

DOI: 10.7667/PSPC180279

基于充电设备利用率的电动汽车充电路径多目标优化调度

周天沛^{1,2}, 孙伟²

(1. 徐州工业职业技术学院机电学院, 江苏 徐州 221140; 2. 中国矿业大学信控学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 由于电动汽车车主选择充电站具有较大的随机性, 使得各充电站的利用率存在较大的差异, 从而造成整个电网的负荷失衡, 影响配电网的稳定性和安全性。针对上述问题, 将行驶路程最近、时间最短、充电站时间利用率偏差最小和功率利用率偏差最小作为优化目标, 建立了电动汽车充电路径多目标优化调度模型。在对该模型进行求解的过程中, 提出了基于细菌趋化的改进粒子群算法进行求解。仿真结果表明, 采用该算法后, 电动汽车车主可以根据区域内充电站的利用率情况有目的选择充电站, 实现均衡化充电站利用率的目的。

关键词: 电动汽车; 充电路径; 多目标优化; 充电设备利用率; 细菌趋化 PSO 算法

Multi-objective optimal scheduling of electric vehicles for charging route based on utilization rate of charging device

ZHOU Tianpei^{1,2}, SUN Wei²

(1. School of Mechatronic Engineering, Xuzhou College of Industrial and Technology, Xuzhou 221140, China;
2. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The utilization of every charging station varies greatly because the Electric Vehicle (EV) owners have great randomness for choosing charging station, which causes the load imbalance of the whole power grid and affects the stability and security of the power grid. In view of the problem, minimum driving distance, minimum time and minimum deviation of time utilization rate and power utilization rate for charging station as optimization objectives, multi-objective optimal scheduling model of EVs for charging route is built. An improved Particle Swarm Optimization Algorithm based on Bacterial Chemotaxis (PSOBC) is proposed in order to solve the model. The simulation results show that the EV owners can purposefully choose charging stations according to the utilization of the charging stations in the area after adopting the proposed algorithm, which realizes the purpose of utilization equalization for charging stations.

This work is supported by Industry-Academy-Research Cooperation Project of Jiangsu Province (No. BY2016026-01) and Natural Science Research Project in Universities of Jiangsu Province (No. 16KJB480006).

Key words: electric vehicle (EV); charging route; multi-objective optimization; utilization efficiency of charging device; particle swarm optimization based on bacterial chemotaxis (PSOBC)

0 引言

由于电动汽车具有环保和节能的优点, 受到了各国政府的大力扶持和推广^[1]。但是由于受到车载蓄电池容量的限制, 大部分电动汽车的行驶里程不超过 200 km, 因此电动汽车为了避免电量不足影响正常出行, 需要到充电站为其补充电能, 因此充电站的建设是作为电动汽车能够实现产业化和商业化

的重要条件之一^[2]。截至 2013 年底, 全世界建成 8 000 座充电站、32 万个充电桩, 其中我国建成 723 座充电站、2.8 万个充电桩。预计到 2020 年, 全球将有 6 万座充电站、240 万个充电桩投入使用^[3-4]。

但是在充电站的建设过程中, 也出现了一些问题。主要有电动汽车用户在去往目的地的途中由于受电量不足的影响, 途中必须选择充电站进行充电, 由于用户对充电站的布局并不清楚, 用户往往要绕很多路程才能找到充电站进行充电, 而且由于对目前站内充电站的使用情况也不清楚, 用户很有可能选择充电负载高的充电站, 又不得不排队等候, 这

基金项目: 江苏省产学研合作计划项目资助 (BY2016026-01);
江苏省高校自然科学研究面上项目资助 (16KJB480006)

使得用户需要支付更多的路程成本和时间成本，大大降低了用户的满意度^[5-6]。

为解决该问题，需要对电动汽车选择充电站的路径进行优化调度，以实现电动汽车的合理充电和充电站的合理布局。国内外很多学者进行了深入研究，例如文献[7]运用改进后的混合离散粒子群-变权 Voronoi 图算法对电动汽车的充电路径进行优化规划。文献[8]将路径选择、到达时间、电池容量作为约束条件，构建了以用户出行总成本最小为优化目标的电动汽车路径选择模型。文献[9]构建了以电池容量和充电时间为优化目标的电动汽车路径选择模型，并采用单亲遗传算法进行模型求解。文献[10]提出将大规模电动汽车、配电网与道路交通网 3 方面作为一个整体进行研究，提出了基于路段权值思想和 Dijkstra 最短路径算法的大规模电动汽车最优充电站推荐和路径规划方法。

