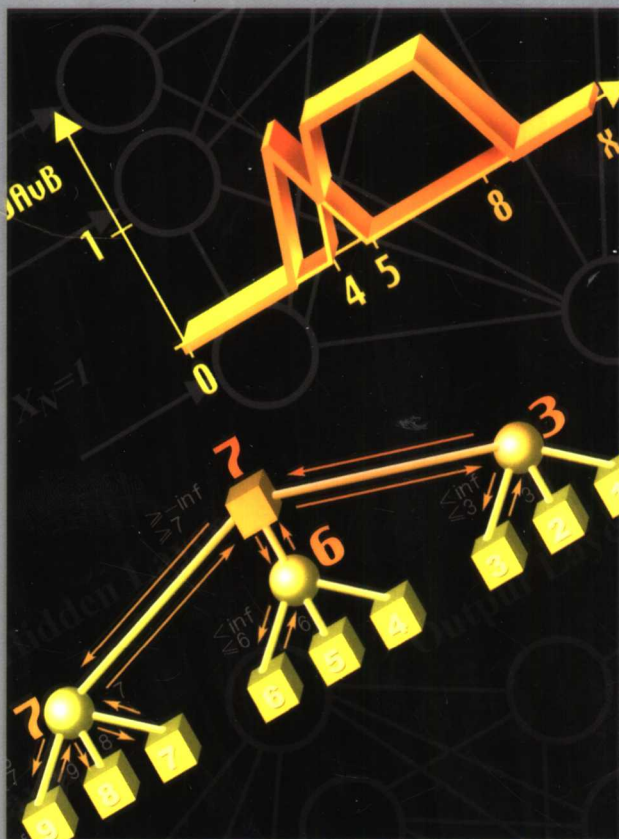


21 世纪高等院校
..... 自动化专业系列教材

智能控制

李少远 王景成 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高等院校自动化专业系列教材

智能控制

李少远 王景成 编著



机械工业出版社

根据本套教材的编写原则,本书从控制系统建模、控制与优化的本质要求出发,系统地介绍近年来模糊推理、神经网络和现代优化理论和方法对控制系统的建模、控制与优化的作用。作为控制理论和方法的进一步发展,本书着重反映智能理论和方法在解决复杂系统控制问题的方法意义,同时介绍智能理论与方法在控制系统中的各种应用实例。

本书可作为大学高年级和研究生教材,也可供控制科学与工程、计算机控制、系统工程、电气工程及相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制/李少远,王景成编著. —北京:机械工业出版社,2005.1
(21世纪高等院校自动化专业系列教材)

ISBN 7-111-15654-4

I. 智… II. ①李…②王… III. 智能控制-高等学校-教材

IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第120790号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:胡毓坚 责任编辑:李馨馨 版式设计:霍永明

责任校对:唐海燕 封面设计:刘吉维 责任印制:李妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·13.75印张·335千字

0 001—5 000册

定价:20.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

出版说明

自动化技术是一门集控制、系统、信号处理、电子和计算机技术于一体的综合技术,广泛用于工业、农业、交通运输、国防、科学研究以及商业、医疗、服务和家庭等各个方面。自动化水平的高低是衡量一个国家或社会现代化水平的重要标志之一,建设一个现代化的国家需要大批从事自动化事业的人才。高等院校的自动化专业是培养国家所需要的专业面宽、适应性强,具有明显的跨学科特点的自动化专门人才的摇篮。

为了适应新时期对高等教育人才培养工作的需要,以及科学技术发展的新趋势和新特点,并结合最新颁布实施的高等院校自动化专业教学大纲,我们邀请清华大学、南开大学、上海交通大学、西安交通大学、东北大学、华中科技大学、山东大学、北京科技大学等名校的知名教师、专家和学者,成立了教材编写委员会,共同策划了这套面向高校自动化专业的教材。

本套教材定位于普通高等院校自动化类专业本科层面。按照教育部颁发的《普通高等院校本科专业介绍》中所提出的培养目标和培养要求,适合作为高校相关专业的教材,反映了当前教学与技术发展的主流和趋势。

本套教材的特色:

1. 作者队伍强。本套教材的作者都是全国各院校从事一线教学的知名教师和相关专业领域的学术带头人,具有很高的知名度和权威性,保证了本套教材的水平和质量。

2. 观念新。本套教材适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求。

3. 内容新。近20年,自动化技术发展迅速,与其他学科的联系越来越紧密。这套教材力求反映学科发展的最新内容,以适应21世纪自动化人才培养的要求。

4. 体系新。在以前教材的基础上重构和重组,补充新的教学内容,各门课程及内容的组成、顺序、比例更加优化,避免了遗漏和不必要的重复。根据基础课教材的特点,本套教材的理论深度适中,并注意与专业教材的衔接。

