

海上搜寻理论与搜救决策支持系统现状及发展

杨克巍, 梁笑天, 郭 珩, 杨清清, 姜 江 *

(国防科技大学系统工程学院 管理科学与工程系, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 海洋安全是海洋强国战略的重要组成部分, 随着海洋工程的发展, 海难事故频发, 为了提高我国的海上搜救(Maritime Search And Rescue, MSAR)成功率, 借助决策支持方法和系统展开搜救行动十分必要。在对海上搜寻理论与搜救决策支持系统的现状进行综述的基础上, 对其未来的发展趋势进行了总结与展望。首先通过分析给出了不同海上搜救问题的分类, 然后对国内外经典海上搜寻理论、搜寻规划方法以及搜救决策支持系统的发展现状进行了总结阐述, 最后讨论了新时代下海上搜救决策支持研究的发展方向, 以期为我国海上搜救体系建设提供建议, 为海洋工程的发展进步提供安全保障。

关键词: 海上搜寻; 搜寻规划方法; 搜救决策支持系统

中图分类号: P76

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2021)04-0291-12

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2021.04.006

引用格式: YANG K W, LIANG X T, GUO Y, et al. Status and development of maritime search theory and search and rescue decision support system[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(4): 291-302. 杨克巍, 梁笑天, 郭珩, 等. 海上搜寻理论与搜救决策支持系统现状及发展[J]. 海岸工程, 2021, 40(4): 291-302.

海洋工程包括海洋工作平台、海上风电、海底工程等不同形式, 是人类开发利用海洋资源过程中产生的一种特殊工程技术。随着海洋工程技术的发展, 海上生物、矿产资源、海水的开发利用, 海洋运输等工程项目日益增多, 海上活动的规模越来越大, 海难事故频发。表 1 为我国 2020 年的海上搜救统计数据^[1], 从表 1 可以直观地看出, 我国海上事故发生频次不容小觑, 海上搜救行动的效能也有一定的提升空间。海上搜救是海上搜寻和救助的简称, 是以政府为主导, 协调一切力量, 为海上遇险人员提供搜救服务的公益性活动。《国际海上搜救公约》(1998 年修正案)^[2]中对海上搜寻和救援行动分别做出了相关界定: “搜寻是指通常由救助协调中心或救助分中心协调的、利用现有的人员和设施以确定遇险人员位置的行动; 救助则是指拯救遇险人员, 为其提供初步的医疗或其他所需要的服务, 并将其转移到安全地点的行动。” 目前各个国家根据各自的国情和特点都制定了相关海上搜救体制和流程规范。我国已成立了中国海上搜救中心及相关各省的搜救中心、分中心, 具体承担海上搜救的组织、指挥、预警、培训等各项职能, 这些部门负责海上搜救行动的响应与决策。由于海上遇险事故具有突发性强、情况危急、任务紧迫和水文气象环境复杂等特点, 而且海上搜救过程涉及预警信息确认、搜救资源选择、搜寻区域确定、搜寻模式选择等一系列问题, 单凭专家队伍难以在短时间内处理多源信息, 快速做出科学、准确的决策, 因此为了提高我国海上搜救行动的效率及成功率, 研究相关决策支持方法及工具十分必要。国内外针对海上搜寻方法与搜救决策支持系统开展了很多工作, 本文关注的是海上搜救领域整体的发展现状和规划。由于海上搜寻是海上救助的前提, 也是众多学者进行量化建模研究的重点, 因此我们从海上搜寻规划方法出发, 收集了来

收稿日期: 2021-06-21

资助项目: 国家自然科学基金项目——海上突发事件应急处置预案智能生成及辅助决策分析关键技术研究(2017YFC1405005); 湖南省科技自主创新计划资助项目——大数据与体系工程管理(2020RC4046)

作者简介: 杨克巍(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事装备体系工程方面研究。E-mail: kayyang27@nudt.edu.cn

* **通信作者:** 姜 江(1981—), 男, 副教授, 主要从事智能决策分析方面研究。E-mail: jiangjiangnudt@163.com

(李 燕 编辑)

自中国知网、Web of Science 等网站关于海上搜寻规划方法和海上搜救决策支持系统的相关文献,对其现状进行了梳理与概括,最后结合新时代的特点,给出了未来我国海上搜救决策支持领域的发展方向。

表 1 中国 2020 年海上搜救统计数据^[1]
Table 1 Statistics of MSAR in China in 2020^[1]

序号	时 间	搜救行动/次	遇险(获救)船舶/艘	遇险(获救)人员/人	成功率/%
1	2020 年 01 月	128	111(84)	874(844)	96.6
2	2020 年 02 月	69	50(39)	461(450)	97.6
3	2020 年 03 月	120	98(80)	819(781)	95.4
4	2020 年 04 月	144	116(88)	834(787)	94.4
5	2020 年 05 月	144	113(92)	830(801)	96.5
6	2020 年 06 月	145	121(100)	913(868)	95.1
7	2020 年 07 月	126	92(74)	783(755)	96.4
8	2020 年 08 月	171	141(108)	1 212(1 162)	95.9
9	2020 年 09 月	165	128(108)	992(950)	95.8
10	2020 年 10 月	163	113(83)	1 144(1 088)	95.1
11	2020 年 11 月	181	130(109)	1 197(1 158)	96.7
12	2020 年 12 月	189	162(139)	1 210(1 150)	95.0

1 海上搜寻相关概念与理论

1.1 海上搜救相关问题分类

海上搜救体系是由有关部门构建的、集组织指挥、搜救力量、搜救手段和法规制度等要素于一体的复杂巨系统。其构建目的是为了实现在复杂的海上救援环境中,为救援对象(失事飞行员、沉船船员等)提供及时、快速、有效的救援活动。为了更加全面地了解海上搜救的现状,从不同角度理解海上搜救中存在的难点、总结归纳应对海上搜救问题的关键技术,本文按照指挥体系、搜救对象、冲突模式等不同的标准,对海上搜救问题进行分类说明,以进行深入的研究。

