

基于交通均衡理论的电动汽车充电负荷预测

张美霞, 张安, 杨秀, 王晓晴
(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 电动汽车(electric vehicle, EV)既是交通网的车流负荷, 又是电网的用电负荷, 它的出行以及充电行为会对交通网和电网的运行规律造成影响。针对电动汽车单体进行随机抽样的传统预测方法, 未能从电动汽车群体的移动运行状态考虑, 提出了一种基于交通均衡理论的电动汽车充电负荷预测方法。首先在时间和空间两个维度上, 分别对电动汽车和路网进行建模, 采用 A* 算法构建电动汽车出行原目的地(origin-destination, OD)对的有效路径集。计及用户有限理性, 引入分时电价制定了一种计及交通流量约束的充电站电价, 并结合随机效用理论与分时电价, 建立了半动态交通均衡模型来求解交通流的分配。随后基于组合荷电状态(calculation method of combined state of charge, CSOC)的概率数值计算方法对电动汽车充电负荷进行求解。最后, 基于上海市新能源汽车数据, 分别以改进的 13 节点路网和上海市某区域路网分析验证了所提充电负荷预测方法的有效性, 结果表明所提方法可以降低充电成本, 缓解充电站充电压力。

关键词: 电动汽车; 半动态均衡; 分时电价; 随机效用理论; 组合荷电状态; 负荷预测

Prediction of Electric Vehicle Charging Load Based on Traffic Equilibrium Theory

ZHANG Meixia, ZHANG An, YANG Xiu, WANG Xiaoqing

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Electric vehicles (EVs) are both traffic loads of the transport network and electricity loads of power grid, and their traveling as well as charging behaviours will have an impact on the operating laws of the transport network and power grid. Aiming at the traditional EV prediction method of random sampling for a single EV unit, which fails to consider the operation state from the movement of EV groups, in this paper, a method for forecasting electric vehicle charging loads that leverages traffic equilibrium theory is proposed. Firstly, models for electric vehicles and road networks are constructed in both time and space dimensions, and an efficient path set for origin-destination (OD) pairs of electric vehicles is generated using the A* algorithm. Taking into account users' limited rationality, a charging station electricity pricing, which incorporates traffic flow constraints, is formulated by introducing time-of-use (TOU) pricing. Furthermore, a semi-dynamic traffic equilibrium model is developed by integrating stochastic utility theory with TOU pricing to address the traffic flow allocation. then based on the probabilistic numerical calculation method of combined state of charge (CSOC), the charging load of electric vehicles is solved. Finally, based on the data of new energy vehicles in Shanghai, the effectiveness of the proposed charging load prediction method is verified by analysing the improved 13 nodes road network and a regional road network in Shanghai, the results show that the proposed method can reduce the charging cost and alleviate the charging pressure of charging stations.

Key words: electric vehicles; semi-dynamic equilibrium; time-of-use tariffs; stochastic utility theory; combined state of charge; load prediction

0 引言

随着化石能源的枯竭和燃油汽车尾气排放加剧空气污染,全球多国大力推广具有清洁、低碳性能的电动汽车。特别是在中国,电动汽车的推广速度和市场占有率迅速提升^[1-3]。然而,随着电动汽车的渗透率逐渐提高,在车辆使用和充电的过程中其对交通网和电网的接纳能力及安全运行带来巨大冲击^[4]。电动汽车作为具有移动属性的交通负荷,充电行为往往取决于车主的个人选择,从而在时间和空间上展现出一定的随机性^[5]。因此,准确地用概率特性去描述充电的随机性是研究电动汽车对电网和交通网影响研究的基础,也是推动充电站规划等研究的前提。

目前国内外较多学者对电动汽车负荷预测进行了大量的研究,电动汽车负荷预测主要从研究方法和求解方法两个方面展开研究。在研究方法方面,大多数学者采用出行链方式,从微观角度对单体电动汽车进行建模研究。文献[6-7]基于统计学上的概率蒙特卡罗法对电动汽车充电负荷预测。文献[8]在只考虑时间维度的条件下,以美国出行数据为基础,构建出行链出行方式求解电动汽车的充电需求。部分学者用电负荷预测研究中引入空间这一维度,随后对充电负荷时空分布开展了研究,引入经典或者真实交通网络结构来建电动汽车的出行方式。文献[9]采用巴斯模型(Bass model)对电动汽车的保有量进行预测,随后结合实际的地理信息求解电动汽车充电时空需求。文献[10-12]通过交通模型的矩阵,采蒙特卡罗法对区域内的不同位置用电负荷的求解。文献[13]基于交通道路模型,考虑交通网络拓扑、路阻函数及功能分区特性,在区域内交通和出行链的双重约束下,采用蒙特卡罗法(Monte Carlo method, MC)求解电动汽车一天内的充电负荷时空分布情况。文献[14]引入跟驰模型对电动汽车用户出行模拟,根据后悔理论和排队论模型模拟用户出行充电的选择,建立了含有用户心理决策的电动汽车时空分布负荷预测模型。在求解方法方面,现有文献大多蒙特卡罗法模拟电动汽车的负荷预测作为常用的方法,然而,该方法作为抽取式方法,存在计算效率较低的问题。文献[15]提出一种基于组合荷电状态(combined state of charge, CSOC)的概率计算方法来求解充电负荷,

CSOC是电动汽车集合的组合荷电状态,将单体的电动汽车进行群体的研究,进行快速求解。

上述文献主要从微观模型角度出发,探讨了电动汽车的个体出行和充电行为,其中出行路径的选择大多倾向于最短路径,但对交通路网的通行容量情况则关注不足。电动汽车的出行特性会影响电动汽车的充电特性与交通路网的流量,所以合理准确描述电动汽车出行行为是进行电动汽车负荷预测的关键。交通均衡理论是描述交通网宏观运行状态的一种理论方法。文献[16]基于交通均衡和最优路径生成对构建了电动汽车可用路径集和充电负荷计算模型,采用分支定价算法求解。文献[17]采用电动汽车群体起点到终点(origin-destination, OD)对的出行方式,对不同OD对之间整体交通流量需求进行分配,然后根据分配结果,采用序贯蒙特卡罗法模拟计算电动汽车的充电负荷。上述文献有的只是考虑车辆个体的行驶路径选择并没有考虑车辆群体之间相互作用下的路径选择,而考虑群体出行时群体车辆选择最短路径出行存在路段流量分布不均匀的问题。交通流量过高发生的拥堵现象是单体车辆的集合相互作用的结果,所以本文通过宏观交通流量分配对电动汽车的出行流量进行求解。

针对上述情况,本文提出基于交通均衡理论的电动汽车充电负荷预测方法。首先分别对电动汽车出行与充电特性以及路网进行建模,并构建了一种基于A*算法的有效路径集,随后引入随机效用理论对车主的出行路径选择进行约束,并通过分时电价制定了一种结合路网节点交通流量的公共充电站的充电电价,通过结合随机效用理论与分时电价建立半动态交通均衡模型来求解交通流的分配,通过CSOC的电动汽车充电负荷概率数值计算方法来描述电动汽车群体各时段各个OD对下行驶过程中的荷电状态,得到用电负荷概率预测结果。最后,基于上海市新能源汽车数据,并通过改进13节点系统和上海市真实路网验证了所提出方法的有效性。

1 总体框架

本文的研究整体框架如图1所示,主要建模内容为通过建立半动态交通模型来获得路径出行流量和出行时间,并基于CSOC法进行电动汽车群体的负荷概率预测计算,并在路网中进行分析。

