[移动式充电设备]

移动式充电设备的多目标调度控制策略

文/黎恒　黄玉俊　王德南　曾伟哲　徐韶华　黄宇　郑飞宇
广西北投信创科技投资集团有限公司产业技术研究院

随着电动汽车数量的快速增长，充电基础设施的需求也快速增长，但存在配电网容量限制、规划建设位置不合理和建设充电站点不足等问题，导致用户充电需求难以得到满足。提出一种基于多目标的移动式充电设备调度策略以满足用户及时充电和最优调度距离的需求。综合考虑运营商和客户双方利益，将调度距离、充电需求以及站点所在地方负荷压力作为调度优先目标，使用混合粒子群算法对多目标进行求解。再结合算例进行分析，结果显示基于多目标的移动式充电设备调度策略可以有效减少运营商的运营成本，同时兼顾了客户的充电需求和站点的负荷压力。

为了实现碳达峰、碳中和的“双碳”目标，我国正在大力推动经济高质量发展。其中，新能源产业的发展就是一个重要内容，尤其在新能源汽车方面，以电动汽车（Electric Vehicles，EV）为代表的新能源汽车时代正加速到来。电动汽车的快速普及，公共充电设施作为最重要的基础保障，既是目前已有电动汽车的运行基础，也是今后逐步替代传统燃油汽车的前提条件。当前，公共充电设施建设面临着诸多问题，比如有些地方由于配电系统建设冗余有限不便于加装适量的公共充电设施。此外，安装大量的公共充电设施所需资金大、回本周期长，并且有些地区只是个别时间存在充电需求大，其余大部分时间设备都处于空闲状态，整体利用率不高。

针对上述问题，当前研究中有两种主流的解决方案。一种是对充电站优化配置，将充电站、光伏发电以及储能设备进行系统联合优化配置，以系统效率和投资运行成本为目标，对充电站进行优化配置和定量定容。黄小庆等考虑充电站成本效益，计及交通流量、电网能力和充电需求等多方面因素，确定充电站容量与地址。Zhang等[2]通过交通网络约束和电网潮流约束，建立随机混合整数二阶锥规划模型，从而确定充电站的配置地点。熊波等[3]结合用户和电网利益，将充电服务范围及配电网各主要参数指标作为约束，采用启发式算法结合维诺图获取最优配置地点。但这种方案未能考虑到充电站建成后闲置情况及充电桩使用的峰谷时间，不利于配电网的平稳运行。另一种是从电动汽车充电进行时空维度优化，通过使用双层优化策略，对充电时间、用户成本进行优化，达到降低用户成本和电网负荷压力的目的。刘岩等[4]提出使用控制充电功率和开始充电时间对电动汽车进行充电调度，从时间维度实现优化。夏娟娟等[5]将分时电价引入到电动汽车充电，引导用户错峰充电。周天沛等[6]考虑距离、时间和充电站利用率等问题，合理安排用户到

基金项目：广西重点研究计划资助项目（AB22035047 & AB23026038）

达最优充电站进行补电。邓友均等[7]提出使用实时信息感知来为电动汽车选择充电地点，从而有效减少用户的成本和配电网的影响。但使用时空维度优化存在一定程度影响用户的充电体验，可能需要用户行走更远路程到达充电地点。现有研究方案还未能同时满足运营商和客户双方利益，亟需寻求新的解决方法。移动式充电设备是可随时转移的、独立运作的充电设备，能够根据充电站点的充电需求，灵活调度调配至不同的充电站点，以避免用户等待充电时间过长的问题。目前亟需研究移动式充电设备的高效调度策略，解决用户及时就近的充电需求和优化移动式充电设备的调度路线。

本文提出一种基于多目标的移动式充电设备调度策略，根据所在区域内的充电需求、电网负荷压力和调度距离等因素实施电力调度，充分考虑充电站使用率的同时兼顾充电高峰期对电网平稳运行的影响，通过对充电站进行合理选址和对移动式充电设备进行高效调度，使用户能及时就近充电，一定程度上减少充电站需求不确定所带来的建造成本。

