

无线网络中的 博弈论研究

Game Theory for
Wireless Engineers

【美】 Allen B. MacKenzie 著
Luiz A. DaSilva
龙飞 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

Game Theory for Wireless Engineers

无线网络中的 博弈论研究

[美] Allen B. MacKenzie 著
Luiz A. DaSilva

龙飞 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2011-159 号

图书在版编目(CIP)数据

无线网络中的博弈论研究/(美)麦肯齐(Mackenzie, A. B.),
(美)达席尔瓦(Dasilva, L. A.)著;龙飞译. —北京:国防
工业出版社, 2012. 3

书名原文: Game Theory for Wireless Engineers

ISBN 978-7-118-07990-6

I. ①无... II. ①麦... ②达... ③龙...

III. ①博弈论-应用-无线网-研究 IV. ①TN92-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 028833 号

Original English Language Edition Published by Morgan and Claypool Publishers

Copyright ©2011 Morgan and Claypool Publishers

All Rights Reserved Morgan and Claypool Publishers

版权所有, 侵权必究。

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 6½ 字数 71 千字

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 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

译 序 一

博弈论是指研究多个个体或团队之间在特定条件下的对局中,依据相关方的策略而实施对应策略的学科。其思想古已有之,我国享誉世界的军事名著《孙子兵法》即可算是最早的一部博弈论专著。近代博弈论的概念首次由冯·诺依曼于1944年提出,并对其进行了系统化和形式化。此后博弈论得到了快速的发展,并被广泛应用于经济学和政治学等领域。

本书原著“Game theory for wireless engineers”系统地介绍了博弈论的基本概念及其在无线网络设计中的应用。虽然国内已有不少关于博弈论的书籍,但介绍博弈论在某一特定领域应用且兼顾博弈论初学者的专著却比较少见。本书由浅入深地逐次介绍了博弈论的基本概念、运用实例及在无线网络中的应用,层次分明、结构合理、言简意赅。因此本书不仅适合以无线网络为研究对象的广大研究人员阅读,也适合没有任何博弈论基础,想了解并应用博弈论的研究者入手。

原著自2006年出版以来,广受业界的欢迎和好评。原著的作者皆为美国无线网络领域的一线研究人员,在无线网络通信领域有一定的学术地位,并获得了美国国家自然科学基金和美国海军研究署等多家单位的基金支持。加之本书的研究内容属于科研前沿,使得本书具有较高的学术价值。

本书的译者有着丰富的科研经历和较多的学术成果,曾在中国科学院和清华大学参与多项国家自然科学基金研究和“863”计划项目研究。译者于香港科技大学的博士后研究与博弈论在无线网络中的应用密切相关,并且已经出版译著一部。此外,他在德国汉堡大学和美国耶鲁大学共计一年半的访学经历也锻炼了其翻译能力,保证了本书的翻译质量。



中国电子科技集团公司第 54 研究所所长

2011 年 10 月 7 日

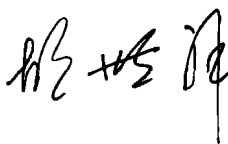
译序二

博弈论是一门古老而又年轻的学科。说它古老是因为博弈论的思想两千多年前已经产生。春秋时期吴国著名军事家孙武的旷世名作《孙子兵法》就可以被认为是一部博弈论专著,之后的众多兵书和韬略类书籍都可以被归入此类。顾名思义,凡是研究弈棋、战争等对抗性行为策略的都可被称为博弈论。说它年轻是因为博弈论(Game Theory)的概念直到1944年才被美国数学家和计算机科学家冯·诺依曼提出,并被系统化、形式化和正规化。博弈论由此得到了迅速的发展并首次进入了经济学领域,目前已经成为经济分析的主要工具之一。此外,博弈论还被广泛应用于政治学、运筹学等领域中。

本书是一部关于博弈论在无线网络领域中应用的专著,书中系统地介绍了博弈论的基本元素、应用实例和在无线网络中的具体应用。它虽然是一部专业书籍,内容却并不艰深。这是因为作者用浅显的语言简要地介绍了博弈论的原理与基本概念。这使得没有博弈论基础的研究者阅读起来也没有任何障碍,故适用范围很广,甚至可以当作博弈论的入门书籍。本书的作者都来自于美国无线网络领域科研的第一线,获得了美国自然科学基金、海军研究署的大量资金支持,并从事相关研究数年。这保证了本书的质量,并使得本书有较高的参考价值。本书的前两章涉及无线网络领域的内容较少,非无线网络研究者可以据此进行选择性的阅读。而有博弈论基础的无线网络研究者又可以跳过这些章节,直接进入后续章节阅读关于无线网络

