



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

Exercises for Modern Control Theory

现代控制理论习题集

李国勇 主编

Li Guoyong

杜永贵 谢刚 副主编

Du Yonggui Xie Gang

谢克明 主审

Xie Keming



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

Exercises for Modern Control Theory

现代控制理论习题集

李国勇 主编

Li Guoyong

太原理工大学

杜永贵 谢刚 副主编

Du Yonggui Xie Gang

谢克明 主审

Xie Keming

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是全国高等学校自动化专业系列教材《现代控制理论》(谢克明、李国勇主编,清华大学出版社出版)的学习指导性配套用书。书中不但精辟总结了现代控制理论的主要内容,而且对该教材各章中的所有习题均给出了相应解答,同时还精选了一定数量的研究生入学试题及其解答。为便于读者独立使用本教材,该习题集中还给出了原教材中的全部例题及解答。与主教材相对应,本书仍分为8章:绪论,控制系统的状态空间描述,线性控制系统状态空间表达式的求解,线性控制系统的能控性和能观测性,控制系统的稳定性,状态反馈和状态观测器,最优控制,线性系统的状态估计。此外,各章都给出了利用 MATLAB 进行线性系统的理论分析和应用设计的典型方法。

本书可作为普通高等院校自动化、电气工程、测控技术等相关专业的本科生和研究生的学习参考用书,也可供准备参加相关专业研究生入学考试的读者备考使用,并可作为相关行业工程技术人员的手册。

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

现代控制理论习题集/李国勇主编. —北京:清华大学出版社,2011.1

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-24427-1

I. ①现… II. ①李… III. ①现代控制理论—高等学校—习题 IV. ①O231-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 260382 号

责任编辑:王一玲 盛东亮

责任校对:李建庄

责任印制:李红英

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

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjjc@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:20.5 字 数:443 千字

版 次:2011 年 1 月第 1 版 印 次:2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:32.00 元

产品编号:039859-01

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) 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)

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。

吴各迪 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、课程实验指导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



本书是谢克明和李国勇主编的全国高等学校自动化专业系列教材和普通高等教育“十一五”国家级规划教材《现代控制理论》(清华大学出版社出版)的学习指导性配套用书。本书可帮助读者正确理解和掌握现代控制理论的基本方法和应用,达到巩固基础、提高能力的目的。

本书的体系架构和物理量符号与配套教材《现代控制理论》一致。各章节结构基本相同,含有基本理论、习题解答、例题解答、典型题解和思考题等。基本理论部分力求围绕教材的中心内容,简明扼要,重点突出,主要公式齐全,便于查阅,可作控制理论手册使用。习题部分详尽地给出了原教材中所有习题的求解方法,内容丰富,注重解题技巧和一题多解,便于读者自学原教材。例题部分给出了原书中的所有例题及其解答,以便于读者独立使用本教材。典型题解部分给出了一定数量的研究生入学试题及其解答。为了培养学生利用现代化的手段进行分析与设计的能力,在每一章都安排了利用 MATLAB 进行线性系统的理论分析、综合和应用设计的典型方法。

书中内容包括 8 章。第 0 章:控制理论的产生及发展,现代控制理论的基本内容,本书的内容和特点。第 1 章:线性系统的状态空间描述、建立状态空间表达式的常用方法,基于 MATLAB 的控制系统状态空间描述。第 2 章: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,利用 MATLAB 求解系统状态空间表达式。第 3 章: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,利用 MATLAB 分析系统的能控性和能观测性。第 4 章: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,利用 MATLAB 分析系统的稳定性。第 5 章: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,利用 MATLAB 实现系统的状态反馈和状态观测器。第 6 章:最优控制的基本概念和基本理论,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,利用 MATLAB 求解线性二次型最优控制问题。第 7 章: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,利用 MATLAB 求解状态估计问题。

本书由李国勇任主编,杜永贵和谢刚任副主编。全书共包含 8 章,其中第 0 章由刘笑达编写;第 1 章由郭红戈编写;第 2 章由曲兵妮编写;

