

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.23.012

## 电动汽车公共充电站布局的最优规划

熊 虎, 向铁元, 祝勇刚, 宋旭东, 陈 浩, 陈红坤

(武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072)

**摘要:** 电动汽车未来大规模发展需要众多公共充电站服务, 公共充电站应根据电动汽车分布进行合理布局。给出电动汽车分布的预测方法, 采用基于排队论的充电机配置方法, 提出公共充电站布局最优规划的数学模型。采用与充电站布局有相似数学特点的 Voronoi 图划分充电站服务区域, 服务区内电动汽车考虑快充随机性, 采用排队论 M/M/s 模型, 以电动汽车排队等候时间为标准确定充电站规模。为解决 Voronoi 图全局寻优的困难, 与具备全局随机寻优能力的改进粒子群优化算法结合, 提出了最优规划的联合求解流程。算例分析验证了规划方法和算法的有效性和实用性。

**关键词:** 电动汽车; 充电站; 最优规划; Voronoi 图; 改进粒子群优化算法

### 0 引言

在能源和环境的双重压力下, 占能源消耗总量 40% 和占温室气体排放量近 25% 的交通行业<sup>[1]</sup>, 正在向低能耗、无污染的电动汽车方向发展。各国都在推动电动汽车的发展<sup>[2-4]</sup>, 中国承诺到 2020 年温室气体比 2005 年减排 40%~45%<sup>[5]</sup>, 低碳经济将成为中国发展方向, 作为国家确定的战略性新兴产业之一, 电动汽车将是新能源战略和智能电网的重要组成部分。预计 2020 年中国将有 20% 的新能源汽车份额, 电动汽车将达到 1 000 万辆<sup>[6]</sup>。

目前电动汽车处于示范推广期, 电动汽车充电的便利程度将直接影响消费者对电动汽车的购买行为<sup>[7]</sup>。电动汽车充电设施一般为充电站和充电桩。充电模式主要有整车(快速或慢速)充电模式和更换电池模式 2 种<sup>[8-9]</sup>。从服务对象看, 充电站可分为向社会私家车和出租车等服务的公共充电站, 以及向电动公交车等专用车辆服务的专用充电站。从充电设施运营和实用的角度看: 公共充电站的服务应首先满足电动汽车整车快速充电需求, 只配置快速充电机; 充电桩为长时间停车的电动汽车提供整车慢充服务; 更换电池模式需要解决电池产权、流通、标准等问题, 目前更适用于电动公交车等专用车辆。

充电桩和专用充电站的规划较易实现, 主要考虑在公共停车场或公交车首末站等专用停车场设置。公共充电站的规划却不同, 不仅要考虑服务范

围和规模, 还要考虑用户充电的便捷。公共充电站布局规划的模型和计算方法尚不成熟。文献[7]将各候选充电站建设点抽象为交通网络节点, 运用两阶段启发式算法评价并确定充电站建设点和规模; 文献[9]研究了不同充电方式的规划成本模型, 给出了不同充电方式的最优规划方法; 文献[10]研究了充电设施在排队等候中的概率特征, 分析了充电设施的运行效率来确定充电设施的最优配置。本文从电动汽车分布的预测入手, 建立公共充电站布局最优规划模型, 并提出相应的优化算法。

### 1 电动汽车分布预测和充电机配置方法

#### 1.1 电动汽车分布预测

一般生活区或商务区是车辆较为集中的区域且配有停车场。在规划水平年, 空间负荷预测综合考虑了小区用地性质、面积和人口信息, 负荷预测值可以反映小区生活和消费的发展水平, 随着电动汽车技术的成熟和人们环保意识的增强, 高发展水平小区电动汽车的购置能力更强。规划水平年, 电动汽车数量可根据城市的千人汽车保有量与小区人口预测, 并考虑小区负荷预测值修正, 表示为:

$$n_j = f_{\text{ceil}}\left(\alpha h_j \eta \frac{P_j}{P_a}\right) \quad j \in J_{\text{CN}} \quad (1)$$

$$P_a = \frac{1}{n} \sum_{j \in J_{\text{CN}}} P_j \quad (2)$$

式中:  $n_j$  为小区  $j$  电动汽车数量;  $\alpha$  为水平年千人汽车保有量;  $h_j$  为水平年小区  $j$  人口;  $\eta$  为电动汽车份额;  $P_j$  为水平年小区  $j$  负荷预测值;  $P_a$  为规划范围水平年负荷预测平均值;  $J_{\text{CN}}$  为小区集合;  $f_{\text{ceil}}(\cdot)$  为向上取整函数;  $n$  为小区集合数。

