



贝叶斯网络

理论及其在军事系统中的应用

史志富 张安◎著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

贝叶斯网络理论及其在军事系统中的应用

史志富 张安 著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地介绍了贝叶斯网络推理学习的理论、模型与算法及其在军事系统中的应用。全书共 13 章,包括贝叶斯网络的基本理论、贝叶斯网络的结构学习、贝叶斯网络的参数学习、贝叶斯网络的推理、动态贝叶斯网络技术、贝叶斯网络的扩展模型、贝叶斯优化算法及贝叶斯网络在军事系统中的应用。

本书取材广泛,覆盖面广,内容翔实,实用性强。它紧密结合复杂智能决策系统发展的需要,吸收国内外有关贝叶斯网络方法的内容和成果,还引入了大量科研成果中的技术资料 and 实例。本书可为从事人工智能、推理决策以及军事应用等领域的工程技术人员提供参考,还可作为人工智能、运筹学和系统工程等专业的研究生教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

贝叶斯网络理论及其在军事系统中的应用 / 史志富,
张安著. —北京:国防工业出版社, 2012. 5

ISBN 978-7-118-07947-0

I. ①贝… II. ①史… ②张… III. ①贝叶斯理论—
应用—军事系统—研究 IV. ①EO

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 035848 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 17¼ 字数 302 千字

2012 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 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

贝叶斯网络是能够以图形化的方式对多变量之间概率关系进行表示和推理的一种不确定性知识处理理论和模型。自从 19 世纪 80 年代以来,贝叶斯网络(或称信任网络、因果网络等)已得到广泛的研究,包括各种推理算法的研究以及贝叶斯网络在各个领域内的应用研究。但是这些工作都散乱地分布在各种各样的学术论文中,目前国内还缺乏对贝叶斯网络理论进行系统论述的书籍和参考资料以供各类研究人员的参考和使用。本书正是为了满足这种日益增长的需求,通过对国内外主要资料的综合研究结合编者自身的研究实践经验形成的。

为了对贝叶斯网络进行系统全面地介绍,本书讨论了贝叶斯网络的各种推理算法、贝叶斯网络的学习算法(包括结构学习与参数学习)以及多种贝叶斯网络的扩展模型。书中内容的重点在于介绍经典的理论算法和模型及其具体应用,限于篇幅不可能包含所有的模型和算法。本书各章内容简述如下。

第 1 章主要介绍复杂系统决策理论、贝叶斯网络的产生和发展以及应用贝叶斯网络进行决策推理的可行性和有效性。

第 2 章着重介绍贝叶斯网络的概率论基础与图论基础,以及贝叶斯网络的概念与模型。

第 3 章是贝叶斯网络的结构学习。在给出贝叶斯网络结构学习评价准则的基础上,将结构学习分为数据完整与数据不完整两种情况进行讨论,并在最后给出了贝叶斯网络结构学习存在的问题。

第 4 章是贝叶斯网络的参数学习。介绍了离散变量数据完整时的贝叶斯估计算法、ML 算法以及数据不完整时的 EM 算法、Gibbs 抽样算法以及 Gaussian 逼近算法,并对连续数据主要是高斯贝叶斯网络的参数学习进行了简要的介绍。

第 5 章是贝叶斯网络推理算法的研究分析。主要内容包括贝叶斯网络精确推理算法和近似推理算法,在精确推理算法中重点分析早期的 Pearl 的消息传递算法、消元算法以及应用较为广泛的连接树推理算法。而在近似推理算法中主要介绍了基于模拟的方法与基于搜索的方法,在本章的最后,对各种推理算法的复杂性进行了分析与说明。

第6章将主要分析动态贝叶斯网络理论模型和算法。介绍了动态贝叶斯网络的理论基础,包括状态空间模型、HMM模型、KFL模型等,并在分析这些模型在动态系统建模时的优缺点的基础上,引出动态贝叶斯网络的概念,然后介绍动态贝叶斯网络的构造、学习和推理技术。

