



普通高等教育 **电气工程  
自动化** 系列规划教材

**M**odeling and Simulation of Power  
Electronics and Motor Control System

# 电力电子、电机控制系统 的建模及仿真

◎ 那日沙 周凯 王旭东 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育  $\frac{\text{电气工程}}{\text{自动化}}$  系列规划教材

# 电力电子、电机控制系统的 建模及仿真

那日沙 周 凯 王旭东 编著

机械工业出版社

本书从两个层面出发,系统地介绍了仿真技术在电力电子及电机控制领域的应用。全书共分8章,紧密结合当前电力电子技术及电机控制技术的发展。在电力电子仿真方面,以Saber软件作为仿真平台,围绕电力电子器件驱动电路、电力电子变流电路等内容展开,并将MAST语言引入建模过程中,为模型的构建提供多种途径。在电机控制仿真方面,以MATLAB/Simulink作为仿真平台,围绕直流电动机、无刷直流电动机、开关磁阻电动机、永磁同步电动机等内容展开,采用多种控制策略构建电机的调速系统。在内容组织上将仿真技术与实际应用相结合,读者可在学习及应用过程中快速掌握电力电子技术及电机控制技术的基础知识,能够对该领域有比较直观的认识,具有很强的实用性。

本书内容丰富、结构合理、图文并茂、可操作性强,可作为电气工程及其自动化及相关专业的本科教材,也可作为电力、电气自动化、电动汽车电力传动等领域工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力电子、电机控制系统的建模及仿真/那日沙,周凯,王旭东编著.  
—北京:机械工业出版社,2016.7

普通高等教育电气工程自动化系列规划教材

ISBN 978-7-111-54206-3

I. ①电… II. ①那… ②周… ③王… III. ①电力电子学—系统建模—高等学校—教材②电力电子学—计算机仿真—高等学校—教材③电机—控制系统—系统建模—高等学校—教材④电机—控制系统—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①TM1-39②TM301.2-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第153567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 王 荣

版式设计:霍永明 责任校对:张玉琴

封面设计:张 静 责任印制:李 飞

北京玥实印刷有限公司印刷

2016年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.5印张·304千字

标准书号:ISBN 978-7-111-54206-3

定价:29.80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

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

# 前 言

电力电子技术是一门快速发展的技术，它是由电力学、电子学和控制理论三个学科的交叉学科，已成为电气工程及其自动化专业不可缺少的一门专业基础课，在培养本专业人才中占有重要地位。电机控制系统是电类、自动化类专业基础课重要的组成部分，广泛应用于电力工业、交通运输、航空航天以及军事等领域。电机控制系统是以电力电子技术为基础而发展起来的，可以说电力电子技术的发展推动了电机控制系统的发展。

在高校理论教学过程中，受到学时、教学条件等多方面因素的影响，学生往往无法从实用的角度来了解理论课所要呈现的核心内容，因此将先进的仿真技术应用于教学中，会显著提高教学质量。

本书着重介绍仿真技术在电力电子和电机控制系统中的应用。Saber 是专门用于电力电子的仿真软件，它为用户提供了一个功能强大的混合信号仿真平台，兼容模拟、数字、控制量的混合仿真。MATLAB 仿真技术有效应用于电机及控制系统等工程技术领域，为用户提供了丰富的模块库，具有适应面广、结构和流程清晰、仿真精细、贴近实际、效率高、灵活等优点。目前，市场上关于 Saber 仿真应用的书籍很少，多数有关电力电子仿真的内容都来自各种教程。有关 MATLAB 的书籍种类繁多，而大多数都是针对电力电子技术或电机控制系统中某一方面介绍的，鲜有对这两方面综合阐述的书籍。

全书共分为 8 章，第 1 章介绍了 Saber 和 MATLAB 仿真的基础内容，包括系统仿真环境及相关模型库等；第 2 章介绍电力电子器件驱动电路仿真，以三种常用的电力电子器件——晶闸管、MOSFET、IGBT 为主要内容；第 3 章对常用的电力电子变流电路进行仿真，包括 AC-DC、DC-DC、AC-AC、DC-AC 变换；第 4 章对 MAST 语言建模进行了说明，包括语言的基本结构组成以及如何使用 MAST 语言创建元器件模型等；第 5 章主要介绍直流电机调速系统及仿真，包括开环调速系统和转速、电流双闭环调速系统控制；第 6 章介绍无刷直流电动机调速系统及仿真；第 7 章介绍开关磁阻电动机调速系统及仿真；第 8 章介绍永磁同步电动机调速系统及仿真，包含矢量控制方式及直接转矩控制方式。本书力求浅显易懂，通过实例介绍仿真软件的使用方法，适用于电气工程及其自动化专业本科生，也为相关专业师生提供参考。本书全部仿真模型均挂在机械工业出版社教育服务网上 ([www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com))。需要说明的是，在做仿真时，需要正确理解仿真所研究的对象，只有在参数取值合理的情况下，才能获得理想的仿真结果；否则会出现仿真中断、计算结果不收敛等提示。

在本书的编写过程中，王旭东教授确定了本书的编写大纲。第 2 章、第 6 章由王旭东教授撰写，第 5 章、第 7 章、第 8 章由那日沙撰写，第 1 章、第 3 章、第 4 章由周凯撰写。王旭东教授负责全书的统校和审定工作。研究生王红、张铮、邱赫男也参与了本书的编写，并在直流无刷电动机、开关磁阻电动机相关章节的编写中做了大量的工作。

