



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2304483

引用格式:邵萌,毛智谋,孙金伟,等.基于直觉模糊环境的海上风机选型[J].科学技术与工程,2024,24(16):6649-6658.

Shao Meng, Mao Zhimou, Sun Jinwei, et al. Offshore wind turbine selection based on intuitionistic fuzzy environment[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6649-6658.

基于直觉模糊环境的海上风机选型

邵萌,毛智谋,孙金伟*,管笑,伊传秀

(中国海洋大学工程学院,青岛 266100)

摘 要 选择合适的海上风力发电机机型对海上风电场的长期高效运行起着至关重要的作用。针对决策者在风机选型决策过程中存在不确定性和主观偏好等问题,提出一种改进的多准则决策(multi-criteria decision making, MCDM)框架及方法:在权重求解算法中将群体决策和直觉模糊数与层次分析法相结合,提出群体直觉模糊层次分析法(group intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process, GIAHP)计算指标权重;在备选方案排序算法中将余弦距离引入接近理想点法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS),提出多距离 TOPSIS 确定备选方案排序。最后以山东省海上风电场风机选型为例,并通过敏感性分析验证框架及方法的鲁棒性。该框架及方法为中国海上风电场风机选型提供理论依据,可确保海上风电场长期稳定运行。

关键词 海上风机选型;直觉模糊数;群体直觉模糊层次分析法(GIAHP);多距离接近理想点法(TOPSIS)

中图分类号 P741;

文献标志码 A

Offshore Wind Turbine Selection Based on Intuitionistic Fuzzy Environment

SHAO Meng, MAO Zhi-mou, SUN Jin-wei*, GUAN Xiao, YI Chuan-xiu

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

[Abstract] The proper selection of offshore wind turbines is crucial for the long-term efficient operation of offshore wind farms. Aiming at the problems of uncertainty and subjective preference of decision-makers in the decision-making process of wind turbine selection, an improved multi-criteria decision making (MCDM) framework and method was proposed: in the weight solving algorithm, group decision and intuitionistic fuzzy numbers were combined with analytic hierarchy process, and the group intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process (GIAHP) was proposed to calculate the index weight, in the alternative ranking algorithm, the cosine distance was introduced into the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS), and the multi-distance TOPSIS was proposed to determine the alternative ordering. Finally, taking the selection of wind turbines in offshore wind farms in Shandong Province as an example, the robustness of the framework and method was verified by sensitivity analysis. The framework and method provide a theoretical basis for the selection of offshore wind turbines in China, which can ensure the long-term stable operation of offshore wind farms.

[Keywords] offshore wind turbine selection; intuitionistic fuzzy numbers; group intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process (GIAHP); multi-distance technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS)

随着工业的发展和人口的增长,能源的需求量急剧增加。目前世界能源供应主要来自传统能源,即化石能源。但化石能源的大量使用造成了严重的环境污染,导致全球气候变化。为了应对气候变化,中国提出“双碳”目标,发展绿色低碳可再生能源成为研究热点^[1]。

风能作为一种重要的可再生能源,因其成熟的技术和广泛的应用场景在各国得到广泛应用^[2]。国际能源署数据显示,截至 2022 年底,全球风能装机容量为 898.8 GW,约占可再生能源总装机容量的

26.67%。由于风电技术的快速发展和海上风能的优势,海上风能发电逐渐成为研究热点^[3]。与陆上风电相比,海上风电有不占用土地、发电稳定、靠近沿海电力负荷中心且适宜大规模开发等优点,已成为沿海国家风能发电发展的主要方向^[4]。

中国作为沿海大国,海上资源丰富,大力发展海上风电有助于推进能源转型和实现“双碳”目标^[5]。在海上风电场运行过程中,风力发电机具有极其重要的作用。风力发电机不仅需要应对海上恶劣环境和极端气候影响,在很大程度上还决定海

收稿日期:2023-06-15 修订日期:2024-03-12

基金项目:国家自然科学基金(51609224);国家重点研发计划(2022YFC3104201);山东省自然科学基金(ZR2020QE297);中国工程院战略研究与咨询项目(2022-DFZD-36)

第一作者:邵萌(1984—),女,汉族,山东青岛人,博士,副教授。研究方向:海洋能利用技术与决策理论。E-mail:mengya@ouc.edu.cn。

*通信作者:孙金伟(1985—),男,汉族,山东青岛人,博士,讲师。研究方向:海洋浮式结构水动力学及新能源利用技术。E-mail:chbhy03@163.com。

上风电场的电能质量和经济效益^[6-7]。因此在风电场建设过程中,风力发电机机型的选择十分重要。

选择海上风力发电机是一个复杂的过程,受技术和经济等多个因素的影响。许多标准相互冲突,这意味着无法同时得到所有标准的最佳选择^[8]。如叶片直径和成本,叶片直径越大,扫掠面积越大,产生电能越多,但需要的维护成本也越高。因此必须综合考虑多个标准,以找到合理的解决方案。风力发电机的选型问题可以视为一个多准则决策(multi-criteria decision making, MCDM)问题。

在风能研究领域中,对风机选型问题的研究较少。层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是最常用和最具代表性的MCDM方法之一^[9]。Şağbanşua等^[10]使用AHP在不同品牌的1.5 MW风机中选择最佳方案。Bagočius等^[11]使用AHP计算指标权重,使用加权聚合产品评估方法(weighted aggregates sum product assessment, WASPAS)确定最佳方案。Ma等^[12]在一个中国海上风电项目中使用AHP、网络分析法(analytic network process, ANP)和熵值法(entropy weight method, EWM)进行方案评价,选出最佳方案。然而,在风机选型过程中,专家判断存在不确定性。因此MCDM方法经常和模糊理论相结合。Lee等^[13]结合解释性结构建模(interpretive structural modeling, ISM)和模糊ANP建立综合评价模型,并应用于中国台湾省风机选型中。Beskese等^[14]使用犹豫模糊AHP计算评价指标权重,将犹豫模糊集和接近理想点法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)结合进行方案排序并应用于土耳其风机选型中。Yu等^[15]建立了一个混合MCDM框架进行风机选型,该框架引入区间二元组语言(interval 2-tuple linguistic, I2TL)模型,将专家主观判断转化为定量评价信息,采用逐步比较分析II(stepwise weighted assessment ratio analysis II, SWARA II)和基于标准去除效应的方法(method based on the removal effects of criteria, MEREC)计算指标权重,使用基于累计前景理论(cumulative prospect theory, CPT)的组合折中解(combined compromise solution, CoCoSo)计算备选方案排名。Wang等^[16]利用Dempster-Shafer证据理论建立风机选型决策模型,使用SWARA计算指标权重,接近理想点法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)进行方案排序,并将该模型应用于福建省海上风机选型问题。

