

智能科学技术著作丛书

高级人工智能

(第二版)

史忠植 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

人工智能是计算机科学的一个分支,是一门研究机器智能的学科,即用人工的方法和技术研制智能机器或智能系统,来模仿、延伸和扩展人的智能,实现智能行为。

本书共 16 章。第 1~6 章讨论人工智能的认知问题和逻辑基础,论述约束推理、定性推理、基于范例推理、概率推理。第 7~13 章重点讨论机器学习,包括归纳学习、支持向量机、解释学习、强化学习、粗糙集、关联规则、知识发现。第 14 章阐述分布智能。第 15~16 章分别讨论进化计算和人工生命。与第一版相比,增加了五章新内容。其他章节也做了较大的修改和补充。

本书内容新颖,反映了该领域的最新研究进展,特别总结了作者多年的科研成果。全书力求从理论、算法、系统、应用等方面讨论人工智能的方法和关键技术。本书可以作为信息领域和相关专业的高等院校高年级学生和研究生的教材,也可以供有关科技人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高级人工智能/史忠植著.—2 版.—北京:科学出版社,2006

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 7-03-017233-7

I. 高… II. 史… III. 人工智能 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 048294 号

责任编辑:田士勇 于宏丽/责任校对:刘亚琦

责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 9 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2006 年 9 月第一次印刷 印张: 36

印数: 1—3 000 字数: 679 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

《智能科学技术著作丛书》编委会

名誉主编：吴文俊

主 编：涂序彦

副 主 编：钟义信 史忠植 何华灿 蔡自兴 孙增圻 童安齐 谭 民

秘 书 长：韩力群

副秘书长：田士勇

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

蔡庆生（中国科学技术大学）

蔡自兴（中南大学）

杜军平（北京工商大学）

韩力群（北京工商大学）

何华灿（西北工业大学）

何 清（中国科学院计算技术研究所）

黄河燕（中国科学院计算语言研究所）

黄心汉（华中科技大学）

焦李成（西安电子科技大学）

李祖枢（重庆大学）

刘 宏（北京大学）

刘 清（南昌大学）

秦世引（北京航空航天大学）

邱玉辉（西南师范大学）

阮秋琦（北京交通大学）

史忠植（中国科学院计算技术研究所）

孙增圻（清华大学）

谭 民（中国科学院自动化研究所）

田士勇（科学出版社）

童安齐（科学出版社）

涂序彦（北京科技大学）

王国胤（重庆邮电学院）

王家钦（清华大学）

王万森（首都师范大学）

吴文俊（中国科学院系统科学研究所）

杨义先（北京邮电大学）

尹怡欣（北京科技大学）

于洪珍（中国矿业大学）

张琴珠（华东师范大学）

钟义信（北京邮电大学）

庄越挺（浙江大学）

庆祝人工智能诞生50周年

暨

中国人工智能学会成立25周年

吴文俊

《智能科学技术著作丛书》序

“智能”是“信息”的精彩结晶，“智能科学技术”是“信息科学技术”的辉煌篇章，“智能化”是“信息化”发展的新动向、新阶段。

“智能科学技术”（intelligence science & technology，简称 IST）是关于“广义智能”的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域，其研究对象包括：

- “自然智能”（natural intelligence，简称 NI），包括：“人的智能”（human intelligence，简称 HI）及其他“生物智能”（biological intelligence，简称 BI）。

- “人工智能”（artificial intelligence，简称 AI），包括：“机器智能”（machine intelligence，简称 MI）与“智能机器”（intelligent machine，简称 IM）。

- “集成智能”（integrated intelligence，简称 II），即：“人的智能”与“机器智能”人机互补的集成智能。

- “协同智能”（cooperative intelligence，简称 CI），指：“个体智能”相互协调共生的群体协同智能。

- “分布智能”（distributed intelligence，简称 DI），如：广域信息网，分散大系统的分布式智能。

1956年，“人工智能”学科诞生，五十年来，在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展，从狭义人工智能走向广义人工智能，从个体人工智能到群体人工智能，从集中式人工智能到分布式人工智能，在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说，当年“人工智能”学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合，那么，可以认为，现在“智能科学技术”领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981年，“中国人工智能学会”（Chinese Association for Artificial Intelligence，简称 CAAI）正式成立，二十五年来，从艰苦创业到成长壮大，从学习跟踪到自主研发，团结我国广大学者，在“人工智能”的研究开发及应用方面取得了显著的进展，促进了“智能科学技术”的发展。在华夏文化与东方哲学影响下，我国智能科学技术的研究、开发及应用，在学术思想与科学方法上，具有综合性、整体性、协调性的特色，在理论方法研究与应用技术开发方面，取得了具有创新性、开拓性的成果。“智能化”已成为当前新技术、新产品的发展方向和显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及

应用成果，中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是，这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信，有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版，特赋贺诗一首：

**智能科技领域广
人机集成智能强
群体智能协同好
智能创新更辉煌**



中国人工智能学会荣誉理事长
2005年12月18日

前 言

人工智能的长期目标是建立人类水平的人工智能。人工智能诞生 50 年来，在崎岖不平的道路上取得了可喜的进展，特别为机器学习、数据挖掘、计算机视觉、专家系统、自然语言处理、规划和机器人等相关的应用带来了良好的经济效益和社会效益。广泛使用的互联网也正在探索应用知识表示和推理，构建语义 Web，提高互联网信息的效率。信息化的必然趋势是智能化，智能革命将开创人类后文明史。如果说蒸汽机创造了工业社会，那么智能机也一定能奇迹般地创造出智能社会，实现社会生产的自动化和智能化，促进知识密集型经济的大发展。

人工智能是计算机科学的一个分支，是一门研究机器智能的学科，即用人工的方法和技术，研制智能机器或智能系统来模仿、延伸和扩展人的智能，实现智能行为。人工智能一般可分为符号智能和计算智能。符号智能是传统人工智能，它以物理符号系统为基础，研究知识表示、获取、推理过程。运用知识解决问题是当前符号智能的最基本、最重要的特点，因此人们经常把当前的人工智能称作知识工程阶段。知识工程侧重研究知识信息处理的方法和技术，促进人工智能的发展。

