

基于用户激励的共享电动汽车调度成本优化

王 宁¹, 郑文晖¹, 刘 向², 郭家辉¹

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对站点车辆时空分布不均衡制约共享模式快速发展的问題, 提出基于用户激励的共享电动汽车自适应调度成本最优模型, 引入共享单车调度与价格激励手段, 通过遗传算法求解获得最优价格优惠、初始站点车辆数、多时段可变最优阈值。实例仿真结果表明, 通过用户激励策略, 企业调度成本降低 60% 以上, 峰值用户取、还车允许率超过 95%, 极大提升了用户满意度与车辆使用率, 充分证明该模型的有效性。

关键词: 电动汽车共享; 用户激励; 自适应调度模型; 遗传算法; 可变阈值

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Relocation Cost Optimization Model of Electric Vehicle Sharing Based on User Incentive

WANG Ning¹, ZHENG Wenhui¹, LIU Xiang², GUO Jiahui¹

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Car-sharing is a very important development direction of urban transportation in the future. However, the unbalanced distribution of site vehicles caused by the tidal characteristics of user travel restricts the rapid development of the model. This paper presents an optimal model of adaptive relocation cost for shared electric vehicles based on user incentive, in which the sharing bicycle and price discount as adjustment strategies are introduced. The genetic algorithm is used to solve the model. The optimal price discount, the initial vehicle numbers, and the multi period variable optimal threshold allocated of each site are obtained. The simulation results based on real data show that the relocation cost of enterprise is reduced by more than 60% through the user incentive scheduling strategy, and the peak order fill rate is more than 95%. The validity of the model is proved to improve customer satisfaction and vehicle utilization

rate.

Key words: electric vehicle-sharing; user incentive; adaptive relocation model; genetic algorithm; variable threshold

电动化、网联化、智能化、共享化是汽车行业正在经历的重大变革。电动共享车辆模式对减少交通拥堵、节能减排、促进共享经济发展具有显著作用, 得到政府和企业的高度重视。北京、上海、深圳等地正展开商业示范运营^[1]。然而客户出行需求的潮汐性特征引起站点间车辆分配不均, 某些时段无法有效满足客户需求, 导致客户体验较差, 制约了该商业模式的大规模推广。

目前, 相关运营企业在解决车辆的不均衡配置问题上主要采用员工调度模式^[2-3]。该模式存在调度反馈滞后、峰谷时段拒绝取、还车比率高、人力成本高昂等诸多问题。如何对车辆的不均衡需求匹配做出快速反应, 解决供需平衡, 提高用户满意度, 扩大运营公司收益并减少调度成本, 成为当前研究的热点及难点问题。

汽车共享车辆的调度按车辆运营模式分为双程式共享车辆调度和单程式共享车辆调度。本文研究所涉及的内容是单程式共享车辆调度。按照调度主体可分为员工调度和用户调度两类。目前大量研究是对员工调度的研究, 仅有少量涉及用户调度的研究。

早期单程式调度研究主要以企业成本最优为优化目标, 采用线性规划模型或混合整数规划模型为主。Fan 等^[4]提出了一种多级随机线性优化模型, 将不确定性纳入模型的构建中, 但模型的求解算法需要进一步优化。Kek 等^[5]提出三步优化法的调度模型, 构建车辆调度与员工再平衡的调度成本最优的

收稿日期: 2018-03-05

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAG11B00); 中央高校基本科研业务经费专项资金(kx0170020172681); 上海市科学技术委员会软科学基金(18692109400)

第一作者: 王 宁(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为电动汽车分时租赁。E-mail: wangning@tongji.edu.cn

通信作者: 郑文晖(1994—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为电动汽车分时租赁。E-mail: 405867164@qq.com

线性整数模型,但算法不适合大规模求解. Jorge 等^[6]以最大企业收入、最小车辆保养、迁移及折旧成本为优化目标,构建了混合整数规划模型. Nourinejad^[7]研究了共享汽车的沿途搭乘路径规划的成本最优问题. Nourinejad 等^[8]考虑了车辆迁移的一次调度与员工再平衡的二次调度问题. 其调度问题分解为 MP(管理工程)和 SP(支撑工程)问题,创建基于企业成本最优的混合整数规划模型,并采用 CPLEX 软件进行混合整数规划求解. Bruglieri 等^[9]研究了单程式的电动汽车调度问题(E0-VRP),并采用两种启发式遗传算法进行优化求解. Saadi 等^[10]通过微观数据的代理人模型(Agent-based model)对需求进行分析.

国内目前没有大规模基于用户调度的研究, Brendel 等^[11]提出了基于用户调度的单程式共享车辆调度框架模型,但其使用双程式数据来仿真单程式问题,并未能实现大量数据的仿真. Cao 等^[12]提出对单一站点的取、还车采用阈值的手段,但只能解决长时段缺车问题,对短时内(1 d 内)调度未能有效解决. Clemente 等^[13]提出采用价格激励和阈值作为用户调度的 DSS(决策支持系统),但未能考虑不同时间下阈值变化的问题,并且其用户调度模式仅考虑在用户还车的情景下.

