



普通高校“十二五”规划教材

# 智能 控制技术

INTELLIGENT  
CONTROL TECHNOLOGY

主 编◎郭广颂



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高校“十二五”规划教材

# 智能控制技术

郭广颂 主编

石庆升 副主编

崔建锋 刘顺新 宋辉 编

李秀娟 主审

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书深入浅出地阐述了智能控制的基本概念、工作原理、控制方法与应用。全书共7章:第1章概述智能控制的发展历史及主要研究问题;第2章介绍了模糊控制的数学基础;第3~4章介绍了模糊控制的基本工作原理、模糊控制系统设计方法和设计实例;第5章介绍了神经网络结构与神经网络控制类型;第6章介绍了专家系统的工作原理与专家控制系统结构;第7章介绍了遗传算法原理及其在控制中的应用。

本书可作为高等院校自动化、机电工程、电子信息类专业高年级本科生及研究生的教材,也可供从事智能控制与智能系统研究、设计和应用的工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能控制技术 / 郭广颂主编. -- 北京:北京航空航天大学出版社,2014.6

ISBN 978-7-5124-1349-8

I. ①智… II. ①郭… III. ①智能控制 IV.

①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 061474 号

版权所有,侵权必究。

### 智能控制技术

郭广颂 主编 石庆升 副主编

崔建锋 刘顺新 宋 辉 编

李秀娟 主审

责任编辑 金友泉

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316524

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:710×1 000 1/16 印张:13.5 字数:288千字

2014年6月第1版 2014年6月第1次印刷 印数:3 000册

ISBN 978-7-5124-1349-8 定价:28.00元

---

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

## 前 言

控制理论发展至今已有 100 多年的历史,经历了“经典控制理论”和“现代控制理论”到“大系统理论”和“智能控制理论”阶段。自从 20 世纪 70 年代傅京逊教授首先提出智能控制概念以来,智能控制的研究受到了广泛的关注。研究领域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(符号主义和连接主义)、模糊集理论、运筹学和控制论。因此,“智能控制”已成为一门综合性很强的多学科交叉的新学科。目前,智能控制技术已进入工程化、实用化阶段,随着科学技术的发展,智能控制的应用领域将不断拓展,理论和技术也必将得到不断的发展和完善。

经过 40 余年的发展,智能控制已成为控制工程学科研究的一个前沿学术方向,作为一门独立课程在工科院校也已普遍开设。为了能让学生更容易地了解 and 掌握智能控制的基本理论与方法,作者在多年教学讲义的基础上,参考国内外代表性的教材和相关研究成果,编写了这本适合普通本科院校的《智能控制技术》。

由于智能控制的理论体系还没有经典控制理论成熟,所以智能控制课程的现行教材内容并不统一,而智能控制发展至今所积累的成果更不是一本教材可以容纳了的。结合普通本科院校的教学任务与特点,本书重点阐述智能控制中的基础内容,对于某些适用于学术研究的交叉内容则不做介绍,即将代表智能控制的基本控制方法作为主要内容,通过理论描述、基本算例演示、典型案例应用的思路完成原理演示和系统设计过程。在具体内容安排上,将模糊控制技术、神经网络控制、遗传算法和专家控制作为基本内容介绍。这样做的目的并非是要减少课程的内容,而是要缩小框架,使学生在尽可能少的课时里能有重点地掌握尽可能全面的基础知识。在编写过程中,遵循启发式思想,通过大量例证说明理论与方法的应用过程,力求深入浅出、层次分明,突出“简明”的编写特点,便于理解和自学。

全书共 7 章:第 1 章概述智能控制的发展历史以及主要研究问题;第 2 章介绍模糊控制的数学基础;第 3~4 章介绍模糊控制的基本工作原理、模糊控制系统设计方法和设计实例;第 5 章介绍神经网络结构与神经网络控制类型;第 6 章介绍专家系统的工作原理与专家控制系统结构;第 7 章介绍遗传算法原理及其在控制中的应用。各章均辅以基于 MATLAB 的实例程序,但限于篇幅,本书并未介绍 MATLAB 中的智能控制工具箱及指令。若想深刻理解这些程序,读者需参考相关的 MATLAB 软件文献。