综上所述,风机选型领域的研究现状与趋势如下。

(1) AHP作为使用最广泛的主观赋权方法,可

以清晰表达各个层次和各个指标之间的关系,具有高兼容性的优点,但难以反映决策者的不确定性和犹豫程度。为解决此问题,一些学者提出将模糊理论与AHP相结合的改进方法。作为处理信息不确定性的有效理论,模糊理论能描述专家评价的模糊性,被广泛应用于各领域的MCDM问题中。相比于传统的模糊理论,直觉模糊数(intuitionistic fuzzy number, IFN)包含隶属度、非隶属度和犹豫度,可以反映专家的模糊性和犹豫程度,减少信息损失^[17]。单个专家因其专业背景和个人偏好,难以给出公正、合理的评价。而群体决策(group decision, GD)可以综合考虑个体差异,降低评价结果的主观偏差,充分发挥专家评价的优势^[18]。

(2) 近年来, TOPSIS在MCDM问题求解中得到广泛应用。TOPSIS数学意义明确,根据各方案与正负理想解的欧式距离来确定最优解。但欧式距离在计算高维空间距离问题上差异性不明确,可能会造成排序结果不明显,而余弦距离通常作为欧式距离在高维空间的替代。

(3) 在风机选型问题中,包含大量的定性指标。定性指标的属性值取决于专家的经验与表达,常规的评价方法无法反映专家的不确定性。而模糊理论被认为是处理此类问题较好的方法之一。

针对以上问题,现提出基于直觉模糊环境的改进MCDM方法,通过IFN确定备选方案属性值,提出群体直觉模糊层次分析法(group intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process, GIAHP)计算指标权重,将余弦距离引入TOPSIS,使用多距离TOPSIS确定最优方案。研究成果可以有效处理风机选型决策过程中模糊信息,使决策结果更加合理,为相关研究提供参考。

1 海上风机选型框架研究

1.1 海上风机选型评价指标体系

建立科学、完善的海上风机选型评价指标体系是本次研究的基础。海上风电场的外部环境相较于陆上风电场更加复杂,海上气候条件、建设环境、运行环境更加恶劣。因此,海上风机选型需要考虑诸多因素,如技术可靠性、经济性和环境等因素。根据现有研究,列举近年来相关学者针对风机选型问题提出的评价指标体系,如表1^[8,13,15-16,19]所示。针对海上风机选型问题,相关学者不仅考虑产品自身的可靠性和成本等方面,还考虑供应商的能力。

综合考虑海上复杂环境、技术和成本等因素,根据文献综述和专家意见,构建风机选型综合评价指标体系,包括风机技术、匹配程度、经济性、供应商,如图1所示。

表1 风机选型评价指标概述^[8,13,15-16,19]

Table 1 Overview of wind turbine selection evaluation criteria^[8,13,15-16,19]

年份	作者	应用地点	评价指标
2012 年	Lee 等 ^[13]	中国台湾	系统转化率、风力发电机运行、利用率、施工可靠性、净现值、资金成本、运维成本、土地利用、美学、生态影响、供应商满意度、系统集成能力、供应商研发能力
2016 年	Shirgholami 等 ^[19]	伊朗	容量系数、可用性、转子效率、初始投资成本、运维成本、对野生动物的影响、噪声、视觉冲击、供应商满意度、交付、政治稳定
2020 年	Supciller 等 ^[8]	土耳其	现场合规性、发电机操作、利用率、功率比、功率曲线的场适用性、中心高度、转子直径、技术发展、发电机损耗率、维护替代方案的可用性、备件的可用性、收入、资本成本、运营成本、现场使用、噪声、美学、供应商满意度、系统集成能力、供应商能力、交货
2022 年	Yu 等 ^[15]	中国山东	发电结构、功率曲线、偏离装机功率的惩罚、初始投资成本、运行成本、无功发电惩罚、品牌名誉、可用性保证、交货时间
2022 年	Wang 等 ^[16]	中国福建	叶片、发电机、齿轮箱、智能监控和故障诊断技术、抵抗恶劣环境的能力、转子直径、技术开发、容量系数、国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)类、额定风速、并网要求、被占海域、施工成本、生产费用、年发电量、内部收益率、度电投资、销售业绩、经营业绩、供应商满意度、供应商能力、系统集成能力