1)按指挥体系分类

根据指挥体系的不同,可以将海上搜救体系分为一元化指挥体系、专业化指挥体系、和协调指挥体系等。其中:组建统一的海上执法队伍,通过中央垂直管理实现一元化指挥体系的国家以美国、日本、韩国、加拿大等为代表;通过构建专门的政府或民间海上搜救协会,实现专业化指挥体系的国家以西班牙、英国和德国等为代表;法国、澳大利亚等国家则通过建立更高级别的统一协调机构实现协调指挥体系。我国海上搜救工作由隶属于中华人民共和国交通运输部的中国海上搜救中心统一协调,实行部级联席会议制度,各省横向管理,各部门垂直管理。表 2 列出了海上搜救指挥体系的分类、特点及主要代表国家。

表 2 海上搜救指挥体系分类
Table 2 Classification of the command system of MSAR

海上搜救指挥体系类型	代表国家	特 点
一元化指挥体系	美国、日本、韩国和加拿大等	中央垂直管理
专业化指挥体系	西班牙、英国和德国等	构建专门的政府或民间海上搜救协会
协调指挥体系	法国、澳大利亚和中国等	多方参与,统筹决议

2)按搜救对象分类

Frost 和 Stone^[3] 根据搜救对象的不同特点,将海上搜救问题分为单边搜救和双边搜救两大类(图 1)。单边搜救中,搜救者可以选择自己的策略,但搜救对象既不选择策略,也不以任何方式对搜救做出反应;单边搜救包括静止目标搜救和运动目标搜救两类。而大多数双边搜救问题涉及运动的搜寻对象,根据搜寻对象是否合作,可以分为合作目标搜救和非合作目标搜救。

3)按冲突模式分类

根据海上搜救行动过程中搜救环境之间的冲突是否可以调和,本文将海上搜救冲突分为两大类:强冲突和弱冲突。其中,强冲突具有明显的威胁和对抗因素,一般不能进行调解;弱冲突是指在搜救合作或联合搜救过程中搜救主体间存在的冲突,一般可以为了共同的利益,通过某种方式或手段进行调和。表 3 为海上搜救冲突模式的分类、特点以及典型场景。

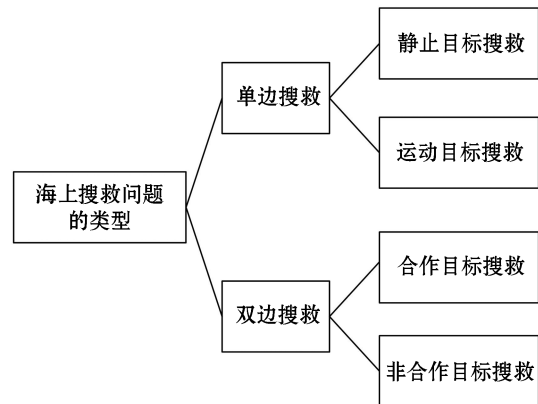


图 1 海上搜救问题分类

Fig.1 Classification of MSAR

表 3 海上搜救冲突模式分类

Table 3 Classification of MSAR conflict modes

海上搜救冲突模式	特 点	典型场景
强冲突	敌对、不可调和	战场对抗 海盗袭击 海上恐怖主义
弱冲突	以合作为前提、可调和	合作国家之间政治、外交、军事等冲突 军队、政府和民间等不同搜救力量之间的冲突 政府部门职责冲突 政府媒体与的冲突 搜救地区的文化冲突

前文给出了与海上搜救问题相关的 3 种典型分类,特别是结合目前海上安全态势的不确定性,提出了冲突背景下海上搜救问题的分类,有助于为不同类型冲突条件下搜救样式的选择提供有益的参考。特别地,当面临极端冲突时(例如战争环境),如何开展有效的搜救行动将是未来需要关注的。

1.2 海上搜寻方法现状

海上搜寻是海上救助的前提,是搜救工作中最关键、最复杂的部分。为了避免搜寻过程的盲目性,在最短时间内合理规划和分配有限的搜救资源,提高搜救效率和准确率,需要研究海上搜寻的基本理论和方法以进行辅助决策。

根据 2001 年 Frost 和 Stone^[3] 指出的搜寻领域研究的 3 个方向,本文将海上搜寻理论的研究分为 3 类:海上经典搜寻理论、遇险目标的漂流预测和海上搜寻规划方法。其中搜寻规划方法可以分为海上搜寻行动的风险分析与评估、搜救资源的选择与分配、搜寻路径规划等。以下重点介绍海上经典搜寻理论与搜寻规划方法的研究现状。

1)经典的海上搜寻理论

搜寻理论是海上搜救规划的理论基础。搜寻理论的数学和作战研究课题源于第二次世界大战期间美国对德国潜艇威胁的反应。早期的工作是由 Koopman 开创的^[4-6],他在一系列开创性的论文中概述了搜寻理论的基础,并阐明其内涵:搜寻理论研究如何最有效地利用有限的资源去试图找到一个位置不确定的对象。此外,他还提出了 3 个目前被广泛使用的概念:包含概率(Probability Of Containment, POC)、发现概率(Probability Of Detection, POD)和成功概率(Probability Of Success, POS)。POS 主要受两个因素的影响:待搜寻区域内包含搜寻目标的概率以及当假设搜寻目标位于搜寻区域时搜寻设备探测到搜寻目标的概率(POD),三者之间 POS 为 POC 和 POD 的乘积。POD 作为在给定区域内花费的努力的函数,可以通过搜寻时间、搜寻区域、轨迹长度或任何其他合适的度量来衡量,对于搜寻理论的研究的重点在于提高 POC 或者 POD^[7-9]。之后 Cooper^[10]、Stone^[11]、Brown^[12]等学者^[13-14]对搜寻理论的内涵、搜寻目标的探测算法、搜寻过程中资源的最优分配等问题进行了更加深入的探索和改进,经过不断发展,逐渐应用到战场搜救、飞机失事救援以及能源勘测等领域。表 4 列出了对搜寻理论的研究做出重要贡献的专家学者及其主要贡献。