本书由郑州航空工业管理学院郭广颂副教授统稿,崔建锋副教授编写第 1 章和第 3 章,郭广颂编写第 2 章和第 4 章,河南工业大学石庆升副教授编写第 5 章,第 6 章由宋辉老师编写,第 7 章由刘顺新老师编写。借此衷心感谢主审河南工业大学李秀娟教授对本书的审阅。

我们切身体会到编写一本让初学者容易学习和理解的教材并不是容易的事,由于学识水平所限,书中缺点和错误不可避免,恳请同行专家和读者批评指正。

作 者

# 目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 智能控制的起源与发展	1
1.1.1 控制理论应用面临新的挑战	1
1.1.2 智能控制的提出与发展概况	2
1.1.3 智能控制的特点	4
1.1.4 智能控制的应用	4
1.2 智能控制的基本概念	6
1.2.1 智能控制的定义	6
1.2.2 智能控制的结构	6
1.3 智能控制的几种形式	7
1.3.1 模糊逻辑控制	7
1.3.2 分级递阶智能控制	8
1.3.3 人工神经网络控制	8
1.3.4 专家控制	9
1.3.5 仿人智能控制	10
1.3.6 学习控制	10
1.4 智能控制系统的研究方向和趋势	11
1.4.1 研究方向	11
1.4.2 发展趋势	11
第 2 章 模糊控制的数学基础	13
2.1 模糊控制概述	13
2.1.1 模糊理论的创立	13
2.1.2 模糊控制的应用	14
2.1.3 模糊控制技术的特点	15
2.1.4 模糊控制技术的发展	15
2.2 模糊集合及其表示方法	17
2.2.1 模糊集合的基本概念	17
2.2.2 模糊集合的表示方法	19
2.2.3 模糊集合的运算	21
2.2.4 确定隶属函数的原则	24

2.3	模糊关系和模糊矩阵	30
2.3.1	普通关系	30
2.3.2	模糊关系	32
2.4	模糊逻辑	38
2.4.1	模糊语言逻辑	38
2.4.2	语言算子	40
2.4.3	模糊逻辑与多值逻辑的区别和联系	41
2.5	模糊逻辑推理	42
2.5.1	似然推理	42
2.5.2	模糊条件推理	48
2.5.3	多输入模糊推理	49
2.5.4	多输入多规则推理	51
<b>第3章</b>	<b>模糊控制的基本原理</b>	<b>54</b>
3.1	模糊控制的基本思想	54
3.1.1	模糊控制思想	54
3.1.2	模糊控制系统的基本组成	55
3.1.3	模糊控制器的组成	56
3.2	模糊控制基本原理	57
3.2.1	单输入单输出模糊控制原理	57
3.2.2	电热炉炉温模糊控制设计例证	57
<b>第4章</b>	<b>模糊逻辑控制器及模糊控制系统设计</b>	<b>64</b>
4.1	模糊控制器设计的内容	64
4.2	模糊控制器结构设计	64
4.2.1	输入输出变量的确定	64
4.2.2	模糊控制器结构的选择	65
4.3	模糊控制规则设计	66
4.3.1	输入输出变量词集的选择	66
4.3.2	各模糊变量的模糊子集隶属函数的选择	66
4.3.3	模糊控制规则的建立	69
4.3.4	模糊化和解模糊化方法	71
4.3.5	论域、量化因子和比例因子	75
4.3.6	模糊控制在线推理示例	77
4.3.7	模糊控制器的硬、软件实现	79

