

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L70051

# 基于电动汽车出行随机模拟的 充电桩需求研究

麻秀范 李颖 王皓 王超 洪潇

(华北电力大学电气与电力工程学院 北京 102206)

**摘要** 提出基于电动汽车出行随机模拟的充电桩需求分析方法。该方法通过对电动汽车在各地点停车时长的相似性分析,将不同地点归类为六类充电功能区域,考虑用户对电池荷电状态变化的接受范围,建立电动汽车出行及充电模型,运用蒙特卡洛随机模拟电动汽车一日出行链和在各目的地的充电需求,模拟中考虑各区域停车数随时间的变化和充电同时性,在模型中输入电动汽车模拟量和各类型电动汽车比例,可得到各区域总的充电桩与停车位的比例(桩位比)和快慢速充电桩的比例。模拟结果显示,工作区桩位比并不高,全天中三次及以上行程目的地内的桩位比较大;快慢充比例较大的区域一般为停车时长较短而充电需求较大的区域,居住区也有快充需求;当电动汽车数量不变时,随着车辆最大续驶里程的增大,桩位比并无明显变化规律,快慢充比例逐渐减小。

**关键词:** 电动汽车 出行链 随机模拟 充电桩需求

**中图分类号:** TM910.6; U469.72

## Research on Demand of Charging Piles Based on Stochastic Simulation of EV Trip Chain

Ma Xiufan Li Ying Wang Hao Wang Chao Hong Xiao

(School of Electrical & Electronic Engineering North China Electric Power University  
Beijing 102206 China)

**Abstract** A method is put forward in this paper to analyze the demand of EV charging piles based on stochastic simulation. Six charging areas are built by correlation analysis of parking time in different places, drivers' acceptance range of battery state of charge are considered, and EV's traveling and charging model is established, where Monte Carlo method is used to stimulate EVs' daily trip chain and charging demand in each destination. Meanwhile, the variation of parking number and the simultaneity of charging number are recorded. The proportion of total charging piles with parking space and the proportion of fast and slow piles are available in each area when entering the scale and proportion of EVs. It is proved that, the proportion of charging piles is not that high in working area, while the one is higher in three or more trip destinations. The proportion of fast and slow piles is higher in the areas with short parking time and urgent charging demand, while there exist fast charging demand in residential area. With constant EV scale and the increase of maximum driving range, there is no obvious change in the proportion of total charging piles, but the proportion of fast and slow piles goes down.

**Keywords:** Electric vehicle, trip chain, stochastic simulation, demand of charging piles

收稿日期 2016-08-21 改稿日期 2016-11-10

## 0 引言

电动汽车产业的发展离不开充电设施的建设,随着电动汽车保有量的增长,充电设施的合理配置将直接影响电动汽车的使用,因此充电设施的布局对电动汽车的推广起着重要作用。

近年来,多数对充电设施的需求分析集中在充换电站定容或选址优化上<sup>[1-4]</sup>。随着研究的深入,部分研究者转向了对充电桩数量的分析,主要研究角度包括以下三方面:一是运用预测方法,通过分析电动汽车保有量来确定充电桩数量<sup>[5,6]</sup>。这种方法可从宏观角度预测某城市电动汽车充电桩数量而无法得到具体某一区域的充电桩数量需求。二是分析电动汽车日耗电量和到家后的电池荷电状态(State of Charge, SOC),从而得到居住区电动汽车充电桩需求<sup>[7,8]</sup>。这种方法对电动汽车的充电场所和充电时间限制较大,多数结果得到的是居住区的充电桩需求。三是对以居住区为起点的单一行程目的地出行进行分析,得到了各目的地充电桩的配比度<sup>[9,10]</sup>。这种方法在车辆行程上做出的限制可能使结果与实际情况存在偏差。

出行链思想可以很好地解决上述问题,现阶段已有研究用出行链概念解决电动汽车出行模拟问题,从而实现电动汽车充电负荷计算、集中式充换电站容量确定或站址优化布局<sup>[11-17]</sup>。而目前还没有基于出行链思想分析各区域中充电桩需求。随着电动汽车保有量的增大,充电桩需求将大幅上升。本文提出的研究方法使区域内充电桩设置数量更接近实际需求,运用出行链思想模拟电动汽车的实际出行和充电,在得到各区域内充电电动汽车数量和停车数量随时间变化曲线后,进一步计算区域内所需的充电桩占停车位的比例,即桩位比,包括快速充电桩和慢速充电桩;比较车辆在各区域内的充电时长与停车时长来确定快慢速充电桩的比例(快慢充比例)。

本文还解决了在前人研究中对车辆出行目的地的划分较为简单和确定车辆 SOC 变化范围时较为主观的问题,以停车时长相似性对停车习惯相同的地点进行归类,得到了更为合理的充电区域划分;以用户对 SOC 变化的承受能力确定车辆 SOC 变化范围,使用户的充电模拟更为客观。

## 1 电动汽车充电桩需求研究框架

2011 年美国 EV Project 对 2 903 辆 Nissan Leaf

的驾驶及充电行为进行了统计<sup>[18]</sup>,依据其统计结果可知,一次充电周期内的行程数为 3,与大部分大中型城市居民人均出行次数<sup>[19,20]</sup>相差不大。一日一充模式较为普遍,个别用户会一日多充或多日一充。

基于上述结论和篇幅限制,本文以一日为研究对象对电动汽车行为进行分析,车辆在一日模拟中可能只充电一次,可能充电多次,也可能不充电。该模型可扩展到多日模式。具体思路如下:

(1) 划分充电功能区域。将停车时长相似的地点合并为同一类充电功能区域。

(2) 确定用户对 SOC 变化的接受范围。

(3) 分析车辆出行特征量概率分布,包括日出行次数、日首次出行时刻、基于不同起点的车辆目的转移概率、基于不同始末点的行驶时长和不同区域内的停车时长。

(4) 建立车辆的出行和充电模型,分析车辆一日行程,且在每次到达目的地后分析其是否需要充电、需要快速充电还是慢速充电。

(5) 在模拟过程中记录各区域每个时段内的停车数量和充电汽车数量,得到充电桩与停车位的比例、快慢速充电桩的比例。

## 2 电动汽车出行及充电模型

出行链是指研究对象在一日内的所有行程及目的地在时空间上的链式组合,可描述车辆的出行规律,出行特征量用以描述车辆出行特点<sup>[19,20]</sup>。为了有效体现电动汽车的实际出行特征,本文将讨论以任意区域为始末点的开环出行链下各区域内充电桩的需求,出行链起点和每次行程的终点均依概率确定。

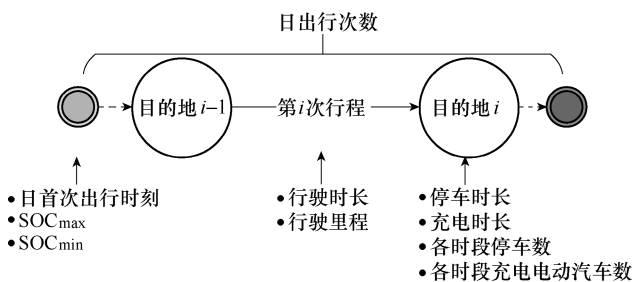


图 1 以任意区域为始末点的出行链

Fig.1 Trip chain with arbitrary area as starting or ending point

本文选用美国交通部 2009 年调查数据(National Household Travel Survey, NHTS)<sup>[21]</sup>对私家车出行特性进行分析,认为除最大续驶里程不同以外,电动汽车与燃油车出行习惯没有区别。

## 2.1 电动汽车充电区域划分

前人在充电区域划分上已有一些经验可借鉴,部分研究者将充电区域划分为居住区、工作区、休闲区等<sup>[9,12]</sup>,这种划分方法优点是较为简单,比较符合人类活动习惯,而不足之处在于某些停放差异性较大的区域被归为一类;有些研究者将出行目的进行了更为细致的划分<sup>[22,23]</sup>,其优点是考虑了车辆可能抵达的每个目的地,而不足在于:划分区域太多可能导致对某些停放和充电特性相似的目的地重复计算。基于上述分析,本文提出了基于停车时长相似性的电动汽车充电区域划分方法。

考虑到若车辆在某些地点的停车时长较为相近,则用户对于是否在此地点充电、充电多久的考虑也较为相近。因此,本文对各地点停车时长概率密度曲线较为相似的地点进行归类,得到不同的充电功能区域。

这里采用相关系数分析停车时长概率密度曲线的相似性,相关系数计算式为

$$\rho_{A,B} = \frac{\text{Cov}(A,B)}{\sigma_A \sigma_B} \quad (1)$$

式中, $A$ 、 $B$ 分别表示某两区域内的停车时长概率密度; $\text{Cov}(A,B)$ 表示 $A$ 、 $B$ 的协方差; $\sigma_A$ 、 $\sigma_B$ 表示 $A$ 、 $B$ 的标准差。当 $0.85 < \rho \leq 1$ 时, $A$ 、 $B$ 为强相关。

