

基于 LCC 和量子遗传算法的电动汽车充电站优化规划

黄小庆¹, 杨 夯², 陈 颀¹, 江 磊¹, 曹一家¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410000; 2. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东省济南市 250000)

摘要: 电动汽车充电站优化规划是电动汽车与智能电网灵活互动的重要研究内容之一。面向电动汽车充电站运营周期, 详细分析了充电站的成本效益及全寿命周期成本(LCC)的计算方法; 基于上述工作, 提出利用交通路网车流量信息估算充电站容量, 以充电站运营商获得的净现值收益最大为优选目标, 以交通路网车流量、电网电能质量和经济性、用户充电需求为约束条件, 确定充电站的选址和容量; 进一步地, 提出了计及 LCC 的充电站优化规划模型, 并采用量子遗传算法求解该模型。算例仿真表明, 优化规划模型及其求解方法有效。

关键词: 充电站; 优化规划; 电网; 量子遗传算法; 全寿命周期成本

0 引言

化石能源短缺、环境污染加剧、电池技术进步促进了电动汽车产业的发展。大规模电动汽车能源供给设施的建设和运营是发展电动汽车消费市场的重要保证^[1-2]。电动汽车充电站(下文简称充电站)作为电动汽车配套设施的重要组成部分, 在政府政策支持及企业积极参与下得到迅速发展。基于实践应用和理论优化对城市纯电动汽车的主流充电模式对各方面影响进行综合分析, 提出相应的指标评价方法, 以及考虑需求侧响应和区域新能源的电动汽车优化控制策略^[3-4]。2014 年 5 月国家电网公司宣布向社会资本开放电动汽车充换电设施市场领域, 允许社会资本投资建设和运营该领域。社会资本的注入, 为电动汽车配套设施市场带来了新的机遇和挑战。作为充电站建设及运营的前期工作, 充电站规划的超前和合理性, 是电动汽车配套市场乃至电动汽车行业有序发展的保障。

充电站规划主要涉及充电站的选址^[5-6]、定容^[7-9]和方案优选问题^[10-12]。目前已经有部分学者针对充电站规划问题展开了研究。总结目前的研究成果, 现有研究对充电站的选址问题主要从考虑交通网络电动汽车流量^[13]、电网电能质量及经济性^[14]、电动汽车充电负荷的时空分布出发^[15], 确定充电站的合理位置; 对充电站的定容问题主要考虑

在确定服务区域范围基础上, 以满足区域电动汽车充电需求为目标, 运用排队论原理^[16]等方法确定充电站容量。对方案优选问题主要以全社会总成本、充电站建设及运营成本、用户路上成本、电网扩建成本和损耗成本等为优化目标, 以用户充电需求、电网、交通网络为约束进行规划方案优选^[17-19]。

从现有研究成果来看, 对于充电站规划问题, 已初步形成了充电站规划的基本原理、方法及步骤。合理的充电站规划, 对于提高用户的便利度, 减小其对电网的不利影响等方面, 都有积极的作用。但目前研究也存在一些问题, 例如对充电站规划方案的优选目标分析不到位, 不能与电动汽车市场运作的模式和发展方向契合, 目标的计算方法分析不深入; 优化规划模型的约束条件未能将交通路网、电力网络、用户需求、市政规划等统筹考虑, 导致模型不完善, 说服力较小等。

本文在分析总结现有研究成果基础上, 对充电站规划问题进行了更加深入的研究和分析。本文首先对充电站规划问题涉及的各方利益进行了分析, 提出计及充电站全寿命周期成本的规划方案优选目标; 其次对充电站的选址、定容问题建模, 确定优化规划模型的主要约束条件; 最后采用量子遗传算法对提出的充电站优化规划模型求解, 通过算例验证所提优化规划方法的正确性和有效性。

1 充电站优化规划目标

1.1 运营商-电网-用户的关系描述

在未来电动汽车市场, 充电站运营服务商既可

收稿日期: 2015-03-23; 修回日期: 2015-07-21。

国家科技支撑计划资助项目(2013BAA01B01); 国家自然科学基金资助项目(51137003, 61104090)。

能来自于电网公司,也可能来自于其他企业。充电站运营商需要购买电能为电动汽车充电。无论充电站运营商是否来自电网公司,均需保证充电站运营商在运营周期内的盈利。充电站的运营商、电网公司、用户相互间的依赖关系,如图 1 所示。从上文分析可见,充电站规划首先应当满足充电站运营商的盈利需求,并兼顾电网公司、电动汽车用户的利益。

