



Artificial Intelligence:  
Principles & Applications

( 第二版 )

Second Edition

蔡自兴 徐光

CAI Zixing , XU Guangyou

清 华 大 学 出 版 社

(京)新登字 158 号

## 内 容 简 介

这是《人工智能及其应用》一书的第二版。

本书系统地介绍人工智能的基本原理及其应用,全面地反映出国内外人工智能研究和应用的最新进展。全书共十二章:第一章叙述人工智能的概况;第二章到第四章分别研究人工智能的知识表示方法、一般搜索原理和高级求解技术;第五章到第十章讨论人工智能的主要应用,包括专家系统、机器学习(含基于神经网络的学习)、机器人规划、机器视觉、自然语言理解和智能控制等;第十一章简要地介绍人工智能的程序设计工具;第十二章评述人工智能各学派的争论,探讨人工智能对人类各方面的影响,并展望人工智能的发展。与第一版相比,大部分内容得以更新。

本书可作为高等院校有关专业高年级学生和研究生的人工智能课程教材,也可供从事人工智能研究和应用的科技工作者参考使用。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

## 图书在版编目(CIP)数据

人工智能及其应用/蔡自兴,徐光 编著 .- 2版 .—北京:清华大学出版社,1996

ISBN 7-302-02127-9

. 人... . 蔡... 徐... . 人工智能-基本知识 . TP 18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 03512 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

责任编辑: 贾仲良

印 刷 者: 北京海淀清华园印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京科技发行所

开 本: 787× 1092 1/16 印张: 28.5 字数: 730 千字

版 次: 1996 年 5 月第 2 版 1996 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-02127-9/TP · 1004

印 数: 0001—5000

定 价: 29.50 元

谨以此书纪念

傅京孙 院士

常 院士

# 序

通过机器实现模仿人类的行为，已经有很长的历史了。随着电子计算机的出现，对人类智能，尤其是认知过程的模仿和了解，也进行了很多尝试。若从 1956 年正式提出人工智能学科算起，已有 30 多年历史。开始时，人们用顺序处理的符号串来建立模型，也有将人工智能解释为某种联接机制或解释为某种“感知器”，但是不久发现了它的一些局限性而放弃了这一方向的研究，使符号主义的方法成为研究的主流。60 年代以一般问题求解的研究为主，发展了各种搜索算法，并在机器定理证明方面取得了重大进展。70 年代以知识工程、认知科学的研究为主，提出知识工程、专家系统，并且使一批专家系统在实际中得到应用，80 年代以推理技术、知识获取、自然语言理解和机器视觉研究为主。目前，机器翻译系统已有商品出售。随着研究的深入，符号主义观点与方法的局限性也逐渐暴露出来，由于知识表示、知识获取的困难以及巨大的计算量等问题，使联接主义又重新成为研究热点。近年来，利用人工神经网络模仿人类智能的研究有了很大发展，即认为智能的基本单元是神经元，由许多神经元联接起来的网络实现并行分布的运算，可以进行自学习，有自适应功能，能更好地模仿人类智能。人工神经网络虽然避开了知识表示带来的困难，但是，神经元间联结的权值的计算又变成新的困难。此外，也有人提出实现无需知识表示及无需理性的智能，如 Brooks 构造的机器虫，它应付复杂环境的能力可以超过现有的一些机器人。尽管取得了如上所述的许多成果，但是，比起刚刚兴起人工智能研究时的许多专家的预想，则仍有很大的距离。当时，一些专家过于乐观的预想，并没有实现。人工智能的研究要比当初某些专家的预想艰难、复杂得多，其发展道路也是很曲折的。甚至到今天，对机器能否实现智能，仍有争论。相当一部分专家认为，近年人工智能的研究没有产生重大突破，甚至出现某种程度的停滞，应当引起反思。

实际上，我认为人工智能研究进程的曲折以及许多尖锐的争论并不表明人工智能学科没有前景，它只是向我们表明，理解人类认知与智能的机制是人类面临的最困难和最复杂的课题之一。暂时的停滞只是孕育着新的进展与突破。我相信，因为人脑是物质的，智能的机制是可以认识的。人工智能学科的研究，与生物学和心理学等研究结合，将使我们能进一步解开人类智能机制之谜。这不仅使我们能最终了解自身，而且，使我们能够解决许多只有依靠智能才能解决的问题，而

这些问题，许多在目前是无法解决的。此外，人工智能向各领域的渗透，将会给一些领域带来革命性的变化，如智能机器人和智能控制，等等。这就是为什么许多人工智能专家在曲折的道路上，尽管遇到各种困难而仍在不断坚持努力工作的原因。

