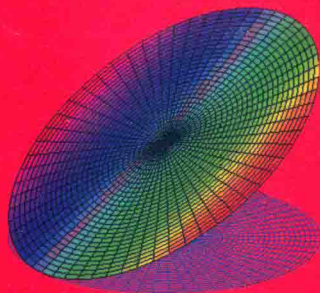




资深作者编写，基于MATLAB R2016a平台的控制系统设计与仿真方面的权威著作
系统性、实用性与先进性相结合，理论与实践相交融
书中提供了180多个MATLAB应用典型例题

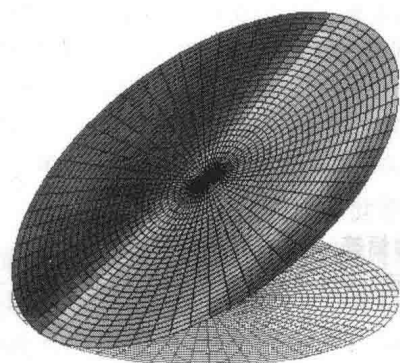
MATLAB R2016a 控制系统设计与仿真 35个案例分析



© 李晓东 编著



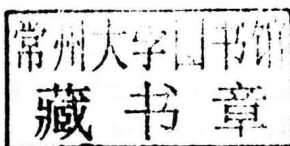
清华大学出版社



MATLAB R2016a

控制系统设计与仿真35个案例分析

◎ 李晓东 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以 MATLAB R2016a 为平台编写,以案例的形式讲解控制系统的设计与仿真。目前, MATLAB 已经成为控制理论与控制工程以及计算机仿真领域的有力工具,控制系统的建模、分析、设计及应用都离不开 MATLAB 的支持。

全书共 35 章,也是 35 个案例,主要介绍了 MATLAB 的使用及控制系统的基本理论、控制系统的数学模型、Simulink 仿真环境、控制系统数学模型的 MATLAB 实现、控制系统分析、离散系统设计、状态空间设计、时频域分析、稳定性判定、校正、最优控制及鲁棒控制等内容。

本书可作为自动控制、电子信息工程及机械与控制工程等领域的广大科研人员、学者、工程技术人员的参考用书,也可供高等院校相关专业的教师、在读学生参考使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB R2016a 控制系统设计与仿真 35 个案例分析/李晓东编著. —北京:清华大学出版社,2018

(精通 MATLAB)

ISBN 978-7-302-49496-6

I. ①M… II. ①李… III. ①MATLAB 软件—应用—控制系统设计—系统仿真 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 020810 号

责任编辑:刘 星

封面设计:刘 键

责任校对:李建庄

责任印制:董 瑾

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:28.5

字 数:677 千字

版 次:2018 年 9 月第 1 版

印 次:2018 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:89.00 元

产品编号:074825-01

随着现代应用数学新成果的推出和计算机的应用,为适应宇航技术的发展,自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。目前,自动控制理论还在继续发展,正向以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论深入发展。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。它的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,主要用于工业控制。第二次世界大战期间用于设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用设备,进一步促进并完善了自动控制理论的发展,到战后,已形成完整的自动控制理论体系。这就是以传递函数为基础的经典控制理论,它主要研究单输入单输出的线性定常数系统的分析和设计问题。

MATLAB 是当今最优秀的科技应用软件之一,强大的科学计算与可视化功能、简单易用及开放式的可扩展环境,使得它在许多科学领域中成为计算机辅助设计和分析、算法研究和应用开发的基本工具和首选平台。MATLAB 应用广泛,是能够有效提高工作效率、改善设计手段的工具软件,掌握了 MATLAB 就好比掌握了开启这些专业领域大门的钥匙。

Simulink 是 MATLAB 中的一个工具包,其建模与一般程序建模相比更为直观,操作也更为简单,不必记忆各种参数、命令的用法,只用鼠标就能够完成非常复杂的工作。Simulink 不但支持线性系统仿真,还支持非线性系统仿真,不但支持连续系统仿真,还支持离散系统甚至混合系统仿真。

