

光机电一体化丛书

智能控制工程 及其应用实例

罗均 谢少荣 蒋蓁 王琦 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

光机电一体化丛书

智能控制工程及其应用实例

罗 均 谢少荣 蒋 蓁 王 琦 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

智能控制工程及其应用实例/罗均等编著. —北京:
化学工业出版社, 2005.2
(光机电一体化丛书)
ISBN 7-5025-6644-9

I. 智… II. 罗… III. 智能控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 011164 号

光机电一体化丛书

智能控制工程及其应用实例

罗 均 谢少荣 蒋 蓁 王 琦 编著

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 徐卿华

责任校对: 李 军

封面设计: 于剑凝

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 290 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6644-9/TH·290

定 价: 26.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《光机电一体化丛书》编辑委员会

主 任 林 宋

副主任 王生则 赵丁选 罗 均

委 员 (排名不分先后)

林 宋	王生则	赵丁选	罗 均	胥信平	黎 放
胡于进	何 勇	谢少荣	高国富	崔桂芝	殷际英
方建军	郭瑜茹	徐盛林	文秀兰	周洪江	刘杰生
蒋 蓁	王 琦	杨野平	王东军	尚国清	叶天朝
戴 荣	刘 勇	裴晓黎			

序

光机电一体化是激光技术、微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术的相互交叉与融合,是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。它包括产品和技术两方面:光机电一体化产品是集光学、机械、微电子、自动控制和通信技术于一体的高科技产品,具有很高的功能和附加值;光机电一体化技术是指其技术原理和使光机电一体化产品得以实现、使用和发展的技术。

目前,国际上产业结构的调整使得各个行业不断融合和协调发展。作为光学、机械与电子相结合的复合产业,光机电一体化以其特有的技术带动性、融合性和普适性,受到了国内外科科技界、企业界和政府部门的特别关注,在提升传统产业的过程中,它以其高度的创新性、渗透性和增值性,成为未来制造业的支柱,被誉为 21 世纪最具魅力的朝阳产业。我国已经将发展光机电一体化技术列为重点高新技术发展项目。

随着光机电一体化技术的不断发展,各个行业的技术人员对其兴趣和需求也与日俱增。光机电一体化丛书第 1 批(共 9 册)的出版,受到了广大读者的欢迎。为满足读者的进一步需求,我们联合北方工业大学、上海交通大学、东华大学、华中科技大学、海军工程大学、北京机械工程学院、中国船舶,工业集团船舶系统工程部、上海大学、吉林大学、江汉大学、河南理工大学等学校的教师编写光机电一体化丛书第 2 批(共 21 册),拟在 2005 年初开始陆续出版发行,主要内容为光机电一体化技术在测试传感、驱动控制、激光加工、精密加工、机器人等方面的应用,以满足科研单位、企业和高等院校的科研及生产和教学的需求,为有关工程技术人员在开发光机电一体化产品时,提供有价值的参考素材。

丛书的基本特点是:①内容新颖,力求及时地反映光机电一体化技术在国内外的最新进展和作者的有关研究成果;②系统全面,丛书分门别类地归纳总结了光机电一体化技术的基本理论和在国民经济各个领域的应用实例,重点介绍了光机电一体化技术的工程应用方法和实现方法;③深入浅出,每本书重点突出,注重理论联系实际,既有一定的理论深度,又具有很强的实用性,力求满足不同层次读者的需求,适合工程技术人员阅读和高校机械类专业教学的需要。

由于本丛书涉及内容广泛,相关技术发展迅速,加之作者水平有限,时间紧促,书中错误和不妥之处在所难免,恳请专家、学者和读者不吝赐教。

《光机电一体化丛书》编辑委员会

2004 年 10 月于北京

前 言

控制理论经过两百多年的发展,在社会生活的各个方面发挥着巨大的作用,但是随着社会和科学技术的不断发展,传统的控制理论受到了很大的挑战,这些挑战主要体现在传统的控制理论在处理系统的复杂性、测量的不准确性和系统动力学的不确定性问题时显得有些无能为力。而在最近几十年才发展起来的智能控制以人工智能为基础,以模仿人类的思维方式为手段来对传统控制方法无法解决的问题进行控制,取得了意想不到的控制效果。

智能控制是在人工智能和自动控制等多学科基础上发展起来的交叉学科,本书旨在在国内外众多智能控制方面的重要文献基础上,用比较浅显的语言对智能控制的主要理论、方法和实现手段进行系统的总结和整理,使许多只具有人工智能和控制理论初步知识的人,通过书中浅显的语言和工程实例的引导,就可以比较快地掌握智能控制的理论和方法,尽早进入工程应用。