第7章是其它贝叶斯网络扩展模型,包括模糊贝叶斯网络、混合贝叶斯网络、面向对象贝叶斯网络与定性贝叶斯网络以及影响图模型。它们都是针对静态贝叶斯网络的某些缺点进行改进或是针对特定的应用领域而提出来的,也都在不同的方面优化和提高了传统贝叶斯网络的应用。

第8章是贝叶斯优化算法理论,它是基于贝叶斯网络学习而发展起来的一种分布估计算法。本章对贝叶斯优化算法的优化机理与算法流程以及优化性能进行了详尽的分析。

第9章是贝叶斯网络在目标识别领域的应用研究。针对目标识别问题分别利用贝叶斯网络和动态贝叶斯网络进行建模,并对模型进行了仿真分析。

第10章是贝叶斯网络在态势/威胁融合估计问题中的应用研究。按照贝叶斯网络的建模步骤,建立了机载光电系统态势融合估计的贝叶斯网络模型以及威胁估计的模糊贝叶斯网络模型,对模型的可靠性与可行性进行了详尽的仿真分析。

第11章是贝叶斯优化算法在UAV编队对地攻击决策中的多目标分配问题中的应用研究。建立多种情况下的目标分配模型,利用决策图贝叶斯优化算法对模型进行优化求解,得到了不同限制条件下的最优目标分配方案。

第12章是贝叶斯网络在对地攻击战术决策问题中的应用研究。分别建立了基于贝叶斯网络模型、面向对象贝叶斯网络模型与影响图模型的战术决策模型,并对这些模型进行了仿真分析。

第13章是贝叶斯网络在损伤评估中的应用研究。建立了损伤评估前两个阶段的贝叶斯网络模型,对数据源采用模糊集合理论进行处理,将清晰数据转换为离散数据,然后利用贝叶斯网络推理算法进行推理计算。

本书的第1、2章属于贝叶斯网络的基础知识的介绍;第3~8章属于贝叶斯网络理论与算法的分析;第9~13章属于贝叶斯网络的应用研究。应用研究部分针对不同的问题采用不同的贝叶斯网络技术进行建模,除了是检验各种贝叶斯网络算法之外,也是考虑到问题的特点与要求。但这并不是说只能使用该种模型,其实对每一个问题每一种贝叶斯网络模型都是适用的。本书是针对贝叶斯网络的学习推理与在决策中的应用进行研究,并不是针对人工智能、专家系统或决策分析进行研究。但是由于贝叶斯网络在这些领域得到了广泛的应用,所以这些技术在本书也经常出现。

本书第1~5章,第7、8章,第10~13章由史志富编写;第6、9章由史志富、张安编写。在本书的编著过程中,第二炮兵工程大学的刘海燕讲师,西北工业大学的曹璐博士、郭凤娟博士等参与了编写与资料收集等工作。在本书在编著过程中,还参考了大量的国内外专家、学者的研究成果和论文中的学术理论与方法,在此对这些文献的作者致以诚挚的感谢。此外,本书的出版得到了第二炮兵工程大学控制理论与控制工程重点学科的资助以及第二炮兵工程大学自动控制系邵军勇主任,火力与指挥控制教研室领导和同事的大力支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有遗漏或不当之处,恳请各位专家和读者批评指正。

编著者

2011年11月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 复杂系统的决策理论	1
1.1.1 复杂决策系统概述	1
1.1.2 复杂决策系统的不确定性	3
1.1.3 复杂决策系统的决策方法	4
1.2 贝叶斯网络的产生和发展	6
1.2.1 贝叶斯网络的产生	6
1.2.2 贝叶斯网络的发展	9
1.2.3 贝叶斯网络的应用	11
1.3 面向复杂决策系统的贝叶斯网络建模	12
1.3.1 贝叶斯网络在决策系统中的应用	12
1.3.2 复杂决策系统的贝叶斯网络建模过程	13
1.3.3 基于贝叶斯网络的知识发现与决策过程	14
第 2 章 贝叶斯网络的理论基础	17
2.1 贝叶斯网络的概率基础	17
2.1.1 概率函数与概率空间	17
2.1.2 随机变量与联合概率分布	18
2.1.3 条件概率与独立性	19
2.1.4 贝叶斯准则	19
2.1.5 马尔科夫性	21
2.2 贝叶斯网络的图论基础	22
2.2.1 图的基本概念	22
2.2.2 无向图模型	23
2.2.3 有向图模型	24
2.2.4 D-分离准则	25

