

基于双向拍卖的车辆编队方案

刘海^{1,2,3}, 吴晋宇^{1,3}, 王天锡^{1,2,3}, 彭泓晔^{1,2,3}

(1. 贵州财经大学贵州省高等学校区块链与金融科技重点实验室, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州财经大学贵州省算网融合全省重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州财经大学信息学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 针对不同位置的车辆消耗的能效不同而导致行驶中出现编队解散, 甚至无法形成车辆编队的问题, 将车辆编队中的排序位置作为一种特殊商品, 通过让领航车辆要价和跟随车辆出价的方式, 为参与编队的各车辆确定其在编队中的位置; 并通过设计激励相容的编队补偿机制, 促使编队车辆在行驶中保持自己的编队位置。理论分析和大量实验表明, 所提方案不仅能高效地形成车辆编队, 还能确保形成编队的稳定性。

关键词: 车辆无人驾驶; 车辆编队; 双向拍卖; 激励相容; 稳定性

中图分类号: TP309

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024172

Vehicle platooning scheme based on two-way auction

LIU Hai^{1,2,3}, WU Jinyu^{1,3}, WANG Tianxi^{1,2,3}, PENG Hongye^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Blockchain and Fintech of Department of Education of Guizhou Province,
Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China

2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Computing and Network Convergence, Guizhou University of
Finance and Economics, Guiyang 550025, China

3. School of Information, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China

Abstract: Vehicles positioned at varying locations in the platoon exhibit differing levels of energy consumption, which may result in the platoon breaking up during travel or even prevent successful formation of the platoon. To solve this problem, a vehicle platooning scheme based on two-way auction was proposed. Specifically, the positions in the vehicle platooning were considered as a special commodity to be auctioned. By requesting a price from the platoon leader and a bid from the platoon follower, the position of each vehicle participating in the platooning was determined. Furthermore, an incentive compatible platooning compensation mechanism was devised that could motivate the vehicles in the platoon to maintain their position while traveling. Theoretical analysis and extensive experiments show that, the proposed scheme can not only realize the vehicle platooning efficiently, but also ensure the stability of the formed platoon.

Keywords: vehicle unmanned driving, vehicle platooning, two-way auction, incentive compatibility, stability

0 引言

随着移动通信技术和智能计算技术的不断发

展, 车辆无人驾驶正逐渐进入人们的日常生活, 不断改善着人们的驾驶体验。最新的市场调查报告显

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-12-19

通信作者: 刘海, liuhai4757@mail.gufe.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62062071); 贵州省高等学校区块链与金融科技重点实验室建设基金资助项目(黔教技No.[2023]014); 贵州财经大学创新探索及学术新苗基金资助项目(No.2022XSXMA01); 贵州省算网融合全省重点实验室建设基金资助项目(黔科合平台No.ZSYS[2025]005)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62062071), The Key Laboratory Building Program of Blockchain and Fintech of Department of Education of Guizhou Province (No.[2023]014), The Guizhou University of Finance and Economics Innovative Exploration and Academic Development Program (No.2022XSXMA01), The Guizhou Provincial Key Laboratory of Computing and Network Convergence Building Program (No.ZSYS[2025]005)

示, 车辆无人驾驶的全球市场规模将从 2023 年的 1.92 万亿美元增长到 2030 年的 13.63 万亿美元, 年复合增长率高达 32.3%。

车辆自主编队是车辆无人驾驶的一个重要组成^[1]。它利用车辆之间以及车辆与服务提供商之间的通信, 使具有相同行程的车辆在行驶过程中能实现安全、紧密的编队行驶^[2-3]。由于车辆自主编队不仅能有效降低编队车辆在行驶过程中的能效消耗, 还能提高道路容量的利用率^[4-5], 因此关于车辆自主编队的研究受到了国内外学者的广泛研究^[6-17]。

然而, 如果直接使用现有的研究方案来实现车辆编队行驶, 将无法保证车辆编队行驶过程中持续地维持编队, 可能会出现编队解散的情形, 甚至还会出现无法形成车辆编队的特殊情形。造成上述问题的根本原因是: 在车辆编队行驶过程中, 位于编队中不同位置的车辆所消耗的能效是具有显著差异的^[9]。具体来说, 由于车辆编队中的领航车辆需对复杂的道路情况进行实时分析并高效地做出决策, 因此领航车辆在编队行驶中消耗的能效高于其余车辆; 此外, 对于跟随车辆来说, 在行驶过程中, 领航车辆为跟随车辆抵挡的空气阻力也存在不同, 从而导致跟随车辆消耗的能效会随着排序位置的不断后移而显著增加^[16]。

为解决该问题, 本文将车辆编队中的排序位置作为一种特殊商品进行拍卖, 提出了一个基于双向拍卖的车辆编队方案。首先根据车辆是否能减少能效损耗将车辆编队中的排序位置分为领航位置与跟随位置进行双向拍卖, 确定车辆编队中各车辆的排序位置; 然后通过分析参与编队位置拍卖的各车辆的预期收益和实际收益, 设计激励相容的车辆编队补偿机制, 促使各车辆在行驶中保持自己的编队位置, 从而确保车辆编队的稳定性。本文的主要贡献如下。

1) 通过让领航车辆要价、跟随车辆出价, 提出一种基于双向拍卖的车辆编队排序方法, 确定车辆编队中各车辆的位置。

2) 基于均衡理论, 通过分析参与竞拍的各车辆的预期收益和实际收益, 设计激励相容的车辆编队激励机制, 确保车辆编队的稳定性。

3) 理论分析和大量实验表明, 所提方案能有效激励各车辆在行驶中保持自己的编队位置, 高效地形成稳定的车辆编队。

1 相关工作

车辆编队的现有研究大多聚焦于优化车辆编队的能耗(如消耗的电量、燃料等)、稳定性及安全性等方面。例如, McAuliffe 等^[6]研究了车辆编队中车辆间隙和位置对车辆能耗的影响; Song 等^[7]进一步探讨了车队规模、车辆间的纵向间距和横向偏移等方面对车辆能源损耗的影响; Ma 等^[8]综合考量编队的稳定性、性能和节能能力, 研究最优的车队规模; Hu 等^[9]指出车辆间等间距对编队稳定性的重要性, 并提出一种分布式控制器, 可在控制成本的前提下优化车队的油耗; Wang 等^[11]从力学角度通过抑制车辆间的共振频率来限制振荡, 进而提高车辆编队的稳定性。

在车辆间的协同控制方面, Zhao 等^[12]研究了车辆间信息流对提高编队安全性的关键作用, 他们将前方车辆的信息发送给后续车辆使用, 以此来提高车辆编队的安全性。然而, Ma 等^[13]却提出在混合交通环境中, 互联车辆与其他车辆无法进行通信和协作可能加剧碰撞风险, 因此他们提出了一种碰撞变道控制方法来增强在复杂环境中车辆编队的安全性。Yao 等^[14]指出在混合交通环境中, 较大的车辆编队规模只能提高车辆通行的效率, 并不利于交通的稳定性和安全性。Duan 等^[15]研究了多车道编队中的协同变道控制方法, 他们指出编队队形对车辆变道行为具有显著影响。Li 等^[16]重点关注车辆之间的交互, 采用一种基于恒定时间间隔策略的控制器来增强车队之间的协同控制。

此外, Dai 等^[17]指出, 在现有研究中, 车辆编队的稳定性指的是车辆编队的最终状态, 但是在达到稳定状态过程中的稳定性无法保障。Zhou 等^[18]提出了车辆编队子系统划分方案, 将大型车辆编队拆分为多个子编队, 从而有效消除了在大中型混合车辆编队中车辆起停带来的不稳定性问题。Li 等^[19]基于强化学习优化性能控制算法, 进一步实现车辆的个体稳定性和车队的强稳定性。Johansson 等^[20]从博弈论角度研究了不同的编队模式对车辆编队稳定性影响。Kokkinogenis 等^[21]通过拍卖机制优化自动驾驶车队的策略选择, 提升任务分配效率和整体协作性能。

然而, 当前车辆编队的研究均假设车辆形成编队后在行驶途中会保持自己在编队中的位置。但

是,在实际应用中,由于位于编队中不同位置的车辆所消耗的能效具有显著差异,因此使用现有方案来实现车辆编队时,可能会出现编队解散的情形,甚至还会出现无法形成车辆编队的特殊情形。

2 预备知识

2.1 系统模型

车辆编队服务拍卖场景主要涉及 3 个交互实体:用户车辆、路侧单元(RSU, road side unit)和服务提供商(SP, service provider),如图 1 所示。

