

DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.25100157

营运类乘用车换电站协同规划及实证研究

李孟山, 周 宽*, 侯鲁平, 庞清仑, 王翰林

(国家电投集团综合智慧能源有限公司, 北京市 西城区 100044)

摘要: 在全球能源转型与新能源汽车产业高速发展的背景下, 换电站作为关键补能基础设施, 其布局优化对提升服务效率与电力基础设施效能至关重要。该文以 B 市营运类乘用车换电市场为研究对象, 通过市场调研获取换电出租车运营数据, 引入混合队列模型, 建立基于动态稀释效应的饱和度预测模型, 同时提出了耦合泰森多边形与粒子群算法的融合算法。基于上述方法, 构建了“预测-优化-布局”的协同规划体系, 量化了政策敏感性与供需的互动关系。经蒙特卡洛模拟验证了 2025 年理论新增换电站 23 座的预测可靠性; 通过“换电站-充电枪”协同配置 (65 座换电站+4 把充电枪) 将用户平均等待时间控制在 10 min 内, 实际建站需求优化至 13 座; 利用动态空间划分与全局寻优耦合, 解决了高密度城区站址优化难题。研究成果为换电网络规划提供了兼顾服务效率与投资成本的可落地方案, 也可为分布式电力基础设施优化提供参考。

关键词: 换电站规划; 动态稀释效应模型; 饱和度预测; 蒙特卡洛模拟; 混合队列模型

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

Collaborative Planning and Empirical Research of Battery Swap Stations for Operational Passenger Vehicles

LI Mengshan, ZHOU Kuan*, HOU Luping, PANG Qinglun, WANG Hanlin

(State Power Investment Corporation Integrated Smart Energy Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: Against the backdrop of global energy transition and the rapid development of the new energy vehicle industry, as critical refueling infrastructure, the optimal layout of battery swap stations is essential for enhancing both service efficiency and power infrastructure effectiveness. This study focuses on the operational passenger vehicle battery swap market in City B. Operational data of battery-swap taxis are obtained through market research. A hybrid queueing model is introduced to establish a saturation prediction model based on dynamic dilution effects. Additionally, a fusion algorithm coupling the Voronoi diagram with the particle swarm optimization algorithm is proposed. Based on the aforementioned methods, a “prediction-optimization-layout” collaborative planning framework is constructed, quantifying policy sensitivity and supply-demand interactions. The reliability of the prediction of 23 theoretically new battery swap stations by 2025 is further verified through Monte Carlo simulation. Through the coordinated allocation of battery swap stations and charging guns (65 stations + 4 charging guns), the average user waiting time is controlled within 10 min, and the actual station construction demand is optimized to 13 stations. By integrating dynamic spatial partitioning with global optimization, the challenge of site optimization in high-density urban areas is addressed. The research findings provide an implementable solution for battery swap network planning that balances service efficiency and investment costs and also offer valuable insights for optimizing distributed power infrastructure.

This work is supported by Project of Beijing Xicheng District Science, Technology and Informatization Bureau (Record No. 3 [2024])

KEY WORDS: battery swap stations planning; dynamic dilution effect model; saturation prediction; Monte Carlo simulation; hybrid queue model

基金项目: 京西城科信局项目 (备[2024]3 号)

© Editorial Department of Distributed Energy Journal 2026. Published by Tsinghua University Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

0 引言

在全球能源结构转型与新能源汽车产业高速发展的背景下,新能源营运类乘用车已经成为了城市交通的重要组成部分,而其补能效率直接影响运营收益与城市出行服务质量。换电站作为新能源汽车的分布式补能基础设施,比充电模式拥有更快的补能速度^[1],能够解决营运类乘用车用户便捷补能的刚性需求,有效减少车辆等待时间,其布局规划对提升服务效率与电力基础设施效能至关重要。截至 2024 年 11 月,中国换电站保有量有 4 193 座^[2]。

然而,换电站作为新兴产业,空间布局层面存在供给过剩与覆盖不足的二元矛盾,导致核心区域等待时间过长、非重点区域资源闲置等问题,阻碍了其进一步发展。针对无序布局状态下的漫长巡站、时间浪费问题^[3],有必要根据新能源车辆市场情况规划充换电站,满足用户的补能需求和最优化的资产配置,助力配电网的稳定运行^[4]。

在研究对象和场景上,现有补能设施研究多聚焦于充电桩^[5-8],换电站相关研究则多以公共交通^[9]、换电重卡^[10-11]等特定线路的换电规划^[12]预测为主,例如文献^[13-14]分别针对公交系统和高速公路场景进行选址分析。在研究方法上,通过进化算法^[15-16]进行多目标优化分析^[17]的方法受到了广泛应用,例如文献^[18]设计改进带精英策略的非支配排序遗传算法,为电动汽车换电站网络规划提供了依据。文献^[19]构建以年均综合费用最小为目标的多因素数学模型,采用改进的量子粒子群算法确定了 4 座换电站的最优布局。文献^[20]基于系统动力学对电动汽车保有量进行动态预测,构建考虑扩建的电动汽车充电站多阶段规划模型。