全书共分8章,第1章概述了传统控制的发展和面临的困难以及智能控制的主要内容;第2章介绍了应用于智能控制的知识工程基础知识;第3章介绍了专家系统和专家控制系统的结构和实现方法;第4章介绍了模糊控制的基本原理、设计方法和一些成熟的应用实例;第5章阐述了人工神经网络的基本理论及应用;第6章介绍了分级递阶智能控制理论及其应用;第7章介绍了进化算法和遗传算法的基本原理和应用;第8章详细介绍了一些工程实例。

本书第1章、第2章、第4章、第7章由罗均博士编写;第3章由谢少荣博士编写;第5章由蒋蓁教授编写;第6章由王琦副教授编写;第8章由王氢硕士编写;全书由罗均博士统稿。博士生高同耀、饶进军,硕士生乔开军、崔坤征、胡崧峰、王东红、邢兰兴等为本书做了大量的协助工作。

本书的编写得到了国家863计划、上海市科技启明星计划、国家自然科学基金和上海市教委青年基金的支持,同时,在本书的编写过程中,我们参阅和引用了许多国内外同行的学术论文和著作,编者在此表示深深的感谢。还要感谢化学工业出版社工业装备与信息工程出版中心的编辑进行的辛苦而细致的工作,使得本书能够顺利出版。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者来信批评指正和讨论(wqlj1228@263.net)。

编 者

2004年11月于上海

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 传统控制的发展及其困难	1
1.1.1 传统控制的产生及其发展	1
1.1.2 传统控制所面临的困难	2
1.2 人工智能的定义与发展	3
1.2.1 人工智能的定义	3
1.2.2 人工智能的产生与发展	3
1.3 智能控制的产生、发展及其特点	5
1.3.1 智能控制的产生与发展	5
1.3.2 智能控制的结构与特点	7
1.4 智能控制与传统控制	8
1.5 智能控制的主要研究内容	9
第 2 章 智能控制的知识工程基础	11
2.1 知识表示	11
2.1.1 一阶谓词逻辑法	11
2.1.2 产生式表示法	13
2.1.3 语义网络表示法	14
2.1.4 框架表示法	16
2.2 知识利用	18
2.2.1 搜索	19
2.2.2 推理	24
2.3 知识获取	26
2.3.1 机器学习的发展	26
2.3.2 机器学习的分类	27
2.3.3 机械式学习	28
2.3.4 归纳学习	28
2.3.5 指导学习	29
第 3 章 基于知识的专家系统及专家控制	31
3.1 专家系统与专家控制系统	31
3.2 专家系统的产生及其原理	31
3.2.1 专家系统的产生与发展	31
3.2.2 专家系统的原理	33
3.2.3 专家系统的分类	34

3.2.4	专家系统的基本结构	35
3.2.5	黑板模型	37
3.2.6	知识获取	38
3.3	专家系统的实现	41
3.3.1	专家系统的设计原则	41
3.3.2	专家系统建立的步骤	43
3.4	专家控制器的设计	44
3.4.1	专家控制系统的产生	44
3.4.2	专家控制器的组成	45
3.4.3	直接专家控制系统的设计	46
3.4.4	间接专家控制系统的设计	48
第4章	基于模糊推理的智能控制系统	51
4.1	模糊控制理论的产生和发展	51
4.2	模糊集合及其基本运算	52
4.2.1	普通集合	52
4.2.2	模糊集合	53
4.2.3	模糊关系	57
4.2.4	模糊推理	62
4.3	模糊控制原理	65
4.3.1	模糊控制系统的组成	66
4.3.2	确定模糊控制器的结构	68
4.3.3	输入模糊化	68
4.3.4	模糊推理决策	69
4.3.5	逆模糊化	70
4.4	自适应模糊控制器	71
4.4.1	性能测量	71
4.4.2	控制对象的增量模型	73
4.4.3	控制规则库的修正	73
4.4.4	尺度变换因子的选择	74
4.4.5	设计步骤	74
4.5	模糊控制软件开发工具	75
4.5.1	Motorola 模糊控制软件	77
4.5.2	美国 FIDE 模糊推理开发环境	78
4.5.3	德国模糊逻辑系统的软件工具 fuzzy TECH	79
4.6	模糊控制应用实例	80
4.6.1	电热炉温度控制的模糊控制	80
4.6.2	模糊控制全自动洗衣机	86
第5章	基于神经网络的智能控制	92
5.1	概述	92
5.1.1	人脑神经网络	92

