

考虑行程时间可靠性的Voronoi图多目标电动出租车充电站规划

电动出租车充电站的合理布局对电动出租车的推广使用具有重要的意义。针对出租车充电站的服务属性和用电属性,提出一种以包括配电网网损成本及出租车充电时间成本在内的全社会成本最小、行程时间可靠性最高为目标函数,以充电站站间距离、配电网安全运行指标为约束条件的多目标规划模型,综合考虑了出租车驾驶员充电的经济性、充电站服务的便捷性以及配电网运行的经济性和安全性。对于充电站容量的确定,基于排队理论的M/G/c模型,采用带约束条件的边际分析法对充电机的数量进行优化配置,进而将Voronoi图与NSGA-2多目标算法相结合获得多目标模型的帕累托前沿,通过TOPSIS综合评价法确定最优规划方案。最后,通过包含48节点路网与35节点配电网的算例,验证了所提方法的正确性和有效性。

李 荣 李金龙 李珏龙 何治华 肖 畅/国网四川省电力公司

0 引言

电动出租车作为当前电动汽车的重要组成部分,其推广能够有效减少汽车尾气的排放,降低我国对化石燃料的依赖^[1],电动出租车充电站作为电动出租车规模化运营的保障,其规划方案是否合理直接影响充电行为的经济性和便捷性。目前,众多学者已对包括电动出租车在内的电动汽车的充电站规划展开了相应的研究。文献[2]对不同类型电动汽车的充电方式、充电行为模式、充电地点及充电时段进行了细致的分析,获得研究区域的充电负荷曲线。文献[3]提出了等负荷距分配法,将集中和分散充电量分配到相应充电设施进行负荷预测,再进行定址定容,最终得到可用的规划

方案。文献[4]以居民负荷的分布情况模拟电动汽车的数量,用层次分析法来确定候选站址的权系数,最后利用最优费用模型实现充电站的选址定容。文献[5]构建了考虑车流信息与配电系统容量约束的充电站规划模型。文献[6]以截获的交通流量最大、配电系统网损最小以及节点电压偏移最小为目标,建立了电动汽车充电站规划的多目标优化模型。文献[7]提出了电动汽车充电站规划的二阶段模型,第一阶段利用聚类分析法将区域的路况信息转化为充电需求集群,第二阶段利用优化算法进行电动汽车充电站的选址操作。文献[8]基于Voronoi图和排队论的相关理论构建了电动汽车公共充电站布局的最优规划模型。文献[9]提出用两步筛选法来确定电动汽车充电站的候选站址,并基于此构建了电动汽车充电站最优规划的数学模型。

上述研究侧重于对包括公交车、私家车、商务车及出租车等在内的所有电动汽车的充电设施进行规划。然而,由于不同类别的电动汽车,其充电行为具有不同的特性^[2]。公交车运营路线固定,时间、地点相对集中,主要在现有停车场进行快充,停运时段进行常规充电;私家车主要被用于车主上、下班以及休闲娱乐等,相应的充电地点主要包括单位办公停车场、居民停车场和商场超市停车场等,在这类地点将进行常规充电,一般为8~10 h^[10]。电动出租车每天24 h运营,考虑到其运营的经济性,主要以快速充电作为补充能量的方式。因而,



李 荣/工程师

关键词/Keywords

电动出租车·
行程时间可靠性·
Voronoi图·
NSGA-2·

已有的电动汽车充电站规划成果不能很好地契合出租车的行为特性。对于电动出租车的行为特性,已有部分学者对出租车的行为特性进行了分析探讨^[11-13],文献[14]通过对电动出租车到站时间和充电服务时间实际调查数据的分析,得出了车辆到站时间间隔服从负指数分布和充电服务时间服从正态分布的结论。

基于这一背景下,本文首先重点分析了电动出租车的充电行为特性,进而确定与实际情况相近的充电站规划场景,综合考虑路网结构与配电网结构,建立了以包括全社会出租车充电耗时成本及配电网网络损耗成本在内的全社会成本最小、路网行程时间可靠性最高为优化目标的多目标规划模型,将Voronoi图与NSGA-2相结合进行求解,获得多目标模型的帕累托前沿,通过TOPSIS综合评价法获得最优规划方案。

