



新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

智能控制导论

第三版

蔡自兴 编著



国家精品课程

“智能控制” 配套教材

国家精品资源共享课程

“智能控制” 配套教材



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

智能控制导论

(第三版)

蔡自兴 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书介绍智能控制的基本概念、原理、技术与应用。全书共 8 章。第 1 章介绍智能控制的概况,第 2 章至第 7 章逐一研究了递阶控制、专家控制、模糊控制、神经控制、进化控制和网络控制等系统,第 8 章介绍智能控制的发展简史与展望。与第二版相比,许多章节内容得到更新。本书内容系统、全面、新颖、精练,反映出国内外智能控制研究和应用的最新进展,是一本智能控制的导论性教材。

本书可作为高等院校自动化、电气工程与自动化、智能科学与技术、测控工程、信息工程、机器人、人工智能、机电工程和电子工程类专业本科生的智能控制类课程教材、大专院校和高等职业技术学院相关专业的教材或教学参考书,也可供从事智能控制与智能系统研究、设计、开发和应用的科技工作者参考。

本书配有免费电子教案,读者可从中国水利水电出版社网站或万水书苑下载,网址:
<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>和 <http://www.wsbookshow.com>。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制导论 / 蔡自兴编著. -- 3版. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2019.5
新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材
ISBN 978-7-5170-7626-1

I. ①智… II. ①蔡… III. ①智能控制—高等学校—
教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第070378号

策划编辑: 杨庆川 责任编辑: 张玉玲 加工编辑: 王玉梅 封面设计: 李 佳

书 名	新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材 智能控制导论(第三版)
作 者	ZHINENG KONGZHI DAOLUN 蔡自兴 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.25印张 318千字
版 次	2007年5月第1版 2007年5月第1次印刷 2019年5月第3版 2019年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

编审委员会

顾问:

冯博琴 (西安交通大学教授, 第一届国家级教学名师)
蔡自兴 (中南大学教授, 第一届国家级教学名师)
蔡惟铮 (哈尔滨工业大学教授, 第一届国家级教学名师)

主任委员:

邹逢兴 (国防科学技术大学教授, 第一届国家级教学名师)

副主任委员:

刘甘娜 (大连海事大学教授, 教育部非计算机专业计算机基础课程
教学指导分委员会委员)
胡德文 (国防科学技术大学教授, 国家杰出青年科学基金获得者)
龚沛曾 (同济大学教授, 国家级精品课程负责人)
王移芝 (北京交通大学教授, 国家级精品课程负责人)

委员:

孙即祥	陈怀义	叶湘滨	马宏绪	张湘平	高 政
李 革	刁节涛	卢启中	潘孟春	陆 勤	黄爱民
宋学瑞	李云钢	陈立刚	彭学锋	徐晓红	杨益强
陈贵荣	王成友	史美萍	李 迅	徐 欣	王 浩

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

总 序

电子信息与自动化系列课程是专业适用面很广的课程系列。随着电子信息时代的到来，特别是进入 21 世纪之后，我国各级各类本科院校相当多的理工科专业都或多或少地开设了该系列课程中的课程。因此，提高该系列课程的教学水平、教学质量，对于提高我国高等教育水平和质量，增强当代大学生应用先进的信息技术解决专业领域问题的能力和业务素质，具有特殊的重要意义。而教材是课程内容和课程体系的知识载体，对课程改革和建设既有龙头作用，又有推动作用，所以要提高课程教学水平和质量，关键是要有高水平、高质量的教材。

正是基于上述认识，中国水利水电出版社有限公司推动成立了“新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材”编审委员会，在经过近两年时间的深入调查研究的基础上，策划提出了本系列教材的编写、出版计划。

本系列教材总的定位是面向各级各类高等院校的本科教学，重点是一般本科院校的教学。整个教材系列大体分为电子信息与通信、计算机基础教育和测控技术与自动化三类，共约 50 本主体教材，它们既自成体系，具有信息类学科的系统性、完整性，又有相对独立性。参加本系列教材编写的作者全部是一些重点大学长期从事相关课程教学的教授、副教授，大多是所在单位的学科学术带头人或学术骨干，不少还是全国知名专家教授、国家级教学名师和教育部有关“教指委”专家、国家级精品课程负责人等。他们不仅有丰富的教学经验，而且有丰富的相关领域的科研经验，对有关课程的内涵、特点、内容相关性及应用等都有较深刻的认识和切身体验。这对编写、出版好本系列教材是十分有利的条件。

本系列教材在编写时均遵循了以下指导思想：

（1）正确处理先进性和基础性的关系，努力实现两者的统一。

作为进入新世纪的新编信息类教材，既注意在原有同类教材的基础上推陈出新，努力反映科学技术的最新成就，使之具有鲜明的时代特征和先进水平，又注重符合教学规律、教学特点，突出基本原理、基本知识、基本方法和基本技术技能的阐述，着力培养学生应用基础知识分析、解决问题的创新思维能力和将来独立获取、掌握新知识，跟踪相关科学技术发展的能力。