NHTS 将车辆所有行程的目的地分为 10 类,本文首先对这 10 类地点中停车时长进行统计,统计结果见附录;其次对停车时长概率密度进行归类分析。其中考虑到居住区在电动汽车充电中的重要性,和工作区停车时长统计结果的独特性(见附录),单独对这两类区域停车时长进行拟合。其余各地点停车时长相关性计算结果见表 1。

表 1 各地点停车时长相关性计算

Tab.1 Correlation calculation of parking period in different places

相关系数	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.00	0.70	0.37	0.88	0.77	0.27	0.61	0.48
2		1.00	0.78	0.91	0.94	0.43	0.93	0.66
3			1.00	0.69	0.85	0.74	0.91	0.89
4				1.00	0.97	0.50	0.86	0.70
5					1.00	0.63	0.94	0.83
6						1.00	0.62	0.90
7							1.00	0.83
8								1.00

表 1 中 1~8 分别表示学校/日托/宗教活动、医疗、购物、社交、家庭私事、接送、就餐、其他。

从结果来看,医疗、社交、家庭私事、就餐四类区域相似度较高,接送与其他相似度较高,因此本文对各充电功能区域的划分结果见表 2。

表 2 各充电功能区域划分

Tab.2 Division of the charging function areas

区域划分	区 域
居住区	家
工作区	工作
功能区 1	学校/日托/宗教活动
功能区 2	医疗、社交、家庭私事、就餐
购物区	购物
功能区 3	接送、其他

对划分后的充电区域的停车时长进行拟合,拟合曲线如图 2 所示,拟合参数见表 3。其中居住区、功能区 2、购物区、功能区 3 服从指数分布,其概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} e^{-\frac{x}{\theta}} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

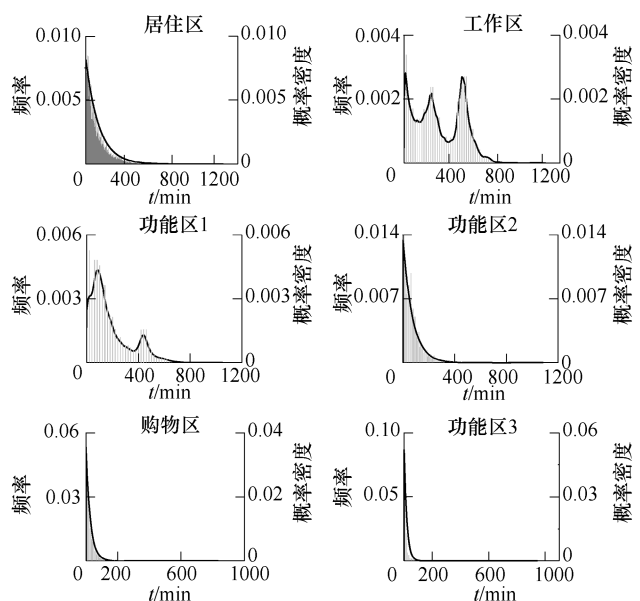


图 2 各区域停车时长频率直方图及概率密度

Fig.2 Frequency chart and probability density of parking period in each area

工作区和功能区 1 无明显分布,使用核密度估计得到其概率密度<sup>[24,25]</sup>,具体计算过程见附录。由于默认每辆车在全天行程结束后一定充电,这里仅考虑出行链内的停车时长,全天行程结束后的停车时长不予考虑。

表 3 各区域停车时长统计结果

Tab.3 Statistic results of parking period in each area

区域划分	服从分布	$\theta$
居住区	指数分布	123.013
工作区	核密度估计	—
功能区 1	核密度估计	—
功能区 2	指数分布	74.420 1
购物区	指数分布	27.923 8
功能区 3	指数分布	18.925 2

## 2.2 确定用户对 SOC 变化的接受范围

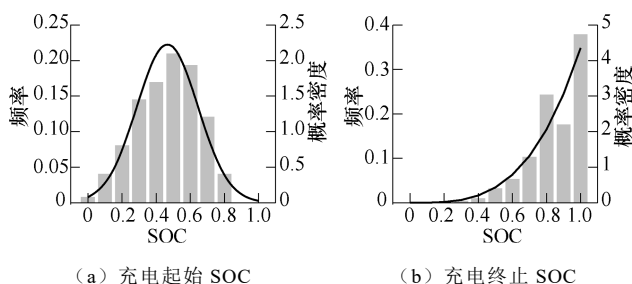
电动汽车续驶里程较低一直以来都是消费者较为担忧的部分, 电池过放电或过充电都会对电池寿命产生影响<sup>[26]</sup>, 因此大多数用户并不会将电池完全充满, 也不会将电量完全用尽。本文设置用户心理最高 SOC ( $SOC_{\max}$ ) 与心理最低 SOC ( $SOC_{\min}$ ) 作为车辆当日首次出行的起始 SOC 和途中需要充电的最低 SOC, 每一辆车在出行时其电池 SOC 将在  $SOC_{\max}$  与  $SOC_{\min}$  之间变化。

$$SOC_{\text{start}}(1) = SOC_{\max} \quad (3)$$

式中,  $SOC_{\text{start}}(1)$  表示一日首次出行的起始 SOC。

由于用户心理状态难以量化, 这里将充电终止 SOC 作为  $SOC_{\max}$ , 即认为用户停止充电时的 SOC 是用户可接受的出行前必须达到的 SOC 水平; 将充电起始 SOC 作为  $SOC_{\min}$ , 即认为用户开始充电时的 SOC 是用户可接受的最低 SOC, 低于此值时必须充电。

选取文献[18]中提供的充电起始 SOC 与充电终止 SOC 统计结果, 拟合两者的概率分布如图 3 所示。



(a) 充电起始 SOC

(b) 充电终止 SOC

图 3 充电终止 SOC 和充电起始 SOC 频率直方图及概率密度

Fig.3 Frequency chart and probability density of final and initial SOC

充电起始 SOC 服从正态分布

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

式中,  $\mu = 0.465\ 76$ ,  $\sigma = 0.179\ 24$ 。

充电终止 SOC 的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} 4.352x^{3.352} & 0 < x \leq 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

为防止抽取的  $SOC_{\max}$  小于  $SOC_{\min}$  或二者相差太小, 本文设定用户耗电最小区间约束, 通过对数据的分析, 本文将最小区间设为 10%, 以保证车辆正常出行, 即

$$SOC_{\max} - SOC_{\min} \geq 10\% \quad (6)$$

基于此, 认为  $SOC_{\min}$  一定小于 90%。

## 2.3 电动汽车出行特征量

本文对所有电动汽车出行特征量进行概率拟合, 用于蒙特卡洛随机模拟时抽取随机数。其中, 部分特征量概率密度服从常见分布, 如日出行次数、基于不同始末点的行驶时长和部分区域内的停车时长; 而对于不服从常见分布的部分特征量, 则运用核密度估计进行拟合, 如日首次出行时刻和部分区域内的停车时长。具体结果见表 4。受篇幅限制, 详细计算过程见附录。考虑到实际出行次数为正整数, 得到日出行次数概率密度函数后需进行离散化处理。

## 2.4 电动汽车出行及充电行为模拟

为方便分析, 在模型中做出以下假设:

(1) 所有电动汽车一日内首次出发时 SOC 已达到其抽取的  $SOC_{\max}$ ; 所有电动汽车在最后一次行程结束后一定充电, 且为慢速充电。

(2) 当车辆 SOC 低于抽取的  $SOC_{\min}$  时, 必须充电。

(3) 车辆行驶里程与耗电量成正比, 即不考虑交通、天气等因素对耗电量的影响, 同时, 不考虑车辆的长途出行, 由于市内日平均行驶里程远小于最大续驶里程<sup>[18]</sup>, 默认每次行程不大于电动汽车的最大续驶里程, 即在抵达目的地前车辆不会有紧急充电需求。

