

电动汽车充电负荷时空分布 预测研究综述

张夏韦^{1,2}, 梁军^{1,2,3}, 王要强^{1,2}, 韩婧^{1,2}

(1. 郑州大学电气与信息工程学院, 郑州市 450001; 2. 河南省电力电子与电能系统工程技术研究中心, 郑州市 450001; 3. 卡迪夫大学工程学院, 英国卡迪夫 CF24 3AA)

摘要: 随着碳达峰、碳中和目标的提出, 电动汽车以其绿色、低碳、节能环保优势逐渐普及。电动汽车兼具负荷与储能双重特性, 其充放电行为具有时间和空间的随机性和波动性, 精准的电动汽车充电负荷时空分布预测是研究电动汽车入网影响、电网规划运行、与电网互动的基础。首先, 分析影响电动汽车充电负荷时空分布的主要因素; 然后, 对充电负荷建模、时空分布预测方法进行系统阐述; 随后, 考虑电动汽车可以作为移动储能装置参与电网互动, 评估其放电潜力并综述电动汽车入网(vehicle to grid, V2G)技术研究现状; 最后, 总结现有研究方法面临的挑战并进行展望。

关键词: 电动汽车; 负荷预测; 影响因素; 时空分布; V2G

Overview of Research on Spatiotemporal Distribution Prediction of Electric Vehicle Charging

ZHANG Xiawei^{1,2}, LIANG Jun^{1,2,3}, WANG Yaoqiang^{1,2}, HAN Jing^{1,2}

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Engineering Research Center of Power Electronics and Energy Systems, Zhengzhou 450001, China;

3. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK)

ABSTRACT: With national targets for carbon peaking and carbon neutrality, electric vehicles (EVs) are gaining popularity owing to their advantages of being green, low-carbon, energy-saving, and environmentally friendly. EVs have both load and energy storage characteristics, and their charge-discharge behavior is random and fluctuates in time and space. Accurate prediction of the spatiotemporal distribution of EV charging and discharging loads is the basis for studying the influence of EV entering the grid, power grid planning and operation, and interaction with the power grid. The main factors influencing the prediction of the spatiotemporal distribution of the EV charging load are analyzed. The modeling of the charging load and prediction method for the spatial and temporal distributions are systematically described. Considering that electric vehicles can be used as mobile energy-storage devices to participate in grid interactions, the discharge potential is evaluated, and the research scenario of V2G technology is reviewed. Finally, the challenges faced by existing research methods are summarized and discussed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507155) and Henan Province Key R&D and Promotion Special Project (No. 222102520001).

KEYWORDS: electric vehicle; load prediction; affecting factors; spatiotemporal distribution; V2G

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2023)12-0161-13

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.12.014

0 引言

随着全球气候变暖、环境污染加剧和传统化石能源逐渐枯竭, 各国都在积极推广发展可再生能源, 新

能源汽车作为一种环境友好型交通工具, 具有低成本、无污染、零排放等优点^[1-2], 在环保、消纳新能源方面优势明显, 与传统燃油汽车相比减少对石油能源的依赖, 是有效应对能源危机和气候变化的良好途径, 近年来受到各国广泛关注^[3]。

我国是当前全球最大的新能源汽车市场^[4], 2021年新能源汽车呈现爆发式规模化增长, 销量超350万

基金项目: 国家自然科学基金项目(51507155); 河南省重点研发与推广专项项目(222102520001)

<http://www.cepc.com.cn>

辆,纯电动汽车是新能源汽车的主力,预计到 2035 年,公共领域用车将全面实现电动化^[5]。大规模电动汽车充电使负荷快速增长给电网安全稳定运行带来不可忽视的影响,如加剧电网负荷峰谷差、产生谐波污染、降低电能质量、增加网络损耗等^[6-7]。由于电动汽车充电行为具有时间和空间上的随机性和波动性,增加了电网运行控制的难度。精确的电动汽车充电负荷时空分布预测是研究电动汽车入网影响、电网规划运行、与电网互动及与能源、交通、互联网领域融合发展的基础^[8-9]。随着电动汽车规模的增长和电池技术的提升,V2G 技术^[10]逐步发展起来,利用电动汽车在停放状态时作为一个分布式储能装置参与电网充放电^[11],可以实现平抑可再生能源波动、削峰填谷、为电网提供调频等辅助服务^[12-13]。

近年来,许多研究人员针对电动汽车充电负荷时空分布预测问题展开广泛的研究并取得丰硕成果。本文从影响电动汽车充电负荷预测因素入手,对充电负荷时空分布预测方法和 V2G 技术研究的现状进行分析,最后总结现有研究方法的不足,并对未来发展方向进行展望,为后续研究提供理论基础。

1 影响充电负荷分布的因素

影响电动汽车充电负荷分布的因素复杂多样,设置不同影响因素权重将改变用户充电需求分布规律^[14]。因此,需要分析各因素之间的影响机理。本文主要根据外界环境和个人行为将影响负荷分布的因素划分为客观因素和主观因素两个方面,客观因素主要考虑电动汽车规模数量、车辆电池特性、出行环境等外部条件对负荷分布的影响;而主观因素主要考

虑用户行为、心理等个人因素对充电负荷时空分布的影响。各因素之间的关联如图 1 所示。

1.1 客观因素

1) 电动汽车规模。

2018 年调查研究发现,交通部门碳排放量占全球碳排放总量的四分之一以上^[15],发展电动汽车是实现道路运输脱碳的关键技术,未来电动汽车数量将规模化增长^[16]。研究人员主要考虑整体负荷容量及渗透率等因素,通过研究不同电动汽车渗透率对电动汽车充电需求的影响,发现渗透率越高充电需求越大,对应的日峰负荷也随之增加^[17]。

大规模电动汽车持续增长的同时充换电基础设施建设也得到了快速发展,而充电站位置和数量会影响用户的排队时间,改变充电负荷的时空分布。在考虑电动汽车充电行为基础上基于排队论^[18]建立用户充电排队模型,提高充电设施利用率;考虑到用户充电成本和充电站运行成本,建立以成本最小为目标函数的电动汽车充电站规划模型,可以为后续充电站选址、定容提供依据^[19]。

2) 动力电池特性。

电动汽车发展亟需解决的两个问题为提升续航里程和减小百公里耗电量。动力电池技术是影响电动汽车规模化发展的关键因素^[20],文献[21]总结了四类典型电动汽车动力电池(如镍氢电池、铅酸电池、三元锂、磷酸铁锂电池)的优缺点和应用的领域。电池特性、容量对充电负荷有着不同的影响,电池的荷电状态(state of charge, SOC)是影响用户行为决策的重要因素,充电功率、充电时长与起始荷电状态密切相关,进而影响充电负荷的时间分布^[22]。

