



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

Principles of Automatic Control

自动控制原理 (第2版) (下册)

吴 麒 王诗宓 主编

Wu Qi Wang Shifu

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

Principles of Automatic Control

自动控制原理 (第2版) (下册)

清华大学	吴 麒	王诗宓	编著
	Wu Qi	Wang Shifu	
	杜继宏	高黛陵	
	Du Jihong	Gao Dailing	

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本教材覆盖高等学校自动化专业“自动控制原理”课程的主要内容,包括建模、分析、设计的基本概念及方法。全书分上、下册出版。上册主要涉及经典控制理论,包括单输入单输出动态系统的数学描述、时间响应、频率响应方法、根轨迹方法、串联校正、非线性系统、采样系统等,但数学模型部分包括状态空间模型及多输入多输出系统。下册主要涉及状态空间方法,包括系统的状态空间结构分析、线性定常系统的综合、李雅普诺夫稳定性分析、最优控制等。除习题与参考答案外,本教材附有术语索引、少量供读者阅读的参考文献。

本书注重分析思考能力的培养,减少单纯用于解决计算、作图技巧的内容,淘汰某些已经过时的作图技巧,推荐使用 MATLAB,随书赠送作者自主编制的设计软件 IntelDes 3.0。

本书是高等学校自动化专业“自动控制原理”课程教材,也可供相关工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理·下册/吴麒,王诗宓主编. —2版. —北京:清华大学出版社,2006.10
(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 7-302-13227-5

I. 自… II. ①吴… ②王… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 065002 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客户服务: 010-62776969

责任编辑: 王一玲

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 175 × 245 印张: 36.5 字数: 750 千字

版 次: 2006 年 10 月第 2 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-13227-5/TP · 8349

印 数: 1 ~ 4000

定 价: 43.00 元

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) 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)

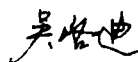


自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20 世纪 50 年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养.五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,“两弹一星”的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果.自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的.现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等.另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、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.

 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深入研究,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。

吴阶 院士

2005 年 10 月于清华大学

《全国高等学校自动化专业系列教材》丛书书目

教材 类型	编 号	教 材 名 称	主 编 / 主 审	主 编 单 位	备注
本科生教材					
控制 理论 与 工程	Auto-2-(1+2)-V01	自动控制原理(研究型)	吴麒、王诗宓	清华大学	
	Auto-2-1-V01	自动控制原理(研究型)	王建辉、顾树生/杨自厚	东北大学	
	Auto-2-1-V02	自动控制原理(应用型)	张爱民/黄永宣	西安交通大学	
	Auto-2-2-V01	现代控制理论(研究型)	张嗣瀛、高立群	东北大学	
	Auto-2-2-V02	现代控制理论(应用型)	谢克明、李国勇/郑大钟	太原理工大学	
	Auto-2-3-V01	控制理论 CAI 教程	吴晓蓓、徐志良/施颂椒	南京理工大学	
	Auto-2-4-V01	控制系统计算机辅助设计	薛定宇/张晓华	东北大学	
	Auto-2-5-V01	工程控制基础	田作华、陈学中/施颂椒	上海交通大学	
	Auto-2-6-V01	控制系统设计	王广雄、何朕/陈新海	哈尔滨工业大学	
	Auto-2-8-V01	控制系统分析与设计	廖晓钟、刘向东/胡佑德	北京理工大学	
	Auto-2-9-V01	控制论导引	万百五、韩崇昭、蔡远利	西安交通大学	
控制 系统 与 技术	Auto-2-10-V01	控制数学问题的 MATLAB 求解	薛定宇、陈阳泉/张庆灵	东北大学	
	Auto-3-1-V01	计算机控制系统(面向 过程控制)	王锦标/徐用懋	清华大学	
	Auto-3-1-V02	计算机控制系统(面向 自动控制)	高金源、夏洁/张宇河	北京航空航天大学	
	Auto-3-2-V01	电力电子技术基础	洪乃刚/陈坚	安徽工业大学	
	Auto-3-3-V01	电机与运动控制系统	杨耕、罗应立/ 陈伯时	清华大学、华北电 力大学	
	Auto-3-4-V01	电机与拖动	刘锦波、张承慧/陈伯时	山东大学	
	Auto-3-5-V01	运动控制系统	阮毅、陈维钧/陈伯时	上海大学	
	Auto-3-6-V01	运动体控制系统	史震、姚绪梁/谈振藩	哈尔滨工程大学	
	Auto-3-7-V01	过程控制系统(研究型)	金以慧、王京春、黄德先	清华大学	
	Auto-3-7-V02	过程控制系统(应用型)	郑辑光、韩九强/韩崇昭	西安交通大学	
	Auto-3-8-V01	系统建模与仿真	吴重光、夏涛/吕崇德	北京化工大学	
	Auto-3-8-V01	系统建模与仿真	张晓华/薛定宇	哈尔滨工业大学	
	Auto-3-9-V01	传感器与检测技术	王俊杰/王家祯	清华大学	
	Auto-3-9-V02	传感器与检测技术	周杏鹏、孙永荣/韩九强	东南大学	
	Auto-3-10-V01	嵌入式控制系统	孙鹤旭、林涛/袁著祉	河北工业大学	
	Auto-3-13-V01	现代测控技术与系统	韩九强、张新曼/田作华	西安交通大学	
	Auto-3-14-V01	建筑智能化系统	章云、许锦标/胥布工	广东工业大学	
	Auto-3-15-V01	智能交通系统概论	张毅、姚丹亚/史其信	清华大学	
	Auto-3-16-V01	智能现代物流技术	柴跃廷、申金升/吴耀华	清华大学	

