

海上大规模人命救助决策建模及仿真

赵梦鸽, 潘家财, 张银昊

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为解决海上大规模人命事故救助力量调度决策问题, 利用专业救助直升机、专业救助船舶和周边过往船舶三种救助力量, 以救援时间最短为目标, 充分利用直升机救援灵活快捷的特性, 以更高效地完成人员转移工作; 建立海上大规模人命事故救助力量优化调度模型, 并设计组合优化求解算法。以台湾海峡中部和南部发生险情为例, 对模型进行仿真验证。仿真结果表明: 针对不同的水域及事故情况, 该模型和算法在救援时间方面能够满足时间最短的目标; 在救助力量调度方案决策方面, 所求方案符合实际调度原则和救助顺序, 决策效果显著, 能够达到快速地调度救助力量以完成大规模人员救助的目的。该研究成果可应用于海上大规模人命救助资源调度和救助方案决策。

[关键词] 海上救援; 大规模人命救助; 优化调度; 仿真

[中图分类号] U 676.8

Decision Modeling and Simulation of Mass Rescue Operation at Sea

ZHAO Mengge, PAN Jiakai, ZHANG Yin hao

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To solve the decision-making problem of resources dispatching in Mass Rescue Operation (MRO) at sea, with professional rescue helicopters, rescue ships and ships in the vicinity taken into consideration, this paper established a rescue forces scheduling model of MRO, which aims to achieve the shortest rescue time and make full use of the helicopter's flexibility and swiftness to complete personnel transfer more efficiently. Finally, hypothetical accidents taking place in the central and southern areas of the Taiwan Strait are taken as examples to verify the model. The results show that the model and algorithm can meet the goal of the shortest rescue time for different water areas and accident situations. In terms of the decision-making of the salvage forces dispatching, the proposed scheme conforms to the actual dispatching principle and the order of rescue, and the effect of decision-making is remarkable, practical, scientific and reasonable, which can achieve the purpose of transferring mass people in distress in an economic and efficient way. The research results can be applied to rescue resources dispatching and scheme decision-making in MRO.

Keywords: maritime rescue; mass rescue operation; optimized scheduling; simulation

0 引言

近年来,“协和号”“世越号”“东方之星”等大规模客船海难事故给海上安全和救援工作带来了严峻考验。大规模事故概率低,但突发性强、危害大、遇险人员多^[1],而现有的针对大规模人命

[收稿日期] 2021-01-26

[作者简介] 赵梦鸽(1997—),女,硕士生,从事海上搜救辅助决策研究。通信作者:潘家财(1975—),男,教授,博士,从事航海技术和海上交通信息研究。E-mail:panjiakai@163.com

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

事故的救助经验匮乏,且常备的救助力量和资源无法满足突发的大规模救助需求。在应对突发事件时,应急资源调度效率是降低人员伤亡和减少损失的重要因素^[2],如何科学合理、及时有效地调度救助力量对大规模人命事故进行救援,提升应急资源调度效率成为一项重要研究工作。

国内外相关领域的学者对此进行了研究。Caunhye 等^[3]提出将优化建模技术应用到海上应急领域,有助于提升海上应急资源调度效率。Wei 等^[4]基于模糊网络分析对海上应急救援能力进行了评价;李洪成^[5]、卢艺源^[6]、朱雪斌等^[7]研究了多目标模糊规划、两阶段法、双层动态网络规划等方法,来解决海上应急物资的调度问题。Wagen^[8]、杨东霞等^[9]针对应急船舶调度问题,研究了应急船舶供应与需求的关系、单一船舶调度与多种船舶调度方法;张乾等^[10]提出一种基于 Voronoi 图^[11]的海上救援船舶调度模型来提升海上应急船舶调度效率。朱小林等^[12]将应急物资和应急船舶进行综合考虑,通过建立应急物资与船舶分配多目标模型来优化海上应急救援系统中应急资源位置-分配问题。此外,文献[13]对落水目标物的漂移预测做了研究,为海上搜救工作提供辅助决策。但是,目前国内外学者的研究大多集中在各类应急物资、专业救助船舶的调度及海上搜寻等方面,缺乏对大规模人命事故救助力量调度、专业救助直升机和周边过往船舶救助能力的研究。

在大规模人命救助中,为了缩短资源调度运筹时间、增强救助的针对性和发挥救助力量的有效性,制定科学合理调度方案尤为重要。本文在现有的专业救助力量的基础上,考虑周边过往船舶的及时性及救援直升机灵活快捷的特性,建立海上大规模人命事故救助力量优化调度模型,并设计求解算法,最后以台湾海峡为例,搭建大规模海上人命救助智能辅助决策仿真平台,实现模型的仿真实验验证。

