基于组合赋权和梯形云模型的发电商市场力评价

刘　军[1]，王　苗[2]，严清心[2]，王　彩[3]，袁　超[3]

（1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院，浙江 杭州 310000；2. 浙江华云信息科技有限公司，浙江 杭州 310000；
3. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院，江苏 南京 210000）

摘　要：针对目前发电商市场力评价忽略指标数据不确定性和模糊性的问题，提出一种基于组合赋权和梯形云模型的发电商市场力综合评价方法。首先，该方法建立发电商市场力评价指标体系，采用组合赋权法得到各指标的权重；然后，利用梯形云模型计算各指标对各等级的隶属度，得到发电商隶属度评价向量；最后，将组合赋权与梯形云模型相结合按最大隶属度原则实现对发电商市场力的综合评价。算例分析验证该方法的可行性及有效性。

关　键　词：组合赋权；梯形云模型；评价体系；市场力

DOI：10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.007　　**中图分类号**：TM732　　**文章编号**：1673-9140(2021)02-0058-09

Market power evaluation of generators based on combination weighting and trapezoidal cloud model

LIU Jun[1], WANG Miao[2], YAN Qingxin[2], WANG Cai[3], YUAN Chao[3]

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
2. Zhejiang Huayun Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. NARI School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the current market power evaluation of generators ignores the uncertainty and ambiguity of the index data, a comprehensive evaluation method of generators' market power based on the combined weighting and trapezoidal cloud model is proposed. Firstly, the method establishes the market power evaluation index system of power producers, and uses the combination weighting method to obtain the weights of each index. Then, the trapezoidal cloud model is utilized to calculate the membership degree of each index to each level, and the evaluation degree vector is obtained. Combining the combination weighting with the trapezoidal cloud model, the comprehensive evaluation of the power generation market power is realized according to the principle of maximum membership degree. The feasibility and accuracy of this method are verified by the case study.

Key words: combination empowerment; trapezoidal cloud model; evaluation system; market power

收稿日期：2019-12-20；**修回日期**：2020-06-03

基金项目：国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY17000W)

通信作者：王　彩(1996-)，女，硕士研究生，主要从事电力市场的分析研究；E-mail：1727812763@qq.com

在电力市场中，交易机制、交易规则以及发电机组成本特性都会影响市场交易结果[1-2]。发电商往往利用自身规模优势，行使市场力来获得超额利润或打压竞争对手。市场力的滥用会破坏公平竞争秩序，情况严重时市场无法正常运行[3]。2001 年前后的加州电力市场危机就是一个典型的案例[4]。在中国新一轮电改进程中，广东、安徽等地也出现过不正常的市场行为，例如信息披露等[5]。因此，对发电商市场力进行有效评价，判断发电商是否存在违规行为，对中国电力市场改革的顺利进行具有重要的现实意义。

发电商通过改善技术等合理手段提高竞争力是值得提倡的，但对于不正当地滥用市场力、恶意提高电价以及破坏交易秩序的行为应该给与警告甚至处罚[6]。对此，构建市场力评价指标体系是电力市场监管的常用手段[7-8]。文献[9]基于主成分分析法对电力市场供应侧主体竞争潜力指数给出分析；文献[10]从市场结构、绩效以及供需等方面对发电商市场力评估指标进行划分；文献[11]基于市场结构、市场供需、竞标策略、供应者地位、交易结果类指标构建了电力市场监管指标体系。

在评价指标的研究中，由于指标数据往往存在不确定性和模糊性，难以准确界定指标的划分范围，如果仅通过划分市场力指标阈值范围来评价发电商市场力等级，则评价结果不够合理。对于此类问题，基于云模型的模糊评价方法是一种有效的解决手段[12-13]。文献[14]提出基于合作博弈法和梯形云模型的模糊综合评价方法，以兼顾配电网评价指标数据的不确定性和模糊性；文献[15]利用云模型和模糊评价识别电力市场中潜在危害行为。此外，权重计算是构建指标体系的重要环节。组合赋权法常用于平衡主客观影响，提高权重计算的合理性[16-20]。

基于此，该文利用组合赋权平衡主客观指标权重，并与梯形云模型相结合，兼顾指标数据的不确定性和模糊性，提出基于组合赋权和梯形云模型的发电商市场力评价方法，并通过算例分析验证该方法的可行性及有效性。