5.1.2	人工神经网络原理	93
5.1.3	人工神经网络发展简史	96
5.2	人工神经网络的学习方法	98
5.2.1	人工神经网络的学习方式	98
5.2.2	人工神经网络的学习规则	98
5.3	人工神经网络的模型与算法	99
5.3.1	单层感知器	99
5.3.2	BP 学习算法	100
5.3.3	Hopfield 神经网络	103
5.3.4	脑模型控制器	108
5.4	基于神经网络的智能控制	110
5.4.1	内模控制	110
5.4.2	直接自校正控制	111
5.4.3	间接自校正控制	111
5.4.4	模型参考自适应控制	111
5.4.5	预测控制	112
5.4.6	神经网络与常规控制方法的结合	112
5.4.7	神经网络专家系统控制	113
5.4.8	神经网络模糊控制	113
5.5	神经网络控制实例	113
第 6 章	分级递阶智能控制	117
6.1	分级递阶智能控制的产生	117
6.2	一般结构原理	117
6.3	组织级	119
6.3.1	组织级的功能	119
6.3.2	组织级的功能的实现方法	119
6.4	协调级和执行级	121
6.4.1	协调级和执行级的结构	121
6.4.2	执行级控制性能的熵函数表示	122
6.5	分级递阶智能控制应用实例	123
6.5.1	PUMA 机械臂的分级递阶智能控制	123
6.5.2	PLC 的分级递阶智能控制	125
6.5.3	仿人智能控制的分级递阶结构	127
第 7 章	进化计算与遗传算法	130
7.1	进化计算	130
7.1.1	进化计算概述	130
7.1.2	进化策略	130
7.1.3	进化规划	131
7.1.4	遗传算法	131
7.1.5	进化策略、进化规划和遗传算法的比较	133

7.2 标准遗传算法的基本原理	134
7.2.1 编码方法	135
7.2.2 适应度函数	137
7.2.3 选择运算	139
7.2.4 交换	142
7.2.5 变异	144
7.3 模式与模式定理	145
7.3.1 模式	146
7.3.2 模式定理	146
7.4 遗传算法和模糊逻辑、神经网络的融合	148
7.4.1 遗传算法在模糊推理中的应用	148
7.4.2 遗传算法和神经网络的融合	150
第8章 智能控制工程的应用实例	151
8.1 专家控制系统在复杂工业过程中的应用	151
8.1.1 系统的结构与功能	152
8.1.2 系统的开发过程	152
8.1.3 知识的表示与知识库结构	153
8.1.4 传感器数据的预处理和不确定性的表示	154
8.2 模糊专家控制在啤酒发酵过程中的应用	155
8.2.1 啤酒发酵工艺	155
8.2.2 啤酒生产发酵工艺微机控制系统结构	157
8.2.3 模糊专家控制器设计	157
8.2.4 系统的实现及控制效果	159
8.3 神经网络在工业机器人高精度控制中的应用	160
8.3.1 基于模型的误差补偿方式	160
8.3.2 应用神经网络补偿误差方式	160
8.3.3 实验结果	161
8.4 遗传算法在机器人路径规划中的应用实例	163
8.4.1 基于栅格划分机器人工作空间的路径规划	163
8.4.2 基于C空间的非完整轮式移动机器人的路径规划	166
8.5 模糊-神经网络智能控制在粮食干燥过程中的应用实例	171
参考文献	180

第 1 章 绪 论

1.1 传统控制的发展及其困难

1.1.1 传统控制的产生及其发展

传统控制是经典控制理论和现代控制理论的统称。经典控制理论最主要的特点是：线性定常对象，单输入单输出，包括应用传递函数、频率特性、根轨迹等方法在内的频域设计和完成镇定任务等。现代控制理论从时域透彻研究了多输入多输出线性系统，其中特别重要的是刻画控制系统本质的基本理论的建立，如可控性、可观性、典范性、实现理论、分解理论等。经典控制理论和现代控制理论的主要特征是基于模型的控制。

传统控制的产生与发展和其他技术学科一样，主要是由人类的生产发展需求和人类当时的技术和知识水平所决定。1765 年，瓦特 (Jams Watt) 发明了蒸汽机，进而应用离心式飞锤调速器原理控制蒸汽机，在工业革命中发挥了巨大的作用。在这之后过了 100 年，J. K. Maxwell 以离心式飞锤调速器为对象，完成了其稳定性分析的研究工作，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》博士论文的发表，建立了从概念到方法的关于系统稳定性理论的完整体系。但直到第二次世界大战后，由于非线性系统大范围稳定性研究的推动，才使得 Lyapunov 稳定性理论得到了广泛的应用和发展。

