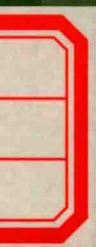


证据推理、置信规则库 与复杂系统建模

周志杰 陈玉旺 胡昌华 张邦成 常雷雷 著



科学出版社

证据推理、置信规则库 与复杂系统建模

周志杰 陈玉旺 胡昌华 张邦成 常雷雷 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在对 D-S 证据理论回顾的基础上,对证据推理基本理论进行了详细的分析,主要包括证据推理方法、基于区间不确定性的证据推理方法、基于概率和模糊不确定性的证据推理方法、证据推理规则;进一步对基于证据推理的置信规则库基本理论进行了深入细致的讨论,主要包括基于证据推理的置信规则库参数离线训练方法、专家干预下置信规则库专家系统参数在线更新方法、基于证据推理的置信规则库在线构造方法和置信规则库前提属性参考值确定方法等内容;最后从多个角度对证据推理和置信规则库在工程实际中的应用进行了全面的介绍,包括证据推理和置信规则库在非平稳时间序列预测、系统行为预测、故障预测、最优维护、寿命评估、分类问题和医学决策等领域中的应用。

本书可供从事推理、专家系统相关专业科研人员和工程技术人员阅读参考,也可作为人工智能、复杂系统建模、系统工程等专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

证据推理、置信规则库与复杂系统建模/周志杰等著. —北京:科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-051552-0

I. 证… II. 周… III. 人工智能-算法-研究 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 020827 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:郭端芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 2 月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:369 000

定价:110.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

传统 D-S 证据理论无法有效处理冲突证据和组合爆炸等问题, Yang Jianbo 于 1994 年提出证据推理(evidential reasoning, ER)方法。在进一步考虑证据可靠性和证据权重的基础上, Yang 于 2013 年在 *Artificial Intelligence* 进一步提出用于证据组合的证据推理规则。传统的 Bayes 推理、D-S 证据推理和 ER 方法均可以看做是 ER 规则的一种特殊情形, 因此 ER 规则是一种更具一般性的推理方法。

基于 ER 方法、决策理论、模糊理论和传统 IF-THEN 规则库, 2006 年提出基于证据推理算法的置信规则库推理方法(belief rule-base inference methodology using the evidential reasoning approach, RIMER)。RIMER 具有对带有模糊不确定性、概率不确定性, 以及非线性特征的数据进行建模的能力。RIMER 主要包括知识的表达和知识的推理。知识的表达通过置信规则库(belief rule base, BRB)系统来实现, 而知识的推理则通过证据推理(evidential reasoning, ER)算法实现。BRB 系统由一系列置信规则组成, 本质上是一种专家系统, 能够有效利用各种类型的信息, 建立输入和输出之间的非线性模型。

本书对 ER 方法、ER 规则、BRB 专家系统, 基于 ER 和 BRB 的复杂系统建模方法及其在故障预测、最优维护、寿命评估和医学决策等方面的应用进行了详细的介绍。全书共分为三部分。第一部分在对 D-S 证据理论进行回顾的基础上, 对证据推理基本理论进行详细的分析, 主要包括 ER 方法、基于区间不确定性的 ER 证据推理方法、基于概率和模糊不确定性的 ER 证据推理方法、ER 规则; 第二部分结合作者的最新研究成果, 对 BRB 的基本理论进行了深入细致的讨论, 主要包括基于 ER 的 BRB 推理方法、基于 ER 的 BRB 参数离线训练方法、专家干预下 BRB 专家系统参数在线更新方法、基于 ER 的 BRB 在线构造方法和 BRB 前提属性参考值确定方法等内容; 第三部分从多个角度对 ER 和 BRB 在工程实际中的应用进行了全面的介绍, 主要包括 ER 和 BRB 在非平稳时间序列预测、系统行为预测、故障预测、最优维护、寿命评估、分类问题和医学决策等领域中的应用。

全书由周志杰和陈玉旺合作完成, 第 1 章~第 3 章由陈玉旺完成, 第 4 章~第 14 章由周志杰完成, 第 15 章由常雷雷完成, 第 16 章由周治国完成。在本书的写作过程中, 得到火箭军工程大学胡昌华教授、英国曼彻斯特大学 Yang Jianbo 教授和 Xu Dongling 教授、长春工业大学张邦成教授、空军工程大学张琳教授、国防科学技术大学姜江副教授等的关心和帮助, 为本书的写作打下了坚实的理论基础, 在本书的出版之际谨向他们表示衷心的感谢!

