

文章编号:1000-4653(2025)02-0016-09

基于 DW-NSGA-II 算法的海上搜救力量调度研究

薛清仁¹, 程亮^{1,2,3}, 吴洁¹, 宋彦杰⁴

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093;

2. 江苏省地理信息技术重点实验室, 江苏 南京 210093;

3. 南京大学 中国南海研究协同创新中心, 江苏 南京 210093;

4. 大连海事大学 船舶导航系统国家工程研究中心, 辽宁 大连 116026)

摘要:针对海上搜救力量调度决策复杂、涉及因素多和全局优化难等问题,建立海上搜救力量调度模型,并采用一种基于去重策略的第二代非支配遗传算法(DW-NSGA-II)进行求解。详细阐述考虑目标生存概率的搜寻成功率指标(POSAS)和搜救力量到达搜寻区域时间的相关数学模型,以最大搜寻成功率、最短搜救物资到达时间和最小搜救成本为优化目标建立搜救力量调度模型;针对第二代非支配遗传算法(NSGA-II)在求解搜救力量调度模型过程中因重复解多导致拥挤距离失效、全局优化差等问题,提出一种基于去重策略的第二代非支配遗传算法(DW-NSGA-II);以某事故为例,分别采用DW-NSGA-II和NSGA-II求解模型并比较优化结果。试验结果表明:所提出方法能充分考虑海洋环境信息、事故救援需求和搜救力量情况,制定合理有效的搜救力量调度方案,在相同的初始条件下,DW-NSGA-II算法的优化效果优于NSGA-II算法,验证DW-NSGA-II在搜救力量调度中的优越性。

关键词:海上搜救力量调度;NSGA-II;搜救成功率;物资到达;搜救成本

中图分类号:U698.6

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.003

Research on maritime search and rescue force scheduling based on DW-NSGA-II algorithm

XUE Qingren¹, CHENG Liang^{1,2,3}, WU Jie¹, SONG Yanjie⁴

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing 210093, China;

3. Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

4. National Engineering Research Center of Maritime Navigation System, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To solve the problems of complex decision-making and the difficulty of global optimisation involving many factors, this paper establishes a scheduling model for maritime search and rescue forces and uses a second-generation non-dominant genetic algorithm based on a reduplication strategy (DW-NSGA-II) to solve these problems. Firstly, the probability of a successful search and survival (POSAS) is elaborated upon, taking into account the survival probability of the target and the relevant mathematical model of the time it takes the search and rescue force to arrive at the search area. A search and rescue force dispatch model is then established with the following optimisation goals: the maximum search success rate, the shortest arrival time of search and rescue materials, and the minimum search and rescue cost. Secondly, to solve the problems of crowding, distance failure, and poor global optimisation caused by multiple repeated solutions when

收稿日期:2024-03-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB3903603);国家自然科学基金(42001401)

作者简介:薛清仁(1997—),男,硕士研究生,研究方向为南海遥感。E-mail:xueqingren_11@163.com

通信作者:程亮(1978—),男,教授,博士,研究方向为南海遥感、激光点云研究。E-mail:lcheng@nju.edu.cn

引用格式:薛清仁,程亮,吴洁,等.基于DW-NSGA-II算法的海上搜救力量调度研究[J].中国航海,2025,48(2):16-24.

XUE Q R, CHENG L, WU J, et al. Research on maritime search and rescue force scheduling based on DW-NSGA-II algorithm[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 16-24. (in Chinese)

solving the search and rescue force scheduling model using the second-generation non-dominant genetic algorithm (NSGA-II), a second-generation non-dominant genetic algorithm based on a reduplication strategy (DW-NSGA-II) is proposed. Finally, an accident is used as an example to demonstrate the use of DW-NSGA-II and NSGA-II to solve the model, with the resulting optimisation outcomes being compared. The experimental results show that the proposed method can consider marine environmental information, accident rescue requirements and search and rescue forces to formulate a reasonable and effective search and rescue force scheduling scheme. The DW-NSGA-II algorithm's optimisation effect is better than that of the NSGA-II algorithm under the same initial conditions, which verifies the superiority of DW-NSGA-II in search and rescue force dispatch.

Key words: maritime search and rescue force scheduling; NSGA-II; Search and rescue success rate; supplies scheduling; search and rescue costs

海上运输作为全球贸易的支柱,承载着绝大部分货物和能源的运输任务。然而,随着海上运输规模的不断扩大,海上事故的发生频率也在逐年上升,使海上安全成为国际社会共同关注的焦点。

海上交通事故发生后,受风、浪、流等海洋环境的影响,极易引发次生灾害,所以快速、准确的搜救力量调度能最大程度地提高搜救效率,提供救助物资,减少事故带来的损失。

目前,国内外学者对搜救力量调度研究很多,主要可分为单目标模型和多目标模型 2 个方向。

1) 针对单目标模型,邢胜伟等^[1]引入 0-1 型决策变量,以最小搜寻完成时间为目标,以搜寻参与船舶数量为限制,建立船舶优选模型,通过分析比较不同限制数量下最优值和搜寻成本的关系,得到经济可行的搜寻力量选择方案;AI 等^[2]以最大化搜救成功率为目标,以总需求量和搜寻时间为约束条件,建立针对搜寻任务的搜救资源调度模型;WU 等^[3]以加权最大化覆盖为目标,基于强化学习方法设计多搜救力量的覆盖路径算法。

