

研究生教学用书

人工智能控制

► 蔡自兴



化学工业出版社

教材出版中心

研究生教学用书

人工智能控制

蔡自兴



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

人工智能控制/蔡自兴. —北京:化学工业出版社,
2005. 5
研究生教学用书
ISBN 7-5025-7046-2

I. 人… II. 蔡… III. 人工智能-智能控制-研究生-
教材 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 046395 号

研究生教学用书

人工智能控制

蔡自兴

责任编辑:唐旭华

文字编辑:朱 磊

责任校对:陶燕华

封面设计:于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(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

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 497 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7046-2

定 价: 36.00 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

序

智能科学是一门以人工智能、认知科学、脑科学等与智能研究有密切关系的学科的基本理论为基础,研究人类智能行为的本质,应用智能机器和其他手段来模拟人类和生物智能,实现各种智能系统的科学,是一门广泛交叉的新学科。智能控制既是自动控制的一个崭新分支,又是智能科学不可或缺的组成部分。

在人工智能发展过程中具有重要意义的计算智能的提出和进展,使人工智能发展成为一门具有比较坚实理论基础和广泛应用领域的学科。计算智能的出现是信息科学与生命科学相互交叉、相互渗透和相互促进的产物,也是智能科学当前研究的重要方向之一。计算智能为智能控制开辟了一些新的研究领域,如进化控制、免疫控制等,使智能控制包含更丰富的研究内容和更广阔的应用背景。

《人工智能控制》一书正是在这种历史和科学背景下诞生的,它是一本综合了人工智能和智能控制两门课程的基本内容而形成的智能控制教材。多年来,《人工智能》与《智能控制》教材往往是分开编写与出版的;至多在人工智能教材中把智能控制作为一个应用领域加以介绍,或在智能控制教材中把人工智能的知识表示与推理作为基础知识进行介绍,这使两类教材都不系统和不全面。蔡自兴教授的这部教材比较系统和全面地介绍了人工智能与智能控制两方面内容,特别便于那些没有学过人工智能的研究生或其他读者学习智能控制。

要在一部教材中把人工智能与智能控制两者有机地结合起来,并非易事。蔡自兴教授凭借他在人工智能和智能控制两个学科领域的高深造诣和对它们的深刻理解,把两者自然地融为一体,形成一个新的体系。

我与蔡自兴教授是在1986年相识的,当时我刚从瑞士留学回来。由于在苏黎世理工大学做的博士论文也涉及到一类智能控制的问题,所以阅读了一些该领域的文献。回国后,遇到曾在著名的傅京孙教授处工作过的蔡教授,自然要抓住机会向他请教。此后,我一直关注着蔡教授的发展轨迹。正如大家所知,蔡自兴教授是我国首部人工智能教材和首部智能控制教材的作者;该两部教材曾分别获得教育部科技进步一等奖和全国(电子类)优秀教材一等奖。还有一部《机器人学》著作获得全国优秀教材一等奖。他编著的《智能控制》一书曾被选定为全国统编教材;他主持开发的新世纪网络课程建设工程项目之一——“人工智能网络课程”被评为教育部首批优秀网络课程;他主讲的“人工智能”课程被评为首批国家级精品课程。由于他在教学、教改和科研中的突出贡献,曾荣获首届全国普通高等学校国家级教学名师奖。因此,由蔡自兴教授来编写这部教材是众望所归的。

本书不仅系统全面,而且内容新颖,反映出国内外智能控制研究与应用的最新进展。全书结构严谨,图文并茂,可读性好。本书的出版适应了当前我国智能控制蓬勃发展和教学改革的需要。希望广大读者从本书中汲取知识和智慧,在人工智能控制的领域中获得探索的乐趣。

吴圣迪

2005年1月26日

前言

科学技术的许多重大进展都是人类智慧、思维、幻想和拼搏的成果；这些科技进步反过来又促进人们思想的解放。地球上的生物经历了长期的和不断的进化历程，早期生物是比较低级的，最终得到进化的最新高级产品是人类。其中大脑是衡量进化水平的最重要标志。有了人类的大脑，我们就能够有思想、思维和规划，有发明、创造和革新，有艺术、音乐和诗歌，也才可能有人类历史上和当今世界上的各种奇迹和壮举。

伴随着人类的进化，人类智慧逐步提高。人类已经发明了目前称之为计算机和自动机的高级机器，创建了能够为人类的进化和发展服务的智能系统，并应用机器智能来模仿人类智能，扩展了人脑的功能。在这一领域，形形色色的“智能制品”大放异彩，为经济、科技、教育、文化和人民生活服务。