收稿日期: 2012-03-07; 修回日期: 2012-04-29。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB215201)。

需要说明的是,电动汽车的分布只考虑人口和车辆集中的居民、商务、服务等非工业功能小区。

由于功能小区用地性质单一且面积相对较小,可认为小区几何中心点代表电动汽车快充需求点,快充需求点到公共充电站的距离为该小区电动汽车快充行驶距离。

## 1.2 基于排队论的充电机配置方法

电动汽车电能需求应大部分由慢充满足,少数来不及慢充的需要公共充电站的快充服务。考虑电动汽车快充的随机性,文献[10-11]将电动汽车到充电站快充归结为排队论的 M/M/s 模型,但没有考虑车辆排队等候时间的限制。一般情况下,车辆进入充电站后非常关心排队等候时间,在车辆数一定的情况下,排队等候时间随充电机增加而减小,充电机应在规定的排队等候时间期望下配置。

若充电站服务区内电动汽车数量为  $n_{ev}$ ,单车日快充概率为  $p$ ,提供快充服务的充电机数量为  $N_{ch}$ ,充电机单车快充时间为  $t_s$ ,电动汽车快充时段为  $t_c$ ,根据排队论的 M/M/s 模型<sup>[12]</sup>,电动汽车排队等候时间期望  $W_q$  为:

$$W_q = \frac{N_{ch} \rho^{N_{ch}+1} P_z}{\lambda N_{ch}! (N_{ch} - \rho)^2} \quad (3)$$

$$P_z = \left[ \sum_{k=0}^{N_{ch}-1} \frac{\rho^k}{k!} + \frac{N_{ch} \rho^{N_{ch}}}{N_{ch}! (N_{ch} - \rho)} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中:  $P_z$  为充电机全部空闲的概率;  $\rho = \lambda/\mu$ , 为充电机服务强度,  $\lambda = n_{ev} p/t_c$ , 为服从泊松流的单位时间内到达充电站的电动汽车数量,  $\mu = 1/t_s$ , 为充电机的平均服务速率。

需要说明的是,式(3)和式(4)成立的必要条件是  $\rho/N_{ch} < 1$ 。

若  $W_q$  最大不超过  $W_{q,max}$ ,通过取式(3)的反函数来求充电机数量  $N_{ch}$  困难。可利用式(3),使充电机数量从  $N_{ch} = f_{ceil}(\rho)$ ,  $N_{ch} \neq \rho$  开始循环增加,直至满足  $W_q < W_{q,max}$  为止,从而确定满足  $W_q$  的  $N_{ch}$ 。需要说明的是,实验表明  $W_q$  随  $N_{ch}$  增加而迅速减小,少量循环操作即可满足要求。

## 2 公共充电站布局最优规划的数学模型

公共充电站布局规划不仅要考虑充电站的建设成本,还要考虑用户快充成本。用户快充成本主要包括快充购电成本、快充途中耗时成本、到站排队等候时间成本 3 个部分。一般快充电量为蓄电池组的 80%,快充时段为上班或下班时段,电价可认为一样,因此电动汽车快充购电成本可认为一样,可忽略其影响。公共充电站布局规划的目标是在满足快充

需求的前提下,使充电站的建设成本、快充途中耗时成本和到站排队等候时间成本三者最小。

### 2.1 目标函数

$$\min F_{cost} = C_{CS} + C_{VT} + C_{WT} \quad (5)$$

式中:  $F_{cost}$  为公共充电站的社会年总成本;  $C_{CS}$  为公共充电站的年建设运行成本;  $C_{VT}$  为用户快充途中年耗时成本;  $C_{WT}$  为用户到站排队等候年时间成本。

