

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191609

# 电动汽车公共应急充电站选址规划模型

蔡子龙<sup>1</sup>, 王品<sup>2</sup>, 宋建<sup>1</sup>, 杨博<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明供电局电力调度控制中心, 云南 昆明 650011)

**摘要:** 合理布局电动汽车公共应急充电站可促进电动汽车产业的发展。应急充电站选址决策既涉及到定性因素, 又涉及到定量因素, 是一个复杂的决策问题。首先确定应急充电站的选址目标和影响因素, 建立了基于层次分析法的应急充电站选址模型。其次将层次分析法和目标规划法结合在一起, 建立基于层次分析法和目标规划法的应急充电站选址模型。将这两种方法应用于某地区的应急充电站选址决策, 结果表明, 由于考虑了资源约束的限制, 采用层次分析法-目标规划法选址模型的决策结果更合理。

**关键词:** 电动汽车; 公共充电站; 应急充电; AHP; 目标规划法

## Location planning model of public emergency charging stations for electric vehicles

CAI Zilong<sup>1</sup>, WANG Pin<sup>2</sup>, SONG Jian<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
2. Power Dispatching Control Center, Kunming Power Supply Bureau, Kunming 650011, China)

**Abstract:** A reasonable layout of electric vehicle public emergency charging stations can promote the development of the electric vehicle industry. The decision on the location of the emergency charging station not only involves qualitative, but also quantitative factors. It is a complex decision-making problem. First, the location target and influencing factors of the emergency charging station are determined, and a location model is established based on an analytic hierarchy process. Secondly, based on that process and a goal programming method, an emergency charging station location model is established. Finally, the two methods are applied to decide the site selection of a certain area. The results show that the AHP-goal programming site selection decision-making method is more reasonable than others because the resource constraints are considered.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61963020).

**Key words:** electric vehicle; public charging station; emergency charging; AHP; goal programming method

## 0 引言

电动汽车的发展有利于减少环境污染, 降低对石油资源的依赖程度。我国把纯电动汽车作为新能源汽车发展的重点方向, 并确定了2020年纯电动汽车保有量达到500万辆的发展目标<sup>[1]</sup>。通过示范运行、促进发展和推广普及等发展阶段, 电动汽车已经广泛应用于公共交通、公务出行、出租车分时租赁、物流运输等领域, 近年来家庭乘用车保有量也有显著增长。

电动汽车产业要取得更大发展, 充电基础设施

的完善是关键。为解决电动汽车的充电问题, 国家发改委出台了电动汽车充电基础设施发展指南<sup>[2]</sup>, 充电站建设速度有望和电动汽车的发展速度相匹配。对电动汽车充电站及其配电网规划建设, 目前已有较多的研究成果<sup>[3-4]</sup>。研究的基本方法是根据不同用途的电动汽车规划其充电站。如为家庭乘用车规划公共应急充电站, 为电动公交车、电动出租车和电动物流车规划专用充电站, 以及为相对封闭的高速公路规划建设充电站。文献[5]研究了换电模式下电池配送和充电方式对集中型充电站容量规划的影响, 在此基础上确定电池组的配送计划、充电机的配置数量和最小电池组储备量。文献[6]综合考虑交通和电力两个影响因素, 以用户时间成本和电

池更换点运行成本最低为优化目标, 确定电池更换点数量、位置及其服务范围, 在此基础上确定电池集中充电站的选址和服务范围。文献[7]在基于出行链思想对出行者的空间行为进行分析的基础上, 建立电动汽车充电需求的时空模型, 从而得到布局更加合理的充电站站址。文献[8]以电动出租车的充电站规划为研究对象, 基于效用函数建立出租车对充电站的概率选择函数, 以全社会总成本为优化目标, 以配电网容量和站址间距离为约束建立模型, 提出一种改进量子遗传算法来对模型进行求解。文献[9]研究了充电和换电两种模式下的电动物流车的充换电设施的选址问题。文献[10]以电站投资运营者与电动汽车用户综合效益最大为目标, 提出高速公路汽车行驶与充电选择的动态模拟方法。

