

第三版  
(Third Edition)

# 人工智能及其应用

Artificial Intelligence: Principles and Applications

研究生用书

蔡自兴 徐光祐

清华大学出版社



第三版  
(Third Edition)

# 人工智能及其应用

Artificial Intelligence: Principles and Applications

研究生用书

蔡自兴 徐光祐

CAI Zixing XU Guangyou

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书共 12 章。第 1 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 2 章和第 3 章研究传统人工智能的知识表示方法、搜索技术和高级知识推理。第 4 章阐述了计算智能的基本知识,包括神经计算、模糊计算、粗糙集理论、进化计算、人工生命、群智能、自然计算和免疫算法诸多内容。第 5 章至第 11 章详细讨论了人工智能的主要应用,包括专家系统、机器学习、自动规划、艾真体(Agent)、机器视觉、自然语言理解和智能控制等。第 12 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。与第二版相比,第三版的许多内容都是第一次出现的,如高级知识推理、分布式人工智能与艾真体、计算智能、进化计算、群智能优化、自然计算、免疫计算以及知识发现和数据挖掘等。其他章节也在第二版的基础上做了相应的修改、精简或补充。

本书可作为高等院校有关专业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。本科生教材请使用本书的姊妹篇“本科生用书”。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

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 研究生用书/蔡自兴,徐光祐编著. —3 版. —北京:清华大学出版社,2004.8

ISBN 7-302-08555-2

I. 人… II. ①蔡… ②徐… III. 人工智能—研究生—教材 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 038701 号

出版者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:薛 慧

印刷者:北京嘉实印刷有限公司

装订者:北京国马印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:33 字数:756 千字

版 次:2004 年 8 月第 3 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-08555-2/TP·6137

印 数:1~5000

定 价:48.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

湖南，长沙，中南工业大学

蔡自兴同志：

喜读你们的大作《AI and Applications》，十分高兴。在傅京孙先生的直接关怀下，您和徐光祐同志能抓紧时间编出中译本，使这一前沿学科的最精彩的成就迅速与中国读者见面，这对AI在中国的传播和发展一定会起到重大推动作用。我衷心向您和徐光祐同志致以谢忱。

京孙先生生前多次回国内讲学，给大家留下了非常深刻的印象。载涛为从Purdue U.回来后也曾率先介绍过一门新学科的基础并给出了一些新的研究工作。带回来和徐炬亭同志的大力推动，使我国AI和PR有了前进的基础。现在有了这本书，千辛万苦的学者得以一窥这门学科的系统、精透的要义，是中国科学界的一件大事。也是中国科学界对京孙先生的重要纪念。

十年前，当钱伯和钱先生修订《自动控制论》时，尚无法谈及此书可言，只能断断续续介绍一点思路。现在钱先生看到此书，也一定会欣喜万分的。

您要写的和已写的几本书，都是十分重要的。我深信，以AI和Pattern Recognition为带头的这门新学科，将为人类迈进智能自动化时期做出奠基性贡献。

希望有机会见到您。 敬礼

大书

宋健 1988年  
2月10日

## 前沿学科的最精彩成就\*

湖南,长沙,中南工业大学

蔡自兴同志:

喜读你们的大作《AI and Applications》<sup>①</sup>,十分高兴。在傅京孙<sup>②</sup>先生的直接关照下,您和徐光祐<sup>③</sup>同志能抓紧时间编出中文本<sup>④</sup>,使这一前沿学科的最精彩的成就迅速与中国读者见面,这对 AI 在中国的传播和发展必定会起到重大推动作用。我衷心向您和徐光祐同志致以谢忱。

京孙先生生前多次回国内讲学,给大家留下了非常深刻的印象。戴汝为<sup>⑤</sup>同志从 Purdue U.<sup>⑥</sup>回来后也曾率先介绍这一门新学科的基础并组织了一些新的研究工作。常迥<sup>⑦</sup>和启恒<sup>⑧</sup>等同志的大力推动,使我国 AI 和 P. R.<sup>⑨</sup>有了前进的基础。现在有了这本书,千千万万的青年科学家得以一览这门学科的系统、精选的要义,是中国科学界的一件大事。也是中国科学界对京孙先生的重要纪念。