人类生命进化也出现新的挑战。智能机器人与人工生命的结合，可能创造出具有生命现象的生物机器人。另一方面，某些不负责任的人或犯罪分子却利用智能技术进行犯罪活动。我们学习与研究智能科学、人工智能、智能机器人和智能控制等，其目的就在于创造和应用智能技术和智能系统为人类进步服务。因此，可以说，对智能控制的钟情、期待、开发和应用，是科技发展和人类进步的必然。

智能控制学科建立的时间还不足20年，仍处于初期发展阶段。我有幸亲历了智能控制的研究和发展进程。1983~1985年，我在美国普度（Purdue）大学等校留学期间，在美国国家工程科学院院士、国际智能控制的奠基者和开拓者傅京孙（K. S. Fu）教授的指导和合作下，研究机器人规划专家系统，受到国际大师的熏陶和指点，开始踏上研究智能系统和智能控制的征程。当我们结束首次访美后不久，我们的《人工智能及其应用》于1987年出版了。该书为智能控制建立了重要基础。为适应自动控制学科发展和教学改革的需要，瞄准国际前沿学科，全国自动控制与计算机教材编审委员会和电子工业部教材办于1987年向全国发出《智能控制》等统编教材公开征稿的通知。经过一年多的艰苦努力，我于1988年写出书稿，呈交教材编审委员会评审。该教材通过了教材编审委员会的审评，中标为全国统编教材，并于1990年出版，成为国内外公开出版的首部关于智能控制的教材和专著。1992~1993年，我第二次留学美国，到纽约伦塞勒大学（RPI）的太空探索智能机器人系统研究中心，同国际著名智能控制专家G. N. Saridis和A. C. Sanderson教授合作研究机器人的智能控制问题，得到不少启发，受益匪浅，为撰写智能控制新著打下基础。我的另外两部著作《Intelligent Control: Principles, Techniques and Applications》和《智能控制——基础与应用》于1997年底和1998年初分别在国外和国内问世。这些智能控制著作已具有比较充实的基础理论以及比较明确的研究和应用方向。

国内外已出版的智能控制教材基本上不包含人工智能的系统内容，有的把人工智能的知识表示和推理作为基础知识进行介绍，有的在有关章节插入计算智能的某些内容，缺乏对相关人工智能内容进行比较系统和全面的阐述。本书比较系统和全面地介绍了人工智能和智能控制内容，使两者融合在一起，为那些没有学过人工智能的读者学习智能控制提供了一本比较适用的教材。

本书介绍人工智能与智能控制的基本概念、原理、技术方法与应用。全书共12章。第1章介绍人工智能与智能控制的概况,包括人类的认知过程、各种认知观以及人工智能和智能控制的起源与发展、定义以及智能控制的特点和结构。第2章和第3章讨论人工智能的基本理论,其中第2章为人工智能的传统知识表示方法和推理技术;第3章为计算智能的基本知识,逐一介绍了神经计算、模糊计算、进化计算、人工生命、粒群计算和蚁群计算。第4章和第5章详细讨论了专家系统和艾真体(Agent)等。第6章~第10章逐一研讨了递阶控制系统、专家控制系统、模糊控制系统、神经控制系统和学习控制系统的作用机理、类型结构、设计方法、控制特性和应用示例。第11章简介拟人控制和进化控制等。第12章探讨人工智能和智能控制有待进一步研究的问题,并展望智能控制的发展方向及其与相关技术的关系。

从本书内容可以看出,智能控制已初具学科体系,包括基础理论、技术方法和实际应用诸方面。在基础理论方面,涉及传统人工智能的知识表示和推理及计算智能等。在技术方法方面,对递阶控制、专家控制、模糊控制、神经控制、学习控制、仿人控制和进化控制等系统加以研究。在实际应用方面,则从十分广泛的领域举例剖析。各种不同人工智能学派的观点在智能控制学科上得到很好的包涵与融合,为不同学术派别的合作树立了典范。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、机电工程和电子工程类专业研究生的智能控制教材以及本科高年级学生的教学参考书,也可供从事智能控制、人工智能与智能系统研究、开发和应用的科技工作者参考使用。

