

引用格式:张美霞,付御临,杨秀.基于电动汽车充换电需求时空分布的充换电设施规划[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):126-137.

Citation: ZHU Chen, WANG Mingxi, ZHANG Yang, et al. Planning of charging and battery swapping facilities based on spatio-temporal distribution of charging and battery swapping demand of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 126-137.

基于电动汽车充换电需求时空分布的 充换电设施规划

张美霞, 付御临, 杨秀

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要:近年来随着电动汽车(electric vehicle, EV)保有量上升,新能源汽车充换电设施需求量同步增加。然而,单一的充电设施无法满足不同类型车辆的充换电需求,为此,提出一种充电桩与换电站的混合规划方法。首先,利用海量网约车订单数据进行数据挖掘和出行特征提取,得到充换电负荷的时空分布;随后,根据充电需求信息建立充电桩规划模型,确定各功能区充电桩的布局规模,以满足EV充电便捷性的需求,再针对换电站错峰运行成本过高的问题,构建基于有序充电的换电站双层规划模型,并通过改进灰狼优化(Grey Wolf optimization, GWO)算法求解各目标成本;最后,以成都市二环交通网络和IEEE 33节点系统为例,对无序和有序充电模式下的换电站规划进行仿真分析。仿真结果表明:所提混合规划方法能够使EV用户获得方便、快速的供电;有序充电模式下换电站的规划结果不仅经济且有利于配电网稳定运行。

关键词:电动汽车;数据挖掘;有序充电;充电桩;换电站;混合规划

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.013 **中图分类号:** TM727 **文章编号:** 1673-9140(2025)01-0126-12

Planning of charging and battery swapping facilities based on spatio-temporal distribution of charging and battery swapping demand of electric vehicles

ZHANG Meixia, FU Yulin, YANG Xiu

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

Abstract: With the increase in the number of electric vehicle (EV) in recent years, the demand for charging and battery swapping facilities of new energy vehicles is also increasing. However, a single-function charging facility cannot meet the charging and battery swapping needs of different types of vehicles. To address this issue, a hybrid planning method for charging piles and battery swapping stations is proposed. First, massive ride-hailing order data is mined to extract travel features and the spatio-temporal distribution of charging and battery swapping demands. Based on the charging demand, a charging pile planning model is established to determine the scale of charging piles in each functional area, ensuring convenient charging for EVs. In view of the high cost of staggered operation of battery swapping stations, a two-layer planning model that integrates ordered charging is constructed, and each target cost is solved using an improved Grey Wolf optimization (GWO) algorithm. Finally, by taking the second ring traffic network of Chengdu City and the IEEE 33 node system as examples, the planning of the battery swapping stations under unordered and ordered charging modes is simulated and analyzed. The results show that the proposed hybrid planning method enables EV users to charge conveniently and quickly. The ordered charging mode for battery swapping stations is both economical and conducive to the stable operation of the distribution network.

Keywords: electric vehicle; data mining; ordered charging; charging pile; battery swapping station; hybrid planning

电动汽车(electric vehicle, EV)作为清洁能源产品的典型代表,在缓解能源危机和减少环境污染

方面发挥了重要作用,各国高度重视并积极支持电动汽车的发展。截至2022年底,中国EV保有量已

收稿日期:2024-01-30;修回日期:2024-06-21

基金项目:国家自然科学基金(52207121)

通信作者:杨秀(1972—),男,博士,教授,主要从事分布式发电与微电网运行与仿真的研究;E-mail:yangxiu721103@126.com

超过 1 045.3 万辆,充电桩数量达到 521.0 万个,其中公共充电桩仅占 179.3 万个。随着 EV 数量的迅速增长, EV 充换电设施的规划和建设面临着巨大挑战^[1]。为此, 2022 年中国发改能源规[2022]53 号文提出了加快电动汽车充换电设施建设的指导意见^[2], 凸显了充换电设施建设的紧迫性和重要性。

EV 负荷预测为充换电设施规划研究的基础, 国内外学者针对 EV 负荷预测展开了研究。随着大数据理念的不断推广, 文献[3]应用网约车数据, 通过提取 EV 出行特征, 构建数据-模型混合驱动的模式, 提高了 EV 负荷预测精度; 文献[4-5]基于数据挖掘和区域聚类的方式, 对国外 EV 出行和充电数据进行分析, 解决了 EV 驾驶员行为的随机特性对模型中行为相关参数分布特性的影响。

充换电设施规划受多种因素影响, 文献[6-10]考虑了地价、经济和环境对充电站规划的影响; 文献[11-14]综合考虑交通网络、交通流和配网等因素, 建立了考虑用户充电便捷性的多目标充电站选址和容量模型; 文献[15-16]从技术合理性、可靠性、服务性和经济性 4 个方面来评价配电网的接纳能力, 为充换电设施规划提供了新的研究视角; 文献[17-18]综合考虑配电网-EV 用户-充电站三方面利益, 以充电站建设运维成本、用户便捷性、充电时间和等待时间, 建立了基于微软管理控制台 (microsoft management console, MMC) 排队论的充电站选址模型; 文献[19-20]针对 EV 保有量和增长率不确定性的问题, 综合多方利益构建了充电站动态规划模型; 文献[21]考虑路况和电网对换电站规划的影响, 权衡了电网投资和用户充电满意度。近年来, 随着 EV 行业的大幅发展, 在充电设施规划方面也存在一些问题, 如文献[22-25]中提到的充电站占地面积大、高昂的投资成本以及服务性差等问题。

上述研究考虑了多种因素, 为充换电规划提供了新的思路, 但这些研究大多集中在某一类型的充电设施方面, 而单一类型的充电设施往往不能同时满足不同类型车辆的充换电需求。

目前, 充换电设施规划问题多采用启发式算法 (模拟退火^[26-27]、免疫算法^[28]等) 求解, 该算法能快速准确地得到最优规划方案。文献[29]首先根据区域因素筛选候选充电站, 然后在满足最大充电需求和确定充电站服务半径的条件下, 以年社会综合成本最小为目标, 运用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法解决充电站规划问题。近年来, 灰狼优化 (Grey Wolf optimization, GWO) 算

法因其收敛速度和精度比 PSO 算法更优, 逐渐被运用于求解规划问题, 但在求解多维动态函数优化问题时, GWO 算法易陷入局部最优。因此, 本文采取改进 GWO 算法来求解规划问题。

在上述研究的基础上, 为了满足 EV 充换电需求, 本文提出一种充电桩和换电站混合规划的方法。首先基于出行概率矩阵, 结合蒙特卡罗法对每辆 EV 的行程过程进行仿真, 得到 EV 充换电需求的时空分布; 然后在此基础上, 确定各功能区充电桩规模, 考虑有序充电策略的换电站双层规划模型, 采用改进 GWO 算法求解规划模型; 最后, 以成都市二环城区为例进行仿真, 得到充电桩与换电站的混合规划方案, 并对充电桩规划结果与 2 种充电模式下换电站规划结果进行分析。仿真结果表明: 因充电桩服务特性, 用户排队等待时间较长, 而换电站弥补此缺点, 在有序充电策略条件下, 换电站通过分时电价吸引部分 EV 错峰换电, 不仅可以降低规划成本, 还能够进行削峰填谷。

