



工业和信息化部“十二五”规划教材
“十二五”国家重点图书出版规划项目

智能控制技术

Intelligent Control Technology

● 梁景凯 曲延滨 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划教材
“十二五”国家重点图书出版规划项目

智能控制技术

Intelligent Control Technology

● 梁景凯 曲延滨 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容提要

本书系统介绍了智能控制的基本概念、理论和主要方法。全书共分7章,包括模糊控制、神经网络控制、专家控制和智能优化算法等方面的内容。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化、计算机应用、电子工程等专业研究生和高年级本科生的教材,也可供自动化领域工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制技术/梁景凯,曲延滨编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2016.3

ISBN 978-7-5603-5731-7

I. ①智… II. ①梁…②曲… III. ①智能控制
IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第287380号

策划编辑 王桂芝
责任编辑 李广鑫
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 17.5 字数 421 千字
版 次 2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-5731-7
定 价 35.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

智能控制是自动控制领域的前沿学科之一,其发展得益于许多学科,不仅包含人工智能、运筹学、自动控制的内容,而且还从计算机科学、生物学、心理学等学科汲取了丰富的营养。因此,智能控制是一门综合性很强的交叉学科,也是控制理论发展的第三阶段。智能控制的发展为解决复杂的非线性、不确定系统的控制问题开辟了新的途径。智能控制的应用研究十分活跃,并且取得了许多成果,智能控制技术呈现出的强大生命力已经引起了世界各国专家学者广泛的关注。

本书选材新颖,系统性强,突出理论,联系实际,叙述深入浅出。全书系统地论述了智能控制系统的概念、理论方法和实际应用。全书共分7章:第1章绪论,着重介绍智能控制的基本概念、基本特点、基本类型,智能控制的发展概况,智能控制系统研究的主要数学方法。第2章模糊控制的数学基础,对模糊控制的数学基础进行了介绍,详细地论述了模糊集合、模糊关系的概念及其与普通集合、普通关系之间的关系,并给出了如何从人类自然语言规则中提取其蕴涵的模糊关系的方法,介绍了如何根据模糊关系进行模糊推理。第3章模糊控制,介绍了模糊控制器的工作原理、基本思想和组成结构,而后对模糊控制器的设计内容和方法给出了详细的描述。第4章神经网络,系统地描述了神经网络的基本原理和特征,并详细给出了几种常用的神经网络模型的结构描述和学习算法。第5章神经网络控制,介绍了神经网络技术在自动控制中的应用。第6章专家控制,主要介绍基于知识的专家系统、专家控制的知识表示和推理方法、专家控制系统基本原理与方法。第7章智能优化算法,主要介绍了优化算法与控制系统,以及智能优化算法与智能控制系统之间的联系,还介绍了退火算法、遗传算法、粒子群算法以及蚁群算法的基本原理与具体实现步骤。

本书第1章由梁景凯教授撰写,第2、3章由张虹老师撰写,第4、5章由张扬老师撰写,第6章由曲延滨教授撰写,第7章由张筱磊老师撰写,任倩、宋蕙慧、侯睿、陈玉敏等参与了本书的校对和图表整理工作。全书由梁景凯教授和曲延滨教授统稿。王明彦教授和张晓华教授对书稿进行了认真细致的审阅,并提出了宝贵的意见,对提高本书的编写质量给予了很大帮助,在此谨致衷心的感谢。本书在编写过程中参考了许多教材和资料,并在书后参考文献中列出,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,智能控制的研究工作发展很快,不断有新的理论和方法产生,因此,疏漏和不当之处在所难免,殷切期望同行专家和广大读者批评指正。

编 者

2015年8月于威海

目 录

第1章 绪论	1
1.1 智能控制的基本概念	1
1.1.1 智能与智能控制	1
1.1.2 智能控制系统的基本结构	2
1.1.3 智能控制的结构理论	3
1.1.4 智能控制的特点	4
1.2 智能控制系统的类型	5
1.2.1 模糊控制	5
1.2.2 神经网络控制	5
1.2.3 专家控制	7
1.3 智能控制的发展	7
1.4 智能控制系统研究的主要数学方法	8
本章小结	9
习题与思考题	9
第2章 模糊控制的数学基础	10
2.1 模糊集合及运算	10
2.1.1 模糊集合	10
2.1.2 模糊集合的运算	14
2.1.3 模糊集合运算的性质	17
2.1.4 隶属函数的建立	17
2.2 模糊关系	22
2.2.1 经典关系	22
2.2.2 模糊关系	24
2.2.3 等价模糊关系	25
2.2.4 模糊关系的运算	25
2.2.5 模糊关系的性质	29
2.2.6 分解原理	29
2.2.7 扩张原理	30
2.3 模糊逻辑与模糊推理	31
2.3.1 经典逻辑	31
2.3.2 模糊逻辑	33
2.3.3 模糊逻辑推理	35

