



研究生教材

智能控制 理论和方法

李人厚 秦世引 编著

西安交通大学出版社

研 究 生 教 材

智能控制理论和方法

李人厚 秦世引 编著

西安交通大学出版社

内容提要

本书系统地阐述了智能控制的基本概念、系统结构和分析方法。综合了智能控制领域国内外最新的技术成就,也包括作者在这方面的研究结果。

全书以智能控制系统的结构分析为主导,强调了神经网络、专家系统方法和模糊逻辑在智能控制中的应用。提出有关智能控制器的设计方法和智能控制系统稳定性、能控性、能观性、基于信息熵的整体优化等重要内容。并注意理论与实践的结合,列举了智能控制许多应用实例。

本书适合作自动控制、人工智能和计算机应用以及与此有关的大专院校硕士和博士研究生教材,也可作为有关专业技术人员和科研工作者的参考书。

(陕)新登字 007 号

智能控制理论和方法

李人厚 秦世引 编著

责任编辑 房立民

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码 710049)

西安向阳印刷厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:13.5 字数:339 千字

1994 年 11 月第 1 版 1994 年 11 月第 1 次印刷

印数:1—2000

ISBN7-5605-0691-7/TP·84 定价:18.00 元

研究生教材总序

研究生教育是为国家培养高层次人才的,它是我国高等教育的最高层次。研究生必须在本门学科中掌握坚实的基础理论和系统的专门知识,具有从事科学研究或担负专门技术工作的能力。这些要求具体体现在研究生的学位课程和学位论文中。

认真建设好研究生学位课程是搞好研究生教学的重要环节。为此,我们组织出版这套以公共课和一批新型学位课程为主的研究生教材,以满足当前研究生教学的需要。这套教材的作者都是多年从事教学、科研,具有丰富经验的教师。

这套教材首先着眼于研究生未来工作和高技术发展的需要,充分反映国内外最新学术动态,使研究学习之后能迅速接近当前科技发展的前沿,以适应“四化”建设的要求;其次,也注意到应有的基本理论和基本内容,以保持学位课程内容的相对稳定性和系统性,并具有足够的深广度。

这套研究生教材虽然从提出选题、拟定大纲、组织编写到编辑出版,都经过了认真的调查论证和细致的工作,但毕竟是第一次出版这样高层次的系列教材,水平和经验都感不足,缺点和错误在所难免。希望通过反复的教学实践,广泛听取校内外专家学者和使用者的意见,使其不断改进和完善。

西安交通大学研究生院
西安交通大学出版社

前 言

智能控制是当代科学技术中一个十分活跃和具有挑战性的领域。它融合了人工智能、自动控制、运筹学、通信、计算机、信息处理、认知心理学等多学科知识,是一门新兴的交叉学科,有极广阔的应用前景。

为了适应科技的迅速发展,作者从 1989 年开始为西安交通大学系统工程和自动控制专业的博士研究生讲授了专家控制方法和人工智能在控制中应用等课程,经过几年的教学实践,归纳和整理了讲稿,并结合作者近年来的研究成果,就形成这本《智能控制理论和方法》研究生教材。

全书比较系统地论述了智能控制的概念、理论和实现方法。共分三个部分。第一部分由本书的第一、二、三章组成。着重介绍学习和掌握智能控制所需的基础知识;智能控制系统的基本性质、结构模式以及分析的方法。第二部分由第四、五、六章组成。综述了实现智能控制系统的主要技术和方法,介绍了采用模糊逻辑、专家控制方法和神经网络所构成的各种智能控制器;阐述了智能控制系统的设计方法和关于智能控制系统可控性和稳定性等方面问题;提出了智能控制系统基于综合信息熵的整体优化概念。第七章是本书的第三部分。有重点地列举了智能控制系统的应用实例,包括在炼钢、催化裂化等过程控制中的应用和在机器人控制和智能决策支持系统中的应用。

本书的第六章和第二章、第一章中的一部分以及 § 7.3 节由秦世引副教授执笔,其它全部内容均由李人厚教授写成。张景副教

授为本书的第二章提供了部分内容。张朋柱、张平安、王矛、高峰、徐晓燕等博士生也为本书提供了许多素材。西安交大胡保生教授和西北工业大学陈新海教授对本书作了认真的评审,并提出了许多宝贵的意见。在此一并致谢。

