

引用格式:陈腾生,杨汝泉,隋坤明,等.考虑用户决策不确定性的电动汽车充电站用户参与度优化方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):128-137.

Citation: CHEN Tengsheng, YANG Ruquan, SUI Kunming, et al. Optimization of user participation in electric vehicle charging stations considering uncertainty of user decision[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 128-137.

考虑用户决策不确定性的电动汽车充电站 用户参与度优化方法

陈腾生¹, 杨汝泉¹, 隋坤明², 董 萍²

(1. 广东顺德电力设计院有限公司, 广东 佛山 528399; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要:在电动汽车充电站参与需求响应的背景下,用户参与度对充电站经济效益有着巨大影响。基于前景理论该文提出充电站用户参与度优化方法,通过改变充电站电价的组成及形式,实现充电站用户参与度及经济效益提高的目标。首先,针对充电站价格对电动汽车用户的影响,建立用户价格影响模型,得到用户数量初步变化率;然后,使用前景理论价值函数量化用户面对不同电价时的决策不确定性,并计及充电站距离的影响,对用户初步变化率进行修正,得到用户最终变化数量;最后,根据上述模型并基于充电站典型负荷数据,以充电站需求响应时段最大负荷为约束,采用非支配排序遗传算法-II(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II),以充电站日收益最大和用户参与度最大为目标进行多目标优化,确定充电站电价的组成及形式,进一步确定最优用户参与度和充电站收益。仿真结果可以验证所提方法的有效性。

关键词:用户参与度;决策不确定性;前景理论;最优参与度

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.015 **中图分类号:** TM863 **文章编号:** 1673-9140(2024)04-0128-10

Optimization of user participation in electric vehicle charging stations considering uncertainty of user decision

CHEN Tengsheng¹, YANG Ruquan¹, SUI Kunming², DONG Ping²

(1. Guangdong Shunde Electric Power Design Institute Co., Ltd., Foshan 528399, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In the context of demand response at electric vehicle charging stations, user participation has a significant impact on the economic benefits of charging stations. Based on prospect theory, an optimization method for user participation at charging stations is proposed, aiming to improve user participation and economic benefits by altering the composition and format of electricity prices at charging stations. Initially, a user price impact model is established to analyze the influence of charging station prices on electric vehicle users, yielding preliminary user quantity change rates. Subsequently, the value function in prospect theory is used to quantify the decision uncertainty of users when faced with different electricity prices, and adjustments are made to the preliminary user change rates, considering the impact of charging station distance, to obtain the final user quantity changes. Finally, based on the aforementioned models and typical load data from charging stations, with the maximum load during demand response periods as a constraint, the non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) optimization algorithm is employed to conduct a multi-objective optimization aiming to maximize daily revenue and user participation at the charging station. This determines the composition and format of electricity prices at the charging station, further identifying the optimal user participation and

收稿日期:2023-03-20;修回日期:2023-10-11

基金项目:国家自然科学基金(52077083);广东省自然科学基金(2021A1515012073);顺德电力设计院重点科技项目(GS20220108)

通信作者:隋坤明(2001—),男,硕士研究生,主要从事电力市场需求响应、电动汽车以及主动配电网的优化控制研究;E-mail:

1132160291@qq.com

charging station revenue. Simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: user participation; decision uncertainty; prospect theory; optimal degree of participation

电动汽车是实现绿色低碳出行的重要途径之一,因而受相关政策支持,各地电动汽车规模不断扩大,充电需求也随之增加。电动汽车用户可使用私人桩或公共桩进行充电,由于私人桩的安装成本较高,因此公共充电站成为大多数人充电的选择。据统计,2022年中国充电基础设施数量达到520万台,其中公共充电基础设施数量达到180万台^[1],在电动汽车普及率较高的省份,如广东省,截至2022年5月底,已建成公共充电桩超过18.5万个^[2]。而对于充电站运营商来说,在日益增长的充电需求下如何最大化充电站收益是亟须解决的问题。随着电力市场改革的推进,充电站运营商可通过调节充电站的充电负荷在负荷高峰期参与需求响应^[3-4],为充电站带来收益;此外,充电站的充电电价一般是由基础电价和服务费组成。基础电价是充电站从电网侧购电的成本,服务费由运营商自行设定,但不得超过相关规定^[5],服务费是充电站最主要的收益来源。因此,运营商可以通过采取一定措施来吸引用户充电,提高充电站的用户参与度,以达到增加收益的目的。

目前,已有不少学者对电动汽车用户参与度展开研究。文献[6]利用随机数生成用户参与度,并结合其他参数对电动汽车进行集群分化,验证电动汽车参与电网辅助服务的效果;文献[7-9]通过自行设定电动汽车用户参与度大小,分析了不同用户参与度下电动汽车的削峰填谷效益,并得出用户参与度越高降低峰谷差的效果越好的结论;文献[10]也是自行设定用户参与度大小,但是是以虚拟电厂综合效益最优为目标进行优化;文献[11]基于用户的响应程度(用户参与度)调整参与需求响应的补偿电价,有效避免了欠响应和过响应问题,实现了更好的需求响应效果。但以上研究多是针对某一地区或社区的电动汽车用户使用私人充电桩有序充电或放电来进行的,而对于电动汽车用户在公共充电站充电这一行为的用户参与度研究较少。文献[12]考虑了电动汽车接入、离开电网时刻以及电池容量,在实现平滑负荷波动的同时,提高了用户经济效益和参与度;文献[13-14]从价格激励和从众心理2个方面综合考虑了用户参与度,并对其进行不确定性处理,最终确定用户是否参与调度,实现了对用户参与度的多维度评判;文献[15-16]建立了