应用方面的内容。

本书的译者自 2005 年起于清华大学攻读博士学位期间即组织并参与过多部科技专著的翻译工作,并出版译著一部。由于经常出席各类国际会议且具有在世界顶级大学交流学习的经历,故笔译能力较强。其在香港科技大学期间的博士后研究方向正是博弈论在无线网络设计中的应用,这保证了翻译的准确性。

国际宇航科学院院士 

2011 年 10 月 2 日

前 言

近来有许多关于博弈论的书籍出版,其中大多数采用经济学或者数学的观点。然而在过去的几年中,博弈论在通信和网络领域的应用逐步变得流行和有效。更重要的是,博弈论模型被用来更好地理解有线和无线网络系统中的拥塞控制、路由、能量控制、拓扑控制、信任管理和其他一些问题。博弈论作为一种无线网络分析工具的预期很清晰:通过模型化独立的决策者,博弈论使我们可以模型化没有中心控制实体的整个网络场景,然而博弈论作为一种应用工具所面临的挑战并不是很明确。博弈论模型如同其他数学模型一样,可以抽象出重要的假设并解决关键的未知问题。希望这本书不仅能阐明博弈论作为一种网络分析工具的预期,也能为网络工程和研究人員指出应用博弈论时潜在的误区和困难。

我们不试图全面地覆盖博弈论及其在无线通信和网络中的应用。本书着眼于我们认为有必要向读者交代的博弈论及其在无线系统中应用的话题和其他一些我们可以提供细节描述的相关资料。

在第1章中,介绍博弈论及其应用的话题,不涉及数学细节。第2章展示决策和应用理论的基础。这些话题在其他介绍博弈论的经济学读本中经常会被忽略。我们不预期本书的读者是经济学系的学生,然而不掌握这种

基础知识会导致应用博弈论的错误。第3章介绍范式博弈。第4章扩展这个框架来涵盖重复博弈。第5章讨论势博弈和其他关于收敛至均衡点的结果。第6章讨论未来的研究方向。总体来说,我们试图将博弈论与无线通信和网络中的问题很好地融合起来。

感谢所有对本书做出贡献的人。我们的编辑 Bill Tranter 启发我们使用这种新的形式来撰写本书,同时对全书提出了很多详细的评论。我们的发行人 Joel Claypool 十分耐心地回答我们的问题并对我们的未能按时交稿表示宽容。审阅者们十分认真地给出了他们的意见,我们希望本书已经至少部分解决了他们提出的问题。

还要感谢点燃了我们对于博弈论和网络的兴趣,并持续支持我们的人: ABM 公司的 Steve Wicker 和 Larry Blume, LAD 公司的 Victor Frost 和 David Petr。

本书的工作部分基于美国海军研究署和国家自然科学基金的项目支持,项目号分别为: Nos. N000140310629 和 CNS - 0448131。本书中任何观点、发现、结论和评语都只代表作者个人,与海军研究署和国家自然科学基金无关。我们对这些赞助者的支持表示感谢。

Allen Brantley MacKenzie

于弗吉尼亚州布莱克本

Luiz Antonio DaSilva

于弗吉尼亚州阿灵顿

目 录

第 1 章 博弈论介绍	1
1.1 什么是博弈论	1
1.2 博弈论的起源	4
1.3 博弈论与无线通信和网络领域相关	5
1.4 如何正确应用博弈论	6
1.5 实例	8
1.5.1 能量控制	9
1.5.2 路由	10
1.5.3 信任管理	11
1.6 标识	12
1.7 后续章节	13
第 2 章 决策和收益理论	14
2.1 偏好关系	14
2.2 序数收益表示的存在性	16
2.2.1 有限集 X	17
2.2.2 可数集 X	18
2.2.3 不可数集 X	19
2.2.4 收益函数的唯一性	21

2.3	彩票偏好	22
2.3.1	von Neumann – Morgenstern 公理	23
2.3.2	von Neumann – Morgenstern 和基数收益表示的存在性	26
2.4	其他版本的期望收益表示	30
2.5	结论	32
第3章	策略式博弈	33
3.1	策略式博弈的定义	33
3.2	支配策略和支配策略的迭代删除	35
3.3	混合策略	37
3.4	纳什均衡	38
3.4.1	混合策略的处理	40
3.4.2	纳什均衡的讨论	40
3.5	纳什均衡的存在性	41
3.6	应用	45
3.6.1	网络资源定价	45
3.6.2	流控制	47
第4章	重复博弈和马尔可夫博弈	49
4.1	重复博弈	49
4.1.1	扩展式表示	50
4.1.2	重复博弈的均衡点	52
4.1.3	策略式重复博弈	53
4.1.4	节点合作:一个重复博弈的实例	55
4.1.5	“大众定理”	57
4.2	马尔可夫博弈:泛化重复博弈思想	61

