

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231537

# 考虑截获交通流量与充电行驶距离的电动汽车充电网络规划

张新松, 朱晨旭, 李大祥, 罗来武

(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226001)

**摘要:** 为优化电动汽车充电网络布局, 提高充电服务能力与效率, 提出了同时考虑截获交通流量与充电行驶距离的充电网络规划模型。电动汽车动力电池初始荷电状态的不确定性导致充电网络截获交通流量具有随机特性, 采用蒙特卡洛模拟方法对其概率特性进行了分析。为提升充电网络在任何情况下的充电服务能力, 所提模型以充电网络截获交通流量最小值最大为优化目标之一。为提升充电服务效率, 模型另一个优化目标为平均充电行驶距离最短。此外, 模型考虑了充电行驶距离机会约束及充电站建设数目约束, 采用非支配遗传算法对所提模型进行求解, 获得 Pareto 最优解集。最后, 以 25 节点交通网络为例进行了仿真实验, 验证了所提方法的有效性。并基于仿真结果, 分析了机会约束置信度与充电站数目对规划结果的影响。

**关键词:** 电动汽车; 截获交通流量; 充电行驶距离; 充电网络规划; 非支配遗传算法

## Electric vehicle charging network planning considering captured traffic flows and charging driving distance

ZHANG Xinsong, ZHU Chenxu, LI Daxiang, LUO Laiwu

(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226001, China)

**Abstract:** To optimize the layout of an electric vehicle charging network, and thus improving charging service capacity and efficiency, this paper develops a charging network planning model that considers both captured traffic flows and charging driving distance. The uncertainty of the initial state of charge of the electric vehicle power battery leads to stochastic characteristics of the captured traffic flows of the charging network. The Monte Carlo simulation method is used to analyze its probability characteristics. To improve the charging service capability in any situation, the model takes the maximum value of minimum traffic flows captured by the charging network as one of the optimization objectives. To upgrade charging efficiency, another optimization goal of the model is to minimize the average charging driving distance. In addition, the model considers the opportunity constraints of charging driving distance and the number of charging station construction constraints, and uses a non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) to analyze the proposed model to obtain the Pareto optimal solution set. Finally, a simulation experiment is conducted on a 25-node transportation network to verify the effectiveness of the proposed method. Based on the results, the impact of chance constrained confidence and the number of charging stations on the solutions is analyzed.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377104).

**Key words:** electric vehicle; captured traffic flows; charging driving distance; charging network planning; nondominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II)

## 0 引言

“双碳”背景下, 发展电动汽车(electric vehicle, EV)是应对气候变化、促进能源变革、实现可持续

发展的重要战略举措之一<sup>[1-2]</sup>。近年来, 随着动力电池技术的不断进步, 再加上国家政策的大力推动, EV 在我国呈现加速发展趋势, 截至 2023 年 6 月底, 我国 EV 保有量达 1620 万辆<sup>[3]</sup>。充电网络是支撑 EV 发展的重要基础设施, 然而, 充电站布局仍存在一定滞后, 成为制约 EV 可持续发展的主要障碍之一<sup>[4-7]</sup>, 因此有必要对充电网络规划问题进行研究,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52377104); 江苏省高校基础科学(自然科学)研究项目资助(22KJA470006)

通过优化充电站布局提升充电服务能力与效率, 激发消费者的 EV 购买意愿, 支撑 EV 产业可持续发展。

作为大容量负荷, 充电站大规模接入可能会导致节点电压偏差超标、线路过载等一系列问题, 甚至危及系统安全运行<sup>[8]</sup>。因此, 部分研究工作主要从配电系统角度进行充电网络规划, 即通过优化充电站接入位置和容量改善配电系统运行工况<sup>[9-11]</sup>。为减少 EV 充电对配电系统的不利影响, 文献[12]提出了考虑配电系统负荷波动和电压偏移的 EV 充电站优化规划模型, 并采用遗传算法与 Voronoi 图联合求解, 获得充电站选址定容结果。文献[13]在概率潮流分析的基础上, 提出了考虑分布式光伏出力与充电负荷随机特性的充电网络机会约束规划方法, 通过优化充电站位置和容量, 最小化配电系统网损。实际上, 作为支撑 EV 可持续发展的重要基础设施, 充电站的首要任务为提供充电服务, 故规划中应着重考虑其公共服务属性, 而文献[9,12-13]在研究中对此考虑的不够充分, 具有一定局限性。

充电网络规划同时涉及交通领域与电力领域, 因此, 规划中理应同时考虑来自交通系统与配电系统的需求。近年来, 我国 EV 保有量快速增长, 但在某些地区, 充电网络建设相对滞后、充电站布点少, 很少出现多座充电站集中在某一区域并接入同一配电系统的情况, 对配电系统的影响尚不突出。因此, 本文在研究中着重关注交通系统的需求, 而暂时忽略了配电系统的需求。

目前, 已有大量文献基于流量类模型<sup>[14-18]</sup>或空间类模型<sup>[19-23]</sup>从公共服务属性出发进行充电网络规划。文献[14]以上海市嘉定区为例, 从车流量截获结果、站点选择等维度横向对比了基于流量需求的中继选址模型(flow refueling location model, FRLM)与灵活重组模型(flexible reformulation of FRLM, FRFRLM), 为流量类模型的发展提供了方向。文献[15]在假定 EV 最大行驶里程服从正态分布的基础上, 提出基于“Benders-and-Price”方法的充电站选址优化模型, 并考虑了交通流量分布的不确定性和车主偏离最短路径的可能性。针对电气化交通网络中 EV 充电需求的不确定性, 文献[16]建立的规划模型揭示了网络中充电需求、电力需求与车流量时空分布之间的内在关系。文献[17]在综合考虑充电需求、充电网络截获交通流量以及配电系统网损等的基础上, 提出了配电系统-充电网络协调规划模型。文献[18]研究了充电站最优选址问题, 并在研究中考虑了充电需求的动态随机特性。

不同于基于流量的充电网络规划方法, 文献[19]从空间距离角度出发, 结合北京充电网络规划

实例, 对 P-median 模型、集覆盖模型(set converting model, SCM)与最大覆盖模型(maximal converting location model, MCLM)进行了对比分析, 结果表明: P-median 模型能考虑充电需求点至充电站的行驶距离, 与其他两种模型相比, 更具优势。实际上, 由于交通拥堵等因素, 车主并不总是驶向距离最近的充电站充电, 因此, 文献[20]在 P-median 模型中引入“备份服务设施”概念, 以更好地适应拥堵环境下产生的充电需求。考虑到传统 P-median 模型以单一效率导向为核心, 忽略了充电站服务能力, 文献[21]建立了考虑出行效率和服务能力的多因子约束 P 中值模型, 能够在一定程度上提升用户充电便捷性。在充分考虑用户充电选择偏好的基础上, 文献[22]提出了一种双目标 EV 网络规划模型, 在满足需求、距离、容量等约束条件下, 分析了充电网络建设成本和充电覆盖范围之间的关系, 给出了最优规划方案。

