

# 前 言

众所周知，人类社会行为具有高度复杂性，要从根本上解释人类群体行为，乃至准确预测群体行为及社会现象，是极其困难的。基于“人工社会”的计算机仿真实验方法，通过简化社会中个体的行为细节来构造抽象的现实仿真模型，然后通过分析模型来理解人类群体行为，探究问题的本质。

自人类社会产生开始，合作问题就一直是影响人类发展的重大问题。个体都是在自利的动机下采取行动，共同利益并非个体行为的直接原因，理性的合作不一定必然出现。这引发了关于合作是如何在由自私个体组成的群体中产生及演化这一问题的研究。

博弈论为研究个体之间的合作关系形成提供了有力的理论框架。博弈论的基本假设是人类行为的效用最大化，即理性人假设，人类正是为了自身效用的最大化而相互博弈。博弈的行为主要表现为合作、背叛、中立、互惠、报复、宽容等。

演化博弈论从生物学中获得灵感，将生物进化的思想与博弈相结合。从演化的角度，人类群体行为是演化的结果，个体行为会表现出先天的不同，同时个体后天被置于不同的环境中，每个个体不断地与外界发生交互作用，这样所有的个体都会根据别人的行为和外界因素的变化来逐步调整自身行为，从而形成了大规模群体行为的演化。

目前在合作演化问题研究领域，学界提出了包括直接互惠与空间互惠在内的五种促进合作的机制，并且围绕着信誉、迁移、教育活动等诸多机制展开研究。但迄今人们对于群体合作行为的演化机制、影响合作的环境因素及基于个体迁移机制的动态交互关系下合作的涌现机理的认识还有待进一步深化与拓展。

本书从个体的博弈策略研究与个体迁移机制研究入手，采用基于 Agent 建模的计算机仿真实验方法，从宏观现象与微观分析两个层面对以上问题展开深入探

究，针对均匀混合群体、静态交互网络、动态交互网络三种问题情境，分别从博弈策略、策略更新机制、个体迁移机制提出了相应的促进合作涌现的机制，并对这些情境下涉及的影响合作策略演化的因素进行了探究。

首先，本书聚焦均匀混合群体下有噪声的重复囚徒困境博弈，提出了一种灵活互惠策略。在该策略下博弈者对于对手的背叛行为会保持一定程度的容忍，并能够为了长期回报而继续采取合作的策略。持该策略的个体，其决策基于与对手长期交互的历史，噪声带来的意外影响不会立即打破两个参与者之间的长期合作关系。

其次，本书聚焦静态网络博弈情境，针对现有的策略更新机制大多采用取代机制这一问题，提出了基于相邻个体收益差的渐进策略模仿机制。假定个体策略为完全背叛策略到完全合作策略之间的连续值，个体在执行策略学习时，策略变化的程度基于自身与学习对象间的收益差值，学习对象的收益相比于该个体差异越大，策略调整的幅度则越大，个体对差异的敏感程度会影响策略调整。

之后，本书聚焦动态交互关系下的合作演化问题，提出了基于个体演化偏好的策略模仿与位置迁移的协同演化机制。为了体现个体对邻居收益信息的掌握程度，引入了策略模仿收益依赖参数；为了体现移动目标空位信息从无到有，引入了迁移空位信息噪声参数。

然后，本书聚焦动态交互关系下的趋利移动带来的局部背叛者簇问题，针对这一问题提出了两种混合移动机制，并且将这两种机制与混合了随机移动的趋利移动机制作比较。本书揭示出趋利移动与其他移动方式的混合移动机制更能够抑制局部背叛者簇的出现，从而进一步促进合作的传播与扩散。