1 总体框架

本文整体研究框架如图 1 所示, 主要包括基于数据挖掘的 EV 充换电负荷预测以及充电桩和换电站混合规划。

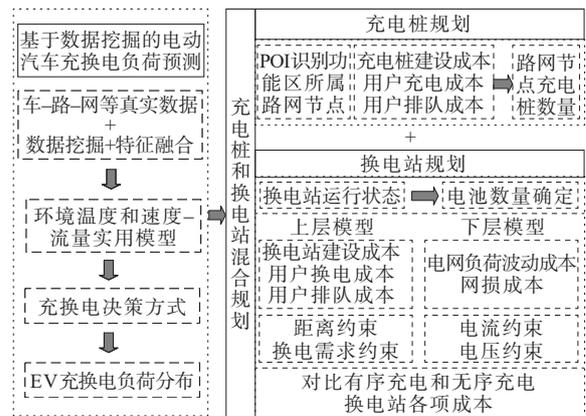


图 1 整体研究框架

Figure 1 Overall research framework

首先对交通网中车辆轨迹数据进行处理, 通过特征融合获取城市居民真实出行规律, 挖掘用户的行驶特征; 然后结合耗电量模型与充换电决策方式得出充换电负荷分布, 在此基础上对成都市二环交通网络进行信息点 (point of information, POI) 识别, 得出不同功能区所属路网节点。充电桩规划考虑运营商与用户两方面成本, 换电站规划考虑运营商、用户与配电网的三方面成本, 并对比 2 种充电模

式的各项成本。

2 EV 充换电负荷需求预测

因 EV 兼具电网的负荷特性与路网的交通特性,充分考虑交通网络以及 EV 出行规律等信息,通过挖掘海量车辆轨迹数据来提取用户出行特征是精确预测 EV 充换电需求的前提。

2.1 数据预处理

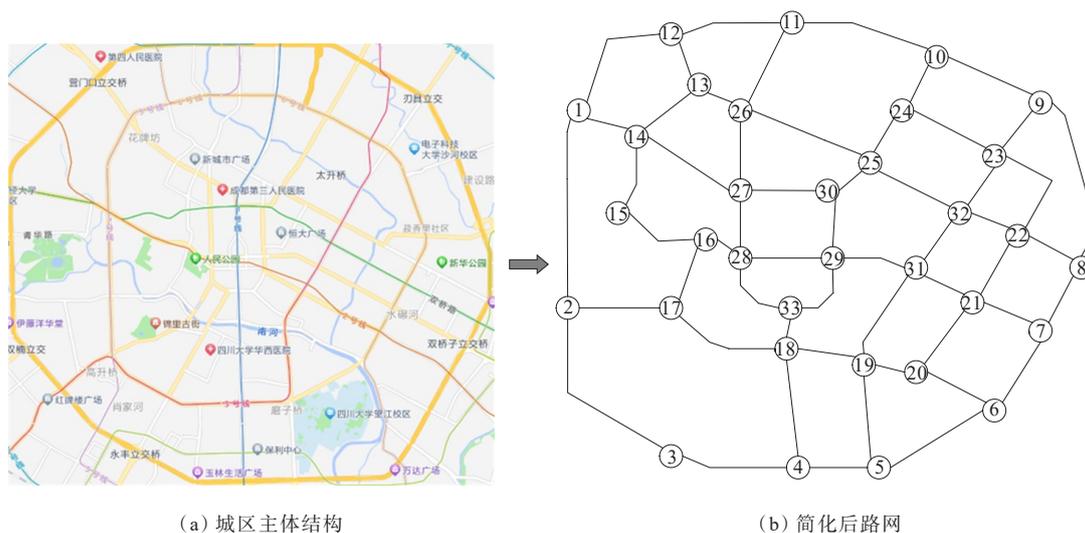
文中选自 2016 年 11 月 1 日—30 日的滴滴盖亚数据开放计划(<https://gaia.didichuxing.com>)提供的成都滴滴网约车订单数据集。数据集中包括私家车和出租车两类用户,各条数据时间间隔为 3~

4 s,数据集主要描述车辆 ID、位置信息等。

由于数据质量不高,故需要对数据进行预处理来提高其质量,具体步骤:①数据清洗,即针对数据集中重复错误、无用的数据进行删除;②数据转化,将标准时间类型数据转化成时间戳格式;③数据筛选,筛选出经纬度在成都市二环内数据(经度为 104.047 2~104.109 0,纬度为 30.638 5~30.691 2)。

2.2 成都市二环道路拓扑结构

本文参考文献[30],针对成都市二环区域构建充电桩与换电站混合规划模型,由 ArcGIS 网站获取路网图,选取一二级道路作为主要部分。城区主体结构及简化后路网如图 2 所示。



(a) 城区主体结构

(b) 简化后路网

图 2 成都市中心城区路网拓扑

Figure 2 Topology of road network in central urban area of Chengdu City

2.3 POI 功能区域划分

将所选区域内的建筑按照功能划分为居民区(H)、工作区(W)、商业区(B)及生活服务区(P),通过高德地图爬取研究区域内的 POI 数据。POI 数据包含地址、经纬度等信息,通过 POI 划分得到 4 大功能区所在的路网节点,如表 1 所示。

表 1 路网节点功能分区

Table 1 Functional zones of road network nodes

功能区	节点编号
居民区	1, 5, 8, 11, 16, 24, 31
公共服务区	3, 8, 9, 12, 14, 22, 29
工作区	2, 6, 13, 15, 23, 25, 28, 32, 33
商业区	17, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 30

2.4 换电站运行状态

换电站配备换电设备、电池充电机和电池,可

为 EV 提供换电服务,并对换电后的空电池进行充电,已完成充电的电池可提供换电服务。如果在一定时间内满电电池数量超过了换电所需的电池数量,则不需要额外增加电池,否则需要增加一定数量的电池。本文参考文献[31]所构建的换电站运行状态模型,得出一天内换电站所需配备的电池数量与电动汽车排队等待时间。

