

须俊铭, 梁士栋, 吴超腾, 等. 动态停车增容设计与交通组织协同优化研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(12): 36-45.  
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24073001

## 动态停车增容设计与交通组织协同优化研究

须俊铭<sup>1</sup>, 梁士栋<sup>1</sup>, 吴超腾<sup>2</sup>, 梁 桢<sup>1</sup>, 何胜学<sup>1</sup>

(1 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2 上海电科智能系统股份有限公司, 上海 200063)

**摘要:** 针对快速增长的小区停车需求, 提出了一种基于交通组织优化的小区动态停车位增容设计。首先对多线路单服务台排队论模型的相应公式进行推导, 在此基础上量化每个交叉路口的冲突强度, 随后建立停车位数量与小区内部交叉口冲突强度的目标函数。以新增停车位数量最大化、小区内部交叉口冲突强度最小化为目的, 在增加小区内部停车位数量的同时, 确保小区内外的可达性。不仅如此, 还通过仿真实验验证了优化小区内部路网模型的准确性, 在实例分析中发现此设计可以满足小区内外车辆的可行性的情况下, 优化得到对小区内部交通流影响最小且使小区内部停车位数量最多的道路通行路网。

**关键词:** 城市交通; 动态停车增容; 冲突强度; 场站停车问题; 交通组织优化; 最短路问题

中图分类号: U491 文献标志码: A 文章编号: 2095-2163(2024)12-0036-10

### Research on dynamic parking capacity expansion design and collaborative optimization of traffic organization in residential areas

XU Junming<sup>1</sup>, LIANG Shidong<sup>1</sup>, WU Chaoteng<sup>2</sup>, LIANG Zhen<sup>1</sup>, HE Shengxue<sup>1</sup>

(1 Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2 Shanghai Electric Science & Technology Intelligent Systems Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

**Abstract:** Addressing the rapidly increasing demand for parking spaces in residential areas, a dynamic parking capacity expansion design based on traffic organization optimization is proposed. Firstly, the corresponding formulas of the multi-line single-server queuing theory model are derived. Based on this, the conflict intensity of each intersection is quantified, and then an objective function is established between the number of parking spaces and the conflict intensity of intersections within the residential area. With the aim of maximizing the number of newly added parking spaces and minimizing the conflict intensity of intersections within the residential area, the design ensures the accessibility of both inside and outside the community while increasing the number of parking spaces within the community. Furthermore, simulation experiments are conducted to verify the accuracy of the optimized internal road network model within the residential area. It is found in the case study that this design can meet the traffic accessibility of vehicles inside and outside the residential area, while optimizing the road network to minimize the impact on internal traffic flow and maximize the number of parking spaces within the community.

**Key words:** urban traffic; dynamic parking capacity expansion; conflict intensity; residential parking issues; traffic organization optimization; shortest path problem

## 0 引言

随着汽车保有量的升高,“停车难”是目前城市场站中普遍面临的核心问题。然而,目前大部分场站受到土地资源、停车需求、道路状况等因素的限

制,对于利用可挖掘停车位仍存在较为明显的空白,而且基本是静态停车扩容。基于上述背景,本文在对场站内部交通组织影响最小的基础上,对停车位进行动态扩容,以解决在停车高峰车位不足的问题。在上述汽车保有量持续增长的背景下,场站内

**基金项目:** 教育部人文社会科学研究一般项目(23YJCZH120)。

**作者简介:** 须俊铭(2004—),男,本科生,主要研究方向:交通运输工程,交通流理论;吴超腾(1982—),男,博士研究生,主要研究方向:交通大数据;梁 桢(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:应急管理,交通管理优化;何胜学(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向:交通运输规划与管理。

**通信作者:** 梁士栋(1990—),男,博士,副教授,主要研究方向:交通管理与控制。Email:sdliang@hotmail.com。

收稿日期: 2024-07-30

部急需挖潜新的停车位以迎合巨大的停车需求。“停车难”作为热点问题,研究者对此进行了较为广泛深入的研究。

在停车优化方面,文献[1]基于路段停车指标特性及需求特点,总结了不同时段停车规律。文献[2]基于平面交叉口的交通组织,采用通行能力和车辆延误等指标进行评价分析。文献[3]通过交通组织优化设计,一定程度上降低交叉口的平均延误,提高其通行能力。文献[4]从道路负荷度、车辆绕行及路侧停车需求出发,为城市中心区域单行交通提供理论支持。文献[5]提出了一种有效路径的定向层次空间搜索算法,可与各类交通分配模型结合。文献[6]分析了适应智能交通系统(ITS)的几种车位检测方法的优缺点,提出了一种先进惠的路侧停车管理系统方案。文献[7]提出一种合理定义路边停车规模,使交通系统的整体效益在 CCA 中达到最佳的模型。文献[8]通过构建单向双车道元胞自动机模型以探究路内停车位供求关系以及停车便利性对路段通行能力的影响。

在量化交通系统的冲突强度方面,文献[9]建立了交叉口的通行效率模型。从交通流、冲突点及整个交叉口分别建立了冲突强度模型。文献[10]建立了不同构型分布的行人与机动车交通冲突概率模型以量化道路交叉口机动车与行人的交通冲突概率模型。文献[11]使用交通冲突评估指数确定碰撞时间(TTC),并通过交通事故的严重程度来量化冲突的权重,确定合并区域每小时交通冲突的数量。文献[12]建立交叉口无冲突交通流组织优化双层规划模型,采用遗传算法对其进行求解,验证了模型与算法的有效性。文献[13]建立了基于平行式路边停车的路段通行能力模型,并通过公式推导构建了车辆进出泊位对通行能力的修正系数模型。文献[14]提出了共享空间模拟期间维护的冲突模型,既可用于算法对冲突进行分类和识别,也可用于仿真后分析。

在提升停车效率方面,文献[15]基于小区开放后的交通量,对横断面、出入口等方面提出开放小区道路规划的建议。文献[16]基于在部分增广乘子法中嵌套 Frank-Wolfe 算法的思路设计了求解模型的算法,提供了新的建模分析思路。文献[17]给出了动态有效路径的明确定义,并提出了对应的一种有效算法。文献[18]通过对小区交通的监控和车辆的引导,有效提升小区的整体环境管理服务质量。文献[19]提出了一种基于无线通信技术的小区智

