

# 基于 ACP 的动态网民群体运动组织建模与计算实验研究

王晓<sup>1,2,3</sup> 韩双双<sup>1,2</sup> 杨林瑶<sup>4</sup> 曾轲<sup>5</sup> 王飞跃<sup>1,6</sup>

**摘要** 由互联网促成的社会运动组织一经出现,就受到了广大社会学者以及计算机领域专家的广泛关注.一方面,互联网特别是移动互联网在整合信息、引发共振、实时分享及高度互动等方面的特性,为网民行为的大规模快速聚集提供了直通渠道,使得多角度超视距观察并研究在线人群复杂行为及其组织特性成为可能;另一方面,这一研究在社会化媒体营销、共享经济、非军事组织行动中的应用意义愈加显著.本文引入群体行为动力学和社会运动组织理论的研究,提出基于 ACP 的动态网民群体运动组织 (Cyber movement organizations, CMOs) 研究方法.本文工作首先使用多智能体建模方法构造双层结构的人工社区模型,以此为基础对动态网民的个体以及群体动态组织行为展开计算实验探讨,重点阐释了社区用户的交互行为机制及群体组织活动的建模机制,为揭示微观个体简单行为对于宏观群体复杂涌现现象的影响奠定基础.

**关键词** 社会网络, 多智能体, 社会运动组织, 动态网民群体运动组织

**引用格式** 王晓, 韩双双, 杨林瑶, 曾轲, 王飞跃. 基于 ACP 的动态网民群体运动组织建模与计算实验研究. 自动化学报, 2020, 46(4): 653-669

**DOI** 10.16383/j.aas.c190641

## The Research on ACP-based Modeling and Computational Experiment for Cyber Movement Organizations

WANG Xiao<sup>1,2,3</sup> HAN Shuang-Shuang<sup>1,2</sup> YANG Lin-Yao<sup>4</sup> ZENG Ke<sup>5</sup> WANG Fei-Yue<sup>1,6</sup>

**Abstract** Once it appeared, the cyber-enabled social movement organizations (CeSMOs) became an instant concern of the majority of scholars in sociology and computer science. On the one hand, the Internet, especially the mobile Internet, with characteristics such as information integrating, resonance causing, real time sharing and high interaction, provides a direct channel for the large-scale and rapid aggregation of human behaviors. This makes it possible to observe and study the complex behavior of online crowds and their organizational features. On the other hand, this research plays an increasingly significant role in social media marketing, sharing economy and non-military organization actions. In this paper, we introduce the studies in crowd behavioral dynamics and social movement organizations, and propose the ACP-based CMOs research method. Firstly, an artificial community with a double-layer structure is designed based on multi-agent modeling method. Secondly, the dynamics of organizational behaviors of netizens and online crowds are analyzed by computational experiments. Thus, the interactive behavioral mechanism of community crowds and the mechanism modeling of crowd organizational activities are emphatically discussed, laying a foundation for revealing the influence of simple behavioral rules of micro individuals on complex emergent phenomena of macro crowds.

**Key words** Social networks, multi-agent modeling, social movement organizations, cyber movement organizations (CMOs)

**Citation** Wang Xiao, Han Shuang-Shuang, Yang Lin-Yao, Zeng Ke, Wang Fei-Yue. The research on ACP-based modeling and computational experiment for cyber movement organizations. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(4): 653-669

收稿日期 2019-09-06 录用日期 2020-01-09

Manuscript received September 6, 2019; accepted January 9, 2020

国家自然科学基金项目 (61702519), 中国科协青年人才托举工程 (2017QNRC001), 英特尔智能网联汽车大学合作研究中心项目 (ICRI-IACV), 北京市科委项目 (Z181100008918007) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61702519), Young Elite Scientists Sponsorship Program of China Association of Science and Technology (2017QNRC001), Intel Collaborative Research Institute for Intelligent and Automated Connected Vehicles (ICRI-IACV), and Beijing Municipal Science & Technology Commission (Z181100008918007)

本文责任编辑 莫红

Recommended by Associate Editor MO Hong

1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190 2. 青岛智能产业技术研究院 青岛 266000 3. 青岛慧拓机器智能有限公司 青岛 266000 4. 中国科学院大学 北京 100049 5. 北京三快在线科技有限公司 北京 100083 6. 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术研究中心 长沙 410073

1. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 2. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266000 3. Waytous Inc., Qingdao 266000 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 5. Beijing Sankuai Online Technology Co., Ltd., Beijing 100083 6. The Research Center for Military Computational Experiments and Parallel Systems Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073

随着互联网、大数据、云计算与边缘计算等信息技术的快速发展,网络的触角已然深入到人类社会的方方面面. 社交媒体平台和移动应用的泛在使用,更使得用户生成内容成为在线信息的主要来源. 依靠大量聚集且具有社会交互通道的网民用户,网络社区成为内容生成、信息分享、知识学习的重要平台. 文献 [1] 中指出网络信息可视为人类现实社会行为的映射,作者同时还指出了网络社会中内在关联的三个重要研究对象:人类的交互方式、群体网络的形态及演化规律. 显然,在线网络社区<sup>[2-6]</sup>为大规模网民群体行为动力学<sup>[7-10]</sup>的研究开拓了新的途径并提供了新的视角和资源.

文献 [11] 将通过网络空间手段和方法诱发或加强的社会运动组织或群体,即:网络空间中针对某一主题、话题或事件,短期内快速聚集在一起,参与、讨论并且共同实施某些社会行为的网民群体定义为动态网民群体运动组织 (Cyber movement organizations, CMOs). 其主要特征包括多平台性、动态性、实时性、自组织性、突变性、高度复杂性、虚实交互性等;其主要组织方式为利用新兴的社交媒体平台如 BBS、论坛、博客、微博等发布相关主题性信息,对网民群体行为进行快速传播、大范围扩散,并感染吸纳更多人群的参与. 由于网络的时空压缩及放大效应,在线网民群体行为的正面或负面作用可在很短时间内发挥到极致,甚至引发政府管理危机.

CMOs 的建模、演化及评估,均属于社会系统的研究范畴<sup>[12]</sup>. 早期建模方法主要采用数学方程来描述社会规律,如使用数学模型对人口进行建模以描述人口在时间和空间上的行为动态. 此类方法往往只适用于描述极其简单的社会系统. 统计建模常被用于社会计量学、经济计量学、统计物理学等领域中的系统建模,往往通过贝叶斯模型、回归模型对社会系统的普遍现象进行静态描述,很难刻画由于个体差异引发的社会系统的动态变化<sup>[13]</sup>. 信息技术的发展推动了新型建模方法的出现及应用<sup>[14-15]</sup>,其中社会网络建模、演化博弈建模、离散事件仿真等取得了很大进展,但传统仿真面临的时间复杂度和空间复杂度的指数增加特性成为制约其实际应用的一大障碍.

因此,本文以 CMOs 为研究对象,阐释了基于 ACP 方法的 CMOs 建模分析与研究工作. 首先,对群体行为动力学的研究进行了简要介绍;随后,阐述了 SMOs、Ce-SMOs 以及 CMOs 的相关概念与理论,以及它们之间的层层递进关系;同时分别考虑 CMOs 中个体及群体组织行为的驱动因素,引入多智能体建模方法设计并构建了基于 ACP 理论与

方法的双层社区模型,为相关工作的展开提供了理论基础、技术和方法支持. 这一研究有助于理解人类在线行为的微观机理以及群体宏观现象的汇聚与涌现,同时对维护国家安全、提高政府应急管理能力具有重要意义.

## 1 网民群体行为动力学相关研究

人类行为研究在社会学中已有很长的历史. 早期社会学研究一般从两个角度理解人类行为:宏观角度和微观角度<sup>[16]</sup>. 前者采取一种自顶向下的方法模拟社会现象,而后者更专注于个体变化、个体之间的交互行为及其对群体宏观现象的影响. 虽然两者在预测全局行为模式上都有较好的表现,但是却都不能很好地解释宏观层面上行为涌现现象的内在机理.

移动智能设备与社交媒体 APP 的结合重塑了“群体组织行为”的含义,这种“随时随地随身随意”的流量媒体传播下的人际互动使得地理空间的差异以及社会关系的约束“形同虚设”,为大规模群体组织行为的研究提供了数据可追溯的全局化视角.

许多社会学相关理论被引入网民群体行为的研究以解释个体交互行为的内在驱动力<sup>[17-19]</sup>. Penaloza 等<sup>[18]</sup> 强调个体的主观能动性在协同活动中的重要作用,并试图用社会学习理论解释人群中的行为模仿和传播过程. Liu 等<sup>[17]</sup> 国内相关学者阐明,历史行为可用于分析个体行为模式及个体兴趣,并尝试使用历史数据解释人类动力学中的行为爆发和长尾现象. 认知理论<sup>[19]</sup> 亦常被用于解释特定社会环境下的个体决策行为,此时,同时会将社会环境对于个体行为执行的影响考虑在内.

也有众多研究关注群体活动中的个体行为是如何达到一种有序且协同的状态的<sup>[19-22]</sup>,即网民群体行为的组织和演化过程的研究. 一种主流的研究视角将群体行为的形成看作一个任务排队模型. Barabási 等<sup>[20]</sup> 考虑优先选择机制,对个体的决策制定过程进行建模,并提出了一种排队理论来解释个体行为以及长尾现象的发生. Vazquez 等<sup>[19]</sup> 扩展了 Barabási 的排队模型,将人类活动划分为有限排队长度和无限排队长度两类情况,并分析了排队长度对于人类行为间隔时间分布情况的影响. Blanchard 等<sup>[21]</sup> 考虑了进入队列的任务是时间独立的情况时,任务的优先度问题. Bedogne 等<sup>[22]</sup> 引入了一种连续模型而不是排队序列,并进一步探索了任务等待时间与优先分布密度函数之间的关系. 这种基于任务队列的理论模型将人类的日常行为视为一系

列具有优先级别划分的待解决的任务, 级别高者优先解决. 该模型合理地解释了许多人类行为中的非泊松特性, 而且很容易被推广到存在多个个体交互的情况.

近年来, 社交媒体平台及应用的发展极大地推动了大规模人类行为的实证及统计分析研究进展. 早期关于人类行为的研究假设人类行为的时间间隔分布符合泊松分布. 2005 年, Barabási<sup>[20]</sup> 在《Nature》上发表的论文揭示, 人类行为存在长时间静默与短时间内高频率爆发共存的特性, 明显不符合泊松分布, 开创了人类行为动力学研究的新思路和新方法. 随后, Leskovec 等<sup>[23]</sup> 对 MSN 用户交互行为进行了实证研究, 统计结果显示群体层面上用户的交互时间间隔分布同样表现出了明显的“长尾特征”, 幂律指数为 1.53. Hoteit 等<sup>[24]</sup> 针对人们的移动通讯记录进行分析, 发现行为的时间间隔分布符合幂指数为 1 的幂律分布. 众多研究表明, 该幂律特性是在人类行为中普遍存在的, “长尾效应” 已经成为社会网络中的一种常态现象<sup>[25-29]</sup>. 在这种情境下, 很小的恶意攻击即可瘫痪整个网络, 甚至引发各类群体性社会安全事件, 导致社会动荡、政权更替或国家解体.