2.3.4	基于规则库的模糊推理	45
2.3.5	模糊推理的性质	48
	本章小结	50
	习题与思考题	51
第3章	模糊控制	54
3.1	模糊控制系统	54
3.1.1	模糊控制系统结构	55
3.1.2	模糊控制系统的工作原理	56
3.1.3	模糊控制系统的特点	63
3.1.4	模糊控制系统设计步骤	64
3.2	模糊控制系统的分类	64
3.2.1	线性模糊控制系统和非线性模糊控制系统	64
3.2.2	恒值模糊控制系统与随动模糊控制系统	65
3.2.3	有差模糊控制系统和无差模糊控制系统	66
3.2.4	单变量模糊控制器和多变量模糊控制器	66
3.2.5	单一模糊控制器和复合模糊控制器	68
3.2.6	变结构模糊控制器、参数自整定模糊控制器和自适应模糊控制器	69
3.3	模糊控制器设计	70
3.3.1	模糊控制器设计步骤	70
3.3.2	单输入单输出模糊控制器设计	74
3.3.3	双输入单输出模糊控制器设计	78
3.4	基于 Takagi-Sugeno 模型的模糊控制	82
3.3.1	Takagi-Sugeno 模糊模型形式	82
3.3.2	Takagi-Sugeno 模糊模型的推理	83
3.3.3	基于 Takagi-Sugeno 模型的模糊控制	84
3.5	模糊控制的应用	85
3.5.1	模糊伺服控制系统	85
3.5.2	模糊控制的锅炉温度控制系统	90
3.6	基于 MATLAB 的模糊控制系统设计	92
3.6.1	MATLAB 模糊控制工具箱简介	92
3.6.2	模糊逻辑工具箱的图形用户界面	93
3.6.3	用模糊逻辑工具箱命令建立模糊系统	99
3.6.4	基于 Simulink 的模糊控制系统	108
	本章小结	113
	习题与思考题	114
第4章	神经网络	115
4.1	神经网络概述	115
4.1.1	神经网络发展历史	115
4.1.2	神经网络基础	117
4.1.3	神经网络的结构	120

4.1.4	神经网络学习算法	122
4.2	前馈神经网络	126
4.2.1	感知器	126
4.2.2	BP 网络	130
4.2.3	RBF 神经网络	136
4.3	反馈神经网络	139
4.3.1	Hopfield 网络	140
4.3.2	Boltzmann 机	145
4.4	自组织神经网络	153
4.4.1	自组织特征映射神经网络	153
4.4.2	自适应共振理论	158
	本章小结	163
	习题与思考题	164
第 5 章	神经网络控制	166
5.1	神经网络控制概述	166
5.2	神经网络控制的结构	168
5.2.1	神经网络监督控制	168
5.2.2	神经网络自校正控制	169
5.2.3	神经网络模型参考自适应控制	170
5.2.4	神经网络内模控制	171
5.2.5	神经网络预测控制	173
5.2.6	神经网络自适应评判控制	174
5.2.7	神经网络集成控制	175
5.3	单神经元自适应控制	177
5.3.1	单神经元自适应 PID 控制	177
5.3.2	单神经元自适应 PSD 控制	180
5.3.3	单神经元控制在直流调速系统中的应用	183
5.4	神经网络 PID 控制	185
5.4.1	基于 BP 神经网络的 PID 控制器	185
5.4.2	改进型 BP 神经网络 PID 控制器	189
5.5	基于神经网络的系统辨识	193
5.5.1	系统辨识的基础知识	194
5.5.2	基于神经网络的系统辨识	196
	本章小结	202
	习题与思考题	203
第 6 章	专家控制	204
6.1	专家系统概述	204
6.1.1	什么是专家系统	204
6.1.2	专家系统的结构	205
6.1.3	专家系统的类型	206

6.2	专家系统工作原理	207
6.2.1	专家系统的特点	208
6.2.2	知识工程基础	208
6.3	专家控制系统	217
6.3.1	专家控制系统工作原理	217
6.3.2	专家控制系统的类型	219
6.3.3	基于专家控制的PID控制系统设计	220
6.4	专家控制系统应用实例	223
6.4.1	孵化控制系统的专家模糊控制	223
6.4.2	专家系统在铁水脱硫中的应用	228
	本章小结	231
	习题与思考题	232
第7章	智能优化算法	233
7.1	引言	233
7.1.1	最优化问题及其分类	233
7.1.2	智能优化算法与智能控制系统	235
7.2	模拟退火算法	238
7.2.1	模拟退火算法的基本原理	238
7.2.2	模拟退火算法的基本步骤与参数选择	239
7.2.3	模拟退火算法应用实例	242
7.3	遗传算法	244
7.3.1	进化计算与遗传算法	244
7.3.2	二进制遗传算法原理与关键步骤	246
7.3.3	连续遗传算法原理与关键步骤	249
7.3.4	遗传算法应用实例	252
7.4	粒子群算法	255
7.4.1	群智能与粒子群算法的基本原理	255
7.4.2	粒子群算法的基本步骤与改进方法	256
7.4.3	粒子群算法应用举例	258
7.5	蚁群算法	261
7.5.1	蚁群算法的基本原理	261
7.5.2	蚁群算法的基本步骤	262
7.5.3	算法应用举例	263
	本章小结	267
	习题与思考题	267
	参考文献	269

