

# 新电改背景下基于多属性决策的 电力客户评估和选择研究

曹清山<sup>a</sup>, 郑梦莲<sup>b</sup>, 丁一<sup>a</sup>, 宋永华<sup>a</sup>

(浙江大学 a. 电气工程学院, b. 能源工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

## Multi-Attribute Decision Making Model for Customer Evaluation and Selection in Electricity Market

CAO Qingshan<sup>a</sup>, ZHENG Menglian<sup>b</sup>, DING Yi<sup>a</sup>, SONG Yonghua<sup>a</sup>

(a. College of Electrical Engineering, b. College of Energy Engineering, Zhejiang University,  
Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** Driven by huge profits of electricity market, competition between electricity retailers becomes increasingly intense. There is a crucial need for a method for prioritizing customers to increase competitiveness of electricity retailers and thereby ensure a healthy and orderly electricity market. This paper presents a customer evaluation model based on multi-attribute decision method. The model proceeds as follows. Firstly, an evaluation index system for prioritizing power customers is developed based on customer characteristics and electricity retailer interests. Secondly, index weights are obtained with analytic hierarchy process along with improved entropy weight method, to reflect opinions of experts and objective quality of different types of data and enable a combined utilization of different types of data. Then, to avoid shortage of technique for order preference by similarity to ideal solution, an improved sorting strategy using absolute ideal solution and vertical projection distance is proposed. Finally, a case study is conducted for different development stages of electricity market. Results show distinct customer prioritizing strategies at different market development stages, and verify effectiveness of the proposed evaluation model.

**KEY WORDS:** electricity market; power customer selection; analytic hierarchy process; improved entropy weight method; improved technique for order preference by similarity to ideal solution

**摘要:** 在售电侧放开背景下和售电市场的巨大利润的驱动下, 售电主体之间竞争异常激烈, 如何科学地指导售电主体选择优质客户、降低运营风险, 从而推动售电市场健康、有序发展是亟待解决的问题。为此, 提出一种基于多属性决策的电力客户评估模型, 首先通过分析电力客户特性和售电主体利益需求构建合理的电力客户评估指标体系; 然后根据数据类型特点提出一种层次分析法与改进熵权法相结合的组合赋权方法, 综合考虑了专家经验和指标数据的客观信息, 解决

了不同类型数据信息融合的问题; 此外, 为了克服逼近理想解排序法存在的逆序和欧式距离计算相对贴适度不合理的缺陷, 提出一种包含绝对理想解和“垂面距离”的电力客户排序策略, 以提高该模型排序的准确性。最后基于产品生命周期理论模拟售电市场的导入、发展和成熟3个阶段, 并通过电力客户实际数据进行算例分析, 根据算例结果为售电主体在售电市场发展的不同阶段提供电力客户选择建议, 验证了评估模型的有效性。

**关键词:** 售电市场; 电力客户选择; 层次分析法; 改进熵权法; 改进逼近理想解排序法

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2012

## 0 引言

随着我国新一轮电力体制改革的不断深入及售电市场的逐步建立和完善, 售电市场千亿元的利润<sup>[1-2]</sup>再分配吸引着电网公司、发电集团以及各类社会资本争先成立售电公司, 直接导致在售电市场改革初期我国售电公司的数量呈现指数增长趋势(如图1所示<sup>[3]</sup>), 售电市场主体之间的竞争异常激烈。在大量售电主体作为市场主体参与市场的竞争的背景下, 如何科学地指导售电主体选择优质的客户、降低运营风险和增加企业收益, 从而推动售电市场健康、有序地发展, 是一个亟待解决的问题。因此, 开展针对售电市场发展的不同阶段的电力客户评估研究具有强烈的现实性和紧迫性。

在我国, 售电公司作为新生事物, 相关研究较少, 售电主体的客户评估和选择策略研究则更少。售电主体电力客户选择和评估本质上是一个多属性决策问题, 目前主要的研究方法包括: 模糊综合评价法、神经网络法、层次分析法(analytic hierarchy

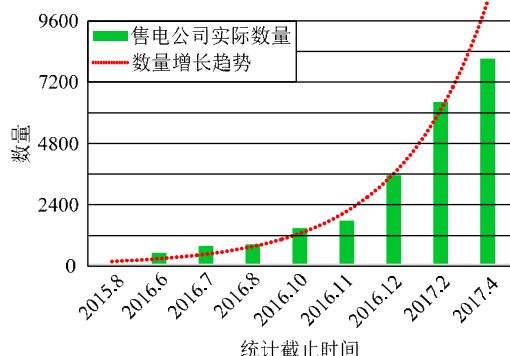


图1 我国售电公司数量增长情况

Fig. 1 The growth of electricity retailers' quantity in China process, AHP)、逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)和组合分析法等<sup>[4-8]</sup>。其中, TOPSIS 方法能够消除不同指标量纲的影响, 对原始数据信息利用最为充分并且能与其他方法组合使用。该方法具有客观、直观等优点, 因而被广泛应用于物流、基建、安防和环境等领域的评估和优化问题<sup>[8]</sup>。应用 TOPSIS 方法进行售电主体客户评估主要以下 3 个难点: 评估指标体系的建立、评估指标权重的确定以及排序策略的选择。

其中, 评估指标体系是整个评估模型的基础。文献[9-11]详细介绍了电力客户信用评价体系、智能配电网综合评估体系和采煤矿厂选址评估体系。上述文献建立指标体系所应该考虑的方面和遵循的原则为本文评估指标体系的建立提供指导意见。

指标的权重是评估模型的关键参数。目前, 权重计算方法主要包括主、客观赋权 2 类。主观赋权的主要特点是引入专家意见, 其中应用最广的是 AHP<sup>[12]</sup>。客观赋权是基于数据客观信息计算指标权重, 典型方法是熵权法<sup>[13-14]</sup>, 但熵权法存在信息熵接近 1 时权重不合理的缺陷。总体而言, 主观赋权具有较强的主观性, 受决策者主观因素影响较大, 客观赋权能够体现数据的客观信息但未纳入专家经验。

排序策略方面, 针对 TOPSIS 存在的逆序问题, 文献[15]分析了逆序产生的原因并提出了解决办法, 文献[16]将该方法应用于变电站智能化改造评估, 验证了该方法的合理性和正确性。同时国内外诸多学者尝试通过改变距离计算<sup>[17]</sup>、定义目标贴近度<sup>[18]</sup>和引入偏序<sup>[19]</sup>等方法对 TOPSIS 存在的欧式距离测度不合理的问题进行改进。文献[20]则采用改变距离计算和定义目标贴近度相结合的方法, 提出了基于“垂面距离”的改进 TOPSIS。

