

## 基于多Agent仿真的电动汽车分时租赁

王丽丽<sup>1,2</sup>, 田俊峰<sup>1</sup>, 杨磊<sup>3†</sup>

(1. 西南财经大学工商管理学院, 成都 611300; 2. 成都信息工程大学物流学院, 成都 610103; 3. 长安大学经济与管理学院, 西安 710064)

**摘要:** “互联网+交通”模式产生出一系列新兴业态,对人们的城市交通出行方式带来颠覆性的改变,其中电动汽车分时租赁在互联网租车背景下得到新发展. 鉴于此,从多Agent仿真的基本思路出发,以北京一嗨公司为例,针对电动汽车分时租赁系统中的主要对象租赁站、消费者和电动汽车车队进行交互模拟,通过分析车辆平均使用率、平均空闲率以及消费者满意度等对租赁商的运营能力进行评估,探讨车队规模和停车位数量对运营利润的影响. 比较消费者还车和站点员工还车情景,同时在Anylogic仿真平台上实现该模型.

**关键词:** 互联网+; 电动汽车; 分时租赁; 多Agent

**中图分类号:** F253      **文献标志码:** A

## Multi Agents based simulation of electric vehicle's car-sharing

WANG Li-li<sup>1,2</sup>, TIAN Jun-feng<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>3†</sup>

(1. Business Administration College, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 611300, China; 2. School of Logistics, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610103, China; 3. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** “Internet+transportation” mode has produced a series of new industry models, which a subversive change to the urban traffic mode, and especially promotes the electric vehicle(EV)'s car-sharing growth under the background of Internet tailored taxi. Aiming at the interaction among the stations, consumers and fleets, which are the main objects in the EV's car-sharing system, according to the basic idea of multi agents simulation, this paper proceeds to assess the operation capacity by the analysis of the average utilization rate, average idle rate and consumer satisfaction rate and taking Beijing's eHi car as an example, and explores the impact of fleet size and parking capacity on profit and compares between the consumer and faculty's drop-off modes. Finally, the simulation model of car sharing is implemented on the Anylogic platform.

**Keywords:** internet plus; electric vehicle; car-sharing; multi Agents

## 0 引言

“互联网+交通”模式产生出一系列新兴业态,对城市交通出行方式带来颠覆性的改变. 2014年7月,我国国务院办公厅发布《关于加快新能源汽车推广应用的指导意见》要求积极引导企业创新商业模式,因此具有灵活、方便性的电动汽车分时租赁模式进入人们的视野. 分时租赁源于分享经济,主要指重复性的短途小汽车租赁,租赁费用依驾驶时间、路程而定,具有分时共享、按需付费、全程自助和随借随还的特点. 目前大量研究结果表明,分时租赁可以降低平均行驶公里数、缓解交通堵塞<sup>[1]</sup>、减少二氧化碳排

放量<sup>[2]</sup>以及提高土地资源的有效利用.

“互联网租车”是分时租赁服务模式在移动互联网背景下的新发展. 2012年兴起的在线租车平台就已经具有“互联网+交通”的雏形,各类软硬件租车团队蜂拥而起,其中占据较大市场份额的包括来自华为、百度、易道用车等软件和神州租车、一嗨租车等公司. 许多租赁公司开始在业务上谋求创新和差异,为了追求绿色出行,推出新能源汽车类型,打造新能源出行平台. 与此同时,为了更好地推动电动汽车分时租赁的发展,我国各地方政府也积极出台相应的运营补贴政策,例如芜湖市出台的《新能源汽车推广应

收稿日期: 2017-04-19; 修回日期: 2017-10-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71571147); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(JBK1507067).

责任编委: 李国齐.

作者简介: 王丽丽(1986—),女,讲师,博士生,从事物流与供应链管理、分享经济的研究; 田俊峰(1973—),男,教授,博士生导师,从事供应链管理、系统工程等研究.

†通讯作者. E-mail: kandy0503@hotmail.com

用财政补贴资金管理办法(试行)》中给予每辆车最高不超过1000元/月的租赁补贴。

电动汽车分时租赁有利于解决电动车充电和成本的问题,但同时也面临租赁点的数量和覆盖范围不足的问题。目前分时租赁的发展具有一定的优势:一是可以提升车辆和停车场利用率,降低投资成本和出行成本;二是可以缓解当前充电基础设施不足、停车位紧张等问题;三是降低消费者的维修保养等费用。

目前,电动汽车分时租赁模式在全球各大城市已成为提供交通服务不可缺少的一部分,例如法国Autolib模式在2015年计划运营3000辆BlueCar纯电动汽车,建成1150个租赁站点,6000个充电桩,有超过10万名会员,并已经开始盈利。德国Car2go模式也已在欧洲和北美的25个城市成功实施运营,现有1200辆smart环保车型,采用的是随取随用、即租即还、按分钟计费的运营模式。我国的易卡租赁模式在北京科技园和高校区设置营业网点,整体运营状况良好,如清华科技园平时电动车出租率为80%,周末出租率达到100%。