接着，本书从移动成本、收益期望与空间博弈的角度探讨多主体系统的博弈策略演化与系统涌现特征之间的关系。

最后，由于针对大部分研究都假设其中的参与者能采用的策略要么是“合作”，要么是“背叛”的问题，本书提出了一种合作机遇驱动的迁移机制。

本书聚焦个体博弈策略的研究，深入探讨个体所处的系统环境对个体生存适应度的影响，该部分内容对于直接互惠机制的研究有重要理论价值；本书聚焦静

态网络上的个体策略演化机制的研究，深入阐释个体策略演化时的模仿差异性影响，该部分内容对于网络互惠有重要的研究价值；本书研究聚焦动态迁移网络上的个体合作行为，深入探究个体移动行为与个体策略模仿行为对群体合作演化的共同作用及混合移动机制对群体策略演化的影响。该部分内容对于动态网络下的合作演化研究具有重要的理论意义，同时，也可以为促进社交网络、科研合作、企业合作、人工社会的良性发展提出理论依据，为相关政策的制定提供理论上的参考与辅助。综上，本书不仅是对合作演化理论现有最新研究的总结与提升，同时也为后续该领域研究工作提供借鉴和科学依据。本书理论与仿真实验相结合，对于同类研究问题的开展，具有重要的实践指导意义。

本书由赵小微和徐秀娟合作撰写，倾注了作者大量的心血，每个章节都是共同探讨合作的结果。本书的完成还要感谢韩旭、黄翊轩、李冰、李娟在撰写过程中给予的支持。感谢大连理工大学系统工程研究所夏昊翔教授对于内容的指导与帮助。最后感谢家人对我们生活的支持和精神的鼓励。

由于作者水平有限，书中不妥之处难以避免，恳请读者批评指正。

赵小微 徐秀娟

2018年6月



# 目 录

## 前言

1 绪论	1
1.1 合作问题的研究背景与意义	1
1.1.1 合作问题的研究背景	1
1.1.2 合作问题的研究意义	4
1.2 合作演化相关研究	7
1.2.1 相关概念界定	7
1.2.2 合作演化研究范畴的界定	11
1.2.3 重复囚徒困境博弈相关研究现状	16
1.2.4 静态网络博弈相关研究现状	18
1.2.5 动态网络博弈相关研究现状	24
1.3 本书内容与研究方法	28
1.3.1 研究问题	28
1.3.2 研究内容	30
1.3.3 研究内容之间的关系	33
1.3.4 研究方法与技术路线	34
2 均匀混合群体中噪声水平和交互频次对策略演化的影响研究	37
2.1 带有噪声干扰的囚徒困境博弈	38
2.2 灵活互惠策略	40
2.3 基于生态模拟实验的重复囚徒困境博弈设计	43

2.4	实验结果与分析	44
2.5	本章小结	51
3	基于空间博弈的渐进策略模仿机制研究	54
3.1	模型构建依据	55
3.2	模型描述	58
3.3	实验结果与分析	62
3.3.1	宏观统计分析	62
3.3.2	单次运行跟踪分析	64
3.3.3	合作小块演化实验	69
3.3.4	合作者对实验	70
3.4	与已有相关工作的对比	71
3.5	本章小结	73
4	基于个体迁移偏好的动态空间博弈研究	74
4.1	模型构建依据	74
4.2	模型描述	78
4.3	实验结果与分析	83
4.3.1	收益信息影响下的策略模仿机制对合作演化的影响	83
4.3.2	个体的移动偏好对合作演化的影响	85
4.3.3	空位预收益信息噪声影响下的移动机制对合作演化的影响	90
4.4	与已有相关工作的对比	93
4.5	本章小结	96
5	基于混合迁移机制的动态空间博弈研究	98
5.1	趋利移动与局部背叛者簇	99
5.2	模型描述	102