（2）正确处理理论与实践的关系，切实贯彻理论与实践紧密结合的原则。

本系列教材绝大多数都是理论与实际结合紧密、实用性很强的课程教材，因此特别强调从应用的角度组织内容，在重视理论系统性的同时，尤其突出实践性、应用性，使学生学了以后懂得有什么用、怎么用。在教材内容阐释时，积极引入“案例”，将基本知识单元、知识点的讲解融入典型案例的解决和研究过程中，以培养学生解决工程实际问题的能力作为突破口。

（3）遵循“宽编窄用”的内容选取原则和模块化的内容组织原则。

凡教育部课程“教指委”制定了教学基本内容及要求的课程，所编教材均覆盖基本内容，满足基本要求；其他的教材内容选取也都尽量符合多数学校和国内外同行专家的共识。在此基础上再改革创新，努力从继承与发展的结合上来准确把握（取舍）内容。模块化的内容组织主要有利

于适应不同专业、不同层次、不同学时数的教学组织和安排。

(4) 努力贯彻素质教育与创新教育的思想, 尽量采用“问题牵引”“任务驱动”的编写方式, 融入启发式教学方法。

各知识单元尽量以实际问题、工程实例引出相关知识点, 在启发学生分析、解决问题及实例的过程中, 讲清原理和概念, 提炼解决问题的思路和方法, 着力培养学生的创新思维意识、习惯和能力, 提高学生思考、分析、解决工程实际问题的素质和能力。

(5) 注重内容编排的科学严谨性和文字叙述的准确生动性, 务求好教好学。

在内容组织上, 除条理清晰、逻辑严谨外, 还尽量做到重点突出、难点分散、循序渐进, 使学生易于理解。在文字叙述上, 不仅概念准确、语言流畅, 而且力求富有启发性、互动性、感染性、思想性, 重视运用形象思维的方法和通俗易懂的语言, 深入浅出地叙述复杂概念, 说明难点问题。

(6) 立足于形成立体配套的教材体系, 以适应现代化教育教学方法手段的需要。

每本教材编写出版后都配套制作有 PowerPoint 电子教案, 可从中国水利水电出版社网站上免费下载。大部分主教材出版后还将相继出版配套的辅助教材(包括教学辅导、习题解答、实验教程等), 有的还将推出相应的多媒体教学资源库、CAI 课件和课程网站, 为教师备课、教学和学生自主性、个性化学习提供更多更好的支持。

总之, 本系列教材是近年来各位作者及所在学校、学科课程教学改革和科学研究成果的结晶, 在内容上、体系上、模式上有一定创新。我相信, 它的出版将对推动我国高校电子信息与自动化系列课程的改革发挥积极的作用。

但是, 由于电子信息与自动化类学科的内涵十分丰富, 课程覆盖面很广, 在组织策划本系列教材时难免有挂一漏万和不妥之处, 所编教材质量也未必都能如愿, 恳请广大读者多提宝贵意见, 以使本系列教材渐趋合理、完善。

邹逢兴

2005年6月

第三版前言

当前国内外正出现人工智能及其产业化热潮,《智能控制导论》(第三版)的修订,正适应人工智能和智能控制新发展的需要,将为我国智能控制的人才培养做出应有贡献。

《智能控制导论》(第三版)介绍智能控制的基本原理及其应用,所涉及的智能控制系统包括递阶控制、专家控制、模糊控制、神经控制、进化控制和网络控制等。本次修订注意“瘦身”与“强体”结合,对全书内容进行了较大更新。首先,删去了人工智能的学派理论与计算方法、学习控制、分布式控制、免疫控制、模糊专家复合控制以及仿人控制等内容,在保留智能控制基本内容的同时使全书篇幅得以减少。然后,增加或更新了一些内容,如模糊推理与模糊判决、深层神经网络与深度学习、计算机网络的发展以及智能控制发展简史与展望等。

我要诚挚感谢许多智能控制和人工智能专家长期以来对本书的关心与指教,衷心感谢国家教育部对我主持的国家级精品课程和精品资源共享课程“智能控制”的立项与支持,感谢中国科学技术协会《科技导报》编辑部、中南大学智能系统与智能控制研究所和湖南省自兴人工智能研究院的厚爱帮助,感谢肖晓明、余伶俐、肖赤心、王晶、蔡竞峰、任孝平等参加本书修订或提供了富有参考价值的国内外智能控制文献,特别感谢中国水利水电出版社有限公司编辑等出版人员为本书付出的辛勤劳动。他们的鼓励、支持与帮助是本书顺利出版的重要保证。

本书是国家级精品课程和国家级精品资源共享课程“智能控制”的配套教材以及新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材,可作为全国高等院校自动化、电气工程与自动化、智能科学与技术、测控工程、信息工程、人工智能、机电工程和电子工程等专业的本科生智能控制类课程教材、大专院校和高等职业技术学院相关专业的教材或教学参考书,也可供从事智能控制和智能系统研究、设计、开发与应用的科技工作者参考。

