

文章编号: 1674-8190(2024)03-191-12

# 民用直升机海上搜救遇险人员处置决策支持系统

陈子坤<sup>1</sup>, 田永亮<sup>2</sup>

(1. 中国直升机设计研究所 民机科研部, 天津 300300)  
(2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 直升机海上搜救是航空应急救援体系中重要的组成部分, 但搜救部门在执行相关任务时通常只能依靠已有经验对险情进行分析并制定处置方案, 缺乏理论指导及工具支撑。针对海上应急响应过程中从接收到遇险信息到开始执行海上搜救任务之前的阶段, 提出一种海上搜救处置决策支持技术框架, 在此基础上, 研发民用直升机海上搜救遇险人员处置决策支持系统, 并通过海上搜救典型任务进行验证。结果表明: 该系统能够通过快速制定处置方案并输出评估结果, 为实际执行海上搜救任务的机组人员提供处置决策支持建议, 间接提高海上搜救效率。

**关键词:** 直升机; 海上搜救; 处置流程; 处置方案; 决策支持系统

**中图分类号:** V221; V37

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.20

## Decision-making support system of civil helicopter maritime search and rescue for people in distress

CHEN Zikun<sup>1</sup>, TIAN Yongliang<sup>2</sup>

(1. Civil Helicopter Research Department, China Helicopter Research and Development Institute, Tianjin 300300, China)

(2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Helicopter maritime search and rescue (MSAR) is one of the important components in aviation emergency rescue system. However, the MSAR unit usually analyzes distress information and makes response plans according to previous experience, which lacks the theoretical guidance and software support. According to the process from receiving the distress message to performing the MSAR mission, a kind of decision-making support technology architecture for helicopter MSAR mission is put forward. The decision-making support system of civil MSAR for people in distress is designed and developed, and verified with MSAR typical mission. The results show that the system can quickly formulate the response plan and output the evaluation results, which can provide decision support suggestions for the helicopter crew of the actual MSAR mission, and then improve the efficiency indirectly.

**Key words:** helicopter; maritime search and rescue; response flow; response plan; decision-making support system

收稿日期: 2023-11-16; 修回日期: 2024-04-02

通信作者: 陈子坤(1992-), 男, 博士, 工程师。E-mail: chenzk008@avic.com

引用格式: 陈子坤, 田永亮. 民用直升机海上搜救遇险人员处置决策支持系统[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 191-202.

CHEN Zikun, TIAN Yongliang. Decision-making support system of civil helicopter maritime search and rescue for people in distress[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 191-202. (in Chinese)

## 0 引言

自 1999 年以来,大舜轮<sup>[1]</sup>、桑吉轮<sup>[2]</sup>等事件,使得我国海域范围内的海上搜救问题受到越来越高的关注。2008 年汶川地震后,27 名院士联名发表《关于建立国家航空应急救援体系的建议》中提到:我国是世界上自然灾害最严重的国家之一,但是,目前我国航空应急救援能力与实际需求差距较大,救援直升机的作用尚未完全发挥<sup>[3]</sup>。直升机以其独有的快速响应能力、低空低速搜寻能力、悬停救助能力在海上搜救任务中起到至关重要的作用<sup>[4-5]</sup>。相较于其他搜救方式,直升机可以在更短的时间内使遇险人员脱离危险,也是全世界各个海上搜救机构所使用的主要装备。

随着计算机技术的发展,海上搜救决策支持系统得到了快速发展。海上搜救决策支持系统能够减轻搜救决策人员的标绘与计算负担,更好地利用搜救目标基本情况、搜救力量部署情况和海上环境数据进行处置决策,为实际海上搜救任务提供具有参考意义的数据,以提高搜救成功率。目前,国外已有很多成熟的系统可对海上搜救任务进行辅助决策。

SARP 系统是美国海岸警卫队在 20 世纪 70 年代设计并开发完成的,是第一个在计算机上实现的海上搜救决策支持系统<sup>[6]</sup>;CANSARP 系统是加拿大海岸警卫队与 Neosoft Technologies 公司于 20 世纪 80 年代联合研发的,是 SARP 系统的延续<sup>[7]</sup>;SARMAP 系统是美国 ASA 公司于 20 世纪 90 年代初开发的,该系统以美国国家海上搜救手册为依据,整合了环境数据库、漂移模型、GIS 系统等技术<sup>[8]</sup>;SARIS 系统是英国 BMT 公司于 1998 年初开发的<sup>[9]</sup>;SARPlan 系统是加拿大国防研究中心于 2001 年开发的<sup>[10-11]</sup>。

上述海上搜救决策支持系统是最优搜寻理论<sup>[12-14]</sup>和经典搜寻规划方法<sup>[15]</sup>对海上搜救问题的应用成果。这种方式使得决策人员摆脱了计算与标绘的负担,从而有更多的时间用于分析险情并做出正确的决策。但是,由于经典搜寻规划方法的固有缺陷,使其面对复杂搜救情况时,很难满足需求。基于蒙特卡洛(Monte Carlo)的计算机仿真方法<sup>[16-17]</sup>,原本已因计算量大而被手动方法弃用,随着计算机技术的不断迭代更新及算力大幅提升,使其用于处理复杂搜救情况成为可能。该方

法以经典概率论、数理统计、随机过程等理论为基础,能更好地利用海洋各种信息,并考虑搜救过程中的多种不确定性因素。

1972 年,CASP 系统(Daniel H. Wagner Associates 公司与美国海岸警卫队共同开发),是公认第一个真正意义上采用 Monte Carlo 仿真方法研发的海上搜救决策支持系统<sup>[18]</sup>;2007 年,美国海岸警卫队与 Northrop Grumman、Metron 和 ASA 等公司共同开发完成 SAROPS 系统,并取代原来的 CASP 系统<sup>[19]</sup>。

21 世纪以来,面对我国海上搜救需求的日益增长,国内研究人员也陆续开展了海上搜救决策支持方法的研究<sup>[20]</sup>,以提高搜救效率,同时对海上搜救决策支持系统进行了一些探索。2011 年,肖方兵<sup>[21]</sup>将海上搜寻区域的最优确定与海上搜寻资源的最优分配作为海上搜救决策支持系统中所需的两个关键技术,基于 Monte Carlo 方法开展了深入研究,并提出了相应的模型和算法,以此开发了海上搜救决策支持系统;2015 年,李广敏<sup>[22]</sup>分析了影响海上物体漂移的主要因素,并介绍了海上搜救辅助决策系统的系统架构与功能以及在南海示范区的应用,其辅助决策的重点主要在漂移预测方面。此外,在国家层面,国家海洋局牵头打造的国家海上搜救环境保障服务平台<sup>[23]</sup>,该平台可以根据失事位置数据,采用漂移预测模型,确定可能区域,并将搜寻区域进行网格划分,计算每个网格的包含概率,然后对搜救力量进行任务分配。

