

B

普通高等教育机电类规划教材

# 智能控制技术

浙江大学 韦 巍 编

机械工业出版社



00011475

TP273

230

普通高等教育机电类规划教材



# 智能控制技术

韦 巍 编  
王耀南 主审

HK84/01



机械工业出版社



C0487733

智能控制是近 20 年来发展起来的一门新兴学科。本书总结了近几年来智能控制的研究成果,详细阐述了智能控制的基本概念、工作原理、设计方法和实际应用。本书的主要内容包括:智能控制的基本概念、模糊控制理论基础、模糊控制系统、人工神经网络模型、神经网络控制论和集成智能控制系统。本书在深入介绍智能控制系统设计理论和实现手段的同时,还给出了大量的设计实例。

本书选材新颖,系统性强,突出理论联系实际,叙述深入浅出,尤其适合于初学者学习智能控制技术。本书配有一定数量的习题和上机操作题。可作为高等院校工业自动化、计算机应用、信息电子工程等专业的硕士研究生和高年级本科生的教材,也适合于从事工业自动化领域的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/韦巍编. —北京:机械工业出版社, 2000.1

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-06589-1

I. 智… II. 韦… III. 智能控制—高等教学—教材 IV. T  
P273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 74735 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 韩雪清 版式设计: 张世琴 责任校对: 张 媛  
刘 辉

封面设计: 姚 毅 责任印制: 路 琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 1 月第 1 版第 2 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·8.5 印张·201 千字

2 001—5 000 册

定价: 13.50 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、68326677-2527

# 前 言

自从 1971 年傅京逊教授首先提出“智能控制”概念以来,智能控制的研究领域已经发生了相当大的变化。在短短的 20 年间智能控制已经从原来的二元论(人工智能和控制论)发展为四元论,即人工智能(符号主义和联接主义)、模糊集理论、运筹学和控制论,而且正处于蓬勃发展之中。智能控制作为一门新兴学科,它的发展得益于许多学科,如人工智能、认知科学、现代控制理论、模糊集理论、生物控制论和学习理论等。因此,它是一门综合性很强的多学科交叉的新学科,被称为自动控制理论的第三发展阶段。智能控制研究的领域相当广泛,而且仍然处于不断的完善和发展之中,虽然其理论体系远没有经典控制理论那样成熟,但它表现出来的强大生命力已引起世界各国专家学者的关注。

本教材是根据 1997 年 4 月在武汉召开的工业电气自动化专业教学指导委员会会议中制订的《智能控制技术》教材编写大纲编写的。智能控制技术的内容相当丰富,本教材编写的宗旨是尽量将一些比较成熟的、实用性较强的内容包含进来。同时,考虑到智能控制的发展,简单地介绍了智能控制的最新进展情况。本教材共分六章,总学时为 32 学时。绪论简要地介绍了智能控制的发展、智能控制的几种主要方法以及智能控制系统的结构和特点。本章建议学时数为 2。考虑到本专业学生通常没有预修过《模糊数学》,本教材第二章首先介绍模糊控制的理论基础,其重点内容是模糊集数学理论,主要介绍与模糊控制相关的模糊集理论、隶属度函数、模糊语言变量和模糊逻辑推理。本章建议学时数为 8。第三章重点介绍模糊控制系统的设计,包括模糊控制系统的结构设计和设计方法,详细给出了两类模糊控制系统设计的实例,最后对模糊 PID 控制的设计作了简单的讨论。本章建议学时数为 8。第四章首先简要介绍了神经元模型和神经网络模型,重点介绍了神经控制中使用较频繁的两类神经网络模型(前向传播神经网络模型和动态神经网络模型)的结构和学习算法。本章建议学时数为 6。本书第五章介绍了神经网络控制器的结构、学习机制、非线性离散动态系统的神经网络建模和控制。本章建议学时数为 6。第六章主要介绍了智能控制的最新发展,着重讨论了模糊神经网络控制器的结构设计和学习算法,最后对学习控制、仿人控制和混沌控制作了说明。本章建议学时数为 2。全书带“\*”的章节为选讲内容。

本教材是在浙江大学“自动控制理论及应用”、“工业自动化”、“电力传动及其自动化”三个硕士点的研究生课程“智能控制理论及应用”讲义的基础上改编而成的。为了适合本专业高年级本科生的教学需要,本教材的选材上更加着重于基础性和实用性。本教材承蒙湖南大学电气工程系王耀南教授的仔细审阅,并得到了上海大学陈伯时教授、浙江大学蒋静坪教授和陈希矛教授的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。在本教材的编写过程中也参阅和引用了国内外专家学者的最新研究成果,在此谨致谢意。

