

DOI: 10.7667/PSPC160526

基于改进双中心粒子群算法的电动公交车运营数量优化策略研究

朱鹰屏¹, 韩新莹¹, 刘世立², 王轶群³

(1. 广东技术师范学院自动化学院, 广东 广州 510665; 2. 国家电网许继集团市场部, 河南 许昌 461000;
3. 武汉理工大学国际教育学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 针对电动公交车在一定容量约束的馈线充电的情况, 采用了一种改进的双中心粒子群算法对电动公交车充电进行优化调度, 以获得最大的电动公交车运营数量。首先, 建立公交车充电后馈线负荷曲线峰谷差最小的模型, 设公交车运营初始数量, 利用改进的双中心粒子群算法进行优化。然后, 根据优化结果对比该馈线容量约束修改电动公交车运营数量, 重新优化, 逐步逼近并最终找到最优的运营数量。改进的双中心粒子群优化算法是在原算法的基础上, 增加了5条粒子运动路线, 扩大了搜索精度, 抑制了粒子群的早熟。同时, 为了提高寻优速度, 粒子的初始化是根据日负荷曲线距离馈线约束容量的远近来确定。最后以南方某城市典型的馈线电路为例进行仿真计算, 结果表明, 该方法具有更优的调度效果。

关键词: 容量约束; 电动公交车; 双中心粒子群; 初始化; 优化

Optimization of operation quantities of electric buses based on improved double center particle swarm optimization algorithm

ZHU Yingping¹, HAN Xinying¹, LIU Shili², WANG Yiqun³

(1. School of Automation, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China; 2. Market Department of State Grid XuJi Group Corporation, Xuchang 461000, China; 3. School of International Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: For the case of electric buses charging under the constraint of feed line capacity, an improved Double Center Particle Swarm Optimization algorithm (DCPSO) which can optimize the charging is offered to get the maximum sum of electric buses operating. Firstly, a mathematical optimization model of the minimum value of difference between daily peak and valley load of feed line is established, the initial sum of electric buses operating is assumed and the improved DCPSO is applied to optimize the charging. Secondly, according to the optimization results and the capacity constraint of the feed line, the sum of electric buses on operating is modified to re-optimize the charging. The modified sum of electric buses on operating will make the load curve's peak approach the feed line capacity, which will find the maximum sum of electric buses on operating at last. The improved DCPSO makes particles increase 5 motion routes based on DCPSO, which improves search range and prevents particle from premature. In order to improve the optimization speed, the initialization of particles is determined according to the distance between the daily load curve and the feeder capacity constraint. An example of typical feed line of a southern city is applied to simulate in the end, the result indicates the scheduling is more optimal.

Key words: capacity constraint; rechargeable bus; DCPSO; initialization; optimization

0 引言

近年来, 由于电动汽车清洁环保, 成为汽车未来的发展趋势, 而城市电动公交车由于路线及运营具有确定的规律, 成为目前我国城市电动汽车优先发展的方向之一^[1-2]。在发展过程中, 充电设施的建

设涉及投资及效率, 并对配网带来一定的干扰, 如何在现有城市变配电站的基础上, 电动公交车能经济、高效、安全的充电是关系配电网稳定性和经济性的基础^[3-5]。

在大量电动公交车充电带来的问题上: 一方面, 充电使得配电网总负荷增加, 势必让原有馈线电路

难以承担负重而须升级改造; 另一方面, 充电给原有配电网带来新的冲击, 从而影响电能质量, 降低安全性。由此, 近年研究的重点集中在充换电站的优化布局和充电的优化调度上。前者中, 文献[6-7]以充电成本最小为首要目标, 根据电动公交车的充电负荷曲线, 建立多目标优化充电模型, 从而获得优化的充电站布局, 降低升级改造的成本。后者则一般以电动公交车的充电需求为目标, 讨论充电对电网的影响。如文献[8-9]通过对电动公交车的容量需求的预测, 计算出电动车的充电负荷曲线, 由此讨论对电网峰谷差的影响。文献[10-12]则以智能群算法为基础寻找一种调度电动汽车充放电的优化策略, 使得电动汽车所在电网的峰谷差或网损最小。

