

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230526

基于电动汽车两阶段充电站分配的聚合商定价方法

林卉, 周一辰, 李永刚, 郑皓阳

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 随着“双碳”目标的提出, 电动汽车数量与日俱增, 充电桩数量不足导致电动汽车充电排队时间增加、聚合商定价等问题日益凸显。针对上述问题, 提出电动汽车两阶段充电站分配的聚合商定价方法。首先将聚合商与电动汽车签约模式分为完全调度、奖罚机制调度和自由调度三类, 考虑外部因素对电动汽车能耗影响并建立路网模型。然后采用改进A*算法求解最短路径, 在A*算法的估价函数中引入时间因子。同时根据交通能耗、不间断行驶时间、红绿灯等待时间等因素改进估价函数。聚合商根据电动汽车的充放电需求、库伦定律得到充电站对电动汽车的吸引力。再建立电网-聚合商-电动汽车供应链, 并进行两阶段的合理定价及充电站分配。最后通过算例验证聚合商定价方法可以显著提高调峰效率和聚合商利润, 减少电动汽车排队时间及交通能耗。

关键词: 改进A*算法; 库伦定律; 吸引力; 充电站分配; 两阶段; 供应链

Aggregator pricing methodology based on two-stage charging station allocation for electric vehicles

LIN Hui, ZHOU Yichen, LI Yonggang, ZHENG Haoyang

(Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: With the introduction of the "dual-carbon" objectives, the number of electric vehicles is increasing day by day. The insufficient number of charging piles has led to extended queuing times for electric vehicles, as well as increasingly prominent pricing issues for aggregators. To address these challenges, an aggregator pricing methodology based on two-stage charging station allocation for electric vehicles is proposed. First, the contract signing modes between aggregator and electric vehicles are categorized into three types: complete dispatching, reward and punishment mechanism dispatching, and free dispatching. The impact of external factors on electric vehicle energy consumption is taken into account, and a road network model is established. Then, an enhanced A* algorithm is employed to determine the shortest path, and a time factor is incorporated into the evaluation function to enhance path selection. Simultaneously, the evaluation function is refined to include factors such as traffic energy consumption, uninterrupted travel time, and traffic light waiting time. The aggregator obtains the attractiveness of charging stations to electric vehicles according to the charging and discharging demand of electric vehicles and Coulomb's law. Subsequently, a grid-aggregator-electric vehicle supply chain is established to facilitate a two-stage rational pricing and charging station allocation process. Finally, numerical examples are used to validate that the proposed aggregator pricing method significantly improves peak shaving efficiency, increases aggregator profits, and reduces both electric vehicle queuing time and transportation energy consumption.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777075).

Key words: improved A* algorithm; Coulomb's law; attractive force; charging station distribution; two stages; supply chain

0 引言

2021年10月24日, 中共中央、国务院印发的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777075); 河北省自然科学基金项目资助(E2020502067)

《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中提到, 全面推进电力市场化改革, 加快培育发展配售电环节独立市场主体, 完善中长期市场、现货市场和辅助服务市场衔接机制, 扩大市场化交易规模。加快形成以储能和调峰能力为基础支撑的新增电力装机发展机制, 完善电力等能源

品种价格市场化形成机制。从有利于节能的角度深化电价改革, 理顺输配电价结构, 全面放开竞争性环节电价。电网、电动汽车聚合商、电动汽车三者之间的合理定价成为迫切需要解决的问题^[1-4]。

按照党中央、国务院决策部署, 2009年以来, 财政部联合有关部门大力支持新能源汽车产业发展。在各方共同努力下, 我国新能源汽车技术水平不断进步、产品性能明显提升, 产销规模连续五年居世界首位。电动汽车^[5-7]行业得到政府的大力支持, 电动汽车数量的不断增加, 且已成为人们日常出行的重要组成部分。然而, 由于电动汽车车主出行时间的随机性, 其充电也具有很大的不确定性, 如果不采取行动控制充电行为, 大量电动汽车并网无序充电将威胁电网运行的安全稳定。随着电动汽车数量的增加, 充电桩数量无法满足电动汽车充电需求, 许多车主对排队等待时间提出争议, 因此电动汽车充电站分配也成为有待解决的问题。

在 A*算法求解最短路径方面: 文献[8]提出了一种新颖的基于图的工业任务最优调度模型和算法, 该模型可以实现包括能源使用在内的资源最优分配; 文献[9]提出了一种基于拉格朗日对偶方法的二分格式算法, 该方法可以使单约束最短路径求解得到的结果更优; 文献[10]提出了一种基于 A*算法与蚁群算法融合的改进路径规划算法, 该算法在复杂环境下也不容易陷入局部最优, 能有效解全局路径规划问题; 文献[11]提出了一种改进的 A*算法来解决特定条件下的路径规划问题, 能找到更短的路径; 文献[12]提出了一种基于变步长稀疏 A*算法的路径规划方法, 该方法改进了传统 A*算法的代价函数、搜索空间和探索步长, 降低了算法的复杂度; 文献[13]提出了一种基于多模型的通用路径规划框架, 该框架不仅可以保证车辆在行驶过程中的舒适性, 还可以保证其快速响应交通场景的变化; 文献[14]提出了一种多级两层优化算法来确定各环节的充电功率, 该策略在行驶时间、充电能量、充电成本和用户便利性等方面都能有效保证较好的综合性能; 文献[15]提出了一种用于电量不足电动汽车充电警告和路径规划的方法, 该方法为电动汽车驾驶员充电提供了有效路径; 文献[16]提出了一种考虑能耗和距离的三维多目标路径规划方法, 能够生成最优路径; 文献[17]开发了一种使用压缩层次结构的多准则最短路径搜索算法, 可以减少电动汽车的等待时间以及总行驶时间。现有的研究中较多对 A*算法进行改进, 但并未在 A*算法的估价函数中引入时间因子, 同时以交通能耗、不间断行驶时间、红绿灯等待时间为目标对估价函数进行改进, 得到改

进 A*算法求解电动汽车前往充电站的最短路径。

在计算充电站对电动汽车吸引力方面: 文献[18]提出了一种基于虚拟负荷与利用率平衡的充电站定价策略, 提高了充电负荷再分配的效果同时减少了交通拥堵的现象; 文献[19]提出了一种基于“车-路”信息融合驱动的电动汽车充电模型, 降低了电动汽车的充电成本; 文献[20]提出了一种基于控制放电策略、考虑充放电价格和充放电功率优化的充电站调度模型, 有效地削峰填谷; 文献[21]提出了一种新的考虑快速充电和定期充电的电动汽车最优路径模型, 降低了电动汽车配送的成本; 文献[22]将电动汽车集中分配至等待点或充电点, 最大化充电站的利润; 文献[23]在不同类型车辆之间的拥堵博弈中给出了电动汽车用户选择的驾驶路径和充电站, 提高了电网的成本; 文献[24]提出了一种基于虚拟服务范围的充电引导策略, 可以实现电动汽车的时空转移; 文献[25]考虑将合适的充电站分配给各个电动汽车, 提出的方案可以最小化充电站运营商的日总费用。现有的研究中大部分仅对电动汽车进行出行引导, 并没有为电动汽车提供充电站及具体路线提供路线引导, 对于吸引力计算并未涉及计算剩余充电桩数量。

为了解决上述问题, 提出电动汽车两阶段充电站分配的聚合商定价方法。本文先将聚合商与电动汽车签约模式分为完全调度、奖罚机制调度和自由调度三类, 考虑外部因素对电动汽车能耗影响并建立路网模型, 然后采用改进 A*算法求解最短路径, 其中在 A*算法的估价函数中引入时间因子, 同时根据交通能耗、不间断行驶时间、红绿灯等待时间等因素对估价函数进行改进, 聚合商根据电动汽车的充放电需求、基于库伦定律得到充电站对电动汽车的吸引力, 再建立电网-聚合商-电动汽车供应链, 并进行两阶段的合理定价及充电站分配, 聚合商根据吸引力对电动汽车进行两阶段的充电站分配, 最后通过电价结合充电站路线引导得到最终的调度方案。算例结果表明, 本方案在电动汽车充电站分配和电网-聚合商-电动汽车供应链定价方面显著提高了调峰效率和聚合商利润, 减少电动汽车排队时间及交通能耗。

