

引用格式:杨威,覃捷,谢宇霆,等.零售市场下智慧用电服务用户优选[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):243-252.

Citation: YANG Wei, QIN Jie, XIE Yuting, et al. User prioritization for smart electricity services in retail market[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 243-252.

零售市场下智慧用电服务用户优选

杨威¹, 覃捷¹, 谢宇霆¹, 池玉泉², 张勇军², 成润婷²

(1. 广东电力交易中心有限责任公司, 广东广州 510180; 2. 华南理工大学电力学院, 广东广州 510640)

摘要:为了在零售市场背景下高效率地选择出智慧用电服务的用户,提出一种智慧用电服务用户优选方法。首先,根据用户负荷数据的物理特征和交易数据的行为特征,从既成价值和潜在价值两个方面提出智慧用电服务价值指标体系;其次,基于G1法和改进熵权法求解评估指标的综合权重,提出智慧用电服务用户优选方法,为提高运营方服务效率提供新的思路;最后,对某地区的零售用户交易与用能数据进行仿真分析,验证了所提方法的有效性。

关键词:电力零售市场;智慧用电服务价值评估;客户关系管理模型;用户优选

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.023 **中图分类号:** TM73 **文章编号:** 1673-9140(2026)01-0243-10

User prioritization for smart electricity services in retail market

YANG Wei¹, QIN Jie¹, XIE Yuting¹, CHI Yuquan², ZHANG Yongjun², CHENG Runting²

(1. Guangdong Power Trading Center Co., Ltd., Guangzhou 510180, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To effectively select users for smart electricity services in the context of the retail market, a user prioritization method for smart electricity services is proposed. First, according to the physical characteristics of user load data and the behavioral characteristics of transaction data, the value index system of smart electricity services is proposed from two aspects of established value and potential value. Then, based on the G1 method and the improved entropy weight method, the comprehensive weight of the evaluation index is solved, and a user prioritization method for smart electricity services is proposed, which provides a new idea for improving the service efficiency of the operator. Finally, the simulation analysis is conducted on retail users' transaction and energy consumption data in a certain area, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: electricity retail market; value assessment of smart electricity service; customer relationship management model; user prioritization

在“双碳”目标和建设新型电力系统的背景下,智慧用电成为提升能源效率、促进电力脱碳的关键手段^[1]。随着分布式光伏、储能、柔性负荷等技术的普及,用户侧可调资源大幅增加,为电网的智慧用电服务提供了客观条件^[2-3]。同时,全体工商业用户参与零售市场交易已经成为未来的发展趋势^[4-7],用户规模的增加使得电网难以对所有用户提供均质

的智慧用电服务,所以必须通过优选机制识别出具有高智慧用电服务价值的目标群体。

用户灵活性资源的可调控程度是智慧用电服务价值的重要体现,目前已有不少学者对用户的可调控潜力评估进行了研究。文献[8]从检修、轮休、错时、避峰4个角度提出负荷调控潜力的评估指标。文献[9-11]针对用户可调负荷进行细致建模,基于

收稿日期:2024-07-24;修回日期:2025-07-26

基金项目:广东电力交易中心科技项目(GDKJXM20222599)

通信作者:池玉泉(2001—),男,硕士研究生,主要从事电力市场运营管理等研究;E-mail:3270996991@qq.com

运行状态对柔性负荷进行可调潜力评估。文献[12]综合负荷预测手段和可调负荷占比,提出了一种用于评估工业负荷响应潜力的分析评估方法。文献[13-17]针对不同用户类型和不同负荷,提出了相应的需求响应潜力评估方法。但是,现有的可调潜力评估或需求响应潜力评估更多聚焦于负荷调控的物理特性,忽略了负荷调控的收益分析。而且,在零售市场环境下,有限理性的用户具有用电行为复杂、信息不对称等特征^[18],仅依靠物理可调资源难以全面评估其智慧用电服务价值,还须从市场交易行为中挖掘出潜在价值^[19]。

客户关系管理模型常被用于挖掘用户的潜在价值,广泛应用于多个零售领域^[20]。该模型的核心指标有最新度指标 R 、频率指标 F 、货币指标 M ,分别用于表示消费间隔、消费频率、消费水平,可结合不同指标权重确立得到用户潜在价值^[21]。文献[22-24]借助客户关系管理模型分析用户潜在价值,并结合聚类方法对不同用户进行分类,最终挑选出值得重点服务的用户。文献[25]表明客户关系管理模型可以识别潜在客户及其需求,有利于制定与用户相匹配的运营策略。客户关系管理模型在用户潜在价值评估中表现出色,但电力零售市场以月度为周期出具结算依据并开展电费结算,消费间隔、消费频率较为固定^[26],这使得客户关系管理模型运用到电力零售市场时存在以下不足:固定周期的结算模式使得用户的最新度指标、消费频率指标在数值上趋同,不同用户之间的消费行为区分度大幅降低,进而降低了客户关系管理模型在用户潜在价值评估上的效果。因此,需要对客户关系管理模型进行改进,才能更好地适配零售市场下智慧用电服务的潜在价值评估。

为此,本文在分析用户交易行为与灵活性资源可调特征的基础上,提出了一种计及既成价值和潜在价值的智慧用电服务用户优选方法。首先,分析了用户侧的灵活性资源特性,并建立了既成价值评估模型;其次,根据用户交易行为特点,在改进客户关系管理模型的基础上建立了潜在价值评估模型,形成了适用于零售用户智慧用电服务价值评估的指标体系;再次,采用G1法和熵权法确定权重,实现零售市场下智慧用电服务的用户优选;最后,通过仿真分析验证了本文方法的有效性。

