具有非跟随者和异质领导者的多层斯塔克尔伯格博弈中的策略互动

扩展摘要

Niloofar Aminikalibar
阿斯顿大学 英国伯明翰
namin21@aston.ac.uk

Farzaneh Farhadi 阿斯顿大学 英国伯明翰
f.farhadi@aston.ac.uk

Maria Chli 阿斯顿大学
英国伯明翰
m.chli@aston.ac.uk

arXiv:2603.04628v1 [cs.MA] 4 Mar 2026

摘要

拥堵系统中的策略互动通常采用斯塔克尔伯格博弈建模，其中相互竞争的领导者会预判利己跟随者的行为。现有模型的一项主要局限是，通常忽视不直接参与市场竞争的智能体，尽管这些智能体既会造成拥堵，也会适应拥堵。虽然这类非跟随者智能体不会创造收入，也不会响应市场激励，但其行为会改变拥堵模式，进而通过共享资源影响领导者和跟随者的决策。

我们认为，忽略非跟随者会导致对拥堵耦合市场的均衡预测出现系统性偏差。为此，我们提出一种三层斯塔克尔伯格框架，其中包含决策时域和可行行动各不相同的异质领导者、策略性跟随者，以及非跟随者智能体；该框架刻画了基础设施决策、竞争与均衡拥堵之间的双向耦合。

我们以电动汽车（EV）充电基础设施为背景实例化该框架：充电服务商与竞争对手展开竞争，而电动汽车交通流与非电动汽车交通流共同影响拥堵。该模型展示了明确考虑非跟随者和异质竞争者如何从定性层面改变策略激励和均衡结果。除电动汽车充电外，该框架还适用于交通出行、能源和计算市场中广泛的拥堵耦合多智能体系统。

关键词

多领导者多跟随者斯塔克尔伯格博弈；拥堵博弈；电动汽车充电基础设施规划；异质竞争者

ACM参考文献格式：

Niloofar Aminikalibar、Farzaneh Farhadi和Maria Chli。2026年。含非跟随者与异质领导者的多层斯塔克尔伯格博弈中的策略互动：扩展摘要。载于第*25*届国际自主代理与多智能体系统会议论文集（*AAMAS 2026*），帕福斯，塞浦路斯，*2026*年*5*月*25*日至*29*日，IFAAMAS，3页。https://doi.org/10.65109/

1 引言

许多现实世界中的多智能体系统都涉及围绕资源展开的策略竞争，而资源的价值取决于拥堵。相关例子包括交通网络、能源系统、云计算，以及数字市场。在这类场景中，服务提供商会做出长期和短期的策略决策，同时预测大量用户群体如何响应价格、延误和容量限制。斯塔克尔伯格博弈已成为一种标准建模工具，用于刻画这种互动：服务提供商作为领导者，用户则作为跟随者，自利地响应已公布的决策。

尽管斯塔克尔伯格模型得到广泛应用，但大多数用于拥堵环境的斯塔克尔伯格模型都依赖一种限制性抽象：它们只关注直接参与领导者—跟随者互动的智能体。通常，那些不产生收入且不响应策略激励的智能体会被视为外生背景流量，或被完全忽略。然而，在拥堵耦合系统中，这些非跟随者既非被动，也不免受影响：它们会改变策略智能体所面临的拥堵状况，同时调整自身行为，以避开因领导者和跟随者的行动而变得拥堵的资源。尽管非跟随者不参与市场竞争，这种双向耦合仍会改变均衡结构。

本文指出，忽略非跟随者并非无伤大雅的建模简化。当拥堵由内生因素决定时，背景智能体可能改变均衡结构、转移竞争压力，并改变领导者的最优战略决策。因此，在拥堵由异质用户群体共享的市场中，抽象掉这些智能体的模型可能会对盈利能力、基础设施部署和竞争强度得出定性上具有误导性的结论。

为弥补这一不足，我们提出了一个层级斯塔克尔伯格框架，整合了三个相互作用的组成部分：决策时域和行动集各不相同的异质领导者；参与市场竞争并根据拥堵状况和领导者的行动调整决策的策略性跟随者；以及不参与市场竞争、但会影响拥堵并根据拥堵状况调整自身行为的非跟随者（见图 1(a)）。由此形成的模型在单一概念结构中刻画了长期决策、短期竞争行为与均衡拥堵之间的双向耦合关系。

该框架以电动汽车（EV）充电基础设施为例展开说明。这一领域因电动汽车普及迅速而日益重要 [9, 10]。在这种情境下，服务提供商竞相争取用户，充电与出行决策会相互影响并与交通拥堵相互作用；非电动汽车交通流则既会造成拥堵，也会根据拥堵情况调整，但不参与充电市场。现有模型通常只研究服务提供商竞争 [4, 6, 7, 11]或充电与交通流的相互作用 [5, 8], ，很少同时涵盖两者，并且往往依赖同质服务提供商、固定位置或外生背景交通流等假设。尽管电动汽车充电是该框架的应用背景，但明确

