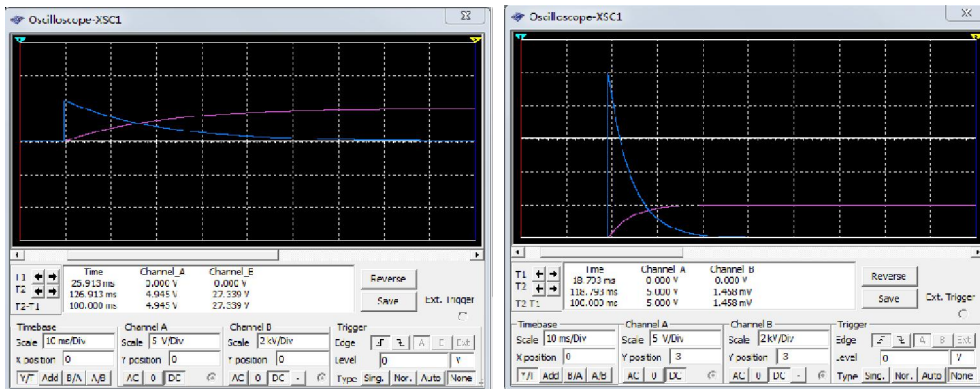


1-4 全响应电容支路电流电压变化

电容电压换路前后值不变，曲线连续，满足换路定理，电容电流换路时跃变，不满足换路定理，由于换路后有电源输入，换路后电容电压衰减到稳定值 4V。与电路分析结果一致。

### 3) 一阶 RC 动态响应时间常数分析

①等效电阻对时间常数影响。增大电路中电阻的值，使零状态响应换路后电路的等效电阻为 2 欧，此时时间常数为 20ms，响应见图 1-5 (a)；减小电路中电阻的值，使零状态响应换路后电路的等效电阻为 0.5 欧，此时时间常数为 5ms，响应见图 1-5 (b)，(b) 图中为了显示需要，将测量的两个通道的数据 Y 轴向平移。



1-5 (a) 增大等效电阻对时间常数影响 1-5 (b) 减小等效电阻对时间常数影响

②电容参数对时间常数影响。保持电阻值不变，使零状态响应换路后电路的等效电阻为 1 欧。增大电路中电容为 20 毫法，此时时间常数为 20ms。减小电路中电容为 5 毫法，此时时间常数为 5ms。此两种情况电路的零状态响应曲线图与图 1-5 分别相同

实验效果：动态电路的过渡过程需要借助示波器才能观察其电路响应的动态过渡过程，在实验室进行实物连接实验时，示波器的使用调节往往对学生而言往往有一定的困难。通过 Multisim 软件仿真，虚拟示波器使用相对简单，便于学生将更多精力投入到观察过渡过程与电路参数变化的联系上去。本实验设计将一阶 RC 电路的三种不同过渡过程都考虑在内，使得学生对过渡过程的特征有更具体的认识，且可通过调节 RC 参数，改变电路动态过程的时间常数，并可用示波器测量时间常数。

### 电路典型实验项目二：三相电路运行特性实验

实验介绍：利用 Multisim 软件提供的元件库及虚拟仪器仪表研究三相电路运行的特征。研究了三相系统电源和负载为 Y-Y 接法情况下有中性线和无中性线时电路的特性。在此两种情况下分别研究了负载对称和不对称时电路的运行特点。负载不对称考虑了三相负载值不对称及单相断线两种情况。通过仿真实验可以系统了解三相电路的运行特征并进一步认识到中性线在三相电路运行中的作用。