慧停车系统,以提高车位利用率。文献[20]设计并构建一套车位诱导与车位信息显示的智慧停车系统。文献[21]改进了基于繁忙状态道路因子的蚁群算法拓扑更新的启发式函数和策略,并采用上述算法搜索最优交通路径。文献[22]提出了一种基于停车需求预测的动态停车分配方法和预测控制方法。该方法有效提高了停车资源利用率和分布均匀性。文献[23]研究了早高峰时段的始发地-目的地(O/D)估计,有助于动态交通模拟分配分析。文献[24]提出基于时间窗约束的实时和固定时间共享停车位分配模型,前者反映供大于求时配置模式的优势,后者的系统资源利用效率最优。文献[25]提出了一种基于群体感知的停车引导系统的通用架构,使用封闭式解析解将停车位可用性建模为  $M/M/c/c$  排队问题。文献[26]提出了一种改进基于 AGV 的智能停车路径规划蚁群优化的回退策略。文献[27]提出一种基于改进蚁群算法的自适应停车引导模型,有助于求解停车最优路径和减少停车时间。文献[28]提供了一种自动路边停车控制和停车位可用性检测系统以及相应的方法。文献[29]提出了基于 Android 应用程序和物联网的智能停车管理系统(SPMS),使客户能够检查可用的停车位并预订停车位。文献[30]提出了一种多属性决策停车模型,以帮助停车场 PGIS 为驾驶员选择最优的停车位。文献[31]通过拉格朗日松弛算法,以最大限度地提高共享停车位的利用率。文献[32]通过避障和运动分析求解停车路径规划问题,并借助贝叶斯网络推断下一时刻的停车位数量与其可用性。文献[33]构建了最小化无人车移位成本的共享停车供需匹配模型,并设计模拟退火算法,使模型反映无人车的泊车特征。文献[34]提出一种基于动态车辆路径规划的协同预约机制,进行出行时间预测和空车位评估,以做出最优路径规划和车位选择。

现有研究主要关注于静态停车规划,以增加车位数或提升停车效率,但很少有研究涉及在停车资源基本接近饱和情况下的停车位增容。本研究旨在停车资源接近饱和的情况下对现有的道路资源进行有效利用,其具体实现方法如下:

传统的双向两车道设计会占用较多空间用于车辆行驶,而将其设为单行道,可以将原本用于车辆行驶的部分空间用于停车,以增加停车容量。基于静态停车规划无法缓解场站停车资源接近饱和情况下的车位不足问题,因此本文提出了动态停车增容与

交通组织协同优化的研究方法。该方法通过兼顾交通组织的条件下将场站内的双向两车道优化为单行道与停车道(如图1所示),以满足停车高峰时期的需求。在停车高峰期,通过此设计,对停车需求进行合理分配,以提供更多的停车位。而在非停车高峰期,恢复为双向两车道,可以更好地适应场站内交通

流量分布的变化。通过对交通流量及停车需求进行数据收集及分析,确定停车高峰时期的时间段和区域。在这些时间段和区域内,将双向两车道进行调整。同时,通过优化算法求解出最佳的场站内部道路通行路网,以最大程度地增加停车位并减少路网的冲突强度。



图1 车位扩容示意图

Fig. 1 Parking space expansion diagram

与现有研究相比,本文的主要贡献包括:

(1) 车位增容与道路交通组织进行协同,构造了综合考虑车位增容和交通通行效率的最优化模型。在牺牲部分通行效率的条件下,进行停车位动态增容不仅增加了停车位,还将优化带来的冲突强度最小化,从而实现局部交通流效率最优。

(2) 将场站内部的交通冲突强度用多线路单服务台的排队论进行量化描述。并将交叉口抽象为服务台,道路抽象为排队列,对交叉口的冲突强度进行公式化描述。

## 1 问题描述

以小区为例,在停车高峰将双向两车道优化为

一条单向道路与一条停车道虽然可以达成增加停车位的目的,但会为小区内部交通流增加冲突。

车辆泊位增容与道路组织协同示意图如图2所示。图2中,虽然通过优化双向道路为小区内部增加了7条停车道,但是为小区内部交通流增加了冲突,因为受车道方向的限制,大量车辆无法使用最短路径离开或进入小区,需要绕行,使交叉口的冲突强度增大,从而导致小区内车辆的通行效率降低。如果盲目地将双向两车道优化为一条单向道路与一条停车道,甚至可能会导致小区内部交通流瘫痪。所以需要平衡增加停车位与小区内部交通流冲突之间的关系,本文通过建立两者的模型以求解局部的最优情况。

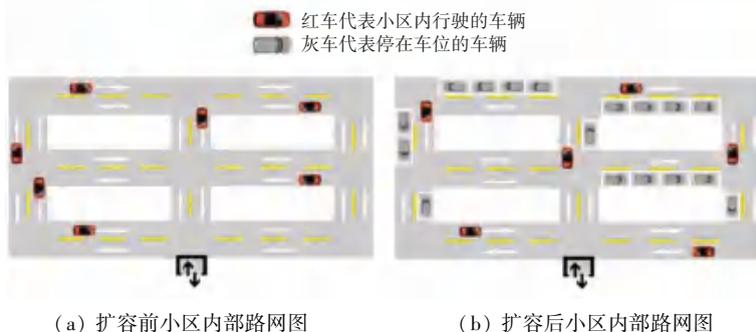


图2 车辆泊位增容与道路组织协同示意图

Fig. 2 Coordination diagram of vehicle parking capacity expansion and road organization

## 2 停车泊位与交通组织协同优化模型

### 2.1 假设条件

停车泊位与交通组织协同优化模型的构建基于以下几点假设:

