

基于多目标优化的电动汽车充电站规划研究

景小敏¹, 邢洁¹, 郭建豪², 郭斌¹

(1. 东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620;

2. 国网山东省电力公司青岛供电公司, 山东 青岛 266001)

摘要: 建立了电动汽车充电站多目标规划模型, 该模型以充电网络服务能力、充电站社会综合成本及配电系统网络损耗作为目标函数; 选取配电系统潮流约束、支路功率约束、电压偏移、充电站的容量及规划个数等影响因素作为约束条件。引入等级号和拥挤度以改善微分进化算法在多目标优化模型求解过程中的收敛性和计算速度。最后, 以 8 节点交通网络和 IEEE 27 节点配电系统为例, 验证了所提模型和算法的有效性。
关键词: 电动汽车; 充电网络规划; 充电网络服务能力; 多目标最优化

Research on electric vehicle charging station planning based on multi-objective optimization

JING Xiaomin¹, XING Jie¹, GUO Jianhao², GUO Bin¹

(1. College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Qingdao Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Qingdao 266001, China)

Abstract: A multi-objective programming model for electric vehicle charging stations is established and the model takes the service capacity of the charging network, the social comprehensive cost of the charging station, and the loss of the power distribution system as the objective function. Influencing factors such as distribution system power flow constraints, branch power constraint, voltage offset, charging station capacity and planned number are selected as constraints. The grade number and congestion degree are introduced to improve the differential evolution algorithm's convergence and calculation speed in the process of solving the multi-objective optimization model. Finally, an 8-node transportation network and an IEEE 27-node power distribution system are taken as examples to verify the effectiveness of the model and algorithm.

Key words: electric vehicles; charging network planning; charging network service capability; multi-objective optimization

0 引言

为应对能源危机, 减少对化石燃料的依赖, 电动汽车代替传统燃油汽车成为一种趋势^[1]。电动汽车可预见的大规模增长给原有电力设施造成巨大压力^[2]。合理规划电动汽车充电网络, 可以利用已有的供配电资源, 防止盲目改扩建带来的资源浪费。

目前, 在电动汽车充电站规划模型的研究中, 考虑的目标有增强充电网络服务能力、降低配电系统损耗及优化充电网络收益等。文献[3-5]分别以充电网络服务能力、配电系统网络损耗以及综合费用为目标函数, 建立电动汽车充电站单目标选址规划模型, 并且对各自的单目标规划模型进行了求解与验证。为克服电动汽车充电站单

目标规划模型适应性不强的弱点,文献[6]建立了包含用户侧与非用户侧双方利益的多目标规划模型;文献[7-8]以充电服务能力最大和配电系统损耗最低为目标函数,构建电动汽车充电站多目标规划模型,并且考虑了电动汽车充电负荷的随机特性影响。上述研究建立的模型中,虽然考虑了充电站与用户成本、配电系统网络损耗和充电网络收益等影响因素,但是上述文献中建立的模型最多包含两个优化目标,未能综合考虑交通网、配电系统以及用户成本等影响电动汽车充电站选址的因素。

文献[9-11]采用微分进化算法求解了电力负荷经济分配等优化问题,通过与粒子群算法、遗传算法的发电成本进化曲线等数据进行对比,充分证实了微分进化算法在求解目标函数之间存在冲突的多目标优化问题时的有效性。文献[12]采用微分进化算法求解含分布式电源的配电网重构问题,通过与遗传算法进行对比,证实了微分进化算法在求解多目标问题上的有效性。此外,求解模型时可以通过调整微分进化算法的偏差放大系数提高收敛速度^[13-14]。

在此基础上,为了所建立的模型更加具备说服力,对充电站以及充电站用户等多方利益做到均衡考虑,本文综合考虑并融合交通网络、配电系统及各类成本对充电站选址规划的影响,建立了以充电网络服务能力、充电站社会综合成本及配电系统网络损耗为目标函数的电动汽车充电站多目标规划模型。选择微分进化算法作为求解本文模型的方法,在算法的选择机制中引入等级号和拥挤度,用以筛选新生成的种群个体,提高算法对本文多目标模型的全局优化能力。最后,以某地区的路网车流量统计数据 and 配电系统为例,通过引入等级号和拥挤度对前后微分进化算法求解结果进行对比与分析,验证了所建模型及算法的有效性。