5.3	实验结果与分析	103
5.4	与已有相关工作的对比	114
5.5	本章小结	115
6	基于移动成本的动态空间博弈研究	117
6.1	模型构建依据	117
6.2	模型描述	118
6.3	实验结果与分析	119
6.4	本章小结	125
7	基于连续策略的动态空间博弈研究	126
7.1	模型构建依据	126
7.2	模型描述	127
7.3	模型实现	131
7.3.1	实验模型类的设计	131
7.3.2	系统界面设计与实现	132
7.4	实验结果与分析	133
7.4.1	宏观结果	133
7.4.2	微观分析	138
7.5	本章小结	154
8	结论	156
8.1	本书主要结论	156
8.2	本书的创新点	159
	参考文献	161



# 1 绪 论

## 1.1 合作问题的研究背景与意义

### 1.1.1 合作问题的研究背景

自人类社会产生开始，合作问题就一直是影响人类发展的重大问题，引起学界广泛关注<sup>[1]</sup>。21 世纪以来，随着互联网技术与通信技术的飞速发展，世界经济一体化越发明显，国家、地域、企业组织、人与人之间的信息交互越来越频繁，同时相互之间的关系越来越紧密<sup>[2]</sup>；各个国家、组织都在采取可持续发展战略，以理性的态度寻求合作与共同发展。

第一，从国际合作的角度，当今世界各国经济相互依存与影响越发密切<sup>[3,4]</sup>。全球生产资源优化配置带来生产领域的国际化分工合作，同时国家间结成关税同盟，彼此取消贸易壁垒以加速商品与资本的跨国流通。自 2016 年 7 月，世界贸易组织（World Trade Organization, WTO）已成功发展到了 164 个成员<sup>[5]</sup>，并在进一步发展中，持续为世界经济的合作化进程做贡献。除了贸易和生产合作以外，科技领域的合作也是国际合作的重要内容，涉及越来越多的领域，如人类基因计划、海洋勘探计划、国际热核试验反应堆计划、国际空间站计划<sup>[6]</sup>等，科研领域的合作为解决许多人类科学难题提供了人力与物力的保障。再者，国际合作还表现在安全合作以及环境保护合作等方面<sup>[7,8]</sup>，如国际化反恐组织超越地缘政治的制约，搭建国际反恐发展平台，为国际联合提供坚实保障。

第二，从区域合作的角度，由多个国家构成的区域经济一体化、集团化也是当今世界经济发展的又一重要特征<sup>[9]</sup>。2015 年 3 月，国家发展改革委、外交部、商务部联合发布《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》，阐述了我国对“一带一路”倡议的具体思路和设想。在大开放、大交流、大

融合的区域合作理念的指导下，我国致力于亚欧非大陆及附近海洋的互联互通，构建全方位、多层次、复合型的互联互通网络，实现沿线各国合作发展；合作项目促进了沿线各国投资和消费，创造需求和就业，增进沿线各国人民的人文交流与文明互鉴<sup>[10,11]</sup>。除了国际区域合作以外，在我国国内也形成了长三角经济发展区、珠三角经济发展区<sup>[12]</sup>、环渤海经济区等若干合作区域<sup>[13]</sup>。这些区域打破地方保护主义，在多省市区域内建立产业的有效分工与合作，形成功能互补和各具优势的产业结构，对区域内各省市经济的长远发展以及应对日趋激烈的国际竞争格局都起到积极的推动作用。

第三，从企业间合作的角度，尽管竞争是企业间的普遍现象，然而这种现象并不妨碍企业之间合作的出现。例如，2014年10月，IBM与微软达成一项在云计算服务领域的合作协议<sup>[14]</sup>。基于该协议，微软 Azure 云服务将能使用 IBM 中间件，IBM Cloud 云服务也能使用微软的 Windows Server 和 SQL Server 等核心产品。这项合作使得两家公司的云服务更具吸引力与灵活性，为其企业客户提供适配性更高、更便捷的云端服务。再如国内，2015年“滴滴打车”和“快滴打车”两大网络打车巨头公司完成合并，除了为两家公司节约成本以外，还可以实现资源共享，在合并重组后，两家公司内部还依旧保持竞争机制，通过竞争来促进技术的推动。合作可以使企业相互借助彼此的资源、经验、技术，不断学习、自我完善，而且还在一定程度上减少了资源的浪费，促进企业创新，使经济生产能更好地服务于市场需求，这对于社会进步也有着重要意义。

