

应用型本科 电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

智能控制及其 LabVIEW应用

主 编 徐本连
副主编 施 健 蒋冬梅
朱培逸 鲁明丽

- 内容新颖：新知识、新技术、新工艺
- 特色鲜明：突出“应用、实践、创新”
- 定位准确：面向工程技术型人才培养
- 质量上乘：应用型本科专家全力打造



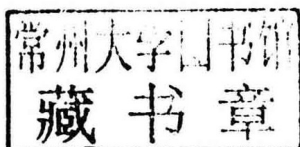
西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

应用型本科 电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

智能控制及其 LabVIEW 应用

主 编 徐本连

副主编 施健 蒋冬梅 朱培逸 鲁明丽



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书面向控制科学与工程、机械工程、计算机科学与工程等学科,主要围绕模糊控制、神经网络和群智能算法这三大主流智能控制方法,以 LabVIEW 为软件开发平台,以实际工程项目为目标,由浅入深地阐述了这些方法的应用实现过程。

本书取材新颖,注重实例,具有一定的前瞻性、创新性和引导性,较好地体现了这一领域的最新进展,可作为高等院校和科研院所计算机、自动化、机械、管理等专业的广大师生和科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制及其 LabVIEW 应用/徐本连主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2017.12

ISBN 978-7-5606-4754-8

I. ① 智… II. ① 徐… III. ① 软件工具—程序设计—应用—智能控制—研究
IV. ① TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 268681 号

策 划 高 樱

责任编辑 高雯婧 阎 彬

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 12.5

字 数 289 千字

印 数 1~2000 册

定 价 28.00 元

ISBN 978-7-5606-4754-8/TP

XDUP 5056001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

应用型本科 电气工程与自动化专业“十三五”规划教材编审专家委员名单

主 任：汪志锋（上海第二工业大学电子与电气工程学院 院长/教授）

副主任：罗印升（江苏理工学院 电气信息工程学院 院长/教授）

刘 燕（常熟理工学院 电气与自动化工程学院 教授）

成 员：（按姓氏拼音排列）

陈 桂（南京工程学院 自动化学院 副院长/副教授）

邓 琛（上海工程技术大学 电子电气工程学院 副院长/教授）

杜逸鸣（三江学院 电气与自动化工程学院 副院长/副教授）

高 亮（上海电力学院 电气工程学院 副院长/教授）

胡国文（盐城工学院 电气工程学院 院长/教授）

姜 平（南通大学 电气工程学院 副院长/教授）

王志萍（上海电力学院 自动化工程学院 副院长/副教授）

杨亚萍（浙江万里学院 电子信息学院 副院长/副教授）

于海春（淮阴师范学院 物理与电子电气工程学院 副院长/副教授）

郁有文（南通理工学院 机电系 教授）

张宇林（淮阴工学院 电子与电气工程学院 副院长/教授）

周渊深（淮海工学院 电子工程学院 副院长/教授）

邹一琴（常州工学院 电子信息与电气工程学院 副院长/副教授）

前 言

当前,高度复杂、非线性与不确定性系统的控制已经成为控制科学和工程科学发展的前沿方向,实际的复杂工程作为其重要的应用领域也不断地推动着这一学科的发展。以模糊控制、神经网络和群智能算法为代表的智能控制作为一个新兴的学科领域,在理论发展和应用研究中都取得了长足的进展,为解决非线性或难以建模的复杂系统控制问题提供了新的思路与方法,得到了广大研究人员的关注。

目前智能控制相关的方法有很多,在许多学科中都得到了应用,相应的出版物也较多,但体现工程实践及应用开发的新手段、新成果等方面的书籍仍非常缺乏。本书在注重理论知识的同时,直接面向具体工程实例的应用,围绕模糊控制、神经网络和群智能算法三大主要内容展开,阐述这些方法的原理及其实际应用。

本书中的所有数值例子与工程实例均在高度可视化的工程软件 LabVIEW 平台上予以实现。LabVIEW 在工业界应用广泛,界面友好,可视化功能丰富,较好地体现了学习中的可操作性与可观测性,更加符合本书注重工程应用实例开发这一特色。

本书是在国家自然科学基金项目研究成果的基础上,结合作者多年应用型本科课程教学经验撰写而成的。本书将内容与科研成果分结构、分层次地融入到知识体系之中,同时也吸纳了国内外该领域的众多代表性研究成果。本书内容新颖,覆盖面广,深入浅出,注重理论联系实际,紧跟智能控制当前研究的前沿成果,在引入数值例子的基础上,进一步以实际工程项目应用为纽带,力图体现这一领域目前的最新研究进展,并使读者能够快速理解和掌握相关内容。

