

国家精品课程“智能控制”立体配套教材

INTELLIGENT CONTROL
PRINCIPLES AND APPLICATIONS

智能控制原理与应用

蔡自兴 编著 Cai Zixing

清华大学出版社



国家精品课程“智能控制”立体配套教材

INTELLIGENT CONTROL
PRINCIPLES AND APPLICATIONS

智能控制原理与应用

蔡自兴 编著 Cai Zixing

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍了智能控制的基本概念、工作原理、技术方法与应用。全书共 12 章。第 1 章介绍智能控制的概况,包括智能控制的起源与发展,智能控制的定义、特点、结构和分类,尤其是智能控制的学科结构理论。第 2~10 章逐一研究了递阶控制系统、专家控制系统、模糊控制系统、神经控制系统、学习控制系统、仿人控制、基于 MAS 的控制、进化控制与免疫控制以及基于 Web 的控制的作用机理、类型结构、设计方法、控制特性和应用示例。第 11 章讨论了复合智能控制。第 12 章探讨智能控制进一步研究的问题,并展望了智能控制的发展方向。书中的很大一部分内容十分新颖,反映了国内外智能控制研究和应用的最新进展,堪称是一部最新最全的高水平智能控制教材。

本书可作为高等学校自动化、自动控制、机电工程和电子工程类专业研究生的智能控制教材,也可供从事智能控制、人工智能与智能系统研究、开发和应用的科技工作者参考使用。

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 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

智能控制原理与应用/蔡自兴编著. —北京:清华大学出版社,2007. 11

ISBN 978-7-302-15211-8

I. 智… II. 蔡… III. ①智能控制—理论 ②智能控制—应用 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 071283 号

责任编辑:王一玲 李 晔

责任校对:梁 毅

责任印制:王秀菊

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 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:24.75 字 数:601 千字

版 次:2007 年 11 月第 1 版 印 次:2007 年 11 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:017538-01



近代科学技术的许多重大进展都是人类智慧、思维、幻想和拼搏的成果，同时，这些科技进步反过来又促进人们思想的解放，或者称为思想革命。人类历史上从来没有出现过像今天这样的思想大解放，关于宇宙、地球、生命、人类、时空、进化、智能的论点和著作，如雨后春笋破土而出，似百花争艳迎春怒放。

作为智能科学领域的一位探索者，我对自然界中的生命、进化与智能深感兴趣。有研究结果表明：大约6亿年前，地球上发生过一次异乎寻常的大爆炸，生物学家把它称为寒武纪爆炸。这次爆炸的最重要意义在于产生了数量颇大和种类繁多的生物，这是地球生态史上任何一个时期都无法比拟的。

大脑是衡量人类进化水平的最重要标志。有了大脑，才能够有思想、思维和规划，有发明、创造和革新，有艺术、音乐和诗歌，也才可能有“上天揽月”、火星探测、“下海捉鳖”以及基因和克隆研究之壮举。

地球上早期生物是比较低级的，它们经历了长期和不断的进化历程，并最终得以进化到最高级生物——人类。人类经过长期进化，通过自然竞争和自然选择，成为当今最有智慧的高级生物种群。人类智能是这种自然过程的创造物，用控制的术语来说，就是人类智能具有传感性能的分布特性和控制机制的鲁棒特性。人类的认知能力是保藏在以大脑为中心的“碳素计算机”中。大脑通过诸如视觉、听觉、触觉、味觉和嗅觉等各种自然传感机制来获取环境信息，借助智能集成这些信息并对信息提供适当的解释。然后，认知过程将这类特性进一步提升为学习、记忆和推理能力，并通过分布在中枢神经系统内的复杂神经网络产生适当的肌肉控制，产生相应的行为或动作。正是这种认知过程和智能特性，使人类在许多方面成为有别于其他生灵的高级动物。