1 智慧用电服务价值指标体系

智慧用电服务是指运营方给电力用户提供用

电优化策略,以降低用户侧的用电费用,提升用户满意度^[27-29]。然而,智慧用电服务的实际效果受到可调资源容量、调节意愿等因素影响,这些影响因素可归纳为物理因素(如设备调节能力、负荷特性等)和社会因素(如市场行为、心理偏好等)。为此,本文从影响因素出发,将智慧用电服务价值分为既成价值和潜在价值。既成价值对应物理因素,反映现有资源特性下的可调控潜力;潜在价值对应社会因素,反映市场行为下的参与意愿。

1.1 既成价值评估指标

零售用户的既成价值体现为其负荷的可调控潜力和调控收益。现有文献在进行可调控潜力评估时,主要通过设备级精细评估或负荷曲线进行特征分析,缺少对调控收益的考虑^[30-31]。而且电网公司往往难以获取用户内部设备的具体信息。为此,本文基于可观测的负荷曲线特征与零售套餐建立既成价值评估模型。

既成价值评估指标包括物理可调性指标和经济收益性指标。其中,物理可调性指标由波动率、峰谷差率、峰谷差、用电高峰时段组成,经济收益性指标为零售套餐峰谷价格差。各指标具体内容如下。

1) 波动率 α_i^1 。

$$\alpha_i^1 = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad (1)$$

式中, σ_i 为第 i 个用户典型日负荷曲线的标准差; μ_i 为第 i 个用户典型日负荷曲线的均值。波动率越大,意味着负荷曲线波动越大,这样的负荷更容易实现错峰和错时运行。

2) 峰谷差率 α_i^2 。

$$\alpha_i^2 = \frac{P_i^{\max} - P_i^{\min}}{P_i^{\max}} \quad (2)$$

式中, P_i^{\max} 、 P_i^{\min} 分别为第 i 个用户典型日负荷曲线中的最大负荷和最小负荷。

3) 峰谷差 α_i^3 。

$$\alpha_i^3 = P_i^{\max} - P_i^{\min} \quad (3)$$

式中,峰谷差 α_i^3 越大,代表可调控潜力越大。

4) 零售套餐峰谷价格差 α_i^4 。

$$\alpha_i^4 = \lambda_i(C_i^{f,\max} - C_i^{f,\min}) + (1 - \lambda_i)(C_i^{l,\max} - C_i^{l,\min}) \quad (4)$$

式中, $C_i^{f,\max}$ 、 $C_i^{f,\min}$ 分别为第 i 个用户零售套餐中固定电价部分的峰值和谷值; $C_i^{l,\max}$ 、 $C_i^{l,\min}$ 分别为第 i 个用户零售套餐中市场联动部分的峰值和谷值; λ_i 为固定电价的占比。零售套餐的峰、谷价格差越大,意味着用户进行智慧用电的收益越大。

5) 用电高峰时段 α_i^5 。

$$\alpha_i^5 = \{1, 2\} \quad (5)$$

式中,当用电高峰时段处于谷时电价时段, α_i^5 记为 1,表明其负荷运行可优化的空间相对有限;当用电高峰时段处于峰时电价时段, α_i^5 记为 2,意味着这类用户的负荷运行存在较大的优化潜力。

1.2 潜在价值评估指标

零售用户的潜在价值体现为其对智慧用电服务的参与意愿。客户关系管理模型中的评估基于最新度 R 、频率 F 、货币 $M^{[21]}$ 这 3 个指标,该三维指标在其他零售领域的用户潜在价值评估中被验证是有效的,但直接应用到电力零售市场中存在理论适配性问题。根据文献[26]中的现货市场结算实施细则可知,电力零售市场以月度为周期实行电费结算,消费间隔和消费周期相对固定。为此,本文在客户关系管理模型的基础上进行改进,对用户的潜在价值进行评估。

1) 最新度指标 R :该指标表示用户最近一次消费距今的时间。消费间隔以月度为周期^[26],因此每个用户的消费间隔 R_i 设为 1 个月。

2) 频率指标 F :根据文献[26],用户的消费以月度为周期,频率较为固定,但会存在更换售电公司的行为。对成本和价格变动敏感的用户更容易出现更换售电公司的行为^[32],故本文引入售电公司更换率 S 来反映用户对智慧用电服务的意愿程度,具体表示如下:

$$S_i = \frac{q_i}{Q_i} \quad (6)$$

式中, S_i 为第 i 个用户的售电公司更换率; Q_i 为第 i 个用户的交易总次数; q_i 为第 i 个用户在 Q_i 次交易中更换售电公司的次数。

若用户的售电公司更换率过低,表明用户可能存在行为惰性,对价格变动不敏感,对智慧用电服务响应不强烈。若用户的售电公司更换率过高,则说明该用户对售电公司的黏性^[33]较低,对性价比要求较高,其行为更容易受价格感知的影响^[34]。

3) 货币指标 M :该指标原来表示用户每次的消费金额,本文将其对应为用户每个消费周期在零售市场上的结算电费 E 。其中, $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$, E_i 为第 i 个零售电力用户的结算电费。

综上,智慧用电服务价值评估指标体系如图 1 所示。

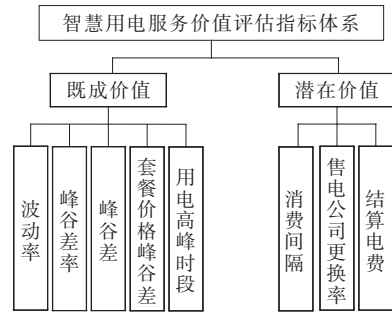


图 1 价值评估指标体系

Figure 1 Value evaluation index system

2 智慧用电服务价值评估方法

本文在智慧用电服务价值评估指标的基础上,引入 G1 法和改进熵权法,分别计算用户的既成价值和潜在价值,结合 K-means 聚类方法得到智慧用电服务价值。首先,针对既成价值和潜在价值中的各个指标,根据 G1 法计算主观权重,根据改进熵权法确定客观权重;然后,根据最小鉴别信息原理确定指标的综合权重。

