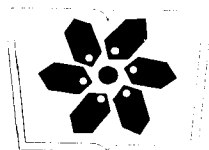


模糊系统理论与 模糊计算机

汪培庄 李洪兴 著

科学出版社



国家自然科学基金委员会资助出版 中国科学院科学出版基金资助出版

模糊系统理论与模糊计算机

汪培庄 李洪兴 著

科学出版社

1996

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是一部关于模糊系统理论和模糊计算机的专著,内容包括:因素空间理论,模糊决策理论,综合分析与变权分析,模糊逻辑与模糊推理,真值流推理理论,模糊控制论与模糊神经网络,模糊计算机的设计思想与结构等。这些内容反映了作者近年来在模糊系统理论研究方面所取得的成果。

本书将因素空间理论作为知识表示的框架贯穿始终,在这个框架之中建立了推理结构(真值流推理)、决策结构和控制方法,并形成模糊计算机的设计思想,这些正是本书的一个重要特色。

本书可作为高等学校人工智能、自动控制、信息处理、系统工程、应用数学等有关专业高年级大学生和研究生的教材和参考书,也可供从事这方面工作的广大科技人员学习参考。

模糊系统理论与模糊计算机

汪培庄 李洪兴 著

责任编辑 鞠丽娜

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1996年3月第一版 开本:850×1168 1/32

1996年3月第一次印刷 印张:16 1/2

印数:1—3 500

字数:433 000

ISBN 7-03-004798-2/TP·458

定价:33.00元

科学出版社发行

前 言

1965年, L. A. 扎德创立了模糊集合论, 基于模糊集合论形成了一门新学科——模糊系统理论. 近30年来, 模糊系统理论的研究受到广泛的重视, 其应用范围遍及理、工、农、医及社会科学等众多的领域.

1973年, L. A. 扎德提出了用模糊语言进行系统描述的方法, 并为模糊控制的实施提供了有效的手段; 1974年, 英国学者 E. H. Mamdani 首次应用这种方法实现了蒸汽发动机的模糊控制实验, 并取得了满意的效果. 1980年, 丹麦的施密斯公司推出水泥窑模糊控制系统, 这是世界上第一套工业实用的模糊控制系统. 1983年, 日本第一套工业实用系统——秋田市净化水场模糊控制药剂投放装置投入运行. 1984年, 国际模糊系统联合会(IFSA)成立, 并于1985年在西班牙帕尔玛大学召开了首届年会. 1987年, 第二届IFSA年会在日本东京召开, 会上推出十余件模糊控制的软件和硬件展品, 其中日本熊本大学山川烈(T. Yamakawa)博士研究的快速模糊控制器(山川烈将该机命名为“Fuzzy Computer”)在会上引起强烈反响. 此后, 在日本和其它一些发达国家立即兴起了一股模糊技术的热潮, 模糊控制的思想被广泛接受, 特别是采用了模糊技术的新一代家用电器产品, 一经上市便受到消费者的青睐, 其中“爱妻号”模糊控制的全自动洗衣机已进入我国市场. 这些家电产品除了洗衣机外, 还有电冰箱、空调器、电烤箱、电饭锅、自动电话、复印机、自动热水器、电子炉灶等. 随着电子技术的发展, 特别是单片机成本的下降, 这些采用模糊控制的家电产品, 只需增加很少的成本, 即可获得较高的附加利润. 在日本, 模糊技术产品已经带来了巨额利润. 据1992年IEEE的资料介绍, 单是销售模糊控制芯片一项, 1991年日本就获利1.5亿美元, 预计1995年以后,

其利润更加可观。

模糊集理论于 70 年代后期才引入我国. 1981 年, 我国创办了当时世界上第二个专门刊物《模糊数学》(后更名为《模糊系统与数学》). 1982 年, 我国成立了全国模糊系统与数学学会, 并于 1984 年、1985 年、1987 年和 1990 年在中国成功地举办了四次有关模糊集理论与应用的国际会议. 目前许多高等院校已开设了模糊数学课程, 相继建立了硕士点、博士点, 并已培养出几百名硕士和几十名博士. L. A. Zadeh 教授已不止一次地评价中国的模糊理论与应用研究属于国际四支劲旅之一. 早在 1985 年, 我国一些模糊技术倡导者就提出从理论研究向应用与开发转移的策略. 1988 年, 北京师范大学研制成功国际上第二台快速模糊控制器(取名为“Fuzzy Inference Machine”). 与日本山川烈的机器相比, 体积仅是它的十分之一, 而推理速度提高了 50%. 经过有关专家论证, 一致认为模糊系统理论将成为 21 世纪的核心技术之一. 为此, 国家自然科学基金委员会组织全国 35 所高等院校及研究机构开展了“模糊信息处理与机器智能”重大联合攻关项目的研究(北京师范大学为牵头单位), 并拨专款 135 万元予以支持, 本书正是该项目中一部分研究成果的总结.

