

基于用地属性的充电站备选点模型构建

黄禹¹, 刘杰^{1*}, 黄健畅¹, 林荔萍²

1. 山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250031

摘要:为提高电动汽车充电基础设施资源配置效率并降低运营成本,提出一种融合用地属性与多目标优化的充电站选址方法,基于兴趣点(point of interest, POI)分布数据,采用 K-means 聚类算法作为预处理方法初步确定充电站备选点;通过计算各充电站备选点覆盖范围内 POI 类型的权重与数量,得到各充电站备选点的重要度,建立最大化充电站备选点重要度目标函数;同时考虑充电站备选点建设、运营成本及用户在途损耗成本,建立最小化充电站总成本目标函数,构建充电站双目标规划选址模型;分别采用传统麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)和融合动态自适应权重、反向学习策略和柯西变异的改进麻雀搜索算法(improved sparrow search algorithm, ISSA)求解模型,以济南市为例进行实例分析。结果表明:ISSA 的充电站选址布局能有效避免过于集中或分散问题,服务覆盖范围与布局均衡性显著优于 SSA;与 SSA 相比,ISSA 的选址方案使总成本降低 7.43%,充电站重要度提高 34.34%;ISSA 求解得到的充电站的服务缓冲区在各类用地类型上的覆盖率均优于 SSA,尤其在商业用地方面,ISSA 方案的覆盖率比 SSA 方案大 6.79 个百分点。通过充电站双目标规划选址模型及优化求解算法能有效提高充电站布局合理性与空间资源配置效率。

关键词:充电站;备选点;重要度;ISSA

中图分类号:U491.8

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)05-0001-10

引用格式:黄禹,刘杰,黄健畅,等.基于用地属性的充电站备选点模型构建[J].山东交通学院学报,2025,33(5):1-10.

HUANG Yu, LIU Jie, HUANG Jianchang, et al. Construction of a candidate-site model for charging stations based on land-use attributes[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(5): 1-10.

0 引言

《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》明确指出,发展新能源汽车是我国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路,是应对气候变化、推动绿色发展的战略举措。随着新能源汽车行业的迅猛发展,其保有量持续快速增长,发展前景广阔。截至2024年年底,全国新能源汽车保有量达3140万辆,其中纯电动汽车保有量2209万辆,占新能源汽车保有量的70.35%^[1];全国充电基础设施累计达1281.8万台,公共充电桩约有357.9万台^[2]。随着新能源汽车规模的持续扩大,充电基础设施体系已成为推动产业发展的关键支撑,该体系的完善在很大程度上依赖充电站的科学布局。如何筛选既能满足实际需求又具备高效服务能力的充电站备选点建设用地已成为当前亟待解决的关键问题。

围绕不同应用场景与需求,国内外学者对电动汽车充电站选址与容量配置问题提出多种模型与方

收稿日期:2024-10-25

基金项目:国家高端外国专家引进计划(G2022023003);山东省人文社会科学课题(2021-YYGL-15);山东省重点研发计划(软科学)重点项目(2023RZB06052)

第一作者简介:黄禹(1998—),男,江西九江人,硕士研究生,主要研究方向为交通运输规划与管理,E-mail:hy07920425@outlook.com。

*通信作者简介:刘杰(1986—),男,济南人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为交通运输规划与管理,E-mail:ajiede1986@163.com。

法,主要包括考虑多代理系统优化、城市交通特征与用户需求分析及模型综合优化等。在多代理系统优化方面:Cai 等^[3]提出一种基于多代理系统的充电基础设施规划方法,通过模拟充电站运营商、电网管理者及用户等不同主体的行为,实现各方利益的协调与系统优化;Park 等^[4]研究多代理系统在电动汽车协调充电中的应用,通过模拟不同类型代理的行为,开发协调充电策略,减少充电高峰时段负荷,提高充电资源利用效率。在城市交通特征与用户需求分析方面:Zhang 等^[5]结合交通流量与电力负荷预测,构建以用户便利性与站点利用率最大化为目标的多目标选址模型;Wang 等^[6]基于用户充电行为与城市交通模式建立充电站选址模型,优化充电站布局与数量配置;姚明等^[7]基于多源充电需求数据建立电动汽车充电站双层布局优化模型,上层模型以社会总成本最小化为目标对充电站进行选址定容优化,下层模型模拟用户最优充电选择;李响等^[8]构建双层规划模型,上层优化电网投资,下层优化分布式电源与充电站接入,兼顾多方利益;江昌旭等^[9]引入用户异质性构建里程焦虑模型,结合多目标优化与证据推理决策,规划高速公路光储充一体化设施。在模型综合优化方面:易校石等^[10]基于统计学方法构建充电桩利润函数,以投资回报时间最短为目标建立电动汽车充电站选址模型;罗清玉等^[11]面向电动汽车通勤群体,以充电站建设成本与用户广义充电成本综合最小为目标,构建充电站选址与容量配置模型;Shiramagond 等^[12]结合地理信息系统技术与多目标优化模型,分析不同区域的太阳能和风能资源分布,研究将可再生能源整合于充电站规划的可行性;Golsefidi 等^[13]通过机器学习算法优化充电站位置,并预测城市动态充电需求;Hoen 等^[14]提出基于多种需求情景的充电站规划模型,分析需求与充电站布局间的时空关系;Wang 等^[15]研究电动汽车充电需求的时空动态模型,重点分析城市区域内不同时间段的充电需求变化。现有研究通过多种建模方法优化充电站的选址与容量配置,为不同场景下充电设施的规划布局提供理论与方法支持。但仍存在以下问题:一是在选址建模方面,现有研究多基于广义连续选址假设,将任意空间点视为候选位置,缺乏对实际用地属性与社会条件的约束考量,导致理论与实际脱节;二是多数研究侧重于车辆行驶途中的动态充电需求,基于途中充电的随机性进行布局优化,与实际充电行为存在偏差,电动汽车用户充电需求更多源于通勤、购物、休闲等固定场所的停车时段,在行驶过程中因电量不足临时寻找充电设施的情况相对较少^[16]。

