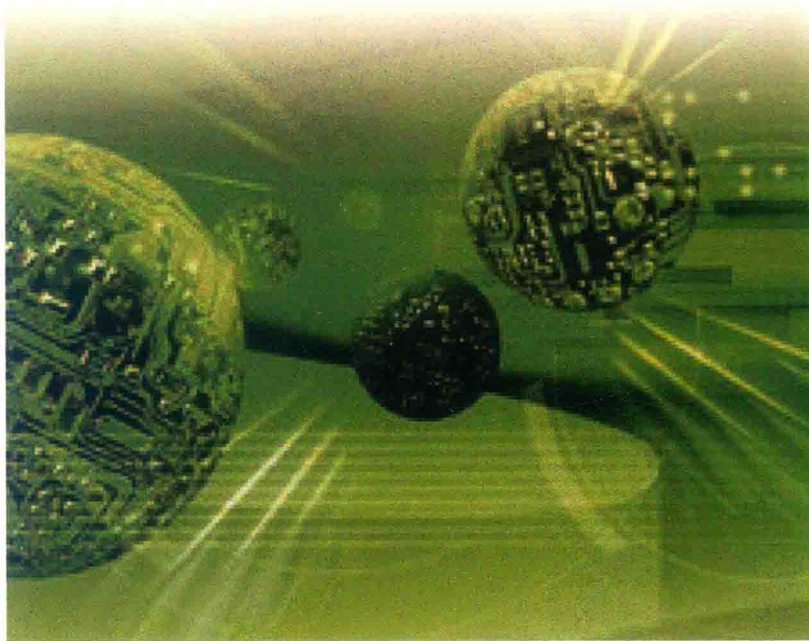




基于不确定性特征的 模糊多属性决策及应用

■ 石乙英 丁志强 著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

基于不确定性特征的模糊 多属性决策及应用

石乙英 丁志强 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共分6章,着重讨论了以下内容:针对直觉模糊蕴涵算子,利用直觉模糊集截集,提出两种构造的理论方法,并对这些蕴涵算子的性质进行讨论;针对模糊数的排序优化问题,给出了一种模糊数排序的新方法并建立了基于态度函数的模糊决策模型,利用实际问题说明该模型的可行性;针对模糊多属性决策问题中指标集的权重具有不确定性的问题,给出了区间熵的定义并建立了基于区间熵的模糊多属性决策模型,结合实际问题说明了决策的整个过程。

本书可作为高等学校数学专业、管理专业、计算机专业和控制专业的高年级学生和研究生教材,也可以作为从事模糊决策专业教学、科研的教师和工程设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于不确定性特征的模糊多属性决策及应用/石乙英、丁志强著.
—北京:国防工业出版社,2020.1

ISBN 978-7-118-12012-7

I. ①基… II. ①石… ②丁… III. ①模糊集理论-应用-决策方法-研究 IV. ①C934

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 008447 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 7¼ 字数 140 千字

2020 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1-1500 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

近年来,随着模糊理论相关研究的深入,越来越多的研究成果被应用于控制与决策领域,从而带动了模糊控制与模糊决策研究的快速发展.模糊理论应用于控制系统中,从控制过程的知识或经验出发,通过提取规则来建立相应的控制策略,实现对被控对象的有效控制,从而避免了经典控制理论对被控对象精确数学模型的依赖;模糊理论应用于决策问题中,将决策者不能精确定义的事件、属性等都处理成某种模糊集,利用隶属度函数展开讨论并进行决策.尽管模糊理论在上述领域中取得了丰富的研究成果,但作为一门年轻的学科,该理论在诸多方面仍亟待完善.例如模糊控制系统中关于蕴涵算子的选取原则,目前相关的研究就尚显缺乏;对于模糊多属性决策中指标集的排序及具有不确定性权重的表示问题,也需要进一步的深化.针对上述问题,本书在直觉模糊集截集定义的基础上,对模糊控制与模糊决策中的相关问题开展了研究工作,主要内容包含以下三个方面:

(1) 针对直觉模糊蕴涵算子,利用直觉模糊集截集,提出两种构造的理论方法:一种方法是基于直觉模糊集的表现定理,分别通过模糊蕴涵及模糊关系来构造直觉模糊关系进而得到七个直觉模糊蕴涵算子;另一种方法是将 Lebesgue 测度引入直觉模糊蕴涵中,利用 Lebesgue 测度构造出一个直觉模糊蕴涵算子,并对这些蕴涵算子的性质进行讨论.

