

上册



人工智能

陆汝钊 编著

科学出版社

人 工 智 能

(上 册)

陆汝钊 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是国家教委计算机软件专业教材编委会推荐教材之一。

人工智能作为独立的学科已经有了 30 年的历史,最近 10 年发展尤为迅速。本书较为全面地介绍了人工智能的各个分支,全书分上、下两册。上册集中介绍当代人工智能的两大支柱:知识表示和搜索技术。前者以演绎系统、产生式系统、框架结构、语义网络和过程性知识表示为中心;后者涉及盲目搜索、启发式搜索、博弈树搜索以及状态空间搜索、问题空间搜索等多个方面。下册介绍非经典逻辑、机器学习、自然语言理解、知识工程等内容。

本书内容全面,涉及人工智能的大部分分支;取材新颖,反映了国际上 80 年代中期的研究水平;从内容到形式力求中国化,叙述深入浅出,各章后附有习题。适于作为计算机科学系本科生及研究生教材,亦可供有关科技人员阅读。

人 工 智 能

(上册)

陆汝钊 编著

责任编辑 刘晓融 魏 玲 陈晓萍

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>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1995 年 8 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2004 年 7 月第六次印刷 印张:14

印数:11 801-12 800 字数:350 000

ISBN7-03-001059-0/TP·68

定价:18.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

谨以本书纪念

慈云桂院士

新世纪重印致谢

感谢同行和读者们的支持，本书又要重印了。由于时间非常紧，不可能做大的修订，只能做一些零星的改动，主要是在引言部分。

常有读者来问本书习题是否有标准答案。我谨在此敬告读者：没有标准答案，而且我们以后也不会给出标准答案。编制本书习题的指导思想是向读者提供一些思路，对人工智能中的一些问题如何独立思考，如何举一反三，如何应用于实际，如何自己去开拓创新？至于某个习题应该这样做还是那样做，这并不是最重要的。

陆汝铃

2002年1月18日

上册重印暨下册出版致谢

首先为下册的交稿延迟多年向科学出版社和编辑同志致歉。本稿是在朋友和同行们的鼓励下完成的。对上册的部分修订和下册内容的广泛修改得益于我在不来梅大学的教学实践，为此衷心感谢 DAAD Konrad Zuse 基金会，不来梅大学和 Krieg-Brückner 教授对我的支持。衷心感谢刘叙华教授为本书提供了他的最新研究成果。当初主持审阅此书上册的慈云桂院士已不幸辞世，我愿在此表达对他的深切怀念。金芝博士是本书下册的第一位读者，感谢她提出了许多宝贵的修改意见和为整理书稿花费的精力。我还感谢张松懋博士在准备本书书稿方面给我的许多帮助。

作者

1995 年春节

致 谢

首先我要感谢杨芙清教授和刘福滋副教授,由于他们的组织、支持和推荐,才有了本书的前身:研究生讲义《人工智能》,并使讲义进一步成为本书正式出版。

其次要感谢慈云桂教授和他领导的审稿组,包括:胡守仁、吴泉源教授,王朴、刘凤岐副教授,刘桂仲、孙成政讲师,王志英、李良良、张晨曦、申宇博士研究生,他们不辞辛劳,在百忙中挤时间仔细审阅书稿并提出了宝贵的意见。

在书稿的修改、整理过程中,我得到不少同行以各种形式给致的帮助,其中有孙永强教授,何志均教授,还有冯方方、李小滨、孔琢、曹存根、赵致琢,以及其他不再一一提名的同志,在此一并予谢。

作者

1987年8月

引 言

人工智能研究不仅与对人的思维的研究密切相关，而且与许多其它学科密切相关。因此，说到人工智能的历史，不能只从这门学科本身形成的时候算起，而应该上溯几千年，追溯历史上一些伟大的科学家和思想家所作的贡献。他们创造的精神和物质财富为今天的人工智能研究作了长足和充分的准备。在这里，我们首先列举几位重要的代表人物。