周涛等在人类行为动力学方面做了很多工作<sup>[30-39]</sup>, 尤其在涌现行为建模、自组织构型相变机理分析、人类群体动力学行为分析、群集内部通讯网络传播与同步控制等方面取得了突破性进展, 并且系统地发展了群集演化建模、分析、控制和决策方法. 特别地, 针对复杂网络的复杂系统动力学及统计行为进行了研究, 动态地评价了网络的统计分析与信息挖掘, 在推荐系统、信息挖掘及基于互联网的信息物理研究方面也取得了很大的研究进展. 比如, 人类行为时间特性的实证分析和建模, 人类行为空间特性的实证分析和建模, 以及人类行为统计分析的应用研究, 社会网络的结构与演化特性对突发事件的影响等.

## 2 从 SMOs 到 Ce-SMOs 和 CMOs

### 2.1 社会运动组织 (SMOs)

社会运动组织 (Social movement organizations, SMOs) 最早出现在 Zald 等于 1966 年发表在 *Social Forces* 的文章<sup>[40]</sup>. 广义而言, SMOs 是指社会运动的有组织的组成部分, 主要起协调作用, 而非直接雇佣或指导运动中的参与人员. 随后, 引发了众多研究者从个体或社会的角度的对 SMOs 形成、演化和组织过程的讨论<sup>[41-47]</sup>. 影响广泛且代表性的

工作包括资源动员学说、政治机会结构和框架理论等.

资源动员学说从社会运动参与者的动机展开分析, 假设个体均具有理性行为, 通过引入经济学的理性选择模型, 甚至运用博弈论方法计算出: 即使是剧院着火后观众惊慌失措、夺门而出以致相互践踏的行为, 都是个体面对有限资源的理性行为<sup>[41]</sup>. 其中的典型代表有斯梅尔塞 (Smelser Neil Joseph) 的加值理论模型<sup>[43]</sup>、剃利的 (Charles Tilly) 动员学说<sup>[44]</sup>、奥尔森 (Mancur Olson) 的搭便车理论<sup>[45]</sup>、麦卡锡和扎尔德 (McCarthy and Zald) 的社会变迁理论<sup>[46]</sup> 等. 斯梅尔塞受到经济学的启发, 于 1962 年提出了集体行为的加值理论模型. 其理论认为集群行为的产生都有一个确定的模式, 它在发展的每一阶段都是在“追加价值”, 最后才有最终产品, 即集群行为的出现. 其最大的贡献为, 指出了社会运动的兴起与外在资源环境的关系. 剃利的动员模型试图为解释集体行动的产生和发展提供一个普适性的模型. 该模型指出, 一次成功的集体行动是由以下因素决定的: 运动参与者的利益驱动、运动参与者的组织能力、集体行动的动员能力、个体加入集体行动的阻碍或推动因素、政治机会或威胁、集体行动整体所具有的力量, 并且这些因素通过特定的组合对集体行动的形成和进程产生影响. 1965 年, 奥尔森以新古典经济学立论出版了富有创意的著作《集体行动的逻辑》, 通过考虑欧美工会的形成因素, 指出由于集体行动 (社会运动) 为参与成员提供公共产品 (资源), 即使个体不参与社会运动也能获得“收益”, 造成了集体行动的“搭便车”问题. 麦卡锡和扎尔德充分研究了 20 世纪 60 年代欧美发达国家的黑人运动、女权运动以及工人运动等现象, 提出大量社会运动的产生并不是由于社会矛盾、社会剥夺的加剧或者个体怨恨等情绪的增加, 而是可用于发起或参与社会运动的资源大大增加了, 个体参加社会运动是对资源动员理性选择的结果. 相对于集体行为主义理论, 资源动员理论关注的是社会运动发生的组织基础和条件, 解释为什么行动者参与社会运动, 及社会运动是如何获得成功的.

政治机会结构<sup>[47]</sup> 这一概念首先出自彼得·艾辛格 (Peter Eisinger) 对美国城市种族抗议的研究. 他将政治体制的问题引入集体行动的研究, 发现“政治机会结构”形式与抗议行为的出现形成了一种曲线关系, 他称之为“抗议悖论”. 极端开放与极端封闭的政治条件都不利于抗议行为的产生: 开放的政治结构会将社会议题纳入体制内的讨论, 问题尚未引发抗议便已被解决; 封闭的政治机会结构则

没有抗议行为发生的可能性. 因此, 他指出: 最容易形成抗议行为的都是开放性与封闭性兼具的政治机会结构. 而麦克·亚当 (Doug McAdam) 则指出: 经济与社会的变迁是引发政治机会结构改变的主要原因<sup>[48]</sup>. 20 世纪 80 年代后期, 在泰罗 (Sidney Tarrow) 的倡导下, 政治机会结构正式成为一个专门的理论. “政治机会”至少受到 4 个方面因素的影响: 制度化政治体系是否开放; 政党联盟的稳定与否; 精英联盟的存在和缺失; 国家对社会运动镇压的能力和决心. 然而, 政治过程模式在一定程度上始终没有超越资源动员理论的框架, 因而也被有些学者称为资源动员理论的变种<sup>[49]</sup>.

框架理论<sup>[50]</sup>起源于对社会学及认知心理学这两方面的研究. 社会学家戈夫曼 (Erving Goffman) 的框架分析认为, 人们在社会生活中使用特定的“主体框架”来认知世界. 通过对于特定社会角色、社会情境的诠释, 帮助个体“定位、感知、确定和命名”周围的情景及关系. 谢里夫 (Farzad Sharifian) 的参照框架理论<sup>[51]</sup>则认为, 个体的判断和认知是在一个参照框架下进行, 这个框架是一套控制感性认识、逻辑评价或社会行为的标准、信仰或预期. 两者的主要区别在于: 前者认为框架是“情境下构建话语的策略”, 后者认为框架是“内在认知的结构”.

## 2.2 网络促成的社会运动组织 (Ce-SMOs)

互联网的普及所导致的日益增长的信息和理念流动以及来自不同国家的人们和组织关系的变化, 同时引发了 SMOs 参加方式、目标和工具的变化, 并形成了网络所促成的社会运动组织 (Cyber-enabled social movement organizations, CeSMOs)<sup>[11]</sup>.

20 世纪末, 随着经济全球化的发展, 出现了许多关于社会运动的新的问题, 许多学者开始注意到, 不同国家、文化、地域的运动倾向于采取相似的标准、策略和概念; 来自不同国家的活动者不断增长融合且为了相同的奋斗集聚到一起. 针对这两个问题, 文献<sup>[52]</sup>总结了其形成因素. 首先是在全球水平发生围绕运动动员的变化, 例如跨国经济和政治的聚合, 产生了抱怨 (贸易竞争引起的失业) 和目标 (跨国公司和国际机构) 的相同集合. 其次, 全球政治协调使得各个国家具有相似的政府结构<sup>[53]</sup>, 分析家称之为“结构类似”. 由于不同国家情景中的政府组织更具有相似性, 活动者更容易跨越国界分享有用的知识和经验. 再次, 所有类型的国际交换, 包括跨国旅游、交流以及因特网的扩展应用的扩散, 极大地增加了不同国家的居民交流和分享政治参与的想法和经验的机会, 在其他活动中也一样. 全球

互联性也增加了政府对于国际压力的脆弱性.

同时, 互联网的出现扩大了传统媒体形式并且已经成为传播信息和促进交流的一种重要方式. 大众传播媒体的日益私有化减少了非商业化公共目标服务的空间. 公共的担心直接威胁其商业兴趣, 例如全球变暖和公众健康, 在合资媒体中只能收到受限制的和有偏见的报道. 而互联网的出现, 可以帮助这种公共对话和交流, 并创造许多开放的机会. 虽然互联网使得贫穷国家和地区的人们掌握了获得信息的途径, 但是许多社区却缺少有效利用高速连接互联网媒介的关键技术<sup>[54]</sup>.

许多学者针对 CeSMOs 的实例进行了分析讨论. 一些研究者更加注重个人或组织网络对于社会运动结果的重要性. Christopher 等以 Jervay 地区为例, 探讨了小区居民自治与抗争利用网络的现象<sup>[55]</sup>; Clark 等以反全球化抗争为例, 叙述了以网络为基础的连带关系<sup>[56]</sup>; Earl 等亦指出, 互联网可加速社会运动的实践, 并可在网络中提出多样化的运动要求<sup>[57]</sup>. 一言以概之, 正如 Garrett 所指出的, 网络在社会运动中主要发挥了三种不同的功能, 即“网络作为动员结构”、“网络作为政治机会”和“网络作为框架化工具”<sup>[58]</sup>. 显然, 人类生活的数字化和网络化, 使得大规模研究人类行为及其演化、群体组织运动及其内在机理以及源起于微观的宏观现象整体过程成为可能.

## 2.3 网群运动组织 (CMOs)

移动互联网的实时实地特性, 为更快感知社会需求和关注、信息整合、情绪共振、实时分享及高度互动创造了可能, 并使得线上网民行为跨越时间、地域和平台的大规模快速聚集成为常态, 因此一出现就受到了社会运动研究者的关注.

网群运动组织 (CMOs), 可视为通过网络空间中手段和方法诱发或加强的社会运动组织或群体, 其互动演化特征刻画如图 1 所示.

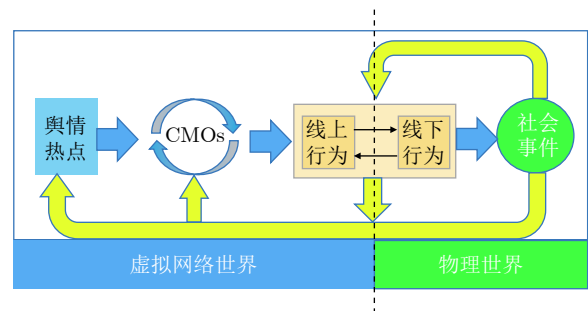


图 1 CMOs 的线上线下互动模式

Fig. 1 Online and offline interaction mode of CMOs

CMOs 遵循一种以目标引导与偶然获得交替并存的演化轨迹<sup>[59]</sup>. 从整个网络发展的宏观角度来看, 大规模网民群体运动及其组织具有很高的不确定性和偶然性, 但在微观层面上却表现出极强的目标引导特性. 以事件作为网民行为组织及演化的驱动因素, 在事件消失之后, 目标引导的群体演变轨迹将丧失其行为牵引的动力, 成为网络空间中偶遇者的一个互动场所. 互不相识的网民由于偶然的因素聚集在一起, 在突发事件的刺激下, 将群体行为引导到实现某一具体目标的方向上来. 经历一段时间后, 该网络或实现了其初始目标或丧失演化的动力, 重新回到除满足若无所图的松散的行动者群体形态. 因此, 在某一特定时间点上, 我们会看到, 网络中出现了若干具有明显互动结构及目标引导的局部中心, 而随着时间的推移, 这些中心会逐渐消失, 取而代之的是许多其他的局部中心和许多结构松散的行动者. 其主要特征可归结为多平台性、动态性、实时性、自组织性、突变性、高度复杂性、虚实交互性等; 其主要组织方式包括但不限于利用新兴的社交媒体平台如 BBS、论坛、博客、微博等发布相关主题性信息, 快速感染、迅速传播并大范围扩散网民群体行为或运动.

有学者依据斯梅尔塞的加值理论模型对网络集体行为的产生进行阐释, 提出了网络集群行为的理论解释模型<sup>[60]</sup> (如图 2 所示), 重点刻画网络传播自身天然具备的将人际传播、群体传播、大众传播, 以及个人议程、媒体议程、团体议程和公众议程机制

包容在内的特点, 以深入揭示网络集群行为发生和发展的复杂机制. 与物理空间中的 SMOs 有很大不同, 虚拟空间中的 CMOs 在整个演化过程中表现出非常快速的形成、传播及演化特征, 同时伴随着大量人群的高度互动、情绪共振及深度参与, 有时还会出现许多“逆反”和“极化”的行为表现, 引发大量关注<sup>[61]</sup>.