1　市场力指标体系的构建

科学的建立指标体系是评估的关键，不同电力市场对于评价体系的建立必然有差异。指标体系的内容可能存在差异，但构建指标体系的基本原理和方法都有一定的规律可循。通常先定性分析电力市场的特点，再根据市场特点选取指标，最后建立评价体系。该文将以交易顺序为脉络，建立市场力的评价指标体系。交易前选取发电商的能力评价指标，判断发电商有无影响市场价格的能力；交易中选取发电商的交易行为评价指标，判断发电商是否有不正常交易行为；交易后选取发电商的交易影响评价指标，判断发电商是否对市场产生不良影响。

1.1　市场力评价指标

单个指标的选取是建立指标体系的重要步骤，若干个互相关联的单个指标组成整个评价指标体系。因此，单个指标选取的科学与否会直接影响评价结果的正确性。该文以交易过程为顺序，交易前判断市场结构、交易中判断市场行为以及交易后判断市场绩效。根据市场结构、市场行为以及市场绩效对指标进行分类。

1.1.1　基于市场结构的市场力评价指标

发电商市场份额指标是表征发电商市场地位的指标，发电商在市场中所占份额越大其拥有的市场力就越大，对市场的支配能力就越强。指标定义为

$$S_i = \frac{Q_i}{\sum Q} \tag{1}$$

式中　Q_i 为发电商 i 的可发电量；$\sum Q$ 为市场总可发电量。

剩余供应率指标，用来判断发电商是否为关键厂商，指除该发电商以外剩余发电商可发电量与市场需求电量之比。指标定义为

$$I_{\mathrm{RSI},i} = \frac{\sum Q - Q_i}{D} \tag{2}$$

式中　$I_{\mathrm{RSI},i}$ 为发电商 i 的剩余供应率指标；D 为市场总需求电量；Q_i 为发电商 i 的可发电量；$\sum Q$ 为市场总可发电量。当发电商的剩余供应率指标大于 1，没有该厂商市场的电力需求也能满足，发电商不具有市场力。当发电商的剩余供应率指标小于 1，剩余发电商的总发电量不能满足市场需求。此时，该发电商对价格具有绝对的影响力存在市场力，且剩余供应率指标越小，发电商对价格的影响力越大即市场力越大。

必运行率指标为满足市场需求电量该发电商必须出力的电量占自身可发电量的比重：

$$I_{\mathrm{MRR},i}=\max\left\{\frac{D-(\sum Q-Q_i)}{Q_i},0\right\} \tag{3}$$

式中 $I_{\mathrm{MRR},i}$ 为发电商 i 的必运行率指标；D 为市场总需求电量；Q_i 为发电商 i 的可发电量；$\sum Q$ 为市场总可发电量。当指标大于 0 时，发电商对市场的影响与指标值成正比，指标越大发电商拥有的市场力就越大。当指标等于 0 时，当前市场中其他发电商可以满足市场需求，该发电商没有市场力。

剩余供应率指标与必运行率指标相互之间既互补又替代，可以根据实际市场情况合理选择应用。

1.1.2 基于市场行为的市场力评价指标

申报容量参与度与申报持留度指标反映发电商对参与市场的电量控制的程度。申报容量参与度＝发电商申报电量/发电商可发电量，申报持留度＝(发电商可发电量－发电商申报电量)/发电商可发电量。申报容量参与度与申报持留度之和为 1。发电商的持留度指标越高，该发电商控制参与市场的电量用来抬价的可能性就越大，行使市场力的可能性就越大。

高报价率为一段时间内发电商报价接近最高价时段的比率。指标越高，发电商企图报高价取得获利的意图越明显。零报价率为一段时间内发电商报价接近 0 的时段的比率。指标越高，该时段市场供应充足，发电商只想拿到发电权，没有市场力。

1.1.3 基于市场绩效市场力评价指标

勒纳指数反映市场出清价格与发电商边际成本的偏离程度：

$$L_i=\frac{P-C_i}{P} \tag{4}$$

式中 L_i 为发电商 i 的勒纳指数；P 为市场出清价格；C_i 为发电商 i 的边际成本。市场中供大于求时，勒纳指数小，发电商没有行使市场力的动机；当供不应求时，价格不具有弹性，勒纳指数趋于无穷，发电商具有的市场力大。

市场价格可控指数是发电商对价格的控制弹性：

$$I_{\mathrm{MPC},i}=\frac{C_{i,\max}-C_{i,\min}}{C_{i,\max}} \tag{5}$$

式中 $I_{\mathrm{MPC},i}$ 为发电商 i 的价格可控指数；$C_{i,\max}-C_{i,\min}$ 为发电商 i 可以控制的市场价格范围；$C_{i,\max}$ 为发电商 i 可以控制的最高市场价格。市场价格可控指数越大，发电商的行使市场力的能力就越大。