表 4 搜寻理论主要贡献者
Table 4 Main contributors to the maritime search theory

学 者	贡 献
Koopman ^[4-6]	1946 年提出搜寻理论的概念
	1957 年解决了特定条件下静止目标搜寻过程中搜寻资源的最优分配问题
Cooper ^[10]	1958 年使用凸多边形规划来研究将最优搜寻力量分配问题,并开发了一个算法
Stone ^[11]	1976 年解决了搜寻问题中“最优搜寻力量配置存在的充分与必要条件”
	1975 年解决静态目标搜寻问题
Brown ^[12]	1980 年提出离散时间和空间中运动目标的最优搜索算法
Washburn ^[13-14]	1980 年研究运动目标的搜寻,提出向前向后(FAB)搜寻算法,是 Brown 算法 ^[12] 的推广

2)海上搜寻规划方法

海上搜寻规划方法是指导海上搜救实践活动的理论方法,主要研究如何利用搜寻理论确定最优搜寻区域、分配搜救资源、规划搜救路径,使得在最短的时间内、耗费最少的搜救资源确定遇险人员位置^[15]。此外,环境的不确定性对搜救的工作也会产生影响^[16]。自 20 世纪 50 年代美国海岸警卫队(United States Coast Guard, USCG)首次将搜寻理论的原则应用于搜寻和救援规划以来,海上最优搜寻规划一直是海上搜救领域中研究的热点和难点^[17]。图 2 为海上搜救决策流程图。

在搜寻规划问题的研究中,美国和加拿大的研究相对比较成熟。美国国家工程院院士 Stone 是搜寻理论与搜寻规划方法的集大成者。曾与 Kratzke 等分析研究了美国最新的搜救计划系统 SAROPS(Search and Rescue Optimal Planning System)中用到的搜寻规划方法^[18],并将贝叶斯方法应用到搜寻理论与实践中去^[19-22],取得了实质性的进步。2016 年,Stone^[23]分析介绍了离散、连续空间中,静、动态目标搜寻问题的基本原理及方法,并介绍了搜寻博弈问题,这是搜寻理论与搜寻规划方法的最新成果。加拿大国防研究发展局(Defence Research and Development Canada, DRDC)的 Abi-zeid 教授是加拿大新一代搜救规划决策系统参与者。2001 年,Abi-zeid 和 Frost^[15]基于搜寻理论对加拿大军队失踪飞机的搜寻任务进行了规划,并设计研发了 SARPlan(Search and Rescue Plan)系统;2011 年,Abi-zeid 等^[24]提出了一种基于约束规划和经典搜寻理论的搜寻模型求解算法,用于解决多矩形搜寻区域问题;2019 年,Abi-zeid 等^[25]在为加拿大设计高级搜寻规划工具(Advanced Search Planning Tool, ASPT)时,提出了一个基于迭代启发式的优化模型,用于确保可用搜寻资源的最佳使用;在最优搜寻路径问题求解方面,Abi-zeid 团队使用博弈论^[26-27]、

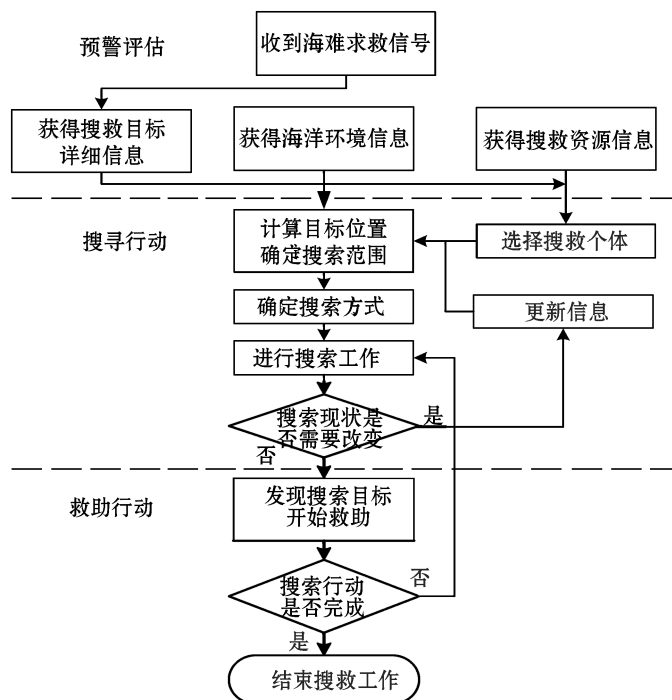


图2 海上搜救决策流程

Fig.2 Flow chart of MSAR decision

约束规划^[28]等方法做出了一系列成果;其团队成员 Michael 等^[29]研究了用机器学习的方法解释基于优化的决策支持系统的输出结果。此外,国外的其他学者在海上搜救船舶的位置分配^[30]、战场搜救中多智能体的行动规划^[31]、不确定威胁下搜救的博弈模型^[32]、已知搜救对象位置条件下搜救资源的最优分配^[33]、使用贝叶斯信念网络(Bayesian Belief Network, BBN)方法^[34]评估海上搜救行动的可靠性方面进行了相关的研究。

我国学者中,中国大连海事大学朱玉柱等^[35]将搜寻理论应用到海上搜救决策中,针对海上搜救船舶优选问题提出了搜救船舶排序决策方法。此外,中国大连海事大学的学者围绕中国海上搜救体制分析、海上最优搜寻区域确定^[36]、最优搜寻力量的选择和任务分配^[37]、搜寻能力评价^[38]以及海上搜救决策支持系统的建研发^[39-42]等问题进行了研究。上海海事大学吴华锋团队^[43-46]研究了海上搜救过程中无线传感器网络的应用,利用相关优化算法和数据融合的方法提高了目标检测与定位的准确性和效率。

