

控制与决策

Control and Decision

基于可信性理论的电动汽车聚合参与日前市场竞标优化方法

周鹏, 曾君, 黄向敏, 王鹏旭, 黄智鹏, 刘俊峰

引用本文:

周鹏, 曾君, 黄向敏, 等. 基于可信性理论的电动汽车聚合参与日前市场竞标优化方法[J]. *控制与决策*, 2025, 40(8): 2373-2382.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0968>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于弱关联的自适应高维多目标进化算法

A weak association-based adaptive evolutionary algorithm for manyobjective optimization

控制与决策. 2021, 36(8): 1804-1814 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1723>

基于正态云模型的状态转移算法求解多目标柔性作业车间调度问题

State transition algorithm based on normal cloud model for solving multiobjective flexible job shop scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(5): 1181-1190 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1233>

基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 885-892 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

基于向量角分解的高维多目标进化算法

Many-objective evolutionary algorithm based on vector angle decomposition

控制与决策. 2021, 36(3): 761-768 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0925>

基于微波无线传能的动态无线传能链路多目标规划问题

Multi-objective planning of dynamic wireless energy transmission link based on microwave wireless energy transmission

控制与决策. 2021, 36(12): 3039-3048 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1187>

基于可信性理论的电动汽车聚合参与日前市场 竞标优化方法

周鹏¹, 曾君^{1†}, 黄向敏¹, 王鹏旭¹, 黄智鹏², 刘俊峰³

(1. 华南理工大学 电力学院, 广州 510640; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510062;
3. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广州 510640)

摘要: 随着电池技术的逐渐成熟和新能源的快速发展, 电动汽车 (EV) 已成为未来电网的重要组成部分, 其作为辅助调频资源的汇聚调度已成为当前研究热点. 为了更好地管理和利用 EV 资源的潜力, 聚合商应运而生. 首先, 考虑 EV 集群参与调频服务的主观意愿度和客观出行行为, 研究评估得到 EV 集群的可调频容量, 并在此基础上讨论聚合商参与日前市场 (DAM) 竞价的策略; 然后, 引入可信性理论来描述竞标过程的不确定性, 同时构建聚合商参与竞标的收益模型并改写, 提出一种基于可信性理论的三目标结构优化模型; 最后, 采用 NSGA-II 算法对模型进行求解. 仿真结果表明, 该模型能够在为聚合商提供多样化的竞价策略选择的同时, 提高其参与辅助调频服务的经济可行性和稳定性.

关键词: 电动汽车; 聚合商; 主观意愿; 可信性理论; 辅助调频; 三目标结构优化模型

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0968

引用格式: 周鹏, 曾君, 黄向敏, 等. 基于可信性理论的电动汽车聚合参与日前市场竞标优化方法 [J]. 控制与决策, 2025, 40(8): 2373-2382.

An optimization method for electric vehicle aggregation to participate in day-ahead market bidding based on credibility theory

ZHOU Peng¹, ZENG Jun^{1†}, HUANG Xiang-min¹, WANG Peng-xu¹, HUANG Zhi-peng², LIU Jun-feng³

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangdong Electric Power Science Academe, Guangzhou 510062, China; 3. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: As battery technology matures and new energy sources advance, electric vehicles (EVs) are increasingly integral to future power grids. Aggregating and dispatching EVs for frequency regulation has emerged as a research focus. This study examines the subjective willingness and objective travel behaviors of EV clusters participating in frequency regulation services, quantitatively assessing their frequency modulation capacity. A tri-objective optimization model based on credibility theory is proposed to analyze aggregator bidding strategies in the electricity day-ahead market (DAM), incorporating a reformulated revenue framework. The non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) is used to derive Pareto-optimal solutions. Simulation results indicate that the proposed model enhances the economic feasibility and stability of aggregator participation in frequency regulation services and provides diverse bidding strategy options.

Keywords: electric vehicles; aggregator entities; subjective willingness; credibility theory; auxiliary frequency regulation; tri-objective structural optimization model

0 引言

随着电动汽车 (EV) 保有量的大规模增长, EV

正逐步成为新型电网的重要组成部分. 处于停放状态时 EV 的闲置电池系统功率曲线具有快速斜坡特

收稿日期: 2024-08-14; 录用日期: 2025-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62173148, 52377186); 广东省自然科学基金项目 (2022A1515010150, 2023A1515010184, 2024A1515012428); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2022A1515240026).

责任编辑: 王燕舞.

†通信作者. E-mail: junzeng@scut.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

性,若能够有效利用,则EV可成为优异的系统灵活性资源^[1].车网互动是未来应对大规模电动汽车有序接入电网的关键和主要途径.但是,EV个体容量有限、分散,且受出行需求、EV用户个体主观性等因素影响,具有强不确定性,聚合和准确评估能力是车网互动的最大难点和挑战,是推进车网互动的关键^[2].

目前关于车网互动的研究,EV聚合参与辅助调频是最常见的场景,其中的关键在于EV聚合的可调频容量(ARC)评估以及参与调频市场竞标策略的研究.从EV聚合可调频容量评估方面来看,现有研究主要围绕EV用户出行行为进行考虑.文献[3-5]基于EV用户的出行行为采用了大数据分析方法得到ARC;文献[6-7]采用随机规划方法生成了EV出行随机场景,进而求解随机场景下EV的预期收益最大化的优化问题以得到ARC;文献[8-9]采用了极限场景法,涵盖了EV集群出行不确定性的取值空间,有效提高了ARC评估结果的准确性.这些方法为EV聚合ARC的研究提供了有益参考,但是,未能考虑EV用户对调频服务响应的主观特性,缺少了EV用户参与调频服务意愿程度对ARC影响的分析.

从聚合商参与DAM竞标策略的研究来看,调频市场分为日前电力市场(DAM)和实时电力市场(RTM),因此,聚合商参与DAM竞标的策略选择不仅与DAM紧密联系,且与RTM市场出清价格以及调频日EV集群提供的可调频容量等因素息息相关.早期研究多通过数据统计来描述和假定RTM中的不确定性因素,采用确定性等价方法来求解聚合商的竞标策略^[10].文献[11-12]引入了两阶段随机规划方法来分析不确定性对于聚合商DAM竞标收益的影响,通过在随机生成的若干场景中寻找一种最大化其预期收益的投标策略;文献[13]通过建立风险约束均值-方差模型来描述聚合商收益的不确定性,优化求解了聚合商的竞价策略.此外,各种风险评估方法,如机会约束算法^[14]和条件风险价值(CVaR)^[15]等用于聚合商投资风险的量化评估,在一定程度上降低了潜在风险.然而,以上研究鲜有具体量化RTM市场出清价格的不确定性,同时,较少考虑调频日EV集群ARC对于聚合商风险和收益带来的影响,因此,寻求一种多维度描述不确定性的方法,对于提高聚合商的DAM竞标效率具有重要意义.基于此,本文引入可信性理论中的可信性测度,其不仅可以多维度地描述收益和风险,且能够处理变量的不确定性和随机性.