基于流量类模型的充电网络规划方法可显著提升充电网络整体服务能力, 并可考虑 EV 行驶途中产生的充电需求, 但无法考虑服务效率, 即无法考虑充电行驶距离, 具有一定的局限性。与之不同的是, 基于空间类模型的充电网络规划方法可充分考虑充电服务效率, 但无法计及整体服务能力与 EV 行驶途中的充电需求<sup>[23]</sup>, 同样具有一定的局限性。

为弥补单一考虑交通流量或充电行驶距离的充电网络规划方法的不足, 本文提出了同时考虑截获交通流量与充电行驶距离的多目标充电网络规划模型。在考虑 EV 动力电池初始荷电状态(state of charge, SOC)不确定性的前提下, 采用蒙特卡洛模拟(Monte Carlo simulation, MCS)方法研究截获车流量的概率特性。为提升充电网络在任何情况下的充电服务能力, 充电网络规划模型以截获交通流量最小值最大为优化目标。为提升充电服务效率, 模型另一个优化目标为平均充电行驶距离最短。此外, 模型考虑了充电行驶距离机会约束及充电站建设数目约束, 采用非支配遗传算法<sup>[24]</sup>(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)对所提模型进行求解, 获得 Pareto 最优解集。最后, 以 25 节点交通网络为例进行了仿真实验, 验证了本文所提方法的有效性, 并基于仿真结果, 分析了机会约束置信度与充电站建设数目对规划结果的影响。

## 1 充电网络截获交通流量的概率特性分析

截获交通流量是衡量充电网络充电服务能力的重要指标。EV 出发时, 动力电池初始 SOC 具有不确定性, 因此, 初始可行驶里程并非固定不变, 也

具有不确定性。EV 初始可行驶里程将显著影响充电网络截获的交通流量, 本文采用 MCS 方法对充电网络截获交通流量的概率特性进行仿真分析。

### 1.1 充电网络截获交通流量计算

采用 FRLM 计算充电网络截获的交通流量  $F_c$ , 并用其量化充电网络的充电服务能力<sup>[14]</sup>, 即

$$F_c = \sum_{q \in \Omega_q} f_q y_q \quad (1)$$

式中:  $\Omega_q$  为交通网络中的最短路径集合, 可通过 Floyd 算法求取<sup>[25]</sup>;  $q$  为最短路径索引;  $y_q$  为表征路径  $q$  交通流量能否被充电网络截获的二进制变量, “1”表示能截获, “0”表示无法截获, 确定方法可见文献[14], 此处不再赘述;  $f_q$  为路径  $q$  上的交通流量, 可通过重力空间模型给出, 即

$$f_q = \frac{W_o W_D}{1.5 d_q}, q \in \Omega_q \quad (2)$$

式中:  $W_o$  为路径  $q$  起点的权重;  $W_D$  为路径  $q$  终点的权重;  $d_q$  为路径  $q$  的长度。从式(2)可以看出: 各路径起点、终点的权系数是决定路径车流量大小的关键因素。一般来讲, 交通网络中的重要节点(如车站、商业中心以及大型居民区等)的权系数较大, 因此, 以这些重要节点为起点/终点的路径车流量也比较大。

### 1.2 考虑 EV 初始可行驶里程不确定性的充电网络截获交通流量模拟

文献[26]计算充电网络截获交通流量时, 假定 EV 初始可行驶里程为确定性数值: 若出发节点建有充电站, 则认为初始可行驶里程为其满充状态下的最大续航里程; 否则, 认为初始可行驶里程为其满充状态下的最大续航里程的一半。这一假设考虑了充电站布点状况、简洁明了, 但未考虑初始可行驶里程的不确定性, 具有一定的局限性。

事实上, EV 出发时动力电池 SOC 的不确定性将导致其初始可行驶里程具有不确定性, 进而引起充电网络截获交通流量的不确定性。因此, 本文采用 MCS 方法对交通网络截获交通流量的随机特性进行模拟分析, 为充电网络规划提供决策依据<sup>[27-28]</sup>, 模拟流程如图 1 所示。

图 1 中, 采用 MCS 方法分析 EV 初始行驶里程不确定情况下的充电网络截获交通流量, 具体步骤如下所述。

步骤 1: 设定蒙特卡洛最大模拟次数  $S_{max}$ , 并利用 Floyd 算法生成最短路径集合  $\Omega_q$ , 计算各最短路径上的交通流量。

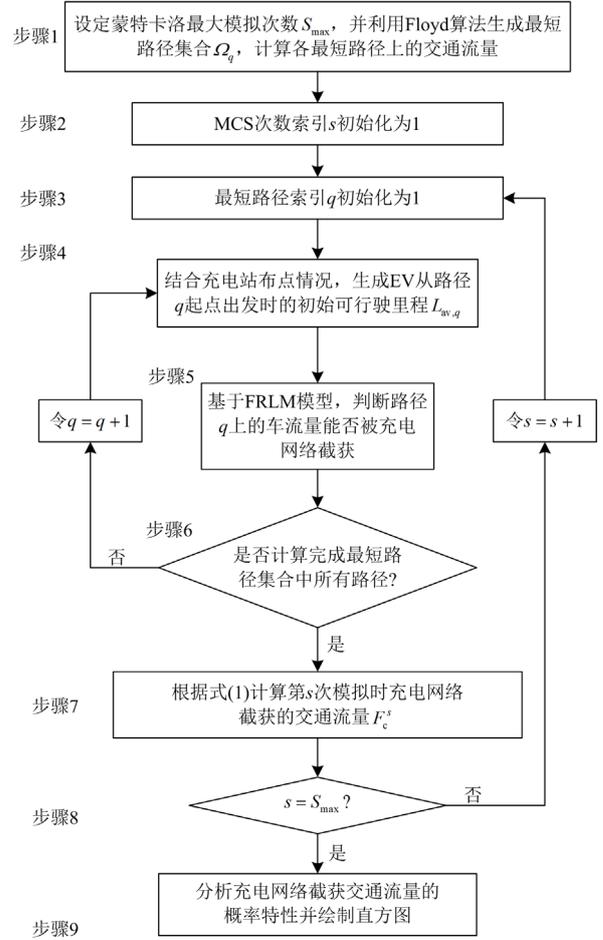


图 1 MCS 过程框图

Fig. 1 MCS process block diagram

步骤 2: MCS 次数索引  $s$  初始化为 1。

步骤 3: 最短路径索引  $q$  初始化为 1。

步骤 4: 结合充电站布点情况, 生成 EV 从路径  $q$  起点出发时的初始可行驶里程  $L_{av,q}$ 。若路径  $q$  起点建有充电站, 则 EV 初始可行驶里程  $L_{av,q}$  为其满充状态下的最大可行驶里程  $L_{max}$ ; 若该节点未建设充电站, 则  $L_{av,q}$  初始化为服从均值为  $L_{max}/2$ 、标准差为  $L_{max}/6$  的正态分布随机数  $L_{sim}$ <sup>[15]</sup>。