2.3	贝叶斯网络	28
2.3.1	贝叶斯网络的定义	28
2.3.2	贝叶斯网络的语义	31
2.3.3	贝叶斯网络的分类	32
2.3.4	贝叶斯网络的特点	34
2.4	贝叶斯网络模型	36
2.4.1	贝叶斯网络的信息管道模型	36
2.4.2	贝叶斯网络的小球模型	37
2.5	本章小结	38
第3章	贝叶斯网络的结构学习	40
3.1	贝叶斯网络结构的评价函数	40
3.1.1	卡方(χ^2)度量	40
3.1.2	信息熵度量	41
3.1.3	贝叶斯度量(BDe)	42
3.1.4	最小描述长度度量(MDL)	44
3.2	完整参数的贝叶斯网络结构学习	44
3.2.1	基于统计测试的方法	45
3.2.2	基于搜索记分的方法	46
3.3	缺失数据的贝叶斯网络的结构学习	49
3.3.1	SEM 算法	49
3.3.2	MCMC 算法	50
3.4	贝叶斯网络结构学习的复杂性	51
3.4.1	结构空间的指数级规模	51
3.4.2	结构空间的不连续性	51
3.4.3	网络结构的无环假设	52
3.4.4	数据的不完备性	52
3.5	本章小结	52
第4章	贝叶斯网络的参数学习	54
4.1	贝叶斯网络模型的参数化表示	54
4.1.1	二项式模型的参数化表示	54
4.1.2	多项式模型的参数化表示	56
4.2	完整参数的贝叶斯网络的参数学习	57

4.2.1	贝叶斯估计方法	58
4.2.2	MLE 估计算法	59
4.3	缺失数据的贝叶斯网络参数学习	60
4.3.1	EM 估计算法	60
4.3.2	吉布斯抽样算法	62
4.3.3	高斯逼近算法	63
4.4	连续变量的参数学习	64
4.4.1	正态分布变量的参数学习	64
4.4.2	多维正态分布变量的参数学习	68
4.4.3	高斯贝叶斯网络的参数学习	72
4.5	贝叶斯网络学习算法的评价标准	76
4.6	本章小结	76
第5章	贝叶斯网络的推理	78
5.1	概率推理	78
5.2	贝叶斯网络推理	79
5.2.1	贝叶斯网络推理的现状	79
5.2.2	贝叶斯网络推理的模式	80
5.2.3	贝叶斯网络推理的过程	81
5.3	精确推理算法	82
5.3.1	链式网络的推理算法	83
5.3.2	基于消息传播的单连通网络推理算法	85
5.3.3	基于消元的多连通网络推理算法	90
5.3.4	基于聚类或多连通网络推理算法	92
5.3.5	基于连接树的多连通网络推理算法	94
5.4	近似推理算法	97
5.4.1	基于随机模拟的方法	98
5.4.2	基于搜索的方法	102
5.5	贝叶斯网络推理的复杂性分析	102
5.6	本章小结	104
第6章	动态贝叶斯网络技术	105
6.1	动态贝叶斯网络的理论基础	105
6.1.1	状态空间模型	105

