

11-30-2023

## Charging Facility Layouts Based on Charging Selection Behavior

Lixiao Wang

*College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830047, China,*  
xjwanglx@foxmail.com

Zhonghui Wang

*College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830047, China,*  
2547404621@qq.com

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

## Charging Facility Layouts Based on Charging Selection Behavior

### Abstract

**Abstract:** A charging facility layout method based on charging selection behavior is proposed for the current uncoordinated development of electric vehicles and charging infrastructure and the low utilization of public charging facilities. The influence of the charging selection behavior of electric vehicle users' trips on the charging facility layout is considered, and a charging selection behavior model is built and applied to the charging demand prediction. Based on the study of charging selection behavior and charging demands, a charging facility layout model with the minimization of total travel time as the objective function is built, and the reciprocal feedback between charging selection behavior and charging facility layout is also considered. The built model is applied to the Nguyen-Dupuis test network to verify the validity of the proposed model. The results show that the charging facility layout considering the reciprocal feedback can reduce the total travel time during user trips and can improve charging convenience.

### Keywords

electric vehicles, charging methods, fast charging, charging demand, charging facility layout, travel time

### Recommended Citation

Wang Lixiao, Wang Zhonghui\*. Charging Facility Layouts Based on Charging Selection Behavior[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2312-2320.

# 基于充电选择行为的充电设施布局研究

王立晓, 王忠辉\*

(新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 针对目前电动汽车与充电基础设施发展不协调、公共充电设施利用率低等问题, 提出了一种基于充电选择行为的充电设施布局方法。考虑了电动汽车用户出行中的充电选择行为对充电设施布局的影响, 构建了充电选择行为模型, 并将该模型应用到充电需求预测。在研究充电选择行为和充电需求的基础上, 构建了以总出行时间最小化为目标函数的充电设施布局模型, 同时考虑充电选择行为与充电设施布局的互馈作用。将所构建的模型应用到 Nguyen-Dupuis 测试网络, 验证所提出模型的有效性, 结果表明考虑互馈作用的充电设施布局能降低用户出行过程中的总出行时间, 可提高用户充电的便利性。

**关键词:** 电动汽车; 充电方式; 快速充电; 充电需求; 充电设施布局; 出行时间

中图分类号: TP391; U491 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)11-2312-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0717

**引用格式:** 王立晓, 王忠辉. 基于充电选择行为的充电设施布局研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(11): 2312-2320.

**Reference format:** Wang Lixiao, Wang Zhonghui\*. Charging Facility Layouts Based on Charging Selection Behavior[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2312-2320.

## Charging Facility Layouts Based on Charging Selection Behavior

Wang Lixiao, Wang Zhonghui\*

(College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** A charging facility layout method based on charging selection behavior is proposed for the current uncoordinated development of electric vehicles and charging infrastructure and the low utilization of public charging facilities. *The influence of the charging selection behavior of electric vehicle users' trips on the charging facility layout is considered, and a charging selection behavior model is built and applied to the charging demand prediction. Based on the study of charging selection behavior and charging demands, a charging facility layout model with the minimization of total travel time as the objective function is built, and the reciprocal feedback between charging selection behavior and charging facility layout is also considered.* The built model is applied to the Nguyen-Dupuis test network to verify the validity of the proposed model. The results show that the charging facility layout considering the reciprocal feedback can reduce the total travel time during user trips and can improve charging convenience.

**Keywords:** electric vehicles; charging methods; fast charging; charging demand; charging facility layout; travel time

收稿日期: 2022-06-22 修回日期: 2023-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(71861032)

第一作者: 王立晓(1976-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为交通规划、交通行为分析。E-mail: xjwanglx@foxmail.com

通讯作者: 王忠辉(1995-), 男, 硕士, 研究方向为电动汽车充电设施布局。E-mail: 2547404621@qq.com

## 0 引言

随着全球环境的不断恶化和能源短缺问题的日益突出, 电动汽车作为一种低碳、环保的出行工具受到公众的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。虽然人们对电动汽车的接受度正逐步提升, 但电动汽车充电难、充电设施利用率低的问题仍然存在。一方面, 现有的充电设施布局难以满足电动汽车充电需求, 充电设施仍需要大力建设; 另一方面, 大量闲置的充电桩无法给电动汽车用户带来方便<sup>[3]</sup>。相关研究表明: 科学规划充电设施布局有利于缓解充电难、充电设施利用率低的问题以促进电动汽车产业体系的逐步完善<sup>[4]</sup>。