电动汽车的充电需求

本文所提的调度策略主要面向充电站服务需求，对于一般公共充电站普遍使用的直流充电桩（即快充），具有充电速度快、功率要求高的特点。快充使用者一般为从事客运服务的车辆，即出租车或网约车，因此本文对电动汽车的充电需求分析将以这部分车辆作为研究对象。

1. 客运电动汽车的日行车里程

日行里程反映了电动汽车的行车需求和行车习惯，车辆的日行里程直接影响日充电需求，是预测电动汽车日充电负荷的重要指标。结合大量真实数据分析后，可将客运电动汽车的日行车里程用高斯分布来表示其分布概率，有

$$f(x)=A\times\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\mathrm{e}\left(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma}\right) \tag{1}$$

式中，A=1.01；μ=128.93；σ=37.76；x为车辆个体每日行驶里程；$f(x)$为车辆每日行驶里程所占比率。

根据图1的累积曲线分析可得到客运电动汽车的日行里程服从以约130 km为均值的正态分布。

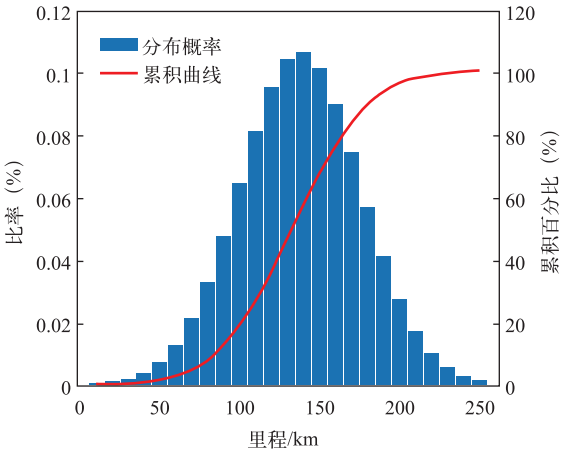

图1　客运电动汽车的日行车里程概率分布图

客运电动汽车的日负荷需求

根据客运电动汽车的日行车里程，结合平均每百公里耗电量，分析车辆的日耗电量，即客运电动汽车的日负荷需求。对于第i辆客运电动汽车EV$_i$的日耗电量有

$$\mathrm{SOC}_i=\frac{D_i}{100}\times P_{100,i},0\leqslant D_i\leqslant D_{\max,i} \tag{2}$$

式中，D_i为EV$_i$的每日行驶里程；$P_{100,i}$为EV$_i$的每百公里电能消耗量；$D_{\max,i}$为EV$_i$的续航里程。

则第i辆客运电动汽车EV$_i$的充电需求为

$$W_i=\frac{\mathrm{SOC}_i}{\eta_i} \tag{3}$$

式中，η_i为充电效率，是指从电网中吸取的电能与最终储存在电池中的电能之间的比率。

结合每辆客运电动汽车的日充电需求，客运电动汽车的日负荷需求可表示为

$$W=\sum_{i=1}^{n}W_i \tag{4}$$

即

$$W=\sum_{i=1}^{n}\frac{D_i\cdot P_{100,i}}{100\eta_i},0\leqslant D_i\leqslant D_{\max,i} \tag{5}$$

式中，n为某区域客运电动汽车总数。

移动式充电设备调度策略

基于电网公司、充电用户以及充电站运营商三方的利益考虑，本文提出一种基于多目标的移动式充电设备调度策略，探究在充电站点的充电负荷需求、充电站点所在区域负荷压力以及充电调度距离等因素基础上实现多目标调度。

1. 调度考虑因素

（1）站点充电负荷需求

充电站点的充电负荷需求与站点所在位置的交通状况有重要关联，假设每条道路的车流量一样，充电站所在位置周边区域的道路交汇数越多，车流量越大，则充电站的使用需求也会随之增加。因此，本文以充电站点在路网中布局情况作为考量充电负荷需求的因素。充电站点在路网中布局示意图如图2所示。