具体实验流程：

- 1) 在 Multisim 环境下搭建以下三相电路运行特性实验仿真电路图。

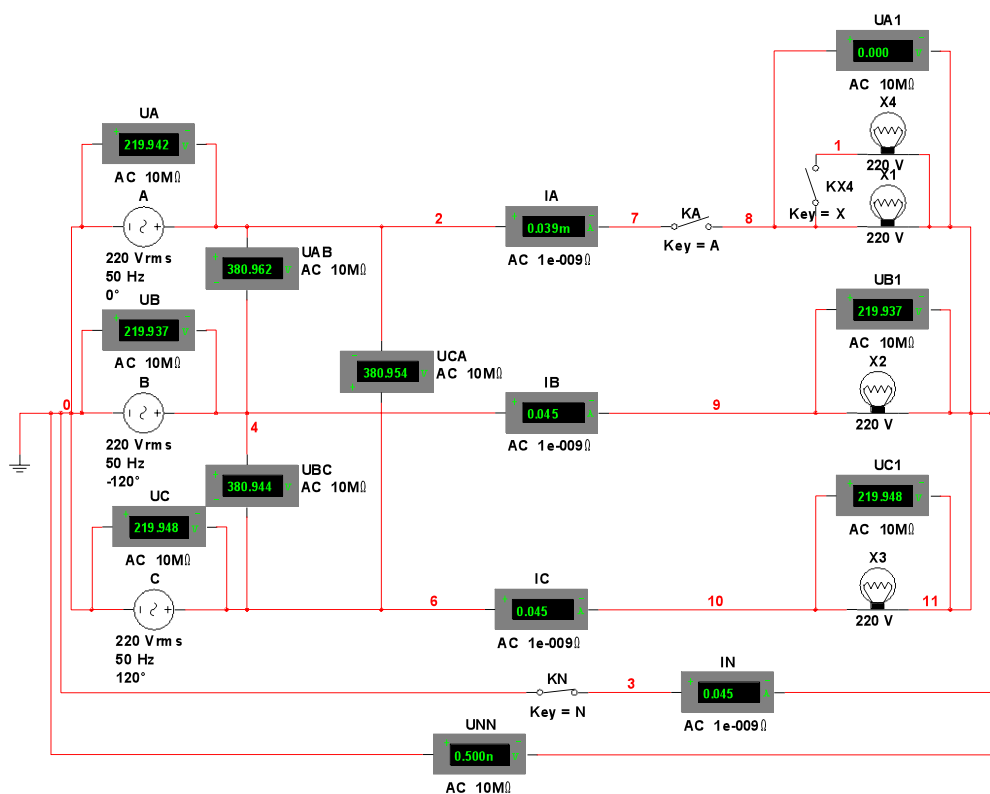


图 2-1 三相电路运行特性实验仿真原理电路图

## 2) 三相对称电路

①开关 KN 断开，三相对称系统无中性线运行。测量此时负载的相电流相电压以及电源和负载中性点间的电压值。

②开关 KN 闭合，中性线投入运行。测量此时负载的相电流相电压以及电源和负载中性点间的电压值。

从两次测量数据值可看到，三相电路对称时，有无中性线对系统负载运行基本无影响。

## 3) 三相负载不对称

实验考虑 A 相负载与其他相不同的情况，当开关 KX4 闭合，A 相负载投入两个白炽灯负载，为其他相的两倍。

在负载不对称条件下，分别投入中性线及退出中性线运行，测量负载相电流电压及中性线端电压。从仿真可看出，有中性线时，不对称负载仍能正常运行；当无中性线时，各相负载电压差别很大，负载不能正常运行。

