

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200579

考虑多需求场景的城市电动汽车充电站多目标规划

臧海祥, 舒宇心, 傅雨婷, 卫志农, 孙国强

(河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 当前, 多数研究基于用户出行路径确定 EV 充电需求, 但是往往未考虑到多种不确定性。基于用户出行数据, 考虑多种不确定性因素, 在三种场景下对 EV 充电需求进行模拟, 并采用 K-means 聚类算法得到三种场景下的充电需求。其次, 基于此建立了一个综合考虑用户侧与非用户侧利益的多目标规划模型。另外, 还提出了考虑多场景的改进排队理论对充电站定容, 所提规划模型由 NSGA-II 求解, 并采用 TOPSIS 综合评价法确定规划方案。最后, 以山东省潍坊市部分城区为规划区域, 交通网耦合 IEEE 69 节点配电网为算例验证了所提规划模型的有效性与优越性。

关键词: 电动汽车; 充电站; 充电需求; 选址与定容; 多目标规划

Multi-objective planning of an urban electric vehicle charging station considering multi demand scenarios

ZANG Haixiang, SHU Yuxin, FU Yuting, WEI Zhinong, SUN Guoqiang

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: At present, most studies determine EV charging needs based on user travel paths, but they have not taken multiple uncertainties into account. Based on user travel data, this paper considers various uncertain factors, simulates EV charging requirements in three scenarios, and uses a K-means clustering algorithm to obtain charging requirements in those scenarios. Secondly, based on charging requirements, a multi-objective planning model that comprehensively considers the interests of both the user side and the non-user side is established. In addition, this paper also proposes an improved queuing theory that considers multiple scenarios to fix the capacity of charging stations. The proposed planning model is solved by NSGA-II, and the TOPSIS comprehensive evaluation method is used to determine the planning scheme. Finally, taking the urban area of Weifang in Shandong Province as the planning area, and the transportation network coupled with the IEEE 69 node distribution network as an example, the effectiveness and superiority of the planning model are verified.

This work is supported by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51507052).

Key words: electric vehicle; charging station; charging demand; sitting and sizing; multi-objective planning

0 引言

交通领域是主要的温室气体排放源和能源消耗源, 30%的二氧化碳排放^[1]和28.9%的能源消耗^[2]来源于交通领域, 近10%的PM2.5和PM10来源于交通领域的排放^[2]。随着能源短缺和环境污染问题的日益凸显, 电动汽车(Electric Vehicle, EV)凭借其零尾气排放、低噪声污染等良好的环保效益和社会效益得到了全世界广泛的关注^[3]。目前, 多个国家都制定了相关政策以激励EV的研究和推广^[4]。法国、荷

兰、德国等国家都已提出停止销售燃油车计划, 我国也已启动传统燃油车的退出时间表研究^[5]。然而, 当前EV渗透率仍处于较低水平, 较低的续驶里程与充电基础设施建设的不足是影响EV推广的主要因素^[6-7], 在此背景下, EV充电基础设施的合理规划显得尤为重要。

EV充电需求的大小与分布是充电基础设施规划的基础, 国内外现有研究成果中对充电需求的模拟有多种方法。文献[8]随机生成了500辆EV位置作为充电需求位置; 文献[9]中的充电需求取决于目的地附近的停车数量; 文献[10]将交通流量转换为固定在交通节点的充电需求; 文献[11-12]将有充电需

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51507052)

求的车辆整合到距离其最近的交通节点。部分文献考虑了用户出行不确定性并建立了EV出行模型以确定充电需求点：文献[13]认为充电需求出现在EV剩余电量达到警戒值时；文献[14]认为充电需求出现在用户出行终点；文献[15]认为充电需求出现在EV电量耗尽处。此外，文献[16]考虑不同充电模式的特点，对不同类型电动汽车的充电需求进行建模；文献[17]以区域内EV保有量和车辆平均充电次数确定区域内充电需求。

在充电站规划的研究中，部分研究考虑了多个充电站规划相关利益主体，主要包括充电站投资方、EV用户和配电网：文献[18]在最大化快速充电站年捕获交通流量的同时最小化年总投资成本和能量损耗；文献[19]建立了一个多目标双层规划模型，上层模型以充电站年效益和网损减少值最大化为目标，下层模型以充电站参与电网调度时收益最大化为目标；文献[20]考虑到充电站覆盖交通流最大化，并将多目标转换为单目标，采用数据包络分析和交叉熵方法进行求解；文献[21]以全社会出租车充电时间最小、行程时间可靠性最高、配电网网损最低为目标函数；文献[22]建立了一个以充电站收益最大为目标的模型和以用户满意指数最大为目标的模型；文献[23]基于系统电压稳定性和充电服务质量，建立了充电站规划的多目标优化模型；文献[24]建立了一个以最小化年建设运行成本、用户耗费时间和用户往返充电站引起的额外碳排放为目标的模型。

当前，多数研究基于用户出行路径简单地确定EV充电需求，但是往往未考虑用户里程焦虑的不确定性，即用户产生里程焦虑时的电量并不统一，难以基于同一个标准将单辆EV的充电需求固定为一个充电需求点。基于此，本文提出一种新的确定充电需求的方法，同时考虑气温对EV容量的影响和空调工作对电能损耗的影响，提出了春秋季、夏季和冬季三种规划场景，在多场景下，将用户可能产生充电需求的路径转化为若干充电需求散点，最后采用K-means聚类算法对若干EV用户充电需求散点进行聚类生成充电需求点。基于多场景下的充电需求，本文建立了一个以用户侧成本和非用户侧成本为目标的充电站多目标规划模型，提出考虑多场景的改进排队理论对充电站定容，最后以一个实际的城市区域为算例验证了本文规划方法的有效性和合理性。

1 电动汽车出行模型

出行链指的是个人完成一项或几项活动，在一

定时间顺序上不同出行目的的连接形式，本文将EV用户出行建模为一条闭环出行链。研究认为，EV不会影响用户的生活方式^[25]，因此，本文假定EV用户出行与燃油车用户相同。根据美国交通部2009年调查数据(National Household Travel Survey, NHTS)^[26]可得用户日出行次数概率分布，如图1所示。基于日出行次数概率分布，采用蒙特卡洛模拟(Mont-Carlo Simulation, MCS)即可得到用户日出行次数。

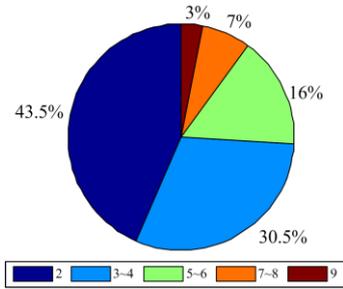


图1 用户日出行次数概率

Fig. 1 Probability of daily trips per vehicle

本文将研究区域划分为居民区(H)、工业区(W)和商业区(SE/SR/O)^[27]。采用马尔科夫过程确定出行链的目的地^[28]，将用户从当前位置前往下一个目的地视为一个状态转移过程，每次状态转移只与前一时刻的状态有关，而与过去的状态无关。用户在居民区(H)、工业区(W)和商业区(SE/SR/O)间的出行类型比例如表1^[26]所示，由表1可进一步得到出行起点区域类型比例，如表2所示。

表1 出行类型比例

Table 1 Proportion of travel types

出行类型	H-H	H-O	H-W	O-H	O-O
比例/%	11.80	25.93	10.08	26.58	11.27
出行类型	O-W	W-H	W-O	W-W	—
比例/%	1.53	8.89	2.62	1.30	—

表2 出行起点区域类型比例

Table 2 Proportion of area types at the starting point of travel

出行类型	居民区(H)	商业区(SE/SR/O)	工业区(W)
比例/%	47.81	39.38	12.81

基于表2出行起点区域类型比例可确定用户起始点区域类型，在确定起始点区域类型后，进一步基于规划区域人口密度采用MCS可确定具体目的地。本文以路网交通节点表示起始点，节点被选择概率可由式(1)计算得到。

$$p_i = \frac{m_{p,i}}{\sum_{j \in U_i} m_{p,j}} \quad (1)$$

式中: p_i 为节点*i*被选择概率; $m_{p,i}$ 为节点*i*人口数量; U_i 为节点*i*相同类型区域集合。

2 电动汽车充电需求模拟

2.1 充电需求散点模拟

EV充电需求与EV类型、EV初始电量、行驶里程、电能损耗等多种因素有关^[29]。其中电能损耗与车辆性能、空调工作、EV启停过程有关,低温环境会对EV电池容量产生较大影响,启停过程则与用户行驶路径和道路状况有关,具体如图2所示。

