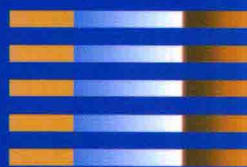


“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材配套用书


电力电子技术



MATLAB仿真实践指导及应用

邹甲 赵锋 王聪 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材配套用书

电力电子技术 MATLAB 仿真实践指导及应用

邹甲 赵锋 王聪 编著

常州大学图书馆
藏书章



机械工业出版社

本书主要是为教材《电力电子技术》(王兆安、刘进军主编,机械工业出版社出版)的辅助学习而编写的,由三个部分组成:第1部分针对每一章的课后习题提供了基于 MATLAB/Simulink 的仿真电路解析,目的是通过仿真电路搭建及分析,对理论知识进行验证,加深对相关知识点的理解。第2部分针对典型的电力电子电路实验项目,搭建了基于 MATLAB/Simulink 的仿真电路,目的是通过仿真研究较好地完成相应实验内容的预习,以提高电力电子技术实验的教学效果。第3部分针对电力电子技术典型综合应用案例,挑选近年全国大学生电子设计竞赛电源类题目进行分析,设计相应的电力电子系统闭环控制器,搭建相对应的 MATLAB 仿真电路,以加深对电力电子系统的认识及理解。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化等专业“电力电子技术”课程的学习参考书或辅助教材,也可供从事电力电子技术研究的广大科技人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 MATLAB 仿真实践指导及应用/邹甲,赵锋,王聪编著. —北京:机械工业出版社,2018.4

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材配套用书

ISBN 978-7-111-58831-3

I. ①电… II. ①邹… ②赵… ③王… III. ①电力电子技术-计算机仿真-Matlab 软件-高等学校-教学参考资料 IV. ①TM1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 000066 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华 路乙达

责任校对:王明欣 封面设计:马精明

责任印制:张博

唐山三艺印务有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·10.75 印张·257 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58831-3

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

电力电子技术是使用以开关方式工作的电力半导体器件对电能进行变换和控制的技术。电力电子技术的进步与发展通常被专家学者们称为人类社会的第二次电子革命，对可持续发展、节能环保以及工业的现代化进步起到越来越大的推动作用。该领域的知名专家 B. K. Bose 教授认为：“电力电子技术在当今时代至少与计算机技术、信息通信技术同等重要，如果不是更重要的话。”

“电力电子技术”的课程教学无论是在本科生还是研究生层次，在我国各高等工科大学电气工程及其自动化、自动化等专业历来受到高度的重视。然而，由于这门课程内容宽泛，且本质上是多学科交叉，对于授课教师和听课学生一直都是一个巨大的挑战。近年来，为了使學生能够对课堂讲授知识更好地融会贯通，电力电子技术的课后作业有时会要求以仿真的形式完成，甚至成为课后作业的主要完成形式；同时为了提高本门课程实验教学的效率，通常会鼓励学生在实验前应用仿真手段对所要完成的电力电子技术实验内容进行预习。应用仿真的形式完成课后作业和实验预习，无论是加深学生对理论知识的直观理解，还是提高学生的综合应用创新能力，都会起到极大的帮助作用。一个普遍的共识是，在学习、分析、设计和评价电力电子变换电路时应用仿真的手段，可以带来诸多的益处，如：①通过观察电力电子变换电路电压和电流的仿真波形，可以对所学习的电路有更加直观和深入的理解，这种理解通常仅靠纸和笔的分析是做不到的；②可以通过仿真对即将进行的实验有一个全面的理解、预习和准备；③可以通过仿真找到电路设计中可能存在的问题，并确定最优的电路拓扑和控制参数；④可以通过仿真观察到所有电路的相关波形，而有些波形在实际实验中可能不便于观察；⑤通过仿真可以对实验室中不存在的实验电路或不方便学生使用的实验电路进行分析和学习。显然，仿真已成为目前学习、分析、设计和评价电力电子变换电路的一个强有力的工具。

早在 20 世纪 50 年代，用于电气和电子电路设计的基于计算机分析的技术就已经被开发出来。随着集成电路的迅猛发展，该类技术在 20 世纪 70 年代受到高度的关注并得到了广泛的应用。在同一时期，计算机仿真技术也开始用于电气传动系统以及晶闸管相控电路的分析与设计，从而为电力电子技术的发展奠定了坚实的基础。目前已有多种能够对电力电子电路和系统进行仿真分析的软件，如 PSpice、Saber、MATLAB、PSIM 等，其中 MATLAB 得到最广泛的应用。MATLAB 不仅是一种强大的通用仿真软件，而且其含有的电力系统工具箱为研究电力电子系统以及电力传动控制系统提供了极大的便利。本书所有的仿真程序设计都是在 MATLAB 环境下完成的。

本书主要是为教材《电力电子技术》（王兆安、刘进军主编，机械工业出版社出版）的辅助学习而编写的，由三个部分组成：第 1 部分针对每一章的课后习题，提供了基于 MAT-

