

[引用格式] 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(1): 44-51.

水下无人系统发展现状及其关键技术

潘 光^{1,2}, 宋保维^{1,2}, 黄桥高^{1,2}, 施 瑶^{1,2}

(1. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安, 710072; 2. 无人水下运载技术工信部重点实验室, 陕西 西安, 710072)

摘 要: 水下无人系统是现代海军装备的重要组成部分, 是海军装备中新概念、新技术应用最为广泛的领域。文章回顾了美国制定的水下无人系统发展规划, 分析了美国水下无人系统体系化、集群化以及对新概念水下无人航行器探索的发展特点; 简要叙述了俄罗斯、欧洲以及国内水下无人系统的发展现状, 以及国内外存在的差距; 最后, 针对水下无人系统“自主性、互操作、数据链、多平台协同”等核心问题, 指出了所应突破的技术关键。文中的研究将为我国多样化水下无人系统开发提供依据。

关键词: 水下无人系统; 体系化; 集群化; 新概念无人水下航行器; 自主航行技术; 水下数据链通信技术
中图分类号: TJ630.1; TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 2096-3920(2017)01-044-08

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2017.01.003

Development and Key Techniques of Unmanned Undersea System

PAN Guang^{1,2}, SONG Bao-wei^{1,2}, HUANG Qiao-gao^{1,2}, SHI Yao^{1,2}

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Key Laboratory for Unmanned Underwater Vehicle, Xi'an 710072, China)

Abstract: Unmanned undersea system(UUS) concerns most of the new concepts and new technologies for modern naval equipment. This paper reviews the development of UUSs in the United States, and analyzes the three features of these UUSs, i.e., the systematization, the clustering, and the exploration of the new concept unmanned undersea vehicle(UUV). This paper also briefly describes the current development of UUSs in Russia, Europe and China, and points out the development gap between China and the United States. Finally, in view of the key aspects of UUSs, such as autonomy, interoperability, data link and multi-platform cooperation, the corresponding key technologies are emphasized. This study may provide a reference for the development of diversified UUSs in China.

Keywords: unmanned undersea system(UUS); systematization; clustering; new concept unmanned undersea vehicle (UUV); autonomous navigation technology; underwater data link communication technology

0 引言

水下无人系统(unmanned undersea system, UUS)是指具有自主航行能力, 可完成海洋/海底环境信息获取、固定/移动目标探测、识别、定位与跟踪以及区域警戒等任务的各类无人水下航行器(unmanned undersea vehicle, UUV)、水下无人作战平台及其所

必要的控制设备、网络和人员的总称。其研究领域涵盖情报收集、水下及水上侦查监视、作战打击和后勤支援等诸多领域, 具有重要的军事价值, 已成为世界各国海军装备的重要研究方向^[1]。UUV 主要包括自主水下航行器(autonomous undersea vehicle, AUV)和遥控水下航行器(remotely operated vehicle, ROV), 其中军事领域重点发展 AUV, 民用领域重

收稿日期: 2017-03-13; 修回日期: 2017-03-25.

作者简介: 潘 光(1969-), 男, 博士, 长江学者特聘教授, 研究方向为水下航行器总体设计、流体力学、水下武器发射与回收技术等.

点发展 ROV。

近年来,随着各国对战场低伤亡率的追求,UUS 在海上战争中发挥的作用愈发显著。相比水下有人系统,UUS 能够代替人执行“枯燥的、恶劣的和危险的”(dull, dirty, dangerous, 3D)任务,具有机动性强、适应能力和生存能力高、无人员伤亡风险、制造和维护成本低等优点,极大地扩展海军的作战能力,被视为现代海军的“力量倍增器”。

1 UUS 发展现状

1.1 国外研究现状

近年来,世界各主要海军大国都加快了 UUV 的研究步伐,并取得了重要进展。随着新材料、新能源、人工智能等技术的不断进步,大深度、远航程、大载荷、自主回收成为 UUV 的发展趋势^[2-3]。

1.1.1 美国

UUS 是现代海军装备的重要组成部分,是海军装备中新概念、新技术应用最为广泛的领域。美国历来对军事高科技保持着高度的敏感性,并针对 UUS 制定了一系列的发展规划。