同时,本书的出版得到火箭军工程大学控制工程系、英国曼彻斯特大学决策科学研究中心、长春工业大学机械工程学院的老师 and 同学们的支持和帮助,在此一并表示感谢!

本书相关的研究工作得到国家自然科学基金项目(61370031)、中国博士后基金项目(2015M570847)、中国博士后特别资助项目(2016T90938)和陕西省自然科学基金项目(2015JM6345)的资助。

周志红

2016年5月于西安

目 录

前言

第一部分 证据推理方法

第 1 章 Dempster-Shafer 证据理论	3
1.1 引言	3
1.2 证据的不确定性表示	3
1.2.1 辨识框架	3
1.2.2 基本概率分配	3
1.2.3 信度和似然函数	4
1.3 证据的合成规则	5
1.3.1 Dempster 合成规则	5
1.3.2 冲突证据的合成处理	5
1.4 D-S 证据理论的研究进展与探讨	6
第 2 章 证据推理方法及扩展	8
2.1 引言	8
2.2 不确定性 MCDA 框架下的证据推理方法	8
2.2.1 迭代合成算法	9
2.2.2 合成特性	10
2.2.3 解析合成算法	11
2.2.4 非线性合成模式分析	11
2.3 信息转换方法	13
2.3.1 定量信息转换方法	13
2.3.2 定性信息转换方法	14
2.4 考虑区间、概率和模糊不确定性的证据推理方法	14
2.4.1 考虑区间不确定性的证据推理方法	15
2.4.2 考虑概率和模糊不确定性的证据推理方法	16
2.5 本章小结	16
第 3 章 证据推理规则	17
3.1 引言	17
3.2 带有证据权重的证据推理规则	17
3.2.1 证据权重及相关处理方法	17

3.2.2 证据推理规则的加权信度分布	18
3.2.3 带有证据权重的证据推理规则	18
3.2.4 数值比较分析	19
3.3 带有证据权重和可靠性的证据推理规则	21
3.3.1 带有证据可靠性的加权信度分布	21
3.3.2 数值比较分析	23
3.4 证据推理规则的特性分析	24
3.4.1 证据推理规则的基本特性	24
3.4.2 证据推理规则的推理模式分析	24
3.4.3 数值仿真分析	26
3.4.4 冲突证据的处理和可靠性摄动分析	27
3.5 本章小结	29

第二部分 置信规则库建模方法

第4章 基于证据推理算法的置信规则库专家系统推理方法	33
4.1 引言	33
4.2 专家系统	34
4.2.1 专家系统的定义	34
4.2.2 专家系统的结构	34
4.2.3 专家系统的特点	35
4.2.4 基于 IF-THEN 规则的专家系统	36
4.3 置信规则库专家系统	37
4.3.1 数据和知识表达中的不确定性	37
4.3.2 知识表达中的权重参数	37
4.3.3 置信规则库	38
4.4 基于证据推理算法的置信规则库专家系统推理方法	38
4.4.1 置信规则库的矩阵表示	38
4.4.2 基于证据推理算法的置信规则库推理方法	40
4.4.3 基于区间效用的证据推理结果评价方法	42
4.5 不同形式输入信息的转化方法	42
4.5.1 使用语义参考值来描述的定量输入信息	43
4.5.2 使用区间来描述的定量输入信息	44
4.5.3 使用主观决策来描述的定性输入信息	45
4.5.4 使用主观决策来描述的符号输入信息	45
4.6 分层置信规则库系统及其推理方法	45
4.6.1 分层置信规则库系统	45

