

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250219005

智能水域应急搜救装备发展现状与趋势*

谢鹏¹, 赵文强¹, 胡卫建¹, 李伟华¹, 朱仲本², 韩世林², 白桂强²,
韩莉¹, 朱笑然¹, 李立¹, 尚红¹

(1. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049; 2. 哈尔滨工程大学青岛创新发展基地, 山东 青岛 266400)

摘要: 系统介绍了智能水域应急搜救装备的发展现状与趋势, 重点分析了智能救生圈、水面无人艇、缆控水下机器人、自主水下机器人及底栖/两栖机器人等关键装备的应用现状及无人救援领域智能规划、导航、控制和感知等等核心技术。随着人工智能技术的快速发展, 水域应急搜救装备将向无人化、集成化和多功能方向演进, 为保障人民生命财产安全提供坚实的技术支撑。

关键词: 水域应急救援; 智能水下装备; 救援装备发展趋势

中图分类号: U676.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0688-09

Current Status and Development Trends of Intelligent Equipment for Water Emergency Search and Rescue

XIE Peng¹, ZHAO Wenqiang¹, HU Weijian¹, LI Weihua¹, ZHU Zhongben², HAN Shilin²,
BAI Guiqiang², HAN Li¹, ZHU Xiaoran¹, LI Li¹, SHANG Hong¹

(1. National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China;

2. Qingdao Innovation and Development Base of Harbin Engineering University, Qingdao 266400, China)

Abstract: This study systematically reviews the current status and future development trends of intelligent aquatic emergency rescue equipment, with a focus on the application status of key equipment—including intelligent lifebuoys, unmanned surface vessels, remotely operated vehicles, autonomous underwater vehicles, and benthic/amphibious robots—as well as core technologies in unmanned rescue, such as intelligent planning, navigation, control, and perception. As artificial intelligence technologies continue to advance rapidly, aquatic emergency rescue equipment will evolve toward unmanned operation, integration, and multifunctionality, thereby providing robust technical support for protecting human life and property.

Keywords: aquatic emergency rescue; intelligent underwater equipment; development trend of rescue equipment

* 收稿日期: 2025-02-19; 修回日期: 2025-04-28

基金项目: 国家重点研发计划课题(2020YFC1512204)资助

作者简介: 谢鹏(1980—), 男, 工程师。主要从事突发灾害事故应急救援技术及装备研究。E-mai: 3862715@qq.com

通信作者: 胡卫建(1959—), 男, 研究员硕士。主要从事事故灾害应急救援技术及装备研究。E-mai: huweijian2016@126.com

0 引言

我国拥有渤海、黄海、东海、南海四大海域,河流5 800多条,湖泊900多个,水库近10万座,受全球变暖影响,洪水、溃坝等水域突发险情愈加频发。中国海上搜救中心发布的数据显示,2014~2020年间,我国平均每年突发水上险情1 923次;1 649艘船舶、1.4万余人遇险;320余艘船舶沉没,600余人死亡或失踪。面向内陆和海洋的水域应急救援任务艰巨不容忽视。

水下救援领域是高风险、高技术要求的专业领域。目前,接受过严格潜水训练的潜水员通常采用“循环搜索”和“Jackstay”技术^[1]等方法搜索伤亡人员,如图1所示。在水下环境中,潜水员必须应对各种极端条件,如深海的高压环境、黑暗或浑浊的水域、冰冷的水温以及强烈的水流和复杂的地形。作为执行任务的一线人员,潜水员的风险主要体现在以下方面:(1)长时间在压力大、环境恶劣的条件下工作,对潜水员的身体和心理均构成严峻考验,可能导致心理压力和判断力下降,甚至出现心率紊乱等症状;(2)水底淤积大量杂物,潜水员可能陷入淤泥,或被沉积物钩挂、擦伤;(3)虽然现代潜水装备如改进的潜水服和呼吸系统为潜水员提供了更好的保护和更长的潜水时间,但设备的复杂性和潜在的故障风险也提出了新的挑战;(4)在复杂多变的水下环境中,潜水员还必须应对诸如强水流、水域生物的威胁以及机械故障等意外情况;(5)遇难者在溺水时精神紧张,配合度低,潜水员难以施救,甚至对潜水员造成伤害。上述诸多危险因素致使潜水员在执行救援任务时自身安全难以保障,甚至会导致自身陷入险情。

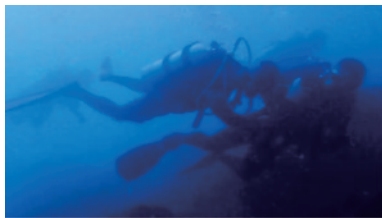


图1 公羊救援队搜救游船翻沉事故中落水人员

Fig.1 Ram rescue team rescuing people from water in cap-sized cruise ship accident