目前国内外已有的海上搜救决策支持系统主要关注于实时指挥方面,即在险情发生后如何整合当前已有资源并生成推荐的任务区域,从而为决策人员提供支持。但是,对于影响任务效能的处置方案问题,鲜有成熟的海上搜救决策支持系统。本文以直升机海上搜救处置方案为核心,提出一套完整的处置决策支持技术框架,在整合任务区域规划方法和处置方案评估方法的基础上,面向直升机海上搜救遇险人员研发一套经过应用验证的处置决策支持系统,并通过海上搜救典型任务进行验证。

## 1 处置决策支持系统总体框架

在讨论决策支持时,首先要搞清楚决策过程

才能提供更为高效且满足需求的决策支持工具。决策人员在接收到险情信息后,需要对众多结构化或半结构化的信息进行筛选和整理,并对关键信息作进一步分析,才能提供更为准确且成功率较高的处置方案<sup>[24]</sup>。但是,当前处置方案主要根据已有经验制定,缺乏理论依据和方法基础,导致决策人员在面临新问题时无法快速做出决策或所提供的处置方案效果较差。此外,处置方案制定后无法对其进行客观地判断,需要借助仿真评估从而有效模拟实际海上搜救过程,其中包括大量不确定性因素对任务效果带来的影响。

### 1.1 直升机海上搜救实际处置流程

当执行海上搜救任务的救助飞行队接到海上

搜救中心分配的海上搜救任务时,首先要尽可能地获取搜救目标的基本信息、直升机的部署情况以及海洋环境的当前状态和预报数据,进而在计算搜救目标漂移预测数据的基础上选择最适合执行任务的直升机,并制定相应的处置方案。然后,机组人员根据处置方案所包含的具体信息执行海上搜救任务,但在执行任务过程中,通常会受到多种不确定性因素的影响<sup>[25]</sup>,直升机实际飞行轨迹以及搜救状态会与处置方案存在一定的偏差,因此需要记录海上搜救过程的关键信息,用于航后讲评以及搜救经验的积累,以便在应对新发生的海上突发事件时能够快速制定有效的处置方案,提高海上搜救效能。详细的直升机海上搜救处置决策过程如图 1 所示。

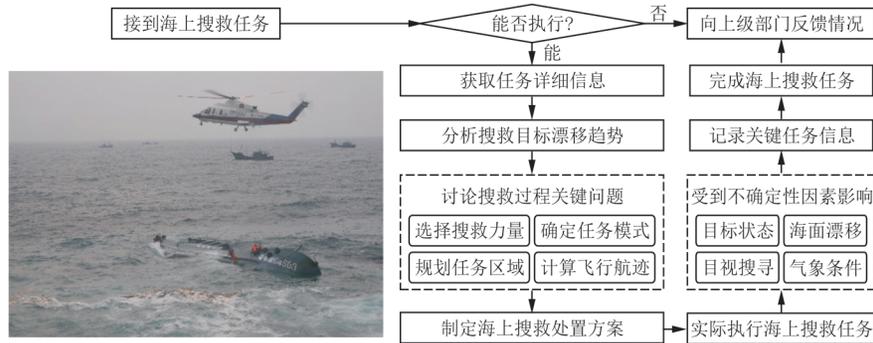


图 1 直升机海上搜救实际处置流程

Fig. 1 The process of decision-making support for helicopter maritime search and rescue

#### 1) 处置方案制定过程

救助飞行队在接到上级指挥部门下达的海上搜救任务时,首先要根据险情内容初步判断本飞行队是否能够执行当前任务,主要判断依据在于两个方面:一方面是险情位置是否在任务半径范围内,另一方面是险情等级与飞行队的搜救能力是否相匹配。当确定由该飞行队执行时,决策人员需要充分获取任务状态信息,包括搜救目标的遇险时间、遇险位置、遇险人数以及当前状态等,此外还要了解当前直升机的救助能力、部署地点以及海上环境因素。在此基础上,根据搜救目标的遇险位置、遇险时间,结合海面风场和流场的预报趋势,对漂移轨迹进行预测,并根据直升机到达现场的时间预判搜救目标可能出现的区域。进一步地,决策人员与机组人员共同商讨海上搜救处置方案的细节问题,包括应当选择哪架或哪几架直升机执行任务,规划具体的任务区域进行海上

搜寻,确定海上搜救任务模式并计算直升机的飞行轨迹,从而制定出海上搜救处置方案。目前直升机主要采用目视搜寻的任务模式,按照《国际航空和海上搜寻救助手册》中的相关规定<sup>[26]</sup>可以按照基准类型将其分成 3 类,即基点搜寻模式、基线搜寻模式和基面搜寻模式。

通过上述分析可知,如何确定任务区域是在处置决策过程中最受关注的问题,因其直接决定了海上搜寻的任务模式以及此次海上搜救任务的成败,而且具体的搜寻路线需根据最终任务区域以及搜寻模式计算得到。与此同时,根据直升机海上搜救处置方案的公式化定义以及在地理信息系统(GIS)中的表现形式,任务区域是其重要组成部分。因此,任务区域规划是在处置方案制定过程中的关键核心问题,在此基础上结合搜寻模式并制定出航路线和返航路线,才能形成完整的海上搜救处置方案。

## 2) 处置方案执行过程

机组人员拿到完整的海上搜救处置方案后,会按照其中规定的航迹飞行,但在实际执行任务时,并不一定能够成功搜寻到目标并对其开展救助工作。这主要是因为海上搜救任务过程中直升机和搜救目标受到很多不可控因素的影响,使得直升机未能搜寻到目标或者搜寻到时遇险人员已经失去生命体征,导致任务失败。

直升机在起飞之前通常需要进行飞行前准备,包括加注航油、加载任务设备等工作,因此从接到报警到直升机起飞所需要的时间通常是不确定的。直升机在飞行过程中会受到风速、风向、气温、降水等气象条件的影响,使其飞行速度在额定范围内波动,影响整体的任务时间。而且,通常海上突发事件发生在气象条件相对恶劣的环境下,例如阴雨天气、台风、风浪较高的情况,能见度不足将导致直升机发现搜救目标的概率降低,同时这种情况下也会使直升机的救助过程受阻,比如剩余功率不足、悬停救助更加危险、机组人员的工作压力增大等。上述问题将导致海上搜救任务的搜寻时间变长、油耗率增大、救助时间减少,会增加搜救目标的遇险时间,从而减小搜救任务安全性。

这些问题将导致同一海上搜救处置方案在相同情况下多次执行的效果存在变化,且在一定范围内波动,而对于实际海上搜救任务的执行结果而言,只是多次执行效果的一种情况。考虑到在处置方案制定阶段虽然最后只得到了唯一的处置方案,但在该过程中决策人员对很多情况都进行了充分的评估分析,可以看作是决策人员根据当前任务态势制定了多个备选的处置方案,并通过讨论从其中选出大家一致认为最适合此次海上搜救任务的处置方案,以此作为接下来直升机海上搜救任务的执行依据,即对多个备选处置方案的评估优选过程。

