

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191596

基于博弈论组合赋权的电力设备供应商模糊综合评价

门业堃¹, 钱梦迪¹, 于钊¹, 滕景竹¹, 陈少坤², 李晓菲²

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075; 2. 北京恒华龙信数据科技有限公司, 北京 100088)

摘要: 针对国家电网电力设备供应商在综合评价方面的不足, 设计了一种基于博弈论组合赋权的模糊综合评价模型。首先, 该模型构建了包含设备台账、设备缺陷和设备装用范围等特征的评价体系, 利用层次分析法和因子分析法分别计算各评价指标的主观权重和客观权重, 然后利用博弈论集合的思想对两种权重进行组合赋权, 最后根据最大隶属度原则确定供应商类别, 完成最终评价。以国网公司 2004 年—2018 年投运 162 个电力设备供应商为例, 结果显示, 共有 A 类供应商 30 个, B 类供应商 16 个, C 类供应商 116 个。验证了评价模型的客观合理性, 可为电网公司针对电力设备供应商的管理决策提供参考价值。

关键词: 电力设备供应商; 层次分析法; 因子分析法; 博弈论组合赋权; 模糊综合评价

Fuzzy comprehensive evaluation of power equipment suppliers based on game theory and combination weighting

MEN Yekun¹, QIAN Mengdi¹, YU Zhao¹, TENG Jingzhu¹, CHEN Shaokun², LI Xiaofei²

(1. State Grid Beijing Electric Power Company Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China;

2. Beijing Ibdpower Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: There are shortcomings in the comprehensive evaluation of the national grid power equipment suppliers. To tackle this, a fuzzy comprehensive evaluation model based on game theory combined weighting is designed. First, the model constructs an evaluation system including features such as equipment ledger, equipment defects and equipment installation scope, and uses the analytic hierarchy process and factor analysis method to calculate the subjective weight and objective weight of each evaluation index. Then, the idea of the game theory set is used to combine and weight the two weights. Finally, the supplier category is determined according to the principle of maximum membership, and the final evaluation is completed. Taking the example of 162 power equipment suppliers put into operation by the State Grid Corporation from 2004 to 2018, the results show that there are 30 A-type suppliers, 16 B-type suppliers and 116 C-type suppliers. The objective rationality of the evaluation model is verified, and this can provide reference value for the grid company to make management decisions for power equipment suppliers.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52022318001H).

Key words: power equipment supplier; analytic hierarchy process; factor analysis; game theory combination weighting; fuzzy comprehensive evaluation

0 引言

供应商绩效评价是整个电网综合管理电力设备供应商的重要环节, 构建科学合理供应商绩效评价体系和方法, 可以有效促进电网公司的管理决策。1966 年, Dickson G.W 首先提出供应商问题, 在此基础上, 大量专家学者对供应商问题又进行了深入

研究。目前国内外常用的综合评价方法大致可以分为五类^[1], 分别为: 定性评价方法^[2]、定量评价方法^[3]、基于统计分析的评价方法^[4-6]、基于目标规划模型的评价方法以及多方法融合的综合评价方法^[7-9]。

供应商绩效评价体系正随着国家电网本身的发展逐渐完善。目前现有电网设备供应商绩效评价方法存在评价不完善的问题, 比如传统的供应商绩效评价主要针对供应商规模、特定年份的缺陷数量和

网省公司通报数量等评价指标,通过简单汇总各方面指标进行单一方法的评价。使用单一方法确定指标权重时,会使评价指标的权重过于片面,没有太多的参考价值。因此,近年来,国内外学者和研究人员偏重于将两种或多种研究方法结合使用^[10-15],使用组合赋权的方式兼顾主客观两种权重,可使指标赋权更加科学,有效提高电力设备供应商绩效评价的正确性和合理性。

本文首先构建科学合理的电力设备供应商综合评价指标体系,然后采用层次分析法和因子分析法分别获取各个评价指标的主观权重和客观权重,进而利用博弈论组合赋权法计算组合权重引入模糊综合评价模型,完成最终评价。研究思路如图 1 所示。

