

考虑供电枢纽传输成本的充电站选址定容模型

胡丹丹, 沈 晨

(中南民族大学管理学院, 武汉 430074)

摘要: 电动汽车及其配套设施的发展受制于早期形成的有限布局, 不断增长的电动汽车市场规模和充电需求产生矛盾。充电站的建设运营方能够在巨大潜力的充电设施发展中获得巨大利好。通过以最大化充电站建设运营方的利润为优化目标, 构建需求覆盖选址模型, 权衡供电枢纽、充电站和充电桩的成本和满足充电需求的收入, 利用遗传算法求解获得选址定容的决策。研究发现: 一方面, 充电站的覆盖半径对利润和决策结果影响较大且复杂, 充电站投资建设前期需要对影响覆盖范围的诸多因素进行市场调研; 另一方面, 铺电单位成本对决策结果影响明显, 相对高的铺电成本会抑制充电站选址数量和容量大小, 从而降低利润。因此充电站投资建设方需要分别对两类成本做好数据调研, 避免决策结果出现较大偏差。

关键词: 选址模型; 覆盖模型; 遗传算法

中图分类号: F5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0050-05

近年来, 电动汽车因其环保效益而备受推崇^[1], 其在节能减排方面发挥着重要作用^[2]。从能源结构的角度来看, 推广电动汽车既对交通运输系统逐步降低石化能源占比具有重要意义^[3], 又为不愿承担高昂燃料成本的汽车用户提供新的选择^[4]。电动汽车早期市场的基础设施与如今日新月异的电动汽车发展现状产生矛盾, 主要表现为充电设施与充电需求的不匹配: 一方面, 充电设施分布零散且呈现弱规划性; 另一方面, 电动汽车用户的充电行为在时间和空间上具有很大的不确定性^[5], 这会使得电动汽车用户产生安全担忧、里程焦虑和成本压力^[6]。如果充电站选址和容量设计不合理, 不但电动汽车用户的充电需求现状很难得到改善, 而且会因此影响充电站投资建设方的服务效率和营运收益^[7], 而这些因素会进一步影响投资决策^[8]。根据关于充电设施发展和布局的诸多研究结果, 适地适时地增加充电设施、拓宽充电站容量和控制充电价格等方法能对供需产生较大影响, 而这对电动汽车及其相关的交通系统具有较大影响^[9]。在充电设施布局尚不成熟时或充电需求增长超出当前承载上限时, 通过合理规划增加新充电站能够更好地解决问题^[10], 而增加现有布局的充电容量是考虑新建充电站的成本要远高于新建充电桩以及现有充电桩的布局主要为早期铺设

的慢充桩, 与当前快速充电需求相矛盾, 从而利用冗余空间增设合适功率的新型快速充电桩。总体而言, 根据需求量级以及现有充电设施的建设情况, 可以采取不同的扩容策略。此外, 电动汽车使用集中在白天, 即使白天充电费用更高, 充电需求也主要分布在白天的工作时间^[11]。而充电需求与充电设施最大的供需矛盾就在于电动汽车的充电需求集中在相同的时间与空间里, 这意味着, 充电站的容量设计应当聚焦在白天的需求波峰时段; 而且, 考虑高昂的用地成本和充电站较少的冗余空间, 在城市环境的充电设施很难通过对既有布局再扩容来缓和供需矛盾, 其更适合通过电网扩张增选新充电站。

诸多文献在充电设施拓展方向上有所研究。Wu 等^[12]提出的模型结合了位置约束、电网承载能力和充电桩供电效率, 对现实环境模型化的权衡具有特别考虑。He 等^[13]提出了考虑行驶里程的双层选址模型, 其上层目标最大化充电站路径流量, 下层目标均衡行驶里程内的路径选择。他们的研究表明充电站所服务的电动汽车的流量具有一定规律, 而且充电站的服务能力与电动汽车流量具有一定联系。Huang 和 Kockelman^[14]提出利润最大化和均衡交通流量分配的双层选址问题, 研究表明运营方需要考虑峰值流量状态下的定容决策。也有