4.4 模糊控制与PID控制的结合 .....	80
4.4.1 模糊控制器与PID控制器的关系 .....	80
4.4.2 模糊PID控制器的几种形式 .....	82
4.5 模糊控制系统设计实例 .....	89
4.5.1 温度控制系统 .....	89
4.5.2 控制系统性能分析 .....	97
4.5.3 模糊控制器的实现 .....	106
<b>第5章 神经网络与神经网络控制 .....</b>	<b>108</b>
5.1 神经网络基础 .....	108
5.1.1 生物神经元与人工神经元 .....	108
5.1.2 神经网络的发展历史 .....	112
5.1.3 神经网络的分类 .....	114
5.1.4 神经网络的特点及应用领域 .....	116
5.2 典型神经网络模型 .....	118
5.2.1 感知机神经网络 .....	119
5.2.2 BP神经网络 .....	122
5.2.3 RBF神经网络 .....	132
5.2.4 Hopfield神经网络 .....	138
5.3 神经网络控制 .....	141
5.3.1 神经网络监督控制 .....	142
5.3.2 神经网络直接逆控制 .....	142
5.3.3 神经网络自适应控制 .....	143
5.3.4 神经网络内模控制 .....	144
5.3.5 神经网络PID控制 .....	145
5.3.6 神经网络预测控制 .....	146
5.3.7 神经网络混合控制 .....	147
<b>第6章 专家控制技术 .....</b>	<b>149</b>
6.1 专家系统 .....	149
6.1.1 专家系统发展历史 .....	149
6.1.2 专家系统的结构与类型 .....	152
6.1.3 知识的表示 .....	158
6.1.4 知识的获取 .....	164
6.1.5 专家系统的推理机制 .....	166

---

6.2 专家控制系统 .....	168
6.2.1 专家控制系统原理 .....	168
6.2.2 专家控制系统的类型 .....	169
6.2.3 专家控制系统的设计 .....	174
<b>第7章 遗传算法与应用</b> .....	<b>184</b>
7.1 遗传算法的基本原理 .....	184
7.1.1 遗传算法的基本操作 .....	184
7.1.2 遗传算法的优化设计 .....	188
7.1.3 遗传算法优化函数实例 .....	191
7.1.4 遗传算法的特点 .....	198
7.2 基于遗传算法的参数辨识 .....	199
7.2.1 基于遗传算法的参数辨识方法 .....	199
7.2.2 遗传算法用于控制系统建模与设计 .....	200
7.3 基于遗传算法的PID控制参数优化 .....	201
7.3.1 基于遗传算法的控制参数优化方法 .....	201
7.3.2 遗传算法PID参数整定实例 .....	204
<b>参考文献</b> .....	<b>207</b>



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 智能控制的起源与发展

### 1.1.1 控制理论应用面临新的挑战

从 1932 年奈奎斯特(H. Nyquist)发表反馈放大器稳定性的论文以来,控制理论学科的发展已经走过 80 余年的历程,其中前 30 年是经典控制理论的成熟和发展阶段,后 50 年至今是现代控制理论的形成和发展阶段。

经典控制理论是一种单回路线性控制理论,只适用于单输入单输出控制系统。主要研究对象是单变量常系数线性系统,系统数学模型简单,基本分析和综合方法是基于频率法和图解法。20 世纪 60 年代前后,由于计算机技术的成熟和普及,促使控制理论由经典控制理论向现代控制理论过渡。现代控制理论的形成使控制理论从深度和广度上进入一个崭新的发展时期,特点如下:

① 控制对象结构的转变 控制对象结构由简单的单回路模式向多回路模式转变,即从单输入单输出向多输入多输出转变。

② 研究工具的转变:

- 积分变换法向矩阵理论、几何方法转变,由频率法转向状态空间的研究;
- 计算机技术的发展使手工计算转向计算机计算。

③ 建模手段的转变 由机理建模向统计建模转变,开始采用参数估计和系统辨识的统计建模方法。

在工程应用方面,航天技术、信息技术和制造工业技术的革命,要求控制理论能处理更加复杂的系统控制问题,提供更加有效的控制策略。这些大型复杂的系统包括大型工业生产过程、计算机集成制造系统、柔性机器人系统和空间飞行的各类复杂设施等。这些系统既有系统运行行为和特征上的复杂性,也有不确定性导致的复杂性,同时也有系统多模式集成和控制策略方面的复杂性。对这类系统的研究设计以及到非线性、鲁棒性、具有柔性结构的系统和离散事件动态系统等,既需要对其进行相对独立研究,也必须按照具体工程问题对其中几个方面集成加以研究。因此,对上述复杂系统的控制理论虽已进行了不同程度的研究,但总体来看,其研究十分有限,特别是那些难以用数学模型描述的问题,单纯的数学工具有时显得无能为力,这对控制理论应用无疑是一个新的挑战。