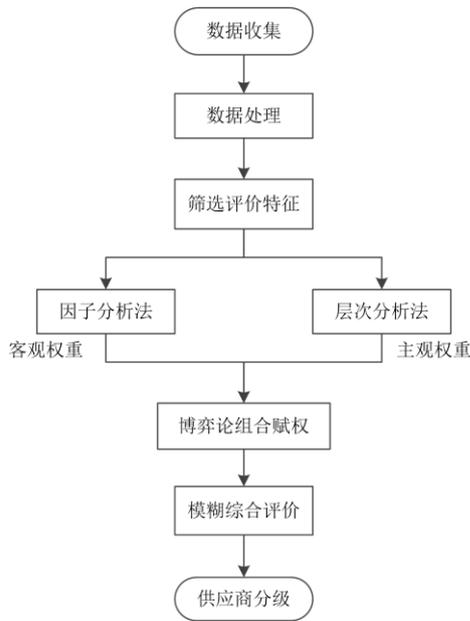


图 1 技术路线图

Fig. 1 Technical route

1 数据来源

本文所用数据为国家电网提供的(2004年1月1日~2018年12月31日)隔离开关供应商数据,经过对数据的整理和汇总,得到162家供应商,包括缺陷数据和台账数据。其中,缺陷数据中有19个变量,分别为所属网省、电压等级、供应商名称(考虑到数据安全问题,对供应商名称做了保密处理)、设备型号、投运日期、发现日期、缺陷性质、缺陷部件、缺陷部位、缺陷描述、分类依据、缺陷内容、技术原因、责任原因、评价导则、评价部件、评价状态量、评价判断依据、扣分值,共14694条数据;台账数据中有7个变量,分别为所属网省、设备型号、电压等级、供应商名称、投运日期、出厂日期、类

型,共476893条数据。部分数据如表1和表2所示。

表 1 缺陷数据表的部分数据

Table 1 Partial data of the defect data table

特征	数据
所属网省	河北
电压等级	交流 110 kV
供应商名称	GLKG-112
设备型号	ZF12B-126(L)
投运日期	2015 年 4 月 6 日
发现日期	2015 年 6 月 12 日
缺陷性质	危急
缺陷部件	隔离(接地)开关
缺陷部位	传动相关部件
缺陷描述	机械部件异常
分类依据	脱落、有裂纹,紧固件松动,造成设备无法正常操作
缺陷内容	吴甘 II 线 142-5 刀闸无法合闸
技术原因	二次系统_二次回路公用设备_二次接触不良
责任原因	设备_制造质量_工艺不佳
评价导则	气体绝缘金属封闭开关设备(含 1 000 kV)
评价部件	隔离开关及接地开关
评价状态量	机构传动部件
评价判断依据	部件脱落、有裂纹,紧固件松动等现象
扣分值	40

表 2 台账数据表的部分数据

Table 2 Partial data in the ledger data sheet

特征	数据
所属网省	安徽
设备型号	GW22B-126DW
电压等级	交流 110 kV
供应商名称	GLKG-151
投运日期	2009 年 10 月 28 日
出厂日期	2009 年 5 月 1 日
类型	隔离开关

2 研究方法

2.1 指标体系的建立

本文综合考虑设备台账、设备缺陷和装用范围三个维度的设备特征属性,筛选出7个指标构成供应商绩效综合评价体系。台账数据中供应商的设备拥有量定义为设备拥有量;台账数据中供应商拥有的电压等级数量和设备型号数量分别定义为电压等级数量和设备型号数量;直接影响设备运行的数量定义为扣分值大于等于30分;缺陷性质为严重和危急的缺陷定义为质量事故;供应商在不同设备型号下拥有相同缺陷的数量定义为家族性缺陷;采用该

供应商设备的网省公司数量(即该供应商生产的隔离开关的覆盖省份数量)定义为设备装用范围。供应商模糊综合评价体系对应的部分数据如表 3 所示。

表 3 供应商绩效综合评价体系

Table 3 Comprehensive evaluation system of supplier performance

供应商名称	GLKG-297	GLKG-134	GLKG-168
电压等级数量	5	3	2
设备型号数量	159	65	13
设备拥有量	22 718	6 971	458
直接影响设备运行	372	92	19
质量事故	533	67	17
家族性缺陷	37	20	2
装用范围	27	23	7

