

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202409001



基于 GM(1,1)模型与 GIS 的城市 充电设施布局优化

南棋梦, 叶青, 李悦

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为解决城市充电基础设施分布不均衡、利用不充分问题,采用 GM(1,1)模型及 Arc GIS 空间网络分析功能,对现有充电基础设施布局展开优化。首先,通过灰色预测模型分析未来电动汽车增长情况,以厦门市为例,选取 2016—2023 年电动汽车保有量数据,经预测至 2030 年将达到 45 万辆,以此作为充电总需求计算依据,届时公共充电桩总数需达到 64 490 个。其次,基于城市交通路网、兴趣点(POI)分布、充电基础设施及公共停车场场点等数据展开核密度分析及缓冲区分析进行初次选址,建立最小化设施点模型完成二次选址。最后,利用 Voronoi 图对模型选址结果进行检验,并通过位置分配模型完成容量分配。结果表明:至 2030 年,厦门市需在 16 处公共停车场处新建充电站,充电站整体扩容比例达到 72.89%,在全市 3 000 m 充电服务半径范围内覆盖率为 99.08%,1 500 m 范围内为 95.41%,基本满足电动汽车用户未来出行的充电需求。

关键词: 电动汽车; 保有量预测; 充电设施; Arc GIS; 选址定容

中图分类号: U 491.8; F 224.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)02-0183-09

Optimisation of Urban Charging Facilities Layout Based on GM(1,1) Model and GIS

NAN Qimeng, YE Qing, LI Yue

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to solve the problem of unbalanced distribution and insufficient utilisation of urban charging infrastructure, GM(1,1) model and the spatial network analysis function of Arc GIS are used to optimise the layout of the existing charging infrastructure. The grey prediction model is used to analyse the future growth of electric vehicles, taking Xiamen City as an example, according to the data of electric vehicle ownership from 2016-2023, 450 000 electric vehicles will be predicted by 2030, which is the basis for calculating the total charging demand, and the total number of public charging piles demanded by that time is 64 490. Based on data such as urban transport network, point of interest (POI) distribution, charging infrastructure, and public car park locations, kernel density analysis and buffer zone analysis are conducted for initial site selection, and a minimum facility point model is established to complete secondary site selection. The model site selection results are checked using Voronoi diagrams, and the capacity allocation is completed by the location allocation model. The results show that by 2030, Xiamen City needs to build new charging stations at 16 public car parks, and the overall expansion ratio of charging stations reaches 72.89%, the coverage rate is 99.08%

收稿日期: 2024-09-01

通信作者: 叶青(1968—),女,教授,博士,主要从事建筑经济与工程项目管理、节能建筑的研究。E-mail: yeqing@hqu.edu.cn。

基金项目: 福建省创新战略研究项目(2023R0040)

within 3 000 m charging service radius, and 95.41% within 1 500 m radius, which basically meets the charging needs of electric vehicle users for future travel.

Keywords: electric vehicles; ownership forecasts; charging facilities; Arc GIS; siting and capacity

当前,我国以“碳达峰碳中和”目标为牵引推动绿色转型,交通运输行业作为碳排放的主要领域之一,也是受气候变化影响最显著的行业之一^[1]。发展新能源汽车成为解决交通运输行业能源消耗大、污染排放多的重要举措,为我国应对气候变化、推动绿色发展提供支撑。在新能源汽车快速增长的趋势下,国内电动汽车发展步入全面拓展期,充电基础设施逐步成为重要的交通能源融合类基础设施。

电动汽车保有量预测的研究主要采用灰色理论模型和 Bass 扩散模型。Zhao 等^[2]结合灰色预测模型生成历史数据和短期预测数据,采用遗传算法对 Bass 模型的创新系数、模仿系数等进行训练,应用于 2023—2040 年的中长期所有权预测。Dong 等^[3]针对上海市近年电动汽车保有量较少的问题,提出一种改进的灰色模型(GM)-马尔可夫预测方法,对电动汽车保有量进行预测。Ding 等^[4]提出一种新的自适应优化灰色模型,利用动态加权序列及 Simpson 公式重构背景值改正,从而提高灰色模型的适应性和预测精度。

