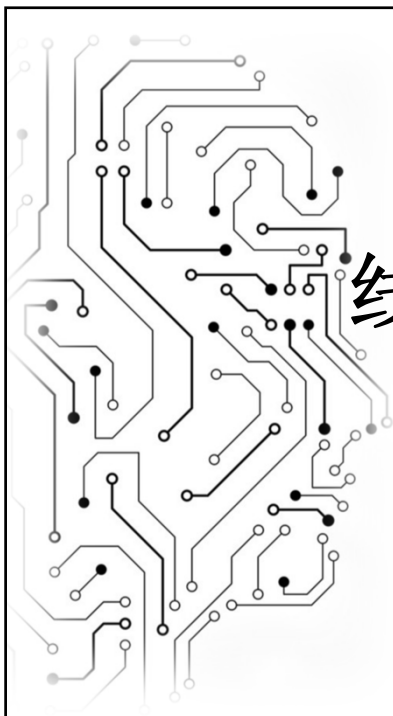




线性电路的计算机仿真

PB15010462

连如意

1. 节点电压法

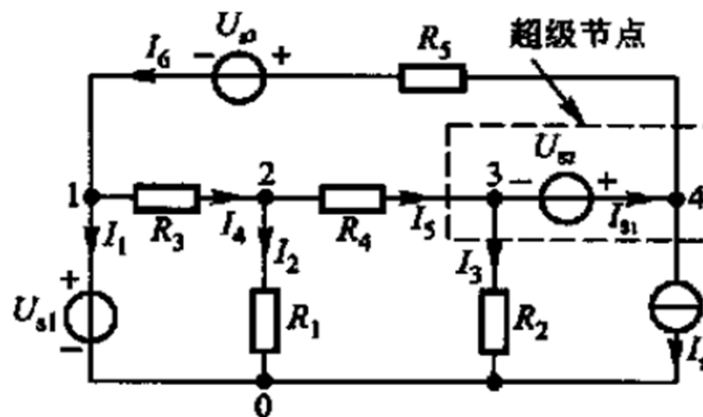
• 1.1 原理

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \dots & G_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{sn} \end{pmatrix}$$

•1.2 改进的节点电压法

引入“超级节点”

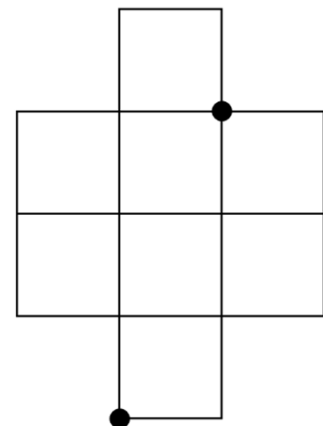
适合处理含有无伴电压源的情况



•1.3.1应用一：处理规则网格问题

内部无源网格，在待测两点之间外加电流源

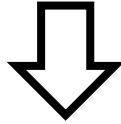
```
>>>vList=[[1,0],[2,0],[0,1],[1,1],[2,1],
[3,1],[0,2],[1,2],[2,2],[3,2],[0,3],[1,3],
[2,3],[3,3],[1,4],[2,4]]
>>> import circuit
>>>circuit.nettest(16,vList,[1,0],[2,3])
1.49793103448
```



- **1.3.2应用二：磁路**

- 1.3.2.1磁路的反问题：**

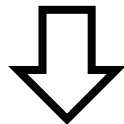
已知励磁电流求各处的磁通量



电压 已知电流源与各支路电阻求各支路的
(可以用节点电压法解决!)

- **1.3.2.2磁路的正问题：**

已知各处的磁通量求各支路上的励磁电流



已知各支路电压与各支路电阻求各支路的电
流源

一点思考...

再次回到我们最初得到的线性方程组：

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \dots & G_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{sn} \end{pmatrix}$$

考虑线性方程：

$$\begin{pmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1n} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{n1} & I_{n2} & \dots & I_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{sn} \end{pmatrix}$$

系数矩阵中非对角元 I_{ij} 表示从节点j流入节点i 的电流源，对角元 I_{ii} 表示从节点0（即参考节点）流入节点i的电流源。易知

$$I_{ij} = -I_{ji}$$

$$\text{记 } A_1 = \begin{pmatrix} I_{s1} & 0 & \dots & 0 \\ I_0 & I_{s2} & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & I_{sn} \end{pmatrix}, \text{ 显然 } A_1 \text{ 满足}$$

$$A_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{sn} \end{pmatrix}$$

称 A_1 为这个问题的一个特解。记 $A_2 = A - A_1$ ，则 A_2 应满足：

$$A_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{pmatrix}$$

且 A_2 在忽略对角元的前提下，可以视为斜对称矩阵。

- **$n=1$** 时 **A_2** 有唯一解
- **$n \geq 2$** 时仅由节点电压法不能给出唯一解

2.节点列表法

• 2.1 交流电路

$$\sum \dot{I} = 0$$

$$\sum \dot{\xi} = \sum \dot{I}(\dot{Z}_R + \dot{Z}_C + \dot{Z}_L) + \boxed{\sum \dot{I}' \dot{Z}_M}$$