网络中网民行为的互动表现在多个层面: 在不同形态媒介间的跨平台互动、在同一媒体平台上不同主题的互动、围绕同一主题不同观点和情感的表达与互动等. 网络空间中发生的事件很容易与物理社会中的事件“交相呼应”, 许多学者指出, 网络热点与社会热点日益汇流、促进、共振, 线上和线下联动趋势明显, 例如对于特定类型事件的共振、事件对象的共振、特定情绪的共振等. 网民行为逆反主要表现为网民发表言论、观点、认知或者精神的逆反, 这被认为是一种“反沉默螺旋”的表现<sup>[62]</sup>. 在推崇个性化和多元化的网络世界中, 许多个体希望借助“特立独行”的方式, 引发关注及认同. 网络群体极化是指网络群体成员就某一事件进行反复讨论时, 最终将形成非常极端的观点. 其主要表现为: 网民讨论主题的极化、讨论指向的极化以及情绪的极化等.

本质上, CMOs 的建模、演化及评估, 均属于社会系统研究范畴. 针对复杂社会系统的建模问题, 兰德公司在上世纪 90 年代初提出了人工社会建模方法<sup>[63-64]</sup>. 借助多智能体建模的方法, 基于自下而上

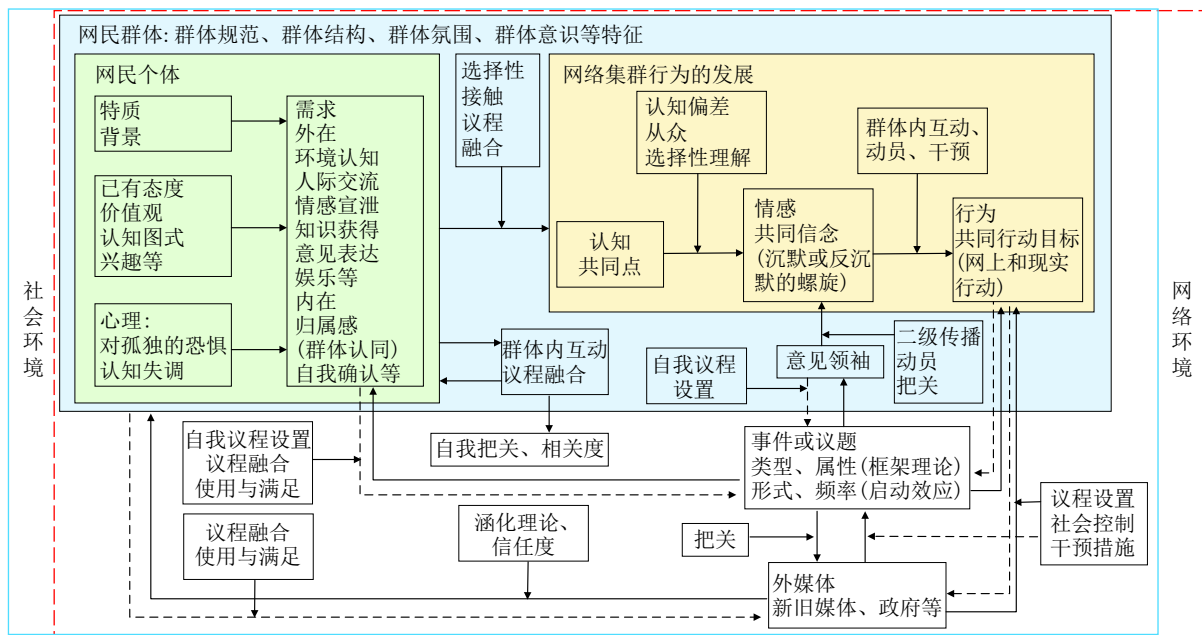


图 2 网络集群行为的理论解释模型

Fig. 2 Theoretical interpretation model of network cluster behavior

的思路对构成系统的模块、模块与模块之间的关联(结构、功能等)、模块间的信息流动等进行建模,从而帮助人们更好地理解系统在不同层次的结构和功能特性。

已有的研究指出,从实际出发,通过将复杂复杂社会网络系统中的个体抽象为一个个具有自主行为且相互作用的智能体,可为复杂系统的研究提供一个更为清晰直观的研究视角. Jiang 等<sup>[65]</sup>试图从多智能体的角度理解社会网络的运行,以多智能体建模的思路针对协同式社会网络、非协同式社会网络以及多元复合社会网络系统展开研究,探索了社会网络与多智能体系统之间的关联. Lane 等<sup>[66]</sup>设计了一个名为“协同社区”(Cooperative communities)的框架,该框架能够融合多个社会网络并识别用户的相似性,从而实现跨平台的用户分类及其协同活动的识别. Mohamed 等<sup>[67]</sup>使用多智能体建模方法研究了社会网络系统中的社会行为传播和演化问题, Radinsky 等<sup>[68]</sup>采用物理学及信号处理中的方法构建了一个时序建模框架,可用于在线搜索行为的时序模式预测. MAS (Multi-agent system) 方法不仅可以从微观层面上帮助我们更好地理解个体行为及其动机,同时为不同场景中问题的建模和实验提供了可靠输入。

在此基础上,中国科学院自动化研究所的王飞跃研究员提出人工社会 (Artificial societies)、计算实验 (Computational experiments) 和平行执行 (Parallel execution) 有机组合的 ACP 方法,不以逼近和还原唯一实际的复杂现象为唯一目标,而将模型运行结果作为实际复杂系统运行的一种可能的替代,为复杂系统问题的分析研究提供了一种新思路. 该方法已在很多领域开展了应用<sup>[69-78]</sup>, 例如, 平行应急管理<sup>[69]</sup>、平行交通<sup>[70]</sup>、平行驾驶<sup>[71]</sup>、平行车联网<sup>[72, 73]</sup>、平行测试<sup>[74]</sup> 等领域, 并取得了很好的应用效果。

### 3 基于 ACP 的 CMOs 的建模分析

本文将 ACP 方法引入对 CMOs 的组织动力学研究中, 提出基于 ACP 的 CMOs 建模分析方法. 以自底向上的多智能体建模方式, 通过赋予智能体自主行为的能力、定义智能体操作对象并设计其行为规则, 模拟网民在网络社区中的动态交互行为并搭建相应的人工社区环境. 通过对个体行为机制的设计与调整, 观察其对群体行为分布特征的影响。

基于 ACP 的 CMOs 演化分析与评估的人工社会+计算实验框架如图 3 所示<sup>[79-80]</sup>。

人工社区充分考虑个体、个体交互以及环境之

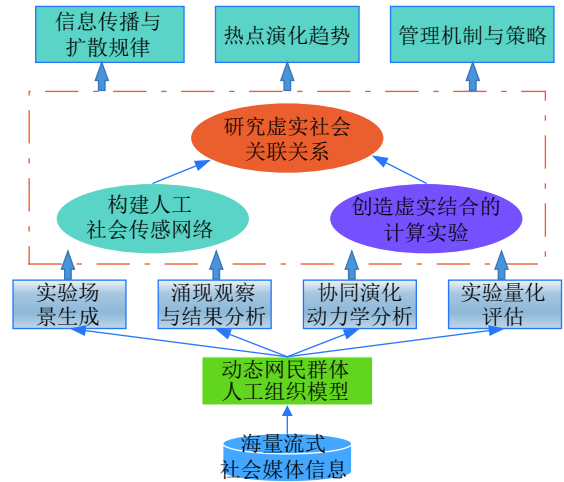


图 3 CMOs 的人工社会建模和计算实验评估框架

Fig. 3 The artificial society modeling and computational experiment evaluation framework for CMOs

间的微观交互与影响. 在人工社区环境中, 可以通过参数及特征调整, 设置特殊的社区场景, 同时加入具有特殊行为模式的智能体个体, 可实验并观察特定比例下群体行为分布状态的差异. 一方面可用于帮助社区管理者发现并识别特殊人群并评估其比例, 消除人为恶意干涉; 另一方面可以真实社区数据为输入, 计算社区将来演化形态, 进行引导及管理。

计算实验考虑随机因素对于群体行为演化过程的影响, 计算相同场景中相同人员构成条件下人工社区未来的演化状态, 以概率性的方式预测未来状态发生的可能性。

#### 3.1 基于多智能体的人工社区建模方法

Agent 一词最早出现于马文·明斯基 (Marvin Minsky) 1986 年出版的“*The Society of Mind*”一书<sup>[81]</sup>, 书中使用了“Society”以及“Social Behavior”的概念强调个体在社会环境下面临矛盾时通过协商或竞争的方法实现问题求解的协同模式. 后来 Wooldridge 等在总结了前人工作的基础上提出, Agent 是一个具有自主性、社会交互性、反应能力和预动能力<sup>[82]</sup>等性质的基础硬件或计算机系统软件. Russell 等<sup>[83]</sup>则提出 Agent 能够感知并理解环境, 而且能够基于对环境理解调整并执行自己的决策行为, 以达到一个或多个预定的目标. 图 4 所示为 Agent 的通用结构模型。

本文中 Agent 定义为一个具有自主性、社会交互性、反应能力的软件定义的模块, Agent 能够感知和理解环境并在此基础上调整自己的行为决策, 以协商或竞争的方式实现对某一问题的求解、

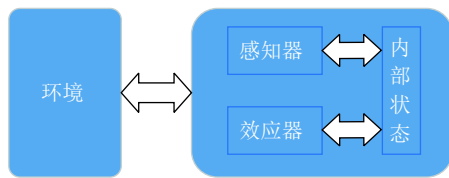


图 4 Agent 通用结构模型

Fig. 4 General structure of an agent

任务的执行或目标的达成。

基于多智能体的思想对人工社区进行搭建, 主要考虑 4 个方面的因素: 智能体个体、智能体的操作对象 (本文中智能体的操作对象指话题)、智能体行为规则以及智能体与社区环境的协同演化。其主要思想为: 每个智能体具有独立自主的行为能力, 在系统运行过程中, 智能体之间保持相对独立, 通过对环境的感知根据设定的规则对其操作对象执行操作, 更新自身状态并再次影响社区环境。智能体的个体不具备处理复杂问题的能力, 通过抽象并简化行为规则促进智能体之间的协作以及智能体与环境的交互, 实现复杂的、多样的、有特定目标引导或功能约束的任务。多智能体的人工社区建模方式主要具有以下优势:

1) 采用自底向上的建模思路, 以单个智能体为建模单位, 最终将整个系统抽象成由相互作用的个体构成的行动网络, 以更好地阐释系统不同层次的结构和功能特性, 极大地降低了建模的复杂程度。

2) 智能体具备自主的、简单的学习和推理能力, 可结合自身属性特征与社会环境的双重影响调整自身的行为策略, 以信息交流共享的方式与其他智能体产生交流互动, 同时推动社区环境的演化, 使得整个人工系统表现出动态交互和协同演化的特征。

3) 智能体之间以及智能体与社区环境相互作用和影响, 推动人工系统的演变和进化。智能体之间的相互作用也是群体涌现行为的基础, 相互作用越强, 系统的复杂程度越高。

4) 多智能体系统具有很强的灵活性, 支持分布式的应用。随着 CMOs 的演化, 其中的智能体的数量和类型也会随之发生改变, 基于多智能体的建模为智能体数量的增减及其类型的变化提供了灵活便捷的手段。

5) 引入复杂系统思想, 基于多智能体的建模方式, 将宏观和微观有机联系起来。智能体个体的自主性、交互性使得个体行为的变化成为系统变化的基础, 为理解复杂群体现象的产生提供了清晰的思路。