相关学者针对电动汽车充电设施布局做了大量研究, 如文献[5]提出同时考虑配电网和城市交通网络, 以最大限度提高用户的出行舒适度和降低充电站建设成本、损耗成本为规划目标进行充电设施布局; 文献[6]提出一种基于电动汽车充电需求预测的充电设施布局方法, 并以充电站规划总成本最小化为目标函数对充电设施布局。然而用户出行过程中的充电选择行为也会影响充电设施布局, 文献[7]提出一种考虑充电行为的充电需求预测模型, 基于充电需求预测结果进行充电设施布局; 文献[8]基于电动汽车出行轨迹数据模拟充电行为, 以模拟充电行为产生的充电需求作为输入变量对快速充电设施布局; 文献[9]通过问卷调查数据, 构建了充电选择行为模型进行充电需求预测, 从而对充电设施布局展开研究。然而, 已有研究大多基于充电选择行为进行是否产生充电需求预测, 鲜有研究考虑充电选择行为对充电方式(快充和慢充)需求的影响。既有充电设施布局研究, 大多考虑充电选择行为对充电设施布局的影响, 尚缺乏基于充电选择行为与充电设施布局的互馈作用进行设施布局的研究。此外, 随着充电技术的发展, 充电功率产生一定的差异性, 文献[10-11]研究考虑多种充电方式对充电设施布局的影响。因此, 本研究通过文献调研方式获取充

电选择行为的影响因素, 通过建立充电选择行为模型预测电动汽车充电需求, 构建以总出行时间最小化为规划目标的充电设施布局模型, 同时考虑充电选择行为与充电设施布局的互馈作用, 最后通过 Nguyen-Dupuis 测试网络验证模型的有效性, 本研究有利于缓解充电难以促进电动汽车的发展, 可为充电设施布局提供一定的理论依据。

## 1 基于BL模型的充电选择行为模型

为探究电动汽车用户的充电选择行为对充电需求的影响, 本研究假定充电站内可供选择的充电桩有2种: 快速充电桩和慢速充电桩, 选用非集计模型中的BL(binary logit)模型研究电动汽车用户的充电选择行为, 该模型可用于后续的充电需求预测和充电设施布局。下文将从BL模型简介和模型构建展开分析。

### 1.1 BL模型简介

非集计模型的理论基础: 用户在选择时追求“效用最大化”假说<sup>[12]</sup>, 假定用户是交通行为意识决定的基本单位, 在特定的选择情况下用户总是选择其认知中效用最大的方案。假设概率变量  $U_{in}$  表示用户  $n$  选择第  $i$  种方案的效用值,  $U_{in}$  分为2个部分: 固定项与随机项即

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1)$$

式中:  $V_{in}$  为用户  $n$  选择第  $i$  种方案效用函数的固定项;  $\varepsilon_{in}$  为用户  $n$  选择第  $i$  种方案效用函数的随机项。

本研究可供选择的充电方式有快速充电和慢速充电, 即  $i=1,2$ 。二项BL模型为

$$P_{1n} = \frac{e^{U_{1n}}}{e^{U_{1n}} + e^{U_{2n}}} = 1 - P_{2n} \quad (2)$$

式中:  $P_{1n}$  为用户  $n$  选择快速充电方式的概率;  $P_{2n}$  为用户  $n$  选择慢速充电方式的概率。

### 1.2 模型构建

本研究通过文献调研方式构建的电动汽车充电选择行为模型, 决策肢仅有快速充电方式和慢

速充电方式,未涉及是否充电的选择,国内外相关学者大多基于充电地点、充电时间段以及充电频率等充电选择,少数学者分析电动汽车用户对充电方式(快充和慢充)的选择,如文献[13]。因此借鉴文献[13]的充电选择行为模型,参考文献[13]中电动汽车充电选择行为模型的估计结果,提取显著因素作为本研究的变量,模型中考虑的变量包括:初始SOC(state of charge)、VKT(vehicle-kilometres of travel)以及以前快速充电的次数。

初始SOC,即电动汽车出发前的电池电量信息。已有研究发现,SOC越低,充电的可能性就越大<sup>[14]</sup>。文献[15]将初始SOC作为“驾驶里程焦虑”的代理变量,由此可见初始SOC对于电动汽车充电选择行为的影响很大。VKT即前一日车辆的行驶公里数。一些司机可能会因为前一个出行日的高耗电量而给电动汽车充电,而不是为将来使用做准备。文献[13]调查数据描述性统计分析表明VKT在[0, 65]近似服从正态分布,本研究拟采用随机生成法对每辆电动汽车赋予唯一的VKT。而快速充电次数指电动汽车在当前充电启动前快速充电的总次数,可以很好地反映电动汽车用户对充电方式的偏好程度。此外,用户还有可能继续维持以往的充电方式,或者已形成了这种习惯<sup>[16]</sup>。快速充电次数仍采用随机生成法对每辆电动汽车赋予唯一的快速充电次数,该次数在[0, 50]服从正态分布,且该次数为整数<sup>[13]</sup>。