在高等学校中,“自动控制”是自动控制类、电子信息工程类及机械与控制工程类各专业学生必修的课程,在其教学计划里各高校可能有各种不同叫法,如自动控制、控制理论、自动控制理论、机械工程控制基础、自动控制工程基础或过程控制原理等。本书名定为《MATLAB R2016a 控制系统设计与仿真 35 个案例分析》,主要讲述该课程里的相关原理与案例。

书中结合实际控制系统的案例,详细介绍了基于 MATLAB 进行控制系统分析、设计的方法与过程。本书具有以下特点。

(1) 内容翔实,实用性强,书中案例都给出了详细说明,读者可以快速掌握 MATLAB 在具体案例中的应用。

(2) 本书大量的例题,均选自国内高校广泛使用的自动控制原理的经典教材与考研辅导用书,极具典型性与参考价值,还可供读者在实践训练或实验时使用。

(3) 本书文字叙述清楚,概念阐述准确,深入浅出,通俗易懂,方便自学。

本书取材先进实用,讲解深入浅出,各章均有大量用 MATLAB/Simulink 实现的仿真实例,便于读者掌握和巩固所学知识。

通过本书的学习,读者不仅可以全面掌握 MATLAB 编程和开发技术,还可以提高快速分析和解决实际问题的能力,从而能够在最短的时间内解决实际工作中遇到的问题。

前言

题,提升工作效率。

全书共 35 章,其部分章节内容概述如下:

- 创建 Simulink 仿真系统的过程;
- 飞行器控制系统综合与分析的方法;
- 最优与鲁棒控制系统设计;
- 飞机偏航阻尼器设计的 MATLAB 实现;
- 控制系统根轨迹校正分析;
- 现代控制系统设计与仿真分析;
- MATLAB 离散控制系统的设计;
- 奈奎斯特稳定判据实际应用;
- PID 控制器校正 MATLAB 实现;
- 控制系统的典型输入信号时域分析;
- MATLAB 控制系统的综合实例;
- 控制系统数学模型的 MATLAB 实现;
- 控制系统的暂态特性和稳态特性;
- 频域分析的 MATLAB 函数实现;
- MATLAB 函数实现的状态空间分析;
- 鲁棒控制系统设计的 MATLAB 实现;
- 借助根轨迹曲线对控制系统进行校正;
- 控制系统频域响应校正分析;
- PID 控制器参数整定。

本书主要由李晓东编写,此外参加编写的还有张基荣、陈华林、林彦佳、廖文辉、栾颖、周品、曾虹雁、邓俊辉、陈添威、邓耀隆、高永崇、李嘉乐、李锦涛、梁朗星、梁志成。

全书内容深入浅出,图文并茂,各章节之间既相互联系又相对独立,读者可根据自己需要选择阅读。

由于时间仓促,加之作者水平有限,所以疏漏之处在所难免。在此,诚恳地期望得到各领域的专家和广大读者的批评指正,如有问题请发送邮件到 workemail6@163.com。

作 者

2018 年 2 月

第 1 章 创建 Simulink 仿真系统的过程	1
1.1 Simulink 概述	1
1.1.1 Simulink 的特点	1
1.1.2 启动 Simulink	2
1.2 一个简单的仿真系统	3
1.2.1 添加模块	4
1.2.2 设置模块属性	4
1.2.3 连接模块	6
1.2.4 仿真器设置	7
1.2.5 运行仿真	7
1.3 建立状态空间表达式	8
1.3.1 由图建立状态空间表达式	9
1.3.2 由函数建立状态空间表达式	13
第 2 章 飞行器控制系统综合与分析的方法	18
2.1 飞行器控制系统应用概述	18
2.2 飞行器控制系统数学模型	18
2.3 飞行器控制系统解析内容	20
2.4 校正装置优化设计	21
2.5 频域性能分析	25
第 3 章 最优与鲁棒控制系统设计	27
3.1 最优控制问题的描述	27
3.2 连续系统二次型最优控制及其 MATLAB 实现	28
3.3 离散系统二次型最优控制及其 MATLAB 实现	32
第 4 章 飞机偏航阻尼器设计的 MATLAB 实现	35
4.1 飞机偏航阻尼器设计	35
4.2 数学模型及 MATLAB 描述	35
4.3 校正前系统性能分析	37
4.4 校正设计	40
4.4.1 根轨迹法设计	41
4.4.2 下洗滤波器设计	44
4.5 校正后系统性能分析	45
第 5 章 控制系统根轨迹校正分析	47
5.1 控制系统性能指标	47

