

面向不规范停车治理的动态共享停车分配模型*

黄敏, 杨靖, 梁宁晨

中山大学智能工程学院, 广东 深圳 518107

摘要:提出了一种基于双层规划的动态共享停车需求分配模型,旨在优化停车需求与停车资源的匹配。首先构建了一个包含不规范停车资源的混合分配框架,以支路级虚拟停车场为基本停车区单位,采用基于时间窗滚动优化的动态分配机制进行停车分配,并通过嵌入距离优先启发式规则的协同进化遗传算法进行求解。以成都市一支路级虚拟停车场为场景进行仿真实验,结果表明:模型在基本满足停车需求的同时,小时平均不规范停车量减少了128辆,实体停车场时空资源利用率提升了9.52%。灵敏度分析进一步表明,模型能够有效应对不同需求的波动,展现了较强的鲁棒性和适应能力。

关键词:共享停车分配;双层规划;协同进化遗传算法

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)05-0059-09

Dynamic shared parking allocation model for irregular parking management

HUANG Min, YANG Jing, LIANG Ningchen

School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China

Abstract: This study presents a dynamic shared parking demand allocation model based on bi-level programming, aiming to optimize the matching between parking demand and available resources. A hybrid allocation framework is developed that incorporates irregular parking resources, with branch-level virtual parking lots serving as the basic spatial units. Parking allocation is carried out through a rolling time-window optimization mechanism, and a co-evolutionary genetic algorithm embedded with a distance-priority heuristic is employed for solution search. A case simulation in a branch-level area of Chengdu demonstrates that the model effectively satisfies parking demand, reduces the hourly average volume of irregular parking by 128 vehicles, and improves the spatiotemporal utilization of physical parking resources by 9.52%. Sensitivity analysis confirms the model's robustness and adaptability to fluctuating demand conditions, showing strong robustness and adaptability.

Key words: shared parking allocation; bi-level programming; co-evolutionary genetic algorithm

截至2024年全国机动车保有量达4.53亿辆,其中汽车3.53亿辆(公安部交通管理局,2025)。有研究显示,超过30%的城市道路拥堵源于车辆寻找车位(Shoup,2006),而不规范停车现象进一步加剧了

交通秩序混乱与安全隐患。为了解决这一问题,过往的研究多聚焦于传统治理手段。袁泉等(2020)提出,在城市规划中结合停车需求与公共服务设施建设,通过优化停车位配置和加强公共服务来提升社

* 收稿日期:2025-03-10

录用日期:2025-03-31

网络首发日期:2025-06-05

基金项目:国家自然科学基金(12472060)

作者简介:黄敏(1975年生),女;研究方向:可计算路网;E-mail:huangm7@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20250051

区停车管理能力。向鹏成等(2024)则建议通过结合智能停车监控系统与加强行政处罚,利用技术与制度协同治理不规范停车行为。然而,传统治理手段未能充分挖掘停车资源的时空互补潜力,也缺乏对不规范停车的主动引导。但城市土地资源紧缺,通过修建新的停车设施可行性较低且成本高昂(Dave et al., 2019)。与此同时,许多实体停车场在非高峰时段存在车位闲置情况(邵欣然, 2021),资源时空错配问题凸显。因此,利用智能化手段高效匹配停车需求与资源,成为了城市停车治理的关键课题,而共享停车则是一个潜在的解决方案(Kong et al., 2018)。

Liu et al.(2022)提出了一种共享停车场布局优化模型,考虑了步行时间和停车费用因素,旨在优化城市商业区和居民区共享停车空间的布局,提高停车效率。Li et al.(2021)针对北京市私人停车位展开研究,采用数学建模和启发式算法,优化了共享停车资源的分配。类似地,Chou et al.(2021)提出了一个动态空间分配模型,通过实时数据和需求预测动态调整停车位的释放。郑硕(2024)提出了一种区域共享停车泊位的动静态组合模型。宁尚彬(2023)提出了一种针对模式下共享停车位动态分配的优化方法,通过滚动时域分配、供需重分配和考虑供需不准时等因素,优化了停车资源的分配效率。Wang et al.(2020)则回顾了多个城市中共享停车资源的优化方法,重点分析了商场、写字楼和住宅区等停车场的共享资源分配策略。戴冀峰等(2021)则针对实体停车场中的固定车位与非固定车位分别构建泊位分配模型。现有研究在提升实体停车场资源利用率方面取得了一定进展,但大多未能有效考虑不规范停车行为的干预,导致问题的治理仍存在局限。