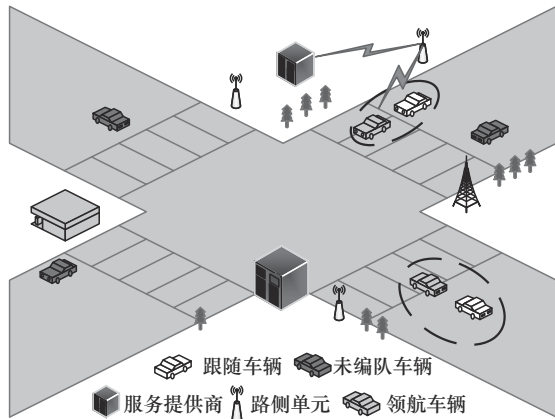


图 1 系统模型

用户车辆被分为跟随车辆(PF, platoon follower)和领航车辆(PL, platoon leader),是移动性较高的节点,每辆车都搭载车载单元,以便与其他车辆或路侧单元进行通信。这些车辆可选择独立行驶或加入车辆编队。其中,PL负责指挥整个车队;PF跟随PL行驶,从而能以更为舒适、节能的方式到达目的地。显然,PL对整个车辆编队的运行具有重要影响,并且PF与PL能组成编队的前提是它们具有相同的行驶路径。

RSU在与SP强交互的应用中具备存储、分发和计算能力,能迁移计算任务以降低能耗、提高实时性。RSU作为数据中继,将车辆查询、PF和PL的响应和信息更新传递给SP。

SP拥有高存储和计算能力,掌握全局的RSU信息,并处理每个RSU提交的请求。本文假设SP在道路交通中已部署充足的路侧单元RSU,且能实时、高效地完成信息交互。

2.2 激励相容

在静态博弈中,参与者同时进行行为选择,并且参与者的行动与效用可以用矩阵表示。其中,矩

阵的行和列表示参与者的行动,用行动交点表示效用集合。静态博弈可以将动态的问题转化为一系列静态的问题求解,它有利于加快策略求解的计算效率^[22]。

本文将每个参与要价的领航车辆作为博弈参与者 \mathcal{L}_i ,每个参与出价的跟随车辆作为博弈参与者 \mathcal{F}_i 。其中,参与要价的领航车辆集合记为 \mathcal{L} ,参与出价的跟随车辆集合记为 \mathcal{F} 。假设竞争各方都为理性决策者,那么领航车辆 \mathcal{L}_i 与跟随车辆 \mathcal{F}_i 会根据现实情况给出理想最低价 $\min(\mathcal{A}_k^i)$ 与 $\min(\mathcal{B}_i^j)$ 、理想最高价 $\max(\mathcal{A}_k^i)$ 与 $\max(\mathcal{B}_i^j)$,建立“出价-要价”矩阵寻找利益均衡点,即让领航车辆 \mathcal{L}_i 与跟随车辆 \mathcal{F}_i 双方利益均衡,从而防止因利益分配问题降低机制可信度。

在博弈论中,Nash均衡是要求所有参与者策略必须响应最优解,以保障参与者在博弈中能够获得公平的效用分配,任何参与者单方面偏离Nash均衡都会导致其效用减小。具体来说,Nash均衡是一种策略合作,使得每一个参与者的策略是对其他参与者策略的最优反应。换句话说,如果在一个策略组合上,当所有其他人都都不改变策略时,没有人会改变自己的策略,则该策略组合就是一个Nash均衡。

在博弈 $G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$ 中,如果在所有博弈方的各一个策略组成的某个策略组合 (s_1^*, \dots, s_n^*) 中,任意博弈方 i 的策略 s_i^* 属于策略集合 S_i ,都是对其余博弈方策略的组合 $(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$ 的最佳对策。即对任意 $s_{ij} \in S_i$,都有 $u_i(s_1^*, \dots, s_n^*) \geq u_i(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_{ij}, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$,则称 (s_1^*, \dots, s_n^*) 为 G 的一个Nash均衡。

定义 1 个体理性。参与者 $\mathcal{F}_i \in \mathcal{F}$ 与 $\mathcal{L}_k \in \mathcal{L}$ 参与拍卖时,其获得的收益应不低于其保留收益或不参与时的收益。换句话说,参与者只有在预期获得的收益 $(U_i^{(f)} \gg 0, U_k^{(l)} \gg 0)$ 等于他们选择不参与时的收益 $(U_i^{(f)} = 0, U_k^{(l)} = 0)$ 时,才会选择参与。其中, $U_i^{(f)}$ 表示 \mathcal{F}_i 的收益, $U_k^{(l)}$ 表示 \mathcal{L}_k 的收益。

定义 2 激励相容。在拍卖中,如果对于每一个竞拍者 $\mathcal{F}_i \in \mathcal{F}$ 与 $\mathcal{L}_k \in \mathcal{L}$ 按照自己的估值进行真实的报价,并且其非负的报价都是一个占优势的策略,则称这个拍卖是占优策略激励相容的。

2.3 拍卖模型

本节详细介绍所设计的排序拍卖模型,旨在阐述车辆编队位置的拍卖流程。本文提出的拍卖模型主要涉及 3 个参与方:买方(即 PF)、卖方(即 PL)和拍卖者(即 SP)。PF 为选定的待行驶路径向 PL 进行出价,而 PL 则提交其最低要价,如图 2 所示。

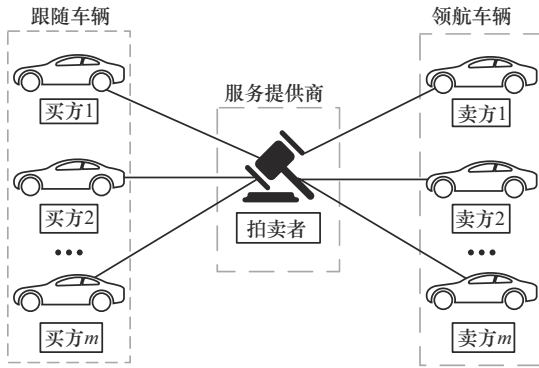


图 2 基于队列的拍卖模型

1) 买方

本文将所有 PF 组成的集合表示为 \mathcal{F} , 每辆车对行驶路径进行出价。对于每辆跟随车辆 $\text{pf}_i \in \mathcal{F}$, 其对于每条路径 \mathcal{R}_j 的出价用向量表示为

$$\mathbf{B}_i = (\mathcal{B}_i^1, \mathcal{B}_i^2, \dots, \mathcal{B}_i^m) \quad (1)$$

其中, \mathcal{B}_i^j 是车辆 pf_i 在路径 \mathcal{R}_j 的最高出价。因此, \mathcal{B}_i^j 可以为 0 (表示车辆 pf_i 不对路径 \mathcal{R}_j 出价) 或正实数 (表示车辆 pf_i 对路径 \mathcal{R}_j 的最高出价)。

PF 具体数量根据编队任务需求决定, 对于每辆跟随车辆 $\text{pf}_i \in \mathcal{F}$, 其估值用向量表示为

$$\mathbf{V}_i = (\mathcal{V}_i^1, \mathcal{V}_i^2, \dots, \mathcal{V}_i^m) \quad (2)$$

其中, \mathcal{V}_i^j 表示选定路径 \mathcal{R}_j 时对 pf_i 路程的估值。在排序拍卖中, \mathcal{B}_i^j 不一定等于 \mathcal{V}_i^j 。此外, SP 作为拍卖中心, 决定了买方 pf_i 最终需要支付的费用 $\mathcal{P}_i^{(f)}$ 。

2) 卖方

将所有 PL 组成的集合表示为 \mathcal{L} , 每辆 PL 根据行驶路线提交最低要价。领航车辆 $\text{pl}_k \in \mathcal{L}$ 对所有路径 \mathcal{R}_j 的要价用向量表示为

$$\mathbf{A}_k = (\mathcal{A}_k^1, \mathcal{A}_k^2, \dots, \mathcal{A}_k^m) \quad (3)$$

其中, \mathcal{A}_k^j 表示领航车辆 pl_k 在路径 \mathcal{R}_j 上的最低要价。

对于每辆领航车辆 $\text{pl}_k \in \mathcal{L}$, \mathcal{C}_k^j 表示其在 \mathcal{R}_j 的实际领航成本 (即领航车辆在提供服务时的资源消

耗, 如燃料)。 \mathcal{C}_k^j 包括了领航车辆在编队任务当中的算力与能耗上的开销。对于 \mathcal{R} 中的所有路径, pl_k 的实际成本由成本向量来表示

$$\mathbf{C}_k = (\mathcal{C}_k^1, \mathcal{C}_k^2, \dots, \mathcal{C}_k^m) \quad (4)$$

值得注意的是, $\forall k, j$, 有 $\mathcal{C}_k^j \leq \mathcal{A}_k^j$ 。在排序拍卖中, \mathcal{A}_k^j 与 \mathcal{C}_k^j 不一定相等。卖方 pl_k 最终的报酬 $\mathcal{P}_k^{(l)}$ 取决于服务提供商。报酬 $\mathcal{P}_k^{(l)}$ 是为了补偿领航车辆在编队任务当中的额外开销, 即领航车辆从中标的跟随车辆处获得的补偿。