收稿日期: 2023-11-03

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(22BGL273)

作者简介: 胡丹丹(1983—), 女, 浙江慈溪人, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 研究方向为管理决策与大数据分析; 通信作者沈晨(1998—), 男, 湖北武穴人, 硕士研究生, 研究方向为管理决策与大数据分析。

一些不同角度的研究。Bai 等^[15]在充电容量扩展上提出了一个最小化成本和最大化服务质量的双目标模型。Ma 和 Xie^[5]在选址的双层模型中将目标设定为最小化运营车队的每日充电时间。Uslu 和 Kaya^[16]在充电容量拓展模型中增加有限充电等待时间的约束以放宽充电站的充电条件。Wang 等^[3]认为充电设施应当存在容量上限,在确定充电容量时引入了充电设施的容量限制来控制排队时间。Yang 等^[17]从电动汽车用户角度出发,在确定电网负荷容量模型中以最小化电动汽车用户充电成本为目标函数。在模型随机性上,相关文献的构想也呈现多样化。Quddus 等^[18-19]在充电站选址模型中同时考虑长期规划决策和短期运营决策,并将决策范围拓展到不确定的随机环境中。Zare 等^[20]提出基于随机规划的分布式拓展规划,该模型囊括了分布式发电资源、电动汽车、电容器组和传统拓展方案,而 Kk 等^[21]对分布式系统的切入角度不同,通过 Monte-Carlo 模拟最小化分布式系统的电压稳定性、可靠性和功率损失指数。

上述研究在选址决策中各有其切入角度,参与主体多是利润最大化的建设运营方和最小化投资成本或最大化流量的公共服务平台。考虑到充电设施拓展中,建设运营方是最具活力的个体,本文中以最大化建设运营方的利润为目的,通过选址新充电站并确定容量服务需求点,同时平衡建设成本与服务收益。与多数研究不同的是,模型选址考虑了充电站的供电条件,即从合适的供电枢纽拉设输电线路,因此在选址决策中,充电站选址的数量和容量需要额外考虑供电成本。

1 决策模型构建

1.1 问题描述

构建决策模型,包括问题描述与假设、参数和模型的数学表达式及其说明。模型从充电站建设运营方的利润最大化为切入角度。一方面,在城市环境中,人群聚居地划分明显,而电动汽车仅有官方的数量统计;另一方面,充电站的容量设计需要考虑其将要服务的充电需求,而电动汽车的使用与充电集中在白天的工作时间且服从高斯分布^[17],即

$$\varphi_c(t_c) = \begin{cases} e^{-(t_c+24-\mu_c)^2/2\sigma_c^2} / \sqrt{2\pi\sigma_c}, & 0 < t_c \leq \mu_c - 12 \\ e^{-(t_c-\mu_c)^2/2\sigma_c^2} / \sqrt{2\pi\sigma_c}, & \mu_c - 12 < t_c \leq 24 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_c 为时间; μ_c 为高斯分布中的均值; σ_c 为高斯

分布中的标准差。

因此,需求点的充电需求可以根据该区域电动汽车数量以及需求峰段来预测。在对所有充电站备选点的决策中,在充电需求预测的基础上,还需确定充电站的容量。根据利润最大化原则,充电站的容量设计应当能满足峰段需求。此外,充电站需从供电枢纽拉设输电线路,在备选点决策方案中,需要考虑输电距离成本,为每个充电站择选合适的供电枢纽。模型中使用的符号含义见表 1。

