

考虑共享自动驾驶汽车特性的停车场 布局及改建选址研究*

孙江涛¹, 刘佳², 张瑾³, 霍月英¹

(1. 内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 呼和浩特 010011;
3. 国汽(北京)智能网联汽车研究院有限公司, 北京 100176)

摘要:共享自动驾驶汽车(Shared autonomous vehicles, SAV)在停车排列以及车辆存取方面相较于传统车辆具有优势,为满足未来SAV商业化的停驻需求,设计适用于SAV特性的停车场布局形式,并提出基于现有停车场的SAV专用停车场改建方法。基于出租车出行数据,对未来SAV的乘车需求分布进行分析预测,并结合实际运营需求,探讨SAV停车场的内部布局,构建以最小化改建成本、距离成本及弃用已选停车场的沉没成本为目标的多目标选址模型,用于优化停车场布局与选址决策。最后通过小区域算例敏感性分析验证选址模型的稳定性与可行性,并将该选址模型用于纽约市整个曼哈顿地区,实现从区级预测到全域选址的一体化,为未来城市中SAV专用停车基础设施的规划提供理论支持与参考。

关键词:共享自动驾驶汽车; 停车场选址; 停车场布局; 多目标规划模型

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

近年来,在政策与技术推动下,共享式自动驾驶汽车(Shared autonomous vehicles, SAV)应用进程加快,已成为未来城市出行的重要工具。SAV由运营方集中管理、按需调度并按次收费提供接驳服务,其过程与传统出租车“即叫即到-接送-离场”高度同构,因此也被称为“自动驾驶出租车”。相较私家车与既有共享出行,SAV调度能力更强、闲置率更低。依托自动泊车,过道与车位面积需求可适度缩减,并在合理组织下提升土地利用与周转效率。更重要的是,停车设施将与集中调配、停取、接送与补能流程耦合,直接影响运营效率与成本,传统分散停泊逻辑难以支撑规模化运营,这也使得停车设施规划成为SAV商业化落地的关键前提。但SAV由验证迈向试点时,设施供给与运营组织尚未形成闭环。现有停车场多按人工驾驶与分散停泊模式建设,难以匹配SAV低占地、高周转特性,同时高密度城区受土地稀缺、建设周期长与审批复杂等因素制约,“新建专用停车场”在阶段性推广过程中面临时空与资金约束,新增车位供给难以及时到位。若能在不新增用地的前提下通过最小必要改造获得与SAV特性相匹配的容量与运行需求,则有望在保障接驳效率的同时降低前期投入与试错成本,便于试点与复制推广。

目前,欧美虽开展泊车行为、补能布置与调度优化探索,但面向SAV停车场选址的系统研究仍存在不足,国内研究已覆盖多目标与地理信息系统(GIS)支撑的选址路径,但针对SAV的选址与改建一体化方法仍显薄弱。因此,微观层面“内部布局-组织”与宏观层面“选址-改建”的构成为SAV商业化运营提供可落地支撑。

* 收稿日期:2025-10-14; 修回日期:2025-12-23

基金项目:内蒙古自然科学基金面上项目(2025MS05045)

作者简介:孙江涛(2000—),男,河南新乡人,2023级硕士研究生。E-mail:Sunjt2000512@163.com

通信作者:霍月英(1985—),女,内蒙古乌兰察布人,教授,博士。主要从事交通运输规划与管理研究。E-mail:hyy@imu.edu.cn

早期学者主要聚焦于传统停车设施的空间配置问题。Church等^[1]与Current等^[2]提出的P-media和最大覆盖等模型强调在服务范围与出行效率之间取得平衡,为停车场选址提供了基础框架。近年来,关于停车场以及停车设施研究逐步从“增量建场”转向“在既有停车资源基础上的功能重构”。一方面,传统公共停车的空间布局与方法框架(如GIS叠加和AHP评价等^[3-6])已较为成熟,可为现存停车设施改建的候选区识别提供方法支撑,这类方法强调将交通需求热度与可达性、用地约束等叠合,形成可操作的技术路径。另一方面,黄亚楠^[7]和Nourinejad等^[8]提出以高密度、快速周转为目标开展研究,论证了紧凑式停车场的模块化与自动存取可显著提高单位面积停车供给能力,为“以改建代新建”提供基础。在空间与规划层面,陈华群等^[9]和颜文碧^[10]指出,SAV等新型共享出行方式的发展可能使中心城区的即时停驻需求趋于收缩,而停车负载呈现“向外圈转移并在枢纽周边形成集聚”的空间特征,需从“设施规划-收费政策-全市统筹”3个层面联动应对,这也表明未来对于SAV发展,停车场改建目标应服务于“集中停驻+快速调配”的运行模式。在运营方面的研究中,赵鑫玮^[11]构建了“AV停车行为-设施供需-空间效应”的完整仿真链,通过仿真研究发现自动驾驶情景会引发停车场小时周转率上升、中心区饱和度下降等问题,为将部分中心区现有停车场重塑为SAV周转枢纽提供了依据。而在“网络-价格-位置”层面,蹇娅婷等^[12]在AV背景下联立停车换乘点位与共享车位定价,并给出利润与社会成本下的最优位置与价格关系,研究表明场址选择与收费策略需协同设计,否则难以稳定供需均衡。因此,本文在仅讨论场址优化的前提下,借鉴其“位置影响系统均衡”的观点用于评估选址。韩艳等^[13]通过集成选择与潜在变量模型研究发现,目的地价格、用户等待厌恶与感知风险会显著影响用户在目的地和近远端之间的停车位置选择,该研究提示改建选址需结合接驳时长等特征。李井波等^[14]、Bauer等^[15]和仲兰芬等^[16]不再将停车设施视为静态资源,而是与动态出行系统相耦合,关注点从需求预测与时空匹配到停车收费与出行成本,在乘车需求预测方面与出行成本方面也为SAV停车场改建选址提供了思路。