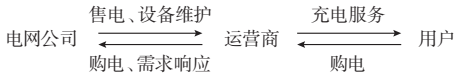


图 1 运营商-电网-用户相互关系

Fig.1 Relationship of operator, grid and customer

1.2 充电站成本效益分析

本文引入全寿命周期成本理论^[20],以充电站运营商所获得的净现值收益最大为目标进行充电站规划方案的优选。充电站运营商所获得的净现值收益用 V_{NPV} 表示, V_{NPV} 计算公式如下:

$$V_{NPV} = \sum_{t_c=1}^T (B_{t_c} - C_{LCC,t_c}) (1 + i_0)^{-t_c} \quad (1)$$

式中: t_c 表示充电站运营的第 t_c 年; B_{t_c} 为充电站运营周期内的资金收益; C_{LCC,t_c} 为充电站全寿命周期成本; i_0 为折现率; T 为充电站运营的全寿命周期。

全寿命周期成本 C_{LCC} 的计算公式为:

$$C_{LCC} = C_{IC} + C_{OC} + C_{MC} + C_{FC} + C_{DC} \quad (2)$$

式中: C_{IC} 为充电站投资成本; C_{OC} 为充电站运行成本; C_{MC} 为充电站检修维护成本; C_{FC} 为充电站故障成本; C_{DC} 为充电站报废成本。

下面,分别讨论充电站全寿命周期成本各分量的含义和计算方法。

充电站投资成本 C_{IC} 计算公式为:

$$C_{IC} = C_{ic} + C_{ie} + C_{ii} + C_{io} \quad (3)$$

式中: C_{ic} 为建筑工程费用; C_{ie} 为设备购置费; C_{ii} 为安装工程费; C_{io} 为其他费用。

充电站运行成本 C_{OC} 计算公式为:

$$C_{OC} = C_{oe} + C_{oh} \quad (4)$$

式中: C_{oe} 为能耗费; C_{oh} 为人工费。

充电站检修维护成本 C_{MC} 计算公式为:

$$C_{MC} = C_{mr} + C_{ml} \quad (5)$$

式中: C_{mr} 为充电站日常设备的维护费用; C_{ml} 为充电站计划检修费用。

充电站故障成本 C_{FC} 计算公式为:

$$C_{FC} = c_f N_1 T_{MTTR} + \lambda N_1 T_{fc} \quad (6)$$

式中: c_f 为充电站平均每次发生故障单位时间修复成本; N_1 为充电站发生故障的次数; T_{MTTR} 为充电站设备平均修复时间; λ 为充电站平均每次故障单位时间的惩罚成本; T_{fc} 为充电站故障持续时间。

充电站报废成本 C_{DC} 计算公式为:

$$C_{DC} = C_{dl} - K_0 (1 - d)^T \quad (7)$$

$$d = 1 - T \sqrt{\frac{K_d}{K_0}} \quad (8)$$

式中: C_{dl} 为充电站的报废处理费用; K_0 为充电站初始价值; d 为充电站折旧率; K_d 为充电站在第 T 年末的剩余价值。

全寿命周期成本中各成本分量产生的时间区间与具体的项目规模有关,从一般充电站的建设规模来看,投资成本在规划的基准年内可完成,不需要再进行折现计算;充电站运行成本、检修成本、故障成本在整个运营周期内各年都会产生;充电站报废成本一般发生在运营周期的最后一年内。文献[21]以中国某大型电动汽车充换示范电站为实例,分析了该电站在全寿命周期内的成本收益模型,进行敏感性分析得到影响收益的关键性因素依次为充换电服务价格、电池租赁费用、购电价格等。

2 充电站优化规划模型及其约束条件

2.1 充电站优化规划模型

本文以充电站运营商获得的净现值收益最大为优选目标,以交通路网车流量、电网电能质量和经济性、用户充电需求为约束条件,建立计及全寿命周期成本的充电站优化规划模型。模型目标函数如下:

$$\max V_{NPV} \quad (9)$$

2.2 交通网络约束

充电站的建设位置直接影响到充电站对用户的服务效果。充电站选址应当符合电动汽车车流量在交通网络中的分布规律。本文借鉴交通规划中的服务站选址方法,利用截流选址模型^[22]对充电站建设位置及组合进行约束,确保充电站的服务效果。