#### 1) 公共充电站年建设运行成本

年建设运行成本包括年固定投资和年运行成本。固定投资主要是充电机、土地、配电变压器和其他辅助设备的投资成本。运行成本主要是充电站的人员工资和设备维护等成本。

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,同时管理人员越多,运行维护成本也越大。因此,固定投资和运行成本都是充电机数量  $N_{ch}$  的函数。年建设运行成本可表示为:

$$C_{CS} = \sum_{i \in J_{CS}} \left[ f_{CS}(N_{chi}) \frac{r_0(1+r_0)^{m_s}}{(1+r_0)^{m_s}-1} + u_{CS}(N_{chi}) \right] \quad (6)$$

式中:  $f_{CS}(N_{chi})$  为充电站  $i$  的固定投资函数;  $u_{CS}(N_{chi})$  为充电站  $i$  的年运行成本函数,可按固定投资的一定比例取值;  $N_{chi}$  为充电站  $i$  的充电机数量;  $r_0$  为贴现率;  $m_s$  为充电站的折旧年限;  $J_{CS}$  为充电站集合。

#### 2) 用户充电途中年耗时成本

充电途中年耗时成本(1 a 以 365 d 计)主要由快充需求点到充电站的距离决定,可表示为:

$$C_{VT} = 365\beta \frac{\sum_{i \in J_{CS}} \sum_{j \in J_{CNI}} p n_j \lambda_{ij} d_{ij}}{v} \quad (7)$$

式中:  $\beta$  为城市出行时间成本系数;  $\lambda_{ij}$  为需求点  $j$  到充电站  $i$  的城市道路非直线系数;  $d_{ij}$  为需求点  $j$  到充电站  $i$  的空间直线距离;  $v$  为城市交通平均行驶速度;  $J_{CNI}$  为属于充电站  $i$  的快充需求点集合。

式(7)中城市道路非直线系数  $\lambda_{ij}$  是城市两点间道路实际最短距离  $d_{tij}$  与其空间直线距离  $d_{ij}$  之比<sup>[13]</sup>,即

$$\lambda_{ij} = \frac{d_{tij}}{d_{ij}} \quad (8)$$

$\lambda_{ij}$  最小值为 1,  $\lambda_{ij}$  越小表明两点间交通越便捷。文献[13]归纳了 4 种道路网络结构的非线性系数:方格网式 1.00~1.41;环形放射式 1.1~1.2;自由式 1.1~2.6;混合式 1.0~1.4。

### 3) 用户到站排队等候年时间成本

用户到站排队等候年时间成本由电动汽车快充期望和到站排队等候时间期望决定,可表示为:

$$C_{WT} = 365\beta \sum_{i \in J_{CS}} (W_{qi} \sum_{j \in J_{Cni}} p n_j) \quad (9)$$

式中:  $W_{qi}$  为充电站  $i$  的排队等候时间期望。

## 2.2 约束条件

### 1) 各充电站充电机配置不等式约束

$$N_{ch,min} \leq N_{chi} \leq N_{ch,max} \quad i \in J_{CS} \quad (10)$$

式中:  $N_{ch,min}$  和  $N_{ch,max}$  分别为充电机配置的最小和最大值。

### 2) 快充需求点到充电站距离的不等式约束

为避免用户长距离行驶充电,快充需求点到充电站距离约束可表示为:

$$\lambda_{ij} d_{ij} \leq d_{max} \quad j \in J_{Cni}, i \in J_{CS} \quad (11)$$

式中:  $d_{max}$  为快充需求点到充电站最大距离。

### 3) 充电站间距离不等式约束

为避免充电站布局过于密集,站间距离约束可表示为:

$$\lambda_{ij} D_{ij} \geq D_{min} \quad i, j \in J_{CS}, i \neq j \quad (12)$$

式中:  $D_{ij}$  为充电站  $i$  和  $j$  的直线距离;  $D_{min}$  为充电站间最小距离。

联合式(5)一式(7)和式(9)一式(12),构成公共充电站布局最优规划的数学模型。模型中有众多变量,包括充电站及其服务区域内快充需求点组成的集合变量、充电站站址坐标组成的连续变量、各充电站的服务车辆数组成的离散变量、充电站数量及其充电机配置组成的整数变量。对于这样复杂的优化问题,传统优化方法难以求解。