十年前,当我们和钱先生<sup>⑩</sup>修订工程控制论<sup>⑪</sup>时,尚无系统参考书可言,只能断断续续介绍一点思路。现在钱先生看到此书,也一定会欣喜万分。

您要写的和已写的几本书<sup>⑫</sup>,都是十分重要的。我深信,以 AI 和 Pattern Recognition<sup>⑬</sup>为带头的这门新学科,将为人类迈进智能化时期作出奠基性贡献。

希望有机会见到您。敬颂

大安

宋 健

1988 年 2 月 8 日

注释:

\* 这是时任国务委员兼国家科委主任的中国科学院院士、中国工程院院士宋健教授 1988 年 2 月 8 日给蔡自兴教授的亲笔信。

① 指由傅京孙、蔡自兴、徐光祐编著的《人工智能及其应用》一书,该书于 1987 年 9 月由清华大学出版社出版后,受到专家与读者的好评。该书第 1 版和第 2 版共已印刷 10 多次,超过 10 万册。

② 傅京孙(King-Sun Fu),美国国家工程科学院院士,美国普度大学教授,我国清华大学、北京大学

和复旦大学等校名誉教授。蔡自兴同志等曾在他指导和合作下进行人工智能和机器人学研究。

③ 徐光祐,清华大学计算机科学与技术系教授,也曾在傅教授指导下进行人工智能和模式识别研究。

④ 在傅教授指导下,蔡自兴和徐光祐抓紧时间,1984年在美国普度大学编出该书。

⑤ 戴汝为,中国科学院院士,中国科学院自动化研究所研究员,《工程控制论》译者,也曾作为访问学者,在傅先生指导与合作下进行模式识别与人工智能研究。

⑥ 美国普度大学。戴、徐、蔡等曾于20世纪80年代作为访问学者,先后在该校进修及研究。

⑦ 常迥,中国科学院学部委员(院士)、清华大学教授。

⑧ 胡启恒,原中国科学院副院长、中国自动化学会理事长、中国计算机学会理事长、中国科学院自动化研究所所长。中国工程院院士。

⑨ 人工智能与模式识别,两个高技术领域。

⑩ 钱学森教授,原中国科学技术协会主席,全国政协副主席。中国科学院院士。

⑪ 《工程控制论》,钱学森著,曾获中国科学院1956年度一等科学奖金。其修订版(1980,科学出版社)系由钱学森、宋健合著。

⑫ 指蔡自兴教授编著的《人工智能及其应用》、《机器人原理及其应用》及《智能控制》等。这些著作曾先后获得国家级和省部级奖励。

## 计算机时代的脑力劳动机械化与科学技术现代化

西方在 18 世纪的工业革命中,以机器代替或减轻人的体力劳动,使科学技术突飞猛进。而在东方,从元明以来中国各方面本已落后于西方,清初更因种种原因未赶上工业革命的潮流,使本已落后的局面更为严重,几乎陷于万劫不复的局面。现在由于计算机的出现,人类正在进入一个崭新的工业革命时代,它以机器代替或减轻人的脑力劳动为其重要标志。中国是否能认清形势,借此契机重新崛起,是每一个中华儿女应该深长思考的问题。

试先就过去和正在到来的两次工业革命借用控制理论奠基人美国维纳(N. Wiener)的话来加以说明。维纳先生说(据钱学森、宋健著《工程控制论》):

第一次工业革命是人手由于机器竞争而贬值。

现在的工业革命则在于人脑的贬值。至少人脑所起的简单的较具体较具有常规性质的判断作用将要贬值。

我把维纳所说人手和人脑的贬值,改成体力劳动与脑力劳动的代替或减轻。说法有异,但其内容实质,基本上应该是相同的。

事实上,这种提法早已有之。例如,已故周恩来总理在 1956 年 1 月 14 日《关于知识分子问题报告》中就提出:

由于电子学和其他科学的进步而产生的电子自动控制机器,已经可以开始有条件地代替一部分特定的脑力劳动,就像其他机器代替体力劳动一样,从而大大提高了自动化技术的水平。这些最新的成就,使人类面临着一个新的科学技术革命和工业革命的前夕。这个革命,就它的意义来说,远远超过蒸汽机和电的出现而产生的工业革命。

