

何亮昆, 滕少华, 张巍. 带预约的有限停车位调度算法[J]. 广东工业大学学报, 2025, 42(6): 44–51. doi: 10.12052/gdutxb.240126.
He Liangkun, Teng Shaohua, Zhang Wei. A limited parking space scheduling algorithm with reservation[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2025, 42(6): 44–51. doi: 10.12052/gdutxb.240126.

带预约的有限停车位调度算法

何亮昆, 滕少华, 张巍

(广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006)

摘要: 停车场中常常会存在停车空位有时较少、有时较多的现象。停车场管理者的诉求是在时间一定的条件下, 尽可能出租更多的车位和更长的停车时长, 以获取更高的收益。然而, 停车位调度存在两个问题。第一, 现有调度方法忽略了对预约用户进行组合指派以获取当前收益最优的指派方案。第二, 现有调度方法未能对停车资源进行整合优化以提高潜在收益。为了解决这些问题, 本文提出了一种基于组合分配的停车位调度方法。首先, 将预约订单看作代理, 停车空位看作角色, 以12 h作为一个调度周期。其次, 在一个调度周期内, 将代理进行组合并将组合代理作为指派元素, 以避免订单被分散指派而导致资源的低效利用。接着, 计算组合代理对角色的评估值, 并约束停车费用越高的订单组合评估值越高, 费用相同则间隔时间段数越少评估值越高。通过这种方式, 能够保证在获取当前最优收益的同时, 减少间隔时间段的数量以对停车资源进行整体调度。最后, 以获取最大评估值为目标对组合代理进行指派。实验证明了所提方法的可行性, 能够有效减少间隔时间段的数量并获得当前收益最优的指派方案。

关键词: 停车位调度; E-CARGO; 组合分配; 组合代理

中图分类号: TP311

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2025)06-0044-08

A Limited Parking Space Scheduling Algorithm with Reservation

He Liangkun, Teng Shaohua, Zhang Wei

(School of Computer Science and Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The number of available parking spaces is sometimes fewer, sometimes more. Managers aim to rent out as many parking spaces as possible within a certain time to maximize revenue. However, there are two problems in parking spaces scheduling. Firstly, existing methods overlook the combination assignment of reservation users to obtain the optimal assignment scheme. Secondly, existing scheduling methods fail to optimize parking resources to maximize the potential revenue. To solve these problems, this paper proposes a parking space scheduling method based on combinatorial allocation. Firstly, within a 12-hour scheduling cycle, orders and parking spaces are viewed as agents and roles, respectively. Secondly, multiple orders are formed into a combined agent. The combined agent is viewed as assignment elements to prevent inefficient resource utilization caused by the scattered order assignments. Then, evaluation values of combined agents for roles are calculated, with higher parking fees leading to higher values. For combined agents with the same fees, fewer time intervals result in higher evaluation values. By this way, the number of interval time periods can be reduced while obtaining the current optimal benefit. Finally, the combined agents are assigned with the objective of obtaining the maximum qualification values. Simulation experiments verify that the proposed method can reduce the number of parking interval time periods and obtain the assignment scheme with the best profit.

Key words: parking spaces scheduling; E-CARGO; combinatorial allocation; combined agent

近年来, 中国的汽车数量不断增加。截至2023年, 中国的私人汽车数量已经超过2.94亿辆^[1]。

汽车数量的快速增加带来了巨大的停车压力。由于建造新的停车设施需要大量的土地资源和金钱, 因

收稿日期: 2024-10-30 录用日期: 2025-03-05 网络首发日期: 2025-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61972102)

作者简介: 何亮昆(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为协同计算、角色协同, E-mail: 2644225072@qq.com

通信作者: 张巍(1964-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为数据挖掘、协同计算、网络安全, E-mail: weizhang@gdut.edu.cn

此,对现有的停车资源进行合理的调度成为了缓解“停车难”问题的重要手段。现有的停车位调度方法主要分为两类:一是以用户停车成本最少为目标,二是以供应商的停车收益最优为目标。基于车位供应商的角度,他们希望在时间一定的条件下,尽可能地出租更多的停车位和更长的停车时长,以获得更高的收益^[2]。

然而,现有的大部分停车位调度方法主要适用于解决多个停车场之间的停车调度问题^[3-5]。这些方法的主要目标是平衡区域内多个停车场之间的车位利用率,尚未涉及求解单个停车场内的车位调度问题。此外,现有的方法忽略了停车服务之间的间隔时间段对车位利用率和管理者潜在收益的影响^[6]。因此,本文尝试使用基于角色的协同理论及E-CARGO (Environments-Classes, Agents, Roles, Groups, and Objects)模型来求解单停车场内的停车位调度问题^[7-9],目标是提高车位供应商的收益。