伴随着人类的进化，人类智慧逐步提高。人类正从大自然学习并力图通过机器来模仿自身的认知过程和智能。人类已经发明了目前称之为计算机和自动机的高级机器，创建了能够为人类的进化和发展服务的智能系统，并应用机器智能来模仿人类智能，扩展了人脑的功能。在这一领域，形形色色的“智能制品”大放异彩，为经济、科技、教育、文化和人民生活服务。CAD、CAM、CAI、CAP、CIMS、互联网、数据挖掘、真体(agent)、机器人、自动机器和智能软件包等，已成为人类学习、工作和生活的组成部分。可以把智能控制系统这个主题看作智能机器这个广阔领域的一个子集。智能自动化技术已成为高级决策的必不可少的得力工具。

生命的进化也遇到了新的挑战。智能机器人与人工生命的结合,可能创造出具有生命现象的生物机器人。一个拟人机器人能够用它的眼睛跟踪人群通过人行横道;一台自主机器人车能够辨识道路的边缘,绕过障碍物,在探索中前进。机器人打乒乓球和机器人辅助外科手术等例子,早已是众所周知了。另一方面,某些不负责任的人或犯罪分子却利用智能技术进行犯罪活动,如制造计算机病毒和盗取银行存款等“智能犯罪”活动。面对机器的进化,我们切不可怠慢。作为机器的主人,我们要以新的成就和实力,继续赢得机器对人类的尊敬,使智能机器和智能系统永远听从人类的指挥,忠诚地为人类服务。

人类的进化归根结底是智能的进化,而智能反过来又为人类的进一步进化服务。我们学习与研究智能系统、人工智能、智能机器人和智能控制等,其目的就在于创造和应用智能技术和智能系统为人类进步服务。因此,可以说,对智能控制的钟情、期待、开发和应用,是科技发展和人类进步的必然。

控制科学和技术在 20 世纪经历了最重要的发展过程,发生了许多重要事件。从 20 世纪 40 年代至 60 年代,控制学科研究线性和非线性控制机理。这类控制器的设计主要是建立在频域模型基础上的。从 20 世纪 60 年代至 80 年代,控制系统领域获得迅速发展,引入了许多新的理论创新。这些创新包括状态空间模型的应用、可控性和可观性概念的开发以及最优和随机控制理论的演化等。其中某些成果被应用于过程控制和航空航天制导。在此期间,还提出了一些新的概念,如自适应、自学习、最优性和鲁棒性等。然而,受控装置和随机环境的模型是根据其物理特性通过离线和在线参数估计而建立的,所有控制方法仍然非常依赖数学模型。

从 1980 年起,控制学科获得快速发展,产生许多创新理论,包含了老策略与新技术(如应用知识库、模糊逻辑和神经网络等)的融合。这些新出现的理论可以归类于智能控制领域。实际上,现在智能控制已成为一个很有名的术语,并被控制系统科学家们广为研究和接受。尽管这些理论发展的某些方面仍然采用基于模型控制的老概念,但出现在该领域的许多新观念正导致非模型控制。在设计基于模型的控制器时,设计者采用了受控装置及其环境的先验知识;这类知识通过装置及其环境的物理特征,或通过实验、辨识和估计来积累。非模型控制方法与在线学习机制相结合。神经网络和模糊逻辑领域出现的技术创新,有助于促进自主机器人系统向智能控制领域发展。近年来,智能控制的某些技术由生物学所固有的控制机理激发而产生;其中,进化控制和免疫控制是基于生物机理激发的控制的代表。

智能控制系统表现出许多系统科学家和应用数学家所积累的知识,特别是 20 世纪 60 年代,这些科学家首次提出了学习和适应这类术语,对一般研究领域和智能系统做出了贡献。细心的读者可能会发现,在智能控制的背后是反馈这一传统概念;反馈一直为我们所用,而且是所有人工控制机制的固有基础。实

际上,反馈不仅对包括智能控制在内的自动控制起到了重大作用,而且在发展和推进人类现代物质文明和精神文明方面也正在起着日益重要的作用。可以预言,具有复杂反馈机制的智能控制必将对 21 世纪高文明和高技术的社会产生举足轻重的影响。