5. 教学配套的手段多样化。本套教材大力推进电子讲稿和多媒体课件的建设工作。本着方便教学的原则,一些教材配有习题解答和实验指导书,以及配套学习指导用书。

机械工业出版社

21 世纪高等院校自动化专业系列教材编审委员会

主 任 袁著祉

副主任 王桂增 席裕庚

委 员 (以姓氏笔画为序)

田作华 李华德 陈大钦 张长水

胡毓坚 贾 磊 韩崇昭 薛定宇

前 言

控制理论经过了经典控制理论和现代控制理论两个具有里程碑意义的重要阶段,在科学理论和实际应用上都取得了辉煌的成就。当前,国内外控制界都把复杂系统的控制作为控制科学与工程学科发展的前沿方向,大型复杂工业过程作为重要的背景领域,以其特有的复杂性推动着这一学科的发展。在过去的二十几年中,以模糊推理、神经网络和遗传算法等为主要内容的智能控制技术取得了长足的发展,在一些非线性或难以建立对象解析模型的系统控制中发挥着重要作用,引起了众多研究者的关注。

目前关于模糊推理、神经网络和现代优化的方法较多,在许多学科中都有应用,相应的出版物也较多。本书从控制系统的建模、控制与优化的要求出发,系统介绍了智能理论和方法对控制系统的作用。其中,模糊推理和神经网络可作为实现智能控制的结构框架,现代优化算法是实现智能控制的核心算法,使控制系统具有学习和自适应的功能正是智能控制的目的。本书将沿着这一主线进行介绍和论述。

本书共分9章。第1章从控制理论发展需要的角度,对智能控制的基本概念和研究内容进行了阐述;第2章介绍了复杂系统结构和专家系统,这些内容包括了传统人工智能的基本概念和控制策略;第3章为模糊集合与模糊推理的数学基础,是学习第4章的重要基础;第4章重点介绍了常用的模糊控制器的形式,包括 Mamdani 型和 T-S 型,详细介绍了其工作原理和设计过程,还给出了模糊控制系统稳定性分析与设计的一些方法;第5章介绍了神经元和神经网络的基础知识,包括前馈、反馈神经网络的典型结构和学习算法;第6章是在第5章基础上,针对非线性系统的建模和控制问题进行了详细阐述。控制系统中涉及的数值优化算法较多,这也是正在广泛研究的热点问题;第7章以遗传算法为重点,介绍了数值优化算法对控制系统设计的作用。推而广之,其他一些数值优化算法也可更广泛地用来设计控制系统。智能系统所利用的信息多是系统的输入/输出“数据”,或者说系统的“数据”反映了系统的性质;第8章从智能控制系统数据利用的角度,介绍了近年来研究较多的数据挖掘、数据校正和数据融合等新技术,当然,介绍这些方法的目的是想使其起到“抛砖引玉”的作用,因为这是一个很广泛的课题,足以形成一门独立的课程;第9章对智能控制的进一步发展进行了粗浅的探讨和展望。

本书力图从控制系统的建模、控制与优化的学科内容要求出发,系统介绍了智能理论和方法对控制系统的作用,书中也引入了一些实际应用的例子,以利于读者理解和掌握课程内容。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2004年10月于上海

目 录

出版说明

前言

第1章 概论	1
1.1 控制科学发展的新阶段——智能控制	1
1.2 智能控制的基本概念与研究内容	3
1.2.1 模糊逻辑控制	3
1.2.2 神经网络控制	5
1.2.3 遗传算法	6
1.3 本书的主要内容	6

第2章 复杂系统结构与智能控制	8
2.1 复杂系统的分层递阶智能控制	8
2.1.1 分层递阶智能控制的一般结构 原理	8
2.1.2 组织级	9
2.1.3 协调级	10
2.1.4 执行级的最优控制	11
2.2 专家系统	13
2.2.1 专家系统的基本组成与特点	13
2.2.2 专家智能控制系统的基本原理	15
2.2.3 仿人智能控制	17
2.3 学习控制	20
2.3.1 基于模式识别的学习控制	20
2.3.2 再励学习控制	21
2.3.3 Bayes 学习控制	22
2.3.4 迭代学习控制	22
2.3.5 基于联结主义的学习控制	23
2.4 习题与思考题	24

第3章 模糊集合与模糊推理	25
3.1 模糊集合及其运算	25
3.1.1 模糊集合的定义及表示方法	25
3.1.2 模糊集合的基本运算	29
3.1.3 模糊集合运算的基本性质	31
3.2 模糊关系与模糊推理	32
3.2.1 模糊关系的定义及表示方法	32
3.2.2 模糊关系的合成	35

3.2.3 语言变量与蕴含关系	36
3.2.4 近似推理	40
3.3 基于规则库的模糊推理	41
3.3.1 模糊推理的基本方法	41
3.3.2 模糊推理的性质	45
3.3.3 模糊控制中几种常用的模糊 推理	50
3.4 习题与思考题	51