某地区交通路网结构用 $N(P, S)$ 表示。 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 表示交通网络中的所有路口节点的集合, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 表示交通网络中所有路段的集合。特别指出,该交通网络与一般交通工程学中定义的交通网络不同,一般的交通网络以实际地理信息为基础,统计道路、交通路口形成网络。本文主要目的是确定充电站的选址和定容,因此该交通网络由多条 O-D(origin-destination)线路交叉分布形成,其中路网节点的实际地理位置应当表示车辆密集停放的地点,如大型停车场、居民区、超市等;路段则是 O-D 线路交叉分割形成的。令 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_o\}$ 表示交通网络中汽车流量不为 0 的所有 O-D 线路的集合, N_l 表示在线路 $l(l \in L)$ 上的所有路网节点的集合, f_l 表示线路 $l(l \in L)$ 上产生的车流量, $I = \{i_1, i_2, \dots, i_q\}$ 表示交通网络中有电动汽

车充电需求的固定节点的集合, k_i 表示节点 $i(i \in I)$ 固定的停车量。

充电站选址的交通网络约束表示为:

$$f > f_{\min} \tag{10}$$

$$f = \sum_{l \in L} f_l y_l + \sum_{i \in I} k_i z_i' \tag{11}$$

式中: f 为单个充电站的总车流量; f_{\min} 为每个充电站中的总车流量的最小值约束; y_l 和 z_i' 均为 0-1 变量, 若属于某充电站的第 l 条线路($l \in L$)上至少建设一个充电站, 则 $y_l=1$, 否则 $y_l=0$, 若在属于某充电站的第 i 个节点($i \in I$)上建充电站, 则 $z_i'=1$, 否则 $z_i'=0$ 。

建设充电站的个数用 M 表示, 充电站集合表示为 $Z=\{z_1, z_2, \dots, z_M\}$, 确定充电站建设位置后, 利用 Voronoi 图^[23] 确定各个充电站的服务范围。每个路网节点所建设的充电站数量需要满足约束为:

$$M_p \leq 1 \quad p=1, 2, \dots, N_p \tag{12}$$

式中: M_p 为路网节点 p 的充电站数量; N_p 为路网节点的数量。

$$\sum_{p=1}^{N_p} M_p \leq M_{\max} \tag{13}$$

式中: M_{\max} 为区域内规划建设的最大充电站数量。

2.3 电网约束

充电站充电负荷较大, 其无序接入电网对电网电能质量和经济性都有不利影响。为保证充电站接入不会对电网产生较大不利影响, 需保证充电站接入电网后, 各指标保持在正常范围内。具体如下。

1) 节点电压幅值的上下限约束

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i=1, 2, \dots, N_d \tag{14}$$

式中: V_i 为配电网节点 i 的电压幅值; V_i^{\max} 和 V_i^{\min} 分别为节点 i 的电压幅值上、下限; N_d 为配电网中节点的个数, 特别地, 配电网的节点和交通路网节点并非一一对应, 属于不同的网络结构。

2) 变电站允许接入电动汽车充电功率容量约束

$$\sum_{k=z_1}^{z_M} P_{ek} \leq P_e^{\max} \tag{15}$$

式中: P_{ek} 为充电站 k 的充电功率; P_e^{\max} 为该区域变电站允许接入的电动汽车充电负荷的最大功率。

3) 馈线最大电流约束

$$|I_{ij}| \leq I_{ij\max} \quad i, j=1, 2, \dots, N_d \tag{16}$$

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

2.4 用户需求约束

充电站的选址和定容需要满足服务区域用户的充电需求, 如下式所示:

$$\sum_{k=z_1}^{z_M} P_{ek} \geq P_{\max} \tag{17}$$

式中: P_{\max} 为规划区域电动汽车充电负荷的最大值, 通过分析该区域电动汽车的统计数据得出。

$$D_{ek} \leq D_{\max} \quad k=z_1, z_2, \dots, z_M \tag{18}$$

式中: D_{ek} 为充电站 k 的服务半径; D_{\max} 为充电站的最大服务半径。

为避免用户充电的路上成本过大, 提高充电便利性, 充电站服务半径应维持在一定范围内。

3 充电站优化规划模型求解

3.1 求解算法——量子遗传算法

本文提出的充电站优化规划模型是一个非线性多约束的复杂优化模型, 适合采用智能算法求解。本文采用量子遗传算法^[24] 求解充电站优化规划模型。量子遗传算法是基于量子计算原理的一种遗传算法, 该算法将量子的态矢量表达引入遗传编码, 以态矢量表述为基础, 用染色体编码表示量子比特的几率幅, 使多个态的叠加可以用一条染色体表达, 并用量子非门和量子旋转门实现染色体的更新操作, 从而进行运算得到最优解。