本教材的编写和本人的智能控制研究,一直得到众多专家的亲切关怀指导和广大读者的热情支持与帮助。褚健,郭雷,何华灿,贺汉根,胡保生,黄琳,饶立昌, A. C. Sanderson, 施鹏飞, 宋健, 谭铁牛, A. B. Тимофеев, 涂序彦, 王成红, 王飞跃, 王龙, 王伟, 王先来, 吴启迪, 吴文俊, 席裕庚, 徐孝涵, 杨宜民, 张良起, 郑应平, 钟义信和周其鉴等教授,用他们的智慧和友谊提供了诸多帮助。著名智能控制专家、国家教育部副部长吴启迪教授在百忙中为本书作序,对本书给予充分肯定,对本书作者给予热情鼓励。本书还从国内外许多智能控制和智能系统的高水平著作或与有关专家的讨论交流中吸取了新的营养。这些著作的作者和专家是 J. S. Albus, K. J. Åström, A. Cawsey, J. Durkin, A. P. Engelbrecht, E. A. Feigenbaum, K. S. Fu, 高济, C. J. Harris, 何华灿, 何新贵, 何志均, C. S. G. Lee, 李人厚, 李士勇, 李祖枢, 陆汝钤, 罗公亮, A. M. Meystel, Z. Michalewics, 莫宏伟, C. G. Moore, N. J. Nilsson, P. Norvig, 秦世引, E. Rich, S. J. Russell, G. N. Saridis, 史忠植, 宋健, 孙增圻, 涂序彦, 王立新, 王永庆, 王正志, N. Wiener, P. H. Winston, 徐光祐, 徐丽娜, 阎平凡, 杨汝清, 易继锴, L. A. Zadeh, M. Jamshidi, 张钹, 张乃尧和诸静等教授。我主持的国家级研究课题组成员和我所指导的研究生们为本书做出特别贡献。蔡竞峰编写了本书的3.4和3.5。谨向上列专家、朋友和学生表示衷心感谢。

智能控制虽然已经取得长足的进步,前景十分看好,但它仍是一门十分年轻的学科,仍处于发展的初期。由于本书编写时间较紧,本人知识和水平不够,书中不足和错误之处在所难免,诚恳地希望各位专家、教授和广大读者不吝指正。

秦自兴

2005年6月2日于长沙岳麓山

目 录

1 引论	1
1.1 人工智能的定义与发展	1
1.1.1 人工智能的定义	1
1.1.2 人工智能的起源与发展	2
1.2 人类智能与人工智能	4
1.2.1 智能信息处理系统的假设	4
1.2.2 人类智能的计算机模拟	5
1.3 人工智能的各种认知观	6
1.4 智能控制的进展	7
1.4.1 自动控制的机遇与挑战	8
1.4.2 自动化与人工智能	9
1.4.3 智能控制的发展	10
1.5 智能控制的定义、特点与一般结构	13
1.5.1 智能控制的定义与特点	13
1.5.2 智能控制器的一般结构	13
1.6 智能控制的学科结构理论	14
1.6.1 二元结构理论	15
1.6.2 三元结构理论	16
1.6.3 四元结构理论	17
1.7 本书概要	20
习题 1	21
2 知识表示与推理	22
2.1 知识表示的一般方法	22
2.2 图搜索策略	23
2.3 一般搜索与推理技术	24
2.4 A* 算法	25
2.5 消解原理	28
2.5.1 子句集的求取	28
2.5.2 消解推理规则	30
2.5.3 含有变量的消解式	31
2.5.4 消解反演求解过程	31
2.6 规则演绎系统	35
2.6.1 规则正向演绎系统	35
2.6.2 规则逆向演绎系统	40

2.6.3	规则双向演绎系统	42
2.7	产生式系统	43
2.7.1	产生式系统的组成	43
2.7.2	产生式系统的推理	45
2.7.3	产生式系统举例	47
2.8	非单调推理	50
2.8.1	缺省推理	51
2.8.2	限定推理	54
2.8.3	真值维持系统	56
2.9	不确定性推理	58
2.9.1	不确定性的表示与度量	59
2.9.2	不确定性的算法	59
2.10	小结	61
习题 2		61
3	计算智能	64
3.1	概述	64
3.2	神经计算	66
3.2.1	人工神经网络研究的进展	66
3.2.2	人工神经网络的结构与模型	67
3.2.3	基于神经网络的知识表示与推理	69
3.3	模糊计算	72
3.3.1	模糊集合、模糊逻辑及其运算	72
3.3.2	模糊逻辑推理	74
3.3.3	模糊判决方法	76
3.4	遗传算法	78
3.4.1	遗传算法的基本机理	78
3.4.2	遗传算法的求解步骤	81
3.5	人工生命	83
3.5.1	人工生命研究的起源和发展	83
3.5.2	人工生命的定义	84
3.5.3	人工生命的研究内容和方法	85
3.6	粒群优化	86
3.6.1	群智能和粒群优化概述	86
3.6.2	粒群优化算法	87
3.7	蚁群算法	89
3.7.1	蚁群算法理论	90
3.7.2	蚁群算法的研究与应用	92
3.8	小结	94
习题 3		95
4	专家系统	97
4.1	专家系统概述	97

