

文章编号:1671-1637(2026)06-0198-11

考虑SAEV充电需求的车队动态调度与配套设施布局协同优化模型

韩飞¹, 曹万彪¹, 王建^{*2}, 李岩¹, 孙超³

(1. 长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096;
3. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:为实现共享自动驾驶电动汽车(SAEV)的车队调度与配套设施布局协同优化,构建了SAEV车队规模、车队行驶总距离、乘客总出行时间以及充电停车设施建设成本最小化的多目标非线性规划模型;该模型基于时间扩展网络描述乘客动态OD出行需求、SAEV车队的动态调度策略以及乘客流的时空位移变化,并利用网络中节点、边的容量限制,分别刻画了交通小区内充电停车设施和连接道路上的拥堵效应;区别于传统模型,该模型考虑了SAEV车队的充电需求、充电/营业SAEV车流与乘客流的动态守恒关系、拼车乘客数量限制以及配套设施容量限制等约束;为提高模型求解效率,采用线性近似与线性等价技术将模型重构为混合整数线性规划模型,并采用Epsilon约束法求解多目标模型的帕累托最优解;采用成都市路网出行数据对模型有效性进行了验证,并针对不同拼车乘客数量、车队充电需求比例进行了情景对比分析。研究表明:当拼车乘客数量从1人增加至4人,车队行驶总距离减少77.87%,车队规模减小88.56%,配套设施建设成本减少96.80%,但乘客总出行时间增加125.46%,表明运营商应选取合适的拼车策略以保证乘客出行效率;当SAEV车队充电需求比例从30%降低至5%,车队行驶总距离降低10.77%,运营商车队规模降低3.69%,配套设施建设成本与乘客出行总时间保持不变,表明提升SAEV续航性能在提高车队运输效率、降低SAEV车队运营成本方面具有较大潜力。

关键词:交通工程;共享自动驾驶电动汽车;混合整数非线性规划模型;车队运营调度;线性化技术;设施布局

中图分类号:U491.1 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.118

Collaborative optimization model of fleet dynamic scheduling and supporting facility layout considering SAEV charging demand

HAN Fei¹, CAO Wan-biao¹, WANG Jian^{*2}, LI Yan¹, SUN Chao³

(1. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: To achieve the collaborative optimization of fleet scheduling and supporting facility

出版历程:2025-04-20 收稿,2025-09-27 修回,2025-11-27 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52472340,52272316);陕西省重点研发计划(2023-YBGY-138);陕西省自然科学基金项目(2020JQ-370);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102344603)

作者简介:韩飞(1986-),男,湖北汉川人,讲师,工学博士,E-mail:hanfei@chd.edu.cn。

*通信作者:王建(1988-),男,江苏南通人,研究员,工学博士,E-mail:jianw@seu.edu.cn。

引用格式:韩飞,曹万彪,王建,等.考虑SAEV充电需求的车队动态调度与配套设施布局协同优化模型[J].交通运输工程学报,2026,26(6):198-208.

Citation: HAN Fei, CAO Wan-biao, WANG Jian, et al. Collaborative optimization model of fleet dynamic scheduling and supporting facility layout considering SAEV charging demand[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(6): 198-208.

layout of shared autonomous electric vehicle (SAEV), a multi-objective nonlinear programming model was established, with the objectives of minimizing the SAEV fleet size, total vehicle travel distance, total passenger travel time, and construction cost of charging and parking facilities. Based on a time-expanded network, the dynamic OD travel demand of passengers, the dynamic scheduling strategy of the SAEV fleet, and the spatiotemporal displacement of passenger flows were described. Furthermore, the capacity constraints of nodes and arcs in the network were utilized to characterize the congestion effects of charging and parking facilities in traffic zones and connecting roads, respectively. Distinguished from traditional models, several constraints were considered, including the charging demand of the SAEV fleet, dynamic conservation relations of charging and operating SAEV flows and passenger flows, ridesharing passenger number limit, and capacity limits of supporting facilities. To improve the solution efficiency of the model, linear approximation and linear equivalence techniques were employed to reconstruct the model into a mixed-integer linear programming model, and the Epsilon-constraint method was used to solve the Pareto-optimal solutions of the multi-objective model. The validity of the model was verified using the travel data of the road network in Chengdu, and a scenario comparison analysis was conducted for different numbers of ridesharing passengers and ratios of fleet charging demand. Research results show that when the number of ridesharing passengers increases from one to four, the total vehicle travel distance decreases by 77.87%; the fleet size decreases by 88.56%, and the construction cost of supporting facilities decreases by 96.80%, but the total passenger travel time increases by 125.46%, which indicates that operators should select an appropriate ridesharing strategy to ensure passenger travel efficiency. When the proportion of SAEV charging demand decreases from 30% to 5%, the total vehicle travel distance decreases by 10.77%, the operator fleet size decreases by 3.69%, and the construction cost of supporting facilities and total passenger travel time remain unchanged, which indicates that improving the SAEV endurance performance has great potential in improving the transport efficiency of SAEV fleet and reducing the operation cost of SAEV fleet.

Keywords: traffic engineering; shared autonomous electric vehicle; mixed-integer nonlinear programming model; fleet operation scheduling; linearization technique; facility layout

Publication history: Received 2025-04-20; Received in revised form 2025-09-27; Accepted 2025-11-27

Funding: National Natural Science Foundation of China (52472340, 52272316); Key R&D Program of Shaanxi Province (2023-YBGY-138); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JQ-370); Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102344603)

* **Corresponding author:** WANG Jian, research fellow, PhD, E-mail: jianw@seu.edu.cn.

0 引言

近年来,随着城市化进程的加速,人均汽车保有量显著上升,由此导致了交通拥堵、环境污染以及能源危机等诸多问题^[1-2]。为了应对这些挑战,共享自动驾驶电动汽车(Shared Autonomous Electric Vehicle, SAEV)作为一种高效的出行方式逐渐受到关注,它不仅能够缓解交通拥堵和提高出行效率,还具有减少碳排放和降低能源消耗潜力^[3-4]。目前,全球多个城市已积极开展共享自动驾驶汽车

(SAV)的商业化运营。例如,美国在亚利桑那州凤凰城推出了 Waymo One 服务,俄罗斯在莫斯科开展了 Yandex 共享自动驾驶汽车的运营,中国“小马智行”“文远知行”“百度”等企业也在特定区域内进行了共享自动驾驶汽车的运营^[5-6]。虽然 SAEV 服务乘客出行的趋势愈发主流化,但在实际运营环节中仍有许多问题值得深入研究。Yao 等^[7]指出优化车辆运营调度可以有效减少空驶里程。Li 等^[8]指出优化配套设施布局能提升整体运营效率。这两者在本质上是相互关联的,对两者进行协同优化能够