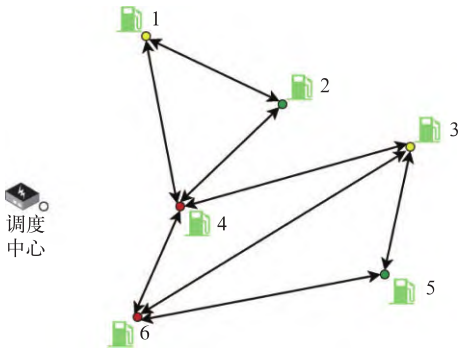

图2　充电站在路网中布局示意图

图2中包括1个调度中心和6个充电站点，其中调度中心是移动式充电设备的驻点（即始发点），1、2和5这三个充电站点所在位置是2条道路的交汇点，3和6这两个充电站点所在位置是3条道路的交汇点，而充电站点4所在位置为4条道路的交汇点，即站点充电需求从大到小依次是4→3→6→1→2→5。由此可得根据充电需求获得调度优先权，有第一个调度策略目标函数为

$$f_1 = \max\left(\frac{m_i}{n_j} \times W\right) \tag{6}$$

式中，m_i为第i个充电站点连接道路的数量；n_j为所有充电站各所在位置道路交汇点总数。

（2）充电站点所在区域负荷压力

由于充电站普遍都是直流充电桩，当遇到高功率、高负荷运行时，再叠加区域负荷高峰将会使电网负荷出现“峰上加峰”的现象，对电网的平稳运行产生严重影响。因此，在调度过程中必须考虑电网承载能力，以更利于电网负荷能够运行在合理区间。充电站所在区域划分示意图如图3所示。

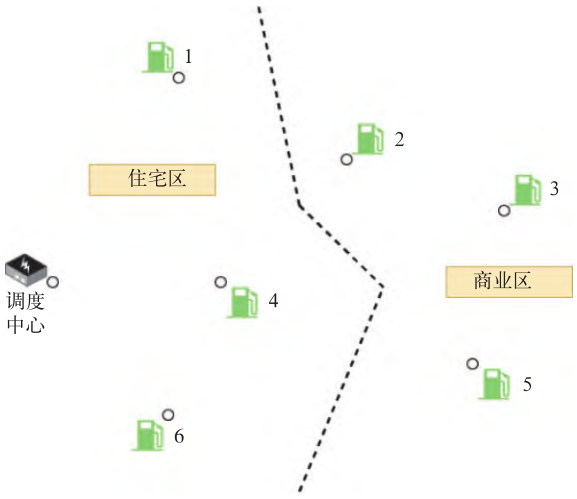

图3　充电站所在区域划分示意图

由图3可知，充电站点1、4、6位于住宅区域内，充电站点2、3、5位于商业区域内。因为不同区域主要的功能规划不尽相同，使得日负荷需求及峰谷时段也不尽相同，而日负荷标准差可以反应住宅区和商业区负荷曲线在一天时间内的稳定程度。因此，本文所提调度策略的第二个目标函数为

$$f_2 = \max\sqrt{\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left(P_{t,i} - \overline{P_{Bi}}\right)^2} \tag{7}$$

其中

$$\overline{P_{Bi}} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} P_{t,i} \tag{8}$$

式中，T表示将一天时间分为T个时段；$P_{t,i}$为第i个充电站点所在区域t时段对应的负荷总量；$\overline{P_{Bi}}$为第i个充电站点所在区域一天的平均负荷量。

