引用格式:莫东,郑文彬,陈明媛,等.基于熵权法的容量补偿成本用户侧分摊机制设计[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):281-289.
Citation: MO Dong, ZHENG Wenbin, CHEN Mingyuan, et al. Design of user-side allocation mechanism for capacity compensation cost based on entropy weight method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):281-289.

基于熵权法的容量补偿成本用户侧分摊机制设计

莫　东[1],郑文彬[1],陈明媛[1],陆裕富[1],杨有慧[1],丁子康[2]
(1.广西电网电力调度控制中心,广西南宁 530000;2.东南大学电气工程学院,江苏南京 210096)

摘　要:随着以风电、光伏为代表的新能源持续快速发展,常规化石能源机组面临固定成本回收困难的问题,须通过容量电价回收常规机组固定成本。但目前的容量电价分摊过程缺乏对负荷率相关因素的考虑,其分摊结果难以合理反映不同负荷率用户的实际供电成本,导致容量成本在不同用户间分摊不公平。为此,先概述电力用户行业分类方法与中国常用的用电行为指标;再选取合适的客户标签,对模糊聚类分析模型进行了分析;然后,提出基于熵权法的用户侧容量补偿综合分摊方法与兼顾支付能力和偏差电量的分配方案;最后,通过实际算例,展示了该分摊机制的具体计算流程和分配结果,验证其在不同类型用户间使用该分摊机制的合理性、公平性和可行性。

关　键　词:固定成本回收;容量电价;模糊聚类分析;熵权法;用户侧分摊
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.028　　**中图分类号**:F426.61　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0281-09

Design of user-side allocation mechanism for capacity compensation cost based on entropy weight method

MO Dong[1], ZHENG Wenbin[1], CHEN Mingyuan[1], LU Yufu[1], YANG Youhui[1], DING Zikang[2]
(1. Power Dispatching Control Center, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530000, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the continuous and rapid development of new energy represented by wind power and photovoltaic power generation, conventional fossil energy units face difficulties in recovering fixed costs, and the fixed costs of conventional units need to be recovered through capacity prices. However, the current capacity price allocation process does not take load rate-related factors into account, and the allocation results cannot reasonably reflect the actual power supply costs of users with different load rates, leading to unfair allocation of capacity costs among users. To address this issue, we first outline the industry classification methods for electricity users and the commonly used electricity consumption behavior indicators in China. Next, appropriate customer labels are selected, and the fuzzy clustering analysis model is applied. A comprehensive user-side capacity compensation allocation method based on the entropy weight method is then proposed, along with an allocation scheme that considers both payment ability and deviation in electricity consumption. Finally, through practical examples, the specific calculation process and allocation results of the allocation mechanism are demonstrated, verifying the rationality, fairness, and feasibility of applying this allocation mechanism among different types of users.

Key words: fixed cost recovery; capacity price; fuzzy clustering analysis; entropy weight method; user-side allocation

在“双碳”背景下,以风电、光伏为代表的新能源持续快速发展,已逐步成为中国电力供应的重要组成部分[1-2]。2022年,中国新能源发电量占全口径总发电量的31.3%,为系统的电量平衡提供了越来越重要的支撑。但新能源机组具有出力波动性大和调节能力差等特点,难以提供可靠的电力供给;

收稿日期:2025-03-26;**修回日期**:2025-08-07
基金项目:广西电网公司科技项目资助(046000KK52222033)。
通信作者:丁子康(2001—),男,硕士研究生,主要从事电力市场方面的研究;E-mail:19895423240@126.com

而火电机组能根据系统需求调节出力,其出力更稳定。因此,在可预见的未来,煤电等常规化石能源的发电的角色定位将发生改变。常规化石能源将不再是提供电力电量的主力电源,而会成为以提供电力为主要功能、提供电量为辅助功能的备用电源[3-4]。

随着发电行业深度参与电力市场,新能源的短期运行边际成本接近于零。这将使其在电能量市场出清中处于优势地位。新能源的发电量占比逐年升高,这也使得常规化石能源发电企业依赖发电量获取收益的运营模式愈发难以维持[5-6]。未来,常规化石能源机组将主要依靠提供辅助服务来回收固定成本。

尽管辅助服务惠及整个电力系统,但目前,相应的辅助服务费用仅在发电侧收取,用电侧几乎不支付任何费用,这不符合电力市场公平分配的原则。为保障负荷高峰时段的系统容量可靠性,提升系统的调节能力,应通过容量电价等手段将常规电源的固定成本以电价形式向用户侧疏导。2020年1月,中国国家发改委和国家能源局修订了《省级电网输配电价定价办法》[7]。中国现行容量成本分摊主要依托“分电压等级+用电类型”的框架,将用户分为居民、一般工商业和大型工业3类,按用电量或容量均摊容量电费。在输配电价核定中,容量成本通过基本电价回收,但未细化考虑负荷率、峰谷贡献等动态指标。从第一轮监审期结束的输配电价定价成果来看,中国的输配电价仍处于简单的分电压等级制定阶段,未考虑负荷率因素。电价不能正确反映不同负荷率用户的供电成本,导致其容量成本在用户间分摊不公平[8-9]。此外,现行机制缺乏对新能源波动性、需求响应等新型因素的适应性设计,难以引导用户主动参与削峰填谷。

目前,鲜有分析容量成本在用户中的分摊原则的研究。文献[10-11]根据经验来确定分摊比例,但仅从经验出发的分配方式难以令人信服。文献[12-13]分别针对传统的峰荷责任法和最大功率法进行了分析。文献[12]认为单一的峰荷责任法不能体现不同用户负荷时变特性。文献[13]也指出单一的最大功率法不能体现系统与用户间的错峰效应和用户最大负荷持续时间不同产生的差异。文献[14]利用微积分理论,提出了基于BARY曲线的容量成本分摊方法,该方法能得到任意负荷率的容量成本分摊系数,但其存在容量成本重复分摊的问题。文献[15]将BARY曲线上过某负荷率对应点的切线的纵坐标(同时率轴)与不同用户同时率之和的比值作为分摊比例系数,解决了容量成本重复分摊的问题,但该方法尚未解决不同用户按负荷率分档后的容量成本在不同负荷率档位和不同电价中同时分摊的问题。

