Open Journal of Transportation Technologies 交通技术, 2026, 15(6), 787-800
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ojtt
https://doi.org/10.12677/ojtt.2026.156068

Hans汉斯

基于供需特征的充电基础设施选址－路径－分配协同优化研究

马榕男[1]，刘　杰[1]，姜　云[2]，黄健畅[1]

[1]山东交通学院交通与物流工程学院，山东 济南
[2]交通运输部公路科学研究院，北京

收稿日期：2026年9月5日；录用日期：2026年10月31日；发布日期：2026年11月12日

摘　要

针对城市充电设施利用率不均、局部排队与闲置并存的供需错配问题，构建综合考虑车辆续航可达性、站点容量及需求满足水平的混合整数线性规划模型，实现充电设施选址、路径选择与负荷分配协同优化。以设施建设、车辆出行及充电服务加权总成本最小化为目标，通过多模型对比与灵敏度分析验证模型有效性。结果表明，最优方案建设6座充电站，需求满足率达97.4%；相比需求密度优先法，充电服务成本和系统总成本分别降低17.1%和3.1%；相比容量约束选址、p-median及最大覆盖模型，系统总成本分别降低2.0%、6.9%和7.2%。研究表明，协同优化能够有效改善充电设施供需匹配，提高充电网络整体运行效率。

关键词

电动汽车续航，充电基础设施，供需平衡

Research on Collaborative Optimization of Location-Routing-Allocation for Charging Infrastructure Based on Supply-Demand Characteristics

Rongnan Ma[1], Jie Liu[1], Yun Jiang[2], Jianchang Huang[1]

[1]School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong
[2]Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing

Received: September 5, 2026; accepted: October 31, 2026; published: November 12, 2026

文章引用: 马榕男, 刘杰, 姜云, 黄健畅. 基于供需特征的充电基础设施选址-路径-分配协同优化研究[J]. 交通技术, 2026, 15(6): 787-800. DOI: 10.12677/ojtt.2026.156068

Abstract

To address the uneven utilization and supply-demand mismatch of urban electric vehicle charging facilities, a mixed-integer linear programming model is developed to jointly optimize station location, route selection, and charging load allocation under driving range, station capacity, and demand satisfaction constraints. The model minimizes the weighted total cost of construction, travel, and charging services. Comparative and sensitivity analyses demonstrate their effectiveness. Results show that the optimal solution deploys six charging stations with a demand satisfaction rate of 97.4%. Compared with the demand-density priority method, charging service costs and total system costs decrease by 17.1% and 3.1%, respectively. Total costs are further reduced by 2.0%, 6.9%, and 7.2% compared with the capacitated location, p-median, and maximal covering models, respectively. The proposed approach improves supply-demand matching and overall charging network efficiency.

Keywords

Electric Vehicle Driving Range, Charging Infrastructure, Supply-Demand Balance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着电动汽车保有量快速增长，城市充电需求呈现显著的时空非均衡特征，充电设施供需矛盾逐渐由总量不足向结构性失衡转变。高需求区域受站点容量限制，易出现充电排队、绕行寻桩等问题，而低需求区域部分场站长期处于低负荷运行状态，局部拥挤与资源闲置并存。其根源在于车辆续航可达性、站点容量、需求空间分布与充电负荷分配之间存在复杂的耦合关系。传统充电设施规划主要关注需求覆盖、设施数量及静态空间选址，难以充分考虑车辆路径选择与站点间负荷转移的相互影响。因此，构建融合设施选址、路径选择与负荷分配的协同优化模型，对于改善充电设施供需错配、提升资源配置效率及用户充电服务水平具有重要意义。

目前，国内外学者围绕充电基础设施规划开展了大量研究，主要集中于充电需求识别与用户行为刻画、设施空间布局与容量优化、规划约束与协同优化三个方面。

在充电需求识别与用户行为刻画方面，相关研究主要关注充电需求时空分布、用户偏好及供需匹配机制。王雅娟等针对动态充电场景下的车桩供需错配问题，构建充电需求优先级函数与密封竞价在线双边拍卖模型，优化充电桩时序资源分配机制，提高了动态供需匹配效率[1]。邵佳佳等利用新能源汽车运行大数据，开展区域充电需求识别、车桩匹配故障诊断及用户充电偏好分析，验证了车辆运行数据在充电设施规划与精细化运营中的应用价值[2]。盛裕杰等融合多源数据，从群体时空规律与个体充电偏好两个层面构建需求预测模型，并结合决策树算法和 Huff 吸引力模型实现候选站点优选[3]。叶文显等分析区域充电设施供需失衡的表现及成因，提出相应的供需均衡调控策略[4]。上述研究提高了充电需求识别与预测的准确性，为设施布局提供了需求依据，但对车辆出行路径、站点选择及负荷分配之间的关联考虑仍相对有限。

在充电设施空间布局与容量优化方面，研究逐步由经验配置转向综合考虑服务覆盖、空间可达性与

建设运营成本的定量优化。刘思奇等综合市场供需均衡与企业盈利目标，构建共享车辆投放均衡模型，为新能源车辆及配套设施合理布局提供依据[5]。刘鑫垚等结合不同车型的充电需求与空间分布特征，提出差异化公交充电设施布局策略[6]。徐婷婷等基于“车–路–网”耦合框架，统筹快充、慢充、超充及移动充电设施，以年化社会总成本最小化为目标，建立多类型充电设施协同选址定容模型[7]。魏晓芳等分析城市充电桩空间布局存在的问题，并提出相应的优化策略[8]。此类研究推动了充电设施规划由数量配置向精准选址与容量优化转变，但部分研究仍以相对静态的需求分布为基础，对车辆出行行为变化及站点间负荷转移的刻画有待深化。