本文考虑不同用地属性下电动汽车静态充电需求,构建充电站备选点重要度目标函数,评估充电站备选点的重要度,以充电站备选点重要度最大化,以及充电站备选点建设、运营成本与用户途中损耗成本最小化为目标,构建充电站备选点双目标规划选址模型。以济南市电动汽车充电站选址为例进行实例分析,验证充电站备选点双目标规划选址模型的可行性与有效性,以期为电动汽车充电站合理布局提供理论依据。

1 问题描述

通过高德地图开放平台应用程序编程接口(application programming interface, API),获取济南市行政范围内的充电设施兴趣点(point of interest, POI)数据,对其进行数据清洗、整理与可视化处理。通过分析现有充电站在不同用地属性上的空间分布特征,识别电动汽车用户的潜在充电需求区域。采用聚类算法对充电站 POI 点位进行聚类分析,辨识充电需求密集区域,生成新的充电站备选点。

1.1 研究区域概况

以济南市 12 个区县为研究区域。根据文献[17],到 2025 年,济南将集聚 5 家以上新能源汽车骨干企业和 10 家以上关键零部件骨干企业,全面建成涵盖商用车与乘用车的新能源汽车全品类产业基地。同时,建成 800 座以上充换电站,22 000 个以上公共及专用充电桩,实现重点应用区域充电设施全覆盖。

1.2 数据来源及处理

通过高德地图开放平台 API 共获取 983 条 2024 年的充换电设施 POI 数据,数据包含 POI 名称、地理坐标和属性分类等信息。电动汽车充换电设施 POI 包括充电站、换电站及专用充电站等类别,其他类型设施占比较小,数据平台中可得到的有效信息较少,故未纳入研究范围。经数据清洗、整理、去重,最终得

到 973 条有效充电设施 POI 数据。

1.3 兴趣点分类

对现有充电站 POI 点位按其所在用地的服务功能进行分类,依据充电站与用地属性的关联划分 POI 点位对应的城市用地类型。分类体系包括居住用地、商业用地、工业用地、交通用地、公共管理与公共服务用地(以下简称公服用地)以及其他用地 6 个一级类,6 个一级类进一步细分为 12 个二级类^[18-19]。济南市 973 个有效样本根据所在用地的服务功能进行分类,各类用地中充电站 POI 数如表 1 所示。

表 1 济南市各类用地中充电站 POI 数

一级类	二级类	说明	POI 数
居住用地	住宅用地	用于建设居住建筑及其配套服务设施的土地	291
商业用地	商务用地	主要从事金融、保险、证券、咨询、贸易、信息服务等机构的办公场所用地	20
	商业服务	主要向消费者直接提供商业、服务业的场所用地,如商业零售、餐饮、住宿和娱乐等	76
工业用地	工业用地	用于工矿企业的生产车间、库房、辅助用房及其附属设施土地	200
交通用地	运输场站	包括物流、公交、火车站及附属设施等	7
	机场用地	用于民用、军用或混用的机场用地	79
公服用地	机关团体用地	党政机关、社会团体、事业单位等机构办公及其相关活动的土地	17
	教育科研用地	用于高等院校、中等专业院校、中学、小学、科研事业单位及其附属设施的土地	26
	医疗用地	用于医疗、预防、保健、康复、急救设施及其附属设施的土地	4
	文体用地	大众体育与训练、文化服务用地	19
	公园与绿地	向公众开放,以游憩为主要功能,兼具生态、美化、防灾等作用的土地	27
其他用地	其他类型用地		207