4.1.1	专家系统的特点	97
4.1.2	专家系统的结构和建造步骤	98
4.2	基于规则的专家系统	101
4.3	基于框架的专家系统	102
4.4	基于模型的专家系统	104
4.5	新型专家系统	106
4.5.1	新型专家系统的特征	106
4.5.2	分布式专家系统	107
4.5.3	协同式专家系统	108
4.6	专家系统开发工具	109
4.7	专家系统设计	111
4.7.1	专家知识的描述	112
4.7.2	知识的使用和决策解释	114
4.8	专家系统实例——MYCIN 剖析	116
4.8.1	MYCIN 概述	116
4.8.2	咨询子系统	117
4.8.3	静态数据库	119
4.8.4	动态数据库	123
4.8.5	非精确推理	124
4.8.6	控制策略	126
4.9	小结	128
习题 4		129
5	艾真体 (agent)	130
5.1	分布式人工智能	130
5.2	agent 及其要素	131
5.3	艾真体的结构	134
5.3.1	艾真体的结构特点	134
5.3.2	艾真体的结构分类	134
5.4	多艾真体系统	136
5.4.1	多艾真体系统的模型和结构	137
5.4.2	多艾真体的协作、协商和协调	138
5.4.3	多艾真体的学习与规划	140
5.4.4	多艾真体系统的研究和应用领域	141
5.5	小结	142
习题 5		142
6	递阶控制系统	144
6.1	递阶智能机器的一般理论	144
6.1.1	递阶智能机器的一般结构	144
6.1.2	递阶智能机器的主要定义	146
6.1.3	IPDI 原理的解析公式	148
6.2	递阶智能控制系统的结构	149

6.2.1	组织级的结构	149
6.2.2	协调级的结构	152
6.2.3	执行级的结构	153
6.3	智能机器人系统的递阶控制模型	154
6.3.1	组织级的控制模型	154
6.3.2	协调级的控制模型	157
6.3.3	执行级的控制模型	159
6.4	递阶控制系统举例	160
6.4.1	红旗车自动驾驶系统的组成	160
6.4.2	汽车自动驾驶控制系统的四层递阶结构	162
6.4.3	驾驶控制系统的结构与算法	164
6.4.4	自动驾驶系统高速公路试验	165
6.5	小结	166
	习题 6	166
7	专家控制系统	168
7.1	专家控制系统的结构与类型	168
7.1.1	专家控制系统的控制要求与设计原则	168
7.1.2	专家控制系统的结构	170
7.1.3	专家控制系统的类型	173
7.2	PI 专家控制器	174
7.3	实时专家控制系统	176
7.3.1	实时控制系统的特点与要求	176
7.3.2	高炉控制概况与监控系统结构	177
7.3.3	系统开发与知识表示	178
7.3.4	传感数据的预处理	180
7.4	小结	181
	习题 7	181
8	模糊控制系统	182
8.1	模糊控制器的结构	182
8.1.1	模糊控制器的一般结构	182
8.1.2	PID 模糊控制器	183
8.1.3	自组织模糊控制器	185
8.1.4	自校正模糊控制器	185
8.1.5	自学习模糊控制器	186
8.1.6	专家模糊控制器	187
8.2	模糊控制器的设计	188
8.2.1	模糊控制器的设计内容与原则	188
8.2.2	模糊控制器的控制规则形式	191
8.2.3	模糊控制系统的设计方法	192
8.3	模糊控制器的设计实例	195
8.3.1	模糊控制器的设计	196

8.3.2	模糊控制器的在线实现	198
8.4	模糊控制器的特性	200
8.4.1	模糊控制器的静态特性	200
8.4.2	模糊控制器的动态品质	202
8.4.3	模糊控制系统的可控性	204
8.4.4	模糊控制系统的鲁棒性	205
8.5	模糊控制系统应用举例	206
8.5.1	双支撑状态的两足机器人力控制问题	207
8.5.2	模糊变增益力控制原理	208
8.5.3	两足机器人控制的实现与结果	209
8.6	小结	211
	习题 8	211
9	神经控制系统	213
9.1	神经控制的结构方案	213
9.1.1	NN 学习控制	213
9.1.2	NN 直接逆模型控制	213
9.1.3	NN 自适应控制	214
9.1.4	NN 内模控制	215
9.1.5	NN 预测控制	215
9.1.6	基于 CMAC 的控制	216
9.1.7	多层 NN 控制	217
9.1.8	分级 NN 控制	219
9.2	模糊逻辑、专家系统及神经网络在控制中的集成	220
9.2.1	模糊神经网络原理	220
9.2.2	模糊神经控制方案	222
9.3	神经控制系统设计实例	224
9.3.1	石灰窑炉神经内模控制系统的设计	224
9.3.2	神经模糊自适应控制器的设计	228
9.4	神经控制系统应用举例	231
9.4.1	水轮发电机双神经元同步控制系统	231
9.4.2	高速列车运行过程的直接模糊神经控制	233
9.5	小结	239
	习题 9	239
10	学习控制系统	240
10.1	学习控制概述	240
10.1.1	什么是学习控制	240
10.1.2	为什么要研究学习控制	241
10.1.3	学习控制的发展	242
10.2	学习控制方案	243
10.2.1	基于模式识别的学习控制	243
10.2.2	反复学习控制	246

