

# 考虑排队时间和里程约束的竞争充电站选址问题

邵 赛,关 伟\*,毕 军

(北京交通大学 交通运输学院,北京 100044)

**摘 要:** 合理的充电站布局对减少用户里程焦虑和电动汽车普及起到重要作用.本文首先从提高用户体验角度出发,提出充电站容量和偏离距离相结合的效用函数,并基于Logit模型对多个充电需求进行合理分配.然后综合考虑充电站排队时间和电动汽车里程约束,以最大化用户总效用为目标建立竞争环境中的充电站选址模型,并采用免疫优化算法对模型进行求解.最后给出实例,结果表明,充电站运营商不仅可获得最佳选址方案,还可根据充电站内部状态和电动汽车到达情况实时调整运营策略以满足大量充电需求.而影响选择因素权重实验则说明,相对于偏离距离,充电站容量更具有吸引力.

**关键词:** 交通工程;电动汽车;充电站选址;Logit模型;排队时间;免疫优化算法

## Charging Station Location Problem with Queue and Range in Competitive Multi-site Service System

SHAO Sai, GUAN Wei, BI Jun

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Reasonable charging station location problem has an important effect on relieving users' range anxiety and popularization of electric vehicles (EVs). Firstly, in terms of improving users' experience, this paper proposes a utility function combining station capacity with deviated distance and allocates charging demand of EVs based on Logit model. And then, with consideration of queuing time in charging stations and EV range constraint, charging station location model in competitive multi-site service system is developed to maximize the total utility. Moreover, the model is solved by immune algorithm. At last, a study case is given. The results show charging station operators not only acquire the optimal location plan, but also real-time adjust the operation scheme to satisfy many charging demand according to the internal status at charging stations and the arrival EVs. In addition, The results of the chosen factor experiment indicate that comparing to the deviated distance, charging capacity plays more important role in the utility function and attracts more users.

**Keywords:** transportation engineering; electric vehicle; charging station location problem; Logit model; queue time; immunity algorithm

## 0 引 言

电动汽车(Electric Vehicle, EV)以其良好的环境保护和能源调整效应,成为推动车辆节能减排

的主流技术方向.现阶段由于电池技术等问题,电动汽车需要在路途中通过快速充电或常规充电的方法补充电量以完成行程.而充电站缺乏、布局不

收稿日期:2016-04-14

修回日期:2016-06-16

录用日期:2016-07-12

基金项目:中央高校基本科研业务费/Fundamental Research Funds for the Central Universities(T15JB00150);国家自然科学基金“重点”项目/Key Program of National Natural Science Foundation of China(71131001-2).

作者简介:邵赛(1989-),女,江西人,博士生.

\*通信作者:weig@bjtu.edu.cn

合理和排队时间过长等问题使得用户难以快速地找到能够满足充电需求并且满意的充电站,严重影响了电动汽车用户的出行体验,进而成为阻碍电动汽车发展的一个障碍.因此,合理的充电站位置对减少里程焦虑,提高出行舒适度及电动汽车普及起到了关键作用.