由于编者水平有限，书中不妥或错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

前 言	
第 1 章 Saber 与 MATLAB 仿真基础	1
1.1 Saber 仿真基础	1
1.1.1 Saber 仿真软件概述	1
1.1.2 使用 Saber 创建设计	2
1.2 MATLAB 仿真基础	10
1.2.1 MATLAB 软件概述	10
1.2.2 系统仿真环境及模型库	11
1.3 Saber 与 Simulink 联合仿真基础	18
第 2 章 电力电子器件驱动电路仿真	24
2.1 晶闸管门极驱动电路	24
2.1.1 光耦合器触发电路	25
2.1.2 脉冲变压器触发电路	29
2.1.3 交流静态无触点电路	31
2.1.4 移相触发电路	32
2.2 MOSFET 栅极驱动电路	34
2.2.1 单晶体管驱动电路	35
2.2.2 推挽式驱动电路	36
2.2.3 隔离式驱动电路	37
2.3 IGBT 栅极驱动电路	38
2.3.1 IGBT 栅极特性	38
2.3.2 分立元器件构成的 IGBT 驱动电路	40
2.3.3 半桥集成驱动电路 IR2110	42
第 3 章 电力电子变流电路仿真	47
3.1 整流电路	47
3.1.1 单相可控整流电路仿真	47
3.1.2 三相可控整流电路仿真	59
3.1.3 电容滤波不可控整流电路仿真	67
3.1.4 同步整流电路仿真	69
3.1.5 功率因数校正电路仿真	73
3.2 直流斩波电路	79
3.2.1 降压斩波电路仿真	79
3.2.2 升压斩波电路仿真	81
3.2.3 升降压斩波电路仿真	84
3.2.4 Cuk 斩波电路仿真	85
3.2.5 Sepic 斩波电路与 Zeta 斩波电路仿真	86
3.3 交流-交流变流电路	87
3.3.1 单相交流调压电路(电阻负载)	87
3.3.2 单相交流调压电路(阻感负载)	89
3.3.3 三相交流调压电路(星形联结)	90
3.3.4 三相交流调压电路(支路控制三角形联结)	92
3.4 逆变电路	93
3.4.1 电压型逆变电路	94
3.4.2 电流型逆变电路	100
3.5 PWM 逆变电路	101
3.5.1 单相桥式 PWM 逆变电路	102
3.5.2 三相桥式 PWM 逆变电路	103
3.6 Saber 电力电子仿真小结	106
第 4 章 MAST 语言建模	109
4.1 MAST 语言建模概述	109
4.2 使用 Saber 模型文件创建设计	111
4.3 MAST 语言建模应用实例	115
4.3.1 单相桥式 PWM 逆变电路 MAST 语言建模	115
4.3.2 三相桥式全控整流电路 MAST 语言建模	118
第 5 章 直流电机调速系统及仿真	122
5.1 直流电机的工作原理	122
5.2 直流电机的基本方程	124
5.2.1 电压方程	124
5.2.2 转矩方程	125

5.2.3 电磁功率方程 .....	125	7.4 开关磁阻电动机调速系统的组成及原理 .....	158
5.3 直流电动机开环调速系统仿真 .....	127	7.4.1 调速系统的组成 .....	158
5.4 转速电流双闭环调速系统仿真 .....	130	7.4.2 调速系统控制策略选择 .....	160
5.4.1 双闭环调速系统组成 .....	131	7.5 开关磁阻电动机调速系统仿真 .....	161
5.4.2 双闭环调速系统数学模型 .....	132	7.5.1 电流斩波控制 (CCC) 方式的仿真 .....	161
5.4.3 双闭环调速系统起动过程分析 .....	132	7.5.2 电压斩波 PWM 控制方式的仿真 .....	164
5.4.4 双闭环调速系统动态结构图仿真 .....	133	<b>第 8 章 永磁同步电动机调速系统及仿真</b> .....	167
5.4.5 基于 Power System 模块的双闭环调速系统仿真 .....	134	8.1 永磁同步电动机简介 .....	167
<b>第 6 章 无刷直流电动机调速系统及仿真</b> .....	137	8.1.1 永磁同步电动机的分类 .....	167
6.1 无刷直流电动机简介 .....	137	8.1.2 永磁同步电动机的基本控制策略 .....	167
6.2 无刷直流电动机的工作原理 .....	137	8.2 永磁同步电动机矢量控制系统 .....	168
6.2.1 无刷直流电动机的基本结构 .....	137	8.2.1 坐标变换原理 .....	168
6.2.2 无刷直流电动机的数学模型 .....	139	8.2.2 永磁同步电动机的数学模型及基本方程 .....	169
6.2.3 无刷直流电动机的工作原理 .....	140	8.2.3 永磁同步电动机的矢量控制原理 .....	169
6.3 无刷直流电动机调速系统仿真 .....	142	8.2.4 空间电压矢量脉宽调制 (SVPWM) 技术 .....	172
6.3.1 仿真系统模型搭建 .....	142	8.3 永磁同步电动机矢量控制系统仿真 .....	175
6.3.2 双闭环调速系统仿真 .....	148	8.3.1 SVPWM 技术仿真 .....	175
<b>第 7 章 开关磁阻电动机调速系统及仿真</b> .....	150	8.3.2 $i_d=0$ 与 MTPA 控制系统仿真 .....	179
7.1 开关磁阻电动机的基本结构与特点 .....	150	8.3.3 弱磁控制系统仿真 .....	183
7.2 开关磁阻电动机的数学模型及特性分析 .....	152	8.4 永磁同步电动机直接转矩控制系统仿真 .....	187
7.2.1 开关磁阻电动机的基本方程 .....	152	8.4.1 传统直接转矩控制方式原理 .....	187
7.2.2 开关磁阻电动机的转矩特性分析 .....	152	8.4.2 传统直接转矩控制方式实现 .....	188
7.2.3 开关磁阻电动机的电流特性分析 .....	154	8.4.3 基于 SVPWM 的直接转矩控制系统 .....	189
7.3 开关磁阻电动机的基本控制方式 .....	155	8.4.4 基于 SVPWM 的直接转矩控制系统仿真 .....	191
7.3.1 角度控制 (APC) 方式 .....	155	<b>参考文献</b> .....	194
7.3.2 电流斩波控制 (CCC) 方式 .....	156		
7.3.3 电压斩波 PWM 控制方式 .....	157		
7.3.4 组合控制方式 .....	158		

# 第 1 章 Saber 与 MATLAB 仿真基础

## 1.1 Saber 仿真基础

### 1.1.1 Saber 仿真软件概述

Saber 模拟及混合信号仿真软件是美国 Synopsys 公司的一款 EDA 软件，被誉为全球最先进的系统仿真软件之一，是唯一的多技术、多领域的系统仿真产品，现已成为混合信号、混合技术设计和验证工具的业界标准，可用于电子、电力电子、机电一体化、机械、光电、光学、控制等不同类型系统构成的混合系统仿真，可实现复杂的混合信号设计与验证，兼容模拟、数字、控制量的混合仿真，可以解决从系统开发到详细设计验证等一系列问题。

