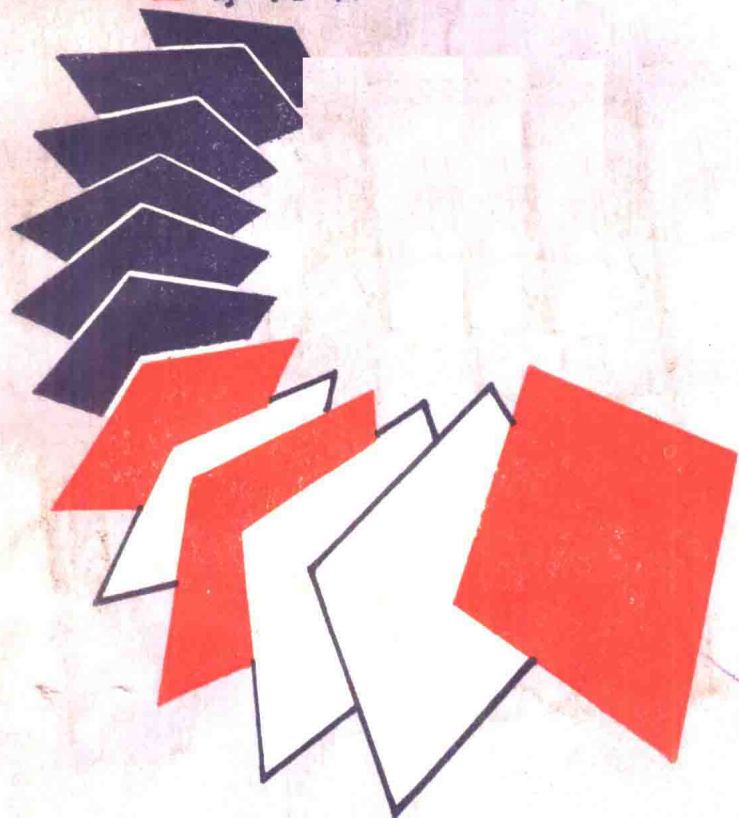


人工智能中的 不确定性

▲ 李凡 著



商务出版社

人工智能中的不确定性

李凡 著

国家自然科学基金资助项目

科学出版社

(京)新登字046号

内 容 简 介

不确定性的处理是人工智能和知识工程的研究中最核心也是最棘手的一个问题,它对专家系统、自然语言的理解与生成、智能机器人以及人工智能的其它研究领域都有深远的影响。本书主要介绍这一领域的理论基础及重要研究成果。首先介绍了模糊集合、语言变量与模糊逻辑、以及模糊度量,然后介绍了专家系统中广泛采用的几种不精确推理模型,最后介绍了国际人工智能界的最新研究成果——模糊推理、采用量化语句的近似推理、模糊产生式系统以及常识推理。书中有些内容是作者的研究成果。

全书取材新颖、由浅入深,如果读者有一些人工智能和模糊数学的基础知识,那么阅读本书将是不困难的。

本书可作为计算机科学系、自动控制系、信息工程系等高年级学生、研究生的教材或参考书,也可供从事人工智能和知识工程研究的科技工作者参考。

人工智能中的不确定性

李 凡 著

责任编辑 黄丽荣

* * *

商务出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

* * *

开本: 787×1092 1/32 印张: 11.125 字数: 243 千字

1992年5月第一版 1992年5月第一次印刷

印数: 1—2300 定价: 8.45元

ISBN 7-5029-0826-9/TP·0032

前 言

在科学技术发展日新月异的今天，人类的视野已经达到大至空间尺度 10^{28}cm ，时间尺度为 10^{10} 年的宇宙；小至空间尺度 10^{-13}cm ，时间尺度为 10^{-22} 秒的基本粒子。从微观到宏观，从人文科学到自然科学，从各门传统学科的深入研究和发展到新兴学科、边缘学科和交叉学科的崛起，许多新思想、新观念、新方法和新技术不断涌现，人类取得了空前的科技成就。

可是，尽管人类的大脑创造了科学，但至今科学却不能很好地解释人类大脑的思维机制。正是在科学技术发展的这种关键时刻，人工智能和知识工程异军突起，使人类第一次把自己的某些认识和思维变成了可以进行精确的定量研究的科学。可以无愧地说，这是迄今为止，人类所从事的最伟大、最艰巨和最富有挑战性的科学研究。