随着电动汽车的快速发展,相关的充电站选址问题研究也被广泛关注.充电站选址问题为设施选址问题的一种,其需要解决的关键点包括所建设施数量,设施位置和设施规模(如场地面积和设备数量等).大部分充电站选址问题研究也是基于普通设施选址方法.首先把充电需求被可看作固定点或者从起点到目的流量.然后选址模型则根据目标(如最少成本和最多系统效用等),结合 P-median 问题<sup>[1]</sup>、P-center 问题<sup>[1]</sup>、覆盖问题<sup>[2]</sup>和截流问题<sup>[3]</sup>等去覆盖所有或部分需求.文献[4]考虑排队、路径可达及成本,基于 P-median 模型建立电动出租车充电站选址模型.文献[5]以截取的交通流量最大、配电系统网络损耗最小及节点电压偏移最小为目标建立多目标的充电站规划模型,应用粒子群算法求解.文献[6]基于覆盖问题研究补给燃料站(充电站为其一种)的选址问题,并在实际的大型路网进行应用.文献[7]考虑里程约束、路径长度及站点位置,最大化所截取的流量,建立补给燃料站选址模型,最后分析站点与流量的均衡关系.文献[8]在文献[7]的基础上,提出3种在路段上增加可选站点的方法优化站点布局.文献[9]比较 P-median 问题和截流问题在充电站选址中的应用.近年来,随着仿真技术和大数据技术的发展,越来越多的新方法被提出.文献[10]通过仿真服务等级,投资规模和站点布局之间关系去优化充电站位置.文献[11]通过采集居民出行的 GPS 数据分析电动汽车充电行为,在此基础上提出考虑预算的充电站选址模型.文献[12]结合葡萄牙里斯本市的大量交通出行数据分析和最大覆盖选址模型去优化充电站位置.文献[13]以最大化能够完成往返行程的人数为目标建立充电站选址模型,最后结果与专业数学优化软件 CPLEX 求得的精确解进行对比.文献[14]基于排队时间和随机需求响应,建立双层模型对电动出租车充电站进行选址并对充电需求进行分配.

有限的续驶里程和充电需求使充电站选址问题与传统选址问题有较大的区别.而且当充电桩资源不足以满足需求时,产生的排队问题直接影响服务质量.针对上述问题,本文以提高用户体验出发,重点考虑里程约束和充电站排队时间约束,建立在竞争环境中的充电站选址模型最大化用户总效用.本文把充电需求看作一系列的点,当面对多个可行的充电站时,利用 Logit 模型合理分配充电站资源.

选址的竞争特性最早由 Hotelling<sup>[15]</sup>提出,其假设需求对服务设施的选择只由距离决定.文献[16-17]认为需求选择某个设施的概率与两者之间的吸引力有关.文献[18]考虑很多影响因素后提出设施效用函数来表示吸引力.文献[19]给出在预算和其他竞争设施情况下的新设施位置方案和规模,以追求包括需求匹配、市场扩展和位置与规模的平衡关系.从竞争特性角度对充电站选址问题研究较少.文献[20]等考虑电价、吸引力和行驶费用去优化充电站位置.文献[21]从博弈论角度对电动汽车充电站规划布局以达到系统最优,并对选址方案进行评价.

## 1 问题描述

本文通过解决考虑排队时间和里程约束的竞争充电站选址问题得到最优充电站选址方案,并基于 Logit 模型为充电需求分配充电站.因此,针对研究的3个关键问题首先进行详细介绍,以便于后续建模.

### 1.1 里程约束

当电动汽车不能以初始剩余里程完成全部行程时,产生充电需求.为确保所建的充电站能够覆盖所有充电需求,所以在建模时要求每个充电需求至少可以到达一个充电站,并且续驶里程(假设车辆在充电站 100%充满电)可完成余下行程.因此充电需求选择充电站时必须满足2个约束条件:

(1) 初始剩余里程不小于起始节点到充电站的最短距离;

(2) 续驶里程不小于充电站到目的节点的最短距离.

根据这2个约束条件,充电需求  $i$  ( $d_{o_i} < d_{o_i, p_i}$ ) 的可选充电站集合可用数学表达式表示:

$C_i = \{j \in C | d_{O_i j} \leq d_{O_i}, d_{j D_i} \leq D\}$ , 其中,  $C$  为候选充电站集合;  $D$  为电动汽车续驶里程;  $O$  和  $D$  分别为起始节点集合和目的节点集合;  $O_i$  和  $D_i$  表示充电需求  $i$  的起始节点和目的节点;  $d_{O_i}$  表示充电需求  $i$  的初始剩余里程;  $d_{ij}$  表示节点  $i$  到节点  $j$  的最短距离, 本文采用 Dijkstra 算法直接求得最短距离. 为更容易理解约束条件和数学表达式, 充电需求  $i$  的可选充电站以图例形式表示, 如图 1 所示. 图 1 中并未考虑路网结构, 所以两点之间的最短距离按照直线距离计算 (包含路网结构, 并基于 Dijkstra 算法计算两点之间的最短距离的实例见第 3 节), 实心点和空心点分别表示充电需求  $i$  的起始节点和目的节点, 带数字的正方形表示充电站. 以  $O_i$  为中心,  $d_{O_i}$  为半径所画的小圆为从起始节点出发的车辆所能到达的范围; 以  $D_i$  为中心,  $D$  为半径所画的大圆为从充电站出发的车辆所能到达的范围; 位于大圆和小圆的重叠处的充电站 (4 号和 5 号) 即为充电需求  $i$  的可选充电站.