在规划约束与协同优化方面，随着交通网络与电力网络耦合程度不断加深，相关研究开始关注配电网运行条件及市场机制对设施布局的影响。Elkholy 等考虑配电网运行约束，建立混合整数非线性规划模型，联合优化电动公交充电车库选址、供电节点匹配及配电网扩容方案，提高了设施布局与电网运行条件的适配性[9]。Yun 等利用多智能体仿真模型，对比规划导向与市场导向的充电设施部署策略，分析不同布局模式对设施投资效益及电动汽车推广的影响[10]。相关研究拓展了充电设施规划的约束维度，但对车辆续航可达性、空间布局与需求负荷分配的统一优化仍有进一步研究空间。

综上，现有研究已在需求预测、设施选址、容量配置及交通–电力耦合等方面取得丰富成果，但部分研究仍将充电需求及车辆充电行为作为外生条件，尚未充分揭示设施选址、车辆路径选择与站点负荷分配之间的联动机制。实际上，充电设施布局决定车辆可选择的充电站点及可行路径，进而影响站点负荷分布；而负荷分配结果又直接关系到设施容量利用率与整体服务效率。因此，有必要在统一框架下综合考虑续航、容量与空间布局约束，实现充电网络的协同优化。

基于此，本文构建考虑车辆续航可达性、站点容量及最小站间距约束的充电设施选址–路径选择–负荷分配协同优化模型。主要研究特色体现在三个方面：一是将设施选址、车辆路径选择与充电负荷分配纳入统一优化框架，强化多要素之间的协调关系；二是综合设置续航可达、站点容量及最小站间距约束，兼顾充电服务可达性、设施利用效率与空间布局合理性；三是构建包含设施建设成本、车辆出行成本及充电服务成本的加权目标函数，在控制系统综合成本的同时优化需求分配，为缓解城市充电设施供需错配及提升网络运营效率提供量化决策依据。

2. 车辆续航与充电桩供需交互机制分析

2.1. 续航约束下的时空资源竞争

车辆行驶过程中剩余电量持续衰减，直接压缩剩余可行驶续航，而剩余续航决定车辆可抵达补能半径；续航余量越低，车辆可覆盖的补能范围越小，车主能够选择的充电站点数量也随之缩减。补能请求将在路径密集区域叠加；高峰时段需求集中释放时，多个走廊将争夺少数相邻站点的有限容量，产生时空资源竞争[1]-[3]。如果局部需求大于单站容量，排队等待、接入绕行、放弃补能的概率将增大；如果站点在低需求区，会出现利用率低、投资闲置的问题[4]。

2.2. 供需平衡量化界定与建模思路

为实现充电供需关系的量化求解，本文从数学层面将供需平衡拆解为三类可量化判定条件，作为后续构建公式约束体系的物理内涵：一是可服务走廊需满足最低需求覆盖比例，实现需求侧总量均衡；二是以服务走廊分配充电功率与自身峰值需求匹配，保障负荷供需对等；三是各建成充电站总汇集负荷不超过设备额定功率，划定供给侧承载上限。三类约束分别对应需求均衡、供给容量边界、系统综合成本控制三大维度，后文将通过线性等式与不等式完成完整数学表征，共同搭建模型目标与约束框架[5] [6]，传统充电规划普遍采用“先选址、后负荷分配”两阶段求解思路，易出现高需求站点满载过载、外围远

距离走廊绕行成本过高的错配问题。为此本文采用建站选址、走廊负荷分配同步优化的一体化建模方式，将车辆续航约束、站点容量上限、空间布局限制纳入同一约束方程组联立求解，直观刻画三者之间的耦合作用关系，从底层规避分步规划带来的供需失衡缺陷。

3. 模型构建

3.1. 模型假设

本文根据车–路–网耦合规划的思想，在区域路网尺度上建立模型[7]。候选站点、需求走廊以及天然可达关系是已知的输入，单站额定功率、站点间的距离、走廊的里程都可以由规划资料得到；里程不超过最大允许行驶距离的走廊进入可服务集合，超过的部分在需求满足率统计中保留。上述设定是规划尺度的续航可达性近似值，主要用于表征走廊是否具备补能节点。

$$I=\{1,2,\cdots,N\},J=\{1,2,\cdots,M\} \tag{1}$$

式中，I 为候选充电站地点集合，N 为候选地点总数，单位为座；J 为需求走廊集合，M 为需求走廊总数，单位为条。

需求走廊峰值充电功率可以由交通量、补能比例和平均补能需求折算得到，即 $D_j=q_j\cdot p_j\cdot e_j/T$。规划时段内第 j 条走廊电动汽车交通量用 q_j 表示，补能车辆比例用 p_j 表示，单车平均补能电量用 e_j 表示，T 是高峰服务时间窗。折算后的参数，可以与交通调查或者充电订单的数据相衔接。

依照以上设定，供需平衡问题可以表述为站点建设、走廊服务选择、走廊–站点功率分配这三个决策的综合，主要符号和单位见表 1。

Table 1. Main symbols and definitions of the model
表 1. 模型主要符号及含义

符号	含义	单位
a_{ij}	走廊 j 是否天然途经地点 i 的 0~1 参数(路径–地点关系)	—
d_i	地点 i 建设 1 座充电站的固定成本	万元
A_i	地点 i 的额定充电功率容量	kW
L_j	走廊 j 的行驶里程	km
D_j	走廊 j 的峰值充电功率需求	kW
c_{ij}	走廊 j 在地点 i 的单位充电服务成本(含绕行、等待等折算项)	万元/kW
s_{ik}	地点 i 与地点 k 之间的直线距离	km
$R_{\max}$	最大允许行驶距离	km
$Q_{\max}$	允许建设的最大站点数	座
$d_{\min}$	充电站之间的最小允许距离	km
x_i,y_j	建站决策与走廊选用决策(0~1)	—
z_{ij},w_{ij}	使用决策(0~1)与充电功率分配(连续)	kW

