

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0916

基于 NSGA-II算法的自动驾驶停车泊位优化模型

于红媚¹, 叶晓飞^{1*}, 汪义路¹, 陈峻², 闫星辰³, 王涛⁴

(1.宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2.东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096;

3.南京林业大学 汽车与交通学院, 江苏 南京 210037; 4.桂林电子科技大学 建工与交通学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 完全自动驾驶车辆将具有自动泊车功能, 自主泊车技术可实现多排布局的高密度、集约化停车布局, 将彻底改变双排多通道的传统停车布局方式。然而, 在释放被阻塞车辆时不可避免产生额外的移动和拥堵。为了明晰多排布局产生排队阻塞和额外移动次数与空间利用率提升的悖反规律, 综合考虑停车场的几何属性、移动策略、需求特征等设计要素, 通过车辆协同让道规则释放阻塞车辆, 以泊位数量最大和移动次数最少为双重目标, 构建了自动驾驶条件下多排布局方式停车泊位优化模型, 设计了带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解, 通过数值实验提出了停车设施的最佳区域和布局, 同时还进行了不同移动策略的敏感性分析。结果表明, 在不降低停车位利用率的前提下, 基于就近原则的移动策略大大减少了预期移动次数。

关键词: 交通工程; 泊位优化; NSGA-II; 自动驾驶车辆; 排队论; 停车

中图分类号: U491.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 03-0057-13

自动驾驶技术是《交通强国建设纲要》《交通领域科技创新中长期发展规划纲要(2021—2035年)》的重要突破性内容, 已然上升到国家战略规划层面, 将引发交通运输系统的深刻变革, 进而改变未来交通基础设施、土地利用、城市空间布局等规划、建设与管理^[1]。其中, 停车是自动驾驶车辆(Autonomous Vehicle, AV)出行链的重要环节, 停车空间需求和设施布局设计均将因自主泊车功能而重塑^[2]。完全自动驾驶车辆(Level 5)在送达出行者后, 可自动搜寻特定停车场的特定泊位停放。可见: (1)AV 自组织实现多排布局停放能力, 根本上改变人工驾驶预留多通道的双排布局形式, 大大节约了停车场占地面积; (2)AV 减少停车设施中不必要的预留空间, 如开门间隙、乘客上下车空间、行人空间等, 泊位设计时可以减小泊位宽度和泊位间

隔, 进一步提高停车空间利用率; (3)AV 车辆间、车辆与停车设施间的通信协同性, 可根据不同停放时长和停放规则的要求, 选择不同位置的停车泊位, 提高泊位利用率。多排布局方式能够最大程度提高停车设施空间利用率, 但是难以避免产生 AV 排队等待和增加额外移动次数。如何平衡排队等待、移动次数与空间利用率的悖反收益, 是自动驾驶环境下停车泊位设计与优化亟需解决的问题。

已有研究表明, 人工驾驶停车泊位设计首要考虑了停车泊位尺寸^[3-4]、车辆转弯半径^[5-6]、停车角度^[7-8]等几何要素对停车空间利用率的影响, 以此制定了停车场设计标准与规范。关于自动驾驶的停车问题, 一些学者进行了大量研究。Mei 等^[9]通过仿真模型对停车收费和预约机制进行了综合效益分析和比较, 在目前的低停车费标准下, 停车

收稿日期: 2023-09-18.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省高校基本科研业务费项目(SJLY2023009); 国家“111”跨海大桥安全与智能运营研究中心项目(D21013); 国家自然科学基金(71971059, 52262047, 52302388, 52272334, 61963011); 广西科研基地和人才专项研究项目(AD20159035); 桂林市重点研发计划(20210214-1); 柳州市重点研发计划(2022AAA0103)。

第一作者: 于红媚, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划与管理。E-mail: y17331526458@163.com

*通信作者: 叶晓飞, 博士/副教授, 主要研究方向: 交通运输规划与管理。E-mail: yexiaofei@nbu.edu.cn

预约机制可以快速有效地提高综合效益. Ye等^[10-11]总结了5种停车选择, 包括在路上巡泊、为其他乘客服务、周边停车、附近停车和返回原点. 出行时间、出行费用、停车费用、巡航费用、停车时间和交通排放是决定出行者选择共享自主车辆停车行为的关键因素. 为了解决寻找停车泊位的困难, 一些研究集中在对搜索行为和停车空间分配进行建模^[12-14]. 几何要素是自动驾驶停车泊位设计的重要内容, 其中, Ferreira等^[15]首先提出了高密度自动驾驶停车场的理念——通过设置多缓冲通道使AV按照顺时针或逆时针绕行的“前出后停、推陈出新”循环停放体系. Nunes等^[16]、D'Orey等^[17]进一步考虑不同的运行参数, 如单车停车空间、移动次数、行驶距离和车辆搜寻时间, 使停车容量提高了50%. Timpner等^[18]和Banzhaf等^[19]分别通过减少车道排数和设置垂直车道降低干扰车辆数, 允许车辆从车道两端驶离, 停车场容量分别提高了33%和25%. Nourinejad等^[20]通过使通道宽度随深度而变化, 以帮助容纳重新停放的车辆, 来获得最小的期望移车次数. 另外, Islam^[21]的研究中单个泊位平均面积可减少 2 m^2 , 较大幅度地节约了泊位空间.

现有布局方案实现了AV高密度泊车, 但在多排自组织停车场设计时期望空间利用率最大(泊位数量最多)的同时车辆移动次数尽可能少, 如何让车辆有序无损地完成这一移动过程是一难点, 同时不可避免要解决车辆移动时产生的阻塞排队问题, 这仍是现有设计未解决的难题. 因此, 本文综合考虑停车场的几何属性、移动策略及需求特征等设计要素, 以泊位数量最大和移动次数最少为双重目标, 构建了多排布局停车泊位优化模型, 寻求最优要素组合的泊位设计方案, 为自动驾驶停车设施泊位设计与优化提供理论方法.

1 自动驾驶停车泊位优化模型

1.1 自动驾驶停车泊位设计要素

停车场几何属性、停放方式和AV移动策略等都是影响停车设施空间利用率和泊位利用率的重要因素. 本文从这几方面出发, 重新定义自动驾驶停车泊位设计要素.

1.1.1 自动驾驶车辆停车设施几何属性

自动驾驶车辆停车场的几何属性包括停车场

的尺寸、泊位尺寸、各区域间通道、车辆排布方式以及停车角度. 考虑一个矩形的停车场, 如图1所示, 停车场长为 L , 宽为 W ; 停车位的长为 l , 宽为 w ; 共有 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 个停车区域, 每个区域均可南北双向垂直停车, 其中, 第 i 个区域的北向停车位行数为 x_i , 南向停车位行数为 y_i , 所有区域停车位的列数均为 z ; 第 $i-1$ 个区域与第 i 个区域之间通道的车道数为 α_i , 每个车道的宽度为 η ; 停车区域两侧的纵向宽度均为 C .