与其它有关模糊系统方面的书籍所不同的是, 本书以因素空间、真值流推理、模糊落影这三个理论为核心形成具有自己特色的理论体系. 因素空间的作用是“搭架子”, 即建立一种“广义”坐标系, 于是概念便成为这种坐标系中的“点”、“曲线”或“曲面”; 概念之间的关系和推理是真值流推理所承担的任务, 其基本观点是把推理视为真值在命题间的流动过程; 模糊落影为概念的模糊集合表示、寻求恰当的模糊算子乃至蕴涵运算的方式提供了基本的理论和方法. 本书的另一特点是, 把模糊系统的理论研究引向当前人工智能与计算机科学中的“热点”之一——智能计算机的研制; 基于模糊系统理论实现的智能计算机便是本书中重点介绍的“模糊计算机”.

全书共分十七章, 概括起来有如下几部分内容:

1. 模糊集合论基础,包括分解定理,表现定理,扩展原理,隶属函数的确定方法以及模糊算子的改善等基本而又必要的内容;

2. 因素空间理论与概念描述方法,包括因素及其状态空间,因素的充分性测度,反馈外延及因素的重合性,概念内涵的表达及状态的合成方法等内容;

3. 综合分析与变权分析,这是由因素状态合成方法中派生出来的两个相对独立的重要问题;前者引伸出综合决策的一般模型,后者中研究的变权原理极为有趣且有很强的应用性;

4. 多重目标综合决策,它不但为极为常用的“综合评判模型”奠定了理论基础,而且可以把多目标规划纳入这个框架之中发现其更有价值的地方;

5. 模糊逻辑、模糊推理与真值流推理,包括推理的本质、渠道网络以及真值流神经网络;

6. 模糊控制理论及其实现方法,包括模糊控制器的可响应性,规则的自调整,稳定性分析以及基于模糊神经网络的模糊控制方法;

7. 模糊计算机的总体结构和设计思想,包括 FD 转换器,知识包,思维处理器以及模糊插值器等最新成果.

1988 年以来,作者所研究的课题一直得到国家自然科学基金委员会的支持,在此我们表示衷心的感谢!

中国科学院科学出版基金专家委员会对本书给予了肯定并使之列入了中国科学院科学出版基金和国家自然科学基金委员会优秀成果专著出版基金共同资助项目.

因作者水平所限,书中的错误和疏漏敬请读者批评指正.

汪培庄 李洪兴

1995 年 3 月于北京师范大学

目 录

第一章 模糊集合论基础	1
1.1 模糊现象与模糊概念	1
1.2 模糊集合的朴素思想	3
1.3 模糊集的定义	7
1.4 模糊集的基本运算	11
1.5 分解定理	15
1.6 表现定理	18
1.7 扩展原理	23
参考文献	28
第二章 因素空间基础	29
2.1 什么是因素	29
2.2 因素的状态空间	30
2.3 因素之间的关系和运算	32
2.4 因素空间的公理化定义	36
2.5 关于因素空间定义的注记	38
2.6 概念在因素空间中的描述	40
2.7 因素的充分性测度	53
参考文献	59
第三章 模糊决策理论基础	61
3.1 反馈外延及其意义	61
3.2 概念的反馈秩和重合度	67
3.3 因素的充分性与因素的重合性等价	71
3.4 反馈外延的精细化	72
3.5 概念内涵的表示	81
3.6 模糊决策的基本形式	85
3.7 加权求和公式的局限性	90
参考文献	91