上述电动汽车充电路径优化调度模型大多以充电路径最短或是车主出行总成本最小为优化目标，但是由于电动汽车车主选择充电站存在随意性和多样性，如果仅从满足车主花费最小的角度出发，很容易导致大量电动汽车集中选择一个充电站进行充电，造成不同充电站的充电设备的利用效率在整个充电站服务网络中的分布不均衡，有可能造成整个配电网的负荷失衡，使得充电站的收益下降，这样必然对充电站的整体发展带来负面影响。因此本文在兼顾用户的利益基础上，将充电站内的充电设备利用效率的均衡性也作为主要优化目标，建立了基于充电设备利用率的电动汽车充电路径多目标优化调度模型，并采用基于细菌趋化的改进粒子群算法进行模型求解。仿真结果证明了该算法的有效性。

1 电动汽车充电路径的优化调度

电动汽车充电路径的优化调度就是根据电动汽车的数量和分布情况、电网可用充电功率、充电站位置和数量等因素来合理调度电动汽车，以实现电动汽车车主花费最小和充电站的合理布局。电动汽车充电路径优化调度的合理性，将可以使各个充电站充电时间利用率均衡分布，直接影响充电站布局的合理性和经济效益，因此电动汽车的合理充电路径优化调度对于充电站的建设和布局起着非常重要的作用^[11-12]。

当电动汽车从起点出发，并计划去一个目的地时，其会面临着以下情况之一：1) 可以直接到达目的地；2) 需要在充电站充电后才能达到目的地；3) 不能够到达指定的目的地和任何一个充电站。下面将分别对这 3 种情况下的电动汽车的路径规划进

行讨论。

情况 1: 直接到达目的地

在这种情况下，电动汽车可以直接到达目的地。也就是说，电动汽车剩余电池容量保证其到达目的地后，还可以再去一个或多个充电站，如图 1 所示，即

$$R \geq S + S_1 \tag{1}$$

式中： R 表示电动汽车在剩余电量的状态下所能行驶的最大距离； S 表示出发点和目的地之间的距离； S_1 表示目的地和某充电站之间的距离。

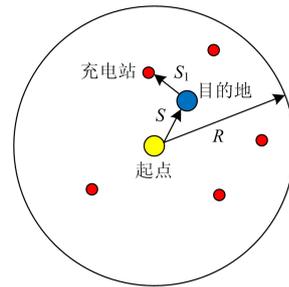


图 1 情况 1

Fig. 1 Case 1

情况 2: 需要在充电站充电后才能达到目的地

在这种情况下，如果电动汽车可行驶里程不能满足式(1)，即 $R < S + S_1$ ，这时电动汽车车主必须选择一个充电站进行充电服务。为保证电动汽车能够到达充电站， R 必须大于等于 S_2 (S_2 表示出发点和某充电站之间的距离)，即

$$S_2 \leq R < S + S_1 \tag{2}$$

在情况 2 中，需要电动汽车车主首先要到一个充电站进行充电，然后开车去往目的地。因此总行驶里程为 $S_3 + S_4$ (S_3 表示起点和要选择的充电站之间的距离， S_4 表示要选择的充电站和目的地之间的距离)，如图 2 所示。这种情况是电动汽车充电路径优化调度中最常见的一种情况，也是本文所要解决的

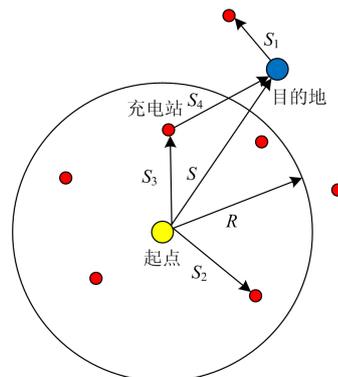


图 2 情况 2

Fig. 2 Case 2

$$\eta_{Tj} = \frac{\sum_{k=1}^n (T_{\text{end},k} - T_{\text{start},k})}{T_{\text{day}}} \quad (11)$$

式中： k 表示充电桩的充电序号； n 表示该个充电桩一天的充电次数； $T_{\text{end},k}$ 表示该充电桩第 k 次的充电结束时间，单位为 min ； $T_{\text{start},k}$ 表示该充电桩第 k 次的充电开始时间，单位为 min ； T_{day} 表示一天中的总时间。

单个充电站的充电桩平均时间利用率 $\bar{\eta}_{Ti}$ 为

$$\bar{\eta}_{Ti} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\sum_{k=1}^{n_j} (T_{\text{end},jk} - T_{\text{start},jk})}{T_{\text{day}}} \quad (12)$$