在完成海上搜救处置方案制定工作后,为了更客观地展现其预期效果,需要在实际执行任务之前预估处置方案执行效果,但在当前救助工作中难以开展,可以借助仿真推演的手段对处置方案进行分析。然而,受不确定性因素(即不可控因素)的影响,单次仿真结果不能代表处置方案执行效果的全貌, Monte Carlo 大样本仿真<sup>[27]</sup>可以弥补

此类短板。因此,海上搜救处置方案综合评估也是该阶段处置决策支持方法的核心关键问题,以此给出处置方案的仿真评估结果以及预期任务数据,如任务时间、成功概率等,为机组人员提供更多的参考信息,有助于指导实际海上搜救任务的顺利开展。

## 1.2 处置决策支持技术框架

直升机海上搜救处置决策过程分为处置方案制定阶段和评估阶段,海上搜救任务区域规划问题和处置方案仿真评估问题是两个阶段的理论依据,已在前期工作中得到有效的解决<sup>[28-29]</sup>。

在外置方案制定中,实际处置决策过程中一般由决策人员根据搜救目标的遇险位置、遇险时间、平均风场和平均流场等因素,通过经典搜寻规划方法进行确定。当存在成熟的海上漂移预测系统时,通常根据搜救目标的漂移轨迹预测结果分析其可能存在的位置,进而结合直升机的任务性能(飞行速度、续航时间、扫视宽度等)确定具体海上搜救任务区域。这种确定任务区域的方式虽然最初是由最优搜寻理论发展来的,但是《国际航空和海上搜寻救助手册》中为了使决策人员更为方便地应用于海上搜救任务的处置决策,从而对理论进行了大量简化工作<sup>[26]</sup>,使得规划过程仍然过多地依赖于决策人员的已有经验,无法避免主观性因素对规划结果所带来的影响。

在评估阶段中,一般由决策人员与机组人员共同商讨决定,通过分析直升机的任务能力(包括燃油量、任务时间、最大载重量、剩余功率等)和环境因素(预报的气象情况、海浪情况和任务过程中可能存在的突发情况等),对备选处置方案进行综合评估,进而选择出既可以进行实际操作又能在很大程度上保证任务成功概率的最优处置方案。这种评估处置方案的方式虽然是由专业救援人员通过群决策来判断的,但是其同样无法避免主观性因素的影响,而且缺乏对实际执行任务过程中不确定性因素等客观性因素的考虑。

根据海上搜救处置决策过程以及其中存在的核心问题,本文提出基于处置方案仿真推演的处置决策支持总体技术框架,其包含的具体内容以及相互关系如图 2 所示。该架构围绕海上搜救处置方案的制定与评估问题,从想定编辑、方案制

定、仿真推演、综合评估4个步骤,研究从接到险情报警到执行搜救任务过程中处置决策支持的具体内容和形式。

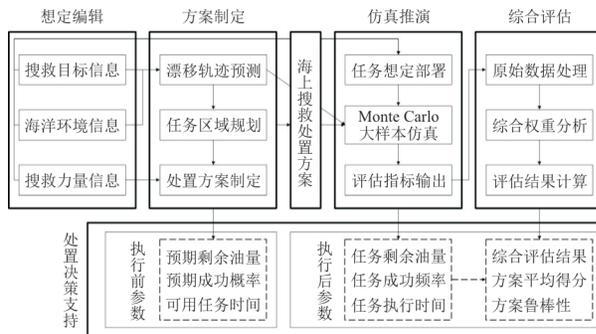


图2 基于处置方案仿真推演的处置决策支持系统技术框架  
Fig. 2 The framework of decision-making support system based on response plan simulation

海上搜救处置方案在总体技术框架中处于核心的位置,起到承上启下的作用,以此为标志可将处置决策支持问题分为两个阶段进行解决,即处置方案制定阶段和处置方案仿真评估阶段,并且这两个阶段输出的关键数据可以为海上搜救任务的处置决策提供有效的理论支持。框架中各个部分的主要内容和相互关系如下:

#### 1) 想定编辑部分

关注在接到海上搜救任务后需要重点获取的信息,包括搜救目标信息、海洋环境信息和搜救力量信息,这些信息能够帮助机组人员尽快了解当前状态,为后续的处置决策工作提供保障。

#### 2) 方案制定部分

根据海洋环境信息对搜救目标的漂移轨迹进行预测,在预测结果的基础上结合搜救力量的搜救能力规划任务区域,进而根据处置方案的基本定义制定直升机海上搜救处置方案。

#### 3) 仿真推演部分

根据已有的任务想定在仿真环境中部署相关的搜救目标和搜救力量,然后根据处置方案内容和漂移预测数据进行Monte Carlo大样本仿真,并按照所建立的处置方案评估指标体系,输出各个评估指标的具体仿真结果。

#### 4) 综合评估部分

首先将大样本仿真得到的原始数据按照指标的评价标准进行标准化处理,然后通过分析指标体系的主观权重和客观权重从而获得综合权重,最后根据指标值和权重计算处置方案的评估

结果。

#### 5) 处置决策支持部分

通过汇总海上搜救处置方案的执行前参数(包括预期剩余油量、预期成功概率、可用任务时间)和执行后参数(任务剩余油量、任务成功频率、任务执行时间、综合评估结果、方案平均得分及鲁棒性),形成针对该搜救目标的处置方案建议报告。

任务想定是海上搜救处置决策支持框架的前提条件,规定了海上突发事件处置的当前态势和险情等级,后续的处置决策过程均是在此基础上开展的。处置方案制定过程主要包括3个步骤:首先根据搜救目标信息和海洋环境信息进行漂移轨迹预测,然后根据预测结果规划最优的海上搜救任务区域,最后根据公式化定义中的要求制定最终的处置方案。相比之下,处置方案评估过程面临两个关键问题,一方面,在实际执行海上搜救任务之前并不能对处置方案的执行效果进行有效评估;另一方面,由于在实际任务过程中存在很多不确定性因素的影响,其执行效果的综合情况不能由单次任务的结果表示。这两个问题在实际的决策过程中并不能得到有效解决,因此在评估过程中采用Monte Carlo方法对处置方案进行大样本仿真。由此确定了该过程的主要思路为,通过在仿真环境中部署任务想定并多次重复地推演处置方案,获得处置方案评估指标的原始数据,进而根据仿真评估模型计算指标得分、综合权重和评估结果。

