考虑电动汽车用户成本最优的聚合商主从博弈充放电策略研究

葛 辉[1,2*]，王雯雯[1]，孙浩冉[1]，刘程子[1]，邢 强[1]，杨 艳[1]

[1]南京邮电大学自动化学院、人工智能学院 江苏南京
[2]南京邮电大学碳中和先进技术研究院 江苏南京

【摘要】电动汽车无序充电让新能源为主体的新型电力系统中的多元决策主体均处在高成本、低收益且不安全的运行状态，针对这一问题，本文提出了一种考虑多元决策主体成本最优的电动汽车有序充放电方法。首先，构建了电动汽车用户成本支付函数最优的多目标优化模型，考虑了电动汽车充放电电价的随机性，并引入了可以改变电价的随机变量，把电动汽车用户成本支付函数转化为成本期望和成本偏差，并利用二次综合合理度函数获得最优解策略。其次，构建了电动汽车聚合商放电竞价模型和配电网运营商调度计划策略模型，并应用到双方主从非合作博弈模型中，通过求解非合作博弈纳什均衡，得到多元主体经济性均最优的电动汽车充放电调度策略。最后，通过仿真算例，结果表明上述方法可有效降低用户成本，提高电动汽车聚合商、配电网运营商的经济收益，其中所提出的基于电动汽车聚合商放电竞价的主从非合作博弈方法在有着较好的削峰填谷的消纳功能的同时，也提高了配电网系统的安全性。

【关键词】电动汽车；充放电电价；主从非合作博弈；用户成本；多目标优化模型

【基金项目】国家自然科学基金重大项目（62293500，62293505）、国家自然科学基金面上项目（52077106）

【收稿日期】2025 年 3 月 6 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 7 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250105

Aggregator master-slave game for scheduling strategy of charging and discharging with considering the optimal cost of electric vehicle users

Hui Ge[1,2], Wenwen Wang[1], Haoran Sun[1], Chengzi Liu[1], Qiang Xing[1], Yan Yang[1]*

[1]School of Automation and School of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu
[2]Institute of Carbon Neutrality Advanced Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】The disorderly charging of electric vehicle (EV) makes the multiple decision-makers in the new power system dominated by new energy all in the state of high cost, low income and unsafe operation, for this problem, an orderly charging and discharging method considering the optimal cost of multiple decision-makers is proposed. First of all, a multi-objective optimization model for EV user (EVU) cost payment function is formulated with considering the randomness of EV charging and discharging electricity price. By introducing the random variable which can change the electricity price, the EVU cost payment function is transformed into cost expectation and cost deviation, and the optimal solution strategy can be obtained according to the secondary comprehensive reasonable function. Secondly, the discharge bidding model of EV aggregator (EVA) and the dispatching plan strategy model of

*通讯作者及第一作者简介：葛辉（1983-）男，副教授，博士，主要研究方向为网络攻击下物理信息融合系统的安全控制策略设计和安全控制算法设计；
作者简介：王雯雯（2003-）女，硕士，主要研究方向为规模化电动汽车电网协同优化调度研究；孙浩冉（1999-）男，硕士，主要研究方向为含需求侧响应和规模化电动汽车电网的优化调度等；刘程子（1984-）女，副教授，博士，主要研究方向为磁悬浮轴承本体及控制策略、开关功放控制策略；邢强（1992-）男，讲师，博士，主要研究方向为电动汽车与电网和交通网互动等研究工作；杨艳（1976-）女，副教授，博士，主要研究无轴承电机及其控制系统相关领域。

distribution network operators are constructed, and applied to the non-cooperative game model of both sides. By solving the Nash equilibrium of non-cooperative game, the EV charging and discharging dispatching strategy with the optimal economy of multiple subjects is obtained. Finally, through the simulation examples, the results show that the above method can effectively reduce the EVU cost, improve economic benefits of the EVA and distribution network operators, and the above-mentioned master-slave non-cooperation game based on discharge bidding has a good absorption effect of peak cutting and valley filling function at the same time, also improve the security of the distribution network system.

【Keywords】Electric vehicle; Charge-discharge electricity price; Master-slave non-cooperation game; User cost; Multi-objective optimization model

引言

电动汽车（*Electric Vehicle, EV*）在我国能源转型中的重要地位不断增强，EV 作为一种灵活的用电负荷，同时也被视为一种分布式储能资源，对电力系统和可再生能源的整合产生了深远影响。因此，各级政府出台了一系列激励政策，如购置补贴、免征购置税等，以促进 EV 的销售和普及。同时，为应对 EV 的快速增长，充电桩等基础设施也加快了建设速度。这些措施有效地推动了 EV 市场的蓬勃发展，然而，随着 EV 市场的快速增长，电网过载、能源消耗不平衡、充电桩设施需求等问题层出不穷。首先，EV 的充电需求具有高度不确定性，充电负荷的集中可能造成电网负荷波动和电网的过载问题，预计到 2030 年 EV 高峰负荷充电将达 479GW[1]。其次，由于电动汽车的充电需求与可再生能源的发电时间不匹配，可能会导致可再生能源的浪费，导致弃风弃光的情况出现。此外，充电基础设施的建设和充电站点的分布不均也是 EV 发展面临的挑战之一。基于此，智能化、有序化的充电模式和车网互动将成为实现碳中和的关键措施，EV 将成为用能和储存能源的终端[2]。

为应对上述挑战，需要进行有效的 EV 优化调度管理。EV 作为分布式储能资源，可以根据电网需求实现灵活的放电行为，为电网提供调节性能量。通过智能管理系统，可以根据电网负荷情况和电力需求，合理地安排 EV 的放电计划，在电网峰时段提供辅助能量，以减轻电力系统的负荷压力。规模化 EV 作为可调控的储能单元集群参与电动汽车聚合商（*Electric Vehicle aggregator, EVA*）调控，从而参与电力市场，能够在用电高峰为配电网运营商（*Distribution System Operator，DSO*）提供电能补给，用电低谷进行充电，实现削峰填谷[3,4]、促进电网安全稳定运行的同时，又能为 EV 用户带来收益及减小充电成本。

目前，已有部分学者对 EV 的充放电优化调度以及 EV 放电管理展开了深入研究。在用户充放电行为与意愿方面，文献[5]提出了计及用户意愿的 EVA 主从博弈优化调度策略，通过量化了 EV 用户的参与意愿来提高了 EVA 与 EV 用户的经济性。文献[6]结合用户充放电行为特性，构建了基于供需双方博弈关系的 EV 充放电优化模型。文献[7]通过建立用户的意愿判别函数，设定响应度模拟 EV 用户意愿，确定 EV 调度可行性。文献[8-10]聚焦 EV 的时空行为和用户行为，对 EV 推广和电力系统中的充电与调控等方面进行了研究和建模。上述文献集中在对用户充放电行为与意愿方面进行研究，但并未考虑到市场电价对用户充放电行为的影响。文献[11]建立了计及市场电价不确定性的聚合商多目标区间调度模型，并通过 EVA 对 EV 放电的可控容量进行预测，参与需求侧放电竞价，实现了 EVA 经济性与鲁棒性的均衡。文献[12-15]通过 EVA 整合 EV 充放电负荷参与电力市场投标竞价，考虑非合作博弈，建立策略投标模型。文献[16]通过 EVA 向 DSO 的投标容量和报价与 EV 用户形成日前响应合同，基于此构建以 EVA 为主体的决策模型，减小了 EVA 投标和制定实际调度方案时的决策风险。上述文献通过市场投标竞价，实现电价对 EV 充放电的灵活调度。文献[17]提出计及用户响应度的 EV 充放电调度策略，统筹考虑了 DSO、EVA 以及 EV 用户的三方收益，在实现削峰填谷的同时，保证了 EVA 以及 EV 用户的利益。文献[18-19]构建了 EV 充放电调度的多策略集演化博弈模型以及不同双方的非合作博弈模型，有效平衡了 EV 用户、EVA 和 DSO 三者之间的经济利益。文献[20-22]通过虚拟电厂运营商与