水下机器人能够有效整合人力、环境与任务需求,在复杂且极端的水域应急场景中,不仅能降低救援人员的安全风险,还能显著提升救援队伍的战

斗力,确保救援任务的高效完成,自主水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)、自主式水下航行器(Remotely Operated Vehicle, ROV)和底栖机器人平台(履带车和足式机器人)已经部署在真实的水下救援响应场景中^[2],如图2所示。2011年3月11日,日本海岸附近发生的里氏9.0级海底地震的救援中,日本政府在4月19日至21日,使用水下搜救机器人“Anchor Diver III”在宫城县海岸附近协助寻找遇难者。世越号沉没后,韩国CRABSTER200被紧急部署到受难者搜救工作中^[3]。

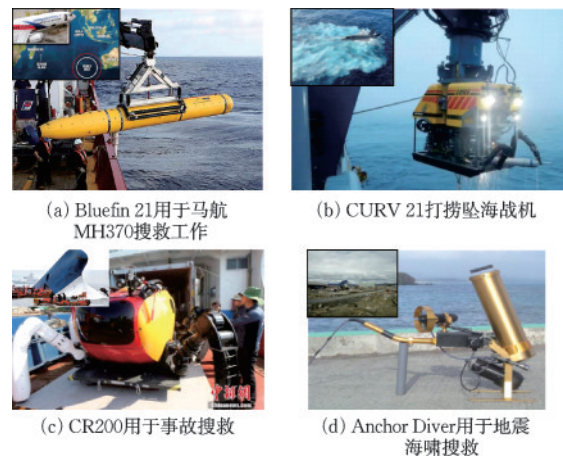


图2 无人设备参与应急救援

Fig.2 Unmanned equipment involved in emergency rescue

1 智能水域应急救援装备

1.1 智能救生圈

智能救生圈是一种半自主水上救援设备,专为快速响应落水事件而设计^[4]。遥控导航至落水者的位置,提供即时救援。通常具有醒目的配色和夜间照明,便于发现;具备高速行驶能力,可迅速接近落水者;无外露桨叶,避免对落水者造成二次伤害,如图3所示,潜水员演示使用智能救生圈进行水面应急救援。此外,智能救生圈还具备自动扶正、搭载救援装备和记录救援过程的功能。智能救生圈不仅适用于泳池、海滩、河流等传统场所,也能在水库、湖泊乃至海洋等复杂水域中发挥作用。通过减少救援人员的直接介入,智能救生圈可有效提升救援效率、降低风险,已成为现代水上安全与应急响应中的重要工具。



图3 使用智能救生圈进行水面应急救援

Fig.3 Surface emergency rescue using intelligent lifebuoy

1.2 水面无人艇

水面无人艇(Unmanned Surface Vessel, USV)配备先进的控制、传感器、通信和救援装置,可执行搜索、救援、探测等高风险或不适宜人类操作的任务^[5]。在水面应急救援中,USV可实现快速抵达、搜索和救助,能够满足水上应急事故搜救需求,减少对人力的依赖,提高救援效率和质量。

在应急救援中,USV能即时响应指令,快速抵达搜救现场,无需等待人员调度,为黄金救援时间赢得先机,并将现场实时情况回传基站和指挥中心,支持远程决策,如图4所示,USV进行水面应急救援。通过多艇编队实现地毯式搜索,有效提升搜索效率。此外,结合类似事故信息及水流方向等数据,USV可以进行敏感区域分析并规划更优的搜救路径,提高搜救的效率。



图4 使用USV进行水面应急救援

Fig.4 Surface emergency rescue using USV

1.3 缆控水下机器人

缆控水下机器人(Remotely Operated Vehicle, ROV)能够深入水下数百米,在水下应急救援中发挥着重要的作用^[6]。ROV具备全天候搜索能力,配备导航声纳系统,能在黑暗且未知的水域进行精准搜索,克服零能见度的挑战,提升搜索效率,如图5所示,救援人员使用遥控器控制ROV进行应急救援。

