



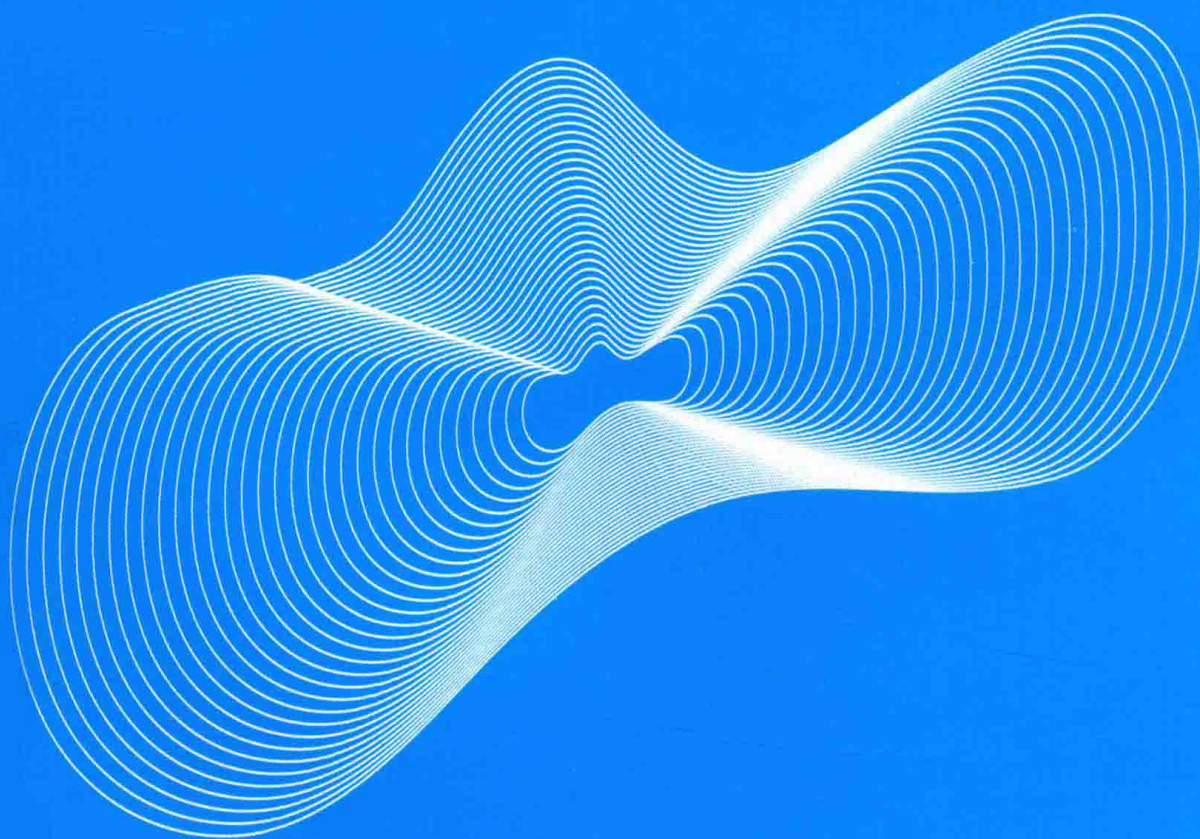
大数据和人工智能技术丛书

国家新闻出版改革发展项目库入库项目

INTELLIGENT ALGORITHM
AND APPLICATION

智能算法及应用

张洪光◎编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



大数据和人工智能技术丛书

国家新闻出版改革发展项目库入库项目

智能算法及应用

张洪光 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书以人工智能理论和应用智能为出发点,对人工智能理论领域内经典且实用的算法进行简明扼要的讲解,力争勾勒出人工智能领域的算法形态和知识架构。迄今为止,人类距离实现广义且通用的类人智能,还有很远很远的路。目前,人工智能理论的算法常常是在具体的行业或领域里率先开花结果。为此,本书突出了应用智能的实例讲解,这些实例是根据多年科研经验改编的小例子。这些例子虽小,但却是全面的、小而精致的、通俗易懂的应用案例,可以作为行业工程师、“大学生创新创业训练计划项目”学生的参考实例。本书阐述了人工智能理论的宏观架构,给出了人工智能的微观应用实例,争取形成一本可以让人一口气读完的且没有感到阻力的基础性书籍。本书共 11 章,每一章彼此独立、学习时不存在依赖关系。