1 聚合商与电动汽车特性

1.1 聚合商与电动汽车签约方式

为了进一步完善电力调峰辅助服务市场建设, 运用市场机制激励聚合商提供调峰资源, 充分挖掘包括分布式储能、电动汽车等负荷侧调节资源以及发电侧储能在内的聚合商调峰潜力, 提升可再生能

源消纳空间。聚合商作为网侧与电动汽车之间的中介，通过中标调峰容量获得调峰服务费用，同时通过电价形式聚合电动汽车侧资源，以达到调峰容量标准。

本文将电动汽车充电设定为慢充负荷，将聚合商与电动汽车的签约模式分为完全调度、奖罚机制调度和自由调度三类。其中，完全调度类型的电动汽车得到的调度补贴最多，但其调度时段、容量、行驶路径引导均需要听从聚合商的分配，若不服从分配则需要支付违约费用，且违约费用会随违约次数呈倍数增长，由于这一类型的签约方式属于强制调度，对于电动汽车的灵活性要求极高，因此数量较少；奖罚机制调度类型的电动汽车是通过聚合商按照需要的调峰容量定价，吸引更多的电动汽车用户参与调度，并非强制参与调度，用户可以通过自身出行意愿、喜好选择是否参与调度，因此这类签约方式的电动汽车用户最多；自由调度类型的电动汽车不参与调度，只向聚合商提供实时位置、剩余电量、需要充电的时段等信息，为了让电动汽车提供此类信息，聚合商需要向该类电动汽车提供一定的补贴，但金额较其他两类少，因此这一类型的电动汽车数量也较少。本文只研究单一聚合商调度的问题，多个聚合商之间的竞价并未考虑在内。

聚合商通过与交通局合作获取交通实时路况信息，聚合商在收集与其签约的电动汽车信息后根据需要调峰的容量，以最小化排队时间、减少电动汽车交通能耗、最大化自身利益为目标，对电动汽车进行充电站路线引导，聚合商会提前 15 min 为电动汽车提供前往的充电站及行驶路径的信息，电动汽车用户可以按照聚合商提供的信息前往充电站进行充电。配电网、聚合商、电动汽车之间的关系如图 1 所示。

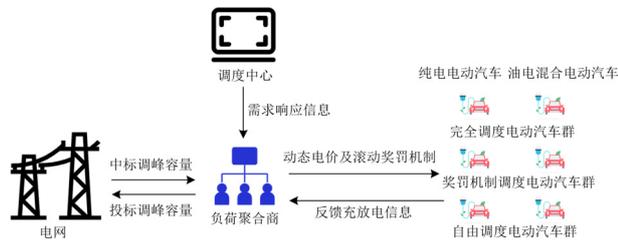


图 1 三者关系图

Fig. 1 Relationship diagram of the three

1.2 电动汽车用户信息收集

聚合商设计一个软件，聚合商与电动汽车签订合同，电动汽车需要向聚合商提供以下信息：电动汽车的实时位置、实时电量、下一时段需要充电的

电量、用户出行时间、用户下一次充电的时间以及所选充电站，其中电动汽车用户可以选择将电动汽车信息与信息收集系统自动连接，自动获取每时段的信息，也可以选择手动输入信息，充分保护用户的隐私。用户信息收集界面如图 2 所示。



图 2 用户信息收集界面

Fig. 2 User information collection interface

1.3 外部因素对电动汽车能耗影响

本文将城市道路分为 4 个等级，分别为快速路、主干路、次干路以及支路，每种等级的道路在不同的交通路况下具有不同类型的电动汽车，快速路、主干路、次干路、支路的单位里程能耗计算公式分别为

$$\begin{cases} E_1 = -0.004v + 0.247 + \frac{1.52}{v} \\ E_2 = 0.004v - 0.179 + \frac{5.492}{v} \\ E_3 = -0.001v + 0.2 + \frac{1.531}{v} \\ E_4 = -0.02v + 0.208 + \frac{1.553}{v} \end{cases} \quad (1)$$

式中： E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 分别为快速路、主干路、次干路、支路的单位里程能耗； v 为电动汽车车速。

不同的环境温度会影响电动汽车的充放电效率，文献[26]对动力电池系统的研究发现，在一定温度范围内，随环境温度升高，动力电池系统能量效率增大，曲线拟合所得关系式为

$$\eta = -1.567 \times 10^{-5} T_{em}^2 + 2.012 \times 10^{-3} T_{em} + 0.8891 \quad (2)$$

式中： η 为电动汽车电池充放电效率； T_{em} 为环境温度。

基于上述单位能耗与行驶速度关系式，考虑电池充放电效率与空调开启时的温度能耗系数对单位里程能耗的影响，电动汽车空调开启时的单位里程

能耗可表示为

$$E_{ev} = \frac{k_T}{\eta} E_g \quad (3)$$

式中: E_{ev} 为电动汽车空调开启时的单位里程能耗; k_T 为温度能耗系数; E_g 为电动汽车在 g 类型道路行驶的单位里程能耗。

1.4 路网模型

规定最大行驶距离及行驶时间, 若电动汽车在实时位置前往充电站的距离及所需时间在最大值以内, 电动汽车可以参与调度, 否则不参与调度, 因此需要建立路网模型。图 3 为交通路网拓扑图, a_h 表示交通网的第 h 节点。采用图论分析方法^[24]对交通路网进行建模描述得到式(4)。

$$\begin{cases} G^T = (V, E, W) \\ A = \{v_i \mid i = 1, 2, \dots, n\} \\ E = \{v_{ij} \mid v_i \in V, v_j \in V, i \neq j\} \\ W = \{w_{ij} \mid v_{ij} \in E\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: G^T 为交通路网; A 为图 G^T 所有节点的集合, 即交通节点集合; v_i 为第 i 条道路的交通节点; E 为图 G^T 所有有向弧段的集合, 即交通网中路段集合; v_{ij} 为第 i 条道路与第 j 条道路包含的路段; W 为路段权值的集合, 即道路路阻, 表示路段的量化属性; w_{ij} 为第 i 条道路与第 j 条道路包含的路阻。

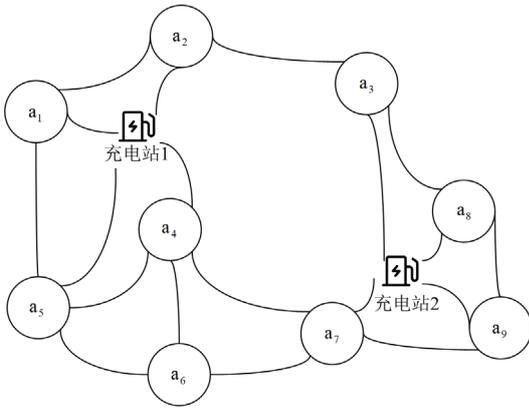


图 3 交通路网拓扑图

Fig. 3 Traffic network topology

进一步, 对于具有 m 个节点的有向带权网络图 G^T 量化赋值, 有

$$a_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, v_{ij} \in E \\ 0, v_i = v_j \\ \infty, v_{ij} \notin E \end{cases} \quad (5)$$

式中, a_{ij} 为路网赋值后第 i 行第 j 列的数值。

邻边矩阵 $E = (a_{ij})_{\max}$ 最终表示为

$$E = \begin{bmatrix} 0 & w_{12} & w_{13} & \dots & \infty \\ w_{21} & 0 & w_{23} & \dots & \infty \\ \infty & w_{32} & 0 & \dots & \infty \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \infty & \infty & \infty & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, ∞ 表示 v_i 与 v_j 之间不存在连接路段。