2) 针对多目标模型,GUO 等^[4]在最优海上搜寻理论的基础上,引入遇险人员平均等待时间,度量人员获救且存活的指标,同时,以最大化资源利用率为目标,对海上搜救过程中多目标船舶调配优化问题进行研究;冯衍凯^[5]以搜寻计划完成时间最短和搜寻计划成功率最大为目标建立多目标优化模型对深远海应急救援船舶调度进行研究;严梦迪等、XIONG 等和 XING 等^[6-8]以搜救成功率和搜救成本为优化目标建立模型,用改进的非支配排序遗传(NSGA-II)算法解决海上船舶搜救资源调度问题;李卓蓉^[9]从搜救物资的角度入手,以最小化搜救物资到达时间和最小化参与港口数量为优化目标解决海上事故物资调度问题。

然而,海上搜救力量研究中仍然存在以下一系列问题:

① 传统的海上搜寻成功率评估,搜寻目标生存

概率的时间依赖性多在约束条件下进行考虑,没有量化进目标函数之中。

② 很少有研究考虑不同海况下搜救力量的航行差异,计算搜救力量的到达时间。

③ 海上搜救力量调度多局限于某种搜救力量和单一优化目标,缺乏对搜救任务的综合考虑。

针对以上问题,本文提出以下解决方案:

① 建立考虑目标生存概率的搜寻成功率指标(Probability of Successful Search and Survive, POSAS),用以描述成功搜寻到搜寻目标存活

的概率。

② 综合考虑海洋环境、搜救力量属性,对搜救力量到达时间进行计算,为搜救力量调度提供支撑。

③ 以最大搜寻成功率、最短搜救物资到达时间和最小搜救成本为优化目标建立搜救力量调度模型。

除此之外,针对第二代非支配遗传算法(NSGA-II)在求解搜救力量调度模型过程中因重复解多导致拥挤距离失效、全局优化差等问题,提出基于去重策略的第二代非支配遗传算法(DW-NSGA-II)对搜救力量调度模型进行求解。

1 数据介绍及预处理

1.1 数据介绍

本文使用数据主要包括海洋环境数据和海上交通数据。

1) 海洋环境数据主要包括风、海浪、海流、海温和水深数据,这些数据在海上搜救决策中起着至关重要的作用。风、浪、海温数据来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF),其中,海温数据、海风数据和浪高数据的空间分辨率分别为 0.5° 、 0.25° 和 0.125° ; 流场数据来自哥白尼海洋数据中心(Copernicus Marine Service, CMEMS),空间分辨率 30 弧秒;水深数据来自全球海陆数据库(The General Bathymetric

Chart of the Oceans, GEBCO), 空间分辨率 30 弧秒。文中海风数据、海流数据用于落水人员漂移预测;海风、海浪和水深用于基于船舶约束条件的可达地图建立;海温数据用于预测人员落水生存概率。

2) 海上交通数据主要是船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)数据,用于获取可参与事故搜救的搜救力量集合。

1.2 数据预处理

由于研究收集的数据来源众多且形式各异,需经过一系列预处理工作才能进一步地使用和分析。预处理涉及的步骤主要包括统一坐标系、统一栅格大小和重采样等过程。本文使用 WGS-84 地理坐标系,采用墨卡托投影,其中,海流、海温和海浪等环境数据需要栅格化,本文确定栅格数据的空间分辨率为 0.05° 。

2 考虑目标生存概率的搜寻成功率

2.1 最优海上搜寻理论

最优搜寻理论主要用于计算搜寻成功率(Probability of Successful Search, P_s),是搜寻行动的主要衡量指标^[10]。 P_s 主要依赖于 2 个概率:包含概率(Probability of Containment, P_c)和发现概率(Probability of Detecting, P_D)^[11]。 P_s 的计算为

$$P_s = P_c \times P_D \quad (1)$$

用于描述搜寻目标位置的先验概率,根据目标位置和其移动路径的概率分布,可获得指定区域的 P_c ^[12]。

P_D 用于描述搜寻目标的当前搜寻行为中能被探测到的概率,是衡量搜寻单元当前搜寻效果的重要指标^[13]。 P_D 的计算跟所采取的搜寻模式密切相关,本文基于平行线下使用目视搜寻,即使用逆立方模型^[14]计算 P_D ,其计算为

$$P_D = \operatorname{erf}\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{w}{l}\right) \quad (2)$$

式(2)中: l 为搜寻设备搜寻间距; w 为搜寻设备扫海宽度,扫海宽度是指在特定搜寻环境中,探测器能发现搜寻目标的有效距离,通常需对大量的试验数据和实际案例数据进行统计分析来确定其数值。

2.2 考虑目标生存概率的搜寻成功率

最优海上搜寻理论最初的提出用于二战时期潜艇搜索^[15],在海上搜救中,该方法忽略了海上搜救场景中人员生存概率的时间依赖性,因此,提出一种新的指标 POSAS,即 P_0 ,用以描述成功搜寻到目标且目标存活概率。指标定义如下:

$$P_0 = \int_0^T \frac{s(t)}{S} \times P_c \times P_D \times P_v(t) dt \quad (3)$$

式(3)中: T 为总搜寻时间; $P_v(t)$ 为人员生存概率随时间变化的趋势; $s(t)$ 为当前搜寻速度; S 为搜寻区域面积; Δt 为微小时间间隔, $\frac{s(t) \times \Delta t}{S}$ 为该时间间隔内已搜寻过的区域面积占总区域的比例,与总 P_c 相乘即为增加区域的 P_c 。再与 P_D 以及当前时间生存概率 $P_v(t)$ 相乘,从而计算出在时间间隔 Δt 内的 P_0 增量,最后对式(3)进行积分,即为整个搜寻期间的总成功搜寻概率 P_0 。