第四，在当今高速发展的信息与智能时代，人们在强调个性独立与自由的同时，也更加重视相互之间的合作与互助<sup>[15,16]</sup>。首先，社会分工越发精细，人们所从事的工作分类也越来越细化，这更需要人们在工作领域协调互助、资源共享、合作解决问题。其次，社会生活本身也需要合作，社会成员彼此间的合作是构建和谐社会的基础。没有社会成员间的合作关系，社会就无法正常运转。

尽管合作在当今社会如此重要，但是合作关系的形成并非一蹴而就，并且合作关系的维持也有很大困难。根据亚当·斯密提出的经济学和社会科学的“第一定律”，当个体只谋求自身利益时，理性的集体结果会自动出现<sup>[17]</sup>。这一理论被称

为“看不见的手”，但事实上，在个人利益与集体利益之间并不必然存在和谐的利益关系，在很多情况下存在冲突。例如，全球气候变化问题上的国际合作，本质上就是国际合作关系是否可以达成的问题。所有的国家为最大限度地获得自身的经济利益，滥用气候资源，不受限制地排放温室气体，从而导致最终全球气候恶化的悲剧。为了达到保护公共气候这一共同利益，各国需要一致同意合作以减少能源消耗。但是合作协议是不稳定的，因为任何一个国家如果私自破坏协议将获得更大利益。从全球气候变化问题中可以看出，人们都是在自利的动机下采取行动，共同利益并非个人行为的直接原因，理性的合作不一定必然出现<sup>[18]</sup>，集体中的个人都会预期其他人合作，自己采取不合作，从而导致了合作失败，这被称为“社会困境”（social dilemma）<sup>[19]</sup>。在没有强制性机制控制的情况下，自私个体能否通过个体理性自发产生合作行为呢？哪些因素以及何种机制会促使合作产生呢？这引发了关于“合作演化”（evolution of cooperation）问题的研究<sup>[20-22]</sup>。

博弈论（game theory）<sup>[23]</sup>为研究合作演化问题提供了有力的理论框架，在社会科学、政治经济学及管理科学领域，博弈论运用数学方法分析个体在博弈中的互动行为所产生的可能后果。所谓博弈，是指某些个人或组织做出相互有影响的决策，它不仅包括扑克、桥牌等游戏，也包括现实生活中大量的合作和冲突现象。博弈论反映的是个体理性与集体理性之间的悖论问题，理性个体对利益的追求不能满足集体理性或福利最大化的要求，导致集体理性失控。合作行动之所以出现困境源于个体理性和集体理性的关系出现了问题<sup>[24]</sup>，从而导致个体间无法达成合作。将进化论中的自然选择与变异引入博弈论，产生了演化博弈论（evolutionary game theory）。在演化博弈论中，采用个体的收益对应于进化论中的适应度（fitness），研究有限理性的个体随着时间的演进，如何通过不断地与其他个体进行重复博弈交互，自适应调整行为策略，从而优化收益，提高生存适应度，最终实现稳定的均衡状态<sup>[25]</sup>。演化博弈论因其动态演化性成为研究合作演化问题的重要理论依据。

近几年来，合作演化问题成为学科交叉的一个热门研究方向，学界将生物学、社会学、心理学、数学、经济学、计算机科学以及复杂性科学的知识联系在一起，以此找到新的方法来研究合作的涌现现象及其背后的机理。合作是如何产生与演