1 电动汽车充电站多目标规划

1.1 目标函数

电动汽车充电站多目标规划模型的建立需

要考虑充电站的各类成本、损耗及充电站服务用户的能力。本文建立的模型包含以下三个优化目标。

(1) 充电网络服务能力

充电网络服务能力越大,服务的车流量就越多。目标函数采用流量需求公式表示,即

$$\max P_g = \frac{F}{\sum_{q \in Q} f_q} \quad (1)$$

式中, P_g 为服务的车流量与路网图的总车流量之比; F 为所建充电站服务的年车流量比例; f_q 为路线 q 的车流量比例; Q 为充电网络中最短路径集合。

F 采用流量需求公式表示,即

$$F = \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (2)$$

式中, y_q 是0-1变量,当车辆的剩余电量能够满足行驶全部里程时, y_q 取0,表示该部分车辆不被服务;当车辆的剩余电量不能满足行驶全部里程,但路径上有规划的充电站,并且充电后的行驶里程可以到达预定地点时, y_q 取1,表示该部分车辆可以被服务;若充电后行驶里程仍不能达到预定地点,那么 y_q 取0,表示车辆不能被服务。

f_q 由重力空间互动模型求得^[15],即

$$f_q = \frac{W_{Oq} W_{Dq}}{1.5 d_q} \quad (3)$$

式中, W_{Oq} 为路线 q 的起点权重; W_{Dq} 为路线 q 的终点权重; d_q 为路线 q 的距离。

(2) 充电站社会综合成本

经济性指标是电动汽车充电站选址定容的重要评价指标,规划时需要满足社会综合成本最小。将充电站建设成本、充电站运营成本以及用户成本这三个目标函数整合为归一化的目标函数^[16],即

$$\min C_C = C_S + C_U \quad (4)$$

式中, C_C 为充电站社会综合成本; C_S 为充电站成本,由建设和运营成本组成; C_U 为用户成本。

$$C_S = \phi \sum_{j=1}^N f_{cs_j} + \psi \sum_{j=1}^N f_{r_j} \quad (5)$$

$$C_U = T \sum_{i=1}^n f_{\text{cus}_i} \quad (6)$$

式中, C_S 为充电站成本, 由建设成本 f_{cs_j} 和运营维护成本 f_{r_j} 组成; C_U 为用户成本; N 为拟建充电站数目; Φ 、 Ψ 和 T 分别为投资成本、运行成本和用户成本的权重系数; n 为充电网络节点数; f_{cus_i} 为节点 i 处的用户在充电途中消耗的费用。

充电站 j 的建设成本折算成每年的投资费用为

$$f_{\text{cs}_j} = M(C_f + aN_{\text{c}_j} + bN_{\text{c}_j}) \quad (7)$$

$$M = \frac{r_0(1+r_0)^Y}{(1+r_0)^Y - 1} \quad (8)$$

式中, M 为资金回收系数; C_f 为征收选址用地及购买充电站设备的固定成本; N_{c_j} 为充电站 j 的充电机数量; a 为购买基础设备等所需费用的投资系数; b 为充电机单价; r_0 为贴现率; Y 为运行年限。

充电站 j 每年运行和维护的成本为

$$f_{\text{r}_j} = \sigma(C_f + aN_{\text{c}_j} + bN_{\text{c}_j}) \quad (9)$$

式中, σ 代表运行和维护充电站的成本系数。

用户成本是一年内用户在有充电需求时行驶至最近充电站消耗的费用, 表达式为

$$f_{\text{cus}_i} = 365n_{\text{ev}_i} p_e D_i E_m \quad (10)$$

式中, n_{ev_i} 为节点 i 处的权重系数; p_e 为电价; D_i 为节点 i 与最近充电站间的距离; E_m 为平均耗电量。

(3) 配电系统网络损耗

为确保配电网运行的经济性, 以配电系统的损耗最小作为目标函数之一, 表达式为

$$\min P_L = \sum_{i=1}^{8760} h_i \left(\sum_{l=1}^L P_{\text{loss},l} \right) \quad (11)$$