ROV全驱动控制可以简化与环境的交互难度并进行一些基础操作,如剪切、切割等。在处理污

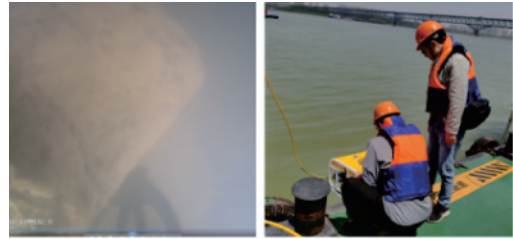


图5 使用遥控潜水器进行水下应急救援

Fig.5 Underwater emergency rescue using remotely operated vehicle



染水域、高危环境或深水救援等任务时,ROV已成为救援队不可或缺的重要工具,如图6所示,Triton SP型ROV机身配备机械臂可完成多种复杂的水下救援任务。

ROV原位定深作业时需通过螺旋桨推进提供平衡力,而该操作会扬起海底泥沙,影响海底作业环境的观测,增加救援难度。此外,在水下救援中,系缆平台的电缆或通信缆通常需要有一定的松弛度,以便自由移动,而这种脐带缆经常会因与海底的障碍物或浮筒缠结而导致事故。



图6 Triton SP型ROV

Fig.6 Triton SP-type ROV

1.4 自主水下机器人

自主水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)能够迅速响应紧急情况,进行广泛的水下搜索和勘察^[7]。AUV具备自主决策能力,配备高度智能化的导航、控制和感知系统,能够精准执行搜索任务,并迅速定位目标。与ROV相比,AUV不受缆线的限制,可以自由航行,从而扩大搜索范围,

这使得 AUV 在大规模水下搜索任务中具备明显优势^[8]。水下救援任务往往涉及在沉船、飞机残骸等复杂的海底地形中的救捞任务,要求机器人能够在不可预测的水下环境中有效地执行原位处置救助操作,如打开紧急舱门或移除障碍物。AUV、ROV 等水下机器人多采用零浮力设计,在水下作业过程中受海底洋流的影响较大,与环境互动时表现出内在的局限性。因此,以 AUV 和 ROV 为代表的远洋机器人通常更适用于失事载具搜索打捞,如图 7 所示,星海“R300”AUV 执行救援任务。

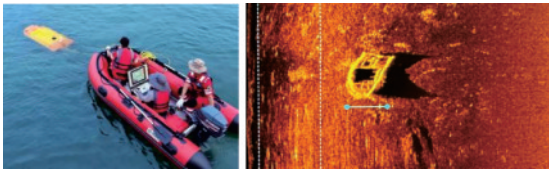


图 7 星海“R300”AUV 执行救援任务

Fig.7 Xinghai "R300" AUV performing rescue missions

1.5 底栖及两栖机器人

与远洋机器人依赖于推进器在水中悬浮或移动不同,底栖机器人依靠负浮力水中贴底移动,在进行物理干预操作时,如打开舱门、移动障碍物或执行维修等任务,不易受到水流或其他外部因素的影响,展现出较高的稳定性,使得底栖水下机器人成为复杂水下救援操作的重要补充。然而,由于水底特有的松软地质,底栖式机器人在行走时会产生沉陷、打滑等问题,尤其在面对海底沟壑等对机器人通过能力以及机动性有更高要求的救援场景时,底栖机器人表现出一定的局限性。

两栖救援机器人可实现陆基收放、底栖行走、大范围海底移动,具有更好的派遣速度和作业能力,甚至本体可作为潜水员的作业工具,通用性好;能够利用机器人的整个身体来处理大型和重型物体,即使在容易因洪水而损坏的情况下,也可进行基于视觉-触觉的运动,功能性和健壮性高。但其结构较为复杂,杂合搭载能力较弱。

机器人在水下救援领域技术特点对比如图 8 所示。

2 智能装备核心技术

在水下救援领域,智能规划技术、智能控制技术、智能导航技术和智能感知技术密切关联,共同

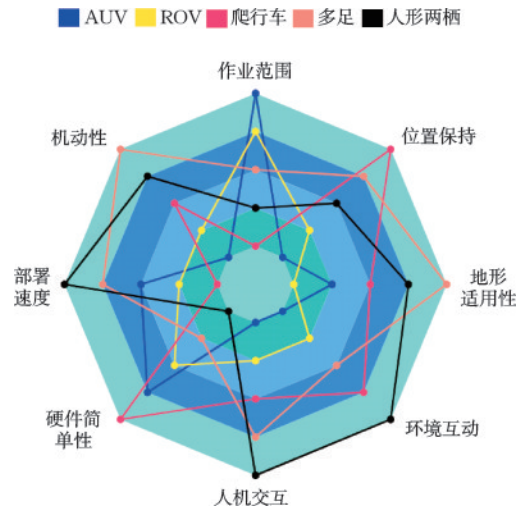


图 8 机器人在水下救援领域技术特点对比

Fig.8 Comparison of technical characteristics of robots in underwater rescue

构建了救援任务的核心执行体系。智能感知技术通过传感器采集环境数据,为智能决策提供实时信息支持;智能规划技术根据感知数据分析并生成最优任务规划和决策方案;智能控制技术则执行规划结果,控制救援机器人或设备的动作;智能导航技术确保救援设备能够在复杂水下环境中高效、精确地移动。四者相辅相成,协同作用,确保水下救援任务的顺利进行,其关系架构如图 9 所示。