部分文献研究了充电方式对充电站规划的影响<sup>[4-6,9]</sup>。文献[11]分析充电功率对充电站规划的影响, 提出一种快充充电站充电设施的优化配置方法。还有文献将配电网概率潮流理论应用到充电站的规划之中。文献[12]在充电站的规划上考虑了配电网概率潮流因素, 使得规划结果更加契合配电网的实际。此外还有文献结合交通网络情况对充电站的规划进行研究, 文献[13]计及道路网络对充电需求的影响, 提出了一种电动汽车充电站最优规划的两阶段方法。

公共应急充电站的规划建设需要考虑的因素较多, 其中有定性的因素, 也有定量的因素。规划时一般会根据充电需求, 提供数个可供选择的充电站地址, 并在这些站址中按一定原则和标准选择一个或者数个作为最终选择的站址。为排除主观因素的影响, 一般可采用层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)来对各候选站址进行评价, 并选择综合评价价值最高的一个或数个站址进行充电站建设。

然而层次分析法是一种简单的指标分配办法, 不能解决有限资源约束的决策问题。根据 AHP 法选择的站址可能会受站址可提供的充电桩个数、固定费用以及运行费用等实际可用的资源约束而变得不可行, 因此电动公交应急充电站的选址问题还需要新的理论和方法指导。

应急管理是为应对公共突发事件, 降低自然灾害或人为灾害带来的损失而发展起来的新兴交叉学科, 广泛应用于地震和消防应急<sup>[14]</sup>以及电力应急<sup>[15-16]</sup>等领域。目标规划法最早应用在应急管理领域, 它是一种使实际目标和决策目标偏差为最小的规划方法。目标规划法求解时不要求求出满足所有约束条件的最优解, 只要求在多个目标和约束条件下能找到尽量好的满意解, 并且能根据实际情况对所有约束条件给予轻重缓急的考虑。将目标规划法

用于解决带资源约束的选址决策问题, 已经在应急系统选址决策中得到了应用<sup>[17-19]</sup>。基于此, 本文在参考上述文献的基础上, 提出将应急管理中的目标规划法用于解决带资源约束的应急充电站的规划问题。首先使用 AHP 法对充电站选址进行评价, 然后将 AHP 和目标规划法结合起来, 将 AHP 的计算结果的权重作为 AHP-目标规划法的一个约束, 建立基于 AHP-目标规划法的应急充电站选址规划模型, 通过算例对模型进行验证, 并与 AHP 计算结果进行比较, 结果表明 AHP-目标规划法更加科学合理, 为应急充电站的选址决策问题提供了一种新的解决思路和方法。

## 1 公共应急充电站选址问题描述

要在一个城市经济区域内建设公共应急充电站, 其选址是一项复杂的系统工程。选址是否合理将对城市交通、经济发展、城市规划和城市电网产生一定影响。

### 1.1 应急充电站选址的影响因素

(1) 交通因素。交通因素包括交通便利性、交通流量和覆盖范围等因素。应尽量把应急充电站建在交通便利、覆盖范围大和交通流量大的节点上。

(2) 经济因素。经济因素指充电站应建在充电需求旺盛、盈利能力强的节点上。

(3) 规划因素。应急充电站的建设要考虑与城市总体规划、城市路网规划和城市电网规划是否一致。

(4) 技术因素。技术因素包括应急充电站站址水文条件、变电站的容量许可等因素。

### 1.2 公共应急充电站选址目标

在考虑上述影响因素的基础上, 应急充电站规划还需要满足应急充电区域的充电需求, 并受拟投入应急充电站建设的固定成本、运营成本、拟建充电站数目等条件的约束。其中固定成本主要包括以下几个部分:

(1) 土地成本。土地成本包括土地的获得成本和土地上附属物的拆迁成本。城市核心区土地资源稀缺, 土地成本较高, 这导致目前建成并投入运营的公共充电站经济性不好。根据《电动汽车充电基础设施发展指南(2015—2020)》, 城市公共充电站纳入公共设施营业网点用地范围, 实行地价优惠政策, 因此计算各候选站址土地成本时均按建设公共设施的地价进行计算。

