

引用格式: 金克帆, 王鸿东, 易宏, 等. 海上无人装备关键技术与智能演进展望[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 1-8.

JIN K F, WANG H D, YI H, et al. Key techniques and evolution of intelligent maritime UV[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(6): 1-8.

海上无人装备关键技术与智能演进展望

金克帆^{1,2}, 王鸿东^{1,2}, 易宏^{1,2}, 刘旌扬^{1,2}, 王健^{1,2}

1 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240

2 上海交通大学 海洋智能装备与系统教育部重点实验室, 上海 200240

摘要: 近年来, 海上无人装备技术发展迅速, 尤其是人工智能技术的发展, 使海上无人装备的功能以及性能有了极大的突破。为了明确人工智能技术在海上无人装备应用的研究方向以及演进路线, 首先, 对国内外海上无人装备技术的发展现状进行综述, 随后, 分析实现海上无人装备的关键技术。在此基础上对海上无人装备的智能化水平提出一套等级划分标准, 并详细定义不同智能等级装备的作业能力以及特点。通过分析, 明确了各级之间演进的关键技术。可为海上无人装备的发展路线提供理论基础。

关键词: 无人装备; 人工智能; 智能演进; 无人水面艇; 无人水下机器人

中图分类号: U674.941

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01293

Key technologies and intelligence evolution of maritime UV

JIN Kefan^{1,2}, WANG Hongdong^{1,2}, YI Hong^{1,2}, LIU Jingyang^{1,2}, WANG Jian^{1,2}

1 State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System, Ministry of Education, Shanghai 200240, China

Abstract: In recent years, the technologies of maritime Unmanned Vehicle (UV) have developed rapidly, and especially because the development of artificial intelligence technology, it has made great breakthroughs in the functions and performance of the maritime UV. The development status of the maritime UV technology at home and abroad is reviewed, and then the key technologies for the maritime UV are analyzed. On this basis, a set of classification criteria for the intelligent levels of the maritime UV is proposed, and the operational capabilities and characteristics of the UVs at different intelligent levels are defined in detail, and the key technologies for evolution between levels are clarified. This provides a theoretical basis for the development of the maritime UV.

Key words: Unmanned Vehicle (UV); artificial intelligence; intelligence evolution; Unmanned Surface Vehicle (USV); Unmanned Underwater Vehicle (UUV)

0 引言

海洋不但蕴藏着大量宝贵的资源, 也见证了无数的战争。在科技飞速发展的21世纪, 随着陆地资源的日益匮乏, 逐步开发海洋资源是必然趋

势。随着人工智能技术的发展, 海上无人装备技术突飞猛进。海上无人装备具有成本低、功能多、机动性高等优点, 能够在检测海底预埋设施、水雷侦察以及跟踪打击等海洋作业中发挥巨大的优势^[1-2]。为了在未来可能的战争中处于有利地位,

收稿日期: 2018-05-17

网络首发时间: 2018-11-26 15:26

基金项目: 中国科学院学部咨询评议资助项目(17Z20320037); 上海市青年科技英才扬帆计划(18YF1411500)

作者简介: 金克帆, 男, 1994年生, 博士生。研究方向: 海洋智能装备开发。E-mail: jinkefan@sjtu.edu.cn

王鸿东(通信作者), 男, 1989年生, 博士, 讲师。研究方向: 船舶系统工程, 海洋智能装备开发。

E-mail: whd302@sjtu.edu.cn

易宏, 男, 1962年生, 教授, 博士生导师。研究方向: 潜器与特种船舶开发, 海上装置与系统开发设计, 系统可靠性与人因工程。E-mail: yihong@sjtu.edu.cn



大力发展无人智能装备,提高无人装备的智能水平非常有必要^[3]。

在无人智能装备发展过程中,对其进行等级划分有助于准确衡量当前技术水平,明确下一阶段的研究方向。2004年,在美国海军发布的《海军无人水下机器人(UUV)总体规划》中^[4],UUV根据载荷量被分为以下4个等级:便携级、轻量级、重量级以及巨型级。2007年,在美国海军发布的《海军无人水面艇(USV)总体规划》^[5]中,将USV根据作业特点以及尺寸分为:X级、海港级、“斯诺科勒”级以及舰队级。