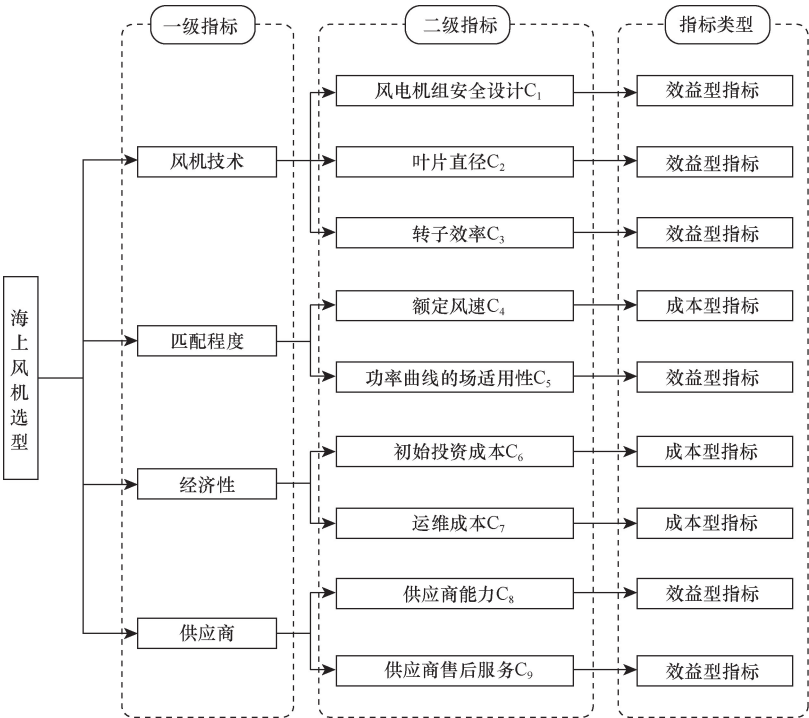


图1 评价指标体系

Fig. 1 Evaluation criteria system

1.1.1 风机技术

(1)风电机组安全设计(C_1)。海上风力发电机运行环境复杂恶劣,面临台风、闪电等恶劣自然环境的挑战,并且海上风电场有维修困难、运维成本高等问题^[20]。因此,风电机组的安全设计至关重要,可以有效降低运维成本,保证风电场的正常运行。

(2)叶片直径(C_2)。叶片直径直接关系到风力发电机的扫掠面积^[21]。扫掠面积越大,捕风能力越强。

(3)转子效率(C_3)。转子效率指风力发电机实

际产生的风能和理想产生的风能的比率,转子比率越高,表示风资源的利用率越高^[22]。

1.1.2 匹配程度

(1)额定风速(C_4)。额定风速指风力发电机正常工作的风速。在相同的风速条件下,额定风速越低,代表该风力发电机的风资源利用率越高^[23]。

(2)功率曲线的场适用性(C_5)。结合当地风资源情况,场适用性越高,表明风力发电机的匹配程度越高,可以提高风资源的利用率^[8]。

1.1.3 经济性

(1)初始投资成本(C_6)。初始投资成本包括设

备的购买、运输、安装成本,是衡量风电机组经济性的重要指标^[24]。

(2) 运维成本(C_7)。运维成本包括风力发电机的日常运营、维护等成本。海上发电机的维护和维修成本高,直接影响了海上风电的经济性^[25]。

1.1.4 供应商

(1) 供应商能力(C_8)。供应商能力指供应商的技术先进性和可靠性,是衡量供应商在风力发电机行业的领先地位^[13]。

(2) 供应商售后服务(C_9)。供应商售后服务是指供应商在风力发电机运营过程中提供的技术服务和维修服务,是评价供应商的重要因素^[13]。

1.2 海上风机选型决策框架

所构建的海上风机选型决策框架主要分为3个阶段:备选方案及属性值确定、指标权重计算、备选方案排序,如图2所示。第一阶段为备选方案及属性值确定:综合考虑风电场的实际情况并结合专家意见确定备选方案,再根据备选方案的详细信息,使用 IFN 确定方案属性值。第二阶段

为指标权重确定:采用 GIAHP,综合考虑每个专家的意见,确定各属性的权重。第三阶段为备选方案排序:对方案属性值进行去模糊化、规范化和加权处理,确定正负理想解,采用欧氏距离和余弦距离相结合的多距离 TOPSIS 进行方案排序,确定最合适的风机类型。

2 海上风机选型方法研究

2.1 直觉模糊集

直觉模糊集的基本定义如下^[26]。

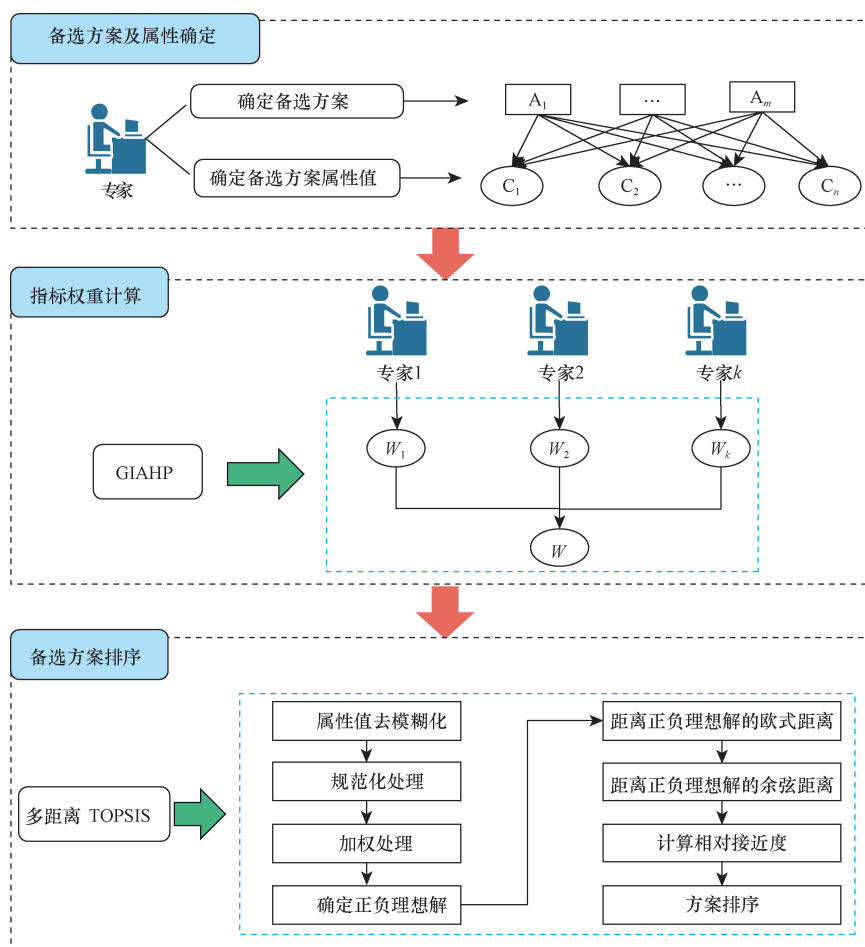
定义1 设 X 为有限非空集合, X 上的直觉模糊集合 A 定义为

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x), v_A(x) \rangle \mid x \in X \} \quad (1)$$

$$X = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \} \quad (2)$$

式中: $\mu_A(x)$ 、 $v_A(x)$ 分别为元素 x 属于 X 的隶属度和非隶属度,二者的取值范围都是 $[0, 1]$, 且 $0 \leq \mu_A(x) + v_A(x) \leq 1$ 。

