



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

辽宁省精品教材

Modern Control Theory (Second Edition)

现代控制理论 (第2版)

张嗣瀛 高立群 编著

Zhang Siying Gao Liqun



清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



全国高等院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

Modern Control Theory (Second Edition)

现代控制理论 (第2版)



张嗣瀛 高立群 编著

Zhang Siying Gao Liqun

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要介绍现代控制理论的基础知识,内容包括系统的状态方程建立及解法,系统的能控性、能观测性和稳定性等定性理论,极点配置、反馈解耦、观测器设计等综合理论,以及最优控制理论和状态估计理论;同时,适当地介绍了鲁棒控制、时滞系统反馈控制等比较前沿的知识以开阔学生视野;特别是将 MATLAB 语言的知识穿插到内容中,有利于培养学生利用计算机解决实际问题的能力。

本书是高等学校自动化专业本科生教材,同时也适合一般工程技术人员自学所用。

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

现代控制理论/张嗣瀛,高立群编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2017

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-45035-1

I. ①现… II. ①张… ②高… III. ①现代控制理论—高等学校—教材 IV. ①O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 218498 号

责任编辑:王一玲

封面设计:傅瑞学

责任校对:时翠兰

责任印制:宋 林

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:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:24 字 数:477 千字

版 次:2006 年 9 月第 1 版 2017 年 2 月第 2 版 印 次:2017 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:49.00 元

产品编号:068074-01

《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,组织编写出版了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、实验指导书、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、论述系统和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年起陆续面世。全套系列教材共五十多本,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、课程实验指导书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教育,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了深入的研究,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,介入的学校五十多所,参与的教授一百二十多人,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 2006 年 9 月出版以来已印刷了 12 次,并作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材被许多所院校采用为自动化及相关专业现代控制理论课程的教材。读者普遍反映本书内容全面、体系清楚、严谨易懂,不仅适合课堂教学,也适合自学。本书受到广大读者的关爱和支持,被评为辽宁省精品教材。根据读者对本书的反馈意见,我们在第 1 版的基础上做了一定程度的修改和补充,以第 2 版的形式出版。

清华大学出版社王一玲及东北大学相关同事对于本书的再版提供了不可缺少的鼓励和帮助,在此深表谢意。

编著者

2016 年 10 月



本书的前身是由原冶金部组织、张嗣瀛院士主编,由冶金部部属院校自动化专业教师共同编写的规划教材,该教材总结了多所高校教师多年的教学经验。本书是编者结合自己长期从事现代控制理论教学的经验,参阅并吸取了国内外优秀教材的内容,进一步修订、完善原有教材而完成。书中将 MATLAB 软件引入课堂教学,有利于培养学生利用计算机进行科学研究及解决实际问题的能力。书中还适当地介绍了有关鲁棒控制的知识,可以帮助学生扩大视野,接触到较新的知识和技术,为今后从事先进理论和技术的研究开发提供支持。

在内容上,本书主要讲述状态空间法的基本概念和基本方法,其中包括系统的状态方程建立及解法,能控性、能观测性和稳定性等定性理论,极点配置、反馈解耦、观测器设计等综合理论,以及最优控制理论和状态估计理论。

在结构上,本书如下安排:首先给出控制系统的数学描述,提出状态变量和状态方程概念;然后对系统进行运动分析和基本性质(能控性、能观测性和稳定性)分析;进而给出系统的综合与设计方法;最后介绍了系统状态的最优估计(卡尔曼滤波)。

东北大学高立群教授编写了第 1、5、6、8 章和附录,井元伟教授编写了第 4、7 章,郑艳副教授编写了第 2、3 章。张嗣瀛院士进行了总体构思和总纂。

鉴于本书是在原冶金部统一教材基础上进一步完成的,这里向原教材的编者朱祖兹、董木森、王景才、王贞祥表示谢意。同时也向支持和参与编写工作的所有老师和同学们表示谢意。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不当之处,敬请各界同仁和广大读者给予批评指正,编者将不胜感激。