4.6.2 分层置信规则库系统的推理	45
4.7 证据推理算法框架下证据与概率之间的关系	47
4.8 仿真例子	49
4.8.1 问题描述	49
4.8.2 从原始规则到置信规则	51
4.8.3 RIMER 的推理过程	53
4.8.4 比较研究	56
4.8.5 基于不完整输入信息的推理	58
4.9 本章小结	59
第 5 章 置信规则库专家系统的离线优化模型	60
5.1 引言	60
5.2 问题描述	60
5.3 用于训练置信规则库系统的离线优化模型	61
5.3.1 基于数值观测值的优化学习模型	61
5.3.2 基于主观观测值的优化学习模型	62
5.3.3 基于混合观测值的优化学习模型	64
5.4 基于置信规则库离线优化模型的输油管道泄漏检测	65
5.4.1 问题描述	65
5.4.2 输油管道泄漏检测置信规则库的建立	66
5.4.3 基于置信规则库离线优化模型的管道泄漏检测	67
5.4.4 一些说明	68
5.5 本章小结	70
第 6 章 专家干预下置信规则库专家系统参数在线更新方法	71
6.1 引言	71
6.2 问题描述	71
6.3 置信规则库参数在线更新算法	71
6.3.1 基于主观观测值的置信规则库参数迭代估计算法	72
6.3.2 基于数值观测值的置信规则库参数迭代估计算法	74
6.3.3 观测值满足正态分布假设条件下的迭代算法	74
6.4 基于两容水箱的置信规则库参数在线更新算法仿真研究	81
6.4.1 问题描述	81
6.4.2 置信规则库的构建	82
6.4.3 基于主观观测值的仿真结果	84
6.4.4 基于数值观测值的仿真结果	87
6.5 专家干预下置信规则库参数的在线更新算法	89

6.5.1 动态系统工作模式的确定	89
6.5.2 置信规则库参数在线更新算法	90
6.6 基于输油管道泄漏检测置信规则库更新的实验研究	91
6.6.1 问题描述	91
6.6.2 专家干预下系统工作模式的确定	91
6.6.3 基于置信规则库的管道泄漏在线检测	92
6.6.4 比较研究	94
6.7 本章小结	95
第7章 置信规则库专家系统的在线构造方法	96
7.1 引言	96
7.2 问题描述	96
7.3 置信规则的统计效用	97
7.4 置信规则库的在线构造	100
7.4.1 置信规则的增加和删除准则	100
7.4.2 置信规则库参数的在线更新	102
7.4.3 置信规则库在线构造算法	102
7.5 基于输油管道泄漏检测置信规则库构造的实验研究	103
7.5.1 问题描述	103
7.5.2 泄漏检测置信规则库系统的在线构造	104
7.6 本章小结	107
第8章 置信规则库前提属性参考值确定方法	109
8.1 引言	109
8.2 置信规则库前提属性参考值优化模型	109
8.2.1 研究现状及存在的主要问题	109
8.2.2 置信规则库前提属性参考值学习方法	110
8.2.3 待估计的参数	111
8.2.4 优化模型	112
8.3 基于差分进化的求解算法	113
8.4 多极函数拟合示例分析	115
8.5 输油管道泄漏预测实例分析	117
8.5.1 场景 I	118
8.5.2 场景 II	120
8.5.3 结果分析	122
8.6 本章小结	124