目录

5.2	校正的基本概念	48
5.3	根轨迹校正法	50
5.3.1	根轨迹的串联超前校正	50
5.3.2	根轨迹的串联滞后校正	54
5.3.3	根轨迹的串联超前滞后校正	57
第 6 章	现代控制系统设计与仿真分析	61
6.1	可控性分析	61
6.1.1	连续系统的完全可控性	61
6.1.2	离散系统的可控性	62
6.1.3	连续系统的状态完全可控标准型	63
6.1.4	连续系统的输出可控性	65
6.2	可观性分析	66
6.2.1	线性离散系统的完全可观性	66
6.2.2	连续系统的完全可观性	68
6.2.3	连续系统的完全可观标准型	69
6.3	系统的极点配置	71
6.3.1	极点配置的 MATLAB 函数	71
6.3.2	极点配置示例分析	72
6.4	系统状态观测器设计	74
第 7 章	MATLAB 离散控制系统的设计	77
7.1	离散控制系统的基本概念	77
7.2	离散信号的数字描述	79
7.2.1	采样过程及采样定理	79
7.2.2	保持器的数学描述	81
7.3	Z 变换	82
7.3.1	离散信号的 Z 变换	83
7.3.2	Z 变换与其逆变换	84
第 8 章	Nyquist 稳定判据的实际应用	89
8.1	频域分析基本概念	89
8.2	Bode 图	90
8.3	Nyquist 图	92
8.4	系统稳定性的判断	93
8.4.1	用 Bode 图法判断系统稳定性	93

8.4.2	用 Nyquist 曲线法判断系统稳定性	96
第 9 章	PID 控制器校正的 MATLAB 实现	99
9.1	PID 控制器校正	99
9.2	PID 控制器概述	99
9.3	P 控制	101
9.4	PD 控制	102
9.5	I 控制	104
9.6	PI 控制	107
9.7	PID 控制	108
第 10 章	控制系统的典型输入信号时域分析	114
10.1	控制系统时域分析法	114
10.2	控制系统时域分析使用的函数	116
10.2.1	step 函数	116
10.2.2	initial 函数	117
10.2.3	impulse 函数	118
10.2.4	lsim 函数	120
第 11 章	MATLAB 控制系统的综合实例	124
11.1	MATLAB 在积分方程中的应用	124
11.2	MATLAB 在微分方程中的应用	125
11.3	MATLAB/Simulink 在机电系统中的应用	126
11.4	MATLAB/Simulink 在时域分析中的应用	128
11.5	MATLAB/Simulink 在根轨迹分析中的应用	131
第 12 章	控制系统数学模型的 MATLAB 实现	135
12.1	连续系统	135
12.2	离散系统	137
12.3	与数学模型相关的 MATLAB 函数	138
12.3.1	传递模型的函数	138
12.3.2	零极点模型函数	142
12.3.3	状态空间模型函数	147
第 13 章	控制系统的暂态特性和稳态特性	152
13.1	典型输入信号实例	152
13.2	时域分析的基本概念	154