2.2原理

$$A\dot{I} = 0$$

$$\dot{U} - A^T \dot{U}_n = 0$$

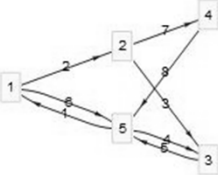
$$F\dot{U} + H\dot{I} = \dot{U}_s + \dot{I}_s$$

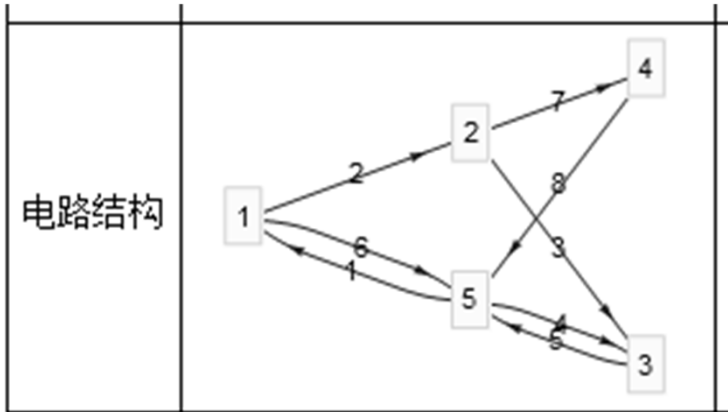
元件	支路方程	F	H
电阻或电感	$\dot{U}_k - Z_k \dot{I}_k = 0$	$F_{kk} = 1$	$H_{kk} = -Z_k$
电导或电容	$Y_k \dot{U}_k - \dot{I}_k = 0$	$F_{kk} = Y_k$	$H_{kk} = -1$
独立电压源	$\dot{U}_k = \dot{U}_{sk}$	$F_{kk} = 1$	$H_{kk} = 0$
独立电流源	$\dot{I}_k = \dot{I}_{sk}$	$F_{kk} = 0$	$H_{kk} = 1$
VCVS	$\dot{U}_k - \mu_{kj} \dot{U}_j = 0$	$F_{kk} = 1, F_{kj} = -\mu_{kj}$	$H_{kk} = 0$
VCCS	$\dot{I}_k - g_{kj} \dot{U}_j = 0$	$F_{kk} = 0, F_{kj} = -g_{kj}$	$H_{kk} = 1$
CCVS	$\dot{U}_k - \gamma_{kj} \dot{I}_j = 0$	$F_{kk} = 1$	$H_{kk} = 0, H_{kj} = -\gamma_{kj}$
CCCS	$\dot{I}_k - \beta_{kj} \dot{I}_j = 0$	$F_{kk} = 0$	$H_{kk} = 1, H_{kj} = -\beta_{kj}$
互感	$\dot{U}_k - j\omega L_k \dot{I}_k \mp j\omega M_{kj} \dot{I}_j = 0$	$F_{kk} = 1, F_{jj} = 1$	$H_{kk} = -j\omega L_k, H_{kj} = \mp j\omega M_{kj}$
理想变压器	$\dot{U}_k - n/m \dot{U}_j = 0, \dot{I}_j + n/m \dot{I}_k = 0$	$F_{kk} = 1, F_{kj} = -n/m$	$H_{jj} = 1, H_{jk} = n/m$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & A \\ -A^T & I_b & 0 \\ 0 & F & H \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_n \\ \dot{U} \\ \dot{I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{U}_s + \dot{I}_s \end{pmatrix}$$

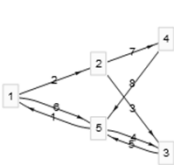
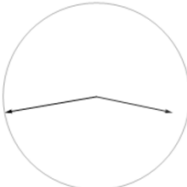
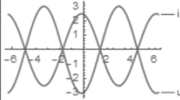
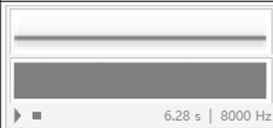
2.3 程序实现