本书的编写队伍由具有科研与工程经验的一线教师构成。全书由主编徐本连进行统稿并审定。全书共分 4 章:第 1 章从智能控制的发展需求及发展历史的角度出发,对智能控制的基本概念和研究内容进行了阐述,本章主要由徐本连和鲁明丽完成;第 2 章在模糊集合、模糊蕴含、模糊推理等模糊数学的基础之上详细介绍了模糊控制的工作原理和设计方法,本章主要由朱培逸完成;第 3 章介绍了神经网络的基础知识,包括前馈、反馈神经网络的典型结构及其相应学习算法,本章主要由施健完成;第 4 章介绍了目前比较流行的几种群智能算法,包括蚁群算法、粒子群算法和烟花算法,并对其在多目标跟踪中的应用进行了研究,本章主要由徐本连和蒋冬梅完成。

这里要非常感谢硕士生张董、李明月在本书撰写过程中给予的程序开发支持;特别感谢南方科技大学史玉回教授在百忙之中认真审阅书稿,并提出了许多宝贵的建议。同时,也感谢西安电子科技大学出版社在本书出版过程中所付出的努力。

由于作者水平和资料有限,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者
2017 年 8 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 控制科学发展新阶段——智能控制	1
1.1.1 智能控制的提出	1
1.1.2 智能控制的发展	2
1.2 智能控制的几个重要分支	2
1.2.1 模糊控制	2
1.2.2 神经网络	3
1.2.3 群智能算法	5
1.3 智能控制系统的构成	6
1.3.1 智能控制系统的结构	6
1.3.2 智能控制系统的特点	7
1.3.3 智能控制系统研究的主要工具	7
1.4 智能控制的未来	9
习题	9
第 2 章 模糊控制	10
2.1 概述	10
2.2 模糊集合及其运算	10
2.2.1 模糊集合的概念	10
2.2.2 模糊集合的运算	12
2.2.3 隶属度函数	14
2.3 模糊关系及其运算	17
2.3.1 模糊关系的定义及表示	17
2.3.2 模糊关系的运算	19
2.3.3 模糊矩阵的合成	19
2.4 模糊推理	20
2.4.1 语言变量与蕴含关系	20
2.4.2 近似推理	23
2.5 模糊控制中常见的两种模糊推理模型	24
2.5.1 Mamdani 模糊推理模型	24
2.5.2 T-S 模糊推理模型	29
2.6 模糊控制的应用	30
2.6.1 模糊控制的原理与特点	30
2.6.2 基于 Mamdani 模糊推理模型的应用	31
2.6.3 基于 T-S 模糊推理模型的应用	50

2.7 模糊控制的工业应用——火电机组主汽温模糊控制系统	64
习题	69
第3章 神经网络	70
3.1 神经网络的基本概念	70
3.1.1 生物神经元模型	70
3.1.2 人工神经元模型	72
3.1.3 人工神经网络模型	73
3.1.4 神经网络的学习方式	74
3.2 前馈神经网络	76
3.2.1 感知器	76
3.2.2 BP 网络	77
3.2.3 RBF 网络	81
3.3 反馈神经网络	81
3.3.1 离散型 Hopfield 网络	81
3.3.2 连续型 Hopfield 网络	85
3.4 神经网络的应用	88
3.4.1 单层感知器的线性分类	88
3.4.2 多层感知器的分类	93
3.4.3 BP 神经网络的曲线拟合	98
3.4.4 数字识别	105
3.4.5 Hopfield 神经网络模式识别	115
3.4.6 TSP 路径寻优	118
3.5 神经网络控制的工业应用——电厂煤耗性能的计算	124
3.5.1 背景	124
3.5.2 影响飞灰含碳量的主要因素	124
3.5.3 基于 BP 神经网络的飞灰含碳量预测	124
习题	133
第4章 群智能算法	134
4.1 引言	134
4.2 蚁群算法	135
4.2.1 蚂蚁的生物学特征	135
4.2.2 蚁群算法原理	136
4.3 粒子群(鸟群)算法	137
4.3.1 鸟群的生物学特征	137
4.3.2 粒子群算法原理	138
4.4 烟花算法	140
4.4.1 烟花燃放现象特征	140
4.4.2 烟花算法原理	142
4.5 群智能算法的应用实例	144
4.5.1 蚁群算法的应用	145
4.5.2 粒子群算法的应用	150
4.5.3 烟花算法的应用	154
4.6 群智能算法的工程应用案例	160

4.6.1 基于蚁群算法的多细胞跟踪技术	161
4.6.2 基于粒子群算法的多细胞跟踪技术	172
4.6.3 基于烟花算法的多细胞跟踪技术	184
习题	189
参考文献	190