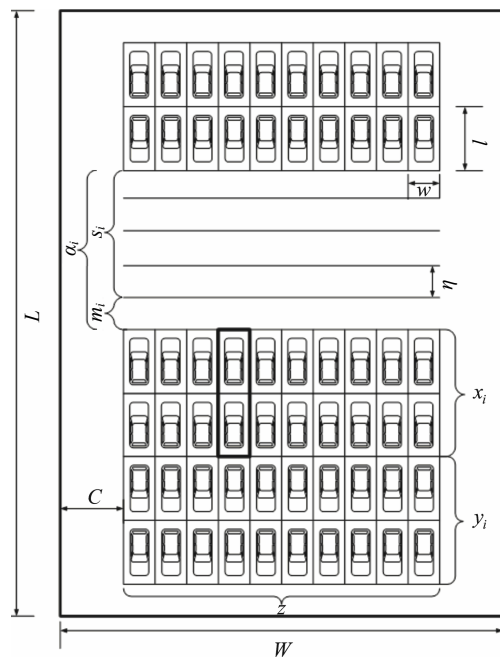


图1 停车场示意

自动驾驶停车场的通道主要包括两部分, 一部分是停车区域两侧用于车辆驶入驶出停车场的安全通道, 另一部分是各个停车区域之间的通道. 两侧通道设计只需满足车辆行驶的 necessary 车道宽度即可, 而停车区域之间的通道不单需要考虑车辆行驶所需宽度, 还需要考虑车辆最小转弯半径, 停车区域之间的通道用于车辆的驶入驶出和阻塞时车辆的移动和临时存储. 如图1所示, 第 $i-1$ 个区域与第 i 个区域之间的通道 α_i 由临时存储车辆车道 s_i ($s_i \geq 1$)和车辆出入车道 m_i 组成.

1.1.2 自动驾驶车辆停放方式

自动驾驶车辆停车场遵循先到先服务的原则, 即优先为先到达车辆寻找泊位. 自动驾驶停车场车辆停放方式可分为外排先停和内排先停. 外排先停是指车辆陆续到达停车区域时, 先到达的车

辆停在最外面一排, 当最外排泊位停满时, 若后面有新到达的车辆, 则最外排的车辆向内移动一行给新到达的车辆让出位置; 内排先停是指车辆陆续到达停车区域时, 先将最内排泊位停满, 停满后若有新到达车辆, 再将次内排停满. 两种停放方式如图 2、图 3 所示. 两种停放方式在驶入驶出停车泊位时均可采取前进式或后退式, 外排先停可产生更少的移动次数, 因此更适合作为自动驾驶车辆的停放方式.

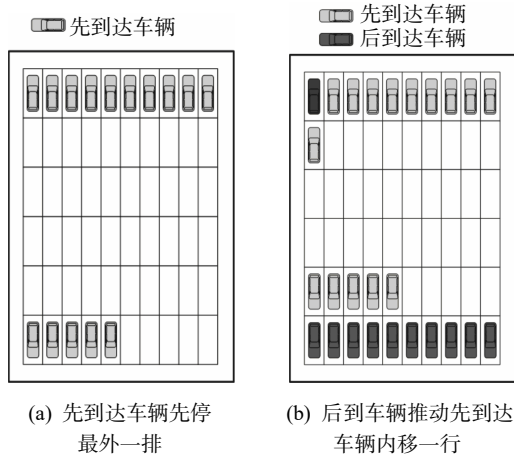


图 2 外排先停的停放方式

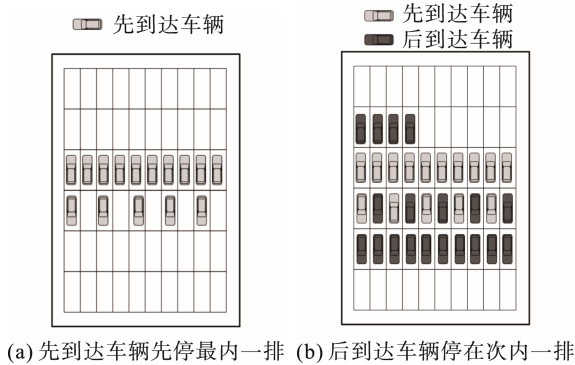


图 3 内排先停的停放方式

1.1.3 自动驾驶车辆移动策略

自动驾驶车辆停车时移动策略包括基于就近原则的移动策略(First Storage and Shortest Moving to outDistance, FSSMD)、基于存储和移动的移动策略(First Storage and Unspecified Direction Moving out, FSUDM)和基于环绕方式的移动策略(No Storage and Circulation of Moving out, NSCM).

基于就近原则的移动策略是指 AV 就近离开. 第 i 个区域左 $[y/2]$ 列被阻塞车辆从左侧离开停车

区域, 第 i 个区域右 $y-[y/2]$ 列被阻塞车辆从右侧离开停车区域. 如图 4 所示, 首先, 左 $[y/2]$ 列阻塞车辆移动至所在列的右侧通道, 以释放被阻塞车辆; 然后, 被阻塞车辆就近从左侧通道离开停车区域; 最后, 阻塞车辆返回停车区域, 右 $y-[y/2]$ 列同理. 基于就近原则的移动策略一方面可减少所需通道面积, 将更多的土地资源用于停车泊位, 另一方面通过最短路离开可减少车辆的移动次数.

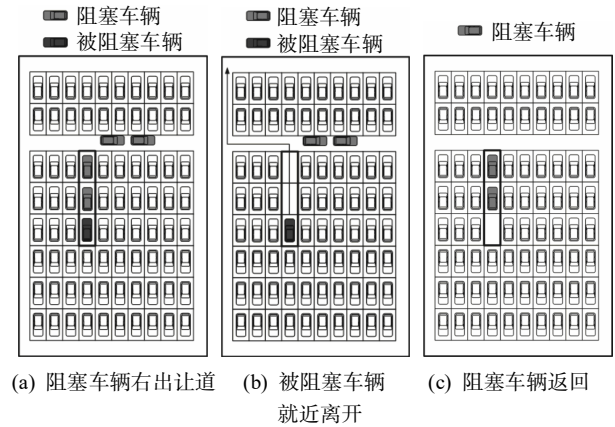


图 4 基于就近原则的移动策略

基于移动和存储的移动策略分 3 步实现车辆的移动. 如图 5 所示, 首先, 阻塞车辆必须先驶出停车区域, 移动到用于临时存储车辆的车道 s_i ($s_i \geq 1$), 以给被阻塞车辆让出通道; 其次, 被阻塞车辆通过车辆出入车道 m_i 安全离开停车区域; 最后, 阻塞车辆返回原来的停车区域.

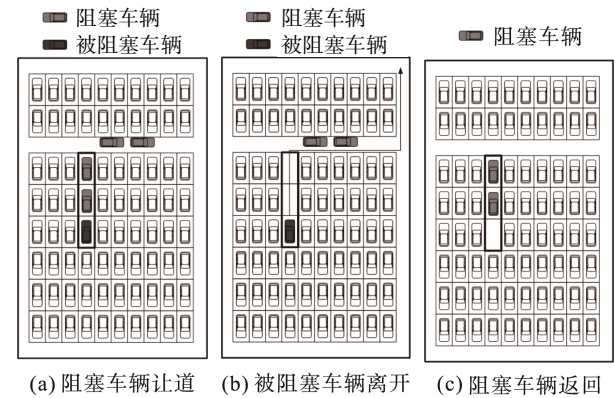


图 5 基于存储和移动的移动策略

基于环绕方式的移动策略通过设置缓冲区使车辆按照顺时针或逆时针方向从一个车道移动至另一个车道, 以“旋转木马”方式释放被阻塞车辆. 如图 6 所示, 6 号被阻塞的车辆想要离开停车区域,

必须让车辆按顺时针通过 1、6 列和缓冲区旋转, 当 7、8、9、10 号阻塞车辆旋转至第 6 列时, 6 号被阻塞车辆便可以离开停车区域.

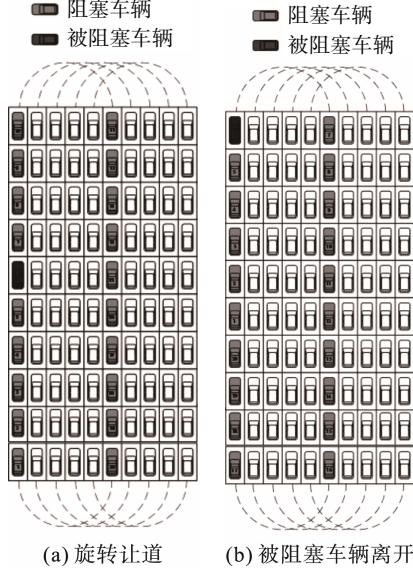


图 6 基于环绕方式的移动策略

1.2 通道约束和移动次数建模推导

推导 1 第 1 列所有行的车辆离开停车区域需满足 $(x_i - 1)l \leq \alpha_i(z_i - 1)w$.