基于这些问题,为保证容量成本在各类用户中进行公平且合理的分摊,本文先从用户侧的角度出发,对当前用户侧电力用户行业进行了分类;再通过模糊聚类分析选择能合理描述用户在电力高峰时段用电特性的用电行为作为指标;然后,提出基于支付能力和偏差电量的分配方案(简记为综合原则);最后,通过熵权法确定用户侧容量成本的综合分摊方法。

模糊聚类能综合多种典型用户标签对用户进行分类,且该方法允许一个用户属于多个类别。相比于传统硬聚类方法,模糊聚类方法能对用户群体进行更细致的特性划分,也更贴合用户实际用电行为的复杂性。通过熵权法对基于公平原则和效率原则的用电行为指标进行权重划分,并基于数据本身的统计特性来确定权重,可避免人为主观因素对指标权重的影响,保证指标评价结果的客观性和公平性。因此,本文结合模糊聚类和熵权法,保障容量成本向各类用户分摊过程的公平性与客观性。该方法对不同地区的不同类型用户均具有较强的实用性和适应性,可实现对容量成本的合理分摊。

基于熵权法的容量补偿分摊机制在实际运用中具有较好的可行性。首先,该方法通过数据特性客观赋权,其与模糊聚类方法结合后,可精准刻画不同用户的用电行为;其次,该方法兼顾支付能力与偏差电量原则,激励峰谷负荷转移,优化成本分配,保证容量成本分摊的公平性;最后,该方法契合中国现行的“分电压等级+负荷率”电价改革方向,通过系数调整实现平稳过渡,可操作性较强。容量成本向用户侧的合理分摊对中国电力系统的安全稳定运行具有参考意义,有助于保障电力系统长期稳定运行,促进新能源消纳,推进电力系统市场化改革,实现社会福利最大化。

1 容量补偿成本分摊参考指标设计

1.1 用户侧电力用户行业分类

不同电力用户的电力需求、结构、电价和其他特征不同,区分不同的电力用户并设置不同的容量补偿分摊比例会带来更合理、高效的结果。目前,对用户侧的分类方式有两种:第一种是将电力用户

分为8类，即居民生活用电、农业生产用电、大工业用电、一般工商业用电、非工业用电、普通工业用电、商业用电、非居民照明用电，这种分类方式过于细化，在处理容量补偿分摊问题时可能难以实施；第二种是根据电压等级和用电类型分为居民、一般工商业和大型工业3类。

考虑到方法的实操性，本文采用第二种分类方式。

对不同电力行业承担的容量补偿费为

$$W_C = \alpha w_1 + \beta w_2 + (1-\alpha-\beta) w_3 \tag{1}$$

式中，W_C为用户承担的总容量补偿费用；α、β均为分摊费用比例系数；w_1、w_2、w_3分别为居民、工商业、大型工业企业承担的容量补偿费用。

分摊费用比例系数α、β的取值须综合考虑用户负荷峰谷特性、负荷稳定性及政策等因素来确定。对高负荷率用户，其负荷曲线与系统峰谷的吻合度越高，其分摊系数越大；负荷稳定性强的用户可适当降低其分摊系数；政策须保障居民用电，故也可适当降低居民用电的分摊系数。目前，为平稳过渡，建议α、β都取值为1/3，后期将逐步调整。

1.2　供电公司对于可中断负荷数量Q的决策

1.2.1　业内客户标签的选择

省级电网输配电固定成本主要以容量电费的形式从总电费中回收。相比国外，中国国内的容量电费在总电费中的占比较低，不利于电网的建设和发展。为合理分摊系统容量成本，应依照某种参考指标来刻画不同用户的特点，并据此来确定分摊方式。容量成本对机组的补偿是为保障系统在高负荷时间段的电力平衡。在责任划分上，对系统负荷带来更大压力的电力负荷应承担更大的分摊责任。因此，须对电力负荷的用电行为指标进行分类。

本文选取一些指标来深入分析用户的用电行为，这些指标一般分为描述类、比较类和曲线类3种。描述类（绝对量）指标主要有：日平均负荷、日峰谷差、月平均日负荷、月平均日峰谷差、年平均日负荷、年平均日峰谷差；比较类（相对量）指标主要有：日最小负荷率、日峰谷差率、月平均日负荷率、月最小负荷率、月最大峰谷差率、月平均日峰谷差率、年最小负荷率、年平均日峰谷差率；曲线类指标主要有：日负荷曲线、周负荷曲线、年负荷曲线、年持续负荷曲线。其中，负荷曲线是分析用户用电行为最常见的指标，不同类型的负荷曲线都有其特定的应用场景和意义。

选取一定的用电行为指标分析不同客户群体的用电行为，对不同客户群体选取相应的客户标签。在标签的选择上，须考虑与直接容量补偿机制的相关性。负荷用电量、负荷增长率主要体现负荷对用电量的贡献。负荷用电量和负荷增长率越大，系统净用电量越大，为保障系统总体容量充裕度所需的发电机组越多；峰谷特性、电价敏感性和负荷稳定性主要体现负荷对用电曲线形状的贡献，在负荷高峰时段的用电量越大且该段负荷可转移能力越弱的，其对系统峰值负荷的影响越大，系统可能需要额外机组才能保障峰值负荷时段的电力平衡，这带来了这部分机组的额外容量成本，故该负荷应对容量成本承担更大的责任。综上所述，本文筛选的标签为：用电量、负荷增长率、峰谷特性、电价敏感性和负荷稳定性。用户行为标签见表1。