综上所述,SAV停车设施应从“分散自管”转向“集中周转与接驳保障”。然而,现有文献仍存在两类空缺:其一,多数研究停留在新增设施或政策仿真,缺少以“现有停车场”为对象的分析框架;其二,现有研究多以设定渗透率与情景来替代实际需求格局,并未以实测出行热点或预测出行热点直接驱动具体场址选择。基于此,本文建立适应SAV特性的停车场场地布局以及选址改建框架,提出针对SAV运营特性的内部布局改进方案,并进一步利用出租车出行数据预测未来乘车需求及其分布,构建以最小化改建成本、接送乘客路径距离和弃选初始停车场成本为目标的多目标选址模型,为未来SAV停车基础设施规划提供理论支持与实践参考。

1 考虑SAV停车特性的停车场布局设计

1.1 停车场布局分析

传统停车场中人工驾驶车辆在进出车位时需要较大的操作空间和通道宽度,以保证转向和安全距离,见图1(a)。受制于通道宽度与操作空间,该布局的车辆容纳能力有限,难以充分发挥场地的潜在泊车规模,同时车辆在进出场过程中的操作路径较长,增加了时间消耗与潜在干扰。在高峰时段,频繁的车辆进出易造成流线干扰,增加场内交通组织的复杂性,并导致整体运行效率下降。

相比之下,SAV依托自动泊车与车队调度功能,可在更紧凑的通道条件下实现精确泊入与驶出。本文提出的SAV纵深堆叠式布局能够显著缩减车道宽度和车位间距,在相同场地条件下提升了泊车密度和容纳能力,见图1(b)。同时,由于SAV停取动作可以统一控制,车辆可按照系统优化路径依次进出,避免了传统场地中随机性操作带来的等待冲突。该设计不仅提升了场地空间利用率,还能加快场内周转速度,更好地支持高频次的出行需求。若结合商业区和交通枢纽等客流密集区域进行部署,可有效提升SAV停车场的服务能力和整体运营效益。

1.2 商业化SAV停车场布局改进

在能源补给方面,传统停车场通常将加油或充电设施布置在独立区域,与停车行为相互分离,车

辆需要额外往返或排队,增加了时间成本。SAV停车场设计将充电桩直接嵌入泊位之间,采用“两车共用一桩”的方式,以提升场地利用率和设备利用率,见图1(b)。车辆在完成充电后能够由调度系统自动移出,为其他车辆让位,实现泊车与补能的一体化衔接,从而缩短补能等待时间并降低场地配置成本。

在车辆存取方面,SAV停车场的堆叠式设计配合集中调度机制,能够高效解决传统停车场布局中前后车相互阻挡的问题(图2)。当需要取出目标车辆时,调度系统可将其前后车辆有序移至过道进行短暂存放,待目标车辆驶离后,再将其他车辆迅速复位。整个过程由系统集中控制,无需人工操作与协调,可实现高效存取,避免了传统停车场中因个体驾驶导致的拥堵与运行低效问题,提升了场内中转效率。

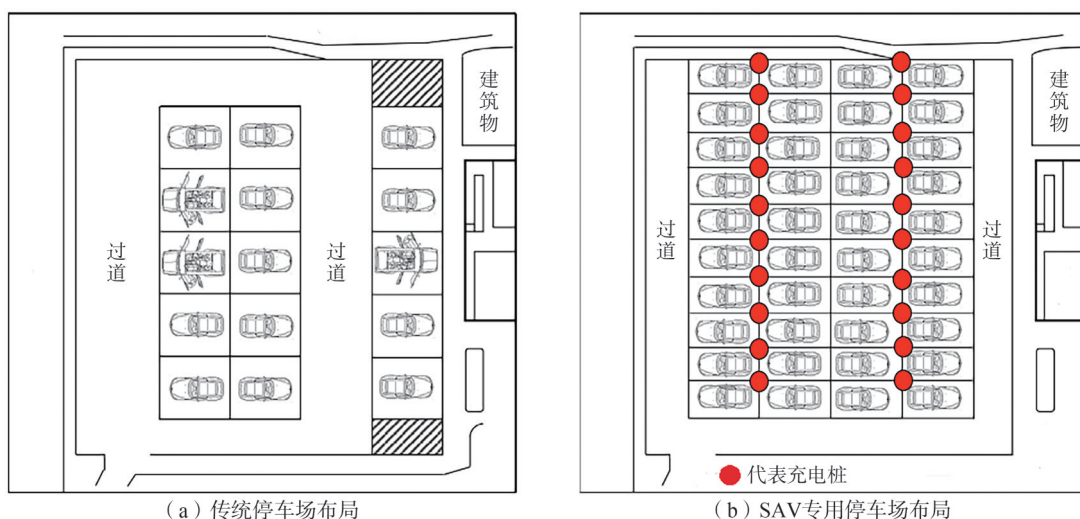


图1 传统停车场布局与SAV专用停车场布局

Fig. 1 Conventional parking lot layouts and SAV dedicated parking lot layouts

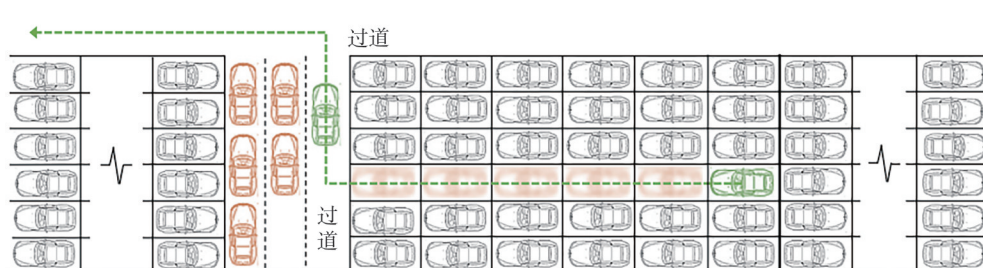


图2 SAV停车场车辆存取示意图

Fig. 2 Illustration of vehicle storage and retrieval in SAV parking lot

综上,SAV专用停车场通过紧凑的泊位布局、集成化的能源补给和智能化的车辆存取方式,有效改善了传统停车场在空间占用、补能组织和运行效率上的不足,为未来大规模SAV商业化运营提供了切实可行的基础设施方案。

