

不确定性知识处理的基本理论与方法

刘大有 杨 博 朱允刚 孙成敏 著



科学出版社

不确定性知识处理的 基本理论与方法

刘大有 杨 博 朱允刚 孙成敏 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

不确定性知识处理是人工智能领域最基本的研究问题。本书对知识表示和推理、不确定性知识处理（亦简称不确定性处理）的基本理论与方法进行了全面、系统的阐述，内容包括知识表示与推理方法、不确定性知识处理的经典理论与方法、贝叶斯网推理与学习方法、粗糙集理论等四部分。

本书一方面使读者能够透彻掌握主要的不确定性处理方法，另一方面也使读者能够掌握对不确定性处理开展科学研究及理论联系实际的方法。为此，本书在描述每个不确定性处理模型时，对模型的背景、模型的核心内容、概念的梳理与厘清、关键论点的证明、必要的算法、应用实例、模型的不足或困难等，都加以全面刻画。书中还融入了作者的研究成果，其中一些难题是应用领域专家提出的。

本书可供计算机、自动化等领域的科研与工程技术人员参考，也可作为高等院校计算机、自动化等相关专业教师、研究生的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

不确定性知识处理的基本理论与方法 / 刘大有等著. —北京：科学出版社，2016.5

ISBN 978-7-03-048267-9

I. ①不… II. ①刘… III. ①知识工程—研究 IV. ①TP182

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 100706 号

责任编辑：王 哲 王晓丽 / 责任校对：郭瑞芝

责任印制：张 倩 / 封面设计：迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张：25 3/4

字数：624 000

定价：155.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前言

在现实世界中,确定性事物是相对的,不确定性事物是绝对的。不确定性知识处理是人工智能领域最基本的研究课题。本书全面、系统地介绍了不确定性知识处理的基本理论与方法。全书分为四个部分。

第一部分

知识表示是人工智能领域的基本研究问题。知识表示与推理密不可分,确定性和不确定性推理均建立在知识表示之上。在建造推理系统时,首先要考虑的问题就是采用什么样的方式表示知识,才能既便于知识推理,又便于人们理解知识推理的结果。为此,首先介绍了逻辑、规则、语义网、框架、脚本和本体等知识表示方法。

推理是指按照某种策略从已知事实推导出结论的过程。不确定性推理是确定性推理的推广和拓展,不确定性推理方法建立在确定性推理方法和控制策略的基础上。为使读者更好地理解不确定性处理方法,本书首先介绍了基于逻辑和产生式的两种主要确定性推理方法。后文讲述的多种不确定性处理方法均建立于其上。作为确定性推理系统的示例,本书还描述了专家系统的基本概念、体系结构、推理过程,以及一个基于规则的专家系统实例。

第二部分

这部分介绍了确定性因子理论、基于概率论的推理方法和证据理论等经典不确定性推理模型(称不确定性知识处理模型更贴切,简称不确定性处理模型),以及我们对这些模型的一些重要改进和扩展。以确定性因子理论为例:证明了确定性因子理论的封闭性,厘清了证据的存在、不存在和无知阈值,增加了规则强度阈值和第二个规则强度,给出了规则质量的评价方法,提出了综合节点和推理链长度等概念,并指出一般情况下专家系统的推理链长度 $\in[2, 5]$ 。

阐述了我们提出的一些不确定性处理模型和多知识系统协作与冲突消解框架。力求从两个层次和多个方面提高不确定性知识处理的准确性和可靠性。用“处理”代替“推理”是以更显式的方式表明模型包括知识表示与推理两部分。

提出一种证据理论模型,将无知部分赋给论域 S 的余集,定义了认可函数,进而针对一类问题给出了线性阶简化证据理论模型SET;提出有序命题概念,进而借鉴SET给出了针对有序命题的凸函数证据理论模型CFET,首次解决了有序命题类问题的不确定性处理难题;在CFET的基础上,提出了基本支持函数的凸度、扩展无知、基本与准-基本支持函数的信息心、信息熵,基本支持函数间的相容性等概念及其计算方法,进而提出整合这些概念的基本支持函数的新融合模型NFM。现实应用领域问题纷繁复杂、千差万别,有序命题类问题就是其中的一个代表。除CFET和NFM外,现有的不确定性处理模型均不能解决该类问题。这给出了两点启示:不确定性知识处理的理论和方法的通用性是相对的;应深入分析现实应用问题,给出其形式化分类,进而提出针对某一类别应用问题的高效不确定性处理模型(或称信息、知识融合模型)。