在分配策略方面,早期研究多基于静态假设,即假定所有停车需求在分配前已知的,在获得全局停车需求信息的条件下对需求进行统一分配。例如,姚恩建等(2017)提出泊位资源优化配置模型及算法。王健等(2019)基于商业区与居住区停车需求的时空互补性,以利用效率最大化和步行距离最小化为目标,构建居住区共享泊位分配模型。因上述模型虽在理想场景下实现了资源高效配置,却难以应对实际中动态到达的随机需求,学者们逐步转向动态分配方法,通过周期性计算分配方案以适应实时变化。例如,王韩麒(2021)基于相似性算法构建了用户预约时段与车位共享时段的匹配度模型,实现了停车需求驱动的分配方案动态优化。唐秋生等

(2020)提出了一种居住区泊位时空错位共享方法。何胜学等(2021)等针对无人驾驶场景,设计了共享停车动态匹配模型,显著降低了无人车辆在泊车过程中的频繁移位现象。Jiang et al.(2020)提出了一个考虑停车不准时性的动态共享停车分配模型。

然而,现有动态分配研究的应用集中于需求预测与未分配资源调度,对已分配车位的重分配机制探索不足,同时多数模型隐含假设已分配需求的不可变更性(一旦需求被绑定至某一车位,其位置与时间即被固定)。这种“一次性分配”机制在突发资源冲突(如停车场临时关闭、用户取消预约)时缺乏动态调整能力。因此,本文提出了一种基于双层规划的动态共享停车分配模型。区别于现有研究,模型首次将实体停车场与不规范停车资源纳入统一分配框架,通过构建混合资源池显著扩展系统容量;同时模型引入了滚动优化机制,允许对已分配但未开始的停车需求进行跨资源二次调整,避免传统动态优化策略固化的情况。同时,为了满足停车需求管理的多维度优化目标,模型基于目标的优先级顺序设置了分层的多目标优化结构,避免了多目标的被动权衡。

1 共享停车分配模型

1.1 问题描述

以成都市某支路划分的虚拟停车场(余志等, 2022)为目标停车区,其空间范围为基于支路形成的封闭地块。该停车区内包含两类停车资源:1)实体停车场资源:包括固定停车场(如商业配建停车场)与规范化路内停车位(即由政府划定的道路临时停车区);2)不规范停车资源:指停车区内除实体停车场外的非正式停车区域,通常分布于未划设合法车位的街道边缘、公共绿地周边等空间,缺乏标准化停车标识及管理约束。其中实体停车场资源在共享开放时间段内,除已被占用车位外,其余空闲车位均可用于共享停车。

停车区中的不规范停车行为被界定为:在停车区内、实体停车场之外的停车行为。图1展示了2024年6月24—30日该支路级虚拟停车场及其内部所有实体停车场的总停车量、不规范停车量以及总闲置车位数的对比情况,数据来源为成都市智慧交通系统。从图中可以看出,停车区整体停车量与实体停车场停车量之间存在明显差异,表明大量车辆停放在实体停车场之外,造成不规范停车现象。同时,实体停车场的闲置车位数也较高,尤其是在高需求

时段,空闲车位依然存在。这表明,尽管停车需求较大,实体停车场的停车资源并未得到充分利用,且存在较大的潜在容纳能力。因此,优化停车需求的分配,不仅有助于减少不规范停车现象,还能够提升实体停车场的资源利用率。

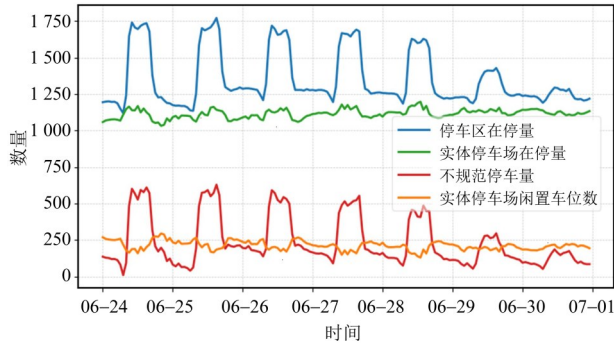


图1 停车现状

Fig. 1 Current parking situation

1.2 模型思路与假设

研究提出了一种基于双层规划的动态共享停车需求分配模型,旨在最大化停车需求的满足量,同时优化实体停车场的停车资源利用率,从而有效改善不规范停车现象。模型的核心任务是对预约的停车需求进行分配,决定是否满足需求并为其选择合适的停车资源。模型采用基于时间窗的动态分配策略,并结合滚动优化方法进行求解。具体而言,每个时间窗内模型会根据当前时间窗提交预约的停车需求的停车覆盖时间窗以及目的地进行分配,同时该过程结合滚动优化策略,每个时间窗还会对已分配但还未开始停车的需求进行重分配,实时更新分配方案,使资源分配方案始终处于最优状态。

模型采用双层规划结构,其中第一层的目标是最大化停车需求的满足量,第二层的目标则是最大化实体停车场时空资源利用率。提出的模型建立在以下假设基础上:

(1)目的地停车区分配假设:每个停车需求的分配仅限于其目的地所在的停车区内,分配决策不涉及跨停车区的分配。即每个停车需求只能在指定的停车区内找到合适的停车资源进行分配。

(2)用户服从分配假设:停车需求严格遵循其提交的停车开始时间和持续时长,并完全服从模型的分配结果。

(3)就近停车假设:对于每个停车需求预约,若存在实体停车场能够满足其需求,则将其优先分配至距其目的地最近的实体停车场,若不存在实体停车场则将需求分配至就近的不规范停车资源。

1.3 模型构建

本模型所涉及到的变量符号及其含义如表1所示。在模型中,停车需求由其预约时间、目的地、停车所覆盖的时间窗集合来定义。每个停车需求 d 经由模型可能被分配到实体停车场 f 中,若实体停车场车位紧缺,则可能被分配到目的地所属停车区的不规范停车资源 r 中。在这种情况下,假设停车需求直接停放在就近的不规范停车资源,而不考虑步行距离。当实体停车场和不规范停车资源都车位不足时,停车需求可能会被拒绝。模型采用0-1变量 $x_{d,f}$ 、 $y_{d,r}$ 、 z_d 分别表征停车需求 d 是否被分配至实体停车场 f 、是否被分配至不规范停车资源 r 、是否被拒绝,取值为1表示是,取值为0表示否。每个停车资源的车位数、共享开放时间等信息作为已知条件,并作为约束条件参与分配决策。

1.3.1 目标函数 模型采用双层规划结构,首先确保尽可能多的停车需求得到满足,并在此基础上优先将停车需求分配至实体停车场,从而减少不规范停车量。对于一个停车区,模型将对目的地位于其内部的停车需求进行分配,优化目标分为:

(1)上层目标:最大化满足停车需求量,即

$$\max Z_1 = \sum_{d \in D} \left(\sum_{f \in F} x_{d,f} + y_{d,r} \right).$$

(2)下层目标:最大化实体停车场时空资源利用率,即

$$\max Z_2 = \frac{\sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \left(B_f + \sum_{d \in D} x_{d,f} 1 \right)}{\sum_{f \in F} C_f K},$$

其中实体停车场时空资源利用率 Z_2 为停车需求在实体停车场所占用的时空资源总和与停车区所拥有的停车时空资源总和之比, K 表示总时长。1为指示函数,用于判断某个需求是否在某指定时间窗内占用资源。

$$1_d(t) = \begin{cases} 1, & t_d^s \leq t \leq t_d^s + l_d - 1, \\ 0, & \text{其他}. \end{cases}$$

1.3.2 约束条件 需求唯一分配约束要求每个停车需求 d 只能被分配至一个停车资源处或是被拒绝,即

$$\sum_{f \in F} x_{d,f} + y_{d,r} + z_d = 1.$$

实体停车场容量约束确保实体停车场 f 在每个时间窗 t 内的车位使用量不超过其总车位数,即

$$H_{f,t} \leq C_f A_{f,t},$$

其中实体停车场 f 在时间窗 t 内的在停量 $H_{f,t}$ 是该实

表 1 符号含义
Table 1 Meanings of symbols

符号及其名称	含义
停车资源	F 停车区内的实体停车场集合, $f \in F$
	r 停车区内的不规范停车资源
实体停车场属性	C_f 实体停车场 f 的总车位数
	$H_{f,t}$ 实体停车场 f 在 t 时间窗的在停车辆数
	$A_{f,t}$ 实体停车场 f 在 t 时间窗的共享开放状态, $A_{f,t} \in \{0, 1\}$ ($A_{f,t} = 1$ 为开放, $A_{f,t} = 0$ 为不开放)
	B_f 实体停车场 f 的固定停车量
不规范停车资源属性	C_r 停车区内的不规范停车资源总容量
	$H_{r,t}$ 停车区内在 t 时间窗的在停车辆数
	B_r 停车区内不规范停车资源 r 的固定停车量
时间维度	T 时间窗集合, $t \in T = \{1, 2, \dots, K\}$
停车需求变量	D 停车区内的停车需求集合, $d \in D$
	o_d 停车需求 d 的目的地
	t_d^p 停车需求 d 提交预约的时间窗
	t_d^s 停车需求 d 开始停车的时间窗
	l_d 停车需求 d 的停车持续时长, 即占用时间窗的个数
	$x_{d,f}$ 停车需求 d 是否被分配到实体停车场 f , $x_{d,f} \in \{0, 1\}$ ($x_{d,f} = 1$ 为是, $x_{d,f} = 0$ 为否)
	$y_{d,r}$ 停车需求 d 是否被分配到停车区的不规范停车资源 r , $y_{d,r} \in \{0, 1\}$ ($y_{d,r} = 1$ 为是, $y_{d,r} = 0$ 为否)
	z_d 停车需求 d 是否被拒绝, $z_d \in \{0, 1\}$ ($z_d = 1$ 为拒绝, $z_d = 0$ 为不拒绝)
距离变量	$\text{dist}(o_d, f)$ 停车需求 d 的目的地与实体停车场 f 间步行距离