1) 量子比特编码

在量子计算中, 采用 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 表示微观粒子的两种基本状态, 称它们为量子比特, 称符号“ $|\rangle$ ”为狄拉克记号。同样, 在量子遗传算法中, 最小的信息单元是量子位, 量子位具有两个基本态: $|0\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态。任意时刻量子位的状态 $|\psi\rangle$ 是基本态的线性组合, 称为叠加态, 即

$$|\varphi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle \tag{19}$$

式中: α 和 β 分别为量子态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的概率幅, 为两个常数, 且满足 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。

量子遗传算法采用二进制编码, 对存在多态的问题进行量子比特编码, 采用的编码方案为:

$$q_j^t = \left\{ \begin{matrix} \alpha_{11}^t & \alpha_{12}^t & \cdots & \alpha_{1K}^t \\ \beta_{11}^t & \beta_{12}^t & \cdots & \beta_{1K}^t \end{matrix} \right\} \tag{20}$$

式中: q_j^t 为第 t 代、第 j 个染色体; m 为染色体的基因个数; K 为编码每一个基因的量子比特数。

在本文中, 采用的最大迭代次数为 200 代, 种群大小为 40 个染色体, 每个染色体即为一个个体, 对应一组变量的确定解。其中每个充电站各有横纵两个坐标, 即两个变量。每个变量为长度为 20 的二进制串。

2) 量子更新处理

本文根据量子遗传算法的计算特点, 选择量子旋转门进行染色体更新, 其第 i 位的更新过程如下:

$$\begin{bmatrix} \alpha_i' \\ \beta_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中: θ_i 为旋转角,它的调整策略如表 1 所示。

表 1 量子更新旋转角选择策略
Table 1 Quantum updating rotation angle selection strategy

x_i	$b_{\text{best}i}$	$f(x) > f(b_{\text{best}})$	$\Delta\theta_i$	$S(\alpha_i, \beta_i)$			
				$\alpha_i\beta_i > 0$	$\alpha_i\beta_i < 0$	$\alpha_i = 0$	$\beta_i = 0$
0	0	False	0	0	0	0	0
0	0	True	0	0	0	0	0
0	1	False	0.01π	+1	+1	0	± 1
0	1	True	0.01π	-1	-1	± 1	0
1	0	False	0.01π	-1	+1	± 1	0
1	0	True	0.01π	+1	-1	0	± 1
1	1	False	0	0	0	0	0
1	1	True	0	0	0	0	0

表 1 中, x_i 为当前染色体的第 i 位, $b_{\text{best}i}$ 为当前的最优染色体 b_{best} 的第 i 位, $f(x)$ 为适应度函数, $S(\alpha_i, \beta_i)$ 为旋转角方向, $\Delta\theta_i$ 为旋转角度大小, 本文所设为固定旋转角, 旋转角大小为 0.01π 。该调整策略是将个体 q_j^t 当前的测量值的适应度值(收益净现值) $f(x)$ 与种群当前最优个体的适应度值 $f(b_{\text{best}})$ 进行比较, 如果 $f(x) > f(b_{\text{best}})$, 则调整 q_j^t 中相应位的量子比特, 使得几率幅对 $(\alpha_i, \beta_i)^T$ 向着有利于 x_i 出现的方向演化, 反之, 如果 $f(x) < f(b_{\text{best}})$, 则调整 q_j^t 中相应位量子比特, 使得几率幅对 $(\alpha_i, \beta_i)^T$ 向着有利于 b_{best} 出现的方向演化。

3) 量子变异处理

量子变异的主要作用在于阻止未成熟收敛, 同时提供算法的局部收敛能力。在执行变异操作时, 以一定概率选择种群中的个体, 本文所设变异概率为 0.01, 对选中的个体随机产生一个变异位并通过量子非门作用, 互换变异位几率幅, 完成染色体变异操作。该变异操作将该个体的进化方向反转, 有助于防止算法过早陷入局部收敛, 增加种群多样性, 使得充电站规划模型的求解更加准确。