随着通信及信息处理技术的迅速发展，电气工程师发展了以实验为基础的频率响应分析法，1932 年美国贝尔实验室工程师奈奎斯特 (H. Nyquist) 发表了《反馈放大器稳定性》的著名论文，给出了系统稳定性的奈奎斯特判据。后来，前苏联学者米哈依洛夫又把奈奎斯特判据推广到条件稳定和开环不稳定系统的一般情况。

二战期间，由于军事上的需要，雷达及火力控制系统有较大发展，频率法被推广到离散系统、随机过程和非线性系统中。美国著名的控制论创始人维纳 (N. Wiener) 系统地总结了前人的成果，1948 年发表了《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》著作，书中论述了控制理论的一般方法，推广了反馈的概念，为控制理论这门学科的产生奠定了基础。

随着生产的发展，控制技术也在不断地发展，尤其是计算机的更新换代，更加推动了控制理论不断地向前发展。控制理论的发展过程一般可分为三个阶段。

第一阶段为 20 世纪 40~60 年代，称为“经典控制理论”时期。经典控制理论主要是解决单输入单输出问题。主要采用传递函数、频率特性、根轨迹为基础的频域分析方法。所研究的系统多半是线性定常系统，对非线性系统，分析时采用的相平面法一般也不超过两个变量，古典控制理论能够较好地解决生产过程中的单输入单输出问题。该时期的主要代表人物有伯德 (H. W. Bode) 和伊文思 (W. R. Evans)。伯德于 1945 年提出了简便而实用的伯德图法。1948 年，伊文思提出了直观而又形象的根轨迹法。

第二阶段为 20 世纪 60~70 年代，称为“现代控制理论”时期。这个时期，由于计算机的飞速发展，推动了空间技术的发展。经典控制理论中的高阶常微分方程可转化为一阶微分

方程组，用以描述系统的动态过程，即所谓状态空间法。这种方法可以解决多输入多输出问题，系统既可以是线性的、定常的，也可以是非线性的、时变的。该时期的主要代表人物有庞特里亚金、贝尔曼（Bellman）及卡尔曼（R. E. Kalman）等人。庞特里亚金于1961年提出了极大值原理；贝尔曼在1957年提出了动态规则；1959年，卡尔曼和布西提出了关于线性滤波器和估计器的论文，创建了著名的卡尔曼滤波理论。

第三阶段为20世纪70年代末至今。70年代末，控制理论向着“大系统理论”和“智能控制理论”方向发展，“大系统理论”是控制理论在广度上的开拓，“智能控制理论”是控制理论在深度上的挖掘。“大系统理论”是用控制和信息的观点，研究各种大系统的结构方案、总体设计中的分解方法等问题的技术基础理论。而“智能控制理论”是模拟人类智能活动方面的控制与信息的规律，研制具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统。目前，人工智能中一个广为重视的问题就是用自然语言进行人机对话的研究，初步把有关智能控制方法应用到机器人而形成的系统就可以称为智能机器人。随着社会和生产的发展，控制理论也在不断发展和完善，随着自动控制技术和计算机技术的迅速发展，人们不仅从繁重的体力劳动中解放出来，也不断地从复杂的脑力劳动中“解脱”出来。

1.1.2 传统控制所面临的困难

以经典控制理论、现代控制理论为代表的传统控制理论曾经在一段时期成为解决现实生活中控制问题的有力工具，并在如今的生活中扮演着重要角色。但随着社会的发展，工程科学、技术对控制提出了越来越高的要求，传统控制理论逐渐遇到了难以解决的困难，主要体现在以下几个方面。

（1）对象的复杂性、高度非线性和不确定性导致系统辨识和建模的困难

控制系统的设计无论是采用以频域法传递函数为基础的经典控制理论方法，还是采用以时域法状态方程为基础的现代控制理论方法，都需要知道被控制对象的数学模型。对象数学模型建立得是否精确，直接影响着控制效果的好坏。然而，一般的工业生产过程，都具有非线性、时变性和不确定性，由于被控对象越来越复杂，其复杂性表现为高度的非线性，高噪声干扰、动态突变性以及分散的传感元件与执行元件，分层和分散的决策机构，多时间尺度，复杂的信息结构等，这些复杂性都难以用精确的数学模型（微分方程或差分方程）来描述。要获取适用的对象数学模型，既有足够的精确性，又不至于过分复杂，这更是相当困难甚至是不可能的。现有控制理论依靠纯数学解析的方法，对被控对象的复杂性、高度非线性和不确定性显得无能为力。