(2) 建设成本。建设成本包括三通(水通、电通、路通)一平(土地平整)、充电站站用房建设、充电设备购置和安装、充电站监控系统、电池维护系统以及道路硬化和绿化等成本。

(3) 配电成本。配电成本包括配电柜、变压器、电缆的购置和安装成本。配电成本主要取决于从电力公司产权分界点到应急充电站电缆敷设的距离和应急充电站所需的配电容量两个因素。

运营成本包括充电站工作人员的薪酬和福利、行政支出和固定资产折旧等支出。

## 2 应急充电站选址模型

### 2.1 应急充电站选址的层次分析法

层次分析法具体实施分为以下几个步骤：

(1) 构建层次分析法的梯阶层次结构。根据层次分析法原理，在查找资料、调查研究和请教专家的基础上，通过反复比较论证和甄别筛选，确定应急充电站选址的层次结构如图 1 所示。

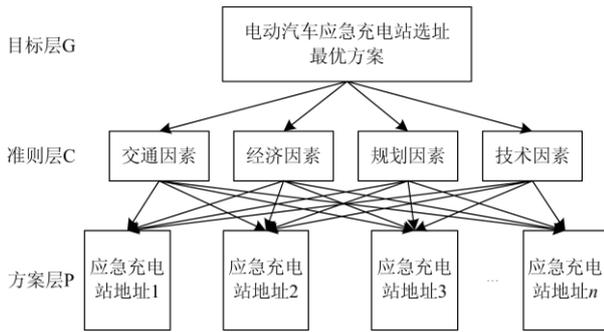


图 1 应急充电站选址的层次分析结构图

Fig. 1 Hierarchy analysis structure of emergency charging station site selection

在图 1 中，应急充电站选址的目标层是最优应急充电站选址方案，准则层为应急充电站选址的合理性评价指标。这些指标包括交通因素、经济因素、技术因素和规划因素。方案层为各候选的应急充电站站址。

(2) 根据同一层各元素对上一层某准则的重要性程度进行两两比较，一般采用 1~9 级标度法<sup>[20]</sup>构造两两比较的判断矩阵。

(3) 层次单排序和一致性检验。对构造出的判断矩阵，利用幂法、方根法或和积法计算判断矩阵的最大特征根  $\lambda_{\max}$  和单排序向量  $\omega$ ，计算一致性指标 C.I 和随机一致性比例 C.R，然后进行一致性判断。若没有通过一致性检验，则调整判断矩阵，直到通过一致性检验为止。

(4) 层次总排序。利用层次单排序的结果由上而下计算出层次分析模型中每一层中所有因素相对于目标层的组合权重。最终得到方案层元素对目标层的组合权重，按权重大小得出各方案的优劣，从而选出最佳方案。

### 2.2 应急充电站选址的目标规划法

应急充电站的目标规划法的实施步骤如下：

(1) 确定各目标的优先级和权系数。在应急充电站的目标规划中，将各目标之间按轻重缓急进行排队，取充电桩需求量  $p_1$  优先级最高，其余优先级依次为固定成本  $p_2$ 、运营成本  $p_3$ 、应急充电站数目  $p_4$ 、应急充电站的 AHP 的方法权重  $p_5$  以及各交通小区应急充电桩需求量及与到各候选站址距离乘积之和  $p_6$ 。

(2) 对约束进行处理。对应急充电站每一个目标的等式或者不等式的表达式都加上负偏差量  $d^-$  及减去正偏差量  $d^+$  后都变成了等式，其中负偏差  $d^-$  表示计算值不足理想值之偏差，即表示未完成指标值的偏差量。正偏差  $d^+$  表示计算值超过理想值之偏差，即超额完成指标值的偏差量。

(3) 求出应急充电站目标规划的准则函数。应急充电站目标规划法中的准则函数是由各目标约束的正、负偏差量及其相应的优先级构成的函数，并对这个函数求极小值。

### 2.3 应急充电站选址的 AHP-目标规划法

#### 2.3.1 决策变量分析

对候选应急充电站站址集  $N = \{1, 2, L, n\}$ ，规划时要决定是否在该站址上建设充电站，设决策变量为  $X_i (i \in N)$ ，如果在站址  $i$  处建设应急充电站，则  $X_i = 1$ ，否则  $X_i = 0$ 。