EV 用户的主从博弈定价模型，有效抑制了电网的波动，实现了 DSO、EVA 与 EV 用户的三方利益最大化。上述文献虽然从不同角度研究如何兼顾三主体之间的利益关系，但均未从 EV 用户成本最优的角度出发，以最大化利用 EV 放电行为实现三方的利益均衡。

本文创新点如下：

（1）从 EV 用户成本最优的角度切入，构建计及 EV 不确定充放电电价的调度模型，以成本期望与成本偏差为目标，求解最优解策略。

（2）构建基于 EVA 放电竞价的主从非合作博弈模型，其中 DSO-EVA 主从非合作博弈，以 DSO 为领导者，EVA 为跟随者，以最大化双方收益为效用函数，采用搜寻者优化方法对模型求解，得到用户最优成本、DSO、EVA 最佳充放电策略以及最优收益。

1 EV 调度与主从博弈优化系统架构设计

EV 用户、EVA 和 DSO 三者之间需要进行协同调度和运营、合理分配调度收益以及资源激励，同时平衡各方利益，以建立良好的合作关系。EVA 作为中介机构，通过聚合大量的 EV 资源，向电网运营商提供灵活的调度服务。EVA 的作用是管理和协调 EV 的充放电行为，与电能市场进行交互以实现整体电能系统的有效运营。DSO 负责管理和运营配电网，监控电能流动和维护电能平衡。DSO 的作用是确保配电网的稳定运行，调度和管理各类负荷，包括 EV 的充电和放电行为，同时协调与下层 EVA 的交互。

本文所构建模型系统包含基础调度层与博弈层（如图 1 所示），在基础调度层，主要对象为 EV 用户，用 j 表示（j=1， 2， …， J），其中，J 为 EV 用户的数量，以 EV 用户成本最小为目标计算 EV 与 EVA 交互的电价、电量等信息，得出 EV 最优充放电策略；在博弈层中，主要对象为 EVA，用 i 表示（i=1， 2， …， I），通过基于 EVA 放电竞价的主从非合作博弈，得出 DSO 与 EVA 最优购售电策略。

首先，以基础调度层为基础，在只考虑 EV 用户成本约束的条件下，建立计及 EV 不确定充放电电价的调度模型。在这个调度模型中，考虑到了充电和放电电价的不确定性因素。由于 EV 用户的利益受到充电和放电电价不确定性的影响，为了最大化自身利益，有必要通过不同时间尺度上的电价差异来调整充电或放电行为，根据不同时间段电价的高低，用户可以选择在相对低电价时充电或在相对高电价时放电，以最大化他们的收益。

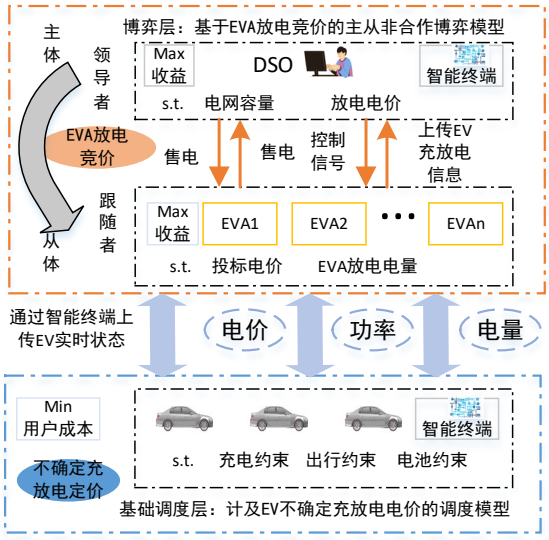

图 1　基础调度与博弈结构框架图

博弈层的各 EVA 通过放电竞价模型计算得出 EV 用户可用的放电电量，EVA 需要确定一个合适的竞价策略通过智能终端系统上传给 DSO，DSO 通过 DSO 调度计划策略模型给出各 EVA 的中标电价和电量来保证每个削峰时段的负荷满足供电的稳定性和可靠性。

在图 1 系统框架下，主从双方可以通过不断的交互和优化来达成平衡，实现整体效益的最大化，DSO 可以根据放电竞价信息和系统情况调整电价和调度策略，以满足电能需求和确保系统稳定运行。EVA 可以基于 DSO 的响应调整放电策略，以最大化聚合业务的收益，同时尽量减少对系统的负面影响。需要指出的是，主从非合作博弈模型中，存在信息不对称、互信度不足等问题，双方需要通过信息共享和博弈优化来增进交互效益。

2 计及 EV 不确定充放电电价的调度模型

2.1 EV 用户成本支付函数

EV 用户在保证自身出行不受影响的前提下，以自身成本最小化为目标，实现与 EVA 之间的协同，EV 用户支付函数表述如下：

$$F_j^{\mathrm{EV}} = F_{t,j}^{b} - F_{t,j}^{s} - M_{t,j} + B_{t,j} \tag{1}$$

$$F_{t,j}^{b}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{X}(\lambda_1\times p_{t,j}^{b}\times d_{t,j}^{b})\times\Delta t \tag{2}$$

$$F_{t,j}^{s}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{X}(\lambda_2\times p_{t,j}^{S}\times d_{t,j}^{S})\times\Delta t \tag{3}$$

$$M_{t,j}=\left|\frac{m}{100}\right|\frac{Y_{t,j}}{E_j}K_j \tag{4}$$

$$B_{t,j}=\omega\times d_{t,j}^{S} \tag{5}$$

式中：$F_{t,j}^{b}$、$F_{t,j}^{s}$分别为EV用户的充电成本以及放电收益；$M_{t,j}$、$B_{t,j}$分别为EV用户的电池损耗电成本以及放电补贴；λ_1、λ_2分别为t时刻充放电电价的随机变量；$p_{t,j}^{b}$、$d_{t,j}^{b}$分别为t时刻EVA提供给EV用户j的充电电价以及EV用户j的充电电量；$p_{t,j}^{S}$、$d_{t,j}^{S}$分别为t时刻EV用户j给EVA的放电电价以及放电电量；m为电池寿命与充放电循环次数的线性关系系数；ω为对应时段的补贴系数；E_j为第j辆EV的电池最大容量；K_j更换电池的成本；Δt为时间间隔；$Y_{t,j}$为t时段第j辆EV的循环充放电电量，受EV的自身荷电状态（*State of Charge，SOC*）影响。其计算公式为：

$$Y_{t,j}=\max\{0,|\mathrm{SOC}_{t,j}-\mathrm{SOC}_{t+1,j}|\times E_j\} \tag{6}$$

