

文章编号:1000-4653(2024)04-0066-07

考虑通航安全的海上风电场选址多目标优化

张进峰^{1,2,3}, 熊茂林¹, 吴小红^{1,3}, 李清⁴, 孙永强⁴, 杨涛宁⁴

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;

3. 武汉理工大学 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063;

4. 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

摘要:在考虑海上风电场建设对周围水域船舶通航安全影响的基础上,针对海上风电场选址涉及的风能密度和建设成本2个冲突的目标,从自然环境和交通环境两个方面对通航风险进行客观评估,并将通航风险作为约束条件,构建了海上风电场选址的多目标优化模型。运用带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)对模型进行求解,利用逼近理想解排序算法(TOPSIS)从Pareto最优解集中选取折中解。以海南岛西海岸离岸50 km内的海域为例,验证所构建的多目标选址模型的可行性与有效性,为海上风电场科学选址提供决策支持。

关键词:海上风电场选址;多目标优化;船舶通航安全;风险评估

中图分类号:U698

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2024.04.009

Multi-objective optimization of offshore wind farm site selection considering navigational safety

ZHANG Jinfeng^{1,2,3}, XIONG Maolin¹, WU Xiaohong^{1,3}, LI Qing⁴, SUN Yongqiang⁴, YANG Taoning⁴

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. National Engineering

Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

3. Hubei Inland Shipping Technology Key Laboratory, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063,

China; 4. China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China)

Abstract: Based on the consideration of the impact of offshore wind farm construction on the safety of ship navigation in the surrounding waters, for the two conflicting objectives of wind energy density and construction cost involved in offshore wind farm siting, this paper objectively evaluates the navigational risk in terms of the natural environment and the traffic environment, and constructs a multi-objective optimization model for offshore wind farm siting with navigational risk as the constraints. The model is solved by NSGA-II with elite strategy, and the compromise solution is selected from the Pareto optimal solution set by using the approximate ideal solution ranking algorithm TOPSIS. Taking the sea area within 50 km offshore of the west coast of Hainan Island as an example, the feasibility and effectiveness of the constructed multi-objective site selection model are verified, providing the decision support for the scientific site selection of offshore wind farms.

Key words: offshore wind farm site selection; multi-objective optimization; ship navigation safety; risk assessment

2020年我国提出了“双碳”目标作为应对全球气候变化的中长期国家战略,发展海上风力发电是减少碳排放、保证可持续发展的重要举措。2021年

我国海上风电新增装机10.8 GW,占全球增量的80%,成为全球海上风电累计装机最多的国家。随着海上风电场的快速发展,其与海上交通安全之间

收稿日期:2023-08-01

作者简介:张进峰(1980—),男,教授,博士,研究方向为水上设施选址多目标优化。E-mail:mount@whut.edu.cn

通信作者:吴小红(1979—),男,高级实验师,船长,研究方向为水上交通安全与环境。E-mail:wuxh@whut.edu.cn

引用格式:张进峰,熊茂林,吴小红,等.考虑通航安全的海上风电场选址多目标优化[J].中国航海,2024,47(4):66-72.

ZHANG J F, XIONG M L, WU X H, et al. Multi-objective optimization of offshore wind farm site selection considering navigational safety

[J]. Navigation of China, 2024, 47(4): 66-72. (in Chinese)

的矛盾日益突出,据统计全球海上风电水域发生事故中约有40%的事故与船舶航行相关^[1]。因此,考虑通航安全因素,科学合理地进行海上风电场选址,对于降低海上风电场选址对船舶通航安全的影响、减少风电水域船舶事故具有重要意义。