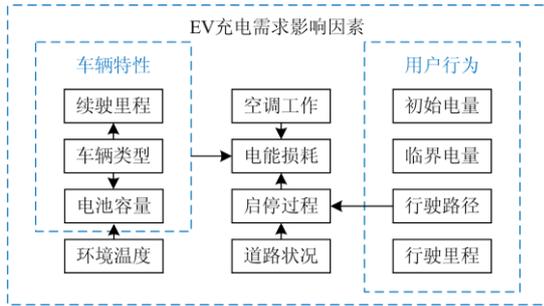


图2 充电需求影响因素

Fig. 2 Charging demand influencing factors

1) EV 相关参数

本文以私家车为研究对象,考虑多种EV类型,常见EV类型如表3所示^[30]。不同类型EV的电池容量与续航里程均略有差异,表3也给出了不同类型EV的相关参数。

表3 不同类型EV及相关参数

Table 3 Technical specifications of various types of EVs

车辆名称	容量/kWh	续航里程/km
Nissan-Leaf	24	160
BYD-E6	63.3	295
Nissan-Altra	29.07	130
长安mini	19.2	105
北汽C30	22.8	130

2) 初始SOC

记用户出发时EV初始SOC为 SOC_0 ,为防止过充电对电池的伤害, SOC_0 服从0.8~0.9的均匀分布^[31]。

3) 电池容量

目前EV市场的主要供能设备是锂离子电池,研究表明,锂电池容量受环境温度影响较大,低温时其容量容易迅速衰减,在外界气温达到0°C的时候,锂电池容量将降至额定容量的80%^[32],需单独考虑极端气候情况下EV的充电需求。本文定义低温系数为 η_s ,根据外界温度取值,考虑极端场景,若冬季达到0°C,则 η_s 取0.8,否则 η_s 取1。

4) 启停过程

引入能耗系数 η_e 表示行驶途中启停的电能损耗, η_e 取值为0.9~1^[33]。本文认为EV启停次数与途中通过交通节点数量成正相关,暂不具体考虑行驶路径交通状况的影响,通过将交通节点数量归一化,基于用户出行通过交通节点数量对能耗系数 η_e 在[0.9~1]区间进行取值,如式(2)所示。

$$\eta_e = 0.9 + 0.1 \frac{n_{\text{node}}}{n_{\text{node}}^{\text{max}}} \quad (2)$$

式中: n_{node} 为EV出行通过交通节点数量; $n_{\text{node}}^{\text{max}}$ 为所有EV所通过最大交通节点数量。

5) 空调工作

引入空调系数 η_v 表示空调工作产生的电能损耗。研究表明,空调将使EV耗电量提高15%^[34],在春秋季节空调不工作时,空调系数 η_v 取0,在夏冬季空调制冷或制热时, η_v 取0.15。

6) 实时SOC

由于EV出行路径已知,根据出行路径跟踪电量即可确定充电需求。用户行驶到*k*处时EV的SOC可由式(3)计算得到。由于本文研究涉及多个EV用户、多款EV,其相关参数取值或有差异,为方便叙述,在公式中不再体现这些个性特点。

$$SOC_k = \eta_s SOC_0 - \frac{d_{ok} e (1 + \eta_v) \eta_e}{P_{ev}} \quad (3)$$

式中: d_{ok} 为EV当日行驶至*k*处时所行驶里程; e 为单位里程耗电量,可根据EV容量与续航里程计算得到; P_{ev} 为EV容量。

7) 里程焦虑

考虑EV用户里程焦虑,通常SOC低于0.3时用户便会产生充电需求,考虑用户个体差异,SOC充电阈值分布在0.15~0.3^[31]。本文将处于充电阈值范围内的路径视为无穷多个充电需求散点,可将其视为若干有着相同出行链、相同状态的EV在存在里程焦虑的路段分布均匀地产生充电需求。

8) 充电需求散点

基于EV出行模型,跟踪EV出行路径,基于式(3)可得SOC达到0.3及0.15警戒值时EV空间位置,有充电需求的路径对应已行驶距离 d_{ok}^e 可由式(4)计算得到,其中 d_{od} 为用户出行总距离。由式(4)可知,用户出行或许不存在SOC低于0.3的情况,或许在到达终点前SOC仍大于0.15。

$$\max \left(\frac{(SOC_0 - 0.3) P_{ev}}{e(1 + \eta_v) \eta_e}, d_{od} \right) \leq d_{ok}^e \leq \min \left(\frac{(SOC_0 - 0.15) P_{ev}}{e(1 + \eta_v) \eta_e}, d_{od} \right) \quad (4)$$

记有充电需求的路径长度为 d_e ,相邻散点间欧

氏距离为步长 $step$, 则有充电需求的路径可视为由 n_d 个散点组成, 散点数 n_d 可由式(5)计算得到。如图 3 所示, 其中红点即为若干充电需求散点, 节点 O、D 为出行起始点, 节点 n 为出行途经交通节点。

$$n_d = \left\lceil \frac{d_e}{step} \right\rceil \quad (5)$$

图 3 充电需求散点示例

Fig. 3 Example of charging demand scatter

2.2 K-means 聚类算法

本文采用 K-means 聚类算法对若干 EV 用户充电需求散点进行聚类生成充电需求点, 需求点的大小与所聚类充电需求散点数相关。

K-means 聚类算法将样本依据某一特征聚类为 K 个簇, 其中 K 需要提前给定。在本文充电需求散点聚类过程中, 依据散点间的欧氏距离进行聚类, 目标函数为

$$\min J = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K x_{ik} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (6)$$

式中: N 为样本点的数量; x_i 为样本点 i ; x_{ik} 表示样本点 i 是否被归为第 k 个簇, 是则取值为 1, 否则取值为 0; μ_k 为第 k 个簇的中心。

K-means 聚类算法容易受到初始簇中心的影响, 从而生成次优解, 为避免初始解的不恰当给聚类带来的负面影响, 在簇数量为 K 时, 重复 K-means 聚类算法优化多次, 并以目标函数为评判标准, 以其中最优解为有 K 个簇时的聚类结果。

由于 K-means 聚类算法中簇的数量需要提前指定, 难以保证其数量的合理性, 本文采用手肘法与轮廓系数法综合确定聚类数 K 。

3 规划模型

3.1 目标函数

建立一个综合考虑用户侧与非用户侧双方利益的多目标规划模型, 目标函数如式(7)所示。其中非用户侧目标函数 F_1 包括充电站建设投资成本 C_c 、充电站运行维护成本 C_{om} 、租金成本 C_{lan} 以及网络损耗成本 C_{loss} , 用户侧目标函数 F_2 包括用户充电途中电量损耗成本 C_{ue} 和用户时间成本 C_{ut} , 分别如式(8)与式(9)所示。

$$\min [F_1, F_2] \quad (7)$$

$$F_1 = \min (C_c + C_{om} + C_{lan} + C_{loss}) \quad (8)$$

$$F_2 = \min C_u = \min (C_{ue} + C_{ut}) \quad (9)$$

不同场景下充电需求的空间分布与大小不同, 用户侧成本 C_u 受到不同场景下充电需求的直接影响, 为多场景下的综合人均用户成本。充电站建设投资成本 C_c 、充电站运行维护成本 C_{om} 、租金成本 C_{lan} 以及网络损耗成本 C_{loss} 均与充电站容量和充电站等级有关, 受到多场景下充电需求的间接影响。各成本与充电需求、定容模型和充电站等级等的关系如图 4 所示。