式中：$\mathrm{SOC}_{t,j}$为t时段第j辆EV的自身荷电状态。

2.2 EV单体约束条件

EV的单体约束条件指的是对充放电电量的限制以及对电池单体的限制条件，以确保用户的出行不受限以及电池的安全运行和性能表现。约束条件如下：

（1）次日出行约束。EV的充放电行为应满足次日用户的出行需求，保证在EV充放电行为结束后EV的SOC应不低于用户设定的SOC，并且要在EV的最大电池容量以内。

$$\mathrm{SOC}_{t,j}^{\exp}\le\mathrm{SOC}_{t,j}^{end}\le 1 \tag{7}$$

式中：$\mathrm{SOC}_{t,j}^{\exp}$为t时段用户设定的第$j$辆EV的荷电状态，式中：$\mathrm{SOC}_{t,j}^{end}$为t时段充放电行为结束后的第$j$辆EV的荷电状态；

（2）充放电功率约束。电池单体的充放电速率要在规定的范围内。过高的充放电速率可能导致电池变热、容量下降或寿命缩短。

$$p_{\min}\le p_t\le p_{\max} \tag{8}$$

（3）电池电量约束。电池单体的SOC，即电池的剩余电量百分比，也需要在特定的范围内保持。过高或过低的SOC都可能导致电池性能下降或寿命缩短。

$$\mathrm{SOC}_{\min}\le\mathrm{SOC}_t\le\mathrm{SOC}_{\max} \tag{9}$$

2.3 EV用户成本多目标优化模型

计及EV不确定充放电电价，本文引入了可以改变电价的λ随机变量，用于解决求解EV用户成本支付函数的最小化问题，EV用户成本支付函数优化模型如下：

$$\begin{aligned}\min(F_j^{\mathrm{EV}})=\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{X}(&\lambda_1\times p_{t,j}^{b}\times d_{t,j}^{b}-\\&\lambda_2\times p_{t,j}^{S}\times d_{t,j}^{S})\times\Delta t-M_{t,j}+B_{t,j}\end{aligned} \tag{10}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}1\ge\mathrm{SOC}_{end}\ge\mathrm{SOC}_{\exp}\\ p_{\min}\le p_t\le p_{\max}\\ \mathrm{SOC}_{\min}\le\mathrm{SOC}_t\le\mathrm{SOC}_{\max}\\ T_{\min}\le T_t\le T_{\max}\\ \lambda_1\in R_1=[\lambda_1^{\min};\lambda_1^{\max}]\\ \lambda_2\in R_2=[\lambda_2^{\min};\lambda_2^{\max}]\end{cases} \tag{11}$$

式中：$\lambda_1^{\min}$，$\lambda_1^{\max}$分别为随机变量λ_1的最小值与最大值，R_1为随机变量λ_1的所属区间范围；同理λ_2一样。

上述的随机变量λ_1和λ_2保证了EVA所给出的充放电电价在合理的范围内变化，并且把EV充放电成本的各种可能性考虑在内。

EV用户成本支付函数存在两个上下限，分别为λ_1和λ_2取最小值与最大值时，具体函数表达式如下：

$$\begin{aligned}F_j^{\mathrm{EV}}=\min_{\substack{\lambda_1\in R_1\\ \lambda_2\in R_2}}\{\min(&\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{X}(\lambda_1\times p_{t,j}^{b}\times d_{t,j}^{b}-\\&\lambda_2\times p_{t,j}^{S}\times d_{t,j}^{S})\times\Delta t-M_{t,j}+B_{t,j})\}\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}F_j^{d}=\max_{\substack{\lambda_1\in R_1\\ \lambda_2\in R_2}}\{\min(&\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{X}(\lambda_1\times p_{t,j}^{b}\times d_{t,j}^{b}-\\&\lambda_2\times p_{t,j}^{S}\times d_{t,j}^{S})\times\Delta t-M_{t,j}+B_{t,j})\}\end{aligned} \tag{13}$$

式中，F_j^{EV}，F_j^{d}分别为EV用户成本支付函数的下限函数与上限函数，代入λ_1和λ_2分取最小值与最大值，可等价转化为下式：

$$F_j^{\mathrm{EV}}=\min(\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{X}(\lambda_1^{\min}\times p_{t,j}^{b}\times d_{t,j}^{b}-\lambda_2^{\min}\times p_{t,j}^{S}\times d_{t,j}^{S})\times\Delta t-M_{t,j}+B_{t,j}) \tag{14}$$

$$F_j^{d}=\min(\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{X}(\lambda_1^{\max}\times p_{t,j}^{b}\times d_{t,j}^{b}-\lambda_2^{\max}\times p_{t,j}^{S}\times d_{t,j}^{S})\times\Delta t-M_{t,j}+B_{t,j}) \tag{15}$$

从 EV 用户一方来看，EV 用户除了需要保证自身的成本最小化，还需要保证成本最小化的稳定性，即成本每天都尽可能的稳定在一点，而不是忽高忽低。所以原本的单目标成本可以转化为成本最小化以及成本偏差两个目标，即把两个目标的平衡点作为求解目标，具体形式如下：

$$F_j^{exp}=\frac{F_j^{\mathrm{EV}}+F_j^{d}}{2}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{X}\left((\frac{\lambda_1^{\min}+\lambda_1^{\max}}{2}\times p_{t,j}^{b}\times d_{t,j}^{b}-\frac{\lambda_2^{\max}+\lambda_2^{\min}}{2}\times p_{t,j}^{S}\times d_{t,j}^{S})\times\Delta t-M_{t,j}+B_{t,j}\right) \tag{16}$$

$$F_j^{dev}=\frac{F_j^{\mathrm{EV}}-F_j^{d}}{2}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{X}\left((\frac{\lambda_1^{\max}-\lambda_1^{\min}}{2}\times p_{t,j}^{b}\times d_{t,j}^{b}-\frac{\lambda_2^{\max}-\lambda_2^{\min}}{2}\times p_{t,j}^{S}\times d_{t,j}^{S})\times\Delta t\right) \tag{17}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\mathrm{SOC}_{t,j}^{\exp}\le\mathrm{SOC}_{t,j}^{end}\le 1\\ p_{\min}\le p_t\le p_{\max}\\ \mathrm{SOC}_{\min}\le\mathrm{SOC}_t\le\mathrm{SOC}_{\max}\\ T_{\min}\le T_t\le T_{\max}\end{cases} \tag{18}$$

成本期望 F_j^{exp} 表示在特定调度计划下，最大成本和最小成本的平均值，即成本的期望值。成本偏差 F_j^{dev} 则表示在该调度计划下，最大成本和最小成本之间差值的一半。

调度计划中的成本期望指标是用来评估在不同电价波动下的平均成本水平，而成本偏差指标则用于衡量调度策略对电价变化的调节能力。因此，通过优化调度计划，可以同时追求最小化 EV 用户的成本期望和最小化成本偏差这两个目标，以提高用户的成本稳定性和鲁棒性。