注：为防止符号混淆，文中把路径–地点的天然经过关系用 a_{ij} 表示，单位充电服务成本用 c_{ij} 表示，充电等待时间折算到 c_{ij} 中，乘客乘车费用折算到路径出行成本中。

3.2. 决策变量体系构建

决策变量分为设施端变量、需求端变量、交互端变量三类，在模型中存在递进的关系。设施端用 0~1

变量表示地点是否建站，见式(2)；需求端用 0~1 变量表示走廊是否被服务，见式(3)；交互端用连续变量表示功率分配，连接供给落点和需求流量，见式(4)。

$$x_i \in \{0,1\}, \forall i \in I \tag{2}$$

式中，x_i 为地点 i 的建站决策，建站取 1，不建站取 0。

$$y_j \in \{0,1\}, \forall j \in J_R \tag{3}$$

式中，y_j 为走廊 j 是否选择的决策变量，被服务取 1，未服务取 0。

$$z_{ij} \in \{0,1\}, w_{ij} \geq 0, \forall i \in I, j \in J_R \tag{4}$$

式中，z_{ij} 为走廊 j 在地点 i 的使用决策，补能取 1，否则取 0；w_{ij} 为走廊 j 在地点 i 分配的充电功率，单位为 kW。

三层变量共同构成供需流量映射关系。连续流量变量 w_{ij} 可以反映同一个走廊需求，在不同的可达站点之间分摊的状态，也可以反映多桩并行充电、站点间容量互补的规划需求。

3.3. 目标函数构建

目标函数用加权系统成本最小来表示，见式(5)。三部分成本分别为路径出行成本、充电桩建设成本、充电服务成本，见式(6)、式(7)、式(8)。模型中加入了最低需求满足率约束，防止出现完全不建设或者完全不服务的退化解。

$$\min Z = \alpha_1 C_{\text{route}} + \alpha_2 C_{\text{build}} + \alpha_3 C_{\text{serve}} \tag{5}$$

系统综合成本用 Z 表示，路径出行成本用 C_{route} 表示，建设成本用 C_{build} 表示，服务成本用 C_{serve} 表示，路径出行成本的权重系数为 α_1，建设成本的权重系数为 α_2，服务成本的权重系数为 α_3。式(6)~式(8)给出了未加权的总成本分项。由于路径里程、建设费用、服务负荷量纲不同，因此将三种原始成本先折合成基准尺度，再代入公式(5)计算。α_1、α_2、α_3 只用以表示规划偏好变化，在分项成本中不重复计权。路径成本表征绕行和运营成本，建设成本表征供给侧的固定投入，服务成本表征接入距离、负荷分配、服务便捷性等需求侧因素。

$$C_{\text{route}} = \sum_{jJ_R} L_j y_j \tag{6}$$

式中，C_{route} 为路径出行成本，单位为万元。

$$C_{\text{build}} = \sum_{iI} d_i x_i \tag{7}$$

式中，C_{build} 为充电桩建设成本，单位为万元。

$$C_{\text{serve}} = \sum_{iI} \sum_{jJ_R} c_{ij} w_{ij} \tag{8}$$

式中，C_{serve} 为充电服务成本，单位为万元。

成本调节系数，用于表征不同的规划目标之间所存在的权衡关系。提高建设成本权重时，模型会减少建站数量，提高容量利用率；提高服务成本权重时，模型会增加可选站点，降低接入绕行。相应处理，使投资节约和服务便利可以在同一个目标函数中比较。

3.4. 核心约束条件转化

约束条件给出供需关系物理边界的代数表达式。覆盖约束表示走廊只能在已建站点补能，见式(9)；经站约束要求被服务走廊至少经过一座已建站点，保证补能可达性，见式(10)。

$$z_{ij} \le x_i, \forall i \in I, j \in J_R \tag{9}$$

式中，z_{ij} 是走廊 j 在地点 i 的使用决策，x_i 是地点 i 的建站决策。

$$\sum_{i \in I} a_{ij} z_{ij} \ge y_j, \forall j \in J_R \tag{10}$$

式中，a_{ij} 为走廊 j 天然途经地点 i 的 0~1 参数，y_j 为走廊 j 的服务决策。为了避免零成本退化解，设置最低需求满足率约束，见式(10a)。

$$\sum_{jJ_R} L_j y_j \ge G \sum_{jJ_R} D_j \tag{10a}$$

式中，J_R 为满足 $L_j \le R_{\max}$ 的可服务走廊集合，G 为最低需求满足比例，取值可以按照规划目标设定。

需求满足约束，要求被服务走廊的功率分配量等于峰值需求，即式(11)；联结约束用大 M 法表示仅在使用站点后才能分配功率的关系，即式(12)；容量约束限制任一已建站点的汇集负荷不超过额定上限，即式(13)。

$$\sum_{i \in I} w_{ij} = D_j y_j, \forall j \in J_R \tag{11}$$

式中，w_{ij} 为走廊 j 在地点 i 的充电功率分配，单位为 kW；D_j 为走廊 j 的峰值充电功率需求，单位为 kW。

式(11)以等式形式避免超额分配，保证未被服务走廊不分配功率。

$$0 \le w_{ij} \le M_{ij} z_{ij}, \forall i \in I, j \in J_R \tag{12}$$

式中，M_{ij} 为大 M 值，取 A_i 与 D_j 的较小值，即 $\min(A_i, D_j)$。

模型保留 $z_{ij} \le a_{ij}$，保证非天然途经站点不会被分配到充电流量。

$$\sum_{j \in J_R} w_{ij} \le A_i x_i, \forall i \in I \tag{13}$$

式中 A_i 为地点 i 的额定充电功率容量，单位为 kW。容量约束用 $\sum_{j \in J_R} w_{ij} \le A_i x_i, \forall i \in I$ 来表示，使未被建设的站点的可用容量自动为 0。