### 1.1.2 智能控制的提出与发展概况

人们在生产实践中发现,一个复杂的传统控制理论似乎难以实现的控制系统,却可以由一个操作工凭着丰富的实践经验得到满意的控制结果。如果这些熟练的操作工、技术人员或专家的经验知识能和控制理论结合,把它作为解决复杂生产过程的控制理论的一个补充手段,那将使控制理论解决复杂生产过程有一个突破性进展。客观上,计算机控制技术的发展为这种突破提供了有效的工具。计算机在处理图像、符号逻辑、模糊信息、知识和经验等方面的功能,完全可以承担起熟练的操作工、技术人员和专家的知识经验、操作方法等付诸对生产过程的操作和控制,使之达到或超过人的操作水平。这相当于人的知识经验直接参与生产过程的控制,这样的自动控制系统称为智能控制系统。

从20世纪60年代至今,智能控制的发展过程通常被化分为3个阶段:萌芽期、形成期和发展期。

#### 1. 萌芽期(约20世纪60年代)

20世纪60年代初,史密斯(F. W. Smiths)首先采用性能模式识别器来学习最优控制方法,试图用模式识别技术来解决复杂系统的控制问题。

1965年,美国加利福尼亚大学伯克利分校的扎德(L. A. Zadeh)教授提出模糊集合理论,为模糊控制奠定数学基础。同年,美国的费根鲍姆(Feigenbaum)着手研制世界上第一个专家系统;美籍华裔模式识别与机器智能专家、普渡大学傅京逊(K. S. Fu)教授提出将人工智能中的直觉推理方法用于学习控制系统。

1966年门德尔(Mendel)在空间飞行器学习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,利昂兹(Leondes)等人首先正式使用“智能控制”一词,并把记忆、目标分解等一些简单的人工智能技术用于学习控制系统,提高了系统处理不确定问题的能力。

#### 2. 形成期(约20世纪70年代)

20世纪70年代初,傅京逊等人从控制论的角度进一步总结了人工智能技术与自适应、自组织、自学习控制的关系。正式提出智能控制是人工智能技术与控制理论的交叉,并在核反应堆、城市交通的控制中成功地应用了智能控制技术。

20世纪70年代中期,智能控制在模糊控制的应用上取得了重要的进展。1974年,英国伦敦大学玛丽皇后分校的玛达尼(E. H. Mamdani)教授把模糊理论用于蒸汽机控制,通过实验取得了良好的结果。

1977—1979年,萨里迪斯(G. N. Saridis)出版了专著《随机系统的自组织控制》,并发表了综述论文“朝向智能控制的实现”,全面地论述了从反馈控制到最优控制、随机控制及至自适应控制、自组织控制、学习控制,最终向智能控制发展的过程,提出了智能控制的三元交集结构以及分层递阶的智能控制系统框架。

1979年,玛达尼成功地研制出自组织模糊控制器,使得模糊控制具有了较高智能。

### 3. 发展期(约20世纪80年代以后)

20世纪80年代以来,微型计算机的迅速发展以及专家系统技术的逐渐成熟,使得智能控制和决策的研究及应用领域逐步扩大,并取得了一批应用成果。

1982年,Fox等人完成了一个称为智能调度信息系统(ISIS)的加工车间调度专家系统,该系统采用启发式搜索技术和约束传播方法,以减少搜索空间,确定最佳调度方法。

1983年,萨里迪斯把智能控制用于机器人系统;同年,美国西海岸人工智能风险企业发表了名为Reveal的模糊决策支持系统,在计算机运行管理和饭店经营管理方面取得了很好的应用效果。