#### 2.3.2 约束条件分析

为弥补 AHP 方法的不足，除把 AHP 方法得到的权重作为目标约束外，还增加 4 个目标约束。

##### (1) 应急充电桩个数约束

应急充电站所提供的总应急充电桩个数不应小于各交通小区应急充电桩的需求总数，其表达式为

$$\sum_{i=1}^n f_i X_i - d_f^+ + d_f^- = F \quad (1)$$

式中： $f_i$  表示第  $i$  个应急充电交通小区的充电桩需求量； $d_f^+$ 、 $d_f^-$  表示应急充电桩需求量约束下的正负偏差量； $F$  为期望的应急充电桩个数。

##### (2) 应急充电站固定成本约束

应急充电站的固定成本不应超过目标固定成本，其表达式为

$$\sum_{i=1}^n t_i X_i - d_t^+ + d_t^- = T \quad (2)$$

式中： $t_i$  为第  $i$  个应急充电站的固定成本； $T$  为应急充电站固定成本的期望值； $d_t^+$ 、 $d_t^-$  分别表示应急充电站固定成本约束下的正负偏差量。

(3) 应急充电站运营成本约束

应急充电站的运营成本不应超过目标运行成本, 其表达式为

$$\sum_{i=1}^n c_i X_i - d_c^+ + d_c^- = C \quad (3)$$

式中:  $c_i$  为第  $i$  个应急充电站的总成本;  $C$  为应急充电站总成本预算值;  $d_c^+$ 、 $d_c^-$  分别表示应急充电站总成本约束下的正负偏差量。

(4) 应急充电站数目约束

根据区域应急充电站发展规划, 应急充电站的数目不应大于目标规划的数目, 其表达式为

$$\sum_{i=1}^n X_i - d_n^+ + d_n^- = N_1 \quad (4)$$

式中:  $N_1$  表示规划区域内拟规划建设应急充电站数目;  $d_n^+$ 、 $d_n^-$  分别表示应急充电站建设数目约束下的正负偏差变量。

(5) AHP 方法权重约束

将 AHP 方法得到的方案层对目标层的组合权重  $\omega_i$  作为目标规划模型的一个目标, 其期望值为 1, AHP 方法权重约束为

$$\sum_{i=1}^n \omega_i X_i - d_\omega^+ + d_\omega^- = 1 \quad (5)$$

式中:  $\omega_i$  为候选的第  $i$  个应急充电站的权重;  $d_\omega^+$ 、 $d_\omega^-$  分别表示权重约束下的正负偏差变量。

(6) 各交通小区应急充电桩需求量及与到各候选站址距离乘积之和目标约束

交通小区应急充电桩需求频率及与各交通小区之间的距离乘积之和反映了应急充电站布局的合理程度, 其期望值越小越好, 表达式为

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_i d_{ij} X_i - d_h^+ + d_h^- = 0 \quad (6)$$

式中:  $h_i$  表示第  $i$  个交通小区的充电桩需求量;  $d_{ij}$  表示第  $i$  个交通小区到第  $j$  个交通小区的距离;  $d_h^+$ 、 $d_h^-$  分别表示应急充电站充电需求频率与各交通小区之间的距离乘积之和目标约束下的正负偏差量。

2.3.3 准则函数的确定

根据前文所确定的决策变量和对约束条件的分析, 得到电动汽车应急充电站选址的目标决策的准则函数为

$$\min Z = P_1 d_f^+ + P_2 d_t^+ + P_3 d_c^+ + P_4 (d_n^+ + d_n^-) + P_5 d_\omega^- + P_6 d_h^+ \quad (7)$$

3 应急充电站选址实例分析

3.1 问题的提出

西部某城市属于国家电动汽车示范推广地区, 要在该城市某核心区规划建设应急充电站并进行示范运行。该核心区目前由 6 个交通小区组成, 6 个交通小区的位置关系如图 2 所示。图中连接交通小区之间的线段表示连接交通小区的道路, 标注在道路上的数字表示两个相连接交通小区的距离, 单位是 km。