但现有研究存在一定局限:(1)对实际应用场景的结合不足,尤其缺乏政策驱动下营运车辆供需动态互动的深入分析;(2)研究对象尚未聚焦营运类车辆,且缺少换电站与充电枪的协同配置分析;(3)在高密度城区站址优化方面缺少可落地的解决方案。

基于此,本文以 B 市营运类乘用车换电市场为研究对象,构建“预测-优化-布局”协同规划体系。基于动态稀释效应的饱和度预测模型,量化政策敏感性与供需互动关系,并采用蒙特卡洛模拟验证;引入混合队列模型,通过“换电站-充电枪”协同配置优化实际建站需求;耦合泰森多边形与粒子群优化(Voronoi diagram & particle swarm optimization, Voronoi-PSO)算法,解决高密度城区的站址优化难题,旨在为换电

网络规划提供兼顾服务效率与投资成本的可落地方法,为分布式电力基础设施优化提供参考。

1 B 市换电市场调研

1.1 市场情况

评估营运类新能源车辆换电补能市场规模是进行换电站布局规划、制定对应策略的前提。

在营运类新能源车辆方面,以 B 市换电出租车为例开展市场分析。截至调研基准日,B 市出租车保有量约 6.7 万辆,运营活跃度超过 95%,单车日均运营里程为 230~250 km。车辆结构呈现梯度分布:换电出租车 4.8 万辆,占比达 71.6%,其中 A 车型 3.6 万辆,B 车型 1.2 万辆;燃油出租车保有量约为 1.8 万辆。该市出租车更新情况受到强政策驱动,预计 2025 年底将完成燃油出租车全面电动化,共计新增换电车型 2.2 万辆,届时换电出租车保有量约 7 万辆。

在运营服务体系方面,为保障新能源出租车补能需求,采用“可充可换”的多元化补能模式。基于日均换电频次计算可知,当前实际采用换电模式的运营出租车约 2.4 万辆,其余 2.4 万辆以充电为主要补能方式。由此可知,预计 2025 年底,对应增加日均活跃换电车辆 1.1 万辆。为进一步推进换电技术路线,B 市拟逐步引导司机加入换电网络。若考虑 20% 充电车辆转用换电,可额外新增换电车辆 7 000 辆;若完全实施则预期可达到 50% 充电车辆转换,日活跃换电车辆将达 5.25 万辆。

在换电基础设施方面,B 市出租汽车换电基础设施网络建设取得显著进展。全市已建成出租汽车专用换电站超 180 座,其中某头部企业占比超 7 成,实际投入商业化运营的换电站超百座,平均利用率约为 32%,日均单站换电服务频次约 200 次。空间分布特征存在显著差异:主城区及重点功能区约建成 52 座换电站,日均单站换电次数超 250 次,平均利用率超 65%;非重点区域换电站数量占比超 50%,而平均利用率约 10%。这种空间分布差异与城市交通出行强度、人口密度及基础设施布局存在显著相关性。B 市换电站布局情况如图 1 所示。

在运营效能方面,B 市典型换电站的日均时刻换电次数如图 2 所示,可知换电站运营高峰期中午以及午夜时段,单小时内换电次数峰值约占整体换电次数的 6%。补能方式的选择与服务费价格和补能时间息息相关,目前用户预期的换电站等待时间不超过 10 min,否则优选充电。

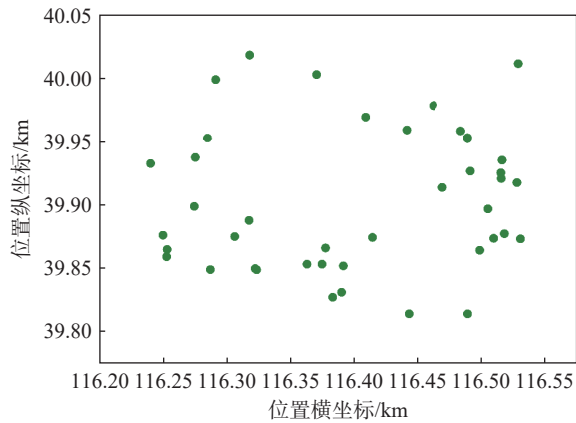


图1 B市部分换电站布局模拟图

Fig. 1 Layout simulation map of partial battery swap stations in city B

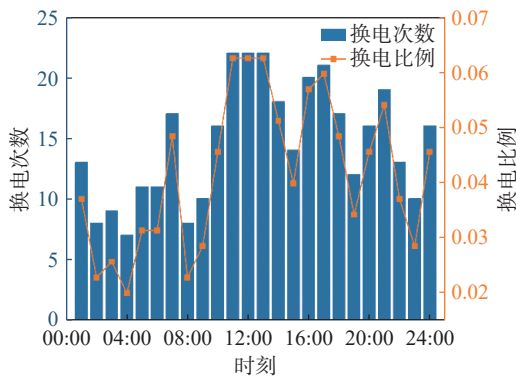


图2 某换电站单日车流量分布图

Fig. 2 Daily vehicle traffic distribution map of a battery swap station

1.2 研究逻辑

基于车站匹配原则,从B市补能市场规模入手,分析总体市场需求,构建区域换电市场预测模型,确定换电站潜在缺口,进而构建混合队列模型并进行优化,得到最优的充换电站协同配置,提出Voronoi-PSO融合算法,实现站址布局预测,如图3所示。

