



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划

国家级精品教材

System Modeling and Simulation
(Second Edition)

系统建模与仿真

(第2版)

张晓华 编著
Zhang Xiaohua

薛定宇 主审
Xue Dingyu



清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划

国家级精品教材

System Modeling and Simulation
(Second Edition)

系统建模与仿真

(第2版)

大连理工大学 张晓华 编著
Zhang Xiaohua

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以 MATLAB 语言为平台,以工程案例教学为特色,系统地阐述了系统建模与仿真技术的基本概念、原理与方法,涉及运动控制、过程控制、电力电子与电力传动控制领域的系统建模、控制器设计与仿真实验等内容。

全书共分 5 章,主要包括:概述、系统建模与分析、控制系统设计与仿真、虚拟样机技术与应用、实物/半实物仿真技术与应用;书中配有练习型、分析/设计型、探究型习题,有助于激发读者的兴趣和进一步领会与掌握自动化领域相关课程内容。

本书系高等学校自动化专业本科生用教材,也可作为电气工程及其自动化、机械电子工程/机械设计制造及其自动化等专业本科生(或研究生)“仿真技术”类课程的教学用书。

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

系统建模与仿真/张晓华编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2015

全国高等学校自动化专业系列教材

ISBN 978-7-302-42282-2

I. ①系… II. ①张… III. ①系统建模—高等学校—教材 ②系统仿真—高等学校—教材 IV. ①N945.12 ②TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 283725 号

责任编辑:王一玲

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

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:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:20.5 字 数:431 千字

版 次:2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 2 版 印 次:2015 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00 元

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

顾问 (按姓氏笔画):

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

主任委员: 吴澄(清华大学)

副主任委员: 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

委员 (按姓氏笔画):

王雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

工作小组(组长): 萧德云(清华大学)

(成员): 陈伯时(上海大学) 郑大钟(清华大学)
田作华(上海交通大学) 赵光宙(浙江大学)
韩九强(西安交通大学) 陈兴林(哈尔滨工业大学)

陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

责任编辑: 王一玲(清华大学出版社)

出版说明

《全国高等学校自动化专业系列教材》



为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指示书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层面、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本系列教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统并适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的参考资料。感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20世纪50年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,“两弹一星”的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等。另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下,中国要完成工业化的任务还很重,或者说我们正处在后工业化的阶段。因此,国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化,工业化促进信息化”的科学发展观,这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得,人才更难得。要发展自动化学科,人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地,或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说,要时刻想着为国家关键行业和战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多,涉及教学改革方方面面,包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等,其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系,编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求,充分吸取国外自动化教材的优势与特点,在全国范围内,以招标方式,组织编写了这套自动化专业系列教材,这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创建精品教材,重视实践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以

激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

吴恪迪 教授

2005年10月于教育部

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指示书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教学,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入的研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所,参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血,为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的、既考虑研究型大学又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设

基础知识与最新知识有机融合的教材?如何充分利用现代技术,适应现代大学生的接受习惯,改变教材单一形态,建设数字化、电子化、网络化等多元形态、开放性的“广义教材”?等等,这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版,对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境,一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限,本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在许多不当甚至谬误之处,还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴俊 院士

2005年10月于清华大学



一、关于本书

2004年5月,针对“系统建模与仿真”技术的广泛应用与发展趋势,为满足本科生教学工作的需要,教育部高等学校自动化专业教学指导委员会决定组织编写“系统建模与仿真”课程的本科生教材,经在全国范围内招投标,确定由张晓华教授编著,薛定宇教授主审,并由清华大学出版社资助出版;本书面世十余年来,先后为国内数十所院校选为“仿真技术”类课程教材,被读者评价为“注重基础、可读性强、工程案例丰富、课件资料实用”,其也是激励作者与本书再版的主要原因。

根据教学需要与篇幅所限,本书内容上有所增减:

(1) 删除原书第3章(系统仿真)内容。鉴于本书的重点将放在“基于系统数学模型的控制系统设计、分析与仿真实验”,故原书中“系统仿真的基本原理”内容已不适合,如读者教学上还有需求,可参考第1章后的参考文献[18]。