计算智能包括神经计算、模糊系统、遗传算法、进化规划等。要实现智能革命，就要更深入地了解人的大脑。彻底揭开人脑的奥秘，是自然科学面临的最大挑战之一。21 世纪初，美国国家科学基金会（NSF）和美国商务部（DOC）共同资助了一个雄心勃勃的计划——“提高人类素质的聚合技术”（convergent technology for improving human performance），将纳米技术、生物技术、信息技术和认知科学看作 21 世纪四大前沿技术，并将认知科学视为最优先发展领域，主张这四大技术融合发展，并描绘了这样的科学前景：“聚合技术以认知科学为先导，因为一旦我们能够在如何（how）、为何（why）、何处（where）、何时（when）这四个层次上理解思维，我们就可以用纳米科技来制造它，用生物技术和生物医学来实现它，最后用信息技术来操纵和控制它，使它工作。”这将对人类社会带来巨大影响。在欧盟的第 6 次研究与技术发展框架新一轮的研究经费资助中，在大脑科学研究方面投入了 4500 万欧元的资金。在 2007 年开始执行的第 7 次发展框架中，欧洲议会还会进一步增加对大脑研究的投入。

表面看来，符号智能和神经计算是完全不同的研究方法，前者基于知识，后者基于数据；前者采用推理，后者通过映射。1996 年，Minsky 在第四届太平洋

地区人工智能国际会议的特邀报告 *Computers, Emotions and Common Sense* 中认为,神经计算与符号计算可以结合起来,神经网络是符号系统的基础。致力于混合系统研究的人们,正是从这种结合出发,提出各种可能的设想。这与我们提出的人类思维的层次模型是吻合的。

智能主体 (intelligent agent) 通过与环境交互实现智能行为。智能主体从环境接受感知信息,进行协同工作,执行各种智能行为。20 世纪 90 年代以来,多主体系统成为人工智能研究的核心之一。

人工生命是指用计算机和精密机械等生成或构造表现自然生命系统行为特点的仿真系统或模型系统。人工生命是形成新的信息处理体系的强大推动力,并成为研究生物的一个特别有用的工具。人工生命的研究可能将信息科学和生命科学结合起来,形成生命信息科学,成为人工智能研究的新途径。

本书第一版自 1998 年发行以来,受到了读者广泛的欢迎,许多院校用作教科书或教材,众多研究人员用作参考书。在这近十年的时间里,人工智能又取得了许多重要的进展,特别在不确定推理、机器学习、多主体系统、人工生命等方面,而且广大读者迫切要求出版第二版。

本书第二版在第一版基础上做了重大修订,共分 16 章。第 1 章是绪论,从人工智能的认知问题出发,介绍本书撰写的指导思想,概要介绍人工智能当前研究的热点。第 2 章讨论人工智能逻辑,较系统地讨论非单调逻辑和与智能主体有关的逻辑系统。第 3 章讨论约束推理,介绍许多实用的约束推理方法。第 4 章介绍定性推理,着重讨论几种重要的定性推理方法。多年来作者及其领导的集体一直从事基于范例推理的研究,其主要成果构成第 5 章。概率推理是一种重要的不确定推理,第 6 章给予重点讨论。机器学习是当前人工智能研究的核心,也是知识发现、数据挖掘等领域的重要基础,本书用 7 章 (第 7~13 章) 的篇幅给予论述,反映研究的最新进展。第 7 章论述归纳学习。第 8 章介绍支持向量机。第 9 章讨论解释学习。第 10 章论述强化学习。第 11 章介绍粗糙集理论。第 12 章阐述关联规则。第 13 章介绍知识发现系统。近几年来分布智能取得重要进展,结合我们研究的成果,在第 14 章重点讨论主体理论和多主体系统的关键技术。第 15 章对进化计算进行了探讨,重点讨论遗传算法。最后一章探讨人工生命,概要介绍人工生命研究的内容和取得的进展。与第一版相比,增加了许多新内容,包括概率推理、支持向量机、强化学习、粗糙集、关联规则等。其他章节也在第一版的基础上做了修改,补充了许多新内容,以反映最新研究成果。本书第二版在每章都增加了习题,以便读者加深理解课文内容。

作者于 1994 年教授高级人工智能课程,本书第一版是根据中国科学院研究生院 (北京) 计算机科学技术专业博士、硕士研究生教学的需要编写的。教材经不断修改和扩充,于 1998 年正式出版,定为普通高等教育“九五”国家级重点

教材、中国科学院研究生教学丛书。本书实际上是集体研究成果的总结，先后有6位博士后、40多位博士生、90多位硕士生参加了研究。陆汝钤院士、戴汝为院士、李衍达院士、张钹院士、董韪美院士、高庆狮院士、林惠敏院士、陈霖院士、郭爱克院士、李国杰院士、何新贵院士、郑南宁院士、钟义信教授、石纯一教授、涂序彦教授、张成奇教授、王珏研究员、何华灿教授、蔡自兴教授等给予诚挚的帮助和有益的讨论，作者借此机会深表谢意。

本书有关研究得到国家自然科学基金、国家重大基础研究计划、国家863高技术计划、北京市自然科学基金、中国科学院知识创新工程等的资助。科学出版社对本书的出版给予了大力支持，在此一并致谢。

史忠植

2006年3月

目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 人工智能的渊源	1
1.2 人工智能的认知问题	3
1.3 思维的层次模型	4
1.4 符号智能	6
1.5 人工智能的研究方法	8
1.5.1 认知学派	8
1.5.2 逻辑学派	9
1.5.3 行为学派	9
1.6 自动推理	9
1.7 机器学习	11
1.8 分布式人工智能	13
1.9 人工思维模型	16
1.10 知识系统	16
习题	19
第 2 章 人工智能逻辑	20
2.1 概述	20
2.2 逻辑程序设计	22
2.2.1 逻辑程序定义	23
2.2.2 Prolog 数据结构和递归	24
2.2.3 SLD 归结	25
2.2.4 非逻辑成分: CUT	27
2.3 非单调逻辑	30
2.4 封闭世界假设	32
2.5 默认逻辑	34
2.6 限制逻辑	39
2.7 非单调逻辑 NML	42
2.8 自认知逻辑	44
2.8.1 Moore 系统 \mathcal{M}	44

