

# 私家车位预订匹配优化模型及计算方法研究

孙智慧, 李文雄

(石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**针对现有停车难问题,以共享经济理念充分挖掘私家车位停车资源以供社会停车需求者停放已成为一种新的研究思路。从私家车位供给、资源的优化配置角度出发,提出一种关于私家车位的预订匹配的优化模型与计算方法。以提高共享停车位利用率和停车用户满意度为目标,将停车用户按照偏好的先后顺序依次将以同一偏好预订同一车位的用户与该停车位进行匹配,使得停车位利用率最大的停车用户为最终预订成功的用户。首先,建立停车位预订匹配模型,其次针对该模型利用树和深度优先遍历算法进行求解,最后,通过实例进行验证。研究表明,该方法与传统先预订先得的方法相比,用户满意度和停车位利用率较高。

**关键词:**私家车位;预订匹配;停车偏好;停车位共享

**中图分类号:** U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2019)04-0089-08

## 0 引言

城市小汽车保有量激增与原有停车位规划不足、配建指标偏低、停车管理方法和技术落后的矛盾导致城市停车困难。尤其在城市商业网点、医院等停车需求旺盛的地点,停车资源已经严重不足,但在其周围的居住小区内,私家车主白天上班或其它外出活动时出现了大量闲置停车位。如何有效利用闲置的私家车位,已受到了学者、专家、政府的广泛关注。李菲<sup>[1]</sup>基于共性停车理论,对小区停车位使用规律、实施共享停车的可行性、共享模式、共享实施步骤等方面进行了研究。陈峻等<sup>[2]</sup>研究了中心城区的高校和周围小区停车位之间的共享问题,以提高中心城区停车位利用率为目标,建立停车位分配双层模型,通过实例研究发现,高校与周围小区之间有着时间上的互补性,两地在特定时段实现车位共享可提高停车位利用率。段满珍等<sup>[3-7]</sup>在共享停车理论上有着较为深入的研究,通过分析居住区停车位的闲置特性,针对不同情况建立了居住区停车位共享服务能力评估模型、诱导服务的泊位协调控制双层规划模型、个性化共享停车服务模型、停车场均衡利用博弈模型。Shao et al<sup>[8]</sup>研究了在车主上班期间通过一个停车平台出租给社会停车的供需分配问题。通过引入一个简单二进制线性规划模型来模拟预订分配过程,从而在有限时间和空间的约束下来最大化停车位的占用率或最大化平台的利润。姚恩建等<sup>[9]</sup>以提高停车位利用率为目标,将停车位供需匹配转化为基于颜色约束的加权顶点着色问题,建立共享车位资源优化配置模型与算法。

目前,关于共享停车方面的研究多数集中在共享策略研究、共享需求预测研究,鲜有从考虑用户停车偏好和停车位优化配置角度研究空闲私家车位与停车需求者的匹配关系。因此,在前人研究的基础上针对私家车位共享问题,建立了私家车位预订匹配优化模型与算法以提高用户满意度和停车位利用率。

## 1 私家车位预订匹配优化模型建立

### 1.1 私家车位预订匹配情景

假设关于私家车位共享平台已建立。在某商业网点附近的小区中有  $N$  个可用于共享的停车位,将每

收稿日期:2018-04-04 网络出版日期:- 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzb.20180072

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1402.n.20191120.1354.015.html>

作者简介:孙智慧(1990—),男,硕士研究生,主要从事交通信息化的研究。E-mail:sunzhahui\_jl@163.com

孙智慧,李文雄.私家车位预订匹配优化模型及计算方法研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2019,32(4):89-96.