综上所述,本文从聚合商的角度,面向EV个体多样性和分散性,提出一种考虑EV集群参与调频服务意愿的ARC评估方法,并引入可信性理论,构建一种基于调频能力系数的聚合商DAM竞标多目标优化模型.本文主要内容如下:1)基于EV集群充电客观规律,从经济激励和充电需求两个维度对EV参与调频服务意愿行为量化建模,完成EV集群主客观行为融合建模;2)引入调频能力系数,基于可信性理论,通过期望、熵以及偏度的定义充分描述聚合商参与DAM竞标收益的不确定性,并基于可信性测度理论刻画RTM调频出清价格对于聚合商竞标策略的影响,从而建立改进的期望-偏度-熵三目标优化模型.仿真实验结果表明,聚合商采用基于该模型优化后的策略表现出更优越的经济性和风险规避能力.

1 系统介绍

本文构建了EV集群参与电网辅助调频系统,如图1所示.该系统主要由EV集群、聚合商、电力调度中心(ISO)构成.EV个体接入充电桩后,其作为可调度资源参与电网调频服务潜力有限,因此,聚合商将它们汇聚形成EV集群,同时制定它们的充放电计划.基于汇聚得到的EV集群资源,聚合商在DAM中与ISO进行交易,并在RTM中调度EV可调频容量给电网提供辅助调频服务.聚合商始终被视为价格接受者,即使提交零价格竞标,ISO也可以按照市场出清价格支付^[16].同时,聚合商支付EV参与调频服务的经济激励也与市场出清价格成正比,从而调动EV在调频日参与辅助服务的积极性^[17-18].

ISO控制调度系统内的弹性资源,并提高整个电网系统的资源协同合作能力^[19].聚合商在DAM中评估RTM中EV集群提供的分时调频容量,进而参与DAM竞标,并与ISO签约.ISO将拟好的交易合同授予聚合商,并制定聚合商应在RTM中提供的调频容量.同时,ISO会根据合约量与EV集群实际提供调频容量的差值,在一定程度上对聚合商实行经济惩罚.

从聚合商参与市场的决策时序角度来看,聚合商在调频日前一天向ISO上报竞标容量并制定第2天EV集群的充放电计划,在调频日中调度EV集群调频容量参与辅助服务,在调频日后基于前两日的市场数据等信息结算总收益.

本文从聚合商的角度出发,围绕聚合商向下与EV集群交互,以及向上与ISO交互两个环节,分别阐述聚合商对EV集群聚合得到的ARC评估方法,

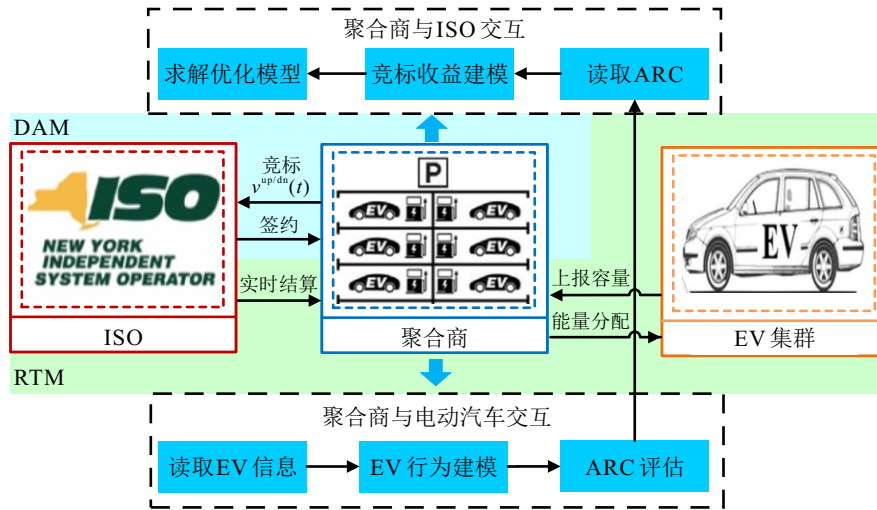


图1 系统介绍

以及聚合商在评估基础上与 ISO 进行 DAM 交易的利益最大化方法, 如图 1 虚线框内容所示。

2 电动汽车集群可调频容量评估

2.1 电动汽车充电行为特性建模

EV 充电行为与其出行信息、接入或离开充电桩的时间以及充电时荷电状态等息息相关, 因此, 本文通过获取 EV 集群入网时刻分布、EV 集群离网时刻分布、EV 集群入网 SOC 分布以及 EV 集群离网 SOC 分布等信息, 建立 EV 集群的充电行为特性模型。

2.1.1 电动汽车集群入网时刻分布

根据 2017 年美国交通部 (NHTS) 对美国车辆出行的调查结果^[20], 本文设定 EV 集群入网时刻分布满足正态分布, 其概率密度函数为

$$f_{IN}(t) = \frac{1}{\sigma_{IN}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \mu_{IN})^2}{2\sigma_{IN}^2}\right]. \quad (1)$$

其中: $f_{IN}(t)$ 为 EV 集群入网时刻的概率密度函数, μ_{IN} 、 σ_{IN} 分别为期望值和标准差。

2.1.2 电动汽车集群离网时刻分布

与入网时刻分布相似, EV 集群离网时刻分布也满足正态分布, 其概率密度函数为

$$f_{OUT}(t) = \frac{1}{\sigma_{OUT}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \mu_{OUT})^2}{2\sigma_{OUT}^2}\right]. \quad (2)$$

其中: $f_{OUT}(t)$ 为 EV 集群离网时刻的概率密度函数, μ_{OUT} 、 σ_{OUT} 分别为期望值和标准差。

2.1.3 电动汽车集群入网 SOC 分布

EV 入网的 SOC 值由该 EV 入网前最近一次出行的耗电量、出行前离网 SOC 以及电池容量决定。EV 出行耗电量可由出行里程和每公里出行实际能耗率计算得到。根据 2017 年 NHTS 的调查结果^[20], 本文设定 EV 集群的日出行里程 D 满足对数正态分布, 其概率密度函数为

$$f_{Tr}(D) = \frac{1}{D\sigma_{Tr}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln D - \mu_{Tr})^2}{2\sigma_{Tr}^2}\right]. \quad (3)$$

其中: $f_{Tr}(D)$ 为 EV 集群日出行里程的概率密度函数, μ_{Tr} 、 σ_{Tr} 分别为期望值和标准差。

实际能耗率主要受到环境温度和交通状况的影响^[20]。温度与能耗率间关系的系数 K_{at} 为

$$K_{at} = k_1T^3 + k_2T^2 + k_3T + c_1, \quad (4)$$

其中 k_1 、 k_2 、 k_3 以及 c_1 为参考调查结果^[18] 数据拟合得到的系数。交通路况与实际能耗率间的关系 K_{tc} 如下所示:

$$K_{tc} = \begin{cases} (v/c)^2/(2\beta^2), & 0 \leq v/c \leq \beta; \\ 1 - (v - c)^2/[2c^2(1 - \beta)^2], & \beta \leq v/c \leq 1; \\ 1, & v/c \geq 1. \end{cases} \quad (5)$$