步骤 5: 基于 FRLM 模型, 采用文献[14]提出的方法判断路径  $q$  上的交通流量能否被充电网络截获。

步骤 6: 判断是否分析完最短路径集合中所有路径, 若是, 执行步骤 7; 否则, 令  $q = q + 1$ , 并跳转至步骤 4。

步骤 7: 根据式(1)计算第  $s$  次模拟时充电网络截获的交通流量  $F_c^s$ 。

步骤 8: 判断模拟次数索引  $s$  是否等于蒙特卡洛最大模拟次数  $S_{max}$ 。若是, 执行步骤 9; 否则,

令  $s = s + 1$ , 并跳转至步骤 3。

步骤 9: 分析充电网络截获交通流量的概率特性并绘制直方图。

### 1.3 充电网络截获交通流量的概率特性分析

基于图 2 给出的交通系统, 对 EV 初始行驶里程不确定情况下的充电网络截获交通流量进行分析。该交通系统由 25 个交通节点、43 条道路组成, 各交通节点权重系数如表 1 所示。此外, 该交通系统中建有 4 座充电站, 分别位于交通节点 8、12、14 与 20。

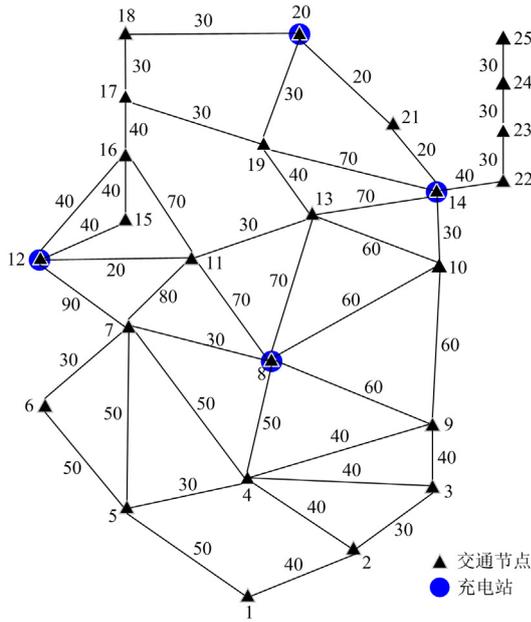


图 2 25 节点交通系统及充电网络

Fig. 2 The 25-node transportation system and charging network

表 1 25 节点交通系统各交通节点权重系数

Table 1 Weight coefficient of traffic nodes of 25-node transportation system

节点	权重	节点	权重	节点	权重
1	0.54	10	0.54	19	0.80
2	0.80	11	0.05	20	0.27
3	0.27	12	0.54	21	0.27
4	0.27	13	0.05	22	0.54
5	0.27	14	0.54	23	0.05
6	0.07	15	0.27	24	1.34
7	0.05	16	0.27	25	0.05
8	0.54	17	0.27	—	—
9	0.27	18	1.07	—	—

目前, 市场主流 EV 最大续航里程大多介于 300~500 km, 因此, EV 满充状态下的最大续航里程  $L_{\max}$  设定为 400 km, 随机数  $L_{\text{sim}}$  服从均值为 200、均方差为 100/3 的正态分布, 蒙特卡洛最大模

拟次数  $S_{\max}$  设定为 1000。

图 3 给出 EV 初始行驶里程不确定情况下充电网络截获交通流量的概率直方图。

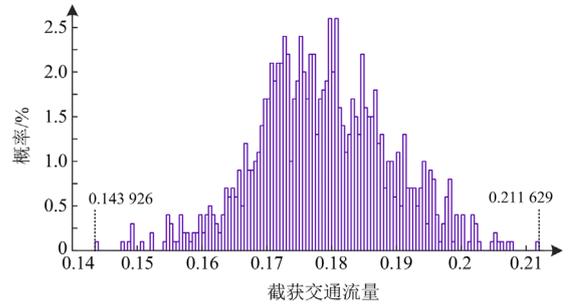


图 3 充电网络截获交通流量概率直方图

Fig. 3 Probability histogram of traffic flow captured by charging network

由图 3 可以看出: EV 初始行驶里程不确定的情况下, 充电网络截获交通流量呈现较强的不确定性, 最小截获交通流量与最大截获交通流量分别为 0.143 926 与 0.211 629, 两者之间相差 0.067 703。为给出更为合理的充电网络规划方案, 充电网络规划中应考虑 EV 初始行驶里程的不确定性导致的截获交通流量的不确定性。

## 2 充电行驶距离计算

以图 4 为例说明 EV 产生充电需求后, 行驶至距离最近的充电站的充电行驶距离。

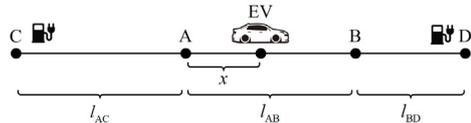


图 4 EV 充电行驶距离计算示意图

Fig. 4 Sketch map for calculating the charging distance of EVs

图 4 中: A、B 为交通网络中的节点, AB 表示交通网络中的道路, 长度为  $l_{AB}$ ; 假定距节点 A 最近的充电站位于节点 C, AC 表示节点 A 至节点 C 的最短路径, 长度为  $l_{AC}$ ; 假定距节点 B 最近的充电站位于节点 D, BD 表示节点 B 至节点 D 的最短路径, 长度为  $l_{BD}$ 。道路 AB 上, 某台 EV 距节点 A 的距离为  $x(0 \leq x \leq l_{AB})$ , 若其产生充电需求, 有以下两个待选充电方案:

1) 途经交通节点 A, 到达建在交通节点 C 的充电站充电, 充电行驶距离为  $x + l_{AC}$ ;

2) 途经交通节点 B, 到达建在交通节点 D 的充电站充电, 充电行驶距离为  $l_{AB} - x + l_{BD}$ 。

显然, 车主会选择距离最近的充电站进行充电,

充电行驶距离  $f(x)$  与交通网络拓扑结构、充电站建设位置及 EV 所处位置等诸多因素有关, 具有随机特性。

$$f(x) = \min[x + l_{AC}, l_{AB} - x + l_{BD}], 0 \leq x \leq l_{AB} \quad (3)$$

### 3 充电网络规划模型

本文从社会利益最大化角度进行充电网络规划, 即通过优化充电站建设地址, 提高充电网络服务能力与效率, 在提升车主充电便利性的同时, 支撑 EV 产业可持续发展。

#### 3.1 优化目标

##### 1) 优化目标 1

如图 3 所示, 考虑 EV 初始可行驶里程的不确定性后, 充电网络截获的交通流量呈现较强的不确定性。此时, 为提升充电网络在任何情况下的充电服务能力, 参照鲁棒优化思想, 本文所提规划模型的第 1 个优化目标为最大化充电网络截获交通流量的最小值。

$$\max F_{\min} = \min\{F_c^s\} \quad (4)$$

式中,  $F_{\min}$  为 MCS 给出的截获交通流量最小值。

##### 2) 优化目标 2

对充电网络来说, EV 产生充电需求后的行驶距离是衡量其服务效率的重要指标。因此, 本文所提规划模型的第 2 个优化目标为最小化 EV 平均充电行驶距离。

$$\min D_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i \in \Omega_R} T_i d_{\text{av},i}}{\sum_{i \in \Omega_R} T_i} \quad (5)$$

