



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

Cybernetics: Concepts, Methods and Applications

控制论——概念、方法与应用

万百五 韩崇昭 蔡远利 编著

Wan Baiwu Han Chongzhao Cai Yuanli



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

Cybernetics : Concepts, Methods and Applications

控制论——概念、方法与应用



西安交通大学

万百五 韩崇昭 蔡远利 编著

Wan Baiwu Han Chongzhao Cai Yuanli

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书由三大部分组成,包括控制论的基本概念篇、控制论的基本方法篇和控制论的应用分支篇。基本概念篇由绪论和基本概念二章组成,基本方法篇由经典控制理论与方法、非线性系统控制方法、现代控制理论与方法、人工智能方法与技术、智能控制方法五章组成,应用分支篇由工程控制、生物控制、社会经济与生态、环境及农业控制以及机器人与智能系统四章组成。在内容上侧重于控制论中概念、思想、知识、方法的介绍,而不拘泥于理论上过多的严格论证,同时注意从“控制论”、“信息论”、“系统论”的角度结合当前网络化的特点进行选材。

本书可以作为工、农、林、商、医、经济、管理及军事等学科非自动化类专业的高年级学生或研究生教材,同时可以作为国家公务员、行政干部、企业及事业单位管理者普及控制论思想和推广应用的入门书籍,也可供广大控制工程技术人员参考。

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 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

控制论——概念、方法与应用/万百五,韩崇昭,蔡远利编著. —北京:清华大学出版社,2009.5

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-19307-4

I. 控… II. ①万… ②韩… ③蔡… III. 控制论—高等学校—教材 IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 008769 号

责任编辑:王一玲

责任校对:白蕾

责任印制:何芊

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:010-62776969, c-service@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:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:23.25 字 数:488 千字

版 次:2009 年 5 月第 1 版 印 次:2009 年 5 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:020837-01



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

《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



美国数学家诺伯特·维纳(Norbert Wiener, 1894—1964)震惊世界学术界的题为《控制论：或在动物和机器中的通信和控制》的著作，于1948年出版。从此，控制论作为一门独立的、跨学科的新兴学科呈现在世界学术界。

近60年来控制论的理论、概念和方法在计算机技术的支持下，已经远远超越了60年前主要为工业生产和军事装备服务的范围，广泛应用到生物、医学、生理、生态、环境、能源、政治、军事和社会科学的各领域，如社会、经济、管理、人口、教育等。

控制论因而迅速发展并形成多个分支：医学控制论、神经控制论、生物控制论、工程控制论、环境控制论、经济控制论、社会控制论、生态控制论、自然控制论、智能控制论、军事控制论以及派生的人口控制论、资源控制论等，它们在国民经济和社会的发展中，特别是在中国人口控制和国民经济宏观调控上，起了极其重要的作用。同时控制论本身也得到了发展。

控制论在中国发展前景广阔。国家要提高自主创新能力，社会要发展，科学在交叉、交互、融合，技术革命方兴未艾。控制论及自动化技术与微电子技术的结合扩大了前者的应用范围，在发挥日益重要的作用。但是，长期以来就发现社会上缺少能为广大非自动化(自动控制)专业出身的人员接受的、能对他们理解和应用控制论有帮助的控制论基础教材或参考书。《控制论——概念、方法与应用》的任务就在于推广控制论的思想，将它的概念、思想、方法和在各分支中的应用作一个简单的介绍，以便读者在实际工作中使用和实践这种思想，并能促使所思考和研究的问题得到妥善甚至最优的解决。

为此，《控制论——概念、方法与应用》定位为一本适宜用作工、农、林、经济、管理、商、医、军事等非自动化类专业本科生的专业基础课、高年级学生或研究生选课用的教材，以及适宜用作国家公务员、管理层人员、企业(公司)干部等普及控制论思想和推广其应用的参考书籍。在介绍控制论方法时本教材要涉及到自动控制原理(理论)，但本书不是作为控制工程的教材而编写的。

《控制论——概念、方法与应用》在内容安排上虽然也基于高等数学来讲授课文内容，但仍侧重于概念、思想、知识、方法的描述，而不偏向过多的理论、论证的论述。同时注意从控制论、信息论、系统论的角度结合网络环

境条件进行讲述。

本书的大纲初稿由万百五提出,曾经由编者三人讨论而“十二易其稿”。

全书分为三个板块:控制论的基本概念篇、控制论的基本方法篇和控制论的应用分支篇,共 11 章。

控制论的基本概念篇由第 1 章绪论(由万百五编写)和第 2 章基本概念(由韩崇昭编写)组成。

控制论的基本方法篇由第 3 章经典控制理论与方法、第 4 章非线性系统控制方法(两章由万百五编写)、第 5 章现代控制理论与方法(由韩崇昭编写)、第 6 章人工智能方法与技术(由蔡远利编写)和第 7 章智能控制方法(由万百五编写)组成。