(1) 小区内部车辆的平均行驶速度可由历史数据分析与实地考察测量得到。

(2) 小区停车需求基本不变。优化前收集的小区内部停车需求基本不发生变化,且不考虑社会车辆临时停车从而增加停车需求的情况。

(3) 小区内部存在较多尚未进行停车规划的双向两车道。

(4) 小区道路设备可以准确地表达车辆进入小区的高峰时段与车辆离开小区的高峰时段小区内部

道路的通行方向信息。

(5) 车辆均以优化后的通行路网中的最短路径离开或进入小区。

基于此, 研究给出的基本参变量列于表 1。

表 1 基本参变量

Table 1 Basic parameter variable

参变量	参数	含义
相关上下标参量	$i, j \in [1, m]$	场站内部交叉口
	$ij$	表示单向车道的方向为由 $i$ 通向 $j$
	$e \in \{1, n\}$	场站出入口
	$n$	系统内有 $n$ 辆车
建模的主要参数	$G$	场站路网图
	$Q_{ie}$	$i$ 到 $e$ 的可通行路线数
	$l_{ij}$	连接交叉口 $i$ 与 $j$ 道路的长度
	$N_{ij}$	连接交叉口 $i$ 与 $j$ 道路的新增停车位之和
	$T_{ij}$	判断参数, 当交叉口 $i$ 与交叉口 $j$ 相邻时, 值为 1; 反之, 则为 0
	$\lambda_{ij}$	单位时间内道路 $ij$ 的车辆平均到达率
自变量	$\mu_{ij}$	第 $i$ 个交叉口单位时间内道路 $ij$ 的平均服务率
	$\rho_{ij} = \lambda_{ij}/\mu_{ij}$	道路 $ij$ 的繁忙度
因变量	$D_{ij}$	道路 $ij$ 车辆平均等待时间
	$P_n$	系统中有 $n$ 辆车的概率
	$L_{ij}$	第 $ij$ 条道路的平均车辆数
	$W_{qi}$	第 $i$ 个交叉口的冲突强度
	$l_p$	一个停车位的长度
	$C$	指定参数
常量	$m$	场站内部交叉口总数
	$\alpha$	新增停车位权重
	$\beta$	交叉口冲突强度权重

## 2.2 协同优化模型

### 2.2.1 目标函数

利用前面给出的参变量和停车位与小区内部交通流冲突之间的关系, 构建满足使小区内部交通流冲突强度尽可能小的条件下使新增停车位最大化的目标函数如下:

$$Z = \max \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n N_{ij} - \sum_{i=1}^n W_{qi} \right) \quad (1)$$

式(1)中的目标函数  $Z$  可由通过优化双向车道而新增的所有停车位总和减去所有交叉口的冲突强度之和表示, 以在兼顾小区内部交通流冲突强度的基础上使新增停车位最大化。

式(1)中  $N_{ij}$  可由如下表达式计算得到:

$$N_{ij} = \begin{cases} l_{ij} T_{ij} / l_p, & \text{交叉口 } i \text{ 与交叉口 } j \text{ 相邻} \\ 0, & \text{交叉口 } i \text{ 与交叉口 } j \text{ 不相邻} \end{cases} \quad (2)$$

当交叉口  $i$  与交叉口  $j$  不相邻, 即无法通过一条

道路连接时, 判断参数  $T_{ij}$  取值为 0, 即优化后的新增停车位数为 0; 反之, 判断参数  $T_{ij}$  取值为 1, 新增停车位  $N_{ij}$  即为该道路的长度  $l_{ij}$  除以一个停车位的长度  $l_p$ 。

而对于冲突强度  $W_{qi}$ , 还需要对其进行量化, 在 2.2.3 节中给出了详细的证明过程, 所有交叉口的

冲突强度总和  $\sum_{i=1}^n W_{qi}$  可由下式来求得:

$$\sum_{i=1}^n W_{qi} = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_{j1} T_{j1}}{\mu_1 (\mu_1 - \sum_{j=1}^n \lambda_{j1} T_{j1})} + \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_{j2} T_{j2}}{\mu_2 (\mu_2 - \sum_{j=1}^n \lambda_{j2} T_{j2})} + \dots + \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_{jn} T_{jn}}{\mu_n (\mu_n - \sum_{j=1}^n \lambda_{jn} T_{jn})} \quad (3)$$

总交叉口冲突强度等于每个交叉口的冲突强度之和,每个交叉口的冲突强度等于该交叉口车辆到达率总和先后除以该交叉口的平均服务率、其与车辆到达率总和之差,其中当2个交叉口无法通过一条道路连接时,该道路判断参数值为0,当2个交叉口可以通过一条道路连接时,该道路的判断参数值为1。

约束条件:

$$Q_{ie} \geq 1, \text{ 且 } Q_{ei} \geq 1 \quad (4)$$

$$\forall W_{qi} < C \quad (5)$$

$$\mu_{ij} - \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} T_{ij} > 0 \quad (6)$$

式(4)表示优化后小区内部通行路网满足小区外部车辆可以抵达小区内部的任意点,且小区内部车辆可以顺利驶出小区的条件;式(5)表示小区内部任意一个交叉口的冲突强度不得大于指定参数C,以避免出现严重拥堵的交叉口;式(6)表示单位时间内交叉口的平均服务率需要大于每条道路单位时间内车辆的平均到达率之和,以确保每个交叉口的冲突强度值存在且大于零。

### 2.2.2 使用排队论模型量化冲突强度

为了求解式(3)中的交叉路口冲突强度  $W_{qi}$ , 需要引入更具体的模型来描述和分析小区内部的交通流情况。本文将通过推导多线路单服务台的排队论模型,以量化小区内部交通流的冲突强度。

多线路单服务台排队论模型对于解决这个问题具有重要意义。在停车高峰期间,车辆在交叉口处等待和通过的情况类似于排队论中的顾客在服务台前等待服务的场景。通过多线路单服务台排队论模型,可以将复杂的交通流情况简化为易于处理的数学问题。在排队论中,顾客的到达和离开时间、等待时间和服务时间等都可以被精确地量化。同样地,多线路单服务台排队论模型也可以分析车辆在交叉口的等待时间和冲突情况,从而得到交叉口的冲突强度。

首先建立双线路单服务台的排队论模型:将道路  $ij$  与  $jk$  的冲突区域看作一个服务台,同时服务2条道路上的车辆。在此情况下,将  $ij$  与  $jk$  两条道路上的车辆汇聚为一条车道,并使用  $M/M/1$  车辆排队模型。其中,冲突区域的定义为:在交叉路口2条存在冲突的车道的汇交区域(例如T形交叉口上与侧边进口道左转相冲突)。

### 2.2.3 双线路单服务台下排队论模型下的 $W_{qi}$

**定理1** 对于共有  $n$  条道路交汇而成的交叉口  $i$ , 其冲突强度可表示为:

$$W_{qi} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{ij}}{(\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij})^2}}{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}}} \quad (7)$$