在关于海上风电场选址的研究中,WU等^[2]将风力资源、自然环境、交通环境和风力涡轮机条件作为属性,提出一种海上风电场选址的模糊多属性决策方法。GAO等^[3]提出了基于直觉语言聚合算子的多准则决策框架,对海上风电场候选场地进行评估排名。KIM等^[4]将选址评价标准分为能源资源和经济、环境保护区、人类活动、海洋生态环境,基于地理信息系统进行了海上风电场选址。MYTILINO等^[5]考虑成本要素的冲突性质,根据每个风电场候选位置的风速、港口距离、水深、涡轮机尺寸和数量建立多目标选址优化模型。LEE等^[6]基于风能密度的选址目标,通过遗传算法选择出合适的海上风电场位置。王哲^[7]基于自然指标建立了三个目标决策函数,并用NSGA II方法求解得出北极海上风电场选址区域。

在关于海上风电场对船舶通航影响的研究中,聂园园等^[8]基于船舶与风电场碰撞概率,提出了一种确定海上风电场与航路之间安全距离的方法,为海上风电场的科学选址、保障船舶航行安全提供依据。YU等^[9]基于船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)数据,从海上风电场附近的船舶最小通过距离和船舶轨迹的横向分布两个方面来表征海上风电场对海上交通的影响。LYU等^[10]从自然环境和船舶航行环境的角度提取风电场水域船舶航行影响因素,基于模糊推理系统定量评估了海上风电场建设对通航安全的影响。梁帅^[11]结合事故树分析风险因子,包括水文气象、港口环境、交通条件、安全保障等因素,采用模糊综合评价方法对海上风电场水域的通航风险进行了定量评价,计算得出该风电场水域的风险等级。王子豪等^[12]为弥补模糊综合评价法和层次分析法的缺陷,提出了结合决策试行与评价实验室法和网络层次分析法的海上风电场水域通航安全评价方法。陈肖龙^[13]从通航安全角度出发,选择各规划场址中对通航安全影响最小的场址进行风电开发建设,前瞻性地降低风电场工程对通航安全造成的影响。

上述研究尚没有将海上风电场选址和通航安全影响结合起来,已有的基于船舶通航安全进行海上风电场选址的研究在候选场址的风险评价过程中存在着评估信息的模糊性、不完整性以及专家判断的

不确定性等问题,考虑通航安全影响的海上风电场选址多目标优化研究尚待深入。为了系统地解决海上风电场选址问题,本文通过客观量化风电水域船舶通航风险来反映海上风电场选址对船舶通航安全的影响,然后构建了以成本、风能为目标,以通航风险作为约束条件的多目标优化选址模型。

1 海上风电场通航风险评价模型

1.1 海上风电场通航风险评价体系构建

为了反映海上风电场工程选址对船舶通航安全的影响,对海上风电场拟选址水域的通航风险进行定量评估。从自然环境和交通环境两个方面选择了可量化指标建立风险评价体系,如图1所示。评价指标量化方法及解析如下:

1) 能见度,以年平均能见度量化。在风电场水域,能见度不良使得船舶驾驶人员对距离和位置的判断容易产生偏差,给船舶安全航行带来困难。

2) 风速,以海面10 m年平均风速量化。船舶在风的影响下可能会产生漂移运动,风速越大,船舶与风机碰撞的风险增加。

3) 浪高,以浪高高度量化。船舶在大浪的作用下,船舶操纵困难,可能引发船舶与风机事故。

4) 锚地距离,以风电场到周围锚地最短距离量化。海上风电场距离锚地太近,锚泊的船舶失控走锚,可能会漂移至风电场水域发生触碰事故。

5) 航路距离,以风电场到周围航路最短距离量化。海上风电场若与航路较近,将增大船舶航行密度,使船舶航行风险增加。

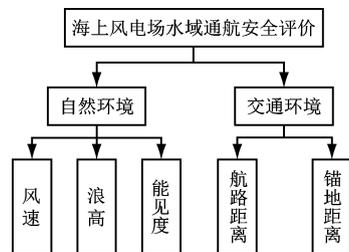


图1 海上风电场水域通航风险评估体系

Fig. 1 Risk assessment system for navigation in waters of offshore wind farms

1.2 指标值标准化

指标值为客观量化值,对其进行归一化处理,可获得指标对所评价风险状况的贡献。指标值越大,风险值越大的指标为正向指标。

对于正向指标,采用下式进行标准化:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (1)$$

对于逆向指标,则采用下式进行标准化:

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

式中: x_{ij} 为第*i*个待评价对象的第*j*项评价指标的取值, $\max x_j$ 为第*j*项评价指标的最大值, $\min x_j$ 为第*j*项评价指标的最小值。 p_{ij} 可以反映第*i*个评价对象的第*j*项评价指标的危险度,其值越大,代表着该项评价指标带来的风险越大。

1.3 MEREC法计算指标权重

基于标准去除效应法(Method based on the Removal Effects of Criteria, MEREC)通过移除标准后对备选方案总体性能产生的影响大小来计算该移除标准的权重。当一个标准的移除对备选方案的总体性能产生更大影响时,该标准具有更大的权重。其步骤如下:

1) 构建决策矩阵。假设有*n*个备选方案和*m*个风险评价指标,用矩阵可表示为:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & \cdots & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2) 归一化决策矩阵。集合**B**为正向指标,包括风速、浪高;集合**H**为逆向指标,包括航路距离、锚地距离和能见度。采用式(4)进行归一化。

$$n_{ij}^x = \begin{cases} \frac{\min_k x_{kj}}{x_{ij}}, & j \in \mathbf{B} \\ \frac{x_{ij}}{\max_k x_{kj}}, & j \in \mathbf{H} \end{cases} \quad (4)$$

3) 采用式(5)计算各备选方案的总体性能 S_i 。

$$S_i = \ln \left[1 + \left(\frac{1}{m} \sum_j |\ln(n_{ij})| \right) \right] \quad (5)$$

4) 依次移除每个标准,采用式(6)再次计算备选方案性能 S'_{ij} 。

$$S'_{ij} = \ln \left[1 + \left(\frac{1}{m} \sum_{k \neq j} |\ln(n_{ik})| \right) \right] \quad (6)$$

5) 计算绝对偏差的总和。根据3)和4)获得的值来计算第*j*个标准的去除效果 E_j 。

$$E_j = \sum_i |S'_{ij} - S_i| \quad (7)$$

6) 确定标准的最终权重。 w_j 代表第*j*个标准的权重。 w_j 计算式如下:

$$w_j = \frac{E_j}{\sum_{j=1}^m E_j} \quad (8)$$

1.4 综合风险值计算

采用加权综合法计算第*i*个风险评价对象的综

合风险指数值 R_i ,计算式如下:

$$R_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot p_{ij} \quad (9)$$

2 海上风电场选址多目标优化模型

2.1 问题描述

我国海上风电将继续向深远海方向发展,但随着离岸距离和水深的增加,海上风电场的建造安装成本和运维成本也急剧上升,且2021年后我国海上风电中央财政补贴全部取消,这将使得风电开发企业面临更大的成本压力。同时,海上风电场的存在占据了船舶航行空间,对船舶航行造成不可忽略的影响,所以风电场选址考虑对船舶通航安全的影响是必要的。

海上风力涡轮机的平准化能源成本强烈依赖于离岸距离和水深^[14],随着离岸距离的增加,将拥有更大的风能资源,但会导致风电场运维、电缆铺设等成本的增加,降低海上风电场开发成本和提高风能密度是冲突的。因此,考虑船舶通航安全的海上风电场选址是一个多目标优化问题。