3 搜救力量到达时间

3.1 船舶到达时间

船舶行驶存在诸多限制,行驶区域需满足船舶安全行驶的需要,使直线距离事故地点最近的船舶未必在最短时间内到达事故点。因此,本文提出顾及海上船舶真实航速和海上可行区域的船舶最短到达时间计算模型,综合考虑船舶自身性能和当前海洋环境,识别不可达区域,同时顾及海洋环境条件对船舶航速影响,计算真实航速下的船舶到达时间。

该模型共分为计算船舶可达区域和计算船舶搜救到达时间 2 个步骤。

3.1.1 计算船舶可达区域

水深、海风和海浪是影响船舶航行安全的主要因素^[16-17],船舶可达区域为船舶可安全航行的区域。在本文中,船舶可达区域用公式表示为

$$N_k = \begin{cases} 0, & N_{k,h} + N_{k,z} + N_{k,w} < 3 \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

$$N_{k,h} = \begin{cases} 0, & h_k < d \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

$$N_{k,z} = \begin{cases} 0, & z_k > z \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

$$N_{k,w} = \begin{cases} 0, & w_k > w \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

式(4)~式(7)中: N_k 为船舶在网格 k 处的可达性,0 为不可达,1 为可达,满足水深、海风和海浪全部约束的可达; $N_{k,h}$ 为网格 k 在水深约束下的可达性; h_k 为网格 k 处的水深; d 为船舶的吃水深度; $N_{k,z}$ 为网格 k 在海风约束下的可达性; z_k 为网格 k 处的海风等级; z 为船舶的抗风等级; $N_{k,w}$ 为网格 k 在海浪约束下的可达性; w_k 为网格 k 处的海浪等级; w 为船舶的抗浪等级。

3.1.2 计算船舶搜救到达时间

将海上搜救到达时间定义为从当前位置到事故发生现场的最短航行时间。以第 3.1.1 节计算的可达区域为底图,考虑海洋环境条件对船舶航行的阻力影响计算真实航速,利用地理信息系统空间分析中成本距离分析技术计算搜救可达时间^[18]。

由于海洋环境的影响,导致在同样输出功率条件下船舶海上和静水中航行所得到的速度不同,静水航速通常大于船舶真实航速。本研究使用 MANNARINI 等^[19]提出的船舶速度计算模型计算船舶在海上的真实航速。

$$v_{k,s} = v_s - f(\theta_k) \times H_k^2 \quad (8)$$

$$f(\theta_k) = \begin{cases} 0.0083, & 0^\circ \leq \theta_k < 45^\circ \\ 0.0165, & 45^\circ \leq \theta_k < 135^\circ \\ 0.0248, & 135^\circ \leq \theta_k < 180^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式(8)和式(9)中: $v_{k,s}$ 为船舶在网格 k 处航行的实际速度; $f(\theta_k)$ 为网格 k 处的波浪和船舶航行方向系数; H_k 为网格 k 处有效波高; θ_k 为网格 k 处波浪与船舶航行方向的夹角。

船舶搜救到达时间计算为

$$t_s = \sum_{k \in Z} \frac{l}{v_{k,s}} \quad (10)$$

式(10)中: t_s 为船舶到达事故现场的最短时间; l 为网格之间的距离; $v_{k,s}$ 为船舶在网格 k 处航行的实际速度; Z 为船舶在最短时间从当前位置到搜救区域中心点所通过网格的集合。

3.2 飞机到达时间

不同于船舶航行,飞机飞行往往限制较少,在搜救行动中,通常按照直线距离对到达时间进行计算,有

$$t_a = \frac{d}{v_a} \quad (11)$$

式(11)中: t_a 为搜救飞机到达搜寻区域的时间; d 为搜救飞机到事故海域的直线距离; v_a 为搜救飞机的飞行速度。

4 搜救力量选择模型

4.1 假设条件

针对海上搜救力量调度特点,做出如下假设:

1) 搜救力量包括搜救船舶和搜救飞机,其中,船舶包括专业搜救船和事故点附近的船舶,专业搜救船部署于搜救基地,事故点附近的船舶包括渔船、货船等类型。

2) 在搜寻方面,所有搜救力量采用目视搜寻,

搜寻方式为平行线搜寻。默认设定覆盖率为 1,即各搜救力量航线间距等于扫海宽度。搜寻过程,待搜寻区域的包含概率平均分布,且稳定不变。

3) 考虑飞机续航,但不考虑搜救飞机的加油时间消耗;同时,不考虑搜救船舶续航。

4) 所有力量包含的搜救物资总和大于等于事故的物资需求,且不考虑搜救力量运力限制。

4.2 输入变量

海上事故可用一个五元组表示为

$$E = (T, G, A_q, C, S) \quad (12)$$

式(12)中:五元组分别为事故发生时间、事故发生坐标、事故所需各类资源数量、搜寻区域中心坐标和搜寻区域面积。

事故发生时,周边可供调用的搜救设备有 M 艘搜救船舶和 N 架搜救飞机,可用一个五元组来表示搜救资源,有

$$E_q = (c, s, z_q, t, l) \quad (13)$$

式(13)中:五元组分别为每小时成本、搜寻速度和具备 q 类资源数量、到达事故现场时间、续航。

引入 0-1 决策变量来表示搜救力量是否参加行动,公式表示为

$$D = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_N, x_1, x_2, x_3, \dots, x_M) \quad (14)$$