现在使用  $M/M/1$  模型来描述这个过程。在  $M/M/1$  车辆排队系统中将一辆车辆到来看作“生”,一辆车服务结束离开看作“死”,设  $N(t)$  为任意时刻  $t$  排队系统的状态。

对于给定  $N(t) = n$ , 到下一辆车到达的间隔时间服从参数为  $\lambda_n (n = 0, 1, 2, \dots)$  的负指数分布;到下一辆车离开的间隔时间服从参数为  $\mu_n (n = 0, 1, 2, \dots)$  的负指数分布。

设  $P_n(t)$  为任意时刻  $t$  系统中有  $n$  辆车的概率,  $P_0$  为系统内有0辆车的概率。在  $M/M/1$  车辆排队系统运行很长一段时间后抵达平稳状态,对于任意的  $n$ ,  $P_n(t)$  满足以下状态平衡方程:

$$P_n(t) = P\{N(t) = n, n = 0, 1, 2, \dots\} = P_n = \rho^n (1 - \rho) \quad (8)$$

其中,  $N(t)$  为任意时刻  $t$  系统的状态。

对于只有2条道路的情况,可以将其视为双线路单服务台的排队论模型。主次道路的马尔可夫链如图3所示。主线道路作为优先通行的道路,根据经典排队论中  $M/M/1$  模型得到其相关参数的表达式,对于交叉口  $i$ , 由主线道路  $i1$  的车辆到达率  $\lambda_{i1}$  和服务台的服务效率  $\mu_{i1}$  构建出主线道路上出现  $n$  辆车的概率计算公式  $P'_n$ , 推得的公式为:

$$\begin{cases} P'_0 = 1 - \frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1}} \\ P'_n = \left(\frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1}}\right)^n \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1}}\right) \end{cases} \quad (9)$$

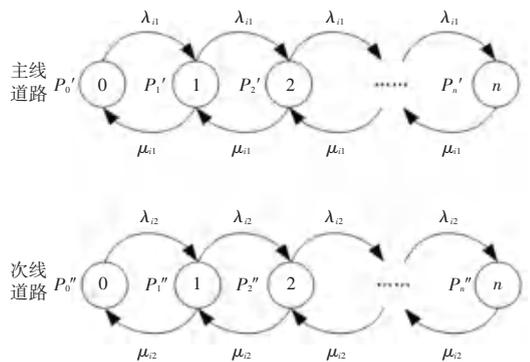


图3 生灭过程状态转换示意图

Fig. 3 State transition diagram of birth and death process

对于次优先道路  $i_2$ , 由于其受到主线道路交通状态的制约, 如果主线有排队车辆, 那么必须先放行直线车辆, 然后再放行次优先道路车辆。因此, 次优先道路上的释放效率要低于主线道路释放效率, 根据具体物理含义, 次优先道路的服务效率  $\mu_{i_2}$  计算公式为:

$$\mu_{i_2} = P'_0 \cdot \mu_{i_1} \quad (10)$$

次优先道路的到达率不受主线道路的影响,  $\lambda_{i_2}$  是一个可以调查得到的常数, 因此, 次优先道路上的排队车辆数出现的概率  $P_n^r$  定义如下:

$$\begin{aligned} P_0^r &= 1 - \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_2}} = 1 - \frac{\lambda_{i_2}}{P'_0 \cdot \mu_{i_2}} = 1 - \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_1} - \lambda_{i_1}} \\ P_n^r &= \left(\frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_2}}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_2}}\right) = \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_1} - \lambda_{i_1}} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_1} - \lambda_{i_1}}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

经典排队论公式为:

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n \quad (12)$$

可由式 (12) 分别计算出主线道路与次优先道路各自的排队长  $L_{i_1}$  与  $L_{i_2}$ , 相应公式为:

$$L_{i_1} = \sum_{n=0}^{\infty} n \left(\frac{\lambda_{i_1}}{\mu_{i_1}}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{i_1}}{\mu_{i_1}}\right) = \frac{\lambda_{i_1}}{\mu_{i_1} - \lambda_{i_1}} \quad (13)$$

$$L_{i_2} = \sum_{n=0}^{\infty} n \left(\frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_2}}\right)^n \left(1 - \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_2}}\right) = \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_1} - \lambda_{i_1} - \lambda_{i_2}} \quad (14)$$

具体推导过程如下:

对于主线道路与次优先道路各自的排列队长, 可看作求解幂级数  $n\rho_{i_1}^n$  的和函数, 其中,

$$\rho_{i_1} = \lambda_{i_1} / \mu_{i_1} \quad (15)$$

令和函数为  $S$ , 由引推得:

$$L_{i_1} = S(1 - \rho_{i_1}) \quad (16)$$

$$S = \rho_{i_1} + 2\rho_{i_1}^2 + \cdots + n\rho_{i_1}^n \quad (17)$$

$$\rho_{i_1} S = \rho_{i_1}^2 + 2\rho_{i_1}^3 + \cdots + n\rho_{i_1}^{n+1} \quad (18)$$

由式 (17) 减式 (18) 可得:

$$(1 - \rho_{i_1}) S = \rho_{i_1} + \rho_{i_1}^2 + \cdots + \rho_{i_1}^n - n\rho_{i_1}^{n+1} \quad (19)$$

由等比数列求和公式可得:

$$S \cdot (1 - \rho_{i_1}) = \frac{\rho_{i_1}^{n+1} - \rho_{i_1}}{\rho_{i_1} - 1} - n\rho_{i_1}^{n+1}$$

将等式两边同除  $1 - \rho_{i_1}$  可得:

$$S = \frac{\rho_{i_1}(1 - \rho_{i_1}^n)}{(\rho_{i_1} - 1)^2} - \frac{n\rho_{i_1}^{n+1}}{\rho_{i_1} - 1}, \rho_{i_1} \neq 1 \quad (20)$$

因  $\rho_{i_1} = \lambda_{i_1} / \mu_{i_1}$ , 且根据  $\lambda_{i_1}$  与  $\mu_{i_1}$  的定义容易推知  $0 < \lambda_{i_1} < \mu_{i_1}$ , 所以  $0 < \rho_{i_1} < 1$  恒成立, 由极限的