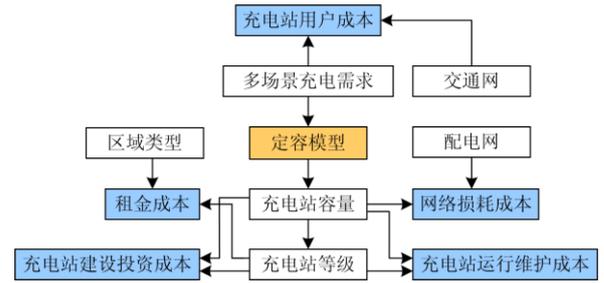


图 4 目标函数各成本与定容模型的关系

Fig. 4 Relationship between each cost of the objective function and fixed capacity model

1) 充电站建设投资成本

充电站建设投资成本 C_c 为折算到充电站生命周期内每年的建设投资成本, 主要包括充电站固定资产投资成本和充电设备(本文特指快速充电机)建设成本, 具体数学表达式如式(10)所示。

$$C_c = \frac{r_0(1+r_0)^{t_{cs}}}{(1+r_0)^{t_{cs}} - 1} \sum_{i=1}^{n_{cs}} (C_{init,i} + P_{ch} C_{con} c_i) \quad (10)$$

式中: r_0 为贴现率; t_{cs} 为充电站生命周期; n_{cs} 为规划充电站数量; $C_{init,i}$ 为充电站固定投资成本; P_{ch} 为充电设备额定容量; C_{con} 为充电设备单位容量建设成本; c 为充电设备数量。

2) 充电站运行维护成本

充电站运行维护成本 C_{om} 包括充电站固定运行维护成本和充电设备运行维护成本, 具体数学表达式如式(11)所示。

$$C_{om} = \sum_{i=1}^{n_{cs}} \left(\frac{r_0(1+r_0)^{t_{cs}}}{(1+r_0)^{t_{cs}} - 1} \eta_{om} C_{init,i} + C_{om}^{ch} c_i \right) \quad (11)$$

式中: η_{om} 为充电站年固定运行维护成本占充电站年固定投资费用的比例; C_{om}^{ch} 为单台充电设备年运行维护成本。

3) 租金成本

租金成本 C_{lan} 与充电站占地面积和该区域单位

租金有关,其中充电站占地面积与充电站等级有关。具体数学表达式为

$$C_{\text{lan}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{cs}}} s_i C_{l,i} \quad (12)$$

式中: s_i 为第 i 个充电站的占地面积; $C_{l,i}$ 为第 i 个充电站所在区域的单位租金成本; n_{cs} 为目标规划充电站数量。

4) 网络损耗成本

在充电站内充电设备全部工作的状态下计算配电网网络损耗,网络损耗成本 C_{loss} 计算公式如式(13)。

$$C_{\text{loss}} = c_e \sum_{\text{day}=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} \sum_{ij \in \Omega_{\text{line}}} \left[(I_{ij}^2 R_{ij})_h \right]_{\text{day}} \quad (13)$$

式中: c_e 为电能单价; day 为天数; h 为小时数; Ω_{line} 为配电网系统中支路集合; I_{ij} 为支路 ij 的电流; R_{ij} 为支路 ij 的电阻。

5) 充电站用户成本

充电站用户成本 C_u 由用户充电途中电量损耗成本 C_{ue} 和用户时间成本 C_{ut} 构成,在场景 s 下用户充电途中电量损耗成本 C_{ue}^s 和用户时间成本 C_{ut}^s 分别如式(14)和式(15)所示,主要取决于用户到其距离最近充电站的距离。

$$C_{\text{ue}}^s = 365 \sum_{i=1}^{n_{\text{c}}} \sum_{j \in \Omega_{\text{cd}}^{s,i}} \left(d_{ij} \sum_{m \in \Omega_j} p e_m \right) \quad (14)$$

$$C_{\text{ut}}^s = 365 \sum_{i=1}^{n_{\text{c}}} \sum_{j \in \Omega_{\text{cd}}^{s,i}} \frac{d_{ij} n_{\text{ev},j} k}{v} \quad (15)$$

式中: $\Omega_{\text{cd}}^{s,i}$ 为在场景 s 下充电站 i 所覆盖充电需求点集合; d_{ij} 为需求点 j 与充电站 i 之间的最短路径距离; Ω_j 为需求点 j 内的 EV 集合; p 为电价; e_m 为第 m 辆 EV 的单位里程耗电量,可根据 EV 类型,基于容量与续航里程得到; k 为当地用户平均每小时收入; v 为 EV 平均速度; n_{c} 为充电站数量。

综合考虑多种场景,充电站用户成本 C_u 如式(16)所示,式中 n_{sc} 为场景数。

$$C_u = \frac{1}{n_{\text{sc}}} \sum_s (C_{\text{ue}}^s + C_{\text{ut}}^s) \quad (16)$$

3.2 约束条件

1) 充电站距离约束

$$d_{i,j} > R \quad i, j \in \Omega_{\text{cs}} \quad (17)$$

式中: $d_{i,j}$ 为充电站 i 与充电站 j 的最短路径距离; R 为相邻充电站最小距离; Ω_{cs} 为充电站集合。

2) 充电站服务范围约束

$$d_{i,k} \leq 0.3d_{\text{ev}} \quad i \in \Omega_{\text{cs}}, k \in \Omega_{\text{cd}} \quad (18)$$

式中: $d_{i,k}$ 为充电站 i 与用户 k 的最短路径距离; d_{ev} 为 EV 续航里程,本文取值为各类型 EV 中最小的

续航里程; Ω_{cd} 为用户集合。

3) 充电站容量约束

$$c \leq c_{\text{max}} \quad (19)$$

式中: c 为充电站内配置的充电设备数量; c_{max} 为充电站内最大配置的充电设备数量。

4) 变量逻辑约束

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{cs}}} x_{pi} = n_{\text{cs}} \quad (20)$$

式中: N_{cs} 为候选充电站数量; x_{pi} 为是否在候选站 i 建设充电站的二元决策变量,若建设则为 1,否则为 0; n_{cs} 为目标规划充电站数量。

此外,还有配电网相关约束及场景约束:

5) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (21)$$

式中: P_i 和 Q_i 为节点 i 的注入有功和无功功率; N 为配电网节点数; V_i 为节点 i 的电压; G 和 B 分别为支路电导和电纳; θ_{ij} 为节点 i 、 j 的电压相角差。

6) 支路最大电流约束

$$|I_{ij}| \leq I_{ij\text{max}} \quad (22)$$

式中, $I_{ij\text{max}}$ 为支路 ij 最大允许流过电流。

7) 节点电压约束

$$V_i^{\text{min}} \leq V_i \leq V_i^{\text{max}} \quad (23)$$

式中, V_i^{max} 和 V_i^{min} 分别为节点 i 电压上下限。

8) 场景约束

规划方案需在所有场景下均满足所有约束条件,即春秋季节、夏季与冬季三种场景。

$$\sum_{i \in \Omega_s} x_{si} = 0 \quad (24)$$

式中: x_{si} 表示规划方案在场景 i 下是否违反任一约束条件,若违反则为 1,否则为 0; Ω_s 为场景集合。

3.3 定容模型

本文所采用的改进排队理论引入了贪心思想,只需明确各个充电站之间服务强度的相对关系,根据各充电站服务强度的相对关系配置充电设备,而不需要掌握具体的 EV 到达率等信息,这将有效解决充电站数据不准确及数据缺失导致的 EV 充电站定容不合理问题。

本文以充电站所服务 EV 数 n_{ev} 相关的线性函数 f 表示充电站的到达率 λ ,如式(25)所示。在定容时,可由 n_{ev} 代替 λ ,同时仍能够正确反映各充电站服务强度的大小关系。

$$\lambda = f(n_{ev}) \quad (25)$$

在基于贪心思想的改进排队理论中，规划区域内充电设备总数 C_a 是固定的。基于当前 EV 保有量现状，本文认为在 EV 市场占有率仍较低的情况下，相比充电站建设投资及相关成本的提高，更应优先保障用户体验，充电设备总数 C_a 一般远大于该区域充电设备实际所需数量。根据各充电站服务强度大小分配充电设备，每次选择为服务强度最大即最繁忙的充电站配置一台充电设备，直到所有充电设备分配完毕。