表1　用户行为标签

Table 1　User behavior labels

序号	指标名称	指标说明
1	用电量	在统计时间内负荷的总量
2	用户类型	包括大工业、一般工商业、居民
3	电价敏感性	分析用户对电价变化的响应情况
4	负荷稳定性	反映用户负荷曲线的波动大小和波动频率
5	负荷增长率	反映一段时间内，用户负荷的增长状况
6	峰谷特性	反应用户的峰谷特性

在表1中，电价敏感性和负荷稳定性须计算得出。

引入负荷转移率的概念来描述用户电价敏感性。负荷转移率是一种描述电价对用户用电行为影响的指标。峰谷负荷转移率被定义为用户负荷在峰谷电价差下从峰时段转移到谷时段的负荷量与原峰时段负荷量之比，即

$$\lambda_{pv,j} = \begin{cases} 0, & 0 \leqslant \Delta p_{pv,j} < a_{pv,j} \\ K_{pv,j}(\Delta p_{pv,j} - a_{pv,j}), & a_{pv,j} \leqslant \Delta p_{pv,j} < b_{pv,j} \\ \lambda_{pv,j}^{max}, & b_{pv,j} \leqslant \Delta p_{pv,j} \end{cases} \tag{2}$$

$$b_{pv,j} = \lambda_{pv,j}^{max} / K_{pv,j} + a_{pv,j} \tag{3}$$

式中，j为电力用户类别标签，$j \in \{r, c, b\}$，r、c、b分别为居民、工商业、大型工业的用户类别；$\lambda_{pv,j}$为第j类用户从峰时段到谷时段的负荷转移率；$\Delta p_{pv,j}$为峰时段第j类用户的电价$p_{p,j}$与谷时段电价$p_{v,j}$之差；$a_{pv,j}$为第j类用户的峰谷死区阈值；$b_{pv,j}$为第j类用户的峰谷饱和区阈值；$\lambda_{pv,j}^{max}$为第j类用户的峰谷最大负荷

转移率；$K_{\mathrm{pv},j}$为第j类用户负荷转移曲线在线性区的斜率。

峰时段到谷时段的负荷转移率曲线如图1所示。在图1中，M为死区上限阈值点，N为饱和区起始阈值点。

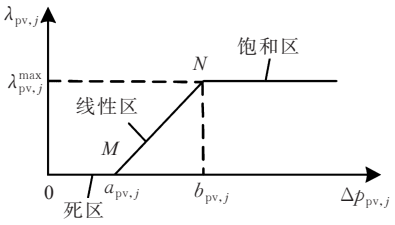

图1 峰时段到谷时段的负荷转移率曲线

Figure 1 Load transfer rate curve from peak period to valley period

同理，可得第j类用户的峰平负荷转移率$\lambda_{\mathrm{pf},j}$和平谷负荷转移率$\lambda_{\mathrm{fv},j}$的计算式，即

$$\lambda_{\mathrm{pf},j}=\begin{cases}0, & 0\leqslant\Delta p_{\mathrm{pf},j}<a_{\mathrm{pf},j}\\ K_{\mathrm{pf},j}(\Delta p_{\mathrm{pf},j}-a_{\mathrm{pf},j}), & a_{\mathrm{pf},j}\leqslant\Delta p_{\mathrm{pf},j}<b_{\mathrm{pf},j}\\ \lambda_{\mathrm{pf},j}^{\max}, & b_{\mathrm{pf},j}\leqslant\Delta p_{\mathrm{pf},j}\end{cases}\tag{4}$$

$$\lambda_{\mathrm{fv},j}=\begin{cases}0, & 0\leqslant\Delta p_{\mathrm{fv},j}<a_{\mathrm{fv},j}\\ K_{\mathrm{fv},j}(\Delta p_{\mathrm{fv},j}-a_{\mathrm{fv},j}), & a_{\mathrm{fv},j}\leqslant\Delta p_{\mathrm{fv},j}<b_{\mathrm{fv},j}\\ \lambda_{\mathrm{fv},j}^{\max}, & b_{\mathrm{fv},j}\leqslant\Delta p_{\mathrm{fv},j}\end{cases}\tag{5}$$

式中，$\Delta p_{\mathrm{pf},j}$为峰时段第j类用户的电价$p_{\mathrm{p},j}$与平时段电价$p_{\mathrm{f},j}$之差；$a_{\mathrm{pf},j}$为第j类用户的峰平死区阈值；$b_{\mathrm{pf},j}$为第j类用户的峰平饱和区阈值；$\Delta p_{\mathrm{fv},j}$为平时段第j类用户的电价$p_{\mathrm{f},j}$与谷时段电价$p_{\mathrm{v},j}$之差；$a_{\mathrm{fv},j}$为第j类用户的死区阈值；$b_{\mathrm{fv},j}$为第j类用户的饱和区阈值；$\lambda_{\mathrm{pf},j}^{\max}$、$\lambda_{\mathrm{fv},j}^{\max}$分别为第$j$类电户的峰平与平谷最大负荷转移率；$K_{\mathrm{pf},j}$、$K_{\mathrm{fv},j}$分别为第$j$类电户的峰平与平谷的负荷转移曲线在线性区的斜率。

选取峰谷负荷转移率、峰平负荷转移率、平谷负荷转移率这3个指标作为电价敏感性评价指标。

对负荷稳定性，须建立用户用电平稳性综合评价指标体系，可从日尺度、周尺度、月尺度这3个角度来考虑。

1）日尺度指标。

日尺度指标主要包括日峰谷差率、最大负荷日峰谷差率和最大负荷日负荷波动率等。最大负荷日峰谷差为最大负荷日负荷峰谷差与最大负荷的比值，最大负荷日负荷波动率为最大负荷日负荷标准差与负荷均值的比值。

2）周尺度指标。

周尺度指标主要包括周末负荷率、周负荷波动率和平均周负荷波动率等。周末负荷率定义为用户休息日平均负荷与工作日平均负荷的比值，平均周负荷波动率定义为各周负荷标准差与负荷均值之比的平均值。