式中, P_L 为配电系统的损耗; $P_{\text{loss},l}$ 为支路 l 的功率损耗; L 为配电网支路数。

1.2 约束条件

(1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in H} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in H} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_i 和 Q_i 分别为节点 i 处注入的有功和无功功率; H 为配电网节点数; U_i 为节点 i 的电压; G_{ij} 和 B_{ij} 为导纳矩阵的实部和虚部; δ_{ij} 为支路 ij 的相角差。

(2) 支路功率约束

$$P_l \leq P_l^m \quad (13)$$

式中, P_l 为线路 l 的有功功率; P_l^m 为线路 l 允许流过的最大功率。

(3) 电压偏移约束

大规模电动汽车接入充电会造成配电网电压偏移^[17]。为确保电能质量, 约束条件为

$$\frac{|U_i - U_N|}{U_N} \leq \gamma \quad (14)$$

式中, U_i 为节点 i 处电压的标幺值; U_N 为对应节点处额定电压的标幺值; γ 为最大允许偏移电压。

(4) 充电站个数约束

考虑充电站与用户双方的成本, 充电站建设时需要限制充电站建设数目, 即

$$\sum_{i=1}^n X_i = N \quad (15)$$

式中, X_i 为0-1变量, X_i 为1表示节点 i 处可以建立充电站, 否则不建站; n 为节点数; N 为计划建立的充电站数目。

(5) 充电站容量约束

考虑充电站的正常运作与收益, 充电网络在规划过程中要确保规划容量可以满足充电需求

$$\sum_{i=1}^n X_i W_i \geq S_m \quad (16)$$

式中, W_i 为节点 i 处的充电站容量; S_m 为充电网络所在区域的最大充电需求与附加充电需求之和。

2 模型求解

本文采用微分进化算法求解了所建的电动汽车充电站多目标规划模型, 整体控制策略流程图如图1所示。

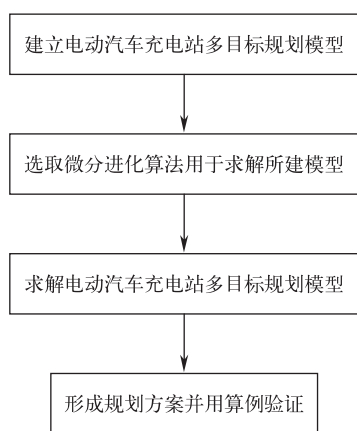


图1 整体控制策略流程图

Fig. 1 Solving flowchart of the overall control strategy

2.1 微分进化算法

微分进化算法可以模拟生物进化规律，迭代多次后得到所需方案。该算法可以记忆全局最优解，共享种群信息，高效求解模型。目前该算法在电力系统电网规划、负荷经济分配等方面得到了广泛应用。算法主要步骤如下。

(1) 种群初始化

随机生成满足约束条件的初始种群 $\mathbf{G}^k = (G_1^k, G_2^k, G_3^k, \dots, G_{N_p}^k)$, $k=0$ ，其中 N_p 为种群规模， $\mathbf{G}_i^k = (g_{i,1}^k, g_{i,2}^k, g_{i,3}^k, \dots, g_{i,m}^k)$ ， m 为充电站候选站址数。

(2) 变异操作

变异种群向量 $\mathbf{M}_i^k$ ($\mathbf{M}_i^k = (m_{i,1}^k, m_{i,2}^k, m_{i,3}^k, \dots, m_{i,m}^k)$) 由式 (17) 产生，即

$$m_{i,j}^k = g_{r_1,j}^k + F(g_{r_2,j}^k - g_{r_3,j}^k) \quad i=1,2,3,\dots,N_p \quad (17)$$

式中， $m_{i,j}^k$ 为变异种群中第 i 个向量的第 j 个分量； $g_{r_1,j}^k$ 、 $g_{r_2,j}^k$ 和 $g_{r_3,j}^k$ 是初始种群的 3 个向量的第 j 个分量，且 $i \neq r_1 \neq r_2 \neq r_3$ ， $N_p \geq 4$ ； F 为缩放因子。