2.2 层次分析法

根据客户对电力设备供应商的常见需求, 将决策目标、决策准则和决策对象按照相互关系^[16-17]构造层次结构图如图 2 所示。

(1) 目标层: 决策的目的。

(2) 准则层: 决策时所需考虑的因素, 包括设备电压等级数量、设备型号数量、设备缺陷数量、设备拥有量、家族性缺陷数量、设备运行时间、设备装用范围。

(3) 方案层: 决策的备选方案。

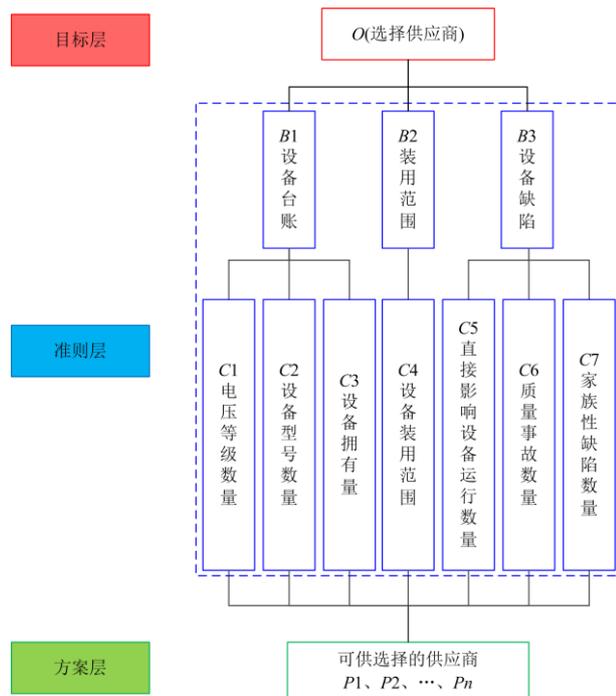


图 2 层次结构图

Fig. 2 Hierarchy diagram

2.2.1 构造判断矩阵

判断矩阵表示本层所有因素针对上层某个因素的相对重要性。判断矩阵的元素 a_{ij} 用 Santy 的 1-9 标度方法给出^[18-19]。

设 $A=(a_{ij})_{n \times n}$, $a_{ij}>0$ 为比较各准则 $C_1、C_2、L、C_7$ 对目标 O 的重要性。

2.2.2 层次单排序及其一致性检验

用判断矩阵得到最大特征值和其对应的特征向量^[20]。用 $\lambda-n$ 的大小来衡量 A 的不一致程度, 其不一致程度越大, 引起的判断误差越大。

定义一致性指标

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (1)$$

其中: $CI=0$, 有完全一致性; CI 越大, 不一致性越严重。

为了衡量 CI 的大小, 引入随机一致性指标 RI 。定义一致性比率为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

当 $CR<0.1$ 时, 认为矩阵 A 的不一致程度在可以接受的范围之内。

2.3 因子分析

基于因子分析构造的指标体系, 结合国家电网提供的电力设备供应商的相关数据进行标准化处理, 形成原始指标数据集。

(1) KMO 和 Bartlett 球形检验。通过 KMO 和 Bartlett 球形检验可以判断指标体系这份数据是否适合用于因子分析。只有通过这两个检验的综合指标体系, 才能被认定为适合做因子分析。

(2) 查看表格“解释的总方差”, 按照特征值大于 1 且累计方差贡献率大于等于 80% 的原则提取主成分, 得到旋转成分矩阵。

(3) 将因子分析所得到的成分得分系数矩阵的系数绝对值所占比例作为客观权重^[21], 如式(3)所示。

$$\omega_{2j} = \frac{|\beta_j|}{\sum_{j=1}^n |\beta_j|} \quad (3)$$

2.4 博弈论组合赋权

基于博弈论的组合赋权法为将采用不同方法获取的权重组合, 以寻求最合理的指标权重的过程。本文将选取主观权重和客观权重共两种赋权方法, 协调两者之间的冲突并寻找两者之间的一致性。博弈论组合赋权法可以将主观意识和客观数据的内在分布