基于峰谷电价差的用户需求响应度模型,求出了用户响应度最大时的最小政府补贴电价;文献[17]将用户群体分为经济型和舒适型,并结合参与度对电网激励和用户效益进行分析,得出结论:电网侧的过补偿虽能提高用户参与水平,但是售电公司需要支付的成本太高,电网效益提升却不明显,因此不宜采取过高激励。以上研究考虑了用户参与度的影响因素,但并没有考虑距离对用户参与度的影响;此外,不同因素影响下的用户参与度如何变化以及如何确定最优用户参与度的研究也较少。

基于此,本文提出在需求响应背景下的公共充电站电动汽车用户参与度的优化方法,首先,通过价格响应数学模型计算用户数量初步变化率;然后,基于前景理论价值函数得出价格影响下的用户决策概率,同时考虑距离这一因素,结合价格和距离的影响对公共充电站用户数量初步变化率进行修正,求出用户变化数量;接着以充电站日收益和用户参与度最大为目标,以需求响应时段最大负荷为约束进行多目标优化,并确定充电站的电价组成以及最优用户参与度;最后,通过仿真验证所提方法的有效性。

1 用户参与度及其影响因素

1.1 用户参与度定义

不同研究对用户参与度的定义各不相同,本文对用户参与度定义:充电站的用户参与度为充电站一天内每时刻充电桩的利用率。这样定义的原因是,充电站收益来源主要是收取服务费用,提高充电桩利用率有助于提高充电站收益,而用户参与度与充电桩利用率有直接关系,参与度越大充电桩利用率越高,因此将参与度与充电桩利用率等效。

1.2 用户参与度的影响因素

1) 价格激励。

电价是用户能够直接感受到的客观因素,用户可通过手机APP实时查询各充电站的电价信息,因此电价越低对用户的吸引力越大。对于电动汽车用户,充电费用是一天中运行的主要成本,不同时刻充电站的价格对其参与度影响较大。

2) 充电站距离。

用户也可以通过手机APP查询到各充电站所在位置及充电桩的空闲状态,并选择前往充电。进

行选择时用户除了受到价格的影响之外,还会考虑充电站与当前位置之间的距离。不同距离导致的行驶时间会影响用户出行计划,进一步影响用户参与度。在不同时间电动汽车用户集中活动的地点不同,相应地,与充电站之间的距离也随之不同,因此,在不同时刻考虑用户与充电站之间的距离服从不同参数正态分布:

$$\text{Distance at Time } i \sim N(\mu_{d,i}, \sigma_{d,i}^2) \quad (1)$$

式中, $\mu_{d,i}$ 为 i 时刻距离正态分布的均值; $\sigma_{d,i}$ 为 i 时刻距离正态分布的方差。

电动汽车在城市道路行驶时速度一般为 45 km/h,而当用户与本充电站之间的距离耗时在 20 min 以内时,用户会选择本充电站充电,那么用户可接受的最大距离为 15 km。本文假设各时刻用户与充电站间距离的正态分布期望如图 1 所示。

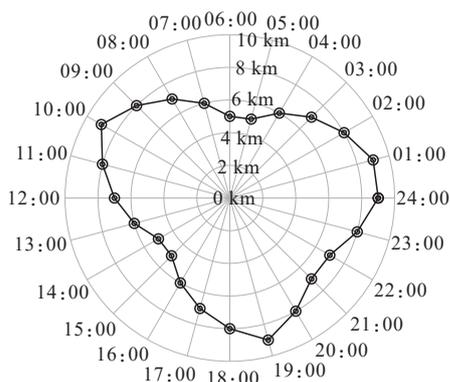


图 1 各时刻正态分布期望

Figure 1 Expectation of normal distribution at each moment

2 用户参与度影响因素的量化

2.1 不同电价形式

本文考虑的 3 种电价形式均由基础电价与服务费组成,如表 1 所示。基础电价是充电站从电网购电的成本,为分时电价形式,通过手机 APP 查询到南方电网运营的充电站在谷、平、峰时段的基础电价分别为 0.274 7、0.677 8、1.132 9 元/(kW·h);服务费是充电站的收益来源,也是算例优化的变量。

表 1 3 种电价形式

Table 1 Three forms of electricity price

电价形式	组成
分时电价	基础电价+分时服务费
实时电价	1 基础电价+基于负荷变化服务费
	2 基础电价+实时变化服务费

1) 基础电价。

基础电价与南方电网运营的充电站保持一致,即

$$c_i^b = \begin{cases} c_p^b, & i \in T_p \\ c_f^b, & i \in T_f \\ c_v^b, & i \in T_v \end{cases} \quad (2)$$

式中, c_i^b 为分时电价的基础电价部分; c_p^b 、 c_f^b 、 c_v^b 分别为峰、平、谷时段基础电价。

2) 充电费用为分时电价形式。

$$c_i^{\text{TOU}} = c_i^b + c_i^{\text{ser, TOU}} \quad (3)$$

式中, c_i^{TOU} 、 $c_i^{\text{ser, TOU}}$ 分别为分时电价充电、服务费用。

不同时段分时电价费用为

$$c_i^{\text{TOU}} = \begin{cases} c_p, & i \in T_p \\ c_f, & i \in T_f \\ c_v, & i \in T_v \end{cases} \quad (4)$$

式中, c_p 、 c_f 、 c_v 分别为峰、平、谷时段电价。

不同时段的服务费用为

$$c_i^{\text{ser, TOU}} = \begin{cases} c_p^{\text{ser}} = c_p - c_p^b, & i \in T_p \\ c_f^{\text{ser}} = c_f - c_f^b, & i \in T_f \\ c_v^{\text{ser}} = c_v - c_v^b, & i \in T_v \end{cases} \quad (5)$$