(2) 针对模糊数的排序优化问题,给出了一种模糊数排序的新方法并建立基于态度函数的模糊决策模型.首先利用区间值模糊集的截集,构造基于可能度的区间值比较关系,进而利用这一关系的积分来构造基于可能度的模糊数比较关系.然后结合态度函数建立基于可能度的模糊数排序方法,通过与已有典型方法的比较说明该方法的合理性及有效性.最后将该排序方法应用于模糊决策问题,建立基于态度函数的模糊决策模型,利用实际问题说明该模型的可行性.

(3) 针对模糊多属性决策问题中指标集的权重具有不确定性的问题,给出了区间熵的定义并建立了基于区间熵的模糊多属性决策模型.首先基于模糊

集熵的定义,提出模糊集区间熵的定义,引入了区间相似度、区间包含度和区间远离度的概念,分析了区间熵与这三个概念之间的关系。其次建立了基于区间熵的模糊多属性决策模型,在这个模型中,以区间熵为权重,将权重与各个指标集通过加权平均得到综合效用值,依据基于可能度的模糊数排序方法对综合效用值进行排序,最终确定方案集的排序关系。最后结合实际问题来说明决策的整个过程。

本书的研究工作为蕴涵算子的理论构造以及模糊多属性决策问题模型的建立等问题提供了新的思路。

由于模糊多属性决策问题涉及的知识面极为宽广,而作者的知识及研究领域有限,因此错误和不足之处在所难免。在此,作者恳切希望得到各方面专家和读者的批评指正。

本书在编写过程中,得到了大连理工大学袁学海教授的鼓励和支持,得到了辽宁省科学技术计划项目的资助,也得到了国防工业出版社的帮助,在此一并表示真诚的感谢。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 模糊蕴涵研究综述	1
1.1.1 关于模糊蕴涵算子的研究	1
1.1.2 关于直觉模糊蕴涵算子的研究	2
1.2 模糊决策研究综述	4
1.2.1 模糊数排序问题的研究现状	6
1.2.2 熵在模糊多属性决策问题中应用的研究现状	8
1.3 主要研究内容	10
第 2 章 预备知识	12
2.1 模糊集基本理论	12
2.2 直觉模糊集	13
2.3 直觉模糊蕴涵及其性质	15
2.4 模糊集的熵、相似度、包含度及远离度	17
2.5 区间数及其运算	18
2.6 小结	19
第 3 章 基于截集的直觉模糊蕴涵	20
3.1 引言	20
3.2 基于表现定理的直觉模糊蕴涵算子	20
3.2.1 基于蕴涵 $A_\alpha \rightarrow B_\alpha$ 来构造直觉模糊蕴涵算子	20
3.2.2 基于模糊关系的直觉模糊蕴涵算子	27
3.3 利用 Lebesgue 测度构造直觉模糊蕴涵算子	30
3.4 直觉模糊蕴涵算子的性质	32
3.5 小结	44
第 4 章 基于截集的模糊决策问题研究	45
4.1 引言	45
4.2 基于可能度的比较方法	45

4.2.1	基于可能度的区间值比较关系	45
4.2.2	基于可能度的模糊数比较关系	47
4.2.3	基于可能度的模糊数排序方法	48
4.3	与其他排序方法的比较	50
4.3.1	与 Huynh 方法的比较	51
4.3.2	与其他方法相比较	54
4.4	在模糊决策中的应用	57
4.5	小结	63
第 5 章	模糊集的区间熵及其在模糊多属性决策中的应用	64
5.1	引言	64
5.2	模糊集的区间熵	64
5.3	区间相似度、区间远离度和区间包含度	68
5.4	区间相似度、区间远离度、区间包含度、区间熵之间的关系	75
5.5	模糊多属性决策中的区间熵	83
5.5.1	区间熵权	83
5.5.2	综合模糊关系合成	84
5.6	铁路改造方案案例分析	85
5.7	小结	96
第 6 章	结论与展望	97
6.1	结论	97
6.2	展望	98
附录	方案决策表	99
参考文献		105