2.5 EV 充换电决策机制

本文将电池阈值功率下限设置为 $0.2Q$ (Q 为电池容量)。当电池电量无法满足下一航程所需电量时,存在充换电需求,即

$$G_d Q - \omega l_{d+1} < 0.2Q \quad (1)$$

式中, G_d 为电动汽车到达终点时的电池状态; ω 为用户单位里程耗电量; l_{d+1} 为下一航程公里数。

若满足条件式(1),则有 2 种供电方式如下。

1) 充电模式。若到达目的地后电池剩余电量

不足以完成下一行程,用户则可选择停车期间进行充电完成剩余行程,即

$$G_d Q + P_1 t_i > 0.2Q + \omega l_h \quad (2)$$

式中, P_1 为充电功率; l_h 为用户剩余行程; t_i 为第 i 辆车停留时间, 其从轨迹数据内不同功能区之间的车辆停留时间数据集中进行抽取。

2) 换电模式。用户选择换电模式的条件: 充电模式的容量不足以完成剩余行程, 并且距离相近的换电站可用电池数目能够满足用户换电需求数目, 此时用户选择换电模式, 否则用户只能选择充电模式。

私家车可以任选 1 种模式补充电能, 而出租车由于需要营利, 只选择换电模式。此外, 部分用户由于目的地充电桩数量不足无法充电, 只能在下次行程时选择更换电池来补充电能。

2.6 充换电需求建模

1) EV 行驶耗电模型。假设 EV 初始荷电状态 (state of charge, SOC) 为 0.9, 考虑环境温度和不同道路等级下行驶速度的单位里程耗电模型参考文献 [32]。使用 Dijkstra 算法进行最短路径规划。

2) EV 充换电负荷预测方法。基于 EV 充换电决策机制的私家车充换电需求预测过程如图 3 所示, 出租车换电需求在私家车的基础上只换电而不充电。

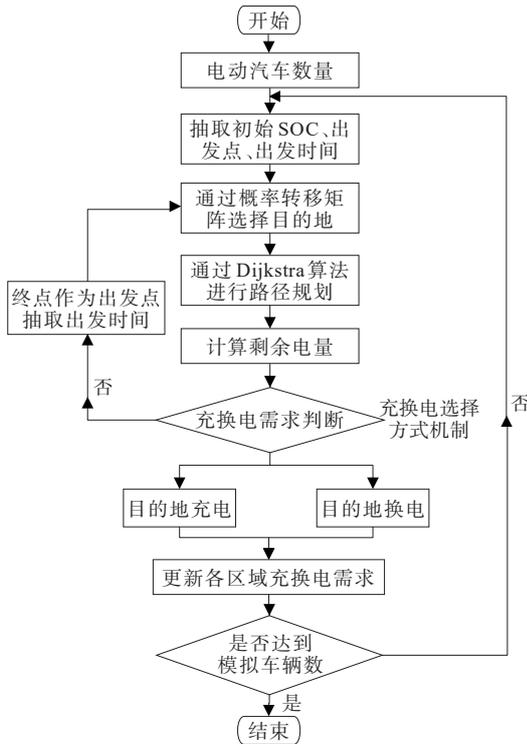


图 3 私家车充换电需求预测流程

Figure 3 Forecast flowchart of charging and battery swapping demands of private car

3 改进 GWO 算法

传统 PSO 算法因收敛速度较慢、容易陷入局部最优等缺点, 目前逐步被淘汰。新型的智能算法 (如 GWO 算法) 在解决多目标求解问题的效果比 PSO 算法更优, 但难免因自身算法缺点也会陷入局部最优。因此, 本文提出一种改进 GWO 算法来解决多目标优化问题。

3.1 灰狼种群更新

为进一步增强 GWO 算法的探索能力和加快收敛速度, 受 PSO 算法的启发, 从群体中随机选取个体与当前个体进行差分搜索, 同时, 将 PSO 算法中对粒子自身运动历史最优解进行记忆保存的思想引入 GWO 算法中, 对个体的记忆功能加以改进, 使其能够记忆自身进化过程中的最优解。因此, 本文设计一种修改的位置更新方程替代原位置更新方程, 即

$$\begin{cases} x_1 = x_\alpha - A_1 D_\alpha \\ x_2 = x_\beta - A_2 D_\beta \\ x_3 = x_\delta - A_3 D_\delta \\ x(t+1) = [x_\alpha(t) + x_\beta(t) + x_\delta(t)]/3 + \\ \quad b_1 r_3 [P_{i, best}^d(t) - x_i^d(t)] + \\ \quad b_2 r_4 [x_j^d(t) - x_i^d(t)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, x_1, x_2, x_3 分别为根据 α, β, δ 狼调整后的狼群位置; $x_\alpha, x_\beta, x_\delta$ 为 α, β, δ 狼的位置; A_1, A_2, A_3 为随机产生的系数向量; $D_\alpha, D_\beta, D_\delta$ 分别为 α, β, δ 狼与其他灰狼的距离向量; $x(t+1)$ 为更新后的子代狼群, t 为迭代次数; b_1 为个体记忆系数, b_2 为交流系数; r_3, r_4 为 $[0, 1]$ 的随机数; $P_{i, best}^d$ 为第 i 只灰狼个体所经历的最佳位置; x_j, x_i 为群体中随机选择的个体, 且 $j \neq i$, 通过调节系数 b_1 和 b_2 , 可以协调群体和个体记忆对灰狼算法搜索的影响。

3.2 精英保留策略

精英保留策略有利于加速种群内优秀个体的积累和进化, 提高算法的收敛性和求解精度。适应度排名前 10% 的个体直接复制到下一代; 然后采用与个体适应度值成正比的概率选择相应的个体, 产生随机数 $\epsilon \in [0, 1]$, 若随机数满足以下关系, 则选择个体 j 保留到下一代, 即

$$\sum_{i=1}^{j-1} f_i / \sum_{i=1}^P f_i < \epsilon \leq \sum_{i=1}^j f_i / \sum_{i=1}^P f_i \quad (4)$$

式中, f_i 为个体适应值; P 为种群数。

传统的精英策略只保留个体适应度值大的一

部分,带来的问题是,随着种群的不断进化,每一代个体适应度值大的一部分几乎趋于一致,因此种群的多样性在不断减弱。为防止优秀个体的丢失,将父代种群中领导者的最优解、次优解和第三优解作为精英个体进行保留,并与子代灰狼种群共同进行下一次迭代,即

$$x_a > x_b > x_c > x_m \quad (5)$$

式中, x_a, x_b, x_c, x_m 分别为各种群中最优、次优、第三优以及其余个体。

4 EV换电站与充电桩混合规划

4.1 充电桩规划模型

为满足用户充电便利性,本文在每个路网节点设置充电桩,综合用户-充电桩利益,构建充电桩规划模型。

4.1.1 目标函数

1) 充电桩建设投资成本,其表达式为

$$C_1 = \sum_{i=1}^H C_{\text{chg}} N_p \frac{v_0(1+v_0)^q}{(1+v_0)^q - 1} \quad (6)$$