1984年,LISP Machine公司设计了用于过程控制系统的实时专家系统PICON。

1986年,M. Lattimer和Wright等人开发的混合专家系统控制器Hexscon是一个实验型的基于知识的实时控制专家系统,用来处理军事和现代化工业中出现的控制问题;同年,鲁梅哈特(D. E. Rumelhart)和麦克莱郎德(J. L. McClelland)提出了多层前向神经网络的偏差反向传播算法,即BP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。

1987年,美国Foxboro公司公布了新一代IA智能控制系统。这种系统的出现体现了传感器技术、自动控制技术、计算机技术在生产自动化应用方面的综合先进水平,能够为用户提供安全可靠的最合适的过程控制系统,这标志着智能控制系统已由研制、开发阶段转向应用阶段。

20世纪90年代以后,智能控制的研究势头异常迅猛,智能控制进入应用阶段,应用领域由工业过程控制扩展到军事、航天等高科技领域以及日用家电领域,如模糊洗衣机、模糊空调机等。专家系统的研究方兴未艾,各种专家系统陆续在许多行业得到应用,如石油价格预测专家系统、地震预报专家系统、水质勘测专家系统以及各种故障诊断专家系统等。与此同时,美国的Hecht-Nielsen神经计算机公司已经开发了两代神经网络软硬件产品,IBM公司推出的神经网络工作站也已进入市场,神经网络的发展也日新月异。

伴随着智能控制新学科形成条件的逐渐成熟,1985年8月,IEEE在纽约召开了第一届智能控制学术讨论会。之后,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控制系统学会与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。这次会议表明,智能控制作为一门独立学科正式在国际上建立起来。此后,IEEE智能控制国际学术研讨会每年举行一次,促进了智能控制系统的研究。

### 1.1.3 智能控制的特点

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。概括地说,智能控制具有以下基本特点:

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。它适用于含复杂性、不完全性、模糊性、不确定和不存在已知算法的生产过程。它根据被控过程动态辨识,采用开闭环控制和定性定量控制结合的多模态控制方式。

② 智能控制器具有分层信息处理和决策机构。该机构是对人的神经系统结构或专家决策机构的一种模仿。在复杂的大系统中,通常采用任务分块、控制分散方式实现系统控制。智能控制核心在高层控制时,对环境或过程进行组织、决策和规划,以实现广义求解。而底层控制也属智能控制系统不可缺少的一部分,一般采用常规控制。

③ 智能控制器具有非线性。因为人的思维具有非线性,作为模仿人的思维进行决策的智能控制也应具有非线性特点。

④ 智能控制器具有变结构特点。在控制过程中,根据当前的偏差和偏差变化率的大小和方向,在调整参数得不到满足时,以跃变方式改变控制器的结构,以改善系统的性能。

⑤ 智能控制器具有总体自寻优特点。由于智能控制器具有在线特征辨识、特征记忆和拟人特点,在整个控制过程中计算机在线获取信息和实时处理并给出控制决策,通过不断优化参数和寻找控制器的最佳结构形式,以获取整体最优控制性能。

⑥ 智能控制是自动控制、人工智能、运筹学等多学科交叉的边缘学科,因此这些学科的发展将为智能控制的深入研究提供理论指导和技术支持。同时,在智能控制的研究过程中,也会提出新的问题,这也为上述学科的发展提供了新的机遇。

### 1.1.4 智能控制的应用

智能控制主要解决那些用传统控制方法难以解决的复杂系统的控制问题,其中包括智能机器人控制、计算机集成制造系统(CIMS)、工业过程控制、航空航天控制、社会经济管理系统、交通运输系统、环保及能源系统等。

#### 1. 在机器人控制中的应用

智能机器人是目前机器人研究中的热门课题。E. H. Mamdan 于 20 世纪 80 年代初首次将模糊控制应用于一台实际机器人的操作臂控制。J. S. Albus 于 1975 年提出小脑模型关节控制器(Cerebellar Model Articulation Controller, CMAC),它是仿照小脑如何控制肢体运动的原理而建立的神经网络模型。采用 CMAC,可实现机器人的关节控制,这是神经网络在机器人控制的一个典型应用。