续航、规模、空间布局约束分别用式(14)~式(18)表示。里程约束确定可以服务的走廊集，建站总量约束控制建站数量，最小站间距约束抑制站点过近。参考空间布局研究中对可达性和关键节点覆盖的关注[8]。本文设置关键点覆盖约束，用以表示走廊与关键节点之间的可达关系。

$$J_R = \left\{ j \mid L_j \le R_{\max}, j \in J \right\} \tag{14}$$

式中，L_j 为走廊 j 的行驶里程，单位为 km；$R_{\max}$ 为最大允许行驶距离，单位为 km。

模型实际求解之前先依据 $L_j \le R_{\max}$ 筛选出 J_R，超过 $R_{\max}$ 的走廊不进入最低需求满足率约束，在需求满足率统计中保留，以反映续航不足造成的服务缺口。

$$\sum_{il} x_i \le Q_{\max} \tag{15}$$

式中，$Q_{\max}$ 为允许建设的最大站点数，单位为座。

$$x_i + x_k \le 1, \forall i < k, s_{ik} < d_{\min} \tag{16}$$

式中，s_{ik} 为地点 i 到地点 k 的直线距离，单位为 km；$d_{\min}$ 为充电站之间的最小允许距离，单位为 km。

$$s_{ik} = \left[\left(X_i - X_k \right)^2 + \left(Y_i - Y_k \right)^2 \right]^{1/2} \tag{17}$$

式中，X_i 为地点 i 的横坐标，单位为 km；Y_i 为地点 i 的纵坐标，单位为 km。

$$\sum_{i \in \Omega_j} z_{ij} \ge y_j, \forall j \in J_R \tag{18}$$

式中，Ω_j 表示可以覆盖走廊 j 关键节点的候选站点集。

本文算例主要用天然途经参数 a_{ij} 来体现走廊和站点的可达关系，未进行逐节点路径仿真。

3.5. 续航与服务成本的等效处理

续航约束可以由车型组的有效可达距离来表示。若车型组 g 的电池容量为 E_g，初始荷电状态为 SOC_{g0}，安全保留荷电状态为 $\mathrm{SOC}_{\min}$，单位里程电耗为 e_g，则 $R_g=\left(\mathrm{SOC}_{g0}-\mathrm{SOC}_{\min}\right)E_g/e_g$。区域规划层面可以根据车型结构占比 π_{jg} 得到 $R_j^{\mathrm{eff}}=\Sigma_g\pi_{jg}R_g$。本文算例采用统一的 $R_{\max}$ 代替 R_j^{eff} 的情景近似，接入分车型 SOC 数据后可以直接替换 R_j^{eff} 而不影响模型主体。服务成本 c_{ij} 综合表征走廊 j 接入站点 i 时产生的绕行、时间和拥挤代价，表示为 $c_{ij}=\beta_d\cdot d_{ij}^{\mathrm{acc}}+\beta_t\cdot t_{ij}^{\mathrm{acc}}+\beta_u\cdot\rho_{i0}$。$d_{ij}^{\mathrm{acc}}$ 为接入距离，t_{ij}^{acc} 为接入时间，ρ_{i0} 为历史或者预测的利用水平。本文算例按照接入距离折算 c_{ij}，以保持模型线性，并为中长期规划选址提供支撑。

4. 模型求解与灵敏度分析

4.1. 模型性质分析

模型的目标函数和约束都是线性等式或者线性不等式，决策变量有 0~1 变量和连续变量，因此属于混合整数线性规划。站点使用和功率分配之间逻辑耦合由式(12)转化为线性不等式，上界取 $\min(A_i, D_j)$，可以在保证逻辑一致的基础上减小线性松弛间隙。将决策变量、系数整理成矩阵后，模型转化为标准紧凑形式，如式(19)所示，0~1 变量松弛后可以得到线性松弛的下界，如式(20)所示。

$$\min c^{\mathrm{T}}x,\ \text{s.t. } Ax\le b, x_B\in\{0,1\}, x_C\ge 0 \tag{19}$$

式中，x 为所有决策变量组成的向量，c 为目标系数向量，A 为约束系数矩阵，b 为约束右端向量。

$$Z_{\mathrm{LP}}\le Z^{*} \tag{20}$$

式中，Z_{LP} 为线性松弛目标下界，单位为万元；Z^{*}为原问题全局最优目标值，单位为万元。

基准算例中线性松弛下界为 2034.9 万元，与整数最优值 2035.3 万元相差 0.02%，说明紧致大 M 处理提高了松弛质量，CBC 可以在较少的搜索节点内收敛。