在成本方面,考虑了充电器硬件、材料人工费用、转换器及启动费用等因素,在合理区间内设定参数(表1),计算得出单个停车位的充电系统约为2.5万元^[17]。通过对SAV专用停车场的布局进行优化设计,提升场地利用率与能源补给效率,为商业化运营提供支撑。

2 SAV停车场改建选址模型

2.1 问题描述

目前传统停车场的建设数量较多,而SAV正处于发展阶段,世界范围内已有许多城市开展试点

运营。但现有研究中,针对 SAV 特性开展停车选址方面的成果较少,适配 SAV 低空间占用率和高频调度等特性的专用停车场也较为匮乏,本文对目前已有的传统停车场进行选址并改建,使其作为 SAV 专用停车场,既能够减小建设成本又符合 SAV 特性以及未来商业化发展需求。

表 1 停车场改建成本价格
Table 1 Retrofitting cost for parking lot

成本项目	价格区间/千元	本文取值/千元
充电器硬件	7.68~22.40	30.0
材料人工费用	4.48~12.16	8.5
转换器	6.40~16.00	11.0
启动费用	0.38~0.77	0.5

将传统停车场转化为可执行的决策方案至少存在 3 类瓶颈:其一,需求侧不确定性。SAV 投放节奏与采用率存在情景差异,如何在区域尺度上将历年出行数据转化为未来 SAV 运营需求指标是决策的前提;其二,供给侧适配性。改建后的停车场需在有限空间内实现自动泊车、纵深堆叠、充电嵌入与调度集散等功能,场地容量约束将直接影响停车场的可服务能力;其三,决策侧权衡。在改建成本、车辆接送乘客路径距离和因方案调整导致的弃用已选场址沉没成本之间,如何构建多目标框架,以输出稳健的候选组合与最小必要改造规模,仍缺乏面向 SAV 场景的系统化方法。

基于此,以城市高密度区域为研究背景,重点探讨在有限土地资源下如何通过改建现有停车场实现选址与布局优化,以提升空间利用率、降低运营成本并提高服务效率。以未来出行需求预测为基础,利用深度学习模型获取各区域 SAV 的乘车需求特征,在多个候选地块中选择合适的停车站点,并提出以最小化改建成本、接送乘客路径距离及弃用已选停车场的沉没成本为目标的多目标选址模型,确保站点的选取在满足未来出行需求的前提下同时兼顾经济性与长期性。

参数及决策变量定义如表 2 所示。

表 2 参数及决策变量定义
Table 2 Definitions for parameters and decision variables

符号	含义	单位
C_j	改造停车场 j 的成本费用	万元
$d_{(i,j)}$	停车场 j 与需求点 i 之间的距离	km
Q_j	停车场 j 的容量	辆
r_i	需求点 i 的乘客数	人次
v_j	从停车场 j 出发的车辆数	辆
D	需求点集合	—
w	停车场选址集合	—
W	选址变动时初始选用的停车场集合	—
x_{ij}	从停车场 j 出发的车辆接送需求点 i 的乘客	—
y_j	0—1 变量,表示是否对停车场 j 进行改建	—

2.2 数学模型

结合实际可能发生的不同情况,在建模过程中做出以下合理假设:①商业化 SAV 停车场选址后仅考虑从停车场出发到达用户需求发起的区域需求点;②考虑到 SAV 专用停车场具有一定的建设投入和持续服务周期,将 2030 年设定为规划目标年,并以该年预测的高峰小时乘车需求作为停车场

容量配置与选址优化的需求依据;③鉴于既有商业化停车场的收购或租赁价格差异较大,不区分具体交易价格,统一假设运营方最终获得所选停车场的使用权或所有权;④由于不同停车场用地面积与形状存在差异,建模时将停车场平面形状近似为正方形,便于容量与布局计算;⑤每辆车有4个容量;⑥允许车辆跨区域提供接送服务,即来自某一选址停车场的车辆可服务非本区域乘客。考虑到上述条件,建立多目标停车场选址模型,数学模型定义为

$$\min Z \sum_{j \in w} C_j \cdot y_j + \sum_{i \in D} \sum_{j \in w} d_{(i,j)} \cdot x_{(i,j)} + \sum_{j \in w} C_j \cdot (1 - y_j) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in w} x_{ij} = r_i, \forall i \in D \quad (2)$$

$$\sum_{i \in D} x_{ij} \leq Q_j \cdot y_j, \forall j \in w \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq Q_j \cdot y_j, \forall i \in D, \forall j \in w \quad (4)$$

$$\sum_{i \in D} x_{ij} \leq 4v_j, \forall j \in w \quad (5)$$

$$v_j \in \mathbb{Z}^+, x_{ij} \geq 0, y_j \in \{0, 1\}, \forall i \in D, \forall j \in w \quad (6)$$