在《科学技术 8 年规划纲要》中也说:

现代科学技术……正经历着一场伟大的革命。特别是电子计算机技术的发展和运用,使机器不仅能够代替脑力劳动,而且能够代替脑力劳动的某些职能,成为记忆、运算和逻辑推理的辅助工具。

体力劳动以机器来代替或减轻，通常称为体力劳动的机械化。因而脑力劳动用适当的设备来代替或减轻，在以下也将称为脑力劳动的机械化。

应该指出，体力劳动千差万别，不同类型的体力劳动，只能用不同类型的机器来代替或减轻。其次，体力劳动的机械化，是一个漫长而几乎无终点可言的过程，根本谈不上完成二字。脑力劳动远比体力劳动复杂。我们对它的认识还停留在表面上，它的机械化路程的复杂与漫长将远远超过体力劳动的机械化，是可想而知的。

尽管如此，历史上减轻脑力劳动的尝试却是由来已久。略举数例如下：

例 1. J. Napier (1550—1617) 在 1614 年发明对数，使繁复的乘除计算转化为简单得多的加减计算。

例 2. R. Descartes (1596—1650) 在 1637 年的《几何学》一书中，引进相当于坐标的方法，使艰难的几何推理，转化为易于驾驭的代数运算。这使艰深的脑力劳动有望减轻。

例 3. B. Pascal (1623—1662) 与 L. Leibniz (1646—1716) 分别于 1642 年与 1672 年造出了加法计算器与加乘计算器，为用适当机器进行某种脑力劳动作出范例。Leibniz 甚至说，把计算交给机器去做，可以使优秀人才从繁重的计算中解脱出来。

两位伟大的思想家 Descartes 与 Leibniz，不仅进行了某些具体的减轻脑力劳动的尝试，还对一般的脑力劳动的代替与减轻即我们所说脑力劳动的机械化提出了许多有普遍意义的思想与主张。现据美国数学史家 M. Kline 所著《古今数学思想》一书所提到的某些有关片段，抄录如下：

[Descartes]认为代数使数学机械化，因而使思考和运算步骤变得简单，而无需花很大的脑力。这可能使数学创造变成一种几乎是自动化的工作。

[Descartes 认为]甚至逻辑上的原理和方法也可能用符号来表达，而整个体系则可用于使一切推理过程机械化。

[Leibniz]为一种宽广演算的可能性所激动。这种运算将使人们在一领域中能够机械地轻易地去推理。

自 Descartes 与 Leibniz 在 17 世纪提出脑力劳动机械化并作出某些具体成就外，此后两百余年间，在他们指引的道路上不断有所前进。略举若干进展如下。

G. Boole (1815—1864) 创立了逻辑代数即现今所称的布尔代数，基本上完成了 Descartes 与 Leibniz 所提出的一种“用符号表达使一切推理过程机械化的宽广的演算。”

Boole 所开创的工作后来为 W.S. Jevons, C.S. Peirce, F.W. Schnoder, G. Frege, G. Peano, A.N. Whitehead 与 B. Russell 等所继承与发展。特别是 D. Hilbert (1862—1943) 在 20 世纪初开创了数理逻辑这一学科，建立了证明论。又提出了数学相容性的命题，它相当于认为整个数学可以机械化。但是，与 Hilbert 的预期相反，1930 年时，奥地利 K. Goedel (1906—1978) 证明了形式系统的不完全定理，使 Hilbert 的相容性命题完全破产。Goedel 的发现成为 20 世纪数学上最惊人的一项成果，它隐含了许多数学领域机械化的不可能性。Goedel 与其后的许多数理逻辑学家，就证明了不少具体的数学领域与问题用逻辑的惯用语言来说是不可判定的，或用我们所使用的语言来说是不能机械化的。举例来说，Hilbert 在他有名的 23 个问题中，第 10 个问题相当于要求机械化地解任意不