基于角色的协同理论(Role-Based-Collaboration, RBC)及E-CARGO模型主要通过将协同对象抽象成代理和角色来求解协同问题^[10-12]。首先,将订单看作代理,将停车位看作角色。其次,在一个调度周期内,将订单进行组合形成组合代理。接着,将组合代理作为指派元素,以避免订单被分散指派而导致停车资源的低效利用。然后,根据组合代理的停车费用和间隔时间段数计算组合代理对角色的评估值。停车费用越高评估值越高,费用相同则间隔时间段数越少评估值越高。最后,以获取最大评估值为目标对订单组合进行指派。

1 相关工作

本节主要介绍在停车位调度以及基于角色的协同理论方面的工作。

1.1 停车位调度

随着社会的发展,我国汽车的保有量不断增加,这导致停车供需缺口越来越大。为了缓解停车难问题,许多学者进行了大量的研究,并提出了一系列有效的停车指派方法。

任军效与常新^[13]基于用户停车成本最优的角度,同时考虑共享车位的利用时段与需求者的满意度,提出了一种双目标优化模型。实验表明,该模型有效地提高了用户的满意度。宋现敏等^[14]提出了一种最优停车位分配模型,并基于增广拉格朗日-交替乘子算法进行求解。实验表明,该模型能够有效降低用户的平均停车成本。

此外,周玉陶等^[15]从供应商最优方面出发,提出了一种基于交替方向乘子法的车位分配模型,并通过实验验证了模型在平衡停车利用率上的有效性。王元庆等^[16]提出了一种车位分配模型,通过0-1整数规划模型进行求解,能有效提高停车资源利用率并降低用户的停车成本。上述的研究方法能很好地解决停车位调度问题,但主要用于解决多个停车场之间停车资源利用率不平衡的问题。

1.2 基于角色的协同理论

目前,在基于角色的协同理论方面已经存在大量的研究。Zhang等^[7]基于E-CARGO模型提出了一个自适应协作模型,用于解决医疗资源的调度问题。实验表明,该模型能合理地调度有限的医疗资源,并提高患者的满意度。为了解决生鲜产品的最后一公里配送问题,Huang等^[8]基于群组角色分配(Group Role Assignment, GRA)方法提出了一种角色感知方法,将多个订单合理地组合成一个角色,以提高订单的交付质量。Jiang等^[9]通过对群组多角色分配(Group Multirole Assignment, GMRA)方法进行扩展,提出了一种难民安置方案。该方案能够在安置难民的同时保证安置国的社会稳定。Jiang等^[17]提出了一种自适应的众包任务分配方法,利用角色感知机制对任务进行划分,以提高众包任务的完成率。上述研究表明,基于角色的协同理论和E-CARGO模型能够有效地用于解决资源调度问题。但是现有的基于角色的协同理论的分配方法不能直接用于求解停车位调度问题。因此本文提出了一种基于组合分配的停车位调度方法。

2 场景案例与形式化建模

2.1 现实场景

停车场X在网络平台出租停车位,司机可以提前在平台上进行预约。在一定的时间周期内,X的管理者希望能够尽可能出租更多的车位和更长的停车时长,以获取更高的收益。因此,他要求技术人员设计一种调度方法,将预约订单合理地指派到停车位上。

为了更好地调度停车位,管理者提出了几条规则:(1) 用户只能预约未来12个小时内的停车位;(2) 停车时间的单位为小时,不足一小时的按一小时收费;(3) 平台会先收集一定时间内的停车订单,在决策点时进行整体调度;(4) 在进行决策前,平台会更新当前可用停车位的数量;(5) 每个小时的停车费用相同,为10元。

通过对历史停车需求数据进行分析,管理员发现主要存在两种停车位指派情况。第一种是现有的空闲停车位数不能满足接收到的所有停车需求;第二种情况则相反。

管理员分别列出了处于情况1(见表1)和情况2(见表2)时平台所接收到的停车需求数据,这两种情况对应的空闲停车位数分别为4个和5个。

表1 情况1的预约订单信息
Table 1 Reservation order information for the case 1

订单编号	预订停车时间段	停车费用/元
1	8:00~11:00	30
2	12:00~15:00	30
3	12:00~15:00	30
4	9:00~11:00	20
5	12:00~15:00	30
6	8:00~10:00	20
7	10:00~13:00	30
8	12:00~15:00	30
9	8:00~10:00	20
10	8:00~11:00	30
11	11:00~14:00	30
12	11:00~14:00	30
13	8:00~11:00	30
14	11:00~14:00	30