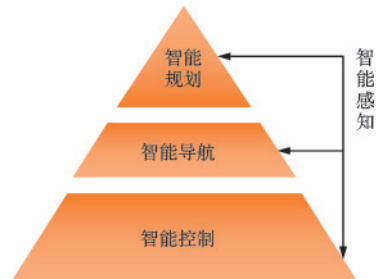


图 9 智能装备核心技术关系架构

Fig.9 Architecture of core technologies for intelligent equipment

2.1 智能规划技术

路径规划可提高机器人在复杂环境下的智能化和任务效率。根据任务需求,路径规划可分为点到点路径规划和全区域覆盖路径规划(CCPP)。在水下搜救中,CCPP的目标是生成一条有效且连续的路径,确保覆盖任务区域的每个可达部分,尤其是不确定或危险的水下环境中。Y.Liu等^[9]研究了多 AUV 系统,结合简化的先验知识与 CCPP 算法,

为每台 AUV 规划路径,适用于水下灾难现场的多机器人协作。但该方法依赖复杂的先验知识和训练模型参数,限制了其在缺乏先验信息的紧急搜救任务中的应用。I.I.Husseindent 等^[10]提出通过反馈控制方法覆盖任务区域,但这种方法依赖零误差反馈,容易导致 AUV 陷入局部最优,无法应对动态变化的环境。L.Paul 等^[11]提出了一种海底对抗目标探测路径优化方法,能自主规划最佳路径,但对于小尺度目标探测能力有限,且缺乏目标身份确认功能。S.W.Cho 等^[12]通过网格区域分解和混合整数线性规划(MILP)优化路径,缩短任务执行时间,但对 AUV 能耗的考虑较少,限制了其在大范围搜救中的应用。F.Hao 等^[13]提出基于声呐(SSS)系统的自动跟踪方案,由于 SSS 声呐在近距离成像上的局限,单一声呐难以满足复杂水下环境中对目标识别和跟踪的需求,未来技术将倾向于多传感器融合以提高探测精度。上述研究为水下搜救路径规划提供了宝贵的参考,但如何克服各方案的局限性,特别是在动态环境和多目标识别中的挑战,仍是未来发展的关键方向。

2.2 智能导航技术

面向复杂的水下应急救援场景,连续、可靠、无缝的高精度定位服务已经成为水下救援机器人的迫切需求。2010年,加拿大的 Explorer AUV 在北极海冰区域开展为期 12 d 的探测任务时,面临海冰移动对 AUV 回收的挑战^[14]。为此,加拿大国防部提出了水下单信标导航技术,通过远距离声学方位保障 AUV 的回收。该技术的创新能够在海冰覆盖的极地或灾难现场提供回收保障。2014年,美国 Webster 等人利用自主水下滑翔机(AUG)监测海流季节性变化,并部署声学信标进行导航定位^[15]。该系统可提供数百公里的中尺度覆盖,并通过卡尔曼滤波算法实时估计 AUG 位置,在长时间和大范围的搜救任务中,可通过实时位置估算确保搜救设备的精确导航。2017年,C.Kongsberg Marine 和 Ballard Marine 联合使用 AUV 在北美对管道进行调查,通过 UTP 算法结合应答器与 AUV 之间的距离,推导出地理参考定位^[16-17],辅助 AUV 的惯性导航系统,如图 10 所示。该方法能够帮助 AUV 精准定位和避免误差,尤其在极端环境和复杂地形中,为 AUV 的自主导航、任务规划和回收提供了强有力的技术保障。

