

国家社会科学基金项目

博弈逻辑理论与方法

张峰 著

BOYI LUOJI LILUN YU
FANGFA



人民出版社

国家社会科学基金项目

博弈逻辑理论与方法

张峰 著

BOYI LUOJI LILUN YU

FANGFA

人民出版社

责任编辑:杜文丽

封面设计:徐 晖

图书在版编目(CIP)数据

博弈逻辑理论与方法/张 峰 著. —北京:人民出版社,2017.3

ISBN 978-7-01-016168-6

I. ①博… II. ①张… III. ①博弈论-逻辑学-研究 IV. ①O225-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 093309 号

博弈逻辑理论与方法

BOYI LUOJI LILUN YU FANGFA

张 峰 著

人民出版社 出版发行

(100706 北京市东城区隆福寺街 99 号)

北京龙之冉印务有限公司印刷 新华书店经销

2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月北京第 1 次印刷

开本:710 毫米×1000 毫米 1/16 印张:16.5

字数:270 千字

ISBN 978-7-01-016168-6 定价:56.00 元

邮购地址 100706 北京市东城区隆福寺街 99 号

人民东方图书销售中心 电话 (010)65250042 65289539

版权所有·侵权必究

凡购买本社图书,如有印制质量问题,我社负责调换。

服务电话:(010)65250042

目 录

导 论	1
第一章 博弈逻辑溯源及发展	9
第一节 博弈逻辑的历史	9
一、不同的文化,不同的智慧结晶——中西博弈思想 脉络	9
二、博弈论的发展和完善——博弈逻辑的理论基础	15
三、博弈论与逻辑学的握手——博弈逻辑的创立	19
第二节 博弈逻辑研究现状	20
一、非合作博弈逻辑研究	20
二、多主体合作博弈逻辑研究	33
第三节 博弈逻辑研究中存在的问题	40
一、非合作博弈逻辑面临的困境	40
二、多主体合作博弈逻辑研究中存在的问题	41

第二章 博弈逻辑概述	45
第一节 博弈逻辑概念及分类	46
一、博弈逻辑的概念界定	46
二、博弈逻辑的分类	49
三、博弈论与博弈逻辑的关系	52
第二节 博弈逻辑中的公共知识	55
一、公共知识的概念	56
二、博弈中的公共知识	58
第三节 博弈逻辑中的均衡	59
一、纳什均衡	61
二、子博弈精炼纳什均衡	64
三、贝叶斯纳什均衡	67
四、精炼贝叶斯纳什均衡	71
第三章 双主体零和博弈逻辑	74
第一节 双主体零和博弈逻辑形式系统	74
一、语法和语义	74
二、双主体零和博弈逻辑中的互模拟	77
三、公理系统	79
第二节 双主体零和博弈逻辑嵌入 μ -演算	81
一、 μ -演算	81
二、把双主体零和博弈逻辑嵌入到 μ -演算中	84
第三节 双主体零和博弈逻辑模型检测的复杂性	88

第四章 克里普克模型上的博弈逻辑	94
第一节 Kripke 模型上博弈逻辑的语义解释	94
第二节 GL 与 PDL、 μ -演算表达力比较	96
一、GL 与 PDL 表达力的比较	96
二、GL 与 μ -演算表达力的比较	97
第三节 Kripke GL 公理系统与归纳公理	98
一、Kripke GL 公理系统	98
二、归纳公理	100
第五章 博弈逻辑中的演绎法与归纳法	103
第一节 博弈逻辑中的演绎推理与归纳推理的适用范围	104
一、博弈信息确定推理类型	104
二、博弈均衡视角下的不同推理	105
第二节 纯策略纳什均衡与演绎推理	107
第三节 混合策略纳什均衡与归纳推理	110
一、不存在纯策略纳什均衡博弈中的归纳推理	111
二、存在多个纯策略纳什均衡博弈中的归纳推理	113
第四节 重复博弈中的推理	118
一、存在纯策略纳什均衡的有限次重复博弈	118
二、存在纯策略纳什均衡的无限次重复博弈	122
三、不存在纯策略纳什均衡的重复博弈	124
第五节 博弈行为中的归纳学习机制	126
第六节 博弈逻辑中纳什均衡预测的可靠性分析	130
一、博弈中纳什均衡预测的价值	131