表2 情况2的预约订单信息
Table 2 Reservation order information for the case 2

订单编号	预订停车时间段	停车费用/元
A	8:00~11:00	30
B	13:00~15:00	20
C	8:00~9:00	10
D	15:00~17:00	20
E	11:00~13:00	20
F	13:00~16:00	30
G	9:00~11:00	20
H	11:00~13:00	20
I	8:00~10:00	20
J	13:00~15:00	20
K	8:00~9:00	10
L	10:00~12:00	20
M	13:00~15:00	20
N	10:00~13:00	20
O	12:00~13:00	10

具体的求解方案将在下文展示。

2.2 问题形式化建模

E-CARGO模型可以用9元组 $\Sigma := \langle C, O, A, M, R, E, G, S_0, H \rangle$ 表示,其中 $C, O, A, M, R, E, G, S_0, H$ 为E-CARGO模型的重要组成部分,分别表示类、对象

集合、代理集合、消息集合、角色集合、环境、群组、系统的原始状态和成员。在E-CARGO模型中,角色是对任务和需求的抽象,代理是任务的执行者。本文将一个订单看作一个代理,将一个停车位看作一个角色,将一个小时看作一个时间段。本文使用非负整数 $m(m=|A|)$ 表示代理集合的大小, $n(n=|R|)$ 表示角色集合的大小, $n_t(n_t=12)$ 表示调度周期内的小时数, $f(f=10)$ 表示每小时所需的停车费用, $i_1, i_2, \dots$ 表示代理的索引标识, $j_1, j_2, \dots$ 表示角色的索引标识, $t_1, t_2, \dots$ 表示时间段的索引标识。

定义1 角色范围矩阵 L 是一个 $n \times n_t$ 矩阵^[9], 其中 $L[j, t] \in \{0, 1\}$ ($0 \leq j < n, 0 \leq t < n_t$) 表示角色 j 在时间段 t 时可以接受的代理数。

在停车位调度中, $L[j, t] = 1$ 表示停车位 j 在时间段 t 处于空闲状态, $L[j, t] = 0$ 则相反。

定义2 代理停车时间矩阵 P 是一个 $m \times n_t$ 矩阵, 其中 $P[i, t] \in \{0, 1\}$ 。 $P[i, t] = 1$ 表示代理 i 要在时间段 t 停车, $P[i, t] = 0$ 则相反。

定义3 代理评估矩阵 Q 是一个 $m \times n$ 矩阵^[10], 其中 $Q[i, j] \in [0, 1]$ ($0 \leq i < m, 0 \leq j < n$) 表示代理 i 扮演角色 j 时的评估值。 $Q[i, j] = 1$ 为最高, $Q[i, j] = 0$ 为最低。

在停车位调度中, $Q[i, j]$ 表示用户 i 将车辆停放在车位 j 时所需的停车费用。经过最大最小归一化处理后, 上述场景中情况1和情况2的代理评估矩阵 Q 分别如式(1)~(2)所示。

$$Q = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (1)$$

定义4 代理分配矩阵 T 是一个 $m \times n$ 矩阵^[18], 其中 $T[i, j] \in \{0, 1\}$ 表示代理 i 是否扮演角色 j 。 $T[i, j] = 1$ 表示代理 i 扮演角色 j , $T[i, j] = 0$ 则相反。

定义5 群组效益 δ 表示所有被指派代理的评估值之和^[10], 即

$$Q = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\delta = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} Q[i, j] \times T[i, j] \quad (3)$$

在停车调度场景中,群组效益 δ 表示车位供应商所获得的收益。

定义6 如果扮演角色 j 的代理数不超过角色 j 的能力范围时,角色 j 是可行的,即

$$\sum_{i=0}^{m-1} (P[i, t] \times T[i, j]) \leq L[j, t] \quad (0 \leq t < n_t) \quad (4)$$

在停车调度中,角色 j 可行表示在每个时间段 t 内,最多只指派一辆车停放在车位 j 。

定义7 如果每个角色 j 都是可行的,那么分配矩阵 T 是可行的,即

$$\sum_{i=0}^{m-1} (P[i, t] \times T[i, j]) \leq L[j, t] \quad (0 \leq t < n_t, 0 \leq j < n) \quad (5)$$

定义8 根据上述的定义,停车位指派模型的目标函数及其约束如下所示。

$$\max \delta = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} Q[i, j] \times T[i, j] \quad (6)$$

s.t.