3.2 优化规划模型的求解步骤

本文假定拟建充电站数量为定值, 事先已确定需要建设的充电站的个数。

1) 充电站服务范围的确定

首先根据预设定的初始站址确定各充电站的服务范围, 进而计算各充电站的充电机配置数量。服务范围的划分借鉴常用的 Voronoi 图思想, 要求每座充电站服务范围内的充电需求点到该充电站的直线距离都不大于充电需求点到其他充电站的距离。

2) 充电站充电机配置数量的确定

在确定服务范围后, 需确定充电站额定容量。

常用的容量确定方法有基于排队论原理的方法、道路路口流量计算法、概率预测法等, 本文提出一种结合 O-D 线路车流量和路网节点固定充电需求量计算充电站额定容量的方法。设充电站 i 中充电机的数量为 n_i , 充电机充电功率为 P_c , 充电效率为 η_c , 电动汽车平均电池容量为 W_e , 充满一辆电动汽车用的时间为 T_e , 道路中电动汽车占汽车总量的比例为 K_e , 电动汽车充电同时率为 α_e 。服务范围 V_{si} 内各 O-D 线路平均每天(24 h)的车流量用 $f_l (l \in L)$ 表示, 用 $k_i (i \in I)$ 表示节点 i 平均每天(24 h)产生的固定停车量。充电站 i 中充电机配置数量表示为:

$$n_i = \left\lceil \frac{\alpha_e K_e W_e T_e \left(\sum_{l \in V_{si}} f_l + \sum_{i \in V_{si}} k_i \right)}{24 \eta_c P_c} \right\rceil \quad (22)$$

即通过 Voronoi 图理念确定所建充电站各服务区域, 再确定每个充电站内所划分的服务区域的车流量总和, 通过给定的电动汽车占汽车总量的比例 K_e 和电动汽车充电同时率 α_e , 可以得出同时充电的电动汽车数量, 再由充电效率 η_c 、电动汽车平均电池容量 W_e 、充满一辆电动汽车所需要的时间 T_e 等参数可以求出充电站内充电需求。根据充电机充电功率 P_c , 按满足最大充电需求取整可以求出每个充电站的充电机配置数量 n_i 。其中, 式(22)的各项参数是基于可见文献和相关统计数据获得的。

通过量子遗传算法求解充电站选址和充电机配置数量, 算法流程见图 2, 其计算步骤详见附录 A。

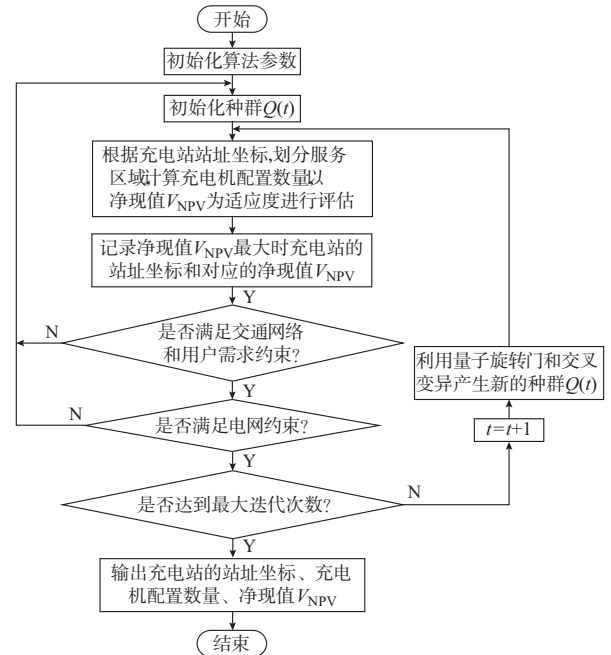


图 2 算法流程图
Fig.2 Flow chart of the algorithm

4 算例仿真与分析

针对本文提出的充电站优化规划方法,为简化计算,便于表示出该方法的应用价值,选取一个由36个路网节点和33个配电网节点耦合组成的区域进行算例仿真。在该区域内建设5个充电站,运用本文提出的方法建立充电站优化规划模型,仿真分析并求解。该区域用5×5共25个方格表示,每一个方格表示一个单位区域。其中配电网的节点与交通路网的节点重合,便于编程实现。实际情况,区域内的路网节点不可能与电网节点完全重合,需要重新绘制电网的地理接线图,而且实际区域的坐标也不会这么均匀,但是通过不断的剖分栅格化,总可以将区域缩小到适当的大小一致的方格单元,进而进行计算。仿真区域如图3所示。

