

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241361

# 考虑用户有限理性的电动汽车充放电行为时空特征分析

李青<sup>1</sup>, 刘雨婷<sup>1</sup>, 刘超<sup>2,3</sup>

(1. 南京信息工程大学管理工程学院, 江苏 南京 210044; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106; 3. 国网南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 大规模电动汽车(electric vehicle, EV)入网互动为新型电力系统的建设带来了新的机遇与挑战。有效引导 EV 有序充放电以提升新型电力系统用户侧调节功能, 助力能源消费低碳转型, 已成为亟需解决的重要议题。但是, 鉴于需求侧 EV 用户决策心理与供给侧交通系统的复杂性, 充放电价格对用户充放电行为的引导作用机制尚不明晰。为此, 首先围绕需求侧 EV 用户充放电的决策心理, 分析了从属于用户不同心理账户的充电与放电决策过程及其影响因素, 基于参照依赖理论, 建立了充电与放电价值衡量函数。然后, 面向供给侧混合燃油车与 EV 的交通系统, 从出行行为产生的根本原因出发, 基于动态活动-出行配流模型揭示 EV 的时空分布机理。最后, 通过算例探讨了 EV 充放电需求的时空分布规律, 分析了充放电价格以及用户决策心理对充放电需求的作用机制。研究结果将为车网互动(vehicle-to-grid, V2G)充电桩的规划与部署、充放电定价机制的完善以及微电网的建设与部署等提供参考。

**关键词:** 电动汽车; 充放电行为; 有限理性; 动态活动-出行配流模型

## Spatiotemporal analysis of electric vehicle charging and discharging behavior considering users' bounded rationality

LI Qing<sup>1</sup>, LIU Yuting<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>2,3</sup>

(1. School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The large-scale integration of electric vehicles (EVs) into power grids presents both opportunities and challenges for the construction of new power systems. Effectively guiding orderly EV charging and discharging to enhance user-side regulation capabilities in new power systems and support the low-carbon transformation of energy consumption has become a pressing issue. However, due to the complexity of demand-side user decision-making psychology and supply-side transportation systems, the mechanism by which charging/discharging prices influence user behavior remains unclear. To address this, this paper first analyzes the decision-making psychology of demand-side EV users, analyzing how charging and discharging decisions are influenced by different psychological accounts. Based on reference dependence theory, value measurement functions for charging and discharging are established. Then, on the supply-side, this paper considers a transportation system composed of both hybrid vehicles and EVs, and the spatiotemporal distribution mechanisms of EVs are revealed through a dynamic activity-travel assignment model that traces the root causes of travel behavior. Finally, case studies explore the spatiotemporal patterns of EV charging/discharging demands and analyze the impact mechanisms of pricing strategies and user decision-making psychology on charging/discharging behaviors. The research findings provide valuable references for the planning and deployment of vehicle-to-grid (V2G) charging infrastructure, the optimization of pricing mechanisms, and the construction and deployment of microgrids.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 72271127 and No. 72171114).

**Key words:** electric vehicles; charging and discharging behavior; bounded rationality; dynamic activity-travel assignment model

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(72271127, 72171114)

## 0 引言

随着电动汽车(electric vehicle, EV)保有量的快速增长,兼具时空储能灵活性与能源调节功能的EV正逐步成为终端能源消费市场的主导力量,并构成新型电力系统支撑“碳中和”目标的核心要素<sup>[1-4]</sup>。2024年8月,国家发展改革委等三部委联合印发《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》<sup>[3]</sup>,明确提出深化车网互动(vehicle-to-grid, V2G)技术应用、健全充电分时电价机制、探索放电价格体系等关键举措,旨在充分释放EV储能资源的系统调节潜力。但是,EV用户与电网的互动行为受到其交通行为、决策心理、激励措施等多维度因素的影响,呈现出显著的随机性与波动性<sup>[2,6-7]</sup>。在多时间尺度下,捕捉EV充放电互动决策机制颇具挑战。因此,如何引导该优质调节资源有序参与电力需求响应市场化交易,成为当前亟待深入探讨的重要课题。

近年来,关于EV充放电协同调度与优化问题的研究已获得较多关注。充电价格作为引导EV有序充电的关键手段<sup>[8-10]</sup>,大部分研究假设EV用户响应充放电策略的意愿与经济激励措施紧密相关。文献[11]构建了双层规划模型,上层聚焦电网与充电桩的协同规划,下层以负荷波动和分布式电源弃电等运行成本最小化为目标。研究结果显示,依据配电网负荷波动制定的充放电价格,能够显著影响EV用户的充放电响应行为。针对充电高峰期充电站负荷分布不均衡的问题,文献[12]指出,EV用户是否参与充电调控主要取决于各充电站之间的电价差是否超过预设的启动阈值;而其参与放电的响应程度,则主要受放电价格的影响。考虑到长时间尺度的激励措施会对EV用户的响应意愿产生作用,文献[13]结合价格型与激励型需求响应措施,对EV充放电调度过程进行优化。结果表明,该策略既能增加EV负荷聚集商的收益,又能降低电网负荷波动和EV用户的成本。在具体的充放电场景方面,文献[14]探究了通过价格引导企业员工参与充放电调度的响应潜力,并建立了以最小化企业能源成本和EV电池退化成本为目标的优化模型。除了经济激励措施以外,部分研究还考虑了EV用户的心理因素。文献[15]考虑到EV用户的时间焦虑心理,将其划分为更倾向于放电的积极用户和更倾向于充电的消极用户,构建了兼顾电网负荷、EV用户成本和运营收益的多目标优化模型。文献[16]以最小化EV用户成本为目标,研究了综合考虑预警负荷、预警电价和放电激励措施的EV充放电优化策略。然而,上述研究在一定程度上简化了EV用户

出行需求的产生机制。

基于2009年美国国家公路交通安全管理局的车辆出行统计数据的拟合结果模拟EV充电需求,文献[17]在构建EV用户参与充放电调度的意愿与能力获取场景的基础上,提出了以满足EV用户的利益诉求为约束、以电网负荷峰谷差最小为目标的优化模型,对充放电调度优化策略进行了探讨。然而,随着城市的快速发展以及居民生活水平的显著提高,2009年的出行数据已难以满足当下EV高保有量情形下研究的需求。为更精准地预测EV用户的出行需求,不少学者开始关注一种模拟方法,该方法充分考虑用户出行目的以及出行之间的关联性,且涵盖了EV行驶距离、停车时长等出行链信息<sup>[18]</sup>。基于出行链理论,文献[19]以EV集群参与车网互动的可调度容量为约束,提出了以价格激励机制为引导的多目标协同调度模型,实现了负荷波动平滑与EV用户成本的降低。考虑到突发事件对EV用户出行链的影响,文献[20]提出了出行链重构的EV充放电调度优化模型,结果表明所得到的优化策略能够有效稳定配电网在既定调度计划被破坏时的负荷需求。尽管如此,目前基于出行概率和出行链来预测EV出行需求或充电需求的研究,均未能揭示EV用户互动行为随机性和波动性产生的根源,即未能深入剖析EV交通行为产生和变化的内在机制,以及EV用户复杂的决策心理。

EV用户是否需要为车辆充电、选择何种充电桩以及充电时长的决策,是为满足日常活动(如工作、购物、娱乐等)需求、结合车辆荷电状态并受自身焦虑里程心理影响而做出的选择。而EV荷电状态的改变,反过来又是用户日常活动出行日程安排以及充电决策共同作用的结果。从活动引发出行的视角出发,文献[21]提出了基于活动的EV充电需求仿真模型,该模型综合考虑了EV用户的出行行为和实时充电行为,有效提高了充电需求时空分布预测的准确度,为充电设施的规划与布局提供了重要参考<sup>[22]</sup>;文献[23]运用贝叶斯法刻画了EV用户在不同活动-出行链之间的转移过程,基于累积前景理论阐述了EV用户出行行为与充电行为的决策心理,结合动态交通分配模型分析了EV及其充电需求的时空分布特征。考虑到充电时长与活动时长之间的作用关系,文献[24]定义了基于活动时长的充电负效用,构建了基于可接受规则的动态用户均衡模型;通过将用户一天的活动-出行日程抽象为一条活动-出行路径<sup>[25]</sup>,文献[26]应用基于活动的动态交通流分配模型<sup>[27]</sup>对EV充电需求的时空演化机理进行了研究。为全面捕捉EV用户的时空分布规律,