市场力行使指数是反映发电商对市场价格的影响度：

$$I_{\mathrm{MPE},i}=\frac{P-C_{i,\min}}{C_{i,\max}-C_{i,\min}} \tag{6}$$

式中 $I_{\mathrm{MPE},i}$ 为发电商 i 的市场力行使指数；P 为市场出清价格；$C_{i,\min}$ 为发电商 i 可以控制的最低市场价格。市场力行使指数越大，发电商实际行使的市场力就越大。

1.2 指标体系的建立

根据市场力评价指标，建立发电商市场力评价指标体系。实际市场运用中可以根据电力市场特点和需求灵活剔除或补充指标。指标体系如表 1 所示。

表 1 市场力评价指标体系

Table 1 Market power evaluation index system

市场结构(交易前)	市场行为(交易中)	市场绩效(交易后)
市场份额 X_1	申报持留度 X_4	勒纳指数 X_7
剩余供应率 X_2	高报价率 X_5	市场价格可控指数 X_8
必运行率 X_3	零报价率 X_6	市场力行使指数 X_9

2 市场力指标权重的确定

指标权重的确定是评价模型的关键环节。权重的确定通常有 2 种方法：主观赋权和客观赋权。层次分析法和相容矩阵法是主观赋权，专家打分给出指标的判断矩阵，主观影响过大；而熵权法为客观赋权，对数值差异的敏感性较高，依赖于样本数据的合理性[14]。该文利用组合赋权对主、客观赋权方法进行组合，平衡主、客观的影响，使权重计算更具有合理性。计算指标的权重过程如下：先通过相容矩阵分析法求解主观权重，再利用熵权法求解客观权重，最后利用分配系数调节得出综合权重。

2.1 相容矩阵分析法

相容矩阵分析法为主观赋权法，相较于层次分析法不需要进行一致性检验。基于发电商市场力评价体系，通过现有专家经验构建指标判断矩阵 $\boldsymbol{C}$。相容矩阵对 $\boldsymbol{C}$ 矩阵中的元素 a_{ij} 进行一致性修正，

使判断矩阵 $\boldsymbol{C}$ 满足一致性要求。具体步骤如下。

1）构造指标判断矩阵 $\boldsymbol{C}=(c_{ij})_{n\times n}$，$c_{ii}=1$，$c_{ij}=1/c_{ji}$。判断标度如表 2 所示。

2）计算相容矩阵 $\boldsymbol{A}$，计算公式为

$$a_{ij}=\sqrt[n]{\prod_{k=1}^{n}c_{ik}\cdot c_{kj}} \tag{7}$$

式中　a_{ij} 为矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中第 i 行、第 j 列元素，$\boldsymbol{A}$ 矩阵满足 $a_{ii}=1$，$a_{ij}=1/a_{ji}$，$a_{ij}=a_{ik}\cdot a_{kj}$。

3）求解指标权重：

$$w_i=\frac{b_i}{\sum_{k=1}^{n}b_k},i=1,2,\cdots,n \tag{8}$$

式中　$b_i=\sqrt[n]{\prod_{k=1}^{n}a_{ik}}$。

表 2　指标标度含义

Table 2　Indicator scale meaning

标度数字	两指标标度的含义
1	同样重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	非常重要
9	极其重要
2、4、6、8	上述相邻指标的中间值
以上各数值的倒数	反比较，$c_{ij}=1/c_{ji}$

2.2　熵权法

熵权法为客观赋权法，通过取样指标参数来计算各指标的权重。基于指标参数，计算指标的信息熵，一个指标的信息熵越小所提供的信息就越大，在评价中所占权重就大。具体步骤如下。

1）选取市场中不同发电商各指标下的参数构成判断矩阵，进行标准化，原矩阵为

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{9}$$

参数标准化公式为

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}-\min x_i}{\max x_i-\min x_i},$$
$$i=1,2,\cdots,n,\ j=1,2,\cdots,m \tag{10}$$

式中　x_{ij} 为第 i 个发电商第 j 个指标值；$\min x_i$、$\max x_i$ 分别为第 i 行的最小、最大值；y_{ij} 为标准化过后的矩阵参数值。

