



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



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Modern Control Theory

现代控制理论

谢克明 主编

Xie Keming

李国勇 副主编

Li Guoyong

郑大钟 主审

Zheng Dazhong



清华大学出版社



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



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Modern Control Theory

现代控制理论

太原理工大学 谢克明 主编 李国勇 副主编
Xie Keming Li Guoyong

清华大学 郑大钟 主审
Zheng Dazhong

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书对现代控制理论进行了较全面的论述。全书共分 8 章。主要内容为现代控制理论的产生及其发展；按照建模→求解→分析稳定性→综合的思路，论述了线性系统的状态空间描述、状态空间表达式的建立和求解方法、线性系统的能控性和能观测性及其对偶关系、李雅普诺夫稳定性理论分析、线性反馈控制系统的极点配置及状态观测器的设计；最优控制的基本概念和极大值原理以及线性二次型最优控制；线性系统状态估计的基本概念和最小二乘估计、线性最小方差估计以及卡尔曼滤波器原理；利用 MATLAB 进行线性系统的理论分析、综合和应用设计。

本书可作为理工科高等学校自动化专业本科生、非自动化专业研究生的教材，也可供从事相关专业的科技人员参考。

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 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论/谢克明主编. —北京：清华大学出版社，2007. 4

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-14577-6

I. 现… II. 谢… III. 现代控制理论—高等学校—教材 IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 010546 号

责任编辑：王 玲

责任校对：李建庄

责任印制：孟凡玉

出版发行：清华大学出版社 地 址：北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编：100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机：010-62770175 邮购热线：010-62786544

投稿咨询：010-62772015 客户服务：010-62776969

印 装 者：清华大学印刷厂

经 销：全国新华书店

开 本：175×245 印 张：25.5 字 数：521 千字

版 次：2007 年 4 月第 1 版 印 次：2007 年 4 月第 1 次印刷

印 数：1~3000

定 价：35.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题，请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话：(010)62770177 转 3103 产品编号：017420-01

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、论述系统并适用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的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

《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)

田作华(上海交通大学)

韩九强(西安交通大学)

陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

郑大钟(清华大学)

赵光宙(浙江大学)

陈兴林(哈尔滨工业大学)

责任编辑: 王一玲(清华大学出版社)

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



本书是按照《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会的建设计划,由“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”牵头招标,评审后中标的,为教学研究型和教学主导型高等学校自动化专业本科生、非自动化专业研究生编写的一部教材,是自动化专业创新型系列教材之一。

本教材共 8 章。绪论着重介绍了控制理论的产生及其发展背景、现代控制理论的基本内容和本教材的结构体系。第 1 章较详细地阐述了线性系统的状态空间描述、建立状态空间表达式常用的几种方法。第 2 章讨论了线性连续系统和离散时间系统状态空间表达式的求解方法,以及线性连续时间系统的离散化。第 3 章着重讲述了线性系统的能控性和能观测性及其对偶关系、系统的能控标准型和能观测标准型以及线性系统的结构分解和实现。第 4 章论述了控制系统稳定性的基本概念、系统的李雅普诺夫稳定性理论分析。第 5 章讲述了线性反馈控制系统的基本结构、系统的极点配置以及状态观测器的设计。第 6 章对最优控制的基本概念和基本理论进行了论述,讨论了最优控制中的变分法、极大值原理以及线性二次型最优控制问题。第 7 章简要介绍了线性系统状态估计的基本概念和基本方法,包括最小二乘估计、线性最小方差估计以及卡尔曼滤波器。为了培养学生现代化的分析与设计能力,在每一章都安排了一节利用 MATLAB 进行线性系统的理论分析、综合和应用设计。

本书由谢克明任主编,并编写绪论、第 1 章和第 2 章;李国勇任副主编,并编写第 3 章和第 6 章;谢刚编写第 4 章;杜永贵编写第 5 章;王焱编写第 7 章。全书由谢克明整理定稿。清华大学郑大钟教授主审了全书,提出了许多宝贵的意见和建议,在此深表谢意。此外,还要感谢清华大学出版社王一玲女士,感谢她为本书的编辑和出版所做的辛勤工作。

由于作者水平有限,书中难免有遗漏与不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2007 年 1 月



第 0 章 绪论	1
0.1 控制理论的产生及其发展	1
0.2 现代控制理论的基本内容	4
0.3 本书的内容和特点	7
0.4 学习建议	8
第 1 章 控制系统的状态空间描述	10
1.1 状态及状态空间表达式	10
1.1.1 控制系统中状态的基本概念	10
1.1.2 状态空间表达式及一般形式	11
1.1.3 状态空间表达式的系统结构图与模拟结构图	17
1.2 根据系统的物理机理建立状态空间表达式	19
1.3 由系统的微分方程式建立状态空间表达式	22
1.3.1 微分方程式中不含输入函数导数项	22
1.3.2 微分方程式中含输入函数导数项	24
1.4 由系统方框图建立状态空间表达式	26
1.5 由系统的传递函数建立状态空间表达式	29
1.5.1 标准型法	30
1.5.2 串联法	31
1.5.3 并联法	33
1.6 系统的状态空间表达式与传递函数阵	38
1.6.1 由系统的状态空间表达式求传递函数阵	38
1.6.2 组合系统的状态空间表达式及传递函数阵	39
1.7 系统状态向量的线性变换	41
1.7.1 线性变换	42
1.7.2 化状态方程式为对角线标准型	45
1.7.3 化状态方程式为约当标准型	48
1.8 离散时间系统的状态空间描述	53
1.8.1 离散时间系统的状态空间表达式	53
1.8.2 差分方程化为状态空间表达式	54