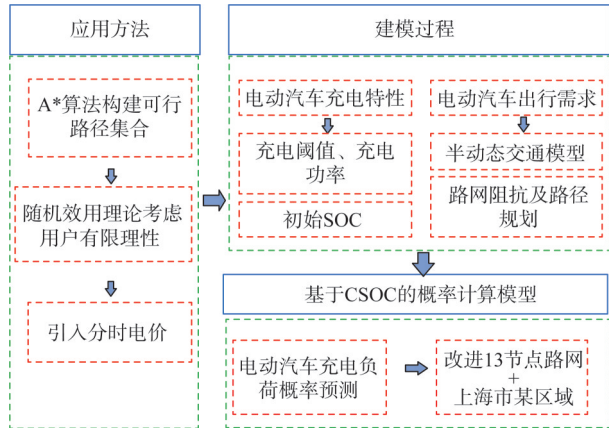


图 1 整体研究框架图

Fig. 1 Overall research framework diagram

2 电动汽车特性与路网特性

电动汽车作为行驶的交通工具在交通网上行驶，从电网获得电能。因此，电动汽车变成了交通网与电网的一个连接纽带，设定当行驶过程的消耗电量达到充电阈值的时需要在选择的充电站进行充电。

2.1 电动汽车出行特性

用户购买电动汽车的目的就是要满足用户的出行要求，用户的出行从起点出发到达终点，构成一个出行行程。现代社会用户的出行根据自身需求做出选择，进而与用户的出行的时间有关，导致车流量会随着时间有一个相对稳定的变化。根据文献[18]上海市电动汽车出行行为开始时刻的分布情况，可以得到图2为2022年上海市24 h电动汽车出行时刻分布图，可以明显看出上海市的电动汽车出行呈现出早晚两个高峰，具有“双峰特性”。

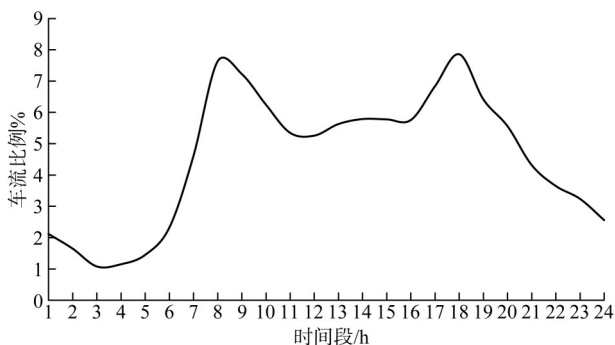


图 2 上海市车流分布图

Fig. 2 Distribution diagram of traffic flow in Shanghai city

2.2 电动汽车充电特性

电动汽车作为消耗电能的交通工具，充电时需考虑若干影响因素。充电功率决定了充电时长，目前存在慢充和快充两种充电方式，慢充适用于有足够长时间的夜间，快充能满足用户对于快速补充电量的需求。本文考虑快速充电，一是由于快速充电功率更大，对电网的冲击性更强；二是考虑到分时充电电价以及附加服务费对充电负荷的影响。

充电阈值决定了充电的上限和充电的下限，充电开始阈值 S_{start} 和充电结束阈值 S_{end} 。当电动汽车在行驶过程中的SOC低于充电开始阈值的时候，要前往充电站充电。本文取 $S_{start}=0.2$ 。电池具有特定的充电特性，即当电量达到80%时，充电功率会降低，导致剩余充电时间明显延长。所以本文取 $S_{end}=0.8$ 。

初始的充电状态(state of charge, SOC)决定电动汽车的行驶距离与后续的充电时间。本文考虑群体的电动汽车为统一的车型，即具有相同的电池总容量以及充电功率，车辆个体之间是相互独立的，根据上海市新能源汽车大数据可知电动汽车的出行起始SOC的分布^[18]，认为其初始SOC服从正态分布，如式(1)所示。

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(s-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中： s 为电动汽车的SOC值，取值范围为 $[0, 1]$ ； $f(s)$ 为电动汽车群的起始SOC值的概率密度函数； μ 为数学期望，本文取 $\mu=0.45$ ； σ 为标准差，本文取 $\sigma=0.1$ 。

2.3 路网建模

电动汽车在路网上行驶，在进行路径行驶之前，首先要将现实的道路网络进行抽象，建立相应的路网模型。本文使用计算机数据结构中图论中“图”的概念来表示路网，将路网中的元素用边和节点进行描述，形成路网的拓扑图，用边代表道路，节点代表连接道路的点，所以路网可以由 $G=(N, A)$ 描述，其中 N 为节点集合， A 为边集合。

道路的拥堵效应可以用时间与流量的函数表达。根据美国公路局的研究^[19]，道路的行驶时间 $t_a(x_{a,t})$ 与车流量之间的函数关系如式(2)所示。

$$t_a(x_{a,t}) = t_a^0 [1 + 0.15 (\frac{x_{a,t}}{c_a})^4] \quad (2)$$

式中: $x_{a,t}$ 为道路 a 在 t 时刻的通行流量; t_a^0 为零流时间, 表示道路 a 通行流量为 0 的通行时间; c_a 为道路 a 的容量。

在路网的出行选择时, 电动汽车车主总是尝试选择一条通行时间最短的路径, 因此一般采用最短路径作为电动汽车行驶。但在均衡状态下, 一个 OD 对的最短出行路径可以有很多条, 枚举法是一种路径搜索的方法, 但此方法会有许多无效的路径纳入到可行路径集, 不符合实际用户的出行选择。因此采用 A* 算法构建电动汽车出行 OD 对的有效路径集, A* 算法是一种启发式的路径搜索算法, 通过设计启发式估价函数选择一条从起点到终点的最短路径^[20]。函数表达式如式(3)所示。

$$f(u) = g(u) + h(u) \quad (3)$$

式中: $g(u)$ 为 OD 对起始节点到任意终点 u 的代价; $h(u)$ 为终点 u 到目标终点的预估消耗代价。令 $h(u) = 0$, 快速地构建可行路径集, 更加符合实际出行路径的选择情况, 图 3 为方法流程图。

3 基于交通均衡模型电动汽车出行模拟

3.1 交通均衡模型的建立

交通流量分配是交通网络规划中的关键环节, 它通过模拟已知交通网络和固定出行需求条件, 对交通流量进行宏观分配, 以求出每条道路的流量。这一过程涉及多种方法, 如传统的四步法和基于智能交通系统的动态交通分配方法, 旨在提高道路网络的运行效率和应对交通拥堵。用户最优分配原则是指路径通行成本相同, 并且比其他任何路径成本都要小, 达到用户最优的均衡状态^[21]。交通流量分配模型可以细分为静态模型、动态模型, 以及介于两者之间的半动态模型^[22]。这些模型的分类依据是时间尺度的不同, 以及相应的求解方法的差异。

半动态交通模型的时间尺度是 15 ~ 90 min, 可以近似多个静态交通问题, 而且相比动态模型求解难度较小。但半动态模型需要考虑一个问题是在某一个时间段内, 部分车辆无法在此时间段到达终点, 在下个时间段到达终点而产生余流现象, 一般情况下半动态模拟可以解决这类问题^[23]。

半动态交通模型由多个静态交通均衡模型组成, 则基本的静态流量模型如式(4)所示。在给定的交通网 $G=(N, A)$ 中, 假设 EV 总的出行需求保持不变, 则任意的 OD 对出行需求与道路流量的关