第3章由杨丽娟编写；第4章由吕青编写；第5章由韩晓霞编写；第6章由王芳编写；第7章由马春燕编写；其余部分由谢刚编写。全书由李国勇和杜永贵整理定稿。谢克明教授主审了全书，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主任和盛东亮编辑，感谢他们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，可通过邮件与作者交流：TYGDLGY@163.com。

编 者

2010年11月

第 0 章 绪论	1
0.1 控制理论的产生及发展	1
0.2 现代控制理论的基本内容	2
0.3 本书的内容和特点	3
第 1 章 控制系统的状态空间描述	5
1.1 状态及状态空间表达式	5
1.1.1 控制系统中状态的基本概念	5
1.1.2 状态空间表达式及一般形式	5
1.1.3 状态空间表达式的状态变量图与信号流图	6
1.2 根据系统的物理机理建立状态空间表达式	7
1.3 由系统的微分方程式建立状态空间表达式	7
1.3.1 微分方程式中不含输入函数导数项	7
1.3.2 微分方程式中含输入函数导数项	7
1.4 由系统结构图建立状态空间表达式	8
1.5 由系统的传递函数建立状态空间表达式	8
1.5.1 标准型法	8
1.5.2 串联法	9
1.5.3 并联法	9
1.6 系统的状态空间表达式与传递函数阵	11
1.6.1 由系统的状态空间表达式求传递函数阵	11
1.6.2 由组合系统的状态空间表达式求传递函数阵	11
1.7 系统状态向量的线性变换	12
1.7.1 线性变换	12
1.7.2 化状态方程式为对角线标准型	13
1.7.3 化状态方程式为约当标准型	14
1.8 离散时间系统的状态空间表达式	16
1.8.1 状态空间表达式描述	16
1.8.2 差分方程式化为状态空间表达式	16
1.8.3 脉冲传递函数化为状态空间表达式	18

1.8.4 由状态空间表达式求脉冲传递函数阵	19
1.9 基于 MATLAB 的控制系统状态空间描述	19
1.9.1 利用 MATLAB 描述系统模型	19
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	19
1.9.3 利用 MATLAB 实现系统的线性变换	20
1.9.4 利用 MATLAB 实现系统模型的连接	20
习题解答	21
例题解答	39
典型题解	57
思考题	59
第 2 章 线性控制系统状态空间表达式的求解	60
2.1 线性定常连续系统齐次状态方程的解	60
2.2 线性定常连续系统的状态转移矩阵	61
2.2.1 状态转移矩阵及其性质	61
2.2.2 矩阵指数函数的计算	63
2.3 线性定常连续系统非齐次状态方程的求解	65
2.4 线性时变连续系统状态方程式的求解	65
2.4.1 齐次状态方程式的解	65
2.4.2 线性时变系统状态转移矩阵	66
2.4.3 线性时变系统非齐次状态方程式的解	66
2.5 线性离散时间系统状态方程的求解	66
2.5.1 迭代法	66
2.5.2 z 变换法	67
2.5.3 离散系统状态转移矩阵的求解	68
2.6 线性连续时间系统的离散化	69
2.6.1 线性定常系统状态方程式的离散化	69
2.6.2 线性时变系统状态方程式的离散化	69
2.6.3 近似离散化	69
2.7 利用 MATLAB 求解系统状态空间表达式	70
习题解答	70
例题解答	82
典型题解	96
思考题	101
第 3 章 线性控制系统的能控性和能观测性	102
3.1 系统的能控性	102

