



普通高等教育
电气工程与自动化类
“十一五”规划教材

INTELLIGENT CONTROL THEORIES
AND THEIR APPLICATIONS

智能控制理论及应用

王耀南 孙炜 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TP273/496

2008

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

智能控制理论及应用

王耀南 孙 炜 等编著

韦 巍 主审

机械工业出版社

本书面向智能控制技术的发展前沿, 基于近年来国内外智能控制技术的研究成果, 系统地介绍了智能控制技术的基础概念、理论及实现的方法与技术。全书共分 10 章, 内容包括模糊控制的数学基础和模糊控制器的设计方法、神经网络的基本理论和其在控制中的应用、模糊逻辑和神经网络的结合、专家控制技术、遗传算法优化控制、智能控制的应用实例以及智能控制的 MATLAB 仿真工具等。

本书综合了作者近年来的教学心得与科研成果, 取材新颖、内容丰富, 注重理论与实践相结合, 论述深入浅出, 力求使读者能够较快掌握和应用智能控制技术。本书可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教材和参考书, 也可供有关工程技术人员和科学研究工作者参考。

本书配有电子课件, 欢迎选用本书作教材的老师索取, 索取邮箱: wbj@mail.machineinfo.gov.cn。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能控制理论及应用/王耀南等编著. —北京: 机械工业出版社, 2008. 1

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材
ISBN 978-7-111-22922-3

I. 智… II. 王… 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 (2007) 第 182770 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: 王保家 责任校对: 张 媛

封面设计: 王洪流 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2008 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16 印张 · 392 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-22922-3

定价: 24.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

全国高等学校电气工程与自动化系列教材 编审委员会

主任委员 汪懋生 浙江大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王兆安 西安交通大学

王孝武 合肥工业大学

田作华 上海交通大学

刘 丁 西安理工大学

陈伯时 上海大学

郑大钟 清华大学

赵光宙 浙江大学

赵 曜 四川大学

韩雪清 机械工业出版社

委 员 (按姓氏笔画排序)

戈宝军 哈尔滨理工大学

王钦若 广东工业大学

吴 刚 中国科技大学

张纯江 燕山大学

张晓华 哈尔滨工业大学

邹积岩 大连理工大学

陈庆伟 南京理工大学

夏长亮 天津大学

萧蕴诗 同济大学

韩 力 重庆大学

熊 蕊 华中科技大学

方 敏 合肥工业大学

白保东 沈阳工业大学

张化光 东北大学

张 波 华南理工大学

杨 耕 清华大学

陈 冲 福州大学

范 瑜 北京交通大学

章 兢 湖南大学

程 明 东南大学

雷银照 北京航空航天大学

序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度，改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同类型、不同层次的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教育委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这类教材基于“加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

1. 适用性：结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法。注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

2. 示范性：力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

3. 创新性：在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

4. 权威性：本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富。组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有

力保障。

这套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

这套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

汪植生 陈万时 郑大钟

前 言

随着现代科学技术的迅速发展,生产系统的规模越来越大,导致了控制对象、控制器以及控制任务和目的的日益复杂化。这些大型复杂系统具有多种形式的复杂性。在整体结构上,表现为非线性、不确定性、无穷维、分布式及多层次等;在被处理的信息上,表现为信号的不确定性、随机性和不完全性,定性知识及定量计算的混合等。传统的以单纯数学解析结构为基础的控制理论方法,其局限性日益明显,已不适用于复杂系统的控制。建立新一代的控制理论方法,不完全以控制对象为研究主体,而是以控制器为研究主体,运用人工智能的逻辑推理、启发式知识、自学习等优势来解决复杂系统的控制问题,已成为各国控制学术界所共同关心的热门研究课题。智能控制就是在这种背景下提出和形成的。

智能控制技术是自动控制理论发展的高级阶段,是当今国内外自动化学科中一个十分活跃和具有挑战性的研究领域,又是一门新兴的交叉学科。它与人工智能、自动控制、运筹学、计算机科学、进化论、信息论、仿生学和认识心理学等有着密切的关系,是相关学科相互结合与渗透的产物,具有广阔的应用背景。目前,智能控制技术已用于工业、农业、国防、航空航天、通信、服务业等各种领域。