售电市场发展研究方面, 文献[21]梳理了国外

电力市场在售电侧引入竞争、建立市场的基本模式, 按照时间尺度, 从市场定价、增量改革和放开用户选择权等方面为我国售电市场的建设和发展提出了建议。文献[22]提出了一种应用于售电市场的动态偏离份额分析法, 从时间、地区、结构、竞争力等不同角度深入地揭示售电市场的变化规律。文献[23]介绍了我国售电市场发展的最新动态, 结合国际经验从竞争格局、交易方式、业务开展、竞争手段等方面研判售电市场的发展趋势。由以上分析可以看出, 目前售电市场发展方面的研究都是从较为宏观的角度进行分析, 本文基于产品生命周期理论从较为微观的角度对售电市场的发展进行模拟。

鉴于此, 本文在前人相关研究工作的基础上, 针对售电市场放开背景下售电主体电力客户评估这一新问题进行研究, 提出一种基于多属性决策的售电主体电力客户评估模型。该模型首先在充分考虑售电主体的实际需求、电力客户特性和数据收集可能性的基础上, 建立合理的评估指标体系; 然后采用层次分析法与改进熵权法相结合的方法计算评估指标的权重, 综合体现了主、客观信息, 解决了大数据时代不同类型数据信息融合的困难, 并且通过引入修正权重克服了熵权法存在的缺陷; 同时提出一种包含绝对理想解和垂面投影法的电力客户排序策略, 解决了 TOPSIS 排序不合理的问题; 最后基于产品生命周期理论模拟了售电市场的导入、发展和成熟阶段, 并结合算例分析结果为售电主体在各个阶段提供电力客户选择建议, 验证该模型的灵活性和有效性。

## 1 评估指标体系

本文就可能影响售电主体电力客户选择的因素进行归纳总结, 通过德尔菲法<sup>[24]</sup>(Delphi method)向相关专业学者和电力营销人员反复咨询, 获得专家对指标隶属关系的意见, 并结合指标体系设计的全面性、客观性和可操作性等原则<sup>[25]</sup>, 建立如表 1 所示的评估指标体系。

### 1.1 评估指标体系的说明

售电主体进行电力客户评估的根本动机在于提前了解目标电力客户的潜在风险, 选择优质电力客户以达到降低企业运营风险、增加企业收益的目的。本文主要从售电主体最关心的经济性为主体进行组织, 将指标体系分为售电盈利、客户忠实度和售电风险 3 个一级指标, 每个一级指标进一步细分为若干二级指标。

表 1 售电主体电力客户评估指标体系

Tab. 1 Customer evaluation index system for electricity retailers

目标层 A	准则层 B	准则层 C	指标类型	含义
合理选择目标客户使 售电综合效益最高	B1 售电盈利	C1 平均电价/(元/kW·h)	定量	统计周期内电力客户总电费支出/总用电量
		C2 电费所占支出比例/%	定量	电力客户电费支出占总生产成本的比例
		C3 年均用电量/(万 kW·h)	定量	统计周期内电力客户的年均用电量
		C4 用电量趋势	定性	电力客户未来 3 年内用电量增长趋势
		C5 峰谷平用电量比例/%	定量	电力客户年用电量中峰谷平各段所占比例
	B2 客户忠实度	C6 合作基础	定性	电力客户与售电主体之前是否有过合作
		C7 合作期限	定性	电力客户偏向于短期、中期或者长期合作
		C8 增值服务	定量	电力客户是否有增值服务的需求
		C9 多联供需求	定量	电力客户是否有蒸汽、热水等其他能源需求
	B3 售电风险	C10 企业性质	定性	按照《公司法》电力客户的企业性质
		C11 所在行业	定性	电力客户在 GB/T 4754—2011 中所属的行业
		C12 企业类型	定量	电力客户是否属于高新产业以及产品能耗情况
		C13 年利润/万元	定量	电力客户统计周期内年利润及其所处的等级

售电盈利方面，基于售电主体的收入为电费=电量×电价，因此将 C1 平均电价、C2 电费所占支出比例、C3 年均用电量作为考核指标，并且为了更加全面地考虑到客户未来的发展和电力市场规则的逐步完善，将 C4 用电量趋势、C5 峰谷平用电量比例也纳入到考虑范围。

客户忠实度方面，主要从电力客户合作的态度和对服务的需求 2 方面进行考虑：偏向长期合作的客户忠实度较高；对于有增值服务需求和多联供需求的客户，售电主体通过增值服务或者多种能源组合套餐能够提高客户满意度，从而增加客户黏性。

售电风险方面，企业性质 C10 是决定其面临风险的一个重要因素，例如对地方国企和央企进行售电的风险可能较低；根据所在行业 C11 的经济增长情况判断电力客户所处的行业发展情况，所在行业经济增长率越高，则对其售电风险越低；企业类型 C12 为国家扶持的高新技术产业售电风险较低，面临淘汰的产业售电风险较高；年利润 C13 越高的客户电费回收风险越低。

1.2 评估数据的获取方式

无论是电改前的节能服务还是现阶段的电力客户用户特性分析和评估，电力客户的数据获取一直都是一个难点，总结本文算例的数据获取方式，售电主体可以从以下几个方面考虑：

- 1) 与掌握客户数据的单位进行合作，直接获取基础数据。
- 2) 对客户进行实地调研，或通过前期免费开展合同能源管理等增值服务积累开展电力客户评估所需的相关数据。
- 3) 借鉴本轮电改前就已经开展节能服务的主体的方式，即客户端安装采集设备，采集所需数据。

4) 通过同行业客户类比的情况，获得电力客户一些较为宏观的数据。

2 评估模型核心算法

2.1 层次分析法

本文采用 T.L.Saaty1-9 比率标度法<sup>[26]</sup>构造判断矩阵 A，基于层次分析法<sup>[26]</sup>按照图 2 中 AHP 部分的基本步骤计算出准则层 C 评估指标相对于目标层 A 的最终主观权重向量  $W_s$ ，计算公式如下所示：

$$w_{sj} = w_{1t} \cdot w_{2j} \tag{1}$$

准则层 C 中第 j 个评估指标隶属于准则层 B 中的第 t 个因素，式(1)中  $w_{1t}$  表示在以目标层 A 为准则时，准则层 B 中的第 t 个因素的局部权重； $w_{2j}$  表示在以准则层 B 中第 t 个因素为准则时，准则层 C 中第 j 个评估指标的局部权重。