（2）线性系统控制理论对解决复杂的对象特性和复杂的控制任务要求的困难

经典控制理论及现代控制理论的任务在于寻求（反馈）控制，使得闭环系统稳定。这就是通称的“镇定问题”。工程技术不断地提出新的控制任务，它们远远不可能用镇定来概括。另外，随着科学技术的发展，人们的控制活动会越来越多，控制的任务也会越来越复杂和困难。面对这样复杂的对象特性和复杂的控制任务要求，传统的线性系统控制理论已经远远达不到要求。

（3）定性、逻辑、语言控制等控制手段面临着数学处理的困难

事实上，随着计算机在自动控制领域的广泛应用，工程师们在实际的控制工程中已经成功地采用了大量定性的、逻辑的以及语言描述的控制手段。然而就是这些在工程实际中成功运用的控制手段和经验，在传统控制理论中面临着极大的数学处理方面的困难。

正因为传统控制存在这么多的困难，因此，必须发展新的概念、理论与方法才能和社会

生产的快速发展相适应。智能控制在这样的背景下应运而生了。智能控制的基础是人工智能。为了更好地理解和学习智能控制，下面将介绍人工智能的定义与发展概况。

1.2 人工智能的定义与发展

1.2.1 人工智能的定义

人类的很多活动，如工程设计、建筑、解题、下棋、猜谜、讨论、竞技、编制计划和编程，甚至驾机、驾车、骑车等，都需要智能。如果机器能够执行这种任务，就可以认为机器已具有某种性质的“人工智能”。那么什么是人工智能呢？人工智能也像许多新兴学科一样，至今尚无统一的定义。下面举出几位著名的人工智能科学家分别在不同的年代对人工智能给出的定义。

1978年 Bellman 的定义：“人工智能是那些与人的思维、决策、问题求解和学习等有关活动的自动化”。

1978年 P. Winston 的定义：“人工智能是研究使计算机更灵活有用，了解使智能实现成为可能的原理，因此，人工智能研究结果不仅是使计算机能模拟智能，而且是了解如何帮助人们变得更有智能”。

1981年 A. Barr 和 E. Feigenbum 的定义：“人工智能是计算机科学的一个分支，它关心的是设计智能计算机系统，该系统具有与人的行为相联系的智能特征，如了解语言、学习、推理、问题求解等”。

1983年 Elaine Rich 的定义：“人工智能是研究怎样让电脑模拟人脑从事推理、规划、设计、思考、学习等思维活动，解决至今认为需要由专家才能处理的复杂问题”。

1985年 Haugeland 的定义：“人工智能是一种使计算机能够思维、使机器具有智力的激动人心的新尝试”。

1987年 Michael R. Genesereth 和 Nils J. Nilsson 的定义：“人工智能是研究智能行为的科学，它的最终目的是建立关于自然智能实体行为的理论和指导创造具有智能行为的人工制品”。

1990年 Kurzweil 的定义：“人工智能是一种能够执行需要人的智能的创造性机器的技术”。

1990年 Schalkoff 的定义：“人工智能是一门通过计算过程力图理解和模仿智能行为的学科”。

1991年 Rick 和 Knight 的定义：“人工智能研究如何通过使计算机做事而让人过得更好”。

1993 Luger 和 Stubblefield 的定义：“人工智能是计算机科学中与智能行为的自动化有关的一个分支”。

以上是人工智能的一些比较权威的定义。人工智能似乎还有一个比较模糊的定义，那就是“如果某个问题在计算机上没有解决，那么这个问题就是人工智能问题”，因为一旦解决了某个问题，也就有了解决算法，因而也就不那么“智能”了。从这个意义上讲，人工智能永远是一个深奥而无止境的追求目标。

1.2.2 人工智能的产生与发展

自 1956 年由麦卡锡等美国年轻的学者正式提出“人工智能”这门新兴的学科以来，它的发展经历了比较曲折的过程。不同文献对人工智能发展阶段的划分有不同的方法，本书将人工

智能发展阶段划分为形成期、成长期、快速发展期和稳步增长期四个阶段（高济，2002）。

（1）形成期

1956年夏季，一群从事数学、心理学、信息论、计算机和神经学研究的年轻美国学者，包括麻省理工学院的麦卡锡（McCarthy）、明斯基（Minsky）、索罗门夫（R. Solomonoff）与塞尔夫里奇（O. Selfridge），贝尔实验室的香侬（Shannon），IBM的朗彻斯特（Lochester）、莫尔（More）与塞缪尔（Samuel），卡内基-梅隆大学的纽厄尔（Newell）和西蒙（Simon）等十人共同发起，在美国的达特茅斯（Dartmouth）大学举办的一次长达两个月的研讨会，认真而热烈地讨论了用机器模拟人类智能的问题。会上首次使用了人工智能这一术语，标志着人工智能学科的正式诞生。