分时租赁模式存在2种类型:自由流动式和固定站点式。前一种类型指消费者可以选择在任意站点还车,后一种类型指消费者必须到租车初始地还车。自由流动型模式对于消费者而言更具有灵活性,但是对租赁商却具有极大的挑战,因为会存在初始地和目的地站点车辆需求不平衡情况。Jorge等<sup>[3]</sup>指出从一个车辆密集度较高的站点调配可用的车辆到短缺站点,是一种可以促进租赁商运营管理的手段,保证车辆可用性以及满足预定需求。缺乏有效的车辆调配,会导致车队数量的不必要增加和车辆利用率不足的结果。因此,制定一个有效的决策计划,必须考虑最优站点位置、数量、车队大小和动态的调配过程,同时要达到租赁商提供的服务和总成本之间的平衡。

然而,目前存在的文献缺乏同时考虑相关站点分布、大小、车队数量和平衡动态调配系统。Correia等<sup>[4]</sup>假设只有在站点周围产生的租车需求才可被服务,车辆调配及其相关成本只有在运营周期结束时才会考虑。Lin等<sup>[5]</sup>只考虑站点分布而忽略了车辆调配决策。Boyaci等<sup>[6]</sup>虽然考虑了车辆调配以及充电站需求,并采用多目标MILP模型建立一个自由流动式电动汽车共享系统,探讨租赁商利润最大化问题,但忽略了消费者、站点和车队三者交互关系。

由于这些复杂性的存在,很难用传统优化或分析方法解决消费者、租赁站、电动汽车车队之间的交互

作用,并且该整体系统中包含众多异质性且具有适应性行为的主体。基于此原因,本文采用多Agent方法构建模型,简称ABM(Agent based model),被认为是研究众多不同特性智能体相互作用所产生“涌现”现象及其过程的有效方法<sup>[7]</sup>,既可以从微观角度对各智能体行为进行观察,也可以从宏观层次对系统整体结果进行分析。近年来,ABM已被广泛应用于研究管理学、经济学、交通、社会学等领域,其中在电动汽车研究方面,Shafiei等<sup>[8]</sup>利用ABM模型预测电动汽车在冰岛区域市场渗透情况。Zhao等<sup>[9]</sup>利用基于Agent的模型分析光伏和插电混合动力电动汽车的能量储存和需求响应。向诗剑等<sup>[10]</sup>构建了一种集成ABM和GIS的方法,研究新能源汽车和加能站的交互扩散。

由于目前国内充电桩还未大面积普及,本文未考虑路面充电桩网点,只研究站点内充电情景。主要研究基于站点的预定型自由流动式电动汽车分时租赁模式,该模式首先由消费者通过互联网平台(移动端或PC端)提前预定从其初始地门店取车,经过较短时间行驶,可选择与取车站点不同的任意门店还车。通过构建可控制、可重复运行的多Agent模型,利用其自底向上的建模方式,综合考虑影响租赁商运营的内外因素来模拟主体间的相互作用及其涌现现象,探讨和比较消费者自行还车和站点员工还车模式,找出最优车队数量、停车位比率和消费者平均满意度。

## 1 ABM构建

本文采用在线GIS(地理信息系统)获得路网中每两个节点的最优路径,保证每两个租赁站之间都有最短路径。假设消费者是理性的,只会选择离自己最近的站点进行租车活动;然后设定租赁站容量,每个站点的容量与可停车比率相关。如果一个租赁站容量为零,则意味着无可用停车位,站点饱和。

本模型存在3种智能体类型,分别为消费者、租赁站和电动汽车车队。此外,本模型主要考虑消费者附近不存在充电桩且只能在站点充电的场景,因此为了减少在行驶过程中因电量不够而无法续航的问题,采取根据每辆车目前可用电量进行订单选择。

### 1.1 需求

在自由流动式电动汽车分时租赁系统中,首先使每一个有租车需求的消费者在任意站点周围依次随机产生,并同时发送包含出发地、目的地和租赁时间的租车订单给站点。假设一个消费者等同于一次租赁行为,其意味着消费者是没有记忆的,也不会出现多人同时共享同一部车的情况。因此之前使用分时租赁服务的经历不会影响将来的租车选择,并且每个

租车决策产生都是单独的、随机的和异质性的。

由于每个站点既是初始站点也是目的地站点, 租赁商会面临如何平衡所需车队规模和可用停车位之间的问题. 每个站点存在有限的停车位, 并且系统无法满足消费者希望到一个已饱和的站点还车的需求. 当然这种情景被认为是严重的, 因为当消费者无法还车时, 他将一直被困于系统中, 除非他找到可用停车位为止才可以完成租赁交易. 如果租赁商无法很好地解决该问题, 则会影响本次消费者租车行为的满意度.