由于本书涉及的面较广,很多理论性问题还有待于进一步探讨。因此难免存在不足或错误,敬希读者不吝赐教。

李人厚

1994年6月

目 录

前言

第一章 绪论

§ 1.1 控制科学发展的历史回顾	1
§ 1.2 智能控制的产生背景	3
§ 1.3 智能控制的基本概念和研究内容	6
1.3.1 智能控制的主要学术观点和理论方法述评	6
1.3.2 智能控制的基本概念	12
1.3.3 智能控制的主要研究内容	14
§ 1.4 智能控制的发展动态:现状和展望	15
思考题	16
参考文献	17

第二章 智能控制的基础:知识信息的处理

§ 2.1 知识的分类	21
§ 2.2 知识的表达	23
2.2.1 逻辑心理模型	24
2.2.2 定性物理模型	37
2.2.3 可视知识模型	45
2.2.4 神经网络知识模型	47
2.2.5 综合各种知识模型的混合型知识表达	50
§ 2.3 知识的获取	51
§ 2.4 推理机制	56
2.4.1 推理方法	57
2.4.2 推理控制策略	59
2.4.3 搜索策略	62
2.4.4 推理机的设计原则	67

§ 2.5 专家系统方法和原理概述	68
2.5.1 专家系统的若干问题	70
2.5.2 专家系统的开发与评估	74
思考题	75
参考文献	76
第三章 智能控制系统的结构体系	
§ 3.1 智能控制系统的特征与定义	80
§ 3.2 智能和智能控制系统的构成	82
3.2.1 智能系统的构成	82
3.2.2 智能控制系统的结构模式	88
§ 3.3 智能控制系统的分类	92
§ 3.4 分级智能控制系统结构和理论	94
3.4.1 智能控制的数学理论	94
3.4.2 组织级的分析理论	101
3.4.3 协调级的分析理论	107
3.4.4 执行层的近似最优和最优控制	111
§ 3.5 智能控制系统的信息结构理论	116
3.5.1 N 维信息理论	116
3.5.2 信息率划分定律	122
3.5.3 对递阶智能控制系统信息流分析	125
思考题	129
参考文献	131
第四章 基于规则的智能控制系统	
§ 4.1 模糊控制的发展和理论基础	134
4.1.1 模糊集合及其运算的基本概念	136
4.1.2 模糊逻辑和近似推理	139
§ 4.2 模糊控制器的结构与设计	149
4.2.1 模糊控制器的基本结构	149
4.2.2 模糊控制系统的设计问题	151

§ 4.3	系统的模糊辨识	165
§ 4.4	模糊控制系统的稳定性分析	177
§ 4.5	专家控制系统	182
4.5.1	实时控制专家系统的特点和要求	182
4.5.2	专家控制系统的结构	187
4.5.3	专家控制系统的类型	190
§ 4.6	直接专家控制系统	192
§ 4.7	间接专家控制系统	195
	习题与思考题	211
	参考文献	216
第五章 基于神经网络的智能控制系统		
§ 5.1	神经网络与控制	220
§ 5.2	神经网络的基本原理和结构	223
5.2.1	神经网络的基本单元	223
5.2.2	神经元的模型	224
5.2.3	神经元的连接方式	228
§ 5.3	几种典型神经网络的原理及算法	230
5.3.1	感知器和反传(BP)网络	230
5.3.2	BAM 和 Hopfield 网络	236
5.3.3	其它网络	245
§ 5.4	基于神经网络的智能控制	258
5.4.1	用神经网络建模	260
5.4.2	用神经网络的智能控制	268
§ 5.5	模糊神经网络及其在控制中的应用	281
§ 5.6	神经网络控制非线性动态系统的能控性 和稳定性	296
	习题与思考题	303
	参考文献	306
第六章 智能控制系统的结构性质与整体优化		
§ 6.1	智能控制系统的结构能控性和结构能观性	311

6.1.1 信息耦合关系的有向图表示法	311
6.1.2 结构能控性与结构能观性分析	318
§ 6.2 智能控制系统的最经济结构综合	325
§ 6.3 智能控制系统中的基本信息定律	329
§ 6.4 智能控制系统的稳定性分析	332
6.4.1 一般智能控制系统的稳定性分析	332
6.4.2 专家控制系统的稳定性分析	335
§ 6.5 智能控制系统的整体优化	341
6.5.1 问题的提法	341
6.5.2 优化的测度:广义综合信息熵.....	343
6.5.3 基于广义综合信息熵的整体优化	348
§ 6.6 智能控制系统的自主性	351
思考题.....	356
参考文献.....	358