根据文献[13]的估算结果,提取初始SOC, VKT以及快速充电次数的系数,按照原效用函数比例组成新的效用函数,并把其他没有考虑到的因素统一归置随机项,由上述分析可构建本研究的BL模型。

选择快速充电方式效用值为

$$U_{1nr} = 5.538 - 0.033SOC_{initial} + 0.210VKT + 2.954N_{fast} + \varepsilon_1 \quad (3)$$

选择慢速充电方式效用值为

$$U_{2nr} = 4.490 + 0.016SOC_{initial} + 1.960VKT - 0.024N_{fast} + \varepsilon_2 \quad (4)$$

选择快速充电方式的概率

$$P = \frac{e^{U_{1nr}}}{e^{U_{1nr}} + e^{U_{2nr}}} \quad (5)$$

式中: $SOC_{initial}$ 表示初始SOC; $N_{fast}$ 为电动汽车快速充电次数;服从参数(0,1)的二重指数分布。由式(3)可知,初始SOC对用户选择快速充电方式具有负效用,这说明当初始SOC越高,越不会选择快速充电方式。由式(4)可知,初始SOC和VKT对用户选择慢速充电方式具有正效用,当它们数值越大时,用户越倾向选择慢速充电方式,而当其越小时,用户倾向于选择快速充电方式,这显然与实际情况较符合。

## 2 充电设施布局模型的构建

### 2.1 充电需求预测

电动汽车用户在出行过程中除了考虑出行起讫点最短路径外,在SOC耗尽前能够到达充电站,还要考虑充电站排队时间和充电时间,且同时满足总出行时间(包括行驶时间、排队时间和充电时间)最小。当电动汽车到达充电站时依据电动汽车电量和出行距离分为3种选择:①电动汽车电量不能支持到达其他充电站,必须在当前站点接受服务;②电动汽车电量能够支持到达其他充电站,在其他站点接受服务;③电动汽车电量能够支持到达其他充电站,在当前站点接受服务。导致后两种情况产生主要取决于:电动汽车充电方式消耗的排队时间和充电时间。电动汽车充电站和路径的选择不仅取决于最短路径,还需考虑其他因素的影响,而选择不同充电站充电又会影响充电站内的充电需求量。本研究拟采用图1所示四节点网络说明出行过程中电动汽车充电选择行为以及充电需求预测,其中节点1为起点、节点2为终点,有4条路径可从起点到达终点,链路1-2(24 km)为路径a,链路1-2(40 km)为路径b,链路1-3-2为路径c,链路1-4-2为路径d,电动汽车充电方式由构建的BL模型决定。

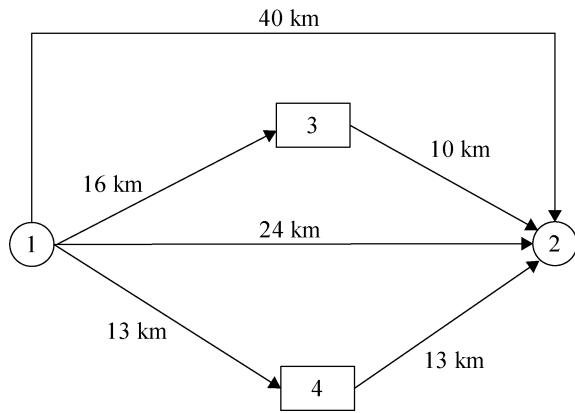


图1 四节点网络  
Fig. 1 Four-node network

出行过程中电动汽车充电选择行为和充电需求预测如下:

(1) 车辆从节点1出发, 电动汽车续航里程 $l$ , 沿着最短路径 $a$ 的行驶距离为 $m$ 和节点2到达最近充电站的距离为 $n$ , 判断是否 $l \geq m+n$ , 若是, 车辆沿着路径 $a$ 完成出行; 否则, 转入第(2)步;

(2) 若 $l < m+n$ , 则电动汽车需要充电, 将沿着路径 $c$ 或路径 $d$ 到达终点; 当电动汽车到达站点时, 由式(5)判断其充电方式;