1 电动出租车充电站规划

1.1 采用Voronoi图法划分服务范围

每个充电站都有相应的服务范围,其服务范围内的车辆选择相应充电站进行充电所需行驶的距离最短。平面上的Voronoi图可以认为是点集 R 中的每个顶点作为生长元,每个生长元都以同样的扩张速度向外延伸,直到在平面上相遇为止而形成的图形。这样,除了在边缘的顶点形成的是开放的区域外,其他的顶点形成的都是凸多边形。如图1所示。

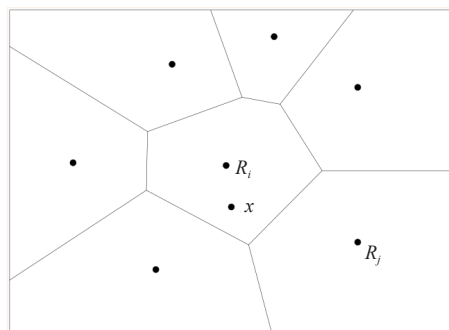


图1 Voronoi图示例

设 $R=\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, $3 \leq n < \infty$ 为平面上的一个控制点集,则任意点的Voronoi图可定义为

$$V(R_i) = \{x \in V(R_i) | d(x, R_i) \leq d(x, R_j), j=1, 2, \dots, n; j \neq i\} \quad (1)$$

式中, x 为平面上的任意点; $d(x, R_i)$ 为点 x 与 R_i 之间的欧式距离, $R_i \neq R_j$, $i \neq j$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$;区域 $V(R_i)$ 称为顶点 R_i 的V多边形,各点的V多边形共同组成Voronoi图。

Voronoi图可以将平面分割成不同的区块,使得一个区块内的任何一点到该区块顶点的距离都比其到其他区块顶点的距离要短。这一性质与电动出租汽车充电站服务范围的概念相对应。以充电站的站址集合作为母点对区域进行分割后,每个充电站服务范围内的充电需求便可确定。

本文基于需要充电的电动汽车选择距离最近的充电站进行能量补充的假设,采用Voronoi图法对充电站进行服务范围的划分,基于各充电站的服务范围计算其服务的车辆,进而计算目标函数值。

1.2 电动出租车行为特性

出租车没有固定的运行线路,具有很大的随机性。大中城市出租车日均行驶里程为350~500 km,一般由两名司机轮流驾驶,分为白班和夜班。以在深圳运行的BYD E6纯电动汽车为参考,其额定行驶里程约为200 km,一次充电难以满足一天的行驶需要,至少要进行两次充电。考虑到出租车运营效益,一般情况下出租车会在交接班时进行充电^[2]。

充电后寻找乘客的时间反映的是出租车完成充电后为寻找乘客到达下一个交通节点的平均时间。由于电动出租车充电过程较长,一般为1 h左右,因此出租车充电期间一定是非载客状态,充电完毕则进入寻找乘客的状态。

当出租车在站完成充电后,随即转入空驶阶段,进行客源的搜索。空驶出租车从充电站点 k 出发,为寻找乘客而选择交通节点 j 的概率受到行驶的时间和目的地乘客需求量的影响,可用如下选择模型^[15-16]来描述,即

$$P_{kj} = \frac{\exp(-\theta t_{kj}^{\beta_1} q_j^{-\beta_2})}{\sum_{j \in A} \exp(-\theta t_{kj}^{\beta_1} q_j^{-\beta_2})} \quad (2)$$

式中, P_{kj} 为从充电站 k 出发, 选择交通节点 j 为寻找乘客目的地的概率; t_{kj} 为从充电站 k 到交通节点 j 的最短行驶时间; q_j 为交通节点 j 乘客对出租车的需求量, 与交通小区所处的区位有关; β_1 、 β_2 为效用函数影响因素的权重系数, 且 $\beta_1, \beta_2 > 0$, 式(2)表示对目的节点的选择概率与行驶时间成反比, 与交通节点的乘客需求量 q_j 成正比; θ 为模型参数。