提出一种能有效处理规则前提诸证据对规则结论之重要性不尽相同的加权模糊逻辑模型, 此前人们在处理规则前件诸证据时只能对它们等量齐观。提出一种统一不确定性推理模型——单位元, 从代数系统的层面, 揭示了不确定性处理模型的共性。

我们研究了假设空间的布尔代数结构, 讨论了证据空间与假设空间之间的双向关联。深入讨论了“信任值的修正、更新和集中”与限定化概念的关系, 证明了几何条件规则所产生的“更新质量函数”是“修正质量函数”和集中“质量函数”的限定化, “修正质量函数”和“集中质量函数”之间没有直接联系; 推广了证据理论, 为证据理论建立了一种合理的代数结构, 并为基于布尔代数的证据理论的应用奠定了基础。

在基于规则的知识系统中, 若想使获取的规则准确无误, 是极其困难的。由此, 二级(或二阶)不确定性概念被提出, 二级不确定性是关于一级不确定性的不确定性。我们提出 3 个二级不确定性处理模型: 基于模糊语言逻辑的模糊推理模型; 用外延方法处理证据信度偏差与规则强度偏差的二级不确定性推理模型; 二级不确定性问题的内涵处理方法。研究表明, 在解决应用领域的问题时, 考虑二级不确定性恰到好处。二级不确定性处理的引入, 显著提高了知识系统求解的可靠性。

随着知识系统研究的深入及应用领域的扩大, 迫切要求大幅提高系统性能的方法。多知识系统协作就是其中的方法之一。通常包括分解、分布、互助和集合(亦称“组协作”, 西医会诊是典型的组协作)等协作方式。由多个知识系统组成的协作系统称为协作知识系统。一方面, 协作知识系统的问题求解性能会明显超过单个知识系统, 另一方面, “哪里有协作, 哪里就有冲突”, 如果缺乏冲突信息、知识的有效融合方法, “协作”只能是一句空话。

信息、知识融合是不确定性信息、知识处理模型的关键技术之一, 特别是冲突信息、知识的融合是亟待解决的挑战性难题。我们提出基于协作方式、问题特点和冲突特性的分类、综合冲突消解思想, 进而提出多种协作冲突消解方法及多维辩论模型。

第三部分

就经典数值不确定性处理的理论与方法而言, 一方面其应用广泛并取得很大成功, 另一方面它们中的大多数存在诸多不足, 甚至困难。20 世纪 80 年代末, 贝叶斯网作为不确定性处理最有前景的技术逐渐兴起。贝叶斯网将概率论和图论相结合, 它是一种描述随机变量间依赖关系并能紧凑高效表示联合概率分布的概率图模型, 其理论基础之坚实自不待言。贝叶斯网以结构为基础, 其问题求解需要推理, 其解答是可理解的; 其通过条件独立性关系还可将复杂问题分解成多个较简单的子问题, 能较好地解决“大变量集”统计难题。同时注意学习与推理深层次结合, 是结构化机器学习未来的关键目标之一。概率图模型有望解决结构化机器学习领域的这一挑战性难题。这正是将贝叶斯网推理与学习两方面的部分内容纳入本书的思考。本书描述了贝叶斯网的基本概念和几种主要的推理方法, 介绍了完备和非完备数据下贝叶斯网参数和结构学习的方法, 并给出了我们的一些研究成果。

第四部分

与上述数值方法不同, 粗糙集理论(1982 年)用证据空间上的多个集合刻画假设的不确定性。该理论用“上、下近似”(两个精确集合)表示一个集合 A (粗集合), 其中 A 的“下近似”包括确实属于 A 的所有对象, 集合 A 的“上近似”包括可能属于 A 的所有对象。该理