2）根据信息论中信息熵的定义，计算各指标的信息熵，令 $P_{ij}=y_{ij}/\sum_{i=1}^{n}y_{ij}$，则指标的信息熵为

$$E_j=-\ln(m)^{-1}\sum_{i=m}^{m}P_{ij}\ln P_{ij} \tag{11}$$

若 $P_{ij}=0$，则定义 $\lim_{P_{ij}\to 0}P_{ij}\ln P_{ij}=0$。

3）确定各指标权重，通过信息熵计算各指标的权重：

$$w_j=\frac{1-E_j}{n-\sum_{k=1}^{n}E_k} \tag{12}$$

2.3　组合赋权法

通过组合赋权计算 2 种方法所求权重的分配系数 k_1、k_2，对所有指标进行赋权。相容矩阵法所求权重为 w_i，熵权法计算的权重为 w_j，设二者满足距离函数：

$$d(w_i,w_j)=\left[\frac{1}{2}\sum_{i=j=1}^{n}(w_i-w_j)^2\right]^{1/2} \tag{13}$$

则分配系数满足条件：

$$d(w_i,w_j)^2=(k_1-k_2)^2 \tag{14}$$

$$k_1+k_2=1 \tag{15}$$

指标 i 的综合权重为

$$W_i=k_1w_i+k_2w_j \tag{16}$$

式中　$i=j=1,2,\cdots,n$。

3　发电商市场力综合评价模型

市场力评价指标划分时具有模糊性，实际难以准确界定划分范围，若仅通过划分市场力指标阈值范围来评价发电商市场力等级，则评价结果不够合理。同时，指标数据对于等级的隶属度具有不确定性，尤其是靠近边界值的指标数据，对相邻两边等级都应存在一定隶属度，若仅认为所有指标数据的隶属度始终落在一个等级上，非 1 即 0，并不符合实际情况。该文利用云模型的模糊评价方法来解决上述问题。

3.1　基于正态云模型的评价模型

复杂系统评估中普遍存在不确定性，在此背景下云模型应运而生。在复杂的评价体系中有可以用

精确数值进行描述的定量变量，也有只能用模糊语言来描述的定性变量。云模型最大限度地保留了评估过程中的这种不确定性[11-15]。

云模型主要由 3 个参数组成（E_x，E_n，H_e），E_x 为云的期望，表示云滴在论域空间分布的期望值；E_n 为云的熵，表示定性概念的不确定度；H_e 为超熵，表示熵的不确定度的度量。

$$\begin{cases} E_x = (B_{\min} + B_{\max})/2 \\ E_n = (B_{\max} - B_{\min})/6 \\ H_e = k \end{cases} \tag{17}$$

式中 $B_{\min}$、$B_{\max}$ 分别为指标的双边约束的取值边界值；k 值一般根据指标实际情况经验取值，大小可根据变量本身的模糊阈度来进行具体调整。对于只有单边界的指标，如（$B_{\min}$，∞）或（−∞，$B_{\max}$）可以先测试指标的边界值再根据式(17)计算。

以该评价体系为例，说明基于正态云模型的评价步骤：

1)建立评价体系，将市场力指标划分为小、中、大 3 个等级；

2)计算指标各等级下的云参数（E_x，E_n，H_e）；

3)生成以 E_n 为期望、H_e 为方差的正态随机数 E'_n；

4)生成以 E_x 为期望、E'_n 为方差的正态随机数 x_i；

5)求解发电商的指标数据 x 对定性概念的隶属度：

$$u_i = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2E'^2_n}\right) \tag{18}$$

6)组合赋权计算指标权重；

7)将步骤 5 得到指标的隶属度矩阵与步骤 6 得到的指标权重矩阵的转置相乘，计算得出发电商的市场力等级的综合隶属度矩阵，根据取隶属度最大值原则得出评价结果。

3.2 基于梯形云模型的评价模型

梯形云模型相较于正态云模型更符合人类对于模糊变量进行定性定量分析的实际情况。正态云模型只存在一个云滴的隶属度为 1，而有一些市场力的评价指标在区间内对于定性概念的隶属度都为 1，且部分指标在一定范围内只有半边云，梯形云模型的 2 个期望值可以满足条件。该文选取的部分指标也具有上述的隶属度需求，因此，该文利用梯形云模型更为合理。

梯形云模型的 4 个数字特征是（E_{x1}，E_{x2}，E_n，H_e），用期望区间［E_{x1}，E_{x2}］、熵 E_n 和超熵 H_e 表示整体定量特性，其中 $E_{x1} \leqslant E_{x2}$，当 $E_{x1} = E_{x2}$ 时梯形云特殊化为正态云。

该文将发电商市场力分为小、中、大 3 个等级，分析各类指标数据和各个指标的理想值，可得到对应状态的梯形云隶属函数。通过发电商指标数据以及云数字特征参数计算指标对应等级的隶属度：①判断指标数据 x。若 x 属于［E_{x1}，E_{x2}］，则隶属度 $\mu = 1$；若 $x < E_{x1}$，则 $E_x = E_{x1}$；若 $x > E_{x2}$，则 $E_x = E_{x2}$。②计算指标数据 x 对定性概念的隶属度：