10.2.3	重复学习控制	248
10.2.4	基于神经网络的学习控制	248
10.3	学习控制的某些问题	249
10.3.1	学习控制系统的建模	249
10.3.2	学习控制的稳定性和收敛性分析	252
10.4	学习控制系统举例	258
10.4.1	自学习模糊神经控制模型	259
10.4.2	自学习模糊神经控制算法	260
10.4.3	弧焊过程自学习模糊神经控制系统	261
10.5	小结	262
习题 10		263
11	其他智能控制	264
11.1	仿人控制	264
11.1.1	仿人控制原理与原型算法	264
11.1.2	仿人控制器的属性与设计依据	266
11.1.3	仿人智能控制器设计与实现的一般步骤	267
11.2	进化控制	271
11.2.1	进化控制及其形式化描述	271
11.2.2	移动机器人进化控制系统的体系结构和算法	272
11.3	小结	274
习题 11		275
12	人工智能控制的展望	276
12.1	人工智能的争论	276
12.2	智能控制的应用研究	277
12.3	智能控制的进一步研究问题	281
12.3.1	智能控制将起更重要的作用	281
12.3.2	智能控制的进一步研究问题	282
12.4	展望智能控制的发展	283
12.4.1	寻求更新的理论框架	283
12.4.2	进行更好的技术集成	284
12.4.3	开发更成熟的应用方法	284
12.5	结束语	285
习题 12		286
参考文献		287

1 引 论

本章首先讨论人工智能的定义、发展概况及相关学派和他们的认知观，接着叙述智能控制的产生与发展，然后介绍智能控制的定义、特点、系统的一般结构与学科结构理论，最后简介本书的主要内容和编排。

1.1 人工智能的定义与发展

人工智能学科诞生至今，已走过近 50 年的历程，它的发展已日益引起众多学科和不同专业背景学者们的重视，成为一门广泛的交叉和前沿科学。近十年来，现代计算机的发展已能够存储极大量的信息，进行快速信息处理。软件功能和硬件实现均取得长足进步，从而使人工智能获得进一步的应用。可以预言：人工智能的研究成果将能够创造出更多、更高级的智能“制品”，并使之在越来越多的领域超越人类智能。人工智能将为发展国民经济和改善人类生活做出更大贡献。

1.1.1 人工智能的定义

人工智能至今尚无统一的定义，要给人工智能下个准确的定义是困难的。人类的自然智能（人类智能）伴随着人类活动时处处存在。人类的许多活动，如下棋、竞技、解答题、猜谜语、进行讨论、编制计划和编写计算机程序，甚至驾驶汽车和骑自行车等，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”。不同科学或学科背景的学者对人工智能有不同的理解，提出不同的观点，人们称这些观点为符号主义、连接主义和行为主义等，或者叫做逻辑学派、仿生学派和生理学派等。下面结合自己的理解来定义人工智能。这些定义可能是比较狭义的。

定义 1 智能机器 (intelligent machine) 能够在各类环境中自主地或交互地执行各种拟人任务 (anthropomorphic tasks) 的机器。

定义 2 智能系统 能够操作（驱动）智能机器实现其目标的系统。

定义 3 智能科学 一门研究人类智能行为本质，模拟人和生物智能，并实现各种智能系统的学科。

定义 4 人工智能（学科）是计算机科学中涉及研究、设计和应用智能机器的一个分支。它的近期主要目标在于研究用机器来模仿和执行人脑的某些智力功能，并开发相关理论和技术。

定义 5 人工智能（能力）是智能机器所执行的通常与人类智能有关的智能行为，如判断、推理、证明、识别、感知、理解、通信、设计、思考、规划、学习和问题求解等思维活动。

为了让读者对人工智能的定义进行讨论，以便更深刻地理解人工智能，下面综述其他几种关于人工智能的定义。

定义 6 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

(Haugeland, 1985)。

定义 7 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 (Bellman, 1978)。

定义 8 人工智能是用计算模型进行研究智力行为 (Charniak 和 McDermott, 1985)。

定义 9 人工智能是研究那些使理解、推理和行为成为可能的计算 (Winston, 1992)。

定义 10 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 (Kurzweil, 1990)。

定义 11 人工智能研究如何使计算机做事让人过得更好 (Rich 和 Knight, 1991)。

定义 12 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 (Schalkoff, 1990)。

定义 13 人工智能是计算机科学中与智能行为自动化有关的一个分支 (Luger 和 Stubblefield, 1993)。

其中, 定义 6 和定义 7 涉及拟人思维; 定义 8 和定义 9 与理性思维有关; 定义 10 和定义 11 涉及拟人行为; 定义 12 和定义 13 与拟人理性行为有关。

