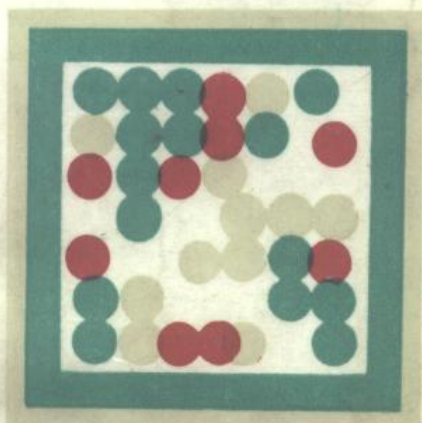




王士同 夏祖勋 陈剑夫 编著

模糊数学 在 人工智能中的应用

机械工业出版社

模糊数学在人工智能中的应用

王士同 夏祖勋 陈剑夫 编著



机械工业出版社

专家系统、自然语言理解、问题求解与机器人学是当前人工智能应用的三大研究课题。本书深刻阐述和研究了模糊集理论在这三个应用领域中的应用。书中首先介绍了常见的模糊数学基本知识,然后较详细地介绍了被誉为模糊集理论的第二大里程碑的可能性理论和模糊语言值逻辑。针对目前人工智能的主要应用领域,本书详细介绍了模糊启发式搜索策略、模糊意义表达语言 PRUF、模糊专家系统实例、采用模糊算法的机器人控制、模糊逻辑程序设计语言等内容。

本书取材新颖,内容翔实、深入浅出。适于计算机、自动控制及应用数学专业的科技人员阅读,亦可作为计算机专业本科及研究生教材。

模糊数学在人工智能中的应用

王士同 夏祖勋 陈剑夫 编著

*

责任编辑:王中玉 责任校对:申春香

封面设计:姚毅 版式设计:王颖

责任印制:卢子祥

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

河北省滦平县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $8 \frac{3}{8}$ · 字数 135 千字

1991年3月北京第一版·1991年3月北京第一次印刷

印数 0,001—3,620 · 定价:6.60元

*

ISBN 7-111-02532-6/TP·134

前 言

自美国加利福尼亚大学的 L·A·Zadeh 教授于 1965 年发表“Fuzzy Sets”一文以后，模糊数学便作为一门崭新的数学学科而诞生了。它的产生不仅拓宽了经典数学的数学基础，而且使计算机科学向人们的自然机理方面发展作出了重大突破。20 多年来，发展非常迅速，应用相当广泛。

电子计算机的出现，为人类从繁重的脑力劳动中解放出来提供了可能。人工智能这一新学科就是在这一背景下产生的。人工智能这门学科主要是研究和模拟人脑思维方式的。近 30 年来，无论在理论上还是在应用上都取得了许多实质性的进展。但是，人脑的思维却不像经典数学那样的有精确性，而是具有天然的模糊性。可以说，模糊数学从诞生之日起就很快与人工智能结下了不解之缘。模糊数学已广泛地应用于人工智能领域中，它在知识描述、语言加工、医疗诊断、机器人控制及问题求解等不确定决策方面，有着明显的实际效果。

模糊数学是人工智能研究的一个极为有用的工具；将模糊数学与人工智能相结合已成为人工智能研究的一个重要研究方向。在国外，已经有许多有关这方面的著作，如 C·V·Negoiita 所著的《Fuzzy Sets and Expert Systems》^[13]等。为了填补国内在这方面的空白，编著一本反映模糊数学在人工智能中的应用的书，是很有必要的。本书从模糊数学的基础理论开始，着重讨论了模糊数学在专家系统、自然语言理

解、问题求解与机器人控制这三个人工智能应用领域中的问题。

本书第二章由夏祖勋同志负责撰写，第九章由陈剑夫同志负责撰写，其余各章由王士同同志负责撰写。全书各章节的审定都经过三人共同讨论、修改，并最后由王士同同志负责全书的统一整理。