在电动汽车的全面发展中,地理信息系统(GIS)为城市基础设施规划整合各类重要数据,并综合展开可视化的空间分析,有效支持电动汽车成长的不同阶段,为城市基础设施布局提供强大支撑^[5]。Suhandri 等^[6]针对从 Ayer Hitam 到 Batu Pahat,在柔佛州(Johor)主要道路上应用 Arc GIS 对公共设施定位分析,开展加油站(PPS)规划。吴鹏^[7]在兴趣点(POI)数据的基础上,提出了一种基于加权 K-Means 聚类算法的电动汽车充电桩选址规划模型。韩韶光等^[8]为解决电动汽车充电站选址布局不合理问题,采用 Arc GIS 网络分析法优化原有充电站站点。Kemala 等^[9]指出为加强电动汽车的普及应规划配套基础设施,预测电动汽车的增长对帮助行业及政府的战略决策具有重要意义。Gao 等^[10]研究表明电动汽车的数量、分布与充电设施之间的紧密对称性对充电设施的布局提出了更高的要求。因此,本文以福建省厦门市为例,探讨充电设施布局,分析电动汽车保有量不断提升下充电基础设施的总体规划。

1 厦门市电动汽车增长预测

1.1 数据来源

国内新能源汽车市场主要由纯电动汽车(BEV)、插电式混合动力汽车(HEV)及燃料电池电动汽车(FCEV)3 类构成,其中,燃料电池汽车占比很小。基于新能源汽车保有量更能反映市场整体规模,对电动汽车的分析采用厦门市新能源汽车保有量展开。2016—2023 年厦门市新能源汽车保有量,如表 1 所示。数据来自厦门市统计局、厦门市工业和信息化局、厦门市车辆管理所等发布的有关报道。

表 1 2016—2023 年厦门市新能源汽车保有量

Tab.1 Number of new energy vehicles in Xiamen City from 2016-2023

指标	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
保有量/万辆	0.931 3	2.300 0	3.900 0	4.400 0	5.129 2	7.218 8	11.430 0	16.388 7

1.2 GM(1,1)模型分析

1.2.1 数据检验 建模前输入原始数列,判断是否适用于 GM(1,1)模型。

定义覆盖区间为

$$\theta=(e^{-\frac{2}{k+1}},e^{-\frac{2}{k+2}})。(1)$$

定义比值为

$$\lambda(n)=x(n-1)/x(n)。(2)$$

式(2)中: $n=2,3,\cdots,k$,若满足对任意 n ,有 $\lambda(n)\in\theta,k=2,3,4,\cdots,k$,则认为原始数列可以作为 GM(1,1)模型而被灰度预测。

若原始数列级别检验不通过,则需要添加常数项 c ,通过平移变换使其落入区间内,即有

$$y^{(0)}(k)=x^{(0)}(k)+c,k=1,2,\cdots,n。(3)$$

级别检验未通过,得到 c 的结果为 15.068 7。

1.2.2 模型构建 首先,确定新的原始数列,通过级比检验后得到 $y^{(0)}$ 。

设新的原始数列为

$$y^{(0)}=(y^{(0)}(1),y^{(0)}(2),\cdots,y^{(0)}(n)),\quad y^{(0)}(i)\geqslant 0,\quad i=1,2,\cdots,n。$$
(4)

式(4)中: n 为未知数的个数。

对新的原始数列进行累加,得到它的一次累加数列,即

$$y^{(1)}=(y^{(1)}(1),y^{(1)}(2),\cdots,y^{(1)}(n)),$$
(5)

$$y^1(k)=\sum_{i=1}^k y^{(0)}(k),\quad k=1,2,\cdots,n。$$
(6)

令 $z^{(1)}$ 为 $y^{(1)}$ 的紧邻均值(MEAN)生成序列,即

$$z^{(1)}=(z^{(1)}(2),z^{(1)}(3),\cdots,z^{(1)}(n)),$$
(7)

$$z^{(1)}(k)=\alpha y^{(1)}(k)+(1-\alpha)y^{(1)}(k-1),\quad k=2,3,\cdots,n。$$
(8)

取 $\alpha=0.5$,生成的数列为均值生成数(等权邻值生成数)。

定义 $y^{(1)}$ 的灰导数为

$$d(k)=y^{(0)}(k)=y^{(1)}(k)-y^{(1)}(k-1)。$$
(9)

结合邻值生成序列,定义 GM(1,1)灰微分方程模型为

$$d(k)+az^{(1)}(k)=b \text{ 或 } y^{(0)}(k)+az^{(1)}(k)=b。$$
(10)

式(10)中: a 为发展系数; b 为灰作用量; $z^{(1)}(k)$ 为白化背景值。

将 $k=2,3,\cdots,n$ 代入式(10)中可得

$$\left. \begin{aligned} y^{(0)}(2)+az^{(1)}(2)&=b, \\ y^{(0)}(3)+az^{(1)}(3)&=b, \\ &\vdots \\ y^{(0)}(n)+az^{(1)}(n)&=b。 \end{aligned} \right\}$$
(11)

将式(11)转变为矩阵形式,设

$$Y=\begin{bmatrix} y^{(0)}(2) \\ y^{(0)}(3) \\ \vdots \\ y^{(0)}(n) \end{bmatrix},\quad B=\begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix},\quad u=\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}。$$
(12)