第1章 概 论

1.1 控制科学发展新阶段——智能控制

1.1.1 智能控制的提出

自1932年奈奎斯特研究反馈放大器的稳定性以来,控制理论学科已历经80多年的发展。20世纪30年代到50年代是经典控制理论逐渐走向成熟的阶段,这一时期的控制对象主要为单输入单输出的线性系统,系统模型由传递函数描述,模型分析主要采用根轨迹法与频率法。在解决实际工程和技术的问题中,PID(比例-积分-微分)控制作为经典控制理论发展的主要成果,成功地运用在了诸多工业控制对象之上。20世纪60年代前后,随着现代电子计算机技术的普及以及实际控制对象的变化,现代控制理论逐步形成并得到了重大发展。阿波罗登月、飞行器控制、飞船对接、高精度制导等重大项目都是现代控制理论与计算机应用的经典案例。现代控制理论主要适用于多输入多输出的时变或非线性系统,系统模型由状态方程描述,以极大值原理、动态规划、卡尔曼滤波等现代数学方法为理论基础,模型分析与设计主要采用最优控制、自适应控制、系统辨识等方法。

随着社会的发展以及科技水平的不断提升,研究对象越来越复杂,控制要求也不断提高,传统控制理论的局限性日益显现。一般来说,实际工业过程对象常常表现出高度复杂性、非线性与不确定性等特征,难以建模,或者即使能够建立模型,其结构也相当复杂或存在病态,难于实施有效的控制方案。自适应控制和鲁棒控制等虽然可以在一定程度上补偿或抵御不确定性,但其本质上仍依赖于模型的辨识度,因此在模型未知或严重不确定时,都存在难以弥补的缺陷。

在实际工业中,很多成功的控制策略除了包含传统控制理论的数学模型之外,也都隐含着人的直觉思维推理。传统控制理论模型难以有效地利用对象中包含的定性信息,也无法集成人类的经验知识、技巧以及推理能力,面对复杂系统的控制要求时显得无能为力,这也无疑是其面临的重大挑战。在这一需求与背景下,智能控制的概念应运而生。

智能控制是将人类经验知识、决策推理等与控制理论相结合,模拟人类智能并解决复杂系统控制问题的理论与方法。智能控制最初的研究对象主要为基于知识推理的机器人,而今,智能控制几乎囊括了除传统控制以外的所有领域,也许以后“智能控制”将会跨越“智能”的定义界限,成为真正意义上的“控制”。关于“智能”的定义,历史上的争议已长达几个世纪,而作为一个新兴的学科领域,有关智能控制的定义、理论、结构框架等尚无统一的描述。总体而言,智能控制目前还处于开创性的研究阶段,理论基础有待夯实。

1.1.2 智能控制的发展

智能控制的概念最早是由美籍华裔科学家 K. S. Fu 教授提出的,他将人工智能与决策支持相结合并应用于不确定环境下的自适应问题。之后,他又研究了启发式智能行为与控制原理的相互关系。由于他在这一领域的开创性工作,K. S. Fu 教授被公认为智能控制的先行者与奠基人。然而,尽管智能控制在很多领域都展现了其在工程应用中的重要性及适用性,却并未引起控制学术界足够的重视。

此后,智能控制成为一门新兴学科的条件逐渐成熟。智能控制的诞生可以追溯到 1985 年 8 月在美国纽约特洛伊市召开的第一次学术讨论会。与会科学家经过深入讨论后,就智能控制的基本原理、框架等达成了共识。会后不久,IEEE 智能控制技术委员会成立了,吸引了多达 300 多名成员加入。研究者们对智能控制的定义及其涵盖的范围进行了热烈的讨论,智能控制作为一门学科已经初具雏形。

第二次智能控制会议于 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组织召开,这次会议延续了之前的讨论,并总结了学科内的研究进展,同时对学科未来的研究方向进行了探讨,并就某些具体的重点方向达成了一致。第二次会议得到了多方赞助,与会人员较第一次会议大幅增加,来自包括美国、欧洲各国、日本、中国等多个国家和地区的 150 多位专家学者参加了本次会议,并提交了 60 余篇论文与报告。

1987 年 8 月在美国华盛顿召开了第三次智能控制学术研讨会。这次研讨会又有数百位科学家加入了智能控制技术委员会,与会人数为历届之最,参会人员来自全球各个国家和地区,这也表明智能控制作为一门新兴学科已被广大研究人员所接受。随着 1989 年 9 月第四次智能控制国际会议(美国纽约奥尔巴尼市)的召开,智能控制的理论框架已经基本成型,这也标志着智能控制这一新兴学科真正建立了起来。