充分结合,在一定程度上提高权重的科学性^[22]。

(1) 使用层次分析法和因子分析法分别得到供应商评价指标的主观权重和客观权重,构成权重向量集合 $w=\{\omega_1,\omega_2\}$,其中 ω_1 为层次分析法确定的主观权重向量, ω_2 为因子分析确定的客观权重向量。则两个权重向量的线性组合为

$$W = \alpha_1 \omega_1^T + \alpha_2 \omega_2^T \quad (4)$$

(2) 根据博弈集结模型的思想,对上述两个权重进行最优的线性组合,以离差最小化为目标,对上式的两个线性组合系数 α_1 、 α_2 进行优化,得到最合理的权重,由此确定目标函数为

$$\min \|W - \omega_k\|_2, k=1,2 \quad (5)$$

(3) 采用矩阵微分性质将上式等价变换为最优化一阶导数条件的线性方程组如式(6)所示。

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \omega_1 \omega_2^T \\ \omega_2 \omega_1^T & \omega_2 \omega_2^T \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \omega_2 \omega_2^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

(4) 由上式得到最优化的线性组合系数 α_1 、 α_2 并进行归一化处理之后,最终得到基于博弈论组合赋权的综合权重 W 为

$$W = \alpha_1^* \omega_1^T + \alpha_2^* \omega_2^T \quad (7)$$

$$\text{式中: } \alpha_1^* = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}; \quad \alpha_2^* = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}。$$

2.5 改进的模糊综合评价

(1) 选取供应综合商评价指标体系^[23],建立评价指标集合 U 。若选择了 n 个评价指标,那么评价指标集为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$,其中, u_1, u_2, \dots, u_n 为 n 个评价指标,本文共选取 7 个评价指标, $n=7$ 。

(2) 建立供应商综合评价标准集。根据选取的供应商综合评价指标,采纳专家建议建立评价标准等级集合 V ,若将供应商划分为 m 个评价等级,那么评价标准集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$,其中, v_1, v_2, \dots, v_m 为 m 个评价等级,本文将供应商划分为三个等级 A、B、C, ($A > B > C$), $m=3$ 。

(3) 建立模糊关系矩阵。根据第(2)步建立的评价标准集,对每个评价指标按照 A、B、C 三个等级进行量化,确定每个指标对应的等级模糊因子的隶属度 r_{ij} ,建立模糊关系矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$, $r_{ij} > 0$ 。正指标和负指标的隶属度计算公式分别为^[24]

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i \geq s_j \\ \frac{x_i - s_{j+1}}{s_j - s_{j+1}} & s_{j+1} < x_i < s_j \\ 0 & x_i \leq s_{j+1} \end{cases} \quad (8)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i \leq s_{j+1} \\ \frac{s_{j+1} - x_i}{s_j - s_{j+1}} & s_j < x_i < s_{j+1} \\ 0 & x_i \geq s_j \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_i 为对应评价指标值; s_j 为对应评价指标的第 j 类供应商评价标准值; $i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m$ 。得到对第 j 类供应商的隶属度为 r_{ij} ,对第 $j+1$ 类供应商的隶属度为 $1-r_{ij}$,对其他类别的供应商的隶属度全为 0,由隶属度向量组成模糊评判矩阵 R 。

(4) 计算组合权重。根据博弈论组合赋权法将层次分析法得到的主观权重和因子分析得到的客观权重进行组合得到综合权重向量。

(5) 计算模糊综合评价向量 P 。如式(10)所示^[25]。

$$p_j = \sum_{i=1}^7 \omega_i r_{ij} \quad (10)$$

由最大隶属度原则 $\max\{p_j\}$ 选择供应商等级。

3 实例分析

为了验证本文所提方法的可行性和科学性,对国家电网提供的 162 个电力设备供应商的相关数据进行综合评估。

3.1 计算主观权重

相对于目标层,将设备台账、装用范围和设备缺陷三个特征的重要程度进行两两比较,得到对应的判断矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 5 & 2 \\ 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