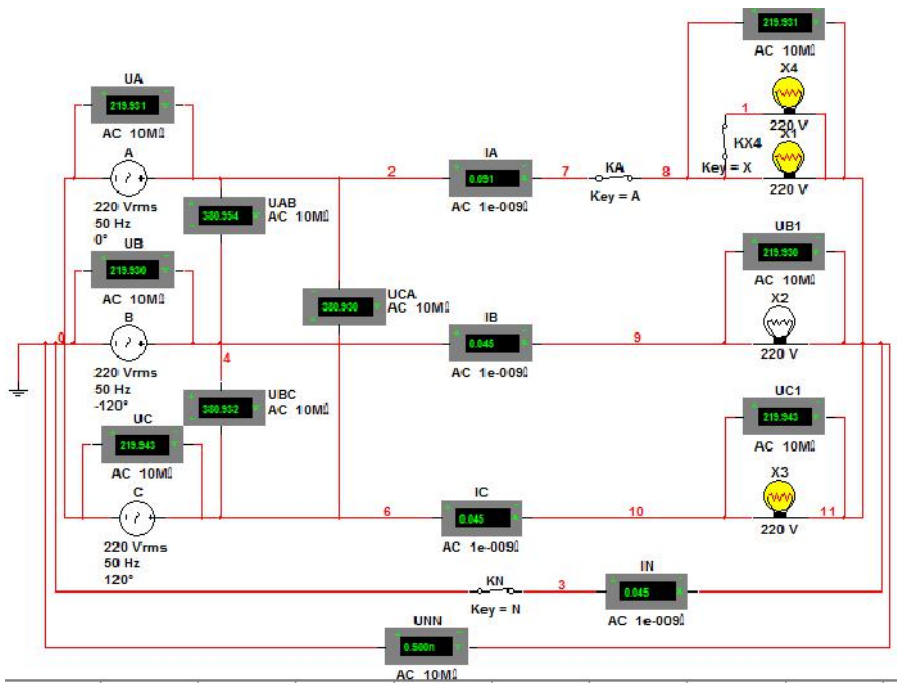


图 2-2 (a) 不对称负载中性线运行时负载运行情况

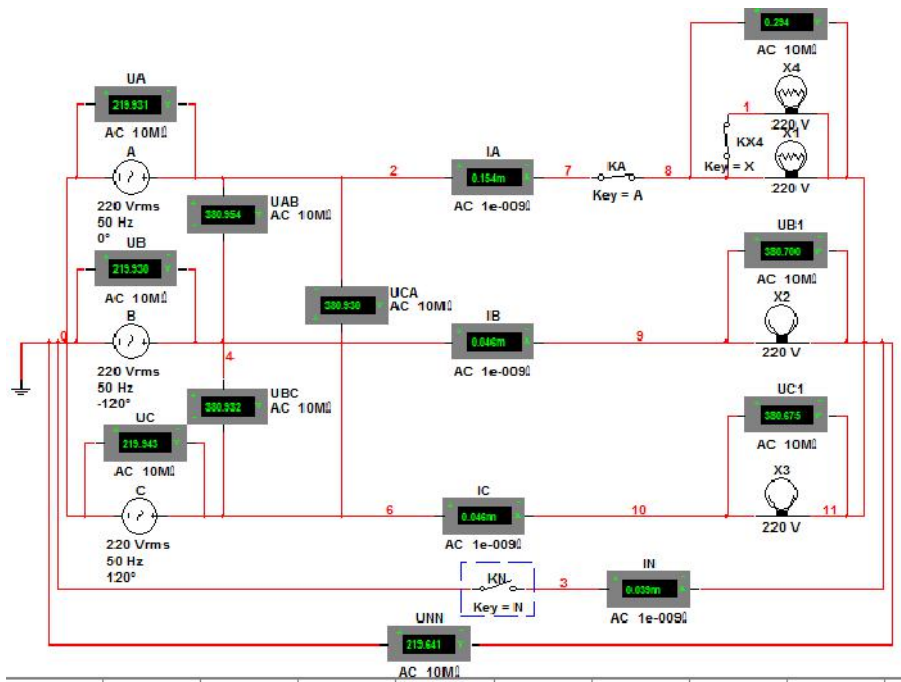


图 2-2 (b) 不对称负载无中性线时负载运行情况

#### 4) 系统故障

实验考虑 A 相断线故障，当开关 KA 断开，A 相发生断相故障。分别仿真有中性线和无中性线时负载运行情况。



中性线运行时，A 相断相故障，A 相负载不能正常运行，BC 两相负载仍然能正常运行；无中性线时，A 相断相故障，ABC 三相负载均不能正常运行。

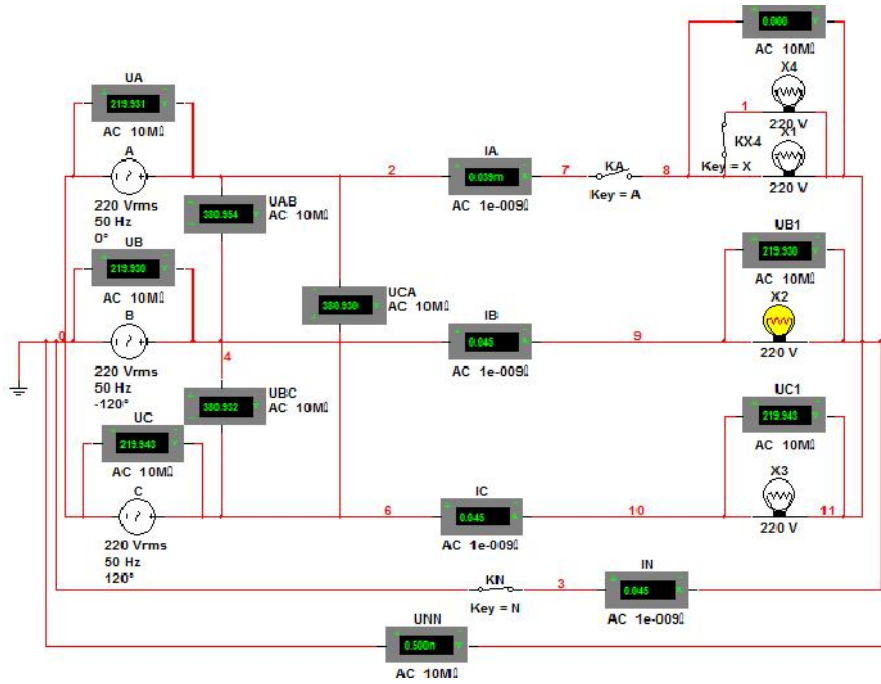


