

Study on the Impact Evaluation of Different Charging and Discharging Strategies for Electric Vehicles

Yinbo Zhang

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract

Because electric vehicles have significant energy saving and emission reduction potential, it has become an important transformation direction in the future transportation field. However, the charging and discharging behavior of electric vehicles is mainly determined by the user, and every car connected to the grid will cause random power load fluctuations. In the case that coal is the main power supply structure in China, the random charging behavior without regulation will lead to the emission reduction benefit in the transportation field to the power generation end, making the energy-saving emission reduction goal of the development of electric vehicles lose practical significance. Therefore, the development of electric vehicles needs to focus on charge-discharge strategies. There are three kinds of charging and discharging strategies: disordered charging strategy, ordered charging strategy and V2G strategy. This paper summarizes the factors affecting the charging and discharging load of electric vehicles, including the type of electric vehicles, battery capacity, daily mileage, charging start time, charging and discharging power, electricity price, etc. Based on statistical probability, a probability statistical model is established for these major influencing factors, and Monte Carlo simulation method is used to predict the load of electric vehicles. The daily load curves to meet the electric demand of electric vehicles under different charging and discharging strategies are obtained. Then, the actual data of Chongqing Municipality was used for simulation to explore the impact of disordered charging, orderly charging and V2G on the power grid, environment and users under actual conditions for large-scale EV users, so as to provide decision-making basis for stakeholders and put forward scientific, reasonable and forward-looking management suggestions based on the conclusions.

Keywords: *Electric Vehicles; Charging and Discharging Strategies; Monte Carlo Simulations*

电动汽车采用不同充放电策略的影响评价研究

张银波

重庆交通大学，重庆 400074

摘要：电动汽车由于其显著的节能减排潜力，已成为未来交通领域的重要转型方向。然而，电动汽车的充放电行为主要由用户决定，每辆车接入电网都会引起随机的电力负荷波动。在我国以燃煤为主要电源结构的情况下，未经调控的随机充电行为将导致交通领域的减排效益转移到发电端，使电动汽车发展的节能减排目标失去实际意义。因此，电动汽车的发展需要重点研究充放电策略。充放电策略有无序充电策略、有序充电策略和 V2G 策略三种方式。本文总结了电动汽车充放电负荷的影响因素，主要包括电动汽车类型、电池容量、日行驶里程、充电起始时间、充放电功率、电价等，根据统计概率对这些主要影响因素建立了概率统计模型，并使用蒙特卡洛模拟法预测电动汽车负荷，得到不同充放电策略下满足电动汽车电力需求的日负荷曲线。然后，使用重庆市实际数据进行仿真，探究在实际条件下，规模电动汽车用户采用无序充电、有序充电、V2G 对电网、环境和用户等各方面的影响，为利益相关者提供决策依据，并根据结论提出科学、合理、有前瞻性的管理建议。

关键词：电动汽车；充放电策略；蒙特卡洛模拟

引言

随着电动汽车的快速发展和普及，充放电策略的研究变得越来越重要。有效管理电动汽车的充放电行为对于实现电能的高效利用、优化能源调度、提升电网可靠性和可持续发展具有重要意义。然而，由于电动汽车充放电负荷的不确定性和复杂性，对各利益相关方来说，如何选择综合效益最优的充放电策略成为一个具有挑战性的问题。

因此，论文总结了电动汽车充放电负荷的影响因素，主要包括电动汽车类型、电池容量、日行驶里程、充电起始时间、充放电功率、电价等，根据统计概率对这些主要影响因素建立了概率统计模型，并使用蒙特卡洛模拟法预测电动汽车负荷，得到不同充放电策略下满足电动汽车电力需求的日负荷曲线。然后，使用重庆市实际数据进行仿真，探究在实际条件下，规模电动汽车用户采用无序充电、有序充电、V2G对电网、环境和用户等各方面的影响，为利益相关者提供决策依据，并根据结论提出科学、合理、有前瞻性的管理建议。

1 国内外研究综述

1.1 电动汽车充放电负荷预测研究

电动汽车充放电负荷预测对于电力市场的运营和资源调度具有重要意义。准确预测充放电负荷可以帮助市场运营商更好地调度和安排电力资源，优化电力市场的运行效率，提高市场参与者的收益。许多学者在电动汽车充电负荷预测方面做了大量的工作，主流研究方法是使用蒙特卡洛模拟、深度学习神经网络。

