

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230496

混合信息下智能变电站建设项目综合效益评价

杨靛青, 叶锟锋

(福州大学经济与管理学院, 福建 福州 350108)

摘要: 从智能效益、经济效益、绿色效益和安全效益4个维度构建了智能变电站建设项目综合效益评价指标体系。其中评价指标的属性值为包含语言变量、精确数和正态分布区间数的混合信息。在此基础上, 基于直觉模糊集和组合赋权法, 构建了一种面向混合信息的混合多准则决策模型。该模型首先用不同的转换规则将混合信息一致化为直觉模糊数的形式。然后采用基于合作博弈模型的群组决策特征根法-直觉模糊熵(group eigenvalue method intuitionistic fuzzy entropy, GEM-IFE)组合赋权法来确定指标的综合权重, 并基于直觉模糊集建立了改进的逼近理想解排序方法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)评价模型。最后, 以10个智能变电站建设项目作为案例进行分析, 并将该模型与传统的TOPSIS方法和单一赋权法进行比较。结果证明该混合多准则决策模型具有良好的鲁棒性。

关键词: 正态分布区间数; 混合信息; 混合多准则决策; 直觉模糊; 组合赋权法; TOPSIS方法

Comprehensive benefit evaluation of smart substation construction projects from hybrid information

YANG Dianqing, YE Kunfeng

(School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A comprehensive benefit evaluation index system of a smart substation construction project is constructed from four dimensions of intelligent, economic, green and safety benefits. The attribute values of the evaluation indicators are the hybrid information containing linguistic variables, exact numbers and normal distribution interval numbers. A hybrid multi-criteria decision making model for hybrid information is constructed based on intuitionistic fuzzy sets and a combined weighting method. First, different transformation rules are used to uniformly convert the hybrid information into the form of intuitionistic fuzzy numbers. Then the GEM-IFE combination weighting method based on a cooperative game model is used to determine the comprehensive weight of indicators, and an improved TOPSIS evaluation model is established based on intuitionistic fuzzy sets. Finally, 10 smart substation construction projects are taken as cases for analysis, and this model is compared with the traditional TOPSIS method and single weighting method. The results show that the hybrid multi-criteria decision-making model has good robustness.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 71572040 and No. 72001126).

Key words: normal distribution interval numbers; hybrid information; hybrid multi-criteria decision-making; intuitionistic fuzzy; combination weighting method; TOPSIS method

0 引言

随着全球能源互联网发展战略的实施, 有必要对影响智能变电站建设和发展的因素展开全面的评估, 从而为智能变电站的大规模推广提供科学的依据。目前, 一些学者对智能变电站评价指标体系展开了研究。文献[1]从智能性、高效性、绿色性和可靠性4个维度对智能变电站进行了技术先进性评价。

文献[2]从技术性、经济性和社会性3个维度构建了基于云模型的智能变电站建设项目评价体系。文献[3]从技术性、经济性、社会性、实用化和工程管理5个维度建立了智能变电站工程项目评价指标体系。文献[4]基于可靠性、可用性、实时性和经济性4个宏观维度提出了智能变电站自动化系统有效度评估模型。文献[5]从安全、技术、管理、经济及环境5个维度构建了智能变电站建设项目风险评价指标体系。目前对于将智能变电站视为一个整体的综合效益的研究还较少, 并且相关研究所建立的智能变电站建设项目评价指标体系还不够完善, 难以为

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(71572040, 72001126); 福建省自然科学基金面上项目资助(2021J1573)

智能变电站的规划建设提供有力的参考^[6-7]，此外，目前的研究中所构建的智能变电站评价指标所包含的信息类型还不够丰富，难以反映实际的情况，仅用单一类型的信息无法准确地刻画智能变电站所有评价指标的信息。因此，更进一步的深入研究和拓展是十分有必要的。

智能变电站建设项目综合效益评价决策问题涉及到多个属性并且更具有复杂性和不确定性，是典型的混合信息多属性决策^[8]问题。解决混合信息多属性决策问题的关键之处在于：通过使用不同的规范化方法，将多种不同信息类型的属性值转化成同一信息类型的属性值，再利用现有的决策方法对其进行决策。文献[9]将所提出的由精确数、区间数和模糊数组成的混合信息一致化为精确数的形式。文献[10]通过对不同类型的属性值进行区间化，将由精确数和模糊语言构成的混合多属性决策问题转化为区间型多属性决策问题。文献[11]将由三角模糊数、语言信息、二元语义信息组成的混合信息转化为二元语义信息，并通过二元语义信息进行决策。文献[12]将包含精确数、区间数和语言信息的混合信息一致化为语言信息的形式。文献[13]提出了一种将包含精确数、区间数和语言变量的混合信息转化为虚拟语言术语的多属性大规模群决策方法。文献[14]将混合多属性决策矩阵中的精确数、区间数、模糊数和语言变量转化为统一的 Z 数的形式。目前的研究所涉及的混合信息主要以精确数、模糊数、区间数和语言变量为主，对于区间数而言，目前的研究都假设在该区间内的数值服从均匀分布，但在实际问题中，所涉及到的区间数并不都符合均匀分布，相对来说，取值集中在中间一小段，而在两边比较少的可能性更大，即出现“中间多两边少”的情形的可能性更大，类似于正态分布，因此，取值服从正态分布的区间数更符合实际情况。此外，混合评价信息存在着复杂、不确定性大且模糊性强的问题，而直觉模糊数可以用隶属度、非隶属度和犹豫度来规范不同类型的信息，并从根本上保留混合信息的不确定性，降低决策信息的损失，相比其他信息类型，直觉模糊数表达模糊信息的能力更强，因此，将混合信息一致化为直觉模糊数的形式更有实用性。

基于上述研究，本文根据智能变电站自身的结构特点，从智能效益、经济效益、绿色效益和安全效益4个维度构建了一个包含27个评价指标的智能变电站建设项目综合效益评价指标体系，其中评价指标的属性值为包含语言变量、精确数和正态分布区间数的混合信息，弥补了以往研究中评价维度不

能全方面反映智能变电站建设项目特点并且指标信息过于单一而无法反映实际情况的缺陷。此外，针对智能变电站评价信息复杂且不确定性大的问题，本文将混合信息一致化为表达模糊信息能力更强的直觉模糊数，并在此基础上，结合群组决策特征根法(group eigenvalue method, GEM)、直觉模糊熵(intuitionistic fuzzy entropy, IFE)、合作博弈模型和用余弦相似度(cosine similarity, CS)代替欧氏距离的改进逼近理想解排序方法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)，提出一个混合多准则决策方法，即基于合作博弈模型的 GEM-IFE 组合赋权法和直觉模糊集的改进 TOPSIS 评价模型，并将其简称为面向混合信息的混合多准则决策模型。随后，本文通过10个智能变电站建设项目作为案例进行分析，并与传统 TOPSIS 评价模型和单一赋权法进行对比分析，验证了该模型在对智能变电站建设项目进行综合效益评价时具有良好的鲁棒性。

1 智能变电站建设项目综合效益评价指标体系的构建

基于文献[15-19]，本文结合智能变电站自身的结构特点，从智能效益、经济效益、绿色效益和安全效益4个维度建立指标体系，这样既考虑到了智能变电站项目建设所带来的直接效益，也考虑到了智能变电站智能化、绿色化和安全化所带来的间接效益，有利于对智能变电站建设项目的综合效益展开更全面的评估。本文所建立的智能变电站建设项目综合效益评价指标体系如表1所示，包含了4个一级指标和27个二级指标，其中，定性指标8个，定量指标19个。

2 面向混合信息的混合多准则决策模型

2.1 面向混合信息的混合多准则决策模型框架

本文所提出的面向混合信息的混合多准则决策模型框架如图1所示，共包括3个部分：(1)基于直觉模糊数的混合信息统一；(2)基于 GEM-IFE 的组合赋权法；(3)基于直觉模糊集的改进 TOPSIS 评价模型。

2.2 基于直觉模糊数的混合信息统一

为了避免不同量纲对决策结果产生影响，本文首先将混合信息划分为语言变量、精确数和正态分布区间数3类，然后用不同的转化规则将混合信息统一为直觉模糊数的形式，并构建直觉模糊决策矩阵，以便于进一步计算和决策分析。

表 1 智能变电站建设项目综合效益评价指标体系

Table 1 Comprehensive benefit evaluation index system of smart substation construction projects