图 2-3 (a) A 相断线有中性线时负载运行情况

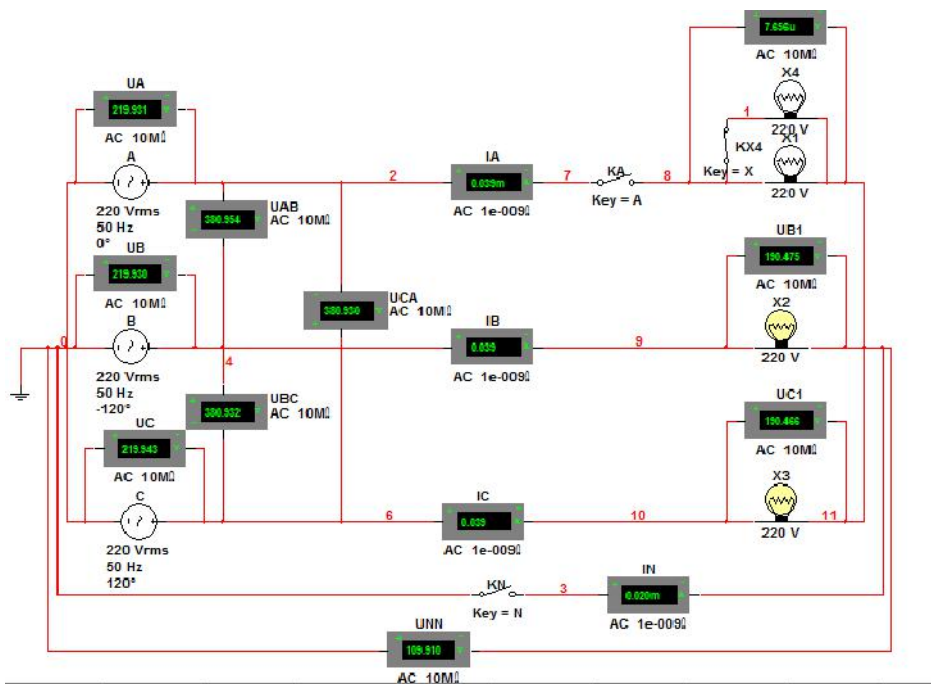


图 2-3 (b) A 相断线无中性线时负载运行情况

### 5) 系统其他故障

在本仿真实验原理的基础上，可通过增加一些开关设置系统的其他故障形式，比如单相接地，相间故障等，进一步分析中性线在各种情况下对系统运行的影响。

**实验效果：**三相电路实验电源相电压达 220V，实际接线操作存在一定的安全风险，且三相电路实际接线较复杂，测量需要的表计较多，实验室一般不会提供多台同类仪表，实际测量时需要多次改变表计的联接位置进行测量，较为不便。通过 Multisim 软件仿真，软件可提供多个同类表计，测量方便，且便于观察分析中性线的作用及负载不对称时电路的特性。

