

Matlab 电路仿真实验常用建模方法

孙文杰

(烟台南山学院 工学院, 山东 龙口 265713)



摘要: 为弥补实验设备的不足和改进实验效果,以 RLC 串联二阶动态电路实验为例,阐述了基于 Matlab 2014 仿真平台的 6 种建模方法:基本编程法、状态空间模型法、传递函数建模法、S 函数建模法、SimPowerSystems 建模法、基于 GUI 的仿真设计法,仿真结果科学有效。每一种仿真建模方法都有其自身特点,不同的专业用户可根据具体的仿真要求和系统特点合理选择,通过计算机仿真建模能够有效地提高对理论知识的理解和工程应用分析能力。

关键词: 建模; Matlab\Simulink; 仿真实验

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7167(2016)07-0080-05

Common Modeling Methods of Circuit Simulation Experiment Based on Matlab

SUN Wen-jie

(College of Engineering, Yantai Nanshan University, Longkou 265713, China)

Abstract: Computer simulation is also used to make up for the shortcomings of the experimental equipments and to improve the experimental results. Taking the RLC series two order dynamic circuit experiment as an example, six kinds of modeling methods based on Matlab 2014 simulation platform are described in this paper. They are the basic programming method, the state space model, the transfer function modeling method, the S function modeling method, the SimPowerSystems modeling method, and the GUI Simulation design method. All simulation results are scientific and effective. Each simulation modeling method has its own characteristics. Different professional users can choose the methods according to the specific requirements and the characteristics of the system. The understanding of the theoretical knowledge and the analysis ability in the engineering application can be effectively improved by the computer simulation modeling.

Key words: modeling; Matlab\Simulink; simulation experiments

0 引言

电路原理是电气信息类专业的必修课,也是许多工科专业考研的必备课程,该课程理论性强,实验多,是后续专业基础课和专业课的先修课程,要想扎实掌

握这门课程的基本知识和分析方法,仅靠传统课本加作业形式的学习方式难以取得较为理想的效果,尤其是当实验设备不足或不能正常工作而影响课程开设的时候,采用计算机仿真不失为一种理想教学方案。在计算机仿真教学中,Matlab 是学习电路课程较为理想的专业仿真工具^[1-2],其良好的人机交互功能可以使用户根据仿真电路的特点灵活选择合适的仿真建模方法,尤其是其 Simulink 库中 Simulink 模块和 Simscape\SimPowerSystems\Foundation Library\子模块能够更好地完成各种验证性、设计性、综合性、研究性电路实验

收稿日期:2015-11-12

基金项目:2015 年民办本科高校优势特色专业支持计划-自动化专业(201505)

作者简介:孙文杰(1976-)男,山东龙口人,硕士,讲师,主要研究方向:信号与信息处理。Tel.:13697869045; E-mail: ytnsxy@163.com

仿真。本文以 RLC 串联二阶动态电路响应实验仿真为例,阐述了基于 Matlab2014 仿真平台的 6 种常用建模方法:基本编程法、状态空间模型法、传递函数建模法、S 函数建模法、SimPowerSystems 建模法、基于 GUI 的仿真设计法,这几种方法也可推广应用到其他专业的仿真建模中。

1 基本编程法

Matlab 除了提供可以直接输入命令进行交互的命令窗口(Command Window)外,还提供了解决复杂和多次重复输入性问题的 m 文件编辑器,该编辑器分为脚本文件和函数文件,后者第一行必须进行函数语句的定义,两者都可以在 m 文件编辑器中执行^[3]。m 文件编辑器方便了用户集中编写和调试程序,提高了编程和解决问题的效率,是基于原始算法步骤的仿真方法。下面以一个典型的、如图 1 所示的二阶动态电路响应为例说明该方法的基本仿真程序及结果。