本书的出版与修订正是在这一背景下进行的。十年前，本书是作者在美国国家工程科学院院士、普渡大学教授傅京孙先生的指导和鼓励下编写的，其目的，一是为计算机科学家和工程师们提供一些人工智能的技术和基础知识；二是填补人工智能理论与实践的间隙。实际上，促进人工智能学科的传播，将人工智能的研究与应用相结合，正是促进人工智能学科发展的最重要途径之一。我想，本书的第一版受到广大读者的欢迎，曾3次印刷，应该说已实现了编写的目标。中国科学院院士常 教授生前也对本书的出版给予热情的指导与支持。本书的修订将是对这两位生前曾对人工智能和模式识别学科热情支持，起过重大推动作用的院士的最好纪念。从本书的第一版到现在已经有十年了。十年来，人们对人工神经网络、机器学习的研究，对知识工程、专家系统的理论与应用研究，以及近年来对人工智能的反思及讨论，都有很大的进展。因此，很有必要对第一版进行相应的补充与修订。在第二版中，作者不仅根据最新研究成果对原有内容进行了重大的增删，而且补充了许多新的内容。计有：人工神经网络，机器学习，自然语言理解，智能控制，人工智能的争论与展望等；对原有内容重新进行组织的包括：不确定性推理，系统组织技术等；根据最新进展重新进行增删的有：专家系统，机器人规划，机器视觉，人工智能编程语言等。除外，本书也注意介绍了应用所必需的编程语言、工具及应用示例等。因此，本书的特点是比较全面地介绍了人工智能的基础知识与技术，做到材料新，易于理解，兼顾基础及应用。我认为，本书的修订，对人工智能学科的传播与应用是适时的，是符合广大读者需要的，因而，将对人工智能学科的发展作出它应有的贡献。

李衍达

1995年12月20日

# 前 言

国际上人工智能研究作为一门科学的前沿和交叉学科，在过去十年中已取得长足进展；在国内，形成一股不小的热潮，使人工智能在我国得到迅速传播与发展。十年前我们在美国编著的《人工智能及其应用》（傅京孙，蔡自兴，徐光编著，清华大学出版社，1987）已不能适应本学科发展与教学以及广大读者的需要。因此，对本书第一版的修订已势在必行。

本书第一版是在美国国家工程科学院院士、普渡大学 (Purdue University) 教授傅京孙先生的悉心指导下完成的。在该版序言中，傅先生曾指出编写该书的目的有二：其一，为计算机科学家和工程师们提供一些人工智能的技术和基础知识；其二，填补人工智能理论与实践的间隙。现在我们仍然遵循这些宗旨来修订本书，并力求反映人工智能研究和应用的最新进展。

本书第二版共 12 章。第一章叙述人工智能的概况，列举出人工智能的研究与应用领域。第二章至第四章研究人工智能的知识表示方法、一般搜索原理和高级求解技术。第五章至第十章比较详细地讨论了人工智能的主要应用，包括专家系统、机器学习、机器人规划、机器视觉、自然语言理解和智能控制等。第十一章简要地介绍人工智能的程序设计工具，涉及编程语言、关系数据库、专用开发工具和人工智能机等。第十二章评述近年来关于人工智能的争论，讨论人工智能对人类经济、社会和文化的影响，展望人工智能的发展。与第一版相比，许多内容都是第一次出现的，如机器学习（含训练神经网络的学习）、自然语言理解和智能控制等。其它章节也在第一版的基础上作了相应的修改、精简或补充。

本书可作为高等院校有关专业高年级学生和研究生的人工智能课程教材，也可供从事人工智能研究与应用的科技工作者学习参考。

在本书第二版出版时，我们特别怀念我们的良师益友，美国国家工程科学院院士傅京孙教授和中国科学院院士常 教授。他们生前对本书第一版的编写和出版工作给予热情指教和有力帮助。谨以此书作为对两位先生的最好纪念。

承蒙广大读者厚爱，本书第一版曾三次印刷，共印刷 5.5 万册，被数百所院校用作教材或教学参考书。1992 年 3 月，台湾儒林图书出版公司又在台北出版了该书的繁体字版，向海外发行。我国科技教育界的许多领导和专家以及一些外国教授，对该书给予充分肯定。部分专家和读者以及我们的学生还对该书提出不少

有益的修订建议。国务委员兼国家科委主任、中国科学院院士和中国工程院院士宋健教授，在极其繁忙的国务活动中，曾于1988年2月亲笔给蔡自兴同志来信，对该书作出很高评价，体现出他对发展我国人工智能的关注和对作者的鼓励。1993年5月，宋主任又赐寄题词“人智能则国智，科技强则国强”，很好地阐明了人工智能与提高民族素质、增强科技实力和建设现代化强国的辩证关系，也是对我们和全国人工智能工作者的殷切期望。在本书修订过程中，宋健教授再次给予关怀与鼓励。中国科学院院士、上海交通大学张钟俊教授和中国科学院院士、中国科学院自动化研究所戴汝为教授也很关心本书的修订及其进展。许多读者也对本书的修订表示了热情的支持。现在，中国科学院院士、清华大学李衍达教授又在百忙中为本书第二版作序，使本书增添光彩。所有这些，都使作者深受鼓舞。在此，谨向诸位领导、专家和广大读者表示诚挚的感谢。