2 最短路径及充电站吸引力

2.1 改进 A*算法求解最短路径

最常用的最短路径求解算法包括 A*算法、Floyd 算法、Bellman-ford 算法和 Dijkstra 算法, 其中, Floyd 算法时间复杂度高, 无法处理大量数据; Bellman-ford 算法时间复杂度比较高; Dijkstra 算法由于其在更新过程中无方向性, 更新过程与终点无关。A*算法以预估代价的方式将终点加入到总体代价中, 使更新的过程具有明显的指向性。A*算法既具有 Dijkstra 算法搜索到最短路径的功能, 又具有广度优先搜索算法使用启发式函数进行启发式搜索的功能, 且 A*算法可以得到具体路径, 因此本文在 A*算法的估价函数中引入时间因子, 同时以交通能耗、不间断行驶时间、红绿灯等待时间为目标改进估价函数, 得到改进 A*算法对最短路径进行计算。

A*算法其在某一节点的估价函数如式(7)所示, 当 $h^*(n) = 0$ 时为盲目搜索, $h^*(n)$ 越复杂, 代表约束条件越多, 耗时越长, 但如果减少约束条件, 可能无法得到最佳路线。

$$f^*(n) = g^*(n) + h^*(n) \quad (7)$$

式中: $f^*(n)$ 为状态 n 到目标状态的最小代价估计; $g^*(n)$ 为在状态空间中从初始状态到状态 n 的代价; $h^*(n)$ 为从状态 n 到目标状态路径的估计代价。

以交通能耗最小为目标, 其中纯电电动汽车的交通能耗为电能, 油电混合动力电动汽车的交通能耗则包含电能和油耗, 其中能耗与行驶的速度、距离有关, 得到

$$g^*(n) = e_{no} (\varepsilon_1 \frac{l_{no}}{v_{no}} + \varepsilon_2 l_{no}) \quad (8)$$

$$h^*(n) = \varepsilon_1 \frac{d}{v_{\max}} + \varepsilon_2 d \quad (9)$$

式中: 将每个状态看作一个节点, o 为按时间顺序排列的节点 n 的上一节点; e_{no} 为 0-1 路径选择变量, 若途经节点则为 1, 否则为 0; l_{no} 为节点 o 到节点 n 的距离; \bar{v}_{no} 为节点 o 到节点 n 当前时刻的实时平均

行驶速度； d 为节点 n 到终点的直线距离； v_{\max} 为 d 的最快速度； ε_1 为单位时间的等价转换因子； ε_2 为单位距离的等价转换因子。

以交通能耗最小为目标，整合后的估价函数表示为

$$f^*(n) = e_{no} \left(\varepsilon_1 \frac{l_{no}}{v_{no}} + \varepsilon_2 l_{no} \right) + \varepsilon_1 \frac{d}{v_{\max}} + \varepsilon_2 d \quad (10)$$

电动汽车用户选择路线时除了会考虑距离因素外，还会考虑时长，而行驶的时长与交通拥堵情况、行驶的道路等级有关，以不间断行使用时最短为目标，将式(8)改写为式(11)，将式(9)改写为式(12)，可表示为

$$g_1^{*}(n) = e_{no} \frac{l_{no}}{v_{no}} \quad (11)$$

$$h^{*}(n) = \frac{d}{v_{\max}} \quad (12)$$

式中： $g_1^{*}(n)$ 为未加入不间断行使用时最短目标后在状态空间中从初始状态到状态 n 的代价； $h^{*}(n)$ 为加入不间断行使用时最短目标后从状态 n 到目标状态路径的估计代价。

在交通路网中，电动汽车经过红绿灯必然会增加行驶时间，降低行驶速度，因此在红绿灯处需要在估价函数中加入惩罚函数，将不同时段平均等待时长作为惩罚函数值，表示为

$$g_2^{*}(n) = T_{no} \quad (13)$$

式中， $g_2^{*}(n)$ 为将红绿灯不同时段平均等待时长作为惩罚函数值，在状态空间中从初始状态到状态 n 的代价； T_{no} 为时间因子。

将式(11)和式(13)合并后，得到

$$g^{*}(n) = e_{no} \frac{l_{no}}{v_{no}} + T_{no} \quad (14)$$

式中， $g^{*}(n)$ 为综合两种因素后在状态空间中从初始状态到状态 n 的代价。

综合不间断行驶时间及加入等红绿灯的时间因子后，将式(7)、式(12)、式(14)合并后得到总时长的估价函数，可表示为

$$f^{*}(n) = \left(e_{no} \frac{l_{no}}{v_{no}} + T_{no} \right) + \frac{d}{v_{\max}} \quad (15)$$

式中， $f^{*}(n)$ 为综合多种因素后从状态 n 到目标状态的最小代价估计。

当上述两条最优路径不重合时，对交通能耗、总时长均采用标准化处理，即

$$f^{*} = \delta \frac{H_1 - H_1^{\min}}{H_1^{\max} - H_1^{\min}} + (1 - \delta) \frac{H_2 - H_2^{\min}}{H_2^{\max} - H_2^{\min}} \quad (16)$$

式中： f^{*} 为估价函数； δ 为交通能耗最小目标的权重； H_1^{\min} 、 H_1^{\max} 、 H_2^{\min} 、 H_2^{\max} 分别为所有路径中的交通能耗成本和总时间成本的最小值、最大值。以总时间最短为目标，优化得到的路径规划方案的最小行程时间为 H_2^{\min} ，相应的行程费用为 H_1^{\max} ，类似地，以交通能耗最少为目标，优化得到的路径规划方案的最小行程费为 H_1^{\min} ，相应的总行程时间为 H_2^{\max} 。

综合考虑交通能耗和总行驶时长后的估价函数可表示为

$$f^{*} = \delta \left(\frac{e_{no} \left(\varepsilon_1 \frac{l_{no}}{v_{no}} + \varepsilon_2 l_{no} \right) - H_1^{\min}}{H_1^{\max} - H_1^{\min}} + \frac{e_{no} \frac{l_{no}}{v_{no}} + T_{no} - H_2^{\min}}{H_2^{\max} - H_2^{\min}} \right) + (1 - \delta) \left(\frac{\varepsilon_1 \frac{d}{v_{\max}} + \varepsilon_2 d - H_1^{\min}}{H_1^{\max} - H_1^{\min}} + \frac{\frac{d}{v_{\max}} - H_2^{\min}}{H_2^{\max} - H_2^{\min}} \right) \quad (17)$$

将不同时段电动汽车可以停车的位置看作一个点，将可以停车的地方按照点划分，充电站的位置也固定，因此可以首先计算不同时段从不同点出发前往不同充电站的交通能耗，将所有数据计算出来后得到不同点行驶前往充电站所需交通能耗最低的路线。

改进 A* 算法求解最短路径的具体步骤如下。

1) 先将道路的各个位置点、红绿灯平均等待时长、不同时段交通实况等信息录入系统，对交通路网中的节点进行标记，将电动汽车位置作为出发点，目标充电站位置作为目标点。

2) 从出发点向周围点进行搜索，计算前往每个点需要的代价，并得到前往目标点的最佳方位点，并将该点作为下一次搜索的父节点，若该点为目标点，则将该路径进行标记并结束该路线探索。

3) 若上述父节点并非目标点，则继续向周围进行搜索，重复上述步骤，直至找到一条完整路径的所有父节点，并连接成完整路径，则该路径即为该时段对应电动汽车前往目标充电站的最短路径。

4) 找到相应的电动汽车最佳路径并录入系统，然后开始寻找下一电动汽车的最佳路径，直至得到该时段所有电动汽车的最佳路径。

5) 统计该时段不同充电站的电动汽车数量，并将对应电动汽车最短路径发送至电动汽车用户端。

2.2 基于库伦定律模型的充电站吸引力

库伦定律是静止点电荷相互作用力的规律。1785 年法国科学家 C-A.de 库伦由实验得出，真空

中两个静止的点电荷之间的相互作用力与它们的电荷量的乘积成正比, 与它们距离的二次方成反比, 作用力的方向在它们的连线上, 同名电荷相斥, 异名电荷相吸。对于充电站在不同时段对不同电动汽车的吸引力^[26]与库伦定律中的电荷相互作用力类似, 可以将库伦定律用在本文聚合商对电动汽车进行充电站分配的模型中。本文基于库伦定律, 根据充电站的规模、与电动汽车的距离等因素得到充电站在不同时段对不同电动汽车的吸引力, 以此作为聚合商分配电动汽车的标准。

