

基于 Voronoi 图的新能源运营车充电设施规模预测

雷永智¹ 唐尔迪² 姜仲¹ 付豪¹

1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 中国·陕西 西安 710100

2. 长安大学, 中国·陕西 西安 710064

摘要: 随着新能源汽车在市场上的迅速普及, 社会对充电设施的需求显著增加, 现有设施数量远不能满足日益增长的需求。针对其中的运营车辆, 本研究提出了一种结合保有量和充电需求的规模预测方法, 为未来新增充电设施的规划提供理论支持。首先, 研究采用 ARIMA 模型对区域内新能源运营车辆的新增保有量进行了预测, 并运用蒙特卡洛仿真法分析了新能源运营车辆的个体充电需求。其次, 采用 Voronoi 图对区域内充电设施的规模和空间分布进行了分析。通过对西安市中心城区的地理数据和人口分布进行加权, 构建了各子区域内充电设施需求的预测模型, 明确了不同区域内充电桩的分配与配置。最终, 研究提出了更为科学的充电设施规划方案, 以应对新能源汽车快速增长所带来的充电需求挑战, 并表明 Voronoi 图模型在确保资源合理配置和提高设施利用率方面具有显著优势。

关键词: Voronoi 图; 新能源运营车辆; 充电设施; 规模预测; 充电需求; 空间布局; ARIMA 模型

Scale Prediction of New Energy Vehicle Charging Facilities Based on Voronoi Diagrams

Lei Yongzhi¹, Tang Erdi², Jiang Zhong¹, Fu Hao¹

1. China Power Construction Group Northwest Survey and Design Research Institute Co., Ltd., China Shaanxi Xi'an 710100

2. Chang'an University, China Shaanxi Xi'an 710064

Abstract: With the rapid proliferation of new energy vehicles in the market, the demand for charging facilities has increased significantly, and the existing number of facilities is far from sufficient to meet the growing demand. Focusing on operating vehicles, this study proposes a scale prediction method that combines vehicle stock and charging demand, providing theoretical support for the planning of future additional charging facilities. Firstly, the study uses the ARIMA model to predict the growth in the stock of new energy operating vehicles within the region and employs the Monte Carlo simulation method to analyse the individual charging demand of new energy operating vehicles. Secondly, Voronoi diagrams are used to analyse the scale and spatial distribution of charging facilities in the region. By weighting the geographic data and population distribution of the central urban area of Xi'an, a predictive model for charging facility demand in each sub-region is constructed, clarifying the allocation and configuration of charging posts in different areas. Ultimately, the study proposes a more scientific plan for charging facility development to address the challenges posed by the rapid growth of new energy vehicles and demonstrates that the Voronoi diagram model has significant advantages in ensuring rational resource allocation and improving facility utilisation.

Keywords: Voronoi diagram; New energy operation vehicles; Charging facilities; Scale forecast; Charging demand; Spatial layout; ARIMA model

0 引言

近年来, 新能源汽车大量进入市场, 加剧了社会对于新能源充电设施的需求。目前, 我国的新能源充电设施数量相较于日益增加的新能源汽车数量远远不足, 暴露了规划中的两大核心难题: 一是规模预测的准确性, 二是空间布局的合理性。因此, 研究基于停车需求的新能源充电设施规模预测, 能够为将来新增充电设施之规模提供一定理

论基础。

现有研究中, 学者们已对保有量进行了预测(戚宇辰等, 2024), 并指出了现有网络存在排队现象和车桩比严重失衡(Yi 等, 2020)的紧迫问题。在规模预测方面, 研究者认为需求变化会影响规模和选址, 并采用了混合整数线性规划、回归预测、多尺度模型、决策过程仿真以及蒙特卡洛法(Xing 等, 2022)等手段进行研究。在空间分布

