

文章编号:1674-4578(2013)03-0026-02

# 基于模拟退火算法的城市电动汽车充电站优化布局\*

加鹤萍<sup>1</sup>, 谢胜利<sup>2</sup>, 邵翔<sup>1</sup>, 黄世龙<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 保定电力职业技术学院, 河北 保定 071015)

**摘要:**阐述了电动汽车充电站选址模型,以充电站收益最大化为目标函数,交通流量为约束条件,并运用模拟退火算法求解该模型。结果表明,将模拟退火算法应用于电动汽车充电站选址可以为电动汽车项目管理者提供一个优化或近似最优的选址方案。

**关键词:**电动汽车; 充电站选址; 模拟退火算法; 交通流量; 服务半径

**中图分类号:**TM922 **文献标识码:**A

## 0 引言

近年来,由于环保意识的增强和汽油价格的上涨,电动汽车项目得到了政府、企业的广泛关注,电动汽车将成为未来的发展主流,成为节能减排有力的手段和保证。然而,无论是混合动力汽车还是纯电动汽车都需要公用充电设施,因此,研究如何科学地进行充电站选址使得充电站整体经济效益最大化有着重要的现实意义<sup>[1-4]</sup>。本文将从充电站年均综合费用、电动汽车数量、电动汽车充电站间距等角度对电动汽车充电站优化布局问题进行建模、分析并求解。

## 1 电动汽车充电站优化布局的数学模型

在电动汽车充电站项目中,需要进行充电站选址工作。通常电动汽车充电站需要建在城市中电动汽车数量和流量较大的位置。电动汽车充电站优化布局的实际意义就在于花尽可能少的成本费用满足尽可能多的电动汽车的充电需求。本文以充电站收益最大化为目标函数,考虑充电站的建设、运行及充电等成本,以交通流量为约束条件,建立电动汽车充电站选址的综合优化数学模型。

$$\begin{cases} \max & \sum_{i=1}^n r q_i x_i - \sum_{i=1}^n f_i x_i \\ s. t. & \\ & q_i x_i \geq q_0 x_i, \quad \forall i \in I \\ & d_{i,j} x_i x_j \geq d_0 x_i x_j, \quad \forall i, j \in I \\ & x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \end{cases} \quad (1)$$

其中, $r$ 为在电动汽车充电站服务半径范围内的每辆电动汽车给充电站带来的收益, $q_i$ 为第 $i$ 个电动汽车充电站在其服务半径范围内的所有电动汽车数量, $f_i$ 为在充电站点 $i$ 建设充电站需要支付的费用, $q_0$ 表示充电站服务半径范围内的最少电动汽车数量要求, $d_{i,j}$ 为充电站点 $i$ 和 $j$ 之间的

距离, $d_0$ 表示充电站之间的最小距离, $x_i$ 表示是否在充站点 $i$ 修建电动汽车充电站(若修建,则 $x_i=1$ ,否则 $x_i=0$ )。

同时定义变量: $I=\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ 是备选电动汽车充电站站点的集合,矩阵 $D=(d_{i,j})_{n \times n}$ 和向量 $F=(f_i)_{n \times 1}$ , $Q=(q_i)_{n \times 1}$ , $R=(r_i)_{n \times 1}$ 。

模型(1)的解可用一长度为 $n$ 的字符串 $X=x_1 x_2 \dots x_n$ 表示,其中, $x_j(j \in I)$ 取0或1,代表第 $j$ 个待选点是否被确定为电动汽车充电站。

模型(1)是一个多约束优化问题,直接对其进行求解需要同时对所有约束进行判断,比较复杂,罚函数是优化理论中一类常用的约束条件处理技术,在模拟退火中处理不等式约束非常有效,本文利用罚函数法<sup>[5]</sup>将该模型进行转化。

$$\text{令 } g_i(X) = q_i x_i - q_0 x_i, \quad \forall i \in I,$$

$$h_{i,j}(X) = d_{i,j} x_i x_j - d_0 x_i x_j, \quad \forall i, j \in I \cap j \neq i,$$

$$\text{选取罚函数为 } G(X) = M_1 \sum_{i=1}^n \min\{g_i(X), 0\},$$

$$H(X) = M_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \min\{h_{i,j}(X), 0\}, \text{ 其中 } M_1, M_2 \text{ 为罚}$$

因子。

模型(1)得相应增广目标函数为:

$$Z(X) = \sum_{i=1}^n r q_i x_i - \sum_{i=1}^n f_i x_i + M_1 \sum_{i=1}^n \min\{g_i(X), 0\} +$$

$$M_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \min\{h_{i,j}(X), 0\},$$