综上,目前关于用户自适应调度的研究还相当缺乏,本文创新之处在于考虑共享单车在共享汽车调度问题中的作用,并提出多时段可变的上下阈值作为调度决策的关键变量,引入价格优惠激励机制引导用户实现自适应调度.

1 研究模型及算法

目前电动共享车辆企业采取员工调度策略匹配运营需求,由于员工调度具有很大的迟滞性和经验性,难以有效应对用户取、还车的瞬时波动和潮汐现象^[14]. 本文提出通过价格变化和共享单车作为激励手段,建立调度成本最优的车辆调度模型,实现车辆的自适应调度.

1.1 问题约定及变量定义

1.1.1 问题假设

(1) 共享汽车方面:运营车辆均为纯电动汽车,1 辆电动汽车任何时刻只能满足 1 个订单需求,所有车辆均为同一等级车辆,共享车辆企业采用单程式运营模式.

(2) 站点方面:每个站点停车位均配有相同型

号的充电桩;任意两站点间距离不得大于车辆最大续航里程;站点周围存在共享单车(OFO、摩拜等),但用户是否愿意采用此方式取、还车受到优惠价格的影响.

(3) 服务周期:在进行历史数据分析时,每天 0:00~6:00 点为车辆维护时间,6:00~24:00 点为正常运营时间;根据实际订单的分配和服务时间,将订单数据采集设定为 30 min 为 1 个周期.

(4) 运营系统:本研究暂不考虑车辆运营路径交通拥堵等异常情况;当用户进行取车操作,并且取车站点的车辆过少(低于阈值)时,系统会询问用户是否接受一定的价格优惠并骑行共享单车到达系统分配的相邻站点完成取车;当用户进行还车操作,并且还车站点车辆过多(高于阈值)时,系统会询问用户是否接受一定的价格优惠并还车到系统分配的相邻网点;用户通过共享单车前往某一相邻的共享汽车站点的时间不会超过 10 min,即在下一个调度时间间隔(30 min)内,调度任务将得以完成.

1.1.2 集合、决策变量和参数定义

(1) 集合

$T=\{1,\cdots,t,\cdots,T\}$ 为仿真过程中时间步长.

$R_m=\{0,1,3,\cdots,r_m,\cdots\}$ 为各站点请求还车数目集合. 其中每一行如 r_m 代表 1 个时间间隔的所有站点的请求还车需求信息,每行中的每个数字是每个站点的还车需求数目. 基于历史数据按 30 min 为间隔获得的各个站点、各个时间段的请求还车数.

$D_m=\{1,1,3,\cdots,d_m,\cdots\}$ 为各站点请求取车数目集合. 与 R 类似, D_m 是基于历史数据按 30 min 为间隔获得的各个站点、各个时间段的请求取车数.

$N=\{1,\cdots,n,\cdots\}$ 为站点编号集合.

(2) 决策变量

s_{tm} 为站点 n 在 t 时刻的上阈值.

s_{bm} 为站点 n 在 t 时刻的下阈值.

x_{tn} 为站点 n 在每天初始时刻所需要安置的可用车数.

X_{ij} 为 t 时刻 i 站点到 j 站点引导用户异地还车,并用共享单车前往目的地的数量矩阵.

Y_{ij} 为 t 时刻 i 站点到 j 站点引导用户通过共享单车异地取车的数量矩阵.

X_{tm} 为站点 n 在 t 时刻于调度前取、还车用户需求预期统计(可能为负值).

X_{bm} 为站点 n 在 t 时刻在拟调度完成后的可用车辆数目(可能为负值).

X_m 为站点 n 在 t 时刻在调度完成后的可用车辆

数目.

(3) 参数

p_{park} 为站点 n 的最大停车位数目.

s_m 为站点 n 在 t 时刻的状态指示符.

a_m 为站点 n 在 t 时刻拟异地用户还车数.

α 为用户选择异地还车的比例, 该比例与优惠价格有关.

b_m 为站点 n 在 t 时刻拟异地取车用户数.

β 为用户选择异地取车的比例, 该比例与优惠价格有关.

d_{ij} 为由站点 i 通过共享汽车骑行到站点 j 的骑行时间.

e 为用户异地还车补贴优惠金额.

g 为用户异地取车补贴优惠金额.

h 为拒绝用户还车潜在损失成本.

k 为拒绝用户取车潜在损失成本.

