

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

艾 欣,李一铮,王坤宇,胡俊杰

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:针对城市电动汽车充电站的选址与定容问题,建立了考虑充电站运营商、电动汽车用户以及电网企业综合利益的充电站选址定容规划模型。采用 Voronoi 图思想和需求点栅格化理论,结合 Floyd 最短路径算法划分充电站的服务范围。提出采用一种混沌模拟退火粒子群优化算法对问题进行求解,通过引入混沌理论使粒子更高效地遍历搜寻空间,并结合模拟退火算法的概率突跳特性使算法在迭代后期仍具有较高的全局寻优能力。通过算例分析表明,采用所提算法对城市电动汽车充电站选址定容进行优化规划的可行性和有效性。

关键词:电动汽车;选址定容;充电站规划;混沌理论;模拟退火粒子群优化算法

中图分类号:U 469.72

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.002

0 引言

近年来,我国电动汽车的保有量迅速攀升,截至 2016 年底,我国电动汽车保有量已经接近 100 万辆,经测算,到 2020 年全国电动汽车保有量将超过 500 万辆^[1]。电动汽车充电基础设施作为电动汽车发展的重要保障,其发展水平直接影响了电动汽车行业的发展速度和质量。目前,全国各地按照“桩站先行,适度超前”的原则,逐步推进充电基础设施的科学发展。根据需求预测结果,到 2020 年新增集中式电动汽车充换电站将超过 1.2 万座^[1]。

电动汽车充电站的选址与定容问题是高维非线性数学问题,决策的优劣直接影响了其服务质量、效率、成本等。现有的国内外学者对城市电动汽车充电站的选址与定容问题研究仍处在起步阶段,没有形成系统完整的理论。文献[2]以投运至目标年综合费用最小为规划目标,利用变权 Voronoi 图的方法划分充电站的服务范围,并采用混合粒子群优化(PSO)算法求解,提高了算法迭代中后期的全局搜索能力。文献[3]将量子理论与粒子群优化算法结合,增强了优化算法的种群多样性以及算法的全局搜索能力。文献[4]结合了城市道路信息和电动汽车续驶里程,提出了电动汽车充电便捷系数,并利用 Voronoi 图理论和排队论确定充电站的容量。文献[5]将配电网约束等引入充电站规划模型中,同时

以截获最大交通流量为目标进行规划,并采用快速非支配排序遗传算法-II 进行多目标优化规划求解。文献[6]引入了路网结构、车流信息、配电网结构等约束进行优化规划。文献[7]综合考虑了城市路网和配电网的交互性,引入博弈论思想,并对电动汽车充放电特性对配电网供电可靠性的支撑作用进行了评估。文献[8]利用网格法确定充电站的站址,分析了充电站的盈利模型,提出了充电站的日负荷率、投资回收期、充电行驶里程、综合满意度 4 类评价指标。文献[9]将碳排放指标引入充电站选址定容规划模型中,采用 Pareto 最优前沿分析可选的方案,提出了基于需求点栅格化的充电站服务范围求解方法。文献[10]对电动汽车出行活动及充电过程进行预测,提出了基于电动汽车用户出行的规划模型,兼顾了电动汽车用户的出行需求以及充电站运营商的利益。

上述的研究均从一定的角度出发,提出了电动汽车充电站选址定容的模型,并采用了不同算法进行求解。本文在上述研究的基础上,提出了一种综合考虑全社会利益的选址定容规划模型。为了求解该模型,克服传统粒子群优化算法的早熟、局部收敛等缺点,本文将混沌理论与模拟退火算法与粒子群优化算法相结合,通过混沌理论优化粒子的搜寻空间,并用模拟退火算法的概率突跳特性改善粒子群优化算法的早熟问题;采用 Voronoi 图思想及需求点栅格化理论来确定充电站的服务范围;求解距离时引入了 Floyd 算法代替传统欧氏距离,使结果更加接近实际情况,进一步提高了算法的准确程度。

