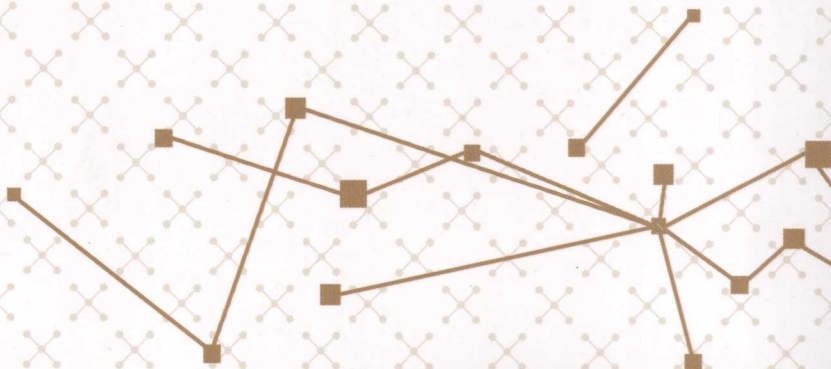




“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 *精品* 教材



10110111010001110101
10110111010001110

丛 爽 / 著

智能控制系统 及其应用

*Intelligent Control Systems and
Their Applications*

中国科学技术大学出版社

014009187

TP273
699



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 **精品** 教材



1011011101000111010
10110111010001

丛 爽 / 著

Intelligent Control Systems and Their Applications

智能控制系统 及其应用

中国科学技术大学出版社

TP273
699



内 容 提 要

智能控制理论是继经典控制理论和现代控制理论之后出现的一个先进的控制理论。它是在众多学科不断发展以及交叉应用的基础上发展成长起来的,并且还在不断成长。本书主要内容包括:人工神经网络、模糊逻辑推理系统、模糊神经网络、进化算法和群智能优化算法及其应用五大部分。作者在介绍神经网络理论与模糊集合理论的基础上,对人工神经网络与模糊逻辑控制系统的设计及其应用,以及两者之间的相互关系和相互结合,进行了较深层次上的理论分析与综合,并结合进化算法在控制系统中的建模与控制的各种实际应用以及群智能优化算法及其在中国旅行商问题中优化的应用,使读者能够从中了解和掌握运用模糊神经系统的理论与技术,以及运用智能优化理论与技术进行实际系统设计的方法。

本书选材新颖,材料翔实,系统性强,通俗易懂。既有理论分析与综合,又有实际系统的设计与应用。本书既可作为高校自动化专业、机械专业、电力电气专业、计算机科学与技术专业及其他相关专业的研究生教学用书,也可供从事智能科学、系统科学、计算机科学、应用数学、自动控制等领域研究的广大科技人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制系统及其应用/丛爽著.—合肥:中国科学技术大学出版社,2013.8

(中国科学技术大学精品教材)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03302-5

I. 智… II. 丛… III. 智能控制—控制系统—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 189754 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

合肥市宏基印刷有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:17.75 插页:2 字数:443 千

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

定价:33.00 元

总 序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念和特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

五十周年校庆精品教材系列于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书50种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划。为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持。国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划。

1958年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。入选精品教材系列的绝大部分是基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践

前 言

智能控制系统、理论及应用是继自动控制原理和现代控制工程之后兴起的先进控制理论及技术。人工神经网络和模糊逻辑系统是智能控制系统发展、研究和应用的关键理论与技术内容。在最近的十几年中,人们已经看到模糊逻辑和神经网络以各自的优势进行相互渗透,所形成的模糊神经网络在各种优化技术的配合下,其应用在数量和种类上都得到迅速增长,其范围涉及各行各业。模糊神经网络在智能控制系统的概念和设计中不断产生重要影响。