第四章 隶属函数的确定方法	92
4.1 确定隶属函数的一般方法	92
4.2 三分法与增量法	98
4.3 多相模糊统计法	101
4.4 择优比较法	103
4.5 绝对比较法	108
4.6 集值统计迭代法	111
4.7 优先关系定序法	114
4.8 相对比较法和对比平均法	116
4.9 实数域上的模糊集	121
参考文献	129
第五章 综合分析	130
5.1 问题的背景	130
5.2 综合函数	131
5.3 可加型标准综合函数的公理化定义	134
5.4 ASM_m -func 的性质	136
5.5 ASM_m -func 的生成	140
5.6 ASM_m -func 与模糊决策	144
5.7 综合决策的一般模型	147
参考文献	150
第六章 变权分析	152
6.1 问题的提出	152
6.2 确定变权的经验公式	155
6.3 变权原理	158
6.4 均衡函数及其梯度向量	163
参考文献	164
第七章 多重目标综合决策	166
7.1 背景与模型	166
7.2 综合评判	172
7.3 质量评级的综合评判	178
7.4 不完全的综合评判问题	183
7.5 多层次综合评判	187

7.6 综合评判在纺织工程中的一个应用	191
参考文献	195
第八章 集值统计与程度分析	196
8.1 模糊统计与随机集	196
8.2 随机集的落影	198
8.3 集值统计	200
8.4 程度分析	203
8.5 随机试验的集值化	208
8.6 人才质量评价的数学模型	211
参考文献	217
第九章 模糊算子的改善	219
9.1 Zadeh 算子的公理化结构	219
9.2 几种常用的模糊算子	223
9.3 广义模糊算子	228
9.4 模糊算子的“与”度和“或”度	232
9.5 基于落影表现理论的模糊算子	235
参考文献	242
第十章 基于证据理论的综合决策	244
10.1 证据理论简介	244
10.2 基于证据理论的综合评判	248
10.3 两种特殊类型的合成函数	252
10.4 多个待评对象的择优原则	254
参考文献	255
第十一章 模糊逻辑	256
11.1 预备知识	256
11.2 模糊命题与逻辑演算	264
11.3 模糊逻辑公式的化简	275
11.4 模糊逻辑的演绎推理	285
11.5 闭区间 $[0,1]$ 上的模糊数	288
11.6 语言值逻辑	294
11.7 语言值逻辑在故障诊断中的应用	298
参考文献	305

第十二章 模糊关系方程	306
12.1 有限模糊关系方程极小解的个数	306
12.2 Fuzzy 关系不等式	315
12.3 格化线性规划	325
12.4 变次 Fuzzy 相似矩阵方程	329
12.5 Fuzzy 相似矩阵方程	334
参考文献	345
第十三章 模糊推理	346
13.1 自然语言的集合描述	346
13.2 模糊判断句及其逻辑演算	350
13.3 模糊推理句	352
13.4 不同变元的模糊推理句	360
13.5 似然推理	363
13.6 模糊条件语句	367
13.7 多段模糊条件语句	373
参考文献	377
第十四章 真值流推理	379
14.1 推理是真值流动的过程	379
14.2 渠道格及其背景图	383
14.3 推理的本质	393
14.4 Fuzzy 渠道及其背景图	396
14.5 可能性测度与必然性测度	399
14.6 具有 Fuzzy 渠首与 Fuzzy 渠尾的 Fuzzy 渠道	402
14.7 背景图的运算	405
14.8 蕴涵的运算	406
14.9 渠道网络	408
14.10 真值流神经网络	411
参考文献	412
第十五章 模糊控制	414
15.1 模糊控制的基本形式	414
15.2 模糊控制器的可响应性	418
15.3 模糊控制规则的自调整	419

15.4	模糊控制稳定性的垫整分析	420
15.5	模糊控制规则的交互影响	438
	参考文献	441
第十六章	基于模糊神经网络的模糊控制	443
16.1	引言	443
16.2	网络各层的意义	446
16.3	权的意义	447
16.4	FCNN 的传递函数和实现	450
16.5	逻辑神经网络	452
16.6	FCNN 的学习规则和学习能力	459
16.7	FCNN 的学习	464
16.8	基于 FCNN 学习结果的因素分析	466
16.9	模糊控制的实现	468
16.10	模糊控制的可控性、稳定性和鲁棒性	469
	参考文献	470
第十七章	模糊计算机	472
17.1	Fuzzy 计算机的总体结构	472
17.2	FD 转换器的基本思想	474
17.3	FD 转换器的内部构造	479
17.4	知识包与特征基	486
17.5	思维处理器	488
17.6	由思维处理器派生出来的几个部件	494
17.7	由 FD 转换器派生出来的几个部件	498
17.8	二维图象实时处理系统	499
17.9	Fuzzy 计算机在数值计算中的应用	501
17.10	Fuzzy 插值映射及其性质	503
17.11	一个可操作的 Fuzzy 插值算法	509
	参考文献	514

