



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

Artificial Intelligence: Principles & Applications

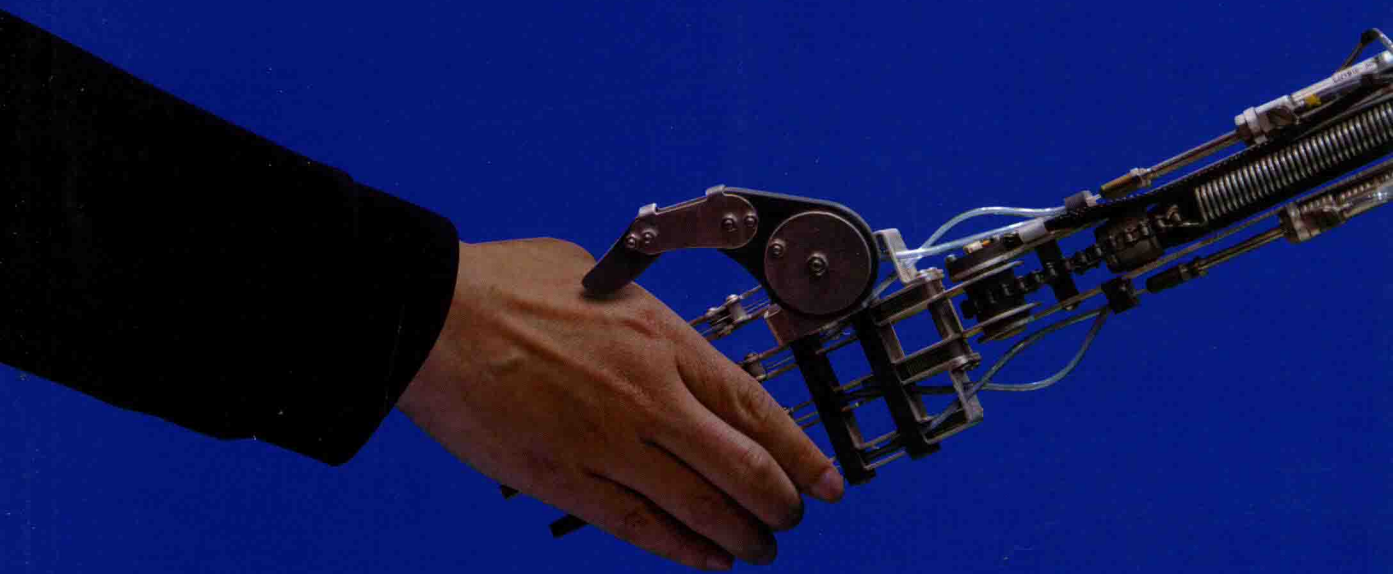
人工智能及其应用

— 第5版 —

(Fifth Edition)

蔡自兴 等

CAI Zixing, et al.



国家级精品课程“人工智能”配套教材
国家级双语教学示范课程“人工智能”配套教材
国家级精品资源共享课程“人工智能”配套教材
第二版获国家教育部科技进步奖一等奖

清华大学出版社





“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

Artificial Intelligence: Principles & Applications

人工智能及其应用

—— 第 5 版 ——

(Fifth Edition)

蔡自兴 刘丽珏 蔡竞峰 陈白帆

CAI Zixing LIU Lijue CAI Jingfeng CHEN Baifan

国家级精品课程“人工智能”配套教材
第二版获国家教育部科技进步奖一等奖

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书第5版共10章。第1章叙述人工智能的定义、起源、分类与发展。第2章和第3章研究人工智能的知识表示方法和搜索推理技术。第4章探讨不确定性推理的主要方法。第5章阐述计算智能的基本知识。第6章至第10章逐一讨论了人工智能的主要应用领域,包括专家系统、机器学习、自动规划、分布式人工智能和自然语言理解等。与第4版相比,许多内容都是第一次出现的,例如,人工智能的分类与计算方法、谓词演算符号的规范、进化算法的框架与执行过程、专家系统的设计方法和基于Web专家系统的开发工具以及深度学习等。其他章节也在第4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本科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。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

人工智能及其应用/蔡自兴等.--5版.--北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-43800-7

I. ①人… II. ①蔡… III. ①人工智能—研究 IV. ①TP18

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第100174号

责任编辑:薛 慧

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:29 字 数:668千字

版 次:1987年9月第1版 2016年7月第5版 印 次:2016年7月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:59.00元