1 充电站选址定容的数学模型

目前主流的电动汽车能源补给方式主要为充电方式及换电方式 2 种,限于文章篇幅,本文暂未考虑

收稿日期:2018-01-24;修回日期:2018-07-17

基金项目:国家重点研发计划重点专项(支撑低碳冬奥的智能电网综合示范工程)(2016YFB0900500);北京市自然科学基金资助项目(3182037)

Project supported by the National Key R&D Program of China (Support Low-carbon Winter Olympics of Integrated Smart Grid Demonstration Project)(2016YFB0900500) and Beijing Natural Science Foundation(3182037)

换电方式,只针对充电方式进行探究。电动汽车充电站是社会的公共服务设施,在进行选址定容时不仅应考虑运营方的效益,还应考虑其社会服务作用。本文在考虑充电站运营方、电网企业的电力负荷均匀性、电力线路走廊、电动汽车车主的方便程度的综合基础上,提出了一种全社会成本最小化的电动汽车充电站选址定容优化规划数学模型,如式(1)~(7)所示。

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (1)$$

$$C_1 = pC_e \sum_{q=1}^{q_{\max}} \sum_{r=1}^{r_{\max}} (d_{qr} \gamma_{qr} N_q) \quad q \in Q; r \in R \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{r_0(1+r_0)^{n_k}}{(1+r_0)^{n_k}-1} [T_r(C_T + C_P) + M_r C_M + A_r C_A + B_r + L_r] \quad (3)$$

$$C_3 = \varepsilon [T_r(C_T + C_P) + M_r C_M + A_r C_A + B_r + L_r] \quad (4)$$

$$C_4 = 365 C_e T_e [T_r(C_{Cu} + C_{Fe}) + M_r(C_L + C_W)] \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R} \gamma_{qr} = 1 \quad q \in Q \quad (6)$$

$$N_q \gamma_{\max} \gamma_{qr} \leq M_r T_e \quad (7)$$

其中, C_1 为电动汽车用户去往充电站路程产生的成本; C_2 为折算至每年的电动汽车充电站固定建设成本; C_3 为电动汽车充电站的年均运行维护成本; C_4 为电动汽车充电站的网损年费用; p 为电动汽车行驶单位千米耗电量; C_e 为电动汽车充电电价; d_{qr} 为从充电需求点 q 到电动汽车充电站 r 的距离; γ_{qr} 为从充电需求点 q 是否去电动汽车充电站 r 充电的决策变量,且 $\gamma_{qr} \in \{0, 1\}$; N_q 为充电需求点 q 需要充电的车辆数; r_0 为资金回收率; n_k 为充电站设计运行年限; T_r 和 C_T 分别为充电站 r 装设的配电变压器数目和配电变压器单价; M_r 和 C_M 分别为充电站 r 装设的充电机数目和充电机单价; C_P 为配电变压器扩容折算至单台配电变压器的费用系数; A_r 和 C_A 分别为充电站 r 的用地面积和土地征用单价; B_r 为充电站 r 的基础设施建设费用; L_r 为充电站 r 的电力走廊建设费用,表示由架空线更换为地下电缆所产生的费用; ε 为将设备维护费用、折旧费用、员工工资折算到初期投资成本的折算系数; T_e 为充电站每天平均有效工作时间; C_{Cu} 和 C_{Fe} 分别为折算至单台配电变压器的铜损和铁损; C_L 和 C_W 分别为折算至单台充电机的线路损耗和充电损耗; Q 为充电需求点的集合,且 $q \in Q = \{1, 2, \dots, q_{\max}\}$, $q_{\max}$ 为充电需求点总数; R 为电动汽车充电站集合,且 $r \in R = \{1, 2, \dots, r_{\max}\}$, $r_{\max}$ 为充电站总数; $\gamma_{\max}$ 为需求点电动汽车最大同时充电率。式(6)、(7)为约束条件,式(6)表示每一个需求点到且只到一个充电站进行充电,式(7)表示充电站 r 服务范围内的需求充电车辆不应大于该站的服务能力。

2 混沌模拟退火粒子群优化算法

2.1 粒子群优化算法及其不足之处

粒子群优化算法是一种基于群体协作的随机搜索算法,其算法的中心思想源自对鸟群捕食行为的研究,自从其在 1995 年由 Eberhart 和 Kennedy 提出以来^[11],一直是广大学者的研究热点。其迭代形式如下:

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{pd}^k - X_{id}^k) \quad (8)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (9)$$

其中, ω 为惯性权重,反映了粒子原来的移动速度对现在的影响,其大小影响了粒子种群的全局搜索能力; P_{id}^k 、 P_{pd}^k 分别为粒子 i 自身最优位置和种群全局最优位置; c_1 、 c_2 为学习因子,分别表示了粒子在自身最好状态和全局最好状态下的学习能力; r_1 、 r_2 为 0~1 之间的随机数。

分析其迭代方程可以看出,粒子群优化算法在计算中虽然收敛速度较快,但非常容易陷入局部最优的情况。例如,处于全局最优位置的粒子其移动速度只由其自身的速度惯性决定,当自身速度为 0 时其将停止运动,当所有粒子被吸引运动到这个位置时将会停止搜寻。而在实际中,这个位置往往是局部极值。因此,为了将算法应用于充电站选址定容问题中,必须提高算法的全局搜索能力,避免过早陷入局部最优的情况。

2.2 算法的改进

为了解决粒子群优化算法后期收敛于局部极值的问题,本文提出了一种基于混沌理论和模拟退火算法的粒子群优化(CSAPSO)算法,引入模拟退火算法的概率突跳能力,使 CSAPSO 算法不但可以接受好的解,也能以一定的概率接受差的解,在退火温度的控制下能有效地提高全局搜索能力。同时引入混沌理论对 r_1 、 r_2 进行动态赋值,使粒子种群的运动行为更加优化。CSAPSO 算法的计算步骤如下。

a. 初始化参数:惯性权重 ω 、学习因子 c_1 和 c_2 、退火速度 δ 。

b. 随机生成包含 m 个粒子的种群,随机初始化粒子的位置和速度,在电动汽车充电站问题中粒子的位置与速度均为正整数。

c. 计算每个粒子 i 的适应度,记录各个粒子位置 P_{id} 和全局最优位置 P_{pd} 。

d. 选出整个种群的最优适应度 Z_{best} ,计算得到退火算法初始温度 T 。

e. 计算得到当前温度下各个 P_{id} 的退火算法适应度如下:

$$f_{TF}(P_{id}) = \frac{e^{-\frac{f(P_{id}) - f(P_{pd})}{T}}}{\sum_{i=1}^n e^{-\frac{f(P_{id}) - f(P_{pd})}{T}}} \quad (10)$$

其中, $f(P_{id})$ 为粒子位置在 P_{id} 时的粒子群优化算法适应度值; $f(P_{pd})$ 为粒子群最优适应度值。

f. 采用轮盘赌输的策略, 从所有个体最优位置 P_{id} 中选出一个值代替全局最优位置, 将其存入 P_{zd} 中。

g. 用 P_{zd} 代替 P_{pd} , 代入式(8)中更新各个粒子的速度如下:

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{zd}^k - X_{id}^k) \quad (11)$$

h. 计算各个粒子的适应度值, 更新各粒子的最优位置 P_{id} 和种群最优位置的 P_{pd} 。

i. 按照下式进行退火操作:

$$T = \delta T \quad (12)$$

j. 判断是否满足算法终止条件(电动汽车充电站选址问题中为预设的迭代次数), 若满足则停止搜索, 输出计算结果, 否则转至步骤 e。

2.3 相关参数的设置

a. 惯性权重的设置。

惯性权重表示粒子过去飞行状态对当前状态的影响, 其值直接决定了粒子种群的全局寻优能力和局部寻优能力。本文采取文献[12]提出的线性递减策略调整惯性权重。在算法运行初期, 较大的惯性权重确保了粒子群可以进行大范围的全局搜索, 以较快的速度确定最优解的大致位置。在迭代中后期, 惯性权重的缩小使粒子群能在局部更加精确地搜寻最优解。设置公式如下:

$$\omega(t) = \omega_{\text{start}} - \frac{\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}}}{k_{\text{max}}} k \quad (13)$$