其中,目标函数(1)表示本文的目标是最小化改建成本、距离成本、弃用已选定的目标停车场所带来的沉没成本;约束(2)表示改造的停车场对于其需求点需保证满足其未来年高峰小时乘车需求;约束(3)表示每个停车场的容量限制,停车场提供服务的能力不能超过其自身停车场容量;约束(4)表示停车场进行服务的约束前提,停车场若要提供服务必须先被改建之后才会提供服务;约束(5)表示停车场提供服务所需的车辆数的约束,每辆车可以提供4个需求量;约束(6)表示停车场发出的车辆数为正整数, x_{ij} 、 y_j 是决策变量,其中 y_j 介于0—1之间。

2.3 选址模型求解

所构建的停车场改建选址模型属于典型的混合整数规划(Mixed-integer programming, MIP)问题。对于此类问题,常用的精确求解方法是分支定界法和分支切割法等方法,其主要求解方式是通过逐步划分解空间并不断收缩界限来获得全局最优解。尽管本文在变量与约束的设置上相对精简,但由于数据集规模庞大,模型仍需在多目标优化框架下同时处理数百个候选停车场与上千个需求点之间的匹配关系。为此,仅依靠常规的分支定界法难以在有限时间内获得高质量解。

鉴于此,本文在总体上采用分支定界法作为主要求解思路,并进一步依托开源软件CBC(Coin-or branch and cut)求解器实现具体计算。CBC在分支定界框架的基础上,结合割平面等增强策略,能够提升模型对大规模MIP问题的计算效率。通过CBC求解器的辅助,模型能够在大规模算例条件下在可接受时间范围内获得高质量的最优解,为后续算例分析和敏感性研究提供了可靠的数据支持。

3 算例分析

为验证所构建模型与算法的可行性及实际应用价值,以纽约市曼哈顿地区为研究对象开展停车场改建分析。由于SAV尚处于商业化探索阶段,缺乏长期、系统的出行需求观测数据,直接获取大规模实测数据存在困难。尽管SAV与传统出租车在运营组织方式和服务获取方式上存在差异,前者更依赖平台化调度,后者则兼具巡游与预约属性,但二者均属于城市即时出行服务,其需求分布受土地利用、人口活动强度、通勤时段变化及交通枢纽布局等因素共同影响,并在城市核心区、商业区和交通节点周边呈现较强集聚特征。因此,以纽约市出租车与豪华轿车委员会(TLC)黄色出租车数据近似刻画SAV需求热点与峰值强度,并将其纳入后续选址与容量配置的计算框架。

数据涵盖2009—2024年的完整出租车运行记录,构建了连续15年的历史样本序列。在此基础上,采用CNN-LSTM深度学习模型对未来出行需求进行预测,以2030年作为研究时间,对曼哈顿各区域的乘车需求进行预测。预测结果进一步作为SAV需求分布的数据,为停车场改建与选址提供依据。

上述案例研究不仅能够在缺乏真实 SAV 出行数据的条件下有效验证所建模型的适用性与稳健性,也为后续停车场选址的仿真实验与敏感性分析提供了数据支撑和参考。

3.1 SAV 出行需求预测

为将现有停车场改建问题落到可计算层面,需先获得不同区域的需求参数。现有出租车数据呈现短期波动与长期趋势并存的非平稳特征,传统统计模型难以同时捕捉。基于此,引入深度学习的时序表示以提取关键模式。

卷积神经网络(CNN)是一类具有卷积结构的深层前馈神经网络,其核心特征在于卷积层通过局部连接、权值共享与下采样机制,能够有效减少模型参数数量,加速训练过程,并从输入数据中提取多层次特征。典型的 CNN 模型通常由输入层、卷积层、池化层、若干全连接层以及输出层构成,在层级式特征提取的基础上实现端到端的模式识别与分类。卷积层提取特征的计算公式为

$$y_i = f_c(y_{i-1} \otimes W_i + b_c) \quad (7)$$

式中, y_i 表示第*i*个卷积层的输出, f_c 表示卷积层的激活函数, y_{i-1} 表示第*i*个卷积层的输入, W_i 表示第*i*个卷积核的权重, b_c 表示卷积层的偏置项。

长短期记忆网络(LSTM)是循环神经网络(RNN)的改进型结构。与传统 RNN 相比,LSTM 在每个神经单元中引入了输入门、遗忘门与输出门 3 类门控机制,用于控制信息的写入、保留与输出。通过这种结构,LSTM 能够在训练过程中动态调节输入权重、记忆权重与输出权重,从而避免传统 RNN 在长序列建模中容易出现的梯度消失或梯度爆炸问题。一个神经元计算过程中输入门 i_t 、遗忘门 f_t 、输出记忆 c_t 、输出门 o_t 和输出特征 h_t 的公式分别为

$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + V_i c_{t-1} + b_i) \quad (8)$$

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + V_f c_{t-1} + b_f) \quad (9)$$

$$c_t = f_t \otimes c_{t-1} + i_t \otimes \tanh(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (10)$$

$$o_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + V_o c_t + b_o) \quad (11)$$

$$h_t = o_t \otimes \tanh(c_t) \quad (12)$$

式中, x_t 表示当前时刻的输入特征向量, c_t 和 c_{t-1} 分别表示当前时刻和上一时刻 LSTM 神经元的状态, h_t 和 h_{t-1} 分别表示当前时刻和上一时刻的隐藏状态, W 、 U 、 V 表示不同权重, b 表示所在门回路的偏置项, σ 表示激活函数, $\otimes$ 表示向量卷积。