(4) 考虑到快速充电大电流对车辆电池寿命的影响<sup>[27]</sup>, 认为在条件允许的情况下优先选择慢速充电。

(5) 不考虑排队充电问题, 当电动汽车抵达目的地时, 可实现即插即充。

(6) 在同一时段内车辆的目的转移概率相同,  $P_T$  是离散化的三维矩阵,  $T=1, 2, \dots, 24$ 。

表 4 电动汽车出行特征量

Tab.4 Travel characteristics of EVs

日出行特性	分布或计算公式	参 数
日出行次数 $I$	对数正态分布 $f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	$\mu = 1.34, \sigma = 0.59$
日首次出行时刻 $T_{\text{start}}(1)/\text{h}$	核密度估计	—
不同区域内的停车时长 $t_{\text{park}}(i)/\text{min}$	见表 3	见表 3
基于不同起点的车辆目的转移概率 $P_T$	$P_T = \begin{bmatrix} p_{T,1,1} & \cdots & p_{T,1,6} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{T,6,1} & \cdots & p_{T,6,6} \end{bmatrix}$ 其中, $\begin{cases} 0 \leq p_{T,k,l} \leq 1 \\ \sum_{l=1}^6 p_{T,k,l} = 1 \end{cases}$ , $T$ 表示时间, $k, l = 1, 2, \dots, 6$	见附录
基于不同始末点的行驶时长 $t_{\text{travel}}(i)/\text{min}$	广义极值分布 $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\left(1+kz\right)^{\frac{1}{k}}\right) (1+kz)^{-\frac{1}{k}} & k \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp(-z - \exp(-z)) & k = 0 \end{cases}$ , 其中 $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$	见附录
行驶里程 $d_{\text{travel}}(i)/\text{km}$	由行驶时长计算, $d_{\text{travel}}(i) = 0.5503 t_{\text{travel}}(i)^{1.15}$	—

#### 2.4.1 电动汽车出行模拟

基于上述假设,对每辆车都进行以下出行模拟:

- (1) 抽取车辆  $e$  的出行特征量  $I$ 、 $T_{\text{start}}(1)$ 、 $\text{SOC}_{\text{max}}$ 、 $\text{SOC}_{\text{min}}$ , 首次行程的起点依概率设定。
- (2) 依据  $T_{\text{start}}(i)$  得到车辆  $e$  此时的目的转移概率  $P_{T_{\text{start}}(i)}$ , 得到本次行程的目的地。
- (3) 抽取以出发地和目的地为始末点的行驶时长  $t_{\text{travel}}(i)$ , 并计算本次行程的行驶里程  $d_{\text{travel}}(i)$ 。
- (4) 抽取车辆  $e$  在本次行程目的地内的停车时长  $t_{\text{park}}(i)$ , 记录该时段内该目的地的停车数。
- (5) 由式 (7) 计算下次行程的起始时刻  $T_{\text{start}}(i+1)$ , 循环步骤 (2)~步骤 (5), 当  $i=I$  时, 结束循环。

$$T_{\text{start}}(i+1) = T_{\text{start}}(i) + t_{\text{travel}}(i) + t_{\text{park}}(i) \quad (7)$$

出行模拟流程如图 4 所示。接下来,在上述循环中,分析车辆  $e$  在本次行程中的耗电量及充电需求。

#### 2.4.2 电动汽车充电需求模拟

用户充电需求的确定需要考虑的是用户抵达目的地后的  $\text{SOC}$  与  $\text{SOC}_{\text{min}}$  的关系。行程中车辆出行起始  $\text{SOC}$  为

$$\text{SOC}_{\text{start}}(i) = \text{SOC}_{\text{arrive}}(i-1) + \frac{P \frac{t_{\text{charge}}(i-1)}{60}}{W_e} \quad (8)$$

$$P = \begin{cases} P_{\text{slow}} & \text{慢速充电模式} \\ P_{\text{fast}} & \text{快速充电模式} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\text{SOC}_{\text{arrive}}(i-1)$  表示车辆抵达  $i-1$  次行程目的

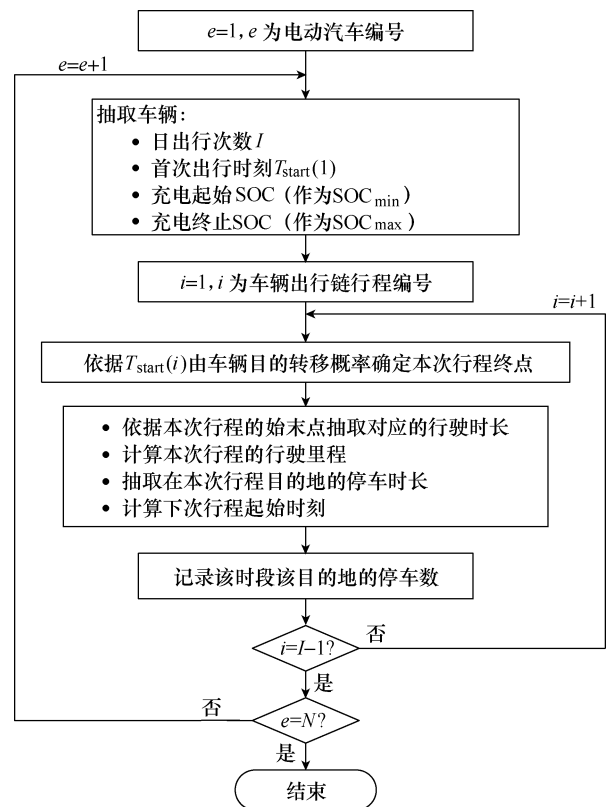


图 4 车辆出行模拟流程

Fig.4 Flow chart of vehicle travel behavior simulation

地时的  $\text{SOC}$ ;  $t_{\text{charge}}(i-1)$  表示在目的地  $i-1$  的充电时长, 若在上一目的地未充电, 则  $t_{\text{charge}}(i-1)=0$ ;  $W_e$  表示车辆  $e$  的电池容量。

车辆  $e$  抵达目的地  $i$  时的  $\text{SOC}$  为

$$\text{SOC}_{\text{arrive}}(i) = \text{SOC}_{\text{start}}(i) - \frac{d_{\text{travel}}(i)}{D_e} \quad (10)$$

式中,  $D_e$  表示车辆  $e$  的最大续航里程。

若  $SOC_{arrive}(i) \leq SOC_{min}$ ，则用户在目的地  $i$  充电；若  $SOC_{arrive}(i) > SOC_{min}$ ，则还需分析用户抵达目的地  $i+1$  时的 SOC 水平。若  $SOC_{arrive}(i+1) \leq SOC_{min}$ ，则认为此时电动汽车的剩余 SOC 无法满足下一行程，因此用户需在目的地  $i$  充电；若  $SOC_{arrive}(i+1) > SOC_{min}$ ，则无需在目的地  $i$  充电。

### 2.4.3 快慢速充电需求模拟

快速充电与慢速充电需求的确定需要考虑的是车辆  $e$  在目的地内的停车时长与慢充充电时长之间的关系。

在目的地  $i$  内慢速充电时长选取的时间精度为 1min，即  $t_{charge}(i) = 0, 1, 2, \dots, 1440$ ，慢速充电时长计算公式为

$$t_{charge}(i) = \frac{[SOC_{max} - SOC_{arrive}(i)]W_n}{P_{slow}} \times 60 \quad (11)$$

若  $t_{charge}(i) \leq t_{park}(i)$ ，则车辆在目的地  $i$  内的停车时长足以使 SOC 通过慢速充电达到  $SOC_{max}$ ，此时车辆慢速充电；若  $t_{charge}(i) > t_{park}(i)$ ，则基于假设

(4) 需要考虑若仅在停车时长内慢速充电，车辆是否能够在电池电量低于  $SOC_{min}$  之前抵达下一目的地。此时，令  $t_{charge}(i) = t_{park}(i)$ ，计算下一次行程的 SOC 变化，即

$$SOC_{start}(i+1) = SOC_{arrive}(i) + \frac{P_{slow} \cdot t_{charge}(i)}{W_e} \quad (12)$$

$$SOC_{arrive}(i+1) = SOC_{start}(i+1) - \frac{d_{travel}(i+1)}{D_e} \quad (13)$$

若  $SOC_{arrive}(i+1) \leq SOC_{min}$ ，则认为慢速充电不能满足下一次行程，车辆必须在目的地  $i$  快速充电；若  $SOC_{arrive}(i+1) > SOC_{min}$ ，则在目的地  $i$  慢速充电。充电需求模拟流程如图 5 所示。

根据上述流程，可以得到每时段、每辆车抵达每个目的地后是否充电、充电时长、充电模式等充电特性。

## 3 充电桩需求算例分析

依据第 2 节中的出行和充电模型，输入电动汽车保有量及各类型电动汽车的比例，即可得到城市不同区域的充电桩需求。为体现最大续航里程对充电桩比例的影响，这里考虑了三种情景：①最大续航里程均为 160km；②最大续航里程依比例设定；③最大续航里程均为 500km（燃油车水平）。下面将分析三种情景下各区域充电桩的数量需求。本文