二、纳什均衡预测存在的不足·····	133
第六章 动态博弈中的分析方法——逆推归纳法 ·····	135
第一节 逆推归纳法推理的逻辑机制·····	135
一、动态博弈的非对称性特点·····	136
二、逆推归纳法推理的步骤·····	137
第二节 逆推归纳法面临的困境——悖论·····	140
一、连锁店悖论·····	141
二、有限重复囚徒困境·····	143
三、蜈蚣博弈悖论·····	144
第三节 关于逆推归纳法是否有效之争·····	147
一、对逆推归纳法有效性的确证·····	147
二、对逆推归纳法有效性的质疑·····	149
第七章 蜈蚣博弈的逆推归纳法分析 ·····	152
第一节 蜈蚣博弈的模型·····	152
一、蜈蚣博弈的原始模型·····	152
二、蜈蚣博弈的其他模型·····	155
三、蜈蚣博弈的基本特征及内涵·····	160
第二节 蜈蚣博弈悖论中决策影响因素分析·····	164
一、蜈蚣博弈中参与人的决策分析·····	164
二、影响参与人决策的主要因素·····	167

第八章 逆推归纳法悖论解悖探索	170
第一节 逆推归纳法悖论成因分析	170
一、收益信息是影响参与人决策信念的决定性因素	171
二、参与人身份是影响决策信念的主要原因	175
三、参与人的信念变化是导致逆推归纳法悖论的最终原因	179
第二节 前人对逆推归纳法悖论的研究路径	183
一、实验方法进行解悖研究	183
二、理论解悖思路	186
第三节 基于信念变化的逆推归纳法悖论解悖分析	188
一、逆推归纳法的推理难题	188
二、参与人信念变化的分析	190
三、一种解悖新思路——将主体的主观感受计入收益	198
第九章 投票悖论分析	202
第一节 投票悖论的提出	202
第二节 对投票悖论的探索	206
一、国外学者的研究	206
二、国内学者的研究	212
第三节 消解投票悖论的新方向——投票规则的选择	213
第十章 博弈逻辑理论基石之夯实	217
第一节 博弈逻辑未来发展需要解决理性人假设的困境	218
第二节 个体理性与集体理性的冲突	221

第三节 完全理性迈向有限理性.....	229
结 语	238
参考文献	241
后 记	252

导 论

在现实生活中,人们经常会遇到一些关于决策行为相互影响的情况,而这些情况在政治、经济、军事、国际关系和外交、体育竞技等众多领域中也常常出现。比如说 OPEC(石油输出国组织)成员国家要选择石油的生产产量;朝核问题中的朝鲜与美国之间的关系等,所有这些事情都会涉及决策者之间决策行为的相互影响,也会涉及到决策者的策略选择。

博弈论是研究理性的决策者的策略行为相互作用的理论。在博弈论中,参与者一方面猜测其他参与者的策略,同时计算各种策略可能下的支付,即求对局的解。然而在实际中,一般情况下,人们是很难计算得益的,人们经常通过逻辑推理来确定自己的行动。博弈逻辑是近年来兴起的一个博弈论和逻辑学交叉的一个新的研究领域。博弈逻辑研究理性的主体互动行动中的推理过程,即研究博弈中的推理问题。

目前,对博弈论的研究相对比较成熟和完善,博弈论已经渐成“显学”经济学皇冠上最闪亮的明珠;而博弈逻辑还处于初创时期。不同的学者沿着不同的路径对博弈逻辑进行研究。一方面,对非合作博弈逻辑展开研究;另一方面,对合作博弈逻辑进行探索。博弈逻辑中对非合作逻辑的研究是研究的主流。

著名的国际逻辑期刊《逻辑研究》(Studia Logica)在2003年11月出版了博弈逻辑的专刊,发表了系列论文:《博弈逻辑综述》(Marc Pauly, Rohit Parikh, Game Logic—An Overview);《逻辑博弈对于博弈逻辑是完全的》(Johan van Benthem, Logic Games are Complete for Game Logics);《博弈等价的基本代数》(Valentin Goranko, The Basic Algebra of Game Equivalences);《博弈代数的描述》(Yde Venema, Representation of Game Algebras),概述了博弈逻辑的最新研究动态,标志着博弈逻辑作为一个新的研究领域已在国际学术界得到公认。