智能进化算法是一系列搜索技术包括遗传算法、进化规划、进化策略、遗传编程等所组成的全局优化算法。与传统的基于微积分的方法和穷举法等优化算法相比,进化计算是一种具有高鲁棒性和广泛适用性的全局优化方法,具有自组织、自适应、自学习的特性,能够不受问题性质的限制,有效地处理传统优化算法难以解决的复杂问题。尤其在解决模糊神经系统的参数自适应调整以及智能控制系统的参数优化中起着重要的作用。群智能优化算法包括粒子群算法、蚁群算法、人工鱼群算法、人工免疫算法等同样具有全局优化的算法。旅行商问题是一个典型的组合优化问题,可以看成许多工程领域复杂优化问题的抽象形式。如系统控制、人工智能、模式识别和生产调度等,因此以旅行商问题作为检验群智能优化算法求解方法的优劣对解决复杂工程优化问题具有重要的参考价值。

作者曾在2001年出版了《神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用》一书,并一直作为中国科学技术大学自动化系“智能系统”研究生课程的教材。为了能够将最新的研究成果融入到研究生的课程中,作者在该书的基础上,增加了近年来模糊神经网络和智能优化算法研究所取得的新成果,写成本书——关于人工神经网络、模糊逻辑推理系统,以及智能优化算法及其应用的书籍。与原书相比,本书在前后章节的衔接上强调相互之间的联系和系统性,注重分析各种不同理论和方法之间的相关性,讲究概念和思路的清晰,强调了实际应用实例,重点增加了智能优化算法及其应用部分。

全书共分13章,系统地介绍了前向神经网络,包括感知器网络、自适应线性元件、反向传播网络和径向基函数网络的基本概念和理论,各种高效率的神经网络的学习算法,包括基于标准梯度下降的方法和基于数值优化方法的网络训练算法,并进行了前向网络的数值性能对比。在递归神经网络中,介绍了各种递归神经网络,重点介绍了全局反馈递归网络和自组织竞争网络。在神经网络在智能控制系统的应用中,给出了利用人工神经网络进行直接正向模型建立、逆模型建立以及系统中控制的应用。在介绍模糊理论基础之后,专门详细给出了模糊控制器的设计方法,包括输入变量和输出变量的确定、论域的确定、模糊化和解模糊化方法、模糊控制规则和模糊逻辑推理,并给出有关模糊控制系统应用的具体实例。在模糊神经网络的基本理论方面的介绍包括模糊神经系统的构成、原理以及与其他函数之间的相互关系。在模糊神经网络的应用方面包括基于自适应神经模糊推理系统的非线性电机系

目 次

总序	(i)
前言	(iii)
第 1 章 概述	(1)
1.1 自动控制系统及其理论的发展历程	(1)
1.2 智能控制系统及其理论	(6)
1.2.1 智能控制理论	(7)
1.2.2 智能控制系统的基本功能特点	(10)
1.2.3 智能控制技术的应用	(10)
1.3 智能控制与传统控制的比较分析	(11)
1.3.1 传统控制的特点与不足	(11)
1.3.2 智能控制与传统控制的关系	(11)
1.4 智能优化算法	(12)
1.5 本书内容	(14)
第 2 章 前向神经网络	(17)
2.1 感知器网络	(20)
2.1.1 感知器的网络结构及其功能	(20)
2.1.2 感知器权值的学习规则与训练	(22)
2.2 自适应线性元件	(25)
2.2.1 自适应线性神经元模型和结构	(26)
2.2.2 W-H 学习规则及其网络的训练	(27)
2.3 反向传播网络	(28)
2.3.1 反向传播法网络模型与结构	(28)
2.3.2 BP 算法	(29)
2.3.3 BP 网络的设计	(31)
2.3.4 BP 网络的限制与不足	(32)
2.4 径向基函数网络	(33)
2.4.1 径向基函数网络结构	(33)
2.4.2 网络训练与设计	(35)
2.4.3 广义径向基函数网络	(36)
第 3 章 网络训练优化算法及其性能对比	(37)
3.1 基于标准梯度下降的方法	(38)