$$T[i, j] \in \{0, 1\} \quad (0 \leq i < m, 0 \leq j < n) \quad (7)$$

$$\sum_{j=0}^{n-1} T[i, j] \leq 1 \quad (0 \leq i < m) \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^{m-1} (P[i, t] \times T[i, j]) \leq L[j, t] \quad (0 \leq t < n_t, 0 \leq j < n) \quad (9)$$

其中,约束(7)中 $T[i, j] = 1$ 时表示将代理 i 指派给角色

j , $T[i, j] = 0$ 则相反;约束(8)表示每个代理最多只能指派给一个角色;约束(9)表示在一个时间段内,每个角色最多只能被一个代理扮演。

通过上述模型,可以得到一个当前收益最大的指派方案。在上述停车场景中,情况1中的订单数为14,可用车位数为4,其对应的分配矩阵 T 如式(10)所示;情况2中的订单数为15,可用车位数为5,其对应的分配矩阵 T 如式(11)所示。指派后情况1和2的车位状态分别如图1和2所示。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

从图1~2可以看出,部分订单服务之间存在没有被占用的空闲时间段。这些分散的停车资源会降低车位的利用率和管理者的潜在收益^[6]。如图2所示,若在下一个决策点时存在停车时间在10:00~12:00的订单,那么供应商将无法满足该订单的需求。但是若将订单E指派到车位1,使得停车位1中的空闲时间段整

	8:00~9:00	9:00~10:00	10:00~11:00	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	15:00~16:00	16:00~17:00
停车位 1	订单 1	订单 1	订单 1		订单 2	订单 2	订单 2		
停车位 2	订单 10	订单 10	订单 10		订单 5	订单 5	订单 5		
停车位 3	订单 6	订单 6		订单 12	订单 12	订单 12			
停车位 4	订单 13	订单 13	订单 13		订单 3	订单 3	订单 3		

预约状态
 空闲状态

图1 情况1的车位状态图

Fig.1 Graph of parking space status for the case 1

合到停车位2,那么就可以满足该需求。因此,在当前收益最大的前提下,指派方案应该要减少间隔时间

段的数量,整合指派后的停车资源,以增加管理者的潜在收益。

	8:00~9:00	9:00~10:00	10:00~11:00	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	15:00~16:00	16:00~17:00
停车位 1	订单 A	订单 A	订单 A			订单 B	订单 B	订单 D	订单 D
停车位 2	订单 C			订单 E	订单 E	订单 F	订单 F	订单 F	
停车位 3		订单 G	订单 G	订单 H	订单 H	订单 J	订单 J		
停车位 4	订单 I	订单 I	订单 L	订单 L	订单 O				
停车位 5	订单 K		订单 N	订单 N	订单 N	订单 M	订单 M		

预约状态
 空闲状态

图2 情况2的车位状态图

Fig.2 Graph of parking space status for the case 2

2.3 停车位调度模型优化

在获取当前最大收益的前提下,为了对分散的停车资源进行整合以增加管理者的潜在收益,本文对上述车位指派模型进行了优化,得出了基于组合分配的停车位调度方法。具体的实现方案将在下文展示。

定义9 $\bar{a} = \{a_x, a_y, \dots, a_z\}$ ($0 \leq x \neq y \neq z < m$) 表示一个组合代理。每个组合代理都是由若干个订单组成的^[19-21]。

定义10 $\bar{A} = \{\bar{a}_0, \bar{a}_1, \dots, \bar{a}_k, \dots, \bar{a}_{u-1}\}$ ($0 \leq k < u$) 表示一个组合代理集合。在本文中,用 $u = |\bar{A}|$ 表示组合代理集合 $\bar{A}$ 的大小, k 表示组合代理的索引标识。

定义11 组合代理停车时间矩阵 $\bar{P}$ 是一个 $u \times n_t$ 矩阵,其中 $\bar{P}[k, t] \in \{0, 1\}$ 。 $\bar{P}[k, t] = 1$ 表示组合代理 k 中的用户要在时间段 t 停车, $\bar{P}[k, t] = 0$ 则相反。矩阵 $\bar{P}$ 的计算如下。

$$\bar{P}[k, t] = \sum_{a_i \in \bar{a}_k} P[i, t] (0 \leq t < n_t) \quad (12)$$

定义12 组合代理停车费用向量 F 是一个 u 维向量,其中 $F[k]$ 表示组合代理 k 所需的停车费用,单位为元。向量 F 的计算如下。

$$F[k] = \sum_{t=0}^{n_t-1} \bar{P}[k, t] \times f \quad (13)$$

定义13 间隔时间段向量 Ψ 是一个 u 维向量,其中 $\Psi[k]$ 表示组合代理 k 中订单服务之间的间隔时间段的数量。

在获得组合代理的停车费用向量 F 以及间隔时间段向量 Ψ 后,可以采用合并排序算法对组合代理进行排序,算法的时间复杂度为 $O(u \log_2 u)$ 。根据停