1) 库伦定律

库伦定律描述静止点电荷相互作用力的规律, 由于电动汽车对于充电站的选择受到多种因素的影响, 聚合商对电动汽车充电进行分配可以用库伦定律类比, 相互作用力越大, 该时段充电优先级越高, 传统的库伦定律公式可表示为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (18)$$

式中: F 为真空中两个静止的点电荷之间的相互作用力; r 为两者之间的距离; q_1 、 q_2 为两个点电荷的电荷量; k 为库伦常数(静电力常量)。

2) 充电站规模

对充电站而言, 其规模越大意味着充电桩的数量越多, 可以容纳的电动汽车数量越多, 引入充电站内充电桩数量来替代库伦定律中的 q_1 电荷量, 可表示为

$$q_1^j = n_j \quad (19)$$

式中: q_1^j 为充电站 j 的规模设施对电动汽车选择的影响, $j=1,2,\dots,N$, 其中 N 为区域内总充电站数量; n_j 为充电站 j 内的充电桩数量。

3) 电动汽车荷电状态

对于电动汽车而言, 当其荷电状态越低时, 需要充电的意愿越强烈。因此, 本文引入电动汽车的荷电状态替代库伦定律中的电荷量 q_2 , 可表示为

$$q_2^{i,j} = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^N L_{ij}^t}{L_{ij}^t}, S_i^{oc,t} \leq S_d^{oc} \\ 1, S_i^{oc,t} > S_d^{oc} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $q_2^{i,j}$ 为 t 时段第 i 辆电动汽车的荷电状态对电动汽车选择的影响, $i=1,2,\dots,M$, 其中 M 为区域内总电动汽车数量; L_{ij}^t 为 t 时段第 i 辆电动汽车行驶至充电站 j 的最短路径; $S_i^{oc,t}$ 为 t 时段第 i 辆电动汽车的荷电状态; S_d^{oc} 为电动汽车荷电状态阈值。

4) 最短路径选择

根据 2.1 节中提及的最短路径算法, 此处电动汽车前往充电站的最短路径也是电动汽车需要考虑的因素, r_{ij}^t 为 t 时段第 i 辆电动汽车行驶至充电站 j 最短路径的距离。

5) 库伦常数

当区域中存在多个充电站时, 充电桩数量多、交通便捷的充电站会成为更多电动汽车用户的选择, 当出现可用充电桩数量较少、排队时间增长等情况时, 充电的电动汽车数量会减少。引入库伦常数, 其中库伦常数用以描述充电站规模与现有电动汽车数量的比值, 比值越高代表现有电动汽车数量越少, 可容纳更多的电动汽车前往充电。

$$k_j^t = \frac{N_j^{um,t}}{N_j^{um,t}} \quad (21)$$

式中: k_j^t 为 t 时段充电站 j 的吸引力; $N_j^{um,t}$ 为 t 时段充电站 j 剩余空闲充电桩数量; $N_j^{um,t}$ 为 t 时段充电站 j 的电动汽车数量。

综合以上因素, 在不同时段不同的充电站对不同的电动汽车吸引力均不一致, 而充电站对电动汽车的吸引力的影响因素众多, 包括电动汽车与充电站的距离、不同时段充电站已有的电动汽车数量、充电站的总充电桩数量、不同时段电动汽车的剩余电量等, 不同时段不同充电站对不同电动汽车的吸引力可表示为

$$F_{ij}^t = k_j^t \frac{q_1^j q_2^{i,j}}{(r_{ij}^t)^2} \quad (22)$$

式中, F_{ij}^t 为 t 时段充电站 j 对第 i 辆电动汽车的吸引力。

3 电动汽车两阶段充电站分配

3.1 第一阶段充电站分配

基于日前对电动汽车出行规律的总结, 聚合商中标调峰容量确认后发布需要调峰的容量, 并且发布需要调度的时段及容量, 电动汽车用户提前填写第二日需要充电和可以参与调度的时段, 聚合商首先根据得到的信息, 对电动汽车进行分配。优先分配完全调度类型电动汽车的充电时段及充电推荐路径, 其次分配有调度意愿的奖罚机制调度类型的电动汽车, 然后分配无调度意愿但需要充电的奖罚机制调度类型的电动汽车, 最后分配自由调度类型的电动汽车。当在某一时段充电站分配满额但仍有电动汽车需要充电时, 需要将该电动汽车推荐至其他

有空闲充电桩的充电站或将其充电时段进行更改。在日前将所有电动汽车的充电策略进行安排并发送至用户端。分配总体流程如图 4 所示，具体分配流程如图 5 所示。

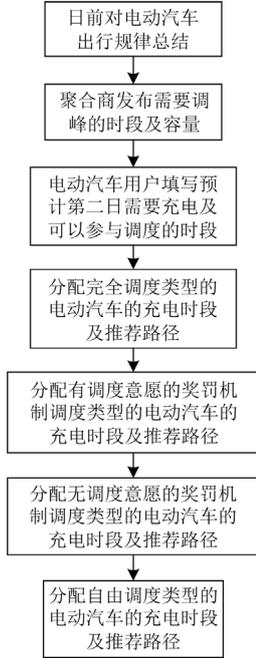


图 4 第一阶段充电站分配总体流程

Fig. 4 Overall process of charging station allocation in the first stage

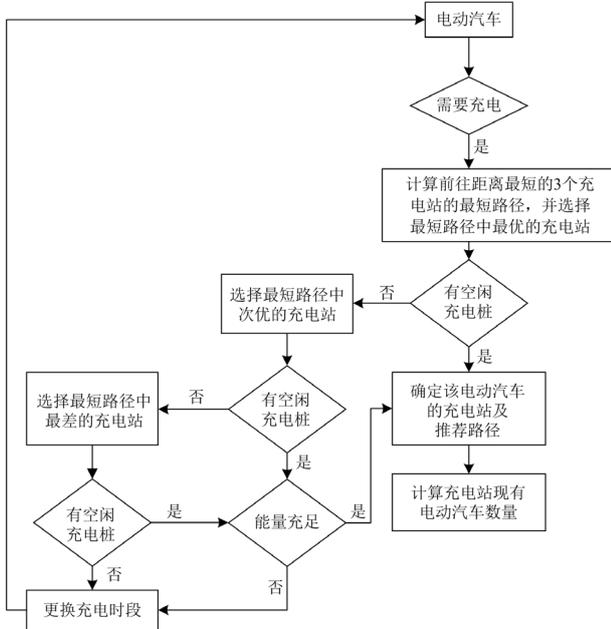


图 5 第一阶段充电站具体分配流程

Fig. 5 Specific process of charging station allocation in the first stage

聚合商按照优先级顺序对电动汽车进行分配，将一日分为 24 h，时间尺度定为 15 min，从第一时段开始分配，当电动汽车需要充电时，先计算电动汽车到与其位置距离最短的 3 个充电站的最短路径，选择最短路径最优的充电站，若该充电站有空闲充电桩，则安排该电动汽车在这一时段前往该充电站进行充电，并统计该充电站这一时段目前的电动汽车数量，否则需要选择最短路径中次优的充电站，若该充电站有空闲充电桩，判断电动汽车剩余能量是否可以支撑电动汽车前往充电站，若可以，则安排电动汽车在该时段前往该充电站，否则更换该电动汽车的充电时段；若充电站无空闲充电桩，需要选择最短路径中最差的充电站，判断充电站是否有空闲充电桩且能量是否可以支撑电动汽车前往充电站，若满足上述条件，则安排电动汽车在该时段前往该充电站充电，否则需要更换该电动汽车的充电时段。