(3) 若电动汽车沿路径 $c$ 和 $d$ 分别行驶, 在充电站3的充电方式为快速充电, 在充电站4的充电方式为慢速充电; 设沿路径 $c$ 消耗总时间(行驶时间+排队时间+充电时间)为 $T_1$ , 沿路径 $d$ 消耗总时间为 $T_2$ 。若 $T_1 \geq T_2$ , 则选择沿路径 $d$ 行驶且充电方式为慢速充电, 相应充电需求+1; 否则, 沿路径 $c$ 行驶且充电方式为快速充电, 相应充电需求+1。

## 2.2 电动汽车充电设施布局模型构建

由于理论和实际问题无可避免存在偏差, 若考虑的次要因素过多将会使建模难度增大, 因此, 在构建模型之前, 有必要进行合理的假设, 既可以简化模型, 还能反映模型的本质问题。为了使研究更符合现实状况, 本模型应尽可能全面地反映电动汽车充电设施布局的影响因素, 但考虑到构建模型和后续求解模型的方便, 有必要对现实情况做出一些基本假设, 本研究的充电设施布局

模型假设如下: ① 当待充电车辆数大于某站点充电桩个数时, 车辆需要等待完成充电服务; ② 充电站建设在网络节点上; ③ 所有电动汽车的车辆类型和电池类型均相同。④ 不考虑道路交通状况的影响, 电动汽车高峰时刻以40 km/h的速度行驶, 电量的消耗与行驶里程呈线性关系; ⑤ 电动汽车出发时刻服从均匀分布, 出发时刻初始电量服从 $[180, 300]$ 正态分布。根据上述假设, 建立以总出行时间最小化为目标的充电设施布局模型, 最小化总出行时间为 $\min(\sum_m T_m + \sum_i \sum_m X_i Y_{im} Z_{im} + \sum_i \sum_m T_{im})$

电动汽车充电站限制:

$$\begin{cases} \sum_i X_i = p \\ \text{s.t.} \begin{cases} X_i \in \{0, 1\} \\ Y_{im} \in \{0, 1\} \end{cases} \end{cases}$$

式中:  $i$ 为充电站数量;  $m$ 为电动汽车的车辆数;  $X_i$ 为决策变量, 即在节点 $i$ 处建设充电站, 即为1, 否则为0;  $T_m$ 为电动汽车 $m$ 路段行驶时间;  $Y_{im}$ 为指示变量, 电动汽车 $m$ 在节点 $i$ 处充电, 即为1, 否则为0;  $Z_{im}$ 为电动汽车 $m$ 在充电站 $i$ 处的排队时间;  $T_{im}$ 为电动汽车 $m$ 在站点 $i$ 的充电时间;  $p$ 为拟建充电站。

模型求解部分充分考虑电动汽车充电选择行为与充电设施布局的互馈作用, 充电需求预测部分与充电设施布局部分相互迭代, 直至达到最优布局。

## 3 实例验证

### 3.1 Nguyen-Dupuis网络概况

为验证所构建模型的有效性, 本文选取文献[17]提出的通用仿真测试网络Nguyen-Dupuis网络作为案例。网络基本结构如图2所示, 该网络拥有13个节点, 19条路段。图中圆圈内的数字表示网络节点的编号。为了使研究符合实际情况, 将文献[17]中路段长度等比例扩大, 网络的OD

(origin destination)需求如表 1 所示, 网络路段参数如表 2 所示。

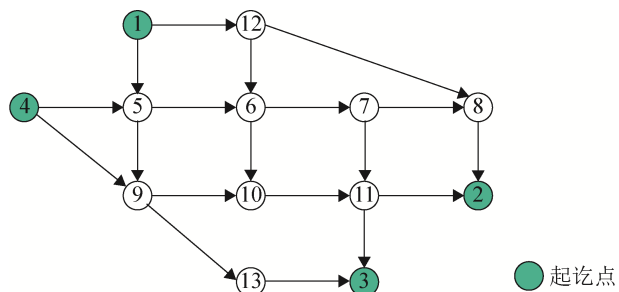


图 2 Nguyen-Dupuis 网络  
Fig. 2 Nguyen-Dupuis network

表 1 Nguyen-Dupuis 网络 OD 相关参数  
Table 1 OD-related parameters of Nguyen-Dupuis network

OD 点对	OD 需求(辆/时)
1-2	200
4-2	300
1-3	400
4-3	100

表 2 Nguyen-Dupuis 网络路段输入参数  
Table 2 Input parameters for Nguyen-Dupuis network sections