2008年以来,阿姆斯特丹大学出版社出版了关于博弈与逻辑的系列论文集,主要有:《互动逻辑》(Edited by Johan van Benthem, Benedikt Löwe, Dov Gabbay, *Interactive Logic*, 2008, 11);《逻辑与自动控制》(Edited by Jörg Flum, Erich Grädel, Thomas Wilke, *Logic and Automata: History and Perspectives*, 2008, 7);《关于博弈和互动的最新前景》(Edited by Krzysztof Apt, Robert van Rooij, *New Perspectives on Games and Interaction*, 2009, 6);《逻辑、博弈基础和决策论》(Edited by Giacomo Bonanno, Wiebe van der Hoek, Michael Wooldridge, *Logic and the Foundations of Game and Decision Theory*, 2009, 6);《关于社会软件的论述》(Edited by Jan van Eijck, Rineke Verbrugge, *Discourses on Social Software*, 2010, 8);2014年7月剑桥大学出版社出版了荷兰阿姆斯特丹大学教授约翰·范·本瑟姆(Johan van Benthem)的著作《逻辑的信息动态与互动》(*Logical Dynamics of Information and Interaction*),标志着博弈逻辑在近年中取得了新进展。

国外学者对非合作博弈逻辑的研究围绕两条路径展开——结合动态逻辑和结合模态逻辑进行研究。居主流的学派是结合动态逻辑研究博弈逻辑。纽约城市大学教授帕里克(Rohit Parikh)在1985年发表了《博弈逻辑

及其应用》(The Logic of Games and Its Applications, *Annals of Discrete Mathematics*, 24, Elsevier)一文,首次提出了博弈逻辑的概念,对博弈逻辑进行了介绍,他把博弈逻辑看成是命题动态逻辑(PDL)的扩展;荷兰阿姆斯特丹大学教授约翰·范·本瑟姆认为博弈逻辑用形式化的语言提供精致的结构来描述博弈中的策略均衡,他指出博弈可以被看作是用规范的逻辑语言、与语义双模拟相关的概念、结构代数等标准工具来研究的多主体程序,并认为这可以看作是博弈论的补充。他进一步发展了两种模拟程序理论的博弈逻辑,即动态博弈逻辑和线性博弈逻辑。日本筑波大学的金子守(Mamoru Kaneko)教授则结合模态逻辑系统,探索建立初步的博弈逻辑系统,由于他的研究是从静态角度出发的,没有考虑动态的因素;他的研究思路未能成为当今世界博弈逻辑研究的主流。

近年来,学者们对博弈逻辑的研究不仅仅局限于非合作博弈逻辑研究领域,开始逐渐向合作博弈逻辑研究的领域拓展。对合作博弈逻辑的研究主要侧重于在多主体系统内博弈逻辑的探索。多主体合作博弈逻辑研究多主体系统中联盟策略能力的推理。国外学者对多主体合作博弈逻辑的研究主要是围绕着联盟逻辑(Coalition Logic)和交互时态逻辑(Alternating-time Temporal Logic)两条线索展开。联盟逻辑是法国学者波利(Marc Pauly)在他2001年的博士论文《关于社会软件的逻辑》(Logic for Social Software, PhD thesis, University Of Amsterdam)中最早提出的,并对其进行了初步研究,联盟逻辑提出之后,学者们对联盟逻辑进行研究及拓展;多主体合作博弈逻辑研究的另一分支是由美国宾夕法尼亚大学的Rajeev Alur教授等人于1997年提出并于2002年完善,最终发表于《Journal of the ACM》上的交互时态逻辑ATL/ATL*(Alternating-time Temporal Logic)。为了对ATL/ATL*进行语义描述,Rajeev Alur等人提出了并发博弈结构。德国克劳斯塔

尔(Clausthal)工业大学的 Wojciech Jamroga 等人在 ATL 中引入了意图算子以增强 ATL 的表达能力,他们构建了 ATL+I(ATL with Intentions),通过博弈论中的概念如纳什均衡等,表达理性意图的推理。比利时学者 P. Y. Schobbens 研究了带有不完美记忆的交互时态逻辑的 ATLir(ATL with Imperfect Recall),使 ATL 在博弈中对于联盟策略能力的推理更接近现实。国外学者对多主体合作博弈逻辑的研究,主要体现为与认知逻辑的融合;与 BDI 逻辑各算子的融合;与动态逻辑的融合;与博弈论中相关重要概念的融合,如策略、不完全信息、不完全记忆等;以及对相应的多主体合作博弈逻辑进行形式系统建构和模型检测。

但是从世界范围看,博弈逻辑研究尚不成熟和完善,缺乏进一步系统深入的研究;更为重要的是博弈逻辑完善的形式系统的建构还面临重重困难。

在国内,对博弈逻辑的研究十分薄弱,还存在许多值得深入研究的课题。还需要更多的学者加入进来,从不同的角度对博弈逻辑进行研究,从而进一步提升其理论深度、拓展其应用价值。