不少学者已经开始应用基于活动的建模方法对 EV 用户的充电行为进行探讨。然而, 放电决策与充电决策存在本质差异。充电决策通常是用户为维持车辆正常使用而不得不付出成本的强制性行为, 而放电决策则是非强制性的参与行为, 用户虽可从中获取收益, 但可能会对后续出行造成影响。因此, 用户在心理上对充电和放电的感知账户有所不同<sup>[28]</sup>。目前, 现有研究尚未清晰阐明 EV 用户在充电与放电决策上的异质心理, 且较少对考虑 EV 用户决策心理的充放电时空行为特征进行全面剖析。

本文首先聚焦于用户满足日常活动-出行需求时 EV 状态的动态变化, 剖析用户充电与放电的异质决策心理; 然后, 基于有限理性行为决策理论阐述 EV 用户充放电决策机制; 在此基础上, 构建考虑 EV 用户充放电异质决策心理的动态活动-出行配流模型, 以期能够系统揭示充放电价格对充放电接入规模的影响机理, 为 V2G 充电桩的部署、充放电策略的制定以及充放电协同调度优化提供参考。

## 1 问题描述

### 1.1 EV 状态分析

鉴于出行者活动-出行日程安排的复杂性, 不少学者对侧重刻画出行需求相关要素的传统交通网络模型进行了扩展, 提出了考虑活动需求要素的活动-出行超网络模型。其中, 多状态超网络(multi-state super-networks, MSNs)<sup>[29-30]</sup>模型具有较强的包容性与可扩展性, 可灵活用于探讨具有特殊属性的出行方式<sup>[24-25]</sup>。

EV 状态的变化是 EV 用户完成其一天的活动-出行日程安排的结果, 该过程可应用 MSNs 进行系统描述。任意一条贯穿 MSNs 的路径由出行路段与活动路段组成<sup>[26-27,29-30]</sup>。考虑 EV 充放电状态的 MSNs 示例如图 1 所示。其中, 出行路段包含出发时间、出行路线、出行方式、出行目的地等出行信息; 活动路段包含活动地点、充放电地点、充放电开始时间、活动时长、充放电时长等与活动相关的信息。

由图 1 可知, 示例中有一个居住地 H、一个户外活动 A 与停车点 P, 一种私家出行方式 EV。五边形表示 EV 行驶网络(private vehicle network-electric vehicle, PVN-EV); 六边形表示公共交通网络(public transport network, PTN)。横向不同 PTN 相连表示 EV 开始/结束充电或放电, 横向 PVN-EV 与 PTN 相连表示取/停 EV, 纵向 PTN 相连表示包含充/放电过程的活动状态变化。图中路径均表示 EV 用户驾驶 EV 离开 H, 然后停在 P 进行活动 A, 活动结束后到 P 处取车回家。其中, EV 状态追踪其停在某处,

是否在被使用以及是否处于充/放电状态; 充放电过程可衍生出 3 种可能的活动状态: (1,0,0)表示该用户未在活动过程中进行充电或放电, 活动-出行路径由黑色实线与黑色“-”线组成; (1,1,0)表示该用户在活动过程中充电, 活动-出行路径由黑色实线与黑色“·”线组成; (1,0,1)表示该用户在活动过程中放电, 活动-出行路径由黑色实线与黑色“-”线组成。

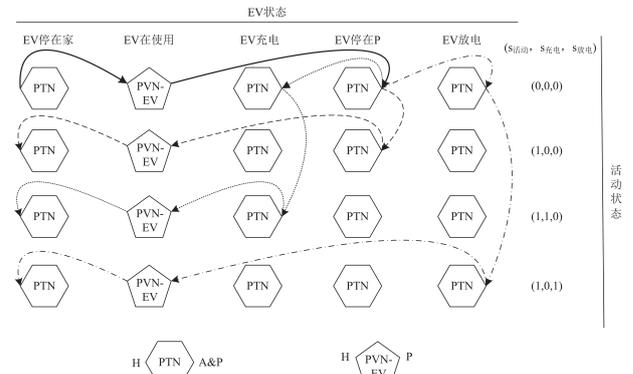


图 1 基于 MSNs 的 EV 用户活动-出行路径示意图

Fig. 1 An example of an EV user's activity-travel path in MSNs

### 1.2 EV 用户充放电决策过程

附录 A 图 A1 给出了充放电决策内容及其与其他因素之间的作用关系。在既定的 V2G 充电桩分布、城市交通道路网络以及土地功能(活动地点)等供给条件下, EV 用户驾驶车辆在道路网络中行驶, 以抵达各个活动地点。在此过程中, 道路网络中的车辆流量会对 EV 的电量消耗产生影响。用户的日程安排越紧凑, 道路车流量越大, 交通拥堵的可能性也随之增加, 进而导致 EV 电量消耗增多。当 EV 的荷电状态处于用户焦虑里程范围时, 用户会基于自身行为效用的衡量机制、实时充电价格以及 EV 充电类型, 对是否充电、在何处充电、何时开始充电以及充电时长等问题进行选择。该决策结果会对电网负荷产生影响, 而电网的负荷状态又会进一步影响实时充电价格的制定。与之类似, 基于 EV 的荷电状态, 在不影响后续活动-出行需求的前提下, EV 用户会依据放电价格评估放电效用, 并结合 EV 类型, 对是否放电、在何处放电、何时开始放电以及放电时长等做出选择。该决策结果同样会对电网负荷产生作用, 进而影响放电价格的制定。本文将聚焦于交通-电力耦合网络, 探讨 EV 用户如何在自身决策心理、焦虑里程、活动-出行日程安排等约束下, 对荷电状态变化的 EV 进行充放电决策。

## 2 考虑参照依赖心理的充放电价值函数

基于上述分析可知, 充放电决策需综合考虑当

前车辆的荷电状态以及用户对充放电价值的衡量心理。依据行为经济学理论框架,可将充电成本定义为负效用,放电收益可表征为正效用。大量行为实验已经证实,由于受到感情、理念、经验以及处理能力的约束,决策者是有限理性的“社会人”<sup>[31]</sup>。

### 2.1 参照依赖心理

为刻画决策者的有限理性行为,面向不确定情境,文献[32-33]提出了适用于描述个体选择具有单一属性方案的(累积)前景理论。考虑到我国的充放电价格总体是相对稳定的,因此,EV用户充放电决策的价格情境是确定的。另外,虽然从物理过程来看,放电与充电是相反的过程,但是,从经济学原理来看,EV用户的充放电决策行为遵循成本-收益原则,两者均是基于电能这一相同的商品,只是在不同的交易环节体现出不同的经济价值。因此,用户的充放电决策属于多属性决策问题。

文献[34]提出了适用于确定性情境下多属性决策的参照依赖理论。该理论描述了个体做决策时:1)会相对于参照点区分获得和损失;2)相较于获得的情况,个体对损失更敏感;3)在某个属性上的损失需要相应的多倍获得来弥补。为便于计算,考虑到充电与放电价值的可加性问题,假设损失规避程度为常数,感知价值是关于各属性的线性函数。

### 2.2 充电价值函数

令 $t$ 时间段 $l$ 地EV的充电价格为 $p_l^c(t)$ , $m$ 类EV用户的充电价格参考点为 $p_0^{cm}$ ,若实际充电价格低于该参考点,则为获得,反之则为损失。损失越大,用户越不可能在该价格进行充电。则该类用户在 $l$ 地从 $t$ 时间段开始充电时长 $d_l^{cm}$ 所感知的价值 $R_l^{cm}(t, d_l^{cm})$ 为各时段感知价值之和,如式(1)所示。

$$R_l^{cm}(t, d_l^{cm}) = \sum_{\omega=t}^{\omega=t+d_l^{cm}} R_l^{cm}(\omega) \quad (1)$$

$$R_l^{cm}(\omega) = \begin{cases} \beta_1^{cm} \cdot (p_0^{cm} - p_l^c(\omega)), & p_l^c(\omega) \leq p_0^{cm} \\ \beta_2^{cm} \cdot (p_l^c(\omega) - p_0^{cm}), & p_l^c(\omega) > p_0^{cm} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\beta_1^{cm}$ 与 $\beta_2^{cm}$ 分别表示充电获得与充电损失的感知系数, $\beta_1^{cm} > 0$ , $\beta_2^{cm} < 0$ ;由于存在损失规避心理, $\frac{|\beta_2^{cm}|}{|\beta_1^{cm}|} > 1$ 。