当罚因子 $M_1$ 和 $M_2$ 充分大时,带复杂约束的优化问题就转化为如下约束简单的优化问题:

$$\begin{cases} \max & Z(X) \\ s. t. & \\ & x_i \in \{0, 1\}, \quad i \in I \end{cases} \quad (2)$$

当 $X$ 满足模型(1)的约束时, $g_i(X) \geq 0, h_{i,j}(X) \geq 0, i \in I,$

收稿日期:2013-03-30

基金项目:华北电力大学校级创新实验项目资助(20131008)

作者简介:加鹤萍(1992-),女,湖北襄樊人,在校大学生,主要研究方向:电力系统自动化。

谢胜利(1971-),男,河北保定人,副教授,主要研究方向:电机技术。

邵翔(1990-),男,江苏建湖人,在校大学生,主要研究方向:电力系统及其自动化。

黄世龙(1992-),男,甘肃临洮人,通信作者,在校大学生,主要研究方向:人工智能及模式识别、电力系统自动化。

$j \in J$ , 则罚函数  $G(X) = H(X) = 0$ , 即  $Z(X) = \sum_{i=1}^n r q_i x_i - \sum_{i=1}^n f_i x_i$ , 说明模型(1)和(2)在可行域中具有相同的最优解和最优值; 当  $X$  不满足式(1)的约束时, 则必存在  $i \in I, j \in J$ , 使得  $g_i(X) \leq 0, h_{i,j}(x) \leq 0$ , 此时充分大的罚因子  $M_1$  和  $M_2$  使得目标函数  $Z(X)$  变得非常小从而不能成为最大收益点, 因此优化过程可以继续。

采用这种形式的罚函数计算, 便于计算机实现。为简便应用, 在应用中  $M_1$  和  $M_2$  通常取  $10$  到  $10^4$  之间的固定值。

## 2 模拟退火算法

模拟退火算法<sup>[6]</sup>的设计重在温度参数的控制、可行解的迭代策略和算法终止条件三个方面。

### 2.1 温度参数的控制

温度参数的控制包括两个方面: 初始温度的选取和温度下降策略。

#### (1) 初始温度 $t_0$

模拟退火的原理是基于金属的热力学降温过程, 在这个降温过程中不断产生更新的最优解, 所以为了提供充足的优化空间, 就必须设置合理的初始温度。初始温度太低容易导致落入局部最优解的陷阱而无法跳出; 初始温度太高又容易产生冗余的迭代, 在本文中确定初始温度  $t_0$  为:  $t_0 = (F_{\min} - F_{\max}) / \ln P_0$ , 其中,  $P_0$  为初始接受概率,  $F_{\min}$  和  $F_{\max}$  分别为随机产生的  $L$  个初始可行解所得的最小和最大目标函数值。

#### (2) 温度下降方法

本文采用时齐算法的定比率温度下降方法:  $t_{r+1} = \alpha t_r$ , 其中  $0 < \alpha < 1$ 。在同一温度下, 则进行固定步数  $W$  进行迭代, 在实际应用中, 可以根据问题规模的大小适当调整  $W$ 。

### 2.2 迭代策略

模型的可行解是长度为  $n$  的 0、1 字符串所组成的集合, 所以把可行解  $X_0$  的邻域取为  $X_0$  的  $n$  位分别发生 0-1 转换产生的解组成的集合, 则任意可行解  $X$  邻居的个数为  $|N(X)| = n$ 。在迭代过程中, 从当前解的邻域内随机产生新的可行解, 且产生概率服从均匀分布, 即:

$$G_{xx'} = \begin{cases} 1/|N(X)|, & X' \in N(X) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

### 2.3 终止准则

(1) 零度法: 给定一个比较小的正数  $t_{\min}$ , 当温度  $t_r \leq t_{\min}$  时, 说明已达到较低温度, 进一步优化的可能性较小, 算法停止;

(2) 基于不改进规则的控制法: 如果当前最优解在连续  $Q$  步降温期间均没有被更新, 则认为已收敛到最优解, 算法停止。

## 3 基于模拟退火算法的城市电动汽车充电站优化布局计算步骤

运用本文所提出的模拟退火算法, 对城市电动汽车充电站进行规划的流程如下:

(1) 随机产生  $L$  个初始可行解  $X_1, X_2, \dots, X_L$ , 分别计算其目标函数值, 确定出最优解  $X^*$ , 令其为当前解  $X$ ; 根据初始可行解的目标函数值, 求出初始温度  $t_0$ , 令  $k=0$ ;