在保证乘客满意度的前提下,更高效地完成乘客接送、车辆充电与停车等功能^[9-10]。

对于 SAEV 系统的运营调度而言,车队路径优化与车队规模优化均发挥着关键作用^[11-13]。优化车队路径可减少车辆空驶里程,提高每辆车的日均利用率;优化车队规模有助于节省成本并避免车辆闲置^[14-15]。现有关于车队路径优化的研究主要从乘客出行满意度的优化及充电、停车便利性优化的角度展开。Levin^[16]提出了一个结合按需出行服务和动态交通分配理论的优化乘客等待时间和行驶时间的线性规划模型,为 SAV 提供了更贴近实际需求的路线规划方案。充电、停车便利性优化主要基于固定的充电、停车设施。Dean 等^[17]建立了基于 Agent 的仿真模型,讨论了 SAEV 车队路径规划和充电策略之间的协同效应,指出整合两者可以显著改善服务质量并减少空载行驶里程。Feng 等^[18]提出了一个 SAV 的路径规划及停车行为联合优化的线性模型,并用可变邻域搜索 (Variable Neighborhood Search, VNS) 启发式方法求解。胡路等^[19]提出了一个混合整数非线性规划模型并根据求解结果得到合理的充电停车行为及定价策略,该方法可以提高车位利用率与运营利润。这些研究逐步融合了动态服务需求与充电、停车行为,但这些方法大多基于固定的车队规模,未考虑可变的车队规模背景。因此也有很多学者研究可变车队规模与运营调度的协同优化。Paparella 等^[20]考虑 SAEV 的充电行为,提出了一个非线性规划模型并探讨了使 SAEV 达到成本效益和服务效率最佳的车队规模与调度方案。Fagnant 等^[21]提出了一个考虑 SAV 动态拼车调度与车队规模的协同优化模型,验证了适当的拼车策略可显著降低拥堵与成本,提高运营收益。这些研究通过考虑多个目标进行建模且有效提升了系统效率与服务质量,但仍存在车队运营与基础设施之间仅交互未协同优化、缺乏乘客动态需求适应性等不足。

对于 SAEV 出行服务的配套交通设施布局规划而言,国内外学者针对充电站、停车泊位分布的优化开展了较为广泛的研究^[22-24]。交通设施的布局规划不仅要考虑土地价格,还要兼顾车辆充电、停车的便利性,以确保车辆能够以最短的时间或路程到达目的地^[25-27]。在现有的研究中,部分学者考虑不同情景下的需求变化和服务质量,建立了配套设施布局与相关行为的动态模型。例如, Lokhandwala 等^[28]提出了一个 SAEV 车队中充电站选址的多目标规划模型,分析了 SAEV 的充电行为及其对整个

交通系统的影响。Yu 等^[29]提出了单目标优化模型,针对需求不确定性下的 SAV 系统来优化停车场的位置和数量。Seo 等^[30]提出了一个协同优化模型,通过优化 SAV 的车辆数、路网设计以及停车设施布局,同时实现动态路径规划与乘客接送及拼车服务。Santos 等^[31]构建了一个考虑车辆的载客移动、车辆重新定位和充电时间等因素的协同模型,以优化车辆规模及充电站的选址与容量。这些研究虽然考虑到了乘客需求的动态性和设施布局的重要性,但并未探究基础设施与车队调度之间的交互关系,考虑到充电站与停车场的位置均会影响整个 SAEV 系统的运行,因此将二者结合进行协同优化是必要的。

当前研究往往独立探讨运营调度和配套设施布局规划的问题,忽略了配套设施与 SAEV 车队运营调度之间的交互关系,但路径规划及运营商会影响 SAEV 的使用频率和分布,充电站及停车泊位的布局决定车辆进行充电和停车等行为的便利性。在整个 SAEV 系统中二者是相互关联的,只对其中单一目标进行优化可能会导致另一方资源部署的不均衡等问题。针对上述问题,本文从 SAEV 运营方、政府部门、乘客这 3 个利益相关方的角度出发,构建了一个协同优化模型来优化 SAEV 系统运营调度与配套设施布局规划问题,明确考虑 SAEV 在运营过程中的充电需求以及配套设施的容量限制,并以最小化 SAEV 行驶总距离、满足乘客及充电需求的 SAEV 车队规模、配套设施建设成本、乘客总出行时间 4 个指标为优化目标,由此确定最佳的 SAEV 车队动态调度策略以及配套充电停车设施布局方案。

1 模型建立

1.1 问题描述

为便于后续建模分析,本文仅考虑以 SAEV 为交通工具的乘客出行需求。乘客出行的起点、终点及期望出发时间已知,由此按照交通小区和一定时间间隔将其集计为动态 OD 出行需求矩阵。在此基础上,城市智慧交通管理部门通过确定最优的 SAEV 运营商会车队规模、宏观调度 SAEV 车队的时空分布以及合理布局配套的充电停车设施,从而以最小的运营成本为乘客提供优质高效的出行服务。

本文研究 SAEV 车队动态调度与配套设施布局的协同优化问题。该问题基于乘客动态 OD 出行需求,优化 SAEV 运营车队的多项调度任务,包括

车辆接送客、充电、区域调配和停放策略等;同时,还与充电站和停车场的空间布局及数量配置进行联合优化,从而实现协同最优的运营商车队调度方案与基础设施布局方案。

为了描述乘客出行需求的时变特征、SAEV 车队的动态调度策略以及乘客流的时空位移变化,本文将城市路网表示为如图 1 所示的时间扩展网络^[32],网络中的节点表示交通小区,各个节点之间连接的弧表示两小区之间的连接道路。图 1 中的红色虚线表示 2 个相邻交通小区之间的移动 SAEV 车流,包括营业 SAEV 移动车流、充电 SAEV 移动车流,绿色点划线表示交通小区内停车等待的 SAEV 车流,包括营业 SAEV 等待车流、充电 SAEV 等待车流。

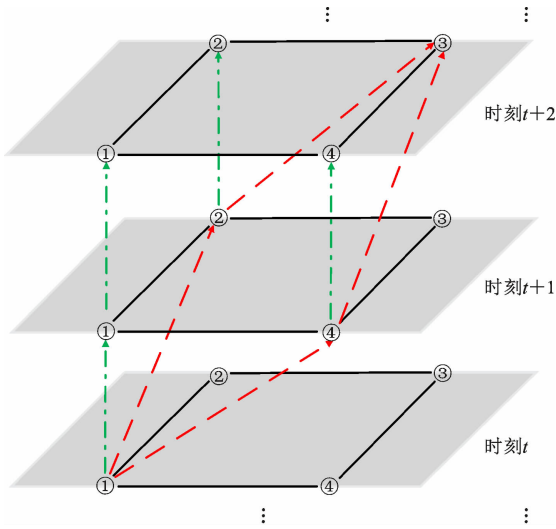


图 1 时间扩展网络

Fig. 1 Time-expanded network

在出行服务过程中,由于 SAEV 续航能力有限,因此部分 SAEV 在完成出行服务后需要去附近充电站充电,即部分营业 SAEV 车流会转变为充电 SAEV 车流;在充电站充满电的 SAEV 立即开始运输服务,即部分充电 SAEV 车流转变为营业 SAEV 车流。SAEV 允许拼车以降低运营成本,但需平衡拼车带来的路径规划复杂性与乘客出行时间成本。为了减少 SAEV 充电空驶里程并降低道路拥堵,各交通小区需要修建配套的 SAEV 充电、停车设施,但需要综合考虑各交通小区的土地租赁成本。