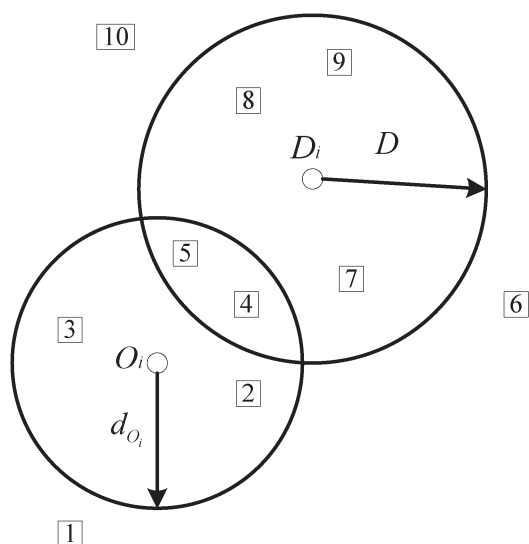


图 1 充电需求  $i$  的可选充电站示例图

Fig. 1 An example of showing the available charging stations for charging demand  $i$

## 1.2 需求分配

每个充电需求要求至少被 1 个充电站所覆盖. 但当充电需求面对多个可行的充电站时, 就需要从中做出选择. 本文应用基于选择行为的 Logit 模型<sup>[22]</sup>对充电需求进行合理分配. 充电需求  $i$  对充电站  $j$  的选择概率和效用函数如式 (1) 和式 (2) 所示. 对不满足里程约束的充电站, 其效用为 0.

$$x_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{j \in C_i} u_{ij}} \quad (1)$$

$$u_{ij} = \begin{cases} e^{c_{ij}}, & j \in C_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $c_{ij}$  是由影响选择因素 (如距离、充电价格、充电站服务质量等) 组成的代价函数.

本文考虑充电站容量和偏离距离作为影响选择因素. 充电站容量与排队时间为正相关关系, 可直接影响充电站服务质量. 在实际应用中, 充电站可能不会被布局在不同最短路径上, 从而发生行驶偏移. 充电需求  $i$  到充电站  $j$  的偏离距离为

$$s_{ij} = d_{O_i j} + d_{j D_i} - d_{O_i D_i} \quad (3)$$

为统一量化单位, 需对充电站容量和相对偏离距离归一化处理.

$$K'_j = \frac{K_j - K_0}{K_0} \quad (4)$$

$$s'_{ij} = \frac{s_{ij}}{d_{O_i D_i}} \quad (5)$$

式中:  $K_j$  为充电站  $j$  的容量;  $K_0$  表示充电站容量下限.

修订后的代价函数表示为

$$c_{ij} = \alpha K'_j - (1 - \alpha) s'_{ij} \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  为影响选择因素权重系数,  $\alpha \in [0, 1]$ .

## 1.3 排队时间约束

充电需求被分配完后, 开始前往充电站充电. 但到达充电站时可能会由于充电桩资源不够而面临排队问题, 直接影响服务水平. 因此本文在建立充电站选址模型时需考虑避免过长的排队时间.

假设在网络节点上产生服从泊松分布的充电需求  $i$ , 其单位时间 (h) 内的平均生成率为  $h_i$ . 根据各充电需求的平均生成率和需求分配, 计算充电站  $j$  的平均到达率为

$$\lambda_j = \sum_{i \in N} x_{ij} h_i \quad (7)$$

式中:  $N$  为产生充电需求的节点集合.