由于作者的学识水平和教学经验都很有有限,书中的缺点和错误在所难免,殷切期望广大读者和专家给予批评和指正。

作 者

1997 年 11 月于浙江大学

# 目 录

前 言	
<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 智能控制的发展过程 .....	1
一、智能控制问题的提出 .....	1
二、智能控制的发展 .....	2
第二节 智能控制的几个重要分支 .....	4
一、专家系统和专家控制 .....	4
二、模糊控制 .....	4
三、神经网络控制 .....	5
四、学习控制 .....	6
第三节 智能控制系统的构成原理 .....	6
一、智能控制系统的结构 .....	6
二、智能控制系统的特点 .....	7
三、智能控制系统研究的数学工具 .....	8
习题和思考题 .....	9
<b>第二章 模糊控制的理论基础</b> .....	10
第一节 引言 .....	10
一、模糊控制发展 .....	10
二、模糊控制特点 .....	11
第二节 模糊集合论基础 .....	13
一、模糊集的概念 .....	13
二、模糊集合的运算 .....	16
三、隶属度函数的建立 .....	18
四、模糊关系 .....	22
第三节 模糊逻辑、模糊逻辑推理 和合成 .....	27
一、二值逻辑 .....	28
二、模糊逻辑及其基本运算 .....	29
三、模糊语言逻辑 .....	30
四、模糊逻辑推理 .....	34
五、模糊关系方程的解 .....	40
习题和思考题 .....	42
<b>第三章 模糊控制系统</b> .....	44
第一节 模糊控制系统的组成 .....	44
一、模糊化过程 .....	45
二、知识库 .....	45
三、推理决策逻辑 .....	49
四、精确化过程 .....	49
第二节 模糊控制系统的设计 .....	50
一、模糊控制器的结构设计 .....	50
二、模糊控制器的设计原则 .....	52
三、模糊控制器的常规设计方法 .....	53
第三节 模糊控制器的设计举例 .....	57
一、流量控制的模糊控制器设计 .....	57
二、直流调速系统的模糊控制器设计 .....	59
第四节 模糊 PID 控制器的设计 .....	61
一、模糊控制器和常规 PID 的混合结构 .....	62
二、常规 PID 参数的模糊自整定技术 .....	64
习题和思考题 .....	66
上机实验题 .....	66
<b>第四章 人工神经网络模型</b> .....	67
第一节 引言 .....	67
一、神经元模型 .....	68
二、神经网络的模型分类 .....	69
三、神经网络的学习算法 .....	70
四*、神经网络的泛化能力 .....	71
第二节 前向神经网络模型 .....	72
一、单一人工神经元 .....	72
二、单层神经网络结构 .....	73
三、多层神经网络结构 .....	73
四、多层传播网络的学习算法 .....	74
第三节 动态神经网络模型 .....	79
一、带时滞的多层感知器网络 .....	80
二、Hopfield 神经网络 .....	81
习题和思考题 .....	87
上机实验题 .....	87
<b>第五章 神经网络控制论</b> .....	88
第一节 引言 .....	88
一、神经网络控制的优越性 .....	88
二、神经网络控制器的分类 .....	89
三*、神经网络的逼近能力 .....	91
第二节 非线性动态系统的神经	

网络辨识 .....	92	二、神经网络的自校正控制 .....	108
一、神经网络的辨识基础 .....	92	习题和思考题 .....	110
二、神经网络辨识模型的结构 .....	94	<b>第六章 集成智能控制系统</b> .....	112
三、非线性动态系统的神经网络辨识 .....	95	第一节 集成智能控制系统简介 .....	112
<b>第三节 神经网络控制的学习机制</b> .....	101	一、模糊神经网络系统 .....	112
一、离线学习法 .....	101	二、神经网络专家系统 .....	113
二、在线学习法 .....	102	<b>第二节 模糊神经网络控制</b> .....	113
三、反馈误差学习法 .....	102	一、模糊神经网络的结构 .....	113
四、多网络学习法 .....	103	二、模糊神经网络的学习算法 .....	116
<b>第四节 神经网络控制器的设计</b> .....	103	<b>第三节 智能控制的展望</b> .....	121
一、神经网络直接逆模型控制法 .....	103	一、学习控制 .....	121
二、直接网络控制设计法 .....	106	二、仿人控制 .....	123
<b>第五节 基于神经网络的自适应</b>		三、混沌控制 .....	124
控制 .....	107	<b>参考文献</b> .....	125
一、神经网络的模型参考自适应控制 .....	107		

# 第一章 绪 论

## 第一节 智能控制的发展过程

### 一、智能控制问题的提出

自从 1932 年奈魁斯特 (H. Nyquist) 发表有关反馈放大器的稳定性论文以来, 控制理论学科的发展已走过 60 多年的历程, 其中前 30 年是经典控制理论的成熟和发展阶段, 后 30 年是现代控制理论的形成和发展阶段。经典控制理论主要研究的对象是单变量常系数线性系统, 它只适用于单输入-单输出控制系统。系统的数学模型采用传递函数表示。系统的分析和综合方法主要是基于根轨迹法和频率法。经典控制理论的主要贡献在于 PID 调节器广泛成功地应用于常系数单输入-单输出线性控制系统中。到了 60 年代, 经典控制理论已经成熟。同时由于计算机技术的成熟和发展, 以及所需要控制的系统不再是简单的单输入-单输出线性系统, 促使控制理论由经典控制理论向现代控制理论过渡。现代控制理论以庞特里亚金的极大值原理、贝尔曼 (Belman) 的动态规划、卡尔曼 (Kalman) 的线性滤波和估计理论为基石, 形成了以最优控制 (二次型最优控制、 $H^\infty$  控制等)、系统辨识和最优估计、自适应控制等为代表的现代控制理论分析和设计方法。系统分析的对象已转向多输入-多输出线性系统。系统分析的数学模型主要是状态空间描述法。随着要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难以解决复杂系统的控制问题, 尤其是在具有如下特点的一类现代控制工程中:

(1) 不确定性的模型 传统控制是基于模型的控制, 这里的模型包括控制对象和干扰模型。传统控制通常认为模型是已知的或经过辨识可以得到的。对于不确定性的模型, 传统控制难以满足要求。

(2) 高度非线性 在传统的控制理论中, 线性系统理论比较成熟, 对于具有高度非线性的控制对象, 虽然也有一些非线性控制方法可供使用, 但总的来说, 目前非线性控制理论还很成熟, 有些方法又过于复杂, 无法广泛应用。

