



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

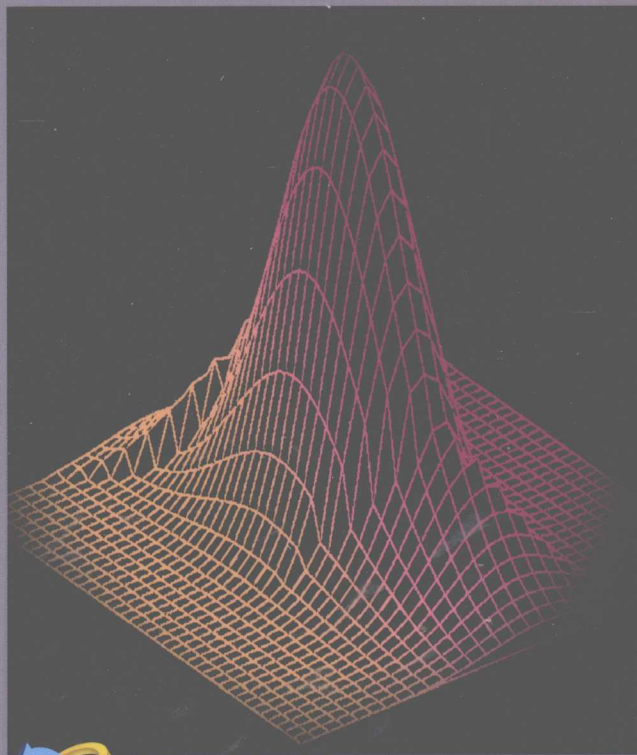
21世纪高等院校

●●●●● 自动化专业系列教材 ●●●●●

控制系统仿真 与计算机辅助设计

第2版

薛定宇 著



购书可获得相关源代码



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TP273/301=2

2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21 世纪高等院校自动化专业系列教材

控制系统仿真与计算机辅助设计

第 2 版

薛定宇 著

机械工业出版社

本书以国际控制界首选的 MATLAB/Simulink 语言为主要工具, 在全新的框架下对控制系统建模、仿真、分析与设计进行了较全面的介绍, 内容包括: MATLAB 语言的编程方法及其在各类数学问题求解中的应用; 各类线性系统模型的表示方法与模型转换、系统辨识问题的求解方法; 控制系统的计算机辅助分析; 基于 Simulink 的控制系统建模仿真的方法; 控制系统的计算机辅助设计算法; PID 控制器与最优控制器设计; 控制工程建模仿真应用技巧及半实物仿真等内容。

本书可作为高等院校自动化专业本科生的教材或参考书, 还可供研究生、科技工作者和教师参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

控制系统仿真与计算机辅助设计/薛定宇著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2008.10

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

(21 世纪高等院校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-111-15636-9

I. 控… II. 薛… III. ①自动控制系统—系统仿真—高等学校—教材②自动控制系统—计算机辅助设计—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 154568 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 时 静

责任印制: 洪汉军

中国农业出版社印刷厂印刷

2009 年 1 月第 2 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·20.75 印张·510 千字

0001 5000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-15636-9

定价: 33.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294 68993821

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379753 88379739

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高等院校自动化专业系列教材

编 审 委 员 会

主 任 袁著祉 南开大学
副主任 王桂增 清华大学
席裕庚 上海交通大学

委 员 (以姓氏笔画为序)

田作华 上海交通大学
李华德 北京科技大学
陈大钦 华中科技大学
张长水 清华大学
胡毓坚 机械工业出版社
贾 磊 山东大学
韩崇昭 西安交通大学
薛定宇 东北大学

出版说明

自动化技术是一门集控制、系统、信号处理、电子和计算机技术于一体的综合技术，广泛用于工业、农业、交通运输、国防、科学研究以及商业、医疗、服务和家庭等各个方面。自动化水平的高低是衡量一个国家或社会现代化水平的重要标志之一，建设一个现代化的国家需要大批从事自动化事业的人才。高等院校的自动化专业是培养国家所需要的专业面宽、适应性强，具有明显的跨学科特点的自动化专门人才的摇篮。