2.2 改进熵权法

熵权法(entropy weight method, EWM)是 C. E. Shannon 将热力学熵的概念引入信息论而产生的一种根据指标的信息变异程度来确定指标权重的客观赋权方法：信息熵值越小，该指标变异程度大，评价时所能提供的信息越多，客观权重就越大，反之信息熵值越大则客观权重就越小<sup>[14]</sup>。熵权法的缺点在于当信息熵值越靠近 1 时，存在权重分配与熵值对应不合理的问题<sup>[27]</sup>。因此本文采用引进修正权重的改进熵权法(improved entropy weight method, IEWM)计算评估指标客观权重，从而解决上述客观权重计算不合理的问题。具体计算步骤如下：

1) 构建原始数据标准化矩阵 P。

客户原始信息矩阵为  $X=[x_{ij}]_{m \times n}$ ，行表示待评估电力客户，列表示准则层 C 评估指标，标准化计算公式：



$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

2) 计算评估指标信息熵  $E$ 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \quad (3)$$

式(3)中  $y_{ij} = p_{ij} / \sum_{i=1}^n p_{ij}$ ，当  $y_{ij} = 0$  时，则定义

$\lim_{y_{ij} \rightarrow 0} y_{ij} \ln y_{ij} = 0$ ， $e_j$  为评估指标  $j$  的信息熵值。

3) 采用 EWM 计算评估指标原始客观权重  $w_o$ 。

$$w_{oj} = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (4)$$

4) 采用 IEWM 计算评估指标的客观权重  $w_o$ 。

$$w_{oj} = \begin{cases} (1 - \bar{E})w_{oj} + \bar{E}w_{oj}, & 0 \leq e_j < 1 \\ 0, & e_j = 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$w_{rj} = \frac{1 + \bar{E} - e_j}{\sum_{k=1, e_k \neq 1}^n (1 + \bar{E} - e_k)} \quad (6)$$

式(6)中  $\bar{E}$  表示所有不为 1 的熵值的平均值， $w_{rj}$  表示评估指标  $j$  的修正权重。

### 2.3 改进逼近理想解排序法

逼近理想解排序法的基本思路是在备选方案中确定出正负理想解，若备选方案到正理想解的欧式距离越小、到负理想解欧式距离越大则为较优方案，反之则为较差方案<sup>[28]</sup>。TOPSIS 的缺点在于存在逆序问题<sup>[15]</sup>和在待选方案为多维方案的情况下，与正理想解越近的方案可能也与负理想解越近<sup>[20]</sup>。因此，本文采用改进逼近理想解排序法方法(improved technique for order preference by similarity to ideal solution, ITOPSIS)解决客户排序问题，主要特点在于：1) 引入绝对理想解<sup>[15]</sup>克服逆序问题；2) 采用正交投影法<sup>[29]</sup>解决距离计算问题。ITOPSIS 的基本步骤如下：

1) 原始决策矩阵标准化。

客户原始信息矩阵为  $X$ ，矩阵行表示待评客户，列表示准则层  $C$  评估指标(已全部转化为效益型指标)，标准化的决策矩阵为  $Q$ 。

$$q_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (7)$$

2) 构造标准化的加权决策矩阵  $Z$ 。

$$Z = \begin{bmatrix} w_1 q_{11} & w_2 q_{12} & \cdots & w_n q_{1n} \\ w_1 q_{21} & w_2 q_{22} & \cdots & w_n q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 q_{m1} & w_2 q_{m2} & \cdots & w_n q_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $w_n$  为第  $n$  个评估指标的综合权重。

3) 确定绝对正理想解  $Z^+$  与绝对负理想解  $Z^-$ 。

$$z_j^+ = \begin{cases} 1, & j \in P_1 \\ 0, & j \in C_1 \end{cases} \quad (9)$$

$$z_j^- = \begin{cases} 0, & j \in P_1 \\ 1, & j \in C_1 \end{cases} \quad (10)$$

式(9)和(10)中“1”和“0”分别表示该指标的绝对正理想解和负理想解； $P_1$  表示效益型指标，值越大越优， $C_1$  表示成本型指标，值越小越优。

4) 确定平移过后的绝对负理想解  $M^-$ 。

$$M^- = Z^- + V \quad (11)$$

式(11)中  $V = \bar{0} - Z^+$ ，即平移过后的绝对正理想解  $M^+$  为  $\bar{0}$ ， $V$  表示将绝对正理想解平移到原点的平移向量。

5) 计算每个待评电力客户到正理想解的“垂面”距离测度  $S_i$ 。

$$s_i = \sum_{j=1}^n m_j^- \times n_{ij} \quad (12)$$

式(12)中  $s_i$  为第  $i$  个待评电力客户到正理想解的“垂面”距离测度，值越小表示该电力客户越优；矩阵  $N = [n_{ij}]_{m \times n}$  为经过平移向量  $V$  平移过后的矩阵  $Z$ 。

### 3 电力客户评估模型

基于上述的 AHP、IEWM 和 ITOPSIS 的基本原理和计算步骤，本文首先采用 AHP 确定评估指标的主观权重，由于判断矩阵  $A$  根据评估专家经验进行构造，因此所求得的评估指标权重体现了专家经验。然后采用 IEWM 计算出评估指标客观权重，因为 IEWM 是基于评估指标的原始数据进行计算，所以求得的指标权重包含了原始数据的客观信息。在综合考虑专家经验和指标数据的客观信息的基础上，采用基于最小相对信息熵原理的乘法合成计算出评估指标的综合权重。最后采用包含绝对理想解和垂面投影法的 ITOPSIS 对待评估电力客户进行排序，有效解决了 TOPSIS 存在的逆序和欧式距离计算相对贴近度不合理的问题。整个评估模型流程如图 2 所示。

### 4 算例分析

选取某省 26 家具有代表性的电力客户作为研究对象，主要包括铝业、钢铁、水泥、机械制造、印务、铁路、电子和制药等。考虑到模型应当适用于售电市场的不同发展阶段和售电环境，本文基于产品生命周期理论<sup>[30]</sup>并结合《关于有序放开发用电计划的实施意见》<sup>[31]</sup>，将售电市场分为导入、发展