2.1 指标预处理

在智慧用电价值评估指标中,由于指标的属性 and 量纲不同,数据差异较大,容易对结果分析产生不良影响,可考虑采用最小最大归一化方法对指标进行处理。

假设共有 N 个用户,第 i 个用户的第 j 个指标为 d_{ij} ,每个用户有 8 个评价指标,当 j 取值从 1 到 8 时, d_{ij} 依次对应 $\{\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3, \alpha_i^4, \alpha_i^5, R_i, S_i, E_i\}$ 。除了指标 α_i^5 (用电高峰时段) 为类别编码外,其他指标均为数值型指标,故须对除指标 α_i^5 外的 7 个指标进行标准化处理。其标准化的具体计算方法如下:

$$d_{ij}^* = \begin{cases} \frac{d_{ij} - \min \{d_{ij}\}}{\max \{d_{ij}\} - \min \{d_{ij}\}}, & \max \{d_{ij}\} \neq \min \{d_{ij}\} \\ 0, & \max \{d_{ij}\} = \min \{d_{ij}\} \end{cases} \quad (7)$$

式中, d_{ij}^* 为归一化后的指标值,具体包括 $\{\alpha_i^{1*}, \alpha_i^{2*}, \alpha_i^{3*}, \alpha_i^{4*}, \alpha_i^{5*}, R_i^*, S_i^*, E_i^*\}$,上标 * 表示对应的归一化后的指标。

2.2 既成价值计算

既成价值评估涉及以下 5 个指标: $\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3, \alpha_i^4, \alpha_i^5$ 。既成价值评估步骤如下:首先,根据 α_i^5 判断负荷高峰期是否与电价高峰期重合,筛选出有较大调峰可能的用户群体;然后,根据用户的另外 4 个数值型指标 $\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3, \alpha_i^4$ 计算出既成价值大小。具体的权重计算如下。

2.2.1 主观权重

本文采用 G1 法确定既成价值的主观权重,其计算步骤如下。

1) 设 $D = \{\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3, \alpha_i^4\}$, 专家将其按重要性从高到低的顺序进行排序, 得到新的指标序列 $\tilde{D} = \{D_1, D_2, D_3, D_4\}$, $D_j (j=1, 2, 3, 4)$ 为排序后的第 j 个指标。

2) 专家根据经验对相邻指标的重要程度之比进行打分^[35]。

3) 根据指标重要程度之比的打分情况, 计算主观权重:

$$\tilde{\omega}_4 = \left(1 + \sum_{s=2}^4 \prod_{j=s}^4 \tilde{\beta}_j\right)^{-1} \quad (8)$$

$$\tilde{\omega}_{j-1} = \tilde{\beta}_j \tilde{\omega}_j, j = 2, 3, 4 \quad (9)$$

式中, $\tilde{\beta}_j$ 为第 $j-1$ 个和第 j 个指标的重要程度比值; $\tilde{\omega}_j$ 为指标 D_j 的权重; ω_j 为 $\{\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3, \alpha_i^4\}$ 中的第 j 个指标的主观权重。

4) 将主观权重与 $\{\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3, \alpha_i^4\}$ 一一对应, 得到新的权重排序 $\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4\}$ 。

2.2.2 客观权重

为了避免在不同指标熵值趋近 1 时, 熵权值对指标数值差异过于敏感, 本文采用改进的熵权法确定客观权重^[36]。其具体步骤如下。

1) 计算各指标信息熵:

$$e_j = -\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N z_{ij} \ln(z_{ij}) \quad (10)$$

$$z_{ij} = \alpha_i^{j*} / \sum_{i=1}^N \alpha_i^{j*}, j = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

式中, e_j 为第 j 个指标的信息熵; α_i^{j*} 为 α_i^j 归一化后的第 j 个指标, $j=1, 2, 3, 4$; z_{ij} 为第 i 个用户在第 j 个指标下的特征比值。

2) 根据信息熵确定指标 D_j 的客观权重:

$$v_j = \frac{1 - 2e_j + \sum_{j=1}^4 e_j}{\sum_{j=1}^4 \left(1 - 2e_j + \sum_{j=1}^4 e_j\right)} \quad (12)$$

式中, v_j 为 $\{\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3, \alpha_i^4\}$ 中第 j 个指标的客观权重系数。

2.2.3 综合权重

为了使第 j 个指标的综合权重 λ_j 尽可能地接近 ω_j 和 v_j , 本文依据最小鉴别信息原理求取综合权重, 具体计算过程^[37]如下:

$$\min \sum_{j=1}^4 \left(\lambda_j \ln \frac{\lambda_j}{\omega_j} + \lambda_j \ln \frac{\lambda_j}{v_j}\right) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^4 \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0 \quad (14)$$

利用式(13)、(14)构造拉格朗日函数:

$$\sum_{j=1}^4 \left(\lambda_j \ln \frac{\lambda_j}{\omega_j} + \lambda_j \ln \frac{\lambda_j}{v_j}\right) + \chi \left(\sum_{j=1}^4 \lambda_j - 1\right) \quad (15)$$

分别对 λ_j 和 χ 求微分, 得:

$$\begin{cases} 2\ln\lambda_j + 2 - \ln\omega_j v_j + \chi = 0 \\ \sum_{j=1}^4 \lambda_j - 1 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

进而, 求得综合权重系数如下:

$$\lambda_j = \sqrt{\frac{\omega_j v_j}{\sum_{j=1}^4 \omega_j v_j}} \quad (17)$$

最后, 得到第 i 个用户的既成价值 θ_i 如下:

$$\theta_i = \lambda_1 \alpha_i^{1*} + \lambda_2 \alpha_i^{2*} + \lambda_3 \alpha_i^{3*} + \lambda_4 \alpha_i^{4*} \quad (18)$$