式中, c_p^{ser} 、 c_f^{ser} 、 c_v^{ser} 分别为峰、平、谷时段服务费用。

3) 充电费用为实时电价形式。

实时电价 1、2 的充电费用分别为

$$c_i^{\text{RTP1}} = c_i^b + c_i^{\text{ser, RTP1}} \quad (6)$$

$$c_i^{\text{RTP2}} = c_i^b + c_i^{\text{ser, RTP2}} \quad (7)$$

$$c_i^{\text{ser, RTP1}} = \frac{m_i}{n} c_{\Delta}^{\text{ser}} + c_{\min}^{\text{ser}} \quad (8)$$

式(6)~(8)中, $c_i^{\text{ser, RTP1}}$ 、 $c_i^{\text{ser, RTP2}}$ 分别为实时电价 1、2 的服务费用; m_i 为价格响应后 i 时刻参与充电的用户数量; c_{\min}^{ser} 为服务费用下限值; c_{Δ}^{ser} 为服务费用浮动最大值,按照相关部门要求该值为 0.8 元/(kW·h)^[5]。

实时电价 1 的服务费用随着充电负荷的改变而改变,而实时电价 2 的服务费用不再随着充电负荷的改变而改变。

2.2 价格响应数学模型

用户充电费用包括基础电价和服务费用,电价对参与充电用户数量的影响可以从本充电站原始电价与优化后的电价差异入手,结合价格响应模型,根据电价变化率求出本充电站用户数量变化率,进而根据原充电站负荷曲线求出响应后的负荷曲线。基于充电站电价变化的价格响应模型以文献[18]中已有模型为参考,即

$$\rho(\theta_i) = a_1 \theta_i^3 + a_2 \theta_i^2 + a_3 \theta_i \quad (9)$$

式中, $\rho(\theta_i)$ 为 i 时刻初步用户数量变化率; a_1 、 a_2 、 a_3

分别为模型的三、二、一次项的系数; θ_i 为*i*时刻价格变化率,即

$$\theta_i = (c_{o,i} - c_{mit,i}) / c_{mit,i} \quad (10)$$

式中, $c_{o,i}$ 为优化后*i*时刻本充电站价格; $c_{mit,i}$ 为充电站*i*时刻原始充电价格。

当本充电站价格相比其他充电站价格降低时,根据价格响应模型得出本充电站用户数量表现为增加,即 $\rho(\theta_i) > 0$;反之表现为减少,即 $\rho(\theta_i) < 0$ 。而对于 $\rho(\theta_i)$ 所带来的用户变化量来说,本文假设当用户数量表现为增加时,增加的用户数量来源于其他充电站的用户,即通过价格措施吸引其他充电站用户转移到本充电站充电;当用户数量表现为减少时,减少的用户数量来源于本充电站原始用户。在该部分中,仅根据价格变化率计算得到初步的用户数量变化率,而没有考虑用户面对多种选择进行决策时的不确定性,因此,需要对初步用户数量变化率作进一步处理,即考虑用户决策行为影响下的用户变化率。

2.3 基于前景理论价值函数的决策概率

考虑用户面对多种选择进行决策时的不确定性,引入行为经济学前景理论中的价值函数对电动汽车用户数量变化率作进一步处理^[19]。前景理论表明:人们根据相对于参照点的预期效用而不是最终结果做出决策。它是一种面向现实生活选择的行为模型,可以描述电动汽车用户根据充电价格机制在不同的选项之间做出选择。

前景理论价值函数具有以下特征:①大多数人对收益是风险厌恶型,即凹函数特点;②大多数人对损失是风险偏好型,即凸函数特点;③与收益相比,大多数人对损失的敏感度更高。前景理论价值函数定义如下:

$$V(x) = \begin{cases} (x - x_0)^\alpha, & x \geq x_0 \\ -\lambda(x_0 - x)^\beta, & x < x_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $x - x_0$ 为变量当前值*x*相对参考点 x_0 的变化; α 为收益值的不均匀程度,其值为(0,1]; β 为损失值的不均匀程度,其值为(0,1]; λ 为损失厌恶程度,其值大于1。

为了提高充电站用户参与度,需要设置合理的价格激励来促使其他充电站用户转移到本充电站充电。站在其他充电站用户的角度,当用户通过手机APP看到本充电站价格低于其习惯所在充电站价格,结合前景理论,此时用户的参考点是其原先所在充电站价格,若仍在原充电站充电,则这一充

电决策将被认为是损失;若前往本充电站充电,这一充电决策将被认为是收益。

此外,还需考虑另外一种情况:本充电站优化后的价格高于用户所在充电站价格。首先根据文2.2中假设优化后的价格低于初始价格,则 $\rho(\theta_i)$ 大于0,即初步判断用户数量会增加,接着结合前景理论,仍然是针对其他充电站用户,其参考点为其习惯所在充电站价格,若用户仍在原充电站充电,则这一充电决策将被认为是收益;若前往本充电站充电,则这一充电决策将被认为是损失。

基于上述充电决策的效果,以其他充电站价格为参考点,定义价值函数为

$$V_{o,i} = \begin{cases} (c_{m,i} - c_{o,i})^\alpha, & c_{m,i} \geq c_{o,i} \\ -\lambda(c_{o,i} - c_{m,i})^\beta, & c_{m,i} < c_{o,i} \end{cases} \quad (12)$$

$$V_{m,i} = \begin{cases} (c_{o,i} - c_{m,i})^\alpha, & c_{m,i} < c_{o,i} \\ -\lambda(c_{m,i} - c_{o,i})^\beta, & c_{m,i} \geq c_{o,i} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $c_{m,i}$ 为用户原先所在充电站*i*时刻的电价; $V_{o,i}$ 为用户前往本充电站充电价值函数; $V_{m,i}$ 为用户在原充电站充电价值函数。