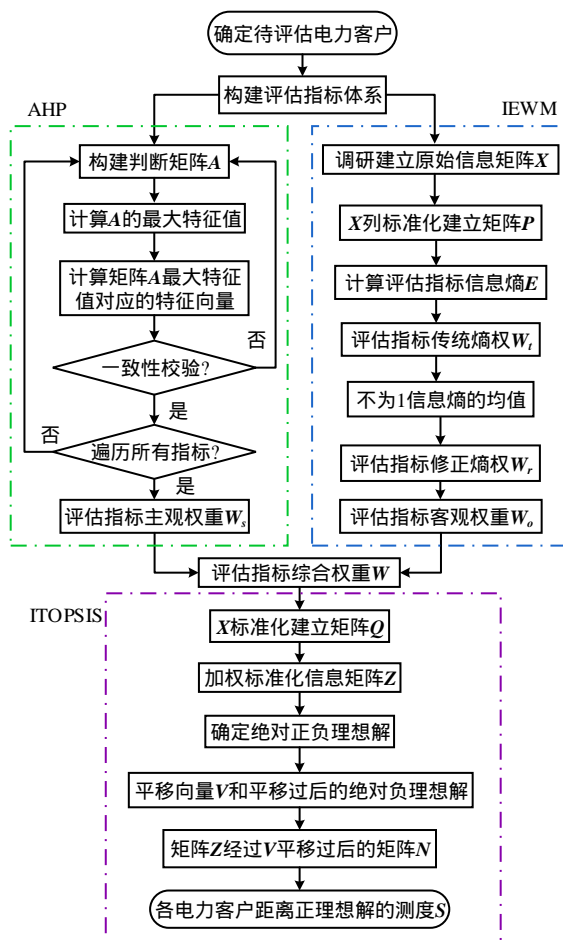


图2 电力客户评估模型流程图

Fig. 2 Flowchart of the evaluation model for power customers

和成熟阶段,通过改变专家意见和电力客户信息模拟售电市场发展的不同阶段,评估电力客户在各个阶段的表现,以验证本文所提方法的灵活性、合理性和有效性。售电市场3个阶段的特征如下所示:

1) 导入阶段。售电侧改革文件公布,各类社会资本争先成立售电公司,由于售电公司刚成立,此时电力客户对售电公司缺少了解,只有少数大工业电力客户考虑让售电公司代理进行购电业务,因此售电公司的数量虽然多,但是售电市场份额以电网企业或拥有发电背景的售电公司为主。此时的售电市场,以逐步放开大用户直接交易为代表性特征,交易方式以双边交易为主。

2) 发展阶段。独立售电公司参与并在售电市场占有一定比例,此时双边交易与现货交易和电力平衡机制相配合,电能量市场将逐步建立完整的市场结构,即建立以现货市场为核心的初级市场体系,实现电量交易向电力交易转变。此时电力客户对售电公司逐步熟悉,愿意由售电公司代理参与申报电量和电价,并对增值服务有一定的需求,独立

售电公司的销售额和需求量迅速上升。

3) 成熟阶段。在第二阶段的现货市场初步建立的基础上,逐步放开户参与市场的比例,引入更为多元化的售电主体与交易方式。此时售电公司的种类将有所增加但数量较第二阶段有所下降,售电市场需求趋于饱和,售电主体关注于电力客户的精细化管理和增值服务的更新。

#### 4.1 数据预处理

表1所建立的售电主体电力客户评估指标体系既包含定量指标也包含定性指标,定量指标中存在一维与多维数据并存的情况,为了方便后续的评估,需要采用科学的方法将其转化为一维数据。

##### 1) 定性指标的量化。

针对定性指标的特点,采用语气因子法<sup>[10]</sup>将其相关属性量化为具体数值。例如用电量趋势(C4){降低,持平,增长}分别对应数值{4,5,6}。

##### 2) 多维指标的一维化。

从几何的角度,以售电主体期望值作为参考向量,每一个多维指标数据为一个空间向量,引入向量夹角余弦<sup>[18]</sup>实现多维指标的一维化。例如峰谷平用电量比例(C5),若售电主体期望值和某一电力客户实际值为向量 $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ 和 $\beta=(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ ,则一维化数值为

$$\cos(\alpha, \beta) = \frac{\sum_{j=1}^3 \alpha_j \beta_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^3 \alpha_j^2 \sum_{j=1}^3 \beta_j^2}} \quad (13)$$

#### 4.2 基于AHP和IEWM的综合权重计算

常见的权重组合方法有加法和乘法合成2种方法。考虑到加法合成虽然能体现线性补偿<sup>[32]</sup>,但是合成系数的确定通常经过主观确定,缺少合理性。所以本文采用基于最小相对信息熵原理<sup>[33]</sup>的乘法合成,其原理如下:

指标综合权重 $w_j$ 应该尽可能接近主客观权重 $w_{sj}$ 和 $w_{oj}$ ,根据最小相对信息熵原理有:

$$\min Q = \sum_{j=1}^n w_j (\ln w_j - \ln w_{sj}) + \sum_{j=1}^n w_j (\ln w_j - \ln w_{oj}) \quad (14)$$

式中 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ ,  $0 \leq w_j \leq 1$ 。

采用拉格朗日乘子法求解可得:

$$w_j = (w_{sj} * w_{oj})^{0.5} / \sum_{j=1}^n (w_{sj} * w_{oj})^{0.5} \quad (15)$$

式中: $n$ 表示准则层C评估指标的数量; $w_j$ 是评估指标 $j$ 的综合权重; $w_{sj}$ 是式(1)计算出的评估指标 $j$ 的主观权重; $w_{oj}$ 为式(5)计算出的评估指标 $j$ 的客观权重,本文算例的权重值如附表A所示。

### 4.3 主观权重计算结果分析

按照 AHP 流程进行计算, 导入、发展和成熟阶段的主观权重计算结果如图 3 所示: 在导入阶段由于售电主体面临的首要问题是在激烈的竞争中生存下去, 因此平均电价(C1)、年均用电量(C3)等售电盈利相关指标的权重较大, 而由于此阶段的电费回收主要由电网公司负责, 并且市场初期交易规则的不断调整, 所以合作期限(C7)、企业类型(C12)等客户忠实度和售电风险等评估指标权重较低。在发展和成熟阶段, 随着现货市场的逐步建立、成熟和售电市场奖惩制度等制度的不断完善, 峰谷平用电量比例(C5)等反应客户实时特性的评估指标权重较大, 而平均电价(C1)和年均用电量(C3)等静态特性指标的权重将逐步减小。并且由于售电主体前期服务的同质化, 售电主体与客户之间的联系方式将由导入阶段的基于前期合作基础的沟通和洽谈等方式过渡到通过增值服务和多能源联供等形式来增加客户黏性, 因而 C8 和 C9 的权重值较大, 而合作基础(C6)的值将逐步减小, 并且随着增值服务的不断开展, 电力客户黏性将逐步提高, 合作期限(C7)也将呈现上升的趋势。