#### 电路典型实验项目三：回转器设计

**实验介绍：**回转器是一种二端口网络元件，能把一个端口上的电流“回转”为另一端口上的电压或相反过程的性质，正是由于这一性质，回转器具有把一个电容（电感）回转为一个电感（电容）的本领。用电容元件来模拟电感器是回转器的主要应用之一，特别是模拟大电感量和低损耗的电感器。根据回转器的端口电流电压关系，可利用多种电路实现，如运算放大器、受控源等等，本设计要求使用运算放大器电路设计回转器，然后利用 multism 软件对其进行仿真验证。

**设计要求：**①使用运算放大器实现回转器功能；②使用回转器实现用电容元件模拟电感元件；

**设计方案：**根据系统设计的要求，要实现的回转器框图见图 3-1，其端口电流、电压关系满足： $i_1 = gu_2$ ； $i_2 = -gu_1$ ，其中， $g$  具有电导量纲，称为回转电导，也称回转常数。根据端口方程，利用运算放大器的“虚短”及“虚断”特点，可设计电路使端口满足回转器端口方程。

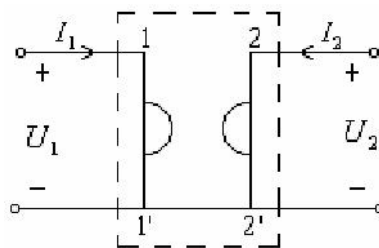


图 3-1 回转器功能框图

利用运算放大器的特性设计的回转器电路如图 3-2.图中 R 为 1k 欧。对



此电路进行理论分析计算：可得 
$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{1000} \\ -\frac{1}{1000} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$
，可知回

转电导常数为  $g = \frac{1}{1000} \text{S}$ 。输出端 2-2' 接阻抗为  $Z_2$  的负载，则输入端 1-1' 的阻抗  $Z_i$  为：

$$Z_i = \frac{U_1}{I_1} = \frac{-\frac{1}{g} \dot{I}_2}{g U_2} = \frac{1}{g^2} \frac{1}{\left( \frac{U_2}{-I_2} \right)} = \frac{1}{g^2 Z_2}$$

可见，1-1' 端负载已被“回转”

为性质相反的元素。

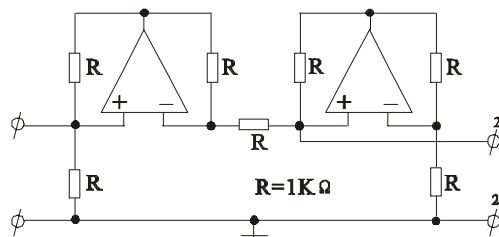


图 3-2 运算放大器实现的回转器

设计流程：

利用 **multism** 软件来设计系统可通过三大步骤来完成，第一是完成项目原理电路的设计并在软件中完成电路搭建，第二是根据项目设计目的设置必要的测量分析器件，第三是仿真并对仿真结果分析。

具体实验流程：

1) 在 **Multisim** 环境下用运算放大器设计以下能实现回转器功能的仿真原理电路。图中 1-1' 和 2-2' 分别是回转器的两个端口。分析回转器回转电导与电路参数的关系，根据运放“虚短”和“虚断”的条件，当  $R_2=R_3=R_5=R_6$ ， $R_1=R_4$  且  $R_7=R_4$  时，电路 1-1' 和 2-2' 端口满足回转器方程，回转常数  $g=1/R_4$ 。