在 2030 年出租车出行需求预测中,出租车历史运行数据同样属于典型的时间序列数据,并受到多种因素的共同作用。对于多特征变量输入下的预测任务,单一神经网络模型往往存在一定局限性。为此,基于 CNN-LSTM 混合神经网络构建预测模型对 2030 年 SAV 出行需求进行预测(图 3)。模型结构由卷积层提取序列局部特征,利用 LSTM 层捕捉长期依赖关系,并通过全连接层输出预测结果。在训练过程中,模型以均方误差作为损失函数,并采用 Adam 优化器进行参数更新。经过多轮预实验发现,模型在约 200 个训练轮次后趋于收敛,进一步增加轮次对验证精度提升有限,因此,将训练轮次设定为 200 轮,并在训练过程中通过验证集监控模型性能,以确保结果的可靠性与泛化性。以 2009—2024 年曼哈顿区域的 TLC 出租车数据、出租车增长率和区域人口规模等作为基础数据,采用滑动窗口方法,使用过去 12 个月的数据预测次月高峰小时乘车需求,依此获得 2030 年各区域高峰小时乘车需求值,并汇总为年度需求总量,作为停车场改建与选址模型的需求数据。

基于上述 CNN-LSTM 混合模型的预测结果,得出了 2030 年纽约市曼哈顿地区各区块的高峰小时乘车需求分布情况。TLC 出租车数据已对曼哈顿区域进行了网格化划分(图 4)。在空间分布上,预测结果显示曼哈顿不同区块的需求差异较大,高需求区与低需求区之间形成分层。从整体上看,

2030年的出租车乘车需求主要聚集在人口密集、商业活动频繁的中城区与下城区,这些区域未来可能成为SAV服务的核心供给区域。综上,预测结果为后续的停车场改建选址提供了依据,为进一步进行多目标选址奠定了基础。

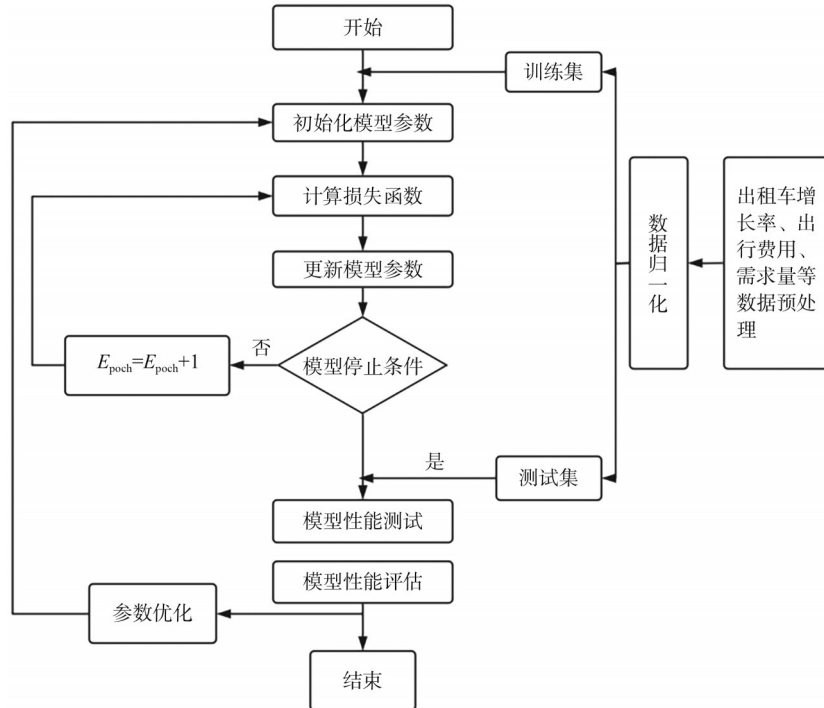


图3 CNN-LSTM模型框架

Fig. 3 Framework of CNN-LSTM model

3.2 SAV停车场选址参数设置及结果分析

2009—2024年的出租车数据集,记录了这期间纽约市黄色出租车的上下车区域、乘车费用与距离、乘车具体时间等,通过分析用户乘车需求预测未来曼哈顿不同区域的高峰小时乘车需求。研究范围划定在纽约市曼哈顿区,利用OpenStreetMap获取区域路网数据,对曼哈顿地区进行1000 m×1000 m栅格化处理,将栅格化后栅格区域的质点作为不同区域的需求点,并将此区域预测的需求值平均分配在各需求点上,以模拟该区域的需求。考虑到曼哈顿地区范围较大,且商业化停车场众多,因此主要通过模型求解得出总改建成本和具体选址。

基于混合整数规划模型,采用CBC求解器进行编程实现,并在Intel Core i5 3.2 GHz、24 GB RAM的环境下调用CBC进行求解。考虑到SAV商业化将呈现逐步推进态势,因此设定不同的乘车需求占比情景对站点进行选址评估,各情景对应的最优选址数量与站点组合情况见表3。以曼哈顿为例,结合对2030年高峰小时需求的预测,从改建成本(商业视角)与最短接驳距离(用户视角)等维度综合权衡,给出最优选址方案,以验证模型与求解方法的可行性。

3.3 敏感性分析

由于直接分析整个曼哈顿地区的选址敏感性所涉及的数据量过于庞大,本文选取曼哈顿下城区的部分区域进行代表性分析。具体而言,在地理信息系统软件(QGIS)中选取了下城区的3个区域作为研究对象,分别标注为A、B、C(图5)。在研究区域内,共划定了19个候选停车场点(图5中黄色标注所示)。在敏感性分析方面,主要关注以下两个方面:①随着未来市场乘车需求量的增长,候选点的选址是否会发生明显变化;②在未来建设成本上升、区域需求波动的背景下,选址结果是否会出现调整。通过上述分析,检验所构建选址模型的稳定性。