进一步,结合式(12)、(13)价值函数和 $\rho(\theta_i)$,从用户损失的角度(用户对损失的敏感度高)定义用户前往本充电站充电的决策概率:

$$p_i^{\text{dec}} = \begin{cases} \frac{|V_{m,i}|}{|V_{m,i}| + |V_{o,i}|}, & \rho(\theta_i) > 0 \\ \frac{|V_{o,i}|}{|V_{m,i}| + |V_{o,i}|}, & \rho(\theta_i) < 0 \\ 0, & \rho(\theta_i) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

当 $\rho(\theta_i) = 0$ 时,根据其定义可知,此时电价变化率为0,表示本充电站未进行电价优化,在其他充电站充电的用户仍然按照自身习惯进行充电选择,前往本充电站充电的 p_i^{dec} 为0;当 $\rho(\theta_i) < 0$ (或 $\rho(\theta_i) > 0$)时,此时电价变化率小于(或大于)0,表示本充电站的电价有所降低,对在其他充电站充电用户的充电选择有所影响,因此 p_i^{dec} 不为0。

2.4 距离影响下的用户参与意愿

在用户做出最终的充电选择之前,还需要考虑当前位置与充电站之间的距离,不同时间用户所处位置不同,其充电意愿也会受到影响。基于文1.2可以求出每一时刻第*i*个用户与充电站之间的距离正态分布满足最大可接受距离的概率 p_i^{dis} ,即

$$P_i(d \leq d_{\max}) = p_i^{\text{dis}} \quad (15)$$

式中, d 为充电站与用户之间的距离, 服从正态分布; d_{\max} 为最大可接受距离, 取为 15 km。

2.5 电动汽车用户数量

使用决策概率并考虑距离的影响, 对初步用户数量变化率进行处理, 得到修正后最终的用户变化率为

$$p_i = p_i^{\text{dec}} \cdot p_i^{\text{dis}} \cdot \rho(\theta_i) \quad (16)$$

价格响应后 i 时刻参与充电的用户数量为

$$m'_i = [1 + p_i] m_i \quad (17)$$

此外, 每时刻的用户数量应满足约束:

$$\text{s.t. } m'_i \leq m_{i, \max} \quad (18)$$

$$m_{i, \max} = \begin{cases} n, & i \notin T_{\text{DR}} \\ P_{c, \text{total}}^{\text{lim}} / P_c, & i \in T_{\text{DR}} \end{cases} \quad (19)$$

式(18)、(19)中, $m_{i, \max}$ 为 i 时刻最大用户数量, 其值与需求响应时刻和非需求响应时刻有关; n 为本充电站充电桩数量; T_{DR} 为需求响应时刻; $P_{c, \text{total}}^{\text{lim}}$ 为需求响应时刻规定的充电负荷之和, 充电站可根据要求关闭部分充电桩, 以此实现最大负荷控制, 参与需求响应; P_c 为单个充电桩的额定充电功率。

2.6 用户参与度

假设本充电站有 n 个充电桩, 每个充电桩均为快充桩且充电功率为 P_c , i 时刻在本充电站充电的电动汽车用户数量为 m_i , 则 i 时刻充电站充电桩的参与度为

$$r_i = m_i / n \quad (20)$$

根据定义可计算出当天充电站的平均用户参与度为

$$r_p = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T r_i \quad (21)$$

式中, T 为一天的总时刻数。

3 用户参与度和充电站日收益最大的双目标优化模型

3.1 目标函数

根据充电站历史数据获取充电站日负荷曲线, 基于上述价格激励模型, 并结合决策概率和距离影响, 建立以充电站平均用户参与度最大(目标函数 1)和充电站日收益最大(目标函数 2)为目标的函数, 进行多目标优化, 验证最佳提升参与度方式及确定最优参与度(平均用户参与度)。目标函数 1、2 分别为

$$\max F_1 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \frac{m'_i}{n} \quad (22)$$

$$\max F_2 = \sum_{i=1}^T m'_i P_c [c_i + K c_{\text{sub}} - c_i^b] \Delta t \quad (23)$$

$$K = \begin{cases} 1, & i \in T_{\text{DR}} \\ 0, & i \notin T_{\text{DR}} \end{cases} \quad (24)$$

式(22)~(24)中, T 为一天总时段数, 取为 24; Δt 为时间间隔, 取为 1 h; K 为补偿系数, 当处于需求响应时刻 T_{DR} 时, K 为 1, 否则, K 为 0; c_{sub} 为需求响应时刻的电价补偿。

3.2 优化流程图

由于目标函数之间存在制约关系, 因此, 采用非支配排序遗传算法-II(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)进行求解^[20]。NSGA-II 流程如图 2 所示。

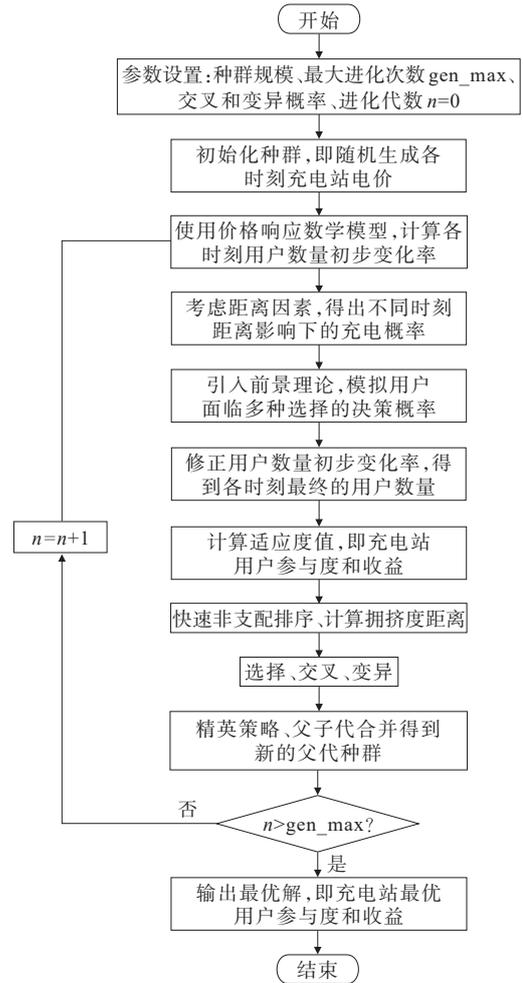


图 2 NSGA-II 流程

Figure 2 Flow chart of NSGA-II

1) 进行优化前的参数设置, 包括种群规模、最大进化次数、交叉和变异概率等;