(3) 复杂的任务要求 在传统的控制系统中, 控制的任務要求输出量为定值 (调节系统) 或者要求输出量跟随期望的运动轨迹 (跟踪系统), 因此控制任务的要求比较单一。但对于复杂的控制任务诸如智能机器人系统、复杂工业过程控制系统、计算机集成制造系统 (CIMS)、航天航空控制系统、社会经济管理系统、环保及能源系统等传统的控制理论都无能为力。

综上所述, 现代控制系统普遍表现为系统的数学模型难以通过传统的数学工具来描述。因此, 采用数学工具或计算机仿真技术的传统控制理论已经无法解决此类系统的控制问题。然而, 我们在生产实践中看到, 许多复杂的生产过程难以实现的目标控制, 可以通过熟练的操作工、技术人员或专家的操作获得满意的控制效果。那么, 如何有效地将熟练的操作工、技术人员或专家的经验知识和控制理论结合起来去解决复杂系统的控制问题就是智能控制原理

研究的目标所在。智能控制的概念主要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提出来的。一方面,这是由于实现大规模复杂系统的控制需要,另一方面,也是由于现代计算机技术、人工智能和微电子学等学科的高速发展,使控制的技术工具发生了革命性的变化。可以说,一个智能化的工业时代已经到来。这一时代的明显标志就是智能自动化,而作为智能自动化基础的“智能控制”的应运而生则是历史的必然。

智能控制的研究工作最初是以机器人控制为背景而提出来的。近几年来,随着研究工作的相对深入,其应用重点已从机器人控制问题向复杂工业过程控制等非机器人领域转移,而且已经成为一种发展趋势。但是,智能控制毕竟还处于开创性的研究阶段,许多概念和理论尚处在发展之中。从总体上来看,还缺乏坚实的系统化的理论基础。

## 二、智能控制的发展

智能控制是一门新兴的学科,它的发展得益于许多学科,其中包括人工智能、认知科学、现代自适应控制、最优控制、神经网络、模糊逻辑、学习理论、生物控制和激励学习等。以上每一个学科均从不同侧面部分地反映了智能控制的理论和方法。同时,智能控制又是一门尚不成熟的学科。智能控制的技术是随着数字计算机、人工智能等技术研究的发展而发展起来的。1966年,J. M. Mendel 首先提出将人工智能用于飞船控制系统的设计。1971年,著名学者 K. S. Fu (傅京逊) 从发展学习控制的角度首次提出智能控制这一概念,他在文献[5]中归纳了三种类型的智能控制系统:

(1) 人作为控制器的控制系统 由于人具有识别决策和控制等功能,因此对于不同的控制任务、不同的对象及环境情况,人作为控制器的控制系统具有自学习、自适应和自组织的功能,能自动采取不同的控制策略以适应不同的情况。

(2) 人-机结合作为控制器的控制系统 在这样的系统中,机器完成那些连续进行的并需快速计算的常规控制任务,人则完成任务分配、决策、监控等任务。

(3) 无人参与的自主控制系统 最典型的例子是自主机器人,这时的自主式控制器需要完成问题求解和规划、环境建模、传感信息分析和低层的反馈控制等任务。它实际上是一个多层的智能控制系统。

Saridis 对智能控制的发展也作出了重要贡献。他在1977年出版了《随机系统的自组织控制》<sup>[6]</sup>一书,其后又发表了一篇综述文章“走向智能控制的实现”<sup>[7]</sup>。在这两篇著作中,他从控制理论发展的观点,论述了从通常的反馈控制到最优控制、随机控制,再到自适应控制、自学习控制、自组织控制,并最终向智能控制这个最高阶段发展的过程。他首次提出了分层递阶的智能控制结构,整个结构由上而下分为三个层次:组织级、协调级和执行级。他在理论上的一个重要贡献是定义了“熵”作为整个控制系统的性能度量,并对每一级定义了熵的计算方法,证明了在执行级的最优控制等价于使用某种熵最小的方法。他在最新的工作中采用神经网络中 Boltzman 机来实现组织级的功能,利用 Petri 网作为工具来实现协调级的功能。

在智能控制的发展中,另一位学者 K. J. Astrom 也作出了重要贡献。他在“专家控制”<sup>[8]</sup>的著名文章中,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。借助于专家系统技术,将常规的 PID 控制、最小方差控制、自适应控制等不同方法有机地结合在一起,能根据不同情况分别采取不同的控制策略,同时还可以结合许多逻辑控制的功能如起停控制、自动切换、越限报警以及故障诊断。这种专家控制的方法已有许多成功应用的实例。



至此,智能控制新学科形成的条件逐渐成熟。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。来自美国各地的60位从事自动控制、人工智能和运筹学研究的专家学者参加了这次学术讨论会。会上集中讨论了智能控制原理和智能控制系统的结构。这次会议之后不久,在IEEE控制系统学会内成立了IEEE智能控制专业委员会。1987年1月,在美国费城由IEEE控制系统学会和计算机学会联合召开了智能控制国际会议。这是有关智能控制的第一次国际会议,来自美国、欧洲、日本、中国以及其他发展中国家的150位代表出席了这次学术盛会。提交大会报告和分组宣读的60多篇论文以及专题讨论显示出智能控制的长足进展;同时也说明了由于许多新技术问题的出现以及相关技术的发展,需要重新考虑控制领域和相近学科。这次会议是个里程碑,它表明智能控制作为一门独立学科,正式在国际上形成。