## 2 直升机海上搜救处置决策支持系统

### 2.1 功能架构

根据图2的技术框架,设计处置决策支持系统的功能架构,3层结构功能架构如图3所示,包括应用层、逻辑层和数据层。应用层主要完成人机交互工作,是决策人员输入基本信息、加入处置意愿并获取评估结果的部分;逻辑层主要完成核心计算工作,是技术架构根据决策人员的输入进行计算并输出相应结果数据的部分;数据层为应用层和逻辑层提供所需的数据支持,是管理并存储处置决策支持技术所需和产出数据的部分。

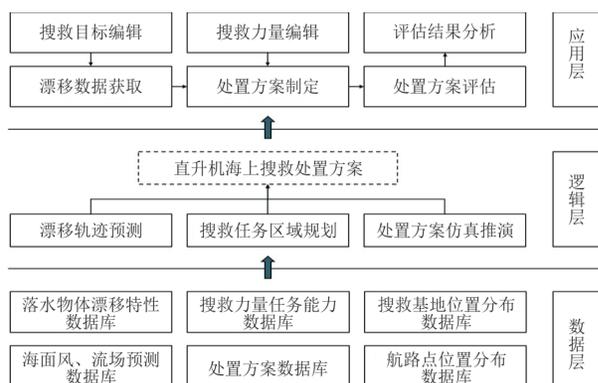


图3 海上搜救处置决策支持系统功能架构  
Fig. 3 The functional architecture of decision-making support system for maritime search and rescue

## 2.2 逻辑架构

根据功能架构设计海上搜救处置决策支持系统的逻辑架构,如图4所示,划分为4个子系统,即任务想定编辑子系统、处置方案制定子系统、处置方案仿真推演子系统和处置方案综合评估子系统。前两个子系统主要与内置数据库以及漂移预测服务器产生交互,进而输出任务想定数据;后两个子系统主要是根据任务想定数据,并通过仿真推演模型,对处置方案进行大样本仿真评估,从而提供处置决策支持信息,并将各次推演的结果存入处置方案数据库。

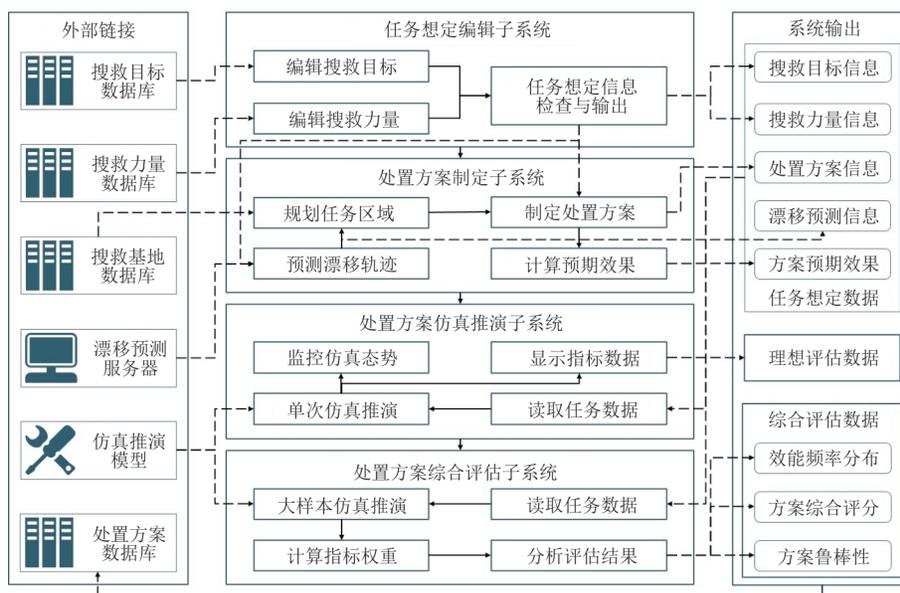


图4 海上搜救处置决策支持系统逻辑架构  
Fig. 4 The logical architecture of decision-making support system for maritime search and rescue

## 2.3 处置决策支持系统组成

直升机海上搜救处置决策支持系统主要由四个子系统组成,这是决策人员与系统产生交互的主要接口,因此本文重点研究子系统的逻辑架构并设计相应的用户界面(User Interface,简称UI)。系统的定位是:针对考虑漂移情况的海上搜救任务,提供辅助处置方案制定的工具(主要由任务想定编辑子系统和处置方案制定子系统实现),并通过仿真推演预估处置方案的执行效果(主要由处置方案仿真推演子系统和处置方案综合评估子系统实现)。需要说明的是,仿真推演需要通过处置方案仿真推演模型框架获取相应的评估数据,该

模型框架是系统的核心内部逻辑,不与决策人员直接产生交互。模型框架与子系统之间的关系如图5所示。

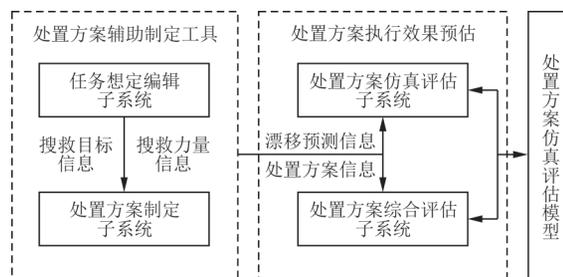


图5 直升机海上搜救处置决策支持系统组成  
Fig. 5 The composition of decision-making support system for helicopter maritime search and rescue

1) 任务想定编辑子系统

任务想定编辑子系统的主要功能是编辑仿真推演中所涉及智能体的基本信息,便于决策人员充分了解当前搜救目标以及可用搜救力量的基本情况,进而为制定合理最优的处置方案提供保障。该子系统主要包括 3 个模块,即搜救目标编辑模块、搜救力量编辑模块和信息检查与数据输出模块,详细的逻辑架构如图 6 所示。其中,搜救目标编辑模块和搜救力量编辑模块均能支持多个单位的基本信息编辑功能;信息检查与数据输出模块主要用于帮助决策人员检查当前已编辑的信息。

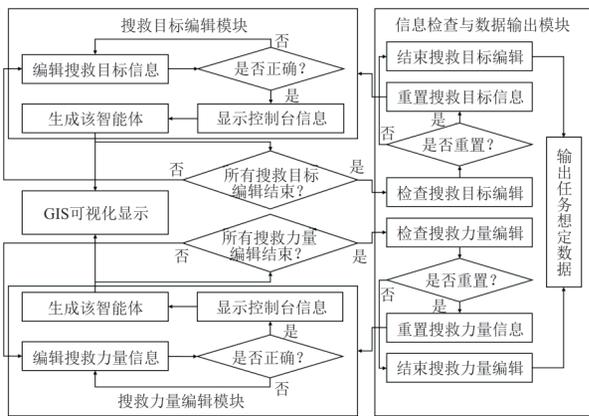


图 6 任务想定编辑子系统逻辑架构  
Fig. 6 The logical architecture of mission scenario editing subsystem