1.3 道路的行程时间可靠性

电动出租车驾驶员往往根据自己对路网和交通状况的经验选择前往充电站的路径, 但是交通状况条件受到很多无法预期的随机事件的影响, 导致驾驶员不能按照预想的时间到达充电站。前往充电站过程中的不确定性问题比单纯地减少时间显得更加重要, 路径的出行时间可靠性成为出行决策的重要依据, 是驾驶员更为关心的指标之一。行程时间可靠性表示在规定的时间内, 车辆从起点 O 到达讫点 D 的概率。行程时间可靠性能反映行程时间的稳定性和预期时间内到达充电站的可能性。

假定交通节点之间路段的通行能力为常数, 行程时间按照美国道路局开发的BPR函数来计算, 如式(3)所示, 则路段行程时间的均值和方差可以由式(4)、式(5)计算, 即

$$t_{ik} = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{Q_{ik}}{C_{ik}} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

$$E(t_{ik}) = t_0 + \alpha t_0 C_{ik}^{-\beta} E(Q_{ik}^\beta) \quad (4)$$

$$D(t_{ik}) = \alpha^2 t_0^2 C_{ik}^{-2\beta} \left[E(Q_{ik}^{2\beta}) - E^2(Q_{ik}^\beta) \right] \quad (5)$$

式中, t_{ik} 为路网节点 i 与 k 之间路段的行程时间, h; Q_{ik} 为该路段交通流量, pcu/h; C_{ik} 为该路段通行能力, pcu/h, 这里假定为常数; t_0 为自由流行程时间; α 、 β 为模型参数, 通常取 $\alpha=0.15$, $\beta=4$ 。电动出租车路段行程时间不超过 $t^*=\gamma t_0$ 时, 其路段行程时间可靠性为^[17]

$$r_{ik} = P\{t_{ik} < \gamma t_0\} = \Phi \left\{ \frac{\gamma t_0 - E(t_{ik})}{\sqrt{D(t_{ik})}} \right\} \quad (6)$$

式中, r_{ik} 为节点 i 与 k 之间路段的可靠性; γ 为参数, $\gamma > 1$, 根据文献[17], γ 在一般情况下取1.2, 也可以在一个较大的范围内取值, 这与所作研究的详细程度有关, 这里取 $\gamma=1.2$; t_{ik} 为该路段上可接受的最大行驶时间, h。

充电站服务范围内的交通网络结构、车流状况和道路状况等因素直接影响缺电车辆前往充电站的便捷性。充电站覆盖区域内路网的行程时间可靠性越高, 缺电车辆驾驶员按照预期时间到达充电站的置信度越高。以路网行程时间可靠性作为出租车充电便捷性的体现从而寻求其最优。

以服务区域内主要干道的行程时间可靠性为主要考虑对象计算服务区域路网的行程时间可靠性, 计 O_k 为充电站 k 服务区域内通向充电站的主干道起点集合, P_k 为主干道集合, $\rho_k \in P_k$, P_k 主干道上出租车需求量为 x_{kp} , 服务区域内电动出租车总需求量(即潜在乘客数量)为 X_k , 则充电站 k 服务区域内路网行程时间可靠性为

$$R_k = P\{t_k < t^*\} = \left[\sum_{p_k} \frac{x_{kp}}{X_k} \Phi \left\{ \frac{\gamma t_0 - E(t_{ik})}{\sqrt{D(t_{ik})}} \right\} \right] \quad (7)$$

1.4 排队等待时间

文献[18-19]假设电动汽车接受服务时间服从负指数分布模型, 文献[14]对电动出租汽车到站时间和充电服务时间实际调查数据的统计分析, 得出了车辆到站时间间隔服从负指数分布和充电服务时间服从正态分布的结论。本文采用排队论中的M/G/c模型计算排队等待时间。

M/G/c模型中的输入过程服从参数为 λ 的泊松分布, 服务时间为一般分布 G , 其期望为 μ , 标准差为 V_T 。在服务时间参数一定的情况下, 平均排队队长 L_q^G 为服务台数(在充电站中为充电桩数)和输入过程参数 λ 的函数, 即

$$L_q^G = \frac{\lambda(V_T + \mu^2)}{2\mu(c - \rho)} \left[1 + \sum_{i=0}^{c-1} \frac{(c-1)!(c-\rho)}{i! \rho^{c-i}} \right]^{-1} \quad (8)$$