LAB/Simulink 的仿真电路。目的是希望学生能够在使用笔和纸完成作业的同时,可以通过仿真波形对理论分析结果进行验证,并加深对课后作业的理解。第2部分针对实验教学大纲要求开设的典型电力电子技术实验项目,进行实验电路的工作原理介绍,并搭建基于 MATLAB/Simulink 的仿真电路,目的是希望学生进行电力电子技术实验之前,能够通过仿真研究较好地完成相应实验内容的预习,以提升实验的教学效果。第3部分针对电力电子技术应用的综合实践教学需求,将近些年全国大学生电子设计竞赛部分电源类题目作为优质的教学资源进行介绍,搭建相对应的仿真系统,目的是希望学生能够通过电力电子系统(包括主电路、检测电路以及闭环控制电路)的整体仿真研究,加深对电力电子技术实际工程应用的理解,提高电力电子技术的应用能力和创新能力。

王聪教授对本书进行了整体规划并撰写了前言部分。本书第1、2章由赵锋博士编写,其余各章由邹甲博士编写并负责全书的统稿。本书由程红教授主审。研究生何棒棒、刘瑞琪、孔佳仪、马勇、邱少坡参与了本书的仿真程序编写与排版等工作,在此一并表示感谢。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化等专业本科生以及研究生的教学参考书或辅助教材,也可供从事电力电子技术研究的广大科技人员阅读。

由于编者水平有限,书中有欠妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

目 录

前 言

第 1 部分 电力电子技术课后习题仿真指导

第 1 章 电力电子电路的 MATLAB 仿真	10
方法介绍	2
1.1 MATLAB 软件简介	2
1.2 Simulink 仿真环境	2
1.2.1 Simulink 仿真环境的运行与启动	3
1.2.2 常用仿真模块库	3
1.2.3 基本电气元件	4
1.2.4 电源模块库	6
1.2.5 电力电子器件库	7
1.2.6 检测与显示元件	7
1.2.7 信号发生器元件	9
1.2.8 运算和逻辑关系元件	10
1.2.9 其他元件	10
第 2 章 电力电子技术课后习题仿真指导	12
2.1 整流电路的习题解析与仿真	12
2.2 逆变电路的习题解析与仿真	43
2.3 直流-直流变流电路的习题解析与仿真	51
2.4 交流-交流变流电路的习题解析与仿真	71
2.5 PWM 控制技术的习题解析与仿真	76
2.6 软开关技术的习题解析与仿真	83

第 2 部分 电力电子技术典型实验的计算机仿真

第 3 章 电力电子技术课程实验教学大纲	90
3.1 电力电子技术课程典型实验教学大纲	90
3.2 电力电子技术典型实验台介绍	92
第 4 章 电力电子电路典型实验项目的仿真实践	95
4.1 单相桥式全控整流电路	95
4.2 三相桥式全控整流及有源逆变电路	100
4.3 直流斩波电路	110
4.4 半桥型直流稳压电路	116
4.5 单相交-直-交变频电路	119

第 3 部分 电力电子技术综合应用实验指导

第 5 章 电力电子技术综合应用教学	128
5.1 电力电子技术应用综合实验教学设计	128
5.2 全国大学生电子设计竞赛电源类题目分析	129
第 6 章 全国大学生电子设计竞赛电源类题目的仿真研究	130
6.1 双向 DC-DC 变换器	130
6.2 开关电源模块并联供电系统	139
6.3 单相 AC-DC 变换电路	145
6.4 光伏并网发电模拟装置	151
6.5 微电网模拟系统	158
参考文献	165



第1部分

电力电子技术课后 习题仿真指导

第 1 章

电力电子电路的MATLAB仿真方法介绍

1.1 MATLAB 软件简介



MATLAB 是由 MATrix 和 LABoratory 两词的前三个字母组合而成。20 世纪 70 年代后期，时任美国新墨西哥大学计算机科学系主任的 Cleve Moler 教授出于减轻学生编程负担的动机，为学生设计了一组调用 LINPACK 和 EISPACK 库程序的“通俗易懂”的接口，此即用 FORTRAN 编写的处于萌芽状态的 MATLAB。

经过几年的校际流传，在 Little 公司的推动下，由 Little、Moler、Steve Bangert 合作，于 1984 年成立了 MathWorks 公司，并把 MATLAB 正式推向市场。从这时起，MATLAB 的内核采用 C 语言编写，而且除原有的数值计算能力外，还新增了数据图视功能。

MATLAB 以商品形式出现后，仅短短几年就以其良好的开放性和运行的可靠性，将原先控制领域里的封闭式软件包（如英国的 UMIST，瑞典的 LUND 和 SIMNON，德国的 KEDDC）纷纷淘汰，而改以 MATLAB 为平台加以重建。经过 30 多年的发展与持续的更新换代，目前最新 MATLAB 软件最新版本已升级至 R2017b。

由于 MATLAB 在编程上的直观性及可视性，在国内外的大学里，诸如应用代数、数理统计、自动控制、数字信号处理、模拟与数字通信、时间序列分析、动态系统仿真等课程的教材都把 MATLAB 作为内容。所以说，MATLAB 是相关专业领域的本科生、研究生所需掌握的基本工具之一。