目录

13.2.1	动态过程与动态性能	154
13.2.2	稳态过程与稳态性能	155
13.2.3	控制系统的稳定性	156
13.3	线性系统时域响应求法	156
13.4	二阶系统	157
13.4.1	二阶系统的单位脉冲响应	157
13.4.2	二阶系统的单位阶跃响应	159
第 14 章	频域分析的 MATLAB 函数实现	162
14.1	频域分析的概念	162
14.2	频域分析的 MATLAB 函数	163
14.2.1	allmargin 函数	164
14.2.2	nyquist 函数	164
14.2.3	bode 函数	165
14.2.4	bodemag 函数	170
14.2.5	nichols 函数	171
14.2.6	ngrid 函数	174
14.2.7	margin 函数	174
第 15 章	MATLAB 函数实现的状态空间分析	177
15.1	状态空间的 MATLAB 实现	177
15.1.1	ctrb 函数	177
15.1.2	ctrbf 函数	178
15.1.3	obsv 函数	179
15.1.4	obsvf 函数	180
15.2	系统状态反馈与状态观测器	181
15.2.1	极点配置	181
15.2.2	状态观测器	182
第 16 章	鲁棒控制系统设计的 MATLAB 实现	185
16.1	鲁棒控制简介	185
16.2	鲁棒控制系统的 MATLAB 实现	189
第 17 章	借助根轨迹曲线对控制系统进行校正	196
17.1	其他几种根轨迹形式	196
17.2	根轨迹对系统暂态特性的分析	199
17.3	控制系统的根轨迹校正法	202

17.3.1 根轨迹法超前校正·····	202
17.3.2 根轨迹法滞后校正·····	207
17.4 根轨迹的设计工具·····	210
第 18 章 控制系统频域响应校正分析·····	216
18.1 频域响应校正法·····	216
18.2 频域法的串联超前校正·····	216
18.3 频域法的串联滞后校正·····	220
18.4 频域串联滞后超前校正·····	224
18.5 反馈校正·····	228
第 19 章 PID 控制器参数整定·····	233
19.1 Ziegler-Nichols 整定法·····	233
19.2 一般数学模型拟合成带延时的惯性环节·····	236
19.3 Cohen-Coon 整定法·····	237
19.4 误差积分指标最优校正·····	239
第 20 章 模型预测控制的实际应用·····	246
20.1 模型预测控制的应用·····	246
20.1.1 直流伺服控制器设计·····	246
20.1.2 直流伺服控制器的 MATLAB 实现·····	247
20.2 控制系统的实际应用·····	249
20.2.1 PID 控制器应用示例·····	249
20.2.2 非线性控制系统应用示例·····	253
第 21 章 系统模型间转换的 MATLAB 实现·····	255
21.1 系统模型间转换·····	255
21.1.1 tf2ss 函数·····	256
21.1.2 ss2tf 函数·····	257
21.1.3 tf2zp 函数·····	258
21.1.4 zp2tf 函数·····	259
21.1.5 zp2ss 函数·····	259
21.1.6 ss2zp 函数·····	260
21.2 系统模型连接方式·····	261
第 22 章 自动控制实际系统的分析设计·····	267
22.1 传递函数模型分析·····	267

目录

22.2	传递函数模型的 MATLAB 实现	268
22.3	状态空间模型分析	271
22.4	状态空间模型的 MATLAB 实现	271
22.5	零极点增益模型分析	272
22.6	零极点增益模型的 MATLAB 实现	273
第 23 章	MATLAB 控制系统的频率特性	276
23.1	频率特性的表示法	276
23.2	典型环节的 Nyquist 图	278
23.2.1	比例环节	278
23.2.2	惯性环节	278
23.2.3	积分环节	279
23.2.4	微分环节	279
23.2.5	一阶微分环节	279
23.2.6	振荡环节	281
23.3	典型环节的 Bode 图	283
23.3.1	比例环节	283
23.3.2	积分环节	284
23.3.3	微分环节	285
23.3.4	惯性环节	286
23.3.5	一阶微分环节	287
23.3.6	振荡环节	289
23.3.7	二阶微分环节	290
第 24 章	离散控制系统的稳定性分析	293
24.1	离散系统的时域数学模型	293
24.2	离散系统的频域数学模型	295
24.2.1	c2d 函数	296
24.2.2	d2c 函数	298
24.2.3	d2d 函数	299
24.2.4	upsample 函数	300
24.3	离散控制系统分析	301
24.3.1	离散控制系统的稳定性	301
24.3.2	采样周期与开环增益对稳定性的影响	303