1 问题描述

定义有 n 个出救点,记为 A_1, A_2, \dots, A_n , 一个事故点 B , B 发生事故时船上的人员数为 P , 事故发生时可用的救助力量共有 m 种, 设为 X_1, X_2, \dots, X_m , 每个出救点拥有至少一种救助力量, 要求给出救助力量的调度方案。在保证所调派的救助力量能够转移所有遇险人员的前提下, 所用的救援时间 T 最短; 同时, 考虑到直升机具有速度快、视野广、受风浪影响较小, 以及救援灵活等特点, 在条件允许时, 可以让其进行重复救援, 以更高效地完成人员转移工作。

定义 1: 可出救条件是指救助力量的作业能力满足当时海上的通航环境及事故现场的救援要求。

定义 2: 救援时间 T 指的是该救助力量从收到救援行动指令开始至到达事故点所耗费的时间, 包括在出救点的准备时间, 以及从出救点到事故点的航行时间。

救助力量调度示意图如图 1 所示。



图 1 救助力量调度示意图

Fig.1 Schematic diagram of rescue force scheduling

2 优化调度模型

2.1 模型假设

海上大规模事故的救助力量调度是一个复杂的组合调度过程, 为了便于研究, 本文建立模型将基于以下前提条件: 1) 事故点只有一个, 在救援时间内不引发其他事故; 2) 假定所调用的救助力量与事故现场的救援需求相匹配; 3) 仅为解决大规模人命事故中的人员转移问题, 不考虑人员救援转移之外的险情, 如灭火、防污染等。

2.2 建立调度模型

本文研究的目标是调度的多种救助力量所用救援时间最短, 记救助力量的最短救援时间为 $T(\varphi)$, 即调度方案中用时最多的救助力量的救援时间。由于各类型的救助力量 (X_1, X_2, \dots, X_m) 隶属于不同的部门, 分布于不同的地点 (A_1, A_2, \dots, A_m) , 故设一个可行的调度方案 φ 表示为:

$$\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\} = \left\{ \begin{matrix} z_{11} & z_{12}, \dots, z_{1j}, \dots, z_{1m} \\ z_{21} & z_{22}, \dots, z_{2j}, \dots, z_{2m} \\ \vdots & \vdots \\ z_{i1} & z_{i2}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{im} \\ \vdots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2}, \dots, z_{nj}, \dots, z_{nm} \end{matrix} \right\} \quad (1)$$

其中: 第 i 行表示出救点 A_i 参与救援的救助力量类型及数目; 第 j 列表示各个出救点参与救援的第 j 种救助力量的数目; z_{ij} 表示出救点 A_i 派遣的第 j 种救助力量 X_j 的数目; $\varphi_j = \{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{nj}\}$ 表示第 j 种救助力量的调度方案。

根据要求建立海上大规模人命事故救助力量调度模型如下。

目标函数: $\min T(\varphi)$ 。

$$\text{约束条件: } \begin{cases} \sum_i \sum_j z_{ij} \times k_{ij} \geq P, & i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; \\ z_{ij} \leq x_{ij}, & i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; \\ z_{ij} \geq 0, \text{且均为整数。} \end{cases}$$

$$t_{ij} = t_{0ij} + t_{Bij}; t_{Bij} = S_{iB} / V_{ij}。$$

其中: x_{ij} 表示第 i 个出救点中满足可出救条件的第 j 种救助力量的数目; k_{ij} 表示第 i 个出救点中第 j 种救助力量一次所能救助的人员数目; t_{ij} 表示第 i 个出救点中第 j 种救助力量的救援时间; t_{Bij} 表示第 i 个出救点中第 j 种救助力量在救助基地的准备时间; t_{0ij} 表示第 i 个出救点中第 j 种救助力量从出救点 A_i 到事故点 B 的航行时间; S_{iB} 表示第 i 个出救点至事故点 B 的距离; V_{ij} 表示第 i 个出救点中第 j 种救助力量的平均航行速度。

2.3 基于直升机重复救援的调度模型优化

为了充分利用直升机救援快速、灵活、受风浪影响较小等特性, 对上述的调度模型进行优化, 在条件允许时, 可以让其进行重复救援, 即直升机完成事故现场人员转移, 并返回基地完成人员转运和自身检修, 再次参与出救。