2) 随机生成一组充电站电价, 并据此得出价格影响下的用户数量初步变化率、距离影响下的充电概率和用户主观决策概率;

3) 结合上述主客观因素对用户数量初步变化率进行修正,得到电价变化后最终的用户数量,进一步得到充电站各时刻用户参与度及收益;

4) 对二维平面上已得到的点进行筛选排序,并根据筛选后的点所对应的电价得到新的电价,重复步骤 2)、3) 数次,直至达到最大进化次数;

5) 输出优化所得 Pareto 前沿。

4 算例分析

4.1 参数设置

算例分析中以某充电站典型充电负荷曲线为参考进行优化,假设充电站共有 25 个快速充电桩,充电功率均为 60 kW。全天分为 24 个时刻,设置 12:00—14:00 时为需求响应时刻,假设需求响应时刻规定充电站负荷不能超过 360 kW,需求响应时刻电价补偿为 0.2 元/(kW·h)。a₁、a₂、a₃ 取值分别为 -1.989、0.000、-6.570; α、β、λ 取值分别为 0.422、0.542、2.315^[21]。算例中假设本充电站原始电价与周围最近的充电站电价相同,其组成均如表 2 所示;距离影响下各时刻用户前往本充电站充电的概率计算如表 3 所示。

表 2 充电站原始电价形式

Table 2 Original electricity price form of charging station 元/(kW·h)

时段	基础电价	服务费	分时电价
谷	0.274 7	0.505 3	0.78
平	0.677 8	0.392 2	1.07
峰	1.132 9	0.317 1	1.45

表 3 不同时刻距离影响下的充电概率

Table 3 Charging probability under influence of distance at different time

时刻	p_i^{dis}	时刻	p_i^{dis}	时刻	p_i^{dis}
01:00	0.884 9	09:00	0.919 2	17:00	0.945 2
02:00	0.919 2	10:00	0.884 9	18:00	0.919 2
03:00	0.945 2	11:00	0.919 2	19:00	0.884 9
04:00	0.964 1	12:00	0.945 2	20:00	0.919 2
05:00	0.977 2	13:00	0.964 1	21:00	0.945 2
06:00	0.977 2	14:00	0.977 2	22:00	0.945 2
07:00	0.964 1	15:00	0.977 2	23:00	0.919 2
08:00	0.945 2	16:00	0.964 1	24:00	0.884 9

4.2 不同电价形式优化结果

本文以 3 种电价形式为例,使用 NSGA-II 优化

算法以充电站平均用户参与度最大和日收益最大为目标进行寻优,得到不同电价形式下的充电站最优用户参与度和收益。每一种电价形式均给出了优化算法得到的 Pareto 前沿、电价柱状图及优化前后的充电负荷曲线。

1) 不同电价形式优化所得 Pareto 前沿和最优解。

NSGA-II 所得 3 种电价形式的 Pareto 前沿如图 3 所示;3 种电价形式所取最优解如表 4 所示。由图 3、表 4 可知,采用实时电价 2 对充电站用户参与度及收益的提高效果最好。为了说明最优解取值的依据,以分时电价为例,可能的分时电价情况所对应的不同目标函数值如图 4 所示。

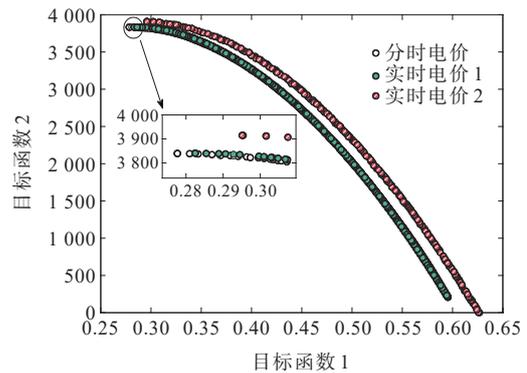


图 3 Pareto 前沿

Figure 3 Pareto front

表 4 不同电价形式所取最优解

Table 4 Optimal solution of different electricity price forms

电价形式	最优解	
	最优参与度	充电站收益/元
分时电价	0.277 4	3 842.13
实时电价	1	0.282 2
	2	0.293 0
		3 917.48

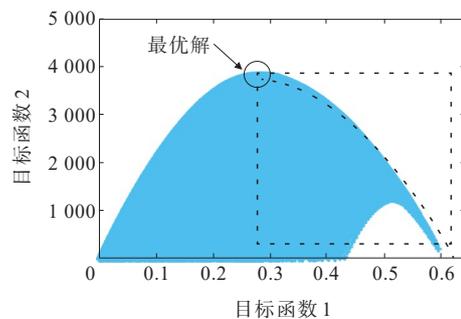


图 4 不同分时电价情况下的目标函数值

Figure 4 Objective function values under different time-of-use prices

图3所展示的优化算法求出的 Pareto 最优前沿即为图4虚线框中的“虚线”部分;最优解为图4中的圆框部分,也即图3圆框部分,可以看到该解并非用户参与度最大的解。但是结合图4可以看出,随着用户参与度的提高,充电站收益先升高后降低,也就是说充电站运营商可以采取电价激励促进用户前来充电,进而提升用户参与度,但当用户参与度提高到一定程度时,继续提升参与度会使充电站运营商的激励成本增加,造成的结果是充电站收益的下降。因此,取得的最优解应该是最优用户参与度,而非最大用户参与度。