2.8.2	Q ₂ 逻辑	45
2.8.3	标准型定理	46
2.8.4	◇记号以及稳定扩张的一种判定过程	48
2.9	真值维护系统	50
2.10	情景演算的逻辑基础	55
2.10.1	刻画情景演算的多类逻辑	56
2.10.2	LR 中的基本动作理论	57
2.11	框架问题	58
2.11.1	框架公理	58
2.11.2	框架问题解决方案的准则	60
2.11.3	框架问题的非单调解决方案	62
2.12	动态描述逻辑 DDL	68
2.12.1	描述逻辑	68
2.12.2	动态描述逻辑的语法	70
2.12.3	动态描述逻辑的语义	72
	习题	75
第 3 章	约束推理	76
3.1	概述	76
3.2	回溯法	81
3.3	约束传播	82
3.4	约束传播在树搜索中的作用	84
3.5	智能回溯与真值维护	85
3.6	变量例示次序与赋值次序	86
3.7	局部修正搜索法	86
3.8	基于图的回跳法	87
3.9	基于影响的回跳法	88
3.10	约束关系运算的处理	92
3.10.1	恒等关系的单元共享策略	92
3.10.2	区间传播	93
3.10.3	不等式图	94
3.10.4	不等式推理	95
3.11	约束推理系统 COPS	96
3.12	ILOG Solver	99
	习题	105
第 4 章	定性推理	106
4.1	概述	106

4.2	定性推理的基本方法	107
4.3	定性模型推理	108
4.4	定性进程推理	110
4.5	定性仿真推理	113
4.5.1	定性状态转换	114
4.5.2	QSIM 算法	115
4.6	代数方法	116
4.7	几何空间定性推理	118
4.7.1	空间逻辑	118
4.7.2	空间时间关系描述	120
4.7.3	空间和时间逻辑的应用	122
4.7.4	Randell 算法	122
	习题	123
第 5 章	基于范例的推理	124
5.1	概述	124
5.2	类比的形式定义	125
5.3	过程模型	126
5.4	范例的表示	129
5.4.1	语义记忆单元	129
5.4.2	记忆网	130
5.5	范例的索引	132
5.6	范例的检索	133
5.7	相似性关系	135
5.7.1	语义相似性	135
5.7.2	结构相似性	136
5.7.3	目标特征	136
5.7.4	个体相似性	137
5.7.5	相似性计算	137
5.8	范例的复用	139
5.9	范例的保存	141
5.10	基于例示的学习	141
5.10.1	基于例示学习的任务	142
5.10.2	IBI 算法	143
5.10.3	降低存储要求	145
5.11	范例工程	147
5.12	范例约简算法	149

5.13 中心渔场预报专家系统	153
5.13.1 问题分析与范例表示	153
5.13.2 相似性度量	155
5.13.3 索引与检索	156
5.13.4 基于框架的修正	157
5.13.5 实验结果	159
习题	160
第 6 章 概率推理	161
6.1 概述	161
6.1.1 贝叶斯网络的发展历史	161
6.1.2 贝叶斯方法的基本观点	162
6.1.3 贝叶斯网络在数据挖掘中的应用	163
6.2 贝叶斯概率基础	165
6.2.1 概率论基础	165
6.2.2 贝叶斯概率	167
6.3 贝叶斯问题求解	170
6.3.1 几种常用的先验分布选取方法	171
6.3.2 计算学习机制	174
6.3.3 贝叶斯问题求解步骤	175
6.4 简单贝叶斯学习模型	178
6.4.1 简单贝叶斯学习模型	178
6.4.2 简单贝叶斯模型的提升	180
6.4.3 提升简单贝叶斯分类的计算复杂性	182
6.5 贝叶斯网络的建造	183
6.5.1 贝叶斯网络的结构及建立方法	183
6.5.2 学习贝叶斯网络的概率分布	184
6.5.3 学习贝叶斯网络的网络结构	186
6.6 贝叶斯潜在语义模型	190
6.7 半监督文本挖掘算法	194
6.7.1 网页聚类	194
6.7.2 对含有潜在类别主题词的文档的类别标注	195
6.7.3 基于简单贝叶斯模型学习标注和未标注样本	196
习题	200
第 7 章 归纳学习	201
7.1 概述	201
7.2 归纳学习的逻辑基础	202
7.2.1 归纳学习的一般模式	202

7.2.2	概念获取的条件	204
7.2.3	问题背景知识	205
7.2.4	选择型和构造型泛化规则	207
7.3	偏置变换	210
7.4	变型空间方法	211
7.4.1	消除候选元素算法	212
7.4.2	两种改进算法	214
7.5	AQ 归纳学习算法	216
7.6	CLS 学习算法	217
7.7	ID3 学习算法	218
7.7.1	信息论简介	218
7.7.2	属性选择	219
7.7.3	ID3 算法	220
7.7.4	ID3 算法应用举例	220
7.7.5	连续型属性离散化	223
7.8	基于偏置变换的决策树学习算法 BSDT	223
7.8.1	偏置的形式化	224
7.8.2	表示偏置变换	225
7.8.3	算法描述	226
7.8.4	过程偏置变换	228
7.8.5	基于偏置变换的决策树学习算法 BSDT	230
7.8.6	经典范例库维护算法 TCBM	231
7.8.7	偏置特征抽取算法	232
7.8.8	改进的决策树生成算法 GSD	232
7.8.9	实验结果	234
7.9	归纳学习的计算理论	236
7.9.1	Gold 学习理论	236
7.9.2	模型推理系统	237
7.9.3	Valiant 学习理论	238
	习题	240
第 8 章	支持向量机	242
8.1	统计学习问题	242
8.1.1	经验风险	242
8.1.2	VC 维	242
8.2	学习过程的一致性	243
8.2.1	学习一致性的经典定义	243
8.2.2	学习理论的重要定理	244

8.2.3 VC 熵	244
8.3 结构风险最小归纳原理	245
8.4 支持向量机	248
8.4.1 线性可分	248
8.4.2 线性不可分	250
8.5 核函数	251
8.5.1 多项式核函数	252
8.5.2 径向基函数	252
8.5.3 多层感知机	252
8.5.4 动态核函数	252
8.6 基于分类超曲面的海量数据分类方法	254
8.6.1 Jordan 曲线定理	254
8.6.2 SVM 直接方法基本思想	255
8.6.3 实现算法	256
8.6.4 实验结果分析	257
习题	260
第 9 章 解释学习	262
9.1 概述	262
9.2 解释学习模型	263
9.3 解释泛化学习方法	264
9.3.1 基本原理	264
9.3.2 解释与泛化交替进行	268
9.4 全局取代解释泛化方法	269
9.5 解释特化学习方法	272
9.6 解释泛化的逻辑程序	275
9.6.1 工作原理	275
9.6.2 元解释器	276
9.6.3 实验例子	277
9.7 基于知识块的 SOAR 系统	278
9.8 可操作性标准	280
9.8.1 PRODIGY 的效用问题	283
9.8.2 SOAR 系统的可操作性	283
9.8.3 MRS-EBG 的可操作性	284
9.8.4 METALEX 的处理方法	284
9.9 不完全领域知识下的解释学习	285
9.9.1 不完全领域知识	285
9.9.2 递归结方法	285