由阻塞车辆长度不大于所在列另一侧区域间通道所能容纳车辆数, 可得:

第 1 列第 1 行车辆离开停车区域需满足 $0 \leq \alpha_i(z_i - 1)w$;

第 1 列第 2 行车辆离开停车区域需满足 $l \leq \alpha_i(z_i - 1)w$;

第 1 列第 3 行车辆离开停车区域需满足 $2l \leq \alpha_i(z_i - 1)w$;

.....

第 1 列第 x_i 行车辆离开停车区域需满足 $(x_i - 1)l \leq \alpha_i(z_i - 1)w$.

上述第 1 列第 1 行至第 x_i 行条件均需满足, 故 $\max[0, l, 2l, \dots, (x_i - 1)l] \leq \alpha_i(z_i - 1)w$,

即

$$(x_i - 1)l \leq \alpha_i(z_i - 1)w.$$

综上, 第 1 列所有行的车辆离开停车区域需满足 $(x_i - 1)l \leq \alpha_i(z_i - 1)w$.

推导 2 各行各列车辆离开停车区域需满足 $2x_i l - \alpha_i z w \leq 2l$.

第 1 列车辆离开停车区域需满足 $(x_i - 1)l \leq$

$$\alpha_i(z - 1)w;$$

第 2 列车辆离开停车区域需满足 $(x_i - 1)l \leq \alpha_i(z - 2)w$;

.....

第 $z/2$ 列车辆离开停车区域需满足 $(x_i - 1)l \leq \alpha_i(z - z/2)w$.

上述第 1 列至第 $z/2$ 列条件均需满足, 故

$$(x_i - 1)l \leq \min[\alpha_i(z - 1)w, \alpha_i(z - 2)w, \dots,$$

$$\alpha_i(z - z/2)w],$$

即

$$(x_i - 1)l \leq \alpha_i(z - \frac{z}{2})w \Rightarrow (x_i - 1)l \leq \alpha_i \frac{z}{2} w \Rightarrow$$

$$2(x_i - 1)l \leq \alpha_i z w.$$

综上, 各行各列车辆离开停车区域需满足 $2x_i l - \alpha_i z w \leq 2l$.

推导 3 车辆离开每栈的移动次数的数学期望 M_v 为 $M_v = v$.

如图 7 所示, 第 i 个停车区域北向每栈有 x_i 个停车泊位, 有 v 辆车停入该栈, 车辆 a 想要离开该栈, 前面的车辆 1 至 $a-1$ 需要先驶出让道, 待车辆 a 离开后, 再回到该栈中. 驶出该栈的移动次数为 $(a-1)+1=a$, 驶入该栈的移动次数为 $a-1$, 车辆 a 离开该栈需要的移动次数为 $a+(a-1)=2a-1$, 故车辆离开每栈的移动次数的数学期望为 $M_v = (1/v) \cdot \sum_{a=1}^v (2a-1) = (1/v) \cdot v[1+(2v-1)]/2 = v$.

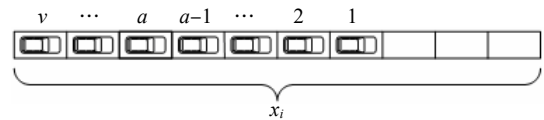


图 7 每栈车辆示意

1.3 泊位数量最多和期望移车次数最少的多目标优化模型

模型假设:

(1) AV 独占. 该停车场专为 AV 设计.

(2) 车辆尺寸. 所有 AV 均为同一给定尺寸或者小于给定尺寸.

(3) 车辆控制. 停车场经营者对所有进入停车场的自动驾驶车辆进行控制, 经营者可以在需要的时候重新安置自动驾驶车辆, 当车辆离开停车设施时, 该车辆的控制权归车主所有.

(4) 车辆到达. AV 到达停车场时服从泊松分布, 到达率(单位时间到达的车辆数)为 λ , 其停车时间

(即停车逗留时间)服从负指数分布, 平均停车时间为 μ . 假设没有任何关于车辆实际到达时间和离开时间的信息.

(5)车辆离开. AV 离开停车场时每个区域间通道只进行一次车辆移动, 其他有离开需求的 AV 需排队等待.

1.3.1 停车需求特征引入建模

给定平面停车场, 自动驾驶车辆停车泊位按照垂直式设计, 采用南北行数不同的多排布局, 停放方式采取外排先停, 移动策略按照最近原则, 区域间设计通道用于车辆移动, 左半列阻塞车辆移至所在列右边以便释放被阻塞车辆, 以此建立总停车泊位数最多以及期望移车次数最少的自动驾驶停车泊位优化模型.

设停车场设计需求为 D , AV 到达停车场服从泊松分布, 到达率为 λ , 车辆的停车时间服从负指数分布, 平均每辆车停车时间为 μ , 则服务率(平均每小时服务车辆数)为 $1/\mu$. 在稳态条件下, 有 $D = \lambda / (1/\mu) = \lambda\mu$.

将整个停车场的需求 D 分配到各个停车区域, 设第 i 个停车区域分配到的停车需求为 d_i , 则停车需求分配约束为

$$D = \sum_{i=1}^n d_i. \quad (1)$$

每个停车区域的供给需大于等于需求, 则供给约束为

$$d_i \leq (x_i + y_i)z, \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

设计的停车泊位总长度以及区域间通道总宽度之和不大于停车场的长度, 故停车场的长度约束为

$$\sum_{i=1}^n (x_i + y_i)l + \eta \sum_{i=1}^{n+1} \alpha_i \leq L. \quad (3)$$

设计的停车泊位总宽度以及停车场两侧通道总宽度之和不大于停车场的宽度, 故停车场的宽度约束为

$$zw + 2C \leq W. \quad (4)$$

车辆按照就近原则的移动策略从停车区域离开需满足相应通道约束, 每个停车区域北向车辆离开所需满足的通道约束为

$$2x_i l - \alpha_i zw \leq 2l, \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

每个停车区域南向车辆离开所需满足的通道

约束为

$$2y_i l - \alpha_{i+1} zw \leq 2l, \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

车辆转弯时需满足最小转弯半径要求, 故转弯约束为

$$\eta \alpha_i \geq R_{\min}, \forall i = 1, 2, \dots, n, n+1. \quad (7)$$

假设第 i 个停车区域的停车需求 d_i 随机分配到 $2z$ 个栈中, 则每一栈的停车需求为 $d_i / (2z)$.