2 换电站饱和度预测模型

2.1 模型构建

为量化换电站供需平衡关系,预测可新增换电站数量,研究综合换电车辆数量、日换电次数、换电站经济利用率等参数,构建了基于动态稀释效应的预测模型,对应边界条件设置如表1所示。

现有的换电网络满足

$$CAB = R_0 n_0 N_0 \quad (1)$$

对于新增换电网络,若不考虑原有换电网络对

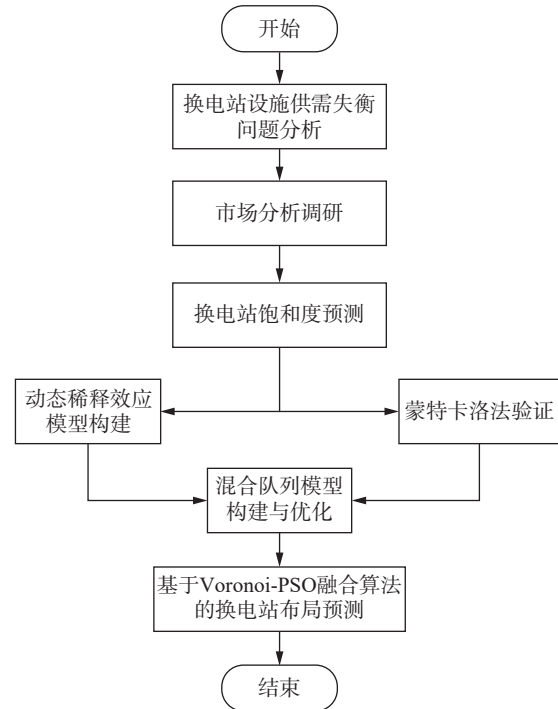


图3 逻辑框架图

Fig. 3 Logical framework diagram

表1 换电站边界条件

Table 1 Boundary conditions for battery swap stations

参数	边界值
现有日活换电车辆数 C	24 000
新增日活换电车辆数 C_x	11 000
车辆日换电次数 A	1.03
区域市场权重 $B/\%$	58
现有换电站日最大换电次数 n_0	960
现有换电站数量 N_0	52
现有换电站平均利用率 $R_0/\%$	30
新增换电站利用率 $R_x/\%$	32
新增换电站日最大换电次数 n_1	960
政策转换率 $P_t/\%$	10

新增换电车辆的影响,可得到简化的换电站计算公式,即新增车辆全部到新增换电站进行换电,新增换电站数量 N_x 为

$$N_x = \frac{C_x AB}{R_x n_1} \quad (2)$$

式中 R_x 高于单站资本金内部收益率为15%的最低利用率。

若考虑现有换电网络对新增换电车辆的稀释效应,以及新增换电站对现有换电站利用率的双向稀释,则对应的计算公式为

$$\frac{N_x}{N_0 + N_x} (C + C_x) AB = R_x n_1 N_x \quad (3)$$

式中 $N_x/(N_0+N_x)$ 可视为稀释因子, 该因子的选取可根据实际情况进行调整。调节新增换电站和已有换电站权重, 式 (3) 简化后可得

$$N_x = \frac{(C + C_x)A}{R_x n_1} B - N_0 \quad (4)$$

考虑 B 市出租车市场换电站供需边界条件呈现显著政策敏感性, 提出基于 Logistic 函数的非线性转换模型, 并引入平滑因子:

$$T_r = \frac{1}{1 + e^{-\frac{C_x - 11000}{100}}} \quad (5)$$

综合政策影响的非线性模型为

$$N_x = T_r N_{x1} + (1 - T_r) N_{x2} \quad (6)$$

其中:

$$N_{x1} = \frac{(C + C_x)(1 + P_f)A}{R_x n_1} B - N_0 \quad (7)$$

$$N_{x2} = \frac{CP_f + (C + C_x)(1 - P_f)A}{R_x n_1} B - N_0 \quad (8)$$

2.2 不确定度分析

为量化参数不确定性对结果的影响, 研究采用蒙特卡洛模拟方法^[21-22], 并对各参数的概率分布进行合理假设, 假设如表 2 所示。

表 2 关键影响因素边界表

Table 2 Boundary table of key influencing factors

参数	分布类型	数值范围	假设原因
C_x	正态分布	$\mu=11\ 000, \sigma=300$; $C_x \in [9\ 000, 13\ 000]$	数据显示日活车辆数呈钟形分布, 符合自然波动特征
A	三角分布	$a=1, b=1.2, s=1.05$	日换电次数符合少数车辆高频换电、多数车辆低频换电的分布特征, 常接近下限, 分布左偏
B	均匀分布	$B \in [0.5, 0.7]$	不同区域的市场权重无明显差异, 进行等概率假设
R_x	三角分布	$a=0.3, b=0.5, s=0.36$	数据显示利用率接近下限, 分布左偏
P_f	三角分布	$a=0.1, b=0.3, s=0.2$	政策转换率预期为 20%, 增大 15%~25% 范围内预期