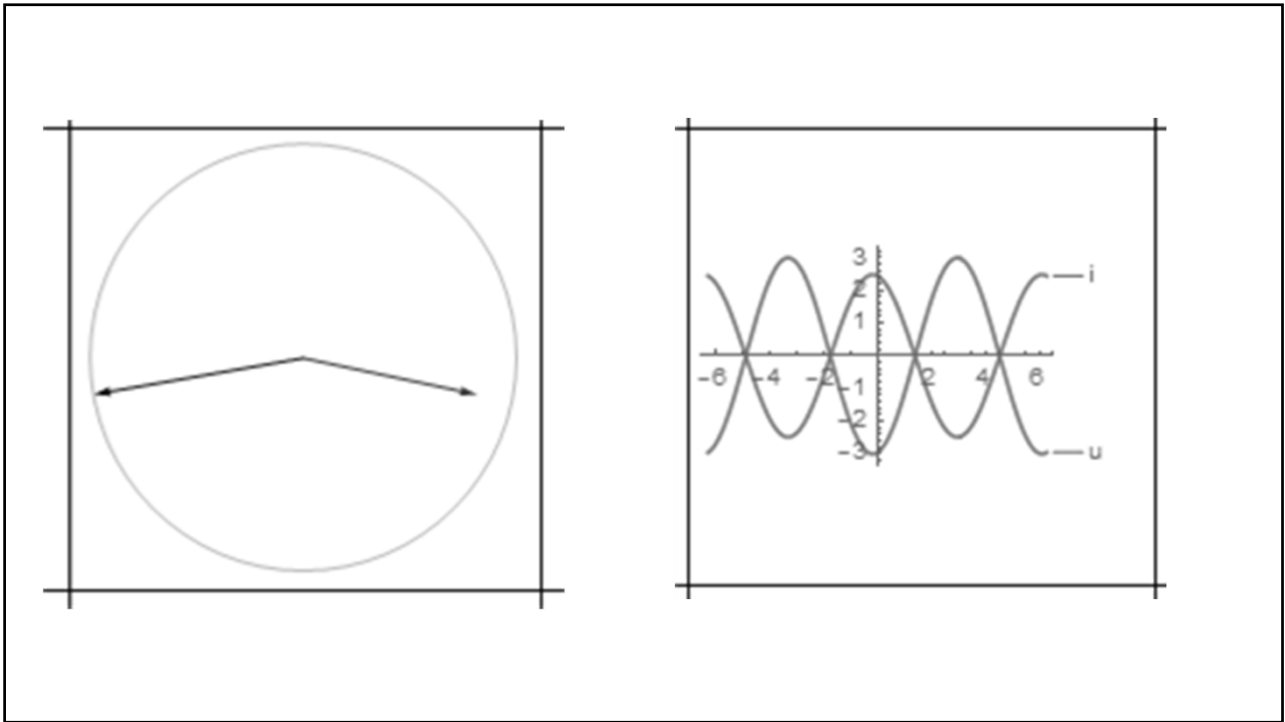
使用Mathematica进行线性电路的分析

用户输入						
支路编号	5	元件种类	互感	起止节点	3 5	
参数设置	{2, 3}	控制支路	{6}	确定		
删除支路	dL	确定	圆频率	1	完成	重置
电路分析						
选择支路	4	确定	复数形式	{4, 5, 3}	{u, -3.79695 - 2.93292 i}	{i, -5.89884 + 6.59445 i}
电路结构			功率	4.58295	功率因数	-0.615025

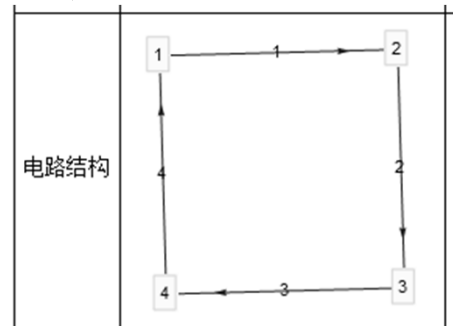
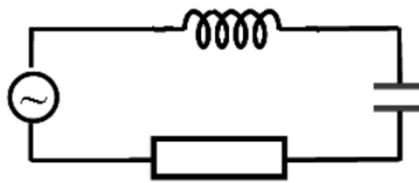


增添一些新的功能——

用户输入							
支路编号	5	元件种类	互感	起始节点	3	结束节点	5
参数设置	{6, }			控制支路	{6}	确定	重置
删除支路		确定	圆频率	1	完成		
电路分析							
选择支路	3	确定	复数形式	{3, 2, 3}	{u, -7.5939 - 5.86584 i}	{i, 5.86584 - 7.5939 i}	
电路结构		相量图		函数图			
功率	-7.45165	功率因数	1.	播放电路声音	u		



2.4.1 算例一：RLC串联电路



若 $Z_L = Z_C$, 即 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, U 、 I 同步 ($\varphi = 0$)