将第 i 个停车区域的每一栈视为一个排队系统, 车辆到达每一栈服从泊松分布, 停车时间服从负指数分布, 服务台的个数为每一栈的停车泊位数, 系统容量也为每一栈的停车泊位数, 顾客源无限, 则排队系统可描述为 $M/M/x_i/x_i/\infty$ (第 i 个停车区域北向的每一栈) 和 $M/M/y_i/y_i/\infty$ (第 i 个停车区域南向的每一栈), 每一栈的到达率为 $d_i / (2z\mu)$, 服务率为 $1/\mu$. 由于停车场不允许排队等待空位(即服务台个数等于系统容量), 由爱尔兰呼唤损失公式可得, 第 i 个停车区域北向的每一栈有 v 辆车的概率 P_{iv} 为

$$P_{iv} = \frac{(d_i / 2z)^v / v!}{\sum_{k=0}^{x_i} (d_i / 2z)^k / k!}, \quad (8)$$

第 i 个停车区域南向的每一栈有 v 辆车的概率 P'_{iv} 为

$$P'_{iv} = \frac{(d_i / 2z)^v / v!}{\sum_{k=0}^{y_i} (d_i / 2z)^k / k!}. \quad (9)$$

停车场期望移车次数为

$$E[M] = \sum_{i=1}^n \sum_{v=0}^{x_i} \frac{d_i}{D} \frac{1}{2z} \frac{1}{2} P_{iv} M_v + \sum_{i=1}^n \sum_{v=0}^{y_i} \frac{d_i}{D} \frac{1}{2z} \frac{1}{2} P'_{iv} M_v. \quad (10)$$

停车场的总停车泊位数 S 为

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i + y_i)z. \quad (11)$$

1.3.2 双目标优化模型构建

优化模型表述如下:

目标函数

$$\max S = \sum_{i=1}^n (x_i + y_i)z, \quad (12)$$

$$\min E[M] = \sum_{i=1}^n \sum_{v=0}^{x_i} \frac{d_i}{D} \frac{1}{2z} \frac{1}{2} v \frac{(d_i / 2z)^v / v!}{\sum_{k=0}^{x_i} (d_i / 2z)^k / k!} +$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{v=0}^{y_i} \frac{d_i}{D} \frac{1}{2z} \frac{1}{2} v \frac{(d_i/2z)^v / v!}{\sum_{k=0}^{y_i} (d_i/2z)^k / k!}, \quad (13)$$

s.t.

$$D = \sum_{i=1}^n d_i, \quad (14)$$

$$d_i \leq (x_i + y_i)z, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i + y_i)l + \eta \sum_{i=1}^{n+1} \alpha_i \leq L, \quad (16)$$

$$zw + 2C \leq W, \quad (17)$$

$$2x_i l - \alpha_i zw \leq 2l, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (18)$$

$$2y_i l - \alpha_{i+1} zw \leq 2l, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (19)$$

$$\eta \alpha_i \geq R_{\min}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, n+1, \quad (20)$$

$$d_i, x_i, y_i, z, \alpha_i \in Z^+, \quad (21)$$

式中: n 为停车场的最大分区数; D 为停车场的需求; d_i 为分配到第 i 个停车区域的需求; x_i 为第 i 区停车位北向的行车数($i=1, 2, \dots, n$); y_i 为第 i 区停车位南向的行车数($i=1, 2, \dots, n$).

式(12)~(13)为目标函数, 式(14)~(21)为约束条件. 其中式(12)表示停车泊位数最大, 式(13)表示车辆移动次数的数学期望最小; 式(14)为停车需求分配约束, 式(15)为供给约束, 式(16)为停车场的长度约束, 式(17)为停车场的宽度约束, 式(18)为北向车辆离开停车区域所需满足的通道约束, 式(19)为南向车辆离开停车区域所需满足的通道约束, 式(20)为车辆转弯需满足的最小转弯半径约束, 式(21)为变量正整数约束. 停车场的分区数 n 通过下式确定:

$$n \leq \frac{L - 2\eta}{2l + 2\eta}. \quad (22)$$

同理, 基于存储和移动的移动策略(FSUDM)建模如下:

$$\max S = \sum_{i=1}^n (x_i + y_i)z, \quad (23)$$

$$\min E[M] = \sum_{i=1}^n \sum_{v=0}^{x_i} \frac{d_i}{D} \frac{1}{2z} \frac{1}{2} v \frac{(d_i/2z)^v / v!}{\sum_{k=0}^{x_i} (d_i/2z)^k / k!} + \sum_{i=1}^n \sum_{v=0}^{y_i} \frac{d_i}{D} \frac{1}{2z} \frac{1}{2} v \frac{(d_i/2z)^v / v!}{\sum_{k=0}^{y_i} (d_i/2z)^k / k!}, \quad (24)$$

s.t.

$$D = \sum_{i=1}^n d_i, \quad (25)$$

$$d_i \leq (x_i + y_i)z, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i + y_i)l + \eta \sum_{i=1}^{n+1} (s_i + m_i) \leq L, \quad (27)$$

$$zw + 2C \leq W, \quad (28)$$

$$(x_i - 1)l - s_i zw \leq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (29)$$

$$(y_i - 1)l - s_{i+1} zw \leq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (30)$$

$$R_{\min} - \eta(s_i + m_i) \leq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, n+1, \quad (31)$$

$$d_i, x_i, y_i, z, s_i \in Z^+. \quad (32)$$

基于环绕方式的移动策略(NSCM)建模如下:

$$\max S = 2yz, \quad (33)$$

$$\min E[M] = \sum_{v=0}^y \frac{1}{2z} v \frac{(D/2z)^v / v!}{\sum_{k=0}^y (D/2z)^k / k!}, \quad (34)$$

s.t.

$$D - 2yz \leq 0, \quad (35)$$

$$yl + 2\beta - L \leq 0, \quad (36)$$

$$2zw - W \leq 0, \quad (37)$$

$$y, z \in Z^+. \quad (38)$$

2 NSGA-II算法

一般将多目标规划转化为单目标规划问题需多次运行得到多个解, 无法得到 Pareto 最优解集, 算法效率不高. 本文建立的双目标非线性整数规划模型的决策变量均为正整数, 导致 Pareto 前沿不连续, 故智能优化算法更适合模型的求解. 由于高峰时段停车需求在短时间内激增, 算法时间复杂度过高在规模较大的停车场应用时会受到一定的限制, 故选取经典的 NSGA-II 求解, 并选取 NSGA-III、ANSGA-III 进行对比, 对 3 种算法的时间复杂度和收敛性进行分析.

NSGA-II 算法流程如图 8 所示. 随机产生规模为 N 的初始种群, 经过非支配排序后通过遗传算法的选择、交叉、变异 3 个基本操作得到第 1 代子代种群; 从第 2 代开始, 将父代种群与子代种群合并, 进行快速非支配排序, 并对每个非支配层中的个体进行拥挤度计算, 根据非支配关系以及个体的拥挤度选取合适的个体组成新的父代种群; 最后, 通过遗传算法的基本操作产生新的子代种群. 依此类推, 直到满足程序结束的条件.