在国际学术界，MATLAB 被认为是一款准确、可靠的科学计算标准软件。在许多国际一流的学术刊物上（尤其是信息科学刊物），都可以看到 MATLAB 的应用成果。截至 2017 年，MATLAB 在工业界和学术界已拥有超过 200 万用户。

1.2 Simulink 仿真环境



Simulink 为 MATLAB 中一个非常重要的集成软件包。它可以处理的系统包括：线性、非线性系统；离散、连续及混合系统；单任务、多任务离散事件系统。它为用户提供了动态系统建模、分析和仿真的交互环境。同时，Simulink 的专用模型库提供了一些元件集，它与 MATLAB 及其工具箱结合使用，可以对连续系统、离散系统、连续和离散混合系统的动态性能进行仿真与分析。

在 Simulink 仿真环境中，系统的各元件模型都用框图来表达，用户可以通过单击拖动鼠标的方式绘制和组织系统，并完成对系统的仿真。对于用户而言，只需要知道这些元件模块的功能、输入输出以及图形界面的使用方法，再根据具体电路的参数，就可以很方便地使用鼠标和键盘进行系统仿真，而不必通过复杂的编程，这无疑是很受欢迎的。

1.2.1 Simulink 仿真环境的运行与启动

以 MATLAB 2016a 版本为例介绍启动进入 Simulink 仿真环境的三种方法，如图 1-1 所示。



- 1) 在 MATLAB 菜单栏单击“Simulink”。
- 2) 在 MATLAB 的命令行窗口输入“simulink”并按回车键。
- 3) 单击工具栏“新建”下拉箭头，然后在弹出的目录中单击“Simulink model”。

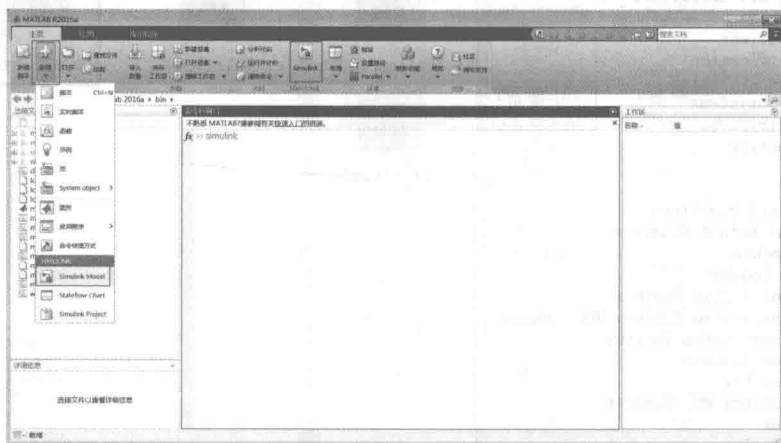



图 1-1 Simulink 仿真环境的进入方法

上述三种方法任选一种，均可进入 Simulink 仿真环境。

1.2.2 常用仿真模块库

仿真模块库内包含了多种基本模块，它们按照功能及应用领域分类，供不同专业领域内的用户选择调用。对于电力电子仿真而言，至少要包含标准的 Simulink 模块库和电气系统 (Power Systems) 模块库。在 Simulink 仿真界面，可通过单击菜单栏中“”打开 Simulink Library Browser，如图 1-2、图 1-3 所示。