第4章 基于模糊推理的智能控制	53
4.1 模糊控制系统的基本概念	53
4.1.1 模糊控制系统组成	53
4.1.2 模糊控制系统的原理与特点	54
4.1.3 模糊控制系统分类	55
4.2 模糊控制的基本原理	57
4.3 模糊控制系统的两种基本类型	62
4.3.1 Mamdani 型模糊控制系统 的工作原理	62
4.3.2 T-S 型模糊控制系统的工作 原理	63
4.4 模糊控制器的设计过程	64
4.4.1 输入量的模糊化	64
4.4.2 模糊规则与模糊推理	65
4.4.3 模糊判决	67
4.5 模糊控制系统的分析与设计	68
4.5.1 模糊模型	68
4.5.2 模糊关系模型的辨识	69
4.5.3 基于 Takagi-Sugeno 模糊模型的 辨识	74
4.5.4 模糊控制系统的稳定性分析	83
4.6 模糊控制系统的应用	86
4.6.1 蒸汽发动机的模糊控制系统	86
4.6.2 聚丙烯反应釜的模糊控制系统	90
4.7 习题与思考题	93

第5章 神经元与神经网络	95
5.1 神经网络的基本概念	95
5.1.1 神经网络的基本原理和结构	96
5.1.2 神经网络的模型	97

5.1.3 神经元的连结方式	99
5.2 前馈神经网络	100
5.2.1 感知器	100
5.2.2 BP 网络	101
5.2.3 GMDH 网络	102
5.2.4 RBF 网络	104
5.3 反馈神经网络	105
5.3.1 CG 网络模型	106
5.3.2 盒中脑 (BSB) 模型	106
5.3.3 Hopfield 网络模型	106
5.3.4 回归 BP 网络	109
5.3.5 Boltzmann 网络	109
5.4 模糊神经网络	111
5.4.1 基于标准模型的模糊神经网络	111
5.4.2 基于 Takagi-Sugenno 模型的模糊神经网络	117
5.5 习题与思考题	122

第 6 章 基于神经网络的智能控制 123

6.1 神经网络建模	123
6.1.1 逼近理论与网络控制	123
6.1.2 利用多层静态网络的系统建模	127
6.1.3 利用动态网络的系统建模	129
6.2 神经网络控制	134
6.2.1 神经网络控制系统的结构	134
6.2.2 基于神经网络的控制器设计	136
6.3 神经网络控制系统的分析	143
6.4 神经网络控制系统的应用	148
6.4.1 神经网络的模型辨识	148
6.4.2 基于神经元网络的机械手控制	150
6.5 习题与思考题	155

第 7 章 智能控制中的现代优化

方法	156
7.1 遗传算法的基本原理	156
7.1.1 遗传算法的生物学基础	156
7.1.2 遗传算法的基本概念	157
7.1.3 遗传算法的基本实现	158
7.1.4 遗传算法的特点	166
7.1.5 遗传算法的应用	167
7.2 遗传算法在加热炉控制系统建模中的	

应用	168
----------	-----

7.2.1 遗传算法建模原理	169
7.2.2 加热炉对象的遗传算法建模	170
7.2.3 遗传算法建模实验及仿真验证	171
7.3 遗传算法在模糊控制器设计中的	
应用	174
7.3.1 对解进行编码	175
7.3.2 对解进行寻优	176
7.3.3 仿真及结果	176
7.4 遗传算法在神经网络控制器设计中	
的应用	177
7.4.1 神经网络为什么需要遗传算法	177
7.4.2 遗传算法在神经网络中的应用	177
7.5 其他现代优化方法	178
7.5.1 基本思想	179
7.5.2 两种算法的特点	181
7.6 习题与思考题	182

第 8 章 控制系统数据处理的智能

方法	183
8.1 数据挖掘与信息处理的基本概念	183
8.1.1 数据挖掘的基本概念	183
8.1.2 信息处理的基本概念	183
8.2 基于智能技术的控制系统数据挖掘	184
8.2.1 数据挖掘中常用技术	184
8.2.2 数据挖掘的功能特性	187
8.2.3 数据挖掘在控制系统的应用: SAS	
技术在宝钢的应用	194
8.3 基于智能技术的控制系统数据校正与	
数据融合	196
8.3.1 数据校正	196
8.3.2 数据融合	199
8.4 习题与思考题	204