### 2.3 放电价值函数

类似地,设 $t$ 时间段 $l$ 地EV的放电价格为 $p_l^d(t)$ , $m$ 类EV用户的放电价格参考点为 $p_0^{dm}$ 。若实际放电价格低于该参考点,则为损失,反之则为获得。 $m$ 类EV用户在 $l$ 地从 $t$ 时间段开始放电时长

$d_l^{dm}$ 所感知的价值 $R_l^{dm}(t, d_l^{dm})$ 为

$$R_l^{dm}(t, d_l^{dm}) = \sum_{\omega=t}^{\omega=t+d_l^{dm}} R_l^{dm}(\omega) \quad (3)$$

$$R_l^{dm}(\omega) = \begin{cases} \beta_1^{dm} \cdot (p_l^d(\omega) - p_0^{dm}), & p_l^d(\omega) \geq p_0^{dm} \\ \beta_2^{dm} \cdot (p_0^{dm} - p_l^d(\omega)), & p_l^d(\omega) < p_0^{dm} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\beta_1^{dm}$ 与 $\beta_2^{dm}$ 分别表示放电获得与放电损失的感知系数, $\beta_1^{dm} > 0$ , $\beta_2^{dm} < 0$ , $\frac{|\beta_2^{dm}|}{|\beta_1^{dm}|} > 1$ 。

参考点 $p_0^{cm}$ 与 $p_0^{dm}$ 的取值可通过问卷、行为实验以及数据挖掘等实证方法获取,具体实施过程不在本文的研究范围内。

## 3 考虑充放电决策心理的动态交通流分配模型

### 3.1 基本假设

本文所构建的模型是基于以下假设进行的。

A1 以1 min为单位时间段将时间范围进行离散划分。充放电价格具有时空差异,且出行者对系统信息完全感知。V2G充电桩均为快速充电桩。

A2 根据经典决策论中的决策准则类型<sup>[35]</sup>,EV用户可分为乐观、悲观与中立3类人群,分别对应充放电决策中最差、最好与中等的参照水平。其中,放电决策的参考点又根据是否面向充放电价差分为仅考虑放电价格与考虑充电价格两种类型。

A3 考虑到EV在途时长受其他车辆流量的影响,系统中存在私家EV与私家燃油车(gasoline vehicle, GV)两种出行方式。EV充放电均发生在活动参与过程中进行,在途充放电不在研究范围内。暂不考虑停车费用。

A4 EV用户根据焦虑里程范围决定是否必须开始充电或终止放电。充电发生的必要条件为EV荷电状态达到用户的焦虑里程范围的下限,放电结束的必要条件为EV荷电状态不能低于用户的焦虑里程范围的上限。

A5 EV匀速行驶,在途电量消耗仅与在途时长有关。其余诸如车辆自身质量、电池性能、行驶路况、环境温度、驾驶行为、车内电器使用、速度变化等因素<sup>[36-37]</sup>带来的电量消耗均不在本文考虑范围内。

A6 基于广义的负效用函数定义出行者的出行成本与活动体验,活动-出行路径负效用由组成活动-出行路径的出行与活动路段负效用构成。出行者对活动-出行路径的选择遵循可接受规则<sup>[26-27]</sup>。

### 3.2 活动-出行路径负效用函数

记MSNs为 $G(L, A)$ , $L$ 表示节点集合,比如活

动地点、停车地点等;  $A$  表示路段集合, 包含出行路段集( $A^v$ )与活动路段集( $A^a$ ); 任一活动-出行路径  $r$  的起讫点均为居住地  $H$ 。出行路段( $A^v = A_c^v \cup A_g^v$ )由使用 EV 与 GV 出行的路段集合  $A_c^v$  和  $A_g^v$  组成, 包含空间位置的变化与出行时间的消耗, 路段起讫点为不同的活动地点; 活动路段( $A^a$ )表示活动时长衍生的时间跨度路段, 路段起讫点为同一活动地点。

### 3.2.1 出行路段负效用函数

令实际道路为  $y(a)$ , 则  $t$  时段  $y(a)$  上累积车流量  $x_{y(a)}^{ii}(t)$  由式(5)表示。

$$x_{y(a)}^{ii}(t) = \max(0, x_{y(a)}^{ii}(t-1) + \sum_m u_a^{mii}(t) - c_a^{ii}) \quad (5)$$

式中:  $x_{y(a)}^{ii}(t-1)$  为上一时段的累积车流量;  $u_a^{mii}(t)$  为  $t$  时段流入路段  $a$  的  $m$  类出行者;  $c_a^{ii}$  为路段  $a$  上的容量。基于 BPR 函数, 该路段上在途时长  $t_a^{mii}(t)$  如式(6)所示。

$$t_a^{mii}(t) = t_a^0 + \eta_a \left( \frac{x_{y(a)}^{ii}(t)}{c_a^{ii}} \right)^{\gamma_a} \quad (6)$$

式中:  $t_a^0$  为路段  $a$  的自由流在途时间;  $\eta_a$  与  $\gamma_a$  为待定参数。 $m$  类 EV 用户在  $t$  时段从  $l$  处出发时的电量为  $S_a^{mi}(t)$ , 令  $\phi_c$  为驾驶过程中平均单位时间的电量消耗率, 根据假设 A5, 到达  $\hat{l}$  处时的电量  $S_a^{mi}(t')$  如式(7)所示。

$$S_a^{mi}(t') = S_a^{mi}(t) - t_a^{mii}(t) \phi_c, t' = t + t_a^{mii}(t) \quad (7)$$

出行路段的负效用  $N_a^{mii}(t)$  如式(8)所示。

$$N_a^{mii}(t) = \lambda_1^m t_a^{mii}(t) + \lambda_2^m t_a^{mii}(t) \tau_a \quad (8)$$

式中:  $\lambda_1^m$  与  $\lambda_2^m$  分别表示在途时间与在途费用的价值系数; 对于 EV 出行路段,  $\tau_a$  为单位时间的耗电成本; 对于 GV 出行路段,  $\tau_a$  为单位时间的燃油费。

### 3.2.2 活动路段负效用函数

#### 1) 活动参与负效用函数

$t$  时段到达  $l$  处的  $m$  类出行者进行活动  $a(\hat{l}=l)$  的负效用  $N_{a0}^{mii}(t)$  可被定义为理想效用  $V_a^{m*}$  与实际效用  $V_a^{mii}(t, d_a^{ml}, c_a^{ii})$  的差<sup>[25-27]</sup>, 如式(9)所示。

$$N_{a0}^{mii}(t) = V_a^{m*} - V_a^{mii}(t, d_a^{ml}, c_a^{ii}) \quad (9)$$

$$V_a^{mii}(t, d_a^{ml}, c_a^{ii}) = F_a^{mi}(t) \frac{\lg(1 + \beta_a d_a^{ml})}{\Phi(t, c_a^{ii})} \quad (10)$$

$$\Phi(t, c_a^{ii}) = \left( 1 + \max \left( 0, \frac{\sum_m u_a^{mii}(t) - \mathcal{G}^m c_a^{ii}}{c_a^{ii}} \right) \right)^{\gamma_a} \quad (11)$$

式中:  $d_a^{ml}$  为活动时长;  $F_a^{mi}(t)$  为与两个时间高峰有关的二次方程<sup>[25-27]</sup>;  $\lg$  函数刻画了活动时长对活动效用的作用关系, 即活动参与时间越久, 效用增长速度越慢;  $\beta_a$  为常数;  $\Phi(t, c_a^{ii})$  表征了活动地点的拥挤效应, 当参与活动的人数超过拥堵水平  $\mathcal{G}^m$  时, 活动参与所获得的满意度降低。