式中:  $D_{\text{ave}}$  为交通网络中所有 EV 行驶至最近充电站的平均距离;  $i$  为道路索引;  $\Omega_R$  为交通网络中的道路集合;  $T_i$  为道路  $i$  的交通流量, 由交通网络最短路径集合  $\Omega_q$  中经过该道路的最短路径交通流量求和而得;  $d_{\text{av},i}$  为道路  $i$  上行驶的 EV 平均充电行驶距离。

$$d_{\text{av},i} = \int_0^{l_{d,i}} \frac{f_i(x)}{l_{d,i}} dx \quad (6)$$

式中:  $l_{d,i}$  为道路  $i$  的长度;  $x$  为待充电的 EV 距离道路  $i$  端点的距离, 为随机变量, 本文假定 EV 在区间  $[0, l_{d,i}]$  上服从均匀分布;  $f_i(x)$  为道路  $i$  上 EV 的充电行驶距离, 与交通网络拓扑结构、充电站建设状况以及 EV 距离道路端点的距离  $x$  有关。

#### 3.2 约束条件

##### 1) 充电行驶距离机会约束

对充电网络来说, EV 产生充电需求后的充电行驶距离越短, 充电服务效率越高。交通网络中, 充电行驶距离是随机变量, 严格要求充电行驶距离小于某一阈值可能会导致不合理的规划结果。因此, 本文将充电行驶距离约束建模为机会约束<sup>[29]</sup>。

$$P_r\{\varphi_{\text{d-char}} \leq d_{\text{cha-lim}}\} \geq \beta \quad (7)$$

式中:  $P_r\{\}$  表示括号中事件发生的概率;  $\varphi_{\text{d-char}}$  为 EV 随机充电行驶距离;  $d_{\text{cha-lim}}$  为充电行驶里程阈值, 取值越小, 充电服务效率越高;  $\beta$  为机会约束置信度, 取值越大, 充电服务效率越高。

充电行驶距离  $\varphi_{\text{d-char}}$  小于给定里程阈值  $d_{\text{cha-lim}}$  的概率可表示为

$$P_r\{\varphi_{\text{d-char}} \leq d_{\text{cha-lim}}\} = \frac{\sum_{i \in \Omega_k} T_i p_i}{\sum_{i \in \Omega_k} T_i} \quad (8)$$

式中,  $p_i$  为道路  $i$  上 EV 充电行驶距离小于里程阈值的概率。

$$p_i = \int_0^{l_{d,i}} \frac{g_i(x)}{l_{d,i}} dx \quad (9)$$

式中,  $g_i(x)$  为判断道路  $i$  上距端点  $x$  处 EV 的充电行驶距离是否小于里程阈值的辅助函数, 有“0”和“1”两种取值。

$$g_i(x) = \begin{cases} 1, & f_i(x) \leq d_{\text{cha-lim}} \\ 0, & f_i(x) > d_{\text{cha-lim}} \end{cases} \quad 0 \leq x \leq l_{d,i} \quad (10)$$

##### 2) 充电站建设数目约束

充电网络规划中, 充电站网络建设规模由市政规划、EV 渗透率、拟投资预算以及配电系统现状等多种因素共同决定, 因此, 充电网络规划模型存在充电站建设数目约束, 如式(11)所示。

$$M = \sum_{j=1}^N y_j \quad (11)$$

式中:  $M$  为充电站建设数目;  $N$  为交通网络中充电站候选地址数;  $y_j$  为表征是否在候选地址  $j$  建设充电站的二进制优化变量, “1”表示建设充电站, “0”表示不建设充电站。

## 4 模型求解

本文提出的充电网络规划模型为复杂约束下的非线性多目标整数规划问题, 很难给出优化目标与优化变量间的解析表达式, 求解较为困难。本文采用 NSGA-II 求解所提模型<sup>[30]</sup>。

#### 4.1 算法流程

算法流程如图 5 所示。

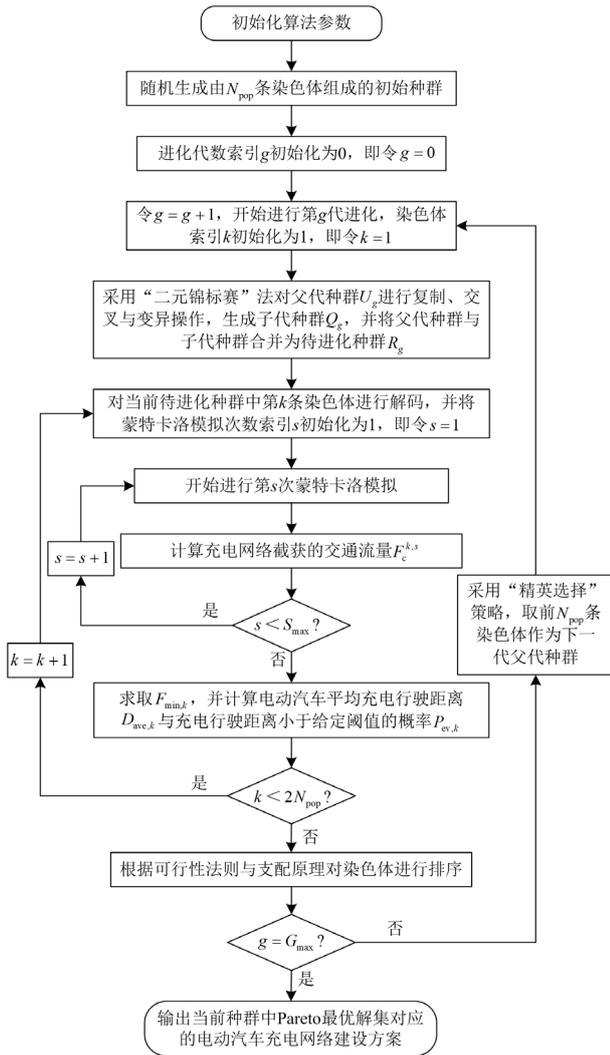


图5 基于 NSGA-II 的求解流程框图

Fig. 5 Solution flowchart based on NSGA-II

图5中： $N_{pop}$  为种群规模； $g$  为进化代数索引； $G_{max}$  为给定的 NSGA-II 最大进化代数，一旦进化至最大进化代数，便认为算法收敛； $k$  为待进化种群  $R_g$  中的染色体索引。NSGA-II 中，每条染色体表示一个充电网络规划方案。 $D_{ave,k}$ 、 $P_{ev,k}$  以及  $F_{min,k}$  分别为按染色体  $k$  对应的方案建设充电网络时的 EV 平均充电行驶距离、EV 充电行驶距离小于给定里程阈值的概率以及充电网络截获交通流量的最小值。

#### 4.2 详细求解过程

利用 NSGA-II 求解本文所提充电网络规划模型的具体过程如下所述。

##### 1) 交通网络参数计算

首先，利用 Floyd 算法确定交通网络最短路径集  $\Omega_q$  及各最短路径经过的道路与交通节点；接着，

按式(2)计算各最短路径交通流量  $f_q (q \in \Omega_q)$ ，并计算交通网络中各道路的交通流量  $T_i (i \in \Omega_R)$ 。