X_{a_m} 为站点 n 在 t 时刻调度所用临时变量.

r_{e_m} 为站点 n 在 t 时刻在承担调度任务后是否车位已满的指标量; r_{e_m} 为 0 表示车位未空, r_{e_m} 为 1 表示车位已空.

r_{b_m} 为站点 n 在 t 时刻在承担调度任务后是否车位已空的指标量; r_{b_m} 为 0 表示车位未空, r_{b_m} 为 1 表示车位已空.

a_m 为富余车辆站点 n 的调度任务是否分配完毕的指标量.

b_m 为缺车车辆站点 n 的调度任务是否分配完毕的指标量.

l_m 为站点 n 在 t 时刻车位数的临时变量.

p_m 为站点 n 在 t 时刻的还车请求是否可以分配指示符; 当 p_m 为 0 时表明周围网点可以进行车辆的还车分配, p_m 为 1 时表明周围网点无法进行车辆的还车分配.

q_m 为站点 n 在 t 时刻的取车请求是否可以分配指示符; 当 q_m 为 0 时表明周围网点可以进行车辆的取车分配, q_m 为 1 时表明周围网点无法进行车辆的取车分配.

$r_{\text{ref } m}$ 为站点 n 在 t 时刻拒绝用户还车数量.

$r_{\text{reb } m}$ 为站点 n 在 t 时刻拒绝用户取车数量.

R_a 为汽车异地还车的用户汽车调度优惠成本.

R_b 为汽车异地取车的用户单车调度优惠成本.

R_{ref} 为拒绝用户还车潜在损失成本.

R_{reb} 为拒绝用户取车潜在损失成本.

1.2 调度模型逻辑流程

该部分逻辑框架流程分为 5 个部分: 站点状态

及站点初值分配, 拟调度汽车单车数初步分配, 调度分配决策算法, 调度最终分配及车辆终值, 调度成本计算.

1.2.1 站点状态及站点初值分配, 拟调度汽车单车数初步分配

X_{f_m} 是对用户的取、还车需求进行统计, 其计算公式为上一时段的车辆数与拟取、还车需求订单的代数加减.

$$X_{f_m} = X_{f(t-1)n} + R_m - D_m \quad (1)$$

s_m 是站点状态指示符, 通过现有情况判断站点处于何种状态, 指示符 2 代表目前站点车辆过多(超过最大停车位), 指示符 1 代表站点车辆偏多(超过上阈值), 高于阈值 s_{f_m} , 指示符 0 代表站点状态良好(处于上下阈值之间), 指示符 -1 代表站点车辆偏少(低于阈值 s_{b_m} 但高于空车位数), 指示符 -2 代表站点车辆过少(低于空车位数). 其计算式如下:

$$s_m = \begin{cases} 2, & X_{f_m} > p_{\text{park}} \\ 1, & p_{\text{park}} \geq X_{f_m} \geq s_{f_m} \\ 0, & s_{f_m} \geq X_{f_m} \geq s_{b_m} \\ -1, & s_{b_m} \geq X_{f_m} \geq 0 \\ -2, & X_{f_m} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

a_m 与 b_m 是拟进行调度分配值. 其中 a_m 是拟引导用户异地站点还车的数量, b_m 是拟引导用户通过骑行共享单车前往异地取车的数量.

当站点可用车辆超过停车位或者低于 0 时, 用户无法在当前站点进行还车(车满)或取车(车空), 因此所有的取、还车订单将分配到相邻站点. 当站点可用车辆高于上阈值或低于下阈值时, 将有一定比例的用户选择异地取、还车, 该比例与奖励金额有关. 其计算式如下:

$$a_m = \begin{cases} r_m, & s_m = 2 \\ \alpha r_m, & s_m = 1 \\ 0, & s_m \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$b_m = \begin{cases} d_m, & s_m = -2 \\ \beta d_m, & s_m = -1 \\ 0, & s_m \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

1.2.2 调度决策分配

算法对每一个站点都进行访问, 若站点状态高于上阈值, 则通过价格优惠手段建议并引导用户异地还车(存在用户选择率). 若站点处于正常状态, 则用户可以在原站点进行取、还车操作.

调度任务完成情况处理如下:

(1) 当分配至其他站点车辆容量均未超过其正常容量时, 将可用车辆进行分配并写入 X_{ij} 中.

(2) 当分配至某一站点的车辆超过该站点车辆容量时,以最大分配原则进行分配.保留剩余车辆任务数,并选择其他相邻站点继续进行分配,将已经分配满的站点置为 $r_{eij}=1$.并选取其他站点继续分配.

(3) 当分配任务搜寻结束后,所有站点均无法满足分配任务,则置 p_m 为 1;若调度任务成功完成,则置 p_m 为 0.

对于通过共享单车进行异地取车也做如上处理,以上部分完成.

1.2.3 调度最终分配及车辆终值

在完成调度任务后需要重新计算站点的实时可用车辆数目,同时对于无法满足调度任务的站点的用户取、还车请求部分予以拒绝.计算得 X_m 的值.