路段	OD 点对	长度/km	路段	OD 点对	长度/km
1	1-5	28	11	8-2	36
2	1-12	36	12	9-10	40
3	4-5	36	13	9-13	36
4	4-9	48	14	10-11	24
5	5-6	12	15	11-2	36
6	5-9	36	16	11-3	32
7	6-7	20	17	12-6	28
8	6-10	52	18	12-8	56
9	7-8	20	19	13-3	44
10	7-11	36			

### 3.2 仿真设计

为了使所构建的充电设施布局模型应用到网络上, 首先要对电动汽车、网络等相关信息进行仿真设计。本研究构建的电动汽车充电设施布局模型受到多种时间约束, 拟采用微观仿真的方法验证充电设施布局模型的有效性。本文验证充电站的数量为 3 个, 且各充电站内快充桩与慢充桩分别为 22 个和 11 个<sup>[18-19]</sup>时的布局结果, 除起讫点

外, 均可作为电动汽车充电设施的候选站点。

本文将从以下方面进行研究, 首先验证考虑充电选择行为与充电设施布局的互馈作用进行充电设施布局的有效性; 其次, 探究不同充电桩比例的充电设施布局; 最后基于不同充电桩比例的最优充电设施布局, 在充电站内充电桩数量总数不变的情况下, 依据电动汽车充电需求量重新对充电站内充电桩数量进行调整。本研究通过 Python 语言开发电动汽车的充电决策行为, 并以 Pycharm 作为仿真平台以及整体系统优化模型。电动汽车出发时刻服从均匀分布, 即在 1 h 内让车辆等时间间隔进入网络, 由表 1 可知, 共有 1 000 辆车进入网络, 在 0 s 时, 网络节点车辆的一半 (500 辆车) 作为起始车辆进入网络, 然后剩余一半车辆在 3 600 s 内等时间间隔进入网络, 以保持网络流量的恒定<sup>[20]</sup>。本研究选取的实验车辆为比亚迪 e3 标准续航版电动汽车, 相关参数如表 3 所示。

表 3 电动汽车相关参数  
Table 3 Relevant parameters for electric vehicles

参数	取值
电池容量/kWh	35.2
能耗因子/(kWh/km)	0.15
慢速充电桩/kW	7
车辆续航里程/km	300
快速充电桩/kW	60

### 3.3 结果分析

由 2.1 节充电需求预测步骤及仿真可知有 500 辆电动汽车产生充电需求, 仿真结果可通过以下 3 个方面进行分析。

#### 3.3.1 考虑充电选择行为与充电设施布局互馈作用的充电设施布局

为探究电动汽车充电选择行为与充电设施布局之间的互馈作用对充电设施布局的影响, 首先研究不考虑互馈作用的充电设施布局; 其次, 以不考虑互馈作用的充电设施最优布局为基础研究考虑互馈作用的充电设施初始布局。

首先为得到不考虑互馈作用的充电设施布局,

仅考虑充电选择行为对充电设施布局的影响进行充电设施布局。通过枚举法列举出84种可能布局组合所分别对应的总出行时间、行程时间、排队时间和充电时间,总出行时间最大值与最小值如表4中布局1和布局2所示,其中布局1为不考虑互馈作用时所对应总出行时间最大值,布局2为不考虑互馈作用时所对应总出行时间最小值,图3是更直观地显示了表4的结果。由表4可以看出,未考虑互馈作用时布局2的总出行时间比布局1总出行减少了30.39%,行程时间减少了2.25%,排队时间减少了73.82%,充电时间减少了53.81%,均同时满足500辆电动汽车的充电需求,由此可见布局2相较于布局1更优。

表4 不同充电设施布局的时间  
Table 4 Duration of different charging facility layouts h

布局	[节点编号]	总出行时间	行程时间	排队时间	充电时间
1	[5,12-13]	11 360.88	6 540.80	3 558.03	1 262.05
2	[7-8,11]	7 908.01	6 393.77	931.35	582.93
3	[8,11,13]	7 609.78	6 486.77	692.03	424.98