9.9.3 基于深层知识方法	288
习题	288
第 10 章 强化学习	290
10.1 概述	290
10.2 强化学习模型	291
10.3 动态规划	294
10.4 蒙特卡罗方法	295
10.5 时序差分学习	297
10.6 Q 学习	299
10.7 强化学习中的函数估计	301
10.8 强化学习的应用	303
习题	305
第 11 章 粗糙集	306
11.1 概述	306
11.1.1 知识的分类观点	308
11.1.2 新型的隶属关系	309
11.1.3 概念的边界观点	310
11.2 知识的约简	310
11.2.1 一般约简	311
11.2.2 相对约简	311
11.2.3 知识的依赖性	312
11.3 决策逻辑	313
11.3.1 决策表的公式化定义	313
11.3.2 决策逻辑语言	314
11.3.3 决策逻辑语言的语义	315
11.3.4 决策逻辑的推演	316
11.3.5 规范表达形式	318
11.3.6 决策规则和决策算法	318
11.3.7 决策规则中的一致性和不分明性	319
11.4 决策表的约简	319
11.4.1 属性的依赖性	319
11.4.2 一致决策表的约简	320
11.4.3 非一致决策表的约简	325
11.5 粗糙集的扩展模型	329
11.5.1 可变精度粗糙集模型	330
11.5.2 相似模型	331
11.5.3 基于粗糙集的非单调逻辑	331

11.5.4 与其他数学工具的结合	332
11.6 粗糙集的实验系统	333
11.7 粒度计算	334
11.8 粗糙集的展望	336
习题	337
第 12 章 关联规则	338
12.1 关联规则挖掘概述	338
12.1.1 关联规则的意义和度量	339
12.1.2 经典的挖掘算法	341
12.2 广义模糊关联规则的挖掘	343
12.3 挖掘关联规则的数组方法	346
12.4 任意多表间关联规则的并行挖掘	347
12.4.1 问题的形式描述	347
12.4.2 单表内大项集的并行计算	348
12.4.3 任意多表间大项集的生成	350
12.4.4 跨表间关联规则的提取	350
12.5 基于分布式系统的关联规则挖掘算法	351
12.5.1 候选集的生成	353
12.5.2 候选数据集的本地剪枝	354
12.5.3 候选数据集的全局剪枝	357
12.5.4 合计数轮流检测	358
12.5.5 分布式挖掘关联规则的算法	359
12.6 词性标注规则的挖掘算法与应用	363
12.6.1 汉语词性标注	363
12.6.2 问题的描述	364
12.6.3 挖掘算法	365
12.6.4 试验结果	367
习题	369
第 13 章 知识发现	371
13.1 概述	371
13.1.1 数据准备	372
13.1.2 数据挖掘阶段	372
13.1.3 结果解释和评估	373
13.2 知识发现的任务	373
13.2.1 数据总结	373
13.2.2 概念描述	374
13.2.3 分类	374

13.2.4	聚类	375
13.2.5	相关性分析	376
13.2.6	偏差分析	376
13.2.7	建模	376
13.3	知识发现工具	377
13.4	MSMiner 的体系结构	380
13.4.1	数据挖掘模型	380
13.4.2	系统功能	382
13.4.3	体系结构	382
13.4.4	小结	383
13.5	元数据管理	384
13.5.1	MSMiner 元数据的内容	384
13.5.2	MSMiner 元数据库	385
13.5.3	MSMiner 元数据对象模型	385
13.6	数据仓库	389
13.6.1	数据仓库含义	389
13.6.2	MSMiner 数据仓库的基本结构	391
13.6.3	主题	392
13.6.4	数据抽取和集成	393
13.6.5	数据抽取和集成的元数据	397
13.6.6	数据仓库建模及 OLAP 的实现	398
13.6.7	小结	402
13.7	算法库管理	402
13.7.1	数据挖掘算法的元数据	403
13.7.2	可扩展性的实现	404
13.7.3	采掘算法的接口规范	405
	习题	407
第 14 章	分布智能	408
14.1	概述	408
14.2	分布式问题求解	410
14.2.1	分布式问题求解系统分类	410
14.2.2	分布式问题求解过程	411
14.3	主体基础	413
14.4	主体理论	414
14.4.1	理性主体	414
14.4.2	BDI 主体模型	415
14.5	主体结构	416

14.5.1	主体基本结构	416
14.5.2	慎思主体	417
14.5.3	反应主体	421
14.5.4	混合结构	423
14.5.5	Inter Rap	424
14.5.6	MAPE 主体结构	425
14.6	主体通信语言 ACL	438
14.6.1	主体间通信概述	439
14.6.2	FIPA ACL 消息	440
14.6.3	交互协议	445
14.6.4	ACL 语义学的形式化基础	447
14.7	协调和协作	450
14.7.1	引言	450
14.7.2	合同网	453
14.7.3	部分全局规划	455
14.7.4	基于约束传播的规划	457
14.7.5	基于生态学的协作	465
14.7.6	基于对策论的协商	467
14.7.7	基于意图的协商	468
14.8	移动主体	468
14.9	多主体环境 MAGE	471
14.9.1	MAGE 系统框架结构	471
14.9.2	主体统一建模语言 AUML	472
14.9.3	可视化主体开发环境 VStudio	472
14.9.4	MAGE 运行平台	474
	习题	475
第 15 章	进化计算	476
15.1	概述	476
15.2	进化系统理论的形式模型	477
15.3	达尔文进化算法	480
15.4	分类器系统	481
15.5	桶链算法	485
15.6	遗传算法	486
15.6.1	遗传算法的主要步骤	487
15.6.2	表示模式	489
15.6.3	杂交操作	490
15.6.4	变异操作	492

15.6.5 反转操作	492
15.7 并行遗传算法	492
15.8 分类器系统 Boole	493
15.9 规则发现系统	496
15.10 进化策略	499
15.11 进化规划	499
习题	500
第 16 章 人工生命	501
16.1 引言	501
16.2 人工生命的探索	505
16.3 人工生命模型	506
16.4 人工生命的研究方法	508
16.5 细胞自动机	511
16.6 形态形成理论	513
16.7 混沌理论	515
16.8 人工生命的实验系统	516
16.8.1 Tierra 数字生命进化模型	516
16.8.2 Avida	517
16.8.3 Terrarium 生物饲养生态系统	519
16.8.4 人工鱼	519
16.8.5 Autolife	520
习题	521
参考文献	523