由于电动汽车数量巨大，日前第一阶段对电动汽车进行充电站分配有利于节约第二阶段对部分电动汽车重新分配的时间，若没有进行第一阶段的充电站分配，在实时阶段中充电站分配安排的时间过长，无法实现实时更新。本文所采用的两阶段充电站分配，在第一阶段有足够的时间对电动汽车进行预分配，在第二阶段只需要对与预测值差距较大的电动汽车进行策略调整，节省了大量的时间，使方案可行有效。

3.2 第二阶段充电站分配

由于在日前的分配策略仅靠预测数据制定，实时性差，因此需要在实时阶段制定第二阶段的更新分配策略。聚合商在第二阶段即实时阶段，电动汽车用户提供需要充电的时段、实时位置、剩余电量、参与调度意愿等信息，将实时信息与日前预测信息进行对比，筛选出差距较大的电动汽车，对其充电策略重新进行安排。

在上述基于库伦定律的充电站吸引力计算中，充分考虑了电动汽车的剩余电量、与充电站的最短路径、充电站规模、剩余充电桩数量等多个因素，因此聚合商可以直接根据充电站对电动汽车的吸引力进行充电站分配。

其中，聚合商优先安排有调度任务的电动汽车进行充电，吸引力更高的电动汽车优先分配到对应的充电站，当某一时段充电站的电动汽车数量达到充电桩数量时，则吸引力较低的电动汽车需要前往其他空闲充电站，或前、后移若干个时段进行充电，因此优先级为调度任务电动汽车 > 吸引力强的电动汽车 > 吸引力弱的电动汽车。

在实时阶段更新电动汽车的信息, 对与第一阶段预测行为差别不大的电动汽车不做调整, 剩余的电动汽车进行重新分配。对于下一时段需要充电的电动汽车, 将电动汽车按照吸引力由高至低进行排序, 优先安排吸引力高的电动汽车, 首先查看附近有空闲充电桩的充电站, 并计算电动汽车前往充电站的最短路径, 同时需要判断电动汽车剩余能量能否支撑其前往该充电站, 当电动汽车剩余能量只能前往最近的充电站, 但该充电站下一时段无空闲充电桩时, 判断该充电站上一时段或下一时段是否有空闲充电桩, 若有则调整电动汽车的充电时段, 当电动汽车剩余能量可以前往多个充电站时, 前往最短路径最优且有空闲充电桩的充电站充电, 循环上述操作, 直至安排完最后一辆电动汽车的充电方案。第二阶段充电站分配流程图如图 6 所示。

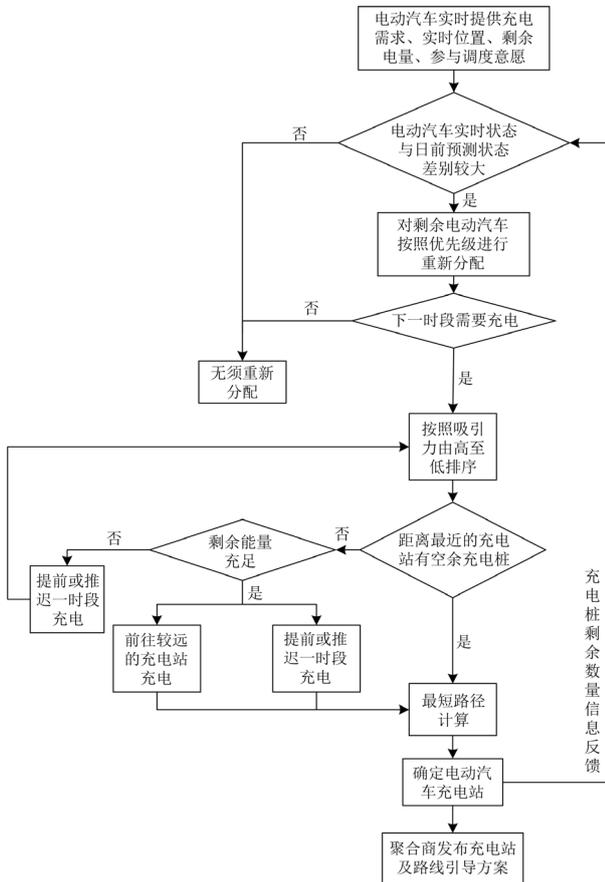


图 6 第二阶段充电站分配流程图

Fig. 6 Distribution flow chart of charging station in the second stage

4 供应链定价

4.1 供应链

传统的电能供应链为发电企业-电网-用户, 原

有的供应链中电网直接将电能向用户出售, 本文则加入电动汽车聚合商作为电网与电动汽车用户之间的中介, 然后研究电网-电动汽车聚合商-电动汽车组成的电能供应链决策问题。电能供应链包含电网、聚合商、电动汽车三者, 其中电网向聚合商售电, 并且与聚合商按签订的电力调峰辅助服务市场交易合同直接开展结算, 而聚合商从电网处购电, 竞标电网发布的调峰容量, 设定合理的电价引导电动汽车充电以达到中标调峰容量, 电动汽车则需要从聚合商处购电, 同时为了降低成本对聚合商发布的调度任务作出决策。

本文构建一个电网-电动汽车聚合商-电动汽车的电能供应链模型, 电网先面向聚合商给出电价信息, 聚合商负责从电网处购电, 同时电动汽车需要从聚合商处购电。电能供应链的决策过程如下:

- 1) 电网向聚合商发布不同时段需要的调峰容量;
- 2) 聚合商得到出清价格和调峰容量后, 根据以往数据预测不同时段可提供的调峰容量, 并以聚合商利润最大化为目标, 向电网上报竞标的报价及调峰容量;
- 3) 电网根据聚合商上报的竞标报价、调峰容量以及需要的总调峰容量, 向聚合商发布出清时段 t 内的出清价格, 同时确定聚合商最终中标调峰容量;
- 4) 聚合商根据中标调峰容量, 在日前阶段确定电动汽车不同时段预分配动态电价;
- 5) 电动汽车用户根据聚合商发布的预分配动态电价反馈预计需要充放电的时段、容量、是否参与调度等信息;
- 6) 聚合商根据电动汽车用户反馈信息统计预测总调峰容量, 在日前阶段对电动汽车进行预安排, 并将安排发送至用户端;
- 7) 在实时阶段, 根据电动汽车用户反馈的实时信息, 调整动态电价, 并对电动汽车安排进行微调, 最终发布实时动态电价及电动汽车分配策略。

聚合商每 15 min 中标从电网处获得的调峰服务费用等于电网中标的调峰电力、出清时长与电网出清价格的乘积, 即

$$F'_{dw} = P'_{dw} \times t \times A'_{dw} \quad (23)$$

式中: F'_{dw} 为出清时段 t 内聚合商获得的电网市场调峰服务费用, 元; P'_{dw} 为出清时段 t 内聚合商在电网市场中标的调峰电力, MW, 电动汽车具备的调峰电力定义为申报的充(用)电功率与基准功率的差值, 中标的调峰电力值不超过资源具备的调峰电力值; A'_{dw} 为出清时段 t 内电网市场出清价格, 元/MWh。

电网的目的是使聚合商尽可能多地提供调峰

容量且尽量降低电网支付给聚合商的费用，而聚合商的目的是尽量提高总利润，电动汽车用户的目的是降低充电成本。

4.2 聚合商定价

聚合商在第一阶段先确定三类电动汽车的动态电价，即完全调度类型 t 时段的动态电价 $p_{dt}^{w,t}$ 、奖罚机制调度类型 t 时段的动态电价 $p_{dt}^{j,t}$ 、自由调度类型 t 时段的动态电价 $p_{dt}^{z,t}$ ，同时确定完全调度类型电动汽车可以提供的总调峰容量，总调峰容量包含完全调度类型的调峰容量 $P^{w,t}$ 和奖罚机制调度类型的调峰容量 $P^{j,t}$ ，根据奖罚机制调度类型电动汽车用户上传的相关信息预测其总调峰容量 $P^{j,2,t}$ ，对比第一阶段中的总调峰容量与中标调峰容量，同时根据第 3 节中提及的第一阶段充电站分配，设定第二阶段中的奖罚机制调度类型电动汽车的激励电价 $p_{jt}^{i,2,t}$ 、惩罚电价 $p_{jt}^{p,2,t}$ ，在第二阶段设定奖罚机制后，总调峰容量需要接近中标调峰容量。