3) 拍卖商

SP 负责主持排序拍卖活动。在给定 PF 集合 \mathcal{F} 和 PL 集合 \mathcal{L} , SP 根据出价矩阵 \mathbf{B} 和要价矩阵 \mathbf{A} , 构造“出价-要价”矩阵。PF 的出价集合为 $\mathcal{F}_w \subseteq \mathcal{F}$; PL 的要价集合为 $\mathcal{L}_w \subseteq \mathcal{L}$; 在 \mathcal{F}_w 和 \mathcal{L}_w 之间形成成功交易的集合为 \mathcal{W}^T 。并且, $\mathcal{P}_i^{(f)}$ 表示胜出的跟随车辆 $\text{pf}_i \in \mathcal{F}$ 在路径 $\mathcal{R}_j \in \mathcal{R}$ 中为胜出的领航车辆 $\text{pl}_k \in \mathcal{L}$ 支付的费用; 同样, $\mathcal{P}_k^{(l)}$ 表示胜出的领航车辆 $\text{pl}_k \in \mathcal{L}$ 在路径 $\mathcal{R}_j \in \mathcal{R}$ 中从胜出的跟随车辆 $\text{pf}_i \in \mathcal{F}$ 获得的报酬。

定义 3 候选交易。若存在 $\text{pf}_i \in \mathcal{F}$ 和 $\text{pl}_k \in \mathcal{L}$, 使得对于路径 $\mathcal{R}_j \in \mathcal{R}$, 跟随车辆 pf_i 出价 \mathcal{B}_i^j 和领航车辆 pl_k 要价 \mathcal{A}_k^j 均为非零正数, 则交易 (i, j, k) 被定义为候选交易。所有的候选交易组成的候选交易集合用 \mathcal{T} 表示。

显然, 根据所有的候选交易, 就可构造出筛选之后的“出价-要价”矩阵。

定义 4 成功交易。给定一组候选交易中的领航车辆 $\mathcal{L}_w \subseteq \mathcal{L}$ 、一组跟随车辆 $\mathcal{F}_w \subseteq \mathcal{F}$, 以及路径集合 \mathcal{R} , 如果通过拍卖与博弈机制筛选存在交易 (i, j, k) 使得双方利益均衡, 且车队数量为 M' , 则称该交易为成功交易。其中, SP 分配领航车辆 $\text{pl}_k \in \mathcal{L}$ 来执行 PF 在 $\mathcal{R}_j \in \mathcal{R}$ 处的任务; 所有此类成功交易的集合表示为 \mathcal{W}^T ; M' 表示成功拍卖后组成编队的车辆数量, 其由 SP 事先指定。

定义 5 激励机制。本文给出的补偿机制如式(5)所示。

$$\mathcal{W}^T = \{(i, j, k) \mid \{\text{pf}_1, \text{pf}_2, \dots, \text{pf}_n\} \in \mathcal{F}_w, \text{pl}_k \in \mathcal{L}_w, \mathcal{R}_j \in \mathcal{R}, \{\text{pf}_1, \text{pf}_2, \dots, \text{pf}_n\} \leftarrow \text{pl}_k\} \quad (5)$$

其中, $\{\text{pf}_1, \text{pf}_2, \dots, \text{pf}_n\}$ 表示形成的车辆编队中的跟随车辆组成的集合。PF 和 PL 效用不仅取决于收取

的费用和奖励的报酬，还取决于 PF 对所获得的领航服务的估值以及 PL 执行此类领航任务的成本。跟随车辆的总效用定义为 $pf_i \in \mathcal{F}$ 对所获得的领航服务的总估值与收取的总费用之间的差值，具体如式(6)所示。

$$U_i^{(f)} = \begin{cases} \sum_{(i,j,k) \in \mathcal{W}^T} \mathcal{V}_i^j - \sum_{(i,j,k) \in \mathcal{W}^T} \mathcal{P}_{ij}^{(f)}, & pf_i \in \mathcal{F}_w \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

类似地，领航车辆 $pl_k \in \mathcal{L}$ 的总效用被定义为 PF 收到的总报酬与其领航任务的总成本之间的差值，如式(7)所示。

$$U_k^{(l)} = \begin{cases} \sum_{(i,j,k) \in \mathcal{W}^T} \mathcal{P}_{kj}^{(l)} - \sum_{(i,j,k) \in \mathcal{W}^T} \mathcal{C}_k^j, & pl_k \in \mathcal{L}_w \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

3 方案介绍

本节将详细阐释本文提出的基于双向拍卖的车辆编队方案。该方案主要由2个阶段组成，即候选交易阶段和成功交易阶段，如图3所示。其中，在候选交易阶段中，SP根据“出价-要价”矩阵筛选符合条件多个交易；在成功交易阶段中，SP通过效用均衡原则确保双方效用最大化，最终选定成功交易。

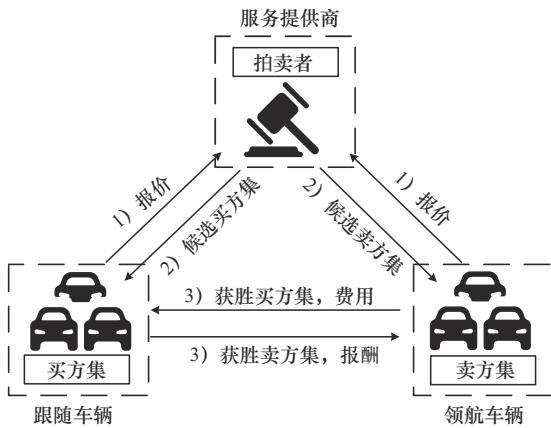


图3 基于车辆编队的拍卖流程

在上述拍卖中，买卖双方的角色并不固定，并且买卖双方之间也存在竞争关系。买方之间通过互相抬价期望获得参与编队以及排序靠前的位置；卖方之间通过互相降价以期获得领航车辆的位置。

此外，鉴于在上述拍卖的出价过程和要价过程可能存在的某种合谋行为会影响拍卖的公平性，本文旨在基于车辆编队场景建立一种匿名拍卖与博弈相结合的激励机制，以实现公平的利益分配和任务

分配，从而确保公平的竞争。为了实现这一目标，需要设计一个车辆编队匹配过程，该过程主要是将 PL 和 PF 进行分配/映射。首先在出价矩阵 B 和要价矩阵 A 中筛选出非零的正出价和正要价。随后，基于潜在交易 (i,j,k) ，确定一组候选交易 \mathcal{T} 。这些候选交易涉及满足某些拍卖标准/条件的 PF 和 PL。只有拥有效用均衡的领航车辆与跟随车辆被保留，其余候选领航车辆将被淘汰，从而进一步完善候选交易集合，以获得成功交易集合 \mathcal{W}^T 。最后，拍卖商确定向 PF 收取的费用以及向 PL 提供的付款/奖励/激励 \mathcal{P} 。

3.1 候选交易

本文方案从 PF 和 PL 收集出价和要价，并创建了出价矩阵和要价矩阵。需要注意的是，PF 和 PL 的出价与要价受其车辆行驶成本的影响。因此，该方案需要考虑以下几个因素。1) 路径长度：相同“起点-终点”可供选择的路径众多，不同路径会影响任务完成的时间和车辆的成本，例如燃料消耗等；2) 路线的难度：编队需要考虑路线的难度，如山路、海拔高度等。因为这些因素可能会影响车辆的燃料效率和任务完成的时间。

可通过下述过程来确定一组候选交易 \mathcal{T} ，以及获胜的跟随车辆。

以一组跟随车辆 \mathcal{F} 、一组领航车辆 \mathcal{L} 、矩阵 B 和要价矩阵 A 作为输入。首先，方案从原始的跟随车辆集合 \mathcal{F} 中创建一个新的跟随车辆集合 \mathcal{M} 。集合 \mathcal{M} 需要满足对于 \mathcal{M} 中任意跟随车辆 $pf_i \in \mathcal{F}$ ， $B_i^j > 0$ 跟随车辆 $pf_i \in \mathcal{F}$ 只有在出价 $\mathcal{R}_j \in \mathcal{R}$ 为非零正数时才出现在 \mathcal{M} 中。之后，方案对 \mathcal{M} 中的跟随车辆按出价的非递增顺序进行编队序，以构建一个列表 $List[\mathcal{M}'] (1 \leq i \leq n), pf_1 \geq pf_2 \geq \dots \geq pf_n$ 。

同样地，对于领航车辆，方案从原始的领航车辆集合 \mathcal{L} 中创建一个新的领航车辆集合 \mathcal{N} 。集合 \mathcal{N} 需要满足对于 \mathcal{N} 中任意领航车辆 $pl_k \in \mathcal{L}$ ，都有 $A_k^j > 0$ 。然后，方案对 \mathcal{N} 中的领航车辆按非零正要价的非递减顺序进行编队序，以构建一个列表 $List[\mathcal{N}'] (1 \leq k \leq m), pl_1 \leq pl_2 \leq \dots \leq pl_m$ 。

以随车辆列表 $List[\mathcal{M}']$ 为行、领航车辆列表 $List[\mathcal{N}']$ 为列构造出价-要价矩阵，如表 1 所示。其中， $U_{(ij)}^{(l)}$ 与 $U_{(ij)}^{(f)}$ 表示领航车辆与跟随车辆在路径 $\mathcal{R}_j \in \mathcal{R}$ 完成任务时的最终效用情况。