第 1 章 绪 论

1.1 人工智能的渊源

人工智能 (artificial intelligence) 主要研究用人工的方法和技术, 模仿、延伸和扩展人的智能, 实现机器智能。2005 年, McCarthy 指出人工智能的长期目标是实现人类水平的人工智能 (McCarthy 2005)。

产业革命解放了人的体力劳动, 可以使用机器完成繁重的体力工作, 极大地促进了人类社会的进步和经济的发展。在人类历史发展的过程中, 自然会提出如何用机器解放人的脑力劳动。制造和使用仿人的智能机器是人们长期以来的愿望。

我国曾经发明了不少智能工具和机器。例如, 算盘是应用广泛的古典计算机; 水运仪象台是天文观测与星象分析仪器; 候风地动仪是测报与显示地震的仪器。我们祖先提出的阴阳学说蕴涵着丰富的哲理, 对现代逻辑的发展有重大影响。

在国外, Aristotle (公元前 384—公元前 322) 在《工具论》中提出形式逻辑。Bacon (1561—1626) 在《新工具》中提出归纳法。Leibnitz (1646—1716) 研制了四则计算器, 提出了“通用符号”和“推理计算”的概念, 使形式逻辑符号化, 可以说是“机器思维”研究的萌芽。

19 世纪以来, 数理逻辑、自动机理论、控制论、信息论、仿生学、计算机、心理学等科学技术的进展, 为人工智能的诞生, 准备了思想、理论和物质基础。Boole (1815—1864) 创立了布尔代数, 他在《思维法则》一书中, 首次用符号语言描述了思维活动的基本推理法则。Godel (1906—1978) 提出了不完备性定理。Turing (1912—1954) 提出了理想计算机模型——图灵机, 创立了自动机理论。1943 年, McCulloch 和 Pitts 提出了 MP 神经网络模型, 开创了人工神经网络的研究。1946 年, Manochly 和 Eckert 成功研制了 ENIAC 电子数字计算机。1948 年, Wiener 创立了控制论, Shannon 创立了信息论。

现实世界中, 相当多的问题求解是复杂的, 常常没有算法可遵循, 或者即使有计算方法, 也是 NP 问题。人们可以采用启发式知识进行求解, 把复杂的问题大大简化, 可在浩瀚的搜索空间中迅速找到解答。这是运用专门领域的经验知识, 经常会取得有关问题的满意解, 但不是数学上的最优解。这种处理问题的方法具有显著的特色, 导致人工智能的诞生。1956 年由 McCarthy、Minsky 等发

起,美国的几位心理学家、数学家、计算机科学家、信息论学家在 Dartmouth 大学举办夏季讨论会,正式提出人工智能的术语,开始了具有真正意义的人工智能的研究。经过 30 多年的研究和发展,人工智能取得了很大的进展。许多人工智能专家系统研制成功,并被投入使用。自然语言理解、机器翻译、模式识别、机器人、图像处理等方面,取得了不少研究成果。其应用渗透到许多领域,促进了它们的发展。

在 20 世纪 50 年代,人工智能以博弈、游戏为对象进行研究。1956 年, Samuel 成功研制了具有自学习能力的启发式博弈程序。同年, Newell、Simon 等研制了启发式程序 Logic Theorist,证明了《数学原理》中的 38 条定理,开创了利用计算机研究思维活动规律的工作。Chomsky 提出了语言文法,开创了形式语言的研究。1958 年 McCarthy 建立了人工智能程序设计语言 LISP,不仅可以处理数值,而且可以更方便地处理符号,为人工智能研究提供了重要工具。

20 世纪 60 年代前期,人工智能以搜索算法、通用问题求解(GPS)的研究为主。1963 年, Newell 发表了问题求解程序,使启发式程序有更大的普适性。1961 年, Minsky 发表题为“走向人工智能的步骤”的论文,推动了人工智能的发展。1965 年, Feigenbaum 研制成功了 DENDRAL 化学专家系统,使人工智能的研究从着重算法转向知识表示的研究,也是人工智能研究走向实用化的标志。1965 年, Robinson 提出了归结原理。1968 年, Quillian 提出了语义网络的知识表示方法。1969 年,国际人工智能联合会(IJCAI)成立。从 1969 年起,每两年召开一次国际人工智能学术会议。由 IJCAI 主办的人工智能学报 *Artificial Intelligence* 于 1970 年创刊。

20 世纪 70 年代前期,人工智能研究以自然语言理解、知识表示为主。1972 年, Winograd 发表了自然语言理解系统 SHRDLU。法国马赛大学的 Colmerauer 创建了 Prolog 语言。1973 年, Schank 提出了概念从属理论。1974 年, Minsky 提出了重要的框架知识表示法。1977 年, Feigenbaum 在第五届国际人工智能会议上提出了知识工程。他认为,知识工程是人工智能的原理和方法,对那些需要专家知识才能解决的应用难题提供求解的手段。恰当运用专家知识的获取、表示和推理过程的构成与解释,是设计基于知识系统的重要技术问题。

20 世纪 80 年代,人工智能蓬勃发展,专家系统开始被广泛应用,出现了专家系统开发工具,开始兴起人工智能产业。特别是 1982 年,日本政府正式宣布投资开发第五代计算机,极大地推动了人工智能的发展。许多国家制定相应的计划,进行人工智能和智能计算机系统的研究。我国也将智能计算机系统的研究列入国家 863 高新技术计划。

五十年来,人工智能的研究取得了一定的进展,提出了启发式搜索策略、非单调推理、机器学习的方法等。人工智能应用,特别是专家系统、智能决策、智

能机器人、自然语言理解等方面的成就促进了人工智能的研究。当前，以知识信息处理为中心的知识工程是人工智能的显著标志。

人工智能的研究与其他事物发展一样，出现过曲折。从一开始，人工智能的工作者因过分地乐观而受人指责。20 世纪 60 年代初，人工智能的创始人 Simon 等就乐观地预言：

- (1) 十年内数字计算机将是世界象棋冠军；
- (2) 十年内计算机将证明一个未发现的重要的数学定理；
- (3) 十年内数字计算机将谱写具有相当美学价值的而为批评家所认可的乐曲；
- (4) 十年内大多数心理学理论将采用计算机程序的形式。