假设直升机一次救援时间为 t_f , 考虑直升机的返程时间及返回基地后的人员转运时间, 结合调研结果, 设定直升机重复一次救援的时间为 $3t_f$, 则直升机参与救援所用的总时间记为 $T(\varphi_f) = (3c_f + 1)t_f$, 其中 c_f 为整数, 表示直升机重复救援的次数, $c_f = 0, 1, \dots$ 。若 $T(\varphi_f) > \min T(\varphi)$, 不进行优化, 上述 2.2 节模型求解的方案即为最优方案; 否则, 对上述 2.2 模型进行优化, 优化后的模型为。

目标函数: $\min T(\varphi_{\text{优}})$

$$\text{约束条件: } \begin{cases} \sum_i \sum_j z_{ij} \times k_{ij} \times c_{ij} \geq P, & i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; \\ z_{ij} \leq x_{ij}, & i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; \\ z_{ij} \geq 0, \text{且均为整数。} \end{cases}$$

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{救助力量为其他类型;} \\ c_f + 1, & \text{救助力量类型为直升机。} \end{cases}$$

其中: c_{ij} 表示最优调度方案中第 i 个出救点派遣的第 j 种救助力量的救援次数。

3 模型的求解及算法步骤

3.1 $T(\varphi)$ 的求解方法

对于多种救助力量组合的最短救援时间问题, 要将方案中救助力量的最长救援时间求出, 即为 $T(\varphi)$ 的值, 海上大规模人命事故救助力量优化调度模型的求解流程如图 2 所示。

对所有符合条件的救助力量, 将数列 $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nm}$ 按其救援时间从小到大排序, 救援时间相同的按所能救援的人数降序排列, 从而得到一个新的数列 $x_{u_1v_1}, x_{u_1v_2}, \dots, x_{u_pv_q}, \dots, x_{u_nv_m}$ 。其中: u 和 v 分别表示排序过后的新数列中的出救点和资源类型; p 和 q 分别代表第几个出救点、第几种资源类型; $x_{u_pv_q}$ 表示第 p 个出救点第 q 种资源类型的调度数量。若存在一个 s 和 w (s 和 w 代表当选择进行到 $p=s, q=w$ 时便达到了救援要求), 使得

$$\sum_{p=1}^{s-1} \sum_{q=1}^{w-1} x_{u_pv_q} k_{u_pv_q} c_{u_pv_q} < P \leq \sum_{p=1}^s \sum_{q=1}^w x_{u_pv_q} k_{u_pv_q} c_{u_pv_q},$$

则 $\varphi' = \{(A_{u_1}, x_{u_1v_1}), \dots, (A_{u_n}, (P - \sum_{p=1}^s \sum_{q=1}^w x_{u_pv_q} k_{u_pv_q} c_{u_pv_q} / k_{u_pv_q}))\} = \{\varphi'_1, \varphi'_2, \dots, \varphi'_m\}$ 为各出救点派遣救助力量以最短救援时间为目标的最优调度方案。设最短救援时间为 $T(\varphi')$, 则 $T(\varphi') = \max\{T(\varphi'_1), T(\varphi'_2), \dots, T(\varphi'_m)\}$, 即方案中的救助力量到事故点的救援时间中的最大值为 $T(\varphi')$ 。

3.2 求解最优方案的算法步骤

Step 1: 出救点集合 $R = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 。

Step 2: 对集合 R 中出救点的每一种救助力量的可派遣量 x_{ij} 的救援时间 t_{ij} 从小到大排列, 救援时间相同的按可救助的人数 k_{ij} 降序排列, 得到序列 $x_{u_1v_1}, x_{u_1v_2}, \dots, x_{u_pv_q}, \dots, x_{u_nv_m}$, 设定 $t_{u_1v_1} \leq t_{u_1v_2} \leq \dots \leq t_{u_nv_m}$ 。

Step 3: 令 $i = 1; j = 1; c_{ij} = 1; c_f = 0$ 。

Step 4: 若 $\sum_{s=1}^i \sum_{w=1}^j x_{u_s v_w} k_{u_s v_w} c_{ij} \geq P$, 则停止, 令 $z_{ij} = x_{u_s v_w}$; 否则转 Step 5。

Step 5: $j = j + 1$, 转 Step 4; 当 $j = m$ 时, 转 Step 6。

Step 6: $i = i + 1$, 转 Step 4; 当 $i = n$ 时, 结束循环, 此时得到的救助力量调度方案为 $\varphi' = \{(A_{u_1}, z_{11}), (A_{u_1}, z_{12}), \dots, (A_{u_i}, z_{ij})\}$, 救援最短时间 $T(\varphi') = \max\{t_{ij}\}$ 。

Step 7: 判断方案中是否有直升机参与救援, 若有, 则转 Step 8; 否则, 算法结束。

Step 8: 计算, 判断, 若 $(3c_f + 1)t_f \leq T(\varphi)$, 则转 Step 9; 否则, 算法结束, 得到最终的救援方案, 直升机重复救援次数为 c_f 。