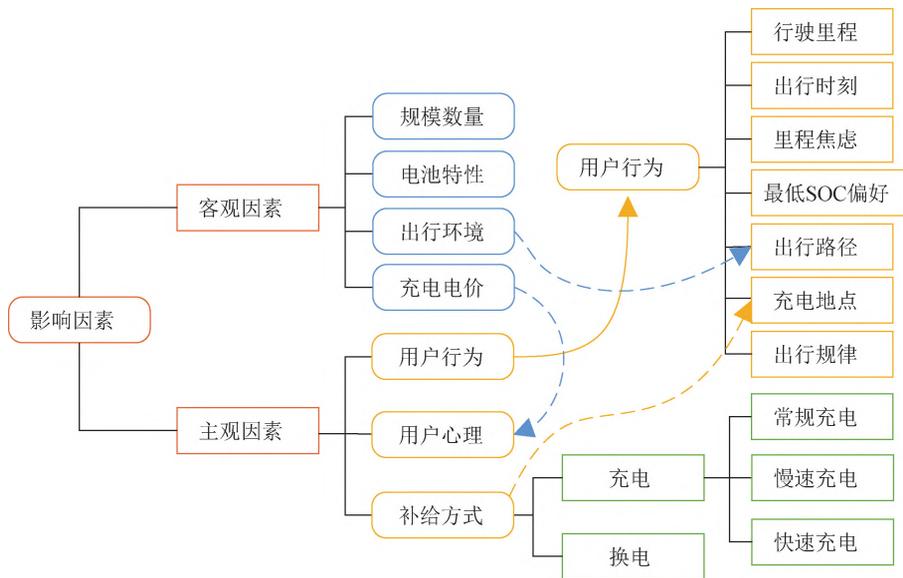


图 1 影响电动汽车充电负荷分布的因素
Fig. 1 Factors affecting the distribution of electric vehicle charging load

3) 出行环境。

温度和道路交通状况等环境因素对电动汽车的单位里程耗电量和出行速度有很大影响^[23-24]。温度的高低影响空调的使用与否,不同道路状况出行速度不同,影响用户出行时长和出行路径的选择,从而改变充电负荷时空分布。考虑温度、道路拥堵情况建立电动汽车出行模型和动态交通路况信息模型^[25],计算充电负荷时空分布,为后续电动汽车参与有序充放电提供参考和依据。

4) 充电电价。

通过分时电价、实时电价等措施引导用户在用电高峰时减少充电需求^[26],在用电低谷时降低电价增加充电需求,实现削峰填谷、平抑负荷波动的目标^[27]。用户可根据电价变化自主选择充电模式,促使其参与电网有序充电,减少无序充电对电网安全运行的影响。

1.2 主观因素

1) 行为特性。

用户行为特性是目前研究重点考虑的因素之一,用户的行驶习惯、出行路径、充电时刻等因素对充电负荷时空分布有着关键影响。

用户的充电行为存在时间和空间的随机性,其出行里程与充电负荷需求直接相关^[28]。现有研究车辆出行规律的重要数据来源主要为美国公布的居民出行调查数据(National Household Travel Survey, NHTS),其中 NHTS2017 还包括电动汽车调研数据^[29],用户出行里程研究常根据出行规律采用概率密度函数拟合。文献[30]基于 NHTS2017 数据集建立出行时刻和出行目的联合概率分布,得到居民出行概率模型,实现对用户行程的随机模拟。电池初始充电状态决定了电动汽车的单车最大行驶距离,电动汽车用户的里程焦虑^[31]和充电方式的选择决定了电动汽车单次行驶的最小剩余电池容量和下一次最大行驶距离,里程焦虑决定了用户最低 SOC 偏好值,影响用户充电决策。

用户的出行路径选择与充电地点对负荷的空间分布有很大影响,出行路径选择与道路交通密切相关,研究该因素影响时应与交通路网联系起来^[32];充电地点与用户出行目的地和里程焦虑相关,用户是否选择在目的地进行充电受下一次出行所需电量影响,通常会选择在以下两种情况下充电:1) SOC 实际值低于用户最低偏好值;2) SOC 实际值高于用户最低偏好值,但是剩余电量低于下次行程所需电量^[33]。

2) 充电方式选择。

目前纯电动汽车的电能补给方式主要有充电和

换电两种^[34],充电方式又分为常规充电、快速充电和慢速充电。用户对充电方式的选择存在随机性,不同充电方式对电网充电功率和充电持续时间有直接影响。用户初始 SOC 和目的地停车时长影响用户充电方式的选择,进而影响负荷时空分布。常规充电时长一般为 5~8 h,居民区用户通常选择此充电方式;快速充电采用大型充电机进行充电,时长为 20 min~2 h,这种方式虽然充电时间缩短,但对电池寿命有较大影响,对充电设备要求也更高;换电方式通过更换电池组快速补充电能,时长在 5~10 min^[35],通常适用于公交车、出租车。采用更换电池组方法进行电动汽车能量补给,可以降低电动汽车充电时空分布不确定性对电网功率造成的影响,也可以接受电池入网(battery to grid, B2G)参与互动^[36]。

3) 用户心理、响应行为。

主要考虑用户博弈心理、后悔理论及有限理性对充电需求的影响^[37]。博弈心理是指用户在电价激励等措施下与其他用户和充电站之间的消费心理博弈,对用户充放电行为有间接影响^[14];后悔理论是一种“不完全理性”理论,电动汽车用户会选择后悔值最小的出行方案,更加符合实际出行情况^[37]。有限理性是指用户在选择出行方案时受选择偏好、里程焦虑等影响,追求“满意”标准,而不是最优标准^[38]。考虑到用户心理因素的影响,可以建立用户感知满意的、后悔值最小的出行模型,分析不同用户心理下电动汽车充电需求。

电动汽车充电负荷分布受上述各种复杂随机的因素影响,设置不同的权重预测结果也不同,准确的影响因素辨识可提高预测准确性;另外,上述因素通常用于一般情况下负荷预测,而突变天气、极端天气^[39]等异常情况下对充电负荷变化考虑较少,后续可针对极端天气条件下电动汽车充电负荷预测展开研究。

2 电动汽车充电负荷时空分布预测方法

电动汽车充电负荷预测研究大致分为两个阶段:一是利用传统燃油汽车数据或 GPS 对车辆出行的调查数据,考虑影响用户充电行为的主要因素,对电动汽车无序充电负荷进行预测^[40],主要因素有电池类型、充电特性、运行规律等,建立充电负荷计算模型,根据所得负荷曲线判断其对电网的影响;2012 年 ASHTARI 等人使用安装在 76 辆代表性车辆上的 GPS 设备记录一年内每秒车辆使用数据^[41],基于车辆使用习惯预测插电式电动汽车(plug-in electric vehicles, PEV)充电行为,预测未来插电式

电动汽车的电力负荷曲线和电气范围可靠性。二是针对大规模电动汽车无序接入电网带来的影响,引导用户参与有序充放电响应^[42],发挥电动汽车作为分布式储能单元的优势,评估其带来的影响和经济效益。

国内外学者针对电动汽车充电负荷预测进行大量研究,按照预测期限来分,有长期、中期、短期和超短期负荷预测^[43],电动汽车充电负荷预测一般属于短期负荷预测,主要预测未来6~48 h 充电负荷;在研究方法上,可归结为机理模型驱动方法、基于人工智能的数据驱动方法及机理数据融合驱动预测方法三类,机理模型驱动法主要包括行为分析和模拟分析方法^[44]。

1) 行为分析是对用户或车辆在一定区域和时间段内的出行规律进行分析,构建出行链、马尔可夫链、交通出行矩阵等反映出行规律的模型^[45-47];模拟分析是指在了解用户出行规律的基础上进行仿真,将仿真结果与实际情况进行比较。采用蒙特卡洛模拟、数理统计分析、排队论、后悔理论等方法建立用户充电需求概率模型^[48-49],通过用户行为和心理学分析进行电动汽车充放电负荷预测^[50]。