（3）移动式充电设备调度距离

对于充电站运营商来说，增加运营效益是非常重要的。因此，作为充电设备调度的负责主体，在设备调度过程中必须考虑的一个重要因素就是调度成本。而调度成本主要体现在设备的调度距离上，即调度的距离越远，成本就越高，科学合理安排调度有利于降低充电站的整体运营成本。本文利用设备调度的始发地和目标地之间的直线距离作为调度成本的考量指标，有第三个调度策略目标函数为

$$f_3 = \min\sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2} \tag{9}$$

式中，目标地的坐标位置为（x_i，y_i），始发地的坐标位置为（x_a，y_a），始发地可以是调度中心或者上一个调度目的地。

调度距离示意图如图4所示。

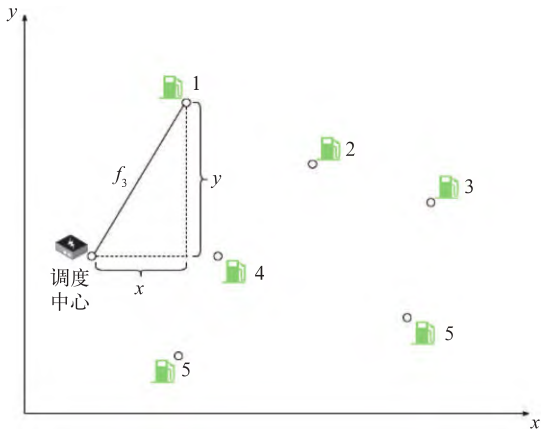

图4　调度距离示意图

2. 调度策略总目标函数

以上综合考虑用户、电网以及运营商三方利益，分别设置三个对应的调度目标函数，对三个目标进行标准化处理后运用权重化为单目标，有利于简化调度决策时间，并一定程度上减少在决策方面所产生的分歧。有

$$f_1' = \frac{f_1 - \min f_1}{\max f_1 - \min f_1} \tag{10}$$

$$f_2' = \frac{f_2 - \min f_2}{\max f_2 - \min f_2} \tag{11}$$

$$f_3' = \frac{f_3 - \min f_3}{\max f_3 - \min f_3} \tag{12}$$

$$f = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 \tag{13}$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1 \tag{14}$$

式中，λ_1、λ_2、λ_3分别是目标函数f_1、f_2、f_3的权重。

混合粒子群算法

1. HPSO算法

本文提出的移动式充电设备调度策略将引入混合粒子群算法（Hybrid Particle Swarm Optimization algorithm，HPSO）进行调度决策。该算法在遗传算法基础上引入粒子群算法的更新思想，寻找群体最优作为下一代杂交对象，一定程度上加快算法寻优速度，缩短获取调度决策的时间，增加调度策略的工作效率。HPSO算法的流程如图5所示。

在传统的遗传算法中，通常使用轮盘赌、二进制锦标赛和排序等方法先对群体染色体进行选择操作，产生规模大小相同的种群，再按照原先设定的概率从种群中选择染色体进行杂交。而本文使用的HPSO算法使用了粒子群算法的思想，选择出最优个体与上代进行杂交，即在保持遗传算法交叉操作和变异操作的同时，引进粒子群算法更新时的思想，使用个体最优和群体最优先后进行交叉，一定程度上加快了获取全局最优个体速度。