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2E'^2_n}\right) \tag{19}$$

其中，E'_n 是以 E_n 为期望、H_e 为标准差生成的一个正态随机数。

综上所述，基于组合赋权和梯形云模型发电商市场力评价模型的步骤如下。

1)建立发电商市场力综合评价指标体系。

2)运用相容矩阵分析法和熵权法确定各指标的权重，再由组合赋权计算 2 种方法所得权重的分配系数，得出指标综合权重。

3)计算指标各等级下的梯形云模型参数（E_{x1}，E_{x2}，E_n，H_e）。

根据已有的发电商市场力评价指标的数据的分布和指标在各等级下的取值情况计算指标的梯形云模型。所有指标对应等级下的云数字特征参数如表 3 所示。指标 X_1 对应 3 个等级下生成的梯形云模型隶属度如图 1 所示，从左往右，依次对应等级小、中、大。

4)基于梯形云模型得到发电商各指标数据的隶属度，计算指标数据 x 对定性概念的隶属度 μ（式(19)）。

5)结合步骤 2 得出的综合指标权重矩阵和步骤 4 得出的隶属度矩阵，最终得到发电商市场力的综合隶属度评估向量，利用最大隶属度原则得出最后评价结果。

表 3　指标的云数字特征参数

Table 3　Cloud digital characteristic parameter

指标	大	中	小
X_1	0.2,1,0.03,0.002	0.085,0.085,0.026,0.002	0.025,0.025,0.019,0.02
X_2	0,0.8,0.30,0.01	0.8,1,0.187,0.01	1.25,5,1.41,0.11
X_3	0.04,1,0.012,0.01	0.03,0.03,0.075,0.01	0.01,0.01,0.038,0.01
X_4	0.8,1,0.149,0.01	0.35,0.35,0.187,0.01	0.05,0.05,0.037,0.01
X_5	0.8,1,0.149,0.01	0.35,0.35,0.112,0.01	0.1,0.1,0.075,0.01
X_6	0.05,0.05,0.037,0.01	0.25,0.25,0.112,0.01	0.6,1,0.15,0.01
X_7	1,15,0.075,0.01	0.55,0.55,0.337,0.01	0.05,0.05,0.037,0.01
X_8	100,600,37.4,0.8	65,65,26.2,0.8	15,15,11.2,0.8
X_9	50,200,18.7,0.8	35,35,11.2,0.8	10,10,7.49,0.8

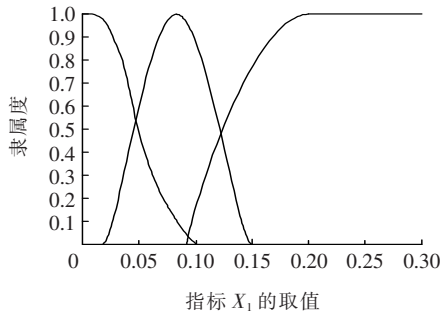

图 1　指标 X_1 的梯形云模型

Figure 1　Trapezoidal cloud model diagram of indicator X_1

4　算例分析

以 4 个参与电力市场交易的发电商为例，各发电商基本指标数据如表 4 所示。

若不计及指标数据的不确定性和模糊性，指标阈值范围的划分如表 5 所示。按照在阈值划分范围内的指标数据隶属度为1，不在阈值划分范围内的指标数据隶属度为 0 的原则，得到该方法下的隶属度评估向量，如表 6 所示。结合指标权重，按隶属度最大原则得出综合评价结果如表 7 所示。

表 4　发电商基本指标数据

Table 4　Generator basic indicator data

指标	发电商			
	1	2	3	4
X_1	0.099 0	0.047 4	0.019 0	0.007 0
X_2	0.00	0.60	1.00	1.23
X_3	0.31	0.06	0.00	0.00
X_4	0.09	0.10	0.00	0.00
X_5	0.50	0.50	0.25	0.25
X_6	0.50	0.25	0.25	0.50
X_7	0.60	0.55	0.50	0.40
X_8	29.00	8.00	7.80	0.70
X_9	19.00	6.00	0.00	0.00