3）月尺度指标。

月尺度指标主要包括月负荷率、月最大峰谷差率和月平均日负荷率。月负荷率定义为一个月内日平均负荷与最大日负荷量的比值，月平均日负荷率定义为一个月内日负荷率的平均值。

1.2.2 模糊聚类分析模型

传统的聚类分析是一种硬聚类方法，其对研究对象进行严格划分，划分界限清晰、明确。模糊聚类分析则是一种采用模糊数学语言的聚类方法，其研究对象划分界限是模糊的，一个研究对象可隶属多个类。

1）模糊聚类与传统聚类。

设$X=\{\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\cdots,\boldsymbol{x}_n\}$为一组待分类的样本集，$X$中的每个样本$\boldsymbol{x}_k=(x_{k1},x_{k2},\cdots,x_{ks})^{\mathrm{T}}\in\boldsymbol{R}^s$，$x_{kj}$为$\boldsymbol{x}_k$的第$j$维特征上的赋值。对数据集$X$划分，得到$c$个子集$X_1,X_2,\cdots,X_c$。该划分为$X$的硬C划分，如果其能满足

$$\begin{cases}X_1\cup X_2\cup\cdots\cup X_c=X\\ X_i\cap X_k=\varnothing,1\leqslant i\neq k\leqslant c\\ X_i\neq\varnothing,X_i\neq X,1\leqslant i\leqslant c\end{cases}\tag{6}$$

样本$\boldsymbol{x}_k(1\leqslant k\leqslant n)$对子集$X_i(1\leqslant i\leqslant c)$的隶属度关系函数$\mu_i(\boldsymbol{x}_k)$为

$$\mu_i(\boldsymbol{x}_k)=\mu_{ik}=\begin{cases}1, & \boldsymbol{x}_k\in X_i\\ 0, & \boldsymbol{x}_k\notin X_i\end{cases}\tag{7}$$

令$\boldsymbol{p}_i=\left(p_{i1},p_{i2},\cdots,p_{is}\right)^{\mathrm{T}}\in R^s,i=1,2,\cdots,c$为第$i$类的典型矢量。硬聚类分析的目标函数为

$$\begin{cases}J_1(\boldsymbol{U},\boldsymbol{P})=\sum\limits_{k=1}^{n}\sum\limits_{i=1}^{c}\mu_{ik}\left(d_{ik}\right)^2\\ \text{s.t. }\boldsymbol{U}\in\boldsymbol{M}_{\mathrm{hc}}\end{cases}\tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{U}$为隶属度矩阵；$\boldsymbol{M}_{\mathrm{hc}}$为硬聚类矩阵空间；$\boldsymbol{P}$为聚类中心矩阵；$d_{ik}$为第$i$类中的样本$\boldsymbol{x}_k$与第$i$类典型样本$\boldsymbol{p}_i$之间的距离；$J_1(\boldsymbol{U},\boldsymbol{P})$为各类中样本与典型样本的误差平方和。

模糊C聚类模型为

$$\begin{cases}J_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{P})=\sum\limits_{k=1}^{n}\sum\limits_{i=1}^{c}\left(\mu_{ik}\right)^m\left(d_{ik}\right)^2,m\in[1,\infty)\\ \text{s.t. }\boldsymbol{U}\in\boldsymbol{M}_{\mathrm{fc}}\end{cases}\tag{9}$$

式中，m 为加权指数；$J_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{P})$ 为模糊 C 聚类模型的目标函数；$\boldsymbol{M}_{\text{fc}}$ 为模糊聚类矩阵空间。

模糊 C 均值算法的聚类准则为取 $J_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{P})$ 的极小值，极值的约束条件为 $\sum_{i=1}^{c}\mu_{ij}=1$，可以用拉格朗日乘数法求解该模型，即

$$F=\sum_{i=1}^{c}(\mu_{ik})^m(d_{ik})^2+\lambda\left(\sum_{i=1}^{c}\mu_{ij}-1\right) \tag{10}$$

式中，F 为拉格朗日函数；λ 为拉格朗日乘子。

其一阶必要条件为

$$\frac{\partial F}{\partial\lambda}=\sum_{i=1}^{c}\mu_{ij}-1=0 \tag{11}$$

联立式(6)～(11)，可得到能使 $J_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{P})$ 为最小的 μ_{ik} 值。考虑到 d_{ik} 可能为 0，应分两种情况讨论。

对于 $\forall k$，定义集合 I_k 和 $\bar{I}_k$：$I_k=\{i|1\leqslant i\leqslant c,d_{ik}=0\}$，$\bar{I}_k=\{1,2,\cdots,c\}-I_k$，则使得 $J_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{P})$ 最小的 μ_{ik} 值为

$$\begin{cases}\mu_{ik}=\dfrac{1}{\displaystyle\sum_{j=1}^{c}\left(\frac{d_{ik}^2}{d_{jk}^2}\right)^{1/m-1}}, & I_k=\varnothing\\ \mu_{ik}=0,\forall i\in\bar{I}_k,\ \displaystyle\sum_{i\in I_k}\mu_{ik}=1, & I_k\neq\varnothing\end{cases} \tag{12}$$

类似地，以获得 $J_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{P})$ 最小值时 $\boldsymbol{p}_i$ 值。令

$$\frac{\partial J_m(\boldsymbol{U},\boldsymbol{P})}{\partial\boldsymbol{p}_i}=0 \tag{13}$$

则有

$$\boldsymbol{p}_i=\frac{\displaystyle\sum_{k=1}^{n}(\mu_{ik})^m\boldsymbol{x}_k}{\displaystyle\sum_{k=1}^{n}(\mu_{ik})^m} \tag{14}$$

用户用电行为复杂，传统硬聚类方法强制单一分类，其最后的结果可能与实际大相径庭。而模糊聚类方法通过隶属度量化研究对象对多类别的归属概率，精准刻画其交叉特征，避免硬聚类“非此即彼”的偏差。模糊聚类方法可连续输出，适配多指标场景，其与熵权法结合后可提升分类精度，为分摊权重提供动态依据，提升电网容量成本分配的公平性与合理性。