编辑每个搜救目标需要确定其遇险位置、遇险时间、遇险人数、目标类型、目标状态等内容,这主要与处置方案制定子系统中漂移预测相关;编辑每个搜救力量需要确定其搜寻救助基地、搜救力量类型等内容,这主要与处置方案制定子系统中根据搜救力量的性能参数制定相应处置方案有关。这些信息直接决定了搜救目标未来的漂移趋势以及搜救力量的任务能力,进而影响所制定处置方案的效能。

任务想定数据是系统实现海上搜救处置决策支持的基础,决定了当前任务环境中所有智能体的部署状态以及海上搜救任务的规模,直接影响了后续 3 个子系统的运行结果,因此需要保证其准确性。需要说明的是,当该子系统中所能支持的搜救目标和搜救力量的编辑种类增多时,系统所能提供决策支持的海上突发事件种类会有所提高。对于搜救目标来说,由于需要考虑方便获取风致漂移参数和流致漂移参数等特征参数,因此

搜救目标的种类仅限于漂移预测系统所提供的 54 种落水物体;对于搜救力量来说,需要全部收集满足仿真过程需求的参数才能算作一条完整的数据,因此当前系统中仅收录了 19 种最常用于执行海上搜救任务的国内外机型。对于这两种数据的扩充需要长期不断完善的工作,随着数据库的建立以及规模不断增大,系统所能达到的处置决策支持效果也会越来越明显。

2) 处置方案制定子系统

处置方案制定子系统的主要功能是根据已编辑的海上搜救任务想定信息,预测搜救目标漂移轨迹,并根据预测结果通过多种优化算法规划所选搜救力量的最优任务区域,进而辅助决策人员制定相应的处置方案。该子系统主要包括 3 个模块,即漂移轨迹预测模块、处置方案制定模块和处置方案信息确认模块,详细的逻辑架构如图 7 所示。漂移轨迹预测模块能够根据所部属搜救目标的信息,通过访问漂移预测服务器获取相应搜救目标的漂移轨迹预测结果,并根据所关注的任务时间区间筛选并显示预测位置的散点分布。处置方案制定模块能够根据所部属搜救力量的信息,通过选择任务类型、选择搜寻模式、制定出航路线和制定返航路线预估某一搜救力量在任务区域内的可用搜救参数,并以此为参考选择具体的规划算法计算最优任务区域。处置方案信息确认模块通过显示当前最优任务区域信息、计算处置方案的预期效果以及 GIS 可视化以检查当前处置方案的信息。当完成所有信息的编辑且检查无误后,该子系统输出处置方案及漂移轨迹预测结果,用于后续仿真推演与综合评估。

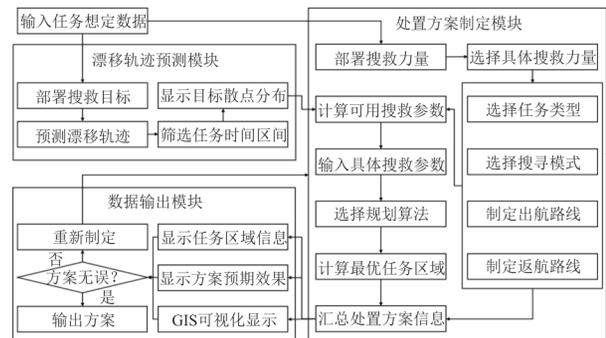


图 7 处置方案制定子系统逻辑架构  
Fig. 7 The logical architecture of decision-making support subsystem

漂移轨迹预测模块主要完成搜救目标漂移轨迹的预测和筛选工作,通过设置预测算法的粒子个数和仿真次数访问漂移预测服务器,并返回预测结果。处置方案制定模块是核心模块,可辅助决策者根据某个搜救目标的漂移数据选择搜救力量、任务类型和搜寻模式,并制定出航航路和返航航路,在此基础上计算该搜救力量在任务区域中搜寻和救助搜救目标时的最大可用参数,进而由决策者输入有效时间、搜寻速度、扫视宽度等规划信息,根据不同优化算法规划该搜救力量在当前状态下的最优任务区域,以完成处置方案的制定工作。处置方案信息确认模块能够显示任务区域的顶点信息和参数化信息,并且实时计算当前处置方案的成功概率、剩余燃油量、任务时间、航线长度等信息,可以辅助决策者对处置方案进行调整,以达到最佳的预期效果。

当处置方案制定完毕而且信息检查无误后,处置方案制定子系统才可以输出相应的方案以及搜救目标的漂移预测结果。至此,系统已完成处置方案仿真评估的所有准备工作,并且与任务想定编辑子系统的输出一并输入至处置方案仿真推演子系统和处置方案综合评估子系统以实现后续的功能。需要说明的是,后续的两个子系统均能对处置方案进行仿真推演,因为它们的输入是相同的。但是处置方案仿真推演子系统的主要功能是确定当前处置方案能够顺利驱动仿真并且输出效能评估指标的原始数据,而处置方案综合评估子系统需要快速地对处置方案进行大样本的仿真推演以对其进行综合评估,从仿真时间进程上来说,实时仿真更适用于前者,而超实时仿真更适用于后者。

### 3) 处置方案仿真推演子系统

处置方案仿真推演子系统主要提供处置方案的仿真推演环境。该子系统主要包括 4 个模块,即任务想定输入模块、仿真进程控制模块、仿真初始设置模块和仿真模型驱动模块,详细的逻辑架构如图 8 所示。其中后两个模块主要完成处置方案的仿真推演工作,在功能上可以根据需求实现实时和超实时的切换,因此既可以用于该子系统也可以用于处置方案综合评估子系统。综上所述,这 4 个模块可以分为两个部分,一方面是为了实现处置方案仿真推演子系统主要功能的界面部

分,由前两个模块组成;另一方面是可进行实时和超实时仿真推演的后台部分,由后两个模块组成。

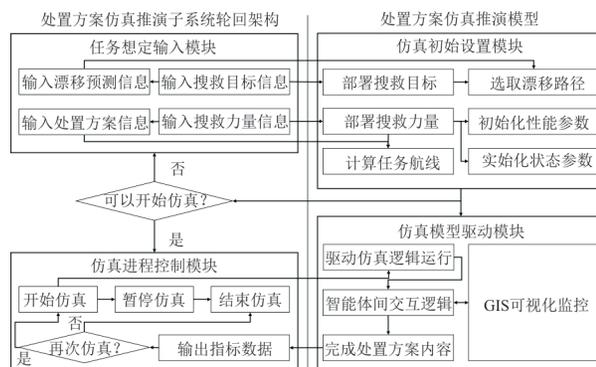


图 8 处置方案仿真推演子系统逻辑架构

Fig. 8 The logical architecture of response plan simulation subsystem

### 4) 处置方案综合评估子系统

处置方案综合评估子系统的主要功能是在考虑不确定性情况下对处置方案进行大样本仿真推演,并根据所输出的评估指标原始数据,进行综合评估。该子系统主要包括 4 个模块,即评估过程控制模块、指标权重计算模块、评估结果分析模块和处置建议输出模块,详细的逻辑框架如图 9 所示,可以看出:该子系统的初始操作与处置方案仿真推演子系统一致,均为输入任务想定信息、漂移预测信息和处置方案信息,这一步由评估过程控制模块实现。