表 1 模型中使用的符号含义

符号	含义
I	需求点集合
J	充电站备选点集合
K	供电枢纽集合
C_S	充电站选址的固定投入成本
C_P	充电桩单位功率的平均成本
ξ_i	需求点 i 的充电需求量
d_{jk}	备选点 j 与供电枢纽 k 之间的距离
d_{ij}	需求点 i 与备选点 j 之间的距离
c	备选点 j 与供电枢纽 k 的单位输电成本
s_j	备选点 j 能承受的充电桩数量上限
φ	充电桩功率
P_R	满足充电需求的单位收益
T	充电设施计划投入使用周期
t	充电设施供电峰段时长
P_N	电力传输综合损耗率
r	充电站覆盖半径
M	一个足够大的数
x_j	在备选点中选址新充电站的决策变量。当 $x_j = 1$ 时表示在备选点 j 选址,反之则不选
y_{ij}	覆盖决策变量,当 $d_{ij} < r$ 时, $y_{ij} = 1$,充电站 j 将覆盖需求点 i ,反之则不覆盖
z_{jk}	选择供电枢纽的决策变量,当 $z_{jk} = 1$ 时表示在备选点 j 选择从供电枢纽 k 拉设输电线路,反之则不选
n_j	充电站 j 的充电桩数量

1.2 模型构建

通过该模型可以确定选址决策方案中的充电站选址及其容量,具体表达式如下:

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} TP_R \xi_i y_{ij} - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c z_{jk} d_{jk} - \sum_{j \in J} x_j [C_S + C_P \varphi n_j / (1 - P_N)] \quad (2)$$

$$n_j \leq M x_j \quad (3)$$

$$n_j \leq s_j \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} z_{jk} \leq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} \leq 1 \quad (6)$$

$$x_j \leq y_{ij} \quad (7)$$

$$z_{jk} \leq x_j \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \xi_i y_{ij} \leq t \varphi n_j \quad (9)$$

$$x_j, y_{ij}, z_{jk} \in \{0, 1\}, n_j \geq 0 \quad (10)$$

式(2)表示最大化利润由服务充电需求的收益、供电成本和建站定容成本组成;式(3)表示选址决策变量与充电桩数量的关系,仅当选址时才存在充电桩数量;式(4)表示充电站能承载的充电桩数量上限;式(5)表示任何充电站只能由不超过一个供电枢纽供电;式(6)表示每个需求点不能被超过一个充电站覆盖;式(7)使得覆盖需求变量需与选址决策变量保持统一,即不允许存在选址但不覆盖需求的情况;式(8)不允许存在供电枢纽向充电站供电而该充电站未选址的情况;式(9)表示充电站在需求峰段能够提供的电量需要满足此时段的需求量;式(10)表示关于变量自身的约束。

2 算例分析

算例用以展示优化的结果和灵敏度分析。案例选取了武汉市地图数据,需求点、备选点和供电枢纽的分布如图 1 所示。

选择电动汽车出行的峰段为 09:00—17:00,即 $t=8$ 。根据武汉市人民政府统计数据,截至 2022 年底电动汽车保有量累计 22.2 万辆,出于现实因素考虑,于峰段出行并有充电需求的车辆占比设定为 25%,并根据式(1)确定各需求点在峰段有充电需求的汽车数量,其中 $\mu_c=17.1, \sigma_c=3.3$ 。其他具体参数设置见表 2。电动汽车的电池电量统一设置为 $64.8\text{ kW}\cdot\text{h}$,此项参考自比亚迪汉电动汽车,电动汽车电量从 20%充至 80%。

求解该模型选择遗传算法,在遗传算法的参数设置中,适应度函数通过利润表示,如式(2)所示,

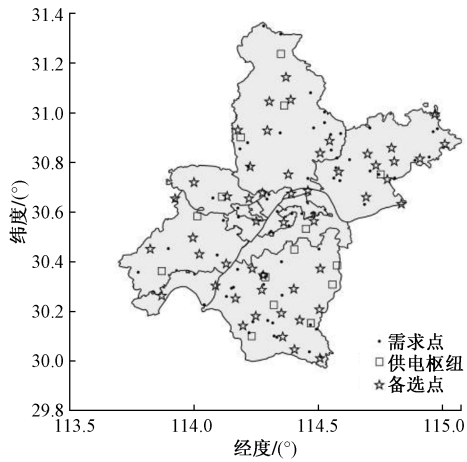


图 1 需求点、备选点和供电枢纽的分布

表 2 参数设置

参数	取值	参数	值取
φ/kW	60	T/d	3 650
$P_N/\%$	5	$P_R/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	1
$C_S/\text{元}$	100 000	$C_P/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	200
$c_{jk}/(\text{元}\cdot\text{km}^{-1})$	200	$s_j/\text{根}$	80