个停车位的开放时间分成若干相等的时间段,比如以 0.5 h 为一个时间段。如某停车位开放时间是上午 8 时到下午 6 时,共享总时长为 10 h,则可分为 20 个时间段。假设以半小时为最小计时单位,社会停车用户通过手机提前进行预订,每隔  $T$  时间平台进行一次匹配处理。假设在  $T$  时间内有  $M$  个停车用户向平台提交停车位申请,且每个用户对搜索到满足其停车时间范围的停车位按照偏好程度由高到低的按顺序选出若干喜欢的停车位。

## 1.2 私家车位供给

令  $K$  表示该小区每个停车位的总共可共享时间段个数, $k = 1$  为开始时间段, $k = K$  为结束时间段。如果为每个停车位设置一个编号(从 1 到  $N$ )。在一个二维坐标空间中,用横坐标表示为每个停车位的编号,纵坐标表示为各个时间段,那么  $s_{nk} = 1$  表示第  $n$  个停车位在第  $k$  时间段闲置, $s_{nk} = 0$  表示已占用或其它情况,则停车供应矩阵

$$\mathbf{S}_{N \times K} = [s_{nk}] \quad n = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

## 1.3 私家车位需求

若  $r_{mk} = 1$  表示第  $m$  个请求停在第  $k$  个时间段, $r_{mk} = 0$  表示其它情况,则它停车需求矩阵

$$\mathbf{R}_{M \times K} = [r_{mk}] \quad m = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

## 1.4 私家车位优化配置模型

### 1.4.1 私家车位利用率优化模型

若  $x_{nm} = 1$  表示第  $m$  个请求最终被编号为  $n$  的停车位接受(即匹配), $x_{nm} = 0$  表示其它情况,则停车选择矩阵可表示为

$$\mathbf{X}_{N \times M} = [x_{nm}] \quad n = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

停车占用矩阵可表示为

$$\mathbf{Z}_{N \times K} = [z_{nk}] = \mathbf{X}_{N \times M} \times \mathbf{R}_{M \times K} \quad n = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

其中

$$z_{nk} = \sum_{m=1}^M x_{nm} \cdot r_{mk} \quad n = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

$z_{nk} = 1$  表示第  $n$  个停车位在第  $k$  时间段被占用, $z_{nk} = 0$  表示闲置,没有被占用。那么停车位利用率  $\theta$  就可以表示为停车位占用与停车位供应之间的比值,即私家车位利用率优化模型为

$$\max \theta = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K z_{nk}}{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K s_{nk}} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \left( \sum_{m=1}^M x_{nm} \cdot r_{mk} \right)}{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K s_{nk}} \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^N x_{nm} \leq 1 \quad m = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

$$z_{nk} \leq s_{nk} \quad n = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

$$x_{nm} \in \{0, 1\} \quad n = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

式(7)表示每个停车用户只能选择停在一个车位上,式(8)表示用户只能预订停车位闲置时间范围,式(9)表示  $x_{nm}$  为 0 或 1 的值。

### 1.4.2 用户满意度优化模型

从车位预定申请提交、车位成功预定到车位使用的全过程体验,用户会有一个满意度。用户的满意度越高,说明该平台被用户认可程度和受欢迎的程度就越高。

与用户满意度最直接相关的指标之一是预订结果是否实现了其偏好序(是否预订到了理想的车位)。如果实现偏好序就意味着用户预订到的停车位是其喜欢的停车位之一,而偏好序等级越高意味着预订到的停车位越满意。令  $R_m$  表示为第  $m$  个预订者预订成功时停车位的偏好值。将这种满意度称之为偏好满意度,用  $f(R_m)$  表示,图 1 为偏好满意度函数示意图。

$$f(j) = \frac{J+1-R_m}{J} \quad 1 \leq R_m \leq J \quad (10)$$

式中,  $J$  为允许选择的最大偏好序个数或最大偏好数, 假设  $J$  为定值, 那么,  $0 < f(R_m) \leq 1, f(1) = 1, R_m$  越大,  $f(R_m)$  越小。

与用户满意度相关的另一指标是等待预订结果的等待时间, 等待时间越长用户的满意度会越差。为了衡量用户等待预订结果的满意程度, 给出了等待满意度函数, 如图 2 所示。