电动汽车在充电站的排队过程可以看成有限服务台的排队系统, 简称 M/M/c,  $c$  代表充电站内的充电桩数. 由于充电站的平均到达率被表示为泊松分布的线性组合, 所以车辆到达充电站的情况也服从泊松分布. 假设所有充电站的充电桩数相同. 根

据排队论理论,充电站  $j$  的平均排队时间可得

$$w(\lambda_j, \mu_j, c) = \frac{(c\rho_j)^{c_j} \rho_j}{c!(1-\rho_j)^2 \lambda_j} P_j(0) \quad (8)$$

其中,

$$P_j(0) = \left[ \sum_{k=0}^c \frac{1}{k!} \left( \frac{\lambda_j}{\mu_j} \right)^k + \frac{1}{c!} \frac{1}{1-\rho_j} \left( \frac{\lambda_j}{\mu_j} \right)^c \right]^{-1} \quad (9)$$

$$\rho_j = \frac{\lambda_j}{c\mu_j} \quad (10)$$

式中:  $\mu_j$  表示在充电站  $j$  内单位时间(h)被充电的电动汽车数;  $P_j(0)$  为充电站  $j$  没有任何一辆电动汽车到达的概率。

## 2 模型建立和求解方法

除第1节所介绍的变量外,其他模型变量定义为:  $U$  为用户总效用;  $\beta$  为充电站平均等待时间上限(h);  $M$  为所建充电站总数;  $y_j$  为 0-1 决策变量, 0 为不建立充电站  $j$ , 1 为建立充电站  $j$ 。

### 2.1 模型建立

本文所建立的竞争充电站选址模型为混合整数规划,数学表达式为

$$\max U = \sum_{j \in C} \sum_{i \in N} u_{ij} \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in C} x_{ij} = 1, \forall i \in N \quad (12)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \forall i \in N; \forall j \in C \quad (13)$$

$$y_j w(\lambda_j, \mu_j, c) \leq \beta, \forall j \in C \quad (14)$$

$$\sum_{j \in C} y_j = M \quad (15)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \forall j \in C \quad (16)$$

$$x_{ij} \in [0, 1], \forall j \in C; \forall i \in N \quad (17)$$

式(11)最大化用户总效用;式(12)确保每个充电需求的选择概率之和等于1;式(13)表示充电需求只能前往充电站充电;式(14)要求所建充电站的平均等待时间都不能超过一定范围;式(15)限定所建充电站的数量;式(16)和式(17)定义2个决策变量。

### 2.2 求解算法

选址问题属于 NP-困难,即计算时间网络节点数目成指数增长.对于复杂的选址问题,精确算法很容易导致无解.因此鉴于本文模型的考虑因素较

多,为了快速求解并取得较满意的可行解,本文采用免疫优化算法对模型进行求解。

免疫优化算法是一种新兴的智能计算方法.该算法利用免疫系统的多样性产生和维持极值来保持群体的多样性,克服了一般寻优过程尤其是多峰函数寻优过程中难处理的早熟问题,最终求得全局最优解.免疫优化算法结构与遗传算法类似,都采用了群体搜索策略,并且个体之间进行交换后生成新种群,最终获得问题的最优解。

## 3 实例

### 3.1 实例数据

选择 25 个节点的路网结构作为本文研究对象,如图2所示.在每个节点上不断地生成服从泊松分布的充电需求及其对应的目的节点和初始剩余里程.从所有网络节点上选取 5 个节点作为选址点。