4.2. PuLP-CBC 支持下的求解框架设计

本文采用 PuLP 建立求解框架，调用 CBC 分支定界器求解。建模时只对天然可达的走廊–站点对建立变量，每条走廊设置 6 个可到达站点，使使用变量和连续流量变量由 300 个减少至 120 个，规模下降约 60%。覆盖、经站、需求、容量、里程、总数、最小站间距、关键点覆盖共生成 318 条约束，模型规模和求解性能见表 2。为了度量供需平衡水平，本文采用站点利用率、平均利用率、利用率变异系数、需求满足率等指标表示，见式(21)~式(24)。利用率体现容量消纳状况，变异系数表征空间利用差别，需求满足率反映可达需求服务水准。

$$\rho_i=\frac{\sum_{j\in J_R}w_{ij}}{A_i}\times 100\%, i\in B \tag{21}$$

式中，ρ_i 为地点 i 的充电功率利用率，单位为%。

$$\rho_{\mathrm{avg}}=\frac{1}{|B|}\sum_{iB}\rho_i \tag{22}$$

式中，ρ_{avg} 为已建站点的平均利用率，单位为%，B 为已建站点集合。

Table 2. Model scale and solution performance
表 2. 模型规模与求解性能

项目	数值
候选站点数 N	15 座
需求走廊数 M	20 条
0~1 决策变量	155 个
连续决策变量	120 个
约束条件	318 条
求解器	CBC 分支定界
求解时间	小于 0.1s
求解状态	全局最优

$$CV_{\rho}=\frac{\sigma(\rho_i)}{\rho_{\text{avg}}}\times 100\% \tag{23}$$

式中，CV_{ρ} 为利用率变异系数，是利用率标准差和平均利用率的比值，单位为%。

$$\eta=\frac{\sum_{j\in J} D_j y_j}{\sum_{j\in J} D_j}\times 100\% \tag{24}$$

式中，η 为需求满足率，单位为%。

4.3. 成本调节系数对供需格局的影响

当建设权重 α_2 增大时，模型更偏向于投资节约，将更多资源分配给容量较大、数量较少的站点，并使平均利用率提高，服务成本也随之增大。结果见表 3。α_2 由 0.3 增至 4.0 时，建站数由 9 座降至 6 座，平均利用率由 58.8%升至 91.4%。

Table 3. Effect of cost coefficient α_2 on supply-demand pattern
表 3. 成本系数 α_2 对供需格局的影响

α_2	建站数(座)	平均利用率(%)	利用率 CV(%)	建设成本(万元)	服务成本(万元)
0.3	9	58.8	46.0	1070	677.5
0.45	7	75.4	29.8	812	766.1
0.6	6	86.6	21.9	700	821.3
1	6	86.6	21.9	700	821.3
2	6	86.6	21.9	700	821.3
4	6	91.4	15.8	664	933.1

服务权重 α_3 增大时，模型更重视需求侧的便利性，并增加站点数量、缩短接入距离。结果见表 4。α_3 由 0.5 增至 5.0 时，建站数由 6 座增至 10 座，平均利用率由 86.6%降至 53.1%。

图 1 中两条趋势线呈相反方向，即建设投入和服务便利之间存在矛盾。

空间布局结果采用平均最近邻距离、局部供给集中度评价，分别见式(25)和式(26)。

Table 4. Effect of cost coefficient α_3 on supply-demand pattern
表 4. 成本系数 α_3 对供需格局的影响

α_3	建站数(座)	平均利用率(%)	利用率 CV (%)	建设成本(万元)	服务成本(万元)
0.5	6	86.6	21.9	700	821.3
1	6	86.6	21.9	700	821.3
2.5	7	75.4	29.8	812	766.1
3	8	65.6	39.0	950	716.4
5	10	53.1	47.6	1188	653.8

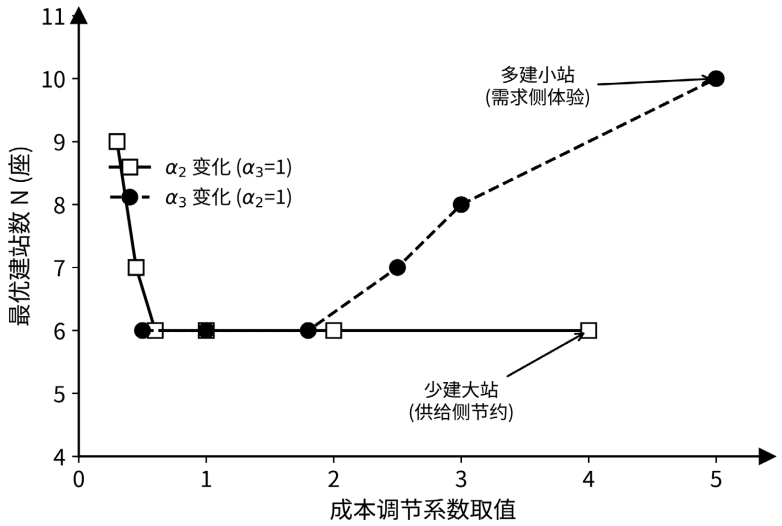


Figure 1. The impact of the cost adjustment coefficient on the optimal number of station-building sites
图 1. 成本调节系数对最优建站数的影响

$$d_{\mathrm{nn}} = \frac{1}{|B|}\sum_{i\in B}\min_{k\in B,k\neq i} s_{ik} \tag{25}$$

式中，d_{nn} 为已建站点的平均最近邻距离，单位为 km。

$$G_{\mathrm{loc}} = \max_{i\in B}\sum_{k\in B:s_{ik}\le r_0}\sum_{j\in J_R} w_{kj} \tag{26}$$

式中，G_{loc} 为局部供给集中度，即邻域内各站点负荷之和的最大值，单位为 kW，邻域半径取 $r_0 = 2.00$ km。

5. 算例分析与约束有效性验证

5.1. 算例参数设置

算例区域约为 13 km × 13 km，包含 15 个候选站和 20 条需求走廊。候选站点建设成本为 86 万至 150 万元，额定功率为 780 至 1200 kW，坐标及参数见表 5；需求走廊里程为 6 至 23 km，高峰充电功率需求为 150 至 400 kW，编号 1 至 6 为热点簇，见表 6。以上参数保持工程量纲一致，站点容量、建设成本、走廊峰值需求均控制在区域公共充电站规划合理范围内；算例用以检验模型结构、约束的有效性以及不同的规划策略之间的相对差别，不进行具体城市的实测结论外推。