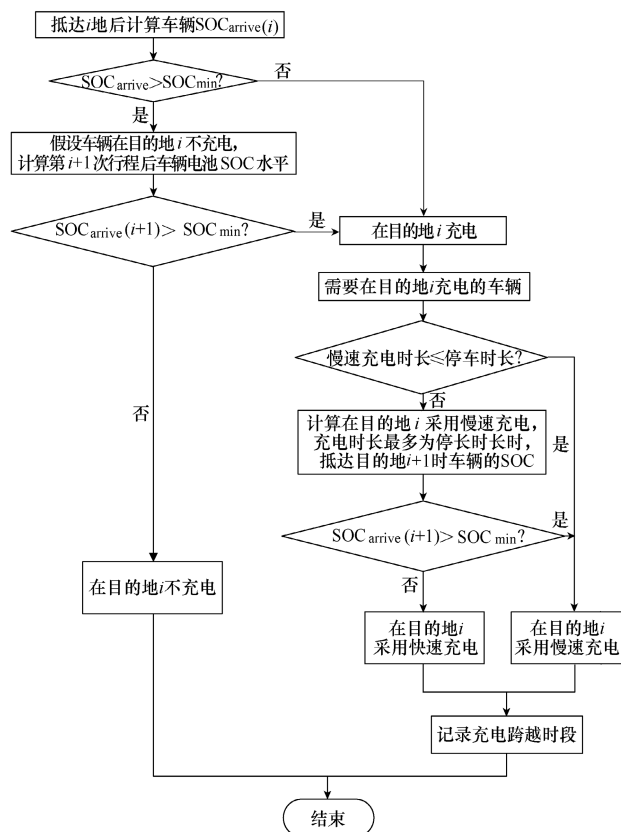


图 5 车辆充电需求模拟流程

Fig.5 Flow chart of vehicle charging demand simulation  
设电动汽车模拟量为 10 000 辆，慢速充电功率为 3.3kW，快速充电功率为 10kW。假设各类型电动汽车的比例见表 5，以各区域为首次出行起点的概率见表 6。

表 5 不同电池容量的电动汽车

车型	电池容量/(kW·h)	最大续航里程/km	比例
北汽 EV160	25.6	160	0.2
北汽 EV200	30.4	200	0.2
比亚迪 e5	60	300	0.2
比亚迪 e6	80	400	0.2
燃油车水平	100	500	0.2

表 6 日首次出行起始区域概率

	居住区	工作区	功能区 1	功能区 2	购物区	功能区 3
概率	0.982 6	0.010 4	0.000 1	0.005 7	0.000 2	0.001 0

### 3.1 各区域充电桩与停车位比例分析

取情景②为例，得到各区域停车数和充电电动汽车数随时间变化曲线如图 6 所示。图 6 中，灰色区域表示电动汽车停车数量的变化，黑色区域表示充电数量的变化。

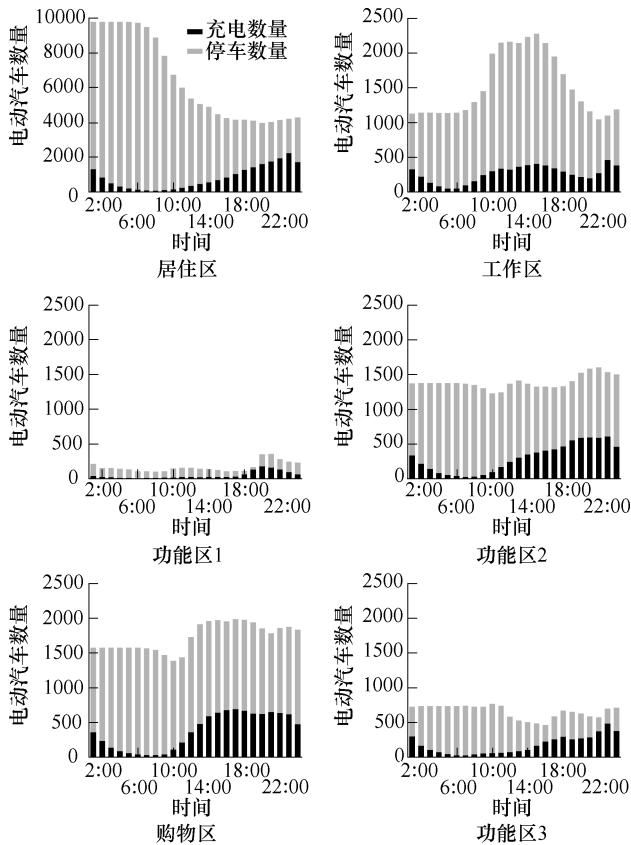


图 6 各区域停车数和充电电动汽车数变化曲线

Fig.6 Numbers of parking and charging EVs in each area

依据停车数的最大值和同时在线充电的电动汽车数量的最大值,可得到各区域桩位比作为充电桩设置的最低需求,见表 7。

表 7 各区域最低桩位比

Tab.7 Lowest demand of charging piles in each area

情景	居住区	工作区	功能区 1	功能区 2	购物区	功能区 3
①	1	0.213 7	0.453 3	0.342 0	0.333 2	0.485 9
②	1	0.201 8	0.485 9	0.355 5	0.333 5	0.537 4
③	1	0.210 2	0.344 9	0.427 4	0.347 7	0.568 6

考虑到居住区充电的重要性和停车位的私有性,认为居住区慢速充电桩与电动汽车数量为 1:1。当充电桩设置低于表 7 数据时,车辆可能在充电高峰期排队。

由表 7 可见,随着最大续驶里程的增大,区域桩位比并未有明显的变化规律,这是因为虽然最大续驶里程的增大使用户的充电次数减少,但由于电池容量变大,用户的充电时长随之增加,导致桩位比变化规律不明显。

同时,区域之间桩位比差异较为明显。不同于前人的研究成果<sup>[9]</sup>,依据本文模型得到的工作区的桩位比并不是除居住区以外的最大值;其他几类区域的桩位比反而较高。桩位比的大小受充电需求及

停车需求的共同影响。为分析上述问题的原因,以情景②为例,对各区域作为行程目的地的分布规律和行程中车辆的充电需求进行统计。各区域停车需求在图 6 可以体现。

目的地的分布规律及充电需求变化规律如图 7 所示,当  $i=1$  时,车辆的充电需求较低;当  $i>2$  时,其充电需求增大。而工作区多作为  $i=1$  时的目的地,车辆在首次出行抵达工作区后,其充电需求并不高,因此工作区的桩位比较低。

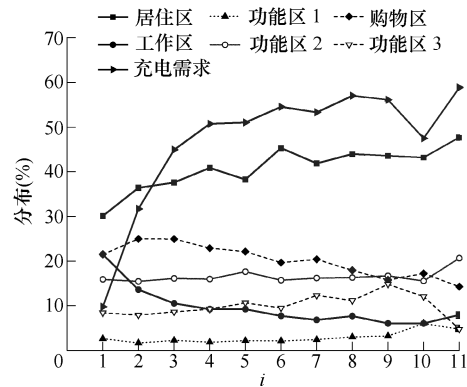


图 7 目的地的分布规律及充电需求变化规律

Fig.7 Distribution regularities of areas and changes of charging demand with trip variation

而随着  $i$  的变化,其他几类区域作为目的地的分布较为均匀,在充电需求较高的行程中,车辆前往这些区域的概率大于前往工作区的概率,因此其桩位比高于工作区。

由于一个城市往往是由不同的地块交织构成的,依据图 7 给出的规律,可得到电动汽车用户偏向于在一日中的第几次出行中抵达某一目的地。这样,即使城市中地块有交织,当将这些地块进一步划分为更小的不交织的单元时,可以根据图 7 来估计电动汽车在单元内的充电需求大小。

值得注意的是,这里表示的是充电桩与区域内停车位比例,区域之间桩位比的差值并不能代表充电桩数量的差值。

### 3.2 各区域快慢速充电桩设置比例分析

依据本文模拟方法,得到各个区域的快慢充比例见表 8。

表 8 各区域快慢速充电桩设置比例

Tab.8 Proportion of fast and slow piles in each area

情景	居住区	工作区	功能区 1	功能区 2	购物区	功能区 3
①	0.149 3	0.125 6	0.135 2	0.196 9	0.225 2	0.220 6
②	0.100 7	0.092 0	0.087 5	0.132 6	0.145 9	0.149 6
③	0.053 8	0.038 5	0.047 6	0.078 3	0.056 1	0.051 7

由表 8 可见, 每个区域都有快充需求, 居住区也应配置适量的快速充电桩, 这是因为个别用户会出现非最终行程的回家行为, 当此时的停车时长较短而充电需求较大时, 用户会选择进行快速充电。因此, 虽然居住区桩位比为 1, 但实际上, 停车位数量应当略高于电动汽车数量, 需要为快速充电留出专用位置。

当车辆最大续驶里程较小时, 快充需求较高的区域主要有功能区 2、购物区和功能区 3, 这类区域停车时长较短, 充电需求较大; 而随着电动汽车续驶里程的增大, 各区域快慢充比例逐渐减小, 说明最大续驶里程的增加使车辆可以逐渐依靠慢速充电完成大多数行程。

