

高级人工智能

科学

P18
32



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

高级人工智能

史忠植 编著

科学出版社

438918

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

高级人工智能

史忠植 编著

科学出版社

1998

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。在智能革命中人工智能是核心。

本书是《知识工程》《神经计算》的姐妹篇,系统地论述了人工智能研究的最新成果,反映了当前人工智能研究的热点。全书共分十二章,分别讨论了人工智能的认知问题、人工智能逻辑、约束推理、定性推理、基于范例推理、归纳学习、类比学习、解释学习、知识发现和数据开采、分布式人工智能、进化计算和人工生命。

本书内容新颖,力求采用智能主体概念描述问题。强调理论与实际结合,通过实例说明原理,富有启发性。取材国内外最新资料,认真总结了作者的科研成果,反映了90年代的研究水平。可供计算机、自动控制及有关专业用作博士生、硕士生的教材,对有关科技人员也有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

高级人工智能/史忠植编著. —北京:科学出版社, 1997. 12
(中国科学院研究生教学丛书)

ISBN 7-03-005984-0

I. 高… II. 史… III. 人工智能—研究生教育—教学参考资料 N. TP18

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第05128号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100010

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

*

1998年1月第一版 开本:787×1092 1/16

1998年1月第一次印刷 印张:20

印数:1-1 300 字数:451 000

定价:32.00元

《中国科学院研究生教学丛书》序

在 21 世纪曙光初露,中国科技、教育面临重大改革和蓬勃发展之际,《中国科学院研究生教学丛书》——这套凝聚了中国科学院新老科学家、研究生导师们多年心血的研究生教材面世了。相信这套丛书的出版,会在一定程度上缓解研究生教材不足的困难,对提高研究生教育质量起着积极的推动作用。

21 世纪将是科学技术日新月异,迅猛发展的新世纪,科学技术将成为经济发展的最重要的资源和不竭的动力,成为经济和社会发展的首要推动力量。世界各国之间综合国力的竞争,实质上是科技实力的竞争。而一个国家科技实力的决定因素是它所拥有的科技人才的数量和质量。我国要想在 21 世纪顺利地实施“科教兴国”和“可持续发展”战略,实现小平同志规划的第三步战略目标——把我国建设成中等发达国家,关键在于培养造就一支数量宏大、素质优良、结构合理,有能力参与国际竞争与合作的科技大军。这是摆在我国高等教育面前的一项十分繁重而光荣的战略任务。

中国科学院作为我国自然科学与高新技术的综合研究与发展中心,在建院之初就明确了出成果出人才并举的办院宗旨,长期坚持走科研与教育相结合的道路,发挥了高级科技专家多,科研条件好,科研水平高的优势,结合科研工作,积极培养研究生;在出成果的同时,为国家培养了数以万计的研究生。当前,中国科学院正在按照江泽民同志关于中国科学院要努力建设好“三个基地”的指示,在建设具有国际先进水平的科学研究基地和促进高新技术产业发展基地的同时,加强研究生教育,努力建设好高级人才培养基地,在肩负起发展我国科学技术及促进高新技术产业发展重任的同时,为国家源源不断地培养输送大批高级科技人才。

质量是研究生教育的生命,全面提高研究生培养质量是当前我国研究生教育的首要任务。研究生教材建设是提高研究生培养质量的一项重要基础性工作。由于各种原因,目前我国研究生教材的建设滞后于研究生教育的发展。为了改变这种情况,中国科学院组织了一批在科学前沿工作,同时又具有相当教学经验的科学家撰写研究生教材,并以专项资金资助优秀的研究生教材的出版。希望通过数年努力,出版一套面向 21 世纪科技发展,体现中国科学院特色的高水平的研究生教学丛书。本丛书内容力求具有科学性、系统性和基础性,同时也兼顾前沿性,使阅读者不仅能获得相关学科的比较系统的科学基础知识,也能被引导进入当代科学研究的前沿。这套研究生教学丛书,不仅适合于在校研究生学习使用,也可以作为高校教师和专业研究人员工作和学习的参考书。

“桃李不言，下自成蹊。”我相信，通过中国科学院一批科学家的辛勤耕耘，《中国科学院研究生教学丛书》将成为我国研究生教育园地的一丛鲜花，也将似润物春雨，滋养莘莘学子的心田，把他们引向科学的殿堂，不仅为科学院，也为全国研究生教育的发展作出重要贡献。