表 1 出价-要价矩阵

参与者	pf ₁	pf ₂	...	pf _n
pl ₁	$U_{(1,1)}^{(l)}, U_{(1,1)}^{(f)}$	$U_{(1,2)}^{(l)}, U_{(1,2)}^{(f)}$...	$U_{(1,n)}^{(l)}, U_{(1,n)}^{(f)}$
pl ₂	$U_{(2,1)}^{(l)}, U_{(2,1)}^{(f)}$	$U_{(2,2)}^{(l)}, U_{(2,2)}^{(f)}$...	$U_{(2,n)}^{(l)}, U_{(2,n)}^{(f)}$
⋮	⋮	⋮	$U_{(ij)}^{(l)}, U_{(ij)}^{(f)}$	⋮
pl _m	$U_{(m,1)}^{(l)}, U_{(m,1)}^{(f)}$	$U_{(m,2)}^{(l)}, U_{(m,2)}^{(f)}$...	$U_{(m,n)}^{(l)}, U_{(m,n)}^{(f)}$

接下来, 需要确定阈值竞争区间。该阈值竞争区间是能够使不同的领航车辆与跟随车辆之间效用均衡的区间, 其满足以下条件, 这里假设 PL 与 PF 数量足够, 并且满足 $n \gg q$ 。

$$\begin{aligned} \min \{ & (U_{(ij)}^{(l)}, U_{(ij)}^{(f)}) | U_{(ij)}^{(l)} = U_{(ij)}^{(f)} \} \cup \\ \max \{ & (U_{(ij)}^{(l)}, U_{(ij)}^{(f)}) | U_{(ij)}^{(l)} = U_{(ij)}^{(f)} \} \end{aligned} \quad (8)$$

区间值为阈值竞争区间 \mathcal{Z} 。其中, \mathcal{Z}_i^j 表示由跟随车辆 pf_i^j 赢得的领航车辆。

当满足阈值竞争区间 \mathcal{Z} 并且有 $\mathcal{A}_i^j \leq \sum_{i=1}^n \mathcal{B}_i^j$ 时, 创建一个交易 (i, j, k) 并将其添加到候选交易集合 \mathcal{T} 中; 反之, 则不满足候选交易条件。

3.2 成功交易

在候选交易阶段之后, 本文方案将进行成功的交易确认。即在剔除不满足阈值竞争区间 \mathcal{Z} 并且不属于候选交易集合 \mathcal{T} 的候选车辆之后形成候选矩阵 \mathbf{M}^T , 进一步需要确定成功交易集合 \mathcal{W}^T 。

为实现这一目标, 本文考虑按照领航车辆最低要价到最高要价依次遍历领航车辆 $\forall pl_m \subset (List[\mathcal{N}'] \cap \mathbf{M}^T)$ 的跟随车辆剩余量, 当剩余跟随车辆数量大于完成任务所需车辆 q 时, 以其出价-要价矩阵表示双方利益情况, 根据静态博弈的方法确定最佳跟随车辆选择情况, 称领航车辆 pl_m 与跟随车辆可能达成成功交易, 将其纳入成功交易集合 \mathcal{W}^T , 循环遍历直到最后一辆领航车辆。

根据成功的交易集合 \mathcal{W}^T , 选取在相同任务下效用最高的一行车队进行编队, 按照位置最大能源损耗预估车辆最大损耗, 对跟随车辆进行编队序最终效用最高的车辆依次编队, 将第 q 位买方的出价 \mathcal{B}_q 作为每位获胜买方所需支付的费用 $\mathcal{P}_q^{(f)}$ 。为了满足预算平衡属性, 卖方所得总报酬不能超过系统总预算, 即 $\mathcal{P}_{kj}^{(l)} \leq q\mathcal{B}_q$ 。拍卖商根据 $\mathcal{P}_{kj}^{(l)} \leq q\mathcal{B}_q$ 计算获胜卖方所得的报酬 $\mathcal{P}_{kj}^{(l)}$ 。

当获胜车辆的数量小于 M' 时, 说明第一轮拍卖不能满足编队的任务需求, 需进行第二轮重复拍卖, 直至拍卖交易成功。

在保证 PF 和 PL 的出价和要价以相同货币形式进行的前提下, 可以确保拍卖过程的结果不会受到影响。例如, 在使用人民币作为货币单位时, 假设 PF 的出价范围为 0~1, 而 PL 的要价范围为 10~1 000。在这种情况下, 由于 PF 和 PL 之间存在较大的差异, 无法达成共识, 因此拍卖无法顺利进行。当出现这种情况时, PF 和 PL 可以重新审视其出价和要价策略, 并有机会通过更新其出价和要价的值来再次参与下一轮的拍卖。这样的调整为 PF 和 PL 提供了重新评估市场需求和竞争态势的机会, 并通过制定更具竞争力和合理性的出价和要价来增加其在拍卖中的成功机会。这种策略的调整是为了使 PF 和 PL 能够更好地适应当前市场环境和对特定路径的需求。通过不断调整和改进策略, PF 和 PL 可以提高其在拍卖中的竞争力, 并增加获得合适交易的机会。这种灵活性和调整能力是拍卖过程中的重要因素, 它为参与者提供了机会, 以适应市场波动和需求变化, 并最大限度地实现其利益。

4 理论分析

为了验证激励机制符合机制设计理论的标准, 本节将从个体理性、预算平衡、激励相容和计算效率 4 个方面进行论证。本节首先阐述了基于拍卖的激励机制的 4 个理论属性, 随后对这些属性进行了详细分析。

4.1 激励机制

引理 1 本文方案满足个体理性。

证明 为了证明本文方案满足个体理性, 本节将从参与者的决策过程和最优性 2 个方面进行论证。

考虑一个参与者 i , 他面临着在本文方案下进行决策的情境。参与者 i 的目标是最大化其个人效用函数 U_i , 该函数依赖于参与者 i 的出价 \mathcal{B}_i (或要价 \mathcal{A}_k) 和分配策略 \mathcal{S}_i 。用 $U_i(\mathcal{B}_i, \mathcal{S}_i)$ 表示参与者 i 在特定报价 \mathcal{B}_i 和分配结果/选择策略 \mathcal{S}_i 下的个人效用。

参与者 i 的个体理性要求他在决策中选择能够使其个人效用最大化的报价。因此, 可以表示参与者 i 的个体理性要求如下

$$\mathcal{B}_i^* = \arg \max \{ U_i(\mathcal{B}_i, \mathcal{S}_i) \} \quad (9)$$

其中, \mathcal{B}_i^* 是参与者 i 的最优报价, 可以使个人效用函数 U_i 达到最大值。

接下来将证明在本文方案下, 参与者 i 的最优报价 \mathcal{B}_i^* 符合个体理性的要求。

根据本文方案的设计原则, 该机制会考虑参与者的报价和其他参与者的报价情况, 从而确定最终的分配结果。假设其他参与者的报价 \mathcal{B}_{-i} 为除参与者 i 外的所有参与者的报价。由于目标是证明本文方案满足个体理性, 在这里证明过程将关注参与者 i 的最优报价。

为了达到最大化个人效用的目标, 参与者 i 需要评估其报价对最终分配结果的影响。假设最优分配结果为 \mathcal{S}_i^* , 那么参与者 i 的个人效用函数可以表示为

$$U_i(\mathcal{B}_i^*, \mathcal{S}_i^*) = U_i(\mathcal{B}_i^*, \mathcal{S}_i^*(\mathcal{B}_i^*, \mathcal{B}_{-i})) \quad (10)$$

其中, $\mathcal{S}_i^*(\mathcal{B}_i^*, \mathcal{B}_{-i})$ 是在参与者 i 报价为 \mathcal{B}_i^* 且其他参与者报价为 \mathcal{B}_{-i} 的情况下得到的最优分配结果。

由于本文的目标是使个人效用达到最大化, 参与者 i 可以通过寻找最优报价 \mathcal{B}_i^* 来实现这一目标。因此, 可重写式(10)如下

$$U_i(\mathcal{B}_i^*, \mathcal{S}_i^*) \geq U_i(\mathcal{B}_i, \mathcal{S}_i^*(\mathcal{B}_i, \mathcal{B}_{-i})) \quad (11)$$

这说明使用本文方案时, 参与者 i 的最优报价 \mathcal{B}_i^* 至少能够使个人效用不低于其他报价情况下的个人效用。

综上所述, 根据式(7)和式(9), 可以得出结论: 本文方案满足个体理性。也就是说, 参与者 i 在本文方案下, 通过选择最优报价 \mathcal{B}_i^* , 可以使其个人效用最大。证毕。

引理 2 本文方案是预算平衡的。

证明 为了证明拟议的拍卖方案是预算平衡的, 本节将从 2 个方面进行论证: 1) 本文方案的系统总预算不会超额; 2) 本文方案对每个参与者的支出是有效和合理的。

要验证激励机制符合预算平衡的理论属性, 需要确保卖方所得总报酬不会超过系统总预算。预算平衡的属性要求

$$\mathcal{P}_{kj}^{(l)} \leq q\mathcal{B}_q \quad (12)$$

其中, $1 \leq k \leq n$, $1 \leq j \leq m$ 。

现在开始详细论证预算平衡的属性。

首先考虑在本文方案下, 系统中的总预算不会被超出。假设有 n 个参与者参与该拍卖, 并且每个参与者 i 的支付为 \mathcal{P}_i 。根据本文方案的设计原则, 拍卖者将选择使拍卖结果最优的报价, 记为 \mathcal{B}^* 。