续表

教材类型	编 号	教 材 名 称	主 编/主 审	主 编 单 位	备 注
本科生教材					
信号处理与分析	Auto-5-1-V01	信号与系统	王文渊/阎平凡	清华大学	
	Auto-5-2-V01	信号分析与处理	徐科军/胡广书	合肥工业大学	
	Auto-5-3-V01	数字信号处理	郑南宁/马远良	西安交通大学	
计算机与网络	Auto-6-1-V01	单片机原理与接口技术	杨天怡、黄勤	重庆大学	
	Auto-6-2-V01	计算机网络	张曾科、阳宪惠/吴秋峰	清华大学	
	Auto-6-4-V01	嵌入式系统设计	慕春棣/汤志忠	清华大学	
	Auto-6-5-V01	数字多媒体基础与应用	戴琼海、丁贵广/林闯	清华大学	
软件基础与工程	Auto-7-1-V01	软件工程基础	金尊和/肖创柏	杭州电子科技大学	
	Auto-7-2-V01	应用软件系统分析与设计	周纯杰、何顶新/卢炎生	华中科技大学	
实验课程	Auto-8-1-V01	自动控制原理实验教程	程鹏、孙丹/王诗宓	北京航空航天大学	
	Auto-8-3-V01	运动控制实验教程	綦慧、杨玉珍/杨耕	北京工业大学	
	Auto-8-4-V01	过程控制实验教程	李国勇、何小刚/谢克明	太原理工大学	
	Auto-8-5-V01	检测技术实验教程	周杏鹏、仇国富/韩九强	东南大学	
研究生教材					
	Auto(*)-1-1-V01	系统与控制中的近代数学基础	程代展/冯德兴	中科院系统所	
	Auto(*)-2-1-V01	最优控制	钟宜生/秦化淑	清华大学	
	Auto(*)-2-2-V01	智能控制基础	韦巍、何衍/王耀南	浙江大学	
	Auto(*)-2-3-V01	线性系统理论	郑大钟	清华大学	
	Auto(*)-2-4-V01	非线性系统理论	方勇纯/袁著祉	南开大学	
	Auto(*)-2-6-V01	模式识别	张长水/边肇祺	清华大学	
	Auto(*)-2-7-V01	系统辨识理论及应用	萧德云/方崇智	清华大学	
	Auto(*)-2-8-V01	自适应控制理论及应用	柴天佑、岳恒/吴宏鑫	东北大学	
	Auto(*)-3-1-V01	多源信息融合理论与应用	潘泉、程咏梅/韩崇昭	西北工业大学	
	Auto(*)-4-1-V01	供应链协调及动态分析	李平、杨春节/桂卫华	浙江大学	