本书是介绍智能算法的入门书,适合于高等学校本科生、研究生和相关技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

智能算法及应用 / 张洪光编著. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2022. 1

ISBN 978-7-5635-5180-4

I. ①智… II. ①张… III. ①人工智能—算法 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 262946 号

策划编辑:姚 顺 刘纳新 责任编辑:刘 颖 封面设计:七星博纳

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码:100876

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:保定市中画美凯印刷有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:16.25

字 数:373 千字

版 次:2022 年 1 月第 1 版

印 次:2022 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5180-4

定价:48.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

► 算法感悟

每一种智能算法都是一种解决问题的思路，学习一种智能算法就是理解它的思路、实现它的思路，探索一种新的智能算法就是去寻找一种新的解决问题的思路。

► 大背景

人工智能正在逐渐重塑很多行业模式，未来的应用价值越来越不容忽视。人工智能的发展给我们的日常生活带来很多益处，也引出很多新问题、新争论。无论是从新问题、新争论的角度，还是从未来发展蓝图的角度，智能算法都是人工智能主要的实施形式。作为一本智能算法的入门书，本书可以帮助初学者、算法工程师直观地看到每一种智能算法的肖像，深入地学到每一种智能算法的特色、应用和扩展知识。

► 本书初衷

在硕士和博士研究生阶段，作者就开始做人工智能方面的研究，至今已二十余年。在此期间，始终想写点东西，但又经常被打断。现将本书的编写初衷和概况分享给大家，希望可以帮助读者更好地理解这本书。

书籍可以传承文明与精神，同样我希望这部书也可以传承一点东西。智能算法涉及的范围很大，所以本书选择的那些智能算法均已经历过多次迭代更新。每一种智能算法进入本书的原因各不相同，有的是因其短小精悍、适用面广，有的是因其未来发展前景明确可期。

阅读书籍的过程是快乐的，同样我希望读者阅读本书时也是快乐的，而且是兴致盎然、不费力气地一口气读完的。我们在编写每一章的提纲时反复迭代，其中包括每一章内容的选取、难易程度的斟酌，包括从读者视角选择每一章的切入点，包括使用思维导图让每一章整体框架浓缩于一幅图、实例均有源码、习题剪代表性、实例可以帮助读者举一反三、阅读材料可以让读者深入探索每一种智能算法。

► 本书内容

本书适合于高等学校本科生、研究生和相关技术人员阅读。读者需要有一些程序设计基础知识和数学能力。本书每一章彼此独立、自成一体，学习时不必担心章节之间的依赖关系，可以根据需要和兴趣阅读。为了加深对每一种智能算法的理解，建议

大家研读每一章的主体内容 and 应用实例源码，并扩展阅读相关材料，这些对于深入地理解和掌握一种智能算法是必需的；而且，每一种闪光背后都是辛勤的汗水，这些努力是值得的，是掌握和实践每种智能算法思路的捷径之一。

全书共 11 章：第 1 章“拍卖算法及应用”是博弈论的重要缩影之一；第 2 章“元胞自动机”理念历久弥新、适用性广；第 3 章“决策树”始终是生命力很强的经典决策理论；第 4 章“路径规划问题”是起源很早、始终研究、始终没有被放弃的研究热点；第 5 章、第 6 章“组合优化问题”和“实数编码优化问题”是经典问题，却始终有新的研究成果不断涌现；第 7 章“模糊推理系统”用模糊集理论打开一扇可以模拟类人推理的大门；第 8 章“支持向量机”是解决非线性分类问题的有力工具；第 9 章“神经网络”是智能算法发展最快的领域，也是未来模拟人类大脑机理的重要雏形之一；第 10 章“强化学习”是可以与复杂外界环境互换，并模拟生物智能的学习算法；第 11 章“迁移学习”是新兴的、未来很有潜力的学习算法。

