

自动化

专业本科系列教材

Zhineng Kongzhi

智能控制

主 编 周德俭
副主编 吴 斌

重庆大学出版社

智能控制

主 编 周德俭
副主编 吴 斌

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书系自动化专业本科系列教材之一。书中以智能控制的基本原理、主要技术以及智能控制技术在生产实际中的应用为主线进行论述。全书内容包括:概论,分级递阶智能控制,基于模糊推理的智能控制系统,基于神经网络的智能控制技术,遗传算法及其在智能控制中的应用,专家控制系统,基于规则的仿人智能控制,智能控制应用实例。

本书可作为工科自动化类专业的本科生、研究生教材,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制/周德俭主编. —重庆:重庆大学出版社,
2005. 8

(自动化专业本科系列教材)

ISBN 7-5624-3401-8

I. 智... II. 周... 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(2005)第 046679 号

智 能 控 制

主 编 周德俭

副主编 吴 斌

责任编辑:曾令维 邵孟春 版式设计:曾令维

责任校对:许 玲 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆联谊印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:17 字数:424 千

2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷

印数:1—4 000

ISBN 7-5624-3401-8 定价:23.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究。

前言

人类已开始进入智能化的工业时代,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人工智能和智能控制的应运而生与快速发展则是历史的必然。智能控制作为一门新兴的理论技术目前还处于发展初期,各种新的智能控制理论和方法还在不断涌现和发展之中。随着这种发展趋势,智能控制在自动化领域的作用将越来越大,在实际中的应用将越来越广泛,学习和掌握这门技术的意义重大。

本书以智能控制的基本原理、主要技术及智能控制技术在生产实际中的应用为主线展开介绍和论述。编著中较注意技术原理论述和应用介绍之间的关系,力求使全书既能反映出智能控制技术所包含的主要内容,又能突出应用性强和易学易懂的特点。为此,在章节的安排和内容的取舍上参考同类教材和结合实际教学、实践经验进行了认真的斟酌。

本书主要阅读对象为工科院校本科生、研究生,可作为工科自动化类专业的专业课程教材,也可作为非自动化类专业的选修课教材,以及作为从事相关专业的工程技术人员的学习参考书。作为本科生教材时,参考学时为36~48学时。

全书共8章,第1章和8.1节由桂林工学院周德俭教授编著;第5、6章和8.2、8.3节由西南科技大学吴斌副教授编著;第2章由重庆工学院余成波教授编著;第7章由桂林工学院刘电霆副教授编著;第4章由桂林工学院张烈平副教授编著;第3章由桂林电子工业学院李春泉博士编著。全书由周德俭教授主编和统稿,吴斌副教授任副主编。在教材编写过程中,桂林工学院的霍红颖、韩可轶等人参加了有关资料收集、文稿计算机处理工作。编写中还借鉴或引用了所列出的参考文献中的有关内容。在此一并予以感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,请读者批评指正。

编者
2005年4月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 智能控制的基本概念	1
1.2 智能控制的发展概况	3
1.3 智能控制的研究对象和研究内容	7
1.4 智能控制系统结构及其功能特点与类型	9
习题 1	14
第 2 章 分级递阶智能控制	15
2.1 递阶智能控制基本原理	15
2.2 分级智能控制的结构与理论	21
习题 2	31
第 3 章 基于模糊推理的智能控制系统	32
3.1 模糊集合与模糊推理	33
3.2 模糊控制系统原理	51
3.3 模糊控制器设计	60
3.4 模糊控制模型与稳定性分析	79
习题 3	86
第 4 章 基于神经网络的智能控制技术	88
4.1 神经网络的基本原理	88
4.2 常用的前向神经网络介绍	96
4.3 常用的反馈神经网络介绍	105
4.4 基于神经网络的系统辨识	111
4.5 基于神经网络的系统控制	115
习题 4	125

第5章 遗传算法及其在智能控制中的应用	126
5.1 遗传算法的基本概念	126
5.2 遗传算法理论基础	138
5.3 遗传算法的改进	144
5.4 遗传算法的计算机实现及应用	152
5.5 基于遗传算法的机器学习系统	161
习题5	168
第6章 专家控制系统	171
6.1 专家系统	171
6.2 专家控制系统	181
6.3 模糊专家系统	189
习题6	201
第7章 基于规则的仿人智能控制	202
7.1 仿人智能控制的基本原理	202
7.2 仿人智能开关控制器	208
7.3 仿人比例控制器	209
7.4 仿人智能积分控制	210
7.5 仿人智能控制应用举例	213
习题7	220
第8章 智能控制应用实例	221
8.1 复杂工业过程的智能控制	221
8.2 智能机器人控制	237
8.3 模糊控制技术应用	247
参考文献	261