1.1.2 人工智能的起源与发展

社会的发展和科技的进步需要时代思潮的推动。时代思潮能够直接帮助科学家去研究某些现象。对于人工智能的发展来说, 20 世纪 30 年代和 20 世纪 40 年代的智能界, 发现了两件最重要的事: 数理逻辑 (它从 19 世纪末起就获得迅速发展) 和关于计算的新思想。弗雷治 (Frege)、怀特赫德 (Whitehead)、罗素 (Russell) 和塔斯基 (Tarski) 以及另外一些人的研究表明: 推理的某些方面可以用比较简单的结构加以形式化。1913 年, 年仅 19 岁的维纳 (Wiener) 在他的论文中把数理关系理论简化为类理论, 为发展数理逻辑做出贡献, 并向机器逻辑迈进一步, 与图灵 (Turing) 后来提出的逻辑机不谋而合。数理逻辑仍然是人工智能研究的一个活跃领域, 其部分原因是由于一些逻辑-演绎系统已经在计算机上实现过。不过, 即使在计算机出现之前, 逻辑推理的数学公式就为人们建立了计算与智能关系的概念。

丘奇 (Church)、图灵和其他一些人关于计算本质的思想, 提供了形式推理概念与即将发明的计算机之间的联系。在这方面的一个重要工作是关于计算和符号处理的理论概念。第一批数字计算机 (实际上为数字计算器) 看来不包含任何真实智能。早在这些机器设计之前, 丘奇和图灵就已发现, 数字并不是计算的主要方面, 它们仅仅是一种解释机器内部状态的方法。被称为人工智能之父的图灵, 不仅创造了一个简单的通用的非数字计算模型, 而且直接证明了计算机可能以某种被理解为智能的方法工作。

到了 20 世纪 50 年代, 人工智能已躁动于人类科技社会的母胎, 即将分娩。1956 年夏, 年轻的美国学者麦卡锡 (McCarthy)、明斯基 (Minsky)、朗彻斯特 (Lochester) 和香农 (Shannon) 共同发起, 邀请莫尔 (More)、塞缪尔 (Samuel)、纽厄尔 (Newell) 和西蒙 (Simon) 等参加在美国的达特茅斯 (Dartmouth) 大学举办了一次长达 2 个月的研讨会, 认真热烈地讨论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。这是人类历史上第一次人工智能研讨会, 标志着人工智能学科的诞生, 具有十分重要的历史意义。这些从事数学、心理学、信息论、计算机和神经学研究的年轻学者, 后来绝大多数都成为著名的人工智能专家, 近 50 年来为人工智能的发展做出重要贡献。

值得一提的是控制论思想对人工智能早期研究的影响。本世纪中叶人工智能的奠基者们在人工智能研究中出现了几股强有力的思潮。维纳 (Wiener)、麦卡洛克 (McCulloch) 和其他一些人提出的控制论和自组织系统的概念集中地讨论了“局部简单”系统的宏观特性。尤其重要的是, 1948 年维纳发表的控制论 (或动物与机器中的控制与通讯) 论文, 不但开创了近代控制论, 而且为人工智能的控制论学派树立了新的里程碑。控制论影响了许多领域, 因为控制论的概念跨接了许多领域, 把神经系统的工作原理与信息理论、控制理论、逻

辑以及计算联系起来。控制论的这些思想是时代思潮的一部分，而且在许多情况下影响了许多早期和近期人工智能工作者，成为他们的指导思想。

最终把这些不同思想连接起来的是由巴贝奇 (Babbage)、图灵、冯·诺依曼 (Von Neumann) 和其他一些人所研制的计算机本身。在机器的应用成为可行之后不久，人们就开始试图编写程序以解决智力测验难题、下棋以及把文本从一种语言翻译成另一种语言等问题。这是第一批人工智能程序。对于计算机来说，促使人工智能发展的是什么？出现在早期设计中的许多与人工智能有关的计算概念，包括存储器和处理器的概念、系统和控制的概念，以及语言的程序级别的概念。不过，引起新学科出现的新机器的惟一特征是这些机器的复杂性，它促进了对描述复杂过程方法的新的更直接的研究（采用复杂的数据结构和具有数以百计的不同步骤的过程来描述这些方法）。