由表 1 可知:充电站的热点分布区域与城市住宅区、工业区及商业区等功能区间存在显著关联。确定充电站备选点时,需重视现有 POI 热点区域,这些热点区域是车辆流动的高频区,潜在充电需求较高。将充电站布局于 POI 热点区域,一方面可为营运车辆驾驶员提供充足的客源并保障其在高效运营中便捷补充电能;另一方面也为私家车用户带来显著便利,使其在购物、休闲或办公的同时易于获取充电服务,满足日常出行需求。

基于现有充电站 POI 分布数据,采用 K-means 聚类算法作为预处理方法科学合理地确定电动汽车充电站备选点。通过该算法对解空间进行聚类,有效缩减问题规模并降低计算复杂度。将整个求解区域划分为多个聚类簇,采用进化算法在各簇内执行局部优化提高整体搜索效率与收敛性能^[20-21]。经聚类分析,最终生成 96 个新的充电站备选点,分别编号 1~96,每个备选点对应于原始 POI 点位集中的一个密集区域。

目前,尚缺少电动汽车充电站服务半径的相关规定,参照文献[22]的建议,公共充电站的服务半径一般为 2.5~4.0 km,结合当前电动汽车发展现状与运行特征,以及多数城市充电站服务半径普遍约为 4.0 km 的实际情况,本文设定公共充电站的服务半径为 4.0 km。

2 模型构建

基于 K-means 聚类算法确定充电站备选点位置后,构建充电站备选点重要度评估模型,综合考虑各充电站备选点覆盖范围内不同 POI 类型的权重,通过对标准化处理后的数据进行综合计算,获得各充电

站备选点的重要度,系统评估各充电站备选点的环境属性与潜在服务需求,筛选服务能力最优的选址。随后,建立以最小化建设、运营成本与用户途中损耗成本为目标的充电站备选点成本模型,在满足建设预算与服务半径等约束条件下,优化充电站备选点的选址方案。通过最大化充电站备选点重要度、最小化充电站备选点总成本的双目标规划模型统筹用户便利性与经济效率,保障充电站布局科学合理,且运行高效。

2.1 充电站备选点重要度模型

计算充电站备选点的重要度,确定该位置是否适合作为充电站。通过对充电站备选点覆盖范围内的POI点位数据进行标准化加权得到充电站备选点的重要度。第 i 个充电站备选点的重要度

$$U_i = \sum_{j \in J} \gamma_j \frac{U_{ij} - \min U_{ij}}{\max U_{ij} - \min U_{ij}},$$

式中: I 为充电站备选点集合, J 为POI类型集合, γ_j 为第 j 类POI的权重, U_{ij} 为第 i 个充电站备选点内第 j 类POI数。

为确保选取的充电站备选点能覆盖充足的POI点位,提高充电站的有效性和实用性,构建最大化充电站备选点重要度目标函数,公式为:

$$\max U = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \gamma_j \frac{U_{ij} - \min U_{ij}}{\max U_{ij} - \min U_{ij}} x_i,$$

式中: U 为所有选择建设充电站备选点的重要度; x_i 为决策变量, $x_i \in \{0, 1\}$, $x_i = 0$ 表示不在第 i 个备选点建设充电站, $x_i = 1$ 表示在第 i 个备选点建设充电站。

2.2 充电站备选点成本模型

充电站建设成本 F_1 包括设备、土地、站内基础设施等成本,公式为:

$$F_1 = \sum_{i \in I} \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} (S_i f_{li} + f_c + f_s) x_i,$$

式中: r 为贴现率, n 为充电站使用年限, S_i 为第 i 个充电站备选点的占地面积, f_{li} 为第 i 个充电站备选点的单位面积土地价格, f_c 为充电桩建造费用, f_s 为其他固定的费用。

充电站运营维护成本 F_2 包括人员工资、场地、设备维护费用等,公式为:

$$F_2 = \sum_{i \in I} \varphi (S_i f_{li} + f_c + f_s) x_i,$$

式中: φ 为比例参数,用来折算运营维护成本。

用户年途中损耗成本

$$F_3 = 365 \sum_{i \in I} \lambda \theta \mu E_i x_i,$$

式中: λ 为充电站备选点到附近已建成充电站的距离, θ 为城市道路曲折系数, μ 为电动汽车单位里程电池能耗成本, E_i 为第 i 个充电站备选点的充电服务费。