第 1 章

概 论

1.1 智能控制的基本概念

1.1.1 智能控制的结构理论

智能控制(IC: Intelligent Control)是一门新兴的交叉前沿学科,具有非常广泛的应用领域。智能控制术语于1967年由 Leondes 和 Mendel 首先使用,1971年著名美籍华人科学家傅京孙(K. S. Fu)教授从发展学习控制的角度首次正式提出智能控制学科与建立智能控制理论的构想。

傅京孙把智能控制概括为自动控制(AC: Automation Control)和人工智能(AI: Artificial Intelligence)的交集,即

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

这种交叉关系可用图 1.1 形象地表示,它主要强调人工智能中“仿人”的概念与自动控制的结合。

萨里迪斯(Saridis)等人从机器智能的角度出发,对傅京孙的二元交集结构理论进行了扩展,引入运筹学(OR: Operations Research)并提出了三元交集结构,即

$$IC = AI \cap AC \cap OR \quad (1.2)$$

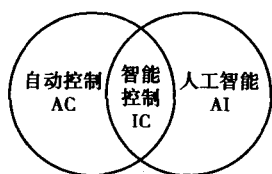


图 1.1 智能控制的二元结构

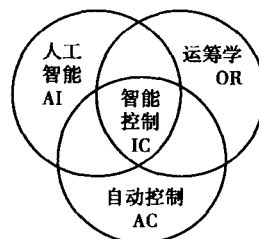


图 1.2 智能控制的三元结构

图 1.2 为三元交集结构示意图,三元交集除“智能”与控制之外,还强调了更高层次控制中的调度、规划、管理和优化的作用。

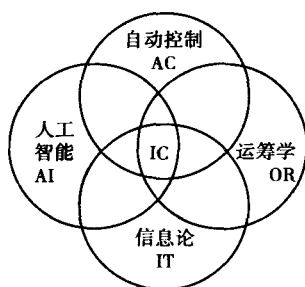


图 1.3 智能控制的四元论结构

我国学者蔡自兴教授于 1989 年提出把信息论 (IT: Information Theory) 包括进智能控制结构理论的四元论结构 (如图 1.3 所示), 即

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

提出四元论结构的 4 点理由是:

1) 信息论与控制论、系统论相互作用和相互靠拢, 构成缺一不可的“三论”观点是众所周知的, 既然控制论 (自动控制) 和系统论 (运筹学) 已成为智能控制的理论结构中的成员, 信息论也不应例外。

2) 许多智能控制系统是以知识和经验为基础的拟人控制系统, 而知识只是信息的一种形式, 人工智能或智能控制中都离不开信息论的参与作用。

3) 人体器官控制具有信息论的功能, 而智能控制力图模仿的恰是人体活动功能。

4) 智能控制以信息熵为测度, 建立智能控制系统的原则是要使总熵最小, 而熵函数是现代信息论的重要基础之一。

上述几种结构理论中, 三元论是较普遍接受的智能控制结构理论。而且几种关于智能控制结构理论的不同见解都存在着某些共识:

1) 智能控制是多种学科的交叉学科。

2) 智能控制以自动控制为基础, 并以人工智能和自动控制相结合为主要标志而形成自动控制发展新阶段。

3) 智能控制在发展过程中不断地吸收运筹学、信息论、系统论、计算机科学、模糊数学、心理学、生理学、仿生学、控制论等学科的思想、方法和新的研究成果, 已在发展和完善之中。

1.1.2 智能控制的定义

智能控制由于其新兴和正在发展中, 至今尚无统一的定义, 所以有多种描述形式。

从三元交集论的角度定义智能控制, 它是一种应用人工智能的理论与技术, 以及运筹学的优化方法, 并和控制理论方法与技术相结合, 在不确定的环境中, 仿效人的智能 (学习、推理等), 实现对系统控制的控制理论与方法。

从系统一般行为特性出发, J. S. Albus 认为, 智能控制是有知识的“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。该系统可以进行规划、产生有效的、有目的的行为, 在不确定的环境中, 达到规定的目标。