在人工智能和知识工程的研究中，为了让机器模拟人类的决策思维和推理行为，其最核心也是最棘手的问题就是如何处理不确定性，除了各种客观原因外，这种不确定性主要是由人类的思维所具有的模糊性而产生的，这就要求我们采用不同于以往计算机科学所采用的理论和方法来进行研究。本书就是在这一思想的指导下而写成的。

由于本人的水平所限，书稿虽几经修改，仍难免差错，热切地希望诸位学者同仁和读者批评指正。

在撰写本书的过程中，作者得到了黄文奇教授、金先级

副教授和周曼丽副教授的鼓励和支持，他们提出了许多很好的建议；中科院计算所的王树林研究员、吉林大学的刘叙华教授提供了一些极有价值的建设性意见，在此一并致以衷心的感谢。

李 凡

1991年10月于华中理工大学

目 录

前 言

第一章 模糊集合	(1)
1.1 模糊数学与知识工程	(1)
1.2 模糊集合的运算	(12)
1.3 模糊集合的代数性质	(16)
1.4 模糊集合与多值逻辑的关系	(30)
1.5 $\max$ - $\odot$ 合成与 $\max$ - $\wedge$ 合成	(34)
第二章 语言变量与模糊逻辑	(40)
2.1 可能性分布	(41)
2.2 语言变量	(45)
2.3 模糊逻辑	(48)
2.4 概率和可能性	(58)
2.5 可能性、真值和确定性之间的关系	(67)
第三章 模糊度量	(73)
3.1 基本概念	(73)
3.2 信任度量和似乎可能性度量	(74)
3.3 概率度量	(83)
3.4 可能性度量和必要性度量	(87)
3.5 各种模糊度量之间的关系	(95)
第四章 专家系统中的不精确推理模型	(97)
4.1 不精确推理模型的基本结构	(98)
4.2 主观Bayes方法	(103)
4.3 确定性理论	(111)

4.4	证据理论	(119)
4.5	可能性理论	(133)
4.6	证据理论与确定性理论	(142)
4.7	四种不精确推理模型的比较	(155)
4.8	规则概率与规则条件概率的关系	(164)
第五章 模糊推理.....		(168)
5.1	基本概念	(170)
5.2	模糊条件推理	(173)
5.3	模糊推理方法的比较	(189)
5.4	模糊三段论	(203)
5.5	模糊换质位法	(207)
5.6	具有“IF...THEN...ELSE...”命题形式的 模糊推理.....	(209)
5.7	扩展模糊推理	(221)
5.8	采用“ $\max$ - $\odot$ 合成”和“ $\max$ - $\wedge$ 合成”的模糊推理.....	(239)
第六章 采用量化语句的近似推理		(260)
6.1	模糊子集的基数概念	(260)
6.2	语言量词和量化语句	(271)
6.3	由给定集合确定量化语句的有效性	(277)
6.4	用量化语句进行不精确推理	(281)
6.5	量词的推理规则	(286)
第七章 模糊产生式系统		(298)
7.1	模糊产生式规则	(298)
7.2	模糊产生式系统	(303)
7.3	模糊产生式系统的一个硬件实现方法	(318)
第八章 常识推理.....		(330)
8.1	常识知识的表示	(331)
8.2	复合语句的翻译	(332)

8.3 逻辑翻译规则	(336)
8.4 常识推理	(340)
参考文献	(344)

第一章 模糊集合

随着科学技术的不断深入发展,计算机的应用已经经历了数值处理和数据处理两个阶段,由于人工智能的发展特别是专家系统的突飞猛进,从而使计算机应用进入到一个崭新的阶段——知识处理阶段。在知识工程的研究中,“不确定数学”占有十分重要的地位,它为知识工程提供了一个强有力的工具,使抽象、模糊的人类思维变成了可以进行定量研究的科学。本章首先讨论模糊数学与知识工程的关系;然后介绍模糊集合的基本概念及运算方法;模糊集合的代数性质以及它与多值逻辑的关系;最后给出了 $\max$ - $\odot$ 合成和 $\max$ - $\triangle$ 合成的运算性能。

1.1 模糊数学与知识工程

Zadeh 提出模糊集理论的根本目的,是要解决“人脑思维”和“计算机”之间的矛盾。通常,人们用来进行思维的工具——语言,在许多场合下都表现为具有模糊性,为了让计算机也能用这些含糊语言来进行“思维”,就需要寻求一个能将含糊语言形式化的工具,使得计算机能够理解人类的部分自然语言。只有这样,才能把人类的部分知识放进计算机,从而使计算机能够代替人来进行判断、推理和决策。