我们还要衷心感谢中南工业大学、清华大学和清华大学出版社有关领导、专家。如果没有他们的大力支持与合作，本书第二版就不可能迅速与读者见面。

我们要特别感谢国内外人工智能专著、教材和许多高水平论文报告的作者们，他们是何华灿，何新贵，何志钧，胡守仁，林尧瑞，蒋新松，沈清，施鹏飞，涂序彦，徐立本，张钹，E.A. Feigenbaum, C.S.G. Lee, N. J. Nilsson, E. Rich, A. C. Sanderson, G. N. Saridis, S. L. Tanimoto 和 P.H. Winston 等教授。他们的作品或与他们的讨论为我们修订本书提供了丰富营养，使我们受益匪浅。我们在本书中引用了他们的部分材料，使本书能够取各家之长，较全面地反映人工智能各个研究领域的最新进展。刘巧光、丁宓佳、王晶、肖晓明、蔡竞峰和蔡昱峰等同志打印了本书部分书稿或提供有关服务。对于他们的帮助，我们也深表谢意。

本书第二版由蔡自兴教授执笔、徐光 教授审阅。由于作者学术水平有限，修订时间又较为紧迫，加上人工智能发展很快，对有些新领域我们尚不熟悉；因此，书中不妥和错误之处在所难免。我们诚恳地希望各位专家和读者不吝指教和帮助。对此，我们将深为感激。

蔡自兴 徐光

1996年3月18日

# 目 录

|                        |                             |    |
|------------------------|-----------------------------|----|
| 序 .....                | 2.4 语义网络法 .....             | 36 |
| 前言 .....               | 2.4.1 二元语义网络的表示 .....       | 37 |
| 第一章 绪论 .....           | 2.4.2 多元语义网络的表示 .....       | 39 |
| 1.1 人工智能 .....         | 2.4.3 连接词和量化的表示 .....       | 39 |
| 1.1.1 人工智能的定义 .....    | 2.4.4 语义网络的推理过程 .....       | 43 |
| 1.1.2 人工智能的起源与发展 ..... | 2.5 框架 (frame) 表示 .....     | 48 |
| 1.1.3 人类智能的计算机模拟 ..... | 2.5.1 框架的构成 .....           | 48 |
| 1.2 人工智能的研究与应用领域 ..... | 2.5.2 框架的推理 .....           | 52 |
| 1.2.1 问题求解 .....       | 2.6 剧本 (script) 表示 .....    | 53 |
| 1.2.2 逻辑推理与定理证明 .....  | 2.6.1 剧本的构成 .....           | 53 |
| 1.2.3 自然语言理解 .....     | 2.6.2 剧本的推理 .....           | 54 |
| 1.2.4 自动程序设计 .....     | 2.7 过程 (procedure) 表示 ..... | 55 |
| 1.2.5 专家系统 .....       | 2.8 小结 .....                | 57 |
| 1.2.6 机器学习 .....       | 习题 .....                    | 58 |
| 1.2.7 人工神经网络 .....     | 第三章 一般搜索原理 .....            | 60 |
| 1.2.8 机器人学 .....       | 3.1 盲目搜索 .....              | 60 |
| 1.2.9 模式识别 .....       | 3.1.1 图搜索策略 .....           | 60 |
| 1.2.10 机器视觉 .....      | 3.1.2 宽度优先搜索 .....          | 61 |
| 1.2.11 智能控制 .....      | 3.1.3 深度优先搜索 .....          | 63 |
| 1.2.12 智能检索 .....      | 3.1.4 等代价搜索 .....           | 66 |
| 1.2.13 智能调度与指挥 .....   | 3.2 启发式搜索 .....             | 66 |
| 1.2.14 系统与语言工具 .....   | 3.2.1 启发式搜索策略 .....         | 67 |
| 1.3 本书概要 .....         | 3.2.2 估价函数 .....            | 67 |
| 第二章 知识表示方法 .....       | 3.2.3 有序搜索 .....            | 68 |
| 2.1 状态空间法 .....        | 3.2.4 $A^*$ 算法 .....        | 70 |
| 2.1.1 问题状态描述 .....     | 3.2.5 双向搜索 .....            | 72 |
| 2.1.2 状态图示法 .....      | 3.3 消解原理 .....              | 73 |
| 2.1.3 状态空间表示举例 .....   | 3.3.1 化为子句集 .....           | 74 |
| 2.2 问题归约法 .....        | 3.3.2 消解推理规则 .....          | 76 |
| 2.2.1 问题归约描述 .....     | 3.3.3 含有变量的消解式 .....        | 77 |
| 2.2.2 与或图表示 .....      | 3.3.4 消解反演求解过程 .....        | 78 |
| 2.2.3 问题归约机理 .....     | 3.3.5 含状态项的回答语句的求取 ...      | 81 |
| 2.3 谓词逻辑法 .....        | 3.4 通用问题求解系统 .....          | 87 |
| 2.3.1 谓词演算 .....       | 3.4.1 通用问题求解原理 .....        | 87 |
| 2.3.2 谓词公式 .....       | 3.4.2 差别操作符表 .....          | 88 |
| 2.3.3 置换与合一 .....      | 3.5 小结 .....                | 90 |
|                        | 习题 .....                    | 91 |