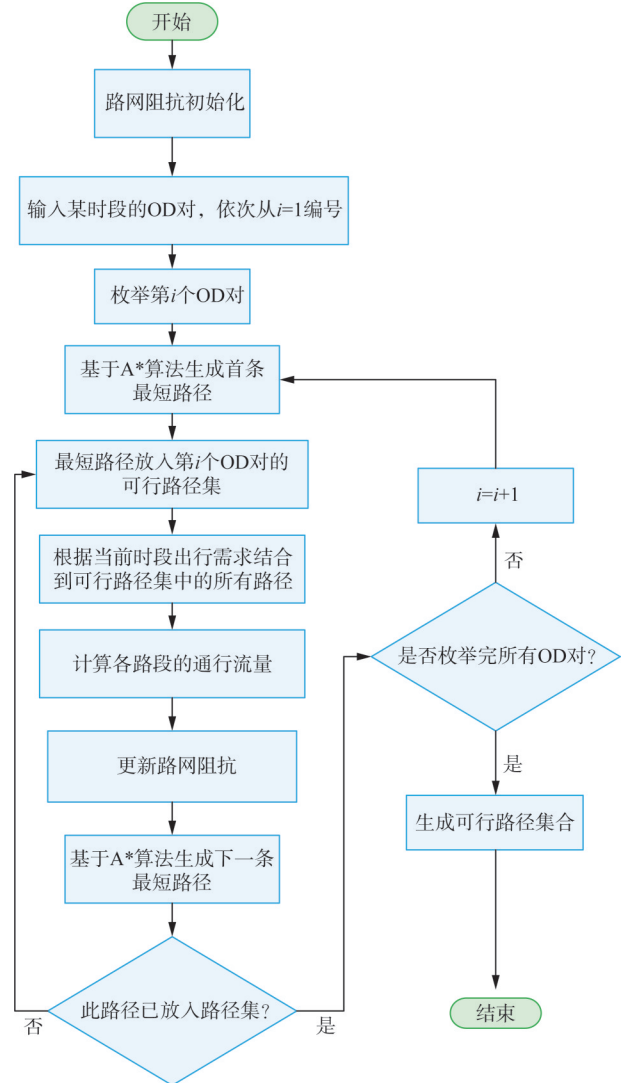


图3 有效路径的生成方法

Fig. 3 Methods for generating effective paths

系满足式(4)。

$$\sum_{n \in N^{od}} h_{n,t}^{od} = q_t^{od}, \forall (o, d) \quad (4)$$

式中: N^{od} 为 (o, d) 中所有路径集合, 其中 o 为起点, d 为终点; $h_{n,t}^{od}$ 为时间段 t 上 (o, d) 第 n 条路径所分的出行流量; q_t^{od} 为时间段 t 上 (o, d) 的出行需求。

$$x_{a,t} = \sum_{(o,d)} \sum_{n \in N^{od}} h_{n,t}^{od} \delta_{an}^{od}, \forall a \quad (5)$$

式中 δ_{an}^{od} 为各个时段每条路径的流量 $x_{a,t}$ 与路段 a 与路径 n 的流量之间的关联系数, $\delta_{an}^{od}=1$ 表示在路径 n 上。

t 时段路径 a 的通行时间 $t_a(x_a)$ 由式(1)可得, 因此在 t 时段路径 n 的通行时间 $T_{n,t}^{od}$ 如式(6)所示。

$$T_{n,t}^{od} = \sum_{a \in A} t_a(x_{a,t}) \delta_{an}^{od}, \forall n, \forall (o, d) \quad (6)$$

当 N^{od} 中的所有可行路径的行驶时间 $T_{n,t}^{od}$ 相等时交通路网达到均衡态。考虑到不是所有车辆都是同一时刻出发,存在着剩余流量,前一时段的剩余流量需要在下一个时段考虑进去,并对时段内进行修正,建立含有多个时段耦合关系的半动态交通模型。

$$e_t^{od} = \sum_{n \in N^{od}} \frac{h_{n,t}^{od} c_{n,t}^{od}}{\tau} \quad (7)$$

$$q_t^{od, \text{mod}} = q_t^{od} + \frac{1}{2} e_{t-1}^{od} - \frac{1}{2} e_t^{od} \quad (8)$$

$$\sum_{n \in N^{od}} h_{n,t}^{od} = q_t^{od, \text{mod}}, \forall (o, d) \quad (9)$$

$$h_{n,t}^{od} \geq 0 \quad (10)$$

式中:式(7)为剩余流量 e_t^{od} 在 t 时段 (o, d) 的大小; τ 为时间长度,大于路径通行时间的上限;式(8)为 t 时段下 (o, d) 修正的出行需求 $q_t^{od, \text{mod}}$,统一规定相邻的上下两个时段分配比例相等,取 $1/2^{[24]}$;式(9)表示满足 t 时段修正的出行需求;式(10)为路径流量的约束。

3.2 考虑随机效用的用户出行和充电电价的制定

车主由于习惯不会总是在理想条件的均衡状态下行驶,因此,所有车主路径选择的决策结果将导致一种随机用户均衡状态,引入随机效用理论描述部分车主因为认知的偏差,不了解实际的路网特性导致车主并不一定选择时间成本最低的路径^[25]。采用具有表达简单、计算复杂度小的 Logit 随机效用模型来确定车主选择出行路径的概率,如式(11)所示。

$$P_{n,t}^{od} = \frac{\exp(-\theta T_{n,t}^{od})}{\sum_{n \in N^{od}} \exp(-T_{n,t}^{od})} \quad (11)$$

式中 θ 为车主对交通路网的熟悉程度, θ 趋近于 0 表示用户对交通网完全不熟悉,随着 θ 逐渐增大,用户对路网的熟悉明显增加,当趋近于无穷大时为理想状态,即完全熟悉,本文取 $\theta=0.3^{[26]}$ 。

近几年许多地区政府制定了电动汽车充电站收取充电服务费。在上海,个人充电桩的充电费用主要由分时电价和充电服务费构成。通常情况下,电动汽车的用电量较大,可能会达到第三档电费,为 0.828 3 元/kWh。如果选择开通峰谷电,峰段电价为 0.858 3 元/kWh,谷段电价则为

0.658 3 元/kWh。此外,基础服务费在峰时为 0.5 元/h,谷时为 0.25 元/h。本文建立了一种结合交通流量约束的充电站电价的调整方法,如式(12)所示。

$$V_{t+1} = V_t + V_{cs} + V_t \alpha Y \cdot \sum_{i \in A} x'_{i,t} \quad (12)$$

式中: V_{t+1} 为下个时段充电站的充电总费用,由 3 种价格决定; V_t 为分时电价; V_{cs} 为充电站固定的充电服务费用,取 0.8 元/kWh; $V_t \alpha Y \cdot \sum_{i \in A} x'_{i,t}$ ($i \in A$, A 为边集合)为基于路网路段的车辆通行数量而调整的附加服务费,其中 $Y \cdot \sum_{i \in A} x'_{i,t}$ ($i \in A$) 为此时段的经过充电站节点的与之相邻路段的车辆通行数量与电动汽车渗透率 Y 的乘积,由均衡模型分配得到; α 为附加充电服务费的调整系数,取 $\alpha=4$ 。

式(13)为总充电服务费的价格约束。

$$V_{cs} \leq V_{cs} + V_t \alpha Y \cdot \sum_{i \in A} x'_{i,t} \leq V_{lim} \quad (13)$$

式中: V_{cs} 为固定充电服务费; $V_t \alpha Y \cdot \sum_{i \in A} x'_{i,t} \leq V_{lim}$ 为附加充电服务费。总充电服务费不得超过地区规定的最高充电服务费 V_{lim} ,且一定高于固定的充电服务费 V_{cs} 。根据上海市发展和改革委员会的规定,本市充电服务费实行政府指导价管理,上限为 1.3 元/kWh。

上海市某年分时电价表如表 1 所示。

表 1 分时电价表

Tab. 1 Table of time of use prices

时段	电价/(元·kWh ⁻¹)
08:00—11:00; 18:00—21:00	1.10
06:00—08:00, 11:00—18:00, 21:00—22:00	0.61
22:00—次日 06:00	0.30

本节设定了在峰时电价时段内,充电站的充电电价作为一个重要的外界因素,影响着车主的行驶路径选择。考虑到本文规定了充电站的电价与充电站连接路径的流量的关系,路段流量较大的附近的充电站的 EV 充电的数量也会提高,从而导致部分区域的用电负荷升高造成配网局部压力过大。在最大出行需求时分时电价处于峰时电价,部分充电站充电人数会增多,造成供需匹配不均衡,式(14)为峰时电价下的路段流量约束。

$$\left| \frac{\sum_{i \in A} x_{i,t} - \sum_{j \in A} x_{j,t}}{\sum_{a \in A} x_{a,t}} \right| \leq \frac{1}{5} \quad (14)$$