本作品根据知识共享署名国际4.0许可协议授权。

第*25*届国际自主代理与多智能体系统会议论文集（*AAMAS 2026 29*，*2026*，*25* 2026年），*C. Amato*、*L. Dennis*、*V. Mascardi*、*J. Thangarajah*（编），*5*月—塞浦路斯帕福斯。©国际自主代理与多智能体系统基金会（www.ifaamas.org）。https://doi.org/10.65109/

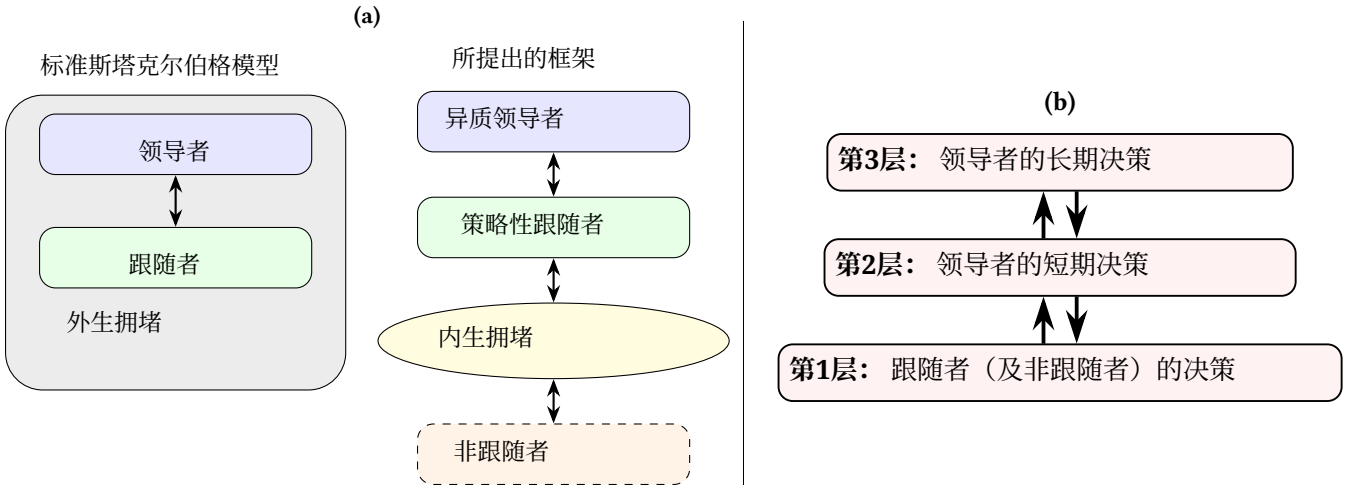

图1：(a)：标准斯塔克尔伯格框架与所提出的含非跟随者的斯塔克尔伯格框架之间的概念比较。现有方法通常将未参与的智能体和背景交通视为外生因素，忽略了它们对拥堵的适应性响应。我们的框架显式建模非跟随者，其行为既促成拥堵又适应拥堵，从而重塑策略领导者和跟随者的均衡激励。(b)：面向异质领导者的三层级斯塔克尔伯格框架。

对非跟随者和内生拥堵进行建模，能够更真实地刻画拥堵耦合市场中的策略互动。

2 问题描述

我们研究一个层级决策问题：一名领导者在进入由相互竞争的领导者组成的市场时作出长期承诺，这些领导者主要通过短期决策进行互动。该承诺塑造跟随者行为，影响在位者的竞争响应，并影响网络拥堵。与跟随者一同，非跟随者会适应拥堵，但不参与市场竞争，却共同决定反馈到策略结果中的均衡拥堵。

在电动汽车充电的实例化中，新进入者将充电桩位置选择作为长期基础设施决策，而在位服务商通过短期定价展开竞争。电动汽车驾驶员（跟随者）在拥堵条件下选择路线和充电地点，在出行时间、延误与价格之间进行权衡 [1–3]。非电动汽车驾驶员（非跟随者）选择路线以避开拥堵；通过共享网络使用，电动汽车交通流与非电动汽车交通流共同产生拥堵并对其作出响应。

领导者具有异质性：现有企业拥有固定的基础设施，仅通过价格竞争，而新进入者则同时决定设施布局和定价。因此，基础设施部署、价格竞争与受拥堵影响的交通均衡紧密耦合。核心挑战在于，如何让新进入者在预判后续竞争以及电动汽车与非电动汽车交通流重新分配的同时部署基础设施。