在上述综合因素作用下,本文试图通过优化 SAEV 车队规模、SAEV 车队宏观动态调度策略(即时间扩展网络中 SAEV 车流的时空分布)以及配套的充电停车设施的空间布局方案,实现 SAEV 总行驶距离、车队规模、充电停车设施建设成本及乘客出

行总时间 4 项指标的最小化。

1.2 车队调度与设施布局协同优化模型

1.2.1 基本假设

(1)SAEV 运营周期为离散成 n 个时间间隔为 Δt 的时间步,时间步 $t \in T = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ 。

(2)网络中仅存在营业车流和充电车流 2 类 SAEV 车流,其中 $n_{ij,t}$ 为时刻 t 在弧 ij 上的营业 SAEV 车流, $p_{ij,t}$ 为时刻 t 在弧 ij 上的充电(非营业)SAEV 车流。

(3)网络中每个弧 ij 都有其最大容量,由于弧上存在拥堵效应,超过容量的车流需在节点 i 处的配套停车设施内等待或绕行其他非拥堵线路。

(4)配套停车设施位于节点处,网络中每个节点都有其最大停车容量,超过容量的 SAEV 营业车流无法进入该节点,需行驶至其他非拥堵节点。

(5)配套充电设施位于节点处,每个节点的充电设施都有其最大容量,超过容量的 SAEV 充电车流无法进入该充电站,需行驶至其他有空位的充电站。

(6)SAEV 在充电站的充电时长为已知的常数,且充满电后立即开始运输服务。

1.2.2 SAEV 车流、乘客流守恒关系

时间扩展网络中时刻 t 在节点 i 的 SAEV 车流守恒,包括充电 SAEV 车流守恒、营业 SAEV 车流守恒,如图 2 所示。对于充电车流,时刻 t 节点 i 处的流入车流包括从相邻节点 j 进入 i 点的充电车流 $\sum_j p_{ji,t-t_{ji}}$ 、时刻 t 节点 i 处营业车流中需要充电的车流 $F_{i,t}$,流出车流包括在 i 点充电完成而转变为营业 SAEV 的车流 $w_{i,t-t_m}$ 、时刻 t 从 i 点离开前往 j 点的充电车流 $\sum_j p_{ij,t}$,根据节点流入、流出车流守恒,则可得到相应的充电 SAEV 车流守恒约束。对于营业车流,在节点 i 处流入车流包括从相邻节点 j 进入 i 点的营业车流 $\sum_j n_{ji,t-t_{ji}}$ 、从 i 点充电完成而转变为营业 SAEV 的车流 $w_{i,t-t_m}$,流出车流包括时刻 t 节点 i 处营业车流中需要充电的车流 $F_{i,t}$ 、时刻 t 离开 i 点前往 j 点的营业车流 $\sum_j n_{ij,t}$,根据节点流入、流出车流守恒,则可得到相应的营业 SAEV 车流守恒约束。

同时,时间扩展网络中还需满足时刻 t 在节点 i 的乘客流量守恒,如图 3 所示。针对节点 i ,流入 i 点的乘客流包括从相邻节点 j 进入节点 i 的乘客数 $\sum_j m_{j,i}^{k,t-t_{ji}}$ 、时刻 t 开始从 i 点出发的乘客数 $m_{i,0}^{k,t}$,流

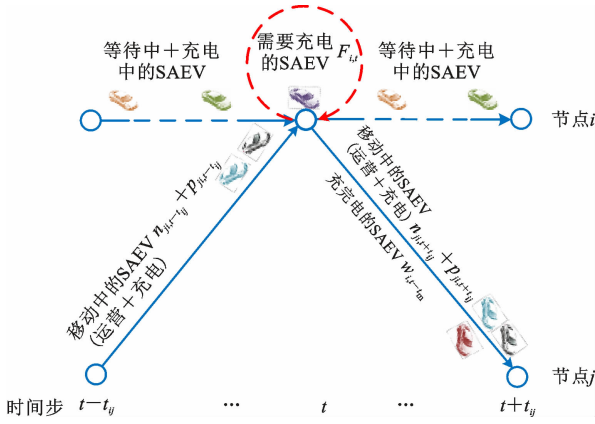


图2 SAEV车流守恒

Fig. 2 SAEV flow conservation

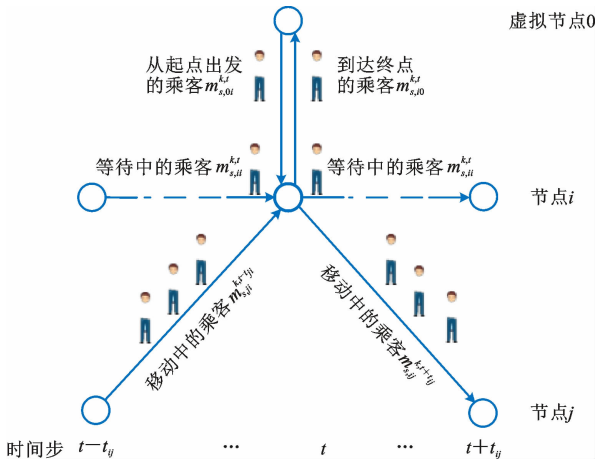


图3 乘客流量守恒

Fig. 3 Passenger flow conservation

出 i 点的乘客流包括时刻 t 到达终点 i 的乘客数 $m_{s,i}^{k,t}$ 、时刻 t 离开 i 点的乘客数 $\sum_j m_{s,i}^{k,t}$ ，由此可得到相应的乘客流守恒约束。其中，虚拟节点 0 用于表征未出发和已到达终点的乘客， $m_{s,i}^{k,t}$ 为出发时间为 k 、目的地为 s 、时刻 t 时在弧 ij 上的乘客总数。

1.2.3 多目标非线性规划模型

基于以上基本假设，本文构建基于 SAEV 运营商用车队调度和设施布局的多目标非线性规划模型，旨在共同考虑 SAEV 运营方、政府部门及乘客等多个利益相关方，分别最小化车队行驶总距离 F_1 、SAEV 运营商用车队规模 F_2 、配套设施总建设成本 F_3 、乘客总出行时间 F_4 ，模型如下

$$\begin{cases} \min F_1 = \sum_{ij, i \neq j, t} d_{ij} p_{ij,t} + \sum_{ij, i \neq j, t} d_{ij} n_{ij,t} \\ \min F_2 = \sum_i n_{0i,0} \\ \min F_3 = \sum_i q_i m_i + \sum_i k_i c_i \\ \min F_4 = t_{ij} m_{s,ij}^{k,t} \end{cases} \quad (1)$$

$$\gamma_{i,\min} \leq q_i \leq \gamma_{i,\max} \quad i \in U \quad (2)$$

$$p_{ij,0} = 0 \quad ij \in A \quad (3)$$

$$w_{i,0} = p_{ii,0} \quad (4)$$

$$\sum_{i,t} p_{ii,t} = t_m \sum_{j,t} F_{j,t} \quad (5)$$

$$\sum_{t=1}^{t_m} w_{i,t-t'+1} = p_{ii,t} \quad (6)$$

$$p_{ii,t} \leq q_i \quad t \in T \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{\sum_{k,r,s} M_{rs,k}}{\sum_i n_{0i,0}} \quad (8)$$