饶阳祥

前 言

21 世纪人类将全面进入信息社会,信息成为最关键的战略物资,它将被转化为现代的智力工具。工业化社会转向信息化社会,信息科学成为高新技术的源泉。人类对智能化的追求将导致“智能革命”。所谓“智能革命”是指人的自然智能通过人工智能的模仿和扩展,实现社会生产的自动化和智能化,促进知识密集型经济的发展。

在智能革命中,人工智能是核心。作为一门学科,人工智能于 1956 年问世以来,同许多其它事物一样,发展是曲折的,不平坦的。在理想和实践的矛盾中,探索着人工智能发展的有效途径和技术。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。经过 40 多年的研究,人工智能的研究成果可以归纳为符号智能、计算智能、人工生命等方面。

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为知识工程阶段。知识工程侧重研究知识信息处理的方法和技术。1988 年由清华大学出版社出版的《知识工程》一书,较好地总结和介绍了这方面的原理和成果。

计算智能包括神经计算、模糊系统、遗传算法、进化程序设计等。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。脑科学是 21 世纪科研活动最重要的领域之一。1990 年美国制定了“脑十年计划”。1991 年欧共体制定了“EC 脑十年计划”。1996 年 7 月 3 日,日本科技厅决定实施“脑科学的时代”20 年研究计划。其中包括脑活动解析、脑疾病治疗及脑计算机的研究。神经计算是从神经生理学和认知科学研究成果出发,应用数学方法描述非程序的和适应性的、大脑风格的人工神经网络信息处理的本质和能力。电子工业出版社于 1993 年出版的《神经计算》,正是从信息处理的高度来探讨人工神经网络的发展。

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。但是,从人类思维模型看,这两个学派,正是研究思维的不同形态。符号智能研究抽象思维,神经计算研究形象思维。人们通常说,抽象思维是人脑左半球的功能,形象思维是人脑右半球的功能。两者之间如何联系,互为补充,是当前人工智能、认知科学、神经科学研究的热门话题之一。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。

从人类思维的层次模型出发,我们提出了人工思维模型。这是基于智能主体(intelligent agent)的概念,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。智能主体的研究成为 90 年代人工智能研究的核心。

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强大的推动力,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,成为人工智能研究新的途径。

本书是在上述思想指导下,吸收国内外大量最新的研究成果,特别是在总结中国科学院计算技术研究所计算机科学开放实验室,完成国家自然科学基金、863 高技术计划等资助项目所取得的研究成果的基础上写成的。本书系统地论述了人工智能领域研究的最新成果,反映出当前人工智能研究的热点。全书共分十二章。第一章是绪论,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。第二章讨论人工智能逻辑,着重讨论与智能主体有关的逻辑体系。第三章讨论约束推理,介绍许多实用的约束推理方法。第四章介绍定性推理,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,其主要成果构成第五章。第六、七、八、九章给出了机器学习研究的最新进展。第六章论述归纳学习。第七章介绍类比学习。第八章讨论解释学习。第九章讨论知识发现和数据开采,特别介绍粗糙集理论。第十章论述分布式人工智能,结合我们研究的成果,重点讨论智能主体的关键问题。在第十一章,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,概要介绍了人工生命研究的内容和意义。

根据中国科学技术大学研究生院(北京)计算机科学技术专业博士、硕士研究生教学的需要,作者于 1994 年开设了高级人工智能课程,并基于以上宗旨撰写了讲义。此后,经不断修改和扩充,于 1996 年 12 月正式定稿,形成本书。本书实际上是集体研究成果的总结,先后有两位博士后、16 位博士生、60 多位硕士生参加了研究,其中田启家博士后、罗玉龙博士后、廖乐健博士、叶世伟博士、张建博士、莫纯欢博士、王军博士、王文杰博士、马海波、李宝东、汪涛、陈源等作了大量工作。清华大学石纯一教授、美国的胡小华博士、荷兰的黄智生博士、澳大利亚的张成奇博士、张焰博士等为本书提供了有价值的参考文献。作者愿借此机会感谢他们的诚挚合作和有益的研究、讨论。中国科学技术大学研究生院的学生曾对本书提出许多宝贵的意见。本书涉及的研究项目得到国家自然科学基金、国家 863 高技术计划的资助。本书得到中国科学院研究生教材出版基金的资助。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