式(14)中: y_j 为飞机 j 是否参加搜救行动; x_i 为船舶 i 是否参与搜救行动。

4.3 中间变量

1) 搜救方案 t 时刻搜救速度 $sv(t)$ 为

$$s(t) = \sum s_{i,s}(t) \times x_i + \sum s_{j,a}(t) \times y_j \quad (15)$$

$$s_{i,s}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{i,s} \\ s_{i,s}, & \text{否则} \end{cases} \quad (16)$$

$$s_{j,a}(t) = s_{j,a}(t' + n \times l_{j,s}) = \bar{s}_{j,a}(t') \quad (17)$$

$$-sv_{j,a}(t') = \begin{cases} 0, & t' < t_{j,a} \text{ 或 } t' > l_{j,a} - t_{j,a} \\ s_{i,s}, & \text{否则} \end{cases} \quad (18)$$

式(15)为搜救方案 t 时刻搜寻速度的计算,表示为所有参与搜救力量在 t 时刻的搜寻速度和。其中, $s_{i,s}(t)$ 和 $s_{j,a}(t)$ 分别为船舶 i 和飞机 j 在 t 时刻的搜寻速度, x_i 和 y_j 是决策变量,分别为船舶 i 和飞机 j 是否参加此次搜救行动;式(16)为船舶 i 在 t 时刻搜寻速度的计算,其中, $t_{i,s}$ 为船舶 i 到达搜寻区域的时间, $s_{i,s}$ 为船舶 i 的额定搜寻速度;式(17)和式(18)为飞机 j 在 t 时刻搜寻速度的计算,其中, $t_{j,a}$ 为飞机 j 到达搜寻区域的时间(路程航行消耗的时间), $l_{j,a}$ 为飞机 j 的续航时间。

2) 搜寻完成时间 T 。由于本文设定搜寻行动完成的标志是实现搜寻区域全覆盖,则搜寻完成时间 T 的计算为

$$S = \int_0^T s(t) dt \quad (19)$$

式(19)中: S 为搜寻区域面积; $s(t)$ 为搜救方案 t 时刻搜寻速度。

4.4 目标函数及约束

构建以搜寻成功率最大、搜救物资到达时间和搜救成本最小的多目标优化模型为

$$F = \min(1 - f_1, f_2, f_3) \quad (20)$$

$$\begin{cases} f_1 = \int_0^T D \times P_v(t) dt = \text{erf}\left(\frac{\pi}{2}\right) \times \int_0^T \frac{s(t)}{S} \times P_v(t) dt \\ P_v(t) = \exp(-0.349 \times t \times \exp(-0.094 \times S_T)) \end{cases} \quad (21)$$

$$f_2 = \sum \sum x_i \times t_{i,s} \times z_{i,q} + \sum \sum y_j \times t_{j,a} \times z_{j,q} \quad (22)$$

$$f_3 = \left(\sum x_i \times c_{i,s} + \sum y_j \times c_{j,a} \right) \times T \quad (23)$$

约束条件如下:

$$t'_{j,a} < \frac{l_{j,a}}{2} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^M x_i \leq Q_s \times S/1\ 000 \\ \sum_{j=1}^N y_{jk} \leq Z_a \times S/1\ 000 \end{cases} \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^M z_{i,q} \times x_i + \sum_{i=1}^N z_{j,q} \times y_j \geq A_q \quad (26)$$

式(20)为目标函数, f_1 、 f_2 和 f_3 分别为海上搜寻成功率、物资到达时间和搜救成本;式(21)为搜寻成功率的计算, $s(t)$ 为搜救方案内所有力量在时间 t 的搜寻速度, t 为当前距事故发生时间,在本文中假定航行宽度等于扫海宽度,取常数 $\text{erf}(\pi/2)$,约为97.36%, $s_{i,s}(t)$ 为船舶 i 在时间 t 的搜寻速度, $P_v(t)$ 为落水人员 t 时刻在特定水温的生存概率^[2], S_T 为事故海域水温;式(22)为物资到达时间的计算, $t_{i,s}$ 和 $t_{j,a}$ 分别为船舶 i 和飞机 j 的到达时间, $z_{i,q}$ 和 $z_{j,q}$ 分别为船舶 i 和飞机 j 的物资 q 的供给数量;式(23)为搜救成本的计算, $c_{i,s}$ 和 $c_{j,a}$ 分别为船舶 i 和飞机 j 的每小时成本;式(24)为搜救飞机时间上的约束,飞机往返搜寻区域的时间应该小于飞机的续航时间, $t'_{j,a}$ 为飞机 j 到达搜寻区域的时间(路程航行消耗的时间), $l_{j,a}$ 为飞机 j 的续航时间;式(25)为搜救方案中搜救船舶和搜救飞机的数量应小于搜救区

域内能容纳的最多船舶和飞机数量约束, Q_s 为每 $1\ \text{n mile}^2$ 能容纳的最大搜救船舶数量,取经验值2, Z_a 为每 $1\ \text{n mile}^2$ 能容纳的最大搜救飞机数量,取经验值2;式(26)为方案提供的搜救物资总量大于等于事故需求量,否则,不能保证任务的完成, $z_{i,q}$ 和 $z_{j,q}$ 分别为船舶 i 和飞机 j 携带 q 类物资的数量, A_q 为 q 类物资的需求量。