因此, 拍卖者的收入为

$$\mathcal{R} = \Sigma \mathcal{B}^* - \Sigma \mathcal{P}_i \quad (13)$$

其中, $\Sigma \mathcal{P}_i$ 表示对所有参与者的支付求和。

接下来将证明在本文方案中的总预算不会被超出。

考虑参与者 i , 他的最优报价为 \mathcal{B}_i^* , 此时的支付为 \mathcal{P}_i^* 。假设其他参与者的最优报价为 \mathcal{B}_{-i}^* , 并且其他参与者的最优支付为 \mathcal{P}_{-i}^* 。在这种情况下, 拍卖者的收入可以表示为

$$\mathcal{R} = \mathcal{B}_i^* - \mathcal{P}_i^* + \Sigma \mathcal{B}_{-i}^* - \Sigma \mathcal{P}_{-i}^* \quad (14)$$

具体地, 假设在交易过程中每个领航车辆的要价 \mathcal{A}_k^j 和每个跟随车辆的出价 \mathcal{B}_i^j 都是确定的。在候选交易阶段, 得到候选交易集合 \mathcal{T} , 其中包含了所有可行的交易组合。

然后, 在成功交易算法中, 对于每个跟随车辆 \mathcal{P}_i^j 在 \mathcal{Z}_i^j 中赢得的领航车辆, 需要淘汰多余的领航车辆, 只保留取得的总效用最大的领航车辆。

考虑 \mathcal{Z}_i^j 中的领航车辆数量, 记为 r_i^j 。可以得到 $r_i^j \leq n$, 因为最多有 n 辆领航车辆可供选择。在编队序后的列表 $\mathcal{Z}_{ij}^{(s)}$ 中, 第 k 辆领航车辆的要价记为 $\mathcal{A}_k^{(s)}$ 。

根据编队序的性质, 有

$$\mathcal{A}_1^{(s)} \leq \mathcal{A}_2^{(s)} \leq \dots \leq \mathcal{A}_{r_i^j}^{(s)} \leq \dots \leq \mathcal{A}_n^{(s)} \quad (15)$$

接下来, 需要确定在列表 $\mathcal{Z}_{ij}^{(s)}$ 中保留的领航车辆数量, 记为 \tilde{r}_i^j 。为了满足预算平衡的属性, 本文方案希望卖方所得总报酬不超过系统总预算, 即

$$\sum_{j=1}^m \mathcal{P}_{kj}^{(l)} \leq \sum_{j=1}^m q\mathcal{B}_q \quad (16)$$

其中, $1 \leq k \leq n$ 。

根据成功交易算法的描述, 只保留列表 $\mathcal{Z}_{ij}^{(s)}$ 中的第一辆领航车辆, 其余领航车辆被淘汰。因此, $\tilde{r}_i^j = 1$ 。

计算获胜卖方所得的报酬 $\mathcal{P}_{kj}^{(l)}$

$$\mathcal{P}_{kj}^{(l)} = \begin{cases} \mathcal{A}_k^{(s)}, & r_i^j = 1, k = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

注意, 当 $\tilde{r}_i^j = 1$ 时, 即只保留第一辆领航车辆时, 卖方所得的报酬 $\mathcal{P}_{kj}^{(l)}$ 就是第一辆领航车辆的要价 $\mathcal{A}_k^{(s)}$ 。

最后, 为了确保预算平衡的属性, 需要确保所有获胜卖方所得的报酬不超过每位获胜买方所需支付的费用, 即

$$\mathcal{A}_1^{(s)} \leq q\mathcal{B}_q \quad (18)$$

由于拍卖者的目标是选择最优报价,使得总效用最大。因此,可以假设参与者*i*的最优支付是有效和合理的,并且其他参与者的最优支付也是有效和合理的。这意味着每个参与者的最优支付都是根据其个人效用函数以及其他参与者的最优报价来确定的。因此,可以重写式(18)如下

$$\begin{aligned} \mathfrak{R} &= \mathcal{B}_i^* - \mathcal{P}_i^* + \sum \mathcal{B}_{-i}^* - \sum \mathcal{P}_{-i}^* \\ &= \mathcal{B}^* - \sum_i \geq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

这表明本文方案的总预算不会被超出,同时也意味着卖方所得的总报酬 $\mathcal{P}_{kj}^{(l)}$ 不会超过获胜买方所需支付的费用 \mathcal{B} 。在这种情况下,激励机制设计确保了系统中的总预算不会被超出,保持了预算的平衡性。

综上所述,根据式(11)和式(17),可以得出结论:本文方案是预算平衡的。证毕。

引理3 本文方案对于跟随车辆是激励相容的。

证明 为证明所提的拍卖方案对于跟随车辆是激励相容的,需要证明在该拍卖中,跟随车辆以真实估值提供出价是其最优策略,并且没有操纵拍卖的动机。

假设跟随车辆 $\text{pf}_i \in \mathcal{F}$ 的真实估值向量为 \mathbf{V}_i ,其在路径 $\mathcal{R}_j \in \mathcal{R}$ 的真实估值为 \mathcal{V}_i^j 。同时假设跟随车辆按照真实估值提供出价。

首先,需要证明在拍卖中,跟随车辆以真实估值提供出价是其最优策略。

假设跟随车辆 $\text{pf}_i \in \mathcal{F}$ 在路径 $\mathcal{R}_j \in \mathcal{R}$ 上的最高出价为 \mathcal{B}_i^j ,对于某个交易 (i,j,k) ,领航车辆 pl_k^j 的要价为 \mathcal{A}_k^j 。根据拍卖机制的规则,该跟随车辆在该交易中需要支付费用 $\mathcal{P}_{ij}^{(f)}$,并且在成功交易后,跟随车辆 pf_i 可以获得领航车辆 pl_k^j 提供的领航服务。

假设跟随车辆 pf_i 在该交易中采取虚报策略,即报出一个低于真实估值的出价 $\mathcal{B}_i^j < \mathcal{V}_i^j$,使得某个领航车辆 pl_k^j 愿意在路径 \mathcal{R}_j 上提供领航服务。在这种情况下,有以下2种可能性。

若 $\mathcal{B}_i^j < \mathcal{A}_k^j$,则跟随车辆 pf_i 不会赢得该交易,因为领航车辆 pl_k^j 的要价高于跟随车辆 pf_i 的出价。因此,跟随车辆 pf_i 不会获得任何领航服务,其效用为0。

若 $\mathcal{B}_i^j \geq \mathcal{A}_k^j$,则跟随车辆 pf_i 可能赢得该交易,因为其出价足够高以满足领航车辆 pl_k^j 的要价。然而,在这种情况下,跟随车辆 pf_i 实际上为获得领航服务支付的费用为 $\mathcal{P}_{ij}^{(f)}$ 需要考虑 \mathcal{A}_k^j ,因为根据拍卖机制的规则,跟随车辆需要支付的费用为赢得

交易时所支付的最低要价。但是,由于 $\mathcal{B}_i^j < \mathcal{V}_i^j$,跟随车辆实际上为其估值支付了较高的费用。因此,跟随车辆 pf_i 将得不偿失,效用会小于0。

现在,假设跟随车辆 pf_i 在该交易中采取虚报策略,即报出一个高于真实估值的出价 $\mathcal{B}_i^j > \mathcal{V}_i^j$,使得某个领航车辆 pl_k^j 愿意在路径 \mathcal{R}_j 上提供领航服务。在这种情况下,有以下2种可能性。

若 $\mathcal{B}_i^j \geq \mathcal{A}_k^j$,则跟随车辆 pf_i 可能赢得该交易,因为其出价足够高以满足领航车辆 pl_k^j 的要价。然而,在这种情况下,跟随车辆 pf_i 实际上为获得领航服务支付的费用为 $\mathcal{P}_{ij}^{(f)}$ 需要考虑 \mathcal{A}_k^j ,因为根据拍卖机制的规则,跟随车辆需要支付的费用为赢得交易时所支付的最低要价。但是,由于 $\mathcal{B}_i^j > \mathcal{V}_i^j$,跟随车辆实际上为其估值支付了较高的费用。因此,跟随车辆 pf_i 将得不偿失,效用会小于0。

若 $\mathcal{B}_i^j < \mathcal{A}_k^j$,则跟随车辆 pf_i 不会赢得该交易,因为领航车辆 pl_k^j 的要价高于跟随车辆 pf_i 的出价。因此,跟随车辆 pf_i 不会获得任何领航服务,其效用为0。

综上所述,在拍卖方案中,跟随车辆以真实估值提供出价是其最优策略,因为任何虚报都会导致跟随车辆得不偿失,效用会小于或等于0。

其次,需要证明在拍卖中,跟随车辆没有操纵拍卖的动机。

假设跟随车辆 $\text{pf}_i \in \mathcal{F}$ 试图操纵拍卖,以获取更高的效用。这意味着该车辆将采取不真实的出价策略来尝试影响其赢得交易的概率或所支付的费用。