2.4 二次综合合理度函数

为了简化模型优化求解的难度，通过把文献[11]的提出的双目标优化转化为模糊满意度函数改进转化为二次综合合理度函数进行计算，改进后的求解函数更能体现出成本期望和成本偏差侧重的不同方面。采用这种方式，更加合理的平衡 EV 用户的成本期望和成本偏差，并寻找使用户成本最优的调度策略。

定义 $\theta_1=F_{j,max}^{exp}-F_{j,min}^{exp}$；$\theta_2=F_{j,max}^{dev}-F_{j,min}^{dev}$。成本期望和成本偏差二次合理度函数如下式：

$$f_{\theta_1}^{exp}(F_j^{exp})=(\frac{F_j^{exp}-F_{j,min}^{exp}}{\theta_1})^2=\frac{\left(F_j^{exp}-\theta_1-F_{j,min}^{exp}\right)^2}{\theta_1^2}+\frac{2F_j^{exp}}{\theta_1}-\frac{\theta_1+2F_{j,min}^{exp}}{\theta_1} \tag{19}$$

$$f_{\theta_2}^{dev}(F_j^{dev})=(\frac{F_j^{dev}-F_{j,max}^{dev}}{\theta_2})^2=\frac{\left(F_j^{dev}-\theta_2-F_{j,max}^{dev}\right)^2}{\theta_2^2}+\frac{2F_j^{dev}}{\theta_2}-\frac{\theta_2+2F_{j,max}^{dev}}{\theta_2} \tag{20}$$

$f_{\theta_1}^{exp}(F_j^{exp})$ 与 $f_{\theta_2}^{dev}(F_j^{exp})$ 为成本期望合理度和成本偏差合理度，是关于成本期望 F_j^{exp} 和成本偏差 F_j^{dev} 的函数，其值越小，则说明成本合理度越好。

则成本期望和成本偏差二次综合合理度函数如下：

$$f_\theta^{fin}=\min\left(k\times f_{\theta_1}^{exp}\left(F_j^{exp}\right),k\times f_{\theta_2}^{dev}\left(F_j^{dev}\right)\right) \tag{21}$$

其中，k 为函数放大系数。

基于式（21），EV 用户成本最优调度策略可推出如下式：

$$f_{\theta,\max}^{fin}=\max(f_{\theta,1}^{fin},f_{\theta,2}^{fin},f_{\theta,3}^{fin}\cdots f_{\theta,n}^{fin}) \tag{22}$$

3 基于 EVA 充放电竞价的主从非合作博弈模型

该模型基于主从博弈理论，由 DSO 和 EVA 两个主体组成。DSO 负责配电网的运营和管理，EVA 负责管理和协调电动车的充电和放电行为。在该模

型中，DSO 和 EVA 之间存在着相互依赖和竞争的关系。DSO 需要根据电动车的需求调整配电网络的运营策略，以满足电动车充电需求并保证电网的安全和稳定运行。EVA 则需要根据电网的运营状态和电动车用户的需求来合理地管理充电和放电行为，以最大程度地满足用户需求并获得最大的经济利益。

3.1 EVA 放电竞价模型构建

日前，配电系统运营商（Distribution System Operator，DSO）需要收集和分析历史用电数据、天气数据、市场需求数据等信息，以便了解未来一段时间内的用电负荷情况。这些数据可以帮助确定削峰时段，削峰时段通常是负荷需求最高、电力供应最紧张的时段。DSO 通过预测情况公布次日需要削峰的时段（$t=1,2,\cdots,T$），以便参与放电竞价的 EVA 可以对次日各时段的响应放电量进行统计。参与放电竞价的 EVA 会根据 DSO 公布的削峰时段，制定相应的放电竞价计划。放电竞价计划通常包括具体的放电量、放电时长等信息。各 EVA 参与竞价的放电电量预测计算公式如下：

$$E_{\mathrm{EVA}_i}^{dc}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J_{\mathrm{EV}}}P_{t,j}^{dc}\times\Delta t \tag{23}$$

式中：$E_{\mathrm{EVA}_i}^{dc}$ 为 EVA_i 对次日需参与削峰时段的响应放电总量的预测值；$P_{t,j}^{dc}$ 为 EVA_i 管辖下第 j 辆 EV 在 t 时段的放电功率；Δt 为削峰的时段的时间间隔。

3.2 DSO 调度计划策略模型

EVA 把 EVA 放电竞价模型的预测电量上传给 DSO，DSO 通过分析 EVA 参与的投标电量和投标电价，所中标的电量首先要满足 t 削峰时段需要削减的最小削减量，然后以最小成本 P 为目标，求解所选取竞标中投标电量和投标电价，以保证每个削峰时段的负荷满足供电的稳定性和可靠性。假设在 DSO 下辖的所有 EVA 中，有 X 家 EVA 参与放电竞价（$i=1,2\cdots,X$），X 家 EVA 在 T 个削峰时段所投标电量可以表示为：

$$D_{t,i}^{s}=\begin{pmatrix}d_{11}^{s} & d_{12}^{s} & \cdots & d_{1X}^{s}\\ d_{21}^{s} & d_{22}^{s} & \cdots & d_{2X}^{s}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ d_{T1}^{s} & d_{T2}^{s} & \cdots & d_{TX}^{s}\end{pmatrix} \tag{24}$$

X 家 EVA 在 T 个削峰时段所投标电价可以表示为：

$$P_{t,i}^{S}=\begin{pmatrix}p_{11}^{S} & p_{21}^{S} & \cdots & p_{T1}^{S}\\ p_{12}^{S} & p_{22}^{S} & \cdots & p_{T2}^{S}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ p_{1X}^{S} & p_{2X}^{S} & \cdots & p_{TX}^{S}\end{pmatrix} \tag{25}$$

则 DSO 调度计划策略模型标准为：

$$P^{s}=\mathrm{tr}(D_{t,i}^{s}\cdot P_{t,i}^{s})\times\Delta t \tag{26}$$

即

$$P^{s}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{X}(p_{t,i}^{S}\times d_{t,i}^{S})\times\Delta t \tag{27}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}E_{\mathrm{EVA}_i}^{dc}\geq d_{t,i}^{S}\geq 0\\ \sum_{i=1}^{x}d_{t,i}^{S}\geq Q_{t}^{\mathrm{DSO}}\end{cases} \tag{28}$$

式中：tr（A）为矩阵 A 的迹，即矩阵 A 的对角线之和；$p_{t,i}^{S}$ 为 t 时段时第 i 个 EVA 的投标电价（元/KWh），也为中标电价；$d_{t,i}^{S}$ 为 t 时段时第 i 个 EVA 的中标电量；Q_{t}^{DSO} 为 DSO 在 t 削峰时段所需要削减的最小削减量。

3.3 DSO-EVA 主从非合作博弈模型构建

3.3.1 DSO 领导者侧

1）DSO 效用函数

在基于EVA放电竞价的主从非合作博弈模型中，DSO 作为主从非合作博弈的决策者，其首要目标是确保电力系统的稳定运行和供电可靠性，合理规划和管理电网负荷，在确保供需平衡，减少停电风险的前提下，通过有效利用 EVA 对 EV 充放电的调度能力，充分利用低负荷时段进行充电，高负荷时进行放电，优化电网运行，降低能源采购成本和网络升级成本。