为了适应 21 世纪科学技术的高速发展,及时地在高等院校的教学中反映学科的前沿技术,培养更多的智能控制技术人才,作者基于近年来国内外研究人员从事智能控制技术研究成果,结合高等院校人才培养的特点,编写了本书。

本书注重深入浅出和理论联系实际,可以作为高等院校本科高年级学生以及研究生的入门级教材,也可以作为研究人员的参考书。

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,共分成 10 章。第 1 章综述了智能控制的发展过程、定义和特点,介绍了智能控制的基本形式,讨论了智能控制系统的现状与发展趋势。第 2 章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,最后针对模糊控制器存在的一些缺点,给出了几种常用的模糊控制改进方法。第 4 章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 章介绍了神经网络技术在自动控制中的应用,重点阐述了神经网络系统辨识技术、神经网络控制技术以及神经网络与其他控制技术的融合。第 6 章着重讨论神经网络与模糊系统的融合技术,论述了神经网络与模糊系统相结合的几种形式,并详细介绍了两种模糊神经网络的模型。第 7 章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 8 章对遗传算法的由来、基本操作、特点、理论基础进行了介绍,对遗传算法应用于优化问题的求解方法进行了阐述。在此基础上,给出了遗传算法在参数辨识和控制参数优化中的应用,并介绍了遗传算法和神经网络的结合。第 9 章给出了许多智能控制技术的应用实例,重点介绍了智能控制在电气传动、过程控制、电

力系统和机器人控制中的应用，深入地介绍了多种智能控制方法的具体设计方法。第10章主要介绍 MATLAB 中智能控制工具箱的使用，重点描述了模糊逻辑工具箱和神经网络工具箱。

在本教材的教学安排上，第1~8章为基础知识部分，深入浅出地阐述了智能控制各种方法的基本原理和方法，要求本科生必须掌握，而模糊控制和神经网络又是其中的重点内容。第9章为应用提高部分，十分详细深入地介绍了智能控制方法在电气传动、过程控制、电力系统和机器人控制中的应用，涉及的知识面较广，任课教师可以根据学生的专业特点和知识结构选择其中的部分内容进行讲授。第10章为辅助工具部分，为学生利用 MATLAB 中智能控制工具箱实现相关仿真实验提供了快速查询和检索的工具，该部分内容任课教师可以安排在实验环节进行教授。

本书的第1~3章由王耀南教授撰写，第4~6章由孙炜教授撰写，袁小芳博士编写了第7、8章，彭金柱博士编写了第9、10章。感谢主审浙江大学韦巍教授对本教材的审阅以及张辉、蔡玉连、孙程鹏、宁伟等研究生对书稿的精心校对。

本书是机械工业出版社联合中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教学委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会组织编写的“普通高等教育电气工程与自动化类‘十一五’规划教材”，得到了机械工业出版社的大力支持和资助。本书还得到了国家自然科学基金、国家863计划和中德国际合作项目等多方面的资助。本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取，索取邮箱：wbj@mail.machineinfo.gov.cn。