从认知过程出发, 智能控制是一种计算上有效的过程, 它在非完整的指标下, 通过最基本的操作, 即归纳 (Generalization)、集注 (Focusing Attention) 和组合搜索 (Combinatorial Search) 等, 把表达不完善、不确定的复杂系统引向规定的目标。

K. J. Astrom 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用机器模拟, 并用于控制系统的分析与设计中, 以期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。

对人造智能机器而言, 往往强调机器信息的加工处理, 强调语言方法、数学方法和多种算法的结合。因此, 可以定义智能控制为认知科学的研究成果和多种数学编程的控制技术的结合。它把施加于系统的各种算法和数学与语言方法融为一体。

从控制论的角度出发,智能控制是驱动智能机器自主地实现其目标的过程。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。

以上描述说明,智能控制具有认知和仿人的功能;能适应不确定性的环境;能自主处理信息以减少不确定性;能以可靠的方式进行规划、产生和执行有目的的行为,获取最优的控制。

1.2 智能控制的发展概况

1.2.1 智能控制的产生

人们将智能控制的产生归结为二大主因,一是自动控制理论发展之必然;二是人工智能的发展提供了机遇。

自从奈魁斯特(H. Nyquist)1932年发表了有关反馈放大器的稳定性论文至今,控制理论从形成到发展,已经历了近70年的历程,3个阶段。

第一阶段(20世纪40~50年代)是经典控制理论的成熟和发展阶段。它以调节原理为标志,主要研究对象是单变量常系数线性系统,主要解决单输入单输出控制问题,研究方法主要采用以传递函数、根轨迹、频率特性为基础的频域分析法。

到了20世纪60年代,由于计算机技术的成熟和发展,以及所需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,进入了控制理论发展的第二阶段(20世纪60~70年代)。现代控制理论以庞特里亚金(Pontryagin)的极大值原理,贝尔曼(Bellman)的动态规划,卡尔曼(Kalman)的滤波理论和能控性、能观性理论,李亚普诺夫(Lyapunov)的稳定性理论为基石,形成了以最优控制、系统辨识和最优估计、自适应控制等为代表的完整的理论体系。现代控制理论主要研究对象是多输入多输出系统,不仅可以研究线性系统,也可以研究有非线性或分布参数特性的系统。研究方法主要采用状态空间描述法,实现了从直接根据被控对象的物理特性研究向根据参数估计与系统辨识等理论研究的扩展。它的计算方法也从过去的手工计算向计算机处理的方向转变和发展。

经典控制理论和现代控制理论统称为传统控制理论,其共同特点是:各种理论与方法都建立在对象的数学模型基础上,对能够得到准确数学模型的对象能进行有效的控制。但是,随着科技的发展,需研究的对象和系统越来越复杂,基于数学模型描述和分析的传统控制理论已很难解决一些复杂系统的问题。例如:

1)传统控制通常认为控制对象和干扰模型是已知的或经过辨识可得的,对于不确定性的模型难以适用。

2)对于具有高度非线性的控制对象,传统控制理论中有限的非线性控制方法难以适用。

3)对于智能机器人系统、复杂工业过程控制系统、计算机集成制造系统、航天航空控制系统、社会经济管理系统、环保及能源系统等具有复杂的控制任务要求的系统,传统控制理论那种对系统输出量为定值(调节系统)或者为跟随期望的运动轨迹(跟踪系统)的单一控制任务要求方式已难以适用。

然而,在生产实践中,许多复杂的生产过程中难以实现的目标控制,往往可以通过熟练的技术人员或专家的操作获得满意的控制效果。为此,人们开始探索开辟控制理论的新途径,研

究如何不依赖确定性的数学模型,而有效地将熟练的人类经验知识和控制理论结合解决复杂系统控制问题,并孕育了新一代控制理论——智能控制的诞生和发展,进入了控制理论的第三发展阶段(20 世纪 80 年代至今)。控制理论发展的 3 个阶段的主要特征见表 1.1。

表 1.1 自动控制理论发展阶段特征

阶段	第一阶段	第二阶段	第三阶段
时期	20 世纪 40 ~ 50 年代	20 世纪 60 ~ 70 年代	20 世纪 80 年代至今
理论基础	经典控制理论	现代控制理论	智能控制理论
研究对象	单因素控制	多因素控制	多层次众多因素控制
分析方法	传递函数、频域法	状态方程、时域法	智能算子、多级控制
研究重点	反馈控制	最优、随机、自适应控制	大系统理论、智能控制
核心装置	自动调节器	电子数字计算机	智能机器系统
应用	单机自动化	机组自动化	综合自动化