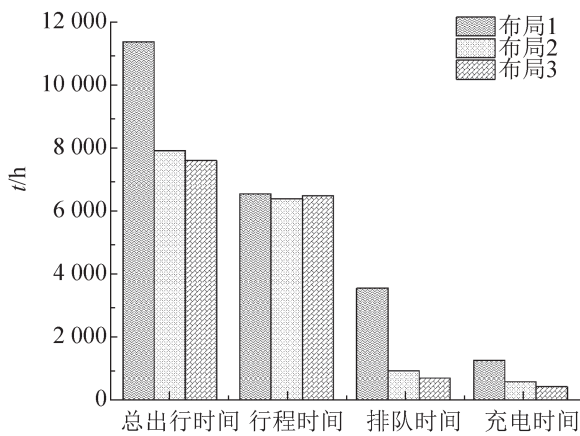


图3 不同充电设施布局的时间

Fig. 3 Time for different charging facility layouts

以布局2作为考虑互馈作用的初始布局来验证充电设施布局模型的有效性,由表4中布局2所示,总出行时间为7 908.01 h,此时充电设施布局为节点7、节点8和节点11。经过计算可得考虑互馈作用的充电设施布局结果如表4中布局3所示。

布局3与布局2相比,总出行时间减少了3.77%,行程时间增加了1.45%,排队时间增加了25.70%,充电时间减少了27.10%;电动汽车用户平均出行时间减少了0.30 h,平均行程时间增加了0.09 h,平均排队时间减少了0.24 h,平均充电时间减少了0.15 h。行程时间增加可能是由于用户绕行至其他充电站接受充电服务,增加电动汽车的行程时间,但排队时间和充电时间减少。通过上述分析可以看出,考虑电动汽车充电选择行为与充电设施布局的互馈作用的充电设施布局比不考虑互馈作用的充电设施布局更优,能有效减少总出行时间。

### 3.3.2 不同充电桩比例的充电设施布局

上述结果均是基于充电站内快充桩和慢充桩分别为22个和11个(原始充电桩比例)时的布局,本研究进一步讨论了不同充电桩比例的充电设施布局时最优布局的变化。以原始充电桩比例为基准,在充电桩总数不变的条件下,充电站内逐次增加1个快充桩或慢充桩并逐次减少1个慢充桩或快充桩进行充电设施布局研究,共列举出17个工况下充电设施布局情况,具体结果如表5和图4所示。

从工况4逐一增加快充桩并逐一减少慢充桩(即工况3、2、1)过程中,总出行时间呈上升趋势,结果表明随着快速充电桩数量增加,电动汽车总出行时间增加,这可能是慢速充电时间较长、选择慢速充电的用户较多所导致的。然而,从工况4逐一减少快充桩并逐一增加慢充桩(即工况4~13)过程中,总出行时间呈下降趋势,当快速充电桩与慢速充电桩比例为13:20时(即工况13),总出行时间最小,此时的充电设施布局为节点8、节点11和节点13。由图2可知,3个充电站位置距离目的地较近,结果与文献[21]研究结果相一致,用户愿意在出行的起点或目的地充电,如家或工作场所。当快速充电桩与慢速充电桩比例低于13:20(即工况14~17),总出行时间反而增加了。当充电站内快速充电桩与慢速充电桩分别为13个和20个



时，此时电动汽车用户的总出行时间最小，即工况 13 所对应的充电设施布局为基于工况 4 的最优充电设施布局。

表 5 不同充电桩比例的充电设施布局  
Table 5 Charging facility layouts with different charging pile ratios

工况	快速充电桩	慢速充电桩	总出行时间/h
1	25	8	7 956.70
2	24	9	7 811.42
3	23	10	7 814.43
4	22	11	7 609.78
5	21	12	7 539.65
6	20	13	7 479.30
7	19	14	7 431.03
8	18	15	7 390.81
9	17	16	7 355.78
10	16	17	7 329.39
11	15	18	7 306.75
12	14	19	7 301.04
13	13	20	7 300.88
14	12	21	7 306.75
15	11	22	7 320.29
16	10	23	7 340.10
17	9	24	7 329.39

3.3.3 基于工况 13 调整充电站内充电桩数量

上述讨论结果均基于每种工况下各充电站内设置相同比例、相同数量的充电桩下计算得出的，

但充电站内的充电桩数量设置过多或过少均会导致目标函数增大，基于此在充电站内充电桩数量总数不变的情况下，依据电动汽车充电需求大小对各充电站内快慢充电桩比例进行调整。表 5 工况 13 下的布局结果所对应电动汽车充电需求如图 5 所示，调整充电桩数量前后所对应的总出行时间如表 6 所示，由表 6 结果可知，调整后的充电设施布局的总出行时间比调整前减少了 0.92%，且节点 11 内充电桩数量最多，这与充电站内充电需求量相一致。