DSO 的效用主要来自 EVA 的购电活动、支付给 EVA 的中标费用、EVA 中标后未能提供中标的放电量而给 DSO 的补偿费用以及 DSO 的损失费用，如式：

$$F^{\mathrm{DSO}}=F_{t,i}^{b}-F_{t,i}^{s}+F^{*} \tag{29}$$

$$F_{t,i}^{b}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{X}(p_{t,i}^{b}\times d_{t,i}^{b})\times\Delta t \tag{30}$$

$$F_{t,i}^{s}=P^{s}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{X}(p_{t,i}^{S}\times d_{t,i}^{S})\times\Delta t \tag{31}$$

$$F^* = (\alpha - \beta) \cdot (d_{t,i}^S - d_{t,i}^{S^*})^2 \quad (32)$$

式中：$F_{t,i}^b$、$F_{t,i}^s$ 分别为第 i 个 EVA 在 t 时段支付给 DSO 的购电费用、DSO 在 t 时段支付给第 i 个 EVA 的中标费用；F^* 包括 EVA 给 DSO 的补偿费用以及 DSO 的损失费用；$p_{t,i}^b$、$d_{t,i}^b$ 分别为 DSO 在 t 时段给第 i 个 EVA 的报价（元/KWh）、第 i 个 EVA 在 t 时段购买 DSO 的电量；α、β 分别为补偿系数、损失系数（$\alpha > \beta$）；$d_{t,i}^{S^*}$ 为第 i 个 EVA 在 t 时段提供给 DSO 的放电量。

2）DSO 约束条件

电网容量约束：DSO 根据配电网的容量和负荷状况，对 EVA 的充放电容量设置限制。

$$\begin{cases} d_{t,i,\min}^b \le d_{t,i}^b \le d_{t,i,\max}^b \\ d_{t,i,\min}^s \le d_{t,i}^s \le d_{t,i,\max}^s \end{cases} \quad (33)$$

放电电价约束：DSO 在给 EVA 报价时，需要对放电电价的约束，以保护电力市场的利益和避免过度收费情况的发生。

$$p_{t,i,\min}^b \le p_{t,i}^b \le p_{t,i,\max}^b \quad (34)$$

3.3.2 EVA 跟随者侧

1）EVA 效用函数

EVA 作为主从非合作博弈的追随者，EVA 的主要目标之一是通过有效管理 EV 的电池储能，参与电力市场交易以实现收益最大化。EVA 通过参与放电竞价等方式将 EV 电池的储能容量纳入电力市场，以获取收益。则其收益为在参与电力市场交易时的 DSO 的购售电差价与 EVA 中标后未能提供中标的放电量而给 DSO 的补偿费用，如式：

$$F_i^{\mathrm{EVA}} = F_{t,i}^s - F_{t,i}^b - \alpha \cdot (d_{t,i}^S - d_{t,i}^{S^*})^2 \quad (35)$$

2）EVA 约束条件

投标电价约束：对参与放电竞价的 EVA，需要对其投标电价进行约束，以保护电力市场的利益和避免不正当竞争的情况。

$$p_{t,i,\min}^s \le p_{t,i}^s \le p_{t,i,\max}^s \quad (36)$$

EVA 放电电量约束：对参与放电竞价中标的 EVA，需要对其中标后提供给 DSO 的放电量进行约束，避免 DSO 因此带来的过多损失。

$$d_{t,i,\min}^{S^*} \le d_{t,i}^{S^*} \le d_{t,i,\max}^{S^*} \quad (37)$$

3.3.3 主从非合作博弈求解

在该博弈模型中，首先，DSO 根据 EVA 中标电量发布最优电价策略，然后 EVA 通过实际 EV 充电、放电电量的响应量选择是否响应 DSO 提供的电价策略，直至博弈达到纯策略 Nash 均衡。定义博弈模型为 $G = \{I, P, D, F^{\mathrm{DSO}}, F^{\mathrm{EVA}}\}$，其中，$I$ 为 i 个 EVA 参与放电竞价；DSO 的电价策略为 $P_i \in P$；效用函数为 F^{DSO}；EVA 的购售电策略为 $D_i \in P$；效用函数为 F^{EVA}。

1）纯策略 Nash 存在性证明

对策略式 $G = \{I, P, D, F^{\mathrm{DSO}}, F^{\mathrm{EVA}}\}$，若策略集合 P_i、D_i 为 Euclid（欧几里得）空间上的非空、封闭、有界的凸集，并且效用函数 F^{DSO}、F^{EVA} 关于策略组合 $\{P, D\}$ 连续，且关于 P_i、D_i 拟凹。则该博弈模型是存在纯策略 Nash 均衡的[23]。

t 时段内 DSO 给 EVA 报价 $p_{t,i}^b$ 需要满足约束条件式（36），报价 $p_{t,i}^b$ 一直处于合理区间最大与最小值范围内；同理 EVA 的投标电价 $p_{t,i}^s$ 与放电电量 $d_{t,i}^{S^*}$ 也需要满足约束条件式（37），投标电价 $p_{t,i}^s$ 与放电电量 $d_{t,i}^{S^*}$ 一直处于合理区间范围内，即都满足约束条件线性不等式。则 DSO 的策略集 P 与 EVA 的策略集 P, D 都为 Euclid 空间上的非空、封闭、有界的凸集。

拟凹函数，在其定义域内的任意两点 x, y，满足下式：

$$f(ax + (1-a)y) \ge \min[f(x), f(y)] \quad (38)$$

式中 $a \in (0,1)$。

对于 DSO 效用函数与 EVA 效用函数各项均为线性函数，则其效用函数为线性函数，是关于策略集的连续拟凹。

由上，本文所提的博弈模型存在纯策略 Nash 均衡的。

2）主从非合作博弈求解方法

由于该博弈模型较为复杂，传统求解方法难以有效求解，因此采用搜寻者优化[24]（*Seeker Optimization Algorithm, SOA*）对博弈模型进行求解。

SOA 算法基于搜寻者的行为和策略，模拟搜寻者在环境中搜索目标的过程。搜寻者被视为个体，通过不断搜索和改进来寻找最优解。算法通过代表搜寻者的解向量进行优化，其中每个解向量表示一个搜寻者的位置。搜寻者根据自身位置和环境信息进行搜索，并利用本地搜索和全局搜索策略来更新位置和搜索方向。

在博弈开始时，DSO 和 EVA 需要独立地选择初始的策略或行动方案。DSO 会决定电网功率分配、电费价格制定等。EVA 则需要根据电动车用户的需求和市场情况选择合适的充电和放电策略。在博弈过程中，DSO 和 EVA 通过制定各自的策略来追求自身的利益最大化。这种博弈是非合作的，即双方没有直接合作或协商的机制，而是基于自身利益和信息来做出决策。双方的目标是通过选择最优的策略实现自身的利益最大化。