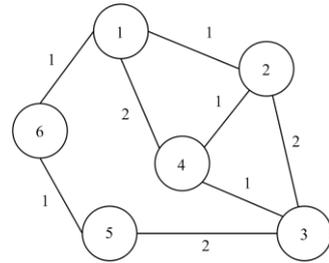


图 2 交通小区位置示意图

Fig. 2 Map of the traffic area location

应急充电站拟建在交通小区的顶点处, 其建设数量和规模取决于电动汽车的发展速度和发展规模。文献[21]预测 2020 年我国汽车保有量约为 2.45 亿辆, 电动汽车渗透率在高油价情形下可达 1.89%。文献[22]预测 2020 年电动汽车的渗透率为 2%。根据《电动汽车充电基础设施发展指南(2015—2020)》, 2020 年我国电动汽车数量将达到 500 万辆, 结合文献[21]对我国汽车保有量的预测, 可得 2020 年电动汽车的渗透率约为 2%。经调研得知 2016 年 5 个规划区域燃油汽车保有量分别为 4 114、8 227、12 751、24 681、12 135 以及 25 298 辆, 按 5% 的年均增长率和 2% 的电动汽车渗透率计算可得 2020 年各区域汽车保有量和电动汽车数量, 如表 1 所示。

表 1 规划区域电动汽车发展数量预测(辆)

Table 1 Electric vehicle development quantity forecast of planning area (unit)

区域	1	2	3	4	5	6
燃油汽车保有量	5 000	10 000	15 500	30 000	24 750	30 750
电动汽车保有量	100	200	310	600	495	615
充电桩需求量	4	7	10	19	16	20

根据《电动汽车充电基础设施发展指南(2015—2020)》规定, 每 2 000 辆电动汽车至少配套建设一座公共充电站。对示范推广地区, 公共充电桩与

电动汽车的比例不低于 1:8。由表 1 可知, 该核心区 2020 年电动汽车的数目为 2 320 辆, 应该建设两座或两座以上公共应急充电站。考虑到未来电动汽车的发展需要, 充电站的规划建设应适度超前, 拟建 3 座公共应急充电站。公共充电桩按 1:8 配置, 需建 290 个。直流快充和交流慢充按 1:4 配置, 直流快速充电桩的个数不应小于 76 个。综上所述, 该地区应急充电站的规划目标是建设 3 座直流快充应急充电站, 直流快充数目不少于 76 个, 固定成本不超过 2 430 万元, 运行成本不大于 310 万元。

### 3.2 规划区域基本情况

应急充电站固定成本包括土地成本、建设成本以及配电成本等。对于土地成本, 该城市规定对国有土地实行分类管理, 公共设施用地分为三类。规划的 6 个交通小区中有 3 种土地类别, 其中交通小区 3、4 属于 1 类, 1、2 属于 2 类, 5、6 属于 3 类。这 3 类用地每平方米基准地价如表 2 所示。

表 2 三类地区基本地价

Table 2 Basic land price of three categories area

(元/m <sup>2</sup> )			
土地类别	1	2	3
地价	578	513	448

对于充电站建设成本, 设每个充电站由 25~30 台 60 kW 充电机组成, 配电容量为 1 600~2 000 kVA, 再加上站房建设、电池维护管理系统、充电站监控系统等, 每个充电站的建设成本约为 500~600 万。该区域内有一座 110 kV 变电站, 能满足配电容量的要求。根据工程实际情况并结合《中国南方电网输电工程典型造价》, 每个充电站配设配电柜一台, 造价为 5 万元。两台互为备用的 10 kV / 0.4 kV 变压器, 造价为 25 万元/台。一台 700 kVA 滤波器, 造价为 10 万。0.4 kV 低压电缆 1 公里, 造价为 20 万。110 kV 变电站用 10 kV 电缆向充电站供电, 每公里 10 kV 电缆造价为 40 万。110 kV 变电站到各交通小区的距离如表 3 所示。