(3) 交叉操作

按照式 (18) 所示的方式产生交叉种群的个体，即

$$v_{i,j}^k = \begin{cases} g_{i,j}^k & b \leq C_R \\ m_{i,j}^k & b > C_R \end{cases} \quad (18)$$

式中， $g_{i,j}^k$ 为初始种群中第 i 个向量的第 j 个分量； $m_{i,j}^k$ 为变异种群中第 i 个向量的第 j 个分量； b 为 0~1 间的随机数； C_R 为交叉因子，介于 0~1

之间。

(4) 选择操作

适应度函数作为评判种群方案优劣的重要依据，当交叉种群个体的适应度函数值更小时，新个体才会被选择到下一代种群。

2.2 改进的微分进化算法的求解步骤

改进的微分进化算法在复杂系统的多目标优化问题求解中得到了广泛应用。为增强微分进化算法的优化能力，采用以下策略对算法改进。

(1) 变异策略的调整

式 (17) 的全局搜索能力较强，使算法被迫中止。为了使算法继续搜索最优方案，令 $F=0$ ，产生满足约束条件的新个体，即

$$g_{i,j}^{k+1} = g_{i,j}^k \quad (19)$$

(2) 等级号与拥挤度的设置

基于非占优排序的方法，引入等级号和拥挤度^[18]。等级越小的个体越优，越有机会进入下一代。同等级的种群方案进入下一代的机会相同。

拥挤度计算公式为

$$y_{c_i} = \sum_{j=1}^M y_{c_{i,j}} \quad (20)$$

当 $\max(o_j) = \min(o_j)$ 时

$$y_{c_{i,j}} = C_d \quad (21)$$

当 $\max(o_j) \neq \min(o_j)$ 时

$$y_{c_{i,j}} = \begin{cases} 2C_d & o_{i,j} = \max(o_j) \\ 0 & o_{i,j} = \min(o_j) \\ y_{ch} & o_{i,j} = \text{其他值} \end{cases} \quad (22)$$

$$y_{ch} = \frac{|o_{i-1,j} - o_{i+1,j}|}{2} \quad (23)$$

式中， $y_{c_{i,j}}$ 为第 i 个个体中第 j 个目标函数的拥挤度； y_{c_i} 为第 i 个个体的总拥挤度； C_d 为种群第 j 个目标函数相等时第 j 个目标函数的拥挤度； $\max(o_j)$ 为第 j 个目标函数的最大值； $\min(o_j)$ 为第 j 个目标函数的最小值； $o_{i,j}$ 为第 i 个个体中第 j 个目标函数的值。

(3) 选择操作的调整

当且仅当交叉种群个体的等级更小时，新个

体才会参与下一代种群的迭代；等级相同，当新个体的拥挤度比父代个体的拥挤度小时，才会被选择。

2.3 改进的微分进化算法的求解流程

对算法求解流程分步描述。

1) 输入种群规模 N_p 、最大进化代数 N_m 和交叉因子 C_R 等算法参数，配电网线路长度、线路阻抗等网络拓扑参数，以及充电站个数、充电站类型等参数。

2) 令 $i=1$ 。

3) $G_i^k = (g_{i,1}^k, g_{i,2}^k, g_{i,3}^k, \dots, g_{i,m}^k)$ 为随机生成的第 i 个向量， $k=1, m$ 为向量维数，表示可配置充电站的候选站点个数。分量数值根据充电站类型随机生成， $g_{i,j}^k = \{x | x \in \{0, 1, 2, 3\}\} (j=1, 2, \dots, m)$ ；求解向量 G_i^k 的配电网潮流，得到节点电压等状态量及网络损耗。

4) 若该方案满足约束条件式(12)~式(16)，则 $i=i+1$ ，继续返回步骤3)产生向量 G_{i+1}^k ；若不满足，则令 $i=i+1$ ，返回步骤3)产生 G_i^k ，直到生成初始种群 $G^k = (G_1^k, G_2^k, G_3^k, \dots, G_{N_p}^k)$ 。