第 9 章 智能控制的进一步发展: 自

适应与学习	206
9.1 自适应控制	206
9.2 学习控制	206
9.3 学习控制和自适应控制的关系	208

参考文献	210
------------	-----

第 1 章 概 论

自从美国数学家维纳在 20 世纪 40 年代创立控制论以来,自动控制理论经历了经典控制理论和现代控制理论两个重要发展阶段,在处理复杂系统控制问题中,传统的控制理论在面临复杂性所带来的问题时,力图突破旧的模式以适应社会对自动化提出的新要求,世界各国控制理论界都在探索建立新一代的控制理论来解决复杂系统的控制问题。近年来,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,充分利用人类的控制知识对复杂系统进行控制,逐渐形成了智能控制理论的雏形。1985 年 1 月,国际电气与电子工程师学会(IEEE)在美国纽约召开了第一届智能控制学术会议,集中讨论了智能控制的原理和系统结构等问题,标志了这一新的体系的形成。虽然智能控制体系的形成只有十几年的历史,理论还远未成熟,但其已有的应用成果和理论发展说明了智能控制正成为自动控制的前沿学科之一。

1.1 控制科学发展的新阶段——智能控制

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已知系统精确数学模型基础上的,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,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) 对于某些复杂的和具有不确定性的对象,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,从而增加了设备的初始投资和维修费用,降低了系统的可靠性。

为了讨论和研究自动控制面临的挑战,在 1986 年 9 月,美国国家科学基金会(NSF)及电气与电子工程师学会(IEEE)的控制系统学会在加利福尼亚州桑克拉拉大学(University of Santa Clara)联合组织了一次名为“对控制的挑战”的专题报告会。有 50 多位知名的自动控制专家出席了这一会议。根据与会自动控制专家的集体意见,发表了《对控制的挑战——集体的观点》。

在自动控制发展的现阶段,存在一些至关重要的挑战原因:科学技术间的相互影响和相互促进,例如,计算机、人工智能和超大规模集成电路等技术;当前和未来应用的需求,例如,空间技术、海洋工程和机器人技术等应用要求;基本概念和时代进程的推动,例如,离散事件驱动、信息高速公路、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) 扩展视野,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) 采用在开始时知之甚少和不甚完善的, 但可以在系统工作过程中加以在线改进, 使之知之较多和愈臻完善的系统模型;

(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。

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。它们是因果性的、动态的、高度非同步的、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。

要解决上述领域中所面临问题, 不仅需要发展控制理论与方法, 而且需要开发应用计算机科学与工程的最新成果。20 世纪 90 年代以来计算机科学在工业控制中的应用问题已引起学术界越来越广泛的重视与深入研究。其中, 最有代表性的是由 IEEE 控制系统学会和国际自动控制联合会(IFAC)理论委员会合作的“计算机科学面临工业控制应用的挑战”的研究计划。这个计划是在一些国家和多国合作研究项目的基础上形成的。本合作研究计划指出: 开发大型的实时控制与信号处理系统是工程界面临的最具挑战的任务之一, 这涉及硬件、软件和智能(尤其是算法)的结合, 而系统集成又需要先进的工程管理技术。

设立这一迎接挑战的研究计划是基于以下因素:

(1) 工业部门往往无法有效地把数学技术的最新进展用于控制和信号处理, 以提高实时系统的智能水平(Intelligent Level);

(2) 控制学术界又常常不清楚如何在工业上进行控制系统硬件、软件和智能三者的集成开发, 自动控制界和计算机科学界在工业和学术两方面的对话与有效合作仍然是需要进一步解决的问题;

(3) 在开发大型的实时系统时, 应了解硬件、软件和智能如何结合以及该系统的算法如何设计;

(4) 评价由收集专家经验或利用数学模型以及依靠控制和信号处理的数学技术而得到的智能的相关价值;

(5) 建议重新树立控制和计算机科学的传统学术形象, 以求组成一个更加统一的实时与动态系统科学。

人工智能(Artificial Intelligence, AI)的产生和发展为自动控制系统的智能化提供了有力支持。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(Intelligent Control)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)或智能体(Agent)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以及基于信息论和人工神经网络的控制思想和方法等。

值得指出的是, 自动控制面临的这一国际性挑战, 不仅受到学术界的极大关注, 而且得到众多工程技术界、公司企业和各国政府有关部门的高度重视。许多工业发达国家先后提出相关研究计划, 提供研究基金, 竞相开发智能控制技术。例如, 美国 NSF 和电力研究所(EPRI)于 1992 年初发布了一个智能控制合作计划的招标书。该计划首期提供 300 万美元

研究经费，用于智能控制的分析和实验研究。

综上所述，自动控制既面临严峻挑战，又存在良好发展机遇。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。

1.2 智能控制的基本概念与研究内容

近年来，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，这类系统一般称为智能控制系统。对“智能控制”这一术语尚未有确切的定义，IEEE 控制系统协会归纳为：智能控制系统必须具有模拟人类学习（Learning）和自适应（Adaptation）的能力。智能控制不同于经典控制理论和现代控制理论的处理方法，控制器不再是单一的数学解析模型，而是数学解析模型和知识系统相结合的广义模型。综合来说，智能控制具有以下基本特点：