1.8.3	脉冲传递函数化为状态空间表达式	57
1.8.4	由状态空间表达式求脉冲传递函数阵	61
1.9	基于 MATLAB 的控制系统状态空间描述	61
1.9.1	利用 MATLAB 描述系统模型	62
1.9.2	利用 MATLAB 实现状态空间表达式与传递函数阵的 相互转换	64
1.9.3	利用 MATLAB 实现系统的线性变换	66
1.9.4	利用 MATLAB 实现系统模型的连接	69
小结	71
习题	72
第 2 章	线性控制系统状态空间表达式的求解	76
2.1	线性定常连续系统齐次状态方程的解	76
2.2	线性定常连续系统的状态转移矩阵	77
2.2.1	状态转移矩阵及其性质	77
2.2.2	矩阵指数函数的计算	84
2.3	线性定常连续系统非齐次状态方程的求解	90
2.4	线性时变连续系统状态方程式的求解	92
2.4.1	齐次状态方程式的解	92
2.4.2	线性时变系统状态转移矩阵	97
2.4.3	线性时变系统非齐次状态方程式的解	98
2.5	线性离散时间系统状态方程式的求解	101
2.5.1	迭代法	101
2.5.2	z 变换法	102
2.5.3	离散系统状态转移矩阵的求解	102
2.6	线性连续时间系统的离散化	106
2.6.1	线性定常系统状态方程式的离散化	107
2.6.2	线性时变系统状态方程式的离散化	108
2.6.3	近似离散化	109
2.7	利用 MATLAB 求解系统状态空间表达式	113
2.7.1	连续时间系统状态方程式的解	113
2.7.2	离散时间系统状态方程式的解	114
2.7.3	线性系统状态方程式的离散化	114
小结	117
习题	118

第 3 章 线性控制系统的能控性和能观测性	121
3.1 系统的能控性	121
3.1.1 线性时变连续系统的能控性	121
3.1.2 线性定常连续系统的能控性	125
3.1.3 线性离散时间系统的能控性	130
3.2 系统的能观测性	132
3.2.1 线性时变连续系统的能观测性	132
3.2.2 线性定常连续系统的能观测性	134
3.2.3 线性离散时间系统的能观测性	137
3.3 能控性和能观测性的对偶关系	138
3.3.1 线性系统的对偶原理	139
3.3.2 能控性和能观测性的对偶关系	140
3.4 单输入单输出系统的能控标准型和能观测标准型	140
3.4.1 能控标准型	141
3.4.2 能观测标准型	144
3.5 系统的结构分解	146
3.5.1 系统按能控性分解	146
3.5.2 系统按能观测性分解	149
3.5.3 系统按能控性和能观测性分解	151
3.6 系统的实现	157
3.6.1 实现问题的基本概念	157
3.6.2 单输入单输出系统的标准型实现	158
* 3.6.3 多输入多输出系统的标准型实现	159
3.6.4 最小实现	161
3.6.5 系统的约当标准型实现	165
3.7 传递函数阵与能控性和能观测性之间的关系	166
3.7.1 单输入单输出系统	167
3.7.2 多输入多输出系统	169
3.8 利用 MATLAB 分析系统的能控性和能观测性	170
3.8.1 系统的能控性和能观测性分析	170
3.8.2 线性系统的能控标准型和能观测标准型	173
3.8.3 将系统按能控和不能控进行分解	174
3.8.4 将系统按能观测和不能观测进行分解	175
小结	176
习题	178

第 4 章 控制系统的稳定性	183
4.1 系统稳定的基本概念	183
4.1.1 外部稳定性和内部稳定性	183
4.1.2 李雅普诺夫稳定性	188
4.2 李雅普诺夫稳定性理论	192
4.2.1 李雅普诺夫第一法	192
4.2.2 李雅普诺夫第二法	195
4.3 线性系统的李雅普诺夫稳定性分析	204
4.3.1 李雅普诺夫第二法在线性连续系统中的应用	204
4.3.2 李雅普诺夫第二法在线性离散系统中的应用	210
4.4 非线性系统的李雅普诺夫稳定性分析	213
4.4.1 克拉索夫斯基法	213
4.4.2 变量-梯度法	217
4.4.3 阿捷尔曼法	220
4.5 利用 MATLAB 分析系统的稳定性	224
4.5.1 利用特征值判断系统的稳定性	224
4.5.2 利用李雅普诺夫第二法判断系统的稳定性	225
小结	227
习题	229
第 5 章 状态反馈和状态观测器	232
5.1 线性反馈控制系统的基本结构	232
5.1.1 状态反馈	232
5.1.2 输出反馈	233
5.1.3 从输出到状态向量导数 \dot{x} 反馈	235
5.1.4 闭环系统的能控性和能观测性	236
5.2 系统的极点配置	237
5.2.1 采用状态反馈实现极点配置	238
5.2.2 采用从输出到输入端反馈实现极点配置	242
5.2.3 采用从输出到状态向量导数 \dot{x} 反馈实现极点配置	243
* 5.2.4 多输入多输出系统的极点配置	244
5.2.5 镇定问题	246
* 5.3 解耦控制	249
5.3.1 串联解耦	251
5.3.2 反馈解耦	252