第 1 章 绪 论

科学技术的飞速发展和进步,对控制系统提出了新的更高要求,被控制对象也变得越来越复杂,传统的控制方法已经无法满足工程技术对自动化水平的要求。信息技术、计算技术的快速发展及其他相关学科的发展和相互渗透,推动了控制科学与工程研究的不断深入,控制系统向智能控制系统的发展已成为一种趋势。

本章主要从工程控制的角度出发,简要介绍智能控制及其系统的基本概念,智能控制系统的基本结构、基本功能、主要类型,智能控制的产生和发展。

1.1 智能控制的基本概念

1.1.1 智能与智能控制

1. 智能

智能是人们在认识与改造客观世界的活动中,由思维过程和脑力劳动所体现的能力,即能灵活、有效、创造性地进行信息获取、信息处理和信息利用的能力。

从人类的认知过程来看,智能是系统的一个特征,当集注(Focusing Attention, FA)、组合搜索(Combinatorial Search, CS)、归纳(Generalization, G)过程作用于系统输入,并产生系统输出时,就表现为智能。

从机器智能的角度来看,机器智能是把信息进行分析、组织,并把它转换成知识的过程。知识就是所得到的结构信息,它可用来使机器执行特定的任务,以消除该任务的不确定性或盲目性,达到最优或次优的结果。

2. 智能控制

从一般行为特征来看,智能控制是知识的“行为舵手”,它把知识和反馈结合起来,形成感知-交互式、以目标为导向的控制系统。系统可以进行规划、决策、联想,产生有效、有目的的行为,在不确定的环境中,达到既定的目标。

从机器智能的角度来看,智能控制是认知科学、多数学编程和控制技术的结合,它把施加于系统的各种算法和数学与语言方法融为一体。

智能控制的定义可以有多种不同的描述,从工程的角度看,有以下几种描述。

智能控制的定义一:智能控制是由智能机器自主地实现其目标的过程。而智能机器则定义为,在结构化或非结构化的、熟悉或陌生的环境中,自主地或与人交互地执行人类规定的任务的一种机器。

智能控制的定义二:K. J. 奥斯托罗姆则认为,把人类具有的直觉推理和试凑法等智能加以形式化或机器模拟,并用于控制系统的分析与设计中,使之在一定程度上实现控制系统的智能化,这就是智能控制。他还认为自调节控制、自适应控制就是智能控制的低级体现。

智能控制的定义三:智能控制是一类无需人的干预就能够自主地驱动智能机器实现其目标的自动控制,也是用计算机模拟人类智能的一个重要领域。

智能控制的定义四:智能控制实际只是研究与模拟人类智能活动及其控制与信息传递过程的规律,研制具有仿人智能的工程控制与信息处理系统的一个新兴分支学科。

以上虽然给出了智能控制系统的几种定义,但是并没有提出一个明确的界限,什么样的系统才算是智能控制系统。同时,即使是智能控制系统,其智能程度也有高有低。

1.1.2 智能控制系统的基本结构

智能控制系统典型结构如图 1.1 所示,图中“广义对象”包括通常意义下的控制对象和外部环境。例如对于智能机器人系统来说,机器人的手臂、被操作物体及所处环境统称为广义对象。“传感器”包括关节位置传感器、力传感器、视觉传感器、听觉传感器和触觉传感器等。“感知信息处理”将传感器得到的原始信息加以处理,例如视觉信息要经过复杂的处理才能获得有用的信息。“认知”主要用来接收和存储信息、知识、经验和数据,并对它进行分析、推理,做出行动的决策,送至“规划/控制”部分。“通信接口”除建立人机之间的联系外,还建立系统中各模块之间的联系,“规划/控制”是整个系统的核心,它根据给定的任务要求、反馈的信息以及经验知识进行自动搜索、推理决策、动作规划,最终产生具体的控制作用,经“执行器”作用于控制对象。