近年来,模糊控制作为一种新颖的智能控制方式越来越受到人们的重视。如果说,传统的控制是从被控对象的数学结构上去考虑进行控制的,那么,模糊控制则是从人类智能活动的角度和基础上去考虑实施控制的。1965年美国加州大学自动控制系专家扎德(L. A. Zadeh)在《信息与控制》杂志上先后发表了“模糊集”<sup>[9]</sup>(Fuzzy Sets)和“模糊集与系统”(Fuzzy Sets & System)产生了模糊集理论,奠定了模糊集理论和应用研究的基础。1968年扎德首次公开发表其“模糊算法”。1973年发表了语言与模糊逻辑相结合的系统建立方法。1974年伦敦大学Mamdani博士首次尝试利用模糊逻辑,成功地开发了世界上第一台模糊控制的蒸汽引擎。可以这样认为,1965~1974年是模糊控制发展的第一阶段,即模糊数学发展和成形阶段;1974~1979年为第二阶段,这是产生简单控制器的阶段;1979年至今是发展高性能模糊控制的第三阶段。1979年T. J. Procky和E. H. Mamdani共同提出了自学习概念,使系统性能大为改善。1983年日本富士电机开创了模糊控制在日本的第一项应用——水净化处理。之后,富士电机致力于模糊逻辑元件的开发和研究,并在1987年仙台地铁线采用了模糊逻辑控制技术。1989年又把模糊控制消费品推向高潮,从而使得日本逐渐成为这项技术的主导国家。今天,模糊逻辑控制技术已经应用到相当广泛的领域之中。模糊控制正是试图模仿人所具有的模糊决策和推理功能来解决复杂问题的控制难点。

神经网络控制又是智能控制的一个重要分支。自从1943年McCulloch和Pitts提出形式神经元的数学模型以来,神经网络的研究开始了它的艰难历程。50年代至80年代是神经网络研究的萧条期,此时,专家系统和人工智能技术发展相当迅速,但仍有不少学者致力于神经网络模型的研究。如Albus在1975年提出的CMAC神经网络模型利用人脑记忆模型提出了一种分布式的联想查表系统,Grossberg在1976年提出的自共振理论解决了无导师指导下的模式分类。到了80年代,人工神经网络进入了发展期。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,从而为神经网络的应用开辟了广阔的前景。神经网络在许多方面试图模拟人脑的功能,并不依赖于精确的数学模型,因而显示出强大的自学习和自适应功能。神经网络在机器人方面的许多研究成果显示了它广泛的应用前景。

智能控制作为一门新兴的理论技术,现在还处于发展初期。但可以预见,随着系统理论、人工智能和计算机技术的发展,智能控制必将出现更大的发展,并在实际中获得广泛的应用。

## 第二节 智能控制的几个重要分支

智能控制已不是一个学科所能完成得了的，应结合多种学科知识来解决复杂系统的控制问题。这一点已得到专家们的共识。基于这种认识，人们将各种学科大胆地应用于控制中引出了许多新理论和新方法。下面我们就几个最主要的智能控制方向作一简单的介绍。

### 一、专家系统和专家控制

毫无疑问，现在人工智能领域应用最多的是专家系统。从本质上来看，专家系统是由许多收集的规则组成，它清楚地表示了知识和结果。规则的最简单形式是 IF-THEN 结构。一般的专家控制系统由三部分组成。其一是控制机制，它决定控制过程的策略，即控制哪一个规则被激活、什么时候被激活等。其二是推理机制，它实现知识之间的逻辑推理以及与知识库的匹配。其三是知识库，包括事实、判断、规则、经验以及数学模型。专家系统的迅速发展为人工智能学科的研究注入了强有力的生机，为人工智能走向实用奠定了基础。然而，专家系统的发展遇到了知识获取的“瓶颈”、“窄台阶”等困难，使其支持能力受到极大的限制而受到严重的挑战。因此，单一依靠专家系统的控制已无法满足实时性、灵活性、自适应性等的要求。专家系统的混合控制技术正引起各国专家的关注，如神经网络专家系统、专家模糊控制等。

作为智能控制系统的一个重要分支，专家控制系统离不开知识的表示、运用、获取和更新等知识工程。广义地说，设计控制系统的过程即是有效地组织和运用知识的过程。控制器是运用知识进行推理、决策而产生控制作用的装置，它一般由计算机完成，对于传统控制，控制对象模型及性能要求可以看成是用数值表示的知识。控制算法则是运用知识进行决策计算，以产生所需的控制作用。在智能控制系统中，有一部分是数值类型的知识，但更主要的知识是一些经验和规则，它们用符号形式表示。在这种情况下，控制器设计的问题便是如何获取和运用知识进行推理和决策，以产生有效的控制。如果此系统带有学习功能，则还有一个如何更新知识以实现学习功能的问题。

### 二、模糊控制

由于模糊控制主要是模仿人的控制经验而不是依赖控制对象的模型，因此模糊控制器实现了人的某些智能。它也是智能控制的一个重要分支。

模糊集理论是介于逻辑计算和数值计算之间的一种数学工具，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，采用数值的方法而非符号的方法进行处理。符号处理方法允许直接用规则来表示结构性的知识，但不能直接使用数值计算的工具，因而也不能用大规模集成电路来实现 AI 系统。而模糊系统可以兼有两者的优点，它可用数值方法来表示结构性知识，并用数值方法进行处理，因而可用大规模集成电路来实现模糊系统。