目前工业上用的 90% 以上的机器人都不具有智能,随着机器人技术的迅速发展,需要各种具有不同程度智能的机器人。

## 2. 在现代制造系统中的应用

现代先进制造系统需要依赖不够完备和不够精确的数据来解决难以或无法预测的情况,人工智能技术为解决这一难题提供了有效的解决方案。制造系统的控制主要分为系统控制和故障诊断两大类。对于系统控制,采用专家系统的“Then - If”逆向推理作为反馈机构,可以修改控制机构或者选择较好的控制模式与参数。利用模糊集合和模糊关系的鲁棒性,将模糊信息集成到闭环控制外环的决策选取机构来选择控制动作。利用人工神经网络的学习功能和并行处理信息的能力,可以诊断 CNC 的机械故障。

现代制造系统向智能化发展的趋势,是智能制造的要求。

## 3. 在过程控制中的应用

过程控制是指石油、化工、冶金、轻工、纺织、制药、建材等工业生产过程的自动控制,是自动化技术的一个极其重要的方面。智能控制在过程控制上有着广泛的应用。在石油化工方面,1994 年美国的 Gensym 公司和 Neuralware 公司联合将神经网络用于炼油厂的非线性工艺过程。在冶金方面,日本的新日铁公司于 1990 年将专家控制系统应用于轧钢生产过程。在化工方面,日本的三菱化学合成公司研制出用于乙烯工程模糊控制系统。

将智能控制应用于过程控制领域,是过程控制发展的方向。

## 4. 在航空航天控制中的应用

1977—1986 年,美国 NASA 喷气推进研究所在“旅行者”号探测器上采用人工智能技术完成了精密导航和科学观测等任务,其上搭载的计算机收集和处理的木星和土星等多种不同数据。为探测器设计的由 140 个规则组成的知识库,可生成对行星摄影所需应用程序的专家系统,大幅度缩短了执行应用计划所需时间,减少了差错,降低了成本。此外,在航天飞机的检测、发射和应用等过程中也大量地采用了智能控制系统,包括加注液氧用的专家系统;执行飞行任务和程序修订用的专家系统;发射及着陆时的飞行控制系统;推理决策用的信息管理系统等。

航空航天控制领域的特殊性,使得智能控制发挥了巨大作用。

## 5. 在广义控制领域中的应用

从广义上理解自动控制,可以把它看作不通过人工干预而对控制对象进行自动操作或控制的过程,如股市行情、气象信息、城市交通、地震火灾预报数据等。这类对象的特点是以知识表示的非数学广义模型,或者含有不完全性、模糊性、不确定性的数学过程。对它们进行控制是无法用常规控制器完成的,而需要采用符号信息知识表示和建模,应用智能算法程序进行推理和决策。

智能控制在广义控制领域中的应用是智能控制优越性的突出体现。

## 1.2 智能控制的基本概念

### 1.2.1 智能控制的定义

智能控制是一门新兴学科,从“智能控制”这个术语于1967年由利昂兹等人提出后,现在还没有统一的定义,IEEE控制系统协会将其总结为“智能控制必须具有模拟人类学习(Learning)和自适应(Adaptation)的能力”。以下两点是对智能控制和智能控制系统的粗略概括。

① 智能控制是智能机自动地完成其目标的控制过程。其中智能机可在熟悉或不熟悉的环境中自动地或人机交互地完成拟人任务。

② 由智能机参与生产过程自动控制的系统称为智能控制系统。

定性地讲,智能控制应具有学习、记忆和大范围的自适应和自组织能力;能够及时地适应不断变化的环境;能够有效地处理各种信息,以减小不确定性;能够以安全和可靠的方式进行规划、生产和执行控制动作,从而达到预定的目标和良好的性能指标。

### 1.2.2 智能控制的结构

#### 1. 智能控制的二元交集结构

1971年傅京逊教授对几个与自学习控制有关领域进行研究后,提出了“智能控制”是自动控制和人工智能的交集的结构,称为智能控制的二元交集结构。它可以表示如下:

$$IC = AI \cap AC$$

式中:IC—Intelligent Control(智能控制);