一、模糊数学产生的背景

1. 急待解决的问题

为了从广度和深度两方面来加快计算机应用的进展速度，让计算机在更高的一个层次上来代替人脑的思维活动，使人类的智力更进一步地得到解放，去从事更富有创造性的思维劳动，人类遇到了许多新的问题，这些问题是人们用已有的方法所难以解决的。例如人类专家的经验知识如何在计算机中表示，怎样让计算机用这些知识代替人来作出判断、推理和决策等等。这就使得人类清楚地认识到：精确数学已经受到了挑战，许多问题的解决对它来说已经显得无能为力了；人类必须寻求新的理论和方法来求解这些问题，从而使计算机具有更高的智能水平。那么是一些什么样的问题使得传统数学遇到了危机呢？

(1) 随着科学技术的深入发展，需要人们研究的变量越来越多，而且变量之间的关系也越来越复杂，对系统的判别和推理的精确性要求也越来越高。而实践告诉我们：复杂的东西是难以精确化的，这就使得人们所需要的精确性和问题的复杂性之间形成了尖锐的矛盾。正如 Zadeh 所说：“当系统的复杂性日益增长时，我们作出系统特性的精确而有意义的描述的能力将相应降低，直至达到这样一个阈值，一旦越过它，精确性和复杂性就变成两个相互排斥的特性”。这就是说复杂性越高，有意义的精确化能力就越低；而复杂性就意味着因素众多，以致使人们无法认真地对全部因素去进行考查。如果人们在求解这类复杂问题时，只抓住其中的主要部分，而忽略掉次要部分，这又常常会使本身十分明确的概念变得模糊起来，从而导致出模糊性。

另一方面复杂性还意味着深度的延长。一个大系统，如果用传统的方法，有时可能需要解数千个微分方程，由于误

差的积累，也可能使模糊性变得不可忽略。

(2) 为了适应新的要求，许多过去与数学毫无关系或关系不大的学科现在也迫切要求将本学科定量化和数学化，而这些学科如心理学、语言学、生物学和社会科学等有大量的模糊概念和模糊问题。人们决不能为迁就现有的数学方法而改变由于这些学科的特点而决定的客观规律，而只能改造数学，使它的应用范围更为广泛。这也需要具有处理模糊性的方法。

(3) 人脑对客观事物的认识和推理并不只是采用二值逻辑，除了识别“非此即彼”的确定现象外，还要识别“亦此亦彼”的不确定现象。这种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“胖和瘦”、“快和慢”，“美与丑”等等都难以明确地划定界限。这就相应地要求特征函数的取值不只是 0 和 1 两个数，而应该是 0 和 1 之间的任何值。因此，要求将特征函数加以推广，也就是要求将普通集合加以推广。

(4) 电子计算机的“智力”发展，其主要障碍就在于传统数学无法全部、真实地反应人脑的思维规律。我们知道，人类实际的思维活动具有两方面的特征：其一是直觉与严格性的有机结合，可以进行整体性、平行性的思考，因而就必须具有模糊性；其二是推理过程具有逻辑的和顺序的特点，因而又必须是形式化的。对于形式化思维，可以采用数理逻辑的方法把它数学化，从而用形式语言把它编成程序让计算机去做。但是人脑的大量思维活动，都是具有模糊性的，而传统数学对此却无能为力。但是科学要发展，电子计算机也要发展，人们决不会为迁就现有的电子计算机而使思维迁腐起

来。因此也必须要寻找新的途径来解决这个问题，从而更进一步地提高计算机的“智能”。

2. 传统数学的限制

通过上面的分析，我们可以看出这样一个十分严峻的问题摆在人们的面前：即如何处理不确定性？如果说，在过去的科学发展中，人们能够回避模糊性而运用传统数学，那么，在科学发展日新月异的今天，人们就再也无法回避模糊性了。

如果仔细地分析上述4个急待解决的问题就会发现，这个不确定性是由两方面的原因引起的：一是由于随机性而引起的不确定性，另一个原因则是由模糊性所导致的。

我们再来看看60年代初期的数学状况，在当时的数学学科中，只有两类数学模型：

(1)一类是确定性数学模型。这类模型所研究的对象具有确定性或固定性，而且对象间还具有必然的联系。如初等数学、高等代数、微积分等。

(2)另一类是随机性数学模型，这类模型所研究的对象具有或然性或随机性。如概率论和数理统计。

从这里可以看到：确定性数学模型是不能用来处理上述两类不确定性的；随机性数学模型也只能用来处理上述由概率所导致的不确定性，而大量由模糊性所导致的不确定性在当时是没有任何数学方法可以处理的。这就给人类提出了这样一个值得探讨的课题：需要寻找一套能够处理模糊性的数学方法。而这在某种意义上来说，就是要寻求架在形式化思维和模糊性之间的一座桥梁，通过它可以把多年积累起来的形式化思维的数学成果应用到由模糊性所引起的不确定性的

