

海上搜救打捞装备发展研究

弓永军¹, 孙玉清^{2*}, 李华军³, 董传明⁴, 张增猛¹

(1. 大连海事大学船舶与海洋工程学院, 辽宁大连 116026; 2. 大连海事大学, 辽宁大连 116026; 3. 中国海洋大学, 山东青岛 266100; 4. 大连海事大学航海学院, 辽宁大连 116026)

摘要: 搜救打捞是海上安全的最后一道防线, 为国家综合运输体系建设、海洋经济可持续发展提供可靠保障; 搜救打捞装备是履行海上人员安全、环境安全、财产救助、应急抢险打捞等公益性职责, 保障国家海上物流供应链安全的重要支撑。本文从目标搜寻定位与探测装备、海上人命救助装备、海上环境救助装备、打捞工程专用装备四方面着手, 全面梳理了国外海上搜救打捞装备的发展现状, 以及我国海上搜救打捞装备的研制与应用进展。与国外发达国家相比, 我国海上搜救打捞装备发展存在搜寻定位装备落后、海上人命救助能力不强、危化品处置能力较低、大吨位沉船打捞能力薄弱等问题。在进一步辨识海上搜救打捞装备发展前沿的基础上, 提出了加大关键装备的研发投入、推动搜救打捞装备的升级迭代、强化科技创新能力以提升装备智能化水平、部署搜救打捞技术装备攻关工程、提供相应产业政策支持等建议, 以期促进我国海上搜救打捞装备高质量发展。

关键词: 搜救打捞; 搜寻定位; 人命救助; 环境救助; 升沉补偿技术

中图分类号: U676.6 **文献标识码:** A

Development of Maritime Search, Rescue and Salvage Equipment

Gong Yongjun¹, Sun Yuqing^{2*}, Li Huajun³, Dong Chuanming⁴, Zhang Zengmeng¹

(1. Naval Architecture and Ocean Engineering College of Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 2. Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 3. Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 4. Navigation College of Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: Maritime search, rescue, and salvage, as the last line of defense for maritime safety, provide a reliable guarantee for the construction of a national transport system and the sustainable development of marine economy. Maritime search, rescue, and salvage equipment is an important support to fulfil public welfare duties regarding life, environment, property rescue, and emergency recovery and salvage, and to guarantee the security of a national maritime logistics supply chain. This study summarizes the global development status of maritime search, rescue, and salvage equipment as well as the research and application progress of these equipment in China from four aspects: (1) target search, location, and detection equipment, (2) life rescue equipment, (3) environment rescue equipment, and (4) salvage engineering equipment. China still lags behind developed countries regarding the maritime search, rescue, and salvage equipment in terms of search and positioning equipment, life rescue capabilities, hazardous chemical disposal capabilities, and the ability to salvage large-tonnage sunken vessels. Therefore, we propose the following suggestions to promote the high-quality development of the maritime search, rescue and salvage equipment in China: (1) increasing investment in the research and development of key

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-02-26

通讯作者: *孙玉清, 大连海事大学教授, 研究方向为船舶辅助机械、救助与打捞技术与装备; E-mail: sunyq@dlmu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“水下工程技术装备与产业链发展战略研究”(2023-XZ-32)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

equipment, (2) promoting the upgrading of these equipment, (3) strengthening the innovation capabilities of the country to enhance the intelligence level of these equipment, (4) establishing major research projects, and (5) providing industrial policy support.

Keywords: maritime search, rescue and salvage; target search and localization; life rescue; environmental rescue; heave compensation technology

一、前言

海洋运输是我国经济命脉的战略基础产业，在对外贸易中占有绝对支配地位。2022年，我国超过90%的对外货物贸易由海运完成，其中，95%以上的进口原油依靠海运，矿石进口量99%的运输渠道依靠海运。随着海洋强国战略的实施，我国的海上油气资源开发、海产捕捞、海洋工程、海水养殖等涉海活动也日益频繁。随着船舶、人员等在海上活动的数量、密度不断加大，发生事故、险情的概率也随之增加。海上危险货物的运输量不断增加，船舶通航环境越来越复杂，航行于我国海域的各类危险品运输船舶日均达1000多艘次，海上交通事故引发的重大溢油及化学品污染的风险也呈上升趋势。近年来，全球气候变化异常，极端自然灾害频发，恶劣的气象和海况导致重特大事件时有发生^[1,2]。海洋运输和海洋工程作为海洋强国战略的重要组成部分，在海上人员安全、财产安全和环境保护等方面面临着巨大挑战^[3,4]。

搜救打捞作为海上安全保障的最后一道防线，为海上活动人员的生命和财产安全保驾护航，为我国海洋经济可持续发展提供可靠保障。“十四五”时期，交通运输部救助打捞局共出动救捞力量4411次；执行特殊应急救援抢险任务1760起；成功救助遇险人员26 230名，较“十三五”时期（救助遇险人员10 827名）增加142.3%；救助遇险船舶2849艘，较“十三五”时期（救助遇险船舶623艘）激增357.3%；成功打捞沉船85艘；获救财产价值达179.9亿元。搜救打捞力量作为保障海上安全的主力军，起到了保驾护航的重要作用。

搜救打捞装备是履行海上人员安全、环境、财产救助和应急抢险打捞等公益性职责，保障国家海上物流供应链安全的重要支撑。海上搜救打捞装备按照功能可以分为目标搜寻定位与探测、海上人员救助、海上环境救助、打捞工程专用装备四大类。目标搜寻定位与探测装备包含卫星、工程专用雷达、红外线、可见光、声呐等^[5,6]，装配的载体包括船舶、

飞机、自主水下航行器（AUV）、无人遥控潜水器（ROV）等^[7,8]。海上人员救助主要包括落水人员搜救、翻扣船救助、大规模遇险人员救助等^[9]。海上环境救助装备主要包括海面溢油的回收清理以及海底沉船或油气设施应急处置装备^[10,11]。打捞工程专用装备涉及大量专用机电液压装备^[12,13]，包括攻千斤、水下除泥卸货、水下抽油、水下焊接、作业工具、沉船起浮等装备。

经过多年的持续发展，我国搜救打捞装备力量不断加强和完善，应对海上突发事件的能力得到显著提升。但是，我国的搜救打捞能力如船舶、飞机、救捞装备等与欧美强国相比，仍存在较大差距^[14]。搜救打捞装备是完成海上应急救援和抢险打捞的重要支撑，也是推动海上搜救打捞能力建设的核心工作之一。切实推动搜救打捞技术装备高质量发展，是提高救助打捞综合能力的根本途径，也是贯彻落实国家交通强国和海洋强国战略的重要内容^[15]。因此，本文对国内外海上搜救打捞装备进行分析，针对我国搜救打捞装备发展中存在的问题提出相应的发展建议，以期为我国海上搜救打捞能力的提升提供借鉴。

二、国外海上搜救打捞装备的发展现状

（一）目标搜寻定位与探测装备发展现状

1. 水上搜寻定位技术与装备

天基海洋目标监视作为卫星技术的重要发展方向，已成为海洋目标监视的重要手段。天基海洋监视卫星主要包括船舶自动识别系统（AIS）卫星、商业合成孔径雷达（SAR）卫星和商业光学遥感卫星。天基海洋目标监视系统是提升全球海洋感知能力的重要装备，具有代表性的系统包括欧洲空间局Sentinel、意大利COSMO-SkyMed、加拿大RadarSat等高分辨率SAR卫星星座以及德国Rubin、加拿大exact-View、美国VesselSat和Aprize-Sat等AIS小卫星星座，天基卫星技术的发展显著提升了海洋目标监视的广域覆盖能力和快速响应能力^[16]。