然而,仅仅以载荷为标准并不能很好地衡量海上无人装备的性能以及功能特点。在未来的海洋战争中,必然需要海上无人装备编队的智能化作业。届时,海上装备的智能化水平将是决定其作业能力的关键。相比于智能化程度较低的装备,高智能化水平的海上无人装备能够完成更复杂的任务,具备更广泛的作业范围以及更高的任务可靠性。目前,各种海上无人装备的智能化水平各有不同,但是,对于海上无人装备的智能水平划分尚缺乏统一的标准,难以指导海上无人装备的智能化发展。本文将对海上无人装备的智能演进路线进行规划,这有助于判断我国海上无人装备当前所处的技术水平,明确其智能系统距下一智能等级所欠缺的技术,确定下一阶段的研究方向。

1 海上无人装备发展现状

海上无人装备主要包括USV和UUV。相比其他无人装备,海上无人装备起步较晚,而且由于海洋的特殊性,其技术发展较为缓慢。但随着技术的不断发展,海上无人装备逐步迎来了一段高速发展的时期。

1.1 USV

1898年,著名发明家特斯拉发明了名为“无线机器人”的世上第1艘无人艇。到20世纪50~60年代,USV初步应用于作战。但受技术所限,当时的USV主要用于向敌方发动自杀式攻击^[6],或者作为演习中的海上靶标。直到20世纪90年代,无人艇成本低、无人身安全危险以及可长时间值守的优势才开始显露,人们对无人艇的认识逐步加深。随着技术的不断发展,USV迎来了一段飞速发展的时期。在2007年美国海军发布的《海军无人水面艇(USV)总体规划》^[5]中,明确了无人艇的7个主要任务:反水雷、反潜艇、海上安全保障、海上作战、特战队作战协助、电子战、水面拦截与

火力封锁任务支持。

如今的USV在反潜、反水雷、情报侦察以及地理勘探等领域均发挥着巨大作用。美国海军水下作战联合公司联合法国、新加坡相关公司共同研制的“斯巴达侦察兵”号无人艇属于舰队级无人艇,艇长7~11 m,最高航速达50 kn,可持续航行8~48 h,航程150 n mile(最大可达1 000 n mile),可配备情报侦察、反水雷、精确打击以及反潜共4个任务模块,既支持远程遥控,也支持自主航行^[7]。以色列研发的“保护者”号艇长11 m,航速达40 kn,艇上搭载有多种传感器以及武器装备,并且采用模块化设计,使用轻型材料控制重量,可以添加数种任务模块。美国国防部高级研究计划局主导研发的“海上猎人”号USV(图1),艇长40 m,最高航速可达27 kn,续航时间长达2~3个月,以反潜并进行持续追踪为主要任务,预计2018年投入使用。而我国研发的“天象一号”^[8]的续航时间可达20天,能够探测海上气象,在北京奥运会奥帆赛期间顺利完成了任务。上海大学研制的“精海”系列无人艇可以完成自主定位、航迹跟踪以及自主避障等任务。云洲M80B海底探测无人艇(图2)可成功地在环境恶劣的南极海域完成海底地形测量作业。



图1 “海上猎人”号无人艇
Fig.1 Sea Hunter USV



图2 云洲M80B海底探测无人艇
Fig.2 YUNZHOU M80B USV

1.2 UUV

早在20世纪50年代,一些国家就开始了UUV的研制。早期的UUV功能较单一,主要以开

发海洋石油和天然气为目的进行研发。到上个世纪末,UUV技术得到了进一步的发展,其性能更加强大,功能更加丰富,能够完成海底信息探测、协助水下科考、海底管道维修,以及水下长时间潜伏侦察等多种任务。许多国家都成立了UUV研究中心,如美国麻省理工学院的AUV实验室、美国海军研究生院智能水下运载器研究中心、日本东京大学机器人应用实验室、英国海事技术中心等^[9]。而在国内,上海交通大学水下工程研究所、哈尔滨工程大学水下机器人实验室等多个机构也致力于这方面的研究。