4.3 应用	62
4.3.1 蜂窝网络中的能量控制	62
4.3.2 媒体接入控制	64
第5章 收敛至均衡点:势博弈	66
5.1 “最佳响应”和“更佳响应”动态	66
5.2 势博弈	69
5.2.1 定义和基本特性	69
5.2.2 收敛	70
5.2.3 认证	72
5.2.4 解释	73
5.3 应用:干扰避免	74
第6章 未来研究方向	76
6.1 无线通信和网络的相关研究	76
6.1.1 分布式决策中信息的作用	76
6.1.2 认知无线电与学习	78
6.1.3 突现行为	79
6.1.4 机制设计	79
6.1.5 变化模型	80
6.1.6 无线系统和网络中的合作	80
6.2 结论	81
参考文献	82
后记	88

第 1 章 博弈论介绍

本书的目的在于向无线工程师介绍博弈论。近年来出现了博弈论在无线通信和网络领域的大量有趣应用。我们努力给研究者和参与者提供了解和参与此项工作的必要工具,如提供一些关于如何使用博弈论的指导并挖掘博弈论应用的潜在方向。

博弈论相关的文献很多,本书不会一一枚举。相反,本书会选择一些我们感觉与无线网络建模非常相关的话题进行介绍。我们会对这些应用进行一个概述(文献[1]可能是对博弈论概述最全面的,虽然其并不包括一些最新的进展)。然而我们并非对先前博弈论在网络和通信方面应用的成果进行一个简单的综述。本书的目的在于提供一个指南。我们会列举一些博弈论的话题并展示它们可能会如何用来解决无线通信和网络中的问题。

本章会介绍博弈论的基本思想,简要介绍其历史,说明其对于无线研究者的重要性,并讨论如何避免在应用博弈论时的一些常见错误。本章还会简要介绍博弈论的一些应用实例,并对后续章节将要提到的主题进行一个简要的概括。



1.1 什么是博弈论

博弈论是一个分析工具包,此工具包可帮助我们了解决策者相互作用的现象。

——Martin Osborne 和 Ariel Rubinstein^[2]

博弈论为分析决策过程中的相互影响提供了数学基础,它提供了一些用于预测当具有利益冲突的代理之间相互作用时可能会(或应该会)发生什么的工具。它不是一项孤立的技术,而是一组用于帮助理解交互决策问题的建模工具。

一局博弈由三个基本组件构成:一组弈者、一组行动和一组喜好。弈者即模型化场景中的决策者。在一个无线系统中,弈者通常都是网络中的节点。弈者之间轮流采取行动。在动态扩展表博弈中,动作配置可能会随时间变化。在无线系统中,动作可能包括转换策略的选择、编码率、协议、流控制、传输能量级别,或其他节点可控的因素。当每个弈者选择了一个动作后,其相应的“动作集”决定了博弈的结果。

最终,每一个弈者的喜好关系体现了弈者对所有可能结局的评估。在许多情况中,喜好关系由一个收益函数表示。收益函数为每个有可能的输出分配一个值,较高的值代表较期望的输出。在无线环境中,弈者可能会倾向于有较高信噪比、较低比特错误率、更鲁棒的网络连接和较低能耗的输出,虽然在许多实际情况中,这些目标可能是冲突的。合理地模型化这些喜好关系是博弈论应用领域最具挑战性的课题之一。

现实中博弈的例子包括传统的一些策略类游戏,如棋类、扑克,在购买车房和生意中的策略协商。一些日常的群体决策,如决定和同事去哪里吃午饭或者与朋友或家人去哪里看电影也在此列。

博弈问题与优化问题有着显著的区别:前者必须包括多个决策者,而后者只需考虑一个决策者。博弈论只适用于每个代理的决策都是理性的情况。单个买家在杂货店里买杂货是一个优化行为,因为他试图以最少的钱购买最多的或者最令人满意的东西。虽然杂货商也可以通过设定价格来进行决策,但他更像一个被动的决策者,因为他不会由于单个买家的原因而调



整价格。另外,一个杂货店可能会卷入与同一地区其他店家的价格博弈中,店家会根据大多数消费者的决定而调整价格。在这个场景中使用博弈论模型是合适的。

类似地,如果某一区域只有一辆车,这辆车选择行驶路径以最快地到达区域中的某个地方的行为是一个优化行为。而当此区域中有许多辆车时,司机便被卷入了一场博弈。因为所有的司机都试图在不发生事故、不吃罚单的情况下尽快地到达其目的地。