产品编号:044416-01

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照下，您和徐光祐同志能抓紧时间编出中文本，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意。

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。戴汝为同志从Purdue U.回来后也曾率先介绍这门新学科的基础并组织了一些新的研究工作。常温和启恒同志的大力推动，使我国AI和PR有了前进的基础。现在有了这本书，千辛万苦的辛勤工作得以一览这门学科的系统性、精湛的要义，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《工程控制论》时，尚无任何参考资料可言，只能断断续续地介绍一点思路。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，都是十分重要的。我相信，以AI和Pattern Recognition为开头的这门新学科，将为人类迈进智能自动化时期做出奠基性之贡献。

希望有机会见到您。敬颂

大妻

宋健 1988
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:

喜读您们的大作《AI and Applications》^①,十分高兴。在傅京孙^②先生的直接关照下,您和徐光祐^③同志能抓紧时间编出中文本^④,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^⑤同志从Purdue U.^⑥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^⑦和启恒^⑧等同志的大力推动,使我国AI和P. R.^⑨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^⑩修订工程控制论^⑪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^⑫,都是十分重要的。我深信,以AI和Pattern Recognition^⑬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。本标题取自《清华书讯》1988年8月25日报道所用标题,也是亲笔信中的原话。

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版至第4版共已印刷41次,发行40多万册。

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,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,曾任中国自动化学会理事长,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。戴汝为、徐光祐、蔡自兴等曾于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多项奖励。

代序

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,而整个体系则可用之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切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。但出乎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来进行。这种机械进程在我国经典著作中通称为“术”，相当于现代词汇中的“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。

新中国成立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2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。宋健同志曾题词说:“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,我们真正的意图绝不在于口舌之争,在字面上夸夸其谈。真正应该做的事是实干巧干,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。

吴文俊

中国科学院数学与系统科学研究院

2004年3月

前言

在 1859 年出版的达尔文 (Darwin) 名著《物种起源》(*The Origin of Species*) 第一版扉页上写道, “作为生物进化论的完整理论体系, 《物种起源》主要讨论两个问题: 一是形形色色的生命是否由进化而来, 二是进化的主要机理是什么。” 达尔文对第一个问题的回答是肯定的, 对第二个问题的回答是“自然选择”。 达尔文的进化学说如同哥白尼 (Copernicus) 的《天体运行论》一样, 长期受到创神论的激烈反对和无情扼杀。 1996 年, 罗马教皇约翰·保罗二世致函教廷科学院说: “天主教信仰并不反对生物进化论。……进化论不仅仅是一种假设。事实上, 由于各学科的一系列发现, 这一理论已被科学家普遍接受。” 时隔 137 年之后, 教廷才被迫放弃了“上帝创造世界和人类始祖”的信条。 一项重大的科学发现, 要得到人们的普遍赞同, 谈何容易!

我们有幸生活在一个研究和解答智能问题的时代。 在这个时代, 一方面, 有关领域的科技资料数据有了丰富的积累, 整个科技水平能够为相关研究提供空前有效的支持和服务; 另一方面, 社会各界能够允许对相关科技问题展开深入的自由讨论, 再也不会出现哥白尼和达尔文时代那种对科学发现的反动。 我们曾经指出: 近代科学技术的许多重大进展都是人类智慧、思维、幻想和拼搏的成果; 同时, 这些科技进步反过来又促进人们思想的解放, 或者称为思想革命。 人类历史上从来没有出现过像今天这样的思想大解放, 关于宇宙、地球、生命、人类、时空、进化、智能的论点和著作, 如雨后春笋破土而出, 似百花争艳迎春怒放。

据研究结果称: 大约 6 亿年前, 地球上发生过一次异乎寻常的大爆炸, 生物学家把它称为寒武纪爆炸。 这次爆炸的最重要意义在于发现了数量颇大和种类繁多的生物, 这是地球生态史上任何一个时期都无法比拟的。

大脑是衡量进化水平的最重要标志。 有了人类的大脑, 我们就能够有思想、思维和梦想, 有发明、创造和创业, 有美术、音乐和诗歌, 也才可能有“上天揽月”、火星探测、“下洋捉鳖”以及基因和克隆研究之壮举。