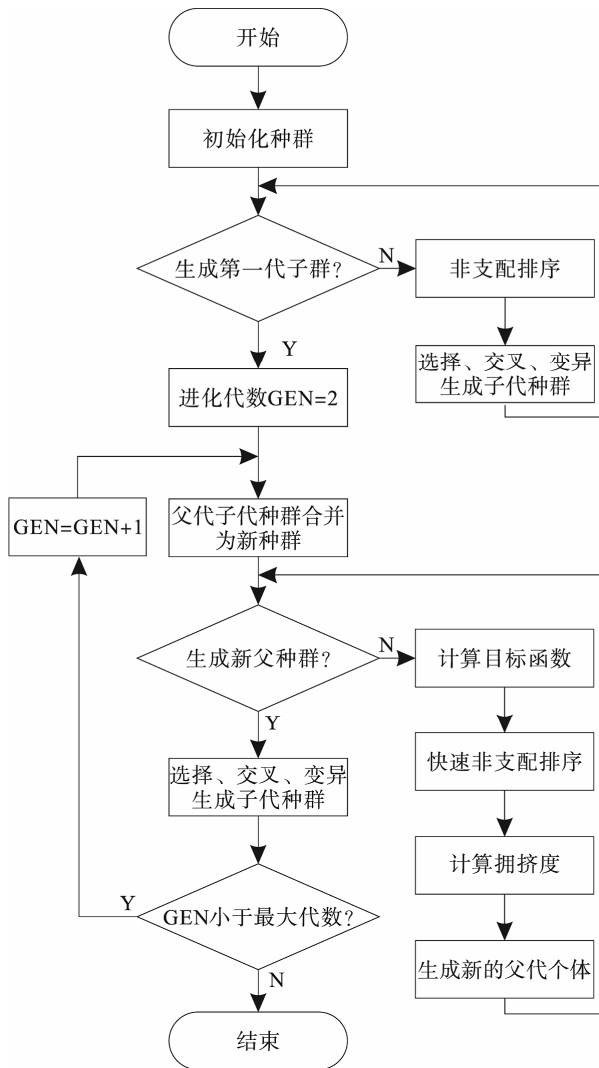


图8 NSGA-II算法流程

带精英策略的非支配排序步骤如图9所示。

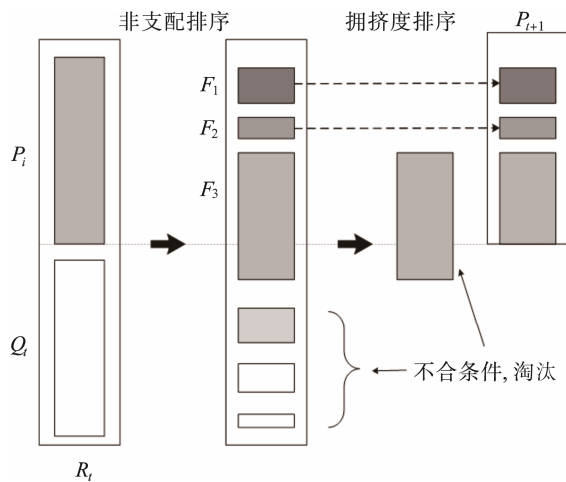


图9 带精英策略的非支配排序步骤

首先将第 t 代产生的新种群 Q_t 与父代 P_t 合并

组成 R_t , 种群大小为 $2N$. 然后 R_t 进行非支配排序, 产生一系列非支配集 F_i 并计算拥挤度. 之后先将 F_1 放入新的父代种群 P_{t+1} 中. 如果 F_1 小于 N , 则继续向 P_{t+1} 中填充下一级非支配集 F_2 , 直到添加 F_3 时, 种群的大小超出 N , 对 F_3 中的个体进行拥挤度排序 ($\text{sort}(F_3, \prec_n)$), 取前 $N - |P_{t+1}|$ 个个体, 使 P_{t+1} 个体数量达到 N . 然后通过遗传算子(选择、交叉、变异)产生新的子代种群 Q_{t+1} .

3 实验分析

3.1 仿真实验设定

为了验证 NSGA-II求解双目标自动驾驶停车泊位优化模型的性能, 模型参数取值见表1. 若 n 为5, 则决策变量为 $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, z, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$, 决策变量的维度为 $4n + 2 = 22$. 实验选取2个经典的多目标优化算法 NSGA-III、ANSGA-III作为对比算法, 它们均为基于参考点的非支配排序方法的进化多目标优化算法.

表1 测试模型参数

参数	取值	参数	取值
D	100	C	6
l	5	η	3
L	100	$R_{\min}$	5.5
w	2.5	n	1
W	50		

在相同条件下对算法进行对比, 每个算法进行30次独立实验, 种群规模均设置为100, 迭代次数为100. 采用超体积(Hyper-Volume, HV)来评价算法的性能.

HV 的计算公式为

$$V_H = \delta \left(\bigcup_{i=1}^{|S|} v_i \right), \quad (39)$$

式中: δ 为勒贝格测度; $|S|$ 为非支配解的数量; v_i 为参考点与解集中第 i 个解构成的超体积. HV 的几何意义为解集中的个体与预设参考点在目标空间中构成的体积, HV 越大, 说明算法的综合性能越好.

3.2 算法性能分析

各种算法的运行时间(runtime)和 HV 均值分别见表2和表3, 可见 NSGA-II 所得为最优结果.

表 2 3 种算法的运行时间均值

n	目标 个数	决策变 量维数	运行时间均值		
			NSGA-II	NSGA-III	ANSGA-III
1	2	6	2.69	2.71	2.88
2	2	10	4.42	4.65	4.64
3	2	14	6.89	7.23	7.54
4	2	18	10.3	10.4	10.6
5	2	22	14.4	14.4	14.5

表 3 3 种算法的 HV 均值

n	目标 个数	决策变 量维数	HV 均值		
			NSGA-II	NSGA-III	ANSGA-III
1	2	6	0.954	0.951	0.950
2	2	10	0.974	0.973	0.973
3	2	14	0.980	0.979	0.979
4	2	18	0.985	0.984	0.985
5	2	22	0.987	0.987	0.986

从运行时间看, NSGA-II 的 runtime 均值明显小于其他算法, 算法运行时间随着分区数的增大而

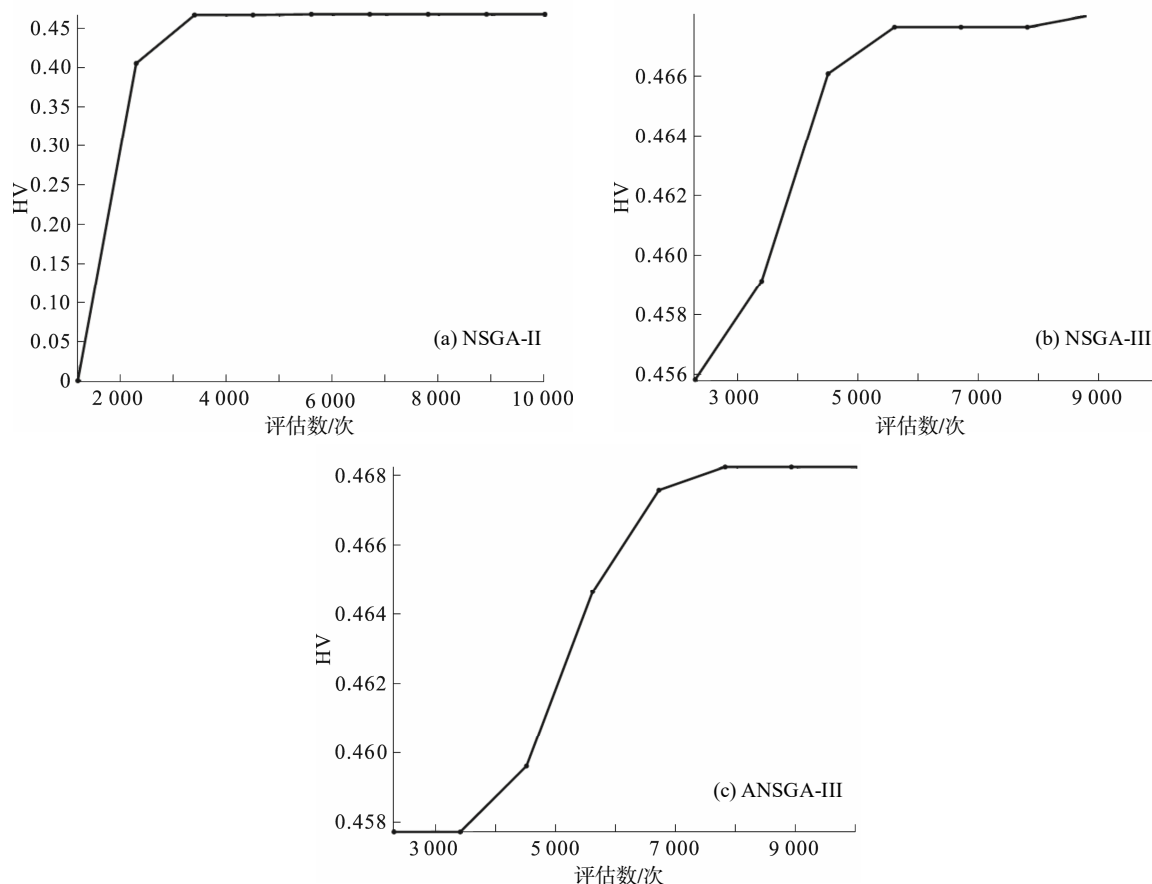
增加, 且当 $n=1$ 时算法的 runtime 均值最小; 从 HV 均值看, NSGA-II 的 HV 均值明显大于其他算法, 并随着分区数的增大而增大, 当 $n=5$ 时算法的 HV 均值最大. 因此, NSGA-II 的时间复杂度最低, 可应对大型停车场高峰时段停车需求在短时间内激增的情况, 适用于本文研究问题.