2) 不同电价形式用户参与度比较。

优化前、后充电站各时刻用户参与度及提升量

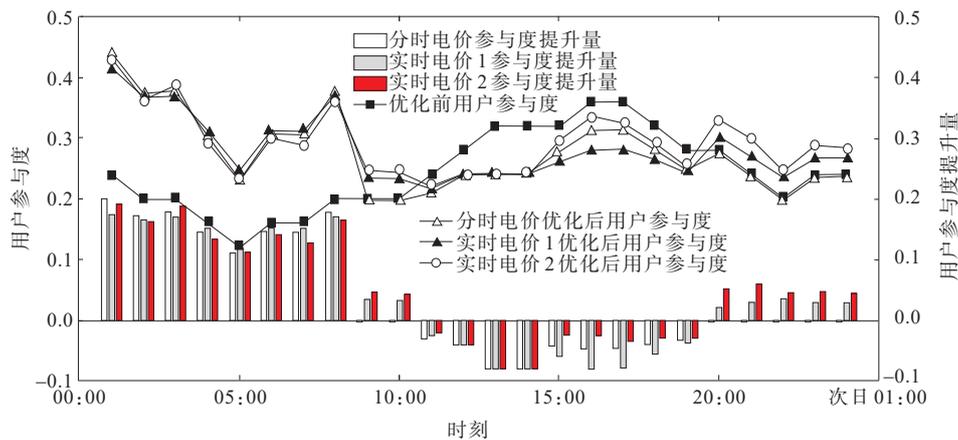


图5 优化前、后充电站各时刻用户参与度及提升量

Figure 5 User participation and its increase of charging station before and after optimization

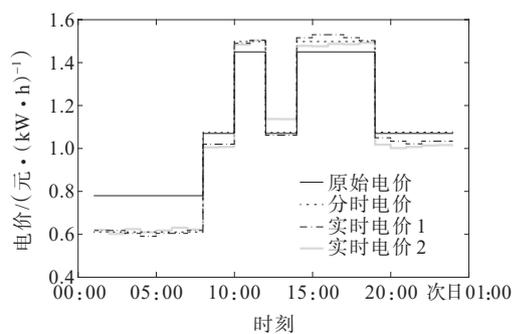


图6 优化所得3种电价

Figure 6 Three electricity prices after optimization

4.3 考虑需求响应前、后充电站用户参与度及收益优化结果分析

根据原始负荷数据,计算得到本充电站原始用户参与度及收益分别为0.243 3、3 436.64元。为了便于对比,将充电站电价优化前、后的用户参与度和充电站收益展现在图7(电价形式:1表示原始分时电价;2、3、4分别表示参与DR的优化分时电价、

如图5所示,可以看出3种电价形式在谷时段对用户参与度的优化结果相差不大;而在12:00—14:00时段由于充电负荷受到限制,三者用户参与度相同,均为0.24;但在此之后,实时电价2对用户参与度的提高均高于其他2种电价形式。

3) 优化所得3种电价。

优化所得3种电价如图6所示,可以看出,相比原始分时电价,优化后得到的3种电价均在谷时段有所降低且降价程度较高,因而在图5的谷时段用户参与度提高效果较好;在平时段且非需求响应时段,实时电价2相比其他2种电价更低,因此,该时段范围内实时电价2的参与度提升效果更好。

实时电价1、实时电价2;5、6、7分别表示不参与DR的优化分时电价、实时电价1、实时电价2)和表5中;此外,为验证充电站参与需求响应的效果,将充电站不参与需求响应时的优化结果也展示在图表中。

由表5可知,在参与需求响应的情况下,当充电站采用优化后的分时电价时,充电站收益相比优化前增加405.49元,最优参与度为27.74%,优化效果较好;采用实时电价1时收益增加了406.67元,最优参与度为28.22%,优化效果略好于分时电价的指标值;当采用实时电价2并参与需求响应时,收益增加了480.84元,最优参与度为29.30%,参与需求响应的情况下该电价形式效益明显好于前两者。一方面,这是由于参与需求响应时电网侧给予充电站补贴,可以减少让利造成的损失;另一方面,在该电价形式下服务费的变化更加灵活,没有充电负荷和时段的限制。在不参与需求响应的情况下,可以看到

3种电价形式所得优化效果基本一致,相差很小;与参与需求响应的情况相比,收益虽然减少,但用户参与度却大大提高,如分时电价下不参与需求响应,所得用户参与度的提升量接近参与度需求响应时的2倍。这是因为参与需求响应时充电站需求响应时段最大负荷受到约束,因此,这些时段的用户参与度也有所降低,影响充电站当天的用户参与度。

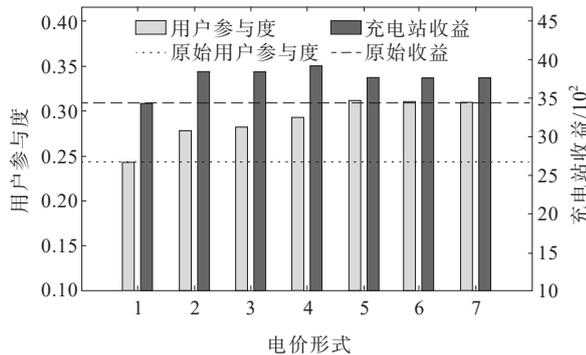


图7 不同电价形式参与需求响应前、后优化结果对比
Figure 7 Comparison of optimization results before and after different forms of electricity price participating in demand response

表5 不同电价形式参与需求响应前后优化结果

Table 5 Optimization results before and after different forms of electricity price participating in demand response