李晓辉^[1]考察了交通信息对电动汽车出行规律的影响，采用交通启停或出行链的方法对电动汽车的随机特性进行建模，得到电动汽车的负载需求。万井培^[2]分析发现在充电桩系统、类型、数量、节点电压等共同作用下，电动汽车充电都会对电网谐波产生影响。张美霞等^[3]针对城市中家用电动汽车与电动出租车出行能耗变化与充电决策问题，考虑实时交通路网、气温以及用户心理，提出一种基于动态能耗模型与用户心理的电动汽车充电负荷预测模型。

1.2 电动汽车充放电策略研究

关于电动汽车充放电策略造成的社会影响，Benjamin K Sovacool^[4]等人对 2015 年至 2017 年发表的关于电动汽车 V2G 放电策略的 197 篇文章进行了系统综述。大多数电动汽车充放电研究都集中在技术方面，主要是可再生能源存储、电池或负载平衡，以最大限度地降低电力成本。而关于评估 V2G 对环境和气候影响的重要性，或关注消费者对 V2G 的接受程度的研究文献则少得多。

选择了 CO₂ 排放量和充放电成本这两个评价标准，再加电动汽车充放电的最大效用，即平衡电网峰谷差，使电网平稳运行。本文将对电动汽车充放电策略对电网可靠性造成的影响、CO₂ 排放、发电成本及用户成本三个方面进行文献综掘与评述。

（1）电动汽车充放电策略对电网可靠性的影响

在电动汽车接入电网对其可靠性造成的影响方面，主要研究目的集中在削峰填谷、实现用户侧和电网侧的平稳运行。陶莉等^[5]根据用电习惯将用户分类，并以极小化峰谷差为目标，构建实时定价优化模型，使用一种依赖电量波动同步扰动的随机逼近算法。仿真结果表明这种算法不仅能够削峰填谷，而且可以使用户和供电商双方获利。罗维祥^[6]建立了考虑用户和电网利益的双阶段优化目标模型。从用户侧分析电动汽车负荷需求，以用户电费最小为目标，在电网侧以削峰填谷为目标，提出了有效的调度策略，减小电网负荷峰谷差，降低了用户成本。李咸善和鄂璇^[7]通过建立微电网和电动汽车的主从博弈优化调度模型，并采用粒子群算法求解模型纳什均衡点，提出了在分档电价和碳配额激励机制下的电动汽车微电网博弈优化调度策略，仿真验证了该方法的有效性。胡思洋等^[8]结合遗传算法和改进鲸鱼算法，提出了基于 V2G 技术的供电恢复优化策略，通过算例仿真，验证了方法的可行性和优越性。文章表明，将拥有 V2G 功能的电动汽车作

为辅助电源，并配合应急供电车，可以有效降低大面积停电损失，并具有高灵活性、低成本等优点。ShaoChao Ma 等^[9]旨在通过分时充电价格机制的设计，引导电动汽车协同充电，助力实现填谷，并在全中国范围内开展离散选择实验，调查中国消费者在不同时间段的充电支付意愿，利用电力经济调度模型模拟了充电分时定价对区域电力系统成本和负荷的影响。

（2）电动汽车充放电策略对碳排放的影响

近年来汽车保有量的持续增加，使越来越多的学者开始关注交通部门碳减排，学界普遍认同电动汽车有助于交通部门向低碳路径转型的观点。电动汽车的碳排放取决于充电过程中使用的电力来源结构，已有研究^[10]证明了与传统燃油汽车相比，电动汽车在减缓气候变化方面存在巨大优势，并证实了以可再生能源为主的电力系统对电动汽车的积极影响^[11]。王振报^[12]分析了美国马里兰州的电动汽车充电过程对碳排放的影响，表明在减少道路客运中的碳排放方面，电动汽车发挥着重要作用。李利军等^{[13][13]}测算了将燃油货运车辆换为电动货车后的碳排放差值，并对其产生的社会效益和经济效益进行估算，结果表明，雄安新区的货运碳减排量明显。邵丹等^[14]重点分析了在不同电动化转型比例下，小型客车对碳排放的影响，提出不仅要坚持能源结构调整，还应重视交通结构优化的减碳政策。张钰等^[15]针对可再生能源和传统化石能源发电设备的碳排放特性、可再生能源的地理位置和电动汽车负荷的时空分布等因素，建立了电动汽车充电负荷与发电设备边际出力关系的模型。以更多地利用可再生能源为目的，提出了电动汽车与可再生能源在碳市场中协同发展的有序充电策略。结果表明这种有序充电策略可以有效减少边际碳排放增长，降低碳费用。