式中, C_{chg} 为单个充电桩价格; N_p 为充电桩数量; v_0 为贴现率; q 为运行年限。

2) 用户前往充电桩时间成本,其表达式为

$$C_2 = 365u \sum_{i=1}^H \sum (L_{ij}/v) \quad (7)$$

式中, u 为单位时间耗时成本; L_{ij} 为用户前往充电桩距离; v 为用户行驶速度,本文设置为 30 km/h。

3) 用户排队等待时间成本。

参考文献[17]构建基于MMC排队理论的用户排队等待时间成本,表达式为

$$C_3 = 365C_w \sum_{N_i} W_i \sum_e N_e \quad (8)$$

式中, C_w 为电动汽车的耗时成本; W_i 为第 i 个充电桩的平均等待时长; N_i 为第 i 个充电桩; N_e 为前往第 i 个充电桩的电动汽车数量。

4) 用户充电成本,其表达式为

$$C_4 = 365 \sum_{i=1}^H \sum_{t=1}^{24} g(1 - S_{\text{OC},i})Q \quad (9)$$

式中, g 为电能价格; $S_{\text{OC},i}$ 为电动汽车到达充电桩的SOC状态;本文设置 Q 为 70 kW·h。

4.1.2 约束条件

1) 路网节点中充电桩数量约束,约束条件为

$$M_{d,\min} \leq M_d \leq M_{d,\max} \quad (10)$$

式中, $M_{d,\min}, M_{d,\max}$ 分别为路网节点中充电桩最小和最大的数量。

2) 排队等待时间约束,约束条件为

$$W_q \leq W_{q,\max} \quad (11)$$

式中, $W_{q,\max}$ 为用户充电最大等待时间。

4.2 基于有序换电的换电站双层规划模型

双层规划模型相比于单层模型求解效率更高、速度更快,不易陷入局部收敛,且存在上、下层之间的逻辑关系以及目标函数之间的主从关系。因换电用户数量时段分布会影响上层目标函数,有序相比于无序换电的EV数量分布更加平稳,所以由净负荷波动、配电网网损成本作为下层目标函数。对此,本文建立基于有序充电的换电站双层规划模型,上层主要考虑换电站和用户各项成本,下层考虑配电网综合负荷波动成本等。双层规划流程如图4所示。

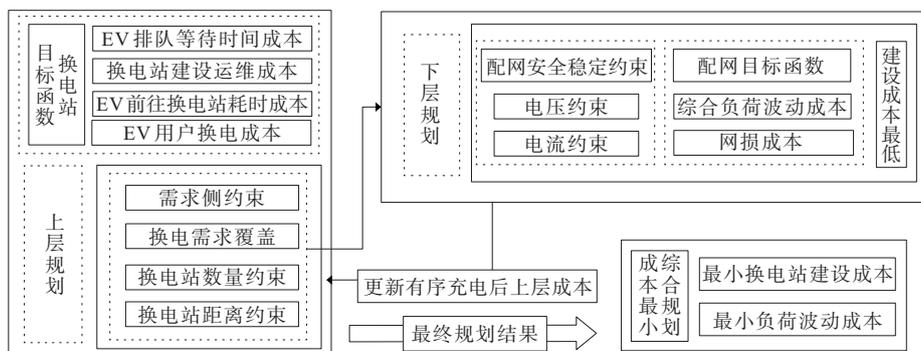


图4 双层规划流程

Figure 4 Two-layer planning flowchart

4.2.1 上层目标函数

上层目标函数为

$$\min F_1 = C_b + C_{\text{wait}} + C_{\text{EV}} + C_p \quad (12)$$

式中, F_1 为上层总目标成本; C_b 为换电站建设运维

成本; C_{wait} 为用户排队等待时间成本; C_{EV} 为用户前往换电站耗时成本; C_p 为用户换电成本。

1) 换电站建设运维成本包括固定投资、备用电池及充电机费用等;运行维护费用包括设备检修和

维护、员工薪酬等。年建设运维成本表示如下:

$$C_b = \sum_{i=1}^H \left[(f) \frac{v_0(1+v_0)^q}{(1+v_0)^q - 1} + F \right] \quad (13)$$

$$f = C_{\text{chr}} N_d^i + C_{\text{bat}} M_B^i + C_{\text{eh}} S_D^i \quad (14)$$

式(13)、(14)中, F 为年运行成本; C_{chr} 、 C_{bat} 、 C_{eh} 分别为单个充电机、电池、换电设备价格; N_d^i 、 M_B^i 和 S_D^i 分别为换电站充电机、电池和换电设备数量。

2) EV排队等待时间成本,其表达式为

$$C_{\text{wait}} = 365 Z_w \sum_{i=1}^H \sum_{t=1}^{24} \bar{W} \cdot N_H \quad (15)$$

式中, Z_w 为单位时间等待成本; N_H 为换电站所服务的电动汽车数量; \bar{W} 为平均等待时间。

3) EV前往换电站耗时成本,其表达式为

$$C_{\text{EV}} = 365 u \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^H (L_{kj}/v) \quad (16)$$

式中, L_{kj} 为用户前往换电站距离; v 设置为30 km/h。

4) 用户换电成本,其表达式为

$$C_p = 365 \sum_{i=1}^H \sum_{t=1}^{24} g(1 - S_{\text{OC},i}^d) Q \quad (17)$$

式中, g 为电能价格; $S_{\text{OC},i}^d$ 为用户到达第*i*个换电站的SOC状态。

4.2.2 上层约束条件

考虑用户和换电站目标函数后的约束如下。

1) 换电设备数量约束,约束条件为

$$S_{d,\min} \leq S_d \leq S_{d,\max} \quad (18)$$

式中, $S_{d,\min}$ 、 $S_{d,\max}$ 分别为换电设备数量最小和最大值。

2) 电池充电机数量约束,约束条件为

$$N_{d,\min} \leq N_d \leq N_{d,\max} \quad (19)$$

式中, $N_{d,\min}$ 、 $N_{d,\max}$ 分别为充电机数量最小值与最大值。

3) 换电距离约束。为了用户有更好的出行体验,用户到达换电站的距离应小于最大换电距离约束,约束条件为

$$K_{ij} \leq K_{ij,\max} \quad (20)$$

$$C_p = a \cdot \text{ceil}(K_{ij} - K_{ij,\max}) \quad (21)$$

式中, $K_{ij,\max}$ 为最大换电距离,若超过最大换电距离,则根据式(21)进入惩罚并加入运维成本; a 为惩罚系数。

4) 排队等待时间约束。为提高用户满意度,排队时间需满足:

$$\bar{W} \leq \bar{W}_{t,\max} \quad (22)$$

式中, $\bar{W}_{t,\max}$ 为车辆最大等待时间。

4.2.3 下层目标函数

将上层目标函数的结果作为下层目标函数的约束,下层目标函数考虑负荷波动和用户换电成本,即

$$\min F_2 = C_{\text{fluc}} + C_{\text{loss}} \quad (23)$$

式中, F_2 为下层总目标成本; C_{fluc} 为系统综合净负荷成本; C_{loss} 为配电网网损成本。

1) 系统综合净负荷成本,其表达式为

$$C_{\text{fluc}} = 365 \sum_{t=1}^{24} \left[P_h(t) - \sum_{i=1}^{24} P_h(t)/24 \right]^2 \quad (24)$$