自 20 世纪 90 年代以来,国际上很多学术机构定期或不定期地组织召开以智能算法为主题的国际学术会议及研讨会,如 WCCI(IEEE World Congress on Computational Intelligence)、CEC(IEEE Congress on Evolutionary Computation)、SSCI(IEEE Symposium Series on Computational Intelligence)等。国内智能控制相关研究也非常活跃,学术团体纷纷成立,并组织举行了如 ICSI(International Conference on Swarm Intelligence)、IWSIS(International Workshop on Swarm Intelligent Systems)等国际知名的系列学术会议。这些都体现了智能控制这一新领域良好的发展势头。

1.2 智能控制的几个重要分支

如前所述,智能控制是一门多学科交叉的学科,包含了一大类控制技术,如人工智能、进化计算、模糊控制、神经网络、群智能算法、机器学习、遗传算法等。以下对智能控制的几个比较重要的分支作一个简要的回顾,以了解其基本思想。

1.2.1 模糊控制

控制论的创始人维纳认为人类能胜过最完美的机器,主要原因就是人具有运用模糊概念的能力。在自然界、人类社会以及人的思维模式中到处存在着模糊现象,模糊数学也因

此而产生。相较于经典数学的精确描述，模糊数学也能对客观事物作出准确的反映。模糊数学最初是由加州大学伯克利分校的扎德(L. A. Zadeh)教授于1965年提出的，他的论文Fuzzy Set首次引入了隶属度函数的概念。但模糊数学的相关理论直到1974年，由伦敦大学的曼达尼(E. H. Mamdani)教授将其应用于实际蒸汽发动机的控制后才逐渐被认可。从广义上讲，模糊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。1975年英国的P. J. King和Mamdani将模糊系统应用于工业反应过程的温度控制；1976年荷兰的W. J. M. Kickert和H. R. VanNauta将模糊控制应用于热水装置中；1977年英国的C. P. Procyk和Mamdani将模糊控制应用于十字路口的交通指挥，使车辆的平均等候时间减少了7%；1980年丹麦的F. LSMIDTH公司将模糊控制应用于水泥窑生产的过程控制中，成为应用模糊控制的经典案例。此后，模糊控制在工业制造、自动控制、汽车、金融、教育等领域得到了广泛的应用，几乎已经深入到了当今社会的方方面面。

由于模糊控制不需要精确地建立对象的数学模型，因此它是解决不确定系统控制的一种有效途径。早期的模糊控制在对复杂的不确定系统进行控制时，由于对信息的模糊化处理过于简单，导致控制精度较低；同时，模糊规则过于依赖于现场，调试时间长，难以满足实时性要求。目前，大量研究者对模糊控制进行了许多改进，发展了多种形式的模糊控制，如模糊自适应控制、模糊PID控制、模糊专家系统、模糊辨识等，并在稳定性、鲁棒性等方面取得了较大进展。

模糊控制的实施过程主要包含三个步骤(如图1-1所示)：

- (1) 模糊化：将输入的精确量转换为不同模糊集合下的隶属度；
- (2) 模糊推理：根据模糊控制规则进行推理得到模糊输出；
- (3) 解模糊：根据最大隶属度、重心法等方法将模糊输出转化为精确量。

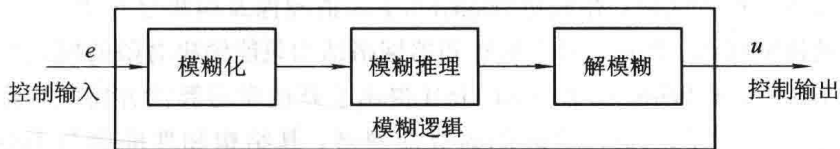


图 1-1 模糊控制的实施过程

可以看出，模糊控制是对实际系统进行精确到模糊，再到精确的操作过程。初始的输入与终端的输出为精确量，而规则推理则是一个模糊过程。从模糊控制的角度来看，任何的物理量之中都包含了其他的分量，世界上不存在真正意义上的精确量。相较于精确量对变量的硬划分，用论域及模糊概念来描述变量可以更准确、更柔性地反映物理量。因此，无论是模糊化还是模糊推理，都包含了人们对客观世界规律的本质理解。

1.2.2 神经网络

Saridis 认为向人脑学习是实现智能控制的唯一途径。人脑与数字计算机的运行规律是完全不同的，神经网络计算模型的灵感正是来自于此。与人脑类似，神经网络的计算能力首先来自于高度并行的分布式结构，其次是它的自学习与推广能力。这两个高效的信息处理特征使得神经网络能够解决很多复杂问题。此外，神经网络还有很多其他的重要特质，如非线性、自适应以及易于硬件实现等。