### 3.2 基于多智能体的社区系统结构建模

Agent 结构建模是复杂多 Agent 系统研究的基

础, 典型的 Agent 基本结构模型包括认知型、反应型和混合型<sup>[84]</sup>。符号主义<sup>[85]</sup>是人工智能研究中的经典学派, 其核心思想在于: 智能发生的基元是符号; 智能过程就是符号运算过程; 智能行为的充要条件是物理符号系统, 人脑、电脑都是物理符号系统; 智能的基础是知识, 其核心是知识表示和知识推理; 知识可用符号表示, 也可用符号进行推理, 因而可以建立基于知识的人类智能和机器智能的统一的理论体系。

本文采纳符号主义的思想, 使用一种 6 元组对复杂社会社区系统中 Agent 的结构进行描述:

$$Agent ::= \langle Identification, Type, KB, SS, RS, AS \rangle \quad (1)$$

其中,

*Identification* ::  $\langle Agent$ 标识 $\rangle$ : 智能体的唯一标识;

*Type* ::  $\langle Agent$ 类型 $\rangle$ : 类型往往表示智能体的领域特征或能力特征, 一组 Agent 可以由相同类型的智能体组成, 也可由多种类型智能体组成;

*KB* ::  $\langle KnowledgeBase$ (知识库) $\rangle$ : 是智能体知识的集合, 在不断地交互和演化过程中, 智能体的知识会发生扩充, 知识库的差异导致智能体个体在面临相同环境时可能选择完全不同的行为规则;

*SS* ::  $\langle StateSet$ (状态集) $\rangle$ : 智能体的内在状态的表示, 例如智能体在社会网络中的活跃程度, 表示了个体在某一时刻的主观能动性;

*RS* ::  $\langle RuleSet$ (规则集) $\rangle$ : 表示智能体的自主行为及状态变化所要遵循的约束, 以外部信息为输入, 并与规则库中的规则进行匹配, 执行相应动作;

*AS* ::  $\langle ActionSet$ (动作集) $\rangle$ : 指 Agent 在运行相应规则之后所要执行的动作的集合。

### 3.3 双层人工社区结构建模与计算实验分析

通过引入多智能体技术方法, 本部分内容从自底向上建模的角度考虑个体心理状态及环境因素对个体行为机制的微观作用, 结合从论坛数据中抽取出的网民行为特征, 以自底向上的方式构建双层人工网络社区结构, 借助计算实验的手段验证人工社区的灵活性和稳定性。针对用户的发帖行为和评论行为设计微观个体行为机制, 以计算实验的手段验证个体内在属性以及外在环境因素对个体行为决策的影响。

#### 3.3.1 社区环境抽象表示

显性的来看, 一个社区论坛可被抽象为一个两层结构的系统: 用户层和内容层。内容层由一个个的话题组织而成, 同时话题按照热度递减的规则进行排序, 形成话题列表。假设一个论坛中有  $M$  个页

而且每个页面包括  $N$  个话题, 那么在任一时刻, 社区的环境内容都可使用一个话题矩阵进行表示.

$$Environment_{Content}^T = \begin{bmatrix} tp_{0,0}^T & \dots & tp_{0,j}^T & \dots & tp_{0,N-1}^T \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ tp_{i,0}^T & \dots & tp_{i,j}^T & \dots & tp_{i,N-1}^T \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ tp_{M-1,0}^T & \dots & tp_{M-1,j}^T & \dots & tp_{M-1,N-1}^T \end{bmatrix} \quad (2)$$

$Environment_{Content}^T$  记录了  $T$  时刻所有话题的位置.  $tp_{i,j}^T$  表示  $T$  时刻在页面  $i$  上排序为  $j$  的话题. 由于所有话题按照热度的降序排列, 可以推断, 此时该话题在整个话题列表中的位置为  $i \times N + j + 1$ . 热度最高的  $N$  个话题被置于首页. 此外, 话题矩阵的使用大大地降低了社区环境的描述复杂度, 同时降低了社区规范的描述复杂度. 图 5 所示为两层社区结构的示意图.

### 3.3.2 基于多智能体的双层人工社区结构建模

一个人工社区系统可视为由 2 类对象 (智能体与话题) 及其互动规则构成的动态演化系统. 在同一时刻, 所有的智能体面对相同的社区环境. 智能体能够创建帖子或者发布评论, 而一个帖子及其众多评论组成了一个话题. 对于智能体来讲, 社区中的所有个体及存在的话题组成了他们的社会环境空间, 人工社区系统可表示为:

$$Community := \{Agent, Topic, Rule\} \quad (3)$$

Agent 的模型结构使用一个多元组表示, 如下所示:

$$Agent := \{Identification, Type, Age, GrowthRate, Knowledge, State, Rule, Action, A\_topics\} \quad (4)$$

$Identification$  是智能体的唯一身份标识.

$Type$  表明智能体的类型, 本文中智能体包括两种类型: 普通网民用户 (0) 和水军 (1).

$Age$  记录智能体的年龄.

$GrowthRate$  表示智能体的生长速度. 本文设计的人工社区考虑动态生长的智能体. 考虑网络社区中用户群体的生命长度的分布, 并将智能体的单次评论行为占总体评论数量的比例作为智能体的生长速度, 那么单个智能体的生长速率可以通过以下公式进行计算:

$$gr_a = \frac{1}{Number\_of\_messages\_published\_by\_Agent_a} \quad (5)$$

$Knowledge$  描述了智能体发布新信息 (帖子及评论) 的活跃度或主观能动性.

$State$  描述了智能体的知识领域或兴趣空间, 可用一个关键词向量对其进行表示.

$Rule$  规定了智能体的行为交互规则, 规定了智能体及其环境在满足什么条件时, 可以执行什么行为.

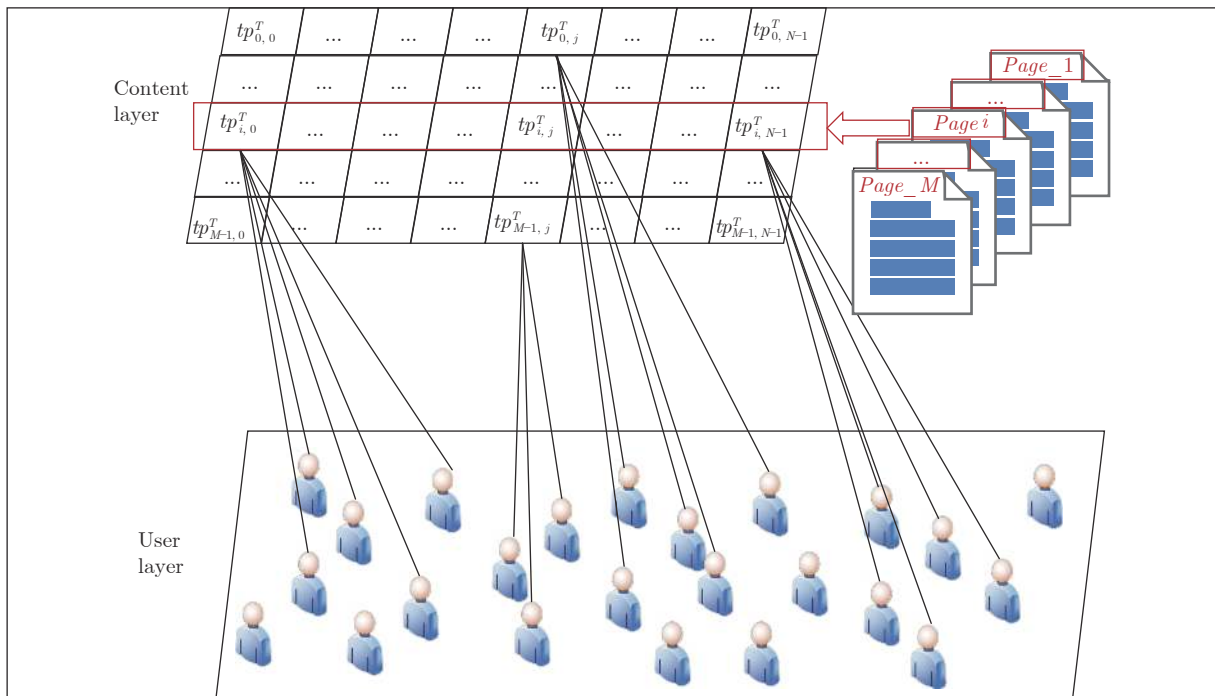


图 5 人工社区的双层结构

Fig. 5 The double-layer structure of artificial community



*Action* 为智能体的行为集合, 本文主要考虑个体的发帖行为以及评论行为。

$A\_topics$  记录了每一时刻智能体参与的话题集合。

智能体的社会环境即为社区的话题空间, 以话题矩阵的方式呈现, 话题也即智能体的操作对象, 此处 Topic 结构模型使用一个多元组来表示其结构模型:

$$Topic := \{Identification, T\_Position, Theme, T\_LifeLength, T\_Agents, State, Rule\} \quad (6)$$

*Identification* 为话题的唯一身份标识。

*T\\_Position* 记录了话题在矩阵中的位置变化。

*Theme* 为话题所要表达的主题, 在人工社区中使用一个关键词向量表示。

*T\\_LifeLength* 表示话题的年龄, 即话题的生命长度。一般而言, 话题的生命长度与参与话题的智能体的生命长度有关。

*T\\_Agents* 为每个时步参与话题评论的智能体集合。

*State* 为话题的状态集合, 有 0 和 1 两个状态, 状态为 0 时话题死亡; 状态为 1 时话题是活跃话题。

*Rule* 为话题的主题更新规则, 随着智能体的评论行为而变化。

*Rule* 明确记录了智能体如何进行交互以及如何对话题执行动作。人工社区的运行满足如下机制: 社区内的话题层对所有的智能体都是开放的, 并且每时步都会发生更新; 如果多个智能体在同一时间加入社区, 那么他们会看到完全一样的社区环境; 智能体的行为同时受到外部 (话题层) 和内部 (智能体自身的属性, 如主观能动性、活跃度、知识范围等等) 因素的影响; 智能体在对话题执行操作时, 会改变话题的排序进而引发社会环境变化, 同时对于话题的动作也会影响智能体自身的属性 (如知识范围), 两者协同促进了社区的动态演化, 如图 6 所示。

### 3.4 互动规则设计

人工社区中的智能体并不直接进行交互, 而是通过发布帖子或者评论表达自身的观念。智能体与话题之间的互动共同推动了社区的演化。

#### 3.4.1 智能体: 帖子发布规则

相对于日常行为, 人们往往在面临非常规情况或者行为时, 更容易执行搜索、发帖或者评论行为。本文设计的人工社区同时考虑这一点因素, 设定当一个智能体有意愿发布新信息, 但是当前社区中并没有提供个体所要发布信息的通道时, 个体会发布一个新帖, 引发大家对相关主题的讨论。使用活跃度表示个体发布信息的“意愿”, 则智能体的新帖

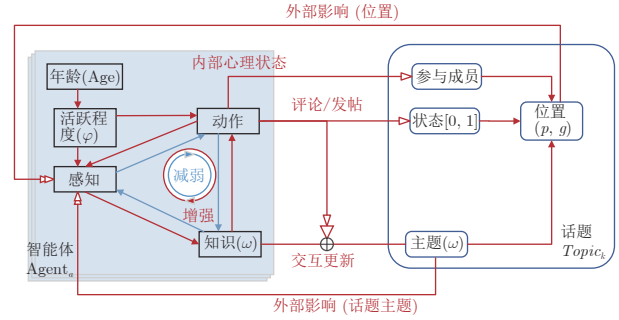


图 6 基于多智能体建模的网络社区计算实验框架

Fig. 6 Computational experiment framework of network community based on multi-agent modeling