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控制的需要,是控制理论发展之必然;另一方面,也是由于人工智能、现代计算机技术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。

人工智能产生于 20 世纪 50 年代,它是控制论、信息论、系统论、计算机科学、神经生理学、心理学、数学,以及哲学等多种学科相互渗透的结果,也是电子数字计算机的出现和广泛应用的结果。人工智能的基本思想是用机器模仿和实现人类的智能,实现脑力劳动自动化或部分自动化。早在 1965 年,傅京孙首先提出把基于符号操作和逻辑推理的启发式规则用于学习控制系统,Mendel 教授进一步在空间飞行器的学习控制中应用了人工智能技术。这是人工智能的符号主义、逻辑主义学派的观点首先与控制理论结合,实现智能控制的大胆尝试。随后的智能控制的提出和发展历程,是伴随着人工智能的发展而发展的,人工智能作为智能控制的基础和重要组成部分,它的每一个重要成就都对智能控制的发展起到积极的推动作用。

无论是智能控制产生和形成初期,启发式程序、专家系统等以符号主义学派为主流的人工智能思想的促进作用,而导致以学习控制、专家控制为标志的智能控制的体系结构和基本技术的形成;还是应用模糊集理论、神经网络等人工智能技术形成的智能控制理论和方法,它们都与人工智能的发展密切相关。可以说,人类已开始进入智能化的工业时代,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人工智能和智能控制的应运而生与快速发展则是历史的必然。

1.2.2 智能控制的发展

1971 年傅京孙提出智能控制概念,并在文章“学习控制系统和智能控制系统:人工智能与自动控制的交叉”中归纳了 3 种类型的智能控制系统:

1) 人作为控制器的控制系统。图 1.4 是操纵驾驶杆为目标的手动控制系统,这里,人作为控制器包含在闭环控制回路中。由于人具有识别、决策、控制等功能,因此对于不同的控制

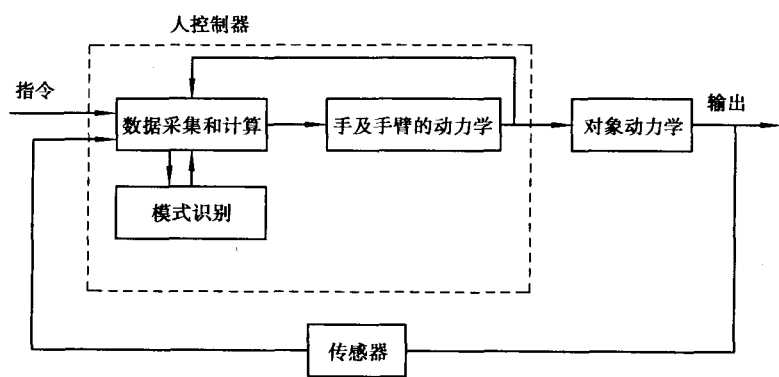


图 1.4 人作为控制器的控制系统

任务及不同的对象和环境情况,它具有自学习、自适应和自组织的功能,自动采用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。图 1.5 示意的是一个遥控操作系统,在这样的控制系统中,机器(主要是计算机)完成那些连续进行的需要快速计算的常规控制任务。人则主要完成任务分配、决策、监控等任务。