➤ 代码和其他材料

本书每一章应用实例都提供了源代码，可使用北邮智信 app 扫描本书封底的二维码下载，也可发送邮件到邮箱 aialgorithm@163.com 获取。如果发现代码中存在问题，欢迎读者通过 aialgorithm@163.com 给予指正。

➤ 致谢和不足

本书的写作得到了很多师生的帮助，感谢同仁们参与讨论，提出了非常有价值的思路和建设性意见；感谢学生们投入了大量精力，为本书的编写提供帮助，参与的学生有张莹、金冠宇、汤梦珍、张青松、刘亭亭、吕秀莎、邹新颖、王涛、渠宇霄、李翔，上述排名不分先后，向大家辛勤的工作表示感谢。感谢北京邮电大学出版社的工作人员，在出版方面提出了专业性的建议，特别感谢姚顺编辑参与全书架构和细节的讨论与推敲，使得本书的章节布局和质量有了很大的提升。最后，感谢我的父亲、母亲、妻子和孩子，感谢他们的理解与支持。

智能算法的发展日新月异，本书一定有不少缺点和不足，希望读者，特别是同行专家予以批评指正。

第 1 章 拍卖算法及应用	1
1.1 拍卖算法概述	1
1.2 拍卖算法基本术语和思维导图	1
1.2.1 基本术语	2
1.2.2 思维导图	2
1.3 拍卖的博弈论模型	3
1.3.1 拍卖与博弈论	3
1.3.2 博弈论的发展历程	3
1.3.3 博弈的相关概念	4
1.3.4 纳什均衡	5
1.3.5 囚徒困境	5
1.4 理论和实例	6
1.4.1 原理	6
1.4.2 拍卖算法的实现	10
1.4.3 实例:基于拍卖算法的目标分配问题优化	10
1.5 习题与实例精讲	13
1.5.1 习题	13
1.5.2 案例实战	14
1.6 结束语	19
1.7 阅读材料	19
本章参考文献	19
第 2 章 元胞自动机	21
2.1 概述	21

2.2	目的	21
2.2.1	基本术语	22
2.2.2	思维导图	22
2.3	理论和实例	23
2.3.1	原理	23
2.3.2	实现	30
2.3.3	实例:森林火灾蔓延建模	31
2.4	习题与实例精讲	35
2.4.1	习题	35
2.4.2	案例实战	36
2.5	结束语	39
2.6	阅读材料	39
	本章参考文献	41
第3章	决策树	43
3.1	概述	43
3.2	目的	43
3.2.1	基本术语	44
3.2.2	思维导图	44
3.3	决策方法	45
3.3.1	确定性决策	45
3.3.2	不确定性决策	46
3.4	理论和实例	47
3.4.1	原理	47
3.4.2	实现	54
3.4.3	实例	55
3.5	习题与实例精讲	67
3.5.1	习题	67
3.5.2	案例实战	68
3.6	结束语	76
3.7	阅读材料	77
3.7.1	推荐书籍	77
3.7.2	推荐论文	77

本章参考文献	78
第 4 章 路径规划问题	79
4.1 概述	79
4.2 目的	79
4.2.1 基本术语	79
4.2.2 思维导图	81
4.3 路径规划问题	82
4.3.1 简介	82
4.3.2 历史	83
4.3.3 分类	85
4.4 理论和实例	85
4.4.1 原理	85
4.4.2 实现	91
4.4.3 实例:带时间窗约束的 TSP 问题	92
4.5 习题与实例精讲	94
4.5.1 习题	94
4.5.2 案例实战	95
4.6 结束语	97
4.7 阅读材料	98
4.7.1 重要书籍	98
4.7.2 重要论文	98
4.7.3 相关网站	99
本章参考文献	99
第 5 章 组合优化问题	101
5.1 概述	101
5.2 目的	101
5.2.1 基本术语	102
5.2.2 思维导图	103
5.3 典型组合优化问题	103
5.3.1 图着色问题	103
5.3.2 最大可满足性问题	104