$$F_{i,t} = \beta \sum_s M_{is,t} / \varphi \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sum_j p_{ji,t-t_{ji}} + F_{i,t} = \sum_j p_{ij,t} \\ t \in \{t \in T | t < t_m\} \\ \sum_j p_{ji,t-t_{ji}} - w_{i,t-t_m} + F_{i,t} = \sum_j p_{ij,t} \\ t \in \{t \in T | t \geq t_m\} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sum_j n_{ji,t-t_{ji}} - F_{i,t} = \sum_j n_{ij,t} \\ t \in \{t \in T | t < t_m\} \\ \sum_j n_{ji,t-t_{ji}} + w_{i,t-t_m} - F_{i,t} = \sum_j n_{ij,t} \\ t \in \{t \in T | t \geq t_m\} \end{cases} \quad (11)$$

$$\sum_j m_{s,ji}^{k,t-t_{ji}} - \sum_j m_{s,ij}^{k,t} + m_{s,0i}^{k,t} - m_{s,i0}^{k,t} = 0 \quad i, s, k \in U \quad (12)$$

$$\sum_{s,k} m_{s,ij}^{k,t} \leq \rho n_{ij,t} \quad i \neq j \quad (13)$$

$$n_{ij,t} + p_{ij,t} \leq \mu_{ij,\max} \quad (14)$$

$$n_{ii,t} + p_{ii,t} \leq k_i \quad (15)$$

$$m_{s,0r}^{k,t} = M_{rs,k} \quad rs \in D \quad (16)$$

$$\sum_t m_{s,s0}^{k,t} = \sum_r M_{rs,k} \quad k \in T \quad (17)$$

$$0 \leq k_i \leq k_{i,\max} \quad (18)$$

$$p_{ij,t} \geq 0 \quad (19)$$

$$n_{ij,t} \geq 0 \quad (20)$$

$$m_{s,ij}^{k,t} \geq 0 \quad (21)$$

$$m_{s,s0}^{k,t} \geq 0 \quad k \in T \quad (22)$$

式(1)为目标函数，表示最小化车队行驶总距离 F_1 、SAEV 运营商用车队规模 F_2 、配套设施建设成本 F_3 、乘客总出行时间 F_4 ，其中 d_{ij} 为弧 ij 之间的距离， q_i 为在节点 i 建设的充电桩数目， m_i 为在节点 i 建设充电桩的单位费用， k_i 为节点 i 的停车泊位数， c_i 为在节点 i 建设停车泊位的单位费用， t_{ij} 为通过弧 ij 的自由流时间，相应 t_{ii} 为在节点 i 上的排队等待时间。式(2)为充电桩建设数量约束，其中 U 为

网络中所有点的集合, $\gamma_{i,\min}$ 与 $\gamma_{i,\max}$ 分别为在节点 i 建设充电桩的数量下限与上限。式(3)为模型的边界条件,表示0时刻弧 ij 无充电车辆,其中 A 为网络中所有弧的集合。式(4)为0时刻进入节点 i 充电的车辆数约束,其中 $p_{i,0}$ 为0时刻在节点 i 充电的充电车辆数。式(5)为进入充电站车辆数与需要充电车辆数守恒约束,其中 t_m 为车辆充满电所需的时间, $p_{i,t}$ 为 t 时刻在节点 i 排队等待的充电车辆数。式(6)为 t 时刻进入节点 i 充电的车辆数约束。式(7)为充电站容量约束。式(8)为计算SAEV平均载客人数 φ ,其中 $M_{rs,k}$ 为时刻 k 出发,从起始地 r 到目的地 s 的乘客出行需求。式(9)为 t 时刻节点 i 内新增的充电需求,其中 β 为营业SAEV车流的充电需求比例系数。式(10)为节点 i 的充电车辆数守恒约束。式(11)为节点 i 的营业车辆数守恒约束。式(12)为节点处乘客数守恒约束。式(13)为拼车情景下的营业SAEV车队载客量约束,其中 ρ 为拼车人数。式(14)为弧 ij 的通行能力约束,其中 $\mu_{ij,\max}$ 为弧 ij 可通行SAEV的最大流量。式(15)为节点 i 停车泊位容量约束。式(16)为起始地 r 处出发乘客的需求守恒约束,其中 D 为乘客出行OD点对的集合。式(17)为目的地 s 处到达乘客的需求守恒约束。式(18)描述停车泊位建设数量范围,其中 $k_{i,\max}$ 为在节点 i 可修建的最大停车泊位数。式(19)~(22)为变量的非负约束。为保证模型一定有解,可将决策变量的上界值预设为一个足够大的正数,从而保证模型的可行域非空,而目标函数最小化可保证运营商车队和设施资源的高效利用。

2 模型线性化转换及求解

2.1 对约束及约束的线性近似

约束条件(8)和(9)合并以后可得约束条件(23)和(24),其中式(23)为非线性约束条件,式(24)为两连续变量相乘的非线性项

$$F_{i,t} = \frac{\beta e_{i,t}}{\sum_{k,r,s} M_{rs,k}} \quad (23)$$

$$e_{i,t} = \sum_k m_{i,i0}^{k,t} \sum_i n_{0i,0} \quad (24)$$

本文采用基于连续变量离散取值的线性化方法^[33],将上述非线性项中的 $\sum_i n_{0i,0}$ 离散为0-1变量与常量的乘积,其中 $e_{i,t}$ 为非线性项。由于 $\sum_i n_{0i,0}$ 为SAEV系统中的总车辆数,则 $\sum_i n_{0i,0}$ 的下界为常数

0;并且 $\sum_i n_{0i,0}$ 的取值小于乘客总数 $\sum_{k,r,s} M_{rs,k}$,因此取 $\sum_i n_{0i,0}$ 的上界为常数 $\sum_{k,r,s} M_{rs,k}$ 。以 m 为间隔,在值域上取 $h = \lceil \sum_{k,r,s} M_{rs,k} / m \rceil$ 个分段点,式中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。设 a 为 $1 \sim h$ 之间的整数,第 a 个分段点的取值为 $x_{a,\text{con}}$,起始点为 $x_{0,\text{con}}$ 。即当 $x_{a-1,\text{con}} < \sum_i n_{0i,0} \leq x_{a,\text{con}}$ 时,有

$$\sum_i n_{0i,0} = \frac{x_{a,\text{con}} + x_{a-1,\text{con}}}{2} \quad (25)$$

进而 $\sum_i n_{0i,0}$ 的取值可表达如下

$$\sum_i n_{0i,0} = \sum_a b_a \frac{x_{a,\text{con}} + x_{a-1,\text{con}}}{2} \quad (26)$$

$$\sum_a b_a = 1 \quad (27)$$

$$\begin{cases} b_a = 1 \\ x_{a-1,\text{con}} < \sum_i n_{0i,0} \leq x_{a,\text{con}} \end{cases} \quad (28)$$