研究中去。

3. Zadeh的历史功绩

在科学技术的发展史中，大凡一个新定理、新理论和新学科的出现，大都是按照“需要+可能=现实”这一模式产生的。在寻求处理模糊性的数学方法中，前已论述过，科学技术的发展迫切“需要”能够处理模糊性的新理论出现，用这一新理论来消除阻止科学和技术深入发展的障碍，剩下的只是“可能性”了。

Zadeh是美国 California 大学著名的控制论专家，多年来他一直在深入探索和研究“大系统”、“模糊性”、“计算机”和“人脑思维”之间的关系和矛盾。为了从根本上解决精确性和模糊性之间的矛盾，他重新研究了数学的基础——集合论，揣摩数学与人脑思维究竟是从何处分离的？结果他发现集合论实质上是扬弃了模糊性而抽象出来的数学概念，是把思维过程绝对化，从而达到精确和严格的目的。

在集合论中，集合可以表示概念，而集合的运算和变换又可以表示判断和推理。一个对象对于一个集合来说，要么属于，要么不属于，二者必居其一，且仅居其一；绝不允许模棱两可。因此一个集合到底包含哪些对象，即集合的外延必须是明确的，这是集合论最起码的要求。从这里可以看出：普通集合论只能处理“非此即彼”的现象。这就大大地限制了精确数学的应用范围。

与集合论相对应的是二值逻辑。在二值(命题)逻辑中一个命题或者为真，或者为假也是两者必居其一。这种绝对的思维方法由来已久，虽然在历史上和现在都起了很大的作用，并在将来仍然会有它的重要地位；但是这种绝对的思维

方法毕竟不能完全反映客观现实。而一些著名的悖论，即取真、取假都出现矛盾的命题，例如罗素(Russell)悖论、康托尔(Contor)悖论等等都是这种矛盾的反映；这些奇特悖论的出现，曾经使数学界发生过混乱，甚至使不少数学家悲观失望地称为“第三次数学危机”。为了寻求解决的方案，策墨洛(Zermelo)提出了划分公理，但这只是回避了矛盾而并没有解决矛盾。这些问题影响十分深远，例如计算机语言中的实型、整形概念就是这种矛盾的反映，而在数学界由此而导致了两个学派，至今仍在争论。

Zadeh并没有介入这两个学派的争论，而是重新把模糊性和数学统一在一起。因为在现实生活中复杂事物要想绝对精确是不可能的，本来就是含糊的事物要想精确化也是不能的，实际上只是把所谓的不准确程度降低到无关重要的水平罢了。Zadeh充分注意到了这一点，但他不是让数学放弃其严格性去迁就模糊性，而是让数学回过头来吸取人脑对于模糊现象认识、推理和作出决策的优点。于是在1965年的《Information and Control》杂志上发表了“Fuzzy Sets”这篇著名的、在数学发展史上具有里程碑意义的论文，于是宣告“模糊数学”正式诞生了。这篇论文在世界上首次成功地运用数学方法来描述模糊概念，从而为数学的运用开辟了一个崭新的方向。在数学发展史上，在科学技术日新月异的今天，这一理论的出现给人类进一步地探索自然界的奥秘和认识人脑思维的机制带来了锐利的武器。它的意义是十分深远的，这也正是Zadeh的历史功绩。

二、模糊数学的特点

模糊数学由于打破了形而上学的束缚，因此它的应用领

域也就比传统数学要广泛得多。

模糊数学不是让数学变成模模糊糊的东西，而是将数学打入到具有模糊现象和模糊概念的各种知识领域中去。因此我们决不能把“模糊”二字看成是消极的贬义词，它实际上是人类认识能力的深化和精确的反映。大量的事实表明，许多事物过分地追求精确反倒更模糊，而适当地模糊反而可以达到精确的目的，而其关键在于应如何寻求适当的数学语言来描述事物的模糊性。