2）模糊 C 均值聚类流程。

模糊 C 均值聚类算法本质是迭代调整 $(\boldsymbol{U},\boldsymbol{P})$，使得目标函数 J 最小，模糊 C 均值聚类算法流程如图 2 所示。

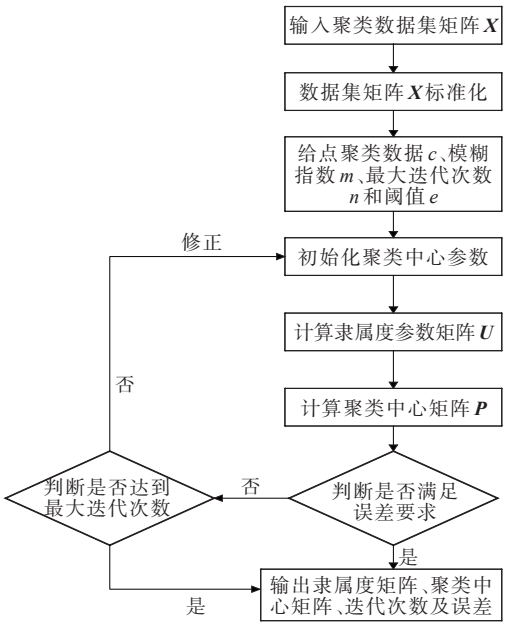

图 2　模糊 C 均值聚类算法流程

Figure 2　Flowchart of fuzzy C-means clustering algorithm

1.3　不同类型用户分摊比例参考指标

在聚类分析得到行业内用户分类后，须对分类后的用户进行容量补偿责任进一步细分。为兼顾公平和合理的原则，本文提出基于支付能力和偏差电量的参考指标。基于支付能力的参考指标根据不同类型用户的国内生产总值（gross domestic product，GDP）贡献来确定容量补偿责任；基于偏差电量的参考指标则考虑某类用户负荷曲线与系统负荷曲线之间的偏差量。

基于支付能力的容量补偿责任分摊方式为

$$w_{y,j}=\frac{G_{y,j}}{G_j}w_j \tag{15}$$

式中，$y\in\{\text{r},\text{c},\text{b}\}$ 为由聚类分析的分类结果而定的用户种类编号（其中，r、c、b 分别为居民、工商业、大型工业的用户类别）；$j\in\{\text{r},\text{c},\text{b}\}$ 为电力用户类别标签；$w_{y,j}$ 为 j 类行业中第 y 种用户应承担的直接容量补偿费用；$G_{y,j}$ 为 j 行业中第 y 种用户的生产总值；G_j 为 j 行业所有用户的生产总值之和；w_j 为 j 行业所有用户的容量分摊总额，即 j 行业所有用户的熵权。

在负荷高峰期，系统容量补偿成本较高。此时，负荷较高的用户理应承担更多的容量补偿分摊责任。在负荷低谷期，电力系统供大于求，负荷增加有利于降低系统运行成本。此时，对负荷较高的用户，应减少其容量补偿责任。

设 r_{grid} 为电网峰谷指标，当电网处于峰时段时，其值为 1；当电网处于谷时段时，其值为 −1。定义 t 时段的电网峰谷指标为 $r_{\text{grid},t}$ 为

$$r_{\text{grid},t}=\frac{P_{\text{grid},t}-\bar{P}_{\text{grid}}}{\left|P_{\text{grid},t}-\bar{P}_{\text{grid}}\right|} \tag{16}$$

式中，$P_{\text{grid},t}$为t时段内电网的平均负荷；$\bar{P}_{\text{grid}}$为电网日平均负荷。

为更准确地描述某类用户负荷曲线与系统负荷曲线之间的偏差电量，定义用户影响指标$A_{y,t}$：

$$A_{y,t}=r_{\text{grid},t}\left(P_{\text{grid},t}\frac{\bar{P}_{\text{load},y}}{\bar{P}_{\text{grid}}}-P_{\text{load},y,t}\right) \tag{17}$$

式中，$y\in\{r,c,b\}$为由聚类分析的分类结果而定的用户种类编号，$\bar{P}_{\text{load},y}$为第y类用户日平均负荷，$P_{\text{load},y,t}$为第y类用户t时段内的平均负荷。

若$A_{y,t}>0$，用户负荷曲线与系统负荷曲线之间的偏差电量较小，其应承担较低的直接容量补偿分摊比例；若$A_{y,t}<0$，用户负荷曲线与系统负荷曲线之间的偏差电量较大，其应承担更高的直接容量补偿分摊比例。

2 基于熵权法的分摊权重算法

2.1 熵权法

信息熵是信息论中量化信息不确定性或随机程度的指标。熵权法则是一种依据信息熵理论来客观分配多指标评价体系中各指标权重的赋权方法。

熵权法依据差异化程度来确定各个指标的权重，某指标变异越大、信息越丰富，其信息熵越小，其权重也越大；反之，某指标变异越小、信息越贫乏，其信息熵越大，其权重也越小。实施熵权法应在评价系统中设置m个指标和n个样本，将其中第i个样本的第j个指标测量值记为x_{ij}。其中，评价系统中标准化后的正向指标$\breve{x}_{ij}$为

$$\breve{x}_{ij}=\frac{x_{ij}-\min\left\{x_{1j},x_{2j},\cdots x_{nj}\right\}}{\max\left\{x_{1j},x_{2j},\cdots x_{nj}\right\}-\min\left\{x_{1j},x_{2j},\cdots x_{nj}\right\}} \tag{18}$$

评价系统中标准化后的负向指标$\hat{x}_{ij}$为

$$\hat{x}_{ij}=\frac{\min\left\{x_{1j},x_{2j},\cdots x_{nj}\right\}-x_{ij}}{\max\left\{x_{1j},x_{2j},\cdots x_{nj}\right\}-\min\left\{x_{1j},x_{2j},\cdots x_{nj}\right\}} \tag{19}$$