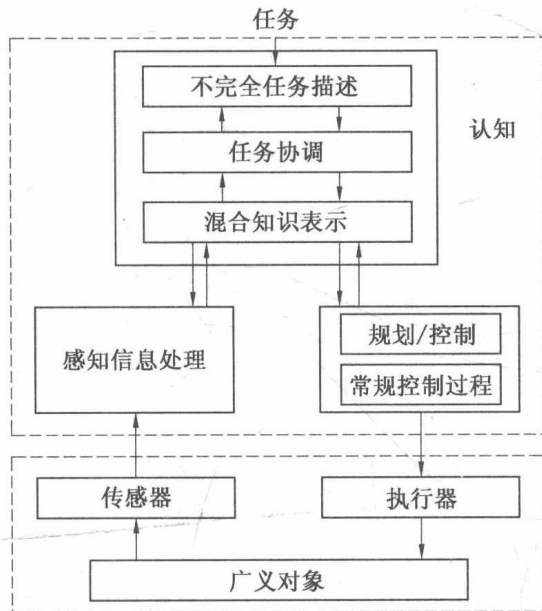


图 1.1 智能控制系统典型结构

从智能控制系统的功能模块结构观点出发,美国普渡大学萨里迪斯(G. N. Saridis)提出了分层递阶结构的智能控制系统,如图 1.2 所示。分层递阶智能控制(Hierarchical Intelligent Control)主要由 3 个控制级组成,按智能控制的高低分为组织级(Organization Level)、协调级(Coordination Level)、执行级(Executive Level),并且这 3 级遵循“伴随智能递降精度递增”原则。执行级需要比较准确的模型,以实现具有一定精度要求的控制任务;协调级用来协调执行级的动作,它不需要精确的模型,但需要具备学习功能以便在现有的控制环境中改善性能,并能接收上一级的模糊指令和符号语言;组织级将操作员的自然语言翻译成机器语

言,进行组织决策和执行任务,并直接干预低层的操作。对于执行级,识别的功能在于获得不确定参数值或监督系统参数的变化;对于协调级,识别的功能在于根据执行级送来的测量数据和组织级送来的指令产生合适的协调作用;对于组织级,识别的功能在于翻译定性的指令和其他输入。这种分层递阶的结构形式已成功地应用于机器人智能控制系统、交通协调的智能控制及管理。

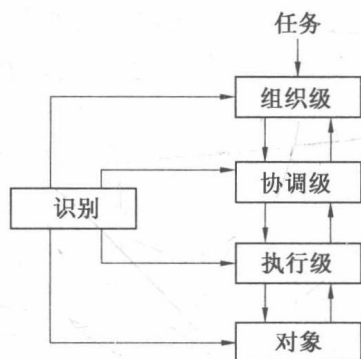


图 1.2 智能控制系统的分层递阶结构

1.1.3 智能控制的结构理论

智能控制系统具有多元跨学科结构。按照傅京孙(K. S. Fu)和萨里迪斯(G. N. Saridis)提出的观点,可以把智能控制看作是人工智能、自动控制和运筹学3个主要学科相结合的产物。如图1.3所示的结构,称为智能控制的三元结构。

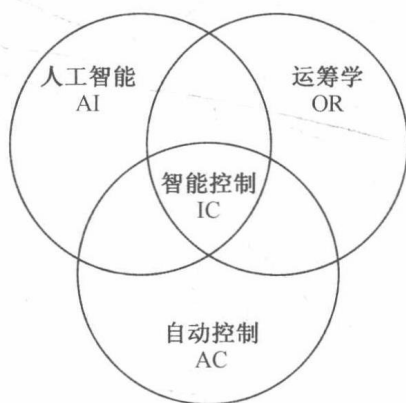


图 1.3 智能控制的三元结构

智能控制的三元结构可用交集形式表示,即

$$IC = AI \cap AC \cap OR \quad (1.1)$$

式中 IC——智能控制(Intelligent Control);
OR——运筹学(Operation Research);
AI——人工智能(Artificial Intelligence);
AC——自动控制(Automatic Control);
∩——交集。

人工智能是一个知识处理系统,具有记忆、学习、信息处理、形式语言、启发式推理等功能;自动控制描述系统的动力学特性,是一种动态反馈;运筹学是一种定量优化方法,如线性

规划、网络规划、调度、管理、优化决策和多目标优化方法等。智能控制就是应用人工智能的理论和技术与运筹学的优化方法,并将其同控制理论方法与技术相结合,在未知环境下仿效人的智能,实现对系统的控制;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。

近年来,随着智能控制的迅速发展,它不仅包括了自动控制、人工智能、运筹学的内容,而且还从计算机科学、生物学、心理学等学科中吸取丰富的营养,成为人工智能、控制论、系统论、仿生学、神经心理学、进化计算和计算机等众多学科高度综合与集成的一门新兴边缘交叉学科。因此,智能控制只能用多元或树形来概括其结构,图 1.4 所示就是智能控制结构的树形图。