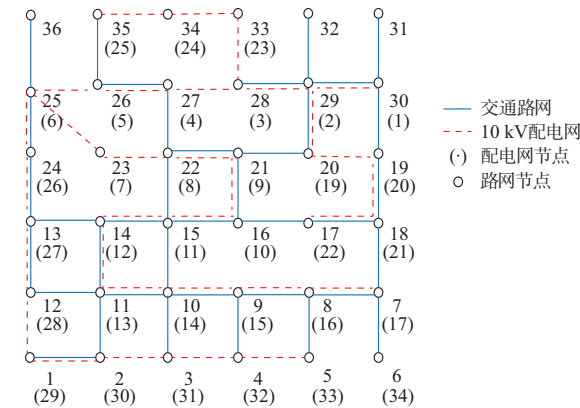


图3 规划区域线路及节点示意图
Fig.3 Lines and nodes of planning area

其中33节点配电网采用IEEE 33节点标准算例系统拓扑和线路及负荷参数,路网节点O-D线路走向和规划水平年车流量数据见附录B表B1,交通路网节点固定停车量见附录B表B2。

特别指出,该数据均为统计出的平均数据,通过对交通路网中各道路行驶车辆、停车场停放车辆的监控,运用云计算和大数据分析等先进的系统平台,采集、分析和预测车辆在各时段各地点的流量和停车状况是可以实现并较为准确地获取相关数据的。通过智能交通系统与智能电网互联,是能源互联网的重要组成部分之一。

考虑到实际充电站的全寿命周期成本受到诸多因素的影响,需根据实际充电站规划项目的具体情况确定。考虑到充电站的成本与充电站的配置容量关系最大,本文假设全寿命周期成本中各个组成分量与充电站的配置容量呈二次函数关系,以此来模拟充电站全寿命周期成本的变化:

$$C = \lambda_1 W^2 + \lambda_2 W \tag{23}$$

式中: C 为充电站全寿命周期成本中各组成分量; W 为充电站中配置充电机总的额定容量; λ_1 和 λ_2 分别为设定的成本与配置容量函数的系数。

充电站的充电服务收益用函数表示为:

$$B = \gamma p_c W T_u \tag{24}$$

式中: γ 为充电站充电机的平均利用率; p_c 为充电电价; T_u 为整个运营周期内有效的工作时间。

具体系数设定见附录B表B3。采用量子遗传算法求解充电站优化规划模型,得到建设5个充电站(记为充电站1,2,3,4,5)时,充电站的建站位置如图4所示。充电站总的净现值收益为13 578万元。充电站1,2,3,4,5规划的充电机实际数量为6.49,5.53,6.15,4.48,6.46个,考虑到必须保证最大的充电功率,基于满足最大充电需求的原则取值,得到各充电站的充电机数量分别为7,6,7,5,7个。

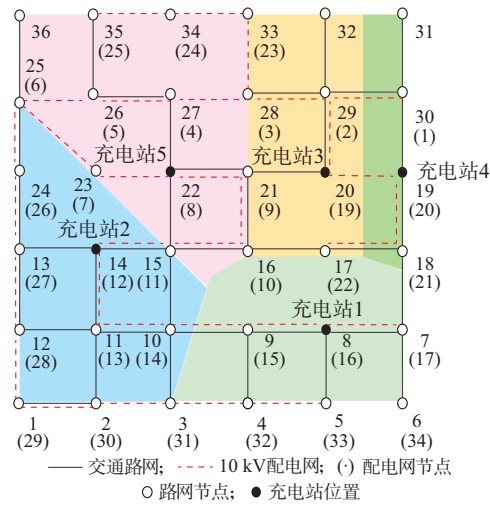


图4 充电站的位置及服务区域示意图
Fig.4 Location and service area of five charging stations

本文规划模型考虑了充电站整个运营周期内成本效益的收益,主要凸显在于长期规划,在长时间的统计中,本文规划模型的净收益将明显大于常规规划模型的净收益。其中,充电站1和5配置的充电机数量最多,为7个。充电站2的充电机配置数量最少,为5个。各个充电站的服务范围在图4中分别用不同颜色填充标出,充电站2和5的服务范围最大,充电站1和3次之,充电站4最小,且规划的充电站站址位置大都位于能捕获总车流量相对较大的、且电网负荷相对较小的节点,如充电站2位于路网节点14-电网节点12。这得益于模型对交通约束和电网约束的全面考虑。特别地,从规划结果来看,充电站4的服务范围相对于充电站5,服务范围较小,主要是因为充电站4和5的充电需求有一定差异。一方面,充电站4入选是因为本文对 f_{\min} 约束值设置的较小。另一方面,在实际运行中,充电站4