(2) 依据迭代策略, 产生新解  $X'$ , 并计算它对应的目标值  $f(X')$ , 令  $k=k+1$ ;

(3) 若  $k=W$ , 转(5); 否则, 转(4);

(4) 计算  $\Delta f(X) = f(X') - f(X)$ , 若  $\Delta f(X) \geq 0$ , 则  $X = X'$ ; 若  $\exp[\Delta f(X)/t] > \text{random}(0, 1)$ , 则  $X = X'$ , 转(2);

(5) 若当前最优解已经在  $T$  步降温期间均未改变, 则输出当前最优解, 算法停止; 否则, 转(6);

(6) 若  $t_r \leq t_{\min}$ , 则输出当前最优解, 算法停止, 返回  $X$  和  $f(X)$ , 否则施行温度下降策略  $t_{r+1} \leq \alpha t_r$ , 并转(2)。

## 4 算例分析

某电动汽车充电站项目计划投资建设两个电动汽车充电站, 备选地址是 8 个充电站:  $I = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8\}$ 。

已知  $F = \{20, 70, 50, 80, 30, 60, 40, 30\}$ ,

$Q = \{200, 400, 600, 100, 300, 700, 400, 200\}$ ,  $r=3$

$$d_{ij} = \begin{cases} 0 & 9 & 21 & 10 & 6 & 7 & 8 & 14 \\ 9 & 0 & 8 & 12 & 8 & 7 & 15 & 16 \\ 21 & 8 & 0 & 7 & 13 & 8 & 9 & 6 \\ 10 & 12 & 7 & 0 & 16 & 13 & 12 & 9 \\ 6 & 8 & 13 & 16 & 0 & 19 & 10 & 11 \\ 7 & 7 & 8 & 13 & 19 & 0 & 6 & 7 \\ 8 & 15 & 9 & 12 & 10 & 6 & 0 & 15 \\ 14 & 16 & 6 & 9 & 11 & 7 & 15 & 0 \end{cases}$$

利用本文提出的模拟退火算法,  $L=10$ ,  $P_0=0.1$ ,  $W=30$ ,  $d_0=10$ ,  $q_0=300$ ,  $M_1=90$ ,  $M_2=90$ ,  $T=20$ ,  $t_{\min}=1$ , 求得该问题的最优解为取  $I_3$  和  $I_6$  作为电动汽车充电站, 充电站总收益为 3790, 仿真时间小于 1 s, 表明该算法求解本文中提到的选址问题比较有效。

### 参考文献

- [1] 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): 36-40.
- [2] 任玉琰, 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.
- [3] 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.
- [4] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及可入网电动汽车的分布式电源最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 11-16.
- [5] 刁在筠, 郑汉鼎, 刘家壮, 等. 运筹学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [6] 韩强, 宿洁. 一类应急服务设施选址问题的模拟退火算法[J]. 计算机工程与应用, 2007(14): 202-203.

(下转第 34 页)

表5 相位的相对误差(%)

窗的类型	$E_{\varphi 1}$	$E_{\varphi 2}$	$E_{\varphi 3}$	$E_{\varphi 4}$	$E_{\varphi 5}$	$E_{\varphi 6}$	$E_{\varphi 7}$	$E_{\varphi 8}$	$E_{\varphi 9}$	$E_{\varphi 10}$	$E_{\varphi 11}$
Blackman-harris	$1.55e-1$	$-1.24e-1$	$-7.2e-3$	$-1.17e-2$	$-2.6e-2$	$-1.76e-2$	$-3.1e-2$	$8.92e-2$	$4.23e-2$	$-2.48e-1$	$-3.98e-1$
4项3阶 Nuttall	$2.1e-2$	$4.1e-2$	$-1.3e-3$	$3.9e-3$	$-4.1e-4$	$-4.1e-3$	$2.7e-3$	$-1.2e-2$	$-1.9e-3$	$-3.48e-2$	$2.92e-2$
4项5阶 Nuttall	$5.1e-4$	$-4.2e-4$	$5.5e-7$	$3.8e-7$	$-8.1e-7$	$-1.1e-5$	$-9.9e-7$	$2.3e-5$	$-3.1e-6$	$4.3e-4$	$1.5e-5$
窗的类型	$E_{\varphi 12}$	$E_{\varphi 13}$	$E_{\varphi 14}$	$E_{\varphi 15}$	$E_{\varphi 16}$	$E_{\varphi 17}$	$E_{\varphi 18}$	$E_{\varphi 19}$	$E_{\varphi 20}$	$E_{\varphi 21}$	
Blackman-harris	$2.25e-1$	$5.38e-1$	$-3.56e-1$	$-9.3e-2$	$1.446$	$5.74e-2$	$-7.1e-1$	$1.132$	$15.352$	$-8.12e-1$	
4项3阶 Nuttall	$-1.1e-2$	$9.8e-3$	$-2.55e-2$	$1.1e-3$	$1.79e-2$	$1e-4$	$-1.33e-2$	$3.1e-2$	$-1.72e-3$	$1.2e-3$	
4项5阶 Nuttall	$-1.9e-4$	$6.5e-6$	$-8.5e-5$	$1.8e-7$	$-2.2e-5$	$4.6e-7$	$6.7e-5$	$-3.3e-4$	$-1.8e-4$	$-1.8e-6$	