$\pi_A(x)$ 为 x 属于 X 的犹豫度,表示专家的不确定程度, $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - v_A(x)$ 。



A_m 为第 m 个备选方案; C_n 为第 n 个评价指标; W_k 为第 k 个专家确定的评价指标权重; W 为确定的最终评价指标权重

图2 风机选型决策框架

Fig. 2 Wind selection decision-making framework

定义 2 设直觉模糊数 $a_i = (\mu_i, v_i)$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, μ_i 和 v_i 分别为直觉模糊数 a_i 的隶属度和非隶属度, 对任何正数 λ 计算法则为

$$a_1 \oplus a_2 = (\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \mu_2, v_1 v_2) \quad (3)$$

$$a_1 \odot a_2 = (\mu_1 \mu_2, v_1 + v_2 - v_1 v_2) \quad (4)$$

$$\lambda a_1 = [1 - (1 - \mu_1)^\lambda, v_1^\lambda] \quad (5)$$

式中: $\oplus$ 表示直觉模糊数之间的加法运算; $\odot$ 表示直觉模糊数之间的乘法运算; λ 为常数。

定义 3 直觉模糊数 a_1 和 a_2 的欧氏距离为

$$d(a_1, a_2) = \sqrt{\frac{1}{2} [(\mu_1 - \mu_2)^2 + (v_1 - v_2)^2 + (\pi_1 - \pi_2)^2]} \quad (6)$$

式(6)中: π_1, π_2 分别为直接模糊数 a_1 和 a_2 的犹豫度。

当其中一个直觉模糊数为 $(0, 1)$ 时, 欧氏距离公式将退化成为去模糊化公式。

2.2 GIAHP

由于传统的权重赋值方法未考虑专家的犹豫度, 易受主观因素的影响, 且个人决策具有主观偏差, 采用 GIAHP 计算权重, 具体计算步骤如下。

步骤 1 确定群体决策专家组。

设有 l 位专家组成专家组 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_l\}$, 该专家组中各专家对应的权重设为 $e = \{e_1, e_2, \dots, e_l\}$ 。

步骤 2 建立直觉模糊判断矩阵

每个专家根据直觉模糊层次分析量表的语言术语关系(表 2), 两两对比评价指标的相对重要性, 从而构造直觉模糊判断矩阵。其中, 第 k 个专家的直觉模糊判断矩阵 $P_{(k)}$ 可表示为

$$P_{(k)} = \{a_{ij}^k\}_{n \times n} \quad (7)$$

式(7)中: $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$, 其中 n 为指标个数; $a_{ij}^k = (\mu_{ij}^k, v_{ij}^k)$, 其中, μ_{ij}^k 为第 k 个专家的模糊判断矩阵中元素 a_{ij}^k 的隶属度, v_{ij}^k 为第 k 个专家的模糊判断矩阵中元素 a_{ij}^k 的非隶属度。

步骤 3 构建一致性矩阵。

根据判断矩阵 $P_{(k)}$, 建立一致性矩阵 $\bar{P}_{(k)}$, 可表示为

表 2 直觉模糊层次分析法语言变量
Table 2 Intuitionistic fuzzy analytic hierarchy linguistic variable

语言变量	直觉模糊数	语言变量	直觉模糊数
极其重要(EI)	(0.90, 0.10)	同等重要(EQ)	(0.50, 0.40)
非常重要(VI)	(0.80, 0.15)	稍微不重要(SU)	(0.40, 0.45)
重要(I)	(0.70, 0.20)	不重要(U)	(0.30, 0.60)
稍微重要(SI)	(0.60, 0.25)	非常不重要(VU)	(0.20, 0.75)
相同(S)	(0.50, 0.50)	极其不重要(EU)	(0.10, 0.90)

$$\bar{P}_{(k)} = \{\bar{a}_{ij}^k\}_{n \times n} = \{(\bar{\mu}_{ij}^k, \bar{v}_{ij}^k)\} \quad (8)$$

$$\bar{v}_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\sqrt{\prod_{t=i+1}^{j-1} v_{it}^k v_{tj}^k}}{\sqrt{\prod_{t=i+1}^{j-1} v_{it}^k v_{tj}^k} + \sqrt{\prod_{t=i+1}^{j-1} (1 - v_{it}^k)(1 - v_{tj}^k)}}, & j > i + 1 \\ v_{ij}^k, & j = i + 1 \\ 0.5, & j = i \\ \bar{\mu}_{ji}^k, & j < i \end{cases} \quad (9)$$

$$\bar{v}_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\sqrt{\prod_{t=i+1}^{j-1} v_{it}^k v_{tj}^k}}{\sqrt{\prod_{t=i+1}^{j-1} v_{it}^k v_{tj}^k} + \sqrt{\prod_{t=i+1}^{j-1} (1 - v_{it}^k)(1 - v_{tj}^k)}}, & j > i + 1 \\ v_{ij}^k, & j = i + 1 \\ 0.5, & j = i \\ \bar{\mu}_{ji}^k, & j < i \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\bar{\mu}_{ij}^k$ 为第 k 个专家在一致性矩阵 $\bar{P}_{(k)}$ 中元素 $\bar{a}_{ij}^k$ 的隶属度; $\bar{v}_{ij}^k$ 为第 k 个专家在一致性矩阵 $\bar{P}_{(k)}$ 中元素 $\bar{a}_{ij}^k$ 的非隶属度。

步骤 4 一致性检验。

计算判断矩阵 $P_{(k)}$ 和一致性矩阵 $\bar{P}_{(k)}$ 的距离 $d[P_{(k)}, \bar{P}_{(k)}]$ 可表示为

$$d[P_{(k)}, \bar{P}_{(k)}] = \frac{1}{2(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^n (|\bar{\mu}_{it}^k - \mu_{it}^k| + |\bar{v}_{it}^k - v_{it}^k| + |\bar{\pi}_{it}^k - \pi_{it}^k|) \quad (11)$$

式(11)中: $d[P_{(k)}, \bar{P}_{(k)}]$ 为判断矩阵 $P_{(k)}$ 和一致性矩阵 $\bar{P}_{(k)}$ 的距离, 当小于 0.1 时, 表示判断矩阵 $P_{(k)}$ 通过一致性检验。