体停车场内固定停车需求量与分配停车需求量的总和, 即

$$H_{f,t} = B_f + \sum_{d \in D} x_{d,f} 1_d(t).$$

不规范停车资源容量约束确保在任意时间窗 t 内, 停车区的不规范停车资源 r 中的在停量不会超过其容量, 即

$$H_{r,t} \leq C_r,$$

其中不规范停车资源 r_p 在时间窗 t 内的在停量 $H_{r_p,t}$ 是该不规范停车资源内固定停车需求量与分配停车需求量的总和, 即

$$H_{r,t} = B_r + \sum_{d \in D} y_{d,r} 1_d(t).$$

实体停车场开放时间约束用于确保停车需求的分配不会超出实体停车场的可用时间范围, 即

$$x_{d,f} \leq A_{f,t}, \quad t \in [t_d^s, t_d^s + l_d - 1].$$

步行距离约束旨在确保停车需求的目的地与其分配的停车资源之间的步行距离不得超过最大

步行距离, 在需求被分配至实体停车场时考虑, 取最大步行距离为 800 m (Zhang et al., 2023), 有

$$x_{d,f} \text{dist}(o_d, f) \leq 800.$$

1.4 模型动态分配决策流程

为应对停车需求的实时动态变化, 提出一种基于时间窗滚动优化的动态分配机制。该机制通过周期性更新分配方案, 实现对预约需求和已分配未开始需求的双重调控, 从而提升系统应对突发资源冲突和需求波动的能力。动态分配流程的核心在于将整个时间范围划分为连续的时间窗, 每个时间窗内根据最新资源状态对需求进行分配或重分配, 其总体框架如图 2 所示。

在动态分配流程中, 以 $t = 1$ 为开始时间窗, $t = K$ 为结束时间窗, 即 $t \in T = \{1, 2, \dots, K\}$, 每个时间窗代表一个决策周期, 模型将在每个时间窗内根据当前的需求和资源状况进行停车需求的分配。时间窗的划分保证了停车资源的动态调整与优化, 在每

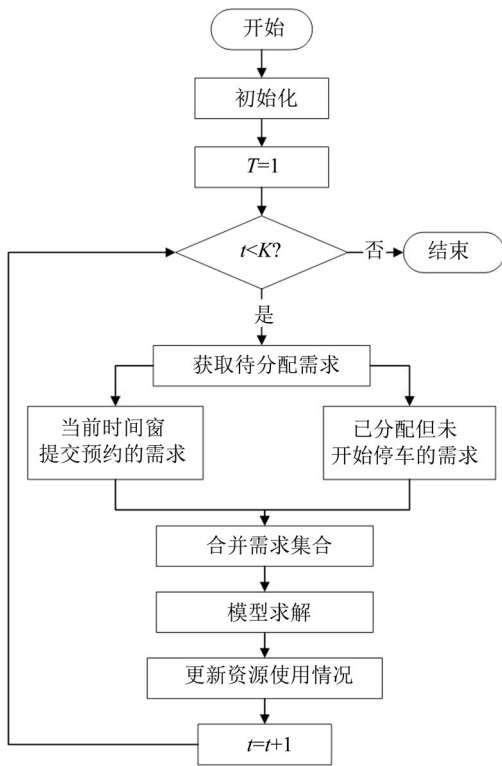


图2 动态共享停车分配流程图

Fig. 2 Flowchart of dynamic shared parking allocation

个决策时间窗内, 停车需求会根据分配策略被分配到适当的停车资源, 并及时更新资源的在停量。具体步骤如下:

(1) 模型初始化。在初始化阶段, 设定当前时间窗 $t = 1$, 并加载每个停车场和不规范停车资源的固定停车需求 B_f 与 B_r 作为其初始在停量 $H_{f,t}$ 、 $H_{r,t}$, 同时令所有停车需求的决策变量 $x_{d,f} = y_{d,r} = z_d = 0$ 。

(2) 需求集合构建。对于时间窗 t , 系统需处理新增预约需求与带重分配需求共2类需求。前者为提交预约的停车需求 $D_1 = \{d \in D | t_d^s = t\}$, 后者为已分配但尚未到停车开始时间的停车需求 $D_2 = \{d \in D | \sum_{f \in F} x_{d,f} + y_{d,r} + z_d = 1, t_d^s > t\}$ 。将二者合并得到当前时间窗待分配的停车需求 $D_t = D_1 \cup D_2$ 。