化的？这一问题涉及个体行为能力、个体偏好及群体关系等若干方面。经典的演化博弈研究中假设任意两个个体之间接触的可能性都是完全一致的，此时个体的理性策略是合作演化问题的一个研究重心<sup>[26]</sup>。在另一方面，现实中当个体之间的接触概率并非一致时，个体间的关系就对合作演化产生很大影响了，这是合作演化问题的另一个研究重心，这一领域越来越受到学界的关注<sup>[27-30]</sup>。

由此可见，从群体中的个体行动策略与个体间互动关系这两个方面入手来研究群体合作行为的演化是很有意义的。这一研究有助于揭示人类社会广义上的群体合作产生的背后动因，以及群体合作如何进行演化。与此同时，合作关系形成是促使群体交互结构演化的内在动因，因此，在微观层面上个体间合作关系形成机理与宏观层面群体合作涌现之间关系的研究，也是从网络层面理解群体交互关系的基本前提。然而，多种个体策略间的对抗除了策略本身还受到哪些因素的影响？个体策略的演化规则，特别是个体间相互模仿的行为是如何影响群体合作演化的？当群体中的个体具有自主移动能力时，个体间的模仿行为与个体自身的移动行为是如何共同影响群体合作演化的？对于这些问题，在过去二十余年，学界已经开展了一系列研究，但迄今为止对这些问题的认知还有待于进一步深化<sup>[31-35]</sup>。据此，本书从个体的博弈策略研究与个体迁移机制研究入手，采用复杂科学领域的基于 Agent 建模的计算机仿真实验方法，从宏观现象与微观分析两个层面对以上问题展开深入探究，以期从理论上更加深入地理解群体合作的演化过程与内在机理，为企业和社会管理者实现合作与可持续发展奠定理论基础。

## 1.1.2 合作问题的研究意义

### 1. 理论意义

合作演化问题是一个社会学<sup>[36,37]</sup>、哲学<sup>[38]</sup>、管理学<sup>[39,40]</sup>、经济学<sup>[41,42]</sup>、生物学<sup>[43]</sup>及计算机科学<sup>[44]</sup>共同关注的交叉学科问题。*Science* 杂志在 2005 年创刊 125 周年之际，邀请各界著名科学家提出了未来 20 年最重要的 125 个科学问题，“合作演化问题”成为这 125 个科学问题之一，并且在其中最关键的 25 个科学问题中

位列第 16 位<sup>[45]</sup>，这充分说明了合作演化问题研究的重要性。个体间以及群体间的合作行为是在人类社会<sup>[46,47]</sup>与自然界<sup>[48,49]</sup>广泛存在的现象，从生物学与经济学的角度，个体都有追求自身利益最大化的目标，这被称为“自私的基因”<sup>[50]</sup>，那么广泛的合作现象是如何出现的呢？不同学科从自身学科特点出发，试图解释现象背后的机理，揭示合作的成因，这一问题构成了“合作的演化”研究领域，这一问题的解释对生物进化、人类社会的发展都具有极其重要的研究价值和理论意义。

20 世纪末，代表系统科学发展新阶段的复杂性科学迅速兴起。仅仅不到 30 年的时间，复杂性科学理论方法已经在社会科学与自然科学各个领域得到了广泛应用，成为当代科学发展的最前沿领域之一，因此，英国著名物理学家霍金称“21 世纪将是复杂性科学的世纪”。面对人类社会中的社会系统、经济系统和生命系统等复杂系统，复杂性科学放弃了传统的系统科学还原分解的方法，取而代之的是一种自下而上的综合集成方法<sup>[51]</sup>。复杂性科学强调计算机模拟仿真，首先观察现实复杂系统并抽象出个体所遵循的一般规则，然后在计算机中重现这些简单的个体，并让它们相互作用，从而分析计算机中的仿真结果，最后用这些结果来反映、理解甚至控制现实系统<sup>[52]</sup>。人类社会系统、自然界的生物种群都是由大量具有复杂行为的个体构成的动态开放、不断演化的非线性复杂系统，个体间的博弈行为与合作现象大量广泛存在，因此探索合作涌现现象背后的动力学机理，进而促进与维持合作关系，保证复杂社会系统的稳定运行，是复杂性科学领域的重要研究课题。