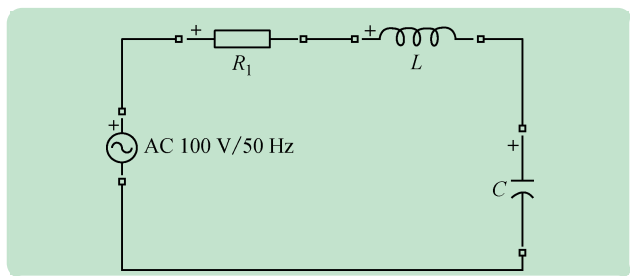


图 1 RLC 电路

仿真求解回路电流 I 、电阻 R 两端电压 U_R 、电感 L 两端电压 U_L 、电容 C 两端电压 U_C 。

(1) 仿真程序

```
Us = 100; W = 100* pi; R = 1;
C = 1* 10^-4; L = 1* 10^-3;
XL = W* L; XC = 1/W* C;
Z = R + j* ( XL - XC );
I = Us/Z
UR = I* R
URabs = abs( UR)
URangle = angle( UR)
UL = j* I* XL
ULabs = abs( UR)
ULangle = angle( UR)
UC = -j* I* XC
UCabs = abs( UR)
UCangle = angle( UR)
```

(2) 仿真结果

```
I = 91.017 0 - 28.593 8i
UR = 91.017 0 - 28.593 8i
URabs = 95.402 8
URangle = -0.304 4
```

```
UL = 8.983 0 + 28.593 8i
ULabs = 95.402 8
ULangle = -0.304 4
UC = -9.101 7e - 06 - 2.897 2e - 05i
UCabs = 95.402 8
UCangle = -0.304 4
```

可以看出,仿真模型沿用了基本的电路分析步骤,简明地得到了各个参量的幅值、幅角数值。

2 状态空间模型法

状态空间模型能够全面地表述系统的全部状态信息,是研究自动控制系统极其有效的数学描述,也是新型的、科学的、应用广泛的系统分析方法,适用于单输入单输出(SISO)、多输入多输出(MIMO)等各种系统,既能描述线性系统,又能描述非线性系统,被公认为是现代控制理论的基础^[4]。当然,根据不同的仿真具体分析要求,可建立诸如能控标准型、能观标准型、对角线标准型、约旦标准型等不同形式的状态空间方程。

对图 1 电路进行状态分析,仿真求解电容输出电压对应的传递函数。

(1) 电路状态分析。RLC 回路电压方程为:

$$U_s(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

电容输出电压 $y(t) = c(t)$, 选择状态变量:

$$x_1(t) = i(t) \quad x_2(t) = \int i(t) dt$$

即 RLC 回路电压方程简写为 $U_s = Rx_1 + Lx_1' + \frac{1}{c}x_2$, 电

容输出电压为 $y = \frac{1}{c}x_2$, 则系统的状态方程为:

$$x_1' = -\frac{R}{L}x_1 - \frac{1}{LC}x_2 + \frac{1}{L}U_s \quad x_2' = x_1$$

可写成:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{LC} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} U_s = Ax + BU_s$$

输出方程为 $y = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} x = Cx$ 。

(2) 仿真程序。

```
A = [-10^3 -10^7; 1 0];
B = [10^3; 0]; C = [0 10^4]; D = 0;
[num den] = ss2tf(A,B,C,D); G = tf(num,den)
```

(3) 仿真结果。

```
G =
1e07
-----
s^2 + 1 000 s + 1e07
```

可以看出,通过状态空间模型较为容易地得到了系统的传递函数,为进一步分析系统响应做好准备。

3 传递函数建模法

在经典控制理论中,描述系统的数学模型除原始的微分方程模型外,常常取而代之的采用传递函数^[5]。传递函数对微分方程等进行拉普拉斯变换(连续系统)或Z变换(离散系统)得到的,反映了系统输出和输入之间的关系,在Matlab中传递函数的分子和分母多项式的系统向量一般分别定义成矩阵变量num和den,并按s或z的降幂排序。