交叉概率为 40%,变异概率为 10%。该模型的迭代优化结果如图 2 所示,选址决策结果如图 3 所示,定容决策结果如图 4 所示。

在灵敏度分析中存在诸多发现,当某些参数产生变化时,决策结果会发生一定规律的变化。覆盖半径 r 产生变化时,在 $r=[5,10,15,20,25,30,35]$

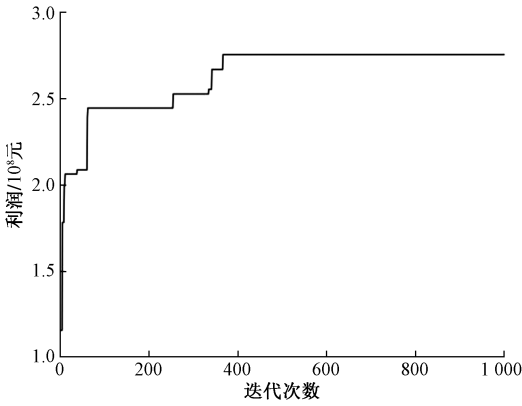


图 2 迭代优化结果

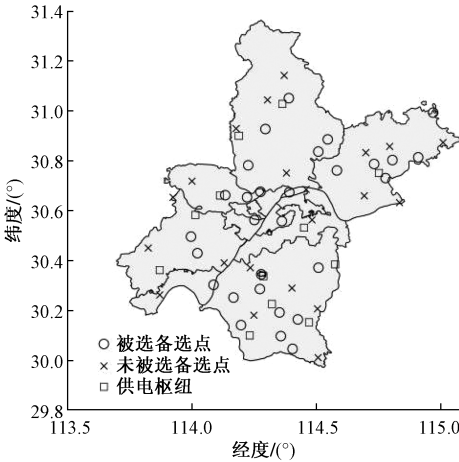
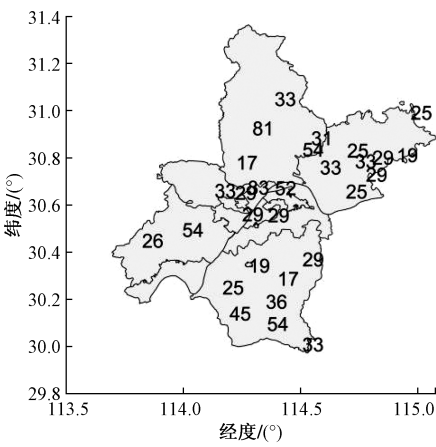


图 3 选址决策结果



数字表示充电桩数量

图 4 定容决策结果(充电桩数量)

中,程序运行 10 次并取最优值,结果见表 3。

当覆盖半径越大时,利润相对更高,但是当覆盖半径大到一定程度后,利润反而会有所回落。根据对应的选址数量和需求点覆盖数量可以分析,以 $r=25$ 和 $r=30$ 为例,当覆盖半径增大时,增加选址数量并不能使需求点覆盖额外增加,这是因为会出现需求点被多个充电站同时覆盖的情况,对单一需求点的多次覆盖并不能满足更多的需求,反而由于充电资源的浪费导致成本增加;此外,充电站选址增加的同时充电桩数量下降,这是因为此时覆盖半径内存在多个需求点被多个充电站重复覆盖的现象,在这个覆盖范围内的充电站并不需要更多充电桩来满足有限的需求。但是当覆盖半径 r 增加到 35 km 时,虽然选址数量减少的同时能够覆盖更多的需求点,但是此时需要更多的充电桩来确保能够满足相当水平的需求,此外,充电站的分布由于覆盖半径大而变得更稀疏,从而产生更多的供电成本。回观较小覆盖半径的情况,如 $r=5$ km 时,受制于覆盖半径,即使选址增加也无法覆盖更多需求,虽然因此造成的建站成本低,但服务充电需求产生的收入也随之减少,其利润水平也较低。从现实意义出发,充电站的覆盖半径取决于许多因素,如道路交通、周边生活设施、消费水平和人口分布等,充电站的覆盖半径在现实角度分析更像是电动汽车车主愿意承受的充电距离上限,这是需要充电站建设运营方在投资前期做市场调研所得出的结