论认为：概率论刻画了概念发生的随机性，模糊集合论刻画了概念的模糊性，而粗糙集理论刻画了概念的粗糙性。这里特别指出：不确定性不仅包括随机性、模糊性和不完备性，而且还包括粗糙性，粗糙性与信息、知识的粒度紧密相关。粗糙集理论能从数字和拓扑两方面刻画粗糙性，具有“知识约简、求精”等机制，是多粒度知识计算的主要工具之一。本书介绍了经典粗糙集的基本理论框架，讨论了粗糙集的各种关系扩展模型，并给出了粗糙集公理组极小化的研究结果。

一个有效的不确定性处理模型，不仅能用于构建知识系统，而且能解决实际应用难题。本书正是基于这样的观点，在描述一个不确定性处理模型时，对其背景与核心内容、概念的梳理与厘清、关键论点的证明、必要的算法、应用实例，以及模型不足或困难等，加以全面刻画，并融入了我们的研究成果。

本书作者所在的知识科学与知识工程团队已发表论文 500 余篇，完成相关的国家项目 30 余项，获国家科技进步二、三等奖各 1 项，获省部级科技进步一、二等奖各 4 项，为本书的撰写提供了坚实的理论基础和丰富的理论联系实际的素材。本书得到国家自然科学基金重点项目“复杂时空知识的智能处理基础理论及应用研究”（项目编号：61133011）的资助。

作 者

2016 年 4 月于长春

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 内容框架	2
参考文献	5
第 2 章 知识表示	8
2.1 知识表示概述	8
2.1.1 知识的定义和结构	8
2.1.2 知识的阈值	10
2.1.3 知识的类型	10
2.1.4 常用的知识表示	11
2.2 逻辑表示	12
2.2.1 命题逻辑	12
2.2.2 一阶谓词逻辑	14
2.3 产生式规则表示	18
2.4 语义网表示	22
2.5 框架表示	30
2.6 脚本表示	38
2.7 本体表示	40
2.8 小结	43
参考文献	44
第 3 章 推理方法与专家系统	45
3.1 推理概述	45
3.1.1 推理方法及分类	45
3.1.2 推理控制策略及分类	47
3.2 逻辑推理系统	48
3.2.1 演绎逻辑与三段论	48
3.2.2 推理规则	50
3.2.3 逻辑系统	54
3.2.4 归结与演绎	56
3.3 产生式推理系统	62
3.3.1 产生式系统概述	63

3.3.2 产生式系统的体系结构及工作原理	64
3.3.3 部分匹配	66
3.3.4 与或树	68
3.3.5 正向和反向推理算法	70
3.3.6 匹配冲突消解	77
3.4 其他推理方法	83
3.4.1 类比	83
3.4.2 生成与验证	84
3.4.3 溯因	84
3.5 专家系统概述	85
3.5.1 专家系统的定义	85
3.5.2 专家系统的体系结构	85
3.5.3 专家系统的主要特征	87
3.5.4 专家系统的类型	88
3.5.5 一个简单的专家系统示例	90
3.6 小结	93
参考文献	94
第4章 确定性因子理论	95
4.1 信任和不信任	95
4.2 信任与不信任之度量	96
4.3 不确定性因子的计算	98
4.4 不确定性值计算的封闭性	101
4.5 不确定性值计算例	103
4.6 规则集合(规则库)的评价	104
4.7 小结	105
参考文献	106
第5章 确定性因子模型改进及其在冲突消解中的应用	107
5.1 不确定性知识的描述	107
5.2 不确定性值的传播算法	108
5.3 最大存在风险和最大不存在风险	110
5.4 冲突消解模型	113
5.5 小结	116
参考文献	117
第6章 基于概率论的处理方法	118
6.1 概述	118
6.2 确定性证据的不确定性处理	119
6.3 不确定性证据的不确定性推理	123