2.2 多目标优化模型

构建以成本最小和风能最大为目标函数的多目标优化模型,并且将通航风险作为约束条件,以求在优化选址过程中避开对船舶通航安全影响较大的区域。

1) 目标函数一:最小成本 f_1 。

考虑到所构建的目标函数是为海上风电场的宏观选址服务,所以成本模型中只考虑与离岸距离和水深相关的成本,包括与离岸距离相关的外部电缆铺设成本、与水深相关的风电支撑结构成本、与离岸距离相关的运维费用。

$$f_1 = \min \sum_{i \in I} \left[Qd_i + 3 \left(\frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} \right)^2 R d_i T u + \frac{P_G (h_i^2 + 100h_i + 1500)}{7500} y_i + \frac{P_G (0.5h_i^2 - 35h_i + 2500)}{7500} z_i + \frac{d_i}{V} (W_{oil} P_{oil} + P_G P_{ele}) \right] x_i \quad (10)$$

式中: Q 为交流电缆每公里的综合造价; R 为电缆等效电阻; T 为电缆年运作小时数; u 为电价; P 为电缆输送功率; U 为交流线电压; $\cos \varphi$ 为功率因素,近似取0.95; P_G 为涡轮机额定功率; V 为运维船服务航速; W_{oil} 为运维船在服务航速下的单位时间油耗; P_{oil} 为运维船燃料油的单价; P_{ele} 为海上风电电价单价;

d_i 为网格点 i 的离岸距离; h_i 为网格点 i 的水深; r_i 为网格点 i 的通航风险值; x_i, y_i, z_i 为 0-1 变量。

2) 目标函数二:最大风能密度 f_2 。

$$f_2 = \max \sum_{i \in I} \left[\frac{1}{2} \rho v_i^3 \right] x_i \quad (11)$$

式中: ρ 为空气密度, v_i 为网格点 i 的风速。

s. t.

$$x_i = 0, \forall r_i \geq 0.7069 \quad (12)$$

$$10 < d_i < 50, \forall i \in I \quad (13)$$

$$h_i > 10, \forall i \in I \quad (14)$$

$$\begin{cases} y_i = 1, z_i = 0; h_i < 35 \\ y_i = 0, z_i = 1; h_i \geq 35 \end{cases} \quad (15)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \forall i \in I \quad (16)$$

$$x_i = 0, \forall s_i \leq 1 \quad (17)$$

式(12)表示不在通航风险等级高和较高的网格点选址。

式(13)和(14)是国家能源局和国家海洋局对海上风电建设提出的海上风电场原则上应在离岸距离不小于 10 km、滩涂宽度超过 10 km 时海域水深不得小于 10 m 的海域布局的标准。

式(15)当候选格点水深小于 35 m,成本目标函数中的支撑结构成本采用单桩支撑结构的成本公式计算;否则,采用导管架支撑结构的成本公式计算。

式(16)表示在第 i 个候选格点选址,则 $x_i \in \{1\}$;不在第 i 个候选格点选址,则 $x_i \in \{0\}$ 。

式(17)表示第 i 个候选格点到周围航路的最近距离 s_i 若小于 1 km,在此建设海上风电场会造成附近航海雷达形成一定阴影区,则不在该候选格点选址。

2.3 模型求解算法

2.3.1 算法原理概述

1) NSGA-II 算法

NSGA-II 算法采用了快速非支配排序算法,计算复杂度大大降低;采用了拥挤度和拥挤度比较算子,保持了种群的多样性;引入了精英策略,扩大了采样空间,防止最佳个体的丢失,提高了算法的运算速度和鲁棒性。

2) TOPSIS 算法

通过 NSGA-II 求解多目标优化问题的最终结果是一组 Pareto 最优解集,再采用 TOPSIS 算法从 Pareto 最优解集中筛选出最佳折中解。TOPSIS 法是一种常用的综合评价方法,其基本思路是通过假定正、负理想解,测算各样本与正、负理想解的距离,得到其与理想方案的相对贴近度(即距离正理想解越近同时距离负理想解越远),进行各评价对象的

优劣排序。

2.3.2 算法流程

第一步:初始化种群。个体编码由海上风电场的位置信息构成,随机生成满足模型约束条件的个体构成初始种群。

第二步:快速非支配排序和拥挤距离计算。快速非支配排序通过计算种群中每个个体的被支配个数和该个体支配的解的集合,划分出种群的 Pareto 等级;拥挤度距离计算可以使得到的解在目标空间中更加均匀。