模糊控制主要研究那些在现实生活中广泛存在的、定性的、模糊的、非精确的信息系统的控制问题。这方面的工作首先是由 Zadeh 建立模糊集理论开始的。至今模糊控制已经得到了广泛的应用。模糊控制有三个基本组成部分：模糊化、模糊决策、精确化计算。模糊控制的工作过程简单地可描述为：首先将信息模糊化，然后经模糊推理规则得到模糊控制输出，再将模糊指令进行精确化计算最终输出控制值。

模糊系统可以看作是一种不依赖于模型的估计器，给定一个输入，便可以得到一个合适

的输出。它主要依赖模糊规则和模糊变量的隶属度函数，而无需知道输入与输出之间的数学依存关系。模糊系统也是一种可以训练的非线性动力学系统，因而也存在诸如稳定性等需要研究的问题。

由于模糊控制不需要精确的数学模型，因此它是解决不确定性系统控制的一种有效途径。但它对信息进行简单的模糊处理会导致被控系统控制精度的降低和动态品质变差。为了提高系统的精度则必然要增加量化等级，从而导致规则的迅速增多，因此影响规则库的最佳生成，且增加系统的复杂性和推理时间。所以混合模糊控制的思想已引起大家的重视。例如模糊PID调节器、模糊专家系统、自适应自学习模糊控制、模糊神经网络控制等。

综上所述，模糊控制既具有广泛的应用前景，又具有许多待开发和研究的理论问题。因此，可以说模糊控制是智能控制不可缺少的一个组成部分。

### 三、神经网络控制

神经元控制是模拟人脑神经中枢系统智能活动的一种控制方式。由于它具有适应能力和学习能力，因此适合用作智能控制的研究工具。从本质上看，神经网络是一种不依赖模型的自适应函数估计器，而通常的函数估计器则依赖于数学模型。当给定的输入并不是原来训练的样本时，神经网络也能给出合适的输出，即它具有泛化功能。人工智能专家系统在一定意义上也可看作不依赖模型的估计器，这一点与神经网络有共同之处。但它采用的是符号处理方法而非数值方法，其硬件实现相对困难。在专家系统中，知识明显地表示为规则。而在神经网络中，知识是通过学习例子而分布地存贮在网络中，因此神经网络有很好的容错能力。当个别处理单元损坏时，对神经网络整体行为只有很小的影响，而不会影响整个系统的正常工作。

神经网络同样也是一种可以训练的非线性动力学系统，因而呈现非线性动力学系统的许多特性，如李雅普诺夫稳定性、平衡点、极限环、平衡吸引子、混沌现象等。这些都是在用神经网络组成的智能控制系统时必须研究的问题。

神经网络通过神经元以及相互连接的权值，初步实现了生物神经系统的部分功能。神经网络具有的非线性映射能力、并行计算能力、自学习能力以及强鲁棒性等优点已广泛地应用于控制领域，尤其是非线性系统领域。一般说来，按神经网络在系统中的作用划分，它有两种功能模式：神经网络建模和神经网络控制。神经网络具有可以逼近非线性函数的能力，因此它可以用来建立非线性系统的动态模型。神经网络建模主要是利用对象的先验知识（即输入输出数据），经过误差校正反馈，修正网络权值，最终得到一个具有输入输出对应关系的函数模型。虽然神经网络对非线性系统的建模起到重要的作用，但是还存在很多需进一步研究的问题。如：对不同的非线性对象神经网络模型的选取及其结构的确定问题、被辨识系统的充分激励问题、带噪声系统的辨识问题、辨识算法的快速性和收敛性问题等。神经网络控制就是利用神经网络这一工具而构成的控制系统。神经网络在控制系统中所起的作用可大致分为四大类：第一类是在基于模型的各种控制结构中充当对象的模型；第二类是充当控制器；第三类是在控制系统中起优化计算的作用；第四类是与其它智能控制如专家系统、模糊控制相结合为其提供非参数化对象模型、推理模型等。神经网络控制系统用于控制非线性对象时，神经网络的自学习、自适应性使其与线性系统的自适应控制系统有许多相同之处，有一些结论可以平移。但是由于从线性系统到非线性系统有着本质的差异，要解决非线性系统自适应控制的问题如稳定性问题、结构问题、鲁棒性问题等等都要比线性系统难得多。因此，在神经

网络的控制中存在的潜在研究问题也相当多。无疑神经网络控制是一个挑战性很强的领域。由于它可能是处理非线性不确定系统的有效途径，因此，近年来受到了国内外学者们的高度重视。

#### 四、学习控制

学习控制是智能控制的一部分。学习是人类的主要智能之一。学习控制正是模拟人类自身各种优良控制调节机制的一种尝试。Tsytkin 曾对学习下过一个定义，即作为一种过程，它通过重复各种输入信号，并从外部校正该系统，从而使系统对特定输入具有特定响应。学习控制系统是一个能在其运行过程中逐步获得被控过程及环境的非预知信息，积累控制经验，并在一定评价标准下进行估值、分类、决策和不断改善系统品质的自动控制系统。

学习控制根据系统工作对象的不同可分为两大类：一类是对具有可重复性的被控对象利用控制系统的先前经验，寻求一个理想的控制输入。而这个寻求的过程就是对被控对象反复训练的过程。这种学习控制又称为迭代学习控制；另一类是自学习控制系统，它不要求被控过程必须是重复性的。它能通过在线实时学习，自动获取知识，并将所学的知识用来不断地改善具有未知特征过程的控制性能。尽管学习控制已研究了多年，但与实际要求还相距较远。它的主要缺点是在线学习能力差、学习速度较慢，跟不上实时要求。