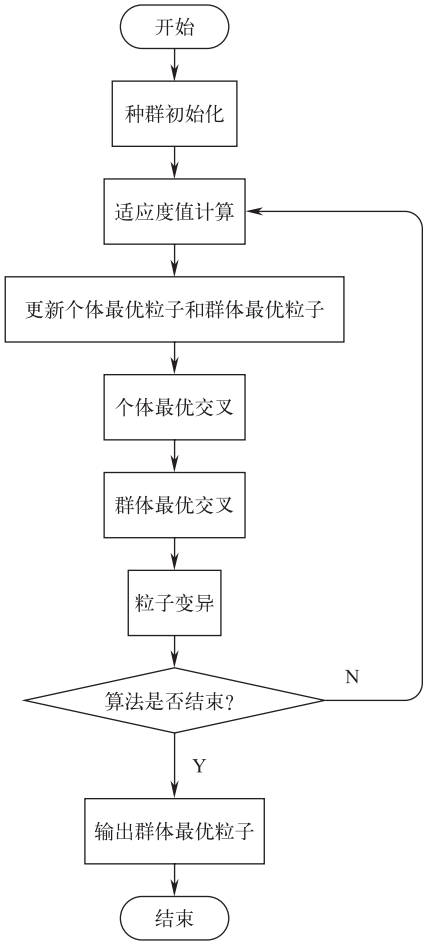

图5　混合粒子群算法流程图

2. HPSO在调度策略中应用

在传统的遗传算法中，一般使用二进制串表示染色体，而杂交时是对二进制串的某些位按照交叉概率进行交换，再对二进制串某些位按照变异概率进行0→1或1→0变换。本文在充电调度策略中，将需要进行充电调度的站点编号的随机排列作为“基因链”，然后不同排列之间进行交叉和变异操作，示意图如图6所示，其中0表示调度中心，1～6分别表示六个需要调度的充电站点。

在算法初始化时把所有站点编号进行随机排列生成预设种群规模大小相同的若干排列作为第一代，然后根据调度策略总目标函数算出每个站点的调度优先适应度，得到调度“基因链”总适应度。

依此不断迭代到算法预设的最大循环次数，最后获得最优调度“基因链”，即每个需要调度充电站点的调度顺序。根据此调度顺序可获得符合电网、用户和运营商三方利益的调度方案，保障了电网平稳运行，满足了用户充电需求，降低了运营商的运营成本。

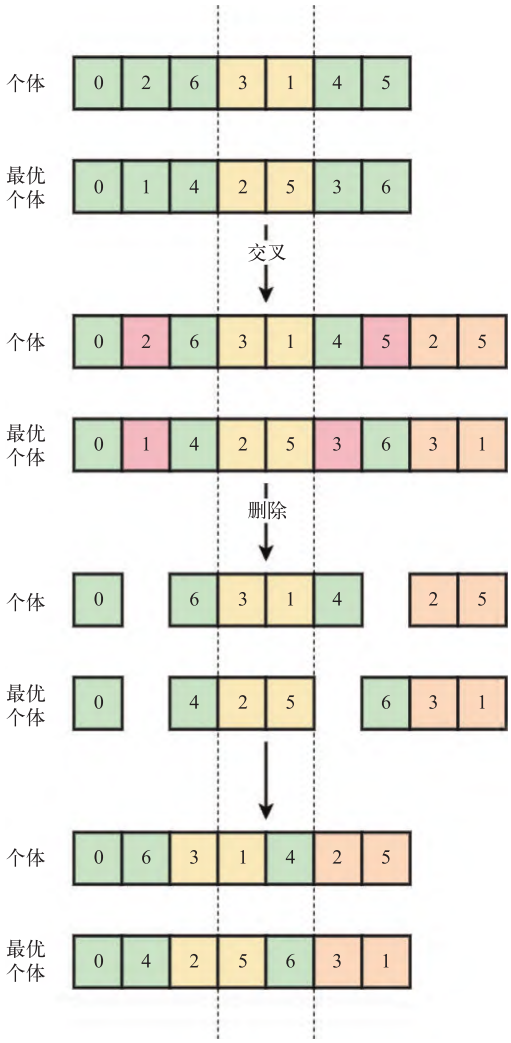

图6　调度策略决策过程算法交叉和变异示意图

算例分析

算例设置了1个调度中心和6个充电站点，其中调度中心坐标为（0，0），充电站点1～6的坐标分别为（3，1）、（1，2）、（5，2）、（3.5，3）、（2，4）、（4，5），六个站点分布在商业区和住宅区，其中充电站点1～3位于住宅区中，充电站点4～6位于商业区中，且n=20，m_i参数设置见表1。调度中心和充电站点位置图如图7所示。