因此，双方可以通过评估博弈结果，确定下一博弈周期的调整策略，直至都达到双方的利益最大化。考虑用户成本最优的聚合商主从博弈充放电策略求解流程图如图 2 所示。

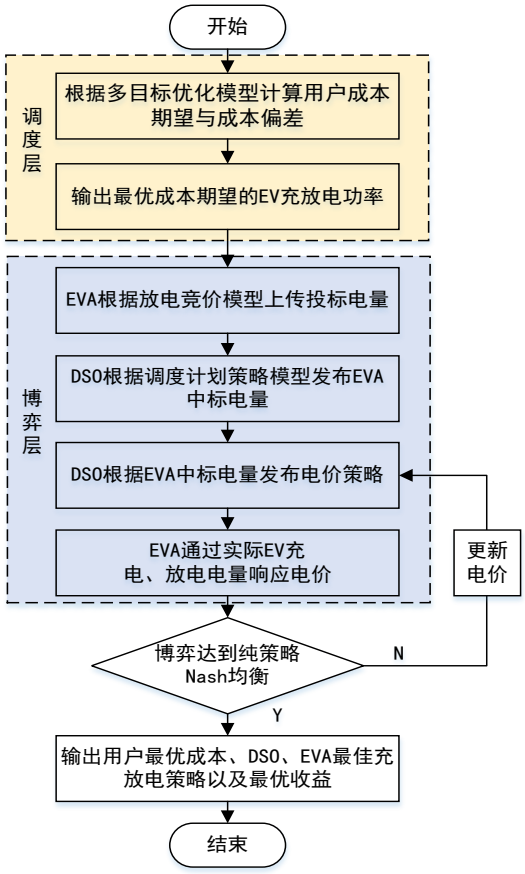

图 2　考虑用户成本最优的聚合商主从博弈充放电策略求解流程图

4 算例分析

4.1 参数设置

本文算例以某地区住宅区负荷为基础负荷，在此住宅区内共有 2000 辆 EV，4 家 EVA，简称为 a、b、c、d。全天调度分为 48 个调度时段，Δt 取为 0.5。为简化模型设置，本文作出如下假设：

1）EV 接入、离开新能源充电桩时刻均服从正态分布，分别为 N（18.6,1.92），N（7.6,1.34），数据来自美国全国家庭交通部调查（*National Household Travel Survey, NHTS*），包括日常非商业性通过各种方式通行，包括通行人员、家庭和车辆特征；

2）EV 接入电网时刻的 SOC 服从 U（0.3,0.1^2）的均匀分布，EV 用户设定离开电网时刻的不小于 0.8 或 0.9，其各占 50%；

3）电池充放电过程中，充电桩以等量的功率来进行操作，其中充电功率为 4 千瓦，放电功率为 6 千瓦，充放电的效率均为 90%；

4）动力电池的容量服从 U（20,30）上的均匀分布,其单位为 kW·h；

5）EV 最大 SOC 设为 95%，最小 SOC 设为 10%，K_j 取 8200 元，m、ω 分别取 0.016、0.15，α、β 分别取 0.85、0.6；

6）所选取住宅区的峰谷分时电价时间划分以及电价如表 1 所示。

表 1　峰谷分时电价表

时段	时间	分时电价/（元）（kw·h）$^{-1}$
峰时段	8：00-11：00、17：00-22：00	1.065
谷时段	00：00-8：00	0.527
平时段	11：00-17：00、22：00-24：00	0.682

4.2 EV 用户成本多目标优化结果分析

为了寻求 EV 用户的最优成本，通过引入电价的不确定性，把用户成本转化为成本期望以及成本偏差两个目标函数得到 EV 用户成本多目标优化模型。即以式（16）、（17）为目标函数，以式（18）为约束条件，求解成本期望与成本偏差的非支配解如表 2 所示。

表 2　成本期望与成本偏差的的非支配解

F_j^{exp}/￥	F_j^{dev}/￥	$f_{\theta_1}^{exp}$	$f_{\theta_2}^{dev}$	f_{θ}^{fin}
12570.49	9695.74	0	1	0
13969.13	9307.57	0.032	0.888	3.2
15290.87	9157.38	0.123	0.846	2.3
15930.71	8577.52	0.188	0.694	18.8
16231.29	7957.51	0.223	0.549	22.3
16509.13	6530.70	0.258	0.279	25.8
17857.69	5970.71	0.466	0.198	19.8
18772.69	4990.87	0.641	0.089	8.9
19295.74	3189.07	0.754	0.0009	0.09
20315.74	2985.67	1	0	0

求解得到 $F_{j,max}^{exp}$、$F_{j,min}^{exp}$ 分别为￥20315.74、￥12570.49，$F_{j,max}^{dev}$、$F_{j,min}^{dev}$ 分别为￥9695.74、￥2985.67，则 θ_1、θ_2 分别为￥7745.24、￥6710.07。F_j^{exp}、F_j^{dev} 的非支配解的成本如表 2 所示。

根据表格 2 的数据，我们可以观察到住宅区 2000 辆 EV 的成本偏差随着成本期望的降低而增加。这意味着当我们追求最低成本时，EV 用户的成本变得非常不稳定。即成本偏差在这种情况下达到了最大值。然而，最优方案是在二次综合合理度函数取得最大值时实现的，从表格 2 中，我们可以观察到二次综合合理度随着成本偏差合理度的减少而先增大后减小的趋势。这意味着最大二次综合合理度对应的数值为表格中的 25.8。在这种情况下，对应的成本期望和成本偏差组成了最优解。综合来看，在寻求最低成本和最低偏差之间存在一种权衡。虽然追求最低成本可能导致较大的成本偏差，但最优方案的实现需要考虑二次综合合理度的最大化。这个权衡考虑了不同因素的综合影响，以确保在成本期望和成本偏差之间取得较好的平衡。

4.3 DSO 调度计划结果分析

本文所选取的住宅区原始基础负荷曲线见本文 4.4 节所示，DSO 根据基础负荷曲线中 17：00-22：00 的负荷量过高，确定 17：00-22：00 这五个时段需要削减负荷，各需要削减的总负荷量分别为 0.5MW.h、1.4MW.h、2.2MW.h、2.5MW.h、1.8MW.h。由于 18：00-21：00 是用电负荷的高峰期，在这个时间段内，如果用电负荷过高超过了电网的负荷承载能力，电网会负荷过载，可能导致电力传输过程中出现故障或损坏。因此在此时间内需要削减的负荷量较多。为了解决这个问题，DSO 与各 EVA 进行了主从非合作博弈来确定中标和投标电量。通过博弈求解，DSO 和 EVA 之间在确定中标和投标电量时会相互影响。这样的博弈过程的目标是实现供需的平衡，同时最大化利益。具体的中标电量和投标电量，如表格 3 所示。

从表 3 的数据来看，EVA 在负荷高峰期选择投标更高的电量，这意味着他们有意识地将更多的电量投放在高负荷时段。这是因为在高负荷时段，电价通常会上升，EVA 可以以更高的价格出售电量，从而获得更高的利润。而 DSO 在选择供电方时，会优先考虑价格较低的投标。会根据众多 EVA 投标的电价中选择最低的电价，以尽量降低成本。EVA 公司希望通过在高负荷时段投放更高的电量和提高电价来获取更高的利润，而：