5.3.3	陷阱问题	104
5.3.4	武器目标分配问题	104
5.3.5	背包问题	105
5.4	二进制类问题理论和实例	105
5.4.1	原理	105
5.4.2	实现	107
5.4.3	实例:塔吊装载问题	108
5.5	多进制类问题理论和实例	108
5.5.1	原理	108
5.5.2	实现	111
5.5.3	实例:装箱问题	111
5.6	习题与实例精讲	112
5.6.1	习题	112
5.6.2	案例实战	113
5.7	结束语	116
5.8	阅读材料	116
5.8.1	重要书籍	116
5.8.2	重要论文	117
	本章参考文献	117
第6章	实数编码优化问题	119
6.1	概述	119
6.2	目的	119
6.2.1	基本术语	120
6.2.2	思维导图	121
6.3	理论和实例	122
6.3.1	原理	122
6.3.2	优化算法:灰狼算法	122
6.3.3	实现	126
6.3.4	实例:无人机航迹优化	127
6.4	习题与实例精讲	129
6.4.1	习题	129
6.4.2	案例实战	130

6.5 结束语	132
6.6 阅读材料	132
6.6.1 重要书籍	132
6.6.2 重要论文	133
本章参考文献	133
第7章 模糊推理系统	135
7.1 概述	135
7.2 目的	135
7.2.1 基本术语	135
7.2.2 思维导图	136
7.3 理论和实例	137
7.3.1 原理	137
7.3.2 实现	147
7.3.3 实例:模糊洗衣机	149
7.4 习题与实例精讲	151
7.4.1 习题	151
7.4.2 案例实战	151
7.5 结束语	155
7.6 阅读材料	155
7.6.1 推荐书籍	155
7.6.2 推荐论文	156
本章参考文献	156
第8章 支持向量机	158
8.1 概述	158
8.2 目的	158
8.2.1 基本术语	159
8.2.2 思维导图	160
8.3 理论和实例	160
8.3.1 原理	160
8.3.2 实现	170
8.3.3 实例:人脸识别	172

8.4	习题与实例精讲	174
8.4.1	习题	174
8.4.2	案例实战	174
8.5	结束语	176
8.6	阅读材料	177
8.6.1	推荐书籍	177
8.6.2	推荐论文	177
	本章参考文献	178
第9章	神经网络	180
9.1	概述	180
9.2	目的	181
9.2.1	基本术语	181
9.2.2	思维导图	182
9.3	理论和实例	182
9.3.1	原理	182
9.3.2	实现	189
9.3.3	实例:车牌识别	190
9.4	习题与实例精讲	193
9.4.1	习题	193
9.4.2	案例实战	193
9.5	结束语	195
9.6	阅读材料	196
9.6.1	推荐书籍	196
9.6.2	推荐论文	196
	本章参考文献	197
第10章	强化学习	199
10.1	概述	199
10.2	目的	199
10.2.1	基本术语	200
10.2.2	思维导图	201
10.3	强化学习理论	201

10.3.1	模型	201
10.3.2	算法分类	202
10.3.3	要素	203
10.3.4	求解方法	203
10.4	Q-learning 算法及应用实例	207
10.4.1	Q 表	207
10.4.2	Q 值函数	207
10.4.3	贪心探索	208
10.4.4	实现伪码	209
10.4.5	应用实例	210
10.5	习题与实例精讲	212
10.5.1	习题	212
10.5.2	案例实战	213
10.6	结束语	216
10.7	阅读材料	216
10.7.1	推荐书籍	216
10.7.2	推荐论文	217
	本章参考文献	217
第 11 章	迁移学习	219
11.1	概述	219
11.2	目的	219
11.2.1	基本术语	219
11.2.2	思维导图	220
11.3	概况	221
11.3.1	迁移学习的必要性	221
11.3.2	迁移学习的可行性	221
11.3.3	迁移学习的适用性	222
11.3.4	迁移学习的架构与思路	223
11.4	基于样本的迁移学习的实现	223
11.4.1	问题描述	223
11.4.2	解决办法	224
11.5	习题与实例精讲	229