这里: c 、 β 分别为道路的额定通行能力和可靠性系数; v 为实际交通流量, 其值可从车联网实时获取。能耗率为

$$w = (aK_{at} + bK_{tc})w_{st}. \quad (6)$$

其中: w_{st} 为电动汽车的标称能耗率, a 、 b 分别为环境温度系数和交通状况系数的影响权重。

由 EV 两次入网充电间的耗电量 ΔSOC 得到 EV 入网 SOC 为

$$\Delta SOC = D \times w, \quad (7)$$

$$SOC_{IN} = \left(SOC'_{OUT} - \frac{\Delta SOC}{C}\right) \times 100\%. \quad (8)$$

其中: SOC_{IN} 为电动汽车入网时刻 SOC, SOC'_{OUT} 为电动汽车上次离网时刻 SOC, C 为电池容量, D 、 w 分别为出行里程和实际能耗率。

2.1.4 电动汽车集群离网 SOC 分布

由于用户需要首先满足自身出行需求, 对 EV 离网的 SOC 有一定要求, 且离网 SOC 满足正态分

布. EV 集群离网 SOC 的概率密度函数为

$$f_{\text{OUT}}(s) = \frac{1}{\sigma_{\text{sOUT}}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(s - \mu_{\text{sOUT}})^2}{2\sigma_{\text{sOUT}}^2}\right]. \quad (9)$$

其中: $f_{\text{OUT}}(s)$ 为电动汽车集群离网时刻的概率密度函数, μ_{sOUT} 、 σ_{sOUT} 分别为期望值和标准差.

2.2 电动汽车意愿行为特性建模

EV 用户普遍具有主观性, 而入网 EV 对于是否接受聚合商调度参与辅助服务有考量指标, 其中主要包括经济性和出行需求. 因此, 本文基于经济激励和充电时间裕度两个因素对 EV 参与服务的意愿度进行建模.

2.2.1 电动汽车经济激励意愿度

EV 用户参与辅助服务并获取聚合商支付的经济激励, 本文将其获取的实际经济激励与预期经济激励的比值定义为激励系数, 如下所示:

$$r_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_{i,E}}. \quad (10)$$

其中: r_i 为第 i 辆 EV 用户的激励系数, α_i 、 $\alpha_{i,E}$ 分别为第 i 辆 EV 用户实际获取的经济激励和预期获取的经济激励. 当 $r_i < 1$ 时, 用户参与辅助服务意愿低, 大概率不提供可调频容量; 当 $r_i = 1$ 时, 用户参与辅助服务意愿具有不确定性, 一般可提供可调频容量; 当 $r_i > 1$ 时, 用户参与辅助服务意愿高, 大概率提供可调频容量. 为表征用户参与服务的意愿度, 本文引用改进的 Sigmoid 函数对意愿度进行建模, 具体如下所示:

$$\phi_{i,1} = \frac{1}{1 + h_1 \times e^{-k_1(r_i-1)}}. \quad (11)$$

这里: $\phi_{i,1}$ 为第 i 辆 EV 用户的经济激励意愿度, h_1 和 k_1 为待设定的参数.

2.2.2 电动汽车充电时间裕度接受度

在现实情况中, 若 EV 实际离网时刻 t_{OUT} 相较于预期离网时刻 t'_{OUT} 提前, 则此时 EV 实际离网时的 SOC 可能不满足其出行需求. 因此, EV 用户充电时间也会影响他们参与辅助服务的积极性.

第 i 辆 EV 的最小充电时间为

$$T_{i,\text{set}} = t_{i,\text{OUT}} - t_{i,\text{IN}}, \quad (12)$$

$$T_{i,\text{min}} = \frac{(\text{SOC}_{i,\text{OUT}} - \text{SOC}_{i,\text{IN}}) \times C_{i,B}}{\eta_i \times P_{i,\text{max}}^c}. \quad (13)$$

其中: $T_{i,\text{set}}$ 为第 i 辆 EV 的充电总时长, η_i 、 $C_{i,B}$ 分别为其充电效率和电池额定容量, $P_{i,\text{max}}^c$ 为其最大充电功率. 基于此, 定义充电时间裕度系数为

$$T_i = \frac{T_{i,\text{set}} - T_{i,\text{min}}}{T_{i,\text{min}}}. \quad (14)$$

与第 2.2.1 节类似, 定义 EV 充电裕度接受度为

$$\phi_{i,2} = \frac{1}{1 + h_2 \times e^{-k_2(T_i-1)}}. \quad (15)$$

这里: $\phi_{i,2}$ 为第 i 辆 EV 用户的充电裕度接受度, h_2 和 k_2 为待设定的参数.

2.2.3 电动汽车参加辅助服务意愿度

本文采用熵权法^[21]对 EV 经济激励意愿度和充电裕度接受度进行赋权, 从而得到第 i 辆 EV 用户的参与辅助服务意愿度为

$$\phi_i = \omega_1 \phi_{i,1} + \omega_2 \phi_{i,2}. \quad (16)$$

其中: ϕ_i 为第 i 辆 EV 用户的意愿度, $\phi_{i,1}$ 、 $\phi_{i,2}$ 分别为第 i 辆 EV 用户的经济激励意愿度和充电裕度接受度, ω_1 和 ω_2 分别为对应的权重.

2.3 考虑用户意愿度的 EV 集群可调频容量评估

当 EV 接入充电桩时, 聚合商可以调整其充放电功率, 使其功率上调或下调. 基于此, 单个 EV 的可调频容量为

$$\Delta P_i^{\text{up}} = P_i - P_{i,\text{max}}^d, \quad \Delta P_i^{\text{dn}} = P_{i,\text{max}}^c - P_i. \quad (17)$$

其中: ΔP_i^{up} 、 ΔP_i^{dn} 分别为第 i 辆 EV 的向上可调频容量和向下可调频容量, $P_{i,\text{max}}^c$ 、 $P_{i,\text{max}}^d$ 分别为第 i 辆 EV 的最大充电和放电功率, P_i 为第 i 辆 EV 的实际功率.

结合第 2.2 节、第 2.3 节的 EV 充电行为和意愿行为特性建模, 基于式 (1) ~ (9) 和式 (12) ~ (15) 得到充电时间裕度系数, 基于式 (10) 和 (11) 得到经济激励意愿度, 有 EV 集群可调频容量评估计算方法如下所示:

$$\begin{aligned} \text{ARCs}^{\text{up}} &= \sum_{i=1}^n \Delta P_i^{\text{up}} \times \phi_i, \\ \text{ARCs}^{\text{dn}} &= \sum_{i=1}^n \Delta P_i^{\text{dn}} \times \phi_i. \end{aligned} \quad (18)$$

其中: ARCs^{up} 、 ARCs^{dn} 分别为 EV 集群的向上可调频容量和向下可调频容量, n 为 EV 数量.

3 基于期望-熵-偏度改进模型的聚合商日前市场竞标策略研究

本文基于可信性理论中的可信性测度描述了 RTM 出清价格的不确定性, 并引入调频能力系数, 建立了基于期望-熵-偏度三目标改进的优化模型.