为了满足海洋目标实时精细化探测与识别的需求,世界海洋大国愈发重视天基海洋目标监视信息融合处理技术的研究,相继建立了基于多源卫星信息融合的海洋目标监视系统,具体如表1所示。

美国的全球定位系统(GPS)是世界上第一个建立并用于导航定位的全球系统,也是最先进、应用最广泛的船载定位终端设备。目前,GPS地面控制系统增加了新导航信号的监测和新增特性的管理与控制等。此外,俄罗斯的格洛纳斯(GLONASS)和欧洲的伽利略(Galileo)作为逐步发展完善的全球卫星导航系统,其船载设备也占有一定的份额。

2. 空中搜寻技术与装备

空中搜寻救助主要依靠固定翼飞机、直升机和无人机等。美国、日本、英国和澳大利亚等国家拥有较为强大的空中搜寻力量。

美国海岸警备队作为海上搜救工作的主要力量,拥有最先进的空中救助技术和装备。2019年,美国已拥有26处航空基地、146架螺旋翼直升机和55架固定翼飞机,可完成短程、中程、远程海上救助任务^[17]。目前,日本也拥有了14处航空飞行基地,33架固定翼飞机和52架螺旋翼直升机。

英国空中搜救直升机多为大型机,其搜救半径为150~200 n mile (1 n miles=1.852 km),英国全部沿海水域可由12架大型直升机完全覆盖。目前,澳大利亚拥有25个固定翼基地,70余个直升机基地,在南半球具备最强的海上搜救能力,可覆盖南太平洋、印度洋与南极洲。

由于无人机具有飞行速度快、机动灵活性强等特点,可以靠近或抵达人类不宜进入的险情事故发生区域开展搜寻救助,并可以快速准确定位遇险目

标和实时传输视频影像,降低搜救人员工作的危险性^[18]。美国海岸警卫队已将“鹰眼”“MQ-9B岸基”“全球鹰”“火力侦察兵”“扫描鹰”等无人机用于海上搜救工作^[19]。欧洲海事安全局使用无人机开展渔业海上监视、船只监视和侦察以及边境巡逻等活动。2022年,日本引进的RQ-4B“全球鹰”高空长航时无人机,配备了光电、雷达和电子监听等侦察设备,可大幅增强远程持续监视能力。

飞机在海面搜寻过程中需要使用光电成像或者合成孔径雷达装备进行海面搜索。在机载光电搜寻系统方面,国外的研究技术已较为成熟,如美国、以色列等国家研制的红外搜寻系统已成功应用于海上搜救任务,并表现出了良好的搜寻能力。

3. 水下搜寻技术与装备

水下搜寻平台是搜寻设备的载体,承担着失事目标搜寻、残骸打捞和人员搜救任务,常见的平台有舰艇、船舶、无人船及水下机器人等^[20]。国外可用于大深度深海探测作业的AUV产品主要包括美国海洋系统(Hydroid)公司的REMUS 6000、挪威的HUGINAUV、美国蓝鳍金枪鱼AUV(Bluefin AUV)和加拿大国际海底工程有限公司(ISE)的探索者级AUV。REMUS 6000自主无人水下航行器作为工作深度最大的AUV,曾参与法国航空公司AF 447大西洋失事飞机的深海搜寻和探测工作。Bluefin AUV包括Bluefin-9、Bluefin-12、Bluefin-21、Bluefin-21 BPAUV等几个系列产品,其中Bluefin-21曾参与马来西亚航空公司MH370飞机的水下搜寻。

水下搜寻装备包括前视声呐探测装备、测深侧扫声呐探测装备、水下声信标搜寻定位装备、水下高清晰光学观测装备以及磁探测装备。美国、

表1 国外多源卫星信息融合海洋监视系统^[16]

国家/组织	项目/系统	数据源	用途
美国	C-SIGMA	AIS卫星、SAR和光学遥感卫星、通信卫星等数据	实现全球海域连续监视
美国	GLADIS	AIS卫星数据和海上浮标等数据	实现全球海域连续监视
加拿大	Polar Epsilon	星载SAR、AIS、LRIT数据和岸基AIS、雷达等数据	海上目标融合跟踪
欧盟	MARISS	岸基雷达、船舶检测/监视系统、星载AIS信息以及卫星遥感图像数据	非法海上活动监控
欧盟	DOLPHIN	星载SAR、AIS、星载光学、岸基雷达、岸基光电系统数据以及SAR/MTI、被动双基地ISAR等数据	海洋边界监视、海上交通、渔业管理
欧盟	LIMS	星载SAR、AIS、LRIT通信卫星数据	地中海目标监视
欧盟	PMAR	星载SAR、星载AIS和岸基AIS数据	非洲海域安全航行
德国	ShipDect	SAR遥感卫星、光学遥感卫星和AIS卫星数据	海上目标监视和预警

注: LRIT表示船舶远程识别与跟踪系统; MTI表示动目标显示系统; ISAR表示逆合成孔径雷达。

英国、加拿大、法国、挪威、丹麦等国家都已配置了许多成熟的水下搜寻装备，其中丹麦 Blue View 公司和 Teledyne Reson 公司、英国 Trittech 公司、挪威 Kongsberg Maritime 和 Norbit Subsea 公司、美国 Far Sounder 公司等都有较全系列的水下搜救装备^[21]。丹麦 Reson 公司的 SeaBat 7125 多波束系统测深仪的最大工作深度为 6000 m，曾参与水下搜寻马来西亚航空公司 MH 370 飞机的黑匣子。

随着水下潜水深度的加深和作业时间的延长，潜水员的作业效率会不断降低。为了适应水下复杂的救援任务，饱和潜水技术的发展大大提高了潜水作业的效率。早在 1962 年，为提升深海的潜水作业能力，美国等潜水技术发达国家开展了一系列试验，进行了增加潜水深度和延伸有效潜水时间方面的研究。1981 年，美国完成了一次“ATLANTIS III”的模拟实验，其下潜最大深度为 686 m，潜水作业人员在大于 650 m 的深度下工作了 7 个昼夜。1992 年，法国科麦思国际控股有限公司（COMEX）进行了一次名为“HYDRA-10”的人体氢氧混合气模拟饱和潜水实验，下潜深度达到了 701 m。2008 年，日本海上自卫队也完成了 440 m 饱和与 450 m 巡回潜水实潜试验，潜水员巡潜深度达 450 m。目前，美国、法国、英国、瑞士、挪威、德国、日本和俄罗斯等国家都已先后突破 400 m 潜水深度。

（二）海上人员救助装备发展现状

1. 翻扣船救助装备

翻扣船救助是一项十分复杂且困难的工作，通常有两种救助方式：一种是派遣专业潜水员穿戴设备进行水下救助，另一种是利用装备在翻扣船船底开孔进行救助。欧美发达国家拥有先进的翻扣船救助技术，包括使用大型起重设备（见图 1）、专业的救援船舶、携带专业潜水器材的潜水员和新型翻扣船救助设备等。针对翻扣船的稳定问题，挪威石油管理局研发了袖珍稳定系统，该系统能够在船舶倾覆的情况下提供稳定支持，以便救援人员和设备进入倾覆的船舶。在翻扣船船底开孔救助方面，美国 AMT International Inc. 公司生产的船舶切割和拆解设备，可用于翻扣船船底开孔操作。