上述过程已经证明了在拍卖中,跟随车辆以真实估值提供出价是其最优策略,因此操纵拍卖对跟随车辆没有任何好处。如果跟随车辆采取不真实的出价策略,其可能导致效用小于或等于0,甚至可能导致损失。因此,跟随车辆没有操纵拍卖的动机。

综上所述,本文方案对于跟随车辆是激励相容的,即跟随车辆以真实估值提供出价是其最优策略。证毕。

引理4 本文方案对于领航车辆来说是激励相容的。

证明 为证明所提的拍卖方案对于领航车辆是激励相容的,需要证明在该拍卖中,领航车辆以真实成本报出要价是其最优策略,并且没有操纵拍卖的动机。

假设领航车辆 $pl_k \in \mathcal{L}$ 的真实成本向量为 C_k , 其在路径 $\mathcal{R}_j \in \mathcal{R}$ 的真实成本为 C_k^j 。同时假设领航车辆按照真实成本报出要价。

首先, 证明在拍卖中, 领航车辆以真实成本报出要价是其最优策略。

假设领航车辆 $pl_k \in \mathcal{L}$ 在路径 $\mathcal{R}_j \in \mathcal{R}$ 上的最低要价为 \mathcal{A}_k^j , 对于某个交易 (i, j, k) , 跟随车辆 pf_i^j 的出价为 \mathcal{B}_i^j 。根据拍卖机制的规则, 该领航车辆在该交易中将获得报酬 $\mathcal{P}_{kj}^{(i)}$, 并且在成功交易后, 该领航车辆需要提供领航服务。

假设领航车辆 pl_k 在该交易中采取虚报策略, 即报出一个高于真实成本的要价 $\mathcal{A}_k^j > C_k^j$, 使得某个跟随车辆 pf_i^j 愿意支付该要价。在这种情况下, 有以下 2 种可能性。

若 $\mathcal{A}_k^j > \mathcal{B}_i^j$, 则领航车辆 pl_k 不会赢得该交易, 因为跟随车辆 pf_i^j 的出价低于领航车辆 pl_k 的要价。因此, 领航车辆 pl_k 不会获得任何报酬, 其效用为 0。

若 $\mathcal{A}_k^j \leq \mathcal{B}_i^j$, 则领航车辆 pl_k 可能赢得该交易, 因为其要价不超过跟随车辆 pf_i^j 的出价。然而, 在这种情况下, 领航车辆实际上将提供领航服务的成本为 $\mathcal{P}_{kj}^{(i)}$ 需要考虑 \mathcal{A}_k^j , 因为根据拍卖机制的规则, 领航车辆获得的报酬为赢得交易时所支付的最低要价。但是, 由于 $\mathcal{A}_k^j > C_k^j$, 领航车辆实际上为提供领航服务支付了较高的成本。因此, 领航车辆 pl_k 将得不偿失, 效用会小于 0。

现在, 假设领航车辆 pl_k 在该交易中采取虚报策略, 即报出一个低于真实成本的要价 $\mathcal{A}_k^j < C_k^j$, 使得某个跟随车辆 pf_i^j 愿意支付该要价。在这种情况下, 有以下 2 种可能性。

若 $\mathcal{A}_k^j > \mathcal{B}_i^j$, 则领航车辆 pl_k 不会赢得该交易, 因为跟随车辆 pf_i^j 的出价低于领航车辆 pl_k 的要价。因此, 领航车辆 pl_k 不会获得任何报酬, 其效用为 0。

若 $\mathcal{A}_k^j \leq \mathcal{B}_i^j$, 则领航车辆 pl_k 可能赢得该交易, 因为其要价不超过跟随车辆 pf_i^j 的出价。然而, 在这种情况下, 领航车辆实际上将提供领航服务的成本为 $\mathcal{P}_{kj}^{(i)}$ 需要考虑 \mathcal{A}_k^j , 因为根据拍卖机制的规则, 领航车辆获得的报酬为赢得交易时所支付的最低要价。但是, 由于 $\mathcal{A}_k^j < C_k^j$, 领航车辆实际上为提供领航服务支付了较低的成本, 因此领航车辆 pl_k 的效用会大于 0。

综上所述, 在本文方案中, 领航车辆以真实成本报出要价是其最优策略, 因为任何虚报都会导致领航车辆得不偿失, 效用会小于或等于 0。

其次, 需要证明在拍卖过程中, 领航车辆没有操纵拍卖的动机。

假设领航车辆 $pl_k \in \mathcal{L}$ 试图操纵拍卖, 以获取更高的效用。这意味着该车辆将采取不真实的要价策略来尝试影响其赢得交易的概率或所得到的报酬。

上述过程已经证明了在拍卖中, 领航车辆以真实成本报出要价是其最优策略, 因此操纵拍卖对领航车辆没有任何好处。如果领航车辆采取不真实的要价策略, 其可能导致效用小于或等于 0, 甚至可能导致损失。因此, 领航车辆没有操纵拍卖的动机。

综上所述, 本文方案对于领航车辆来说是激励相容的, 领航车辆以真实成本报出要价是其最优策略, 且没有操纵拍卖的动机。证毕。

定理 1 本文方案是激励相容的。

证明 引理 4-3 表明本文方案对于跟随车辆是激励相容的, 引理 4-4 表明本文方案对于领航车辆是激励相容的。引理 4-3 和引理 4-4 共同证明本文方案具有激励相容性, 对于买方和卖方来说都是最优策略。这为拍卖的成功实施提供了坚实的基础, 使得拍卖可以在真实的环境中广泛应用, 并促进了资源的有效配置和交易的顺利进行。证毕。

4.2 计算复杂度

1) 候选交易阶段。在这一阶段, 拍卖者根据投标矩阵 \mathbf{B} 和要价矩阵 \mathbf{A} 来确定候选交易集合 \mathcal{T} 和新的跟随车辆集合 \mathcal{M} 。首先, 创建新的跟随车辆集合 \mathcal{M} 的时间复杂度为 $O(n)$, 其中 n 是跟随车辆的数量。然后, 对新的跟随车辆集合 \mathcal{M} 按照非递增顺序进行编队序的时间复杂度为 $O(n \log n)$ 。接着, 创建新的领航车辆集合 \mathcal{N} 的时间复杂度为 $O(m)$, 其中 m 是领航车辆的数量。对新的领航车辆集合 \mathcal{N} 按照非递减顺序进行编队序的时间复杂度为 $O(m \log m)$ 。确定阈值要价 \mathcal{A}_λ 的时间复杂度为 $O(1)$ 。构建集合 \mathcal{M}'_q 的时间复杂度为 $O(n)$, 并且将所有 \mathcal{Z}'_i 合并成新的集合 \mathcal{Z} 的时间复杂度为 $O(n \log n)$ 。因此, 候选交易阶段的总计算复杂度为 $O(n \log n + m \log m)$ 。

2) 成功交易阶段。在这一阶段, 拍卖者根据交易集合 \mathcal{T} 来确认成功的交易 \mathcal{W}^T 。首先, 对交易集合 \mathcal{T} 中的每个交易进行编队序的时间复杂度为

$O(|\mathcal{T}|\log|\mathcal{T}|)$, 其中 $|\mathcal{T}|$ 表示交易集合 \mathcal{T} 的大小。然后, 对交易集合 \mathcal{T} 进行遍历, 并根据编队序后的列表 $\mathcal{Z}_i^{(s)}$ 来选择成功的交易, 时间复杂度为 $O(|\mathcal{T}|)$ 。因此, 成功交易阶段的总计算复杂度为 $O(|\mathcal{T}|\log|\mathcal{T}|)$ 。

综上所述, 执行本文方案所需的计算复杂度为 $O(n\log n + m\log m + |\mathcal{T}|\log|\mathcal{T}|)$ 。在实际情况下, 通常有 $n \gg m$ 且 $|\mathcal{T}|$ 远小于 n 和 m , 故可以忽略 $|\mathcal{T}|$ 的影响。因此, 本文方案的计算复杂度为 $O(n\log n + m\log m)$ 。

5 实验

5.1 实验设置

本实验考虑 500 个 PF, 并且它们的出价在 $\mathcal{B}_i^j \in (0,1]$ 进行归一化。由于没有关于领航车辆要价的现有统计数据, 故本实验为领航车辆随机生成要价, 且该要价均匀分布在 $\mathcal{A}_k^j \in (0,1]$, 最多生成 100 个领航车辆的要价。所有要价和出价都是关于 60 个路径集 \mathcal{R} 随机生成的。

实验硬件环境为 IntelCorei7-8750H、DDR4-2666 Hz 8 GB RAM, 实验软件环境为 Windows11 64 位操作系统, 编程语言为 Python 3.7.0。