上述研究中, 前者只是对建设充电站的一种经济规划, 对原有的配电网仍会带来冲击, 影响配电网的安全性, 后者则只研究电动公交车充电对原有配电网电能的影响和策略, 未能具体解决充电的安排问题, 实用性不大。本文则从实用性出发, 结合上述研究, 在原有配电馈线不改造升级的基础上建设充电站, 以馈电线路的最大允许容量为约束, 计算电动公交车运营总数量的最大值, 从而使得成本更加节约。在电动公交车运营总数量最大化的优化中, 首先假定公交车运营初始数量, 利用改进的双中心粒子群算法对公交车充电后馈线负荷曲线峰谷差进行优化, 根据优化后的负荷曲线峰值对比该馈线容量约束, 修改电动公交车运营数量, 重新优化, 逐步逼近并最终找到最优的运营数量。其中改进的双中心粒子群优化策略可以改善寻优路径, 粒子的初始化则根据日负荷曲线距离馈线约束容量的远近来确定, 提高了寻优速度。

1 数学模型

1.1 目标函数

日负荷曲线可以根据馈电线路的负荷情况得出, 如何配合日负荷曲线对电动汽车充电和对时间进行调度是需要解决的问题。本文以日负荷曲线标准差最小为目标函数^[13], 通过标准差函数的优化可以降低负荷波动的大小。以每辆电动汽车每个时段的充电功率作为变量, 将一天分为 T 个时间段。目标函数见式(1)、式(2)。

$$\min F = \left(\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{L_t} + P_t - P_{\text{arg}})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$P_{\text{arg}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{L_t} + P_t) \quad (2)$$

式中: T 为 24, 即 24 个时段; P_t 为电动汽车在 t

时段的充电功率; P_{L_t} 为 t 时段的负荷功率; P_{arg} 为一天的平均负荷功率。

1.2 约束条件

1) 变量总数约束

变量为每个小时的充电车辆数, 其总数的约束为

$$C_{\min} \leq \sum_{t=1}^T N_t \leq C_{\max} \quad (3)$$

式中: C_{\min} 为最小充电车辆数; C_{\max} 为最大充电车辆数; N_t 为电动公交车一天中 t 时段的充电车辆数。

2) 单个变量的约束

每个时段的最大充电公交车数为总数减去行驶的公交车数, 其约束见式(4)。

$$0 < N_t < M_t \quad (4)$$

式中, M_t 为每个时段不在路上行驶的公交车数目。

3) 电量约束

每辆电动公交车一天的充电量必须满足行驶所需的用电量, 设充电效率为 90%, 其约束见式(5)。

$$P_y \times T_j^{\text{Run}} < P_c \times T_j^{\text{Chg}} \times 0.9 \quad (5)$$

式中: T_j^{Chg} 为第 j 辆电动公交车一天充电的时长; T_j^{Run} 为第 j 辆电动公交车一天行驶的时长; P_c 为电动公交车充电功率; P_y 为电动公交车用电功率。

4) 充用电功率限制

$$\begin{aligned} P_{t,j}^c &= c_{t,j} P_c \\ P_{t,j}^y &= y_{t,j} P_y \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $P_{t,j}^c$, $P_{t,j}^y$ 分别为第 j 辆电动公交车第 t 个时段的充、用电量; $c_{t,j}$ 为第 j 辆电动公交车第 t 个时段充电控制量(1 表示充电, 0 表示不充电); $y_{t,j}$ 为第 j 辆电动公交车第 t 个时段用电控制量(1 表示用电, 0 表示不用电)。

5) 电池电量存储限制

$$B_{\min} < B_{t,j} < B_{\text{full}} \quad (7)$$

式中: $B_{t,j}$ 为第 j 辆电动公交车第 t 个时段蓄电池的剩余电量; B_{full} 为电动公交车蓄电池的容量; B_{\min} 为电动公交车蓄电池的最小电量要求。