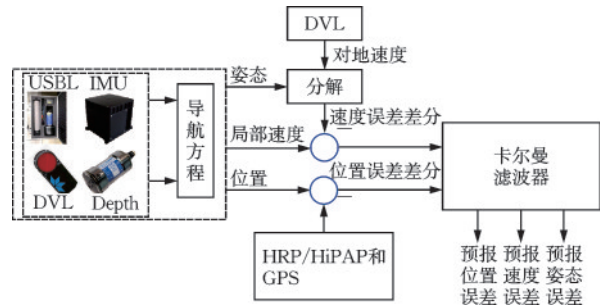


图 10 声学辅助组合导航技术原理图

Fig.10 Schematic diagram of acoustic-aided integrated navigation technology

2.3 智能控制技术

在水下救援任务中,智能控制技术可确保救援机器人在复杂动态环境中精确执行任务,典型救援机器人控制系统架构如图 11 所示,主控系统,运动控制系统,导航系统和控制系统。M.Mudassir 等^[18]利用滑模控制设计了鲁棒反馈动态控制器,能有效抑制海流、障碍物等外部干扰,保证 AUV 稳定按预定轨迹运行。H.Ali 等^[19]结合扩展卡尔曼滤波器与高增益观测器,在模型不确定和参数变化的情况下进一步增强了 AUV 的控制能力。R.P.Desai 等^[20]提出的基于扰动观测器的滑模控制方案,针对水下机器人在遭遇外部扰动时的轨迹跟踪问题,能够有效抑制抖振,减少误差。P.Gong 等^[21]提出的基于模型预测控制的双闭环三维轨迹跟踪框架,能够有效解决 AUV 在外部扰动下的精确导航问题。C.Shen 等^[22]提出的基于 Lyapunov 的模型预测控制框架,通过在线优化提高了轨迹跟踪性能,适用于动态变化的水下救援任务,可以显著提高机器人在复杂水下环境中的适应性和精度。对于具有强非线性的 AUV 系统,结合神经网络进行控制优化成为一种有效策略。神经网络能够通过实时学习系统的动态行为,解决 AUV 系统中的非线性问题,使机器人能够适应多变的海洋环境^[23]。S.Song 等^[24]通过集成神经网络、卡尔曼滤波器和速度补偿,有效减少传感器误差,实现俯仰角精准控制。

2.4 智能感知技术

在水下救援领域,智能感知技术在帮助搜救机器人快速识别和定位水下目标方面发挥着重要的作用。传统的水下目标检测方法主要依赖于目标的形状轮廓进行判断,例如基于高阶统计量、频域

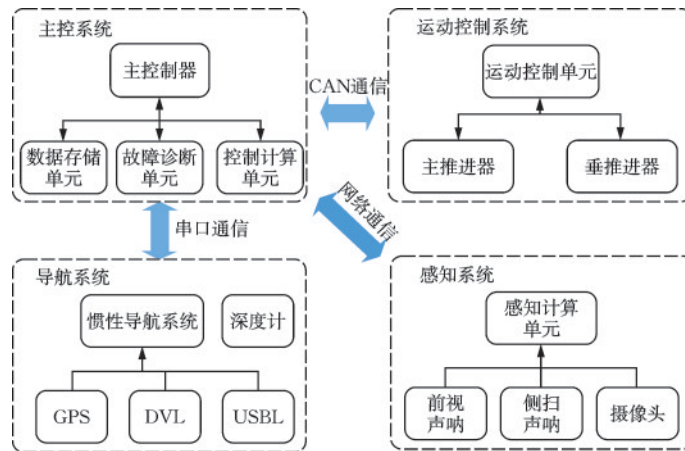


图 11 典型救援机器人控制系统架构

Fig.11 Architecture of control system for typical rescue robots

傅里叶变换、K均值聚类以及马尔可夫随机场模型等窗口检测法。上述方法虽然在一些特定条件下有效,但在复杂背景和噪声较强的水下环境中,往往会出现误检和漏检的问题,导致目标识别精度下降,影响搜救任务的效率。深度学习通过模仿人脑的神经网络结构,能够自动从大量数据中学习特征,而不依赖人工设计特征。通过深层神经网络能够有效处理图像、语音、文本等数据,尤其在水下声呐图像目标检测中表现出色,如图 12 所示,星海“R300”AUV 使用声学感知技术搜寻目标。通过深度学习模型的优化,能够解决特征丢失和复杂背景下的误检问题,从而大幅提高目标检测的精度和效率。结合深度学习与声呐图像的目标检测,能够为水下救援任务提供更为可靠和高效的目标识别手段,帮助搜救机器人更精准地识别和定位被困人员或其他关键目标。2015年,R.Girshick 团队提出的 Fast R-CNN 网络以及 S.Ren 等^[25]改进的 Faster R-CNN 模型,利用区域建议网络(RPN)生成候选区域,并通过共享卷积信息提升了检测效率,受到声呐图像目标检测领域的广泛关注。2016年,A.Farhadi 等^[26]提出的 YOLO(you only look once)技术实现了实时目标检测,为水下救援任务中动态目标的实时识别提供了技术支持。深度学习技术的引入和应用,不仅为水下救援任务中复杂环境下的目标识别提供了强有力的技术保障,还为自动化搜救、灾后评估等应用场景提供了可行的解决方案。通过与声呐图像的结合,深度学习技术能够帮助搜救机器人在水下环境中精准定位、识别目标,提高任务成功率并节省时间和成本。