2) 基于人工智能的数据驱动预测方法应用机器学习、深度学习等人工智能方法对电动汽车历史充电负荷数据进行分析预测^[51-52]。

3) 机理数据融合驱动预测方法将机理驱动和数据驱动两种方法有效结合^[44],进行电动汽车充放电负荷预测研究。

2.1 机理模型驱动方法

用户充电行为在时间和空间上的规律性使得电动汽车充电负荷具有时间周期性和空间相关性,前期研究人员主要关注电动汽车充电负荷时间分布特性,主要根据不同类型电动汽车不同时刻充电行为建立概率模型。蒙特卡洛法(Monte Carlo method, MC)是常用的一种基于概率统计理论利用随机数解决计算问题的方法^[53],基于蒙特卡洛的模拟用来预测电动汽车不受控制的能源消耗,还考虑了许多不确定性参数,例如,充电开始时间、充电持续时间、每小时更换电池的数量以及行驶距离^[54]。虽然蒙特卡洛技术的模拟非常精确,但电动汽车所有者的行为影响模型的灵活性和准确性,并且没有充分考虑交通系统的影响,不能准确反映日常出行的随机性。随着研究的深入,充电负荷空间分布特性逐渐被重视起来,时空耦合特性研究成为当下研究热点,以下从时间分布特性、空间分布特性和时空耦合分布特性层面展开分析。

2.1.1 时间分布特性

以往多数研究将电动汽车充电负荷预测视为时间序列预测问题,通过对过去每日负荷段的加权平均进行预测,赋予片段的权重取决于与预测片段的接近程度^[55],捕获待预测负荷段的定性定量特征;考虑待预测日充电负荷与其历史日充电负荷间的相关性,提出基于多相关日场景生成的EV充电负荷区间预测方法^[56];不同于短期单一时间尺度负荷预测,文献^[57]提出考虑季节特征的多时间尺度负荷预测模型,基于Bass修正模型预测未来数年EV保有量,实现短期至中长期多时间尺度EV负荷预测。

2.1.2 空间分布特性

电动汽车充电负荷空间分布预测是研究的难点,空间分布特征从点需求和流量需求两方面预测^[58],点需求按照区域划分,将负荷归结到电力网络节点上,但未考虑用户行驶特性,流量需求预测模型考虑用户行驶和交通路网信息,对EV充电需求预测更加精准。

不同类别的电动汽车行驶特性和充电行为有较大差异,考虑到居民日常出行需求,可将电动汽车分为公交车、私家车、出租车、公务车等^[59]。研究人员多以私家车为研究对象探究其用户出行规律及充电负荷预测,不同类型的电动汽车出行模型如图2所示,公交车在起讫点之间往返,S为始发站,E为终点站;公务车在各工作地 W_1 、 W_2 之间往返;私家车出行目的可分为家(home, H)、工作(work, W)、购物用餐(shopping & eating, SE)、休闲娱乐(recreation & entertainment, RE)和其他区(other things, OT); N_n 为出租车出行随机网络节点,节点间的空间转移为电

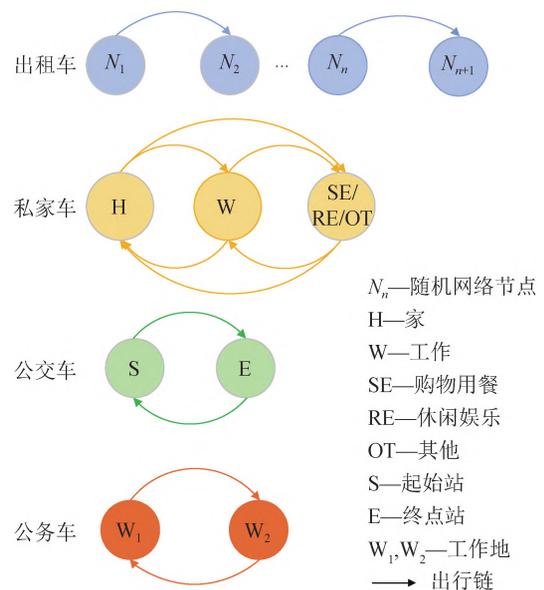


图2 不同类型电动汽车出行模型

Fig. 2 Different types of electric vehicle travel models

电动汽车行驶过程^[60]。

随着起讫点 (origin-destination, OD) 方法的引入,结合交通运输网络建立出行需求和时空模型,考虑动态交通信息常采用 OD 矩阵分析法^[61]、实时 Dijkstra 动态路径搜索算法^[62]、Floyd 算法^[63] 规划电动汽车行驶路径,模拟其动态行驶过程和充电行为,结合出行链预测电动汽车充电负荷概率密度函数;文献[61-62]基于用户出行链,考虑交通路网的约束,解决现有评估参考因素较少的问题。

研究人员常利用图论^[64]对道路网络进行建模,用 $G=(V,E)$ 表示交通网络结构,由顶点集 V 和联通集 E 组成,分别表示道路节点和所有道路, $D(G)$ 是描述各路段长度和连接关系的 $N \times N$ (N 为节点数) 矩阵, $N_{\text{Ini}} = [n_1^I, n_2^I, n_3^I, \dots, n_{NR}^I]$, $N_{\text{End}} = [n_1^E, n_2^E, n_3^E, \dots, n_{NR}^E]$ 分别为路段的初始节点和末端节点数量向量, $n_i^I, n_i^E \in \{1, 2, 3, \dots, N_{\text{Node}}\}$, 其中 n_i^I, n_i^E 分别为路段 i 的初始节点数和结束节点数。如图 3 所示,多路段的交点组成顶点集 $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, 各路段组成联通集 $E = \{d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{24}, d_{25}, d_{34}, d_{45}\}$ 。

$$D(G) = \begin{cases} d_i^N, n_i^I \neq n_i^E \& n_i^I \in N_{\text{Ini}} \& n_i^E \in N_{\text{End}} \\ 0, n_i^I = n_i^E \\ \text{inf}, n_i^I \neq n_i^E \& n_i^I \in N_{\text{Ini}} \& n_i^E \notin N_{\text{End}} \\ \text{inf}, n_i^I \neq n_i^E \& n_i^I \notin N_{\text{Ini}} \& n_i^E \in N_{\text{End}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_i^N 是路段 i 的距离;inf 表示路段间无连接。

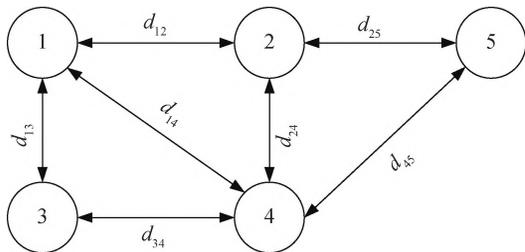


图 3 道路网络拓扑图

Fig. 3 Road network topology

$$D(G) = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} & d_{14} & \text{inf} \\ d_{21} & 0 & \text{inf} & d_{24} & d_{25} \\ d_{31} & \text{inf} & 0 & d_{34} & \text{inf} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & 0 & d_{45} \\ \text{inf} & d_{52} & \text{inf} & d_{54} & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