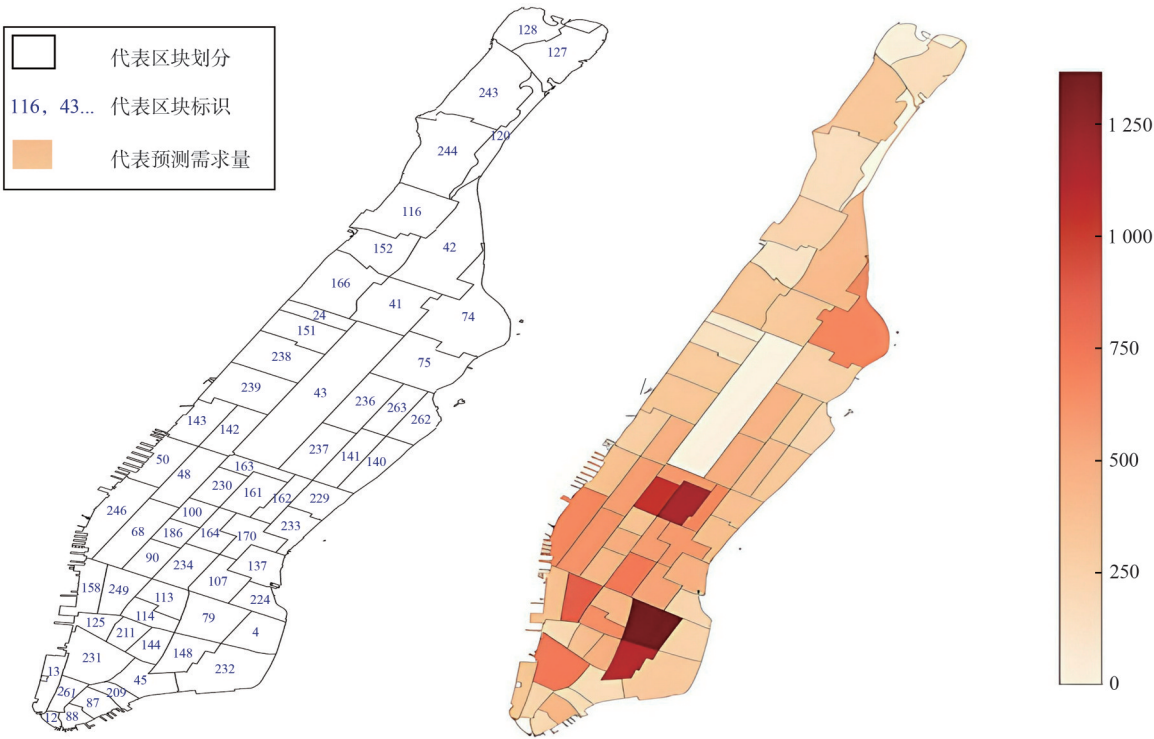


图4 纽约市曼哈顿地区区块划分及2030年出租车使用需求热力图

Fig. 4 Zoning division and taxi demand heatmap in 2030 in Manhattan, New York

表3 不同SAV对出租车替代率情景下曼哈顿地区停车场改建初始选址结果

Table 3 Initial site-selection results for parking lot retrofitting in Manhattan under different SAV substitution rates for taxi demand

指标	SAV 占有率/%				
	10	20	30	40	50
高峰小时需求总量/人次	5 355	10 709	16 063	21 417	26 771
选址数量/个	31	64	86	108	125
改建所耗金额/万元	8 134.5	16 051.5	23 910.5	31 943.5	39 614.0

指标	SAV 占有率/%				
	60	70	80	90	100
高峰小时需求总量/人次	32 125	37 479	42 833	48 187	53 541
选址数量/个	148	163	175	190	205
改建所耗金额/万元	47 531.0	55 390.0	63 336.0	71 108.0	78 851.0

SAV 的市场接受度与占有率存在逐步提升的趋势,在不设定初始停车场位置的条件下,针对不同 SAV 对出租车替代率占比情境,分析了该区域停车场的选址变化情况(表 4)。表 4 记录了满足 2030 年该区域高峰小时乘车需求预测的不同选址情形,当 SAV 乘车需求在整体市场中占比较低时,仅有两个停车场被选为商业化 SAV 停车场,而当出租车占比较高时选址量可达 15 个。以此选址求解结果为基准研究以下情景。

情景 1 中,未来的年高峰小时乘车需求可能受到经济发展、自然环境变化及社会因素等多方面影响而产生波动。为评估选址模型在不同需求变动下的稳定性,分别探讨两种方向的变化:需求增长和需求下降。同时考虑到 SAV 商业化推广是一个逐步递进的过程,不可能直接占据所有市场需求

份额,因此设置 SAV 出行对出租车替代率比例为 30%、50%、70% 3 种阶段性情境,分别对应不同发展阶段的选址需求。

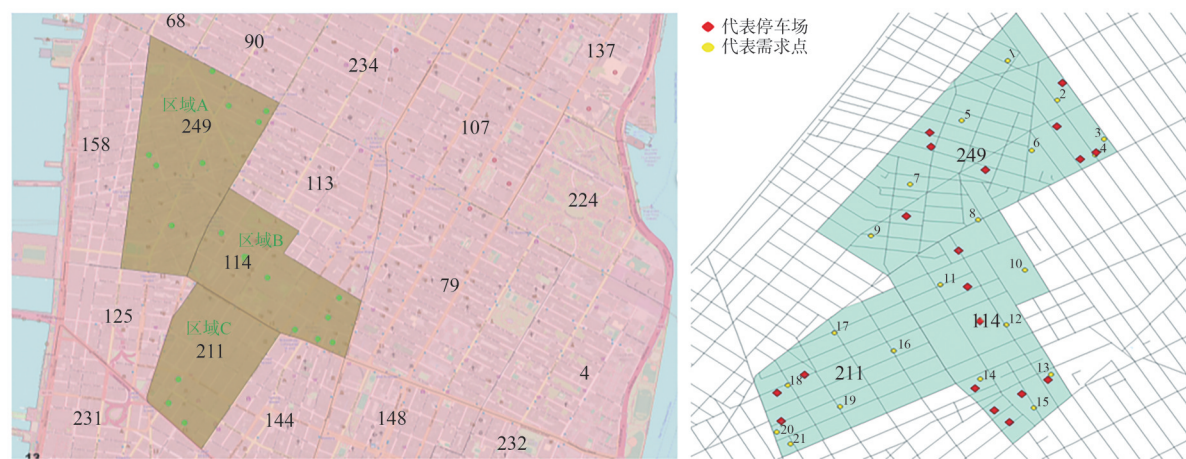


图 5 选取的部分区域以及供给与需求点分布
Fig. 5 Selected areas and its supply-demand points distribution