式中: b_a 为表示 $\sum_i n_{0i,0}$ 是否在第 a 段的0-1变量,若在则为1,不在则为0。

此时式(24)转换为式(29)

$$e_{i,t} = \sum_k m_{i,i0}^{k,t} \sum_a b_a \frac{x_{a,\text{con}} + x_{a-1,\text{con}}}{2} \quad (29)$$

式(29)可视为 h 个独立项的累加,将式(29)展开后每一项可以写为

$$e_{i,t,a} = \sum_k m_{i,i0}^{k,t} b_a \frac{x_{a,\text{con}} + x_{a-1,\text{con}}}{2} \quad (30)$$

式中: $e_{i,t,a}$ 为组成 $e_{i,t}$ 的每一个独立项。

则式(24)可转换如下

$$e_{i,t} = \sum_a e_{i,t,a} \quad (31)$$

线性近似方法如图4所示,模型精度与分段点个数 h 成正比,且线性近似的误差不超过 $(x_{a,\text{con}} - x_{a-1,\text{con}})/2$,可以综合考虑求解效率和精度要求合理选取 h 的值。

2.2 对式(30)的线性等价

此时已将2个连续变量相乘转换为连续变量与多个0-1变量相乘的和,对于辅助变量 $e_{i,t,a}$ 加入以下约束可得线性化结果,其中 M 为一个极大的正数

$$e_{i,t,a} \leq \sum_k m_{i,i0}^{k,t} \frac{x_{a,\text{con}} + x_{a-1,\text{con}}}{2} \quad (32)$$

$$e_{i,t,a} \leq M b_a \quad (33)$$

$$e_{i,t,a} \geq \sum_k m_{i,i0}^{k,t} \frac{x_{a,\text{con}} + x_{a-1,\text{con}}}{2} + M(b_a - 1) \quad (34)$$

$$e_{i,t,a} \geq 0 \quad (35)$$

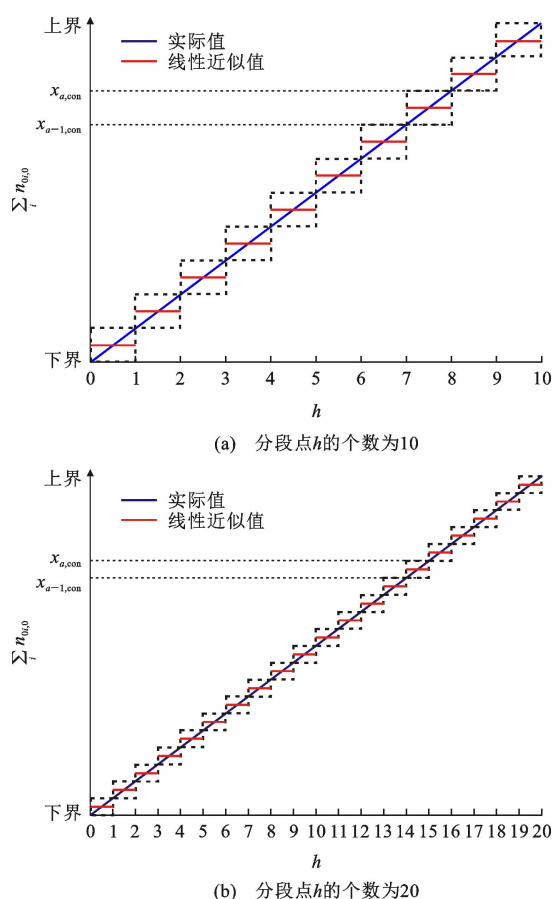


图4 线性近似方法

Fig. 4 Linear approximation method

则约束(23)修改为

$$F_{i,t} = \frac{\beta}{\sum_{k,r,s} M_{rs,k}} \sum_a e_{i,t,a} \quad (36)$$

通过上述线性转换技术,可将复杂的非线性规划模型在保证精度的同时转化为更易求解的线性规划模型。

2.3 模型求解

为求出所构建多目标优化模型的帕累托解集,本文采用 Epsilon 约束法进行求解。在本文中,将 SAEV 总行驶距离 F_1 作为主目标进行最小化, F_2 、 F_3 、 F_4 转化为带上界 Epsilon 值的不等式约束,得到每个子问题如式(37)~(39)所示。每组 Epsilon 值对应一个在四维目标空间中的候选解,通过在 Epsilon 值组合的网格上系统遍历,构造并用 Gurobi 求解多个单目标优化问题。最后,通过帕累托支配关系筛选非支配解,获得帕累托解集如下

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{ij, i \neq j, t} d_{ij} p_{ij,t} + \sum_{ij, i \neq j, t} d_{ij} n_{ij,t} \\ & \sum_i n_{0i,0} \leq \epsilon_{2c} \quad c \in \{1, 2, \dots, z\} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\sum_i q_i m_i + \sum_i c_i k_i \leq \epsilon_{3c} \quad (38)$$

$$\sum_{ij, s, t, k} t_{ij} m_{s,ij}^{k,t} \leq \epsilon_{4c} \quad (39)$$

式中: z 为网格化分数。

求出第 i 个目标函数的最优值 $F_i(x_i^*)$, 得到其最优解 x_i^* , 同时得到其他函数的目标值 $F_j(x_i^*)$, $j \in \{1, 2, 3, 4, j \neq i\}$; 对所有目标函数进行遍历, 令第 i 个目标函数的最优解为 $F_i(x_i^*)$, 最劣解为 $F_i(x_w^*)$, 则得到 $\epsilon_i (i=2, 3, 4)$ 的计算方法如下

$$\epsilon_{ic} = F_i(x_w^*) - c \frac{F_i(x_w^*) - F_i(x_i^*)}{z} \quad (40)$$

3 算例分析

3.1 算例说明与基本参数设定

本文选取四川省成都市为研究区域, 以成都市网约车数据集为基础数据集。按照 Henao 等^[34]的研究方法对乘客量进行估计后作为乘客出行数据。利用 K-means 聚类算法划分出交通小区, 再通过汇总得到 OD 出行矩阵, 该时段出行乘客数量为 7 005 人, 聚类数为 30, 得到聚类结果如图 5 所示, 交通网络拓扑结构如图 6 所示。

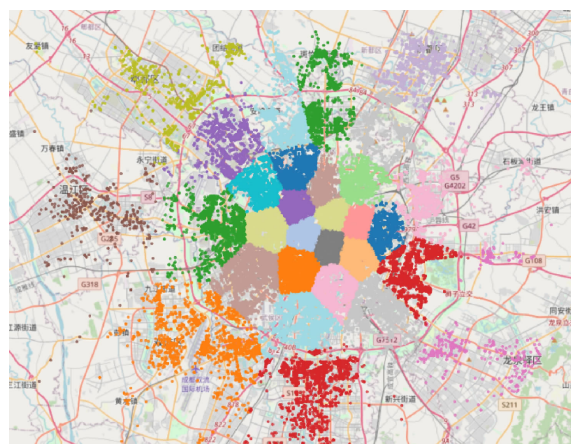


图5 成都市乘客 OD 聚类结果

Fig. 5 Cluster results of passenger OD in Chengdu

在本算例中设置自由流时间为 1 个时间步长, 最大允许行程时间步为 6 个时间步长, SAEV 的充电时间 t_m 设置为 2 个时间步长。假设每个区域土地价值与聚类结果中每类的样本数成正比, 可得成都市各聚类区域土地价值如表 1 所示, 建设停车泊位的单位费用 c_i 的取值为单位土地价值所对应的值, m_i 的取值为单位土地价值的 5 倍, d_{ij} 取两区域质心之间的欧氏距离(单位: km), 其余模型参数见表 2。