果,而充电站的覆盖半径对利润和决策结果影响非常大,对覆盖范围的市场调研是非常有必要的。

固定 $r=20$ km,取 c 分别为 50、100、200、300 元/km,同样运行 10 次并取最优结果,见表 4。可以发现,当铺电成本增加时,选址数量会随之减少,利润也相应减少。铺电成本增加或减少会同向影响选址决策,过高的铺电成本会抑制充电站扩建的意愿,从而使得充电需求的满足情况表现不佳。铺电成本主要受电网基础设施建设的影响,因此充电站投资建设方需要将区域电网基建水平纳入考量,在规划方案之初核实电力传输成本。

3 结论

充电站的覆盖半径对利润和决策结果的影响是复杂的,覆盖半径的大小变化造成的结果并非同向变化。单位铺电成本对结果的影响是清晰的,单位成本增加会抑制充电站选址的数量和容量大小,利润也会随之下降。总而言之,在面对充电站选址布局的决策时,一方面,投资建设方需要在规划初期对影响覆盖半径的诸多元素纳入考量。具体而言,影响覆盖半径的诸多要素包括人口分布、需求分布和道路设施等,充电站建设运营方可以对各要素按评价体系予以赋值并使用决策评价方法,以此综合评价得到覆盖半径数值。另一方面,考虑铺电成本对决策的影响,充电站投资建设方需要对当前电网设施条件下的材料成本和施工成本等相关成本预先校对,避免因决策输入参数产生偏差而对决策结果造成负面影响。

表 3 覆盖半径灵敏度分析结果

r/km	5	10	15	20	25	30	35
利润/元	167 076 293.508	271 320 495.355	301 140 137.901	305 350 589.735	319 997 751.726	312 853 681.155	306 857 248.325
选址数量/个	19	24	28	32	28	30	27
需求覆盖量/个	25	38	42	45	44	44	46
充电桩数量/个	780	1 258	1 445	1 554	1 504	1 475	1 502

表 4 单位铺电成本灵敏度分析结果

$c/(\text{元}\cdot\text{km}^{-1})$	50	100	200	300
利润/元	305 699 546.927	305 350 589.735	299 930 720.680	285 432 622.164
选址数量/个	30	32	29	27
需求覆盖量/个	43	45	42	40
充电桩数量/个	1 488	1 554	1 452	1 369

参考文献

- [1] MCCOLLUM D, KREY V, KOLP P, et al. Transport electrification: a key element for energy system transformation and climate stabilization[J]. Climatic Change, 2014, 123: 651-664.
- [2] ZHANG R, ZHANG J, LONG Y, et al. Long-term implications of electric vehicle penetration in urban decar-

bonization scenarios: an integrated land use-transport-energy model[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 68: 102800.

- [3] WANG C, HE F, LIN X, et al. Designing locations and capacities for charging stations to support intercity travel of electric vehicles: an expanded network approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 102: 210-232.