(3) 模型求解。对 D_t 中的停车需求调用协同进化遗传算法进行求解, 生成决策变量 $x_{d,f}$ 、 $y_{d,r}$ 、 z_d 。

(4) 资源使用情况更新。根据分配结果更新未来时间窗的停车资源占用情况, 对于每个实体停车场 f 更新其在停量, 即

$$H_{f,\tau} = B_f + \sum_{d \in D_t} x_{d,f} 1_d(t).$$

(5) 对于每个被分配至不规范停车资源的停车需求 $d \in D_t$ 更新其在停量, 即

$$H_{r,\tau} = B_r + \sum_{d \in D_t} y_{d,r} 1_d(t).$$

(6) 时间窗滚动与中止。若 $t < K$, 则 $t = t + 1$, 转步骤(2); 否则结束分配。

1.5 模型求解方法

共享停车需求分配问题涉及变量、约束数量众多, 其解空间会随问题规模增大呈指数级增长, 传统确定性算法在求解此类问题时计算复杂度较高。而遗传算法作为一种高效的全局搜索算法, 具有较强的鲁棒性与自适应性, 能在复杂解空间中有效搜索最优解或近似最优解。因此, 本文采用一种嵌入距离优先启发式规则的协同进化遗传算法进行求解, 该求解算法通过分层优化机制实现上下层目标的协同进化: 上层以全局视角最大化停车需求满足量, 下层则聚焦于实体停车场占用时长的局部优化。模型在每个决策时间窗的求解中调用该求解框架, 具体如下:

(1) 种群初始化与编码设计。在遗传算法中, 每个个体代表一个停车需求分配方案, 染色体为个体的具体编码, 采用0-1编码表示停车需求的分配状态。每个染色体由分配变量组成的三元组 $(x_{d,f}, y_{d,r}, z_d)$ 构成。初始种群由40%的优先策略生成个体与60%的随机个体组成, 其中优先策略生成个体针对每个停车需求, 首先尝试将其分配至距目的地最近的可用实体停车场; 当实体资源不足时, 转而分配至不规范停车区域; 若2类资源均无法满足, 则标记为拒绝需求, 全过程严格遵循约束条件。后者在可行解空间内通过蒙特卡罗方法随机生成分配方案并通过约束过滤非法解。

(2) 适应度评估。上层适应度函数 $F_1 = Z_1 - \alpha \sum_{d \in D} z_d$, 其中 Z_1 为上层优化目标, α 为惩罚系数, 通过引入拒绝需求的惩罚项引导种群尽量避免拒绝停车需求。下层适应度函数 $F_2 = Z_2 - \beta \sum_{d \in D} y_{d,r}$, 其中 Z_2 为下层优化目标, β 为惩罚系数, 由此引导种群尽可能避免将需求分配至不规范停车资源。

(3) 上下层协同进化。上下层种群通过交互式进化实现目标协同。在每代进化中, 上层通过轮盘赌选择策略与交叉操作生成候选解, 优化停车需求的满足量, 下层则基于上层提供的解进行局部优化, 关注实体停车场的车位占用时长。具体地, 轮盘赌选择通过计算每个个体的适应度, 依据适应度比例来决定个体被选中的概率, 适应度较高的个体参与交叉操作的可能性更高。在交叉操作中, 采用两点交叉方法, 在选择的父代个体之间交换基因片段时, 优先保留停车需求与停车资源之间距离较小的基因片段, 以确保需求分配的合理性。上下层种群

通过交替进化,在每一代中不断优化,形成闭环反馈机制,最终实现全局目标和局部目标的协同优化。

(4)终止条件判断。当迭代次数达到终止条件时,输出最终分配方案。

2 仿真实验

2.1 实验设置

为了验证模型的有效性,以成都市某支路级虚

拟停车场作为研究对象进行仿真实验。

2.1.1 停车资源参数 具体参数基于成都市智慧交通系统获取得到,如表2所示,其中固定停车需求指的是长期停放在停车区的车辆需求,这些车辆的停车位置和时间不会随停车需求的变化而变动。停车区中各停车资源的在停量为固定停车需求量与动态停车需求量的总和。

表2 停车资源信息

Table 2 Parking resource information

停车资源类型	仿真场景条件	参数	
实体停车场	车位数	停车场 A	889
		停车场 B	438
	固定停车需求量	停车场 A	94
		停车场 B	41
	共享开放时间	停车场 A	08:00:00—20:00:00
		停车场 B	08:00:00—20:00:00
不规范停车资源	车位数	700	
	固定停车需求量	270	