Step 9: $c_f = c_f + 1$, 转 Step 8。

4 仿真算例分析

台湾海峡是我国重要的南北海上运输通道, 也是重要的国际通航水道。海峡水域内船舶交通量大, 夏季台风侵袭次数多、冬季东北季风持续时间长, 海峡内海洋捕捞、养殖、旅游观光等海上活动不断增多, 因此, 台湾海峡一直是海上交通事故多发区, 是海上安全的重点监管水域。故本文以台湾

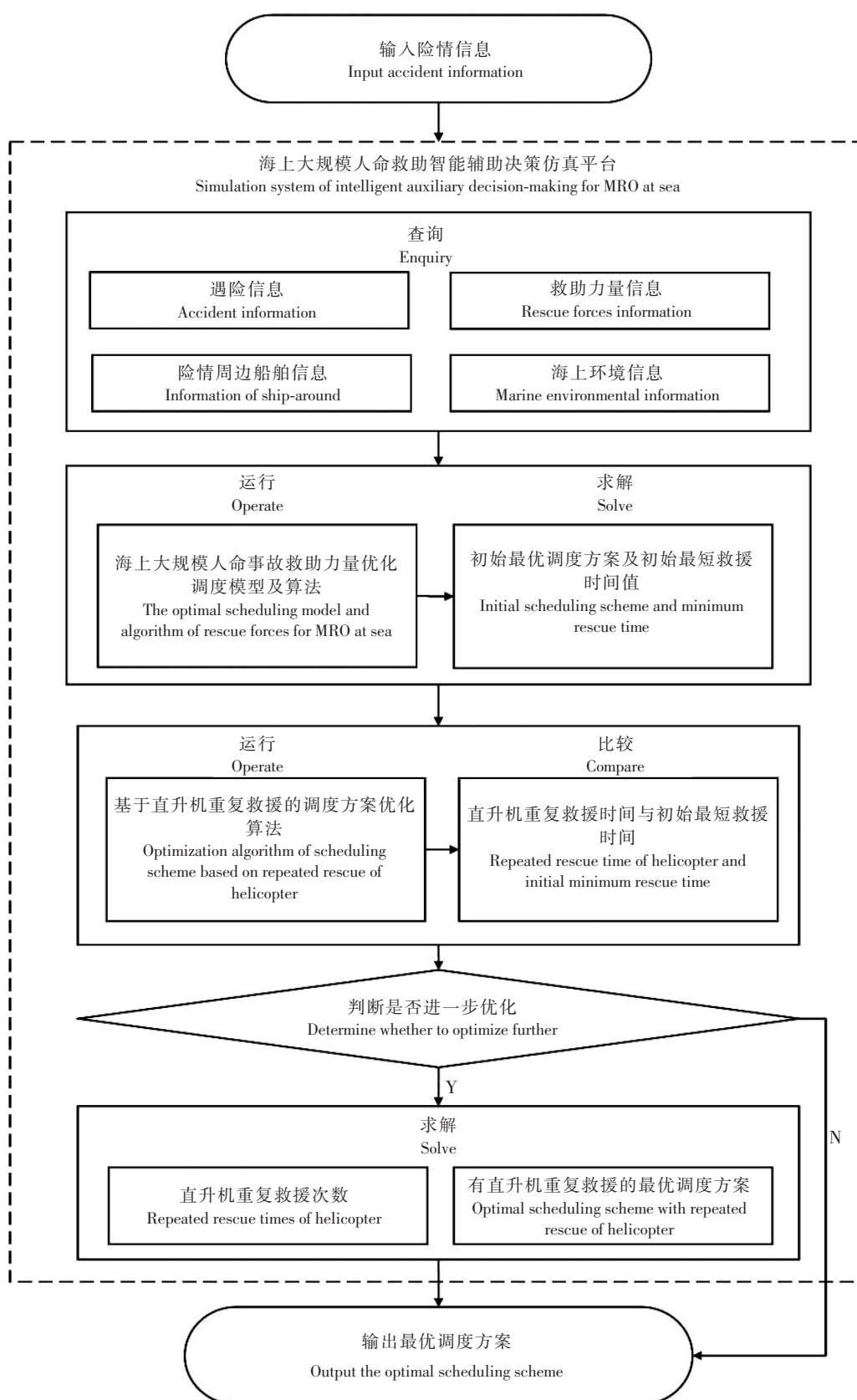


图2 海上大规模人命事故救助力量优化调度模型求解流程图

Fig.2 Flowchart for solving optimal dispatching model of rescue forces in MRO

海峡为例搭建大规模海上人命救助智能辅助决策仿真平台, 实现模型的仿真验证。

4.1 智能辅助决策仿真平台

大规模海上人命救助智能辅助决策仿真平台采用 C/S 架构, 基于实时的 AIS (automatic identification system) 船舶信息及海洋气象信息, 能够实现海洋水文气象数据可视化、救助力量的智能调配与最优推荐等服务, 该仿真平台的主要界面如图 3 所示。