由于修订时间比较匆忙以及作者知识和能力的局限,本书一定存在一些不足之处,欢迎广大专家、高校师生和其他读者提出宝贵意见,供下次修订时参考与借鉴。

蔡自兴

2019年5月

于长沙德怡园

第二版前言

本书第一版出版至今已有6个年头。为了反映国内外智能控制的最新进展,满足国内智能控制科学研究和课程教学的需要,有必要对该书进行修订。

《智能控制导论》(第二版)介绍智能控制的基本原理及其应用,着重讨论智能控制几个主要系统的原理、方法及应用。所涉及的智能控制系统依次为递阶控制、专家控制、模糊控制、神经控制、学习控制、进化控制与免疫控制、多真体控制、网络控制、复合智能控制等系统。本次修订时,对全书进行了较大更新,特别突出了计算智能(软计算),加强了模糊控制与神经控制的计算和Matlab工具的应用指导,充实了网络控制的内容,对其他各章也做了一些调整与增删,例如把“网络控制”和“多真体控制”分别扩展独立成章,删去“其他智能控制”和“展望智能控制”两章,把“仿人控制”并入“复合控制”,把“展望智能控制”的部分内容调入第1章“概述”等。在保持本书固有特色的基础上,精炼了内容,增加了训练,吸收了新知识,更加适合作为本科生教材,有利于提高课程教学水平和本科生培养质量。

本书是国家精品课程和国家精品资源共享课程“智能控制”的配套教材,可作为高等院校自动化、电气工程与自动化、智能科学与技术、测控工程、机电工程、电子工程等专业本科生智能控制类课程的教材,也可供从事智能控制和智能系统研究、设计、应用的科技工作者阅读与参考。

值此新版问世之际,想向广大读者汇报我的智能控制著作编著与出版的历程。本书是我在国内外出版的智能控制著作的第九个版本:①智能控制(全国统编教材),电子工业出版社,1990;②Intelligent Control: Principles, Techniques and Applications, World Scientific Publishers, 1997;③智能控制——基础及应用,国防工业出版社,1998;④智能控制,第2版,电子工业出版社,2004;⑤人工智能控制(研究生用书),化学工业出版社,2005;⑥智能控制原理与应用,清华大学出版社,2007;⑦智能控制导论,中国水利水电出版社,2007;⑧智能控制原理与应用,第2版,清华大学出版社,2013;⑨智能控制导论,第2版,中国水利水电出版社,2013。这些智能控制著作的编著与出版,得到众多专家、学者和相关部门领导、同仁的支持与帮助,受到高校广大师生和其他读者的热情欢迎和普遍使用,为我国智能控制学科建设、课程建设和人才培养做出了应有贡献。谨对各位专家、领导、编辑、师生和其他读者致以衷心感谢!

在第二版修订出版过程中,继续得到许多专家和同仁的有力帮助。中国水利水电出版社宋俊娥编辑等为本书的编辑和出版付出辛勤劳动;国内外许多智能控制专著、教材和论文的作者为本书提供了丰富的营养,使我们受益匪浅。在此对所有这些支持与帮助表示诚挚感谢!

本书由蔡自兴编著。肖晓明、余伶俐、谷明琴、郭璠和李昭协助第4章、第5章和第9章的修订。

本书的出版也是献给龙年九、十月(2012年11月和12月)先后出生的我的小孙女和小孙子的一份礼物,他们的平安诞生和健康成长使我们感到欣慰与温馨。

由于修订时间比较匆忙,一些新资料未能及时收集与消化,本书难免存在一些不足之处,诚恳欢迎和衷心感谢广大专家、高校师生和其他读者提出宝贵意见,供下次修订时参考与借鉴。

蔡自兴

2013年8月于美国西雅图

第一版前言

地球上的生物经历了长期的和不断的进化历程,并最终得到进化的最新高级产品——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、智能机器人和智能控制,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。

我自 1988 年应征《智能控制》教材招标,开始编写智能控制教材至今将近 20 年了。随着智能控制学科的发展,在从对智能控制知之较少到知之较多的过程中,我所编著的智能控制教材也从写得较薄到写得较厚,其篇幅和深度已远远超过本科教学要求。因此,多年来我一直存在编写一本比较简练的本科生智能控制教材的愿望。现在,中国水利水电出版社和邹逢兴教授盛情邀请我写一本比较适用的智能控制本科生教材,为我提供了实现愿望的机会。

本书定名为《智能控制导论》,是一本智能控制的导论性教材。本书介绍智能控制的基本概念、原理、技术与应用,共十章。第一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。第二章至第六章逐一研究了递阶控制、专家控制、模糊控制、神经控制和学习控制,第七章讨论进化控制和免疫控制,第八章叙述复合智能控制,第九章探讨仿人控制、基于 MAS 的控制及基于 Web 的控制,第十章论述智能控制进一步研究的问题,并展望智能控制的发展方向。本书内容系统、全面、新颖、精练,反映出国内外智能控制研究和应用的最新进展。