为了适应新时期对高等教育人才培养工作的需要，以及科学技术发展的新趋势和新特点，并结合最新颁布实施的高等院校自动化专业教学大纲，我们邀请清华大学、南开大学、上海交通大学、西安交通大学、东北大学、华中科技大学、山东大学、北京科技大学等名校的知名教师、专家和学者，成立了教材编写委员会，共同策划了这套面向高校自动化专业的教材。

本套教材定位于普通高等院校自动化类专业本科层面。按照教育部颁发的《普通高等院校本科专业介绍》中所提出的培养目标和培养要求，适合作为广大高校相关专业的教材，反映了当前教学与技术发展的主流和趋势。

本套教材的特色：

1. 作者队伍强。本套教材的作者都是全国各院校从事一线教学的知名教师和相关专业领域的学术带头人，具有很高的知名度和权威性，保证了本套教材的水平和质量。
2. 观念新。本套教材适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求。
3. 内容新。近 20 年，自动化技术发展迅速，与其他学科的联系越来越紧密。这套教材力求反映学科发展的最新内容，以适应 21 世纪自动化人才培养的要求。
4. 体系新。在以前教材的基础上重构和重组，补充新的教学内容，各门课程及内容的组成、顺序、比例更加优化，避免了遗漏和不必要的重复。根据基础课教材的特点，本套教材的理论深度适中，并注意与专业教材的衔接。
5. 教学配套的手段多样化。本套教材大力推进电子讲稿和多媒体课件的建设工作。本着方便教学的原则，一些教材配有习题解答和实验指导书，以及配套学习指导用书。

机械工业出版社

前 言

十多年来，随着 MATLAB[®] 语言和 Simulink[®] 仿真环境在控制系统研究与教学中日益广泛的应用，在系统仿真、自动控制等领域，国外很多高校在教学与研究中都 将 MATLAB/Simulink 语言作为首选的计算机工具。我国的科学工作者和教育工作者也 逐渐认识到 MATLAB 语言的重要性。MATLAB 语言是一种十分有效的工具，能容易 地解决在系统仿真及控制系统计算机辅助设计领域的教学与研究中遇到的问题，它可 以将使用者从烦琐的底层编程中解放出来，把有限的宝贵时间更多地花在解决科学问题 中。MATLAB 语言虽然是计算数学专家倡导并开发的，但其普及和发展离不开自动控制 领域学者的贡献。在 MATLAB 语言的发展进程中，许多有代表性的成就是和控制界的 要求与贡献分不开的。MATLAB 具有强大的数学运算能力、方便实用的绘图功能及语言 的高度集成性，它在其他科学与工程领域也有着广阔的应用前景和无穷的潜能。因此， 以 MATLAB/Simulink 作为主线，为我国高校自动化专业的一门很重要课程——“控制 系统仿真与计算机辅助设计”或“计算机仿真”编写一本实用的教材就显得非常迫切。

本书作者从使用者的角度出发，融合了作者二十多年的教学、研究和实际编程经 验，并参考以往出版的专著和教材，精心编写了本书。书中除简单介绍 MATLAB 的基础 知识外，其余内容均围绕其在控制系统中的应用展开介绍。所以本书还可以作为“自动 控制原理”等课程的计算机实践材料。本书入选普通高等教育“十一五”国家级规划教 材，并作为支撑教材之一入选国家级精品课程《控制系统仿真与 CAD》。本书的读者对 象是应用型高校自动化专业的本科生，英文版 *Linear Feedback Control — Analysis and Design with MATLAB* 由美国 SIAM 出版社 2007 年出版，可以用于双语教学。

作者从 1988 年开始系统地使用 MATLAB 语言进行程序设计与控制理论研究，积累 了丰富的第一手经验；用 MATLAB 语言编写的程序 Control Kit 曾作为英国 Rapid Data 软件公司的商品在国际范围内发行，并于 1991 年在 *国际电工教学杂志* 上发表文章介绍该 软件。新近编写的几个通用程序在 The MathWorks 公司 (MATLAB 语言的开发者) 的网 页上可以下载，其中反馈系统分析与设计程序 CtrlLAB 的下载量长期高居控制类软件的 榜首，得到了国际上很多用户的关注。