由于智能控制系统是一门新兴学科，很多理论与应用性问题还待进一步深入研究和发
展，加上作者学识有限，因而书中尚有不足之处，敬请读者和专家们批评指正。

作 者

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

书名	主 编
★电路基础	东南大学 黄学良
电路实验教程	燕山大学 毕卫红
工程电磁场基础及应用	山东大学 刘淑琴
数字电子技术	中国计量学院 王秀敏
电子技术实验	天津大学 王萍
★计算机软件技术基础	哈尔滨工程大学 李金
通信技术基础（非通信类）	重庆邮电大学 鲜继清
★微型计算机原理及应用	西安交通大学 张彦斌
计算机网络与通信	清华大学 张曾科
★自动控制理论	合肥工业大学 王孝武 方敏 葛锁良
★自动控制理论	西安理工大学 刘丁
★现代控制理论基础（第2版）	合肥工业大学 王孝武
现代控制理论	浙江大学 赵光宙
控制工程基础	浙江工业大学 王万良
信号分析与处理（第2版）	浙江大学 赵光宙
自动化概论	四川大学 赵曜
★电力电子技术（第5版）	西安交通大学 王兆安 刘进军
电力电子技术（少学时）	华南理工大学 张波
Power Electronics	吴斌
★电机及拖动基础（第4版）（上下册）	合肥工业大学 顾绳谷
电力拖动基础	四川大学 张代润
★电力拖动自动控制系统——运动控制系统（第4版）	上海大学 阮毅 陈伯时
电力拖动自动控制系统——运动控制系统（少学时）	上海海运大学 汤天浩
控制系统数字仿真与CAD（第2版）	哈尔滨工业大学 张晓华
★过程控制与自动化仪表（第2版）	西安理工大学 潘永湘

过程控制与自动化仪表	浙江大学	张宏建
过程控制系统	华东理工大学	俞金寿
传感器与检测技术	清华大学	赵勇
自动检测技术与系统设计	东南大学	周杏鹏
计算机控制技术	沈阳大学	范立南
现场总线技术及应用	哈尔滨工业大学	佟为明
电磁兼容原理及应用	华中科技大学	熊蕊
★电气绝缘技术基础（第4版）	西安交通大学	曹晓珑
★电机学	重庆大学	韩力
电力工程基础	河海大学	鞠平
★供电技术（第4版）	西安理工大学	余健明
智能控制理论及应用	湖南大学	王耀南 孙炜
智能电器	大连理工大学	邹积岩
建筑智能化系统	东北大学	吴成东
控制电机	山东大学	李光友
智能机器人引论	中国科学技术大学	关胜晓
机器人引论	清华大学	张涛
嵌入式系统原理与应用	青岛大学	范延滨
数字图像处理与应用基础	西安理工大学	朱虹

电网络理论	浙江大学	周庭阳
非线性电路理论	北京机械工业学院	刘小河
非线性系统理论	上海大学	康惠骏
最优控制理论与应用	西安交通大学	吴受章
系统建模理论与方法	东南大学	夏安邦
高等数字信号处理	海军工程技术大学	吴正国
高等电力电子技术	合肥工业大学	张兴
现代电机控制技术	沈阳工业大学	王成元

1. 本套教材全部配有免费电子课件，欢迎选用本套教材的老师索取，索取邮箱：wbj@mail.machineinfo.gov.cn

2. 书名前标“★”号的为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”

目 录

序

前言

第1章 绪论	1	3.2.6 模糊控制器的设计内容	40
1.1 智能控制的产生和发展	1	3.3 模糊控制的优缺点及改进方法	40
1.2 智能控制的定义和特点	3	3.3.1 模糊控制的优缺点	40
1.3 智能控制的几种主要形式	4	3.3.2 模糊比例控制	40
1.4 智能控制系统的研究方向和趋势	7	3.3.3 模糊—PI复合控制	40
1.5 小结	8	3.3.4 自校正模糊控制	41
第2章 模糊控制的数学基础	9	3.3.5 变结构模糊控制	46
2.1 概述	9	3.4 小结	46
2.2 模糊集合	10	第4章 神经网络的基本理论	47
2.2.1 普通集合	10	4.1 人工神经元模型	47
2.2.2 模糊集合	13	4.2 神经网络的定义和特点	48
2.3 λ 水平截集	16	4.3 感知器模型	48
2.3.1 λ 水平截集的定义	16	4.4 多层前向BP神经网络	49
2.3.2 λ 水平截集的性质	16	4.4.1 多层前向神经网络的结构	49
2.4 模糊关系	16	4.4.2 BP学习算法	51
2.4.1 普通关系	17	4.5 Hopfield神经网络	51
2.4.2 模糊关系	17	4.5.1 离散型Hopfield神经网络	52
2.4.3 模糊变换	20	4.5.2 连续型Hopfield神经网络	53
2.4.4 模糊决策	20	4.6 自组织神经网络	55
2.5 语言规则中蕴涵的模糊关系	21	4.7 小脑神经网络	56
2.5.1 语言变量	22	4.7.1 CMAC的原理	56
2.5.2 模糊蕴涵关系	23	4.7.2 CMAC学习的数学推导	57
2.6 模糊推理	26	4.7.3 CMAC的学习	58
2.6.1 单输入模糊推理	26	4.8 小结	59
2.6.2 多输入模糊推理	27	第5章 神经网络在控制中的应用	60
2.6.3 多输入多规则模糊推理	29	5.1 神经网络系统辨识	60
2.7 小结	30	5.1.1 神经网络系统辨识的原理	60
第3章 模糊控制器的设计方法	31	5.1.2 多层前向BP神经网络的系统 辨识	61
3.1 模糊控制器的工作原理	31	5.1.3 递归神经网络系统辨识	61
3.2 模糊控制器的结构和设计	32	5.2 神经网络控制	62
3.2.1 模糊化接口	33	5.2.1 神经网络直接反馈控制系统	62
3.2.2 规则库	36	5.2.2 神经网络逆控制	63
3.2.3 模糊推理	37	5.2.3 神经网络内模控制	63
3.2.4 清晰化接口	38	5.2.4 神经网络自适应控制	64
3.2.5 模糊查询表	39	5.2.5 神经网络学习控制	65
		5.2.6 神经网络预测控制	65