式中, $P_h(t)$ 为*t*时段内系统综合负荷。

2) 配电网网损成本,其表达式为

$$C_{\text{loss}} = 365 g \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^H I_{ij}^2 R_{ij} \quad (25)$$

式中, I_{ij} 、 R_{ij} 分别为配电网线路电流和电阻。

4.2.4 下层约束条件

主要考虑用户换电和系统综合净负荷成本。基于此,约束如下。

1) 节点电压约束,约束条件为

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (26)$$

式中, U_i^{\min} 、 U_i^{\max} 分别为第*i*个节点电压最小和最大值。

2) 线路电流约束,约束条件为

$$I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} \quad (27)$$

式中, I_{ij}^{\max} 为第*ij*条线路所允许流经的最大电流。

4.3 求解策略

采用改进GWO算法进行充电桩和换电站选址定容规划的具体步骤如下:

1) 读取成都市区域内各道路节点充换电需求信息,由此确定充电桩和换电站建设数量范围;

2) 设置种群规模为*N*,最大迭代次数为*t*,群体交流系数为*b*₁,个体记忆系数为*b*₂;

3) 随机产生灰狼种群,种群内每个灰狼设置充电桩和换电站数量的上、下限(每次求解逐步增加其数量),将换电站的横、纵坐标位置以及站内电池和充电机数量等每一个目标作为一个维度;初始化灰狼各种参数(如速度、位置、种群规模);

4) 计算不同充电桩、换电站数目时的各项费用及其总成本,并将总成本当作灰狼的适应度;取适应度值最优解、次优解和第三优解的灰狼为 α 、 β 、 δ ;每个灰狼个体代表区域的换电站规划方案;

5) 由式(3)对灰狼位置更新;选择目标函数最优的3只狼为 α 、 β 、 δ ,生产子代狼群,并将父代狼群中的 α 、 β 、 δ 狼作为精英个体进行保留;

6) 返回步骤3)重新计算各参数,直到满足最大迭代次数,完成数据处理工作;列出不同换电站数目对应的最优解,并从中选择最优方案输出全局最优解,此时所得到的方案即为综合最优的选址定容规划方案。

5 算例分析

5.1 换电站选址相关参数

本文以成都市二环城区为例进行充换电设施规划研究。假设规划区内有私家车6000辆和出租车4000辆,规划区内配电网采用IEEE 33节点系统,路网与配电网耦合如图5所示,其他参数如表2、3所示。

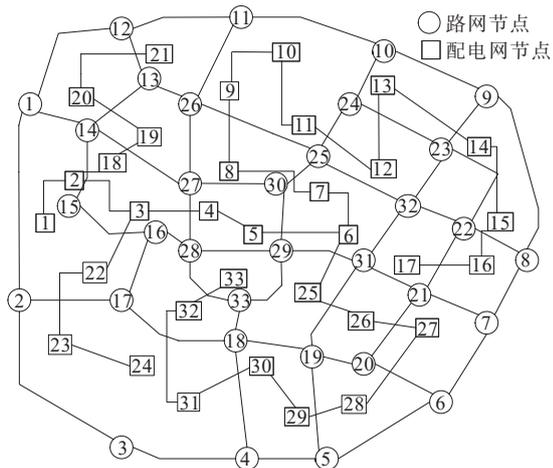


图5 路网与配电网节点耦合示意

Figure 5 Road network and distribution network node coupling

表2 各时段电价设置

Table 2 Electricity price setting for each time period

时段	起止时间	电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
低谷	00:00—08:00	0.363
平	12:00—17:00, 21:00—24:00	0.687
高峰	08:00—12:00, 17:00—21:00	0.870

表3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数名称	数值及单位	参数名称	数值及单位	参数名称	数值及单位
V_0	5%	$N_{d,min}$	10台	a	10 000元
q	20 a	$N_{d,max}$	55台	C_w	18.44元/h
F	20万/座	C_{chg}	1万/台	$M_{d,min}$	0个
C_{chr}	3万/套	S_{min}	4套	$M_{d,max}$	30个
C_{bat}	3万/台	S_{max}	13套	$W_{q,max}$	15 min
Z_w	25元/h	$L_{ij,max}$	3 km	C_{eh}	4万/套
u	30元/h	$\bar{W}_{t,max}$	5 min		

5.2 充电桩规划结果

根据所提充电需求预测方法,居民区充电车辆数最高达到348辆,在18:00—20:00达到峰值;工作区充电车辆数最高为274,在06:00—08:00达到峰值;商业区和公共服务区充电车辆数较低,高峰时分别为158、147辆,如图6所示,可以看出,EV总充电需求在16:00—18:00达到峰值。居民区充电需求在此时段达到峰值,工作区在07:00—08:00达到峰值,商业区充电需求在10:00—15:00达到峰值,公共服务区充电需求在08:00—12:00达到峰值。这与电动汽车的行驶规律基本一致。

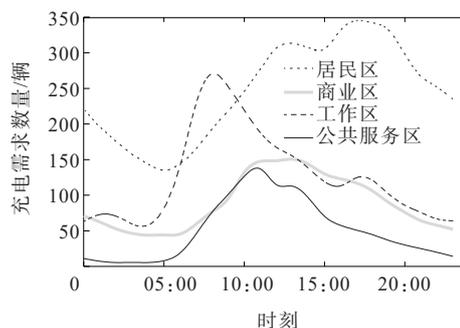


图6 各功能区充电需求数

Figure 6 Number of charging demands for each functional zone

由改进GWO算法可求得各区域部署的充电桩数量,充电桩规划结果如图7所示(各功能区所属路网节点见表1),居民区充电需求较大,其对应节点所部署的充电桩数量较多,如路网节点1、5、11等,最大数量达到20;工作区充电需求比居民区低,其路网节点所需部署的充电桩数量适中,如路网节点32、33,数量在10个左右;商业区充电需求较少,其充电桩数量较低,其中19、20节点因远离城区,所需部署的充电桩数量最低为2个。根据区域内部署的充电桩数量可得充电桩各项成本,如表4所示。