第一章 模糊集合论基础

1.1 模糊现象与模糊概念

模糊概念来源于模糊现象,而模糊现象在自然界中是客观存在的.例如,“下雨”是常见的自然现象,从“绵绵细雨”到“倾盆大雨”,各种程度的雨都会经常不断地发生,这种不是以固定不变的一种或几种程度(或方式)出现,使得人们很难用确定的尺度(或模型)来刻画的现象就是模糊现象.

人们了解、掌握和处理自然现象时,在大脑中所形成的概念往往是模糊概念,这些概念的类属边界是不清晰的.由此产生的划分、判断与推理也都具有模糊性.比如,人们为描述雨下的程度,可以划分为“小雨”、“中雨”和“大雨”.然而,什么样的雨是“小雨”,什么样的雨是“中雨”,什么样的雨是“大雨”,又很难说清楚,这样的概念(小雨、中雨或大雨)就是模糊概念,这样的划分就是模糊划分.假如今天下雨了,人们会根据雨下的程度定为小雨、中雨或大雨,这就是模糊判断.再根据判断的结果猜测今年的收成是“好”、“一般”、还是“坏”,这就是模糊推理.

人类的大脑具有很高的模糊划分、模糊判断和模糊推理的能力.人们为了表达和传递知识所采用的自然语言中已巧妙地渗透着模糊性,并能用最少的词汇表达尽可能多的信息.

由于历史的原因,人们习惯追求精确性或清晰性,总希望把事物以数字的形式清楚地表达出来,看来这是事物发展的必然趋势,L. A. 扎德认为:“一种现象,在能用定量方法表征它之前,不能认为已被彻底地理解,这是现代科学的基本信条之一.”但是,面对模糊现象,人们使用传统数学会遇到实质性的困难.

早在古希腊时期,人们就讨论过这样一个问题:多少粒种子算

作一堆?正因为“一堆”是个模糊概念,因此找不出一个适当界限来判定一些种子是否为一堆。

计算机的出现是人类大脑延伸的一个飞跃,它能在几秒或几十秒内完成人在几天甚至几年才能完成的计算或其它某些问题,比如解一个高阶线性方程组或证明“四色定理”。然而在许多问题中,计算机的智力水平还不如一个婴儿,一个两岁婴儿可以准确而迅速地识别出他的母亲,如果让计算机来完成这件事,真不知需要提供多少个参数,其结果很可能还是个笑话。由于人们重视精确、严格和定量的东西,蔑视模糊、不严格和定性的东西,因此采用计算机的定量方法在大部分领域内得到了迅速发展。无疑,计算机在处理机器系统方面已被证实是高度有效的。所谓机器系统是指力学、物理、化学和电磁学所规定的无生命系统。可惜关于人文系统不能作出相同的结论,这类系统至少到现在为止,与数学的分析和计算机的模拟还有一段距离。对于生理学、心理学、文学、法律、政治、社会学和其它与人类判决所及的领域中的基本论题,计算机的应用却没能提供有效的帮助,这一点已得到普遍的承认。

所谓人文系统是指行为受人类的判断、感觉或情感影响的重大系统。例如,经济系统、管理系统、教育系统、政治系统、法律系统等。随着科学的深化,数学的应用对象不得不从“物理”进入“事物”,而这恰恰是模糊性最集中的地方,因此人们不得不与模糊现象打交道。

模糊性在日常生活中随处可见,模糊概念比比皆是。例如,“高个子”、“多云”、“黄昏”、“四肢无力”、“性能良好”等。可以说,模糊性是绝对的,而清晰性或精确性是相对的。所谓精确性或清晰性是人们对不确定性或模糊性实行的一种分离,这种分离是具有重要意义的,它使得人们能方便地对某些事物进行严格的定量表示,即建立数学模型。但是随着科学的深化,研究对象越来越复杂化。复杂的事物有两个突出的特点:一是影响该事物的因素众多,人们又不可能掌握全部因素,只能在有限的一些因素上考察事物,这样一来,本来是清晰的现象也变得模糊了;二是深度延长(难度增大),