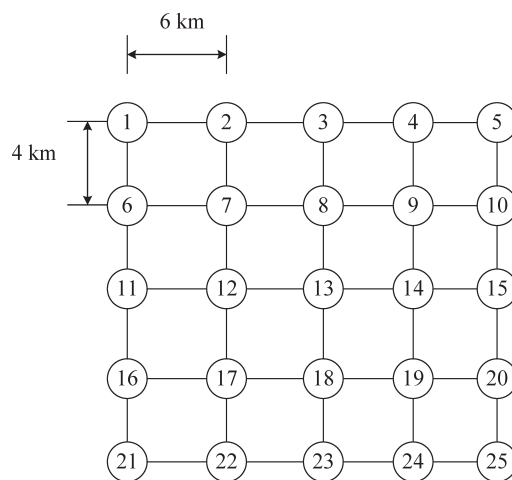


图2 路网结构

Fig. 2 Road network

### 3.2 求解结果

首先在给定 3 个模型参数(影响选择因素权重  $\alpha$ , 平均等待时间上限  $\beta$  和充电桩数  $c$ )的条件下,对模型进行求解.设置  $\alpha=0.5$ ,  $\beta=0.5$  和  $c=10$ .算法收敛曲线(图3)表明免疫优化算法能够快速收敛,获得目标最优值.对应的最优选址方案如图4所示.以选址点的用户总效用(式(18))和被选择概率(式(19))作为指标评价选址方案性能,如表1所示.结果可知由于处于网络中心的选址点 12 能够满足大部分充电需求,使其用户总效用和被选择概率最大。



$$U_j = \sum_{i \in N} x_{ij} u_{ij} \tag{18}$$

$$X_j = \sum_{i \in N} x_{ij} \tag{19}$$

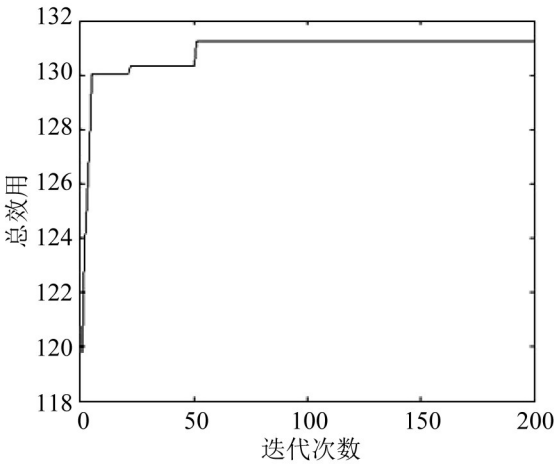


图3 目标值收敛曲线

Fig. 3 Convergence curve of the object

表1 选址点的平均效用和平均被选择概率  
Table 1 Average utility and average chosen probability of the locations

选址点	用户总效用	被选择概率
3	0.98	0.19
7	1.09	0.21
9	1.04	0.20
12	1.13	0.21
23	1.01	0.20

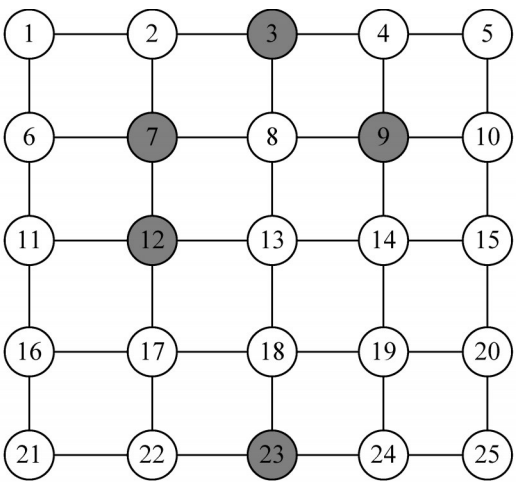


图4 最优选址方案(实心点为选址点)

Fig. 4 Location scheme (The filled nodes are the locations)

3.3 参数分析

(1)充电桩数和平均等待时间上限.

为确定排队时间约束对求解结果的影响,本小节通过改变排队时间约束里的充电桩数和平均等待时间上限,进行参数分析.参数分析结果如表2所示.随着平均等待时间上限减少,充电站必须通过增开多个充电桩以满足需求.表2不仅提供了最优选址方案,还给出了对应的开放充电桩数.充电站运营商可根据充电站实时状态和电动汽车到达情况,随时调整运营策略.