从生物系统到人类社会中人與人之间存在的复杂关系网，“网络”无处不在。复杂网络科学，已经发展成为一个极其重要的研究领域，在各种复杂系统的定性定量研究中扮演着不可替代的角色。基于复杂网络，可以用抽象图来表示个体间的交互关系，即网络中的个体用图中的节点来表示，节点之间的交互关系用图中的连边来表示。发展到现在，对复杂网络的研究不再局限于数学领域，已经逐渐发展成为物理学、生态学、社会学、经济学等各个领域的共同研究目标，特别是节点间的合作与背叛关系的研究极具研究价值，网络的结构对于节点间合作关系的影响，以及节点间合作关系对于网络结构的反作用是该领域主要的研究热点，对于复杂网络的深入研究具有重要的意义。

## 2. 现实意义

在我国，和谐社会呼唤合作，个体与个体、个体与集体、集体与集体间的合作对于经济发展和社会进步起到越来越重要的作用。一方面，现实社会中各类跨越企业（组织）的合作活动日益普遍，另一方面企业（组织）在追求利益最大化的过程中产生竞争。这些与合作有关的现象给人们提出了许多挑战，有必要进一步深入地研究合作产生及演化现象背后的机理。

除了企业组织合作，近些年科研合作、学术合作也受到广泛关注，这些与知识创新、知识传播相关的人类活动也是以合作关系的建立为基本前提的，党的十八大报告提出实施创新驱动发展战略，将科技创新置于国家发展全局的核心位置，因此在这一发展框架下，合作方式、影响合作的因素、合作的演化方式、群体结构的演化方式等诸多问题的研究具有很重要的现实意义。

从网络信息化的角度，随着 Web 2.0 和人工智能的迅猛发展，人类已经置身于各种人工的网络化系统中，如 Facebook、Twitter、Flickr 等在线社交网络，BitTorrent、Gnutella、SETI@home 和知乎等数据共享网络等，这些网络上的每一个节点的背后都是具有理性的真实人类，因此这些网络上个体的行为也都表现出复杂性、智能性与自利性，例如，在一些文件共享网络中，个体更希望从其他用户那里获取所需的资源，但是却不愿意分享自己的资源。合作演化研究中的网络互惠问题可以用来解释这些个体行为，并有针对性地提出管理建议，因此具有较强的实际价值。

在复杂性科学领域，把复杂性科学方法与人工智能（artificial intelligence）相结合则诞生了“人工社会”（artificial societies）这样一个交叉学科<sup>[53]</sup>。在人工社会系统内，智能体追求自身利益最大化，同时又自发形成合作，构成了个体与整体的博弈关系。此外，移动是人工社会智能体的另一重要行为特征<sup>[54]</sup>，智能体还会通过移动脱离原有交互关系，进而形成新的合作关系。因此，探索移动多智能体合作涌现现象以及合作演化动力学机理，进而促进与维持合作关系，保证人工社会的稳定运行，是人工智能与人工社会领域的重要研究课题，具有重要的实际意义<sup>[55,56]</sup>。

综上所述，本书主要从个体博弈行为和个体迁移行为两个角度入手，深入探索个体在这两种行为的影响下形成的合作关系，并深入探究合作现象背后的动力学过程。本书不仅是对合作演化理论的重要发展，同时也为后续的研究工作提供借鉴和科学依据。

## 1.2 合作演化相关研究

### 1.2.1 相关概念界定

#### 1. 博弈论相关的基本概念

博弈理论研究始于 Ernst Zermelo、Emile Borel 及 John Von Neumann 的早期工作。1944 年数学家 Von Neumann 和经济学家 Morgenstern 合著了 *Theory of games and economic behavior*<sup>[23]</sup>，奠定了博弈论研究的开端，他们提出人类大部分的经济行为都可以当作博弈行为来分析。