这些预言至今还未完全实现。甚至连一个 3 岁的小孩也能轻而易举地从一幅图画中辨别出一棵树来，而功能最强大的超级计算机也只能在小孩认树方面达到中等水平，对小孩认树的理解还非常困难。

人工智能尚缺乏必要的理论。在一些关键技术方面，如机器学习、非单调推理、常识性知识表示、不确定推理等尚未取得突破性的进展。人工智能对全局性判断模糊信息处理、多粒度视觉信息的处理是极为困难的。

总的来看，人工智能还处于智能学科研究的早期阶段，必须开展智能科学的研究。智能科学研究智能的基本理论和实现技术，是由脑科学、认知科学、人工智能等学科构成的交叉学科。脑科学从分子水平、细胞水平、行为水平研究人脑智能机理，建立脑模型，揭示人脑的本质。认知科学是研究人类感知、学习、记忆、思维、意识等人脑心智活动过程的科学。人工智能研究用人工的方法和技术，模仿、延伸和扩展人的智能，实现机器智能。三门学科共同研究，探索智能科学的新概念、新理论、新方法，必将在 21 世纪共创辉煌（史忠植 2006）。

1.2 人工智能的认知问题

一般认为，认知（cognition）是和情感、动机、意志等相对的理智或认识过程。美国心理学家 Houston 等将对“认知”的看法归纳为如下五种主要类型：

- (1) 认知是信息的处理过程；
- (2) 认知是心理上的符号运算；
- (3) 认知是问题求解；
- (4) 认知是思维；
- (5) 认知是一组相关的活动，如知觉、记忆、思维、判断、推理、问题求解、学习、想像、概念形成、语言使用等。

认知心理学家 Dodd 等则认为，认知应包括三个方面，即适应、结构和过

程。也就是说,认知是为了一定的目的,在一定的心理结构中进行的信息加工过程。

认知科学是研究人类感知和思维信息处理过程的科学,包括从感觉的输入到复杂问题求解,从人类个体到人类社会的智能活动,以及人类智能和机器智能的性质(史忠植 1990)。认知科学是现代心理学、信息科学、神经科学、数学、科学语言学、人类学乃至自然哲学等学科交叉发展的结果。它是人工智能重要的理论基础。

认知科学的兴起和发展标志着对以人类为中心的认知和智能活动的研究已进入新的阶段。认知科学的研究将使人类自我了解和自我控制,把人的知识和智能提高到前所未有的高度。它的研究将为智能革命、知识革命和信息革命建立理论基础,为智能计算机系统的研制提供新概念、新思想、新途径。

受到纽威尔和西蒙早期研究工作的推动,认知科学的研究在20世纪50年代末期就出现了(司马贺 1986)。认知科学家的研究成果提供了较好的模型以代替行为主义学说关于人的简化模型。认知科学研究的目的是要说明和解释人在完成认知活动时是如何进行信息加工的。认知科学涉及的问题非常广泛,包括知觉、语言、学习、记忆、思维、问题求解、创造、注意以及环境、社会文化背景对认知的影响。

1991年,有代表性的杂志 *Artificial Intelligence* 第47卷发表了人工智能基础专辑,指出了人工智能研究的趋势。Kirsh在专辑中提出了人工智能的五个基本问题(Kirsh 1991):

- (1) 知识与概念化是否是人工智能的核心;
- (2) 认知能力能否与载体分开来研究;
- (3) 认知的轨迹是否可用类自然语言来描述;
- (4) 学习能力能否与认知分开来研究;
- (5) 所有的认知是否有一种统一的结构。

这些问题都是与人工智能有关的认知问题,必须从认知科学的基础理论进行探讨。这些问题都涉及人工智能的关键,因此成为不同学派的分水岭。各个学派对上述问题都有不同的答案。

1.3 思维的层次模型

思维是客观现实的反映过程,是具有意识的人脑对于客观现实的本质属性、内部规律性的自觉的、间接的和概括的反映。由于科学的发展和对思维研究的结果,当代已进入一个注重自知的阶段,强调自我认识。1984年,钱学森教授倡导开展思维科学(noetic science)的研究(钱学森 1986)。

人类思维的形态主要有感知思维、形象思维、抽象思维和灵感思维。感知思维是一种初级的思维形态。在人们开始认识世界时，只是把感性材料组织起来，使之构成有条理的知识，所能认识到的仅是现象。在此基础上形成的思维形态即是感知思维。人们在实践过程中，通过眼、耳、鼻、舌、身等感官直接接触客观外界而获得的各种事物的表面现象的初步认识，它的来源和内容都是客观的、丰富的。

形象思维主要是用典型化的方法进行概括，并用形象材料来思维，是一切高等生物所共有的。形象思维是与神经机制的连接论相适应的。模式识别、图像处理、视觉信息加工都属于这个范畴。

抽象思维是一种基于抽象概念的思维形式，通过符号信息处理进行思维。只有语言的出现，抽象思维才成为可能，语言和思维互相促进，互相推动。可以认为物理符号系统是抽象思维的基础。

对灵感思维至今研究甚少。有人认为，灵感思维是形象思维扩大到潜意识，人脑有一部分对信息进行加工，但是人并没有意识到。也有人认为，灵感思维是顿悟。灵感思维在创造性思维中起重要作用，有待进行深入研究。

人的思维过程中，“注意”发挥着重要作用。“注意”使思维活动有一定的方向和集中，保证人能够及时地反映客观事物及其变化，使人能够更好地适应周围环境。“注意”限制了可以同时思考的数目。因此在有意识的活动中，大脑更多地表现为串行的，而看和听是并行的。

根据上述讨论，作者提出人类思维的层次模型（图 1.1）（Shi 1994, Shi 1992, 史忠植 1990）。图中感知思维是极简单的思维形态，它通过人的眼、耳、鼻、舌、身等感知器官产生表象，形成初级的思维。形象思维以神经网络为理论基础，可以高度并行处理。抽象思维以物理符号系统为理论基础，用语言表述抽象的概念。注意的作用使其处理基本上是串行的。