5) 向量 G_i^k 按照式(17)依次进行变异操作，生成 M_i^k ，直至 G^k 全部变异完成，生成变异种群 $M^k = (M_1^k, M_2^k, M_3^k, \dots, M_{N_p}^k)$ 。

6) 种群 M^k 依据式(18)进行交叉操作，令 $i=1$ ，产生种群向量 $C_i^k = (c_{i,1}^k, c_{i,2}^k, c_{i,3}^k, \dots, c_{i,m}^k)$ 。

7) 通过计算配电网潮流判断向量 C_i^k 是否满足约束条件，若满足，则令 $V_i^k = C_i^k$ ；否则由式(19)可令 $V_i^k = G_i^k$ ，若 $i \leq N_p$ ，则 $i=i+1$ ，重复步骤6)，直至形成交叉种群 $V^k = (V_1^k, V_2^k, V_3^k, \dots, V_{N_p}^k)$ 。

8) 根据式(1)、式(4)及式(11)求解初始种群 G^k 和交叉种群 V^k 的目标函数。

9) 根据式(20)~式(23)、步骤8)中数据计算两个种群的等级号与拥挤度，选择进化种群并产生Pareto解集。

10) 若满足算法的终止条件，则输出种群的Pareto解集；否则令 $k=k+1$ ，转至步骤5)进行进化。

算法求解流程图如图2所示。

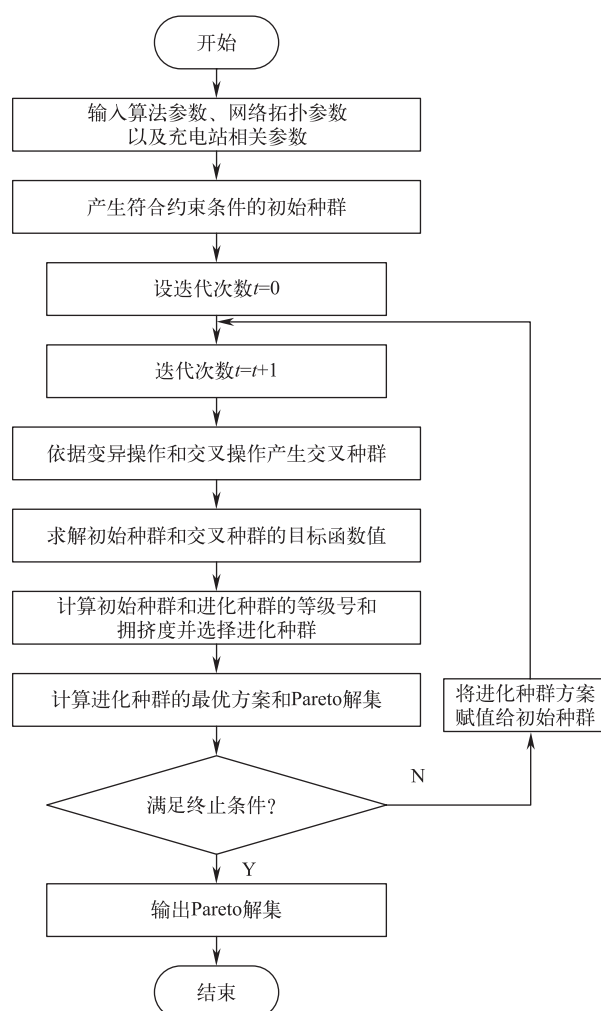


图2 算法求解流程图

Fig. 2 Solving flowchart of the algorithm

3 算例分析

3.1 算例概况

本文针对某区域的路网车流量统计数据 and 配电网现状，对电动汽车充电站规划模型进行求解，验证算法的有效性。

该区域路网示意图如图3所示，灰色实线表示车辆的主要行驶路径，A~H为电动汽车充电站的候选站点。中压配电网结构示意图如图3中粉色实线所示，表示配电网线路敷设情况。如图3中的黑色虚线为候选站点A与站点C的行驶路径，长度为20.2 km，根据文中式(3)计算该条路线上的电动汽车占整个路网中电动汽车数量的比例为11.9%。