定方程组，但经过几十年的努力，最后的结论却是：这种机械化的解法是不可能有的。

与以上相反，波兰的数学家 A.Tarski (1901—1983) 在 1950 年却证明了初等代数与初等几何的定理证明都是逻辑上可判定的，也就是说是可以机械化的。这似乎出人意料。

但是，上面所列举的许多成果，基本上都是理论上的探讨。20 世纪 40 年代出现了计算机，使局面为之改观。计算机为机械化提供了一种现实可行的工具手段。它使原来的理论探讨可以考虑如何通过计算机来具体实现。例如 Tarski 即曾提出过为他初等代数与初等几何定理的机械化证明方法专门制造一种判断机或证明机。到 70 年代美国还曾利用当时的计算机对 Tarski 的方法进行过实验。但是以方法过于复杂远远超出计算机的计算能力而放弃。1976 年时，美国的 K. Appel 与 W. Haken 借助于计算机证明了地图四色定理，引起了数学界的震动，但这只是说明计算机可以对特殊的个别问题起到辅助作用而已。真正的成功应该是在 1959 年，当时我国留美的王浩教授 (1921—1995) 在一台计算机上只用了几分钟的计算时间，就证明了 Whitehead-Russell 的名著《数学原理》中的几百条命题。这可以说是开创了数学机械化的新时代。

计算机的出现对现代数学这种脑力劳动的发展带来了不可估量的影响。计算机不仅可以代替繁重的人工计算，而且 Tarski, Appel 与 Haken, 特别是王浩先生等的工作说明计算机还可以至少帮助人们进行看来与机械化很不相容像定理证明这一类的工作。计算机将使数学面临脱离传统的一张纸一支笔方式，而代之以以计算机进行不仅计算且能推理的全新形式。例如在 20 世纪的 70 年代，对于计算机的发明有过重要贡献的波兰数学家 S. Ulum 就曾说过：“将来会出现一个数学研究的新时代，计算机将成为数学研究必不可少的工具。”

事实上，王浩先生早在他 1959 年划时代的工作之后，就曾写有专文说明计算机对于数学研究的重要意义。现据王浩先生原文试意译片段如下：

“可以认为一门新的应用逻辑分支已经趋于成熟。它可以称为‘推理’分析，用以处理证明，就像数值分析之处理计算那样。可以相信，这一学科将在不远的将来，导致用机器来证明艰难的新定理。

适用于一切数学问题的普遍的判定程序已知是不可能有的。但是形式化使我们相信，机器能完成当代数学研究所需的大部分工作。”

计算机的发明使人类进入计算机时代以后，脑力劳动的机械化具有了某种程度的现实可行性。除了上面所说的种种成就外，另一项有着重大意义的成就是在 20 世纪 50 年代人工智能这一新学科门类的诞生。

所谓人工智能，意指人类的各种脑力劳动或智能行为，诸如判断、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，可用某种智能化的机器来予以人工的实现（见本书第 1 章中定义 1.3）。诸如机器编译、机器诊断、机器推理、机器下棋以及各种专家系统，在 20 世纪 50 年代后，都不断出现，并有相应的软件与器件问世。特别是世界国际象棋冠军卡斯波洛夫与计算机的人机大战，曾引起轰动。

2003 年 11 月，在广州召开了全国人工智能大会的第 10 届全国学术年会，笔者有

幸参加。在会议期间，参观了广州工业大学举办的一次机器人的足球比赛。目前，具有某种智能行为的各种机器蛇、机器人等等已频繁出现。总之，人工智能已成为一个受到广泛重视与认可并有广阔应用潜能的庞大学科。另一方面，又由于学科所牵涉到的许多概念与方法的不确定性，引发了学科内部的许多争论。总之，关于人工智能的方方面面，读者包括笔者在内，可从本书获得充分的了解。