表 5　未计及不确定性和模糊性的指标的阈值划分范围

Table 5　Threshold division of indicators excluding uncertainty and ambiguity

指标	等级		
	大	中	小
X_1	[0.2,1]	[0.05,0.2)	[0,0.05)
X_2	[0,0.8]	(0.8,1]	(1,∞)
X_3	[0.04,1]	[0.02,0.04)	[0,0.02)
X_4	[0.6,1]	[0.1,0.6)	[0,0.1)
X_5	[0.6,1]	[0.1,0.6)	[0,0.1)
X_6	[0,0.1]	(0.1,0.4]	(0.4,1]
X_7	[1,∞]	[0.1,1)	[0,0.1)
X_8	[100,600]	[30,100)	[0,30)
X_9	[50,200]	[20,50)	[0,20)

表 6　未计及不确定性和模糊性的隶属度评估向量

Table 6　Membership evaluation vectors excluding uncertainty and ambiguity

指标	发电商			
	1	2	3	4
X_1	0,0,1	0,0,1	0,0,1	0,0,1
X_2	1,0,0	1,0,0	0,1,0	0,0,1
X_3	1,0,0	1,0,0	0,0,1	0,0,1
X_4	0,0,1	0,1,0	0,0,1	0,0,1
X_5	0,0,1	0,1,0	0,1,0	0,1,0
X_6	0,1,0	0,1,0	0,1,0	0,0,1
X_7	0,0,1	0,1,0	0,1,0	0,1,0
X_8	0,1,0	0,0,1	0,0,1	0,0,1
X_9	0,0,1	0,0,1	0,0,1	0,0,1

表 7 梯形云模型的隶属度评估向量

Table 7 Membership evaluation vector of trapezoidal cloud model

指标	发电商			
	1	2	3	4
X_1	0.004,0.879,0.181	0.050,0.364,0.418	0.014,0.092,0.961	0.005,0.005,0.745
X_2	1,0,0.605	1,0.507,0.915	0.806,1,0.984	0.374,0.435,1
X_3	1,0,0	1,0.882,0.228	0.005,0.899,0.889	0.229,0.906,0.915
X_4	0.005,0.765,0.512	0,0.428,0.27	0,0.235,0.476	0,0.134,0.126
X_5	0.165,0.408,0.423	0.094,0.402,0.87	0,0.588,0.511	0.002,0.694,0.419
X_6	0,1,0.066	0.001,1,0.055	0,1,0.05	0,0.026,0.754
X_7	0,0.998,0.753	0,1,0	0,0.987,0	0,0.902,0
X_8	0.602,0.993,0	0.05,0.058,0.804	0.045,0.081,0.827	0.025,0.035,0.337
X_9	0.203,0.694,0.623	0.058,0.124,0.84	0.045,0.106,0.798	0.025,0.05,0.447

若计及指标数据的不确定性和模糊性，先利用梯形云模型计算出发电商各指标数据对各等级的隶属度，得到的隶属度评估向量结果如表 8 所示。将梯形云模型与组合赋权相结合，计算综合评价向量，根据隶属度最大原则得出发电商市场力模糊综合评价结果，如表 9 所示。

由表 4～6 可知，发电商 1 的评价指标 X_1、X_4、X_5、X_7、X_9 的值均临近阈值划分边界的值，指标数据与“中”、“小”2个等级相邻。若不考虑不确定性和模糊性，则这 5 个指标的数据只能落在等级“小”，其他等级的隶属度都为 0。

表 8 未计及不确定性和模糊性的发电商市场力综合评价结果

Table 8 Power producer market power comprehensive evaluation results of irrespective indicator excluding uncertainty and ambiguity

发电商	等级			
	大	中	小	评价结果
1	0.258	0.198	0.544	小
2	0.258	0.344	0.398	小
3	0.000	0.290	0.710	小
4	0.000	0.127	0.873	小

表 9 基于梯形云模型的发电商市场力综合评价结果

Table 9 Comprehensive evaluation results of market power of generators based on trapezoid cloud model

发电商	等级			
	大	中	小	评价结果
1	0.381 7	0.603 1	0.210 3	小
2	0.285 6	0.474 9	0.513 3	小
3	0.092 6	0.478 7	0.688 0	小
4	0.080 9	0.323 6	0.538 3	小

表 7 中发电商 1 的指标数据 X_1、X_4、X_5、X_7、X_9 在云模型中的隶属度分别为(0.004，0.879，0.181)、(0.005，0.765，0.512)、(0.165，0.408，0.423)、(0，0.998，0.753)、(0.203，0.694，0.623)，考虑到模糊性和不确定性，指标数据对于 3 个等级都存在相应的隶属度。尤其是与 2 个等级相邻的指标数据，对应“中”、“小”等级的隶属度都应存在，相较于表 6 中非 0 即 1 的隶属度的计算，表 7 更加合理。