6.1.2	隐马尔科夫模型	107
6.1.3	卡尔曼滤波模型	108
6.2	动态贝叶斯网络	110
6.2.1	动态贝叶斯网络的概念	110
6.2.2	动态贝叶斯网络表示 HMM	113
6.2.3	动态贝叶斯网络中时间的引入方法	116
6.3	动态贝叶斯网络的学习	122
6.3.1	结构已知数据完整的 DBN 学习	123
6.3.2	结构已知数据不完整的 DBN 学习	123
6.3.3	结构未知数据完整的 DBN 学习	123
6.3.4	结构未知数据不完整的 DBN 学习	125
6.4	动态贝叶斯网络的推理	125
6.4.1	动态贝叶斯网络的推理	125
6.4.2	动态贝叶斯网络的解码	128
6.4.3	动态贝叶斯网络的学习	129
6.4.4	动态贝叶斯网络的剪枝	130
6.5	本章小结	130
第7章	贝叶斯网络的扩展模型	132
7.1	模糊贝叶斯网络	132
7.1.1	模糊逻辑与贝叶斯网络	132
7.1.2	模糊贝叶斯网络的定义	133
7.1.3	精确量的模糊化与去模糊化方法	134
7.2	面向对象贝叶斯网络	135
7.2.1	复杂决策系统知识的面向对象表达	136
7.2.2	面向对象贝叶斯网络的知识表达方法	136
7.2.3	面向对象贝叶斯网络的推理算法	139
7.3	定性贝叶斯网络	141
7.3.1	定性贝叶斯网络的概念	141
7.3.2	定性贝叶斯网络的推理	142
7.4	影响图	143
7.4.1	决策树与最大期望效用原则	144
7.4.2	影响图的定义与表示方法	146
7.4.3	影响图的求解与推理算法	149

7.5 本章小结	151
第8章 基于贝叶斯网络的优化技术	152
8.1 基于概率模型的进化计算	152
8.1.1 进化计算概论	152
8.1.2 遗传算法分析	153
8.1.3 基于概率模型的分布估计算法	154
8.2 贝叶斯优化算法	157
8.2.1 贝叶斯优化算法流程	157
8.2.2 贝叶斯网络的评价与搜索	157
8.2.3 对贝叶斯网络的采样	159
8.3 决策图贝叶斯优化算法	161
8.3.1 决策图的基本理论	161
8.3.2 决策图贝叶斯优化算法	163
8.3.3 DBOA 算法性能分析	165
8.4 本章小结	170
第9章 贝叶斯网络在目标融合识别中的应用	171
9.1 多传感器目标融合识别	171
9.1.1 目标融合识别的复杂性分析	171
9.1.2 空中目标的类型划分	173
9.1.3 空中目标的战术特征和物理特征分析	174
9.2 基于贝叶斯网络的目标融合识别方法	176
9.2.1 目标识别的贝叶斯网络结构	176
9.2.2 目标识别的贝叶斯参数设置	177
9.2.3 仿真与结果分析	178
9.3 基于动态贝叶斯网络的目标识别方法	179
9.3.1 目标识别的动态贝叶斯网络模型	179
9.3.2 基于动态贝叶斯网络的目标识别推理	180
9.3.3 仿真与结果分析	181
9.4 本章小结	182
第10章 贝叶斯网络在态势/威胁融合估计中的应用	183
10.1 多传感器数据融合中的态势估计技术	183

10.1.1	态势估计的定义与研究现状	183
10.1.2	态势估计模型的数学描述	184
10.1.3	态势估计的数据处理流程	185
10.2	基于贝叶斯网络的机载光电传感器态势估计技术	186
10.2.1	机载光电传感器态势估计模型	186
10.2.2	基于模糊聚类的目标点迹数据关联对准	186
10.2.3	基于最大似然估计的目标状态融合估计	188
10.2.4	基于贝叶斯网络推理技术的态势估计	189
10.2.5	仿真与结果分析	190
10.3	基于模糊贝叶斯网络的机载光电传感器威胁估计技术	193
10.3.1	机载光电系统目标威胁估计分析	193
10.3.2	基于贝叶斯网络的目标威胁估计流程	193
10.3.3	目标威胁估计的模糊贝叶斯网络模型	194
10.3.4	仿真与结果分析	196
10.4	本章小结	198
第 11 章	贝叶斯优化算法在无人机对地攻击任务分配中的应用	199
11.1	无人机编队对地攻击的任务分配	199
11.2	无人机编队对地攻击协同任务分配基本模型	201
11.2.1	单无人机自主优势函数	201
11.2.2	无人机编队的协同优势函数	202
11.2.3	协同任务分配的数学模型	203
11.2.4	仿真与结果分析	203
11.3	无人机编队对地攻击协同任务分配扩展模型	206
11.3.1	协同任务分配模型分析	206
11.3.2	结合距离折扣因子的协同任务分配模型	208
11.3.3	基于 DBOA 的无人机协同任务分配优化方法	208
11.3.4	仿真与结果分析	209
11.4	本章小结	216
第 12 章	贝叶斯网络在无人机对地攻击战术决策中的应用	217
12.1	无人机编队对地攻击战术决策系统	217
12.1.1	无人机编队对地攻击战术决策的任务分析	217
12.1.2	无人机编队对地攻击战术决策的系统结构	218