在脑力劳动的机械化中，数学家们起了特殊的作用。计算机的发明与发展过程中，数学家如 J. von Neumann, A. Turing, K. Goedel 等都有着特殊的贡献。对于脑力劳动机械化的认识，前面已提到过 Descartes 与 Leibniz 的思想影响与实际作为。这两位既是思想家又是数学家。此外在前面提到过的许多人物，大多也是数学家。这绝不是因为笔者本人是数学工作者对数学情有独钟而有意提到那些数学家。事实上此事绝非偶然，而是有着深层次的原因，使得数学家们自然而然地要在脑力劳动机械化的伟大事业中扮演重要的角色。首先，数学研究现实世界中的数与形。由于数与形无处不在，因而数学也就通过数与形渗透到形形色色几乎所有的不同领域，成为具有最广泛的基础性的学科。这说明了数学在各种脑力劳动的机械化中，显得更为迫切，而应享有机械化的最高优先权。其次，数学作为一种典型的脑力劳动，它与前面人工智能中所提到的各种智能型脑力劳动相比较，具有表达严密精确，且又极其简明等特点。因而在各种脑力劳动的机械化中，理应更为容易取得突破。Tarski, Appel-Haken, 王浩先生等人的工作，以及笔者本人在 20 世纪 70 年代以来在几何定理证明方面所做的工作，足可说明易于突破之说绝非妄言。

人们在中学时代的学习中，都熟知几何定理证明的一般方式。一个几何定理包含假设与结论两部分。为了证明这一定理，需要从假设这一叙述出发，根据某些已给公理或是某些已经证明过的定理，得出另一个叙述。然后再据某些已给的公理，或是某些已经证明过的定理，得出又一个新的叙述。如此逐次进行，如果到某一步所得的叙述恰好是原来已给的结论，定理就算是获得了证明。在证明的过程中，每一步已给公理或已证定理的选择，漫无依据可言。总之定理的这种证明方式，与机械化毫无共同之处，而是极端非机械化的。它是一种超高强度的脑力劳动。

然而，笔者在 20 世纪 70 年代有幸学习中国古代的数学，开始发现中国古代的传统数学遵循了一条与源自古希腊的现代所谓公理化数学完全不同的途径。它与源于古希腊的所谓演绎体系毫无共同之处。简言之，中国的古代数学是高度机械化的。它使数学研究这种脑力劳动的强度大大减轻。这具体表现在几何定理的证明上面。试说明如下。

源于古希腊的现代公理化数学体系主要内容是证定理。它的成果往往以定理的形式出现。与之相反，中国古代的传统数学根本不考虑定理的证明，根本没有公理、定理与证明这样的概念，自然也没有什么演绎体系。中国的古代数学重视的是解决问题，而考虑的问题主要来自客观实际，虽然也有例外。由于问题的原始数据与所求的结果数据总是用某种类型现代所谓方程的形式联系起来，而多项式方程是这种最根本也是最自然的形式，因而解多项式方程（组）的问题自然成为我国古代数学几千年研究与发展的核心。这一发展到元代（1271—1368）朱世杰时达到了顶峰。朱世杰在所著《四元玉鉴（1303）》一书中给出了解任意多项式方程组的思想路线与具体的方法过

程。朱所提出的思想路线与方法过程在原则上应该说是完满无缺的。尤其应该指出的是：中国古代在解决问题时，结果数据往往用原始数据的某种公式的形式表示出来。这可以认为是某种形式的“定理”。因之中国古代的方程解法，实质上也已隐含了至少是某种形式的定理证明。事实上，朱在他的著作中已经指出了这一点，且已具体使用在某些著名的问题上。下面将再作具体说明。

笔者由于学习中国古代数学史而得到启发，在1976年冬季进行用机械化方法证明几何定理的尝试。首先是引进适当坐标，在通常的情况下，定理的假设与结论将各转化为一个多项式方程组与一个多项式方程。于是定理变成一个纯代数的问题：如何从相当于假设的多项式组得出相当于终结的多项式。从朱世杰的著作得知有一机械化的算法，可从杂乱无章的假设多项式组得到另一颇有条理的有序多项式组，由此即容易验证是否可导出终结多项式来。循此途径笔者对某些已知定理进行相应的计算验证。但出于意外的是其间总是会遇到一些不合理的意外情况。经过几个月的反复计算与深入思考，才发现了问题的症结所在。终于在1977年春节期间获得了恰当的证明几何定理的机械化方法。此后的许多年间，即致力于置备适当的计算机使这一定理证明方法得以在机器上予以实现。在此期间曾得王浩先生的许多鼓励与协作。特别是当时留美的周咸青先生，利用美国的良好设备，在计算机上用上述方法证明甚至发现了几百条艰深的几何定理，每条定理的证明所需时间以微秒计。这成为周在美获得博士学位的主要内容，并已写成专著于1988年在国外出版。这说明王浩先生预测有一新学门“将在不久的将来导致用机器来证明艰难的新定理”，事实上已经实现。