对于在多场景下的充电站定容问题，本文以各场景下的最大到达率为参与定容的到达率，充电站所服务 EV 数取各场景下最大服务 EV 数。

4 求解算法

本文所提规划模型是一个复杂的混合整数非线性非凸多目标多约束优化问题，难以采用传统数学方法求解，适合采用智能算法求解。本文选取带精英策略的非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm with elitist strategy,

NSGA-II)^[35]求解该问题。该算法在求解多目标优化问题上有着良好的性能，运行速度快，收敛性能好。由 NSGA-II 可得一组 pareto 解，仍然无法确定一个唯一解，本文采用 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS) 综合评价法评估所有 pareto 解并确定最终规划方案。

5 算例分析

5.1 参数与场景设置

本文以山东省潍坊市部分城市中心区域为算例，其交通网如附录图 A1 所示，假设交通网耦合 IEEE69 节点配电网，如附录图 A2 所示，交通网节点与配电网对应关系如附录表 A1 所示。该区域横向为 14 km，纵向最远为 8 km，其内部含有交通节点 71 个，有 34 个交通节点与外部区域相联系，区域类型主要为居民区，周边分布有三个大型工业区，中心区域分布有三个商业区，如图 5 所示，有 50 个节点分布在居民区内，25 个节点分布在商业区内，30 个节点分布在工业区内。规划区域人口热力图如附录图 A3 所示。

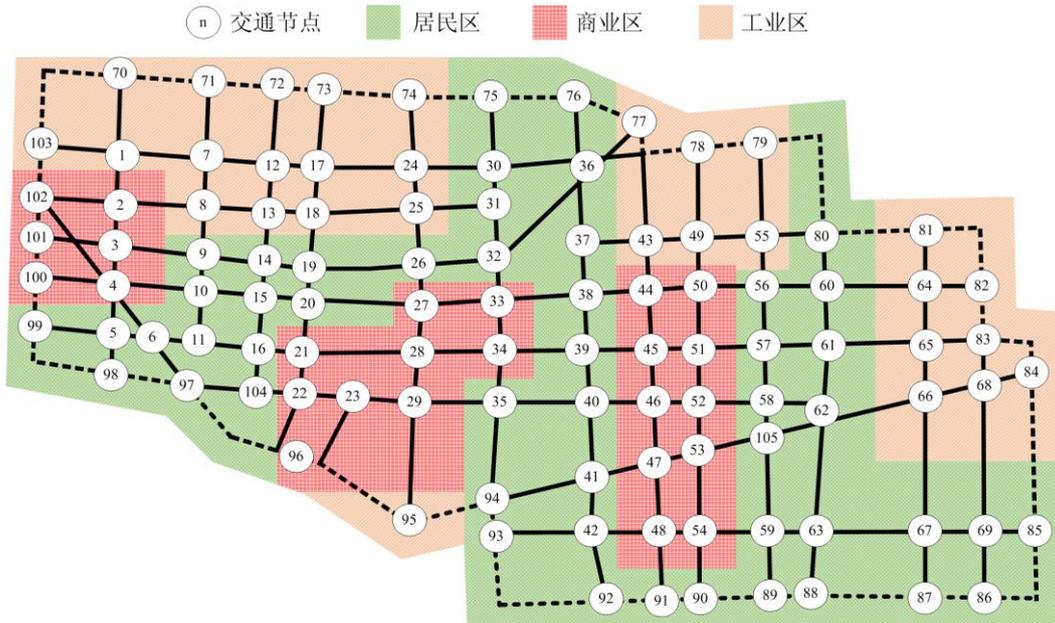


图 5 规划区区域类型分布图

Fig. 5 Map of the regional types of the planning area

潍坊市在国家充电基础设施分区域规划目标中属于加快发展区域^[36]，根据规划，充电设备数与 EV 的比例应力争达到 1:12。假定目标年规划区域有 1 000 辆 EV，则快速充电设备共需至少 84 台，为规划区域充电设备数量留有一定裕度，取充电设备总数 C_a 为 100，规划区域内计划规划 4 座快速充电

站。选取 NCCP-DC750-060K-GB01 型号快速充电桩作为充电站内直流充电设备，其额定功率为 96 kW，算例其他相关参数取值可见表 4。充电站固定投资成本、占地面积与充电站等级有关，充电站租金成本与用地性质有关，具体取值可见附录表 A2 与附录表 A3^[37]。

表 4 参数设置

Table 4 Study parameters

参数	数值	参数	数值
r_0	8% ^[37]	R	2 km ^[35]
t_{cs}	20 年	c_{max}	45
C_{con}	1 458 元/kW ^[8]	v_{max}	1.05
η_{om}	30%	v_{min}	0.90
C_{om}^{ch}	5 000 元	η_q	1.2
p	0.54 元/kWh	I_{ijmax}	600 A
k	20 元/h	μ	2 辆/h
v	50 km/h	c_e	0.54 元/kWh ^[38]
a	1.2	c	2
b	30	d	100
P_c	0.9	P_m	0.1
$popsize$	100	$itermax$	50

5.2 EV 充电需求仿真与分析

记有 n_{ev} 辆 EV, 基于 EV 出行次数、起始点区域类型、人口密度, 在 Matlab 中采用 MCS 可得 n_{ev} 条 EV 闭环出行链, 即 $n_{ev}=1000$ 。基于 1000 辆 EV 出行数据, 考虑多种因素的不确定性, 采用 MCS 方法对规划区域充电需求进行模拟。研究发现, 潍坊市冬季气温维持在 0°C 上下, 同时考虑春秋季节与夏冬季节是否使用空调, 本文分别对春秋季节 (η_v 取 0, η_s 取 1)、夏季 (η_v 取 0.15, η_s 取 1) 与冬季 (η_v 取 0.15, η_s 取 0.8) 三种场景下的 EV 充电需求进行模拟, 得到 1000 辆 EV 出行途中存在充电需求, 可以看出低温对电池容量和空调工作的电能损耗的影响较大, 不同场景下充电需求差异较大, 有必要考虑多种场景下的 EV 充电需求。

对存在充电需求的 EV 生成充电需求散点, 春秋季节、夏季与冬季的充电需求散点图分别如附录图 A4、图 A5、图 A6 所示。

从图中可以看出, 三种场景下充电需求散点图均存在差异, 但充电需求分布密度大致相同, 与交通流量密度分布密切相关。

在三种场景下采用 K-means 聚类算法对充电需求散点进行聚类, 聚类簇数量为 20~50 个, 在每一个聚类数下对算例独立运行 10 次, 并取最优聚类结果。在春秋季节, 聚类数为 47 时平均轮廓系数最大, 聚类数 $K=47$; 在夏季, 聚类数 $K=43$; 在冬季, 聚类数 $K=45$ 。春秋季节、夏季与冬季聚类结果分别如图 6、图 7、图 8 所示。

从图中可以看出, 需求点基于充电需求疏密分布, 且大多数需求点聚类在交通网道路上。三个场景下聚类得到的各个充电需求点所覆盖需求散点数量如图 9 所示, 在大多数情况下冬季充电需求远大于春秋季节与夏季, 这主要是由于气温对 EV 电池容量影响较大, 此外空调制热也增加了 EV 的耗电量。

但是, 并不是所有充电需求点都是冬季充电需求大于春秋季节与夏季, 因此无论是充电需求的分布还是大小上都有必要同时考虑三种场景。

5.3 充电站规划仿真与分析

采用 NSGA-II 求解所提模型, 初始解如附录图 A7 所示, 基于 NSGA-II 的支配关系得到的非支配序, 初始解被划分为若干个集合。算法最终种群分布如图 10 所示, 其中数字为规划方案编号。

