

上海市本科教育高地建设
机械制造及其自动化系列教材

智能控制 理论、方法与应用

程武山 主 编

清华大学出版社

上海市本科教育高地建设
机械制造及其自动化系列教材

智能控制 理论、方法与应用

程武山 主 编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以智能控制理论为主线,全面系统地介绍了智能控制、模糊控制、专家系统、神经网络、遗传算法的理论方法及系统设计的实现技术。全书共7章,第1章概述智能控制的发展过程及所面临的问题,综述了智能控制的研究内容及特点。第2章讲述了递阶智能控制系统,详细介绍了信息层次性,采用数据融合的方法建立系统框架。第3章主要介绍了模糊数学的一些基本概念及运算规则,同时介绍了模糊控制系统的组成及设计方法。第4章介绍了专家系统和专家控制方法,概述了传统人工智能的知识表示方法和搜索推理技术。第5章主要介绍了前馈神经网络、反馈神经网络和自组织神经网络等几种常用网络的基本原理与建模方法。第6章主要介绍了遗传算法的基本原理与实现过程,并对其数学基础进行了综述,同时还提出了遗传算法的几种改进措施及其和神经网络的结合。第7章是智能控制系统的应用,具体给出了六个综合智能控制系统在工程上应用实例,以给读者提供对不同复杂生产制造过程建立智能控制系统的方法和手段。

本书注重理论基础,强调实际应用,可作为高等院校硕士研究生和高年级本科生的教材,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。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

智能控制理论、方法与应用/程武山主编. —北京:清华大学出版社,2009.12
(上海市本科教育高地建设机械制造及其自动化系列教材)
ISBN 978-7-302-21291-1

I. 智… II. 程… 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(2009)第 181936 号

责任编辑:庄红权 赵从棉

责任校对:刘玉霞

责任印制:孟凡玉

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

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:15

字 数:362千字

版 次:2009年12月第1版

印 次:2009年12月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:27.00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:033535-01

前言



智能控制是在人工智能和自动控制等多学科基础上发展起来的交叉学科。随着社会和科学技术的不断发展,传统的控制理论面临着很大的挑战,这些挑战主要体现在传统的控制理论在处理系统的复杂性、多变量的耦合性和不确定性问题时显得无能为力。在此背景下,模糊推理、神经网络、遗传算法和专家系统等智能控制技术取得了长足的发展。当前,国内外控制界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。

正是基于这些原因,许多院校已将智能控制理论作为硕士研究生和大学本科高年级学生的首选或必选计算机控制课程。本教材以智能控制理论为主线,全面系统地介绍了模糊控制、专家系统、神经网络、遗传算法的理论方法及系统设计的实现技术。其突出的优点是在复杂系统的基础上利用技术和现代智能控制手段,建立递阶智能控制系统。本书通过对国内外工艺过程的控制要求及发展方向的分析研究,跟踪和借鉴国外模糊控制、神经网络和专家系统等人工智能技术在复杂工艺过程中的发展趋势和应用成果,探讨和研究了信息融合领域的前沿课题,并提出了用递阶和分层技术对数据融合、集成、决策和推理,大大提升了智能控制的内容和实现手段。

全书共7章,前6章详细阐述了基本概念和方法,通过例题加深学生对内容的理解,每章给出习题以帮助理解基本概念;第7章为应用篇,介绍的多个综合例子都是作者近年来在国家重大科研项目中的研究成果。其中上海市自然科学基金项目“高炉智能系统的快速推理机制的分析”已经专家鉴定,其成果达到国际先进水平,并申请三项国家发明专利。发表相关论文近二十篇,被SCI、EI、ISTP收录6篇,受到了国际学术界的肯定。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2009年9月于上海

目录

1	绪论	1
1.1	传统控制所面临的问题	1
1.2	智能控制的定义、特点及其发展历史	2
1.3	智能控制的主要研究内容	3
1.3.1	模糊控制	3
1.3.2	神经网络控制	5
1.3.3	遗传算法	6
1.4	智能控制面临的问题	7
	习题	8
2	递阶智能系统	9
2.1	递阶智能系统概述	9
2.1.1	信息的层次	9
2.1.2	信息的特征	10
2.2	递阶智能系统的信息处理	11
2.2.1	基本概念	11
2.2.2	基本方法	13
2.3	递阶智能系统的数据融合	18
2.3.1	分解与综合	18
2.3.2	数据融合	19
2.4	递阶智能系统的优化算法	21
	习题	22
3	模糊控制理论	23
3.1	概述	23
3.1.1	模糊控制理论简介	23
3.1.2	模糊理论的发展简史	23
3.1.3	模糊控制理论的特点	24