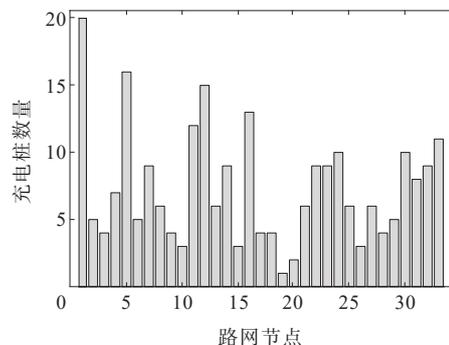


图7 充电桩规划结果

Figure 7 Charging pile planning results

表 4 充电桩各项成本

Table 4 Charging pile costs 万元

充电桩数量	建设投资成本	充电成本	耗时成本	排队时间成本	年社会综合成本
175	525.9	983.5	194.1	448.3	2 151.8
208	624.7	983.5	93.8	387.5	2 089.5
244	732.6	983.5	38.4	304.9	2 059.4
296	882.3	983.5	38.4	238.4	2 142.6
335	1 056.2	983.5	38.4	182.1	2 260.2

由表 4 可知,相比于换电模式,充电模式下的排队时间成本较高,区域中选择充电的用户远大于选择换电的用户,其充电成本也相对较高;因充电桩价格低于电池价格,其建设成本也远低于换电站的建设运维成本。当充电桩数量较低时,因部分路网节点未安装充电桩,故其耗时成本、排队时间成本较高。随着充电桩数量的增加,年社会综合成本先降低后升高,当充电桩数量为 244 时,其年社会综合成本最低为 2 059.4 万元,244 即为区域中最优的充电桩数量个数。

5.3 换电需求预测结果

不同时段换电需求数量如图 8 所示,可知 06:00—09:00 和 16:00—19:00 换电需求较为集中;07:00—08:00 和 17:00—18:00 时换电需求数量达到峰值。

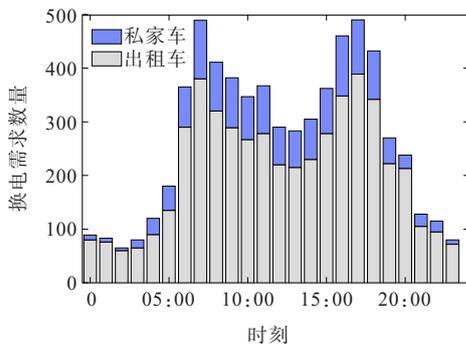


图 8 换电需求数量

Figure 8 Number of battery swapping demands

5.4 无序充电模式下的换电站规划结果

无序充电方式指的是,无论配电网的负载状态如何,都对完成换电后的蓄电池进行及时充电。无序充电模式下换电站各项成本如表 5 所示,随着换电站数量的增加,年社会综合成本先下降后上升,当换电站数量为 8 时,年社会综合成本最低为 2 999.8 万元,规划区内换电站最优数量即为 8。各站址坐标、所连接的配电网节点号、充电桩数量、电池数量以及各换电站服务的 EV 数量如表 6 所示;各

换电站站点分布如图 9 所示,充电桩、电池数量与换电站服务的 EV 数量呈正相关。

表 5 无序充电模式下换电站各项成本

Table 5 Cost of battery swapping station in unordered charging mode 万元

换电站数量	建设运维成本	换电成本	换电距离惩罚值	耗时成本
6	1 423.9	483.5	145	294.1
7	1 481.4	483.5	90	213.8
8	1 540.1	483.5	62	148.3
9	1 591.2	483.5	54	137.6
10	1 652.2	483.5	49	127.7

换电站数量	排队等待时间成本	网损成本	负荷波动成本	年社会综合成本
6	248.3	104.1	440.5	3 139.4
7	227.5	118.9	440.5	3 055.8
8	204.9	120.5	440.5	2 999.8
9	198.4	115.9	440.5	3 021.1
10	182.1	107.8	440.5	3 042.8

表 6 无序充电模式下各换电站规划结果

Table 6 Planning results of battery swapping station in unordered charging mode

换电站编号	充电桩数量	电池数量	换电设备数量	服务汽车数量	配电网节点号
A	28	31	8	592	19
B	21	24	7	486	22
C	42	46	11	938	28
D	47	52	13	1 057	5
E	29	33	8	618	31
F	39	42	10	845	11
G	44	51	13	1 041	14
H	24	29	8	605	17

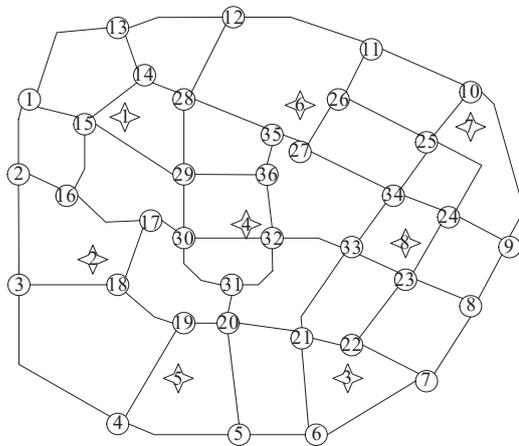


图 9 无序充电模式下换电站分布范围

Figure 9 Distribution range of battery swapping station in unordered charging mode

5.5 有序充电模式下的换电站规划结果

基于有序充电的换电站双层规划模型,换电站能够通过分时电价吸引部分出租车进行错峰换电。当换电站采取有序充电策略后,因凌晨电价较低,部分出租车在此时段进行换电;部分私家车在12:00—14:00的电价平时段进行换电。对完成换电的蓄电池立即充电,换电站能够削峰填谷。不同充电模式下区域总负荷如图10所示。

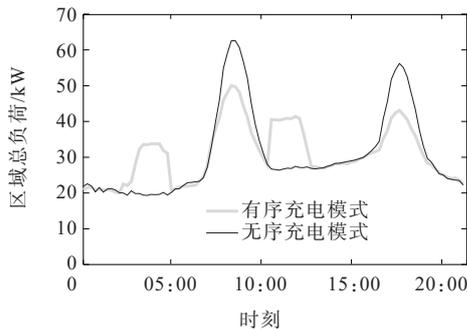


图10 不同充电模式下区域总负荷

Figure 10 Total area load in different charging modes

有序充电模式下换电站各项成本如表7所示,有序充电下的最优换电站数量也是8个;各换电站规划结果如表8所示;各换电站站点分布如图11所示。在换电站数量最优的情况下,有序充电模式小于无序充电模式下的年社会综合成本,这是因为有序充电模式下负荷曲线相对平稳、峰值下降,最大换电需求约束值、充电机以及电池数目减少,综合成本降低。

表7 有序充电模式下换电站各项成本

Table 7 Cost of battery swapping station in ordered charging mode

ordered charging mode					万元
换电站数量	建设运维成本	换电成本	换电距离惩罚值	耗时成本	
6	1 195.3	251.4	145	294.1	
7	1 242.5	251.4	90	213.8	
8	1 285.7	251.4	62	148.3	
9	1 335.4	251.4	54	137.6	
10	1 398.8	251.4	49	127.7	
换电站数量	排队等待时间成本	网损成本	负荷波动成本	年社会综合成本	
6	248.3	98.6	220.7	2 453.4	
7	227.5	112.6	220.7	2 358.5	
8	204.9	113.1	220.7	2 286.1	
9	198.4	102.6	220.7	2 300.1	
10	182.1	96.6	220.7	2 326.3	