#### 2) 考虑 EV 充放电的活动路段负效用函数

令 EV 最高电量为  $S^{\max}$ , 最低电量为  $S^{\min}$ 。

$\sigma_a^{mi}(t)$  为  $t$  时间段到达  $l$  处的  $m$  类 EV 用户接入电网充电的概率。根据假设 A3, 若  $S_a^{mi}(t)$  低于其焦虑里程下界  $\underline{S}^m$ , 则必须充电,  $\sigma_a^{mi}(t) = 1$ , 若在焦虑电量范围内, 则有 0.5 的可能性选择充电, 否则不充电,  $\sigma_a^{mi}(t) = 0$ 。记  $\phi^c$  为充电功率, 实际充电时长  $d_l^{cm}$  如式(12)所示, 活动结束后的电量为关于活动时长的函数, 如式(13)所示。

$$d_l^{cm} = \min \left\{ d_a^{ml}, \frac{S^{\max} - S_a^{mi}(t)}{\phi^c} \right\} \quad (12)$$

$$S_a^{mi}(t + d_l^{cm}) = \min \{ S_a^{mi}(t) + d_a^{ml} \phi^c, S^{\max} \} \quad (13)$$

另外, 根据假设 A3, 若放电后的电量低于焦虑里程的上界  $\bar{S}^m$ , 则必须终止放电。若  $S_a^{mi}(t)$  远超过  $\bar{S}^m$ , 则可进行放电, 且放电地点与充电地点不重叠。记  $\phi^d$  为放电功率, 则  $m$  类 EV 用户在  $t$  时间段到达  $l$  处接入电网的可放电时长  $d_l^{dm}$  以及放电后的电量分别为

$$d_l^{dm} = \min \left\{ d_a^{ml}, \frac{S_a^{mi}(t) - \bar{S}^m}{\phi^d} \right\} \quad (14)$$

$$S_a^{mi}(t + d_l^{dm}) = S_a^{mi}(t) - d_l^{dm} \phi^d \quad (15)$$

综上, GV 车主参与活动的负效用为  $N_{a0}^{mii}(t)$ , 而 EV 用户参与活动的负效用由活动参与负效用和充放电效用两部分组成, 如式(16)所示。

$$N_a^{mii}(t) = N_{a0}^{mii}(t) - U_a^{mii,cd}(t) \quad (16)$$

$$U_a^{mii,cd}(t) = \hat{\sigma}_a^{mi}(t) \cdot \alpha_l^{cm} \cdot R_l^{cm}(t, d_l^{cm}) + (1 - \hat{\sigma}_a^{mi}(t)) \cdot \alpha_l^{dm} \cdot R_l^{dm}(t, d_l^{dm}) \cdot \text{True}(S_a^{mi}(t) \gg \bar{S}^m) \quad (17)$$

式中:  $\hat{\sigma}_a^{mi}(t)$  为基于  $\sigma_a^{mi}(t)$  转换的是否插入充电的指示变量, 当  $\sigma_a^{mi}(t) = 0$  时,  $\hat{\sigma}_a^{mi}(t) = 0$ , 则在该活动地点处不进行充电, 若同时  $S_a^{mi}(t)$  远超过  $\bar{S}^m$ , 可插入放电; 当  $\sigma_a^{mi}(t) = 1$  时,  $\hat{\sigma}_a^{mi}(t) = 1$ , 在该活动地点处进行充电, 则在该活动地点不再进行放电; 当  $\sigma_a^{mi}(t) = 0.5$  时, 随机生成概率, 若  $\sigma_a^{mi}(t)$  高于 0.5,

则  $\hat{\sigma}_a^{ml}(t) = 0$ , 反之  $\hat{\sigma}_a^{ml}(t) = 1$ ;  $\alpha_i^{cm}$  与  $\alpha_i^{dm}$  分别表示  $m$  类 EV 用户对充电与放电价值的感知系数。

### 3.2.3 活动-出行路径效用函数

根据假设 A6,  $m$  类出行者  $k$  时段从居住地  $H$  出发选择活动-出行路径  $r$  的总负效用  $N_{hr}^m(k)$  为

$$N_{hr}^m(k) = \sum_{a \in A^h \cup A^v} \sum_t \delta_{at}^{hrk} N_a^{mli}(t) \quad (18)$$

式中:  $\delta_{at}^{hrk}$  为 0-1 指示变量,  $\delta_{at}^{hrk} = 1$  表示  $k$  时段从  $h$  出发通过  $r$  在  $t$  时段到达路段  $a$ , 否则,  $\delta_{at}^{hrk} = 0$ 。

### 3.3 动态交通流分配模型

根据假设 A6, 交通流分配均衡处, 所有具有流量的活动-出行路径上, 路径负效用在可接受范围内; 否则, 活动-出行路径上没有流量<sup>[26-27]</sup>。令  $\xi$  为可接受水平;  $f_{hr}^m(k)$  为  $k$  时段从  $h$  出发选择  $r$  的  $m$  类出行者数量;  $Q^m$  为  $m$  类出行者的数量;  $v_a^{mli}(t)$  为  $t$  时段流出路段  $a$  的  $m$  类出行者。上述均衡条件如式(19)所示, 不失一般性, 式(20)—式(25)给出了满足均衡条件的流量在点与路段上的守恒以及定义约束。

$$\begin{cases} N_{hr}^m(k) \leq (1 + \xi) \min\{N_{hr}^m(k), f_{hr}^m(k)\}, f_{hr}^m(k) > 0 \\ N_{hr}^m(k) \geq (1 + \xi) \min\{N_{hr}^m(k), f_{hr}^m(k)\}, f_{hr}^m(k) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

s.t.

$$\sum_h \sum_r \sum_k f_{hr}^m(k) = Q^m \quad (20)$$

$$u_a^{mli}(t) = \sum_h \sum_r \sum_k \delta_{at}^{hrk} f_{hr}^m(k) \quad (21)$$

$$\sum_l v_a^{mli}(t) = \sum_l u_a^{mli}(t) \quad (22)$$

$$u_a^{mli}(t) = v_a^{mli}(t + d_a^{ml}), a \in A^a \quad (23)$$

$$u_a^{mli}(t) = v_a^{mli}(t + t_a^{mli}(t)), a \in A^v \quad (24)$$

$$f_{hr}^m(k) \geq 0, u_a^{mli}(t) \geq 0, v_a^{mli}(t) \geq 0 \quad (25)$$

其中: 式(20)表示各类活动-出行路径上的流量之和为各类出行者数量; 式(21)表示各路段的流入流为经过该路段的所有活动-出行路径上的流量之和; 式(22)表示各活动地点处的流出流等于以该节点为进入节点的流入流; 式(23)与式(24)分别为满足先进先出原则的活动路段与出行路段流量守恒约束; 式(25)为路径与路段流量的定义约束。

### 3.4 求解算法

基于 route-swapping 方法对本文所构建的模型进行求解, 该方法已被广泛应用于求解中小规模的基于活动的动态用户均衡模型<sup>[25-27,38]</sup>, 具有较好的收敛性与计算效率。算法流程如图 2 所示。