本实验通过与现有 2 种激励方案^[20-21] 进行比较, 来说明本文方案的有效性。将文献[20]方案和文献[21]方案中使用的跟随车辆满意度、领航车辆满意度、跟随车辆的总效用以及领航车辆的总效用作为度量标准^[23], 具体如下所示。

$$\text{跟随车辆满意度} = \frac{\text{跟随车辆成功交易总数}}{\text{跟随车辆总数}}$$

$$\text{领航车辆满意度} = \frac{\text{领航车辆成功交易总数}}{\text{领航车辆总数}}$$

$$\text{跟随车辆的总效用} = \sum \text{跟随车辆的效用}$$

$$\text{领航车辆的总效用} = \sum \text{领航车辆的效用}$$

其中, 跟随车辆满意度指的是跟随车辆在自动驾驶模式下对于领航车辆行为的满意程度; 领航车辆满意度与跟随车辆满意度相对, 是指领航车辆对其跟随车辆行为的满意程度; 跟随车辆的总效用表示跟随车辆在整个行程中的整体表现和满意度, 是所有跟随车辆效用的总和; 领航车辆的总效用表示领航车辆在整个行程中的整体表现和满意度, 是所有领航车辆效用的总和。

5.2 实验结果和分析

1) 跟随车辆满意度

通过实验, 对使用本文方案、文献[20]方

案和文献[21]方案时跟随车辆满意度进行比较。在该部分实验中, 设定参与的跟随车辆和领航车辆的总数从 50 到 500 和 10 到 100 不等, 然后评估算法的性能。注意, 在本实验中, 跟随车辆的出价在 $\mathcal{B}_i^j \in (0,1]$ 内标准化, 领航车辆的要价在 $\mathcal{A}_k^j \in (0,1]$ 内标准化, 路径集 $\mathcal{R} = 60$ 。

图 4 显示了 3 种方案中 PL 和 PF 数量增加对 PF 满意度的影响。虽然在使用上述 3 种方案时, 跟随车辆满意度均随着领航车辆数量的增加而增加, 但是本文方案能为跟随车辆提供更高的满意度。其原因是: 随着领航车辆数量的增加, 跟随车辆中标的数量也随之增加 (即 $|\mathcal{W}^T|$ 增加)。然而, 随着跟随车辆数量的增加, 跟随车辆满意度却在减少。这是因为, 随着跟随车辆数量的增加, $|\mathcal{F}_w|$ 的值也会增大, 但是 $|\mathcal{L}_w|$ 的值却保持不变, 从而限制成功交易的总数。

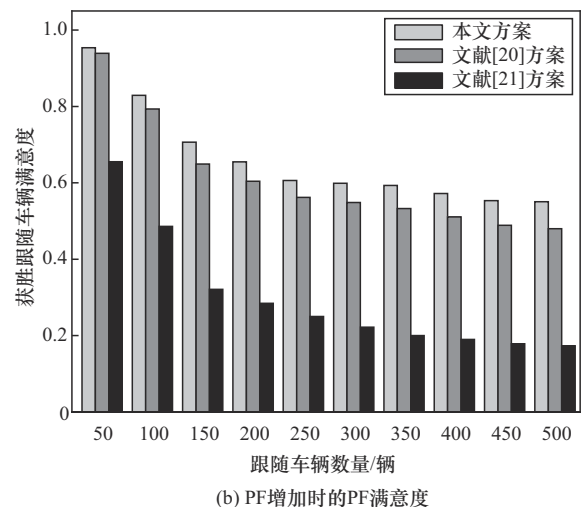
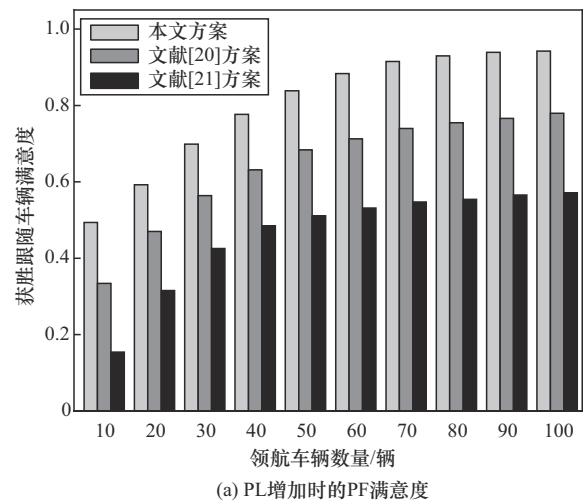


图 4 PL 和 PF 数量增加对 PF 满意度的影响

2) 领航车辆满意度

图 5 显示了 3 种方案中 PL 和 PF 数量增加对 PL 满意度的影响。通过该实验可以发现，随着领航车辆数量的增加，使用上述 3 种方案时，领航车辆满意度均不断减少。其原因是：随着领航车辆数量的增加， $|L_w|$ 的值也会增大，但是 $|F_w|$ 变化不大，因此这将限制成功交易的总数 $|W^*|$ 。然而，在本文方案中，随着跟随车辆数量的增加， $|F_w|$ 和 $|W^*|$ 也会随之增加，这使得在随车辆数量增加时，本文方案能为领航车辆提供较高的满意度。

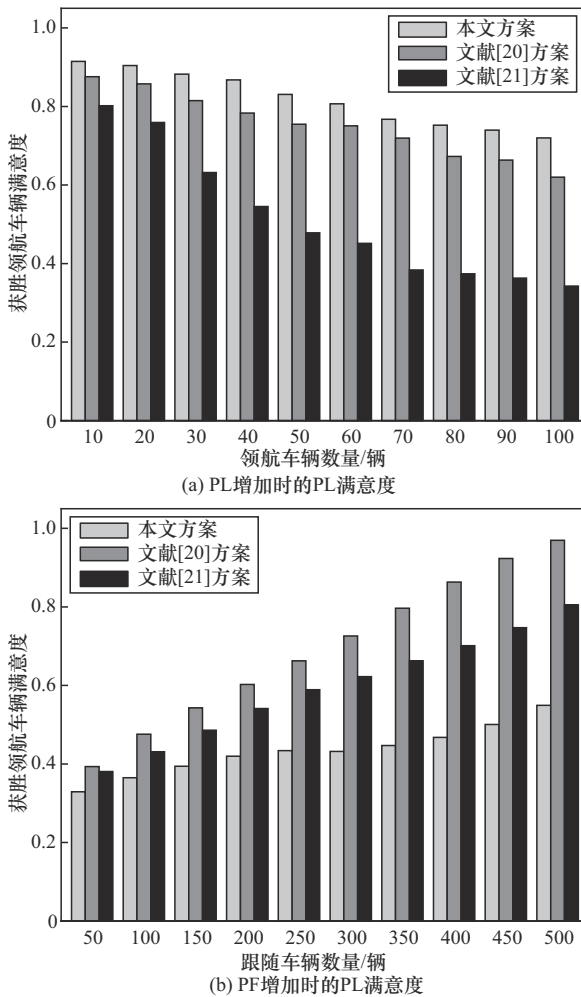


图 5 PL 和 PF 数量增加对 PL 满意度的影响

3) 领航车辆的总效用

图 6 比较了 3 种方案中 PL 和 PF 数量增加对 PL 总效用的影响。通过该实验可发现，使用本文方案时，领航车辆总效用迅速上升。这是因为：随着跟随车辆数量的增加，尚未分配且要价 $A_i^k < A_i$ 的车辆成为领航车辆的概率不断增大，从而导致领航车

辆的总效用也随之增大。同样地，随着跟随车辆数量的增加，要价较低的车辆成为领航车辆的概率不断增大，使得领航车辆总效用也随之增大。

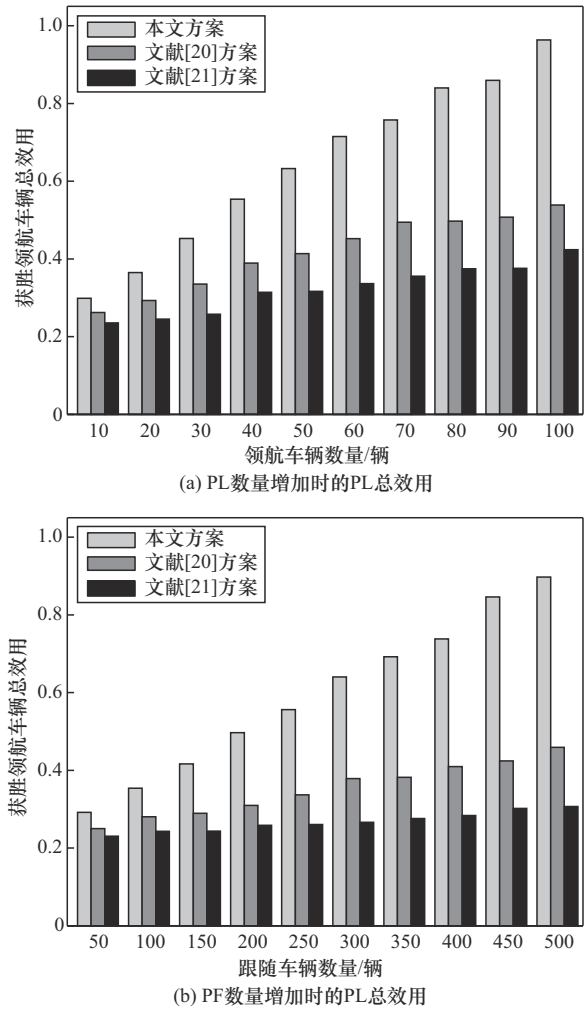


图 6 PL 和 PF 数量增加对 PL 总效用的影响

4) 跟随车辆的总效用

类似地，如图 7 所示，使用本文方案、文献[20]方案和文献[21]方案时，跟随车辆的总效用都随着领航车辆数量和跟随车辆数量的增加而增大。其原因是：随着领航车辆数量和跟随车辆数量的增加，在位置拍卖中，成功交易的数量也随之增多。