目前,各国针对UUV的研发已有一定的成果^[10]。美国海军空间和海战系统司令部的无人搜索系统的下潜深度达到了6 000 m,并且能够从深海向水面传输电荷耦合器件视频以及声呐数据。美国海军研究办公室资助华盛顿应用物理实验室研发的翼身融合水下滑翔机X-Ray能够很好地探测并跟踪浅水域的低噪声潜艇,拥有长达数月的作业能力,其第2代产品Z-Ray在水动力性能上拥有更优良的性能。俄罗斯目前正致力于研发一款能够携带核武器的高速自主式水下机器人,预计续航里程10 000 km,最高航速可达56 kn。而我国以上海交通大学为首研发的“海马”号遥控水下机器人(ROV)(图3)能够达到4 502 m的下潜深度^[11],可完成水下布缆、海底沉淀物采样以及海底探测设备布放等任务,并且能够在水下进行部分科学实验。哈尔滨工程大学的“智水”系列水下机器人实现了水下自主规划航线和模拟自主清除目标等多项功能^[6]。

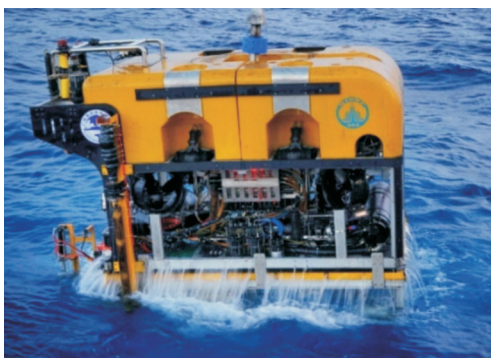


图3 “海马”号遥控水下机器人
Fig.3 “HAIMA”-4500 ROV

2 海上无人装备关键技术

从国内外的发展现状可以看出,近年来,海上无人装备技术发展迅速,各项性能不断提升,主要体现在以下技术:设备高可靠性技术、装备模块化技术、海上通信技术、长期续航技术以及人工智能技术等。这些技术是海上无人装备能否实现智能

化并充分发挥其优势的关键,能够极大地拓展海上无人装备的任务范围,提高作业能力,使得智能化策略更好地得到实现。

2.1 设备高可靠性技术

可靠性是指在规定时间内、规定条件下完成规定功能的能力^[12]。海上无人装备在作业过程中不但会受到风、浪、流等自然环境的影响,还会遭受敌方的恶意干扰,由于没有人能够对其进行维护,一旦发生故障,可能直接导致任务失败。因此,如何在恶劣的条件下保证设备的高可靠性至关重要。为了提高海上无人装备的可靠性,降低故障率,应当充分分析所有设备的潜在失效模式,根据具体作业环境,对其发生的可能性进行评估,并做出有效的改进或者预防措施。同时,不同关键重要度的设备评估标准不同,对于一旦发生故障则会对装备作业产生极大影响的重要设备,应确保其具备足够高的可靠度。

2.2 装备模块化技术

装备的模块化对海上无人装备技术的研发有着很大的促进作用。一方面,包括传感器、计算芯片等硬件以及智能控制软件在内的船用设备正迅速地更新换代;另一方面,装备本身的演进过程却相对缓慢。为了能够及时对无人装备上的设备进行更新,需要对无人装备进行模块化的结构设计,采用“即插即用”型任务模块^[6],对不同设备、组件的接口以及搭载方式进行通用化、标准化处理,以实现设备的即时更新,并降低新设备的更新周期与成本。此外,可以根据所执行的任务,便捷地更换搭载的模块,以满足不同的作业要求,最终实现“一体多用”。

2.3 海上通信技术

安全可靠的高速数据传输通信能力是无人系统的关键技术^[13]。海上无人装备的通信通常分为:

1) 装备与基站之间的通信。该通信主要传输运载器的作业进展、侦测得到的有效信息、基站下达的指令信息等。由于距离较远,通常采用卫星进行通信。为提高信息传输距离以及信息传输容量,可采用多波束、窄波束工作,并且向更高频段发展。

2) 同一编队中智能装备之间的通信。该通信主要传输需要编队内共享的数据信息以及编队协作的控制信息等。由于编队内装备之间距离较短,通常采用超短波频段进行通信^[14]。为解决短

波信道的时变色散特性和高电平干扰的问题,提高短波通信质量,可采用自适应技术使得系统能主动适应环境的变化、抵御人为干扰^[2]。

2.4 长期续航技术

目前,为执行长时间巡航值守、情报收集侦察、反潜、反水雷等任务,无人装备的续航力越来越受到各国的重视。能否在海上进行长达数天甚至数月的持续作业,很大程度上影响了海上无人装备的作业能力。为实现长期续航能力,仅利用传统的燃油能源是不够的,还需对新能源的有效利用进行开发。