构建包括建设、运营成本与用户途中损耗成本的最小化充电站备选点总成本目标函数,公式为:

$$\min F = \rho_1 F_1 + \rho_2 F_2 + \rho_3 F_3,$$

式中 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 的权重。

2.3 约束条件

为满足电动汽车用户的充电需求,需建设数量充足的充电站。充电站占用土地资源较多,应在保障充电需求的前提下,设置充电站建设数量的上限 N ,即:

$$\sum_{i \in I} x_i = N.$$

作为基础设施,公共充电站具有特定的服务范围,服务半径越大,所能覆盖的用户群体越广泛。通常情况下,位于服务半径范围内的用户需求可得到满足,但处于服务边缘区域用户的满意度可能有所降低。为确保服务覆盖的均匀性并避免资源浪费,充电站的布局需满足一定的空间间隔要求,即:

$$d_{ii'} \geq D, \forall i, i' \in I, i \neq i',$$

式中: $d_{ii'}$ 为第 i 个充电站备选点与第 i' 个备选点间的距离, D 为充电站最大服务半径。

为有效筛选符合条件的充电站备选点,将 POI 覆盖数量阈值作为筛选条件之一。将所有充电站备选点覆盖范围内 POI 数的平均值与标准差之和作为 POI 覆盖数量阈值 T 。若某充电站备选点覆盖的 POI 数小于该阈值,则该点不符合要求,予以剔除,即:

$$\sum_{i \in I, j \in J} U_{ij} \geq T, \forall i \in K,$$

式中 K 为选择建设的充电站备选点集合。

3 算法求解

在充电站选址问题的求解过程中,求解算法选择对决策效果具有关键影响。传统麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)在迭代后期易陷入局部最优,种群多样性下降,导致优化结果精度不足。为克服该局限,引入一种融合柯西变异与反向学习策略的改进麻雀算法(improved sparrow search algorithm, ISSA),通过引入动态自适应权重、柯西变异算子与反向学习策略,有效增强全局探索能力与收敛精度^[23-26]。

3.1 动态自适应权重

若发现者在迭代初期向全局最优解靠近,会导致搜索范围不足,陷入局部最优解。为解决该问题,可在发现者位置更新中引入上一代的全局最优解。发现者的位置不仅受当前代发现者的位置影响,还受上一代全局最优解的影响,可增强搜索多样性,降低陷入局部最优解的风险,提高找到全局最优解的概率。借鉴惯性权重思想,在发现者位置更新中引入动态权重。在迭代初期权重较大,有利于全局探索;在迭代后期权重自适应减小,有利于局部搜索,提高收敛速度。权重^[23]

$$\omega = [e^{2(1-t/t_{\max})} - e^{-2(1-t/t_{\max})}] / [e^{2(1-t/t_{\max})} + e^{-2(1-t/t_{\max})}],$$

式中: t 为当前迭代次数, $t_{\max}$ 为最大迭代次数。

改进后发现者位置更新公式为^[23]:

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{ij}^t + \omega(f_j^t - X_{ij}^t), R_2 < S_T \\ X_{ij}^t + Q, R_2 \geq S_T \end{cases},$$

式中: X_{ij}^t 为第 t 代中第 i 只麻雀在第 j 维的位置; f_j^t 为第 t 代中第 j 维的全局最优解; Q 为服从 $(0,1)$ 正态分布的随机数; R_2 为预警值, $R_2 \in [0,1]$; S_T 为安全值, $S_T \in [0.5,1.0]$ 。

3.2 改进的侦查预警麻雀更新公式

改进后的侦查预警麻雀位置更新策略为:若麻雀不处于当前全局最优位置,即其适应度未达到全局最优,则其向自身与全局最优位置间的随机位置移动;若其已处于最优位置,则向全局最优与最差位置间的随机位置移动,以增强种群多样性。发现者位置更新公式为^[24]:

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best},j}^t + \beta(X_{ij}^t - X_{\text{best},j}^t), f_i \neq f_g \\ X_{\text{best},j}^t + \beta(X_{\text{worst},j}^t - X_{\text{best},j}^t), f_i = f_g \end{cases},$$

式中: $X_{\text{best},j}^t$ 为第 t 代第 j 维的全局最优位置; $X_{\text{worst},j}^t$ 为第 t 代第 j 维的全局最差位置; β 为步长调整系数; f_i 为当前麻雀的适应度; f_g 为目前全局最优适应度, $f_i = f_g$ 表示在种群中心的麻雀察觉到被天敌袭击的危险,需向其他麻雀靠拢。

3.3 融合柯西变异和反向学习策略

为提高算法跳出局部最优解的能力,引入反向学习策略。该策略通过计算当前解的反向解,扩大搜索范围。第 t 代全局最优解 X_{best}^t 的反向解^[25]

$$X_{\text{best}}^{t'} = u_b + r \oplus (l_b - X_{\text{best}}^t),$$

式中: $\boldsymbol{u}_b$ 、 $\boldsymbol{l}_b$ 分别为搜索空间的上、下界向量, $\boldsymbol{r}$ 为服从 $(0,1)$ 标准均匀分布的 $1 \times d$ (d 为空间维数) 的随机数矩阵。