2.1.2 预约停车需求生成 仿真所采用的预约停车需求数据为生成数据,其信息包括目的地位置、停车开始时间、停车持续时长以及预约时间。停车需求的目的地由停车区内基于地理位置随机均匀抽取的3个坐标点组成。每个停车需求的目的地均等概率地从这3个坐标点中随机选择。预约停车需求的开始时间与停车持续时长基于停车区真实小时在停量数据、真实停车时长分布数据生成。其中,真实小时在停量数据包括停车区每小时的总在停量、停车区内各停车场每小时在停量以及停车区内每小时的不规范停车量。如图3所示,各停车资源的固定停车需求与生成的预约停车需求能够拟合真实小时在停量数据。停车区真实停车时长分布数据如图4所示,每小时提交预约的停车需求的停车持续时长均服从该分布。预约停车需求的预约时间基于停车持续时长生成,短时需求(时长 ≤ 2 h)的预约时间窗随机选自停车开始前0或1 h;长时需求(时长 > 2 h)的预约时间窗随机选自开始前2、3或4 h,模拟用户即时决策与提前规划行为。

2.1.3 步行距离 停车区内各类停车资源距目的地的距离如表3所示。其中,不规范停车资源距各目

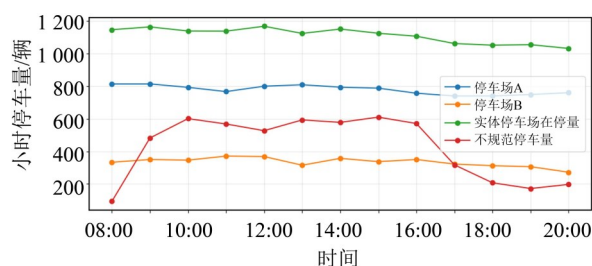


图3 真实小时在停量

Fig. 3 Actual hourly parking volume of each parking resource

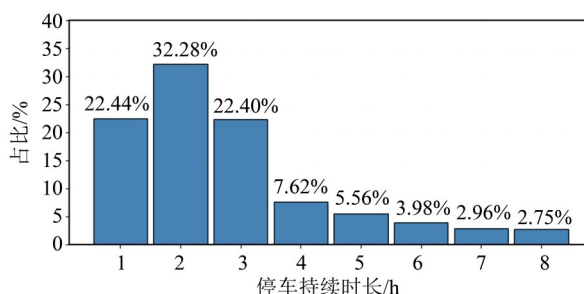


图4 真实停车时长分布

Fig. 4 Parking duration distribution

的地的距离为一常量,该常量通过计算停车区几何中心到所有目的地的平均欧氏距离确定。

2.1.4 时间范围与决策周期 取2024年6月24日

表 3 停车资源与目的地之间的步行距离

停车资源	目的地 1	目的地 2	目的地 3
停车场 A	810	460	330
停车场 B	370	680	830

08:00—20:00 作为仿真实验的时间范围, 以 1 h 为决策周期, 共有 12 个决策周期。

2.1.5 求解算法参数设置 综合考量模型规模、计算资源及优化目标, 协同进化遗传算法求解的参数如表 4 所示。

表 4 算法参数设置

参数	取值
种群规模	300
交叉概率	0.85
变异概率	0.02
上层惩罚系数	0.3
下层惩罚系数	0.25
上层目标权重	0.6
下层目标权重	0.4
迭代次数	300

2.2 实验结果与分析

2.2.1 对比分析 为了验证模型有效性, 将本文提出的动态共享停车分配模型与自发停车分配策略进行对比。自发停车分配策略模拟用户真实停车行为, 分配规则为:

(1) 对每个停车需求, 按距离升序遍历实体停

车场;

(2) 若最近的停车场有空闲车位, 则分配至该停车场; 若无空闲车位, 则检查次近的停车场, 依此类推, 直到找到空闲车位, 且距离不超过 800 m;

(3) 若所有可用实体停车场均无空闲, 则分配至不规范停车资源(若有剩余容量);

(4) 否则拒绝需求。该策略为动态分配策略, 但不包括预约机制, 每个时间窗仅对当前时间窗内开始停车的需求进行分配。

实验采用 2.1 节中的生成停车需求集和资源参数, 评价指标包括预约停车需求满足率 E_1 、小时平均不规范停车量 E_2 、实体停车场时空资源利用率 Z_2 。停车需求满足率

$$E_1 = \frac{\sum_{d \in D} \left(\sum_{f \in F} x_{d,f} + y_{d,r} \right)}{|D|}$$

其中 $|D|$ 为预约停车需求总量。 E_1 为满足的停车需求量与提交预约的总需求量之比。小时平均不规范停车量

$$E_2 = \frac{\sum_{d \in D} \sum_{f \in F} y_{d,r}}{K}$$

自发停车分配与本文模型的分配方案效果如表 5 所示。本文模型的停车需求满足率达到了 99.71%, 能够有效满足停车需求。相比自发分配策略, 本文模型的分配方案使每小时的不规范停车量减少了 128 辆, 实体停车场时空资源利用率提升了 9.52%, 其中停车场 A 提升了 8.16%, 停车场 B 提升了 12.28%。结果表明, 模型通过更高效的资源分配显著减少了空闲车位的浪费, 也有效控制了不规范停车情况。