### 1.2 消费者

图1清楚地阐述了当消费者进入系统时的行为. 首先, 消费者通过移动端APP选择出发站点和到达站点, 并预计所花时间, 将此订单发送给出发站点. 当接收到该出发站点已接受的反馈消息后, 消费者可以步行前往初始地站点, 否则离开. 此时被选择出发站点中的合适空闲车已被预订, 等待消费者到达站点.

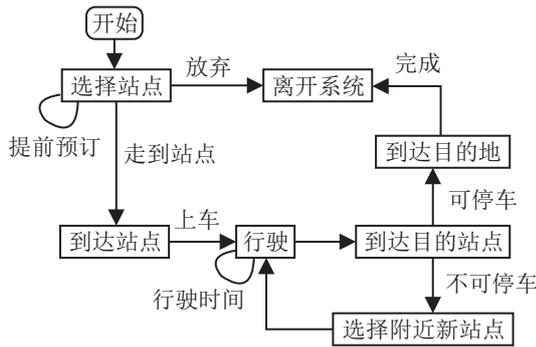


图1 消费者行为流程

消费者参与租车服务的前期预定过程可以纳入损失制排队论范畴. 每个合适空闲车相当于一个服务台, 消费者被拒绝的概率(损失率)是影响消费者对租车系统满意度的重要指标.

参照胡运权等<sup>[11]</sup>指出的生灭过程是研究系统内部随时间产生的状态变化过程. 令  $N(t)$  表示  $t$  时刻租车系统中的顾客数量. 假设在时间区间  $(t, t + \Delta t)$  内, 系统由状态  $n$  转移到状态  $n + 1 (i \geq 0)$ ,  $\Delta t$  内有一个消费者到达的概率服从参数为  $\lambda_n$  的负指数分布. 假设在时间区间  $(t, t + \Delta t)$  内, 系统由状态  $n$  转移到状态  $n - 1 (i \geq 0)$ ,  $\Delta t$  内有一个消费者离开的概率服从参数为  $\mu_n$  的负指数分布.

消费者预订模型类似于 M/M/S/S, 是指消费者按照负指数(泊松)分布到达, 系统服务资源数为  $S$  个, 且系统容量也为  $S$  个, 意味着系统为即时制, 不允许顾客在预订系统内排队, 其中系统的服务强度  $\rho =$

$\lambda/S\mu$ . 系统状态概率为

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{S-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n},$$

$$p_N = \frac{(S\rho)^2}{S!} p_0.$$

依据排队论可以实现不同的消费者和车辆的匹配行为, 并且在预定系统中, 有效减少了消费者不必要的等待时间, 可以更好地判定消费者满意度情况.

消费者到达站点后上车, 租期开始, 当到达目的地后下车, 同时支付租期费用, 然后前往其目的地, 此租赁活动结束, 离开系统. 若在还车时, 消费者发现目的地站点无可用车位, 则需要重新选择附近存在空闲停车位的站点还车. 因此存在两种情景:

- 1) 若是消费者自身原因(堵车、临时差事等)超过初始预定租赁时间, 不影响对本次租赁行为的评价.
- 2) 若是租赁站内部管理原因导致消费者在规定时间内到达而无法正常停车, 则消费者对本次租赁行为进行的评价将直接影响满意度.

在本模型中采用订单中的预定时间作为判断两种情景的标准, 若大于预定时间则认为是第1)种情景, 否则为第2)种情景. 同时本模型未考虑消费者提前还车时无可用停车位的情景, 是因为假设每次分时租赁最短租期为30分钟, 租赁站在事先收到预定的情况下, 会优先满足该消费者的停车计划.

另外, 租赁站可以为到达站点后发现无可用车位的消费者提供服务, 由站点员工进行还车, 这时消费者满意度不会因为无法正常停车受到影响, 但是对站点车辆调配系统增加更高难度, 因为员工需要根据每个站点的需求进行调配, 保证用车和停车需求的平衡. 因此, 本文基于消费者自行还车和站点员工还车这两种不同模式进行仿真比较分析, 试图找到不同模式下的最优还车策略.

### 1.3 租赁站

每个站点内需要同时完成消费者和电动汽车之间的交互活动. 当租赁站接收到消费者订单的同时, 便需要执行找到合适车辆的工作, 并将结果同时反馈给消费者和车队. 由于设定车辆属于公共资源, 任意站点都拥有调配的权利, 站点如何寻找合适的车辆成为关键. 首先需在本站点寻找空闲并拥有充足电量的车辆, 若没有, 则可以调配其他站点的车辆来执行任务. 所以假设每个消费者只会选择一个租赁站进行租车, 若无法满足租车需求则离开, 并不会发生当一个站点无法满足自己的租车需求而选择去附近站

点租车的情景. 同时, 每调配一辆车都会发生人工费.