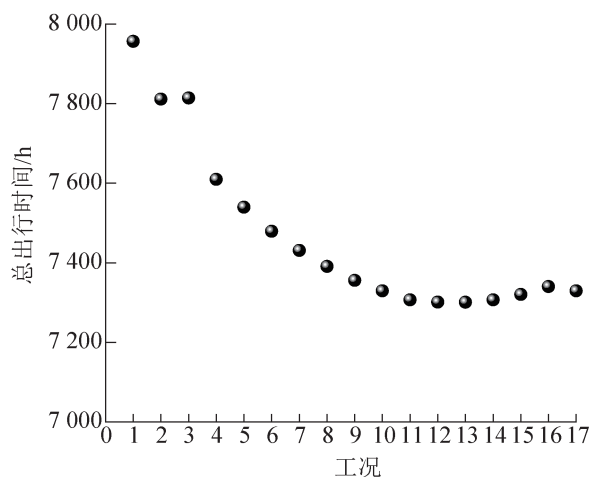


图 4 不同充电桩比例的充电设施布局  
Fig. 4 Charging facility layouts with different charging pile ratios

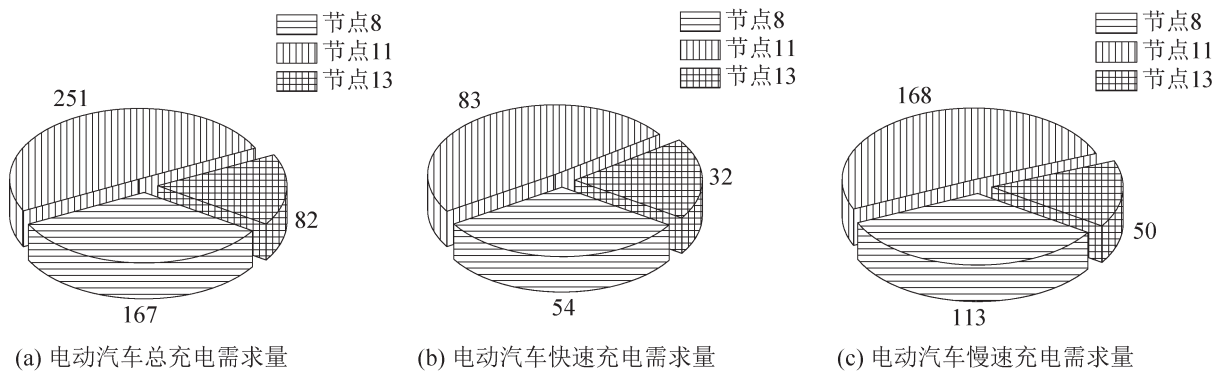


图 5 工况 13 下电动汽车充电需求分布情况  
Fig. 5 Charging demand distribution of electric vehicles under working condition 13

表6 基于工况13调整充电站内充电桩数量前后结果对比  
Table 6 Result comparison before and after adjusting the charging pile number in the charging station based on working condition 13

节点	调整前			调整后		
	快充桩	慢充桩	总出行时间/h	快充桩	慢充桩	总出行时间/h
8	13	20		13	19	
11	13	20	7 300.88	20	29	7 233.84
13	13	20		6	12	

## 4 结论

本文构建了以所有电动汽车用户总出行时间最小化为规划目标, 以及考虑充电选择行为与充电设施布局互馈作用的充电设施布局模型, 并将此模型应用到仿真测试网络中, 验证了模型的有效性。

结果表明: 考虑互馈作用的充电设施布局相较于未考虑互馈作用的充电设施布局的总出行时间减少了3.77%, 充电时间减少了27.10%。在充电站内充电桩总数不变的情况下, 依据电动汽车充电需求大小对各个充电站内快慢充电桩比例进行调整, 调整后的充电设施布局的总出行时间比调整前减少了0.92%。

本研究的充电选择行为模型仅考虑在公共场所快速充电和慢速充电两种选择, 未来研究可考虑建立更多选择肢的充电选择行为模型。

## 参考文献:

- [1] 余金永, 段佳钢. 电动汽车无线充电技术的研究与应用[J]. 时代汽车, 2022(1): 125-126.  
Yu Jinyong, Duan Jiagang. Research and Application of Wireless Charging Technology for Electric Vehicles[J]. Auto Time, 2022(1): 125-126.
- [2] 王伟权, 丁鼎, 颜林莎. 线性充电策略下多车型电动车辆路径模型研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(3): 614-623.  
Wang Weiquan, Ding Ding, Yan Linsha. Path-based Model for the Heterogeneous-fleet Electric Vehicle Routing Problem with Partial Linear Recharging[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(3): 614-623.
- [3] He Huan, Ge Qin. Location Planning of Electric taxi Charging Station Based on Driving Trajectory[C]//2021