式(12)中: Y 为数据向量; B 为数据矩阵; u 为参数向量。

此时,GM(1,1)模型转化为

$$Y=Bu。$$
(13)

通过最小二乘法可得参数估计值为

$$\hat{u}=\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix}=(B'B)^{-1}B'Y。$$
(14)

对于 GM(1,1)灰微分方程,如果将 $y^{(0)}(k)$ 的离散时刻 $k=2,3,\cdots,n$ 视为连续变量 t ,则 $y^{(1)}$ 为连续变量间 t 的函数 $y^{(1)}(t)$,于是灰导数 $y^{(0)}(k)$ 对应于导数 $\frac{dy^{(1)}(t)}{dt}$, $z^{(1)}(k)$ 对应于 $y^{(1)}(t)$ 。GM(1,1)灰微分方程相对应的白微分方程为

$$\frac{dy^{(1)}(t)}{dt}+ay^{(1)}(t)=b。$$
(15)

假设其初始值 $y^{(1)}(t=1)=y^{(0)}(1)$,则其通解为

$$y^{(1)}(t)=\left(y^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right)e^{-a(t-1)}+\frac{b}{a}。$$
(16)

于是,预测值可表达为

$$\hat{y}^{(1)}(k+1)=\left(y^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right)e^{-ak}+\frac{b}{a},\quad k=1,2,\cdots,n。$$
(17)

累减得还原后的预测值为

$$\hat{y}^{(0)}(k+1)=\hat{y}^{(1)}(k+1)-y^{(1)}(k), \quad k=1,2,\cdots,n。$$

(18)

减去常数项 c , 得到原始数列的预测值为

$$\hat{x}^{(0)}(k)=\hat{y}^{(0)}(k)-c, \quad k=1,2,\cdots,n。$$

(19)

1.2.3 模型检验 采用后验差检验和小误差概率方法检验模型的准确性及精确度。

1) 后验差检验法。模型的残差表达式为

$$\epsilon(k)=x^{(0)}(k)-\hat{x}^{(0)}(k)。$$

(20)

原始数列的均方差表达式为

$$\overline{X}^{(0)}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nX^{(0)}(i),$$

(21)

$$S_{12}^2=\sum_{i=1}^n(X^{(0)}-\overline{X}^{(0)})^2,$$

(22)

$$S_{12}=\sqrt{\frac{S_{12}^2}{n-1}}。$$

(23)

残差数列的均方差表达式为

$$\epsilon^{(0)}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\epsilon^{(0)}(i),$$

(24)

$$S_{22}^2=\sum_{i=1}^n(\epsilon^{(0)}-\bar{\epsilon}^{(0)})^2,$$

(25)

$$S_{22}=\sqrt{\frac{S_{22}^2}{n-1}}。$$

(26)

后验差比值为

$$C=\frac{S_{22}}{S_{12}}。$$

(27)

2) 小概率误差检验法。小误差概率为

$$P=P\{|\epsilon(k)-\bar{\epsilon}|<0.674\,5S_{12}\}。$$

(28)

模型拟合结果后, 后验差比值 C 为 0.068 7, 小误差概率 P 为 1.0, 对照表 2^[11] 可知, 模型精度等级为 1 级, 精度较高。

表 2 灰色模型 GM(1,1)精度等级

Tab. 2 Accuracy level of grey model GM(1,1)

模型精度等级	C	P
1 级(好)	$C\leqslant 0.35$	$P\geqslant 0.95$
2 级(合格)	$0.35<C\leqslant 0.50$	$0.80\leqslant P<0.95$
3 级(勉强合格)	$0.50<C\leqslant 0.65$	$0.70\leqslant P<0.80$
4 级(不合格)	$C>0.65$	$P<0.70$

1.3 预测结果分析

GM(1,1)灰色预测模型分析随时间的拉长, 精度降低, 因此, 选取 2024—2030 年的数据进行预测, 拟合结果, 如表 3 所示。

表 3 2024—2030 年厦门市新能源汽车保有量预测

Tab. 3 Forecast of new energy vehicle ownership in Xiamen City from 2024-2030

指标	2024 年	2025 年	2026 年	2027 年	2028 年	2029 年	2030 年
保有量/万辆	17.642 5	21.143 9	25.020 2	29.311 4	34.062 0	39.321 0	45.143 0