为了更好地满足消费者的用车需求, 租赁商应以较短的时间完成调配合适车辆的方案, 该方案应使车辆以尽可能短的时间到达所需站点, 因此本文采用时间最优算法.

设  $\gamma$  为任一选点方案,  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im}$  为分配点,  $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im}$  为相应行驶时间,  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$  为相应的可用车辆资源,  $x$  为目标站点所需车辆资源 ( $i = 1, 2, \dots, n$ , 其中  $i1, i2, \dots, im$  为  $1, 2, \dots, n$  子列的一个排列). 因此根据何建敏等<sup>[12]</sup>从应急系统多出救点中提出的时间最短概念可知

$$\sum_{j=1,2,\dots,m} x_{ij} \geq 0,$$

即每次可调配资源总数不能小于该目标站点需求.

在本模型中, 每次调配是基于订单驱动的, 因此每次只会调配一辆车. 设定  $\chi^*$  为所有可行方案的集合, 故该模型的目标是求出满足约束条件的  $\gamma^*$ , 使得

$$T(\gamma^*) = \min_{\gamma \in (\chi^*)} T(\gamma).$$

算法步骤如下.

**Step 1:** 遍历周围站点以取得一定范围内作为可提供车辆的站点, 即分配点.

**Step 2:** 遍历所有分配点找出空闲并拥有充足电能的车辆资源数, 及其到达目标接收站点时间.

**Step 3:** 对于所有分配点, 按照到达目标接收站点时间的长短进行排序.

**Step 4:** 从时间最少的点开始进行所需资源数的调配.

**Step 5:** 求出参与调配的分配点, 得到解决方案.

同时需要考虑租赁商的总运营利润, 其中各参数符号定义如下:

$R_{jl}^{tu}/S_{jl}^{tu}$ :  $t$ 时刻从  $j$  站点出发到达  $l$  站点为  $u$  时刻的租金/补贴;

$O_{jl}^{tu}$ :  $t$ 时刻从  $j$  站点出发到达  $l$  站点为  $u$  时刻的

租车运营成本;

$VRC_{jl}^t$ :  $t$ 时刻开始从  $j$  站点到  $l$  站点的车辆调配费用;

VC: 每小时充电费用;

$P_j$ : 在  $j$  站点的停车成本;

RPC<sub>jl</sub>: 从  $j$  站点到  $l$  站点调配车辆人工费用;

$v_j^e$ : 在  $j$  站点需充电  $e$  时间的车辆数量;

$r_{jl}^t$ : 期初  $t$  时刻从  $j$  站点调配到  $l$  站点的车辆数量;

$n_j^t$ : 期初  $t$  时刻  $j$  站点可用车辆数量;

$z_{jl}^{tu}$ :  $t$ 时刻从  $j$  站点出发到达  $l$  站点为  $u$  时刻被租赁车辆数量;

Totalprofit =

$$\sum_{(j,l,t)} \left[ \sum_u (R_{jl}^{tu} + S_{jl}^{tu} - O_{jl}^{tu}) z_{jl}^{tu} - VRC_{jl}^t r_{jl}^t \right] - \left( VC v_j^e + \sum_{jl} RPC_{jl} r_{jl}^t \right) - \sum_j P_j n_j^t.$$

运营总利润由总租金收入和补贴之和减去运营和调配费用, 其中调配费用包含车辆被调配所发生的成本和调配车辆所支付的人工费用两部分.

当消费者到达站点后, 站内将会发生消费者与电动汽车的交互活动, 如图2所示. 首先每个站点都存在初期车队数量和从其他站点调配来的空闲可用车辆, 同时也存在从其他站点出发到达本站点的车辆 (包括其他站点员工调配该站无法顺利停车车辆到达本站), 他们共同完成消费者租车行为. 其中, 每一辆车都需要与拥有同样目的地站点的消费者匹配, 才可以执行租车活动, 并且在到达目标站点中存在3种类型车辆分别为: 从其他站点调配到本站点的可用车辆、正在充电无法接单的车辆和本站电量充足可直接接单的. 同时假设不存在因为消费者自身原因导致超过预定时间而引发的电量不足情况.