上, Voronoi 图也已被用于城市空间规模和农业部署分区等相关研究 (李兴发等, 2024)。

综上所述, 现有对于充电设施规模预测的研究主要分为充电需求的预测和充电设施空间分布数量的预测。因此, 本研究结合时间序列预测、蒙特卡洛仿真对新能源汽车保有量和充电需求进行预测, 基于充电需求再结合 Voronoi 图模型, 将区域内充电需求具象化为空间分布数量。

1 充电需求预测

考虑研究对象为西安市内的公共停车场充电设施, 因此后续针对新能源汽车选取的示例和数据均以运营车辆为准。本节采用 ARIMA 模型进行预测新能源汽车保有量, 便于捕捉数据中的趋势和季节性变化。选取西安市中心六个城区作为研究对象, 再使用蒙特卡洛随机仿真法对新能源车车辆个体充电周期和充电量的预测, 最终得出区域内的充电需求预测。

1.1 新能源汽车保有量预测

根据相关新能源汽车公共数据采集与监测研究中心对 2017 年至 2024 年 6 月的每月新增新能源汽车保有量的数据, 西安市对应时期内的新能源汽车新增保有量呈现出逐年加速增长的态势, 尤其自 2021 年起增幅尤为显著。通过 ADF 单位根检验确定序列在一次差分后平稳, 并结合自相关函数与偏自相关函数图识别, 最终确定模型。可以对其进行平稳性处理, 残差的自相关和偏相关函数结果通过了检验。检验结果显示自相关系数和偏自相关系数大部分靠近 0 且在置信区间内, 由此可见模型对于数据的拟合结果较好, 后续的预测数据可信度较高。最终对未来 12 个月的新能源汽车新增保有量预测结果如表 1 所示。据此可知, 未来一年内此区域内新能源汽车新增保有量预计有 33.51 万辆, 而同样根据《纯电新能源汽车市场发展与用车年度报告 (2023)》的相关内容, 市场上运营车辆的占比普遍超过 15%, 其中 2023 年西安的占比约为 17.2%, 因此考虑到研究的预测性, 区域内的新能源运营车辆数取 20% 为佳, 即 6.71 万辆新能源汽车作为后续的研究对象。

表 1 预测结果

| 时间 | 预计新增保有量 (万辆) | 时间 | 预计新增保有量 (万辆) |
|--------|--------------|---------|--------------|
| 2025.1 | 2.28 | 2025.7 | 2.83 |
| 2025.2 | 2.41 | 2025.8 | 2.85 |
| 2025.3 | 2.48 | 2025.9 | 3.07 |
| 2025.4 | 2.58 | 2025.10 | 2.99 |
| 2025.5 | 2.62 | 2025.11 | 3.32 |
| 2025.6 | 2.84 | 2025.12 | 3.24 |

1.2 新能源汽车充电需求预测

新能源汽车的续航分布和电池容量分布根据《纯电新能源汽车市场发展与用车年度报告 (2023)》相关数据, 具体如图 1 和图 2 所示。从图 1 可以得出, 标称续航 400 公里以下的占比从 2021 年 55.4% 下降至 2023 年 35.1%。从图 2 可以得出, 电池容量的三年累计变化中, 30kWh 以下占比下降了 7.2%, 80-100kWh 占比上升最多为 5.4%。

总结出, 新能源车辆目前电池容量以 50-60kWh 以下为主, 续航以 400-500 公里为主。因此, 后续对新能源车车辆充电需求进行预测时, 个体车辆参数中电池容量和续航取 60kWh 和 450 公里。