•Aristotle (亚里士多德) (公元前 384—前 322)，古希腊伟大的哲学家、思想家，著名学者 Plato (柏拉图) 的学生。他的主要贡献是为形式逻辑奠定了基础。形式逻辑是一切推理活动的最基本的出发点。他的代表作是《工具论》，共六篇。在这些著作中，他最早给出了形式逻辑的一些基本规律，如矛盾律、排中律，并且实际上已经提到了同一律和充足理由律。Aristotle 详细地研究了概念，考察了概念的分类及概念之间的关系。他还研究了判断问题，判断的分类以及它们之间的关系。Aristotle 的最著名的创造应该是现人都熟悉的三段论法。

•Frege (弗雷格) (1848—1925)，德国数学家和逻辑学家，他在耶那大学期间构造了命题逻辑的第一个公理系统，从而形成了完整的命题逻辑。他又首先使用量词，创建了谓词逻辑。他是最早提出通过把算术建立在逻辑基础上使算术形式化的人，开创了数学证明论中的逻辑主义学派。弗雷格在语义学方面也有贡献，他首先指出应该把“意义”和“指称”区别开来。

•Bacon (培根) (1561—1626)，英国哲学家和自然科学家。他的主要贡献是系统地提出了归纳法，成为和 Aristotle 的演绎法相辅相成的思维法则。《新工具》是他的一本主要著作。但是 Bacon 本人有点走极端，否认演绎法的作用。实际上，归纳同演

绎一样，已被 Aristotle 所研究，并且在 Socrate（苏格拉底）那里就已提出了，只是没有 Bacon 提得这样系统。

Bacon 的另一个功绩是强调了知识的作用，著名的警句“知识就是力量”即是他提出的。

•Leibnitz（莱布尼茨）（1646—1716），德国数学家和哲学家，和 Newton（牛顿）并列为微积分的发明者。他改进了 Pascal 的加法计算器，做出了能作四则运算的手摇计算器，在计算工具的历史上占有一席之地。但是 Leibnitz 最主要的贡献（这里所说的贡献均指对人工智能的发展而言）还是他提出的关于数理逻辑的思想。把形式逻辑符号化，从而能对人的思维进行运算和推理。这是一个伟大的思想。Leibnitz 提出的计划是：建立一种通用的符号语言，以及一种在此符号语言上进行推理的演算。后来的数理逻辑的产生和发展，基本上走了他提出的道路。

•Boole（布尔）（1815—1864），英国数学家、逻辑学家。他的主要贡献是初步实现了 Leibnitz 关于思维符号化和数学化的思想。Boole 在 1847 年发表了称为“逻辑的数学分析，论演绎推理演算”的文章，1854 年又出版了《思维法则，作为逻辑与概率的数学理论的基础》一书。提出了一种崭新的代数系统，被后世称为布尔代数。凡是传统逻辑能处理的问题，布尔代数都能处理，而某些能用布尔代数处理的问题，用传统逻辑处理却极其困难。

•Gödel（哥德尔）（1906—1978），美籍奥地利数理逻辑学家。他研究数理逻辑中一些带根本性的问题，即形式系统的完备性和可判定性问题。他在 1930 年证明了一阶谓词演算的完备性定理。接着又在 1931 年证明了：任何包含初等数论的形式系统，如果它是无矛盾的，那末一定是不完备的。他的第二条不完备性定理是：如果这种形式系统是无矛盾的，那末这种无矛盾性一定不能在本系统中得到证明。Gödel 的这两条定理彻底摧毁了 Hilbert（希尔伯特）的建立无矛盾数学体系的纲领，它们

对人工智能研究的意义在于，指出了把人的思维形式化和机械化的某些极限，在理论上证明了有些事情是做不到的。

·Turing (图灵) (1912—1954)，英国数学家。他于 1936 年提出了一种理想计算机的数学模型，后世通称之为图灵机。现已公认，所有可计算函数都能用图灵机计算，这就是所谓 Church-Turing 论题。Turing 的这项工作为后来出现的电子计算机建立了理论根据。