这带来了数学模型的复杂化,于是模糊性逐次积累,变得不可忽略.因此,精确性或清晰性与模糊性的对立是当今科学发展所面临的一个十分突出的矛盾. Zadeh 正是注意到了这个矛盾,总结出—条互克性原理:“随着系统复杂性的增长,我们对其特性作出精确而有意义的描述能力相应地降低,直到达到一个阈值,一旦超过它,精确性和有意义性几乎成为两个互相排斥的特征.”这就是说,复杂程度越高,模糊性越强,精确化程度便越低;也说明模糊性来源于复杂性.解决这个矛盾的有效方法之一,就是在“高复杂性”与“高精度”之间架起一座桥梁——模糊集合论.

1.2 模糊集合的朴素思想

“概念”是人们常使用的名词,例如“男人”就是一个概念.一个概念有其内涵和外延.所谓内涵是指符合此概念的对象所具有的共同属性;而外延指的是符合此概念的全体对象.自从有了“集合”这个名词之后,概念的外延亦解释为:符合此概念的全体对象所构成的集合.因此,集合可以表现概念(从外延的角度);集合之间还有运算和变换,它们可以表现判断与推理.现代数学是以集合论为基础的,这意味着现代数学成为描述和表现各门学科的形式语言和系统.

集合论是由德国数学家 G. Cantor 于 1874 年创立的. Cantor 创造集合的重要方法之一就是概括原则.所谓概括原则是指:任给一个性质 P , 便能把所有满足性质 P 的对象,也仅由具有性质 P 的对象,汇集在一起构成一个集合,用符号表示为

$$A = \{a | P(a)\}$$

其中 A 表示集合; a 表示 A 中任何一个对象,称为集合 A 的元集; $P(a)$ 表示元素 a 具有性质 P ; $\{ \}$ 表示把所有具有性质 P 的元素 a 汇集成一个集合.用逻辑的语言,概括原则陈述为

$$(\forall a)(a \in A \Leftrightarrow P(a))$$

Cantor 的集合论对于数学基础的奠定有重大贡献,但对数学

的应用也带来了限制.事实上,Cantor 要求组成集合的对象是确定的,彼此有区别的;这意味着用以构造集合的性质 P 必须是界线分明的,亦即要求任何对象要么具有性质 P ,要么不具有性质 P ,因此排中律被满足.按照这一要求,集合所表现的概念(性质或命题),真就是真,假就是假,只有真假二字以供推理,形成一种二值逻辑.于是,数学对于客观事物便作了一个绝对化的写像.然而,人脑中的概念几乎都是是没有明确外延的,例如像“高个子”(性质 P)这样一个概念在 Cantor 的意义下就不能构成集合.因为对任何一个人来说,他是否具有性质 P (高个子)是不能明确判定的.

没有明确外延的概念就是模糊概念.模糊概念能否硬性地用 Cantor 集合来刻画?“秃头悖论”将给出否定的答案.对于秃与不秃,一根头发不能区分“楚河”与“汉界”,于是我们承认下列的公设:

公设 若具有 n (n 是任一自然数)根头发的人是秃头,则具有 $n+1$ 根头发的人亦秃.

基于这个公设,可以证明

秃头悖论:任何人都是秃头.

证明 采用数学归纳法.

- (1) 仅有一根头发的人自然是秃头.
- (2) 假定有 n 根头发的人是秃头.
- (3) 由公设便知有 $n+1$ 根头发的人亦秃.
- (4) 由归纳法原理得出结论:任何人都是秃头.

这个悖论出现的原因在于,把一个二值逻辑的推理运用到一个二值逻辑所不能施行的判断上去.

质与量是统一的,量变蕴涵着质变.从头发的根数来区分“秃”与“不秃”,绝对的界限是没有的,但根数的加一与减一又都必须计较,在这个微小的量变之中已经蕴涵着质的差别,而这种差别是不能只用“真”(是)与“假”(非)这两个字刻画出来.