6.4 讨论	129
参考文献	130
第 7 章 证据理论	131
7.1 D-S 理论	131
7.2 一种简化的证据理论 SET	137
7.3 一种凸函数证据理论模型 CSET	140
7.3.1 SET 模型面对有序命题类问题的困难	140
7.3.2 具有凸函数性质的简化证据理论	141
7.3.3 凸函数简化证据理论的分析	144
7.3.4 小结	148
参考文献	149
第 8 章 一种面向有序命题类问题的信息融合新方法	150
8.1 预备知识	151
8.2 原方法的问题与不足	152
8.3 一些基本概念	154
8.4 信息熵	157
8.5 融合两个基本支持函数的新方法——算法 F	164
8.5.1 算法 F 的描述	164
8.5.2 关于算法 F 的一些例子	171
8.6 用 8.2 节中的例子比较两种方法	174
8.7 小结	176
参考文献	177
第 9 章 加权模糊逻辑	178
9.1 概述	178
9.2 加权模糊逻辑和加权模糊逻辑命题演算	178
9.3 加权模糊逻辑在专家系统中的应用及其推理规则	180
9.4 相关工作的比较	184
9.5 小结	185
参考文献	185
第 10 章 专家系统中的一种模糊推理模型——一种二阶不确定性处理模型	186
10.1 概述	186
10.2 模糊推理模型 FURM	186
10.2.1 FURM 的知识表示	186
10.2.2 FURM 的不确定性推理	189
10.3 讨论	192
参考文献	192

第 11 章 专家系统中不精确推理单位元	193
11.1 抽象不精确推理模型	193
11.2 单位元的性质	194
11.3 实例分析	195
11.4 小结	199
参考文献	199
第 12 章 两级不确定性知识处理模型	200
12.1 概述	200
12.2 规则中的不确定性、准确性	200
12.2.1 规则强度	200
12.2.2 规则的准确性、可靠性	200
12.2.3 知识表示	201
12.3 关于偏差的两级不确定性推理模型	201
12.3.1 两级不确定性推理模型的必要条件	202
12.3.2 处理两级不确定性的推理模型	203
12.3.3 多条前件不同但后件相同的规则的结论综合	206
12.4 讨论	207
参考文献	208
第 13 章 多 ES 协作系统中不一致性处理	209
13.1 概述	209
13.2 一致性处理	210
13.2.1 协作组中诸 ES 之看法间的影响	210
13.2.2 决策	214
13.3 讨论	215
参考文献	216
第 14 章 协作知识系统中冲突消解的辩论方法	217
14.1 概述	217
14.2 多维辩论方法辩论的基本过程	218
14.3 依赖性值的计算	221
14.4 外部约束的计算	223
14.5 多维辩论系统框架 PAT-1 简介	224
14.6 讨论与总结	225
参考文献	225
第 15 章 Belief 的解释和更新	227
15.1 广义概率与信任函数	227
15.2 随机集合与信任函数	230
15.3 内、外测度与上、下概率	231

15.4 信任值的修正、更新和集中	232
15.5 小结	233
参考文献	234
第 16 章 布尔代数上的 Belief 模型	235
16.1 布尔代数的基本概念	236
16.2 广义 Dempster-Shafer 理论	236
16.3 广义随机集合	237
16.4 信任值的更新和修正	240
16.5 求精和相容概念	243
16.6 布尔代数上的限定化概念	244
16.7 Belief 模型中的决策模型	249
16.8 小结	253
参考文献	254
第 17 章 处理二阶不确定性的内涵方法	256
17.1 集合-值映射的扩充	256
17.2 “概率簇空间”的传递模型	259
17.2.1 不确定性结构的传递方法	259
17.2.2 限定化关系的传递	261
17.3 规则的组策略	262
17.3.1 组合证据源	262
17.3.2 组合结论	263
17.4 小结	264
参考文献	264
第 18 章 贝叶斯网的基本概念及推理方法	265
18.1 贝叶斯网的基本概念	265
18.2 贝叶斯网推理问题概述	266
18.3 变量消除推理算法	266
18.4 Query DAG 算法	267
18.5 基于最大四重约束子集的推理算法	268
18.5.1 算法 TD	269
18.5.2 算法 CPP	280
18.5.3 实验结果	283
18.5.4 小结	291
参考文献	291
第 19 章 贝叶斯网学习方法	293
19.1 参数学习	293
19.1.1 概述	293