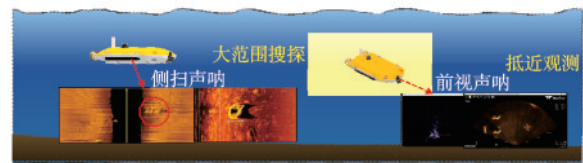


图 12 救援机器人声学感知技术

Fig.12 Acoustic sensing technology of rescue robots

3 典型应用案例

2022年8月,山东威海警方使用云洲智能“海豚1号”智能救生圈,顶着2m高的海浪,仅用8min便救回了一名在海里游泳时被风浪冲走无法上岸的15岁男孩,最大化保障救援安全,有效减少遇难和牺牲。2017年9月6日,在河北唐山潘家口水下长城探索项目中,两名潜水员失联。传统的水下搜救手段受限,ROV通过高精度图像识别,成功在水下60m处发现了失联人员的图像,为搜救人员提供了关键信息^[27]。2018年10月3日,日照岚山区发生了沉箱倾斜事故,导致9人遇难。ROV被部署进行后续搜索,凭借图像传输和深度探测功能,成功找到并确认了两名被困人员的位置,如图 13 所示,江豚 ROV 通过规划路径实行搜救任务,成功搜寻到失联人员。与传统方法相比,ROV 在狭小空间和复杂环境中的操作能力大大提高了搜救效率^[28]。在 2020 年 11 月 15 日,广西南宁一名女潜水员失联,ROV 被迅速派遣进行定位。其精确的深水探测能力和实时反馈系统,使得搜救人员能够迅速锁定遗体位置,减少了传统搜寻方法中的盲目性和不确定性,为最终的遗体打捞作业提供了关键信息。2021年7



图13 江豚ROV搜救路径和失联人员图像

Fig.13 Search path and image of missing persons by Jiangtun ROV

月15日,珠海市兴业快线项目的透水事故中,ROV再次发挥了重要作用。在后续的搜寻工作中,ROV成功找到了多具遗体。该案例展示了ROV在灾难发生后,通过高效的水下探测和图像识别,能够快速提供精确的搜救位置,帮助救援人员在时间紧迫的情况下高效执行任务。

在救援领域,AUV的应用也表现得尤为突出。2009年6月1日,法国航空447航班失事,导致228名乘客和机组人员遇难。在此事件的搜救行动中,Remus6000AUV发挥了关键作用,如图14所示,Remus6000AUV依靠支持母船开展搜救任务。该AUV能够潜至6000m深度进行作业,其先进的声呐系统在深海区域精确成像,帮助快速识别飞机残骸。AUV的自主操作减少了对人工操控的依赖,大大提高了搜救效率,并成功定位了飞机的主要残骸和黑匣子,提供了关键证据,推动了事故调查^[29]。

通过上述案例可知,水下机器人在深水、高风险环境下,其高效、精准、可靠的探测能力使其成为现代水下搜救行动中不可或缺的工具。



图14 Remus6000AUV执行搜救任务

Fig.14 Remus 6000 AUV performing search and rescue missions

4 发展趋势

随着人工智能、机器学习等技术的迅速发展,智能化技术在救援装备中的应用将得到进一步加

强。无人救援装备将更多地利用机器视觉、场景理解、深度学习等技术,实现自主感知、决策和执行任务的能力,智能水域应急救援装备将向着无人化操作方向发展,基于机器人的典型救援应用场景如图15所示。通过自主控制、遥控操作或者远程操控技术,无人装备将能够在完成救援任务的同时,降低人员风险,提高应急响应速度和效率。目前,尽管行业面临技术挑战和市场集中度低等问题,但在国家政策的推动和市场需求的拉动下,预期将迎来更广阔的发展前景。