表 5 自发分配策略与本文模型分配效果对比¹⁾

评价指标	停车区整体		停车场 A		停车场 B	
	自发停车分配策略	本文模型	自发停车分配策略	本文模型	自发停车分配策略	本文模型
$E_1/\%$	99.94	99.71				
$E_2/(\text{辆} \cdot \text{h}^{-1})$	424.31	296.23				
$Z_2/\%$	83.84	93.36	87.61	95.77	76.20	88.48

1) 空格表示没有数值或数值无意义。

图 5 对比了本文模型和自发停车分配策略在不同时间窗内停车动态变化情况。其中, 图 5a 展示了两种分配方法的小时不规范停车量。由图可看出,

若采用自发停车分配策略, 日间时段(10:00—16:00)小时不规范停车量普遍维持在 500~600 辆之间; 而经过本文模型优化后, 这一数值显著下降至

400~500 辆之间。

图 5b 展示了停车场 A 和 B 在 2 种分配方法下的车位占用率,停车场 A 在自发停车分配策略下的车位占用率已处于较为合理的水平,小时车位占用率普遍高于 85%。经本文模型优化后,停车场 A 的车位资源得到了更加充分的利用,其小时车位占用率稳定保持在 93% 以上。相比之下,停车场 B 在自发停车分配策略下的车位占用率相对较低,小时车位占用率普遍低于 80%。经本文模型优化后,停车场 B 的车位占用率得到了显著提升,尤其是在日间时段(10:00—16:00),优化后的小时车位占用率基本维持在 90% 以上。

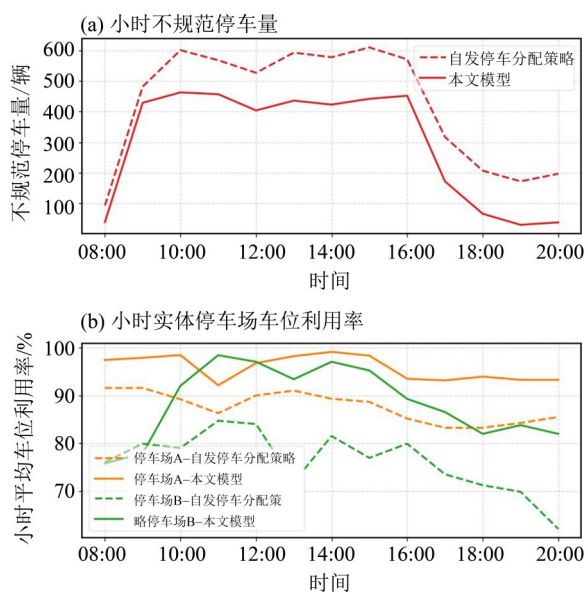


图 5 自发停车分配与本文模型的小时动态分配性能

Fig. 5 Hourly allocation performance of spontaneous strategy and proposed model in this paper

2.2.2 灵敏度分析 本节通过调整原始需求集的规模(-10%、+10%、+20%、+30%)生成 4 种情景,分析需求波动对模型性能的影响。需求调整方法分为:(1)需求减少:从原始需求集中,对于每个时间窗,随机删除特定比例的在该时间窗开始停车的需求;(2)需求增加:在原始需求基础上,对

于每个时间窗,增加真实停车时长分布特定比例的在该时间窗开始停车的增量需求。

实验采用与 2.1 节的资源参数与算法配置,实验结果表明,在需求处于基准规模 $\pm 10\%$ 的范围内时,本文模型和自发停车分配策略的结果均在可接受区间。相比自发策略,本文模型在控制不规范停车量上优势显著。当需求增加至 20%,自发停车分配策略的需求满足率为 95.10%,本文模型则为 94.40%,降低了 0.70%。但在不规范停车量方面,本文模型仅 328 辆/h,大幅低于自发策略的 451 辆/h,这表明模型能以轻微降低需求满足率为代价,有效改善不规范停车状况。当需求超载至 30%,受停车区资源所限,两种分配策略效果均不理想。即便如此,本文模型的不规范停车量较自发停车分配策略低 25.2%,时空利用率则高出 3.56%,凸显了模型在资源紧张场景下的相对优势。在需求 $\pm 20\%$ 的波动范围内,本文模型的不规范停车量小于 330 辆/h,时空利用率大于 88%,具备作为常态化停车管理工具的潜力。