学习控制系统通常是通过对系统性能的评价和优化来调整系统的结构和参数的，因此，一个好的优化理论和算法是智能控制系统设计的精髓。遗传学习是最近发展起来的一种全局优化算法，它在实时性要求不高的复杂控制系统的优化中是很有潜力的。遗传学习理论属于随机优化理论，其算法称遗传算法（GA 算法）。这是一种全局随机寻优算法，它模仿生物进化的过程来逐步获得最好的结果。这种优化算法可以在智能控制中发挥重要作用，是智能控制的一个重要组成部分。

### 第三节 智能控制系统的构成原理

#### 一、智能控制系统的结构

由于智能控制尚处于发展阶段，关于什么是智能控制系统目前还没有非常明确一致的定义。但可以这样说，智能控制系统是实现某种控制任务的一种智能系统。所谓智能系统是指具备一定智能行为的系统，具体地说，若对于一个问题激励输入，系统具备一定的智能行为，能够产生合适的求解问题的响应，这样的系统便称为智能系统。对于智能系统，激励输入是任务要求和反馈的传感信息等，产生的响应则是合适的决策和控制作用。

从系统的角度看，智能行为是一种从输入到输出的映射关系。这种映射关系并不能用常规数学的方法来精确地加以描述，因此它可以看成一种不依赖于模型的自适应估计。例如一个钢琴家弹奏一支优美的乐曲，这是一种很高级的智能行为，其输入是乐谱，输出是手指的动作和力度。显然输入输出之间存在某种映射关系，这种映射关系可以定性地加以说明，但却难以用数学的方法来精确地加以描述，也不可能由别人来精确地加以复现。

按照 G. N. Saridis 的定义，通过驱动自主智能机来实现其目标而无需操作人员参与的系统称为智能控制系统。这里所说的智能机指的是能够在结构化或非结构化、熟悉或不熟悉的环境中自主地或人参与地执行拟人任务的机器。按照这一定义，智能机器人是典型的智能控制系统。

智能控制系统典型的原理结构如图 1-1 所示。其中，“广义对象”包括通常意义下的控制对象和外部环境。如智能机器人系统中，机器人的手臂、被操作物体及所处环境统称广义对象。“传感器”包括关节位置传感器、力传感器、视觉传感器、距离觉传感器、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，如视觉信息要经过复杂的处理才能获得有用的信息。“认知”主要用来接收和贮存信息、知识、经验和数据，并对它们进行分析、推理，作出行动的决策，送至规划和控制部分。“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。“规划和控制”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。对于不同的智能控制系统，以上各部分的形式和功能可能存在较大的差异。

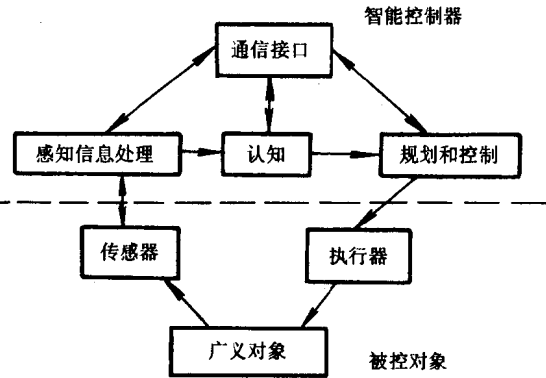


图 1-1 智能控制系统的原理结构

从智能控制系统的功能模块结构观点出发，Saridis 提出了分层递阶结构的智能控制系统，其组成结构如图 1-2 所示。其中执行级一般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再现的控制环境中改善性能，并能接受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，进行组织决策和规划任务，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的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命令和其它输入。这种分层递阶的智能控制系统具有两个明显的特点：

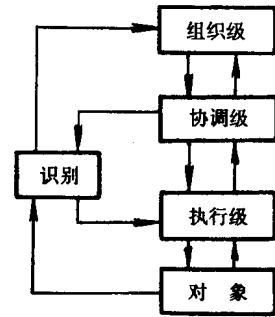


图 1-2 智能控制系统的分层递阶结构

1) 对控制而言，自上而下控制的精度愈来愈高。

2) 对识别而言，自下而上信息反馈愈来愈粗略，相应的智能程

度也愈来愈高。这种分层递阶的结构形式已成功地应用于机器人的智能控制、交通系统的智能控制及管理。

## 二、智能控制系统的特点

智能控制系统具备以下特点：

(1) 智能控制系统一般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。它适用于含有复杂性、不完全性、模糊性、不确定性和不存在已知算法的生产过程。它根据动态被控对象的特征辨识，采用开闭环控制和定性与定量控制结合的多模态控制方式。因此，在研究和设计智能控制系统时，并不把主要注意力放在对数学公式的表达、计算和处理上，而放在对任务和世界模型的描述、符号和环境的识别以及知识库和推理机的设计开发上。也就是说，智能控制系统的设计重点不在常规控制器上，而在智能机模型上。

(2) 智能控制器具有分层信息处理和决策机构。它实际上是对人神经结构和专家决策机

构的一种模仿。智能控制的核心是高层控制，它对环境或过程进行组织、决策和规划，实现广义求解。要实现此任务需要采用符号信息处理、启发式程序设计、知识表示及自动推理和决策的相关技术。这样的问题求解方法与人的思维过程相接近。当然，低层控制级也是智能控制系统不可缺少的组成部分，它属于常规控制范畴。