车费用对组合代理进行降序排列,若停车费用相同,则根据间隔时间段数进行升序排列。

定义14 组合代理评估矩阵 $\bar{Q}$ 是一个 $u \times n$ 矩阵,其中 $\bar{Q}[k, j] \in [0, 1]$ 表示组合代理 k 对角色 j 的评估值。 $\bar{Q}[k, j] = 1$ 为最高值, $\bar{Q}[k, j] = 0$ 为最低值。

由于指派模型的目标是在获取当前最大收益的前提下,减少间隔时间段的数量以增加管理者的潜在收益。因此,影响组合代理评估值的首要因素是停车费用,次要因素则是间隔时间段的数量。矩阵 $\bar{Q}$ 的计算如下。

$$\bar{Q}[k, j] = F[k] - \frac{\Psi[k]}{n_t} \times f \quad (14)$$

由于组合 k 的间隔时间段数 $\Psi[k]$ 小于 n , 因此式(14)确保了停车费用越高的订单组合,其评估值越高。

定义15 组合代理冲突矩阵 A^c 是一个 $u \times u$ 矩阵^[10],其中 $A^c[k_1, k_2] \in \{0, 1\}$ 。 $A^c[k_1, k_2] = 1$ 表示组合代理 k_1 和 k_2 之间存在冲突, $A^c[k_1, k_2] = 0$ 则表示没有冲突。

当组合代理 k_1 和 k_2 中存在相同的订单时, k_1 和 k_2 之间存在冲突。

定义16 组合代理分配矩阵 $\bar{T}$ 是一个 $u \times n$ 矩阵^[18],其中, $\bar{T}[k, j] \in \{0, 1\}$ 表示组合代理 k 是否扮演角色 j 。 $\bar{T}[k, j] = 1$ 表示组合代理 k 扮演角色 j , $\bar{T}[k, j] = 0$ 则相反。

定义17 基于组合分配的停车位调度模型的目标函数及其约束如下所示。

$$\max \delta = \sum_{k=0}^{u-1} \sum_{j=0}^{n-1} \bar{Q}[k, j] \times \bar{T}[k, j] \quad (15)$$

s.t.

$$\bar{T}[k, j] \in \{0, 1\} (0 \leq k < u, 0 \leq j < n) \quad (16)$$

$$\sum_{j=0}^{n-1} \bar{T}[k, j] \leq 1 (0 \leq k < u) \quad (17)$$

$$\sum_{k=0}^{u-1} (\bar{P}[k, t] \times \bar{T}[k, j]) \leq L[j, t] (0 \leq t < n_t, 0 \leq j < n) \quad (18)$$

$$\sum_{k=0}^{u-1} \bar{T}[k, j] \leq 1 (0 \leq j < n) \quad (19)$$

$$A^c[k_1, k_2] \times \sum_{j=0}^{n-1} (\bar{T}[k_1, j] + \bar{T}[k_2, j]) \leq 1 (0 \leq k_1, k_2 < u) \quad (20)$$

式中,约束(16),(17)和(18)的意义分别与约束(7),(8)和(9)的意义相同。约束(19)表示每个角色只能被一个组合代理扮演。约束(20)表示每个订单只能被指派一次。目标函数是要获得评估值最高的指派方案。由于式(14)约束了评估值越高的订单组合,其停车费用越高,因此该模型能够获得当前收益最优的指派方案。

通过定义17中的模型得到的分配结果如图3和4所示。通过与图1和2对比可以看出,基于组合分配的停车位调度模型可以在获取当前最优收益的前提下,减少间隔时间段的数量。

	8:00~9:00	9:00~10:00	10:00~11:00	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	15:00~16:00	16:00~17:00
停车位 1	订单 1	订单 1	订单 1	订单 14	订单 14	订单 14			
停车位 2	订单 10	订单 10	订单 10	订单 11	订单 11	订单 11			
停车位 3	订单 6	订单 6	订单 7	订单 7	订单 7				
停车位 4	订单 13	订单 13	订单 13	订单 12	订单 12	订单 12			