表 4 不同的 SAV 对出租车替代率占比下的初始选址数据

Table 4 Initial selected sites data under various SAV substitution rates for taxi demand

指标	SAV 替代率占比/%									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
高峰小时需求总量/人次	212	423	634	845	1056	1268	1479	1690	1901	2112
选址数量/个	2	4	5	7	8	10	11	12	13	15
改建停车场面积/m ²	1277	2749	4135	6212	7714	9098	10502	11993	12972	13845
改建所耗金额/万元	78.3	155	232	307	384.3	461.1	536.5	613.4	691.7	765.6

在不同 SAV 对出租车替代率占比下,进一步设定乘车需求量波动幅度为±5%、±10%、±15%,分析不同波动情形下停车场选址结果相较于基准情形是否发生变化(表 5),从而评估模型对需求不确定性的敏感性。

在情景 2 中,未来曼哈顿地区在宏观经济环境、政策导向与居民出行行为等多重因素影响下,不同区域停车场改建成本可能上升或下降,同时区域出行需求也可能同步发生变化。为评估选址模型对成本与需求双重扰动的响应情况,设置多个联动分析情景。具体而言,分别以 SAV 对出租车出行替代率为 30%、50%、70% 3 个阶段作为基础情景,对研究区域 A、B、C 分别施加改建成本与乘车需求的联合变化,设定改建成本浮动幅度为±5%、±10%,区域需求浮动幅度为±5%、±10%、±15%,并以基准选址方案为参照,比较不同情景下选址结果的变化情况,以评估模型在多因素扰动下的稳定性与适应能力。

为提高结果呈现的可读性与情景之间的可比性,仅对在联动变化条件下引发选址方案调整的情形进行汇总(表 6—8),对于改建成本与需求同时变化后选址结果仍保持不变的情景组合,则归入稳定情形,不再逐项列示。同时,考虑到部分改建成本调整幅度下得到的选址变动结果相同,表 6—8 不再单列“改建成本调整”项,而是以需求调整幅度为主线呈现各区域选址数量变化。其中,在 30% 和 50% 替代率情景下,不同成本调整幅度对应的选址变动结果完全一致;在 70% 替代率情景下,需求下降 10% 和上升 10% 时,不同成本调整幅度下的选址变动结果也保持一致。仅在需求上升 5% 时,不同成本调整幅度对区域 B 产生差异化影响:当改建成本下降 10% 和 5% 或上升 5% 时,各区域选址

数量均增加 1 个;当改建成本上升 10% 时,区域 B 选址数量增加 2 个,其余区域及组合区域仍增加 1 个。

表 5 SAV 对出租车替代率 30%~70% 并伴随需求波动时的选址变动情况

Table 5 Site selection changes under 30%~70% SAV substitution of taxi demand with demand fluctuations

SAV 对出租车替代率/%	需求波动/%	选址数量	改建成本/万元	相较于初始选址变动	修改初始选址的 沉没成本/万元
30	+5	7	2 610.0	+1	0
	−5	6	2 320.0	0	0
	+10	7	2 610.0	+1	0
	−10	6	2 320.0	0	0
	+15	7	2 697.0	+1	0
	−15	5	2 059.0	−1	93.96
50	+5	10	4 123.5	+1	0
	−5	9	3 842.5	0	0
	+10	10	4 408.0	+2	0
	−10	8	3 494.5	−1	125.28
	+15	11	4 509.5	+3	0
	−15	8	3 378.5	−1	167.04
70	+5	12	5 298.25	+1	0
	−5	11	4 908.25	0	0
	+10	12	5 473.75	+1	0
	−10	10	4 502.25	−1	146
	+15	13	5 662.25	+2	0
	−15	10	4 313.75	−1	214

表 6 SAV 对出租车替代率 30% 情境下改建选址变动

Table 6 Site selection changes for retrofitting under a 30% SAV substitution of taxi demand

需求调整/%	区域						
	A	B	C	A、B	A、C	B、C	A、B、C
−10	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1
5	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
10	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

表 7 SAV 对出租车替代率 50% 情境下改建选址变动

Table 7 Site selection changes for retrofitting under a 50% SAV substitution of taxi demand

需求调整/%	区域						
	A	B	C	A、B	A、C	B、C	A、B、C
−10	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1
5	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
10	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

表 8 SAV 对出租车替代率 70% 情境下改建选址变动

Table 8 Site selection changes for retrofitting under a 70% SAV substitution of taxi demand

需求调整/%	区域						
	A	B	C	A、B	A、C	B、C	A、B、C
−10	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1
5	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
5	+1	+2	+1	+1	+1	+1	+1
10	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

从实施层面看,选址稳定性有助于降低因频繁调整带来的额外建设与组织成本。从用户侧看,固定的发车与接驳位置有利于保持接驳时间的可预期性,进而提升出行体验。总体而言,模型在保证方案稳健性的同时,对需求侧的边际变化保持足够的灵敏性,能够为商业化运营中的阶段性扩容、收缩与投资节奏提供直接的决策依据。