表2  $\beta$  和  $c$  参数分析结果

Table 2 Parameter analysis of  $\beta$  and  $c$

$\alpha$	$\beta$	$c$	选址方案(选址号)						用户 总效用	$\alpha$	$\beta$	$c$	选址方案(选址号)						用户 总效用
0.5	1.1	8	—						—	0.3	11	8	—						—
		9	17	12	22	13	7	133.48	9			—						—	
		10	2	13	18	19	8	136.93	10			—						—	
		11	18	7	14	13	8	140.41	12			14	13	19	4	18	136.32		
		12	14	18	13	8	13	141.38	13			17	8	13	14	18	140.55		
		13	23	14	13	8	18	137.37	14			4	13	18	8	12	138.09		
		14	23	13	18	8	12	137.46	14			3	18	8	13	7	138.24		
	0.7	8	—						—	0.1	12	8	—						—
		9	—						—			9	—						—
		10	9	8	14	18	13	140.50	10			—						—	
		11	13	12	8	14	18	141.30	11			—						—	
		12	17	13	12	18	14	140.08	13			6	13	18	17	8	136.07		
		13	4	12	18	13	14	137.52	14			19	12	9	18	14	137.70		
		14	19	13	8	18	17	139.45	14			17	8	12	19	13	139.27		

(2) 影响选择因素权重系数.

本小节通过改变权重系数,并以用户总效用相对变化率(式(20))为衡量指标去分析2个影响

选择因素(偏离距离和充电站容量)的重要性.

$$\rho_{\alpha} = \frac{|U_{\alpha} - U_{0.5}|}{U_{0.5}} \tag{20}$$

$U_{0.5}$  定义为当两个因素同样重要时 ( $\alpha=0.5$ ) 的用户总效用, 称为基准用户总效用,  $U_{0.5}=131.24$ . 参数分析结果如表3所示, 当  $\alpha=0.2$  和  $\alpha=0.8$  时, 偏离距离和充电站容量所占权重相同. 这时用户总效用相对变化率从 18% 增到 39% (当  $\alpha=0.4$  和  $\alpha=0.6$ , 结果类似). 这说明充电站容量在效用函数和充电需求对充电站选择时更能起关键作用. 充电站运营商可以首先通过扩大充电站容量吸引用户.

表3  $\alpha$  参数分析结果  
Table 3 Parameter analysis of  $\alpha$

$c$	$\beta$	$\alpha$	用户总效用	用户总效用相对变化率/%
10	0.5	0.2	107.27	18
		0.8	182.06	39
		0.4	126.76	3
		0.6	146.52	12

#### 4 结 论

本文重点考虑排队时间约束和里程约束, 在用户总效用最大化的基础上, 建立基于竞争环境下的充电站选址模型. 为了更好地体现竞争特性和充电需求选择特性, 引入 Logit 模型对充电需求进行分配, 最后使用免疫优化算法对模型进行求解. 结果表明, 免疫优化算法可快速收敛, 并得到最优值. 为了分析模型参数对求解结果的影响, 本文通过设置不同的参数值进行多次实验. 当平均等待时间上限减少时, 充电站必须增开多个充电桩以满足约束条件. 本文结果不仅为充电站运营商提供了最佳选址方案, 还可根据充电站内部状态和电动汽车达到情况实时调整充电桩开放数, 避免资源浪费. 影响选择因素权重系数实验说明, 充电站容量更能吸引用户关注, 为以后充电站建设提供理论依据.