为进一步增强扰动,引入柯西变异,对历史最优解、反向解及当前个体位置进行混合与变异产生新的候选解,位置公式为^[25]:

$$\boldsymbol{X}_i^{t+1} = \boldsymbol{X}_i^t + c_1(\boldsymbol{X}_{\text{best}}^t - \boldsymbol{X}_i^t) + c_2(\boldsymbol{X}_{\text{best}}^{t'} - \boldsymbol{X}_i^t) + \eta \boldsymbol{C},$$

式中: $\boldsymbol{X}_i^{t+1}$ 为第 t 代中第 i 只麻雀的位置向量; c_1 、 c_2 为学习因子,分别控制向历史最优解和其反向解学习的程度; η 为变异尺度因子; $\boldsymbol{C}$ 为服从多元标准柯西分布的随机向量,在每一维上产生扰动。

通过动态自适应权重、反向学习策略和柯西变异的结合,ISSA 收敛速度较快,陷入局部最优解的风险降低。

4 实例验证

分别采用 SSA 与 ISSA 对最大化充电站备选点重要度、最小化充电站备选点总成本的双目标规划模型进行迭代求解,得到不同算法下的最优充电站备选点布局方案。对比两种算法的选址结果,评估模型及求解算法的有效性。

4.1 选址结果分析

设置参数并完成算法求解,得到 SSA 与 ISSA 两种算法下的济南市充电站备选点空间选址布局,结果如图 1 所示。由图 1 可知:ISSA 在优化充电站备选点空间布局时,能充分考虑区域服务需求的差异性和地理分布特征,有效避免选址过于集中或分散的问题。在偏远区域,ISSA 能综合考虑充电站服务覆盖需求与最低服务标准,通过动态调整目标函数,优先选择覆盖范围更广、运营成本更低的备选点。整体来看,ISSA 在选址均衡性方面显著优于 SSA,有效克服了传统算法易陷入局部最优解的局限,能有效平衡投资成本与用户便利性间的关系,处理多目标优化问题时适应性更强,为充电站的科学布局提供更可靠的决策依据^[26]。

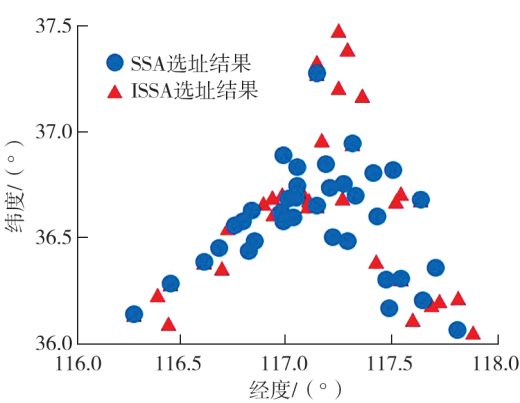


图 1 充电站备选点空间选址布局结果

采用 SSA 与 ISSA 两种算法,从 96 个备选点中分别筛选得到 36 个充电站备选点,具体备选点的编号、成本及重要度如表 2、3 所示。

表 2 通过 SSA 筛选得到的充电站备选点信息

备选点 编号	成本/万元	重要度	备选点 编号	成本/万元	重要度	备选点 编号	成本/万元	重要度	备选点 编号	成本/万元	重要度
2	269.08	0.02	25	344.74	0.01	56	369.94	0.79	75	355.57	0.15
3	248.06	0.07	29	213.11	0.01	58	267.89	0.02	76	300.64	0.01
4	247.64	0.11	31	323.25	0.01	62	325.44	0.01	77	287.97	0.01
7	336.31	0.06	33	307.66	0.02	65	337.82	0.03	80	335.34	0.01
12	306.89	0.01	42	190.90	0.07	67	331.75	0.05	83	349.06	0.12
15	273.26	0.01	44	276.03	0.01	68	323.96	0.07	84	336.13	0.06
18	361.22	0.87	45	276.66	0.03	69	272.74	0.00	85	349.07	0.46
22	334.44	0.02	50	298.45	0.01	72	356.67	0.34	90	294.25	0.02
23	256.21	0.21	52	294.68	0.02	73	351.18	0.12	96	319.29	0.13