2. 落水人员救助装备

在落水人员救助方面，国外水面救生装备经过多年的技术发展、完善和升级，可以在各种海况下



图 1 大型起重设备对翻扣船进行固定

开展个体落水人员的搜救任务，确保溺水人员的生命安全。美国 Marine Advanced Robotics 公司结合双体船的优点与悬架，研发了波浪适应模块化船舶，增加了船舶的稳定性，减少了连接处的附加荷载。葡萄牙 Noras Performance 公司设计的具有航行能力的 U-Safe 救生圈，将传统救生圈外形改为“U”形，尾部设有一对电动螺旋桨推进器，在救援过程中可以远程遥控至待救人员身边，但与救助船艇相比，其抗风浪能力较差，且动力和速度有限。

3. 海上大规模人员救助装备

近年来，海上大规模人员救助设备的发展一直在不断进步和创新，以提高救援效率和减少潜在风险。挪威 Norsafe 救生艇制造公司生产的自动救生艇采用高科技系统，可以通过遥控和自动化装置实现快速的部署和投放。英国 RFD 救生设备制造公司开发的 Surviva 自动救生艇系统，可以精确地计算宽波、高波和船舶姿态，从而保证救生艇在最恶劣的条件下仍能安全部署。

救生无人机也是大规模海上救助的一项重要技术，可在紧急情况下提供快速、准确的救援支持。澳大利亚 SwellPro 航空器制造公司开发的救生无人机 Splash Drone 3，具备防水设计和浮力模块，可以在水面上漂浮并进行救援任务。美国研发了水下和航空技术相结合的救生无人机 Hydrone RCV，除了具备飞行功能外，该无人机还可在水面上浮，也能潜入水中执行任务。

4. 大吨位难船脱浅

由于设备庞大、工作条件复杂，大吨位难船脱浅属于船舶救援处置难题。荷兰代夫特理工大学研究出一种多目标协同控制方法，使用多艘拖船分别连接难船的船首与船尾，用于在拥挤的水上交通环境中对拖船系统进行控制。该方法能够有效地协调多艘拖船，实现船舶的安全、平稳和快速运输。

克罗地亚萨格勒布大学水下系统与技术实验室研究出一种合作自主机器人拖曳系统 (CART)，并提出了海上遇险船舶打捞作业的新概念。CART 系统能够自动执行将遇险船舶的紧急拖曳系统与拖曳船舶连接的高风险作业。

(三) 海上环境救助装备发展现状

世界各国都普遍重视海洋事故环境救助装备的发展。在油船“威望号”的沉船打捞过程中，西班牙雷普索尔公司通过与美国 Sonsub 公司合作，采用大深度 ROV 150 马力作业级“创新者号”等新技术装备，在近 4000 m 水深成功地完成 1.37×10^4 t 燃油的回收作业。深水泄漏应急处置的首要任务是第一时间进行定位，并找到泄漏点。英国 Sonardyne 公司、挪威 Kongsberg 公司和法国 iXblue 公司是国际上的泄漏点定位主导企业，主要采用长基线声学定位技术。

水下泄漏的挑战是微泄漏定位。英国 CTG 公司 PLK 水下管线泄漏监测系统采用荧光剂法，在墨西哥湾实现了油井微泄漏监测。深水泄漏状态检测通常采用基于二维光学的相机检测技术，水下激光扫描技术已在加拿大 2G Robotic 和 Voyis 的相关产品中得到了应用。深水水下泄漏事故的应急处置主要是要实现带压封堵，美国潮水公司 (TDW) 和英国 STATS Group 公司开发了典型的封堵器 Smart Plug 和 Tecno Plug，解决了管道水下密封与承压问题。表 2 是从事水下泄漏应急处置技术与装备研究的主要机构及装备情况。

当船舶发生搁浅或沉没等事故时，船舶溢油的风险将显著增加，及时高效地抽吸出事故船舶的

燃料油或货油，并将其过驳至安全船舶内，是减轻溢油事故危害的一种有效措施。受限于潜水员作业深度、作业强度等问题，挪威 FRAMO 公司和芬兰 LAMOR 公司开发了自动化程度较高的沉船存油回收作业系统。美国 SLICKBAR 公司研发的水下沉船抽油作业设备，其作业深度浅于 60 m、抽油能力大于 $500 \text{ m}^3/\text{h}$ 。许多发达国家也将 ROV 技术应用于沉船溢油处置，研制了基于 ROV 深水沉船溢油处置系统及装备。2015 年，挪威 Miko Marine 公司研发了一种利用 ROV 进行水下抽油的装置，该抽油装置具有体积小、质量轻、易布放等特点，其作业水深可以达到 300 m。

(四) 打捞工程专用装备

1. 大吨位起浮提升技术及装备

面对大吨位沉船的打捞需求，欧美等发达国家进行了较早的工程尝试。1974 年，美国首次使用大型液压机械抱爪式沉船整体打捞装备、被动升沉补偿和深海探测技术等，对沉没在太平洋 5000 m 水深的前苏联 G 级 II 型核潜艇 K-129 进行了打捞尝试，由于机械结构强度或海况环境等因素影响，导致整体打捞失败。在大吨位沉船起浮过程中，利用升沉补偿装置来减少工程船的随波浪运动影响。2001 年 10 月，俄罗斯联合荷兰的 Mammoet 救助打捞公司进行“库尔斯克号”潜艇的整体打捞工作，潜艇的沉没深度为 108 m，整体质量高达 9500 t。开展打捞的大型驳船安装有 26 套被动升沉补偿器和液压同步提升装置，提升装置牵引 26 条缆绳连接至潜艇外壳，如图 2 所示。

表 2 从事水下泄漏应急处置技术与装备研究的主要机构及装备

机构名称	相关技术内容	相关装备	应用情况
英国 CTG	采用荧光剂法进行泄漏监测	水下管线泄漏监测系统	应用于墨西哥湾马孔多油井，具有超过 25 年的成功记录，适应 3000 m 水深工况
英国 Sonardyne	深水水下定位	推出市场化程度较高的深水 USBL/LBL 定位系统产品	工作水深超过 6000 m，最大作用距离超过 8000 m，测距精度为 0.5% 斜距
美国 Oceaneering	深水管道泄漏维修	液压智能法兰 (HSF) 连接器	为深水油田或潜水员不能进行维修的位置提供理想解决方案
英国 STATS Group	管内封堵器	Remote Tecno plug	能在管道上进行水平、垂直及任意角度的封堵作业
德国 ROSEN	电磁超声波内检测器	电磁超声探头 (EMAT) 管道外涂层内检测器	应用于天然气管道，其轴向定位精度达到 0.1 m，周向定位精度达到 $\pm 10^\circ$

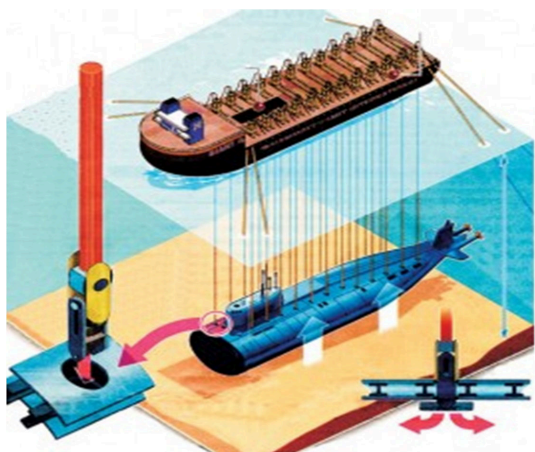


图2 “库尔斯克号” 潜艇起浮过程示意图

2. 沉船除泥卸货装备

沉船及特殊目标物打捞工程一般需要除泥作业。除泥的主要目标是清理沉船周围和内部的泥沙，以便对船体进行进一步的检查和分析。近年来，许多新型的水下机器人技术用于提高除泥效率。除泥作业一般采用吸泥机，荷兰斯密特打捞公司（Smit Salvage）开发的专用吸泥设备可以快速地泥沙从沉船中吸出，大大提高了打捞效率。装载大量货物的沉船在打捞需要提前进行卸货以减轻打捞载荷，同时提高打捞过程的安全系数。英国南安普顿大学的研究团队开展了在恶劣海洋环境中对文物进行保护的方法研究，不仅考虑了沉船货物的高精度提取，还研究了在水下环境中对物品的有效保存和保护。