电价形式	最优参与度	充电站收益/元	用户参与度提升量/%	充电站收益提高/元
分时 参与DR	0.277 4	3 842.13	+3.41	+405.49
电价 不参与DR	0.311 4	3 763.59	+6.81	+326.95
实时 参与DR	0.282 2	3 843.31	+3.89	+406.67
电价1 不参与DR	0.310 5	3 761.99	+6.72	+325.35
实时 参与DR	0.293 0	3 917.48	+4.97	+480.84
电价2 不参与DR	0.309 5	3 763.73	+6.62	+327.09

综合考虑,实时电价2这种电价形式在2种情景下均具有较好的优化效果,因此充电站运营商在制定电价时,可从实时电价2入手,提高用户参与度和充电站收益。

4.4 考虑用户决策不确定性优化策略的有效性

为了验证本文考虑用户决策不确定性优化方法(情景1)的有效性,与不考虑用户决策不确定性优化方法(情景2)进行对比。将情景2中用户决策概率设置固定值为0.5,即用户在面对本充电站与其原先所在充电站间的价格差时,选择本充电站和原先所在充电站的概率是相等的。

在不同电价形式下,不同情景的充电站用户参与度及收益如表6所示;不同电价形式下的决策概率如图8所示。由表6和图8可知,相比情景2,情景1对于充电站收益及用户参与度的优化效果均较好。这是因为在考虑用户决策不确定性时,用户会根据价格差而不同程度地偏向选择价格较低的充电站,而非选择不同充电站的概率相等。因此,不考虑用户决策不确定性时无法得出用户受价格差影响的选择概率,影响充电站价格的制定,进一步影响充电站用户参与度的提高,而本文所提方法考虑用户决策不确定性,能够更加合理地引导充电站价格的制定。

表6 不同电价形式下充电站用户参与度及收益 (情景1、2对比)

Table 6 User participation and revenue of charging stations under different electricity prices (Comparison of scenarios 1 and 2)

电价形式	最优参与度	充电站收益/元	用户参与度提升量/%	
分时电价	情景1	0.277 4	3 842.13	+3.41
	情景2	0.248 8	3 747.09	+0.49
实时电价1	情景1	0.282 2	3 843.31	+3.89
	情景2	0.257 9	3 752.89	+1.83
实时电价2	情景1	0.293 0	3 917.48	+4.97
	情景2	0.255 3	3 801.80	+0.47

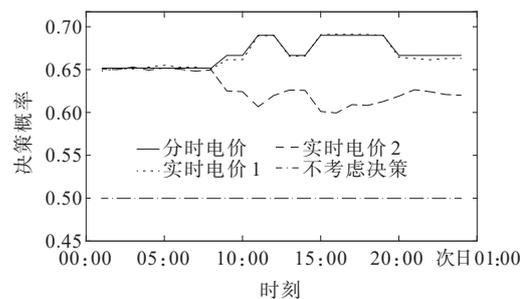


图8 不同电价形式下的决策概率

Figure 8 Decision probability under different electricity prices

4.5 考虑距离因素优化策略的有效性

为了验证本文考虑距离因素优化方法(情景1)的有效性,与不考虑距离因素优化方法(情景3)进行对比。情景3中用户在不同时刻选择本充电站概率为固定值,将其设置为0.8,不同电价形式下不同情景的充电站用户参与度及收益如表7所示,可知不同电价形式下的情景1对于充电站用户参与度的优化效果要好于情景3。这是因为在不同时刻用户

所处位置不同,因而与充电站间的距离也随之发生变化,用户选择充电站的概率也会随之发生变化,而不是固定不变的。通过考虑距离因素对用户选择充电站的影响,能够更加贴近实际地考虑用户在不同时刻选择充电站的概率。

表 7 不同电价形式下充电站用户参与度及收益
(情景 1、3 对比)

Table 7 User participation and revenue of charging stations under different electricity prices
(Comparison of scenarios 1 and 3)

电价形式		最优参与度	充电站收益/元	用户参与度提升量/%
分时 电价	情景 1	0.277 4	3 842.13	+3.41
	情景 3	0.260 3	3 776.46	+1.70
实时 电价 1	情景 1	0.282 2	3 843.31	+3.89
	情景 3	0.265 5	3 771.80	+2.22
实时 电价 2	情景 1	0.293 0	3 917.48	+4.97
	情景 3	0.270 8	3 833.96	+2.75

5 结语

本文考虑了电动汽车用户前往公共充电站充电的用户参与度影响因素,并对影响因素进行量化,以充电站日收益最大和平均用户参与度最大为目标进行求解,优化充电站电价组成,提高充电站收益和用户参与度。结果显示,所提方法能够引导充电站运营商调整充电站电价,实现充电站收益和用户参与度的提高;此外,本文所考虑的用户决策行为不确定性及距离影响因素能够更真实地反映充电站用户数量变化率,进一步使得用户参与度的计算更加合理。

参考文献:

- [1] 人民网. 2022年我国充电桩数量同比增长近100%[EB/OL]. <http://finance.people.com.cn/n1/2023/0215/c1004-32624156.html>,2023-02-15.
People.cn. Nearly 100% year-on-year growth in the number of charging piles in China by 2022[EB/OL]. <http://finance.people.com.cn/n1/2023/0215/c1004-32624156.html>,2023-02-15.
- [2] 广东省能源局. 广东省发展改革委关于广东省十三届人大五次会议第1025号代表建议答复的函[EB/OL]. http://drc.gd.gov.cn/rdjybl/content/post_3949061.html, 2022-06-13.
Energy Bureau of Guangdong Province. Guangdong