我有幸亲历了智能控制的研究和发展进程。这是一种缘分,也是一种机遇。借此机会,略向大家汇报一二。1983—1985 年,我在美国普度(Purdue)大学等校留学期间,绝大部分时间是在美国国家工程科学院院士、国际智能控制的奠基者和开拓者傅京孙(K. S. Fu)教授的指导和合作下,研究机器人规划专家系统——一种基于知识工程的智能机器人高层控制技术和方法,受到国际大师的熏陶和指点,开始踏上研究智能系统的征程。当我们结束首次访美后不久,我们的《人工智能及其应用》于 1987 年在清华大学出版社出版发行了。该书为智能控制建立了重要基础。1985 年和 1987 年国际智能控制研讨会(ISIC)之后,智能控制作为一门新学科在国际上建立起来,并开始讨论智能控制的教学问题。中国的智能控制研究差不多是与国际同步启动的。为适应自动控制学科发展和教学改革的需要,瞄准国际前沿学科,全国自动控制与计算机教材编审委员会和电子工业部教材办于 1987 年向全国发出《智能控制》等统编教材公开征稿的通知。尽管编写时间紧迫并且参考资料奇缺,我还是大胆应征。我想,自己有一定自动控制的基础,又在美国研究过人工智能,两者在我身上的结合使我具有一定优势,因而满怀信心地进行准备,全力以赴地投入写作。经过一年多的艰苦努力,我于 1988 年写出书稿,呈交教材编审委员会评审。在教材编审委员会主任委员张钟俊院士、副主任委员兼该教材责任编委胡保生教授及全体委员的关怀和支持下,我编写的《智能控制》教材通过了教材编审委员会的审评,中标为全国统编教材,并于 1990 年由电子工业出版社出版,成为国内外公开出版的首部关于智能控制的教材和专著。该书于 1996 年获得第三届全国优秀教材(电子类)一等奖,并与其他著作一起于 2001 年获得全国高校自然科学奖二等奖。

1992—1993 年,我第二次留学美国,到纽约州伦塞勒大学(RPI)的太空探索智能机器人系统研究中心(CIRSSE),同国际著名智能控制专家萨里迪斯(G. N. Saridis)和桑德森(A. C. Sanderson)教授合作研究机器人的智能控制问题,得到不少启发,受益匪浅,为撰写智能控制新著打下了基础。

随着智能控制研究的进一步发展,到 20 世纪 90 年代中期,智能控制学科和课程内容有了进一步充实的基础和更新的必要。我的另外两部著作 *Intelligent Control: Principles, Techniques and Applications* 和《智能控制——基础与应用》于 1997 年年底和 1998 年年初分别在国外和国内问世。这些智能控制著作已具有比较充实的基础理论以及比较明确的研究和应用方向。

进入 21 世纪以来,智能控制学科又有了新的发展。为了及时反映智能控制

研究和学科的最新发展,在电子工业出版社的大力支持下,我们修订了《智能控制》课程的教学大纲,进一步优化和更新教学内容。我们确定的内容是:介绍智能控制的基本概念、工作原理、控制方法与应用,涉及人类的认知观和认知过程,智能控制的发展过程、定义和结构原理,知识表示方法和推理技术,计算智能的基本知识,各种智能控制系统的作用机理、结构和应用,一些新的智能控制简介以及智能控制的研究与应用展望等。我们的期望目标是:编写出反映新世纪智能控制学科发展水平和发展趋向的新一代智能控制课程研究生教材,争取为我国智能控制课程建设、教材建设以至学科建设做出新的贡献。

为了编好本教材,这两年来作者进行了深入的调研和充分的准备,其中包括 2004 年夏赴俄访问研究和 2005 年夏赴美访问研究。特别是在俄罗斯科学院圣彼得堡信息学与自动化研究所和美国 CASE 大学(CWRU)的研究,为本教材的编写提供了大量的第一手宝贵资料。