由此得到的目标层权重如表 4 所示。

表 4 目标层权重

Table 4 Target layer weight

	设备台账	装用范围	设备缺陷
权重	0.582	0.109	0.309

相对于设备台账,将电压等级数量、设备型号数量和设备拥有量三个特征的重要程度进行两两比较,得到对应的判断矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1/3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

由此得到的设备台账层权重如表 5 所示。

表 5 设备台账层权重

Table 5 Equipment account layer weight

	电压等级数量	设备型号数量	设备拥有量
权重	0.297	0.163	0.54

相对于设备缺陷, 将直接影响设备运行数量、设备缺陷数量和家族性缺陷数量三个特征的重要程度进行两两比较, 得到对应的判断矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 1/5 \\ 3 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

由此得到的设备缺陷层权重如表 6 所示。

表 6 设备缺陷层权重

Table 6 Device defect layer weight

	直接影响设备运行数量	设备缺陷数量	家族性缺陷数量
权重	0.23	0.122	0.648

将表 4—表 6 中的权重进行结合, 得到所有指标层的权重, 如表 7 所示。

表 7 指标层权重

Table 7 Indicator layer weight

指标层	主观权重
电压等级数量	0.173
设备型号数量	0.095
设备拥有量	0.314
直接影响设备运行数量	0.071
质量事故	0.038
家族性缺陷	0.2
设备装用范围	0.109

根据文献[26], 本文选取 5 位专家分别按照上述步骤, 给出各自的指标层权重, 确定各位专家的先验权重, 利用贝叶斯权重修正法得到最终的指标权重如表 8 所示。

表 8 最终指标层权重

Table 8 Final indicator layer weight

指标层	主观权重
电压等级数量	0.169
设备型号数量	0.098
设备拥有量	0.303
直接影响设备运行数量	0.077
质量事故	0.045
家族性缺陷	0.195
设备装用范围	0.112

3.2 计算客观权重

如表 9 所示, 将选取的绩效评价指标检验之后,

KMO 的值为 0.842, 大于阈值 0.5, 说明变量之间的相关性较强; Bartlett 球形度显著性水平为 0.000, 小于 0.05, 说明相关系数矩阵与单位阵有显著性差异。综上所述, 这份数据适合进行因子分析。

表 9 KMO 和 Bartlett 的检验

Table 9 KMO and Bartlett's inspection

检验	数值
取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量	0.842
Bartlett 的球形度检验近似卡方	1 813.554
Bartlett 的球形度检验 df	21
Bartlett 的球形度检验 Sig.	0.000

如表 10 所示, 七个特征经过因子分析共提取出一个公因子, 最后一列表明抽取的公因子旋转之后的累计方差贡献率为 81.461%, 说明这个公因子能够解释原始数据的绝大部分信息, 即因子分析的结果较为理想。

表 10 解释的总方差

Table 10 Total variance of interpretation

主成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	5.702	81.461	81.461	5.702	81.461	81.461
2	0.730	10.423	91.885			
3	0.223	3.190	95.075			
4	0.174	2.487	97.562			
5	0.104	1.486	99.048			
6	0.056	0.796	99.844			
7	0.011	0.156	100.000			

如表 11 所示, 为成分得分系数矩阵和客观权重。

表 11 指标层客观权重

Table 11 Objective weights of the indicator layer

指标层	成分得分系数	客观权重
电压等级数量	0.137	0.124
设备型号数量	0.158	0.143
设备拥有量	0.166	0.15
直接影响设备运行	-0.167	0.151
质量事故	-0.166	0.15
家族性缺陷	-0.142	0.128
装用范围	0.17	0.154

3.3 计算组合权重

由式(6)、式(7)得到的主观权重和客观权重的系数如下所示, 分别为 0.93 和 0.07。进而求得综合权重如表 12 所示。

$$\begin{pmatrix} \alpha_1^* \\ \alpha_2^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.93 \\ 0.07 \end{pmatrix}$$