3.2 模糊集合与隶属函数	24
3.2.1 从经典集合到模糊集合	24
3.2.2 模糊集合及其运算	25
3.2.3 隶属函数	29
3.3 模糊矩阵与模糊关系	31
3.3.1 模糊矩阵的定义及其运算	31
3.3.2 模糊关系	32
3.3.3 模糊关系的合成	34
3.4 模糊逻辑与模糊推理	35
3.4.1 语言变量与蕴含关系	35
3.4.2 模糊推理的方式	38
3.4.3 模糊推理的性质	41
3.5 模糊控制器	42
3.5.1 模糊控制结构概述	42
3.5.2 模糊控制器的设计结构	43
3.5.3 输入向量的模糊化	43
3.5.4 规则库和推理机	45
3.5.5 输出向量的解模糊	46
3.6 模糊单点算法优化	48
3.6.1 传统的模糊查询表算法	48
3.6.2 由传统模糊查询表算法推导出模糊单点算法	48
3.6.3 二输入下的模糊单点算法及编程思路	53
习题	54

4 专家系统	56
4.1 专家系统概述	56
4.1.1 专家系统简介	56
4.1.2 专家系统发展简史	56
4.1.3 专家系统的特点	57
4.2 专家系统类型及基本组成	57
4.2.1 专家系统的类型	57
4.2.2 专家系统的基本组成	58
4.3 专家系统的知识表示法	60
4.3.1 逻辑表示法	60
4.3.2 产生式表示法	65
4.3.3 框架表示法	68
4.3.4 “与或图”表示法	70
4.3.5 语义网络表示法	71
4.4 专家系统的推理机制	74

4.4.1	盲目推理	74
4.4.2	启发式推理机制	82
4.4.3	演绎推理和归纳推理	89
4.4.4	精确推理和不精确推理	91
4.5	知识库	91
4.5.1	设计初始知识库	92
4.5.2	知识库的建立	92
4.5.3	知识库的管理和维护	95
	习题	96

5 神经网络 98

5.1	神经网络概述	98
5.1.1	神经网络简介	98
5.1.2	神经网络发展历史	99
5.1.3	神经网络的特点	99
5.2	神经网络模型及学习方法	100
5.2.1	神经网络模型	100
5.2.2	神经网络学习方法	101
5.3	前向神经网络	101
5.3.1	前向神经网络的数学基础	101
5.3.2	前馈 BP 网络	104
5.3.3	径向基函数神经网络	110
5.3.4	前馈神经网络的泛化问题	114
5.4	反馈神经网络	114
5.4.1	离散型 Hopfield 神经网络	115
5.4.2	连续型 Hopfield 神经网络	116
5.4.3	Hopfield 神经网络的应用领域	118
5.5	自组织神经网络	120
5.5.1	网络的拓扑结构	121
5.5.2	SOM 网络的原理及其算法	121
	习题	124

6 遗传算法 125

6.1	概述	125
6.1.1	遗传算法简介	125
6.2.2	遗传算法发展简史	125
6.2.3	遗传算法的特点	126
6.2	基本遗传算法	127
6.2.1	遗传算法的基本原理	127

6.2.2	遗传算法的设计与实现	128
6.2.3	遗传算法运行参数的选择	133
6.2.4	函数寻优实例	134
6.3	遗传算法的数学基础	137
6.3.1	模式定理	137
6.3.2	积木块假设	142
6.4	遗传算法的改进	142
6.4.1	早熟现象	142
6.4.2	自适应遗传算法	143
6.4.3	小生境技术	145
7	应用篇	147
7.1	物料平衡的数字仿真	147
7.1.1	工艺描述	147
7.1.2	纯滞后系统的机制分析	149
7.1.3	数据跟踪	154
7.1.4	数字仿真控制	156
7.1.5	程序设计	157
7.1.6	系统调试	158
7.2	烧结矿化学成分预测系统	159
7.2.1	工艺介绍	159
7.2.2	样本数据归一化	160
7.2.3	专家系统	161
7.2.4	烧结过程化学成分专家控制系统知识库	163
7.2.5	烧结过程化学成分知识库的组织结构	165
7.2.6	知识库的检测	166
7.2.7	化学成分专家控制系统推理机	167
7.2.8	专家系统的实现	168
7.3	高炉专家系统的建立	175
7.3.1	工艺描述	175
7.3.2	国内外高炉专家系统现状	176
7.3.3	系统总体结构	177
7.3.4	高炉炉况异常预报的方法研究	179
7.3.5	运行情况	185
7.3.6	小结	186
7.4	LF炉模糊控制系统设计	186
7.4.1	工艺介绍	186
7.4.2	电弧炉炼钢过程电极升降智能复合控制系统	188
7.5	SKF炉自适应预测推理系统	195