第三部分 证据推理与置信规则库的应用

第 9 章 基于置信规则库的非平稳时间序列预测	127
9.1 引言	127
9.2 问题描述	127
9.3 基于置信规则库预测模型的构造算法	128
9.3.1 基于 Bayes 推理的置信规则库推理方法	129
9.3.2 预测模型参数的确定准则	129
9.3.3 预测模型延迟步数的确定准则	130
9.3.4 基于置信规则库预测模型的构造算法	131
9.4 数值仿真和实验研究	131
9.4.1 数值仿真	132
9.4.2 实验研究	136
9.4.3 小结	142
9.5 本章小结	143
第 10 章 基于双层置信规则库的动态系统行为预测方法	144
10.1 引言	144
10.2 问题描述	144
10.2.1 置信规则库	144
10.2.2 系统行为预测模型	145
10.2.3 基于半定量信息的可观测行为预测问题描述	145
10.3 基于半定量信息的动态系统可观测行为在线预测算法	145
10.3.1 基于主观观测值的预测模型参数在线更新算法	146
10.3.2 基于数值观测值的预测模型参数在线更新算法	147
10.3.3 专家干预下预测模型参数在线更新算法	148
10.4 仿真研究	151
10.4.1 问题描述	151
10.4.2 预测模型的构造	151
10.4.3 基于主观观测值的仿真结果	152
10.4.4 基于数值观测值的仿真结果	158
10.5 实验研究	161
10.5.1 问题描述	161
10.5.2 初始预测模型的构造	162
10.5.3 管道泄漏特定的工作模式	163
10.5.4 在线更新初始预测模型和比较研究	164

10.5.5 更新后预测模型的测试和比较研究	165
10.5.6 比较研究	166
10.6 本章小结	167
第 11 章 基于置信规则库的复杂系统隐含行为预测	168
11.1 引言	168
11.2 隐含行为预测问题描述	169
11.2.1 基于 BRB 的行为预测模型	169
11.2.2 基于 BRB 的隐含行为预测模型	169
11.3 隐含行为预测算法	170
11.3.1 似然函数的构造	170
11.3.2 预测模型的参数估计算法	172
11.3.3 隐含行为预测算法步骤	173
11.4 实验研究	173
11.4.1 问题描述	173
11.4.2 陀螺漂移预测模型构造	175
11.4.3 漂移预测模型的训练	176
11.4.4 预测模型的检验	177
11.4.5 比较研究	177
11.5 本章小结	178
第 12 章 基于置信规则库动态系统在线故障预测	179
12.1 引言	179
12.2 一种基于隐含马尔可夫链和置信规则库的模型	179
12.3 基于隐含马尔可夫链和置信规则库模型参数的在线更新算法	182
12.4 存在环境影响下动态系统在线故障预测	186
12.5 基于连续釜式搅拌器隐含故障预测的仿真研究	187
12.5.1 问题描述	187
12.5.2 基于隐含马尔可夫链和置信规则库的模型构造	189
12.5.3 初始置信规则库的确定	190
12.5.4 连续釜式搅拌器隐含故障的在线预测	193
12.5.5 与基于隐含马尔可夫链的故障预测方法的比较研究	196
12.6 本章小结	197
第 13 章 基于置信规则库的动态系统最优维护	198
13.1 引言	198
13.2 基于置信规则库的故障预测和最优维护模型	198
13.2.1 基于多特征参数故障预测的原理	198

13.2.2 最优维护模型	199
13.3 基于置信规则库和多特征参数的故障预测模型	200
13.3.1 基于多特征参数的故障预测原理	200
13.3.2 特征参数预测模型的构造	201
13.3.3 建立用于反映系统运行状况的置信规则库	202
13.4 故障预测模型参数更新算法	202
13.4.1 BRB _m 的推理	202
13.4.2 特征参数预测模型参数在线更新算法	204
13.5 基于在线故障预测的最优维护方法	205
13.5.1 在线故障预测算法	205
13.5.2 最优维护方法	206
13.6 实验研究	206
13.6.1 问题描述	206
13.6.2 陀螺仪故障的在线预测	206
13.6.3 基于故障预测陀螺仪最优维护	212
13.7 本章小结	212
第 14 章 基于证据推理和置信规则库的航天产品寿命评估	214
14.1 引言	214
14.2 问题描述	215
14.3 融合多环境下失效时间数据的寿命评估模型	216
14.3.1 BRB-ER 模型结构	216
14.3.2 BRB-ER 模型的推理	217
14.4 基于差分优化的 BRB-ER 模型参数训练算法	220
14.4.1 优化模型	220
14.4.2 基于差分优化算法进行优化的步骤	221
14.5 应用研究	222
14.5.1 BRB-ER 的模型	222
14.5.2 数据融合	224
14.5.3 比较研究	225
14.5.4 基于差分进化的 BRB-ER 模型优化	226
14.6 本章小结	227
第 15 章 基于置信规则库的分类问题求解	228
15.1 引言	228
15.2 分类问题背景与研究现状	228
15.3 分类问题的公共测试数据集	229
15.4 基于置信规则库参数学习的分类问题求解步骤	230