思维模型就是要研究这三种思维形式的相互关系，以及它们之间的相互转换的微观过程。人们可以用神经网络的稳定吸引子来表示联想记忆、图像识别的问

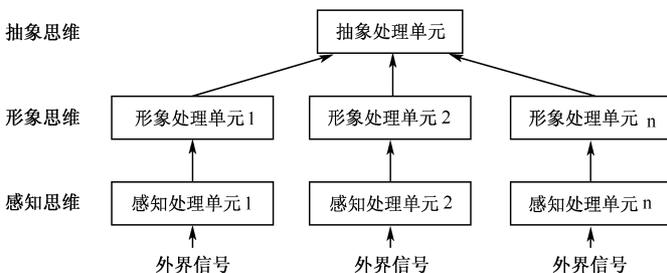


图 1.1 思维的层次模型

题。但是要解决从形象思维到逻辑思维的过渡的微过程,还需要作长期的进一步研究。

1.4 符号智能

智能是什么?智能是个体有目的的行为、合理的思维,以及有效的适应环境的综合性能。通俗地说,智能是个体认识客观事物和运用知识解决问题的能力。人类个体的智能是一种综合性能,具体讲,可以包括感知与认识客观事物、客观世界与自我的能力;通过学习取得经验、积累知识的能力;理解知识、运用知识和运用经验分析问题和解决问题的能力;联想、推理、判断、决策的能力;运用语言进行抽象、概括的能力;发现、发明、创造、创新的能力;实时地、迅速地、合理地应付复杂环境的能力;预测、洞察事物发展变化的能力等。人生活在社会中,其智能与社会环境有密切的关系。随着人类社会的不断进步,智能的概念也不断发展。

人工智能(artificial intelligence)是相对人的自然智能而言,即用人工的方法和技术,模仿、延伸和扩展人的智能,实现某些“机器思维”。作为一门学科,人工智能研究智能行为的计算模型,研制具有感知、推理、学习、联想、决策等思维活动的计算系统,解决需要人类专家才能处理的复杂问题。

长期以来,人们从人脑思维的不同层次对人工智能进行研究,形成了符号主义、连接主义和行为主义。传统人工智能是符号主义,它以 Newell 和 Simon 提出的物理符号系统假设为基础。物理符号系统假设认为物理符号系统是智能行为的充分必要条件。物理符号系统由一组符号实体组成,它们都是物理模式,可在符号结构的实体中作为组分出现。该系统可以进行建立、修改、复制、删除等操作,以生成其他符号结构。

连接主义研究非程序的、适应性的、大脑风格的信息处理的本质和能力。人们也称它为神经计算。由于它近年来的迅速发展,大量的神经网络的机理、模型、算法不断地涌现出来。神经网络主体是一种开放式的神经网络环境,提供典型的、具有实用价值的神经网络模型。系统采用开放方式,使得新的网络模型可以比较方便地进入系统中,利用系统提供良好的用户界面和各种工具,对网络算法进行调试修改。另外,对已有的网络模型的改善也较为简单,为新的算法的实现提供了良好的环境。

神经计算从脑的神经系统结构出发来研究脑的功能,研究大量简单的神经元的集团信息处理能力及其动态行为。其研究重点侧重于模拟和实现人的认识过程中的感知觉过程、形象思维、分布式记忆和自学习自组织过程。特别是对并行搜索、联想记忆,时空数据统计描述的自组织以及一些相互关联的活动中自动获取

知识，更显示出了其独特的能力，并普遍认为神经网络适合于低层次的模式处理。

神经网络的基本特点集中表现在：①以分布式方式存储信息。②以并行方式处理信息。③具有自组织、自学习能力（史忠植 1993b）。正是这些特点，使神经网络为人们在利用机器加工处理信息方面提供了一种全新的方法和途径。当然，随着人工神经网络应用的深入，人们也发现原有的模型和算法所存在的问题，在理论的深入时也碰到很多原来非线性理论、逼近论中的难点。可是我们相信，在深入、广泛应用的基础上，这个领域将会继续发展，并会对科学技术有很大的促进作用。我们提出的神经场理论是一种新的尝试。

目前，符号处理系统和神经网络模型的结合是一个重要的研究方向。模糊神经网络就是将模糊逻辑、神经网络等结合在一起，在理论、方法和应用上发挥各自的优势，设计出具有一定学习能力、动态获取知识能力的系统。

Brooks 提出了无需知识表示的智能（Brooks 1991a），无需推理的智能（Brooks 1991b）。他认为智能只是在与环境的交互作用中表现出来，在许多方面是行为心理学观点在现代人工智能中的反映，人们称之为基于行为的人工智能，简言之，称为行为主义。

这三种研究从不同侧面研究人的自然智能，与人脑思维模型有对应关系。粗略地划分，可以认为符号主义研究抽象思维，连接主义研究形象思维，而行为主义研究感知思维。表 1.1 给出了符号主义、连接主义和行为主义特点的比较。

表 1.1 符号主义、连接主义和行为主义特点的比较

	符号主义	连接主义	行为主义
认识层次	离散	连续	连续
表示层次	符号	连接	行动
求解层次	自顶向下	由底向上	由底向上
处理层次	串行	并行	并行
操作层次	推理	映射	交互
体系层次	局部	分布	分布
基础层次	逻辑	模拟	直觉判断

有人把人工智能分成两大类：一类是符号智能，一类是计算智能。符号智能是以知识为基础，通过推理进行问题求解，也即所谓的传统人工智能。计算智能是以数据为基础，通过训练建立联系，进行问题求解。人工神经网络、遗传算法、模糊系统、进化程序设计、人工生命等都可以包括在计算智能内。

目前,传统人工智能主要运用知识进行问题求解。从实用观点看,人工智能是一门知识工程学:以知识为对象,研究知识的表示方法、知识的运用和知识获取。本书主要介绍和讨论传统人工智能的内容。有关计算智能的内容请参阅史忠植的《神经计算》等。

1.5 人工智能的研究方法

从20世纪50年代以来,人工智能经过发展,形成了许多学派。不同学派的研究方法、学术观点、研究重点有所不同。这里,仅以认知学派、逻辑学派、行为学派为重点,介绍人工智能的研究方法。

1.5.1 认知学派

以 Simon、Minsky 和 Newell 等为代表,从人的思维活动出发,利用计算机进行宏观功能模拟。20世纪50年代,Newell 和 Simon 等共同倡导“启发式程式”。他们编制了 Logic Theorist 计算机程序,模拟人证明数学定理的思维过程。20世纪60年代初,他们又研制了通用问题求解程序 (general problem solver, GPS) 分三个阶段模拟了人在解题过程中的一般思维规律:首先拟订初步解题计划;然后利用公理、定理和规则,按规划实施解题过程;不断进行“目的-手段”分析,修订解题规划;从而使 GPS 具有一定的通用性。