4.2 仿真步骤及参数设置

以台湾海峡为研究对象, 分别选取海峡中部和南部两个海域作为险情发生地, 建立救助力量的调度模型, 并基于搭建的大规模海上人命救助智能辅助决策仿真平台中的专业资源调度和搜救方案模块实现仿真验证。

仿真步骤如下:

- 1) 选取事故发生点、设置险情概况 (包括风浪条件、遇险地点及遇险人数等);
- 2) 启动海上大规模人命救助智能辅助决策仿真平台, 查询救助力量信息 (包括救助力量类型、位置、救援时间等);
- 3) 获取最优的救助力量调度方案。

仿真参数设置如下:

- 1) 为了更真实准确地对模型进行验证, 仿真实验中除险情信息之外, 其余所有的救助力量参数信息、海洋气象信息, 以及 AIS 船舶信息均为实时实际数据;
- 2) 假设 9:00 启动应急预案, 并协调各类救助力量前往, 设定救援直升机和专业救助船舶在基地的准备时间均为 30 min, 周边船舶的应急反应时间为 10 min。

4.3 仿真案例

4.3.1 台湾海峡中部水域

- 1) 险情概况 东北风 7 级, 东北浪 6 级, 能见度良好, 周边船舶的调度范围为 10 n mile, 两岸直航某客船在距离平潭岛以东 33 n mile 的台湾海峡中部水域发生事故, 船上载客 420 人。

险情位置: $120^{\circ}20'19''E$, $25^{\circ}9'10''N$, 如图 4 所示。

- 2) 仿真平台参数设定 启动大规模海上人命救助智能辅助决策仿真平台, 在专业资源调度模块中设置险情参数信息, 参数设置界面如图 5 所示。

- 3) 运行仿真平台, 查询救助力量信息

根据“海上大规模人命救助智能辅助决策仿真平台”计算, 得到各类救助力量到事故点的距离及航行所需时间, 结合假设的专业救助力量在基地的准备时间和周边船舶的应急反应时间, 整理得到各类救助力量到事故点的距离及预计到达时间, 如表 1 所示。

- 4) 获取最优的救助力量调度决策方案

根据本文所建模型及求解算法, 最终通过平台仿真得到台湾海峡中部水域事故案例的救助力量调度最优方案, 最优方案为: 4 架专业救助直升机、3 艘专业救助船和 5 艘事故周边船舶。最优方案详细信息如表 2 所示, 救助结果如图 6 所示。