对图1进行传递函数建模,仿真求解电容电压作为输出量时对应的传递函数响应曲线。

(1) 传递函数建模。以电容电压 $U_c(t)$ 为输出信号,对图1中的电源取为 DC100 V,其它参数不变,建立RLC微分方程为 $u_s(t) = LC \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t)$,在初始条件为0时,两边同时进行拉普拉斯变换,得到传递函数:

$$G(s) = \frac{u_c(s)}{u_s(s)} = \frac{10^7}{s^2 + 10^3 s + 10^7}$$

打开Simulink Library Browsers,新建一个Model文件,建立如图2所示的传递函数仿真模型。

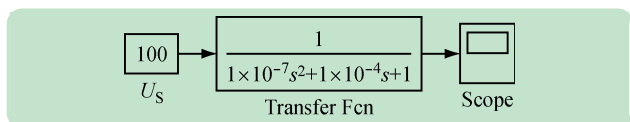


图2 传递函数模型

(2) 仿真结果。仿真结果如图3所示。

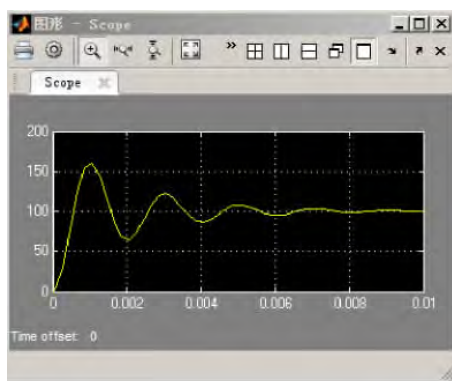


图3 $U_c(t)$ 仿真曲线(电源为DC100V时)

可以看出,这种系统仿真建模分析方法效果较好,在仿真时间为0.01s的情况下能够得到电路的充电过程曲线,这是一个典型的二阶振荡系统响应过程,系统在初始振荡后迅速到达100V的稳态。

4 S函数建模法

S函数(S-Function或System Function)指的是在Matlab\Simulink中建立的函数,又称为系统函数^[6-8],

还可采用C、C++、Fortran、Ada等语言进行编写,用户可以在S函数内部添加自己的算法。当Matlab的模型库中没有用户需要的模块时,就可以利用S函数编写程序建立自己的Simulink模块。具体格式在编写时可参考Matlab提供的内在模板文件C:\Program Files\Matlab\R2014a\toolbox\simulink\blocks\sfuntmpl.m,打开后可以看到S函数文件仿真的三个阶段:①初始化函数部分,对系统的输入和输出个数、采样周期、初始状态等参数大小进行设置;②计算系统的状态变量;③计算系统输出,文件编写好后进行保存,保存的文件名必须和S函数内部第一行定义的函数名称一致。

对图1根据前面描述的状态空间模型法中的状态方程编写S函数,仿真求解系统输出曲线。

(1) 编写S函数模块。建立的S函数文件名和函数名要一致,保存为RLCS,保存在Matlab的安装目录D:\Backup\我的文档\MATLAB中,保证文件在Matlab搜索路径内,并把函数内部的初始值设为 $x_0 = [0.001 \ 0.001]$ 。

```
function [sys x0 str ts] = RLCS(t, x, u, flag, A, B, C, D)
A = [-1 0.0001; -1e-7; 1 0];
B = [1e-7; 0];
C = [0 1e-4];
D = 0;
switch flag,
case 0
[sys x0 str ts] = mdlInitializeSizes(A, D);
case 1
sys = mdlDerivatives(t, x, u, A, B);
case 3
sys = mdlOutputs(t, x, u, C, D);
case [2 4 9]
sys = [];
end
.....
function sys = mdlDerivatives(t, x, u, A, B)
sys = A * x + B * u;
function sys = mdlOutputs(t, x, u, C, D)
sys = [C * x + D * u; x];
```