本书介绍智能控制的基本概念、工作原理、技术方法与应用。全书共 12 章。第 1 章介绍智能控制的概况,包括智能控制的起源与发展、智能控制的定义、特点、结构和分类,尤其是智能控制的学科结构理论。第 2 章~第 10 章逐一研究了递阶控制系统、专家控制系统、模糊控制系统、神经控制系统、学习控制系统、仿人控制、基于 MAS 的控制、进化控制与免疫控制以及基于 Web 的控制的作用机理、类型结构、设计方法、控制特性和应用示例。第 11 章讨论了复合智能控制。第 12 章探讨智能控制进一步研究的问题,并展望智能控制的发展方向。书中的大部分章节内容是十分新颖的,反映出了国内外智能控制研究和应用的最新进展,堪称国内外内容最新的一部智能控制教材。

综上所述,智能控制已颇具学科体系,包括基础理论、技术方法和实际应用诸方面。在基础理论方面,涉及传统人工智能的知识表示和推理、计算智能(如模糊计算、神经计算、进化计算和免疫计算等)和机器学习等。在技术方法方面,从递阶控制、专家控制、模糊控制、神经控制、学习控制、仿人控制、进化控制、免疫控制、基于 Web 的控制和基于 MAS 的控制等系统加以研究。在实际应用方面,则从十分广泛的领域举例剖析。各种不同人工智能学派的观点在智能控制学科上得到很好的包涵与融合,为不同学术派别的合作树立了和谐发展的典范。

本书相当大一部分内容是作者及其指导的博士研究生们合作研究的成果。这些博士生已获得博士学位,并在科学研究上做出新的成绩。其中,蔡竞峰、王勇、龚涛、周翔、文敦伟以及蔡清波博士等以不同形式参与了本书部分内容的编写工作。本书的另一部分内容借鉴了国内外其他专家和作者的最新研究成果。因此,本书较好地反映出国内外智能控制研究和应用的最新进展。与其他智能控制教材相比,很多内容是以前没有的,水平也有明显提高。例如,基于 Web 的控制、基于 MAS 的控制、进化控制、免疫控制等都有很大的编写难度。对原有

的智能控制系统,也补充了不少新内容。

本教材各版本的编写和本人的智能控制研究工作,一直得到众多专家的亲关怀指导和广大读者的热情支持帮助。K. S. Fu、A. C. Sanderson、A. B. Тимофеев、常迥、戴汝为、冯纯伯、高为炳、郭雷、何继善、胡启恒、黄伯云、黄琳、李德毅、李衍达、宋健、唐稚松、吴澄、吴文俊、杨嘉墀、张钟俊、郑南宁和周宏鑫等院士曾以各种不同方式给作者以指导和支持。褚健、何华灿、贺汉根、胡保生、李春盛、李祖枢、梁天培、饶立昌、施鹏飞、谭铁牛、涂序彦、王成红、王飞跃、王龙、王伟、王先来、魏世泽、吴启迪、席裕庚、徐孝涵、杨宜民、张钹、张良起、郑应平、钟义信和周其鉴等教授,用他们的智慧和友谊提供了诸多帮助。本书还从国内外许多智能控制和智能系统的高水平著作或与有关专家的讨论交流中吸取了新的营养。这些著作的作者和专家是 J. S. Albus、K. J. Åström、M. Brown、K. S. Fu、M. M. Gupta、C. J. Harris、M. Jamshidi、D. Katic、A. M. Meystel、R. Mohammad、C. G. Moore、N. Wiener、G. N. Saridis、N. K. Sinha、L. A. Zadeh、A. Zilouchian、陈曦、傅明、李人厚、李士勇、李祖枢、陆汝钤、罗公亮、莫宏伟、秦世引、瞿志华、史忠植、宋健、孙增圻、王立新、王耀南、徐丽娜、阎平凡、杨汝清、易继锴、张钹、张乃尧和诸静等教授。

谨向上列各位院士、教授、专家和朋友表示诚挚的感谢。

中南大学及其信息科学与工程学院的有关领导和师生对本书写作提供了宽松环境和多方协助。我主持的国家级研究课题组成员和我所指导的研究生们为本书做出特别贡献。余伶俐、陈白帆、曾威、龚涛、李仪、王勇、夏洁、江中央等精心打印了部分书稿或绘制了插图。清华大学出版社的有关领导和编辑也为本书的编辑出版付出了辛勤劳动。在此,也向他们深表谢意。