定义可知  $\rho_{i_1}^n, n\rho_{i_1}^{n+1} \sim 0$ , 保留式 (20) 的非零项可得:

$$S = \frac{\rho_{i_1}}{(\rho_{i_1} - 1)^2} \quad (21)$$

将式 (15) 与式 (21) 代入式 (16) 即可以得到  $L_{i_1}, L_{i_2}$  表达式:

$$L_{i_1} = \frac{\rho_{i_1}}{(1 - \rho_{i_1})^2} (1 - \rho_{i_1}) = \frac{\rho_{i_1}}{1 - \rho_{i_1}} = \frac{\lambda_{i_1}}{\mu_{i_1} - \lambda_{i_1}} \quad (22)$$

$$L_{i_2} = \frac{\rho_{i_2}}{1 - \rho_{i_2}} = \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_2} - \lambda_{i_2}} = \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_1} - \lambda_{i_1} - \lambda_{i_2}} \quad (23)$$

由经典排队论对于车辆平均等待时间的定义式可推得主线道路与次优先道路的平均延误计算式:

$$\begin{aligned} D &= 1 / (\mu - \lambda) \\ D_{i_1} &= 1 / (\mu_{i_1} - \lambda_{i_1}) \\ D_{i_2} &= 1 / (\mu_{i_2} - \lambda_{i_2}) = 1 / (\mu_{i_1} - \lambda_{i_1} - \lambda_{i_2}) \end{aligned} \quad (24)$$

最后再根据主线道路与次优先道路各自的平均延误  $D_{i_1}$  和  $D_{i_2}$ , 由下列公式计算整个系统的平均延误, 也就是车辆平均等待时间:

$$W_{qi} = \frac{L_{i_1} D_{i_1} + L_{i_2} D_{i_2}}{L_{i_1} + L_{i_2}} = \frac{\frac{\lambda_{i_1}}{(\mu_{i_1} - \lambda_{i_1})^2} + \frac{\lambda_{i_2}}{(\mu_{i_2} - \lambda_{i_2})^2}}{\frac{\lambda_{i_1}}{\mu_{i_1} - \lambda_{i_1}} + \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_2} - \lambda_{i_2}}} \quad (25)$$

#### 2.2.4 多线路单服务台下排队论模型下的 $W_{qi}$

将式 (25) 推广至多线路单服务台情况下, 即存在  $n$  条道路的情况下。对于交叉口  $i$ , 先对  $\mu_{in}$  的表达式进行推导:

$$\begin{aligned} \mu_{i_2} &= P'_0 \cdot \mu_{i_1} = \left(1 - \frac{\lambda_{i_1}}{\mu_{i_1}}\right) \cdot \mu_{i_1} = \mu_{i_1} - \lambda_{i_1} \\ \mu_{i_3} &= P'_0 \cdot \mu_{i_2} = \left(1 - \frac{\lambda_{i_2}}{\mu_{i_2}}\right) \cdot \mu_{i_2} = \mu_{i_2} - \lambda_{i_2} = \\ &\quad \mu_{i_1} - \lambda_{i_1} - \lambda_{i_2} \\ &\quad \vdots \\ \mu_{in} &= P'_0 \cdot \mu_i(n-1) = \left(1 - \frac{\lambda_i(n-1)}{\mu_i(n-1)}\right) \cdot \mu_i(n-1) = \\ &\quad \mu_i(n-1) - \lambda_i(n-1) T_i(n-1) = \\ &\quad \mu_{i_1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij} \end{aligned} \quad (26)$$

随后代入  $\mu_{in}$  的表达式易得  $L_{in}, D_{in}$  的数学表达

式可分别表示为:

$$L_{in} = \frac{\lambda_{in}}{\mu_{in}} \xrightarrow{\mu_{in} = \mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}} \frac{\lambda_{in}}{\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}} \quad (27)$$

$$D_{in} = \frac{1}{\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}} \quad (28)$$

最终可以得到在  $n$  条道路情况下交叉口  $i$  的冲突强度  $W_{qi}$  表达式:

$$W_{qi} = \frac{\sum_{j=1}^n L_{ij} D_{ij}}{\sum_{j=1}^n L_{ij}} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{ij}}{(\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij})^2}}{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}}} \quad (29)$$

### 3 求解算法

#### 3.1 算法概述

小区动态停车扩容与交通组织协同优化问题旨在最大程度地增加停车位并减少小区内部路网的冲突强度。这是一个多目标优化问题,遗传算法已被认为是最适合于多目标优化的求解算法。因此本文使用遗传算法来对其模型进行求解。

遗传算法的寻优过程是通过将问题的解编码成染色体后对染色体种群进行选择、交叉和变异等遗传进化操作来完成的。在该问题中,本文以路段是否通行来作为变量进行编码,每个路段由 2 个基因组成,当基因均为 1 时表示该路段双向通行,当基因均为 0 表示该路段不通行,当 2 个基因不同时,则表示该路段为单向道并基因 1 为路段的方向。在适应度函数中对 3 个部分进行考虑,分别是所布设的车位数最多、冲突强度最少以及路网中每条道路流量与其容量的比值。遗传操作则利用轮盘赌选择法和精英保留策略的组合选择方式,利用个体的适应度函数值决定个体的选择概率,适应度函数值越大的个体被选中向下一代繁殖的概率越大,交换采用单点交换,变异操作采用单点变异(0 变异为 1,1 变异为 0),交叉与变异操作后,生成下一代新总群。为了更好地体现代码的逻辑,综上过程的算法伪代码描述如下。

#### 3.2 用于小区路网优化的遗传算法

Initialize  $G$ (初始化  $G$ (图)),  $start\_node$ (起始节点),  $end\_nodes$ (终点节点集合),  $gdf\_edges$ (边集

合),  $demand$ (需求量)

设置参数:  $\alpha, \beta, parking\_slot\_length$ (停车槽位长度),  $\mu$ (单位时间内道路的平均服务率)

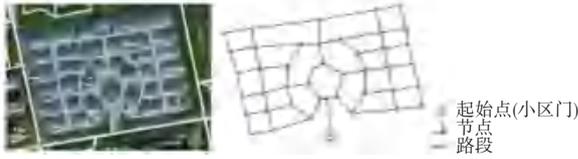
设置遗传算法参数:  $population\_size$ (种群大小),  $generations$ (迭代次数),  $mutation\_rate$ (变异率),  $crossover\_rate$ (交叉率)