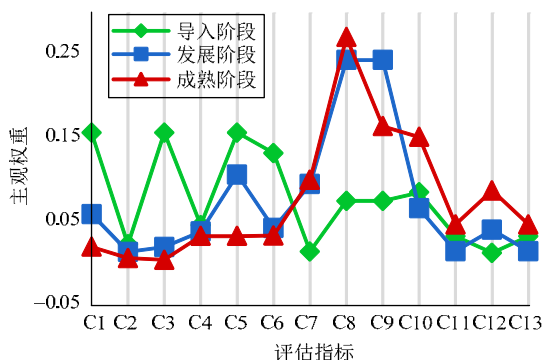


图3 各阶段评估指标主观权重对比

Fig. 3 The comparison of index's subject weights

### 4.4 基于 ITOPSIS 的电力客户排序

按照如 2.3 所示的 ITOPSIS 的步骤, 输入 3 个阶段的比较矩阵  $A$  和电力客户原始信息矩阵  $X$  对待评电力客户进行重复评估, 结果如图 4 和附表 B 所示。结合附表 A 评估指标综合权重和电力客户各指标的评估值对评估结果进行说明:

#### 1) 导入阶段电力客户排序结果分析。

根据距离测度  $S$  进行排序, 优质电力客户群主要包含 U3(铝电)、U1(铝业)、U11(铝业)和 U6(合金)等, 劣势电力客户群主要包含 U22(制药)、U10(炭素)和 U18(电子)等。这说明在售电市场导入阶段, 用电量较大、国企性质的传统大工业用户能够为售电主体带来更大的收益。结合图 5 的电力客户评估

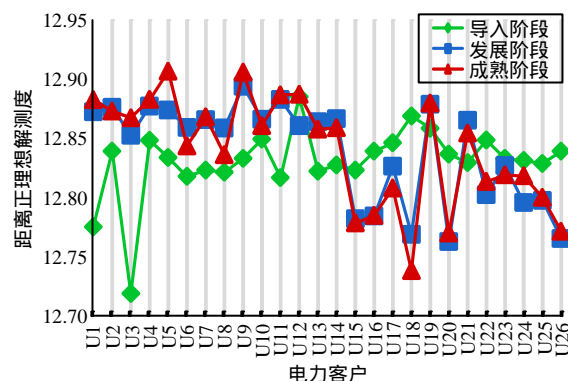


图4 电力客户评估结果图

Fig. 4 The result of evaluation in the three market stages

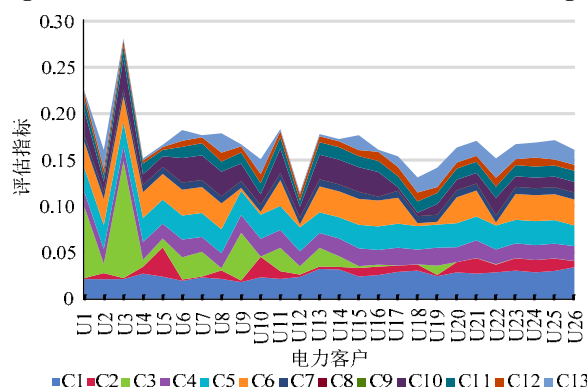


图5 导入阶段电力客户评估数据

Fig. 5 Evaluation data in the introduction market stage

数据可知, 在导入阶段, 优质客户群在指标 C3、C6 和 C10 等方面表现较好, 说明此类客户能够为售电主体带来较大的市场份额和良好的发展前景。劣质客户群在 C1、C8、C11、C12、C13 等方面表现较好而优质电力客户在此方面则表现较差, 而出现此类结果的原因在于, 导入阶段电费结算暂由电网企业负责、售电市场初期定价机制不明确和政府行政干预等。

#### 2) 发展阶段电力客户排序结果分析。

评估结果表明随着售电市场的逐步发展, 发展阶段 U20(玻璃)、U26(电气)、U18(电子)、U15(水泥)等客户排名较为靠前, 而 U2(特钢)、U19(钢铁)、U11(铝业)和 U9(化工)等客户排名较为靠后, 说明此阶段部分传统高耗能企业已经不能满足环保和售电主体的需求, 逐步被社会淘汰, 而新兴产业及部分传统产业受到售电主体的关注。结合图 6 指标评估结果可知, 在发展阶段优质电力客户群在 C1、C5、C7、C8 和 C9 等方面表现较好, 这说明此类客户能为售电主体带来较高的售电盈利和较强的客户黏性, 而劣质客户群在 C3、C10 等方面表现较好。出现上述结果的原因在于售电市场逐步由电量市场向现货市场的转变、客户用能需求的多元化和市场自由化程度的逐步提高。



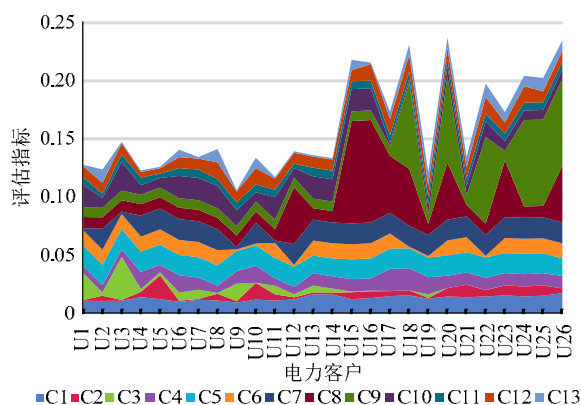


图6 发展阶段电力客户信息数据

Fig. 6 Customers' evaluation data in the growth market stage

## 3) 成熟阶段电力客户排序结果分析。

对成熟阶段电力客户进行排序可知, U18(电子)、U20(玻璃)、U26(电气)等客户为优质客户群, U11(铝业)、U12(钢铁)、U9(化工)、U5(钢铁)等客户为劣质客户群, 由图7可知, 优质电力客户群在C8、C9方面表现依然较好, 但是相比发展阶段C9方面表现有所下降; 而相比发展阶段, 劣质客户群在C10方面表现有所提高, 而在C3方面的表现有明显的下降, 造成以上结果的原因在于市场售电主体在多联供需求方面服务竞争的同质化和市场完全自由化导致售电主体对于企业性质的重要程度的下降等。