本书作为高等院校自动化、自动控制、机电工程和电子工程类专业本科生的智能控制教材,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,还可作为大专院校和高等职业技术学院有关专业的教学参考书使用。对于研究生课程,请使用本教材的姊妹篇《智能控制原理与应用》一书。

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。我主持的国家级研究课题组成员、国家精品课程“智能控制”教研组成员和我所指导的研究生们为本书做出特别贡献。本教材的编写得到众多专家的亲切关怀指导和广大读者的热情支持帮助。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给予许多帮助。中国水利水电出版社的有关领导和责任编辑也为本书的编辑出版付出了辛勤劳动。国家自然科学基金委员会及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以及湖南省教育厅精品课程工程对本项研究提供了重要支持。在此,谨向他们表示诚挚的感谢。

今年是我从事信息科学研究 50 周年和从事高等教育 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。

本书的编著和出版是献给我的两位新问世的可爱孙子的最好礼物。我满怀喜悦地祝贺他们的诞生,衷心地祝愿他们茁壮成长。

虽然智能控制已取得长足进展,但她仍然是一门十分年轻的学科,作者对许多问题并未深入研究。由于编写时间较紧,作者水平有限,书中一定存有不足之处,希望各位专家、教授和广大读者批评指正。

蔡自兴

2007 年 2 月 17 日于长沙岳麓山

目 录

总序	
第三版前言	
第二版前言	
第一版前言	
第 1 章 概述	1
1.1 智能控制的产生与发展	2
1.1.1 自动控制面临的机遇与挑战	2
1.1.2 智能控制的发展和学科的建立	3
1.2 智能控制的基本知识	6
1.2.1 智能控制的定义与特点	6
1.2.2 智能控制器的设计特点与一般结构	7
1.2.3 智能控制系统的分类	8
1.3 智能控制的结构理论	10
1.3.1 二元交集结构理论	11
1.3.2 三元交集结构理论	11
1.3.3 四元交集结构理论	12
1.4 本书概要	16
习题 1	16
第 2 章 递阶控制	17
2.1 递阶智能机器的一般结构	18
2.2 递阶智能控制系统举例	20
2.2.1 汽车自动驾驶系统的组成	20
2.2.2 汽车自动驾驶系统的递阶结构	21
2.2.3 自动驾驶系统的结构与控制算法	24
2.2.4 自动驾驶系统的试验结果	25
2.3 本章小结	26
习题 2	26
第 3 章 专家控制	27
3.1 专家系统的基本概念	28
3.1.1 专家系统的定义与一般结构	28
3.1.2 专家系统的建造步骤	30
3.2 专家系统的主要类型及其结构	30
3.2.1 基于规则的专家系统	31
3.2.2 基于框架的专家系统	32
3.2.3 基于模型的专家系统	33
3.3 专家控制系统的结构与类型	35
3.3.1 专家控制系统的控制要求与设计原则	36
3.3.2 专家控制系统的结构	38
3.3.3 专家控制系统的类型	41
3.4 专家控制系统应用举例	42
3.4.1 实时控制系统的特点与要求	42
3.4.2 高炉监控专家系统	43
3.5 本章小结	45
习题 3	46
第 4 章 模糊控制	47
4.1 模糊数学基础	48
4.1.1 模糊集合、模糊逻辑及其运算	48
4.1.2 模糊关系与模糊变换	50
4.1.3 模糊逻辑语言	52
4.2 模糊推理与模糊判决	53
4.2.1 模糊逻辑推理	53
4.2.2 模糊判决方法	57
4.3 模糊控制系统的原理与结构	59
4.3.1 模糊控制原理	59
4.3.2 模糊控制系统的工作原理	60
4.4 模糊控制器的设计内容	61
4.4.1 模糊控制器的设计内容与原则	61
4.4.2 模糊控制器的控制规则形式	65
4.5 模糊控制系统的设计方法	66
4.5.1 模糊系统设计的查表法	66
4.5.2 模糊系统设计的梯度下降法	67
4.5.3 模糊系统设计的递推最小二乘法	70
4.5.4 模糊系统设计的聚类法	72
4.6 模糊控制器的设计实例与实现	73
4.6.1 模糊控制器设计	74
4.6.2 模糊控制器的在线实现	76
4.7 Matlab 模糊控制工具箱简介	79
4.8 本章小结	80