5 求解算法设计

将力量组合问题构建为具有3个目标的多目标优化模型。采用NSGA-II算法对模型求解。

NSGA-II算法在NSGA算法基础上引入快速非支配排序、拥挤距离层级排序等机制创造的^[20-21]。算法基本步骤如下。

1) 初始化规模为 N 的种群,初始化算法参数(迭代次数、变异率和交叉率)。

2) 父代种群 P_t 通过选择、交叉和变异产生子代种群 Q_t ,并计算子代种群中个体的适应度。

3) 合并父代种群 P_t 和子代种群 Q_t 得到新种群 R_t ,即 $R_t = P_t \cup Q_t$,对 R_t 进行快速非支配排序,将其划分为等级不同的非支配解集(F_1, F_2, \dots, F_w)。

4) 产生规模为 N 的新解集 S_t ,将 R_t 中的个体逐等级放入 S_t ,直到某一等级个体数量大于 S_t 的剩余容量,对该等级按照拥挤度进行排序,从大到小进行选取,直到 S_t 放满 N 个, S_t 视为下一个迭代过程的父代种群,即 P_{t+1} 。

5) 判断是否达到设定的迭代次数,若达到则终止,否则继续步骤2)。

对于搜救力量调度这类以0-1为决策变量模型,在实际求解过程中会出现重复解多的情况,从而导致拥挤距离失效、全局寻优能力差等问题。为解决该问题,本文在NSGA-II算法的基础上,添加去重机制,提出一种基于去重策略的第二代非支配遗传算法DW-NSGA-II,即在创建初始种群和生成子代种群的步骤1)和步骤2)中,对生成的解进行去重。经试验证明,DW-NSGA-II能解决0-1决策类模型重复解多的情况,恢复NSGA-II的拥挤距离机制,保证种群分布多样性,提高全局寻优能力。

6 案例分析

6.1 事故案例简介

为验证所提模型及方法的可行性和有效性,以某渔船倾覆事故为例进行求解。

2023年7月20日,1艘渔船意外倾覆,事故点为(17°7'.68N,111°9'.36E),6名船员弃船逃生,同时发生汽油泄漏。

获取周边过往船舶和待命的专业搜救力量,搜救力量空间分布见图1。事发地海温15℃,事故区域流速、波高、水深和风速空间分布见图2。由于本次事故涉及人员落水 and 海面溢油,经专家判断,此次事故需保温毯、水、药物和吸油毡等物资,其需求量分别为(24,24,6,2)。根据文献[3]的搜寻区域确定模型,以事故发生点为起始点,确定事故发生后1.25h搜寻区域,搜寻区域中心点(17°9'.78N,111°10'.08N),搜寻区域面积7.48 n mile²。以搜寻区域中心点为目的计算搜救力量到达时间,搜救力量表见表1。

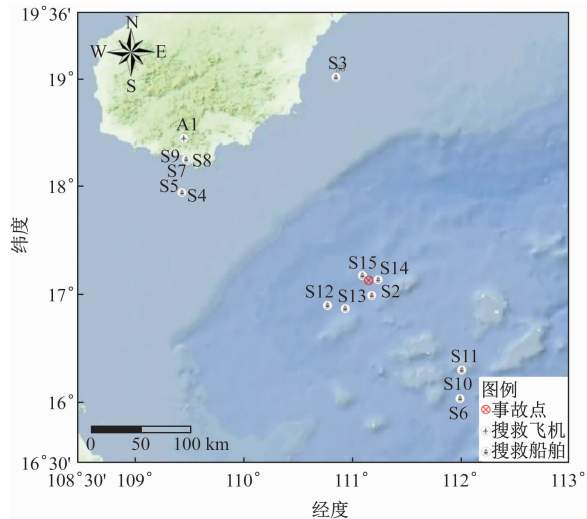


图1 搜救力量空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of search and rescue units