(1) 智能控制系统应能对复杂系统，如非线性、快时变、复杂多变量、环境扰动等进行有效的全局控制，并具有较好的容错能力；

(2) 定性决策和定量控制相结合的多模态组合控制；

(3) 智能控制的基本目的是从系统的功能和整体优化的角度来分析和综合系统，以实现预定的目标，智能控制应具有自组织能力；

(4) 同时具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型表示的混合控制过程，人的知识在控制中起着重要的协调作用，系统在信息处理上，既有数学运算，又有逻辑和知识推理能力。

1.2.1 模糊逻辑控制

模糊控制是智能控制较早的形式，它吸取了人的思维具有模糊性的特点，从广义上讲，模糊逻辑控制指的是应用模糊集合理论，统筹考虑系统的一种控制方式，模糊控制不需要精确的数学模型，是解决不确定性系统控制的一种有效途径。在早期（1990 年以前）的文献中，如 Lee C.C.、Zimmerman H.J. 认为模糊控制是在其他基于模型的控制方法不能很好地进行控制时的一种有效选择，模糊控制器的隶属度函数、控制规则是根据经验预先总结而确定的，控制过程中没有对规则的修正功能，不具有学习和适应能力。即便如此，模糊控制仍然取得了一些成功的应用，如在窑炉、工业机器人等方面。但在对较复杂的不确定性系统进行控制时往往精度较低，总结控制规则过分依赖现场操作，调试时间长，难以满足要求，比较而言，可以称为经典模糊控制。目前，众多学者对传统模糊控制进行了许多改进，发展成为多种形式的模糊控制，出现了模糊模型及辨识、模糊自适应控制，并在稳定性分析、鲁棒性设计等方面取得了进展，基于模型和分析方法的模糊控制可以称为现代模糊控制，这给模糊控制带来了新的活力，从而成为智能控制的重要分支。

传统控制理论通常是基于控制系统的线性数学模型来设计控制器，而大多数工业被控对象是具有时变、非线性等特性的复杂系统，对这样的系统进行控制，不能仅仅基于在平衡点附近的局部线性模型，而需要加入一些与工业状况有关的人类的控制经验，这种经验通常是定性的或定量的，模糊推理控制正是这种控制经验的表示方法，Lee C.C. 称这种模糊控制

为直接模糊控制，并已成功地应用于一些工业过程控制中。这种方法的优点是不需要被控过程的数学模型，因而省去了传统控制方法的建模过程，但同时过多地依赖控制经验。此外，由于没有被控对象的模型，在投入运行之前就很难进行稳定性、鲁棒性等闭环分析，这也妨碍了传统控制理论在模糊控制中的应用，基于模型的现代控制与基于控制经验的模糊控制很难形成统一的模式，发挥各自的优势。

随着研究的深入，越来越多的研究者在模糊控制模式中引入了模糊模型的概念，出现了模糊模型，控制器就可根据这个模型采用现代控制理论方法进行设计，将定量知识和定性知识较好地融合在一起，模糊模型如图 1-1 所示。

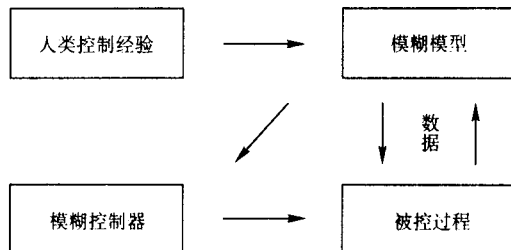


图 1-1 模糊模型

模糊模型就是用 if-then 形式的规则表示控制系统的输入/输出关系，现在发表在各种文献上的模糊模型，主要有 Mamdani 模型和 Sugeno 模型。

在 Mamdani 模型中，图 1-1 表示的系统映射可以写成

$$\begin{aligned} R_i: & \text{if } y(k) \text{ is } A_{i1} \text{ and } y(k-1) \text{ is } A_{i2} \text{ and } \cdots \text{ and } y(k-n+1) \text{ is } A_{in} \\ & \text{and } u(k) \text{ is } B_{i1} \text{ and } u(k-1) \text{ is } B_{i2} \text{ and } \cdots \text{ and } u(k-m+1) \text{ is } B_{im} \\ & \text{then } y(k+1) \text{ is } C_i \end{aligned} \quad (1-1)$$

按 Mamdani 推理，质心法进行模糊判决，则系统总的推理输出为

$$y(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{C}_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i} \quad (1-2)$$

式中， μ_i 为前提条件的模糊蕴含， $\bar{C}_i$ 为第 i 条规则输出模糊集合的中心点。已经证明这种带模糊判决和取小蕴含运算 Mamdani 型的模糊模型是对连续函数的一种完备映射。