多年来，作者一直试图以最实用的方式将 MATLAB 语言介绍给国内的读者，并在清 华大学出版社出版了多部有关 MATLAB 语言及其应用方面的著作，受到了国内外广大中 文读者的普遍欢迎。其中，1996 年出版的《控制系统计算机辅助设计——MATLAB 语 言与应用》一书被公认为国内关于 MATLAB 语言方面书籍中出版最早、影响最广的著 作，被期刊文章他引数千次。本书主要介绍目前最新的 MATLAB 2008a 版本，相信仍然 能受到读者的欢迎。

本书由上海交通大学的施颂椒教授主审，感谢他对作者提出的建设性意见和细致审

读。作者的导师，东北大学任兴权教授和英国 Sussex 大学的 Derek P Atherton 教授也对本书的最终成型提供了很多的帮助，是他们将作者引入系统仿真和 MATLAB/Simulink 语言编程这个充满趣味的领域。

作者的一些同事、同行和朋友也先后给予作者许多建议和支持，他们是东北大学信息学院的徐心和教授、刘建昌教授、张化光教授、吴成东教授、美国 Utah 州立大学的陈阳泉教授、英国 Sussex 大学的杨泰澄博士、北方交通大学的朱衡君教授、中科院系统科学研究所的韩京清研究员、南开大学的王治宝教授、清华大学胡东成教授、郑大钟教授、王雄教授、萧德云教授、孙增圻教授、北京理工大学的谢力教授、西安电子科大的陈怀琛教授、上海交通大学的田作华教授、哈尔滨工业大学的张晓华教授、马广富教授、北京航空航天大学申功璋教授、刘金琨教授等，还有在互联网上交流的众多同行与朋友，在此表示深深的谢意。东北大学潘峰博士和陈大力博士参加了本书部分章节的编写，部分辅助程序与模型由黄跃刚、熊鲲等同学编写。

本书的出版得到了丛书编委会主任南开大学袁著祉教授、清华大学王桂增教授和上海交通大学席裕庚教授的指点，作者对他们的辛勤工作深表谢意。

本书受“教育部高等学校骨干教师资助计划”资助，在此深表谢意。

感谢美国 The MathWorks 公司图书计划的支持，并特别感谢 Courtney Esposito、Noami Fernandez 女士对作者的各种帮助。

由于作者水平有限，书中的缺点、错误在所难免，欢迎读者批评指教。

为了配合本书教学，读者可以从机械工业出版社教材网站 (<http://www.cmpedu.com>) 和作者的 MATLAB 大观园 (<http://www.matlab-china.com>) 网站均可免费下载本书的源代码和演示实例。

谨以此书献给我的妻子杨军和女儿薛杨。在编写本书时我花费了大量本该陪伴她们的业余时间，没有她们的鼓励、支持和理解，本书是不可能顺利完成的。

薛定宇

2008 年 7 月 10 日修订于沈阳东北大学

目 录

出版说明

前 言

第 1 章 控制系统仿真与计算机辅助设计概述	1
1.1 控制理论和控制系统概述.....	1
1.1.1 自动控制理论的历史回顾.....	1
1.1.2 控制系统分类.....	2
1.2 系统仿真与仿真语言工具概述.....	2
1.2.1 系统仿真与控制系统仿真.....	2
1.2.2 常规计算机语言的局限性.....	4
1.2.3 数学软件的发展.....	5
1.2.4 控制系统仿真与计算机辅助设计软件.....	7
1.3 本书主要结构及相关内容.....	9
1.3.1 本书结构概述.....	9
1.3.2 MATLAB 语言的相关资源.....	10
1.3.3 书中的 MATLAB 代码.....	10
1.4 本章要点小结.....	11
1.5 习 题.....	11
第 2 章 MATLAB 语言 —— 必备的基础知识	13
2.1 MATLAB 的数据结构与语句结构.....	14
2.1.1 MATLAB 语言的变量与常量.....	14
2.1.2 MATLAB 的数据结构.....	14
2.1.3 MATLAB 的基本语句结构.....	15
2.1.4 数据存储与读取.....	16
2.1.5 MATLAB 语言的基本运算.....	16
2.2 MATLAB 基本控制流程结构.....	19
2.2.1 循环结构.....	19
2.2.2 转移结构.....	20
2.2.3 开关结构.....	21
2.2.4 试探结构.....	22