第 1 章 绪 论

1.1 模糊蕴涵研究综述

经典的自动控制理论通过对被控对象建立精确的数学模型来展开研究。然而,实际生产过程具有复杂性、不稳定性,以及在复杂系统中存在着大量的模糊性因素,这就使得精确数学模型的建立变得极为困难。因此,当面对复杂系统的被控对象时,很难取得合理的控制效果。如何寻找新的理论体系来解决复杂工业系统中的模糊性问题是控制理论和控制工程研究者需要解决的问题。美国的 Zadeh 教授于 1965 年创建了模糊集理论,1974 年又展开了关于模糊逻辑推理问题的研究,这就为处理复杂工业控制系统中的模糊性问题找到了一个新的方法。与此同时,Mamdani 于 1974 年利用模糊控制语句在实验室成功实现了对锅炉和蒸汽机的控制问题,取得了理想的效果,标志着模糊控制的产生。此后,模糊控制迅速发展,其原理及方法日趋完善,至今已经取得了显著的成绩,广泛地应用于交通管理、工业控制、信息传输、国防建设等领域,在控制、管理、信息、决策的自动化与科学化进程中发挥了极其重要的作用。

1.1.1 关于模糊蕴涵算子的研究

所谓模糊控制,是基于模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理建立的一种计算机数字控制技术。模糊控制器是决定模糊控制系统是否良好的关键^[1],主要包含四个部分:模糊化、建立推理规则、模糊推理和解模糊化^[2]。其基本结构如图 1.1 所列。

由于通过模糊蕴涵算子,可以对控制规则建立一个函数关系,因此在建立推理规则和模糊推理中起着重要的作用。Zadeh 教授^[3]于 1973 年首次利用模糊蕴涵算子,将其与推理规则进行合成,建立了合成推理规则(Compositional Rule of Inference, CRI),标志着模糊推理的建立,其基本思想是:利用模糊蕴

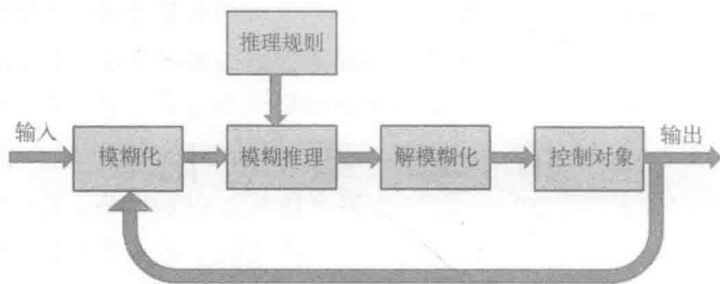


图 1.1 模糊系统的基本框图

涵 $\rightarrow$ (或 I)将模糊推理句“如果 x 是 A ,那么 y 是 B ”表示为 $X \times Y$ 上的一个模糊关系. 即

$$(A \rightarrow B)(x, y) = A(x) \rightarrow B(y) = I(A(x), B(y)). \quad \forall x, y \in X \times Y.$$

然后将输入与模糊关系合成得到输出. 而模糊蕴涵算子不仅能作用于模糊关系,还可以在基于模糊规则的推理系统中表示推理规则前件与后件之间的函数关系,至今在模糊控制与近似推理中取得了研究成果^[4-15]. 这些研究成果可以分为两大类. 一类是在理论方面: Mas^[10]对由 t -模、 t -余模及聚合算子生成模糊蕴涵算子的定义、性质进行总结,分别从 S -蕴涵、 R -蕴涵、 QL -蕴涵及 D -蕴涵的角度对这些模糊蕴涵算子进行重新定义; Baczyński^[9]分别研究了 (S, N) -蕴涵和 R -蕴涵的性质,指出这两类蕴涵均满足左中立性及交换性,此外 R -蕴涵还满足恒同性等性质; Baczyński^[11]进一步研究了 (S, N) -蕴涵、 R -蕴涵和 QL -蕴涵的关系,指出若一个模糊蕴涵算子既是 (S, N) -蕴涵,又是由左连续 t -模生成的 R -蕴涵,则其一定是 QL -蕴涵; 王国俊教授^[8]利用三 I 推理算法,通过蕴涵算子来建立模糊逻辑,有效地改进了经典的 CRI 算法; 汪培庄^[14]和Dubois^[15]等分别利用模糊集的截集和表现定理构造了模糊蕴涵关系,从而构造出具有理论基础的模糊蕴涵算子. 另一类是在应用方面: Mandal^[5]建立了基于模糊关系推理的单输入单输出模糊推理系统,由于其主要关注具有弱一致性的一类蕴涵算子,因此与针对某个特定的蕴涵算子建立的模糊系统相比,具有更大的普遍性; 文献[2]对于由模糊蕴涵算子构造的模糊控制系统,利用选择机制来对系统的响应能力进行检验. 此外,模糊蕴涵算子也可以应用于模糊关系方程和模糊形态学^[10]、图像处理和模糊测度^[16,17]及数据挖掘^[18]等领域.