Saber 包括 Sketch、Simulator、CosmoScope 等工具，用来完成多层次设计、电路仿真模拟、仿真测试与波形显示等功能。Saber 支持自顶向下的系统设计和由底向上的具体设计验证，在概念设计阶段支持模块化的框图设计，详细设计阶段可用具体元器件组成实际系统；具有功能强大的混合信号仿真器，支持包括模拟电路、数字电路及混合电路，混合技术系统设计；Saber 内部采用 5 种不同的算法依次对系统进行仿真，一旦其中某一种算法失败，Saber 将自动采用下一种算法，在仿真精度和仿真时间上进行平衡，保证在最少的时间内获得最高的仿真精度；通过直观的图形化用户界面全面控制仿真过程；可以在各种流行的 EDA 设计环境中运行，采用通用的建模语言，实现信息共享，提供对标准库的支持；可以通过对稳态、时域、频域、统计、可靠性及控制等方面的分析来检验系统性能；可以仿真一个实际系统，Saber 的仿真原理图里有相应主电路和控制模块。实际电路需要程序控制，Saber 中可以将实际系统的控制算法通过 MAST 语言编程完全实现。

Saber 软件的主要应用领域如下：

(1) 电源变换器设计 用来设计各种电源设备，如 DC-DC、AC-DC、DC-AC、AC-AC 变换，能够全面分析系统的各项指标如环路频率响应、功率管开关、磁性器件的工作情况、元器件的电学应力等。

(2) 伺服系统设计 主要是通过 Saber 自带的电机模型、机械及液压模型形成伺服回路，建立电流环、速度环、位置环等多环伺服控制系统，重点进行电机控制器的设计，能够分析功率器件导通与关断细节以及发热状况、驱动芯片与功率开关管的匹配、直流母线尖峰吸收及制动能量回馈等。

(3) 电路仿真 主要是对模拟电路、数字电路及数模混合电路进行前期的原理验证，指导器件选型，并在此基础上进一步模拟产品在各种实际工况下的特性，比如考虑元器件的容差、参数漂移、温度变化、线路或者器件故障等。根据系统响应进行设计优化，提高产品设计质量。在国内可以用于完成国标所要求的电路最坏情况分析、故障模式分

析等分析项目。

(4) 供配电设计 主要针对的是大系统整机电气系统,如飞机供配电系统、卫星供配电系统等,通过对其发电、配电、用电负载、控制策略等部分建模,全面分析供电网络构架、能量策略管理、配电总线数据传输、故障模式下拓扑重构等。

(5) 总线仿真 通过对系统数据传输网络的底层收发器、ECU 等器件建模,重点考量总线数据信号在物理层传输过程中的各种物理特性(如失真、畸变)等。除了支持 CAN、LIN 等总线类型,还支持 1553B、429 等总线类型。

Saber 的典型案例是航空器领域的系统设计,其整个设计过程包含了机械技术、电子技术、液压技术、燃油系统、娱乐系统、雷达无线技术等复杂的混合技术设计与仿真。从航空器、轮船、汽车到消费电子、电源设计,都可以通过 Saber 来完成。

Saber 是混合信号、混合技术设计与验证工具,在电力电子、数模混合仿真、汽车电子及机电一体化领域得到广泛应用。Saber 软件在技术、理论及新产品开发方面保持明显优势,其大量的器件模型、先进的仿真技术和精确的建模工具为用户提供了全面的系统解决方案,并在技术方面不断地完善创新。

### 1.1.2 使用 Saber 创建设计

本书使用 Saber2008 版本,在这一部分中将从实用角度介绍怎样利用 Saber 创建一个电压调节电路,在电路创建过程中可以掌握以下几部分内容:怎样使用 Part Gallery 来查找和放置符号;怎样使用 Property Editor 来修改属性值;怎样为设计连线;怎样进行电路仿真及波形显示。

#### 1. 调用 Saber Sketch

单击“开始”→“所有程序”→“Synopsys”→“Saber Sketch”,将出现一个空白的原理图窗口,这就是 Saber Sketch 的工作环境,如图 1-1 所示。

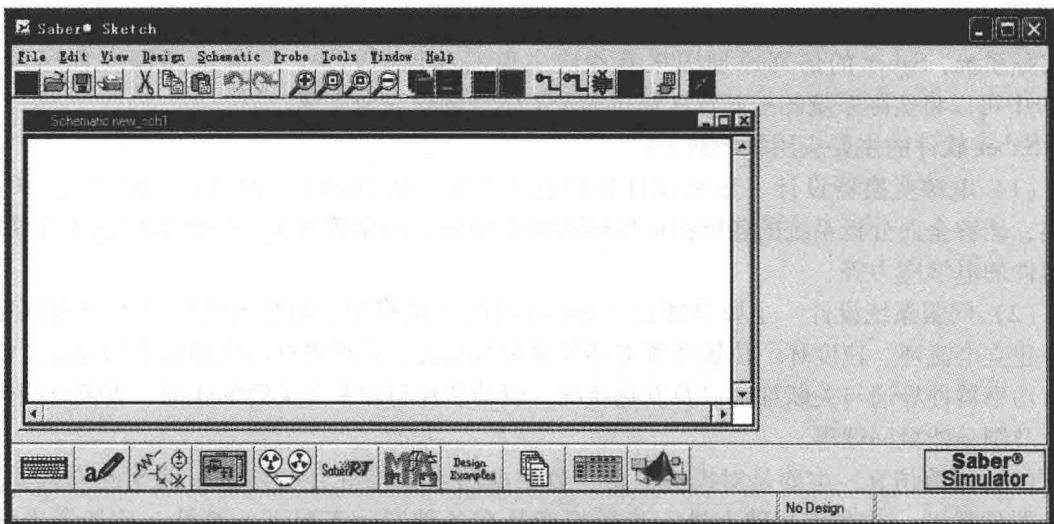


图 1-1 Saber Sketch 的工作环境



## 2. 保存目前空白的设计

单击“File”→“Save As”，在“File Name”字段输入名称“VoltageRegulator”，在保存文件的时候需要注意，文件的保存路径必须为英文路径，否则在文件再次打开时会出现错误。