3.1 可信性理论

定理 1^[22] 对于任意实数 λ_1 和 λ_2 , E 、 H 、 S 分别为期望、熵、偏度, 则有

$$E[\lambda_1 \xi + \lambda_2] = \lambda_1 E[\xi] + \lambda_2. \quad (19)$$

特别地, 当 ξ 为三角模糊数时, 若其三元组为 (a, b, c) ,

且 $a < b < c$, 则有

$$\begin{aligned} E[\xi] &= \frac{a + 2b + c}{4}, \quad H[\xi] = \frac{c - a}{2}, \\ S[\xi] &= \frac{(c - a)^2(c - 2b + a)}{32}. \end{aligned} \quad (20)$$

定理 2^[22] 模糊变量的期望: 设 ξ 和 η 为一对相互独立的三角模糊数. 其中: $\xi = (a_1, a_2, a_3)$, $\eta = (b_1, b_2, b_3)$. 则其与 $\xi + \eta$ 亦为三角模糊数, 且有

$$\xi + \eta = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3). \quad (21)$$

定理 3^[22] 设 ξ 为一个三角模糊数, 其三元组为 (a, b, c) , λ 为一个实数, 则有

$$\begin{aligned} \lambda\xi &= \begin{cases} (\lambda a, \lambda b, \lambda c), & \lambda \geq 0; \\ (\lambda c, \lambda b, \lambda a), & \lambda < 0; \end{cases} \\ H[\xi + \lambda] &= H[\xi]; \quad S[\xi + \lambda] = S[\xi]. \end{aligned} \quad (22)$$

3.2 基于可信性理论的聚合商竞标策略建模

现实情况下市场信息有限, 因此, EV 集群在调频日能够提供的可调频容量随机性较高, 同时, RTM 调频出清价格也具有一定波动性. 聚合商在调频日后结算的总收益 R 为

$$\begin{aligned} R &= \sum_{t=1}^{24} (p_{\text{DAM}}^{\text{up}}(t)v^{\text{up}}(t) + p_{\text{DAM}}^{\text{dn}}(t)v^{\text{dn}}(t) + \\ & p_{\text{RTM}}^{\text{up}}(t)\Delta v^{\text{up}}(t) + p_{\text{RTM}}^{\text{dn}}(t)\Delta v^{\text{dn}}(t) - \\ & U^{\text{up}}(t) - U^{\text{dn}}(t) - C(t)). \end{aligned} \quad (23)$$

其中: $v^{\text{up}}(t)$ 和 $v^{\text{dn}}(t)$ 分别为聚合商与 ISO 签约的 EV 集群分时向上调频容量和分时向下调频容量, $p_{\text{DAM}}^{\text{up}}(t)$ 和 $p_{\text{DAM}}^{\text{dn}}(t)$ 分别为 DAM 中分时向上调频容量和分时向下调频容量的出清价格, $p_{\text{RTM}}^{\text{up}}(t)$ 和 $p_{\text{RTM}}^{\text{dn}}(t)$ 则为 RTM 中的出清价格, $\Delta v^{\text{up}}(t)$ 和 $\Delta v^{\text{dn}}(t)$ 为调频日聚合商提供的 EV 集群调频容量与合约容量的差值, $U^{\text{up}}(t)$ 和 $U^{\text{dn}}(t)$ 分别为聚合商在调频日由于交付的向上调频容量和向下调频容量与合约量相差过大而面临的罚款, $C(t)$ 为聚合商支付用户响应服务的费用, 有

$$\begin{cases} \Delta v^{\text{up}}(t) = \sum_{i \in N} v_i^{\text{up}}(t) - v^{\text{up}}(t), \\ \Delta v^{\text{dn}}(t) = \sum_{i \in N} v_i^{\text{dn}}(t) - v^{\text{dn}}(t), \\ C(t) = \lambda(P^c(t) - P^d(t)), \\ U^{\text{up}}(t) = \\ d^+ \left(\frac{|-\Delta v^{\text{up}}(t) - \theta v^{\text{up}}(t)| - \Delta v^{\text{up}}(t) - \theta v^{\text{up}}(t)}{2} \right), \\ U^{\text{dn}}(t) = \\ d^- \left(\frac{|-\Delta v^{\text{dn}}(t) - \theta v^{\text{dn}}(t)| - \Delta v^{\text{dn}}(t) - \theta v^{\text{dn}}(t)}{2} \right). \end{cases} \quad (24)$$

这里: θ 为 ISO 允许的合约容量与实际容量偏差的百分比; d^+ 、 d^- 分别为 ISO 对聚合商向上调频和向下调频违约量的每单位罚款; $\sum_{i \in N} v_i^{\text{up}}(t)$ 、 $\sum_{i \in N} v_i^{\text{dn}}(t)$ 为调频日 EV 集群实际提供的分时可调频容量, 其计算方法参见第 2.3 节, 主要受到聚合商在调频日制定的充放电计划以及经济激励 λ 等因素的影响.

3.2.1 基于可信性理论的模糊化建模

取 $p_{\text{RTM}}^{\text{up}}(t)$ 和 $p_{\text{RTM}}^{\text{dn}}(t)$ 为三角模糊数, 有

$$p_{\text{RTM}}^{\text{up}}(t) = (a_1, b_1, c_1), \quad p_{\text{RTM}}^{\text{dn}}(t) = (a_2, b_2, c_2). \quad (25)$$

不妨假设 $\Delta v^{\text{up}}(t)$, $\Delta v^{\text{dn}}(t) > 0$ (这里的正负性不会影响下文 3 个目标的计算), 由定理 2 和定理 3 可知, 收益 $R(t)$ 也为三角模糊数, 即

$$\begin{aligned} R(t) &= (\Delta v^{\text{up}}(t)a_1 + \Delta v^{\text{dn}}(t)a_2, \\ & \Delta v^{\text{up}}(t)b_1 + \Delta v^{\text{dn}}(t)b_2, \\ & \Delta v^{\text{up}}(t)c_1 + \Delta v^{\text{dn}}(t)c_2). \end{aligned} \quad (26)$$

考虑到分时调频容量变量在调频日中每个时段的随机性, 本文进一步提出基于时段 t 的调频能力系数 $\text{COP}_m(t)$, 如下所示:

$$\text{COP}_m(t) = \frac{v^{\text{up}}(t) + v^{\text{dn}}(t)}{\sum_{t=1}^{24} (v^{\text{up}}(t) + v^{\text{dn}}(t))}, \quad t \in H. \quad (27)$$

由定理 1 ~ 定理 3, 结合调频能力系数, 收益 R 的期望 E 、熵 S 、偏度 H 分别为

$$\begin{aligned} E &= \sum_{t=1}^{24} ([\Delta v^{\text{up}}(t)(a_1 + 2b_1 + c_1) + \\ & \Delta v^{\text{dn}}(t)(a_2 + 2b_2 + c_2)]/4 + \\ & p_{\text{DAM}}^{\text{up}}(t)v^{\text{up}}(t) + p_{\text{DAM}}^{\text{dn}}(t)v^{\text{dn}}(t) - U^{\text{up}}(t) - \\ & U^{\text{dn}}(t) - C(t)) \times \text{COP}_m(t), \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} S &= \sum_{t=1}^{24} \left(\frac{\Delta v^{\text{up}}(t)(c_1 - a_1) + \Delta v^{\text{dn}}(t)(c_2 - a_2)}{2} \times \right. \\ & \left. \text{COP}_m(t) \right), \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} H &= \\ & \frac{\left(\sum_{t=1}^{24} (\Delta v^{\text{up}}(t)(c_1 - a_1) + \Delta v^{\text{dn}}(t)(c_2 - a_2)) \right)^2}{32} \times \\ & \left(\sum_{t=1}^{24} (\Delta v^{\text{up}}(t)(c_1 - 2b_1 + a_1) + \right. \\ & \left. \Delta v^{\text{dn}}(t)(c_2 - 2b_2 + a_2)) \times \text{COP}_m(t) \right). \end{aligned} \quad (30)$$