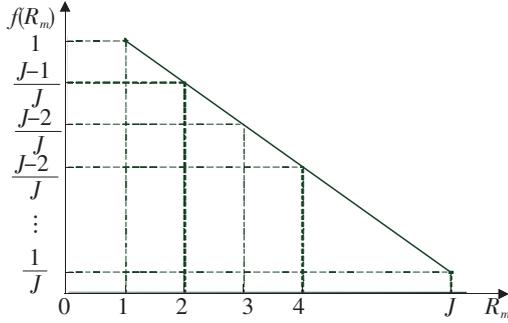


图 1 偏好满意度函数示意图

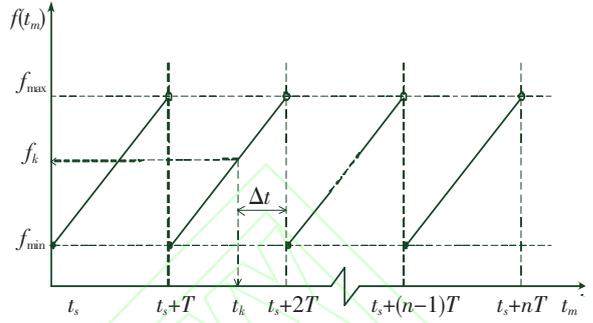


图 2 等待满意度函数示意图

图 2 中横坐标  $t_m$  表示为第  $m$  个用户开始预订停车位的时间,  $t_s$  为平台开始接受预订的开始时间,  $t_s + nT$  是接受预订的截止时间,  $n$  为  $t$  所在的预订周期序数。纵坐标  $f(t_m)$  表示用户  $m$  等待预订结果的等待满意度, 其中  $f_{\max}$  表示最高等待满意度, 即预订后立刻可以收到预订结果,  $f_{\min}$  表示为最低满意度, 即预订后需要等待  $T$  时间才可以收到预订结果, 其中,  $0 < f(t_m) \leq 1, 0 \leq f_{\min} < f_{\max} < 1$ 。  $T$  为平台预订分配的周期时间, 即每隔  $T$  时间计算并分配一次。用户预订的时间越接近计算时间, 需要等待的时间越短。所以, 用户的等待满意度是随着预订时间周期性线性变化的, 在每个周期内是一个左闭右开的线性函数。假如某用户在  $t_k$  时刻预订的停车位需要等待  $\Delta t$  才能收到预订结果, 其等待满意度为  $f_k$ 。那么等待满意度的函数表达式为

$$f(t_m) = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{T} [t_m - t_s - (n - 1)T] + f_{\min} \tag{11}$$

式中,  $t_s + (n - 1)T \leq t_m < t_s + nT$ 。

那么, 用户  $m$  最终满意度  $\pi_m$  可表示为偏好序满意度和等待满意度的线性组合, 即

$$\pi_m = \alpha \cdot f(R_m) + \beta \cdot f(t_m) = \alpha \frac{J + 1 - R_m}{J} + \beta \frac{f_{\max} - f_{\min}}{T} [t_m - t_s - (n - 1)T] + f_{\min} \tag{12}$$

使得,  $1 \leq R_m \leq J, t_s + (n - 1)T \leq t_m < t_s + nT, \alpha + \beta = 1$ 。

式中,  $\alpha$  为偏好满意度系数;  $\beta$  为等待满意度系数。

$\pi_m$  只是针对某个停车预订者的满意度, 评价该平台被用户认可的程度要分析用户平均满意度, 则用户平均满意度  $\pi$  优化模型可表示为

$$\max \pi = \frac{\sum_{m=1}^M \pi_m - \mu (M - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{mn})}{M} \tag{13}$$

式中,  $M$  为总共向平台预订车位的请求数;  $\pi_m$  为第  $m$  个用户的满意度;  $\mu$  为由于被拒绝使得预订者满意度降低的惩罚因子。

## 2 私家车位预订匹配模型的计算方法

针对以上提出的 2 种优化模型, 即私家车位利用率优化模型和用户平均满意度优化模型, 提出一种私家车位预订分配方案及对应的计算方法, 该方法可同时满足停车位利用率最优和用户满意度最优。

### 2.1 停车用户请求数字化

将所有以相同偏好预订同一停车位的用户按预订时间的先后顺序从 1 开始编号, 然后依次递增。令  $t_m^s$  和  $t_m^e$  分别表示为第  $m$  个请求的开始时间段和结束时间段, 那么请求持续时间段长度为  $t_m^e - t_m^s + 1$ 。图