控制论的应用分支篇由第 8 章工程控制、第 9 章生物控制(两章由蔡远利编写)、第 10 章社会经济与生态、环境及农业控制(由万百五编写)以及第 11 章机器人与智能系统(由韩崇昭编写)组成。在这几个领域对控制论的应用作了简明的介绍和阐述。

附录 A 拉普拉斯变换简表和附录 B 矩阵初步(由万百五编写)供读者查阅。全书由万百五加以统稿。

全书方法篇和应用篇(包括前者的许多例子都联系到应用)两者的比例大致为一比一,这对于一个具体专业来说应用的介绍当然显得很不够。所以读者在学习时还要适当参考其他有关专业控制论的书籍。

各专业教师在应用本书进行讲授时根据专业需要,首先选择“应用分支篇”中一个方向,再在“基本方法篇”中选择合适的章节和深度。编者为满足各类型专业的需要和留作日后必要的知识储备在编写时取材都略扩大范围和加深深度。

本书审稿人萧德云教授和窦曰轩教授对本书仔细审稿,并提出许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。同时要感谢西安理工大学郭会军博士,他对万百五在第 3 章中有关 MATLAB 的例题进行计算时提供了帮助。

谨以此书纪念维纳的《控制论》创立 60 周年^①,并以此迎接 21 世纪中华民族的伟大复兴。

为这样一门跨学科的、新兴学科编写一本各类型、各专业的读者都满意的教材,编者深感不易。所有疏漏、不当之处恳请读者批评、指正。

编 者

西安交通大学电子与信息工程学院

2008 年 7 月

^① 参见万百五. 控制论创立六十年,控制理论与应用,2008,25(4): 597~602

基本概念篇

第 1 章 绪论	3
1.1 控制论的发展简史	3
1.1.1 中国古代自动装置与反馈思想	3
1.1.2 控制和自动化技术的发展经历了四个历史时期	4
1.1.3 控制论的创立和发展	7
1.2 维纳的《控制论》	11
1.2.1 《控制论》名著简介	11
1.2.2 “三论”与控制科学	13
1.3 控制论的哲学思考	15
1.4 控制论在国民经济发展中的作用与地位	17
1.5 本书结构	18
1.6 小结	19
习题	19
参考文献	19
第 2 章 基本概念	21
2.1 控制论系统	21
2.2 控制与调节	22
2.3 反馈原理	23
2.4 系统模型与信号流图	24
2.5 信息与通信	25
2.6 估计与识别	26
2.7 决策与对策	27
2.8 仿真与重构	28
2.9 稳定性与收敛性	29
2.10 最优性与鲁棒性	30
2.11 小结	32
习题	32
参考文献	32

基本方法篇

第 3 章 经典控制理论与方法	35
3.1 自动控制系统的类型和组成	35
3.1.1 恒值自动调节系统	35
3.1.2 程序自动控制系统	36
3.1.3 随动系统(伺服系统)	37
3.1.4 自动控制系统的组成	38
3.1.5 模拟控制(调节)器控制和计算机控制	39
3.2 反馈控制方法与扰动补偿方法	41
3.3 系统模型与时域分析法	42
3.3.1 控制系统的稳定性、稳态误差和动态品质	42
3.3.2 自动控制系统的控制规律	45
3.3.3 建立控制元件和系统的数学模型	46
3.3.4 炉温自动控制系统的数学模型	47
3.3.5 自动控制系统的时域研究法	52
3.3.6 稳定性分析及代数判据	55
3.4 传递函数与频域分析法	57
3.4.1 拉普拉斯变换	57
3.4.2 元件和系统的传递函数,系统的结构图	58
3.4.3 自动控制系统的频率域分析法	65
3.4.4 频率法分析系统的动态性能和稳定性	70
3.5 控制系统的校正	74
3.5.1 控制系统的频率法校正	75
3.5.2 随动系统基于开环幅相特性的频率法校正	77
3.5.3 Simulink 仿真支持下基于开环传递函数的频率法校正	81
3.5.4 过程控制系统的控制器参数整定	84
3.5.5 扰动补偿器设计	87
3.6 其他线性控制系统	89
3.6.1 多变量控制系统和解耦设计	89
3.6.2 线性离散控制系统	91
3.7 小结	95
习题	96
参考文献	97
第 4 章 非线性系统控制方法	98
4.1 非线性元件及其线性化	98