目标层	一级指标	二级指标	性质	单位
智能变电站 建设项目综 合效益评价 指标体系 A	智能效益 A1	一次设备智能化率 A11(+)	定量	%
		二次设备网络化率 A12(+)	定量	%
		智能化投资比例 A13(+)	定量	%
		时间同步功能实现程度 A14(+)	定性	—
		在线状态监测功能实现程度 A15(+)	定性	—
		在线数据分析及决策功能 A16(+)	定性	—
		故障智能诊断能力 A17(+)	定性	—
	经济效益 A2	工程变压器最大负载率 A21(+)	定量	%
		最大负荷时刻功率因数 A22(+)	定量	—
		总投资内部收益率 A23(+)	定量	%
		总投资财务净现值 A24(+)	定量	万元
		利息备付率 A25(+)	定量	%
		偿债备付率 A26(+)	定量	%
	绿色效益 A3	线损率 A31(-)	定量	%
		“四新”技术应用程度 A32(+)	定性	—
		无线电干扰强度 A33(-)	定量	dB·μV/m
		工频电场强度 A34(-)	定量	kV/m
工频磁感应强度 A35(-)		定量	μT	
噪声排放强度 A36(-)		定量	dB	
安全效益 A4	环保投资比例 A37(+)	定量	%	
	影响电能质量考核次数 A41(-)	定量	次	
	继电保护和安稳装置误动、拒动次数 A42(-)	定量	次	
	母线电压合格率 A43(+)	定量	%	
	安全事故发生次数 A44(-)	定量	次	
	电网抗灾能力 A45(+)	定性	—	
	电网故障自愈能力 A46(+)	定性	—	
网络信息安全与运维能力 A47(+)	定性	—		

注: +和-分别表示正向和负向指标。

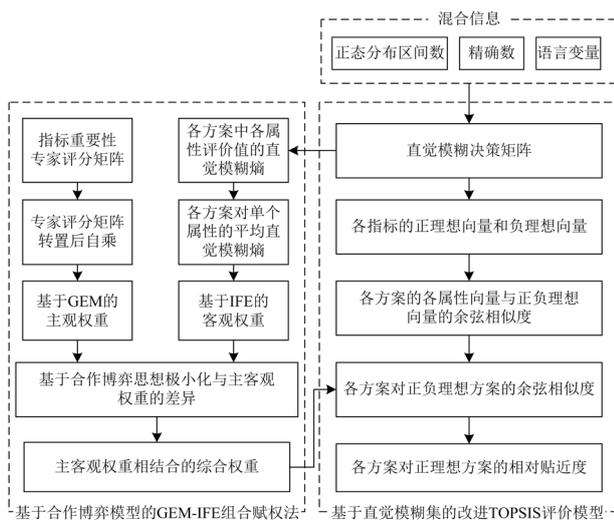


图 1 面向混合信息的混合多准则决策模型框架

Fig. 1 Framework of the hybrid multi-criteria decision-making model for hybrid information

1) 语言变量的直觉模糊转化规则

对于定性指标, 通过收集相关领域专家小组的决策意见并根据表 2 所示的语言变量得出对该属性的综合评价。例如: 专家小组对评价指标“时间同

表 2 语言变量表示属性值

Table 2 Linguistic variables to represent attribute values

语言变量	直觉模糊数
最好(B)	(1.00, 0.00, 0.00)
极好(EG)	(0.90, 0.10, 0.00)
很好(VG)	(0.80, 0.20, 0.00)
好(G)	(0.70, 0.20, 0.10)
稍好(MG)	(0.60, 0.30, 0.10)
中等(M)	(0.50, 0.40, 0.10)
稍差(MP)	(0.40, 0.50, 0.10)
差(P)	(0.25, 0.60, 0.15)
很差(VP)	(0.10, 0.75, 0.15)
极差(EP)	(0.10, 0.90, 0.00)
最差(W)	(0.00, 1.00, 0.00)

步功能实现程度”的评价为：70%的人认为满意，20%的人认为不满意，10%的人保持中立，那么专家小组对该评价指标“时间同步功能实现程度”属性的综合评价为“好”，对应的直觉模糊数为(0.70, 0.20, 0.10)。

2) 精确数的直觉模糊转化规则

(1) 对于属性值为精确数的定量指标，需要先将其规范化。

① 对于成本型指标，其规范化公式为

$$x_{ij}^t = \frac{\max_{1 \leq i \leq n}(a_{ij}) - a_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n}(a_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq n}(a_{ij})} \quad (1)$$

式中： a_{ij} 为属性值为精确数的定量指标的原始数值； x_{ij}^t 为规范化后的指标值； n 为指标个数。

② 对于效益型指标，其规范化公式为

$$x_{ij}^t = \frac{a_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n}(a_{ij})}{\max_{1 \leq i \leq n}(a_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq n}(a_{ij})} \quad (2)$$

(2) 通过式(3)和式(4)将精确数转化为直觉模糊数。由精确数的定义可知，其不存在犹豫度，因此 $\pi_{ij}^t = 1 - \mu_{ij}^t - \nu_{ij}^t = 0$ 。

$$\mu_{ij}^t = x_{ij}^t \quad (3)$$

$$\nu_{ij}^t = 1 - x_{ij}^t \quad (4)$$

式中， μ_{ij}^t 、 ν_{ij}^t 和 π_{ij}^t 分别为 x_{ij}^t 直觉模糊转化后的隶属度、非隶属度和犹豫度。

3) 正态分布区间数的直觉模糊转化规则

本文所选取的“绿色效益”维度指标中的工频电场强度、工频磁感应强度、无线电干扰强度和噪声排放强度都是在变电站的四周测到的，测量结果随着位置的变化而变化，基于以往的研究，这4个属性所测得的数据都近似服从正态分布，因此这4个指标的属性值为正态分布区间数^[20]。通常来说，由于正态分布区间数的波动性较大，在其区间上的数值并不总是令人满意，通常基于以往的经验 and 知识来划定关于该正态分布区间数的满意区间、不满意区间和犹豫区间。因此，用直觉模糊数来描述这些正态分布区间数是非常适合的。

定义 1^[21] 设 $D=[a,b]$ 为区间数，若属性值 $r \in [a,b]$ ，且服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ，则称 $[a,b]$ 为正态分布区间数，根据正态分布的 3σ 原则，均值和标准差由式(5)和式(6)确定。

$$\mu = \frac{1}{2}(a+b) \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{1}{6}(b-a) \quad (6)$$

式中， μ 和 σ 分别表示正态分布区间数 $[a,b]$ 的均值和标准差。

定义 2^[22] 设区间数 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ，概率密度函数为 $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ ，则其分布函数为 $F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$ 。

定义 3 设区间 $[x_1, x_2]$ ， $[x_2, x_3]$ ， $[x_3, x_4]$ 分别表示对某属性的满意区间、犹豫区间和不满意区间，且该属性值为正态分布区间数 $[a,b]$ ，其中 $[a,b] \subseteq [x_1, x_4]$ ， $a \in [x_1, x_2]$ ， $b \in [x_3, x_4]$ ，则该属性值的隶属度 $\mu(x)$ 、非隶属度 $\nu(x)$ 和犹豫度 $\pi(x)$ 分别如下：

$$\mu(x) = S_1 = \int_a^{x_2} f(t)dt \quad (7)$$

$$\nu(x) = S_2 = \int_{x_3}^b f(t)dt \quad (8)$$

$$\pi(x) = S_3 = \int_{x_2}^{x_3} f(t)dt \quad (9)$$

其中

$$S_1 + S_2 + S_3 = 1 \quad (10)$$

式中， S_1 、 S_2 和 S_3 分别表示分布函数 $F(x)$ 在区间 $[a, x_2]$ 、 $[x_2, x_3]$ 和 $[x_3, b]$ 上的面积。

经过专家咨询，本文划定的正态分布区间数的不同评语区间如表3所示。

表3 正态分布区间数的不同评语区间

Table 3 Different linguistic intervals for the normal distribution interval numbers

评价指标	满意区间	犹豫区间	不满意区间
工频电场强度/(kV/m)	[0, 1]	[1, 1.3]	[1.3, ∞)
工频磁感应强度/(10 μT)	[0, 1]	[1, 1.3]	[1.3, ∞)
无线电干扰强度/(10 dB·μV/m)	[0, 4.2]	[4.2, 4.6]	[4.6, ∞)
噪声排放强度/(10 dB)	[0, 4.5]	[4.5, 4.8]	[4.8, ∞)