平均等待时间为

$$W_q^G = L_q^G / \lambda \quad (9)$$

式中, $\rho=\lambda\mu$; c 为服务台数量; 式(8)、式(9)成立的条件为 $c>\rho$ 。

1.5 充电站规划模型

(1) 充电站规划模型目标函数

电动出租车充电站一方面是为出租车提供充电服务的城市基础设施, 另一方面是配电网用电设施, 兼具两方面的属性。作为基础服务设施, 其站址和容量的规划应满足城市出租车运营系统的需求, 为出租车司机提供便捷的充电服务, 使出租车寻找充电站, 接受充电站服务, 寻找乘客所耗费的时间较短。另外, 作为一种用电设施, 充电站的接入必须保证配电网运行的经济性、安全性。在出租车充电站规划模型中, 为了实现充电站运营商、出租车司机及电网运营方的总体经济性, 以包括电动出租车充电站建设及运行维护年费用、充电耗时年成本(包括前往充电站途中耗时年成本、接受充电服务等待耗时年成本以及充电后为寻找乘客到达首个目的地的耗时年成本)及配电网网络损耗年成本之和最小作为目标函数一; 以充电站服务区域内行程时间可靠性最高作为目标函数二。电动出租车充电站规划模型如下, 即

$$\min F = C_{CS} + C_{VH} + C_G + C_W + C_F + C_{Loss} \quad (10)$$

$$\max R = \max \sum_{k=1}^N \frac{X_k}{X} R_k \quad (11)$$

$$C_{CS} = \sum_{i=1}^{N_{ETS}} (ae_i + bN_i^{CD} + c_i) \frac{r_0(1+r_0)^z}{(1+r_0)^z - 1} \quad (12)$$

$$C_{VH} = \eta \sum_{i=1}^{N_{ETS}} (ae_i + bN_i^{CD} + c_i) \quad (13)$$

$$C_G = 365\rho q \sum_{k \in M} \sum_{i \in A_k} n_i^b t_{ik} \quad (14)$$

$$C_W = 365\rho q \sum_{k \in M} \sum_{i \in A_k} n_i^b W_k \quad (15)$$

$$C_F = 365q\rho \sum_{k \in M} \left(\sum_{j \in A_k} n_i^a P_{kj} t_{kj} \right) \quad (16)$$

$$C_{Loss} = pP_{Loss}(x_i P_{si}, x_i Q_{si}) \quad (17)$$

式(10)与式(11)为子目标函数, F 为全社会充电年总成本; R 为充电站服务覆盖区行程时间可靠性; N 为充电站总数; X_k 为充电站 k 服务区域内电动出租车总需求量; $X = \sum_{k=1}^N X_k$ 。式(12)中, C_{CS} 为充电站投资建设成本, 主要是由充电站建设初期, 充电机、土地、配电变压器和其他辅助设备的一次性投资成本折算而来, 充电机是固定投资的决定因素, 充电机数量体现了充电站规模, 充电机越多, 服务车辆越多, 占地面积越大, 相应的土地购置和配电变压器及其他辅助设备的固定投资越大, 因此, 固定投资和运行成本都是充电机数量 N^{CD} 的函数; e_i 为充电站 i 配置的变压器数量; a 为变压器的单价; N_i^{CD} 为充电站 i 配置的充电机数量; b 为充电机的单价; c_i 为充电站 i 的基建费用, r_0 为贴现率, z 为运行年限, N_{ETS} 为充电站数量。式(13)中, C_{VH} 为年运行维护费用, 主要包括充电站的设备检修维护费用、设备折旧费用和人员工资等。将年运行维护费用按照初期投资的百分比进行计算。 η 为比例因子。式(14)中, C_G 为一年, 按照365日计算, 规划区域中出租车由于前往充电站充电途中损耗时间年成本; ρ 为单辆电动出租车日平均充电次数; q 为驾驶员单位时间成本; n_i^b 为交通节点 i 前往充电站 k 的空驶出租车数量; t_{ik} 为从交通节点 i 出发, 前往充电站 k 的时间; M 为出租车充电站点集; $i \in A_k$, A_k 为充电站 k 服务范围内的交通节点集合。式(15)中, C_W 为电动出租车在充电站的排队等待时间成本; W_k 为在充电站 k 等待充电所耗费的时间, 这一数值是根据充电站 k 服务范围内需要充电的车辆数由排队理论计算获得。式(16)中, C_F 为寻找乘客时间成本; P_{kj} 为充电车辆由充电站 k 出发选择 j 点作为首个寻找乘客地点的概率。