3. 救助打捞专用船艇

在海上救助活动中，救助船可以完成水域通信、运输、巡逻、侦察、救生等救援任务，是不可或缺的重要角色。美国海岸警卫队装备有巡逻船、破冰船、巡逻艇、训练帆船等各种搜救船艇共 2035 艘，且其搜救船艇基本上是标准化的船只，有利于操作、培训、检查、维护和管理。日本专业救助船艇拥有包括巡视船、消防船、特殊警备救难船、训练船等 700 余艘救助船艇。加拿大海岸警卫队共有专业救助船艇约 200 艘，主要包括破冰船、救生船、环境调查船、气垫船、巡逻舰等。英国皇家海岸警备队拥有 4 艘应急拖船，英国皇家救生艇协会拥有 130 艘全天候工作救生艇和 170 艘近岸救生艇。

饱和潜水支持船是开展大深度潜水作业的重要技术装备。美国、法国和挪威等欧美国家十分重视推进深潜水作业支持船的研究，研制出了一批设计

先进、功能强大的深潜水作业支持船，其具备 400~500 m 深度的水下作业能力。其中，挪威 Subsea 7 系列深潜水作业支持船“Seven Atlantic”是世界上较为先进的潜水支援船，其采用潜水系统与船体一体化设计，总长 145 m，型宽 26 m，并配备有 350 m 饱和潜水系统。

三、我国海上搜救打捞装备研制与应用进展

（一）目标搜寻定位与探测装备

1. 水上搜寻定位技术与装备

在军用方面，我国第一代海洋目标监视卫星系统已建成，初步具有了对全球大范围海洋移动目标的监视能力。在民用方面，我国已布局了“海洋”“高分”“环境”“资源”等民用遥感卫星以及“天拓一号” AIS 小卫星，“珠海一号”“吉林一号”“天拓二号”等商业遥感小卫星^[6]。我国天基卫星系统的发展显著提高了对海洋目标监视的快速响应能力和时空覆盖能力，但是目前在民用的救援领域中应用较少。

交通运输部救助打捞局系统内部已建立了救捞专网专线链路，可用于视频会议、现场图像传输、核心业务系统访问等功能。专业救助船舶上已安装了海事卫星 C 站、F 站、FB 站，VSAT 船载设备，VHF 和 AIS 船台，在船载局域网 1940 kW 以上救助船舶上已布局。专业救助船舶安装了 AIS 船载终端设备，可以通过 AIS 船舶动态监控终端对救助打捞作业船舶的位置进行监控。此外，2023 年 11 月，秦皇岛海胜电子科技有限公司设计研发了船载的“基于北斗技术的多功能集成系统”（MIBT），提升了船舶定位、导航和搜寻的能力。

2. 空中搜寻技术与装备

目前，我国拥有 3 个救助局、5 个救助飞行队，设置有 8 个救助飞行基地，共计各类直升机 24 架，其中 20 架大、中型救助直升机和 4 架卡布里 G2 小型训练直升机。此外，有 6 架 AW189 超中型救助直升机和 2 架 H175 大型救助直升机即将投入使用。在搜寻装备方面，由于我国搜救飞机以进口为主，先进搜寻装备受制于国外进出口管制，仅有几架直升机安装了搜寻装备，其探测性能较差，远远无法满足海上搜救应用，迫切需要研发适用于海上搜寻的光电成像与合成孔径等技术装备。

在无人机方面,基于小型多旋翼无人机、复合翼无人机的海事巡航监管应用技术已经比较成熟。扬州、张家港等海事部门先后采用“大疆经纬300”等多型多旋翼无人机、复合翼无人机开展海事日常巡逻、违法行为取证、船舶尾气监测等海事监管作业。但是,面向深远海域的无人机搜寻技术装备仍处于起步阶段,特别是针对长航时、恶劣海上环境、长距离通信传输、目标搜寻装备、智能目标检测等技术方面的问题仍需进行专项攻关。

3. 水下搜寻定位技术及装备

20世纪90年代,我国开始研制AUV系统平台,经过30余年的不懈努力,先后成功研制了一系列AUV装备产品,并在长航程、大深度等技术指标上取得了突破。中国科学院沈阳自动化研究所面向海洋科学研究和深海资源调查的需求,分别研发了“探索”系列AUV和“潜龙”系列深海AUV,其中“探索”系列主要用于海洋科学研究,“潜龙”系列主要用于深海资源勘查。此外,哈尔滨工程大学研制了1000米级的AUV“智水-IV”,天津大学研发了2000米级海底勘测AUV。

国内在水下声呐、水下相机等方面也取得了一定成效。中国科学院声学研究所研制了高分辨率测深侧扫声呐,该系统能够同时获得海底地形和地貌信息,测深覆盖范围为两侧共500 m,侧扫声呐的覆盖范围为两侧共800 m,水平波束开角 1.5° ,垂直航迹分辨率为5 cm。哈尔滨工程大学研究团队研制的水下航行器通过搭载多波束测深系统、侧扫声呐等传感器、立体阵接收换能器及矢量水听器,可以实现对失事目标黑匣子进行信号检测、定向、测距及目标成像一体化搜寻^[21]。

近年来,我国的饱和潜水技术发展有效提升了深水作业能力。2006年,我国饱和潜水技术的下潜深度为103.5 m,实现了饱和潜水零的突破;2014年下潜深度至313.5 m。2021年6月,我国完成了500 m饱和潜水土基载人实验,标志着我国在有人潜水领域步入了世界先进行列,自主掌握了大深度饱和潜水核心技术。目前,我国救捞系统拥有1艘300 m饱和潜水作业母船,在建1艘500 m新型深潜水工作母船,配置了各种饱和潜水系统和装备,包括供管式潜水装具、防污染潜水装备、便携式医疗加压舱、潜水供气装备、自携式潜水装具等支持类装备。我国已建成或正在建造多艘/型深潜水作业

支持船,但是在饱和潜水作业系统配置和高端深潜水作业支持船自主研发等方面仍部分依靠国外技术。

(二) 海上人员救助装备

1. 翻扣船救助装备

针对翻扣船内部被困人员自行从船舱内部由船底向船体外部逃生的问题,国内翻扣船救助设备也取得一定进展。交通运输部北海救助局研制了一种用于翻扣船救援的快速开孔设备,利用磁座固定在船板上,利用高速旋转的刀具进行开孔,该设备实现了船底开孔救援的功能。针对没有搭载逃生系统的钢制翻扣船的救助,武汉理工大学研究团队设计了一种倒扣船舶开孔气密舱,通过交替打开内外两个舱门使被困人员能够逃离翻扣船的同时防止船舱内的气体逸出。此外,大连海事大学研究团队设计出一种在保障翻扣船的平衡状态前提下,可实现密封探测、补给功能的设备,从而提升了翻扣船被困人员的救助效率^[23]。