1950 年，他还提出了著名的“图灵实验”：让人和计算机分处两个不同的房间里，并互相对话，如果作为人的一方不能判断对方是人还是计算机，则那台计算机就达到了人的智能。这是对智能标准的一个明确定义。

·Mauchly，美国数学家。他和 Eckert 等人共同发明了电子数字计算机。这项划时代的成果为人工智能研究奠定了物质基础。

电子计算机的研制成功是许多代人坚持不懈地努力的结果。从 1642 年 Pascal 的加法器，到 1673 年的 Leibnitz 的四则运算器，从 1832 年 Babbage 的分析器，到 1889 年 Hollerith 的穿孔卡计算机，人类的智慧之花一朵比一朵更鲜艳，终于在 1946 年给出了胜利的果实：第一台电子计算机 ENIAC。在此之后，又有不少人为之奋斗，其中贡献最卓著的也许是 Von Neumann (冯·诺依曼)。目前世界上占统治地位的依然是冯·诺依曼计算机。

·McCulloch，美国神经生理学家。他和 Pitts 一起，在 1943 年建成了第一个神经网络数学模型。他们认为，这个网络由许多神经元组成，神经元的状态和神经元之间的联系都采用兴奋-抑制（即 0-1）方式，网络没有记忆功能。就是这个网络执行着高级神经活动功能。1956 年 Kleene 把 McCulloch 的神经网络模型抽象为有限自动机理论。

McCulloch 和 Pitts 的理论开创了微观人工智能，即用模拟人脑来实现智能的研究。

·Shannon (香农) (1916—)，美国数学家。他于 1948 年

发表了《通讯的数学理论》，这是一个标志，代表了一门新学科——信息论——的诞生。信息论对心理学产生了很大的影响，而心理学又是人工智能研究的重要支柱。早期的心理学称为行为心理学，该学派认为人的心理只能从行为上加以观察，不承认意念（mind）是可以研究的。认知心理学派则与之相反，他们从信息论得到启发，认为人的心理活动可以通过信息的形式加以研究，并在此基础上提出了各种描述人的心理活动的数学模型。这一派的代表人物有瑞士的 Piaget 和美国的 Bruner 等人。接着 Newell 和 Simon 等人又进一步发展出信息处理心理学，认为心理活动不仅可以用信息模型描述，而且可以用计算机处理。信息论和心理学的结合，构成了当代人工智能研究的一个重要潮流，即宏观人工智能研究。

• McCarthy，美国数学家、计算机科学家，人工智能的早期研究者。1956 年夏天，他和其他一些学者联合发起了在达德茅斯大学召开的世界上第一次人工智能学术大会，参加者有 Minsky, Rochester, Shannon, Moore, Samuel, Selfridge, Solomonff, Simon, Newell 等一批数学家、信息学家、心理学家、神经生理学家、计算机科学家。经 McCarthy 提议，在会上正式决定使用“人工智能”一词来概括这个研究方向，因此，1956 年的这个大会可以看作是人工智能作为一门独立的学科正式诞生的日子，而 McCarthy 本人在美国也常常被人们看作是“人工智能之父”。

上面给出的是一个非常不完全的清单，当然还有许多人为人工智能这门学科的产生作出过重大贡献。但是我们不能一一列出了。我们相信，读者从这里至少可以得到一条概要的线索，看到这门学科产生的主要背景。

在第一次人工智能大会（1956 年）前后，及在那以后的差不多 10 年间，人工智能研究取得了许多引人注目的成果，我们举一些著名的例子来说明这个阶段的成果。

自然语言的机器翻译，也许是人工智能研究中最早的方向

之一。电子计算机刚一问世，人们就有了机器翻译的想法。1953年，美国乔治敦大学的语言系主任组织了第一次机器翻译的实际试验。1954年7月，IBM公司在701计算机上作了俄译英的公开表演。此后，包括前苏联、中国在内的许多国家纷纷开展机器翻译的研究。