|                                  |     |                                 |     |
|----------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 第四章 高级求解技术 .....                 | 93  | 5.5.2 咨询子系统 .....               | 155 |
| 4.1 规则演绎系统 .....                 | 93  | 5.5.3 静态数据库 .....               | 157 |
| 4.1.1 规则正向演绎系统 .....             | 93  | 5.5.4 动态数据库 .....               | 161 |
| 4.1.2 规则逆向演绎系统 .....             | 99  | 5.5.5 非精确推理 .....               | 162 |
| 4.1.3 规则双向演绎系统 .....             | 101 | 5.5.6 控制策略 .....                | 165 |
| 4.2 系统组织技术 .....                 | 103 | 5.6 新一代专家系统 .....               | 167 |
| 4.2.1 议程表 .....                  | 103 | 5.6.1 新一代专家系统的特征 .....          | 167 |
| 4.2.2 黑板法 .....                  | 104 | 5.6.2 分布式专家系统 .....             | 168 |
| 4.2.3 $\epsilon$ -极小搜索法 .....    | 104 | 5.6.3 协同式专家系统 .....             | 170 |
| 4.3 不确定性推理 .....                 | 105 | 5.7 小结 .....                    | 172 |
| 4.3.1 关于证据的不确定性 .....            | 105 | 习题 .....                        | 172 |
| 4.3.2 关于结论的不确定性 .....            | 106 | 第六章 机器学习 .....                  | 174 |
| 4.3.3 多个规则支持同一事<br>实时的不确定性 ..... | 107 | 6.1 机器学习的定义、研究意义<br>与发展历史 ..... | 174 |
| 4.4 非单调推理 .....                  | 108 | 6.1.1 机器学习的定义和研<br>究意义 .....    | 174 |
| 4.4.1 缺省推理 .....                 | 108 | 6.1.2 机器学习的发展史 .....            | 175 |
| 4.4.2 非单调推理系统 .....              | 110 | 6.2 机器学习的主要策略与基本结构 .....        | 176 |
| 4.5 小结 .....                     | 113 | 6.2.1 机器学习的主要策略 .....           | 176 |
| 习题 .....                         | 114 | 6.2.2 机器学习系统的基本结构 .....         | 177 |
| 第五章 专家系统 .....                   | 117 | 6.3 机械学习 .....                  | 179 |
| 5.1 产生式系统 .....                  | 117 | 6.3.1 机械学习的模式及<br>主要问题 .....    | 179 |
| 5.1.1 产生式系统的组成 .....             | 117 | 6.3.2 机械学习应用举例 .....            | 180 |
| 5.1.2 产生式系统的表示 .....             | 119 | 6.4 基于解释经验的学习 .....             | 182 |
| 5.1.3 产生式系统示例 .....              | 123 | 6.4.1 解释学习的基本原理 .....           | 182 |
| 5.2 专家系统 .....                   | 131 | 6.4.2 学习形式与功能 .....             | 187 |
| 5.2.1 专家系统的定义与类型 .....           | 131 | 6.4.3 解释学习的匹配 .....             | 190 |
| 5.2.2 专家系统的一般特点 .....            | 134 | 6.5 基于事例的学习 .....               | 193 |
| 5.2.3 专家系统的结构 .....              | 135 | 6.5.1 原经验的记录与检索 .....           | 193 |
| 5.2.4 专家系统的建造步骤<br>与设计技巧 .....   | 136 | 6.5.2 最邻近物体的寻求 .....            | 196 |
| 5.2.5 专家系统的评价 .....              | 138 | 6.6 基于概念的学习 .....               | 200 |
| 5.3 专家系统开发工具 .....               | 141 | 6.6.1 类型定义 .....                | 200 |
| 5.3.1 骨架型开发工具 .....              | 141 | 6.6.2 分类程序 .....                | 201 |
| 5.3.2 语言型开发工具 .....              | 143 | 6.7 基于类比的学习 .....               | 204 |
| 5.3.3 构造辅助工具 .....               | 144 | 6.8 基于神经网络的学习 .....             | 206 |
| 5.3.4 支撑环境 .....                 | 144 | 6.8.1 神经网络的组成与特性 .....          | 206 |
| 5.4 专家系统设计举例 .....               | 146 | 6.8.2 基于反向传播网络的学习 .....         | 210 |
| 5.4.1 专家知识的描述 .....              | 146 | 6.8.3 基于 Hopfield 网络的学习 .....   | 217 |
| 5.4.2 知识的使用 .....                | 150 | 6.9 小结 .....                    | 221 |
| 5.4.3 决策的解释 .....                | 153 | 习题 .....                        | 221 |
| 5.5 专家系统实例——MYCIN 剖析 .....       | 153 | 第七章 机器人规划 .....                 | 223 |
| 5.5.1 MYCIN 概述 .....             | 154 | 7.1 机器人规划的作用与任务 .....           | 223 |