(2) 系统建模与分析部分增加了“电力电子与电力传动”案例,即“直流电动机转速控制问题”、“PWM整流器控制问题”,以加强电气工程领域的工程案例。

(3) 控制系统设计与仿真部分增加了“自平衡式两轮电动车直行与转向复合控制”和“电力电子与电力传动控制”案例,以加强系统建模在控制工程中的应用案例。

(4) 增加了“dSPACE/半实物仿真技术与应用”内容,以拓展读者在线/实时仿真技术的视野,为仿真技术的工程应用开阔思路。

(5) 增加了“电力电子与电力传动”相关领域的系统建模与控制习题。

(6) 删减或补充了各章参考文献。

我们希望,本书通过以上内容的删减与补充能够在“注重基础、内容精炼、可读性强”写作风格的基础上,进一步加强工程案例教学,使工程

问题与仿真实验有机地结合,以期培养学生独立思考、勤于实践、勇于解决复杂工程问题的思维方法,以及紧随新技术发展、不断开拓进取的创新精神。

全书共分5章,其中第2、3章中的“电力电子技术”相关内容,由大连理工大学电气学院郭源博讲师编写;全书由张晓华教授统稿,东北大学薛定宇教授主审。

二、关于教师用电子课件

为便于选用本书的院校与专业教师有效地组织教学,本书为任课教师备有电子课件光盘(800MB),其中包括“仿真技术概述 PPT、各章电子教案 PPT、习题解答、教学参考影像资料”,以及教学文档(教学大纲、实验指导书、课程设计指导书)等资料,请选用本书作为“仿真技术”类课程教材的教师直接给作者发 E-mail 索取;同时,作者也希望与广大读者就教学内容、工程应用等问题开展讨论与交流。

三、关于教学环节的组织

本书按授课30学时编写,其中第3章的内容可视专业/行业需要适当增减,第4章与第5章作为拓展内容,供教学参考与读者选读,以扩大知识面;作为实践性较强的“仿真技术”类课程,应安排“课程实验”教学环节(4~8学时),有条件的院校还可安排“课程设计”教学环节(一周时间),在“电子课件”光盘中备有相关的“实验指导书”、“课程设计指导书/教学大纲”等教学资料,仅供参考;作为以提高学生综合解决“复杂工程问题”能力为主的专业基础课,课程考核建议采取(实验验收+习题报告+课程试卷)的“累加式”考核模式,重点培养与考核学生“独立解决问题、归纳总结、知识掌握”的能力与水平。

四、致谢

在本书的成稿与面世过程中,得到以下同仁的热诚支持与帮助:

国家自然科学基金(项目编号:51377013/E070602,51407023);

大连理工大学教学与改革发展基金;

大连理工大学电气工程学院;

东北大学薛定宇教授;

大连理工大学电气工程学院黄凯、张宇、夏金辉研究生;

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会;

清华大学出版社。

在此,一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,错误与不当之处在所难免,殷切期望广大读者批评指正。

信函请至:辽宁省大连市高新区凌工路 2 号

大连理工大学电气工程学院基础部 102 室 张晓华收

邮编: 116023

E-mail: xh_zhang@dlut.edu.cn。

作 者

2015 年 8 月



10年前, MATLAB语言在国内的出现与推广改变了以往人们“手工编程”的历史,使得数字仿真技术进入到“实质性的应用阶段”;5年前, MATLAB/Simulink的日臻完善,使得“数字仿真技术”进入到“视窗化与图形化的人机交互阶段”,“数字仿真技术”开始广泛应用于教学与科研工作中;今天,以虚拟现实技术、3D显示技术、数字仿真技术为核心内容的“虚拟样机技术”(又称“虚拟制造技术”)也已进入科研院所与大专院校,并开始工厂企业中广泛应用,“数字仿真技术”又进入一个新的应用与发展阶段。

“系统建模与仿真”技术在其近50年的发展过程中,“推动了几乎所有设计领域的革命”,被喻为20世纪下半叶“十大工程技术成就之一”。如今,系统建模与仿真技术已成为现代工程技术人员应该掌握的基本技能之一。

2004年5月,针对“数字仿真与CAD技术”的广泛应用与发展趋势,为满足本科生教学工作的需要,教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会决定组织编写“系统建模与仿真”课程的本科生教材。经在全国范围内招投标,确定由哈尔滨工业大学张晓华教授主编、东北大学薛定宇教授主审,并由清华大学出版社资助出版该教材。