本书承蒙夏振华教授、王来生教授、周西苓副教授审阅。他们在百忙之中仔细审阅了全稿，提出了许多宝贵的修改意见；高群同志抄写了本书的部分书稿，笔者在此一并致谢！

由于笔者才疏学浅，书中会有很多不足之处恳请读者批评指正。

作 者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 模糊数学的产生与发展	1
§ 1.2 人工智能的应用现状	2
§ 1.3 模糊数学与人工智能	5
第二章 模糊集合	8
§ 2.1 模糊集的定义	8
§ 2.2 模糊集的运算	13
§ 2.3 模糊集的模运算	19
§ 2.4 分解定理和扩展原理	22
§ 2.5 模糊数及其扩展运算	28
§ 2.6 模糊关系	33
§ 2.7 模糊事件的概率与语言概率	40
第三章 可能性理论	47
§ 3.1 可能性分布的概念	47
§ 3.2 可能性测度	52
§ 3.3 可能性分布与模糊集	54
§ 3.4 多元可能性分布	56
§ 3.5 投影与边缘可能性分布	58
§ 3.6 条件可能性分布	62
第四章 模糊语言值逻辑	67
§ 4.1 语言变量	67
§ 4.2 模糊命题的范式	72
§ 4.3 模糊逻辑的推理规则	77
§ 4.4 应用举例	82
第五章 问题求解中的模糊搜索策略	88
§ 5.1 状态问题求解	88

§ 5.2	推广的 A*算法和启发式图搜索算法 RA*	95
§ 5.3	RA*算法的改进算法IRA*及 IRA'	105
§ 5.4	问题归约与算法 AO*	112
§ 5.5	AND/OR 图的算法 NAO*	121
第六章	模糊意义表达语言PRUF	134
§ 6.1	PRUF 的基本概念	134
§ 6.2	I 型翻译规则	138
§ 6.3	II 型翻译规则	139
§ 6.4	III型翻译规则	143
§ 6.5	一致性、兼容性和真值	147
§ 6.6	IV型翻译规则	151
§ 6.7	命题的修饰规则	155
§ 6.8	翻译实例	158
第七章	模糊数学在专家系统中的应用	163
§ 7.1	专家系统的基本设计思想	163
§ 7.2	关幼波治疗肝病的专家系统	168
§ 7.3	用于自动分析回声心动描记器的模糊专家系统	172
§ 7.4	用于石油勘探的模糊专家系统 SPII-2	186
§ 7.5	模糊知识库的查询策略	203
第八章	模糊逻辑程序设计语言	226
§ 8.1	模糊逻辑程序设计语言的概率型推理机制	226
§ 8.2	模糊逻辑程序设计语言的支持型推理机制	230
§ 8.3	Fuzzy PROLOG 语言	243
第九章	机器人控制与模糊计算机	253
§ 9.1	模糊算法	253
§ 9.2	机器人控制实例 1	256
§ 9.3	机器人控制实例 2	262
§ 9.4	模糊计算机	272
	参考文献	276

第一章 绪 论

§ 1.1 模糊数学的产生与发展

模糊数学的创始人是美国自动控制专家 Zadeh 教授。模糊数学是用数学方法研究和处理具有“模糊性”现象的数学。这里所谓的模糊性，主要是指客观事物差异的中间过渡中的“不分明性”。这在日常生活中俯拾皆是，例如“高个与矮个”、“清洁与污染”、“美与丑”、“冷与热”等等都难以明确地划定界限。

模糊数学决不是把已经很精确的数学变得模模糊糊，而是用精确的数学方法来处理过去无法用数学描述的模糊事物，因为在现实世界里如果要想绝对精确是办不到的，我们只不过是把事物的不精确程度降低到无关重要的水平罢了。

模糊数学从它诞生的那天起，便和计算机的发展息息相关，相辅相成。没有电子计算机，就没有模糊数学；没有模糊数学，计算机的应用也会大大受到限制。因为利用模糊数学构造数学模型，来编制计算机程序，可以更广泛、更深入地模拟人的思维。

精确数学是建立在集合论的基础上的。根据集合论的要求，一个对象对于一个集合，要么属于，要么不属于，两者必居其一，且仅居其一，绝不允许模棱两可！而模糊数学既认识到事物的“非此即彼”的明晰性状态，又认识到事物的“亦此亦彼”的模糊性状态，因此它的适应面也就比传统数学

广泛得多。模糊数学已在自动控制、信息处理、天气预报、地震研究、人工智能、图像识别、医疗诊断、农作物选种以及心理学、生态学、语言学等多种领域内得到应用。

当前,模糊数学的研究领域可大体分为三个方面:模糊数学理论及其与经典数学、统计数学的关系;模糊语言和模糊逻辑;模糊数学的应用等。尽管模糊数学诞生很晚,但其发展十分迅速。1978年,Zadeh教授提出了可能性理论,阐述了随机性与可能性的区别。这被认为是模糊数学发展的第二个里程碑。可能性理论的出现为模糊数学更广泛地应用于人工智能和其他领域提供了强有力的理论基础和有效的工具。