清华大学黄全义等^[47]阐述了海洋环境安全保障平台应具备的功能,并分析探讨了平台设计和构建过程中需要解决的关键技术问题,为海上搜救决策支持系统的建设提供了参考。国防科技大学的应急管理智能决策团队是进行海上搜救辅助决策研究的新力量。在国家重点研发计划——海洋安全重点保障专项的牵引下,国防科技大学与北海预报中心等单位针对海上搜救智能辅助决策技术、决策支持工具的研发等内容展开了研究。国防科技大学团队基于体系的思想,综合运用管理学、运筹学、智能优化算法等理论方法,针对海上搜寻路径规划^[48]、搜救资源调度^[49-50]、搜救方案动态调整^[51]以及搜救系统能力评估^[52-53]等问题展开了研究并取得了一系列成果。

2 海上搜救决策支持系统

海上搜救决策支持系统是由海上搜救规划工具发展而来的。海上搜救规划工具的发展经历了3个阶段:手工方法阶段、手工方法的自动化阶段以及复杂的随机计算机模型或仿真阶段^[3]。手工方法是经典搜寻

规划方法的手工计算,当可用环境数据的数量和分辨率显著增加时,会给搜救计划者带来了很大的计算负担,这促使手工方法的计算机化或自动化版本的出现。第一个手工方法的自动化版本是美国海岸警卫队在 1970 年开发的 SARP (Search and Rescue Planning Program) 系统,大大减轻了手工方法所带来的大量计算和绘图负担。同时,随着 20 世纪 80 年代 GIS(Geographic Information System) 技术的蓬勃发展,各国开始将 GIS 集成到海上搜救决策支持系统中,如加拿大的 CANSARP(Canadian Search and Rescue Program) 系统^[54]、英国的 SARIS (Search and Rescue Information System) 以及美国的 SARMAP (Search and Rescue Mapping and Analysis Program)^[55] 等。自动化工具虽然提高了计算效率,但并没有突破手工计算理论方法层面的局限性,大量高质量、高分辨率的环境数据没有得到有效利用。得益于计算机技术的迅速发展,一些学者开始尝试使用随机过程对搜救对象的漂移进行建模,最广泛使用的是 Monte-Carlo 方法。1972 年,美国实施的第一个贝叶斯 SAR(Search and Rescue) 规划系统 CASP (Computer-Assisted Search Planning System),被公认为是第一个真正意义上采用 Monte-Carlo 方法开发的搜救规划系统^[56],之后各个国家开发的系统大都增加了采用随机模型预测搜寻目标漂流轨迹的功能。图 3 给出了不同海上搜救规划工具的分类及部分代表系统。

随着搜寻理论和海上搜寻规划方法的不断进步和发展,世界各国开始建立智能化的海上搜救决策支持平台。美国海岸警卫队 2003 年开始实施、2007 年投入使用的 SAROPS 系统^[57] 是目前美国用于海上搜救的唯一搜救计划辅助工具,该系统基于 GIS 平台、开发并集成多个环境数据服务产品,并应用最新的搜寻规划方法,显著提高了海岸警卫队在沿岸、大洋以及五大湖环境中的搜寻效率。21 世纪初,针对失事飞机的搜寻问题,加拿大海岸警卫队的 Abi-zeid 和 Frost^[15] 研发了 SARPlan 系统,该系统创造性地引入了搜救资源最优分配算法,较大程度地提高了搜救成功率。2019 年加拿大海岸警卫队开始研发高级搜寻规划工具 ASPT, Abi-Zeid 等负责该系统中智能搜救规划模块的研究,他

提出了一种基于启发式的优化算法,该算法可以针对不同搜寻单元提供可行的、最优或接近最优的搜救区域和搜救模型规划^[25]。BMT 公司(1985 年由英国船舶研究协会(the UK's British Ship Research Association)和国家海事研究所(the UK's National Maritime Institute)合并而成的一家国际设计、工程、科学和风险管理咨询公司)开发的搜救响应决策支持系统 SARIS,自 1996 年以来一直供世界各地的搜救部门使用,该搜救软件 4.0 版本是最新的版本,可以提供海上搜寻对象的漂移轨迹预测、搜寻区域确定、搜寻模式选择以及搜救资源分配等功能^[58]。2016 年,意大利海岸警卫队开发了海上搜救移动端决策支持系统——OCEAN-SAR(OCEAN Search And Rescue),基于哥白尼海洋环境监测中心以及地中海监测预报中心提供的环境数据支持,构建了 Leeway 模型对 16 种类型的遇险目标进行漂移轨迹预测,并进一步生成搜寻计划^[59]。

为提高海上搜救通信能力,中华人民共和国交通运输部先后建立了海事卫星系统,海上安全信息播发系统、数字选择性呼叫系统和搜救卫星系统等海上遇险与安全信息系统;并在全中国沿海主要港口建立了船舶交通管理系统、海事电视监控系统以及船舶自动识别系统用于监控船舶航行信息。2014 年,交通运输部与中国人民解放军总装备部联合建设基于北斗的中国海上搜救信息系统示范工程,有效提升了海上动态监管和救助现场动态信息监测能力,实现了跨区域、跨部门的信息共享。从前文的分析可知,我国前期研制的系统更多侧重于数据集成和信息共享,随着海上搜救理论方法研究方面的进步,我国开始研