由图 2 可知, 初始化 MSNs、EV 与 GV 需求量、

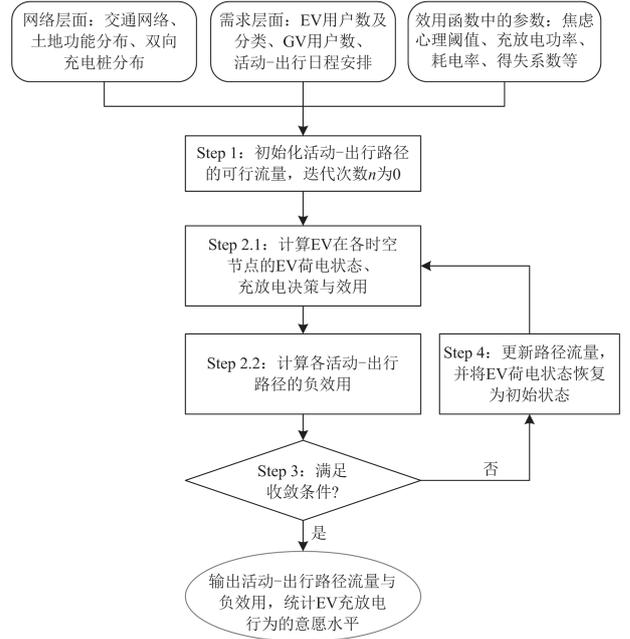


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

充放电相关参数以及各效用函数中的参数后, 将需求量平均分配在各活动-出行路径上得到初始路径流量, 进而计算各活动-出行路径的初始负效用; 然后, 各路径上的流量  $f^n = \{f_{hr}^m(k)^n\}$  根据可接受规则更新调整为  $f^{n+1} = \{f_{hr}^m(k)^{n+1}\}$ ; 若满足预先给定的收敛条件  $\max(\gamma^n(N^n - N^{*n})) \leq \xi N^{*n}$ , 其中  $\gamma^n$  表示流量标识变量  $\{\gamma_{hr}^m(k)^n\}$ , 则迭代终止, 输出活动-出行路径的流量与负效用, 并统计 EV 的充放电行为特征。  $N^n = \{N_{hr}^m(k)^n\}$ ,  $N^{*n} = \min\{N_{hr}^m(k)^n\}$ 。若  $r, k \in \Gamma^n = \{h, r, k : N_{hr}^m(k)^n \leq (1 + \xi) \min\{N_{hr}^m(k)^n\}\}$ ,  $\Gamma^n$  表示第  $n$  迭代步拥有流量的时空路径集合, 则  $f^{n+1} = f^n + \frac{\sum(f^n - f^{n+1})}{|\Gamma^n|}$ ; 否则,  $f^{n+1} = \max(0, f^n - \rho^n f^n \cdot (N^{*n} - N^n))$ ,  $\rho$  为调整参数。若  $f^n$  不为 0, 则  $\gamma_{hr}^m(k)^n$  为 1; 否则,  $\gamma_{hr}^m(k)^n$  为 0。

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

基于图 2 可知, 算例中的参数主要包括: 网络层面、需求层面与效用函数中的参数。具体设置如下:

1) 网络层面: 交通侧, 考虑节点活动属性的道路网络使用经典的 Nguyen-Dupuis 网络<sup>[26-27]</sup>进行设计, 如图 3 所示; 电网侧, 仅在活动地点安装 V2G 充电桩。

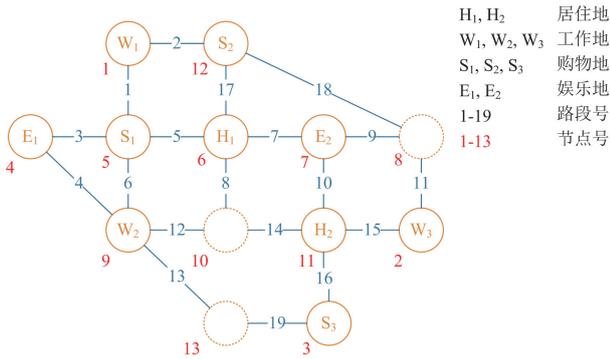


图3 基于活动的 Nguyen-Dupuis 网络

Fig. 3 Activity-based Nguyen-Dupuis network

2) 需求层面: 总出行需求量为 10 000 人。其中, 8000 人住在  $H_1$ , 2000 人住在  $H_2$ 。假设各居住地拥有 EV 的人数均占 60%, 且 6 类 EV 用户数取平均值。工作时长均为 8 h, 购物计划时长有 0.5 h、1 h、1.5 h 这 3 种选择, 娱乐计划时长有 1 h、1.5 h、2 h 这 3 种选择。由此, 枚举所有可行的活动-出行空间路径, 共 679 条。研究时间范围为 06:00—22:00, 出行者出发时间段为 06:00—10:00, 时间间隔为 1 min, 则生成 162 960 条时空活动-出行路径。EV 初始荷电状态根据用户类型进行设置, 乐观、中立与悲观的 EV 用户分别以 50%、75%、100% 的荷电状态出发。

3) 参照点的选择: 根据假设 A2, 在峰谷电价策略引导下, 充电参考点为最低、平均或最高充电价格。若仅以放电价格进行评估, 则放电参考点为最低、平均或最高放电价格。另外, 考虑到 EV 用户会基于充电价格评估放电行为是否能够带来经济收益。比如, 当充电价格较高时, 用户为获取电能付出了较多成本, 为弥补该充电成本, 仅当放电价格超过预期充电价位时, 用户会感受到“获得”, 否则体验为“损失”, 即放电决策存在第 2 种参考点, 可为最低、平均或最高充电价格。综上, EV 用户充放电价值评估参考点如表 1 所示。

表 1 充放电价值评估参考点

Table 1 Reference points for value evaluation of charging and discharging

属性	充电价格	放电价格 (类型 1)	放电价格 (类型 2)	准则
参考点	$\max\{p_i^c(t)\}$	$\min\{p_i^d(t)\}$	$\min\{p_i^c(t)\}$	乐观
	$\bar{p}^c$	$\bar{p}^d$	$\bar{p}^c$	中立
	$\min\{p_i^c(t)\}$	$\max\{p_i^d(t)\}$	$\max\{p_i^c(t)\}$	悲观

注:  $\bar{p}^c$  与  $\bar{p}^d$  分别表示平均充电价格与平均放电价格。

所研究时间段内 EV 充电价格采用电网实际定价<sup>[39]</sup>; 相应地, 各地放电价格初始设置为充电价格的 1 倍(基准), 具体充放电价格如附录 A 图 A2(a) 所示。根据表 1 即可获得各类 EV 用户充放电决策的参考点, 如附录 A 图 A2(b) 所示。

4) 效用函数中的参数: 所有出行者具有相同的时间与金钱价值, 以及拥挤感知系数, 有  $\lambda_1^m = 0.2$ ,  $\lambda_2^m = 0.1$ ,  $\rho^m = 0.6$ ,  $\tau_{a \in A_i^c} = 0.2 \text{ 元/min}$ ,  $\tau_{a \in A_i^d} = 1 \text{ 元/min}$ ,  $\phi_c = 0.09 \text{ kWh/min}^{[40]}$ ,  $\phi^c = 20 \text{ kW}$ ,  $\phi^d = 20 \text{ kW}$ ,  $S^{\max} = 60 \text{ kWh}$ ,  $\eta_a = 0.2$ ,  $\gamma_a = 1$ 。EV 用户的焦虑里程范围  $[S^m, \bar{S}^m]$  根据决策准则进行设置, 则乐观 EV 用户的焦虑里程范围为 [9, 15] kWh, 中立 EV 用户的焦虑里程范围为 [15, 30] kWh, 悲观 EV 用户的焦虑里程为 [30, 45] kWh。所有用户拥有相同的得失敏感度,  $\beta_1^{cm}$  与  $\beta_2^{cm}$  分别为 0.5 与 -1,  $\beta_1^{dm}$  与  $\beta_2^{dm}$  分别为 0.5 与 -1,  $\alpha_i^{cm}$  与  $\alpha_i^{dm}$  均为 1。

## 4.2 结果分析

### 4.2.1 动态用户均衡结果分析

在 Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU @ 1.80 GHz 的电脑运行 MATLAB, 经过 248 s 后, 算法达到均衡状态。出行者活动参与的时空分布情况如图 4 所示。由图 4 可知, 近 80% 的出行者在 08:00—10:00 出发参加工作, 并在 17:00—19:00 回家或购物, 近 10% 的出行者会在 10:00 左右进行娱乐活动。相应地, 各活动地点处 EV 用户充放电需求时空分布情况如图 5 所示。

结合附录 A 图 A2(a) 中充放电价格, 由图 5(a) 可知, EV 用户倾向于在低谷时段进行充电, 且大部分用户会在结束一天行程后回家充电; 与之相对应, 由图 5(b) 可知, 由于峰期放电价格较高, 大部分 EV 用户会在峰期到达工作地后对 EV 进行放电。该结果反映了不同地点的峰谷电价对充放电决策的时空分布具有影响。