地球上早期生物是比较低级的, 它们经历了长期的和不断的进化历程, 并最终得到进化的最新高级产品——人类。 人类经过长期进化, 通过自然竞争和自然选择, 成为当今最有智慧的高级生物种群。 人类智能是这种自然过程的创造物, 具有传感性能的分布特性和控制机制的鲁棒特性。 人类的

认知能力是保藏在以大脑为中心的“碳素计算机”中。大脑通过诸如视觉、听觉、触觉、味觉和嗅觉等各种自然传感机制来获取环境信息，借助智能而集成这些信息并对信息提供适当的解释。然后，认知过程进一步提升这类特性为学习、记忆和推理能力，并通过分布在中枢神经系统内的复杂神经网络产生适当的肌肉控制，产生相应的行为或动作。正是这种认知过程和智能特性，使人类在许多方面成为有别于其他生灵的高级动物。

伴随着人类的进化，人类智慧逐步提高。人类正从大自然学习并力图通过机器来模仿自身的认知过程和智能。人类已经发明了计算机和自动机之类的高级机器，创建了能够为人类的进化和发展服务的智能机器和智能系统，并应用机器智能来模仿人类智能，扩展了人脑的功能。在这一领域，形形色色的“智能制品”正在大放异彩，为经济、科技、教育、文化发展服务。基因、纳米、CAD、CAM、CAI、CAP、CIMS、互联网、物联网、微信、数据挖掘、大数据、真体(agent)、本体、计算智能、智能机器人、不确定推理、机器学习、机器翻译和智能软件包等，已成为我们学习、工作和生活的组成部分。

生命的进化也出现新的挑战。一方面，智能机器与人工生命的结合，可能创造出具有生命现象的生物机器人。一个拟人机器人能够用它的眼睛跟踪人群通过人行横道；一台自主机器人车能够辨识道路的边缘，绕过障碍物，在探索中前进。机器人打乒乓球和机器人辅助外科手术等例子，则早已众所周知。2016年3月9—15日，谷歌的人工智能程序阿尔法围棋(AlphaGo)与世界顶级围棋职业选手李世石的人机对决，引起国内外棋界、体育科技界、全球媒体和群众的广泛关注。这次世纪大战，AlphaGo以4:1获得胜利。人工智能虽然获得了胜利，但是并不代表着完胜，而且AlphaGo及其程序也是人类创造的。正如某些人工智能行内人士在人机对决过程中所指出的：无论人机谁胜谁负，都是人类的胜利。同样，作为AlphaGo主要工作原理的深度学习，也还没有达到至臻至美的地步，人工智能在模拟人脑方面还有很大一段路程要走。有些人担心，有朝一日，智能机器的人工智能会超过人类的自然智能，使人类沦为智能机器和智能系统的奴隶。另一方面，某些不负责任的人或犯罪分子却利用智能技术进行罪恶活动，如制造计算机病毒和盗取银行存款等“智能犯罪”活动。面对机器智能的进化，我们人类自己切不可掉以轻心。作为机器的主人，我们要以新的成就和实力，继续赢得智能机器对人类的尊敬，使智能机器和智能系统永远听从人类的指挥，与人类和谐共处，忠诚地为人类服务。

人类的进化归根结底是智能的进化，而智能反过来又为人类的进一步进化服务。我们学习与研究人工智能、智能系统、智能机器和智能控制等，其目的就在于创造和应用智能技术和智能系统为人类进步服务。因此，可以说，对智能科学的钟情、期待、开发和应用，是科技发展和人类进步的必然。

人类在进入新世纪以来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”的重要作用已得到人们普遍重视。

国际上人工智能研究作为一门前沿和交叉学科，伴随着社会进步和科技发展，与时

俱进,在过去半个多世纪中已取得长足进展。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研究成果就是一个例证。2015年智能机器人研究热潮澎湃神州大地,显示出诱人魅力和强大生命力。2016年3月AlphaGo与李世石的人机大战将人工智能的关注度推至前所未有的高度,引发新一轮的人工智能研究和创业热情。极大地推动人工智能的发展。

作为智能科学领域的探索者,我们对地球这一自然界上的生命、进化与智能深感兴趣。我们有幸亲历了近三分之一世纪人工智能的研究和发展进程,这是一种缘分,也是一种机遇。借此机会,谨向读者汇报如下。