表 12 综合权重

Table 12 Comprehensive weights

指标层	综合权重
电压等级数量	0.169
设备型号数量	0.098
设备拥有量	0.303
直接影响设备运行数量	0.077
质量事故	0.046
家族性缺陷	0.195
装用范围	0.112

3.4 模糊综合评价

根据专家建议，建立评价等级集合，将评价标准分为 A、B、C，(A>B>C)三个等级，如表 13 所示。

表 13 评价等级建立标准

Table 13 Evaluation level establishment criteria

指标层	C	B	A
电压等级数量	<2	≥2	≥4
设备型号数量	<20	≥20	≥100
设备拥有量	<1 000	≥1 000	≥10 000
直接影响设备运行	≥100	<100	<10
质量事故	≥100	<100	<10
家族性缺陷	≥20	<20	<5
装用范围	<10	≥10	≥20

以代号 GLKG-134 的供应商为例，该供应商的设备型号数量为 65，属于第二级别，求得其为 A 级

表 16 部分供应商各等级分值统计表

Table 16 Statistics of partial supplier scores

供应商	A	B	C	等级
GLKG-297	0.682 0	0.000 0	0.318 0	A
GLKG-112	0.682 0	0.000 0	0.318 0	A
GLKG-307	0.682 0	0.000 0	0.318 0	A
GLKG-218	0.682 0	0.000 0	0.318 0	A
GLKG-151	0.682 0	0.000 0	0.318 0	A
GLKG-133	0.682 0	0.000 0	0.318 0	A
GLKG-129	0.224 2	0.457 9	0.318 0	B
GLKG-134	0.437 0	0.368 1	0.195 0	A

以供应商 GLKG-168 为例，由表 15 可知，它的评价等级为 C，结合表 3 和表 12 发现主要原因为设备台账较少，设备装用范围较小。

3.5 评价结果与分析

(1) 表 17 为所有供应商的评级结果统计表，其中，等级为 A 的供应商有 30 家，占比 18.52%；等级为 B 的供应商有 16 家，占比 9.88%；等级为 C 的供应商有 116 家，占比 71.60%。

别的隶属度为 $r_{ij}=0.56$ ， $r_{ij}=1-r_{ij}=0.44$ ，其他等级隶属度为 0，则该供应商设备型号数量的隶属度向量为(0.56,0.44,0)，同理，可以算出该供应商在各指标上的隶属度矩阵 P 。代号为 GLKG-134 的供应商的隶属度矩阵如表 14 所示。

表 14 隶属度矩阵

Table 14 Membership matrix

GLKG-134	A	B	C
电压等级数量	0.25	0.75	0.00
设备型号数量	0.56	0.44	0.00
设备拥有量	0.66	0.34	0.00
直接影响设备运行	0.10	0.90	0.00
质量事故	0.41	0.59	0.00
家族性缺陷	0.00	0.00	1.00
装用范围	1.00	0.00	0.00

代号为 GLKG-134 的供应商的模糊综合评价向量如表 15 所示。可见，该供应商等级为 A 的概率为 0.437，等级为 B 的概率为 0.368，等级为 C 的概率为 0.195，所以，该供应商最终等级为 A。

表 15 模糊综合评价向量

Table 15 Fuzzy comprehensive evaluation vector

等级	A	B	C
分值	0.437	0.368	0.195

将所有供应商各特征的数值均按照上述过程计算，选择分值最高的等级为最终的供应商评级结果，部分评价结果如表 16 所示。

表 17 供应商等级统计表

Table 17 Supplier rating statistical table

等级	A	B	C
供应商个数	30	16	116

(2) 如表 18 所示，为不同评价结果的对比分析，选择传统模糊综合评价方法(AHP)与本文方法进行对比。以部分供应商为例，比较传统模糊综合评价方法与本文方法评价结果，可看出供应商 GLKG-129

和 GLKG-245 利用传统方法的评价结果为 A 类, 而本文方法的评价结果为 B 类; 供应商 GLKG-257 和 GLKG-153 利用传统方法的评价结果为 B 类, 而本文方法的评价结果为 C 类, 这主要是因为基于 AHP 的模糊评价法仅考虑专家意见, 难以发现数据之间的内在规律, 缺乏客观性, 造成评价结果与实际情况存在差异。