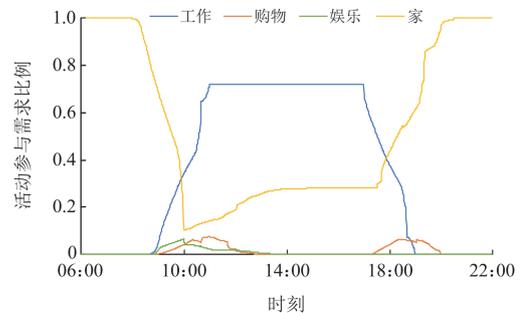
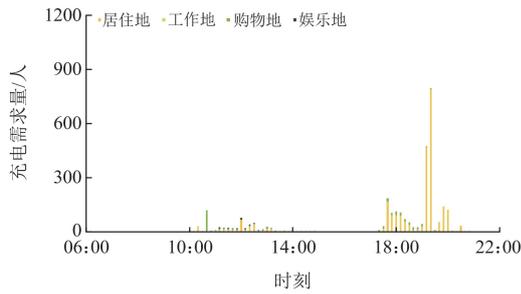
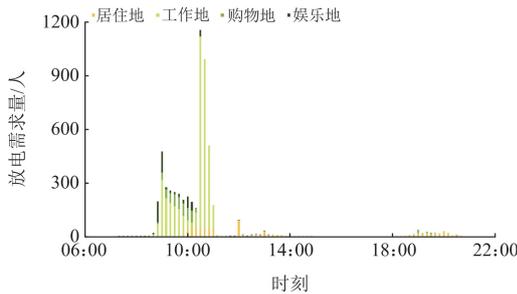


图 4 出行者活动参与的时空分布情况

Fig. 4 Spatiotemporal distribution of travelers' activity participation



(a) 各活动地点的充电需求



(b) 各活动地点的放电需求

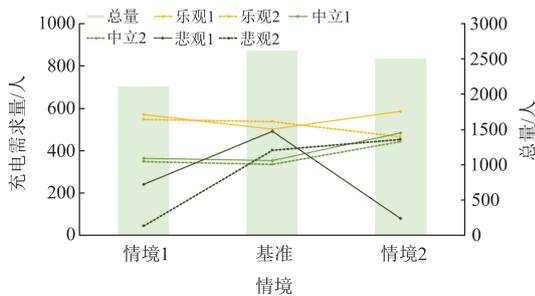
图 5 充电需求与放电需求时空分布情况

Fig. 5 Spatiotemporal distribution of charging and discharging demands

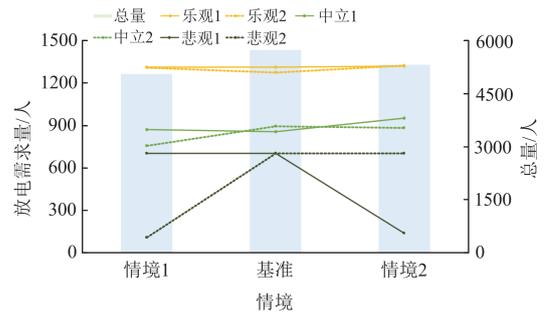
### 4.2.2 放电价格对充放电决策的影响分析

为进一步探讨充放电价格对 EV 用户充放电决策的影响规律,以初始参数设置为基准,充电价格不变,各地放电价格分别为充电价格的 50%(情境 1)、1.5 倍(情境 2),算法平均收敛时长为 232 s。图 6(a)与图 6(b)分别给出了各情境下 6 类 EV 用户充放电需求量,图例中 1 与 2 分别对应表 1 中放电参考点类型 1 与类型 2。

由图 6 可知,当充电价格不变,放电价格较高时,中立心态的 EV 用户充放电意愿均增幅明显,乐观心态的 EV 用户放电意愿波动较小;放电价格过高时,悲观心态的 1 类型 EV 用户感知损失进一步加大,“水涨船高”的心理作用,放电意愿反而受到抑制,而对于 2 类型用户,提高放电价格,电价



(a) 充电需求量



(b) 放电需求量

图 6 各情境下的充放电需求量

Fig. 6 Charging and discharging demand in each scenario

差增大,放电意愿增强,充电需求也相应增加。结果表明,当充电价格一定,放电价格低于充电价格时,放电意愿减弱,充电需求相应降低;放电价格高于充电价格时,放电意愿与充电需求增加并不显著,主要源于悲观心态的用户对放电价格的波动较为敏感。

### 4.2.3 参照依赖心理对充放电需求的影响

假设所有用户均依据绝对效用对充放电价值进行衡量,即式(17)中,充放电的参照点均统一设定为 0。在活动-出行路径负效用的考量中,该部分的权重系数为金钱价值系数 0.1,经过 116 s 的算法运行,模型达到收敛状态。参照依赖心理对充放电需求的影响结果如图 7 所示。各活动地点不考虑参照依赖心理的充放电需求时空分布如附录 A 图 A3 所示。由图可知,在无参照点的均衡状态下,充放电需求量均高于考虑参照依赖心理的情境,且前者在峰期的分布更为平稳。基于 4.2.2 节所设置的放电价格,情境 1、基准情境与情境 2 下充电需求量分别为 3508、3526 与 3596 人;放电需求量分别为 7073、7065 与 7082 人。结果表明,当充电价格不变,仅放电价格增加时,充放电需求量变化趋势并不显著,且难以深入探究该结果产生的原因。

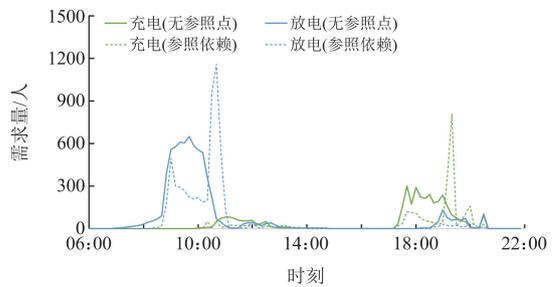


图 7 参照依赖心理对充放电需求的影响

Fig. 7 Influence of reference-dependent psychology on charging and discharging demand

综上所述, 当不考虑 EV 用户参照依赖决策心理时, 本文所构建的理论模型也能够刻画充放电行为与充放电峰谷价格间的依赖关系, 但难以阐释 EV 用户异质决策准则下充放电行为的复杂多样性。

## 5 结论

厘清充放电价格对 EV 充放电行为的作用机制, 是制定引导 EV 用户有序参与充放电策略的重要前提。但是, 鉴于 EV 用户的复杂决策心理与交通系统的时空多样性, EV 充放电行为的时空分布规律较难捕捉。本文回归活动参与需求这一本质, 以参照依赖行为决策理论为基础, 建立了融合 EV 用户充放电决策心理的交通流分配模型, 探讨了充放电价格及用户决策心理对充放电行为的影响规律。算例分析结果表明, 充放电行为对价格依赖较强且具有显著的时空分布特征。保持充电价格不变, 降低放电价格会抑制放电行为; 但提高放电价格时, 却未能对放电行为产生明显的激励效果, 并且不同用户的行为特征差异明显。本文研究将为 V2G 充电桩的合理布局、充放电定价机制的完善、微电网的

建设与部署等提供参考。

但是, 上述工作还存在以下几点不足: 1) 所构建的模型中未考虑各活动地点处 V2G 充电桩的规模与容量约束。2) 假设电网统一设置充放电价格, 但是在实际市场运营中, 存在多个 EV 聚合商, 多聚合商竞争机制下的充放电价格会对 EV 用户充放电行为产生影响。3) 大规模 EV 入网互动将对电网潮流产生影响<sup>[41]</sup>, 通过调整电价引导 EV 有序充放电的决策机制也是未来需要探讨的问题之一。4) 本文采用线性函数表征充电与放电的价值衡量以及充放电总效用, 在具体应用过程中, 可选择更能准确反映实际情况的其他形式的函数。5) 算例中基于理论假设对充放电参考点进行设置, 特别是放电决策存在两种可能的参考点, 需结合具体的市场背景特征(如经济发展水平、文化等)对参考点进行评估。6) 本文采用全枚举方法生成算例网络中所有可行的活动-出行路径, 在实际大规模网络应用过程中, 需结合其他更高效的算法<sup>[42]</sup>对可行活动-出行路径的生成与更新进行优化。