(2) 建立Simulink仿真框图(见图4)。并设置信号源幅度100V,频率50Hz,把自定义的RLCS函数块和S-Function通过相应参数进行链接。

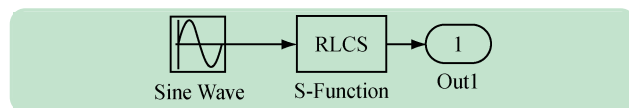


图4 S函数Simulink模型

(3) 仿真运行。仿真设置采用变步长,仿真时间

为 0.5 s, 输入命令: `plot(tout ,yout(:,1))`。运行结果如图 5 所示。

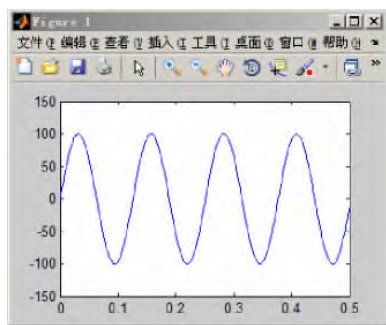


图 5 $U_C(t)$ 仿真曲线(电源为 AC100V 时)

5 SimPowerSystems 建模法

在 Matlab2014 版本中,可以利用 Simulink \ Simscape \ SimPowerSystems \ Specialized Technology 模块集进行电路、电力电子、电机、电力传输等控制系统的物理级仿真^[9-40],只需把相应的电力电子元器件或控制模块搭建连接起来,设置好仿真参数,就可以得到真实电路中的有关实验数据,比采用 Simulink 模块进行的传递函数等仿真更接近现实,该模块继承了 Matlab7.0 的 SimPowerSystem 特点,但在模块参数的设置上进行了优化,使用起来更加便利。作为一款优秀的电气仿真软件,SimPowerSystem 的内核主要由加拿大魁北克 Hydro-Quebec 研究所(IREQ)和 Ecole de Technologie Superieure(ETS)两大学术研究机构完成,其中 IREQ 的 Gibert Sybille 和 Patrice Brunelle 是主要贡献者。

对图 1 进行 SimPowerSystems 物理级建模,此时电源设为 DC100V,电阻 $R=1\ \Omega$,电感 $L=1\text{ mH}$,电容 $C=100\ \mu\text{F}$,仿真求解电路电流 I 、电容两端电压 U 的相应曲线,并把某一随机采样值采用 Display 模块进行显示。