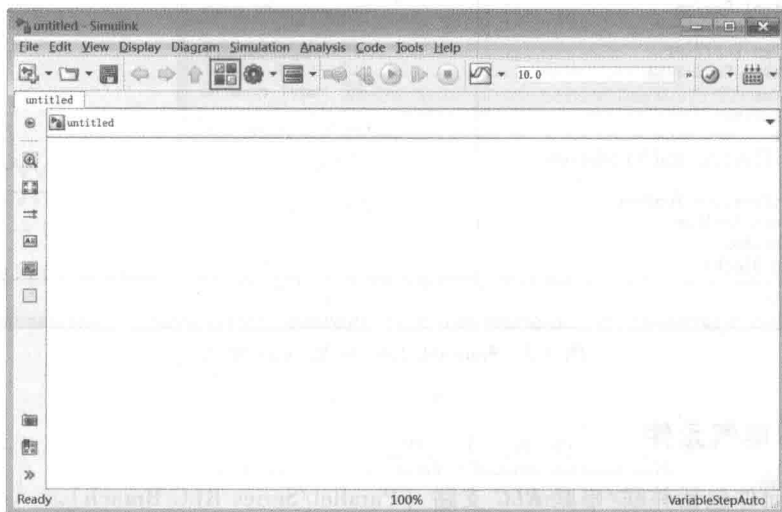


图 1-2 Simulink 仿真界面

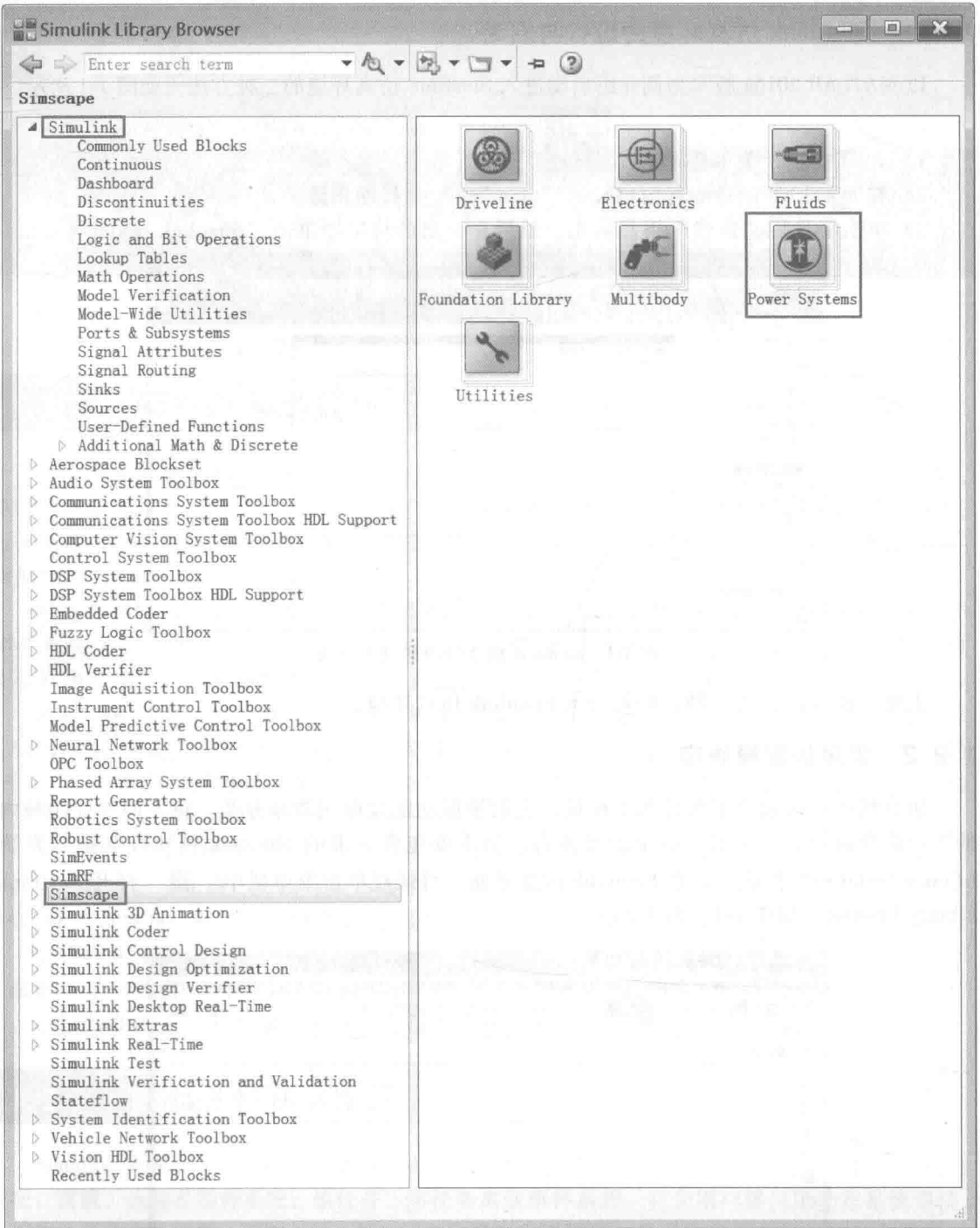


图 1-3 Simulink Library Browser 界面

1.2.3 基本电气元件

基本电气元件包括并联/串联 RLC 支路 (Parallel/Series RLC Branch)。

并联 RLC 支路取自 Specialized Technology 下的 Elements (线性及非线性的电路网络元件

模块库), 如图 1-4 所示, 其元件图形及参数设置对话框如图 1-5 所示。通过设置 “Branch type” 可以自由组合 RLC 的并联情况, 也可将其设置为单一的 R 、 L 、 C 。