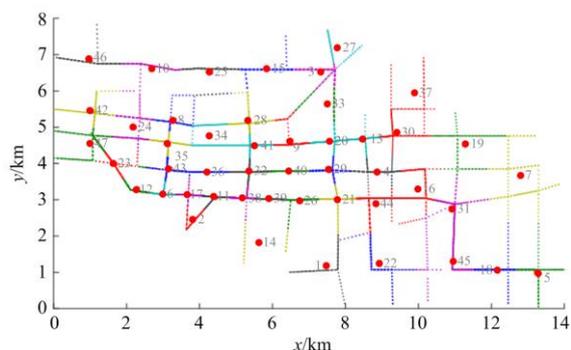


图 6 春秋季节充电需求散点聚类结果

Fig. 6 Scatter clustering results of charging demand in spring and autumn

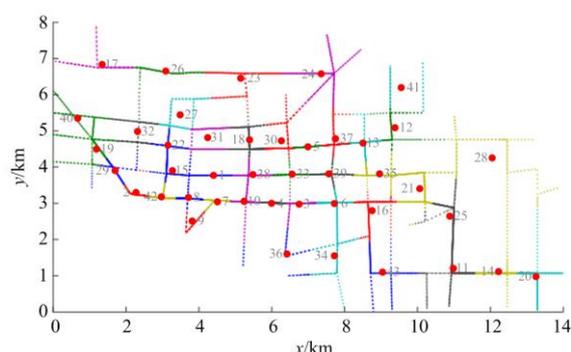


图 7 夏季充电需求散点聚类结果

Fig. 7 Summer charging demand scatter clustering results

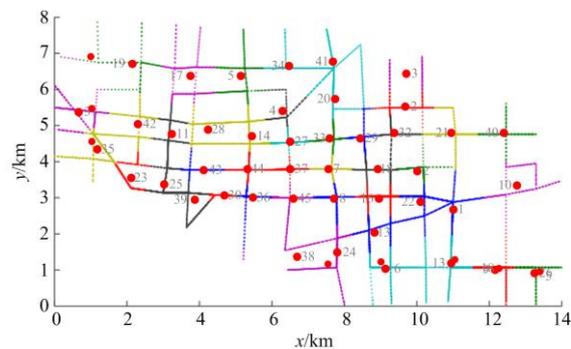


图 8 冬季充电需求散点聚类结果

Fig. 8 Scatter clustering results of winter charging demand

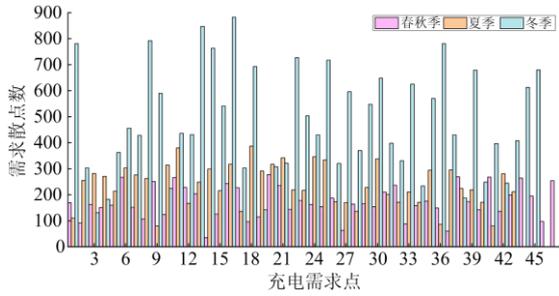


图9 充电需求点覆盖需求散点数量

Fig. 9 Number of scattered demand points covered by charging demand points

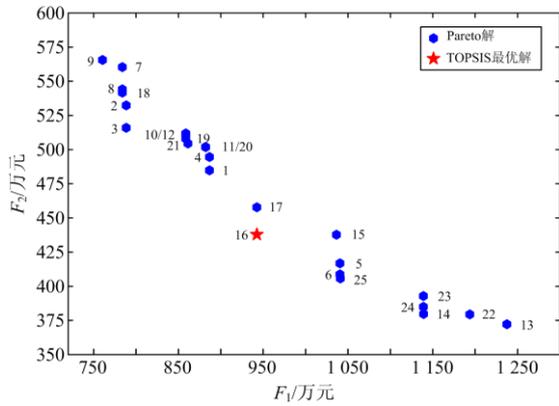


图10 NSGA-II 求解模型 Pareto 解

Fig. 10 The Pareto solution of NSGA-II

从图 10 中可以看出，本文所提多目标规划模型不存在绝对最优解，存在一组含 25 个解的 Pareto 解，本文采用 TOPSIS 综合评价法评估所有 Pareto 解，Pareto 解的目标函数值与相对接近度如附录表 A4 所示，本文取相对接近度最大的方案 16 为最终规划结果。

Pareto 解集的具体选址与定容结果如附录表 A5 所示，具体成本如附录表 A6 与图 11 所示。TOPSIS 最优解如表 5 所示。

表 5 TOPSIS 最优解规划结果

Table 5 Optimal planning result of TOPSIS

充电站选址	充电设备数量	充电站等级
18,35,43,66	29,45,23,23	2,1,2,2

由附录表 A6 可知，最优解的充电站建设投资成本、运行维护成本、租金成本、网络损耗成本和用户成本都不是最低的，但从综合用户侧成本与非用户侧成本两个目标来看，该方案更具有优势。从图 11 可以看出，若将用户侧成本 F_1 与非用户成本 F_2 作为单目标对充电站进行规划，规划结果也会有所不同，单目标值最小的方案为方案 3，而原本的

TOPSIS 最优方案仅排第 17 名。在 Pareto 解中，单目标值最小的方案 3 的用户侧成本是偏高的，该规划方案对用户是不利的，若建立单目标规划模型，由于用户侧成本远小于非用户侧成本，所得规划结果往往利于充电站与配电网而相对忽视了 EV 用户的利益，这与为了推广 EV 而适度超前合理规划充电站的指导思想相悖。

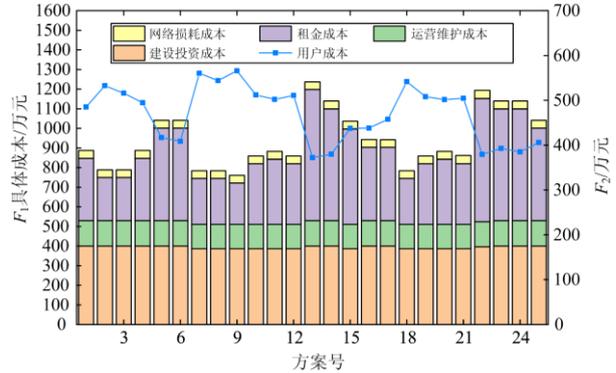


图11 Pareto 解的规划方案具体成本

Fig. 11 Specific costs of planning schemes in Pareto

不同的充电站规划方案下配电网电压幅值如附录图 A8 所示，从图中可以看出，不同的规划方案对配电网的影响也有所不同，充电站的规划需考虑其对配电网的影响。确定充电站选址定容方案后，充电站接入前后配电网电压幅值变化如图 12 所示，从图中可以看出，采取最优解规划方案时充电站接入对配电网电压幅值影响较小，可见本文所提规划模型充分考虑了充电站对配电网的影响，所提规划模型能够对多方利益做到均衡考虑。

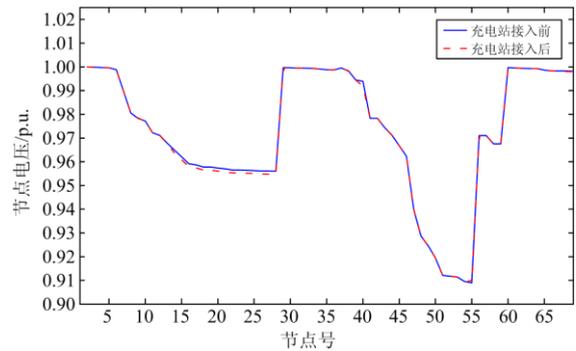


图12 最优规划方案下充电站接入前后节点电压

Fig. 12 Node voltage before and after charging station access under optimal planning scheme

充电站选址如图 13 所示，充电站在配电网中的接入点如图 14 所示。从图中可以看出，所有充电站均没有规划在商业区，其中 3 座充电站规划在工业区，1 座充电站规划在居民区，这与规划模型中不