5.2.7 神经网络 PID 控制	66	8.5 小结	114
5.2.8 神经网络滑模控制	67	第 9 章 智能控制的应用实例	115
5.2.9 神经网络鲁棒控制	68	9.1 智能控制在电气传动中的应用	115
5.3 小结	69	9.1.1 基于模糊控制的交流伺服系统	115
第 6 章 模糊神经网络	70	9.1.2 基于小波神经网络定子电阻估 计器的模糊直接转矩控制	118
6.1 模糊控制与神经网络的结合	70	9.1.3 无速度传感器异步电动机矢量 控制系统的自适应模糊控制	132
6.2 模糊神经网络模型	72	9.1.4 基于递归模糊神经网络的异步 电动机无速度传感器矢量控制	137
6.2.1 模糊联想存储器	72	9.2 智能控制在过程控制中的应用	146
6.2.2 模糊推理神经网络	73	9.2.1 复杂工业系统的分布式递阶智 能控制	146
6.3 小结	78	9.2.2 模糊神经网络在炉温控制中的 应用	151
第 7 章 专家控制技术	79	9.2.3 一种基于专家模糊控制的磨削 加工质量控制系统的	156
7.1 专家系统概述	79	9.3 智能控制在电力系统中的应用	159
7.2 专家系统的知识表示方法	80	9.3.1 电力系统有功功率与频率的神 经网络自校正控制	159
7.2.1 产生式规则表示法	80	9.3.2 一种专家智能型电力系统稳定 器	162
7.2.2 状态空间表示法	81	9.3.3 基于模糊自整定 PI 控制的 SSSC 潮流控制器	165
7.2.3 框架表示法	81	9.3.4 基于神经网络的静止无功补偿 器自校正内模控制	170
7.2.4 “与或图”表示法	82	9.4 智能控制在机器人控制中的应用	175
7.2.5 黑板模型结构	83	9.4.1 基于模糊神经网络的机器人学 习控制	175
7.2.6 神经网络知识表示	84	9.4.2 模糊 CMAC 及其在机器人轨迹 跟踪控制中的应用	179
7.3 专家系统的自动推理机制	85	9.4.3 基于控制器输出误差方法的机 器人自适应模糊控制	184
7.3.1 宽度优先搜索	87	9.4.4 基于混合人工势场—遗传算法 的移动机器人路径规划	186
7.3.2 深度优先搜索	88	9.5 小结	193
7.3.3 不精确推理	89	第 10 章 MATLAB 中智能控制工具 箱	194
7.4 专家控制系统	89	10.1 MATLAB 简介	194
7.4.1 专家控制系统原理	89	10.2 MATLAB 模糊逻辑工具箱	197
7.4.2 直接专家控制	91	10.2.1 使用图形界面工具建立模糊推 理系统	197
7.4.3 间接专家控制	92		
7.5 小结	98		
第 8 章 遗传算法	99		
8.1 遗传算法基本原理	99		
8.1.1 遗传算法的由来	99		
8.1.2 遗传算法的基本操作	100		
8.1.3 遗传算法的特点	101		
8.1.4 遗传算法的理论基础	102		
8.1.5 用于优化问题的遗传算法	103		
8.2 基于遗传算法的参数辨识	106		
8.2.1 遗传算法辨识系统参数	107		
8.2.2 数字仿真	108		
8.3 基于遗传算法的控制参数优化	109		
8.4 基于遗传算法的神经网络学习方法	111		
8.4.1 遗传神经网络结构	112		
8.4.2 用遗传算法训练神经网络权值	113		