2.3	MATLAB 的 M-函数设计	22
2.3.1	MATLAB 语言的函数的基本结构	23
2.3.2	可变输入输出个数的处理	25
2.4	MATLAB 的图形可视化	25
2.4.1	二维图形的绘制	25
2.4.2	三维图形的绘制	30
2.4.3	图形修饰	34
2.5	MATLAB 的图形用户界面设计入门	34
2.5.1	图形界面设计工具 Guide	35
2.5.2	菜单设计系统	41
2.5.3	界面设计举例与技巧	41
2.6	MATLAB 语言与数学问题计算机求解	47
2.6.1	线性代数问题的 MATLAB 求解	47
2.6.2	常微分方程问题的 MATLAB 求解	53
2.6.3	最优化问题的 MATLAB 求解	56
2.7	本章要点小结	60
2.8	习 题	61
第 3 章	控制系统模型与转换	65
3.1	连续线性系统的数学模型	65
3.1.1	线性系统的传递函数模型	65
3.1.2	线性系统的状态方程模型	68
3.1.3	线性系统的零极点模型	69
3.1.4	多变量系统的传递函数矩阵模型	70
3.2	离散系统模型	71
3.2.1	离散传递函数模型	71
3.2.2	离散状态方程模型	73
3.3	框图描述系统的化简	74
3.3.1	控制系统的典型连接结构	74
3.3.2	纯时间延迟环节的处理	77
3.3.3	节点移动时的等效变换	78
3.3.4	复杂系统模型的简化	79
3.3.5	基于连接矩阵的结构图化简方法	81
3.4	系统模型的相互转换	83
3.4.1	连续模型和离散模型的相互转换	83
3.4.2	系统传递函数的获取	85
3.4.3	控制系统的状态方程实现	86

3.4.4	状态方程的最小实现	88
3.5	线性系统的模型降阶	89
3.5.1	Padé 降阶算法与 Routh 降阶算法	89
3.5.2	时间延迟模型的 Padé 近似	93
3.5.3	带有时间延迟系统的次最优降阶算法	94
3.6	线性系统的模型辨识	98
3.6.1	连续系统的模型辨识	98
3.6.2	离散系统的模型辨识	100
3.6.3	辨识模型的阶次选择	105
3.6.4	离散系统辨识信号的生成	106
3.6.5	多变量离散系统的辨识	108
3.7	本章要点小结	109
3.8	习 题	110
第 4 章	线性控制系统的计算机辅助分析	114
4.1	线性系统定性分析	114
4.1.1	线性系统稳定性分析	114
4.1.2	线性系统的线性相似变换	117
4.1.3	线性系统的可控性分析	117
4.1.4	线性系统的可观测性分析	121
4.1.5	Kalman 规范分解	122
4.2	线性系统时域响应解析解法	122
4.2.1	基于状态方程的解析解方法	123
4.2.2	连续状态方程的直接积分求解方法	125
4.2.3	基于部分分式展开方法求解	125
4.2.4	二阶系统的阶跃响应及阶跃响应指标	129
4.3	线性系统的数字仿真分析	131
4.3.1	线性系统的时域响应	131
4.3.2	任意输入下系统的响应	135
4.4	根轨迹分析	136
4.5	线性系统频域分析	140
4.5.1	单变量系统的频域分析	141
4.5.2	利用频率特性分析系统的稳定性	144
4.5.3	多变量系统的频域分析	146
4.5.4	频域分析的复域空间扩展	150
4.6	本章要点小结	151
4.7	习 题	152

第 5 章 Simulink 在系统仿真中的应用	157
5.1 Simulink 建模的基础知识	157
5.1.1 Simulink 简介	157
5.1.2 Simulink 下常用模块简介	158
5.1.3 Simulink 下其他工具箱的模块组	164
5.2 Simulink 建模与仿真.....	164
5.2.1 Simulink 建模方法简介	164
5.2.2 仿真算法与控制参数选择	168
5.2.3 Simulink 在控制系统仿真研究中的应用举例	170
5.3 非线性系统分析与仿真	179
5.3.1 分段线性的非线性环节	179
5.3.2 非线性系统的极限环研究	182
5.3.3 非线性环节的描述函数数值求取方法	183
5.3.4 非线性系统的线性化	186
5.4 子系统与模块封装技术	188
5.4.1 子系统概念及构成方法	188
5.4.2 模块封装方法	189
5.4.3 模块集构造	194
5.5 S-函数及其应用.....	194
5.5.1 S-函数的基本结构.....	195
5.5.2 用 MATLAB 编写 S-函数举例.....	196
5.5.3 S-函数的封装.....	199
5.6 输出显示形式.....	199
5.7 本章要点小结.....	202
5.8 习 题	203
第 6 章 控制系统计算机辅助设计	207
6.1 基于传递函数的控制器设计方法	207
6.1.1 串联超前滞后校正器	208
6.1.2 基于相位裕量的设计方法	209
6.1.3 控制系统工具箱中的设计界面	214
6.2 状态反馈控制.....	218
6.3 基于状态反馈的控制器设计方法	219
6.3.1 线性二次型指标最优调节器	219
6.3.2 极点配置控制器设计	221
6.3.3 观测器设计及基于观测器的调节器设计	224