对于一类传统的博弈,我们考虑表 1.1 所列的博弈。这是一个双弈者博弈。弈者 1 选择行,弈者 2 选择列。单元格中的每一个值表示的是每个弈者的收益函数,这些收益函数表示了弈者的喜好。第一个数表示的是弈者 1 的收益;第二个数表示的是弈者 2 的收益。这个博弈有一个参数 c , c 取值在 0 和 1 之间。

表 1.1 双弈者博弈

	T	W
T	$(-c, -c)$	$(1-c, 0)$
W	$(1-c, 0)$	$(0, 0)$

博弈论的一个目的在于预测博弈开始后会产生什么样的结果。最常用来进行结果预测的是“纳什均衡”。在纳什均衡点,所有弈者都没有单边改变策略的动力。表 1.1 所列的博弈具有两个纳什均衡点。它们分别是动作配置 (T, W) 和 (W, T) 。考虑动作配置 (T, W) 。在这种情况下,弈者 1 采取策略 T 并获取绩效 $1-c$,同时弈者 2 采取策略 W 并获得绩效 0。弈者 1 没有动力改变,因为将其策略改变为 W 会使其绩效从 $1-c$ (一个正数)变为 0。弈者 2 同样没有动力改变,因为将其策略改变为 T 会使其绩效从 0 变为 $-c$ 。

另外,考虑一个非纳什均衡行动配置(T, T)。从这个行动配置中,弈者 1 可以通过将其策略改变为 W 来增加其绩效。这个改变将使行动配置改变为(W, T),由此将弈者 1 的绩效从 $-c$ 变为 $1-c$ 。

第 3 章会提供纳什均衡的数学定义。通过接触“纳什均衡是什么,有什么作用”这样的哲学问题,可以帮助我们理解博弈何时会发生。

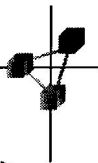


1.2 博弈论的起源

博弈论历史悠久,最早关于概率的研究可能会被认为是博弈论。它致力于机会博弈的研究,且并没有多个弈者。虽然没有现代博弈论的工具,1985 年,我们发现犹太法典(0-500AD)中预言了一些现代博弈论的结果^[3]。在现代,19 世纪和 20 世纪的科学家 Cournot, Edgeworth, Zermelo 和 Borel 为策略博弈的分析进行了奠基(关于博弈论的详细历史可见文献[4])。

然而,现代博弈论一般追溯至冯·诺依曼(John von Neumann)和摩根斯坦(Oskar Morgensgtern)于 1944 年出版的《博弈论与经济行为》一书。Von Neumann 和 Morgensgtern 对绩效理论的发展做出了毋庸置疑的贡献,如我们将在第 2 章中所述,这些贡献至今仍主导着经济学思想。我们在第 2 章中还会介绍合作博弈的正式概念。如很多博弈论的早期工作一样,他们研究的非合作博弈(现在是博弈论的主流)只关注相对简单的两弈者零和博弈。

在 1950 年—1953 年间发表的文献中,纳什(John Nash)对非合作和合作博弈都做出了巨大贡献^[5-7]。其最大的贡献莫过于证明了非合作博弈中均衡点的存在,也即纳什均衡^[5];我们将在第 3 章中介绍证明的细节。由于其贡献突出,纳什在 1994 年获得了为纪念诺贝尔(Alfred Nobel)所设立的诺



贝尔经济学奖。

这些早期工作得到了兰德公司的大力支持。此公司是第二次世界大战以后成立,专门对军事决策进行研究的一个机构。由于职责所系,兰德公司致力于为不确定条件下的决策开发工具并提供理论支持,这使得其贡献不仅局限于博弈论领域,还涉及了线性、动态规划和数学建模与仿真。博弈论的一个早期应用是研究冷战期间的国家决策^[8]。

由于许多早期的博弈论研究者都是经济学家,博弈论最成功的应用在经济学的一些革新领域就不那么令人惊奇了。本书中介绍的博弈论思想体现了经济学应用的各个方面,如绩效理论、信息应用策略、合作和群体博弈、独立弈者之间的合作问题、拍卖理论、激励机制的实现。

博弈论在其他领域也有很广泛的应用,包括政治科学、社会学、生物学和军事策略。在下一部分会讨论为什么我们相信博弈论有能力在无线通信和网络领域做出巨大贡献。



1.3 博弈论与无线通信和网络领域相关

Ad hoc 网络在过去数年中成为无线通信和网络领域最引人注目的研究热点。一个 Ad hoc 网络是一个没有中心控制者的自组织多跳网络。因此,Ad hoc 网络中的配置和操作的所有部分都需要完全分布式地完成。此外,Ad hoc 网络中的节点是能源受限的。在现有的无线网络,如传感器网络、网状网络和普适计算系统中,其中的许多特性——非中心式操作、自组织、节能——都是需要的。

博弈论,如之前所见的那样,是研究自动代理之间的相互作用的。基于