表 3 110 kV 变电站到各交通小区距离

Table 3 Distance between the 110 kV substation and the traffic area

km						
区域	1	2	3	4	5	6
距离	2	3	2	1	3	3

根据中国石油天然气总公司《加油站建设标准(2012)》, 地级以上城市的主干道三级站建设面积为 2 200 m<sup>2</sup>。考虑到加油站各设备间安全距离较充电站充电设备之间的安全距离大, 表 4 中在计算土地

成本时, 每个充电站均按占用 3 亩地进行计算, 约为 2 000 m<sup>2</sup>。综上所述, 可计算出各交通小区的资源情况, 如表 4 所示。

表 4 各候选站址的资源数据

Table 4 Resource data of each candidate site

万元						
候选站址	土地成本	建设成本	配电成本	充电机台数	固定成本	运行成本
1	102	530	165	26	797	100
2	102	540	205	25	847	105
3	115	560	165	25	840	110
4	115	570	125	26	810	95
5	90	520	205	30	815	115
6	90	510	205	27	805	98

### 3.3 应用 AHP 对应急充电站进行选址

通过对影响应急充电站选址的各因素的对比分析, 形成了准则层到目标层(G-C)的判断矩阵以及各因素权重如表 5 所示。

表 5 G-C 排序权重

Table 5 Sort weight of G-C layer

影响因素	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	权重
A <sub>1</sub>	1	1	2	3	0.355 9
A <sub>2</sub>	1	1	2	3	0.355 9
A <sub>3</sub>	1/3	1/2	1	2	0.177 0
A <sub>4</sub>	1/3	1/3	1/2	1	0.111 1

表 5 中的 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>、A<sub>4</sub> 分别表示影响应急充电站选址的交通因素、经济因素、规划因素和技术因素。W = (0.3559, 0.3559, 0.1770, 0.1111) 表示上述 4 个影响因素所对应的权重。同理对 6 个候选站址的上述四个影响因素分别打分, 可得各候选站址的 C-P 层排序权重, 限于篇幅, 不再累述。根据 G-C 层排序权重和 C-P 层排序权重, 得到 G 层的总排序权重, 如表 6 所示。

表 6 G 层总排序权重

Table 6 Total order weight of G layer

候选站址	总权重	排序
1	0.35	1
2	0.09	5
3	0.22	2
4	0.11	4
5	0.18	3
6	0.05	6

从表 6 中可以看出, 按权重大小排序的结果, 应急充电站应选择建在 1、3 和 5 三处。

### 3.4 用 AHP-目标规划法对应急充电站进行选址

使用 AHP 和目标规划法相结合的模型, 考虑应

急充电站选址的各目标约束和各候选点权重, 代入第 2.3 节的约束条件和准则函数。使用 LINGO 软件对上述 AHP-目标规划法模型进行求解<sup>[23-24]</sup>, 并与 AHP 法的计算结果相比较, 所得结果如表 7 和表 8 所示。

表 7 AHP 方法和 AHP-目标规划方法解的比较

Table 7 Result comparison between AHP method and AHP-objective programming method

候选站址	AHP-目标规划法	AHP 方法
1	$\sqrt{(X_1=1)}$	$\sqrt{(W_1=0.35)}$
2	$\times(X_2=0)$	$\times(W_2=0.09)$
3	$\times(X_3=0)$	$\sqrt{(W_3=0.22)}$
4	$\sqrt{(X_4=1)}$	$\times(W_4=0.11)$
5	$\sqrt{(X_5=1)}$	$\sqrt{(W_5=0.18)}$
6	$\times(X_6=0)$	$\times(W_6=0.05)$

表 8 两种方法对资源目标约束的比较

Table 8 Resource constraint comparison of the two methods

资源情况	目标值	AHP-目标规划法	AHP 方法
固定成本	2 430	-8	+22
运行成本	310	0	+15
充电桩个数	76	+6	+4
权重之和	1	0.63	0.75

从表 7 和表 8 中可以看出, 如果采用 AHP 方法, 根据权重的大小, 应该选择在交通小区 1、3 和 5 建设应急充电站, 结果固定成本和运行成本分别超出目标值 22 万元和 15 万元, 从而导致这种方案由于缺乏足够的资源作为支撑而变得不可行。采用 AHP-目标规划法选择在 1、4 和 5 处建设应急充电站, 由于考虑了资源的约束问题, 所得的结果是满意而且可行的。