6.4 多变量系统的解耦控制	228
6.4.1 状态反馈解耦控制	228
6.4.2 状态反馈的极点配置解耦系统	230
6.5 本章要点小结	232
6.6 习 题	232
第 7 章 PID 控制器与最优控制器设计	234
7.1 PID 控制器及其 Simulink 建模	234
7.1.1 PID 控制器概述	234
7.1.2 离散 PID 控制器	235
7.1.3 PID 控制器的变形	236
7.2 过程系统的一阶延迟模型近似	237
7.2.1 由响应曲线识别一阶模型	238
7.2.2 基于频域响应的近似方法	239
7.2.3 基于传递函数的辨识方法	240
7.2.4 最优降阶方法	240
7.3 Ziegler-Nichols 参数整定方法	241
7.3.1 Ziegler-Nichols 经验公式	241
7.3.2 改进的 Ziegler-Nichols 算法	243
7.3.3 改进 PID 控制结构与算法	245
7.3.4 最优 PID 整定算法	248
7.3.5 大时间延迟的 Smith 预估器补偿	249
7.4 PID 工具箱应用举例	252
7.4.1 基于 FOLPD 的 PID 控制器设计程序	252
7.4.2 Simulink 下的 PID 控制器模块集	255
7.5 最优控制器设计	258
7.5.1 最优控制的概念	258
7.5.2 最优控制目标函数的选择	259
7.5.3 控制器参数寻优	262
7.5.4 基于 MATLAB/Simulink 的最优控制程序及其应用	265
7.5.5 最优控制程序的其他应用	268
7.6 最优 PID 控制器设计程序	269
7.7 本章要点小结	273
7.8 习 题	273
第 8 章 控制工程中的仿真技术应用	275
8.1 电路和电子系统的建模与仿真	275
8.1.1 复杂系统的 Simulink 建模概述	275

8.1.2	SimPowerSystems 简介	276
8.1.3	电路系统的建模与仿真	276
8.1.4	电子电路的建模与仿真	281
8.2	直流电机双闭环拖动系统的建模与仿真	285
8.2.1	晶闸管整流系统仿真模型	286
8.2.2	电机模型库及直流电机建模	287
8.3	半实物仿真系统及其应用	291
8.3.1	半实物仿真概述	291
8.3.2	dSPACE 简介	294
8.3.3	dSPACE 模块组	294
8.3.4	半实物仿真举例	295
8.4	本章要点小结	298
8.5	习 题	299
附 录	301
附录 A	积分变换问题及 MATLAB 直接求解	301
A.1	Laplace 变换及其反变换	301
A.2	Z 变换及其反变换	302
A.3	Laplace 变换和 Z 变换的计算机求解	303
A.4	本附录要点小结	306
A.5	习 题	306
附录 B	反馈系统分析与设计程序 CtrlLAB 简介	307
B.1	CtrlLAB 的安装与运行	308
B.2	控制系统模型的输入与处理	308
B.3	反馈控制系统的分析	309
B.4	反馈控制系统计算机辅助设计	310
B.5	本附录要点小结	311
B.6	习 题	311
参考文献	313