15.5 公共测试数据集分类结果及对比·····	231
15.5.1 Iris 测试数据集结果分析·····	231
15.5.2 Cancer 测试数据集结果分析·····	231
15.5.3 Wine 测试数据集结果分析·····	235
15.5.4 Glass 测试数据集结果分析·····	235
15.6 与现有文献实验结果对比·····	238
15.7 本章小结·····	239
第16章 基于置信规则库的淋巴结特征的转移诊断 ·····	240
16.1 引言·····	240
16.2 问题描述·····	241
16.3 双层置信规则库模型·····	242
16.4 基于 CSA 的双层置信规则库优化算法·····	242
16.4.1 优化模型·····	243
16.4.2 新的优化算法·····	243
16.5 双层置信规则库模型用于淋巴结转移诊断·····	245
16.5.1 前提属性和结果的参考点·····	245
16.5.2 构造置信规则库·····	246
16.5.3 所提模型的训练过程·····	247
16.6 实验研究·····	248
16.6.1 数据描述·····	248
16.6.2 验证所提模型·····	249
16.6.3 与传统置信规则库模型的比较研究·····	250
16.6.4 优化算法的比较研究·····	250
16.6.5 与已有方法的比较研究·····	253
16.7 本章小结·····	255
参考文献 ·····	256
附录 ·····	262
附录 A 初始和训练之后的输油管道泄漏诊断置信规则库专家系统·····	262
附录 B 一些导数的计算·····	266
附录 C 协方差矩阵中参数估计算法·····	267
附录 D 参数迭代估计算法的收敛性分析·····	269
附录 E 更新之后的输油管道泄漏诊断置信规则库专家系统·····	271
附录 F 均匀分布假设条件下统计效用的计算方法·····	274
附录 G 预测模型参数迭代估计算法中一些导数的计算·····	275
附录 H 更新后泄漏预测模型中 BRB ₂ 的置信度和规则权重·····	277

第一部分

证据推理方法

第 1 章 Dempster-Shafer 证据理论

1.1 引言

Dempster-Shafer(D-S)证据理论作为一种不确定性推理方法,在信息与决策学科中得到越来越广泛的关注。D-S 证据理论最早由 Dempster 在 20 世纪 60 年代提出,并由 Shafer 在 1976 年作了进一步发展和完善,成为认知不确定性建模的一般性框架。虽然 D-S 证据理论一般特指由 Dempster 和 Shafer 提出的数学理论,但是在更广义层面上涵盖所有基于 D-S 证据理论发展起来的方法体系,尤其包括处理各种冲突证据的推理和合成规则。证据推理方法的研究和应用包括信息融合、故障诊断、基于知识的系统、决策与风险分析等诸多领域。

1.2 证据的不确定性表示

D-S 证据理论采用信度函数而不是概率来度量不确定性。作为在有限离散空间中概率推理方法的一般形式,D-S 证据理论能更好地描述问题的未知性和不确定性。

1.2.1 辨识框架

在 D-S 证据理论中,样本空间定义为一个辨识框架(frame of discernment),由一系列元素组成。通常,假设辨识框架定义为 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$,其中 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ 表示一组相互排斥且可以构成一个完备集的基本假设,即 $\theta_i \cap \theta_j = \emptyset$, ($i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, N$)。辨识框架的定义完全取决于问题的特性。例如,针对医疗诊断问题,其辨识框架应包含所有潜在的疾病,医生诊断后得出的结果称为证据。与传统概率建模方法不同的是,部分证据通常支持的结论不只是一种疾病而是多种疾病。在定义辨识框架的基础上,D-S 证据理论通过三种函数从不同层次上刻画不确定性。