发布行为可表示为:

$$\begin{aligned} & \text{IF} (Activity_a^{T_l} > \varphi) \text{ and} \\ & \quad (Sim(AK\_Value_a^{T_l}, TV\_Theme^{T_l}) < \omega) \\ & \text{THEN } Agent\_a \text{ publish\_a\_new\_post} \quad (7) \end{aligned}$$

$\varphi$  为智能体的活跃度阈值, 当智能体在时刻  $T_l$  的活跃度超过  $\varphi$  时, 具有发布新信息的意愿。该参数强调了个体主观能动性在发布新帖行为中的重要性。

$\omega$  定义为智能体的知识集与话题空间领域知识的相似度阈值。  $TV\_Theme^{T_l}$  展现了  $T_l$  时刻社区话题环境的一个静态切面。

当  $Sim(AK\_Value_a^{T_l}, TV\_Theme^{T_l}) < \omega$  时, 个体认为整个社区话题环境中不存在与自身知识十分相似的内容, 此时为了更好地表达自身观念, 智能体  $Agent_a$  将发布一个新帖并提供发表与其自身知识相似的信息的入口。  $Sim(AK\_Value_a^{T_l}, TV\_Theme^{T_l})$  按照下式进行计算。

$$Sim(AK\_Value_a^{T_l}, TV\_Theme^{T_l}) = \text{Max}_{TP_k^{T_l}} Sim(AK\_Value_a^{T_l}, TV\_Theme_k^{T_l}) \quad (8)$$

$$Sim(AK\_Value_a^{T_l}, TV\_Theme_k^{T_l}) = \frac{AK\_Value_a^{T_l} \cdot TV\_Theme_k^{T_l}}{\sqrt{|AK\_Value_a^{T_l}| \cdot |TV\_Theme_k^{T_l}|}} \quad (9)$$

$\text{Max}_{TP_k^{T_l}}$  表示  $T_l$  时刻所有话题中主题与智能体  $Agent_a$  知识空间最为相似的话题。

$Sim(AK\_Value_a^{T_l}, TV\_Theme_k^{T_l})$  表示话题  $Topic_k$  的主题与智能体  $Agent_a$  的知识相似度。

#### 3.4.2 智能体: 评论发表规则

智能体在发表评论时考虑来自两个方面的影响: 社区环境 (即话题矩阵) 的影响以及智能体自身属性, 特别是自身知识领域和活跃度的影响。因此, 使用式 (10) 表示智能体  $Agent_a$  在时刻  $T_l$  针对话题  $Topic_k$  发表评论的概率。

$c_1$  是环境影响因子,  $c_2$  为内在驱动因子, 且有  $c_1 + c_2 = 1$ .

$P_{outside}(Topic_k, T_l)$  表示外部环境因素影响下,  $Agent_a$  对话题  $Topic_k$  评论的概率.

$P_{inner}(Agent_a, Topic_k, T_l)$  表示在自身认知的影响下,  $Agent_a$  于  $T_l$  参与话题  $Topic_k$  评论的概率.

假设话题  $Topic_k$  在  $T_l$  时刻的位置

$$T\_Position_k^{T_l} = \langle p, g \rangle$$

则  $Topic_k$  被评论的概率可以通过下式进行计算:

$$P_{outside}(Topic_k, T_l) = P_{page}(p) \cdot P_{list}(g) \quad (11)$$

$P_{page}(p)$  为页面  $p$  被点击的概率.

$P_{list}(g)$  为页面上列表索引位置  $g$  被点击的概率.

很显然, 该式计算与时间无关. 此外, 当分开考虑话题所在的页面索引  $p$  和页面上的列表索引  $g$  时, 页面  $p$  与话题吸引评论能力的关系为:

$$ACV(p) = \alpha \cdot p^{-\gamma} \quad (12)$$

页面上列表位置与话题吸引评论能力的关系为:

$$ACV(g) = \alpha \cdot g^{-\gamma} \quad (13)$$

其中,  $\gamma$  和  $\alpha$  可以由具体数据实证分析来获得.

$$P_{page}(p) = \frac{ACV(P\_p)}{\sum_{p=0}^{M-1} ACV(P\_p)} \quad (14)$$

$$P_{list}(g) = \frac{ACV(P\_pg)}{\sum_{g=0}^{N-1} ACV(P\_pg)} \quad (15)$$

$P_{inner}(Agent_a, Topic_k, T_l)$  表示智能体  $Agent_a$  在其内在因素驱动下, 在  $T_l$  时刻对话题  $Topic_k$  的评论概率, 使用下式进行计算:

$$P_{inner}(Agent_a, Topic_k, T_l) = Activity_a^{T_l} \cdot Sim(AK\_Value_a^{T_l}, TV\_Theme_k^{T_l}) \quad (16)$$

$Activity_a^{T_l}$  表示  $T_l$  时刻, 智能体  $Agent_a$  的活跃度.

### 3.4.3 智能体: 知识更新规则

考虑降低计算的复杂性, 人工社区中的智能体知识的关键词向量和话题的关键词向量可设置为相同元素和长度. 智能体和话题之间的交互会改变其知识向量值和主题向量值在不同关键词上的分布. 因此, 智能体的知识更新可视为其知识向量值的更新计算.

智能体  $Agent_a$  在时刻  $T_l$  的知识更新受到两个因素的影响, 智能体自身在上一时刻的知识以及它从话题环境中学习到的新的知识. 因此, 智能体  $Agent_a$  的更新规则可见式 (17).

$AK\_Value_a^{T_{l-1}}$  为  $T_{l-1}$  时刻智能体  $Agent_a$  的知识表示;

$Sim(AK\_Value_a^{T_{l-1}}, TV\_Theme_k^{T_{l-1}})$  表示智能体  $Agent_a$  与其参与讨论的话题主题  $Topic_k$  的知识相似程度;

$Topic_k \in A\_Topic_a^{T_{l-1}}$  表示  $T_{l-1}$  时刻智能体  $Agent_a$  参与的所有话题集合;

$TV\_Theme_k^{T_{l-1}}$  为智能体参与话题集合中的  $Topic_k$  在  $T_{l-1}$  时刻的主题.

### 3.4.4 话题: 排序更新规则

话题在接收评论的同时, 其排序位置会随之改变, 当设置系统运行时步足够小的时候, 每个时步内只有一个话题得到推送, 进行位置更新, 该话题排序索引成为首位, 而其他话题排序索引随之移一位.

### 3.4.5 话题: 主题更新规则

智能体通过不断地参与话题评论改变已有话题的主题分布, 话题不断接收智能体的评论, 从而使得自身主题对关键词上的覆盖产生变化, 见式 (18).

$T\_Theme_k^{T_{l-1}}$  表示  $T_{l-1}$  时刻话题  $Topic_k$  的讨论主题;

$Agent_a \in T\_Agent_k^{T_{l-1}}$  为  $T_{l-1}$  时刻所有参与话题  $Topic_k$  讨论的智能体集合;

$AK\_Value_a^{T_{l-1}}$  表示  $T_{l-1}$  时刻智能体  $Agent_a$  的知识分布.

$$P_{comment}(Agent_a, Topic_k, T_l) = \frac{2 \cdot (c_1 \cdot P_{outside}(Topic_k, T_l)) \cdot (c_2 \cdot P_{inner}(Agent_a, Topic_k, T_l))}{c_1 \cdot P_{outside}(Topic_k, T_l) + c_2 \cdot P_{inner}(Agent_a, Topic_k, T_l)} \quad (10)$$

$$AK\_Value_a^{T_l} = AK\_Value_a^{T_{l-1}} + \sum_{Topic_k \in A\_Topic_a^{T_{l-1}}} Sim(AK\_Value_a^{T_{l-1}}, TV\_Theme_k^{T_{l-1}}) \cdot TV\_Theme_k^{T_{l-1}} \quad (17)$$

$$TV\_Theme_k^{T_l} = T\_Theme_k^{T_{l-1}} + \sum_{Agent_a \in T\_Agent_k^{T_{l-1}}} Sim(TV\_Theme_k^{T_{l-1}}, AK\_Value_a^{T_{l-1}}) \cdot AK\_Value_a^{T_{l-1}} \quad (18)$$

## 4 用户发帖与评论行为的计算实验探讨

用户交互行为的计算实验是认识网民群体行为内在演化规律的重要技术手段,也是开展网络社会行为引导策略的基础.使用人工社区对网民交互行为进行建模,结合计算实验方法对个体行为机制与群体交互行为组织演化的影响进行解析,通过可重复性的实验计算,分析网民用户的异质性及其行为多样性对于群体演化的作用,有助于掌握微观个体与宏观现象的关联效果,并设计针对性的调控策略.

### 4.1 智能体行为机制设计

网民在社区中的常见行为包括:浏览话题、发布帖子和发表评论.本文考虑话题在社区页面排序随其评论数量变化而更新位置的情况.因此,涌现出的结果就是话题在社区页面的排序,本文重点考虑的网民行为包括帖子发布和评论发布.为了详细揭示这两类微观行为机制设计的原理与考虑因素,以及相应的计算实验的设计,本文针对帖子发布和评论发布设计了两项计算实验案例.在设计具体的计算实验之前,首先使用一组智能体和一个话题矩阵对人工社区进行初始化.话题矩阵可设置为空.在演化过程中,智能体动态地操作话题以此与社区环境及其他智能体产生交互,直至智能体死亡.在整个社区演化过程中,会不断有新智能体生成或死亡.同时,话题矩阵、智能体知识、智能体状态和话题主题每时步都会更新.本文重点展现以下两项计算实验设计案例.

### 4.2 发帖行为的计算实验与设计

本实验考虑的场景为个体行为机制对群体发帖行为的分布影响,具体设计为:

设定当一个智能体有意愿发布新信息,但是当前社区中并没有提供个体所要发布信息的通道时,个体会发布一个新帖,引发大家对相关主题的讨论.使用活跃度表示个体发布新信息的“意愿”.个体活跃度阈值指的是当智能体在某个时刻的活跃度超过一定范围时,具有发布新信息的意愿.该参数强调了个体主观能动性在发布新帖行为中的重要性.而相似度阈值指的是智能体的知识集与话题空间领域知识的相似度阈值,当个体认为整个社区中话题环境中不存在与自身知识十分相似的内容时(相似度小于相似度阈值),为了更好地表达自身观念,

该实验内容研究个体行为机制如何导致了群体发帖行为的分布.当设计个体发帖行为机制时,主

要考虑两个因素,个体活跃度阈值 $\varphi$ 以及个体知识与话题矩阵的相似度阈值 $\omega$ (简称为兴趣相似度阈值).此处主要考虑这两个因素在个体发帖行为规则中的变化对于群体行为分布的影响.

假设初始情况下,人工社区中有3000个具有不同属性参数(生长速率、知识空间、活跃度函数)的智能体个体.智能体的最大生长速率设置为0.1,从而使得一个智能体至少存活10个时间步长.该场景的初始运行周期为1000个时步.智能体的知识向量值随机初始化为0~1的取值,表示个体知识在某个关键词上的分布.若某一 $value_{ak_\omega} = 0$ ,则表明 $Agent_a$ 没有关于 $keyword_\omega$ 的知识.其中,兴趣相似度阈值 $\omega$ 的变化影响群体行为模式,个体活跃度阈值 $\varphi$ 影响群体发帖行为分布.本实验的主要目的是检验群体行为分布的形态是否同时受到智能体数量及个体活跃度阈值的影响,实验设计参数如表1所示.以表格中参数作为初始条件输入,运行人工社区.为了避免随机性,可以令每次实验运行100次,并记录整个社区中智能体的群体发帖行为的分布,并使用指数函数对其分布进行拟合.通过该实验可以验证个体知识相似度阈值的调整变化是否会对智能体群体的发帖行为分布产生影响.