的充电机闲置时间相对较多一些。

为对比分析,采用遗传算法求解充电站优化规划模型,相较于量子遗传算法,遗传算法极易因为交叉概率、变异概率选取不当而陷入局部收敛,并且收敛速度较慢。而量子遗传算法采用量子比特编码可以使得一个染色体表达多个态的叠加,收敛速度快,精确度更高。仿真结果很好地验证了采用量子遗传算法在收敛速度、计算精度上的优势。求解建设 5 个充电站时,算法的迭代收敛情况如图 5 所示。

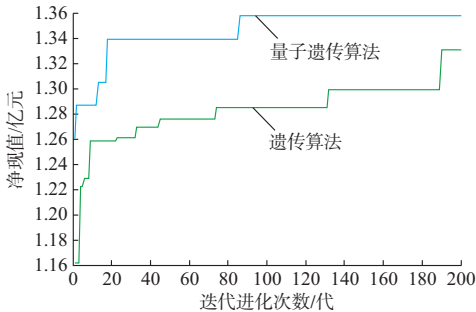


图 5 算法收敛对比
Fig.5 Algorithm convergence contrast

从图 5 可以看出,量子遗传算法的收敛速度明显优于遗传算法,量子遗传算法在 90 代左右收敛得到了收益最大值,而遗传算法在 190 代左右才收敛;遗传算法得到的最大值解小于量子遗传算法,说明遗传算法的求解值陷入了局部最优解,量子遗传算法的求解值高说明其较之遗传算法,能有效避免陷入局部最优解,求解的结果更为准确。

5 结语

本文提出了一种充电站优化规划的方法。从充电站投资主体最关心的净现值收益最大化出发,综合考虑投资、运行、检修、故障修复和报废成本,结合电网约束和交通流量约束,建立了充电站优化规划模型,并利用量子遗传算法求解模型,确定充电站的位置和站内充电机配置的数量。算例分析表明,该方法计算准确,算法收敛速度快,适用于充电站规划。本文工作对于当前缺额较大的充电站建设具有重要的理论指导价值。但由于目前缺少充电站运行数据,本文所建规划模型中的一些经验系数,如式(10)中交通网络中车流量的允许最小值、式(23)中成本函数的结构和系数等,还需进一步优化、修正。本文的下一步研究工作包括 O-D 流量的准确计算、成本模型的结构和系数的优化,以及更加准确的交通流量和流量约束计算等。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

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.
CHEN Liangliang, ZHANG Hao, NI Feng, et al. Present situation and development trend for construction of electric vehicle energy supply infrastructure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 11-17.

[2] 肖湘宁,温剑锋,陶顺,等.电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的研究与建议[J].电工技术学报,2014,29(8):1-10.
XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, TAO Shun, et al. Study and recommendations of the key issues in planning of electric vehicles' charging facilities [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 1-10.

[3] 刘文霞,张蕾蕾,刘宗岐,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.
LIU Wenxia, ZAHNG Leilei, LIU Zongqi, et al. A development pattern argumentation method for battery electric vehicles in cities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 34-40.

[4] LIU Hong, ZENG Pingliang, GUO Jianyi. An optimization strategy of controlled electric vehicle charging considering demand side response and regional wind and photovoltaic[J]. Journal of Modern Power System and Clean Energy, 2015, 3(2): 232-239.

[5] DONG J, LIU C, LIN Z. Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: an activity-based approach using multiday travel data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 38: 44-55.

[6] LAM A, LEUNG Y, CHU X. Electric vehicle charging station placement: formulation, complexity, and solutions[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2014, 5(6): 2846-2856.

[7] 高赐威,张亮,薛飞,等.集中型充电站容量规划模型研究[J].中国电机工程学报,2012,32(31):27-34.
GAO Ciwei, ZHANG Liang, XUE Fei, et al. Study on capacity and site planning of large-scale centralized charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 27-34.

[8] 路欣怡,刘念,汤庆峰,等.计及服务可用性的电动汽车换电站容量优化配置[J].电力系统自动化,2014,38(14):77-83.
LU Xinyi, LIU Nian, TANG Qingfeng, et al. Optimal capacity configuration of electric vehicle battery swapping station considering service availability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 77-83.