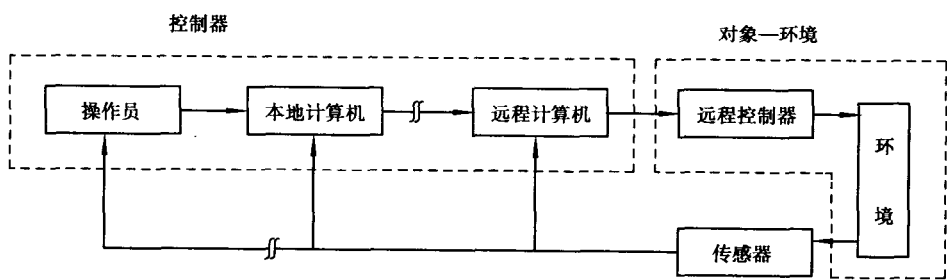


图 1.5 人机结合作为控制器的遥感操作系统

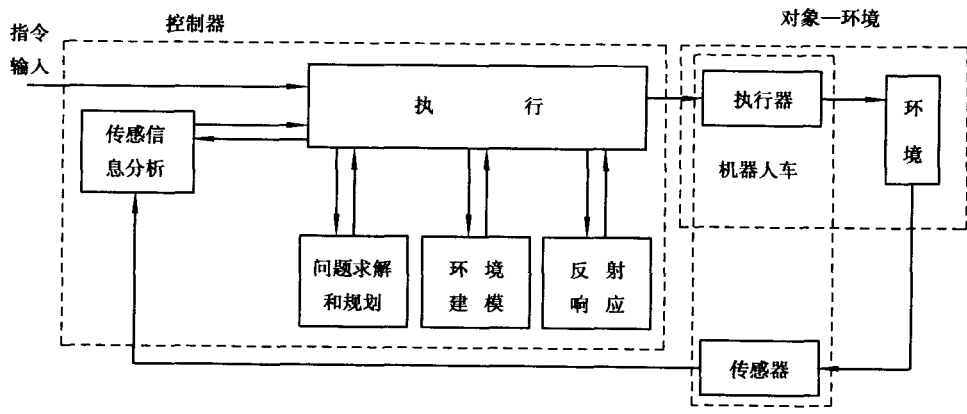


图 1.6 自主机器人系统

3) 无人参与的智能控制系统。图 1.6 示意的是一个自主机器人系统,这里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(反射响应)等任务。

以上列举的3种智能控制系统,特别是无人参与的智能控制系统,其被控过程是一个复杂和不确定环境,难以建立准确的数学模型和用传统控制方法进行控制。傅京孙提出的将人工智能技术中较少依赖模型的问题求解方法与传统控制相结合的思想,正是智能控制的基本内容。

萨里迪斯对智能控制的发展做出了重要贡献,在1977年出版了“随机系统的自组织控制”一书,1979年发表了综述文章“朝向智能控制的实现”。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更高阶段发展的过程。他首次提出分层递阶的智能控制结构,并在分层递阶智能控制的理论和实践方面做了大量的工作。他在理论上的一个重要贡献是定义了“熵”作为整个智能控制系统的性能度量,并对分层递阶智能控制结构由上而下的组织级、协调级和执行级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。他还对采用神经网络 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等问题进行了研究。

K. J. 奥斯特洛姆(Astrom)对智能控制的发展也做出了重要的贡献。他在1986年发表的“专家控制”著名文章中,提出了引入人工智能中的专家系统技术的另一种类型的智能控制系统。它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,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、自动切控、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的应用例子,有着广阔的应用前景。

以上述学者的智能控制理论、方法成果为代表,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,会上集中讨论了智能控制原理和智能控制系统的结构等问题。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,IEEE控制系统学会和计算机学会在美国费城联合召开了智能控制的第一次国际会议,来自美、欧、日、中以及其他国家的150余位代表出席了这次学术盛会。会议报告和交流论文以及专题讨论显示出智能控制技术的长足进展;同时也说明了由于许多新技术的出现,以及相关技术的发展,需要重新考虑其控制领域和与相近学科的关系等新问题。这次会议是个里程碑,它表明智能控制作为一门独立学科,正式成立并得到了国际上的广泛认可。

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并进行控制的。那么,模糊控制则是从人类智能控制活动的角度和基础上去考虑实施控制的,它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。1965年美国加州大学自动控制系统专家扎德(L. A. Zadeh)在《信息与控制》杂志上先后发表了“模糊集”(Fuzzy Sets)和“模糊集与系统”(Fuzzy Sets & System)等研究成果,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,并于1987年在仙台地铁线上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。

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。20世纪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。

遗传算法(GA: Genetic Algorithms)是人工智能的重要新分支,是基于达尔文进化论,在计算机上模拟生命进化机制而发展起来的一门新学科。GA由美国J. H. Holland博士在1975年提出,从80年代中期开始,随着人工智能的发展和计算机技术的进步逐步成熟,应用日渐增多。不仅应用于人工智能领域(如机器学习等),也开始在工业系统,如控制、机械、土木、电力工程中得到成功应用,显示出了诱人的前景,与此同时,GA也得到了国际学术界的普遍肯定。遗传算法根据适者生存,优胜劣汰等自然进化规则来进行搜索计算和问题求解。对许多用传统数学难以解决或明显失效的复杂问题,特别是优化问题,GA提供了一个行之有效的新途径,也为人工智能和智能控制的研究带来了新的生机。