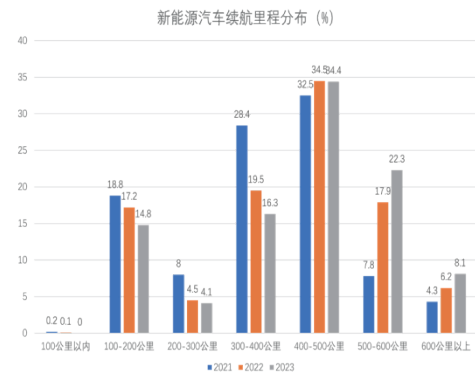


图1 新能源汽车续航里程分布

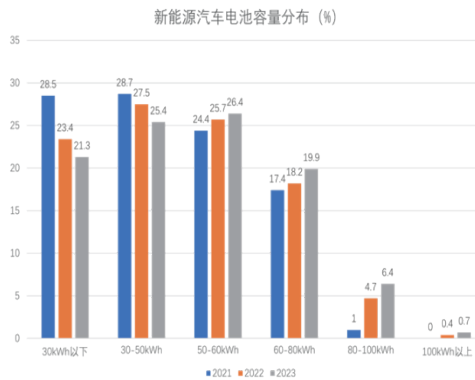


图2 新能源汽车电池容量分布

为了进行蒙特卡洛仿真预测, 研究仍需新能源车运营时的平均耗电量并为其在模拟中设置一个充电阈值。《新能源汽车产业发展规划 (2021-2035 年)》中提到, 我国新能源运营车辆的平均每小时电耗为 6.6kWh/ 小时。而目前市面上大部分新能源车企会在车辆电量低于 10% 时进行低电量提示, 因此研究选取的充电阈值为电池容量的 10%。

根据以上数据可以通过蒙特卡洛仿真预测, 对新能源运营车辆的个体充电需求进行预测。该方法的核心是模拟单体车辆从满电状态开始的连续运营过程。在每一次模拟迭代中, 系统首先为车辆赋予一个符合正态分布的随机单

日运行时间（均值为 9.3h，标准差为 0.5h）。随后，根据设定的平均每小时电耗（6.6 kWh/h）计算当日总电量消耗，并更新车辆的剩余电量状态（State of Charge, SOC）。此过程逐日重复，直到车辆的剩余 SOC 首次低于预设的充电阈值（10%），此时一次完整的充电周期模拟结束。仿真记录下该周期所持续的天数（即充电间隔）和需要补充的电量（初始电量 - 剩余电量）。通过将此过程重复数万次，即可得到关于充电频率和单次充电量的稳定概率分布，从而为后续计算提供可靠的个体充电需求参数。

为了直观展示仿真数据的分布，按照 90% 的概率选取充电量和充电天数的数据分布，采用累计函数分布图（CDF）表示，结果如图 3 和图 4 所示，对 90% 概率分布的选取，可以得出个体新能源运营车辆的充电需求为：1.38（天/次）、57（kWh/次）。