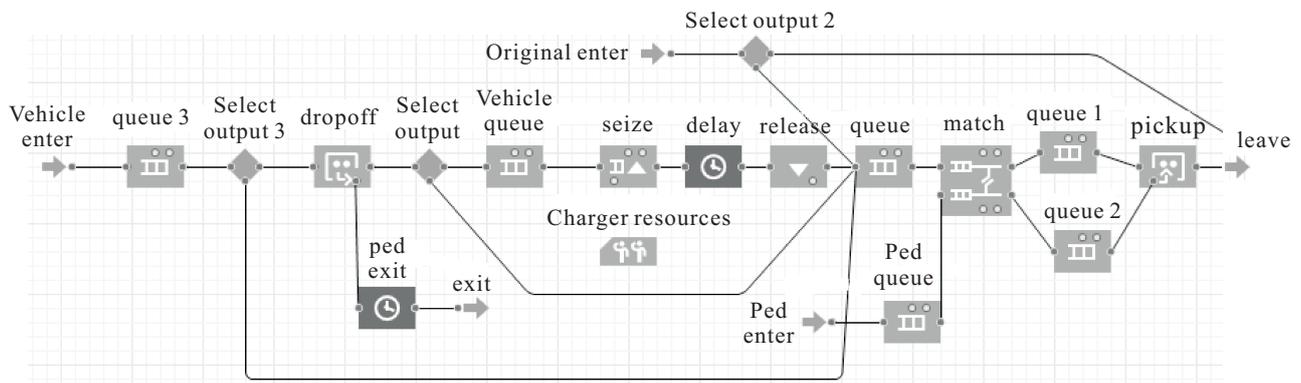


图2 站点仿真模型

### 1.4 电动汽车

图3展现了运营期间的电动汽车车队行为仿真过程. 当系统开始时, 车队在每个站点内初始化, 等待任务. 如果一辆车停在站点, 并没有被安排充电或调配, 则根据其可用电量, 可以由站点按照消费者订单时长执行租车任务. 在到达目的站点时, 消费者或者站点员工可以根据该站点可用停车位数量进行判断是否需要选择寻找新站点进行停车, 从而结束租赁活动. 但是需要区分在车队运营过程中存在的正常接单车辆和被调配车辆同时到达目标站点时的情景, 前者根据自身电量判断是否需要进入充电环节, 后者不需要进行充电便可直接接单进行租赁活动. 本模型假设若由员工还车, 则首先判断该车电量情况, 若较充足则可直接调配到其他站点; 若电量不足则需要在本站充电, 同时将本站其他电量充足且空闲车辆进行调配, 因此本模型的可调配车辆均为电量充足车辆.

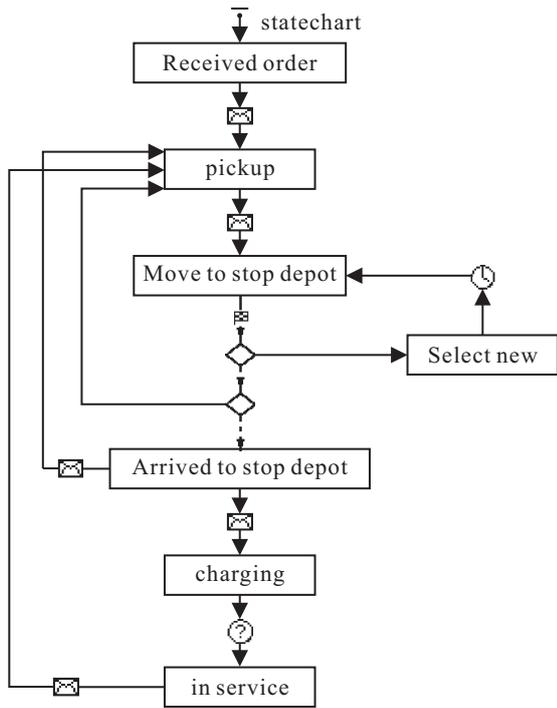


图3 电动汽车行为仿真模型

## 2 实验情景

研究采用 AnyLogic7.3Professional 平台, 并利用 JAVA 编程. 根据艾瑞咨询《2014 年中国在线租车行业研究报告》<sup>[13]</sup> 可知, 一嗨租车公司车辆规模超过 10000 辆, 覆盖全国 500 多个网点, 线上租车为主要订单来源, 其中 2013 年平均超过 20% 订单来自移动端 APP, 并提供上门取还车服务. 因此本模型选取北京一嗨租赁公司的 10 个门店租赁站作为分时租赁研究对象, 见图 4. 设定模型仿真周期为 5 天, 假设每

天运营时间为 24 h, 产生人的速率为 1 人/h, 每辆电动汽车最大行驶里程为 120 km, 充满电需要 8 h, 至少需要充满 2 h 才可以进行功能性运动, 平均行驶线路为 30 km, 每个站点拥有 2 个充电桩. 每次充电时间根据车辆行驶中所消耗的电量进行充电, 其中假设到达站点的车辆电量低于 1/4 时不可接单. 根据《关于 2016 年~2020 年新能源汽车推广应用财政支持政策的通知》中电动汽车续航里程为 120 km 可获得补贴 3 万以及假设全年行驶 240 天, 生命周期为 6 年换算可得每公里补贴为 0.17 元. 具体模型参数的初始值设定见表 1.