利用计算机证明数学定理是又一项大胆的设想。1956年，Newell和Simon等人首先取得突破，他们编制的程序Logic Theorist证明了《数学原理》第二章中的38条定理（实际上，Martin和Davis在1954年就已经编制了算术方面的定理证明程序，只是没有发表）；后来经过改进，又于1963年证明了该章中的全部52条定理。

1956年，Samuel研制了跳棋程序，该程序具有学习功能，能够从棋谱中学习，也能在实践中总结经验，提高棋艺。它在1959年打败了Samuel本人，又在1962年打败了美国康涅狄克州的冠军（全美第四名）。由于该程序是在IBM 701计算机上实现的，它的胜利竟使IBM公司的股票价值上涨了15%。又由于它是一个早期的十分成功的非数值计算的例子，据说IBM公司的设计师们在它的启发下在计算机的指令中加进了逻辑运算功能，并使其它计算机公司竞相效仿。

也是在1956年，Selfridge研制出第一个字符识别程序，接着又在1959年推出功能更强的模式识别程序。1965年，Roberts编制了可以分辨积木构造的程序，开创了计算机视觉的新领域。

定理证明在1958年取得了新的成就。美籍数理逻辑学家王浩，在IBM 704计算机上以3—5分钟的时间证明了《数学原理》中有关命题演算的全部220条定理，并且还证明了该书中带等式的谓词演算的150条定理中的85%，时间也只用了几分钟。1959年，王浩再接再厉，仅用8.4分钟的时间就证明了以上全部定理。同一年，IBM公司的Gelernter还研制出了平面几何证明程序。

从1957年开始，Newell，Shaw和Simon等人就开始研究一

种不依赖于具体领域的通用解题程序，称为 GPS，它是在 Logic Theorist 的基础上发展起来的。做成后，又反过来应用于改进 Logic Theorist。GPS 的研究前后持续了 10 年，最后的版本发表于 1969 年。

人工智能研究也应用于解一些困难的数学题。1963 年，Slagle 发表了符号积分程序 SAINT，他用 86 道积分题作试验，其中 54 道选自麻省理工学院的大学考题，结果做出了其中的 84 道。1967 年，Mosis 以他的 SIN 程序再创记录，效率比 SAINT 提高了约三倍。由于在这期间 Ritch 已经基本上解决了超越函数的积分问题，因而使得 SIN 成为一个相当完备的积分系统。如果说 SAINT 具备了一个大学生的能力，则 SIN 已达到了一个专家的水平。

1965 年，Robinson 独辟蹊径，提出了与传统的自然演绎法完全不同的消解法，当时被公认为是一项重大突破，掀起了研究计算机定理证明的又一次高潮。

一连串的胜利使人们兴奋起来，醉心于人工智能远景的专家们作出了种种乐观的预言。1958 年，Newell 和 Simon 充满自信地说：不出 10 年，计算机将要成为世界象棋冠军；不出 10 年，计算机将要发现和证明重要的数学定理；不出 10 年，计算机将能谱写具有优秀作曲家水平的乐曲；不出 10 年，大多数心理学理论将在计算机上形成。有些人甚至断言：照此趋势下去，80 年代将是全面实现人工智能的年代。到了公元 2000 年，机器的智能就可以超过人了。

但是，初战告捷的欢乐只是暂时的，当人们进行了比较深入的工作以后，发现这里的困难比原来想象的要严重得多。

就定理证明来说，1965 年发明的消解法曾给人们带来了希望，可是，很快就发现了消解法的能力也有限。用消解法证明两个连续函数之和还是连续函数，推了十万步也还没有推出来。

Samuel 的下棋程序也不那么神气了。当了州的冠军之后没有能进一步当上全国冠军。1965 年，世界冠军 Helmann 与

Samuel 的程序对弈了四局，获得全胜。仅有的一个和局是因为世界冠军“匆忙地同时和几个人对弈”的结果。

最糟糕的恐怕还是机器翻译。原先，人们曾以为只要用一部双向字典和某些语法知识即可很快地解决自然语言之间的互译问题。结果发现机器翻译的文字阴差阳错，颠三倒四。著名的例子是：英语句子“The spirit is willing but the flesh is weak”（心有余而力不足）翻成俄语再翻回来后竟成了“The wine is good but the meat is spoiled”（酒是好的，肉变质了）。因此有人挖苦说，美国花 2000 万美元为机器翻译立了一块墓碑。