（3）电动汽车充放电策略对成本影响

在使用大规模电动汽车来调节电网频率、平衡负荷，减少碳排放时，也必须考虑到电网和用户的经济利益。对电力公司来说，电动汽车的无序充电导致负荷高峰上升，会增加额外的发电设施建设和电网运行费用，而充放电行为受到调控的电动汽车则可以为电网减轻负担，并消纳可再生资源，降低发电成本。对用户来说，采用有序充电策略，可减少充电费用，使用 V2G，还可以通过低价购买和高价卖出动力电池中的电能来获取利润。

在以电价差引导电动汽车用户充放电方面，项顶等^[16]分析了电动汽车放电成本和效益，给定电动汽车放电电价的上下限，以最优峰谷电价差为目的建立了电动汽车与电网互动模型。黄贵鸿^[17]和谭维玉等^[18]以用户价格偏好为基础，提出了电动汽车智能充放电控制算法。Hui Hwang Goh 等^[19]基于电动汽车充电的随机电力需求弹性模型，提出了适合电动汽车充电的最佳分时电价结构。仿真结果表明，通过引导用户的充电时间、降低用户成本、减少电网的损耗，可以实现电网和用户的双赢。Olalekan Kolawole 等^[20]考虑了实时电价、电池磨损等参数，使用混合整数线性规划，建立了电动汽车充放电过程的优化模型，以降低电动汽车的使用成本。

在以电动汽车充放电成本最小为目标的研究中，杨镜司等^[21]考虑了插电式电动汽车接入电网后的不同需求，研究了不同的充电调度方式。结果显示，对电动汽车的科学充电规划可以降低电网维护成本和用户用电成本。Sid-Ali Amamra 等^[22]建立了 V2G 优化策略，以初始电池充电状态、电动汽车充电开始时间、电价、电动汽车出发时间、电池退化成本和车辆充电需求为变量，分析了电动汽车充电成本的变化。仿真结果表明，通过集成 V2G 技术，特别是在对有功和无功功率需求很高的高峰时段，使用 V2G 可以在提供频率和电压支持的同时，降低电动汽车充电成本的机会。周晨瑞等^[23]在传统微电网的基础模型上加入了电动汽车充电过程，建立了包括电动汽车充放电成本和电网运行成本的目标函数，利用改进的 NSGA-II 算法进行了优化调度。

在电动汽车充放电负荷预测的研究中，由于放电数据的获取难度，多是用蒙特卡洛模拟法和神经网络法进行预测，上述研究选择的电动汽车充放电负荷的影响因素各有不同，针对的情境也各有不同，所以建立一套精确度高且适用研究目的的负荷预测模型，是每篇文献的重点。

在电动汽车充放电策略的研究中，其对电网的影响是无法忽视的话题。已有大量学者对此进行了研究，但国内至今没有既能够适用于以传统火力发电为主的恒定电网，又能够适用于以清洁能源发电为主的随机电网的影响评估指标。

在电动汽车充放电策略对碳排放的研究中，电动汽车消耗的能源中，化石能源和清洁能源的比重决定着电动汽车在行驶过程中的碳排放。可以理解为，如果电动汽车充电使用的全部是可再生能源产生的电力，那么电动汽车的充放电过程碳排放几乎为零；如果电动汽车使用的电力来自煤炭、石油、天然气等能源，那么电动汽车充电所产生的碳排放，等于燃烧这些能源所产生的碳排放。而有研究表明，我国城市交通部门的能源消耗，90%以上来自传统的柴油、汽油等化石能源。即使是纯电动车，其消耗的清洁能源电能占比也仅 15%^[24]。