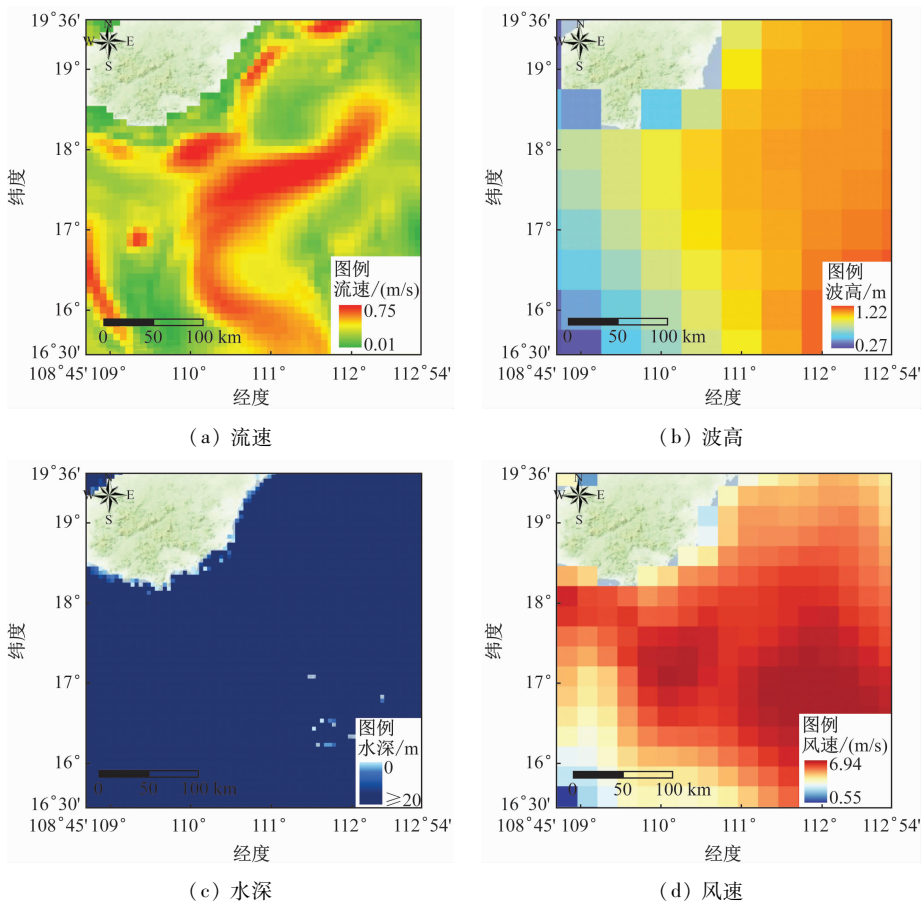


图2 事故区域海流、波高、水深和风速空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of flow, wave, water deep and wind in the accident area

6.2 力量调度结果及分析

设置 DW-NSGA-II 算法和 NSGA-II 算法初始参数后,分别采用求解模型并比较优化结果。DW-NSGA-II 算法设置参数:迭代次数 100 次,种群数量为 50,交叉率 0.9,变异率 0.1。NSGA-II 算法设置参数:迭代次数 200 次,种群数量为 100,交叉率

0.9,变异率 0.1。计算机配置:64 位 Windows10 操作系统,Intel Core i7-7700K CPU,16 GB。编程语言为 Python。采用 2 种算法分别求解模型得到的 Pareto 最优解见图 3。由图 3 可知:除 8 个重复解之外,其余 DW-NSGA-II 算法生成的 Pareto 最优解基本支配 NSGA-II 算法生成的 Pareto 最优解。2 个算

表1 搜救力量表

Tab.1 Search and rescue unit

编号	当前位置	单航次续航/ h	每小时成本/ 元	物资	搜寻速度/ (n mile ² /h)	到达搜寻区域 时间/h
A1	18°26'.88N,109°27'.01E	2.85	25 000	[15, 10, 8, 0]	2.83	0.81
S2	16°59'.34N,111°11'.28E	-	27 698	[2, 8, 0, 0]	1.81	0.91
S3	19°0'.82N,110°12'.57E	-	978	[12, 7, 5, 0]	4.25	6.14
S4	17°56'.52N,109°26'.04E	-	29 935	[21, 23, 8, 1]	2.74	5.97
S5	17°56'.52N,109°26'.04E	-	29 935	[27, 25, 8, 0]	2.76	5.93
S6	16°1'.98N,112°0'.24E	-	22 351	[30, 19, 8, 3]	2.40	5.07
S7	18°15'.0N,109°28'.38E	-	34 059	[11, 15, 5, 1]	4.12	4.14
S8	18°15'.0N,109°28'.38E	-	539	[11, 10, 5, 0]	4.25	4.01
S9	18°15'.0N,109°28'.38E	-	978	[13, 15, 5, 1]	4.25	4.01
S10	16°1'.98N,112°0'.24E	-	29 935	[30, 16, 7, 2]	2.76	4.41
S11	16°17'.88N,112°1'.14E	-	3 911	[19, 15, 5, 2]	4.39	2.36
S12	16°53'.76N,110°46'.74E	-	28 735	[7, 6, 4, 0]	1.65	2.56
S13	16°52'.08N,110°56'.52E	-	26 337	[7, 2, 0, 0]	1.67	1.95
S14	17°8'.16N,111°14'.82E	-	34 535	[4, 2, 0, 0]	1.92	0.30
S15	17°10'.44N,111°6'.06E	-	39 935	[6, 4, 4, 0]	2.47	0.16

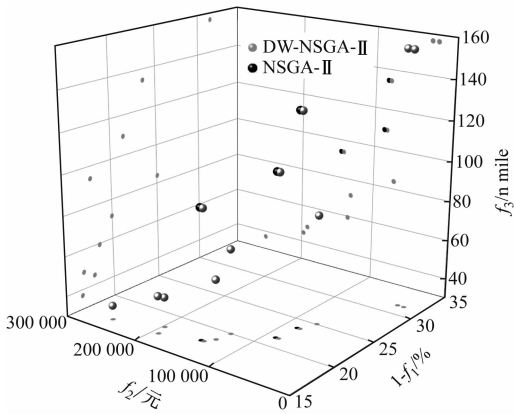


图3 Pareto 最优解

Fig.3 Pareto optimal solution

法分别生成 Pareto 最优解都为 11 个。将 2 种算法生成的 Pareto 最优解混合后进行非支配排序,生成混合解 22 个,快速非支配排序后,得到混合 Pareto 最优解 19 个,其中 2 种算法在生成 Pareto 最优解中处于非支配地位的点数分别为 11 个和 8 个,分别占各自算法原 Pareto 最优解的 100% 和 72.727%。2 种算法的运行时间分别为 54.176 s 和 63.754 s。比较 2 种算法生成的 Pareto 最优解在混合 Pareto 最优解中的非支配解占比及运算时间可知,与 NSGA-II 相比, DW-NSGA-II 的非支配地位的点增加了 27.273%,算法运行时间减少了 15.023%,具有更强的寻优能力。