步骤 5 计算直觉模糊向量。

根据通过一致性检验的直觉模糊判断矩阵 $P_{(k)}$, 计算直觉模糊向量 $S_{(k)}$, 计算公式为

$$S_{(k)} = (s_1^k, s_2^k, \dots, s_n^k) \quad (12)$$

$$s_j^k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}^k}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (1 - v_{ij}^k)}, 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (1 - v_{ij}^k)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_{ij}^k} \right) \quad (13)$$

式中: s_j^k 为第 k 个专家在直觉模糊向量 $S_{(k)}$ 中指标 j 的直觉模糊数。

步骤6 直觉模糊向量去模糊化。

将直觉模糊向量 $S_{(k)}$ 去模糊化得到向量 $D_{(k)}$ 。设 $s_0 = (0, 1)$, 则向量 $D_{(k)}$ 可表示为

$$D_{(k)} = (d_1^k, d_2^k, \dots, d_n^k) \quad (14)$$

$$d_j = d(s_j, s_0) = \sqrt{\frac{1}{2}[(\mu_j - \mu_0)^2 + (v_j - v_0)^2 + (\pi_j - \pi_0)^2]} \quad (15)$$

式(15)中: d_j 为第 k 个专家对指标 j 归一化前的权值; μ_j 、 v_j 和 π_j 分别为直觉模糊数 s_j 的隶属度、非隶属度和犹豫度; μ_0 、 v_0 和 π_0 分别为直觉模糊数 s_0 的隶属度、非隶属度和犹豫度, 分别为 0、1、0。

步骤7 计算指标权重。

$$w_j^k = \frac{d_j^k}{\sum_{i=1}^l d_i^k} \quad (16)$$

式(16)中: w_j^k 为第 k 个专家确定的评价指标 j 的权重。

步骤8 集体决策。

通过集体决策综合各位专家确定的评价指标权重, 最终权重的计算公式为

$$w_j = \prod_{k=1}^l w_j^{k e_k} \quad (17)$$

式(17)中: w_j 为评价指标 j 的最终权重; e_k 为第 k 位专家对应的权重。

2.3 多距离 TOPSIS

传统 TOPSIS 的排序计算基于欧式距离, 但欧式距离在多维空间计算结果不明显, 故本文将余弦距离引入 TOPSIS, 采用多距离 TOPSIS 计算方案排序。

步骤1 决策矩阵去模糊化。

已知决策矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n} = (\langle \mu'_{ij}, v'_{ij} \rangle)_{m \times n}$, 其中, m 为方案个数, n 为指标个数。则去模糊化决策矩阵 $C = (c_{ij})_{m \times n}$ 可表示为

$$c_{ij} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\mu'_{ij} - 0)^2 + (v'_{ij} - 1)^2 + (\pi'_{ij} - 0)^2]} \quad (18)$$

式(18)中: μ'_{ij} 为第 i 个方案第 j 个属性值的隶属度; v'_{ij} 为第 i 个方案第 j 个属性值的非隶属度; c_{ij} 为第 i 个方案第 j 个指标去模糊化后的属性值。

步骤2 规范化决策矩阵。

采用向量规范化法进行指标的规范化, 得到矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 为

$$r_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m c_{ij}^2}} \quad (19)$$

式(19)中: r_{ij} 为规范化后的属性值。

步骤3 加权规范化矩阵。

构造加权规范化矩阵 $U = (u_{ij})_{m \times n}$, 其中 u_{ij} 为

$$u_{ij} = r_{ij} w_j \quad (20)$$

式(20)中: u_{ij} 为规范化后的属性值。

步骤4 确定正理想解和负理想解。

$$A^+ = [(\max_i u_{ij} | j \in J), (\min_i u_{ij} | j \in J')] \quad (21)$$

$$= [u_1^+, u_2^+, \dots, u_n^+]$$

$$A^- = [(\min_i u_{ij} | j \in J), (\max_i u_{ij} | j \in J')] \quad (22)$$

$$= [u_1^-, u_2^-, \dots, u_n^-]$$

式中: A^+ 为正理想解方案; A^- 为负理想解方案; J 为效益型指标的目标属性; J' 为成本型指标的目标属性。 u_n^+ 和 u_n^- 分别为正理想解和负理想解的属性值。

步骤5 计算欧氏距离和余弦距离。

$$E_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_j^+)^2} \quad (23)$$

$$E_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_j^-)^2} \quad (24)$$

$$F_i^+ = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij} u_j^+}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_j^+)^2}} \quad (25)$$

$$F_i^- = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij} u_j^-}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_j^-)^2}} \quad (26)$$

式中: E_i^+ 、 E_i^- 分别为第 i 个备选方案与正、负理想解的欧氏距离; F_i^+ 、 F_i^- 分别为第 i 个备选方案与正负理想解的余弦距离。

步骤6 计算相对贴进度。

$$I_i = \lambda \frac{E_i^-}{E_i^+ + E_i^-} + (1 - \lambda) \frac{F_i^-}{F_i^+ + F_i^-} \quad (27)$$

式(27)中: I_i 为第 i 个方案的相对贴进度; λ 为测量距离的偏好系数, $0 < \lambda < 1$ 。

3 案例分析

在中国实现“双碳”目标的背景下, 山东省大力发展海洋经济、全力推进山东半岛蓝色经济区建设, 推动海上风电规模化、商业化发展。威海市海岸线长度约为 986 km, 近岸海域总面积 11 449 km², 其中, -20 m 的浅海域总面积为 3 482 km², 占总面积的 30.4%, 风能资源丰富, 海上风电场建设难度小。将建立的 MCDM 框架及方法应用于山东省威海市海上风力发电机选型问题

中。拟建设的海上风电场面积约为 30 km²,装机容量约为300 MW。风电场位置位于山东省威海市东南海域,离岸距离约为 20 km,水深为 18 ~ 30 m,海拔 100 m 处的年平均风速和风功率密度约为 7.33 m/s 和 491 W/m²。