最后,特别感谢国家自然科学基金委员会、国家教育部新世纪网络课程建设工程和国家精品课程工程、湖南省教育厅以及中南大学对本项研究的支持。

本书的编著和出版是献给我的两位刚刚出世的可爱孙子的最好礼物,祝贺他们的诞生,祝愿他们茁壮成长。

今年是我从事信息科学研究 50 周年和从事高等教育工作 45 周年。愿借本书出版的机会,向所有教导过我的老师,向所有教育、鼓励、支持和帮助过我的领导、朋友和亲人,向所有与我合作和交流过的同行和合作者,向所有我的学生们表示最诚挚的感谢。

本书覆盖了智能控制领域各种广泛的主题。希望这 12 章内容能够为在蓬勃发展的智能控制学科领域学习与工作的师生、研究者和工程师们服务,做出应有贡献。本书可作为高等学校自动化、自动控制、机电工程和电子工程类专业研究生的教材,也可供从事智能控制、人工智能与智能系统研究、开发和应用的科技工作者参考使用。在使用本教材时,欢迎登录国家精品课程《智能控制》网址: <http://netclass.csu.edu.cn/jpkc2006/ic/index.htm>,并请批评指正。

尽管智能控制已获得很大发展,但仍然是一门十分年轻的学科,仍处于欣欣向荣的发展时期,对许多问题作者并未深入研究,一些有价值的新内容也来不及收入本书。加上编写时间很紧,作者知识和水平有限,书中存有不足之处在所难免,热忱欢迎各位专家、教授和广大读者赐正。

蔡自兴

2007年6月

于中南大学

目 录

第 1 章 智能控制概论	1
1.1 智能控制的产生与发展	1
1.1.1 自动控制的机遇与挑战	1
1.1.2 智能控制的发展和作用	3
1.2 智能控制的定义、特点、一般结构与分类	6
1.2.1 智能控制的定义、特点与评价准则	6
1.2.2 智能控制器的一般结构	8
1.2.3 智能控制系统的分类	8
1.3 智能控制的学科结构理论体系	11
1.3.1 二元交集结构理论	11
1.3.2 三元交集结构理论	12
1.3.3 四元交集结构理论	14
1.4 本书概要	17
习题	17
参考文献	17
第 2 章 递阶控制系统	20
2.1 递阶智能机器的一般理论	20
2.1.1 递阶智能机器的一般结构	20
2.1.2 递阶智能机器的信息论定义	23
2.1.3 IPDI 原理的解析公式	24
2.2 递阶智能控制系统的原理与结构	25
2.2.1 组织级原理与结构	25
2.2.2 协调级原理与结构	29
2.2.3 执行级原理与结构	30
2.3 递阶智能控制的控制与决策模型	31
2.3.1 组织级的控制与决策模型	31
2.3.2 协调级的控制与决策模型	36
2.3.3 执行级的控制与决策模型	38
2.4 递阶智能控制系统举例	39
2.4.1 汽车自动驾驶系统的组成	39
2.4.2 汽车自动驾驶系统的递阶结构	41
2.4.3 自动驾驶系统的结构与控制算法	43
2.4.4 自动驾驶系统的试验结果	44