(3) 智能控制器具有非线性和变结构特点。

(4) 智能控制系统是一门新兴的边缘交叉学科，它需要更多的相关学科配合支援。目前，智能控制无论在理论上还是在实践上都很不成熟、很不完善，需要进一步的探索和研究。

一般说来，智能控制系统必须具备以下一个或多个功能特点：

(1) 学习功能 一个系统，如能对一个过程或其环境的未知特征所固有的信息进行学习，并将得到的经验用于进一步估计、分类、决策或控制，从而使系统的性能得以改善，那么便称该系统具有学习功能。

(2) 适应功能 与传统的自适应控制相比，这里所说的适应功能具有更广泛的含义，它包括更高层次的适应性。所谓的智能行为实质上是一种从输入到输出的映射关系，它可以看成是不依赖于模型的自适应估计，因此具有很好的适应性能。即使是在系统的某一部分出现故障时，系统也能正常工作。体现了它很强的适应性。

(3) 组织功能 即对于复杂的任务和分散传感信息具有自行组织和协调的功能。该组织行为还表现为系统具有相应的主动性和灵活性，即智能控制器可以在任务要求的范围内自行决策，主动采取行动；而当出现多目标冲突时，各控制器在一定限制条件下自行解决。

### 三、智能控制系统研究的数学工具

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的数学工具。显然两者有着根本的区别。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；下层是传统意义下的控制系统，采用数值计算方法。

(2) 离散事件系统与连续时间系统分析的结合 例如在 CIMS 中，上层任务的分配和调度、零件的加工和传输等均可用离散事件系统理论来进行分析和设计；下层的控制（如机床和机器人的控制）则采用常规的连续时间系统分析方法。

(3) 模糊集理论 模糊理论形式上是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，其处理的方法是基于数值的而不是基于符号的。

(4) 神经网络理论 神经网络通过许多简单关系来实现复杂的函数。神经网络本质上是一个非线性动力学系统，但它并不依赖于模型，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。

(5) 优化理论 学习控制系统时常通过对系统性能的评判和优化来修改系统的结构和参数；神经网络控制也时常根据某种代价函数极小来选择网络的连接权系数。在分层递阶控制系统中，通过使系统的总熵最小来实现系统的优化设计。因此优化理论是智能控制系统中设计的精髓。

智能控制是一门交叉学科，傅京逊教授称它是人工智能与自动控制的交叉。以后 Saridis 又加入了运筹学，即认为智能控制是人工智能、自动控制和运筹学三者的交叉。图 1-3 形象地

说明了这种交叉。此图主要针对分层递阶智能控制系统的情况。对于其它类型的智能控制系统，如基于专家系统的控制、神经元控制、模糊控制等，它们仍然是多学科的交叉，只是它们所涵盖的学科不尽相同罢了。智能控制系统的研究领域相当广泛，每个领域都有各自特有的感兴趣的研究课题。这些研究领域包括智能机器人控制、智能过程控制、智能调度与决策、专家控制系统、语言控制、康复智能控制器和智能仪器等。值得指出，这些智能控制的子领域并非完全独立，它们的智能特性也不是互不相关的。

智能控制作为一门新兴学科，还没有形成一个统一的完整的理论体系。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。文献[11]中指出，把复杂环境建模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的进展，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的常规

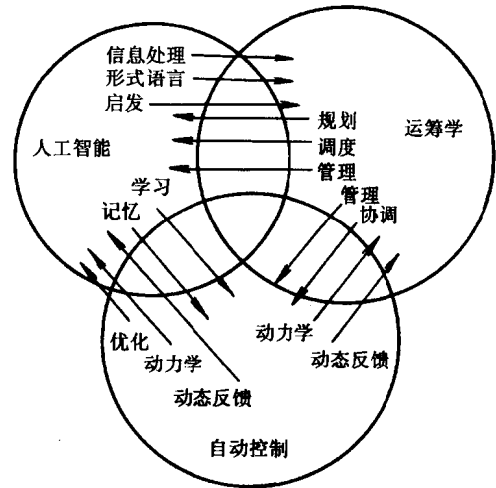


图 1-3 智能控制的交叉

控制系统松散地耦合起来的水平。这里的“自上而下”的含义是指从高层控制的思想、观念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相当长的艰苦工作。综上所述，智能控制理论的研究领域相当广泛，且存在的问题也相当多。可以说智能控制的基础理论体系还处于比较模糊的阶段。限于作者的水平不可能将众多智能控制研究的内容作全面的介绍。本书的目的是将智能控制研究中的一部分比较成熟的又有一定的数学基础支持的有关内容（模糊控制理论、神经网络控制理论）介绍给大家。最后对目前一些智能控制研究的动向作简单讨论。

### 习题和思考题

- 1-1 智能控制系统由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
- 1-2 智能控制系统的特点是什么？
- 1-3 智能控制与常规控制相比较有什么不同？在什么场合下应该选用智能控制策略？

## 第二章 模糊控制的理论基础

### 第一节 引言

#### 一、模糊控制发展

以往各种传统控制方法均是建立在被控对象的精确数学模型之上的，随着系统复杂程度的提高，将难以建立系统的精确数学模型和满足实时控制的要求。人们期望探索出一种简便灵活的描述手段和处理方法，并为此进行了种种尝试。结果发现一个复杂的传统控制理论似乎难以实现的控制系统，却可由一个操作人员凭着丰富的实践经验得到满意的控制结果。骑自行车就是一个例子。任何一个经过训练的人都可以骑车自如地穿过人群，却难以对这种极为复杂的动力学问题使用精确的数学模型进行控制。这个例子给我们带来启示，吸收人脑的这种特点，模拟人的思维方法，把自然语言植入计算机内核，使计算机具有活性和智能。这长期以来一直是中外科学家的夙愿。模糊逻辑控制 (Fuzzy Logic Control) 就是使计算机具有活性和智能的一种新颖的智能控制方法。