研究通过 120 万次采样模拟计算, 得到新增换电站增量的统计特征如图 4 所示。换电站期望值为 22.3 座, 中位数 21.5 座。基于非参数 Bootstrap 方法进行 1 000 次重采样计算的 95% 置信区间为 [22.29, 22.33], 验证了估计值的稳定性。 N_x 近似服从正态分布, 右尾轻微延伸, 存在少数高增量场景。

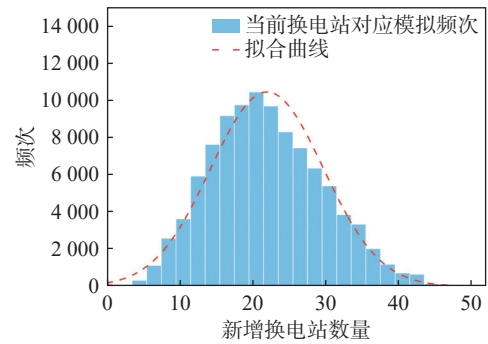


图 4 部分蒙特卡洛预测结果的分布图

Fig. 4 Distribution map for partial results of Monte Carlo prediction

研究基于 Sobol 法, 通过逾 50 万次采样得到相关参数的全局敏感性分析, 结果如图 5 所示, 可见: 车辆日换电次数是影响换电站饱和度的最关键参数, 其一阶敏感性指数达 0.097 0, 总效应指数达 1.043 5; 其余参数均存在一定程度的影响。

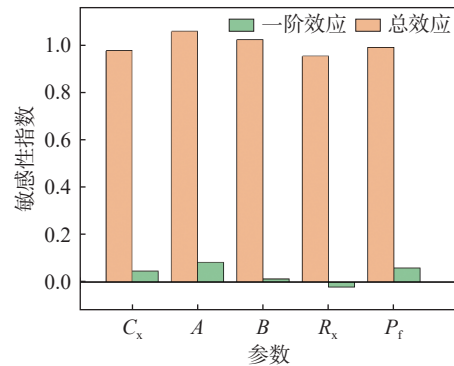


图 5 基于 Sobol 法的全局敏感性分析图

Fig. 5 Global sensitivity analysis diagram based on Sobol method

研究采用 Pearson 相关系数来衡量参数与换电站饱和度增量的相关性, 结果如表 3 所示。新增换电站利用率与结果的 Pearson 相关系数达 -0.68, 这表明新增换电站利用率与换电站饱和度增量之间存在很强的负相关关系。由表 3 可知, 相关性分析与全局敏感性分析结果趋势一致, 相互印证, 进一步说明了相关参数在换电站规划建设中的重要地位。

表 3 参数敏感性、相关性指数表

Table 3 Table of parameter sensitivity and correlation indices

参数	一阶敏感性指数	总效应指数	相关性系数
新增日活换电车辆数	0.043 3	0.977 7	0.056 2
车辆日换电次数	0.097 0	1.043 5	0.246 7
区域市场权重	0.000 8	1.029 3	0.613 5
新增换电站利用率	-0.013 3	0.933 0	-0.684 7
政策转换率	0.052 4	0.986 8	0.222 2

2.3 模型验证

根据饱和度预测模型,在对应的参数下计算可知,到2025年底,需新增换电站数量为22.87座。理论公式与模拟结果对比显示,饱和度增量的均值绝对误差为0.57座,相对误差为2.49%,证实了模型的工程适用性。

特殊场景验证表明:在冬季高需求场景($A=1.2$ 次/天)下,新增换电站数量为35.2座;当政策转换率提升至0.3时,新增容量可增至36.48座;复合场景($A=1.2$ 次/天且 $P_r=0.3$)下新增容量为51.08座。

结果表明,基于动态稀释效应的饱和度分析模型,能够有效应对极端条件,具有较高预测精度,可为不同政策和运营场景下的换电站建设规划提供科学依据。

3 混合队列优化分析

3.1 基本假设

为提升换电站的服务效率,满足用户的需要,研究建立了充换电站混合队列模型,基于排队理论对平均排队时间进行测算,根据排队时长优化目标,深入探讨实际换电站建站需求。

由于换电站服务时间短,能够实现快速补能需求,在该补能场景中适用先来先服务的排队算法^[23],模型假设如下:

(1)到达过程,车辆顾客平均到达间隔服从泊松分布^[24],到达率为 λ (单位“辆/h”)。

(2)资源配置,每个换电场景站仅配置1座换电站、0~4把充电枪,构成多服务台并系统^[25]。

(3)排队规则,换电车辆为等待制,若预估等待时间超过10 min,则选择充电,否则不会因电池未充满等因素而拒绝换电服务。

(4)服务机制,充换电站服务时间基本固定,可视为符合负指数分布。单个服务台的换电平均服务率 $\mu_{\text{swap}}=20$ 辆/h,单个服务台的充电平均服务率 $\mu_{\text{charge}}=2.6$ 辆/h^[26]。

3.2 控制方程

在上述假设基础上,采用爱尔兰C公式对混合队列充换电站模型进行计算。

服务台的利用率 ρ 为

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} \quad (9)$$

式中: c 为服务台数量; μ 为平均服务率。

系统中没有顾客的概率 P_0 为

$$P_0 = \begin{cases} 1 - \rho, & c = 1 \\ \left\{ \sum_{j=0}^{c-1} \left[\frac{1}{j!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^j + \frac{1}{c! (1-\rho)} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c \right] \right\}^{-1}, & c > 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中 j 为服务台编号。

顾客到达时需要排队的概率 P_{wait} 为

$$P_{\text{wait}} = \frac{1}{c! (1-\rho)} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c P_0 \quad (11)$$

顾客平均排队时间 W_q 为

$$W_q = \frac{P_{\text{wait}}}{\mu \left(c - \frac{\lambda}{\mu} \right)} \quad (12)$$

3.3 模型求解

为了优化排队时长,将换电站平均排队时间控制在10 min以内,使用上述模型预测2025年末换电站-充电桩协同配置下的换电站排队时间,结果如图6所示。

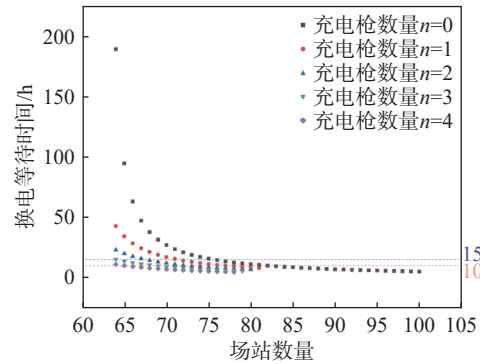


图6 不同配置情况下的排队等待时间

Fig. 6 Queuing waiting time of different configuration scenarios

根据场地经济性复核,出具充换电站配置方案如图7、表4所示。

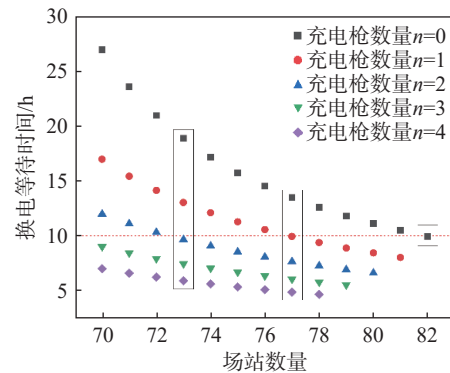


图7 配置方案图

Fig. 7 Configuration scheme chart

表 4 排队时间限制下充换电站配置
Table 4 Battery swap and charging station configuration under queuing time constraint

换电站数量	充电枪数量	排队等待时间/min
82	0	9.95
77	1	9.94
73	2	9.66
69	3	9.66
65	4	10.00

基于优化后的排队时长, 研究发现 2025 年底 B 市及重点区域预期换电站建站需求最低为 13 座, 比 2.3 节的预测减少约 10 座, 并满足市场需求。该研究为优化换电站布局、提高服务效率提供了理论依据, 有助于降低用户等待时间、提升换电网络整体运营效率。

4 换电站布局规划

4.1 模型构建

为进一步解决高密度城区换电站场址优化难题, 使用本文 Voronoi-PSO 融合算法, 预测未来优质站点布局, 形成高密度区域补网、低负荷区域避撞的补网规划^[27-28]。

以现有换电站坐标集 Q 为输入值, 通过 Voronoi 图生成服务单元 V , 量化现有服务覆盖范围。每个单元 $V(q_i)$ 为到 q_i 的距离小于到其他任何现有站距离的点的集合, 通过计算单元面积 $S(V(q_i))$ 与换次 A_i 综合考量服务压力。算法优先将新站选址目标锁定在服务压力较高的单元, 为后续搜索划定重点区域。

$$Q_i = \{q_1, q_2, \dots, q_n\} \quad (13)$$

$$V(q_i) = \{V(q_1), V(q_2), \dots, V(q_n)\} \quad (14)$$

粒子位置直接编码为候选新站的经纬度坐标, 并通过现有站址的空间分布划定搜索边界。为平衡算法的全局探索与局部开发能力, 采用动态调整惯性权重 $\omega=0.4\sim0.9$, 使算法在迭代初期保持较强的全局搜索能力, 后期增强局部开发能力, 对候选点进行分阶段调整。粒子的速度更新公式为