由于海上有丰富的可再生新能源,如太阳能、风能以及波浪能等,因此,相比于无人机、无人车等其他智能装备,海上无人装备在新能源的获取方面更具优势。在作业过程中,无人装备可以通过利用上述新能源为系统充电,此外,风能不仅能为系统供电,甚至可以为无人装备直接提供驱动力。随着人们对新能源利用能力的提高,海上无人装备的续航能力逐步提升,其作业能力以及应用范围也将得到进一步拓展^[15]。

2.5 人工智能技术

人工智能技术主要包括监督学习、非监督学习以及强化学习,近年来在诸多领域取得了突破性的成果,是实现海上无人装备智能化的关键技术,通常体现在视觉识别以及策略控制方面:

1) 视觉识别是实现智能化的基础。主要包括:障碍物的识别、河岸和海岸的检测,以及任务目标的识别。传统的计算机视觉可以大致分为如下几个步骤:特征感知、图像预处理、特征提取、特征筛选、推理预测与识别^[16]。而深度神经网络通过模仿人类大脑的作业方式建立神经元,将图像数据抽象化并进行特征提取。随着硬件技术的不断发展以及高效算法的提出,以卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)^[17]、生成对抗神经网络(Generative Adversarial Networks, GAN)^[18]等算法为代表的深度神经网络模型,在目标识别^[19]、视觉推理^[20-21]、实时追踪等领域取得了突破性的进展,在一定程度上已经接近甚至超越了人类判别的准确率。

2) 策略控制系统通过视觉识别得到的信息对海上无人装备做出控制指令。能够自主实现策略控制是海上无人装备智能化的必要能力。强化学习作为一种通过不断“试错—优化”与环境进行交互,探索自然、社会科学以及工程领域序贯决策

问题最优策略的学习方法^[22],是实现海上无人装备智能化的关键。传统的强化学习策略以视觉识别的结果作为输入,不断探索环境,根据反馈实现优化过程。而近年来,深度强化学习^[23-24]、模仿学习^[25]等技术迅速发展,让端到端的控制策略^[26]成为可能。该技术跳过视觉识别过程,直接输入原始像素数据,返回控制命令,避免了二次训练的误差累计,强化了智能体的作业能力。此外,通过与迁移学习^[27]相结合,在仿真环境中的智能体可以直接迁移到海上无人装备中,不但避免了训练过程中错误尝试导致的不良后果,同时还极大地缩短了训练周期。而元学习(meta learning)方法^[28]通过探索任务分布,为模型创造核心价值,在学习任务过程中形成元知识的经验积累,让智能体学会如何学习,进一步提升其智能水平。

3 智能演进等级

设备高可靠性技术、装备模块化技术、海上通信技术、长期续航技术的发展从硬件上保证了海上无人装备的作业能力,拓展了其任务范围。而人工智能技术则决定了海上无人装备能否在自主作业的情况下,较好地运用自身的各项功能,制定合理的策略,完成目标任务。为了更好地衡量海上无人装备的智能化水平,规划智能系统的发展方向,本文以任务为导向,根据不同的作业能力,提出了一套智能演进等级划分标准,将智能水平分为以下5个等级:

- 1) 远程测控级;
- 2) 单机自主级;
- 3) 合作交互级;
- 4) 自主学习级;
- 5) 智能对抗级。

3.1 远程测控级

该等级的海上无人装备可以在人为远程控制下完成任务。

该等级的无人装备有完成任务所需的执行力,没有自主的决策层。工作时通过电缆与母船相连,或者通过无线与基站进行通信,对外界事物有图像采集能力,作业过程依赖人类对目标的识别与判断,执行来自基站的宏观指令。作业过程中,该等级装备能够利用多传感器为人提供辅助航行的信息,如港口信息、海图信息、海流状况等,以及实时可靠的导航定位和姿态运动情报等装备自身航行状态的信息,为人的决策提供参考。最终,无人装备通过接收来自基站的宏观指令,经计