Takagi 和 Sugeno 于 1985 年提出了一种区别于 Mamdani 模型的 T-S 模糊模型，T-S 模型在前提部分与 Mamdani 模型有相同的结构，而结论部分代替了原来的模糊集合，用一个前提部分变量的多项式表示，是前提变量的线性函数，对于式 1-1 有这样的结构

$$\begin{aligned} R_i: & \text{if } y(k) \text{ is } A_{i1} \text{ and } y(k-1) \text{ is } A_{i2} \text{ and } \cdots \text{ and } y(k-n+1) \text{ is } A_{in} \\ & \text{and } u(k) \text{ is } B_{i1} \text{ and } u(k-1) \text{ is } B_{i2} \text{ and } \cdots \text{ and } u(k-m+1) \text{ is } B_{im} \\ & \text{then } y_i(k+1) = g_i(\cdot) = p_0^i + p_1^i y(k) + \cdots + p_n^i y(k-n+1) \\ & \quad + p_{n+1}^i u(k) + \cdots + p_{n+m}^i u(k-m+1) \end{aligned} \quad (1-3)$$

也可表示为状态方程的形式

$$\begin{cases} x(k+1) = A_r x(k) + B_i u(k) \\ y(k) = C_r x(k) \end{cases} \quad (1-4)$$

这种控制系统的结构如图 1-2 所示。T-S 模糊模型可以看成是系统在不同工况时的局部模型，基于 T-S 模型，可以充分利用现代控制理论知识对各个局部模型分别设计控制器，由于它们在前提条件中对应不同的隶属度 μ_i ，则系统总的输出仍可按 (1-4) 式进行

模糊判决。

模糊模型除具有连续函数的映射能力外，还具有以下优点：

- (1) 集成专家控制经验，以 if-then 规则的形式表示，具有知识表达的特点；
- (2) 局部线性化模型可以采用现代控制理论（极点配置、状态反馈、预测控制等）方法进行系统设计和分析；
- (3) Mamdani 和 T-S 模型都可以根据系统的输入/输出进行辨识，具有定量和定性知识集成的特点。

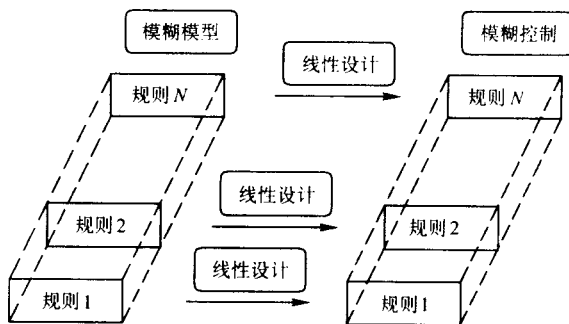


图 1-2 Sugeno 模糊控制器的设计

1.2.2 神经网络控制

神经网络控制是研究和利用人脑的某些结构机理以及人的知识和经验对系统的控制，采用神经网络，控制问题可以看成模式识别问题，被识别的模式是映射成“行为”信号的“变化”信号。人们普遍认为，神经网络控制系统的智能性、鲁棒性均较好，能处理高维、非线性、强耦合和不确定性的复杂工业生产过程的控制问题，其显著特点是具有学习能力，不断修正神经元之间的连接权值，并离散存储在连接网络中，因而对非线性系统、难以建模的系统具有良好的映射能力，权值的修正可以看成是对映射的修正，以达到希望的目标函数。

模糊推理和神经网络在控制中的应用有着不同的特点。一般来说，模糊控制是基于规则的推理，如果具有足够的系统控制知识，则可以进行很好的控制；而神经网络需要大量的数据学习样本，如果系统有足够的各态遍历的学习样本，神经网络可以通过学习得到满意的控制器，并可在控制中不断进行学习，修正连接权值。Hornik K. 证明了多层神经网络是一种对连续函数的完备的逼近，Wang L.X. 证明了模糊基函数也具有同样的逼近。模糊映射在系统中是集合到集合 (set-set) 的规则映射，而神经网络则是点到点 (point-point) 的映射。因此，模糊逻辑容易表达人们的控制经验等定性知识，而神经网络在利用系统定量数据方面有较强的学习能力。神经网络控制将系统控制问题看成“黑箱”的映射问题，缺乏明确的物理意义，因而控制经验的定性知识不易融入控制中。

神经网络的研究已有较长的历史，对于控制界，神经网络的优势在于：

- (1) 能够充分逼近任意复杂的非线性系统；
- (2) 能够学习与适应严重不确定性系统的动态特性；
- (3) 由于大量神经元之间广泛连接，即使有少量单元或连接损坏，也不影响系统的整体功能，表现出很强的鲁棒性和容错性；
- (4) 采用并行分布处理方法，使得快速进行大量运算成为可能。

这些特点显示了神经网络在解决高度非线性和严重不确定性系统的控制方面的巨大潜力,将神经网络引入控制系统是控制学科发展的必然趋势,它的引入不仅给这一领域的突破带来了生机,也为控制研究者带来许多亟待解决的问题。

一般来说,神经网络用于控制有两种方法,一种是用来实现建模,一种是直接作为控制器使用。具体可分为以下几个方面:

(1) 系统建模。对于系统的输入/输出数据,利用神经网络在带有严重非线性特性的系统中建立其输入/输出映射,比传统的线性系统辨识更为有效,多数神经网络建模是和控制器一起实现的。

(2) 直接自校正控制。神经网络先离线学习被控对象的逆动力学特性,然后作为对象的前馈控制器,并在线继续学习动力学特性,这种方法的思想是,如果 NN 充分逼近对象的逆动力学特性,则从 NN 的输入端至对象的输出端的传递函数近似为 1。

(3) 间接自校正控制。自校正调节器的目的是在被控系统参数变化的情况下,自动调整控制器的参数,消除扰动的影响,以保证系统的性能指标,在这种控制方式中,神经网络用作过程参数或某些非线性函数的在线估计器。

(4) 神经网络模型参考自适应控制。文献中还提出神经网络控制器(NNC)根据输出误差 $e = y_m - y$ 来修正权值,使得 $e \rightarrow 0$,当系统结构已知时,即可用常规的控制方法取代 NNC,当系统结构未知时,则用 NNC 的逼近能力来完成控制。

(5) 神经网络内模控制。神经网络内模控制(IMC)是一种非线性控制,为了获得更好的控制效果,通常在控制器前加一个常规的滤波器,NNC 不去直接学习被控系统的逆动力学映射关系,而由 NN 状态估计器来训练学习,以减轻 NNC 的负担。

1.2.3 遗传算法

遗传算法(GA)是模拟自然进化过程而得到的一种随机性全局优化方法,现在也被广泛研究和应用,而其方法的全局性、快速性、并行性和鲁棒性,使得遗传算法越来越为各领域所接受,遗传算法在自动控制学科中,已用来研究离散时间最优控制问题、Riccati 方程的求解问题、控制系统的鲁棒稳定问题等。尤其是在模糊神经网络训练中,应用最广的 BP 算法,由于本身的机理,使得其训练结果常常陷入局部最优,成为神经网络发展的一大障碍,因而,近年来遗传算法成为模糊神经网络训练中的有力工具,用来训练神经网络权值,对控制规则和隶属度函数进行优化,也可以用来优化网络结构。

遗传算法的应用研究比理论研究更为丰富,已渗透到许多学科,如工程结构优化、计算数学、制造系统、航空航天、交通、计算机科学、通信、电子学、电力、材料科学等。遗传算法的应用按其方式可分为三部分,即基于遗传的优化计算、基于遗传的优化编程和基于遗传的机器学习。

1.3 本书的主要内容

本书从控制系统建模、控制与优化的本质要求出发,系统地介绍近年来模糊推理、神经网络、现代优化理论与方法对控制系统的建模、控制与优化的作用。作为控制理论和方法的进一步发展,本书着重反映智能理论和方法在解决复杂系统控制问题的方法和意义,同时介绍智能理论与方法在控制系统中的各种应用实例。本书包括下列内容:

(1) 简述智能控制产生的背景、起源与发展,讨论智能控制的定义、特点和智能控制器的一般结构,介绍智能控制的分层递阶结构,阐述专家系统和学习控制与智能控制之间的关系。

(2) 介绍现有智能控制的主要形式,包括模糊推理、神经网络和遗传算法,着重从控制系统的建模、控制与优化的学科内容要求出发,系统地介绍这些理论和方法对控制系统的意义。

(3) 结合近年来在复杂控制系统的数据挖掘和信息处理,介绍智能控制方法的应用,主要包括控制系统软测量、数据挖掘、数据校正与数据融合等。

实现智能控制的结构框架是模糊推理和神经网络,而实现智能控制的核心算法是现代优化算法,智能控制的目的是实现控制系统的学习和自适应功能。本书将沿着这一主线进行介绍和论述。

第 2 章 复杂系统结构与智能控制

智能控制的概念和原理主要是针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性而提出的，本章主要介绍复杂系统的结构和智能控制的基本原理，包括分层递阶智能控制、专家系统智能控制和学习控制，是学习后续各章智能控制具体方法和技术的重要基础。

2.1 复杂系统的分层递阶智能控制

为了实现规划、决策、学习等智能功能，智能控制所实现的含义要比常规控制广泛得多。广义的控制可以定义为：驱使系统实现要求功能的过程。为了实现广义的控制功能，智能控制需要将认知系统研究的成果与常规的系统控制方法加以有机的结合。

认知系统传统上是作为人工智能的一部分，主要实现类似与人的一些行为功能，这些功能主要是基于从简单的逻辑操作到高级的推理方法来实现的。在这方面已取得了很大进展，如模式识别、语言学以及启发式方法等已经作为认知系统的一部分，广泛应用于声音、图像及其他传感信息的分析和分类中。在系统控制方面也已经建立起许多成熟的理论和方法，它们可以用来进行运动控制的轨迹跟踪、动态规划及优化控制等。