19.1.2	极大似然估计方法	295
19.1.3	贝叶斯方法	298
19.1.4	不完备数据下的参数学习	303
19.1.5	参数的增量学习	312
19.1.6	小结	315
19.2	结构学习	315
19.2.1	概述	315
19.2.2	常用评分函数简介	316
19.2.3	几种搜索算法	322
19.2.4	不完备数据下的结构学习	326
19.2.5	基于约束的方法	332
19.2.6	变量顺序的学习	336
19.2.7	结构的增量学习	337
19.2.8	小结	340
	参考文献	340
第 20 章	经典粗糙集	342
20.1	知识	342
20.1.1	知识、分类和知识库	342
20.1.2	知识库的等价、泛化和特化	344
20.2	不精确概念、近似与粗糙集	345
20.2.1	粗集集合的近似：上近似和下近似	345
20.2.2	近似的性质	346
20.2.3	近似与隶属关系	347
20.2.4	不精确的数字特征	348
20.2.5	不精确的拓扑特性	348
20.2.6	划分的近似	350
20.2.7	集合的粗等价	351
20.2.8	集合的粗包含	352
20.3	知识的约简	354
20.3.1	知识的简式与核	354
20.3.2	知识的相对简式和相对核	355
20.3.3	簇的化简	356
20.3.4	集合簇的相对简式与核	357
20.3.5	知识的相关性	358
20.3.6	知识的部分相关性	359
20.4	信息系统与决策系统	360
20.4.1	信息系统形式化定义	360
20.4.2	信息系统的区分矩阵	361

20.4.3 决策系统形式化定义	364
20.4.4 属性的强度	364
20.4.5 决策系统区分矩阵	365
20.4.6 决策规则生成的一个实例	366
20.5 小结	370
参考文献	370
第 21 章 粗糙集关系扩展模型	371
21.1 不完备信息系统	371
21.2 基于相容关系的粗糙集	372
21.3 基于非对称相似关系粗糙集	373
21.4 量化相容关系	374
21.5 限制相容关系	376
21.6 限制量化相容关系	377
21.7 基于支配（优势）关系的粗糙集	380
21.8 覆盖粗糙集	382
21.9 小结	385
参考文献	385
第 22 章 粗糙集公理组的极小化	387
22.1 相关研究	387
22.2 现有粗糙集公理组的简化	388
22.3 极小粗糙集公理组	390
22.4 粗糙集公理组 S5 及其可靠性和极小性	391
22.5 小结	392
参考文献	393
附录	394

第1章 绪 论

20 世纪 60 年代初,人们第一次尝试用智能程序——专家系统,去解决过去只有应用领域的专家才能解决的问题。尽管这一尝试在当时还不够完美,但是今天这种基于知识的技术已成功应用于社会生产、生活和科学技术等领域。

从某种意义上来说,专家系统亦可看作一个智能信息、知识检索系统,其目标是回答用户的提问。专家系统(亦称基于知识的系统)的发展向人们提出了两个基本问题:一是,如何形式化表示大量不确定性知识和信息;二是,如何利用这些表示好的知识、信息去解答(推理)用户提出的问题。

为了处理不确定性信息、知识,或者说处理信息与知识的不确定性(如随机性、模糊性、不完备性、粗糙性等),人们主要采用三种方法:一是工程方法;二是控制方法;三是并行确定性推理方法。第三种方法又可为四类,可信度方法、推理维持方法、注记理论和非数值方法。

不确定性知识、信息处理是十分重要的研究课题^[1]。该研究主要用于专家系统、时空推理、图像分析、信息索引与检索、计算机视觉、机器人规划、知识发现与数据挖掘等领域。与不确定性处理直接相关的国际重要期刊和会议主要有^①: *Journal of Automated Reasoning*、*International Journal of Approximate Reasoning*、*IEEE Transactions on Fuzzy Systems*、*Fuzzy Sets and Systems*、*International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge Based Systems*、*International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence* (每年一次)、*International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning* (每两年一次)、*International Joint Conference on Automated Reasoning* (每一年或两年一次)。此外,人工智能领域的一些其他国际重要 SCI 期刊和国际会议也包含不确定性处理方面的内容,如 *Artificial Intelligence*、*IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*、*IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*、*IJCAI* (每年举办一次)、*AAAI* (每年举办一次)。

1.1 概 述

20 世纪 70 年代,医疗专家系统 MYCIN 和探矿专家系统 PROSPECTOR 的问世对人类社会产生了很大影响。这两个专家系统的问题求解过程可用推理网络来描述,其网络中的“节点”表示随机变量,“边”表示规则(知识)。