表1　充电站周边道路交汇点数

充电站点i	1	2	3	4	5	6
m_i	2	4	3	5	3	3

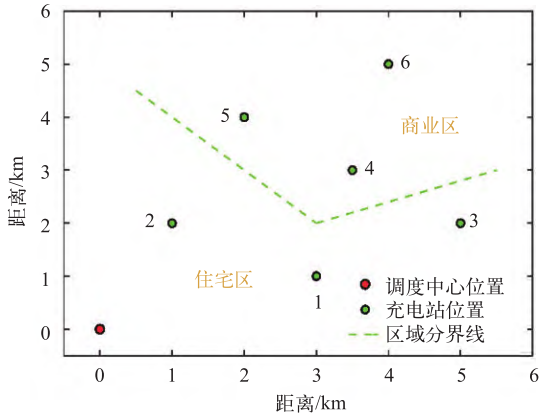

图7　算例充电站点位置图

算例中的商业区和住宅区一天基础负荷情况如图8所示。把一天分为24个时段，根据式（7）和式（8）可得，商业区一天的基础负荷标准差为1 056.1 kW，住宅区一天的基础负荷标准差为791.9 kW。

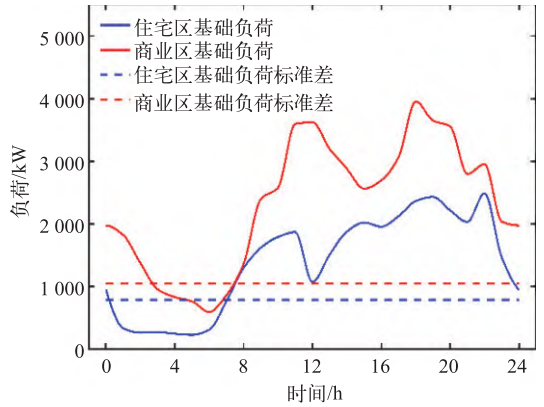

图8　区域基础负荷情况图

假设一天共有300辆电动汽车有充电需求，随机在两个区域中的六个充电站点进行补电。参与充电电动汽车的每百公里耗电$P_{100,i}$=12 kW·h，充电效率η_i= 0.9，续航里程$D_{\max,i}$=350 km。根据式（1）～式（5）可得全日充电负荷需求为16 200 kW，再结合式（6）可得各站点的充电需求负荷，如图9所示。其中，充电站点1的负荷需求最少，为1 620 kW，站点4的负荷需求最多，为4 050 kW，站点3、5和6的负荷需求均为2 430 kW，站点2的负荷需求则为3 240 kW。

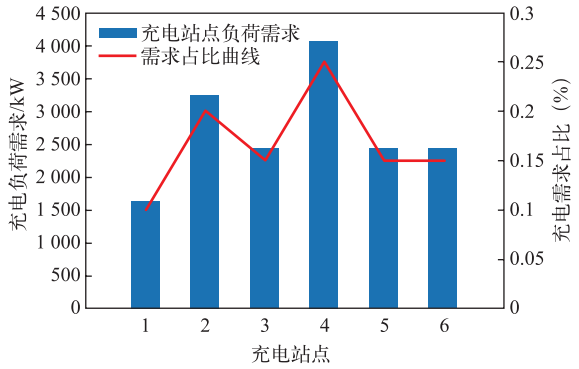

图9　站点充电负荷需求图

结合以上分析并根据式（13），考虑电网、用户及运营商三方利益，设置λ_1、λ_2、λ_3均为1/3，使用HPSO对目标进行求解，可得调度决策如图10所示。由图10可知，充电调度路径为0→4→6→5→2→1→3→0，调度总路程为20.57 km。