文献[65-66]用图论描述复杂的交通网络,并建立速度-流量模型模拟车辆行驶过程速度的变化,得到道路交通模型,考虑速度和温度对电池电量的影响建立单位里程耗电量模型,结合交通状况和电动汽车出行特性基于 Dijkstra 算法得到出行路径^[66],并计算电动汽车充电负荷时空分布。

2.1.3 时空分布特性

若同时考虑负荷时间维度信息和空间维度信息将取得更好的预测效果。为进一步挖掘电网-交通网强耦合态势下电动汽车时空分布特征,文献[67]提出了基于图 WaveNet 电动汽车充电负荷预测框架,将充电负荷时间维度信息和空间维度信息同时输入到自适应图 WaveNet 进行预测,挖掘潜在的时空分布特征提高预测精度。为更好分析大规模电动汽车接入电网的充电需求,需综合考虑电动汽车(车)、交通路网(路)、配电网(网)的耦合特性及对充电负荷时空分布特征的影响,文献[68]提出了“车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测方法,体现了电动汽车充电负荷在同一时间尺度下的空间属性和能量属性。空间属性包括实时位置、行驶速度等,对应电动汽车充电负荷“何地”,能量属性包括实时电量、单位里程消耗电量等,对应“何时”,二者共同决定 EV 充电时空分布特征。文献[69]在“车-路-网”模式基础上考虑多个充电站对用户出行路径选择的影响,建立电动汽车充电站选择模型,实现“车-路-站-网”融合的充电负荷时空分布预测。

通过交通系统模型和出行链模拟具有时空特性的电动汽车充电负荷,描述电动汽车在耦合运输和分配网络中的时空特性^[70],较以往电动汽车空间转移模型加入时间分布特性,能够可视化充电负荷和交通拥挤程度。图 4 所示为以居民区为起讫点的通勤出行链示意图,包含用户出行的时间链和空间链特征。

- 1) 时间链:首次出行时刻 T_0 、到达目的地 D_n 时刻 T_n 、在目的地 D_n 停留时长 t_{pn} 、离开目的地 D_n 时刻 T'_n 、第 n 次出行时长 t_{dn} ;
- 2) 空间链:出行起点 D_0 、第 n 次出行目的地 D_n 、第 n 次出行里程 d_n 。

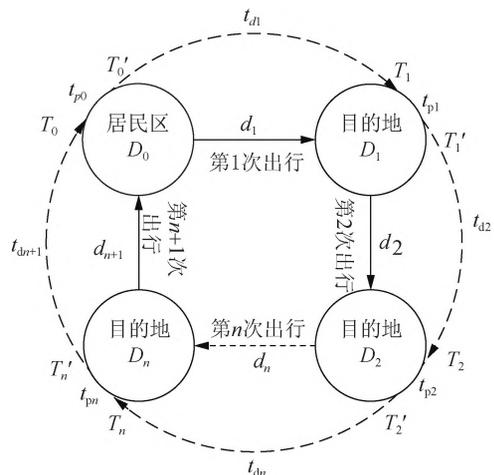


图 4 电动汽车出行链示意图

Fig. 4 Schematic diagram of electric vehicle travel chain

用户可根据电池剩余电量、最低 SOC 偏好决定是否充电,根据停留时长选择充电方式,由此建立时空耦合关系。考虑用户出行路线的随机性,结合出行链构建不同类型电动汽车时空转移模型,采用马尔可夫决策过程(Markov decision processes, MDP)实时动态随机模拟用户出行路径^[71],体现电动汽车空间位置移动的随机性,有效计算负荷时空分布变化。考虑到用户驾驶习惯和充电的不确定性,文献[72]在出行链基础上提出基于车辆-交通-电网轨迹的时空仿真方法,充分考虑了交通系统约束、用户出行需求和充电选择的不确定性。

2.2 数据驱动方法

电动汽车充电负荷预测研究受历史数据限制,2018年之前的研究通常以MC模拟、排队论等仿真方法为主,无法完全模拟负荷变化特性。随着大数据时代的发展,数据驱动型预测方法逐渐得到重视,基于电动汽车实测充电负荷数据运用机器学习、深度学习等智能算法预测电动汽车充电需求^[73],基于历史充电负荷数据预测效果更接近真实充电负荷。

除了传统机器学习技术外,还有深度学习、强化学习、集成学习等理论框架^[73-75]。在处理大规模负荷数据时,一般采用以下两种数据驱动方法:一种是改进经典算法实现数据开发和并行处理,另一种是推动以深度学习为代表的前沿机器学习。深度学习方法在大数据支撑下具有很强的自主学习能力,能够捕获数据中的非线性依赖关系,较好地应用于负荷预测任务中。强化学习如Q学习技术主要用于增强复杂问题的实时学习,可以在所有可用的动作和状态之间进行最优搜索^[76-77]。文献[78]提出一种新颖的混合集成深度学习(hybrid ensemble deep learning, HEDL)模型用于确定性和概率性负荷预测,该模型集合了深度学习优秀的拟合能力和集成学习多样的假设空间的优点^[78],利用中国东部和澳大利亚实际负荷数据验证了所提方法预测的有效性。

数据处理是采用数据驱动方法进行预测的关键步骤,主要是对原始数据进行特征提取,文献[79]将负荷数据进行自适应噪声完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)处理得到不同频率的本征模态分量(intrinsic mode functions, IMF),利用双向常短期记忆网络算法(bi-directional long short-term memory, Bi-LSTM)进行预测;文献[80]利用电动汽车充电低频特性,用两阶段分解技术提取家庭智能电表数据低频分量,采用基于卷积神经网络-长短期记忆网络结合注意力机制

(convolutional neural networks-attention-long short-term memory, CNN-Attention-LSTM)的神经网络算法预测家庭电动汽车用户短期充电负荷情况。

传统点预测方法难以考虑数据中不确定信息及不同影响因素间的影响,区间预测法的优势便显现出来,将负荷预测结果以区间的形式表示,体现负荷变化的不确定性。现有学者对模型的输入区间研究较少,为充分利用历史负荷数据信息,可采用负荷预测误差分布^[81]的方法获得历史数据区间的上下限,作为组合区间预测的输入,预测效果更好。不同的预测组合模型效果不同,文献[81]采用改进极限学习机(extreme learning machine, ELM)的方法进行负荷预测,通过优化算法得到ELM最优参数配置,提高模型准确性、稳定性和泛化能力。

数据质量是负荷预测建模和预测性能优良的重要保证,虽然基于数据驱动的充电负荷预测方法采用真实历史数据更加贴近实际充电负荷情况,但是该方法依赖海量样本数据,对数据质量要求较高,存在难以处理缺陷数据、数据资源利用率低等问题,研究人员可通过数据处理等方法提升数据质量^[43-44]。将模型驱动方法与数据驱动方法结合可发挥两者优势,对电动汽车充电负荷分布影响因素、出行规律建模,利用真实充电负荷数据验证模型,再通过大数据人工智能技术提升预测精度。

2.3 基于机理与数据融合驱动的预测方法

不同类型电动汽车运行特点差别较大,加上用户充电行为这一关键因素的随机性和不确定性,难以建立统一的预测模型。将机理模型驱动与数据驱动方法融合可以充分发挥各自的优势,提高预测精度。将电动私家车作为研究对象,建立如图5所示的电动汽车充电负荷预测框架。