表 18 不同评价方法结果对比

Table 18 Results comparison of different evaluation methods

供应商	基于 AHP 的模糊综合评价方法	基于博弈论组合赋权的模糊综合评价方法
GLKG-129	A	B
GLKG-245	A	B
GLKG-257	B	C
GLKG-153	B	C

4 结语

文章在传统模糊综合评价法的基础上, 设计了基于改进模糊综合评价法的电力设备供应商综合评价模型。首先, 综合考虑设备台账、设备缺陷和装用范围构建合理的供应商评价体系; 然后, 采用层次分析法和因子分析法分别计算评价指标的主观权重和客观权重; 进而采用博弈论组合赋权模型计算指标的综合权重, 最后, 引入模糊综合评价法对供应商分级并通过实例验证了模型的有效性和实用性。本文依据最大隶属度原则将供应商划分为 3 个等级, 其中, A 类供应商 30 个, B 类供应商 16 个, C 类供应商 116 个。与传统模糊综合评价方法得到的供应商分类结果对比发现基于博弈论组合赋权改进的模糊综合评价法兼顾主、客观权重, 指标赋权更加科学, 从而有效提高电力设备供应商综合评价的正确性和合理性。

参考文献

[1] 彭张林, 张强, 杨善林. 综合评价理论与方法研究综述[J]. 中国管理科学, 2015, 23(增刊 1): 245-256.
 PENG Zhanglin, ZHANG Qiang, YANG Shanlin. Overview of comprehensive evaluation theory and methodology[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(S1): 245-256.

[2] 张梦中, MARCHOZE R. 定性研究方法总论[J]. 中国行政管理, 2001(11): 39-42.
 ZHANG Mengzhong, MARCHOZE R. An overview on qualitative research methods[J]. Chinese Public Administration, 2001(11): 39-42.

[3] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228.
 CHENG Qiyue. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index[J]. Systems

Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(7): 1225-1228.

[4] DU R Y, KAMAKURA W A. Improving the statistical performance of tracking studies based on repeated cross-sections with primary dynamic factor analysis[J]. International Journal of Research in Marketing, 2015, 32(1): 94-112.

[5] 李福祥, 刘琪琦. 我国地区金融发展水平综合评价研究——基于面板数据的因子分析和 TOPSIS 实证研究[J]. 工业技术经济, 2016, 35(3): 152-160.
 LI Fuxiang, LIU Qiqi. The comprehensive evaluation of China's regional financial development — based on panel data empirical research by factor analysis and TOPSIS[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2016, 35(3): 152-160.

[6] TANG Xiaoling, TAN Zhuling. Comprehensive evaluation of the development level of Shanxi's real estate industry based on factor analysis and cluster analysis[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014: 3335.

[7] 吴杰. 数据包络分析(DEA)的交叉效率研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
 WU Jie. Cross efficiency research on data envelopment analysis (DEA)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.

[8] 柳顺. 基于数据包络分析的模糊综合评价方法及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
 LIU Shun. Fuzzy comprehensive evaluation method and its application based on data envelopment analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[9] XIN Yuhong, LI Xingxing. Supply chain performance evaluation based on data envelopment analysis[C] // 2011 2nd IEEE International Conference on Emergency Management and Management Sciences, August 8-10, 2011, Beijing, China.

[10] LI Rui, DUAN Kaiyan. Comprehensive evaluation of performance in logistics service supply chain based on the entropy method and gray analysis[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2657.

[11] 李廉水, 杨浩昌, 刘军. 我国区域制造业综合发展能力评价研究——基于东、中、西部制造业的实证分析[J]. 中国软科学, 2014(2): 121-129.
 LI Lianshui, YANG Haochang, LIU Jun. Evaluation study on comprehensive developing ability of regional manufacturing industry in China based on the empirical analysis of manufacturing industry in east, middle and west China[J]. China Soft Science, 2014(2): 121-129.