表8 有序充电模式下各换电站规划结果

Table 8 Planning results of battery swapping station in ordered charging mode

换电站编号	充电机数量	电池数量	换电设备数量	服务汽车数量	配电网节点号
A	23	28	7	618	20
B	18	23	5	509	1
C	33	38	8	855	29
D	36	44	10	1 065	5
E	21	28	7	646	24
F	26	34	8	860	9
G	29	39	10	992	27
H	23	29	7	638	12

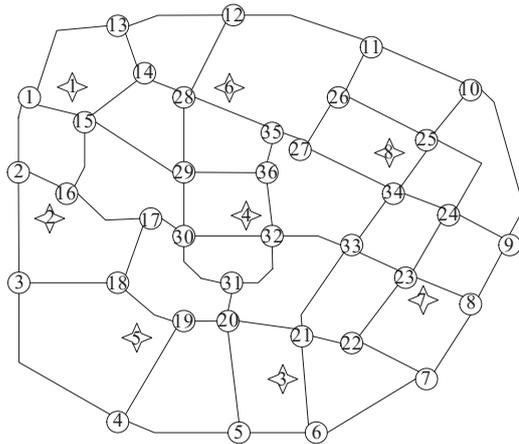


图11 有序充电模式下换电站分布范围

Figure 11 Distribution range of battery swapping station in ordered charging mode

不同算法迭代情况对比如图12所示,文献[33-34]运用PSO、遗传算法(genetic algorithm, GA)解决充电站规划问题,本文所提改进GSO算法的搜索速度比普通智能(PSO、GA)和GSO算法更快,适应度值更小、不易陷入局部最优,所提规划方案更优、求解速度更快。

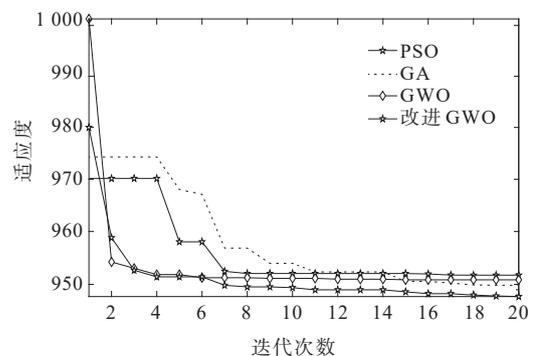


图12 不同算法迭代情况对比

Figure 12 Comparison of different algorithm iterations

5.6 2种充电模式下换电站规划结果分析

从表5、7可以看出,换电站的建设运维成本与换电站数量呈正相关,换电距离惩罚值逐渐减少,用户的平均等待时间小于5 min;从图9、11可以看出,换电站分布较为均匀,能够充分利用投资为规划区内的电动汽车提供换电服务。

从经济角度分析,由表5~8可以得出,有序充电模式下换电站所需要的充电桩、电池数量变低,建设运维成本、换电成本、网损成本和负荷波动成本均下降。因此,其年社会综合成本比无序充电模式下低713.7万元(最优换电站数量为8)。

从配电网运行安全角度考虑,无序充电和有序充电模式下规划区域的峰值负荷分别为63.54、51.48 MW(图10),因此,有序充电模式下更有利于配电网的安全运行。

6 结语

本文提出了一种充电桩和换电站混合规划方法,并以成都二环城区实际路网和IEEE 33节点为例,验证了所提模型的可行性。仿真结果表明:

1) 通过对网约车行驶数据的挖掘,可以得到更符合城市居民出行特性的出行规律、动态模拟充换电需求时空分布情况;得到不同功能区充电高峰时段,其中居民区充电高峰位于18:00—20:00、工作区位于06:00—08:00、商业区位于12:00左右、部分私家车和出租车的换电需求分别在07:00—08:00和17:00—18:00达到峰值;基于此结果可为充换电设施规划模型提供实际应用价值;

2) 考虑了EV充电需求,结合POI识别得到不同功能区的充电桩规划,各路网节点均设有充电桩,因此,充电桩规划可以满足EV的充电便捷性需求;

3) 换电站的规划可以满足EV的换电需求;换电站通过分时电价引导出租车在夜间凌晨换电;在降低换电站规划成本的前提下还能参与电网辅助服务、进行削峰填谷,有序充电规划结果不仅更加经济,而且年社会综合总成本比无序充电模式下低713.7万,其中建设运维成本、用户换电成本、网损成本以及负荷波动成本分别减少了254.4、232.1、7.4、219.8万,其负荷峰谷差比无序充电模式下减少12.49 MW,更利于配电网安全稳定运行。

未来对于换电站可以制定电池充放电策略,其作为储能装置还可以参与电网辅助调频。此外,考

虑新能源出力的不确定性,需均衡新能源消纳效率和换电站容量配置。后续将考虑光伏与换电站的混合规划。

参考文献:

- [1] 刘博文. 充换电基础设施产业升级建议[J]. 中国电力企业管理, 2022(33):44-46.
LIU Bowen. Suggestions for upgrading the charging and swapping infrastructure industry[J]. China Power Enterprise Management, 2022, (33):44-46.
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局, 工业和信息化部, 等. 关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669780.htm, 2022-01-10.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Implementation opinions on further improving the service guarantee capacity of electric vehicle charging infrastructure[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669780.htm, 2022-01-10.
- [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] SHEPERO M, MUNKHAMMAR J. Spatial Markov chain model for electric vehicle charging in cities using geographical information system (GIS) data[J]. Applied Energy, 2018, 231:1089-1099.
- [5] XYDAS E, MARMARAS C, CIPCIGAN L M, et al. A data-driven approach for characterising the charging demand of electric vehicles: a UK case study[J]. Applied Energy, 2016, 162:763-771.
- [6] 宋亚辉. 城市电动汽车充电设施布局规划研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
SONG Yahui. Research on the layout planning of electric vehicle charging station in the city[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [7] 陈光, 毛召磊, 李济沅, 等. 计及碳排放的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 49-53+136.
CHENG Guang, MAO Zhaolei, LI Jiyuan, et al. Multi-objective optimal planning of electric vehicle charging stations considering carbon emission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 49-53+136.
- [8] 官嘉玉, 江修波, 刘丽军. 考虑电动汽车随机充电行为及