2.5 集散递阶智能控制系统.....	45
2.5.1 集散递阶智能控制系统的工作原理	45
2.5.2 集散递阶智能控制系统示例	48
2.6 小结.....	52
习题	53
参考文献	53
第3章 专家控制系统	56
3.1 专家系统的基本概念.....	56
3.1.1 专家系统的定义与一般结构	56
3.1.2 专家系统的建造步骤	59
3.2 专家系统的主要类型及其结构.....	60
3.2.1 基于规则的专家系统	60
3.2.2 基于框架的专家系统	61
3.2.3 基于模型的专家系统	63
3.3 专家系统的知识表示与推理.....	65
3.3.1 知识表示	65
3.3.2 知识获取	70
3.3.3 知识推理	72
3.3.4 不确定性推理	75
3.3.5 基于规则的推理系统	77
3.4 专家控制系统的结构与类型.....	78
3.4.1 专家控制系统的控制要求与设计原则	79
3.4.2 专家控制系统的结构	81
3.4.3 专家控制系统的类型	84
3.5 专家控制系统的建模.....	85
3.5.1 受控对象模型	85
3.5.2 专家控制器的模型	86
3.5.3 专家控制系统模型	90
3.6 专家控制器的设计.....	92
3.7 专家控制系统应用举例.....	94
3.7.1 实时控制系统的特点与要求	94
3.7.2 高炉监控专家系统	95
3.8 小结.....	99
习题.....	100
参考文献.....	101
第4章 模糊控制系统.....	103
4.1 模糊数学基础	103
4.1.1 模糊集合、模糊逻辑及其运算	103
4.1.2 模糊逻辑推理.....	106

4.1.3 模糊判决方法	108
4.2 模糊控制系统原理与结构	109
4.2.1 模糊控制原理	110
4.2.2 模糊控制系统的工作原理	110
4.3 模糊控制器的设计内容	111
4.3.1 模糊控制器的设计内容与原则	111
4.3.2 模糊控制器的控制规则形式	115
4.4 模糊控制系统的设计方法	116
4.4.1 模糊系统设计的查表法	116
4.4.2 模糊系统设计的梯度下降法	118
4.4.3 模糊系统设计的递推最小二乘法	121
4.4.4 模糊系统设计的聚类法	122
4.5 模糊控制器的设计实例与实现	123
4.5.1 造纸机模糊控制系统的设计与实现	123
4.5.2 直流调速系统模糊控制器的设计	128
4.6 模糊控制系统的特性	130
4.6.1 模糊控制器的静态特性	130
4.6.2 模糊控制系统的稳定性	132
4.6.3 模糊控制系统的可控性	133
4.6.4 模糊控制系统的鲁棒性	134
4.7 小结	135
习题	136
参考文献	137
第5章 神经控制系统	140
5.1 人工神经网络概述	140
5.1.1 神经元及其特性	141
5.1.2 神经网络与智能控制	141
5.1.3 人工神经网络的基本类型和学习算法	142
5.1.4 人工神经网络的典型模型	143
5.1.5 基于神经网络的知识表示与推理	145
5.2 神经控制的结构方案	147
5.2.1 NN 学习控制	147
5.2.2 NN 直接逆模控制与内模控制	148
5.2.3 NN 自适应控制	149
5.2.4 NN 预测控制	151
5.2.5 基于 CAMC 的控制	151
5.2.6 多层 NN 控制和分级 NN 控制	153
5.3 神经控制器的设计与实现	154
5.3.1 石灰窑炉神经内模控制系统的设计	154

5.3.2	神经模糊自适应控制器的设计	158
5.3.3	神经控制系统应用举例	162
5.4	神经控制系统的稳定性	165
5.4.1	神经控制器的稳定性证明	165
5.4.2	设计一个稳定的神经控制器	170
5.5	小结	171
	习题	171
	参考文献	172
第6章	学习控制系统	176
6.1	学习控制概述	176
6.1.1	学习控制的定义与研究意义	176
6.1.2	学习控制的发展及其与自适应控制的关系	178
6.1.3	控制律映射及对学习控制的要求	181
6.2	学习控制方案	182
6.2.1	基于模式识别的学习控制	183
6.2.2	迭代学习控制	185
6.2.3	重复学习控制	188
6.2.4	基于神经网络的学习控制	189
6.3	学习控制系统的建模与特性分析	189
6.3.1	学习控制系统的建模	189
6.3.2	学习控制系统的稳定性和收敛性分析	192
6.3.3	学习系统的性能反馈	199
6.4	学习控制系统应用举例	201
6.4.1	无缝钢管张力减径过程壁厚控制迭代学习控制算法	201
6.4.2	钢管壁厚迭代学习控制的仿真及应用结果	203
6.5	小结	206
	习题	207
	参考文献	207
第7章	仿人控制	209
7.1	仿人控制基本原理与原型算法	209
7.1.1	仿人控制的基本原理	209
7.1.2	仿人控制的原型算法和智能属性	210
7.2	仿人控制的递阶结构	211
7.2.1	人体运动控制的递阶结构	211
7.2.2	产生式系统的组成与推理	213
7.2.3	仿人智能控制的高阶递阶结构	217
7.3	仿人控制的特征模型和决策模态	219
7.3.1	仿人控制的特征模式与特征辨识	219
7.3.2	仿人控制的多模态控制	221