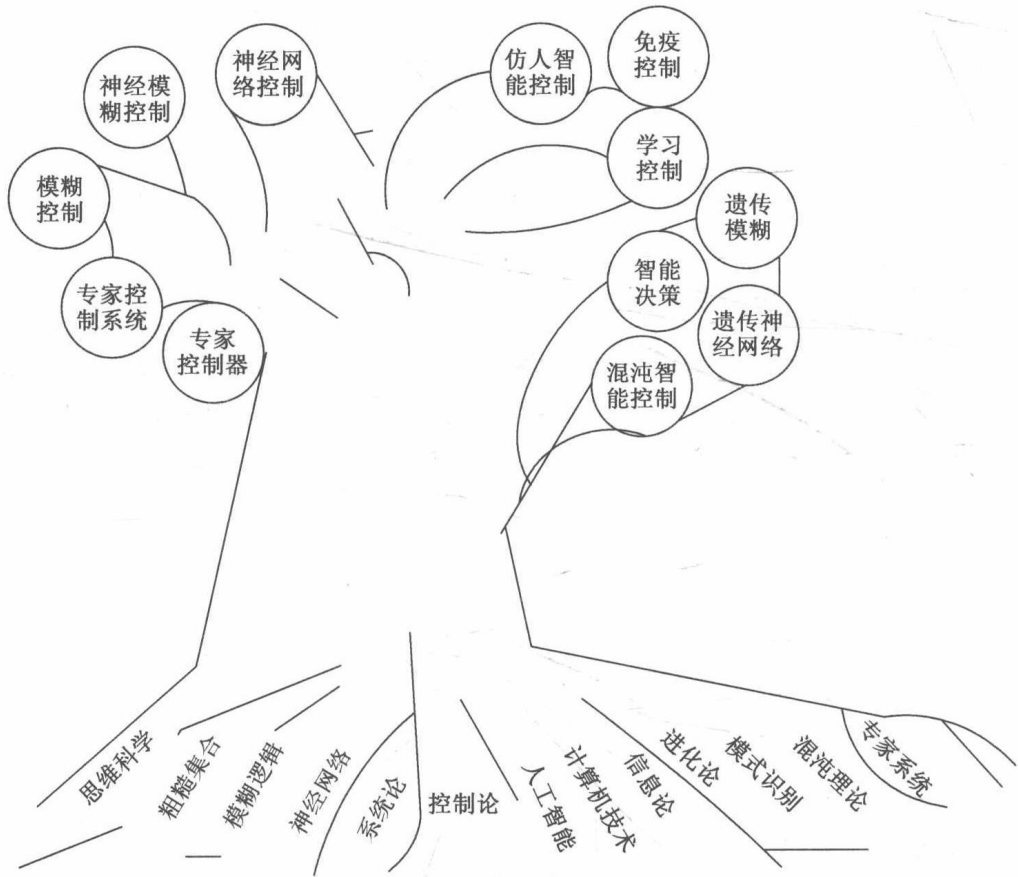


图 1.4 智能控制结构的树形图

1.1.4 智能控制的特点

智能控制具有以下特点:

- (1)智能控制系统具有较强的学习能力。系统能对未知环境提供的信息进行识别、记忆、学习、融合、分析、推理,并利用积累的知识和经验不断优化、改进和提高自身的控制能力。
- (2)智能控制系统具有较强的自适应能力。系统具有适应对象动力学特性变化、环境特性变化和运行条件变化的能力。

(3)智能控制系统具有足够的关于人的控制策略、被控对象及环境的有关知识以及运用这些知识的能力。

(4)智能控制系统具有判断决策能力。系统满足一般组织结构“智能递增,精度递减”的基本原理,具有高度可靠性。

(5)智能控制系统具有较强的容错能力。系统对各类故障具有自诊断、屏蔽和自恢复能力。

(6)智能控制系统具有较强的鲁棒性。系统性能对环境干扰和不确定性具有自诊断、屏蔽和自恢复能力。

(7)智能控制系统具有较强的组织功能。系统对于复杂任务和分散的传感器信息具有自组织和协调功能,使系统具有主动性和灵活性。

(8)智能控制系统的实时性好。系统具有较强的实时在线响应能力。

(9)智能控制系统的人机协作性能好。系统具有友好的人机界面,以保证人机通信、人机互助和人机协同工作。

(10)智能控制系统具有变结构和非线性特点。其核心在高层控制,即组织级,能对复杂系统进行有效的全局控制,实现广义问题求解。

(11)智能控制器具有总体自寻优特性。

(12)智能控制系统应能满足多样性目标的高性能要求。

1.2 智能控制系统的类型

智能控制作为一门新兴学科和交叉学科,目前还未形成完整的理论体系。但智能控制系统的几个主要类型各有其较完整的体系,下面简要介绍模糊控制(Fuzzy Control, FC)、神经网络控制(Neural Network Control, NNC)和专家控制(Expert Control, EC)。

1.2.1 模糊控制

1965年,美国加州大学的扎德(L. A. Zadeh)教授创立了模糊集合理论,为模糊控制奠定了基础。模糊控制就是在被控对象的模糊模型的基础上,运用模糊控制器近似推理手段,实现系统控制的一种方法。模糊模型是用模糊语言和规则描述的一个系统的动态特性及性能指标。