表1 个体知识相似度阈值 $\omega$ 对于群体发帖行为分布的影响实验参数  
Table 1 Computational experimental parameters for the experiment on the influence of crowd behavior distribution by individual knowledge similarity threshold  $\omega$

Parameters	Values
$\omega$	0.01 ~ 0.09
$\varphi$	0.5
$Max\_A_a$	$p(Max\_A_a = X) = 0.1,$ $X = 1.1, 1.2, \dots, 2.0$
$GrowthRate_a$	$p(gr_a = Y) = 0.1,$ $Y = 0.01, 0.02, \dots, 0.1$
Initial num of Agents	3 000
Num of new Agents added at each time step	30
$Knowledge$	$[a, z]$
$ AK\_Value_a^{T_i}  =  TV\_Theme_k^{T_i} $	26
$value_{ak_\omega}$	$p(value_{ak_\omega} = Z) = 0.1,$ $Z = 0.05, 0.1, \dots, 0.5$
C	10
Time	1 000

图7所示为个体的兴趣相似度阈值发生变化时,群体发帖行为的分布情况.可以看出,智能体的发帖行为分布表现出了明显的“长尾效应”,其幂指数在-1.004到-1.167之间.每时步新增智能体数量不影响社区群体发帖行为的分布,个体兴趣相似

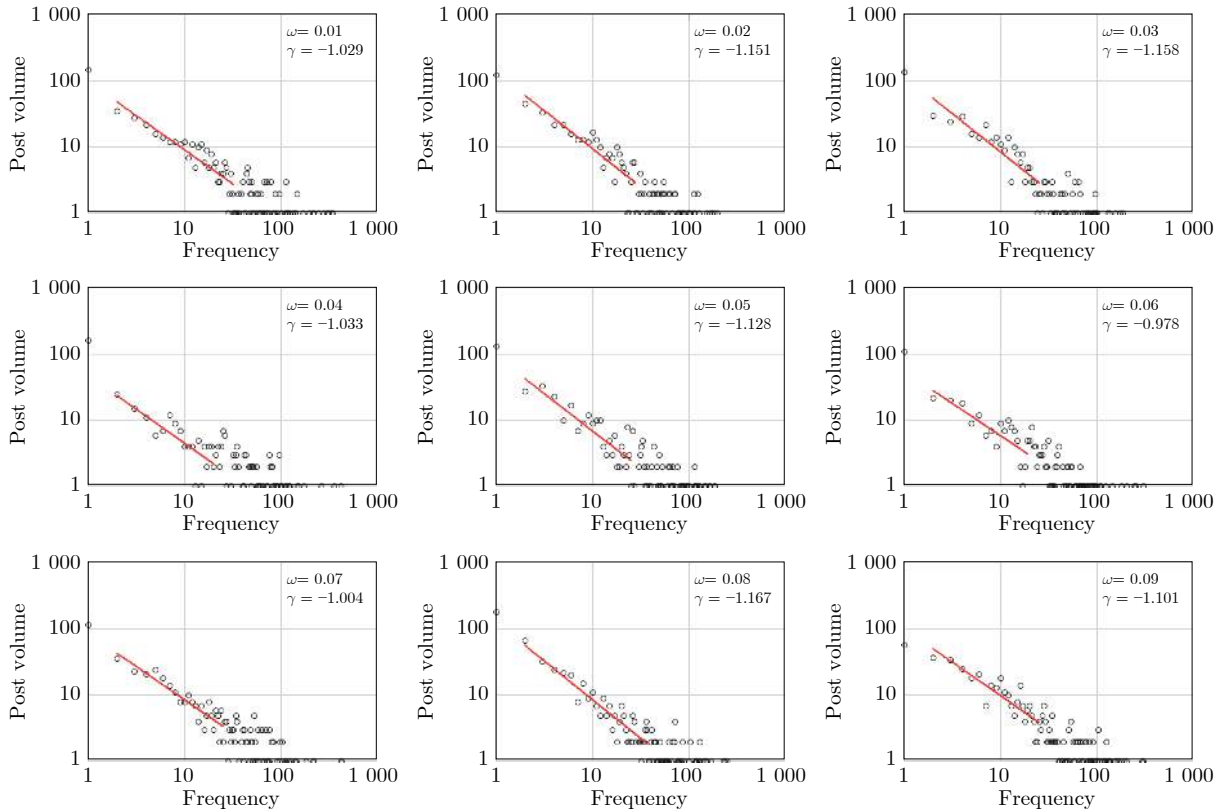


图 7 兴趣相似度阈值  $\omega$  变化时, 群体发帖行为的分布情况  
 Fig. 7 The distribution of crowd posting behavior when  $\omega$  changes

度阈值的变化对于智能体群体的发帖行为的分布几乎没有影响。

进一步扩展  $\omega$  的区间到  $\omega=[0.01, 0.99]$ , 每次运算 100 次, 群体行为分布函数中幂指数  $\gamma$  与拟合精度  $R^2$  的稳定情况如图 8 所示。图 8 左图刻画了  $\omega$  取不同值时, 幂指数  $\gamma$  的变化情况; 图 8 右图刻画了  $\omega$  取不同值时, 拟合精度  $R^2$  的变化情况。  $\mu(\gamma)$  和  $\theta(\gamma)$  分别表示  $\gamma$  的平均值和方差。  $\mu(R^2)$  和  $\theta(R^2)$  分别为  $R^2$  的均值与方差。图中可以看出, 人工社区的运行十分稳定。

后续工作将拓展探讨个体活跃度状态对于群体发帖行为分布的影响。

### 4.3 评论行为的计算实验与设计

本实验考虑的场景为个体评论机制与群体评论行为分布之间的相互影响, 具体设计为:

从两个方面考虑社区中智能体的数量变化是否会影响群体行为的分布。一方面, 当社区中给定固定数量的话题, 并在每时步生成固定数量的智能体时, 初始智能体数量是否会对整个社区中智能体评

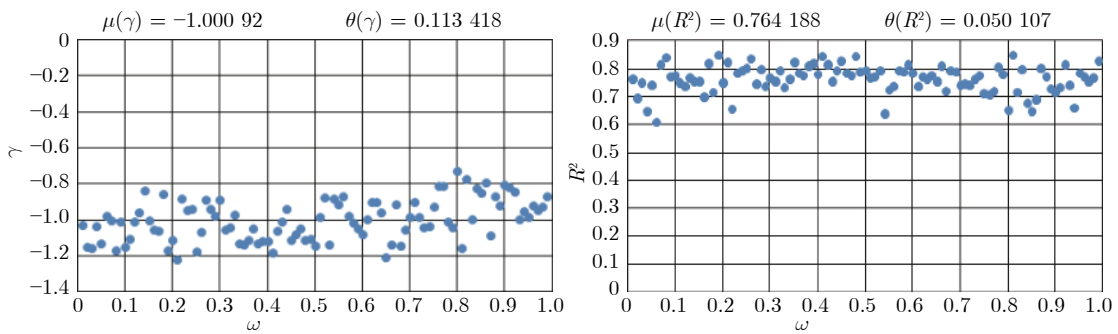


图 8 兴趣相似度阈值  $\omega$  取  $[0.01, 0.99]$  时, 群体发帖行为分布的参数变化情况  
 Fig. 8 The distribution of crowd posting behavior when  $\omega$  changes

论行为的分布产生影响; 另一方面, 当社区中给定固定数量的初始智能体和话题数量时, 每时步生成不同数量的新加入智能体是否会对整个社区中智能体评论行为的分布产生影响. 另外, 在构建个体评论行为机制时, 考虑了两方面的因素: 内在驱动因素 (个体的主观能动性和知识空间), 以及外在影响因素 (其他智能体行为及话题矩阵影响). 本文简单展现一种场景案例, 探讨初始化的智能体数量对于群体评论行为的影响 (具体参数如表 2 所示).

该场景探讨初始化智能体的数量是否会影响群体评论行为的分布. 初始化智能体数量设置在 100 ~ 3 000 之间, 智能体个体根据互动规则进行个体知识更新同时改变话题矩阵及话题的主题. 通过该实验可以验证初始智能体数量的差异是否可以改变智能体群体的评论行为分布, 从而验证结果与真实社区情况是否一致.

群体评论行为分布实验结果如图 9 所示. 很显然, 初始智能体数量的差异并不能改变智能体群体的评论行为分布. 评论数量及其频率满足幂律分布且双对数坐标下表现为斜率在  $-1.524 \sim -1.585$  之间的直线. 这与真实社区情况十分一致, 无论社区中成员数量如何, 其评论行为总是符合幂律分布.

综上所述, 计算实验结果表明, 群体发帖行为

表 2 初始智能体数量变化对群体评论行为影响的实验参数

Table 2 Computational experimental parameters of the effect crowd comment behavior by the number of initial agents

Parameters	Values
$Max\_A_a$	$p(Max\_A_a = X) = 0.1,$ $X = 1.1, 1.2, \dots, 2.0$
$GrowthRate_a$	$p(gr_a = Y) = 0.1,$ $Y = 0.01, 0.02, \dots, 0.1$
Initial num of Agents	100 ~ 3 000
Num of new Agents added at each time step	30
Number of Topics	1 000
$Knowledge$	$[a, z]$
$ AK\_Value_a^{T_1}  =  TV\_Theme_k^{T_1} $	26
$value_{ak\_w}$	$p(value_{ak\_w} = Z) = 0.1,$ $Z = 0.05, 0.1, \dots, 0.5$
$c_1$	0.9
C	10
Time	1 000

分布的形成与组成群体的个体行为的兴趣无关; 个体发帖行为与当前社区中已有帖子内容无关; 与真实网络社区的情景一致, 未来工作将探索个体活跃度状态分布是否与群体发帖行为分布相关性. 同时,