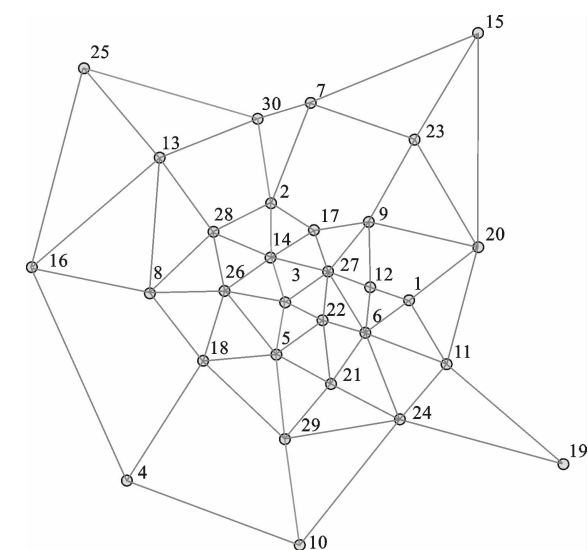


图 6 成都市路网拓扑结构

Fig. 6 Topological structure of road network in Chengdu

表 1 各聚类区域土地价值假设值

Table 1 Assumed land values in cluster areas 千元

区域	价值	区域	价值	区域	价值
1	12.342	11	11.806	21	14.663
2	15.453	12	18.546	22	19.389
3	18.642	13	6.530	23	6.947
4	7.094	14	18.505	24	9.417
5	15.614	15	6.516	25	6.513
6	18.561	16	5.284	26	13.496
7	11.285	17	16.947	27	18.591
8	9.712	18	12.015	28	11.924
9	17.399	19	5.722	29	11.338
10	6.646	20	7.190	30	8.036

表 2 其他参数

Table 2 Additional parameters

参数	$\mu_{ij,max}/\text{veh}$	$\gamma_{i,min}/\text{座}$	$\gamma_{i,max}/\text{座}$	$k_{i,max}/\text{veh}$	m	$\beta/\%$
取值	80	1	10	80	10	30

3.2 算例结果与分析

进行计算的计算机设备配置:CPU 为 Intel Core i9-12900H,1.75 GHz,内存 16 GB。按照上述要求设定参数后进行算例试验。

选取网格化分数 z 为 5,对不同拼车人数($\rho=1\sim 4$ 人)情况下的多目标优化模型进行求解,将所有求解结果中的非帕累托最优解去除,对帕累托最优解进行可视化,具体结果如图 7 所示。

为明确各个目标之间的相关性,根据数据分布的特性,对当前不同拼车人数情况下的帕累托最优解进行斯皮尔曼相关系数计算,将拼车人数也纳入

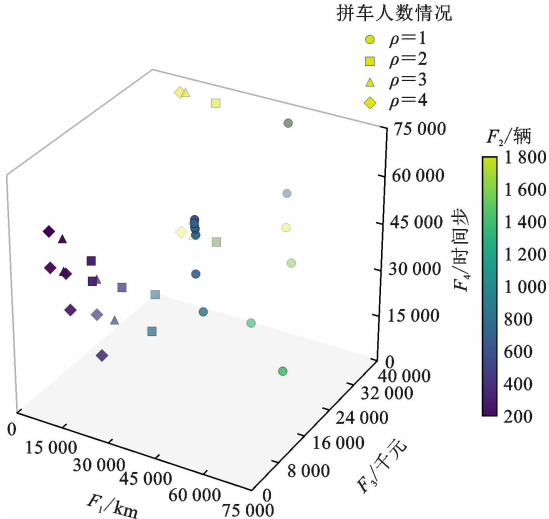


图 7 多目标模型求解结果

Fig. 7 Multi-objective model solving results

到相关性分析中,得到斯皮尔曼相关系数热力图如图 8 所示。

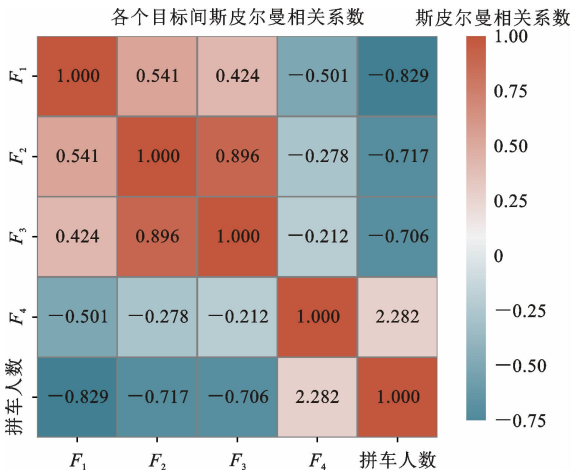


图 8 斯皮尔曼相关系数热力图

Fig. 8 Spearman correlation coefficient heatmap

从热力图结果中可知,拼车人数与 SAEV 行驶总距离相关系数为 -0.829 ,呈强负相关性,表明拼车人数越多,车队行驶总距离就越低,因此对于 SAEV 运营商来讲可以大力发展拼车策略以节省车辆运营成本。SAEV 车队规模与配套设施总建设成本相关系数为 0.896 ,呈强正相关性,表明车队规模越大,配套设施总建设成本则越高,因此在构建 SAEV 系统时需要均衡运营商与公共资源建设方之间的关系。其余各因素之间均互相影响且有一定的相关性,则在后续优化中可适当考虑各目标,有利于多目标调和策略的设计。

3.2.1 不同拼车人数试验结果

针对所求得的不同拼车人数情景下的帕累托最优解,分别选取均衡折中解进行对比,得到不同拼车

人数试验结果如表 3 所示。

表 3 不同拼车人数试验结果

Table 3 Test results of different ridesharing numbers

ρ /人	F_1 /km	F_2 /veh	F_3 /千元	F_4 /时间步
1	54 545.14	1 355	19 199.02	26 960.00
2	23 722.51	475	9 906.69	38 152.77
3	16 337.45	205	614.37	49 804.22
4	12 072.17	155	614.37	60 782.70

由表 3 结果可知,拼车人数增加可以有效降低车队行驶总距离、车队规模以及配套设施建设成本,但也会导致乘客出行总时间增加。当拼车人数为 3 人时,可以得到配套设施建设成本已达到最优。当拼车人数由 1 人增加至 4 人的过程中,乘客出行总时间有所上升,主要原因在于随着拼车人数的增加,SAEV 需要前往不同地点接送乘客,导致绕行时间和路程增加,进而增加了乘客的出行总时间。