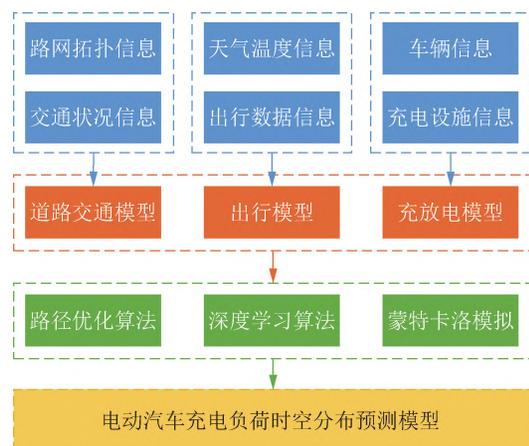


图5 机理模型驱动与数据驱动融合的电动汽车充电负荷预测框架

Fig. 5 A model-driven and data-driven charging load forecasting framework for electric vehicles

首先,融合路网、天气、充电设施等多源数据信息的数据层;其次,基于路网建立道路交通模型,基于天气温度、出行信息结合数据驱动方法挖掘用户出行规律,建立用户出行模型,基于充放电信息建立充电模型;最后,利用路径优化算法、蒙特卡洛模拟和深度学习算法等挖掘电动汽车充电时空分布特性,结合模型驱动与数据驱动方法优点,构建电动汽车充电负荷时空分布预测模型。

文献[82]提出基于 V2G 技术的充放电容量预测方法,将用户出行时刻、电池 SOC、对电价的敏感度作为输入特征,采用随机森林模型判断车辆是否参与调度,根据车辆充放电行为参数,应用 MC 方法模拟车辆出行及充放电情况,预测电动汽车集群充放电情况。采用改进随机森林(improved random forest, IRF)算法自下而上的时空分布预测方法^[83],考虑不同类型电动汽车的充电行为特性以及电动汽车与充电站之间的时空耦合,与支持向量机(support vector machine, SVM)、反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)和一般随机森林相比,该方法可以提高总充电负荷预测精度并获得该区域充电负荷的时空分布。

综上所述,数据驱动方法可以融合历史充电负荷、天气、温度等多源数据集,简化电动汽车充电负荷预测模型,不需要假设大量机理模型参数,而机理模型驱动法对历史数据的依赖性较小,适用性更强,但分析过程较为复杂,分析结果的可靠性不如数据驱动法。当前,对机理数据融合驱动的电动汽车充电负荷预测方法研究较少,可以充分结合机理建模和数据建模的优势有效预测电动汽车充电负荷时空分布。同时,融合更多实际影响因素、减少计算维数也是未来研究重点方向。

3 V2G 技术研究现状

电动汽车兼具“荷”与“源”的双重属性,是目前最具有发展潜力的灵活性储能资源。在保证用户充电需求的前提下,根据相应激励政策引导电动汽车参与电网放电,充分发挥电动汽车作为移动储能的作用,实现车到电网之间能量双向互动,有助于配电网削峰填谷实现优化潮流^[84],在满足用户充电需求同时为用户带来一定的收益。但是目前面临着用户参与放电服务标准体系不成熟、用户响应度不高、各方机制难协调等问题,需不断完善交易机制,制定合理的充放电价格控制策略引导用户参与其中,通过激励协议^[85]调动用户响应积极性。

根据电动汽车各时段 SOC、充放电功率等约束

条件可估计电动汽车集群参与放电可用容量^[86]。文献[87]对电动汽车参与 V2G 响应能力进行了有效评估,采用轨迹数据驱动的方法对电动汽车充电需求时空分布进行预测,建立了用户选择参与 V2G 响应的概率选择模型,得到该区用户愿意参与 V2G 调控的比例为 43%。虽然对该地区负荷调峰效率略低,但是在一定程度上反映了社会初期开展 V2G 试点的情况,可以为相关部门提供政策导向。另外,电动汽车多次进行充放电带来的电池损耗不容小觑,在考虑分时电价政策影响和电池损耗的基础上,对电动汽车集群 V2G 响应成本进行评估^[88],分析峰谷时电价和电池损耗对不同时刻 V2G 响应成本的影响,为运营商制定用户补偿机制提供了模型基础,可以在保证用户利益前提下实现自身效益最大化。文献[89]针对 V2G 交易系统提出一种新型分层区块链架构,设计 V2G 交易智能合约、两级拍卖和优化策略,安排电动汽车有序充放电参与电网负荷调节,减少电网总负荷方差,实现电动汽车用户、聚合商、电网三方互惠互利。

另外,需要考虑 V2G 响应过程带来的成本问题,文献[90]提出电动公交车参与 V2G 响应的优化调度策略,建立了电动公交车电池损耗模型,对电池损耗成本和充电站充放电计划进行双层优化,减小电网负荷峰谷差;从用户利益角度出发,建立计及电池动态放电损耗的用户充放电成本最小的 V2G 优化模型,保障用户与电网双方的利益需求。

V2G 技术是推进交通电气化和智能电网的关键技术之一,电动汽车集群具有 V2G 响应能力,可以为电网提供辅助服务参与电力市场调度^[91],但其理论体系和定价机制需要进一步完善;同时也要考虑在响应过程中产生的成本费用,未来电池技术的发展可以减少电池频繁充放电带来的能耗损失,进一步提升用户参与 V2G 响应的收益,有效促进 V2G 技术的普及。

4 研究不足与展望

4.1 研究不足

虽然电动汽车充电负荷时空分布预测研究已经取得诸多进展及丰硕成果,但仍然存在一些问题和不足,本文从以下三个方面进行总结。

1) 影响因素方面。

影响因素的精准辨识直接影响预测结果的准确性,电动汽车充电行为受多种因素的影响,现行电动汽车充电负荷预测局限于常规情况下的预测,主要利用历史负荷、气象条件、节假日、交通状况等因素进行

建模,对极端天气和转折天气等^[39]预测误差较大,影响预测精度的提升。因此,全面、准确的影响因素辨识是保证负荷预测方法可靠性和准确性的一大挑战。未来应对规模化电动汽车充放电行为展开研究,建立适用于各种情况下的充电负荷预测模型。

2) 时空相关性方面。

由于电动汽车用户的充电行为存在时间和空间的规律性使充电负荷具有时间周期性和空间相关性,未来研究中融合交通路网、天气温度、充电站、电网等多源信息^[37],同时考虑用户决策的随机性^[45],结合路径优化模型、排队论充分挖掘电动汽车充电负荷空间分布信息^[50],同时建立基于深度学习的时间序列预测模型挖掘时间分布规律,进一步提升模型预测的准确度。

3) 放电行为方面。

目前对规模化电动汽车放电行为研究相对较少,用户主动参与V2G需求响应度不高,具备互动能力的充电桩较少。另外,电池频繁充放电带来的损耗、投资成本过高、收益机制是否公平仍是目前需要解决的问题^[85]。因此,需要建立综合预测模型准确评估电动汽车参与放电的潜力。