12.1.3 无人机编队对地攻击战术决策的数学描述	220
12.2 基于贝叶斯网络的无人机对地攻击战术决策模型	221
12.2.1 确定贝叶斯网络节点	221
12.2.2 确定贝叶斯网络节点状态	221
12.2.3 建立贝叶斯网络模型	222
12.2.4 仿真与结果分析	223
12.3 基于 OOBN 的无人机编队对地决策建模	224
12.3.1 无人机编队对地决策分析	224
12.3.2 基于 OOBN 的无人机编队对地决策建模	225
12.3.3 仿真实例	226
12.4 基于影响图的无人机对地攻击战术决策模型	227
12.4.1 无人机编队对地攻击战术任务决策因素分析	227
12.4.2 无人机编队对地攻击战术任务决策的影响图模型	229
12.4.3 无人机编队对地攻击战术任务决策影响图的概率分析	230
12.4.4 仿真与结果分析	231
12.5 本章小结	233
第 13 章 贝叶斯网络在无人机对地攻击损伤评估中的应用	234
13.1 无人机对地攻击战斗损伤评估	234
13.1.1 损伤评估的历史与发展	234
13.1.2 损伤评估的定义	235
13.1.3 损伤评估的模型	237
13.2 无人机对地攻击战斗损伤评估贝叶斯网络模型	239
13.2.1 无人机对地攻击 BDA 分析	239
13.2.2 无人机对地攻击 BDA 的知识表示	240
13.2.3 无人机对地攻击 BDA 贝叶斯网络模型的建立	241
13.3 仿真结果与分析	243
13.4 本章小结	246
附录 A 常用术语及其缩写	247
附录 B 常用 BN 软件及其应用平台	250
参考文献	255

第1章 概 论

客观世界的复杂性、动态性与不确定性使得不确定性决策问题越来越多,专家系统、决策支持、数据挖掘等领域都需要对不确定性信息和知识进行有效地表示、推理和学习。在处理此类问题时,经验决策的模式是决策者凭借自身的经验、知识和洞察力,对已掌握的信息进行分析,发现其中的规律,从而进行决策。但是由于信息运用不充分,随意性较大,因而很难保证决策结果的正确性。因此,必须从经验决策转变为定性和定量相结合的科学决策来对不确定性决策问题进行建模、求解,以消除不确定性,获得最优的决策结果。随着数学理论与人工智能的发展,研究者相继提出了多种不确定性问题的处理方法,如证据理论、模糊集理论、粗糙集理论、贝叶斯网络理论等。其中贝叶斯网络是以概率理论与图论为数学基础的图模式,同时又解决了概率理论的局限性,能够很好地解决不确定性决策问题,因此在复杂决策系统中得到了成功的应用。

1.1 复杂系统的决策理论

1.1.1 复杂决策系统概述

决策(Decision Making)是指选择、判断、决定等从多个候选方案中有目的地选择一个的行为。近几个世纪以来,随着系统化的科学方法作为人类探索自然与指导社会实践的重要手段的产生、发展和完善,对基于理性思维的决策方法展开了广泛的研究,逐步形成了以统计决策理论和系统分析法等为支撑的决策分析(Decision Making Analysis, DMA)这一专门学科。随着人工智能技术的兴起,越来越多的复杂计算和推理任务依赖计算机来完成,于是在信息处理、机器人、控制领域中提出了智能决策(Intelligent Decision Making)的问题,即机器如何才能根据其所面临的任务,自主地做出行为决策以实现其目的。专家系统(Expert System)等专用智能决策技术应运而生,智能决策问题也成为人类智能的核心问题。