1.1.2 关于直觉模糊蕴涵算子的研究

模糊集理论的核心思想是把经典集中取值为 $0, 1$ 的特征函数扩展到可在

$[0,1]$ 中任意取值的隶属函数.然而,模糊集的隶属度不能同时表示肯定、否定、不确定性的程度.而在人们对事物的认知过程中,往往存在着不同程度的犹豫性及不确定性,从而使人们对事物的认知往往表现为肯定、否定,或介于肯定和否定之间的不确定性,因此有必要对模糊集进行进一步的扩展. Atanassov 于 1983 年提出了同时考虑到隶属度、非隶属度、犹豫度三方面信息的直觉模糊集的概念.近年来,关于这一理论的研究已经受到研究人员的关注并被广泛应用于聚类分析^[19]、模糊控制及模式识别^[20]等各个方面.

在实际设计知识系统时,由于对事物本质规律的认识不清楚,存在着不同程度的犹豫性及不确定性,而单一的模糊集隶属度函数无法表示这种不确定性,因此需要将直觉模糊集引入模糊推理中.在应用模糊推理中,对于模糊推理句“如果 x 是 A ,那么 y 是 B ”,如果将 A, B 表示为直觉模糊集,那么便可以利用直觉模糊蕴涵来表现此推理句.关于直觉模糊蕴涵的研究已取得了许多结果,总体上可分为两类.一类是关于直觉模糊蕴涵算子性质、分类、应用等方面的研究^[20-29],例如 Cornelis^[20]等对现有的直觉模糊蕴涵算子的构建方法、分类及应用做了一个总结,认为直觉模糊蕴涵算子是以数理逻辑为基础,通过引入代数结构进行扩展而得到的; Yao^[21]讨论了由二元算子生成剩余算子所需满足的最小条件,以及生成的剩余算子满足单调性、中立性、恒等性、反对称性等性质的条件; Bedregal^[22]研究了区间值的 S -蕴涵.另一类是关于直觉模糊蕴涵算子具体构造的研究^[19,30-36],例如 Bustince^[19]等基于模糊蕴涵算子,分别利用直觉模糊集的隶属度及非隶属度来构造直觉模糊蕴涵算子,并且讨论了构造的直觉模糊蕴涵算子能满足的基本性质,但缺乏进一步的讨论; Glad^[30]等研究了直觉模糊集上一类具有特定性质的二元聚合算子,以及由这个二元聚合算子生成的直觉模糊蕴涵算子及其性质.

尽管关于模糊蕴涵算子及直觉模糊蕴涵算子的研究取得了上述成果,但仍存在诸多不足.在经典逻辑中,对于推理句“如果 x 是 A ,那么 y 是 B ”,其真值表如表 1.1 所列.

表 1.1 真值表

A	B	$A \rightarrow B$
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	1

将其推广至模糊逻辑,对于满足 $I(1,0)=0, I(0,1)=I(1,1)=I(0,0)=1$ 的蕴涵算子 I 均称为正常模糊蕴涵算子. 尤飞^[2]对模糊蕴涵算子的构造方法进行了总结,指出可以分别通过规则的并与交、圈乘算子、对偶算子、三角模与余三角模等构造出412个模糊蕴涵算子. 面对众多的模糊蕴涵算子,对于何种蕴涵算子在构造模糊控制器时能取得理想的控制效果的相关研究并不多见. 而对于直觉模糊蕴涵算子构造,仅要求当其退化为经典集时与经典逻辑保持一致,对于其他点处的逻辑取值并无更多理论上的表述. 若能构建出具有理论背景的直觉模糊蕴涵算子,则会对模糊系统性能的改进产生积极的影响.

1.2 模糊决策研究综述

决策理论的历史源远流长. 在中国古代,田忌赛马、万里长城建设等都体现了决策的思想,由于其缺乏规范性,没有形成完整的理论与方法体系,因此称为经验决策. 随着科学技术的发展,经验决策已经不能满足社会发展的需要,因此需要将经验决策向科学化的决策发展,形成一套具有完整理论体系,便于学习和掌握的科学决策理论和方法. 随着科学技术发展的日益加快,对决策方面的要求也越来越高. 例如在复杂工业的生产过程中,其主要目的是在满足控制约束的前提下,尽量实现控制目标. 但由于系统约束使得控制目标无法满足时,则需要考虑如何兼顾控制目标和系统约束,使系统性能实现最优. 随着生产过程复杂性不断提高,往往需要综合考虑相互矛盾、相互制约的多个因素或目标,而这些因素或目标的度量指标往往是不尽相同的,因此需要建立一种新的决策模式来处理这类决策问题,这就是多准则(属性)决策理论和方法在近年来得到迅速发展的主要原因^[37].