第 25 章 线性二次型高斯最优控制的 MATLAB 实现	306
25.1 LQG 最优控制概述	306
25.2 LQG 最优控制的 MATLAB 实现	307
25.2.1 reg 函数	307
25.2.2 lqg 函数	308
25.2.3 lqgreg 函数	311
第 26 章 MATLAB 函数直接绘制系统的根轨迹	316
26.1 根轨迹的概述	316
26.2 二阶系统的根轨迹分析	317
26.3 MATLAB 中与根轨迹相关的函数	321
26.3.1 pzmap 函数	321
26.3.2 rlocus 函数	322
26.3.3 rlocfind 函数	324
26.3.4 sgrid 函数	326
26.3.5 zgrid 函数	327
26.3.6 damp 函数	327
第 27 章 可控性与可观性的 MATLAB 实现	329
27.1 可控性与可观性	329
27.2 状态可控性	329
27.3 状态可观性	330
27.4 可控性和可观性的实现	331
27.4.1 可控标准型	331
27.4.2 可观标准型	333
第 28 章 系统稳态误差分析的 MATLAB 实现	338
28.1 系统误差分析与计算	338
28.2 MATLAB LTI Viewer 稳定性判定实例	347
第 29 章 频域稳定性分析	350
29.1 Nyquist 稳定判据	350
29.2 稳定裕度	356
29.2.1 相对稳定性	356
29.2.2 增益裕度	356
29.2.3 相角裕度	356

目录

第 30 章 控制系统工程应用实例	359
30.1 MATLAB 在频域响应中的应用	359
30.2 MATLAB/Simulink 在状态空间中的应用	365
30.3 MATLAB 在 PID 控制器设计中的应用	369
第 31 章 变换矩阵与状态空间表达式	372
31.1 非唯一性与特征不变性	372
31.2 标准型	373
31.2.1 对角规范型	373
31.2.2 约当规范型	375
第 32 章 高阶系统的时域分析	378
32.1 高阶系统	378
32.2 时域分析的 MATLAB 实现	380
32.2.1 step 函数	380
32.2.2 dcgain 函数	383
32.2.3 impulse 函数	385
32.2.4 initial 函数	387
32.2.5 lsim 函数	387
32.3 MATLAB 图形化时域分析	389
第 33 章 控制系统稳定性判定的 MATLAB 实现	392
33.1 方程特征根判定稳定性	392
33.2 Lienard-Chipard 判据判定系统稳定性	393
33.3 根轨迹法判定稳定性	393
33.4 传递函数极点法判定系统稳定性	397
33.5 李亚普诺夫第二法判定系统稳定性	399
33.6 频率法判定系统稳定性	401
33.6.1 Bode 图判定系统稳定性	401
33.6.2 Nyquist 曲线判定系统稳定性	404
第 34 章 设计 kalman 滤波器最优状态估计器	409
34.1 kalman 函数	409
34.2 lqi 函数	411
34.3 estim 函数	414

第 35 章 闭环比值与解耦控制系统分析	418
35.1 闭环比值控制系统	418
35.1.1 单闭环比值控制系统	418
35.1.2 双闭环比值控制系统	421
35.2 解耦控制系统	425
35.2.1 前馈补偿解耦控制	425
35.2.2 反馈补偿解耦控制	430
附录 A MATLAB R2016a 安装说明	435
参考文献	441

状态空间描述模型是用一阶矩阵向量微分方程来描述系统,其核心是状态向量,它由一组可以完全描述给定系统动态行为的状态变量组成。在特定时刻 t , 状态向量即为 n 维状态空间的一个点。连续线性系统状态空间模型的表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1-1)$$