决策是人类的一项基本活动,存在于我们生活的方方面面,是人们行动的先导。它是指为达到某种目的或目标而在众多的可行方案中进行选择的过程。尽

管人类的决策活动有着悠久的历史,但把决策作为一个专门领域来研究只是近一两个世纪的事情,而真正使其独立成为学术界得到普遍认可的领域则得力于 20 世纪 50 年代蓬勃发展的统计决策理论,以 Savage、Wald、Fishburn、Fisher 为代表的科学家在统计决策理论的基础上建立了具有严格哲学基础和公理框架的决策理论体系。20 世纪 60 年代, Raiffa、Schlaifer 等人研究了如何利用新信息来改进决策,进而提出了贝叶斯统计决策理论和方法。1966 年,Howard 在第四届运筹学会议上正式提出“决策分析”的概念。在此之后,决策分析的研究范围日益扩大,如从单准则问题到多准则问题,从个体决策到群决策,从单次决策到序贯决策,从一般决策到模糊决策等。由此,形成了一个十分活跃、生气勃勃的研究领域。

当前,随着科学技术的飞速发展,决策者所面临的决策系统变得越来越复杂。表现在:一是系统的规模不断扩大,往往一个系统中包含有许多子系统,这些子系统又由若干个其他子系统组成;二是系统的关系错综复杂,相互影响,相互制约;三是系统呈现递阶多层结构;四是系统具有多个相互冲突,不可公度的目标;五是决策者不是一个而是多个,这些决策者的知识经验、利益、偏好、期望等不完全一致;六是最前沿、多学科的相互交叉;七是决策过程中出现许多随机不确定的信息与模糊信息。由于这些信息的出现,使得决策问题成为半结构化或非结构化问题。这就要求在决策过程中建立复杂决策问题的适当的数学模型并利用现代化的科学手段进行求解,并且能够根据实际系统的变化动态地对模型进行修正。对于军事系统工程来说,其决策过程和决策方法有一定规律可以遵循,但又不能完全确定,这样的决策问题一般可适当建立模型,但无法确定最优方案。所以它通常是一个复杂的半结构化问题,对此复杂决策问题的分析和综合建立智能决策支持系统具有重要的理论和现实意义。

对于复杂系统,至今还没有一个严格的定义,一般认为可以从内部结构、外部行为以及与环境的关系等方面来认识它。一般来说复杂系统是由大量相互作用或相互分离的子系统结合在一起,具有元素众多、变量之间关系复杂、关联形式多样并且有些还难以定量描述的特点。复杂系统的复杂性从定量上来讲数学模型是高维的,具有多输入多输出;从定性上来讲系统具有非线性、外部扰动、结构和参数的不确定性。对于现代大型工程项目,如水利、航空、航天、计算机集成制造系统(CIMS)等,必须将其视为复杂系统来分析设计和规划实施。复杂系统设计涉及面广、影响系统的因素较多,目标函数多、子系统和组成单元数目庞大,并具有多层次、多关联、动态和信息不完备的特点。对复杂系统的分析和综合是决策部门、使用部门和设计部门共同关心的问题。近 30 年来,在系统工程领域对决策问题进行建模的研究有了许多进展,例如从单目标建模到多目标建模和

优化(MOP)、分级多目标优化(HMO)、分级全息建模(HHM)和多目标风险评价等。但是这些方法都过度依赖复杂的数学表达方法,不够直观和形象,系统结构和关联信息不够明了,对决策者的要求较高。任何决策都是建立在人类对客观世界的主观认识和人类改造客观世界的实践基础之上的,由于客观世界的不确定性、模糊性、变化性、多样性等导致人们主观认识上的种种不足与误差以及人们认识上的局限性,因此决定了决策的复杂性。

1.1.2 复杂决策系统的不确定性

从人们对自然现象的认知角度讲,自然界有两类基本现象,一类是确定性现象,其基本特点是已知其初始状态,即可确知其未来状态;另一类是不确定现象,其基本特点是已知其初始状态,不能确知其未来状态。不确定性在复杂的、动态的或者难以接近的环境中是不可避免的。