式中： m 表示充电站中的充电桩的数量； n_j 表示第 j 个充电桩一天的充电次数； $T_{\text{end},jk}$ 表示第 j 个充电桩第 k 次的充电结束时间，单位为 min ； $T_{\text{start},jk}$ 表示第 j 个充电桩第 k 次的充电开始时间，单位为 min ；其余变量含义同式(11)。

在区域内所有充电站的充电桩平均时间利用率 $\bar{\eta}_T$ 为

$$\bar{\eta}_T = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{n_{ij}} (T_{\text{end},ijk} - T_{\text{start},ijk})}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot T_{\text{day}}} \quad (13)$$

式中： N 表示区域内充电站的数量； m_i 表示第 i 个充电站中的充电桩的数量； n_{ij} 表示第 i 个充电站中第 j 个充电桩一天的充电次数； $T_{\text{end},ijk}$ 表示第 i 个充电站中第 j 个充电桩第 k 次的充电结束时间，单位为 min ； $T_{\text{start},ijk}$ 表示第 i 个充电站中第 j 个充电桩第 k 次的充电开始时间，单位为 min ；其余变量含义同式(11)。

不同的充电站内充电桩的时间利用率并不平衡，有的充电站偏高，有的则偏低。如果某一个充电站的时间利用率过高，这说明有更多的电动汽车选择该充电站进行充电，但是在这个区域内的电动汽车数量是一定的，那造成的后果是选择到其他充电站的电动汽车数量减少了，这使得其他充电站的充电设备的利用率下降^[16]。为了使该区域内各个充电站内的充电站的利用率能够均衡发展，本文将区域各个充电站的充电桩的时间利用偏差率最小作为优化目标之一，即

$$\omega_3 = \min F_3 = \left(\frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{\sum_{k=1}^{n_{ij}} (T_{\text{end},ijk} - T_{\text{start},ijk})}{T_{\text{day}}} - \bar{\eta}_T \right)^2 \quad (14)$$

4) 功率利用率偏差最小

在研究充电设备的使用效率时，仅仅考虑时间利用率这一指标是不够的。由于充电站内各个充电桩的额定功率都已确定，如果某个充电桩长时间处于欠额定功率状态下进行充电，即使该充电桩的时间利用率较高，但是因为功率利用率偏低，也是不利于充电站的经济性运营^[17]。充电桩的功率利用率等于该充电桩的实际输出功率与其本身的额定功率的比值。

单个充电桩的功率利用率 η_{Pj} 为

$$\eta_{Pj} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{(T_{\text{end},k} - T_{\text{start},k}) \cdot W} \quad (15)$$

式中： k 表示充电桩的充电序号； n 表示该个充电桩一天的充电次数； $T_{\text{end},k}$ 表示该充电桩第 k 次的充电结束时间，单位为 min ； $T_{\text{start},k}$ 表示该充电桩第 k 次的充电开始时间，单位为 min ； Q_k 表示该充电桩第 k 次的充电度数，单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ； W 表示该充电桩的额定功率，单位为 kW 。

单个充电站的充电桩平均功率利用率 $\bar{\eta}_{Pj}$ 为

$$\bar{\eta}_{Pj} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} \omega_j \frac{Q_{jk}}{(T_{\text{end},jk} - T_{\text{start},jk}) \cdot W_j} \right) \quad (16)$$

式中： m 表示充电站中的充电桩的数量； n_j 表示第 j 个充电桩一天的充电次数； $T_{\text{end},jk}$ 表示第 j 个充电桩第 k 次的充电结束时间，单位为 min ； $T_{\text{start},jk}$ 表示第 j 个充电桩第 k 次的充电开始时间，单位为 min ； ω_j 表示第 j 个充电桩的权重系数； Q_{jk} 表示第 j 个充电桩第 k 次的充电度数，单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ； W_j 表示第 j 个充电桩的额定功率，单位为 kW 。

在区域内所有充电站的充电桩平均功率利用率 $\bar{\eta}_P$ 为

$$\bar{\eta}_P = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} \left(\frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_{ij}} \omega_{ij} \frac{Q_{ijk}}{(T_{\text{end},ijk} - T_{\text{start},ijk}) \cdot W_{ij}} \right)}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (17)$$