第三步:选择、交叉和变异操作,获得子代种群。采用锦标赛选择出适合繁殖的父代,然后对选出来的父代使用单点交叉和基本位变异产生子代。

第四步:合并父代种群和子代种群,再次计算快速非支配排名和拥挤距离。通过精英保留策略选择合适的个体组成新的父代种群。

第五步:重复步骤三到四,直到进化代数达到最大代数,得到一组迭代稳定的 Pareto 最优解集。

第六步:指标正向化、标准化得到规范化矩阵。将 Pareto 解集的各个体的两个目标函数作为指标。

第七步:确定正、负理想解,计算 Pareto 最优解集中各个体的两个指标距离正、负理想解的距离。

第八步:计算各评价对象与最优方案的贴近程度,得到评分最高的解即为模型求解的最佳选址方案。

其中 NSGA-II 算法的伪代码描述如下:

Input: 种群大小 N 、最大迭代次数 Max_Gen

Output: Pareto 前沿 PF

1: 初始化种群 P_0

2: $t = 0$; $Q_t = []$ // t 为迭代次数, Q_t 为当前代生成的 z 代种群

3: While $t < \text{Max_Gen}$

4: $R_t = P_t + Q_t$ // R_t 为合并父代种群 P_t 和子代种群 Q_t

5: $F = \text{Fast-non-dominated-sort}(R_t)$ // R_t 所有的非支配前沿 $F = (F_1, F_2, \dots)$; F_i 表示第 i 个非支配前沿

6: $P_{t+1} = []$; $i = 1$

7: until $|P_{t+1}| + |F_i| \leq N$

8: Crowding distance calculation(F_i) // 计算拥挤度

9: $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$ // 将非支配等级为 i 的个体放入 P_{t+1}

10: $i = i + 1$

11: Sort(F_i) // 将 F_i 按拥挤度距离从大到小排序

12: $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i[1: (N - |P_{t+1}|)]$ // 选择 F_i 的前 $(N - |P_{t+1}|)$ 个个体放入 P_{t+1}

13: $Q_{t+1} = \text{make-new-pop}(P_{t+1})$ // 选择、交叉、变异生成新种群 Q_{t+1}

14: $t = t + 1$ // 开始下一次迭代

15: end While

16: PF = F1

3 实例

3.1 研究区域

海南岛拥有 1 944 km 的海岸线,风能资源丰富,发展海上风电有优越的自然条件。有研究表明海南省的风能资源开发利用区域主要集中在西部海域^[15]。因此对海南省西部海域开展海上风电场选址工作,在参考风电场开发建设的离岸距离标准以及海南省“十四五”海上风电规划的基础上,研究区域确定为海南岛西部离岸距离在 10 ~ 50 km 的海域。

研究需要的数据中水深数据的空间分辨率最小,约为 $1/60^\circ \times 1/60^\circ$ 。为便于开展研究,基于水

深数据的分辨率对研究区域网格化,经度和纬度每隔 0.033° 作为一个统计单元,以此开展网格化风险评价和网格化选址。

3.2 海上风电场通航风险评价

3.2.1 评价指标数据获取与量化处理

从欧洲中期天气预报中心获取研究区域 2021 年全年的海面 10 m 风速和浪高数据,能见度数据从美国国家环境预报中心获取。由于数据空间分辨率不一致,每个网格单元的风速、浪高和能见度数据通过克里金插值求得,每个单元到附近航路和锚地的距离通过 matlab 程序计算获得。评价指标数据示例如表 1 所示。

表 1 评价指标数据

Tab. 1 Evaluation metrics data

经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$	年平均风速/(m/s)	浪高/m	能见度/km	航线距离/km	锚地距离/km
109.275	20.475	5.631	0.768	22.701	10.87	24.754
109.308	20.475	5.613	0.754	22.701	8.62	23.151
...
109.275	20.442	5.602	0.759	22.697	11.06	22.079
109.308	20.442	5.577	0.739	22.662	8.74	20.465
...