决策问题具有固有的难解性,研究智能决策的动机,不仅在于代替人做出自动决策,更在于在一些复杂决策场景下借助智能技术完成即使人类专家也难以有效完成的决策。不确定性是决策分析中存在的普遍现象。在运筹学、管理科学、信息科学、系统科学、计算机科学以及工程等众多领域都存在着不确定性。这些不确定性的表现形式是多种多样的,如随机性、模糊性、粗糙性、模糊随机性等。确定与不确定揭示和反映了事物变化发展过程中的必然与偶然、清晰与模糊、近似与精确之间的关系。确定性是指客观事物联系和发展过程中有规律的、必然的、清晰的、精确的属性;不确定性是指客观事物联系和发展过程中无序的、或然的、模糊的、近似的属性。由于客观事物的复杂性、不确定性以及人类思维的模糊性,近年来,对不确定环境下决策方法的研究已引起国内外学者的极大关注,并在不确定多属性决策领域涌现了众多的研究成果。而不确定(Uncertainly)作为智能决策问题的本质特征,智能主要反映在求解不确定问题的能力。不确定性表现在证据、规则和推理3个方面。

1. 证据的不确定性

歧义性:指证据含有多种意义明显不同的解释,如果离开了具体的上下文和证据所在的环境,往往难以判明其正确的含义。

不完全性:包括证据的特征不全和证据尚未收集完全两层含义,在现实生活中,大部分决策都是在知识不完全的情况下做出的。

不精确性:表示证据的观测值与真实值之间存在一定的差别。

模糊性:边界不明确的概念所包含的不确定性。

可信性:专家主观上对证据的可靠性不能完全确定,如果一批证据不稳定,则证据是否完全可信任值得怀疑。

随机性:证据本身是随机的,如交通流量等。

2. 规则的不确定性

经验知识具有明显的可用性约束和固有的不确定因素。包括构成前提条件的模式的不确定性,观测证据的不确定性,组合证据的不确定性,规则自身的不确定性,规则结论的不确定性。

3. 推理的不确定性

推理的不确定反映了知识不确定性的动态积累和传播过程。在推理的每一步都需要综合证据和规则的不确定因素,为此,通常要通过某种不确定的测度,寻找尽可能符合客观实际的计算模式,随着推理的展开和不确定测度的传递,得到最终结果的不确定测度。

1.1.3 复杂决策系统的决策方法

决策需要信息,信息是决策者进行决策的基础,传统的决策分析是利用已有的信息建立函数或关系模型来进行决策。而在信息爆炸的今天,决策者面临的是大量的、动态的甚至是有噪声的信息,决策者企图通过建立函数或数学模型来进行决策显然是不可能的,也难以满足实际的需要。为此基于知识的智能决策分析应运而生,它不需要定量的数学模型,而是基于知识进行决策,这些知识隐含在大量的原始数据中,如何从大量的数据中挖掘出有用信息是智能决策的核心。常用的推理决策模型主要包括主观贝叶斯的概率推理模型、贝叶斯网络模型、可信度理论推理模型、证据理论及其改进推理模型以及粗糙集和模糊集模型等。不同的推理决策模型处理问题的基本思想和方法有很大的差异,但推理的本质都是相同的,都具有一个相同的结构形式,即对知识不确定性的描述、证据不确定的描述和不确定性的更新算法。

基于主观贝叶斯方法的概率推理模型是很早以来应用比较广泛的模型。对概率推理起着支撑作用的是贝叶斯定理。在主观贝叶斯方法的概率推理模型中,证据 e 的不确定性为 e 发生的概率 $P(e)$,推理规则的不确定性为在事件 e 已经发生的情况下,假设 h 发生的概率 $P(h|e)$,由此利用贝叶斯公式可以从假设 h 的先验概率 $P(h)$ 得到 h 的后验概率。主观贝叶斯方法是具有公理基础和易于理解的数学性质。但是,其缺点也是显而易见的,一是由其数学性质引起的,由于概率的分配具有一定的主观性,尤其在无法定量分析的情况下,此时在系统中很难保证领域专家和样本统计给出的概率具有前后的一致性;二是在实际应用中推理融合所需要的那些关键的先验和条件概率的获取存在着较大困难。

关于使用贝叶斯网络的概率推理工作始于 Pearl。一个贝叶斯网络是一个有向无环图,每个节点表示一个随机变量,并且网络中所有节点的联合概率等于