模糊数学虽然已在自然科学及社会科学领域内有着广阔的发展前景,但它正处于发展之中。这就要求我们要密切联系实际问题,从实际中吸取营养,发展和丰富模糊数学的内容。

§ 1.2 人工智能的应用现状

人工智能(Artificial Intelligence,简称AI)是一门新兴的边缘学科,它已引起许多学科的日益重视,并具有越来越重要的实用意义。人工智能与核能技术、空间科学一起称为本世纪三大科技成就;人工智能被誉为下一世纪的带头学科。人工智能是计算机科学中涉及设计智能计算机系统的一个分支,是人类学习、推理、计划、探索、自适应、模式识别、自然语言理解、知识处理等能力的机器化。

人工智能技术是一个可能导致对我们的社会产生重大影响的新的智能技术。人工智能的实验系统已引起工业界的热情关注,并正在研究供应市场的人工智能实验系统。这些系统包括:

(1) 专家系统。专家系统能在专家的水平上解决化学、

生物学、地质学、医学等方面的某些难题。

(2) 问题求解与机器人控制。机器人学中所研究出的机器人控制程序能够操纵机器人装置去执行某些有效的、重复的和传感电机系统的任务。

(3) 自然语言理解。自然语言理解的研究是以人工智能的基本概念为指导，来研究和发展计算语言学。自然语言理解的目标就是编制出实际上能够理解语言的程序。

专家系统、问题求解与机器人学、自然语言理解是人工智能的三大应用研究方向。

1. 问题求解

人工智能的核心问题之一就是问题求解技术；人工智能的第一大成就就是发展了能够求解难题的下棋程序。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较容易的子问题，发展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、国际象棋等；能够把各种数学符号汇编在一起，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。到目前为止，人工智能程序已经知道如何考虑它们要解决的问题，即搜索解答空间，寻找较优或最优的解答。

2. 专家系统

近年来，在专家系统或知识工程的研究中已经出现了成功和有效地应用人工智能技术的趋势。有代表性的是，用户与专家系统进行“咨询对话”，就像他与具有某方面经验的专家进行对话一样：解答他的问题，建议进行某些试验以及向专家系统提出询问以求出有关解答等。目前的实验系统，在咨询任务如化学和地质数据分析、计算机系统结构、建筑工程以及医疗诊断等方面，其质量达到很高的水平。在人工智

能的这个领域里，还有许多集中在使专家系统具有较强的逻辑推理能力，从而使咨询更好地为用户所接受。逻辑推理是人工智能研究中最持久的子领域之一。

发展专家系统的关键是表达和运用专家知识，即来自专家的并已被证明对解决有关领域内的典型问题是有用的事实和过程。专家系统和传统的计算机程序最本质的不同之处在于专家系统所要解决的问题一般没有算法解，并且经常在不完全、不精确或不确定的信息基础上作出结论。

3. 自然语言理解

自然语言理解包括语音理解和书面语言的理解两种类型。自然语言理解系统有问答系统、声音理解系统、手书文字识别系统和机器翻译系统等，是人工智能应用研究的一个重要领域。已经编写出一个灵活地结合句法、语义、推理以及上下文和世界(社会)知识的具体程序，成功地进行了人同计算机间的灵活对话。

机器理解语言不只要考虑句法，还要考虑语义，要利用知识，以及上下文信息，要把所有这些因素灵活地结合起来进行适当的翻译和解释。近年来的主要研究方向之一是知识表达。学者们已经对知识的描述形式，上下文理解，演绎推理等进行了很多研究。实质上，自然语言处理的根本问题是知识的表达和利用。一旦充分建立起适当的知识结构和表达理论，自然语言处理显然会得到成功。当前，自然语言处理的一个重要研究方向就是由模糊集理论创始人 Zadeh 教授所倡导的模糊语言学的研究。