绘制 HV 均值变化曲线如图 10 所示, 3 种算法在评估次数达到 10 000 时, HV 均值均达到最大且保持不变, 说明 3 种算法均实现了全局收敛, NSGA-II 在迭代了 40 次后便达到全局收敛, 而 NSGA-III 和 ANSGA-III 至少要迭代 100 次才能全局收敛, 说明 NSGA-II 的收敛速度明显优于 NSGA-III 和 ANSGA-III.

3.3 实验结果分析

3.3.1 移动策略对比分析

停车场的长度和宽度发生改变, 其他参数保持不变, 在接近饱和需求的情况下, 分析不同移动策略对停车场布局的影响. 表 4-6 为不同尺寸停车

图 10 HV 均值变化曲线($n=1$)

场的 3 种移动策略对比结果.

表 4 小型(100 m×50 m)停车场移动策略的影响

移动策略	目标函数 $F1$	目标函数 $F2$
基于就近原则	255	0.146 642
基于存储和移动	255	0.170 290
基于环绕方式	340	0.543 749

表 5 中型(200 m×100 m)停车场移动策略的影响

移动策略	目标函数 $F1$	目标函数 $F2$
基于就近原则	1 295	0.129 338
基于存储和移动	1 295	0.167 626
基于环绕方式	1 480	0.623 299

表 6 大型(400 m×200 m)停车场移动策略的影响

移动策略	目标函数 $F1$	目标函数 $F2$
基于就近原则	5 700	0.125 962
基于存储和移动	5 775	0.137 960
基于环绕方式	6 160	0.656 382

基于就近原则的移动策略可设计停车泊位数与基于存储和移动的移动策略相差不大. 在小、中、大型停车场中, 可设计停车泊位数分别为 255、1 295、5 700 个, 相比基于环绕方式的移动策略分别减少 25.0%、12.5%、7.47%.

基于就近原则的期望移车次数相对其他 2 种移动策略改善很大. 在小、中、大型停车场中, 相比基于移动和存储的移动策略分别减少 13.89%、22.84%、8.70%, 相比基于环绕方式的移动策略分别减少 73.03%、79.25%、80.81%.

基于环绕方式的移动策略虽能最大化停车泊位的供给, 但车辆移动成本过高. 与基于移动和存储的移动策略相比, 基于就近原则的移动策略可在不显著减少停车泊位的情况下降低期望移车次数, 一定程度上节约了车辆移动成本, 故选取基于

就近原则的移动策略进行后续分析.

3.3.2 停车场布局最优方案

考虑如下参数的停车场: $L=100\text{ m}$, $W=50\text{ m}$, $l=5\text{ m}$, $w=2.5\text{ m}$, $C=6\text{ m}$, $\eta=3\text{ m}$, $R_{\min}=5.5\text{ m}$, $D=100$ 辆, 从设计者的角度考虑, 表 7 选取停车泊位数最大的 pareto 解.

当 $n=1$ 和 $n=4$ 时, 整个停车场的利用率均为 99.00%, 停车场的空间效益得以充分挖掘. 分区数为 1 时最多可提供停车泊位 255 个, 分区数为 4 时最多可提供停车泊位 210 个; 分区数为 1 时停车泊位占比达 63.75%, 而分区数为 4 时停车泊位占比达 52.50%; 分区数为 1 时区域间通道占比达 11.25%, 而分区数为 4 时区域间通道占比达 22.50%. 分区数越少可设计停车泊位数越多, 增加的停车泊位数可由区域间通道转换而来. 图 11 所示为停车场的不同布局, 通过权衡最大利用率和最小期望移动次数之间的悖反关系来决定最佳布局. 最佳的停车布局是分区为 4 个, 区域间通道个数均为 2.

3.3.3 停车需求影响分析

其他参数保持不变, 停车需求从 $D=100$ 辆增加至 $D=250$ 辆, 在保证停车供给大于需求的前提下, 使期望移车次数尽可能小, 绘制停车场的布局方案如图 12 所示. 需求较低时, 每个区域均南北各一行排布, 这与人工驾驶停车场布局相同, 这种布局的移动成本最低, 可适用于中等以下需求的布局. 随着需求的增加, 各区域的行数也增加, 人工驾驶停车场南北各一行的布局逐渐被取代, 区域间的通道逐渐被停车泊位填充. 最大停车需求为 $D_{\max}=100$ 辆时, 求得期望移车次数为 0.174 4, 4 种停车需求的停车供给分别为 150、180、210、255.

表 7 模型求解结果

n	目标函数 $F1$	目标函数 $F2$	需求分配	北向行数	南向行数	列数	区域间通道数	停车泊位占比/%	区域间通道占比/%	两侧通道占比/%	利用率/%
1	255	0.081 3	100	12	5	15	3; 2	63.75	11.25	24.00	99.00
2	240	0.034 8	22; 78	8; 1	1; 6	15	2; 2; 2	60.00	13.50	24.00	97.50
3	225	0.021 0	29; 36; 35	6; 1; 4	1; 2; 1	15	2; 2; 2; 2	56.25	18.00	24.00	98.25
4	210	0.017 2	15; 39; 39; 7	1; 2; 1; 3	1; 1; 2; 1	15	2; 2; 2; 2; 2	52.50	22.50	24.00	99.00
5	180	0.012 3	18; 20; 8; 31; 23	1; 1; 1; 1; 1	1; 1; 2; 2; 1	15	2; 2; 2; 2; 2	45.00	27.00	24.00	96.00

注: “22; 78”代表分配到两个停车区域的需求分别为 22 和 78, “8; 1”代表分配到两个区域的北向行数分别为 8 和 1, “1; 6”代表分配到两个区域的南向行数分别为 1 和 6, “2; 2; 2”代表区域间的通道个数均为 2.