算,最优化执行命令,如自动实现最优舵角、确定打舵时间、选择最佳航线,以及根据当时的海况判断并实现达到理想航速等功能。

该等级无人装备由于依然有人在后台控制,因此能够完成大多数有人装备可以完成的任务,如货运、巡逻等。此外,由于是无人装备,它适用于不宜有人的危险任务,如复杂海况下的水文探测、危险海域的情报侦察、水雷排查等。远程测控级海上无人装备主要依赖自动控制技术以及一定程度的智能优化,其技术已相对成熟。目前,已有许多国家着手研制该等级的商业化货船:如罗尔斯·罗伊斯公司透露,其海运部门正在开发一艘沿海岸自动航行的样船;世界上最大的矿业集团必和必拓目前正在研发一种巨型的自动航行货轮;欧洲企业正在政府的支持下推进自主无人船的研发进程,表示争取在未来3年内实现波罗的海域的完全遥控船舶运营。相信在数年之后,远程测控级无人船将大量涌现。

3.2 单机自主级

该等级的海上无人装备可以自主完成任务,能够和基站进行通信、反馈作业进程,并随时接受来自基站的遥控操作。

为了脱离人为控制,单机自主级海上无人装备必须拥有目标识别能力以及自主决策层。目标识别能力是保证自主作业的基础,包括障碍物的识别、河岸与海岸的检测、任务目标的识别,是海上装备实现自主智能化的关键^[29]。根据工作海域海况的不同,目标识别能力必须保证在恶劣海况下具备较高的可靠性。自主决策层主要通过人工智能技术来实现。在出航作业之前需要人为提供学习样本,经过大量的学习后,能够实现基本的自主航行,并完成任务。

单机自主级无人装备在实现自主作业的同时,能够实时向基站反馈作业情况,包括设备自身的运转情况,便于后台人员的监控,并且在必要的时候可以调整为遥控操作。但是该等级的无人装备没有与其他单位进行协同合作的能力,只能独立进行作业。对于入港、卸货等需要与其他设备互动协作的任务,仍然需要人为控制。此外,由于该等级无人装备仅能处理通过样本学习过的事件,对于未知事件没有很好的处理能力,因此,单机自主级海上无人装备仅适用于可预测的工作环境。

3.3 合作交互级

该等级的无人装备能够与其他装备进行通

信,并合作完成任务。

通过大量的集群训练,合作交互级海上无人装备能够基于互联通信与其他装备进行编队协作,不同装备负责作业策略中的不同任务,共同实现同一目标,如编队围捕、护航、作战等。目前,无人艇编队控制的主要方法有:基于行为法、虚拟结构法和领航跟随者法^[30]。其中,基于行为法通过将编队的整体行为分解到各个单元的行为来实现整体的控制;虚拟结构法提出为编队系统设定一个刚性队形,各个单位在作业过程中以队形中相应参考点为预期位置状态进行运动;领航跟随者法为编队确立一个或数个领航者,其他单位则作为追随者通过一定的策略跟随领航者进行运动,通过控制领航者来控制编队的运动。这种方法控制简单,易于实现集中式或分布式控制,在舰艇编队控制方面应用较为广泛。

在一个复杂的作业中,通常需要多种功能协同工作,如火力打击、侦察通信、环境感知等,单独作业通常难以很好地实现所有功能。而编队集成了多个单位,各个单位可以负责不同的任务,最大化利用所有资源,并通过通信技术实现信息共享,以弥补个体单位的能力不足。此外,编队作业具有更强的容错能力,每个单位仅负责作业中的部分任务。即使个别单位发生损毁,其他单位可以及时顶替该单位,使其作业能力、范围以及可靠性都有极大提高,从而能够完成高强度、高难度和高要求的任务。

编队协作能够最大限度地发挥整体的优势、装备以及武器的威力,并且能够实时机动地变换队形,密切协作,便于整体指挥以及战术的布置。然而,合作交互级海上无人装备的作业范围依然局限于已知任务。对于作业过程中出现的未知情况,仍不能采取较好的应对措施。为了解决这个问题,可以将合作交互级装备与远程测控级装备相结合。在系统编队中加入一定数量的远程测控级装备,作业过程中以远程测控级装备为领航者,合作交互级装备作为跟随者,遭遇未知事件时,通过人为控制远程测控级装备引导,合作交互级装备协同作业,强化其作业能力。