以 $s_m=2$ 、 $p_m \neq 1$ 为例,有

$$X_{bm} = X_{(t-1)n} - d_m - \sum_{i=1, i \neq n}^N Y_{in} \quad (5)$$

式中: Y_{in} 为用户由 i 站点通过共享单车取车至 n 站点的数量.

不同的 s_m 值与不同的 p_m 值所获得的 X_{bm} 计算公式不同.系统通过判断不同站点的状态后对用户进行引导,用户异地取、还车率受到价格优惠和站点状态的影响,在进行用户自适应调度后,站点的可用车辆数将重新计算.

1.2.4 调度成本计算

若 $X_{bm} > p_{\text{park}}$, 则拒绝还车数为

$$r_{\text{ref } m} = X_{bm} - p_{\text{park}} \quad (6)$$

若 $X_{bm} < 0$, 则拒绝取车数为

$$r_{\text{reb } m} = -X_{bm} \quad (7)$$

公式(6)、(7)是当周围站点无法满足调度任务且取、还车需求过大时,对部分用户的取、还车需求进行部分拒绝.当车辆超过可用停车位数量时,拒绝部分还车需求.当车辆低于 0 值时,拒绝部分取车需求.

在完成拒绝取、还车计算后,将最终的可用车辆数赋值于 X_m 中.

1.3 调度成本函数及约束条件

优化目标是企业的调度成本最优.由于考虑了共享汽车和共享单车两方面调度函数的因素,因此需要将共享汽车的调度成本 R_a 和共享单车的调度成本 R_b 同时考虑.但若只单纯考虑调度汽车和调度单车的成本,容易使得阈值趋向于某一极端,可能会使某些站点长期处于车辆过多或无车可用的情形.因此,拒绝用户还车的潜在成本损失 R_{ref} 和拒绝用户取车的潜在成本损失 R_{reb} 被引入.这两项成本从用户

体验度出发,能够将拒绝用户取车的成本和拒绝用户还车的成本(发生这一情况说明站点的车辆数处于极端值)考虑进来.最终优化目标函数如式(8)所示.

(1) 目标函数

$$\min Z = \sum_{t=1}^T \left(e \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N x_{ij} + g \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N y_{ij} + h \sum_{n=1}^N r_{\text{ref } m} + k \sum_{n=1}^N r_{\text{reb } m} \right) \quad (8)$$

式中: $e \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N x_{ij}$ 是企业激励用户异地还车所产生的调度成本, $g \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N y_{ij}$ 是企业激励用户异地取车所产生的调度成本,以上两部分合称为用户调度成本; $h \sum_{n=1}^N r_{\text{ref } m} + k \sum_{n=1}^N r_{\text{reb } m}$ 是考虑了用户满意度成本,当拒绝用户取、还车时带来的企业订单与满意度成本损失.

(2) 约束条件

$$s_{fm} > s_{bm} \quad (9)$$

$$s_{fm} \leq p_{\text{park}} \quad (10)$$

$$s_{bm} \geq 0 \quad (11)$$

$$x_{fn} \leq p_{\text{park}} \quad (12)$$

$$x_{fn} \geq 0 \quad (13)$$

$$r_m \geq x_{ij} \geq 0, \text{ 且为整数} \quad (14)$$

$$d_m \geq y_{ij} \geq 0, \text{ 且为整数} \quad (15)$$

$$r_m \geq a_m \geq 0, \text{ 且为整数} \quad (16)$$

$$d_m \geq b_m \geq 0, \text{ 且为整数} \quad (17)$$

$$r_{em} = (0, 1), \forall n \in N, t \in T \quad (18)$$

$$r_{bm} = (0, 1), \forall n \in N, t \in T \quad (19)$$

$$p_m = (0, 1), \forall n \in N, t \in T \quad (20)$$

$$q_m = (0, 1), \forall n \in N, t \in T \quad (21)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1, \text{ 且 } \alpha \text{ 为任意小数} \quad (22)$$

$$0 \leq \beta \leq 1, \text{ 且 } \beta \text{ 为任意小数} \quad (23)$$

$$s_m = (-2, -1, 0, 1, 2), \forall n \in N, t \in T \quad (24)$$

约束条件(9)~(11)是阈值约束条件,保证阈值的范围在 0 和站点最大停车位数量之间;约束条件(12)、(13)是站点车位初值约束,保证每天站点初始投放车位数在运营合理范围内;约束条件(14)~(17)是异地还车任务分配数和共享单车异地取车任务分配数的约束,其范围不能超过实际用户取、还车数量;约束条件(18)~(21)、(24)是状态指示符变量约束;约束条件(22)、(23)是选择率约束,选择率是与价格有关的概率变量,其范围仅在 0~1 之间.

1.4 遗传算法设计与实现

对于调度问题的常用解法主要有线性规划法和启发式算法两种思路. 在调度问题中本文选取了阈值作为主要的未知量进行求解, 同时需要对大量历史数据进行仿真模拟. 因此采用启发式算法中的遗传算法进行求解是合适的.