10.2.2	用命令行函数实现模糊逻辑系统	208	10.4	MATLAB 智能控制工具箱函数	232
10.3	MATLAB 神经网络工具箱	217	10.4.1	MATLAB 模糊逻辑工具箱函数	232
10.3.1	神经元模型	217	10.4.2	MATLAB 神经网络工具箱函数	234
10.3.2	网络结构	219	10.5	小结	236
10.3.3	数据结构	221	参考文献	237	
10.3.4	训练方式	223			
10.3.5	反向传播网络	226			

第 1 章 绪 论

智能控制是一门新兴的交叉前沿学科，是自动控制学科发展过程中一个崭新的阶段。目前智能控制的研究与应用已深入到众多的领域，例如航空航天、军事、工业、家电及服务业等。本章简要介绍智能控制的发展过程、定义和特点、主要形式以及发展趋势。

1.1 智能控制的产生和发展

20 世纪 20 年代，布莱克、奈奎斯特和博德在贝尔实验室的一系列工作中奠定了经典反馈控制理论基础。经典控制理论是对由微分方程和差分方程描述的动力学系统进行控制的理论和方法，研究的是单变量常系数线性系统，只适用于单输入单输出控制系统（SISO）。经典控制理论处理方法比较简单，极大地推动了当时的自动化技术的发展和普及，而且在当今许多工程领域和技术领域仍得到应用。但是随着科学技术和生产的迅速发展，对自动化的要求不断提高，以单纯数学解析结构为基础的控制理论，其局限性日益明显，尤其是对于一些大型、复杂、高维、非线性和不确定性严重的对象，其数学模型难以精确描述，用传统的控制理论无法对其进行有效的控制，所以人们转而寻求新的控制方法和理论。20 世纪 60 年代以后，产生了线性系统理论、最优控制理论、系统辨识、随机控制理论、自适应控制理论和鲁棒控制理论等现代控制理论。现代控制理论在深度和广度上都比经典控制理论进了一大步，主要表现在以下方面：

- 1) 控制对象结构的转变。控制对象由单输入单输出系统转变为多输入多输出系统。它可以处理复杂的工业生产过程中的优化和控制问题。
- 2) 分析方法的转变。系统信息的获得由借助传感器转变为借助状态模型。
- 3) 研究方法的转变。如积分变换向矩阵理论、几何方法的转变；由频率方法转向状态空间的研究。
- 4) 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理论。

现代控制理论虽然能解决比经典控制复杂得多的系统，但仍然不能满足当前技术发展的需求。随着航天技术、信息技术和制造工业技术的高速发展。要求控制理论能处理更加复杂的系统控制问题，从而为其提供更加有效的控制策略。大型生产过程、计算机集成制造系统（CIMS）、计算机网络、机器人系统和空间飞行的各类设施等，这些大型的复杂系统具有多种形式的复杂性。在整体结构上，表现为非线性，不确定性、无穷维、分布式及多层次等；在被处理的信息上，表现为信号的不确定性、随机性和不完全性，图像及符号信息的混合等；在计算上，表现为数学运算与逻辑运算的混合。这些都有待采用新型控制理论和方法来实现。正当人们为寻找新型的控制理论费尽心机时，人工智能由于得益于计算机科学技术的飞速发展，已经形成了一门学科。人工智能技术可以用计算机实现原来只有人才能做的具有智能的工作，如符号、语言和知识表达，状态特征的识别，定性和定量、精确与模糊的信息处理，分析推理，判断决策等。与此同时，人们发现在许多系统中，复杂性不仅仅表现在