中国工程院院士、大连理工大学王众托教授认为:“多层次多目标多人决策问题是当今处理社会经济系统规划的有力工具,也是当今决策科学的热点课题.”^[37]根据决策空间的不同,经典的多准则决策可以分为两类:在备选方案的个数有限即决策空间是离散的时进行的决策称为多属性决策;依据多个目标的满足程度进行方案的选取称为多目标决策. 一般来说,多属性决策指的是如何评价选择已知方案,多目标决策指的是如何对未知方案进行规划设计.

多属性决策是现代科学决策的核心内容之一,其问题广泛存在于控制工程、信息科学、系统工程等各个领域. 其问题可以概括为:给定一组备选方案,对于每个方案,都需要通过若干个属性来进行综合评判^[37],最终的目的是通过

综合评判对备选方案进行排序,使之能反映决策者的意图.实际工作的需要和人们对事物认识的复杂性,使得在整个决策系统中存在着大量的不确定性信息.如何对这些不确定性信息进行处理,是决策理论研究的重点.所谓不确定性,是指获得的信息无法反映事物的准确特性.随着科学的发展,人们认识到如果忽略了信息的不确定性,将无法对事物进行正确的认识,也不能对复杂系统进行科学的研究.通常情况下,不确定性可分为两类:一种是事件发生的不确定性,通常称为随机性;另一种是事件状态的不确定性,通常称为模糊性.

针对不确定性,传统的决策理论通常利用概率统计方法来建立随机模型.这种方法的前提是假设不确定性事件受到随机因素的影响.但是随着研究的深入,人们逐渐认识到这种理论存在不足.当人们主观判断存在局限性或者对事物认识具有不充分性时,很难给出事物的精确信息或建立准确的概率分布模型.因此,需要寻找新的决策理论来解决上述问题. Zadeh 于 1965 年提出了模糊集理论,这一理论在某种程度上弥补了概率统计的不足. 1970 年, Bellman 与 Zadeh^[38] 将模糊集与决策问题联合起来,在多目标决策的基础上提出了模糊决策的基本模型. 由于其具有很大的灵活性与适应性,因此被视为整个模糊决策的基础,也是系统工程、人工智能、控制科学等交叉学科的重要研究领域. 在这个模型中,凡是决策者不能精确定义的事件、属性等都可以被处理成某种适当的模糊集,然后通过截集转化为经典决策问题. 1977 年 Bass^[39] 提出的模糊多属性决策方法被认为是模糊多属性决策的经典方法. 模糊多属性决策问题的基本模型可以描述为: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 为给定的备选方案集, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 为相应于每个方案的属性集, $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 为表示每种属性相对重要程度的权重集. 其中,属性和权重既可以为数字,也可以为语言变量;涉及的数据类型既可以是精确的,也可以是不确定的. 所有的指标都可以表示为决策空间中的模糊子集或模糊数^[37]. 其模糊属性值矩阵可以写成:

$$\tilde{X} = \begin{matrix} & C_1 & \cdots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

首先采用模糊合成算子对权重和属性进行综合模糊关系合成,得到方案的模糊决策综合效用值 F_i :

$$F_i = W \odot X_i$$

其中 $X_i = \{\tilde{x}_{i1}, \tilde{x}_{i2}, \dots, \tilde{x}_{in}\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $\odot$ 为模糊合成算子. 然后按照排序方

法根据 F_i 对各个方案进行分析,实现对方案的排序.这样一来,模糊多属性决策问题就可以归结为以下几个步骤:首先针对给出的模糊属性指标,确定各个属性指标的权重;其次进行综合模糊关系合成;最后对模糊属性指标进行排序,即利用得到的模糊决策综合效用指标来确定属性指标的排序关系.

