

第三版
(Third Edition)

人工智能及其应用

Artificial Intelligence: Principles and Applications

本科生用书

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

本科生用书

蔡自兴 徐光祐

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书第三版本科生用书共 11 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。第二章和第三章研究传统人工智能的知识表示方法和搜索推理技术。第四章和第五章初步阐述了计算智能的基本知识,包含神经计算、模糊计算、进化计算和人工生命诸内容。第六章~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、自动规划、艾真体(Agent)和自然语言理解等。第十一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,许多内容都是第一次出现的,如分布式人工智能与艾真体、计算智能与进化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。

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,徐光祐编著. —3 版. —北京:清华大学出版社,2003
ISBN 7-302-06837-2

I. 人… II. ①蔡… ②徐… III. 人工智能—高等学校—教材 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 050897 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

封面设计: 常雪影

版式设计: 肖 米

印 刷 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: 20.25 字数: 464 千字

版 次: 2003 年 9 月第 3 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06837-2/TP·5074

印 数: 1~5000

定 价: 26.00 元

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。在傅宗孙先生的直接关照下，你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。我衷心向你和徐光祐同志致以谢忱。

宗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过一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，千辛万苦的科学家们得以一览这门学科的系统性、精湛的含义，是中国科学界的一件大事。也是中国科学界对宗孙先生的重要纪念。

十年前，当我和钱先生修订《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，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贡献。

希望有机会见到您。敬颂

大寿

宋健 1984
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。

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。

第三版 序

本书第二版 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那样有那么多的争论。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,如对计算智能进行了系统的阐述;增加了分布式人工智能与 Agent 系统、进化计算、知识发现和数据挖掘等内容,同时,也对各种学派的认知观作了概括介绍。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。

我相信本书第三版会继续得到广大读者的喜爱。

李衍达

2003 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,也有将人工智能解释为某种连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。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,使连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,由许多神经元连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,神经元间连接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

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”的重要作用已为人们普遍共识。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的进展。在国内,人工智能已得到迅速传播与发展,并促进了其他学科的发展。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》。该书也为我国人工智能的发展做出了应有的贡献。在首版序言中,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。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。

本书第三版本科生用书共11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和搜索推理技术。第4章和第5章初步阐述了计算智能的基本知识,包含神经计算、模糊计算、进化计算和人工生命诸多内容。第6章~第10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)和自然语言理解等。第11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,第三版中的许多内容都是第一次出现的,如分布式人工智能与艾真体、计算智能与进化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。研究生教材请使用本书的姊妹篇“研究生用书”。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曾十多次印刷,共印刷10多

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国外一些教授，对本书给予了充分肯定。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。1988年2月，时任国务委员兼国家科委主任的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，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，宋健主任又赐寄题词“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。在本书的修订过程中，得到许多专家和读者的热情支持。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三版作序，中国工程院首任院长、全国政协副主席宋健院士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大学、清华大学和清华大学出版社的有关领导和专家。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 课程的知识点已为更广泛的 Intelligent Systems 学科知识点所代替。

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、陆汝钤、邵军力、施鹏飞、史忠植、宋健、涂序彦、王士同、王永庆、吴文俊、张钹以及 A. Cawsey, J. Durkin, E. A. Feigenbaum, C. S. G. Lee, Z. Michalewics, N. J. Nilsson, P. Norvig, E. Rich, S. J. Russell, G. N. Saridis, A. V. Timofeev 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。龚涛、魏世勇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。

本书第三版除第五章由蔡竞峰编写以外，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，对有些新领域我们尚不够熟悉，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。

在教育部“新世纪网络课程建设工程”的支持下，以本书为蓝本开发了“人工智能网络课程”，并已通过教育部组织的专家验收和质量认证。该网络课程由教育部组织上网服务，可与本书配套使用。

蔡自兴 徐光祐

2003年2月26日



蔡自兴 1962年毕业于西安交通大学电机工程系工业电气化与自动化专业。1983至1985年为美国普度(Purdue)大学和内华达大学 (UNR) 访问学者。1988年10月至1989年8月任中国科学院自动化研究所客座研究员。1989年9月至1990年5月任北京大学信息科学中心客座研究员。1992年至1993年为美国伦塞勒工学院 (RPI)客座教授。现任中南大学信息科学与工程学院学位委员会主席、首席教授、博士生导师, 联合国专家, 纽约科学院院士, 中国人工智能学会副理事长, 智能机器人分会名誉理事长, 中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会委员, 中国自动化学会理事, IEEE高级会员和全国政协委员等职, 曾任湖南省政协副主席。

蔡自兴教授的主要研究领域为人工智能、机器人学 and 智能控制等。1985年, 在国际上首创机器人规划专家系统。1986年, 在国际上首次提出智能控制的四元交集结构理论。1989年, 提出智能控制学科体系的初步框架。已在国内外发表论文400多篇, 出版专著和教材20部, 如《人工智能及其应用》、《机器人学》、《智能控制》和《Intelligent Control: Principles, Techniques and Applications》等。他主持和参加国家级和省部级科教研究10多项, 其中获国家级奖励2项, 省部级奖励7项, 其他奖励5项。



徐光祐 1963年毕业于清华大学自动控制系，后留校任教至今。1982至1984年为美国普度（Purdue）大学访问学者。1989年起为清华大学计算机系教授，1992年起为博士生导师。1985至1996年任清华大学计算机系信息处理和应用教研室主任。1993年11月至1994年5月任美国依利诺斯大学Beckman研究所访问教授。现为清华大学计算机系责任教授。已主持完成国家自然科学基金项目4项（其中一项为重点），国家863项目8项，国家科技攻关项目5项。得到国家和部委科技进步一、二等奖、光华科技二等奖等8项奖励。现为IEEE高级会员，国际测量学会IMEKO TC-17中国代表，中国图象图形学会多媒体技术委员会主席，《中国图象图形学报》副主编。出版了《人工智能及其应用》、《软磁盘驱动器》、《多媒体个人计算机》等多部学术著作。在国内外学术刊物和会议上已发表学术论文200余篇。目前主要研究领域为计算机视觉、移动机器人视觉导航、自然的人机交互和多媒体计算等。