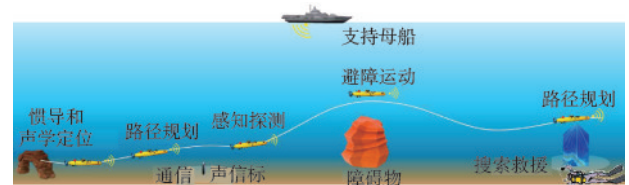


图15 基于机器人的典型救援应用场景

Fig.15 Typical rescue application scenarios based on robots

5 结语

系统综述了我国智能水域应急搜救装备的发展现状与趋势。受全球气候变化影响,我国水上和 underwater 应急救援任务面临严峻挑战,传统人工潜水救援方式风险高、效率低,难以满足需求。近年来,AUV、ROV等智能装备在智能规划、导航、控制和感知等核心技术支撑下,已在实际救援中展现出高效、精准、可靠的优势,典型案例充分证明了ROV和AUV在水下搜救中的有效性。未来,随着人工智能、机器学习与深度学习等技术的快速发展,水域应急救援装备将向无人化、集成化、多功能方向发展,自主感知、决策与执行能力将显著提升。尽管在环境适应性、系统集成和技术推广方面存在挑战,但在国家政策支持 and 市场需求拉动下,我国智能水域应急搜救装备将迈向更高水平,为保障人民生命财产安全提供坚实技术支撑,推动救援行业向更安全、高效的方向发展。

参考文献:

- [1] 国家防灾减灾救灾委员会办公室应急管理部发布2024年上半年全国自然灾害情况[J].中国减灾,2024(14):6-7.
National Disaster Prevention, Mitigation and Relief

- Commission Office, Ministry of Emergency Management. Natural disaster situation in the first half of 2024 [J]. *China Disaster Reduction*, 2024(14): 6-7. (in Chinese)
- [2] 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. Current status and development of key technologies for water emergency rescue equipment [J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(4): 432-451, 458. (in Chinese)
- [3] 李国平. 解读《关于加强水上搜救工作的通知》[J]. *中国海事*, 2020(3): 11-12.
Li G P. Interpretation of the Notice on Strengthening Water Search and Rescue Work [J]. *China Maritime Safety*, 2020(3): 11-12. (in Chinese)
- [4] 赵云龙. 遥控智能救生圈在海上救助中的应用 [J]. *航海技术*, 2023(3): 72-74.
Zhao Y L. Application of remote-controlled intelligent lifebuoy in marine rescue [J]. *Navigation Technology*, 2023(3): 72-74. (in Chinese)
- [5] 张韩西子, 倪海参, 石正坤, 等. USV 发展趋势及关键技术展望 [J]. *舰船科学技术*, 2024, 46(8): 108-111.
Zhanghan X Z, Ni H S, Shi Z K, et al. Development trend and key technologies of USV [J]. *Ship Science and Technology*, 2024, 46(8): 108-111. (in Chinese)
- [6] 连琰, 魏照宇, 陶军, 等. 无人遥控潜水器发展现状与展望 [J]. *海洋工程装备与技术*, 2018, 5(4): 223-231.
Lian L, Wei Z Y, Tao J, et al. Development status and prospects of unmanned remotely operated vehicles [J]. *Marine Engineering Equipment and Technology*, 2018, 5(4): 223-231. (in Chinese)
- [7] 康帅, 俞建成, 张进. 微小型自主水下机器人研究现状 [J]. *机器人*, 2023, 45(2): 218-237.
Kang S, Yu J C, Zhang J. Research status of micro and small autonomous underwater vehicles [J]. *Robot*, 2023, 45(2): 218-237. (in Chinese)
- [8] Cai C, Chen J, Yan Q, et al. A multi-robot coverage path planning method for maritime search and rescue using multiple AUVs [J]. *Remote Sensing*, 2022, 15(1): 93.
- [9] Liu Y, Wang M, Su Z, et al. Multi-aUVs cooperative target search based on autonomous cooperative search learning algorithm [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(11): 843.
- [10] Hussein I I, Stipanovic D M. Effective coverage control for mobile sensor networks with guaranteed collision avoidance [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(4): 642-657.
- [11] Paull L, Seto M, Li H. Area coverage planning that accounts for pose uncertainty with an AUV seabed surveying application [C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2014: 6592-6599.
- [12] Sung W C, Hyun J P, Hanseob L, et al. Coverage path planning for multiple unmanned aerial vehicles in maritime search and rescue operations [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 161: 107612.
- [13] Hao F, Jian C Y, Yan H, et al. Automatic tracking method for submarine cables and pipelines of AUV based on side scan sonar [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114689..
- [14] Goh Y K, Nguyen H, King P, et al. AUV Waypoint Re-planning for Optimal Sonar Area Coverage [C] // OCEANS 2022-Chennai. Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 1-8.
- [15] Feng H, Yu J, Huang Y, et al. Automatic tracking method for submarine cables and pipelines of AUV based on side scan sonar [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114689.
- [16] Ø. Hegrenæs, C. Wallace and E. Børhaug, "Autonomous under-ice surveying using the MUNIN AUV and single-transponder navigation [C] // OCEANS 2017-Anchorage. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1-10.
- [17] Webster S E, Freitag L E, Lee C M, et al. Towards real-time under-ice acoustic navigation at mesoscale ranges [C] // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). New York: IEEE Communications Society, 2015: 537-544.
- [18] Mudassir M, Memon A Y. Steering control of an autonomous underwater vehicle using smc techniques [C] // 2020 3rd International Conference on Control and Robots (ICCR). New York: IEEE Communications Society, 2020: 154-158.
- [19] Ali H, Memon A Y. Robust output feedback control design for a class of AUVs [C] // 2018 Australian & New Zealand Control Conference (ANZCC). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 248-253.
- [20] Desai R P, Manjarekar N S. Disturbance observer based sliding mode control for lateral motion of an AUV [C] // 2021 Seventh Indian Control Conference (ICC). New York: IEEE Communications Society, 2021: 1-6.
- [21] Gong P, Yan Z, Zhang W, et al. Lyapunov-based model predictive control trajectory tracking for an autonomous underwater vehicle with external disturbances [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 232: 109010.