目前,关于模糊多属性决策问题的研究取得了很多新的成果^[40-52]. Hadi-Vencheh 等^[41] 基于聚合决策函数,利用模糊劣比法在理想解的距离最近点和非理想解的距离最远点之间找到了一个平衡点. Zhao 等^[43] 构造出了一系列的犹豫三角模糊 Einstein 算子,并利用这些算子研究了属性值为犹豫三角模糊信息的模糊多属性决策问题. Liu 等^[45] 提出了正规单值归一化加权 Bonferroni 均值算子,并且将其应用于模糊多属性决策问题,但这种方法只对参数取离散值的情况进行了讨论,缺少对其他类型的讨论. 徐泽水等^[51] 基于 Pythagorean 模糊集提出了一种改进的逼近理想解排序法,即利用基于评分函数比较法来确定 Pythagorean 正负理想解,通过给出的距离函数来计算各个属性值与正负理想解的距离,通过不断修正正负理想解来得到最优解.

综上所述,模糊多属性决策是数学与运筹学、信息技术、管理科学等相结合的交叉学科,其研究成果在神经网络、决策树、智能控制系统等方面得到了广泛的应用,但在理论上还需进一步深化,应用上还需做进一步的拓广. 科学、合理、适用的模糊多属性决策理论、方法,是当今决策理论的重要问题,对社会生产的发展具有重要的理论价值和应用价值.

1.2.1 模糊数排序问题的研究现状

模糊数作为模糊集理论中的基本概念,经常用来表示不确定信息,被广泛应用于模糊多属性决策^[53-57]、模糊控制^[58,59] 等各个方面. 模糊多属性决策问题的主要思想是通过各个指标集的决策综合值来实现对各个指标集的选择或排序. 但是系统的复杂性、数据的不完整性及认识的不确定性等,使得决策综合值往往以模糊数的形式出现,因此指标集的选择或排序就转化为模糊数的排序问题. 此时模糊数排序方法的选择直接决定了最终指标集的排序关系. 当然,类似的问题还会出现在其他知识领域,例如模式识别中的关于如何确定模糊决策树效用比较的问题,层次分析法中涉及因素权重排序的问题^[60,61],模糊群决策理论备选方案序关系的问题^[62,63],通过构建模糊线性规划模型解决不等式的问题^[64,65] 等. 总而言之,只要涉及关于研究对象的选择或排序,并且以模糊数的形式进行表示,都可以转化为模糊数的排序问题. 对于模糊数来

说,恰恰由于其能够表示不确定性,才使得其隶属度函数具有多种表达形式,与实数集相比,在直观上没有明确的序关系,因此需要对模糊数的排序方法展开专门的研究.

早在 1976 年, Jain^[66] 在模糊决策问题中首先提出了利用模糊数与定义的模糊最大集偏离程度来确定模糊数排序问题的方法. 随后, Baas^[39] 和 Watson 等^[67] 分别在研究模糊多属性决策模型的构建及建立的模糊决策树模型问题中提出了各自的模糊数排序方法. 相应理论一经建立,立即得到了广泛重视. 1979 年, Baldwin 和 Guild^[68] 联合发表了专注于讨论模糊数排序问题的文章, 针对以上三种方法各自的缺陷展开讨论并提出了相应的改进方法. 此后,随着排序方法的增多,模糊数排序的应用领域也越来越广泛,而应用领域的扩大必然又带来了新的排序方法. 迄今为止,有很多学者从不同的角度提出了模糊数的排序方法,所涉及的排序指标有 40 多个. 现有的排序方法总结起来可以分为三类. 第一类方法是通过建立模糊数与实数之间的映射,按照实数的大小关系对模糊数进行排序^[69-78],例如, Yager^[75-77] 通过计算模糊数截集的均值在其隶属度函数值域上积分的数值来确定模糊数的排序关系; Yoon^[71] 从概率密度函数角度出发,利用隶属度函数与均值的距离数值确定模糊数的排序关系; Gonzalez^[69] 利用隶属度函数的平均值进行排序等. 这类排序方法的优点是可以借助于实数的序关系来确定模糊数的排序关系,直观性强,便于理解;其缺点是利用一个具体的实数来代替一个隶属度函数,这实际上等同于解模糊化过程,往往会忽略大量的有用信息,导致排序结果与直观认识相矛盾或出现无法区分的情形^[79]. 第二类方法是将每个模糊数与给定的指标集进行比较,按照比较结果来确定模糊数的序关系^[56,80-86],例如 Jain^[56] 定义的模糊最大集, Huynh^[86] 定义的乐观函数集、悲观函数集及中立函数集. 这类方法的优点是不仅能够减少有用信息的流失,而且能够体现决策者的偏好态度;缺点是具有主观性,排序结果缺乏客观性^[81,85]. 当需要偏重于决策者主观态度时,常采用此类方法. 第三类方法通过建立模糊数的模糊关系来构建模糊数的两两比较矩阵^[68,87-90],例如 Baldwin^[68] 利用两个模糊集中变量差值来定义模糊关系; Lee^[89] 利用满意度函数来构造模糊关系. 这类方法的优点是能够减少有用信息的丢失,其排序结果不受主观因素干扰,具有客观性;缺点是局限在特定的模糊关系下,评价指标单一,不能全面考虑决定排序的各个因素. 对于这一缺点, Dubois 和 Prade^[87] 对其进行了改进,提出同时利用四个模糊关系对两个模糊数进行排序的方法. 虽然该方法评价指标增多,涉及的因素增多,但由于四个指标含义各不相同,侧重点