##### 2) 染色体编码与种群初始化

采用二进制编码对充电网络规划模型进行编码，即采用长度为  $N$  的二进制码串表示 NSGA-II 的染色体，具体如图6所示。

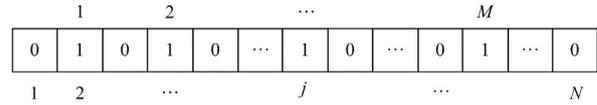


图6 染色体编码方案

Fig. 6 Chromosome encoding scheme

图6中，码位  $j$  表征是否在候选地址  $j$  建设充电站，有“0”、“1”两种取值：“1”表示在该候选地址建设充电站；反之，则表示未在该候选地址建设充电站。为满足式(11)给出的充电站建设数目约束，图6中，有且仅有  $M$  个二进制码取值为“1”。

为满足上述要求：首先，将初始种群中各染色体所有码位赋值为“0”，接着，随机在每条染色体中挑选  $M$  个码位，将其赋值修改为“1”，进而生成初始父代种群。

##### 3) 生成待进化种群

依据染色体在种群中的排序，采用“二元锦标赛”法对父代种群  $U_g$  进行复制、交叉与变异操作，生成同等规模的子代种群  $Q_g$ ，并与父代种群  $U_g$  合并为待进化种群  $R_g (R_g = U_g \cup Q_g)$ 。显然，待进化种群  $R_g$  的种群数量为  $2N_{pop}$ 。

为确保交叉、变异后的染色体满足式(11)给出的充电站建设数目约束，本文按文献[31]提出的交叉、变异算子对染色体进行交叉与变异操作。

##### 4) “精英选择”策略

基于可行性法则与支配原理对待进化种群  $R_g$  中所有染色体进行排序，具体如下所述。

首先，根据是否满足式(7)给出的机会约束，将待进化种群  $R_g$  中的所有染色体归入可行解集与非可行解集，可行解集中的所有染色体排序居于非可行解集中所有染色体之前。

其次，根据支配原理对可行解集中的所有染色体进行分层，具体方法如文献[32]所述，此处不再赘述。染色体所属层级越低，排序越靠前，相同层级中的染色体，虚拟适应度越大，排序越靠前。虚拟适应度计算方法如图7所示。

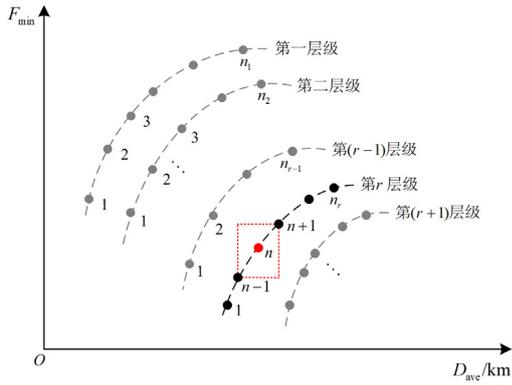


图 7 染色体虚拟适应度计算

Fig. 7 Virtual fitness calculation for chromosomes

图 7 中,第  $r$  层、第  $n$  个染色体的虚拟适应度  $I_{r,n}$  可按式(12)计算。

$$I_{r,n} = \begin{cases} (F_{\min}^{r,n+1} - F_{\min}^{r,n-1}) + (D_{\text{ave}}^{r,n+1} - D_{\text{ave}}^{r,n-1}), & 1 < n < n_r \\ K & n = 1, n = n_r \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $n_r$  为第  $r$  层级染色体数目;  $F_{\min}^{r,n+1}$ 、 $F_{\min}^{r,n-1}$  分别为第  $r$  层的第  $n+1$  条及第  $n-1$  条染色体对应的充电网络截获交通流量最小值,  $D_{\text{ave}}^{r,n+1}$ 、 $D_{\text{ave}}^{r,n-1}$  则为其对应的平均充电行驶距离;  $K$  为给定的一个大数。

接着,根据约束违反程度对非可行解集中各染色体进行排序,约束违反程度越小的染色体排序越靠前。染色体约束违反程度  $C_v$  表达式如式(13)。

$$C_v = \left| \frac{P_{\text{ev}}}{\beta} - 1 \right| \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{ev}}$  为该染色体对应规划方案下充电行驶距离小于给定里程阈值的概率;  $\beta$  为充电行驶距离机会约束的置信度。

最后,采用“精英选择”策略,即根据待进化种群  $R_g$  中染色体排序,取前  $N_{\text{pop}}$  条染色体作为新的父代种群。

### 5) 输出 Pareto 最优解集

当进化至最大进化代数时,将可行解集中第一层级的染色体作为 EV 充电网络规划模型的 Pareto 最优解集输出,结束算法流程。

## 5 算例分析

为验证本文所提模型与求解方法的有效性,本节以 25 节点交通系统为例进行仿真计算,该系统拓扑结构以及节点权重系数分别如图 2 与表 1 所示。

### 5.1 算例介绍

图 2 所示 25 节点交通系统中,所有交通节点均

为充电站候选场址,拟建造充电站数目暂定为 4 座, EV 最大续航里程为 400 km, EV 从未建有充电站的交通节点出发时,其随机初始可行驶里程服从均值为 200、均方差为 100/3 的正态分布;蒙特卡洛最大模拟次数  $S_{\text{max}}$  设定为 1000 次;充电行驶里程阈值  $d_{\text{cha-lim}}$  设定为 80 km;充电行驶距离机会约束的置信度  $\beta$  设定为 95%。

采用 NSGA-II 对充电网络规划模型进行求解时,算法参数设置如下:种群规模  $N_{\text{pop}}$  为 100,交叉率  $P_c$  为 0.5,变异率  $P_m$  为 0.2,最大进化代数  $G_{\text{max}}$  为 150。

### 5.2 基于 NSGA-II 的规划模型求解结果

采用本文第 4 节描述的方法对充电网络规划模型进行求解。此时, Pareto 最优解集中仅包含单一解,即分别在节点 4、14、19 与 23 各建设充电站 1 座。在该充电网络建设方案下, EV 充电行驶距离概率密度函数、累积概率分布函数分别如图 8 和图 9 所示。平均充电行驶距离  $D_{\text{ave}}$  为 34.08 km;充电行驶距离小于给定里程阈值 80 km 的概率  $P_{\text{ev}}$  为 95.06%,大于置信度 95%,满足式(7)给定的机会约束。

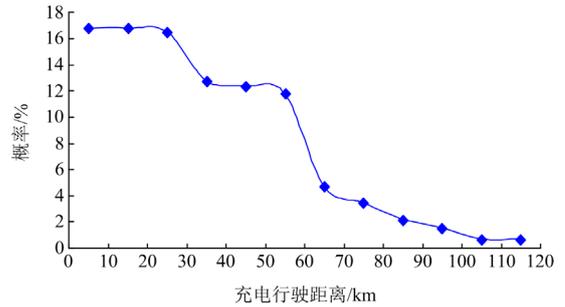


图 8 充电行驶距离概率密度函数( $M = 4$ 、 $\beta = 95\%$ )

Fig. 8 Probability density function of EV charging driving distance ( $M = 4$  and  $\beta = 95\%$ )