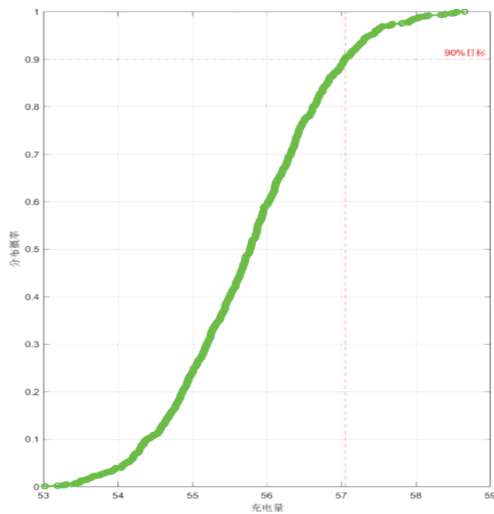


图3 充电天数的CDF

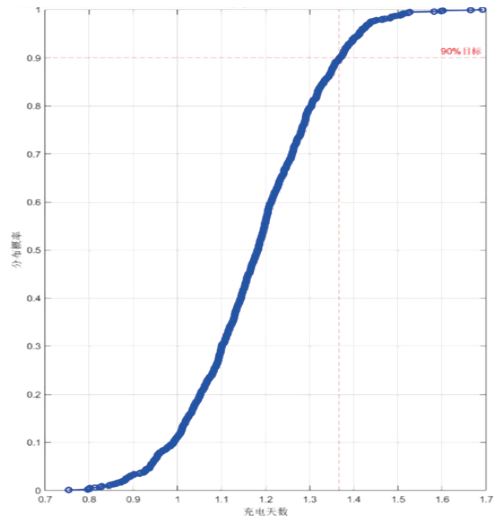


图4 充电量的CDF图

2 充电设施规模预测

上节中对充电需求预测的结果是充电设施规模预测的

重要基础，即规模数量的落脚点在于个体数量的大小，充电需求的预测结果和空间分布尺度上的充电设施规模结合可得出区域内充电设施规模的预测，并具体到站点数量与不同充电桩占比。

为了更好的结合空间分布与充电设施比例的预测，研究结合上述预测结果，决定采用 Voronoi 图表示出区域内充电设施的规模。

2.1 预测步骤及区域需求分析

Voronoi 图是一种基于种子点的空间分割方法，研究中对区域内划分几个较小的子区域，对其内部的质心的不同来划分出空间影响范围与边界（李兴发等，2024）。而质心可以具象化为子区域内充电设施的数量，空间影响边界则是子区域的地理分布。

首先，在划分子区域时，以西安市中心六城区为例，根据相关地理数据，分别选取其中心地理位置的经纬度坐标，具体如表 2 所示。

表2 西安市中心城区地理坐标

| 区域名称 | 坐标（经纬度） |
|------|-------------------------|
| 未央区 | 108.946719E, 34.292921N |
| 新城区 | 108.960829E, 34.266609N |
| 碑林区 | 108.940523E, 34.256861N |
| 莲湖区 | 108.943964E, 34.265321N |
| 灞桥区 | 109.064567E, 34.273378N |
| 雁塔区 | 108.948732E, 34.222019N |

其次，要确定这些子区域内的新能源汽车需求密度，就是将其转化为新能源汽车保有量的分配，对此 Tor 等（2021）在对土耳其国家电动汽车分布的研究时给出了一个相对简单的加权分配模型。

$$N_i = N_{ev} \times \frac{\left(\omega_1 \times \frac{P_i}{P_{total}}\right) + \left(\omega_2 \times \frac{D}{A_{total}}\right) + \left(\omega_3 \times \frac{A_i}{A_{total}}\right)}{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3} \quad (1)$$

其中， N_i 表示子区域内的新能源汽车数量（万辆）（ $i=1,2,\dots,6$ ）； N_{ev} 表示总区域内所预测的新能源汽车数量（万辆）； P_i 表示 i 区域的人口（万人）； P_{total} 表示总区域的人口（万人）； D 表示总区域的充电桩密度（台/平方公里）； A_i 表示 i 区域的面积（平方公里）； A_{total} 表示总区域面积（平方公里）； ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别表示人口、充电桩密度和面积的权重系数。

N_{ev} 表根据 3.1 中做出的预测可知是 6.71 万辆。 P_i 和 P_{total} 具体如表 3 所示。

表3 每个区域人口和总人口

| 标号 (i) | 区域名称 | 人口 (万人) | 总人口 (万人) |
|--------|------|---------|----------|
| 1 | 未央区 | 98 | 495 |
| 2 | 新城區 | 54 | |
| 3 | 碑林区 | 73 | |
| 4 | 莲湖区 | 76 | |
| 5 | 灞桥区 | 66 | |
| 6 | 雁塔区 | 128 | |

D 根据《2023 年中国主要城市充电基础设施监测报告》的相关数据，西安市中心城区的充电桩密度平均为 36.5 台 / 平方公里。

i 区域的面积 A_i 和总区域面积 A_{total} 具体如表 4 所示。

表4 每个区域面积和总面积

| 标号 (i) | 区域名称 | 面积 (平方公里) | 总面积 (平方公里) |
|--------|------|-----------|------------|
| 1 | 未央区 | 263 | 831 |
| 2 | 新城區 | 30 | |
| 3 | 碑林区 | 23 | |
| 4 | 莲湖区 | 39 | |
| 5 | 灞桥区 | 324 | |
| 6 | 雁塔区 | 152 | |