- Provincial Development and Reform Commission on the fifth session of the thirteenth session of the Guangdong Provincial People's Congress No. 1025 letter of response to the proposal of the representatives[EB/OL]. http://drc.gd.gov.cn/rdjybl/content/post_3949061.html,2022-06-13.
- [3] 徐箴,孙宏斌,郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2018,38(24):7194-7205+7446.
XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of CSEE,2018,38(24):7194-7205+7446.
- [4] 姚一鸣,赵溶生,李春燕,等. 面向电力系统灵活性的电动汽车控制策略[J]. 电工技术学报,2022,37(11):2813-2824.
YAO Yiming, ZHAO Rongsheng, LI Chunyan, et al. Control strategy of electric vehicles oriented to power system flexibility[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(11):2813-2824.
- [5] 广东省发展和改革委员会. 关于我省新能源汽车用电价格有关问题的通知[EB/OL]. http://drc.gd.gov.cn/ywtz/content/post_833857.html,2018-07-02.
Guangdong Provincial Development and Reform Commission. Notice on issues related to the price of electricity for new energy vehicles in the Guangdong Province[EB/OL]. http://drc.gd.gov.cn/ywtz/content/post_833857.html,2018-07-02.
- [6] 韩妍,丁惜瀛,程锬,等. 考虑用户参与度的电动汽车集群优化调度策略[J]. 控制与信息技术,2021(6):51-56.
HAN Yan, DING Xiying, CHEN Kun, et al. A cluster-based optimal scheduling strategy for electric vehicles considering user participation[J]. Control and Information Technology,2021(6):51-56.
- [7] 张良,孙成龙,蔡国伟,等. 基于PSO算法的电动汽车有序充放电两阶段优化策略[J]. 中国电机工程学报,2022,42(5):1837-1852.
ZHANG Liang, SUN Chenglong, CAI Guowei, et al. Two-stage optimization strategy for coordinated charging and discharging of EVs based on PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(5):1837-1852.
- [8] 朱超婷,杨玲君,崔一铂,等. 考虑需求响应用户参与度的主动配电网优化调度[J]. 电测与仪表,2023,60(4):99-105+154.
ZHU Chaoting, YANG Lingjun, CUI Yibo, et al. Optimal scheduling of active distribution network considering user participation in demand response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 99-105+154.
- [9] 林卉,周一辰,李永刚,等. 基于电动汽车两阶段充电站分配的聚合商定价方法[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(21):44-56.
LIN Hui, ZHOU Yichen, LI Yonggang, et al. Aggregator

- pricing methodology based on two-stage charging station allocation for electric vehicles[J]. *Power System Protection and Control*,2023,51(21):44-56.
- [10] 沈鑫,严松,李妍.考虑交通流量的电动汽车充电站优化规划方法[J]. *智慧电力*,2023,51(7):74-79.
SHEN Xin, YAN Song, LI Yan. Optimal planning method of electric vehicle charging station considering traffic flow[J]. *Smart Power*,2023,51(7):74-79.
- [11] 范晋衡,刘琦颖,曲大鹏,等.考虑EV用户响应特性的激励型DR的削峰效果和各方需求分析[J]. *电力科学与技术学报*,2022,37(6):138-149.
FAN Jinheng, LIU Qiyang, QU Dapeng, et al. Analysis on peak shaving effect and needs of all parties based on incentive demand response considering response characteristics of EV users[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2022,37(6):138-149.
- [12] 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.
- [13] 冯雨龙.聚合商模式下考虑用户参与度的分布式储能优化配置研究[D].南京:南京师范大学,2021.
FENG Yulong. Research on optimal allocation of distributed energy storage considering user participation in aggregator model[D]. Nanjing: Nanjing Normal University,2021.
- [14] 吴佳龙,蔡晔,唐夏菲,等.基于Isard法的充电站服务范围划分与实时定价策略[J]. *电力建设*,2023,44(10):72-83.
WU Jialong, CAI Ye, TANG Xiafei, et al. Isard method based charging station service range division and real-time pricing strategy[J]. *Electric Power Construction*, 2023,44(10):72-83.
- [15] 周凌锋,王杰.考虑用户响应程度的电动汽车分时电价策略[J]. *电测与仪表*,2018,55(22):67-72.
ZHOU Lingfeng, WANG Jie. Time-of-use pricing strategy for electric vehicles considering demand response degree of users[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*,2018,55(22):67-72.
- [16] 王呈轩,樊艳芳,李弘昌,等.直流微网供电的电动汽车无线充电站控制策略[J]. *电网与清洁能源*,2022,38(10):126-134.
WANG Chengxuan, FAN Yanfang, LI Hongchang, et al. Research on the control strategy of electric vehicle wireless charging station powered by DC microgrid[J]. *Power System and Clean Energy*,2022,38(10):126-134.
- [17] 郑若楠,李志浩,唐雅洁,等.考虑居民用户参与度不确定性的激励型需求响应模型与评估[J]. *电力系统自动化*,2022,46(8):154-162.
ZHENG Ruonan, LI Zhihao, TANG Yajie, et al. Incentive demand response model and evaluation considering uncertainty of residential customer participation degree [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(8): 154-162.
- [18] 罗建竹,苏春.基于用户行为和分时电价的充电定价策略优化[J]. *东南大学学报(自然科学版)*,2021,51(6):1109-1116.
LUO Jianzhu, SU Chun. Optimization of charging pricing strategy based on user behavior and time-of-use tariffs[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*,2021,51(6):1109-1116.
- [19] BAO Y, CHANG F, SHI J, et al. An approach for pricing of charging service fees in an electric vehicle public charging station based on prospect theory[J]. *Energies*, 2022,15(14):5308.
- [20] 张育颖,谢品杰.基于NSGA-II算法的互补能源接入方案优化配置[J]. *电力科学与技术学报*,2021,36(5):153-160.
ZHANG Yuying, XIE Pinjie. Research on multi-energy supplement system optimization method based on NSGA-II[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2021,36(5):153-160.
- [21] GAO K, YANG Y, QU X. Diverging effects of subjective prospect values of uncertain time and money[J]. *Communications in Transportation Research*, 2021, 1: 100007.