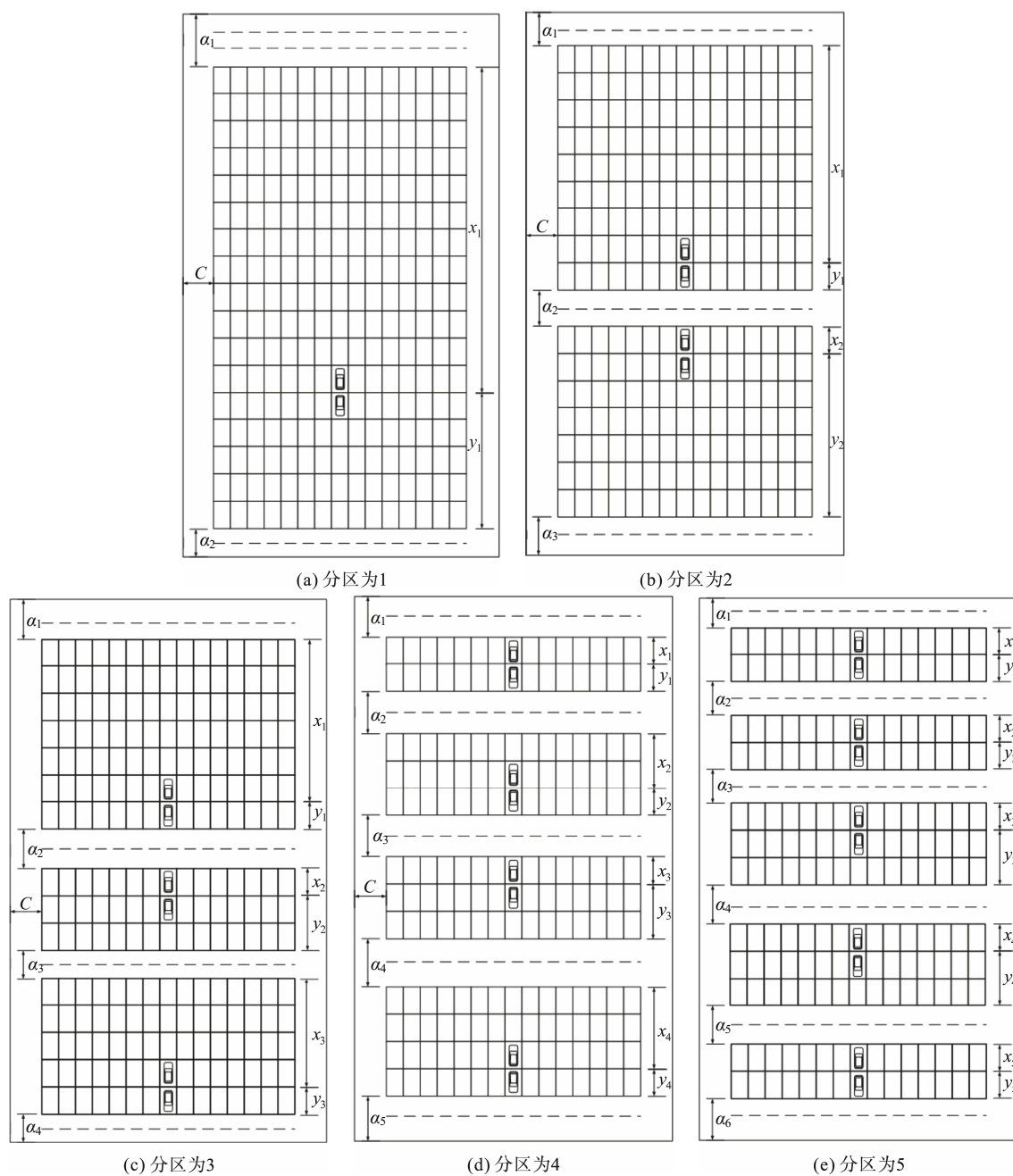


图 11 停车场的不同布局

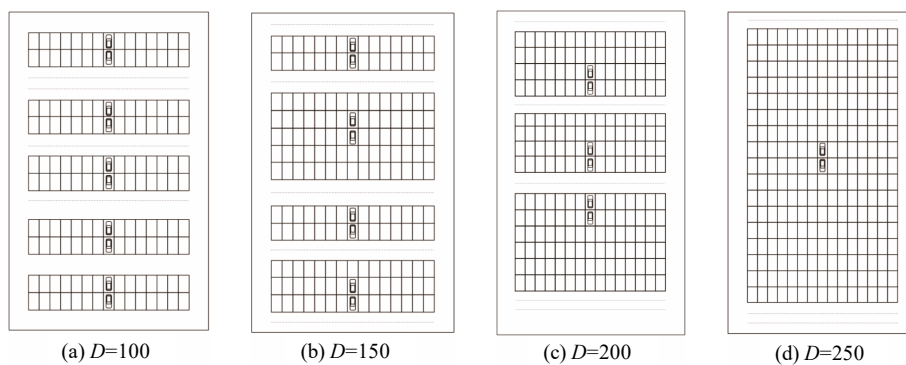


图 12 不同停车需求的布局

停车供给与期望移车次数随停车需求的变化情况如图 13 所示, 停车供给随着停车需求呈阶梯式增加, 在某些点布局发生根本性改变. 如当需求从 $D=0$ 到 $D=100$ 时, 停车场的布局均为南北向各一行, 共 5 个区域, 区域间通道均为双车道, 当 $D=101$ 时布局发生根本变化. 期望移车次数同样随着停车需求阶梯式增加, 并在某个点布局发生根本性改变. 不同的是期望移车次数在每一阶层有小幅增长, 这意味着更高需求对应更多的车辆移动. 经营者可根据不同的设计停车需求确定停车场的停车供给和相应的布局, 考虑期望移车次数发生急剧变化的点进行设计停车需求的确定, 从而降低高密度停车时车辆移动的成本.

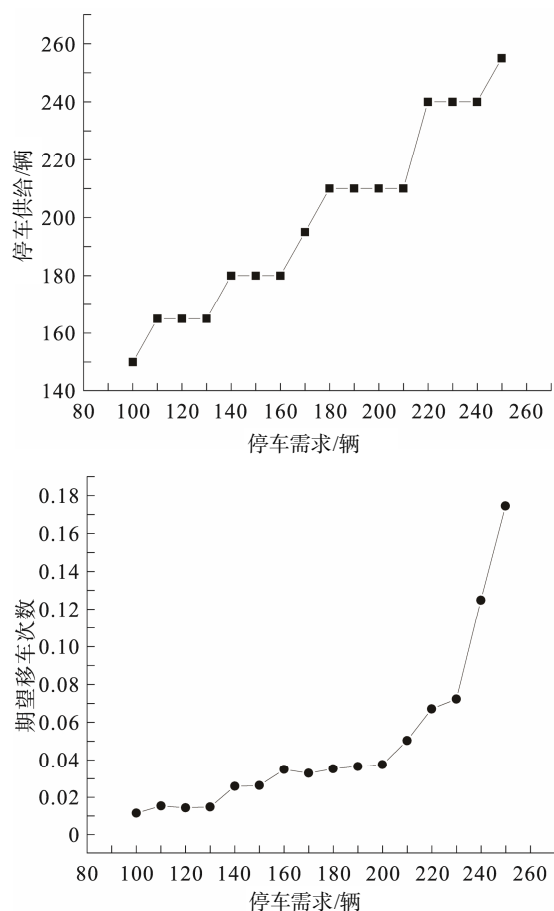


图 13 不同停车需求的停车供给和期望移车次数

3.3.4 通道宽度的敏感性分析

在最大停车需求 $D_{\max}=255$ 下, 区域间通道各车道的宽度从 $\eta=2.0\text{ m}$ 增至 $\eta=3.0\text{ m}$, 见表 8, 绘制区域间总通道数变化趋势如图 14 所示. 随着通道宽度的增加, 为了满足停车场高密度布局, 区域

间通道个数相应减少, 故区域间总通道数随通道宽度的增加而减少. 期望移车次数也随通道宽度增加而增加, 原因在于尽管总通道数减少, 但总通道面积却有所增加, 同时需求保持不变, 只能将需求放入低效率布局中. 有 50% 的人工驾驶停车区域间通道可转为停车泊位, 随着通道宽度的增加, 更少的车辆可以适应人工驾驶停车场布局, 空间效率比从 1.42 增加至 1.70.

表 8 通道宽度对布局影响

η/m	区域间通道	目标函数 $F2$	布局	通道转换率/%	空间效率比
2.0	3, 3	0.125 962	10, 7; 15	40	1.42
2.2	3, 3	0.135 848	5, 12; 15	40	1.42
2.4	3, 3	0.158 805	9, 8; 15	40	1.55
2.6	3, 3	0.163 742	12, 5; 15	40	1.55
2.8	3, 2	0.170 589	9, 8; 15	50	1.70
3.0	3, 2	0.172 635	12, 5; 15	50	1.70

注: 目标函数 $F1$ 均为 255, 通道转化率为人工驾驶停车布局转化为自动驾驶停车布局后的效率, 空间效率比为自动驾驶停车场与人工驾驶停车场的最大需求之比.