表 3 通过 ISSA 筛选得到的充电站备选点信息

备选点 编号	成本/万元	重要度	备选点 编号	成本/万元	重要度	备选点 编号	成本/万元	重要度	备选点 编号	成本/万元	重要度
2	269.08	0.02	24	361.58	0.39	47	338.98	0.22	70	232.90	0.01
3	248.06	0.07	26	357.21	0.34	48	349.70	0.22	72	356.67	0.34
4	247.64	0.11	29	213.11	0.01	50	298.45	0.01	74	232.08	0.04
6	234.26	0.20	34	349.99	0.37	55	292.48	0.01	85	349.07	0.46
10	296.71	0.18	35	194.55	0.02	57	200.12	0.01	88	188.13	0.02
14	277.26	0.01	40	317.29	0.13	60	230.21	0.02	89	193.26	0.01
17	342.66	0.08	44	276.03	0.01	61	295.93	0.15	91	349.15	0.43
20	306.09	0.10	45	276.66	0.03	64	369.54	0.58	92	370.90	0.58
21	286.10	0.01	46	232.62	0.12	66	275.04	0.02	95	194.37	0.01

由表 2、3 可知:采用 SSA、ISSA 所选充电站备选点方案的总成本分别为 11 023.31 万元、10 203.86 万元,重要度分别为 3.96、5.32。采用 ISSA 引入动态权重调整机制,实现全局搜索与局部搜索间更高效的切换,避免 SSA 因搜索范围受限导致的局部最优问题。在部分土地价格较高且需求密集的区域(如备选点 64 和 92),采用 ISSA 优化选址权重和成本因子,降低土地租赁费用及建站成本,总成本减小约 7.43%,重要度增大约 34.34%。

4.2 算法对比

4.2.1 迭代收敛

为对比 ISSA 与 SSA 的优化性能,设置种群规模为 200,最大迭代次数为 150,进行算法优化运算。两种算法的适应度随迭代次数的变化曲线见图 2。由图 2 可知:SSA 的收敛速度较快,但易陷入局部最优解。在迭代初期,SSA 性能优于 ISSA,但迭代到第 8 次即趋于收敛,ISSA 在迭代到第 51 次后得到最优解。随着迭代次数的增大,ISSA 搜索精度逐渐提高,全局搜索能力明显优于 SSA。

4.2.2 Pareto 前沿分析

为量化评估 ISSA 与 SSA 在多目标优化中的性能差异,对成本与重要度两个目标的权衡关系进行可视化分析,绘制两种算法的帕累托前沿如图 3 所示。由图 3 可知:成本为 250 万元~350 万元时,ISSA 的前沿位置显著高于 SSA,表明在相同成本约束下 ISSA 所选充电站的重要度评分更高;成本超过 350 万元时,SSA 和 ISSA 的重要度评分差距缩小,但 ISSA 的前沿位置仍略高于 SSA。ISSA 能增强全局探索能力,实现单位成本投入下的效益最大化,该算法较适合在预算受限条件下进行充电站的优化布局决策。

4.3 覆盖率对比

为验证 ISSA 与 SSA 求解的充电站备选点方案

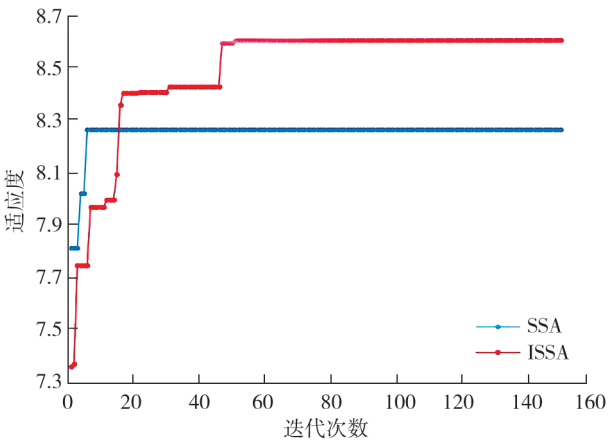


图 2 两种算法的适应度随迭代次数的变化曲线

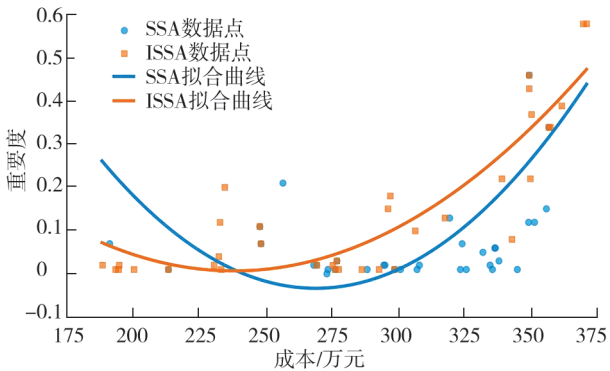


图 3 SSA 与 ISSA 两种算法的帕累托前沿

在用地属性覆盖方面的效能差异,通过开放街道地图(OpenStreetMap, OSM)获取用地属性数据,采用 ArcGIS 工具对 SSA 与 ISSA 选址方案进行量化对比。分别计算各方案充电站备选点服务缓冲区与各类用地的空间交集面积,采用覆盖率指标进行效能评估。充电站备选点服务缓冲区对第 j 类用地类型的覆盖率^[27]

$$C_j = 100\% \times \sum_{i=1}^n A_{ij}/A_j^{\text{total}},$$

式中: n 为充电站备选点数, A_{ij} 为第 i 个充电站备选点服务缓冲区与第 j 类用地的交集面积, A_j^{total} 为第 j 类用地类型的总面积。