ω_1 、 ω_2 、 ω_3 参考 Guler 等 (2020) 的研究，用层次分析法确定其分别取 0.5050、0.0027、0.4923。

根据上述各参数取值，得到 N_i 的结果，具体如表 5 所示。

表 5 各区域新能源汽车保有量

| 标号 (i) | 区域名称 | 保有量 (辆) |
|--------|------|---------|
| 1 | 未央区 | 17171 |
| 2 | 新城區 | 4897 |
| 3 | 碑林区 | 5919 |
| 4 | 莲湖区 | 6760 |
| 5 | 灞桥区 | 17405 |
| 6 | 雁塔区 | 14812 |

最后，在预测总充电桩数量时，用 $N_{stations}$ 表示，其计算方式如下：

$$N_{stations} = \frac{N_i \times f_c \times Q_v}{Q_c \times \eta} \quad (2)$$

式中： $N_{stations}$ 表示预测的充电桩数量； N_i 表示此 i 区域内电动汽车数量； f_c 表示每辆车平均充电频率（次 / 天）； Q_v 表示每辆车每次充电平均充电量（千瓦时 / 次）； η 表示充电桩的利用率； Q_c 表示每个充电桩每天能提供的充电量（千瓦时 / 天）。 Q_c 的取值取决于充电桩的平均工作时间、快慢充电桩各自的充电功率以及它们之间的比例。根据《2023 年中国主要城市充电基础设施监测报告》的相关数据，国家电网提供的标准充电桩（慢充）充电功率约为 37.5 千瓦时，快充桩约为 200 千瓦时，主要城市的公共充电设施平均工作时间约为 10 小时，其充电设施利用率约为 51.8%，快慢充比例接近 7:3。并且孙帅等

(2024) 的研究指出，公用充电设施的充电桩数量普遍在 20 台左右。

2.2 充电设施数量与分布预测

依据上述参数，将区域坐标和子区域新能源车保有量转化为矩阵，在模型中先计算充电桩数量，在转化为充电站数量，同时给出快慢充的比例，所构建的 Voronoi 图如图 5 所示。

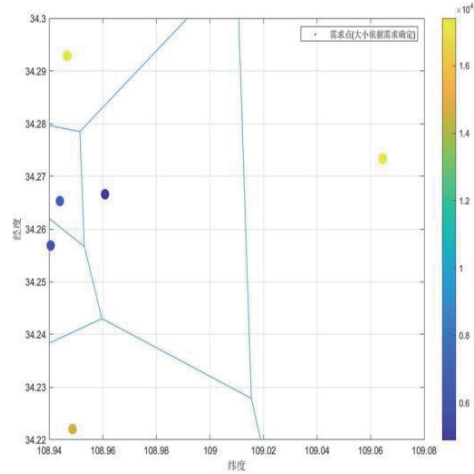


图5 充电站分布Voronoi图

为了具象化数据，每个区域预测出所分配的充电桩、充电站和快慢充数量如表 6 所示。

表6 充电站分布Voronoi图详细数据

| 标号 | 区域名称 | 充电桩数量 | 充电站数量 | 快充桩数量 | 慢充桩数量 |
|----|------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 未央区 | 1082 | 54 | 758 | 324 |
| 2 | 新城區 | 308 | 15 | 216 | 92 |
| 3 | 碑林区 | 373 | 18 | 261 | 111 |
| 4 | 莲湖区 | 426 | 21 | 298 | 127 |
| 5 | 灞桥区 | 1097 | 54 | 768 | 329 |
| 6 | 雁塔区 | 934 | 46 | 653 | 280 |