2. 落水人员救助装备

目前,国内很重视水上人命救生装备相关技术的研发,抛绳器、救生捞网、无人艇等救助装备可将落水人员救援至直升机或救助船等安全地点,提高落水人员生还的概率。为了能在特殊环境下对船舶落水人员进行可靠的施救,研究人员开展了远程遥控水面救助机器人研发^[24],该设备便于操控,能适应大风浪天气下的航行,机动性能良好。中国云洲智能科技有限公司研制的M75无人水面救助艇,具有搜寻、通信和救援模块。

3. 海上大规模人命救助装备

近年来,我国海上大规模人命救助设备得到了显著提升。CS Rescue 8000是我国研制的一款8米级别的大型救生艇,可搭载12名乘客和2名船员,其装备有动力驱动系统,可以在海上高速航行,达到快速响应和救援的能力。CDM-100是我国自主研发的大型救生艇,具有良好的稳定性和波浪适应能力,可以在恶劣的天气条件下进行救援行动。我国交通运输部救援船队配备的“救助济安-1”是一种大型救生艇,具备高速、大船体和大载客能力的特点,能够在灾害和事故现场全面展开救援工作(见图3)。

4. 难船脱浅装备

在难船脱浅救助方面,上海船舶设计研究院设计出了一种深远海大型多功能综合救助船,其配备

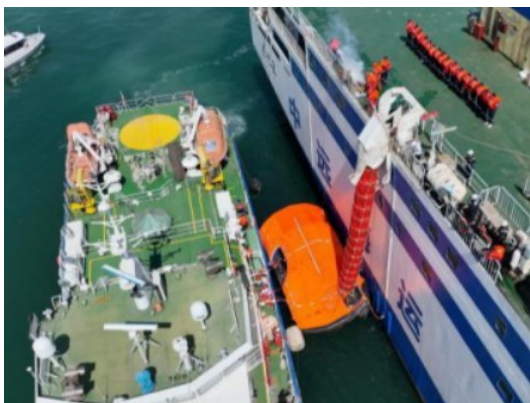


图3 海上大规模人命救助现场

全海深多波束系统、深拖系统、500 t 大型拖缆机、高冗余度三级动力定位系统、250 t 主动升沉补偿起重机、无人驾驶高速救助工作艇、直升机起降平台和机库等作业设备和系统设施，具备水面搜寻救助、深远海拖曳救助、海空立体搜寻救助、饱和潜水、应急抢险救助、对外消防灭火、水下救助打捞等功能。

拖船和绞车是难船脱浅的重要装备。上海海事大学针对拖船航行中保持最佳燃油消耗率的要求，提出固定值控制燃油喷射的方案，其混合能源配置优化系统可以显著降低拖船等施工船舶的燃油消耗率。大连海事大学研究团队成功研制了全海深地质绞车系统，关键核心部件实现了 100% 国产化^[25]。

（三）海上环境救助装备

我国海上溢油应急救助能力显著加强，救助装备作业效率稳步提高，有效保护了我国海洋的生态环境^[26]。我国的溢油处置装备已初步实现了沿海离岸 50 n mile 以内水域溢油清除能力不低于 1000 t，重点水域不低于 10 000 t 的目标。目前，我国救捞系统拥有 1 艘（建造中 2 艘）溢油回收能力 400 m³/h、污油回收舱容 3000 m³ 的大型溢油回收船 1 艘、改装的溢油回收船 9 艘，从国外引进 1 套芬兰劳模侧挂式溢油回收机（LSC-5C/2300）、2 套芬兰劳模内置式溢油回收机（LSC-5C/270）、1 套挪威弗莱姆移动式溢油回收机（TransRec 125）、1 套 LFF-400W 溢油回收机和 1 台 LFF-200C 溢油回收机，并配置了 JHY-CYN200 型储油囊（1000 m³）、JHY-CYN100 型储油囊（300 m³）和 JHY-ZW3 型充气式围油栏（2000 m）。我国溢油处置能力有了显著提升，但关键装备技术仍依赖于进口。

我国在深水油气泄漏的定位、探测和封堵方面也取得了一些成果。中海辉固地学服务（深圳）有限公司在深水油气设施检修定位方面，采用基于长基线、超短基线融合多源辅助传感器的综合定位技术，在陵水深海油田实现了水下 0.3 m 的定位精度，如图 4 所示。哈尔滨工程大学主导研制的水声综合定位导航系统，在大洋科考中实现了优于 1 m 的定位精度。天津水运工程科学研究院提出一种海底目标物探测声呐匹配算法，可实现水下泄漏的声学探测。天津大学研制了管内智能检测球，体积小、通过性好，能够有效避免卡堵问题。

我国国家石油天然气管网集团有限公司研发了一种带压螺塞式封堵器，可以允许在不降低管线压力和放空管线的情况下对管线进行维修，从而减少停产时间。中国石油大学（北京）与大连海事大学联合开发了一种深水管内智能封堵技术，形成了多种管道应急处置技术试验平台，可实现陆上 10 MPa 封堵压力测试，突破了封堵器由开孔进入管道的结构性局限。

国内水下抽油技术装备研究起步较晚，常规的水下抽油清污 / 深水无人抽油作业模式都是由潜水员来完成水下勘察、清理、设备安装以及拆卸作业等各工艺环节^[27]。交通运输部水运科学研究院联合中国科学院沈阳自动化研究所共同研发了 ROV 辅助水下抽油清污一体化机的作业系统（见图 5），由 ROV 拖带辅助完成钻孔和抽油作业，主要作业流程可通过水上远程控制实现。

（四）打捞工程专用装备

1. 大吨位起浮提升专用装备

上海打捞局在 2017 年对韩国大型渡轮“世越号”沉船进行整体起浮作业（见图 6），标志着我国在沉

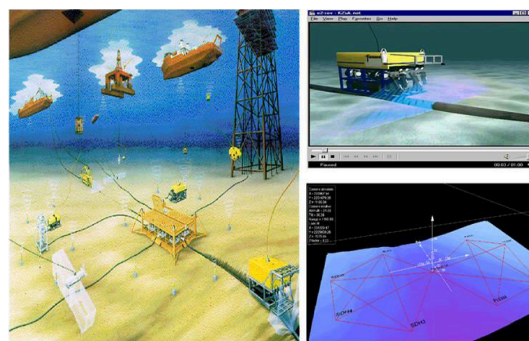


图4 深水油田水下长基线定位应用示意图



图5 ROV 携带水下抽油清污一体化机



图6 “世越号”沉船打捞现场

船救助打捞和大吨位起浮领域取得了技术突破^[28]。在“世越号”沉船打捞过程中，上海打捞局使用了包括双驳抬撬打捞方法、被动升沉补偿和液压同步提升等关键技术，展现了与国外比肩的技术水平。

液压同步提升技术负责将大吨位抬浮中多个液压提升装置联合起来进行同步作业，是大吨位打捞能力的核心技术之一。在船载升沉补偿方面，杭州国辰正域科技有限公司开发了国内首套加装在风电运维船上的运动补偿平台，可以有效补偿登靠步桥的垂荡和横纵摇运动。上海海事大学研究团队设计并试验了一种200吨级半主动升沉补偿提升绞车，其半主动补偿器的平均位移补偿率可以达到92.9%。针对在大吨位沉船的多缆起浮打捞场景中升沉补偿技术问题，大连海事大学研究团队开展了一系列研究，主要包括构建双驳抬撬多体动力学系统模型和液压被动、半主动升沉补偿系统模型，利用数值模拟、水动力分析和理论推导等对水下沉船精准定位与姿态探测等。