## 附录 A

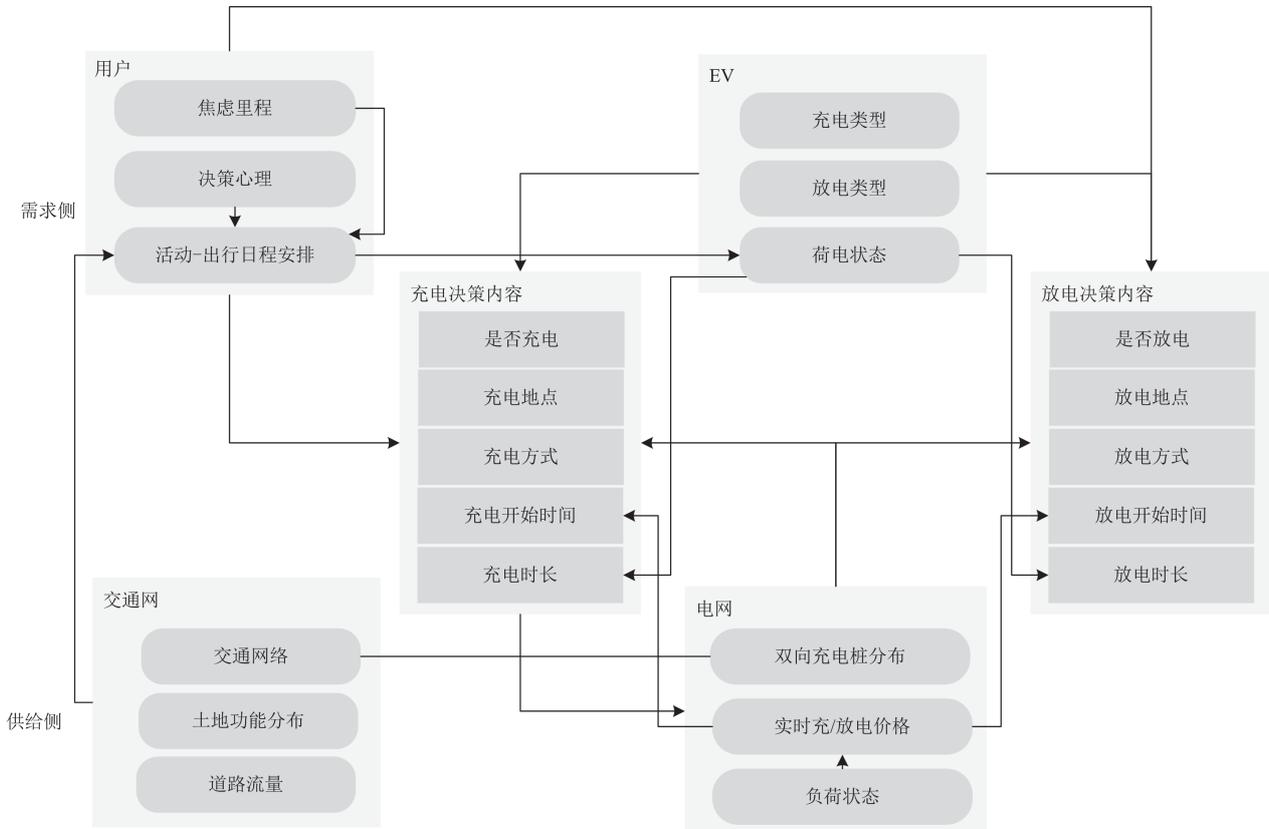
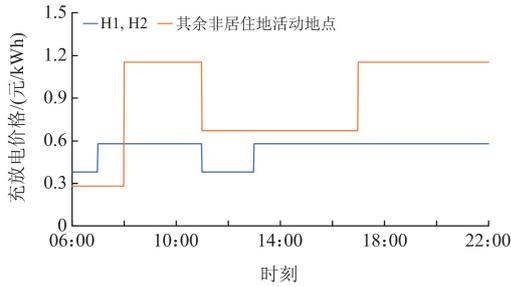
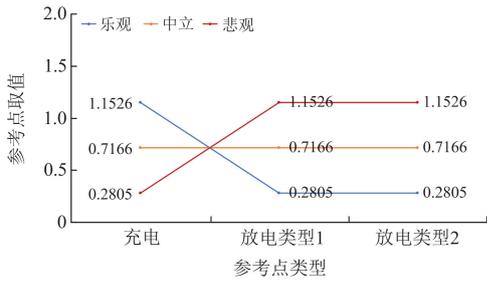


图 A1 交通-电力耦合网络中 EV 用户充放电决策过程

Fig. A1 Process of EV users' charging and discharging decisions in the coupled transportation-power network



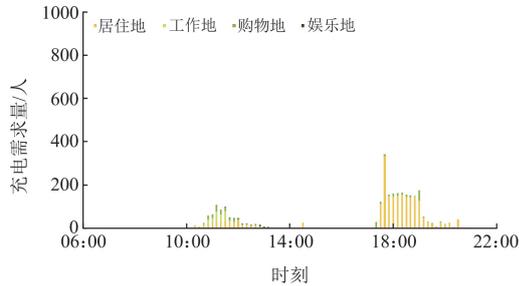
(a) 各活动地点处充放电价格



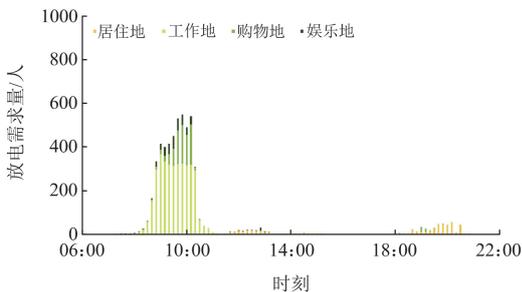
(b) 各类EV用户参考点取值

图 A2 充放电价格设置与各类 EV 用户参考点取值

Fig. A2 Setting of charging/discharging prices and reference points for various EV users



(a) 充电需求



(b) 放电需求

图 A3 不考虑参照依赖心理的充电需求与放电需求时空分布情况

Fig. A3 Spatio-temporal distribution of charging and discharging demands without the consideration of reference-dependent psychology

### 参考文献

[1] 《新型电力系统发展蓝皮书》编写组. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.

[2] 侯慧, 何梓姻, 侯婷婷, 等. 大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 177-187.

HOU Hui, HE Ziyin, HOU Tingting, et al. A review of demand response strategies and potential evaluation for large-scale vehicle to grid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 177-187.

[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] 于霄宇, 纪正森, 嵇灵, 等. 双碳目标下我国电动汽车碳减排贡献潜力分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 25-31, 39.

YU Xiaoyu, JI Zhengsen, JI Ling, et al. Analysis on carbon emission reduction potential of electric vehicles in China under goal of carbon neutrality and carbon peaking[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 25-31, 39.

[5] 国家发展改革委, 国家能源局, 国家数据局. 关于印发《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》的通知[EB/OL]. [2024-10-06]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content\\_6966863.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966863.htm)

National Development and Reform Commission, National Energy Administration, National Data Bureau. Notice on issuing the action plan for accelerating the construction of a new electricity system (2024-2027) [EB/OL]. [2024-10-06]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content\\_6966863.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966863.htm)

[6] CAI H, CHEN Q, GUAN Z, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 93-107.

[7] 马力, 彭伟伦, 范晋衡, 等. 基于改进纵横交叉算法的车网互动模式下电动汽车充放电优化调度策略研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(2): 133-142.

MA Li, PENG Weilun, FAN Jinheng, et al. Research on electric vehicle charging and discharging optimization scheduling strategy under V2G mode based on improved crisscross algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(2): 133-142.

[8] 邓衍辉, 李剑, 卢国强, 等. 考虑分区动态电价机制引导的电动汽车充电优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 33-44.