- 2nd International Academic Conference on Energy Conservation, Environmental Protection and Energy Science. France: EDP Sciences, 2021: 01024.
- [4] 左志, 王涛, 潘晓锋, 等. 基于通勤行为的电动汽车充电站选址模型[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(2): 233-237.  
Zuo Zhi, Wang Tao, Pan Xiaofeng, et al. Location Model for Electric Vehicle Charging Stations Based on Commuting Behavior[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2016, 40(2): 233-237.
- [5] Tadayon-Roody P, Ramezani M, Falaghi H. Multi-objective Locating of Electric Vehicle Charging Stations Considering Travel Comfort in Urban Transportation System[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(5): 960-971.
- [6] 张智禹, 王致杰, 杨皖昊, 等. 基于充电需求预测的电动汽车充电站选址规划研究[J/OL]. 电测与仪表. (2021-09-09) [2022-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210909.1052.002.html>.  
Zhang Zhiyu, Wang Zhijie, Yang Wanhao, et al. Research on the Site Selection Planning of Electric Vehicle Charging Stations Based on Charging Demand Prediction [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation. (2021-09-09) [2022-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210909.1052.002.html>.
- [7] Cao Weitao, Wan Youhong, Wang Lu, et al. Location and Capacity Determination of Charging Station Based on Electric Vehicle Charging Behavior Analysis[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2021, 16(6): 827-834.
- [8] Kaviani-pour M, Fakhrmoosavi F, Singh H, et al. Electric Vehicle Fast Charging Infrastructure Planning in Urban Networks Considering Daily Travel and Charging Behavior[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 93: 102769.
- [9] 潘龙. 基于充电选择行为的电动汽车充电设施布局优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
Pan Long. Charging Choice Behavior Based Location Optimization for EV Charging Facilities[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [10] Luo Lizi, Gu Wei, Zhou Suyang, et al. Optimal Planning of Electric Vehicle Charging Stations Comprising Multi-types of Charging Facilities[J]. Applied Energy, 2018, 226: 1087-1099.
- [11] 张端鸿, 史一炜, 冯冬涵, 等. 含多类型充电设施的城市电动汽车充电站群协同规划方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(20): 60-66, 80.  
Zhang Duanhong, Shi Yiwei, Feng Donghan, et al. A

- Cooperative Planning Method of Urban Electric Vehicle Charging Station Group with Multi-type Charging Facilities[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(20): 60-66, 80.
- [12] 姚丽亚, 孙立山, 关宏志. 基于分层Logit模型的交通方式选择行为研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2010, 34(4): 738-741.  
Yao Liya, Sun Lishan, Guan Hongzhi. Study on Model Split Method Based on Nested Logit Model[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering)*, 2010, 34(4): 738-741.
- [13] Xu Min, Meng Qiang, Liu Kai, et al. Joint Charging Mode and Location Choice Model for Battery Electric Vehicle Users[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 103: 68-86.
- [14] Zoepf S, MacKenzie D, Keith D, et al. Charging Choices and Fuel Displacement in a Large-scale Demonstration of Plug-in Hybrid Electric Vehicles[J]. *Transportation Research Record*, 2013, 2385(1): 1-10.
- [15] Nilsson M. Electric Vehicles: An Interview Study Investigating the Phenomenon of Range Anxiety[C]// Task 5000 Lindholmen Science Park. Sweden: Elvire, 2011: 1-17.
- [16] Adamowicz W L. Habit Formation and Variety Seeking in A Discrete Choice Model of Recreation Demand[J]. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 1994, 19(1): 19-31.
- [17] Nguyen S, Dupuis C. An Efficient Method for Computing Traffic Equilibria in Networks with Asymmetric Transportation Costs[J]. *Transportation Science*, 1984, 18(2): 185-202.
- [18] E充电网. 2020北京市新能源汽车充电关键数据发布: 基本形成以快充为主的社会公用充电服务网络[EB/OL]. (2020-11-24) [2022-03-05]. <https://www.evehicle.cn/html/article.html?id=8303>.
- [19] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 关于印发《电动汽车充电基础设施发展指南(2015-2020年)》的通知: 改能源[2015]1454号[EB/OL]. (2015-11-18) [2022-03-06]. <http://www.china-nengyuan.com/news/85642.html>.
- [20] Hess A, Malandrino F, Reinhardt M B, et al. Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Vehicular Networks[C]//Proceedings of the first workshop on Urban networking. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2012: 1-6.
- [21] Kitamura R, Sperling D. Refueling Behavior of Automobile Drivers[J]. *Transportation Research Part A: General*, 1987, 21(3): 235-245.