3.1 确定备选方案

为满足拟建风电场的要求,减少选型计算量,通过初步筛选确定适合的海上风电机组。海上风电机组的初步筛选条件为:①海上风机的额定功率在 5 ~ 7 MW;②海上风力机技术成熟、运行性能好;③海上风机生产企业在企业规模、市场占有率、供货能力等方面具有较好表现;④海上风机的安全等级必须在 IEC II C 以上。

综合考虑初步筛选条件和风电场的实际资源、环境条件,确定 3 个备选方案 A₁ ~ A₃,如表 3 所示。根据备选方案的详细信息,通过专家分析讨论,确定备选方案的属性值,如表 4 所示。

3.2 计算指标权重

通过 GIAHP 计算指标权重。共有 5 位专家参与风机选型评价指标权重的确定过程,包括海洋技术、风能开发、工程机械方面的专家。根据专家的专业背景,确定各位专家的权重分别为 {0.3,0.3,0.2,0.1,0.1}。根据语言变量表,各专家对评价指

标进行两两比较,确定评价指标的判断矩阵,对应的判断矩阵为

$$B_1 = \begin{bmatrix} S & SU & SI & EQ & I & SI & VU & VU & VU \\ SI & S & VI & SI & VI & SI & U & U & VU \\ U & VU & S & U & SI & U & EU & EU & EU \\ EQ & U & I & S & VI & SI & VU & VU & VU \\ VU & EU & SU & VU & S & VU & EU & EU & EU \\ SU & U & SI & SU & I & S & VU & EU & EU \\ I & SI & VI & I & EI & VI & S & U & U \\ I & SI & EI & I & EI & VI & SI & S & EQ \\ VI & I & EI & VI & EI & EI & SI & EQ & S \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} S & EQ & SI & EQ & I & I & U & U & VU \\ EQ & S & SI & EQ & I & I & U & U & VU \\ U & U & S & SU & SI & SI & VU & VU & EU \\ EQ & EQ & SI & S & I & I & U & U & EU \\ VU & VU & U & VU & S & EQ & EU & EU & EU \\ VU & VU & U & VU & EQ & S & EU & EU & EU \\ SI & SI & I & SI & VI & VI & S & EQ & U \\ SI & SI & I & SI & VI & VI & EQ & S & U \\ VI & I & VI & I & EI & EI & SI & SI & S \end{bmatrix},$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} S & SU & SI & EQ & I & SI & VU & VU & VU \\ SI & S & VI & SI & VI & SI & U & U & VU \\ U & VU & S & U & SI & U & EU & EU & EU \\ EQ & U & I & S & VI & SI & VU & VU & VU \\ VU & EU & SU & VU & S & VU & EU & EU & EU \\ SU & U & SI & SU & I & S & EU & EU & EU \\ I & SI & VI & I & EI & VI & S & EQ & EQ \\ I & SI & EI & I & EI & VI & EQ & S & EQ \\ I & I & EI & I & EI & VI & EQ & EQ & S \end{bmatrix},$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} S & EQ & SI & EQ & I & I & U & U & U \\ EQ & S & SI & EQ & I & I & U & U & U \\ U & U & S & SU & SI & SI & VU & VU & VU \\ EQ & EQ & SI & S & I & I & U & U & U \\ VU & VU & U & VU & S & EQ & EU & EU & EU \\ VU & VU & U & VU & EQ & S & EU & EU & EU \\ SI & SI & I & SI & VI & VI & S & EQ & EQ \\ SI & SI & I & SI & VI & VI & EQ & S & SU \\ SI & SI & I & SI & VI & VI & EQ & SI & S \end{bmatrix},$$

表 3 备选方案主要参数			
Table 3 Main technical parameters of the alternatives			
参数	方案		
	A ₁	A ₂	A ₃
额定功率/MW	5	5	5.5
ICE	ICE II	S	IEC I
切入风速/(m·s ⁻¹)	3.5	3	3
运行 额定风速/(m·s ⁻¹)	9.6	10.8	10.1
参数 切出风速/(m·s ⁻¹)	25	23	30
使用寿命/年	25	25	25
工作温度/℃	-20 ~ 40	-20 ~ 40	-10 ~ 40
生存温度/℃	-30 ~ 50	-30 ~ 50	-20 ~ 50
叶片数量	3	3	3
叶片	叶片直径/m	171	193
	扫掠面积/m ²	22 966	29 154
发电机	发电机类型	永磁同步	双馈异步
	额定电压/V	690	1 140
	变流器	全功率变流器	双馈变流器

表 4 备选方案属性值

Table 4 Criteria value of the alternatives									
方案	指标								
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
A ₁	(0.8,0.15)	(0.7,0.2)	(0.6,0.25)	(0.8,0.2)	(0.8,0.2)	(0.6,0.25)	(0.7,0.2)	(0.7,0.2)	(0.7,0.2)
A ₂	(0.7,0.2)	(0.6,0.25)	(0.6,0.25)	(0.7,0.2)	(0.7,0.25)	(0.7,0.2)	(0.6,0.3)	(0.8,0.15)	(0.8,0.15)
A ₃	(0.8,0.15)	(0.8,0.15)	(0.7,0.2)	(0.6,0.25)	(0.6,0.25)	(0.7,0.25)	(0.6,0.25)	(0.7,0.2)	(0.7,0.2)

$$B_5 = \begin{bmatrix} S & SU & SI & EQ & I & SI & VU & VU & VU \\ SI & S & VI & SI & VI & VI & U & U & VU \\ U & VU & S & U & SI & EQ & EU & EU & EU \\ EQ & U & I & S & VI & I & VU & VU & VU \\ VU & EU & SU & VU & S & SU & EU & EU & EU \\ U & VU & EQ & U & SI & S & EU & EU & EU \\ I & SI & VI & I & EI & VI & S & U & U \\ I & SI & EI & I & EI & EI & SI & S & EQ \\ VI & I & EI & VI & EI & EI & SI & EQ & S \end{bmatrix}。$$