模糊控制的基本思想是把人类专家对特定的被控对象或过程的控制策略总结成一系列以“IF 条件 THEN 作用”形式表示的控制规则,通过模糊推理得到控制作用集,作用于被控对象或过程。模糊控制器的模糊算法包括:定义模糊子集,建立模糊控制规则;由基本论域转变为模糊集合论域;模糊关系矩阵运算;模糊推理合成,求出控制输出模糊子集;进行逆模糊判决,得到精确控制量。模糊控制系统的典型结构如图 1.5 所示。

1.2.2 神经网络控制

神经网络是指由大量与生物神经系统的神经细胞相类似的人工神经元互联而组成的网络,或由大量像生物神经元的处理单元并联互联而成。这种神经网络具有某些智能和仿人控制功能。

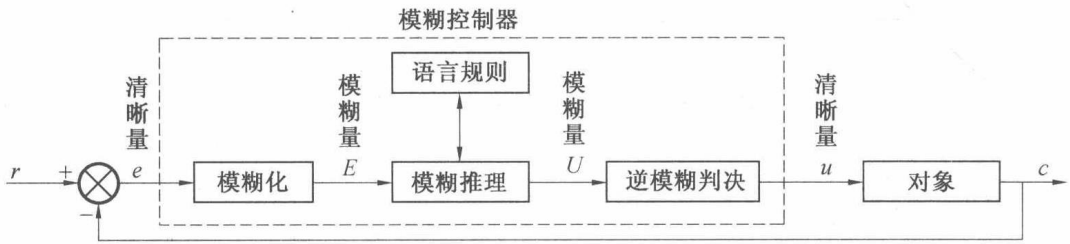


图 1.5 模糊控制系统的典型结构

学习算法是神经网络的主要特征,也是当前研究的主要课题。学习的概念来自生物模型,它是机体在复杂多变的环境中进行有效的自我调节。神经网络具备类似人类的学习功能。一个神经网络若想改变其输出值,但又不能改变它的转换函数,只能改变其输入,而改变输入的唯一方法只能修改加在输入端的加权系数。

神经网络具有几个突出的特点:可以充分逼近任意复杂的非线性关系;所有定量或定性的信息都分布存储于网络的各神经元的连接上,故有很强的鲁棒性和容错性;采用并行分布处理方法,使得快速进行大量运算成为可能;可用于自学习和自适应不确定或不确定的系统。

神经网络与控制相结合形成了智能控制领域的一个重要分支——神经网络控制。由于神经网络控制系统在许多方面呈现出人脑的智能特点,例如不依赖精确的数学模型、具有自学习能力、对环境的变化具有自适应性等,因此其应用越来越广泛。目前,神经网络已在多种控制结构中得到应用,如自校正控制、模型跟踪自适应控制、预测控制、内模控制等。

神经网络的学习过程是修改加权系数的过程,最终使其输出达到期望值,学习结束。常用的学习算法有 Hebb 学习算法, Widrow Hoff 学习算法,反向传播学习算法——BP 学习算法, Hopfield 反馈神经网络学习算法等。

神经网络是利用大量的神经元按一定的拓扑结构和学习调整的方法,它能表示出丰富的特性:并行计算、分布存储、可变结构、高度容错、非线性运算、自我组织、学习或自学习等,这些特性是人们长期追求和期望的系统特性。它在智能控制的参数、结构或环境的自适应、自组织、自学习等控制方面具有独特的能力,因此其应用越来越广泛。目前,神经网络已在多种控制结构中得到了应用,如自校正控制、模型参考自适应控制、预测控制、内模控制等。