- DENG Yanhui, LI Jian, LU Guoqiang, et al. Charging optimization strategy of electric vehicles guided by the dynamic tariff mechanism of a subregion[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(7): 33-44.
- [9] 刘东奇, 张曦, 钱奕衡. 电动汽车集群充放电演化博弈协同策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(16): 84-93.  
LIU Dongqi, ZHANG Xi, QIAN Yiheng. Evolutionary game coordination strategy of electric vehicle cluster charging and discharging[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16): 84-93.
- [10] 房超运, 杨昆, 柴瑞环. 分时电价下含电动汽车的微电网群双层多目标优化调度[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(1): 124-133.  
FANG Chaoyun, YANG Kun, CHAI Ruihuan. Two-layer multi-objective optimal dispatching of microgrid group with electric vehicles under time-of-use electricity prices[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(1): 124-133.
- [11] 刘晋源, 吕林, 高红均, 等. 计及分布式电源和电动汽车特性的主动配电网规划[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(12): 41-48.  
LIU Jinyuan, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Planning of active distribution network considering characteristics of distributed generator and electric vehicle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(12): 41-48.
- [12] 郑远硕, 李峰, 董九玲, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充放电时空灵活性优化调度策略[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(12): 88-97.  
ZHENG Yuanshuo, LI Feng, DONG Jiuling, et al. Optimal dispatch strategy of spatio-temporal flexibility for electric vehicle charging and discharging in vehicle-road-grid mode[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 88-97.
- [13] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 价格与激励联合需求响应下电动汽车长时间尺度充放电调度[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(15): 46-55.  
HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Long-time scale charging and discharging scheduling of electric vehicles under joint price and incentive demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(15): 46-55.
- [14] LEIPPI A, FLESCHUTZ M, DAVIS K, et al. Optimizing electric vehicle fleet integration in industrial demand response: maximizing vehicle-to-grid benefits while compensating vehicle owners for battery degradation[J]. *Applied Energy*, 2024, 374.
- [15] GUO S, LI P, MA K, et al. Robust energy management for industrial microgrid considering charging and discharging pressure of electric vehicles[J]. *Applied Energy*, 2022, 325.
- [16] 周斌, 张卫国, 崔文佳, 等. 考虑预警负荷的电动汽车充放电优化策略[J]. *电力建设*, 2020, 41(4): 22-29.  
ZHOU Bin, ZHANG Weiguo, CUI Wenjia, et al. Optimization method for electric vehicle charging/discharging considering forewarning load[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(4): 22-29.
- [17] 李怡然, 张姝, 肖先勇, 等. V2G 模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(3): 129-135, 143.  
LI Yiran, ZHANG Shu, XIAO Xianyong, et al. Charging and discharging scheduling strategy of EVs considering demands of supply side and demand side under V2G mode[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(3): 129-135, 143.
- [18] ZHANG Y Y, LUO X, QIU Y S, et al. Understanding the generation mechanism of BEV drivers' charging demand: an exploration of the relationship between charging choice and complexity of trip chaining patterns[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2022, 158: 110-126.
- [19] 王敏, 吕林, 向月. 计及 V2G 价格激励的电动汽车削峰协同调度策略[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(4): 27-33, 85.  
WANG Min, LÜ Lin, XIANG Yue. Coordinated scheduling strategy of electric vehicles for peak shaving considering V2G price incentive[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(4): 27-33, 85.
- [20] 朱永胜, 孙贤, 谢晓峰, 等. 多态场景下考虑出行链重构的电动汽车多目标协同优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(9): 129-141.  
ZHU Yongsheng, SUN Xian, XIE Xiaofeng, et al. Multi-objective collaborative optimal dispatch for electric vehicles in multistate scenarios considering trip chain reconstruction[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(9): 129-141.
- [21] LIU Y, TAYARANI M, GAO H. An activity-based travel and charging behavior model for simulating battery electric vehicle charging demand[J]. *Energy*, 2022, 258.
- [22] 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.
- [23] 吴赋章, 杨军, 林洋佳, 等. 考虑用户有限理性的电动汽车时空行为特性[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(7): 1563-1574.  
WU Fuzhang, YANG Jun, LIN Yangjia, et al. Research on spatiotemporal behavior of electric vehicles considering the users' bounded rationality[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(7): 1563-1574.
- [24] WANG D, LIAO F, GAO Z, et al. Analysis of activity duration-related charging behavioral responses of electric vehicle travelers to charging services[J]. *Transport Policy*,

- 2022, 123: 73-81.
- [25] LIU P, LIAO F, HUANG H, et al. Dynamic activity-travel assignment in multi-state supernetworks[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 81: 656-671.
- [26] 刘超, 李青, 马明明, 等. 基于 DATA 模型的电动汽车充电需求时空演化规律分析[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(12): 86-94.  
LIU Chao, LI Qing, MA Mingming, et al. Analysis on spatial-temporal evolution law of electric vehicle charging demand based on dynamic activity-travel assignment model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(12): 86-94.
- [27] LI Q, LIAO F X. Incorporating vehicle self-relocations and traveler activity chains in a bi-level model of optimal deployment of shared autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 140: 151-175.
- [28] THALER R H. Mental accounting matters[J]. *Journal of Behavioral Decision Making*, 1999, 12(3): 183-206.
- [29] ARENTZE T, TIMMERMANS H J P. Multistate supernetwork approach to modelling multi-activity, multimodal trip chains[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2004, 18(7): 631-651.
- [30] LIAO F, ARENTZE T A, TIMMERMANS H J P. Incorporating space-time constraints and activity-travel time profiles in a multi-state supernetwork approach to individual activity-travel scheduling[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2013, 55: 41-58.
- [31] 赫伯特·A·西蒙. 管理行为[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [32] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk[J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1979: 263-291.
- [33] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [34] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Loss aversion in riskless choice: a reference-dependent model[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1991: 1039-1061.
- [35] 周晶. 运筹学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [36] ZHANG R, YAO E. Electric vehicles' energy consumption estimation with real driving condition data[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 41: 177-187.
- [37] FIORI C, AHN K, RAKHA H A. Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation[J]. *Applied Energy*, 2016, 168: 257-268.
- [38] LI Q, LIAO F, TIMMERMANS H J P, et al. Incorporating free-floating car-sharing into an activity-based dynamic user equilibrium model: a demand-side model[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 107: 102-123.
- [39] 江苏省发展和改革委员会. 关于进一步明确我省电动汽车充换电设施用电价格有关事项的通知[EB/OL]. [2024-10-06]. [https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2023/9/28/art\\_84097\\_11085479.html](https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2023/9/28/art_84097_11085479.html)  
Jiangsu Development & Reform Commission. Notice on further clarifying matters related to electricity price for electric vehicle charging/ battery swap infrastructure in our province[EB/OL]. [2024-10-06]. [https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2023/9/28/art\\_84097\\_11085479.html](https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2023/9/28/art_84097_11085479.html)
- [40] 曲大鹏, 范晋衡, 刘琦颖, 等. 考虑配电网综合运行风险的充电桩接纳能力评估与优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(3): 131-139.  
QU Dapeng, FAN Jinheng, LIU Qiying, et al. Assessment and optimization of charging pile acceptance capacity considering the comprehensive operational risk of a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(3): 131-139.
- [41] MAHDI B, MEHRDAD A, GEVORK B G, MARYAM F. Short-term interaction between electric vehicles and microgrid in decentralized vehicle-to-grid control methods[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(1): 42-52.
- [42] WANG D, LIAO F, Gao Z, et al. Tolerance-based column generation for boundedly rational dynamic activity-travel assignment in large-scale networks[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 141.

收稿日期: 2024-10-14; 修回日期: 2025-03-26

作者简介:

李青(1988—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为考虑无人驾驶汽车的交通系统建模与优化、交通与电力耦合系统的建模与优化等; E-mail: liqing321@nuist.edu.cn

刘雨婷(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为交通与电力耦合系统的建模与优化等; E-mail: liuyuting@nuist.edu.cn

刘超(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事集控电力系统开发与维护、智能电网调度等方面的工作。E-mail: liuchao@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 周金梅)