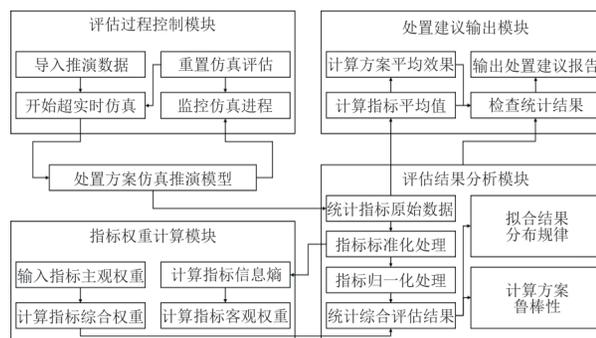


图 9 处置方案综合评估子系统逻辑架构

Fig. 9 The logical architecture of response plan comprehensive evaluation subsystem

将以上数据输入至处置方案仿真推演模型框架中进行大样本仿真推演,将所得到的指标原始数据输出至评估结果分析模块,在进行标准化处理后将指标的标准化结果输入到指标权重计算模

块,计算指标的综合权重。与此同时,评估结果分析模块将指标进一步做归一化处理,并与综合权重进行综合计算,可统计得到处置方案的综合评估结果,进而可以分析其分布规律和鲁棒性,以更加全面地分析处置方案的效能。在完成处置方案的 Monte Carlo 大样本仿真推演和评估结果计算后,由处置建议输出模块对该过程的重要数据进行汇总和处理,输出处置建议报告。

评估过程控制模块可以导入处置方案仿真推演的相应数据,并监控仿真评估过程的进展,在指标权重计算模块中主观权重部分需要由决策人员输入,而客观权重和综合权重均根据仿真推演的结果进行实时计算,使得决策人员能够更直观地了解每个指标仿真结果的数据规律,至此主要实现了处置方案的大样本仿真功能和评估指标的处理功能。

了解每个指标仿真结果的数据规律,至此主要实现了处置方案的 Monte Carlo 大样本仿真功能和评估指标的处理功能。

根据处置方案综合评估子系统的逻辑架构,进而设计相应的用户交互(UI)界面,如图 10 所示(其中 1 lb $\approx$ 0.453 6 kg)。评估过程控制模块可以导入处置方案仿真推演的相应数据,并监控仿真评估过程的进展,在指标权重计算模块中主观权重部分需要由决策人员输入,而客观权重和综合权重均根据仿真推演的结果进行实时计算,使得决策人员能够更直观地了解每个指标仿真结果的数据规律,至此主要实现了处置方案的大样本仿真功能和评估指标的处理功能。

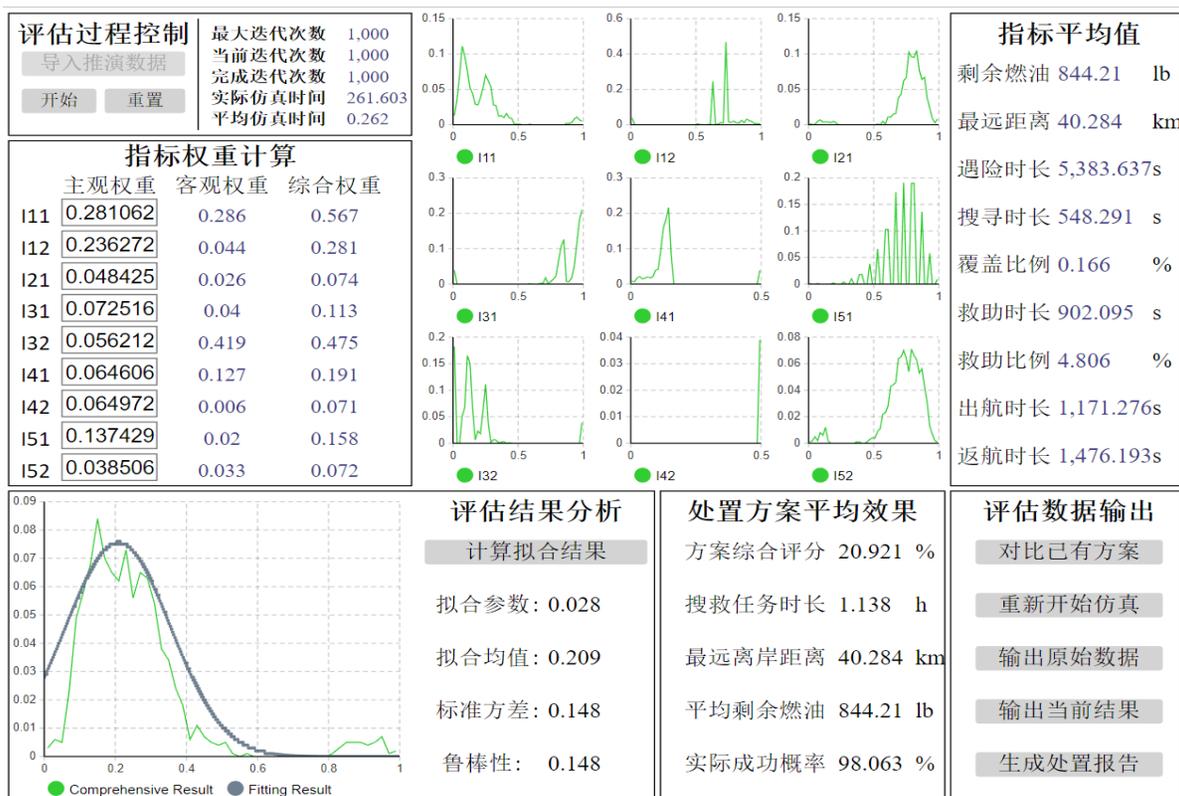


图 10 处置方案综合评估子系统 UI 界面

Fig. 10 The user interface of response plan comprehensive evaluation subsystem

当大样本仿真推演结束后,该子系统将自动计算评估指标的仿真推演原始数据的平均值以及评估结果的分布情况,以此可以统计处置方案的平均效果,包括方案综合评分、搜救任务时长、实际飞行距离、实际消耗燃油和实际成功频率。进而系统可以输出针对该海上突发事件的处置建议。

### 3 系统应用验证

通过海上搜救典型任务,验证海上搜救处置决策支持系统在辅助决策人员处置海上突发事件中所发挥的作用:通过任务想定编辑、漂移轨迹预测制定处置方案,依托仿真推演预估处置方案的执行效果,并最终形成处置决策支持建议。