#### 4 结论

本文通过停车时长相似性分析对不同地点进行归类, 得到六类充电区域, 考虑用户对 SOC 变化的接受范围, 运用蒙特卡洛随机模拟电动汽车出行和充电行为, 模拟期间考虑了停车数随时间的变化和充电同时性问题, 得到了各个区域电动汽车充电桩与停车位的比例和快慢速充电桩的比例。考虑到居住区的重要地位, 认为居住区的慢速充电桩数量应当与车辆比例为 1:1, 且需要为快速充电留出专用位置。模拟结果显示:

1) 工作区桩位比并不高, 而其他几类区域的桩位比较大。

2) 快慢充比例较大的区域为功能区 2、购物区和功能区 3, 居住区也具有一定的快充需求。

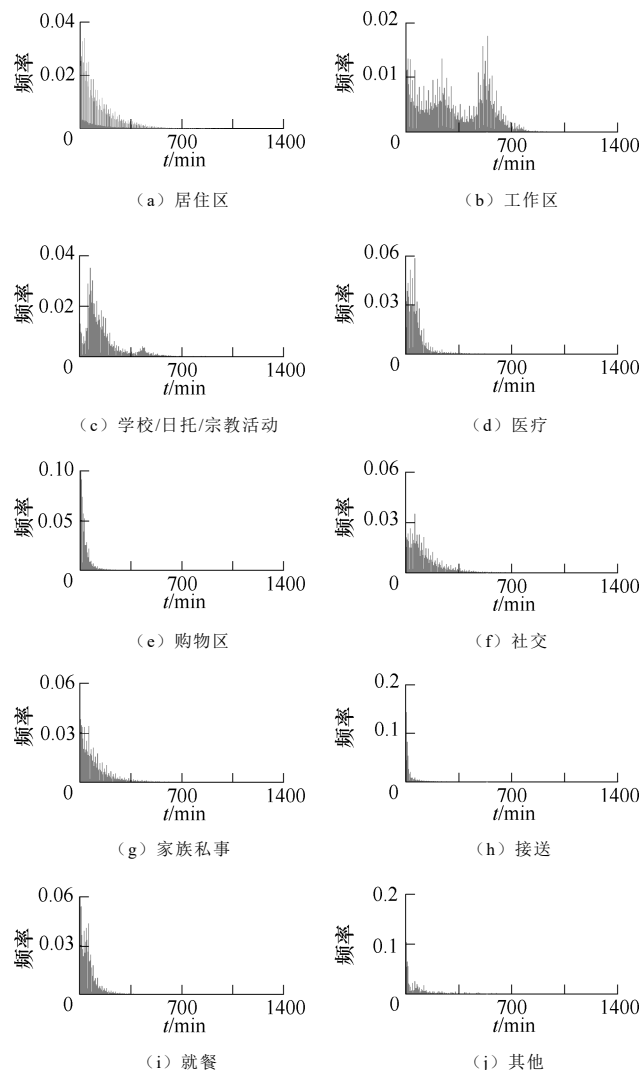
3) 当电动汽车数量不变时, 随着车辆最大续驶里程的增大, 充电桩总需求并未有明显变化规律, 快慢充比例逐渐减小。值得注意的是, 这是在电动汽车数量不变时的结果, 当电动汽车的保有量逐步上升, 虽然快慢充比例减小, 但其数量可能会增大。

本文在进行模拟时考虑了区域内全部充电桩的需求, 并没有区分集中式或分散式。因此, 模拟结果可为充电站选址定容提供依据, 也可分散式充电桩的建设提供依据。

本文的私家车出行数据来源于 NHTS, 国内尚缺乏相关数据, 因此结果与国内可能存在偏差; 在研究中可增加控制策略以研究不同激励下用户行为对桩位比的影响; 本文的模型仅针对城市内区域而设, 并未考虑城际间高速公路充电设施; 另外, 城市已有的充电设施建设情况会影响到电动汽车用户的出行习惯。以上内容在今后可进一步深入研究。

## 附 录

### 1. NHTS 十类地点停车时长频率直方图



附图 1 各地点停车时长

App.Fig.1 Parking time in different places

### 2. 电动汽车出行特征量计算过程

#### 1) 日出行次数

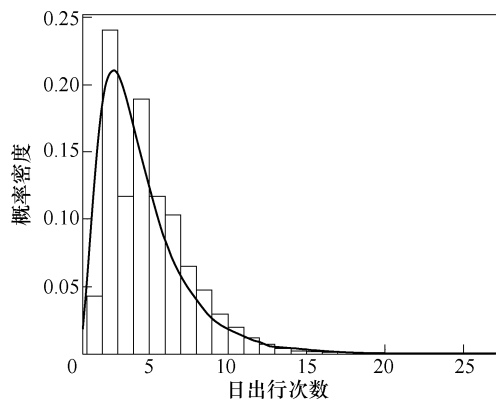
日出行次数是指一辆车在一日内完成的行程数。从离开上一行程目的地开始至离开本次行程目的地为止这段过程称为一次行程。车辆一日出行链即为一日内一系列行程首尾相接, 本文以  $I$  表示车辆的日出行次数。

根据车辆日出行次数统计结果拟合日出行次数概率密度曲线, 如附图 2 所示。日出行次数服从对数正态分布

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (A1)$$

式中,  $\mu=1.34$ ,  $\sigma=0.59$ 。





附图 2 日出行次数频率直方图及概率密度

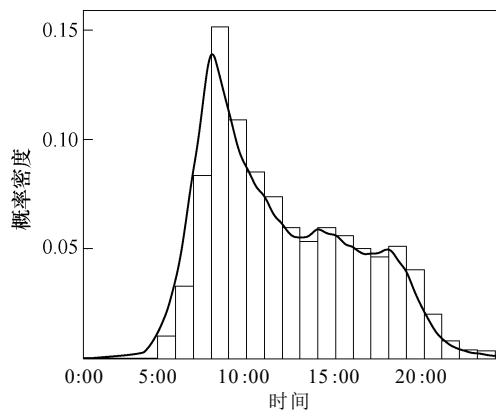
App.Fig.2 Frequency chart and probability density of length of daily trip chain

考虑到实际出行次数为正整数, 因此对日出行次数概率密度函数进行离散化处理。

## 2) 行程起始时刻

行程起始时刻是指用户每次行程的出行时刻, 用  $T_{\text{start}}(i)$  表示,  $i$  表示今日的第  $i$  次行程。  $T_{\text{start}}(1)$  表示日首次出行时刻, 日首次出行时刻是指私家车在一日出行链中首次行程的出行时刻。本文行程起始时刻选取的时间精度为 1h, 即  $T_{\text{start}}=1, 2, \dots, 24$ , 其中  $T_{\text{start}}=1$  表示从 0:00~0:59 时间段内出发的车辆其行程起始时刻均按 1:00 出发计算。

根据车辆日首次出行时刻统计结果拟合日首次出行时刻概率密度函数, 如附图 3 所示。



附图 3 日首次出行时刻频率直方图及概率密度

App.Fig.3 Frequency chart and probability density of start time of trip-chain

首次出行时刻的概率分布并非常用概率分布, 使用常见概率分布拟合误差较大, 非参数估计方法可以很好地解决这一问题。本文将利用核密度函数对首次出行时刻概率密度函数进行估计。

$X_1, X_2, \dots, X_n$  是取自一元连续总体的样本, 在任意点  $x$  处的总体密度函数  $f(x)$  的核密度估计定义为

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (\text{A2})$$

式中,  $K(\cdot)$  称为核函数;  $h$  称为窗宽。样本点  $X_i$  落入以  $x$  为中心, 以  $h/2$  为半径的领域内时,  $K(\cdot)=1$ , 否则为 0。依据模型, 抽取日首次出行时刻随机数时需进行取整处理。

## 3) 基于不同起点的车辆目的转移概率

分析车辆出行规律可以发现, 在出行过程中, 过去的状态会对当前产生影响。本文将六类充电功能区域两两组合, 统计每一时段内基于不同起点的车辆转移频率。因 NHTS 数据量较大, 认为此频率可以替代车辆的目的转移概率, 形成随时间变化的目的转移概率矩阵  $P_T$ 。

由于功能区域划分范围较大, 出行的始末两端可能发生在同一区域内, 从某区域出发而返回此区的概率不一定为零, 即  $p_{T,k,k}$  不一定为 0。转移概率的具体结果如下, 比较可见, 在不同时段内车辆的转移概率具有较大差异。