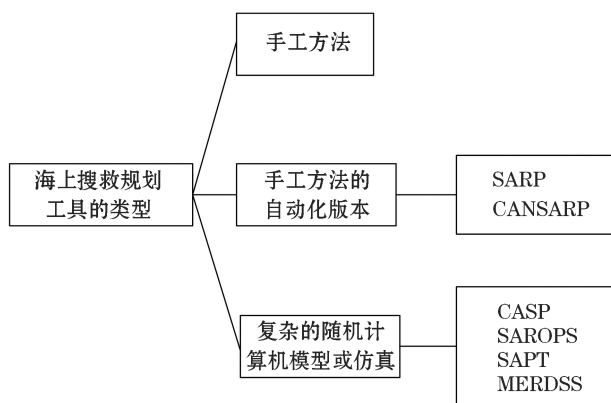


图 3 海上搜救规划工具分类

Fig.3 Classification of the tools for MSAR planning

制具有漂流预测、决策方案智能生成等功能的新一代海上搜救决策支持系统。国家海上搜救环境服务保障平台(National Maritime Search And Rescue Support System, NMSARSS)是自然资源部于2016年研发的,旨在为海上搜救部门提供海上搜救漂移预测和海洋环境信息查询服务的全国统一业务化平台,能够在短时间内计算出最优搜寻区域。海上突发事件应急处置综合决策支持系统(Marine Emergency Response Decision Support System, MERDSS)^[60]是自然资源部北海局与国防科技大学等单位正在共同参与的新一代海上搜救决策支持系统,该系统目前主要突破了大数据平台构建、智能优化算法和运筹规划模型在海上搜救的应用等关键技术,与NMSARSS相比,增加了漂移自动预测、搜寻模式选择、资源方案自动生成和任务自主分发等功能。2019年12月,青岛海事局在对“苏泗洪货1055”失联船进行搜救时,使用该系统成功预测了失联船的漂流位置,圆满完成了搜救任务。图4给出了5个主要国家的海上搜救决策支持系统(Maritime Search And Rescue Decision Support System, MSARDSS)的发展图,表5对一些典型系统进行了对比分析。

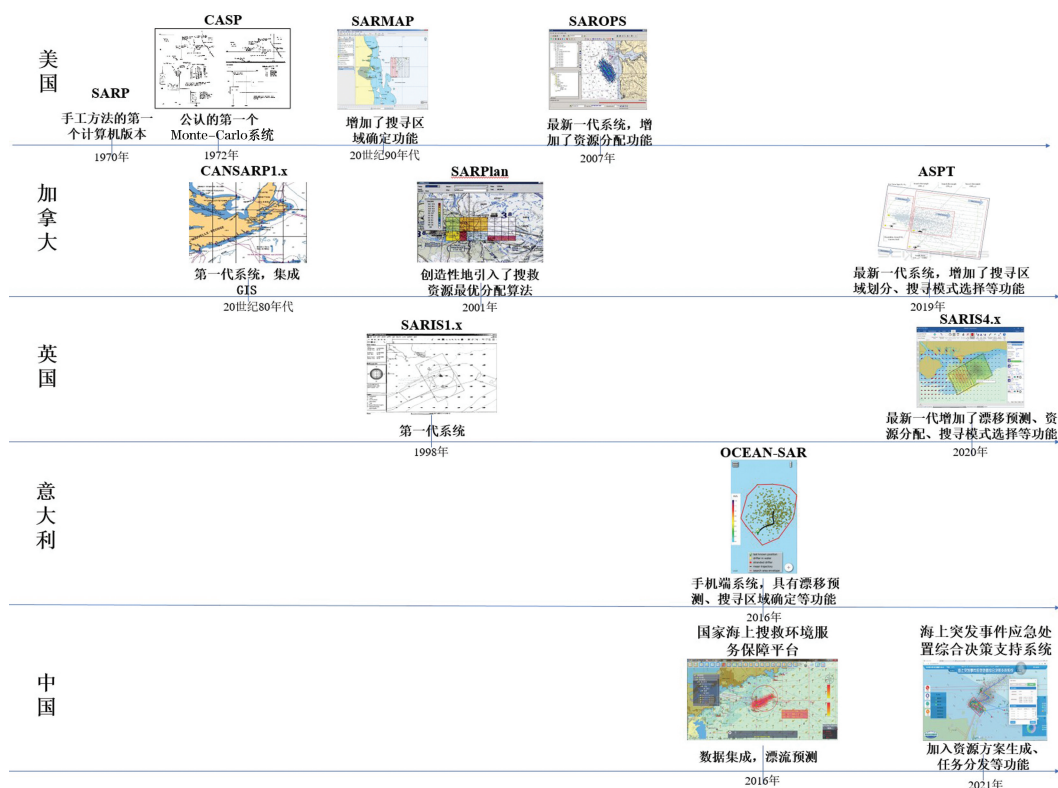


图4 海上搜救决策支持系统发展历程

Fig.4 Development of MSARDSS

从表5可以看出,最新的海上搜救系统大都可以提供漂移轨迹预测、搜寻区域确定、搜寻模式选择、搜救资源分配等功能,但是这些系统依据的搜寻原理以及搜寻规划方法并不相同。以漂移轨迹预测功能为例,除了使用Monte-Carlo之外,还可以使用拉格朗日法、马尔科夫链等方法。由于在海上搜救领域,迄今为止的大部分工作都是技术报告形式的“灰色文献”,可能不容易获得,也无法通过同行评审进行适当审查,因此我们海上搜救决策支持系统的创新型与实用性需要在具体的业务应用中去进行检验。