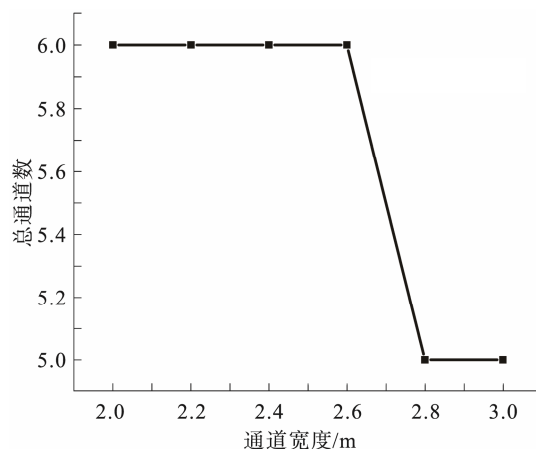


图 14 区域间总通道数变化趋势

4 结论

本文针对 AV 停放自组织和协同特性, 综合考虑停车场几何尺寸、泊位尺寸、通道设计、停放方式和车辆移动策略等关键设计要素, 以泊位数量最多和期望移动次数最少为双重目标, 构建了自动驾驶条件下多排布局停车泊位优化模型, 并设计了带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)对模型进行求解, 得出了给定尺寸停车场的最佳分区及布局方式, 主要结论如下:

(1)NSGA-II的收敛速度和超体积评价(HV均值)均优于其他算法,有效地提高了解集的收敛性和分布性;与传统停车场可设计100个停车泊位相比,自动驾驶停车场最多可设计255个停车泊位,停车场空间利用率均达到99%。

(2)尽管分区为1能够最大限度地提高停车泊位的数量和停车设施的利用率,但更多的泊位数不可避免带来额外的移动次数。因此,应通过权衡最大利用率和最小期望移动次数之间的悖反关系来决定最佳布局,最佳的停车场布局是分区为4,区域间通道个数均为2。

(3)随着停车需求的增加,各分区的行数逐渐增加,人工驾驶停车场南北各一行的布局逐渐被取代,区域间的通道逐渐被停车泊位填充;随着通道宽度的增加,空间效率比从1.42增加到1.70。

(4)基于存储和移动的移动策略和基于环绕方式的移动策略最大限度地提高了停车位的利用率,但也产生了最多的期望移动次数,相比之下,基于就近原则的移动策略大大减少了期望移动次数,而没有显著降低停车位的利用率。

研究结果为自动驾驶停车设施的设计和优化提供了一种理论方法。然而,本文局限性在于所研究的停车设施只是矩形的,三角形或其他不规则多边形需进一步研究。此外也没有考虑每辆车的个体特征,包括到达时间和离开时间。在未来的研究中,根据不断变化的需求推导出设施的最佳动态布局将是有益的。最后,有必要为自动驾驶车辆和传统车辆共同设计一个停车设施。

参考文献:

- [1] 胡笏, 罗书源, 赖金涛, 等. 自动驾驶对交通运输系统规划的影响综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5):52-65, 76.
- [2] 刘云铎. 自动驾驶对城市发展的影响[J]. 科技视界, 2021(23):172-173.
- [3] BINGLE R, MEINDERTSMA D, OOSTENDORP W, et al. Designing the optimal placement of spaces in a parking lot[J]. Mathematical Modelling, 1987, 9(10):765-776.
- [4] GUO C, GUO P. Research on parking space optimal design method in parking lots[J]. Advanced Science Letters, 2012, 11(1):698-701.
- [5] ABDULLAH K, KAMIS N H, AZAHAR N F N, et al. Optimization of the parking spaces: a case study of Dataran Mawar, UiTM Shah Alam[C]//2012 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering (CHUSER). Kota Kinabalu, Malaysia. IEEE, 2012:684-687.
- [6] SYAHRINI I, SUNDARI T, ISKANDAR T, et al. Mathematical model of parking space unit for triangular parking area[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 300:012012.
- [7] 高新涛, 陈丽. 基于优化模型的停车场规划设计分析[J]. 河南科技, 2015(18):68-71.
- [8] 杨曼林, 郑帮泽, 王欢. 基于整数规划模型的停车场优化设计研究[J]. 中国新通信, 2020, 22(15):67.
- [9] MEI Z Y, FENG C, DING W C, et al. Better lucky than rich? Comparative analysis of parking reservation and parking charge[J]. Transport Policy, 2019, 75:47-56.
- [10] YE X F, SUI X L, WANG T, et al. Research on parking choice behavior of shared autonomous vehicle services by measuring users' intention of usage[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2022, 88:81-98.
- [11] YE X F, YANG C, WANG T, et al. Research on parking app choice behavior based on MNL[J]. Travel Behaviour and Society, 2021, 25:174-182.
- [12] PEL A J, CHANIOTAKIS E. Stochastic user equilibrium traffic assignment with equilibrated parking search routes[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 101:123-139.
- [13] SHAO C Y, YANG H, ZHANG Y, et al. A simple reservation and allocation model of shared parking lots[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 71:303-312.
- [14] LEI C, OUYANG Y. Dynamic pricing and reservation for intelligent urban parking management[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 77:226-244.
- [15] FERREIRA M, DAMAS L, CONCEIÇÃO H, et al. Self-automated parking lots for autonomous vehicles based on vehicular ad hoc networking[C]//2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. Dearborn, MI, USA. IEEE, 2014:472-479.
- [16] NUNES R, MOREIRA-MATIAS L, FERREIRA M. Using exit time predictions to optimize self automated parking lots[C]//17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Qingdao, China. IEEE, 2014:302-307.
- [17] D'OREY P M, AZEVEDO J, FERREIRA M. Exploring

- the solution space of self-automated parking lots: an empirical evaluation of vehicle control strategies[C]//2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Rio de Janeiro, Brazil. IEEE, 2016:1134-1140.
- [18] TIMPNER J, FRIEDRICHS S, VAN BALEN J, et al. K-Stacks: high-density valet parking for automated vehicles[C]//2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Seoul, Korea (South). IEEE, 2015:895-900.
- [19] BANZHAF H, QUEDENFELD F, NIENHÜSER D, et al. High density valet parking using k-deques in driveways [C]//2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Los Angeles, CA, USA. IEEE, 2017:1413-1420.
- [20] NOURINEJAD M, BAHRAMI S, ROORDA M J. Designing parking facilities for autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 109:110-127.
- [21] ISLAM N. The huge impact driverless cars will have on parking and urban landscapes[EB/OL]. [2023-07-15]. <https://www.linkedin.com/pulse/huge-impact-driverless-cars-have-parking-urban-landscapes-nash-islam>.

Optimizing model for automatic parking based on NSGA-II algorithm

YU Hongmei¹, YE Xiaofei¹, WANG Yilu¹, CHEN Jun², YAN Xingchen³, WANG Tao⁴

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3.College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

4.School of Architecture and Transportation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Autonomous parking technology has been applied for optimizing parking space allocation. In this paper the problems with freeing blocked vehicles are addressed, exclusively aiming at multi-row parking layout. With the targets of maximizing parking spaces meanwhile minimizing the number of vehicle maneuvers, a parking optimization model is constructed for multi-row parking layout under automatic driving conditions. The decision-making for optimized area allocation and layout of parking facilities are proposed. And the sensitivity analysis of different movement strategies is also conducted through numerical experiments. The results suggest that the movement strategy based on the proximity principle greatly reduces the expected number of movements without compromising the parking space function efficiency.

Key words: traffic engineering; parking berth optimization; NSGA-II; autonomous vehicle; queuing theory; parking

(责任编辑 韩 超)