基准参数设定为：最大允许行驶距离 22 km，最大建站数 10 座，最小站间距 2.2 km，成本权重 $\alpha_1 = 2.0$、$\alpha_2 = 1.0$、$\alpha_3 = 1.0$。每条走廊有 6 个可及站点，采用几何邻近法确定。单位服务成本按照接入绕行距

离折算，使空间邻近性成为服务成本的主要因素。站点与需求走廊的空间布局如图 2 所示。

5.2. 供需平衡优化结果分析

基准方案中模型选择建设 S1、S4、S6、S7、S9、S14 共 6 个站点，以满足 19 条走廊的需求。编号 19 的超长走廊超过续航上限，在模型中记录为不可服务需求，在需求满足率统计中体现其影响。选址及负荷分布结果见表 7。

Table 5. Engineering parameters of candidate charging stations
表 5. 候选充电站点工程参数

编号	坐标(km)	建设成本(万元)	额定容量(kW)
S1	(2, 3)	110	900
S2	(4, 9)	96	1020
S3	(7.5, 2)	104	840
S4	(10, 7)	130	1080
S5	(3, 11)	118	960
S6	(11, 4)	126	1020
S7	(6, 6)	92	1200
S8	(1, 7)	120	840
S9	(9, 10.5)	140	1140
S10	(5, 1)	100	780
S11	(12, 11)	124	960
S12	(12.5, 8)	138	1080
S13	(7, 6.6)	98	990
S14	(4.8, 9.6)	102	1020
S15	(11, 1)	112	840

Table 6. Characteristic parameters of demand corridors
表 6. 需求走廊特征参数

编号	里程(km)	需求(kW)	类型	编号	里程(km)	需求(kW)	类型
L1	8	340	热点	L11	16	300	外围
L2	9	330	热点	L12	15	280	外围
L3	10	320	热点	L13	17	310	外围
L4	8	330	热点	L14	18	290	外围
L5	9	300	热点	L15	19	340	外围
L6	7	310	热点	L16	14	250	外围
L7	11	180	外围	L17	16	300	外围
L8	12	200	外围	L18	20	360	外围
L9	14	160	外围	L19	23	150	外围
L10	13	240	外围	L20	21	400	外围

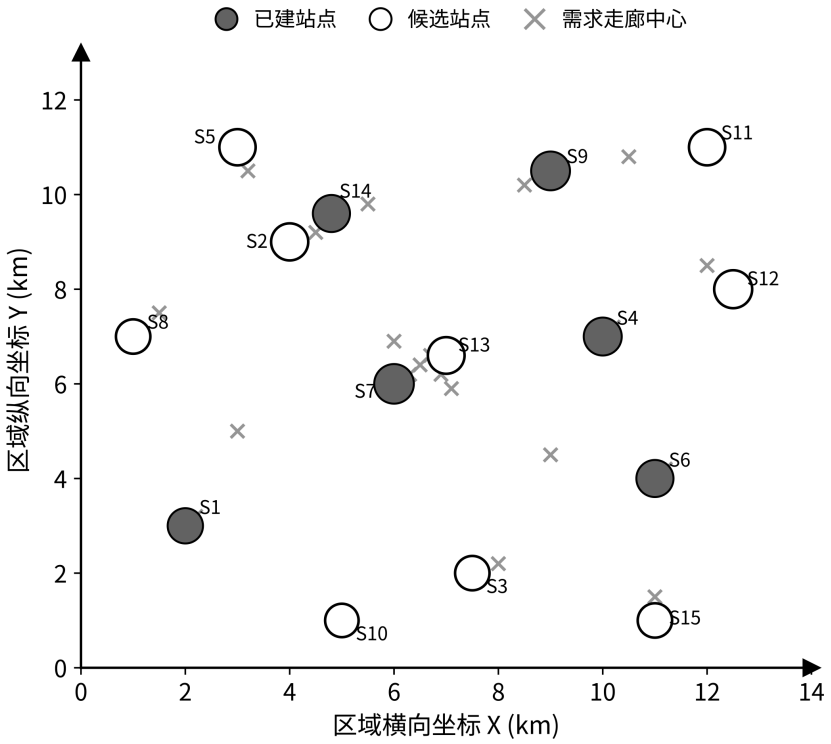


Figure 2. Spatial distribution of candidate sites and demand corridors
图 2. 候选站点与需求走廊的空间分布

Table 7. Site selection and station load allocation for the benchmark scenario
表 7. 基准方案选址与站点负荷分配

站点	坐标(km)	容量(kW)	负荷(kW)	利用率(%)	服务走廊数
S1	(2, 3)	900	540	60.0	3
S4	(10, 7)	1080	1080	100.0	5
S6	(11, 4)	1020	1020	100.0	3
S7	(6, 6)	1200	1200	100.0	5
S9	(9, 10.5)	1140	680	59.6	3
S14	(4.8, 9.6)	1020	1020	100.0	4
合计	—	6360	5540	87.1	19

从供需匹配看，系统负荷合计 5540 kW，建站总容量 6360 kW，系统利用率为 87.1%；已满足需求 5540 kW，占总需求 5690 kW 的 97.4%。S4、S6、S7 和 S14 满载运行，S1 和 S9 利用率分别为 60.0%和 59.6%。整体平均利用率 86.6%，利用率变异系数为 21.9%，说明在较高的需求满足率下仍然留有部分边缘兜底容量。各站点的容量、负荷、利用率。