“真”与“假”作为逻辑值可分别记为 $1(=100\%)$ 与 $0(=1-100\%)$.逻辑值是对命题真确程度的一种度量.二值逻辑把真与假

绝对化,只容许 1 与 0 这两个值.“秃头悖论”给予我们启示,对于模糊概念仅用这两个值是不够的,必须在 1 与 0 之间采用其它中介过渡的逻辑值来表示不同的真确程度.要使数学能够处理模糊现象,从根本上讲,就要改造 Cantor 集合,即建立一种新的“集合”形式,称之为模糊集合.

在实际问题中,集合总是作为某个概念的外延,因此,总要把涉及的议题限制在一定的范围内.例如要讨论“男人”这一概念,不必去考虑那些风马牛不相及的事物,可以把议题限制在“人”这个范围内,从一切人(记为 U)中选出所有的男人,构成 U 上的一个集合 A , A 便是“男人”这个概念的外延.

被讨论对象的全体称为论域,常以大写英文字母 $U, V, \dots, X, Y$ 等表示;论域中的每个对象称为元素,以相应小写英文字母 $u, v, \dots, x, y$ 等表示.

给定一个论域 U , U 中一部分元素全体称为 U 上的一个集合,常以大写英文字母 A, B, C 等表示.

论域 U 可以视为一个“方框框”, U 中元素被看作一些没有大小,没有质量的抽象“点子”, U 上的集合 A 想象为“方框框”中的一个“圆圈”.图 1.2.1 给出 Cantor 集合的直观表示,这就是文氏图.

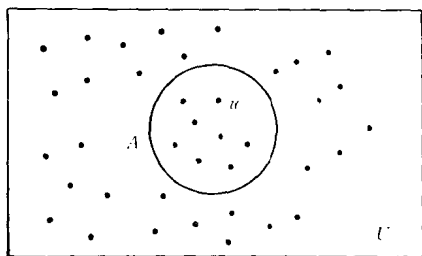


图 1.2.1 论域、集合、元素

在 U 中任意指定一个元素 u 及 U 上一个集合 A ,在 u 与 A 之间,要么 u 属于 A (记作 $u \in A$),要么 u 不属于 A (记作 $u \notin A$),二

者必居其一,且仅居其一.

若 $u \in A$, 即 u 在“圆圈”内, 则记为 1; 若 $u \notin A$, 即 u 在“圆圈”外, 则记为 0. 要想建立模糊集合, 就必须把元素对集合的绝对隶属关系扩展为各种不同的隶属程度.

类似文氏图, 我们给出模糊集合的直观解释. 首先, 把论域 U 看作平面(欧氏平面)上的一个矩形, U 中元素是该矩形中的一些点子(未必充满 U), 见图 1.2.2.

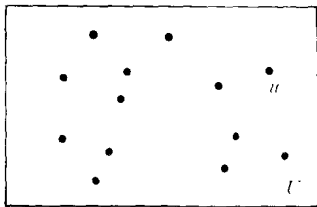


图 1.2.2 论域、元素

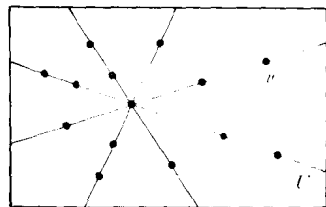


图 1.2.3 论域、元素、射线

在矩形中任取一点 x (未必属于 U), 以 x 为始点作出全部射线, 这些射线可以“覆盖”整个矩形, 因此 U 中每个元素一定位于这样的射线上(见图 1.2.3).

我们想象 U 上有一个模糊集合, 记为 A , 它可视为矩形中一个具有单位宽度边界的一个“圆圈”, 即同心圆环(见图 1.2.4).

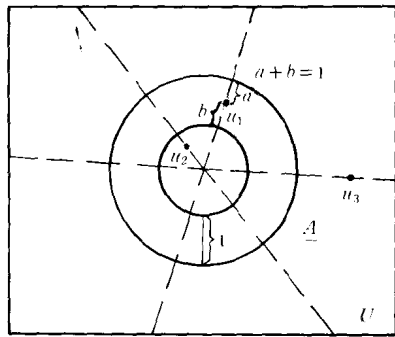


图 1.2.4 模糊集的直观解释