4.2 研究展望

影响电动汽车充电负荷分布的因素随机多样,且影响程度不尽相同,可以采用相关性分析等方法在不同时空分布下将各种因素对负荷预测的影响程度进行量化,筛选出高度影响预测结果的输入特征。另外,概率负荷预测技术可以捕捉负荷变化的不确定性范围,通过综合考虑负荷影响因素提高预测模型准确性。将机理模型驱动与数据驱动方法有效结合,深入分析电动汽车充放电负荷时空分布特性,为电动汽车参与需求侧响应提供理论依据,促进未来更多不同类型电动汽车参与到需求侧响应中。

5 结束语

电动汽车作为一种具有负荷与储能双重特性的灵活性资源,其充放电行为具有时间和空间的随机性。本文密切关注电动汽车充电负荷时空分布特性,系统阐述电动汽车充电负荷时空分布预测的影响因素及研究方法,为能源转型下交通电气化发展研究提供依据。另外,作为移动储能装置,电动汽车参与需求响应成为现实,随着V2G技术的进步和政策的不断完善,未来共享汽车、无人驾驶汽车也将参与其中,共同为电网提供辅助服务,实现电动汽车与电网良好互动。

6 参考文献

[1] GONG L L, CAO W, LIU K L, et al. Demand responsive charging

strategy of electric vehicles to mitigate the volatility of renewable energy sources[J]. *Renewable Energy*, 2020, 156: 665-676.

[2] XIANG Y, LIU J Y, LI R, et al. Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 647-659.

[3] 陈丽丹, 张尧, Antonio FIGUEIREDO. 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, FIGUEIREDO A. Overview of charging and discharging load forecasting for electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(10): 177-191.

[4] 赵怡军. 我国新能源汽车技术发展的挑战与前景[J]. *时代汽车*, 2023(3): 122-124.

ZHAO Yijun. Challenges and prospects of new energy vehicle technology development in China[J]. *Auto Time*, 2023(3): 122-124.

[5] 刘勇, 李全优, 戴朝华. 电动汽车充电负荷时空分布建模研究综述[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(8): 1-9.

LIU Yong, LI Quanyou, DAI Chaohua. Review on the spatiotemporal distribution modeling of electric vehicle charging load[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(8): 1-9.

[6] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(6): 1-9, 30.

GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(6): 1-9, 30.

[7] CAI Z L, SHU H C. Long-term development scale and charging load forecasting of electric vehicle[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 448/449/450/451/452/453: 3194-3200.

[8] 毛玲, 张钟浩, 赵晋斌, 等. 车-桩-网交融技术研究现状及展望[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(24): 6357-6371.

MAO Ling, ZHANG Zhonghao, ZHAO Jinbin, et al. Research status and prospects of fusion technology of vehicle-charging pile-power grid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(24): 6357-6371.

[9] 胡泽春, 邵成成, 何方, 等. 电网与交通网耦合的设施规划与运行优化研究综述及展望[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(12): 3-19.

HU Zechun, SHAO Chengcheng, HE Fang, et al. Review and prospect of research on facility planning and optimal operation for coupled power and transportation networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 3-19.

[10] KEMPTON W, LETENDRE S E. Electric vehicles as a new power source for electric utilities[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 1997, 2(3): 157-175.

[11] 陈中, 刘艺, 陈轩, 等. 考虑移动储能特性的电动汽车充放电调度策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 77-85.

CHEN Zhong, LIU Yi, CHEN Xuan, et al. Charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles considering characteristics of mobile energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 77-85.

[12] 姚一鸣, 赵溶生, 李春燕, 等. 面向电力系统灵活性的电动汽车控制策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(11): 2813-2824.

YAO Yiming, ZHAO Rongsheng, LI Chunyan, et al. Control strategy of electric vehicles oriented to power system flexibility[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2813-2824.
- [13] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [14] 王海鑫, 袁佳慧, 陈哲, 等. 智慧城市车-站-网一体化运行关键技术研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 112-132.
WANG Haixin, YUAN Jiahui, CHEN Zhe, et al. Review and prospect of key techniques for vehicle-station-network integrated operation in smart city[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 112-132.
- [15] BUZNA L, DE FALCO P, FERRUZZI G, et al. An ensemble methodology for hierarchical probabilistic electric vehicle load forecasting at regular charging stations[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116337.
- [16] LIU M J, ZHAO Z L, XIANG M C, et al. A novel large-scale electric vehicle charging load forecasting method and its application on regional power distribution networks[C]//2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). IEEE, 2022: 236-241.
- [17] QIAN K J, ZHOU C K, ALLAN M, et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 802-810.
- [18] 李如琦, 苏浩益. 基于排队论的电动汽车充电设施优化配置[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 58-61.
LI Ruqi, SU Haoyi. Optimal allocation of charging facilities for electric vehicles based on queuing theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 58-61.
- [19] 姜欣, 冯永涛, 熊虎, 等. 基于出行概率矩阵的电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 272-281.
JIANG Xin, FENG Yongtao, XIONG Hu, et al. Electric vehicle charging station planning based on travel probability matrix [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 272-281.
- [20] 陈维荣, 黄锐森, 陈隆, 等. 电动汽车电池技术发展综述[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 166-178.
CHEN Weirong, HUANG Ruisen, CHEN Long, et al. Review of development of battery technology for electric vehicles[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 166-178.
- [21] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 1-7.
SONG Yonghua, YANG Yuexi, HU Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 1-7.
- [22] 麻秀范, 李颖, 王皓, 等. 基于电动汽车出行随机模拟的充电桩需求研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S2): 190-202.
MA Xiufan, LI Ying, WANG Hao, et al. Research on demand of charging piles based on stochastic simulation of EV trip chain [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 190-202.
- [23] 张谦, 王众, 谭维玉, 等. 基于 MDP 随机路径模拟的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 59-66.
ZHANG Qian, WANG Zhong, TAN Weiyu, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicle based on MDP random path simulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 59-66.
- [24] 刘敦楠, 张悦, 彭晓峰, 等. 计及相似日与气象因素的电动汽车充电负荷聚类预测[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 43-49.
LIU Dunnan, ZHANG Yue, PENG Xiaofeng, et al. Clustering prediction of electric vehicle charging load considering similar days and meteorological factors [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 43-49.
- [25] 程杉, 赵子凯, 陈诺, 等. 计及耦合因素的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 194-201, 208.
CHENG Shan, ZHAO Zikai, CHEN Nuo, et al. Prediction of temporal and spatial distribution of electric vehicle charging load considering coupling factors [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 194-201, 208.
- [26] 叶文浩, 陈耀红, 颜勤, 等. 基于动态分时电价引导的电动汽车需求侧响应 [J/OL]. 电力科学与技术学报, 2023 (2023-03-10) [2023-04-23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1475.TM.20230310.1543.002.html>.
YE Wenhao, CHEN Yaohong, YAN Qin, et al. Demand response of charging and discharging electric vehicle load based on dynamic time-to-use electricity price [J/OL]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023(2023-03-10) [2023-04-23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1475.TM.20230310.1543.002.html>.
- [27] 李明洋, 邹斌. 电动汽车充放电决策模型及电价的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 75-81.
LI Mingyang, ZOU Bin. Charging and discharging decision-making model of electric vehicles and influence analysis of electricity price [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 75-81.
- [28] 范磊, 陈良亮, 罗雯茜, 等. 考虑城市不同功能区的电动汽车负荷时空分布建模方法[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 67-75.
FAN Lei, CHEN Liangliang, LUO Wenqian, et al. Spatial and temporal distribution model of electric vehicle load considering different urban functional areas [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 67-75.
- [29] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2017 national household travel survey [EB/OL]. [2023-04-23]. <https://nhts.o-rnl.gov>.
- [30] 宋雨浓, 林舜江, 唐智强, 等. 基于动态车流的电动汽车充电负荷时空分布概率建模[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 47-56.
SONG Yunong, LIN Shunjiang, TANG Zhiqiang, et al. Spatial-temporal distribution probabilistic modeling of electric vehicle charging load based on dynamic traffic flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 47-56.
- [31] NEUBAUER J, WOOD E. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility [J]. Journal of Power Sources, 2014, 257: 12-20.
- [32] 梅杰, 高赐威. 交通特性在电动汽车并网研究中的考虑[J]. 电