编号 20 的走廊由 S4、S6、S9 三个站点共同提供服务，以缓解单个站点容量限制造成的局部供需缺口。已有研究表明，充电场站配置需兼顾成本、容量约束和电力系统影响，公共充电设施部署也需比较规划导向与市场导向。为了保证对比的充分性，本文设置相同的最大建站数、最低需求满足率、候选站点集，执行 p-median 模型、最大覆盖模型、容量约束选址、需求密度优先四个基线模型。表 8 给出各个模型的约束结构，表 9 给出同一个算例下各个模型的数值比较。为了保证可比性，所有基线结果均进行

容量可行性校核，不能被容纳的负荷会被转移到附近的可达站点上。

Table 8. Comparison of constraint structures for typical contrast models
表 8. 典型对照模型的约束结构比较

模型	选址目标	续航约束	容量约束	负荷分流	适用性说明
本文模型	加权系统成本最小	有	有	有	同步优化站点、走廊和功率分配
p-median 模型	接入距离最小	可附加	通常无	无	适合距离导向选址，容量边界需后验校核
最大覆盖模型	给定站点数下覆盖需求最大	可附加	通常无	无	适合覆盖评价，难以刻画负荷消纳
容量约束选址模型	建设成本与容量可行性	可附加	有	弱	可控制过载，但对连续分流刻画不足
需求密度优先	按可达需求排序	弱	后验校核	无	作为启发式排序对照

Table 9. Performance comparison of different location-allocation methods
表 9. 不同选址–分配方法的性能对比

方法	建站数(座)	建设成本(万元)	服务成本(万元)	总成本(万元)	较本文总成本变化(%)	需求满足率(%)
本文模型	6	700	821.3	2035.3	—	97.4
容量约束选址	6	688	873.9	2075.9	+2.0	97.4
需求密度优先	6	622	961.8	2097.8	+3.1	97.4
p-median 模型	7	812	850.5	2175.5	+6.9	97.4
最大覆盖模型	6	650	1018.2	2182.2	+7.2	97.4

比较结果表明，在相同的满足率下本文模型总成本最低。本文模型总成本比最接近的容量约束选址低 2.0%，比需求密度优先法低 3.1%，比 p-median 模型和最大覆盖模型低 6.9%和 7.2%。比较结果说明，单独追求距离最小、覆盖最大或者建设成本节约，均会忽略容量消纳、连续分流的约束条件；将选址、分配、空间约束都纳入同一个目标函数中，可以在建设投入和用户服务成本之间取得更均衡的结果。

5.3. 关键约束的有效性验证

为了确定主要的约束因素，本文设置了两个对照试验。第一，对最小站间距约束进行启闭对比。约束打开时，6 个站点的最小间距为 3.16 km，平均最近邻距离为 3.76 km，局部供给集中度为 1200 kW；约束关闭后，S7 和 S13 同时被选中，间距仅为 1.17 km，平均最近邻距离降到 3.35 km，局部供给集中度达到 2020 kW。两种布局如图 3 所示。

约束关闭使系统总成本降低了约 5.3%，但也产生了局部供给集聚增强的代价，结果说明，最小站间距约束以一定的成本溢价，换取更均衡的空间分布。第二，开展最大允许行驶距离的灵敏度扫描。当 $R_{\max}$ 从 14 km 增加到 24 km 时，服务走廊的数量由 11 条增加至 20 条，需求满足率也由 52.0%提高至 100.0%，建站数由 3 座增加至 6 座，结果如表 10 所示。

续航弹性以满足率变化率和续航变化率之比表示，即式(27)。弹性在 14~16 km 处为 2.09，降至 22~24 km 处的 0.29，说明续航改善对于需求满足率的提高存在边际递减效应。

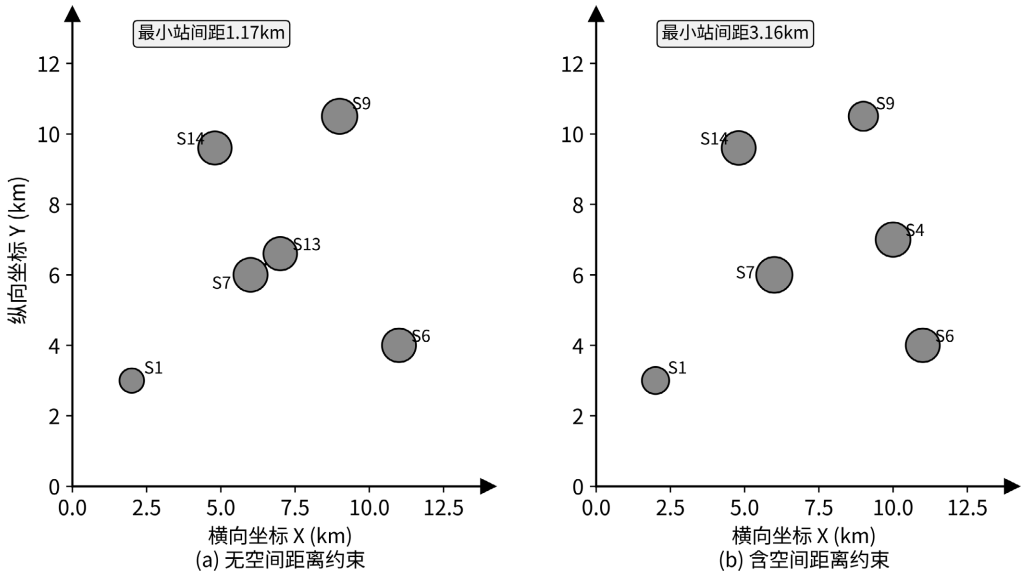


Figure 3. Comparison of station layout with and without spatial distance constraints
图 3. 有无空间距离约束下的站点布局对比