综上所述，电动汽车充放电策略对各方的影响评估工作已取得卓有成效的研究成果，但在以下方面有待深入探索。一是建立适用于不同类型电网的电动汽车充放电策略影响评估模型，二是电动汽车充放电的各利益相关方如何决策充放电策略的系统性评估策略。

2 研究方法

2.1 文献研究法

通过收集文献资料，对电动汽车充放电负荷的影响因素进行归纳整理，为本文建立电动汽车充放电负荷预测的蒙特卡洛模拟奠定了理论基础。

2.2 蒙特卡洛模拟法

蒙特卡洛模拟法是一种基于随机数和概率统计的数值计算方法，用于解决复杂问题和风险评估。它模拟随机事件的多次重复实验，通过对大量的随机样本进行统计分析，得出对问题的定量评估或预测结果。

在蒙特卡洛模拟法中，通过随机抽样生成符合指定分布的随机数，并基于这些随机数进行模型的迭代计算。通过反复模拟大量的随机样本，可以获得问题的概率分布、期望值、方差等统计指标，从而对问题进行评估。

蒙特卡洛模拟法广泛应用于金融、工程、物理、生物、环境等领域。它可以用于评估投资风险、模拟金融市场走势、优化工程设计、分析物理过程的随机性等。通过引入随机因素和概率统计，蒙特卡洛模拟法能够处理现实世界中的不确定性和复杂性，提供对问题的全面和可靠的评估，为决策提供科学依据。

2.3 案例研究法

以重庆市为例，收集相关数据，建立电动汽车采用三种充放电策略的负荷预测蒙特卡洛模拟。最后对案例结论进行分析，提出相应的管理启示和政策建议。

3 研究内容与创新点

3.1 研究内容

电动汽车充放电负荷的影响因素，主要包括电动汽车类型、电池容量、日行驶里程、充电起始时间、充放电功率、电价等。本文根据统计概率对这些主要影响因素建立了概率统计模型，并使用蒙特卡洛模拟法预测电动汽车负荷，得到不同充放电策略下满足电动汽车电力需求的日负荷曲线。然后，使用重庆市实际数据进行仿真。

3.1.1 基于蒙特卡洛模拟的重庆市电动汽车负荷仿真预测

本文使用提出的影响因素对电动汽车的充放电过程进行蒙特卡洛模拟建模，得到一天内电动汽车充放电负荷需求的预测，并对重庆市电动汽车采用多种充放电策略的预测结果进行对比分析。做出以下假设：

- ①参加模拟的车辆全部为纯电动汽车；
- ②电动汽车充电方式为慢速充电；
- ③电动汽车使用电池为同一型号，且电池充电功率保持恒定；
- ④车主驾驶习惯与按照传统燃油车一致，早出晚归，在住宅区充电；
- ⑤考虑到电池寿命和充电损耗等因素，SOC 可用范围设置为 0.1~0.9。

3.1.2 电动汽车充放电负荷需求的影响因素

对 2022 年重庆市电动汽车销量统计，以销量前十的电动汽车平均电池容量 42kW 为参考数据。以家用慢速充电设备的功率为充放电功率，以 2022 年重庆私人汽车保有量为汽车总量。为保证电动汽车能够满足第二天行驶电量的要求，结合重庆市电价低谷时段，本文随机选取 0:00~7:00 中的一个时刻作为电动汽车充电起始时间。在尊重出行规律的前提下，结合重庆市电价高峰时间段，随机选取 11:00~17:00 和 20:00~22:00 中的任意时刻为放电起始时间。为了不影响电动汽车的当日往返，当 SOC 大于等于 0.5 时，电动汽车参加早高峰放电，否则不参与；当 SOC 大于等于 0.1 时，电动汽车参与晚高峰放电，否则不参与或通知放电。对电动汽车充放电负荷的影响因素总结如表 1 所示。