遗传算法求解在大规模快速运算上具有明显优势. 该算法最早由美国 J. H. Holland 教授提出. 该算法是基于生物进化理论的自适应随机搜索算法, 对于求解车辆的调度问题十分有效^[15].

问题中需要求解的变量数目为 $(2t+1)n+2$. 其中, t 是指在进行调度中将 1 d 划分的时间段个数, n 是指调度站点的总个数. 由于站点存在上、下两个阈值, 且存在着多个时间段, 因此有 $2tn$ 个阈值变量需要求解. 站点每天需要在初始时间停放初始车辆, 则有 n 个站点初值需要求解. 由于引入了价格和选择率机制, 故需要求解两个变量, 即共享汽车优惠价格和共享单车优惠金额. 其需要求解的变量总数如下式:

$$(2t+1)n+2 = 2tn + n + 2 \quad (25)$$

遗传算法求解的基本步骤为: 编码操作, 产生初始种群, 计算适应度函数, 遗传算子(选择、交叉和变异), 终止规则.

1.4.1 染色体编码与解码

本文采用二进制编码对车辆调度问题进行求解. 染色体的基因序列 $h = (A, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, D_0)$, 由 12 部分组成, 第 1 部分(A)是车辆的初始投放数量, 第 2~6 部分(B_1 至 B_5)是车辆的各个时段的上阈值, 第 7~11 部分(C_1 至 C_5)是各个时段的下阈值, 第 12 部分(D_0)是车辆调度的优惠金额.

1.4.2 初始化种群

在满足编码的前提下, 随机产生 n 个个体, 组成初始种群, 记为

$$G = \{g_0, g_1, \dots, g_n\}$$

1.4.3 约束条件与适应度

常见约束处理方法有 3 种: 第 1 种是直接处理约束条件, 在编码过程中加入约束条件. 第 2 种是计算过程中通过约束条件校验. 第 3 种是通过惩罚函数处理约束. 根据模型特点, 采用直接处理约束的方法.

采用目标函数作为适度函数, 即以调度成本最优为目标函数, 作为种群的适应度函数, 适应度更优的种群将有更大的概率繁衍后代.

1.4.4 遗传操作与终止规则

遗传算子中包括选择算子、交叉算子、变异算子. 选择算子是根据样本适应度大小在已知种群中选择一定数量的个体, 算法中使用 select 高级选择算例进行种群选择筛选. 交叉算子是通过给定的概率重组一对个体而产生后代. 算法使用高级重组算子(recombin)实现种群交叉繁衍. 变异算子是按照极低的概率对基因序列的某一位数进行变异, 算法使用离散变异算子(mut)产生种群基因突变. 最后终止条件可以按迭代次数终止或按适应度变化幅度终止, 最终优势种群(即能够更好地适应环境的种群)将获得生存优势并获得繁衍机会.

2 实例应用与分析

2.1 案例概况

数据选取上海市 EVCARD 公司嘉定区安亭镇的 14 个站点 2017 年 6 月所有订单数据进行研究, 当月 1~25 日的运营数据进行启发式算法计算求解, 26~30 日的的数据对模型进行验证分析. 数据主要包括了用户取车时间、用户还车时间、用户订单总金额等. 其数据格式如表 1 所示, 还车日期为用户还车的日期, 如 20170601 对应 2017 年 6 月 1 日; 用户取车时间为用户取车的时分秒时间, 如 234853 对应为 23:48:53; 还车网点编号为用户还车的网店信息, 如 1 对应还车在 1 号网点.

针对用户异地取还车价格和比例的接受度, 本研究通过针对嘉定区 403 个消费者进行问卷调查获得, 其中 63% 为男性, 37% 为女性, 52% 的被调查者的年龄在 20~25 岁之间, 71% 的受访者均有驾照. 获得汽车异地还车用户优惠价格 e 与选择率 α 关系式如下:

$$\alpha = 0.27 + 0.15 \ln e \quad (26)$$

表 1 仿真时所用数据示例

还车日期	用户取车时间	还车网点编号	用车时间/min
20170601	234853	1	25
20170601	225246	1	60
20170601	225219	1	42
20170601	224904	1	74
20170601	224805	1	13
20170601	224805	1	29
20170601	223448	1	23
20170601	221635	1	61

由于优惠价格受到具体情况限制, 在实际过程中, 将共享汽车优惠价格限定在 5~15 元. 对于共

享单车而言,由于单次使用共享单车的费用在 0.5~1.0 元,用户选择率在 0.4~0.7,对于共享单车调度在实际中处理为共享单车用户选择率 $\beta=0.5$,用户异地取车补贴优惠金 $g=2$ 元。