第 7 章 描述函数方法与相平面方法	1
7.1 引言	1
7.1.1 线性系统和非线性系统	2
7.1.2 非线性系统的某些特征现象	4
7.2 非线性特性的描述函数	10
7.2.1 描述函数	12
7.2.2 描述函数的计算	14
7.2.3 某些典型非线性特性的描述函数	17
7.2.4 非线性特性的串联与并联	26
7.3 非线性系统的描述函数分析方法	29
7.3.1 稳定性分析	29
7.3.2 描述函数的负倒数特性	32
7.3.3 自持振荡的分析与计算	36
7.3.4 伯德图在描述函数方法中的应用	39
7.4 相平面	43
7.4.1 相平面图	44
7.4.2 相平面图的性质	46
7.4.3 相轨迹的作图方法	48
7.4.4 奇点的分类与性质	52
7.4.5 极限环	57
7.5 非线性系统的相平面分析方法	59
7.5.1 线性系统的分析	60
7.5.2 非线性系统的分区分析方法	63
7.5.3 非线性部件对控制系统性能的影响	68
7.6 小结	75
习题	76
第 8 章 采样控制系统	81
8.1 引言	81
8.2 采样与保持	82

8.2.1	采样过程	83
8.2.2	理想采样过程	85
8.2.3	保持器	88
8.3	z 变换	91
8.3.1	时间函数的 z 变换	91
8.3.2	z 变换的性质	92
8.3.3	反 z 变换	95
8.4	脉冲传递函数	97
8.4.1	脉冲传递函数的推导	97
8.4.2	脉冲传递函数的计算	101
8.5	采样系统的稳定性分析	103
8.5.1	s 平面与 z 平面之间的映射	104
8.5.2	z 平面上的稳定性分析方法	106
8.5.3	双线性变换	111
8.5.4	w 平面上的稳定性分析方法	113
8.6	采样控制系统的时间响应	116
8.6.1	闭环极点与冲激响应的关系	116
8.6.2	采样系统的瞬态响应指标	118
8.6.3	采样系统的稳态响应	121
8.6.4	修正的 z 变换	123
8.7	采样控制系统的校正	128
8.7.1	等效模拟校正设计方法	129
8.7.2	数字控制器的直接设计	135
8.7.3	数字控制器的解析设计	140
8.8	小结	149
	习题	150
第9章	线性系统的结构分析	153
9.1	引言	153
9.2	特征值规范型	155
9.2.1	对角线规范型	155
9.2.2	状态运动模态与特征结构	160
9.2.3	共轭模态规范型	162
9.2.4	循环矩阵的若尔当规范型	164
9.2.5	非循环矩阵的若尔当规范型	168
9.2.6	由可控或可观规范型化特征值规范型	172

9.3	状态可控性	176
9.3.1	状态可控性的示例	176
9.3.2	状态可控性的定义	179
9.3.3	可控子空间和可控性的基本判据	181
9.3.4	定常系统可控性的特征值规范型判据和模态判据	183
9.3.5	定常系统可控性的代数判据	189
9.3.6	定常系统的可控性指数	195
9.4	状态可观性	196
9.4.1	状态可观性的示例	196
9.4.2	状态可观性的定义	199
9.4.3	不可观子空间和可观性基本判据	201
9.4.4	定常系统可观性的特征值规范型判据和模态判据	203
9.4.5	定常系统可观性的代数判据	207
9.4.6	定常系统的可观性指数	212
9.5	对偶原理	214
9.5.1	对偶系统与对偶原理	215
9.5.2	对偶原理的应用	217
9.6	线性定常离散时间系统的结构分析	220
9.6.1	离散时间系统的可控性和可达性判据	220
9.6.2	可达性指数	222
9.6.3	离散时间系统的可观性和可重构性判据	224
9.6.4	连续时间系统离散化后保持可达和可观的条件	225
9.6.5	单输入系统可达性矩阵行列式的值与可达程度	227
9.7	系统的结构分解	230
9.7.1	线性定常系统按可控性分解	230
9.7.2	线性定常系统按可观性分解	234
9.7.3	线性定常系统结构的标准分解	238
9.8	可控规范型和可观规范型	243
9.8.1	单输入系统的两种可控规范型	243
9.8.2	采用矩阵行列初等变换求可控规范型	250
9.8.3	单输出系统的两种可观规范型	255
9.8.4	多输入系统的可控规范型	258
9.8.5	多输出系统的可观规范型	264
9.9	传递函数矩阵中的零极点对消	268
9.9.1	单输入单输出系统的零极点对消	268
9.9.2	多输入多输出系统的零极点对消	272