2.3 潜在价值

潜在价值根据改进客户关系管理模型进行评估计算, 涉及以下 3 个指标: R (消费间隔 R_i)、 F (售电公司更换率 S_i)、 M (结算电费 E_i)。第 i 个用户的潜在价值记为 W_i :

$$W_i = w_1 R_i^* + w_2 S_i^* + w_3 E_i^* \quad (19)$$

式中, w_1 、 w_2 和 w_3 分别为指标 R_i 、 S_i 、 E_i 所对应的权重, 其确定方式和本文中的主客观权重确定方法类似, 唯一区别在于把指标对象从 $\{\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3, \alpha_i^4\}$ 换成了 $\{R_i, S_i, E_i\}$; R_i^* 、 S_i^* 、 E_i^* 分别为指标 R_i 、 S_i 、 E_i 归一化后的数值。

为了分析不同用户的潜在价值与 R 、 F 、 M 的相关性, 本文通过 k-means 算法^[38]将用户聚成 K 类, 然后采用戴维森堡丁指数 (Davies Bouldin index, DBI)^[39] 和聚类误差平方和 (sum of squares of error in cluster, SSE) 指标^[40-41] 来确定最优分类数 K , 并计算 K 类用户的平均潜在价值。

3 用户优选方法框架

智慧用电服务用户优选方法如图 2 所示。整个流程主要围绕既成价值的确定、潜在价值的确定和用户分类展开。智慧用电服务优选是在高潜在价值用户群体的基础上, 进行既成价值的排序, 选出具有高智慧用电服务价值的用户。

既成价值是从用户自身的负荷特点考虑, 若用户调整用电习惯后, 成本减少得多, 则更适合智慧用电服务。在这个过程中, 首先考虑用户负荷高峰期是否与电价峰时重合, 判断调峰的可能性; 其次通过峰谷差、波动率分析用户错峰、错时运行的潜力, 根

据峰谷价格差分析调节负荷可降低成本的大小;最后采用G1法、改进熵权法、最小信息鉴别原理确定4个评价指标的权重,从而得出用户的既成价值。

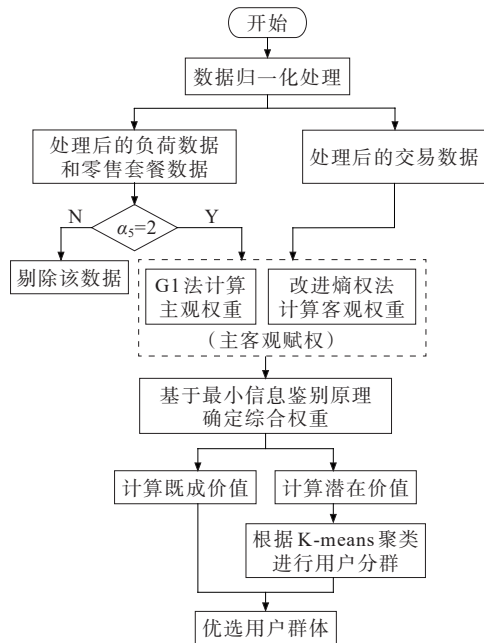


图2 智慧用电服务用户优选方法

Figure 2 User prioritization method for smart electricity services

用户的潜在价值评估是从服务提供方的角度出发,在用户过往的消费行为中挖掘其服务价值,避免服务资源浪费。在这个过程中,本文结合零售市场的特点改进客户关系管理模型,通过权重分析法得到了用户的潜在价值,最后通过聚类的方法将用户分成不同价值类别的群体,以更快地缩小值得提供智慧用电服务的用户的范围。

4 仿真分析

4.1 基础数据

本文选取某地区的零售电力用户交易和用能数据进行仿真,数据具体类型包括更换售电公司次数、交易总次数、电费、典型日负荷、零售套餐、用户行业等。部分零售电力用户负荷曲线如图3所示(仅展示变化趋势,不进行具体区分)。

图3包含了早峰型、午峰型、晚峰型等多种用户类型。零售套餐中涉及的数据类型包括固定电价部分的峰、平、谷价格,市场联动电价部分的峰、平、谷价格、固定电价和市场联动电价的占比。其中,峰、平、谷的比例为1.53:1:0.32,固定电价和市场联动电价的占比之和为100%。用户行业的选择参考了《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)中的

96个大类,并结合文献[42]和智慧用电服务的需求特点将行业分成4类,具体分类情况如表1所示。

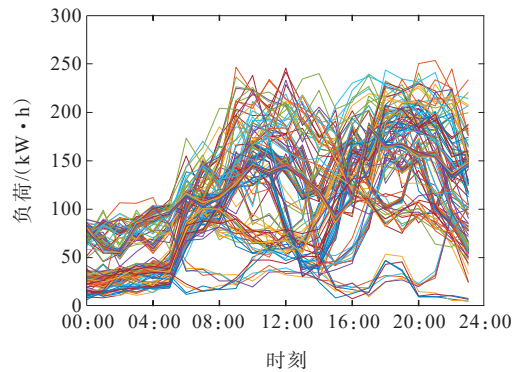


图3 零售电力用户负荷曲线

Figure 3 Retail electricity consumer load curve

表1 行业类别

Table 1 Industry categories

类别	行业	组成
1	连续均衡生产行业	信息传输/软件和信息技术服务业、橡胶和塑料制品业、金属制品业
2	非连续低载能行业	计算机/通信和其他电子设备制造业
3	非连续高载能行业	非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业、黑色金属冶炼和压延加工业、化学原料和化学制品制造业
4	灵活高载能行业	铝冶炼、采矿业、纺织业、石油/煤炭及其他燃料加工业

为了更好地验证所提方法的有效性和优越性,本文设置了4组对比实验,相关实验设置情况如表2所示。其中,对比实验1、2的目的是探究考虑用户零售套餐调控收益对用户优选的有效性;对比实验2、3的目的是探究考虑潜在价值对用户优选的有效性;对比实验3、4的目的是分析不同权重确定方法下的优选效果,而本文方法为实验3。