对于拒绝用户还车单次成本 h ,共享汽车企业平均租车价格为 $0.6 \text{ 元} \cdot \text{min}^{-1}$,用户去往下一个站点还车额外花费时间约为 15 min,因此计 $h=9$ 元。对于拒绝用户取车单次成本 k ,根据历史订单数据可知平均单次用户使用金额(不包含优惠券优惠)为

31.12 元,因此计 $k=31.12$ 元。

选择上海市同济大学嘉定校区一嘉亭荟等周围的 14 个站点,并进行随机编号。这 14 个站点的最大停车位数目为 11、13、35、10、13、3、6、10、6、6、40、3、10、4。另外需要注意的是,站点之间的距离是共享自行车的骑行时间距离。这 14 个站点之间的骑行时间矩阵如表 2 所示。由表 2 可知,每个站点周围至少存在一个能够通过骑行在 10 min 以内到达的站点,这为用户自适应调度提供了条件。

表 2 各共享站点骑行时间

站点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	28	29	31	16	16	17	5	9	36	30	7	2	33
2	28	0	6	8	25	23	13	26	41	13	4	36	30	6
3	29	6	0	4	27	27	12	25	41	9	1	35	30	5
4	31	8	4	0	29	31	15	28	44	7	5	38	32	9
5	16	25	27	29	0	3	17	13	28	34	27	23	14	29
6	16	23	27	31	3	0	17	12	28	33	26	22	13	28
7	17	13	12	15	17	17	0	13	29	19	13	24	18	17
8	5	26	25	28	13	12	13	0	17	32	26	11	6	29
9	9	41	41	44	28	28	29	17	0	48	42	10	9	45
10	36	13	9	7	34	33	19	32	48	0	9	42	36	12
11	30	4	1	5	27	26	13	26	42	9	0	37	31	4
12	7	36	35	38	23	22	24	11	10	42	37	0	8	40
13	2	30	30	32	14	13	18	6	9	36	31	8	0	35
14	33	6	5	9	29	28	17	29	45	12	4	40	35	0

2.2 调度需求模型实例模拟

本文采用 MATLAB 2016b 编写程序,计算机为 64 位操作系统,处理器为 Intel (R)、Core (TM)i7-6700、CPU @ 3.40GHz,安装内存为 8.00 GB。

遗传模型输入参数如下:遗传算法种群数 $N_{ind}=80$;最大种群繁衍数 $MAXGEN=800$;需要求解的变量维数 $NVAR=155$;设定遗传代沟参数 $GGAP=0.9$;变异概率 $P_m=0.01$;交叉概率 $P_c=0.8$,采用离散变异,由函数 `mut` 设定。适应度规则基于秩的适应度筛选机制;选择规则采用高级选择算子,由函数 `select` 设定;交叉规则采用高级重组算子,由函数 `recombin` 设定。

将企业调度成本与用户满意度潜在损失成本合计最优作为目标函数,对 2017 年 6 月份的数据进行验证分析。种群在经过 300 次迭代后开始收敛,种群的最小值稳定在 1.2×10^4 范围,最终输出站点各个时段的上、下阈值,站点初始时段的最优停放车辆数量,最佳优惠价格等。经过计算后结果如表 3 所示。

由表 3 可以得出,初始运营时间需要安排的最优可用车辆数,不同时间段上阈值(一定比例的用户激励异地还车)和下阈值(一定比例的用户激励异地取车),共享汽车优惠奖励红包金额,共享单车优惠

奖励补贴金额。

2.3 站点验证实例

通过对 1~25 日的历史数据进行遗传算法的最优求解,在结果验证中调用 26~30 日用车订单数据。以任意站点的调度情况为例,图 1 给出了站点 8 在最优初始站点值为 5 辆,最优优惠价格为 5 元的情况下,未进行用户激励调度的可用车辆数情况。图中,中横线为站点停车位数为 0。由图中可知,站点在将近一半的时间内均处于车位未能满足需求的情况,特别是在用车高峰的 10:00 之后。其负值产生的原因是因为这是在未进行任何人工调度与用户自适应调度的情况下产生的,实际工作中不产生负值是因为有人工调度员的参与和调度。

图 2 是进行人工调度后的 8 号站点变化情况。其中,最上端横线是最大停车位数目,为 10 辆;最下端横线是可用车辆数,为 0;中间横线为各时段上、下阈值,粗实线为站点可用车辆数。

由图 2 可知,站点的初始停车位最优解为 5 辆,并且站点在各个时间段的可用车辆数上、下阈值分别为:6:00~11:00,[6,3];11:00~14:00,[8,4];14:00~17:00,[8,5];17:00~21:00,[10,2];21:00~24:00,[6,2];24:00~6:00 为车辆停运时间,进

表 3 遗传算法给出的站点初值、上下阈值及优惠金额

Tab.3 Initial value of site, upper and lower threshold, and discount price, calculated by the genetic algorithm