2. 沉船除泥卸货装备

国内的除泥技术主要依赖于吸泥船和挖泥船。这些设备通过强大的吸力或者切割力将泥沙从沉船中移出。我国在大型泥沙疏浚装备研发方面处于领先地位，但针对沉船打捞的小型吸泥装置研发力度不够。近年来，我国在沉船除泥方面的研究也较为

丰富，涉及到潜水员操作、吸沙船技术、水下机器人等多种方法。在沉船卸货打捞方面，在“南海一号”沉船打捞过程中，相关科研人员就利用了先进的卸货设备和技术，成功地将大量珍贵文物安全地提取出来。

3. 救助打捞专用船艇

海上专业救助船和打捞船是实现海上人命搜救和财产救助的重要保障。目前，我国救捞系统拥有74艘救助船、142艘打捞工作船舶、23个救助基地，争取做到危难关头、紧急时刻，冲得上去、救得下来，潜得下去、捞得起来。2024年1月，我国14 000 kW大型深远海多功能救助船投入使用，这是我国迄今为止研发设计建造的主尺度最大、综合救助能力最强、科技含量最高的新一代“深海救助母舰”，也是目前全球最大、最先进的深远海全天候、大功率、多功能综合立体救助船，将有力提升我国深远海综合救助和应急处置能力。

四、我国海上搜救打捞装备存在的不足

近年来，我国海上搜救打捞装备取得了跨越式发展，但与国外发达国家的发展水平和国内人民群众日益增长的需求相比，我国的海上搜救打捞装备在遇险目标快速搜寻定位、海上人命救助、危化品处置、大吨位沉船打捞等方面仍存在着技术相对落后、救助能力不足、综合性能不高、实力不强等问题。

（一）遇险目标快速搜寻定位装备相对落后

我国已形成较为完善的海上应急救援体系，可开展一定范围内的海空联合搜救任务，但由于我国海域辽阔和海岸线漫长，现有的空中搜救装备及救援能力存在较大短板。在搜寻装备方面，由于我国搜救飞机以进口为主，先进搜寻装备受制于国外进出口管制，仅有几架直升机安置了搜寻装备，其探测性能较差，远远无法满足海上搜救应用，迫切需要研发适用于海上搜寻的光电成像与合成孔径等技术装备。我国在深远海域的无人机搜寻技术装备方面仍处于起步阶段，特别是针对长航时、恶劣海上环境、长距离通信传输、目标搜寻装备、智能目标检测等技术方面的能力仍相对较弱。相比于国外的成熟水下搜寻定位技术及装备产品，我国仍处于科研试验阶段，在产品的可靠性、使用便捷性以及稳

定性方面仍然存在较大的差距。

（二）海上人命救助能力未满足需求

当面临大型海洋事故时，通常需要海上大规模人命救助装备。海上大规模人命救助是指对发生海难或灾害造成大量人员在海上遇险的情况下进行规模较大的救援行动。从救助力量的出动到成功救援，难以逾越的是救助环境的限制。救助直升机和救助船艇在普通的海况环境中都可以成功救助人命，但是海上遇险事件往往是在恶劣环境下发生，海况越恶劣，遇险事件越紧迫，救助难度就越大。因此，海上人命救助的瓶颈就是“恶劣海况”环境。此外，黑夜环境中海上能见度差，救助对象距离远等都将成为恶劣环境的特定困难。人命救助的关键就是如何利用精良的装备、依靠高技术水平的救助人员、突破恶劣海况的限制，采用先进的救助技术和装备开展成功高效的救援。

（三）大规模溢油、深水沉船油污及危化品处置能力低

危化品事故处置的高技术装备需求越来越迫切，形势更显严峻。与其他海洋环境污染事故相比，海上运输的危险品具有易燃、易爆、有毒和有害等特性，一旦运输船舶发生碰撞或泄漏容易引发火灾、爆炸和环境污染等重大灾害事故。危化品泄漏后的变化特征十分复杂，主要表现为泄漏种类繁多，且入海后危化品的化学和物理形态会发生显著变化。当前，我国水面溢油回收能力为 400 m³/h，水下抽油作业深度为 60 m 以浅，水下应急抽油能力为 350 m³/h。面对特大溢油和深水沉船油污、危险品事故的巨大风险，我国的处置能力还相当薄弱，且关键装备技术仍依赖于进口。

（四）大吨位沉船打捞装备能力仍显薄弱

随着大吨位船舶不断增多，海上应急抢险打捞形势愈加严峻，一旦出现大吨位船舶在港区或主航道沉没，极易导致整个港口或航道的瘫痪，带来严重的环境灾难。目前，我国中小型船舶的起浮打捞相关技术和装备较为成熟，而大吨位船舶沉没事故相对处置难度大、次数少、周期长，现有的救助打捞装备在作业深度、能力和效率上都难以满足大吨位沉船应急抢险打捞作业的需求。此外，在开展实

际工程前进行的包括驳船水动力分析、系泊系统分析以及结构强度分析等过程都比较依赖国外主流有限元仿真软件和数值模拟软件，国产化的打捞仿真和模拟软件的基础仍十分薄弱。

五、我国海上搜救打捞装备前沿发展方向

（一）深远海遇险目标搜寻定位与探测

在卫星搜寻定位方面，针对远海搜寻定位难题，围绕北斗、海事卫星、VSAT 卫星、交通 VDES 卫星、AIS 卫星、遥感卫星等多通信融合的前沿技术和装备开展研究。① 针对通信、导航、遥感一体化搜寻卫星系统和关键载荷设计，研究卫星组网模式和星座模式；② 研制 AIS 卫星星座、遥感卫星星座以及导航卫星星座等空间基础设施的一体化搜寻应用平台；③ 研发多环境要素耦合的综合感知技术及装备，实现深远海关键航路海域环境及复杂交通态势的全面感知；④ 针对深远海特有通航环境导致通信保障难的问题，研究标准、开放、可扩展的多频多模、高可靠通信技术；⑤ 研发支持北斗、海事卫星、VSAT 卫星、交通 VDES 卫星等多种通信手段融合的船载综合无线电通信系统。

在空中搜寻方面，相关前沿技术和装备研究方向包括：突破无人机船载起降、大风浪飞行以及无人机防沉定位等技术，研制海上搜救无人机平台，满足恶劣的海上工作条件；研发融合第四代移动通信/第五代移动通信（4G/5G）+卫星的无人机载图像传输模块，实现船-岸、船-无人机、无人机-岸的实时通信和数据传输。

围绕水下搜寻方面，开展机载光电吊舱系统、雷达、合成孔径雷达、GNSS-R 和合成孔径声呐等搭载探测装备的前沿技术与装备研究。① 研制面向广域搜寻的机载光电吊舱系统，满足海上大范围、高分辨率搜寻要求；② 研究单光子激光雷达、合成孔径雷达、GNSS-R 等先进探测技术，实现全天候、全天时、恶劣条件下的遇险目标探测；③ 突破适合于深海搜寻的高精度多波束测深仪、合成孔径声呐、磁力探测仪等协同搜寻设备研制的关键技术；④ 研究 AUV 在不同水域场景下最优搜索能力的设备配置；⑤ 开发基于 AUV 矩阵式阵列的多海深协同搜寻技术。