表2 实验设置情况

Table 2 Different experimental settings

实验	负荷特征	既成价值	潜在价值	熵权法	G1法、改进熵权法
1	✓	×	×	×	✓
2	×	✓	×	×	✓
3	×	✓	✓	×	✓
4	×	✓	✓	✓	×

4.2 结果分析

4.2.1 潜在价值与行业关联性分析

首先,通过k-means聚类算法将零售电力用户聚成K类,不同K值下的聚类效果如图4所示。

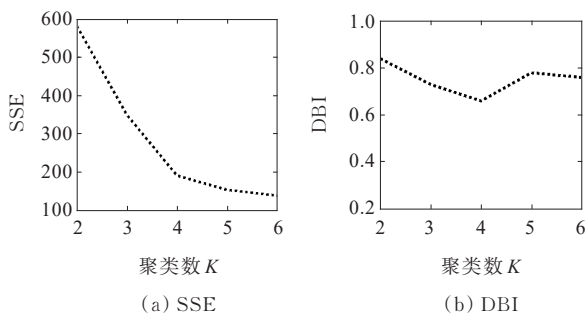


图 4 不同 K 值下的聚类效果

Figure 4 Clustering effects under different K values

SSE 指标下降越快, DBI 指数越小, 聚类效果越好, 所以由图 4 可知, 当 $K=4$ 时聚类效果最好。4 个类别的潜在价值如表 3 所示。

表 3 不同类别的潜在价值

Table 3 Potential values of different categories

类别	最小潜在价值	最大潜在价值	平均潜在价值
1	0.05	0.32	0.16
2	0.30	0.56	0.44
3	0.41	0.72	0.58
4	0.53	0.87	0.64

从表 3 可以看出, 类别 3、4 的平均潜在价值比其他两类更高。这 4 类用户的行业分布情况如图 5 所示, 图 5 中的数值为不同类型行业的用户占比。由图 5 可知, 类别 1 中的连续均衡生产行业占比较高, 类别 2 中的非连续低载能行业占比较高, 类别 3 中的非连续高载能行业占比较高, 类别 4 中的灵活高载能行业占比较高。由此可以发现, 潜在价值与行业类型之间的关联性: 非连续高载能行业和灵活高载能行业的用户具有较高的潜在价值, 较多连续均衡生产行业的用户具有较低的潜在价值。

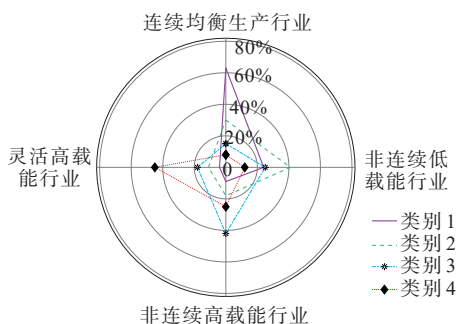


图 5 行业分布情况

Figure 5 Industry distribution

4.2.2 不同实验结果对比分析

本文对不同实验方法下优选出的用户采用同

等程度的智慧用电调控策略, 以理想情况下用户所能降低的用电成本作为评估指标之一, 不同实验下的成本减少情况如表 4 所示, 其中, S_m ($m=10, 50, 100, 200$) 代表优选 m 个用户进行智慧用电所能减少的总成本。

表 4 不同实验下的成本减少情况

Table 4 Cost reduction under different experiments

实验	万元/a			
	S_{10}	S_{50}	S_{100}	S_{200}
1	35.1	218.5	416.9	568.7
2	50.4	243.5	452.1	848.8
3	50.4	242.2	445.0	842.5
4	46.9	237.0	357.5	797.2

从表 4 可以看出, 相比于常规的优选方法(实验 1), 本文的优选方法(实验 3)能选择出成本降低空间更大的用户。在优选 10、50、100、200 个用户时, 实验 3 相较于实验 1 可分别多减少 15.3、23.7、28.1、273.8 万元/a 的用电成本。可见, 在不同优选用户规模下, 本文的优选方法均显著优于常规方法。

实验 1 是只通过负荷曲线的物理可调特征去优选用户, 实验 2 是通过兼顾物理可调特征和经济调控收益的既成价值评估方法去优选用户。通过对比两组实验, 可以探究零售套餐峰谷价格差对智慧用电服务用户优选效果的影响。在优选 10、50、100、200 个用户时, 实验 2 相较于实验 1 分别可多减少 15.3、25.0、35.2、280.1 万元/a 的用电成本。由此可以得出: 在不同优选用户规模下, 本文的既成价值评估方法均显著优于仅考虑物理特征的常规方法; 随着优选用户数量的增加, 增效幅度先减小后快速增加, 表明本文方法在大规模用户优选场景中的效果更佳。

实验 3 采用 G1 法、改进熵权法确定用户优选权重, 而实验 4 采用常规权重分配方法。通过对比实验 3 和实验 4 的结果, 可以了解 G1 法、改进熵权法对智慧用电服务用户优选效果的影响。在优选 10、50、100、200 个用户时, 实验 3 相较于实验 4 分别可多减少 3.5、5.2、87.5、45.3 万元/a 的用电成本。由此可知, 在不同优选用户规模下, 采用 G1 法、改进熵权法确定指标权重, 其效果均优于常规熵权法。但是, 相比于小规模用户优选和大规模用户优选, 在中等优选用户规模时增效幅度最佳, 该权重确定法的稳定性在大规模优选用户时仍然有待加强。

实验 2 和实验 3 的区别在于是否考虑潜在价值,两者在成本减少的情况下差别不大,因此需要进一步分析所优选出的用户的组成情况。为此,本文对不同优选规模下的用户群体进行了行业统计分析,得到用户行业占比如表 5 所示。