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (p_{\text{best},i} - x_i(t)) + c_2 r_2 (p_{\text{best}} - x_i(t)) \quad (15)$$

式中: $v_i(t)$ 为粒子 i 在第 t 次迭代时的速度; c_1 和 c_2 分别为个体学习因子和社会学习因子, 均为 1.4; r_1 和 r_2 均为 0~1 之间的随机数; $p_{\text{best},i}$ 和 p_{best} 分别为粒子个体最优和全局最优位置; $x_i(t)$ 为粒子 i 在第 t 次迭代

时的位置^[29-30]。

适应度函数综合考虑需求匹配、空间均衡与建设合理 3 大指标, 具体为

$$F(x) = \frac{1}{D(x)} + \alpha S(V(q_i)) \quad (16)$$

$$D(x) = \sum_{i=1}^N A_i d(x, q_i) \quad (17)$$

式中: $D(x)$ 为候选点到所有现有站的加权距离和; α 为权重系数; $d(x, q_i)$ 为候选位置到第 i 个现有换电站的欧几里得距离。

4.2 结果分析

以 B 市重点区域为实现场景, 模拟实际规划中的滚动优化过程, 算法采用“分批迭代、动态加入”的策略, 确定了新增 13 座换电站的选址, 保证整体布局的适应性。新 Voronoi 图如图 8 所示, 验证了算法对重点区域过载问题的针对性优化能力。新建站址能够有效切割原有的超大服务区域, 降低建设成本, 避免资源重复投入。

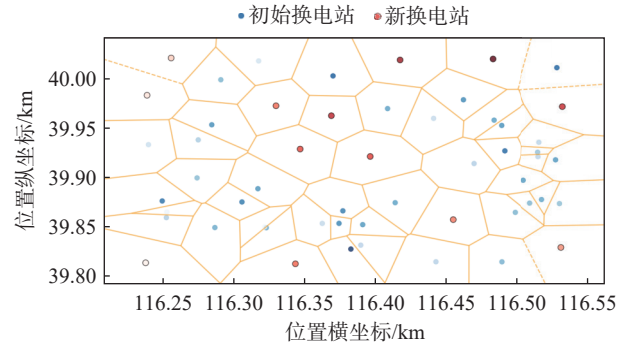


图 8 预期换电站布局 Voronoi 图
Fig. 8 Voronoi diagram for anticipated layout of battery swap stations

5 结论

围绕 B 市营运类乘用车换电站规划问题, 本文构建了“预测-优化-布局”的协同规划体系, 通过模型构建、算法设计与实证分析, 得出以下结论:

(1) 通过市场调研分析, 构建了基于动态稀释效应的换电站饱和度分析模型, 有效量化了政策引导与市场需求的交互影响。通过蒙特卡洛方法分析验证表明, 模型具有较高精度, 关键参数敏感性分析为未来换电站的差异化规划、预警电网扩容需求提供了依据。研究表明, B 市五环内及重点区域换电站 2025 年理论需求为 75 座 (52 现有+23 新增)。

(2) 本文提出了混合队列模型, 实现了充换电设

施的协同规划,通过协同配置可优化用户的使用体验,实际的建站需求降低为 65 座,显著提升了资源利用效率;同时,提出了 Voronoi-PSO 融合算法,给出了新增换电站位置的优选方法,实现了高密度城区站址精准布局,有效缓解了核心城区的补能压力。