图 1.6 给出了神经网络控制系统的 3 种典型结构。

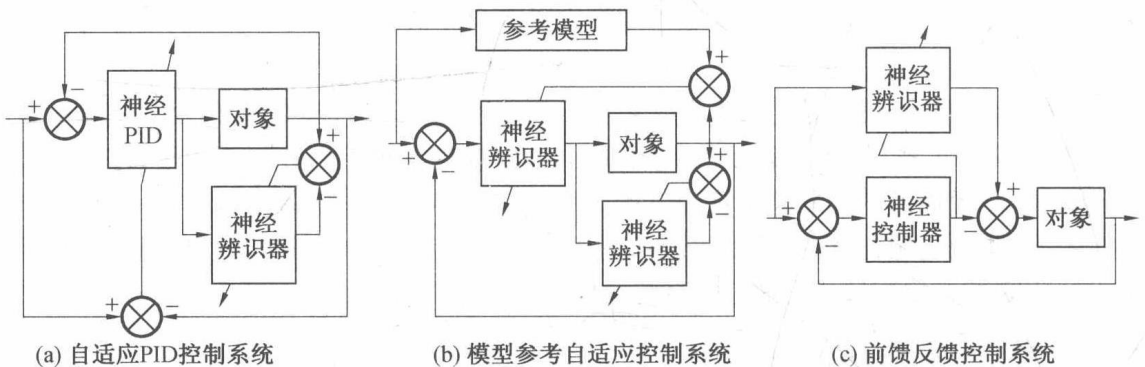


图 1.6 神经网络控制系统的 3 种典型结构

1.2.3 专家控制

专家指的是那些对解决专门问题非常熟悉的人,他们的这种专门技术通常源于丰富的经验,以及处理问题的详细专业知识。专家系统主要指的是一个智能计算机程序系统,其内部含有大量的某个领域专家水平的知识与经验,能够利用人类专家的知识解决问题的经验方法来处理该领域的高水平难题。它具有启发性、透明性、灵活性、符号操作、不确定性推理等特点。

应用专家系统的概念和技术,模拟人类专家的控制知识与经验而建造的控制系统,称为专家控制系统。专家控制系统的出现改变了传统的控制系统设计中单纯依靠数学模型的局面,使知识模型与数学模型相结合,知识信息处理技术与控制相结合,它是人工智能与控制理论方法和技术相结合的典型产物。根据专家系统的方法和原理设计的控制器称为基于知识的控制器。按照基于知识的控制器在整个智能控制系统中的作用,又可以分为直接专家控制系统和间接专家控制系统两种类型,如图 1.7 所示。

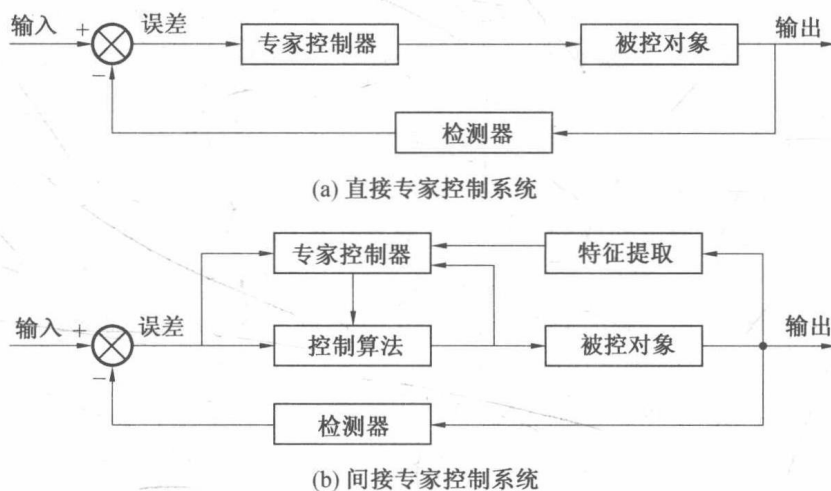


图 1.7 专家控制系统的典型结构

1.3 智能控制的发展

自 1932 年奈魁斯特(H. Nyquist)的有关反馈放大器稳定性论文发表以来,控制理论的发展已走过了 70 多年的历程。一般认为,前 30 年是经典控制理论的发展和成熟阶段,后 30 年是现代控制理论的形成和发展阶段。随着研究的对象和系统越来越复杂,借助于数学模型描述和分析的传统控制理论已难以解决复杂系统的控制问题。智能控制是针对控制对象及其环境、目标和任务的不确定性和复杂性而产生和发展起来的。

自 20 世纪 60 年代起,计算机技术和人工智能技术迅速发展,为了提高控制系统的自学习能力,控制界学者开始将人工智能技术应用于控制系统。

1965 年,美籍华裔科学家傅京孙教授首先把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统;1966 年,Mendel 进一步在空间飞行器的学习控制系统中应用了人工智能技术,并提出了“人工智能控制”的概念;1967 年,Leondes 和 Mendel 首先正式使用“智能控制”一词。

20世纪70年代初,傅京孙、Glofiso和Saridis等学者从控制论角度总结了人工智能技术与自适应、自组织、自学习控制的关系,提出了智能控制就是人工智能技术与控制理论交叉的思想,并创立了人机交互式分层递阶智能控制的系统结构。

20世纪70年代中期,以模糊集合论为基础,智能控制在规则控制研究上取得了重要进展。1974年,伦敦大学Mamdani提出了基于模糊语言描述控制规则的模糊控制器,将模糊集和模糊语言逻辑用于工业过程控制,之后又成功地研制出自组织模糊控制器,使模糊控制器的智能化水平有了较大提高。模糊控制的形成和发展,以及与人工智能的相互渗透,对智能控制理论的形成起到了十分重要的推动作用。