智能控制作为一门新兴的理论技术,现在还处于发展初期。基于遗传算法的智能控制,基于Petro网理论和方法的智能控制,遗传算法、神经网络和模糊控制相结合的综合优化控制系统等新的智能控制理论和方法在不断涌现和发展之中。可以预见,随着系统理论、人工智能和计算机技术的发展,智能控制将会有更大的发展,并在实际中获得更加广泛的应用。

1.3 智能控制的研究对象和研究内容

1.3.1 智能控制的研究对象

智能控制是自动控制的最新发展阶段,主要用于解决传统控制技术与方法难以解决的控制问题。主要研究对象为:

- 1)具有复杂的任务要求、高度非线性、时变性、不确定性和不完全性等特征,一般无法获得精确数学模型,或根本无法建立数学模型的系统控制问题。
- 2)需要对环境和任务的变化具有快速应变能力,需要运用知识进行控制的复杂系统的控制问题。
- 3)采用传统控制方法时,必须提出并遵循一些苛刻的线性化假设等难以达到控制期望目

标的复杂系统的控制问题。

4) 采用传统控制方法时, 控制成本高、可靠性差或控制效果不理想的复杂系统的控制问题。

1.3.2 智能控制的主要研究内容

根据智能控制基本研究对象的开放性、复杂性、多层次、多时标和信息模式的多样性、模糊性、不确定性等特点, 其主要研究内容如下:

1) 智能控制基础理论的研究。主要为对智能控制认识论和方法论的研究, 探索人类的感知、判断、推理和决策的活动机理。

2) 智能控制基本方法的研究。研究各种智能控制方法, 如含有离散事件和动态连续时间子系统的交互反馈混合系统的分析与设计; 基于故障诊断的系统组态理论和容错控制; 基于实时信息学习的自动规划生成与修改方法; 基于模糊逻辑和神经网络以及软计算的智能控制方法; 实时控制的任务规划的集成和基于推理的系统优化方法; 在一定结构模式条件下, 系统的结构性质分析和稳定性分析方法等。

3) 智能控制系统研究。智能控制系统基本结构模式的分类, 多个层次上系统模型的结构表达; 系统的学习、自适应和自组织等概念的软分析和数学描述; 处理组合复杂性的数学和计算的框架结构; 在根据实验数据和机理模型所建立的动态系统中, 对不确定性的辨识、建模与控制等。

4) 智能控制系统应用研究。智能控制及其智能控制系统在工业过程控制、计算机集成系统、机器人、航天航空控制系统等领域的应用研究。

1.3.3 智能控制研究的数学工具

传统控制理论主要采用微分方程、状态方程, 以及各种数学变换等作为研究的数学工具, 它本质上是数值计算方法。而人工智能则主要采用符号处理、一阶谓词逻辑等作为研究的数学工具。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个方面的交叉和结合, 它主要有以下几种形式:

(1) 符号推理与数值计算的结合

专家控制是符号推理与数值计算的结合的典型例子, 它的上层是采用人工智能中的符号推理方法的专家系统, 下层是采用数值计算方法的传统控制系统。因此, 整个智能控制系统的数学研究工具是这两种方法的结合。

(2) 离散事件系统与连续时间系统分析的结合

计算机集成制造系统(CIMS)和智能机器人是典型的智能控制系统, 它们属于离散事件系统与连续时间系统分析结合的形式。例如在 CIMS 中, 可用离散事件系统理论来分析和设计上层任务的分配和调度、零件的加工和传输等; 而机床及机器人的控制等下层的控制, 则采用常规的连续时间系统分析方法。

(3) 介于两者之间的方法

1) 神经网络。它本质上是非线性的动力学系统, 但并不依赖于模型, 通过许多简单的关系来描述复杂的函数关系。

2) 模糊集理论。它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,采用数值的方法而非符号的方法进行处理。

神经网络和模糊集理论这两种方法,在某些方面如逻辑关系、不依赖于模型等类似于人工智能的方法;而其他方面,如连续取值和非线性动力学等特性,则类似于通常的数值方法,即传统控制理论的数学工具。因而它们是介于二者之间的数学工具,且同为进行智能控制研究的主要数学工具。