基于直觉模糊理论，并结合以上3个定义和表3，通过正态分布计算器即可求得工频电场强度、工频磁感应强度、无线电干扰强度和噪声排放强度的隶属度 $\mu(x)$ 、非隶属度 $\nu(x)$ 和犹豫度 $\pi(x)$ 。由于篇幅有限，本文仅讨论这种区间位置的情况，其他区间位置情况的直觉模糊数也是基于这种思想求得。

4) 构建与混合信息对应的直觉模糊决策矩阵

将混合信息通过上述转化规则规范化成统一的直觉模糊数并集结在一起，可得到与混合信息相对应的直觉模糊决策矩阵。设 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 为决策方案集， $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 为属性集，方案 A_i 关于属性 C_j 的直觉模糊值为 r_{ij} ，则直觉模糊决策矩阵

R 如式(11)所示。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $r_{ij} = (\mu_{ij}, \nu_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$; 其中 $\mu_{ij} \in [0, 1]$, $\nu_{ij} \in [0, 1]$, $0 \leq \mu_{ij} + \nu_{ij} \leq 1$, $\pi_{ij} = 1 - \mu_{ij} - \nu_{ij}$ 。

2.3 基于合作博弈模型的 GEM-IFE 组合赋权法

1) 基于 GEM 的主观赋权法

GEM 即群体 G 对多个被评目标作评判决策的新特征根法。运用此法只需要专家对各个指标打分, 然后将评分矩阵转置并自乘记为矩阵 F 。 F 的最大特征根对应的特征向量就是最优决策结论, 由 GEM 求得的权重是各级指标相对于上一层指标的权重, 其步骤如下^[23]。

步骤 1: 构建指标重要性专家评分矩阵 $X = [x_{ij}]_{q \times n}$ 。首先, 邀请相关领域的 q 个专家基于李克特 5 级量表对 n 个指标的重要性进行问卷调查, 分值 1—5 分别对应着很不重要、不重要、一般、重要和很重要。第 i 个专家的评分形成一个 n 维列向量 x_i , 专家的评分形成一个 $q \times n$ 阶的评分矩阵 X 。

$$x_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \cdots \ x_{in}]^T \in E^n \quad (12)$$

$$X = [x_{ij}]_{q \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{q1} & x_{q2} & \cdots & x_{qn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: E^n 为 n 维评分向量空间; x_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个指标的重要性评分。

步骤 2: 将评分矩阵 X 转置后自乘记为矩阵 F 。

$$F = X^T X \quad (14)$$

步骤 3: 用 Matlab 软件计算矩阵 F 的最大特征值 ρ_{\max} 及所对应的特征向量, 该特征向量即为所对应的权重向量 W_i 。

2) 基于 IFE 的客观赋权法

直觉模糊集的模糊性体现在不确定性和未知性两个方面, 而直觉模糊熵是直觉模糊集模糊性的理想度量^[24-25]。本文采用文献[24]所提出的改进的直觉模糊熵计算公式来确定评价指标的客观权重, 结果更具科学性和客观性, 具体步骤如下。

步骤 1 基于直觉模糊决策矩阵计算各方案中各属性评价值的直觉模糊熵。直觉模糊熵可形成矩阵 $E = [E(r_{ij})]_{m \times n}$ 。

$$E(r_{ij}) = \frac{1 - |\mu_{ij} - \nu_{ij}|^2 + \pi_{ij}^2}{2} \quad (15)$$

式中, $E(r_{ij})$ 表示方案 i 中属性 j 的评价值的直觉模糊熵。

步骤 2 计算各方案关于单个属性的平均直觉模糊熵。将各方案的重要性认为是同等的, 则各方案关于单个属性的平均直觉模糊熵为

$$E(r_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E(r_{ij}) \quad (16)$$

式中: m 表示评价方案的数量; $E(r_j)$ 为各方案关于单个属性 j 的平均直觉模糊熵。

步骤 3 计算各属性的客观权重。第 j 个属性的客观权重可通过式(17)计算。

$$W_j = \frac{1 - E(r_j)}{\sum_{j=1}^n [1 - E(r_j)]} \quad (17)$$

式中, W_j 为属性 j 的客观权重。

3) 基于合作博弈模型的综合赋权法

主观赋权法虽然基于专家丰富的理论和经验, 但具有一定的主观随意性。客观赋权法是通过具体的数理分析来计算指标的信息权重, 但所得到的赋权结果往往不能反映指标的真实重要性。因此, 采用单一的赋权法缺乏科学性、合理性, 需将主客观赋权法进行组合, 以克服单一赋权法的缺点^[26-28]。

本文基于合作博弈模型, 将主、客观赋权法进行组合, 通过极小化最优权重与基本权重之间的偏差使得评价指标权重的赋值更加科学合理^[29], 其具体步骤如下。

步骤 1 将主观赋权法和客观赋权法得到的主观权重向量 W_i 和客观权重向量 W_j 进行任意线性组合。

$$W = \alpha_1 W_i^T + \alpha_2 W_j^T \quad (18)$$

式中: α_1 和 α_2 分别表示 W_i^T 和 W_j^T 的线性组合系数; W 表示组合权重向量。

步骤 2 基于合作博弈的思想, 将组合权重 W 与主观权重 W_i 和客观权重 W_j 之间的离差极小化为目标, 来实现组合系数 α_1 和 α_2 的优化, 以求得最优权重。

$$\min \left\| \sum_{k=1}^2 \alpha_k W_k^T - W \right\|_2 \quad (19)$$

式中, t 表示参与组合赋权的不同方法的数量。

根据矩阵的微分性质, 可将式(19)转化为所对应的线性方程组的矩阵形式, 并求得最优权重的线性组合系数 α_1 和 α_2 。

$$\begin{bmatrix} W_i W_i^T & W_i W_j^T \\ W_j W_i^T & W_j W_j^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_i W_i^T \\ W_j W_j^T \end{bmatrix} \quad (20)$$

步骤 3 对最优组合系数进行归一化处理, 并求得最优组合权重。

$$\begin{cases} \alpha_1^* = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \\ \alpha_2^* = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \end{cases} \quad (21)$$

$$W = \alpha_1^* W_i^T + \alpha_2^* W_j^T \quad (22)$$

式中, α_1^* 和 α_2^* 表示最优权重的线性组合系数。

2.4 基于直觉模糊集的改进 TOPSIS 评价模型

传统的 TOPSIS 方法使用欧式距离来计算贴近度, 虽然有一定的适用性, 但是当各指标间存在相关性时, 用欧式距离求解的数值显得不合理, 造成决策结果的不准确^[30-33], 为了克服这个缺陷, 本文用余弦相似度代替了传统 TOPSIS 方法中的欧氏距离, 利用数据信息构造空间向量, 通过计算向量夹角衡量方向性差异变化, 从而建立了基于直觉模糊集的改进 TOPSIS 评价模型, 具体方法如下。

步骤 1 基于直觉模糊决策矩阵确定正理想方案和负理想方案。

$$\text{正理想方案为: } A^+ = (r_1^+, r_2^+, \dots, r_n^+) \quad (23)$$

$$\text{负理想方案为: } A^- = (r_1^-, r_2^-, \dots, r_n^-) \quad (24)$$

其中

$$r_j^+ = (\mu_j^+, \nu_j^+) = (\max_i \mu_{ij}, \min_i \nu_{ij}) \quad (25)$$

$$r_j^- = (\mu_j^-, \nu_j^-) = (\min_i \mu_{ij}, \max_i \nu_{ij}) \quad (26)$$

$r_j^+ = (\mu_j^+, \nu_j^+)$ 与 $r_j^- = (\mu_j^-, \nu_j^-)$ 均为直觉模糊数,

且 $0 \leq \mu_j^+ + \nu_j^+ \leq 1$, $0 \leq \mu_j^- + \nu_j^- \leq 1$ 。

在此基础上, 正理想向量 $\overline{r_j^+}$ 和负理想向量 $\overline{r_j^-}$ 分别为

$$\overline{r_j^+} = (\mu_j^+, \nu_j^+, \pi_j^+) \quad (27)$$

$$\overline{r_j^-} = (\mu_j^-, \nu_j^-, \pi_j^-) \quad (28)$$

步骤 2 利用向量夹角余弦计算各评价方案的各个属性值向量与正理想向量、负理想向量的方向差异。

$$\sigma_{ij}^+ = \cos^+ \theta = \frac{\overline{r_{ij}^-} \cdot \overline{r_j^+}}{\|\overline{r_{ij}^-}\| \cdot \|\overline{r_j^+}\|} \quad (29)$$

$$\sigma_{ij}^- = \cos^- \theta = \frac{\overline{r_{ij}^-} \cdot \overline{r_j^-}}{\|\overline{r_{ij}^-}\| \cdot \|\overline{r_j^-}\|} \quad (30)$$