AI—Artificial Intelligence(人工智能);

AC—Automatic Control(自动控制)。

可以看出,智能控制系统的设计就是要尽可能地把设计者和操作者所具有的与指定任务有关的智能转移到机器控制器上。由于二元交集结构简单,它是目前应用得最多最普遍的智能控制结构。

#### 2. 智能控制的三元交集结构

1977年,萨里迪斯对傅京逊的二元交集结构进行了扩展,将运筹学概念引入智能控制,使之成为三元交集中的一个子集,即

$$IC = AI \cap AC \cap OR$$

式中:OR—Operation Research(运筹学),是一种量化优化方法。它包括数学规划、图论、网络流、决策分析、排队论、存储论、对策论等内容。

三元交集结构强调了更高层次控制中调度、规划与管理的作用,为其递阶智能控制的提出奠定了基础。

### 3. 智能控制的四元交集结构

1987年,我国中南大学蔡自兴教授把信息论融合到三元交集结构中,提出了智能控制的四元交集结构,即

$$IC = AI \cap AC \cap OR \cap IT$$

式中,IT—Information Theory (信息论)。

这种结构突出了智能控制系统是以知识和经验为基础的拟人控制系统。知识是对收集来的信息进行分析处理和优化形成结构信息的一种形式,智能控制系统的知识和经验来自信息,又可以被加工为新的信息,因此智能控制系统离不开信息论的参与作用。

## 1.3 智能控制的几种形式

常规的智能控制方法有模糊逻辑控制(Fuzzy Logic Control)、分级递阶智能控制(Hierarchical Intelligent Control)、神经网络控制(Neural Network Control)、专家控制(Expert Control)、仿人智能控制(Human - Simulated Control)和学习控制(Learning Control)等。

### 1.3.1 模糊逻辑控制

模糊逻辑在控制领域的应用称为模糊控制。它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。模糊控制有三个基本组成部分:模糊化、模糊决策、精确化计算。它的工作过程简单地描述为: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。模糊控制系统的一般结构如图1-1所示。

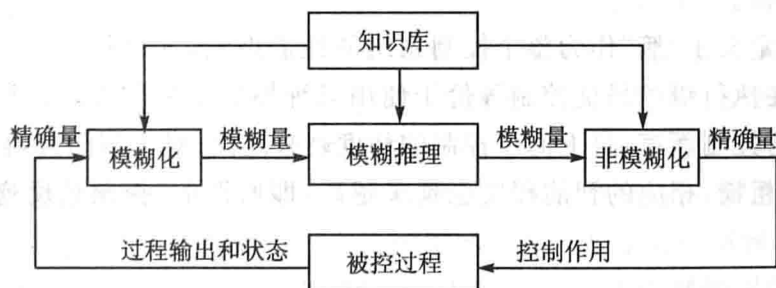


图 1-1 模糊控制系统的一般结构

模糊控制的有效性可以从以下两个方面来考虑:

① 模糊控制提供了一种实现基于知识描述的控制规律的新机理。

② 模糊控制提供了一种改进非线性控制器的替代方法,这些非线性控制器一般用于控制含不确定性和难以用传统非线性控制理论处理的过程。

到目前为止,模糊控制已经得到了十分广泛的应用。

### 1.3.2 分级递阶智能控制

分级递阶智能控制是从工程控制论角度,总结人工智能、自适应、自学习和自组织的关系后逐渐形成的。分级递阶智能控制可以分为基于知识/解析混合多层智能控制理论和基于精度随智能提高而降低的分级递阶智能控制理论两类。前者由意大利学者 A. Villa 提出,可用于解决复杂离散时间系统的控制设计;后者由萨里迪斯于 1977 年提出,它由组织级、协调级和执行级组成,如图 1-2 所示。