## 3. 放置元器件

按图 1-2 所示在原理框图上放置元器件（软件中元器件库的图形符号与国标不完全相符，为与软件对应，仿真模型未使用国标，请读者注意）。

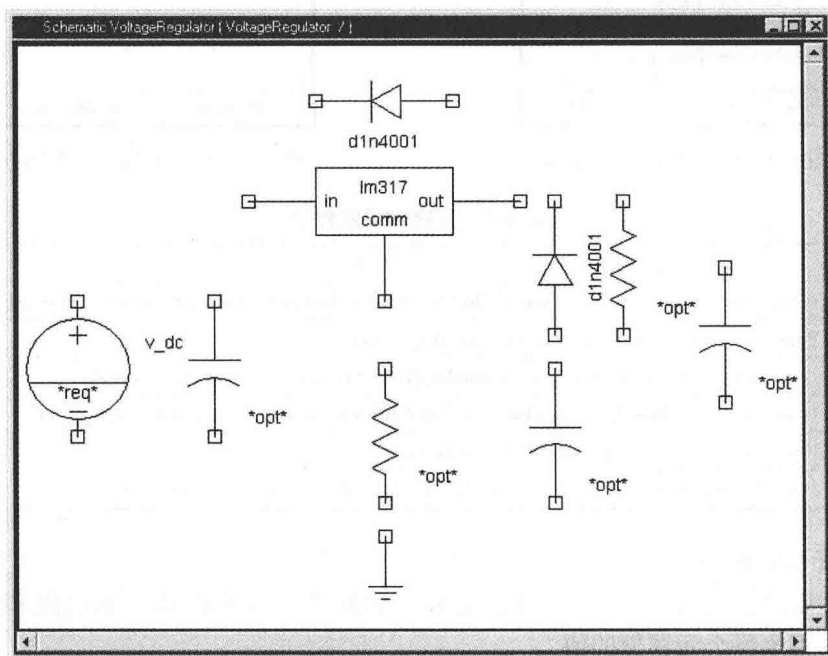



图 1-2 电压调节器元器件布局

这里首先以图 1-2 中最左侧电源符号为例，对其进行查找与放置操作，其步骤如下：

1) 单击窗口左下角 Parts Gallery 图符 ，出现 Parts Gallery 对话框，如图 1-3 所示。


2) 单击 Search 选项卡，选择如下参数进行设置：

Search Object: Any Field                      String match: Containing

3) 在输入栏中输入“V\_DC”并单击  按钮，如图 1-4 所示。

4) 在“Parts Found”表中选择“Voltage Source Constant Ideal DC Supply”，双击鼠标左键放置元器件。

按以下方式查找和放置电阻符号：

1) 在上面步骤（3）中的输入栏中输入“resistor”并单击  按钮。

2) 在 Parts Found 表中可以看到有多个搜索结果，其中 Resistor(-) 和 Resistor(1) 是最常用的电阻符号，括号中的符号表示电阻的摆放方向，选择 Resistor(1) 双击鼠标左键放置元件。

其他元器件均按此方法查询。如果不是初次使用 Saber，对于元器件的路径较为熟悉，也可直接在 Browse 选项卡中选择，这里给出所有元器件的提取路径，见表 1-1。

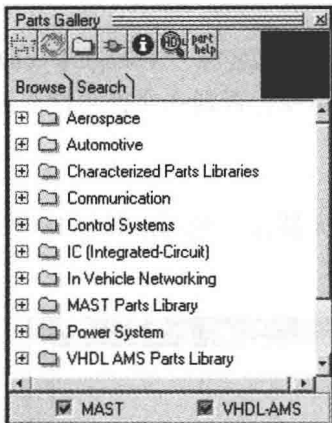


图 1-3 Parts Gallery 对话框

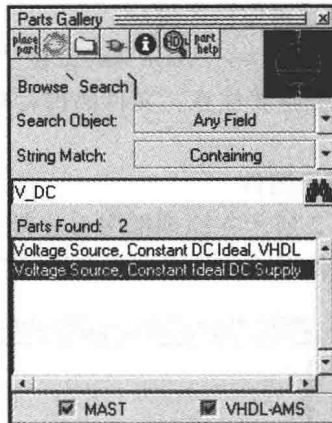


图 1-4 Search 选项卡对话框

表 1-1 元器件提取路径

元器件名称	提取路径
电源	Power System\Source, Power& Ground\Electrical Sources\Voltage Sources\Voltage Source Constant Ideal DC Supply
电容	Power System\Passive Elements\Capacitors\Capacitor(1)
二极管	Power System\Semiconductor Devices\Diodes\Diode (General) Components\d1n4001
电压调节器	Power System\Voltage Regulators\Voltage Regulators Component\Positive Adjustable\lm317
电阻	Power System\Passive Elements\Resistors\Resistor(1)
参考地	Power System\Source, Power& Ground\Power& Ground\Ground (Saber Node 0)

#### 4. 编辑元器件属性

对于那些属性值为 (\* opt \*) 并已被显示的元器件图形符号 (如电阻和电容符号), 可按以下方法更改每个元器件的值。

- 1) 将光标放在需要修改属性的元器件上 (以电阻为例)。
- 2) 双击鼠标左键, 弹出电阻属性对话框, 如图 1-5 所示。

3) 在 “rnom” 栏中输入所要设置的阻值, 阻值的设置方法为: 若电阻为 250 Ω, 则输入 250 即可; 若电阻为 2k Ω, 则需输入 2k。修改属性后电阻示意图如图 1-6 所示。

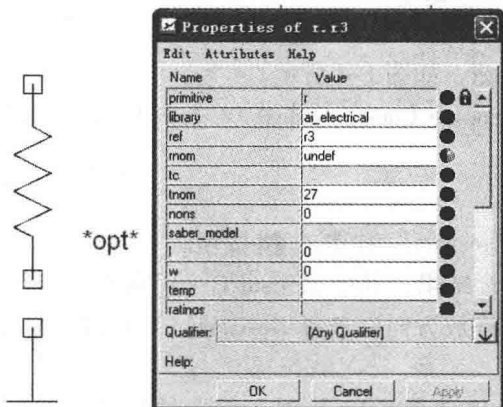


图 1-5 电阻属性对话框

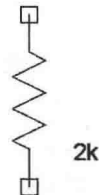


图 1-6 修改属性后电阻示意图

同理，其他元器件属性修改参见表 1-2（电容的单位为微法，这里用 u 来表示）。

表 1-2 元器件属性

元器件名称	属性名	值
电源	dc_value (直流电压)	36
电容	c (电容值)	0.1u/1u/10u

4) 若需要对元器件进行翻转或旋转的操作，例如电路图中的二极管，可在选中元器件后，单击鼠标右键，选择“Rotate”下拉菜单中的内容进行元器件的角度旋转（见图 1-7），或选择“Flip”下拉菜单中的内容进行元器件的上下翻转和左右翻转（见图 1-8）。