（二）恶劣海况下的海上人命救助

针对翻扣船的救助打捞问题，重点开展船内监视、通信、搜寻、救援等前沿技术和装备的研制。

① 研制翻覆船舶的勘察、拍摄和搜寻被困者的设备；② 研发准确定位翻覆船舶和被困者的技术；③ 研发船舶翻覆现场的监视、通信和救援任务的先进无人机救援系统；④ 研制高强度船用绳索，用于固定和稳定翻覆船舶；⑤ 研发性能优良的护栏和支撑器，以增强翻扣救援装备的稳定性，为救援力量提供支撑和保护；⑥ 研制多功能救生艇，实施翻覆船舶被困者的救援；⑦ 开发气囊救援系统，提供浮力和稳定遇险船舶，实现翻扣救援。

围绕海上落水人员的救助需求，重点考虑人员定位、通信、搜寻和救助等方面的技术与装备研发。

① 研究高可靠性的人工智能图像识别技术，实现远距离自动识别和定位落水人员，提高救援效率；② 研究新型起重装备和救生索具，实现落水人员的迅速抬起；③ 研发紧急救生装备，给落水人员提供浮力和保护；④ 开发新型无人机搜索系统，为无人机配备红外热成像摄像头和高清摄像头，实现搜索和定位落水人员；⑤ 装备性能稳定的远程通信设备，用于与落水人员进行联系和协调救援行动；⑥ 研制新型智能救生装备，实现主动送救、主动报警和自动定位等功能。

此外，结合人工智能、新能源和新一代信息技术等，开发海上大规模人命救助的新技术和新装备。① 研究船舶自主导航和自动化技术，实现救生船舶的无人操作和监控；② 研制新型水下搜救机器人，实施被困人员的搜索和救助，实现精确定位和救援；③ 开发水上救生飞艇，使其具备垂直起降和长时间飞行能力；④ 研究新型多功能救生衣，除了提供浮力，还配备发光、发声、定位和通信等功能；⑤ 研发先进的紧急救生通信系统，实现与被困人员的远程通信，加强指挥和救援协调；⑥ 研发适用于水下的生命探测技术，探测海上人员的生命迹象。

（三）高效的环境救助装备

随着大型石油码头、海上石油平台、海上油田等的大规模发展，溢油回收船必然会向专业化、大型化的方向发展。① 研究新型溢油船装备，提升其回收能力、作业效率和动力系统；② 提升溢油船的

研发设计能力，实现核心装备和系统的国产化，特别是在溢油回收设备、溢油检测系统、船舶动力系统、控制设备等方面；③ 提升环境救助装备的智能化、无人化救助装备技术水平，有效保障消防人员和救助船舶的安全。

（四）大吨位提升与大深度作业装备

面对日益多样的大吨位沉船应急抢险打捞的需求，重点围绕大吨位提升与大深度作业装备领域进行技术突破。① 研发钢绞线液压同步提升系统，通过电液比例控制技术，实现液压提升中的同步控制和精度；② 针对不同作业工程的打捞设备布置和作业要求的差异，研制模块化大吨位提升装备，提高作业设备的通用性，不断提升液压系统的可靠性；③ 研究双泵、双比例阀和双主回路系统，实现连续提升、连续下降以及大流量驱动。此外，拖曳水动力性能预测、搁浅船舶舱室调压脱浅方案优化、多目标协同控制方法、燃料消耗优化控制方案是脱浅技术装备的重点研发方向。

六、我国海上搜救打捞装备发展建议

（一）加大关键装备的研发投入

强化搜救打捞领域关键核心技术装备研发力度，加大在搜救打捞领域前瞻性、战略性技术的研发投入。建议瞄准高海况条件下群体性遇险人员救助、大吨位大深度沉船快速整体打捞、深远海搜寻扫测定位、大面积海上溢油和沉船存油及危化品污染等重大需求，合理加大关键装备的研发投入，强化和突出核心装备及配套技术的未来主体地位，在深远海半潜式打捞起重船、大型深远海多功能救助船、深潜水装备、水下机器人研发等方面实现重点突破，形成支撑系统化搜救打捞作业能力，提升我国深远海搜救打捞装备的全球竞争力和控制力。同时，通过引进国外先进技术，重点攻关，协同作业，推动救助打捞装备资源整合，为深远海搜救打捞建立成体系的装备链和产业链做铺垫。

（二）推动搜救打捞装备的升级迭代

瞄准新一代信息技术、人工智能、新材料、新能源和新装备等世界科技发展前沿，发展多系统多网络互联互通的综合搜救打捞系统平台，提供层级

递进的立体搜救服务、多元化的打捞装备产品、高效可靠的搜救打捞保障服务。构建信息化、无人化、智能化作业系统和装备体系,不断推动搜救打捞装备的升级迭代,形成海面和水下目标搜寻探测、海上人命救助、环境救助、沉船沉物打捞核心装备链。建立直升机、固定翼机和无人机群组,构建海事卫星网,打造岸基、海上、空中和空间一体化的搜救打捞装备体系。建造大功率救助船,并配备先进深水扫测设备,具备多种条件下的深水救助打捞作业能力。

(三) 强化科技创新能力以提升装备智能化水平

围绕人命环境财产救助、应急抢险打捞、防治重大海洋环境污染等关键问题,依托互联网+、大数据、云计算、5G、人工智能、北斗等新技术应用,强化信息化基础,推动救捞设备的核心要素数字化、网络化、智能化发展,提升搜救打捞装备科技创新研发能力。构建“覆盖近海、兼顾远海天地一体、网信融合”的搜救通信网络,完善船舶通信、航空通信、水下通信和卫星通信等通信系统,实现船-岸、机-岸、船-机高效互联互通。完善科技创新激励机制,加大科研经费保障力度,推动形成饱和潜水、深远海搜寻救捞等一批具有代表性的高科技装备成果。加强创新人才培养力度,以关键核心技术装备为靶向,培养一批以搜救打捞技术装备研发、深海搜寻扫测技术装备应用和大吨位沉船打捞装备等为重点方向的科技领军人才。

(四) 部署搜救打捞技术装备攻关工程

建议发挥我国体制机制优势,聚焦深远海搜救打捞核心装备的研发,实施高校、科研院所与企业的联合攻关,围绕大型客船、危化品船舶和深远海险情应急处置和搜救能力的建设,开展深远海立体搜寻技术与装备、深远海应急救助技术与装备、大吨位深水抢险打捞技术与装备、深远海环境救助技术与装备等领域的关键技术装备攻关工程,推进“产学研用”深度融合,强化科技人才在深远海搜救打捞科技创新中的重要作用,促进搜救打捞领域的技术装备、人才队伍和经济效益的综合发展。

(五) 提供相应产业政策支持

出台高端搜救打捞装备制造产业高质量发展的

相应支持政策,深入推进军用与民用相结合或技术引进,如借助军用直升机的研发能力,推动军用直升机产业向民用救助直升机研发溢出。出台装备研发制造、先进装备技术引进等方面的免税和补贴等财政优惠政策,以及先进高端搜救打捞装备研发的奖励制度等,积极与欧美国家的先进搜救打捞装备制造厂商洽谈合作,吸引共建合资公司,加快重要核心搜救打捞装备国产化进程。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 23, 2024; **Revised date:** February 26, 2024

Corresponding author: Sun Yuqing is a professor from Dalian Maritime University. His major research fields include ship auxiliary machinery, rescue and salvage technology and equipment. E-mail: sunyq@dlmu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Development Strategy of Underwater Engineering Technology Equipment and Industry Chain” (2023-XZ-32)