1982—1985年,我和清华大学徐光祐教授以访问学者身份赴美国普渡大学研修人工智能,与美国国家工程科学院院士、国际人工智能开拓者和国际模式识别之父傅京孙(K. S. Fu)教授合作研究人工智能,受到国际大师的熏陶和指点,开始踏上研究智能科学的征程。那时,人工智能在西方得到重视,迅速发展,而在当时的苏联却受到批判,在中国也不敢冲破这一禁锢,不能公开立项研究和公开出版教材。为了突破这一“禁区”,为我国高等学校提供一部优秀的人工智能教材,在傅京孙院士的建议和指导下,我们两人执笔编著了《人工智能及其应用》一书,于1987年在清华大学出版社出版,成为国内率先出版的具有自主知识产权的人工智能教材。该教材的编著和出版,不仅为我国人工智能课程提供了一部好教材,而且促进了人工智能课程在国内高校的普遍开设和建设。宋健院士在该书出版后不久指出:本书的编著和出版“使这一前沿学科的最精彩的成就迅速与中国读者见面,这对人工智能在中国的传播和发展必定会起到重大的推动作用”。

1992年,台湾儒林图书有限公司授权出版该书的海外版,供海外读者使用。

随着人工智能学科和技术的发展及计算机等专业的发展,研究应用人工智能的科技工作者和研读人工智能课程的学生与年俱增。总结10年教学经验,听取各方意见,吸取“百家”营养,我们于1996年编著出版了《人工智能及其应用》第2版,继续得到国内同行肯定和赞许,并获得1999年度国家教育部科技进步一等奖等奖励。

进入21世纪之后,一方面,在教育部支持下,我在中南大学牵头于2002年精心设计和开发了具有智能化、个性化、情境化和形象化等课程特色的“人工智能网络课程”,通过了教育部组织的质量认证和验收,被评为全国优秀网络课程,为人工智能课程建设提供了一个有力的手段和有特色的环境。另一方面,我们与时俱进着手编写《人工智能及其应用》第3版,并分别编著出版“本科生用书”(2003年)和“研究生用书”(2004年)。该教材第3版反映人工智能各学派的观点和人工智能的最新进展,以便更好地满足本课程建设和教学改革的需要。2005年又为人工智能网络课程编著出版了配套教材《人工智能基础》,由高等教育出版社出版。2010年《人工智能及其应用》和《人工智能基础》分别出版了第4版和第2版,又增补了许多新内容。这些人工智能教材已先后印刷40多次,发行近40万册,不仅成为作者主持的首批国家精品课程(2003年)、全国双语教学示范课程(2007年)和国家级“智能科学基础系列课程教学团队”(2008年)、国家级精品资源共享课程(2013年)“人工智能”课程的配套教材或展示成果,而且被国内高校广泛用做人工智能课程教材和考研参考书,得到众多专家

好评和广大师生欢迎，为人工智能课程建设和创新型人才培养做出了贡献。

本教材第4版和第5版作为“十一五”和“十二五”国家级规划教材，需要编出新的特色和更高水平。为了编好本教材，近年来作者在国内进行了深入的调研和充分的准备。除了查阅大量相关文献资料外，我们主持和参加了国家级科研项目研究，取得一些具有较高水平的研究成果。我们借助国家教育部多种“质量工程”平台，对本课程和本教材进行教学改革，积累了不少经验和体会。这些都为新版教材编写提供了难得的翔实材料。我本人的出国访问与学术交流，包括2005年夏赴美国访问、2007年夏到丹麦进行交流、2012年和2013年赴美国交流和2015年到日本出席IEEE计算智能大会，也为本教材的编写提供了大量的第一手宝贵资料。

在第1版序言中，傅京孙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空白。我们始终遵循这些宗旨来修订本书，力求反映人工智能研究和应用的最新进展。