对比表 8、9，未计及不确定性和模糊性的方法中，发电商 1 的评价等级为“小”；而基于组合赋权和梯形云模型的计算结果为“中”。这是因为前者主观划分阈值过程中，没考虑到指标边界存在的模糊性。同时，也没有考虑到指标数据对各等级隶属度的不确定性。一方面，若指标阈值划分不合理将直接导致结果的偏差，主观影响较大。另一方面，一个指标数据可能对每个等级都有隶属度，尤其是临近边界的数据，对于左、右 2 个等级都应该存在一定的隶属度，但未计及不确定性和模糊性的方法只能让指标数据落在一个等级上，这对于评价结果可能存在影响。梯形云模型极大程度避免了此问题，考虑到指标划分的边界具有模糊性，降低了主观影响。尤其是边界指标数据的计算中提高了指标数据 x 的隶属度计算的合理性。

基于梯形云模型的评价结果，发电商 1 市场力

偏强达到等级“中”，其余 3 个发电商市场力综合评价等级都为“小”。依据指标隶属度向量进一步分析可知：发电商 3、4 市场结构类指标对等级“小”的隶属度都较高，即不具备滥用市场力的能力。发电商 2 的剩余供应率指标以及必运行率指标对等级“大”的隶属度为 1，为市场中的关键厂商，但其市场价格可控指数和市场力行使指数对等级“小”的隶属度较高，说明发电商 2 虽然拥有较大的市场力但并没有行使市场力，仅需对其加强监督。发电商 1 的剩余供应率指标对等级“大”的隶属度为 1，市场价格可控指数及市场力行使指数对等级“中”的隶属度都很高，说明其拥有并行使了市场力，且对市场交易产生了一定影响。因此，对于发电商 1 应给与警告。

5　结语

发电商市场力的评价是一个复杂的过程。该文综合考虑评价指标数据具有的不确定性和模糊性，提出利用梯形云模型计算市场力评价指标的评估等级隶属度向量，利用组合赋权的方法平衡主、客观指标权重计算。算例分析表明，该方法减少了客观赋权对数据过于敏感而带来的指标权重不合理的影响，并避免了主观权重带来的主观性过大的问题，提高了评价结果的合理性。此外，基于该文中的指标体系及指标隶属度计算值，可对发电商是否具有市场力、是否行使市场力以及是否对市场交易产生影响进行有效分析，可为市场监管提供参考依据。

参考文献：

[1] 张永明，郭晨雨，何英静，等. 开放售电市场环境下考虑 DG 和 ILR 的配电网双层规划[J]. 电力科学与技术学报，2020，35(3)：107-113.
ZHANG Yongming，GUO Chenyu，HE Yingjing，et al. Distribution network planning considering DG and ILR under the environment of power sales side liberalization [J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2020，35(3)：107-113.

[2] 代琼丹，邓昕，吴雪妍，等. 能源互联网下综合能源服务商业模式综述[J]. 高压电器，2021，57(2)：135-144.
DAI Qiongdan，DENG Xin，WU Xueyan，et al. Overview on integrated energy service business model under energy internet[J]. High Voltage Apparatus，2021，57(2)：135-144.

[3] 曹伟，叶桂南，周先哲，等. 用电经济政策调整下电力市场交易发电侧报价研究[J]. 电网与清洁能源，2019，35(12)：49-53.
CAO Wei，YE Guinan，ZHOU Xianzhe et al. A study on the generation side bidding of electricity market transaction under the adjustment of electricity consumption policy[J]. Power System and Clean Energy，2019，35(12)：49-53.

[4] 薛禹胜，徐群，辛耀中，等. 加州电力危机的动态仿真和防御对策分析(一)模型的建立和定性分析[J]. 电力系统自动化，2004，28(7)：24-29.
XUE Yusheng，XU Qun，XIN Yaozhong，et al. Dynamic simulation and countermeasure analyses of California power crisis part one models and qualitative analyses [J]. Automation of Electrical Power System，2004，28(7)：24-29.

[5] 高怡静，肖艳炜，杨朋朋，等. 基于强化学习的电力市场信息披露程度对市场成员交易行为影响研究[J]. 智慧电力，2020，48(2)：109-118.
GAO Yijing，XIAO Yanwei，YANG Pengpeng et al. Influence of information disclosure on trading behavior in electricity market based on reinforcement learning[J]. Smart Power，2020，48(2)：109-118.

[6] 陈政，张翔，马子明，等. 引导电力供需长期有效均衡的容量市场设计[J]. 中国电力，2020，53(8)：164-172.
CHEN Zheng，ZHANG Xiang，MA Ziming，et al. Guide the long-term effective power supply and demand balance design capacity of the market[J]. Elecric Power，2020，53(8)：164-172.