综合新能源汽车保有量预测发展趋势可知, 厦门市电动汽车发展有较大增长空间。一方面, 随着《“电动厦门”展规划(2023—2025 年)》(厦府办[2023]63 号)等文件的发布, 厦门市政府正在不断完善充电基础设施体系, 多方面优化电动汽车发展环境, 为新能源汽车产业发展持续提供政策利好。另一方面, 省级新能源政府监管和便民信息服务平台加快建设, “以桩促车”配套服务建设得如火如荼, 为广大

新能源电动汽车用户提供便捷的充电服务环境,极大提高了新能源电动汽车用户的满意度。

2 厦门市充电设施布局分析

2.1 厦门市概况与数据源

2.1.1 厦门市概况 厦门市位于中国东南沿海,福建省南部,闽南金三角中部,与漳州市、泉州市相连,地处北纬 $24^{\circ}23'-24^{\circ}54'$ 、东经 $117^{\circ}53'-118^{\circ}26'$ 。厦门市辖区包括厦门岛内(含鼓浪屿)的思明区、湖里区,岛外西部的海沧区、集美区,岛外北部的同安区及东部的翔安区^[12]。截至 2023 年末,厦门市常住人口 532.70 万人,常住人口城镇化率 90.81%^[13]。各类经济指标表现良好,地区生产总值、全社会用电量、机动车保有量等均稳步增加。

2.1.2 基础地理信息数据 依托国家地理信息公共服务平台天地图(<https://www.tianditu.gov.cn/>),申请获取国家 1:1 000 000 基础地理信息数据库 G50(2021 公众版),导入 Arc GIS 整理得到厦门市区概况,如图 1 所示。

2.1.3 电动汽车用户的出行兴趣点 分析中考虑兴趣点分布较多的区域为出行目的地集合。设定区域中兴趣点的数量多少体现电动汽车用户出行的充电需求大小,若数量多,则该区域对充电需求较高,应优先设立充电站。

基于高德开放平台(<https://lbs.amap.com/>)利用 Python 多边形查询,爬取厦门市 POI 数据作为电动汽车用户的出行兴趣点,以高德 POI 分类与编码文件为分类标准,相关兴趣点类包括餐饮服务、风景名胜等 15 个大类。高德地图采用 GCJ-02 坐标,研究转换为 WGS-84 坐标系,并对数据展开清洗处理,主要去除重复数据、无效数据及漳、泉两地的边缘数据,得到厦门市 POI 兴趣点 xlsx 格式坐标数据 223 602 条。

2.2 核密度分析

对电动汽车用户出行兴趣点采用核密度分析。结合分析的服务范围,环境处理和栅格分析的掩膜选取厦门市行政区域,以 1 000 m 作为阈值,采用几何间隔分类,优化类范围,保证核密度图像分析质量。POI 核密度分析图,如图 2 所示。

分析图 2 可知:POI 兴趣点总体分布表现出发展核心高密度集聚,其他片区沿主要发展方向发散布置的特征^[14],其中,高密度斑主要集中在思明区、湖里区,随着与厦门岛的距离拉大,集聚程度逐步降低。各区 POI 数量和集聚差异大,空间分布发散性较强。思明、湖里两区合计 135.82 万人,占全市户籍人口的 45.0%^[13],人口数量大,生活集聚,故 POI 兴趣点数量较多;海沧区作为厦门岛外第一个新兴城区,开发建设时点最早、城区成熟度最高,POI 沿主要交通道路分散布置;集美区发展基础夯实,分布相对均匀;同安区是岛外商业基础较为薄弱的板块之一,POI 分布主要位于同安老城区,辐射范围较局限,在环东海域新城片区滨海居住带呈现带状分布;翔安区发展基础较为薄弱,POI 分布围绕汇景购物广场与闽篮城市广场一北一南双中心格局分散。整体来看,岛外四区大都分布于南部,这也与北部的生态屏障相适应。

基于核密度分析结果,将不同密度区域划分为不同量级的充电需求区域。红色及深橙色区域为一级区域,考虑该区域有旺盛的充电需求;浅橙色区域为二级区域,充电需求程度较大;黄色区域为三级区域,充电需求一般。针对不同需求程度的区域分别设定充电服务半径。

2.3 缓冲区分析

根据厦门市 POI 数据分类统计整理充电站、换电站、专用充电站三类数据,具体包括站点名称、经纬度、站点运营信息、充电容量等属性。

现有充电设施分布情况,如图 3 所示,在此基础上分别建立 900、1 500、2 500、3 000 m 缓冲区,明确覆盖范围,从而建立合适的服务半径,如图 4 所示。基于缓冲区分析结果,对一级区域设定充电站服务