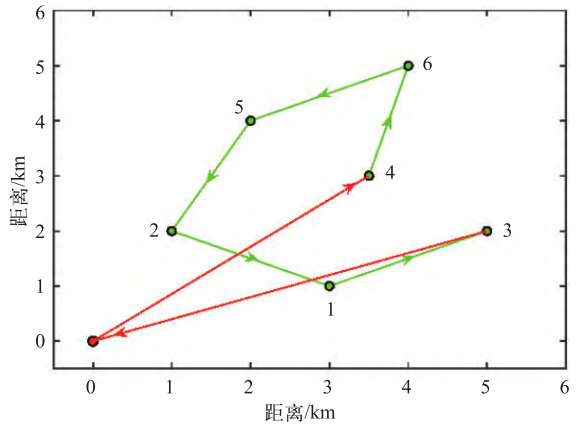

图10　算例充电调度决策图

使用HPSO算法对单目标和多目标进行调度仿真对比，结果见表2。由表2和上文分析可得，当以充电需求为目标进行充电调度时，会出现调度总路程远的现象，这不符合运营商降低运营成本的目标；当以区域负荷标准差作为目标进行充电调度时，会出现未能满足用户充电需求的现象，将降低用户便利性和满意度；当以调度总路程最短为目标进行充电调度时，往往会忽略地区的负荷压力，对电网的平稳运行又带来影响。本文提出的多目标充电调度策略，虽然对比分别以负荷标准差和调度总路程为目标时，调度路程会有所增加。但考虑到用户的充电需求，且相比以充电需求为调度目标时，调度总路程更符合运营商的利益。

表2　单目标调度与多目标调度对比

λ值设置	λ_1=1 λ_2=0 λ_3=0	λ_1=0 λ_2=1 λ_3=0	λ_1=0 λ_2=0 λ_3=1	λ_1=1/3 λ_2=1/3 λ_3=1/3
优化目标	f_1（充电需求）	f_2（充电需求）	f_3（充电需求）	f（多目标调度）
调度决策	0→4→2→3→6→5→1→0	0→5→6→4→3→1→2→0	0→1→3→4→6→5→2→0	0→4→6→5→2→1→3→0
总调度距离/km	23.02	17.29	15.97	20.57

为了证明文中所提优化策略的可推广性，本文增加一组算例分析，具体调度中心和充电站站点设置如图11所示。其中调度中心坐标为（3.5，3），充电站点1～3的坐标分别为（0.5，0）、（3，1）、（1，2），均分布在商业区，充电站点4～6的坐标分别为（5，2）、（2，4）、（4，5），均分布在住宅区，m_i参数设置见表3，n=18。增加算例的商业区和住宅区一天基础负荷情况沿用第一个算例的数据。

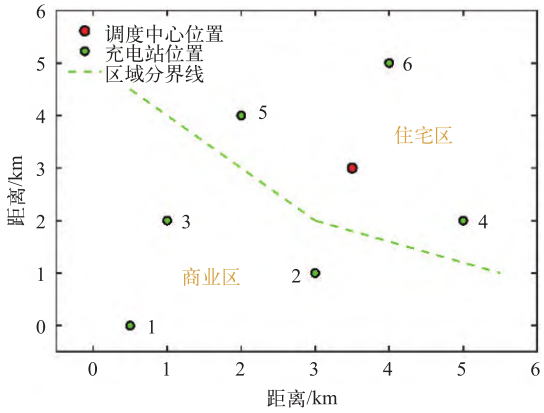

图11　增加算例的充电站点位置图

表3　增加算例的充电站周边道路交汇点数

充电站点i	1	2	3	4	5	6
m_i	2	3	4	3	3	2

假设一天共有350辆电动汽车有充电需求，随机在两个区域中的六个充电站点进行快充。参与充电电动汽车的参数沿用第一个算例数据，根据式（1）～式（5）可得全日充电负荷需求为170 10 kW，再结合式（6）可得各站点的充电需求负荷，如图12所示。其中，充电站点1和6的负荷需求为1 890 kW，充电站点2和4的负荷需求为2 835 kW，

充电站点3和5的负荷需求为3 780 kW。

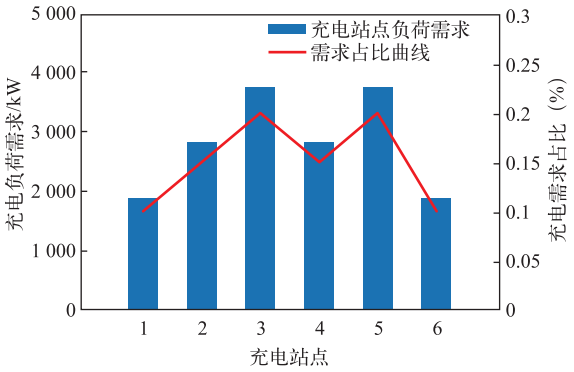

图12　增加算例的站点充电负荷需求图

结合以上分析并根据式（13），考虑电网、用户及运营商三方利益，设置λ_1、λ_2、λ_3均为1/3，使用HPSO对目标进行求解，可得调度决策图如图13所示。由图13可知，充电调度路径为0→5→3→1→2→4→6→0，调度总路程为16.25 km。对增加算例的单目标和多目标进行调度仿真对比，结果见表4。