表 5 用户行业占比

Table 5 Proportion of user industries

实验	优选用户数量/个	连续均衡生产行业占比/%	非连续低载能行业占比/%	非连续高载能行业占比/%	灵活高载能行业占比/%
2	10	0	0	20	80
	50	0	0	26	74
	100	0	25	28	47
	200	0	30	22	48
3	10	0	0	20	80
	50	0	0	22	78
	100	0	10	18	72
	200	0	18	24	58

根据表 5 中实验 1 和实验 2 的对比分析可以发现,在优选用户数量较少时,无论是否考虑潜在价值,两种方法筛选出的用户组成差异不显著。但是,随着优选用户数量的增多,考虑潜在价值的方法倾向于选择更多非连续高载能行业和灵活高载能行业的用户,不考虑潜在价值的方法更偏向于选择非连续低载能行业用户。这一差异说明,在优选用户数量多的应用场景下,引入潜在价值能够优化智慧用电服务用户优选策略。

4.2.3 灵敏度分析

在实际评估时,用户的负荷情况往往会随着节假日、季节等发生变化。为此,本文单独对节假日的用户优选情况进行分析,其结果如图 6 所示。

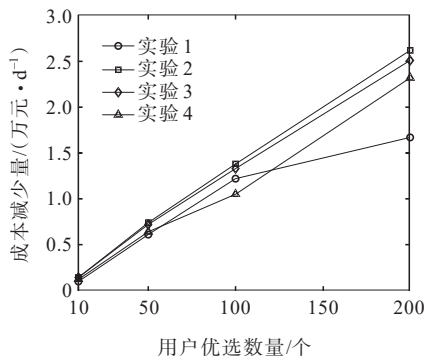
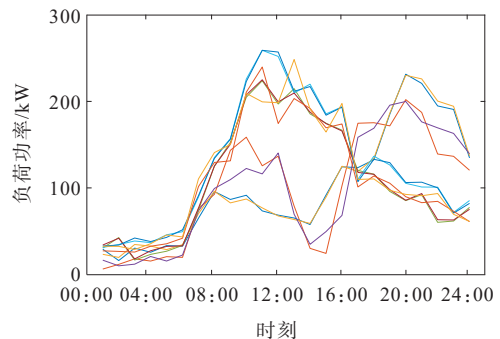


图 6 节假日下的用户优选情况

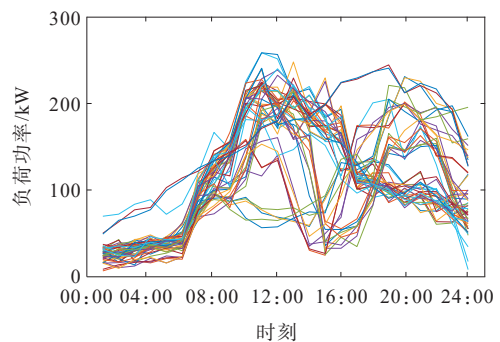
Figure 6 User prioritization under holidays

从图 6 中可以看出,在节假日场景下,相比于常规物理特征优选方法和基于传统熵权法的优选方

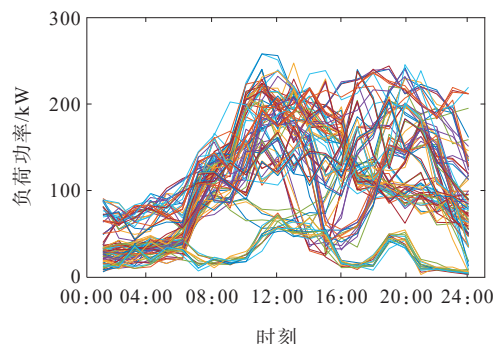
法,本文所提的优选方法依旧具有良好的效果。另外,不同优选用户规模下的负荷曲线如图 7 所示(仅展示变化趋势,不进行具体区分)。



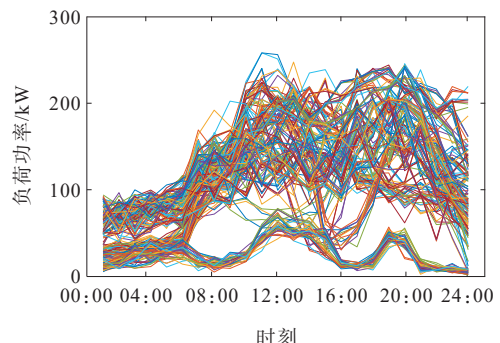
(a) 优选 10 个用户



(b) 优选 50 个用户



(c) 优选 100 个用户



(d) 优选 200 个用户

图 7 不同优选用户规模下的负荷曲线

Figure 7 Load curves under different scales of prioritized users

从图7可以看出,在优选用户不多时,优选用户主要表现为高用电量、高峰时段集中的负荷特征,具有显著的错峰潜力;在优选用户数量增多时,优选的用户呈现分层特征,大部分用户呈现出高电量、高峰值特征,小部分用户呈现出低电量、高峰谷差率、负荷形态趋同特征。此外,经过对本文优选用户进行行业分析可以发现,优选用户在非连续高载能行业、灵活高载能行业具有较高的占比,说明本文所提出的潜在价值评估方法具有一定的适用性。

5 结语

提供智慧用电服务有利于降低零售用户用电成本,引导用户进行需求响应,增强电网的安全稳定性。但是,运营方在面临行为复杂的海量零售用户时,难以快速准确地选择出适合智慧用电服务的用户。为此,本文提出了一种零售市场下智慧用电服务用户优选方法,帮助运营方选择出适合智慧用电服务的用户,为提升新型电力系统的负荷管理能力提供了一种新途径,相关研究结论如下。

1) 根据用户的负荷特点和交易特点,提出了一种考虑既成价值和潜在价值的智慧用电服务价值指标体系。该方法可合理分析用户的交易行为和用电行为,并量化用户在智慧用电服务上的价值。

2) 基于价值评估指标体系,提出了零售市场下智慧用电服务用户优选方法框架。研究结果表明,本文所提方法能够有效识别出具有更大成本降低空间的用户。

本文的主要目的在于为运营方快速选择出适合智慧用电服务的用户,具体的优化用电服务策略仍须根据用户的负荷信息、用能意愿、未来用电计划等因素进行深入研究。另外,未来还应开展高效管理海量用户数据的相关技术研究。

参考文献:

[1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.