其中, ω_{start} 和 ω_{end} 分别为起始和终止的惯性权重值, 一般分别设置为 0.9 和 0.4; k_{max} 和 k 分别为迭代次数和当前迭代数。

b. r_1 、 r_2 的设置。

本文采用混沌理论对 r_1 、 r_2 进行动态调整。采用 Logistic 模型产生混沌序列^[13]如下:

$$r_i^{k+1} = 4r_i^k(1-r_i^k) \quad r_i \in (0, 1); t=1, 2 \quad (14)$$

其中, r_i^k 为 r_i 在第 k 次迭代时的值, 由混沌理论可知, 当 r_i^1 不等于 0.25、0.5、0.75 时, 序列能呈现完全混沌的特性, 变量 r_i 可以不重复地遍历整个搜索空间, 提高了变量 r_i 的随机性。

c. 初始温度设置。

算法中初始温度 T 直接影响了模拟退火算法的全局搜索能力, 较高的初始温度可以显著提高搜索到全局最优解的可能性。设置公式如下:

$$T = -\frac{Z_{\text{best}}}{\ln 0.2} \quad (15)$$

其中, Z_{best} 为初始粒子种群中最优的适应度值。

d. 退火速度设置。

模拟退火算法运行中, 模拟的退火过程越慢, 算

法找到全局最优的概率就越大, 本文将退火速度设置为 0.95。

3 基于 CSAPSO 算法的充电站选址定容

3.1 规划假设

基于上文提出的电动汽车充电站选址定容规划模型, 做以下假设。

a. 选择城市的交通节点为电动汽车充电站的候选站址, 现实中应根据实际情况选取。

b. 将所有需求充电的车辆整合到距离其最近的交通节点, 将每个交通节点看作一个充电需求点, 在实际规划过程中充电需求量可结合交通节点典型日车流量数据和目标年电动汽车占比获得。

c. 假设每一个需求点的车辆到且仅到距离其最近的充电站进行充电。根据 Voronoi 图原理和需求点栅格化理论^[14], 即规定充电站的服务范围为到该充电站实际距离(由 Floyd 算法求得)最近的需求点的集合。

3.2 服务范围划定及 Floyd 算法概述

根据栅格化理论的思想, 将城市道路和交通节点组成的二维图形视作栅格化后的图形。按照假设将道路上需要充电的车辆和每个栅格内的需要充电的车辆整合到道路节点处, 将交通节点看作充电需求点。

划分充电站的服务范围: 将充电站的选址集合看作二维平面上的点集, 充电需求点视为平面上的点。根据 Voronoi 图原理可知, 充电站服务范围内的充电需求点到该站的实际距离应小于等于充电需求点到其他充电站的实际距离。

本文采用 Floyd 算法求实际距离, Floyd 算法的具体步骤如下。

a. 根据规划新区实际道路情况生成城市道路 CAD 图, 并对各道路节点进行编号。

b. 根据道路节点编号数 b , 生成 $b \times b$ 阶初始距离矩阵 $D^{(0)}$, 矩阵中元素 $d_{ij}^{(0)}$ 表示道路节点 i 到道路节点 j 的距离。如果节点 i 到 j 之间有直接相连的道路, 则 $d_{ij}^{(0)}$ 为两节点间实际道路长度; 如果节点 i 到 j 之间不能直接相连, 则 $d_{ij}^{(0)}$ 为无穷大, 如式(16)所示。

$$d_{ij}^{(0)} = \begin{cases} w_{ij} & \text{节点 } i \text{ 到 } j \text{ 间有直连的道路} \\ \infty & \text{节点 } i \text{ 到 } j \text{ 间无直连的道路} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $i, j=1, 2, \dots, b$; w_{ij} 为道路节点 i 到 j 之间的实际道路长度。

c. 对于任何 2 个道路节点 i 和 j , 判断是否存在一个中间节点 s , 使节点 i 通过节点 s 再到节点 j 的距离小于现有的距离, 如果存在这样的节点 s , 则更新迭代距离矩阵 $D^{(k)}$, 如式(17)所示。

$$d_{ij}^{(k)} = \min(d_{is}^{(k-1)} + d_{sj}^{(k-1)}) \quad s=1, 2, \dots, b; s \neq i, j \quad (17)$$

d. 按照上述规则更新迭代获得距离矩阵 $D^{(k+1)}$, 若 $D^{(k+1)} \neq D^{(k)}$, 则返回步骤 c; 否则终止迭代, 得到最短路径矩阵即为 $D^{(k)}$ 。