式中: $x_{i,t}$ 和 $x_{j,t}$ 表示与不同充电站相邻的路段流量, 峰时电价下对通过充电站的路段流量进行约束, 重新分配前序路段的交通流量尽可能满足峰时电价下约束达到新的交通均衡状态。

3.3 迭代法求解半动态交通均衡模型

采用连续平均算法(mean successive algorithm, MSA)进行迭代^[22], 当车主选择出行的路径概率为 $P_{n,t}^{od}$, 交通网达到均衡状态, 反复迭代求解新的半动态交通模型, 收敛条件如式(15)所示。

$$\left| \frac{h_{n,t}^{od(k)} - P_{n,t}^{od(k)} q_t^{od, mod}}{q_t^{od, mod}} \right| < \varepsilon \quad (15)$$

式中: ε 为预设误差; k 为迭代步数。当达到均衡状态时, 任意一个车主都无法改变出行决策。

具体求解步骤如图4所示。

4 CSOC的充电负荷概率计算方法

CSOC计算方法通过概率密度函数来描述电动汽车群体的荷电状态变化, 文献[23]详细阐述了这一计算和推导流程。该方法将CSOC状态的变化分为车主行驶和充电两个过程, 其中概率密度函数的参数估计和蒙特卡洛模拟技术在电动汽车负荷预测和充放电负荷计算中发挥着关键作用。

4.1 CSOC行驶过程的计算推导

假设电动汽车电量都能完成一个OD行驶过程, 初始的CSOC概率密度函数如式(1)所示。在 t 时段, (o, d) 之间选择路径 n 离开起点的CSOC概率密度函数如式(16)所示。

$$f_{n,t}^{od(o)}(s) = \frac{f_t^{od}(s)}{S_{end}^{od}}, S_{n,t}^{od} \leq s \leq S_{end} \quad (16)$$

$$S_{n,t}^{od} = \frac{T_{n,t}^{od} \cdot P_d}{C} + \partial \quad (17)$$

式中: $f_t^{od}(s)$ 为初始时刻OD对的CSOC概率密度函数; x 为积分变量; $S_{n,t}^{od}$ 为选择路径 n 所消耗的SOC的变化量; P_d 为电动汽车每千米能耗量; C 为电池容量, 假设电动汽车的电量完全耗尽会带来损害; ∂ 为安全裕度, 取 $\partial=0.08$ 。

根据文献[16], 假设车辆为同一种车型,

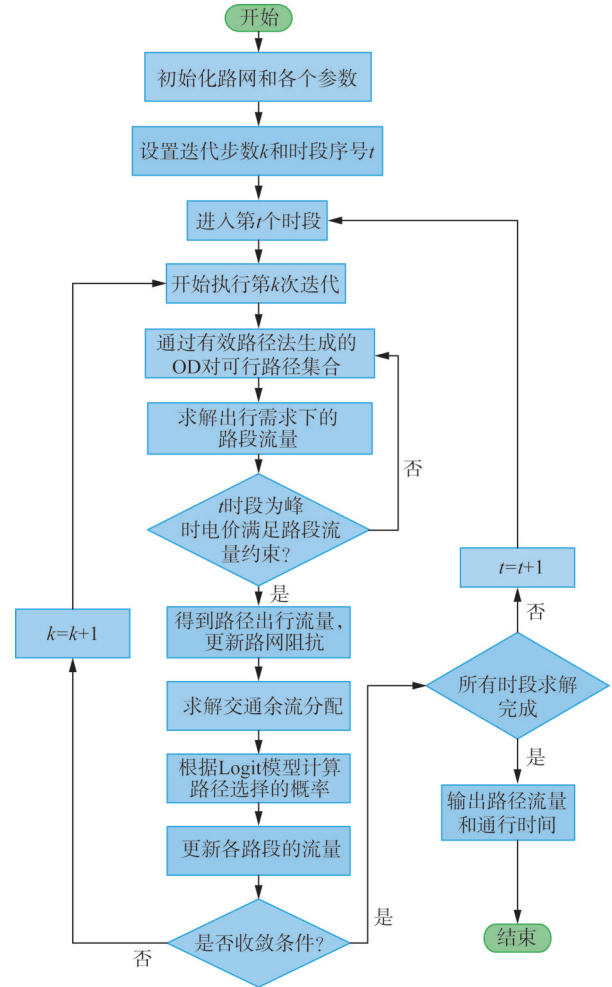


图4 迭代法求解半动态交通均衡模型

Fig. 4 Iterative method for solving semi-dynamic traffic equilibrium models

CSOC的值记作 S_{csoc} , 所有路段上车辆群体行驶过程中的 S_{csoc} 的概率密度函数在坐标轴上进行左移。则路径 n 从 o 到 d 的概率密度函数 $f_{n,t}^{od(o)}$ 与 $f_{n,t}^{od(d)}$ 的关系如式(18)所示。

$$f_{n,t}^{od(d)}(s) = f_{n,t}^{od(o)}\left(s + \frac{T_{n,t}^{od} \cdot P_d}{C}\right) \quad (18)$$

4.2 CSOC充电过程的计算推导

电动汽车群体到达终点或者到达终点前的充电站时, 如果 S_{csoc} 低于最低阈值, 进行充电。充电由充电的电动汽车数量、充电概率、充电功率以及充电效率决定。充电时长受到开始时段 S_{csoc} 影响, 车辆充电的条件为 S_{csoc} 属于 $[\partial, S_{start}]$, 所以在 t 时刻到达终点 d 的充电开始时刻的 S_{soc} 概率密度函数 $f_{s,t}^{od}(s)$ 如式(19)所示。

$$f_{s,t}^{od}(s) = \frac{\sum_{n \in N^{od}} h_{n,t}^{od} \cdot f_{n,t}^{od(d)}(s)}{\sum_{n \in N^{od}} h_{n,t}^{od} \cdot \int_{\partial}^{S_{\text{start}}} f_{n,t}^{od(d)}(s) ds}, \partial \leq s \leq S_{\text{start}} \quad (19)$$

式中 $f_{n,t}^{od(d)}(s)$ 为 (o, d) 之间选择路径 n 到达终点的 CSOC 概率密度函数。

因此, 当充电功率为 P_c , 充电时长为 t_c , 满足的约束条件如式(20)~(21)所示。

$$\frac{(S_{\text{end}} - S_{\text{start}})C}{P_c} \leq \frac{(S_{\text{end}} - s)C}{P_c} \leq \frac{(S_{\text{end}} - \partial)C}{P_c} \quad (20)$$

$$t_c = \frac{(S_{\text{end}} - s)C}{P_c} \quad (21)$$

式中下标 c 为 charge 的简称。

综上, 可得到充电时长概率密度函数 $f_{ct,t}^{od}(t_a)$ 如式(22)所示。

$$f_{ct,t}^{od}(t_a) = f_{s,t}^{od}(S_{\text{end}} - \frac{t_c P_c}{C}) \quad (22)$$

设定车辆的充电开始时刻为 t_m , t_c^{start} 和 t_c^{end} 分别为充电时长最小值和最大值, 则当充电时间 t_i 为充电时间范围内任意时刻时, 充电概率服从的分布为如式(23)所示。

$$p_{t_i} = \begin{cases} 1, & t_m \leq t_i \leq t_m + t_c^{\text{start}} \\ 1 - \int_{t_c^{\text{start}}}^{t_i - t_m} f_{ct,t}^{od}(x) dx, & t_m + t_c^{\text{start}} \leq t_i \leq t_m + t_c^{\text{end}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

式(24)为计算电动汽车充电的数量, 在任意时刻下电动汽车群体平均充电需求如式(25)所示。

$$Q_t^{od} = \sum_{n \in N^{od}} h_{n,t}^{od} \cdot \int_{\partial}^{S_{\text{start}}} f_{n,t}^{od(d)}(x) dx \quad (24)$$

$$P_{t_i} = p_{t_i} \cdot Q_t^{od} \cdot P_c \quad (25)$$

式中 Q_t^{od} 为电动汽车充电的数量, 由路径流量和充电比例获得。所以, 叠加所有时段的 OD 对的充电需求, 即可得到区域内充电站一天的日充电负荷曲线, 且可以针对某一系列 OD 对进行单独分析对各个充电站的影响。求解流程图见图 5。