也不相同,因此导致排序关系矛盾,最终仍需借助决策者的主观判断来确定最终的排序关系.对于现有的排序方法,正如 Huynh 指出“None of them is a well-accepted golden choice for all cases”^[86].上述三类方法的共同点是通过对排序指标进行构造并处理来确立模糊数的序关系,最终都是将模糊数转化为具体的实数,利用实数的序关系来建立模糊数的序关系.还有一种思想是利用语言变量方法^[91],但由于尚缺乏操作过程的规范性,主观性较强,而且只能定性分析,还不能进行定量比较,因此相关研究进展较缓慢.除了专注于设计模糊数具体排序方法的研究,还有一部分专注于模糊数排序的综述性文章^[92-96],例如文献[92]对于涉及排序的各个指标进行分析归类;文献[93]借助于特定的数值例子对现有的排序方法进行分析比较;文献[96]对关于模糊数排序研究作了全面回顾,包括排序问题的描述、应用背景、排序指标综述及分类、排序方法的合理性、排序方法之间的联系等.

综上所述,虽然关于模糊数排序问题的研究成果较多,但并没有哪一种是“放之四海而皆准”的方法,其原因在于模糊数其隶属度函数形式较复杂,本身并非是全序的关系,因此在排序方法上会出现“百家争鸣”的局面.目前,关于模糊数排序问题的研究远远没有结束,人们更期待从新的角度、在新的观点下提出相关的排序方法,从而对模糊数排序的应用范围作进一步的扩充.

1.2.2 熵在模糊多属性决策问题中应用的研究现状

随着社会进步及人类的发展,事物的外界环境十分复杂,往往存在着大量随机的、不精确的信息;或者即使信息本身是十分清晰的,但由于人们的主观反映存在偏差,检测条件水平所限,也会产生主观认识上的某种不确定性.这些信息可以统称为不确定性信息.对这些不确定性信息的有效分析和处理,将会加深对人工智能和决策模式的理解,促进智能控制、专家系统、模式识别等领域的进一步发展.而对于不确定性信息进行处理的关键就是如何对其不确定性程度进行度量.一般来说,信息的不确定程度越低,含有可控信息量越多,对其特征的掌握越容易,对决策者的干扰越小;反之,信息的不确定程度越高,含有可控信息量越少,对其特征的掌握越困难,对决策者的干扰越大.因此,关于寻找用来描述这些不确定信息的不确定程度指标的问题引起了研究人员的广泛关注.

熵是用来度量不确定性信息的重要指标.其最早出现在力学系统中,用来描述系统的无序程度.1865年, Clausius 利用熵来阐述热力学第二定律,

Boltzmann 利用熵推导出热力学中著名的 Boltzmann 关系. 熵的概念一经提出, 与之相关的推广研究便应运而生. 1948 年, Shannon^[97] 将其引入到信息论中, 用来度量随机信息信源的不确定性, 采用概率的方法用熵建立了信源与信道的数学模型. 文献[97]的发表, 标志着信息科学的创立. 因此, Shannon 被世人公认为信息论的鼻祖. Saridis^[98] 依据信息熵建立了判断控制性能是否等价最优的熵测度理论, 并将其应用于专家系统的归约推理, 其优点为能够满足推理过程一致性的要求; 若出现新知识, 则无须重新设定推理系统, 只需将原来的结论进行修改即得新的结论. Phillips^[99] 利用环境数据, 基于最大熵原则建立了适合物种生存的地理分布模型. 以上文献从不同的角度对熵进行了定义及构造, 但尚缺乏系统的描述. 直到 1972 年, Luca^[100] 提出了模糊熵需要满足的四条性质, 这被视为关于模糊熵的公理性描述. 基于该描述, Ebanks^[101] 为了描述模糊集进行并、交运算以后熵的变化情况, 对熵的性质进行了补充; Darbellay^[102] 讨论了多元连续分布熵的表达形式; Wang^[103] 利用代数算子研究了形状相同、支撑集不同的模糊数熵之间的关系; 此外, Chen^[104, 105], Gray^[106, 107, 108], Gyorgy^[109, 110], Harremoës^[111-114] 分别从不同的角度对于熵的性质及应用展开了研究.