表 5 典型海上搜救系统的对比
Table 5 Comparison of typical MSAR systems

国家	系统名称	运行时间	GIS	Monte-Carlo 方法	气象和海洋数据的自动输入	主要功能
美国	SARP	1970 年	×	×	×	
	CASP	1972 年	×	√	×	漂移轨迹预测
	SARMAP	20 世纪 90 年代	√	×	×	漂移轨迹预测 搜寻区域确定
	SAROPS	2007 年	√	√	√	漂移轨迹预测 搜寻区域确定 搜救资源分配
加拿大	CANSARP1.x	20 世纪 80 年代	√	×	×	
	SARPlan	2001 年	√	×	×	搜寻区域确定 搜救资源分配
	ASPT	2019 年至今	√	√	√	漂移轨迹预测 搜寻区域确定 搜救资源分配
英国	SARIS1.x	1998 年	√	×	×	漂移轨迹预测
	SARIS4.x	2020 年至今	√	√	√	漂移轨迹预测 搜寻区域确定 搜寻模式选择 搜救资源分配
意大利	OCEAN-SAR	2016 年	√	√	√	漂移轨迹预测
中国	NMSARSS	2016 年	√	√	√	漂移轨迹预测 搜寻区域确定
	MERDSS	2021 年	√	√	√	漂移轨迹预测 搜寻区域确定 搜寻模式选择 搜救资源分配 自主任务分发

3 结 语

本文首先通过分析给出了海上搜救相关问题的不同分类,然后对国内外经典的海上搜寻理论、搜寻规划方法以及搜救决策支持系统的发展现状进行了归纳总结。最后将结合在本领域的经验及相关研究,给出对于我国海上搜救决策支持领域未来发展的一些理解和思考。

3.1 搜救模式方面

1)完善我国海上联合搜救体制

随着海上搜救行动复杂性的提高,我国需要加强专业救助队伍建设,重视企业及民间志愿者等社会力量

参与救援行动的作用,不断推进“专群结合、军地结合”的海搜救应急协作机制。因此,需要针对军民融合背景下海上联合搜救模式、搜救机制、搜救体系结构总体设计、信息指挥链路优化、智能搜救装备建设与运用等问题展开相关的研究。根据海上联合搜救中存在的冲突类型及特点,通过建立合理的海上搜救联动机制,推动联合搜救指挥组织体系化、情报信息体系化、法律法规体系化,从而提高我国海上搜救协作能力建设水平。

2) 建设新一代海上搜救资源体系

搜救资源能力是海上搜救工作开展的支撑和保障。针对我国大多以行政隶属结构为基础的应急资源储备布局,可以从层级单位间的协同合作视角来研究海上应急资源的布局问题,优化应急资源的选址和配置、创新应急资源的储备管理模式。除此之外,还需要发展研制新一代自动化、智能化的海上搜救资源(例如无人机、无人艇等),优化资源的配备结构,注重物联网等前沿科技在应急管理和资源建设中的应用,研究发展有人装备与无人装备的协同作业,构建能够实现人—环境—任务的高效融合、并具有一定决策能力的智能海上搜救资源体系。

3.2 搜救理论、方法及工具方面

1) 完善海上搜救理论

针对搜救行动中冲突问题的存在,尤其是战场环境下的海上搜救问题,将对抗防御因素及冲突博弈理论应用到海战场搜救决策中去,在海上搜寻规划的研究中考虑实际问题的动态性和不确定性,以提高搜救决策模型的实用性。

2) 应用智能化决策支持方法

随着计算机技术的发展,探索将机器学习、强化学习等人工智能方法应用于海上搜救决策全链条中。目前海上搜救决策支持方法多集中于漂移预测模型的完善、传感器与无人机的应用上,缺少海上搜救资源调度和任务分发等决策模型。国防科技大学应急管理智能决策团队在将新方法、新技术应用到海上搜救决策支持方面做出了一系列的探索,例如:将强化学习方法应用到多无人机协同搜寻规划、将多视图建模方法应用于海战场联合搜救体系的设计、将神经网络方法应用于海上联合搜救风险的分析与评估;后续将继续探索利用智能决策方法以及算法来制定海上搜救计划(包括搜救单元放置数目、类型搭配的问题、搜寻路径规划、搜寻子区域划分、搜救任务的智能分发以及搜救行动方案风险评估)的可能性,从而使得智能决策技术能够覆盖海上搜救决策全链条。

3) 研发海上搜救决策支持系统

海上搜救决策支持系统的应用可以有效地辅助搜救决策者针对搜救过程中结构化、半结构化问题做出科学、合理、高效的决策。前文提及的国内外海上搜救决策支持系统在实际的海上搜救过程中得到了一定的应用,但是囿于海洋环境的动态性、复杂性和不可预测性等特点,相关的模型算法仍然有很大的提升和改进空间;此外,随着计算机科学的发展,新的技术架构层出不穷,为提高和改善决策支持系统的稳定性、可靠性、可扩展性提供了更多可能性。利用新的技术架构研发海上搜救决策支持系统、集成核心决策方法模型、提高多源信息融合处理技术水平,研发海上搜救行动的模拟推演系统等实用工具是未来提高我国海上搜救能力的重要发展方向。

参考文献(References):

- [1] China Maritime Search and Rescue Center. National maritime search and rescue in 2021[EB/OL]. [2021-01-19]. http://zizhan.mot.gov.cn/sj2019/soujiuzx/shujutj_sjzx/. 中国海上搜救中心. 2020 年全国海上搜救情况[EB/OL]. [2021-01-19]. http://zizhan.mot.gov.cn/sj2019/soujiuzx/shujutj_sjzx/.
- [2] International Maritime Organization. Resolution MSC.155(78), Adoption of amendments to the International Convention on maritime search and rescue, 1979[R]. Hamburg: IMO, 1998.
- [3] FROST J R, STONE L D. Review of search theory: advances and applications to search and rescue decision support[R]. Groton: U.S.