[7] Rahimi A F，Sheffrin A Y. Effective market monitoring in deregulated electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2003，18(2)：486-493.

[8] 陈青，杨骏伟，黄远明，等. 国外电力市场中市场力监测与缓解机制综述[J]. 南方电网技术，2018，12(12)：10-15.
CHEN Qing，YANG Junwei，HUANG Yuanming，et al. Surveillance indicates and evaluating system of electricity market[J]. Southern Power System Technology，2018，12(12)：10-15.

[9] 李东东，段维伊，周波，等. 基于主成分分析的电力市场供应侧主体竞争潜力指数研究[J]. 电力系统保护与控

制,2020,48(19):1-8.
LI Dongdong,DUAN Weiyi,ZHOU Bo,et al. Competitive potential index of the supply side of the market entity based on principal component analysis[J]. Power System Protection and Control,2020,48(19):1-8.

[10] 杨力俊,郭联哲,谭忠富.几种发电商市场力评估指标的对比分析[J].电网技术,2005,29(2):2-7.
YANG Lijun, GUO Lianzhe, TAN Zhongfu, et al. Comparative analysis of market power evaluation indexes of power generators[J]. Power System Technology,2005,29(2):2-7.

[11] 刘敦楠,陈雪青,何光宇,等.电力市场评价指标体系的原理和构建方法[J].电力系统自动化,2005,29(23):2-7.
LIU Dunnan, CHEN Xueqing, HE Guangyu, et al. The principle and construction method of power market evaluation system[J]. Automation of Electrical Power System,2005,29(23):2-7.

[12] 张秀文,王林,宋仁杰,等.基于云模型的配电网综合评价方法[J].计算机工程与设计,2018,39(7):2096-2101.
ZHANG Xiuwen, WANG Lin, SONG Renjie, et al. Comprehensive evaluation method of distribution network based on cloud model[J]. Computer Engineering and Design,2018,39(7):2096-2101.

[13] 周永林,王磊.基于云模型理论的多层次模糊综合评价法[J].计算机仿真,2016,33(12):390-395.
ZHOU Yonglin,WANG Lei. Multi level fuzzy comprehensive evaluation method based on cloud model theory[J]. Computer Simulation,2016,33(12):390-395.

[14] 门业堃,钱梦迪,于钊,等. 基于博弈论组合赋权的电力设备供应商模糊综合评价[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(21):179-186.
MEN Yekun, QIAN Mengdi, Yu Zhao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of power equipment suppliers based ongame theory and combination weighting[J]. Power System Protection and Control,2020,48(21):179-186.

[15] 刘敦楠,张潜,李霄彤,等.基于云模型和模糊 Petri 网的电力市场潜在危害行为识别[J].电力系统自动化,2019,43(2):25-33.
LIU Dunnan,ZHANG Qian,LI Xiaotong,et al. Based on cloud model and fuzzy Petri net to identify the potential harmful behaviors in power market[J]. Automation of Electrical Power System,2019,43(2):25-33.

[16] 李霄.我国电力市场力评价指标和方法研究[D].北京:华北电力大学,2017.

[17] 陈仲伟,黄来,王逸超,等.基于全寿命周期理论的电网技术经济评价体系[J].电力科学与技术学报,2017,32(4):120-124.
CHEN Zhongwei,HUANG Lai,WANG Yichao,et al. Technical economic evaluation system of power grid based on the whole-life-cycle theory[J]. Journal of Electric Power Science And Technology,2017,32(4):120-124.

[18] 黄宇翔,李绍金,刘乐平,等.基于优化组合赋权法的含分布式电源配电网规划设计[J].电力科学与技术学报,2012,27(4):40-45.
HUANG Yuxiang,LI Shaojin,LIU Lepin,et al. Designing of distribution networks with distributed generation based on optimum combination weighting method[J]. Journal of Electric Power Science And Technology,2012,27(4):40-45.

[19] 唐俊熙,王梓耀,张俊潇,等. 基于文化蚁群算法的高可靠多电源配电网规划模型[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(7):99-107.
TANG Junxi,WANG Ziyao,ZHANG Junxiao,et al. High reliability multi-power distribution network planning model based on memetic ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control,2020,48(7):99-107.

[20] 卢仁军,李然,王健,等. 考虑需求侧响应的新能源接入下的配电网无功规划研究[J].电测与仪表,2020,57(6):46-51.
LU Renjun,LI Ren,WANG Jian,et al. Reactive power planning of distribution network with renewable energy resourceconsidering demand response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2020,57(6):46-51.