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.0536 & 0.2857 & 0.0179 & 0.1964 & 0.1429 & 0.3036 \\ 0.9142 & 0.0188 & 0 & 0.0161 & 0.0402 & 0.0107 \\ 0.7222 & 0 & 0 & 0.1111 & 0.0556 & 0.1111 \\ 0.8360 & 0.0032 & 0 & 0.0804 & 0.0193 & 0.0611 \\ 0.8088 & 0 & 0 & 0.0588 & 0.0882 & 0.0441 \\ 0.8571 & 0.0119 & 0 & 0.0357 & 0.0119 & 0.0833 \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.0606 & 0.4848 & 0.0606 & 0.1515 & 0.0909 & 0.1515 \\ 0.9000 & 0.0588 & 0 & 0.0118 & 0.0176 & 0.0118 \\ 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9125 & 0 & 0 & 0.0313 & 0.0125 & 0.0438 \\ 0.8438 & 0 & 0 & 0.0313 & 0.0938 & 0.0313 \\ 0.7941 & 0 & 0 & 0.1176 & 0 & 0.0882 \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.7941 & 0.0294 & 0.0588 & 0.0882 & 0.0294 \\ 0.9060 & 0.0427 & 0 & 0.0256 & 0.0171 & 0.0085 \\ 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8317 & 0.0198 & 0 & 0.0891 & 0 & 0.0594 \\ 0.7778 & 0.1111 & 0 & 0 & 0.1111 & 0 \\ 0.8182 & 0 & 0 & 0.0909 & 0 & 0.0909 \end{bmatrix}$$

$$P_4 = \begin{bmatrix} 0.0364 & 0.8364 & 0 & 0.0364 & 0.0545 & 0.0364 \\ 0.9028 & 0.0694 & 0 & 0 & 0.0139 & 0.0139 \\ 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8125 & 0.0833 & 0 & 0.0417 & 0.0208 & 0.0417 \\ 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8000 & 0 & 0 & 0.1000 & 0 & 0.1000 \end{bmatrix}$$

$$P_5 = \begin{bmatrix} 0.0032 & 0.7636 & 0.0032 & 0.1119 & 0.0512 & 0.0670 \\ 0.1111 & 0.5556 & 0 & 0.1111 & 0.2222 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1176 & 0.5294 & 0 & 0.2745 & 0.0196 & 0.0588 \\ 0.2340 & 0.5957 & 0 & 0.0426 & 0.1064 & 0.0213 \\ 0.4651 & 0.3721 & 0 & 0.0233 & 0 & 0.1395 \end{bmatrix}$$

$$P_6 = \begin{bmatrix} 0.0030 & 0.7579 & 0.0117 & 0.1180 & 0.0469 & 0.0624 \\ 0.2055 & 0.6849 & 0 & 0.0548 & 0.0548 & 0 \\ 0.3333 & 0.6667 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3379 & 0.5251 & 0.0046 & 0.0548 & 0.0457 & 0.0320 \\ 0.1915 & 0.6277 & 0.0053 & 0.0479 & 0.0798 & 0.0479 \\ 0.3857 & 0.3952 & 0.0095 & 0.0571 & 0.0238 & 0.1286 \end{bmatrix}$$

$$P_7 = \begin{bmatrix} 0.0030 & 0.7352 & 0.0337 & 0.0806 & 0.0473 & 0.1002 \\ 0.1921 & 0.6897 & 0.0049 & 0.0246 & 0.0640 & 0.0246 \\ 0.3902 & 0.3659 & 0.0732 & 0.0244 & 0.0976 & 0.0488 \\ 0.3857 & 0.4670 & 0.0088 & 0.0484 & 0.0516 & 0.0385 \\ 0.2252 & 0.5598 & 0.0061 & 0.0669 & 0.0953 & 0.0467 \\ 0.3458 & 0.4174 & 0.0187 & 0.0430 & 0.0441 & 0.1311 \end{bmatrix}$$

$$P_8 = \begin{bmatrix} 0.0033 & 0.5692 & 0.0592 & 0.0954 & 0.0556 & 0.2173 \\ 0.1664 & 0.6264 & 0.0033 & 0.0734 & 0.1011 & 0.0294 \\ 0.4694 & 0.3143 & 0.0776 & 0.0408 & 0.0694 & 0.0286 \\ 0.3428 & 0.4131 & 0.0140 & 0.0827 & 0.0812 & 0.0662 \\ 0.2945 & 0.4323 & 0.0150 & 0.0752 & 0.1298 & 0.0530 \\ 0.3447 & 0.3843 & 0.0211 & 0.0398 & 0.0533 & 0.1568 \end{bmatrix}$$

$$P_9 = \begin{bmatrix} 0.0022 & 0.4054 & 0.0532 & 0.2316 & 0.1434 & 0.1643 \\ 0.1858 & 0.5973 & 0.0037 & 0.0740 & 0.1029 & 0.0363 \\ 0.4444 & 0.2102 & 0.0601 & 0.1111 & 0.1291 & 0.0450 \\ 0.4084 & 0.2221 & 0.0178 & 0.1437 & 0.1638 & 0.0442 \\ 0.3825 & 0.2310 & 0.0081 & 0.1063 & 0.2343 & 0.0378 \\ 0.4028 & 0.2721 & 0.0143 & 0.0964 & 0.1049 & 0.1095 \end{bmatrix}$$

$$P_{10} = \begin{bmatrix} 0.0012 & 0.2104 & 0.0397 & 0.3439 & 0.3230 & 0.0819 \\ 0.1733 & 0.5639 & 0.0052 & 0.0852 & 0.1508 & 0.0215 \\ 0.4717 & 0.0701 & 0.1132 & 0.1240 & 0.1995 & 0.0216 \\ 0.4144 & 0.1126 & 0.0091 & 0.1633 & 0.2726 & 0.0279 \\ 0.3714 & 0.0983 & 0.0065 & 0.1267 & 0.3763 & 0.0207 \\ 0.3709 & 0.1075 & 0.0102 & 0.1322 & 0.3377 & 0.0415 \end{bmatrix}$$

$$P_{11} = \begin{bmatrix} 0.0011 & 0.1154 & 0.0261 & 0.3276 & 0.4610 & 0.0688 \\ 0.1833 & 0.5015 & 0.0048 & 0.0979 & 0.1895 & 0.0231 \\ 0.4545 & 0.0440 & 0.1349 & 0.1261 & 0.2053 & 0.0352 \\ 0.4120 & 0.0659 & 0.0058 & 0.1696 & 0.3210 & 0.0258 \\ 0.4144 & 0.0545 & 0.0040 & 0.1124 & 0.3959 & 0.0189 \\ 0.3395 & 0.0723 & 0.0132 & 0.1904 & 0.2494 & 0.1352 \end{bmatrix}$$

$$P_{12} = \begin{bmatrix} 0.0009 & 0.1133 & 0.0233 & 0.3025 & 0.4561 & 0.1040 \\ 0.3084 & 0.3395 & 0.0044 & 0.1176 & 0.1987 & 0.0313 \\ 0.5210 & 0.0499 & 0.0778 & 0.0778 & 0.2216 & 0.0519 \\ 0.4264 & 0.0912 & 0.0051 & 0.1532 & 0.2906 & 0.0336 \\ 0.4450 & 0.0464 & 0.0026 & 0.0935 & 0.3856 & 0.0269 \\ 0.4444 & 0.0489 & 0.0101 & 0.1273 & 0.2319 & 0.1374 \end{bmatrix}$$

$$P_{13} = \begin{bmatrix} 0.0019 & 0.2077 & 0.0240 & 0.2970 & 0.3761 & 0.0933 \\ 0.4130 & 0.2449 & 0.0043 & 0.1021 & 0.2090 & 0.0267 \\ 0.6198 & 0.0553 & 0.0335 & 0.0921 & 0.1541 & 0.0452 \\ 0.3564 & 0.2387 & 0.0077 & 0.1195 & 0.2377 & 0.0400 \\ 0.4640 & 0.0759 & 0.0023 & 0.0858 & 0.3471 & 0.0249 \\ 0.4923 & 0.0610 & 0.0030 & 0.1262 & 0.1919 & 0.1256 \end{bmatrix}$$

$$P_{14} = \begin{bmatrix} 0.0022 & 0.1901 & 0.0165 & 0.2910 & 0.4105 & 0.0896 \\ 0.3635 & 0.2934 & 0.0034 & 0.0996 & 0.2011 & 0.0391 \\ 0.5841 & 0.0890 & 0.0484 & 0.0774 & 0.1567 & 0.0445 \\ 0.3809 & 0.1919 & 0.0056 & 0.1294 & 0.2469 & 0.0454 \\ 0.4531 & 0.0692 & 0.0029 & 0.0930 & 0.3541 & 0.0277 \\ 0.4667 & 0.0552 & 0.0076 & 0.1397 & 0.1892 & 0.1416 \end{bmatrix}$$