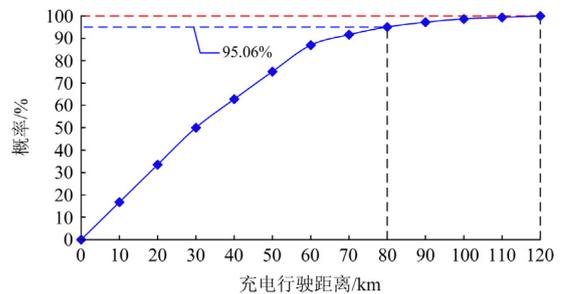


图 9 充电行驶距离累积分布函数( $M = 4$ 、 $\beta = 95\%$ )

Fig. 9 Cumulative distribution function of charging driving distance ( $M = 4$  and  $\beta = 95\%$ )

充电网络截获交通流量的概率直方图如图 10 所示。从图 10 可看出,在考虑 EV 初始可行驶里程

不确定性的情况下, 截获交通流量具有显著的不确定性, 其最小值为 0.167 198。作为对比, 图 3 中的 4 座充电站分别建于交通节点 8、12、14 与 20 时, 截获交通流量最小值仅为 0.143 926。以上分析表明: 本文提出的充电网络规划模型可显著提升充电网络截获交通流量的最小值, 即显著提升充电网络在任何情况下的充电服务能力。

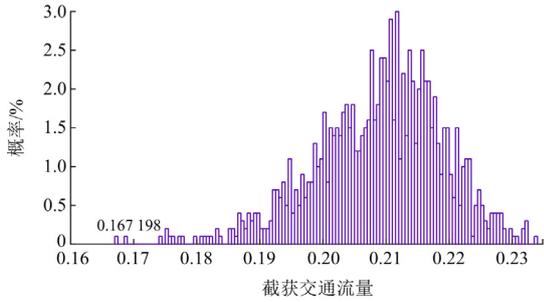


图 10 充电网络截获交通流量概率直方图( $M=4$ 、 $\beta=95\%$ )  
Fig. 10 Probability histogram of traffic flow captured by charging network ( $M=4$  and  $\beta=95\%$ )

### 5.3 机会约束置信度对规划结果的影响

为分析机会约束置信度 $\beta$ 对规划结果的影响, 下文将其由 95%降为 90%, 并在此基础上规划充电网络。此时, 规划结果发生了显著变化, Pareto 最优解集中的解由 1 个提升至 5 个, 如表 2 所示。

表 2 置信度改变后的规划结果( $M=4$ 、 $\beta=90\%$ )

Table 2 Planning results after changing confidence level

( $M=4$  and  $\beta=90\%$ )

规划方案	$D_{ave}/\text{km}$	$F_{min}$	$P_{c\%}/\%$	建设地址
1	33.99	0.166 505	93.31	4、14、17、23
2	34.08	0.167 198	95.06	4、14、19、23
3	36.14	0.168 649	93.44	3、13、14、23
4	36.53	0.172 445	91.04	9、14、19、23
5	37.24	0.175 288	91.79	9、13、14、23

表 2 中, 按平均充电行驶距离  $D_{ave}$  由小到大对 Pareto 最优解集中的 5 个解进行了排序。从表 2 可看出, Pareto 最优解集中所有解均满足式(7)给定的机会约束, 即充电行驶距离小于给定里程阈值 80 km 的概率均大于 90%。Pareto 最优解集中, 5 个解对应的 EV 充电行驶距离概率密度函数、累积概率分布函数及充电网络截获交通流量概率直方图分别如图 11—图 13 所示。

从表 2 与图 11—图 13 可以看出: 解 1 给出的规划方案中, 拟在节点 4、14、17 与 23 各建设充电站 1 座, 此时, 最大充电行驶距离小于 110 km, 平均充电行驶距离缩短至 33.99 km, 但截获交通流量的最小值仅为 0.166 505。如按解 5 给出的规划方案

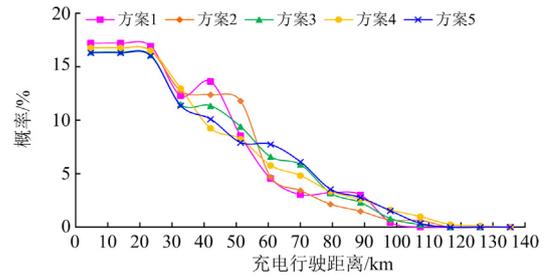


图 11 充电行驶距离概率密度函数(5 个解,  $M=4$ 、 $\beta=90\%$ )  
Fig. 11 Probability density function of charging driving distance (5 solutions,  $M=4$ ,  $\beta=90\%$ )

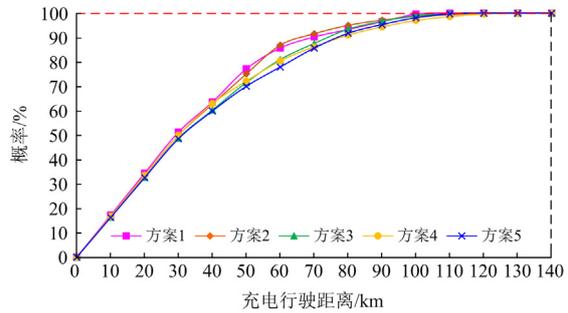


图 12 充电行驶距离累积分布函数(5 个解,  $M=4$ 、 $\beta=90\%$ )  
Fig. 12 Cumulative distribution function of charging driving distance (5 solutions,  $M=4$  and  $\beta=90\%$ )

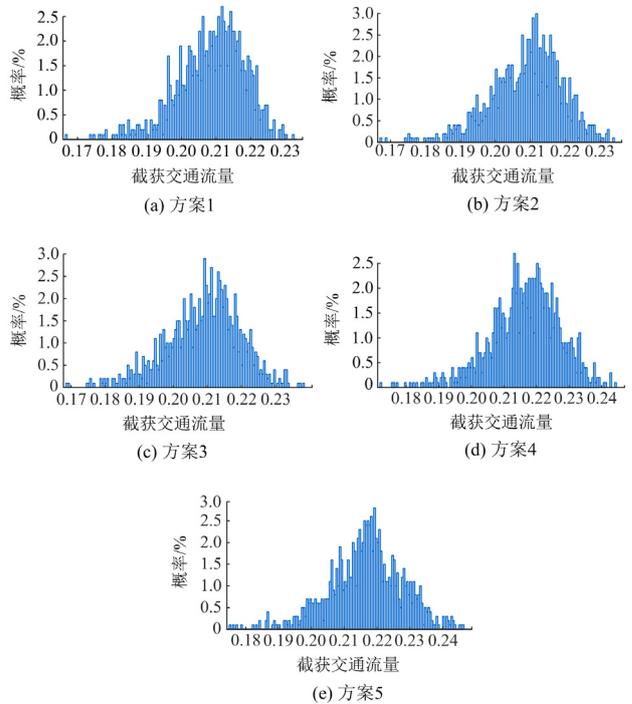


图 13 截获交通流量概率直方图(5 个解,  $M=4$ 、 $\beta=95\%$ )  
Fig. 13 Probability histogram of traffic flow captured by charging network (5 solutions,  $M=4$ ,  $\beta=90\%$ )