1997 年 3 月

中国科学院研究生教学丛书
总编委会成员名单

主 任：路甬祥
常务副主任：白春礼
副 主 任：李云玲 师昌绪 杨 乐 汪尔康 沈允钢
黄荣辉 叶朝辉 李 佩
委 员：赵保恒 匡廷云 冯克勤 冯玉琳 朱清时
王 水 刘政凯 龚 立 侯建勤 颜基义
黄凤宝

中国科学院研究生教学丛书
技术学科编委会成员名单

主 编：师昌绪
副主编：冯玉琳
编 委：刘政凯 徐至展 陈先霖 王占国 马颂德
吴承康 史忠植

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
1.1 人工智能的认知问题.....	(1)
1.2 思维的层次模型	(2)
1.3 符号智能	(3)
1.4 人工智能的发展概况	(5)
1.5 人工智能的研究方法	(6)
1.5.1 认知学派	(7)
1.5.2 逻辑学派	(7)
1.5.3 行为学派	(7)
1.6 自动推理	(8)
1.7 机器学习	(10)
1.8 分布式人工智能	(11)
1.9 人工思维模型	(13)
1.10 知识系统.....	(14)
第二章 人工智能逻辑	(17)
2.1 重要的形式工具——逻辑	(17)
2.1.1 逻辑程序设计	(17)
2.1.2 关于知识的表示与推理	(18)
2.2 非单调逻辑	(20)
2.3 默认逻辑	(21)
2.4 限定逻辑	(24)
2.5 自认知逻辑	(26)
2.5.1 Moore 系统 $\mathcal{L}_B$	(26)
2.5.2 OS 逻辑	(27)
2.5.3 标准型定理	(28)
2.5.4 $\Diamond$ -记号以及稳定扩张的一种判定过程.....	(29)
2.6 真值维护系统	(31)
2.7 情景演算的逻辑基础	(35)
2.7.1 刻划情景演算的多类逻辑 LR	(36)
2.7.2 LR 中的基本动作理论	(37)
2.7.3 多类逻辑 LR 的改进	(38)
第三章 约束推理	(41)

3.1	概述	(41)
3.2	回溯法	(45)
3.3	约束传播	(46)
3.4	约束传播在树搜索中的作用	(48)
3.5	智能回溯与真值维护	(48)
3.6	变量例示次序与赋值次序	(49)
3.7	局部修正搜索法	(49)
3.8	基于图的回跳法	(50)
3.9	基于影响的回跳法	(51)
3.10	约束关系运算的处理	(54)
3.10.1	恒等关系的单元共享策略	(54)
3.10.2	区间传播	(56)
3.10.3	不等式图	(57)
3.10.4	不等式推理	(58)
3.11	约束推理系统 COPS	(58)
第四章	定性推理	(62)
4.1	概述	(62)
4.2	定性推理的基本方法	(63)
4.3	定性模型推理	(63)
4.4	定性进程推理	(65)
4.5	定性仿真推理	(68)
4.5.1	定性状态转换	(69)
4.5.2	QSIM 算法	(70)
4.6	代数方法	(71)
4.7	几何空间定性推理	(72)
4.7.1	空间逻辑	(73)
4.7.2	空间时间关系描述	(74)
4.7.3	空间和时间逻辑的应用	(76)
4.7.4	Randell 算法	(76)
第五章	基于范例推理	(78)
5.1	概述	(78)
5.2	基于范例学习的一般过程	(80)
5.3	范例的表示	(82)
5.3.1	语义记忆单元	(83)
5.3.2	记忆网	(83)
5.4	基于记忆网的范例检索	(86)
5.4.1	检索问题	(86)
5.4.2	语义记忆单元和范例检索	(86)