图 1 厦门市区概况

Fig. 1 Overview of Xiamen City

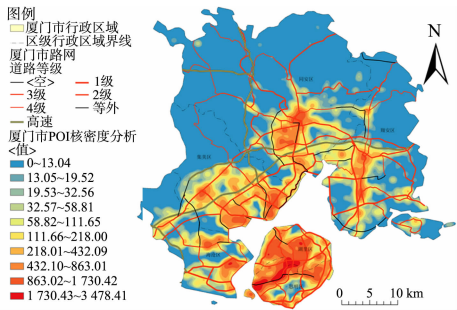


图 2 POI 核密度分析图

Fig. 2 POI kernel density analysis plot

半径为 900 m,二级区域服务半径为 1 500 m,三级区域服务半径为 3 000 m,分级覆盖全市所有充电需求。

对现有充电设施的优化基于厦门市公共停车场建设情况新建充电站,一定程度上避免部分区域由于盲目建站带来的资源浪费。经过筛查可知,目前共有 4 830 个公共停车场,分布情况与 POI 核密度图近似。

在未覆盖到的需求区域中最多需在 18 处公共停车场增设充电站,候选站点,如表 4 所示,最大化覆盖所有充电需求。

完成充电站的初次选址,对候选充电站建立后的情况分级进行缓冲区分析复核。据目前厦门市充电设施发展情况,城市核心区公共充电服务半径已达 900 m,对最大化覆盖范围下建设情况展开 1 500、3 000 m 缓冲分析,复核通过。