$$P_{15} = \begin{bmatrix} 0.0046 & 0.1339 & 0.0158 & 0.2481 & 0.3810 & 0.2167 \\ 0.4513 & 0.2109 & 0.0051 & 0.0982 & 0.1533 & 0.0812 \\ 0.6184 & 0.0579 & 0.0329 & 0.1053 & 0.1158 & 0.0697 \\ 0.4582 & 0.0803 & 0.0037 & 0.1347 & 0.2603 & 0.0626 \\ 0.4924 & 0.0429 & 0.0016 & 0.0837 & 0.3391 & 0.0403 \\ 0.5587 & 0.0279 & 0.0040 & 0.0903 & 0.1436 & 0.1755 \end{bmatrix}$$

$$P_{16} = \begin{bmatrix} 0.0045 & 0.1106 & 0.0196 & 0.2729 & 0.3683 & 0.2241 \\ 0.5700 & 0.1033 & 0.0050 & 0.0883 & 0.1541 & 0.0793 \\ 0.6800 & 0.0595 & 0.0151 & 0.1005 & 0.0919 & 0.0530 \\ 0.5307 & 0.0430 & 0.0030 & 0.1263 & 0.2395 & 0.0574 \\ 0.5474 & 0.0283 & 0.0018 & 0.0842 & 0.2966 & 0.0417 \\ 0.6350 & 0.0230 & 0.0020 & 0.0730 & 0.1047 & 0.1623 \end{bmatrix}$$

$$P_{17} = \begin{bmatrix} 0.0073 & 0.0895 & 0.0283 & 0.3098 & 0.3704 & 0.1947 \\ 0.6578 & 0.0544 & 0.0051 & 0.0730 & 0.1353 & 0.0743 \\ 0.6991 & 0.0346 & 0.0303 & 0.0541 & 0.1212 & 0.0606 \\ 0.6127 & 0.0281 & 0.0048 & 0.1108 & 0.1937 & 0.0499 \\ 0.6202 & 0.0208 & 0.0032 & 0.0700 & 0.2485 & 0.0373 \\ 0.6729 & 0.0166 & 0.0058 & 0.0703 & 0.1109 & 0.1234 \end{bmatrix}$$

$$P_{18} = \begin{bmatrix} 0.0075 & 0.0799 & 0.0837 & 0.3783 & 0.2761 & 0.1746 \\ 0.7350 & 0.0270 & 0.0074 & 0.0634 & 0.1065 & 0.0607 \\ 0.7615 & 0.0179 & 0.0282 & 0.0615 & 0.0872 & 0.0436 \\ 0.6804 & 0.0211 & 0.0082 & 0.1088 & 0.1351 & 0.0464 \\ 0.6819 & 0.0139 & 0.0055 & 0.0658 & 0.1971 & 0.0357 \\ 0.7098 & 0.0110 & 0.0083 & 0.0715 & 0.0945 & 0.1049 \end{bmatrix}$$

$$P_{19} = \begin{bmatrix} 0.0053 & 0.0624 & 0.1727 & 0.4157 & 0.2234 & 0.1205 \\ 0.7690 & 0.0331 & 0.0112 & 0.0607 & 0.0994 & 0.0265 \\ 0.7386 & 0.0033 & 0.0425 & 0.0850 & 0.0719 & 0.0588 \\ 0.7020 & 0.0135 & 0.0243 & 0.1104 & 0.1148 & 0.0350 \\ 0.7272 & 0.0108 & 0.0127 & 0.0678 & 0.1535 & 0.0280 \\ 0.6953 & 0.0097 & 0.0279 & 0.0838 & 0.1014 & 0.0819 \end{bmatrix}$$

$$P_{20} = \begin{bmatrix} 0.0063 & 0.0457 & 0.1065 & 0.3841 & 0.3230 & 0.1344 \\ 0.8055 & 0.0276 & 0.0064 & 0.0558 & 0.0800 & 0.0247 \\ 0.8381 & 0.0082 & 0.0061 & 0.0471 & 0.0738 & 0.0266 \\ 0.7723 & 0.0097 & 0.0046 & 0.0837 & 0.0950 & 0.0347 \\ 0.7469 & 0.0091 & 0.0033 & 0.0561 & 0.1562 & 0.0284 \\ 0.7616 & 0.0031 & 0.0144 & 0.0660 & 0.0764 & 0.0784 \end{bmatrix}$$

$$P_{21} = \begin{bmatrix} 0.0129 & 0.0702 & 0.0178 & 0.3164 & 0.3584 & 0.2244 \\ 0.8480 & 0.0245 & 0.0017 & 0.0389 & 0.0693 & 0.0177 \\ 0.8849 & 0.0034 & 0.0017 & 0.0203 & 0.0575 & 0.0321 \\ 0.8265 & 0.0078 & 0.0005 & 0.0648 & 0.0633 & 0.0370 \\ 0.7900 & 0.0046 & 0.0011 & 0.0406 & 0.1270 & 0.0366 \\ 0.8217 & 0.0051 & 0.0025 & 0.0459 & 0.0446 & 0.0803 \end{bmatrix}$$

$$P_{22} = \begin{bmatrix} 0.0234 & 0.2219 & 0.0156 & 0.2563 & 0.2578 & 0.2250 \\ 0.8821 & 0.0222 & 0.0011 & 0.0323 & 0.0456 & 0.0167 \\ 0.8917 & 0 & 0 & 0.0220 & 0.0439 & 0.0425 \\ 0.8599 & 0.0026 & 0.0010 & 0.0535 & 0.0399 & 0.0430 \\ 0.8321 & 0.0083 & 0 & 0.0595 & 0.0726 & 0.0274 \\ 0.8617 & 0.0059 & 0.0020 & 0.0198 & 0.0553 & 0.0553 \end{bmatrix}$$

$$P_{23} = \begin{bmatrix} 0.0223 & 0.3454 & 0.0195 & 0.1894 & 0.1699 & 0.2535 \\ 0.8993 & 0.0193 & 0 & 0.0290 & 0.0400 & 0.0124 \\ 0.8806 & 0.0075 & 0 & 0.0224 & 0.0522 & 0.0373 \\ 0.8592 & 0.0111 & 0.0009 & 0.0614 & 0.0239 & 0.0435 \\ 0.8317 & 0.0190 & 0 & 0.0571 & 0.0635 & 0.0286 \\ 0.8345 & 0.0144 & 0.0036 & 0.0252 & 0.0504 & 0.0719 \end{bmatrix}$$

$$P_{24} = \begin{bmatrix} 0.0414 & 0.3077 & 0 & 0.1598 & 0.1243 & 0.3669 \\ 0.9401 & 0.0133 & 0 & 0.0166 & 0.0233 & 0.0067 \\ 0.8095 & 0.0476 & 0 & 0.0952 & 0 & 0.0476 \\ 0.8512 & 0.0105 & 0.0042 & 0.0587 & 0.0335 & 0.0419 \\ 0.8019 & 0.0094 & 0 & 0.0472 & 0.0943 & 0.0472 \\ 0.8243 & 0 & 0 & 0.0405 & 0.0541 & 0.0811 \end{bmatrix}$$

#### 4) 行驶时长及行驶里程

(1) 不同始末点间的行驶时长。由于各区域之间的行驶距离不同, 本文将分别分析以不同区域作为行程始末点的行驶时长。行驶时长选取精度为 1min, 即  $t_{\text{travel}}(i) = 0, 1, 2, \dots, 1440$ 。较多文献认为单次行程行驶时长服从对数正态分布。在以六类区域为行程始末点, 对  $6 \times 6$  种行驶时长分别进行对数正态分布和广义极值分布拟合后, 对比来看两者拟合精度相当, 部分曲线使用广义极值分布拟合更贴近数据。因此本文选用广义极值分布拟合行驶时长, 拟合参数如下:

$k =$

$$\begin{bmatrix} 0.372667 & 0.263564 & 0.247598 & 0.429317 & 0.320739 & 0.340761 \\ 0.276592 & 0.489038 & 0.290786 & 0.290786 & 0.271761 & 0.432539 \\ 0.296177 & 0.273994 & 0.296177 & 0.382261 & 0.295025 & 0.2939 \\ 0.282927 & 0.396662 & 0.418701 & 0.38759 & 0.471525 & 0.405067 \\ 0.34373 & 0.491928 & 0.545567 & 0.54634 & 0.436056 & 0.379257 \\ 0.379257 & 0.2902 & 0.305937 & 0.495669 & 0.372938 & 0.366603 \end{bmatrix}$$

$\sigma =$

$$\begin{bmatrix} 9.142931 & 10.04428 & 6.401941 & 7.402228 & 5.417502 & 5.902642 \\ 8.736829 & 9.545227 & 9.097791 & 9.097791 & 10.84756 & 6.296244 \\ 8.061661 & 6.606031 & 8.061661 & 6.541503 & 5.716069 & 5.173492 \\ 6.127676 & 7.470441 & 5.433066 & 5.755783 & 7.145304 & 5.562394 \\ 5.810319 & 6.465431 & 6.152658 & 6.221502 & 6.361351 & 6.247412 \\ 6.247412 & 8.715193 & 6.622737 & 7.289207 & 5.78967 & 6.054774 \end{bmatrix}$$