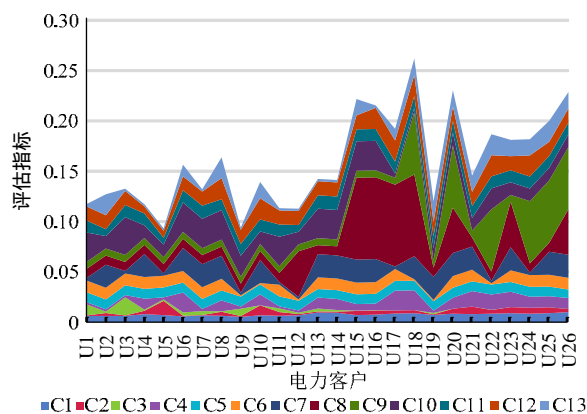


图7 成熟阶段电力客户信息数据

Fig. 7 Customers' evaluation data in the mature market stage

总结各阶段排名靠前的客户特性并结合附表A评估指标综合权重计算结果, 本文为售电主体在售电市场不同的阶段电力客户选择提出以下建议:

1) 在售电市场导入阶段, 售电主体的发展重点应该放在钢铁、水泥、铝业等年均总用电量较大、负荷曲线较平缓、有一定的合作基础、企业性质较好、年利润也较高的一些大工业客户。

2) 在售电市场发展阶段, 售电主体的发展重点应该放在电气、电子和水泥等有增值服务或者多联供需求的、用电负荷波动较大的一些新兴或传统

产业客户。

3) 在售电市场成熟阶段, 售电主体的发展重点应该放在电子和电气等有增值服务或者多联供需求的、倾向于长期合同的一些新兴产业客户。

根据市场发展的一般规律, 导入、发展和成熟阶段市场主体面临的主要任务分别是开发占领市场、巩固市场份额进行市场细分与区隔和形成品牌效应对客户进行管理, 本文的权重计算结果与客户选择建议大致上与其符合, 在一定程度上说明本文所提出选择策略的合理性和有效性。

## 4.5 评估模型扩展性讨论

本文主要从售电盈利、用户忠实度和售电风险3个角度对电力客户进行经济性方面的评估, 然而随着电力市场交易规则的改变和不同地区售电主体利益需求和关注焦点的变化, 本文所提出的评估指标体系很难满足所有售电主体的需求, 售电主体可以根据实际情况对评估指标体系从2个方面进行调整:

1) 增加评估指标体系的层数, 例如随着售电市场的不断发展, 电力交易中心可能增加电力客户对电网安全性、可靠性等方面的考核, 此时的评估指标体系将增加为4层, 即A层将分为经济性和安全性2个方面, 同时B层的安全性可以从电压偏差、谐波畸变和功率因数等方面进行评估。

2) 增加准则层指标的数量, 例如随着电力市场交易规则的改变, 售电主体考虑偏差电量考核、需求侧响应收益等因素, 此时就可以在售电风险中增加上月偏差比例, 在售电盈利中增加负荷重要性、客户能够响应的设备容量和客户响应配合度等因素。因此, 本文所提出的评估指标体系具有可扩展性, 评估模型具有较强的灵活性和适用性。

进一步根据市场发展状况和售电主体需求的变化不断完善评估指标体系、考虑评估指标之间的相互影响和分析数据不确定性对于评估结果的影响是下一步研究的重点, 从而为售电主体更加有效的电力客户管理和选择提供依据。

## 5 结论

针对目前售电侧放开环境下的售电主体电力客户盲目选择的问题, 本文建立了电力客户评估指标体系, 并提出一种基于多属性决策的电力客户评估模型。通过实际算例验证, 得出以下结论:

1) 本文电力客户评估指标体系的设计体现了电力客户特性和售电主体关注焦点, 注重定量和定性数据相结合, 考虑较为全面、综合, 奠定了优质

电力客户评估和选择的基础。

2) 通过采用基于 AHP 与 IEWM 相结合的评估指标综合权重确定方法, 所提出的包含绝对理想解和垂面距离的 ITOPSIS 评估方法, 能够在兼顾专家意见和数据客观信息的前提下, 实现对电力客户的科学排序。所提出的评估模型具有操作简便、计算量少和主客观结合等优点, 能够避免逆序问题并且更加合理地刻画待评电力客户与绝对理想解的距离测度。

3) 算例结果表明, 售电市场发展的不同阶段电力客户特性和售电主体关注焦点都会发生变化, 从导入阶段的抢占售电市场, 到发展阶段的增加客户的粘性到成熟阶段的客户管理。电力客户选择的相关评估方法和评估结果为售电主体在各个阶段选择电力客户提供决策依据, 有助于提高企业收益降低运营风险, 进而为我国售电侧改革的不断发展和完善提供有益参考。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