式中： N 表示区域内充电站的数量； m_i 表示第 i 个充电站中的充电桩的数量； n_{ij} 表示第 i 个充电站中的第 j 台充电桩一天的充电次数； $T_{\text{end},ijk}$ 表示第 i 个充电站中第 j 个充电桩第 k 次的充电结束时间，单位为 min ； $T_{\text{start},ijk}$ 表示第 i 个充电站中第 j 个充电桩第 k 次的充电开始时间，单位为 min ； ω_{ij} 表示第 i 个充电站中第 j 个充电桩的权重系数； Q_{ijk} 表示第 i 个充电站中第 j 个充电桩第 k 次的充电度数，单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ； W_{ij} 表示第 i 个充电站中第 j 个充电桩的额

定功率, 单位为 kW。

同时间利用率分析过程类似, 为了使该区域内各个充电站内的充电站的利用率能够均衡发展, 本文将区域各个充电站的充电桩功率利用偏差率最小作为优化目标之一, 即

$$\omega_4 = \min F_4 = \left(\frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} \left(\frac{1}{n_{ij}} \sum_{k=1}^{n_{ij}} \omega_{ij} \frac{Q_{ijk}}{(T_{\text{end},ijk} - T_{\text{start},ijk}) \cdot W_{ij}} \right) - \bar{\eta}_p \right)^2 \quad (18)$$

综上所述, 电动汽车充电路径的多目标优化调度函数为

$$\min F = \lambda_1 \cdot \omega_1 + \lambda_2 \cdot \omega_2 + \lambda_3 \cdot \omega_3 + \lambda_4 \cdot \omega_4 \quad (19)$$

式中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 分别为目标函数 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 对应的加权系数, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$ 。

2.2 约束条件

1) 用户行为约束

在电动汽车用户选择充电站时, 一般只能选择该区域内的一个充电站进行充电^[18], 如式(20)所示。

$$\sum_{k=1}^N x_{i,k} = 1 \quad (20)$$

2) 充电路程约束

为了能够满足第 1 节中所提的情况 1 和情况 2 或是避免第 1 节所提的情况 3, 即第 i 辆电动汽车到达第 k 个充电站的最远距离 $D_{i,k}^{\max}$ 应该小于等于第 i 辆电动汽车在剩余电量的状态下所能行驶的最远距离 D_i^{\max} ^[19], 如式(21)所示。

$$D_{i,k}^{\max} \leq D_i^{\max} \quad (21)$$

3) 充电功率约束

$$P_{k,t,\min} \leq P_{k,t} \leq P_{k,t,\max} \quad (22)$$

式中: $P_{k,t,\min}$ 为 t 时刻第 k 个充电站最小充电功率; $P_{k,t,\max}$ 为 t 时刻第 k 个充电站最大充电功率。

4) 电池电量约束

$$\sum_{t=1}^{24} P_{j,t} \cdot \Delta t + C_{j0} = C_{j,\max} \quad (23)$$

式中: $P_{j,t}$ 表示 t 时刻第 j 个充电站的充电功率, $j=1, 2, \dots, N$, N 表示充电站的数量; C_{j0} 表示一天内到第 j 个充电站充电的所有电动汽车充电前的剩余电量之和; $C_{j,\max}$ 表示一天内到第 j 个充电站充电的所有电动汽车的电量之和。

3 电动汽车充电路径多目标优化调度模型的求解

3.1 采用的优化算法

式(19)中目标函数中变量维数多, 且为非线性问题, 经典的线性优化方法难以求解, 故本文采用

全局搜索能力强、收敛速度快的粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)求解^[20-21]。PSO 算法的基本原理是在解空间内随机生成一组解, 然后根据迭代式(24)、式(25)使得空间中的解向最优解的位置运动, 当满足给定条件后就会输出最优解。

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{wd}^k - x_{id}^k) \quad (24)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (25)$$

式中: i 为粒子的编号, $i \in [1, 2, \dots, P]$; d 为变量的维数; k 为粒子的更新代数, $k \in [1, 2, \dots, K]$; v_{id}^k 为第 i 个粒子 d 维在第 k 代的更新速度; x_{id}^k 为第 i 个粒子 d 维在第 k 代的值; p_{id}^k 为第 i 个粒子在第 k 代前的最优位置; p_{wd}^k 为第 k 代前粒子群中的最优位置; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为非负常数; r_1 、 r_2 为 0 到 1 的随机数。

由于标准 PSO 算法中每个粒子都向自身最优位置和群体最优位置靠近, 这会使得粒子失去多样性而容易陷入局部最优^[22]。为保证粒子的多样性, 本文提出了基于细菌趋化的改进 PSO 算法(Particle Swarm Optimization Based on Bacterial Chemotaxis, PSOBC)^[23]。