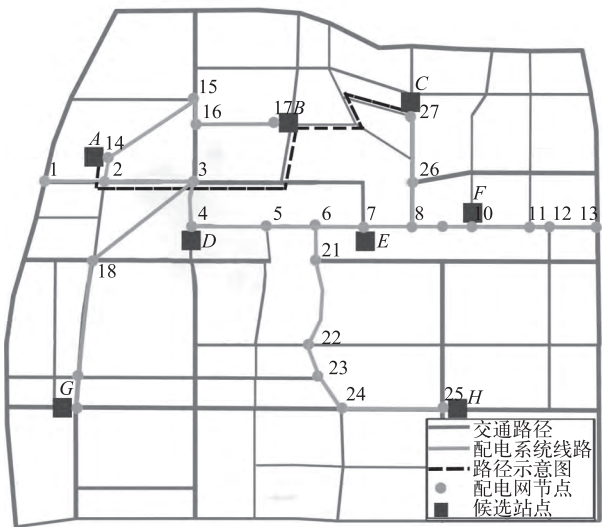


图3 某地区实际路网及其配电网结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the actual road network and its distribution network structure in a certain area

电动汽车充电站候选站点间的最短路径距离见表1。

表1 交通网节点间的部分最短路径距离
Tab. 1 Part of the shortest path distance between nodes in the transportation network

起止	距离 /km	起止	距离 /km
A—B	12.0	D—E	7.84
A—D	7.0	D—G	12.6
A—G	11.3	D—H	19.2
B—C	8.2	E—F	4.9
B—D	8.24	E—H	16.16
B—E	9.1	F—H	16.5
C—E	7.2	G—H	16.5
C—F	7.7		

依据各交通节点的繁忙程度可以设置交通网络各个节点的权重系数^[19]，详细数据见表2。

表2 交通节点权重系数
Tab. 2 Weights of various traffic nodes

节点	系数	节点	系数
1	0.54	5	0.58
2	0.80	6	0.07
3	0.67	7	0.05
4	0.50	8	0.14

中压配电网结构的敷设线路长度见表3。

表3 配电网线路长度
Tab. 3 Line length of distribution network

起止	距离 /km	起止	距离 /km
1—2	13.5	6—25	13.92
2—14	1.02	6—7	2.24
14—17	9.02	7—8	2.2
2—3	4.0	8—27	5.0
3—20	12.6	8—10	2.7
3—4	2.0	10—13	5.7
4—6	5.6		

设电动汽车在满电状态下的最大行驶路程 $L_m=100$ km。拟建充电站的数目 n 为3个，待建充电站按照服务能力的不同，分为三种规模：类型Ⅰ为小型充电站，容量为1 MW；类型Ⅱ为中型充电站，容量为2 MW；类型Ⅲ为大型充电站，容量为3 MW。充电机功率为150 kW^[20]；充电网络最大充电负荷为7 MW，考虑1 MW的附加负荷；网络中电压最大允许偏移量 $\gamma=7\%$ ；拥挤度 $C_d=50$ ；线路 l 允许流过的最大功率为10 MW^[21]；充电站建设成本的相关参数见表4^[22]。

表4 充电站建设成本相关参数
Tab. 4 Relevant parameters of charging station construction cost

参数	取值
C_f /万元	100
α /（万元/台）	2
b /万元	10
r_0	0.08
Y /年	20
σ	0.08
E_m /（kW·h/km）	0.15
P_e / [元/（kW·h）]	0.7
ϕ	0.5
ψ	0.2
T	0.3

3.2 仿真结果分析

为和多目标综合优化结果进行比较，根据本文的目标函数，分别构建充电网络服务能力、充电网络社会综合成本以及配电系统网络损耗三个单目标优化模型，在约束条件相同的情况下，采用改进的微分进化算法进行求解，依次得到三个单目标优化模型的求解方案见表5。

表5 单目标优化函数值

Tab. 5 Value of single objective optimization

优化方案 站址	类型	P_g	C_c /万元	P_L /kW·h
{B C E}	{Ⅲ Ⅱ Ⅲ}	0.584 86	65.068	845.92
{A B E}	{Ⅱ Ⅲ Ⅲ}	0.306 52	65.065	668.19
{A B D}	{Ⅲ Ⅱ Ⅲ}	0.379 57	65.068	623.04