表 3　各 EVA 投标信息与中标电量

电动汽车聚合商（EVA）	投标电量（MW·h）/投标电价（￥）				
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5
a	0.3/0.7	0.6/0.88	0.2/1.23	0.7/1.15	0.8/1.0
b	0.4/0.68	0.5/0.88	0.5/1.20	1.5/1.0	0.3/1.21
c	0.2/0.7	0.1/0.9	1.5/1.20	0.7/1.15	0.8/1.1
d	0/0.85	0.8/0.85	1.2/1.16	0.1/1.2	0.5/1.1
电动汽车聚合商（EVA）	中标电量（MW·h）				
a	0.1	0.6	—	0.7	0.8
b	0.5	—	—	1.5	—
c	—	—	1.0	0.3	0.8
d	—	0.8	1.2	—	0.2
总需负荷（MW·h）	0.6	1.4	2.2	2.5	1.8

DSO 则希望通过选择最低的电价来降低成本。这种竞争关系体现了市场供需的交互作用，同时也反映了供需双方追求利益最大化的动机。

图 3 为非合作博弈求解得出的电动汽车聚合商（EVA）-a 向 EV 用户提供的最优充电价格、放电价格以及向 DSO 提供的购电价格、售电价格。售电价格中又包括了 DSO 需要削减负荷时间段中，EVA 向 DSO 提供的投标电价。从图中可以看出，EVA 在分时电价的基础上，通过设置不同的充放电电价来引导用户的充电行为。充放电电价被设定为在夜晚负荷较低时期较低，而在早晚负荷高峰时期较高。这样的设定鼓励用户在夜间充电、早晚放电以达到

削峰填谷的目的。EVA 向电网提供的售电电价即投标电价始终高于自己向 DSO 的购电电价，并且在高峰时段的投标电价会更高，这样在保证自己利润的同时，尽可能的利用 EV 用户频繁的充放电行为，将剩余的电能在需求高峰时段反向送回电网。

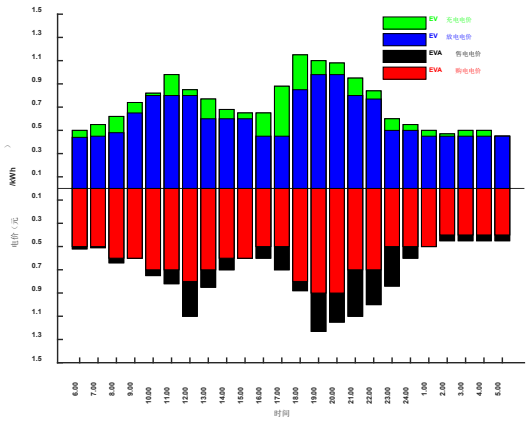

图 3　聚合商 a 实时电价

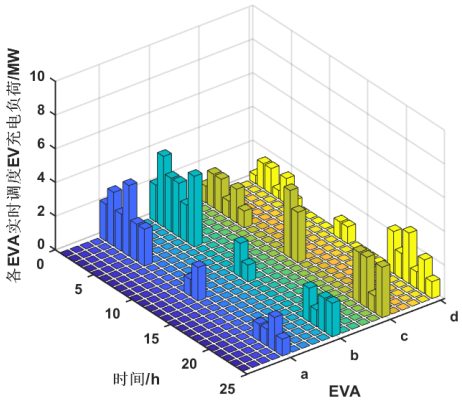

图 4　EVA 实时调度 EV 充电结果

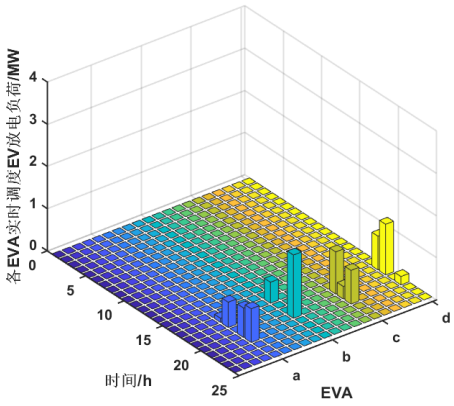

图 5　EVA 实时调度 EV 放电结果

各 EVA 通过对接入自身管辖下的 EV 进行实时充放电调度，得到如图 4、图 5 的 EV 充放电负荷实时调度结果。从图中可以看出，EVA 会选择在用电低峰期对 EV 进行充电调度，在 DSO 需要削峰的时间段对 EV 进行放电调度，这是因为一方面通过选择在低峰或谷时段进行充电，可以充分利用电力系统在这些时段的闲置容量，这样一来，不仅可以最大限度地利用电力资源，还最大限度的减少了成本。另一方面 EVA 在对 EV 进行放电调度时，首先需要满足 DSO 的削峰的需求，放电量必须尽可能的满足自身的中标电量，否则将要面临罚款。

4.4 非合作博弈有效性分析

为体现出本文经济效益以及削峰填谷的有效性，设置了以下三种情形：情形 1 中，无 EVA 作为代理商，采用 EV 无序充放电模型，并且充放电电价采用峰谷分时电价，见表 1；情形 2 中，不考虑 EV 用户的成本，但加入了 EVA 放电竞价的主从非合作博弈模型，EV 用户可以通过放电减小其成本；情形 3 中，既考虑 EV 用户的成本，也加入了 EVA 放电竞价的主从非合作博弈模型，其中各 EVA 电价由非合作博弈求解得出。

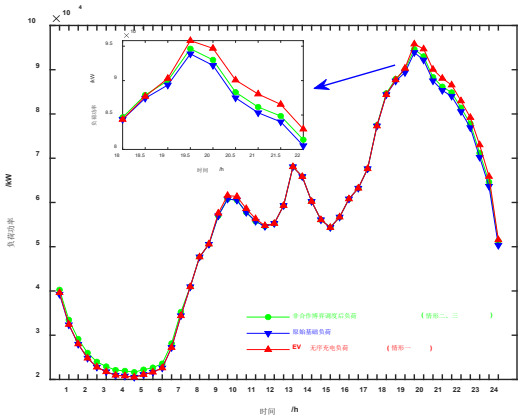

图 6　各情形电网负荷曲线

原始负荷以及各情形下的电网负荷曲线如图 6 所示。从图中可以看出，相比 EV 无序充电模型，经过 EVA 放电竞价的主从非合作博弈模型调度后的电网负荷在高负荷时段能够迅速减少负荷，而在低负荷时段则能够充分利用剩余的电力资源给 EV 充电，有效的平衡了电网的供需关系，达到了较理想的削峰填谷效果。并且从图中可以看出在 18：00-19：00 之间情形一与情形二、三的负荷曲线有个交点，这是因为在 17：00-22：00 之间 EVA 正在对 EV 进行放电调度，由此带来了负荷曲线的下降。

各情形下 EV 用户、EVA、DSO 的经济效益对

比如图 7 和表 4 所示。由图 7 和表 4 可知，情形三下 EV 用户总成本相比情形一降低了 14897 元，这是由于 EV 用户会主动选择在电价较低的时段充电，并通过参与放电调度获取相应补贴。情形三下 EVA 通过在参与电力市场交易时的 DSO 的购售电差价赚取相应的利润，DSO 则通过卖电获取更多经济效益。这使 EVA、DSO 的总收益相比情形二下增长了 1720、7165 元。说明情形三较其他情形经济性最优。