博弈论是对理性的、智能的决策者之间冲突与合作行为的研究，为分析那些涉及两个或者多个参与者且决策会相互影响到参与者各自的福利的局势提供一般数学模型。严格地讲，博弈论并不是经济学的一个分支，它是一种方法，它为社会科学和经济学的学者提供了一个重要视角和分析研究问题的框架。

博弈论的基本概念包括参与者、环境、行为、战略、支付函数和信息。

(1) 参与者 (players) 是指在博弈过程中能够独立进行行为决策的主体，可以是某一个人，也可以是团体（如国家、企业）。参与者符合理性人假设，其目的是通过选择行为或战略以最大化自己的支付效用水平。

(2) 环境 (environment) 是指参与者所处的外部，指独立于参与者决策以外的随机变量的概率分布的机制。

(3) 行为 (actions) 也称策略，是指博弈参与者某个时点的决策变量，由所有可以采取的行为构成的集合称为博弈策略集合。

(4) 战略 (strategies) 是参与者选择行动的规则, 它决定参与者在什么时候选择什么行为。

(5) 支付函数 (payoff function), 根据对局的博弈参与者的行为构成了特定的策略组合, 在这一策略组合下每个参与者可以获得的效用。

(6) 信息 (information) 是与“参与者”“环境”有关的知识, 包括环境的随机变量分布及其他参与者的特征、行为、效用的知识。

合作博弈 (cooperative game) 与非合作博弈 (non-cooperative game)。合作博弈是指在博弈双方产生实际的博弈行为之前, 如果他们能够提前达成某种具有约束力的协议, 再进行博弈。这种博弈更加体现公平与公正, 更加容易达到集体理性。非合作博弈是指博弈双方不能在行为之前达成协议, 无法强制对方遵守, 博弈双方只能通过选择自己的行为达到收益最大。这种博弈更加体现个体收益最大化, 不容易达到集体理性。非合作博弈反映的是个体理性与集体理性之间的悖论问题, 理性个体对利益的追求不能满足集体理性或社会福利最大化的要求, 导致集体理性失控。

零和博弈 (zero-sum game) 与非零和博弈 (non-zero-sum game)。零和博弈是指参与博弈的各方, 在严格竞争下, 一方的收益必然意味着另一方的损失, 博弈各方的收益和损失相加总和永远为零, 双方不存在合作的可能。非零和博弈是指博弈中各方的收益或损失的总和不是零值, 它区别于零和博弈, 对局各方不再是完全对立的, 一个局中人的所得并不一定意味着其他局中人要遭受同样数量的损失。非零和博弈在经济学研究中比较有用。在非零和博弈中, 博弈参与者之间不存在“你之得即我之失”这样一种简单的关系。其中隐含的一个意思是, 参与者之间可能存在某种共同的利益, 蕴含博弈参与者“双赢”或者“多赢”的理念。

囚徒困境博弈 (prisoner's dilemma game, PDG) 是非零和博弈的一个重要模型, 也是一种非合作博弈。1950年普林斯顿大学数学系的Tucker教授首次在教学中提出了囚徒困境的情景<sup>[57]</sup>: 甲、乙两人因涉嫌一起严重的案件被警方抓获, 但是由于警方没有掌握足够的犯罪证据无法起诉他们, 因此将他们分别关押在不同的地点单独进行审讯并要求坦白认罪, 他们是否坦白认罪直接影响他们各自的服刑结

果。如果甲、乙都选择坦白认罪，那么甲、乙都将面临 3 年刑期。如果甲、乙都选择否认罪行，则警方犯罪证据不足，甲、乙都将面临 1 年刑期。如果甲、乙两人中，一人选择拒不认罪，而另一人选择坦白且愿意指证另一人，那么拒不认罪者将面临 5 年刑期，而坦白者会因为指证另一人戴罪立功，因此获得释放。该问题假定甲、乙两人无法通过提前沟通的方式获知对方的策略。这时甲、乙面对这种选择两难的困境，该采取怎样的策略？将囚徒困境博弈表现为支付矩阵的形式，如表 1.1 所示。