习题 4	80	6.2.2 进化控制的形式化描述	129
第 5 章 神经控制	83	6.3 进化控制系统示例	130
5.1 人工神经网络的初步知识	84	6.4 本章小结	132
5.1.1 神经元及其特性	84	习题 6	132
5.1.2 神经网络与智能控制	85	第 7 章 网络控制	135
5.1.3 人工神经网络的基本类型和学习 算法	86	7.1 计算机网络与网络控制基础	136
5.1.4 人工神经网络的典型模型	89	7.1.1 计算机网络及其结构	136
5.1.5 基于神经网络的知识表示与推理	93	7.1.2 数据通信与网络通信	137
5.2 神经控制的结构方案	96	7.1.3 网络控制的基本问题	138
5.2.1 NN 学习控制	96	7.2 计算机网络的发展	139
5.2.2 NN 直接逆模控制与内模控制	97	7.2.1 国际计算机网络的发展	139
5.2.3 NN 自适应控制	98	7.2.2 中国计算机网络的发展	140
5.3 深层神经网络与深度学习	99	7.3 网络控制系统的结构与特点	141
5.3.1 深层神经网络	99	7.3.1 网络控制系统的一般原理与结构	141
5.3.2 深度学习的定义与特点	100	7.3.2 网络控制系统的特点与影响因素	144
5.3.3 深度学习的常用模型	101	7.4 网络控制系统的性能评价标准	146
5.3.4 深度学习应用举例	103	7.4.1 网络服务质量	146
5.4 神经控制器的设计	104	7.4.2 系统控制性能	147
5.4.1 神经控制系统的设计内容和结构	104	7.5 网络控制系统的应用举例	147
5.4.2 神经控制器的训练与学习算法	105	7.5.1 烟草包装网络测控系统的工作原理	147
5.5 模糊神经复合控制	109	7.5.2 烟草包装网络测控系统的功能与 特色	151
5.5.1 模糊神经复合控制原理	109	7.6 本章小结	151
5.5.2 自学习模糊神经控制模型	111	习题 7	152
5.5.3 自学习模糊神经控制算法	112	第 8 章 智能控制的发展简史与展望	153
5.5.4 弧焊过程自学习模糊神经控制系统	114	8.1 智能控制发展简史	154
5.6 Matlab 神经网络工具箱及其仿真	115	8.1.1 国内外智能控制发展过程	154
5.6.1 Matlab 神经网络工具箱图形用户 界面设计	115	8.1.2 我国智能控制科技成果	154
5.6.2 基于 Simulink 的神经网络及其 控制仿真	116	8.1.3 我国智能控制教育与人才培养	157
5.7 本章小结	118	8.1.4 我国智能控制的存在问题	158
习题 5	119	8.2 智能控制展望	159
第 6 章 进化控制	121	8.2.1 智能控制研究展望	159
6.1 遗传算法简介	122	8.2.2 智能控制应用展望	161
6.1.1 遗传算法的基本原理	122	8.2.3 智能控制发展展望	166
6.1.2 遗传算法的求解步骤	125	8.3 本章小结	168
6.2 进化控制基本原理	127	习题 8	169
6.2.1 进化控制原理与系统结构	127	参考文献	171
		附录 各章教学重点、难点和要求	183



第 1 章

概述

梦想总是伴随人类的发展而存在。例如，人类梦想发明各种机械工具和动力机器，协助甚至代替人们从事各种体力劳动。18 世纪第一次工业革命中，瓦特发明的蒸汽机开辟了人类利用机器动力代替人力和畜力的新纪元。此后，显著减轻体力劳动和实现生产过程自动化才成为可能。人类又梦想发明各种智能工具和智能机器，协助甚至代替人们从事各种脑力劳动。20 世纪 40 年代计算机的发明和 50 年代人工智能的出现开辟了人类利用智能机器代替自身脑力劳动的新纪元。此后，显著减轻脑力劳动和实现生产过程智能化才成为可能。

人类在发展过程中总要不不断有所创新、有所发明、有所前进、与时俱进。自动控制也不例外。我们将从本书看到自动控制近半个世纪以来取得的长足进展。

人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 学科自 1956 年建立以来，已走过 60 多年的路程。人工智能的发展已引起众多学科和不同专业背景学者们的日益重视，成为一门广泛的交叉和前沿科学。现代计算机的发展使人工智能获得进一步的应用，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。近年来，人工智能及其产业化的迅速发展，为各国科学技术进步、国民经济发展和人民生活改善带来了前所未有的机遇与挑战，也为智能控制的发展提供了优良的环境。

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 (Intelligent Control)——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

智能控制的产生和发展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,发展成为一种日臻完善和广泛应用的控制新手段。

1.1.1 自动控制面临的机遇与挑战

自动控制在20世纪40年代至80年代取得长足进展。在自动控制领域,20世纪40年代至60年代,主要研究线性控制和非线性控制机理,这类控制器的设计主要建立在频域理论模型的基础上。从20世纪60年代至80年代,控制系统快速发展,出现了许多理论创新,包括应用了状态空间法,发展了强有力的可控性和可观性概念,以及演化了最优控制和随机控制理论等。在这个时期,最优性、自适应性、自学习和鲁棒性等得以引用,不过这时的控制方法论仍然极大地依赖于基于模型的方法,受控装置和随机环境的模型是由它们的物理特性建立的,而且通过离线和在线参数估计。

自动控制科学已对整个科学技术的理论和实践做出重要贡献,并为人类的生产和生活带来巨大便利。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、近代控制和大系统理论等,在应用中遇到不少难题。多年来,自动控制一直在寻找新的出路。

自动控制科学面临的困难及其智能化出路说明:自动控制既面临严峻挑战,又存在良好机遇。自动控制正是在这种挑战与机遇并存的情况下不断发展的。

传统控制理论在应用中面临的难题包括:

(1) 传统控制系统的设计与分析是建立在精确的系统数学模型基础上的,而实际系统由于存在复杂性、非线性、时变性、不确定性和不完全性等特性,一般无法获得精确的数学模型。

(2) 研究这类系统时,必须提出并遵循一些比较苛刻的假设,而这些假设在应用中往往与实际不相吻合。

(3) 对于某些复杂的和包含不确定性的对象,根本无法以传统数学模型来表示,即无法解决建模问题。

(4) 为了提高性能,传统控制系统可能变得很复杂,从而增加了设备的投入和维修费用,降低系统的可靠性。

(5) 应用要求进行创新,提出新的控制思想,进行新的集成开发,以解决未知环境中复杂系统的控制问题。

自动控制发展现阶段存在一些挑战主要基于下列原因:

(1) 科学技术间的相互影响和相互促进,例如生命科学、计算机、人工智能和超大规模集成电路等技术。

(2) 当前和未来应用的需求,例如空间技术、海洋工程、基因工程和机器人技术等应用要求。

(3) 基本概念和时代思潮发展水平的推动,例如离散事件驱动、高速信息公路、分布式系统、网络系统、非传统模型和人工神经网络的连接机制等。

面对这一挑战,自动控制工作者的任务是:

- (1) 拓展视野,着力创新,发展新的控制概念和控制方法,采用非完全模型控制系统。
- (2) 采用开始时知之甚少和不甚正确的,但可以在系统工作过程中加以在线改进,使之知之较多和日臻正确的系统模型。
- (3) 采用离散事件驱动的动态系统和本质上完全断续的系统。
- (4) 不仅要进行控制系统与计算机系统的结合,而且要实现控制科学与系统科学及生命科学的结合。

从这些任务可以看出,系统与信息理论以及人工智能思想和方法将深入建模过程,不把模型视为固定不变的,而是不断演化的实体。所开发的模型不仅含有解析与数值,而且包含定性和符号数据及仿生算法。它们是因果性的和动态的,高度非同步的和非解析的,甚至是非数值的。对于非完全已知的系统和非传统数学模型描述的系统,必须建立包括控制律、控制算法、控制策略、控制规则和协议等理论。实质上,这就是要建立智能化控制系统模型或者建立传统解析和智能方法的混合(集成)控制模型,而其核心就在于实现控制器的智能化。

上述领域面临问题的解决,不仅需要发展控制理论与方法,而且需要开发与应用计算机科学与工程及生命科学的最新成果。

人工智能的产生和发展正在为自动控制系统的智能化提供有力支持。人工智能影响了许多具有不同背景的学科,它的发展已促进自动控制向着更高的水平——智能控制——发展。人工智能和计算机科学界已经提出一些方法、示例和技术,用于解决自动控制面临的难题。例如,简化处理松散结构的启发式软件方法(专家系统外壳、面向对象程序设计和再生软件等),基于角色(Actor)或真体(Agent)和本体的处理超大规模系统的软件模型,模糊信息处理与控制技术,进化计算、遗传算法、自然计算以及基于信息论和人工神经网络的控制思想和方法等。

综上所述,自动控制既面临严峻挑战,又存在良好的发展机遇。为了解决面临的难题,一方面要推进控制硬件、软件和智能的结合,实现控制系统的智能化;另一方面要实现自动控制科学与计算机科学、信息科学、系统科学、生命科学以及人工智能的结合,为自动控制提供新思想、新方法和新技术,创立边缘交叉新学科,推动智能控制的发展。

1.1.2 智能控制的发展和学科的建立

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。智能控制是人工智能和自动控制的重要部分和研究领域,并被认为是通向自主机器递阶道路上自动控制的顶层。图 1.1 表示自动控制的发展过程和通向智能控制路径上控制复杂性增加的过程。从图 1.1 可知,这条路径的最远点是智能控制,至少在当前是如此。智能控制涉及高级决策并与人工智能密切相关。

智能控制思潮第一次出现于 20 世纪 60 年代,几种智能控制的思想和方法得以提出和发展。20 世纪 60 年代中期,自动控制与人工智能开始交接。1965 年,著名的美籍华裔科学家傅京孙(K.S.Fu)首先把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统;1971 年他又论述了人工智能与自动控制的交接关系。由于傅先生的重要贡献,他已成为国际公认的智能控制的先行者和奠基人。

模糊控制是智能控制的又一活跃研究领域。扎德(Zadeh)于 1965 年发表了他的著名论文《模糊集合》(Fuzzy Sets),为模糊控制打下基础。此后,在模糊控制的理论探索和实际应用两个方面都进行了大量研究,并取得一批令人感兴趣的成果。值得一提的是,自从 20 世纪 70 年代以来,模糊控制的应用研究获得广泛开展,并取得一批令人感兴趣的成果。