7.4 仿人控制器的设计与实现	223
7.4.1 仿人控制系统的设计依据	223
7.4.2 仿人智能控制器设计与实现的一般步骤	224
7.5 仿人控制器的设计与实现示例	228
7.5.1 小车-单摆系统仿人控制器的设计	228
7.5.2 小车-单摆系统仿人控制器的实现	231
7.6 小结	233
习题	234
参考文献	234
第8章 基于多真体系统(MAS)的控制	236
8.1 分布式人工智能与真体(Agent)	236
8.1.1 分布式人工智能	236
8.1.2 真体及其特性	238
8.1.3 真体的结构	240
8.2 真体的通信	243
8.2.1 真体通信的类型和方式	243
8.2.2 真体的通信语言	245
8.3 多真体系统	246
8.3.1 多真体系统的模型和结构	247
8.3.2 多真体系统的协作、协商与协调	248
8.3.3 多真体系统的学习与规划	251
8.4 多真体控制系统的工作原理	252
8.4.1 MAS控制系统的基本原理和结构	252
8.4.2 MAS控制系统的信息模型	255
8.5 MAS控制系统的设计与实现示例	258
8.5.1 基于MAS的多机械手装配系统规划与控制	258
8.5.2 烧结过程的多真体建模与控制	263
8.6 小结	268
习题	269
参考文献	270
第9章 进化控制与免疫控制	273
9.1 遗传算法简介	273
9.1.1 遗传算法的基本原理	273
9.1.2 遗传算法的求解步骤	276
9.2 进化控制基本原理	279
9.2.1 进化控制原理与系统结构	279
9.2.2 进化控制的形式化描述	280
9.3 进化控制系统示例	281
9.3.1 一种在线混合进化伺服控制器	281

9.3.2	一个移动机器人进化控制系统	287
9.4	免疫算法和人工免疫系统原理	289
9.4.1	免疫算法的提出和定义	289
9.4.2	免疫算法的步骤和框图	291
9.4.3	人工免疫系统的结构	293
9.4.4	免疫算法的设计方法和参数选择	294
9.5	免疫控制基本原理	296
9.5.1	免疫控制的系统结构	296
9.5.2	免疫控制的自然计算体系和系统计算框图	298
9.6	免疫控制系统示例	299
9.6.1	扰动抑制和最优控制器的性能指标	299
9.6.2	基于免疫算法的扰动抑制问题	300
9.6.3	选择最优参数的计算步骤	302
9.6.4	免疫反馈规则与免疫反馈控制器的设计	304
9.7	小结	305
	习题	306
	参考文献	306
第 10 章	基于 Web 的控制	311
10.1	Web 和计算机网络简介	311
10.1.1	Web 和计算机网络的定义和体系结构	311
10.1.2	Web 的工作机制和站点体系结构	314
10.2	基于 Web 的控制原理和控制系统结构	315
10.2.1	基于 Web 的控制系统的一般原理与结构	315
10.2.2	基于 Web 的控制系统结构实例分析	317
10.3	基于 Web 的控制系统示例	318
10.3.1	基于 Web 控制系统的结构	318
10.3.2	基于 Web 控制系统的通信协议及其处理算法	320
10.3.3	基于 Web 的嵌入式控制器和系统实验	323
10.4	小结	325
	习题	325
	参考文献	326
第 11 章	智能复合控制	328
11.1	智能复合控制概述	328
11.2	模糊神经复合控制原理与方案	329
11.2.1	模糊神经网络原理	329
11.2.2	模糊神经复合控制方案	331
11.3	模糊神经复合控制系统举例	333
11.3.1	自学习模糊神经控制模型	334
11.3.2	自学习模糊神经控制算法	335