3.2.2 指标权重确定

根据表 1 中评价指标的量化数据构建决策矩阵 X ,通过式(3)~式(8)计算出风速、浪高、能见度、航线距离、锚地距离的客观权重值分别为 0.062 7, 0.120 7, 0.002 7, 0.502 6, 0.311 3。显然,航线距离是其中最重要的标准,如果在离航线太近的位置建设风电场,势必会对船舶通航安全造成很大的影响。能见度的权重最小,分析研究区域近 1 a 能见度数据发现其年平均能见度都处于良好及以上的状况。

3.2.3 风险评价结果在选址优化中的体现

通过式(1)、式(2)、式(9)计算出每个网格单元的综合风险指数 R ,研究区域通航风险空间分布图如图 2 所示。 R_i 代表的是假设在第 i 个网格单元建设风电场,该网格点水域作为风电场周围水域的通航风险值,风险值大小能反映该网格点若建设海上风电场将会对船舶通航安全产生的影响大小。风险值越高则代表在该网格点建立风电场对船舶通航安全的影响越大,该网格点就不适合进行风电场选址。

采用 k -means 聚类将所有网格单元的通航风险

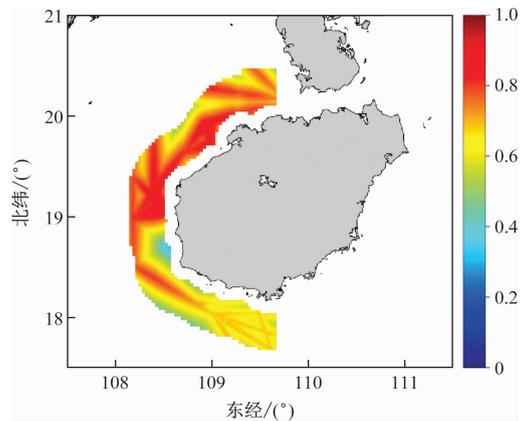


图 2 通航风险空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of navigation risks

值分为五个风险等级(即极低风险、低风险、中风险、高风险和极高风险),以此反映出各网格单元对船舶通航安全影响大小的程度。各风险等级的界限值分别是 0.526 4、0.626 5、0.706 9、0.782 3。高风险和极高风险的网格单元由于其若建设风电场,将会对周围水域船舶通航安全造成较大影响,所以不作为海上风电场选址的候选点,在选址多目标优化模型的约束条件式(12)中体现。

3.3 海上风电场多目标选址

海南省“十四五”海上风电规划总场址面积 1 742 km², 网格单元面积约为 13 km², 于是算法设置选择 134 个网格点构成选址结果。NSGA-II 算法迭代多次直到目标函数值收敛后, 得到的 Pareto 最优前沿如图 3 所示。可以看出, 成本目标和风能目标相冲突, Pareto 解集的分布符合实际, 该方法可以有效地平衡成本和风能。运用 TOPSIS 算法对收敛的 Pareto 解集进行评价, 得到海南西部海域考虑船舶通航安全的海上风电场多目标选址结果, 如图 4 所示, 适合风电场建设的大致范围有四个区域:

1) 以 20° 10' 30N, 108° 50' 31.2E; 20° 10' 30N, 108° 56' 31.2E; 19° 50' 30.12N, 108° 30' 28.8E; 19° 34' 30N, 108° 30' 28.8E 所围成的多边形区域。

2) 以 19° 40' 30N, 108° 18' 28.8E; 19° 36' 29.9N, 108° 14' 31.2E; 19° 26' 30.12N, 108° 16' 30E; 19° 30' 29.9N, 108° 18' 28.8E 所围成的多边形区域。