|                       |                         |     |                         |                      |     |
|-----------------------|-------------------------|-----|-------------------------|----------------------|-----|
| 7.1.1                 | 规划的作用与问题分解途径 .....      | 223 | 8.3.2                   | 位置网络表示 .....         | 281 |
| 7.1.2                 | 机器人规划系统的任务与方法 .....     | 226 | 8.3.3                   | 视觉系统的控制策略 .....      | 282 |
| 7.2                   | 积木世界的机器人规划 .....        | 230 | 8.4                     | 物体形状的分析与识别 .....     | 282 |
| 7.2.1                 | 积木世界的机器人问题 .....        | 230 | 8.4.1                   | 复杂形状物体的表示 .....      | 282 |
| 7.2.2                 | 用 F 规则求解规划序列 .....      | 231 | 8.4.2                   | 三维物体的形状描述 .....      | 286 |
| 7.3                   | STRIPS 规划系统 .....       | 233 | 8.4.3                   | 物体形状识别方法 .....       | 287 |
| 7.3.1                 | STRIPS 系统的组成 .....      | 233 | 8.5                     | 机器人视觉系统举例 .....      | 290 |
| 7.3.2                 | STRIPS 系统规划过程 .....     | 234 | 8.5.1                   | EYECOM 机器人视觉系统 ..... | 290 |
| 7.3.3                 | 含有多重解答的规划 .....         | 236 | 8.5.2                   | 机器人三维视觉系统 .....      | 293 |
| 7.4                   | 具有学习能力的规划系统 .....       | 239 | 8.6                     | 小结 .....             | 297 |
| 7.4.1                 | PULP-I 系统的结构与操作方式 ..... | 240 | 习题                      | .....                | 297 |
| 7.4.2                 | PULP-I 的世界模型与规划结果 ..... | 241 | <b>第九章 自然语言理解</b> ..... |                      | 301 |
| 7.5                   | 分层规划 .....              | 242 | 9.1                     | 语言及其理解的一般问题 .....    | 301 |
| 7.5.1                 | 长度优先搜索 .....            | 242 | 9.1.1                   | 语言与语言理解 .....        | 301 |
| 7.5.2                 | NOAH 规划系统 .....         | 243 | 9.1.2                   | 自然语言理解研究的进展 .....    | 303 |
| 7.6                   | 基于专家系统的机器人规划 .....      | 245 | 9.1.3                   | 自然语言理解过程的层次 .....    | 303 |
| 7.6.1                 | 系统结构和规划机理 .....         | 245 | 9.2                     | 句法和语义的自动分析 .....     | 305 |
| 7.6.2                 | ROPES 机器人规划系统 .....     | 247 | 9.2.1                   | 句法模式匹配和转移网络 .....    | 305 |
| 7.7                   | 太空构件装配顺序规划系统 .....      | 254 | 9.2.2                   | 扩充转移网络 .....         | 307 |
| 7.7.1                 | 太空构件装配及其顺序规划 .....      | 254 | 9.2.3                   | 词汇功能语法 (LFG) .....   | 309 |
| 7.7.2                 | 三维结构装配顺序规划示例 .....      | 257 | 9.2.4                   | 语义的解析 .....          | 310 |
| 7.8                   | 小结 .....                | 259 | 9.3                     | 句子的自动理解 .....        | 312 |
| 习题                    | .....                   | 259 | 9.3.1                   | 简单句的理解方法 .....       | 312 |
| <b>第八章 机器视觉</b> ..... |                         | 262 | 9.3.2                   | 复合句的理解方法 .....       | 315 |
| 8.1                   | 图象的理解与分析 .....          | 263 | 9.4                     | 语言的自动生成 .....        | 317 |
| 8.1.1                 | 视觉信息的表达方法 .....         | 263 | 9.5                     | 文本的自动翻译——机器翻译 .....  | 318 |
| 8.1.2                 | 边缘距离的计算 .....           | 264 | 9.6                     | 自然语言理解系统的主要模型 .....  | 320 |
| 8.1.3                 | 表面方向的计算 .....           | 267 | 9.7                     | 自然语言理解系统应用举例 .....   | 322 |
| 8.2                   | 积木世界的景物分析 .....         | 270 | 9.7.1                   | 自然语言自动理解系统 .....     | 322 |
| 8.2.1                 | 积木世界景物的线条标示方法 .....     | 271 | 9.7.2                   | 机器翻译系统 ARIANE .....  | 323 |
| 8.2.2                 | 无断裂和阴影时三面顶点的标示方法 .....  | 273 | 9.7.3                   | 自然语言问答系统 .....       | 325 |
| 8.2.3                 | 有断裂和阴影时线条图的分析 .....     | 277 | 9.8                     | 小结 .....             | 327 |
| 8.3                   | 视觉的知识表示与控制策略 .....      | 279 | 习题                      | .....                | 328 |
| 8.3.1                 | 视觉信息的语义网络表示 .....       | 280 | <b>第十章 智能控制</b> .....   |                      | 329 |
|                       |                         |     | 10.1                    | 智能控制的发展与定义 .....     | 329 |
|                       |                         |     | 10.1.1                  | 智能控制的产生与发展 .....     | 329 |
|                       |                         |     | 10.1.2                  | 智能控制的定义 .....        | 331 |
|                       |                         |     | 10.2                    | 智能控制的结构理论与特点 .....   | 332 |
|                       |                         |     | 10.2.1                  | 智能控制的结构理论 .....      | 332 |
|                       |                         |     | 10.2.2                  | 智能控制器的一般结构 .....     | 336 |
|                       |                         |     | 10.2.3                  | 智能控制的特点 .....        | 337 |