3.2.2 不同拼车乘客数量下的 SAEV 车流分布

本文对比了不同拼车乘客数量下的 SAEV 车流空间分布结果以便于分析路网拥堵情况,如图 9 所示。结果表明,拼车策略可以大幅减少车队数及车队行驶总距离,因此对于较为拥堵的交通场景,拼车策略是一个有效解决交通拥堵问题的方案。但需要注意的是:拼车虽然会减小车队规模,但车队规模的减小会导致更多的乘客等待车辆,从而导致乘客出行总时间上升;并且由于拼车需要车辆前往不同目的地接送乘客,中途可能因接送其他乘客而产生绕行,也会导致乘客出行总时间上升。

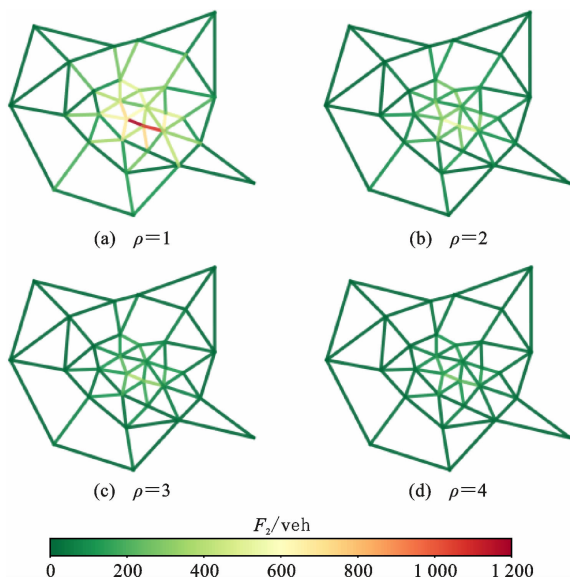


图 9 SAEV 车流分布

Fig. 9 SAEV traffic flow distribution

3.2.3 不同充电需求的灵敏度分析

为分析 SAEV 不同续航能力对车队行驶总距离、运营商车队规模、配套设施建设成本以及乘客出行时间的影响,本文对 SAEV 充电需求比例系数 β 进行灵敏度分析。 β 反映了车辆的续航能力, β 取值越小表明车辆续航能力越强,反之则越弱。本文以 $\rho=1$ 的情景为基础,在 Epsilon 约束框架下分析 SAEV 充电需求比例参数 β 变化对各个优化目标的影响,结果见表 4 和图 10。

表 4 不同充电需求比例下的各目标函数值

Table 4 Values of each objective functions under different charging demand proportions

$\beta/\%$	F_1 /km	F_2 /veh	F_3 /千元	F_4 /时间步
30	54 545.14	1 355	19 199.02	26 960
25	52 859.86	1 335	19 199.02	26 960
20	51 625.56	1 325	19 199.02	26 960
15	50 486.65	1 325	19 199.02	26 960
10	49 469.58	1 315	19 199.02	26 960
5	48 669.76	1 305	19 199.02	26 960

结果表明:随着充电需求比例系数从 30% 降至 5%,车队行驶总距离降低 10.77%,运营商车队规模降低 3.69%,而配套设施建设成本与乘客出行总时间维持不变。因此,车队的平均续航越长可保证更多的 SAEV 完成运营任务,从而可以降低车队规模,且充电车流的减少也可以降低车队行驶总距离,提高交通系统运行效率。

4 结 语

(1) 本文针对 SAEV 运营商车队动态调度与配套充电停车设施布局协同优化问题,采用时间扩展交通网络描述了乘客出行需求和 SAEV 车队调度的动态特性,在此基础上共同考虑 SAEV 运营方、政府部门及乘客等多个利益相关方,构建了车队行驶总距离、SAEV 车队规模、配套设施总建设成本以及乘客总出行时间最小化的多目标非线性规划模型。

(2) 为提高模型求解效率,本文通过基于连续变量乘积离散取值策略的线性近似方法及二元变量与连续变量相乘的线性等价方法,进一步将本模型重构为混合整数线性优化模型,并采用了 Epsilon 约束法对重构模型进行求解。

(3) 采用成都市路网出行数据,对本文模型和算法进行了验证。算例结果表明:拼车乘客数量与 SAEV 行驶总距离呈强负相关性,SAEV 车队规模与配套设施总建设成本呈强正相关性。拼车乘客数

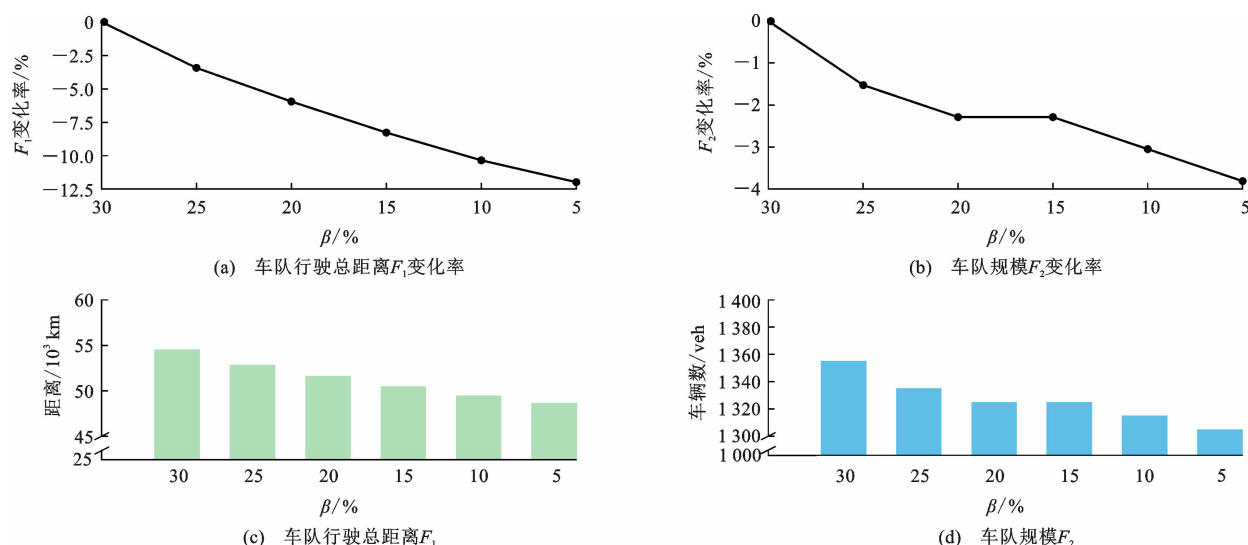


图10 充电需求比例系数灵敏度分析结果

Fig. 10 Sensitivity analysis results of charging demand proportion coefficient

量增加可有效降低SAEV运营调度及设施建设相关成本,但多人拼车也会增加SAEV接送乘客的绕行时间。SAEV车辆的续航能力越强,车队充电需求比例越低,则SAEV车队运输效率越高,车队行驶总距离与车队规模均降低。

(4)本文仅考虑了单一SAEV方式的交通场景下SAEV运营商车队调度与配套设施协同优化问题,在未来的研究中还可以拓展考虑公交、私人小汽车、地铁等多方式出行场景,此时可引入离散选择模型进一步考虑出行者的SAEV出行方式选择行为;此外,本文模型还可拓展考虑SAEV随机充电需求或充电需求动态性情景,从而进一步研究相应的鲁棒协同优化问题。

参考文献:

References:

- [1] MACHADO C A S, DE SALLES HUE N P M, BERSANETI F T, et al. An overview of shared mobility[J]. Sustainability, 2018, 10(12): 4342.
- [2] 李同飞,赵梦晴,熊杰,等.面向网联自动驾驶混行场景的车道通行能力与路阻函数研究[J].交通运输工程学报,2025,25(6):146-156.
LI Tong-fei, ZHAO Meng-qing, XIONG Jie, et al. Lane capacity and cost function for the mixed traffic scenario with connected and autonomous vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(6): 146-156.
- [3] COKYASAR T, LARSON J. Optimal assignment for the single-household shared autonomous vehicle problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 141: 98-115.
- [4] MILITÃO A M, TIRACHINI A. Optimal fleet size for a shared demand-responsive transport system with human-

driven vs automated vehicles: A total cost minimization approach[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2021, 151: 52-80.