在 PSOBC 算法中粒子运动存在吸引和排斥两种操作, 吸引操作同标准 PSO 算法; 在排斥操作中粒子会远离自身的最差位置和群体的最差位置^[24]。

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k - c_1 r_1 (d_{id}^k - x_{id}^k) - c_2 r_2 (d_{wd}^k - x_{id}^k) \quad (26)$$

式中: d_{id}^k 为第 i 个粒子在 k 代前的最差位置; d_{wd}^k 为在 k 代前粒子群中的最差位置。

由式(26)可以看出粒子会远离最差位置, 即受到排斥。排斥作用增加了粒子群的多样性。为了判断粒子群进化中采取吸引操作还是排斥操作, 引入多样性度量指标, 计算方法如式(27)。

$$\text{diversity}(P) = \frac{1}{LP} \sum_{i=1}^P \sqrt{\sum_{j=1}^N (S_{ij} - \bar{S}_j)^2} \quad (27)$$

式中: P 为种群大小; L 为搜索空间最长对角线长度; N 为维数; S_{ij} 为第 i 个粒子的第 j 个分量; \bar{S}_j 为第 j 个分量的平均值。

该算法的基本步骤如下:

Step1 初始化算法中参数, 设置种群规模 P ; 迭代次数 K ; 惯性权重范围 $[w_1, w_2]$; 学习因子 c_1 、 c_2 ; 多样性阈值范围 $[d_{\text{low}}, d_{\text{high}}]$ 。

Step2 计算各粒子的适应度值。

Step3 若 $\text{diversity}(P) \leq d_{\text{low}}$, 选择 PSOBC 算法; 若 $\text{diversity}(P) \geq d_{\text{high}}$, 选择标准 PSO 算法; 若 $d_{\text{low}} < \text{diversity}(P) < d_{\text{high}}$, 则随机选择标准 PSO 算法或者 PSOBC 算法。

Step4 若为 PSOBC 算法, 用式(26)更新粒子的速度, 用式(25)更新粒子位置; 若为标准 PSO 算法, 用式(24)更新粒子的速度, 用式(25)更新粒子位置。

Step5 更新 p_{id}^k 、 p_{wd}^k 、 d_{id}^k 、 d_{wd}^k 。

Step6 判断是否达到最大迭代次数, 若没有, 则 $k=k+1$, 跳转到步骤 Step3。

3.2 电动汽车充电路径优化调度步骤

当有电动汽车有充电需求并以此要选择充电站时, 其充电路径优化调度步骤如下(见图 4)。

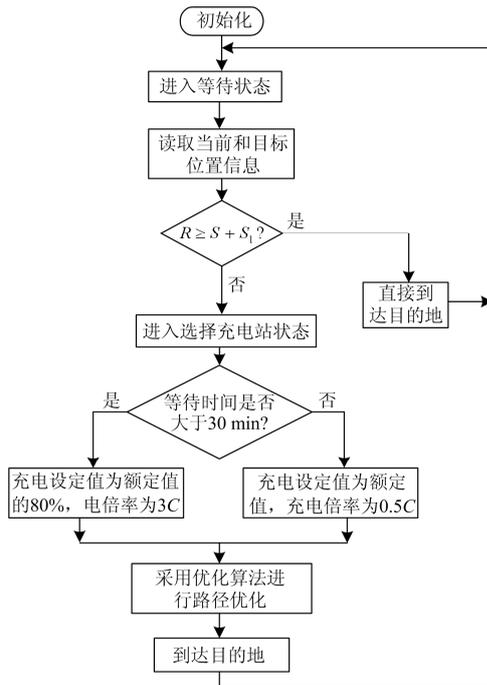


图 4 电动汽车充电路径优化调度步骤

Fig. 4 Optimal scheduling step of EVs for charging route

Step1 当电动汽车有充电需求时, 进入等待状态, 并读取当前位置和目标位置来决定行驶路径;

Step2 如果 $R \geq S + S_1$, 电动汽车将进入直接到达目的地状态, 最终到达目的地。此后, 由于随着行驶里程的增加电动汽车的剩余电池容量在下降, 电动汽车将返回到 Step1, 进入等待状态, 等待下一个路径优化;

Step3 如果 $R < S + S_1$, 电动汽车将进入选择充电站状态, 为提高充电设备利用率, 当等待时间大于 30 min, 充电设定值为额定值的 80%, 充电倍率为 3C, 以减少充电时间, 从而等待时间也随之变少, 充电站的时间利用率也提高。当等待时间小于 30 min, 则充电设定值为额定值, 充电倍率为 0.5C。