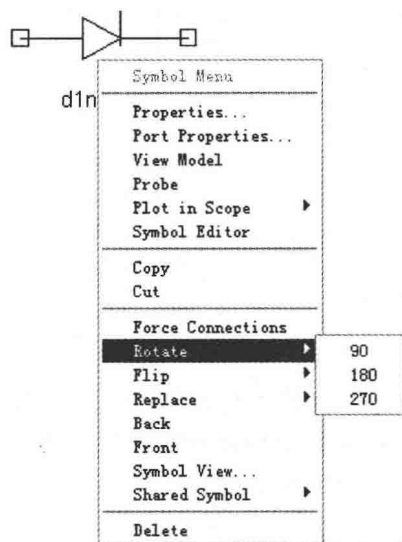


图 1-7 元器件旋转

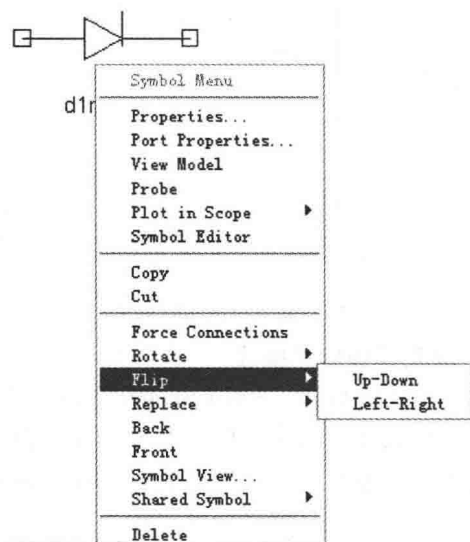


图 1-8 元器件翻转

5) 将鼠标放置在窗口空白处并单击鼠标右键，通过图 1-9 所示的下拉菜单可以改变主窗口背景颜色。第一项为彩色黑背景，第二项为彩色白背景，第三项为黑色白背景。用户可根据自己的习惯进行修改。

### 5. 连接原理图

在完成元器件布局并设定属性后，可以将元器件用导线连接在一起。在两个端口间连线的最简单的方法如下：

- 1) 将光标放在第一端口上面（以 v\_dc 符号的顶部开始）。
- 2) 单击鼠标左键。
- 3) 将光标放在第二个端口上（lm317 的左侧端口）。
- 4) 再次单击鼠标左键。

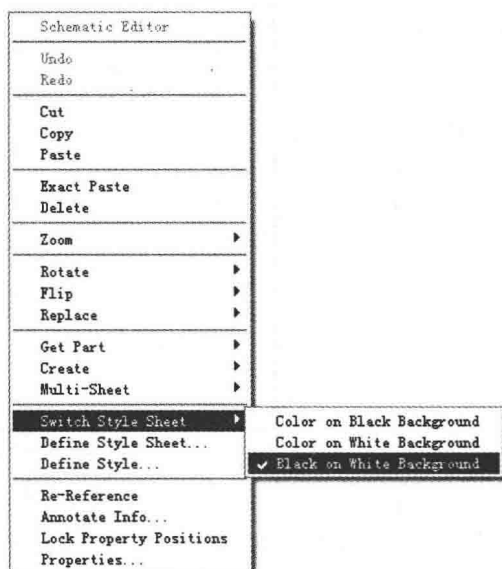


图 1-9 主窗口颜色属性对话框

重复步骤 1~4，从而将每个元器件符号连至相关部件，如图 1-10 所示。

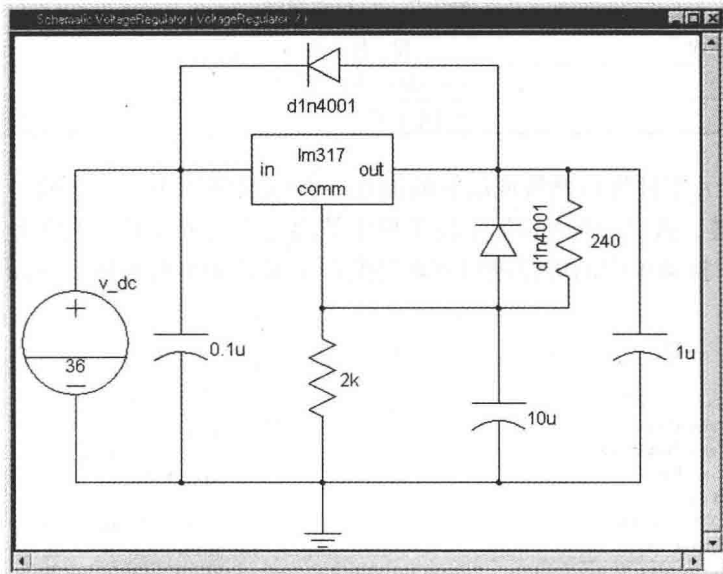


图 1-10 电压调节器连接图

#### 6. 修改导线标记属性

如果不标记导线，Saber Sketch 会自动为每根导线标记名称，将鼠标停留在导线上，软件会自动显示导线名称，例如 n\_1。用便于阅读和理解的名称来标记导线，对于设计分析是非常有用的，而且会增加电路的可读性，导线标记如图 1-11 所示。

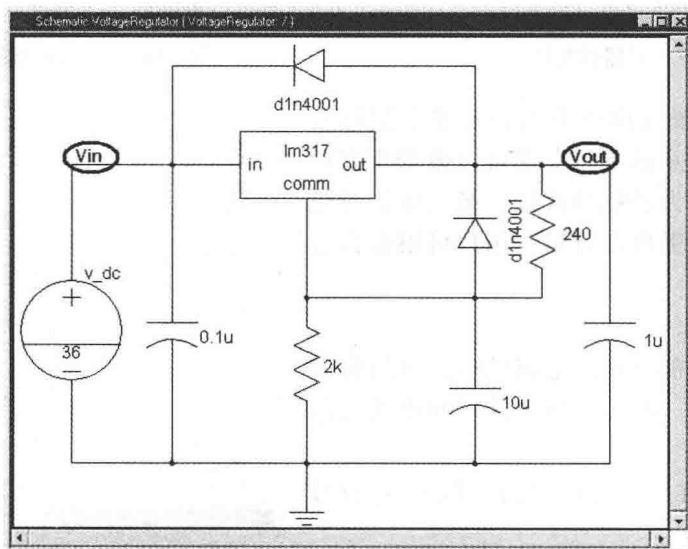


图 1-11 电路导线标记

要增加图 1-11 所示的 2 个导线标记，可按如下步骤进行：

- 1) 将光标移至所要的导线并使其改变颜色，然后双击鼠标左键弹出导线属性对话框，

如图 1-12 所示。

- 2) 将“Name”字段中的值改成所需要的文字串。
- 3) 在“Display Name”选项中单击“Yes”。
- 4) 单击“Apply”并关闭 Wire Attributes 对话框。
- 5) 重复 1~4 步骤，直至完成所有导线标记的修改。