3) 以 18° 50' 30.12N, 108° 16' 30E; 18° 44' 30.12N, 108° 18' 28.8E; 18° 34' 30N, 108° 16' 30E; 18° 32' 30.12N, 108° 18' 28.8E 所围成的多边形区域。

4) 以 18° 24' 29.88N, 108° 12' 28.8E; 18° 24' 29.88N, 108° 14' 31.2E; 18° 22' 30N, 108° 12' 28.8E 所围成的多边形区域。

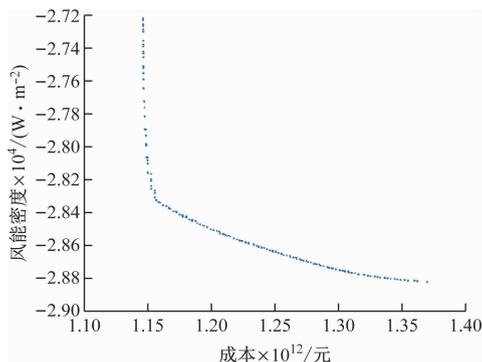


图 3 Pareto 前沿

Fig. 3 The Pareto optimal front

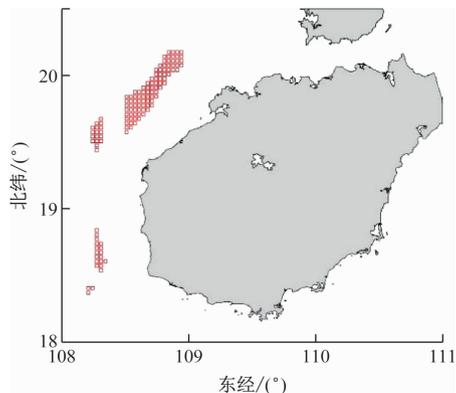


图 4 海南岛西海岸海上风电场开发最佳区域

Fig. 4 The best area for offshore wind farm development on the west coast of Hainan Island

4 结束语

为了降低海上风电建设对船舶通航安全的影响, 以客观的方法对海上风电场候选水域的船舶通航安全进行风险评估, 并采用聚类对其风险值进行准确的等级分类, 构建出考虑船舶通航安全且以成本最低、风能最大为目标的海上风电场选址多目标优化模型。以海南岛西部海域为例, 运用 NSGA-II 算法和 TOPSIS 算法进行模型求解, 最终得到海上风电场开发的最佳区域。

参 考 文 献

- [1] CWIF. Summary of wind turbine accident data [R]. Cupar: Scotland Against Spin, 2021.
- [2] WU B, YIP T L, XIE L, et al. A fuzzy-MADM based approach for site selection of offshore wind farm in busy waterways in China [J]. Ocean Engineering, 2018, 168: 121-132.
- [3] GAO J, GUO F, MA Z, et al. Multi-criteria group decision-making framework for offshore wind farm site selection based on the intuitionistic linguistic aggregation operators [J]. Energy, 2020, 204: 117899.
- [4] KIM T, PARK J I, MAENG J. Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea [J]. Renewable energy, 2016, 94: 619-628.
- [5] MYTILINO V, KOLIOS A J. A multi-objective optimisation approach applied to offshore wind farm location selection [J]. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2017, 3(3): 265-284.
- [6] LEE K H, JUN S O, PAK K H, et al. Numerical optimization of site selection for offshore wind turbine installation using genetic algorithm [J]. Current Applied Physics, 2010, 10(2): 302-306.
- [7] 王哲. 北极东北航道自然风险评估与海上风能资源区划研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
WANG Z. Natural risk assessment and evaluation of offshore wind energy resources of the northeast passage [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [8] 聂园园, 刘克中, 杨星, 等. 海上风电场与航路安全距离 [J]. 中国航海, 2019, 42(4): 12-17.
NIE Y Y, LIU K Z, YANG X, et al. Safety distance between offshore wind farms and ship routes [J]. Navigation of China, 2019, 42(4): 12-17. (in Chinese)
- [9] YU Q, LIU K, TEIXEIRA A P, et al. Assessment of the influence of offshore wind farms on ship traffic flow based on AIS data [J]. The Journal of Navigation, 2020, 73(1): 131-148.