本书第5版共10章。第1章叙述人工智能的定义、起源与发展，简介人工智能不同学派的认知观，列举出人工智能的研究与应用领域。第2章和第3章主要研究传统人工智能的知识表示方法和搜索推理技术。第4章探讨不确定性推理方法，涉及概率推理、主观贝叶斯方法、可信度方法和证据理论等。第5章阐述计算智能的基本知识，包含神经计算、模糊计算、进化计算、人工生命、粒群优化和蚁群计算诸内容。第6章至第10章比较详细地逐一讨论人工智能的主要应用领域，包括专家系统、机器学习、自动规划、分布式人工智能和自然语言理解等。与第4版相比，许多内容都是第一次出现的，例如，人工智能的分类与计算方法、谓词演算符号的规范、进化算法的框架与执行过程、专家系统的设计方法和基于Web专家系统的开发工具以及深度学习等。其他章节也在第4版的基础上或多或少做了相应的修改、精简或补充。

承蒙广大读者厚爱，本书被数百所院校用作教材或教学参考书。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（包括学生）还对本书提出不少有益的修订建议。时任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月亲笔来信，对本书做出很高评价，体现出他对发展我国人工智能的关注和对作者的鼓励。时隔15年后，本书第3版公开发表这封亲笔信，相信这对我国人工智能的发展具有重要的指导意义和现实意义。1993年5月，宋健教授又赐寄“人智能则国智，科技强则国强”的题词，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，这也是对我们和全国人工智能工作者的殷切期望。本书第2版、第3版和第4版出版发行后，继续受到广大高校师生的欢迎和专家教授的肯定。在本书修订过程中，得到许多专家和读者的热情支持。特别是中国科学院院士、国际著名人工智能专家吴文俊研究员为本书第3版写了长达万言的代序，中国科学院院士、清华大学李衍达教授在百忙中分别为本书第2版、第3版和第4版作序，为本书增添光彩。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，包括使用本书和对本书提出宝贵建议的师生们，表示诚挚的感谢。

我要特别感激和怀念我的导师、合作者傅京孙先生和我的老师、指导者常迥先生。

他们不但为本书的编著提供了悉心指导和有力帮助，而且为本书冲破“禁锢”获得公开出版做出功不可没的贡献。

我们还要衷心感谢中南大学和清华大学以及清华大学出版社有关领导、专家和编辑。如果没有他们的智慧才干、辛勤劳动和大力合作，本书第5版就不可能迅速与读者见面。

我们诚挚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。

我们要特别感谢国家教育部“十二五”国家级教材规划、国家级精品课程、国家级精品资源共享课程、新世纪网络课程建设工程和国家级教学团队等“质量工程”的大力支持。

本书第5版是在第4版的基础上进行修订的。我与徐光祐教授在美国和国内合作进行《人工智能及其应用》编著已经30多年，在研究与写作中结下了深厚友谊。在傅京孙教授的悉心指导与大力支持下，我们于20世纪80年代初期在美国普渡大学编著了我国首部具有自主知识产权的人工智能著作，并冲破禁锢于1987年在清华大学出版社出版发行。由于徐教授忙于机器视觉等研究，无暇修订本著作，因此本书的第2版至第4版均由我执笔修订，由徐教授负责审阅。我非常珍惜这段可贵的友谊，由衷地感谢徐教授的合作与支持。经徐教授一再建议，此次（第5版）修订就不再把他的名字列入作者。我相信，他一定能够继续关心本书的编著和出版工作，给予进一步的指教。第5版全书由蔡自兴执笔与统稿。刘丽珏负责第3章和第4章修订，陈白帆负责第2章修订，蔡竞峰继续负责第5章和7.4节（决策树学习）编写，肖赤心、宋武、谢锦和王冰川负责7.10节（深度学习）编写。其中，唐素勤参加2.6节（本体技术）修订，王勇参加5.4节（进化算法）修订。由于作者学识有限，修订成文时间较为仓促，加上近年来人工智能发展很快，对有些领域的最新发展我们尚不够熟悉，因此，书中不当之处在所难免。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。

本书第5版的出版是献给刚刚问世的自兴人工智能(深圳)有限公司和湖南省自兴人工智能研究院的最好礼物，祝愿他们欣欣向荣，为我国人工智能研究和产业化做出创造性贡献。

本课程的网址是：<http://netclass.csu.edu.cn/jpkc2003/rengongzhineng/Index.htm>（精品课程）和http://www.icourses.cn/coursestatic/course_6696.html（精品资源共享课），相关资源均早已上网服务，可与本书配套使用。使用本教材的教师可向出版社申请本课程（教材）的电子课件，供讲授时参考。

蔡自兴

2016年3月17

于长沙鹅羊山德怡园