5.4	状态观测器的设计	259
5.4.1	状态重构问题	259
5.4.2	全维观测器的设计	261
5.4.3	降维观测器的设计	264
5.5	带状态观测器的闭环控制系统	268
5.5.1	闭环控制系统的结构和状态空间表达式	269
5.5.2	带状态观测器的闭环控制系统的基本特征	270
5.6	利用 MATLAB 实现系统的状态反馈和状态观测器	273
5.6.1	系统的极点配置	273
5.6.2	状态观测器的设计	274
5.6.3	带状态观测器的系统极点配置	278
	小结	279
	习题	281
第 6 章	最优控制	284
6.1	最优控制的基本概念	284
6.1.1	最优控制问题	284
6.1.2	最优控制的提法	287
6.2	最优控制中的变分法	289
6.2.1	变分法	289
6.2.2	应用变分法求解最优控制问题	299
6.3	极大值原理	309
6.3.1	连续系统的极大值原理	309
6.3.2	离散系统的极大值原理	312
6.4	线性二次型最优控制问题	315
6.4.1	线性二次型问题	315
6.4.2	状态调节器	316
6.4.3	输出调节器	323
6.4.4	输出跟踪器	326
6.5	利用 MATLAB 求解线性二次型最优控制问题	330
	小结	335
	习题	336
第 7 章	线性系统的状态估计	339
7.1	概述	339
7.1.1	估计问题	339

7.1.2	估计的准则	340
7.1.3	状态估计与系统辨识	340
7.2	最小二乘估计	341
7.2.1	最小二乘法的基本概念	341
7.2.2	最小二乘状态估计	343
7.2.3	线性离散系统的最小二乘估计	345
7.2.4	线性离散系统的最小二乘递推估计	349
7.3	线性最小方差估计	350
7.3.1	线性最小方差状态估计	350
7.3.2	线性离散系统的最小方差估计	352
7.3.3	数学期望和方差的递推计算	355
7.4	卡尔曼滤波器	356
7.4.1	线性离散系统的卡尔曼滤波方程	356
7.4.2	滤波器的稳定性与发散性问题	358
7.5	利用 MATLAB 求解状态估计问题	361
	小结	366
	习题	368
	习题参考答案	370
	参考文献	384



0.1 控制理论的产生及其发展

控制理论研究的是如何按照被控对象和环境的特性,通过能动地采集和运用信息施加控制作用而使系统在变化或不确定的条件下保持预定的功能。控制理论是在人类的实践活动中发展起来的,它不但要认识事物运动的规律而且要用之于改造客观世界。

历史告诉我们,人类发明具有“自动”功能的装置,可以追溯到公元前14—11世纪在中国、埃及和巴比伦出现的自动计时漏壶。公元前4世纪,希腊柏拉图(Platon)首先使用了“控制论”一词。公元235年,我国发明了按开环控制的自动指示方向的指南车。公元1086年左右,我国苏颂等人发明了按闭环控制工作的具有“天衡”自动调节机构和报时机构的水运仪象台。比较自觉运用反馈原理设计出来并得到成功应用的是英国瓦特(J. Watt)于1788年发明的蒸汽机用的离心式飞锤调速器。后来,英国学者麦克斯韦(J. C. Maxwell)于1868年发表了“论调速器”一文,对它的稳定性进行了分析,指出控制系统的品质可用微分方程来描述,系统的稳定性可用特征方程根的位置和形式来研究。该文当属最早的控制理论工作。1875年劳斯(E. J. Routh)和1895年赫尔维茨(A. Hurwitz)先后提出了根据代数方程系数判别系统稳定性的准则。1892年李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)在其博士论文《论运动稳定性的一般问题》中提出的一种能量函数的正定性及其导数的负定性判别系统稳定性的准则,建立了从概念到方法的关于稳定性理论的完整体系。1948年美国著名科学家维纳(N. Wiener)出版了专著《控制论——关于在动物和机器中控制和通信的科学》,系统地论述了控制理论的一般原理和方法,推广了反馈的概念,为控制理论作为一门独立学科的发展奠定了基础。

控制理论和社会生产及科学技术的发展密切相关,在近代得到极为迅速的发展。它不仅已经成功地运用并渗透到工农业生产、科学技术、