- [10] LYU P, ZHEN R, SHAO Z. A novel method for navigational risk assessment in wind farm waters based on the fuzzy inference system [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2: 1-13.
- [11] 梁帅. 浙江海上风电场通航风险及安全防范策略研究[D]. 大连:大连海事大学, 2018.
LIANG S. Navigation risk analysis and safety precautions for Zhejiang offshore wind farms [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018. (in Chinese)
- [12] 王子豪, 范中洲, 丰懿. 海上风电工程毗邻水域通航安全评价[J]. *上海海事大学学报*, 2022, 43(2): 54-59.
WANG Z H, FAN Z Z, FENG Y. Evaluation on navigation safety in adjacent waters of offshore wind power projects [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2022, 43(2): 54-59. (in Chinese)
- (上接第 65 页)
- WANG X T, WU L H, ZHOU Q Y, et al. Particle swarm-fast simulated annealing algorithm in path planning research on cross country shortest path planning based on optimized A* algorithm [J]. *Information Technology & Informatization*, 2021, 255(6): 13-16. (in Chinese)
- [10] 范林林, 邱德楠, 曹震, 等. 基于优化 A* 算法的越野最短路径规划研究[J]. *地理空间信息*, 2022, 20(6): 71-73.
FAN L L, QIU D N, CAO Z, et al. Research on cross country shortest path planning based on optimized A* algorithm [J]. *Geospatial Information*, 2022, 20(6): 71-73. (in Chinese)
- [11] 赵巍. 水文与气象条件下的船舶多目标航路规划研究[D]. 长春:吉林大学, 2021.
ZHAO W. Research on multi-object route planning of ships under hydrological and meteorological conditions [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [12] 廖鹏, 杨文章, 褚明生, 等. 基于 GM 跟驰模型的内河限制性航道船舶交通流基本图[J]. *东南大学学报* (自然科学版), 2022, 52(3): 602-608.
LIAO P, YANG W Z, CHU M S, et al. Fundamental diagram of vessel traffic flow in inland restricted waterway based on GM following model [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(3): 602-608. (in Chinese)
- [13] 林珈伊, 陶桂兰. 船闸阻抗影响下的内河航线非线性配船模型[J]. *上海海事大学学报*, 2012, 33(2): 14-17.
LING J Y, TAO G L. Nonlinear ship assignment model under effect of lockage time impedance for inland river route [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2012, 33(2): 14-17. (in Chinese)
- [14] 廖鹏, 孔庄, 杨春红. 内河单级多线船闸交通建模与仿真[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(3): 414-421.
LIAO P, KONG Z, YANG C H. Traffic modeling and simulation of single-stage multilane lock in inland waterway [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(3): 414-421. (in Chinese)
- [13] 陈肖龙. 考虑通航安全因素的海上风电场场址优选研究[D]. 大连:大连海事大学, 2017.
CHEN X L. Research on optimization of the offshore wind farm considering navigation safety factors [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. (in Chinese)
- [14] MYHR A, BJERKSETER C, ÅGOTNES A, et al. Levelised cost of energy for offshore floating wind turbines in a life cycle perspective [J]. *Renewable Energy*, 2014, 66: 714-728.
- [15] 周荣卫, 何晓凤, 朱蓉, 等. 中国近海风能资源开发潜力数值模拟[J]. *资源科学*, 2010, 32(8): 1434-1443.
ZHOU R W, HE X F, ZHU R, et al. Numerical simulation of the development potential of offshore wind energy resources in China [J]. *Resources Science*, 2010, 32(8): 1434-1443. (in Chinese)