$\mu =$

$$\begin{bmatrix} 11.84199 & 14.29898 & 9.790018 & 9.949049 & 7.971563 & 8.267954 \\ 12.10408 & 11.45282 & 13.18142 & 13.18142 & 14.97076 & 8.450897 \\ 11.66357 & 9.827734 & 11.66357 & 8.602277 & 8.470794 & 7.579609 \\ 8.81012 & 10.16637 & 7.472052 & 7.862189 & 9.038435 & 7.315555 \\ 8.486834 & 8.143034 & 8.010555 & 7.430304 & 8.411008 & 8.47982 \\ 8.47982 & 11.81035 & 9.538169 & 9.352169 & 7.811621 & 8.252187 \end{bmatrix}$$

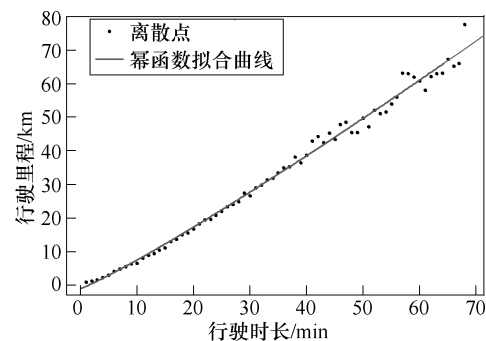
(2) 行驶里程的计算。由于电动汽车的耗电量与交通路况、天气、电池使用年限和效率有关, 车辆在行程中的行驶时长与行驶里程并不是简单的线性关系。本文将首先计算调查数据各个时长的平均行驶里程。

$$\bar{d}(t) = \frac{1}{X_t} \sum_{x(t)=1}^{X_t} d[x(t), t] \quad (\text{A3})$$

式中,  $t=1, 2, \dots, 1440$ , 表示一日内所有时间长度的行驶时长;  $X_t$  表示所有行驶时长为  $t$  的样本量;  $d[x(t), t]$  表示行驶时长为  $t$  的样本  $x(t)$  的行驶里程;  $\bar{d}(t)$  表示行驶时长为  $t$  的平均行驶里程。

得到各时段平均行驶里程后, 将行驶时长与各时段平均行驶里程进行拟合, 如附图 4 所示, 拟合显示, 以幂函数拟合行驶里程与行驶时长关系精度较高, 拟合函数为

$$d_{\text{travel}}(i) = 0.5503 t_{\text{travel}}^{1.15}(i) \quad (\text{A4})$$



附图 4 行驶里程与行驶时长拟合曲线

App.Fig.4 Fitting curve of driving distance and driving period

#### 参考文献

- [1] 李国, 张智晟, 温令云. 换电模式下电动汽车充换电网的规划[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 93-98.  
Li Guo, Zhang Zhisheng, Wen Lingyun. Planning of battery-switching and vehicle-charging network based on battery switching mode[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 93-98.
- [2] 张帝, 姜久春, 张维戈, 等. 电动出租车充电桩优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 181-188.  
Zhang Di, Jiang Jiuchun, Zhang Weige, et al. Optimal configuration of charging spots for electric taxis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 181-188.
- [3] 刘自发, 张伟, 王泽黎. 基于量子粒子群优化算法的城市电动汽车充电站优化布局[J]. 中国电机工

- 程学报, 2012, 32(22): 39-45.
- Liu Zifa, Zhang Wei, Wang Zeli. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on quantum PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 39-45.
- [4] 潘樟惠, 高赐威. 电动汽车换电网络协调规划[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 480-487.
- Pan Zhanghui, Gao Ciwei. Coordinated planning of EV battery-swapping network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 480-487.
- [5] 罗汉武. 电动汽车灵活接入的充电设施需求预测、运行与能效评估方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [6] 辛建波, 温宇宾, 李睿. 电动汽车充电设施建设需求预测方法探讨[J]. 江西电力, 2010, 34(5): 1-5.
- Xin Jianbo, Wen Yubin, Li Rui. Discussion on demand forecast method for electric vehicle charging facilities[J]. Jiangxi Electric Power, 2010, 34(5): 1-5.
- [7] 郭晓斌, 张乐平, 赖宇阳. 不同模式下电动汽车充电负荷及充电设施需求数量计算[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(11): 76-81.
- Guo Xiaobin, Zhang Leping, Lai Yuyang. Calculation of electric vehicles charging load and necessary amount of charging facilities under different modes[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2013, 29(11): 76-81.
- [8] 陈楚月. 电动汽车充换电需求分析与预测[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [9] 陶顺, 肖湘宁, 温剑锋, 等. 电动汽车分散充电设施配比度分析与计算方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 11-19.
- Tao Shun, Xiao Xiangning, Wen Jianfeng, et al. Configuration ratio for distributed electrical vehicle charging infrastructures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 11-19.
- [10] 温剑锋. 电动汽车充电需求及设施配比度研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2015.
- [11] 徐青山, 蔡婷婷, 刘瑜俊, 等. 考虑驾驶人行为习惯及出行链的电动汽车充电站站址规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 59-65, 77.
- Xu Qingshan, Cai Tingting, Liu Yujun, et al. Location planning of charging stations for electric vehicles based on drivers' behaviours and travel chain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 59-65, 77.
- [12] 陈丽丹, 聂涌泉, 钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 216-225.
- Chen Lidan, Nie Yongquan, Zhong Qing. A model for electric vehicle charging load forecasting based on trip chains[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 216-225.
- [13] 温剑锋, 陶顺, 肖湘宁, 等. 基于出行链随机模拟的电动汽车充电需求分析[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1477-1484.
- Wen Jianfeng, Tao Shun, Xiao Xiangning, et al. Analysis on charging demand of EV based on stochastic simulation of trip chain[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1477-1484.
- [14] 王岱, 管晓宏, 吴江, 等. 基于车辆行驶行为特性建模的电动汽车充放电策略与分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2322-2327.
- Wang Dai, Guan Xiaohong, Wu Jiang, et al. Vehicle driving pattern based modeling and analysis of centralized charging/discharging strategy for plug-in electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2322-2327.
- [15] Tang Difei, Wang Peng. Probabilistic modeling of nodal charging demand based on spatial-temporal dynamics of moving electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 627-636.
- [16] Agarwal L, Peng W, Goel L. Probabilistic estimation of aggregated power capacity of EVs for vehicle-to-grid application[C]//International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Durham, 2014: 1-6.
- [17] 于强强. 基于行为的电动汽车充换电需求与服务容量研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [18] Smart J, Schey S. Battery electric vehicle driving and charging behavior observed early in the EV project[J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2012, 1(1): 27-33.
- [19] 邹志云, 蒋忠海, 胡程, 等. 国内不同类型城市居民出行特征分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(3): 554-557.
- Zou Zhiyun, Jiang Zhonghai, Hu Cheng, et al. Analysis on resident trip characteristics in part of Chinese cities[J]. Journal of Wuhan University of

- Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, 32(3): 554-557.
- [20] 何流, 陈大伟, 卢静, 等. 基于出行链的居民出行次数建模与仿真[J]. 深圳大学学报(理工版), 2012, 29(3): 264-269.
- He Liu, Chen Dawei, Lu Jing, et al. Modeling and simulating of residents number of trips based on trip chain[J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2012, 29(3): 264-269.
- [21] U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2009 National Household Travel Survey [EB/OL]. URL: <http://nhts.ornl.gov>.
- [22] Cheng Lin, Chang Yao, Liu Manjun, et al. Estimating EV integration patterns considering spatial dispersion in distribution systems[C]//Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2015: 1-5.
- [23] Grahn P, Alvehag K, Soder L. PHEV utilization model considering type-of-trip and recharging flexibility[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 139-148.
- [24] 杨冰, 王丽芳, 廖承林, 等. 含有耦合特性的电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 76-82.
- Yang Bing, Wang Lifang, Liao Chenglin, et al. Charging load calculation method of large-scale electric vehicles with coupling characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 76-82.
- [25] 谢中华. MATLAB 统计分析与应用: 40 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [26] 马银山. 电动汽车充电技术及运营知识问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [27] 王雪非. 基于工况仿真的锂动力电池寿命研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.
- 
- 作者简介
- 麻秀范 女, 1970 年生, 博士, 副教授, 研究方向为配网规划与运行, 电动汽车规划与运行。
- E-mail: xfmhbdll@vip.sina.com
- 李 颖 女, 1992 年生, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车充电设施规划与运营。
- E-mail: 1249859140@qq.com (通信作者)
- (编辑 郭丽军)