3.2.2 约束条件

1) EV 充放电功率约束为

$$\begin{cases} \psi_i^c(t) + \psi_i^d(t) \leq 1, \\ 0 \leq P_i^c(t) \leq \psi_i^c(t)P_{i,\max}^c, \\ \psi_i^d(t)P_{i,\max}^d \leq P_i^d(t) \leq 0. \end{cases} \quad (31)$$

其中 $\psi_i^c(t)$ 和 $\psi_i^d(t)$ 为EV充放电状态的0-1变量。

2) EV的SOC约束。

为保护EV电池寿命, EV的SOC需要受到一定约束, 如下所示:

$$\text{SOC}_{i,\min} \leq \text{SOC}_i \leq \text{SOC}_{i,\max}, \quad (32)$$

其中 $\text{SOC}_{i,\min}$ 、 $\text{SOC}_{i,\max}$ 分别为第*i*辆EV的SOC下限和上限。

3) EV用户出行约束。

EV用户的首要需求为出行需求, 因此, 在EV参与辅助服务后其SOC状态必须满足用户需求, 得到如下约束:

$$\text{SOC}_{i,\min}(t') = \text{SOC}_{i,\text{OUT}} - \frac{P_{i,\max}^c \times \eta_i (T_{i,\text{OUT}} - t')}{C_i} \times 100\%. \quad (33)$$

其中: $\text{SOC}_{i,\min}(t')$ 为下一时刻EV需要满足的最小SOC, $\text{SOC}_{i,\text{OUT}}$ 为用户离网时为满足出行需求的设定SOC, η_i 为充电效率, $T_{i,\text{OUT}}$ 为离网时刻。

4) 聚合商合约容量约束。

聚合商在DAM中竞标的合约量显然不会超过EV集群可调频容量评估结果。同时, 聚合商必须满足其参与辅助调频市场的最低门槛, 因此, 有

$$\begin{aligned} v_{\text{threshold}}(t) &\leq v^{\text{up}}(t) \leq \text{ARCS}^{\text{up}}(t), \\ v_{\text{threshold}}(t) &\leq v^{\text{dn}}(t) \leq \text{ARCS}^{\text{dn}}(t). \end{aligned} \quad (34)$$

其中: $v_{\text{threshold}}(t)$ 为调频日ISO对EV集群要求提供的最小可调频容量, $\text{ARCS}^{\text{up}}(t)$ 为时段*t*的ARC评估结果, $\text{ARCS}^{\text{dn}}(t)$ 同理。

3.2.3 基于期望-熵-偏度改进的三目标优化模型

根据可信性理论, 期望表示聚合商的收益预期, 熵表示聚合商的收益风险, 偏度表示聚合商竞标策略的有效性和适用性, 决定了聚合商可选择的竞标策略的多少。因此, 本文提出了一种基于期望-熵-偏度改进的三目标优化模型, 其中要求期望最大、熵最小以及偏度最大, 并同时满足约束(31)~约束(34)。

基于NSGA-II精英遗传算法^[23], 本文求解上述三目标优化模型的具体流程如图2所示。

4 算例分析

4.1 算例说明

本文仿真实验共分为两步: 第1步评估EV集群可调频容量, 第2步基于评估得到的可调频容量数据对聚合商参与DAM竞标策略进行仿真分析。

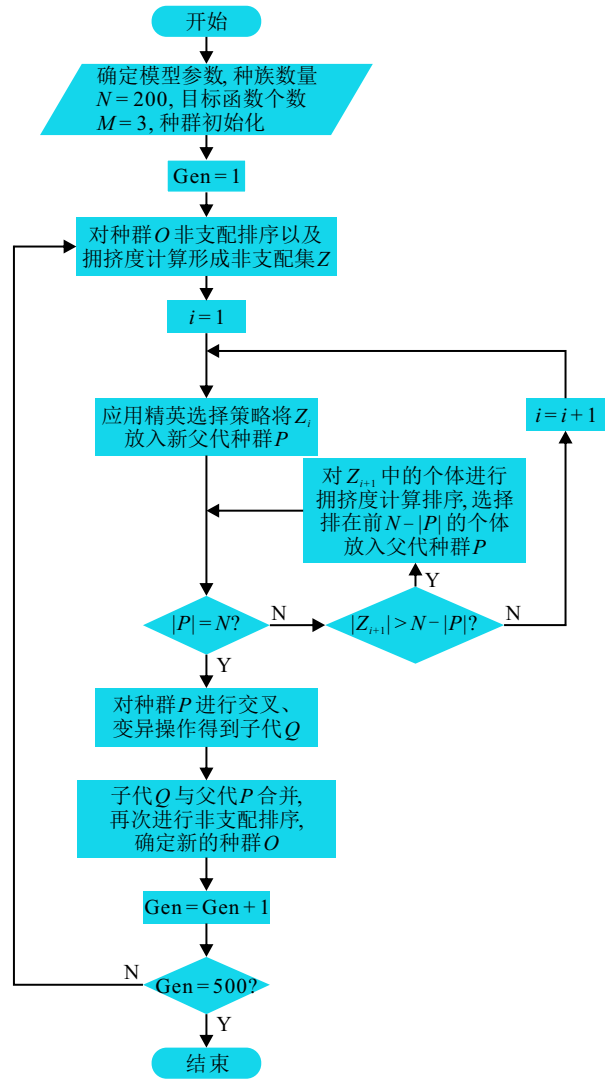


图2 算法流程

本文设定EV集群总数为2000, RTM出清价格模糊数和DAM出清价格取自PJM网站的调频市场历史交易价格记录^[24]。取ISO对聚合商的罚款价格 $d^+ = 27.5 \$/\text{MWh}$, $d^- = 28 \$/\text{MWh}$ 以及 $\theta = 0.05$ 。环境温度和交通状况数据分别取自气候数据中心和百度地图。采用NSGA-II精英遗传算法, 取种族数量 $N = 200$, 目标函数个数 $M = 3$, 迭代代数 $\text{Gen} = 500$ 。计算机硬件配置: CPU Core i9, 主频2.5 GHz, 内存16 GB。

4.2 结果与分析

本文基于Matlab平台仿真得到共3天的EV集群可调频容量评估, 不失一般性, 选取第2天的仿真结果作简要分析。为了更直观地体现用户意愿行为对于结果的影响, 计算时假设EV实时充放电功率为0, 用户预期经济激励相同以及预期最小充电时间相同, 具体结果如图3(a)和图3(b)所示。