高维性上,更多的则是表现在系统信息的模糊性、不确定性、偶然性和不完全性上,是否可以改变一下思路,不要完全以控制对象为研究主体,而是以控制器为研究主体呢?能否用人工智能的逻辑推理、启发式知识等解决复杂对象的控制问题呢?在这种思想的指引下,智能控制应运而生了。

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

(1) 萌芽期(1960~1970年)

20世纪60年代初,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)教授提出了模糊集合理论,为模糊控制奠定数学基础。同年,美国的Feigenbaum着手研制世界上第一个专家系统,普渡大学傅京孙(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,Leonides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性问题的能力。这标志着智能控制的思想已经萌芽。

(2) 形成期(1970~1980年)

20世纪70年代初,傅京孙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系统。

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E. H. Mamdani教授把模糊理论用于控制领域,把扎德教授提出的IF~THEN~型模糊规则用于模糊推理,再把这种推理用于蒸汽机的自动运转中,通过实验取得了良好的结果。

1977年,萨里迪斯(Saridis)提出了智能控制的三元结构定义,即把智能控制看做人工智能、自动控制和运筹学的交叉。

20世纪70年代后期起,把规则型模糊推理用于控制领域的研究颇为盛行。1979年,Mamdani又成功研制出自组织模糊控制器,使得模糊控制器具有了较高的智能。

(3) 发展期(1980年至今)

进入20世纪80年代,专家系统技术的逐渐成熟和神经网络研究的重大突破,使得智能控制的研究和应用领域逐步扩大。智能控制的研究得到了飞速的发展。

1982年,Fox等人完成了一个称为ISIS的加工车间调度的专家系统,该系统采用启发式技术与约束制导的方法,减少搜索空间,确定最佳调度方案,并在生产中获得应用。同年,Hopfield根据神经网络的非线性微分方程,引用能量函数(Lyapunov函数)的概念,使神经网络的平衡稳定状态有了明确的判据方法,并利用模拟电路的基本元件构造了人工神经网络的硬件原理模型,为实现硬件奠定了基础,使神经网络的研究取得突破性进展。随后,一大批学者和研究人员围绕着Hopfield提出的方法展开了进一步的工作,形成了20世纪80年代以来人工神经网络的研究热潮。

1983年,Saridis把智能控制用于机器人的控制。同年,美国西海岸AI(人工智能)风险企业发表了名为Reveal的模糊决策支援系统,在计算机的运行管理和饭店经营管理方面,

取得了许多成绩，得到好评。

1984 年，LISP Machine 公司设计了一个以过程控制系统设计为目标的实时专家系统 PI-CON。

1985 年，IEEE 在纽约召开了第一届全球智能控制学术讨论会，标志着智能控制作为一个学科分支正式被学术界接受。

1986 年 Rumelhart 和 McClelland 提出多层网络的“递推”（或称“反传”，back propagation）学习算法，简称 BP 算法，该算法从后向前修正各层之间的连接权重，可以求解感知机所不能解决的问题，从实践上证实了人工神经网络具有很强的运算能力。BP 算法是最为引人注目，应用最广的神经网络算法之一。

1987 年在费城举行的国际智能控制会议上，提出了智能控制是自动控制、人工智能、运筹学相结合或自动控制、人工智能、运筹学和信总论相结合的说法。此后，每年举行一次全球智能控制研讨会，形成了智能控制的研究热潮。

1990 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，其应用研究领域由工业过程控制扩展到军事、航天等高科技领域或日用家电领域。模糊技术的发展如日中天，各种模糊控制商品相继问世，如模糊洗衣机、模糊空调机等。另外，模糊控制在工业控制中的比重日益增加并取得了良好的控制效果。专家系统的研究方兴未艾，各种专家系统陆续在各个行业得到应用，如石油价格预测专家系统（OPFES），地震预报专家系统（ES-EP），勘测地下水专家系统（ESNCGW）以及各种故障诊断专家系统（PFDES）等，都取得了良好的控制效果。神经网络的发展也日新月异，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。