Table 10. Effect of driving range on path service and demand satisfaction
表 10. 续航对路径服务与需求满足的影响

R_{max} (km)	服务走廊数	需求满足率(%)	满足需求(kW)	建站数
14	11	52.0	2960	3
16	14	67.5	3840	4
18	16	78.0	4440	5
20	18	90.3	5140	6
22	19	97.4	5540	6
24	20	100.0	5690	6

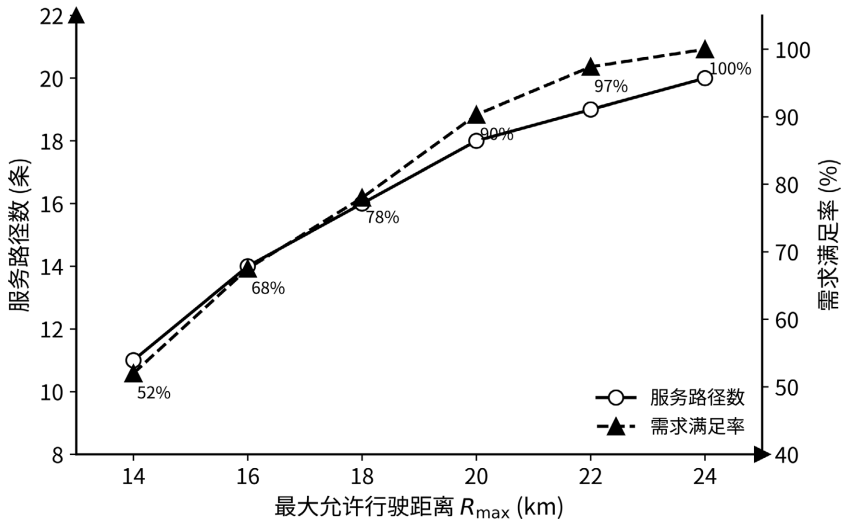


Figure 4. Effect of endurance range on number of service corridors and demand satisfaction rate
图 4. 续航对服务走廊数与需求满足率的影响

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta\eta/\eta}{\Delta R_{\max}/R_{\max}} \tag{27}$$

式中，ε_R 为需求满足率对续航的弹性系数，$\Delta\eta$ 为需求满足率改变量，η 为需求满足率，ΔR 为续航变化量，R 为最大允许行驶距离。

图 4 为续航与需求满足率的关系曲线。续航里程增大时，曲线逐渐变缓，说明，单方面提高续航里程难以使服务品质得到等比例的改善。

以上分析表明，最小站间距与续航保障约束分别影响设施空间集聚和需求可达范围，需与设施扩容及容量配置协同优化，以平衡投资成本与服务效益。本文模型统筹需求可达性、容量约束及负荷分流可行性，适用于热点需求集聚与边缘区域服务保障并存的规划情景。

6. 结论

本文构建了考虑车辆续航可达性、站点容量及最小站间距约束的充电设施选址与负荷分配联合优化模型，实现设施布局与需求分配的协同优化。通过加权成本目标函数统筹建设经济性与充电服务便利性，改善设施集聚与资源配置不均问题。结果表明，相较容量约束选址、需求密度优先、p-median 及最大覆盖模型，系统总成本分别降低 2.0%、3.1%、6.9%和 7.2%。灵敏度分析表明，车辆续航提升有助于扩大充电服务范围，但其优化效益呈边际递减趋势，表明充电网络优化需综合考虑多重约束。然而，本研究尚未纳入配电网运行约束，采用静态续航参数及规划情景数据，难以充分反映实际充电行为。未来将融合交通与电网运行约束，引入真实出行及充电数据，进一步提升模型的动态适应性与工程应用价值。

基金项目

国家自然科学基金(72601197)。

参考文献

[1] 王雅娟, 李云豪. 面向充电桩时间分配的在线双边拍卖机制设计[J]. 物流科技, 2024, 47(18): 57-64.

[2] 邵佳佳, 吴志炜, 陈小毅, 等. 新能源汽车大数据在充电供需研究中的应用[J]. 供用电, 2022, 39(12): 74-81.

[3] 盛裕杰, 郭庆来, 刘梦洁, 等. 多源数据融合的用户充电行为分析与充电设施规划实践[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 151-162.

[4] 叶文显, 杨恩昊. 西安新能源汽车充电设施供需失衡分析[J]. 汽车测试报告, 2025(8): 49-51.

[5] 刘思奇, 朱从坤. 供需平衡视角下的共享汽车投放量研究[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2020, 33(4): 72-76.

[6] 刘鑫垚, 陈亮. 基于供需平衡的重庆市公交充电基础设施规划探索[J]. 城市公共交通, 2020(9): 42-46.

[7] 徐婷婷, 龙羿, 胡晓锐, 等. “车-路-网”耦合下含多类型充电桩协同的充电站规划[J]. 电力建设, 2025, 46(7): 95-107.

[8] 魏晓芳, 吕飞, 张宇峰, 等. 健康城市导向下新能源汽车充电桩的空间布局研究[J]. 城市建筑, 2023, 20(5): 54-61.

[9] Elkholy, S., Shaaban, M.F., Ali, A., Nos, T. and Awad, A.S.A. (2024) Optimal Allocation of Depots for Electric Bus Charging: Cost Minimization and Power System Impact Mitigation Using Mixed Integer Nonlinear Programming. *Energy Science & Engineering*, **12**, 5466-5479. https://doi.org/10.1002/ese3.1955

[10] Wang, Y., Fan, S., Sun, X. and Liu, X. (2023) Investigating the Deployment of Initial Public Charging Infrastructure: Planning-Based vs Market-Based Approaches. *Transportation Research Part D*: *Transport and Environment*, **119**, Article 103755. https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103755