笔者在机器证明几何定理上取得了成功。按前面笔者曾说过：数学作为一种典型的脑力劳动，在各种脑力劳动中，它的机械化应最为迫切而有最大的优先权。又说过：数学的机械化较之其他脑力劳动的机械化，应更易取得成功。几何定理机器证明的成功足见笔者所言非虚。

在几何定理机器证明取得成功之后的二十多年来，笔者与许多志同道合的同志们在科技部、科学院、基金委等大力支持下，开展了一场可谓“数学机械化”的“运动”，它在理论与应用诸多方面都已取得了若干成功。但总的说来还只是刚开始起步，漫长而更为艰难的路程正等着我们。

需要郑重指出的是：我们工作的起点来自于对中国古代数学的认识。这是有深刻的道理的。中国古代数学以解多项式方程（组）为其主要目标。解方程的方法以依据确定步骤逐步机械地进行。这种机械进程在我国经典著作中通称为“术”，相当于现代辞汇中的“算法”。如果有一台计算机，即可依据“术”编成程序，将原始数据输入后，即可机械地进行计算以解所设的方程。这种机械进行的“术”贯穿在中国古代的数学经典之中。因之中国的古代数学是一种算法型数学，或即是一门适合于现代计算机的“机械化”数学。

不仅如此。中国不仅具有作为典型脑力劳动的数学机械化的合适的土壤，而且也是各种脑力劳动机械化的沃土。原因是，古代的中国是脑力劳动机械化的故乡，也是脑力劳动机械化的发源地。它有着为发展脑力劳动机械化所需的坚实基础、有效手段与丰富经验。

我们都知道0与1的二进制制对于计算机的关键作用。虽然中国未真正进入到二

进制，但完善的十进位位值制则早已在中国的远古作出了典范。这一十进位位值制通过印度阿拉伯传入西方后，曾被西方的科学家誉为亘古以来最伟大的一项发明创造。仿制为位值制二进制后，成为制造计算机以至脑力劳动机械化的不可或缺的组成部分。追本溯源，应该归之于中国古代位值制十进制的创造。至于西方往往把这一创造归之于印度，自然是一种历史性的错误，是张冠李戴。

其次，在作为典型脑力劳动的数学方面，中国古代有过许多重大的大幅度减轻脑力劳动强度的特殊成就。除有关定理证明者外，还可举数例如下。

中国古代的十进位位值制，不仅可以使不论多大的整数有简明的表达形式，而且加、减、乘、除以至分数运算甚至开方都可变得轻而易举，因而大大减轻了计算中脑力劳动的强度。这是位值制被西方有识之士誉为最伟大创造的根本原因。此其一。

解放前我国的小学六年级或初中一年级往往要花整整一年的时间，学习各种四则难题的解法，这是一种极度非机械化的超高强度脑力劳动。但至少早在公元前二世纪时，我国就创造了解线性联立方程组的各种消去算法。它使解四则难题变得轻而易举。这些算法已被吸收入了初中代数教科书中，使年轻学子解除了不必要的脑力负担。这是用机械化的方法大幅度减轻脑力劳动强度的又一实例，而这一实例来自古代中国。

解方程必须先列出方程。但列方程并无成法。事实上这是一个难题，它无必然的途径可以遵循，也就是高度非机械化的。但中国在宋元时代，在过去已引进了的整数、分数或有理数、正负数以及小数、无理数、实数之外，又引进了一种新型的数，称之为天元、地元等，相当于现代的未知数。这种天元、地元等可以作为通常的数那样进行各种运算。由此产生了与现代多项式与有理函数等相当的概念及其运算方法，成为现代代数与代数几何的先驱。不仅如此，天元、地元等的引入，使列方程这种非机械化的脑力劳动，从此变成容易得多的接近于机械化的脑力劳动。这是中国古代脑力劳动机械化的又一实例。