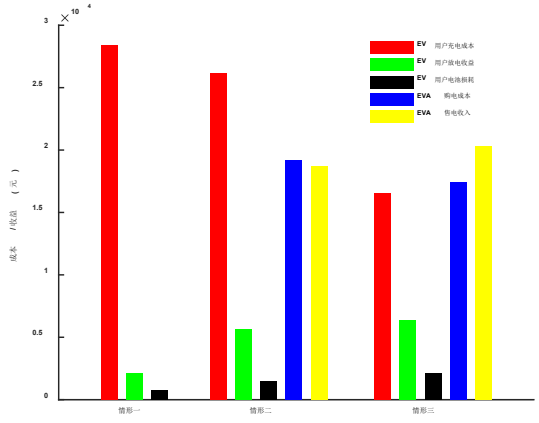

图 7　各情形 EV 与 EVA 经济效益

表 4　各情形 EV 用户、EVA、DSO 经济效益对比

	情形一	情形二	情形三
EV 用户充电：成本/元	28521	26173	16509
EV 用户放电：收益/元	2124	5681	6371
EV 用户电池：损耗/元	781	1511	2146
EV 用户：总成本/元	27178	22003	12284
EVA 购电：成本/元	—	18524	17341
EVA 售电：收益/元	—	19818	20355
EVA 总收益/元	—	1294	3014
DSO 总收益/元	—	25647	32812

综上，情形三下既考虑 EV 用户的成本，并且应用了 EVA 放电竞价的主从非合作博弈模型，即本文所提出的考虑 EV 用户成本最优的聚合商主从博弈充放电策略，有效的降低了 EV 用户的成本，大幅增加了 EVA 和 DSO 的经济收益，实现三者经济价值最大化。

5 结论

针对以新能源为主体的新型电力系统，需要综合考虑多主体之间的经济利益关系问题，本文考虑了使用户成本最优的最佳策略，以放电竞价模型为聚合商的提供决策指导，建立了考虑用户成本最优的聚合商主从博弈充放电策略，主要结论如下：

1）在考虑 EV 用户成本最优时，将成本单目标转化为成本期望与成本偏差两个目标，并以二次合理度函数作为评价成本最优的指标，所得出的结果在最优化 EV 用户成本的同时，有效降低了成本偏差，在成本期望和成本偏差之间取得了较好的平衡。

2）DSO-EVA 主从非合作博弈，以 DSO 为领导者，EVA 为跟随着，以最大化双方收益为效用函数，采用搜寻者优化方法对模型求解，得到用户最优成本、DSO、EVA 最佳充放电策略以及最优收益。

3）本文所提出的考虑 EV 用户成本最优的电动汽车聚合商主从博弈充放电策略有效的平衡了各方的利益需求，仿真表明调度策略可以兼顾实现电网负荷平稳和高效运行的同时，满足了 DSO、EVA 和 EV 用户的利益和需求，实现三者间经济价值的最大化。

参考文献

[1] 魏一凡,韩雪冰,卢兰光等.面向碳中和的新能源汽车与车网互动技术展望[J]. 汽车工程, 2022, 44 (04): 449-464.

[2] 侯贸军,罗春辉,武学伟等.计及 PEV 聚合器的含可再生能源电力系统 AGC 调节功率的协调调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46 (01): 63-70.

[3] 杨镜司, 秦文萍, 史文龙, 等. 基于电动汽车参与调峰定价策略的区域电网两阶段优化调度[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 58-71.

[4] Yue Huanzhan, Zhang Qian, Zeng Xiaosong, et al. Optimal scheduling strategy of electric vehicle cluster based on index evaluation system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 1212-1221.

[5] 房宇轩,胡俊杰,马文帅.计及用户意愿的电动汽车聚合商主从博弈优化调度策略[J].电工技术学报, 1-13[2024-01-30].

[6] 戴朝华,杨帅,叶圣永等.供需双方博弈视角下的 V2G 优化策略[J].西南交通大学学报, 1-10[2024-01-30].

[7] 李怡然,张姝,肖先勇等. V2G 模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (03): 129-135.

[8] 马文帅,胡俊杰,房宇轩等.电动汽车用户参与调控意愿的多代理表征与可信容量量化[J].电力系统自动化,2023,

47(18):122-131.

[9] 黄瑞锦,顾高峰.基于混合 Logit 模型的电动汽车购买意愿影响因素研究[J].交通运输研究,2021,7(01):95-103+114.7.

[10] 吴赋章,杨军,林洋佳等.考虑用户有限理性的电动汽车时空行为特性[J].电工技术学报,2020,35(07):1563-1574.

[11] 陈海瑞,米增强,贾雨龙等.计及电价不确定的电动汽车聚合商区间调度策略[J].电测与仪表,2021,58(12):24-30.

[12] WU Hongyu, SHAHIDEHPOUR, ALABDULWAHAB A, et al. A game theoretic approach to risk-based optimal bidding strategies for electric vehicle aggregators in electricity markets with variable wind energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016,7(1):374-385.

[13] CHEN Lvpeng, YU Tao, CHEN Yongxiang,et al. Real-time optimal scheduling of large-scale electric vehicles: a dynamic non-cooperative game approach[J]. IEEE Access, 2020,8:133633-133644.

[14] 王晛,张华君,张少华.风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J].电力系统自动化,2019, 43(3): 155-162.

[15] 詹祥澎,杨军,韩思宁,等.考虑电动汽车可调度潜力的充电站两阶段市场投标策略[J].电力系统自动化, 2021, 45(10): 86-96.

[16] 潘樟惠,高赐威,刘顺桂.基于需求侧放电竞价的电动汽车充放电调度研究[J].电网技术,2016,40(04):1140-1146.

[17] 李军,梁嘉诚,刘克天等.计及用户响应度的电动汽车充放电优化调度策略[J].南方电网技术,2023,17(08):123-132.

[18] 刘东奇,张曦,钱奕衡.电动汽车集群充放电演化博弈协同策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(16):84-93.

[19] 蔡国伟,姜雨晴,黄南天等.电力需求响应机制下基于多主体双层博弈的规模化电动汽车充放电优化调度[J].中国电机工程学报,2023,43(01):85-99.

[20] 马永翔,马少洁,闫群民等. 虚拟电厂与电动汽车用户的主从博弈定价策略[J].华北电力大学学报(自然科学版), 1-10[2024-01-30].

[21] 刘卫亮,闫倩文,张启亮等. 基于虚拟电厂区间主从博弈的车网互动优化调度[J].系统仿真学报, 1-13[2024-01-30].

[22] 李强,朱丹丹,黄地等. 虚拟电厂运营商与电动汽车用户的主从博弈定价策略[J].电力工程技术, 2022, 41 (04): 183-191.

[23] CHAI Bo, CHEN Jiming, YANG Zaiyue, et al. Demand response management with multiple utility companies: a two-level game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2):722-731.

[24] 戴朝华.搜寻者优化算法及其应用研究[D].西南交通大学,2009.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OPEN ACCESS