计算第j项指标下第i个样本的比重p_{ij}，即

$$p_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}x_{ij}} \tag{20}$$

计算各个指标的熵值，将第j项指标的熵值定义为e_j，即

$$e_j=-\frac{1}{\ln(n)}\sum_{i=1}^{n}p_{ij}\ln\left(p_{ij}\right) \tag{21}$$

计算信息熵的冗余度d_j，即

$$d_j=1-e_j \tag{22}$$

计算第j项指标的熵权$\hat{w}_j$，即

$$\hat{w}_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m}d_j} \tag{23}$$

熵权法计算流程如图3所示。

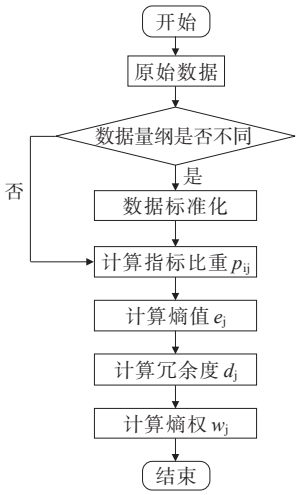

图3 熵权法计算流程

Figure 3 Calculation flowchart of entropy weight method

2.2 基于熵权法的用户侧容量补偿综合分摊方法

为求出兼顾支付能力和偏差电量（简记为综合原则）的分配策略，本文采用熵权法，对支付能力和偏差电量进行耦合，即

$$w_{tx}=\gamma_{1,x}w_{1,x}+\gamma_{2,x}w_{2,x} \tag{24}$$

式中，w_{tx}为综合原则下第x类客户的容量补偿费用，$\gamma_{1,x}$为支付能力原则下的第x类客户容量补偿权重；$w_{1,x}$为支付能力原则下的第x类客户的配额；$\gamma_{2,x}$为偏差电量原则下的第x类客户容量补偿权重；$w_{2,x}$为偏差电量原则下的第x类客户的配额。

3 算例分析

由式(1)可知，α、β的取值可以根据实际运行情况确定，本文α、β都取1/3，即居民、一般工商业和大型工业占总容量补偿费用的比例相同。在此基础上，根据表1的客户标签，采用模糊聚类分析方法，对行业内用户进行细分。

以中国某省份2022年负荷控制中心数据为例，选取558户典型一般工商业客户，对用户的合同容量、电价敏感性、负荷稳定性、负荷增长率、峰谷特性进行综合评价。

针对电价敏感性，分别计算用户的峰谷负荷转移率、峰平负荷转移率、平谷负荷转移率，并运用熵权法得到用户价格敏感性指标权重，结果见表2。

表 2　用户价格敏感性指标权重

Table 2　Weights of user price sensitivity indicators

指标	峰平负荷转移率	峰谷负荷转移率	平谷负荷转移率
权重	0.187	0.400	0.413

综合评价后，电价敏感性综合评价指标分布情况如图4所示。

运用熵权法，同样可以得到负荷稳定性分析指标的权重，其结果见表3。

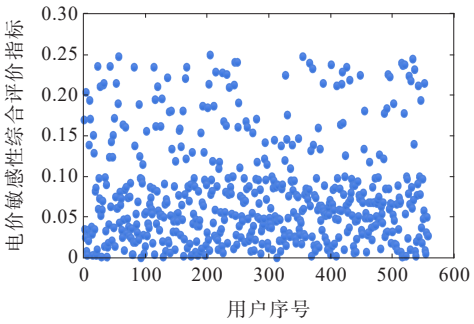

图 4　电价敏感性综合评价指标分布情况

Figure 4　Distribution of comprehensive evaluation indicators for electricity price sensitivity

表 3　负荷稳定性分析指标的权重

Table 3　Weights of load stability analysis indicators　%

指标	最大负荷日峰谷差率	最大负荷日负荷波动率	周末负荷率	平均周负荷波动率	月平均日负荷率	月负荷率
权重	0.116	0.425	0.035	0.356	0.053	0.015

负荷稳定性综合评价指标分布情况如图5所示。

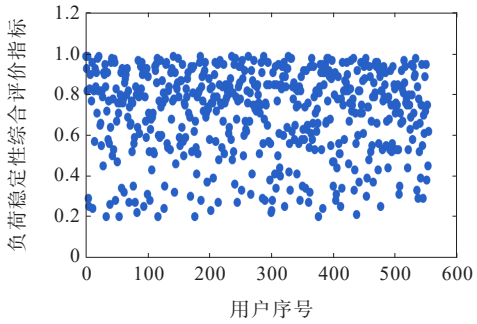

图 5　负荷稳定性综合评价指标分布情况

Figure 5　Distribution of comprehensive evaluation indicators for load stability

将用户的容量进行归一化处理，结合综合评价的合同容量、电价敏感性、负荷稳定性、负荷增长率、峰谷特性等5个可量化指标进行聚类，将用户群组分成4种类型。用户群体类型如图6所示。