第七章 智能控制的应用实例

§ 7.1 炼铁过程中高炉的专家控制系统	362
7.1.1 高炉监控专家系统	364
7.1.2 复杂大系统的自动化	370
§ 7.2 智能控制机械手和机器人	375
7.2.1 基于神经网络的机械手控制器	375
7.2.2 移动机器人控制	382
§ 7.3 炼油过程的智能优化控制	394
§ 7.4 智能决策支持系统	405
7.4.1 智能决策支持系统的决策支持过程	405
7.4.2 智能决策支持系统的系统结构	407
7.4.3 智能人机系统	409
7.4.4 智能化问题处理系统	412
参考文献.....	416

第一章 绪论

本章首先对控制科学发展的历史予以简要的回顾,对智能控制产生的背景进行了必要的分析。进而对智能控制的基本概念和主要研究内容进行了讨论。最后,对智能控制的发展动态作了述评,包括研究的现状和未来发展趋势的展望。

§ 1.1 控制科学发展的历史回顾

在科学技术发展史上,控制科学同其它技术科学一样,它的产生与发展主要由人类的生产发展需求和人类当时的技术知识水平所决定。从古亚历山大运用反馈控制来调节水流的水钟到现代太空探索和大规模复杂工业系统的综合自动化,控制科学在技术进步中都起着十分重要的作用。

J. Watt 的飞球调节器保证了蒸汽机的运行,在工业革命中发挥了巨大的作用。此后约经过了一百年,J. K. Maxwell 以飞球调节器系统为对象,完成了其稳定性分析的研究工作,从而揭开了关于控制系统分析和反馈原理等基础研究的序幕。1892 年, Lyapunov “论运动稳定性的一般问题”的博士论文的发表,建立了从概念到方法的关于稳定性理论的完整体系。当时,由于社会生产力发展的局限性,在 Lyapunov 的工作问世后近半个世纪内,除了为数不多的数学家和力学家之外,他的卓越贡献并未引起控制科学界的重视。直到第二次世界大战之后,特别是本世纪 50 年代后期,由于控制科学中研究非线性系统大范围稳定性问题的推动,才掀起了相当持久的 Lyapunov 热,使他的理论在广度和深度上有了很大的发展。今天, Lyapunov 理论和方法在控制科学界已家喻

户晓,在系统的稳定与镇定、二次型最优、模型参考自适应、大系统等众多领域得到了应用与发展。

20 年代以来,Black, Nyquist, Bode 关于反馈放大器的研究,奠定了自动控制理论的基础,并在此基础上逐步发展形成了经典控制理论。

从 40 年代中到 50 年代末,由于生产过程局部自动化的需要,经典控制理论又进一步得到了发展和完善。进入 60 年代以来,因为人类探索空间的需要及电子计算机的飞速发展和普及应用,以多变量控制为特征的现代控制理论得到了重大发展,它对科学技术的发展起了积极的推动作用。Apollo 宇宙飞船按最优轨线飞向月球的制导和登月艇的软着陆等都是现代控制理论的精彩应用成果。

自 70 年代开始,关于大系统理论及其应用的研究逐渐形成了一个专门领域,它综合了现代控制理论、图论、数学规划和决策方面的成果,不仅把复杂的工业系统作为研究的对象,并扩展到社会、政治经济系统和生态环境中。大系统理论涉及大系统的建模和模型简化,大系统的结构和信息,大系统的稳定性和镇定,以及大系统的递阶与分散控制。这些理论已成功地用于工农业生产、社会经济、资源开发、水源管理、交通运输、环境保护等方面。

在现代控制理论和大系统理论中具有重要意义的工作有 Kalman 的滤波理论和能控性、能观性理论; Pontriagin 的极大值原理; Bellman 的动态规划; Lyapunov 的稳定性理论等,它们同反馈,灵敏度及动态稳定性等概念相结合,形成了完整的理论体系,不仅推进了控制科学和技术的发展,而且对其它学科领域也产生了很大的影响。反馈控制和优化控制一直是控制理论中的两大中心主题。

但是,应当看到,无论是现代控制理论还是大系统理论,其分析、综合和设计都是建立在严格和精确的数学模型基础之上的。而在科学技术和生产力水平高速发展的今天,人们对大规模、复杂和

不确定性系统实行自动控制的要求不断提高。因此,传统的基于精确数学模型的控制理论的局限性日益明显。以工业过程为例,在实际的工业系统中,常常存在着许多不确定性、高度非线性、时变、时滞和分布式的传感器和激励器。受控对象动态特性的突变性、多时标以及复杂的信息模式等,使得建立精确的和简单实用的数学模型非常困难,甚至是不可能的。在某些情况下,即使经过了艰苦的工作,建立了数学模型,其结构也十分复杂,难以适应实时控制的要求。所以我们说,在最近 30 年来,虽然控制理论以科学史上少有的速度经历了现代控制理论和大系统理论两个重要的发展阶段,但是,它对精确数学模型的依赖性,使其应用受到很大的限制,从而面临着一场严峻的挑战。