电动出租车充电站接入配电系统后会影响到配电网的网络损耗, 为了在充电站规划中兼顾到电网运营者的经济性, 以配电网系统网络损耗作为优化目标的一部分, 网络损耗不但与原始负荷有关, 还与电动汽车充电站的建设位置和容量大小有关。式(17)中, C_{loss} 为配电系统网络损耗; p

为售电价格； P_{loss} 为配电系统网络年损耗； x_i 为在节点 i 是否接入充电站，若是则为1，否则为0； P_{si} 、 Q_{si} 分别为 i 节点建设的充电站有功、无功容量。

(2) 约束条件

充电站接入的配电网的约束条件主要包括等式约束和不等式约束。等式约束主要是指潮流平衡方程。不等式约束主要考虑配电网的容量限制及安全运行的约束，具体包括以下几个方面。

1) 变电站容量约束为

$$\sum_{l \in L_K} P_l + \sum_{o \in O_K} P_o \leq S_K e(S_K) \cos \varphi \quad (18)$$

式中， l 为配电网负荷节点； o 为作为充电站在配电网中接入点的负荷节点； L_K 为变电站 K 所供负荷点集合； O_K 为变电站 K 供电范围内作为充电站接入点的负荷节点集合； S_K 为变电站 K 的容量； $e(S_K)$ 为变电站 K 负载率； $\cos \varphi$ 为功率因数； P_l 为配电网在 l 点的有功负荷。

2) 节点电压幅值的上、下限约束为

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i=1, 2, \dots, M \quad (19)$$

式中， V_i 为配电网节点 i 的电压幅值； $V_i^{\max}$ 、 $V_i^{\min}$ 分别为该节点电压幅值的上、下限； M 为所研究的配电网的节点数目。

3) 馈线最大电流约束

$$|I_{ij}| \leq I_{ij\max} \quad i, j=1, 2, \dots, M \quad (20)$$

式中， I_{ij} 、 $I_{ij\max}$ 分别为配电网中馈线 ij 的电流和允许流过的最大电流。

4) 充电站接入点容量约束为

$$P_{Cij} \leq P_{j\max} \quad (21)$$

式中， P_{Cij} 为接入电网节点 j 的充电站 i 的最大充电功率； $P_{j\max}$ 为电网节点 j 所能允许的最大接入功率，这主要是由节点 j 处的负荷和所在线路的传输能力决定的。

5) 电动出租车充电站布局不均匀会使部分充电站服务区域互相重合，进而导致资源浪费，故引入站间距离约束，充电站距离约束为

$$D_{ij} \geq 2\lambda R \quad (22)$$

式中， λ 为城市道路非直线系数； D_{ij} 为两站之间直线距离。

1.6 基于排队理论的充电机配置

确定电动出租车充电站容量是充电站规划的关键环节，电动汽车充电站容量配置决定充电站充电机的配置数量、停车位数量，直接影响充电站用地规划和建设投资。在稳态的情况下，设单位时间内平均每个充电机的服务成本为 C_s ，每个顾客在充电站内的等待费用为 C_w ，则以单位时间内的总费用（服务成本和等待费用之和）的期望值最小为目标的充电桩优化配置模型为

$$\min f(c) = C_s c + C_w L_q^G \quad (23)$$

另外，以在深圳市运营的比亚迪E6电动出租车为例，其平均充电时间为1.5 h^[20]，即使司机在电量较为充裕时就选择充电仍需1 h左右。若接受充电服务需要较长的等待时间，充电耗时将被大大的增加，不利于电动出租车的推广。因而，在容量确定模型中引入硬性时间约束上限，使充电的排队等待时间满足

$$W_q^G(c) \leq W_{\max} \quad (24)$$

2 求解方法

2.1 基于Voronoi求取Pareto前沿

将Voronoi图特性与NSGA-2算法相结合对规划模型进行求解。采用Voronoi图划分服务范围，基于服务范围内电动汽车的充电需求及路网结构计算两个子目标函数值；采用NSGA-2对两目标模型进行求解获得帕累托前沿，具体求解步骤如图2所示。