7.5.1	问题的引入.....	195
7.5.2	APIS 总结构流程图及设计	196
7.5.3	系统运行结果.....	205
7.6	烧透点递阶智能控制系统	208
7.6.1	工艺描述.....	208
7.6.2	研究现状.....	209
7.6.3	递阶系统的优化算法.....	210
7.6.4	建立预测模型.....	211
7.6.5	隶属函数的建立.....	216
7.6.6	开发阶段.....	220
7.6.7	系统框架设计.....	221
7.6.8	烧透点预测系统与模糊控制联调.....	225
参考文献		227

控制理论学科经历了从经典控制理论到现代控制理论,再到目前的智能控制理论的发展过程。其主要研究对象也从单输入单输出的常系数线性系统,发展为多输入多输出的复杂控制系统。对现代复杂系统的研究,涉及非线性、鲁棒性、具有柔性结构的系统和离散事件动态系统等。对这些复杂系统的控制理论的研究,长期以来虽取得了一些进展,但其研究成果十分有限,有的问题还难以解决,特别是对于那些难以用数学模型描述的问题。显然,对于这些复杂控制系统的研究必须另辟蹊径。

人们在长期的生产实践中发现,对于许多复杂的生产过程,难以用自动控制系统实现,但在熟练的操作工、技术人员或专家的操作下却控制自如,可以获得满意的控制效果。这就使研究人员受到启发,若能把这些熟练的操作工、技术人员或专家的经验知识与控制理论相结合,把它作为控制理论解决复杂生产过程的一个补充手段,那将使控制理论解决复杂生产过程的难题有一个突破性的进展。现代的计算机控制技术的发展也为这种设想提供了有效的工具。计算机在处理逻辑运算、模糊信息、模式识别、知识与经验的积累等方面,完全可以取代人的操作。当把这种计算机控制技术应用到上述复杂的生产过程中,使之达到或超过人的操作水平时,这种由计算机实现的控制系统就具有了某些人的智能。因此,把这样的自动控制系统称为智能控制系统。

1.1 传统控制所面临的问题

以经典控制理论、现代控制理论为代表的传统控制理论曾经在一段时期成为解决现实生活中控制问题的有力工具,并在如今的生活中扮演着重要角色。但随着社会的发展,工程科学、技术对控制提出了越来越高的要求,传统控制理论逐渐遇到了难以克服的困难,主要体现在以下几个方面。

1) 对象的复杂性、高度非线性和不确定性导致系统辨识和建模的困难

控制系统的设计无论是采用以频域法传递函数为基础的经典控制理论,还是采用以时域法状态方程为基础的现代控制理论,都需要知道被控制对象的数学模型。对象数学模型建立得是否精确,直接影响着控制效果的好坏。然而,一般的工业生产过程,都具有非线性、时变性和不确定性,由于被控对象越来越复杂,其复杂性表现为高度的非线性、高噪声干扰、

动态突变性以及分散的传感元件与执行元件、分层和分散的决策机构、多时间尺度、复杂的信息结构等,这些复杂性都难以用精确的数学模型(微分方程或差分方程)来描述。要获取适用的对象数学模型,既保证足够的精确性,又不至于过分复杂,更是相当困难甚至是不可能的。现有控制理论依靠纯数学解析的方法,对被控对象的复杂性、高度非线性和不确定性显得无能为力。

2) 线性系统控制理论在解决复杂的对象特性和复杂的控制任务时面临的困难

经典控制理论及现代控制理论的任务在于寻求(反馈)控制,使得闭环系统稳定,这就是通称的“镇定问题”。工程技术不断地提出新的控制任务,它们远远不可能用镇定来概括。另外,随着科学技术的发展,人们的控制活动会越来越多,控制的任务也会越来越复杂和困难。面对这样复杂的对象特性和复杂的控制任务要求,传统的线性系统控制理论已经远远达不到要求。