- 网技术, 2015, 39(12): 3549-3555.
- MEI Jie, GAO Ciwei. Considerations of traffic characteristics in research of grid integration of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3549-3555.
- [33] YI T, ZHANG C, LIN T Y, et al. Research on the spatial-temporal distribution of electric vehicle charging load demand: a case study in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 242: 118457.
- [34] 肖湘宁, 温剑锋, 陶顺, 等. 电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的研究与建议[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 1-10. XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, TAO Shun, et al. Study and recommendations of the key issues in planning of electric vehicles' charging facilities [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 1-10.
- [35] 高赐威, 吴茜. 电动汽车换电模式研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 891-898. GAO Ciwei, WUXi. A survey on battery-swapping mode of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 891-898.
- [36] HE C K, ZHU J Z, LAN J, et al. Optimal planning of electric vehicle battery centralized charging station based on EV load forecasting[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 6557-6575.
- [37] 张美霞, 孙铨杰, 杨秀. 考虑多源信息实时交互和用户后悔心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 632-645. ZHANG Meixia, SUN Quanjie, YANG Xiu. Electric vehicle charging load prediction considering multi-source information real-time interaction and user regret psychology [J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 632-645.
- [38] 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.
- [39] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513, 681. ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513, 681.
- [40] 朱慧婷, 杨雪, 陈友媛. 电动汽车充电负荷预测方法综述[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(5): 44-47. ZHU Huiting, YANG Xue, CHEN Youyuan. Overview of the charging load forecasting methods of plug-in electric vehicles[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(5): 44-47.
- [41] ASHTARI A, BIBEAU E, SHAHIDINEJAD S, et al. PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 341-350.
- [42] 王鹤, 冷贤达, 潘禹含, 等. 考虑时空特性及时间成本的电动汽车有序充电策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 86-91, 133. WANG He, LENG Xianda, PAN Yuhan, et al. Orderly charging and discharging strategy of electric vehicle considering time-space characteristics and time cost [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 86-91, 133.
- [43] 朱继忠, 董瀚江, 李盛林, 等. 数据驱动的综合能源系统负荷预测综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7905-7924. ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. Review of data-driven load forecasting for integrated energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7905-7924.
- [44] 韩富佳, 王晓辉, 乔骥, 等. 基于人工智能技术的新型电力系统负荷预测研究综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023(2023-02-23) [2023-04-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221560>. HAN Fujia, WANG Xiaohui, QIAO Ji, et al. Review on artificial intelligence based load forecasting research for the new-type power system [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023(2023-02-23) [2023-04-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221560>.
- [45] 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.
- [46] SHEN H R, WANG Z J, ZHOU X Y, et al. Electric vehicle velocity and energy consumption predictions using transformer and markov-chain Monte Carlo [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(3): 3836-3847.
- [47] 张晨彧, 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.
- [48] 王浩林, 张勇军, 毛海鹏. 基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 207-213. WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 207-213.
- [49] 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 Lidian, 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.
- [50] 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. Prediction of electric vehicle charging load considering interaction between road network and power grid and user's psychology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 86-93.
- [51] 刘文霞, 龙日尚, 徐晓波, 等. 考虑数据新鲜度和交叉熵的电动

- 汽车短期充电负荷预测模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 45-52.
- LIU Wenxia, LONG Rishang, XU Xiaobo, et al. Forecasting model of short-term EV charging load based on data freshness and cross entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 45-52.
- [52] SU H Y, HONG H H. An intelligent data-driven learning approach to enhance online probabilistic voltage stability margin prediction [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3790-3793.
- [53] 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.
- [54] DAI Q, CAI T, DUAN S X, et al. Stochastic modeling and forecasting of load demand for electric bus battery-swap station[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1909-1917.
- [55] PAPANOTIS E, SAPATINAS T. Short-term load forecasting: the similar shape functional time-series predictor [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3818-3825.
- [56] 黄南天, 刘德宝, 蔡国伟, 等. 基于多相关日场景生成的电动汽车充电负荷区间预测[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7980-7990.
- HUANG Nantian, LIU Debao, CAI Guowei, et al. Interval prediction of electric vehicle charging load based on scene generation with multiple correlation days [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7980-7990.
- [57] 牛牧童, 廖凯, 杨健维, 等. 考虑季节特性的多时间尺度电动汽车负荷预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 74-85.
- NIU Mutong, LIAO Kai, YANG Jianwei, et al. Multi-time-scale electric vehicle load forecasting model considering seasonal characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 74-85.
- [58] 郭磊, 王克文, 文福拴, 等. 电动汽车充电设施规划研究综述与展望[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 56-70.
- GUO Lei, WANG Kewen, WEN Fushuan, et al. Review and prospect of charging facility planning of electric vehicles [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 56-70.
- [59] 刘青, 戚中译. 基于蒙特卡洛法的电动汽车负荷预测建模[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(10): 14-19.
- LIU Qing, QI Zhongyi. Electric vehicles load forecasting model based on Monte Carlo simulation [J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(10): 14-19.
- [60] 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 an active distribution network considering temporal and spatial load distribution characteristics of electric vehicles [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 1-13.
- [61] 张琳娟, 许长清, 王利利, 等. 基于 OD 矩阵的电动汽车充电负荷时空分布预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 82-91.
- ZHANG Linjuan, XU Changqing, WANG Lili, et al. OD matrix based spatiotemporal distribution of EV charging load prediction [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 82-91.
- [62] 李晓辉, 李磊, 刘伟东, 等. 基于动态交通信息的电动汽车充电负荷时空分布预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 117-125.
- LI Xiaohui, LI Lei, LIU Weidong, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicles based on dynamic traffic information [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 117-125.
- [63] 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.
- [64] TANG D F, WANG P. 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.
- [65] 锁军, 李龙, 贺瀚青, 等. 考虑交通路况的电动汽车充电负荷预测[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 141-147.
- SUO Jun, LI Long, HE Hanqing, et al. Load forecasting of electric vehicle charging considering traffic conditions [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 141-147.
- [66] 吴钉捷, 李晓露. 基于实时出行需求和交通路况的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力建设, 2020, 41(8): 57-67.
- WU Dingjie, LI Xiaolu. Charging load prediction of electric vehicle according to real-time travel demand and traffic conditions [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(8): 57-67.
- [67] 胡博, 张鹏飞, 黄恩泽, 等. 基于图 WaveNet 的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 207-213.
- HU Bo, ZHANG Pengfei, HUANG Enze, et al. Graph WaveNet based charging load forecasting of electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 207-213.
- [68] 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, 5519.
- SHAO Yinchi, 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, 5519.
- [69] 刘志强, 张谦, 朱熠, 等. 计及车-路-站-网融合的电动汽车充电负荷时空分布预测 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 36-45.
- LIU Zhiqiang, ZHANG Qian, ZHU Yi, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging loads for electric vehicles considering vehicle-road-station-grid integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 36-45.
- [70] 林铭蓉, 胡志坚, 高明鑫, 等. 考虑需求响应和电动汽车负荷路-电耦合特性的配电网可靠性评估[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 86-95.