1.4 智能控制系统结构及其功能特点与类型

1.4.1 智能控制系统的基本结构

智能控制系统是实现某种控制任务的一种智能系统。这种系统具备一定的智能行为,对于一个问题的激励输入,能利用其智能行为产生合适的求解问题的响应。例如,对于智能控制系统,激励输入是任务要求及反馈的传感信息等,产生的响应则是合适的决策和控制作用。

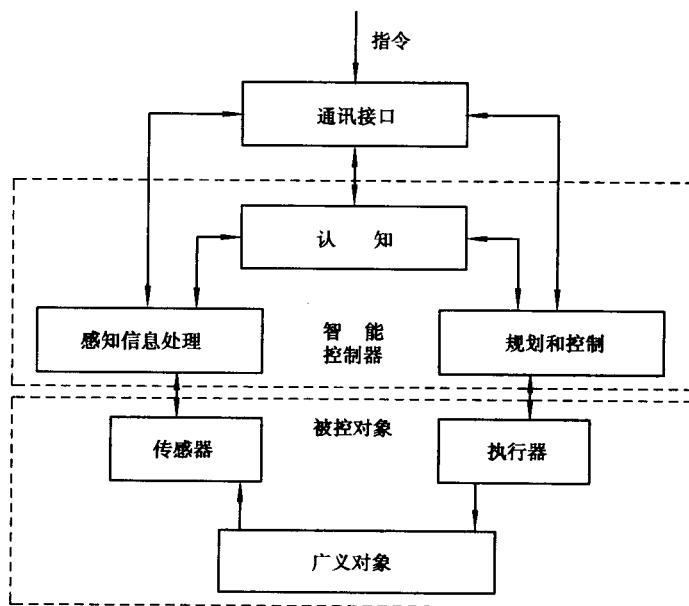


图 1.7 智能控制系统的基本结构

如图 1.7 所示为智能控制系统的基本结构。在该系统中,广义对象包括通常意义下的控制对象和所处的外部环境。感知信息处理部分将传感器递送的分级的和不完全的原始信息加以处理,并要在学习过程中不断加以辨识、整理和更新,以获得有用的信息。认知部分主要接收和储存知识、经验和数据,并对它们进行分析、推理,做出行动的决策并送至规划和控制部分。通讯接口除建立人-机之间的联系外,也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、反馈信息及经验知识,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,经执行部件作用于控制对象。

智能控制系统有多种类型,对于不同用途的智能控制系统,其结构形式和功能与图 1.7 系

统会有所差异。

1.4.2 智能控制系统的主要功能特点

智能控制系统有学习功能、适应功能、组织功能三大主要功能特点。

(1) 学习功能

G. N. 萨里迪斯对学习系统的定义为:一个系统,如果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的估计、分类、决策或控制,从而使系统的性能得到改善,那么就称该系统为学习系统。

智能控制系统是具有学习功能的系统,其学习功能可能有低有高,低层次的学习功能主要包括对控制对象参数的学习,高层次的学习则包括知识的更新。具有学习功能的控制系统也称为学习控制系统,它主要强调其具备学习功能的特点。为此,学习控制系统也可看成是智能控制系统的一种。

(2) 适应功能

智能控制系统的适应功能比传统的自适应控制中的适应功能具有更广泛的含义,它包括更高层次的适应性。智能控制系统中的智能行为实质上是一种从输入到输出之间的映射关系,是一种不依赖模型的自适应估计,因此具有很好的适应性能。当智能控制系统的输入不是已经学习过的经验时,由于它具有插补功能,从而可给出合适的输出。甚至当系统中某些部分出现故障时,系统也能够正常的工作。当系统具有更高程度的智能时,它还能自动进行故障诊断,甚至具备自修复的功能,从而体现了更强的适应性。

(3) 组织功能

智能控制系统的组织功能指的是对于复杂的任务和分散的传感信息等内容,智能控制系统具有自行组织和协调的功能。该组织功能也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范围内自行决策、主动地采取行动,而当出现多目标冲突时,在一定的限制下,控制器可有权自行裁决和处理。

一个理想的智能控制系统,除了这三大主要功能之外,还往往具有其他一些功能。例如:对各类故障进行自诊断、屏蔽和自恢复的容错性功能;具有对环境干扰和不确定性因素不敏感的鲁棒性功能;具有相当的在线实时响应能力的实时性功能;具有友好的人-机界面,能保证人-机通信、人-机互助和人-机协同工作的人-机协作性功能。