模糊控制是以模糊集合论作为它的数学基础的，它的诞生是以 L. A. Zadeh 1965 年提出模糊集理论为标记的。模糊控制经历了 30 多年的研究和发展已经逐步完善，尤其在其应用领域更是成果辉煌。自从 1974 年 E. H. Mamdani 首先利用模糊数学理论进行蒸汽机和锅炉控制方面的研究获得成功以后，模糊控制的研究和应用一直十分活跃。模糊控制系统应用于诸如在测量数据不确切、要处理的数据量过大以致无法判断它们的兼容性、一些复杂可变的被控对象等场合是非常合适的。与传统控制器依赖于系统行为参数的控制器设计方法不同的是模糊控制器的设计是依赖于操作者的经验。在传统控制器中，参数或控制输出的调整是根据对由一组微分方程描述的过程模型的状态分析和综合来进行的，而模糊控制器参数或控制输出的调整是从过程函数的逻辑模型产生的规则来进行的。改善模糊控制性能的最有效方法是优化模糊控制规则。通常，模糊控制规则是通过将人的操作经验转化为模糊语言形式获取的，因此它带有相当的主观性。可以说，没有一种特定的方法是最优的，每一种规则控制方式都有其优缺点。

自从扎德 1965 年发表了首篇有关模糊集理论的论文以来，模糊理论和模糊控制开始了它的艰难历程。正如扎德本人说的那样，如果他当时不是 *Information and Control* 杂志的编委的话，此文章就不可能发表。可以想像出当时模糊理论的困境。在崇尚科学的精确性和严密性的时代，模糊集理论无法得到广大学者的认同，尤其是得到权威学者的认可。当时提出反对模糊集理论主要有两个理由：①认为模糊隶属度函数的确定具有主观臆断性和人为经验技巧色彩，没有严格的系统方法，因而是不可靠的。②认为模糊逻辑实际上是改头换面的概率理论。由于存在众多权威人士的反对，模糊理论在它的发源地美国的发展相当缓慢。在欧洲，对模糊理论的研究着重在模糊控制上。自从 Mamdani 教授 1974 年首先将模糊理论用于锅炉和蒸汽机的控制，开创了模糊控制的先河。模糊控制理论的应用研究在 70 年代的欧洲取得了一



些成功,推动了模糊控制理论的研究,同时模糊理论也不断地得到人们的认识和重视。在80年代后期,模糊控制理论进入了发展期,包括美国在内的世界各国在模糊控制理论研究投入的基金、各大公司投入的开发资金明显增加,从而促使了模糊控制理论和模糊控制产品的不断发展和不断翻新。近十年来模糊控制发展相当迅速,我们无法对这一模糊控制理论发展史上灿烂时期作全面的回顾,从历史的发展来看以下几篇文章可以简单地说明模糊控制发展的几个转折点:

1972	Zadeh	模糊控制原理 <sup>[15]</sup>
1973	Zadeh	复杂系统分析和决策过程新的逼近方法 <sup>[16]</sup>
1974	Mamdani et al	蒸汽机的模糊控制 <sup>[17]</sup>
1976	Rutherford et al	模糊算法分析 <sup>[18][19]</sup>
1977	Ostergaad	热交换器和水泥窑模糊控制 <sup>[20]</sup>
1977	Willaeey et al	最优模糊控制 <sup>[21]</sup>
1979	Komolov et al	有限自动机理论 <sup>[22]</sup>
1980	Tong et al	污水处理过程的模糊控制 <sup>[23]</sup>
1980	Fukami et al	模糊条件推理 <sup>[24]</sup>
1983	Hirota et al	概率模糊集理论 <sup>[25]</sup>
1983	Takagi et al	模糊控制规则的获取 <sup>[26]</sup>
1983	Yasunobu et al	预测模糊控制 <sup>[27]</sup>
1984	Sugeno et al	汽车的停车控制 <sup>[28]</sup>
1985	Kiszka et al	模糊系统的稳定性 <sup>[28]</sup>
1985	Togai et al	模糊芯片 <sup>[29]</sup>
1986	Yamakawa	模糊控制的硬件系统 <sup>[30]</sup>
1988	Dubois et al	逼近推理 <sup>[31]</sup>
1988	Czogala	多输入模糊控制系统 <sup>[32]</sup>
1991	De Neyer et al	内模模型的模糊控制 <sup>[33]</sup>
1992	Yager	模糊控制隶属度函数的神经网络学习 <sup>[34]</sup>

## 二、模糊控制特点

模糊控制是建立在人工经验基础上的。对于一个熟练的操作人员,他并非需要了解被控对象精确的数学模型,而是凭借其丰富的实践经验,采取适当的对策来巧妙地控制一个复杂过程。若能把这些熟练操作员的实践经验加以总结和描述,并用语言表达出来,它就是一种定性的、不精确的控制规则。如果用模糊数学将其定量化就转化为模糊控制算法,从而形成了模糊控制理论。它在最近的短短十多年来发展如此迅速,应主要归结于模糊控制器的一些明显的特点:

(1) 无需知道被控对象的数学模型 模糊控制是以人对被控系统的控制经验为依据而设计的控制器,故无需知道被控系统的数学模型。

(2) 是一种反映人类智慧思维的智能控制 模糊控制采用人类思维中的模糊量,如“高”、“中”、“低”、“大”、“小”等,控制量由模糊推理导出。这些模糊量和模糊推理是人类通常智能活动的体现。