6) 电池电量最后一个时段约束

为了保证电动公交车第二天出发行驶时为满电状态, 要求在第一天的最后一个时段电动公交车必须充满电, 见式(8)。

$$B_j^{\text{Last}} = B_{\text{full}} \quad (8)$$

式中, B_j^{Last} 为第 j 辆电动公交车一天运营时间的最后一个小时的电量。

7) 负荷限制

$$L_{\max} < L_{\text{high}} \quad (9)$$

式中： L_{high} 为馈电线路最大负荷允许值； L_{\max} 为当馈电线路叠加公交车充电后的日负荷曲线峰值。

以上建立的电动公交车充放电模型以日负荷曲线峰值为目标，不超过馈电线路最高负荷允许值。从优化电网运行的角度出发，引入标准差优化函数，可减少充电对馈电线路总负荷的波动。

2 优化算法及初始化策略

2.1 改进的双中心粒子群算法

1) 双中心粒子群(DCPSO)

双中心粒子群^[14]是在普通粒子群^[15]的基础上的改进，主要改进包括： PSO 速度更新式由 $w \times V_{id}^{\text{old}}$ ， $c_1 \times r_1 \times (pbest_{id} - x_{id}^{\text{old}})$ ， $c_2 \times r_2 \times (gbest_d - x_{id}^{\text{old}})$ 这 3 项进行矢量合成，合成过程指引着粒子的飞行轨迹。粒子 i 从起始位置 x_i^{old} 飞行到新位置 x_i^{new} ，这一过程从矢量合成角度可以描述为：粒子 i 起先沿着速度 V_i^{old} 的方向飞行 wV_i^{old} 距离，到达位置 A ，紧接着改变飞行方向，沿着平行于矢量 $pbest_i - x_i^{\text{old}}$ 的方向飞行 $c_1 \times r_1 \times (pbest_i - x_i^{\text{old}})$ 的距离，到达位置 B 。最后再沿着平行于矢量 $gbest - x_i^{\text{old}}$ 方向飞行 $c_2 \times r_2 \times (gbest - x_i^{\text{old}})$ 的距离，到达终点位置 x_i^{new} 。个体极值更新式见式(10)。

$$f(pbest_i^{\text{new}}) = \min(f(A), f(B), f(x_i^{\text{new}}), f(pbest_i)) \quad (10)$$

同时引入广义中心粒子(General center particle, GCP)和狭义中心粒子(Special center particle, SCP)参与全局极值的竞争，全局极值更新见式(11)、式(12)。

$$x_d^{\text{GCP}} = \frac{1}{n-2} \left(\sum_{i=1}^{n-2} pbest_{id} \right) \quad (11)$$

$$x_d^{\text{SCP}} = \frac{1}{n-2} \left(\sum_{i=1}^{n-2} x_{id} \right) \quad (12)$$

$$f(gbest) = \min(f(pbest_1), f(pbest_2), \dots, f(pbest_N), f(x^{\text{GCP}}), f(x^{\text{SCP}})) \quad (13)$$

尽管这两个粒子相比整个群体来说，其数量显得“微不足道”，却能对种群的全局极值产生重要影响。

2) 改进的双中心粒子群

由于普通的双中心粒子群中粒子的位置更新是按照普通粒子群速度更新的顺序进行的，存在着局限性固定性。粒子不一定是严格按照沿着速度 V_i^{old} 的方向飞行、接着沿着 $pbest_i - x_i^{\text{old}}$ 的方向飞行、最后再沿着 $gbest - x_i^{\text{old}}$ 的方向飞行，这条固定的路线存在着人为性和局限性。粒子群模拟的是鸟群的

觅食过程，鸟群的觅食线路应该存在很大的自由性。

由粒子的 3 个运动方向 V_i^{old} ， $pbest_i - x_i^{\text{old}}$ ， $gbest - x_i^{\text{old}}$ 的排列组合，可以得出粒子可以有 6 种运动路线见表 1。所以普通双中心粒子群中粒子的运动路线只是其中的一种情况，粒子还有其他 5 种运动路线的选择，以单一路线作为所有粒子的运动路线具有局限性，粒子群可能会出现早熟现象。由图 1 和图 2 的运动路线，给个体极值更新，见式(14)。

$$f(pbest_i^{\text{new}}) = \min(f(A), f(B), f(C), \dots, f(G), f(H), f(x_i^{\text{new}}), f(pbest_i)) \quad (14)$$

