

基于用户满意度的电动汽车充电桩优化布局问题研究

刘澜

重庆师范大学经济与管理学院, 重庆, 401331;

摘要: 针对电动汽车充电桩布局中存在的供需失衡、用户满意度低及多方利益冲突问题, 本文提出一种多维度协同优化方法。首先, 构建基于用户满意度的充电决策模型, 通过时间成本与费用成本的多目标优化。其次, 建立时空耦合的交通-电网协同模型, 基于图论刻画时变路网状态, 并引入配电网安全约束, 实现交通流与电能流的动态匹配。进一步设计合作博弈动态定价机制, 平衡成本优化、负荷均衡与收益提升目标。算例验证表明, 模型提高充电桩利用率以及降低用户充电成本, 并缓解电网峰值负荷压力。本研究为充电桩布局优化提供了理论框架与技术路径, 对推动城市交通-能源系统协同发展具有实践意义。

关键词: 充电桩优化布局; 多目标优化; 合作博弈; 时空耦合模型; 用户满意度

DOI: 10.69979/3029-2700.25.07.096

引言

电动汽车 (EV) 凭借零排放、低噪音及能源多样化优势, 已成为全球交通低碳转型的核心方向^[1]。当前布局失衡问题凸显: 空间分布上, 充电桩过度集中于城市中心及商业区, 而居民区、城郊及高速公路沿线覆盖率不足, 导致“充电荒漠”与“资源闲置”并存^[2]; 服务容量上, 部分区域高峰时段排队率超 85%, 而低需求区利用率不足 20%, 加剧电网局部过载风险^[3]。

多方利益冲突加剧布局复杂性: 用户追求低时间成本与费用, 但动态电价与交通拥堵耦合导致成本波动; 运营商倾向高收益区快充桩密集建设, 忽视社会公平性; 电网需平衡负荷稳定性与充电需求, 限制桩群部署密度^[4]。

未来路径需融合多学科创新: 基于车联网 (V2X) 与人工智能技术, 构建动态需求预测-资源调度模型; 通过合作博弈平衡用户、运营商与电网利益, 设计动态定价策略。充电桩布局优化不仅是技术问题, 更是涉及城市规划、能源管理与社会公平的系统工程, 需多方协同以实现交通-能源系统可持续发展。

1 文献综述

电动汽车用户的出行行为模式与充电需求特征是充电基础设施规划的关键决策依据^[1,2]。电动汽车用户的出行行为和充电需求特征, 是充电基础设施规划的关键依据。用户充电行为的时空差异, 像通勤规律、电量阈值偏好等, 直接影响充电桩的布局和服务容量^[1,2]。为量化这些影响, 现有研究构建需求预测模型, 结合出行数

据分析和机器学习算法, 实现区域充电需求的动态映射^{[1][3]}。

针对用户个性化需求和资源分配效率的矛盾, 学者提出多维度协同优化方法。路径规划上, 集成改进算法和排队理论, 构建实时反馈机制, 使充电时间减少 19.3%。基于集合覆盖理论的模型, 优化了充电等待时间, 目标函数收敛速度提高 41%^{[4][5]}。

充电桩布局优化模型多样, 基于不同目标和约束, 有鲁棒优化选址模型等。为优化布局, 研究者认为用户需求变为综合模式, 提出流融合选址模型。也有研究用出行日志开发模拟器, 强调信息共享^[6]。充电桩布局需考虑用户需求和配电网负荷。充电桩与配电网协调优化, 深度耦合电能、交通和信息流, 提升电网灵活性和稳定性^[7]。

充电桩布局要平衡各方利益, 学界构建多维度优化框架。如智能充电调度算法缓解电网压力, 还有集成双层随机规划的决策框架应对需求时空演化和设施部署约束^{[7][8]}。

随着数据技术发展, 基于大数据和人工智能的用户行为分析和需求预测更准确高效。布局优化方面, 多目标优化等应用广泛。能源互联网技术发展, 充电设施与配电网协同向高阶演进, V2G 技术实现多模态耦合^{[9][10]}。针对利益平衡问题, 可用博弈论和平衡模型提出合理方案。从系统视角, “交通 - 能源” 协同优化的充换电网络, 为 “零碳交通走廊” 提供保障^[12,13]。

2 考虑路网状况、电网负荷的时空分布模型

2.1 路网

对于引导用户充电,考虑动态路网信息,包括路况的突发事件、拥堵状况、信号灯等,针对复杂的路网环境,本文所研究的城市路网区域包含 M 条道路、 N 个道路节点,可用所示的图论 $G=(V, E, W, B)$ 方式描述。

2.2 电网

由于本文考虑的是该环境中所有充电站的设施布局,因此约束条件应考虑该域配电网的安全,从充电功率和变压器容量约束两方面进行衡量^[15]:

1、在 EV (电动汽车) 充电过程中,为避免安全事故的出现,其充电功率应当被控制在规定的允许区间之内:

$$s.t. \quad P_{\min} < P_{EV} < P_{\max}$$

式中, $P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别表示最小、最大充电功率。

3 计及用户满意度的充电站选择决策模型

用户的综合满意度,主要通过时间成本与费用成本这两个维度来进行考量。其中,时间成本涵盖了两个部分:一是 EV 用户从起始位置行驶至充电站的路途时间,二是从开始充电直至电池充满期间的等待时长。而费用成本,则由充电所需的费用以及相应的服务费用构成^[12]。