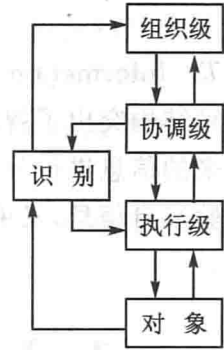


图 1-2 分级递阶智能控制结构

#### 1. 执行级

执行级一般需要被控对象的准确模型,以实现具有一定精度要求的控制任务,因此多采用常规控制器实现。

#### 2. 协调级

它是高层和低层控制级之间的转换接口,主要解决执行级控制模态或控制模态参数自校正。它不需要精确的模型,但需要具备学习功能,并能接受上一级的模糊指令和符号语言。该级通常采用人工智能和运筹学的方法实现。

#### 3. 组织级

组织级在整个系统中起主导作用,涉及知识的表示与处理,主要应用人工智能方法。在分级递阶结构中,下一级可以看成上一级的广义被控对象,而上一级可以看成下一级的智能控制器,如协调级既可以看成组织级的广义被控对象,又可以看成执行级的智能控制器。

萨里迪斯定义了“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,证明在执行级的最优控制等价于使用某种熵最小的方法。这种分层递阶结构的特点是:对控制而言,自上而下控制的精度越来越高;对识别而言,自下而上信息的反馈越来越粗糙,相应的智能程度也越来越高,即所谓的“控制精度递增伴随智能递减”。

### 1.3.3 人工神经网络控制

人工神经网络采用仿生学的观点与方法研究人脑和智能系统中的高级信息处理。由很多人工神经元按照并行结构经过可调的连接权构成的人工神经网络具有某



些智能和仿人控制功能。典型的神经网络结构包含多层前馈神经网络、径向基函数网络、Hopfield 网络等。

人工神经网络具有可以逼近任意非线性函数的能力,因此既可以用来建立非线性系统的动态模型也可以用于构建控制器。神经网络控制系统结构如图 1-3 所示,其工作原理是:

若图中输入输出满足下列关系

$$y = g(u)$$

则设计的目标是寻找控制量  $u$ ,使系统输出  $y$  与期望值  $y_d$  相等,因此系统控制量必须满足

$$u_d = g^{-1}(y_d)$$

若  $g(u)$  是简单的函数,求解  $u_d$  并不难,但在多数情况下,  $g(u)$  形式未知,或难以找到  $g(u)$  的反函数  $g^{-1}(u)$ ,这也是传统控制的局限性。若用神经网络模拟  $g^{-1}(u)$ ,则无论  $g(u)$  是否已知,通过神经网络自学习能力,总可以找到  $u_d$  (神经网络输出)作为被控对象的控制量。若用被控对象的实际输出与期望值输出的误差来控制神经网络学习,则可以通过调整神经网络加权系数,直至  $e = y_d - y = 0$ 。

神经网络的特点是:有很强的鲁棒性和容错性、采用并行分布处理方法,可学习和适应不确定系统、能同时处理定量和定性知识。从控制角度看,神经网络控制特别适用于复杂系统、大系统以及多变量系统。

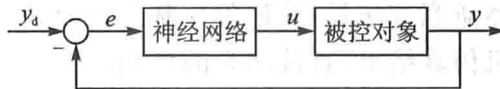


图 1-3 神经网络控制系统结构

### 1.3.4 专家控制

专家系统是一种模拟人类专家解决问题的计算机软件系统。专家系统内部含有大量的某个领域的专家水平的知识与经验,能够运用人类专家的知识解决问题的方法进行推理和判断,模拟人类专家的决策过程,来解决该领域的复杂问题。

基于知识工程的专家控制,是应用专家系统的概念和技术,模拟人类专家的控制知识和经验,实现对被控对象的控制,是人工智能与自动控制相结合的典型产物。专家控制系统具有全面的专家系统结构、完善的知识处理功能和实时控制的可靠性能。这种系统采用黑板等结构,知识库庞大,推理机制复杂。它包括知识获取子系统和学习子系统,人一机接口要求较高。专家式控制器多为工业专家控制器,是专家控制系统的简化形式,针对具体的控制对象或过程,着重于启发式控制知识的开发,具有实时算法和逻辑功能。它具有设计较小的知识库、简单的推理机制,可以省去复杂的人一机接口。由于其结构较为简单,又能满足工业过程控制的要求,因而应用日益广泛。图 1-4 是专家控制系统原理图。