- Coast Guard Research and Development Center, 2001.
- [4] KOOPMAN B O. The theory of search. I. kinematic bases[J]. *Operations Research*, 1956, 4(3): 324-346.
- [5] KOOPMAN B O. The theory of search. II. target detection[J]. *Operations Research*, 1956, 4(5): 503-531.
- [6] KOOPMAN B O. The theory of search: III. the optimum distribution of searching effort[J]. *Operations Research*, 1957, 5(5): 613-626.
- [7] LIU G Q. Research on determining sweep widths for sea searches[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. 刘广强. 海上搜寻中确定扫海宽度的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [8] ZHOU T. Research on POD in sea searches[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. 周涛. 海上搜寻中目标发现概率的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- [9] AGBISSOH O D, LI B, AI B, et al. A decision-making algorithm for maritime search and rescue plan[J]. *Sustainability*, 2019, 11(7): 1-16.
- [10] COOPER A C W. The theory of search: optimum distribution of search effort[J]. *Management Science*, 1958, 5(1): 44-50.
- [11] STONE L D. *Theory of optimal search*[M]. New York: Academic Press, 1975.
- [12] BROWN S S. Optimal search for a moving target in discrete time and space[J]. *Operations Research*, 1980, 28(6): 1275-1289.
- [13] WASHBURN A R. On a search for a moving target[J]. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1980, 27(2): 315-322.
- [14] WASHBURN A R. Search for a moving target: the FAB algorithm[J]. *Operations Research*, 1983, 31(4): 739-751.
- [15] 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.
- [16] XUE J, CHEN Z, PAPADIMITRIOU E, et al. Influence of environmental factors on human-like decision-making for intelligent ship[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 186: 106060.
- [17] International Maritime Organization, International Civil Aviation Organization. *International Aviation and Maritime Search and Rescue Manual*[M]. Translated by the Maritime Safety Administration of the People's Republic of China. Beijing: China Communications Press, 2003. 国际海事组织, 国际民用航空组织. 国际航空和海上搜寻救助手册[M]. 中华人民共和国海事局译. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [18] KRATZKE T M, STONE L D, FROST J R. Search and rescue optimal planning system[C]//13th International Conference on Information Fusion. Edinburgh: IEEE, 2010: 1-8.
- [19] STONE L D, KELLER C M, KRATZKE T M, et al. Search analysis for the underwater wreckage of Air France Flight 447[C]//14th International Conference on Information Fusion. Chicago: IEEE, 2011: 1-8.
- [20] STONE L D. Response to discussion by AH Welsh on the AF 447 paper[J]. *Statistical Science*, 2014, 29(1): 104-105.
- [21] STONE L D, KELLER C M, KRATZKE T M, et al. Search for the wreckage of Air France Flight AF 447[J]. *Statistical Science*, 2014, 29(1): 69-80.
- [22] STONE L, STREIT R, CORWIN T, et al. Bayesian multiple target tracking[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2014, 29(8): 23-24.
- [23] STONE L D. Optimal search for moving targets[J]. *Advances in Applied Probability*, 2016, 12(2): 279-280.
- [24] ABI-ZEID I, NILO O, LAMONTAGNE L. A constraint optimization approach for the allocation of multiple search units in search and rescue operations[J]. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 2011, 49(1): 15-30.
- [25] ABI-ZEID I, MORIN M, SNILO O. Decision support for planning maritime search and rescue operations in Canada[C]//ICEIS: International Conference on Enterprise Information Systems. Heraklion: ICEIS, 2019: 328-339.
- [26] SIMARD F, MORIN M, QUIMPER C G, et al. Bounding an optimal search path with a game of cop and robber on graphs[C]//CPI-CLP. CP 2015: the 21st International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming. Stamford: Springer, Cham, 2015: 403-418.
- [27] SIMARD F, MORIN M, QUIMPER C G, et al. Relaxation of the optimal search path problem with the cop and robber game[C]//CPICLP. CP 2014: Doctoral Program of the 20th Conference on Principles and Practice of Constraint Programming. Lyon: Springer, 2014.
- [28] MORIN M, PAPILLON A P, ABI-ZEID I, et al. Constraint programming for path planning with uncertainty[C]//CPICLP. CP 2012: the 18th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming. Heidelberg: Springer, Berlin, 2012: 988-1003.
- [29] MORIN M, THOMOPOULOS R, ABI-ZEID I, et al. Explaining the results of an optimization-based decision support system - a machine learning approach[C]//APMOD: 2016-12th International Conference on Applied Mathematical Programming and Modeling. Brno, Czech Republic: Editions Presses de Sciences, 2016, 14: 8.
- [30] AKBARI A, PELOT R, EISELT H A. A modular capacitated multi-objective model for locating maritime search and rescue vessels[J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 267(1): 3-28.