3.4 自主学习级

自主学习级海上无人装备能够在完成作业的过程中持续学习,不断提高自己的智能化水平。

该等级的海上无人装备的学习过程不再局限于人为提供的学习样本,可以在执行任务的过程中不断学习,并及时同步,因此,可以一定程度上

应对作业过程中出现的未知事件。为了实现海上无人装备的自主学习能力,可以采用强化学习^[31]的深度策略。强化深度学习在遇到未知事件时,首先尝试做出一些行为来得到一个该事件对于这种行为的后果,随后通过该结果下环境产生的反馈对自身策略进行优化,并在下一次遇见该事件时,做出更优的判断。随着反馈学习次数的增加,自主学习级海上无人装备逐渐掌握对于该事件的处理方式。

但在执行高危任务时,一个错误的尝试很可能导致该单位被破坏,那么“学习”所得到的结果就会全部失去。因此,编队中所有单位必须能够实时共享所做的每个尝试性动作以及其所得到的结果,使得“学习”不是个体行为,每个单位都能从其他单位的行为和结果中进行学习,并及时把“学习成果”传输到基站,以防止错误尝试所引发的不良结果导致学习成果丢失,以致学习过程停滞。

在处理未知情况的过程中,由于没有相应样本的积累,强化学习过程的结果反馈可能会有一定的延迟,需要在多次“试错—优化”的过程后才能做出正确的判断。为了加速学习进程并且最大化地利用资源,统一规划所有海上无人装备单元,并实时将任务样本传输至基站。同时,基站将各学习样本及时同步至所有海上无人装备,实现所有自主学习级海上无人装备的智能等级同步提升,缩短学习周期。

自主学习级海上无人装备能够较好地处理未知事件,适合执行细节信息缺失、不确定性强、未知程度高的高难度任务。随着执行任务量的增加,自主学习级海上无人装备将逐步增强作业能力,扩大作业范围,提升智能水平。

3.5 智能对抗级

智能对抗级海上无人装备拥有相当程度的智能化水平,并能够和人类一样进行快速学习。

在自主学习级智能水平的基础上,智能对抗级海上无人装备能够通过元学习形成自身的核心价值,实现通用作业能力,能够在短时间内适应未知的任务环境,并完成任务。在战斗中,该等级海上无人装备可以迅速地对周围局势以及战况做出判断,对敌方的战斗力进行评估,并对未来的发展做出预测,及时将有效信息上传到基站,提供对当前战局的分析。此外,在遇到未知事件时,智能对抗级海上无人装备通过已有元知识的积累,能够迅速理解现状,实现快速学习并做出判断,拟定参考作业策略。

该等级的海上无人装备功能强大、可靠性高,作业模式不局限于单一任务,能够兼顾多个并行任务,支持作业内容的即时切换。此外,智能对抗级海上无人装备不再仅仅是完成任务的工具,同时也是深入战场的移动指挥台,不仅能够及时提供战场信息,还能够对信息进行分析,为指挥者提供策略建议。

表1总结了上述智能演进的方式以及级差优势。

表1 智能演进说明表
Table 1 Intelligence evolution

序号	智能等级	智能水平	级差优势
1	远程测控级	最优化执行命令,提供辅助信息	
2	单机自主级	目标识别,自主航行,自主完成任务	完全独立作业,无需人为操作
3	合作交互级	信息融合,多单位协作交互,编队作业	更广的任务范围,更强的作业能力,更高的可靠性
4	自主学习级	任务过程中自主学习,各单位同步优化	终生学习,持续强化自身能力
5	智能对抗级	形成自身核心价值,迅速适应未知情况,快速学习	迅速理解环境与局势,合理应对未知事件,提供对抗策略

目前,第1智能等级的技术已经较为成熟,国内外的海上无人装备智能等级尚处于第2级与第3级之间:编队的整体行为仍然需要人为干预,相比于完全自主的无人单位,作为领航者的无人单位依然依赖于人为的远程测控。随着技术的发展,合作交互级无人装备系统最终将对水下、水面、海上空间进行智能装备云部署,完成无人水下机器人、无人水面艇、海上无人机等多种类智能装备深度协同作业,集巡航、侦察、追踪、护卫、反击等任务于一体的广域任务链,实现海洋领土的一年365天不间断防卫。合作交互级海上智能装备编队作为任务范围广、高鲁棒性的复杂作业系统,将成为未来数十年内海上智能装备的主要发展方向,是海上战争的重要组成部分。第4级无人装备弥补了人为预编程可能造成的疏漏,通过对各智能体进行互联、共享任务过程,采集庞大的作业样本库,从而实现智能水平的自我更迭。而第5级无人装备作为海上无人智能体的最终形态,具备自身的核心价值,对战场环境、任务内容有相当的认识和理解,能够基于新的战况以及作业任务为人拟定参考策略。近年来,人工智能技术与航海学科正逐步交叉融合,驱动着海上装备无人