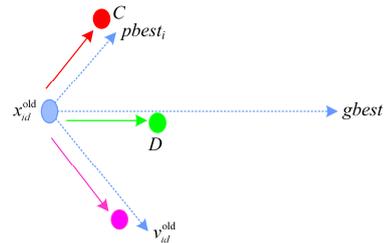


图 1 粒子位置更新过程(情况 1)

Fig. 1 Progress of the particle's position's updating (No. 1)

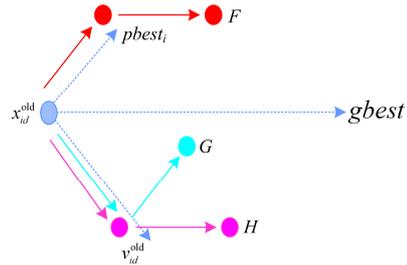


图 2 粒子位置更新过程(情况 2)

Fig. 2 Progress of the particle's position's updating (No. 2)

表 1 粒子更新的路线选择

Table 1 Option of the particle's routine for updating

路线	第一步	第二步	第三步
1	V_i^{old}	$pbest_i - x_i^{\text{old}}$	$gbest - x_i^{\text{old}}$
2	V_i^{old}	$gbest - x_i^{\text{old}}$	$pbest_i - x_i^{\text{old}}$
3	$pbest_i - x_i^{\text{old}}$	V_i^{old}	$gbest - x_i^{\text{old}}$
4	$pbest_i - x_i^{\text{old}}$	$gbest - x_i^{\text{old}}$	V_i^{old}
5	$gbest - x_i^{\text{old}}$	V_i^{old}	$pbest_i - x_i^{\text{old}}$
6	$gbest - x_i^{\text{old}}$	$pbest_i - x_i^{\text{old}}$	V_i^{old}

多样化的粒子运动路线使得粒子的搜索范围更广，其优点如下所述。

1) 就单个粒子而言，多样化的折线运动经历的区域比直线运动和单一折线运动复杂，粒子的搜索范围能够以更大更广的覆盖面作用于整个区间，每个粒子都有更好的搜索条件，更易于找到最优解，这样每个粒子的个体极值都会得到提高。

2) 从整个粒子群来说, 每个粒子个体极值的改善将直接影响着种群全局极值的增强, 这一影响使得种群能更好地收敛于最优解。

2.2 初始化策略

以一天各个时段电动公交车充电的数量作为粒子变量。由此, 本文初始化种群的方式为: 根据待建电动公交车充电站线路的日负荷曲线的趋势来初始化一天各个时间段充电车辆数的多少。即在负荷曲线高峰时间段限制充电的电动公交车辆数, 而在负荷曲线的低谷时间段则尽量增加充电的电动公交车辆数, 使之达到削峰填谷的作用。因此, 以每个时段的用电负荷与充电站线路的最高负荷限制的距离大小确定该时间段充电车辆权重的大小。如图3所示, 一天各个时段充电车辆的权重计算见式(15)、式(16)。

$$Y_i = \frac{L_{\text{high}} - P_{L_i}}{L_{\text{high}} - P_{L_{\text{min}}}} \quad (15)$$

$$Y'_i = \frac{Y_i}{\sum_{i=1}^T Y_i} \quad (16)$$

式中: $P_{L_{\text{min}}}$ 为负荷曲线最低谷值; Y_i 为第 i 个小时的负荷跟充电站线路最高允许负荷的距离与一天中最低负荷跟充电站线路最高允许负荷的距离的比值; Y'_i 为每个小时的 Y_i 占一天总的 Y_i 的比例。这个比例的大小决定充电车辆的多少。