(3)研究为换电网络规划提供了兼顾服务效率与投资成本的解决方案,未来可探索换电站作为分布式储能节点的电网调节能力,以及多种类型换电站的动态规划协调能力。

参考文献

- [1] 王志远,郭贤,冉伦,等. 考虑充换电操作的新能源汽车换电站选址定容问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2024, 44(12): 3963-3978.
WANG Zhiyuan, GUO Xian, RAN Lun, et al. The location and capacity planning of new energy vehicle battery swapping stations with integrated charging and swapping operations[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2024, 44(12): 3963-3978.
- [2] 中商产业研究院. 2025 年中国换电站市场现状及发展前景预测分析[EB/OL]. [2024-12-24]. <https://m.askci.com/news/chanye/20241224/084008273500080865851276.shtml>.
China Merchants Industry Research Institute. Forecast analysis of the current situation and development prospects of China's power conversion station market in 2025[EB/OL]. [2024-12-24]. <https://m.askci.com/news/chanye/20241224/084008273500080865851276.shtml>.
- [3] 王雪燕,王新禹,李登雕,等. 基于自适应粒子群优化算法的电动汽车换电站选址模型设计[J]. *办公自动化*, 2024, 29(20): 58-60, 96.
WANG Xueyan, WANG Xinyu, LI Dengdiao, et al. Design of electric vehicle swapping station site selection model based on adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. *Office Informatization*, 2024, 29(20): 58-60, 96.
- [4] 刘祺,王承民,谢宁,等. 新型配电系统中考虑电动汽车差异化行为特性的充换电站规划方法[J]. *智慧电力*, 2024, 52(9): 18-24, 64.
LIU Qi, WANG Chengmin, XIE Ning, et al. Charging and swapping stations planning method considering differentiated behavior characteristics of electric vehicles in new distribution system[J]. *Smart Power*, 2024, 52(9): 18-24, 64.
- [5] 雒焕强,梁丽. 基于区块链的电动汽车共享充电交易模式研究[J]. *分布式能源*, 2022, 7(2): 64-69.
LUO Huanqiang, LIANG Li. Research on electric vehicle sharing charging transaction mode based on block chain[J]. *Distributed Energy*, 2022, 7(2): 64-69.
- [6] 覃文泽,李强,姚方,等. 考虑不同电价的电动汽车充电服务最优网格划分[J]. *分布式能源*, 2020, 5(4): 59-68.
QIN Wenzhe, LI Qiang, YAO Fang, et al. Optimal grid generation of EV charging service considering different electricity prices[J]. *Distributed Energy*, 2020, 5(4): 59-68.
- [7] 颜俊,罗宇杰,颜安,等. 计及用户响应特性的电动汽车充电站设备优化配置方法[J]. *中国电力*, 2025, 58(4): 140-147.
YAN Jun, LUO Yujie, YAN An, et al. Optimal equipment configuration method for electric vehicle charging stations considering user response characteristics[J]. *Electric Power*, 2025, 58(4): 140-147.
- [8] 何云华,程宇航,袁晓冬,等. 面向 V2G 调度的可信联邦学习方法[J]. *分布式能源*, 2024, 9(6): 65-74.
HE Yunhua, CHENG Yuhang, YUAN Xiaodong, et al. Trustworthy federated learning approach for V2G scheduling[J]. *Distributed Energy*, 2024, 9(6): 65-74.
- [9] 杨鹤. 电动公交车充换电站优化运行策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
YANG He. Research on optimal operation strategy of electric bus charging and swapping station[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [10] 刘展鹏,范帅,蔡思烨,等. 面向准线型需求响应的重卡换电站日前-实时优化调度方法[J]. *电力建设*, 2025, 46(6): 106-120.
LIU Zhanpeng, FAN Shuai, CAI Siye, et al. Day-ahead real-time optimal scheduling approach for customer directrix load-based demand response of heavy-duty truck battery swapping stations[J]. *Electric Power Construction*, 2025, 46(6): 106-120.
- [11] 崔景渠,张怡,张执超,等. 路径规划下考虑电池损耗的纯电重卡集群充电负荷时空分布预测[J]. *电力建设*, 2025, 46(6): 192-204.
CUI Jinghao, ZHANG Yi, ZHANG Zhichao, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load of electric truck cluster considering battery loss under path planning[J]. *Electric Power Construction*, 2025, 46(6): 192-204.
- [12] 吕应龙. 基于遗传算法的电动公交车换电站选址模型[J]. *电工技术*, 2022(11): 40-44, 47.
LV Yinglong. Location model of electric bus swap station based on genetic algorithm[J]. *Electric Engineering*, 2022(11): 40-44, 47.
- [13] 李艳波,柳柏松,姚博彬,等. 考虑路网随机特性的高速公路换电站选址[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(5): 1364-1371.
LI Yanbo, LIU Baisong, YAO Bobin, et al. Location of electrical changing station of expressway considering stochastic characteristics of road network[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(5): 1364-1371.
- [14] 常帆,邓友均,杨洪明,等. 充换电站模式下电动汽车参与物流配送的电能补给方式规划[J]. *电力建设*, 2018, 39(6): 7-14.
CHANG Gong, DENG Youjun, YANG Hongming, et al. Power supply planning of electric vehicles participating in logistics distribution based on the battery charging and swapping mode[J]. *Electric Power Construction*, 2018, 39(6): 7-14.
- [15] 戎晓雪,刘熙媛,孙启明,等. 电动汽车充换电站换电池的有序充电优化[J]. *电力建设*, 2015, 36(7): 120-125.
RONG Xiaoxue, LIU Xiyuan, SUN Qiming, et al. Coordinated charging strategy for battery in EV charging and switching station[J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(7): 120-125.
- [16] 郑卫健. 国网 XX 电力公司松原市电动汽车换电站选址优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
ZHENG Weijian. Research on site selection optimization of electric vehicle charging station in Songyuan City, state grid XX electric power company[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [17] 周相宜. 基于多目标优化的电动汽车充换电站建设规划研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.