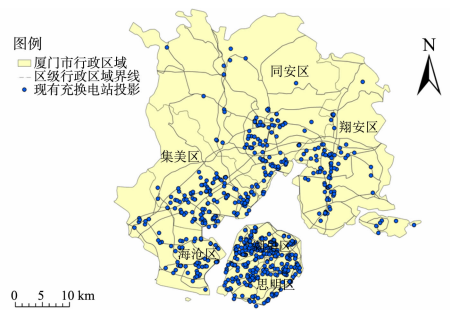


图 3 现有充电设施分布
Fig. 3 Distribution of existing charging facilities

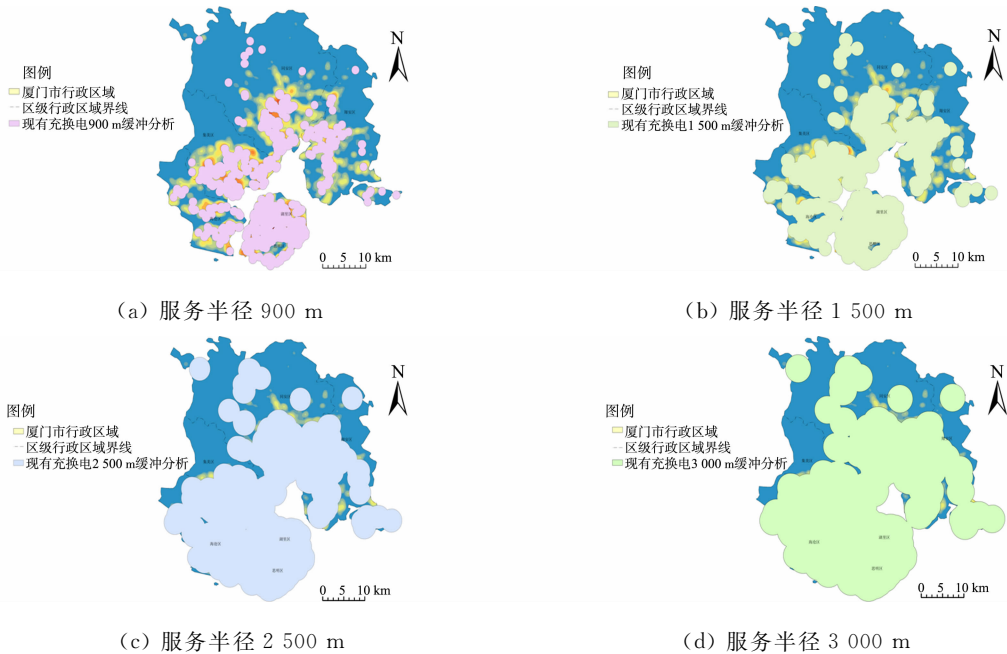


图 4 现有充电设施多环缓冲分析

Fig. 4 Multi-ring buffer analysis of existing charging facilities

表 4 候选站点

Tab. 4 Candidate sites

编号	名称	经度/(°)	纬度/(°)	所属区	类别
1	市政芸景实小公共停车场	117.980 1	24.538 3	海沧区	公共停车场
2	旺角新天地地面停车场	118.079 0	24.631 9	集美区	公共停车场
3	艾茅土休闲农庄地面停车场	117.980 6	24.628 2	集美区	公共停车场
4	厦门同安影视城停车场	118.156 0	24.744 0	同安区	公共停车场
5	大新停车场	118.205 4	24.738 8	同安区	公共停车场
6	银丰温泉停车场	118.127 1	24.779 8	同安区	公共停车场
7	地面停车场	117.938 9	24.849 7	同安区	公共停车场
8	闽盛交通停车场	118.153 4	24.765 8	同安区	公共停车场
9	北辰山景区北山岩门停车场	118.236 3	24.789 7	同安区	公共停车场
10	八怪谷停车点	118.151 3	24.858 5	同安区	公共停车场
11	丽田园景区停车点	118.070 7	24.778 7	同安区	公共停车场
12	厦门翔安天红钓场地面停车场	118.220 7	24.603 5	翔安区	公共停车场
13	双沪站停车场	118.271 0	24.572 2	翔安区	公共停车场
14	大宅生态停车场	118.274 5	24.613 1	翔安区	公共停车场

续表

Continue table

编号	名称	经度/(°)	纬度/(°)	所属区	类别
15	中航锂电(厦门)科技有限公司地下停车场	118.303 3	24.670 9	翔安区	公共停车场
16	厦门莲花医院莲河总院停车场	118.341 5	24.584 4	翔安区	公共停车场
17	地面停车场	118.262 3	24.760 9	翔安区	公共停车场
18	海屿原营销中心地面停车场	118.199 6	24.566 0	翔安区	公共停车场

2.4 位置分配及容量分析

2.4.1 最小化设施点模型 总体满足全部充电需求后,遵循资源分配及经济性原则,使充电站数量最小化。在充电站的不同服务半径内,让尽可能多的兴趣点被分配到充电站的服务范围内,同时保证覆盖出行兴趣点的充电站建设数量最小化。在 Arc GIS 中对充电站进行细化分类,分类标准,如表 5 所示。

表 5 充电站建设候选点分类标准

Tab. 5 Classification criteria of candidate sites for charging station construction

字段	类型	图例	参考准则
0	候选		充电桩数量<4 的充电站;有充电需求的公共停车场
1	必选		考虑高速服务区、环岛路的充电设施为必要需求
2	竞争(不选)		运营不佳、已暂停营业、不对外开放的充、换电站;公交场站
3	已选		充电桩数量≥4 的充电站,正常运营的充电站

依托厦门市路网数据分析搭建交通路网。构建基于 1 500,3 000 m 服务半径下充电站的最小化设施点模型,如图 5 所示。

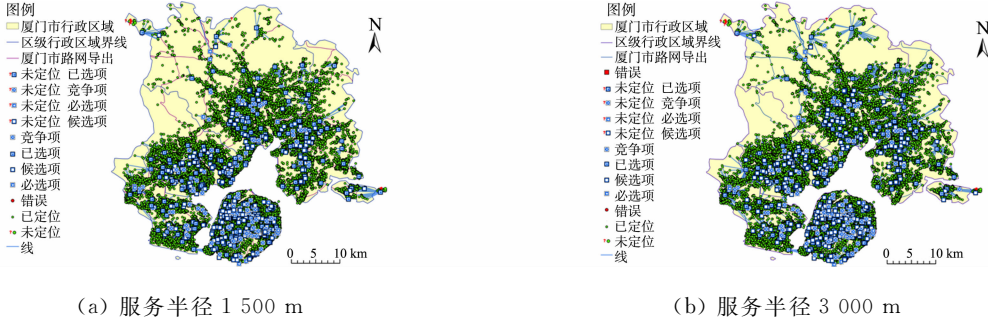


图 5 不同阻抗最小化设施点模型

Fig. 5 Different impedance minimization facility point models

不同阻抗最小化模型选址结果,如表 6 所示。由模型分析表 6 可知,厦门市内至少需要表 6 要求位置处建设充电站才能满足所有充电需求,从而优化候选站。

表 6 不同阻抗最小化模型选址结果

Tab. 6 Site selection results for different impedance minimisation models

指标	现有充电设施建设情况	服务半径 1 500 m 充电设施建设	服务半径 3 000 m 充电设施建设
候选充电站数量/个	62	454	544
必选充电站数量/个	21	21	21
不选充电站数量/个	95	95	95
已选充电站数量/个	566	192	102
有效充电站数量/个	587	213	123
覆盖率/%	—	95.41	99.08

以必选类、已选类站点作为基础,在不同阻抗最小设施点模型中选取对应区域站点作为候选。可知一级区域 900 m 范围内已完全覆盖,不需要新建站点;二级区域若要满足充电服务半径在 1 500 m 范围内,仍需在 2 处位置新建充电站;三级区域若要满足充电服务半径在 3 000 m 范围内,仍需在 14 处位置新建充电站。组合选址情况,如图 6 所示。最后,对选址结果进行缓冲区分析,几乎满足全部充电需求,二次复核结果通过。