2.2 最优方案的确定

利用TOPSIS^[21]对Pareto前沿中的个体进行排序，得到问题的最优解。定义“虚拟最优解”为各个子目标函数均取可行域内最优值的虚拟解。

“虚拟最劣解”为各个子目标函数均取可行域内最劣值的虚拟解。此处将可行域视为帕累托前沿中所有个体所构成的集合。由于各子目标之间的复杂相关性，虚拟解一般不存在于可行域内。基于TOPSIS的决策过程如下。

1) 原始矩阵归一化处理

$$a_{i,j} = H_{i,j} / \sqrt{\sum_{k=1}^W H_{k,j}^2} \quad (25)$$

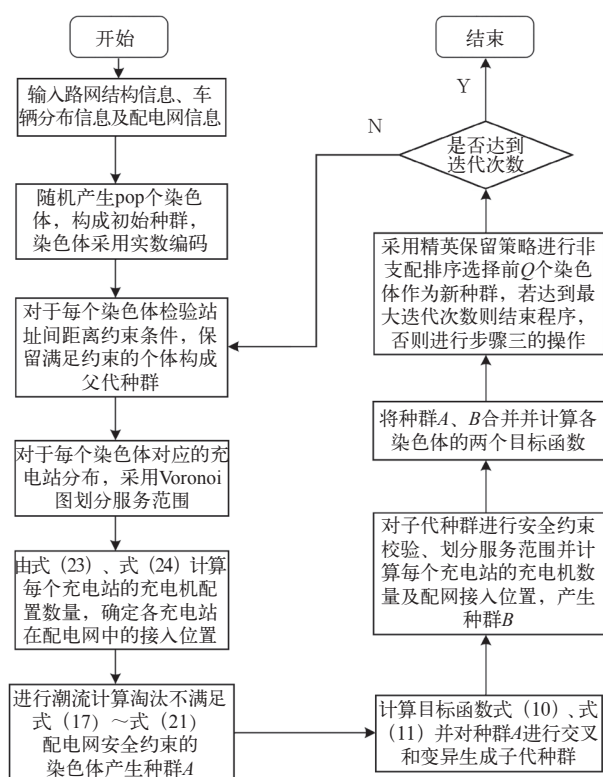


图2 求解步骤

式中, $H_{i,j}$ 为第 i 个解的第 j 个子目标函数值; w 为帕累托前沿中的个数总数; $a_{i,j}$ 为 $H_{i,j}$ 归一化后的值。

2) 得到“虚拟最优解”和“虚拟最劣解”归一化后的解向量: “虚拟最优解”为: $A^+ = [a_1^+, a_2^+, \dots, a_n^+]$; “虚拟最劣解”为: $A^- = [a_1^-, a_2^-, \dots, a_n^-]$ 。

3) 计算非劣解 A^+ 与 A^- 及之间的距离 L_i^+ 和 L_i^- , 即

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (a_{i,j} - a_{i,j}^+)^2} \quad (26)$$

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (a_{i,j} - a_{i,j}^-)^2} \quad (27)$$