第 1 章 控制系统仿真与计算机辅助设计概述

1.1 控制理论和控制系统概述

1.1.1 自动控制理论的历史回顾

自动化科学作为一门学科起源于 20 世纪初, 自动化科学与技术的基础理论来自于物理学等自然科学和数学、系统科学、社会科学等基础科学^[1]。自动控制理论在现代科学技术的发展中有着重要的地位, 起着重要的作用。在第 40 届 IEEE 决策与控制年会的全会开篇报告中, 美国学者 John Doyle 教授引用了国际著名学者, 哈佛大学的何毓琦 (Larry Yu-Chi Ho) 教授的新观点: “控制将是 21 世纪的物理学 (Control will be the physics of the 21st century)。”^[2]

自动控制系统的早期应用可以追溯到两千多年前古埃及的水钟控制^[3]与中国汉代的指南车控制^[4], 但当时未建立起自动控制的理论体系。1769 年, 英国科学家 James Watt 设计的内燃机引发了现代工业革命, 1788 年 Watt 为内燃机设计的飞锤调速器可以认为是最早的反馈控制系统的工程应用。由于当时应用的调速器会出现振荡现象, 所以后来出现了 Maxwell 对微分方程系统稳定性的理论研究 (1868 年), 他指出线性系统稳定的条件是其特征根均有负实部^[5], Routh (1874 年)^[6]和 Hurwitz (1895 年)^[7]等人提出了间接的稳定性判据, 使得高阶系统稳定性判定成为可能。控制器的设计问题是由 Minorsky 在 1922 年开始研究的^[8], 其研究成果可以看成是现在广泛应用的 PID 控制器的前身, 而 1942 年, Ziegler 与 Nichols 提出了调节 PID 控制器参数的经验公式方法^[9], 此方法对当今的 PID 控制器整定仍有影响。

系统的频域分析技术是在 Nyquist (1932 年)^[10]、Bode (1945 年)^[11]、Nichols (1946 年)^[12]等进行的早期关于通信学科的频域研究工作的基础上建立起来的, Harris 于 1942 年提出的传递函数概念将通信学科的频域技术移植到了控制领域, 构成了控制系统频域法理论研究的基础。Evans 在 1946 年提出的线性反馈系统的根轨迹分析技术^[13]是那个时代的另一个里程碑, 在这些成果的基础上诞生了第一代控制理论——经典控制理论。

前苏联学者 Pontryagin 于 1956 年提出的极大值原理^[14]、美国学者 Bellman 的动态规划 (1957 年)^[15]和美国学者 Kalman 的状态空间分析技术 (1960 年)^[16]开创了控制理论研究的新时代, 这三个代表性成果构成了第二代控制理论——即当时所谓的“现代控制理论”的理论基础。在那个时期以后, 控制理论研究中出现了线性二次型最优调节器^[17]、极点配置状态反馈、最优状态观测器^[18]及线性二次型 Gauss (Linear Quadratic Gaussian, LQG) 问题的研究, 并在后来出现了引入回路传输恢复技术的 LQG 控制器。

鲁棒控制是控制系统设计中的另一个令人瞩目的领域。1981 年, 美国学者 Zames 提出了基于 Hardy 空间范数最小化方法的鲁棒最优控制理论^[19], 而 1992 年美国学者 Doyle 等人提出的最优控制的状态空间数值解法在这个领域有着重要的贡献^[20], 多变

量鲁棒控制理论又被称为“第三代控制理论”^[1]。

当代的控制理论发展仍然很迅速，出现了众多新的分支，如自适应控制与模型预测控制、最优控制理论、非线性控制理论、网络控制理论、智能控制理论(如专家系统、神经网络控制、模糊逻辑控制、学习控制)等。这些领域的研究还远未结束，控制理论正在迅猛、蓬勃地发展^[21]。

1.1.2 控制系统分类

系统是由客观世界中实体与实体间的相互作用和相互依赖关系构成的具有某种特定功能的有机整体。系统的分类方法是多种多样的，习惯上依照其应用范围可以将系统分为工程系统和非工程系统。工程系统的含意是指由相互关联部件组成的一个整体，可实现特定的目标，例如，电力拖动自动控制系统是由执行部件、功率转换部件、检测部件所组成，用它来完成对电机的转速、位置和其他参数的某个特定目标的控制。非工程系统涵盖的范围更加广泛，大至宇宙，小至微观世界都存在着相互关联、相互制约的关系。形成的可以实现某种目的一个整体，均可以认为是系统。