编 者

2006 年 1 月

第 1 章 绪论	1
1.1 控制理论的发展历程简介	1
1.2 现代控制理论的主要内容	2
1.3 本书的内容和特点	3
第 2 章 控制系统的状态空间描述	5
2.1 基本概念	6
2.1.1 几个定义	6
2.1.2 状态空间表达式的一般形式	7
2.1.3 状态空间表达式的系统方框图	13
2.1.4 状态空间表达式的状态变量图	13
2.2 传递函数与传递函数矩阵	15
2.2.1 单输入单输出系统	15
2.2.2 多输入多输出系统	17
2.3 状态空间表达式的建立	18
2.3.1 由物理系统的机理直接建立状态空间表达式	18
2.3.2 由高阶微分方程化为状态空间描述	20
2.3.3 由传递函数建立状态空间表达式	28
2.4 组合系统的状态空间表达式	35
2.4.1 并联联结	35
2.4.2 串联联结	37
2.4.3 反馈联结	39
2.5 线性变换	41
2.5.1 系统状态的线性变换	42
2.5.2 把状态方程变换为对角标准形	44
2.5.3 把状态方程化为若尔当标准形	48
2.5.4 系统经状态变换后特征值及传递函数矩阵的 不变性	51
2.6 离散时间系统的状态空间表达式	52
2.7 用 MATLAB 分析状态空间模型	56

小结	59
习题	60
第3章 状态方程的解	64
3.1 线性定常系统齐次状态方程的解	64
3.2 矩阵指数	65
3.2.1 矩阵指数的性质	66
3.2.2 几个特殊的矩阵指数	67
3.2.3 矩阵指数的计算	70
3.3 线性定常连续系统非齐次状态方程的解	79
3.4 线性定常系统的状态转移矩阵	80
3.4.1 基本概念	81
3.4.2 线性定常系统的状态转移矩阵	82
3.4.3 状态转移矩阵的性质	84
3.5 线性时变系统状态方程的解	84
3.5.1 线性时变系统齐次状态方程的解	84
3.5.2 线性时变系统的状态转移矩阵	88
3.5.3 线性时变系统非齐次状态方程的解	89
3.6 线性连续系统的时间离散化	91
3.6.1 近似离散化	92
3.6.2 线性连续系统状态方程的离散化	93
3.7 离散时间系统状态方程的解	95
3.7.1 递推法求解线性离散系统的状态方程	96
3.7.2 z 变换法	97
3.8 利用 MATLAB 求解系统的状态方程	99
小结	102
习题	102
第4章 线性系统的能控性与能观测性	106
4.1 定常离散系统的能控性	107
4.1.1 定常离散系统的能控性定义	107
4.1.2 单输入离散系统能控性的判定条件	107
4.1.3 多输入离散系统能控性的判定条件	110
4.2 定常连续系统的能控性	111
4.2.1 线性定常连续系统的能控性定义	111
4.2.2 线性定常连续系统的能控性判据	111

4.2.3	线性定常连续系统的输出能控性	116
4.2.4	利用 MATLAB 判定系统能控性	117
4.3	定常系统的能观测性	118
4.3.1	定常离散系统的能观测性	119
4.3.2	定常连续系统的能观测性	121
4.3.3	利用 MATLAB 判定系统能观测性	124
4.4	线性时变系统的能控性及能观测性	125
4.4.1	线性时变系统的能控性判据	125
4.4.2	线性时变系统的能观测性判据	127
4.5	能控性与能观测性的对偶关系	129
4.6	线性定常系统的结构分解	131
4.6.1	系统的能控性分解	131
4.6.2	系统的能观测性分解	134
4.6.3	系统按能控性与能观测性进行标准分解	136
4.7	能控性、能观测性与传递函数矩阵的关系	137
4.7.1	单输入单输出系统	137
4.7.2	多输入多输出系统	141
4.8	能控标准形和能观测标准形	141
4.8.1	系统的能控标准形	142
4.8.2	系统的能观测标准形	145
4.9	系统的实现	147
4.9.1	单输入单输出系统的实现问题	148
4.9.2	多输入多输出系统的实现问题	151
4.9.3	传递函数矩阵的最小实现	151
小结		155
习题		155
第 5 章	控制系统的李雅普诺夫稳定性分析	161
5.1	稳定性的基本概念	161
5.2	李雅普诺夫稳定性理论	165
5.2.1	李雅普诺夫第一方法	166
5.2.2	李雅普诺夫第二方法	167
5.2.3	几点说明	171
5.3	李雅普诺夫方法在线性系统中的应用	171
5.3.1	用李雅普诺夫方法判断线性系统的稳定性	171
5.3.2	用李雅普诺夫函数求解参数最优化问题	174