3) 定性、逻辑、语言控制等控制手段面临着数学处理的困难

事实上,随着计算机在自动控制领域的广泛应用,工程师们在实际的控制工程中已经成功地采用了大量定性的、逻辑的以及语言描述的控制手段。然而就是这些在工程实际中成功运用的控制手段和经验,在传统控制理论中面临着极大的数学处理方面的困难。

正因为传统控制存在这么多的困难,因此,必须发展新的概念、理论与方法才能和社会生产的快速发展相适应。智能控制在这样的背景下应运而生了。

1.2 智能控制的定义、特点及其发展历史

与许多先进科学的概念一样,智能控制直到目前都没有一个明确的定义。人们根据它的技术特征和发展历程给它一个定义:通过定性与定量相结合的方法,针对对象环境和任务的复杂性与不确定性,有效自主地实现复杂信息的处理及优化决策与控制功能,其主要特点如下。

- (1) 智能控制通常是一个混合的控制过程,建立在非数学和数学模型的基础上。
- (2) 智能控制的核心是对高水平实际过程环境的管理、决策、规划和控制。
- (3) 智能控制是利用人工智能、系统理论、专家经验、信息获取、神经网络、模式识别、机器人、推理、空间技术、计算机科学等技术去协调解决复杂过程控制问题。
- (4) 智能控制是最新发展研究的领域,并仍然在不断发展之中,是目前解决复杂过程控制问题的最好手段。

智能控制理论是在人们要求越来越高的控制性能和针对被控系统的高度复杂性、高度不确定性的情况下产生的,并以常规控制为基础进一步发展和提高的。图 1-1 给出了控制科学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。

由图 1-1 可见,智能控制处于控制科学的前沿领域。

1985 年 8 月,IEEE 在美国纽约召开了第一届智能控制学术讨论会,会议决定在 IEEE 控制系统学会下设立一个 IEEE 智能控制专业委员会。这标志着智能控制这一新兴学科研究领域的正式诞生,智能控制作为一门独立的学科,已正式在国际上建立起来。

在我国,智能控制也受到广泛的重视。中国自动化学会等分别于 1993 年 8 月、1997 年 6 月和 2000 年 6 月在北京、西安和合肥召开了第一届、第二届和第三届全球华人智能控制



图 1-1 控制科学发展中的智能控制地位

与智能化大会。已成立的学术团体有中国人工智能学会计算机视觉与智能控制学会、中国智能机器人专业委员会和中国自动化学会智能自动化专业委员会等。这表明，智能控制作为一门独立的新学科，也已在我国建立起来了。

综上所述，智能控制理论和技术在国内外已有了较大的发展，已进入工程化、实用化的阶段。虽然智能控制在理论和技术上不十分成熟，但随着人工智能技术、计算机技术等相关技术的迅速发展，智能控制必将迎来它美好的明天。

1.3 智能控制的主要研究内容

智能控制是一门交叉学科，它的建立和发展是以众多学科特别是许多新兴学科为基础的，它内容广泛而多样，融合了人工智能、自动控制、运筹学、模糊集合论、生命科学、神经生理学、认知科学、人类工程学、计算机科学、系统论、信息论、耗散结构论、协同论、突变论、混沌学多学科知识。下面仅仅介绍与本书相关的几方面内容。

1.3.1 模糊控制

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 和 Zimmerman 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、工业机器人等方面都有成功的案例。但在对较复杂的不确定性系统进行控制时往往精度较低，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 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,以发挥各自的优势。

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 1-2 所示。

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 T-S 模型。

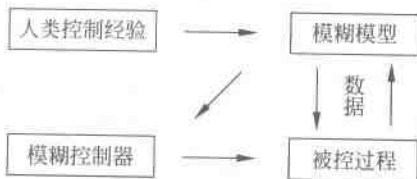


图 1-2 模糊模型

在 Mamdani 模型中,图 1-2 表示的系统映射可以写成

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

按 Mamdani 推理,采用质心法进行模糊判决,则系统总的推理输出为

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

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

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

也可表示为状态方程的形式

$$\begin{cases} x(k+1) = A_i x(k) + B_i \mu(k) \\ y(k) = C_i x(k) \end{cases} \quad (1-4)$$

这种控制系统的结构如图 1-3 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式(1-4)进行模糊判决。