- LIN Mingrong, HU Zhijian, GAO Mingxin, et al. Reliability evaluation of distribution network considering demand response and road-electricity coupling characteristics of electric vehicle load [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 86-95.
- [71] IVERSEN E B, MORALES J M, MADSEN H. Optimal charging of an electric vehicle using a Markov decision process [J]. Applied Energy, 2014, 123: 1-12.
- [72] XIANG Y, JIANG Z Z, GU C H, et al. Electric vehicle charging in smart grid: a spatial-temporal simulation method [J]. Energy, 2019, 189: 116221.
- [73] 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 机器学习在能源与电力系统领域的应用和展望 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 15-31.
- CHENG Lefeng, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Machine learning for energy and electric power systems: state of the art and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 15-31.
- [74] 朱天怡, 艾芊, 贺兴, 等. 基于数据驱动的用电行为分析方法及应用综述 [J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3497-3507.
- ZHU Tianyi, AI Qian, HE Xing, et al. An overview of data-driven electricity consumption behavior analysis method and application [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3497-3507.
- [75] LI H J, ZHU J H, ZHOU Y, et al. Review of load forecasting methods for electric vehicle charging station [C]//2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). IEEE, 2022: 1833-1837.
- [76] DABBAGHJAMANESH M, MOEINI A, KAVOUSI-FARD A. Reinforcement learning-based load forecasting of electric vehicle charging station using Q-learning technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(6): 4229-4237.
- [77] 范培潇, 杨军, 肖金星, 等. 基于深度 Q 学习的含电动汽车孤岛微电网负荷频率控制策略 [J]. 电力建设, 2022, 43(4): 91-99.
- FAN Peixiao, YANG Jun, XIAO Jinxing, et al. Load frequency control strategy based on deep Q learning for island microgrid with electric vehicles [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(4): 91-99.
- [78] CAO Z J, WAN C, ZHANG Z J, et al. Hybrid ensemble deep learning for deterministic and probabilistic low-voltage load forecasting [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1881-1897.
- [79] 胡俊杰, 赖信辉, 郭伟, 等. 考虑电动汽车灵活性与风电消纳的区域电网多时间尺度调度 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 52-60.
- HU Junjie, LAI Xinhui, GUO Wei, et al. Multi-time-scale scheduling for regional power grid considering flexibility of electric vehicle and wind power accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 52-60.
- [80] 周润, 向月, 王杨, 等. 基于智能电表集总数据的家庭电动汽车充电行为非侵入式辨识与负荷预测 [J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1897-1908.
- ZHOU Run, XIANG Yue, WANG Yang, et al. Non-intrusive identification and load forecasting of household electric vehicle charging behavior based on smart meter data [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1897-1908.
- [81] 曾林俊, 许加柱, 王家禹, 等. 考虑区间构造的改进极限学习机短期电力负荷区间预测 [J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2555-2563.
- ZENG Linjun, XU Jiazhu, WANG Jiayu, et al. Short-term electrical load interval forecasting based on improved extreme learning machine considering interval construction [J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2555-2563.
- [82] 邓艺璇, 黄玉萍, 黄周春. 基于随机森林算法的电动汽车充放电容量预测 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 181-188.
- DENG Yixuan, HUANG Yuping, HUANG Zhouchun. Charging and discharging capacity forecasting of electric vehicles based on random forest algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 181-188.
- [83] GE X L, SHI L, FU Y, et al. Data-driven spatial-temporal prediction of electric vehicle load profile considering charging behavior [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187: 106469.
- [84] 师瑞峰, 李少鹏. 电动汽车 V2G 问题研究综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 28-37.
- SHI Ruifeng, LI Shaopeng. Review on studies of V2G problem in electric vehicles [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(6): 28-37.
- [85] 侯慧, 王逸凡, 赵波, 等. 价格与激励需求响应下电动汽车负荷聚集商调度策略 [J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1259-1269.
- HOU Hui, WANG Yifan, ZHAO Bo, et al. Electric vehicle aggregator dispatching strategy under price and incentive demand response [J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1259-1269.
- [86] 刘峻岐, 蒋姝俊, 王照琪, 等. 基于时空耦合关联分析的电动汽车集群可调度能力评估 [J]. 电力建设, 2021, 42(12): 83-92.
- LIU Junqi, JIANG Shujun, WANG Zhaoqi, et al. Dispatchable capability of eclectic vehicle clusters considering temporal-spatial characteristics [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 83-92.
- [87] 周椿奇, 向月, 童话, 等. 轨迹数据驱动的电动汽车充电需求及 V2G 可控容量估计 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 46-55.
- ZHOU Chunqi, XIANG Yue, TONG Hua, et al. Trajectory-data-driven estimation of electric vehicle charging demand and vehicle-to-grid regulable capacity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 46-55.
- [88] 张书盈, 孙英云. 考虑分时电价和电池损耗的电动汽车集群 V2G 响应成本分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(11): 39-46.
- ZHANG Shuying, SUN Yingyun. Analysis for V2G response cost of EV aggregator considering time-of-use tariffs and battery wear [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(11): 39-46.
- [89] LUO Q S, ZHOU Y M, HOU W C, et al. A hierarchical blockchain architecture based V2G market trading system [J]. Applied Energy, 2022, 307: 118167.
- [90] 陈丽娟, 秦萌, 顾少平, 等. 计及电池损耗的电动公交车参与 V2G 的优化调度策略 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 52-60.
- CHEN Lijuan, QIN Meng, GU Shaoping, et al. Optimal dispatching strategy of electric bus participating in vehicle-to-grid

considering battery loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 52-60.

[91] 檀勤良, 郭明鑫, 刘源, 等. 基于大规模 V2G 的区域电源低碳优化策略[J]. 电力建设, 2022, 43(12): 56-65.

TAN Qinliang, GUO Mingxin, LIU Yuan, et al. Research on low-carbon optimization strategy of regional power supply based on large-scale V2G[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(12): 56-65.

收稿日期: 2023-04-23

作者简介:

张夏韦(2000),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统负荷预测及优化调度,E-mail:zxw13526885624@163.com;

梁军(1970),男,教授,博士生导师,通信作者,IET Fellow,主要研究方向为电力电子及新能源发电、电力系统运行与控制等,E-mail:liangj1@cardiff.ac.uk;

王要强(1982),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为电力电子与电力传动、新能源发电与微电网、新能源电力系统等,E-mail:WangyqEE@163.com;

韩婧(1992),女,博士研究生,主要研究方向为电力系统负荷预测及配电网韧性评估,E-mail:409188131@qq.com。

(编辑 张小飞)