对于电动汽车而言，电动汽车的出行成本包含行驶能耗、时间、充电对于电池损耗等，在前文中计算电动汽车最短路径时已经考虑了行驶能耗、时间、电池损耗等因素。

聚合商在竞标前需要考虑电动汽车可以提供的调峰容量，中标后聚合商需要根据电动汽车用户的出行规律制定电动汽车充放电动态电价，制定尽可能高的动态电价的同时让更多电动汽车用户参与调度。聚合商在电网处以分时电价购入电动汽车所需电量，聚合商通过电网市场获得调峰服务费用，同时需要减去调度电动汽车所需的成本，最终为聚合商的总成本。整体定价分配流程如图 7 所示，采用粒子群算法^[27]求解各参数。

5 算例分析

本文对交通路径进行模拟，以中国南方某城市区域数据进行分析，该区域大小为 $20.6 \text{ km} \times 10.3 \text{ km}$ ，包含 20 个小区域、19 个节点及 37 条道路，如图 8 所示，电动汽车数量为 10 000 辆，电动汽车充电功率为 7 kW，电池容量为 82 kWh，百公里电耗为 20.5 kWh。假设完全调度类型的电动汽车占比为 10%，奖罚机制调度类型的电动汽车占比为 85%，自由调度类型的电动汽车占比为 5%，出清时段 t 取 15 min，快速路、主干路、次干路以及支路的通行能力^[26]分别为 1800、960、730、600 pcu/h，根据文献^[26]得到的温度与电动汽车放电效率曲线如图 9 所示，分时电价如表 1 所示。

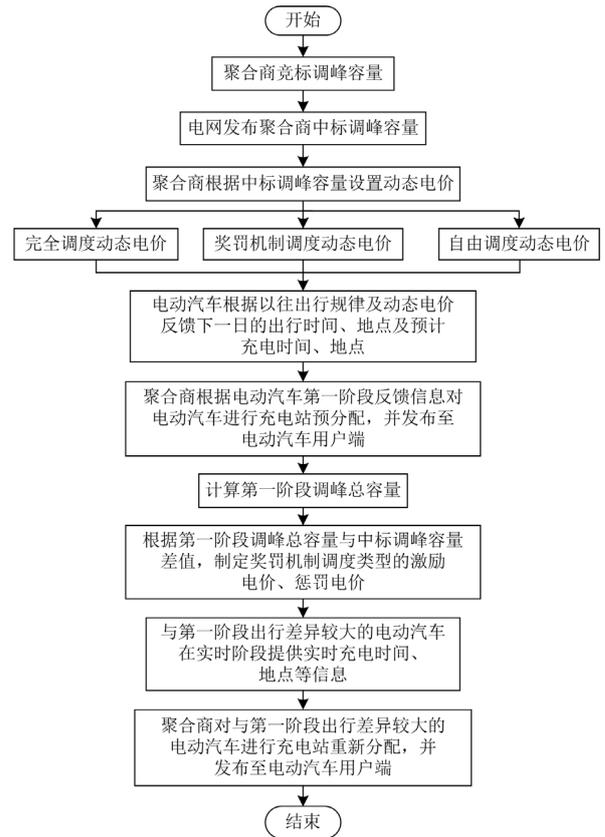


图 7 整体定价分配流程

Fig. 7 Overall pricing allocation process

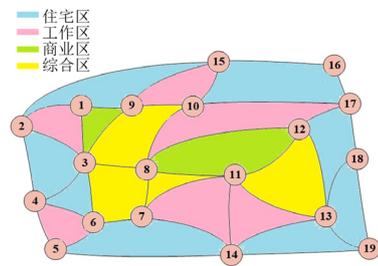


图 8 区域路拓扑图

Fig. 8 Regional road topology map

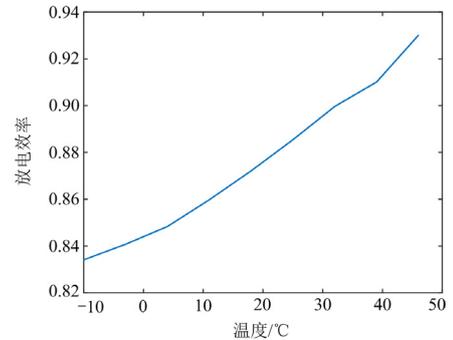


图 9 放电效率与温度的关系图

Fig. 9 Relationship between discharge efficiency and temperature

表 1 分时电价

Table 1 Time of use tariff

时期	时间段	电价/(元/kWh)
峰	10:00—12:00; 14:00—19:00	1.0033
平	08:00—10:00; 12:00—14:00; 19:00—24:00	0.5902
谷	00:00—08:00	0.3811

采用模拟交通路网对比 Dijkstra 算法、A*算法求解、改进 A*算法求解最短路径的效果,最短路径如图 10—图 12 所示。

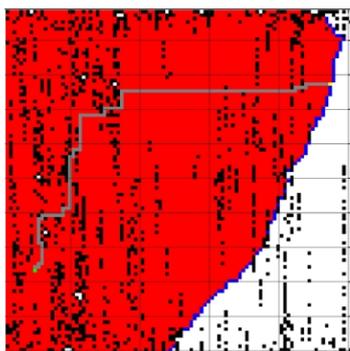


图 10 Dijkstra 算法求解

Fig. 10 Dijkstra algorithm solution



图 11 A*算法求解

Fig. 11 A* algorithm solution

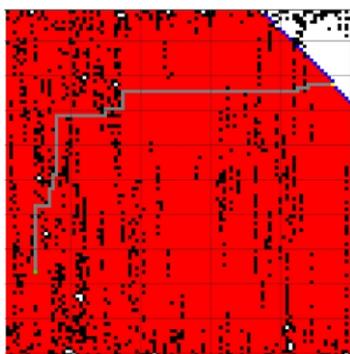


图 12 改进 A*算法求解

Fig. 12 Improved A* algorithm solution

将交通道路网格化,同时将距离、行驶时间、红绿灯等数据化,每个网格对应的距离、时间、红绿灯数量均不一致,其中黑色部分为障碍块,绿色部分为起点,黄色部分为终点,灰色部分为求出的最短路径,可以看出不同算法求解的最短路径均不相同,搜索的方式也不一致。

表 2 为不同算法求解后得到的最短路径所需的行驶相对时间及行驶相对距离,可以看出采用改进 A*算法求解后的行驶相对时间最少、相对距离最短,结果最优。

表 2 不同算法求解后的行驶相对距离、时间

Table 2 Relative travel distance and time after different algorithms

算法	行驶相对距离/m	行驶相对时间/min
Dijkstra	5231	13.46
A*	5211	12.67
改进 A*	5145	10.12

部分路网及不同充电站的吸引力计算结果,如图 13 所示。

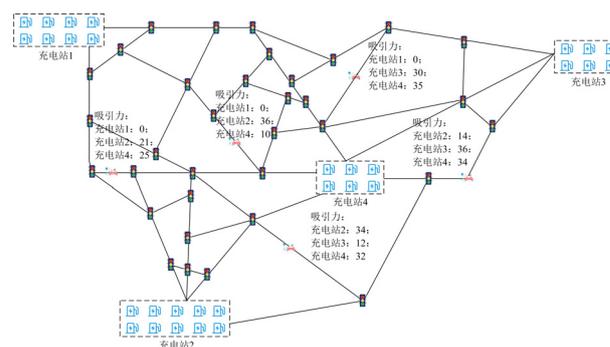


图 13 充电站吸引力计算结果

Fig. 13 Calculation results of attraction force of charging station

对以下 3 个场景进行仿真。

场景 1: 两阶段分配,但不进行电动汽车进行充电站分配及路径引导;