1.2.2 基本概率分配

一个基本概率设置(basic probability assignment, BPA)可以定义为以下映射函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$,且满足

$$m(\emptyset) = 0 \text{ 和 } \sum_{\theta \subseteq \Theta} m(\theta) = 1$$

其中, 2^Θ 或 $P(\Theta)$ 表示辨识框架 Θ 的幂集, 包含如下 2^N 个子集, 即

$$P(\Theta) = 2^\Theta = \{\emptyset, \theta_1, \dots, \theta_N, \{\theta_1, \theta_2\}, \dots, \{\theta_1, \theta_N\}, \dots, \{\theta_1, \dots, \theta_{N-1}\}, \Theta\}$$

式中, $m(\theta)$ 表示 Θ 中任意一个子集 θ 的 BPA, 可以赋予单个元素或辨识框架中元素的任意子集, 其与 θ 的任意较小子集上的 BPA 无关。

若 $m(\theta) > 0$, 称 θ 为该基本概率分配的焦元。赋予空集 $\emptyset$ 的 BPA 为 0, 赋予全集 Θ 的 BPA 表示全局无知不确定性, 而赋予除单个判别假设的某个子集上的基本概率设置表示局部无知不确定性。若某个 BPA 既不包含全局无知不确定性, 也不包含局部无知不确定性, 则该基本概率分配函数退化为传统概率函数。

1.2.3 信度和似然函数

通过基本概率分配函数, 证据的不确定性可以分别定义为信度(belief)和似然(plausibility)函数。

定义 1-1 信度函数定义为 $\text{Bel}: \theta \rightarrow [0, 1]$, 并且满足

$$\text{Bel}(\theta) = \sum_{B \subseteq \theta} m(B)$$

其中, $\text{Bel}(\theta)$ 表示所有确定赋予 θ 本身及其较小子集上的 BPA 的和。

例如

$$\begin{aligned} \text{Bel}(\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}) \\ = m(\{\theta_1\}) + m(\{\theta_2\}) + m(\{\theta_3\}) + m(\{\theta_1, \theta_2\}) + m(\{\theta_1, \theta_3\}) \\ + m(\{\theta_2, \theta_3\}) + m(\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}) \end{aligned}$$

信度函数具有以下性质。

① 对于单个元素集合 A , 有 $\text{Bel}(A) = m(A)$ 。

② 对于 Θ , 有 $\text{Bel}(\Theta) = \sum_{\alpha \subseteq \Theta} m(\alpha) = 1$ 。

③ $\text{Bel}(\emptyset) = m(\emptyset)$ 。

定义 1-2 似然函数定义为 $\text{Pl}: \theta \rightarrow [0, 1]$, 并且满足

$$\text{Pl}(\theta) = \sum_{B \cap \theta \neq \emptyset} m(B)$$

其中, $\text{Pl}(\theta)$ 表示赋予与 θ 之间存在非空交集的所有集合上的 BPA 的和, 也表示不反对假设 θ 的 BPA 的和。

$\text{Bel}(\theta)$ 和 $\text{Pl}(\theta)$ 之间的关系为

$$\text{Pl}(\theta) = 1 - \text{Bel}(\bar{\theta})$$

其中, $\bar{\theta}$ 表示 θ 的补集。

$[\text{Bel}(\theta), \text{Pl}(\theta)]$ 可以解释为支持基本假设 θ 的概率上下界或称为置信区间, 也表示证据的不确定性程度。若 θ 的置信区间为 $[0, 0]$, 则说明 $\text{Bel}(\bar{\theta}) = 0$, 即完全信