## 参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2015 年全社会用电量[EB/OL]. [2016-01-15]. [http://www.nea.gov.cn/2016-01/15/c\\_135013789.htm](http://www.nea.gov.cn/2016-01/15/c_135013789.htm).
- [2] 国家能源局. 2015 年度全国电力价格情况监管通报[EB/OL]. [2016-09-13]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto92/201611/t20161101\\_2312.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto92/201611/t20161101_2312.htm).
- [3] 国家发展改革委. 国家发展改革委国家能源局召开全国电力体制改革座谈会[EB/OL]. [2017-03-08]. [http://www.ndrc.gov.cn/tpxw/201703/t20170308\\_840674.html](http://www.ndrc.gov.cn/tpxw/201703/t20170308_840674.html).
- [4] Zeng F P, Dong Y L, Ju T. feature extraction and severity assessment of partial discharge under protrusion defect based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(16): 2493-2500.
- [5] 阮玲, 谢齐家, 高胜友, 等. 人工神经网络和信息融合技术在变压器状态评估中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 822-828. Ruan Ling, Xie Qijia, Gao Shengyou, et al. Application of artificial neural network and information fusion technology in power transformer condition assessment[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 822-828(in Chinese).
- [6] Bernardon D P, Sperandio M, Garcia V J, et al. AHP decision-making algorithm to allocate remotely controlled switches in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1884-1892.
- [7] Aalami H A, Moghaddam M P, Yousefi G R. Modeling and prioritizing demand response programs in power markets[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(4): 426-435.
- [8] Behzadian M, Otaghsaei S K, Yazdani M, et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications[J]. Expert Systems with Applications, 2012(39): 13051-13069.
- [9] 瞿斌, 李存斌, 田惠英. 工业用电客户信用综合评估指标体系的构建方法[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 75-78. Qu Bin, Li Cunbin, Tian Huiying. Construction and methodology of comprehensive evaluation system for credit of industrial electricity customers[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 75-78(in Chinese).
- [10] 张心洁, 葛少云, 刘洪, 等. 智能配电网综合评估体系与方法[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 40-46. Zhang Xinjie, Ge Shaoyun, Liu Hong, et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 40-46(in Chinese).
- [11] Safari M, Kakaei R, Ataei M, et al. Using fuzzy TOPSIS method for mineral processing plant site selection[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2012, 5(5): 1011-1019.
- [12] Zhu K Y, Cooper O, Yang S L, et al. An extension of the AHP dummy pivot modeling applied to the restructuring of the iron and steel industry in China[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2014, 61(2): 370-380.
- [13] 李娜娜, 何正友. 主客观权重相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 55-61. Li Nana, He Zhengyou. Power quality comprehensive evaluation combining subjective weight with objective weight[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 55-61(in Chinese).
- [14] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 77-81. Luo Yi, Li Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relation analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81(in Chinese).
- [15] 黄德才, 郑河荣. 理想点决策方法的逆序问题与逆序的消除[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(12): 80-83. Huang Decai, Zheng Herong. Study on the problem and elimination of rank reversal existing in ideal point multiple attribute decision making[J]. Systems Engineering & Electronics, 2001, 23(12): 80-83(in Chinese).
- [16] 胡元潮, 阮玲, 阮江军, 等. 基于改进逼近理想点法的变电站智能化改造评估[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 42-48. Hu Yuanchao, Ruan Ling, Ruan Jiangjun, et al. Evaluation on intelligent renovation of substations based on improved TOPSIS[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 42-48(in Chinese).
- [17] 田世明, 潘明明, 苑嘉航, 等. 有源重要用户供电风险评估方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 35-41. Tian Shiming, Pan Mingming, Yuan Jiahang, et al. Power supply risk element assessment for important consumers equipped with standby power supplies[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 35-41(in Chinese).
- [18] 王深哲, 高山, 李海峰, 等. 含高渗透率间歇性电源的电网规划方案优选方法[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2129-2135. Wang Shenzhe, Gao Shan, Li Haifeng, et al. Optimal selection of planning schemes for power grid with high penetration of intermittent generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2129-2135(in Chinese).
- [19] Chou W C, Lin W T, Lin C Y. Application of fuzzy theory and PROMETHEE technique to evaluate suitable ecotechnology method: a case study in Shihmen Reservoir Watershed, Taiwan[J]. Ecological Engineering, 2007, 31(4): 269-280.
- [20] 徐存东, 翟东辉, 张硕, 等. 改进的 TOPSIS 综合评价模型在河道整治方案优选中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 222-228. Xu Cundong, Zhai Donghui, Zhang Shuo, et al. Application of improved TOPSIS comprehensive evaluation model to optimization of river regulation schemes[J]. Journal of Hohai University, 2013, 41(3): 222-228(in Chinese).
- [21] 马莉, 范孟华, 郭磊, 等. 国外电力市场最新发展动向及其启示



- [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 1-9.  
Ma Li, Fan Menghua, Guo Lei, et al. Latest development trends of international electricity markets and their enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 1-9(in Chinese).
- [22] 庄彦, 康重庆, 贾俊国, 等. 售电市场变化特点的动态偏离份额分析法[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 12-17.  
Zhuang Yan, Kang Chongqing, Jia Junguo, et al. Dynamic shift-share analysis on the variation feature of power sale markets[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 12-17(in Chinese).
- [23] 马莉, 张晓萱, 杨素, 等. 中国售电市场发展动态及关键问题[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 5-9.  
Ma Li, Zhang Xiaoxuan, Yang Su, et al. Recent developments and key issues of China's retail electricity market[J]. Electric Power, 2017, 50(7): 5-9(in Chinese).
- [24] 周黎莎, 于新华. 基于网络层次分析法的电力客户满意度模糊综合评价[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 191-197.  
Zhou Lisha, Yu Xinhua. Fuzzy comprehensive evaluation of power customer satisfaction based on analytic network process[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 191-197(in Chinese).
- [25] 曾博, 白婧萌, 郭万祝, 等. 智能配电网需求响应效益综合评价[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1603-1611.  
Zeng Bo, Bai Jingmeng, Guo Wangzhu, et al. Comprehensive evaluation for benefits of demand response in smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1603-1611(in Chinese).
- [26] Saaty T L. How to make a decision: The analytic hierarchy process [J]. European Journal of Operation Research, 1990, 48: 9-26.
- [27] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159.  
Ouyang Sen, Shi Yili. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 156-159 (in Chinese).
- [28] Caiado R G G, Lima G B A, Gaviao L O, et al. Sustainability analysis in electrical energy companies by similarity technique to ideal solution[J]. IEEE Latin America Transactions, 2017, 15(4): 675-681.
- [29] 华小义, 谭景信. 基于“垂面”距离的 TOPSIS 法: 正交投影法[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(1): 114-119.  
Hua Xiaoyi, Tan Jingxin. Revised TOPSIS method based on vertical projection distance: vertical projection method[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2004, 24(1): 114-119(in Chinese).
- [30] 张军. 产品生命周期理论及其适用性分析[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2008(1): 31-36.  
Zhang Jun. Analyses on the product life cycle theory and its applicability[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008(1): 31-36(in Chinese).
- [31] 国家发展改革委. 关于有序开放用电计划的通知[EB/OL]. 2017-03-29. [http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201704/t20170410\\_843778.html](http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201704/t20170410_843778.html).
- [32] 唐承畅, 庞志兵, 李涛, 等. 基于组合权重的某型地空导弹环境适应性模糊综合评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 12-16.  
Tang Chengchang, Pang Zhibing, Li Tao, et al. Fuzzy comprehensive environmental worthiness evaluation of certain type ground-to-air missile based on combined weights[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 12-16(in Chinese).
- [33] 文俊, 吴开亚, 金菊良, 等. 基于信息熵的农村饮水安全评价组合权重模型[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(4): 43-47.  
Wen Jun, Wu Kaiya, Jin Juliang, et al. Combined weight method for rural drinking water insurance evaluation based on information entropy[J]. Journal of Irrigation & Drainage, 2006, 25(4): 43-47(in Chinese).