场景 2: 两阶段分配,对电动汽车进行充电站分配但不进行路径引导;

场景 3: 两阶段分配,对电动汽车进行充电站分配及路径引导。

不同场景下聚合商净利润、减少的交通能耗、减少的排队时间如表 3 所示。可以看出当聚合商不对电动汽车进行充电站分配以及路径引导时,由于电动汽车用户减少的交通能耗与排队时间最少,电动汽车用户参与调峰的意愿最低,聚合商净利润最低。聚合商对电动汽车进行充电站分配时,电动汽车减少的交通能耗和排队时间较多,因此电动汽车用户参与调峰的意愿提升,进而聚合商净利润较高。

当聚合商对电动汽车进行充电站分配的同时对路径进行引导, 电动汽车减少的交通能耗和排队时间最多, 用户参与调峰的意愿最高, 因此聚合商净利润最高。

表 3 不同场景下数据

Table 3 Data under different scenarios

场景	聚合商净利润/元	折合后减少的交通能耗/元	减少的排队时间/min
1	54 628.046	376.2	160.6
2	72 500.7471	1016.4	871.2
3	76 960.0357	1476.2	922.9

不同场景下, 不同调度类型调峰容量与中标调峰容量对比、实际调峰容量与中标调峰容量差值对比、不同调度类型的动态电价与分时电价对比、奖罚机制调度类型激励与惩罚电价对比结果如图 14—图 17 所示。

由图 14 可以明显看出, 奖罚机制调度类型电动汽车提供的调峰容量远大于完全调度类型电动汽车提供的调峰容量, 原因是选择奖罚机制调度类型电动汽车的数量远大于完全调度类型电动汽车的数量。由图 15 可以看出, 中标调峰容量与实际调峰的差值大小为场景 1 > 场景 2 > 场景 3, 显然当聚合商对电动汽车充电站进行分配及路径引导时, 电动汽车的调峰容量最大。

由图 16 可以看出, 场景 1、2 下动态电价较低, 场景 3 下动态电价较高, 因为场景 3 聚合商为电动汽车进行充电站分配与路径引导, 有效减少电动汽车交通能耗与排队时间, 电动汽车在动态电价稍低于分时电价时也愿意参与调度, 而当聚合商没有为

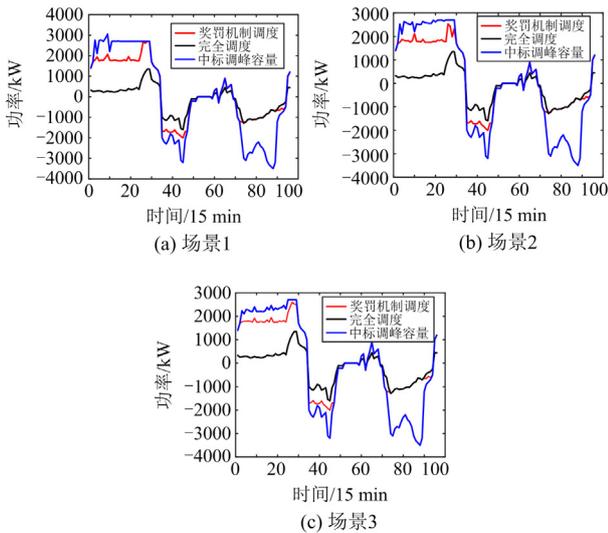


图 14 不同调度类型的调峰容量与中标调峰容量对比

Fig. 14 Comparison between peak shaving capacity of different dispatching types and peak shaving capacity of winning the bid

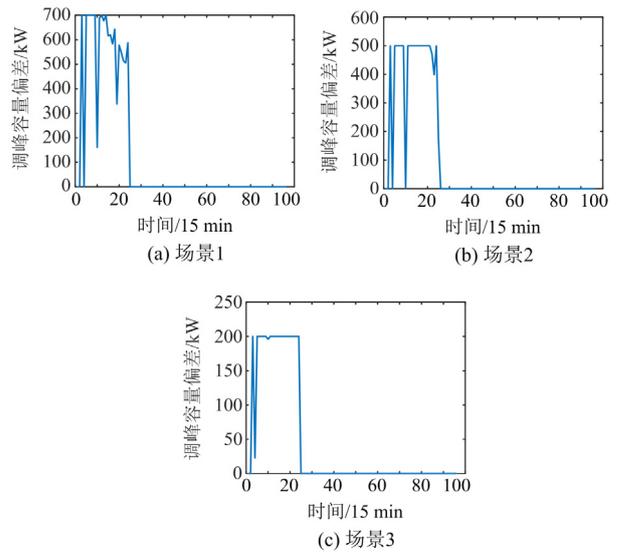


图 15 实际调峰容量与中标调峰容量差值对比图

Fig. 15 Comparison of difference between actual peak shaving capacity and bid winning peak shaving capacity

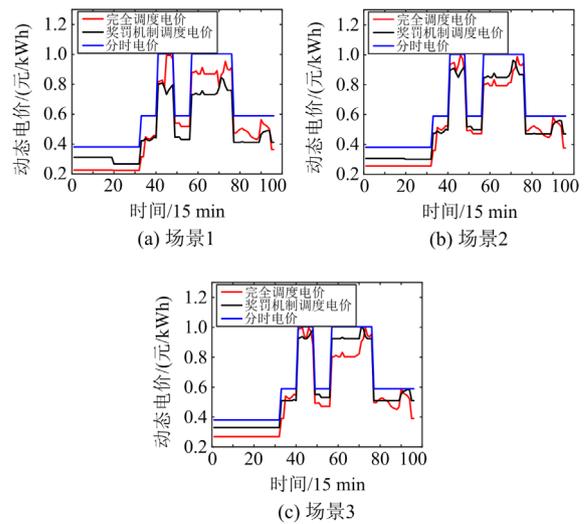


图 16 不同调度类型的动态电价与分时电价对比图

Fig. 16 Comparison of dynamic electricity price and time of use electricity price of different dispatching types

电动汽车进行充电站分配或路径引导时, 为了吸引更多电动汽车进行调度, 聚合商只能降低动态电价。

由图 17 可以看出, 场景 1、2 的奖罚机制调度类型的激励电价、惩罚电价高于场景 3。奖罚机制调度类型的电动汽车用户在第二阶段的调度容量主要与激励电价、惩罚电价相关, 激励电价越高, 用户充电意愿越高, 惩罚电价越高, 抑制用户充电的效果越好, 调峰容量越大。由于场景 3 聚合商为电动汽车提供充电站分配及路径引导服务, 电动汽车

用户的参与调度意愿相对场景 1、2 较高, 因此当需要相同的调峰容量时, 场景 1、2 需要设置较高的激励电价、惩罚电价才能达到目标调峰容量, 而场景 3 只需要设置较低的激励电价、惩罚电价就可以达到目标调峰容量。

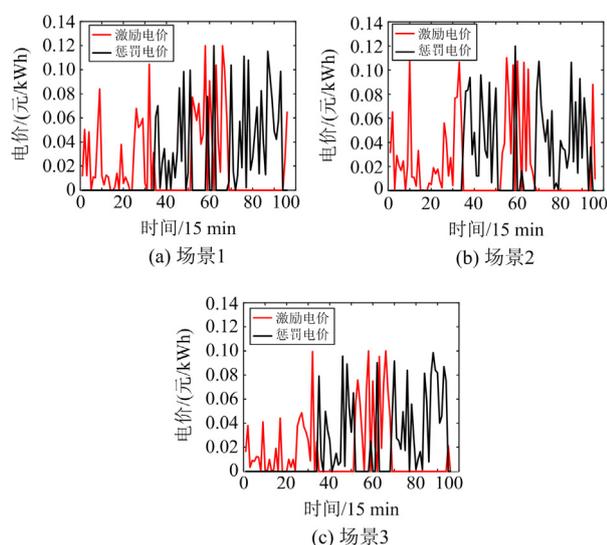


图 17 奖罚机制调度类型激励与惩罚电价对比图

Fig. 17 Comparison of incentive and punishment electricity prices of incentive and punishment mechanism scheduling types