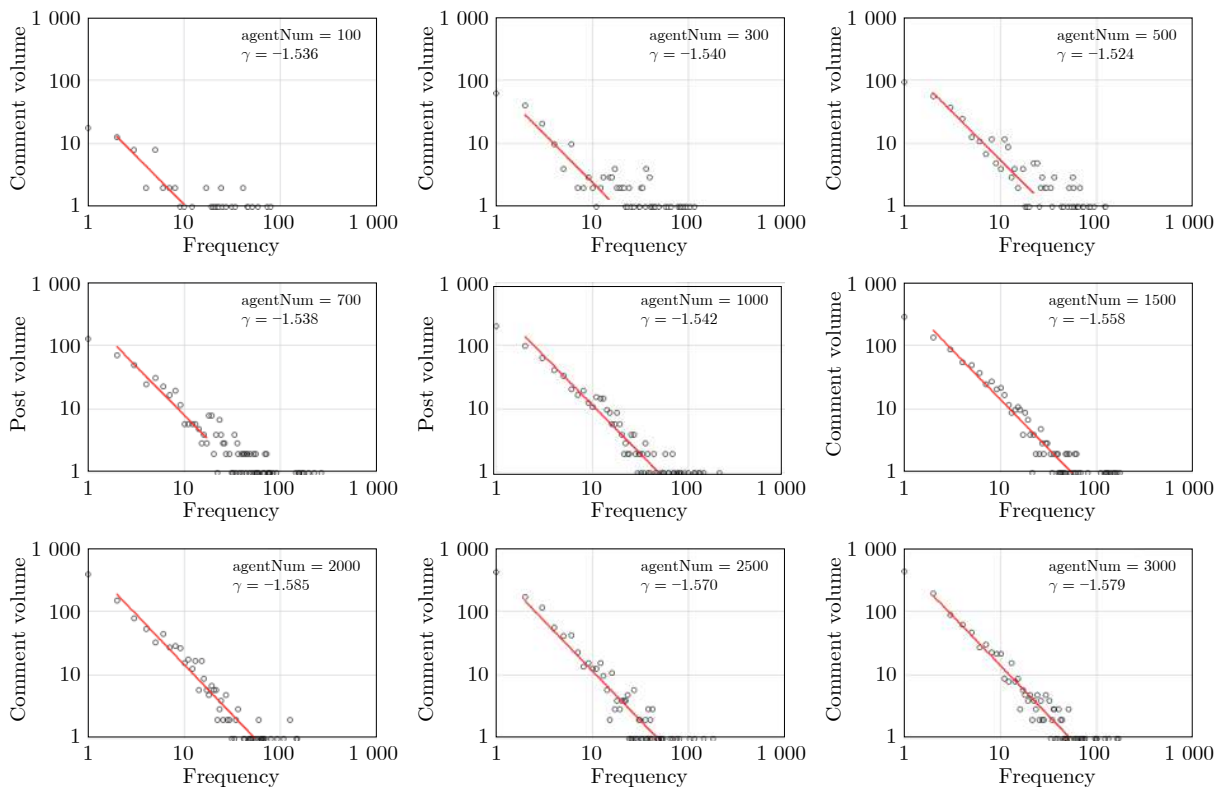


图 9 初始智能体数量发生变化时, 群体评论行为的分布情况

Fig. 9 The distribution of crowd comment behavior when the number of initial agents changes

社区中成员数量不影响社区中贴文评论的分布. 进一步验证了本文构建的人工社区模型鲁棒地模拟了真实社区中评论分布的特征.

## 5 结论与展望

本文着重阐释了 SMOs、Ce-SMOs、CMOs 的概念、特征及其理论依据, 从人类动力学的角度对网络空间中大规模网民行为的研究进行了阐述, 深入讨论了基于 ACP 的人工社区建模及其计算实验的理论和实验支持, 从多智能体建模的角度, 考虑微观个体行为与宏观群体现象的内在关联, 解释了复杂社区中用户行为的形成机理, 并验证了人工社区与实际社区的特征一致性. 本文的内容是 CMOs 建模分析与研究的基础理论和指导方法, 为其在个性化推荐、舆论战、非军事组织行动等领域的拓展应用提供了思路 and 方向.

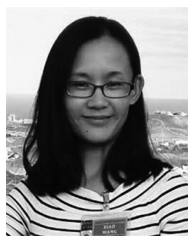
## References

- Sökjer-Petersen M. The role of grassroot leaders in building networks and organizing learning groups. *Nordic Psychology*, 2010, **62**(1): 4–23
- Gu K, Liu D X, Wang K M. Social community detection scheme based on social-aware in mobile social networks. *IEEE Access*, 2019, **7**: 173407–173418
- Cao J X, Liu W J, Cao B W, Wang P, Li S C, Liu B, Iqbal M. Social relationships and temp-spatial behaviors based community discovery to improve cyber security practices. *IEEE Access*, 2019, **7**: 105973–105986
- Roy S, Dey P, Kundu D. Social network analysis of cricket community using a composite distributed framework: from implementation viewpoint. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2018, **5**(1): 64–81
- Zaamout K, Barker K. Structure of crowdsourcing community networks. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2018, **5**(1): 144–155
- Zhang X L, Liu J, Li J, Liu L X. Large-scale dynamic social network directed graph K-In&Out-degree anonymity algorithm for protecting community structure. *IEEE Access*, 2019, **7**: 108371–108383
- Lazer D, Pentland A, Adamic L, Aral S, Barabasi A L, Brewer D, et al. Computational social science. *Science*, 2009, **323**(5915): 721–723
- Sundaram H, Lin Y, Choudhury M D, Kelliher A. . Understanding community dynamics in online social networks: a multidisciplinary review. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012, **29**(2): 33–40
- Zhou Y, Guan X, Zheng Q, Sun Q, Zhao J. Group dynamics in discussing incidental topics over online social networks. *IEEE Network*, 2010, **24**(6): 42–47
- Feng X, Wang Y, Yu H, Luo F. A novel intelligence algorithm based on the social group optimization behaviors. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, **48**(1): 65–76
- Wang Fei-Yue. Study on cyber-enabled social movement organizations based on social computing and parallel systems. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2011, **33**(1): 8–17  
(王飞跃. 基于社会计算和平行系统的动态网民群体研究. 上海理工大学学报, 2011, **33**(1): 8–17)
- Sajadi S H, Fazli M, Habibi J. The affective evolution of social norms in social networks. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2018, **5**(3): 727–735
- Ye M B, Liu J, Anderson B D O, Yu C B, Basar T. Evolution of social power in social networks with dynamic topology. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, **63**(11): 3793–3808
- Shuai H H, Shen C Y, Yang D N, Lan Y F C, Lee W C, Yu P S, et al. A comprehensive study on social network mental disorders detection via online social media mining. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2018, **30**(7): 1212–1225
- Wang W Y, He Z P, Shi P, Wu W W, Jiang Y C, An B, et al. Strategic social team crowdsourcing: forming a team of truthful workers for crowdsourcing in social networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019, **18**(6): 1419–1432
- Chopra A K, Artikis A, Bentahar J, Colombetti M, Dignum F, Fornara N, et al. Research directions in agent communication. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2012, **4**(2): Article No.20
- Jiao Y, Liu Y H, Wang J, Zhu J Q. Impact of habitual behaviors on human dynamics and spreading process. In: Proceedings of the 5th International ICST Conference on Communications and Networking in China. Beijing, China: IEEE, 2010. 25–27
- Penaloza C I, Mae Y, Ohara K, Arai T. Social human behavior modeling for robot imitation learning. In: Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Chengdu, China: IEEE, 2012. 457–462
- Vazquez A, Racz B, Lukacs A, Barabasi A L. Impact of non-Poissonian activity patterns on spreading processes. *Physical Review Letters*, 2007, **98**(15): Article No.158702
- Barabasi A L. The origin of bursts and heavy tails in human dynamics. *Nature*, 2005, **435**(7039): 207–211
- Blanchard P, Hongler M O. Modeling human activity in the spirit of Barabasi's queueing systems. *Physical Review E*, 2007, **75**(2): Article No.26102
- Bedogne C, Rodgers G J. A continuous model of human dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, **385**(1): 356–362
- Leskovec J, Horvitz E. Planetary-scale views on a large instant-messaging network. In: Proceeding of the 17th International Conference on World Wide Web. New York: ACM, 2008. 915–924
- Hoteit S, Secci S, Sobolevsky S, Ratti C, Pujolle G. Estimating human trajectories and hotspots through mobile phone data. *Computer Networks*, 2014, **64**: 296–307
- Zhao Z D, Zhou T. Empirical analysis of online human dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2012, **391**(11): 3308–3315
- Zhou T, Kiet H A T, Kim B J, Wang B H, Holme P. Role of

- activity in human dynamics. *EPL (Europhysics Letters)*, 2008, **82**(2): Article No.28002
- 27 Duarte Torres S, Weber I, Hiemstra D. Analysis of search and browsing behavior of young users on the web. *ACM Transactions on the Web*, 2014, **8**(2): Article No.7
- 28 Hu H B, Han D Y. Empirical analysis of individual popularity and activity on an online music service system. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2008, **387**(23): 5916–5921
- 29 Jiang Z Q, Zhou W X, Tan Q Z. Online-offline activities and game-playing behaviors of avatars in a massive multiplayer online role-playing game. *EPL (Europhysics Letters)*, 2009, **88**(4): Article No.48007
- 30 Yan X Y, Zhou T. Destination choice game: a spatial interaction theory on human mobility. *Scientific Reports*, 2019, **9**: Article No.9466
- 31 Zhou T, Han X P, Wang B H. Towards the understanding of human dynamics. *Science Matters: Humanities as Complex Systems* Singapore: World Scientific Publishing, 2015
- 32 Wang P, Zhou T, Han X P, Wang B H. Modeling correlated human dynamics with temporal preference. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, **398**: 145–151
- 33 Zhao Z D, Cai S M, Huang J M, Fu Y, Zhou T. Scaling behavior of online human activity. *EPL (Europhysics Letters)*, 2012, **100**(4): Article No.48004
- 34 Zhou Tao, Han Xiao-Pu, Yan Xiao-Yong, Yang Zi-Mo, Zhao Zhi-Dan, Wang Bing-Hong. Statistical mechanics on temporal and spatial activities of human. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, **42**(4): 481–540 (周涛, 韩筱璞, 闫小勇, 杨紫陌, 赵志丹, 汪秉宏. 人类行为时空特性的统计力学. 电子科技大学学报, 2013, **42**(4): 481–540)
- 35 Zhang Hai-Tao, Zhou Tao, Li Chun-Guang. Analysis and control of cluster dynamics based on individual intelligence. *China Science and Technology Achievements*, 2016, (15): 77 (张海涛, 周涛, 李春光. 基于个体智能的群集动力学演化分析与控制研究. 中国科技成果, 2016, (15): 77)
- 36 Han Xiao-Pu, Wang Bing-Hong, Zhou Tao. Researches of human dynamics. *Complex Systems and Complexity Science*, 2010, **7**(2-3): 132–144 (韩筱璞, 汪秉宏, 周涛. 人类行为动力学研究. 复杂系统与复杂性科学, 2010, **7**(2-3): 132–144)
- 37 Zhou Tao, Han Xiao-Pu, Yan Xiao-Yong, Yang Zi-Mo, Zhao Zhi-Dan, Wang Bing-Hong. Statistical mechanics on temporal and spatial activities of human. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, **42**(4): 481–540 (周涛, 韩筱璞, 闫小勇, 杨紫陌, 赵志丹, 汪秉宏. 人类行为时空特性的统计力学. 电子科技大学学报, 2013, **42**(4): 481–540)
- 38 Zhou Tao, Wang Bing-Hong, Han Xiao-Pu, Shang Ming-Sheng. Social network analysis and its application in the prevention and control of propagation for public opinion and the epidemic. *Journal of Systems Engineering*, 2010, **25**(6): 742–754 (周涛, 汪秉宏, 韩筱璞, 尚明生. 社会网络分析及其在舆情和疫情防控中的应用. 系统工程学报, 2010, **25**(6): 742–754)
- 39 Zhou Tao, Fu Zhong-Qian, Niu Yong-Wei, Wang Da, Zeng Yan, Wang Bing-Hong, et al. Overview of communication dynamics in complex networks. *Progress in Natural Science*, 2005, **15**(5): 513–518 (周涛, 傅忠谦, 牛永伟, 王达, 曾燕, 汪秉宏, 等. 复杂网络上传播动力学研究综述. 自然科学进展, 2005, **15**(5): 513–518)
- 40 Zald M N, Ash R. Social movement organizations: growth, decay and change. *Social Forces*, 1966, **44**(3): 327–341
- 41 Zhao D X. *Social and Political Movements*. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2006: 273 (赵鼎新. 社会与政治运动讲义. 北京: 社会科学文献出版社, 2006: 273)
- 42 Klandermans B, Roggeband C. *Handbook of Social Movements Across Disciplines*. Boston: Springer, 2007.
- 43 Smelser N J. *Theory of Collective Behavior*. New York, Free Press, 1962.
- 44 Tilly C. Does modernization breed revolution? *Comparative Politics*, 1973, **5**(3): 425–447
- 45 Olson M. *The Logic of Collective Action*. Cambridge, Mass: Cambridge University Press, 1965.
- 46 McCarthy J D, Zald M. *The Trend of Social Movements in America: Professionalization and Resource Mobilization*. Morristown: General Learning Corporation, 1973.
- 47 Eisinger P K. The conditions of protest behavior in American cities. *The American Political Science Review*, 1973, **67**(1): 11–28
- 48 McAdam D. *Political Process and the Development of Black Insurgency* (Second edition). Chicago: University of Chicago Press, 1982.
- 49 Goffman E. *Frame Analysis*. New York: Harper and Row Publisher, 1974.
- 50 Meyer D S, Tarrow S. *The Social Movement Society: Contentious Politics for a New Century*. Lanham, MD: Rowman and Littlefield, 1998.
- 51 Sharifian F. *Cultural Conceptualisations and Language: Theoretical Framework and Applications*. Amsterdam: John Benjamins Publishing Company, 2011.
- 52 Passy F, Giugni M. Life-spheres, networks, and sustained participation in social movements: a phenomenological approach to political commitment. *Sociological Forum*, 2000, **15**(1): 117–144
- 53 Bissio R. Occupying new places for public life: politics and people in a network society. *Whose World Is It Anyway? Civil Society, the United Nations, and the Multilateral Future*. Ottawa: United Nations Association of Canada, 1999. 429–459
- 54 Gamson W A, Meyer D S. Framing political opportunity. *Comparative Perspectives on Social Movements: Political Opportunities, Mobilizing Structures, and Cultural Framing*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- 55 Mele C. Cyberspace and disadvantaged community: the internet as a tool for collective action. *Communities in Cyberspace*. London: Routledge, 2009. 290–310
- 56 Clak J D, Themudo N S. Linking the web and the street: Internet-based “Dotcauses” and the “Anti-Globalization” movement. *World Development*, 2006, **34**(1): 50–74
- 57 Earl J, Kimport K. Movement societies and digital protest: fan activism and other nonpolitical protest online. *Sociological Theory*, 2009, **27**(3): 220–243
- 58 Garrett R K. Protest in an information society: a review of liter-