4.1.1	非线性元件	98
4.1.2	非线性元件的线性化	100
4.2	非线性控制系统的经典研究方法	102
4.2.1	非线性系统的相平面研究法	102
4.2.2	二阶线性系统的相平面轨迹	103
4.2.3	二阶非线性系统的相平面轨迹及其绘制法	104
4.2.4	继电器控制系统的相平面图	106
4.3	分叉与混沌	108
4.4	其他描述与控制方法	110
4.4.1	非线性系统研究的描述函数法	110
4.4.2	非线性系统的快速控制和校正	115
4.5	小结	116
	习题	117
	参考文献	118
第5章	现代控制理论与方法	119
5.1	状态空间模型	119
5.1.1	状态空间模型的一般概念	119
5.1.2	状态空间模型的时域响应	125
5.1.3	连续时间模型的离散化	128
5.2	稳定性、能控性与能观性	129
5.2.1	线性系统的稳定性	129
5.2.2	连续时间线性系统的能控性	133
5.2.3	连续时间线性系统的能观性	135
5.2.4	离散时间线性系统的能控性与能观性	136
5.3	状态估计	136
5.3.1	状态估计的准则	136
5.3.2	线性系统滤波原理	138
5.3.3	基本卡尔曼滤波器	139
5.4	系统辨识	139
5.4.1	模型辨识问题的数学描述	140
5.4.2	离散时间线性差分模型的最小二乘参数估计	140
5.4.3	离散时间线性差分模型的递推最小二乘参数估计	141
5.4.4	二位式伪随机序列及其在系统辨识中的应用	142
5.5	最优控制	144
5.5.1	最优控制的基本概念	144
5.5.2	离散时间线性二次型最优控制问题	145

5.6	自适应控制与预测控制	146
5.6.1	自适应控制的一般概念	147
5.6.2	最小方差控制与自校正调节器	147
5.6.3	广义预测自校正控制器	151
5.7	大系统理论与系统工程	151
5.7.1	系统工程的一般概念	151
5.7.2	现代工业系统的信息结构	152
5.7.3	系统优化与大系统理论	152
5.7.4	决策与决策支持系统	156
5.8	小结	157
	习题	158
	参考文献	158
第6章	人工智能方法与技术	160
6.1	概述	160
6.2	模式识别与贝叶斯决策	161
6.2.1	模式及其识别	161
6.2.2	模式识别系统	161
6.2.3	特征提取与特征选择	162
6.2.4	分类问题	162
6.2.5	贝叶斯决策	163
6.3	专家系统与知识推理	166
6.3.1	专家系统的特征	166
6.3.2	专家系统的结构	167
6.3.3	知识表示方法	168
6.3.4	知识推理	172
6.4	模糊逻辑与模糊推理	174
6.4.1	模糊集合论	174
6.4.2	模糊逻辑系统	175
6.4.3	模糊推理	177
6.5	神经网络与机器学习	179
6.5.1	神经元数理模型与 Hebb 规则	180
6.5.2	感知器及 δ -规则	182
6.5.3	多层前馈网络与 BP 学习算法	185
6.5.4	RBF 神经网络与聚类分析	189
6.6	小结	191
	习题	191

参考文献	192
第7章 智能控制方法	193
7.1 智能控制的概念	193
7.2 专家控制	194
7.2.1 专家系统和专家控制器	194
7.2.2 专家控制系统举例——青霉素发酵过程专家控制系统	195
7.3 模糊控制	197
7.3.1 模糊控制原理	197
7.3.2 模糊控制应用举例	199
7.4 学习控制	202
7.5 神经网络控制	204
7.5.1 利用神经网络建立模型	204
7.5.2 神经元控制	206
7.5.3 神经网络控制方法	207
7.5.4 基于神经网络的故障诊断	209
7.6 小结	212
习题	212
参考文献	213

应用分支篇

第8章 工程控制	217
8.1 过程工业控制	217
8.1.1 过程工业控制的研究内容及特点	217
8.1.2 过程控制系统的结构与组成	218
8.1.3 基于计算机技术的过程控制系统	219
8.2 机械加工自动化	223
8.2.1 机械加工自动化的内涵与意义	223
8.2.2 数控机床	224
8.2.3 计算机群控系统	226
8.2.4 柔性制造系统	226
8.3 电力系统自动化	228
8.3.1 电力系统自动化的目标与任务	228
8.3.2 电力设备的监督与控制	228
8.3.3 电力系统的协调与优化	230
8.4 飞行器控制	231
8.4.1 飞行器与控制	231

8.4.2	飞行器姿态控制系统	232
8.4.3	飞行器导航与制导系统	233
8.5	自主车辆与交通控制	235
8.5.1	自主车辆	235
8.5.2	交通控制	236
8.6	工业大系统优化与综合自动化	239
8.6.1	工业大系统优化	239
8.6.2	合成氨装置的在线稳态优化控制	241
8.6.3	综合自动化	244
8.7	网络化控制系统	246
8.7.1	网络化控制系统的特点	246
8.7.2	网络传输时延分析	247
8.7.3	网络化控制实际应用	249
8.8	小结	249
	习题	250
	参考文献	251
第9章	生物控制	252
9.1	概述	252
9.2	生物反馈系统	253
9.2.1	体温调节系统	253
9.2.2	生物反馈治疗	255
9.3	神经控制论	257
9.3.1	神经网络	257
9.3.2	人工智能与模糊系统	260
9.3.3	感觉信息处理	261
9.4	生物仿生	261
9.5	中医学	263
9.6	小结	264
	习题	265
	参考文献	265
第10章	社会经济与生态、环境及农业控制	266
10.1	社会经济系统中反馈与控制	266
10.2	人口系统的建模与控制	267
10.2.1	人口数学模型的参数估计	269
10.2.2	人口数学模型的应用	269