6 结论

为了提高调峰效率, 提高聚合商利润, 减少电动汽车排队时间及交通能耗, 本文提出了一种电动汽车两阶段充电站分配的聚合商定价方法。算例分析中以中国某城市路网为模型, 对 10 000 辆电动汽车进行仿真, 实验结果表明:

1) 本文的改进 A*算法与传统的 Dijkstra 算法、A*算法相比, 计算的最短路径中行驶距离和行驶时长最优;

2) 在本文提出的基于库伦定律的电动汽车充电站吸引力计算中, 可以精确地计算出不同充电站对不同电动汽车的吸引力, 有利于聚合商对电动汽车进行充电站分配及路径引导;

3) 本文提出的电网-聚合商-电动汽车供应链可以有效提高聚合商利润和调峰效率, 使各环节定价更合理。

本文所提方法可以为聚合商提供一套完整的电动汽车资源整合及定价方案, 有效地提高聚合商调峰效率, 最大化聚合商利润, 有望推动多源主体之间的信息共享以及合作共赢, 提高社会综合效益, 所提方法更具理论指导意义和实际应用价值。本文中并未充分考虑电动汽车充电次数对电池寿命的影

响, 后续会对此进一步进行研究。

参考文献

- [1] 阳婷婷, 李晓刚, 邹斌, 等. 促进灵活性资源的辅助服务市场分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 73-83. YANG Tingting, LI Xiaogang, ZOU Bin, et al. Market analysis of an ancillary service to promote flexible resources[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 73-83.
- [2] 庄晓丹, 刘卫东, 黄为群, 等. 浙江电力现货市场环境下储能的市场交易机制与效益分析[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 80-85. ZHUANG Xiaodan, LIU Weidong, HUANG Weiqun, et al. Energy storage market trading mechanism and benefit analysis of Zhejiang power spot market[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 80-85.
- [3] 刘瑞丰, 祁小芳, 贺元康, 等. 中国西北地区电力市场和清洁能源交易运营绩效分析[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 159-167. LIU Ruifeng, QI Xiaofang, HE Yuankang, et al. Analysis on operation performance of power market and clean energy transactions in northwest China[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 159-167.
- [4] 丁伟斌, 谭忠富. 考虑不平衡资金处理的电力市场结算机制研究[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 13-23. DING Weibin, TAN Zhongfu. Research on settlement mechanism of bilateral power market considering unbalanced capital treatment[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 13-23.
- [5] XU B, ZHANG G Y, LI K, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 801-813.
- [6] 肖丽, 谢尧平, 胡华锋, 等. 基于 V2G 的电动汽车充放电双层优化调度策略[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 164-171. XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 164-171.
- [7] 黄敬尧, 侯登旭, 朱嘉帅, 等. 考虑电动汽车移动储能的微电网调度[J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 81-88. HUANG Jingyao, HOU Dengxu, ZHU Jiashuai, et al. The micro-grid scheduling considering mobile energy storage of electric vehicles[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(2): 81-88.
- [8] LOTFI M, OSORIO G J, JAVAD M S, et al. A Dijkstra-inspired graph algorithm for fully autonomous tasking in industrial applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(5): 5448-5460.
- [9] KOU C, HU D, YUAN J, et al. Bisection and exact algorithms based on the Lagrangian dual for a single-constrained shortest path problem[J]. IEEE/ACM

- Transactions on Networking, 2020, 28(1): 224-233.
- [10] LAN X, LÜ X, LIU W, et al. Research on robot global path planning based on improved A-star ant colony algorithm[C] // 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), March 12-14, 2021, Chongqing, China.
- [11] JU C, LUO Q, YAN X. Path planning using an improved A-star algorithm[C] // 2020 11th International Conference on Prognostics and System Health Management (PHM-2020 Jinan), October 23-25, 2020, Jinan, China.
- [12] WANG Y H, ZHANG W J, ZHOU T X. Path planning of surface unmanned craft based on variable step-length sparse A-star algorithm[C] // Proceedings of the 33rd Chinese Control and Decision Conference, May 22-24, 2021, Kunming, China: 545-548.
- [13] JIAN Z, CHEN S, ZHANG S, et al. Multi-model-based local path planning methodology for autonomous driving: an integrated framework[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(5): 4187-4200.
- [14] ZHOU Z, LIU Z, SU H, et al. Intelligent path planning strategy for electric vehicles combined with urban electrified transportation network and power grid[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2): 2437-2447.
- [15] DING D, LI J, TU P, et al. Electric vehicle charging warning and path planning method based on spark[J]. IEEE Access, 2020, 8: 8543-8553.
- [16] HUANG G, YUAN X, SHI K, et al. A 3-D multi-object path planning method for electric vehicle considering the energy consumption and distance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 7508-7520.
- [17] SCHOENBERG S, DRESSLER F. Reducing waiting times at charging stations with adaptive electric vehicle route planning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(1): 95-107.
- [18] 傅质馨, 朱韦翰, 朱俊澎, 等. 动态路-电耦合网络下电动出租车快速充电引导及其定价策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 9-17.
- FU Zhixin, ZHU Weihang, ZHU Junpeng, et al. Fast charging guidance and pricing strategy of electric taxi under dynamic road electric coupling network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 9-17.
- [19] 吕金瑞, 张智俊, 窦春霞. 基于信息间隙决策理论与动态分时电价的电动汽车接入虚拟电厂双层经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 77-85.
- GUO Jinrui, ZHANG Zhijun, DOU Chunxia. Bi-level economic dispatch strategy for electric vehicles connecting to virtual power plant based on information gap decision theory and dynamic time-of-use price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 77-85.
- [20] 程杉, 杨堃, 魏昭彬, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站有序充放电调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 1-8.
- CHENG Shan, YANG Kun, WEI Zhaobin, et al. Orderly charging and discharging scheduling of electric vehicle charging stations considering electricity price optimization and discharge control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 1-8.
- [21] YANG H, YANG S, XU Y, et al. Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by learnable partheno-genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 657-666.
- [22] YE Z, GAO Y, YU N. Learning to operate an electric vehicle charging station considering vehicle-grid integration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 3038-3048.
- [23] SOHET B, HAVEL Y, BEAUDE O, et al. Hierarchical coupled driving-and-charging model of electric vehicles, stations and grid operators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5146-5157.
- [24] ZHANG J L, PEI Y Q, SEHN J M, et al. Charging strategy unifying spatial-temporal coordination of electric vehicles[J]. IEEE Access, 2020, 8: 74853-74863.
- [25] DAS S, ACHARJEE P, BHATTACHARYA A. Charging scheduling of electric vehicle incorporating grid-to-vehicle and vehicle-to-grid technology considering in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(2): 1688-1702.
- [26] 刘志强, 张谦, 朱熠, 等. 计及车-路-站-网融合的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 36-45.
- LIU Zhiqiang, ZHANG Qian, ZHU Yi, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging loads for electric vehicles considering vehicle-road-station-grid integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 36-45.
- [27] 闫群民, 董新洲, 穆佳豪, 等. 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 11-19.
- YAN Qunmin, DONG Xinzhou, MU Jiahao, et al. Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 11-19.

收稿日期: 2023-05-09; 修回日期: 2023-08-19

作者简介:

林 卉(1998—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统调度; E-mail: saturn1334@163.com

周一辰(1990—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制等; E-mail: zhou.yi.chen.1990@163.com

李永刚(1967—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电气设备诊断、新能源电力系统。E-mail: lygzxm0@163.com

(编辑 许 威)