人工神经网络的发展历经了一个多世纪(如表 1-1 所示),在此过程中出现了许许多多不同领域的杰出人物,他们通过几十年的潜心研究才提出了很多相关概念。

表 1-1 神经网络发展历史

时 间	发 展 内 容
19 世纪 90 年代至 20 世纪 40 年代	物理学、心理学、神经学方面的基础研究
20 世纪 40 年代至 20 世纪 60 年代	MP 模型、感知器、线性网络
20 世纪 60 年代至 20 世纪 80 年代	研究低潮期
20 世纪 80 年代至今	Hopfield 网络、BP 网络、径向基神经网络、深度学习

神经网络的背景研究工作可以追溯到 19 世纪末 20 世纪初。这些工作来自很多交叉学科,如物理学、心理学与神经生理学等。早期的这些研究着重于人脑在学习、视觉等领域的综合理论,而关于神经元机理的数学模型在这一时期尚未出现。

20 世纪 40 年代初,心理学家 Warren McCulloch 和数学家 Walter Pitts 率先提出了神经网络的概念。他们构造了一个表示大脑基本组成的神经元数学模型,并通过研究发现基于神经元互相连接的模型可以进行任意的算术与逻辑运算。这一工作也被认为是神经网络的开创性工作。

1949 年 Hebb 和其他学者通过研究神经系统的自适应定律,提出了改变神经元连接强度的 Hebb 学习规则。

人工神经网络首次在实际中成功应用是在 20 世纪 50 年代末。1958 年 Rosenblatt 首次引入了感知器的概念,设计了相应的学习规则,并完成了该网络的硬件实现。感知器网络可以快速可靠地解决线性可分问题,并成功地运用在了二值图像及简单字符的分类问题中,这引发了神经网络的研究热潮。然而,基本的感知器网络结构只能解决有限的模式识别问题。

几乎同时, Bernard Widrow 和 Ted Hoff 提出了新的学习算法并将之应用在自适应线性单元的训练之中。Adaline 是连续取值的线性网络,其结构和性能都与 Rosenblatt 的感知器网络类似,主要用于自适应系统。

然而,根据 Marvin Minsky 和 Seymour Papert 于 1969 年发表的研究结果,感知器网络与自适应线性网络都存在着本质上的缺陷。Rosenblatt 和 Widrow 也清楚这些局限,他们都提出了新的网络,但其结构更为复杂,针对旧网络结构的学习算法也不再适用于新网络的训练。遗憾的是,他们都未能成功地改进学习算法。

很多科学家受 Minsky 和 Papert 的悲观结论的影响,认为神经网络的研究已经走入了死胡同。在此后相当长的一段时间内,神经网络的研究几乎陷于停滞。但这一阶段仍然有一些重要的工作在不断进行。1972 年, Teuvo Kohonen 和 James Anderson 分别独立地提出了可以用作记忆存储器的新网络结构。Stephen Grossberg 在自组织网络方面的研究也很活跃,提出了集中非线性动态系统的结构。

20 世纪 60 年代神经网络研究的低潮主要是由两个原因引起的,一是缺乏关于网络新结构的思路,二是当时还没有功能强大的数字计算机进行仿真实验。到了 20 世纪 80 年代,这些问题都迎刃而解。个人电脑与工作站得到了大范围普及,功能也越来越强大,同时,很多重要的新概念与新思路也不断涌现,其中有两个新概念的出现标志着神经网络的重生。

首先是 Hopfield 在他 1982 年的论文中引入能量函数用于解释递归网络的运行机理,并将其视作关联记忆,这就是著名的 Hopfield 网络。其次就是几位学者分别独立地提出了误差反传算法,主要用于多层感知器网络的训练。其中最有影响力的误差反传算法论文是由 David Rumelhart 和 James McClelland 于 1986 年发表的。这些算法都成功地解决了 20 世纪 60 年代 Minsky 和 Papert 提出的问题。

随着这些工作的不断展开,神经网络的研究进入了复兴时期。在过去的十年中发表的神经网络相关论文成千上万,神经网络在实际中的应用也层出不穷。尽管无法预计神经网络未来会取得怎样的成就,但是无论在基础理论还是应用研究领域,神经网络都已经展示了其强大的潜力。

1.2.3 群智能算法

“群”这一概念常用于描述一些相互作用、相邻个体的集合体,如蜂群、蚁群、鸟群、鱼群等。鱼聚集成群可以有效地逃避捕食者,因为任何一条鱼发现异常都可带动整个鱼群逃避。蚂蚁成群则有利于寻找食物,因为任一只蚂蚁发现食物都可带领蚁群共同搬运和进食。

对于群体中的个体而言,其行为主要取决于它对周围的感知,是随机的,也无法进行精准预测,因此个体行为能力非常有限,几乎不可能独立存在于自然世界中。自组织的个体通过形式多样的聚集协同导致了群智能的产生。群体可以通过这种智能行为来有效地利用周边的环境与资源。群体的自组织能力可以通过微观层次的交互行为引申到宏观层次的群体行为,这也是群智能的关键特征。Bonabeau 等人用四个特征来描述群体的自组织行为(如图 1-2 所示)。