§ 1.2 智能控制的产生背景

当今的控制理论与技术发展的重要标志可归结为两个方面。第一是作为基本研究对象的自动控制系统变得越来越复杂;其次是控制科学的发展同计算机技术的发展越来越紧密地联系在一起。就控制系统的复杂性而言主要包括两个方面的内容,其一是指系统的规模和结构;其二是指系统与问题的结构化程度和非结构化程度的比例。从单变量到多变量,从普通规模到大规模,从线性到非线性,从单层次到递阶结构等体现了系统的规模和结构的演进;从确定性控制到随机控制,到自适应、自组织控制、鲁棒控制、模糊控制,从良定(Well-defined)结构到半结构、非结构,从自学习控制到智能控制等等则体现了系统与问题的结构化与非结构化程度的变化。计算机的快速更新为控制系统的高级控制策略和算法的实施提供了有效的工具和手段。有人甚至说,在 20 年前,我们常常有好的想法而没有先进的计算机予以实现;在今天,我们有了以先进的计算机技术为支撑的智能型工具,却缺乏好的想法。

随着计算机科学、人工智能(AI)、微电子学等学科的迅速发

展,人们对人类自身的智能活动机理的认识进一步深化了。机器获取、表达和利用知识的条件也得到了不断地发展和改善。从工业自动化的角度,可将工业发展分为四个阶段。即以利用大量人力操作简单机器,以从事工业生产为特点的劳动密集型工业(Labor Intensive Industry);以单机自动化设备的数量和质量起决定性因素的设备密集型工业(Equipment Intensive Industry);以人类专家决策与计算机信息处理相结合为支柱,以大量的计算和数据处理为特征的信息密集型工业(Information Intensive Industry);以知识的拥有量和对知识的自动化处理技术(提高生产效率的决定性因素)为特征的知识密集型工业(Knowledge Intensive Industry)。在工业自动化的这四个阶段中,总的发展趋势是,由代替人的四肢和感官到代替人脑,以硬件为主转化为以软件为主,发展到管理和决策层的智能自动化。总而言之,在科学技术空前发达的今天,人类社会已从工业化社会逐步转入信息化社会,或称之为知识或智力社会,其基本特征就是大量生产知识。智能自动化和智能工程是这一社会阶段的重要标志之一。作为智能自动化的基础,智能控制也就应运而生。

智能控制的概念主要是针对被控对象及其环境和任务的不确定性而提出来的。计算机科学、人工智能、信息科学、思维科学、认知科学和人工神经网络的连接机制等方面的新进展和智能机器人的工程实践,从不同的角度为智能控制的诞生奠定了必要的理论和技术基础。

傅京孙(K. S. Fu)于1965年首先提出把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统,并于1971年提出了以控制理论和人工智能相结合为主体的智能控制的概念,对智能控制的形成做出了重要贡献。从此以后,许多控制理论界的学者和研究人员都投身于研究智能控制基本机理和理论方法的行列,并取得了重要进展。

自70年代中期以来,Saridis对智能控制问题进行了长期系统的研究,将智能控制的内容确定为人工智能(AI)、运筹学(OR)

和自动控制理论(AC)三门技术学科的交集。循着这样的思路,李祖枢提出了以人工智能(AI)、控制理论(CT)和计算机科学(CS)三者的交集为核心的智能控制框架体系;也有人提出了以人工智能(AI)、控制理论(CT)、运筹学(OR)和信息理论(IT)的四元交集和其它类似的多元交集为主体的智能控制结构体系。所有这些提法都是在一定的应用工作背景下,从不同的角度对智能控制问题的一种理论概括。