表 1 电动汽车充放电负荷的影响因素

影响因素	取值范围
汽车保有量(万辆)	563.6
EV-%	电动汽车占私人汽车总量比例
V2G-%	采用 V2G 的电动汽车占私人汽车总量比例
电池容量 (kW)	42
平均每公里耗电量(kW/km)	0.2
充电功率(kW/h)	服从 (5.0,8.0) 上的均匀分布
放电功率(kW/h)	服从 (5.0,8.0) 上的均匀分布
充电和放电效率	0.9
每日出行里程(km)	根据 NHTS 调查，在日行驶里程的正态分布内随机取值
SOC	电池电荷状态，取值范围 0.1~0.9
无序充电策略下充电开始时间	根据 NHTS 调查，车辆到达住宅区的时刻分布随机取值
有序充电策略下充电开始时间	0:00—7:00
V2G 策略下充电开始时间	0:00—3:00
V2G 策略下放电开始时段	11:00—17:00 20:00—22:00

得到不同充放电策略下满足电动汽车电力需求的日负荷曲线：

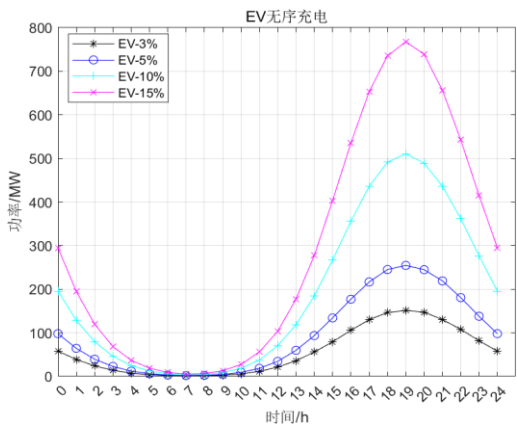


图 1 电动汽车无序充电负荷曲线

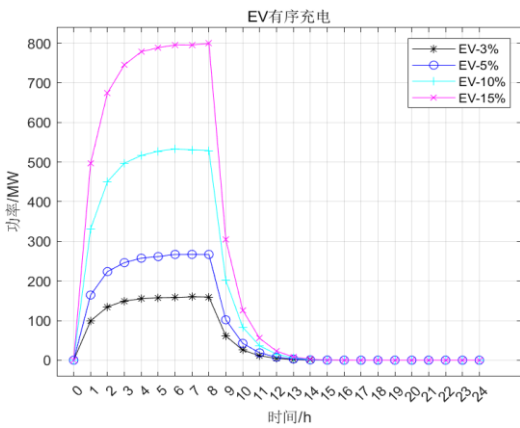


图 2 电动汽车有序充电负荷曲线

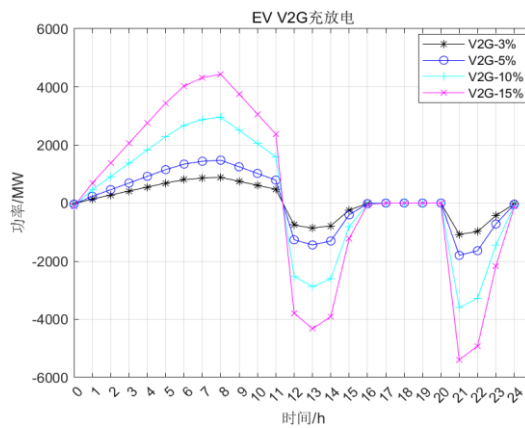


图 3 电动汽车 V2G 负荷曲线

当车辆电气化率小于 8%时，V2G 策略最优，对缩小电网负荷峰谷差具有最大效用。当车辆电气化率大于 8%时，有序充电策略最优。

3.2 创新点

创新性提出了可靠因子和发展可靠因子两种指标，以评估电动汽车充放电负荷对稳定发电的恒定电源电网可靠性和可再生能源占比较高的不稳定发电的随机电源电网可靠性的影响。

4 结论

(1) 就电网负荷平衡方面，车辆电气化率区间不同，最优充放电策略也不同。通过对电动汽车充放电负荷需求进行蒙特卡洛模拟，得到三种充放电策略的负荷曲线，并结合地区原始负荷曲线分析。当车辆电气化率小于 8%时，V2G 策略最优，对缩小电网负荷峰谷差具有最大效用。当车辆电气化率大于 8%时，有序充电策略最优。

(2) 相较于传统燃油汽车而言，电动汽车具有显著的节能减排潜力，然而目前尚未充分发挥其优势。这一现象主要归因于重庆市电力结构的特点，该地区主要依赖火力发电和水力发电，对于电动汽车而言，其碳排放主要取决于其充电过程所使用的电能的来源。因此，优化发电结构，增加清洁能源比例，对于降低电动汽车的碳排放具有重要意义。电动汽车的 CO₂排放量与发电端的能源来源密切相关。