根据式(8)~式(11),对每个专家的判断矩阵的一致性进行检验,经验证均小于0.1,满足一致性要求。根据式(12)~式(16)对专家的判断矩阵计算模糊向量,并进行去模糊化和归一化处理,得到各专家的指标权重,如表5所示。经式(17)对5个专家决策结果进行集合,得到最终的指标权重如图3所示。在各评价指标中,功率曲线的场适用性是所有专家公认最重要的属性,权重为15.8%。其次是初始投资成本和转子效率,初始投资成本作为项目经济性的最重要指标,权重为14.6%,转子效率是风力发电机将风能转化为电能的效率,权重为14.4%。安全设计、额定风速和叶片直径极大地影响了风力发电机在生产运行中的正常运转和电力生产,其权重分别为12%、11.8%和10.8%。其余3个评价指标不超过10%,包括运维成本、供应商能力和售后服务,权重分别为7.5%、7.0%和5.8%。

$$U = \begin{bmatrix} 0.0714 & 0.0621 & 0.0804 & 0.0730 & 0.0988 & 0.0799 & 0.0468 & 0.0391 & 0.0327 \\ 0.0653 & 0.0565 & 0.0804 & 0.0689 & 0.0897 & 0.0877 & 0.0406 & 0.0428 & 0.0357 \\ 0.0714 & 0.0679 & 0.0883 & 0.0627 & 0.0849 & 0.0844 & 0.0426 & 0.0391 & 0.0327 \end{bmatrix}。$$

通过式(21)~式(26)分别求得正理想解、负理想解和各方案对应的欧式距离、余弦距离分别如表6、表7所示。根据式(27),确定备选方案的相对接近度,其中偏好系数取0.5,求得各方案的相对接近度 $I = (0.5260, 0.2804, 0.5935)$,故 $A_3 > A_1 > A_2$ 。 A_3 方案因其转子效率、功率曲线的场适用性和初始投资成本整体最优,相对接近度大于其他两个方案。因此, A_3 方案是海上风机选型的首选发电机。

表6 正理想解与负理想解
Table 6 Positive ideal solution and negative ideal solution

理想解	评价指标								
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
A ⁺	0.0714	0.0679	0.0883	0.0627	0.0988	0.0799	0.0406	0.0428	0.0357
A ⁻	0.0653	0.0565	0.0804	0.0730	0.0849	0.0877	0.0468	0.0391	0.0327

表5 各专家求解的评价指标权重
Table 5 Criteria weights from each expert

评价指标	权重/%				
	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5
安全设计 C ₁	12.8	11.6	11.1	12.7	12.5
叶片直径 C ₂	10.4	11.4	11.1	10.4	10.1
转子效率 C ₃	15.4	13.6	13.4	15.4	15.1
额定风速 C ₄	12.4	11.5	11.2	12.3	12.1
功率曲线的场适用性 C ₅	16.2	15.5	15.2	16.3	16.2
初始投资成本 C ₆	13.5	15.5	15.2	13.4	15.1
运维成本 C ₇	7.5	8.0	7.5	6.6	7.2
供应商能力 C ₈	6.1	8.0	7.9	6.6	6.1
售后服务 C ₉	5.7	5.0	7.4	6.2	5.7

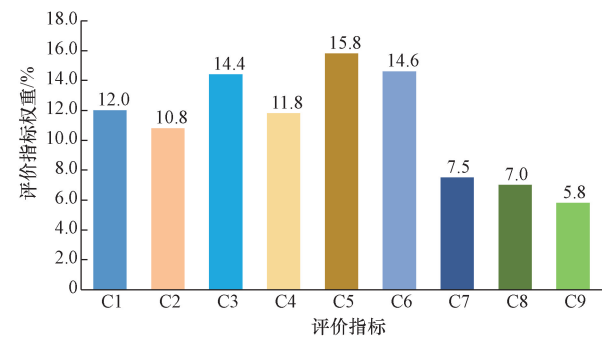


图3 最终指标权重
Fig. 3 Final criteria weight

3.3 备选方案排序
方案排序通过多距离 TOPSIS 计算得到。根据式(18)~式(20)对方案属性矩阵进行去模糊化、规范化和加权处理,求得加权规范化矩阵U为

表7 备选方案到正理想解和负理想解的欧式距离和余弦距离
Table 7 Euclidean and cosine distances of the alternatives to positive and negative ideal solutions

备选方案	欧氏距离		余弦距离	
	E ⁺	E ⁻	F ⁺	F ⁻
A ₁	0.0162	0.0180	0.0031	0.0034
A ₂	0.0203	0.0100	0.0043	0.0013
A ₃	0.0155	0.0191	0.0026	0.0045

3.4 敏感性分析

在计算最终方案排序中,选取不同的偏好系数可能会导致结果的变动。因此将对偏好系数 λ 的变化对结果的影响进行分析。将偏好系数 λ 设置在0~1变动,变化幅度为0.1,相对接近度与偏好系数的变化如图4所示。由计算结果可知,偏好系数的变化会影响相对接近度变化,但这些变化不足以改变备选方案优先级。对相对接近度的变化进行分析发现,将余弦距离引入TOPSIS中,可以有效增加不同方案之间的差异性。因此,经敏感性分析验证,即使偏好系数发生一定程度的改变,仍能保证模型的鲁棒性和可靠性。

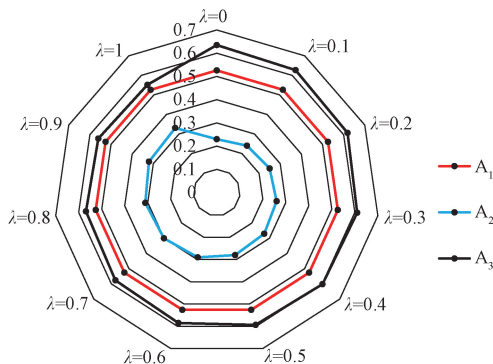


图4 不同偏好程度下备选方案的相对接近度

Fig. 4 Relative proximity of alternatives at different levels of preference

4 结论

随着可再生能源的迅速发展,海上风电的优势越来越显著。作为海上风电开发必不可少关键环节,海上风力发电机选型对海上风电场的长期高效运行起着至关重要的作用。以往对海上风机选型的研究有限,且在决策过程中存在评价指标体系不全面和决策过程易产生主观偏差问题。为了更好地解决海上风机选型问题,推动海上风电产业化发展,提出了一种新的MCDM框架及方法,并将其应用于山东省海上风电场风机选型实例中。通过敏感性分析,验证该框架及方法的鲁棒性和可靠性,可以为海上风电场风机选型提供理论参考。得出如下结论。