1. For 每一代从 1 开始到总迭代代数 do
2. For 种群中的每一个个体 do
3. 修改后的图  $\leftarrow$  修改图 ( $G$ , 个体)
4. If 修改后的图是强连通的 then
5.  $\lambda \leftarrow$  计算  $\lambda$  值(修改图, 需求量)
6.  $W_{qi} \leftarrow$  计算  $W_{qi}$ ( $\lambda$  值,  $\mu$ )
7. 停车槽位  $\leftarrow$  计算停车槽位(修改图, 停车槽位长度)
8. 流量容量比  $\leftarrow$  计算流量容量比(修改后的图, 需求量)
9. 适应度  $\leftarrow \alpha \times$  停车槽位  $- \beta \times W_{qi}$
10. else
11. 适应度  $\leftarrow$  负无穷大
12. end If
13. If 适应度  $>$  最佳适应度 then
14. 最佳适应度  $\leftarrow$  适应度
15. 最佳个体  $\leftarrow$  个体
16. end If
17. end for
18. 父母个体  $\leftarrow$  锦标赛选择(种群)
19. 种群  $\leftarrow$  交叉和变异(父母个体, 交叉率, 变异率)
20. end for
21. 最佳个体  $\leftarrow$  选择最佳个体(种群)
22. If 修改图 ( $G$ , 最佳个体) 是强连通的 then
23. 总停车槽位  $\leftarrow$  计算停车槽位(修改图 ( $G$ , 最佳个体), 停车槽位长度)
24. else
25. 总停车槽位  $\leftarrow 0$
26. end If
27. return 最佳个体和总停车槽位

### 4 实例分析

本节将位于上海市浦东合庆的庆华花苑小区内部的真实交通网络作为实例进行相关实验分析,以验证所提算法的性能,小区路网情况如图 4(a) 所示。该算法采用 Python3.10 求解器进行编码。所有仿真实验都是在一台 Windows 11 机器上完成的,

配有英特尔 (R) 核心 (TM) AMD Ryzen 7 6800 CPU 3.2 GHz 和 16 GB 内存。每种方法的 CPU 时间限制都设置为 3 600 s。基于文献中有关遗传算法参数设置的先例, 将算法参数设置为: 种群规模  $N_{pop}$  为 100, 交叉率  $P_c$  为 0.8, 变异率  $P_m$  为 0.1, 最大迭代次数  $G_m$  为 4 000 次。



(a) 庆华花苑小区路网卫星图 (b) 庆华花苑小区路网拓扑图

图 4 小区路网卫星图与拓扑图

Fig. 4 Satellite map and topology diagram of residential area road network

为了方便路网数据的输入和计算, 研究将真实路网转化为 44 个节点、68 条路段的路网拓扑图, 并已知

表 2 路网流量实验数据表

Table 2 Experimental data table of road network traffic flow

全双向道路网总流量/(车辆·天 <sup>-1</sup> )					单行道配置路网总流量/(车辆·天 <sup>-1</sup> )				
实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5	实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5
68 704	68 704	68 704	68 704	68 704	88 552	81 856	85 520	93 392	82 448

单双车道流量结果如图 5 所示。由图 5 可以看出当小区路网全为双车道时路网的总流量为 68 704 辆/天, 但在进行单行道的配置之后路网的总流量有了显著的提升, 在 5 次实验中最低流量为 81 856 辆/天, 最高流量达到 93 392 辆/天, 均高于全为双车道的路网总流量 68 704 辆/天。由此可以看出, 在该路网中单行道的配置显示出了对比全双车道更优的流量管理能力, 单行道的配置更有效地利用了路网资源, 提高了整体的交通流量, 并减少了车辆在交叉路口的交汇, 通过分散交通流量来减少了交通拥堵, 从而提高了车辆的流动性和小区内部的总体容量。

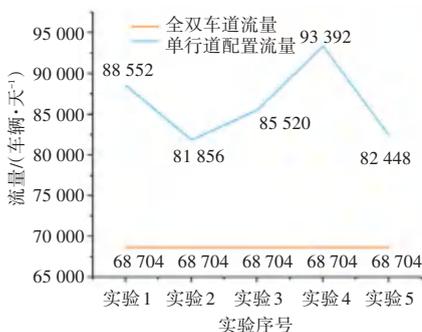


图 5 单双车道流量图

Fig. 5 Flow diagram of single and double lane road networks

所有车道的长度, 如图 4(b) 所示。在该路网中假设所有路段初始都为双向车道, 随机选取一条路段为单向道, 进行初始化处理。在此基础上将此拓扑路网作为实验的输入来进行下面实验的路网数据的仿真测试。

为了验证该模型通过动态调整路网中的单行道配置来减少交通拥堵并提高道路利用效率的有效性, 选取路网中全为双向道路时路网的总流量以及单向车道配置下的路网总流量两组实验做对比, 通过比较 2 组实验路网的总交通流量表现, 展示单行道配置在缓解交通压力方面的有效性。

为了避免遗传算法的随机性对实验的影响, 将单行道配置下的路网进行了 5 次实验并记录其实验结果, 2 组实验的节点需求次数均为 3 次进小区、5 次出小区, 即模拟节点的需求为 3 辆车进入小区、5 辆车离开小区, 其他参数设置均一致。实验结果见表 2。

为了进一步探究该模型的有效性, 通过每个节点车辆的进出需求次数来模拟早高峰期间小区路网单行道分布的情况, 即通过进入小区车辆数少, 离开小区的车辆数多来模拟早高峰。本文以每个节点的进出需求次数为变量设置实验模拟早高峰小区单行道配置情况, 同时实验也通过 QGIS 软件 (QGIS 是一个用户界面友好的桌面地理信息系统) 来对小区路网的流量分布和节点冲突强度进行了相应的记录和对比。

本文分别对节点的冲突强度和路段的流量做了可视化处理。在节点冲突分布情况方面, 节点颜色越深代表冲突强度越大, 如图 6 所示, 单行道配置前后中心节点的冲突强度都是所有节点中最高的, 表明中心区域是交通流量汇聚的关键点。通过将图 6 (a) 与图 6 (b) 进行对比, 可以发现在早高峰时段进行单行道配置, 会使作为车辆离开小区的主要通道的中心区域的冲突强度增加, 但使周边道路的节点冲突明显下降, 所以可以将周边道路进行单行道配置以增加停车高峰期小区的车位供给。