|                          |               |     |                            |                  |     |
|--------------------------|---------------|-----|----------------------------|------------------|-----|
| 10.3                     | 智能控制的研究领域     | 337 | 11.5                       | 专用开发工具           | 388 |
| 10.4                     | 智能控制系统        | 340 | 11.6                       | 人工智能机            | 388 |
| 10.4.1                   | 分级递阶智能控制系统    | 340 | 11.7                       | 小结               | 390 |
| 10.4.2                   | 专家控制系统        | 344 | 习题                         |                  | 390 |
| 10.4.3                   | 模糊控制系统        | 347 | <b>第十二章 人工智能的争论与展望</b> 392 |                  |     |
| 10.4.4                   | 学习控制系统        | 350 | 12.1                       | 关于人工智能的争论        | 392 |
| 10.4.5                   | 神经控制系统        | 354 | 12.1.1                     | 人工智能的主要学派        | 393 |
| 10.5                     | 智能控制应用示例      | 357 | 12.1.2                     | 对人工智能理论的争论       | 394 |
| 10.6                     | 小结            | 362 | 12.1.3                     | 对人工智能方法的争论       | 395 |
| 习题                       |               | 364 | 12.1.4                     | 对人工智能技术路线的<br>争论 | 395 |
| <b>第十一章 人工智能程序设计</b> 365 |               |     | 12.2                       | 人工智能对人类的影响       | 396 |
| 11.1                     | 逻辑型编程语言       | 365 | 12.2.1                     | 人工智能对经济的影响       | 396 |
| 11.2                     | LISP 语言       | 366 | 12.2.2                     | 人工智能对社会的影响       | 397 |
| 11.2.1                   | LISP 的特点和数据结构 | 366 | 12.2.3                     | 人工智能对文化的影响       | 398 |
| 11.2.2                   | LISP 的基本函数    | 368 | 12.3                       | 对人工智能的展望         | 399 |
| 11.2.3                   | 递归与迭代         | 371 | 12.3.1                     | 更新的理论框架          | 400 |
| 11.2.4                   | LISP 编程举例     | 373 | 12.3.2                     | 更好的技术集成          | 400 |
| 11.3                     | PROLOG 语言     | 376 | 12.3.3                     | 更成熟的应用方法         | 402 |
| 11.3.1                   | 语法与数据结构       | 376 | 12.4                       | 结束语              | 403 |
| 11.3.2                   | PROLOG 程序设计原理 | 377 | 参考文献                       |                  | 404 |
| 11.3.3                   | PROLOG 编程举例   | 379 | 名词术语                       |                  | 416 |
| 11.4                     | 关系数据库         | 379 | ABOUT THE BOOK             |                  | 437 |
| 11.4.1                   | 关系数据模型        | 379 | CONTENTS                   |                  | 438 |
| 11.4.2                   | 关系模型的操作语言     | 385 |                            |                  |     |