同区域类型租金成本相符, 即工业区租金成本最低而商业区租金成本最高。从充电站选址分布可以看出, 充电站相对均匀地分布在了规划区域内。

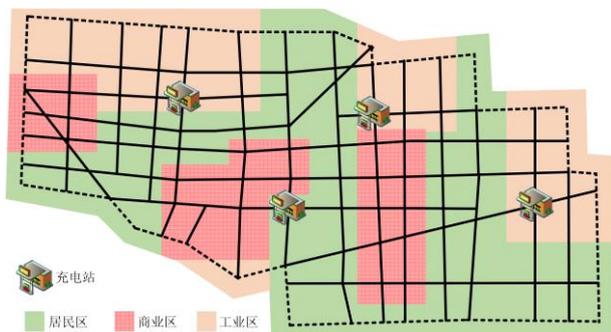


图 13 充电站选址结果

Fig. 13 Sitting results of charging station

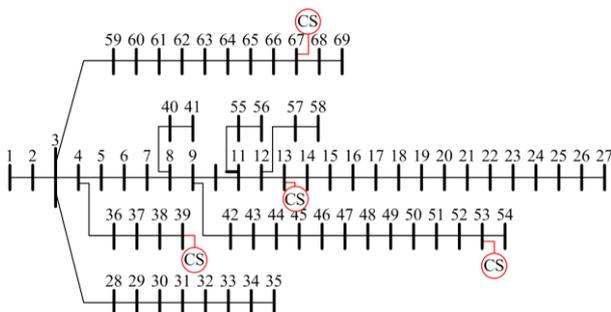


图 14 配电网中充电站接入点

Fig. 14 Access points for charging station in the distribution network

6 结论

本文首先考虑多种因素的不确定性, 基于用户出行数据, 考虑多种不确定性因素(EV 类型、SOC、充电阈值、低温系数、能耗系数与空调系数等), 在三种场景下对 EV 充电需求进行模拟, 并采用 K-means 聚类算法对生成的充电需求散点进行聚类, 进一步确定三个场景下的充电需求, 解决了电动汽车用户充电需求的不确定性问题。以山东省潍坊市部分城市区域为实际算例, 验证了本文所提 EV 充电需求模拟方法的可行性与必要性, 为 EV 充电基础设施的规划奠定了必要和良好的基础。基于 EV 充电需求多场景, 本文建立了一个综合考虑用户侧与非用户侧双方利益的多目标模型, 为充电设备保留一定裕度, 提出了考虑多场景的改进排队理论对充电站进行定容, 采用 NSGA-II 求解所提规划模型, 对求解所得 Pareto 解采用 TOPSIS 综合评价法确定最终规划结果。以潍坊市部分城区为规划区域, 交

通网耦合 IEEE 69 节点配电网, 算例仿真结果验证了本文所提规划模型和求解算法的有效性和可行性, 所提规划模型能够对多方利益做到均衡考虑, 优于传统单目标规划模型。

附录

表 A1 交通网与配电网耦合关系

Table A1 Coupling relationship between transportation network and distribution network

交通网节点	配电网节点	交通网节点	配电网节点	交通网节点	配电网节点
1	59	25	55	49	68
2	60	26	17	50	25
3	2	27	18	51	26
4	3	28	19	52	46
5	4	29	38	53	45
6	5	30	64	54	31
7	60	31	56	55	69
8	40	32	22	56	27
9	6	33	21	57	42
10	7	34	20	58	47
11	8	35	39	59	32
12	61	36	65	60	50
13	41	37	66	61	69
14	9	38	57	62	49
15	10	39	23	63	33
16	11	40	42	64	51
17	62	41	28	65	52
18	13	42	29	66	53
19	14	43	67	67	34
20	15	44	58	68	54
21	16	45	24	69	35
22	36	46	43	70	12
23	37	47	44	71	48
24	63	48	30		

表 A2 不同等级充电站相关数据

Table A2 Relevant data of different levels of charging stations

充电站等级	C_{init} /万元	C_{max}	占地面积/ m^2
1	690	45	1 085
2	520	30	693
3	310	15	337
4	210	8	165

表 A3 各类型用地土地成本

Table A3 Land cost of various types of land

土地类型	居民区(H)	商业区(SE/SR/O)	工业区(W)
价格/(万元/ m^2 /年)	0.211 4	0.685 4	0.069 6

表 A4 TOPSIS 综合评价 Pareto 解集

Table A4 TOPSIS comprehensive evaluation of Pareto solution

方案	F_1 /万元	F_2 /万元	相对接近度
1	886.661	484.888 3	0.598 577
2	788.458 4	532.332 7	0.584 299
3	788.458 4	516.014 2	0.613 047
4	886.660 8	494.653 9	0.577 974
5	1 040.637	416.811 2	0.548 97
6	1 040.653	408.766 7	0.561 983
7	783.853 2	560.396 2	0.544 95
8	783.853 2	544.077 6	0.568 294
9	760.456	565.633 8	0.551 014
10	858.657 9	511.849 6	0.569 908
11	882.054 9	501.986 5	0.567 619
12	858.658 4	510.901 5	0.571 722
13	1 237.451	372.232 4	0.448 986
14	1 139.243	379.662	0.504 8
15	1 036.499	437.693 3	0.516 248
16	942.538 8	437.85	0.634 957
17	942.481 3	457.805 8	0.593 763
18	783.990 6	541.710 8	0.571 854
19	858.795 8	508.091 5	0.577 04
20	882.192 1	501.758 3	0.567 941
21	861.177 9	504.489	0.582 046
22	1 193.741	379.469 5	0.464 913
23	1 139.112	392.931 2	0.486 385
24	1 139.128	384.886 8	0.497 876
25	1 040.936	405.688 1	0.566 392

表 A5 Pareto 解选址定容结果

Table A5 Sitting results of Pareto solution

方案	充电站选址	充电设备数量	充电站等级	配电网接入点
1	13,25,43,63	27,26,39,28	2,2,1,2	41,55,67,33
2	13,25,43,65	27,26,42,25	2,2,1,2	41,55,67,52
3	13,25,43,66	27,26,42,25	2,2,1,2	41,55,67,53
4	13,25,49,63	27,29,36,28	2,2,1,2	41,55,68,33
5	13,35,43,59	25,39,26,30	2,1,2,2	41,39,67,32
6	13,35,43,63	25,44,26,25	2,1,2,2	41,39,67,33
7	13,36,43,65	44,7,44,25	1,4,1,2	41,65,67,52
8	13,36,43,66	44,7,44,25	1,4,1,2	41,65,67,53
9	13,43,49,65	44,44,7,25	1,1,4,2	41,67,68,52
10	13,43,55,63	44,40,8,28	1,1,4,2	41,67,69,33
11	13,43,59,67	44,41,27,8	1,1,2,4	41,67,32,34
12	13,43,59,68	44,41,30,5	1,1,2,4	41,67,32,54
13	16,26,39,59	26,26,42,26	2,2,1,2	11,17,23,32
14	16,26,39,66	26,26,45,23	2,2,1,2	11,17,23,53
15	16,43,59,67	44,41,27,8	1,1,2,4	11,67,32,34
16	18,35,43,66	29,45,23,23	2,1,2,2	13,39,67,53
17	18,35,43,68	29,45,29,17	2,1,2,2	13,39,67,54
18	18,36,43,66	44,7,44,25	1,4,1,2	13,65,67,53
19	18,43,59,68	44,41,30,5	1,1,2,4	13,67,32,54
20	18,43,59,69	44,41,27,8	1,1,2,4	13,67,32,35
21	18,43,62,66	44,38,30,8	1,1,2,4	13,67,49,53
22	20,39,49,62	44,39,11,26	1,1,3,2	15,23,68,49
23	35,43,59,104	32,28,30,30	1,2,2,2	39,67,32,12
24	35,43,63,104	37,28,25,30	1,2,2,2	39,67,33,12
25	35,43,66,104	42,25,23,30	1,2,2,2	39,67,53,12