(1) 电路仿真模型。电路仿真模型如图 6 所示。

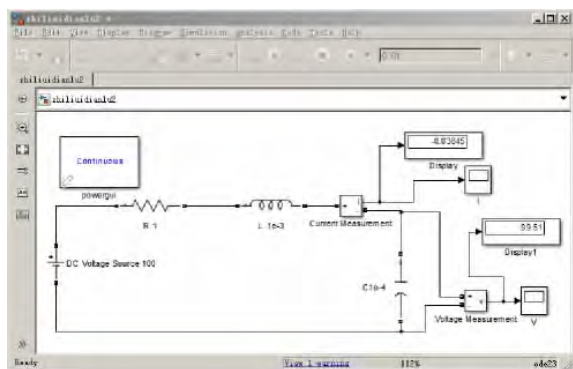


图 6 SimPowerSystems 电路模型

(2) 仿真结果。由 powergui 进行电容电压初始值设置,点击 To Zero 和 Apply; 仿真时间设为 0.01 s。仿真结果如图 7 所示。

由图可以看出在仿真时间较短的情况下,得到了电路各参数的动态特性,仿真效果较为理想,符合电路实验实际参数。

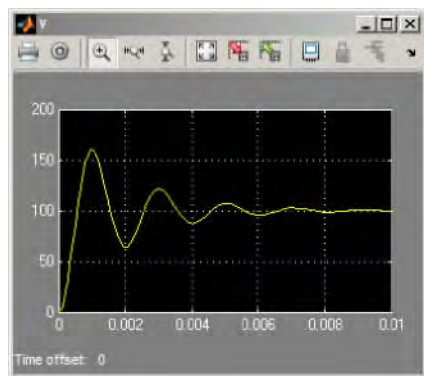
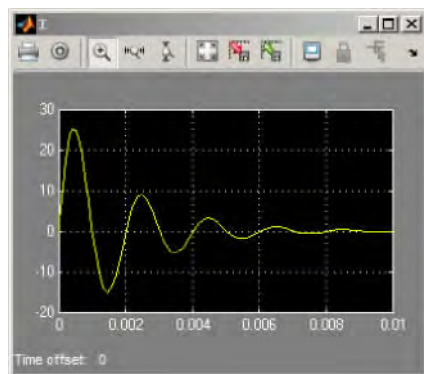


图 7 $U_C(t)$ 仿真结果(电源为 DC100V 时)

6 GUI 仿真设计法

图形用户界面 GUI 是仿真的高级阶段,具有良好的展示和交互功能^[11-42]。Matlab 提供了可视化的开发向导,在其 GUI 仿真过程中,只需做好两件事:图形界面设计和相应的 m 文件编程。创建和打开 GUI 图形的常用方法是打开主页的新建\图形用户界面,一般选择空白的 GUI 自行设计,其四个工作区分别为菜单栏、工具栏、控件区、设计区。在图形界面设计时控件数量和种类尽量少,控件的“sting”和“tag”属性宜简明,这样方便 callback 回调函数的编写。

对图 1 进行 GUI 设计仿真,此时电源不变,但为了实验输出曲线具有良好对比性,这里 $R=20\ \Omega$, $L=0.1\text{ H}$, $C=0.001\text{ F}$,仿真求解回路电流 I 、电阻电压 U_r 、电感电压 U_l 、电容电压 U_c 的稳态输出响应曲线。

(1) 仿真按钮回调函数。

```
Um = str2double( get( handles.edit1,'string') );
w = str2double( get( handles.edit2,'String') );
o = str2double( get( handles.edit3,'String') );
R = str2double( get( handles.edit4,'String') );
L = str2double( get( handles.edit5,'String') );
C = str2double( get( handles.edit6,'String') );
XL = w * L; XC = 1 / ( w * C ); X = XL - XC;
Im = Um. / Sqrt( R * R + X * X )
```



```

h = atan( X. /R) ;
t = 0: 0.001: 0.5;
tem_I = Im* cos( w* t + h) ;
Ur = Im* R
tem_Ur = Ur* cos( w* t + h) ;
Ul = Im* XL
hl = h + pi/2;
tem_Ul = Ul* cos( w* t + hl) ;
Uc = Im* XC
h2 = h - pi/2;
tem_Uc = Uc* cos( w* t + h2) ;
axes( handles. quxian) ;
plot( t ,tem_I ,k - - , t ,tem_Ur ,g: . , t ,tem_Ul ,- b - . , t ,
tem_Uc ,r - )
title( '1,Ur,Ul,Uc'); xlabel( t) ;
set( handles. quxian ,XminorTick,'on') ;
grid on