图3(a)为EV集群在服务意愿度为1(即完全愿意参加调频服务), $r = 1.60$, $r = 0.95$ 以及 $r = 0.6$ 四

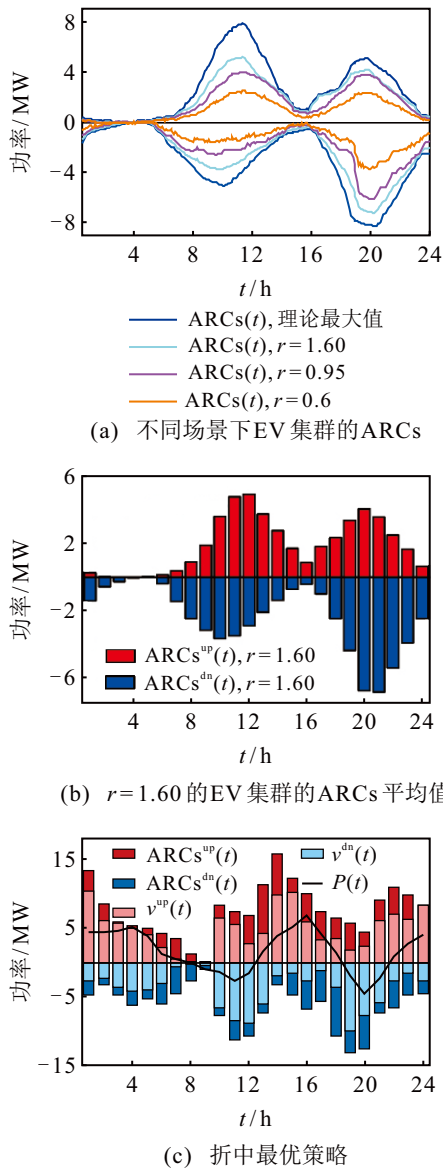


图3 EV 集群 ARCs 评估结果和折中最优策略

个场景下的 ARCs. 图 3(a) 结果表明: EV 集群在 $r = 1.60$ 的场景下, $8:00 \sim 16:00$ 和 $16:00 \sim 24:00$ 两个时段的 ARCs 明显受到用户意愿的影响, 峰值仅有理论值的 63.4% 以及 72.8%; 随着经济激励的进一步降低, EV 集群 ARCs 下降的同时呈现出曲线不平滑现象, 激励系数越低, 曲线越不平滑, 这是因为用户在激励不理想的情况下表现出更明显的不确定性. 图 3(b) 为每个时段 (1 h) 对 ARCs 取平均值的结果, 下文的策略优化将会用到类似的处理.

对于在 DAM 中有限信息下与 ISO 进行交易的聚合商, 根据所提出算法, 可得到若干最优竞价策略, 为切合实际市场交易情况, 本文进一步寻求符合聚合商需求的最优策略.

4.2.1 最优策略分析

考虑到现实中聚合商会更倾向于收益高的策略竞标, 同时尽可能承担少量风险, 因此, 本节采用熵

权法得到最优折中解, 并对其作分析, 其中具体权重数值如表 1 所示.

表1 熵权法权重赋值

优化目标权重	数值
聚合商收益期望 E 权重	0.57
聚合商收益熵 S 权重	0.31
聚合商收益偏度 H 权重	0.12

折中最优解如图 3(c) 所示. 该策略中经济激励 $\lambda = 26.54 \text{ \$/MWh}$. 其中: $9:00 \sim 12:00$ 和 $19:00 \sim 21:00$ 时段聚合商对 EV 集群进行放电, 其余时段充电; 同时, 该时段 EV 集群的向下可调频容量明显大于向上可调频容量, 其余时段相反. 在 $0:00 \sim 6:00$ 以及 $21:00 \sim 24:00$ 时段 EV 集群基本没有出行需求, 表现出高度的稳定性, 因此, 聚合商的合约容量与 EV 的 ARC 的偏差最大仅有 24.5%, 明显小于其他时段的偏差. 在 EV 集群集中出行的早晨, 正午以及傍晚 3 个时段, 聚合商尊重用户的基本要求, 签约的向上可调频容量明显降低, 以降低自身经济风险.

4.2.2 结果对比分析

为了展示所提出模型在不同条件下结果的有效性和稳定性, 在这里设置两种场景变化: 1) EV 集群数量分别为 1000、3000; 2) DAM 市场出清价格设置波动范围分别为 5%、10%、15%.

图 4(a) ~ 图 4(c) 分别为 EV 数量为 1000、3000 时, 采用所提出模型求解得到的折中最优策略的具体结果. 其中: 充放电功率、最大可调频容量以及合约可调频容量变化趋势均与 EV 数量为 2000 时相同, 且根据数量等比换算后的误差最高仅有 5.11%, 体现出所提出模型在 EV 集群规模变化时的稳定性.

图 4(d) ~ 图 4(f) 分别为 DAM 价格波动为 5%、10%、15% 时, 采用所提出模型求解得到的折中最优策略的具体结果 (EV 集群数量为 2000). 经简要数据分析, 价格波动带来的单时段数据误差在充放电功率中平均为 4.12%, 在最大可调频容量中平均为 12.3%, 在合约可调频容量中平均为 13.84%. 同时, 图 4(d) ~ 图 4(f) 展现出了各情况下数据的同趋势和相似性, 体现出所提出模型在 DAM 价格波动时的稳定性.

为了进一步地体现所提出策略的有效性和优越性, 考虑美国德克萨斯州某一地区, 选取该地区 PJM 中随机 100 天的历史数据^[24], 参考折中最优策略计算每天的具体收益. 这里引用 3 种基准模型进行对比: 1) 确定性等价 (CEQ) 模型. 该模型通过数学方法