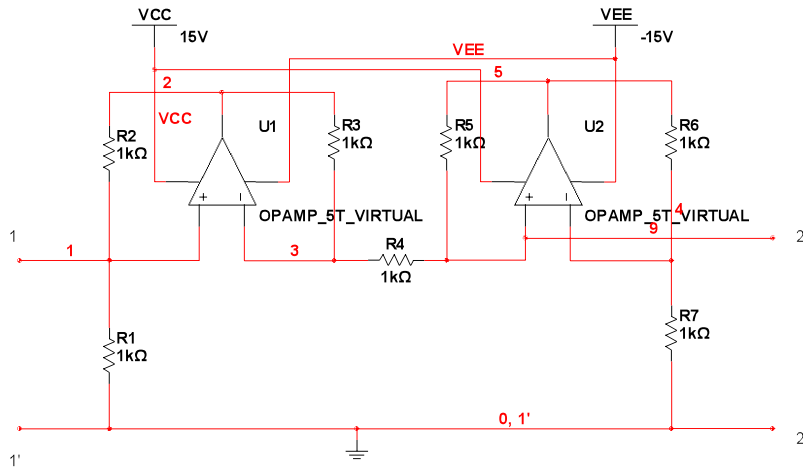


图 3-3 运算放大器实现的回转器电路

2) 回转器功能的实现。根据回转器端口方程，两个端口的电压电流满足  $i_1 = gu_2$ ； $i_2 = -gu_1$ ，需要测量端口的电流电压值验证其参数与理论分析值。可通过 Measurement probe 测量电流电压。由测量值得到回转电导值，并与理论分析值比较。

3) 电容元件回转。利用回转器，将电容元件回转为电感元件，设置恰当的元件参数，可使 RLC 串联电路谐振。

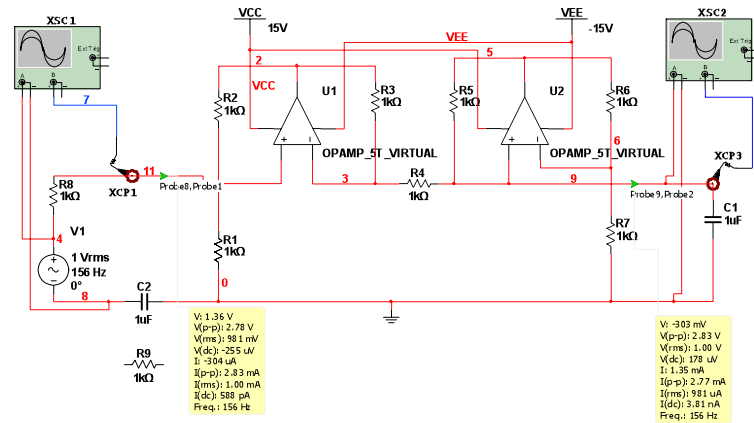


图 3-4 回转器电路参数测量及电容回转电路构成

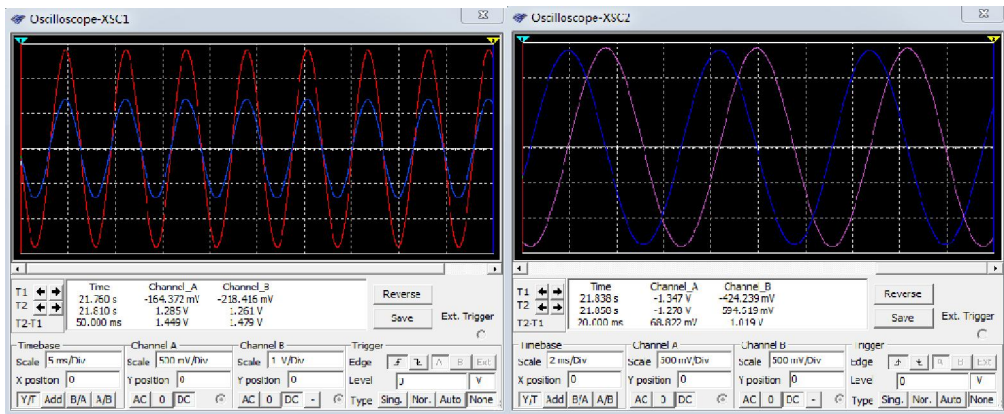


图 3-5 (a) 电容回转 1-1' 波形

图 3-5 (b) 电容回转 2-2' 波形

实验效果: 基于 **multism** 软件的元件库及虚拟仪器仪表, 掌握利用运放设计回转器的方法, 并通过理论分析及仿真互相验证回转器的回转常数值及修改电路回转常数值的方法; 通过回转器端口变换功能, 实现将用电容元件回转为一个电感, 解决实际电路中电感元件难以集成的问题。