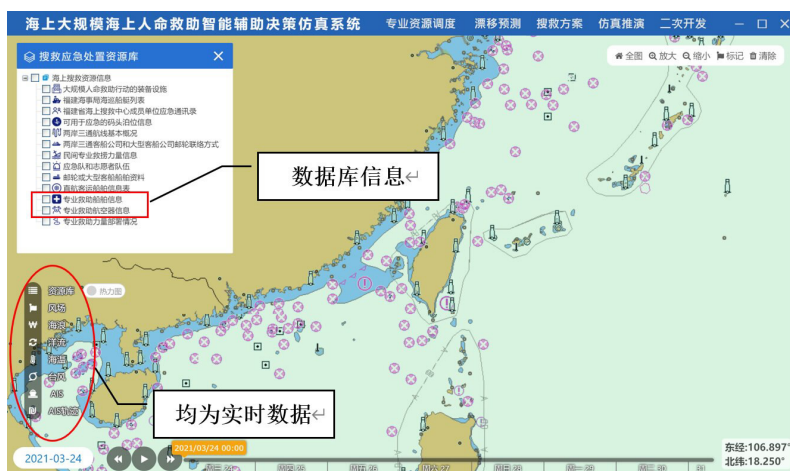


图 3 仿真平台主要界面

Fig.3 The main interface of simulation platform

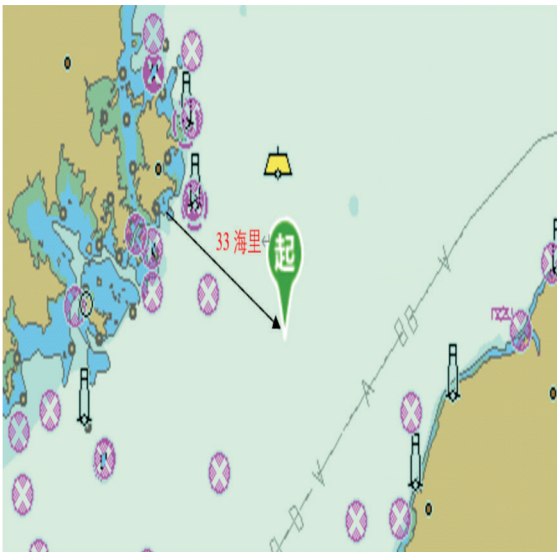


图 4 险情位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of danger position



图 5 参数设置界面

Fig.5 Parameter setting interface

表 1 各类型救助力量信息表

Tab. 1 Information table of various types of rescue forces

救助力量类型 Type of rescue forces	距离 Distance /n miles	预计到达时间 Estimated arrival time	救助力量类型 Type of rescue forces	距离 Distance /n miles	预计到达时间 Estimated arrival time
直升机 1,2 Helicopter 1 and helicopter 2	68.4 000	9:55	救助船 5 Rescue ship 5	135.939 5	16:20
直升机 3,4 Helicopter3 and helicopter4	144.800 0	10:20	YMK QUARTET(周边船舶) YMK QUARTET(ship-around)	3.055 6	9:25
救助船 1 Rescue ship 1	123.670 0	1:05	412451309(周边船舶) 412451309(ship-around)	5.392 8	9:35
救助船 2 Rescue ship 2	72.590 0	13:10	美森洛妮(周边船舶) Mason Loney(ship-around)	10.452 9	9:45
救助船 3 Rescue ship 3	135.5 100	14:00	412450617(周边船舶) 412450617(ship-around)	8.793 7	9:50
救助船 4 Rescue ship 4	130.284 7	16:00	412447433(周边船舶) 412447433(ship-sround)	9.698 9	9:55

表 2 台湾海峡中部水域救助力量调度最优方案

Tab.2 Optimal scheme of rescue force dispatching in the central waters of Taiwan Strait

救助力量类型 Type of rescue forces	救援时间 Rescue time/h	重复救援次数 Repeated rescue times	救助力量类型 Type of rescue forces	救援时间 Rescue time/h	重复救援次数 Repeated rescue times
YMK QUARTET(周边) YMK QUARTET(ship-around)	0.352 8	0	直升机 2 Helicopter 2	0.884 4 + 2.653 2	1
412451309(周边) 412451309(ship-around)	0.580 8	0	直升机 3 Helicopter 3	1.312 9	0
美森洛妮(周边) Mason Loney(ship-around)	0.744 2	0	直升机 4 Helicopter 4	1.313 9	0
412450617(周边) 412450617(ship-around)	0.828 8	0	救助船 1 Rescue ship 1	4.039 9	0
412447433(周边) 412447433(ship-around)	0.918 4	0	救助船 2 Rescue ship 2	4.150 9	0
直升机 1 Helicopter 1	0.884 2 + 2.652 6	1	救助船 3 Rescue ship 3	5.024 2	0