如果想定量地研究系统的行为，可以将其本身的特性及内部的相互关系抽象出来，构造出系统的模型。系统的模型分为物理模型和数学模型。系统的数学模型是描述系统动态特性的数学表达式，用来表示系统运动过程中各个量的关系，是分析、设计系统的依据。从它所描述系统的运动性质和数学工具来分，又可以分为连续系统、离散时间系统、离散事件系统、混杂系统；从是否满足叠加原理上又可以细分为线性和非线性系统；从系统参数是否显式地依赖时间变化而变化可以分为定常系统与时变系统，从系统输入和输出情况可以分为单变量系统与多变量系统等；另外还可以依据其数学模型的性质分为集中参数系统、分布参数系统、确定性系统与随机系统等。

由于计算机技术的迅速发展和广泛应用，数学模型的应用越来越普遍。在实际控制工程中，获得系统模型主要有两种途径，其一是根据已知工程的物理定律和数学推导获得系统的数学模型，这样的方法称为物理建模方法，另一种途径是由实验数据拟合数学模型的方法，这类方法称为系统的模型辨识。

不同的系统模型需要不同的数学分支和求解工具来研究。例如，连续系统需要用常微分方程理论来研究，离散系统需要用差分方程理论来研究，分布参数系统需要用偏微分方程理论来研究，线性系统需要采用线性代数理论去研究，为了使整个系统的性能达到最好，则需要掌握最优化理论与技术。

解决控制系统的实际控制也可能需要各方面的知识，如自动控制原理与现代控制理论、电力电子系统、电机及拖动系统以及机械原理等内容，所以控制理论和控制系统的研究是一门综合的科学。

1.2 系统仿真与仿真语言工具概述

1.2.1 系统仿真与控制系统仿真

计算机仿真是指以计算机为主要工具，运行真实系统或预研系统的仿真模型。计算

机仿真通过对计算机输出信息的分析与研究,实现对实际系统运行状态和演化规律的综合评估与预测。它是分析评价现有系统运行状态或设计优化未来系统性能与功能的一种技术手段,在工程设计、航空航天、交通运输、经济管理、生态环境、通信网络和计算机集成等领域中有着广泛的应用。计算机仿真的基本内容包括系统建模、仿真算法、计算机程序设计与仿真结果显示、分析与验证等环节。

动态系统计算机仿真是一门以系统科学、计算机科学、系统工程理论、随机网络理论、随机过程理论、概率论、数理统计和时间序列分析等多个学科理论为基础的,以工程系统和各类社会经济系统为主要处理对象的,以数学模型和数字计算机为主要研究工具的新兴的边缘学科,它属于技术科学的范畴。

动态系统计算机仿真的目的是通过对动态系统仿真模型运行过程的观察和统计,获得系统仿真输出和掌握模型基本特性,推断被仿真对象的真实参数(或设计最佳参数),以期获得对仿真对象实际性能的评估或预测,进而实现对真实系统设计与结构的改善或优化^[22]。

随着计算机仿真实理论与技术的发展,目前各个科学与工程领域均已开展了仿真技术的研究。系统仿真技术已经被公认为是一种新的实验手段,在科学与工程领域发挥着越来越重要的作用。

顾名思义,“控制系统仿真”就是利用计算机研究控制系统性能的一门学问,它依赖于现行《自动控制原理》课程的基础知识,但侧重点不同。控制系统计算机仿真更侧重于控制理论问题的计算机求解,可以解决以往控制原理不能解决的问题。例如,以往非线性系统的研究在控制原理课程中采用描述函数^[23]这样的近似方法来研究,这是因为历史局限性所致,有了计算机仿真工具就能轻而易举地对复杂非线性系统进行精确的建模与仿真,且得出的结果更加直观、可信。再例如,以往系统稳定性分析中由于没有办法直接解决高阶系统的特征值求解问题,故出现了各种各样的间接方法,如连续系统的 Routh 判据与离散系统的 Jury 判据^[24]等,其实有了现代的计算工具,用一个指令就可以得出线性系统的全部特征根,根据它们的位置立即就能判定出系统的稳定性,且能得到比传统间接方法多得多的信息。