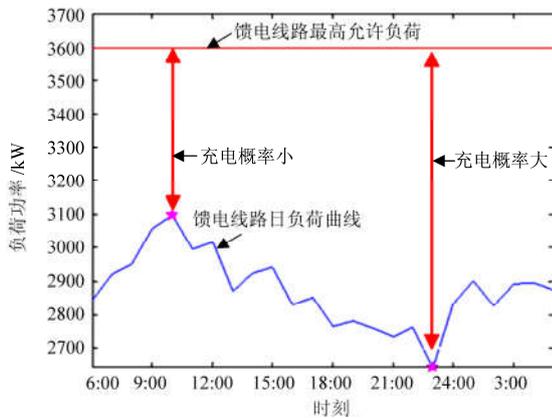


图3 加入电动公交车充电的初始化示意图

Fig. 3 Initialization schematic which includes the charging electric buses

2.3 优化程序步骤

Setp1: 从 10 辆开始以 5 的整数倍产生电动公交车的总数量。

Setp2: 以电动公交车的每小时的充电车辆作为粒子变量, 初始化粒子群, 给定群体规模 N , 随机

产生粒子 x_i 和速度 V_i 。

Setp3: 更新粒子 x_i 和速度 V_i , 将每个粒子代入目标函数, 找出个体极值和全局极值。

Setp4: 将 Setp3 中的个体极值的适应度与 $Num_A, Num_B, \dots, Num_H$ 的适应度更新个体极值, 全局极值与广义中心粒子 Num_{GCP} 和狭义中心粒子 Num_{SCP} 的适应度作比较, 更新全局极值。

Setp5: 迭代次数加 1, 重复 Setp3 和 Setp4, 当粒子适应度迭代收敛时, 确定全局最优值为最优粒子解。

Setp6: 观察叠加电动公交车充电的日负荷曲线是否超过该地区最高负荷限制, 如果不超过则继续增加电动公交车数量, 重复 Setp3~Setp6, 至叠加电动公交车充电的日负荷曲线超过该地区最高负荷限制, 退回记录上一代全局最优值, 退出程序。

3 算例分析

3.1 算例参数

以南方某城区一条馈电线路日负荷曲线为例(见图3)进行研究, 该负荷曲线的最高峰为 3097.16 kW, 最低谷为 2644.26 kW, 假定该线路允许最高负荷限制为 3600 kW。表 2 是该城区电动公交车一天中每个小时的行驶安排表。电动公交车的充电功率分别为 $P_c=22$ kW, 行驶放电功率为 $P_f=28$ kW, 蓄电池容量为 $B_{\text{full}}=150$ kWh。粒子群算法参数设置: 惯性权重 $w_{\text{max}}=0.96, w_{\text{min}}=0.4$; 学习因子 $c_1=c_2=2$ 。粒子种群 $N=20$, 最大迭代次数 $I_{\text{max}}=300$, 粒子速度 $V_{\text{max}}=3, V_{\text{min}}=-1$ 。

表 2 行驶车辆的安排表

时间	行驶车辆	时间	行驶车辆
6:00-7:00	20%	18:00-19:00	90%
7:00-8:00	80%	19:00-20:00	30%
8:00-9:00	90%	20:00-21:00	30%
9:00-10:00	30%	21:00-22:00	30%
10:00-11:00	30%	22:00-23:00	20%
11:00-12:00	30%	23:00-0:00	0
12:00-13:00	30%	0:00-1:00	0
13:00-14:00	30%	1:00-2:00	0
14:00-15:00	30%	2:00-3:00	0
15:00-16:00	30%	3:00-4:00	0
16:00-17:00	30%	4:00-5:00	0
17:00-18:00	80%	5:00-6:00	0

3.2 计算结果及分析

计算要求全部电动公交车按表 2 的要求进行调

度,总功率不超过 3600 kW 下优化电动公交车数量。优化首先采用 10 辆电动公交车作为基础车辆,以标准差最小为目标函数,算得日负荷曲线离馈电线路最高负荷的距离,增加车辆数,重新计算,逐步逼近。通过改进的 DCPSO 算法可求得在不超过馈电线路所允许最高负荷的情况下一天可安排 65 辆电动公交车进行充电。图 4 是一次仿真后各负荷曲线图,其中初始化负荷曲线由 2.2 节所述初始化策略获得的充电方案叠加到原负荷曲线而得到。表 3 是采用改进的 DCPSO 优化算法后形成的电动公交车充电安排。由图 4 和表 3 可知,电动公交参与充电后,总负荷曲线出现了上移,位于馈线最高允许负荷附近,同时在晚上安排充电的车辆较多,有利于削峰填谷,而为了满足运力需求,白天也安排了不少的车辆充电。由图 4 可知,当运营规模为 65 辆电动公交时,采用改进的 DCPSO 算法具有较好的负荷曲线。此时,初始化负荷曲线的峰值超过 3600 kW(峰