- [22] Shen C, Shi Y, Buckham B. Trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle using Lyapunov-based model predictive control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(7): 5796-5805.
- [23] 白德乾. 智能水下机器人运动的强化学习控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
Bai D Q. Research on reinforcement learning control methods for intelligent underwater robot movement [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)
- [24] Song S, Liu J, Guo J, et al. Neural-network-based AUV navigation for fast-changing environments[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 9773-9783.
- [25] Ren S, He K, Girshick R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2016, 39(6): 1137-1149.
- [26] Farhadi A, Redmon J. Yolov3: An incremental improvement [C]//Computer vision and pattern recognition. Berlin: Springer, 2018: 1-6.
- [27] Hegrenæs Ø, Wallace C. Autonomous under-ice surveying using the MUNIN AUV and single-transponder navigation[C]//OCEANS2017-Anchorage. New York: IEEE Communications Society, 2017: 1-10.
- [28] 张志春, 赵远飞, 谭志伟. 水域救援用水下机器人的发展现状与趋势[J]. 机电工程技术, 2024, 53(3): 17-21.
Zhang Z C, Zhao Y F, Tan Z W. Development status and trends of underwater robots for water rescue [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(3): 17-21. (in Chinese)
- [29] 董炳艳, 张自强, 徐兰军, 等. 智能应急救援装备研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2020, 56(11): 1-25.
Dong B Y, Zhang Z Q, Xu L J, et al. Research status and development trends of intelligent emergency rescue equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(11): 1-25. (in Chinese)
- (本文编辑: 张艺)



(上接第 642 页)

- [24] 陈升平, Tan K H. 钢纤维水泥砂浆加固砌体墙的平面外受力性能[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 169-172.
Cheng S P, Tan K H. Out-of-plane behavior of masonry walls strengthened with SFRC overlays [J]. Journal of Engineering mechanics, 2010, 27(4): 169-172. (in Chinese)
- [25] Lin Y, Lawley D, Wotherspoon L, et al. Out-of-plane testing of unreinforced masonry walls strengthened using ecc shotcrete[J]. Structures, 2016, 7: 33-42.
- [26] 砌体结构设计规范: GB 50003—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [27] 砌体基本力学性能试验方法标准: GB/T 50129—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [28] 潘兴庆. 云南农村民居典型土坯砌体基本力学性能试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
Pan X Q. Basic mechanics characteristics of adobe masonry of rural houses in Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [29] 李聪. 不同掺合料泥浆对土坯砌体及墙体力学性能影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
Li C. Influence of different admixture slurry on mechanical properties of adobe masonry and wall [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. (in Chinese)
- [30] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012, [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [31] 刘寅, 袁康, 叶坤祥, 等. 生土砌块墙体地震失效机理试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(23): 140-150.
Liu Y, Yuan K, Ye K X, et al. Experimental study on seismic failure mechanism of raw soil block wall [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(23): 140-150. (in Chinese)
- [32] 殷晓三. 无明显屈服特征构件屈服点的确定与评价[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(3): 143-150.
Yin X S. Evaluation and determination methods on yield point of structural components without obvious yield feature [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(3): 143-150. (in Chinese)
- [33] Singhal V, Rai D C. Behavior of confined masonry walls with openings under in-plane and out-of-plane loads [J]. Earthquake Spectra, 2018, 34(2): 817-841
- [34] Derakhshan H, Griffith C M, Ingham M J. Airbag testing of multi-leaf unreinforced masonry walls subjected to one-way bending [J]. Engineering Structures, 2013, 57: 512-522.