预约状态
 空闲状态

图3 情况1的分配结果

Fig.3 Graph of assignment result for the case 1

	8:00~9:00	9:00~10:00	10:00~11:00	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	15:00~16:00	16:00~17:00
停车位 1	订单 A	订单 A	订单 A	订单 H	订单 H	订单 M	订单 M	订单 D	订单 D
停车位 2	订单 K	订单 G	订单 G	订单 E	订单 E	订单 F	订单 F	订单 F	
停车位 3	订单 I	订单 I	订单 L	订单 L	订单 O	订单 B	订单 B		
停车位 4									
停车位 5	订单 C		订单 N	订单 N	订单 N	订单 J	订单 J		

预约状态
 空闲状态

图4 情况2的分配结果

Fig.4 Graph of assignment result for the case 2

在基于组合分配的停车位调度方法中,指派元素由单个代理变为组合代理。组合代理的构建过程如算法1所示。

算法1 组合代理形成算法

1) 输入: A : 原始代理集; P : 代理停车时间矩阵。

2) 初始化;

(a) $\bar{A} = \phi$;

(b) 将原始代理集 A 中的每个代理 $a_i (0 \leq i < m)$ 作为一个单独的代理集 $\{a_i\}$, 并加入到组合代理集 $\bar{A}$ 中: $\bar{a}_k = \{a_i\}$, $\bar{A} \leftarrow \bar{a}_k$, 并根据式(12)获得对应的矩阵 $\bar{P}$ 。

3) 进行组合:

(a) d_s : 记录上一轮组合过程开始时, 集合 $\bar{A}$ 中组合代理的数量; d_e : 记录上一轮组合过程结束时, 集合 $\bar{A}$ 中组合代理的数量; d : 记录每个步骤中, 集合 $\bar{A}$ 中组合代理的数量; i : 表示原始代理集 A 中, 代理 a_i 的索引;

$d_s = 0, d_e = |\bar{A}|, d = |\bar{A}|, k = 0, i = 0$;

(b) 将原始代理集 A 中的代理 a_i 分别与组合代理集 $\bar{A}$ 中每个新增的组合代理 $\bar{a}_k (d_s \leq k < d_e)$ 进行匹配;

(c) 若代理 a_i 与组合代理 $\bar{a}_k$ 的停车时间段存在冲突, 即 $P[i, t] + \bar{P}[k, t] > 1 (0 \leq t < n_t)$, 则匹配失败;

(d) 若代理 a_i 与组合代理 $\bar{a}_k$ 的停车时间段不存在冲突, 则将 a_i 与 $\bar{a}_k$ 进行组合, 形成一个新的组合代理, 并将其加入到组合代理集 $\bar{A}$ 中, $\bar{a}_d = \bar{a}_k \cup \{a_i\}$, $\bar{A} \leftarrow \bar{a}_d, d++$ 。

(e) $k++$, 转到步骤3(b), 直至 $k = d_e$;

(f) $i++$, 转到步骤3(b), 直至 $i = m$;

(g) 一轮组合过程结束, 判断是否需要进行新一轮组合;

(h) 若 $d - d_e > 0$, 则令 $d_s = d_e, d_e = |\bar{A}|$, 并转到步骤3(b) 进行新一轮组合;

4) 输出: $\bar{A}$: 组合代理集; $\bar{P}$: 组合代理的停车时间矩阵。

基于组合分配的停车位调度方法的实现过程如算法2所示。

算法2 基于组合分配的停车位指派算法

1) 输入: A, P, L 。

2) 初始化;

(a) 调用算法1获取组合代理集 $\bar{A}$ 及其对应的停车时间段矩阵 $\bar{P}$;

(b) 根据定义12、13和14计算出组合代理评估矩阵 $\bar{Q}$;

(c) 根据定义15计算出组合代理冲突矩阵 A^c ;

(d) 根据定义17获得分配矩阵 $\bar{T}$, 并计算出对应的群组效益值 δ ;

3) 输出: $\bar{T}, \delta$ 。

在算法1中,步骤2的复杂度为 $O(m)$;步骤3的复杂度为 $O(mu)$ 。在算法2中,步骤2(a)的复杂度为 $O(mu)$;步骤2(b)和2(c)的复杂度为 $O(u)$;步骤2(d)的复杂度为 $O(u^3)$ 。因此,基于组合分配的停车位调度方法的复杂度为 $O(u^3)$, u 为组合代理的数量。

3 实验结果及讨论

本节通过仿真实验来验证所提方法的可行性。实验所使用的平台为运行内存16 GB的计算机,以及型号为Intel(R) Core (TM) i7-12800HX的处理器,开发环境为Eclipse软件。