#### 参考文献:

- [1] HAKIMI S L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph [J]. Operations Research, 1964, 12(3): 450-459.
- [2] CHURCH R, VELLE C R. The maximal covering location problem[J]. Papers in Regional Science, 1974, 32(1): 101-118.
- [3] HODGSON M J. A flow capturing location allocation model[J]. Geographical Analysis, 1990, 22(3): 270-279.
- [4] 刘子先, 李晓鹏. 多因素 P-median 下对电动出租车充电站的选址研究[J]. 工业工程与管理, 2013, 18(6): 1-6. [LIU Z X, LI X P. Research on locating electric taxi charging stations based on P-median model with multi-factor[J]. Industrial Engineering and Management, 2013, 18(6): 1-6.]
- [5] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 63-69. [WANG H, WANG G B, ZHAO J H, et al. Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 63-69.]
- [6] WANG Y W, WANG C R. Locating passenger vehicle refueling stations[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46(5): 791-801.
- [7] KUBY M, LIM S. The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2005, 39(2): 125-145.
- [8] KUBY M, LIM S. Location of alternative-fuel stations using the flow-refueling location model and dispersion of candidate sites on arcs[J]. Networks and Spatial Economics, 2007, 7(2): 129-152.
- [9] UPCHURCH C, KUBY M. Comparing the p-median and flow-refueling models for locating alternative-fuel stations[J]. Journal of Transport Geography, 2010, 18(6): 750-758.
- [10] XI X, SIOSHANSI R, MARANO V. Simulation-optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013(22): 60-69.
- [11] DONG J, LIU C, LIN Z. Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014(38): 44-55.
- [12] FRADE I, RIBEIRO A, GONÇALVES G, et al. Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011(2252): 91-98.
- [13] YOU P S, HSIEH C. A hybrid heuristic approach to the problem of the location of vehicle charging stations[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014(70): 195-204.
- [14] JUNG J, CHOW J Y, JAYAKRISHNAN R, et al. Stochastic dynamic itinerary interception refueling

- location problem with queue delay for electric taxi charging stations[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014(40): 123–142.
- [15] HOTELLING, HAROLD. Stability in competition[J]. *Economics Journal*, 1929, 39(1): 41–57.
- [16] HUFF D L. A programmed solution for approximating an optimum retail location[J]. *Land Economics*, 1966, 42(3): 293–303.
- [17] HUFF D L. Defining and estimating a trading area[J]. *Journal of Marketing*, 1964, 28(3): 34–38.
- [18] DREZNER T. Locating a single new facility among existing unequally attractive facilities[J]. *Journal of Regional Science*, 1994, 34(2): 237–252.
- [19] ABOOLIAN R, BERMAN O, KRASS D. Competitive facility location and design problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 182(1): 40–62.
- [20] ABOOLIAN R, BERMAN O, KRASS D. Optimizing pricing and location decisions for competitive service facilities charging uniform price[J]. *The Journal of the Operational Research Society*, 2008, 59(11): 1506–1519.
- [21] 周洪超, 李海锋. 基于博弈论的电动汽车充电站选址优化模型研究[J]. *科技和产业*, 2011, 11(2): 51–54. [ZHOU H C, LI H F. Optimization model of electric vehicle charging station siting based on game theory[J]. *Science Technology and Industry*, 2011, 11(2): 51–54.]
- [22] MCFADDEN D. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior[M]. New York: Zarembka P Ed *Frontiers in Econometrics*, 1974.

---

上接第152页

- [13] LIU L, ANDRIS C, BIDERMAN A, et al. Uncovering taxi driver's mobility intelligence through his trace[J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2009(160): 1–17.
- [14] HWANG K P, WU K H C, JIAN R J. Modeling consumer preference for global positioning system-based taxi dispatching service: Case study of Taichung city, Taiwan[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2006, 1971(1): 99–106.
- [15] 丁靖艳. 基于计划行为理论的侵犯驾驶行为研究[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(12): 15–18. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.2006.12.003. [DING J Y. Study on the aggressive driving behavior based on theory of planned behavior[J]. *China Safety Science Journal*, 2006, 16(12): 15–18. DOI:10.3969/j.issn.1003-3033.2006.12.003.]
- [16] 邹庆茹. 基于改进的计划行为理论的交通行为分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011. [ZOU Q R. The analysis of traffic behavior based on the improved TPB (Theory of Planned Behavior) [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.]
- [17] 李鹏飞, 石建军, 刘小明. 基于计划行为理论的竞争驾驶行为建模[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(1): 92–98. [LI P F, SHI J J, LIU X M. Modeling of competitive driving behavior based on theory of planned behavior[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, 16(1): 92–98.]
- [18] AJZEN I. From intentions to actions: A theory of planned behavior[M]// *Action Control*. Springer Berlin Heidelberg, 1985: 11–39.