2.4.2 容量分配 借助电动汽车保有量预测值估计充电总需求,查询历年车桩比变化情况,2020 年厦门市新能源汽车与公共充电桩比为 1.0 : 11.8,到 2021 年车桩比达到 1.0 : 10.5,而到 2023 年车桩比约为 1 : 15,电动汽车的推广速度逐渐加快。2030 年厦门市整体车桩比力求达到 2 : 1,按照目前 1 个公桩约等于 3 个私桩的比例进行测算,考虑电动汽车的增长速度及公共充电桩的建设程度,推断至 2030 年厦门市公共充电桩的车桩比约为 7 : 1,公共充电桩总数需达到 64 490 个。

综合核密度分析、缓冲区分析及位置分配模型的结果分配具体容量。对于候选充电站,根据最小化设施模型中的网络分析数据将各充电站分配的充电需求数目进行统计分析。对现有充电设施建立最大化覆盖范围模型进行分析,确定各站点分配到的权重。

两类模型中有部分站点重复分析,对此分配的优先级别为 3 000 m 最小化设施模型>1 500 m 最大化覆盖范围模型>1 500 m 最小化设施模型。原因是以 1 500 m 为阻抗,最大化覆盖范围模型考虑到 2 个及以上已有充电站相距较近时,对充电需求的分配更偏向于实际,最小化设施模型则更偏向于经济,忽略此类站点的存在;以覆盖范围为考虑因素,阻抗越大,意味着有更多的需求点被选入。在此基础上,仍有部分兴趣点在超过一个模型中被重复计算,对此平均分配误差到各站点。

结合充电站总体规模及充电站点权重完成容量分配,结果如表 7 所示。由表 7 可知:厦门市不同区域的充电设施扩容比例均在 60 % 以上。其中,各区域有 10 % ~ 30 % 的充电站容量变化不大,设计适度超前;主要在充电桩数量过少的候选站及换电站处需新增充电桩来更好满足周边充电需求,兼顾充换电模式的充电设施将持续增加。

表 7 充电站容量分配
Tab. 7 Capacity allocation of charging stations

范围	容量分配比例/%		
	扩容	不变或略微减少	新建
厦门市	72.89	19.64	7.47
思明区	66.09	29.57	4.35
湖里区	73.97	19.18	6.85
集美区	81.74	13.91	4.35
翔安区	67.82	18.39	13.79
海沧区	84.62	9.62	5.77
同安区	67.33	21.78	10.89

2.5 Voronoi 图检验

通过 Voronoi 图对模型输出结果进一步验证,检验 Voronoi 图中各充电站覆盖的充电需求点是否与模型输出结果相同,从而验证结果的可行性^[15]。在预设站点选址基础上,生成的 Voronoi 图,如图 7 所示。图 7 中大多数需求点符合要求,充分表明模型输出结果的可行性。

3 结论

从整体规划角度出发,运用灰色预测方法及 Arc GIS 建模分析对充电站选址、定容进行优化,构建厦门市电动汽车保有量预测模型和充电站布局模型,并对模型输出结果进行有效性检验。主要有以下 3 点结论。

1) 利用 GM(1,1)模型对厦门市电动汽车未来 6 年保有量进行预测,结果显示,2024—2030 年厦门市电动汽车发展仍保持增长势头,至 2030 年全市电动汽车保有量将突破 45 万辆,并将该数据作为充电

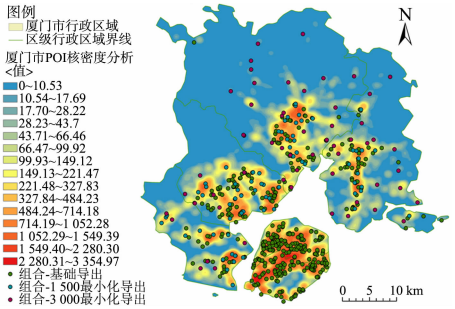


图 6 选址分布
Fig. 6 Site distribution

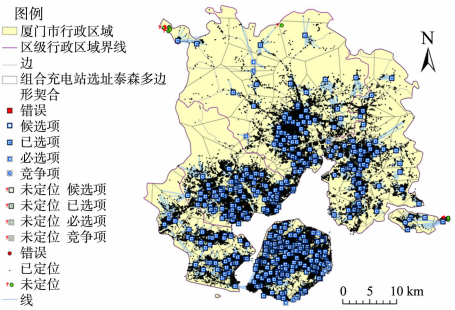


图 7 Voronoi 图
Fig. 7 Voronoi diagram

总需求的计算依据,按车桩比 7 : 1 的需求进行分配,届时公共充电桩总数需达到 64 490 个。

2) 结合核密度分析、缓冲区分析、位置分配模型可知,需在 16 处公共停车场附近新建充换电站,分级满足厦门市电动汽车用户出行的充电需求。

3) 综合选址与容量分析结果,厦门市充电设施扩容将成为未来几年的必然趋势;厦门市有约 20 % 的充电设施设计适度超前,符合未来需求;兼顾充换电模式的充电设施将持续增加。