Step4 采用前面所提的优化算法进行充电路径优化调度; 电动汽车选择好一个充电站进行充满电后, 驶向目的地, 到达目的地后电动汽车同样将返

回到 Step1, 进入等待状态, 等待下一个路径优化。

4 仿真实验及结果分析

深圳市是我国电动汽车发展最快的城市之一, 其充电站的建设数量居全国前列, 因此本文选取深圳市的 15 个充电站进行电动汽车路径规划优化调度, 即 $N=15$ 。每个充电站的参数设置如表 1 所示, 充电站的分布图如图 5 所示。假定需要充电的电动汽车数量为 1 000 辆, 即 $M=1\ 000$ 。选用的电动汽车为比亚迪 E6, 其电池容量为 82 kWh, 充电功率为 30 kW, 如果采用快速充电, 充电倍率为 0.5C, 如果采用专用快速充电器, 充电倍率为 3C, 大约 30 min 左右即可充到电池容量的 80%。电动汽车的行驶速度 $v_f=40$ km/h。在本文中, 充电桩选用直流充电桩, 其额定功率一致, 都为 100 kW, 为了解决同一台充电设备对多种车型充电造成功率利用率低的问题, 在该充电桩的内部设置有 4 个并联模块, 每个模块额定功率最大为 25 kW, 该充电桩会根据不同功率的充电设备分配内部模块使用情况。例如给公交电动车充电, 由于公交电动车的充电功率较大, 4 个模块同时工作, 而本例采用的比亚迪 E6 的充电功率为 30 kW, 只需要 2 个模块参与工作, 为了减少各模块之间老化程度的差异, 延长充电机的使用寿命, 在小功率电动汽车充电时采用循环使用

表 1 充电站参数设置

Table 1 Parameter settings of charging stations

编号	充电站	充电桩数	编号	充电站	充电桩数	编号	充电站	充电桩数
1	田贝站	4	6	机场站	10	11	月亮湾站	8
2	笔架山站	8	7	高新西站	4	12	清水河站	8
3	香蜜湖站	6	8	沙河东站	6	13	民治花厂站	8
4	清湖总站	8	9	体育场站	8	14	科苑南站	4
5	南山地税站	8	10	深圳湾站	10	15	福田枢纽站	10



图 5 充电站分布图

Fig. 5 Charging stations distribution map

的方法, 即第一次充电使用 2 个模块, 第二次使用另外 2 个模块, 以此类推。PSOBC 算法参数设置为: 种群的规模为 300, 迭代次数为 300, $c_1=c_2=2$, 惯性权重采用线性递减法, $w_{max}=0.9$, $w_{min}=0.4$ 。

经过 20 次的独立仿真运行, 仿真结果如表 2 所示, 从表 2 中可以看出, 采用本文所提的算法进行优化调度后, 电动汽车都能够根据自身的情况和充电站的可用资源选择合理的充电站, 避免了优化前电动汽车集中在部分充电站进行充电的现象发生, 使得整个区域充电站的设备利用率更加均衡化。图 6 为利用常规 PSO 算法和细菌趋化 PSO 算法, 得到的目标函数 F 适应度值收敛曲线对比图。从图中可看出 PSOBC 算法具有更快的收敛速度, 且可以得到全局最优解, 避免了常规粒子群算法易陷入局部最优的缺点。此外各个充电站在优化前后的时间利用率对比如图 7 所示, 可以从中看出, 在采用本文所提出的算法后, 各个充电站的时间利用率更加均衡分布, 达到了优化目标函数的要求。

为了同时兼顾车主的利益, 本文将车主较为关心的路程距离和等待时间这两个指标也进行比较, 比较结果如图 8 和图 9 所示。从图 8 和图 9 可以看出, 采用本文所提出的算法后, 电动汽车到达充电站的路程距离和等待时间都得到了大幅度的下降, 达到了优化目标函数的要求。

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation results

编号	充电站	充电车辆分配	编号	充电站	充电车辆分配
1	田贝站	42	9	体育场站	80
2	笔架山站	86	10	深圳湾站	50
3	香蜜湖站	82	11	月亮湾站	68
4	清湖总站	59	12	清水河站	75
5	南山地税站	70	13	民治花厂站	76
6	机场站	79	14	科苑南站	35
7	高新西站	37	15	福田枢纽站	106
8	沙河东站	55			