式中: $\overline{r_{ij}^-}$ 为方案 i 中指标 j 的属性值向量; σ_{ij}^+ 和 σ_{ij}^- 分别为方案 i 中指标 j 的属性值向量与正理想向

量、负理想向量的余弦相似度; $\cos^+ \theta$ 、 $\cos^- \theta$ 分别表示 $\overline{r_{ij}^-}$ 与 $\overline{r_j^+}$ 和 $\overline{r_j^-}$ 的余弦值。

步骤 3 计算各个评价方案对正、负理想方案的余弦相似度。

$$\sigma_i^+ = \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^+ \omega_j \quad (31)$$

$$\sigma_i^- = \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^- \omega_j \quad (32)$$

式中: σ_i^+ 和 σ_i^- 分别为方案 i 对正、负理想方案的余弦相似度; ω_j 为评价指标 j 的权重值。

步骤 4 计算各个评价方案对正理想方案的综合效益相对贴近度。

$$C_i = \frac{\sigma_i^+}{\sigma_i^+ + \sigma_i^-} \quad (33)$$

式中, C_i 为方案 i 对正理想方案的综合效益相对贴近度。

步骤 5 计算各个不同维度效益下各个评价方案对正理想方案的相对贴近度。

$$C_i^k = \frac{\sigma_i^{k+}}{\sigma_i^{k+} + \sigma_i^{k-}} \quad (k=1, 2, 3, 4) \quad (34)$$

式中: C_i^k 为第 k 个维度效益下方案 i 对正理想方案的相对贴近度; σ_i^{k+} 和 σ_i^{k-} 分别为第 k 个维度效益下方案 i 对正、负理想方案的余弦相似度。

3 算例分析

3.1 算例相关情况

随着经济的发展, 我国产业结构不断优化, 全社会用电量逐年攀升, 智能变电站的投资建设对于促进我国的经济发展有着重大的意义。本文选取 10 个 220 kV 的某省份智能变电站建设项目作为案例进行分析, 评价指标的相关信息如表 4 所示。

3.2 基于直觉模糊数的混合信息统一

首先, 本文邀请 10 位电网领域的专家对属性值为语言变量的定性指标进行评价, 并综合各位专家的决策意见, 得出专家组对指标属性值的综合评价, 即表 2 中所示的 11 个评语等级以及所对应的直觉模糊数。其次, 通过计算式(1)式(4)将属性值为精确数的评价信息规范化为直觉模糊数。再次, 通过正态分布计算器并结合式(5)式(10)计算得出正态分布区间数所对应的直觉模糊数。最后, 将所有的属性值所对应的直觉模糊数集结在一起, 构成直觉模糊决策矩阵, 结果如表 5 所示。

表 4 智能变电站建设项目指标信息
Table 4 Index information of smart substation construction projects

指标	项目 1	项目 2	...	项目 10
A11	68	92	...	54
A12	62	96	...	55
A13	12.5	13.6	...	6.9
A14	P	EG	...	P
A15	EP	M	...	EP
A16	P	M	...	MG
A17	EG	EP	...	EP
A21	60.60	4.47	...	28.00
A22	0.98	0.86	...	0.98
A23	14.20	9.27	...	13.12
A24	2741.87	3799.77	...	2593.19
A25	3.66	21.64	...	28.28
A26	3.23	2.39	...	3.14
A31	3.72	3.50	...	4.44
A32	MG	G	...	EP
A33	[3.32, 4.58]	[3.02, 4.48]	...	[3.72, 5.32]
A34	[0.65, 1.13]	[0.72, 1.86]	...	[0.26, 1.56]
A35	[0.67, 1.29]	[0.25, 2.17]	...	[0.36, 1.66]
A36	[4.22, 4.86]	[3.81, 4.73]	...	[3.91, 4.75]
A37	1.88	2.17	...	1.23
A41	1	2	...	2
A42	2	0	...	0
A43	99.24	91.27	...	93.63
A44	2	1	...	3
A45	G	MP	...	EP
A46	G	P	...	MG
A47	EG	P	...	EP

表 5 直觉模糊决策矩阵

Table 5 Intuitionistic fuzzy decision-making matrix

二级指标	智能变电站建设项目		
	项目 1	...	项目 10
A11	< 0.311, 0.689 >	...	< 0.000, 1.000 >
A12	< 0.163, 0.837 >	...	< 0.000, 1.000 >
A13	< 0.659, 0.341 >	...	< 0.000, 1.000 >
A14	< 0.25, 0.60 >	...	< 0.25, 0.60 >
A15	< 0.10, 0.90 >	...	< 0.10, 0.90 >
A16	< 0.25, 0.60 >	...	< 0.60, 0.30 >
A17	< 0.90, 0.10 >	...	< 0.10, 0.90 >
A21	< 0.940, 0.060 >	...	< 0.394, 0.606 >
A22	< 0.857, 0.143 >	...	< 0.857, 0.143 >
A23	< 0.214, 0.786 >	...	< 0.174, 0.826 >
A24	< 0.175, 0.825 >	...	< 0.165, 0.835 >
A25	< 0.036, 0.964 >	...	< 0.694, 0.306 >
A26	< 0.551, 0.449 >	...	< 0.529, 0.471 >
A31	< 0.865, 0.135 >	...	< 0.615, 0.385 >
A32	< 0.60, 0.30 >	...	< 0.10, 0.90 >
A33	< 0.883, 0.000 >	...	< 0.115, 0.382 >
A34	< 0.915, 0.000 >	...	< 0.661, 0.036 >
A35	< 0.577, 0.000 >	...	< 0.482, 0.091 >
A36	< 0.354, 0.008 >	...	< 0.888, 0.000 >
A37	< 0.845, 0.155 >	...	< 0.497, 0.503 >
A41	< 0.667, 0.333 >	...	< 0.333, 0.667 >
A42	< 0.500, 0.500 >	...	< 1.000, 0.000 >
A43	< 0.943, 0.057 >	...	< 0.374, 0.626 >
A44	< 0.333, 0.667 >	...	< 0.000, 1.000 >
A45	< 0.70, 0.20 >	...	< 0.10, 0.90 >
A46	< 0.70, 0.20 >	...	< 0.60, 0.30 >
A47	< 0.90, 0.10 >	...	< 0.10, 0.90 >

3.3 指标权重的计算

1) 基于 GEM 的主观权重的计算

本文邀请 10 位电网领域的专家基于李克特 5 级量表对一级指标和二级指标的重要性进行问卷调查, 并使用 GEM 通过用 Matlab 软件计算式(14)来求得一级指标对目标层的主观权重和二级指标对应一级指标的主观权重, 依次相乘即可求得二级指标相对于目标层的主观权重, 结果如表 6 中的 “ W_i ” 所示。

2) 基于 IFE 的客观权重的计算

基于直觉模糊决策矩阵采用改进的直觉模糊熵计算公式来计算一级指标和二级指标的客观权重, 计算结果如表 6 中的 “ W_j ” 所示。

3) 基于合作博弈模型的综合权重的计算

将主观权重 W_i 与客观权重 W_j 代入式(20)中, 然后通过 Matlab 软件进行计算可以得到: $\alpha_1 = 0.7878$, $\alpha_2 = 0.2149$, 然后将 α_1 和 α_2 通过式(21)进行归一化

处理得到: $\alpha_1^* = 0.7857$, $\alpha_2^* = 0.2143$, 再计算式(22)即可得到最优组合权重 W , 结果如表 6 中的 “ W ” 所示。

将一级指标和二级指标的权重用可视化的方式进行比较并分析, 如图 2 和图 3 所示。

由图 2 可以得到以下结论:

1) 3 种赋权法所得到的权重中 A4 的权重最大, 说明安全效益在综合效益评价中是最重要的。

2) 在 4 个不同维度之间, 基于 IFE 客观赋权法所求得的客观权重较为接近, 而基于 GEM 主观赋权法所求得的主观权重差异较大。

3) 基于 GEM 主观赋权法所求得的主观权重和基于合作博弈模型的综合权重表明安全效益和经济效益在综合效益评价中是最重要的, 说明安全效益和经济效益是智能变电站建设的基石, 而智能效益和绿色效益是智能变电站实现智能化和可持续发展的重要体现。而基于 IFE 客观赋权法求得的客观权