[2] 王蓓蓓,胥鹏,赵盛楠,等.基于“互联网+”的智慧能源综合服务业务延展与思考[J].电力系统自动化,2020,44(12):1-12.

WANG Beibei, XU Peng, ZHAO Shengnan, et al. Business extension and related consideration of integrated services for smart energy based on 'Internet plus'[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 1-12.

[3] 张伟,张波,刘苑红,等.现代智慧配电网新型网架结构思考与建议[J].供用电,2025,42(6):85-92+103.
ZHANG Wei, ZHANG Bo, LIU Yuanhong, et al. Thoughts and suggestions on new grid structure of modern intelligent distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(6): 85-92+103.

[4] GUO H Y, DAVIDSON M R, CHEN Q X, et al. Power market reform in China: motivations, progress, and recommendations[J]. Energy Policy, 2020, 145: 111717.

[5] 白杨,谢乐,夏清,等.中国推进售电侧市场化的制度设计与建议[J].电力系统自动化,2015,39(14):1-7.
BAI Yang, XIE Le, XIA Qing, et al. Institutional design of Chinese retail electricity market reform and related suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 1-7.

[6] 夏超鹏.泛在电力物联网在电力市场应用中的展望[J].发电技术,2020,41(2):142-149.
XIA Chaopeng. Prospect of ubiquitous power Internet of Things in electricity market[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(2): 142-149.

[7] 刘贞,井广迷.考虑主体理性层级与信念结构变化的售电市场演化模型[J].电力建设,2025,46(10):168-180.
LIU Zhen, JING Guangmi. An evolutionary model of electricity sales market considering changes in rational hierarchy and belief structure for subjective[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10): 168-180.

[8] 徐青山,丁一帆,颜庆国,等.大用户负荷调控潜力及价值评估研究[J].中国电机工程学报,2017,37(23):6791-6800+7070.
XU Qingshan, DING Yifan, YAN Qingguo, et al. Research on evaluation of scheduling potentials and values on large consumers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6791-6800+7070.

[9] 张华鲁,严干贵,石杰,等.蓄热式电采暖柔性负荷特性建模及可调潜力研究[J].高电压技术,2022,48(6):2108-2116.
ZHANG Hualu, YAN Gangui, SHI Jie, et al. Research on the characteristics modeling and adjustable potential of regenerative electric heating flexible load[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2108-2116.

[10] 曾庆彬,梁伟强,张勇军,等.考虑多重轮换调控的空调负荷调控潜力评估与控制策略[J].电力系统自动化,2024,48(4):123-131.
ZENG Qingbin, LIANG Weiqiang, ZHANG Yongjun, et al. Regulation potential evaluation and control strategy

- of air conditioning load considering multiple rotation regulation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(4): 123-131.
- [11] 杨秀,刘欣雨,孙改平,等. 基于改进粒子群算法的中央空调系统节能优化控制[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(3): 65-75+93.
YANG Xiu, LIU Xinyu, SUN Gaiping, et al. Energy-saving optimization control of central air-conditioning system based on improved particle swarm algorithm[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(3): 65-75+93.
- [12] 范宇辉,姜婷玉,黄奇峰,等. 基于画像的工业园区需求响应潜力评估[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(1): 41-49.
FAN Yuhui, JIANG Tingyu, HUANG Qifeng, et al. Portrait-based assessment on demand response potential of industrial parks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(1): 41-49.
- [13] 王飞,李美颐,张旭东,等. 需求响应资源潜力评估方法、应用及展望[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(21): 173-191.
WANG Fei, LI Meiyi, ZHANG Xudong, et al. Assessment methods for demand response resource potential and their application and prospect[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(21): 173-191.
- [14] 杨梓俊,丁小叶,陆晓,等. 面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15): 132-140.
YANG Zijun, DING Xiaoye, LU Xiao, et al. Inverter air conditioner load modeling and operational control for demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15): 132-140.
- [15] 张凯瑞,明昊,高赐威. 基于CPSS视角的需求响应能力评估综述[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(1): 28-46.
ZHANG Kairui, MING Hao, GAO Ciwei. A review of demand response capability assessment based on CPSS perspective[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(1): 28-46.
- [16] 李新国,杨轩,程少靖,等. 面向多类型用户负荷的需求响应潜力量化评估[J]. *智慧电力*, 2024, 52(9): 56-64.
LI Xinguo, YANG Xuan, CHENG Shaojing, et al. Quantitative assessment of demand response potential for various types of user loads[J]. *Smart Power*, 2024, 52(9): 56-64.
- [17] 万靖,别芳玫,陈泽宇,等. 现货市场下考虑等效循环寿命和温控负荷的综合能源需求响应运行策略[J]. *高压电器*, 2025, 61(11): 84-97.
WAN Jing, BIE Fangmei, CHEN Zeyu, et al. Operation strategy of integrated energy demand response considering equivalent cycle life and temperature control load in spot market[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(11): 84-97.
- [18] 徐明杰,赵健,王小宇,等. 基于多任务联合模型的居民用电模式分类方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(21): 5490-5502.
XU Mingjie, ZHAO Jian, WANG Xiaoyu, et al. Residential electricity consumption pattern classification method based on multi-task joint model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(21): 5490-5502.
- [19] 王毅,张宁,康重庆,等. 电力用户行为模型:基本概念与研究框架[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(10): 2056-2068.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Electrical consumer behavior model: basic concept and research framework[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(10): 2056-2068.
- [20] ANITHA P, PATIL M M. RFM model for customer purchase behavior using K-Means algorithm[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022, 34(5): 1785-1792.
- [21] CHRISTY A J, UMAMAKESWARI A, PRIYATHARSINI L, et al. RFM ranking-An effective approach to customer segmentation[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2021, 33(10): 1251-1257.
- [22] RAHIM M A, MUSHAFIQ M, KHAN S, et al. RFM-based repurchase behavior for customer classification and segmentation[J]. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2021, 61: 102566.
- [23] SABUNCU İ, TÜRKAN E, POLAT H. Customer segmentation and profiling with rfm analysis[J]. *Turkish Journal of Marketing*, 2020, 5(1): 22-36.
- [24] RUNGRUANG C, RIYAPAN P, INTARASIT A, et al. RFM model customer segmentation based on hierarchical approach using FCA[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 237: 121449.
- [25] MENA G, COUSSEMENT K, DE BOCK K W, et al. Exploiting time-varying RFM measures for customer churn prediction with deep neural networks[J]. *Annals of Operations Research*, 2024, 339(1): 765-787.
- [26] 广东电力交易中心. 广东电力现货市场结算实施细则(2025年修订):批发市场采取三部制结算模式[EB/OL]. (2025-04-03). <https://news.bjx.com.cn/html/20250403/1435294.shtml#>.
Guangdong Power Exchange Center. Implementation rules for the settlement of Guangdong electricity spot market (2025 revision): wholesale market adopts a three-part settlement mechanism [EB/OL]. (2025-04-03). <https://news.bjx.com.cn/html/20250403/1435294.shtml#>.