```

(2) 仿真结果。图形用户界面及仿真结果如图 8 所示。

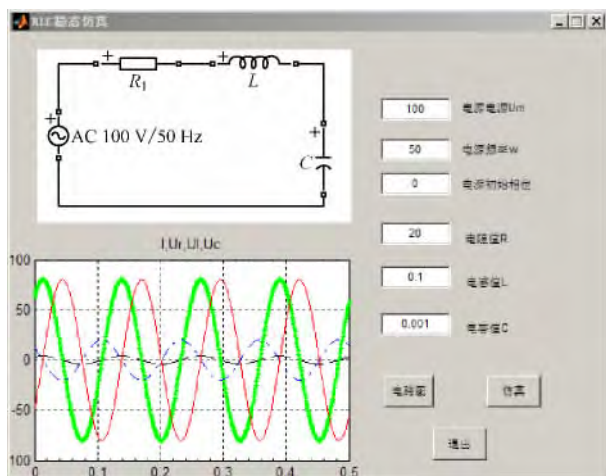


图 8 GUI 界面及仿真结果

7 结 语

通过 6 种电路建模方法的仿真对比,可以看出仿

真结果科学有效,具有较高的参考价值,一般电路中宜采用基本编程法、传递函数法、Simpowersystem 建模法,较为复杂的系统或交互性较强的场合还可采用状态方程法、S 函数编程法、GUI 仿真设计法,每一种方法都有各自的仿真特点,所有的建模方法也都可以其它课程学习和科研方向上采用。采用 Matlab2014 对实验进行仿真,更易于掌握各种仿真建模方法,弥补传统实验硬件条件的不足,激发学生学习兴趣,提高学生计算机仿真应用能力,有利于其深入掌握理论知识和进行毕业设计,更有利于在研究生阶段的学习和科研工作的开展。

参考文献(References):

- [1] 张敬南,张镭钟. 实验教学中虚拟仿真技术应用的研究[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(12): 101-104.
- [2] 徐凯,徐果薇,刘楚红. 电气信息类专业研究生的仿真与实践教学探究[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(8): 77-80.
- [3] 张晓江,黄云志. 自动控制系统计算机仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] 陈军. 基于 SystemView 的数字基带传输系统模型设计与分析[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(10): 98-101.
- [5] 潘湘高. 基于 MATLAB 的电力电子电路建模仿真方法的研究[J]. 计算机仿真, 2003(5): 113-114.
- [6] 张鸣,李白萍. Matlab 仿真在通信原理课程中的应用[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(11): 87-93.
- [7] 李建海,皮之军,张晨亮. Matlab/Simulink 仿真技术在电机实验教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(8): 79-82.
- [8] Le Nguyen BINH. MATLAB Simulink Simulation Platform for Photonic Transmission Systems[J]. I. J. Communications, Network and System Sciences, 2009(2): 91-168.
- [9] 蒋珉,柴干,王宏华. 控制系统计算机仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [10] 张志涌,杨祖樱. MATLAB 教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [11] 朱明扬. RLC 串并联稳态电路的 MATLAB 界面设计[J]. 东北电力大学学报, 2009, 29(4): 21-25.
- [12] 刘云龙,王瑞兰,刘丽君. 基于 Matlab 仿真的自动控制原理实验教学改革[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(6): 102-106.

(上接第 47 页)

- [10] 钟勇. SW_RU 型水下机械手工作空间及机构误差补偿研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [11] Masayuki Shimizu. Analytical inverse kinematics for 5-DOF humanoid manipulator under arbitrarily specified unconstrained orientation of end-effector[J]. Robotica, 2015, 33(4): 747-767.
- [12] Tian Tixian, Jiang Hongzhou, Tong Zhizhong, et al. An inertial parameter identification method of eliminating system damping effect for a six-degree-of-freedom parallel manipulator[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 582-592.
- [13] Adrian-Vasile Duka. ANFIS based Solution to the Inverse Kinematics of a 3DOF Planar Manipulator[J]. Procedia Technology, 2015(19): 526-533.

- [14] Matteo-Claudio Palpacelli, Luca Carbonari, Giacomo Palmieri, et al. Analysis and design of a reconfigurable 3-DoF parallel manipulator for multimodal tasks[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(4): 1975-1985.
- [15] Sehoon Oh, Kyoungchul Kong. Two-degree-of-freedom control of a two-link manipulator in the rotating coordinate system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5598-5607.
- [16] Mohammad Reza Chalak Qazani, Siamak Pedrammehr, Arash Rahmani, et al. Kinematic analysis and workspace determination of hexarot-a novel 6-DOF parallel manipulator with a rotation-symmetric arm system[J]. Robotica, 2015, 33(8): 1686-1703.