4) 计算各个解与虚拟最优方案的接近程度, 即

$$M_i = \frac{L_i^-}{(L_i^- + L_i^+)} \quad (28)$$

由式 (28) 可知, M_i 为小于 1 的正数, 根据 M_i 大小进行排列, M_i 的大小表示解的优劣程度。

3 算例分析

3.1 算例概况

以某区域电动出租车充电站规划为例, 其道路分布及路网节点编号如图 3 所示, 该区域共有主要路网节点 48 个, 规划区面积为 63 km^2 。

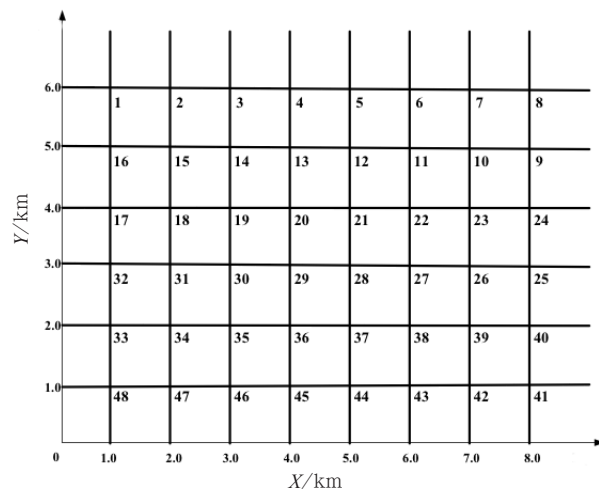


图3 某规划区道路分布地理图及路网节点编号

规划区配电网采用文献[6]的网络结构, 包含三个 35/10 kV 变电站, 容量均为 $2 \times 16 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 有 35 个负荷节点, 配电网结构如图 4 所示。网络节点坐标及用电高峰时刻的负荷在此不作赘述。

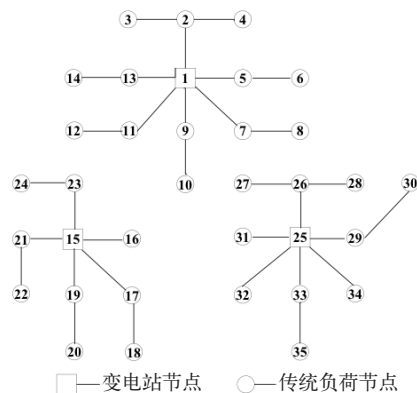


图4 规划区配电网结构图

根据文献[22]对深圳市电动出租车实际运行情况的调研分析, 电动出租车每天至少进行两次充电, 主要在两次交接班时间段进行, 集中在凌晨 2:00~6:00 和下午 14:00~18:00, 即在 14:00~18:00 这一时间段, 几乎每辆车都需进行一次充电。本文以 14:00~18:00 为典型时间段采用前文所述的规划模型进行规划。典型规划时间段车辆分布及充电

需求预测值作为边界条件分布于各个路网节点，路网各节点位置坐标及初始化的出租车分布数据、出租车需求分布数据及由路网节点驶出车辆的流量期望与方差在此不作赘述。假设由于规划区用地限制，拟建七座电动汽车充电站，在63 km²的区域内分布着400辆电动出租车，每次交接班的位置固定，电动汽车的平均行驶速度 $v=30$ km/h，以深圳运营的比亚迪E6为例，电池额定容量为60 kW·h，单台充电桩充电功率为120 kW，充电站最小容量配置为10台充电机，最大容量配置为30台充电机。充电机的充电效率为0.9，同时率为0.8~1.0。充电站规划中需要的其他参数如表1所示。

表1 算例参数值设定表

参数	α	β	C_{ik}	γ	α_1	α_2	α_3	θ	σ	β_1	β_2
取值	0.15	4	400	1.25	1	0.5	0.5	1	1	1	0.5

参数	λ	M/km	$v/(\text{km/h})$	$W_{\min}/\text{min}$	$C_s/\text{元}$	$C_w/\text{元}$
取值	1.32	150	30	10	1.6	30

注：文中公式重要参数的取值。

按照2.1节所述步骤对待规划区域进行电动出租车充电站规划，初始化规划所研究时间段起始阶段的出租车分布及乘客对出租车需求数量的分布，初始化路网中各条线路在主要研究时间段的车辆流量期望与方差（根据线路起始节点的车辆流量数据折算而得）；输入区域配电网参数。

3.2 结果分析

由NSGA-2与Voronoi相结合对多目标规划模型进行求解，采用TOPSIS综合评价法对帕累托最优解集进行评价排序，其最优的五个方案对比如表2所示。

表2 规划方案比较

序号	理想度	全社会成本/万元	行程时间可靠性
1	0.736 9	221.479	0.606 5
2	0.719 1	219.536	0.572 1
3	0.692	225.395	0.579 7
4	0.653 2	250.107	0.610 3
5	0.639 6	210.916	0.539 4

表2中给出最优的五个方案所对应的两个目标函数值及方案对应的理想度，理想度即采用

TOPSIS综合评价法所得的与理想解的靠近程度，理想度越高，则越逼近理想解。比较最优排序的前两个方案，方案二的全社会成本较方案一更低，然而方案一行程时间可靠性较方案二更优。规划者可根据实际情况对两个目标函数有所侧重地确定最终方案。若规划者更加看重全社会成本，则可以选择方案二作为最终的规划方案；若规划者较为看重反映充电车辆便捷性的行程时间可靠性，则可以选择方案一作为最终规划方案。