(3) 管理建议：对电网来说，推进车网建设协调发展，推进新型技术落地，大推广 V2G 策略和有序充电策略是最优选项；对政府来说，为寻求更好的环境效益和能源安全，推广有序充电策略最优；对用户来说，采用有序充电策略能够降低能源成本，获得更好的充电体验。

参考文献

- [1] 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(01):117-125.
- [2] 万井培.电动汽车直流充电桩接入对电网谐波的影响分析[J].电工技术,2022, 575(17):9-11.
- [3] 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(06):710-719.
- [4] Sovacool B K,Kester J, Noel L,et al. Actors, business models, and innovation activity systems for vehicle-to-grid (V2G) technology: A comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2020,131:109963.
- [5] 陶莉,高岩,朱红波.以极小化峰谷差为目标的智能电网实时定价[J].系统工程学报,2020,35(03):315-324.
- [6] 罗维祥,常喜强,伏睿,等考虑供需需求的电动汽车充放电调度策略[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(07):106-112.
- [7] 李咸善,鄂璇.分档电价和碳配额激励的含电动汽车微电网优化调度策略[J].科学技术与工程,2022,22(16):6537-6546.
- [8] 胡思洋,廖凯,杨健维,等基于 V2G 技术的城市电网供电恢复策略[J/OL].电力自动化设备:1-17[2023-02-09].
- [9] Ma S C,Yi B W,Fan Y. Research on the valley-filling pricing for EV charging considering renewable power generation[J]. Energy Economics,2022,106:105781.

- [10] Sovacool B K, Kester J, Noel L, et al. Actors, business models, and innovation activity systems for vehicle-to-grid (V2G) technology: A comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 131: 109963.
- [11] Bauer C, Hofer J, Althaus H J, et al. The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework[J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 871-883.
- [12] 王振报. 电动汽车策略对碳排放的影响评估——以美国马里兰州一体化模型应用为例[J]. *城市交通*, 2021, 19(05): 66-72+16.
- [13] 李利军, 孙凯扬, 李艳丽. 碳达峰背景下雄安电动货车减碳量测评研究[J]. *交通节能与环保*, 2021, 17(02): 5-12.
- [14] 邵丹, 李涵. 城市客运交通电动化碳减排效益和碳达峰目标——以上海市为例[J]. *城市交通*, 2021, 19(05): 53-58.
- [15] 张钰, 张玥, 韩新阳, 等. 碳排放最小化条件下电动汽车有序充电策略研究[J]. *中国电力*, 2020, 53(04): 147-154.
- [16] 项, 宋永华, 胡泽春, 等. 电动汽车参与 V2G 的最优峰谷电价研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(31): 11.
- [17] 黄贵鸿, 雷霞, 芦杨, 等. 考虑用户满意度的电动汽车用户侧最优智能充放电策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(24): 40-47.
- [18] 谭维玉. 计及用户需求侧响应的电动汽车充放电电价制定策略研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [19] Goh H H, Zong L, Zhang D, et al. Orderly charging strategy based on optimal time of use price demand response of electric vehicles in distribution network[J]. *Energies*, 2022, 15(5): 1869.
- [20] Kolawole O, Al-Anbagi I. Optimizing electric vehicles charging cost for frequency regulation support in a smart grid[C]. 2017 International Conference on Open Source Systems & Technologies (ICOSST). (Lahore, Pakistan): IEEE, 2017: 1-6.
- [21] 杨镜司, 秦文萍, 史文龙, 等. 基于电动汽车参与调峰定价策略的区域电网两阶段优化调度[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(01): 58-71.
- [22] Amamra S A, Marco J. Vehicle-to-grid aggregator to support power grid and reduce electric vehicle charging cost[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 178528-178538.
- [23] 周晨瑞, 盛光宗, 李升. 考虑电动汽车接入的微电网多目标优化调度[J/OL]. *电气工程学报*: 1-8[2023-02-09].
- [24] 郭继孚. 推动城市交通碳达峰、碳中和的对策与建议[J]. *可持续发展经济导刊*, 2021, 23(03): 22-23.