# 第一章 绪 论

本章首先介绍人工智能的一般情况，接着讨论人工智能的研究和应用领域，最后简介本书的主要内容和编排。

## 1.1 人 工 智 能

40年来，人工智能获得很大发展，它引起众多学科的日益重视，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其大量的信息，进行快速信息处理，软件功能和硬件实现均取得长足进步，使人工智能获得进一步的应用。尽管目前人工智能在发展过程中面临不少争论、困难和挑战，然而这些争论是十分有益的，这些困难终将被解决，这些挑战始终与机遇并存，并将推动人工智能的继续发展。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作出更大贡献。

### 1.1.1 人工智能的定义

像许多新兴学科一样，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。人类的自然智能伴随着人类活动处处时时存在。人类的许多活动，如解算题、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 (Symbolism)、连接主义 (Connectionism) 和行为主义 (Actionism) 等，或者叫做逻辑学派 (Logicism)、仿生学派 (Bionicsism) 和生理学派 (Physiologism)。此外还有计算机学派、心理学派和语言学派等。我们将在最后一章中综述他们的主要观点。这里，我们结合自己的理解来定义人工智能。这些定义是比较狭义的。

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 人工智能 (学科)

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3 人工智能 (能力)

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功能，如判断、推理、证明、识别、感知、理解、设计、思考、规划、学习和问题求解等思维活动。

## 1.1.2 人工智能的起源与发展

时代思潮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 40 年代的智能界, 发现了两件最重要的事: 数学逻辑 (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。数学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 (Turing) 和其它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。道格拉斯·霍夫施塔特 (Douglas Hofstadter) 在 1979 年写的《永恒的金带》(An Eteranal Golden Braid) 一书对这些逻辑和计算的思想以及它们与人工智能的关系给予了透彻而又引人入胜的解释。

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 年夏季, 年轻的美国学者麦卡锡 (McCarthy)、明斯基 (Minsky)、朗彻斯特 (Lochester) 和香侬 (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, 绝大多数都成为著名的人工智能专家, 40 年来为人工智能的发展作出重要贡献。

1969 年召开了第一届国际人工智能联合会议 (International Joint Conference on AI), 此后每两年召开一次; 1970 年《人工智能》国际杂志 (International Journal of AI) 创刊。这些对开展人工智能国际学术活动、促进人工智能的研究和发展起到积极作用。

值得一提的是控制论思想对人工智能早期研究的影响。正如艾伦·纽厄尔 (Allen Newell) 和赫伯特·塞蒙 (Herbert Simon) 1972 年在他们的优秀著作《人类问题求解》(Human Problem Solving) 的“历史补篇”中指出的那样, 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 (Winner)、麦克洛克 (McCulloch) 和其它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。我国优秀的科学家钱学森提出的“工程控制论”开辟了控制论的新分支, 是对控制论的重大贡献。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·诺曼 (Von Neumman) 和其它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。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唯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）。

20多年来，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年~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。

近年来，机器学习和人工神经网络研究深入开展，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研究的进一步发展。

我国的人工智能研究起步较晚。纳入国家计划的研究（“智能模拟”）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项目列入国家科技攀登计划。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控制联合会议（CJCAI）至今已召开3次。已有多部国内自编的人工智能专著和教材公开出版，其中，本书第一版即已发行5万多册。《模式识别与人工智能》杂志已于1987年创刊。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，它必将为促进其它学科的发展和我国的现代化建设作出新的重大的贡献。

### 1.1.3 人类智能的计算机模拟

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。这里仅讨论几个与人工智能有密切关系的问题。

#### 1. 研究认知过程的任务

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。

研究认知过程的主要任务是探求高层次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  $x$  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

(a) 人类 (b) 计算机

图 1.1 人类认知活动与计算机的比较

$$\begin{matrix} T & T + 1 \\ x = f(S, R) \end{matrix} \quad (1.1)$$

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。我们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 (也称为专家系统) 是研究认知过程的一个具体而又重要的目标。例如，一个具有智能信息处理能力的自动控制系统就是一个智能控制系统，它可以是专家控制系统，或者是智能决策系统等。

## 2. 智能信息处理系统的假设

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，只要它能与其它模式相区别，它就是一个符号。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，这种系统就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、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，那么它就表现出智能；这种智能指的是人类所具有的那种智能。我们把这个假设称为物理符号系统的假设。

物理符号系统的假设伴随有 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，那么我们就能够用计算机来模拟人的活动。

值得指出，推论三并不一定是从推论一和推论二推导出来的必然结果。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。

我们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，也是智能控制的主要研究内容。如果做到了这一点，我们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。

### 3. 人类智能的计算机模拟

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自身的智能活动进行直接联系。今天，新技术已使我们所建造的机器的复杂性大为提高。现代电子计算机要比以往的任何机器复杂几十倍、几百倍，以至几千倍以上。