4 结束语

电动汽车种类众多，对于电动的公交车、私家车和商务车而言，其运行具有较强的规律性，充电地点比较固定，充电时间较为充裕，往往选择慢速充电。电动出租车由于没有慢充的时间条件，主要以快充为主。本文在分析电动出租车充电行为特性及路网行程时间可靠性的基础上，提出一种电动出租车充电站多目标规划方法，具有以下特点。

1) 引入路网交通规划中的行程时间可靠性，综合考虑出租车驾驶员充电的全社会成本、充电站服务便捷性以及配电网运行的经济性和安全性，建立以全社会成本最小、路网行程时间可靠性最高的目标函数，以充电站站间距离、配电网安全运行指标为约束的多目标规划模型。

2) 基于排队理论的M/G/c模型，采用带约束条件的边际分析法对充电站容量进行优化配置，使前往充电的出租车在分钟内即可接受充电服务。

3) 利用Voronoi图的数学特性对充电站的服务范围进行划分，计算充电站的服务需求；采用NSGA-2算法对多目标规划模型进行求解，计算速度较快且所得帕累托前沿面分布均匀；采用TOPSIS综合评价法从中选出最优规划方案，规划结果表明所提出的规划方法行之有效，较为实用。

参考文献

- [1] 陈良亮, 张浩, 倪峰, 等. 电动汽车能源供给设施建设现状与发展探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 11-17.

- [2] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
- [3] 郭春林, 肖湘宁. 电动汽车充电基础设施规划方法与模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 70-75.
- [4] 寇凌峰, 刘自发, 周欢. 区域电动汽车充电站规划的模型与算法[J]. 现代电力, 2010, 27(4): 44-48.
- [5] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 考虑车流信息与配电网容量约束的充电站规划[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 582-589.
- [6] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 63-69.
- [7] Andy Ip, Simon Fong, Elaine Liu. Optimization for allocating BEV recharging stations in urban areas by using hierarchical clustering[C]. The 2nd International Conference on Data Mining and Intelligent Information Technology Applications, Seoul, Korea, ETRI, 2010: 460-465.
- [8] 熊虎, 向铁元, 祝勇刚, 等. 电动汽车公共充电站布局的最优规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 65-70.
- [9] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车充电站的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 54-59.
- [10] 刘文霞, 张蕾蕾, 刘宗歧, 等. 城市纯电动汽车发展模式论证方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 34-40.
- [11] 周晶, 何建敏, 盛昭瀚. 城市出租车运营系统的随机分析[J]. 管理工程学报, 2000, 14(1): 63-66.
- [12] Yang H, Wong S C. A network model of urban taxi services[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1998, 32(4): 235-246.
- [13] Kenneth E Train. Discrete choice methods with simulation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [14] 张维戈, 陈连福, 黄彧, 等. M/G/k排队模型在电动出租汽车充电站排队系统中的应用[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 724-729.
- [15] 李雪飞, 郎茂祥. 基于广义巢式Logit的多用户多准则随机用户平衡模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014(4): 139-145.
- [16] 黎冬平, 陈峻, 晏克非. 带容量限制的城市出租车服务站点选址模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(2): 394-398.
- [17] 孟维伟, 段妍, 屈芳. 考虑行程时间可靠性的阻抗函数及其应用[J]. 公路与汽运, 2015(1): 40-44.
- [18] 李如琦, 苏浩益. 基于排队论的电动汽车充电设施优化配置[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 58-61.
- [19] Cruz F R B, Smith J M. Approximate analysis of M/G/c/c state-dependent queueing networks[J]. Computers and Operations Research, 2007, 34(8): 2332-2344.
- [20] 才艺欣, 王贺武, 叶强, 等. 深圳和杭州电动出租车充电或换电池服务的商业模式[J]. 汽车安全与节能学报, 2013, 4(1): 54-60.
- [21] 何逢标. 综合评价方法MATLAB实现[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2010.
- [22] 李亚芬, 黄梅, 张维戈. 电动出租车日充电负荷估算方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10): 55-60.

(收稿日期: 2018-07-02) **EA**