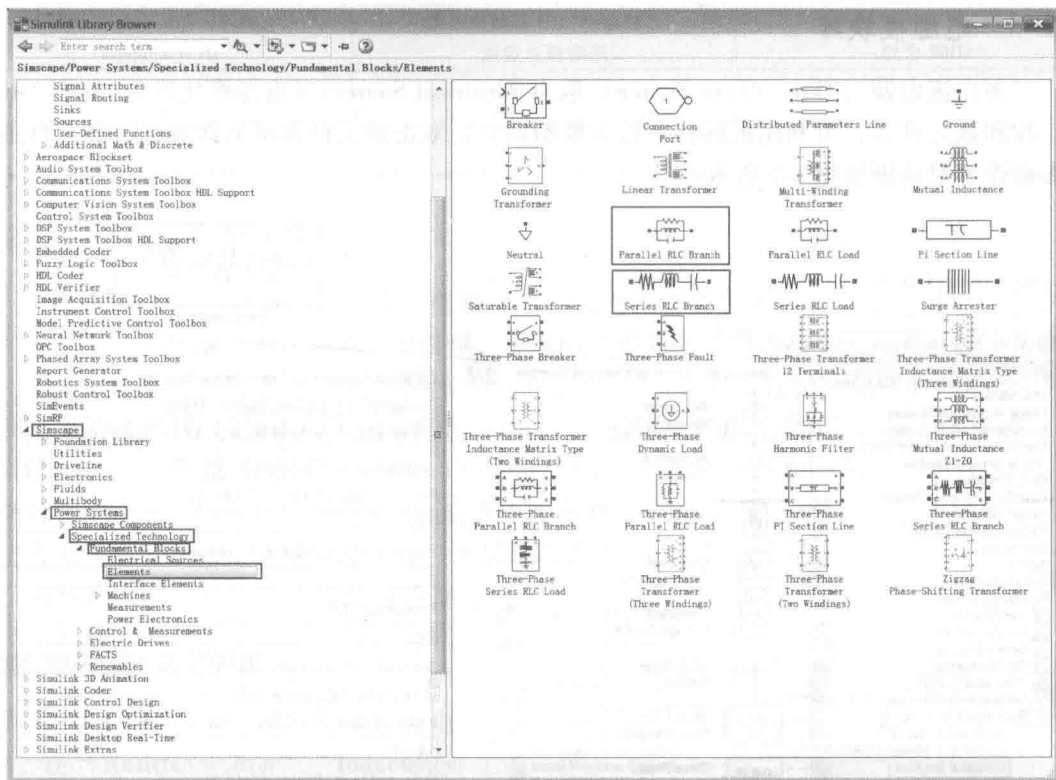


图 1-4 线性及非线性的电路网络元件模块库

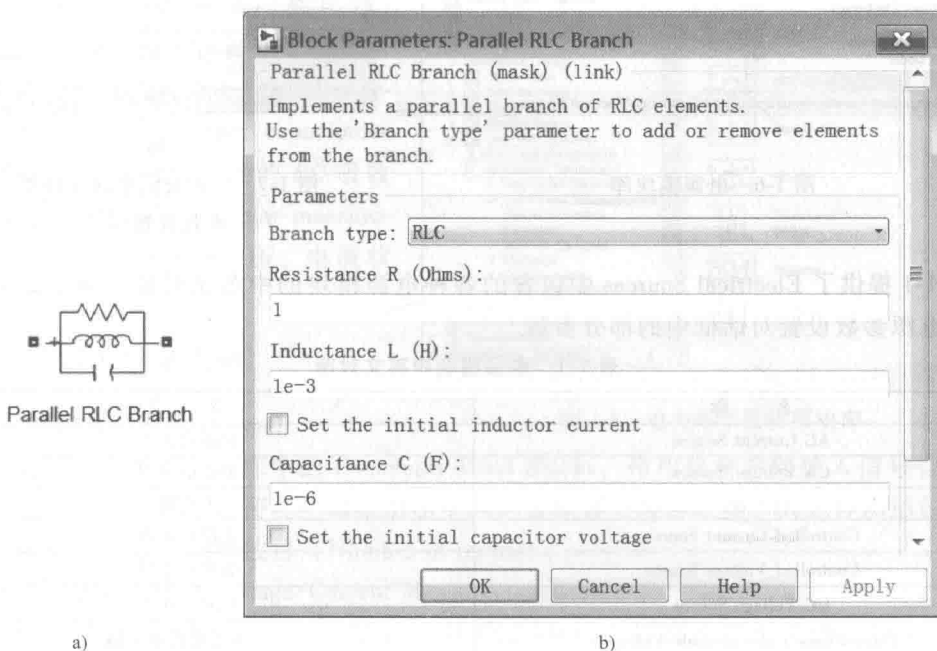


图 1-5 并联 RLC 支路图形及参数设置对话框

串联 RLC 支路的文件位置、参数设置可参考并联 RLC 支路，通过设置 “Branch type” 可以自由组合 RLC 的串联情况，也可将其设置为单一的 R 、 L 、 C 。

1.2.4 电源模块库

三相交流电源 (Three-Phase Source) 取自 Electrical Sources (电源模块库)，如图 1-6 所示。找到该元件后，可利用鼠标将其拉入模型窗口。双击该元件即可修改参数，其元件图形及参数设置对话框如图 1-7 所示。