(1)构建海上风机选型综合评价指标体系,可以全面反映海上风力发电机的实际情况,提高决策的合理性。

(2)将直觉模糊数引入评价指标体系,采用直觉模糊数表示方案属性值,能更大限度减少评价信息的缺失。同时,将群体决策引入指标赋权过程,能够进一步降低因单个专家的主观偏差对决策结

果的影响,提高赋权结果的准确性和可靠性。

(3)引入多尺度接近理想点法,综合考虑余弦距离和欧氏距离,提高排序结果的可靠性和合理性。采用敏感性分析,验证排序方法的鲁棒性。

(4)提出的海上风机选型框架,可以准确有效地确定最优方案,为相关项目提供有效参考。通过修改评价指标和偏好参数,该框架可以应用于其他方案选型问题。

参 考 文 献

- [1] 中共中央国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. (2021-09-22)[2023-05-15]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
The State Council of the CPC Central Committee. Opinions on completely, accurately and comprehensively implementing the new development concept and doing a good job of carbon peak and carbon neutralization[EB/OL]. (2021-09-22)[2023-05-15]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [2] Rehman S, Alhems L M, Alam M M, et al. A review of energy extraction from wind and ocean: technologies, merits, efficiencies, and cost[J]. Ocean Engineering, 2023, 267: 113192.
- [3] 徐佳楠, 张天瑞, 李玉龙. 基于自适应遗传-粒子群优化算法的风电场微观选址优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 6917-6922.
Xu Jia'nan, Zhang Tianrui, Li Yulong. Micro-location and optimization of wind farm based on the adaptive GA-PSO algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 6917-6922.
- [4] Dfaz H, Soares C G. Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms[J]. Ocean Engineering, 2020, 209: 107381.
- [5] 李红伟, 明兴莹, 罗华林, 等. 基于改进灰狼优化的开关磁阻风力发电最大功率点跟踪控制策略[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11224-11231.
Li Hongwei, Ming Xingying, Luo Hualin, et al. Maximum power point tracking control strategy for switched reluctance wind power generation based on improved gray wolf optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11224-11231.
- [6] Li M, Jiang X, Carroll J, et al. A multi-objective maintenance strategy optimization framework for offshore wind farms considering uncertainty[J]. Applied Energy, 2022, 321: 119284.
- [7] Ma H, Ge M, Wu G, et al. Formulas of the optimized yaw angles for cooperative control of wind farms with aligned turbines to maximize the power production[J]. Applied Energy, 2021, 303: 117691.
- [8] Supciller A A, Toprak F. Selection of wind turbines with multi-criteria decision making techniques involving neutrosophic numbers: a case from Turkey[J]. Energy, 2020, 207: 118237.
- [9] Shao M, Han Z, Sun J, et al. A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection[J]. Renewable Energy, 2020, 157: 377-403.
- [10] Şagbanşua L, Balo F. Multi-criteria decision making for 1.5 MW wind turbine selection[J]. Procedia Computer Science, 2017, 111: 413-419.
- [11] Bagočius V, Zavadskas E K, Turskis Z. Multi-person selection of

- the best wind turbine based on the multi-criteria integrated additive-multiplicative utility function[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2014, 20(4): 590-599.
- [12] Ma Y, Xu L, Cai J, et al. A novel hybrid multi-criteria decision-making approach for offshore wind turbine selection[J]. *Wind Engineering*, 2021, 45(5): 1273-1295.
- [13] Lee A H I, Hung M C, Kang H Y, et al. A wind turbine evaluation model under a multi-criteria decision making environment[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 64: 289-300.
- [14] Beskese A, Camci A, Temur G T, et al. Wind turbine evaluation using the hesitant fuzzy AHP-TOPSIS method with a case in Turkey [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2020, 38(1): 997-1011.
- [15] Yu Y, Wu S, Yu J, et al. A hybrid multi-criteria decision-making framework for offshore wind turbine selection: a case study in China[J]. *Applied Energy*, 2022, 328: 120173.
- [16] Wang J, Xu L, Cai J, et al. Offshore wind turbine selection with a novel multi-criteria decision-making method based on Dempster-Shafer evidence theory[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 51: 101951.
- [17] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets [J]. *International Journal Bioautomation*, 2016, 20: 252-261.
- [18] Shao M, Zhao Y, Sun J, et al. A decision framework for tidal current power plant site selection based on GIS-MCDM: a case study in China [J]. *Energy*, 2023, 262: 125476.
- [19] Shirgholami Z, Zangeneh S N, Bortolini M. Decision system to support the practitioners in the wind farm design: a case study for Iran mainland[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2016, 16: 1-10.
- [20] Ederer N. The right size matters: investigating the offshore wind turbine market equilibrium[J]. *Energy*, 2014, 68: 910-921.
- [21] Bagočius V, Zavadskas E K, Turskis Z. Multi-person selection of the best wind turbine based on the multi-criteria integrated additive-multiplicative utility function[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2014, 20(4): 590-599.
- [22] Nguyen V T, Hai N H, Lan N T K. Spherical fuzzy multicriteria decision-making model for wind turbine supplier selection in a renewable energy project[J]. *Energies*, 2022, 15(3): 713.
- [23] Huang R, Zhang M, Guo M, et al. Selection of offshore wind turbine based on analytic hierarchy process [C]//2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). New York: IEEE, 2020: 341-345.
- [24] Hu S, Hoare C, Raftery P, et al. Environmental and energy performance assessment of buildings using scenario modelling and fuzzy analytic network process[J]. *Applied Energy*, 2019, 255: 113788.
- [25] Kolios A, Mytilinou V, Lozano-Minguez E, et al. A comparative study of multiple-criteria decision-making methods under stochastic inputs[J]. *Energies*, 2016, 9(7): 566.
- [26] Alcantud J C R, Khameneh A Z, Kilicman A. Aggregation of infinite chains of intuitionistic fuzzy sets and their application to choices with temporal intuitionistic fuzzy information[J]. *Information Sciences*, 2020, 514: 106-117.