11.5.1 习题	229
11.5.2 案例实战	229
11.6 结束语	232
11.7 阅读材料	232
11.7.1 推荐书籍	232
11.7.2 推荐论文	232
本章参考文献	233
附录一	235
附录二	236
附录三	242
附录四	244

第 1 章

拍卖算法及应用

1.1 拍卖算法概述

拍卖是一种市场机制,以参与人的出价作为基础,来决定资源的分配与价格,其起源可以追溯到公元前 500 年的中亚巴比伦^[1]。而作为一个理论出现是在 1961 年,威廉·维克瑞(William Vickrey)发现拍卖的核心思想就是博弈,因此尝试运用博弈论知识解决拍卖问题,并提出拍卖理论的基本研究思想及方法^[2]。经过 60 多年的研究,拍卖理论形成了完整的理论体系,在商业等领域发挥着重要作用,从电信频段的分配,到搜索引擎的竞价拍卖,从电力资源的调配,到倒闭企业的破产重组,都离不开拍卖博弈^[3]。2020 年诺贝尔经济学奖更是被分别授予对拍卖理论做出突出贡献的保罗·米尔格罗姆(Paul R. Milgrom)和罗伯特·B. 威尔逊(Robert B. Wilson)两位斯坦福大学教授。

拍卖算法就是建立在拍卖理论的基础上,通过仿真实际的拍卖过程来求解指派问题,它最早由 Bertsekas 于 1979 年提出^[4]。在拍卖算法执行过程中,投标人对目标物品进行出价,提高物品价格,拍卖师根据投标人的出价,将物品分配给投出最高出价的投标人。拍卖算法属于分布式算法,与集中式算法相比,对中心节点的依赖性小,拥有更好的可扩展性和鲁棒性^[5]。如今拍卖算法已发展为一种综合性算法,用于求解指派问题、最小费用流问题、最短路径问题等。

1.2 拍卖算法基本术语和思维导图

拍卖算法是一种分布式算法,其各个阶段都具有高度的并行性,可以选择同步或者异步实现,非常灵活,同时相比于其他算法,其运行效率高,计算复杂度低^[6]。因此拍卖算法适用于组合优化算法的多种变体,可以解决分配问题以及具有线性成本和凸成本/非线性成本的网络优化问题^[7]。

1.2.1 基本术语

拍卖算法及应用的基本术语如表 1-1 所示。

表 1-1 拍卖算法及应用的基本术语

术语	解释
投标人	通过对想要的物品出价来竞争物品的所有权的实际个体或虚拟个体
价值	物品可以带给投标人的收益
价格	投标人的出价
净利润	投标人最终的收益,等于价值减去价格
价格向量	所有物品的价格所组成的向量
分配问题	也称作指派问题,是一种整数规划问题,要求为 n 个人分配 n 项任务,人和任务必须一一对应,寻找一种分配方式使完成 n 项任务的总效率最高
指派	投标人和物品的二元对所构成的集合
可行指派	如果每个投标人和物品都被指派,则称为可行指派
部分指派	如果存在未被指派的投标人和物品,则称为部分指派

