

大规模智能体集群的平均场博弈与控制: 从理论到实践专题简介

申铁龙*

大连理工大学, 大连 116024

* 通信作者. E-mail: tetu-sin@sophia.ac.jp

在现实世界里有很多可以称之为智能体的人工系统所构成的大规模集群, 比如与电网链接的大规模电动车群、大规模写字楼或公寓里的空调集群、交通网络里的车群、通讯网络中人手一部的手机等等. 这些大规模智能体具有相同的动力学特征以及促使智能决策的目标函数, 即具有同质性; 其次, 由于其规模之大, 基于集群中所有个体的状态及决策信息实现集中控制是不现实的. 平均场博弈 (mean-field game, MFG) 的基本范式是基于个体的局部信息实现分布式控制. 每个个体不可能针对其他所有个体的个别利益得失决策自己的行为, 但是会在意统计意义上的集群状态或集群平均收益对自身的影响. 换言之, 每个个体在“me first”原理的驱使下, 以获得个体与集群的纳什均衡状态为决策基准. 所谓平均场博弈, 正是以大规模智能体为对象, 以分布式决策为基本范式, 实现个体与集群纳什均衡的博弈.

平均场博弈理论是 2006 年由加拿大学者 Minyi Huang (黄敏懿)、Roland Malhamé、Peter Caines, 以及法国学者 Jean-Michel Lasry、菲尔兹奖得主 Pierre-Louis Lions 分别独立提出的较新理论. 近 20 年来, 对于线性系统特别是成本函数具有二次型结构的 LQ 博弈问题, 给出了非常丰富的结果. 在社会学、经济学以及工程领域也相继出现了很多应用研究报告. 但是, 对于诸如非线性智能体等一般系统, 仍然处于挑战状态. 其根本的瓶颈在于, 平均场博弈问题的解本征上脱离不了求解相互耦合的正向 - 反向偏微分方程; 而且, 纳什均衡的存在与实现依赖于不动点定理等, 繁杂甚至没有

一般性求解工具. 近些年, 运用强化学习、神经动力学逼近等工具, 出现了许多较为一般的针对非线性智能体集群控制的策略设计方法以及工程领域的应用范例. 在平均场博弈理论即将迎来二十周年之际, *SCIENCE CHINA Information Sciences* 在 2025 年第 68 卷第 11 期组织出版了“大规模智能体集群的平均场博弈与控制: 从理论到实践专题” (Special Topic: Mean-field Game and Control of Large Population Systems: From Theory to Practice), 共收录了 14 篇该领域的最新研究成果.

由哥伦比亚大学 Xuan Sharon Di、东京科学大学徐臻惠和大连理工大学申铁龙合作撰写的“Mean field games for urban mobility: a review”, 首次系统总结了平均场博弈在城市交通领域的应用, 详细介绍了融合传统交通流模型与 MFG 融合框架下实现纳什均衡的分布式车辆速度控制策略, 以及基于图的平均场博弈 (MFG on graphon) 在多节点网络中速度决策与路径规划的协同演化问题, 并且进一步介绍了 MFG 在电动汽车能源管理以及集群充电与电网负载平衡问题中的应用.

集群行为的平均场描述方法的基本假设是智能体的同质性 (homogeneity) 和匿名性 (anonymity), 这个假设也限制了 MFG 的工程应用. 纽约大学 (上海) 的 Mathieu Lauriere 的综述文章 “An overview of some extensions of mean field games beyond perfect homogeneity and anonymity” 系统地介绍了 MFG 理论研究在突破这个框架的最新尝试, 以及多种群 MFG、MFG on graphon、斯塔克伯格 MFG 等相关话

引用格式: 申铁龙. 大规模智能体集群的平均场博弈与控制: 从理论到实践专题简介. 中国科学: 信息科学, 2026, 56: 243–244, doi: 10.1360/SSI-2025-0553

SHEN T L. Special topic: mean-field game and control of large population systems: from theory to practice. Sci Sin Inform, 2026, 56: 243–244, doi: 10.1360/SSI-2025-0553

题的最新进展.

中国地质大学 Qing Tang、意大利学者 Fabio Camilli 和 Yong-Shen Zhou 的合作论文研究了无限域 MFG 策略迭代问题, 运用半拉格朗日方法提出了离散化数值解法.

山东大学 Xinwei Feng 等讨论了智能体动力学模型具有不确定性的情况下的平均场社会 (mean-field team) 优化问题, 并给出了基于随机微分方程的正 - 反向耦合哈密尔顿系统的解决方案; Ying Cao 等运用 Q-learning 方法提出了 leader-follower 框架下随机线性二次型斯塔尔伯格博弈策略.

大连理工大学 Na Li 等讨论了具有机制转移和平均场耦合的随机系统的最优控制问题, 并确立了充分性随机极大原理; Yuexi Zhang 等讨论了面向电网平衡下大规模暖通空调群的分布式控制问题, 且从平均场博弈视角提出了一种实现斯塔克伯格意义下的纳什均衡的创新解决方案; Yingying Chai 等从群体博弈的视角提出了平衡个体与集群利益的可持续解决方案.

平均场博弈的一个基本特征是运用平均场极限, 即经验分布 (empirical distribution) 的极限, 近似描述大规模集群的统计特性及其沿时空轴的演绎行为, 从而简化了处理大规模集群中个体之间耦合关系的维数灾难.

因此, 有限个智能体之间的博弈问题, 特别是分布式决策问题, 与平均场博弈具有很密切的关系.

华中科技大学 Chuanjian Li 等关于同质性非线性多智能体的无模型集群编队控制 (group formulation control) 的论文研究的正是这类主题; Ning Xing 等则提出了无人艇目标防御的差分博弈模型, 给出了防御者在面对攻击者和目标的多变动态环境下的相应决策方法.

中国科学院数学与系统科学研究院的 Ruicheng Zhang 等讨论了加权观点动力学的同步问题, 主要讨论了实现期望同步所需的偏见智能体数目.

天津工业大学 Zijun Li 等则针对多个和单个无人机追逃对抗零和博弈控制问题, 运用滑模控制和强化学习方法给出了纳什均衡策略.

大连理工大学 Yan Wang 等将跳跃扩散与信息不对称结构引入非零和线性二次随机微分博弈, 拓展了经典的博弈模型. 东北大学的 Yiheng Liu 等讨论了强化学习求解 MFG 方法的收敛速度, 提出了融合牛顿步与弦步的切比雪夫迭代算法.

最后, 衷心感谢本专题特约编辑 Mathieu Lauriere (纽约大学 (上海))、徐臻惠 (东京科学大学)、高爽 (蒙特利尔理工大学) 的辛勤付出, 以及作者们和严谨的审稿专家们对本专题的贡献.