5 算例分析

算例分析选择两个路网进行分析。第一个路网选择改进的 13 节点 N-D 路网^[23], 其拓扑图如图 6 所示, 拓扑图的参数见表 2 所示。设置 4 类 OD 对, 分别为 (1, 2)、(1, 3)、(4, 2) 以及 (4, 3), 其中节点 1 和 4 为电动汽车起始位置, 节点 3 和 4 为电动

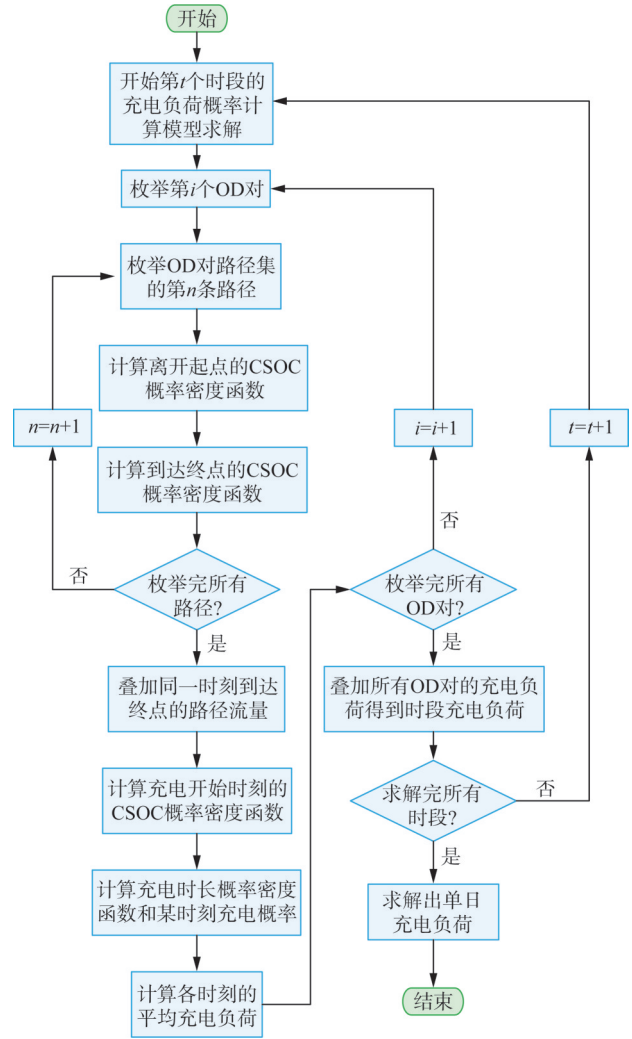


图 5 CSOC 充电负荷计算流程图

Fig. 5 Flow chart of CSOC charging load calculation model

汽车行驶至终点位置, 出行比例分别为 0.15、0.3、0.25、0.3。规定车流比例最高的时候为 10 000 辆, 根据上海市电动汽车出行需求规律动态变化求出其余时刻的出行车辆, 设定电动汽车的充电功率为 77.7 kW, 充电效率 90%, 单位千米耗电量为 0.145 kWh/km, 电池容量为 70 kWh, 电动汽车渗透率 15%, 路径的通行流量均为 3 600 pcu/h。

5.1 CSOC 计算性能优越性分析

设定车辆从起点到终点行驶后, 充电站建立在终点节点 2 和 3 且只能在终点进行充电, 不考虑充电分时电价进行分析。

图 7 为随着时间变化, 各路段的流量在空间上的分布, 呈现半动态交通均衡状态。因为用户存在非理性行驶的情况, 部分路段流量在空间上分布有较大的差异, 部分路段几乎没有车流, 行驶方向一

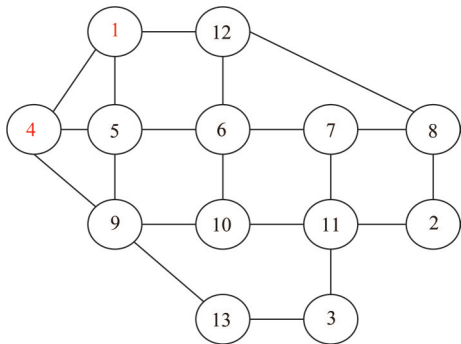


图6 改进13节点N-D路网图

Fig. 6 Improvements to the 13-node N-D road network

表2 改进13节点路网参数

Tab. 2 Improvement of 13-node road network parameters

路段号	路段起止	路段长度/km
1	1-5	4
2	10-11	4
3	12-8	9
4	1-12	9
5	5-6	3
6	6-7	2
7	8-2	6
8	11-2	6
9	13-3	8
10	4-5	6
11	4-9	8
12	5-9	6
13	6-10	8
14	12-6	4
15	7-8	3
16	7-11	6
17	12-8	9
18	9-10	7
19	9-13	6

致的路段距离较短的车流量大于路径较长的路段。如路段5、6和路段2和18，因为车主出行时通常会选择较短的路径，当车流量超出道路通行能力，最短路径无法承载所有车流时，车主便会转向其他较远路径，路网达到新的均衡状态。

如图8所示，本文采用的CSOC法求解用电负荷与采用蒙特卡罗法进行多次随机多次抽样做了对比的案例分析所得到的结果。

可以观察结果得知，将蒙特卡罗法与本文方法进行对比，在多次蒙特卡罗得到的用电负荷结果与本文的方法大致相同，表明采用的电动汽车集群在宏观状态上的预测方法具有个体抽样达不到的效果与优势，且蒙特卡罗为反复抽样，在计算耗时上比较长，50次蒙特卡罗的耗时为7 894 s，本文通过计

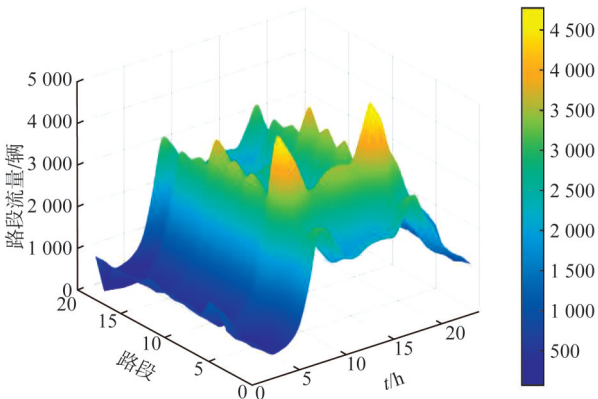


图7 半动态交通流量分配图

Fig. 7 Semi-dynamic traffic flow distribution diagram

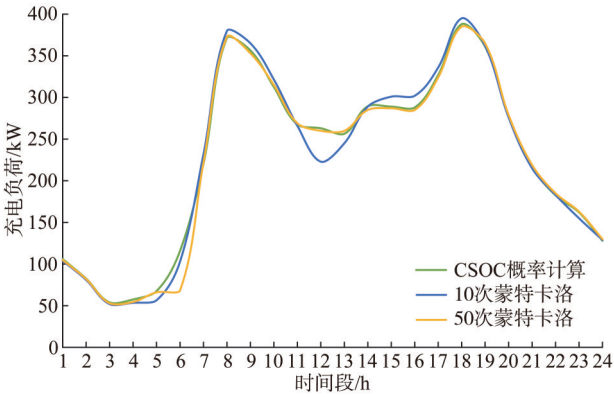


图8 CSOC与蒙特卡洛法的充电负荷预测对比

Fig. 8 Comparison of CSOC and Monte Carlo methods for charging load prediction

算耗时约为5 s，为对照方法的0.063%，计算性能具有速度快的优势。

如图9所示，为各时段余流修正的结果。最大余流修正量占最大出行车辆数的1.36%，这归因于大多数电动汽车能在同一时间段内抵达终点，因此修正后的出行需求与修正前相比差异甚微。如图10所示，得到车辆的初始出行需求、修正出行需求以及日充电出荷曲线。出行需求越高，相应的耗电量就越大，充电需求也就越高。因为电动汽车要结束此段行程后前往充电站充电，日负荷曲线在时间上要比修正出行需求曲线滞后。