在模糊数学的研究中有两大支柱。其一是模糊数学的概念，它是普通集合论的推广，也就是把 $\{0,1\}$ 两点上取值的特征函数推广到可在 $[0,1]$ 闭区间上取任意值的隶属函数，这是模糊数学的核心思想。另一个就是分解定理和扩张原则，这两个定理沟通了模糊数学和精确数学之间的关系。因为从方法论的角度上来说，任何模糊数学的定理可通过分解定理化为普通集合论的问题来处理；而扩张原则又可以把普通集合论的方法扩张到模糊数学中去。因而可以看出，从概念上说来模糊数学是精确数学的推广和发展，但从方法上说来模糊数学又是使用传统的普通集合论的方法。可见模糊数学与精确数学之间有着密切的关系。

在模糊数学中，Zadeh用隶属程度来描述差异的中介过渡，所以说隶属函数是描述对象模糊性的关键。对于一个实际问题总是要首先确定隶属函数的，它可以用客观的方法确定，如示范法(L.A.Zadeh, 1972年)，子集比较法(K.S.Fu等, 1974年)，统计法(H.M.Hersh, 1976年)，蕴合解析法(M.Kochen, 1976年)，可变模型法(H.Bremermann, 1976年)，滤波函数法(P.J.Macvicar, 1978年)等等。也可

以通过专家的经验来确定，目前在许多基于知识的专家系统中都是这样来确定隶属函数的。

三、模糊数学与知识工程的关系

如何使计算机不仅能做数值计算和数据处理的工作，而且能象人类专家那样具有进行判断和推理的能力，帮助人们作出决策，这是计算机应用面临的新课题。知识工程就是要研究知识的表示、利用和获取的问题。在这些工作中，模糊数学都有着重要的作用。特别是在知识工程的推理研究中，模糊数学更有着特殊的作用。

所谓推理就是由已知的判断引申出另一个新判断的思维过程。推理的形式是多种多样的，按其推导方向的不同可分为演绎推理，归纳推理和类比推理。演绎推理是从真前提必然得出真结论的推理，实际上它是从一般性原理出发，引申出较特殊性结论的推理，即是由一般到个别的推理。由于结论的正确性蕴涵在前提中，所以只要前提为真，结论也必然为真。目前，知识系统应用的主要形式仍然是专家系统，在专家系统中，除了知识表示和获取外，推理（主要是演绎推理）仍然是一个主要的研究课题，仍有许多问题需要知识工程师做深入地研究，例如：

（1）如下形式的演绎推理怎样在计算机中实现？

前提1 如果西红柿是红的，那么它就熟了。

前提2 这个西红柿很红。

结论 所以它很熟。

（2）如下自然语言如何在计算机中形式化，并用它们来进行推理？

① 大部分高个子学生都来了。

② 约30%的教授担任了本科生的教学。

③ 至少5个人可能不同意。

(3) 在有些问题中, 如果我们已经知道或计算出了可能性分布函数, 如何根据这一信息来求得概率分布函数? 又如果已知概率分布函数, 怎样求得可能性分布函数呢?

这些问题的解决都与模糊数学有着密切的关系。在1和2中所列出的这类自然语言语句都是人们在日常生活中经常要采用的, 人们用这些含糊语句来进行思维和推理。这些语句的含糊性主要是由两方面引起的, 一是由于词汇本身的模糊性所产生的, 如“红”, “高个子”等; 二是由于含有不确定的语言量词所致, 如“很”, “大部分”, “约30%”和“至少5”等等; 而这些不确定的语言量词又可以分为二类: 一类是确定量词, 如“至少5”, 另一类是相对(或比例)量词, 如“很”, “大部分”和“约30%”等。问题3所提出的概率分布函数与可能性分布函数的相互转换关系实际上在许多模糊推理问题中都有用处。我们仅举了3个例子, 当然还有许多其他类似的问题有待深入地研究。

人类除了具有演绎(逻辑)推理的能力外, 还具有归纳推理和类比推理的能力, 而要想让计算机“更聪明”, 就必须使计算机也要具有归纳推理和类比推理的能力。因为人类的实践已经证明, 演绎推理是一种收敛式的思维方式, 这种思维方式不可能有创造性。思维的创造性, 主要体现在归纳推理和类比推理中, 这两种思维方式要求思维不断向外发散, 去研究新的情况, 从实践中概括出一般的原理。

归纳推理是从真前提可能得出真结论的推理, 实际上归纳推理就是以个别的知识作为前提而推出一般性结论的推