3 为假设 7 个用户预订同一停车位的不同时段预订图,表 1 为这 7 个用户的预订请求信息。

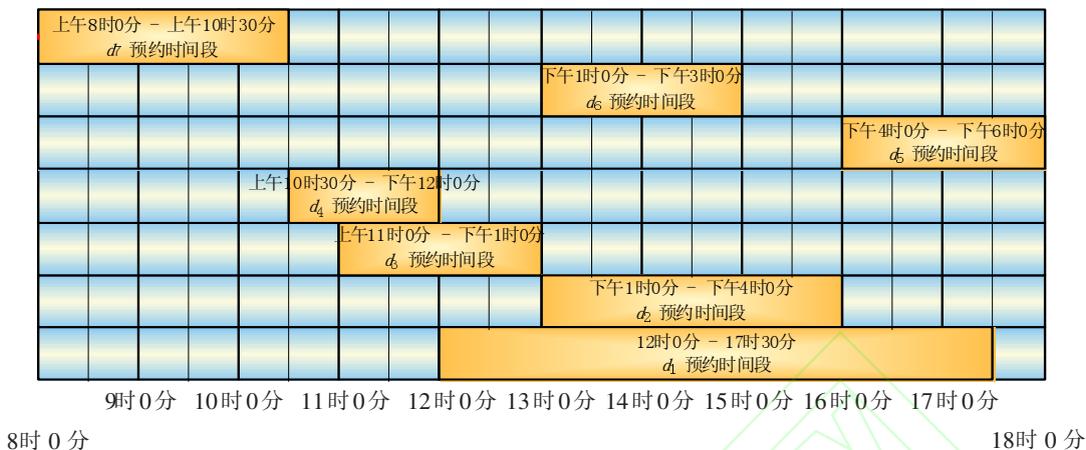


图 3 不同时段预订图

2.2 寻找后匹配项

所谓“匹配”是指针对同一车位的 2 个预订请求的时间段不重叠,以保证每一时刻只允许一辆车的停放。要使得任意 2 个用户  $d_i$  和  $d_j$  的预订时间段不重叠,只需判断  $d_i$  的结束时间段小于  $d_j$  的开始时间,或者判断  $d_i$  的开始时间段大于  $d_j$  的结束时间段即可。“后匹配项”是指比自己编号大且匹配的用户。如,  $d_1$  的后匹配项为  $d_4$  和  $d_7$ ,关于该停车位的全部匹配项如表 2 所示。

表 1 预订请求信息

用户编号	开始时间段	结束时间段	总时间段
$d_1$	9	19	11
$d_2$	11	17	7
$d_3$	7	10	4
$d_4$	6	8	3
$d_5$	17	20	4
$d_6$	12	14	3
$d_7$	1	5	5

表 2 不同用户对应的后匹配项

用户编号	后匹配项
$d_1$	$d_4, d_7$
$d_2$	$d_3, d_4, d_5, d_7$
$d_3$	$d_5, d_6, d_7$
$d_4$	$d_5, d_6, d_7$
$d_5$	$d_6, d_7$
$d_6$	$d_7$
$d_7$	—

现用“树”的形式表示用户之间的匹配关系,如图 4 所示,根节点表示同一预订等待时间内预订同一停车位的所有用户的编号,子节点表示后匹配项对应的编号。

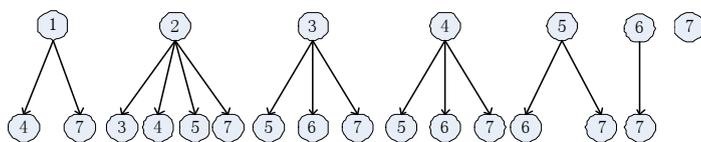


图 4 不同用户对应后匹配项树

2.3 寻找最佳组合

采用图论中优先遍历算法 DFS( $v$ )查找以每个用户为根节点的最佳组合。所谓“深度优先遍历 DFS( $v$ )”的过程如下。

(1)访问初始根节点  $v$ ,并将该点加入到组合,同时记录组合的长度(即该组合对应用户预订车位时段总长度)。

(2)遍历根节点  $v$  的第一个左子节点  $v_1$  (如果存在),并将该点加入到该组合中,同时记录组合的长度,再从  $v_1$  出发进行深度优先搜索,判断  $v_1$  的第一个左子节点(如果存在)是否与其父节点以上节点相匹配,如果匹配则将该点加入到组合中并更新组合的长度,否则,回溯到其父节点,再访问父节点的第二左