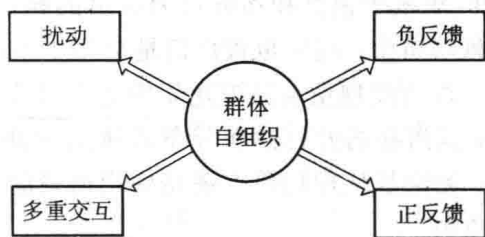


图 1-2 群体的自组织行为

(1) 正反馈:最简单的特征,也是自组织的首要特征。在个体进行交互时,信息的加强都可视作正反馈,如蚂蚁信息素的释放、蜜蜂跳舞等。

(2) 负反馈:用于平衡正反馈效应,并使得整个群体模式能够稳定下来。为了避免饱和和情况的发生,如觅食过程中的食物源耗尽、过度竞争等,引入负反馈机制是十分必要的。

(3) 扰动:对于保持群体的多样性非常重要,有助于新行为模式的发现,如随机漫步、误差、随机任务分配等。

(4) 多重交互:群体内个体进行多重交互,将来自其他个体的信息作为行为决策的重要参照之一,最终将信息传播到整个群体。

目前,已有的群智能算法都是源于对动物界的协作与分工行为的模拟,主要强调对社会系统中个体之间相互协同作用模式的模拟。这一点与进化计算不同,进化计算是对生物演化中适者生存的模拟。协作分工与自组织能力一样,是许多社会性种群的重要特征。在群体外部或内部发生变化时,个体任务分配的灵活性也是劳动力分工的显著特征。

Mark Millonas 在 1994 年提出了构建一个群智能系统所应满足的五个基本原则:

(1) 近邻原则:群内个体具有执行简单的时间或空间上的评估和计算的能力。

(2) 质量原则:群内个体对环境(包括群内其他个体)的关键性因素(食物的质量、安全性等)的变化作出响应。

(3) 多样性原则: 群内不同个体对环境中的某一变化所表现出的响应行为具有多样性, 群体资源的分配不应过于集中或过于分散。

(4) 稳定性原则: 群体应能过滤环境的某些波动, 不是每次环境的变化都会导致整个群体行为模式的改变。

(5) 自适应原则: 当环境发生变化, 且值得群体付出相应代价以获得正回报时, 群体应能在环境允许的情况下改变其行为模式。

以上五条原则已经成为群智能的最基本理论, 现有的群智能方法和策略都符合这些原则。

生态学家们纷纷根据上述特征对群体的行为进行了建模分析。近年来, 大量研究者在相关的模型上得到了灵感, 他们在进行各种自组织分布式设计的同时, 也开发出了各种群智能新方法用于解决现实生活中的难题, 如交通规划、网络路由、游戏开发、工业控制以及金融分析等。

群智能理论目前在一些场合得到了应用, 也出现了一些基于群智能的算法和策略。在 20 世纪 90 年代, 两种典型的群智能算法的出现吸引了研究人员的兴趣, 它们分别是由 Dorigo 等人于 1991 年基于蚂蚁群体行为提出的蚁群算法, 以及由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年基于鱼群和鸟群行为提出的粒子群算法。这两种算法及其改进算法出现在了大量文献报道中, 同时也被广泛地应用于不同领域。

群智能理论及其应用研究已经证明了它是一种能够有效解决大部分优化问题的新方法, 其潜在的并行性和分布式特点为处理大量的以数据库形式存在的数据提供了技术保证。无论是从理论研究还是应用前景的角度来看, 群智能算法都具有重要的学术意义和现实价值。

1.3 智能控制系统的构成

1.3.1 智能控制系统的结构

智能控制系统是指能够模拟人类智能行为, 具备学习、决策、调度、执行等能力的系统。智能行为本质上是一种从输入到输出的映射关系, 是指系统在特定的输入激励下, 能够产生合理的响应。

自从智能控制的概念提出以来, 很多研究人员都提出了不同的智能控制系统结构思想。由于智能控制具有非常明显的交叉学科(多元)特点, 一般都将智能控制看成是一个多元交接的结构。

K. S. Fu 教授通过对多个自学习控制系统的研究, 采用“智能控制系统”来描述自动控制系统与人工智能的交接。这种结构也被称为二元结构, K. S. Fu 以远距离环境下机器人的自动控制系统为例对这一结构进行了详细说明。在这一结构中, 既包括了高层的智能决策单元, 如人机组合控制, 也包括了低层的智能应用单元, 如数据采集、计算执行等。