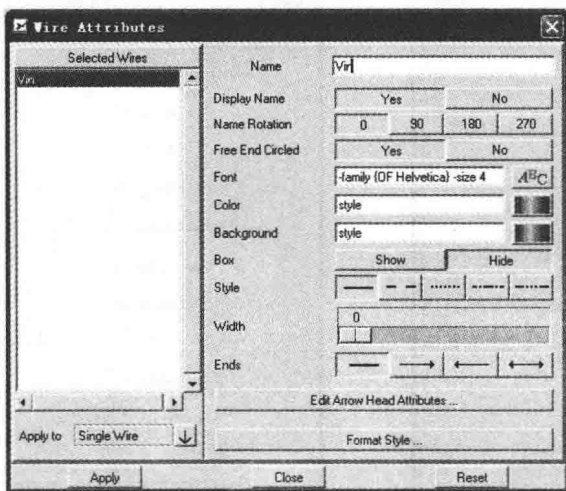



图 1-12 导线属性对话框

至此，我们已拥有一个可用于分析的完整设计。

## 7. 电路仿真

用 Saber Sketch 创建好可用于仿真的设计后，便可以进入 Saber Guide Simulation 环境对设计进行仿真。单击工具条上的  按钮或选择“View”→“Show Guide Iconbar”，将会出现仿真工具条，如图 1-13 所示。

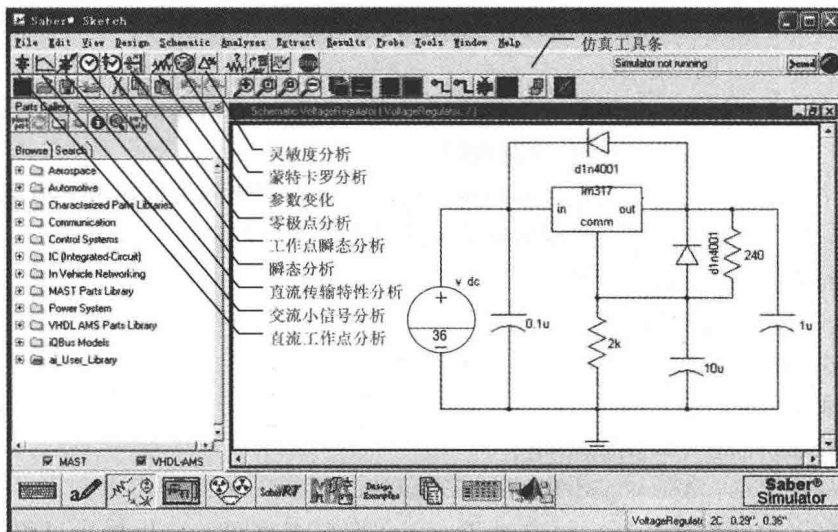



图 1-13 仿真工具条

这里较常用的功能为瞬态分析，瞬态分析用于检验系统的时域特性，通常从静态工作点开始。单击  按钮或选择“Analysis”→“Time Domain”→“Transient”选项即可打开瞬态分析仿真器，瞬态分析仿真器的主窗口和输入输出窗口如图 1-14、图 1-15 所示。

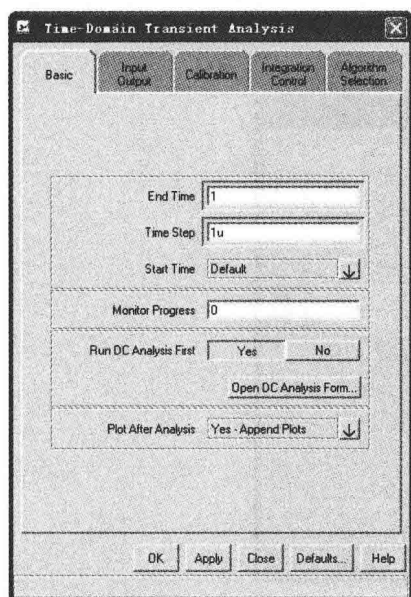


图 1-14 瞬态分析仿真器的主窗口

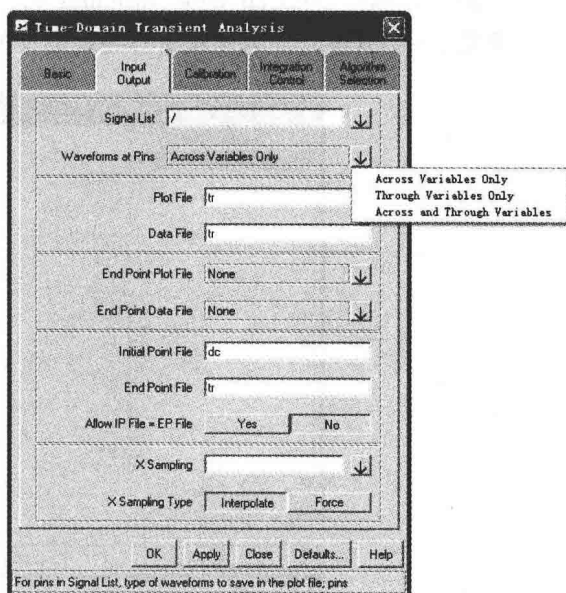


图 1-15 瞬态分析仿真器的输入输出窗口

图 1-14 中，各参数说明如下所示：

End Time：瞬态分析的终止时间。

Time Step：起始步长，即前两次分析计算的时间间隔。所设定的只是起始步长，起始步长越小，仿真精度高。第一步计算完成后，仿真器会根据上一步运算结果，自动选择下次步长。