5.4	BP 网络结构、参数及训练方法的设计与选择	(93)
5.4.1	BP 网络的设计	(94)
5.4.2	采用自适应学习速率与固定学习速率的比较	(98)
5.4.3	改进算法的性能比较	(99)
5.5	具有 PID 特性的神经网络非线性自适应控制	(100)
5.5.1	NLPIDC 的结构	(101)
5.5.2	NLPIDC 的输入/输出关系	(101)
5.5.3	NLPIDC 的权值调整公式	(102)
5.5.4	NLPIDC 闭环控制系统的稳定性分析	(103)
5.5.5	NLPIDC 的实时在线控制策略步骤	(105)
5.5.6	基于 ADAMS 和 Matlab 的三级倒立摆镇定控制仿真平台	(106)
5.5.7	NLPIDC 在三级倒立摆镇定控制中的应用	(108)
第 6 章	模糊理论基础	(110)
6.1	基本概念与术语	(110)
6.2	模糊集合及其隶属函数	(113)
6.2.1	模糊集合的定义	(113)
6.2.2	模糊集合的表示方法	(114)
6.2.3	模糊集合的并、交、补运算	(115)
6.2.4	模糊集合的隶属函数	(115)
6.3	模糊逻辑	(117)
6.3.1	二值逻辑、多值逻辑和模糊逻辑	(117)
6.3.2	模糊逻辑的基本运算	(117)
6.3.3	模糊关系和模糊矩阵	(119)
6.3.4	模糊语言及其算子	(122)
6.4	模糊规则与模糊推理	(125)
6.4.1	模糊“如果-那么”规则	(125)
6.4.2	模糊逻辑推理	(126)
第 7 章	模糊控制器的设计方法	(133)
7.1	精确与模糊控制的事例	(133)
7.1.1	采用精确的非模糊求解方法	(133)
7.1.2	模糊方法	(136)
7.2	模糊逻辑控制过程	(137)
7.3	输入变量和输出变量的确定	(138)
7.4	论域的确定	(139)
7.5	确定模糊化和解模糊化方法	(140)
7.5.1	模糊化方法	(141)
7.5.2	解模糊判决方法	(143)
7.6	模糊控制规则	(144)

11.1.1	遗传算法的基本特点	(198)
11.1.2	遗传算法的基本操作	(199)
11.1.3	遗传算法的设计步骤	(201)
11.1.4	遗传算法的实质	(203)
11.1.5	小结	(203)
11.2	进化算法的分析及其性能对比	(204)
11.2.1	进化算法基本原理	(204)
11.2.2	遗传算法	(204)
11.2.3	遗传编程	(205)
11.2.4	进化策略	(206)
11.2.5	进化规划	(206)
11.3	进化算法的性能对比	(207)
11.3.1	编码策略	(207)
11.3.2	选择方法	(208)
11.3.3	遗传算子	(209)
11.4	遗传编程中一种改进的 GROW 算法	(211)
11.4.1	改进的 GROW 方法	(212)
11.4.2	多样性的量度	(213)
11.4.3	回归实验	(213)
11.4.4	实验结果及分析	(214)
第 12 章	进化算法的应用	(217)
12.1	模糊神经网络和遗传算法相结合的控制策略	(217)
12.2	基于遗传算法和单纯形法的直流电机参数辨识	(223)
12.2.1	直流电机非线性模型及其待辨识参数	(223)
12.2.2	基于遗传算法和单纯形法的非线性系统参数辨识	(224)
12.2.3	系统参数辨识及其结果验证	(226)
12.2.4	小结	(229)
第 13 章	智能优化算法及其应用	(230)
13.1	基于感知范围的鱼群优化算法	(230)
13.1.1	标准人工鱼群算法	(230)
13.1.2	生物系统中的鱼群模型	(231)
13.1.3	新鱼群算法描述	(232)
13.1.4	新鱼群算法的实施步骤	(233)
13.1.5	测试函数的对比实验及其结果分析	(233)
13.1.6	作用力权重因子的线性变化策略	(235)
13.1.7	小结	(236)
13.2	人工免疫算法	(237)
13.2.1	基于相似性矢量距的选择概率计算方法	(237)