G. N. Saridis 教授于 1977 年将智能控制系统的二元结构理论扩展成三元结构。他认为二元结构的二元相互作用无法有效应用于智能控制, 因此主张在其中引入运筹学的概念。三元结构将智能控制描述为人工智能、自动控制与运筹学的交接, 这一结构也在 1985 年的

第一次智能控制大会上引发了热烈讨论。与此同时, Saridis 还从智能控制的功能模块结构观点出发, 提出了分级智能控制系统, 为解决大系统计算的复杂性及性能模式的多样性等问题提供了行之有效的方法。按照智能程度的高低, 该结构分为组织级、协调级和执行级, 各级别随着智能程度的增加其相应精度降低。最低级的执行级必须高精度地执行局部控制任务以满足特定的性能指标要求, 一般需要建立准确的模型。次高级的协调级用来协调各子任务的运行, 不需要较高的运算精度, 但需要具备较高的决策能力及一定的学习能力, 以在变化的环境中改善性能。最高级的组织级将自然语言翻译成机器语言, 是语言的组织者, 它通过任务规划与组织, 识别控制情况, 提出适当的控制模式, 并能对低层进行直接干预。

此后, 蔡自兴教授在深入研究了智能控制的结构理论及其与其他相关学科理论的关系之后, 提出了四元系统结构, 将智能控制描述为人工智能、自动控制、运筹学与信息论的交接。信息是知识的载体, 也是解释知识和智能的一种手段。信息参与了智能控制的全过程, 是控制与实现智能的基本工具, 同时信息论与系统论、控制论共同构成了系统科学基础理论, 在智能控制系统中, 三者也有着紧密的关系与相互作用。因此, 将信息论引入智能控制系统可以将人工智能、自动控制与运筹学有机地联系起来。

1.3.2 智能控制系统的特点

智能控制系统一般具有如下特点:

(1) 自适应与再学习。虽然自适应并不意味着再学习, 但对于智能控制系统而言, 当被控对象及其环境发生未知变化时, 为了使系统在运行过程中去不断提取有关模型的信息, 使模型逐步完善, 系统再学习的能力也是必不可少的。而智能系统更广泛意义上的自适应功能甚至不需要依赖模型就可以进行自适应估计, 从而表现出很好的适应性能。

(2) 自治性与智能性。自动控制系统在一定意义上都具有自治性。一个系统如果在没有外界干预的情况下, 能够在不确定环境下长时间稳定运行, 则称该系统是高度自治的。对于实际的控制系统而言, 自治的程度各有不同。比如一个自适应控制器与另一个参数、结构都固定的反馈控制器相比, 更加适用于不确定环境下的控制问题, 因此也就具有更高的自治性。自治系统不一定表现出“智能”, 但对于高度自治的控制系统而言, “智能”是必不可少的。

(3) 分层递阶。随着科学技术与生产力水平的不断提高, 实际的控制问题也变得越来越复杂。为了降低系统的复杂度, 智能控制系统必须设计相应的分层递阶功能结构来对整个控制策略进行有效的分析与评价。这里所说的分层递阶不仅仅指的是系统硬件控制器层面, 同时也包含了时空维度上的各级功能模块。当环境发生变化时, 不同层级的功能结构也必须能够从对象及其环境的未知特性中学习, 从而使系统性能得以改善。

根据以上的观点, 智能控制系统的工作特点可以总结如下: 必须具有自学习/再学习能力以应对未知的复杂环境变化; 在应对未知的变化时能够表现出高度自治性; 具有处理复杂问题的分层递阶结构。

1.3.3 智能控制系统研究的主要工具

1. 数学工具

传统的自动控制理论主要以目标的传递函数、状态方程作为研究对象, 以数值计算与

分析为工具来解决控制问题。智能控制作为多元交叉学科,在工具上也是多方面的融合,主要有以下几种形式:

(1) 符号推理。从模仿人在控制决策方面表现出的智能入手,智能控制在规则控制这一方向上的发展也非常迅速。以逻辑推理与符号运算为基础的规则控制可以将直观的过程行为表达为推理规则的形式,而无需建立精确的数学解析模型。

(2) 模糊集合。模糊语言是人类进行表达交流的重要方式,模糊控制在形式上也是以规则进行逻辑推理的,其规则均以被量化了的模糊语言集表示,但其逻辑值为 0 到 1 之间的连续值,因此本质上是一种数值推理方法。由于同样不需要数学模型,因此模糊集合也是解决不确定系统控制问题的重要方法。

(3) 神经网络理论。神经网络模拟了人体神经结构模型,通过简单的连接关系来实现复杂的映射关系。从系统的角度来说,神经网络在本质上是一个不依赖于对象机理的非线性黑箱模型,因此也常被看成是介于逻辑推理与数值分析之间的一种工具和方法。