通过观察曲线，本文发现18:00是电动汽车出行的高峰时段，而18:00—19:00期间，日充电负荷达到了峰值，具体为375.6 kW。这凸显了充电负荷与出行需求之间的正相关关系：电动汽车出行需求越高，随着电量的消耗，达到充电阈值的电动汽车数量也随之增多。此外通过观察及相关研究可

得, 上午 08:00—09:00 为电动汽车充电的第二个峰值时段, 该时段的充电功率达到 362.3 kW。

综上, CSOC 计算方法相较于传统的蒙特卡罗法在相同精准度的情况下具有很快的计算速度, 为大型路网进行分析提供了一种新的计算思路。

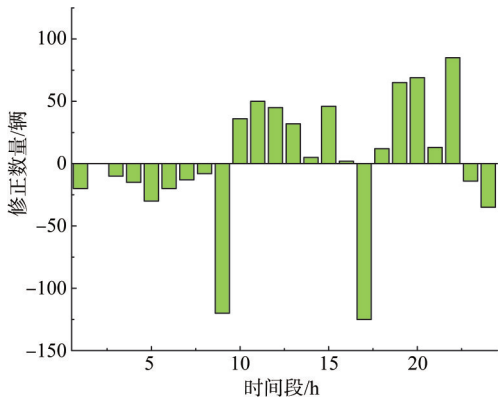


图9 各时段余流修正结果

Fig. 9 Residual current correction results for each period

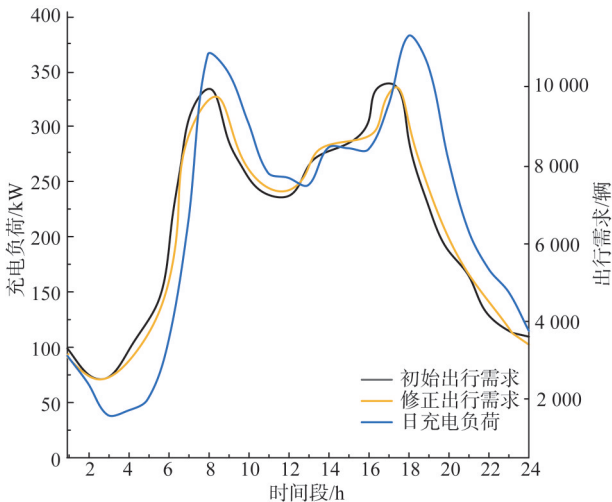


图10 出行需求与日充电负荷曲线

Fig. 10 Curves of travel demands and daily loads

5.2 考虑分时充电电价的分析

本文对 13 节点的路段长度进行了细致调整, 同时维持了原有的 OD 对出行方式不变, 仅对充电站位置进行了重新规划, 将其设定在路网节点 8、11、13 处, 而非终点。这里对 13 节点的路段长度进行调整, 忽略充电站节点与目的地节点的距离, 即终点节点为 2 的车辆充电选择 8 和 11 充电站; 终点节点为 3 的车辆充电选择 11 和 13 充电站。以 11 充电站为研究目标, 分析考虑在峰时分时充电电价前后充电负荷预测情况, 如图 10 所示。研究表明,

通过峰谷分时电价的引导, 可以有效优化电动汽车充电负荷, 降低电网高峰时段的负荷压力, 提高能源利用效率。

图 11 中, 高峰时分时电价恰好与早晚两个出行高峰重叠。当考虑分时充电电价时, 由 3.2 节可知, 对于两个目的地之间的公共充电站, 在峰时电价的时段其充电可调服务费受到路网节点通行流量的影响, 提高充电价格, 且具有流量约束。故 11 节点充电站在分时充电电价的路径流量调节下, 前来充电部分的车辆被转移到节点 8 和 13 的充电站, 缓解充电站的压力, 也会使得充电站接入配电网分散配网节点的压力。在非分时电价下两条曲线是一致的, 在峰时电价时体现出不同, 且考虑分时电价的结束后要滞后恢复到原预测曲线。两条曲线所封闭的面积代表了充电站一天内由于电损耗而减少的充电电量。

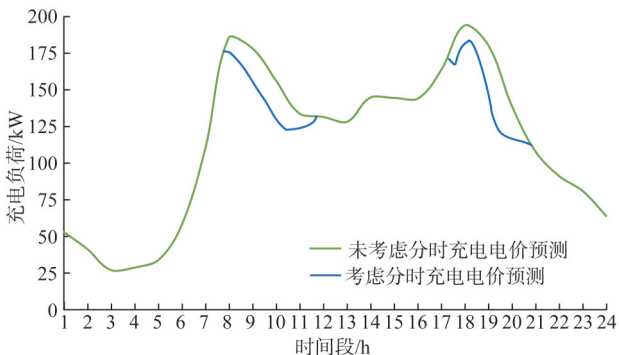


图11 考虑分时充电电价的充电负荷对比

Fig. 11 Comparison of charging loads considering the time charging prices

4 个 OD 对在一天时间内出行需求相同的情况下, 分别采用最短路径行驶, 半动态交通均衡出行以及考虑分时电价下的半动态交通均衡出行下, 不同 OD 对下车辆群体的充电成本如表 3 所示。

若不考虑通行容量的限制, 车主倾向于选择最短路程出行, 这往往导致路段拥堵, 从而使得部分

表 3 3 种模型的充电成本比较

Tab. 3 Comparison of charging costs for three models

模型	OD 对充电成本/元			
	(1,2)	(1,3)	(4,2)	(4,3)
最短路径	1 432.6	2 642.4	2 254.8	2 898.4
半动态交通均衡	1 205.4	2 374.6	1 997.8	2 408.6
分时电价-半动态交通均衡	1 137.6	2 274.4	1 906.4	2 376.6

充电站,尤其是节点 11 这一公共充电站,在交通流量高峰期面临电价上涨。因此,选择最短路径出行的车辆若需充电,往往需要支付更高的附加服务费。与之相较,半动态交通模型能够较为真实地结合道路的实际情况以及车主在出行时道路的选择,在多次迭代后使得出行流量分配均匀,电动汽车用户群的总出行充电成本比最短路径出行低。因此在同时考虑交通均衡和分时电价下可调充电服务费的条件下,所有用户的日总充电成本降至最低,相较于仅考虑半动态交通均衡条件时降低了约 3.6%。

5.3 实际路网 的充电特性分析

图 12 为上海市某区域的路网 21 节点拓扑网架图^[27],各个节点经纬度坐标在表 4 所示。

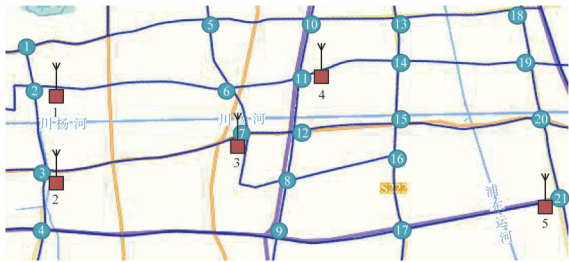


图 12 上海市某区域路网

Fig. 12 Road network of some area in Shanghai

图 12 中路网节点 5-17 附近集中的大量居民小区,为居民区;18-20 为公共服务区;21 为物流集散区;1-4 为工作区,5 个充电站设置在节点 2、3、7、11、21,为使研究的行驶时间变长,将路网的长度增至原来的二倍。同样设置出行 OD 对,区域内车辆总数取 30 000 辆电动汽车渗透率为 15%,车型信息同上一个算例。