专家系统中,简单规则的表示形式为 IF X THEN H , $I(X, H)$, 其中变量 X 是规则之前件,变量 H 是规则之后件(或结论), $I(X, H)$ 是规则强度。文献[2]还提出了规则的可靠度,并指出在处理二级(或称二阶)不确定性的专家系统中,规则强度和规则可靠度并存。专家系统中,一些规则之前件通常是由多个变量的复杂(标准或非标准的)逻辑组合构成的,同时多

① 这里采用中国计算机学会(CCF)对信息科学类和计算机科学技术类学术期刊和国际会议的分类标准。

条件前件不同但后件却一样的规则并非少见（称它们之间具有综合关系，且它们之前件是统计独立的，或独立差错的）。因此，在网络上进行的推理过程就是用顺序规则和并行规则计算结论之不确定性值的过程。

尽管基于规则的系统在应用中取得了很大成功，但它们也存在一些问题，甚至存在一些困难，其原因主要在于这些早期的基于规则的系统不能正确地分析信息间的依赖结构^[3]。

【例 1.1.1】 设 $\Omega^{(1)}, \Omega^{(2)}, \Omega^{(3)}, \Omega^{(4)}$ 是四个空间（相应于四个随机变量），每个空间有两个元素 $\omega_i^{(1)}, \omega_i^{(2)}, i = 1, 2, 3, 4$ 。假定四条规则用到这四个随机变量，图 1.1 给出了规则的图示。

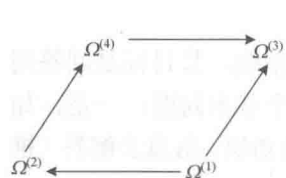


图 1.1 四条规则的图示

如果用条件概率表示 $I(X, H)$ ，则规则 $\Omega^{(1)} \rightarrow \Omega^{(2)}$ 的规则强度 I 就可表为条件概率 $P(\omega_2^{(i)} | \omega_1^{(j)})$ 。一般说来，让应用领域专家直接给出规则强度 I ，往往导致系统不相容，因为乘积空间 $\Omega^{(1)} \times \Omega^{(2)} \times \Omega^{(3)} \times \Omega^{(4)}$ 上可能不存在满足这些给定条件概率的联合概率分布。基于规则的方法存在困难，主要是因为未能考虑知识之间的依赖结构。

与基于规则的方法（亦称外延方法）不同，基于模型的方法（亦称内涵方法，intension method）考虑知识之间的依赖结构，且该方法都以某一种（仅仅是一种）数学理论为基础。基于模型的方法主要包括：贝叶斯网^[4]、证据理论^[5]、基于 Fuzzy 集合和 L-集合的可能性理论^[6,7]、粗糙集（rough set）理论^[8]等。

基于模型的方法由两部分组成，第一部分被称为静态部分（描述一般的领域知识），第二部分被称为动态部分（该部分用来集成用户的知识）。为了描述静态部分，通常假定存在一个辨别框架（the frame of discernment） Ω ， Ω 是完备的且其元素是互斥的。不确定性信息处理的一个主要目的就是用专家和用户的信息来发现 Ω 中唯一为真的元素 ω_0 。当新的证据（也可能是不确定性的证据^[7]）出现时，动态部分要给出静态部分知识变化的合理过程。人们往往用一个集合 $E \subseteq \Omega$ 来描述用户所提供的信息（或不确定性信息），该信息的直观含义是说“用户认为 $\omega_0 \in E$ ，但用户不知道 ω_0 是 E 中的哪一个”。

可以说，专家系统知识库中的知识对应于静态部分，而推理则对应于动态部分。1988 年，Gardenfors 认为有两种更新方式，第一种被称为“expansion”（即不确定性程度不断减小），第二种被称为“contraction”（一种非单调的更新方式）。

1.2 内容框架

本书由四部分组成：第一部分，知识表示与推理方法；第二部分，不确定性知识处理的经典理论与方法；第三部分，贝叶斯网推理与学习；第四部分，粗糙集理论。下面依序对每一部分的特点及所包括的内容进行简要说明。