- [5] SINGH S, SAINI B S. Autonomous cars: Recent developments, challenges, and possible solutions[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1022(1): 012028.
- [6] 霍月英,张越,李晓娟,等.接驳地铁的共享自动驾驶汽车动态合乘匹配研究[J].中国公路学报,2024,37(6):288-301.
HUO Yue-ying, ZHANG Yue, LI Xiao-juan, et al. Dynamic ridesharing matching of shared autonomous vehicles as connection to metro[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(6): 288-301.
- [7] YAO Z H, JIANG H R, CHENG Y, et al. Integrated schedule and trajectory optimization for connected automated vehicles in a conflict zone[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(3): 1841-1851.
- [8] LI H, WANG Z W, CHEN S W, et al. Integrated optimization of planning and operation of a shared automated electric vehicle system considering the trip selection and opportunity cost[J]. Electronic Research Archive, 2024, 32(1): 41-71.
- [9] NARAYANAN S, CHANIOTAKIS E, ANTONIOU C. Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 111: 255-293.
- [10] VOSOOGHI R, PUCHINGER J, BISCHOFF J, et al. Shared autonomous electric vehicle service performance: Assessing the impact of charging infrastructure[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 81: 102283.
- [11] ZHANG S Y, YU J J Q. Online joint ride-sharing and dynamic vehicle-to-grid coordination for connected electric vehicle system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 1194-1206.
- [12] YANG S, WU J J, SUN H J, et al. Trip planning for a mobility-as-a-service system: Integrating metros and shared

- autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 176: 103217.
- [13] LIU Z Y, LI R M, DAI J C. Effects and feasibility of shared mobility with shared autonomous vehicles: An investigation based on data-driven modeling approach[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2022, 156: 206-226.
- [14] MARUYAMA R, SEO T. Dynamic user optimal model for shared autonomous vehicles system: Development and systematic comparison with social optimal model[C]//IEEE. 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2022: 749-754.
- [15] ZHAO L H, MALIKOPOULOS A A. Enhanced mobility with connectivity and automation: A review of shared autonomous vehicle systems [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2022, 14(1): 87-102.
- [16] LEVIN M W. Congestion-aware system optimal route choice for shared autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 82: 229-247.
- [17] DEAN M D, GURUMURTHY K M, DE SOUZA F, et al. Synergies between repositioning and charging strategies for shared autonomous electric vehicle fleets[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 108: 103314.
- [18] FENG C, MEI Z Y. Optimization of shared autonomous vehicles routing problem: From the view of parking [J]. *Sustainability*, 2023, 15(16): 12303.
- [19] 胡 路,徐尉耀,李 皓.考虑混合车位的自动驾驶电动共享汽车系统配置与运营联合优化[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(4): 37-47.
- HU Lu, XU Wei-yao, LI Hao. Joint optimization of mixed parking spaces and dynamic pricing for a shared autonomous electric vehicle system[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(4): 37-47.
- [20] PAPARELLA F, HOFMAN T, SALAZAR M. Electric autonomous mobility-on-demand: Jointly optimal vehicle design and fleet operation [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(11): 17054-17065.
- [21] FAGNANT D J, KOCKELMAN K M. Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas[J]. *Transportation*, 2018, 45(1): 143-158.
- [22] IACOBUCCI R, MCLELLAN B, TEZUKA T. Optimization of shared autonomous electric vehicles operations with charge scheduling and vehicle-to-grid[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 100: 34-52.
- [23] VAN DEN BERGH O, WEEKX S, DE CAUWER C, et al. Locating charging infrastructure for shared autonomous electric vehicles and for vehicle-to-grid strategy: A systematic review and research agenda from an energy and mobility perspective[J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2023, 14(3): 56.
- [24] 马骏驰,张 源,段宗涛,等.考虑充电需求的电动汽车行为策略研究综述[J]. *交通运输工程学报*, 2024, 24(6): 66-79.
- MA Jun-chi, ZHANG Yuan, DUAN Zong-tao, et al. Research review on behavior strategies of electric vehicles considering charging demands [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(6): 66-79.
- [25] CHEN T D, KOCKELMAN K M, HANNA J P. Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016, 94: 243-254.
- [26] 杨佳逸,梅振宇,唐 巍,等.基于前馈控制的高密度停车场自主泊车动态分配模型[J]. *交通运输工程学报*, 2025, 25(6): 219-228.
- YANG Jia-yi, MEI Zhen-yu, TANG Wei, et al. A proactive control-based dynamic allocation model for high-density autonomous parking lots [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(6): 219-228.
- [27] TIAN J J, JIA H F, WANG G F, et al. Integrated optimization of charging infrastructure, fleet size and vehicle operation in shared autonomous electric vehicle system considering vehicle-to-grid[J]. *Renewable Energy*, 2024, 229: 120760.
- [28] LOKHANDWALA M, CAI H. Siting charging stations for electric vehicle adoption in shared autonomous fleets[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 80: 102231.
- [29] YU X L, CHEN J X, KUMAR P, et al. An integrated optimisation framework for locating depots in shared autonomous vehicle systems [J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2024, 20(2): 2152299.
- [30] SEO T, ASAKURA Y. Multi-objective linear optimization problem for strategic planning of shared autonomous vehicle operation and infrastructure design[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(4): 3816-3828.
- [31] SANTOS G G D, BIROLINI S, DE ALMEIDA CORREIA G H. A space-time-energy flow-based integer programming model to design and operate a regional shared automated electric vehicle (SAEV) system and corresponding charging network [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 147: 103997.
- [32] YANG H, MENG Q. Departure time, route choice and congestion toll in a queuing network with elastic demand[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1998, 32(4): 247-260.
- [33] 周苏洋,关奥博,顾 伟,等.工业综合能源系统的多工序统一建模与规划[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(3): 31-41.
- ZHOU Su-yang, GUAN Ao-bo, GU Wei, et al. Unified Modeling and Planning of Industrial Integrated Energy System with Multiple Processes[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(3): 31-41.
- [34] HENAO A, MARSHALL W E. The impact of ride-hailing on vehicle miles traveled[J]. *Transportation*, 2019, 46(6): 2173-2194.