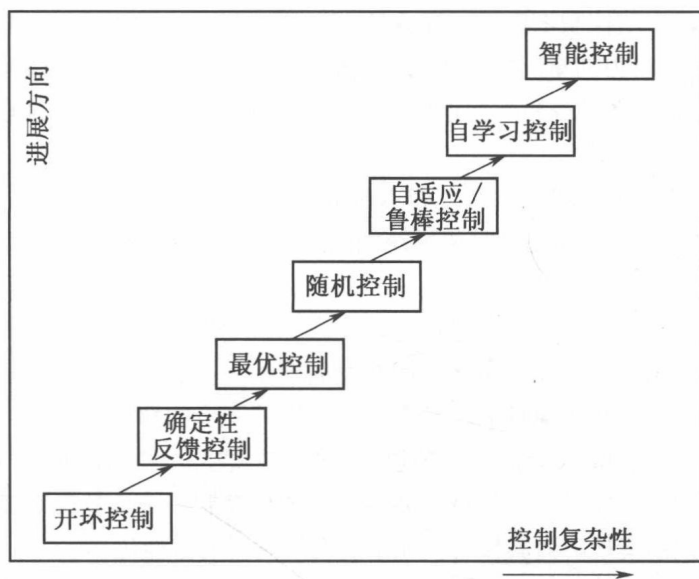


图 1.1 自动控制的发展过程

1967年,利昂兹(Leondes)等人首次正式使用“智能控制”一词。这一术语的出现要比“人工智能”晚11年,比“机器人”晚47年。初期的智能控制系统采用一些比较初级的智能方法,如模式识别和学习方法等,而且发展速度十分缓慢。

近十多年来,随着人工智能和机器人技术的快速发展,对智能控制的研究出现一股新的热潮。各种智能决策系统、专家控制系统、学习控制系统、模糊控制、神经控制、主动视觉控制、智能规划和故障诊断系统等已被应用于各类工业过程控制系统、智能机器人系统和智能化生产(制造)系统。

萨里迪斯(Saridis)对智能控制系统的分类做出贡献。他把智能控制发展道路上的最远点标记为人工智能。他认为,人工智能能够提供最高层的控制结构,进行最高层的决策。他领导的研究小组建立的智能机器理论采用“精度随智能降低而提高”原理和三级递阶结构,即组织级、协调级和执行级。这些思想成为递阶智能控制的基础。虽然递阶控制的应用实例较少,但递阶控制思想已渗透到其他智能控制系统,成为这些智能控制的有机组成部分。

阿尔布斯(Albus)等开发出一个分层控制理论,它能够表示学习,并提供复杂情况下学习的反射响应。此外,他还提出了问题求解和规划功能,这些功能通常与人工智能领域内的最高层智能作用有关,并含有用于纠正中间各控制层次错误的专家系统规则。

奥斯特洛姆(Aström)、迪席尔瓦(de Silva)、周其鉴、蔡自兴、霍门迪梅洛(Homen de Mello)和桑德森(Sanderson)等于20世纪80年代分别提出和发展了专家控制、基于知识的控制、仿人控制、专家规划和分级规划等。例如,奥斯特洛姆等1986年的论文《专家控制》(Expert Control)就是很有影响的,并促进了专家控制的发展。

麦卡洛克和皮特茨于1943年提出的脑模型,其最初动机在于模仿生物的神经系统。随着超大规模集成电路(VLSI)、光电子学和计算机技术的发展,人工神经网络(ANN)已引起更为广泛的注意。近十多年来,基于神经元控制的理论和机理已获进一步开发和应用。神经控制器具有并行处理、执行速度快、鲁棒性好、自适应性强和适宜应用等优点,因而具有广泛的应用前景。以

神经控制器为基础而构成的神经控制系统已在非线性和分布式控制系统以及学习系统中得到不少成功应用。

近年来,以计算智能为基础的一些新的智能控制方法和技术已被先后提出。这些新的智能控制系统有仿人控制系统、进化控制系统和免疫控制系统等。把源于生物进化的进化计算机制与传统反馈机制相结合,实现一种新的控制——进化控制;而把自然免疫系统的机制和计算方法用于控制,则可构成免疫控制。进化控制和免疫控制是两种新的智能控制方案,其研究推动智能控制的进一步发展。

随着智能控制新学科形成的条件逐渐成熟,1985年8月,IEEE(电气和电子工程师学会)在美国纽约召开了第一届智能控制学术讨论会。会上集中讨论了智能控制原理和智能控制系统的结构。1987年1月,在美国费城由IEEE控制系统学会与计算机学会联合召开了智能控制国际会议(ISIC)。这是有关智能控制的第一次国际会议,显示出智能控制的长足进展。这次会议及其后续相关事件表明,智能控制作为一门独立学科已正式在国际上建立起来。近20年来,世界各地成千上万具有不同专业背景的研究者投身于智能控制研究行列,并取得很大成就。这也是对人工智能研究的一种促进。