第一部分。知识表示和推理是人工智能最基本的研究问题，复杂知识表示与推理已成为当今的研究热点。推理（包括确定性推理和不确定性推理）建立在知识表示的基础之上。在建造各种知识系统时，首先要考虑的问题就是采用何种知识表示形式，以使基于知识的推理更加有效。为此，在介绍各种不确定性推理方法（本书第二部分，第 4~17 章）之前，在第 2 章介绍了知识表示的基本概念和主要的知识表示方法。不确定性推理是确定性推理的推广和拓展，不确定性推理方法建立在确定性推理方法和控制策略的基础上。第 3 章阐述了两种主要的

确定性推理方法: 基于逻辑的推理和基于产生式的推理。第二部分的第 9、10 章与基于逻辑的推理方法有关, 第 4、5、6、11、12 章与基于产生式的推理方法有关。第 3 章介绍了一个简单的专家系统, 用其作为确定性推理系统的示例。确定性推理系统是不确定性推理系统的特例。

第二部分。第 4、6、7、8 章是经典的不确定性处理模型, 我们对其进行了改进、扩展。

(1) 对确定性因子理论 (第 4、5 章): 证明了不确定性计算的封闭性; 增加了规则强度阈值和第二个规则强度; 厘清了证据的存在阈值、不存在阈值和无知阈值, 以及具有综合关系之规则的“前件”需要彼此独立等问题; 提出了初始节点、中间节点、最高假设节点、综合节点和推理链长度等概念, 进而指出专家系统的推理链长度必须大于 1; 对 MB、MD 的解析表达式进行了解释; 给出了规则质量评价方法。

(2) 对证据理论 (第 7、8 章): 提出了一个简化证据理论模型, 与证据理论不同, 将基本支持函数的无知部分赋给论域 S 的余集, 定义了基本支持函数的认可函数, 它虽然不如证据理论通用, 但却具有线性复杂度和较宽应用空间; 提出有序命题的概念, 分析了其特点, 进而提出针对有序命题的凸函数证据理论模型, 首次解决了该类问题的不确定性处理问题^[9,10]; 提出了基本支持函数的凸度、扩展无知、基本或准-基本支持函数的信息心、信息熵, 基本支持函数间的相容性等概念, 以及对应这些概念的计算方法; 进而提出了整合信息心、信息熵计算, 相容性度量, 非正整数信息心处理、扩展无知和凸度的基本支持函数融合模型^[11]。

上面的 (2) 说明现实的应用领域问题纷繁复杂、千差万别, 有序命题类问题就是其中的一个代表。随处可见的评价类问题就是有序命题类问题, 现有的不确定性信息、知识处理的理论、方法均不能有效解决该类问题。这也启示我们: 正像世上没有包治百病的灵丹妙药一样 (系指具体问题具体分析), 不确定性处理的理论和方法的通用性是相对的, 衡量一个不确定性处理模型之优劣, 最重要的是其有效性; 应对现实世界的应用问题进行深入分析, 给出其分类及形式化描述, 进而提出针对某一类别应用问题的高效信息融合模型 (或称不确定性信息、知识处理模型)。

在第 9 章, 一个能有效区分规则前提中诸证据对规则结论之重要性不同的加权模糊逻辑模型被提出。

在第 11 章, 通过对经典不确定性处理模型 (亦称推理模型) 的深入分析, 找出它们的共性, 提出一种统一的不确定性推理模型——单位元。

对于决策而言, 用户往往更关心某个较小的子空间, 但基于模型的方法最终得到的是关于大空间上的一个不确定性结构。因此, 基于模型的方法总是使用柱面扩张或投影等操作来实现不同空间上不确定性结构之间的关联。目前, 人们更倾向于用内涵方法研究不确定性信息、知识的处理问题。如何更好地表达专家知识、如何根据证据更新假设空间上的不确定性结构, 以及刻画不同空间上信息的联系等, 是基于模型方法的研究重点之一^[6,7,12,13]。

我们^[14-17]研究了假设空间的布尔代数结构, 讨论了证据空间与假设空间 (有限的幂集合或更一般的布尔代数) 之间正反两方面的关联, 并为不确定性信息处理理论确立了一种代数结构。在第 15、16 章深入讨论了“信任值修正”“信任值更新”和“信任值集中”与限定化概念的关系, 证明了几何条件规则所产生的“更新 mass 函数”是“修正 mass 函数”和集中“mass 函数”的限定化, “修正 mass 函数”和“集中 mass 函数”之间没有直接联系; 推广了证据理论, 为证据理论建立了一种合理的代数结构, 并为基于布尔代数的证据理论的应用打下了坚实的基础。