目 录

前沿学科的最精彩成就	宋 健	2
第三版序	李衍达	5
第二版序	李衍达	7
前言	蔡自兴 徐光祐	9
第 1 章 绪论		1
1.1 人工智能的定义与发展		1
1.1.1 人工智能的定义		1
1.1.2 人工智能的起源与发展		2
1.2 人类智能与人工智能		4
1.2.1 智能信息处理系统的假设		4
1.2.2 人类智能的计算机模拟		7
1.3 人工智能各学派的认知观		8
1.4 人工智能的研究与应用领域		9
1.4.1 问题求解		10
1.4.2 逻辑推理与定理证明		10
1.4.3 自然语言理解		11
1.4.4 自动程序设计		11
1.4.5 专家系统		12
1.4.6 机器学习		12
1.4.7 神经网络		13
1.4.8 机器人学		14
1.4.9 模式识别		15
1.4.10 机器视觉		16
1.4.11 智能控制		17
1.4.12 智能检索		17
1.4.13 智能调度与指挥		18
1.4.14 分布式人工智能与 Agent		18
1.4.15 计算智能与进化计算		19
1.4.16 数据挖掘与知识发现		20

1.4.17 人工生命	21
1.4.18 系统与语言工具	21
1.5 本书概要	22
习题	23
第2章 知识表示方法	24
2.1 状态空间法	24
2.1.1 问题状态描述	24
2.1.2 状态图示法	26
2.2 问题归约法	28
2.2.1 问题归约描述	28
2.2.2 与或图表示	30
2.3 谓词逻辑法	33
2.3.1 谓词演算	33
2.3.2 谓词公式	35
2.3.3 置换与合一	37
2.4 语义网络法	38
2.4.1 二元语义网络的表示	39
2.4.2 多元语义网络的表示	41
2.4.3 语义网络的推理过程	41
2.5 框架表示	44
2.5.1 框架的构成	45
2.5.2 框架的推理	47
2.6 剧本表示	48
2.6.1 剧本的构成	48
2.6.2 剧本的推理	49
2.7 过程表示	51
2.8 小结	52
习题	53
第3章 搜索推理技术	55
3.1 图搜索策略	55
3.2 盲目搜索	57
3.2.1 宽度优先搜索	57
3.2.2 深度优先搜索	59
3.2.3 等代价搜索	61
3.3 启发式搜索	62
3.3.1 启发式搜索策略和估价函数	62

3.3.2 有序搜索	63
3.3.3 A* 算法	66
3.4 消解原理	68
3.4.1 子句集的求取	68
3.4.2 消解推理规则	71
3.4.3 含有变量的消解式	71
3.4.4 消解反演求解过程	72
3.5 规则演绎系统	75
3.5.1 规则正向演绎系统	76
3.5.2 规则逆向演绎系统	81
3.5.3 规则双向演绎系统	84
3.6 产生式系统	85
3.6.1 产生式系统的组成	85
3.6.2 产生式系统的推理	88
3.6.3 产生式系统举例	90
3.7 系统组织技术	94
3.7.1 议程表	94
3.7.2 黑板法	95
3.7.3 Δ -极小搜索法	96
3.8 不确定性推理	96
3.8.1 关于证据的不确定性	96
3.8.2 关于结论的不确定性	97
3.8.3 多个规则支持同一事实时的不确定性	98
3.9 非单调推理	100
3.9.1 缺省推理	100
3.9.2 非单调推理系统	102
3.10 小结	105
习题	106
第4章 计算智能(1): 神经计算 模糊计算	109
4.1 概述	109
4.2 神经计算	111
4.2.1 人工神经网络研究的进展	111
4.2.2 人工神经网络的结构	112
4.2.3 人工神经网络的典型模型	114
4.2.4 基于神经网络的知识表示与推理	116
4.3 模糊计算	119
4.3.1 模糊集合、模糊逻辑及其运算	119

4.3.2	模糊逻辑推理	121
4.3.3	模糊判决方法	123
4.4	小结	125
	习题	126
第5章	计算智能(2): 进化计算 人工生命	128
5.1	遗传算法	128
5.1.1	遗传算法的基本机理	129
5.1.2	遗传算法的求解步骤	131
5.2	进化策略	136
5.2.1	进化策略的算法模型	137
5.2.2	进化策略和遗传算法的区别	138
5.3	进化编程	138
5.3.1	进化编程的机理与表示	139
5.3.2	进化编程的步骤	140
5.4	人工生命	141
5.4.1	人工生命研究的起源和发展	141
5.4.2	人工生命的定义和研究意义	142
5.4.3	人工生命的研究内容和方法	144
5.4.4	人工生命的实例	146
5.5	小结	147
	习题	148
第6章	专家系统	149
6.1	专家系统概述	149
6.1.1	专家系统的特点	149
6.1.2	专家系统的类型	150
6.1.3	专家系统的结构和建造步骤	153
6.2	基于规则的专家系统	156
6.3	基于框架的专家系统	157
6.4	基于模型的专家系统	160
6.5	新型专家系统	162
6.5.1	新型专家系统的特征	162
6.5.2	分布式专家系统	163
6.5.3	协同式专家系统	166
6.6	专家系统设计	167
6.6.1	专家知识的描述	167
6.6.2	知识的使用和决策解释	170