从神经生理学角度研究人工智能的人发现他们遇到几乎是不可逾越的困难。人的脑子有 10^{10} 以上的神经元，生理学认为，每个神经元可能不只是一个信息存储转送单位，而是一台完整的自动机。计算机技术虽然有了很大的发展，但要把 10^{10} 台机器，哪怕是最小的微型机，组成一个联合运行的网络，这在 20 世纪能否做到恐怕也是一个问题。

当然，不一定有必要一下子就造出像人的神经网络功能一样强大的机器神经网络。例如 Rosenblatt 于 1958 年提出的感知机就是神经网络的一个最简单的模型，该模型对多路输入加权求和，得到一个输出。调整权值，即可使特定的输入与特定的输出挂钩。例如把某些照片与“好人”挂钩，另一些照片与“坏人”挂钩，使感知机起到学习器和分类器的作用。Rosenblatt 的思想新颖直观，激起了当时人们的研究热情，可以说是神经网络研究的第一次高潮。但是，1969 年 Minsky 和 Papert 出版了《感知机》一书，书中指出：感知机的功能十分有限，连“异或”这样简单的逻辑运算都做不了，从而使感知机吃了一记闷棍。神经网络的研究从此被打入冷宫达 10 余年之久。

种种困难使人们对人工智能的乐观情绪大大下降了。在英国，它受到了最大的打击。英国曾在这方面有一批出色的科学家，其研究工作居于世界前列。可是在 1971 年，剑桥大学的应

用数学家 James 先生应政府的要求起草了一份综合报告。这份在 1972 年发表的报告指责人工智能的研究即使不是骗局，至少也是庸人自扰。报告被英国政府采纳了。于是，形势急转直下。人工智能的研究经费被削减，研究机构被解散。好端端的局面被目光短浅的人一笔勾销。

在人工智能的发源地美国，原来对这一领域持保守态度的人变得更保守了。IBM 公司的人员曾在 1956 年夏天的那次会议上占了相当的比重，这些人在初期作的贡献不仅有 Gelernter 的平面几何证题程序，而且还有 Bernstein 的下棋程序，该程序曾被当时的《纽约时报》、《时代》和《美国科学》等报刊大事宣扬。但是，结局是意想不到的，IBM 公司的负责人下令取消了本公司范围内的人工智能研究活动。理由很简单，人工智能解决不了实际问题。

但是，尽管社会的压力很大，却没能动摇人工智能研究先驱者的信念。他们冷静地坐下来，认真总结前一时期的经验和教训。结论是：人工智能研究比预计的要难得多。前一段是初步的成功掩盖了本质性的困难。因此，急于求成是不行的。为了打开困难的局面，必须检讨过去的战略思想，以找到问题的症结。

自从人工智能形成一个学科以来，科学家们遵循着一条明确的指导思想：研究和总结人类思维的普遍规律，并用计算机模拟它的实现。他们深信：计算机一定能达到人的智能。达到这一步的关键就是建立一个通用的、万能的符号逻辑运算体系。对于输入的任何智力问题，它都能给出一个解答。Newell 等老一辈人工智能专家称此为“物理符号系统假设”。Nilsson 的观点则更进一步，认为这种符号体系的核心方法应该是逻辑演绎方法。他提出了一个口号，叫“命题主义”。他主张，一切人工智能研究应该在一个类似逻辑的形式框架内进行。这些思想代表了符号智能学派的主流。

事实上，他们几十年来的努力奋斗，就是为了创造这样一

个万能的逻辑推理体系。通用解题程序 GPS 是他们早期的代表作，而通用弱方法（见第九章）则是 GPS 思想的进一步发展。弱方法指的是解决某类问题的启发式方法，通用弱方法则企图从各种弱方法中找出共同的规律。