参考文献

- [1] 林婉妮,王诺,高忠印,等. 边远海域救援船舶与直升机联合搜救优化[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 187-199.
Lin W N, Wang N, Gao Z Y, et al. Associated searching and rescuing optimization of salvage vessels and helicopters in remote sea area [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 187-199.
- [2] 朱焱,牟林,王道胜,等. 海上搜救辅助决策技术研究进展[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(3): 440-449.
Zhu K, Mu L, Wang D S, et al. Advance in maritime search and rescue decision support techniques [J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(3): 440-449.
- [3] 尹杰,虞兰兰,杨丽芬,等. 渤海海域搜救困难度研究[J]. 海洋通报, 2023, 42(5): 574-584.
Yin J, Yu L L, Yang L F, et al. Evaluation and analysis of maritime search and rescue difficulty in the Bohai Sea [J]. Marine Science Bulletin, 2023, 42(5): 574-584.
- [4] 杨克巍,梁笑天,郭巧,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.
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.
- [5] 李洪烈,王倩,宋斌. 卫星通信导航在海上搜救的应用[J]. 无线电工程, 2017, 47(6): 15-19, 37.
Li H L, Wang Q, Song B. Application of satellite communication and navigation in maritime search and rescue [J]. Radio Engineering, 2017, 47(6): 15-19, 37.
- [6] 申翔,吴培仁. 基于北斗卫星导航系统的海上应急搜救系统[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(6): 43-49.
Shen X, Wu P R. Maritime emergency SAR system based on Beidou

- navigation satellite system [J]. *Command Control & Simulation*, 2018, 40(6): 43–49.
- [7] 顾临怡, 宋琦, 殷宏伟, 等. 基于 ROV 等载体的水下搜救流程综述 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48(9): 1137–1151.
Gu L Y, Song Q, Yin H W, et al. An overview of the underwater search and salvage process based on ROV [J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2018, 48(9): 1137–1151.
- [8] Wang Y D, Liu W Z, Liu J, et al. Cooperative USV-UAV marine search and rescue with visual navigation and reinforcement learning-based control [J]. *ISA Transactions*, 2023, 137: 222–235.
- [9] Robert B, David M, Joshua R, et al. Maritime search and rescue in Canada and the use of emergency radio beacons [J]. *Marine Policy*, 2023, 147: 105261.
- [10] Zhang W P, Li C X, Chen J H, et al. Governance of global vessel-source marine oil spills: Characteristics and refreshed strategies [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 213: 105874.
- [11] Abhinav D, Pradipta C. A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112428.
- [12] Zhang F R, Hou J Y, Ning D Y, et al. Performance analysis of the passive heave compensator for hydraulic shipwreck lifting systems in twin-barge salvaging [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114469.
- [13] 周东荣, 陈世海, 朱小东, 等. 一种无接触式整体打捞技术在古船整体打捞项目中的应用 [J]. *上海交通大学学报*, 2023, 57(S1): 159–169.
Zhou D R, Chen S H, Zhu X D, et al. Application of a non-contact integrated salvage technology in integral salvage of ancient vessels [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2023, 57(S1): 159–169.
- [14] 王祖温. 救助打捞装备现状与发展 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(20): 91–100.
Wang Z W. Current development of rescue and salvage equipments [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(20): 91–100.
- [15] 杨立波. 远海深海搜救装备建设思路研究 [J]. *海洋开发与管理*, 2017, 34(6): 96–99.
Yang L B. Oceanic and deep-sea search and rescue capacity construction [J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(6): 96–99.
- [16] 何友, 姚力波. 天基海洋目标信息感知与融合技术研究 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(11): 1530–1536.
He Y, Yao L B. Space-based sea target information awareness and fusion [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1530–1536.
- [17] 赵杰超, 金浩, 陈健, 等. 水上应急救援关键装备技术现状与发展 [J]. *中国机械工程*, 2022, 33(4): 432–451, 458.
Zhao J C, Jin H, Chen J, et al. State-of-the-art of key maritime rescue and salvage equipment and technology [J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(4): 432–451, 458.
- [18] 张寒, 黄炎焱, 耿泽, 等. 海上被动无人搜救路线规划方法 [J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*: 1–14 [2024-01-10]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230733>.
Zhang H, Huang Y Y, Geng Z, et al. Passive unmanned maritime search and rescue routing method [J/OL]. *Journal of Jilin University (Engineering Edition)*: 1–14 [2024-01-10]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230733>.
- [19] 孟祥尧, 马焱, 曹渊, 等. 海洋维权无人装备发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 49–55.
Meng X Y, Ma Y, Cao Y, et al. Development of unmanned equipment in marine rights protection [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 49–55.
- [20] 全世豪, 孙建波, 陈亚辉, 等. 面向海上搜救的 ASV 与 AUV 的协同控制 [J]. *船舶工程*, 2023, 45(7): 1–8.
Tong S H, Sun J B, Chen Y H, et al. Cooperative control of ASV and AUV for marine search and rescue [J]. *Ship Engineering*, 2023, 45(7): 1–8.
- [21] 李向阳, 陈立纲, 姜岳. 无人水面艇声呐装备现状与发展趋势 [J]. *声学及电子工程*, 2022 (3): 1–7.
Li X Y, Chen L G, Jiang Y. Present situation and development trend of sonar equipment for unmanned surface craft [J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2022 (3): 1–7.
- [22] 李海森, 张阳, 朱建军, 等. 失事目标水中搜寻技术发展现状及趋势 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(4): 546–553, 579.
Li H S, Zhang Y, Zhu J J, et al. Development status and trends of underwater search technology for wrecked targets [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(4): 546–553, 579.
- [23] 田津昕, 宁大勇, 侯交叉. 翻扣船探测补给装置研制及仿真 [J]. *船舶工程*, 2021, 43(S1): 286–289, 410.
Tian J X, Ning D Y, Hou J Y. Development and simulation of detection and replenishment device for flip-flop ship [J]. *Ship Engineering*, 2021, 43(S1): 286–289, 410.
- [24] 朱海涛. 水面救助机器人的设计与应用前景 [J]. *中国水运*, 2019 (11): 64–66.
Zhu H T. Design and application prospect of surface rescue robot [J]. *China Water Transport*, 2019 (11): 64–66.
- [25] 李文华, 柯思诚, 宋晓华, 等. 深海绞车系统收放缆过程及动力行为 [J]. *船舶工程*, 2022, 44(11): 1–7, 30.
Li W H, Ke S C, Song X H, et al. Cable retraction and release process and dynamic behavior of deep sea winch system [J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(11): 1–7, 30.
- [26] 郑云亮, 赵杰超, 王吉武, 等. 水上危化品运输事故分析及应急处置能力提升研究 [J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(9): 69–74.
Zheng Y L, Zhao J C, Wang J W, et al. Analysis of maritime transport accidents of hazardous chemicals and research on the improvement of emergency response capabilities [J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(9): 69–74.
- [27] 刘伟, 张增猛, 孙坐福, 等. 沉船水下开孔抽油技术的研究现状 [J]. *船舶工程*, 2017, 39(S1): 235–239, 274.
Liu W, Zhang Z M, Sun Z F, et al. Research status of technology on underwater opening and pumping oil from Sunken ships [J]. *Ship Engineering*, 2017, 39(S1): 235–239, 274.
- [28] 燕铄锋, 张峰瑞, 李腾, 等. 大吨位海底沉船抱捞液压驱动回路设计与结构设计 [J]. *液压与气动*, 2023, 47(11): 128–135.
Yan S F, Zhang F R, Li T, et al. Hydraulic driving system and structure design of a salvage claw for large-tonnage shipwreck [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2023, 47(11): 128–135.