表6 基波频率的相对误差(%)

窗的类型	Blackman-harris	4项3阶 Nuttall	4项5阶 Nuttall
$E_n$	$6.2e-6$	$-3.5e-7$	$1.32e-9$

## 5 结论

针对目前电力系统中日益严重的谐波污染,为了保证电力系统的安全和经济运行,本文研究窗函数的特性,将具有优良性能的4项5阶 Nuttall 窗与双谱线插值 FFT 算法结合,提出一种用于电力谐波分析的加4项5阶 Nuttall 窗的双谱线插值 FFT 算法,利用 Matlab 中的曲线拟合函数求得简单实用的插值修正公式。仿真分析表明,本文提出的电力谐波分析方法计算量小且实用性强,比如4项3阶 Nuttall 窗的双谱线插值 FFT 算法计算精度高。

### 参考文献

- [1] 张伏生,耿中行,葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报,1999,19(3):63-66.
- [2] 潘文,钱俞寿,周鹤. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论(II) 双插值 FFT 理论[J]. 电工技术学报,1994,9(2):53-56.
- [3] 鹿浩,李东霞,俎云霄,等. 应用 FFT 进行电力系统谐

波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):50-54.

- [4] 周俊,王小海,祁才君. 基于 Blackman 窗函数的插值 FFT 在电网谐波信号分析中的应用[J]. 浙江大学学报(理学版),2006,33(6):650-653.
- [5] 许珉,张鸿博. 基于 Blackman-harris 窗的加窗 FFT 插值修正算法[J]. 郑州大学学报(工学版),2005,26(4):99-101.
- [6] Zhang Fusheng, Geng Zhongxing, Yuan Wei. The Algorithm of Interpolating Windowed FFT for Harmonic Analysis of Electric Power System[J]. IEEE Trans. on power Delivery,2001,16(2):160-164.
- [7] 卿柏元,滕召胜,高云鹏,等. 基于 Nuttall 窗双谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):153-157.
- [8] 许珉,杨阳,陈飞,等. 基于 Nuttall(I) 窗的插值 FFT 算法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):44-45.
- [9] 曾博,滕召胜. 纳托尔窗改进 FFT 动态谐波参数估计方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):67.

## Harmonic Analysis Based on Nuttall Window Interpolation FFT Algorithm

Luo Shan

(School of Information and Electrical Engineering, Panzhihua University, Panzhihua Sichuan 617000, China)

**Abstract:** The Fast Fourier Transformation (FFT) algorithm for harmonic analysis is not easy to realize synchronous sampling and integer period truncation and the result by the spectrum leakage and fence effect will affect the precision of harmonic analysis. The windowing and interpolation algorithm can improve the calculation accuracy of harmonic parameters based on FFT, and double-spectrum-line interpolation FFT algorithm is presented for harmonic analysis with 4 5 order Nuttall window, also the interpolation correction formula is given. The experimental results show that, compared with Blackman-harris window and 4 3 order Nuttall window interpolation FFT algorithm, this algorithm has less amount of calculation and higher precision analysis.

**Key words:** harmonic analysis; Nuttall window; FFT; double-spectrum-line interpolation

(上接第27页)

## The Location Model of the Electric Vehicle Charging Station Based on Simulated Annealing Algorithm

Jia Heping<sup>1</sup>, Xie Shengli<sup>2</sup>, Shao Xiang<sup>1</sup>, Huang Shilong<sup>1</sup>

(1. North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China;

2. Baoding Electric Power Voc. & Tech. College, Baoding Hebei 071051, China)

**Abstract:** The location model of the electric vehicle charging station is expounded in this paper. The solution to this model is to use the simulated annealing algorithm with taking the maximization of charging station utility as the objective function and the traffic flow as the constraint condition. The result shows that this model is reasonable to provide the electric vehicle project managers with an optimal or approximate optimal location solution.

**Key words:** electric vehicle charging station; location model; simulated annealing algorithm; traffic flow; service radius