表 6 智能变电站建设项目综合效益评价指标权重表

Table 6 Weight table of comprehensive benefit evaluation index of smart substation construction project

目标层	一级指标	W_i	W_j	W	二级指标	W_i	W_j	W
智能变电站 建设项目综 合效益评价 指标体系 A	智能效益 A1	0.2310	0.2598	0.2372	一次设备智能化率 A11	0.0335	0.0368	0.0342
					二次设备网络化率 A12	0.0335	0.0396	0.0348
					智能化投资比例 A13	0.0313	0.0403	0.0332
					时间同步功能实现程度 A14	0.0315	0.0341	0.0320
					在线状态监测功能实现程度 A15	0.0364	0.0376	0.0366
					在线数据分析及决策功能 A16	0.0349	0.0360	0.0352
					故障智能诊断能力 A17	0.0300	0.0355	0.0312
	经济效益 A2	0.2609	0.2416	0.2568	工程变压器最大负载率 A21	0.0413	0.0365	0.0403
					最大负荷时刻功率因数 A22	0.0402	0.0419	0.0406
					总投资内部收益率 A23	0.0504	0.0440	0.0490
					总投资财务净现值 A24	0.0504	0.0430	0.0488
					利息备付率 A25	0.0384	0.0405	0.0388
					偿债备付率 A26	0.0403	0.0358	0.0394
					线损率 A31	0.0361	0.0396	0.0368
	绿色效益 A3	0.2366	0.2375	0.2368	“四新”技术应用程度 A32	0.0370	0.0336	0.0363
					无线电干扰强度 A33	0.0278	0.0287	0.0280
					工频电场强度 A34	0.0357	0.0359	0.0357
					工频磁感应强度 A35	0.0349	0.0274	0.0333
					噪声排放强度 A36	0.0348	0.0324	0.0343
					环保投资比例 A37	0.0302	0.0399	0.0323
					影响电能质量考核次数 A41	0.0393	0.0391	0.0393
	安全效益 A4	0.2716	0.2611	0.2693	继电保护和安稳装置误动、拒动次数 A42	0.0394	0.0400	0.0395
					母线电压合格率 A43	0.0362	0.0398	0.0369
					安全事故发生次数 A44	0.0410	0.0391	0.0406
					电网抗灾能力 A45	0.0403	0.0362	0.0394
					电网故障自愈能力 A46	0.0344	0.0336	0.0342
					网络信息安全与运维能力 A47	0.0411	0.0333	0.0394

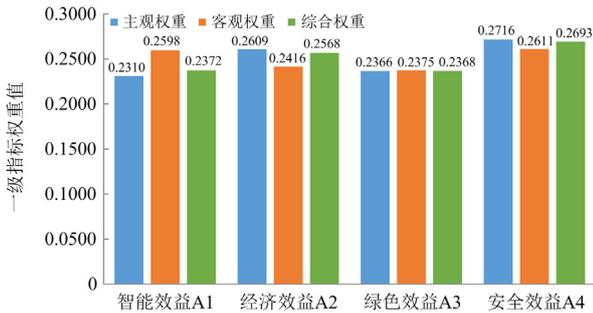


图 2 不同赋权法下一级指标权重比较

Fig. 2 Comparison of the weights of the primary indicators under different weighting methods

重表明智能效益和安全效益在综合效益评价中是最重要的,与主观权重和综合权重的结果有些不一致。

由图 3 可以得到以下结论:

1) 二级指标主观权重的曲线趋势和综合权重的

曲线趋势相似,这是由于在组合赋权的时候,主观权重的系数比较高所导致的。

2) 在 3 种赋权法得到的权重中, A23 和 A24 的权重都排在前三名,说明盈利能力是智能变电站建设的重要考虑因素,其中总投资内部收益率和总投资财务净现值是智能变电站建设项目整体效益的重要体现。

3) 二级指标间客观权重的差异性较小,而主观权重和综合权重的差异比较显著。

因此,本文所选择的组合赋权法得到的综合权重重要优于使用单一的主观赋权法或客观赋权法所得到的权重,避免了权重值过于主观或客观而导致评价结果发生较大偏差的缺陷。

3.4 基于直觉模糊集的改进 TOPSIS 计算结果

本文采用基于直觉模糊集的改进 TOPSIS 评价模型对智能变电站建设项目进行综合效益评价,相对贴近度 C_i 的结果如表 7 所示。

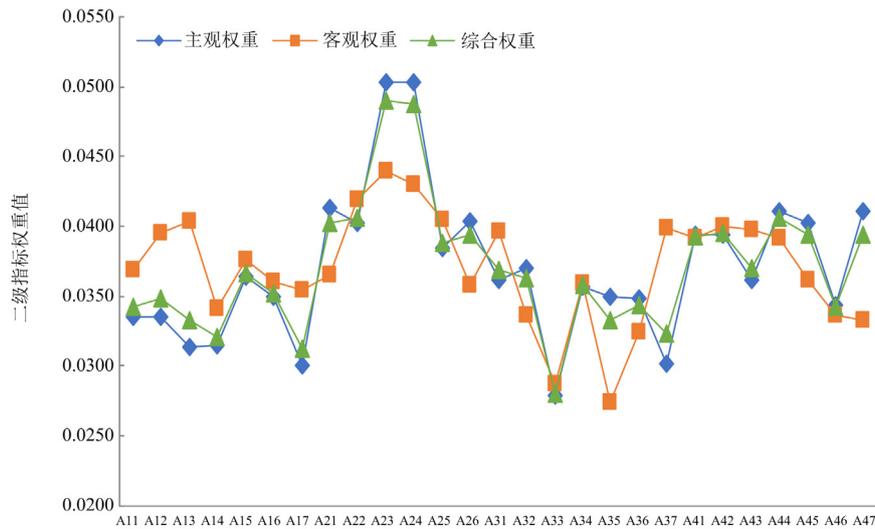


图 3 不同赋权法下二级指标权重比较

Fig. 3 Comparison of the weights of secondary indicators under different weighting methods

表 7 基于直觉模糊集的改进 TOPSIS 计算结果
Table 7 Improved TOPSIS calculation results based on intuitionistic fuzzy sets

项目编号	σ_i^+	σ_i^-	C_i
项目 1	0.6965	0.5444	0.5613
项目 2	0.6052	0.6309	0.4896
项目 3	0.7572	0.4659	0.6191
项目 4	0.4965	0.6639	0.4279
项目 5	0.6099	0.6534	0.4828
项目 6	0.8418	0.3384	0.7132
项目 7	0.6695	0.5798	0.5359
项目 8	0.6447	0.6474	0.4990
项目 9	0.6832	0.5671	0.5464
项目 10	0.4958	0.7408	0.4009

由表 7 可知, 项目 6 的相对贴近度最高, 其次是项目 3, 项目 10 的相对贴近度最低。项目 6 的相对贴近度为 0.7132, 项目 3 的相对贴近度为 0.6191, 这两个项目的综合效益是最优的。项目 10 的相对贴近度为 0.4009, 该项目的综合效益是最差的。

各个维度效益下各项目的相对贴近度 C_i^k 的结果如图 4 所示。由图 4 分析可得:

1) 在智能效益维度, 项目 6 的效益最优, 其次是项目 2, 项目 10 的效益是最差的。项目 6 在除了在线数据分析及决策功能和智能化投资比例外的其余指标上都表现得最好, 表明项目 6 的智能化系统的整体设计和运营取得了良好的效果, 资金利用率高。项目 2 在除了故障智能诊断能力外的其余指标上都表现良好。而项目 10 仅在在线数据分析及决策功能上表现良好, 在其余指标上表现不佳, 原

因在于两方面, 一是一次设备智能化和二次设备网络化的覆盖率不高, 二是其智能化投资力度不够并且投资效果不理想。

2) 在经济效益维度, 项目 6 的效益最优, 其次是项目 3, 项目 2 的效益是最差的。项目 6 在经济效益的所有指标上都做的很好, 既实现了智能变电站高效的运行效率, 又保证了该项目具有很好的盈利能力和偿债能力。项目 3 在总投资内部收益率上要表现得比项目 6 好一点, 在其余指标上都比项目 6 稍微逊色一些, 导致了在经济效益的整体表现要比项目 2 稍微逊色一点。项目 2 在盈利能力和偿债能力方面表现得还可以, 但是在项目运行效率方面表现不佳, 其最大负荷时刻功率因数和工程变压器最大负载率表现不佳, 说明设备利用率较低, 电能质量较差, 电网传输能力下降, 从而导致较低的运行效率和更多的供电损失。