表 1.1 Tucker 的囚徒困境博弈支付矩阵

甲	乙	
	抵抗	坦白
抵抗	$(-1, -1)$	$(-5, 0)$
坦白	$(0, -5)$	$(-3, -3)$

在囚徒困境博弈中，个体拒不认罪行为可以视为与另一个体合作 (cooperation, C)，个体坦白指认对方的行为可以视为对另一个体的背叛 (defection, D)，那么囚徒困境博弈如表 1.2 所示。

表 1.2 囚徒困境博弈支付矩阵

甲	乙	
	C	D
C	$R, R$	$S, T$
D	$T, S$	$P, P$

表 1.2 中， $R$  为两人合作的收益 (reward for mutual cooperation)； $T$  为自己背叛对方合作的收益 (temptation to defect)； $S$  为自己合作但是对手选择背叛的收益 (sucker's payoff)； $P$  为双方都选择背叛的收益 (punishment for mutual defection)。为了构成真正意义上的困境，收益矩阵参数必须满足关系： $T > R > P > S$ ；同时，为了避免两个博弈参与者通过交替背叛对手的方式获得比合作更高的收益，参数还必须满足关系： $2R > T + S$ 。

$T, R, P, S$  的取值可能产生多种组合, 为了避免收益负值带来的计算麻烦, 一般对收益做正值化处理, 其中较为常用的是经典囚徒困境博弈, 即  $R=3, T=5, S=0, P=1$ 。但这一收益矩阵为常数矩阵, 即不包含任何变量, 无法表现背叛与合作的收益差值变化的影响。

一般研究中普遍将参数引入囚徒困境博弈, 为了简化多参数带来的复杂性, 仅采用一个参数, 令  $T=b, R=b-c, P=0$  且  $S=-c$ 。为简单起见, 用  $r=c/b$  表征博弈的损益比 ( $0 < r < 1$ ), 则博弈收益矩阵仅含有一个参数, 如下:

$$M = \begin{pmatrix} R & S \\ T & P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1+r & r \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

为了进一步简化问题, Nowak 和 May<sup>[58]</sup>首次提出了“弱囚徒困境”的概念, 令  $R=1, P=S=0, T=1+b$ , 此时该矩阵已经不能严格满足囚徒困境博弈的收益关系不等式, 背叛的收益事实变弱了。

## 2. 合作演化的相关概念界定

无论是自然界还是人类社会系统, 个体之间因相遇进而产生交互行为, 在群体影响与个体理性共同作用下, 每个个体的行为表现出多样性与动态变化性。聚焦到博弈问题, 参与者的行为主要表现为合作、背叛、中立等。

合作的涌现 (emergence of cooperation)。从系统科学的角度, 复杂系统的基本原理是系统的结构与环境共同决定系统的功能, 同时系统功能反过来也会影响系统结构和环境, 它们的影响是双向关系。系统环境包括自然环境和社会环境, 系统结构包括物理结构与信息结构<sup>[59]</sup>。由于系统的复杂性, 非线性系统的功能不能采用还原法, 即系统功能不是其不同组成部分自身功能的简单相加, 而是随着时间与空间的演化出现的, 这种系统功能的出现被称为“涌现” (emergence)。在群体进行博弈的系统中, 随着时间与空间的演化, 出现了稳定的群体合作行为, 并且可以持续一段时间, 这种现象被称为“合作的涌现”现象。

合作的演化 (evolution of cooperation)。在群体进行博弈的系统中, 系统初始时, 其中个体的行为是混乱失序的, 之后个体通过自身行为改变、与系统环境的