2.1.1 分层递阶智能控制的一般结构原理

G. N. Saridis 等提出了一种分层递阶智能控制理论，将计算机的高层决策、系统理论中先进的数学建模和综合方法以及处理不确定和不完全信息的语言学方法结合在一起，形成了一种适合于工程需要的智能控制方法。该理论可认为是三个主要学科领域的交叉：人工智能、运筹学和控制理论。

分层递阶智能控制系统的结构如图 2-1 所示，由组织级、协调级和执行级三个层次组成，并按照自上而下精确程度渐增、智能程度递减的原则进行功能分配，图 2-2 是一个典型的复杂系统智能控制的分层递阶结构。

智能控制系统上层的作用主要是模仿人的行为功能，因而主要是基于知识的系统，它所实现的规划、决策、学习、数据存储、任务协调等主要是对知识进行处理，智能控制系统下层的作用是执行具体的控制任务，对数值进行操作和运算。对各功能模块可赋以主观的概率模型或模糊集合，因此，对每一个所执行的任务，可以用熵来进行计算，它对整个系统的协调提供了一个分析的度量准则。分层递阶智能控制的理论可以表述为：对于自上而下按照精度渐增、智能递减的原则所建立的分层递阶结构的系统，智能控制器的设计问题可以认为是这样的数学问题：寻求正确的决策和控制序列，以使得整个系统的总熵最小，这就是 Saridis 智能控制理论中的“精度随智能降低而增高 (IPDI)”原理。

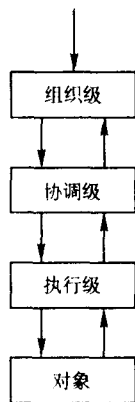


图 2-1 典型的分层递阶结构

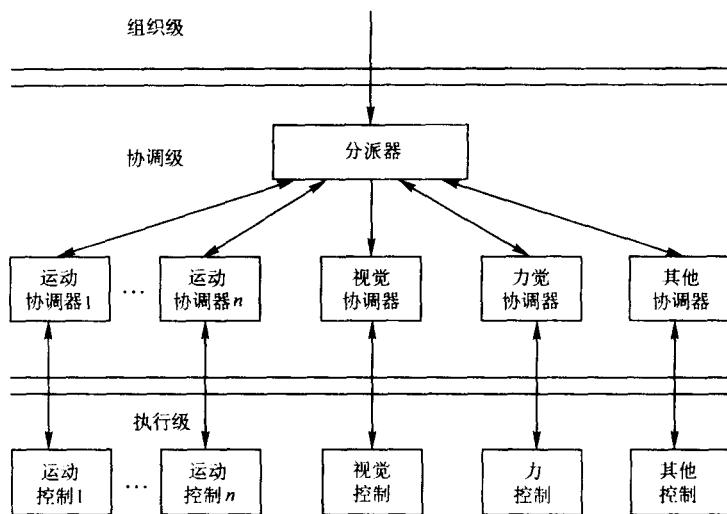


图 2-2 机器人分层递阶智能控制系统

关于熵的定义可以在有关信息论的文献中查到，为了便于读者理解本书中的有关内容，现把熵的定义简述如下：

对连续的随机过程 x ，熵 $H(x)$ 的定义为

$$H(x) = - \int p(x) \ln p(x) dx = - E[\ln p(x)] \quad (2-1)$$

式中， $p(x)$ 是 x 的概率密度； $E[\cdot]$ 表示数学期望值。对离散随机过程

$$H(x) = - \sum p(x) \ln p(x) \quad (2-2)$$

熵是不确定性的一种度量。由熵的表达式可知，熵愈大，期望值愈小。熵最大就表明不确定性最大，时间序列最随机，功率谱最平坦。

2.1.2 组织级

组织级是分层递阶智能控制系统的最上面一层，其作用是对于给定的外部命令和任务，寻找能够完成该任务的子系统控制任务的组合，再将这些子任务要求送到协调级，通过协调处理，最后将具体的执行动作要求送至执行级去完成所要求的任务，最后对任务执行的结果进行性能评价，并将评价结果逐级向上反馈，同时对以前存储的知识信息加以修改，从而起到学习的作用。

由此可见，组织级的作用主要是进行任务规划，是典型的人工智能中的问题求解，已有很多人工智能专家在这方面做了大量工作。这里介绍一种由 Moed 和 Saridis 所提出的基于神经网络来实现组织级功能的方法。

为了便于对问题的描述，定义一组基元事件的集合 $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ ， c_i 可以表示基本动作、动作对象、动作结果等，它们是最基本的事件，这些基元的组合既可以表示外部的任务输入要求，也可以表示子任务的组合，在神经网络中， c_i 表示神经网络节点，网络由如下 3 部分所组成：

- (1) 输入节点：用来表示要求的目标或子目标，在这里外部输入命令即是要求的目标。
- (2) 输出节点：由基元时间组成，这些基元事件的适当组合可实现要求的目标。