以上是笔者认为古代中国是脑力劳动机械化的故乡与发源地的一些理由，是否言之过当，甚至有浮夸之嫌，愿各家学者有以教之。

科学技术是第一生产力，科技兴国，在四个现代化中，科学技术的现代化具有特殊的关键地位。而科学技术的现代化，是与脑力劳动的机械化密不可分的。宋健同志曾作对联说：“人智能则国智，科技强则国强”，把智能与科技并列，可谓一语道出了真谛。

自然，我们真正的意图决不在于口舌之争，在字面上夸夸其谈。真正应该做的是实干巧干，借计算机时代来临的大好契机，率先在全世界推行脑力劳动机械化。以具体成就和我们的成功来向世人表明我们的主张。

中国科学院数学与系统科学研究院

吴文俊

2004年3月

# 第三版 序

本书第二版自 1996 年发行以来,受到了广泛的欢迎,许多院校用作教材或教科书,这足以表明人工智能学科所受到的广泛重视与认可。同时,人工智能学科又取得了许多重要的进展,出现了许多新的研究成果。

从总的方面来说,人工智能领域加强了从人类智能与生命现象中吸取养分的趋向,例如,表现在人工生命、进化计算与计算智能的迅速发展。另外,这一学科也加快了向分布式系统与复杂系统靠拢的步伐,表现在分布系统与 Agent 的发展。从应用方面看,智能化的应用更为深入,影响更为广泛,表现在知识发现、数据挖掘等领域的兴起。值得一提的是,很少有学科像人工智能学科这样有那么多的争论。各种学派在不同时期、不同的方面各领风骚,而各种学派的争论使人工智能学科的发展更趋完善。这些都说明人工智能学科正在向纵深发展。

本书的第三版正是在这样的背景下进行修改、补充的。在第三版研究生用书中不仅对第二版进行了精简与修正,更重要的是补充了许多新的内容。除了对传统人工智能的知识表示方法和搜索推理技术作系统介绍外,还补充了不少最新的技术进展。例如,增加了“计算智能”一章,对计算智能进行了系统的阐述,涉及神经计算、模糊计算、粗糙集理论、进化计算与遗传算法、人工生命、群计算、蚁群算法、自然计算和免疫计算等;增加了“高级知识推理”一章,对非经典推理加以全面阐述,包括非单调推理、时序推理、不确定性推理、概率推理和其他推理方法;增补了分布式人工智能与 Agent 系统、知识发现和数据挖掘等内容。同时,也对各种学派的认知观和认知层次做了概括介绍。这些都说明本书对人工智能发展的趋势把握得相当准确,也使新版对最新的技术进展介绍得更为及时。

在本书第三版研究生用书出版前夕,欣闻蔡自兴教授主持的“人工智能网络课程”被评为国家教育部新世纪网络课程建设工程的优秀网络课程,他主讲的“人工智能”课程被评为首批国家精品课程。除对此表示诚挚祝贺外,我认为这些研究成果必将有助于本书的进一步推广应用,并对我国人工智能课程建设以至学科建设起到促进作用。我相信本书第三版会继续得到广大读者的喜爱。

李衍达

2004 年 3 月 28 日

## 第二版 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,也有研究者将人工智能解释为某种联接机制或某种“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。20世纪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。20世纪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。20世纪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。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,也有人提出实现无须知识表示及无须理性的智能,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得多、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。有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,将能进一步解开人类智能机制之

谜。这不仅使人们能最终了解自身，而且，使人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。10年前，本书是作者在美国国家工程科学院院士、普度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。中国科学院院士常迺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10年了。10年来，人们对神经网络、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：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，对人工智能学科的宣传与应用是适时的，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

人类在进入新世纪时对未来充满新的更大的希望。科技进步必将为各国的可持续发展提供根本保障,科技新成果必将在更大的广度和深度上造福于人类。人工智能学科及其“智能制品”的重要作用已成为人们的普遍共识。最近,中国教育部决定在中学开设“人工智能”新课程就是一个新的例证。