在不考虑分时电价的条件下,取 18:00—19:00 时段,区域内出行 OD 对为(1, 10)、(4, 11)、(1, 12)、(4, 8)、(1, 9)、(1, 21)、(2, 13)、(4, 14)、(3, 17)以及(4, 15),分别按照 10 %的比例出行。此时为下班时间,在研究区域内,80 %的车辆按照 OD 对进行行驶,从工作区向居民区和服务区等方向移动。通过对比最短路径和半交通均衡流量行驶,本文发现部分路段的车流量分布存在显著差异。例如,根据图 12 所示,某些路段在交通均衡模型下的流量明显高于最短路径模型预测的流量,这反映了交通分配的非均衡性。

图 13 可以分析出,在最短路径行驶模式下没

表 4 节点经纬度

Tab. 4 Latitudes and longitudes of nodes

节点	经度/(°)	纬度/(°)	节点	经度/(°)	纬度/(°)
1	121.580 41	31.214 12	12	121.653 35	31.195 34
2	121.585 67	31.198 64	13	121.679 82	31.237 38
3	121.593 35	31.175 04	14	121.683 10	31.224 60
4	121.602 79	31.152 37	15	121.687 13	31.203 36
5	121.632 75	31.227 36	16	121.690 66	31.186 62
6	121.632 65	31.205 71	17	121.696 46	31.169 98
7	121.631 55	31.188 34	18	121.769 24	31.249 30
8	121.652 85	31.179 09	19	121.739 58	31.233 05
9	121.655 93	31.159 45	20	121.752 94	31.213 55
10	121.652 09	31.229 58	21	121.764 64	31.192 74
11	121.649 57	31.212 03			

有考虑电动汽车之间的互相影响,行驶在最短路段会使个别路段的流量猛增,非常不符合实际的情况,这凸显出半动态均衡模型的优势,即能够充分考虑车辆间的相互影响。

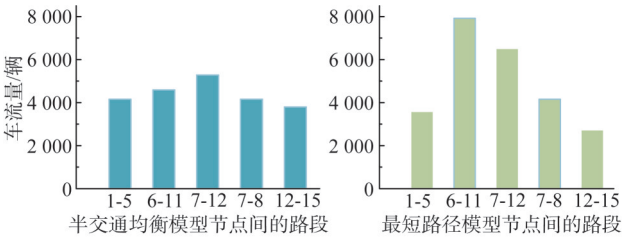


图 13 两种模型的路径流量对比

Fig. 13 Comparison of roadway volumes between the two models

在不考虑分时电价的条件下,取 08:00—09:00 时段,区域内车辆总数取 20 000 辆电动汽车渗透率为 15 %,此时正值早高峰时段,本文设定 80 %的车辆由居民区和服务区驶向工作区,行驶方向与 18:00—19:00 时段的 OD 对相反,且各 OD 对的出行比例均为 10 %。则在进行充电站布局规划时,考虑了交通流量、土地利用和电网容量等因素,5 个充电站的最大充电功率对比结果如图 14 所示。

图 14 可以分析出,在最短路径行驶模式下,没有考虑路径流量,车辆总是选择行驶里程最短,耗电量最低的路径行驶,所以车辆需要补充的电量也较少,充电站相对于半动态交通模型充电负荷偏小。综上,不考虑路网络径流量的最短路径行驶,已经不符合现在电动汽车出行预测的路径选择方式,要权衡多种因素才会使得预测的结果更加具有

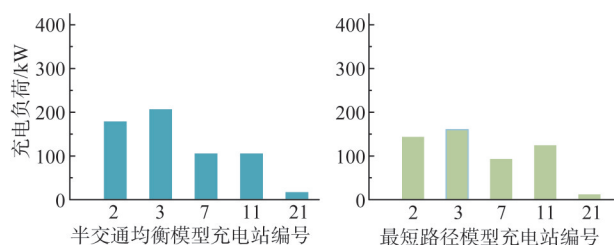


图 14 两种模型的充电站充电负荷对比

Fig. 14 Comparison of charging loads at charging stations for the two models

实际意义。

在上述相同的参数和条件下，分时间段进行预测，04:00—15:00 时为居民区行驶至工作区的方式，16:00—次日 03:00 时为工作区行驶至居民区的方式。在考虑分时电价情况下本文方法与文献[28]在实际 21 节点路网下进行电动汽车充电负荷进行预测，预测电动汽车总充电负荷曲线如图 15 所示。

由图 15 中的总负荷曲线可知：本文的方法与文献[28]计算得到结果相近，分别为 432.6 kW 和 422.4 kW。由于文献[28]为出行链下的空间出行方式，为个体电动汽车出行进行计算，交通拥堵情况以区间内的拥挤系数调整，以蒙特卡罗法进行充电负荷预测，部分充电存在慢充方式，导致存在夜间峰值滞后现象，峰值和谷值分别为 945.4 kW 和 72.6 kW；而本文考虑的群体电动汽车出行考虑到群体内部关系以及交通均衡出行的空间上的合理性，总负荷曲线相对较为平稳，峰谷差值更小。

6 结论

本文以交通均衡理论为基础，采用交通均衡理

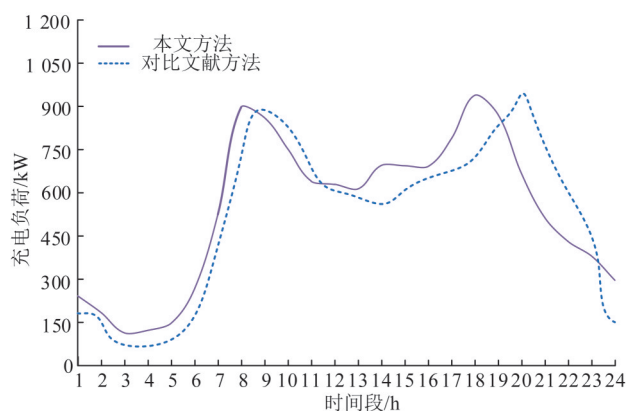


图 15 充电总负荷曲线对比

Fig. 15 Comparison of total charging load curves

论对电动汽车进行宏观的交通流量分配，并计及用户有限理性，引入分时电价，通过半动态交通均衡理论来求解电动汽车的出行流量分布；并通过 SOC 方法进行充电负荷计算，求解区域内电动汽车负荷充电需求，并通过经典路网和真实路网进行验证所提方法的有效性，可以得到如下结论。

1) 通过整合真实的城市车流量信息和交通道路数据，结合大数据分析技术，可以更准确地模拟 EV 出行过程，为充电负荷预测提供更为可靠的基础。

2) 本文提出的充电负荷概率预测能够结合宏观电动汽车群体的运行状态，并且计算求解速度快于个体抽样的蒙特卡罗法，计算时间为蒙特卡罗法的 0.063%，对于车辆数量较多的且路网较大的网络提供了新的负荷预测计算思路。

3) 本文验证了最短路径的行驶不适用于实际的路网中，且考虑分时电价下的可调附加充电服务费的半动态交通均衡模型下，电动汽车用户各 OD 对出行总充电成本会降低，在不改变电动汽车用户出行和充电时间习惯的前提下，该模型能有效缓解充电站充电空间不平衡的问题。

后续研究将聚焦于完善充电站电价的制定策略，并深入考虑因用户充电焦虑而产生的特定出行模式，如电量未达到预设充电阈值时的紧急充电行为及因此可能导致的行程中断情况。考虑多种多样的出行需求，使得电动汽车的群体出行场景更加丰富，这些将是下一步工作的研究重点。