Start Time：仿真分析的起始时间，一般使用默认值。

Monitor Progress：监控进度。

Run DC Analysis First：求解系统的静态工作点，为其他分析提供计算初始点。

Plot After Analysis：瞬态分析后绘制曲线。

图 1-15 中，需关注“Waveforms at Pins”选项，单击右侧箭头可弹出下拉菜单，三个选项可分别理解为：只测量电压、只测量电流、测量电压和电流。

对瞬态分析仿真器做如下设置：

End Time：1（1 代表 1s）；

Time Step：1u（1u 代表 1 $\mu$ s）；

Run DC Analysis First：Yes；

Plot After Analysis：Yes-Open Only；

Waveforms at Pins：Across and Through Variables。

单击“OK”执行瞬态分析。可通过 Transcript 窗口观察瞬态分析执行过程，如图 1-16 所示。

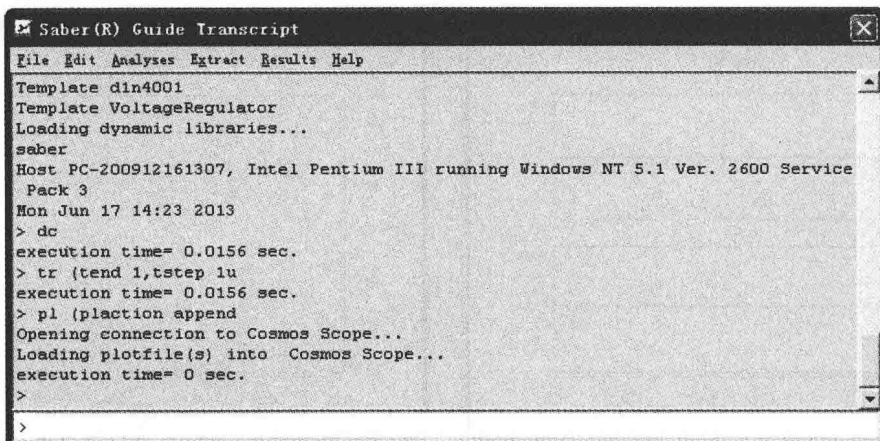


图 1-16 瞬态分析执行过程

若此过程中未提示相关出错信息，系统将自动启动 CosmosScope 混合信号图形化波形分析器，如图 1-17 所示。

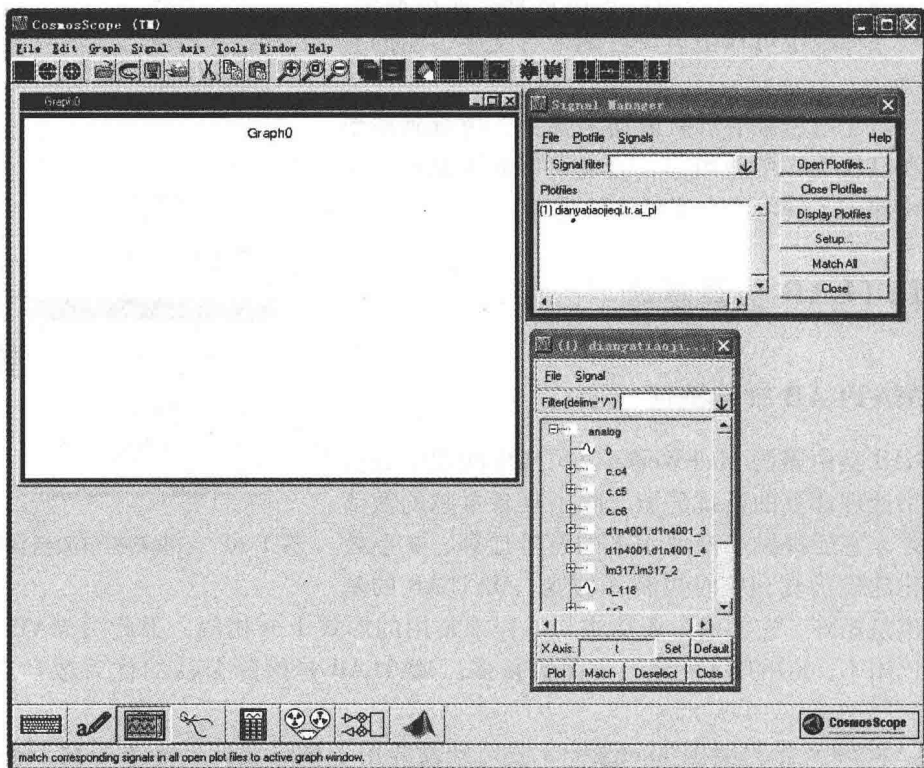


图 1-17 混合信号图形化波形分析器

这里分别对输入电压和输出电压进行观测，在信号窗口中分别选择“Vin”和“Vout”并双击鼠标左键即可得到观测结果，如图 1-18 所示。

为了便于在同一坐标系下对各点波形进行对比，可将各波形拉至同一窗口中，操作方法为：用光标选取窗口右侧带有文字说明的直线，按下鼠标左键进行拖拽，结果如图 1-19 所示。

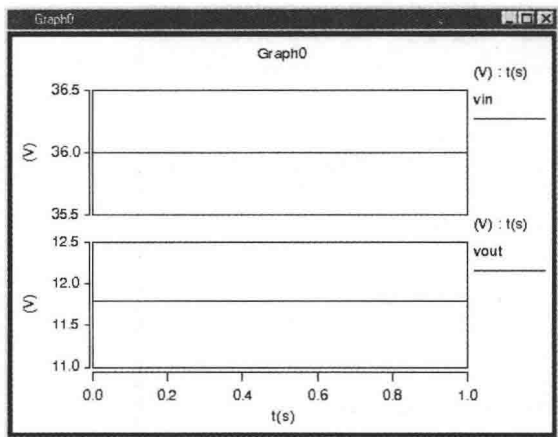


图 1-18 输入电压与输出电压观测波形

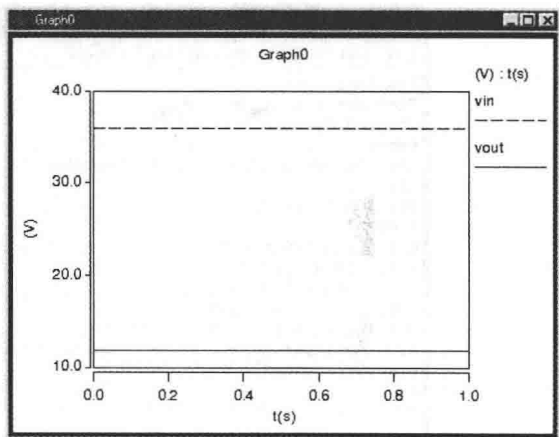


图 1-19 输入电压与输出电压对比观测波形

在空白处单击鼠标右键，通过图 1-20 中的选项可以改变示波器窗口的背景颜色。第一项为彩色黑背景，第二项为彩色灰背景，第三项为黑色白背景。显示器中，各信号的线条样式也可双击窗口右侧带有文字说明的直线进行修改。