3.3 规划流程

具体规划流程如下。

a. 初始数据处理。处理规划目标城市道路交通信息及车流量信息, 生成城市道路 CAD 图, 得到各需求点充电需求量。以充电站最大服务容量、最小服务容量以及总充电需求量来估算最大建站数 $n_{\max}$ 和最小建站数 $n_{\min}$ 。

b. 充电站规划的粒子群编码。电动汽车充电站选址定容包含两部分内容: 站址的确定和站规模的确定。因此粒子编码形式如下:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n] \quad n \in (n_{\min}, n_{\max}) \quad (18)$$

其中, x_g 为互不重复的正整数, 表示第 g 个充电站选在备选位置 x_g 处; y_g 为正整数, 表示第 g 个充电站的规模等级。例如 $n=4$ 时, $\mathbf{X} = [15, 9, 31, 19, 1, 4, 4, 3]$ 表示在备选站址 15、9、31、19 处建站, 站规模等级分别为 1、4、4、3。

c. 按照编码形式生成初始粒子种群和粒子速度, 在充电站选址定容问题中, 粒子位置与速度的分量均为正整数, 因此在算法中应进行取整操作。

d. 根据规划模型求出个体适应度值和全局最优值(模型中涉及的距离均采用 Floyd 算法求解), 按照式(15)求出模拟退火算法初始温度。

e. 采用 CSAPSO 算法更新粒子群的位置与速度, 并记录全局最优适应度值。

f. 循环操作步骤 c—e。求出不同建站数 n 的最优适应度值及选址定容方案。

采用 CSAPSO 算法进行电动汽车充电站选址定容的规划流程如附录中图 A1 所示。

4 算例分析

以某典型新区的电动汽车充电站选址定容为例进行分析, 该新区规划总面积为 26.75 km^2 , 东西跨度为 6.4 km , 南北跨度为 5.3 km , 含有道路 78 条。该新区的道路节点图如图 1 所示, 图中的道路节点处数字为该节点的编号。各道路节点及其典型日的车流量见附录中表 A1。

规划在该新区建设适当的电动汽车充电站, 使充电站的全社会成本最小。假设充电站的使用运行年限为 20 a, 每辆电动汽车电池平均容量为 $50 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。根据文献[15]对电动汽车充电站等级及各项指标的划分, 合理假设电动汽车充电站的基本参数如附录中表 A2 所示, 表中建设成本为充电机成本、配电变压器成本以及基础建设成本之和, 不包含用地成本。该新区各类型土地出让价格如附录中表 A3 所示。

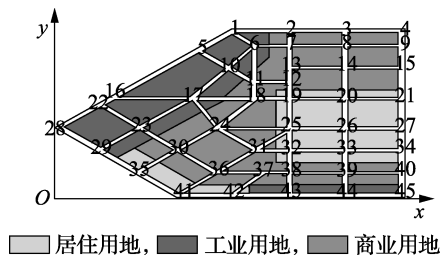


图 1 规划新区道路节点

Fig.1 Road nodes of new planning district

由于现有的车辆群体是汽油车与电动汽车的混合群体, 所以假设至规划目标年电动汽车所占的比例为 10%, 结合附录中表 A1 的数据可知, 分别按照单位日最小服务能力和最大服务能力配置充电站时, 可以计算得到分别需要 3 座和 18 座充电站。随着充电站数目的增多, 虽然降低了用户的充电路程成本, 但同时增加了充电站建设成本。所以经过合理的筛选规划, 可以得出该新区建设充电站数目为 3~7 座。采用 CSAPSO 算法进行计算的各项参数值见附录中表 A4。