研究所使用的 Voronoi 图模型可通过划分各自服务区域，自动形成非重叠的覆盖范围，确保各区域的资源配置得当，在降低需求拥堵的同时提升资源的利用率。

本研究的预测结果具有明确的管理启示。首先，西安市未央区与灞桥区因其较大的面积与人口承载量，在未来一年内将产生最大的新增充电设施需求（分别为 1082 和 1097 个充电桩），建议城市规划部门在这两个区域优先审批和布局新的大型公共充电场站。其次，对于新城區、碑林区等中心老城区，虽然总需求量不大，但空间资源紧张，应鼓励建设集约化、小型的快充站点，满足运营车辆的即时补电需求。最后，本研究提出的分区域配额可作为政府补贴和企业投资的重要参考依据，引导充电设施建设资本向需求最迫切的区域流动，避免资源错配。

3 结语

研究围绕新能源充电设施的规模预测展开,以新能源运营车辆作为研究主体。

首先,本文的核心贡献在于提出并验证了一套从宏观需求预测到中观空间配置的整合性规划方法。通过 ARIMA 模型对新能源汽车新增保有量进行时间序列预测,结合蒙特卡洛仿真法评估充电需求,为后续充电设施规模的研究奠定了数据基础。其次,基于充电需求的预测结果,采用 Voronoi 图对充电设施的空间布局进行了分析。Voronoi 图模型利用需求点的分布自动生成服务区边界,避免了传统模型在高需求区域的过度集中及低需求区域的资源浪费。通过对西安市中心城区的地理信息进行划分,研究明确了不同子区域内的充电需求密度,并据此合理配置充电设施的数量和类型。同时,本研究也存在一定的局限性。其一,模型中的关键参数(如电池容量)基于当前市场状况设定,可能随技术发展而变化;其二,Voronoi 图基于欧式距离进行空间划分,未考虑实际路网的复杂性。

展望未来,后续研究可从两方面深入:一是开展多情景敏感性分析,评估关键参数变化对预测结果的影响;二是引入 GIS 路网数据,采用基于网络距离的服务区划分算法,使布局规划更贴近现实。

参考文献:

[1] GULER D, YOMRALIOGLU T. Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS[J]. *Annals of GIS*, 2020, 26(2): 169-189.

[2] 国务院办公厅. 新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)[R]. 2020.

[3] 李兴发,李艳,高莉萍等. 基于核密度和 Voronoi

多边形的农村居民点空间布局优化[J]. *国土与自然资源研究*, 2024(5): 47-51.

[4] 戚宇辰,姜雨萌,李灏恩等. 双碳目标背景下上海新能源汽车保有量及用电需求分析及预测[J]. *时代汽车*, 2024, 10(35): 114-120.

[5] 孙帅,廖威,邹广新等. 数据驱动下北京中心城区电动汽车充电站空间分布研究[J]. *安徽建筑*, 2024,31(10): 13-15.

[6] TOR O B, TEIMOURZADEH S, KOC M, et al. Transport sector transformation: Integrating electric vehicles in Turkey's distribution grids[J]. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2021, 16(1112): 1026-1047.

[7] XING Y, LI F, SUN K, et al. Multi-type electric vehicle load prediction based on Monte Carlo simulation[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 966-972.

[8] YI T, ZHANG C, LIN T, et al. Research on the spatial-temporal distribution of electric vehicle charging load demand: a case study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118437.

[9] 中国电动汽车充电基础设施促进联盟,百度地图. 纯电新能源汽车市场发展与用车年度报告(2023)[R]. 2023.

[10] 中国电动汽车充电基础设施促进联盟. 2023年中国主要城市充电基础设施监测报告[R]. 2023.

基金项目:陕西省教育厅服务地方专项计划项目《新能源汽车充换电需求关键技术研究》。

作者简介:雷永智(1980-),男,大学本科,研究方向:可持续与绿色基础设施。