3 概念框架

上述交互形成了一个包含序贯决策的三层斯塔克尔伯格结构，如图 1(b) 所示。在最底层（第1层），电动汽车驾驶员和非电动汽车驾驶员会根据价格和拥堵情况选择路线与充电选项，以最小化个体成本。尽管非电动汽车驾驶员不参与充电市场，但他们会根据充电相关交通流造成的拥堵调整路线选择，进而影响电动汽车用户的出行时间和充电选择。这一层体现了不同驾驶员群体通过共同面临的拥堵产生的双向耦合。

在中间层级（第2层），充电服务商通过设定价格展开竞争，同时预判驾驶者会如何响应受拥堵影响的选择。充电服务商的定价激励既受策略竞争对手影响，也受非电动汽车交通流影响；后者通过拥堵影响需求，而非通过直接互动产生影响。

在最高层级（第3层），新进入者选择充电桩位置，同时预判现有企业由此产生的定价行为及相应的均衡交通模式。这一长期决策会预判充电服务商和驾驶者在拥堵条件下的诱导响应。

这些层级共同构成一种层级式斯塔克尔伯格结构，其中基础设施决策、竞争行为和拥堵结果共同决定。该框架将拥堵视为由异质主体群体的策略决策和适应性行为所塑造的内生结果，而非外生背景条件。

为使这一框架具有可操作性，我们采用了一种与博弈层级结构相匹配的求解方法。我们使用适用于各决策层的均衡概念，分别对每一决策层进行分析；同时，高层决策会明确预见下游的诱导响应。这种层级求解使我们能够以严谨且符合均衡的方式，分析拥堵环境下的基础设施布局与竞争行为，而无需依赖主体同质性或外生流量等限制性假设。

4 致谢

本文已被接收，将发表于《第25届国际自主智能体与多智能体系统会议论文集》（AAMAS 2026）。最终出版版本可通过 ACM数字图书馆 获取。

参考文献

[1] Niloofar Aminikalibar、Farzaneh Farhadi 和 Maria Chli。2025。《智慧城市中智能电动汽车充电网络优化的博弈论框架》。载于*IEEE*智能交通系统国际会议 *2025*。IEEE。[2] Niloofar Aminikalibar、Farzaneh Farhadi 和 Maria Chli。2025。《电动汽车充电网络的博弈论优化：基于原子拥塞博弈的选址与定价策略》。载于英国人工智能会议。PMLR，43–52。[3] Niloofar Aminikalibar、Farzaneh Farhadi 和 Maria Chli。2025。《通过联合选址与定价的多智能体拥塞博弈进行战略性基础设施设计》。载于第*22*届欧洲多智能体系统会议。Springer。[4] Yan Cui、Hu Zechun 和 Duan Xiaoyu。2021。《考虑耦合交通与电力系统运行的公共电动汽车充电站最优定价》。《IEEE智能电网汇刊》12, 4 (2021), 3278–3288。https://doi.org/10 1109 2021 3053026 . /TSG. 。[5] Xinxin Ge、Ge Wang、Rongfu Sun 和 Fei Wang。2024。《耦合能源—交通—信息网络下基于分布式博弈论的电动汽车充电定价模型》。《IEEE智能电网汇刊》(2024)。

[6] Mahsa Ghavami、Mohammad Haeri 和 Hamed Kebriaei。2023。《智慧城市中电动汽车交通与充电站管理的去中心化定价机制》。《IEEE智能交通系统汇刊》25, 6 (2023), 5258–5270。[7] Woongsup Lee、Schober Robert 和 Wong Vincent W. S.。2019。《异质电动汽车充电站的价格竞争分析》。《IEEE Transactions on Smart Grid》10, 4 (2019), 3990–4002。https://doi.org/10.1109/TSG. 2018.2847414[8] Lyuzhu Pan 和 Hongcai Zhang。2024。《耦合电力与交通网络中的电动汽车充电竞争性定价》。载于*2024 IEEE*亚太交通电气化会议暨展览会（*ITEC*亚太）。IEEE，83–88。[9] 英国交通部。2021。电动汽车充电市场研究：最终报告。技术报告。竞争与市场管理局，英国政府。h t t p s:// w w w. g ov.uk/government/publications/electric-vehicle-charging-market-study-final-report/final-report 访问日期：2025-09-17。[10] 英国交通部。2022。采取行动：电动汽车基础设施战略。在线。英国政府。https://www.gov.uk/government/publications/uk-electric-vehicle-infrastructure-strategy 访问日期：2025-09-17。[11] Yanru Zhang、Yingjie Zhou、Changkun Jiang、Yan Wang、Ruichang Zhang 和 George Chen。2020。《多种充电选项下的插电式电动汽车充电：对服务提供商定价策略的系统分析》。《IEEE智能电网汇刊》12, 1 (2020), 524–537。