CASPSO 算法参数如下: 粒子种群规模为 50, 起始惯性权重 $\omega_{\text{start}} = 0.9$, 终止惯性权重 $\omega_{\text{end}} = 0.4$, 退火速度 $\delta = 0.95$, 学习因子 $c_1 = c_2 = 1.49445$, 终止迭代次数为 200 次。通过计算可得当建设 3~7 座充电站时, 全社会成本如图 2 所示。可见当建设 4 座充电站时, 可满足该算例中用户充电需求并且使全社会成本最优。当建设 4 座充电站时, 各充电站选址、等级及其服务范围如表 1 所示。各项成本如下: $C_1 = 204.5$ 万元, $C_2 = 363.9$ 万元, $C_3 = 407.8$ 万元, $C_4 = 365$ 万元。

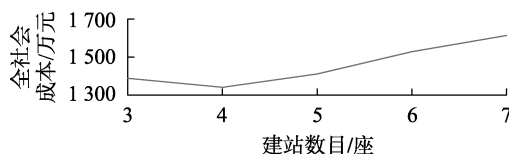


图 2 建站数目及对应成本

Fig.2 Cost of station vs. number

表 1 优化计算结果

Table 1 Optimal calculation results

充电站	建站道路节点	建站等级	服务道路节点
1	20	4	2—4, 6—9, 11—15, 18, 19, 21
2	26	4	24, 25, 27, 31—34, 36—45
3	22	1	23, 28—30, 35
4	16	2	1, 5, 10, 17

为了验证算法的优化能力, 当建站数目为 4 座时, 分别采用粒子群优化算法和 CSAPSO 算法对该算例进行求解, 得出 2 种算法的最佳适应度曲线如图 3 所示。由实验数据可知, 粒子群优化算法在迭代第 25 次时求得其最佳适应度值为 1 360.7 万元; CSAPSO 算法在迭代第 130 次时求得最佳适应度值

为1341.2万元。对比图3中2条曲线可知,迭代初期粒子群优化算法收敛的性能优于CSAPSO算法,并于较少的迭代次数时收敛,而CSAPSO算法在迭代的中后期仍保有较好的种群多样性,其最终综合优化结果优于粒子群优化算法。最终求得的建站位置及其服务范围示意图如图4所示。

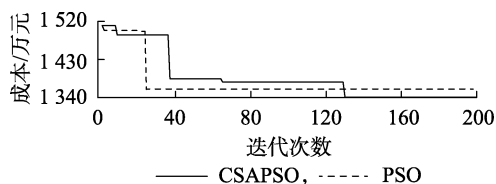


图3 2种算法最佳适应度曲线对比

Fig.3 Comparison of best fitness curve between two algorithms

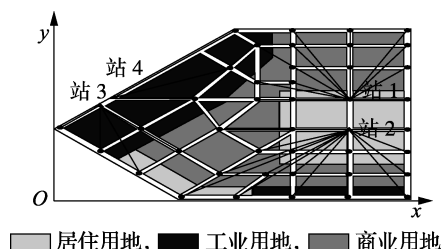


图4 建站位置及其服务范围示意图

Fig.4 Schematic diagram of charging station location and its service range

5 结论

本文考虑了充电站运营方、电网企业的电力负荷均匀性、电力线路走廊、电动汽车车主的方便程度等多方面因素,对选址定容问题进行了研究,通过对某典型新区的算例进行分析,得到的主要结论如下。

a. 针对电动汽车选址定容问题,提出了一种全社会成本最优化的充电站规划模型,平衡了电动汽车用户、充电站运营方和电网企业的利益。提出了CSAPSO算法来改善粒子群优化算法早熟和局部收敛的问题。

b. 提出的CSAPSO算法相较于传统的粒子群优化算法全局寻优能力更好,求得的规划结果更为优化。通过引入混沌理念,使粒子更加高效地遍历整个搜索空间。同时结合模拟退火算法的概率突跳特性,使算法在迭代进行到中后期时,仍能保持较高的全局寻优能力,避免出现过早的陷入局部最优的情况。

c. 算例中考虑了不同用地性质的情况,并且采用Floyd算法求取距离代替传统算法中的欧氏距离,结合Voronoi图思想及需求点栅格化理论划分充电站服务范围,进一步提高了算法的准确性。