1.2.2 思维导图

拍卖算法思维导图如图 1-1 所示。

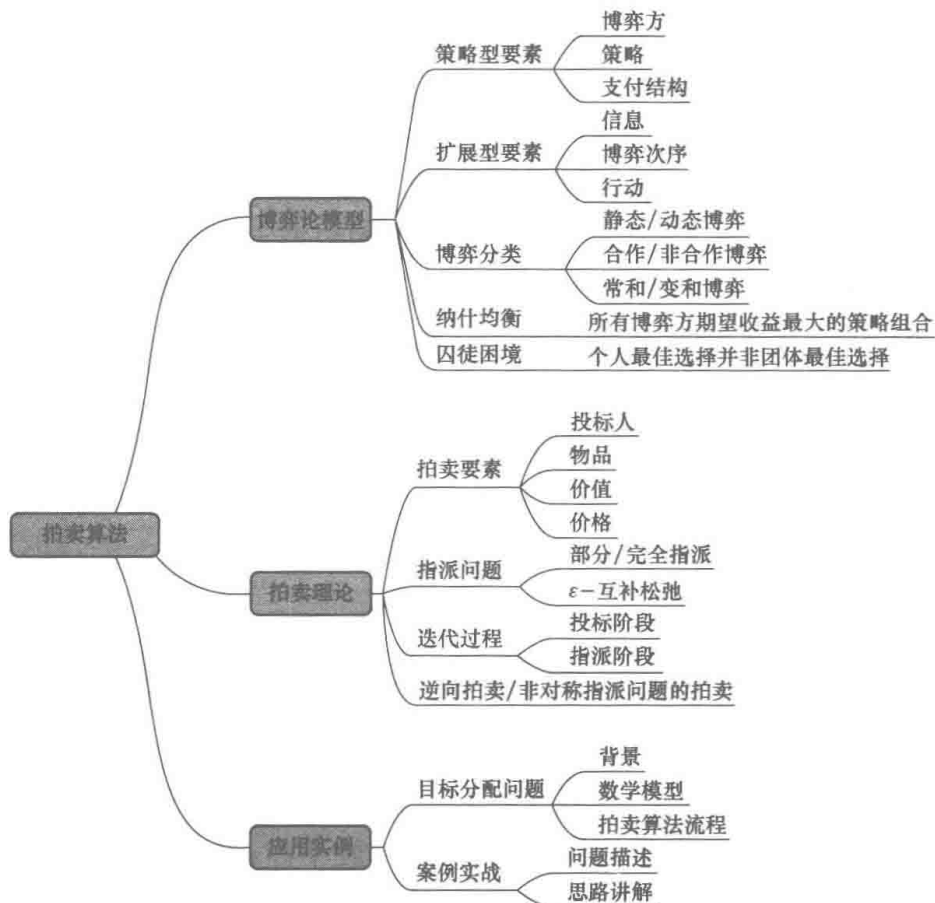


图 1-1 拍卖算法思维导图

1.3 拍卖的博弈论模型

1.3.1 拍卖与博弈论

拍卖本身就是一个博弈的过程。博弈的基本假设包括：每个博弈方充分了解整个博弈结构；每个博弈方都是充分理性的；每个博弈方的决策是独立的。而拍卖中的基本假设包括：每个投标人对拍卖物都有一个固定的估值；在竞拍过程中，如果竞拍的价格低于投标人的估值，则投标人继续竞拍直到中标，如果竞拍的价格高于投标人的估值，则退出竞拍。博弈论的三个基本要素为：博弈方、策略和收益。而在拍卖中，投标人就是博弈方，策略是竞拍者在固有估值下竞拍过程中的出价，如果中标，则收益是估值减去中标时的出价，如果没有中标，则收益为零。

在博弈论中，博弈方通过选择有限的策略，来达到自己最优的收益。在拍卖中，竞拍者通过在固定估值下的出价，为自己带来最优的回报。不同的选择，带来不同的收益。在经典博弈中，通过损益矩阵、纳什均衡、严格占优策略来帮助博弈方分析博弈，从而更好的做出选择。在拍卖中，相比经典博弈更加复杂，因为出价既跟策略相关，也跟回报相关。出价高，则回报低，但中标的概率大；出价低，则回报高，但中标的概率小^[8]。

因此为了学习拍卖算法了解博弈论知识是有必要的，下面介绍博弈论的相关知识。

1.3.2 博弈论的发展历程

1. 博弈论的起源

博弈原始思想的起源可以追溯到两千多年前。例如，《史记》中记载的“田忌与齐王赛马”就是一个典型的博弈案例，还有春秋战国时期出现的围棋、六博等博弈游戏。国外的《梨俱吠陀》《圣经》《摩诃婆罗多》等书中也详细记载了骰子游戏等博弈案例^[9]。