## 3 Voronoi 图和改进粒子群优化算法的联合求解

### 3.1 Voronoi 图和改进粒子群优化算法

Voronoi 图(简称 V 图)又称泰森多边形。V 图可看做由生长点集的每个生长点  $p_i (i=1, 2, \dots, n, n \geq 2, n \in \mathbf{R})$  以等同速度向四周扩张,直到相遇为止,扩张结束形成 V 图。具备最邻近特性的 V 图在气象、测绘、考古等领域,尤其是地理设施选址方面被广泛应用<sup>[14]</sup>,在电力系统中也应用于变电站选址定容<sup>[15]</sup>。V 图的生成方法就算法特点而言,主要分为矢量生成法和栅格生成法。目前,高版本的地理信息系统(GIS)软件(如 ArcGIS 和 MapInfo)和高版本 MATLAB 软件都可以方便地实现 V 图的生成,如 MALAB 7.9 的 V 图命令“voronoi”。

粒子群优化(PSO)算法是 1995 美国学者 J. Kennedy 和 R. C. Eberhart 提出的群体智能优化

技术,是群体迭代的启发式算法,初始化的群体在搜索空间并行搜索,通过个体间的行为交互达到全局寻优的目的。PSO 算法与遗传算法(GA)有类似之处,但 PSO 算法没有选择、复制、变异等操作。与同为群体智能算法的蚁群算法(ACO)相比,PSO 算法保留了个体和全局的最优信息,具有个体和群体的协同搜索能力。PSO 算法需要调整的参数不多,结构简单易于实现。本文采用在原始粒子群算法<sup>[16]</sup>中修改惯性权重  $w$  及学习因子  $c_1$  和  $c_2$ ,达到提高搜索速度,减少陷入局部最优的效果。

惯性权重  $w$  采用在  $[0.5, 1.0]$  间随机取值,实验表明比线性递减策略精度更高,收敛速度更快<sup>[17]</sup>。惯性权重  $w$  可表示为:

$$w = 0.5 + 0.5 N_{rand} \quad (13)$$

式中:  $N_{rand}$  为  $[0, 1]$  间的随机数。

学习因子  $c_1$  和  $c_2$  采用非线性反余弦加速,  $c_1$  先大后小,  $c_2$  先小后大。基本思想是:搜索初期粒子飞行主要参考本身的历史信息  $c_1$ ,到了后期则更加注重社会信息  $c_2$ 。构造方式<sup>[14]</sup>如下:

$$c_1 = c_{1e} + (c_{1s} - c_{1e}) \left[ 1 - \frac{\arccos\left(-\frac{2t}{t_{max}} + 1\right)}{\pi} \right] \quad (14)$$

$$c_2 = c_{2e} + (c_{2s} - c_{2e}) \left[ 1 - \frac{\arccos\left(-\frac{2t}{t_{max}} + 1\right)}{\pi} \right] \quad (15)$$

式中:  $c_{1s}$  和  $c_{2s}$  为迭代初值;  $c_{1e}$  和  $c_{2e}$  为迭代终值;  $t$  为当前迭代次数;  $t_{max}$  为最大迭代次数。

本文取值为:  $c_{1s} = 2.5$ ,  $c_{2s} = 0.5$ ,  $c_{1e} = 0.5$ ,  $c_{2e} = 2.5$ 。

### 3.2 V 图和改进 PSO 算法联合优化求解流程

虽然 V 图有诸多适合选址的重要特性,但 V 图是一种由给定生长点剖分区域的局部最优,缺乏全局寻优的能力。本文采用具备全局随机寻优能力的 PSO 算法与 V 图联合求解。具体规划步骤如下。

步骤 1: 首先由规划区域电动汽车总数  $n_a$ , 应用 1.2 节方法估算总体充电机数量  $N_{ch\Sigma}$ 。然后确定规划区域整体充电站数量  $n_c$ ,  $n_c \in [n_{c,min}, n_{c,max}]$ , 其中,  $n_{c,min}$  和  $n_{c,max}$  分别为充电站最小和最大数量。

$$n_{c,min} = f_{ceil}\left(\frac{N_{ch\Sigma}}{N_{ch,max}}\right) \quad (16)$$

$$n_{c,max} = f_{ceil}\left(\frac{N_{ch\Sigma}}{N_{ch,min}}\right) \quad (17)$$

以充电站数量  $n_c$  为整数循环变量,搜索不同数量充电站及其充电机配置方案的最优解。

步骤 2: 在规划范围随机生成  $n_c$  个充电站站址

坐标,并编译为粒子初始坐标  $\mathbf{X}$ 。若随机站址坐标集  $S = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{n_c}, y_{n_c})\}$ , 则编译为粒子的  $2n_c$  维空间坐标可表示为:

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n_c} \ y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{n_c}] \quad (18)$$

若粒子种群为  $m$ , 则每个充电站随机同时产生  $m$  个站址坐标, 编译后粒子群初始坐标可表示为:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{n_c}^1 & y_1^1 & y_2^1 & \dots & y_{n_c}^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{n_c}^2 & y_1^2 & y_2^2 & \dots & y_{n_c}^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1^i & x_2^i & \dots & x_{n_c}^i & y_1^i & y_2^i & \dots & y_{n_c}^i \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1^m & x_2^m & \dots & x_{n_c}^m & y_1^m & y_2^m & \dots & y_{n_c}^m \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为  $m \times 2n_c$  阶矩阵, 第  $i$  行元素为第  $i$  个粒子的  $2n_c$  维空间坐标。

步骤 3: 作 V 图, 确定各充电站的充电机配置  $N_{ch}$ 。以充电站站址坐标  $S$  为生长点作 V 图, V 图凸多边形对应各充电站的服务区域, 根据各服务区域内电动汽车数量应用 1.2 节方法确定各充电站的充电机配置  $N_{ch}$  及其排队等候时间期望  $W_q$ 。  $m$  个粒子并行计算可得  $N_{ch}$  为:

$$\mathbf{N}_{ch} = \begin{bmatrix} N_{ch1}^1 & N_{ch2}^1 & \dots & N_{chn_c}^1 \\ N_{ch1}^2 & N_{ch2}^2 & \dots & N_{chn_c}^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ N_{ch1}^m & N_{ch2}^m & \dots & N_{chn_c}^m \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中:  $\mathbf{N}_{ch}$  为  $m \times n_c$  阶矩阵。

步骤 4: 计算各粒子适应值。各充电站充电机配置  $N_{ch}$  代入式(6)可得到各充电站年建设运行成本。同时, 由各充电站站址坐标和其服务区域内快充需求点坐标得到需求点到其所属充电站的直线距离  $d_{ij}$  ( $j \in J_{CNi}, i \in J_{CS}$ ), 考虑城市道路非直线系数  $\lambda_{ij}$ , 利用式(7)得到用户充电途中年耗时成本。并且, 根据各充电站所属电动汽车数量和快充概率, 与各站排队等候时间期望一起代入式(9)得到用户充电站排队等候年时间成本。最后, 由式(5)得到公共充电站的社会年总成本  $F_{cost}$ 。

采用罚函数法处理约束条件, 将以上数据代入式(10)一式(12), 若超出约束, 则取罚因子  $Q$  为  $F_{cost}$  的 100 倍; 否则,  $Q=0$ 。粒子群适应值为:

$$F_{fit} = F_{cost} + Q \quad (21)$$

记录个体极值  $P_p$  和全局极值  $P_g$ 。

步骤 5: 更新粒子群速度和位置, 并编译为新的充电站站址坐标。循环至步骤 3, 直至达到迭代次数或预定收敛精度, 预定收敛精度可选用寻优结果

的站址坐标变化量达到预定精度。本文采用较大迭代次数。

V 图和改进 PSO 算法联合求解整体流程图见图 1。

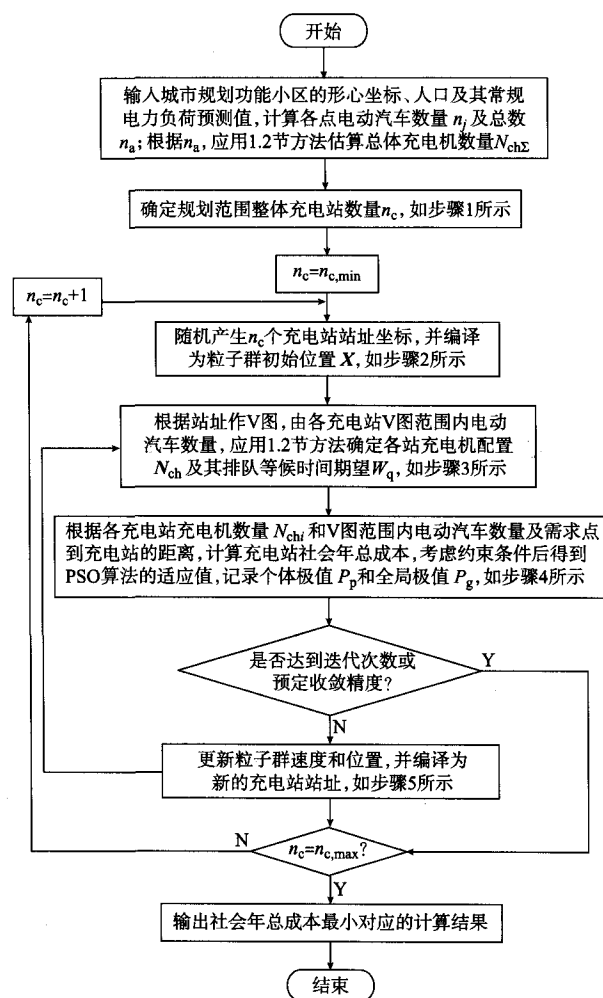


图 1 V 图和改进 PSO 算法联合求解的整体流程图  
Fig. 1 United solving flow diagram of Voronoi diagram combined with improved PSO algorithm

#### 4 算例计算与分析

某规划区面积  $8.2 \text{ km}^2$ , 分成 38 个功能区, 主要用于住宅、商业、办公等, 远期常规电力负荷预测总计  $177.5 \text{ MW}$ , 人口总计 7.87 万人, 负荷及人口分布见附录 A 图 A1。远期千人汽车保有量为 80 辆, 电动汽车份额 60%, 各小区电动汽车预测分布按式(1)分析, 合计 4 724 辆。

电动汽车单车日快充概率为 0.05, 即每 20 次充电中有 1 次快充, 1 d 充电 1 次。快充时段发生在上班(7:00~9:00)或下班(17:00~19:00)时段, 时段为 2 h, 充电站排队等候时间期望最大不超过 10 min。应用 1.2 节方法估算  $N_{ch\Sigma}$  为 62 台。充电

站的充电机配置范围  $N_{ch,min}$  为 4 台,  $N_{ch,max}$  为 12 台。

充电站固定投资用充电机数量  $N_{chi}$  的二阶多项式模型表示:

$$f_{CS}(N_{chi}) = W + qN_{chi} + eN_{chi}^2$$

式中:  $W$  为固定不变投资, 包括营业建筑和道路等辅助建设, 取  $W$  为 100 万元;  $q$  为站内与充电机单价有关的投资, 取  $q$  为 10 万元/台;  $e$  为与充电机数量有关的等效投资系数, 包括占地面积、配电变压器容量和电缆等, 取  $e$  为 3 万元/台<sup>2</sup>。

年运行成本  $u_{CS}(N_{chi})$  取固定投资成本的 10%。充电站折旧年限  $m_s$  为 20 a, 贴现率  $r_0$  为 0.08, 城市出行时间成本系数  $\beta$  为 30 元/h, 城市道路非直线系数  $\lambda_{ij}$  为 1.2, 城市交通平均行驶速度  $v$  为 40 km/h, 快充需求点到充电站最大距离  $d_{max}$  为 0.9 km, 充电站间最小距离  $D_{min}$  为 0.5 km。

应用 3.2 节图 1 的求解流程, 设置粒子种群数为 20, 最大迭代次数为 300 次, 不同充电站数量的计算结果见图 2, 最优解对应的充电站充电机配置及其投资见表 1 (社会年总成本为 765.43 万元), 站址及其服务区域划分见图 3。