现实中,充电站的选址定容问题仍有很多需要考虑的因素,例如:充电站中快慢桩的配比问题、充电需求的时空分布问题、电动汽车充换电方式等。

在下阶段的研究中可以针对以上问题,构建更加合理准确的规划模型。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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]. (2015-10-09)[2018-01-16]. <http://zfxxgk.ndrc.gov.cn/PublicItemView.aspx?ItemID=%7bba02b628-cd5a-4ecd-8431-63bb32-a657d3%7d>.
- [2] 麻秀范,王皓,李颖,等. 基于变权Voronoi图和混合粒子群算法的电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报,2017,32(19):160-169.
MA Xiufan, WANG Hao, LI Ying, et al. Optimal planning of charging stations for electric vehicle based on weight-changed Voronoi diagram and hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 160-169.
- [3] 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.
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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 葛少云,冯亮,刘洪,等. 考虑车流信息与配电网络容量约束的充电站规划[J]. 电网技术,2013,37(3):582-589.
GE Shaoyun, FENG Liang, LIU Hong, et al. Planning of charging stations considering traffic flow and capacity constraints of distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 582-589.
- [7] 刘畅,刘洪,李香龙,等. 考虑路网与配电网可靠性的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):28-34.
LIU Chang, LIU Hong, LI Xianglong, et al. Multi-objective EV charging station planning with consideration of road network reliability and distribution network reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 28-34.
- [8] 张成,滕歆. 电动汽车充电站规划模型及评价方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(1):49-52.
ZHANG Cheng, TENG Huan. Planning model and evaluation method for electric vehicle charging station[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(1): 49-52.
- [9] 陈光,毛召磊,李济沅,等. 计及碳排放的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统自动化,2014,38(17):49-53,136.
CHEN Guang, MAO Zhaolei, LI Jiyuan, et al. Multi-objective optimal planning of electric vehicle charging stations considering carbon emission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17):

- 49-53, 136.
- [10] 陈静鹏, 艾芊, 肖斐. 基于用户出行需求的电动汽车充电站规划[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 34-39.
CHEN Jingpeng, AI Qian, XIAO Fei. EV charging station planning based on travel demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 34-39.
- [11] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, WA, Australia; IEEE, 1995: 1942-1948.
- [12] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]// IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage, AK, USA; IEEE, 1998: 69-73.
- [13] 刘爱军, 杨育, 李斐, 等. 混沌模拟退火粒子群优化算法研究及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(10): 1722-1730.
LIU Aijun, YANG Yu, LI Fei, et al. Chaotic simulated annealing particle swarm optimization algorithm research and its application[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(10): 1722-1730.
- [14] KENNEDY J, EBERHART R. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]// Proceedings of the World Multi Conference on Systems, and Cybernetics. Orlando, FL, USA; IEEE, 1997, 4104-4108.

- [15] 北京市质量技术监督局. 电动汽车电能供给与保证技术规范充电站: DB11/Z 728—2010[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2010.

作者简介:



艾 欣

艾 欣(1964—), 男, 吉林吉林人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为新能源电力系统及微网(**E-mail**: aixin@ncepu.edu.cn);

李一铮(1994—), 男, 内蒙古赤峰市人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统及微网(**E-mail**: lyz19940406@163.com);

王坤宇(1991—), 男, 吉林辽源人, 博士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统及微网(**E-mail**: wky91@ncepu.edu.cn);

胡俊杰(1986—), 男, 江苏沭阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向为新能源电力系统及微网(**E-mail**: junjiehu@ncepu.edu.cn)。

Locating and sizing of electric vehicle charging station based on chaotic simulated annealing particle swarm optimization algorithm

AI Xin, LI Yizheng, WANG Kunyu, HU Junjie

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the problem of the locating and sizing for urban electric vehicle charging stations, a locating and sizing planning model for charging stations is proposed, which considers the comprehensive profits of charging station operators, electric vehicle users and power grid enterprises. Combined with the shortest path algorithm of Floyd, the Voronoi graph and demand point grid theory are employed to divide the service range of charging stations. A chaotic simulated annealing particle swarm optimization algorithm is used to solve the problem, in which, the theory of chaos is introduced to enable particles more efficient in traversing search space, and the probability jump characteristic of the simulated annealing algorithm ensures that the algorithm still exhibits an efficient global optimization ability in the later period of iteration. Test results indicate that the proposed algorithm is feasible and effective for the optimal locating and sizing of urban electric vehicle charging stations.