图 1-6 电源模块库

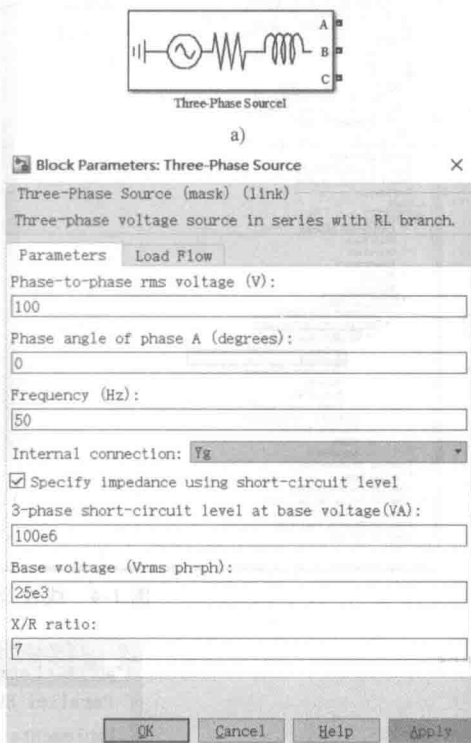


图 1-7 三相交流电源元件图形及参数设置对话框

表 1-1 提供了 Electrical Sources 中包含的各种电源模块的中英文对照，表 1-2 介绍了三相交流电源参数设置对话框中的部分参数。

表 1-1 电源模块中英文对照

名称	释义
AC Current Source	交流电流源
CA Voltage Source	交流电压源
Battery	干电池
Controlled Current Source	受控电流源
Controlled Voltage Source	受控电压源
DC Voltage Source	直流电压源
Three-Phase Programmable Voltage	三相可编程电压源
Three-Phase Source	三相电源

表 1-2 三相交流电源参数设置对话框中部分参数

名称	含义	备注
Phase-to-phase rms voltage/V	设置三相电压的线电压有效值	线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍
Phase angle of phase A/ $^{\circ}$	设置电源 A 相的初始相角	—
Frequency/Hz	设置电源频率	一般为 50Hz
Internal connection	三相电源星形联结方式	Y: 中性点不接地 Yn: 中性点经端子 N 引出 Yg: 中性点接地

1.2.5 电力电子器件库

对于电力电子技术 MATLAB 仿真电路而言, 电力电子器件库尤为重要。MATLAB 中提供的电力电子器件均为简化后的等效模型, 即忽略了电力电子器件本身的开关过程。仿真中常用的电力电子器件可通过调用“Power Electronics”器件库进行选择, 如图 1-8 所示, 其中主要包括了晶闸管 (Thyristor)、二极管 (Diode)、GTO、IGBT、带反并联二极管的 IGBT (IGBT/Diode)、理想开关 (idea Switch)、MOSFET、三相桥式电路 (Three-Level Bridge)、晶闸管精细模型 (Detailed Thyristor)、通用桥式电路 (Universal Bridge) 等十余种可供选择的仿真元件模型。下面以晶闸管为例, 介绍其端子及相关参数的设定。

晶闸管元件图形及参数设置对话框如图 1-9 所示。其中, 端子“a”为阳极, “k”为阴极, “g”为门极, “m”为晶闸管状态输出端 (晶闸管电压及电流)。在“Resistance Ron”“Inductance Lon”和“Forward voltage Vf”参数下分别设置等效电阻、电感及门槛电压; “Initial current Ic”用于仿真非零初始状态下设置器件的初始电流; “Snubber resistance Rs”和“Snubber capacitance Cs”用于设置与晶闸管并联的 RC 吸收电路元件参数; 当勾选“Show measurement port”时, 晶闸管的电压、电流状态将在端子“m”输出。

1.2.6 检测与显示元件

1. 总线合成 (Bus Creator)

总线合成取自 Simulink 库中的 Commonly Used Blocks, 作用是将多路输入信号合成为信号总线, 输出至示波器, 以便在一幅波形图中同时显示多个波形曲线, 其元件图形如图 1-10 所示。双击可设置输入端口数目 (Number of inputs)。

2. 电压/电流测量 (Voltage/Current Measurement)

电压测量取自 SimPowerSystems 库中的 Measurements, 若输入侧连接到被测电路两端, 输出侧 (v) 将产生所测端点间的电压波形, 其元件图形如图 1-11 所示。