## 4 结语

构建布局合理、互为补充的电动汽车充电基础设施, 可有效解决电动汽车充电难问题。公共应急充电站作为电动汽车常规慢速充电方式的辅助充电设施, 其合理选址对促进电动汽车产业健康发展具有重要意义。本文对应急充电站的选址决策问题进行了研究, 得出了以下结论:

(1) 建立了应急充电站选址的层次分析法模型。

(2) 考虑应急充电站建设的资源约束问题, 将 AHP 和目标规划法结合起来, 克服了传统 AHP 不能处理候选站址的有限资源约束的情况, 建立了基于 AHP-目标规划法的公共应急充电站选址模型。

(3) 通过具体案例对两种方法进行分析对比, 结果表明 AHP-目标规划法选址模型具有总费用更小、服务能力更强的优点, 选址结果更加合理。

应该指出的是, 公共应急充电站一般采用直流快充, 由于充电功率大, 充电过程势必会对电网造成冲击, 同时快充对电池寿命也有不利影响。如何把大功率直流快充对电网的影响降到最低, 同时减少充电过程对电池寿命的影响, 这些问题将是下一步拟进行研究的重点。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于印发节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020)的通知[EB/OL].[2012-06-28].[http://www.gov.cn/zwqk/2012-07/09/content\\_2179032.html](http://www.gov.cn/zwqk/2012-07/09/content_2179032.html).
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发《电动汽车充电基础设施发展指南(2015-2020 年)》的通知[EB/OL]. [2015-10-9]. [http://www.Sdpc.gov.Cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151117\\_758762.html](http://www.Sdpc.gov.Cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151117_758762.html). The National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Notice on the development of charging infrastructure for electric vehicles (2015-2020) [EB/OL]. [2015-10-09]. [http://www.Sdpc.gov.Cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151117\\_758762.html](http://www.Sdpc.gov.Cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151117_758762.html).
- [3] AWASTHI A, VENKITUSAMY K, PADMANABAN S, et al. Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm[J]. Energy, 2017, 133: 70-78.
- [4] 顾博, 李凤婷, 张增强, 等. 基于 GA-PSO 的电动汽车换电站时空双层充电优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 116-124. GU Bo, LI Fengting, ZHANG Zengqiang, et al. Optimization strategy of electric vehicle battery swapping station space-time bi-level charging based on GA-PSO[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 116-124.
- [5] 杨丽君, 郭茜茜, 闫鹏达. 考虑电池组配送的集中型充电站容量规划研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1387-1393. YANG Lijun, GUO Xixi, YAN Pengda. Study on capacity planning of large-scale centralized charging stations considering distribution scheme on battery pack[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1387-1393.
- [6] 严俊, 严凤. 基于两步规划的电动汽车充换电服务设施选址方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 48-56. YAN Jun, YAN Feng. Location method of charging and swapping service facilities based on a two-step planning[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 48-56.
- [7] 徐青山, 蔡婷婷, 刘瑜俊, 等. 考虑驾驶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(2): 59-64. 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(2): 59-64.
- [8] 葛少云, 李荣, 韩俊, 等. 考虑电动出租车随机概率行为特性的充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 50-57. GE Shaoyun, LI Rong, HAN Jun, et al. Charging station