目前，处理自然语言的工作已开始从实验室走向工程实用，例如应用于飞机订票系统及家庭自动电话中。

4. 机器人学

机器人是一种具有类似生物器官的某些功能，用以完成操作或移动任务并能用程序加以控制的自动装置。它是人工智能的模式识别、问题求解、自然语言理解等的综合成果。机器人学研究以智能计算机为基础的机器人的基本组织和控制。三个领域所研究的问题，从机器人手臂的最佳移动到实现机器人目标的操作步骤序列的规划方法，无所不包。

机器人和机器人学的研究促进了许多人工智能思想的发展。它所导致的一些技术可用来模拟世界的状态，用来描述从一个世界状态转变为另一种世界状态的过程。它对于怎样产生操作步骤序列的规划以及怎样监督这些规划的执行有了一种较好的理解。

智能机器人已开始从实验室走向实用。已经研制出机械装配、集成电路压焊、电弧焊及人工手等方面的实用智能机器人。

人工智能应用的领域很多，以上所讨论的仅仅是目前最为活跃、应用成果最多的三大应用领域。可以说，人工智能的应用已经渗透到国民经济的各个领域之中。

§ 1.3 模糊数学与人工智能

尽管人工智能目前无论在理论上还是在应用上都取得了许多实质性的进展，但正像 Zadeh 教授所指出的，目前用于探求一些人工智能问题的那些工具有时太精确了，不能处理现实世界中的模糊性。模糊数学将成为人工智能研究的不可缺少的工具。模糊数学与人工智能相结合已成为一个重要的研究方向。

人工智能可以分为表现人们行为过程的行为智能和表现人们思维过程的思维智能。行为智能还可以借用一些经典数

学,当然,这是远远不够的。例如,在军事上,当各军事要地之间的距离并不完全肯定时,要用经典数学描述是一件非常困难的事。又例如,当一状态转换到另一状态的可能性很小或很大等时,用经典数学描述这一问题也是不易的。基于经典数学的人工智能启发式搜索算法在解决诸如寻求一最优求解路径,使得从一状态经此路径到另一状态的可能性最大这类问题时,是几乎无能为力的。应用模糊集理论来描述上面的问题是比较容易的。本书将研究基于模糊集理论的人工智能启发式搜索算法。模糊集理论在机器人控制中也是大有作为的。已经研制出了不少基于模糊集理论的机器人控制算法。这些控制算法能够使机器人像人一样地对客观世界作出敏捷的响应,进而完成预定的任务。

用计算机来表现人的思维过程,借用二值逻辑是根本不可能的。人脑实际上采用着一种为我们现在还不能严格表述的模糊逻辑和近似推理。可能性理论为研究模糊逻辑和模糊语言学提供了有效的工具。自然语言的模糊意义表达语言PRUF就是建立在可能性理论基础上的。PRUF语言能够把自然语言中的语言实体用精确的形式来表述它们的结构。PRUF语言是模糊语言学研究的一个重要成果,为研究自然语言处理提供了新的途径和方法。

在构造一个专家系统时,模糊性是所遇到的最主要困难之一。知识库中的信息是模糊的,推理过程也是模糊的。和现行的其他方法相比,模糊逻辑提供了一个更为系统、可靠的基于数据库的推理方法的基础,是专家系统中知识表达和推理两方面广泛应用的工具。基于模糊集理论和可能性理论的模糊专家系统已经应用到医学、地质勘探、故障诊断等领域中。

随着模糊数学与人工智能技术的日益结合，迫切需要有基于模糊集理论的人工智能专用语言。目前，已经出现了 FLISP、FRIL、FPROLOG 等模糊逻辑程序设计语言。运用这些语言，人们可以更方便地实现模糊专家系统等实用系统。随着信息革命的兴起和第五代计算机的深入研究，研制模糊计算机已经是势在必行。

总之，模糊数学的研究紧密联系着计算机科学的发展，它是研究人工智能的不可缺少的重要工具。将模糊数学应用于人工智能必定会使得人工智能这门年轻的学科有着更为广泛的应用前景。

第二章 模糊集合

§ 2.1 模糊集的定义

经典集合论中的集合是不定义的概念，集合是一种称之为“数学语言”的数学刻画。所谓数学语言就是指满足真伪性只有两种可能，“非真即伪”的语言。适应这种数学语言的对象便构成经典集合论中的各种集合。

为了给出模糊集的概念，首先给出模糊集合论的一个基础，即论域。所谓论域就是我们讨论问题所涉及到的对象的全体，是一个普通集合。在这里，通常用大写字母 U 、 V 、 W 、 X 、 Y 、 Z 等表示。