- [4] 姬丹丹, 干宏程, 刘凯强, 等. 基于排序 Logit 的电动汽车购买意愿研究[J]. 科技与产业, 2021, 21(7): 198-203.
- [5] MA T Y, XIE S. Optimal fast charging station locations for electric ridesharing with vehicle-charging station assignment[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 90: 102682.
- [6] 殷雅荣, 李援, 张艳. 低碳经济背景下海南省电动汽车购买意向影响因素分析及建议[J]. 科技与产业, 2022, 22(5): 78-84.
- [7] GEORGE S R, ZAFAR M. Electrifying the ride-sourcing sector in california [R]. Sacramento: California Public Utilities Commission, 2018.
- [8] HANUN I, SUTOPO W, ROCHANI R. Feasibility study of charging infrastructure to increase vehicle electrification in Indonesia[EB/OL]. (2023-11-30) [2023-12-2]. <https://jurnalindustri.petra.ac.id/index.php/ind/article/view/27005>.
- [9] 张露, 张建成. 新能源汽车协同实现“双碳”目标路径研究[J]. 科技与产业, 2022, 22(12): 109-113.
- [10] CHEN J, HUANG X, CAO Y, et al. Electric vehicle charging schedule considering shared charging pile based on generalized nash game[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 13: 107579.
- [11] PAN L, YAO E, YANG Y, et al. A location model for electric vehicle public charging stations based on drivers' existing activities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 59: 102192.
- [12] WU X, FENG Q, BAI C, et al. A novel fast charging stations locational planning model for electric bus transit system[J]. *Energy*, 2021, 224: 120106.
- [13] HE J, YANG H, TANG T Q, et al. An optimal charging station location model with the consideration of electric vehicle's driving range[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 86: 641-654.
- [14] HUANG Y, KOCKELMAN K M. Electric vehicle charging station locations: elastic demand, station congestion, and network equilibrium[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 78: 102179.
- [15] BAI X, CHIN K S, ZHOU Z. A bi-objective model for location planning of electric vehicle charging stations with GPS trajectory data[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 128: 591-604.
- [16] USLU T, KAYA O. Location and capacity decisions for electric bus charging stations considering waiting times [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 90: 102645.
- [17] YANG X, NIU D, SUN L, et al. A bi-level optimization model for electric vehicle charging strategy based on regional grid load following[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 325: 129313.
- [18] QUDDUS M A, SHAHVARI O, MARUFUZZAMAN M. Modeling electric vehicle charging station expansion with an integration of renewable energy and vehicle-to-grid sources[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 128: 251-279.
- [19] QUDDUS M A, SHAHVARI O, MARUFUZZAMAN M, et al. Designing a reliable electric vehicle charging station expansion under uncertainty [J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 36: 108132.
- [20] ZARE P, DEJAMKHOY A, DAVOUDKHANI I F. Efficient expansion planning of modern multi-energy distribution networks with electric vehicle charging stations: a stochastic MILP model[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2023, 38: 101225.
- [21] KK N, NS J, JADOUN V K. Optimization of distribution network operating parameters in grid tied microgrid with electric vehicle charging station placement and sizing in the presence of uncertainties[EB/OL]. (2023-11-23) [2023-12-2]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15435075.2023.2281334>.

A Location Model for Charging Station and Capacity Considering the Transfer Cost of Power Supply Hub

HU Dandan, SHEN Chen

(School of Management, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China)

Abstract: The current state of development of electric vehicles and their supporting facilities is constrained by the limited layout formed in the early years, and the contradiction between the growing market of electric vehicles and the demand for charging. The construction and operation of charging stations can gain great benefits from the development of charging facilities with great potentials. Considering these factors, taking profit maximizing of charging station owner as the target, a siting and sizing model is constructed. By weighing the costs of power supply hubs, charging stations and charging piles, and the income from satisfying charging demand, the results can be obtained from optimization by utilizing genetic algorithm. It is found that the radius of coverage of charging stations has a large and complex impact on profits and decision result, and it is necessary to conduct market research on many factors affecting the coverage in the pre-investment period of charging station construction. On the other hand, the unit cost of laying electricity has an obvious impact on the decision-making results, and the relatively high cost of laying electricity inhibits the number of charging stations and their capacity, which in turn reduces the profits. Therefore, in order to avoid large deviation in decision result, the two kind of cost should be analyzed at the beginning of the work.

Keywords: location model; covering model; genetic algorithm