9.9.3	状态可控性和可观性的频域判据	277
9.9.4	输出可控性和输入可观性	278
9.10	传递函数矩阵的状态空间实现	281
9.10.1	实现和最小实现	281
9.10.2	标量传递函数的实现	284
9.10.3	传递函数矩阵的实现	287
9.10.4	利用汉克尔矩阵寻找最小实现	293
9.11	反馈控制系统的可控性和可观性	299
9.11.1	状态反馈和输出反馈	299
9.11.2	反馈控制对可控性和可观性的影响	303
9.11.3	化完全可控的多输入系统为对单一输入分量完全 可控的系统	305
9.12	小结	310
	习题	311
第 10 章	线性定常系统的综合	317
10.1	闭环系统的极点配置	317
10.1.1	单输入系统的极点配置	317
10.1.2	多输入系统极点配置的一种方法	325
10.1.3	闭环极点配置定理	328
10.1.4	镇定问题	330
10.1.5	输入变换和稳态特性	333
10.2	多输入系统极点配置方法与特征结构配置	335
10.2.1	多输入系统的极点配置方法	336
10.2.2	特征结构配置	346
10.2.3	不完全可控系统的特征结构配置	356
10.3	闭环系统的解耦	361
10.3.1	系统的可解耦性	361
10.3.2	用逆系统方法实现闭环解耦	362
10.3.3	解耦阶常数的性质	365
10.3.4	具有期望闭环极点的解耦系统	368
10.3.5	解耦系统的零点	370
10.3.6	带输入补偿器的解耦控制	374
10.4	状态观测器	376
10.4.1	全维观测器	377
10.4.2	系统引入观测器后的频域性质	383

10.4.3	降维观测器	385
10.5	带有观测器的反馈控制系统	389
10.5.1	闭环系统结构及其极点可分离性	389
10.5.2	闭环传递函数矩阵的零极点对消	391
10.5.3	重构状态反馈和带补偿器的输出反馈的等价性	392
10.6	有外扰时控制系统的综合	394
10.6.1	调节器问题	394
10.6.2	闭环系统稳态无差的判据	398
10.6.3	外扰状态可直接测量时的系统综合方法	401
10.6.4	外扰状态观测器与内模原理	407
10.7	鲁棒调节器	415
10.7.1	常值扰动下的鲁棒调节器	416
10.7.2	鲁棒调节器的频域性质	419
10.7.3	鲁棒调节器的构造	421
10.8	小结	426
	习题	427
第 11 章	李雅普诺夫稳定性分析	435
11.1	引言	435
11.1.1	运动稳定性和平衡状态	435
11.1.2	李雅普诺夫稳定性	436
11.1.3	李雅普诺夫第一方法	439
11.1.4	二次型函数的定号性和西尔维斯特判据	442
11.2	李雅普诺夫第二方法	444
11.2.1	李雅普诺夫函数	444
11.2.2	李雅普诺夫稳定性基本定理	445
11.2.3	其他稳定性和不稳定性定理	448
11.2.4	离散系统的李雅普诺夫稳定性定理	451
11.3	吸引域	451
11.4	李雅普诺夫方法在线性定常系统中的应用	454
11.4.1	连续系统的李雅普诺夫方程	454
11.4.2	离散系统的李雅普诺夫方程	457
11.4.3	系统响应快速性的估计	457
11.4.4	参数的优化设计	460
11.5	李雅普诺夫方法在非线性系统中的应用	462
11.5.1	克拉索夫斯基方法	462

11.5.2 变量梯度法	465
11.6 小结	469
习题	470
第12章 最优控制	473
12.1 引言	473
12.2 最优控制问题	474
12.2.1 几个示例	474
12.2.2 最优控制问题的数学描述	478
12.3 泛函和变分法	480
12.3.1 泛函	480
12.3.2 泛函的变分	482
12.3.3 泛函的极值	485
12.3.4 古典变分法	485
12.4 变分法在最优控制中的应用	493
12.4.1 拉格朗日问题	493
12.4.2 波尔查问题	495
12.4.3 最优轨线上的哈密顿函数	498
12.4.4 离散时间系统的最优控制	501
12.5 极小值原理及其应用	503
12.5.1 变分法的局限性	504
12.5.2 极小值原理的几种具体形式	505
12.5.3 时间最优控制问题	509
12.6 极小值原理的证明	514
12.6.1 两个引理	514
12.6.2 采用增量法的证明过程	515
12.7 线性二次型调节器	521
12.7.1 线性二次型问题	522
12.7.2 有限时间状态反馈调节器	523
12.7.3 定常系统无限时间状态反馈调节器	528
12.7.4 离散系统的线性二次型状态反馈调节器	535
12.7.5 输出调节器问题	538
12.8 小结	538
习题	539
下册部分习题参考答案	542
下册名词索引	557