### 3.1 典型任务基本情况

海上搜救处置决策支持系统在使用时需要获取当前任务想定信息。根据厦门市海上搜救中心提供给海上救助飞行队的《飞行救助任务书》

可知,决策人员在指挥海上搜救任务之前收到的信息主要包括遇险标的名称、险情概况、险情接收时间、遇险人数、遇险位置和目标类型等。因此,此次任务的基本情况如表 1 所示。

表 1 任务基本情况  
Table 1 The detail information of mission scenario

救助任务	险情概况	险情时间	遇险位置	目标类型	遇险人数	航向航速	联系方式
救助“海鸥”帆船 4 名落水人员	台风来临,一艘帆船返港避风时发生桅杆断裂,船体失控并翻覆,1 名艇员被主帆覆盖在水底被帆索缠住,情况危急	2020 年 6 月 18 日 10 时	24.503N, 118.23E	帆船	4	未知	无

### 3.2 处置方案制定结果

假定在厦门高崎机场有两架直升机,呼号为 B-0001 的直升机能够提供 2 h 任务时间,呼号为 B-0002 的直升机能够提供 1 h 任务时间,且这两架直升机的搜寻速度均为 60 kn(1 kn=1.852 km/h),扫视宽度均为 0.2 km。因此,在 1~3 h 漂移数据基础之上,可以确定最优任务区域,进而可以制定这两架直升机的处置方案,如表 2 所示。

表 2 处置方案详细信息  
Table 2 Detail information of response plan

具体内容	处置方案 1	处置方案 2
机型/呼号	B-0001	B-0002
任务时间	10:00—12:00	10:00—11:00
搜救模式	平行线搜寻,悬停救助	平行线搜寻,悬停救助
去程航线	搜救基地—五通码头—任务区域	搜救基地—五通码头—任务区域
任务区域	P1(24.47N, 118.2E) P2(24.50N, 118.2E) P3(24.51N, 118.3E) P4(24.49N, 118.3E)	P1(24.50N, 188.2E) P2(24.49N, 118.2E) P3(24.49N, 118.2E) P4(24.50N, 118.2E)
回程航线	任务区域—厦门大学翔安医院—搜救基地	任务区域—厦门大学翔安医院—搜救基地

为了给实际海上搜救任务提供处置决策支持信息,不仅要考虑处置方案评估结果的准确性问题,还要考虑时效性。因此,选择仿真次数为 1 000,以满足实际需求。其仿真推演结果如表 3 所示,综合评估结果如表 4 所示。重点关注任务总

时间、剩余燃油、目标遇险时间、搜救成功率等指标,并根据综合评估结果分布计算出处置方案的综合评分。

表 3 仿真推演结果均值  
Table 3 Mean value of Monte Carlo simulation result

结果数据	处置方案 1	处置方案 2
直升机剩余燃油质量/lb	975.243	1 052.920
直升机离岸距离/km	9.877	9.877
目标遇险时间/s	4 760.466	3 879.128
搜寻目标时间/s	1 158.575	276.616
搜寻覆盖比例	0.616	0.682
救助目标时间/s	754.199	682.001
救助成功率/%	98.4	92.6
前往任务区域时间/s	161.726	171.209
返回基地时间/s	421.655	420.179

表 4 处置方案综合评估结果  
Table 4 Comprehensive evaluation result

结果数据	处置方案 1	处置方案 2
任务总时间/s	2 496.16	1 550.01
剩余燃油/L	601.71	649.64
目标遇险时间/s	4 760.466	3 879.128
搜救成功率/%	98.4	92.6
综合评分	0.581	0.753

两种处置方案的评估结果分布情况如图 11 所示。

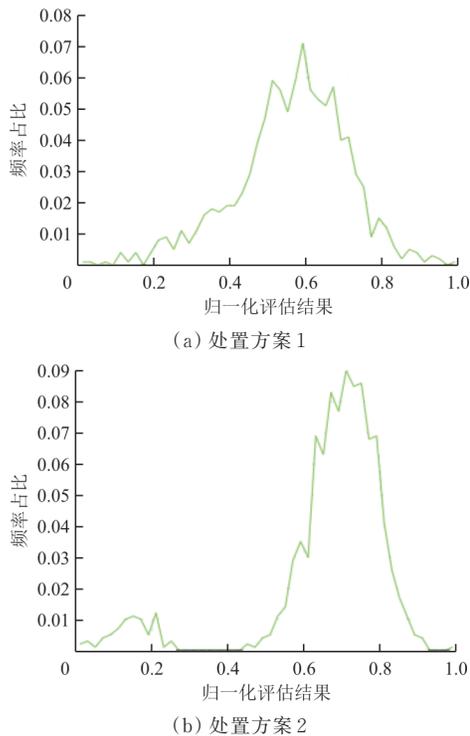


图11 评估结果分布情况

Fig. 11 The logical architecture of response plan

### 3.3 任务情况总结

根据典型任务的基本情况,使用直升机海上搜救处置决策支持系统制定了两个备选处置方案,并通过 Monte Carlo 大样本仿真推演预估了它们的处置效果。根据表 4 中的统计结果可知,处置方案 2 的任务总时间、剩余燃油量和目标遇险时间要优于处置方案 1,但是救助成功率略低。这种情况是决策人员在面对实际海上搜救问题时经常碰到的情况,通常需要权衡不同处置方式的利弊,系统进一步统计了综合评估结果的分布,进而计算了处置方案的综合评分,为决策人员提供更明确的处置建议。对于上述两个备选处置方案,处置方案 1 的综合评分是 0.581,处置方案 2 的综合评分是 0.753,因此,建议决策人员优先考虑采用处置方案 2。任务结束后,针对系统的操作过程和处置建议的有效性与决策人员开展了深入交流,从而得到了两条重要结论。

1) 由系统规划出的任务区域与任务中假人的漂移情况一致,在误差允许范围内,且所提供任务区域能够为决策人员制定处置方案规划有益参考。

2) 由系统经 Monte Carlo 大样本仿真所提供的处置方案评估结果,能够有效预估处置方案的执行效果,并且能够为决策人员对比优选处置方

案提供参考。

## 4 结论

1) 本文设计的直升机海上搜救处置决策支持系统的功能和逻辑架构,从顶层视角描述了系统功能及内部数据流和逻辑流,以此详细设计了 4 个子系统,任务想定编辑子系统、处置方案制定子系统、处置方案仿真推演子系统和处置方案综合评估子系统。

2) 通过典型任务,说明了系统的使用过程和输出结果,论证了其能够为决策人员提供有效的处置决策支持建议,证明了系统的实用性。

3) 该系统围绕处置方案形成了一套完整可用的决策支持方法,能够根据漂移预测情况及直升机能力快速制定多个处置方案,通过 Monte Carlo 大样本仿真计算各处置方案综合评估结果,以此提供决策支持依据。