在流量分布方面, 路段的颜色越深代表该路段的流量越大, 如图 7 所示, 早高峰期间进行单行道配置可以将车流量由分散在小区道路集中至中心区域以及周边的主要道路, 大大减少了周边道路的车流

量,可在停车高峰期对车流量较低的道路进行单行道配置以实现小区内部停车动态扩容的目标。

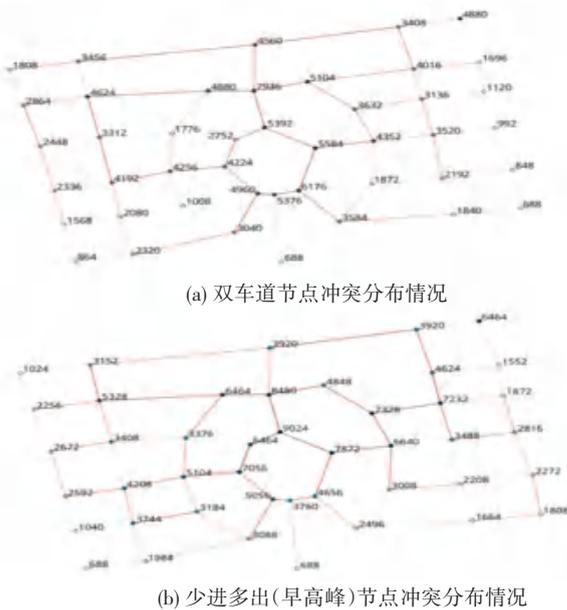


图 6 早高峰单行道配置前后节点冲突分布对比图

Fig. 6 Comparative chart of node conflict distribution before and after configuration of one-way streets during morning rush hour

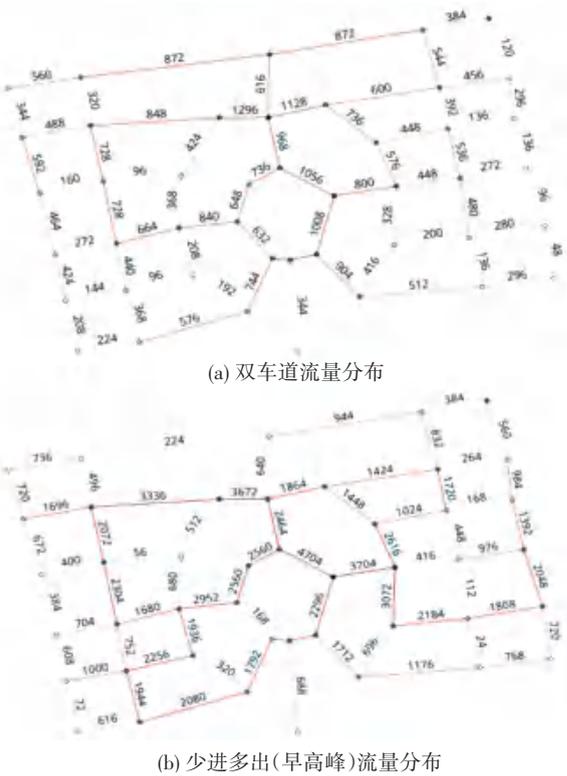


图 7 早晚高峰流量分布图

Fig. 7 Distribution map of morning and evening rush hour traffic flow

在本文中,采用遗传算法对小区路网进行停车位的设置以及单行道的布设,为了验证算法的稳定

性评估算法的收敛速度,本文设置染色体交叉率为 0.8,变异概率为 0.1,种群 100,最大迭代次数为 5 000,在此设置下进行了多次实验,并选取其中的一次生成迭代结果如图 8 所示。

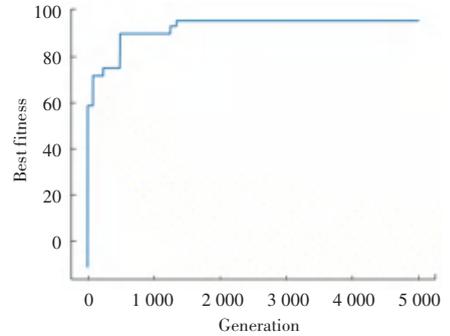


图 8 遗传算法迭代图

Fig. 8 Genetic algorithm iteration chart

从图 8 中可以看出,适应度函数的值随着代数的增加而增加,这表明算法随着时间的推移而逐渐找到更优的路网配置。初始阶段,适应度函数的值迅速增加,这表明算法探索了大量不同的解决方案,并快速排除了那些性能较差的基因序列。随着迭代的继续,适应度的提升速度减慢,进入一个平稳状态,在 1 500 次迭代后算法走势趋于稳定,表明种群已经成熟,算法收敛性较好。

当计算终止时,早高峰期间小区单行道配置的情况以及相对应的流量见图 9(标蓝路段为单行道)。从图 9 中可以观察到,单行道大多布设在车流量较低的路段,呈现中心少、四周多的分布趋势,并得到在此路网下的新增停车位数为 264 个。

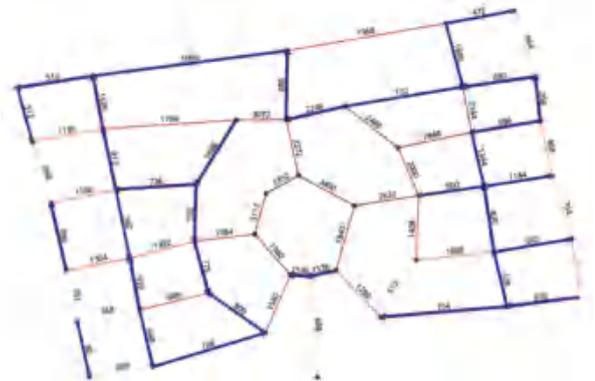


图 9 小区内部路网优化方案图

Fig. 9 Optimization scheme diagram of internal road network in residential area

### 5 结束语

本文建立了以小区新增停车位数以及交叉口总冲突强度之差最大为目标的协同优化模型,推导了

在多线路单服务台情况下的冲突强度表达式,以量化交叉口的延误。通过遗传算法对小区路网进行停车位的设置以及单行道的布设,发现了单行道大多布设在车流量较低的路段,呈现中心少四周多的分布趋势,体现本文可以在实现对小区内部交通组织影响最小的基础上,对内部停车位进行最大化扩容,并生成小区内部路网的优化方案图。但是,本文在研究中没有考虑车辆在停车过程中为道路所带来的延误,未来可围绕路侧停车对道路整体延误的影响进行研究。