[12] 穆永铮, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全与效益综合评价指标体系[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 23-28.
 MU Yongzheng, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. A comprehensive evaluation index system of power grid security and benefit based on multi-operator fuzzy hierarchy evaluation method[J]. Power System Technology,

- 2015, 39(1): 23-28.
- [13] ZHU Xiaochen, NIU Dapeng, WANG Xu, et al. Comprehensive energy saving evaluation of circulating cooling water system based on combination weighting method[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 157.
- [14] 宋人杰, 丁江林, 白丽, 等. 基于合作博弈法和梯形云模型的配电网模糊综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 1-8.
SONG Renjie, DING Jianglin, BAI Li, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of distribution network based on cooperative game theory and trapezoidal cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 1-8.
- [15] 徐斌, 马骏, 陈青, 等. 基于改进 AHP-TOPSIS 法的经济开发区配电网综合评价指标体系和投资策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 35-44.
XU Bin, MA Jun, CHEN Qing, et al. Research on comprehensive evaluation index system and investment strategy of economic development zone distribution network based on improved AHP-TOPSIS method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 35-44.
- [16] 周钰, 黄进. 基于模糊层次分析法的部队生鲜食品冷链物流供应商评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(11): 3632-3637.
ZHOU Yu, HUANG Jin. Evaluation of military fresh food cold chain logistics suppliers based on fuzzy analytical hierarchy process[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(11): 3632-3637.
- [17] 田春笋, 殷奕恒, 关朝杰, 等. 基于供电分区的中高压配电网综合评价策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 152-159.
TIAN Chunzheng, YIN Yiheng, GUAN Chaojie, et al. Comprehensive evaluation strategy of medium and high voltage distribution network based on power supply division[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 152-159.
- [18] 刘璇. 天津电力公司电网工程项目造价控制评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
LIU Xuan. Cost control evaluation research on power grid project of Tianjin Electric Power Company[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [19] 王琨鹏. RC 公司客户满意度评价体系的构建与应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
WANG Kunpeng. Construction and application research on RC company customer satisfaction evaluation system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [20] 黄厚波. 基于 AHP-模糊综合评价法的长沙市公交乘客满意度评价研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
HUANG Houbo. Changsha public transportation passenger satisfaction evaluation research based on AHP-fuzzy comprehensive method[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014.
- [21] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation method of AHP weight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.
- [22] 陈婧, 赵敏, 周华, 等. 基于博弈论组合赋权的姜堰区模糊综合水质评价法及应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 32-35, 91.
CHEN Jing, ZHAO Min, ZHOU Hua, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in evaluation of water quality based game theory[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(9): 32-35, 91.
- [23] 毕娟, 李希建. 基于博弈论组合赋权灰靶模型的煤矿安全综合评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(7): 113-118.
BI Juan, LI Xijian. Comprehensive evaluation of coal mine safety based on grey target model with combination weighting of game theory[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(7): 113-118.
- [24] 石宝峰, 修宇鹏, 王静. 基于博弈论组合赋权的地市绿色产业评价[J]. 技术经济, 2017, 36(2): 75-84.
SHI Baofeng, XIU Yupeng, WANG Jing. Evaluation on cities green industry by combined weight method based on game theory[J]. Technology Economics, 2017, 36(2): 75-84.
- [25] 刁柏青, 张伟昌, 王中龙, 等. 基于改进模糊综合评价法的电力供应商评价模型[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(5): 226-231.
DIAO Baiqing, ZHANG Weichang, WANG Zhonglong, et al. Power supplier evaluation model based on improved fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Computer Systems & Applications, 2018, 27(5): 226-231.
- [26] LI Gengyin, LI Guodong, ZHOU Ming. Comprehensive evaluation model of wind power accommodation ability based on macroscopic and microscopic indicators[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 215-226. DOI: 10.1186/s41601-019-0132-6.

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-02-21

作者简介:

门业堃(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力大数据; E-mail: yekun.men@foxmail.com

钱梦迪(1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力大数据; E-mail: qianmengdi@bj.sgcc.com.cn

于钊(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力大数据. E-mail: yuzhao@bj.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)