SSA 与 ISSA 两种算法下不同用地类型上充电站备选点缓冲区的覆盖率如表 4 所示。

由表 4 可知:采用 ISSA 求解得到的充电站备选点的服务缓冲区在各种用地类型上的覆盖面积及覆盖率均优于 SSA,尤其在商业用地方面,ISSA 方案的覆盖率比 SSA 方案大 6.79 百分点,显示出其对高需求、高价值用地类型的精准识别与优先覆盖能力。从空间分布特征来看,在重要度模型的引导下,采用 ISSA 求解得到的充电站备选点布局更倾向于覆盖高需求用地类型,空间资源配置效率更优。这一结果验证了将用地属性重要度纳入充电站选址决策的科学性和有效性,也为未来城市充电基础设施的精准规划与布局提供了可靠的理论依据和实践指导。

表 4 充电站备选点服务缓冲区覆盖率

用地类型	面积/km ²	覆盖面积/km ²		覆盖率/%	
		SSA	ISSA	SSA	ISSA
居住用地	985.4	655.8	702.3	66.55	71.27
商业用地	482.7	352.6	385.4	73.05	79.84
工业用地	563.2	321.5	345.8	57.08	61.40
交通用地	387.6	248.9	268.5	64.22	69.27
公服用地	332.7	136.5	154.2	41.03	46.35
其他用地	625.1	342.6	351.4	54.81	56.22

5 结束语

本文综合考虑济南市现有充电站空间分布与充电站服务范围内的用地属性,构建以充电站备选点重要度最大化、社会总成本最小化为目标的充电站双目标规划选址模型,分别采用传统麻雀搜索算法与融合动态自适应权重、柯西变异和反向学习策略的改进麻雀算法求解模型,以济南市为例进行实证研究。结果表明:传统麻雀搜索算法收敛速度较快,但易陷入局部最优解;改进的麻雀搜索算法在全局搜索精度与收敛稳定性方面均表现更优。经改进的麻雀搜索算法优化后,充电站布局方案的总成本减小约 7.43%,同时备选点重要度增大约 34.34%。优化后的充电站空间分布更均衡合理,扩大了城市区域服务覆盖,增强了对人口密集区的充电保障能力,能有效提高设施整体服务水平与用户满意度,为城市充电基础设施的科学规划提供可靠依据。

未来研究可在模型中纳入环境影响、能源消耗及用户行为偏好等多重因素,增强模型的综合决策能力。随着智能交通系统的发展,融合实时交通与充电需求数据,实现充电站布局的动态优化调整,也将成为提高充电站适应性与运行效率的重要研究方向。

参考文献:

[1] 中华人民共和国公安部. 全国机动车保有量达 4.53 亿辆驾驶人达 5.42 亿人[EB/OL]. (2025-01-18)[2025-05-25]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c9939035/content.html>.

[2] 中国电动汽车充电基础设施促进联盟. 2024 年全国电动汽车充换电基础设施运行情况[EB/OL]. (2025-01-23)[2025-05-25]. <https://www.evcipa.org.cn/newsinfo/8137834.html>.

[3] CAI L, GUO G, WU D B. A cooperative multi-agent charging scheduling by regrouping EVs with differentiated deadlines[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025, 26(5): 6414-6424.

[4] PARK K, MOON I. Multi-agent deep reinforcement learning approach for EV charging scheduling in a smart grid[J]. Applied Energy, 2022, 328: 120111.