本文多目标规划模型的优化结果见表6。

表6 多目标优化方案

Tab. 6 Scheme of multi-objective optimization

优化方案 站址	类型	P_g	C_c /万元	P_L /kW·h
{B D E}	{Ⅲ Ⅲ Ⅱ}	0.565 58	65.066	722.63

由表6可得, 最终的优化方案为{B D E}, 容量类型为{Ⅲ Ⅲ Ⅱ}, 得到 P_g 为0.565 58 (即56.558%), C_c 为65.066万元, P_L 为722.63 kW·h。与表5相关数据对比发现, 本文多目标优化方案保证了社会综合成本最小, 充电网络能力和网络损耗比单目标优化方案中的相应目标函数值有微小变化; 充电网络服务能力由58.486%下降至56.558%, 下降率约为3.30%; 网络损耗由623.04 kW·h上升至722.63 kW·h, 上升率约为15.98%。

用改进前后的微分进化算法对算例进行求解, 以充电网络平均服务能力的收敛情况为例进行对比分析, 如图4所示。

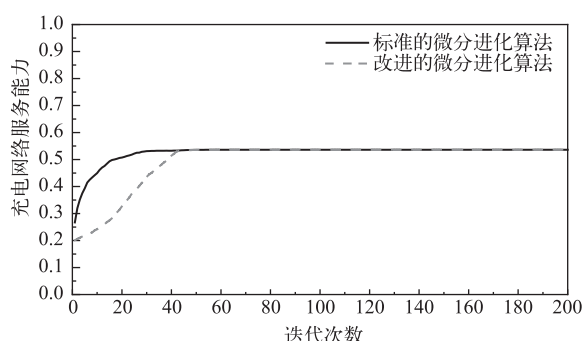


图4 充电网络的平均服务能力

Fig. 4 Average service capacity of charging network

由图4可知, 改进微分进化算法后, 随着迭代次数的增加, 充电网络的服务能力快速且平稳收敛至最优, 跳出局部最优解的能力进一步增强, 而传统微分进化算法寻优能力较弱。因此改进后的微分

进化算法在求解多目标优化问题时适应性良好。

除电动汽车充电站选址定容的多目标优化方案之外, 还可以根据实际需要对种群进行筛选, 得到不同程度的次优化方案, 图5为模型的Pareto解集, 是包含最优方案在内的集合。

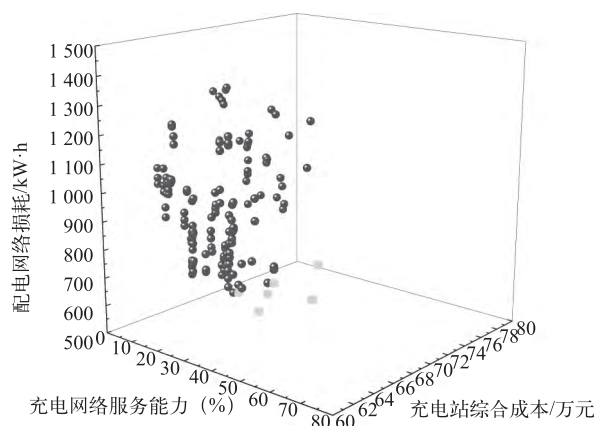


图5 Pareto 解集

Fig. 5 Pareto solution set

图5中, x坐标表示充电网络服务能力; y坐标表示充电站社会综合成本; z坐标表示配电系统网络损耗。除了求解优化方案集合外, 还可以从Pareto解集中选择等级号最小, 即遗传复制能力最强的种群方案作为一组解集, 以便决策者根据自身对于不同目标函数的侧重程度, 通过更改模型的筛选条件, 选择Pareto解集的其他优化方案, 方案见表7, 对应于图5中矩形所示方案。