此外, 模糊熵还广泛应用于聚类分析、模式识别、信号处理、控制算法等领域, 尤其广泛应用于多属性决策问题中. 对于多属性决策问题已有的研究成果, 正如 Zimmermann^[115, 116] 指出的, 其实质上可以分为两部分: 第一部分是确定属性的权重和评价值, 通过模糊算子将两者合成为模糊效用值的问题; 第二部分是 1.2.1 节提到的利用模糊效用值确定方案集的排序问题.

当决策可行方案各属性指标值给定时, 决策结果就依赖于权重指标. 给定权重的合理性直接关系决策结果的正确性及可信程度, 因此权重的确定是决策中的重要问题. 在关于权重方法的研究中, 有一类权重反映了决策方案各属性指标在决策过程中的不同作用, 由于其不受决策者的主观影响而引起了研究者的极大关注. 这类权重主要通过属性值为决策者提供信息量的多少或通过属性指标值在各个方案之间的差异大小来确定权重取值, 能够有效区分方案之间的差异. 熵权法就是常用的方法之一^[117-125]. 文献[118]通过熵和犹豫模糊集的 Cross-熵, 研究了两种属性值为犹豫模糊集的多属性决策方法: 一种方法是以犹豫模糊熵为权向量, 通过比较指标集和理想解的犹豫模糊熵来确定最优解; 另一种方法是通过最大偏差法得到犹豫模糊熵权, 然后利用逼近理想点排序法确定最优解. 文献[123]基于有序加权平均算子, 将 Szmidt 和 Kacprzyk 的直觉模糊熵推广为区间值直觉模糊加权熵, 建立了最小熵最优权准则的规划模

型,并给出了基于加权和评分函数的区间值直觉模糊多准则群决策的具体方法.文献[124]利用定义的直觉模糊熵,通过熵的方法去解决当指标集为区间值直觉模糊集时,属性权重未知的多属性决策问题,然后基于评价矩阵,利用熵来确定指标集的权重,最终确定最优解.

除了研究熵在决策中的应用外,还有一类文献研究了熵与其他模糊集模糊程度(例如相似度、远离度、包含度)之间的相互关系^[126-136],如文献[126]研究了熵和远离度的关系,文献[127]研究了区间值模糊集熵与相似度的关系,文献[128]研究了型2模糊集上相似度与包含度的关系.

对于熵权法,现有的研究均针对权重取值为实数的情形展开讨论.但对于模糊多属性决策问题,其权重除了可以为某个确定的实数外,也可以具有不确定性.当权重具有不确定性时,相关研究并不多见,而这个问题的解决会对多属性决策问题的应用范围做进一步的扩充.

1.3 主要研究内容

现有关于直觉模糊蕴涵算子的研究,或专注于对直觉模糊蕴涵算子的理论分析,或专注于算子的具体构造,而对于两者之间联系的研究并不多,并且关于模糊控制系统中蕴涵算子的选取依据并没有明确的表述.在模糊系统中,截集是建立经典集与模糊集联系的基本工具,基于截集建立了模糊集的基础理论——分解定理和表现定理.进一步,汪培庄^[14]和Dubois^[15]等分别利用模糊集的截集和表现定理构造了模糊蕴涵关系.对于直觉模糊集,袁学海教授^[34]提出了八种截集的定义,并分别建立了基于这些截集的分解定理及表现定理.本书首先从直觉模糊集的截集及其表现定理入手,构造具有理论基础的直觉模糊蕴涵算子,解决了以往直觉模糊蕴涵算子构造性与理论性分离的问题,并将此截集应用于模糊决策中,提出新的模糊数排序方法,结合具有不确定性的权重,构建新的模糊多属性决策模型.

本书各个章节安排如下:

第1章介绍模糊控制与模糊决策的应用、研究现状及研究趋势,给出本书的结构及研究成果.

第2章介绍本书用到的模糊数、模糊关系、模糊蕴涵、直觉模糊集、熵等定义和结论,并给出相关记号,为后续章节的理论分析及应用做准备.

第3章建立了构造直觉模糊蕴涵的理论方法.首先,从模糊推理句“如果 x