重复的随机时间段有 17 组(如 8:30~10:30,9:00~11:00,9:30~11:30 等等)。为分析停车位利用率 随预订者请求数 M 的变化趋势,将 M 从 0 开始一直到 400 个结束,计算对应的  $\theta$ 。

图 6 为采用优化前与优化后 2 种方法停车位利用率  $\theta$  随预订请求数 M 的变化曲线图,对于采用优化后(优化前同理)方法 随 M 的变化曲线,开始时随着 M 的增加,以  $k=0.004$  的斜率线性增加,当 M 达到 176 时,停车位利用率  $\theta$  为 0.704,当 M 大于 176 时,随着 M 的增加  $k$  逐渐减少, $\theta$  依然在小幅度增加。当 M 达到 268 时, $\theta$  达到最大 0.836, $k=0$ ,之后随着 M 的增加  $\theta, k$  将保持不变。

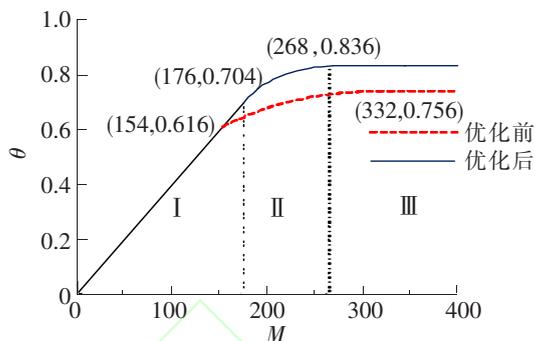


图 6 停车位利用率  $\theta$  随预订者请求数 M 的变化对比图

I、II、III 为采用优化后(优化前同理)方法  $\theta$  随 M 变化的 3 个阶段。以下为实验的结论。

第 I 阶段为不筛选阶段,在该阶段有充足的停车位,在这个阶段的预订者都可分配到停车位,即这些预订者的请求都不会拒绝。

第 II 阶段为筛选阶段,也为优化后方法发挥优势的阶段,在该阶段采用优化后的方法的停车位利用率要高于采用优化前的方法的停车位利用率。

第 III 阶段为过饱和阶段,所有满足预订的时段(其长度大于或等于 2 h 的连续时段)都被占用,此时,这些停车位将不再接受任何预订者的请求,若采用优化前方法,由于存在满足预订时段的停车位,该车位将一直接受预订者的请求,直到有正好符合的预订者的请求占用为止。

所以,在相同情况下采用优化后方法相比优化前会使得停车位利用率更高。以下分析预订者平均满意度  $\pi$ 。

采用优后方法时当  $\theta$  达到最大 0.836 时拒绝人数为 59(268 - 1 000 × 0.836/4) 人,采用优化前方法时,当  $\theta$  达到最大 0.756 时拒绝人数为 143(332 - 1 000 × 0.756/4) 人,所以,采用优化后方法不仅使得停车位利用率增大,而且拒绝人数也在减少,从而使得用户整体满意度提高。

以上是从拒绝人数角度考虑用户满意度,为进一步对比采用 2 种方法用户满意度,从用户偏好满意度分析,既不考虑用户等待时间也不考虑拒绝人数,只考虑当  $\theta$  同时最大且相等时用户的平均满意度。为使  $\theta$  同时最大且相等,假设停车用户的停车时间段请求规律为:从最开始的 2 h(8:00~10:00)到最后 2 h(16:00~18:00)之间以 0.5 h 为一个间隔“按顺序”产生,则不重复的时间段有 17 组。如图 7 为按照以上请求规律采用优化前方法停车位占用分布图,图 8 为按照以上请求规律采用优化后方法停车位占用分布图,两种情况最终都有 213 个用户分配到停车位, $\theta = 213 \times 4 / 1 000 = 0.852$ 。