Key words: electric vehicles; locating and sizing; charging station planning; chaos theory; simulated annealing particle swarm optimization algorithm

附 录

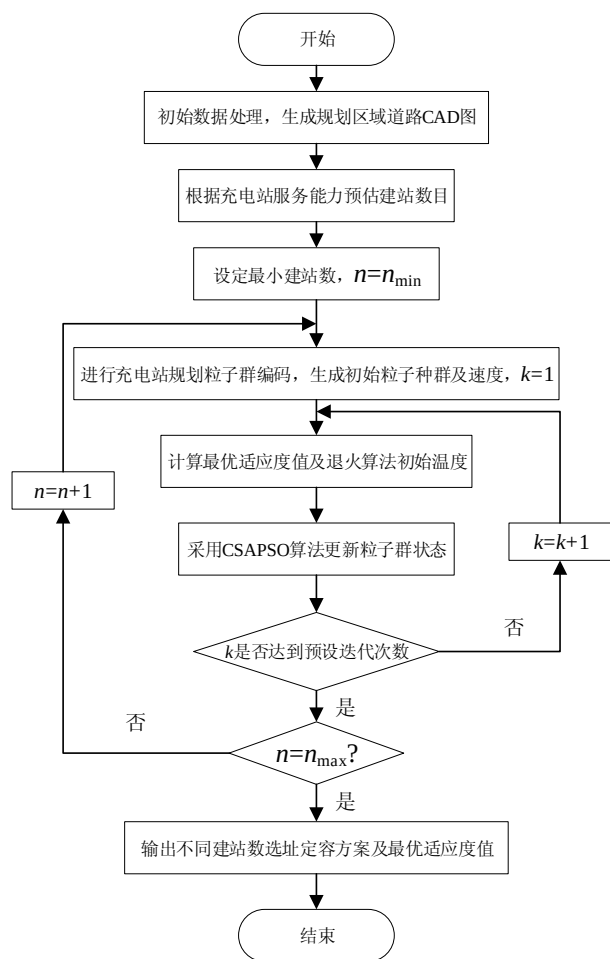


图 A1 充电站选址定容规划流程

Fig.A1 Flowchart of planning of charging stations

表 A1 道路节点及其典型日车流量

Table A1 Road node and typical daily vehicle flow

道路节点编号	典型日车流量/ 辆	道路节点编号	典型日车流量/ 辆
1	2990	24	7424
2	2626	25	6024
3	3190	26	3870
4	2989	27	2312
5	2940	28	422
6	6608	29	1086
7	6368	30	3484
8	6200	31	4118
9	2658	32	3264

10	6808	33	4110
11	6420	34	2370
12	4816	35	654
13	5530	36	3132
14	4654	37	5052
15	2170	38	5420
16	3110	39	4802
17	8068	40	2658
18	4918	41	1400
19	4484	42	1476
20	4080	43	2022
21	2320	44	1432
22	2198	45	986
23	3628		

表 A2 充电站等级及其对应参数

TableA2 Charging station level and corresponding parameters

充电站等 级	服务能力/（辆/ 单位日）	建设成本/ 万元	充电机 个数	占地面积 /m ²
1	360	690	45	1085
2	240	520	30	693
3	100	310	15	337
4	60	210	8	165

表 A3 各类型土地出让价格

TableA3 Cost of different land

土地类型	住宅用地	商业用地	工业用地
土地单价/（万元/m ² ）	0.3174	0.7644	0.2583

表 A4 充电站规划参数数值

TableA4 Parameters of charging station planning

参数	数值	参数	数值
ρ /(kWh/km)	0.1429	r_0	0.12
C_e /(元/kWh)	0.8	n_k /年	20
C_{Cu} 、 C_{Fe} /(元/kWh)	0.04	ε (%)	15
C_L 、 C_W /(元/kWh)	0.05	$\gamma_{\max}$ (%)	10
T_e /小时	20		