化、智能化的发展。虽然目前海上无人装备的智能化水平离第4级和第5级尚有一定的距离,但相关技术正飞速发展,相信在不久的将来一定能实现。

4 结 语

本文对发展海上无人装备的意义以及在国内外发展的现状进行了阐述,分析了人工智能的发展对海上无人装备技术的影响。详细介绍了实现海上无人装备智能化的5项必要技术:设备高可靠性技术、装备模块化技术、海上通信技术、长期续航技术以及人工智能技术,并根据作业能力和特点对其智能化水平进行了等级划分,主要将其分为:远程测控级、单机自主级、合作交互级、自主学习级以及智能对抗级。描述了各个等级的作业能力、任务内容等细节,明确了各个等级之间演进的关键技术以及功能差异。

海上无人装备成本低、功能多、机动性强等优势使其拥有广阔的应用前景,而人工智能技术的发展使其性能有了进一步的提升。在未来,海上无人装备必将极大地影响海洋运输、海洋资源开发的格局,而大量无人化军事装备也将在战争中得到使用,成为海洋战争中重要的组成部分。为此,我国应尽快制定海上无人装备智能演进发展路线,加大对海上无人装备研发支持力度,为加快海洋强国建设提供强大的装备支撑。

参考文献:

- [1] CAMPBELL S, NAEEMW, IRWIN GW. A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres[J]. *Annual Reviews in Control*, 2012, 36(2): 267-283.
- [2] American Navy. Unmanned systems intergrated roadmapfy: 2013-2038[R]. USA: Department of Defense, 2013.
- [3] 徐玉如, 苏玉民, 庞永杰. 海洋空间智能无人运载器技术发展展望[J]. *中国舰船研究*, 2006, 1(3): 1-4.
XU Y R, SU Y M, PANG Y J. Expectation of the development in the technology on ocean space intelligent unmanned vehicles [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2006, 1(3): 1-4 (in Chinese).
- [4] American Navy. The navy unmanned undersea vehicle (UUV) master plan [R]. USA: Department of Defense, 2004.
- [5] American Navy. The navy unmanned surface vehicle (USV) master plan [R]. USA: Department of Defense, 2007.
- [6] 万接喜. 外军无人水面艇发展现状与趋势[J]. *国防科技*, 2014, 35(5): 91-96.
WAN J X. Status and development trends of foreign military unmanned surface boats [J]. *National Defense Science & Technology*, 2014, 35(5): 91-96 (in Chinese).
- [7] 李家良. 无人水面艇发展与应用[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(6): 203-207.
LI J L. Development and application of unmanned surface vehicle [J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(6): 203-207 (in Chinese).
- [8] 熊亚洲, 张晓杰, 冯海涛, 等. 一种面向多任务应用的无人水面艇[J]. *船舶工程*, 2012, 34(1): 16-19.
XIONG Y Z, ZHANG X J, FENG H T, et al. An unmanned surface vehicle for multi-mission applications [J]. *Ship Engineering*, 2012, 34(1): 16-19 (in Chinese).
- [9] 徐玉如, 李彭超. 水下机器人发展趋势[J]. *自然杂志*, 2011, 33(3): 125-132.
XU Y R, LI P C. Developing tendency of unmanned underwater vehicles [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2011, 33(3): 125-132 (in Chinese).
- [10] 潘光, 宋保维, 黄桥高, 等. 水下无人系统发展现状及其关键技术[J]. *水下无人系统学报*, 2017, 25(2): 44-51.
PAN G, SONG B W, HUANG Q G, et al. Development and key techniques of unmanned undersea system [J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017, 25(2): 44-51 (in Chinese).
- [11] 连琏, 马厦飞, 陶军. “海马”号4500米级ROV系统研发历程[J]. *船舶与海洋工程*, 2015, 31(1): 9-12.
LIAN L, MA X F, TAO J. R & D process of 4 500 m ROV system “Hai Ma” [J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015, 31(1): 9-12 (in Chinese).
- [12] 易宏, 梁晓锋. 泛可靠性工程理论与实践[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
- [13] 刁海龙. 反水雷、反潜、反导和反恐的利剑——无人水面艇系统[J]. *水雷战与舰船防护*, 2011, 19(1): 1-5.
DIAO H L. Unmanned surface vehicle system the sword of MCM, ASW, anti-missile and anti-terrorism [J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defence*, 2011, 19(1): 1-5 (in Chinese).
- [14] 陈波, 金瓯, 涂娟. 海上超短波通信距离分析[J]. *舰船科学技术*, 2010, 32(6): 88-90, 127.
CHEN B, JIN O, TU J. Analysis of marine ultra-short wave communication distance [J]. *Ship Science and Technology*, 2010, 32(6): 88-90, 127 (in Chinese).
- [15] 钱东, 唐献平, 赵江. UUV技术发展与系统设计综