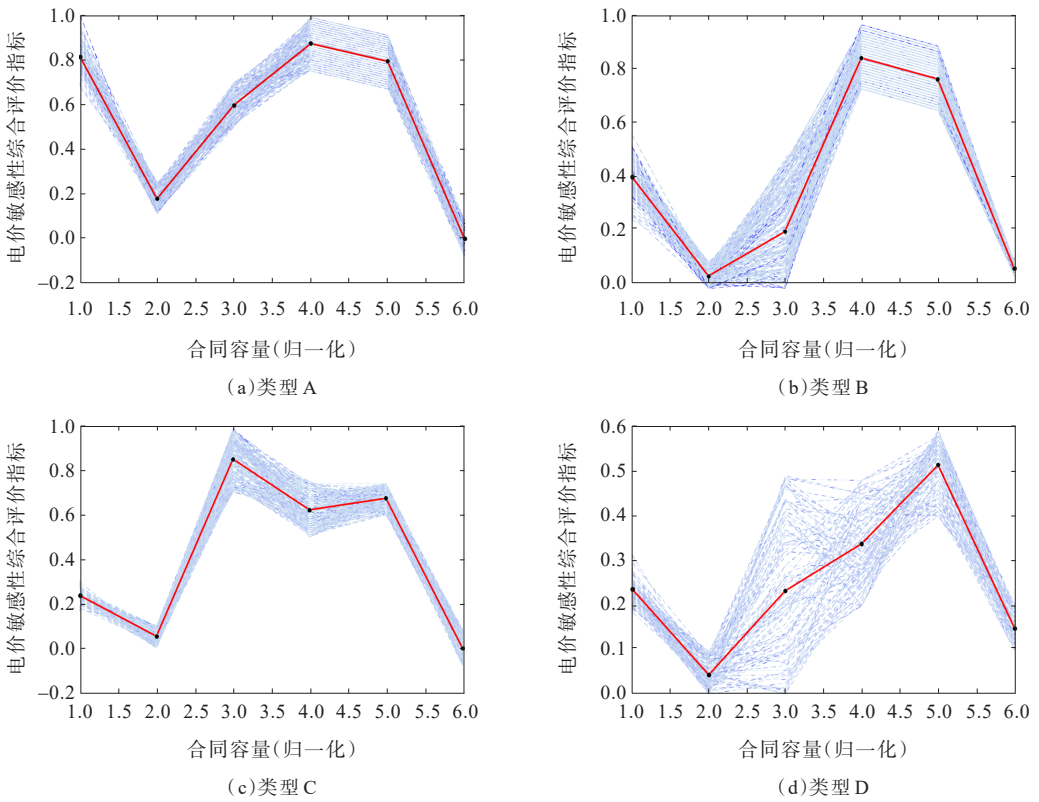

图 6　用户群体类型

Figure 6　User group types

表 4 4类客户标签特征

Table 4 Characteristics of four user label types

标签名称	客户标签特征			
	A类工业客户	B类工业客户	C类服务型商业客户	D类办公型商业客户
合同容量	大	中等	小	小
用电类型	工业	工业	商业	商业
电价敏感性	中等	低	低	低
负荷稳定性	高	高	较高	中等
电量增长率	持平	略有上升	持平	上升

结合这4类用户的属性,归纳得到这4类典型用户的特征,结果见表4。

经过聚类分析得到了客户标签的分类结果后,将按照这4类客户群体,运用熵权法,对不同类型客户群体的直接容量补偿分摊量进行计算。

先选取支付能力作为分配依据。根据调研数据,对这558户典型一般工商业客户的支付能力进行逐一梳理。运用式(12),得到这4类客户费用分摊占比,结果见表5。

表 5 支付能力原则下4类客户容量补偿费用分摊占比

Table 5 Capacity compensation cost share for four user types under ability-to-pay principle

客户群体	支付能力原则下费用分摊占比/%
A类工业客户	32.81
B类工业客户	28.94
C类服务型商业客户	14.32
D类办公型商业客户	23.93

按照该省峰谷电价用电时间段分类,高峰时段为每日11:00—13:00和17:00—23:00。依据式(13)、(14),计算不同时间段内用户影响指标,根据用户影响指标的大小,分配容量补偿的费用,偏差电量原则下4类客户容量补偿费用分摊占比见表6。

运用熵权法对两种原则进行耦合,多种分配方案下4类客户容量补偿费用分摊占比见表7。

表 6 偏差电量原则下4类客户容量补偿费用分摊占比

Table 6 Capacity compensation cost share for four user types under deviated power principle

客户群体	偏差电量原则下费用分摊占比/%
A类工业客户	35.72
B类工业客户	22.43
C类服务型商业客户	19.37
D类办公型商业客户	22.48

表 7 多种分配方案下4类客户容量补偿费用分摊占比

Table 7 Capacity compensation cost share for four user types under various allocation schemes %

客户群体	支付能力原则下费用分摊占比	偏差电量原则下费用分摊占比	综合原则下费用分摊占比
A类工业客户	32.81	35.72	34.27
B类工业客户	28.94	22.43	25.69
C类服务型商业客户	14.32	19.37	16.85
D类办公型商业客户	23.93	22.48	23.19

这4类客户的分摊占比差异直接反映了其用电行为对系统容量成本的差异化影响:A类工业客户因其合同容量大、负荷稳定性高,在系统峰时持续高负荷运行,对容量需求贡献显著,故其在偏差电量原则下分摊比例高于其在支付能力原则的比例;B类工业客户负荷稳定性高但电价敏感性低,其峰谷调节能力弱,导致其在偏差电量原则下的分摊比例低于其在支付能力原则下的比例,这也体现了其“高责任、低灵活性”特征;C类服务型商业客户负荷波动大、峰谷差显著,对系统峰时压力较大,故其在偏差电量原则下的分摊比例明显高于其在支付能力原则下的比例;D类办公型商业客户负荷增长率高但稳定性中等,其用电增量与系统峰谷部分重叠,故其在两类原则下分摊比例接近,这体现其“增长与责任并存”的特点。负荷稳定性、峰谷特性等指标直接影响偏差电量分摊结果,而合同容量、经济能力则主导支付能力分摊权重,综合原则通过熵权法耦合两类逻辑,更科学地平衡了效率与公平。

4 结语

本文先介绍了用户侧电力用户行业分类方法,根据电压等级和用电类型将电力用户分为居民、一般工商业和大型工业3类;然后,简述了中国常用的用电行为指标,并从中选取合适的客户标签,采用模糊聚类分析模型对其进行分析;最后,简要介绍了熵权法的计算方法,并提出了基于熵权法的用户侧容量补偿综合分摊方法与兼顾支付能力和偏差电量(简记为综合原则)的分配方案。该分摊方法能有效解决容量成本在不同类型用户间的分摊问题,更准确地反映不同类型用户的用电成本,优化电力系统运行,引导用户合理安排用电峰谷时段,减轻系统负荷峰值,降低自身用电成本,其对提高电力系统效益和实现可持续发展具有重要作用。