3) 在绿色效益维度, 项目 1 的效益最优, 其次是项目 8, 项目 4 的效益是最差的。项目 1 在除噪声排放强度外的指标上都表现良好, 其中在无线电干扰强度上是所有项目中表现得最好的。项目 8 在除噪声排放强度和“四新”技术应用程度外的指标上都表现良好, 其在工频磁感应强度上的表现是所有项目中最好的。项目 4 仅在“四新”技术应用程度和线损率方面表现不错, 在其余指标上都表现不佳, 表明其在电磁环境防控措施上落实不够到位, 未能将电磁污染有效地屏蔽, 就噪声排放强度而言, 项目 4 的降噪措施未落实到位, 其未在主变压器的镂空侧设置一定高度的声屏障。

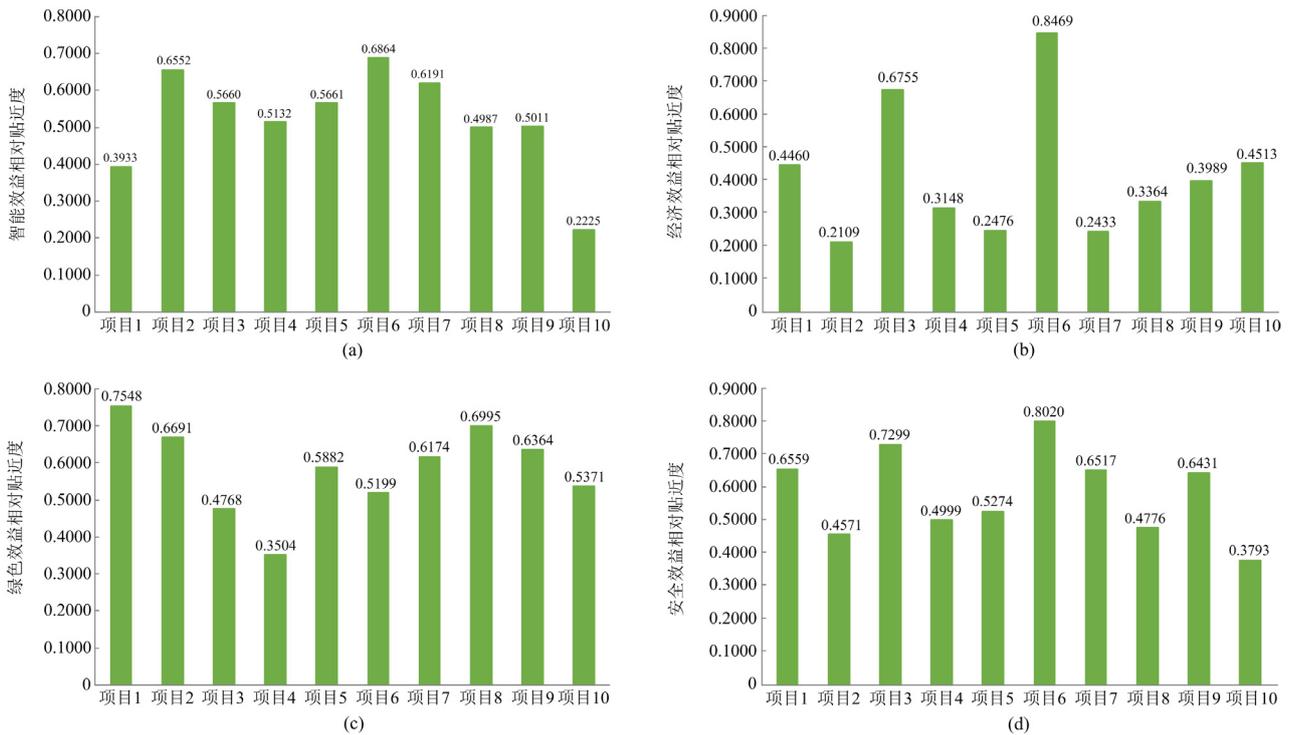


图 4 4 个不同维度效益的相对贴近度

Fig. 4 Relative closeness of four different dimensions of benefit

4) 在安全效益维度, 项目 6 的效益最优, 其次是项目 3, 项目 10 的效益是最差的。项目 6 在除电网故障自愈能力外的其余指标上都表现得很好, 项目 3 在除母线电压合格率外的其余指标上都表现得很好, 但其母线电压合格率是 10 个项目中表现最差的, 原因在于当母线电压越限时, 监控系统无任何提示信息, 容易造成值班人员疏忽, 未及时调整机组功率。项目 10 仅在继电保护和安稳装置误动、拒动次数上表现得很好, 在电网故障自愈能力上表现较好, 而在其余的指标上都表现不佳, 其原因在于项目 10 过多地关注经济效益给项目带来的利益, 而忽视了安全效益给智能变电站带来的间接效益。

综上所述, 为了提高智能变电站建设项目的综合效益, 应注重 4 个维度效益的提升。在智能效益维度, 要引进先进的智能技术和一二次智能设备, 统一采集和处理各种稳、暂、动态数据, 以增强智能变电站的高级应用功能。在经济效益维度, 应结合本地区具体情况, 通过合理的规划, 制定细致的无功补偿, 提高电力系统的功率因数和电能质量, 从而提高电力企业的经济效益。在绿色效益维度, 应将电磁环境防控措施落实到位, 通过设置屏蔽装置、建筑物或绿色景观等来防治电磁污染。在安全效益维度, 要注重提升建设项目的继电保护安全性,

抗灾能力以及网络信息安全维护能力, 针对母线电压合格率的提升, 应在电压下降至预警值时, 监控系统发出警报, 并设置专项考核制度, 积极采取措施控制母线电压。

3.5 模型的鲁棒性检验

1) 模型的稳健性检验

排名相似性是反映所提出的混合多准则决策模型稳健性的重要指标。WS 排名相似系数^[34]是一种非对称系数, 它认为排名顶部差异的重要性要比排名底部差异的重要性更大, 对排名位置的变化比较敏感。因此, 本文选用 WS 排名相似系数来衡量所提出的混合多准则决策模型的稳健性, 通过式(35)即可求得该系数。

$$W_s = 1 - \sum_{i=1}^N 2^{-x_i} \frac{|x_i - y_i|}{\max\{|x_i - 1|, |x_i - N|\}} \quad (35)$$

式中: W_s 是排名相似系数的值; x_i 和 y_i 是排名的顺序; N 是排名中备选方案的数量。

本文建立了 3 个对比模型用于排名相似性的比较, 如表 8 所示。模型 1 为本文所提出的面向混合信息的混合多准则决策模型, 即基于合作博弈模型的 GEM-IFE 组合赋权法和直觉模糊集的改进 TOPSIS 评价模型。模型 2 中基于直觉模糊集的 TOPSIS 评价模型的详细步骤可参考文献[35]。本文

通过比较模型 3、模型 4 与模型 1 的 WS 排名相似系数, 可以分析所提出的组合赋权法的适用性, 通过比较模型 2 与模型 1 的 WS 排名相似系数, 可以分析所提出的评价模型的适用性。

表 8 不同评价模型

Table 8 Different evaluation models

模型	模型描述
模型 1	基于合作博弈模型的 GEM-IFE 组合赋权法和直觉模糊集的改进 TOPSIS 评价模型
模型 2	基于合作博弈模型的 GEM-IFE 组合赋权法和直觉模糊集的传统 TOPSIS 评价模型
模型 3	基于 GEM 主观赋权法和直觉模糊集的改进 TOPSIS 评价模型
模型 4	基于 IFE 客观赋权法和直觉模糊集的改进 TOPSIS 评价模型

用不同评价模型对智能变电站建设项目的综合效益进行评价, 所得到排名结果和 WS 排名相似系数如表 9 所示, 其中 WS 排名相似系数均大于 0.95, 排名结果相似性很高, 说明不同的赋权方法和评价模型的变化对排名结果影响较小, 即所提出的基于合作博弈模型的 GEM-IFE 组合赋权法和直觉模糊集的改进 TOPSIS 评价模型具有良好的适用性。