在形成期的主要成果如下。

① 1957年 A. Newell、J. Shaw 和 H. Simon 等人的心理学小组编制出一个称为逻辑理论机的数学证明程序，证明了“数学原理”中的 38 个定理；1958 年美籍华人数理学家王浩在计算机上仅用了 5min 就证明了“数学原理”中的有关命题演算的全部 220 条定理。

② 1956 年 Samuel 研究的具有自学习、自组织、自适应能力的西洋跳棋程序是 IBM 小组有影响的工作，这个程序可以像一个优秀棋手那样，向前看几步来下棋。它还能学习棋谱，在分析大约 175000 幅不同棋局后，可猜测出书上所有推荐的走步，准确度达 48%，这是机器模拟人类学习过程卓有成就的探索。1959 年这个程序曾战胜设计者本人，1962 年还击败了美国一个州的跳棋大师。

③ 1959 年 McCarthy 发明的表（符号）处理语言 LISP，成为人工智能程序设计的主要语言，至今仍被广泛采用。

④ 1960 年 A. Newell、J. Shaw 和 H. Simon 编制了能解十种类型不同课题的通用问题求解程序 GPS（General Problem Solving）。另外他们还发明了编程的表处理技术和 NSS 国际象棋机。和这些工作有联系的 Newell 关于自适应象棋机的论文和 Simon 关于问题求解和决策过程中合理选择和环境影响的行为理论的论文，也是当时信息处理研究方面的巨大成就。

此外，1958 年 N. Chomsky 的文法体系，1958 年 Selfridge 等人的模式识别系统程序等，都对人工智能的研究产生有益的影响。

（2）成长期

20 世纪 60 年代以来，人工智能的研究活动越来越受到重视。1969 年召开了第一届国际人工智能联合会议（International Joint Conference on Artificial Intelligence），它标志着人工智能这门新兴学科得到了世界范围的公认。为了揭示智能的有关原理，研究者们相继对问题求解、博弈、定理证明、程序设计、机器视觉、自然语言理解等领域的课题进行了深入的研究。这一时期中某些课题曾出现一些较有代表性的工作。

1965 年 J. A. Robinson 提出了归结（消解）原理，推动了自动定理证明这一课题的发展。20 世纪 70 年代初，T. Winograd、R. C. Schank 和 R. F. Simmon 等人在自然语言理解方面做了许多发展工作，较重要的成就是 Winograd 提出的积木世界中理解自然语言的程序。关于知识表示技术有 C. Green（1966 年）的一阶谓词演算语句，M. R. Quillian（1966 年）的语义记忆的网络结构，R. F. Simmon（1973 年）等人的语义网结构，R. C. Schank（1972 年）的概念网结构，M. Minsky（1974 年）的框架系统的分层组织结构等。关于专家系统方面，被誉为“专家系统和知识工程之父”的费根鲍姆（Feigenbaum）所领导的研究小组于 1968 年研究成功第一个专家系统 DENDRAL，用于质谱仪分析有机化合物的分子结构。

1972~1976 年, 费根鲍姆小组又开发成功 MYCIN 医疗专家系统, 用于抗生素药物治疗。此后, 许多著名的专家系统, 如 PROSPECTOR 地质勘探专家系统、CASNET 青光眼诊断治疗专家系统、RI 计算机结构设计专家系统、MACSYMA 符号积分与定理证明专家系统、ELAS 钻井数据分析专家系统和 ACE 电话电缆维护专家系统等被相继开发, 为工矿数据分析处理、医疗诊断、计算机设计、符号运算和定理证明等提供了强有力的工具。1977 年, 费根鲍姆进一步提出了知识工程 (knowledge engineering) 的概念。

(3) 快速发展期

20 世纪 80 年代初被卡内基-梅隆大学的研究组称作为 AI 研究的淘金热。专家系统的初步成功和日本于 1979 年宣布的第五代计算机研究计划起到了决定性的推动作用。美国、西欧和英国都拟定了庞大的投资计划。在美国, DARPA (美国国防部先进研究计划署) 提出新一代计算系统的 10 年研究计划 (1983~1992 年), 头五年就投资 6 亿美元, 直接用于 AI 项目的为 1 亿美元; 西欧提出 ESPRIT 计划, 拨款 13.3 亿美元, 直接用于 AI 的为 1 亿美元; 英国投资 5.25 亿美元, 直接用于 AI 的为 5000 万美元。相比之下, 日本尽管提出了第五代计算机计划, 却只投资了 3000 万美元。20 世纪 80 年代初, AI 被视为具有很高的经济价值, 因而风险性投资骤然剧增。例如, 美国有 40 家小公司在 20 世纪 80 年代初的 3 年内, 居然投资了 1 亿美元去发展商品化的 AI 产品。可以说, 20 世纪 80 年代初是 AI 事业在全球得到大发展的时期。但由于人工智能技术的不成熟性以及 AI 经济效益的期望值太高, 结果不免令人失望; 更糟糕的是大部分草率上马的专家系统项目均未达实用化程度。进而导致了一部分人对 AI 前景持悲观态度。