逻辑学自产生以来,就被认为是一门应用性学科,从亚里士多德的《工具论》到培根的《新工具》,再到当前逻辑学在众多学科和社会领域中的应用,逻辑一贯与应用密不可分。近年来,逻辑学发展的重要特征是与其它学科的不断交叉融合,推动着逻辑学和其他学科共同发展。逻辑学在数学、法学、认知科学、语言学、计算机科学、人工智能等众多学科中广泛应用,催生了许多属于应用逻辑学科群的新兴交叉学科,如法律逻辑、语言逻辑、博弈逻辑等。应用逻辑在 20 世纪中后期获得了迅速发展,进入 21 世纪,重视应用逻辑研究已成为国际逻辑学界的共识。2006—2007 年,由世界上 17 位著名逻辑学家编写的两卷本《应用逻辑的数学问题:21 世纪的逻辑》出版,标志着应用逻辑成为 21 世纪逻辑学研究的主流之一。博弈逻辑作为应用

逻辑学的分支学科之一,研究博弈逻辑是拓展逻辑学和推动相关学科发展的需要。

本书的研究是在非合作博弈逻辑的框架下进行的。在本书中,作者建构了双主体零和博弈逻辑和克里普克模型上博弈逻辑的形式系统;从博弈逻辑的基本理论着手,从方法论的角度切入,探讨了博弈逻辑的历史与现状、博弈逻辑的分类、博弈逻辑中的公共知识、均衡等基本理论,在此基础上分析了博弈逻辑中的演绎法、归纳法及逆推归纳法,并对博弈逻辑中的瓶颈问题,逆推归纳法悖论、投票悖论、博弈逻辑理论基础的夯实等问题进行针对性的分析、研究。

作者在国内学者已有研究的基础上,在注重研究的相对系统性和完整性的同时,力图在以下方面有所创新。

第一,突出难点,建构了双主体零和博弈逻辑和克里普克模型上的博弈逻辑的形式系统。

目前,双主体零和博弈逻辑是国际上非合作博弈逻辑研究的重心。本书对双主体零和博弈逻辑和克里普克(Kripke)模型上的博弈逻辑进行了系统研究。

双主体博弈逻辑就是两个各自独立决策,但策略和利益具有相互依存关系的博弈方如何合理选择策略的逻辑。零和博弈逻辑研究的是博弈双方得益之和等于零的情况,在零和博弈中,博弈方的利益是完全相反的,没有任何调和的余地。双主体零和博弈逻辑也称为“严格竞争博弈逻辑”。本书对双主体零和博弈逻辑的语法、语义、公理系统,如何把双主体零和博弈逻辑嵌入 μ -演算,双主体零和博弈逻辑模型检验的复杂性进行了探索。

当在Kripke-模型上解释博弈逻辑时,基本的原子博弈假定为1人博弈,也就是程序。在原子博弈上的所有选择都是由第一个博弈方(即参与

人1)进行的,所有互动都是通过博弈建构来引入的,更具体地说,是通过对偶算子进行的。这样,即使在 Kripke-模型上,通过博弈逻辑运算建构的博弈允许一人去建构博弈,但所有互动都建构在非原子和语法的层次上。本书主要研究了 Kripke 模型上博弈逻辑的语义解释,博弈逻辑与命题动态逻辑、 μ -演算表达力比较,Kripke 博弈逻辑公理系统与归纳公理。

第二,采用跨学科研究方法,借鉴与博弈逻辑相关的相对成熟的学科领域,对博弈逻辑中的推理展开研究。

本书在博弈逻辑研究中,借鉴相对成熟的博弈论的某些理论,将纳什均衡引入到逻辑学中,分析博弈中的推理问题。纳什均衡来源于博弈论,博弈逻辑作为新创的研究领域,理应从比较成熟的博弈论中吸取精华,从而站在更高的起点、从不同的角度进行研究。

博弈逻辑的核心是通过研究推理寻求各博弈方合理的策略选择。博弈过程是一个推理过程,也是寻求纳什均衡的过程。本书运用跨学科的研究方法,在引入纳什均衡概念及理论的基础上,研究博弈逻辑中的演绎推理与归纳推理。分析了寻求纯策略纳什均衡和混合策略纳什均衡过程中运用的不同类型的推理,把纳什均衡理论与逻辑学中的推理方法紧密地联系起来,并对重复博弈中的推理进行了重点分析,研究了博弈行为中的归纳学习机制,对博弈逻辑中纳什均衡预测的可靠性进行分析。本书引入纳什均衡分析博弈行为中的推理,也凸显了博弈逻辑中推理与传统逻辑中推理的差异及独特性。