- ZHOU Xiangyi. Construction planning of electric vehicle charging and swapping station based on multi-objective optimization[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2024.
- [18] 陈博文, 陈建岭. 基于改进多目标遗传算法的电动汽车换电站选址研究[J]. *物流研究*, 2024(1): 36-40.
- CHEN Bowen, CHEN Jianling. Research on the location planning of electric vehicle battery swap stations based on improved multi-objective genetic algorithm[J]. *Logistics Research*, 2024(1): 36-40.
- [19] 韩顺杰, 于渲铎, 李东奇, 等. 基于改进量子粒子群算法的新能源汽车换电站优化布局[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(27): 11720-11725.
- HAN Shunjie, YU Xuanduo, LI Dongqi, et al. Optimized layout of new energy vehicle changing station based on improved quantum particle swarm optimization[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(27): 11720-11725.
- [20] 张梦诗. 城市公交换电站集群电池调度优化研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.
- ZHANG Mengshi. Research on battery scheduling optimization of urban bus swapping station cluster[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2024.
- [21] 杨楠, 梁鹏程, 黄悦华, 等. 基于系统动力学预测的电动汽车充电站规划方法[J]. *电力建设*, 2025, 46(6): 49-59.
- YANG Nan, LIANG Pengcheng, HUANG Yuehua, et al. Electric vehicle charging station planning method based on system dynamics prediction[J]. *Electric Power Construction*, 2025, 46(6): 49-59.
- [22] 班勇霜, 李春华, 汪本科, 等. 基于序贯蒙特卡洛模拟法的孤岛微电网可靠性评估[J]. *分布式能源*, 2024, 9(3): 39-46.
- BAN Yongshuang, LI Chunhua, WANG Benke, et al. Reliability assessment of islanded microgrids based on sequential Monte Carlo simulation[J]. *Distributed Energy*, 2024, 9(3): 39-46.
- [23] 李翠萍. 面向换电模式出租车的换电站布局规划研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- LI Cuiping. The layout planning of battery swap station for electric taxis with swappable batteries[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [24] 梁露, 韩飞. 考虑排队时间和充电费用的电动汽车充电站选址模型[J]. *交通信息与安全*, 2023, 41(4): 154-162.
- LIANG Lu, HAN Fei. A site selection model for electric vehicle charging stations considering queuing time and charging cost[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2023, 41(4): 154-162.
- [25] 李璇, 葛风雷, 史静, 等. 基于自适应量子遗传算法的电动出租车充电站规划[J]. *电力建设*, 2016, 37(6): 116-124.
- LI Hu, GE Fenglei, SHI Jing, et al. Planning of electric taxi charging station based on adaptive quantum genetic algorithm[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(6): 116-124.
- [26] 林道哈, 宁爱兵, 刘书傲, 等. 电动汽车换电站选址问题的降阶回溯算法[J/OL]. *计算机工程与应用*, 1-11[2025-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20250121.1615.006.html>.
- LIN Daoan, NING Aibing, LIU Shu'ao, et al. A backtracking algorithm with reduction for location problem of electric vehicle swap stations[J/OL]. *Computer Engineering and Applications*, 1-11[2025-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20250121.1615.006.html>.
- [27] 赵睿智, 练小林, 应凯文, 等. 基于改进二进制粒子群优化算法的综合能源系统故障定位研究[J]. *发电技术*, 2025, 46(2): 231-239.
- ZHAO Ruizhi, LIAN Xiaolin, YING Kaiwen, et al. Research on fault location in integrated energy systems based on improved binary particle swarm optimization algorithm[J]. *Power Generation Technology*, 2025, 46(2): 231-239.
- [28] 段玉, 朱子民, 王小云, 等. 基于改进粒子群算法的自适应构网型变流器控制策略[J]. *广东电力*, 2024, 37(2): 10-17.
- DUAN Yu, ZHU Zimin, WANG Xiaoyun, et al. Adaptive grid-type converter control strategy based on improved particle swarm algorithm[J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(2): 10-17.
- [29] 任哲, 邹瑄, 温一凡, 等. 大型停车区域的电动汽车充电桩规划设计[J]. *智慧电力*, 2024, 52(8): 89-97.
- REN Zhe, ZOU Xuan, WEN Yifan, et al. Planning of electric vehicle charging pile for large parking lots[J]. *Smart Power*, 2024, 52(8): 89-97.
- [30] 赵天翼, 刘代飞, 何灵奇, 等. 基于改进粒子群算法的高速公路充电站储能系统优化配置[J]. *广东电力*, 2025, 38(8): 19-31.
- ZHAO Tianyi, LIU Daifei, HE Lingqi, et al. Optimal configuration of energy storage system for highway charging stations based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Guangdong Electric Power*, 2025, 38(8): 19-31.

收稿日期: 2025-07-03

作者简介:



李孟山

李孟山 (1998), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事新能源系统工程开发与项目投资工作, sobermaple@sjtu.edu.cn;

*通信作者: 周 宽 (1988), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事综合智慧能源项目投资及商业模式研究工作, zhoukuan@spic.com.cn;

侯鲁平 (1995), 男, 硕士, 主要从事换电站商业模式研究及经济性测算分析工作;

庞清仑 (1999), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事综合智慧能源与电力市场研究工作;

王翰林 (1994), 男, 学士, 政工师, 研究方向为新能源开发标准化流程设计、运营策略研究。

(责任编辑 谷 子)