(4) 优化算法。控制系统通常需要通过系统的控制效果进行评价,据此修改系统结构和参数来改善系统的响应。优化理论是解决这一问题的常用方法,也是智能控制系统设计的精髓。同时,现代优化算法,尤其是启发式算法,大量借鉴了自然界、生物界和社会学的各种智能行为,是“智能”的集中体现。

2. 软件工具

智能控制象征着自动控制的未来,目前在实际工业生产中也得到了越来越广泛的应用。在智能控制理论的基础上研究开发的各种智能控制系统也层出不穷,正确评价这些控制系统的控制效果及适用范围,并将其进行普及与推广应用是一个亟待解决的重要问题。

随着现代数学方法、计算机技术和仿真实理论的发展,系统数字仿真已经成为控制系统设计与分析的重要手段。以模型来替代真实系统,可以有效地研究对象系统的特性,从而构造合适的智能控制器。

目前常用的智能控制系统仿真工具软件主要包括 Matlab 和 LabVIEW。Matlab 软件为很多工程计算领域提供了准确、高效的多功能工具箱,在信号和图像处理等领域的算法开发与分析上具有较大的优势,因此也具有很强的专业性。

LabVIEW 是美国 National Instruments 公司推出的虚拟仪器开发平台软件,是一种非常优秀的面向对象的图形化编程语言,以其强大的数据采集、数据处理、数据分析和仪器控制功能在现代控制领域中得到了广泛的应用。同时,LabVIEW 提供各种总线接口和常用仪器的驱动程序,用户可将其与硬件直接连接,方便地完成信号数据采集、信号分析等任务。相较于 Matlab 而言,LabVIEW 可以很方便地建立交互式的系统控制界面,人机交互更为友好,可视化功能极为丰富,设计开发过程更加人性化,学习过程中的时效性与可观测性也更为突出。因此,更易于上手并且适用于工业界应用的 LabVIEW 软件是进行智能控制系统仿真的有力工具。

3. 案例工具

近几十年以来,随着现代技术的发展以及人们对智能的不断追求,智能控制的基础理论研究已经达到了较高的水平,对科学技术的发展也起着积极的推动作用。智能控制的应用也有了长足的进步,2013 年全球的智能控制器工业化产值已经达到了 1.0711 万亿美元,并保持着每年 20% 的递增态势。其中,中国的产值达到了 1337 亿美元的规模。然而智能控

制在实际工业生产中的应用比例还远远落后于传统控制。因此,大力推广并普及智能控制系统在实际中的应用,无论是对于提高生产力的水平,还是反过来推进智能控制的理论研究,都有着非常积极的意义。

为了使理论与实际能密切结合,达到学术性和应用性的统一,本书以工程项目为纽带,通过分析各种智能控制系统的应用原理,使读者在学习过程中直接感触“理论对应用产生支撑,应用需要理论指导”这一基本工程逻辑。

1.4 智能控制的未来

第三代控制理论——智能控制将随着计算机技术的不断进化和工程控制实践的进一步要求而飞速发展。它从数学、物理学、机器人、仿生学、神经科学等基础科学与新兴科学中汲取各种智能化思想,却并非是各种已知算法与技术的简单集成,而是更高层面的有机融合。

经过多年的发展,智能控制已在很多实际应用中被证明是行之有效的,但目前仍未建立起系统的、严谨的理论基础。无论在深度还是广度上,智能控制还有很多的问题等待着人们去研究,同时建立在严格数学框架基础上的新概念与新方法也亟待提出。

(1) 每种智能方法都有其优缺点,通过各种方法的综合有可能带来更好的控制效果,并在实施过程中来抵消各自的缺陷与不足。当然,“智能”的提升并非通过将多种方法简单叠加就可以达到。

(2) 智能控制的理论研究还要进一步深入,比如数学稳定性、收敛性、鲁棒性、设计理论以及与其他自适应方法的比较研究等。

(3) 结合其他学科的一些研究热点,比如神经生理学、认知心理学等学科理论,深入地研究和模仿人在控制中表现的经验、技巧与策略。

(4) 解决智能控制器的具体实现,包括软件和硬件。提高运行速度,实现实时控制,研制各种解决实际工业控制难题的智能机和智能仪表等。

习 题

- 1.1 给出你所理解的智能控制的定义。
- 1.2 列出智能控制与传统控制的区别。
- 1.3 当前智能控制发展所面临的挑战有哪些?
- 1.4 模糊数学与经典数学主要有哪些不同?
- 1.5 神经网络主要有哪些特点?
- 1.6 你知道目前有哪些群智能算法吗?试总结它们的相同与不同之处。
- 1.7 通过阅读文献了解智能控制更多的应用领域。
- 1.8 给出一个运用智能控制解决问题的简单实例,简述其步骤,并用编程工具(LabVIEW/C/C++/Matlab)实现。