从表 9 中的结果可得, 本文所提出的模型 1 所得到的排名与模型 2 的结果在综合效益、经济效益

和安全效益维度有些不一致, 其中在综合效益维度, 在模型 1 的结果中, 项目 8 的效益要优于项目 2, 而模型 2 的结果却相反, 结合项目实际建设情况来看, 项目 8 的成功度要优于项目 2, 因此模型 1 所得到的结果比较合理。模型 2 的结果有些偏差的原因在于当各指标间存在着一些相关性时, 欧氏距离不再适用, 用欧氏距离计算得到的结果会和实际结果有些偏差, 而用余弦相似度计算得到的结果会更准确。此外, 模型 1 所得到的排名与模型 3 和模型 4 的结果在综合效益和智能效益维度有些不一致, 其中在智能效益维度, 在模型 1 的结果中, 项目 5 的效益要优于项目 3, 而模型 3 的结果却与之相反, 在实际建设中, 项目 5 的整体智能化水平要优于项目 3, 因此模型 1 的结果比模型 3 的要更合理; 项目 9 的效益要优于项目 8, 而模型 4 的结果与之相反, 在实际建设中, 项目 9 的整体智能化水平要优于项目 8, 因此模型 1 的结果比模型 4 的要更合理。模型 3 和模型 4 的结果有些偏差, 其原因在于组合赋权法与单一赋权法不同所导致的指标权重的差异, 使得评价排名结果产生了差异, 由于组合赋权法相比单一赋权法更具有优越性, 因此模型 1 所得到的排名与模型 3 和模型 4 的结果相比更准确。综上, 模型 1 所得到的排名与模型 2、3、4 的结果相比更准确、更合理。

表 9 不同评价模型排名对比结果

Table 9 Comparison of ranking results of different evaluation models

效益	模型	项目 1	项目 2	项目 3	项目 4	项目 5	项目 6	项目 7	项目 8	项目 9	项目 10	W _s
综合效益	模型 1	3	7	2	9	8	1	5	6	4	10	1.0000
	模型 2	3	6	2	9	8	1	5	7	4	10	0.9956
	模型 3	3	7	2	9	8	1	5	6	4	10	1.0000
	模型 4	3	6	2	9	8	1	5	7	4	10	0.9956
智能效益	模型 1	9	2	5	6	4	1	3	8	7	10	1.0000
	模型 2	9	2	5	6	4	1	3	8	7	10	1.0000
	模型 3	9	2	4	6	5	1	3	8	7	10	0.9833
	模型 4	9	2	5	6	4	1	3	7	8	10	0.9981
经济效益	模型 1	4	10	2	7	8	1	9	6	5	3	1.0000
	模型 2	3	10	2	6	8	1	9	7	5	4	0.9673
	模型 3	4	10	2	7	8	1	9	6	5	3	1.0000
	模型 4	4	10	2	7	8	1	9	6	5	3	1.0000
绿色效益	模型 1	1	3	9	10	6	8	5	2	4	7	1.0000
	模型 2	1	3	9	10	6	8	5	2	4	7	1.0000
	模型 3	1	3	9	10	6	8	5	2	4	7	1.0000
	模型 4	1	3	9	10	6	8	5	2	4	7	1.0000
安全效益	模型 1	3	9	2	7	6	1	4	8	5	10	1.0000
	模型 2	3	8	2	7	6	1	4	9	5	10	0.9992
	模型 3	3	9	2	7	6	1	4	8	5	10	1.0000
	模型 4	3	9	2	7	6	1	4	8	5	10	1.0000

2) 模型的灵敏度检验

模型的灵敏度检验是判断混合多准则决策模型排序结果有效性的重要手段。检验评价模型灵敏度的常用指标主要包括标准差 σ 和变异系数 c_v 。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\delta_j - \bar{\delta})^2}{m}} \quad (36)$$

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{\delta}} \quad (37)$$

式中： δ_j 为各方案与正理想方案的相对接近度； $\bar{\delta}$ 为 δ_j 的平均值。

通过式(36)和式(37)来计算表 8 中模型 1(改进 TOPSIS 评价模型)和模型 2(传统 TOPSIS 评价模型)的相对贴近度 C_i 和 C_i^k 的标准差和变异系数，计算结果如表 10 所示。

表 10 模型灵敏度对比

Table 10 Sensitivity contrast of different models

效益	模型	标准差	变异系数
综合效益	模型 1	0.0858	0.1624
	模型 2	0.0728	0.1409
智能效益	模型 1	0.1286	0.2463
	模型 2	0.1244	0.2393
经济效益	模型 1	0.1929	0.4625
	模型 2	0.1666	0.3802
绿色效益	模型 1	0.1122	0.1919
	模型 2	0.0992	0.1763
安全效益	模型 1	0.1271	0.2182
	模型 2	0.1106	0.1928

从表 10 可以看出，模型 1 的标准差和变异系数均比模型 2 的更大，表明模型 1 所得到的相对贴近度的数据离散程度比模型 2 的更大，说明改进 TOPSIS 评价模型比传统 TOPSIS 评价模型在评价不同方案时有着更大的区分度和更高的灵敏度。

综上所述，基于模型的稳健性检验和灵敏度检验两方面可得，本文所提出的面向混合信息的混合多准则决策模型在评价智能变电站建设项目综合效益时具有很好的鲁棒性。

4 结论

1) 本文从智能效益、经济效益、绿色效益和安全效益 4 个维度建立了智能变电站建设项目综合效益评价指标体系，其中评价指标的属性值是包含正态分布区间数、精确数和语言变量的混合信息，在使得评价维度更全面的同时丰富了评价指标的信息。针对该混合信息，本文将该混合信息集划分为 3 类，并用不同的转化规则将该混合信息转化为统

一的直觉模糊数的形式，为决策和计算提供了便利，同时也提供了一种新的混合信息多属性决策的规范方法。

2) 本文所提出的面向混合信息的混合多准则决策模型具有很好的鲁棒性。一方面，本文采用基于合作博弈模型的 GEM-IFE 组合赋权法来计算指标的综合权重，所得到的权重结果比单一赋权法的权重结果更合理，另一方面，本文基于直觉模糊集，用余弦相似度代替传统的欧式距离，对传统的 TOPSIS 进行了改进，克服了传统 TOPSIS 的缺陷，在对智能变电站建设项目的综合效益进行评价排序时也有着更大的区分度和更高的灵敏度。

参考文献

- [1] 张道天, 严正, 韩冬, 等. 采用灰色聚类方法的智能变电站技术先进性评价[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1724-1730. ZHANG Daotian, YAN Zheng, HAN Dong, et al. A grey clustering based evaluation on technical advancement of smart substation[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1724-1730.
- [2] 肖艳利. 基于云模型的智能变电站建设项目综合评价研究[J]. 中国电力企业管理, 2016(27): 33-37. XIAO Yanli. Technical economic evaluation of smart substation construction based on cloud model[J]. China Power Enterprise Management, 2016(27): 33-37.
- [3] 曾乐宏, 周晖, 张祥龙. 基于区间数的多指标灰靶模型在智能变电站综合评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32(12): 182-185. ZENG Lehong, ZHOU Hui, ZHANG Xianglong. Application of multi-attributes target model based on interval grey number in comprehensive evaluation of smart substation[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(12): 182-185.
- [4] 邱剑, 王慧芳, 陈志光, 等. 智能变电站自动化系统有效度评估模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 87-94. QIU Jian, WANG Hui Fang, CHEN Zhiguang, et al. Effectiveness evaluation model of smart substation automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 87-94.
- [5] 徐翀. 基于直觉模糊熵权法的智能变电站建设项目风险评估[J]. 华东电力, 2014, 42(7): 1449-1451. XU Chong. Risk evaluation of intelligent substation construction based on intuitionistic fuzzy entropy weight method[J]. East China Electric Power, 2014, 42(7): 1449-1451.
- [6] 杨庆, 朱道华. 智能变电站二次系统失效风险评估方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 179-185. YANG Qing, ZHU Daohua. The equipment failure assessment on the secondary system in smart substation[J].

- Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 179-185.
- [7] 吴思源, 刘潇, 谢强. 变电站系统抗震韧性快速评估方法[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 222-230.
WU Siyuan, LIU Xiao, XIE Qiang. Rapid assessment method for seismic resilience of substation system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 222-230.
- [8] 李莉, 阳东升, 余梦天, 等. 基于改进混合合法的电网运行可靠性评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 74-79.
LI Li, YANG Dongsheng, YU Mengtian, et al. Research on reliability assessment method of power grid operation based on improved hybrid method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 74-79.
- [9] 梁昌勇, 吴坚, 陆文星, 等. 一种新的混合型多属性决策方法及在供应商选择中的应用[J]. 中国管理科学, 2006, 14(6): 71-76.
LIANG Changyong, WU Jian, LU Wenxing, et al. A new method on hybrid multiple attribute decision-making problem for choosing the supplier[J]. Chinese Journal of Management Science, 2006, 14(6): 71-76.
- [10] 柏明国, 朱金福, 姚韵. 基于可能度的多混合属性决策方法[J]. 商业研究, 2006, 14: 19-21.
BAI Mingguo, ZHU Jinfu, YAO Yun. Multiple mixed-attribute decision making method based on possibility degree[J]. Commercial Research, 2006, 14: 19-21.
- [11] 曾雪兰, 李正义. 不确定多属性群决策中混合信息的集结[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(24): 92-98.
ZENG Xuelan, LI Zhengyi. A fusion method for hybrid information in uncertain multiple attributes group decision-making[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2010, 40(24): 92-98.
- [12] 张发明, 杨杰, 王伟明. 大规模混合信息下的群体评价方法及应用[J]. 模糊系统与数学, 2017, 31(3): 96-102.
ZHANG Faming, YANG Jie, WANG Weiming. Under the large scale blend information of group evaluation method and application[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2017, 31(3): 96-102.
- [13] 王伟明, 徐海燕. 混合信息下的多属性大规模群体决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(11): 2560-2569.
WANG Weiming, XU Haiyan. Multiple attribute large-scale group decision making method based on hybrid information[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(11): 2560-2569.
- [14] LIN R, LU S, YANG A, et al. Multi-criteria sustainability assessment and decision-making framework for hydrogen pathways prioritization: an extended ELECTRE method under hybrid information[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(24): 13430-13445.
- [15] CHEN Yangrong, LI Jun'e, XU Ang, et al. Reliability evaluation for cyber-physical smart substation[J]. Complexity, 2021, 2021: 3434148.
- [16] 彭志强, 张琦兵, 郑明忠, 等. 基于GSP的变电站二次设备一体化运维设计[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 180-185.
PENG Zhiqiang, ZHANG Qibing, ZHENG Mingzhong, et al. Integrated operation and maintenance design of secondary equipment in substation based on GSP[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 180-185.
- [17] 晁武杰, 唐志军, 林国栋, 等. 智能变电站二次设备即插即用文件自动配置技术研究及平台研发[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 163-171.
CHAO Wujie, TANG Zhijun, LIN Guodong, et al. Plug-and-play file automatic configuration technology and platform development of secondary equipment in a smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 163-171.
- [18] 吴建宇, 唐志军, 晁武杰, 等. 智能变电站二次设备即插即用理论模型与应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 163-171.
WU Jianyu, TANG Zhijun, CHAO Wujie, et al. A plug and play theory model and application of secondary equipment in a smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 163-171.
- [19] 李肖博, 刁伟, 周柯, 等. 智能变电站工程配置镜像管控技术研究[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 209-216.
LI Xiaobo, XI Wei, ZHOU Ke, et al. Research on mirror image control technology of project configuration in the intelligent substation[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2022, 37(4): 209-216.
- [20] 于少伟, 史忠科. 基于正态分布区间数的逆向云新算法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10): 2021-2026.
YU Shaowei, SHI Zhongke. New algorithm of backward cloud based on normal interval number[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(10): 2021-2026.
- [21] 汪新凡, 肖满生. 基于正态分布区间数的信息不完全的群决策方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(10): 1494-1498, 1506.
WANG Xinfan, XIAO Mansheng. Approach of group decision making based normal distribution interval number with incomplete information[J]. Control and Decision, 2010, 25(10): 1494-1498, 1506.
- [22] 李川, 李科. 旧城镇电磁辐射问题研究——以贵州兴义市为例[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(8): 198-202.
LI Chuan, LI Ke. A study of electromagnetic radiation in

- old towns—a case study of Guizhou, Xingyi[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2020, 34(8): 198-202.
- [23] 方曦, 尤宇, 何华, 等. 国家科技重大专项知识产权育成管理指标体系构建[J]. 科技管理研究, 2022, 42(2): 162-171.
- FANG Xi, YOU Yu, HE Hua, et al. Construction of management index system for intellectual property cultivation of major national science and technology projects[J]. Science and Technology Management Research, 2022, 42(2): 162-171.
- [24] 高明美, 孙涛, 朱建军. 一种改进的直觉模糊熵公理化定义和构造公式[J]. 控制与决策, 2014, 29(3): 470-474.
- GAO Mingmei, SUN Tao, ZHU Jianjun. Revised axiomatic definition and structural formula of intuitionistic fuzzy entropy[J]. Control and Decision, 2014, 29(3): 470-474.
- [25] 左高, 张超, 陈毓春, 等. 基于区间直觉模糊群决策的分布式光伏运维综合评估[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 154-163.
- ZUO Gao, ZHANG Chao, CHEN Yuchun, et al. Comprehensive evaluation of operation and maintenance of distributed photovoltaic power based on interval intuitionistic fuzzy group decision[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 154-163.
- [26] 郭晓晶, 何倩, 张冬梅, 等. 综合运用主客观方法确定科技评价指标权重[J]. 科技管理研究, 2012, 32(20): 64-67, 71.
- GUO Xiaojing, HE Qian, ZHANG Dongmei, et al. Application of subjective and objective methods in weights determination of synthetic evaluation of science and technology[J]. Science and Technology Management Research, 2012, 32(20): 64-67, 71.
- [27] 王立斌, 孙寻航, 杨迪, 等. 基于大数据的专变客户用能健康状态综合评价[J]. 智慧电力, 2021, 49(12): 96-103.
- WANG Libin, SUN Xunhang, YANG Di, et al. Comprehensive evaluation of energy utilization health status of specialized transformer customers based on big data[J]. Smart Power, 2021, 49(12): 96-103.
- [28] 黄冬梅, 许明珊, 胡安铎, 等. 计及地质灾害风险的输电线路路径选择[J]. 智慧电力, 2021, 49(7): 73-78.
- HUANG Dongmei, XU Mingshan, HU Anduo, et al. Selection of transmission line route considering geological disaster risk[J]. Smart Power, 2021, 49(7): 73-78.
- [29] 南东亮, 王维庆, 张陵, 等. 基于关联规则挖掘与组合赋权-云模型的电网二次设备运行状态风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 67-76.
- NAN Dongliang, WANG Weiqing, ZHANG Ling, et al. Risk assessment of the operation state of power grid secondary equipment based on association rule mining and combination weighting-cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 67-76.
- [30] 孙希彤, 刘秋生, 梁东. TOPSIS 和灰色关联度结合的信号质量评估方法[J]. 现代防御技术, 2017, 45(2): 183-188, 201.
- SUN Xitong, LIU Qiusheng, LIANG Dong. Method of signal quality assessment based on TOPSIS and GRA correlation[J]. Modern Defense Technology, 2017, 45(2): 183-188, 201.
- [31] 刘江, 郭云鹏, 张波, 等. 基于云模型和改进证据理论的调峰型虚拟电厂聚合用户优选[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 37-45.
- LIU Jiang, GUO Yunpeng, ZHANG Bo, et al. Aggregated user selection of peak-regulation virtual power plant based on cloud model and improved evidence theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 37-45.
- [32] 谭忠富, 薛帆, 樊伟, 等. 基于合作博弈-云模型的农村能源互联网建设成熟度评价[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 9-14, 22.
- TAN Zhongfu, XUE Fan, FAN Wei, et al. Maturity evaluation of rural energy internet construction based on cooperative game-cloud model[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 9-14, 22.
- [33] 檀晓林, 胡诗尧, 张菁, 等. 基于主成分分析与加权 TOPSIS 的县域配电网投资效益评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 133-139.
- TAN Xiaolin, HU Shiyao, ZHANG Jing, et al. Investment benefit assessment based on PCA and weighted TOPSIS in county distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 133-139.
- [34] ZHAO Huiru, LI Bingkang, LU Hao, et al. Economy-environment-energy performance evaluation of CCHP microgrid system: a hybrid multi-criteria decision-making method[J]. Energy, 2022, 240: 122830.
- [35] 南江霞, 李登峰, 张茂军. 直觉模糊多属性决策的 TOPSIS 法[J]. 运筹与管理, 2008(3): 34-37.
- NAN Jiangxia, LI Dengfeng, ZHANG Maojun. TOPSIS for multiattribute decision making in if-set setting[J]. Operations Research and Management Science, 2008(3): 34-37.

收稿日期: 2023-04-28; 修回日期: 2023-07-22

作者简介:

杨靛青(1979—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为模糊决策与对策分析; E-mail: jgxy_ydq@fzu.edu.cn

叶锟锋(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网建设项目效益评价。E-mail: 970707716@qq.com

(编辑 周金梅)