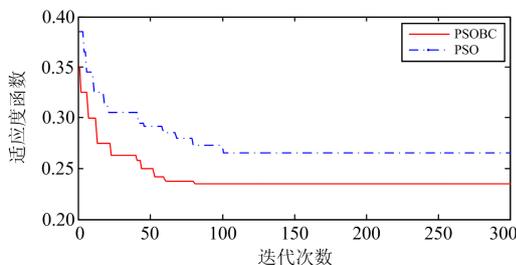


图 6 目标函数 F 适应度值收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve of objective function F fitness

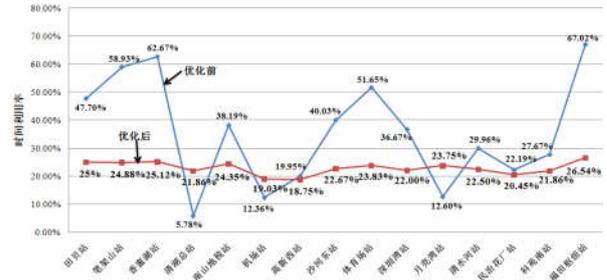


图 7 充电站时间利用率优化前后对比图

Fig. 7 Time utilization comparison of charging stations before and after optimization

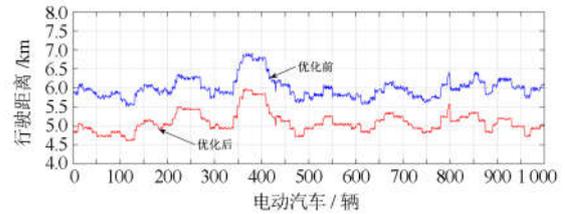


图 8 电动汽车到达充电站的路程距离优化前后对比图

Fig. 8 Comparison of distance that the EVs reach the charging stations before and after optimization

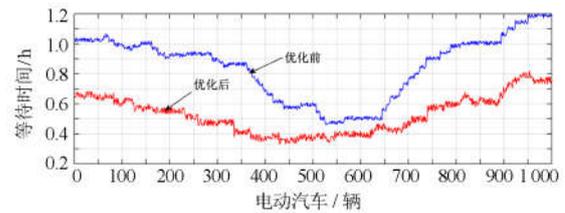


图 9 电动汽车等待时间优化前后对比图

Fig. 9 Comparison of waiting time for EVs before and after optimization

5 结论

相对于电动汽车的快速发展, 目前充电站的建设比较滞后且分布不平衡, 用户在选择充电站进行充电时带有很大的随机性, 这种无序选择充电站的行为会导致充电站的利用效率分布不均衡。这种不平衡会对充电站的正常运行带来挑战, 负载过高的充电站其维护成本会大大增加, 而负载过低的充电由于大量充电桩的闲置, 会导致充电站无法盈利甚至亏损。为解决该问题, 需要对电动汽车选择充电站的路径进行合理的优化调度。本文建立了基于充电设备利用效率的电动汽车充电路径多目标优化调度模型。并采用基于细菌趋化的改进粒子群算法进行模型求解。仿真结果证明了该算法的有效性。