4) 由于处置方案定义具有广泛性和通用性,不只是针对海上搜救问题,在其他航空应急救援任务中同样适用。因此,本文所提出的系统及其仿真评估方法可扩展至其他应急救援领域,例如解决森林灭火、地震搜救、洪涝救援等问题。

5) 本文以直升机任务流程作为基础开展相应的研究,所形成的方法除航空应急救援领域,还可应用于通用航空作业领域,例如护林作业、电力巡线、海上石油平台运输等,但须根据具体问题进行适应性研究和调整。

### 参考文献

- [1] 超级大本营. 中国的泰坦尼克号—大舜号海难事件[EB/OL]. (2013-10-31)[2023-11-16]. <https://lt.cjdbdy.net/thread-1736952-1-1.html>.  
CJDBY. China's Titanic: the shipwreck of 'Dashun'[EB/OL]. (2013-10-31)[2023-11-16]. <https://lt.cjdbdy.net/thread-1736952-1-1.html>. (in Chinese)
- [2] 孟素婧, 王辉, 卢伟, 等. 海上无动力船舶漂移轨迹模型及其在“桑吉”油轮漂移模拟中的应用[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(2): 242-250.  
MENG Sujing, WANG Hui, LU Wei, et al. Drift trajectory model of the unpowered vessel on the sea and its application in the drift simulation of the Sanchi oil tanker[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(2): 242-250. (in Chinese)
- [3] 顾诵芬, 师昌绪, 庄逢甘, 等. 关于建立国家航空应急救援体系的建议[J]. 科技导报, 2009, 27(8): 10.  
GU Songfen, SHI Changxu, ZHUANG Fenggan, et al. Suggestion on the establishment of national aviation emergen-

- cy rescue system[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(8): 10. (in Chinese)
- [4] KARATAS M, RAZI N, GUNAL M M. An ILP and simulation model to optimize search and rescue helicopter operations [J]. Journal of the Operational Research Society, 2017, 68: 1-12.
- [5] XUE S, HU L, WU G H, et al. Training effectiveness evaluation of helicopter emergency relief based on virtual simulation [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(10): 2000-2012.
- [6] FROST J R, STONE L D. Review of search theory: advances and applications to search and rescue decision support [R]. Fairfax: SOZA and Company Ltd., 2001.
- [7] GUARD C C. National search and rescue manual: emergency services resources [R]. US: Military Forces (United States), 2000.
- [8] SPAULDING M L, HOWLETT E. Application of SARMAP to estimate probable search area for objects lost at sea [J]. Marine Technology Society Journal, 1996, 30(2): 17-25.
- [9] CORDAH B. Search and rescue information system (SARIS) [EB/OL]. [2023-11-16]. <http://www.bmtcordah.com/Services%20&%20Capabilities>.
- [10] ABI-ZEID I, FROST J R. SARPlan: a decision support system for Canadian search and rescue operations [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 162(3): 630-653.
- [11] ABI-ZEID I, DOYON B. Using a geographic decision support system to plan search and rescue operations [J]. International Journal of Emergency Management, 2003, 1(4): 346-362.
- [12] KOOPMAN B O. The theory of search II: target detection [J]. Operations Research, 1956, 4(5): 503-531.
- [13] FROST J R. The theory of search: a simplified explanation [M]. US: SOZA and Company Ltd., 1997.
- [14] STONE L D. Theory of optimal search [M]. US: Elsevier, 1976.
- [15] COOPER D C, FROST J R, ROBE R Q. Compatibility of land SAR procedures with search theory [R]. US: Potomac Management Group, Inc., 2003.
- [16] LI W, ZHU J, LI H, et al. A game theory based on Monte Carlo analysis for optimizing evacuation routing in complex scenes [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 32: 125-136.
- [17] RANQUE P, FREEMAN D, KERNSTINE K, et al. Stochastic agent-based analysis of UAV mission effectiveness [C]// The 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia Beach, VA: AIAA, 2011: 1-9.
- [18] RICHARDSON H R, DISCENZA J H. The United States coast guard computer-assisted search planning system (CASP) [J]. Naval Research Logs Quarterly, 2010, 27(4): 659-680.
- [19] COAST D C. U. S. coast guard addendum to the United States National search and rescue supplement (NSS) to the international aeronautical and maritime search and rescue manual (IAMSAR) [R]. Washington, DC: Department of Homeland Security, United States Coast Guard, 2009.
- [20] 张晓全, 柳淑亚. 直升机海上应急救援能力评估研究 [J/OL]. 航空工程进展: 1-9 [2023-11-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20230615.1602.002.html>. ZHANG Xiaoquan, LIU Shuya. Assessment study of helicopter maritime emergency rescue capability [J/OL]: 1-9 [2023-11-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20230615.1602.002.html>. (in Chinese)
- [21] 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 Fangbing. Research on the key technologies of maritime search and rescue decision support system [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
- [22] 李广敏. 海上搜救辅助决策系统在南海的应用与实践 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015. LI Guangmin. Application in the south China sea of aided decision system for salvage and rescue at sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese)
- [23] 国家海洋局. 国家海上搜救环境保障服务平台 [EB/OL]. [2023-11-16]. <http://www.marinesar.cn/index.html>. State Oceanic Administration. National maritime search and rescue support system [EB/OL]. [2023-11-16]. <http://www.marinesar.cn/index.html>. (in Chinese)
- [24] 徐敬海, 聂高众. 城市地震应急处置方案技术研究 [J]. 地震地质, 2014, 36(1): 196-205. XU Jinghai, NIE Gaozhong. Study on city's earthquake emergency disposal scheme-related technology [J]. Seismology and Geology, 2014, 36(1): 196-205. (in Chinese)
- [25] 黄炎焱. 面向军民领域的系统仿真及效能评估技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014. HUANG Yanyan. System simulation and effectiveness evaluation technology for military and civilian fields [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [26] ICAO, IMO. International aeronautical and maritime search and rescue manual: mission coordination [M]. US: IMO Publication, 1999.
- [27] 郭星, 孙建红, 李名琦, 等. 直升机应急漂浮系统传感器模块可靠性分析 [J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 532-539. GUO Xing, SUN Jianhong, LI Mingqi, et al. Reliability analysis of sensor module of helicopter emergency floating system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 532-539. (in Chinese)
- [28] CHEN Z, LIU H, TIAN Y, et al. A particle swarm optimization algorithm based on time-space weight for helicopter maritime search and rescue decision-making [J]. IEEE Access, 2020, 8: 81526-81541.
- [29] LIU H, CHEN Z, TIAN Y, et al. Evaluation method for helicopter maritime search and rescue response plan with uncertainty [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 493-507.

(编辑:丛艳娟)