- [31] ALLOUCHE M K, BOUKHTOUTA A. Multi-agent coordination by temporal plan fusion: application to combat search and rescue[J]. *Information Fusion*, 2010, 11(3): 220-232.
- [32] LIDBETTER T. Search and rescue in the face of uncertain threats[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 285(3): 1153-1160.
- [33] MAKSHANOV A, ERMOLAEV V. On optimizing search efforts (area effectively swept) allocation in the course of search and rescue operations[M]//*Information Fusion and Geographic Information Systems*. Heidelberg: Springer, 2009: 289-298.
- [34] RUSSELL A, QUIGLEY J, VAN DER MEER R. Modeling the reliability of search and rescue operations within the UK through Bayesian belief networks[C]//*Proceedings of the First International Conference on Availability, Reliability and Security*. California: IEEM, 2006: 810-816.
- [35] ZHU Y Z, ZHAO D P, HUANG X L. The optimum principle and method for choosing the rescue ship in rescue at sea[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 1999(4): 48-51. 朱玉柱, 赵德鹏, 黄晓丽. 海上救助工作中救助船舶的优选原则与方法[J]. *大连海事大学学报*, 1999(4): 48-51.
- [36] WANG B Y. Maritime optimal search area research[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016. 王博研. 海上搜寻最佳区域研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [37] XING S W. Research on global optimization model and simulation of joint aeronautical and maritime search[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. 邢胜伟. 海上立体搜寻全局优化模型及仿真研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [38] TAN C Y. On Assessment and management of search & rescue at sea-the research on SAR of Guangzhou salvage[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2003. 谭朝阳. 海上搜救管理及其能力评价——广州救捞局搜救问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2003.
- [39] LV G. Research on marine search and rescue assistant decision-making system based on GIS[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2005. 吕刚. 基于 GIS 的海上搜救辅助决策系统研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2005.
- [40] XIAO F B. Research on the key technologies of maritime search and rescue decision support system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. 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.
- [41] LI W. Research and implement of intelligent decision technology in maritime system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2004. 李伟. 海事系统智能决策技术的研究与实现[D]. 大连: 大连海事大学, 2004.
- [42] HE Y X. Research and design on the SAR DSS[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008. 赫永霞. 海上搜救决策支持系统的研究与开发[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [43] WU H F, SHI C J, ZHANG Q N. A real-time location method of maritime search and rescue targets based on wireless sensor networks; CN103108281A[P]. 2013-05-15. 吴华锋, 施朝健, 张倩楠. 一种基于无线传感器网络的海上搜救目标实时定位方法: CN103108281A [P]. 2013-05-15.
- [44] WU H F, SHI C J, ZHANG Q N. Maritime search and rescue system and method based on wireless sensor network; CN102711246A [P]. 2012-10-03. 吴华锋, 施朝健, 张倩楠. 一种基于无线传感器网络的海上搜救系统及方法: CN102711246A [P]. 2012-10-03.
- [45] WU H F, SHI C J, ZHANG Q N. A maritime search and rescue system based on wireless sensor network; CN202663554U[P]. 2013-01-09. 吴华锋, 施朝健, 张倩楠. 一种基于无线传感器网络的海上搜救系统: CN202663554U [P]. 2013-01-09.
- [46] WU H, XIAN J, MEI X, et al. Efficient target detection in maritime search and rescue wireless sensor network using data fusion[J]. *Computer Communications*, 2019, 136: 53-62.
- [47] HUANG Q Y, CAO Y Z, LIN T Y, et al. Analysis and discussion on key technologies of Marine Security Platform[J]. *Marine Information*, 2018(1): 31-35. 黄全义, 曹英志, 林天埜, 等. 海洋环境安全保障平台关键技术分析与探讨[J]. *海洋信息*, 2018(1): 31-35.
- [48] GAO Y, JIN G, GUO Y, et al. Weighted area coverage of maritime joint search and rescue based on multi-agent reinforcement learning [C]//2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). Chongqing: IEEE, 2019: 593-597.
- [49] XIONG W, VAN GELDER P, YANG K. A decision support method for design and operationalization of search and rescue in maritime emergency[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 207: 107399.
- [50] 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.
- [51] ZHU G H. Research on generation method and application of maritime search and rescue resource scheme based on two-stage model[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020. 朱国海. 基于两阶段模式的海上搜救资源方案生成方法与应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- [52] JIA N, YOU Y, LU Y, et al. Research on the search and rescue system-of-systems capability evaluation index system construction method based on weighted supernetwork[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 97401-97425.
- [53] ZHAO Q, DING J, XIA B, et al. Search and rescue at sea: situational factors analysis and similarity measure[C]//2019 IEEE Interna-

- tional Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), Bari: IEEE, 2019: 2678-2683.
- [54] CANADIAN COAST GUARD. National Search and Rescue Manual[M]. Ottawa: Department of National Defense/Canadian Coast Guard (DND/CCG), 2000.
- [55] MALYSZKO M. Assessment of the potential effectiveness of the WIG craft in search action at sea using SARMAP software[J]. TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2019, 13(2): 437-442.
- [56] RICHARDSON H R, DISCENZA J H. The United States Coast Guard Computer-Assisted Search Planning system (CASP)[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1980, 27(4): 659-680.
- [57] TURNER A C, LEWANDOWSKI M J, LESTER S, et al. Evaluation of environmental information products for Search and Rescue Optimal Planning system (SAROPS)-Version for public release[R]. Groton: Coast Guard Research and Development Center, 2008.
- [58] BMT CORDAH. Search and Rescue information system (SARIS)[EB/OL]. [2021-01-19]. <https://www.bmt.org/our-innovations/bmt-saris/>.
- [59] COPPINI G, JANSEN E, TURRISI G, et al. A new search-and-rescue service in the Mediterranean Sea: a demonstration of the operational capability and an evaluation of its performance using real case scenarios[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, 16(12): 2713-2727.
- [60] GAO S, XU J L, AI B. National maritime search and rescue support platform based on Service-Oriented Architecture[J]. Marine forecasts, 2019, 36(3): 71-77. 高松, 徐江玲, 艾波, 等. 基于 SOA 架构的国家海上搜救环境服务保障平台研发与应用[J]. 海洋预报, 2019, 36(3): 71-77.

Status and Development of Maritime Search Theory and Search and Rescue Decision Support System

YANG Ke-wei, LIANG Xiao-tian, GUO Yu, YANG Qing-qing, JIANG Jiang

(Department of Management Science and Engineering, College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Marine security is an important part of the maritime power strategy. With the development of marine engineering, sea accidents occur frequently. In order to improve the success rate of the maritime search and rescue (MSAR) in China, it is necessary to carry out the search and rescue operations with the help of decision support methods and systems. The future development trends of the maritime search theories and methods and the decision support systems for MSAR are summarized and prospected on the basis of reviewing the current status. Firstly, the classification of different MSAR is given through the analysis, and then the current situations of typical maritime search theories, search planning methods and search and rescue decision support systems at home and abroad are summarized and expatiated. Finally, the directions of the study on the search and rescue decision support system in the new era are discussed. The purpose is to provide suggestions for the construction of maritime search and rescue system in China and securities for the progress of marine engineering.

Key words: maritime search; search planning method; search and rescue decision support system

Received: June 21, 2021