值为 3638.6 kW),此种安排不能满足 65 辆公交运营充电的需求(只能满足 60 辆的需求)。采取 DCPSO 算法的曲线峰值也略超过 3600 kW(峰值为 3611.2 kW),而采用改进的 DCPSO 算法得到的负荷曲线峰值不高于 3600 kW(峰值为 3589.7 kW),可以满足运营需求。

图 5 和图 6 是电动汽车参与充电后,分别采用两种不同优化算法的 7 次重复迭代的收敛曲线。由图可知,改进的 DCPSO 算法收敛曲线比普通 DCPSO 算法收敛曲线更加密集靠下。多次迭代的结果,前者收敛均值为 6.95,后者为 7.15,降低了约 3%。由此可见改进的 DCPSO 算法具有更好的寻优效果。

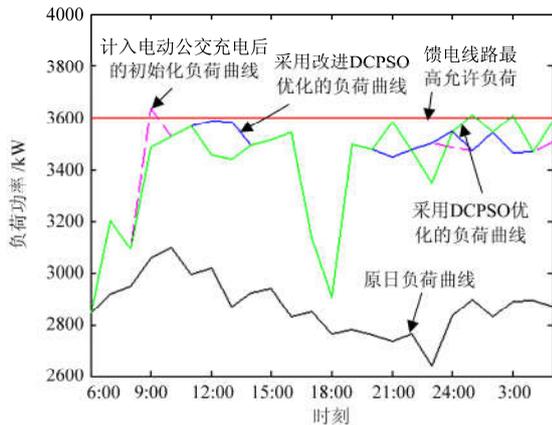


图 4 加入 65 辆电动公交车充电的负荷变化曲线
Fig. 4 Load curve which includes 65 charging electric buses

表 3 改进 DCPSO 对每个时间段充电车辆的安排表

Table 3 Each time the charging electric bus schedule by improved DCPSO

时间	充电车辆	时间	充电车辆
6:00-7:00	0	18:00-19:00	10%
7:00-8:00	20%	19:00-20:00	50%
8:00-9:00	10%	20:00-21:00	50%
9:00-10:00	30%	21:00-22:00	50%
10:00-11:00	30%	22:00-23:00	50%
11:00-12:00	40%	23:00-0:00	60%
12:00-13:00	40%	0:00-1:00	50%
13:00-14:00	50%	1:00-2:00	40%
14:00-15:00	40%	2:00-3:00	50%
15:00-16:00	40%	3:00-4:00	40%
16:00-17:00	50%	4:00-5:00	38.2%
17:00-18:00	20%	5:00-6:00	45.5%