1976年,Newell 和 Simon 提出了物理符号系统假设,认为物理系统表现智能行为必要和充分的条件是它是一个物理符号系统。这样,可以把任何信息加工系统看成是一个具体的物理系统,如人的神经系统、计算机的构造系统等。所谓符号就是模式。任何一个模式,只要它能和其他模式相区别,它就是一个符号。不同的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,即找出哪几个是相同的符号,哪几个是不同的符号。物理符号系统的基本任务和功能是辨认相同的符号和区分不同的符号。

20世纪80年代,Newell 等又致力于 SOAR 系统的研究。SOAR 系统是以知识块 (chunking) 理论为基础,利用基于规则的记忆,获取搜索控制知识和操作符,实现通用问题求解。

Minsky 从心理学的研究出发,认为人们在他们日常的认识活动中,使用了大批从以前的经验中获取并经过整理的知识。该知识是以一种类似框架的结构记存在人脑中。因此,在20世纪70年代他提出了框架知识表示方法。到20世纪80年代,Minsky 认为人的智能,根本不存在统一的理论。1985年,他出版了一本著名的书 *Society of Mind* (《思维社会》)。书中指出思维社会是由大量具有某种思维能力的单元组成的复杂社会。

1.5.2 逻辑学派

逻辑学派以 McCarthy 和 Nilsson 等为代表,主张用逻辑来研究人工智能,即用形式化的方法描述客观世界。他们认为:

- (1) 智能机器必须有关于自身环境的知识;
- (2) 通用智能机器要能陈述性地表达关于自身环境的大部分知识;
- (3) 通用智能机器表示陈述性知识的语言至少要有一阶逻辑的表达能力。

逻辑学派在人工智能研究中,强调的是概念化知识表示、模型论语义、演绎推理等。McCarthy 主张任何事物都可以用统一的逻辑框架来表示,在常识推理中以非单调逻辑为中心。

1.5.3 行为学派

人工智能的研究大部分是建立在一些经过抽象的、过分简单的现实世界模型之上, Brooks 认为应走出这种抽象模型的象牙塔,而以复杂的现实世界为背景,让人工智能理论、技术先经受解决实际问题的考验,并在这种考验中成长。

Brooks 提出了无需知识表示的智能 (Brooks 1991a),无需推理的智能 (Brooks 1991b)。他认为智能只是在与环境的交互作用中表现出来,其基本观点如下:

- (1) 到现场去;
- (2) 物理实现;
- (3) 初级智能;
- (4) 行为产生智能。

以这些观点为基础, Brooks 研制了一种机器虫,用一些相对独立的功能单元,分别实现避让、前进、平衡等功能,组成分层异步分布式网络,取得了一定程度的成功,特别对机器人的研究开创了一种新的方法。

不同的人工智能学派,对 1.2 节中提到的五个基本认知问题给以不同的回答。以 Nilsson 为代表的逻辑学派,对认知问题的(1)~(4)给予肯定的回答,对(5)持中立观点。以 Newell 为代表的认知学派,对认知问题的(1)、(3)、(5)给予肯定的回答。而以 Brooks 为代表的行为学派,对认知问题的(1)~(5)持否定的看法。

1.6 自动推理

从一个或几个已知的判断(前提)逻辑地推论出一个新的判断(结论)的思维形式称为推理,这是事物的客观联系在意识中的反映。人解决问题就是利用以

往的知识,通过推理得出结论。自动推理的理论和技術是程序推导、程序正确性证明、专家系统、智能机器人等研究领域的重要基础。

自动推理早期的工作主要集中在机器定理证明。开创性的工作是 Simon 和 Newell 的 Logic Theorist。1956 年, Robinson 提出归结原理,把自动推理的研究向前推进了一步。归结法推理规则简单,而且在逻辑上是完备的,因而成为逻辑式程序设计语言 Prolog 的计算模型。后来又出现了自然演绎法和等式重写式等。这些方法在某些方面优于归结法,但它们本质上都存在组合问题,都受到难解性的制约。

从任何一个实用系统来说,总存在着很多非演绎的部分,因而导致了各种各样推理算法的兴起,并削弱了企图为人工智能寻找一个统一的基本原理的观念。从实际的观点来看,每一种推理算法都遵循其特殊的、与领域相关的策略,并倾向于使用不同的知识表示技术。从另一方面来说,如果能找到一个统一的推理理论,当然是很有用的。人工智能理论研究的一个很强的推动力就是要设法寻找更为一般的、统一的推理算法。

人工智能自动推理研究的成果之一是非单调逻辑的发明。这是一种伪演绎系统。所谓非单调推理,指的是如果一个正确的公理加到理论中,反而会使预先所得到的一些结论变得无效。非单调推理明显地比单调推理复杂。非单调推理过程就是建立假设,进行标准逻辑意义下的推理,若发现不一致,进行回溯,以便消除不一致,再建立新的假设。

1978 年, Reiter 首先提出了非单调推理方法封闭世界假设 (CWA) (Reiter 1978),并提出默认推理 (Reiter 1980)。1979 年, Doyle 建立了非单调推理系统 TMS (Doyle 1979)。1980 年, McCarthy 提出限定逻辑 (McCarthy 1980)。限定某个谓词 p 就是排除了以 p 的原有事实所建的大部分模型,而只剩下有关 p 的最小模型。不同形式的限定公理会引出不同类型的最小化标准。

定量模拟是计算机在科学计算领域的常规应用。但是人们常常不需要详细的计算数据,就能预测或解释一个系统的行为。这不能简单地通过演绎进行求解,人工智能提出了定性推理的方法。定性推理把物理系统或物理过程细分为子系统或子过程,对于每个子系统或子过程以及它们之间的相互作用或影响都建立起结构描述,通过局部因果性的传播和行为合成,获得实际物理系统的行为描述和功能描述。最基本的定性推理方法有三种:即 de Kleer 的基于部件的定性方程方法, Forbus 的定性进程方法, Kuipers 的基于约束的定性仿真方法。定性与定量推理的结合将会对专家系统科学决策的发展产生重大影响。

在现实世界中存在大量不确定问题。不确定性来自人类的主观认识与客观实际之间存在的差异。事物发生的随机性,人类知识的不完全、不可靠、不精确和不一致,自然语言中存在的模糊性和歧义性都反映了这种差异,都会带来不确定