由于海上搜救是一种具有服务性质的工作,其意义体现在保障人命安全、保护环境和维护航运秩序等方面,因此,设置偏好权重(0.5,0.1,0.4),通过 TOPSIS 算法选择最终解^[22]。指派 A1、S2、S11、S14 和 S15 这 5 个搜救力量参与行动,方案搜寻成功率 83.33%、搜救物资到达时间 36.97、搜救成本 254 751 元,各搜救力量完成任务情况见表 2。

表2 各搜救力量完成任务情况

Tab.2 The completion of tasks by search and rescue units

力量编号	参与搜寻面积/ n mile ²	提供物资	成本/元
A1	1.60	[14, 10, 2, 0]	54 416
S2	0.83	[0, 8, 0, 0]	63 194
S11	0.00	[0, 0, 0, 2]	18 435
S14	2.06	[4, 2, 0, 0]	57 592
S15	2.99	[6, 4, 4, 0]	61 112

由表 2 可知:各搜救力量承担的任务量各不相同。由式(16)得到方案搜寻成功率和搜救力量到达事故现场时间与搜寻速度强相关。搜寻速度较快的 S7、S8 和 S9 到达事故现场时间都约在 4 h,不能在任务结束之前进行搜寻,但从表 2 来看,而方案 1 总的搜寻时间为 1.37 h,能按时到达现场的只有 A1、S2、S14 和 S15 等 4 个搜救力量。

由式(17)可知:方案物资到达时间和搜救力量到达事故现场时间与具备的物资数量相关。到达时间最快的 A1、S2、S14 和 S15 提供的物资已满足保温毯、水和药物等前 3 类物资的需求。但仍然缺少吸油毡,具备吸油毡的搜救力量分别为 S4、S6、S7、S9、S10 和 S11,其中,S4、S7 和 S9 携带数量并不满足需求,在满足需求的搜救力量中 S11 到达事故现场时间最快。综上所述,方案 1 选择 A1、S2、S11、S14 和 S15 参与本次搜救。

7 结束语

本文对海上搜救中搜救力量调度问题进行建模,先基于海上最优搜寻理论,考虑搜寻目标存活率的时间依赖性,提出 POSAS 指标,然后顾及海况、水下地形对搜救力量到达时间进行计算,最后以最大搜寻成功率、最短搜救物资到达时间和最小搜救成本为 3 个优化目标建立多目标模型,并运用 DW-NSGA-II 实现模型的求解,得到高效且经济可行的搜救力量调度方案,为复杂情况下搜救力量调度提供了科学依据。然而,本研究存在一定的局限性,包括假设搜救力量中搜救物资绝对充足,搜寻区域中包含概率平均分布且保持不变。在未来的研究中,需考虑搜救基地在物资调配环节中的参与;并考虑搜寻区域中包含概率的空间差异性,分权重计算区域搜寻成功率,优先搜索高权重区域。

参 考 文 献

- [1] 邢胜伟,张英俊,李元奎,等. 海上搜寻力量选择优化模型[J]. 大连海事大学学报,2012,38(2): 15-18.
- XING S W, ZHANG Y J, LI Y K, et al. An optimal model for search effort selection at sea [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2012, 38(2): 15-18. (in Chinese)
- [2] AI B, LI B S, GAO S, et al. An intelligent decision algorithm for the generation of maritime search and rescue emergency response plans [J]. IEEE Access, 2019, 7(99): 15835-155850.
- [3] WU J, CHENG L, CHU S, et al. An autonomous coverage path planning algorithm for maritime search and rescue of persons-in-water based on deep reinforcement learning [J]. Ocean Engineering, 2024, 29: 1-21.
- [4] GUO Y, YE Y, YANG Q, et al. A Multi-objective INLP model of sustainable resource allocation for long-range maritime search and rescue [J]. Sustainability, 2019, 11(3) 1-25.
- [5] 冯衍凯. 深远海应急救援船舶调度模型与方法研究 [D]. 大连:大连海事大学,2022.
- FENG Y K. Research on dispatching model and method of emergency salvage vessels in far-reaching sea [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022. (in Chinese)
- [6] 严梦迪,王海红. 改进 NSGA-II 算法的海上搜救调度方法 [J]. 计算机系统应用, 2023, 32(8): 244-9.
- YAN M D, WANG H H. Maritime search and rescue dispatching method based on improved NSGA-II algorithm [J]. Computer Systems & Applications, 2023, 32(8): 244-9. (in Chinese)
- [7] XIONG W, GELDER P H, YANG K. A decision support method for design and operationalization of search and rescue in maritime emergency [J]. Ocean Engineering, 2020, 207: 1-17. .
- [8] XING S. Optimal search facilities selection model for joint aeronautical and maritime search [J]. IEEE Access, 2021, 9: 36455-36465.
- [9] 李卓蓉. 水上事故救援物资优化调度问题研究 [D]. 大连:大连海事大学,2012.
- LI Z R. The study on the scheduling of urgent relief for marine perils [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese)
- [10] 马晓雪,石树凯,乔卫亮. 我国海上搜救成功率指标评价体系 [J]. 中国航海, 2017, 40(2): 50-55.
- MA X X, SHI S K, QIAO W L. Index and evaluation system for success rate of maritime search and rescue operations [J]. Navigation of China, 2017, 40(2): 50-55. (in Chinese)
- [11] MORIN M, ABI-ZEID I, QUIMPER C G. Ant colony optimization for path planning in search and rescue operations [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 305: 53-63.
- [12] 李浩. 海上搜寻包含概率研究 [D]. 大连:大连海事大学,2011.
- LI H. Study on the probability of containment at sea [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
- [13] 吴翔,周江华. 海上搜救中发现概率的研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015(1): 28-33.
- WU X, ZHOU J H. Study on probability of detection in marine search and rescue [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015(1): 28-33. (in Chinese)
- [14] 肖方兵. 海上搜救决策支持系统关键技术的研究 [D]. 大连:大连海事大学,2011.
- XIAO F B. Research on the key technologies of maritime search and rescue decision support system [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
- [15] KOOPMAN B O. The theory of search [J]. Operations Research, 1957, 5(5): 93-123.