在过去 30 多年中，人工智能的应用研究取得明显进展。首先，专家系统 (expert system) 显示出强大的生命力。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，该小组又开发成功 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。整个 20 世纪 80 年代，专家系统和知识工程在全世界得到迅速发展。在开发专家系统过程中，许多研究者获得共识，即人工智能系统是一个知识处理系统，而知识表示、知识利用和知识获取则成为人工智能系统的三个基本问题。专家系统已经取得的突出成就是人工智能生命力的一个重要表现。一些新型结构、集成算法和新的应用领域正在开发和开辟。可以预言：专家系统将成为 21 世纪知识管理和智能决策的关键技术。

机器学习是继专家系统之后人工智能的又一重要应用领域。尽管机器学习比专家系统更早出现，但它的发展道路并不平坦，而是经历了起步、冷静、复苏和蓬勃发展等时期。神经网络在 20 世纪 80 年代后期的重新兴起、行为主义的强化学习新算法开发以及遗传算法的改进与应用，为机器学习提供了新的得力工具，促进了数据挖掘和知识发现的迅速发展。机器学习成为 20 世纪 90 年代人工智能最令人瞩目的发展领域。基于知识发现和数据挖掘的知识获取和机器学习方法已成为 21 世纪机器学习的一个重要研究课题，必将对人工智能的发展起到重要的推动作用。

尤其值得提到的是，在人工智能发展过程中具有重要意义的计算智能 (computational intelligence) 的提出和兴起，使人工智能发展成为一门具有比较坚实理论基础和广泛应用领域的学科。计算智能的出现是信息科学与生命科学相互交叉、相互渗透和相互促进的产物，是生物信息学的主要研究内容之一。计算智能研究始于 1943 年麦卡洛克 (McCulloch) 和皮茨 (Pitts) 提出的“似脑机器”。到了 20 世纪 80 年代，神经网络的研究进入一个新的阶段，它使连接主义成为人工智能的一个新学派。

除了以神经网络为基础的计算外，计算智能还包括模糊计算、粗糙集理论、进化计算和遗传算法、群计算和自然计算等。其中，模糊计算是以扎德 (Zadeh) 于 1965 年提出的模糊集合为基础的，它也已得到深入研究、迅速发展和广泛应用。进化计算的研究始于 20 世纪 60 年代，并于 20 世纪 70 年代取得显著进展。进化计算和遗传算法试图模仿生物遗传学和自然选择机理，通过人工方式构造一种优化搜索算法，对生物进化过程进行数学仿真。自 1975 年霍兰德 (Holland) 提出的遗传算法以来，经过近 30 年的开发，已发展到一个比较成熟的阶段，并在实际中得到很好的应用。

近十多年来，机器学习、计算智能、人工神经网络等和行为主义的研究深入开展，形成

高潮。同时，不同人工智能学派间的争论也非常热烈。这些都推动人工智能的进一步发展。

我国的人工智能研究起步较晚。纳入国家计划的“智能模拟”研究始于1978年；1984年召开了智能计算机及其系统的全国学术讨论会；1986年起把智能计算机系统、智能机器人和智能信息处理（含模式识别）等重大项目列入国家高技术研究计划；1993年起，又把智能控制和智能自动化等相关项目列入国家科技攀登计划。进入21世纪后，已有更多的人工智能与智能系统研究获得各种基金计划支持。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、中国人工智能学会智能机器人专业委员会以及中国自动化学会智能自动化专业委员会等学术团体。中国的科技工作者，已在人工智能领域取得一些具有国际领先水平的创造性成果。其中，尤以吴文俊关于几何定理证明的“吴氏方法”最为突出，已在国际上产生重大影响，并于2001年与袁隆平的“杂交水稻”一起荣获首届国家科学技术最高奖励。现在，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学习、研究与应用，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的贡献。

1.2 人类智能与人工智能

人类的认知过程是个非常复杂的行为，至今仍未能被完全解释。人们从不同的角度对它进行研究，从而形成诸如认知生理学、认知心理学和认知工程学等相关学科。对这些学科的深入研究已超出本书范围。这里仅从符号学派的观点出发，讨论几个与人工智能有密切关系的问题。

1.2.1 智能信息处理系统的假设

人的心理活动具有不同的层次，它可与计算机的层次相比较，见图1.1。心理活动的最高层级是思维策略，中间一层是初级信息处理，最低层级为生理过程，即中枢神经系统、神经元和大脑的活动。与此相应的是计算机的程序、语言和硬件。