单一智能控制往往无法满足一些复杂、未知或动态系统的控制要求。20世纪90年代以来,特别是进入21世纪以来,各种智能控制互相融合,“取长补短”构成众多的“复合”智能控制,开发某些综合的智能控制方法来满足现实系统提出的控制要求。“智能复合控制”指的是智能控制方法与其他控制方法(经典控制和现代控制)的集成,也包括不同智能控制技术的集成。仅就不同智能控制技术组成的智能复合控制而言,就有模糊神经控制、神经专家控制、进化神经控制、神经学习控制、专家递阶控制和免疫神经控制等。以模糊控制为例,就能够与其他智能控制组成模糊神经控制、模糊专家控制、模糊进化控制、模糊学习控制、模糊免疫控制以及模糊PID控制等智能复合控制。

“多真体系统”(Multi-Agent System, MAS)是一种分布式人工智能系统,能够克服单个智能系统在信息资源、时空分布和系统功能上的局限性,具备并行、分布、交互、协作、适应、容错和开放等优点,因而在20世纪90年代获得快速发展,并在21世纪以来得到日益广泛的应用。在这种背景下,分布式智能控制系统也应运而生,成为智能控制一个新的研究领域。

随着网络技术的快速发展,网络已成为大多数软件用户的交互接口,软件逐步走向网络化,为网络服务。智能控制适应网络化趋势,其用户界面已逐步向网络靠拢,智能控制系统的知识库和推理机也逐步与网络接口交接。与传统控制和一般智能控制不同的是,网络控制系统并非以网络作为控制机理,而是以网络为控制媒介;用户对受控对象的控制、监督和管理,必须借助网络及相关浏览器和服务器的实现。无论客户端在什么地方,只要能够上网就可以对现场设备及其受控对象进行控制与监控。智能控制系统与网络系统的深度融合而形成的网络智能控制系统,是当今智能控制的一个新的研究和应用方向,已成为21世纪智能控制的一个新亮点。

进入21世纪以来,智能控制在更高水平上复合发展,并实现与国民经济的深度融合。特别是近年来,各先进工业国家竞相提出人工智能、智能制造和智能机器人的发展战略,为智能控制的发展提供了前所未有的发展机遇。我国政府发布的《中国制造2025》(国发〔2015〕28号)、《新一代人工智能发展规划》(国发〔2017〕25号)和《机器人产业发展规划2016—2020》(工信部联规〔2016〕109号)等国家重大发展战略,为智能控制基础研究及其在智能制造、智能机器人、智能驾驶等领域的产业化注入活力。

智能控制作为一门新的学科登上国际科学舞台和大学讲台，是控制科学与工程界以及信息科学界的一件大事，具有十分重要的科学意义和长远影响：

(1) 为解决传统控制无法解决的问题找到一条新的途径。多年来，自动控制一直在寻找新的出路。现在看来，出路之一就是实现控制系统的智能化，即智能控制。

(2) 促进自动控制向着更高水平发展。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。智能控制已发展成为自动控制的一个新的里程碑，并获得日益广泛的应用。

(3) 激发学术界的思想解放，推动科技创新。智能控制采用非数学模型、非数值计算、生物激励机制和混合广义模型，并可与反馈机制相结合组成灵活多样的控制系统和控制模式，激励人们解放思想，大胆创新。

(4) 为实现脑力劳动和体力劳动的自动化——智能化——做出贡献。智能控制已使一些过去无法实现自动化的劳动实现了智能自动化。

(5) 为多种学派合作树立了典范。与人工智能学科相比，智能控制学科具有较大的包容性，没有出现过激烈的对立和争论。

1.2 智能控制的基本知识

本节讨论智能控制的基本知识，包括智能控制的定义、特点及智能控制系统的分类和一般结构等问题。

1.2.1 智能控制的定义与特点

正如人工智能和机器人学科及其他一些高新技术学科一样，智能控制至今尚无一个公认的统一定义。然而，为了探究本学科的概念和技术，开发智能控制新的性能和方法，比较不同研究者和不同国家的成果，就要求对智能控制有某些共同的理解。

1. 智能控制的定义

下面提出的关于智能控制的定义有待于进一步讨论，并在讨论中集思广益，求得完善。

定义 1.1 自动控制

自动控制是能按规定程序对机器或装置进行自动操作或控制的过程。简单地说，不需要人工干预的控制就是自动控制。例如，一个装置能够自动接收检测到的过程物理变量，自动进行计算，然后对过程进行自动调节就是自动控制装置。反馈控制、最优控制、随机控制、自适应控制、学习控制、模糊控制和进化控制等均属于自动控制。

定义 1.2 智能机器

智能机器能够在定形或不定形，熟悉或不熟悉，已知或未知的环境中自主地或交互地执行各种拟人任务（Anthropomorphic Tasks）的机器。

定义 1.3 智能控制

智能控制是采用智能化理论和技术驱动智能机器实现其目标的过程。或者说，智能控制是一类无需人的干预就能够独立地驱动智能机器实现其目标的自动控制。所述智能化理论和技术包括传统人工智能和所谓“计算智能”的理论和技術。对自主机器人的控制就是一例。

定义 1.4 智能控制系统（Intelligent Control Systems）

用于驱动智能机器以实现其目标而无需操作人员干预的系统叫智能控制系统。智能控制系统