MATLAB/Simulink 及其工具箱已经成为国际控制界公认的首选计算机语言^[21]。本书以 MATLAB/Simulink 作为解决控制系统仿真与设计的主要语言,介绍控制系统模型表示与变换、控制系统定性分析(如稳定性、可控可观测性等性质)、系统的时域分析、复域分析与频域分析等内容,从各个角度对控制系统进行全面分析,并基于分析结果给系统设计控制器,改善闭环系统的性能。本书的内容不是“自动控制原理”课程的简单重复,而是利用一个强大的计算机语言从另一个全新的角度全面研究控制问题,使读者能更好地掌握控制系统仿真与设计的基本问题,并进一步扩展思路,用该工具直观地解决电子线路仿真、电机及拖动系统仿真、机电一体化系统仿真问题等,为控制理论与实践搭建起一种有益的桥梁。

1.2.2 常规计算机语言的局限性

人们有时习惯用其他计算机语言，如 C 和 Fortran，去解决实际问题。毋庸置疑，这些计算机语言在数学与工程问题求解中起过很大的作用，而且它们曾经是实现 MATLAB 这类高级语言的底层计算机语言。然而，对于一般科学研究者来说，利用 C 这类语言去求解数学问题是远远不够的。首先，一般程序设计者无法编写出符号运算和公式推导类程序，只能编写数值计算程序；其次，常规数值算法往往不是求解数学问题的最好方法；另外，除了上述的局限性外，采用底层计算机语言编程，由于程序冗长难以验证，即使得出结果也不敢相信与依赖该结果。所以应该采用更可靠、更简洁的专门计算机数学语言来进行科学研究，因为这样可以将研究者从烦琐的底层编程中解放出来，更好地把握要求解的问题，避免“只见树木、不见森林”的现象，这无疑是受到更多研究者认可的方式。本节将给出两个简单例子演示 C 语言的局限性。

例 1-1 已知 Fibonacci 数列的前两个元素为 $a_1 = a_2 = 1$ ，随后的元素可以由 $a_k = a_{k-1} + a_{k-2}$ ， $k = 3, 4, \dots$ 递推地计算出来。试用计算机列出该数列的前 100 项。

C 语言在编写程序之前需要首先给变量选择数据类型，如此问题需要的是整数，所以很自然地选择 int 或 long 来表示数列的元素，若选择数据类型为 int，则可以编写出如下 C 程序

```
main()
{ int a1, a2, a3, i;
  a1=1; a2=1; printf("%d %d ", a1, a2);
  for (i=3; i<=100; i++)
  { a3=a1+a2; printf("%d ", a3); a1=a2; a2=a3;
  }
}
```

只用了上面几条语句，问题就看似轻易地被解决了。然而该程序是错误的！运行该程序会发现，该数列显示到第 24 项突然会出现负数，而再显示下几项会发现时正时负。显然，上面的程序出了问题。问题出在 int 整型变量的选择上，因为该数据类型能表示数值的范围为 $(-32767, 32767)$ ，超出此范围则会导致错误的结果。即使采用 long 整型数据定义，也只能保留 31 位二进制数值，即保留 9 位十进制有效数字，超过这个数仍然返回负值。可见，采用 C 语言，如果某些细节考虑不到，则可能得出完全错误的结论。故可以说 C 这类语言得出的结果有时不大令人信服。用 MATLAB 语言则不必考虑这些烦琐的问题。

```
>> a=[1 1]; for i=3:100, a(i)=a(i-1)+a(i-2); end; a
```

另外，由于 long 整型数据只能保持 9 位有效数字，而 double 型只能保留 15 位有效数字，如果得出的结果超出此范围，则精度将存在局限性。采用 MATLAB 的符号运算则可以避免这类问题，只需将第一个语句修改成 $a = \text{sym}([1, 1])$ 就可以得出 a_{100} 的值为 354224848179261915075，这个结果是采用任何数值运算无法得出的。

例 1-2 试编写出两个矩阵 A 和 B 相乘的 C 语言通用程序。

如果 A 为 $n \times p$ 矩阵， B 为 $p \times m$ 矩阵，则由线性代数理论，可以得出 C 矩阵，其元素为 $c_{ij} = \sum_{k=1}^p a_{ik} b_{kj}$ ， $i = 1, \dots, n$ ， $j = 1, \dots, m$ 。分析上面的算法，容易编写出 C 语言程序，其

核心部分为三重循环结构：