参考文献

[1] 王敏, 许建, 潘永春, 等. 电动汽车参与配电网侧电力市

- 场竞价博弈的研究[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 1-6.
WANG Min, XU Jian, PAN Yongchun, et al. Research on electric vehicles participating in bidding game in distribution side power market[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 1-6.
- [2] 王鑫, 周步祥, 唐浩. 考虑用户因素的电动汽车有序充放电控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 129-137.
WANG Xin, ZHOU Buxiang, TANG Hao. A coordinated charging/discharging strategy for electric vehicles considering customers' factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 129-137.
- [3] TANG Wanrong, ZHANG Yingjun. A model predictive control approach for low-complexity electric vehicle charging scheduling: optimality and scalability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1050-1063.
- [4] MAIGHA, CROW M L. Cost-constrained optimal electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 716-724.
- [5] 黄贵鸿, 雷霞, 芦杨, 等. 考虑用户满意度的电动汽车用户侧最优智能充放电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 40-47.
HUANG Guihong, LEI Xia, LU Yang, et al. Optimus smart charge-discharge tactics in electric vehicle user profile considering user's satisfaction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 40-47.
- [6] 张惠生, 王帅, 赵兴勇, 等. 基于负荷区间电价激励的电动汽车充放电调度控制策略[J]. 广东电力, 2017, 33(3): 42-46.
ZHANG Huisheng, WANG Shuai, ZHAO Xingyong, et al. Charging and discharging scheduling control strategy for electric vehicles based on price incentive of load interval[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 33(3): 42-46.
- [7] 麻秀范, 王皓, 李颖. 基于变权 Voronoi 图和混合粒子群算法的电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 160-169.
MA Xiufan, WANG Hao, LI Ying. Optimal planning of charging stations for electric vehicle based on weight-changed Voronoi diagram and hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 160-169.
- [8] 杨洪明, 李明, 文福拴, 等. 利用实时交通信息感知的电动汽车路径选择和充电导航策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 106-113.
YANG Hongming, LI Ming, WEN Fushuan, et al. Route selection and charging navigation strategy for electric vehicles employing real-time traffic information perception[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 106-113.
- [9] YANG Hongming, YANG Songping, XU Yan, et al. Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by learnable Parthenon-genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 657-666.
- [10] 严奔遥, 罗禹贡, 朱陶, 等. 融合电网和交通网信息的电动车辆最优充电路径推荐策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 32(2): 310-318.
YAN Yiyao, LUO Yugong, ZHU Tao, et al. Optimal charging route recommendation method based on transportation and distribution information[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 32(2): 310-318.
- [11] WANG Xiumin, CHU Yuen, NAVEED H, et al. Electric vehicle charging station placement for urban public bus systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(1): 128-139.
- [12] 舒隽, 唐刚, 韩冰. 电动汽车充电站最优规划的两阶段方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 10-17.
SHU Jun, TANG Gang, HAN Bing. Two-stage method for optimal planning of electric vehicle charging station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 10-17.
- [13] 胡宇航, 皮一晨, 崔静安. 电动汽车充电站负荷建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 107-112.
HU Yuhang, PI Yichen, CUI Jingan. Research on electric vehicle charging station modeling[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 107-112.
- [14] YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A multi-objective collaborative planning strategy for integrated power distribution and electric vehicle charging systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1811-1821.
- [15] DONG Qiumin, DUSIT N, WANG Ping, et al. The PHEV charging scheduling and power supply optimization for charging stations[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(2): 566-580.
- [16] 邓磊, 刘敏, 应丽云, 等. 不同充电模式下电动汽车充电站的仿真与谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 87-95.
DENG Lei, LIU Min, YING Liyun, et al. Simulation and harmonic analysis of electric vehicle charging station under different charging modes[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 87-95.
- [17] 段庆, 孙云莲, 张笑迪, 等. 电动汽车充电桩选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 88-93.
DUAN Qing, SUN Yunlian, ZHANG Xiaodi, et al. Location

- and capacity planning of electric vehicles charging piles[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 88-93.
- [18] YANG Shaobing, WU Mingli, YAO Xiu, et al. Load modeling and identification based on ant colony algorithms for EV charging stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1997-2003.
- [19] SHOJAABADI S, ABAPOUR S, ABAPOUR M, et al. Optimal planning of plug-in hybrid electric vehicle charging station in distribution network considering demand response programs and uncertainties[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(13): 3330-3340.
- [20] AWADALLAH M A, VENKATESH B. Bacterial foraging algorithm guided by particle swarm optimization for parameter identification of photovoltaic modules[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2016, 39(2): 150-157.
- [21] 张新明, 王霞, 涂强, 等. 融合榜样学习和反向学习的粒子群优化算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 91-99.
ZHANG Xinming, WANG Xia, TU Qiang, et al. Particle swarm optimization algorithm based on combing example learning and opposition learning[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2017, 45(6): 91-99.
- [22] 史旭栋, 高岳林, 韩俊茹. 基于模糊推理的粒子群优化算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 108-118.
- SHI Xudong, GAO Yuelin, HAN Junru. Particle swarm optimization algorithm based on fuzzy reason[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2017, 45(3): 108-118.
- [23] 杨萍, 孙延明, 刘小龙, 等. 基于细菌觅食趋化算子的 PSO 算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(10): 3640-3642.
YANG Ping, SUN Yanming, LIU Xiaolong, et al. Particle swarm optimization based on chemotaxis operation of bacterial foraging algorithm[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(10): 3640-3642.
- [24] 张新明, 涂强, 尹欣欣, 等. 嵌入趋化算子的 PSO 算法及其在多阈值分割中的应用[J]. 计算机科学, 2016, 43(2): 311-315.
ZHANG Xinming, TU Qiang, YIN Xinxin, et al. Chemotaxis operator embedded particle swarm optimization algorithm and its application to multilevel thresholding[J]. Computer Science, 2016, 43(2): 311-315.

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-23

作者简介:

周天沛(1977—), 男, 博士, 研究方向为智能微电网优化与能量管理、电动汽车充电站布局最优规划; E-mail: zhoutianpei_001@163.com

孙伟(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为分布式智能微电网建设以及优化运行。E-mail: sw3883204@163.com

(编辑 周金梅)