(4) 稳步增长期

尽管 20 世纪 80 年代中期 AI 研究的淘金热跌到谷底, 但大部分 AI 研究者都还保持着清醒的头脑。一些老资格的学者早就呼吁不要过于渲染 AI 的威力, 应多做些脚踏实地的工作。甚至在这个淘金热来到时就已预言其很快就会降温。也正是在这批人的领导下, 大量扎实的研究工作接连不断地进行, 从而使 AI 技术和方法论的发展始终保持了较高的速度。顺便提一下, 20 世纪 80 年代中期的降温并不意味着 AI 研究停滞不前或遭受重大挫折, 因为过高的期望未达到是预料中的事, 不能认为是受到挫折。自那以来, AI 研究进入稳健的线性增长时期, 而人工智能技术的实用化进程也步入成熟时期。

我国的人工智能研究起步较晚, 1978 年才开始进行人工智能课题的研究, 主要在定理证明、汉语自然语言理解、机器人及专家系统方面设立课题, 并取得了一些初步成果。1981 年起, 相继成立了中国人工智能学会 (CAAI)、全国高校人工智能研究会、中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会、中国自动化学会模式识别与机器智能专业委员会、中国软件行业协会人工智能协会、中国智能机器人专业委员会、中国计算机视觉与智能控制专业委员会以及中国智能自动化专业委员会等学术团体。1989 年首次召开的中国人工智能联合会议 (CJCAI) 至今已召开 7 次。目前, 我国已有数以万计的科技人员和大学师生从事不同层次的人工智能研究与学习, 人工智能研究已在我国深入开展, 它必将为促进其他学科的发展和我国的现代化建设做出新的重大贡献。

1.3 智能控制的产生、发展及其特点

1.3.1 智能控制的产生与发展

人工智能的发展促进了传统控制向智能控制的发展。遗憾的是, 在相当长的时间内, 很

少有人提到控制理论与人工智能的联系。直到 20 世纪 60 年代中期,控制理论与人工智能才开始交接。1965 年,著名的美籍华裔科学家傅京逊教授首先把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统,然后,他又于 1971 年论述了人工智能与控制理论的交接关系。由于傅京逊教授的重要贡献,他已成为国际公认的智能控制的先行者和奠基人。

1965 年,扎德(Zadeh)发表了著名论文“模糊集合”(fuzzy sets),开辟了模糊控制的新领域。此后,在模糊控制的理论探索和实际应用两个方面都进行了大量研究,并取得一批成果。

1967 年,利昂兹(Leondes)等人首次正式使用“智能控制”一词。这一术语的出现要比“人工智能”晚 11 年,比“机器人”晚 47 年。初期的智能控制系统采用一些比较初级的智能方法,而且发展速度十分缓慢。

萨里迪斯教授对智能控制系统的分类做出了贡献。他把智能控制发展道路上的最远点标记为人工智能。他认为,人工智能能够提供最高层的控制结构,进行最高层的决策。萨里迪斯教授和他的研究小组建立的智能机器理论采用精度随智能降低而提高原理(IPDI)和三级递阶结构,即组织级、协调级和执行级。

阿尔布斯(Albus)等开发出一个分层控制理论,它能够表示学习,并提供复杂情况下学习的反射响应。此外,他还提出了问题求解和规划功能,这些功能通常与人工智能领域内的最高层智能作用有关,并含有用于纠正中间控制层次错误的专家系统规则。

进入 20 世纪 80 年代以来,奥斯特洛姆(Astrom)、迪席尔瓦(de Silva)、周其鉴、蔡自兴、霍门迪梅洛(Homen de Mello)和桑德森(Sanderson)等人分别提出和发展了专家控制、基于知识的控制、仿人控制、专家规划和分级规划等理论。由于微机的迅速发展以及人工智能的重要领域——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。例如,1982 年 Fox 等人实现加工车间调度专家系统 ISIS;1983 年 Saridis 把智能控制用于机器人系统;1984 年 LISP 公司研制成功用于分布式的实时过程控制专家系统 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。1987 年 4 月,美国 Foxboro 公司公布了新二代的 IA 系列智能自动控制系统。这种系统体现了传感器技术、自动控制技术、计算机技术和过程知识在生产自动化应用方面的综合先进水平。它能够为用户提供安全可靠的最合适的过程控制系统,这就标志着智能控制系统已由研制、开发阶段转向应用阶段。