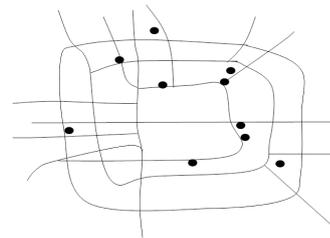


图4 仿真站点分布

表1 参数初始值

类型	取值范围	单位
租金	25	元/h
补贴	0.17	元/km
调配工资	10	元/h
停车成本	20	元/天
充电成本	0.5	元/kWh
运营成本	0.08	元/km
调配成本	0.05	元/km

根据研究需要, 设置 4 组不同车队规模实验, 范围分别从一辆车执行 24 次有效行程到一辆车执行 8 次有效行程, 同时设定停车位和车辆数量的比率分别为 2 和 3, 因此结合以上参数可以得到 8 组不同仿真实验, 见表 2.

表2 决策变量

车队规模	比率(停车位/车辆)
80	
100	2.0
140	
200	3.0

由于电动汽车的自身特性, 消费者需在租赁商运营区域范围内还车, 根据还车对象不同, 可分为以下两种模式:

- 1) 消费者自行还车. 消费者到达目的站点后, 不管是否存在空闲停车位, 均由消费者自行归还.

2) 站点员工还车. 消费者到达目的站点后, 当不存在空闲停车位时由站点员工负责还车.

### 2.1 消费者自行还车模式

首先通过经济效益评估租赁商整体运营情况, 但未考虑建设成本、车辆购置成本、广告投入和税收

等. 本文采用车队相关指标, 如平均使用率、平均空闲率以及由于充电导致的平均不可用率等来评估租赁站系统. 另一个重要指标是完成租车行为比率, 由此指标可以得出整体系统的运营情况, 仿真结果见表3.

表3 租赁商仿真结果(消费者自行还车)

参数		经济			电动汽车		
车队大小	比率(停车位/车辆)	收入/千元	成本/千元	利润/千元	平均使用次数	平均空闲率/%	平均不可用率/%
80	2	24.97	8.296	16.674	13.7	52.36	5.06
	3	35.23	11.341	23.889	14.03	34.48	5.18
100	2	40.315	13.009	27.306	11.26	25.88	6.02
	3	44.855	14.426	30.429	11.32	18.47	6.59
140	2	46.353	14.709	31.644	7.48	8.89	6.57
	3	49.577	15.831	33.746	8.17	11.21	6.98
200	2	48.26	15.323	32.937	5.35	7.61	7.07
	3	48.169	15.289	32.88	5.34	7.59	6.99

表4 消费者仿真结果

车队大小	比率(停车位/车辆)	潜在行程次数	已完成行程次数	比率/%	平均满意度
80	2	1096	550	50.2	4.03
	3	1123	776	69.1	6.43
100	2	1121	888	79.2	7.54
	3	1132	988	87.2	8.41
140	2	1047	1021	97.5	9.72
	3	1144	1092	95.4	9.53
200	2	1222	1063	86.9	9.65
	3	1068	1061	99.3	9.93

在模型中, 消费者不存在记忆, 不会受到之前租车经历的影响, 因此采用平均顾客满意度指标进行评估, 具体细则如下: 1) 每个消费者由于在站点未找到合适的车辆而选择离开系统扣2分; 2) 每个完成旅程的消费者得10分; 3) 由于自身原因导致无法正常停车不扣分; 4) 由于站点内部调配原因导致准时到达的消费者无法正常停车扣5分. 具体仿真结果见表4.

通过仿真结果可以发现, 车队规模越大满意度越高, 边际收益会随着车队数量增大而逐渐增加, 同时平均使用次数随着车队规模增加而降低. 由表3可知, 当车队规模为140辆, 停车位数量为420个时, 获得的利润最大.

停车位与车队规模之间的比率增加, 可以避免车队分布不平衡的问题. 一方面会因为提高潜在行驶次数而导致租金收入和停车成本增加; 另一方面可以有效减少由于消费者无法按时到达目的站点后而

选择寻找新的停车位所带来的时间浪费, 提高消费者满意度. 然而, 较大规模车队的平均空闲率较低, 整体行程完成率较大. 这是因为每段行程都是较短的, 通常一辆车在一天的运营期间内可以被反复使用多次, 对于缓解城市交通拥堵和环境压力有着明显的积极作用.

与此同时, 本文在以上8组实验的基础上, 继续讨论不同规模的车队和停车位对利润的影响, 并寻找最优车队规模和停车位比率, 见图5. 通过仿真发现, 最优车队大小为200辆, 最优停车位数量为300个, 利润为3.48万元. 由图5可知, 较小规模的车队随着停车位数量增多导致利润降低, 但是较大规模车队随着停车位数量增多而利润增加. 这是因为虽然停车位数量越多, 成本越大, 但由于租车完成率较高而导致收入增多, 较大车队规模利润反而会增加, 而较小规模车队本身营运能力较弱, 容易导致利润较少.