国际上人工智能研究作为一门前沿和交叉学科,伴随着世界社会进步和科技发展的步伐,与时俱进,在过去十多年中已取得长足进展。在国内,人工智能已得到迅速传播与发展,并促进其他学科的发展。吴文俊院士的定理证明的几何方法就是一个例证和代表性成果。20年前,我们作为访问学者,在美国普度大学与美国国家工程科学院院士傅京孙教授合作研究人工智能,并在他的指导下编写了《人工智能及其应用》第一版。该书也为我国人工智能的发展做出了应有的贡献。在该书序言中,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。我们始终遵循这些宗旨来修订本书的第二版和第三版,并力求反映人工智能研究和应用的最新进展。

本书第三版研究生用书共12章。第1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2章和第3章研究传统人工智能的知识表示方法、搜索技术和高级知识推理。第4章阐述了计算智能的基本知识,包含神经计算、模糊计算、粗糙集理论、进化计算、人工生命、群智能、自然计算和免疫算法诸多内容。第5章至第11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、自动规划、艾真体(Agent)、机器视觉、自然语言理解和智能控制等。第12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。与第二版相比,第三版研究生用书的许多内容都是第一次出现的,如高级知识推理、分布式人工智能与艾真体、计算智能、进化计算、群智能优化、自然计算、免疫计算以及知识发现和数据挖掘等。其他章节也在第二版的基础上做了相应的修改、精简或补充。

本书可作为高等院校有关专业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。本科生教材请使用本书的姊



妹篇“本科生用书”。分别编著出版“本科生用书”和“研究生用书”是一种尝试，希望能够发挥更好的作用。

承蒙广大读者厚爱，本书第一版和第二版已十多次印刷，共发行 12 万多册，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本书的繁体字版，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，对本书给予充分肯定。部分专家和读者以及我们的学生还对本书提出不少有益的修订建议。国务委员兼国家科委主任宋健教授，在极其繁忙的国务活动中，曾于 1988 年 2 月亲笔致函蔡自兴同志，对本书作出很高评价，体现出他对发展我国人工智能的关注和对作者的鼓励。事隔 15 年后，在本书第三版中公开发表这封信，仍然具有重要的指导意义。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。本书第二版 1996 年出版发行后，继续受到广大高校师生的欢迎和专家教授的肯定。该书曾获 1999 年度国家教育部科技进步一等奖和 2002 年国际优秀作品奖，并与其他著作和成果一起获得 2000 年度中国高校自然科学奖二等奖和省部级优秀教学成果奖一等奖。在本书修订过程中，得到许多专家和读者的热情支持。现在，国际人工智能大师、我国首届国家科学技术最高奖获得者、中国科学院院士、中国科学院数学研究院吴文俊先生在 85 岁高龄专为本书第三版研究生用书写了代序，中国科学院院士、清华大学信息科学与技术学院院长李衍达教授在百忙中再次为本书作序，中国工程院首任院长、原国务委员兼国家科委主任、原全国政协副主席、美国国家工程科学院外籍院士及中国科学院院士和中国工程院院士宋健教授同意发表他的亲笔来信，均使本书增添光彩。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，本书第三版就不可能迅速与读者见面。

修订本书第三版时，参考了我国人工智能课程教学大纲和美国 2001 年 Intelligent Systems 教学大纲。从新世纪开始，美国的 Artificial Intelligence 课程已为 Intelligent Systems 所包含。

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：高济，何华灿，何新贵，何志均，李德毅，陆汝钤，施鹏飞，史忠植，宋健，涂序彦，王永庆，王正志，吴文俊，张钺，钟义信以及 A. Cawsey, J. Durkin, A. P. Engelbrecht, E. A. Feigenbaum, C. S. G. Lee, Z. Michalewics, N. J. Nilsson, P. Norvig, E. Rich, S. J. Russell, G. N. Saridis, А. В. Тимофеев 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。肖晓明、龚涛、于金霞、肖雄军、李仪等同志打印了本书部分书稿。对于他们的帮助，我们也深表谢意。

本书第三版除 4.2 节和 4.3 节由蔡竞峰编写外，全书由蔡自兴教授执笔、徐光祐教授审阅。由于作者学识有限，修订时间又较为紧迫，加上人工智能发展很快，对有些