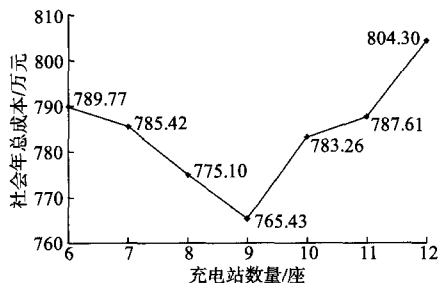


图 2 充电站社会年总成本曲线

Fig. 2 Social annual total cost curve of charging stations

表 1 充电站最优规划结果

Table 1 Results of charging station optimal planning

充电站编号	充电机配置/台	电动汽车/辆	年固定投资/万元	年运行成本/万元	途中年耗时成本/万元	年排队等候时间成本/万元
1	11	728	58.39	57.3	0.32	4.75
2	10	615	50.95	50.0	0.45	2.50
3	8	502	37.91	37.2	0.27	3.38
4	6	354	27.31	26.8	0.12	2.46
5	9	583	44.12	43.3	0.33	4.23
6	11	725	58.39	57.3	0.45	4.55
7	6	368	27.31	26.8	0.14	3.26
8	6	343	27.31	26.8	0.22	1.97
9	8	506	37.91	37.2	0.30	3.62

图 2 结果表明充电站为 9 座时最优。需要说明的是, 根据总充电机估算数量和充电机配置最大值, 规划区域最少需要 6 座充电站; 另外, 由于充电站间距离的限制, 在规划区域内最多只能容纳 12 座充电

站, 因此充电站数量计算范围为 6~12 座。

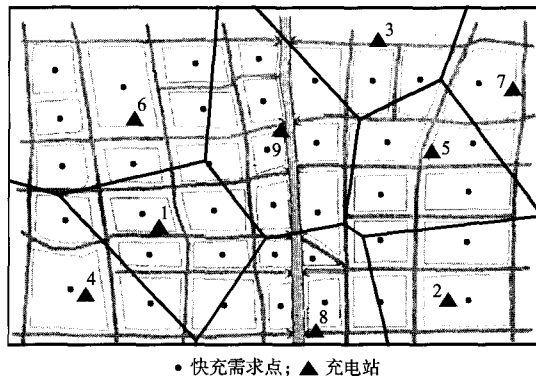


图 3 充电站选址结果及服务区域划分

Fig. 3 Results of charging stations location and services division

由表 1 可见, 各充电站有不同的充电机配置, 电动汽车数量和充电机匹配恰当, 有利于充分利用充电站。由图 3 可见, 三角形代表的充电站站址布局均匀, 靠近快充需求重心。并且服务区域划分明确, 有效解决了电动汽车分布不均匀的规划问题。

不同充电站数量的运算机时如图 4 所示, 整体运行时间为 758.52 s, 计算机采用 Pentium (R) Dual 1.60 GHz CPU, 内存 1 GB。从图 4 中可以看出, 运算机时随着充电站数量增多而增加, 主要消耗在粒子群适应值并行计算上。需要指出的是, 本文采用较大的固定迭代次数, 若采用站址坐标变化量达到预定精度且满足约束条件作为收敛判据, 运算机时将得到改善。

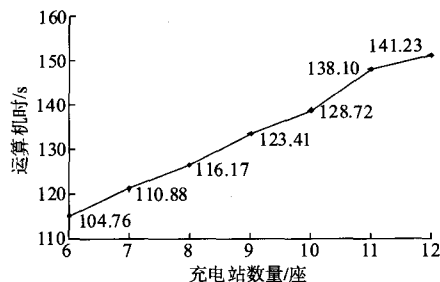


图 4 运算机时曲线

Fig. 4 Operation time curve

## 5 结语

电动汽车的大规模使用需要充电设施作为支撑, 充电站规划应纳入城市规划, 电动汽车充电站布局最优规划需要考虑多种因素, 优化问题的数学模型包含众多变量类型, 一般数学方法不适于求解。本文采用与充电站布局特点有许多相似数学特性的 V 图, 以 V 图生长点为充电站站址, V 图凸多边形划分服务区域, 服务区内电动汽车应用排队论 M/M/s 模型, 以最大排队等候时间确定充电机配置。

为解决 V 图缺乏全局寻优能力的缺点,采用具备全局随机寻优能力的改进 PSO 算法与 V 图联合求解,改进 PSO 算法根据布局最优规划的目标函数确定 V 图生长点,达到了全局寻优目的。本文方法无需给出充电站待选站址,能有效解决规划范围电动汽车分布不均匀的规划问题,可根据电动汽车分布自动生成站址和规模,并给出各充电站服务区域划分,使充电站固定投资、年运行成本、用户充电途中耗时成本及排队等候时间成本最小,方法有效实用。