站点编号	初值	停放车辆数/辆										调度优惠/元	
		6:00~11:00		11:00~14:00		14:00~17:00		17:00~21:00		21:00~24:00		汽车	单车
		上阈值	下阈值	上阈值	下阈值	上阈值	下阈值	上阈值	下阈值	上阈值	下阈值		
1	5	10	2	11	2	10	0	8	3	8	0	5.2	2
2	8	13	4	10	2	7	6	7	3	9	6	5.0	2
3	14	34	2	34	12	23	13	32	17	33	7	5.1	2
4	8	9	3	9	3	8	3	9	5	10	5	5.7	2
5	12	8	2	12	6	12	3	11	6	11	6	5.3	2
6	3	2	1	3	0	3	0	3	0	2	2	5.2	2
7	6	6	2	4	3	4	2	5	2	4	2	5.4	2
8	4	6	3	8	4	8	5	10	2	6	2	5.1	2
9	6	4	1	4	2	4	2	4	1	5	0	5.0	2
11	17	36	7	34	14	21	19	24	14	37	19	5.1	2
12	1	3	1	2	1	3	1	3	1	2	2	5.2	2
13	4	10	5	7	2	7	4	8	4	6	5	5.3	2
14	4	3	1	4	2	4	1	4	1	4	2	5.4	2

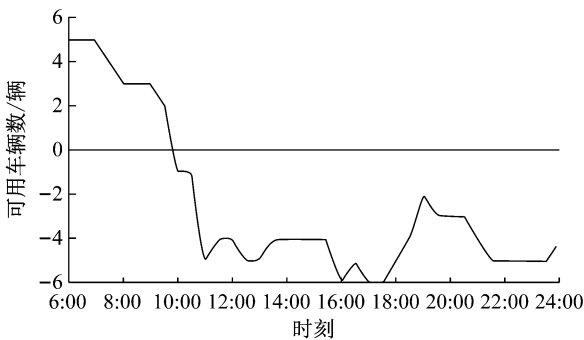


图 1 站点 8 未采用用户激励调度可用车辆数
Fig.1 Available vehicle number without user incentive relocation at NO.8 site

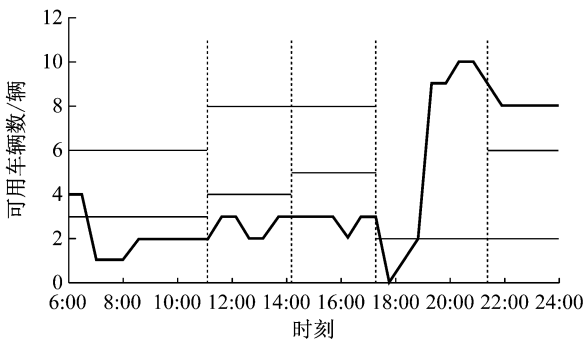


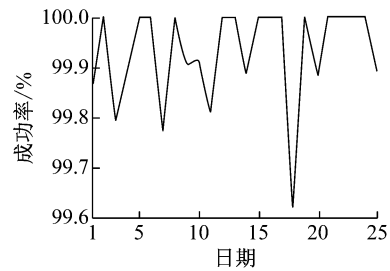
图 2 站点 8 采用用户激励调度可用车辆数
Fig.2 Available vehicle number with user incentive relocation at NO.8 site

行车辆的整备和调整. 在进行联合调度后, 可用车辆数长期处于可用范围内. 能够充分满足用户的取还车需求.

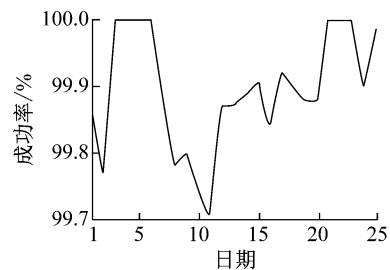
由于在调度过程中, 不能仅仅关注可用车辆数目和调度成本, 更应该关注用户的使用体验. 如果某一站点的车辆长期处于 0 以下或者满载状态, 则会影响到用户的取、还车体验. 在这种情况下, 可能会

出现拒绝用户取车、还车订单的问题, 这一比例应该尽可能降低.

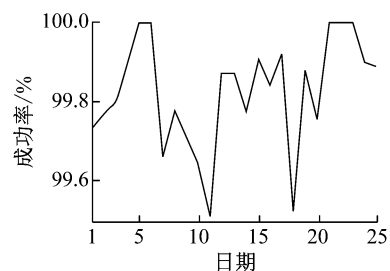
图 3 给出了 1~25 日的允许用户还车订单比例、允许用户取车比例, 以及总体允许用户取、还车比例. 相关数据结果表明, 用户平均取车订单成功率



a 允许用户还车订单比例



b 允许用户取车订单比例



c 允许用户取、还车订单比例

图 3 用户订单成功率

Fig.3 Success rate of user order

高于 99.5%, 峰值取车订单成功率不低于 95%; 用户平均还车订单成功率高于 99.7%, 峰值还车订单成功率不低于 95%; 总体用户取、还车成功率比例不低于 99.4%, 峰值用户取还车成功率不低于 95%。结果表明, 激励调度模型能够在保证各个站点良好有序运行的基础上, 具有良好的用户取车体验和还车体验。