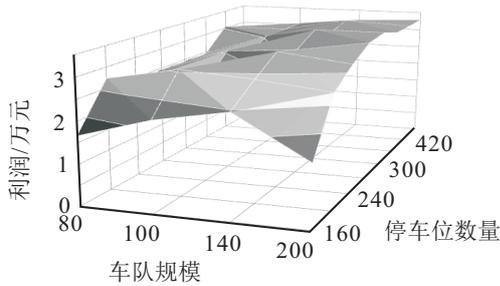


图5 消费者还车模式对利润的影响

### 2.2 站点员工还车模式

当由站点员工替代消费者进行还车流程时,可保证消费者满意度,但是调配系统难度加大. 调配系统首先需要确定其他站点的用车需求是否饱和,若没有饱和,则将本站无法停车的车辆调配到该站点直接执行租车任务;若已饱和,则需调配到其他有空闲停车位的站点;若到达目的站点的车辆需要充电,则优先完成充电再进行租赁任务. 仿真结果见表5.

表5 租赁商仿真结果(站点员工还车)

参数		经济			电动汽车		
车队大小	比率(停车位/车辆)	收入/千元	成本/千元	利润/千元	平均使用次数	平均空闲率/%	平均不可用率/%
80	2	25.69	8.319	17.371	14.06	46.84	3.81
	3	35.28	11.354	23.926	14.07	30.27	5.09
100	2	40.74	13.016	27.724	11.43	24.46	5.31
	3	46.478	14.709	31.769	11.81	14.43	4.57
140	2	46.353	14.709	31.644	7.51	8.44	6.34
	3	49.576	15.831	33.745	8.17	11.21	6.98
200	2	48.285	15.330	32.955	5.35	7.61	7.03
	3	48.169	16.084	32.085	5.34	7.51	6.99

由仿真结果可知,运营成本与车队规模增大成正比,边际收益也会随着车队数量增大而逐渐增加,这是因为员工还车模式虽然增加了调配成本,但是车辆平均使用次数增多,租金收入有效提高. 同时当车队规模为200辆,停车位为600个时,平均空闲率最低,说明需要被调配的车辆数量最少. 因此当车队规模为140辆,停车位数量为420个时,获得最大利润为3.37万元.

在此8组实验基础上,继续讨论不同规模的车队和停车位对利润的影响,如图6所示. 通过仿真发现,最优车队大小为200辆,最优停车位数量为280个,利润为4.79万元. 由此可知,当采用站点员工还车模式时,可以有效减少停车位数量,通过合理调配系统去满足用车和停车需求,虽然调配成本增多,但是停车位成本降低,有效租车完成率提高,从而利润增加.

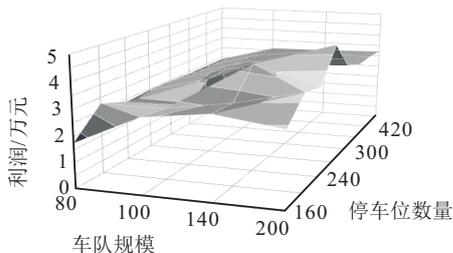


图6 站点员工还车模式对利润的影响

### 2.3 比较结果分析

首先讨论大型车队规模时租赁商提供的最优还车决策. 设定当车队规模为200辆时,结果如图7所

示,当停车位数量较少时,选择员工还车模式更优,这是因为消费者会花费更多的时间寻找以及行驶到其他站点的空闲车位,从而导致车辆平均使用次数降低. 虽然员工还车模式会导致调配成本上涨,但是车辆执行有效行程变大,租金收入增长幅度远远大于成本涨幅,故总利润比消费者还车模式的利润更多. 当停车位数量在400个以上时,两种模式的利润差距不大,但是当停车位数量大于600个时,消费者还车模式最优. 这是因为此时每个站点基本都可以保证消费者的停车需求,但是利润相对于停车位数量小时要偏低. 所以当停车位为280个时,选择员工还车模式对于租赁商和消费者都是双赢局面.

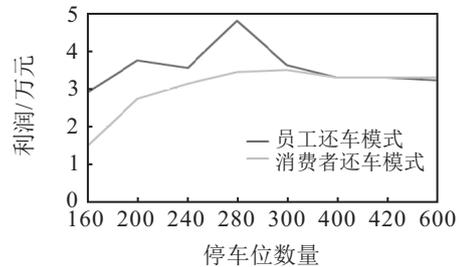


图7 大型车队规模下的两种还车模式利润比较

其次讨论小型车队规模时租赁商提供的最优还车决策. 设定当车队规模为80辆时,结果如图8所示. 可以发现,停车位数量对两种还车模式影响较小,员工还车模式的利润略高于消费者还车模式. 这是因为由于车队规模较小,车辆平均使用率较高,例如在

停车位数量为160个时,两种模式下的车辆平均使用率分别为13.7和14.06。但是在员工还车模式中车辆平均空闲率远低于消费者还车模式,说明通过员工还车和调配可以使小规模车队更有效地满足用车需求,但是不可避免地会增加运营成本。