不确定性推理的准确性、可靠性是不确定性推理研究的最重要目标之一。

让我们审视一下基于规则的系统,若想使其所包含的规则准确无误,不仅是极其困难的,甚至是不可能的。其理由是:领域专家的权威性是相对的,知识工程师的水平是有限的,建造一个专家系统在时间、成本等方面是有严格限制的,确保大量规则之间的完全一致性是非常困难的,等等。由此人们提出二级(或二阶)不确定性的概念,二级不确定性是关于不确定性(亦称一级不确定性)的不确定性。书中介绍了三个二级不确定性处理模型^[18,19]:一是,一种基于模糊语言逻辑的模糊推理模型;二是,用外延(extensional)方法分别处理证据信度偏差与规则强度偏差的两级不确定性推理模型;三是,提出了“概率簇空间”的传递模型,给出了二级不确定性问题的内涵处理方法。该方法使用“概率簇空间”表示证据空间的二级不确定性结构,用 L-集合表示规则强度的二级不确定性,用“概率簇空间”的传递方式刻画二级不确定性的传播过程。

随着知识系统(knowledge system, KS)应用领域的不断扩大,对其性能有了更高的要求,这促使人们去不断寻求那些能有效提高系统性能的方法。多个知识系统相互协作(cooperation of KS)就是其中的方法之一。多个知识系统的协作方式,大致可分为四类:分解、分布型(dividing),互助型(如各类工程任务中的分工协作,层次型协作),集合型(如组协作 Group Cooperation, 西医会诊是典型的组协作),混合型(hybrid)等。由多个知识系统组成的协作系统称为协作知识系统。民间有一个很有哲理的谚语“三个臭皮匠顶个诸葛亮”,充分说明了三个(≥ 3)普通人相互协作,其能力会达到或超过一个智者(权威专家),协作知识系统在解决问题的能力 and 问题的求解精度方面都会明显超过单个知识系统。但是,我们必须看到协作的另一个方面,那就是“哪里有协作,哪里就有冲突”,没有有效的冲突消解机制,即冲突信息、冲突知识的有效融合方法,“协作”只能是一句空话。

在处理不确定性信息、知识的理论和方法中,关键的问题是信息融合,特别是,不一致和冲突信息、知识的融合是亟待解决的挑战性难题。2008年, Bleiholder 等^[20]指出不确定性数据、冲突数据的融合是数据融合研究的富有挑战性的问题。我们提出基于协作方式、问题特点和冲突特性的分类、综合消解冲突思想,进而提出多种协作与冲突消解方法及多维辩论模型^[21-24]。在第5、13、14章,介绍了协作冲突消解方面的一些研究工作:“协作知识系统中协作冲突消解的辩论方法”“改进的确定性因子模型 ICF”“在多个 ES 协作系统中不一致性问题的处理”。

经典的数值不确定性(信息、知识)处理理论与方法已趋成熟,应用相当广泛,取得了很大成功,但它们中的多数尚存在这样或那样的问题和困难。

第三部分介绍贝叶斯网的基本方法:第18章描述了贝叶斯网的基本概念和几种主要的推理方法;第19章刻画了贝叶斯网的主要学习方法,包括完备和不完备数据下贝叶斯网的参数和结构学习方法。20世纪80年代后期,作为不确定性处理最有前景的技术——贝叶斯网,逐渐兴起。贝叶斯网是由 Pearl^①提出的,贝叶斯网将概率论和图论相结合,它是一种描述随机变量间依赖关系、并能紧凑高效表示联合概率分布的概率图模型。贝叶斯网以结构为基础,其问题求解需要推理,其解答是可解释的、可理解的;此外,通过条件独立性关系可将复杂问题分解成多个较简单的子问题,能较好地解决“大变量集”统计难题,有望成为大数据处

① Pearl 教授,美国科学院院士、美国工程院院士,由于他在因果推断和贝叶斯网方面的杰出贡献,获2011年图灵奖。