表7 多目标非占优排序解

Tab. 7 Solution of multi-objective non-dominance sort

优化方案 站址	类型	P_g	C_c /万元	P_L /kW·h
{B D E}	{Ⅲ Ⅲ Ⅱ}	0.565 58	65.066	722.62
{B C E}	{Ⅲ Ⅱ Ⅲ}	0.584 86	65.068	845.92
{B C D}	{Ⅲ Ⅱ Ⅲ}	0.434 37	65.066	740.48
{A D E}	{Ⅲ Ⅱ Ⅲ}	0.411 76	65.069	695.0
{A B E}	{Ⅲ Ⅱ Ⅲ}	0.306 52	65.065	668.19
{A B D}	{Ⅲ Ⅱ Ⅲ}	0.379 57	65.068	623.04

4 结束语

本文建立了一种电动汽车充电站的多目标规划模型, 并用算例进行了求解与验证工作。

1) 节点权重系数除了用于充电网络服务能力的求解外, 还可以用于充电站社会成本的求解。

节点权重系数加深了交通网与配电系统的融合。

2) 通过实验结果可知, 在微分进化算法中引入等级号与拥挤度, 可以提升算法求解多目标规划模型时的收敛速度。

3) 列举的次优化方案中, 决策者可以根据自身实际需求, 通过对不同目标函数的偏重, 选择更具有针对性的方案。

参考文献

- [1] 王高红. 电动汽车技术的现状分析和发展趋势研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(11): 97-100.
- [2] 朱心月, 李炳华, 王成, 等. 电动汽车V2G关键技术的研究[J]. 电气应用, 2021, 40(4): 38-43.
- [3] 夏露, 刘畅, 李斌, 等. 面向私人电动汽车的城市公共充电网络运营服务能力评估方法与仿真研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3543-3548.
- [4] 徐杨杨, 张新松, 陆胜男, 等. 多重随机特性下的电动汽车充电网络机会约束规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 30-39.
- [5] 闫天泽, 邱晓燕, 刘延博, 等. 基于引入模拟退火思想的改进粒子群算法的电动汽车充电站最优规划[J]. 电测与仪表, 2017, 54(6): 11-16.
- [6] 臧海祥, 舒宇心, 傅雨婷, 等. 考虑多需求场景的城市电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 67-80.
- [7] 钱科军, 谢鹰, 张新松, 等. 考虑充电负荷随机特性的电动汽车充电网络模糊多目标规划[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4404-4414.
- [8] 丁丹军, 戴康, 张新松, 等. 基于模糊多目标优化的电动汽车充电网络规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 43-50.
- [9] 于万霞, 张维存, 郑宏兴. 基于遗传粒子群算法的高维复杂函数优化方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(36): 31-33.
- [10] 姚玮, 罗建军, 马卫华, 等. 一种改进的微分进化算法及其在多目标访问任务中的应用[J]. 宇航学报, 2017, 38(9): 919-926.
- [11] 刘自发, 张建华. 一种求解电力经济负荷分配问题的改进微分进化算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 100-105.
- [12] 刘定国, 李清辉. 含分布式电源的配电网多目标优化重构研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 92-98.
- [13] 向育鹏, 卫志农, 孙国强, 等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 264-270.
- [14] 段美军, 杨红雨, 刘洪, 等. 基于共享学习策略的微分进化算法[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 205-212.
- [15] HODGSON M J. A flow capturing location-allocation model[J]. Geographical Analysis, 1990, 22(3): 270-279.
- [16] 任锐焕. 智能配电网中分布式储能布局优化配置研究[J]. 电气应用, 2021, 40(04): 31-35.
- [17] 孟宪珍, 张艳, 安琪, 等. 电动汽车接入充电对配电网电压波动的影响[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(2): 91-98.
- [18] 冷旭, 崔倩, 年浩, 等. 航空兵对舰突击行动中反舰导弹火力分配模型[J]. 光电与控制, 2016, 23(6): 27-29, 49.
- [19] 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.
- [20] 孙远, 但富中, 叶建德, 等. 电动汽车传导式大功率充电向前兼容技术研究[J]. 电气应用, 2021, 40(9): 50-57.
- [21] 黄贵鸿, 雷霞, 杨毅, 等. 考虑风电与用户满意度的电动汽车两层智能充放电策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 85-97.
- [22] 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.

作者简介

景小敏(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划。

(收稿日期: 2022-01-24)