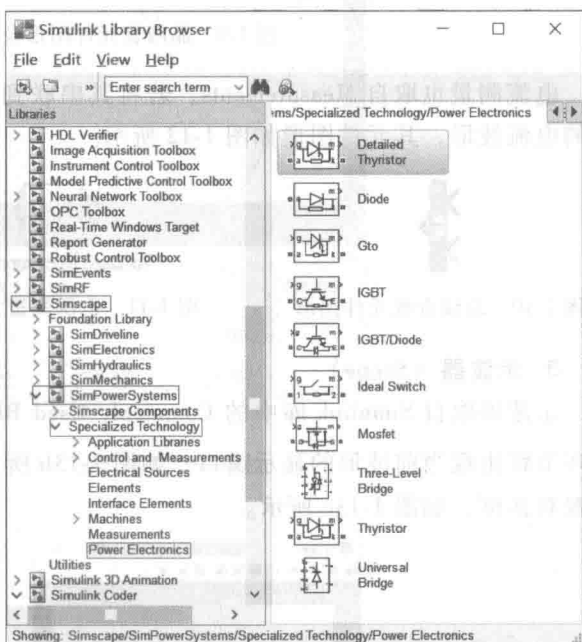


图 1-8 电力电子器件模块库

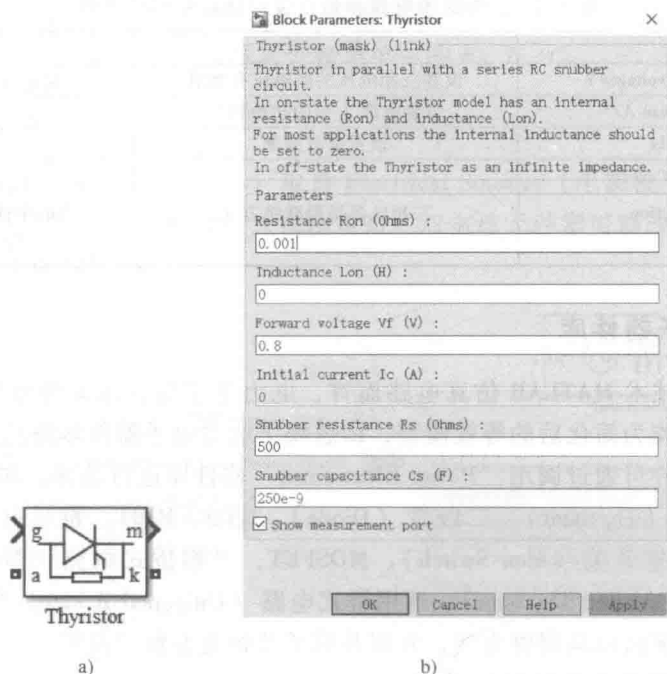


图 1-9 晶闸管元件图形及参数设置对话框

电流测量也取自 Measurements，若将其串联到被测支路中，输出侧 (i) 将产生所测支路的电流波形，其元件图形如图 1-12 所示。



图 1-10 总线合成元件图形



图 1-11 电压测量元件图形



图 1-12 电流测量元件图形

3. 示波器 (Scope)

示波器取自 Simulink 库中的 Commonly Used Blocks，其元件图形如图 1-13a 所示，双击该环节将出现当前波形的显示窗口，如图 1-13b 所示，单击窗口工具栏中的 将显示其参数设置对话框，如图 1-13c 所示。

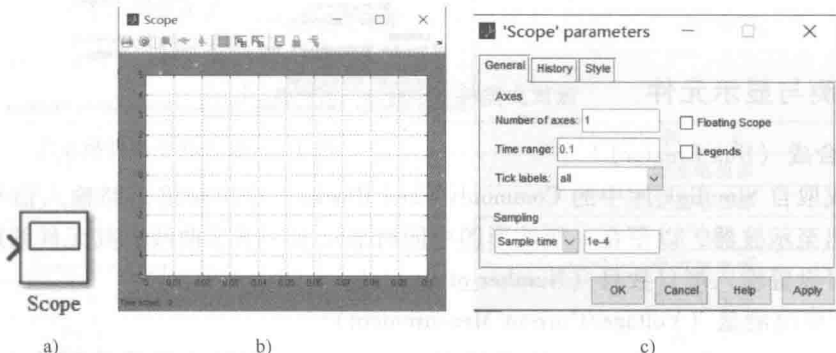


图 1-13 示波器元件图形、波形显示窗口及参数设置对话框

参数设置对话框中，“Number of axes”可以设置示波器窗口内的波形图数目；“Time range”用于设置时间轴的时间范围，可根据电路的仿真时间来选择；“Tick labels”，用于选择时间轴的显示方式；“Sampling”有两个选项：“Decimation”和“Sample time”，用于设置显示间隔，前者设置为 n 时表示每计算 n 点显示一次，后者则直接设置显示的时间间隔，单位为 s 。

使用 Scope 时，针对用户经常遇到的如下两个问题，给出了解决方法：

1) 首次打开波形显示窗口时，背景色为黑色，虚线为白色，要想改变/交换其颜色，用户只需在 Scope parameters 的 Style 中更改 Axes colors 即可。

2) 图 1-13b 显示的界面比较简单，有时无法满足用户对波形的处理需求，此时可在 MATLAB 的命令行窗口输入 “set (0, 'ShowHiddenHandles', 'on'); set (gcf, 'menubar', 'figure');” 后回车，即可得到图 1-14 所示带工具栏的示波器波形显示窗口，可以对界面和相关参数进行设置。

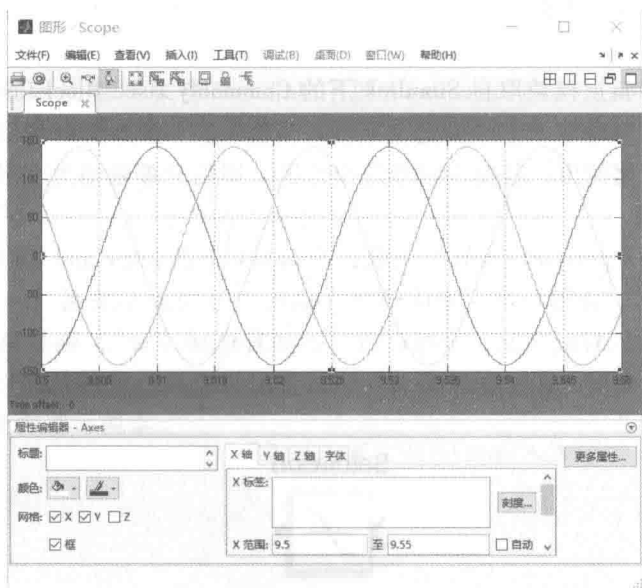


图 1-14 带工具栏的示波器波形显示窗口

1.2.7 信号发生器元件

1. 触发环节 (Pulse Generator)