- [27] 王静智, 赵磊, 邓方明, 等. 居民用户参与电网调峰激励智慧用能策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 121-127.
WANG Jingzhi, ZHAO Lei, DENG Fangming, et al. Research on smart energy consumption strategy of residents participating in peak load regulation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 121-127.
- [28] 刘林, 李成鑫, 赵林昕. 考虑用户多次响应的空调负荷集群控制与调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(18): 39-51.
LIU Lin, LI Chengxin, ZHAO Linxin. Cluster control method and scheduling strategy of air-conditioning loads considering multi-round participation of users in demand response[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(18): 39-51.
- [29] 赵莎莎, 袁葆, 安亚刚, 等. 智能电网需求侧用户参与度研究模型[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 60-66.
ZHAO Shasha, YUAN Bao, AN Yagang, et al. A study on the research model of user participation on the demand side of the smart grid[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2024, 40(3): 60-66.
- [30] 郭浩然, 刘洋, 许立雄, 等. 基于多源异构数据关联规则分析的需求响应潜力居民用户辨识方法[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1950-1961.
GUO Haoran, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Recognition of demand response potential resident users based on multi-source heterogeneous data association rule analysis [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1950-1961.
- [31] 陈逸涵, 李扬, 沈运唯. 基于负荷控制潜力量化模型的工业用户群体画像方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 208-216.
CHEN Yihan, LI Yang, SHEN Yunwei. Industrial customer group portrait method based on potential quantization model of load control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 208-216.
- [32] 赵琛, 张少华. 考虑用户切换行为的电力零售市场博弈模型[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 162-170.
ZHAO Chen, ZHANG Shaohua. Game model of electricity retail market considering consumers' switching behaviors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 162-170.
- [33] RANE N L, ACHARI A, CHOUDHARY S P. Enhancing customer loyalty through quality of service: effective strategies to improve customer satisfaction, experience, relationship, and engagement[J]. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 2023, 5(5): 427-452.
- [34] ÖZDEMİR GÜZEL S, BAŞ Y N. Understanding the relationship between physical environment, price perception, customer satisfaction and loyalty in restaurants[J]. Journal of Tourism and Gastronomy Studies, 2020, 8(2): 762-776.
- [35] 刘一民, 章家欢, 杨心平, 等. 一种基于专家调研和 G1 法的继电保护综合评价方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3533-3539.
LIU Yimin, ZHANG Jiahuan, YANG Xinping, et al. Comprehensive evaluation of relay protection based on expert investigation and G1 method[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3533-3539.
- [36] 南钰, 宋瑞卿, 陈鹏, 等. 基于改进熵权-灰色关联法的配电网可靠性影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 101-107.
NAN Yu, SONG Ruiqing, CHEN Peng, et al. Study on the factors influencing the reliability analysis in distribution network based on improved entropy weight gray correlation analysis algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 101-107.
- [37] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC 法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 143-148+162.
ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 143-148+162.
- [38] IKOTUN A M, EZUGWU A E, ABUALIGAH L, et al. K-means clustering algorithms: a comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data[J]. Information Sciences, 2023, 622: 178-210.
- [39] ROS F, RIAD R, GUILLAUME S. PDBI: a partitioning Davies-Bouldin index for clustering evaluation[J]. Neurocomputing, 2023, 528: 178-199.
- [40] SOWAN B, HONG T P, AL-QEREM A, et al. Ensembling validation indices to estimate the optimal number of clusters[J]. Applied Intelligence, 2023, 53(9): 9933-9957.
- [41] 苗璐, 樊玮, 肖红燕, 等. 基于改进 FCM 聚类的光伏电站出力场景特性研究[J]. 广东电力, 2024, 37(3): 1-11.
MIAO Lu, FAN Wei, XIAO Hongyan, et al. Study on typical output scenario characteristics of photovoltaic power station based on improved FCM clustering[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(3): 1-11.
- [42] 唐文升, 王阳, 张煜, 等. 基于多维价格弹性系数的分时电价对负荷特性影响机理[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 202-211.
TANG Wensheng, WANG Yang, ZHANG Yu, et al. Influence mechanism of time-of-use electricity prices on industry load characteristics based on multi-dimensional price elasticity coefficient matrix[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 202-211.