建设充电网络(即在节点 9、13、14 与 23 各建设充电站 1 座), 最大充电行驶距离将超过 140 km, 平均充电行驶距离由 33.99 km 增加至 37.24 km, 增加了 9.56%, 不过, 截获交通流量的最小值由 0.166 505 增加至 0.175 288, 同样增加了 5.01%。从以上分析可看出: 充电网络规划模型中的两个规划目标分别为优化充电服务能力与服务效率, 一定程度上互相冲突, 也就是说, 本文将充电网络规划问题建模为多目标优化问题是合理的。实际工程中, 规划人员可综合考虑充电网络的服务能力与服务效率, 从 Pareto 最优解集中挑选最终规划方案。

### 5.4 充电站数目对规划结果的影响

拟建造充电站数目  $M$  是充电网络规划模型中的重要边界条件, 将对规划结果产生显著影响。为此, 本文进行了不同充电站建设数目下的充电网络规划, 结果如图 14、图 15 所示。图 14、图 15 分别给出了不同充电站建设数目下 Pareto 最优解集中的最短平均充电行驶距离与最大的截获交通流量最小值。

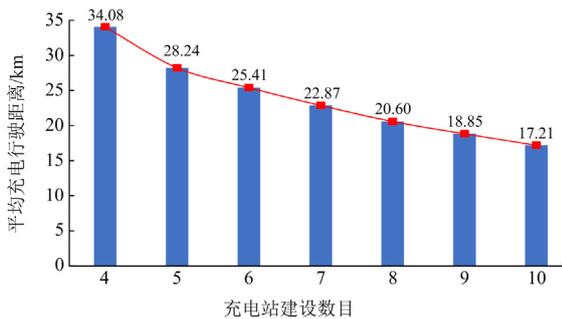


图 14 不同充电站数目下的最短平均充电行驶距离  
Fig. 14 Minimum average charging driving distance with different number of charging stations

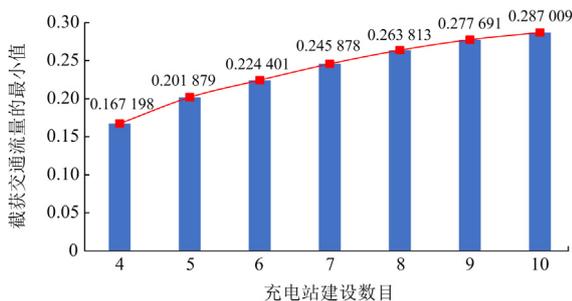


图 15 不同充电站数目下最大截获交通流量最小值  
Fig. 15 Minimum value of maximum traffic flow captured by charging network with different number of charging stations

从图 14、图 15 可以看出: 充电站数目增加后, 充电网络充电服务能力与效率随之更佳, 即 Pareto 最优解集中的最短平均充电行驶距离随之下落, 最

大的截获交通流量最小值也随之上升。当充电站数目由 4 座增加至 10 座时: Pareto 最优解集中的最短平均充电行驶距离由 34.08 km 下降至 17.21 km, 降幅为 49.36%; Pareto 最优解集中的最大的截获交通流量最小值由 0.167 198 增加至 0.287 009, 增幅为 71.7%。此外, 随着充电站数目增加, 平均充电行驶距离的下降趋势与截获交通流量最小值的增加趋势均趋于平缓, 呈现“饱和”现象, 也就是说, 随着充电站数目的增加, 新建充电站对充电网络充电服务能力与效率提升的边际效益呈递减趋势。实际工程中, 规划人员可在综合考虑充电网络投资成本与收益的基础上确定合适的充电站建设数目。

## 6 结论

在对充电网络截获交通流量的随机特性进行分析的基础上, 本文提出了一种同时考虑截获交通流量与充电行驶距离的多目标充电网络规划模型。模型以截获交通流量最小值最大与平均充电行驶距离最短为优化目标, 并同时考虑充电行驶距离机会约束及充电站建设数目约束。采用 NSGA-II 进行求解, 获得 Pareto 最优解集。最后, 以 25 节点交通网络为例进行了仿真实验, 并基于仿真结果分析了机会约束置信度与充电站数目对规划结果的影响, 主要结论如下:

- 1) 充电网络规划模型以截获交通流量最小值最大与平均充电行驶距离最短为优化目标。算例分析表明: 本文提出的规划模型弥补了单一考虑截获交通流量或充电行驶距离的充电网络规划方法的不足, 可显著提高充电网络的服务能力与服务效率。
- 2) 充电站数目是充电网络规划模型中的重要边界条件, 且随着充电站数目的增加, 新建充电站对充电网络充电服务能力与效率提升的边际效益呈递减趋势。规划人员可在综合考虑充电网络投资成本与收益的基础上确定合适的充电站建设数目。

### 参考文献

[1] 陈杰军, 奚巍民, 朱婵霞, 等. 电动汽车发展态势评价体系及方法研究[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(1): 74-79. CHEN Jiejun, XI Weimin, ZHU Chanxia, et al. Evaluation system and method of electric vehicle development trend[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(1): 74-79.

[2] 林晓明, 唐建林, 张帆, 等. 基于虚拟同步策略的电动汽车 V2G 技术在多能互补系统中的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 143-150. LIN Xiaoming, TANG Jianlin, ZHANG Fan, et al. Research and application of electric vehicle V2G technology based on a virtual synchronization strategy in a multi-energy