5.3.3	用李雅普诺夫函数估计线性系统动态响应的快速性	176
5.3.4	利用 MATLAB 进行稳定性分析	178
5.4	李雅普诺夫方法在非线性系统中的应用	181
5.4.1	克拉索夫斯基方法	182
5.4.2	变量-梯度法	184
小结		187
习题		187
第 6 章	状态反馈和状态观测器	190
6.1	状态反馈的定义及其性质	190
6.2	极点配置	194
6.2.1	极点配置定理	194
6.2.2	单输入系统极点配置的算法	196
6.2.3	讨论	199
6.2.4	多输入系统的极点配置	200
6.2.5	利用 MATLAB 实现极点配置	204
6.3	应用状态反馈实现解耦控制	207
6.3.1	问题的提出	207
6.3.2	实现解耦控制的条件和主要结论	209
6.3.3	算法和推论	212
6.3.4	利用 MATLAB 实现解耦控制	214
6.4	状态观测器	218
6.4.1	状态观测器的存在条件	218
6.4.2	全维状态观测器	219
6.4.3	降维状态观测器	223
6.4.4	利用 MATLAB 设计状态观测器	227
6.5	带状态观测器的反馈系统	230
6.6	线性不确定系统的鲁棒控制	235
6.6.1	问题的提出及不确定性的描述	235
6.6.2	利用 MATLAB 设计状态反馈控制律	237
6.6.3	时滞系统状态反馈镇定	243
6.6.4	H_∞ 控制简介	246
小结		252
习题		252
第 7 章	最优控制	256
7.1	最优控制问题	256

7.1.1	两个例子	256
7.1.2	问题描述	257
7.2	求解最优控制的变分方法	259
7.2.1	泛函与变分法基础	259
7.2.2	欧拉方程	261
7.2.3	横截条件	262
7.2.4	含有多个未知函数泛函的极值	264
7.2.5	条件极值	264
7.2.6	最优控制问题的变分解法	266
7.3	最大值原理	275
7.3.1	古典变分法的局限性	276
7.3.2	最大值原理	276
7.3.3	古典变分法与最小值原理	283
7.4	动态规划	284
7.4.1	多级决策过程与最优性原理	284
7.4.2	离散系统的动态规划	287
7.4.3	连续系统的动态规划	288
7.4.4	动态规划与最大值原理的关系	291
7.5	线性二次型性能指标的最优控制	292
7.5.1	问题提出	292
7.5.2	状态调节器	293
7.5.3	输出调节器	301
7.5.4	跟踪问题	302
7.5.5	利用 MATLAB 求解最优控制	306
7.6	快速控制系统	307
7.6.1	快速控制问题	307
7.6.2	综合问题	310
小结		313
习题		313
第 8 章	状态估计	316
8.1	随机系统的描述	316
8.1.1	状态空间模型	317
8.1.2	差分方程模型	317
8.2	最小方差估计	318
8.3	线性最小方差估计	320

8.4 最小二乘估计	323
8.5 投影定理	324
8.6 卡尔曼滤波	326
8.6.1 无控制项的线性动态系统的滤波	326
8.6.2 一般线性动态系统的滤波	329
8.6.3 带有有色噪声的线性动态系统的滤波	332
8.7 利用 MATLAB 实现状态估计	332
小结	335
习题	336
参考文献	340
附录A MATLAB 软件包简介	341
A.1 MATLAB 介绍	341
A.2 MATLAB 工作环境	341
A.3 MATLAB 语言的程序设计	344
A.4 利用 MATLAB 语言解决初等数学问题	351
A.5 利用 MATLAB 语言解决高等数学问题	352
A.6 MATLAB 语言在线性代数中的应用	353
A.7 MATLAB 语言在控制工程中的应用	357