由系统的状态空间描述模型出发,将进入现代控制理论的领域。状态空间表达式中,矩阵表示法的引入使系统可以用简洁明了的数字表达式描述,并且容易用计算机求解,为多输入多输出(MIMO)系统和时变系统的分析与研究提供了有力工具。

1.1 Simulink 概述

Simulink 是 MATLAB 最重要的组件之一,它提供了一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。在该环境中,不需要大量书写程序,只需通过简单直观的鼠标操作,就可构造出复杂的系统。Simulink 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。基于以上优点,Simulink 已被广泛应用于控制理论和数字信号处理的复杂仿真和设计,同时有大量的第三方软件和硬件可应用于或被要求应用于 Simulink。


1.1.1 Simulink 的特点

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。

Simulink 提供了一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境,其本身具有如下特点。

- 丰富的可扩充的预定义模块库；
- 交互式的图形编辑器来组合和管理直观的模式图；
- 以设计功能的层次性来分割模型,实现对复杂设计的管理；
- 通过 Model Explorer 导航、创建、配置、搜索模型中的任意信号、参数、属性,生成模型代码；
- 提供 API 用于与其他仿真程序的连接或与手写代码集成；
- 使用 Embedded MATLAB 模块在 Simulink 和嵌入式系统执行中调用 MATLAB 算法；
- 使用定步长或变步长运行仿真,根据仿真模式 (Normal, Accelerator, Rapid Accelerator)来决定以解释性的方式运行或以编译 C 代码的形式来运行模型；
- 图形化的调试器和剖析器用来检查仿真结果,诊断设计的性能和异常行为；
- 可访问 MATLAB 从而对结果进行分析与可视化,定制建模环境,定义信号参数和测试数据；
- 模型分析和诊断工具用来保证模型的一致性,确定模型中的错误。

1.1.2 启动 Simulink

在进行 MATLAB 安装时,选择 Simulink 模块,进行 Simulink 安装。首先启动 MATLAB 软件,然后再启动 Simulink。用户可以单击 MATLAB 主界面工具栏中的  按钮,并在 MATLAB 命令窗口中输入 simulink 来启动 Simulink。启动后的 Simulink 的库浏览器如图 1-1 所示。

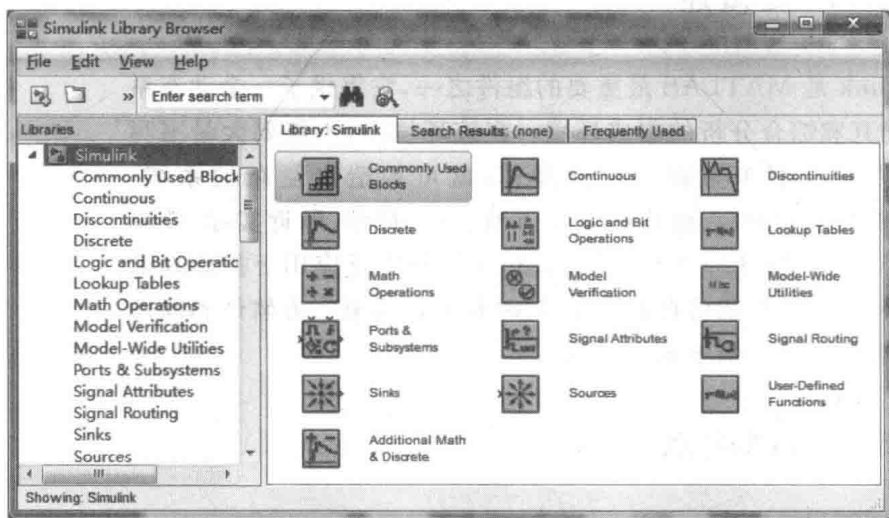



图 1-1 Simulink 库浏览器

利用 Simulink 建立的模型文件扩展名为 .mdl。用户可以通过 Simulink 库浏览器工具栏的 Open 按钮,打开已经建立的模型文件,也可以在命令窗口输入模型文件的名称打开模型文件,注意不能输入扩展名。