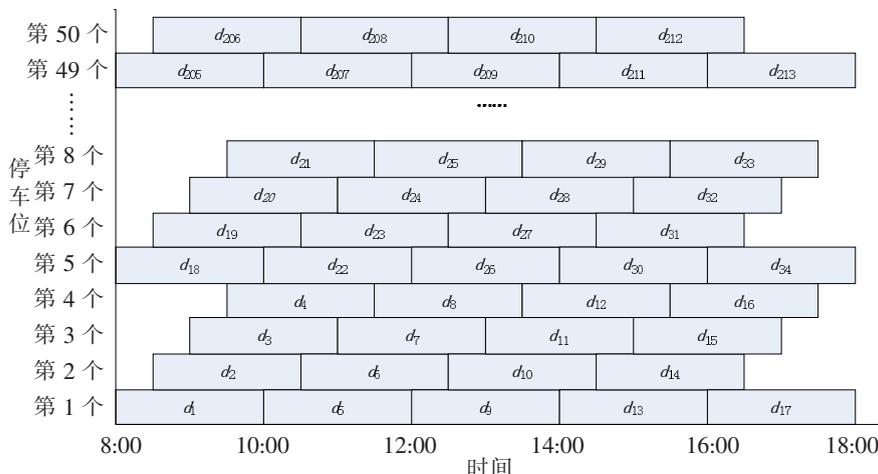


图 7 采用优化前方法停车位占用分布图

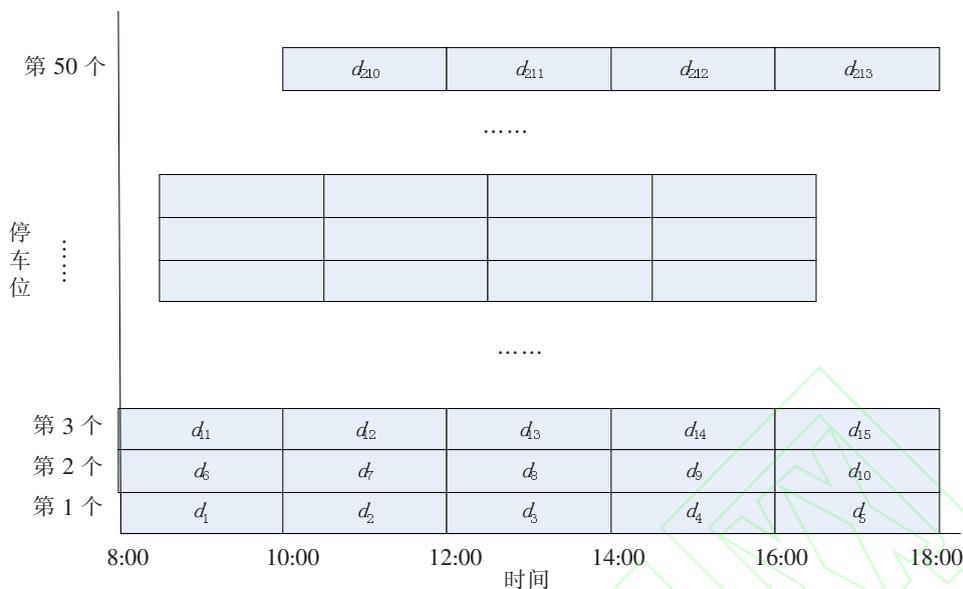


图 8 采用优化后方法停车位占用分布图

在式(12)中,令 $\alpha = 1, \beta = 0, J = 50$ ,将 $\pi_m$ 代入式(13)中,令 $M = 213$ ,计算得出,采用优化前方法用户平均满意度 $\pi = 0.511$ ,采用优化后方法用户平均满意度 $\pi = 0.533$ 。所以采用优化后方法相比采用优化前方法用户平均满意度高。

### 4 结论

在假设私家车位共享平台已建立的情况下,针对私家车位预订过程中的供给和需求之间的优化配置问题,提出了优化模型与计算方法,即将停车用户按照停车偏好和停车位分组分批处理,采用树和图论深度优先遍历算法进行了求解,通过与传统先到先得方法结果对比,验证了该模型与计算方法不仅可以提高用户满意度,还可以最大化停车位利用率,对于缓解城市停车难有着较大的社会效益。该方法将对实施私家车位共享有一定的指导意义,且该方法还可为其它相关匹配问题提供参考。