5) 车辆数量对平均计算时延的影响

在该部分实验中，将参与拍卖的车辆数量总和从 100 变化至 500，具体实验结果如图 8 所示。从图 8 可以看到，执行本文方案所需的平均计算时延随着参与拍卖的车辆数量的增多而增加。其原因是：当参与拍卖的车辆数量增多时，形成的候选交易数量也在增多，导致服务提供商确定成功交易所需的平

均计算时延也就不断增大。但是,当参与拍卖的车辆数量为500辆时,每辆车所需的平均计算时延仅为0.636 ms。

6 结束语

位于不同位置的车辆在编队行驶中消耗的能效不同,如果直接使用现有的车辆编队方案,可能会出现车辆编队在行驶中出现解散的情形,甚至还会出现无法形成车辆编队的特殊情形。因此,本文将车辆编队中的排序位置作为一种特殊商品,提出了一个基于双向拍卖的车辆编队方案,有效激励各车辆在行驶中保持自己的编队位置,确保形成的车辆编队的稳定性。

参考文献:

- [1] HUANG Z C, CHU D F, WU C Z, et al. Path planning and cooperative control for automated vehicle platoon using hybrid automata[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(3): 959-974.
- [2] LI Q W, CHEN Z W, LI X P. A review of connected and automated vehicle platoon merging and splitting operations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 22790-22806.
- [3] PI D W, XUE P Y, WANG W H, et al. Automotive platoon energy-saving: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 179: 113268.
- [4] HAN X, MA R, ZHANG H M. Energy-aware trajectory optimization of CAV platoons through a signalized intersection[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 118: 102652.
- [5] XU L W, ZHUANG W C, YIN G D, et al. Energy-oriented cruising strategy design of vehicle platoon considering communication delay and disturbance[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 107: 34-53.
- [6] MCAULIFFE B, LAMMERT M, LU X Y, et al. Influences on energy savings of heavy trucks using cooperative adaptive cruise control[C]// Proceedings of the SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2018: 1-20.
- [7] SONG M T, CHEN F, MA X X. Organization of autonomous truck platoon considering energy saving and pavement fatigue[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 90: 102667.
- [8] MA F W, YANG Y, WANG J W, et al. Predictive energy-saving optimization based on nonlinear model predictive control for cooperative connected vehicles platoon with V2V communication[J]. Energy, 2019, 189: 116120.
- [9] HU J Y, BHOWMICK P, ARVIN F, et al. Cooperative control of heterogeneous connected vehicle platoons: an adaptive leader-following approach[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 977-984.
- [10] HU M J, LI C K, BIAN Y G, et al. Fuel economy-oriented vehicle platoon control using economic model predictive control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(11): 20836-20849.
- [11] WANG P C, WU X K, HE X Z. Vibration-theoretic approach to vulnerability analysis of nonlinear vehicle platoons[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(10): 11334-11344.
- [12] ZHAO C C, CAI L, CHENG P. Stability analysis of vehicle platooning

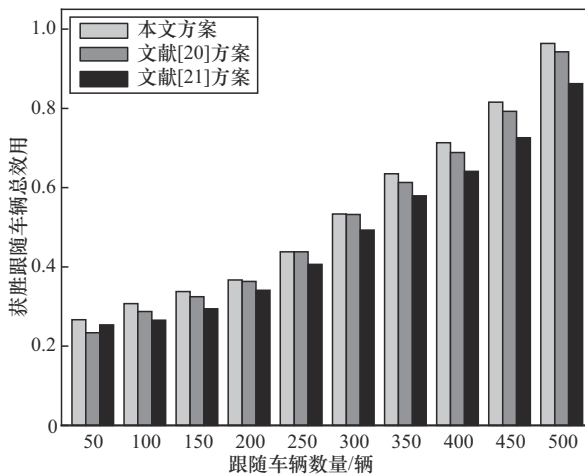
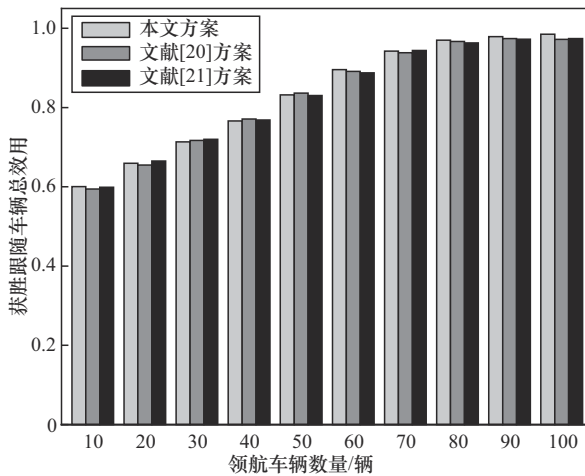


图7 PL和PF数量增加对PF总效用的影响

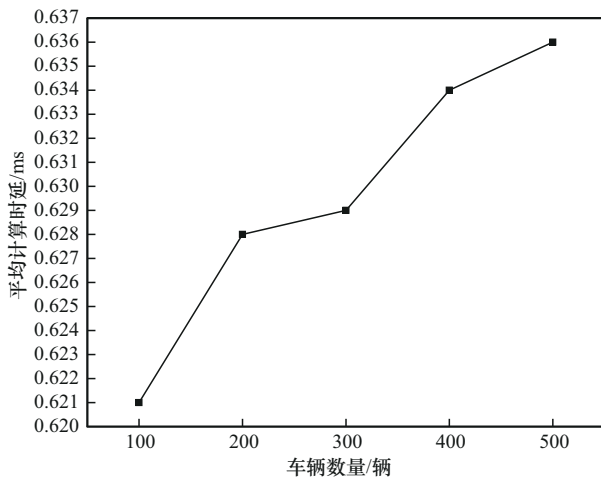


图8 车辆数量对平均计算时延的影响

- with limited communication range and random packet losses[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(1): 262-277.
- [13] MA Y T, LIU Q, FU J, et al. Collision-avoidance lane change control method for enhancing safety for connected vehicle platoon in mixed traffic environment[J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 184: 106999.
- [14] YAO Z H, WU Y X, WANG Y, et al. Analysis of the impact of maximum platoon size of CAVs on mixed traffic flow: an analytical and simulation method[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 147: 103989.
- [15] DUAN X T, SUN C, TIAN D X, et al. Cooperative lane-change motion planning for connected and automated vehicle platoons in multi-lane scenarios[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(7): 7073-7091.
- [16] LI Y F, TANG C C, PEETA S, et al. Integral-sliding-mode braking control for a connected vehicle platoon: theory and application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4618-4628.
- [17] DAI Y L, WANG C, XIE Y C. Explicitly incorporating surrogate safety measures into connected and automated vehicle longitudinal control objectives for enhancing platoon safety[J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 183: 106975.
- [18] ZHOU Y, AHN S, WANG M, et al. Stabilizing mixed vehicular platoons with connected automated vehicles: an H-infinity approach[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 132: 152-170.
- [19] LI K W, LI Y M. Fuzzy adaptive optimization prescribed performance control for nonlinear vehicle platoon[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2024, 32(2): 360-372.
- [20] JOHANSSON A, MÅRTENSSON J. Game theoretic models for profit-sharing in multi-fleet platoons[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 3019-3024.
- [21] KOKKINOGENIS Z, TEIXEIRA M, D' OREY P M, et al. Tactical level decision-making for platoons of autonomous vehicles using auction mechanisms[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1632-1638.
- [22] 衣鹏, 潘越, 王文远, 等. 基于博弈论的多车智能驾驶交互决策综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1159-1175.
- YI P, PAN Y, WANG W Y, et al. A review on interactive decision-making of multi-vehicle autonomous driving with a game theoretical perspective[J]. Control and Decision, 2023, 38(5): 1159-1175.
- [23] ETTEMA D, FRIMAN M, GÄRLING T, et al. How in-vehicle activities affect work commuters' satisfaction with public transport[J]. Journal of Transport Geography, 2012, 24: 215-222.

[作者简介]



刘海 (1984-), 男, 河北献县人, 博士, 贵州财经大学副教授, 主要研究方向为密码协议、大数据安全和隐私保护等。



吴晋宇 (1999-), 男, 贵州毕节人, 贵州财经大学硕士生, 主要研究方向为面向车联网的隐私保护技术。



王天锡 (1999-), 男, 贵州六枝人, 贵州财经大学硕士生, 主要研究方向为面向车联网的隐私保护技术。



彭泓晔 (2000-), 女, 贵州贵阳人, 贵州财经大学硕士生, 主要研究方向为位置隐私保护技术。