作为联系“自动控制理论”、“自动控制系统/设计”、“计算机控制”、“课程设计”、“毕业设计”等教学环节的专业方向选修类课程,其不仅可以使学生了解与掌握“系统建模与仿真”技术的基本理论与方法,而且还可为学生在毕业设计中提供一个强有力的工具,有效地加强教学中的实践性教学环节,培养学生的独立工作能力和创造性思维能力。

因此,本书编写的目的在于:

(1) 向读者传授“系统建模与仿真”技术这一利器,并使读者清楚:随着新技术的不断发展,将会不断地产生更有效、更实用的“仿真工具”,而我们应该不断地学习与掌握,以使自己能够与时俱进;

(2) 为读者讲明“系统建模与仿真”技术中所涉及的基本原理、基本概念与基本方法,因为它们是我们能够有效运用仿真工具的理论基础;

(3) 给读者提供一些生动有趣、启迪思想的工程实际问题,创造一个“自由畅想、激发创造”的空间,以使读者从中体会到:“数字仿真技

术”是我们学习、探究以及生活中不可缺少的有力工具。

本书在“注重基础、内容精炼、可读性强”写作风格的基础上,在如下几方面进行了积极的探索。

1. 案例教学

(1) 在系统建模方面,包含有“一阶直线倒立摆系统”、“龙门吊车防摆控制系统”、“水箱液位控制系统”、“燃煤热水锅炉温度控制系统”等工程案例。

(2) 在系统仿真/CAD方面,包含有“直流电动机转速电流双闭环控制系统设计”、“一阶直线倒立摆运动控制”、“龙门吊车负载防摆控制”、“一阶直线双倒立摆系统的可控性研究”、“自平衡式两轮电动车运动控制”等工程案例。

(3) 从例题到习题,给读者提供了十余个生动、形象的工程实际问题,它们是:

- ① 一阶直线倒立摆小车位置伺服控制问题;
- ② 龙门吊车重物防摆伺服控制问题;
- ③ 水箱液位控制问题;
- ④ 燃煤热水锅炉水温控制问题;
- ⑤ 一阶直线双摆系统可控性问题;
- ⑥ 水轮发电机组功率控制问题;
- ⑦ 具有弹性立杆的移动小车控制问题;
- ⑧ 自平衡式两轮电动车运动控制问题;
- ⑨ 斜梁-滚球系统的控制问题;
- ⑩ 多部直行电梯运行管理的最佳调度控制问题。

通过对这些问题的分析、设计与仿真实验研究,有助于提高学生独立分析问题与解决问题的能力;同时,也希望这些案例能够对本科生毕业设计的选题有所帮助。

2. 启发与探究式教学

21世纪,人类社会进入到知识经济时代,社会对人才的需求发生了变化。那些具有“独立思维能力、自主创新能力与敏捷适应能力”的能力型人才将成为社会进步的中坚力量。

作为一门时代特色鲜明,以向学生传授系统分析与设计的“利器”,培养学生“综合运用所学知识、勤于思考、勇于探索”工作作风的专业课,在“系统建模与仿真”课程的教学工作中,笔者认为:“能力”比“知识”更重要,新技术的不断涌现会使得已有的知识变得陈旧,而获取新知识与独立工作的能力永恒;“过程”比“结果”更重要,随着“问题与条件”的改变,“结果”将会不同,而通过“提出问题、分析问题、解决问题、归纳总结”这样一个“过程”的训练,将会有效地塑造学生们科学

的“思维方式”与“工作习惯”，而这将会使他们终身受益。

因此，本书在各章中均设立了“问题与探究”一节，为读者提供了一个畅想与实践的空间，以求抛砖引玉。同时，作者声明：在本书各章的例题、习题及有关工程案例的阐述中，其工程背景(或问题的提出)是确凿的，但是其中模型建立的有效性、控制策略的优劣性、仿真结果的可信性等方面内容，作者不敢说是最终结果，希望读者勇于给出质疑，以使我们共同进步。