附录见本刊网络版 (<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

### 参考文献

- [1] United States Energy Information Administration. International energy outlook 2010-highlights[R]. 2010.
- [2] VOELCKER J. Top 10 technology cars[EB/OL]. [2010-10-10]. <http://spectrum.ieee.org/green-tech/advanced-cars/top-10-tech-cars-of-2007>.
- [3] SCOTLAND W W F. The role of electric vehicles in Scotland's low carbon future[R]. 2010.
- [4] The Alpig Group. Electric vehicle market penetration in Switzerland by 2020[R]. 2010.
- [5] 中美宣布温室气体减排目标[EB/OL]. [2009-11-27]. <http://nfdaily.cn/epaper/nfds/content/20091127/ArticleA30002FM.htm>.
- [6] 25届电动车大会敲定中国电动车未来十年线路图[EB/OL]. [2010-11-09]. <http://auto.ifeng.com/news/special/diandongchedahui2010/20101109/460989.shtml>.
- [7] 任玉珑,史乐峰,张谦,等. 电动汽车充电站最优分布和规模研究[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):53-57.  
REN Yulong, SHI Lefeng, ZHANG Qian, et al. Optimal distribution and scale of charging stations for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 53-57.
- [8] 周逢权,连湛伟,王晓雷,等. 电动汽车充电站运营模式探析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):63-66.  
ZHOU Fengquan, LIAN Zhanwei, WANG Xiaolei, et al. Discussion on operation model to the electric vehicle charging station[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 63-66.
- [9] 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.  
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.
- [10] 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.  
LI Ruqi, SU Haoyi. Optimal allocation of charging facilities for electric vehicle based on queuing theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 58-61.
- [11] BAE S, KWASINSKI A. Spatial and temporal model of electric vehicle charging demand[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(1): 394-403.
- [12] 吴凤平. 运筹学方法与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2009.
- [13] 冯树民,高贺,郭彩香. 城市道路网结构形式的评价[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(10):1610-1613.  
FENG Shumin, GAO He, GUO Caixiang. Evaluation of structural types of urban road network[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(10): 1610-1613.
- [14] 陈军. Voronoi 动态空间数据模型[M]. 北京: 测绘出版社, 2002.
- [15] 葛少云,李慧,刘洪. 基于加权 Voronoi 图的变电站优化规划[J]. 电力系统自动化,2007,31(3):29-33.  
GE Shaoyun, LI Hui, LIU Hong. Substation optimization planning based on the weighted Voronoi diagram[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 29-33.
- [16] 李丽,牛奔. 粒子群优化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [17] BERGH F V D. An analysis of particle swarm optimizer[D]. South Africa: University of Pretoria, 2002.

熊 虎(1980—),男,博士研究生,工程师,主要研究方向:电力系统运行与控制、电力系统规划。E-mail: xh5233063@163.com

向铁元(1953—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制。E-mail: xty01@163.com

祝勇刚(1977—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统规划。

### Electric Vehicle Public Charging Stations Location Optimal Planning

XIONG Hu, XIANG Tieyuan, ZHU Yonggang, SONG Xudong, CHEN Hao, CHEN Hongkun  
(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Taking into account the need of electric vehicles (EVs) of many public charging stations with their rapid growth in the future, public charging stations should be located according to the distribution of EVs. The method of predicting the distribution of EVs is given, and the charger configuration method based on the queuing theory is provided. A mathematical model for charging station location optimal planning is presented. The Voronoi diagram with many mathematical properties similar to EV charging stations is used to divide service areas. By considering the randomness of fast charging, the queuing time of EVs in the service areas calculated by the queuing theory M/M/s model is used to determine the scale of charging stations. To solve the Voronoi diagram global optimization problem, the Voronoi diagram is combined with the improved particle swarm optimization (PSO) algorithm, which has global stochastic optimization ability, and forms a joint solving process of the optimal planning model. Finally, the example analysis verifies the effectiveness and practicality of the planning method.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215201).

**Key words:** electric vehicle; charging station; optimal planning; Voronoi diagram; improved particle swarm optimization algorithm