智能控制在我国国内也受到广泛重视，中国自动化学会于 1993 年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大会。我国的智能控制研究虽然起步较晚，但是发展十分迅速，目前我国智能控制研究水平已得到了国际学术界的认可。

1.2 智能控制的定义和特点

对于智能控制，目前尚没有统一的定义，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。

一般来说，一个智能控制系统要具有对环境的敏感、进行决策和控制能力的功能，随着智能程度的提高，根据其性能要求的不同，可以有各种人工智能的水平。最低级的智能控制要具有感知环境、作出决策和控制的能力。较高一级的智能控制可以具有辨识对象和事件、在客观世界模型中获取和表达知识、进行思考和计划未来行动的能力。更高级的智能控制应具有分析、组织数据的能力；将数据变换为机器理解的结构化信息的能力；在复杂环境中成功地选取一个优化行为，使系统能在设计时不太确切知道或未料到发生变化的情况下继续工作的能力。总之，智能控制系统具有在不确定环境中作出合适行为的能力，使系统增加完成任务要求的概率。因此，智能控制系统要有自适应和自学习的能力。

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) 应能为复杂系统（如非线性、快时变、多变量、强耦合、不确定性等）进行有效的全局控制，并具有较强的容错能力。
- 2) 定性决策和定量控制相结合的多模态组合控制。
- 3) 从系统的功能和整体优化的角度来分析和综合系统，以实现预定的目标，并应具有自组织能力。
- 4) 同时具有以知识表示的非数学广义模型和以数学表示的数学模型的混合控制过程，系统在信息处理上，既有数学运算，又有逻辑和知识推理。

1.3 智能控制的几种主要形式

常规的智能控制方法有模糊逻辑控制（FLC）、分级递阶的智能控制（HIC）、神经网络控制（NNC）、专家控制（EC）和仿人智能控制（AHC）等。著名的控制理论权威 Austrom 在其“智能控制的方向”一文中指出：模糊逻辑控制、神经网络与专家控制是典型的智能控制方法。

(1) 基于信息论的分级递阶智能控制

分级递阶智能控制系统是在研究早期学习控制系统的基础上，并从工程控制论的角度总结人工智能与自适应、自学习和自组织控制的关系之后而逐渐形成的，是智能控制的最早理论之一。

目前已经提出的分级递阶控制理论主要有两种：基于知识/解析的混合多层智能控制理论和“精度递增伴随智能递减”的分级递阶智能控制理论。后者又称为 Saridis 分级递阶智能控制理论。3级分级递阶智能控制系统（见图 1-1）是由 G. N. Saridis 于 1977 年提出的。该系统由组织级、协调级和执行级组成，遵循“精度递增伴随智能递减”的原则，并把熵（信息度量）的概念引入智能控制，采用熵来度量智能机器执行各指令的效果，用熵来进行最优决策。在这类多级智能控制系统中，智能主要体现在高的层次上。其中，组织级起主导作用，涉及知识的表示与处理，主要应用人工智能；协调级在组织级和执行级间起连接作用，涉及决策方式及其表示，采用人工智能及运筹学实现控制；执行级是底层，具有很高的控制精度，采用常规自动控制。

(2) 以模糊系统理论为基础的模糊逻辑控制

人类最初对事物的认识，都是定性的、模糊的和非精确的，因而将模糊信息引入智能控制具有现实的意义。模糊逻辑在控制领域的应用称为模糊控制。模糊控制是一种正在兴起的能够提高工业自动化能力的控制技术，是智能控制中一个十分活跃的研究领域。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。它与常规控制相比具有以下优点：

- 1) 模糊控制完全是在操作人员控制经验基础上实现对系统的控制，无需建立数学模

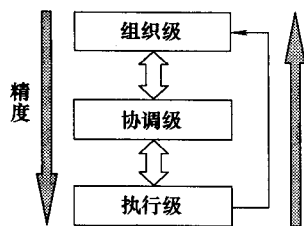


图 1-1 3级分级递阶智能控制系统