为了验证所提方法在获取最优收益方面的性能,实验1将定义17中的停车位调度模型与分支定界算法进行对比。实验设定 m 从10增加到100,步长为10, $n = m/5$, $n_t = 12$, $L[j,t] = 1$, $f = 10$ 。对于每个 m ,都进行100次随机实验并取平均值作为结果。实验结果如图5~6所示。

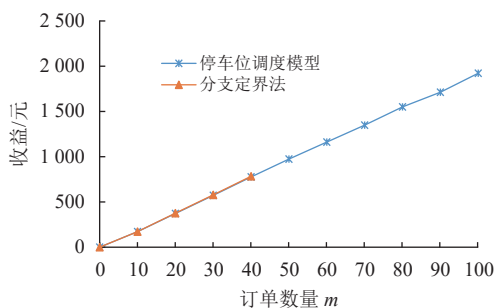


图5 收益对比

Fig.5 Comparison of the profit

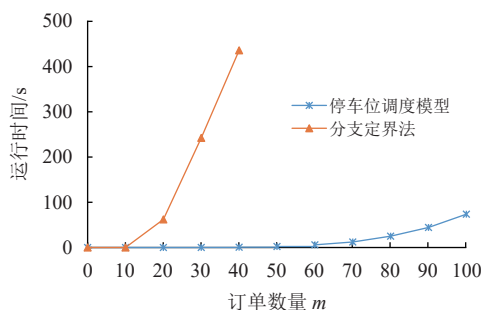


图6 求解时间对比

Fig.6 Comparison of the solution time

分支定界法是一种用于求解整数规划问题的算法,通过将大问题划分为一系列小问题,进行逐步求解,最终获得全局最优解。但由于其时间复杂度为 $O(2^n)$,因此当求解时间超过600 s,则认为其求解失败。

由于分支定界法能够获得全局最优解,因此从图5可以看出,本文所提的方法能够获得当前收益最优的解。图6表明,与分支定界方法相比,本文提出的

算法拥有更短的求解时间。当 $m \leq 70$ 时,停车位调度模型能在13 s内完成求解。由于本文所研究的是单个停车场内部的停车位指派问题,单次指派的订单数量一般不会超过70个,因此该停车位调度模型是可行的。

为了验证优化后的停车位调度模型在减少间隔时间段数方面的性能,实验2将定义8的停车位指派模型(优化前)与定义17的模型(优化后)进行对比。实验设定与实验1相同,实验结果如图7所示。

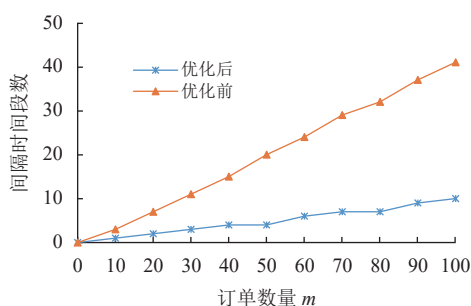


图7 间隔时间段数对比

Fig.7 Comparison of the number of interval time

由图7可知,优化后的模型能够有效地减少间隔时间段的数量。

为了验证 n 对停车位调度模型性能的影响,实验3设定 m 从6增加到60,步长为6,并分别设定 $n = m/3$, $n = m/6$,其他设定与实验1相同。实验的平均求解时间如图8所示。