13.2.2	一种改进的抗体相似性及抗体浓度表示方法	(239)
13.2.3	免疫疫苗的引入及算法求解旅行商问题步骤	(240)
13.2.4	改进算法求解 TSP 问题基本步骤	(241)
13.2.5	对比实验及其结果分析	(242)
13.2.6	小结	(243)
13.3	不同蚁群优化算法在 CTSP 中的性能对比	(244)
13.3.1	蚁群优化算法的框架	(244)
13.3.2	CTSP 关于蚁群优化算法的描述	(245)
13.3.3	蚂蚁系统	(245)
13.3.4	精华蚂蚁系统	(246)
13.3.5	基于排列的蚂蚁系统	(247)
13.3.6	最大-最小蚂蚁系统	(248)
13.3.7	蚁群系统	(248)
13.3.8	5 种 ACO 算法的 CTSP 实验及其结果分析	(249)
13.3.9	小结	(252)
13.4	基于进化策略与蚁群算法的融合算法求解旅行商问题	(252)
13.4.1	进化策略求解 TSP 问题	(252)
13.4.2	蚁群算法求解 TSP 问题的基本描述	(253)
13.4.3	进化策略与最大-最小蚂蚁算法的融合	(254)
13.4.4	中国 31 个省会城市 TSP 问题的求解	(255)
13.5	粒子群与模拟退火的混合算法求解 TSP 问题	(258)
13.5.1	基本粒子群算法	(258)
13.5.2	带有突变的粒子群优化算法	(260)
13.5.3	模拟退火算法	(261)
13.5.4	粒子群与模拟退火混合算法	(261)
13.5.5	混合算法求解中国旅行商问题实验及其结果分析	(263)
13.5.6	小结	(264)
参考文献		(265)

第 1 章 概 述

自从美国科学家维纳(N. Wiener)于 20 世纪 40 年代创立“控制论”以来,控制科学已经经历了经典控制理论和现代控制理论两个阶段。随着控制科学的不断发展,人们对控制系统性能的要求也不断提高。在处理复杂系统控制问题时,面对控制系统的复杂性、不确定性、突变性所带来的问题,国内外控制科学界一直都在探索新的控制理论,逐步形成了智能控制理论。为了适应不同技术领域和社会发展对控制科学提出的新要求,越来越多的学者意识到在传统控制中加入逻辑、推理和启发式知识的重要性,把传统控制理论与模糊逻辑、神经网络、遗传算法等人工智能技术相结合,充分利用人的控制知识对复杂系统进行智能化控制,逐渐形成了智能控制理论较完整的体系。

在讨论智能控制理论之前,有必要对经典控制理论和现代控制理论的内容、特点及其与智能控制理论之间的关系作一了解。

1.1 自动控制系统及其理论的发展历程

现代社会中的各个领域都在广泛地采用自动控制理论及其技术,在卫星的运行、导弹的制导和飞机的驾驶中,自动控制系统一直起着极其重要的作用。“自动控制”是指采用某种控制装置使机器设备或生产过程自动地按照事先给定或设计出的规律进行运行,使一个或数个物理量,如:电压、电流、速度、温度、流量等,能够在一定的精度范围内按照给定的规律变化。如果将工作的机器设备称为“被控对象”,将表征其工作状态的物理量称为“被控量”,将给定的规律称为“命令信号(或参考输入)”,则“控制”的任务又可概述为:采用适当的外加控制策略使被控对象的被控量等于参考输入。这个任务如果由人来完成,则称为“人工控制”;如果靠自动装置承担,即在没有人的直接参与下,利用控制装置自动操纵被控对象,使被控量保持恒定或按一定规律变化,则称为“自动控制”。由自动控制装置与被控对象组成的系统称为“自动控制系统”。自动控制的基本原理是通过在整个控制系统中引入“负反馈”形成“反馈控制系统”来完成系统控制任务的。通常,将系统检测出来的输出信号送回到系统的输入端,并与参考输入信号比较的过程称为“反馈”。若反馈信号与输入信号相减,则为负反馈;若相加,则为正反馈。在反馈控制系统中,如果给定的输入量保持常量或者随时间