3.1 时间成本

$$\min \quad T_{\text{total}} = T_{\text{road}} + T_{\text{wait}}$$

式中: T_{total} 为 EV 用户充电的综合时长; T_{road} 为 EV 用户从初始点行驶至充电站的路径时长; T_{wait} 为 EV 用户从未充电到充满电的等待时长。

由于电动汽车到达充电站的随机性,因此对模型中等待时间的衡量进行一个预测。电动汽车前往充电站的充电活动符合 M/G/k 排队模型^[11]。

3.2 充电费用

为引导 EV 用户进行合理充电并保障配电网的负荷稳定,充电成本的计算考虑了动态电价机制。

$$\min \quad C^t = C_{\text{electric}}^t + C_{\text{service}}^t$$

式中: 从左至右分别表示为 EV 用户在 t 时的充电费用、EV 用户在 t 时的充电电价、EV 用户在 t 时的充电服务费。在本文中,根据变压器负载率的不同,将其运行状态划分为低谷、平段、高峰和尖峰四个区间,每个区间对应着不同的电价标准。

4 合作博弈模式下的动态定价策略

EV (电动汽车) 的充电行为紧密连接起了用户、充电站以及配电网三者之间的关系。鉴于各自的利益来说,有必要基于三方之间的博弈关系,对用户、充电站以及配电网各自的利益展开深入分析^[15]。

本文所提出的合作博弈模型包含 4 个关键要素,分别是参与人、策略集、目标函数和特征函数,将其定义为 (F, P_e, f_1, u) 。在这个模型中: F 代表着合作博弈参与者的集合; P_e 是策略集; f_1 作为联盟目标函数,体现了联盟中个体进行合作博弈的目标; u 则是联盟特征函数,反映了合作联盟在博弈结束后所获得的收益。

5 模型求解

为解决多目标优化问题,运用了经过改良的 NSGA-II 算法,以此来生成 Pareto 前沿解集。而后,借助模糊决策理论,从解集中挑选出最终的方案。具体的选择方式是,将隶属度最高的充电站确定为推荐方案。

模型优势与创新性:

1、动态耦合性: 融合实时路网信息与排队论,精准刻画交通拥堵和服务能力对用户决策的影响;

2、多目标协同: 通过归一化系数平衡时间与费用成本,适应不同用户偏好;

3、求解高效性: 改进的 NSGA-II 算法提升 Pareto 解集覆盖率,模糊决策增强方案可解释性。

仿真结果表明,本模型相较传统单目标优化方法,用户综合满意度提升,解集覆盖率提高。

6 总结

合理优化电动汽车充电桩布局,是绿色交通发展的关键。针对充电桩布局存在的供需失衡、用户满意度低及利益冲突等问题,本文提出多维度协同优化方法,为充电桩布局优化提供新路径,也为交通 - 能源融合提供理论支撑。未来计划整合车联网大数据与人工智能算法,提升需求预测和调度精准度,挖掘电动汽车移动储能价值。

参考文献

- [1] 王震坡,张瑾,刘鹏,等. 电动汽车充电站规划研究综述[J]. 中国公路学报,2022,35(12):230-252.
- [2] Kumar A K ,Sam B ,M. J. H , et al. Multi-stakeholder perspectives for transport electrification: A review on placement and scheduling of electric vehicle charging infrastructure[J]. Jo

- urnal of Cleaner Production,2023:427.
- [3]Xiangke C ,Zhenji Z ,Fang L , et al.Layout evaluation for electric vehicle charging pile based on charging frequency[J]. Journal of Intelligent Fuzzy Systems,2021,41(4):4735-4747.
- [4]徐薇,陆玮洁,陈志强. 基于鲁棒优化的电动汽车充电站点流融合选址模型[J]. 系统管理学报,2024,04(20):1-20.
- [5] Mouna Kchaou-Boujelben.Charging station location problem: A comprehensive review on models and solution approaches.Transportation Research Part C: Emerging Technologies[J]. 2021,11(132),103376.
- [6] Babu M S V K ,Pratyush C ,Mayukha P .Planning of fast charging infrastructure for electric vehicles in a distribution system and prediction of dynamic price[J].International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2024:155.
- [7]袁晓冬,甘海庆,王明深,等. 车联网环境下电动汽车主动充电引导模型[J]. 电力系统自动化,2024,48(07):159-168.
- [8]苏粟,王建祥,王磊,等. 基于动态哈夫模型及双边匹配的电动汽车充电引导策略[J]. 电力系统自动化,2024,48(07):181-189.
- [9] Davidov S .Optimal charging infrastructure planning based on a charging convenience buffer[J]. Energy,2020,192116655-116655.
- [10] Anker C V ,Jeppe R .Optimal placement and sizing of charging infrastructure for EVs under information-sharing[J]. Technological Forecasting Social Change,2023,187.
- [11]黄洁,高阳,付晓,等. 基于出行链的新能源汽车公共充电站点可达性研究——以北京市为例[J]. 地理研究,2022,41(12):3305-3317.
- [12]穆云飞,金尚婷,赵康宁,等. “人-车-桩-路-网”深度耦合下的配电网协同规划与运行优化[J]. 电力系统自动化,2024,48(07):24-37.
- [13] Yaxian W ,Zhenli Z ,Tomas B .Benefit distribution in shared private charging pile projects based on modified Shapley value[J].Energy, 2023,263.
- [14]尚夏,王美佳,许刘晓,等. 城市区域电动汽车充电设施配置优化[J]. 浙江大学学报(工学版),2020,54(06):1210-1217.