3.1.1	线性时变连续系统的能控性	102
3.1.2	线性定常连续系统的能控性	103
3.1.3	线性离散时间系统的能控性	104
3.2	系统的能观测性	105
3.2.1	线性时变连续系统的能观测性	105
3.2.2	线性定常连续系统的能观测性	105
3.2.3	线性离散时间系统的能观测性	106
3.3	能控性和能观测性的对偶关系	106
3.3.1	线性系统的对偶原理	107
3.3.2	线性系统的对偶关系	107
3.4	单输入单输出系统的能控标准型和能观测标准型	107
3.4.1	能控标准型	107
3.4.2	能观测标准型	108
3.5	系统的结构分解	109
3.5.1	系统按能控性分解	109
3.5.2	系统按能观测性分解	110
3.5.3	系统按能控性和能观测性分解	111
3.6	系统的实现	114
3.6.1	实现问题的基本概念	114
3.6.2	单输入单输出系统的标准型实现	114
3.6.3	多变量系统的标准型实现	115
3.6.4	最小实现	115
3.6.5	系统的约当标准型实现	116
3.7	传递函数阵与能控性和能观测性之间的关系	116
3.7.1	单输入单输出系统	116
3.7.2	多变量系统	117
3.8	利用 MATLAB 分析系统的能控性和能观测性	117
	习题解答	117
	例题解答	129
	典型题解	152
	思考题	154
第 4 章	控制系统的稳定性分析	155
4.1	系统稳定的基本概念	155
4.1.1	外部稳定性和内部稳定性	155
4.1.2	李雅普诺夫稳定性	157
4.2	李雅普诺夫稳定性理论	158

4.2.1	李雅普诺夫第一法	158
4.2.2	李雅普诺夫第二法	160
4.3	线性系统的李雅普诺夫稳定性分析	163
4.3.1	李雅普诺夫第二法在线性连续系统中的应用	163
4.3.2	李雅普诺夫第二法在线性离散系统中的应用	164
4.4	非线性系统的李雅普诺夫稳定性分析	166
4.4.1	克拉索夫斯基法	166
4.4.2	变量-梯度法	166
4.4.3	阿捷尔曼法	167
4.5	利用 MATLAB 分析系统的稳定性	168
4.5.1	利用特征值判断系统的稳定性	168
4.5.2	利用李雅普诺夫第二法判断系统的稳定性	168
	习题解答	169
	例题解答	178
	典型题解	191
	思考题	193
第 5 章	状态反馈和状态观测器	194
5.1	线性反馈控制系统的基本结构	194
5.1.1	状态反馈	194
5.1.2	输出反馈	195
5.1.3	从输出到状态向量导数 $\dot{x}$ 反馈	195
5.1.4	闭环系统的能控性和能观测性	196
5.2	系统的极点配置	196
5.2.1	采用状态反馈实现极点配置	196
5.2.2	采用从输出到输入端反馈实现极点配置	197
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	197
5.2.4	多输入多输出系统的极点配置	197
5.2.5	镇定问题	199
5.3	解耦控制	199
5.3.1	串联解耦	199
5.3.2	反馈解耦	200
5.4	状态观测器的设计	200
5.4.1	状态重构问题	200
5.4.2	全维观测器的设计	201
5.4.3	降维观测器的设计	202
5.5	带状态观测器的闭环控制系统	202

5.5.1	闭环控制系统的结构和状态空间表达式	202
5.5.2	带状态观测器的闭环系统的基本特征	203
5.6	利用 MATLAB 实现系统的状态反馈和状态观测器	204
5.6.1	系统的极点配置	204
5.6.2	状态观测器的设计	204
5.6.3	带状态观测器的系统极点配置	204
	习题解答	205
	例题解答	222
	典型题解	238
	思考题	245
第 6 章	最优控制	246
6.1	最优控制的基本概念	246
6.1.1	最优控制问题	246
6.1.2	最优控制的提法	247
6.2	最优控制中的变分法	247
6.2.1	变分法	247
6.2.2	应用变分法求解最优控制问题	249
6.3	极大值原理	250
6.3.1	连续系统的极大值原理	250
6.3.2	离散系统的极大值原理	251
6.4	线性二次型最优控制问题	252
6.4.1	线性二次型问题	252
6.4.2	状态调节器	253
6.4.3	输出调节器	254
6.4.4	输出跟踪器	255
6.5	利用 MATLAB 求解线性二次型最优控制问题	257
	习题解答	257
	例题解答	267
	典型题解	283
	思考题	289
第 7 章	线性系统的状态估计	290
7.1	概述	290
7.1.1	估计问题	290
7.1.2	估计的准则	290
7.1.3	状态估计与系统辨识	290

7.2 最小二乘估计	291
7.3 线性最小方差估计	292
7.4 卡尔曼滤波器	292
习题解答	294
例题解答	297
参考文献	303