### 参 考 文 献

[1]李菲. 住区停车资源共享的策略研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
 [2]陈峻, 谢凯. 中心城区高校停车泊位共享的动态分配模型及效果评价[J]. 中国公路学报, 2015, 28(11): 104-111.  
 [3]段满珍, 杨兆升, 张林, 等. 居住区泊位对外共享能力评估模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(4): 106-112.  
 [4]段满珍, 杨兆升, 米雪玉, 等. 基于居住区共享停车的双层规划诱导模型[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(6): 1250-1257.  
 [5]段满珍, 杨兆升, 张林, 等. 个性化诱导下的居住区共享停车泊位分配模型[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2017, 38(2): 174-179.  
 [6]段满珍, 米雪玉, 李铮, 等. 毗邻关系居住区与医院共享停车分析[J]. 城市公共交通, 2016(6): 24-29.  
 [7]段满珍, 陈光, 曹会云, 等. 停车场均衡利用博弈模型[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(4): 810-816.  
 [8]Shao C, 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.  
 [9]姚恩建, 张正超, 张嘉霖, 等. 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, 2017, 17(2): 160-167.

Sun Zhihui, Li Wenxiang

(School of Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** It has become a new research idea to make full use of the parking resources of private parking spaces for social parking users by sharing the economic concept. In order to improve the utilization rate of shared parking space and the satisfaction of parking users, this study presents an optimization model and calculation method of reservation matching for private parking spaces. The users who reserve to the same parking space with the same preference are matched in sequence in order of preference, so that the parking users with the largest utilization rate of parking space are the successful users of the final reservation. Firstly, a model of parking space reservation matching is established. Secondly, this model is solved by the tree and depth first traversal algorithm. Finally, it is verified by an example. The results show that this method has higher user satisfaction and parking utilization rate compared with the traditional first-book-first-get method.

**Key words:** private parking space; reservation and matting; parking preference; parking sharing

(上接第 65 页)

- [2] 杨彩霞, 黎建军, 孙卫红, 等. 支撑式油气管道机器人变径机构优化设计与仿真[J]. 机械传动, 2018, 42 (3) : 38-44.
- [3] 刘清友. 油气管道机器人技术现状及发展趋势[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2016, 35 (1) : 1-6.
- [4] Tsai L W. Mechanism design: enumeration of kinematic structures according to function[M]. Florida: The Chemical Rubber Company Press, 2001.
- [5] 邓宗全, 陈军, 姜生元, 等. 六独立轮驱动管内检测牵引机器人[J]. 机械工程学报, 2005, 41 (9) : 67-72.
- [6] 张云伟, 颜国正, 丁国清, 等. 煤气管道机器人管径适应调整机构分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39 (6) : 950-954.
- [7] Roh S G, Choi H R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines[J]. IEEE transactions on Robotics, 2005, 21:1-17.
- [8] Park J, Hyun D, Cho W H, et al. Normal-force control for an in-pipe robot according to the inclination of pipelines[J]. IEEE transactions on Industrial Electronics, 2011, 58:5304-5310.

## Dynamic Analysis and Simulation of Adjusting Mechanism for Tracked Pipe Robot

Zhang Baozhen, Wang Zhanzhong, Yang Chenxia

(Department of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In order to improve the driving efficiency and pipeline adaptability of the tracked pipeline robot, a ball screw nut vice-triangle lifting adjusting mechanism is proposed based on the lift and ball screw nut pair adjusting mechanism. The adjusting mechanism is designed and its working principle is expounded. The main parameters that affect the output torque of the driving motor are determined by analyzing the dynamics of the adjusting mechanism and driving characteristics based on virtual work principle. A group of adjusting mechanism models are established using multi-body dynamics simulation software ADAMS, and dynamic simulation analysis is carried out. The simulation results show that the relationship between the output torque and the supporting angle can provide a theoretical basis for selecting suitable motor torque and supporting angle.

**Key words:** tracked pipeline robot; adjusting mechanism; ADAMS; dynamics analysis; simulation