5.4.3	检索信息集与源范例的对应	(87)
5.4.4	单概念的范例检索算法 AS	(88)
5.4.5	多概念的范例检索算法 AM	(89)
5.5	相似性关系	(90)
5.5.1	语义相似性	(90)
5.5.2	结构相似性	(90)
5.5.3	目标特征	(91)
5.5.4	个体相似性	(91)
5.5.5	相似性计算	(91)
5.5.6	优选过程	(92)
5.5.7	约束满足理论	(93)
5.6	范例复用	(94)
5.6.1	类比映射	(94)
5.6.2	类比转换	(96)
5.7	范例保存	(97)
5.8	基于范例的规划设计程序	(98)
5.9	范例库维护	(99)
5.10	基于范例推理的洪水预报系统 FOREZ	(99)
第六章	归纳学习	(101)
6.1	概述	(101)
6.2	归纳学习的逻辑基础	(102)
6.2.1	归纳学习的一般模式	(102)
6.2.2	概念获取的条件	(103)
6.2.3	问题背景知识	(104)
6.2.4	选择型和构造型泛化规则	(105)
6.3	偏置变换	(108)
6.4	变型空间方法	(109)
6.4.1	消除候选元素算法	(110)
6.4.2	两种改进算法	(112)
6.5	AQ 归纳学习算法	(113)
6.6	产生与测试方法	(114)
6.7	决策树学习	(116)
6.7.1	CLS 学习算法	(116)
6.7.2	ID3 学习算法	(117)
6.7.3	ID4 学习算法	(120)
6.7.4	ID5 学习算法	(121)
6.8	归纳学习的计算理论	(121)
6.8.1	Gold 学习理论	(122)

6.8.2	模型推理系统	(123)
6.8.3	Valiant 学习理论	(123)
第七章	类比学习	(126)
7.1	什么是类比学习	(126)
7.2	类比的形式定义	(129)
7.3	基于抽象的有用类比推理	(130)
7.4	转换类比	(132)
7.4.1	手段—目的分析的问题求解模型	(132)
7.4.2	类比求解问题计算模型	(133)
7.4.3	问题求解状态变换	(134)
7.4.4	转换类比学习系统	(137)
7.4.5	类比学习的泛化规则	(141)
7.5	派生类比	(144)
7.6	因果关系型类比学习	(145)
7.6.1	类比匹配技术与相似性度量概述	(145)
7.6.2	知识表示	(146)
7.6.3	类比匹配	(148)
7.6.4	抽取问题的特征	(148)
7.6.5	相似度的计算方法	(149)
7.6.6	最佳对应关系匹配	(149)
7.7	联想类比学习	(150)
7.7.1	联想类比	(150)
7.7.2	联想类比条件	(151)
7.8	约束满足类比	(152)
7.8.1	三类约束	(152)
7.8.2	约束满足理论	(153)
7.8.3	ACME	(153)
第八章	解释学习	(155)
8.1	概述	(155)
8.2	解释学习模型	(156)
8.3	解释泛化学习方法	(157)
8.3.1	基本原理	(157)
8.3.2	解释与泛化交替进行	(160)
8.4	全局取代解释泛化方法	(161)
8.5	解释特化学习方法	(164)
8.6	解释泛化的逻辑程序	(166)
8.6.1	工作原理	(166)
8.6.2	元解释器	(167)

8.6.3 实验例子	(168)
8.7 基于知识块的 SOAR 系统	(169)
8.8 可操作性标准	(172)
8.8.1 PRODIGY 的效用问题	(174)
8.8.2 SOAR 系统的可操作性	(174)
8.8.3 MRS-EBG 的可操作性	(175)
8.8.4 META-LEX 的处理方法	(175)
8.9 不完全领域知识下的解释学习	(176)
8.9.1 不完全领域知识	(176)
8.9.2 逆归结方法	(176)
8.9.3 基于深层知识方法	(178)
第九章 知识发现和数据开采	(180)
9.1 概述	(180)
9.2 数据驱动知识发现——BACON	(182)
9.3 模型驱动知识发现——COPER	(184)
9.4 理论驱动式发现方法	(186)
9.4.1 知识表示	(186)
9.4.2 学习实现	(188)
9.4.3 学习发现	(191)
9.5 概念聚类	(191)
9.5.1 概念内聚	(192)
9.5.2 聚类方法	(195)
9.6 数据开采	(197)
9.7 数据开采的数学工具——粗糙集	(198)
9.7.1 粗糙集理论	(199)
9.7.2 粗糙分类	(200)
9.7.3 渔网算法	(201)
9.8 广义粗糙集	(202)
9.9 基于粗糙集的数据约简	(204)
9.10 以数据仓库为基础的数据开采	(206)
9.10.1 数据仓库	(206)
9.10.2 联想规则发现算法	(207)
9.11 知识发现工具 KDT	(208)
9.11.1 系统结构	(209)
9.11.2 知识发现算法	(211)
第十章 分布式人工智能	(212)
10.1 概述	(212)
10.2 分布式问题求解	(214)