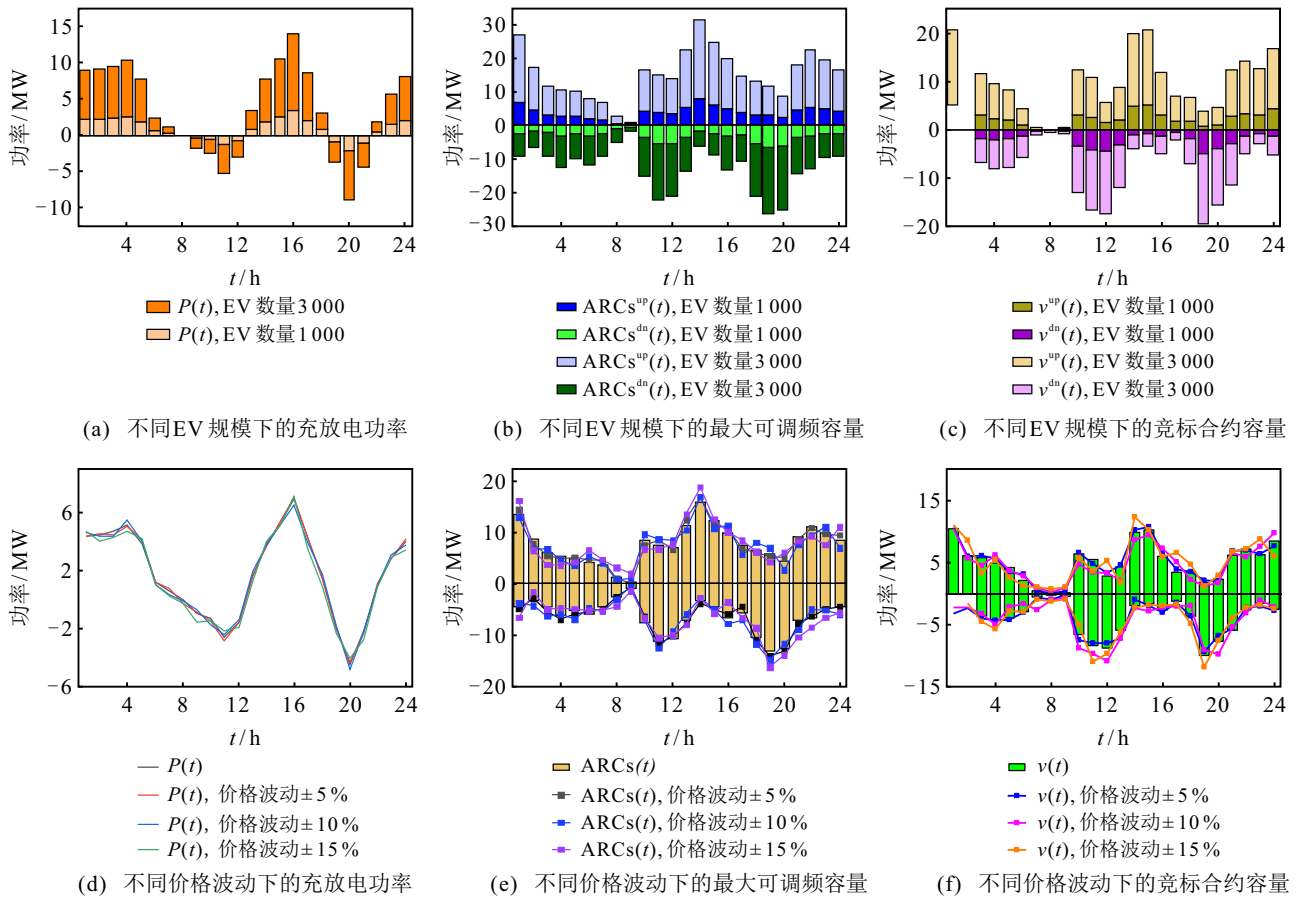


图4 不同场景下的折中最优策略

表2 不同优化模型结果对比分析

优化模型	平均收益/\$	收益波动/\$	最大收益/\$
本文方法	17782.93	501.58	18850.58
E*SH*	16197.14	705.87	17486.36
E*S*H*	15711.25	902.46	17998.14
SP	15500.13	1374.12	18970.92
CEQ	15274.86	1417.94	18715.51
优化前	14776.29	1559.18	19059.35

统计得到 PJM 网站中 RTM 分时调频容量价格期望, 并以此视为调频日的分时调频容量价格. 2) 随机规划 (SP) 模型. 该模型会对 DAM 生成若干个随机场景, 通过最大化聚合商的收益期望值来确定签约量. 3) 一般的期望-熵-偏度模型. 该模型在目标函数中没

有考虑每个时段内分时调频容量对于整体的影响, 即没有引入调频能力系数.

将上述模型与所提出模型所得结果进行对比, 数据统计分析如表 2 所示, 对比结果如图 5(a) 所示. 其中: ESH 为所提出模型, *为该参数未结合调频能力系数, 收益波动为选取 100 天的收益数据标准差. 由表 2 可见: 基于 ESH 模型优化结果的聚合商平均收益以及收益稳定性相比于 CEQ 模型分别提高了 16.42% 和 64.62%; 相比于 SP 模型分别提高了 14.73% 和 63.49%; 相比历史实际平均收益提高了 20.35%, 收益稳定性提高了 67.83%. 算例表明, 在 3 个优化目标均采用调频能力系数的情况下, 所提出

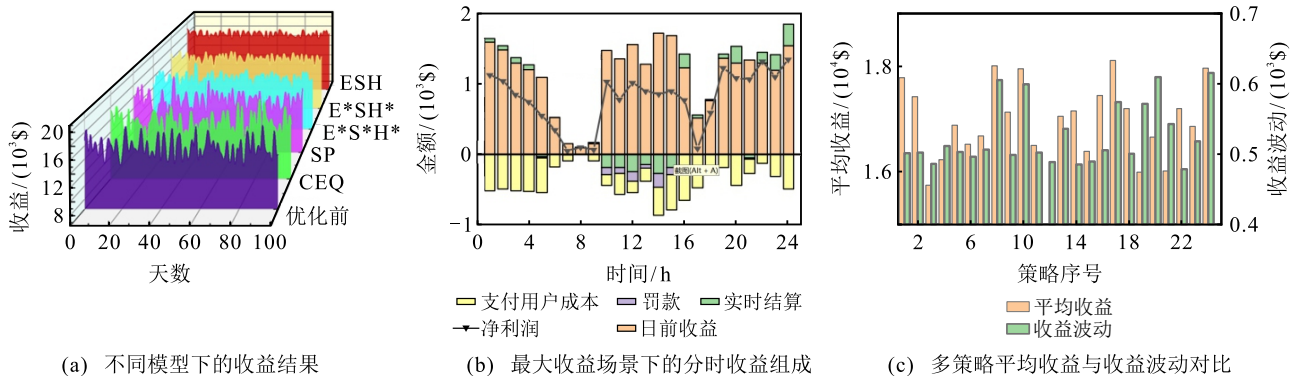


图5 模型收益结果以及相关具体分析

方法不仅能够保持良好的稳定性,还能增加聚合商的收益.如图5(a)所示,所提出模型结果曲线相较于其他模型结果的曲线波动幅度小,波峰波谷落差小且均匀,体现出所提出模型对聚合商每天收益波动具有有效的降低作用.

进一步地,选取最大收益为18850.58 \$的场景对其收益组成作具体分析,如图5(b)所示.由图5(b)不难看出,聚合商该日在早晚EV出行高峰的时段收益骤降,在10:00~16:00、20:00~24:00时段EV存在充分的充电需求时收益较为平稳.同时,聚合商在采用所提出策略的情况下,该日需要支付罚款的时段仅占总时段的29.7%,且最大罚款占比仅有22.33%,平均占比不到15%,体现出所提出策略的风险规避能力.

为体现折中最优策略的优越性,本文选取最优解集中随机若干个策略代入场景得到对应的平均收益和收益波动,具体如图5(c)所示.其中:策略1为折中最优策略,图5(c)中策略8、策略10、策略17和策略24的平均收益分别高于策略1的平均收益2.29%、1.97%、3.03%以及1.81%;然而,收益波动却分别高于策略1的收益波动20.68%、19.46%、22.67%以及14.53%.因此,折中最优策略对于聚合商具有更高的适用性.