## 参考文献

- [1] 丰勋,陈光,周迅,等. 城市路边停车交通组织优化设计—以蚌埠市大学城区汤和路为例[J]. 工业 A, 2023(4):62-65.
- [2] 尚雨昕,李思杰,刘志钢. 平面交叉口交通组织优化设计及仿真评价[J]. 上海工程技术大学学报, 2022, 36(2):159-167.
- [3] 姬利娜,晏永廷,晏子. 城市道路平面交叉口交通组织优化设计[J]. 道路交通与安全, 2022, 22(1):60-66.
- [4] 曹文娟,贾顺平,邵文. 考虑路侧停车需求的城市办公区单行交通组织优化[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5):2082-2087.
- [5] 何胜学,范炳全. 基于定向层次空间推理的有效路径树搜索算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(2):66-71.
- [6] 王泽河,吕安涛,郑长青,等. ITS 中路侧停车管理系统方案的研究[J]. 林业机械与木工设备, 2005, 33(4):23-26.
- [7] PEI Yulong, YANG Zhongliang. Benefit analysis of curb parking and study on its optimization model[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 10(3):311-314.
- [8] 沈金星,蒋文凤,曹惠敏,等. 基于元胞自动机的路内停车对路段通行能力的影响研究[J]. 交通信息与安全, 2023, 41(4):132-142.
- [9] 何雅琴,李杰. 基于路边停车的路段通行能力研究[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(1):44-47.
- [10] 沈家军,王炜. 道路交叉口通行效率与冲突强度关系模型研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(8):91-95.
- [11] 谢爱磊. 道路交叉口机动车与行人冲突概率模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(1):152-156.
- [12] 陈群,刘嘉晖. 区域交通微循环支线网络交叉口无冲突交通流组织优化[J]. 公路与汽运, 2020(6):19-23.
- [13] SHEN Li, XIANG Qiaojun, MA Yongfeng, et al. Crash risk prediction modeling based on the traffic conflict technique and a microscopic simulation for freeway interchange merging areas[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2016, 13(11):1157.
- [14] HOSSAIN S, JOHORA F P, MÜLLER J, et al. A conceptual model of conflicts in shared spaces[C]//Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Industrial and Business Engineering (ICIBE 2020). New York, USA: Association for Computing Machinery, 2020: 228-235.
- [15] 崔洪军,孙婉茹,朱敏清,等. 基于畅通可靠性的开放小区交通流分配及优化决策[J]. 运筹与管理, 2022, 31(2):8-14.
- [16] 何胜学,高蕾. 停车需求分布的双层规划模型及算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(1):83-88.
- [17] 何胜学,范炳全. 动态交通路网中有效路径的确定方法[J]. 交通运输工程与信息学报, 2006, 4(1):11-23.
- [18] 满益彬. 基于无线通信的小区智能停车系统应用[J]. 市场周刊·理论版, 2020(26):190.
- [19] 康泽威,周堂,曾丽萍. 基于无线通信技术的现代化小区智慧停车系统的研究[J]. 仪表技术, 2020(11):39-41.
- [20] 崔立军. 居住小区智慧停车系统构建思路与实现研究[J]. 交通科技与管理, 2021(21):1-2.
- [21] HUANG Yi, XIAO Fang, SHEN Yiming. Parking guidance system based on intelligent terminal [C]// IEEE International Conference on Cloud Computing & Intelligence Systems. Piscataway, NJ:IEEE, 2014:565-570.
- [22] ZHAO Z, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Neural-network-based dynamic distribution model of parking space under sharing and non-sharing modes[J]. Sustainability, 2020, 12(12):4864.
- [23] BUSTILLOS B I, SHELTON J, CHIU Y C. Urban university campus transportation and parking planning through a dynamic traffic simulation and assignment approach [J]. Transportation Planning and Technology, 2011, 34(2):177-197.
- [24] YANG Y, YANG B, YUAN Z, et al. Modelling and comparing two modes of sharing parking spots at residential area: Real-time and fixed-time allocation[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2023.
- [25] LI Bo, HOU Fen, DING Hongwei, et al. Community based parking: Finding and predicting available parking spaces based on the Internet of Things and crowdsensing [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 162:107755.
- [26] WANG Xianwei, SHI Hao, ZHANG Chao. Path planning for intelligent parking system based on improved ant colony optimization[J]. IEEE Access, 2020, 8:65267-65273.
- [27] YONG Yan, HANG Lei, PAN Liang. Design of adaptive parking guidance system based on improved ant colony algorithm [J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(3):80-82.
- [28] PATEROPOULOS C. System and method for providing automatic on-street parking control and unoccupied parking spot availability detection[P]. US:201916439373, 2019-12-19.
- [29] ELSONBATY A, SHAMS M. The smart parking management system [J]. International Journal of Computer Science and Information Technology, 2020, 12(4):55-66.
- [30] CHEN Mingkai, HU Chao, CHANG Tianhai. The research on optimal parking space choice model in parking lots [C]// Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Computer Research and Development. Piscataway, NJ:IEEE, 2021:93-97.
- [31] TANG Zhenpeng, JIANG Yanping, YANG Feifei. An efficient Lagrangian relaxation algorithm for the shared parking problem [J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 176:108860.
- [32] XUE J, WANG J, YI J, et al. Optimal parking path planning and parking space selection based on the entropy power method and bayesian network: A case study in an indoor parking lot [J]. Sustainability, 2023, 15(11):8450.
- [33] HE Shengxue, MA Sihan, CHENG Chaozhong, et al. Shared parking supply - demand matching model and algorithm with autonomous vehicles [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(4):99-105.
- [34] XIAO Y, CAI Z, LI J, et al. A Collaborative reservation mechanism of multiple parking lots based on dynamic vehicle path planning[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021:8876069.