通过仿真结果可以发现,当停车位数量不超过400个时,员工还车模式更具有优势,但是当停车位数量大于400个时,消费者还车模式最优。这是因为此时每个站点基本都可以保证消费者的停车需求,但是利润随着停车位数量与车队规模的比率增大而降低。所以当停车位为200个时,选择员工还车模式对于租赁商和消费者都是双赢局面。

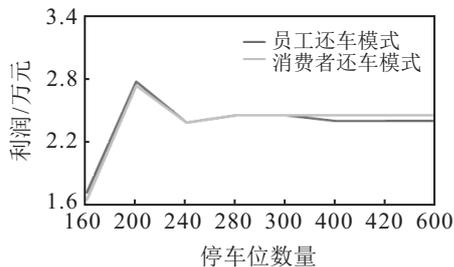


图8 小型车队规模下的两种还车模式利润比较

### 3 结论

在移动互联时代,加大对电动汽车分时租赁的推动与发展,可以有效地缓解交通压力以及降低环境污染。本文构建电动汽车分时租赁系统并进行多Agent仿真,展现租赁站、消费者和电动汽车车队三者交互活动,分别讨论消费者还车和员工还车两种模式,寻找出最优车队数量和停车位,以及最优还车决策。实验结果表明,当车队规模为200辆,停车位为280个或车队规模为80辆,停车位为200个,选择员工还车模式对于租赁商和消费者都是双赢局面。但是在车队规模和停车位数量都比较大或车队规模较小但停车位数量较大时,消费者还车模式更具有优势。

鉴于系统的复杂性,本文的研究还存在很多不足,如由于充电桩普及率较低,只考虑了站内充电情景,未考虑站外充电。同时本文研究了基于站点的预定制自由流动式电动车分时租赁模式,但是可以作进一步拓展,如消费者不提前设定目的站点,而是随意在电动汽车分时租赁商的运营范围内进行还车活动,以及对工作日用车需求的低高峰时段展开仿真。

#### 参考文献(References)

[1] Crane K, Ecola L, Hassell S, et al. An alternative approach for identifying opportunities to reduce emissions of greenhouse gases[R]. RAND Corporation, 2012.

[2] Shaheen S A, Cohen A P. Carsharing and personal vehicle services: Worldwide market developments and emerging trends[J]. *Int J of Sustainable Transportation*, 2013, 7(1): 5-34.

[3] Jorge D, Correia G H A, Barnhart C. Comparing optimal relocation operations with simulation relocation policies in one-way carsharing systems[J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation System*, 2014, 15(4): 1667-1775.

[4] Correia G H A, Jorge D R, Antunes A P. The added value of accounting for users' flexibility and information on the potential of a station-based one-way car-sharing system: An application in Lisbon, Portugal[J]. *J of Intelligent Transportation Systems*, 2014, 18(3): 299-308.

[5] Lin J R, Yang T H. Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints[J]. *Transportation Research Part E*, 2011, 47(2): 284-294.

[6] Boyaci B, Zografos K G, Geroliminis N. An optimization framework for the development of efficient one-way car-sharing systems[J]. *European J of Operational Research*, 2015, 240(3): 718-733.

[7] Dunhan J B. An agent-based spatially explicit epidemiological model in MASON[J]. *J of Artificial Societies & Social Simulations*, 2006, 9(1): 231-244.

[8] Shafiei E, Thorkelsson H, Ásgeirsson E, et al. An agent-based modeling approach to predict the evolution of market share of electric vehicles: A case study from Iceland[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2012, 79(9): 1638-1653.

[9] Zhao J Y, Kucuksari S, Mazhari E, et al. Integrated analysis of high-penetration PV and PHEV with energy storage and demand response[J]. *Applied Energy*, 2013, 112(4): 35-51.

[10] 向诗剑, 马铁驹. ABM与GIS集成及在分析新能源汽车扩散中的应用[J]. *管理科学学报*, 2014, 17(1): 1-10. (Xiang S J, Ma T J. Integration of ABM and GIS and its application in analysis of diffusion of alternative energy vehicles[J]. *J of Management Sciences in China*, 2014, 17(1): 1-10.)

[11] 胡运权, 郭耀煌. 运筹学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 325-333. (Hu Y Q, Guo Y H. *Operations research*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 325-333.)

[12] 何建敏, 刘春林, 尤海燕. 应急系统多出救点的选择问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2001, 21(11): 89-94. (He J M, Liu C L, You H Y. Selection of multi-depot in emergency systems[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2001, 21(11): 89-94.)

[13] 艾瑞咨询. 2014年中国在线租车行业研究报告[EB/OL]. [2014-07-01][2016-03-10]. <http://www.iiresearch.com.cn/report/2204.html>.

(责任编辑: 郑晓蕾)