1.4.3 智能控制系统的类型

可以按系统的构成原理、系统的结构形式和系统实现功能等对智能控制系统进行分类。但是,由于智能控制有各种形式和各种不同的应用领域,又尚处于发展阶段,因此至今仍无统一的分类方法。若基于智能理论和技术已有的研究成果,以及当前的智能控制系统的研究现状,按其构成的原理进行分类,大致可分为以下几类:

(1) 仿人智能控制系统

仿人智能控制把起控制作用的人作为控制环节,对其特性进行研究和模仿,建立其数学模型,并构造相应的控制器,实现对控制对象的控制。仿人智能控制所要研究的主要目标是控制器本身,而不是被控对象,即系统直接对人的控制经验、技巧和各种直觉推理逻辑进行测辨、概括和总结,使控制器的结构和功能更好地从宏观上模拟控制专家的功能行为,从而实现在缺乏

精确数学模型的情况下,对控制对象进行有效的控制。

事实上,如 PID 比例、积分、微分控制等控制理论本身的研究,也都是从模仿人的控制行为开始的。傅京孙阐述智能控制的基本理论和系统时,首先提出的也是人作为控制器的系统。因此,从广义上说,各种智能控制方法研究的共同点,就是使工程控制系统具有某种“仿人”性质的智能,即研究人脑的微观和宏观的结构功能,并把它移植到工程控制系统中来。至今,仿人智能控制的研究已取得了很多成果,例如在分级递阶智能控制系统框架的基础上,进一步从宏观结构和行为功能上模仿人的运动控制系统的提出与实现等。

(2) 专家控制系统

专家系统技术在工程控制中的应用和二者的结合形成了专家控制系统(ECS: Expert Control System)。它是一种已广泛使用于故障诊断、各种工业过程控制和工业设计的智能控制系统。专家系统模拟人类技术操作者、工程师的经验和知识,并将其与控制器的算法结合,实现对工业过程的有效控制。由于专家的经验通常以规则形式表示,因此,有时也称专家控制系统为基于规则的控制。按照专家系统影响被控过程的不同形式,专家控制系统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。

1) 直接专家控制系统。在直接专家控制系统中,专家系统位于内环或执行级中,以及外环或监控级中。一般由专家系统根据测量到的过程信息和知识库中的规则,导出每一采样时刻的控制信号,驱动过程,实现控制作用。即专家系统直接给出控制信号,影响被控过程。

2) 间接专家控制系统。在间接专家控制系统中,专家系统位于外环或监控级中,专家系统通过层间界面指导内环或执行级的工作,专家系统只是通过控制器的结构或参数进行调整,间接地影响被控过程。例如,为防止控制回路中突变产生的影响,在自适应控制中可以设计有从结构中切除参数估计过程的专家系统;在 PID 控制器中可以有自调整参数的专家系统。在这些情况下,专家系统只是根据其各种输入信号和专家经验,完成切断参数估计过程或调整 PID 参数,而不直接在每个采样周期内都去确定控制动作。

专家控制系统在智能控制理论与方法的探索中是较早实现的一类智能控制系统,实用中多采用间接专家控制系统。由于专家控制系统不需要对象的精确数学模型,因此,它是解决不确定性系统的一种有效途径。

(3) 模糊控制系统

模糊控制(FC: Fuzzy Control)是模糊逻辑理论在控制领域中的应用,它是一种有效的智能控制技术。模糊控制核心为模糊推理,它同样是根据人的控制经验,模仿人的控制决策。与专家控制系统类似,其推理过程也是基于规则形式表示的人类经验,只是模糊控制和专家控制的理论基础不同,前者基于模糊集合理论,后者基于专家控制系统原理。因此,人们也常将专家控制系统和模糊控制均归类为基于规则的控制。

模糊控制单元一般由规则库、模糊化、模糊推理和清晰化 4 个功能模块组成,如图 1.8 示意。

模糊化模块实现对系统变量论域的模糊划分和对清晰输入值的模糊化处理。规则库用于存储系统的基于语言变量的控制规则和系统参数。模糊推理是一种从输入空间到输出空间的非线性映射关系,即如果已知“控制状态 A”,则通过模糊推理推论出“控制作用 B”。清晰化模块将推论出的“控制作用 B”转换为清晰化的输出值。

模糊控制的特点是:一方面,模糊控制提供了一种实现基于自然语言描述规则的控制规律