10.2.1	分布式问题求解系统分类	(214)
10.2.2	分布式问题求解过程	(215)
10.3	主体	(216)
10.4	主体理论	(217)
10.4.1	理性主体	(217)
10.4.2	BDI 主体模型	(219)
10.4.3	RAO 逻辑框架	(219)
10.4.4	关于对别人进行推理的一个模式——换位推理	(219)
10.4.5	动作理论	(220)
10.4.6	次协调机制的引进	(223)
10.5	主体结构	(223)
10.5.1	反应主体	(223)
10.5.2	认知主体	(223)
10.5.3	复合式主体	(225)
10.6	主体通信	(228)
10.6.1	KQML	(228)
10.6.2	主体通信语言 SACL	(228)
10.6.3	SACL 语法结构	(229)
10.6.4	SACL 保留关键字	(229)
10.7	主体的协调与协作	(235)
10.7.1	计算生态学	(236)
10.7.2	基于对策论的协调与协作	(238)
10.7.3	协商	(238)
10.8	多主体处理环境 MAPE	(240)
10.8.1	主体的逻辑结构	(240)
10.8.2	主体虚拟层	(241)
10.8.3	主体逻辑层	(242)
10.8.4	主体概念层	(244)
10.8.5	多主体系统的总体结构	(245)
10.8.6	主体创建	(246)
10.8.7	多主体系统构建	(248)

第十一章 进化计算 (249)

11.1	概述	(249)
11.2	进化系统理论的形式模型	(250)
11.3	达尔文进化算法	(252)
11.4	分类器系统	(253)
11.5	桶链算法	(257)
11.6	遗传算法	(258)

11.6.1	遗传算法的主要步骤	(259)
11.6.2	表示模式	(259)
11.6.3	杂交操作	(261)
11.6.4	变异操作	(263)
11.6.5	反转操作	(264)
11.7	并行遗传算法	(264)
11.8	分类器系统 Boole	(264)
11.9	规则发现系统	(267)
11.10	进化策略	(270)
11.11	进化程序设计	(270)
第十二章	人工生命	(271)
12.1	引言	(271)
12.2	研究人工生命的原因	(271)
12.3	人工生命的探索	(273)
12.4	人工生命模型	(273)
12.5	人工生命的研究方法和战略	(275)
12.6	计算机生命	(276)
12.7	细胞自动机	(278)
12.8	形态形成理论	(280)
12.9	混沌理论	(281)
参考文献		(283)

第一章 绪 论

1.1 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 等人将对“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、想象、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到新的阶段。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空前未有的高度。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 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。

1.2 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、图象处理、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。

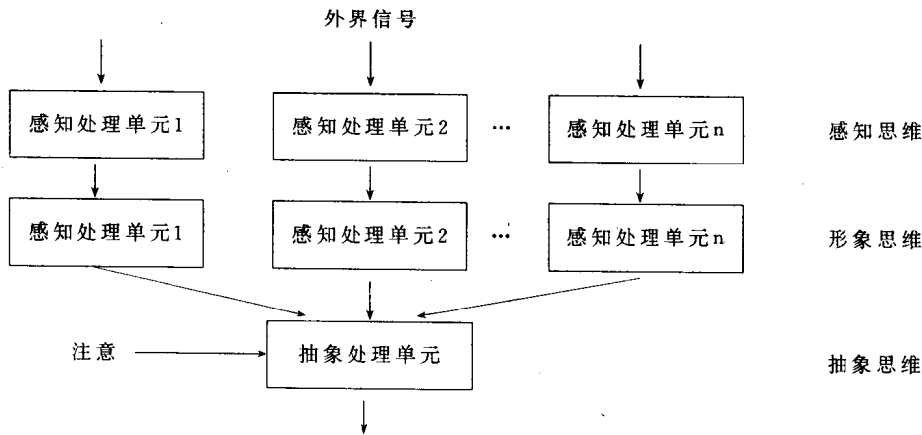


图1.1 思维的层次模型