学理论》，提出了极大值原理；美国的贝尔曼(Bellman)于1957年发表著名的《动力学规划》，建立了最优控制的基础；世界第一颗人造地球卫星Sputnik由苏联于1957年发射成功；美国的久瑞(Jury)于1958年发表《采样数字控制系统》，建立了数字控制及数字信号处理的基础；国际自动控制联合会(IFAC)于1957年成立，中国为其发起国之一，第一届学术会议于1960年在莫斯科召开；美籍匈牙利人卡尔曼(Kalman)于1960年发表了《控制系统理论》等论文，引入状态空间法分析系统，提出可控性、可观性、最佳调节器和卡尔曼滤波等概念，奠定了现代控制理论的基础；苏联“东方”1号飞船于1961年载着加加林(Gagarin)进入人造地球卫星轨道，从此开始了人类宇航时代；美国的查德(Zadeh)于1963年发表了《线性系统：状态空间法》，并于1965年提出了模糊集合和模糊控制的概念；苏联于1966年发射了“月球”9号探测器，首次在月面软着陆成功；3年后，美国“阿波罗”11号把宇航员阿姆斯特朗(Armstrong)送上月球；瑞典阿斯特鲁姆(Aström)于1967年提出了最小二乘辨识，解决了线性定常系统参数估计问题和定阶方法，6年后，他又提出了自动调节器，建立自适应控制的基础，阿斯特鲁姆于1993年获得IEEE的最高荣誉奖；英国的罗森布劳克(Rosenbrock)于1970年发表《状态空间和多变量理论》；加拿大的沃海姆(Wonham)于1974年发表《线性多变量控制：几何法》；美国的麦卡特(Merchant)于1969年提出计算机集成制造的概念；日本Fanuc公司于1976年研制出由加工中心和工业机器人组成的柔性制造单元；美国的布罗凯特(Brockett)于1976年提出用微分几何研究非线性控制系统；加拿大的詹姆斯(Zames)于1981年提出H_∞鲁棒控制设计方法；美国“哥伦比亚”号航天飞机于1981年首次发射成功；意大利的伊斯道瑞(Isidori)于1985年出版了《非线性控制系统》一书；美国的布瑞森(Bryson)和何毓琦于1969年发表《实用最优控制》；1983年，何毓琦、曹希仁等提出离散事件系统理论。

现代控制理论是在经典控制理论基础上，于20世纪60年代以后发展起来的。建立基础是状态空间法，研究对象包括单变量系统和多变量系统，以及定常系统和时变系统；基本的分析和综合方法是时域方法，各类系统数学模型的建立和分析涉及现代数学的多个分支。它通过将经典控制理论中的高阶常微分方程转化为一阶微分方程组，使其扩展适用于描述多变量控制系统，并通过状态空间法来描述系统，开发出揭示系统内部结构特性的理论，如可控性、可达性、可观性等，从而奠定了现代控制理论的基础，并提出了状态观测器和卡尔曼滤波器，它在随机控制系统的分析与控制中得到广泛应用；由庞特里亚金等人提出的极大值原理，深入地研究了最优控制问题；由贝尔曼提出的动态规划广泛用于各类最优控制问题。

经典控制理论与现代控制理论已经形成了一整套系统控制理论体系，发展出来许多由独立的系统控制原理所形成的控制理论与方法，其中包括：PID控制、最优控制、自适应控制、辨识与估计理论、鲁棒控制、预测控制、 μ 综合等，这些都成为了系统控制理论丰富的独立的理论分支。

在系统控制理论中，一般根据物理或化学定理，采用机理建模，通过线性微分方程来描述系统输入/输出之间的关系。但微分方程的求解运算相当复杂，大量高阶、复杂的微分积分运算常常是无法求得函数解析解的。所以经典控制理论引进了数学方法中的拉普拉斯变换，将“微分”与“积分”运算转换为“乘法”与“除法”运算，把微分方程变成容易计算和分析的代数方程，并且提出了大量的系统分析理论，在不需要对系统方程求解的情况下，只需要对