神经网络控制是智能控制的重要分支。自从1943年McCulloch和Pitts提出形式神经元数学模型以来,神经网络的研究开始了它的艰难历程。20世纪50年代至80年代是神经网络研究的萧条期,但仍有不少学者致力于神经网络模型的研究。到了20世纪80年代,神经网络研究进入了发展期,1982年Hopfield提出了HNN模型,解决了回归网络的学习问题。1986年PDP小组的研究人员提出的多层前向传播神经网络的BP学习算法实现了有导师指导下的网络学习,从而为神经网络应用开辟了广阔前景。神经网络在许多方面模拟人脑的功能,并不依赖精确的数学模型,因而显示出强大的自学习和自适应功能。神经网络与控制技术有机结合,形成了一系列有效的控制方法。特别是神经网络技术与自适应控制技术、鲁棒控制技术相结合,以及与非线性系统控制理论相结合,形成对非线性系统的鲁棒自适应控制方法,引起了国内外控制界的广泛关注。

20世纪80年代,专家系统技术的逐渐成熟及计算机技术的迅速发展,使得智能控制和决策的研究也取得了较大进展。1986年,K. J. Astrom发表的著名论文《专家控制》中,将人工智能中的专家系统技术引入控制系统,组成了另一种类型的智能控制系统——专家控制。目前,专家控制方法已有许多成功应用的实例。

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,随后成立了IEEE智能控制专业委员会;1987年1月,在美国举行第一次国际智能控制大会,标志着智能控制领域的形成。智能控制在国内也受到广泛的重视,中国自动化学会于1993年8月在北京召开了第一届全球华人智能控制与智能自动化大会;1995年8月在天津召开了智能自动化专业委员会成立大会及首届中国智能自动化学术会议。

1.4 智能控制系统研究的主要数学方法

传统的控制理论主要采用微分方程、状态方程及各种数学变换作为研究工具,它们本质上是一种数值计算的方法。而人工智能主要采用符号处理、一阶谓词逻辑等作为研究工具。两者有着本质的区别。智能控制研究的数学工具则是上述两方面的交叉和结合,它主要有以下几种形式:

(1)符号推理与数值计算的结合。例如专家控制,它的上层是专家系统,采用人工智能中的符号推理方法。下层是传统的控制系统,采用数值计算方法。因此,整个智能控制系统的数学工具是这两种方法的结合。

(2)离散时间系统与连续时间系统分析的结合。

(3)介于两者之间的方法。神经网络通过许多简单关系来实现复杂的函数,它们的组

合可实现复杂的分类和决策功能。神经网络本质上是一个非线性动力学系统,但它不依赖模型,因此可以看成是一种介于逻辑推理和数值计算之间的工具和方法。模糊控制是另一种介于两者之间的方法,它形式上利用规则进行逻辑推理,但其逻辑取值可在0与1之间连续变化,其处理的方法也是基于数值的而非符号的。神经网络和模糊集合论,在某些方面如逻辑关系,不依赖模型等类似于人工智能的方法;而在其他方面如连续取值和非线性动力学特性等则类似于通常的数值方法,即传统的控制理论数学工具;由于它们介于符号逻辑和数值计算两者之间,因而有可能成为今后智能控制研究的主要数学工具。

(4) 优化理论。学习控制系统时常通过系统性能的评判来修改系统的结构和参数。利用优化理论来解决智能控制系统中的结构和参数设计是常用的方法,也是智能控制系统设计的精髓。

智能控制作为一门新兴学科,还没有形成一个统一、完整的理论体系。智能控制研究所面临的最迫切的问题是,对于一个给定的系统如何进行系统的分析和设计。专家预测,把复杂环境的严格数学方法研究同人工智能中的新兴学科分支“计算智能”的理论方法研究紧密地结合起来,有望导致新的智能控制体系结构的产生和发展;并预示,这种研究将在“自上而下”和“自下而上”两个方向工作的交汇处取得突破性进展,使智能控制系统的研究出现崭新的局面,而不是停留在监控级,用一个简单的基于规则的控制将基础级常规控制系统松散地耦合起来的水平。这里“自上而下”的含义是指由高层控制的思想、观点和理论入手向下层发展,在简化条件下建造仿真或实验系统来研究智能控制的基本概念和验证控制算法。“自下而上”的含义是指从建立“感知-行为”的直接映射入手向上层发展,同样是在简化条件下去研究各种新的分布式智能控制体系结构及其相应的控制算法。所以,智能控制理论要发展到如经典控制理论、现代控制理论那么完整还需要做相当多的艰苦工作。

本章小结

智能控制是自动控制发展的高级阶段,在自动化领域中占有重要位置。本章主要介绍了智能控制的基本定义、结构、类型、特点和发展历史,简单介绍了智能控制系统常见的3种类型:模糊控制系统、神经网络控制系统和专家控制系统,最后介绍了智能控制研究的主要数学方法。智能控制与传统控制的研究方法有本质的区别,学习智能控制对了解自动控制的新方法具有重要意义。

习题与思考题

1. 简述智能控制的概念。
2. 智能控制的研究对象具有哪些主要特征?
3. 智能控制由哪几部分组成?各自的特点是什么?
4. 比较智能控制和传统控制的特点。