表 A6 Pareto 解规划方案具体成本

Table A6 Specific costs of planning schemes in Pareto

方案	充电站建设投资成本/万元	充电站运行维护成本/万元	租金成本/万元	网损成本/万元	用户成本/万元
1	400.240 1	128.750 2	318.481 8	39.188 94	484.888 3
2	400.240 1	128.750 2	220.214 4	39.253 69	532.332 7
3	400.240 1	128.750 2	220.214 4	39.253 69	516.014 2
4	400.240 1	128.750 2	318.481 8	39.188 65	494.653 9
5	400.240 1	128.750 2	472.334 8	39.312 34	416.811 2
6	400.240 1	128.750 2	472.334 8	39.328 38	408.766 7
7	385.980 8	124.472 4	234.145 8	39.254 16	560.396 2
8	385.980 8	124.472 4	234.145 8	39.254 16	544.077 6
9	385.980 8	124.472 4	210.748 8	39.254 01	565.633 8
10	385.980 8	124.472 4	309.016 2	39.188 5	511.849 6
11	385.980 8	124.472 4	332.413 2	39.188 46	501.986 5
12	385.980 8	124.472 4	309.016 2	39.189	510.901 5
13	400.240 1	128.750 2	668.869 6	39.590 68	372.232 4
14	400.240 1	128.750 2	570.602 2	39.650 29	379.662
15	385.980 8	124.472 4	486.266 2	39.779 67	437.693 3
16	400.240 1	128.750 2	374.067 4	39.481 07	437.85
17	400.240 1	128.750 2	374.067 4	39.423 56	457.805 8
18	385.980 8	124.472 4	234.145 8	39.391 58	541.710 8
19	385.980 8	124.472 4	309.016 2	39.326 36	508.091 5
20	385.980 8	124.472 4	332.413 2	39.325 71	501.758 3
21	385.980 8	124.472 4	309.016 2	41.708 47	504.489
22	396.166	127.528	628.693 4	41.353 4	379.469 5
23	400.240 1	128.750 2	570.602 2	39.519 28	392.931 2
24	400.240 1	128.750 2	570.602 2	39.535 32	384.886 8
25	400.240 1	128.750 2	472.334 8	39.610 54	405.688 1



图 A1 规划区域交通网

Fig. A1 Transportation network in planning area

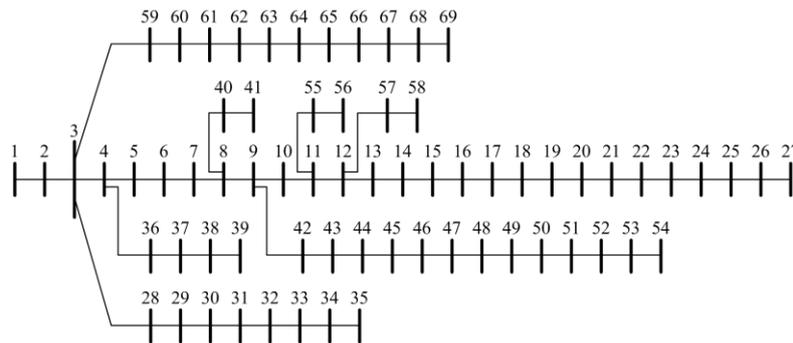


图 A2 IEEE 69 节点配电网拓扑图

Fig. A2 Topology diagram of IEEE 69 node distribution network

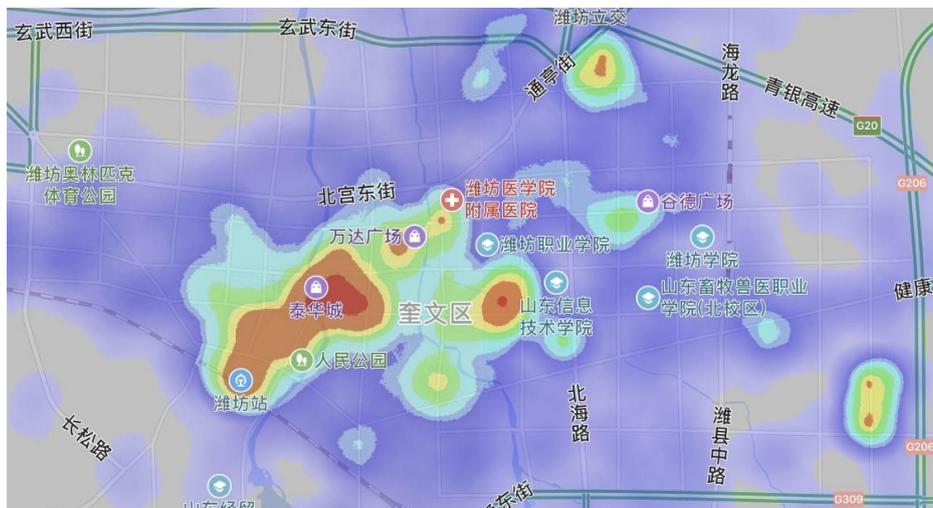


图 A3 规划区域人口热力图

Fig. A3 Population heat map of planning area

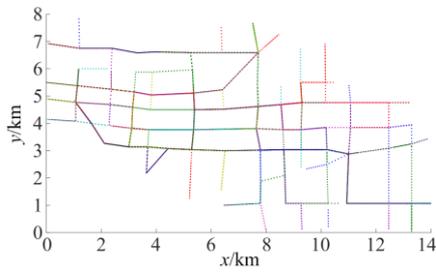


图 A4 春秋季充电需求散点图

Fig. A4 Scatter diagram of charging demand in spring and autumn

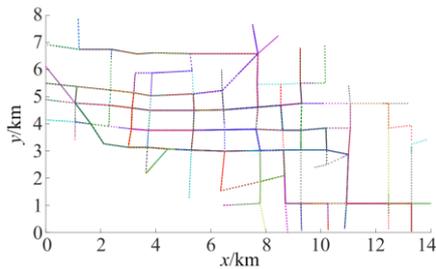


图 A5 夏季充电需求散点图

Fig. A5 Scatter diagram of summer charging demand

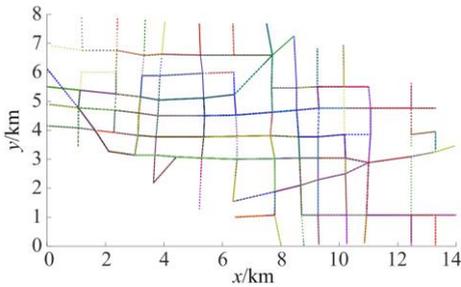


图 A6 冬季充电需求散点图

Fig. A6 Scatter diagram of charging demand in winter

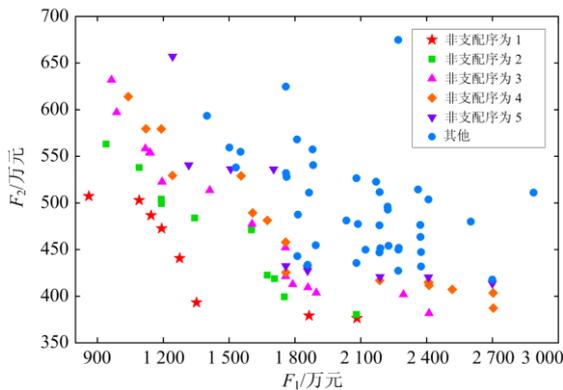


图 A7 NSGA-II 求解模型初始解

Fig. A7 Initial solution of NSGA-II solution model

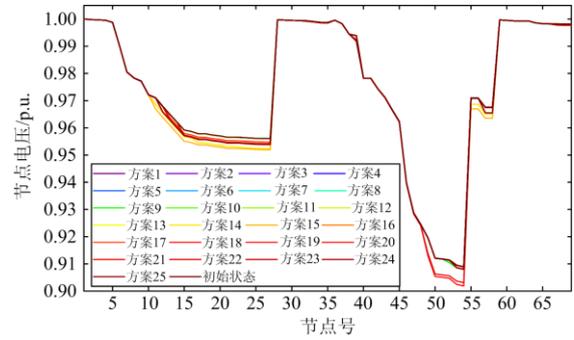


图 A8 不同的充电站规划方案下配电网电压幅值

Fig. A8 Distribution network voltage amplitude under different charging station planning schemes

参考文献

[1] CHEN Q, LIU N, WANG C, et al. Optimal power utilizing strategy for PV-based EV charging stations considering real-time price[C] // 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), August 31-September 3, 2014, Beijing, China.

[2] United States Environmental Protection Agency. Greenhouse gas emissions. Sources of greenhouse gas emissions[EB/OL]. www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions.

[3] SUN S, YANG Q, YAN W. Optimal temporal-spatial PEV charging scheduling in active power distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 379-388. DOI: 10.1186/s41601-017-0065-x.

[4] CHRISTENSEN T B, WELLS P, CIPCIGAN L. Can innovative business models overcome resistance to electric vehicles? Better place and battery electric cars in Denmark[J]. Energy Policy, 2012, 48: 498-505.