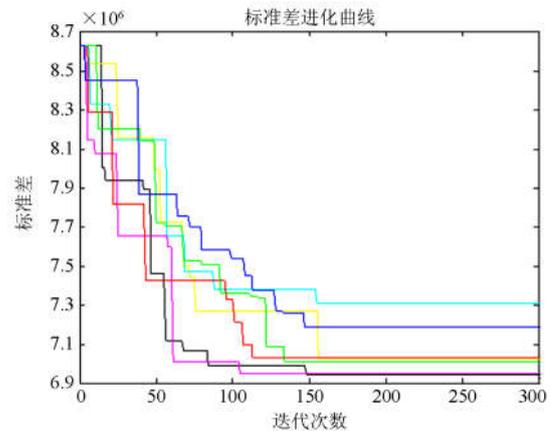


图 5 普通双中心粒子群收敛曲线
Fig. 5 Normal DCPSO's fitness

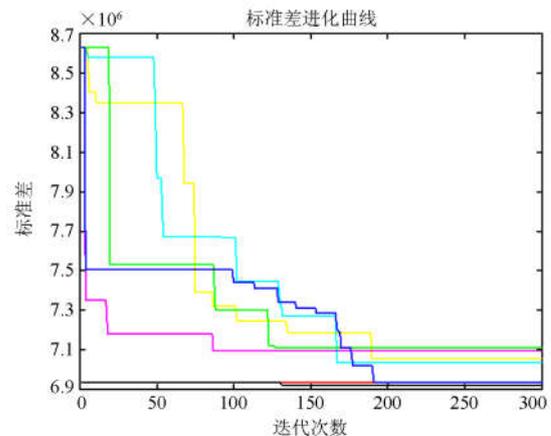


图 6 改进的双中心粒子群算法的收敛曲线
Fig. 6 Improved DCPSO's fitness

4 结论

本文研究了在一定馈线容量约束下,可容最大电动公交车运营数量的确定方法。提出了使得该馈线在不超过最高负荷限制的情况下最大车辆的优化模型。为了获得较优的结果,提出了一种基于该计

算模型的改进的双中心粒子群算法。通过对比, 表明改进的双中心粒子群由于扩大了每个粒子的搜索范围, 提高了粒子的搜索精度, 使优化结果具有更好的适应度, 最后的算例数据结果也表明该方法的有效性。这对于待建设电动公交车充电站选址规划以及建成充电站后的实际经营具有一定的参考作用。

参考文献

- [1] 潘姝月. 城市公交车行驶工况的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
PAN Shuyue. City buses driving conditions[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [2] KUKKONEN S, HALMEAHO T, KARVONEN V. Fully electric city buses-the viable option[C] // IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), Florence, Italy, December 17-19, 2014: 1-8.
- [3] 许庆强, 寇英刚, 马建伟, 等. 电动汽车充换电设施典型设计方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 118-124.
XU Qingqiang, KOU Yinggang, MA Jianwei, et al. Research on typical design scheme of charging/battery swap infrastructure for electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 118-124.
- [4] MACEDO J, KOKKINOGENIS Z, SOARES G, et al. A HLA-based multi-resolution approach to simulating electric vehicles in Simulink and SUMO[C] // 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), The Hague, Holland, October 6-9, 2013: 2367-2372.
- [5] 徐鹏, 陈祺伟, 连湛伟. 一种电动公交车充换电站动力电池全自动更换技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 150-154.
XU Peng, CHEN Qiwei, LIAN Zhanwei. An EV charging/swap station automatic battery replacement technology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 150-154.
- [6] 阳岳希, 胡泽春, 宋永华. 电动公交充换电站的优化运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 35-43.
YANG Yuexi, HU Zechun, SONG Yonghua. Research on optimal operation of battery swapping and charging station for electric buses[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 35-43.
- [7] 钱斌, 石东源, 谢平平, 等. 电动公交车换电站-电池充电站优化规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 64-70.
QIAN Bin, SHI Dongyuan, XIE Pingping, et al. Optimal planning of battery charging and exchange stations for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 64-70.
- [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): 77-84.
LU Xinyi, LIU Nian, TANG Qingfeng, et al. Optimal capacity configuration of electric vehicle battery swapping station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 77-84.
- [9] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [10] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-11.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-11.
- [11] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [12] DEILAMI S, MASOUM A S, MOSES P S. Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 456-467.
- [13] 韩海英, 和敬涵, 王小君, 等. 基于改进粒子群算法的电动车参与负荷平抑策略[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 165-169.
HAN Haiying, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. An improved particle swarm optimization-based load response strategy with participation of vehicle to grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 165-169.
- [14] 汤可宗, 柳炳祥, 杨静宇, 等. 双中心粒子群优化算法[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(5): 1086-1094.
TANG Kezong, LIU Bingxiang, YANG Jingyu, et al. Double center particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(5): 1086-1094.
- [15] EBERHART R C, SHI Y H. Particle swarm optimization: development, application and resource[C] // Proceedings of Congress on Evolutionary Computation, Seoul, Korea, 2001, 5: 81-86.

收稿日期: 2016-04-14; 修回日期: 2016-09-18

作者简介:

朱鹰屏(1976-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统的调度及优化运行, 大规模新兴能源的应用对电力系统的影响等; E-mail: sagelake@126.com

韩新莹(1978-), 男, 博士, 研究方向为测控技术在电力系统中的应用。

(编辑 姜新丽)