11.3.3 弧焊过程自学习模糊神经控制系统	336
11.4 专家模糊复合控制器	337
11.4.1 专家模糊控制系统的结构	338
11.4.2 专家模糊控制系统示例	339
11.5 进化模糊复合控制器	341
11.5.1 控制器设计步骤和参数优化方法	341
11.5.2 解释(编码)函数的设计	343
11.5.3 规则编码	346
11.5.4 初始种群和适应度函数的计算	349
11.5.5 直流电动机 GA 优化模糊速度控制系统	352
11.6 其他模糊复合控制器	355
11.6.1 PID 模糊控制器	355
11.6.2 自组织模糊控制器	356
11.6.3 自校正模糊控制器	357
11.6.4 自学习模糊控制器	358
11.7 小结	359
习题	360
参考文献	360
第 12 章 智能控制的展望	363
12.1 人工智能争论及其对智能控制的影响	363
12.2 智能认识论的若干基础问题	365
12.3 智能控制的应用研究问题	368
12.4 智能控制的进一步研究问题	373
12.5 展望智能控制的发展	375
12.5.1 寻求更新的理论框架	375
12.5.2 进行更好的技术集成	376
12.5.3 开发更佳的应用方法	377
12.6 结束语	377
习题	378
参考文献	379

第 1 章

智能控制概论

人工智能(artificial intelligence, AI)学科已走过了半个世纪的路程,它的发展已引起众多学科和不同专业背景的学者们的日益重视,并成为一门广泛的交叉和前沿科学。近十多年来,现代计算机的发展使人工智能获得了进一步的应用。人工智能的研究将在越来越多的领域超越人类智能,并将为发展人类的物质文明和精神文明做出更大贡献。

人类通过研究人工智能正以空前的规模、速率和成效从大自然学习并力图通过智能机器来模仿人类的认知过程和自然智能,其目标在于构建一个能够在不确定和非结构环境中运行的自主智能系统。这种智能机器具有现实的和潜在的挑战性。不过,现在运行于制造业、卫生、农业、采矿、空间和海洋等行业的机器人很少存在这类应用例子。智能控制系统则是这种智能机器的一个子集。

人工智能已经促进自动控制向着它的当今最高层次——智能控制发展。智能控制代表了自动控制的最新发展阶段,也是应用计算机模拟人类智能,实现人类脑力劳动和体力劳动自动化的一个重要领域。

本章将首先讨论智能控制的产生与发展概况,接着叙述智能控制的定义、特点、一般结构与分类,然后探讨智能控制的学科结构理论,最后介绍本书的主要内容和编排。

1.1 智能控制的产生与发展

智能控制采用各种智能化技术实现复杂系统和其他系统的控制目标,是一种具有强大生命力的新型自动控制技术。尽管智能控制这门学科的建立只有 20 年历史,但它的发展前景十分诱人。从智能控制的发展过程和已取得的成果来看,智能控制的产生和发展正反映了当代自动控制的发展趋势,是历史的必然。智能控制已发展成为自动控制的一个新的里程碑;发展成为一种日趋成熟和日臻完善的控制手段,并获得日益广泛的应用。

1.1.1 自动控制的机遇与挑战

长期以来,自动控制科学已对整个科学技术的理论和实践做出了重要贡献,并为人类的生产、经济、社会、工作和生活带来了巨大利益。然而,现代科学技术的迅速发展和重大进步,已对控制和系统科学提出了新的更高的要求,自动控制理论和工程正面临新的发展机遇和严峻挑战。传统控制理论,包括经典反馈控制、现代控制和大系统理论等,在应用中遇到了不少难题。多年来,自动控制一直在寻找新的出路。