[5] 新浪财经. 工信部回应燃油车退出时间表: 有条件地区设燃油车禁行区试点[EB/OL]. [2019-08-22]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2019-08-22/doc-ihytcitn1021796.shtml>.

[6] 周天沛, 孙伟. 基于充电设备利用率的电动汽车充电电路多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 115-123.

ZHOU Tianpei, SUN Wei. Multi-objective optimal scheduling of electric vehicles for charging route based on utilization rate of charging device[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 115-123.

- [7] 侯慧, 徐焘, 柯贤彬, 等. 电动汽车快充对配电网的风险研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 87-93.
HOU Hui, XU Tao, KE Xianbin, et al. Research on risks of electric vehicle charging to distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 87-93.
- [8] SADEGHI-BARZANI P, RAJABI-GHAHNAVIEH A, KAZEMI-KAREGAR H. Optimal fast charging station placing and sizing[J]. Applied Energy, 2014, 125: 289-299.
- [9] 黄飞腾, 翁国庆, 南余荣, 等. 基于改进云自适应粒子群的多DG配电网EV充电站优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 514-525, 682.
HUANG Feiteng, WENG Guoqing, NAN Yurong, et al. Optimization of electric vehicle charging stations based on improved cloud adaptive particle swarm in distribution network with multiple DG[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 514-525, 682.
- [10] 黄小庆, 杨夯, 陈颀, 等. 基于LCC和量子遗传算法的电动汽车充电站优化规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 176-182.
HUANG Xiaoqing, YANG Hang, CHEN Jie, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations based on life cycle cost and quantum genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 176-182.
- [11] 艾欣, 李一铮, 王坤宇, 等. 基于混沌模拟退火粒子群优化算法的电动汽车充电站选址与定容[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 9-14.
AI Xin, LI Yizheng, WANG Kunyu, et al. Locating and sizing of electric vehicle charging station based on chaotic simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 9-14.
- [12] 赵书强, 李志伟, 党磊. 基于城市交通网络信息的电动汽车充电站最优选址和定容[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 8-15, 23.
ZHAO Shuqiang, LI Zhiwei, DANG Lei. Optimal EV charging station siting and sizing based on urban traffic network information[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 8-15, 23.
- [13] 徐青山, 蔡婷婷, 刘瑜俊, 等. 考虑驾驶人行为习惯及出行链的电动汽车充电站站址规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 59-65, 77.
XU Qingshan, CAI Tingting, LIU Yujun, et al. Location planning of charging stations for electric vehicles based on drivers' behaviours and travel chain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 59-65, 77.
- [14] ANDRENACCI N, RAGONA R, VALENTI G. A demand-side approach to the optimal deployment of electric vehicle charging stations in metropolitan areas[J]. Applied Energy, 2016, 182: 39-46.
- [15] 董晓红, 穆云飞, 于力, 等. 考虑配网潮流约束的高速公路快速充电站校正规划方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 124-131.
DONG Xiaohong, MU Yunfei, YU Li, et al. Freeway FCS planning and correction considering power-flow constraints of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 124-131.
- [16] 李琳玮, 宁光涛, 俞悦, 等. 基于交通信息的多类型电动汽车综合充电需求研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 191-199.
LI Linwei, NING Guangtao, YU Yue, et al. Comprehensive charging demand of multitype electric vehicles based on traffic information[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 191-199.
- [17] 吴春阳, 黎灿兵, 杜力, 等. 电动汽车充电设施规划方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 36-39, 45.
WU Chunyang, LI Canbing, DU Li, et al. A method for electric vehicle charging infrastructure planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 36-39, 45.
- [18] WANG S, DONG Z Y, LUO F, et al. Stochastic collaborative planning of electric vehicle charging stations and power distribution system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(1): 321-331.
- [19] 所丽, 向驰, 唐巍, 等. 均衡不同主体利益的集中型充电站多目标二层规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 100-107.
SUO Li, XIANG Chi, TANG Wei, et al. Multi-objective bi-level programming of centralized charging station considering benefits balance for different subjects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 100-107.
- [20] WANG G, XU Z, WEN F, et al. Traffic-constrained multiobjective planning of electric-vehicle charging stations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2363-2372.
- [21] 刘洪, 李荣, 葛少云, 等. 考虑出租车随机行为特性及路网行程时间可靠性的充电站多目标规划[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 433-441.
LIU Hong, LI Rong, GE Shaoyun, et al. Multiple objective planning for electric taxi charging station considering random-probability behavioral trait of taxi and travel time reliability[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 433-441.
- [22] LIU Y, XIANG Y, TAN Y, et al. Optimal allocation model for EV charging stations coordinating investor and user benefits[J]. IEEE Access, 2018, 6: 36039-36049.

- [23] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 12-21.
CHENG Shan, WU Siyuan, SUN Weibin. Optimal planning of charging stations for electric vehicles considering voltage stability of distribution system and the quality of service[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 12-21.
- [24] 徐荆州, 葛磊蛟, 杨昌海, 等. 考虑用户便捷性和配网接纳能力的EV充电站选址定容[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 112-119, 142.
XU Jingzhou, GE Leijiao, YANG Changhai, et al. Location and capacity selection method of EV charging stations considering transportation convenience and distribution network capacity[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 112-119, 142.
- [25] WU D, ALIPRANTIS D C, GKRTZA K. Electric energy and power consumption by light-duty plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 738-746.
- [26] U.S. Department of Transportation. National household travel survey (NHTS)[EB/OL]. [2018-01-01]. <http://nhts.ornl.gov/download.shtml>.
- [27] STEEN D, TUAN LA, CARLSON O, et al. Assessment of electric vehicle charging scenarios based on demographical data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1457-1468.
- [28] GRAHN P, MUNKHAMMAR J, WIDEN J, et al. PHEV home-charging model based on residential activity patterns[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2507-2515.
- [29] 李丹奇, 郑建勇, 史明明, 等. 电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 75-83.
LI Danqi, ZHENG Jianyong, SHI Mingming, et al. Prediction of time and space distribution of electric vehicle charging load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 75-83.
- [30] 杨冰, 王丽芳, 廖承林. 大规模电动汽车充电需求及影响因素[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 22-27, 35.
YANG Bing, WANG Lifang, LIAO Chenglin. Research on power-charging demand of large-scale electric vehicles and its impacting factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 22-27, 35.
- [31] EU Merge Project. (2010). Deliverable 2.1: modelling electric storage devices for electric vehicles[EB/OL]. http://www.evmerge.eu/imagesstories/uploads/MERGE_WP2_D2.1.pdf.
- [32] 李哲. 纯电动汽车磷酸铁锂电池性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
LI Zhe. Characterization research of LiFePO₄ batteries for application on pure electric vehicles[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [33] MU Y, WU J, JENKINS N, et al. A spatial-temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicles[J]. Applied Energy, 2014, 114: 456-465.
- [34] 高赐威, 张亮, 薛飞, 等. 集中型充电站容量规划模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 27-34, 215.
GAO Ciwei, ZHANG Liang, XUE Fei, et al. Study on capacity and site planning of large-scale centralized charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 27-34, 215.
- [35] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [36] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 电动汽车充电基础设施发展指南[EB/OL]. [2015-11-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/W020190905506446446683.pdf>.
National Development and Reform Commission, People's Republic of China. A guideline of electric vehicle charging infrastructure development[EB/OL]. [2015-11-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/W020190905506446446683.pdf>.
- [37] 刘自发, 张伟, 王泽黎. 基于量子粒子群优化算法的城市电动汽车充电站优化布局[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 39-45, 20.
LIU Zifa, ZHANG Wei, WANG Zeli. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on quantum PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 39-45, 20.
- [38] 代倩, 段善旭, 蔡涛, 等. 电动汽车充换电站的成本效益模型及敏感性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 41-47.
DAI Qian, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Cost-benefit model and its sensitivity analysis for battery charging and swapping station for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 41-47.

收稿日期: 2020-05-24; 修回日期: 2020-06-30

作者简介:

臧海祥(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统规划与运行分析、新能源发电技术等; E-mail: zanghaixiang@hhu.edu.cn

舒宇心(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车充电站规划。E-mail: syx@hhu.edu.cn

(编辑 魏小丽)