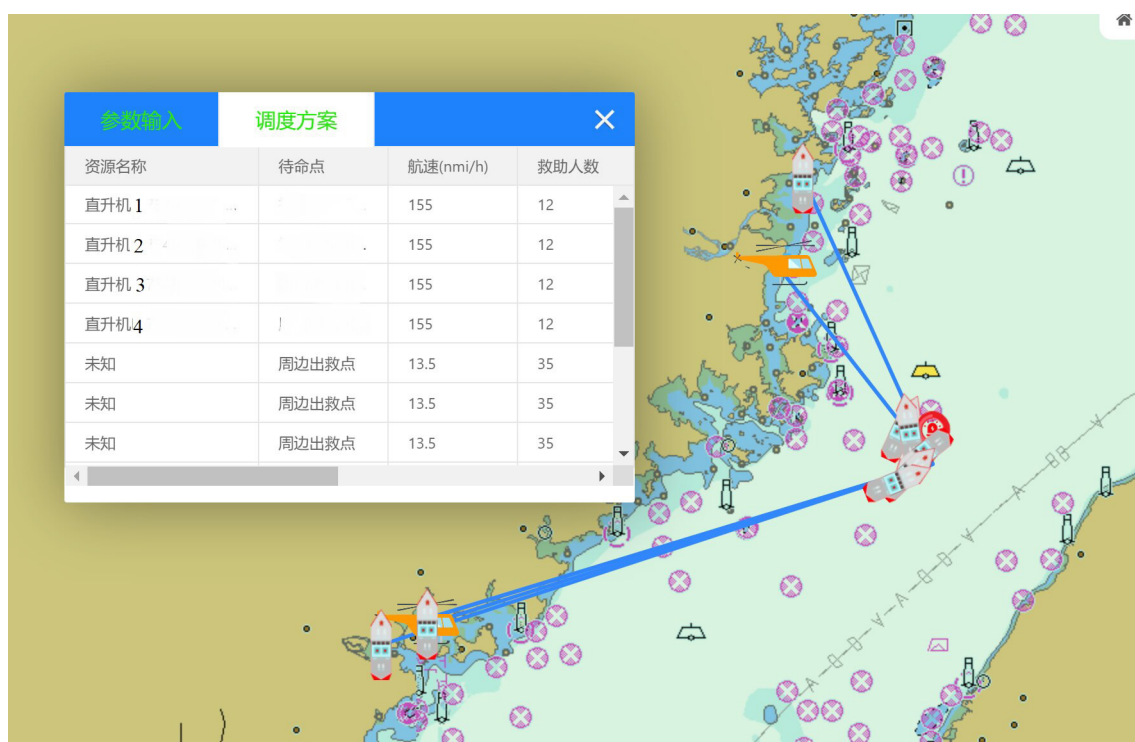


图 6 最优调度方案救助结果可视化界面

Fig.6 The visual interface for optimal scheduling scheme results

4.3.2 台湾海峡南部水域

1) 险情概况 东北风 7 级，东北浪 6 级，能见度良好，周边船舶的调度范围为 10 n mile，两岸直航某客船在厦门岛以东 67 n mile 的台湾海峡南部水域发生事故，船上载客 400 人。

险情位置：119°14'24"E，23°53'9"N，如图 7 所示。

2) 救助力量调度仿真实验结果 根据本文所建模型及求解算法，最终系统给出的台湾海峡南部水域事故案例的救助力量最优调度方案为：2 艘周边过往船舶、4 架专业救助直升机和 4 艘专业救助船舶。仿真结果平台展示如图 8 所示，调度方案详细信息如表 3 所示。



图 7 险情位置示意图

Fig.7 Diagram of danger position

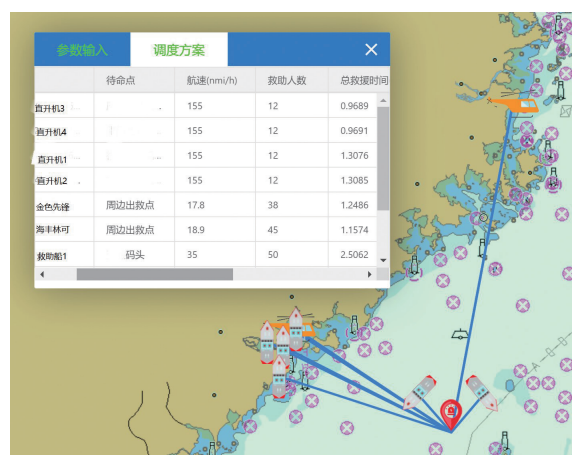


图 8 仿真结果展示图

Fig.8 Model simulation results

表3 台湾海峡南部水域救助力量调度最优方案

Tab.3 Optimal scheme of rescue force dispatching in the southern waters of Taiwan Strait

救助力量类型 Type of rescue forces	救援时间 Rescue time/h	重复救援次数 Repeated rescue times	救助力量类型 Type of rescue forces	救援时间 Rescue time/h	重复救援次数 Repeated rescue times
直升机 3 Helicopter 3	0.968 9 + 2.906 7	1	直升机 2 Helicopter 2	1.308 5	0
直升机 4 Helicopter 4	0.969 1 + 2.907 3	1	救助船 1 Rescue ship 1	2.506 2	0
海丰林可(周边) Haifeng Link (ship-around)	1.157 4	0	救助船 3 Rescue ship 3	3.075 9	0
金色先锋(周边) Golden pioneer (ship-around)	1.248 6	0	救助船 4 Rescue ship 4	3.910 2	0
直升机 1 Helicopter 1	1.307 6	0	救助船 5 Rescue ship 5	4.051 1	0

4.4 仿真结果分析

本研究以海上大规模人命事故救援中人员转移时间最短为目标,并充分考虑直升机救援特点,提出了海上大规模人命事故救助力量优化调度模型,并以发生在台湾海峡中部和南部的险情为例,对模型进行了仿真验证。