由于时间等诸多因素限制,未充分考虑针充电桩与换电站的比例及建造成本,未来还可以从以下两方面展开深入的研究。

1) 建立的 GM(1,1)训练集与测试集验证模型的预测图像显示,2022 年、2023 年的实际值明显高于预测值,预测精度不够高。未来可结合政策波动、技术发展、市场影响等因素,基于微博平台挖掘关键词判断当前形势是否有利于电动汽车发展的情感分析,从而提高预测精度。

2) Arc GIS 空间分析部分爬取了实时 POI 数据分析复杂的现实情况,对充电需求分布趋势作出判断。分析时由于交通路网数据只覆盖主要道路,各级道路数据不够全面,选用了任意两点间的通勤距离都可以在略长于直线距离范围内到达的欧式距离,这与实际行驶道路有差异。

参考文献:

[1] 宋媛媛,姚恩建,徐洪磊,等. 交通运输领域应对气候变化策略及路径[J]. 清华大学学报(自然科学版),2023,63(11):1707-1718. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2023.26.021.

[2] ZHAO Xiaoxiao,JIANG Weijia,LIU Xiangyu,*et al.* Medium- and long-term electric vehicle ownership forecasting for urban residents[J]. World Electric Vehicle Journal,2024,15(5):212. DOI:10.3390/wevj15050212.

[3] DONG Ran,SUN Lijiang. Short-term forecast of EV ownership in Shanghai based on metabolic GM(1,1)-Markov model[J]. Journal of Physics: Conference Series,2022,2351(1):012031. DOI:10.1088/1742-6596/2351/1/012031.

[4] DING Song,LI Ruojin. Forecasting the sales and stock of electric vehicles using a novel self-adaptive optimized grey model[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2021,100:104148. DOI:10.1016/j.engappai.2020.104148.

[5] 夏佼,段然,杨颖. 基于城市规划的地理信息系统探讨[J]. 信息系统工程,2024(1):4-7. DOI:10.3969/j.issn.1001-2362.2024.01.003.

[6] SUHANDRI H F,NOZLAN N F. Analysis of public facility (Petrol Pump Station) localization by using Geographic Information System (GIS). Case study: Ayer Hitam-Batu Pahat, Johor[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2023,1205(1):012071. DOI:10.1088/1755-1315/1205/1/012071.

[7] 吴鹏. 基于 POI 数据的电动汽车充电站选址规划[C]//2022 世界交通运输大会论文集. 重庆:重庆交通大学,2022:159-165. DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.019782.

[8] 韩韶光,邹常丰,何永明,等. 电动汽车充电站选址优化:以哈尔滨市为例[J]. 交通科技与经济,2023,25(1):42-49. DOI:10.19348/j.cnki.issn1008-5696.2023.01.006.

[9] KEMALA B K L,SURJANDARI I,PUSPITA A N G. Forecasting methods for the electric vehicle ownership: A literature review[J]. Procedia Computer Science,2024,234:87-95. DOI:10.1016/j.procs.2024.02.155.

[10] GAO Hui,YANG Lutong,ZHANG Anyue,*et al.* Analysis of urban electric vehicle trip rule statistics and ownership prediction[J]. Symmetry,2021,13(11):2052. DOI:10.3390/sym13112052.

[11] 李梦迪,李娇,薛月光,等. 基于灰色-马尔科夫模型评估石雀滩海洋牧场岩礁鱼类碳储量[J]. 渔业科学进展,2024,45(1):14-22. DOI:10.19663/j.issn2095-9869.20220718001.

[12] 厦门市人民政府. 厦门市电动汽车充电设施专项规划(2016—2020)[R]. 厦门:厦门市人民政府,2016.

[13] 厦门市统计局. 厦门市 2023 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 厦门:厦门市统计局,2023.

[14] 沈飞,尚正永. 基于 POI 数据的小学空间分布特征及可达性分析:以苏州市区为例[J]. 苏州科技大学学报(自然科学版),2023,40(3):54-61. DOI:10.12084/j.issn.2096-3289.2023.03.007.

[15] 侯慧,唐俊一,王逸凡,等. 城区电动汽车充电站布局规划研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(14):181-187. DOI:10.19783/j.cnki.pspc.226008.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)