计算机的早期工作主要集中在数值计算方面。然而，人类最主要的智力活动并不是数值计算，而在逻辑推理方面。物理符号系统假设的推论一也告诉我们，人有智能，所以他是一个物理符号系统；推论三指出，可以编写出计算机程序去模拟人类的思维活动。这就是说，人和计算机这两个物理符号系统所使用的物理符号是相同的，因而计算机可以模拟人类的智能活动过程。计算机的确能够很好地执行许多智能功能，如下棋、证明定理、翻译语言文字和解决难题等。这些任务是通过编写与执行模拟人类智能的计算机程序来完成的。当然，这些程序只能接近于人的行为，而不可能与人的行为完全相同。此外，这些程序所能模拟的智能问题，其水平还是很有限的。

作为例子，让我们考虑下棋的计算机程序。现有的国际象棋程序是十分熟练的、具有人类专家棋手水平的最好实验系统，但是下得没有像人类国际象棋大师那样好。该计算机程序对每个可能的走步空间进行搜索，它能够同时搜索几千种走步。进行有效搜索的技术是人工智能的核心思想之一。不过，计算机不能战胜最好的人类棋手，其原因在于：向前看并不是下棋所必须具有的一切，需要彻底搜索的走步又太多；在寻找和估计替换走步时并不能确信能够导致博弈的胜利。国际象棋大师们具有尚不能解释的能力。一些心理学家指出，当象棋大师们盯着一个棋位时，在他们的脑子里出现了几千盘重要的棋局；这大概能够帮助他们决

定最好的走步。至今还未能设计出辨别这种棋局的计算机程序。

近年来，智能计算机的研究取得许多重大进展。对神经型智能计算机的研究就是一个新的范例，它必将为模拟人类智能作出新的贡献。

神经计算机 (neural computer) 能够以类似人类的方式进行“思考”，它力图重建人脑的形象。据日本通产省 (MITI) 报导，对神经计算机系统的可行性研究早于 1989 年 4 月底完成，并提出了该系统的长期研究计划的细节。在美国、英国、中国和其它一些国家，都有众多的研究小组投入对“神经网络”的研究，一个“神经网络热”正在形成。

据预测，神经计算机将在本世纪末进入实用阶段，并将有产品投放市场。

人脑这个神奇的器官能够复制大量的交互作用，快速处理极其大量的信息，同时执行几项任务。迄今为止的所有计算机，基本上都未能摆脱冯·诺依曼机的结构，只能依次对单个问题进行“求解”。即使是 80 年代初期的并行处理计算机，其运行性能仍然十分有限。人们期望，对神经计算 (neural computing) 的研究将造出神经计算机，大大提高信息处理能力，达到更高的人工智能水平。

## 1.2 人工智能的研究与应用领域

在大多数学科中存在着几个不同的研究领域，每个领域都有其特有的感兴趣的研究课题、研究技术和术语。在人工智能中，这样的领域包括语言处理、自动定理证明、智能数据检索系统、视觉系统、问题求解、人工智能方法和程序语言以及自动程序设计等。在过去 30 多年中，已经建立了一些具有人工智能的计算机系统；例如，能够求解微分方程的，下棋的，设计分析集成电路的，合成人自然语言的，检索情报的，诊断疾病以及控制太空飞行器和水下机器人的具有不同程度人工智能的计算机系统。

本书首先不是以这些应用研究领域来讨论人工智能的，而是介绍人工智能一些最基本的概念和基本原理，它们是后面几章中各种应用的基础。下面对人工智能研究和应用的讨论，试图把有关各个子领域直接联接起来，辨别某些方面的智能行为，并指出有关的人工智能研究和应用的状况。

值得指出的是，正如不同的人工智能子领域不是完全独立的一样，这里所要讨论的各种智能特性也完全不是互不相关的。把它们分开来介绍只是为了便于指出现有的人工智能程序能够做些什么和还不能做什么。大多数人工智能研究课题都涉及许多 (如果不是全部的话) 智能领域。

### 1.2.1 问题求解

人工智能的第一个大成就是发展了能够求解难题的下棋 (如国际象棋) 程序。在下棋程序中应用的某些技术，如向前看几步，并把困难的问题分成一些比较容易的子问题，发展成为搜索和问题归约这样的人工智能基本技术。今天的计算机程序能够下锦标赛水平的各种方盘棋、十五子棋和国际象棋。另一种问题求解程序把各种数学公式符号汇编在一起，其性能达到很高的水平，并正在为许多科学家和工程师所应用。有些程序甚至还能够用经验来改善其性能。1993 年美国出版了一个叫做 MACSYMA 的软件，就能进行比较复杂的数学公式符号运算。

如前所述，这个问题中未解决的问题包括人类棋手具有的但尚不能明确表达的能力，如