4 结论

结合当前全球 SAV 商业化发展的趋势,研究了将现有商业化停车设施改建为 SAV 专用停车场的选址问题。通过重新规划 SAV 车辆的布局方式,构建以现有商业停车场为候选地址的选址优化模型,将最小改建成本、最短需求点接驳路径以及选址的长期性融入算法进行求解,在纽约市曼哈顿地区进行算例研究,并对曼哈顿下城区部分区域进行敏感性分析,得出具体结论如下。

1) 将现有商业化停车场作为 SAV 专用停车场的候选选址是可行的。该策略能够有效利用现有空间资源,在不新增土地使用的情况下,通过合理改造提升 SAV 车辆容量,有助于降低基础设施建设成本,促进 SAV 商业化落地。

2) 敏感性分析结果表明,需求波动与改建成本变化均会对 SAV 停车场改建选址产生影响,但二者作用程度存在差异。在单独考虑需求波动时,小幅需求变化对选址方案影响有限,模型整体表现出较好的稳定性;而当改建成本发生变化时,部分候选停车场的经济性会发生改变,进而可能引发选址方案调整。尤其是在已形成初始选址方案的情况下,若后续市场扩展或运营规模调整需要重新优化选址,沉没成本会在一定程度上抑制站点替换,但当改建成本上升幅度较大时,模型仍可能选择放弃部分原有候选点并转向其他站点。该结果说明,运营方在制定 SAV 停车场改建方案时,应重点关注改建成本的不确定性,并建立成本阈值和备选站点机制,以降低后续调整对运营效益和用户接驳体验的影响。

参考文献:

[1] CHURCH R, REVELLE C. The maximal covering location problem[J]. Papers in Regional Science, 1974, 32(1): 101-118.

[2] CURRENT J R, REVELLE C S, COHON J L. The hierarchical network design problem[J]. European Journal of Operational Research, 1985, 20(1): 58-66.

[3] 张晓晗. 基于 GIS 的公共停车场空间布局分析[J]. 地理科学研究, 2023, 12(6): 777-789.

[4] 于文燕. 基于 GIS 的公共停车场选址模型设计: 以济南市历城区为例[J]. 设计进展, 2023, 8(4): 4000-4008.

[5] 高弋凡, 韩冉旂, 王子宸. 基于 GIS 的西安市主城区公共停车场选址研究[J]. 天津建设科技, 2023, 33(4): 8-12.

[6] 卫辉, 张晓瑞, 刘淑珍. 基于人口热力数据与 GIS 的城市公共停车场选址研究[J]. 北京建筑大学学报, 2022, 38(6): 48-58.

[7] 黄亚楠. 基于数学建模的停车场优化设计[J]. 计算机科学与应用, 2022, 12(4): 1122-1138.

- [8] NOURINEJAD M,BAHRAMI S,ROORDA M J. Designing parking facilities for autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part B:Methodological,2018,109:110-127.
- [9] 陈华群,熊静,黄炬凯. 基于多目标规划的低空飞行服务站选址[J]. 科学技术与工程,2021,21(11):4717-4723.
- [10] 颜文碧. 共享自动驾驶汽车对小城市公共交通系统和停车需求的影响研究[D]. 重庆:重庆大学,2023.
- [11] 赵鑫玮. 考虑自动驾驶汽车应用的城市停车需求分析[D]. 上海:同济大学,2020.
- [12] 蹇娅婷,田丽君,吴鹏. 自动驾驶背景下停车换乘点和共享停车位的优化管理[J]. 中国管理科学,2025,33(3):223-230.
- [13] 韩艳,袁昌银,唐心恬,等. 考虑心理因素的自动驾驶车用户停车选择行为分析[J]. 交通运输系统工程与信息,2025,25(5):72-82.
- [14] 李井波,张骥,马山,等. 城市停车设施需求预测与规划方法研究:以天津西青区为例[J]. 交通与运输,2023,36(S1):33-37.
- [15] BAUER G S, GREENBLATT J B, GERKE B F. Cost, energy, and environmental impact of automated electric taxi fleets in Manhattan[J]. Environmental Science & Technology,2018,52(8):4920-4928.
- [16] 仲兰芬,徐海红,王文忠,等. 无人驾驶停车共乘缓解瓶颈拥堵研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版),2023,54(4):399-407.
- [17] 储楚. 基于城市电动汽车出行特性的充电站选址研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.

(责任编辑 李成兵)

City Parking Lot Layout and Retrofit Siting Considering the Characteristics of Shared Autonomous Vehicles

SUN Jiangtao¹, LIU Jia², ZHANG Jin³, HUO Yueying¹

(1. Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;

2. Inner Mongolia Transportation Design Institute Co., Ltd, Hohhot 010011, China;

3. China Intelligent & Connected Vehicles (Beijing) Research Institute Co., Ltd, Beijing 100176, China)

Abstract: Shared autonomous vehicles (SAVs) offer potential advantages over conventional vehicles in terms of parking organization and vehicle storage-and-retrieval efficiency. To accommodate the future parking demand associated with large-scale SAV deployment, a layout form of parking lots tailored to SAV characteristics was proposed and a method for retrofitting existing parking facilities into dedicated SAVs parking lots was developed. Using taxi data, the spatial distribution of future SAV travel demand was forecasted. Combined with the practical operational requirements, the internal layout of SAV parking lots was further investigated. On this basis, a multi-objective location model was established to minimize retrofitting cost, travel distance cost, and the sunk cost associated with abandoning some existing parking facilities. The proposed model can support the optimization of parking lot layout and location decisions. Finally, the stability and feasibility of the proposed model were verified through the sensitivity analysis on a small-scale case study. The proposed model was then applied to the entire Manhattan area of New York City, which enables an integrated process from district-level demand forecasting to citywide location optimization. The study can provide theoretical support and practical guidance for planning dedicated parking lots for SAV in future urban environments.

Key words: shared autonomous vehicles; parking lot location; parking lot layout; multi-objective programming model