- ature on social movements and new ICTs. *Information Communication & Society*, 2006, **9**(2): 202–224
- 59 Kilduff M, Tsai W [Author], Wang Feng-Bin, Zhu Chao-Wei [Translator]. *Social Networks and Organizations*. Beijing: China People's University Press, 2007  
(马汀•奇达夫, 蔡文彬 [著], 王凤彬, 朱超威 [译]. 社会网络与组织. 北京: 中国人民大学出版社, 2007.)
- 60 Yue Guo-An, Xue Ting. The theoretical interpretation model on the internet collective behaviors. *Nankai Journal*, 2011, (5): 116–123  
(乐国安, 薛婷. 网络集群行为的理论解释模型探索. 南开学报 (哲学社会科学版), 2011, (5): 116–123)
- 61 Chmiel A, Sienkiewicz J, Thelwall M, Paltoglou G, Buckley K, Kappas A, et al. Collective emotions online and their influence on community life. *PLoS One*, 2011, **6**(7): Article No.e22207
- 62 Xia Yan. Netizen Group Behavior and Psychological Research [Master thesis], Nanchang University, China, 2011  
(夏艳. 网民群体行为及心理研究 [硕士学位论文], 南昌大学, 中国, 2011)
- 63 Epstein J M, Axtell R. Artificial societies and generative social science. *Artificial Life and Robotics*, 1997, **1**(1): 33–34
- 64 Epstein J M, Axtell R. *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom up*. Cambridge, USA: MIT Press, 1996.
- 65 Jiang Y C, Jiang J C. Understanding social networks from a multiagent perspective. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, **25**(10): 2743–2759
- 66 Lane N D, Xu Y, Lu H, Eisenman S B, Choudhury T, Campbell A T. Cooperative Communities (CoCo): exploiting social networks for large-scale modeling of human behavior. *IEEE Pervasive Computing*, 2011, **10**(4): 45–53
- 67 Nemiche M, Cavero V, Lopez R P. Understanding social behavior evolutions through agent-based modeling. In: Proceedings of 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems, Tangier, Morocco, 2012. pp. 980–986
- 68 Radinsky K, Svore K M, Dumais S T, Shokouhi M, Teevan T, Bocharov A, et al. Behavioral dynamics on the Web: learning, modeling, and prediction. *ACM Transactions on Information Systems*, 2013, **31**(3): Article No.16
- 69 Zhou M, Dong H R, Zhao Y B, Ioannou P A, Wang F Y. Optimization of crowd evacuation with leaders in urban rail transit stations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, **20**(12): 4476–4487
- 70 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630–638
- 71 Wang F Y, Zheng N N, Cao D P, Martinez C M, Li L, Liu T. Parallel driving in CPSS: a unified approach for transport automation and vehicle intelligence. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(4): 577–587
- 72 Han S S, Wang X, Zhang J J, Cao D P, Wang F Y. Parallel vehicular networks: a CPSS-based approach via multimodal big data in IoV. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, **6**(1): 1079–1089
- 73 Wang Xiao, Yao Ting-Ting, Han Shuang-Shuang, Cao Dong-Pu, Wang Fei-Yue. Parallel internet of vehicles: the ACP-based networked management and control for intelligent vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(8): 1391–1404  
(王晓, 姚婷婷, 韩双双, 曹东璞, 王飞跃. 平行车联网: 基于 ACP 的智能车辆网联管理与控制. 自动化学报, 2018, **44**(8): 1391–1404)
- 74 Li L, Wang X, Wang K F, Lin Y L, Xin J M, Chen L, et al. Parallel testing of vehicle intelligence via virtual-real interaction. *Science Robotics*, 2019, **4**(28): Article No.eaaw4106
- 75 Yang Lin-Yao, Han Shuang-Shuang, Wang Xiao, Li Yu-Ke, Wang Fei-Yue. Computational experiment platforms for networks: the state of the art and prospect. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(9): 1637–1654  
(杨林瑶, 韩双双, 王晓, 李玉珂, 王飞跃. 网络系统实验平台: 发展现状及展望. 自动化学报, 2019, **45**(9): 1637–1654)
- 76 Wang Fei-Yue, Zhang Jun, Zhang Jun, Wang Xiao. Industrial internet of minds: concept, technology and application. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(9): 1606–1617  
(王飞跃, 张军, 张俊, 王晓. 工业物联网: 基本概念、关键技术与核心应用. 自动化学报, 2018, **44**(9): 1606–1617)
- 77 Lin Yi-Lun, Dai Xing-Yuan, Li Li, Wang Xiao, Wang Fei-Yue. The New frontier of AI research: generative adversarial networks. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(5): 775–792  
(林懿伦, 戴星原, 李力, 王晓, 王飞跃. 人工智能研究的新前线: 生成式对抗网络. 自动化学报, 2018, **44**(5): 775–792)
- 78 Liu Shuo, Wang Shuai, Meng Qing-Zhen, Ye Pei-Jun, Wang Tao, Huang Wen-Lin, Wang Fei-Yue. Parallel modeling of criminal subjects behavior based on ACP behavioral dynamics. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(2): 251–261  
(刘烁, 王帅, 孟庆振, 叶佩军, 王涛, 黄文林, 王飞跃. 基于 ACP 行为动力学的犯罪主体行为平行建模分析. 自动化学报, 2018, **44**(2): 251–261)
- 79 Wang Fei-Yue, Li Xiao-Chen, Mao Wen-Ji, Wang Tao. *Social Computing: Methods and Applications*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2013.  
(王飞跃, 李晓晨, 毛文吉, 王涛. 社会计算的基本方法与应用. 杭州: 浙江大学出版社, 2013.)
- 80 Wang X, Zheng X H, Zhang X Z, Zeng K, Wang F Y. Analysis of cyber interactive behaviors using artificial community and computational experiments. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, **47**(6): 995–1006
- 81 Minsky M. *The Society of Mind*. New York: Simon & Schuster, 1986.
- 82 Wooldridge M J, Jennings N R. Towards a theory of cooperative problem solving. In: Proceeding of the 6th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World. Odense, Denmark, 1994. 15–26
- 83 Russell S J, Norving P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- 84 Liu Da-You, Yang Kun, Chen Jian-Zhong. Agents: present status and trends. *Journal of Software*, 2000, **11**(3): 315–321  
(刘大有, 杨鲲, 陈建中. Agent 研究现状与发展趋势. 软件学报, 2000, **11**(3): 315–321)
- 85 Swanke T A. Book review: growing artificial societies: social science from the bottom up. *Review of Radical Political Economics*, 1999, **31**(2): 113–116





**王 晓** 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室副研究员. 2016 年获得中国科学院大学社会计算博士学位. 主要研究方向为群体行为的激发与汇聚激励, 群体智能和社交网络挖掘与分析.

E-mail: x.wang@ia.ac.cn

(**WANG Xiao** Associate professor at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her Ph. D., degree in social computing from University of Chinese Academy of Sciences in 2016. Her research interest covers stimulation and convergence of collective behavior, swarm intelligence, social network mining and analysis.)



**韩双双** 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室副研究员. 2013 年获得加拿大阿尔伯塔大学博士学位. 主要研究方向为平行网络, 社会网络, 无线网络关键技术.

E-mail: shuangshuang.han@ia.ac.cn

(**HAN Shuang-Shuang** Associate

professor at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her Ph. D., degree from University of Alberta, Canada in 2013. Her research interest covers parallel networks, social networks, and wireless networking techniques.)



**杨林瑶** 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室博士研究生. 2017 年获得山东大学信息科学与工程学院学士学位. 主要研究方向为社交网络分析、多智能体建模和复杂网络.

E-mail: yanglinyao2017@ia.ac.cn

(**YANG Lin-Yao** Ph. D. candidate at the the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his bachelor degree in Internet of Things engineering from Shan-dong University in 2017. His research interest covers social network analysis, multi-agent modeling, and complex networks.)



**曾 轲** 2014 年于西安交通大学电信学院获得博士学位. 早期研究方向包括社交网络、社会计算、用户仿真建模研究. 近期他工作于美团网语音交互中心, 开展知识图谱、智能交互与知识计算的技术研究与实践应用, 重点关注知识计算与用户推荐方法的

结合. E-mail: zengke02@meituan.com

(**ZENG Ke** Received his Ph. D., degree from Xi'an Jiaotong University in 2014. His early research interest covers social networking, social computing and user simulation modeling. Recently, worked in the voice interaction center of Meituan.com, he studied the practical application of the knowledge graph, intelligent interaction and knowledge computing, focusing on the combination of knowledge computing and user recommendation.)



**王飞跃** 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术研究中心主任, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任, 青岛智能产业技术研究院院长. 主要研究方向为平行系统的方法与应用, 社会计算, 平行智能以及知识自动化. 本文通信作者. E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(**WANG Fei-Yue** State specially appointed expert and director of the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Professor of the Research Center for Computational Experiments and Parallel Systems Technology, National University of Defense Technology. Director of China Economic and Social Security Research Center in University of Chinese Academy of Sciences. Dean of Qingdao Academy of Intelligent Industries. His research interest covers methods and applications for parallel systems, social computing, parallel intelligence, and knowledge automation. Corresponding author of this paper.)