应该特别指出,20 世纪 80 年代中后期,由于神经网络的研究获得了重要进展,于是这一领域吸引了众多学科的科学家、学者。如今在控制、计算机、神经生理学等学科的密切配合下,在“智能控制论”的旗帜下,又在寻求新的合作,神经网络理论和应用研究为智能控制的研究起到了重要的促进作用。

进入 20 世纪 90 年代以来,智能控制的研究势头异常迅猛,1992 年 4 月,美国国家自然科学基金委和美国电力研究院联合发出《智能控制》研究项目倡议书;1993 年 5 月美国 IEEE 控制系统学会智能控制专业委员会成立专家小组,专门探讨智能控制领域“智能控制”的含义;1994 年 6 月在美国奥兰多召开了 94IEEE 全球计算智能大会,将模糊系统、神经网络、进化计算三方面内容综合在一起召开,引起国际学术界的广泛关注,因为这三个新学科已成为研究智能控制的重要基础。

美国《IEEE 控制系统》杂志 1991 年、1993~1995 年多次发表《智能控制专辑》,英国

《国际控制》杂志 1992 年也发表了《智能控制专辑》，日文《计测与控制》杂志 1994 年发表了《智能系统特集》，德文《电子学》杂志自 1991 年以来连续发表多篇模糊逻辑控制和神经网络方面的论文，俄文《自动化与遥控技术》杂志 1994 年也发表了自适应控制的人工智能基础及神经网络方面的研究论文。从上述论文和专辑的内容看，智能控制研究涉及到众多领域，从高新技术的航天飞机推力矢量的分级智能控制、空间资源处理设备的高自主控制到智能故障诊断及控制重新组合，从轧钢机、汽车供油系统的神经控制到家电产品的神经模糊控制。

1.3.2 智能控制的结构与特点

智能控制是多学科的交叉。傅京逊在 1971 年认为智能控制是人工智能与自动控制的交叉。后来萨里迪斯加进了运筹学，认为智能控制是人工智能、运筹学和自动控制三学科的交叉，并用图 1-1 所示来形象地说明这一点。

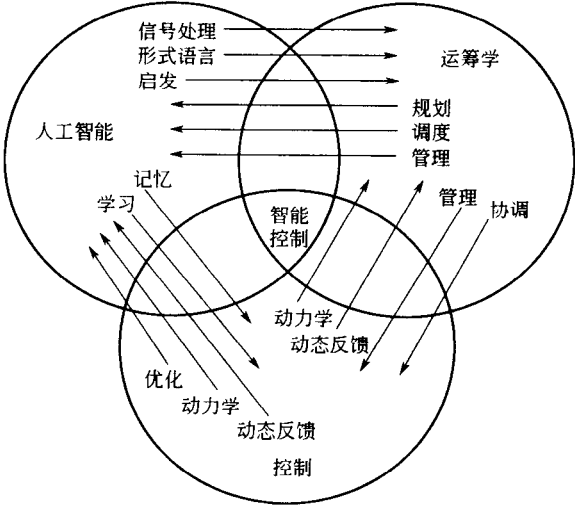


图 1-1 智能控制三学科的交叉

智能控制和其他高新技术学科一样，有许多定义，但是没有一个公认的统一定义。从系统一般行为特性出发，J. S. Albus 在 1986 年提出，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，达到既定的目标。除此之外，智能控制还有其他几种定义。

- ① “能够代替人在不确定性变化的环境中决策的能力、反复练习学习新功能的能力和在不允许有操作者的环境中的智能操作的控制”（美国的萨里迪斯）。
- ② 不需要人的干预，而又具有由人操作的控制系统那样的能力的控制，即由人操作的系统具有判断、决策和学习的能力，无论控制对象所处的环境怎么变化，其都具有识别、模型化和恰当地解决问题的能力控制（日本的古田胜久）。
- ③ 驱动智能机器自主地实现其目标的过程，是一“无需人的干预就能够独立驱动智能机器实现其目标的自动控制”（中国的蔡自兴）。

智能控制系统的结构是随着控制对象与环境复杂性和不确定性的程度不同而有不同的变化。图 1-2 是智能控制的基本结构。