触发环节取自 Simulink 库下的 Sources 库，可用来驱动电力电子器件，其元件图形如图 1-15 所示。双击弹出其参数设置对话框：脉冲形式 (Pulse Type) 选择 “Time based”；时间 (Time) 选择 “Use simulation time”；脉冲幅度 (Amplitude) 设为 10V；脉冲周期 (Period) 取电源周期 0.02s；脉冲宽度 (Pulse Width) 设置为电源周期的 50%；相位延迟 (Phase Delay) 为从零时刻起至发出脉冲的间隔时间，该参数对应于触发角 α ，通过改变该参数可以仿真不同触发角 α 下的电路工作状态，例如若该参数设为 2.5ms，则对应



图 1-15 脉冲发生器元件图形

于 $\alpha = 45^\circ$ 。

2. 重复序列 (Repeating Sequence)

重复序列取自 Simulink 下的 Sources 库，其元件图形如图 1-16 所示。该模块能够产生随时间变化的重复信号，波形可以任意指定。其参数设置对话框内，“Time values”可设置单调增加的时间向量；“Output values”可设置与 Time values 对应的输出向量，例如，生成一个周期为 1s、幅值为 1 的三角波信号，需设置 Time values 为 [0 0.5 1]，Output values 为 [0 1 0]。



Repeating Sequence

图 1-16 重复序列模块元件图形

1.2.8 运算和逻辑关系元件

1. 求和模块

求和 (Sum) 模块取自 Simulink 下的 Commonly Used Blocks 库，其元件图形如图 1-17 所示。修改参数设置对话框内 List of sign 为 “++” 和 “+-” 可以实现加减求和功能。

2. 饱和度模块

饱和度 (Saturation) 模块取自 Simulink 下的 Commonly Used Blocks 库，其元件图形如图 1-18 所示。该模块可以对输入信号设定上下限：当输入在 Lower limit 和 Upper limit 范围内变化时，输入信号无变化输出；若输入信号超出范围，则信号被限幅为上限值或下限值。

3. 关系运算模块

关系 (Relational Operator) 运算模块取自 Simulink 下的 Logic and Bit Operations 库，其元件图形如图 1-19 所示。该模块可用来比较两个输入信号的大小关系 (=、≈、<、≤、≥、>等)，左边第一个输入对应于第一个操作数。例如若选择 “≤”，则当第一个操作数大于等于第二个操作数时输出 1，反之输出 0。



图 1-17 求和模块元件图形



图 1-18 饱和度模块元件图形

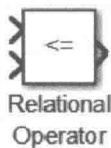


图 1-19 关系运算模块元件图形

1.2.9 其他元件

1. 常数模块

常数 (Constant) 模块取自 Simulink 下的 Commonly Used Blocks 库。该模块可以产生一个常数，双击该元件即可进行设置，其元件图形如图 1-20 所示。

2. 增益模块

增益 (Gain) 模块取自 Simulink 下的 Commonly Used Blocks 库，其元件图形如图 1-21 所示。该模块可用来设置信号的放大倍数。

3. 终止模块

暂时不用的输出端子要用终止 (Terminator) 模块进行封闭，该模块位于 Simulink 集的

Sinks 库中。

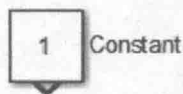


图 1-20 常数
模块元件图形

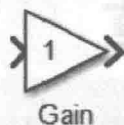


图 1-21 增益
模块元件图形

4. Powergui 模块

只要模型中用到了任何 PowerSystems 的模块，就必须包含 Powergui 模块（且一个模型中只能有一个）。大部分情况下，该模块会自动添加，但有些版本可能不太完善，或者用户不小心误删了该模块，就会导致仿真出错。解决方法如下：找一个 Powergui 加到模型中即可，可以放在模型的任意位置，也不需要任何设置。该模块位于 PowerSystems 模块集的 Specialized Technology 库下 Fundamental Blocks 中。

5. PID 模块

PID (PID Controller) 模块取自 Simulink 下的 Continuous 库，其元件图形如图 1-22 所示。该模块输出是比例、积分和微分控制器作用的总和。修改参数设置对话框内 Controller parameters 部分可以选择控制器的形式 (PID、PI、PD、P、I)，PID 控制器的传递函数是

$$P + \frac{I}{s} + D \frac{N}{1 + N/s}$$

其中，增益参数 P 、 I 和 D 是可调的， N 用来设置微分滤波器的极点位置。

不同版本的 MATLAB 的组织形式可能有差别，若读者使用不同版本时找不到相关模块，可以在工具栏输入全称进行搜索。

PID Controller

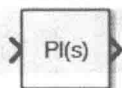


图 1-22 PID 模
块元件图形