- [5] ZHANG Q, SI G W, LI H Y. Optimization of electric vehicle charging station location distribution based on activity-travel patterns[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2025, 14(10): 373.
- [6] WANG P, GU F Q, LIU H L. Location planning of electric vehicle charging stations based on a multi-objective three-level optimization model [C]//Proceedings of 18th International Conference on Computational Intelligence and Security. Chengdu, China: IEEE, 2022: 346-350.
- [7] 姚明, 毛文杰, 曹淑超, 等. 基于多源数据的电动汽车充电设施布局优化方法研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(9): 31-37.
- [8] 李响, 王世谦, 李秋燕, 等. 考虑 DG 和 EV 接入的分布式智能配电网联合规划[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(增刊 1): 159-167.
- [9] 江昌旭, 卢明君, 袁羽娟, 等. 考虑里程焦虑的高速公路充电站及配电网扩展规划[J]. 电网技术, 2025, 49(9): 3881-3890.
- [10] 易校石, 祁宝川, 易正俊. 新能源电动汽车充电桩的优化选址[J]. 公路交通科技, 2022, 39(7): 166-171.
- [11] 罗清玉, 田万利, 贾洪飞. 考虑通勤需求的电动汽车充电站选址与定容模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(5): 1471-1477.
- [12] SHIRAMAGOND T, LEE W J. Integration of renewable energy into electric vehicle charging infrastructure [C]//Proceedings of IEEE International Smart Cities Conference. Kansas City, MO, USA: IEEE, 2018: 1-7.
- [13] GOLSEFIDI A H, HÜTTEL F B, PELED I, et al. A joint machine learning and optimization approach for incremental expansion of electric vehicle charging infrastructure[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2023, 178: 103863.
- [14] HOEN S F, DÍEZ-GUTIÉRREZ M, BABRI S, et al. Charging electric vehicles on long trips and the willingness to pay to reduce waiting for charging: Stated preference survey in Norway[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2023, 175: 103774.
- [15] WANG Y X, ZHAO Y Y, GAN S J, et al. Optimization of charging stations integrated with dynamic transportation systems in metropolises[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 119: 103726.
- [16] 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, 33(4): 901-913.
- [17] 济南市人民政府办公厅. 济南市人民政府办公厅关于印发济南市支持新能源汽车产业高质量发展和推广应用行动计划(2023—2025 年)的通知[EB/OL]. (2023-08-22)[2024-09-01]. http://www.jinan.gov.cn/art/2023/9/1/art_2615_4957936.html.
- [18] GONG P, CHEN B, LI X C, et al. Mapping essential urban land use categories in China (EULUC-China): Preliminary results for 2018[J]. Science Bulletin, 2020, 65(3): 182-187.
- [19] 刘智才, 徐涵秋, 林中立, 等. 不同城市规划用地类型的生态效应研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(10): 1352-1359.
- [20] ABO-ELNAGA Y, NASR S. K-means cluster interactive algorithm-based evolutionary approach for solving bilevel multi-objective programming problems[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(1): 811-827.
- [21] 崔健, 徐健. K-means++ 聚类算法研究与实现[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(17): 78-81.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市综合交通体系规划标准: GB/T 51328—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [23] 毛清华, 张强. 融合柯西变异和反向学习的改进麻雀算法[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(6): 1155-1164.
- [24] 杨小琴, 朱玉全. 改进麻雀搜索算法求解物流配送中心选址问题[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(5): 1441-1450.
- [25] 闫丽梅, 罗晴川. 基于改进麻雀搜索算法的电动汽车充电站规划[J]. 广东电力, 2022, 35(9): 56-66.
- [26] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [27] SISMAN A. Identification of suitable sites for electric vehicle charging stations: A geographical information systems based multi criteria decision making approach[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45(2): 4017-4030.

Construction of a candidate-site model for charging stations based on land-use attributes

HUANG Yu¹, LIU Jie^{1}, HUANG Jianchang¹, LIN Liping²*

1. School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250031, China

Abstract: To improve the resource allocation efficiency of electric vehicle charging infrastructure and reduce operational costs, a charging station site selection method integrating land-use attributes and multi-objective optimization is proposed. Based on the distribution data of points of interest (POI), the K-means clustering algorithm is used as a preprocessing method to initially determine potential charging station locations. By calculating the weight and number of POI types within the coverage area of each potential site, the importance of each site is determined, and an objective function is established to maximize the importance of the charging station candidate points. At the same time, considering the construction and operational costs of the charging stations and the travel loss costs for users, an objective function to minimize the total cost of the charging stations is formulated. A bi-objective planning model for the charging station site selection is built. The model is solved using both the traditional sparrow search algorithm (SSA) and an improved sparrow search algorithm (ISSA), which integrates dynamic adaptive weights, reverse learning strategies, and Cauchy mutations. An example analysis for Jinan city is presented. The results show that the ISSA-based charging station layout effectively avoids issues of excessive concentration or dispersion, with significantly better service coverage and layout balance than SSA. Compared to SSA, the ISSA site selection plan reduces the total cost by 7.43% and increases the charging station importance by 34.34%. The service buffer coverage of the charging stations solved by ISSA outperforms SSA in all types of land-use areas, especially in commercial areas, where the coverage rate of the ISSA plan is 6.79 percentage points higher than that of the SSA plan. The charging station bi-objective planning model and the optimized solving algorithm can effectively improve the rationality of the charging station layout and spatial resource allocation efficiency.

Keywords: charging station; candidate site; importance; ISSA

(责任编辑:赵玉真)