3 结 语

本文所提模型在基本满足预约停车需求的同时,能够有效提升实体停车场停车资源的利用率。同时,结合动态分配策略模型能够实时调整停车需求分配,优化停车资源的利用,但仍存在改进空间。首先,尽管模型考虑了不规范停车资源,但对不规范停车行为的进一步细化建模(如不规范停车资源的具体分布)仍较为简单。其次,模型假设了停车需求完全遵循提交的预约时间及停车持续时长,未考虑个体需求的变动或临时性取消情况,这可能在实际应用中影响分配的灵活性。最后,尽管灵敏度分析表明模型具有较强的鲁棒性,但在面对极端需求波动或停车资源极度紧张的情况下,模型的表现仍可能受到限制。因此,未来计划进一步完善模型的动态适应能力,并探索模型在多个城市区域下的适应性,进一步提高其普适性和实际应用价值。

参考文献:

戴冀峰,冉越,孙展,等,2021.基于泊位使用特性的停车共享策略方法[J].科学技术与工程,21(27):11820-11827.
公安部交通管理局,2025.全国机动车保有量达 4.53 亿辆[EB/OL].(2025-01-18)[2025-03-01].[https://www.](https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c9939035/content.html)

[mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c9939035/content.html](https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c9939035/content.html).
何胜学,马思涵,程朝中,等,2021.无人驾驶条件下共享单车匹配模型及算法[J].交通运输系统工程与信息,21(2):99-105.
宁尚彬,2023.预约模式下共享停车位动态分配优化研究

- [D].北京:北京交通大学.
- 邵欣然,2021.基于共享平台的私人闲置车位与需求者的匹配方法研究[D].沈阳:东北大学.
- 唐秋生,林琳,张杰,2020.居住区错时错位泊位共享优化模型研究[J].交通科技与经济,22(1):1-5.
- 王韩麒,2021.时间窗约束下的共享停车泊位动态分配模型[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),45(2):253-258.
- 王健,付兴胜,胡晓伟,等,2019.考虑心理潜变量的居住区共享泊位停车选择行为分析[J].大连交通大学学报,40(4):1-5+12.
- 向鹏成,高璐,贾富源,2024.技术与制度协同演化与我国交通运输治理能力现代化—基于纵向案例研究[J].北京交通大学学报(社会科学版),23(1):96-104.
- 姚恩建,张正超,张嘉霖,等,2017.居住区共享泊位资源优化配置模型及算法[J].交通运输系统工程与信息,17(2):160-167.
- 余志,黄敏,何兆成,2022.道路交通信息物理系统(TCPS)概述[EB/OL].(2022-05-18)[2025-03-09].<https://www.openits.cn/news/821.jhtml>.
- 袁泉,陈小鸿,2020.15分钟社区生活圈停车治理与公共服务提升方案探究[J].交通与港航,7(5):29-36.
- 郑硕,2024.区域共享停车泊位分配的动静态组合模型研究[D].大连:大连交通大学.
- CHOU S Y, DEWABHARATA A, ZULVIA F E, 2021. Dynamic space allocation based on internal demand for optimizing release of shared parking [J]. Sensors, 22(1):235.
- DAVE S M, JOSHI G J, RAVINDER K, et al, 2019. Data monitoring for the assessment of on-street parking demand in CBD areas of developing countries [J]. Transp Res A-Pol, 126: 152-171.
- JIANG B, FAN Z P, 2020. Optimal allocation of shared parking slots considering parking unpunctuality under a platform-based management approach [J]. Transp Res E-Log, 142(1):102062.
- KONG X, XU S X, CHENG M, et al, 2018. IoT-enabled parking space sharing and allocation mechanisms [J]. IEEE T Autom Sci Eng, 15: 1654-1664.
- LI X, LIU X, WANG X, et al, 2021. Mathematical modeling and heuristic approaches to optimize shared parking resources: A case study of Beijing, China [J]. Transp Res Interdiscip Perspect, 9: 100246.
- LIU J, ZHANG X, LI Y, 2022. Layout optimization for shared parking spaces considering shared parking walking time and parking fee [J]. Sustainability, 14(7): 2345-2362.
- SHOUP D C, 2006. Cruising for parking [J]. Transp Policy, 13(6): 479-486.
- WANG L, ZHANG X, LIU J, 2020. A review on shared parking and its allocation [J]. Transp Res A-Pol, 133: 1-15.
- XIE M, LIN S, WU Z, et al, 2023. Optimal allocation and adjustment mechanism of shared parking slots considering combined parking resources [J]. Transp Lett, 15(7):730-741.
- ZHANG X Y, LIN S, WU Z, et al, 2023. Optimal allocation and adjustment mechanism of shared parking slots considering combined parking resources [J]. J Int Transp Sys, 27(5): 606-620.

(责任编辑 王海蓉)