第三,从国外学者研究的薄弱点和瓶颈问题着手,寻求创新与突破。

博弈逻辑发展中存在的瓶颈问题,如悖论问题、博弈逻辑理论基石的夯实等,是目前在博弈逻辑研究中亟需探索和解决的。本书对这些问题进行了分析、思考,并探索解决问题的途径,将已有的研究进一步推进。

本书对博弈逻辑中的悖论问题进行了探讨,探析了逆推归纳法悖论的概念及典型悖论,对有关逆推归纳法悖论的争论进行了梳理与辨析;以蜈蚣博弈悖论为例,提出了逆推归纳法悖论的解悖新思路;并且对投票悖论进行了研究,探讨了投票悖论的解悖方案;在此基础上研究了博弈逻辑的理论基石的夯实路径。

“逆推归纳法”是一种分析完全且完美信息动态博弈,寻求子博弈精炼纳什均衡的方法。逆推归纳法在逻辑上是严密的,然而它存在着“困境”。如果人们在博弈中的真实行动与运用逆推归纳法所得到的关于博弈的理论预测不一致,就会产生悖论,这是一种合理行为悖论。本书剖析了逆推归纳法的典型悖论——“蜈蚣博弈悖论”、“有限重复囚徒困境”及“连锁店悖论”,分析了逆推归纳法悖论产生的原因。本研究认为,参与人的信念变化是导致逆推归纳法悖论的最终原因,而收益信息和参与人身份是影响决策者信念的主要因素,并提出了基于信念变化的逆推归纳法悖论解悖新思路。

投票博弈(Voting Game)是一种特殊的博弈,以投票方式进行的集体决策可以看作多主体博弈。在投票博弈中,每个投票人对候选人或者候选方案存在着偏好,并且可以对之进行排序。投票博弈中最著名的悖论是循环投票悖论。对于投票悖论问题,本研究对已有的关于投票悖论的探索作了全面的梳理和评价,并提出了消解投票悖论的新方向——投票规则的选择。

对于博弈逻辑中悖论问题的研究不仅能促进博弈逻辑的发展,而且对于逻辑悖论领域的研究也意义重大。逆推归纳法悖论的研究对于博弈逻辑的基本方法产生冲击,在理论上有助于完善分析博弈的方法,在一定程度上可以完善归纳理论和演绎理论。通过投票悖论的研究发现人为设计的投票顺序和规则,对投票的结果能够产生重大的影响。博弈逻辑中悖论的研究意义最主要地体现在理论分析与现实互动的一致性完善方面。博弈逻辑中

的悖论属于合理行为悖论,它是一种新型的语用悖论。对于合理行为悖论的探讨,是逻辑悖论研究通向实践的桥梁,对它的研究更能凸显出悖论研究的应用价值。

本书对于博弈逻辑的理论基石——理性人假设进行了深入分析,指出了夯实博弈逻辑的理论基石是博弈逻辑理论不断成熟和完善的基础,并提出了由完全理性假设迈向有限理性假设的研究路径。

本书是作者主持的国家社会科学基金项目《博弈逻辑研究》(项目编号:07CZX018)的结项成果。本书亦为作者目前正主持的国家社科基金项目《大数据视域下科学方法创新研究》(项目编号:15BZX040)奠定了方法论的基础。本书在非合作博弈逻辑框架下进行研究,研究内容分为四部分共十章。第一部分是博弈逻辑的研究基础,包括第一章和第二章。具体研究博弈逻辑的历史与现状;博弈逻辑基本理论概述。鉴于国内博弈逻辑的研究还比较薄弱,在本章中重点分析国外的最新研究进展包括非合作博弈逻辑与多主体合作博弈逻辑的研究现状及存在问题;第二部分研究博弈逻辑的难点,即建构双主体零和博弈逻辑和克里普克模型上的博弈逻辑的形式系统,包括第三章和第四章;第三部分研究博弈逻辑中的方法,包括第五章至第六章。着重研究了博弈逻辑中的演绎法与归纳法,探讨了动态博弈中的分析方法——逆推归纳法,为博弈逻辑中悖论的探讨奠定了基础;第四部分研究目前博弈逻辑研究中存在的瓶颈问题,包括第七章至第十章。首先以蜈蚣博弈为例,进行了该博弈的逆推归纳法分析,探讨了蜈蚣博弈的基本特征及蜈蚣博弈悖论中决策的影响因素;进而对逆推归纳法悖论进行解悖分析;探索了投票悖论的解悖方案;作者尤其重点分析了博弈逻辑中理论基石的夯实的必要性及路径。本书最后在结语中对博弈逻辑的未来发展趋势进行了展望。