然而，当人们在困难面前重新检讨战略思想时，老科学家信奉的原则开始受到年轻一代的挑战。他们认为，万能的逻辑推理体系至今没有创造出来，并不是因为人工智能专家的本事不够，而是因为这种万能的体系从根本上说就是不可能有的。它最大的弱点就是缺乏知识，即缺乏人类在几千年的文明史上积累起来的知识。在实际生活中，人是根据知识行事的，而不是根据在抽象原则上的推理行事的。其次，即使就逻辑推理体系来说，它的主要技术是状态空间搜索，而在执行中遇到的主要困难是“组合爆炸”。事实表明，单靠一些思维原则是解决不了组合爆炸问题的，要摆脱困境，只有大量使用现成的知识。

斯坦福大学的年轻教授 Feigenbaum 是上述观点的著名代表人物。他说：“过去 20 年中，人工智能的研究发生了转变，从探索广泛普遍的思维规律转向智能行为的中心问题，即评价特定的知识——事实，经验知识以及知识的运用”。“用机械装置模拟人的智能——人工智能及其同属的、同类的科学——在前 25 年里试探了多条道路，走过了漫长的行程。条条道路汇合在一个中心问题上，认为所有智能活动，即理解、解决问题的能力，甚至学习能力，都完全靠知识”。

他还认为：世界已经进入了第二个计算机时代，计算机的作用已经发生了根本改变，从以信息为处理对象转变为以知识为处理对象，从以计算为主要任务转变为以推理为主要任务。Feigenbaum 重新举起了 Bacon 的旗帜：“知识就是力量”！

Feigenbaum 提出上述观点的背景，是他开创了人工智能研究的一个重要的应用领域：以知识为基础的专家咨询系统，并且取得了异乎寻常的成功。在他主持下，第一个成功的专家系统 DENDRAL 于 1968 年问世。它根据质谱仪的数据推知物质

的分子结构。在 DENDRAL 的影响下，涌现出一大批各行各类的专家系统。由于专家系统向人们展示了人工智能应用的广阔前景，社会上对人工智能的兴趣与日俱增。军界人士期望它能开辟自动化武器和自动化指挥作战的新纪元；卫生部门则因某些医学专家系统的成功而得到极大的鼓舞；至于工商企业界，部分地出于对新技术的厚望，部分地出于宣传和其它方面的动机，热情也在逐渐高涨起来，连过去较为保守的 IBM 公司也感到在这方面不能无所作为，推出了自己的第一个人工智能语言 Mu-Lisp。进入 80 年代后，专家系统的开发已经走出实验室，成为软件产业的一个新分支：知识产业。有人估计，这方面的专业公司正以差不多每周新开张一个的速度发展着。Feigenbaum 教授为这个新领域起了一个名字：知识工程，并于 1977 年在第五届国际人工智能大会的讲台上公诸于世。现在，大多数人工智能专家都承认，知识工程是 20 世纪七八十年代人工智能研究中最有成就的分支之一，它在恢复和推进人工智能的社会形象方面起了很大的作用。

促进人工智能研究的还有另外一个重要因素，这就是日本的五代机计划以及许多发达国家的高技术计划。对于日本的计划，惊呼者有之，怀疑者有之，贬斥者有之。然而，多数人是重视的，认为这是日本人做出的一个认真的努力。实现这个计划将使日本人从经济大国向科技大国迈进一大步。形势的发展表明，五代机计划的意义已经超出日本列岛的范围，80 年代出现了世界范围的开发新技术的高潮。英国的阿尔维计划、西欧的尤里卡计划、东欧的经互会计划、美国的 STARS 计划和 MCC 计划等相继推出，我国也有相应的 86·3 计划。当然这些计划的内容并不限于计算机技术，更不限于人工智能。但是，差不多每项计划都以人工智能（特别是知识工程）为基本重要组成部分。这说明，国际上已经公认人工智能是当代高技术的核心部分之一。

尽管如此，人工智能仍旧是引起争议最多的学科之一。我