[9] 高赐威,吴茜,薛飞,等.换电模式下电动汽车电池组需求规划[J].电网技术,2013,37(7):1783-1791.
GAO Ciwei, WU Qian, XUE Fei, et al. Demand planning of electric vehicle battery pack under battery swapping mode[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1783-1791.

[10] LIU Z, WEN F, LEDWICH G. Optimal planning of electric vehicle charging stations in distribution systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(1): 102-110.

[11] ZHENG Y, DONG Z Y, XU Y, et al. Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(1): 221-229.

[12] WANG G, XU Z, WEN F, et al. Traffic-constrained multiobjective planning of electric-vehicle charging stations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(4): 2363-2372.

[13] 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.

WANG Hui, WANG Guibin, ZHAO Junhua, et al. Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 63-69.

[14] 所丽,唐巍,白牧可,等.考虑削峰填谷的配电网集中型充电站选址定容规划[J].中国电机工程学报,2014,34(7):1052-1060.

SUO Li, TANG Wei, BAI Muke, et al. Locating and sizing of centralized charging stations in distribution network considering load shifting[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1052-1060.

[15] 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.

GUO Chunlin, XIAO Xiangning. Planning method and model of electric vehicle charging infrastructure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 70-75.

[16] 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 vehicles based on queuing theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 58-61.

[17] 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.

LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 54-59.

[18] 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.

XIONG Hu, XIANG Tieyuan, ZHU Yonggang, et al. Electric vehicle public charging stations location optimal planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 65-70.

[19] 唐现刚,刘俊勇,刘友波,等.基于计算几何方法的电动汽车充电站规划[J].电力系统自动化,2012,36(8):24-30.

TANG Xiangang, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Electric vehicle charging station planning based on computational geometry method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 24-30.

[20] 苏海峰,张建华,梁志瑞,等.基于 GIS 空间分析与改进粒子群算法的变电站全寿命周期成本规划[J].中国电机工程学报, 2012,32(16):92-99.

SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Substation life cycle cost planning based on the gis spatial analysis and improved PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 92-99.

[21] 代倩,段善旭,蔡涛,等.电动汽车充换电站的成本效益模型及敏感性分析[J].电力系统自动化,2014,38(24):41-46.

DAI Qian, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Cost-benefit model and its sensitivity analysis for battery charging and swapping station for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 41-46.

[22] 杨珺,张敏,陈新.一类带服务半径的服务站截流选址-分配问题[J].系统工程理论与实践,2006(1):117-122.

YANG Jun, ZHANG Min, CHEN Xin. A class of the flow capturing location allocation model with service radius[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006(1): 117-122.

[23] BOSE N K, GARGA A K. Neural network design using Voronoi diagrams[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1993, 4(5): 778-787.

[24] LEE J C, LIN W M, LIAO G C, et al. Quantum genetic algorithm for dynamic economic dispatch with value-point effects and including wind power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(2): 189-197.

黄小庆(1981—),女,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:电动汽车与电网互动、智能变电站、电力信息集成。E-mail: huang_xq@126.com

杨 夯(1990—),男,硕士,主要研究方向:电动汽车充电站规划及运营技术。E-mail: yh19901018@126.com

陈 颀(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向:电动汽车充电站规划。E-mail: jie1897324@163.com

(编辑 万志超)

Optimal Planning of Electric Vehicle Charging Stations Based on Life Cycle Cost and Quantum Genetic Algorithm

HUANG Xiaoqing¹, YANG Hang², CHEN Jie¹, JIANG Lei¹, CAO Yijia¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China;

2. Shandong Power Economic Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250000, China)

Abstract: Optimal planning of electric vehicle charging stations is an important research area in the study of flexible interaction between electric vehicle and smart grid. The calculation method of cost-benefit and life cycle cost of electric vehicle charging stations is analyzed in the operation period of electric vehicle charging stations, based on which, a method of calculating charging station capacity using the data from the traffic flow is proposed, and an optimal objective of the operator gaining best net present value is proposed. With the traffic flow, the power quality and economy of grid and charging demand of customer as constraints, the location and capacity of charging stations can be determined. In addition, the optimal planning model of charging stations considering life cycle cost theory is proposed, with the quantum genetic algorithm used to solve the model. The simulation of the example has confirmed that the optimal planning model and solving method are effective.

This work is supported by National Key Technologies R&D Program (No. 2013BAA01B01) and National Natural Science Foundation of China (No. 51137003, No. 61104090).

Key words: charging station; optimal planning; power grid; quantum genetic algorithm; life cycle cost