论域 U 的子集 A 在普通集合论中可以有以下两种表达方式。一种方式是 A 为满足某种性质 $p(x)$ 的点的全体，即 $A = \{x | x \in U, \text{ 且 } x \text{ 满足 } p(x)\}$ 。另一种方式是用特征函数表示，即

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

若论域 U 中的子集 A 与 B 的运算以特征函数来表示，则可写成

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad \forall x \in U$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad \forall x \in U$$

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in U$$

式中， A' 为集合 A 之补集，有时亦记补集为 $\bar{A}$ 。若 $P(U)$

表示 U 的幂集, 而 $\text{ch}(U)$ 表示 U 上一切特征函数的全体, 则 $(P(U), \cup, \cap, \bar{})$ 与 $(\text{ch}(U), \vee, \wedge, -)$ 是完全格同构的, 其中 $\vee$ 表示 $\max$, $\wedge$ 表示 $\min$ 。这一事实反映了对 U 的子集的研究完全可以用其特征函数来代替。因为特征函数恰好给出对象 x 和所要求条件的相符合的程度。这种程度在普通集合论中只允许有两个值, 或者为1, 即完全满足; 或者为0, 即完全不满足。正因为如此, 普通集合论中只能是“非此即彼”或“非真即伪”。现在让我们根据与特征函数相似的被称之为隶属函数的概念来定义模糊集合。

定义 2-1 论域 $U = \{x\}$ 上的模糊集合 A 由隶属函数 $\mu_A(x)$ 来表征, 其中 $\mu_A(x)$ 在实数轴的闭区间 $[0, 1]$ 中取值, $\mu_A(x)$ 的大小反映了 x 对于模糊集合 A 的隶属程度。

这就是说, 论域 $U = \{x\}$ 上的模糊集合 A 是指 x 中的具有某种性质的元素整体, 这些元素具有某个不分明界限。对于 U 中任一元素, 我们能根据该种性质, 用一个 $[0, 1]$ 区间上的数来表征该元素隶属于 A 的程度。论域是指被讨论的全体对象。论域元素总是分明的, 而只有 x 的模糊子集 A 、 B 等才是模糊的, 所以模糊集通常是模糊子集合。在不易混淆的场合。模糊子集简称为模糊集。 $\mu_A(x)$ 的值接近于1, 表示 x 隶属于 A 的程度很高; $\mu_A(x)$ 的值接近于0, 表示 x 隶属于 A 的程度很低。

例 2-1 模糊集 A 表示远大于0的实数, 即

$$A = \{x \mid x \gg 0\}$$

A 的隶属函数可以确定为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ \frac{1}{1 + \frac{100}{x^2}} & x > 0 \end{cases}$$

如图 2-1 所示。

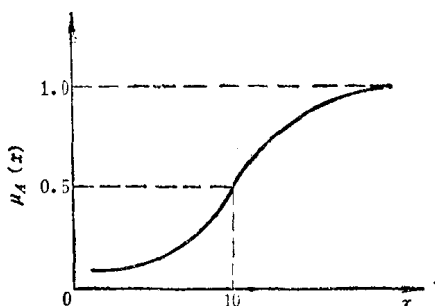


图 2-1 A 的隶属函数

模糊数学用来研究和处理模糊现象。在这里，概念本身没有明确的含义，概念的外延是模糊的，我们称之为模糊概念。为了定量表达模糊概念，我们将集合拓广为模糊集合。一个对象是否符合一个模糊概念，不应单用一个字“是”或“否”来回答，最好用一个数来反映它隶属于该模糊概念的程度。在模糊数学中，我们用 0 与 1 之间的数来反映论域中元素隶属于模糊集合的程度，隶属函数就是用于此目的的。模糊概念是客观事物本质属性在人们头脑中的反映。模糊性的根源在于在客观事物的差异之间存在着中间过渡，存在着亦此亦彼的现象。当然，隶属函数的具体确定，确实包含着人脑的加工，其中包含着某种心理过程。心理学的大量实验表明，人的各种感觉所反应出来的心理量与外界刺激的物理量之间保持着相当严格的关系。这些便在客观上对隶属函数进行了某种限定，使得隶属函数是对模糊概念所具有的客观性