至此，对于电压调节器从电路的建立、仿真到波形观测的过程已较为详细地给出，读者可以此为基础，在后续章节中深入了解电力电子技术的仿真。

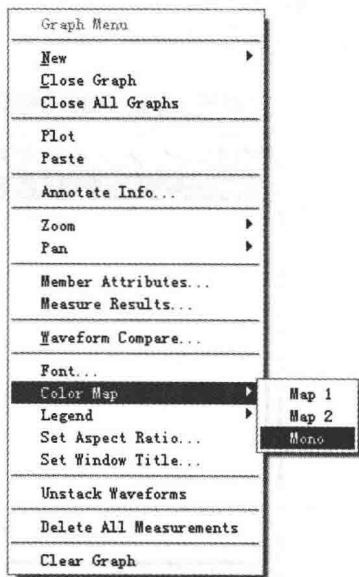


图 1-20 示波器窗口颜色属性对话框

## 1.2 MATLAB 仿真基础

### 1.2.1 MATLAB 软件概述

MATLAB 是由美国 MathWorks 公司推出的用于数值计算和图形处理计算的系统环境，除了具备卓越的数值计算能力外，它还提供了专业水平的符号计算、文字处理、可视化建模仿真和实时控制等功能。MATLAB 的基本数据单位是矩阵，它的指令表达式与工程中常用的形式十分相似，因此用 MATLAB 来解算问题要比用 C、FORTRAN 等语言简捷得多。MATLAB 是国际公认的优秀数学应用软件之一。

MATLAB 2008 作为美国 MathWorks 公司开发的用于概念设计、算法开发、建模仿真、实时实现的理想的集成环境，是目前最好的科学计算类软件，2008 年 3 月，MATLAB R2008a 正式发行，包含 Win32 和 Win64 位版。相比以前版本而言，MATLAB R2008a 不仅包括 MATLAB 和 Simulink 的新特性，同时还包含 81 个其他产品模块的升级和 bug 修正。从 R2008a 开始，MATLAB 和 Simulink 产品家族软件在安装后需要激活才能使用。R2008a 将引入 License Center 在线 License 管理的工具。



Simulink 是 MATLAB 中的一种可视化仿真工具，是一种基于 MATLAB 的框图设计环境，是实现动态系统建模、仿真和分析的一个软件包，被广泛应用于线性系统、非线性系统、数字控制及数字信号处理的建模和仿真中。Simulink 可以用连续采样时间、离散采样时间或两种混合的采样时间进行建模，它也支持多速率系统，也就是系统中的不同部分具有不同的采样速率。为了创建动态系统模型，Simulink 提供了一个建立模型框图的图形用户接口，这个创建过程只需单击和拖动鼠标操作就能完成，它提供了一种更快捷、直接明了的方式，而且用户可以立即看到系统的仿真结果。

Simulink 是用于动态系统和嵌入式系统的多领域仿真和基于模型的设计工具。对各种时变系统，包括通信、控制、信号处理、视频处理和图像处理系统，Simulink 提供了交互式图形化环境和可定制模块库来对其进行设计、仿真、执行和测试。

构架在 Simulink 基础之上的其他产品扩展了 Simulink 多领域建模功能，也提供了用于设计、执行、验证和确认任务的相应工具。Simulink 与 MATLAB 紧密集成，可以直接访问 MATLAB 大量的工具来进行算法研发、仿真的分析和可视化、批处理脚本的创建、建模环境的定制以及信号参数和测试数据的定义。


Simulink 产品新特性主要表现在以下几个方面：Simulink 中重新设计的多平台库浏览器；Real-Time Workshop Embedded Coder 中生成对 AUTOSAR 兼容代码；Embedded MATLAB 中 M-Lint 代码分析仪和 Simulink Design Verifier 对 Embedded Matlab 语言子集函数生成代码进行检查；Simulink Verification and Validation 提供对安全关键系统 IEC 61508 设计规则检查；Simulink Fixed Point 提供对浮点模型的自动定点转换的指导意义；Communication Blockset 针对调制、解调、编码和解码函数的定点支持；Embedded IDE Link MU 作为新产品将 Simulink 模型生成代码并应用到 Green Hills MULTI 开发环境中。

MATLAB R2008a 将不再支持 PowerPC 处理器上运行 Macintosh OS X 操作系统，也不支持 Microsoft Windows 2000 操作系统。此外，在 R2008a 中 15 个产品模块被重新命名。

本书中，电机控制系统的建模与仿真主要是在 MATLAB Simulink 环境下进行的，主要使用电力系统 SimPower System Blockset 模型库。由于与 MATLAB 相关的书籍较多，因此本书只介绍与电机控制系统仿真有关的内容，如果读者需要了解 MATLAB 的基础内容，可以参阅相关的 MATLAB 书籍。

## 1.2.2 系统仿真环境及模型库

本节将主要介绍 Simulink 和 SimPowerSystems 工具箱。Simulink 工具箱的功能是在 MATLAB 环境下，将一系列模型框图连接起来构成复杂系统模型；电力系统工具箱（SimPowerSystems）可用于电路、电力电子、电机控制等领域的仿真。

在 MATLAB 文本窗口中键入“Simulink”命令或在 MATLAB 工具栏中单击  按钮，即可进入 Simulink 环境，Simulink 模型库浏览器如图 1-21 所示。

### 1. Simulink 工具箱

Simulink 工具箱包含多个模型库：Continuous、Discontinuities、Discrete、Logic and Bit Operations、Lookup Tables、Math Operations、Model Verification、Moder-Wide Utilities、Ports&Subsystems、Signal Attributes、Signal Routing、Sinks、Sources。

在本书电机系统仿真中，主要用到以下模型库：