曹清山

收稿日期: 2017-08-17。

作者简介:

曹清山(1992), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力用户特性和售电主体电力客户评估, E-mail: caoqingshan@zju.edu.cn;

郑梦莲(1989), 女, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为电力需求响应、能源系统、储能技术等, E-mail: menglian\_zheng@zju.edu.cn;

丁一(1978), 男, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为智能电网、复杂多状态工程系统可靠性、电力系统规划与可靠性评估和电力经济, E-mail: yiding@zju.edu.cn;

宋永华(1964), 男, 教授, 英国皇家工程院院士, IEE Fellow, IEEE Fellow, 研究方向为智能电网、灵活交流输电系统的稳态和暂态分析与控制、电力系统商业化运营的理论与现代优化算法、电力系统非线性与自适应控制和智能故障诊断系统等, E-mail: yhsongcn@zju.edu.cn。

(责任编辑 李兰欣)

附录 A 电力客户评估结果数据

附表 A 售电市场各个阶段评估指标权重值

Tab. A Weights of evaluation indexes in the three market stage

指标	导入阶段			发展阶段			成熟阶段		
	主观权重	客观权重	综合权重	主观权重	客观权重	综合权重	主观权重	客观权重	综合权重
C1	0.1568	0.0806	0.1327	0.0594	0.0632	0.0668	0.0202	0.0621	0.0393
C2	0.0231	0.0957	0.0555	0.0142	0.0757	0.0358	0.0067	0.0746	0.0248
C3	0.1568	0.1262	0.1661	0.0199	0.1011	0.0489	0.0045	0.0998	0.0236
C4	0.0461	0.1216	0.0883	0.0383	0.0735	0.0578	0.0330	0.0760	0.0555
C5	0.1568	0.0770	0.1297	0.1067	0.0602	0.0874	0.0330	0.0591	0.0490
C6	0.1323	0.0851	0.1252	0.0425	0.0669	0.0581	0.0336	0.0658	0.0522
C7	0.0145	0.0734	0.0385	0.0952	0.0628	0.0843	0.1002	0.0729	0.0948
C8	0.0751	0.0000	0.0000	0.2437	0.1093	0.1780	0.2712	0.1081	0.1899
C9	0.0751	0.0000	0.0000	0.2437	0.1195	0.1861	0.1645	0.1182	0.1546
C10	0.0853	0.0827	0.0991	0.0662	0.0649	0.0715	0.1517	0.0638	0.1091
C11	0.0327	0.0780	0.0596	0.0149	0.0610	0.0329	0.0469	0.0600	0.0588
C12	0.0128	0.0785	0.0374	0.0405	0.0615	0.0544	0.0875	0.0604	0.0806
C13	0.0327	0.1014	0.0679	0.0149	0.0804	0.0377	0.0469	0.0793	0.0676

附表 B 售电市场各个阶段评估结果及排序

Tab. B Result and sorting of evaluation in the three market stage

电力客户	导入阶段		发展阶段		成熟阶段	
		排序		排序		排序
U1	12.7752	2	12.8724	20	12.8826	21
U2	12.8392	19	12.8763	22	12.8729	19
U3	12.7187	1	12.8525	11	12.8673	17
U4	12.8483	21	12.8772	23	12.8828	22
U5	12.8337	15	12.8740	21	12.9068	26
U6	12.8178	4	12.8592	13	12.8435	12
U7	12.8232	7	12.8657	17	12.8680	18
U8	12.8212	5	12.8587	12	12.8361	11
U9	12.8331	14	12.8941	26	12.9059	25
U10	12.8492	23	12.8661	18	12.8608	16
U11	12.8167	3	12.8829	25	12.8867	23
U12	12.8852	26	12.8606	14	12.8872	24
U13	12.8221	6	12.8641	15	12.8577	14
U14	12.8275	9	12.8665	19	12.8588	15
U15	12.8232	8	12.7820	4	12.7783	4
U16	12.8390	17	12.7842	5	12.7847	5
U17	12.8462	20	12.8263	9	12.8079	7
U18	12.8689	25	12.7688	3	12.7381	1
U19	12.8584	24	12.8789	24	12.8798	20
U20	12.8367	16	12.7627	1	12.7697	2
U21	12.8294	11	12.8653	16	12.8544	13
U22	12.8484	22	12.8023	8	12.8134	8
U23	12.8330	13	12.8268	10	12.8189	10
U24	12.8312	12	12.7957	6	12.8182	9
U25	12.8287	10	12.7974	7	12.7999	6
U26	12.8390	18	12.7651	2	12.7713	3

附录 B 层次分析法介绍

层次分析法(analytic hierarchy process , AHP)是由美国运筹学家 T.L.Saaty 教授于 20 世纪 70 年代提出。该方法的基本思路是将与最终目标相关的组成因素归类并层次化，比较同层因素之间的重要性，从而将思维过程数学化。以目标层 A 为准则，计算准则层 B 评估指标的主观权重为例说明 AHP 的基本步骤：

1) 将售电主体电力客户评估问题条理化、层次化，建立如表 1 所示的评估指标体系，主要包含目标层 A 和准则层 B。

2) 采用 T.L.Saaty1-9 比率标度法，以目标层 A 为准则，计算准则层 B 各因素之间的判断矩阵  $A=[a_{ij}]_{r \times r}$  (正负反矩阵<sup>[26]</sup>)。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1r} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{r1} & a_{r2} & \cdots & a_{rr} \end{pmatrix} \quad (1)$$

表 1 T.L.Saaty1-9 比率标度法标度及含义

Tab. 1 The scale and meaning of T.L.Saaty1-9 scale method

重要性标度	含义
1	两个因素有同等重要性
3	前者比后者稍微重要
5	前者比后者明显重要
7	前者比后者强烈重要
9	前者比后者极端重要
2、4、6、8	表示上述判断的中间值
倒数	若元素 $i$ 与 $j$ 的重要性之比为 $a_{ij}$ , 则元素 $j$ 与 $i$ 的重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

3) 由判断矩阵计算出准则层 B 因素的相对权重, 进行一致性校验保证相对权重计算的合理性。

$$AW_p = \lambda_{\max} W_p \quad (2)$$

由 Perron-Frobenius 定理可得, 正负反矩阵  $A$

必存在唯一的正最大特征值  $\lambda_{\max}$  和对应的特征值向量  $W_p$ ,  $W_p$  即为准则层 B 的相对权重向量。

判断矩阵的一致性指标计算公式如下所示:

$$C_I = \frac{\lambda_{\max} - r}{r - 1} \quad (3)$$

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \quad (4)$$

上式中,  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵  $A$  的最大特征值,  $r$  为判断矩阵的阶数,  $C_I$  为一致性指标,  $R_I$  为平均随机一致性指标, 取值如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性指标值  $R_I$

Tab. 2 The value of Random Consistency Index ( $R_I$ )

$r$	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_I$	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40

当  $C_R < 0.1$  时, 则通过一致性校验, 否则认为权重计算结果不合理, 需重新构造判断矩阵。