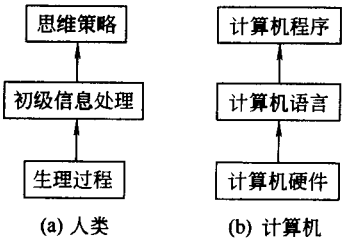


图 1.1 人类认知活动与计算机的比较

研究认知过程的主要任务是探求高层思维决策与初级信息处理的关系，并用计算机程序来模拟人的思维策略水平，而用计算机语言模拟人的初级信息处理过程。

令 T 表示时间变量， x 表示认知操作（cognitive operation）， x 的变化 Δx 为当时机体状态 S （机体的生理和心理状态以及脑子里的记忆等）和外界刺激 R 的函数。当外界刺激作用到处于某一特定状态的机体时，便发生变化，即

$$\left. \begin{aligned} T &\rightarrow T+1 \\ x &\rightarrow x+\Delta x \\ \Delta x &= f(S, R) \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

计算机也以类似的原理进行工作。在规定时间内，计算机存储的记忆相当于机体的状态；计算机的输入相当于机体施加的某种刺激。在得到输入后，计算机便进行操作，使得其内部状态随时间发生变化。可以从不同的层次来研究这种计算机系统。这种系统以人的思维方式为模型进行智能信息处理（intelligent information processing）。显然，这是一种智能计算机系统。设计适用于特定领域的这种高水平智能信息处理系统，是研究认知过程的一个具

体而又重要的目标。

可以把人看成一个智能信息处理系统。

信息处理系统又叫符号操作系统 (Symbol Operation System) 或物理符号系统 (Physical Symbol System)。所谓符号就是模式 (pattern)。任一模式, 只要它能与其他模式相区别, 就是一个符号。例如, 不同的汉语拼音字母或英文字母就是不同的符号。对符号进行操作就是对符号进行比较, 从中找出相同的和不同的符号。物理符号系统的基本任务和功能就是辨认相同的符号和区别不同的符号。为此, 这种系统必须能够辨别出不同符号之间的实质差别。符号既可以是物理符号, 也可以是头脑中的抽象符号, 或者是电子计算机中的电子运动模式, 还可以是头脑中神经元的某些运动方式。一个完善的符号系统应具有下列 6 种基本功能。

- ① 输入符号 (input)。
- ② 输出符号 (output)。
- ③ 存储符号 (store)。
- ④ 复制符号 (copy)。
- ⑤ 建立符号结构: 通过找出各符号间的关系, 在符号系统中形成符号结构。
- ⑥ 条件性迁移 (conditional transfer): 根据已有符号, 继续完成活动过程。

如果一个物理符号系统具有上述全部 6 种功能, 能够完成这个全过程, 那么它就是一个完整的物理符号系统。人能够输入信号, 如用眼睛看, 用耳朵听, 用手触摸等。计算机也能通过卡片或纸带打孔、光碟、磁带或键盘打字等方式输入符号。人具有上述 6 种功能, 现代计算机也具备物理符号系统的这 6 种功能。

假设 任何一个系统, 如果它能表现出智能, 那么它就必定能够执行上述 6 种功能。反之, 任何系统如果具有这 6 种功能, 那么它就能够表现出智能; 这种智能指的是人类所具有的那种智能。把这个假设称为物理符号系统假设。

物理符号系统假设伴随有 3 个推论, 或称为附带条件。

推论一 既然人具有智能, 那么他 (她) 就一定是一个物理符号系统。人之所以能够表现出智能, 就是基于他的信息处理过程。

推论二 既然计算机是一个物理符号系统, 它就一定能够表现出智能。这是人工智能的基本条件。

推论三 既然人是一个物理符号系统, 计算机也是一个物理符号系统, 那么就能够用计算机来模拟人的活动。

值得指出, 推论三并非一定是从推论一和推论二推导出的必然结果。因为人是物理符号系统, 具有智能; 计算机也是一个物理符号系统, 也具有智能, 但它们可以用不同的原理和方式进行活动。所以, 计算机并不一定都是模拟人活动的, 它可以编制出一些复杂的程序来求解方程式, 进行复杂的计算。不过, 计算机的这种运算过程未必就是人类的思维过程。

可以按照人类的思维过程来编制计算机程序, 这项工作就是人工智能的研究内容。如果做到了这一点, 就可以用计算机在形式上来描述人的思维活动过程, 或者建立一个理论来说明人的智力活动过程。

1.2.2 人类智能的计算机模拟

上面已经得出“能够用计算机来模拟人的活动”的结论, 也就是说, 能够用机器智能来模拟人类智能。机器智能的应用研究已取得可喜进展, 其前景令人鼓舞。

帕梅拉·麦考达克 (Pamela McCorduck) 在她的著名的人工智能历史研究《机器思维》(Machine Who Think, 1979) 中曾经指出: 在复杂的机械装置与智能之间存在着长期的联系。从几世纪前出现的神话般的复杂巨钟和机械自动机开始, 人们已对机器操作的复杂性与