- complementary system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 143-150.
- [3] 中华人民共和国公安部. 2023 年上半年全国机动车达 4.26 亿辆 驾驶人达 5.13 亿人 新能源汽车保有量达 1620 万辆[EB/OL]. (2023-07-08) [2023-09-10]. <https://www.mps.gov.cn/n2254098/n4904352/c9106327/content.html>.
- [4] AZIN B, YANG X T, MARKOVIĆ N, et al. Infrastructure enabled and electrified automation: charging facility planning for cleaner smart mobility[J]. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 2021, 101.
- [5] 周衍涛, 戴军, 苑惠丽, 等. 城市电动汽车充电设施需求预测与规划布局研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(24): 177-187.  
ZHOU Yantao, DAI Jun, YUAN Huili, et al. Demand forecasting and planning layout of urban electric vehicle charging facilities[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(24): 177-187.
- [6] 王敏, 向月, 周椿奇, 等. 城市充电服务网多维评估指标体系与方法[J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(3): 261-270.  
WANG Min, XIANG Yue, ZHOU Chunqi, et al. Multi-dimension evaluation index system and method of urban charging service network[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(3): 261-270.
- [7] 李子, 刘亮, 丁玲, 等. 基于泰森多边图的分场景充电基础设施规划[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(3): 131-135, 142.  
LI Zi, LIU Liang, DING Ling, et al. Scenario-based charging infrastructure planning based on Tyson's multilateral graph[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(3): 131-135, 142.
- [8] 张美霞, 张倩倩, 杨秀, 等. 基于交通-电力均衡耦合的电动汽车快充站与配电网联合规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(11): 51-63.  
ZHANG Meixia, ZHANG Qianqian, YANG Xiu, et al. Joint planning of electric vehicle fast charging stations and distribution network based on a traffic-electricity equilibrium coupling model[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(11): 51-63.
- [9] ARIAS N B, TABARES A, FRANCO J F, et al. Robust joint expansion planning of electrical distribution systems and EV charging stations[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(2): 884-894.
- [10] 沈鑫, 严松, 李妍. 考虑交通流量的电动汽车充电站优化规划方法[J]. *智慧电力*, 2023, 51(7): 74-79.  
SHEN Xin, YAN Song, LI Yan. Optimal planning method of electric vehicle charging station considering traffic flow[J]. *Smart Power*, 2023, 51(7): 74-79.
- [11] 蔡海青, 代伟, 赵静怡, 等. 基于多参数规划的电动汽车充电站有效容量评估方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(11): 175-183.  
CAI Haiqing, DAI Wei, ZHAO Jingyi, et al. Available capacity evaluation method of electric vehicle charging stations based on multi-parametric programming[J]. *Electric Power*, 2022, 55(11): 175-183.
- [12] 曹佳佳, 王淳, 霍崇辉, 等. 考虑配电网负荷波动和电压偏移的充电站优化规划[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(4): 12-19.  
CAO Jiajia, WANG Chun, HUO Chonghui, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations considering the load fluctuation and voltage offset of distribution network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(4): 12-19.
- [13] 徐杨杨, 张新松, 陆胜男, 等. 多重随机特性下的电动汽车充电网络机会约束规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(6): 30-39.  
XU Yangyang, ZHANG Xinsong, LU Shengnan, et al. Chance constrained optimization of an electric vehicle charging network with multiple stochastic characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(6): 30-39.
- [14] WANG C, GAO Z, YANG P, et al. Electric vehicle charging facility planning based on flow demand—a case study[J]. *Sustainability*, 2021, 13: 4952-4962.
- [15] LEE C, HAN J. Benders-and-price approach for electric vehicle charging station location problem under probabilistic travel range[J]. *Transportation Research Part B-Methodological*, 2017, 106: 130-152.
- [16] ZHOU B, CHEN G, SONG Q K, et al. Robust chance-constrained programming approach for the planning of fast charging stations in electrified transportation networks[J]. *Applied Energy*, 2020, 262.
- [17] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 配电系统与电动汽车充电网络的协调规划[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 10-18.  
YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Coordinated planning for power distribution system and electric vehicle charging infrastructures[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 10-18.
- [18] KADRI A A, PERROU AULT R, BOUJELBEN M K, et al. A multi-stage stochastic integer programming approach for locating electric vehicle charging stations[J]. *Computers and Operations Research*, 2020, 117.
- [19] HE S Y, KUO Y H, WU D. Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: a case study of Beijing, China[J]. *Transportation Research*

- Part C-Emerging Technologies, 2016, 67: 131-148.
- [20] KARATAS M, YAKICI E. An analysis of P-median location problem: effects of backup service level and demand assignment policy[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 272(1): 207-218.
- [21] 陈振, 王伟贤, 李卓群, 等. 基于多因子约束 P 中值模型的充电桩布局优化研究[J]. *北京交通大学学报*, 2021, 45(3): 93-99.  
CHEN Zhen, WANG Weixian, LI Zhuoqun, et al. Study on optimization of charging pile layout based on multi-factor constrained P-median model[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2021, 45(3): 93-99.
- [22] 田枫, 陈淮莉. 考虑用户选择偏好的电动汽车充电站规划研究[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(15): 294-301.  
TIAN Feng, CHEN Huaili. Research on planning of electric vehicle charging station considering user choice preference[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(15): 294-301.
- [23] 陶卓霖, 程杨, 戴特奇, 等. 重力 p-median 模型在设施选址中的应用及检验[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(6): 1600-1608.  
TAO Zhuolin, CHENG Yang, DAI Teqi, et al. Application and validation of gravity p-median model in facility location research[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(6): 1600-1608.
- [24] VERMA S, PANT M, SNASEL V. A comprehensive review on NSGA-II for multi-objective combinatorial optimization problems[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 57757-57791.
- [25] 张琳娟, 许长清, 王利利, 等. 基于 OD 矩阵的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(20): 82-91.  
ZHANG Linjuan, XU Changqing, WANG Lili, et al. OD matrix based spatiotemporal distribution of EV charging load prediction[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(20): 82-91.
- [26] SCHEIPER B, SCHIFFER M, WALTHER G. The flow refueling location problem with load flow control[J]. *Omega-International Journal of Management Science*, 2019, 83: 50-69.
- [27] 王振浩, 罗剑潇, 成龙, 等. 面向台风天气下主动配电网韧性提升的改进分级减载策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22): 34-48.  
WANG Zhenhao, LUO Jianxiao, CHENG Long, et al. Improved graded load reduction strategy for resilience enhancement of an active distribution network in a typhoon[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 34-48.
- [28] 黄金鑫, 李华强, 陆杨. 基于蒙特卡洛模拟和频谱分析法的孤岛微电网储能容量配置[J]. *电网技术*, 2020, 44(5): 1622-1629.  
HUANG Jinxin, LI Huaqiang, LU Yang. Energy storage capacity configuration of isolated microgrid based on Monte Carlo simulation and spectrum analysis[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5): 1622-1629.
- [29] 钱科军, 谢鹰, 张新松, 等. 考虑充电负荷随机特性的电动汽车充电网络模糊多目标规划[J]. *电网技术*, 2020, 44(11): 4404-4414.  
QIAN Kejun, XIE Ying, ZHANG Xinsong, et al. Fuzzy multi-objective optimization of electric vehicle charging network with stochastic characters of charging load[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(11): 4404-4414.
- [30] 李飞, 李咸善, 李振兴, 等. 基于梯级水电调节的多能联合发电系统短期优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(15): 11-20.  
LI Fei, LI Xianshan, LI Zhenxing, et al. Short-term optimal scheduling of multi-energy combined generation systems based on the regulation of cascade hydropower stations[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(15): 11-20.
- [31] 谢鹰, 郑众, 刘剑峰, 等. 基于遗传算法计及充电行驶距离的电动汽车充电网络规划[J]. *湖南电力*, 2023, 43(3): 29-36.  
XIE Ying, ZHENG Zhong, LIU Jianfeng, et al. Electric vehicle charging network planning considering charging driving distance based on genetic algorithm[J]. *Hunan Electric Power*, 2023, 43(3): 29-36.
- [32] 姜惠兰, 安星, 王亚微, 等. 基于改进 NSGA2 算法的考虑风机接入电能质量的多目标电网规划[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(21): 5405-5411.  
JIANG Huilan, AN Xing, WANG Yawei, et al. Improved NSGA2 algorithm based multi-objective planning of power grid with wind farm considering power quality[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(21): 5405-5411.

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-05-03

作者简介:

张新松(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型电力系统规划与运行; E-mail: zhang.xs@ntu.edu.cn

朱晨旭(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车充电网络规划; E-mail: 1546907501@qq.com

罗来武(1987—), 男, 通信作者, 硕士, 实验师, 研究方向为新型电力系统运行与控制。E-mail: luolaiwu@ntu.edu.cn

(编辑 魏小丽)