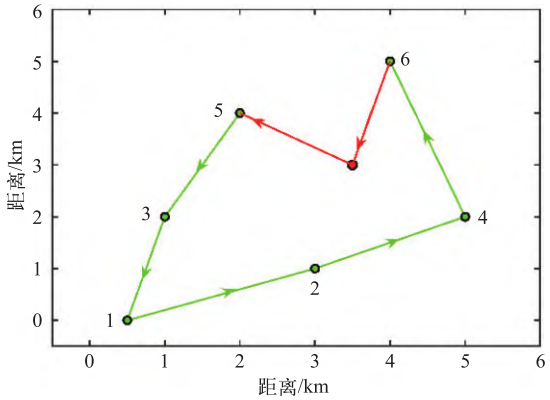

图13　增加算例的充电调度决策图

表4　增加算例的单目标调度与多目标调度对比

λ值设置	λ_1=1 λ_2=0 λ_3=0	λ_1=0 λ_2=1 λ_3=0	λ_1=0 λ_2=0 λ_3=1	λ_1=1/3 λ_2=1/3 λ_3=1/3
优化目标	f_1（充电需求）	f_2（充电需求）	f_3（充电需求）	f（多目标调度）
调度决策	0→5→3→2→4→1→6→0	0→3→6→5→1→2→4→0	0→6→5→3→1→2→4→0	0→5→3→1→2→4→6→0
总调度距离/km	21.61	22.15	15.33	16.25

结论

面对当前电动汽车充电需求日益增加，这就需要合理配置充电设备，既能给用户带来方便快捷的充电服务，同时也考虑大量电动汽车接网充电对电网平稳运行带来压力，以及不合理配置固定式充电设备将给运营者提高投资成本和增加回本周期等一系列问题。本文提出了一种基于多目标的移动式充电设备调度策略，并使用HPSO算法对多目标调度策略进行求解，通过两个案例的仿真分析，得到以下结论：

1）多目标调度策略能够很好地考虑多方利益，分别顾及到用户的充电需求、区域的负荷压力以及运营商的经营成本，达到共赢的目标。

2）通过HPSO算法将传统遗传算法以二进制形式表示的“基因链”改为适用于本文移动式充电调度的充电“调度链”，并结合粒子群算法的更新方法，有效提高调度效率。EA

（收稿日期：2024-03-22）

参考文献

[1] 黄小庆，杨夯，陈颉，等．基于LCC和量子遗传算法的电动汽车充电站优化规划[J]．电力系统自动化，2015，39(17)：176-182．

[2] Hongcai Zhang，Scott J．Moura，Zechun Hu，et al．A Second-Order Cone Programming Model for Planning PEV Fast-Charging Stations[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2018(33)：2763-2777．

[3] 熊波，舒征宇，郭晨，等．基于社会效益视角的充电站优化规划研究[J]．智慧电力，2019，47(12)：78-84．

[4] 刘岩，邓彬，王瑾，等．基于多目标优化模型的电动汽车充电调度策略[J]．沈阳工业大学学报，2022，44(2)：127-132．

[5] 夏娟娟，周明坚，袁帅，等．电动汽车峰谷分时电价时段充电优化模型[J]．电源技术，2016，40(9)：1848-1850+1877．

[6] 周天沛，孙伟．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[J]．电力系统保护与控制，2019，47(4)：115-123．

[7] 邓友均，李明，余千，等．基于实时信息感知的电动汽车物流配送路径优化与充电导航[J]．南方电网技术，2017，11(2)：41-49．