2.4 调度成本分析

成本及利润是企业最需要考量的指标。本节将人工调度成本定为传统共享车辆企业通过员工调度所产生的成本费用, 用户激励调度成本定为采用用户自适应调度所产生的成本费用。其中人工调度成本按上海市平均工资的工作时间进行计算。

图 4 为总共 14 个站点在第 28 日的采用员工调度和用户激励调度的成本比较图。由图可知, 在大部分时间内, 用户激励调度所用成本远低于员工调度, 仅在某些用车高峰时段成本略高于员工调度。但是调度的灵活性是员工调度难以媲美的。

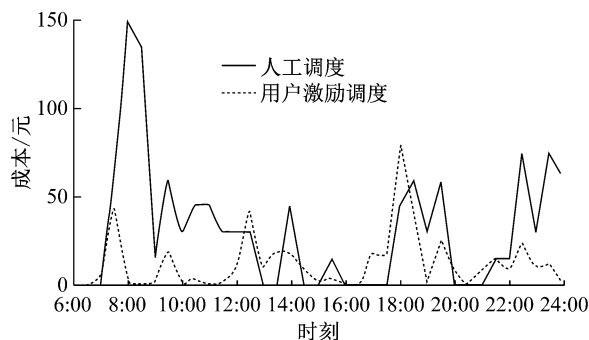


图 4 14 个站点的员工调度-用户激励调度成本对比图

Fig.4 Cost contrast figure of stuff relocation and user relocation

经过计算, 采用用户激励调度, 调度成本仅占人工调度的 30%~40%。表 4 给出了 6 月 26 日~30 日的占比计算结果, 表明基于共享汽车和共享单车的联合调度作为一种用户激励的自适应调度手段, 不仅可以快速获取用户需求并通过动态调度提升用户的消费体验, 还能进一步降低企业成本, 提升企业利润。

表 4 用户激励调度所占人工调度成本的比例

Tab.4 Cost ratio of user incentive relocation to stuff relocation

日期	26	27	28	29	30
占比/%	40	21	30	30	29

3 结论与展望

本文建立了基于用户激励的自适应调度模型,

考虑将共享单车与价格调节引入电动汽车调度中。通过获取用户调研和企业实际取、还车数据, 建立基于用户激励的电动汽车共享调度成本优化模型, 并用遗传算法进行仿真求解。求解结果得到站点初值汽车配置数、各时段可变阈值与最优价格优惠值, 并对模型结果进行验证与分析, 主要得到以下成果:

(1) 通过本研究, 提出了共享汽车价格优惠和共享单车价格激励的自适应联合调度模型, 并通过遗传算法求解该问题, 设计算法流程与思路。

(2) 对 EVCARD 电动汽车共享公司 14 个站点的实际 1 个月运营数据进行验证表明, 采用用户激励的自适应调度能够明显提高运营公司的收益及车辆利用率, 节约成本并提高用户满意度。

(3) 采用分时段的阈值能够有效平滑峰谷问题。由于用户取还车需求在时间-空间上具有短时间周期的不确定性和长时间周期的潮汐现象, 因此采用分时段可变阈值能够有效预测和调配车辆, 实现平滑过渡峰谷。

(4) 企业可以定制针对性的优惠价格策略, 在提升用户满意度的同时实现车辆调度成本最优。本例中最优优惠价格为 5 元, 企业可以根据自身情况和相关实践进行调整, 实现企业利润和用户满意度之间的平衡。

参考文献:

- [1] 陈卫东, 杨若愚, 杨浩博. 我国新能源汽车分时租赁发展的现状、问题与对策研究——以上海市“EVCARD”模式为例[J]. 综合运输, 2017(8):89.
CHEN Weidong, YANY Ruoyu, TANG Haobo. Present situation, problems and countermeasures of new energy car time-sharing rentals in China: EVCARD model in Shanghai as an example [J]. Comprehensive Transportation, 2017(8):89.
- [2] 荣萍. 智慧园区出行首推分时租赁——EVCARD 从张江示范区走向全国高新区[J]. 中国高新区, 2016(11):135.
RONG Ping. The first time of car sharing rent mode EVCARD from Zhangjiang demonstration area to the national high-tech zone [J]. Science & Technology Industry Parks, 2016 (11):135.
- [3] KLATT S. Carsharing, an integral part of an intermodal transport system. European Parliament [J]. Scientific and Technological Options Assessment, 2001, 4(4):3.
- [4] FAN W, MACHEMEHL R B, LOWNES N E. Carsharing: dynamic decision-making problem for vehicle allocation [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2063(1):97.

(下转第 1721 页)