- planning considering probability behavior characteristic of electric taxi[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 50-57.
- [9] 杨磊, 郝彩霞, 唐瑞红. 基于电物流车的充电和换电设施选址模型[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(7): 1781-1795.  
YANG Lei, HAO Caixia, TANG Ruihong. Location models of charging and battery swapping facilities based on electric vehicles[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2019, 39(7): 1781-1795.
- [10] 刘洪, 李荣, 葛少云, 等. 基于动态车流模拟的高速公路充电站多目标优化规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 56-62.  
LIU Hong, LI Rong, GE Shaoyun, et al. Multi-objective planning of electric vehicle charging stations on expressway based on dynamic traffic flow simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 56-62.
- [11] 孟旭瑶, 张维弋, 鲍谚, 等. 考虑充电功率的电动汽车快充站充电设施优化配置[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 28-34.  
MENG Xuyao, ZHANG Weiyi, BAO Yan, et al. Optimal configuration of charging facility for electric vehicle fast charging station considering charging power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 28-34.
- [12] 张永明, 姚志力, 李菁, 等. 基于配电网概率潮流计算的电动汽车充电站规划策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 9-14.  
ZHANG Yongming, YAO Zhili, LI Jing, et al. Electric vehicle charging station planning strategy based on probabilistic power flow calculation of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 9-14.
- [13] 舒隽, 唐刚, 韩冰. 电动汽车充电站最优规划的两阶段方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 10-16.  
SHU Jun, TANG Gang, HAN Bing. Two-stage for optimal planning of electric vehicle charging station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 10-16.
- [14] 何建敏, 刘春林, 曹杰, 等. 应急管理 with 应急系统一选址、调度与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [15] 黄裕春, 王宏, 文福栓. 含区间数的电力应急网络最优调度路径的确定[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 19-25.  
HUANG Yuchun, WANG Hong, WEN Fushuan. Determining of optimal scheduling path in power emergency support network represented by interval values[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(1): 19-25.
- [16] 王宏, 林振智, 文福栓, 等. 记及负荷停电风险的电力应急服务的最优选址[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 73-78, 84.  
WANG Hong, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Optimal siting of power emergency service stations considering outage risk of loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 73-78, 84.
- [17] 莫海熙, 郜振华, 陈森发. 基于 AHP 和目标规划的物流配送中心选址模型[J]. 公路交通科技, 2007, 24(5): 150-153.  
MO Haixi, GAO Zhenhua, CHEN Senfa. Location model of distribution center based on analytic hierarchy process and goal programming[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(5): 150-153.
- [18] 蒋美仙, 徐畅, 禹美凤, 等. 基于 AHP 和目标规划的物流配送中心集成选址模型研究[J]. 浙江工业大学学报, 2012, 40(5): 562-566.  
JIANG Meixian, XU Chang, YU Meifeng, et al. Integrated location model research on logistics distribution center on the AHP-goal programming[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2012, 40(5): 562-566.
- [19] 方磊, 何建敏. 综合 AHP 和目标规划方法的应急系统选址规划研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(12): 117-120.  
FANG Lei, HE Jianmin. Combining the analytic hierarchy process and goal programming for location model of emergency systems[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2003, 23(12): 117-120.
- [20] 何永秀. 电力综合评价方法及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [21] 曾鸣, 曾繁孝, 朱晓丽, 等. 基于 BASS 模型的我国电动汽车保有量预测[J]. 中国电力, 2013, 46(1): 36-39.  
ZENG Ming, ZENG Fanxiao, ZHU Xiaoli, et al. Forecast of electric in China based on BASS model[J]. Electric Power, 2013, 46(1): 36-39.
- [22] 王中阳, 王威, 戴建卓, 等. 基于弹性系数法和千人保有量法的陕西省电动汽车保有量预测[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 142-147.  
WANG Zhongyang, WANG Wei, DAI Jianzhuo, et al. Forecasting of electric vehicle quantity based on the elastic coefficient and Shaanxi vehicles ownership per thousand people method[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 142-147.
- [23] 何坚勇. 运筹学基础[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [24] 韩中庚. 实用运筹学模型、方法与计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

收稿日期: 2019-12-26; 修回日期: 2020-03-22

作者简介:

蔡子龙(1976—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电动汽车充电站规划、V2G、信息技术在电力系统中的应用; E-mail: 1250582439@qq.com

王品(1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、配电网规划; E-mail: 752889491@qq.com

宋建(1978—), 男, 通信作者, 硕士, 实验师, 研究方向为电力系统信号处理、复杂系统建模与控制; E-mail: songjian0803@163.com

杨博(1988—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源发电系统优化与控制以及人工智能在智能电网中的应用. E-mail: yangbo\_ac@outlook.com

(编辑 魏小丽)