3. 虚拟样机与实物仿真

系统建模与仿真技术的最终目的是指导人们去实践。

本书在“应用篇”中系统地阐述了虚拟样机与实物仿真技术的最新成果，希望读者能够从中理解“数字仿真与实物仿真”在认识世界与自身成长过程中所起到的不同作用。同时，也希望有条件的院校能够结合自身的行业背景，建立自己的实物仿真平台，尽可能多地给学生提供一些亲手实践的环境与机会，因为“实践出真知”是古今中外的教育家们所崇尚的认知理念。

4. 参考文献

一个人的经验与阅历是有限的，在探究未知中，如何快速准确地把握他人已有的经验与结论是我们在教学与研究中要面对的一个实际问题。本书在各章均给出相关的参考文献，在有关章节中还给出了网上资源等信息。希望这些资料能够有助于读者对所感兴趣的问题进行深入探究，以达到触类旁通的目的。

5. 电子课件

本教材为任课教师配有“现代仿真技术概述”多媒体课件(适用于本书第1章的教学)与“系统建模与仿真”电子教案(适用于本书各章节的教学)，所配电子课件中还将包括：各章习题解答、图像资料、参考文献电子文档以及PPT讲稿等教学参考资料。需要说明的是，为便于选用本书的院校与教师有效地组织教学工作，凡选用本书作为“仿真技术”类课程教材院校的任课教师，均可获赠逐年更新的“多媒体课件与电子教案”。

本书共6章，其中第1、4、5、6章由哈尔滨工业大学张晓华教授编写，第3章由西安理工大学王华民教授编写，第2章由张晓华、王华民合作编写；全书由张晓华教授统稿，东北大学薛定宇教授主审。

本书按授课30学时编写。对于“计算机仿真技术基础”类课程，可选用本书的前3章；一般学时数为20学时授课+4学时实验。对于“系统建模与仿真”类课程，可选用全书内容(其中第4、5、6章内容，可视具体情况灵活掌握)；一般学时数为30学时授课+8学时实验。

“系统建模与仿真”是一门实践性较强的专业课,一般均要求安排一定量的上机实验。对于4学时的实验,可安排MATLAB/Simulink基础内容的上机实验,重点在引领学生入门;对于8学时的实验,可在MATLAB/Simulink入门实验内容的基础上,安排“水箱液位控制”、“双闭环直流调速系统设计”或“基于双闭环PID控制的一阶倒立摆控制系统设计”等方面的“系统仿真实验”,重点在于培养学生的综合应用能力;如有条件,还可进一步安排书中有关内容的“验证性仿真实验”。

作为以提高学生能力为主要目的的专业类课程,“系统建模与仿真”一般为考查课。因此,笔者建议:本门课程的考核以“写作报告”形式为主(如“实验报告”或“课程报告”),重点考核学生解决实际问题的能力、归纳总结能力以及科技论文的撰写能力。

在本书的成稿与面世过程中,我们得到《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会、清华大学出版社以及哈尔滨工业大学教学发展基金的支持;东北大学薛定宇教授提出的中肯意见为本书添色许多;还有许多同仁给予了无私的帮助。在此,一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,错误与不当之处在所难免,殷切期望广大读者批评指正。

信函请至:哈尔滨工业大学354信箱 张晓华 收 邮编 150001。

E-mail: xh_zhang@hit.edu.cn

编者

2006年9月

第 1 章 概述	1
1.1 系统的实验研究方法	1
1.2 仿真实验的分类	3
1.3 相似性原理	7
1.4 系统、模型与数字仿真	11
1.5 仿真技术的应用	14
1.5.1 控制系统 CAD	14
1.5.2 虚拟现实	19
1.5.3 工程应用	22
1.5.4 几种常用的数字仿真工具软件	25
1.6 仿真技术的发展与展望	28
1.7 问题与探究——投针实验	30
本章小结	32
习题	32
参考文献	33
第 2 章 系统建模与分析	35
2.1 控制系统的数学模型	35
2.2 系统建模概述	40
2.3 系统建模方法	43
2.4 模型验证	62
2.5 系统建模实例	65
2.5.1 独轮自行车实物仿真问题	65
2.5.2 龙门吊车运动控制问题	69
2.5.3 水箱液位控制问题	75
2.5.4 燃煤热水锅炉控制问题	78
2.5.5 直流电动机转速控制问题	81
2.5.6 三相电压型 PWM 整流器系统控制问题	86
2.6 问题与探究——水轮发电机系统的线性化模型	92
本章小结	93
习题	93