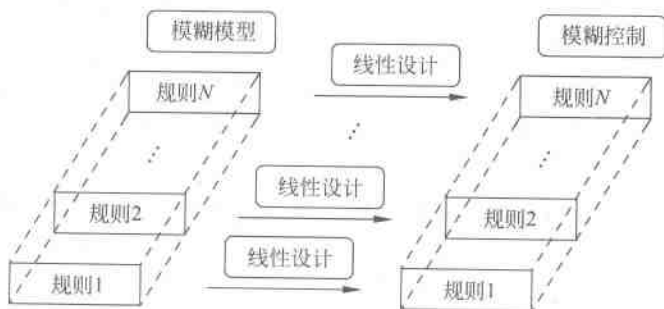


图 1-3 T-S 模糊控制器的设计

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。

1.3.2 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进行控制。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 证明了多层神经网络是一种对连续函数的完备的逼近,Wang 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,如果神经网络(neural network, 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(neural network control, NNC)根据输出误差 $P = y_m - y$ 来修正权值,使得 $e \rightarrow 0$ 和系统结构已知时,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。

1.3.3 遗传算法

遗传算法(genetic algorithms, 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,由于该方法的全局性、快速性、并行性和鲁棒性,其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、电力和材料科学等。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。

1.4 智能控制面临的问题

智能控制技术是一门探索和模拟人的感觉和思维活动过程规律而设计类似人的某些智能的技术。

1) 从技术实现角度看,存在如下问题。

(1) 复杂生产制造过程的影响因素多,具有大滞后等特性,依靠传统的建模方法很难解析该工艺过程。

(2) 目前人们在对复杂生产制造过程的预测和控制中,通常把整个复杂过程分解为不同侧面或部分,采用单一智能技术去预测和调节,缺乏系统性和科学性。

(3) 控制模式仍沿用传统的控制方法,在一个层面上将被控对象的各个参量和过程按轻重缓急建立起相应的控制分系统,用某一参量的误差和误差变化率来调节另一变量;用推理规则来描述有因果关系的被控对象特征;用神经网络来映射那些难以精确描述的非线性对象输入和输出关系。用这种方式建立的智能系统并非真正地按人的中枢神经系统递阶分层结构组织起来,同时也抹杀了被控对象的本身分层结构的特点。

2) 从工程实现角度看,存在如下问题。

(1) 缺少特殊检测仪表,如反映透气性的透气性检测仪等;而检测水平对控制的效果有很大的影响,体现在两个方面:一是检测的准确度,即检测量是否真实地反映过程状态;二是检测的精度,即参数的可观测量程度。如复杂的生产制造过程的检测和控制的任务就是在较准确地采集足够多的可观测量的基础上,选择适宜的控制方法和手段达到优化生产制造的目的。

(2) 人工智能技术研究发展不平衡,在高校和研究院所已将人工智能技术作为解决复杂工艺过程的主要手段,而在企业界,由于缺乏使用和维护人工智能系统的领域专家,人工智能系统又需要较长时间的调整和维护,所以人工智能系统很难长期稳定运行。

(3) 开发人员缺乏现场经验和调试经验,尤其在系统安装和调试最艰苦的时候,也最需要系统开发人员能和现场工人师傅生活和工作在一起,按现场工作状态来整定参数和控制算法,同时教授操作人员熟悉和操作人工智能系统。

(4) 设计和建设很少考虑到人工智能系统的投资,如大多数生产制造单位对人工智能系统的研究和应用没有足够的重视,投入不足。在项目的立项和申请过程中,因经费紧张,总认为智能系统可上可不上,国家也没有强行规定。

(5) 目前所开发的数学模型和专家系统只是根据部分信号或专家经验,提出某一方面或某些参数的预测和控制算法,很难保证整个系统在较长时间内的稳定。

基于以上原因,人们正在积极研究和开发递阶智能控制系统(见第2章)。

控制理论的发展正面临新的突破,智能控制作为自动控制理论的前沿学科之一,是常规控制理论与技术的进一步发展和提高。智能控制象征着自动控制的未来,是自动控制学科发展道路上的又一次飞跃。随着人工智能技术、计算机技术及信息科学技术的迅速发展,智能控制必将获得更大的发展,并在实际中获得广泛的应用。

习 题

1. 什么是智能、智能系统、智能控制系统？
2. 智能控制系统一般由哪几部分组成？它们之间存在什么关系？
3. 试述智能控制系统的类型及其特点。
4. 比较智能控制与传统控制的优劣性。
5. 智能控制有哪些应用领域？试举例说明其工作原理和控制性能。