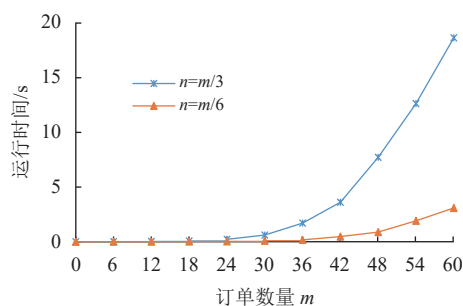


图8 不同n值下的运行时间对比

Fig.8 Comparison of the solution time under different n values

图8表明, n 值越小,所需的求解时间越短。这表明当预约订单数相同时,停车空位数越少,求解时间越少。

综合上述的实验结果,基于组合分配的停车位调度模型能够在获得当前最优收益的前提下,减少指派后的间隔时间段的数量。因此,本文所提出的停车位调度模型是可行的。

4 结论

本文对单个停车场内的车位调度问题进行了研究,结合角色协同理论,提出了基于组合分配的停车

位调度模型。该模型的目标是增加车位供应商的收益。在一个调度周期内,对订单进行组合并以订单组合作为指派元素,以避免订单被分散指派而导致资源的低效利用。然后,根据组合代理的停车费用和间隔时间段数,计算出组合代理对角色的评估值,并保证组合代理的停车费用越高,评估值越高。最后,以获取最大评估值为目标,对订单组合进行指派。实验结果证明了该模型的可行性。进一步的研究方向为:(1)研究多个停车场之间的车位调度问题;(2)从用户的角度进行研究。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2024-02-29) [2024-09-29]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
- [2] ZHANG X Y, PITERA K, WANG Y Q. Parking reservation techniques: a review of research topics, considerations, and optimization methods[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 10(6): 1099-1117.
- [3] ABDEEN M A R, NEMER I A, SHELTAAMI T R. A balanced algorithm for in-city parking allocation: a case study of Al Madinah City[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 3148.
- [4] WANG Y, CHEN Q. Dynamic parking allocation model in a multideestination multiple parking lot system[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2022, 14(5): 195-208.
- [5] NAKAZATO T, FUJIMAKI Y, NAMERIKAWA T. Parking lot allocation using rematching and dynamic parking fee design[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2022, 9(4): 1692-1703.
- [6] YANG G, CHEN J, LU K, *et al.* Improving utilization efficiency and drivers' degree of satisfaction in urban complex parking lot through modelling the dynamic allocation of parking spaces[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(18): 8680-8696.
- [7] ZHANG W, LI W D, TENG S H, *et al.* A new insight in medical resources scheduling of physical examination with adaptive collaboration[C]//2021 IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Dalian: IEEE, 2021: 546-551.
- [8] HUANG B Y, ZHU H B, LIU D N, *et al.* Solving last-mile logistics problem in spatiotemporal crowdsourcing via role awareness with adaptive clustering[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2021, 8(3): 668-681.
- [9] JIANG Q, ZHU H B, QIAO Y, *et al.* Refugee resettlement by extending group multirole assignment[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2021, 10(1): 36-47.
- [10] CHENG Z X, ZHU H B, LIU D N. Solving the external auditor assignment problem via GMRACCF[C]//2024 27th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Tianjin: IEEE, 2024: 1479-1484.
- [11] LIU X F, ZHU H B, LIU D N. Solving the energy supply strategic planning problem by extended group multirole assignment[C]//2024 27th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Tianjin: IEEE, 2024: 1461-1466.
- [12] KE X T, ZHU H B, LIU D N. Group multirole assignment with cooperation, conflict, and public interest factors[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2024, 11(5): 6112-6124.
- [13] 任军效, 常新. 考虑用户满意度的车位共享分配模型[J]. *数学的实践与认识*, 2024, 54(9): 38-51.
- [13] REN J X, CHANG X. A shared parking allocation model based on customer satisfaction[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2024, 54(9): 38-51.
- [14] 宋现敏, 湛天舒, 李海涛, 等. 考虑用户成本和泊位利用率的停车预约分配模型[J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*. (2023-10-17) [2025-01-09]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230682>.
- [14] SONG X M, ZHAN T S, LI H T, *et al.* Reservation and allocation model considering the user cost and the utilization of parking space[J/OL]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*. (2023-10-17) [2025-01-09]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230682>.
- [15] KIM O T, TRAN N H, PHAM C, *et al.* Parking assignment: Minimizing parking expenses and balancing parking demand among multiple parking lots[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 17(3): 1320-1331.
- [16] 王元庆, 蔺思玉, 谢明辉, 等. 多停车场共享车位动态预约与分配优化模型[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(9): 12-21.
- [16] WANG Y Q, LIN S Y, XIE M H, *et al.* Dynamic reservation and allocation optimization model of shared parking slots in multiple parking lots[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2022, 50(9): 12-21.
- [17] JIANG Q, LIU D N, ZHU H B, *et al.* Quasi group role assignment with role awareness in self-service spatiotemporal crowdsourcing[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, 9(5): 1456-1468.
- [18] LIANG L, FU J D, ZHU H B, *et al.* Solving the team allocation problem in crowdsourcing via group multirole assignment[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, 10(3): 843-854.
- [19] MA H, LI J Z, ZHU H B, *et al.* Collaborative optimization of learning team formation based on multidimensional characteristics and constraints modeling: a team leader-centered approach via E-CARGO[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, 11(1): 184-196.
- [20] ZHU H B. Group role assignment with constraints (GRA+): a new category of assignment problems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 53(3): 1670-1683.
- [21] TENG S H, CHEN Y H, TENG L Y, *et al.* Solving injection molding production cost problem based on combined group role assignment with costs[C]//International Conference on Web Information Systems Engineering. Singapore: Nature, 2023: 748-762.

(责任编辑:王威娜 英文审核:费伦科)