- 低碳效益的充电站规划[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 93-100
- GUAN Jiayu, JAING Xiubo, LIU Lijun. Optimal allocation of charging stations considering stochastic charging behavior and low carbon efficiency of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 93-100.
- [9] 万玲玲, 陈中, 王毅, 等. 考虑能量时空转移的城市规模化共享电动汽车充放电优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 135-143.
- WAN Lingling, CHEN Zhong, WANG Yi, et al. Optimal charging and discharging scheduling of urban large-scale shared electric vehicles considering energy temporal and spatial transfer[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 135-143.
- [10] 车彬, 张泽龙, 杨燕. 考虑 V2G 储能特性与负荷需求响应的主动配电网低碳鲁棒调度[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 29-39.
- CHE Bin, ZHANG Zelong, YANG Yan. Research on the low-carbon robust dispatch of active distribution networks considering storage characteristics of V2G and load demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 29-39.
- [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, LYV 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] 尚龙龙, 程俊杰, 王伟, 等. 计及交通拥堵的电动汽车充电站规划方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 66-76.
- SHANG Longlong, CHENG Junjie, WANG Wei, et al. An electric vehicle charging station planning method considering traffic congestion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 66-76.
- [13] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 考虑车流信息与配电网容量约束的充电站规划[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 582-589.
- GE Shaoyun, FENG Liang, LIU Hong, et al. Planning of charging stations considering traffic flow and capacity constraints of distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 582-589.
- [14] 李高扬, 王宁, 高若田, 等. 面向新型电力系统智能化提效的多源异构数据融合技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 116-121.
- LI Gaoyang, WANG Ning, GAO Ruotian, et al. Research on multi-source heterogeneous data integration technology for smart efficiency improvement in new-type power systems[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 116-121.
- [15] 田梦瑶, 汤波, 杨秀, 等. 综合考虑充电需求和配电网接纳能力的电动汽车充电站规划[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 498-509.
- TIAN Mengyao, TANG Bo, YANG Xiu, et al. Planning of electric vehicle charging stations considering charging demands and acceptance capacity of distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 498-509.
- [16] 邵佳佳, 陈小毅, 戴媛媛, 等. 基于随机森林的纯电动汽车公共充电需求研究[J]. 供用电, 2023, 40(9): 58-64.
- SHAO Jiajia, CHEN Xiaoyi, DAI Yuanyuan, et al. Research on public charging demand of electric vehicles based on random forest[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 58-64.
- [17] 张美霞, 徐立成, 杨秀, 等. 基于电动汽车充电需求时空分布特性的充电站规划研究[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 256-268.
- ZHANG Meixia, XU Licheng, YANG Xiu, et al. Planning of charging stations based on spatial and temporal distribution characteristics of electric vehicle charging demand[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 256-268.
- [18] 沈筱琦, 方鑫, 谭林林, 等. 基于居民出行模拟的电动汽车负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 130-139.
- SHEN Xiaoyi, FANG Xin, TAN Linlin, et al. Prediction of spatio-temporal distribution of electric vehicle load based on residential travel simulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 130-139.
- [19] 臧海祥, 傅雨婷, 陈铭, 等. 基于改进自适应遗传算法的 EV 充电站动态规划[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 163-170.
- ZANG Haixiang, FU Yutin, CHEN Ming, et al. Dynamic planning of EV charging stations based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 163-170.
- [20] 王可淇, 赵子涵, 钟俊, 等. 基于改进模拟退火遗传算法的配电网动态故障恢复策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 16-22.
- WANG Keqi, ZHAO Zihan, ZHONG Jun, et al. Dynamic fault recovery strategy for distribution network based on improved simulated annealing genetic algorithm[J]. Smart Power, 2024, 52(6): 16-22.
- [21] 卢慧, 谢开贵, 邵常政, 等. 考虑燃油车和电动汽车动态混合交通流的电动汽车充电站规划[J]. 高压技术, 2023, 49(3): 1150-1160.
- LU Hui, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Charging station planning with the dynamic and mixed traffic flow of gasoline and electric vehicles[J]. High Voltage Engineering 2023, 49(3): 1150-1160.
- [22] 赵书强, 周靖仁, 李志伟, 等. 基于出行链理论的电动汽车充电需求分析方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37

- (8):105-112.
ZHAO Shuqiang, ZHOU Jinren, LI Zhiwei, et al. EV charging demand analysis based on trip chain theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 105-112.
- [23] 李宏仲, 张伟, 高宇男, 等. 考虑用户出行特性和配电网线路可用裕度的充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 48-56.
LI Hongzhong, QIANG Wei, GAO Yunan, et al. Charging station planning considering users' travel characteristics and line availability margin of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 48-56.
- [24] 蔡子龙, 王品, 宋建, 等. 电动汽车公共应急充电站选址规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 62-68.
CAI Zilong, WANG Pin, SONG Jian, et al. Location planning model of public emergency charging stations for electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 62-68.
- [25] 贾俊, 范炜豪, 吕志鹏, 等. 用于电动汽车集群并网的直流变压器启动研究[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 875-882.
JIA Jun, FAN Weihao, LYU Zhipeng, et al. Research on startup of DC transformer for electric vehicle cluster grid-connection[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 875-882.
- [26] 艾欣, 李一铮, 王坤宇, 等. 基于混沌模拟退火粒子群优化算法的电动汽车充电站选址与定容[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 9-14.
AI Xin, LI Yizheng, WANG Kunyu, et al. Locating and sizing of electric vehicle charging station based on chaotic simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 9-14.
- [27] 高超, 王志武, 冯玉辉, 等. 基于模拟退火法与多层感知机的变压器故障诊断模型及其泛化性能研究[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 77-85.
GAO Chao, WANG Zhiwu, FENG Yuhui, et al. Fault diagnosis model of transformer and its generalization performance based on simulated annealing and multilayer perceptron[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 77-85.
- [28] 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' behaviors and travel chain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 59-65+77.
- [29] 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(增刊2): 190-202.
MA Xiufan, LI Yin, WANG Hao, et al. Research on demand of charging piles based on stochastic simulation of EV trip chain[J]. Transaction of China Electrotechnical Society 2017, 32(Sup2): 190-202.
- [30] 张美霞, 张倩倩, 杨秀, 等. 基于交通-电力均衡耦合的电动汽车快充站与配电网联合规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 51-63.
ZHANG Meixia, ZHANG Qianqian, et al. Joint planning of electric vehicle fast charging stations and distribution network based on a traffic-electricity equilibrium coupling model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 51-63.
- [31] ZHANG L, HUO R, CAI G, et al. A joint planning method of charging piles and charging-battery swap stations considering spatial-temporal distribution of electric vehicles[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022.
- [32] 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.
- [33] 麻秀范, 王皓, 李颖. 基于变权 Voronoi 图和混合粒子群算法的电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 160-169.
MA Xiufan, WANG Hao, LI Yin. Optimal planning of charging stations for electric vehicle based on weight-changed voronoi diagram and hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. transaction of china electrotechnical society, 2017, 32(19): 160-169.
- [34] 王华莹, 李勇, 朱辉, 等. 考虑配电网负荷的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(11): 134-141.
WANG Huaying, LI Yong, ZHU Hui, et al. Planning of electric vehicle charging stations considering distribution network load[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(11): 134-141