下面主要从救援时间、救助力量调度决策方案,以及直升机救援特性三个方面来分析仿真结果。

1) 从救援时间来分析。台湾海峡中部和南部两个水域发生事故时,该模型求解给出的救助力量调度方案所用的最短时间分别为 5.024 2 h 和 4.051 1 h。通过与各类型救助力量到事故点的距离及到达事故现场的时间等信息进行对比,该模型求解给出的救助力量调度方案均能在满足所有遇险人员救援需求的前提下,保证了救援时间最短。

2) 从救助力量的调度决策方案来分析。从两个案例的仿真结果可以看出,对于大规模的人命事故,最优决策方案并非是调度距离事故点最近的全部救助力量参与救援,而是遵循一定的救助原则来进行调度,这样可以有效避免救助资源浪费,从而实现救助力量的有效出动。此外,由于专业救助力量从待命点出发到事故点,往往要花费不少时间,事故周边的过往船舶能够在第一时间赶至事故现场,快速投入救助,因此对于海上事故中的紧迫情况,过往船舶发挥着重要作用,这符合海上人命救助的就近、就快原则。

3) 从直升机的救援特性来分析。两个仿真案例结果显示,4 架救助直升机均全部出动参与救援。这是由于救助直升机速度快且受海况影响较小,直升机重复救援可以在尽可能短的时间内转移更多的遇险人员,从而更高效地完成人员转移工作。但是,从以上两个案例也可以看出,在遇险人数较多的时候,专业救助直升机由于载人数量有限,不能及时地转移大量遇险人员。同样作为海上搜救的核心和中坚力量的专业救助船舶,由于一次救助人数较多,因此在大规模人命事故救援中也发挥着重要作用。

5 结语

海上大规模人命事故救助力量优化调度模型针对专业救助直升机、专业救助船舶和周边过往船舶三种类型的海上救助力量,考虑它们的最大载人数以及救援时间,并充分利用直升机救援快捷灵活的特点,从实际出发,解决了海上大规模人命救助决策问题。仿真结果分析表明:所建立的海上大规模人命事故救助力量优化调度模型实现了救援转移时间最短的目的,利用直升机重复救援使得人员转移工作完成的更高效;另一方面所设计的算法求得的调度决策方案也符合海上救助力量调度原则和救助顺序。经过咨询海上搜救领域的专家,该仿真结果与专家意见一致,证明了所建模型和算法的科学

性、合理性和有效性。这项研究对海上应急部门制定救助力量调度计划、缩短调度运筹时间具有重要意义。

在救助力量的调度决策过程中,如何综合考虑时间、经济及救援效率等,建立多目标函数,有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 李世锋. 从客船视角谈大规模海难救助的几点思考 [J]. 航海, 2016(6): 53-56.
- [2] ANAYA-ARENAS A M, RENAUD J, RUIZ A. Relief distribution networks: a systematic review [J]. Annals of Operations Research, 2014, 223(1): 53-79.
- [3] CAUNHYE A M, NIE X, POKHAREL S. Optimization models in emergency logistics: a literature review [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2012, 46(1): 4-13.
- [4] WEI-HAO MA, TIAN-YU MAO, TIAN-FU, et al. Maritime emergency rescue capability evaluation based on fuzzy network analysis [C] //Advanced Science and Industry Research Center. Proceedings of 2017 2nd International Conference on Advances in Management Engineering and Information Technology (AMEIT 2017). [S. l.]:Advanced Science and Industry Research Center, 2017: 229-235.
- [5] 李洪成, 吴晓平, 付钰, 等. 海上应急保障资源调度的多目标模糊规划模型 [J]. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 172-176.
- [6] 卢艺源, 方晨, 姜文杰. 基于资源救助点变化的海上应急资源调度研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2016, 16(5): 84-86.
- [7] 朱雪斌, 吕靖. 基于双阶段的海上应急物资协同调度模型 [J]. 水运管理, 2020, 42(5): 38-42.
- [8] WAGNER M R, RADOVILSKY Z. Optimizing boatre-sources at the US coast guard: deterministic and stochastic models [J]. INFORMS, 2012, 60(5): 1035-1049.
- [9] 杨东霞. 海上突发事件应急船舶优选与调度研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- [10] 张乾. 基于空间关系的海上应急救助力量调度模型 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- [11] 戴鹏, 吴建华, 胡烈云. 一种面向多尺度面状居民地匹配的 Voronoi 图自适应构建算法 [J/OL]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2022, 47(2): 304-312. DOI:10.13203/j.whugis20200324.
- [12] 朱小林, 陈昌定. 海上应急资源调度多目标模型优化 [J]. 中国航海, 2019, 42(1): 56-62.
- [13] 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: 155835-155850. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2949366.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)