综观控制科学的发展历史,将各个发展阶段有代表性的理论工作同研究对象的复杂性(含不确定性)联系起来,可用图 1.1 给出直观的解释。

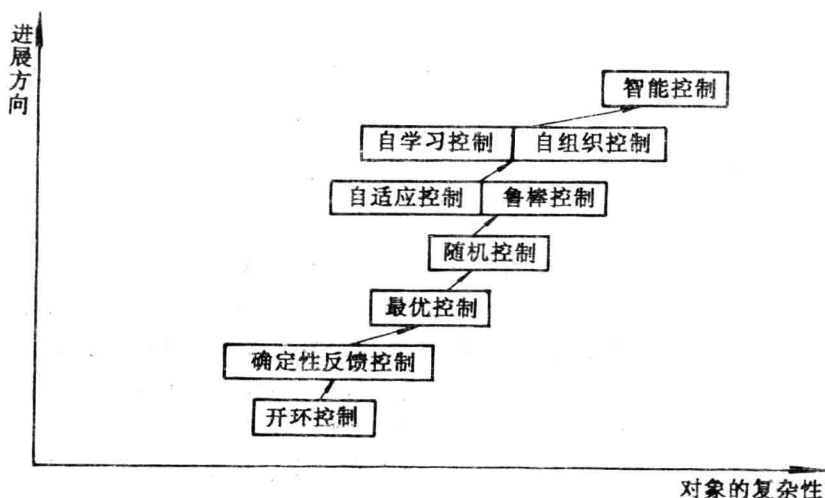


图 1.1 控制科学发展进程

从图 1.1 可以看出控制科学发展的基本进程。在目前的技术条件下,智能控制是控制科学发展的最前沿,代表着控制科学发展的新阶段。当然其他理论方法也在不断发展和完善之中。

§ 1.3 智能控制的基本概念和研究内容

1.3.1 智能控制的主要学术观点和理论方法述评

1. 傅京孙(K. S. Fu)的二元交集论

傅京孙通过对含有拟人控制器的控制系统和具有人机控制器的控制系统以及自主机器人诸方面的研究,以“智能控制”概念性地强调了系统的问题求解和决策能力。他把智能控制(IC)概括为自动控制(AC)和人工智能(AI)的交集。即:

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

可以用图 1.2 形象地表示这种交叉关系。

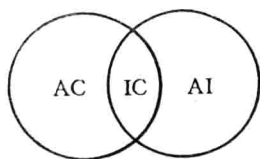


图 1.2 智能控制的二元交集论示意图

傅京孙是从自学习控制系统的研究入手,提出了智能控制的概念。他的工作对智能控制的形成和发展起过重大作用。在自学习控制系统中,如果采用人机结合的控制器,需要较高层次的智能决策,要求控制器具有拟人化的功能。例如,识别复杂的环境状况,为常规控制器设定子目标,纠正常规控制器的故障偏差等。而对于较低层次的信息处理和控制行为的制导,如数据采集、按预定程序进行在线计算等,则仍可由常规的控制器来执行。在设计这种智能控制系统时,要尽可能多地把设计者与操作者(与环境 and 指定任务有关)的知识(或智能)转移到控制器中去。实质上,傅京孙的主要观点是“仿人”,他提供了智能控制的一种研究方法和途径。虽然在这方面还未形成系统化的理论,但是傅京孙的研究工作在智能控

制的形成和发展过程中的历史作用是值得肯定的。

2. Saridis 的三元交集递阶智能控制

Saridis 以智能机器人的控制问题为主要背景,从研究机器智能入手,于 1977 年提出了智能控制的三元交集论和相应的递阶结构模式。

Saridis 认为,智能控制是驱动智能机器自动地达到其目标的过程。智能控制就是能够代替人完成危险的、远程的、冗长乏味的、高精度的工作。在效率和代替人或人的价值方面,智能机器是更有效的(more cost-effective)。智能机器应当能在结构化的或非结构化的,熟悉的或不熟悉的环境下,极少有人介入或自动地执行拟人化的任务。智能控制系统就是驱动自治的智能机器,在没有任何人的操作介入的条件下达到其目标的控制系统。柔性加工过程就是典型的交互式智能系统,而机器人则是典型的自治系统的例子。要达到此目标,系统必须具有以智能为特征的组织、规划和执行的功能。所以,智能控制的理论基础应为人工智能(AI)、运筹学(OR)和自动控制(AC)三个技术学科的交集。即:

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

这种交集关系可以用图 1.3 给出。

Saridis 的工作是对傅京孙的二元交集论的扩展。Saridis 指出,构成二元交集的二元相互支配,无助于智能控制有效而成功地应用。他认为必须把运筹学引入,使其成为三元集中的一个子集。这种三元交集论曾是 1985 年在美国召开的第一次 IEEE 智能控制学术讨论会上的重要议题之一。

在给出三元交集智能控制理论的同时,Saridis 根据适用于一般组织机构的“智能与精度逆向增降(即智能递增,精度递减)”的原理,提出了三级即组织级,协调级和执行级递阶智能控制系统的结构模式。我们将在第三章较详细地介绍 Saridis 所提出的递阶智能控制理论。

Saridis 的工作在智能控制的发展过程中占有重要地位。他主