参考文献

- [1] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8 (1): 801 – 813.
- [2] 陈丽丹, 张尧. 电动汽车充放电负荷预测研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 177 – 191.
CHEN Lidian, ZHANG Yao. A review of electric vehicle charging and discharging load prediction research [J]. Automation of Power Systems, 2019, 43(10): 177 – 191.
- [3] 周原冰, 龚乃玮, 王皓界, 等. 中国电动汽车发展及车网互动对新型储能配置的影响[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 1 – 11.
ZHOU Yuanbing, GONG Naiwei, WANG Haojie, et al. Study on the influence of electric vehicle development and the vehicle-grid interaction on new energy storage configuration in China [J]. Electric Power, 2024, 57(10): 1 – 11.
- [4] 陈鹏, 刘友波, 袁川, 等. 考虑电动汽车充电模式的配电网可

- 开放容量提升改造策略[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 177 - 186.
- CHEN Peng, LIU Youbo, YUAN Chuan, et al. Strategy for enhancing the available capacity of distribution networks considering electric vehicle charging modes[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 177 - 186.
- [5] 周衍涛, 戴军, 苑惠丽, 等. 城市电动汽车充电设施需求预测与规划布局研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 177 - 187.
- ZHOU Yantao, DAI Jun, YUAN Huili, et al. Demand forecasting and planning layout of urban electric vehicle charging facilities[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 177 - 187.
- [6] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126 - 130.
- TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126 - 130.
- [7] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36 - 42.
- LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36 - 42.
- [8] 赵书强, 周靖仁, 李志伟, 等. 基于出行链理论的电动汽车充电需求分析方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 7(8): 105 - 112.
- ZHAO Shuqiang, ZHOU Jingren, LI Zhiwei, et al. EV charging demand analysis based on trip chain theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 105 - 112.
- [9] 于海东, 张焰, 潘爱强. 电动私家车充电负荷中长期推演模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 80 - 87.
- YU Haidong, ZHANG Yan, PAN Aiqiang. Medium-and long-term evolution model of charging load for private electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 80 - 87.
- [10] 程杉, 钟仕凌, 尚冬冬, 等. 考虑电动汽车时空负荷分布特性的主动配电网动态重构 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 1 - 13.
- CHENG Shan, ZHONG Shiling, SHANG Dongdong et al. Dynamic reconfiguration of active distribution network considering spatial and temporal load distribution characteristics of electric vehicles [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 1 - 13.
- [11] 邵尹池, 穆云飞, 余晓丹, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5207 - 5219.
- SHAO Yinchu, MU Yunfei, YU Xiaodan, et al. A spatial-temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5207 - 5219.
- [12] 张晨曦, 丁明, 张晶晶. 基于交通出行矩阵的私家车充电负荷时空分布预测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 78 - 87.
- ZHANG Chenyu, DING Ming, ZHANG Jingjing. A temporal and spatial distribution forecasting of private car charging load based on origin-destination matrix [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 78 - 87.
- [13] 李含玉, 杜兆斌, 陈丽丹, 等. 基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及V2G评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 88 - 96.
- LI Hanyu, DU Zhaobin, CHEN Lidan, et al. Trip simulation based charging load forecasting model and vehicle-to-grid evaluation of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 88 - 96.
- [14] 龙雪梅, 杨军, 吴赋章, 等. 考虑路网-电网交互和用户心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 86 - 93.
- LONG Xuemei, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Charging load forecasting of electric vehicles considering the road-grid interaction and user psychology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 44(14): 86 - 93.
- [15] 张宇轩, 郭力, 刘一欣, 等. 电动汽车充电负荷概率分布的数值建模方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 61 - 70.
- ZHANG Yuxuan, GUO Li, LIU Yixin, et al. Numerical modeling method for probability distribution of electric vehicle charging load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 61 - 70.
- [16] 邵成成, 李徐亮, 钱涛, 等. 基于交通均衡的电动汽车快速充电负荷模拟[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1368 - 1376.
- SHAO Chengcheng, LI Xuliang, QIAN Tao, et al. Simulation of EV fast charging load based on traffic equilibrium [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1368 - 1376.
- [17] 董杨. 城市配电-交通耦合网络可靠性评估研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- [18] 上海新能源汽车公共数据采集与监测研究中心. 上海市新能源汽车大数据研究报2022[R]. 上海: 上海国际汽车城有限公司, 2022.
- [19] 郑远, 杜豫川, 孙立军. 美国联邦公路局路阻函数探讨[J]. 交通与运输(学术版), 2007(1): 24 - 26.
- ZHENG Yuan, DU Yuchuan, SUN Lijun. Discussion on road resistance function of federal highway administration [J]. Traffic and Transportation (Academic Edition), 2007(1): 24 - 26.
- [20] 葛晓琳, 何钊博, 符杨, 等. 融合分层规划和A*算法的共享电动汽车换车与充电路径规划 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7668 - 7681.
- GE Xiaolin, HE Yanbo, FU Yang, et al. Path planning for vehicle exchange and charging of shared electric vehicles by integrating hierarchical planning and A* algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7668 - 7681.
- [21] 崔岩, 胡泽春, 段小宇. 考虑充电需求空间灵活性的电动汽车运行优化研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 981 - 994.
- CUI Yan, HU Zechun, DUAN Xiaoyu. Review on the electric vehicles operation optimization considering the spatial flexibility of electric vehicles charging demands [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 981 - 994.
- [22] 柯松, 陈磊, 杨军, 等. 基于半动态交通流模型的电动汽车出行引导策略[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3362 - 3380.
- KE Song, CHEN Lei, YANG Jun, et al. Electric vehicles travel guidance strategy based semi-dynamic traffic flow states model [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3362 - 3380.
- [23] 朱峻良, 武志刚, 刘嘉宁. 基于半动态交通均衡的电动汽车充电负荷概率分布建模[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 640 - 654.
- ZHU Junliang, WU Zhigang, LIU Jianing. Electric vehicle charging load probability distribution modeling based on semi-dynamic traffic equilibrium [J]. Power System Technology,

- 2024, 48 (2): 640 – 654.
- [24] LÜ S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Optimal power and semi-dynamic traffic flow in urban electrified transportation networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 1854 – 1865.
- [25] 盛裕杰, 郭庆来, 薛屹洵, 等. 信息-物理-社会视角下的电力-交通耦合网络建模与协同优化 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48 (7): 62 – 85.
- SHENG Yujie, GUO Qinglai, XUE Yixun, et al. Modeling and collaborative optimization of power-traffic coupling network from the perspective of information-physical-society [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48 (7): 62 – 85.
- [26] 杨临润, 赵祥模, 贺冰花, 等. 随机用户均衡交通分配问题的蚁群优化算法 [J]. 交通运输工程学报, 2018, 18 (3): 189 – 198.
- YANG Linjian, ZHAO Xiangmo, HE Binghua, et al. Ant colony optimization for stochastic user equilibrium traffic assignment problem [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18 (3): 189 – 198.
- [27] 屈克庆, 赵登辉, 毛玲, 等. 考虑城市空间结构和用户有限理性的电动汽车快充负荷预测 [J]. 南方电网技术 2024, 18 (10): 151 – 160.
- QU Keqing, ZHAO Denghui, MAO Ling, et al. Fast charging load forecasting of electric vehicles considering urban spatial structure and user's bounded rationality [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 151 – 160.
- [28] 张美霞, 吴子敬, 杨秀. 基于动态能耗模型与用户心理的电动汽车充电负荷预测 [J]. 现代电力, 2022, 39 (6): 710 – 719.
- ZHANG Meixia, WU Zijing, YANG Xiu. Electric vehicle charging load prediction based on dynamic energy consumption model and user psychology [J]. Modern Electric Power, 2022, 39 (6): 710 – 719.

收稿日期: 2024-01-04; 网络首发日期: 2025-07-16

作者简介:

张美霞(1979), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为电力系统优化运行、电动汽车与电网互动, zmx19790612@sina.com;

张安(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车负荷预测与并网影响, zhangan19980517@163.com;

杨秀(1972), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为分布式发电与微电网的运行与仿真, yangxiu721102@126.com。

广 告

电网仿真重点实验室 封二
南网知识星球 封三
直流输电技术全国重点实验室 A1

积成电子股份有限公司 A2
北京四方继保自动化股份有限公司 A4