—— 串联谐振

$\{u, \text{Abs}[u], \text{Arg}[u]\}$

$$\left\{ i, \right. \\ \left. \text{Abs} \left[\frac{c u \omega}{-1 + i c R \omega + c L \omega^2} \right], \right. \\ \left. \text{Arg} \left[\frac{i c u \omega}{-1 + i c R \omega + c L \omega^2} \right] \right\}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{cL}}$$

$$\text{In[62]:= arg}\left(\frac{ic u}{\sqrt{cL}\left(\frac{icR}{\sqrt{cL}} + \frac{cL}{cL} - 1\right)}\right)$$

$$\text{Out[62]= arg}\left(\frac{u}{R}\right)$$

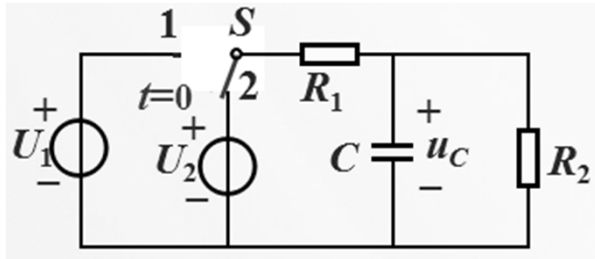
2.4.2 算例二：一阶暂态电路的“三要素法”

$$f(t) = f(\infty) + [f(0_+) - f(\infty)] e^{-t/\tau}$$

对于一阶**RC**电路来说： $\tau = R_0 C$

1) 简单的一阶电路， $R_0=R$ ；

2) 复杂的一阶电路， R_0 为换路后的电路除去电源和储能元件后，在 储能元件两端所求得的 无源二端网络的等效电阻。



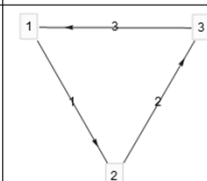
已知 $U_1=3V$, $U_2=+6V$,
 $R_1=1k\Omega$, $R_2=2k\Omega$, $C=3\mu F$,
 $t<0$ 时电路已处于稳态。用三要素法求
 $t \geq 0$ 时的 $u_C(t)$ 。

换路之前

用户输入						
支路编号	1	元件种类	电压源	起止节点	1	2
参数设置	{3, 0}			控制支路	0	确定
删除支路	1	确定	圆频率	0	完成	重置
电路分析						
选择支路	3	确定	复数形式	{1, 1, 2}	{u, 3}	{i, $\frac{1}{1000}$ }
电路结构			功率	0	功率因数	$\cos\left[\frac{2999}{1000}\right]$

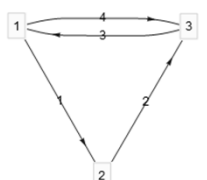
$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = \frac{R_2 \cdot U_1}{R_1 + R_2} = 2V$$

换路之后

用户输入						
支路编号	1	元件种类	电压源	起止节点	1	2
参数设置	{6, 0}			控制支路	0	确定
删除支路	1	确定	圆频率	0	完成	重置
电路分析						
选择支路	3	确定	复数形式	{3, 3, 1}	{u, -4}	{i, 1/500}
电路结构			功率	$\pi \cos\left[\frac{1999}{500}\right]$	功率因数	$\cos\left[\frac{1999}{500}\right]$

当 $t > 0$ 电路处于稳态时,
$$u_C(\infty) = \frac{R_2 \cdot U_2}{R_1 + R_2} = 4V$$

等效电阻的计算

用户输入						
支路编号	4	元件种类	电流源	起止节点	1	3
参数设置	{1, 0}			控制支路	0	确定
删除支路	1	确定	圆频率	0	完成	重置
电路分析						
选择支路	4	确定	复数形式	{4, 1, 3}	{u, 2000/3}	{i, 1}
电路结构			功率	0	功率因数	$\cos\left[\frac{1997}{3}\right]$

$$R_0 = R_1 * R_2 / (R_1 + R_2) = 2/3k\Omega$$

$$\tau = (R_1 // R_2)C = \frac{2}{3} \times 3 = 2\text{ms}$$

$$u_C = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$u_C = 4 - 2e^{-500t} \text{ V} \quad (t \geq 0)$$

3 前景展望

- 1. 节点列表法的正式版程序中会出现卡顿现象
- 2. 用户界面仍显得粗糙，电路图与设想相差甚远
- 3. 不能处理非线性元件
-

4.参考资料

- [1]叶邦角，《电磁学》，中国科大出版社
- [2]赵伟光，《电路分析基础》，清华大学出版社
- [3]林锡忠，《磁路欧姆定律应用的问题》，成都华林检测技术研究所，610081
- [4]李京秀，舒云星，《大规模稳态电路分析程序的Matlab实现》，武汉理工大学学报

谢谢！