5 结论

本文充分考虑EV集群参与调频服务的意愿不确定性,提出了一种考虑EV集群充电行为和参与服务意愿行为的可调频容量计算方法,主客观融合地刻画了EV用户行为,体现出用户意愿对可调频容量评估结果的显著影响.进一步地,基于EV集群可调频容量的评估,提出了基于调频能力系数的改进期望-熵-偏度三目标优化模型并采用NSGA-II优化算法进行求解.算例验证结果表明,所提出方法与CEQ、SP等模型相比,所提出模型能够更全面地为聚合商提供DAM竞标策略选择,并提高了聚合商参与辅助服务的经济性和稳定性,同时,基于熵权法得到的折中最优策略使得聚合商具有更好的风险规避能力,并有效提高了收益期望.

总体而言,所提出方法与传统方法相比,在描述不确定性、提高经济性和稳定性方面展现出了一定优势.但是,考虑到NSGA-II算法的复杂性,其中相关参数的敏感性以及实际应用中的约束,仍然存在局限性,这是未来本文继续深入研究的方向之一.

参考文献 (References)

[1] 蔡凌,郭戈,施冷安东.考虑差异化需求的电动汽车充

电调度策略[J].控制与决策,2024,39(3):795-803.

(Cai L, Guo G, Shi L A D. Electric vehicle charging scheduling strategy considering differentiated demand[J]. Control and Decision, 2024, 39(3): 795-803.)

[2] 黄学良,刘永东,沈斐,等.电动汽车与电网互动:综述与展望[J].电力系统自动化,2024,48(7):3-23.

(Huang X L, Liu Y D, Shen F, et al. Vehicle to grid: Review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 3-23.)

[3] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰,等.基于充电行为预测的电动汽车参与系统调频备用:容量挖掘与风险评估[J].电力自动化设备,2022,42(4):18-26.

(Wu Z Y, Ai X, Hu J J, et al. EVs' participation in system frequency regulation reserve based on charging behavior prediction: Capacity mining and risk evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 18-26.)

[4] 郭戈,徐涛,韩英华,等.电动汽车时代的电网-交通网协同优化综述[J].控制与决策,2021,36(9):2049-2062.

(Guo G, Xu T, Han Y H, et al. A survey of cooperative optimization of traffic-grid networks in the era of electric vehicles[J]. Control and Decision, 2021, 36(9): 2049-2062.)

[5] 邢玉伟,王展华,杨华龙.需求可离散拆分电动汽车充电策略和路径优化问题[J].控制与决策,2025,40(3):987-995.

(Xing Y W, Wang Z H, Yang H L. Electric vehicle charging strategies and routing optimization under discrete split demands[J]. Control and Decision, 2025, 40(3): 987-995.)

[6] He G N, Chen Q X, Kang C Q, et al. Cooperation of wind power and battery storage to provide frequency regulation in power markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3559-3568.

[7] Sarker M R, Dvorkin Y, Ortega-Vazquez M A. Optimal participation of an electric vehicle aggregator in day-ahead energy and reserve markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3506-3515.

[8] Kazemi M, Zareipour H, Amjady N, et al. Operation scheduling of battery storage systems in joint energy and ancillary services markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1726-1735.

[9] 陈渊睿,徐铭康,曾君,等.基于平行CPSS的电动汽车参与储能汇聚复用建模与分析[J].控制与决策,2019,34(11):2428-2437.

(Chen Y R, Xu M K, Zeng J, et al. Modelling and analysis of electric vehicles participating in the convergence and multiplexing of energy storage system based on parallel CPSS[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2428-2437.)

[10] 田硕.电动汽车聚合商参与日前市场的运营优化与竞标策略研究[D].北京:华北电力大学,2018.

(Tian S. Research on operation optimization and bidding strategy of electric vehicle aggregator participating in day-ahead market[D]. Beijing: North China Electric

- Power University, 2018.)
- [11] Wang Q, Huang C Y, Wang C M, et al. Risk-averse frequency regulation strategy of electric vehicle aggregator considering multiple uncertainties[J]. *Applied Energy*, 2025, 382: 125259.
- [12] 聂麟鹏. 含分布式电源的虚拟电厂参与现货市场交易模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
(Nie L P. Research on the transaction model of virtual power plant with distributed power supply participating in spot market[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.)
- [13] Pei W, Du Y, Deng W, et al. Optimal bidding strategy and intramarket mechanism of microgrid aggregator in real-time balancing market[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(2): 587-596.
- [14] Faria A S, Soares T, Sousa T, et al. Participation of an EV aggregator in the reserve market through chance-constrained optimization[J]. *Energies*, 2020, 13(16): 4071.
- [15] Vagropoulos S I, Bakirtzis A G. Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4031-4041.
- [16] Ko K S, Han S, Sung D K. Performance-based settlement of frequency regulation for electric vehicle aggregators[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 866-875.
- [17] Chen Y A, Zeng W T, Khurram A, et al. Cost-optimal aggregated electric vehicle flexibility for demand response market participation by workplace electric vehicle charging aggregators[J]. *Energies*, 2024, 17(7): 1745.
- [18] 詹泽伟, 徐湘楚, 纪陵, 等. 基于目标鲁棒的电动汽车及基站储能联合参与电力市场的决策模型[J]. *电网技术*, 2024, 48(8): 3361-3372.
(Zhan Z W, Xu X C, Ji L, et al. A decision model for joint participation of electric vehicle and base station energy storage in electricity market based on robust satisficing[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(8): 3361-3372.)
- [19] 李哲涵. 国内典型调频辅助服务市场数值仿真与比较研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
(Li Z H. Numerical simulation and comparative study of typical frequency regulation ancillary service markets in China[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.)
- [20] Department of Transportation, Federal Highway Administration of USA. 2017 national household travel survey[EB/OL]. (2017-07-15)[2022-01-20]. <http://nhts.omn.gov>.
- [21] Jia Y, Song B W, Zhao X T, et al. Method of combat programs optimization by fuzzy AHP based on entropy weight[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(11): 180-183.
- [22] Kapetanios E. Uncertainty theory[J]. *Computing Reviews*, 2015, 56(9): 536-536.
- [23] Deb K, Agrawal S. A niched-penalty approach for constraint handling in genetic algorithms[J]. *Springer Vienna*, 1999, 14(5): 235-243.
- [24] U.S. Energy Information Administration. 2024 PJM frequency regulation market historical records[EB/OL]. (2024-07-25)[2025-01-18]. <https://www.eia.gov>.

作者简介

周鹏 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为电动汽车集群汇聚、光储系统参与电力市场竞争策略, E-mail: 2351312053@qq.com;

曾君 (1979-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为微电网能量管理及优化、可再生能源发电系统中的电力电子及控制技术, E-mail: junzeng@scut.edu.cn;

黄向敏 (1990-), 男, 博士, 主要研究方向为配电网运行控制、分布式储能汇聚优化, E-mail: wingshxm@foxmail.com;

王鹏旭 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为分布式可再生能源的集群控制与优化, E-mail: 1482018804@qq.com;

黄智鹏 (1988-), 男, 高级工程师, 硕士生, 主要研究方向为配电技术、新型电力系统, E-mail: 409839243@qq.com;

刘俊峰 (1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为高频微电网关键技术、电力电子及其控制技术, E-mail: aujfliu@scut.edu.cn.