2. 现代博弈论理论的建立

诺伊曼和摩根斯坦 1944 年合著的《博弈论与经济行为》可以称为现代博弈论的开端，此书认为在所有的二人零和博弈中，如果允许使用混合策略，必然存在一个理性的决策规则解，该解中所有博弈方都将采用最小最大化策略。但是他们并没有将研究拓展到两人博弈、零和博弈之外，同时他们的“最小最大定理”不但迷惑了许多博弈论学者，也束缚了博弈思维在其他社会科学领域的延伸。尽管如此，他们的分析方式仍然成为一种研究规则：即将一个经济问题表示为一种博弈，求解其博弈论解，最后再对该解赋予经济学意义的解释。

3. 博弈论的发展

到了 20 世纪中叶，塔克、纳什等人相继提出了囚徒困境、纳什均衡等概念，博弈论才开始真正发展。塔克定义的囚徒困境，将博弈论分析扩展到了非零和博弈，促进了后续

非合作博弈的出现。之后他的学生纳什在《N人博弈的均衡点》和《非合作博弈》两篇论文中,从囚徒困境发展出了后来被称为“纳什均衡”的概念,同时证明了有限博弈中纳什均衡的存在性定理。从此,纳什均衡成为现代主流博弈论和经济理论的重要基础。与此同时,合作博弈领域也出现了许多成果,例如夏普利(Shapley)和纳什提出的经典“讨价还价”模型,以及夏普利和吉利斯(Gillies)提出的合作博弈中的“核”(Core)的概念^[10]。

1.3.3 博弈的相关概念

1. 博弈的定义

博弈是指个人、团队或其他组织,面对特定的环境及规则,同时或先后,一次或多次,选择并实施可行策略,获得相应结果的过程。

2. 策略型博弈的基本要素

基本的静态博弈我们常常用策略型(标准型)博弈结构来表示。博弈的策略型表述的基本因素包括:博弈方、每个博弈方可行的策略、得益函数。博弈方、行动和结果可以统称为“博弈规则”。

(1) 博弈方:在博弈中所有具备决策权的参与者都称为博弈方。

(2) 策略:可供博弈方选择的一个可行的全局行动方案。

(3) 支付结构:对应所有选择的策略组合所产生的固定收益或期望效益。

(4) 策略型或标准型:反映了所有可能的策略组合所产生的支付情况,主要包括博弈方集合、博弈方策略组合空间以及得益函数。

(5) 损益矩阵:反映所有可能的行动组合给博弈方带来的损益情况的矩阵,通常用来表示有限双人博弈的标准型。

3. 扩展型博弈的基本要素

当博弈是动态的或者信息不完全时,通常用扩展型博弈结构表示。扩展型博弈的构成是在策略型博弈的基础上增加博弈的先后顺序,以及博弈方在行动时掌握的信息。

(1) 信息:博弈方有关博弈的知识,由博弈方特征、策略空间以及支付结构等组成。

(2) 博弈次序:在涉及多个独立博弈方时,需要考虑行动的先后顺序问题。

(3) 展开型和博弈树:相对于策略型为静态博弈的表达式,展开型为动态博弈的表达方式,且常用博弈树来形象化表示,包括节点、路径、信息集等要素。

(4) 行动和行为:博弈方在博弈的某一阶段的决策变量。

4. 其他概念

除上述两类博弈的表达式外,还有一些概念是博弈论中经常用到的,也是博弈理论的基本概念^[11]。

(1) 均衡:策略组合中的策略均为博弈方的最佳策略。

(2) 均衡策略:博弈方在最大化各自支付时所选取的策略。

(3) 共同知识:通常假设博弈的结构、博弈方的理性以及得益函数等都是共同知识,即对所有博弈方而言都是常识。

(4) 可理性化策略:符合可理性化要求的策略称为可理性化策略,即理性的博弈方清