- 述[J].鱼雷技术,2014,22(6):401-414,419.
- QIAN D, TANG X P, ZHAO J. Overview of technology development and system design of UUVs[J]. Torpedo Technology, 2014, 22(6): 401-414, 419 (in Chinese).
- [16] 许志杰,王晶,刘颖. 计算机视觉核心技术现状与展望[J]. 西安邮电学院学报,2012,17(6):1-8.
- XU Z J, WANG J, LIU Y. A review of computer vision development and trends[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2014, 17(6): 1-8 (in Chinese).
- [17] SERMANET P, EIGEN D, ZHANG X, et al. OverFeat: integrated recognition, localization and detection using convolutional networks [J]. arXivpreprint arXiv: 1312.6229, 2013.
- [18] GOODFELLOW I J, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial nets [C]//Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems. Montreal, Canada: MIT Press, 2014, 2: 2672-2680.
- [19] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. arXivpreprint arXiv:1409.1556, 2014.
- [20] JOHNSON J, HARIHARAN B, VAN DER MAATEN L, et al. Inferring and executing programs for visual reasoning [J]. arXivpreprint arXiv: 1705.03633, 2017: 3008-3017.
- [21] SANTORO A, RAPOSO D, BARRETT D G T, et al. A simple neural network module for relational reasoning[J]. arXivpreprint arXiv:1706.01427, 2017.
- [22] SUTTON R S, BARTO A G. Reinforcement learning: an introduction [M].Cambridge: MIT Press, 1998: 216-224.
- [23] LILLICRAP T P, HUNT J J, PRITZEL A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning [J]. arXivpreprint arXiv:1509.02971, 2015.
- [24] MNIH V, KAVUKCUOGLU K, SILVER D, et al. Playing atari with deep reinforcement learning [J]. arXivpreprint arXiv:1312.5602, 2013.
- [25] HO J, ERMON S. Generative adversarial imitation learning[J]. arXivpreprint arXiv:1606.03476, 2016.
- [26] RUSU A A, VECERIK M, ROTHÖRL T, et al. Sim-to-real robot learning from pixels with progressive nets[J]. arXivpreprint arXiv:1610.04286, 2016.
- [27] TAYLOR M E, STONE P. Transfer learning for reinforcement learning domains: a survey [J]. Journal of Machine Learning Research, 2009, 10: 1633-1685.
- [28] FINN C, YU T H, ZHANG T H, et al. One-shot visual imitation learning via meta-learning [J]. arXivpreprint arXiv:1709.04905, 2017.
- [29] 马忠丽,文杰,梁秀梅,等. 无人艇视觉系统多类水面目标特征提取与识别[J]. 西安交通大学学报, 2014,48(8):60-66.
- MA Z L, WEN J, LIANG X M, et al. Extraction and recognition of features from multi-types of surface targets for visual systems in unmanned surface vehicle [J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 2014, 48(8):60-66. (in Chinese).
- [30] 齐小伟,任光. 基于领导跟随的船舶航迹控制[J]. 船舶, 2016, 27(1): 92-99.
- QI X W, REN G. Ship track control based on leader-follower[J]. Ship & Boat, 2016, 27(1): 92-99 (in Chinese).
- [31] LILLICRAP T P, HUNT J J, PRITZEL, A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning [J]. arXivpreprint arXiv:1509.02971, 2015.