单击 Simulink 库浏览器工具栏中的  按钮,可以创建新的模型文件,如图 1-2 所

示。用户可以用鼠标将库浏览器中的模块拖到新建的模型窗口中,根据仿真的实际需要建立自己的模型文件。

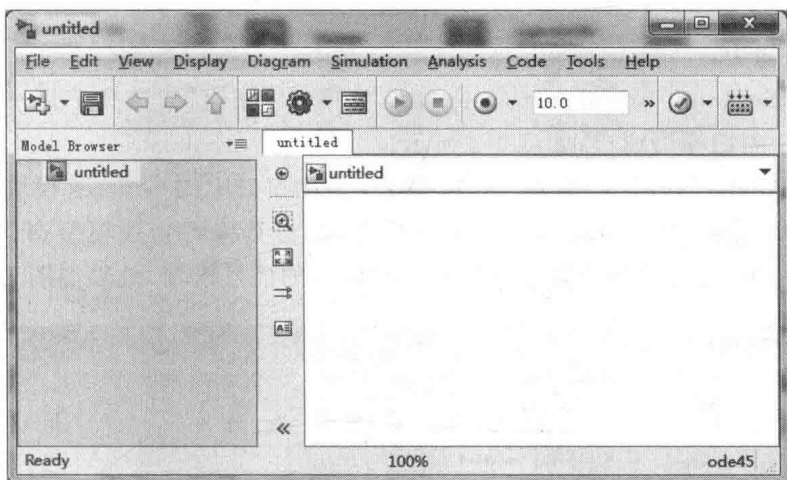


图 1-2 新建模型文件窗口

选择 Simulink 库浏览器窗口中 File→Preferences 选项,或选择模型文件窗口中 File→Preferences 选项,会显示 Simulink 全局特性窗口,如图 1-3 所示。在图 1-3 中,可以对 Simulink 的全局属性进行设置。

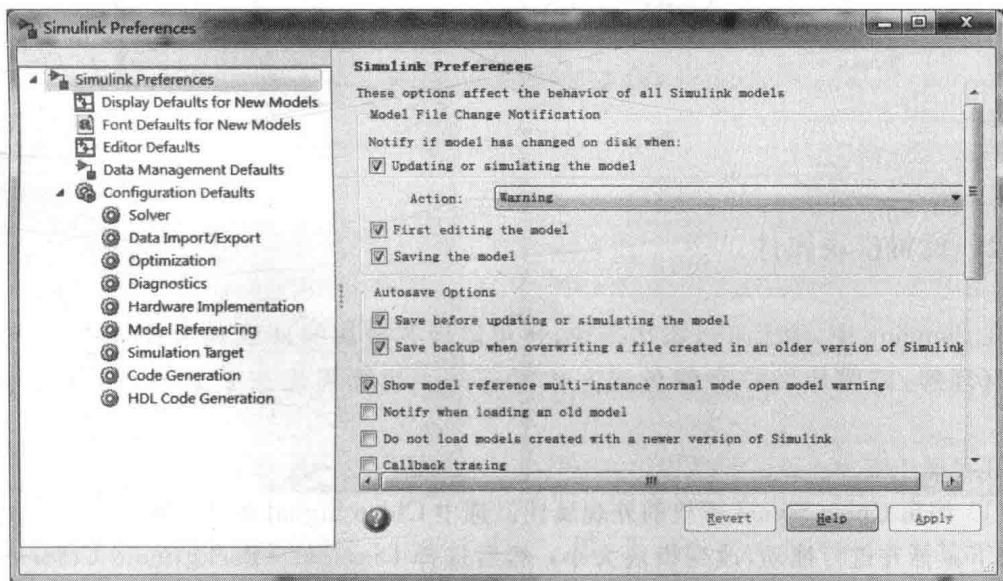


图 1-3 Simulink 全局特性窗口

1.2 一个简单的仿真系统

本节通过一个简单的仿真系统,演示创建 Simulink 仿真系统的典型过程。