- [16] HUANG J C, NIEH C Y, KUO H C. Risk assessment of ships maneuvering in an approaching channel based on AIS data [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 399-414.
- [17] 左潇懿,程亮,楚森森,等. 南海海上搜救困难性评价[J]. *热带地理*, 2022, 42(7): 1138-1147.
ZUO X Y, CHENG L, CHU S S, et al. Difficulty assessment of maritime search and rescue in the South China Sea [J]. *Tropical Geography*, 2022, 42(7): 1138-1147. (in Chinese)
- [18] SILJANDER M, VENALAINEN E, GOERLANDT F, et al. GIS-based cost distance modelling to support strategic maritime search and rescue planning: a feasibility study [J]. *Applied Geography*, 2015, 57: 54-70.
- [19] MANNARINI G, COPPINI G, ODDO P, et al. A prototype of ship routing decision support system for an operational oceanographic service [J]. *Transnav International Journal on Marine Navigation & Safety of Sea Transportation*, 2013, 7(1): 53-59.
- [20] 陈志伟,王鸿鹏. 基于NSGA-II算法的福建省海港-陆港网络构建研究[J]. *中国航海*, 2023, 46(1): 114-119.
CHEN Z W, WANG H P. Construction of Fujian seaport-landport network by means of NSGA-II algorithm [J]. *Navigation of China*, 2023, 46(1): 114-119. (in Chinese)
- [21] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [22] 刘培德,秦西友. 基于区间语言直觉模糊集及信息熵的TOPSIS方法[J]. *经济与管理评论*, 2018, 34(3): 87-94.
LIU P D, QIN X Y. An extended TOPSIS method based on interval-valued linguistic intuitionistic fuzzy numbers and information entropy [J]. *Review of Economy and Management*, 2018, 34(3): 87-94. (in Chinese)

(上接第15页)

- [16] 王磊. 长江上游弯曲河道的形态特征及有效航宽研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.
WANG L. Study on the morphological characteristics and effective width of curved channel in the upper reaches of the Yangtze River [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [17] 余葵,吴威力,刘宪庆,等. 山区涉河桥墩布设防撞装置对通航的影响[J]. *水运工程*, 2022(6): 119-126.
YU K, WU W L, LIU X Q, et al. Influence of anti-collision devices for skew bridge piers on navigation [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(6): 119-126. (in Chinese)
- [18] 张贵宾,张绪进,郭昊天,等. 张靖皋长江大桥南航道桥南塔防撞方案研究[J]. *桥梁建设*, 2024, 54(2): 16-21.
ZHANG G B, ZHANG X J, GUO H T, et al. Research on collision protection schemes of south tower of south navigation channel bridge of Zhangjiagang-Jingjiang-Rugao Changjiang River Bridge [J]. *Bridge Construction*, 2024, 54(2): 16-21. (in Chinese)
- [19] 付旭辉,田鹏,余葵,等. 珠海淇澳大桥船撞能力评估及防撞设计[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(10): 4205-4210.
FU X H, TIAN P, YU K, et al. Assessment of the collision capability and collision prevention design of Qi'ao Bridge, Zhuhai, Guangdong [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(10): 4205-4210. (in Chinese)
- [20] 余鸿,贾小龙,张俊立. 大型通航桥梁防撞设施的设
计及分析[J]. *公路*, 2024, 69(3): 165-170.
YU H, JIA X L, ZHANG J L. Design and analysis of anti-collision facilities for large navigable bridges [J]. *Highway*, 2024, 69(3): 165-170. (in Chinese)
- [21] 曾科伟,毛熊磊,金健灵,等. 基于大数据的三峡库区航标布设分析平台[J]. *中国水运*, 2021(10): 72-74.
ZENG K W, MAO X L, JIN J L, et al. Analysis platform of navigation beacon layout in Three Gorges reservoir area based on big data [J]. *China Water Transport*, 2021(10): 72-74. (in Chinese)
- [22] 刘兴龙,初秀民,马枫,等. 山区航道虚拟航标基站布设间距研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(3): 382-387.
LIU X L, CHU X M, MA F, et al. Base station spacing of virtual aids to navigation in mountain waterways [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(3): 382-387. (in Chinese)
- [23] 蒋友祥,文岑,张晓明. 永川长江大桥施工期通航安全评估[J]. *中国水运(下半月)*, 2013, 13(2): 28-30.
JIANG Y X, WEN C, ZHANG X M. Navigation safety assessment of Yongchuan Yangtze River Bridge during construction period [J]. *China Water Transport*, 2013, 13(2): 28-30. (in Chinese)
- [24] 李瀛,曾乐,李有为. 长江干线重点支流河口航标配布方案[J]. *水运工程*, 2019, (6): 126-131.
LI Y, ZENG L, LI Y W. Distribution schemes of navigation marks for key tributary estuaries of the Yangtze River trunk line [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2019, (6): 126-131. (in Chinese)