但本文所构建的模型在某些方面还有一些不足:一是依赖静态指标,未纳入新能源波动等动态

因素；二是熵权法指标选择偏主观，未涵盖环境成本等社会性维度；三是模糊聚类参数依赖经验标定，缺乏自适应优化。未来，将融合实时数据与动态指标，结合深度学习方法，优化分类，提升鲁棒性，拓展多区域实证，验证模型普适性。此外，还可探索与碳市场协同机制，推动容量分摊与能源转型目标衔接，增强模型在新型电力系统中的适用性与政策兼容性。

参考文献：

[1] 马莉，范孟华，曲昊源，等．中国电力市场建设路径及市场运行关键问题[J]．中国电力，2020，53(12)：1-9．
MA Li，FAN Menghua，QU Haoyuan，et al．Construction Path and Key Operation Issues of Electricity Market in China[J]．Electric Power，2020，53(12)：1-9．DOI：10.11930/j.issn.1004-9649.202007095．

[2] MILLIGAN M，FREW B A，BLOOM A，et al．Wholesale electricity market design with increasing levels of renewable generation：Revenue sufficiency and long-term reliability[J]．The Electricity Journal，2016，29(2)：26-38．

[3] 陈威君，谢雨辛，何永秀．市场环境下电网侧储能电站的容量电价核定优化[J/OL]．现代电力，1-8(2025-03-13)[2025-03-25]．https://doi．org/10．19725/j．cnki．1007-2322．2024．0062．
CHEN Junwei，XIE Yuxin，HE Yongxiu．Optimization of capacity tariff approval for grid-side energy storage stationsin market environment[J/OL]．Modern Electric Power，1-8(2025-03-13)[2025-03-25]．https://doi．org/10．19725/j．cnki．1007-2322．2024．0062．

[4] 国家能源局．2024年度中国电力市场发展报告[R/OL]．(2025-07-17)[2025-07-20]．https://www．nea．gov．cn/20250717/54ae0fdb11f04b39a5b670999c04ef81/2025071754ae0fdb11f04b39a5b670999c04ef81_19fe782a11f3aa40209907a80e3e692150．pdf．
National Energy Administration．2024 China electricity market development report[R/OL]．(2025-07-17)[2025-07-20]．https://www．nea．gov．cn/20250717/54ae0fdb11f04b39a5b670999c04ef81/2025071754ae0fdb11f04b39a5b670999c04ef81_19fe782a11f3aa40209907a80e3e692150．pdf．

[5] 屈博，刘畅，李德智，等．“碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]．电力需求侧管理，2021，23(2)：1-3+9．
QU Bo，LIU Chang，LI Dezhi，et al．Research on the development strategy of electricity substitution under the target of “carbon neutral”[J]．Power Demand Side Management，2021，23(2)：1-3+9．

[6] 屈博，刘畅，李德智，等．“碳中和”愿景下电力消费侧发展模式转型探讨[J]．电力需求侧管理，2021，23(5)：2-4+34．
QU Bo，LIU Chang，LI Dezhi，et al．Exploration of the development mode of electricity consumption side under “carbon neutral” vision[J]．Power Demand Side Management，2021，23(5)：2-4+34．

[7] 国家发展改革委．国家发展改革委关于印发«省级电网输配电价定价办法»的通知[EB/OL]．(2020．01．19)[2023．12．18]．http://www．china-nengyuan．com/news/china-nengyuan_news_151569．pdf．
National Development and Reform Comission．Notice of the National Development and Reform Commission on Issuing the Pricing Method for Transmission and Distribution Tariffs of Provincial Grids[EB/OL]．(2020．01．19)[2023．12．18]．http://www．china-nengyuan．com/news/china-nengyuan_news_151569．pdf．

[8] 黄海涛，高畅，吴洁晶，等．负荷率电价的选择性证明及实用化选项设计方法[J]．电网与清洁能源，2017，33(5)：74-78．
HUANG Haitao，GAO Chang，WU Jiejing，et al．Selective proof and practical option design method for load factor price[J]．Power System and Clean Energy，2017，33(5)：74-78．

[9] 林海涛．分时输配电价格机制研究[D]．北京：华北电力大学，2017．
LIN Haitao．Study on price mechanism of time-sharing transmission and distribution[D]．Beijing：North China Electric Power University，2017．

[10] 唐学军，张维，郑志云，等．销售电价结构设计与实例计算[J]．华中电力，1999，12(1)：60-62+65．
TANG Xuejun，ZHANG Wei，ZHENG Zhiyun，et al．Structure design and example calculation of sales electricity price[J]．Central China Electric Power，1999，12(1)：60-62+65．

[11] 谢传胜，郭昆．基本电价的探讨与实例计算[J]．华北电力技术，2005(9)：4-7．
XIE Chuansheng，GUO Kun．Discussion and instance calculating on capacity fee[J]．North China Electric Power，2005(9)：4-7．

[12] 黄海涛．销售电价长期边际成本定价及峰荷责任法[J]．上海电力学院学报，2012，28(2)：189-192+197．
HUANG Haitao．Long-Run marginal cost pricing and peak load pricing of electricity retail tariff[J]．Journal of Shanghai University of Electric Power，2012，28(2)：189-192+197．

[13] 姚赛．考虑负荷率因素的销售电价模型及应用[D]．长沙：长沙理工大学，2014．
YAO Sai．Sales price model considering load factor and its application[D]．Changsha：Changsha University of Science & Technology，2014．

[14] 任玉珑，曹凯，关岭．基于BARY曲线的基本电价测算模型研究[J]．技术经济，2009，28(12)：39-42．
REN Yulong，CAO Kai，GUAN Ling．Study on basic tariff reckoning model of power market based on BARY curve[J]．Technology Economics，2009，28(12)：39-42．

[15] 谭真勇．负荷率电价的理论依据、计算方法与政策选择[D]．长沙：湖南大学，2013．
TAN Zhenyong．Theoretical basis，calculation method and policy choice of load rate electricity price[D]．Changsha：Hunan University，2013．