2000 年,美国海军综合考虑未来 50 年需求情况制定了一个中、远期发展规划,即《无人水下航行器(UUV)总体规划》^[4],确定了未来 UUV 优先发展的 4 个特征能力:1) 潜艇跟踪和追猎;2) 海事侦察;3) 水下搜索和调查;4) 通信和导航援助。2004 年,美国海军对该规划进行了修订,将 UUV 的任务最终调整为 9 项,包括情报/监视/侦察、反水雷战、反潜战、检查与识别、海洋调查、通信/导航网络节点、负载投送、信息作战、时敏打击,并提出了多 UUV 的概念^[5]。之后,美国海军未单独针对 UUV 再次发布规划,而是由美国国防部对陆、海、空各类无人系统进行统筹规划。2007 年,美国国防部发布了《2007-2032 年无人系统发展路线图》^[6],首次提出了地面、水下、空中统一的无人系统总体发展战略规划,并表示未来 25 年美国将逐步建立一支完善而先进的无人作战部队。2009 年、2011 年、2013 年美国国防部又先后对无人系统发展路线图进行了修订,进一步强调了陆海空各无人系统的协同工作能力。2016 年 10 月,美国国防科学委员会发布了《下一代水下无人系统》报告,对于美国国防部在下一个 10 年及以后如何维持水下优势提出了重要建议^[7]。

由美国制定的系列发展规划可以看出,UUV

正由单个系统朝向集群化趋势发展,并与其他无人系统组网协同,通过网络化无人平台的分布式态势感知和信息共享,提高作战效能。目前,美国已基本解决了单个 UUV 技术,并正在向多 UUV 自主集群协同及海陆空集群协同发展。纵观美国 UUS 的发展,体系化、集群化以及对新概念水下航行器的探索成为其显著特点。

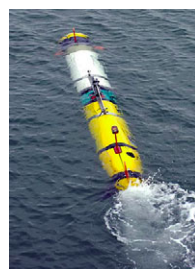
1) UUV 向体系化发展

美国海军空间和海战系统司令部(space and naval warfare systems command, SPAWAR)的先进无人搜索系统(advanced unmanned search system, AUSS),最大潜深 6 000 m,最大速度 5 kn,一次充电可在深海进行 10 h 的搜索活动,携带的水声通信设备可保证在 6 000 m 的水下向水面传送电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)电视或侧视声呐数据。

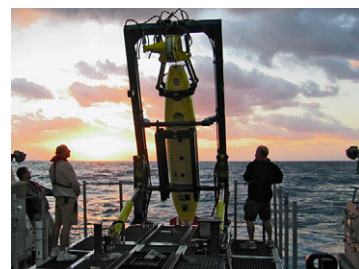
美国在研发水下航行器的过程中,还特别注重体系化发展。比如由伍兹霍尔海洋研究所设计的 REMUS(remote environmental monitoring units)系列化水下航行器(见图 1)。



(a) REMUS 100



(b) REMUS 600



(c) REMUS 6000

图 1 REMUS 系列化无人水下航行器
Fig.1 Remote environmental monitoring units(REMUS)

该系列具体包括 REMUS 100、REMUS 600、REMUS 3000、REMUS 6000 等型号,可用于反水雷、航道侦察、港口警戒、地形测绘以及深水取

样等任务,目前有超过 150 艘 REMUS 水下航行器在 北约国家中使用^[8]。该系列水下航行器主要技术参数参见表 1。

表 1 REMUS 系列化水下航行器主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of REMUS

型号	长度 /m	直径 /m	重量 /kg	最大工作 深度/m	续航力 /h
REMUS100	1.32	0.190	37	100	15(3 kn)
REMUS600	3.25	0.324	240	600	70(5 kn)
REMUS3000	3.70	0.356	335	3 000	44(4 kn)
REMUS6000	3.84	0.71	864	6 000	22(4 kn)

2) 新概念型水下航行器研究

美国新一代水下航行器“曼塔”(Manta)主要用于新概念及新技术的试验^[9]。该航行器采用非常规的扁平外形设计,悬挂在潜艇外部,由潜艇释放自主执行任务(见图 2)。Manta 采用模块化结构设计,可根据任务需要携带不同的传感器、武器及对抗设备,执行情报搜集、侦察、监测、反水雷及反潜等多种任务,完成任务后返回,可重复使用。Manta 的研制分 2 期进行,近期排水量 56.9 t,长度 15 m,宽度 5.8 m,高度 1.7 m;远期排水量 91.700 t,航程 2 000 km。

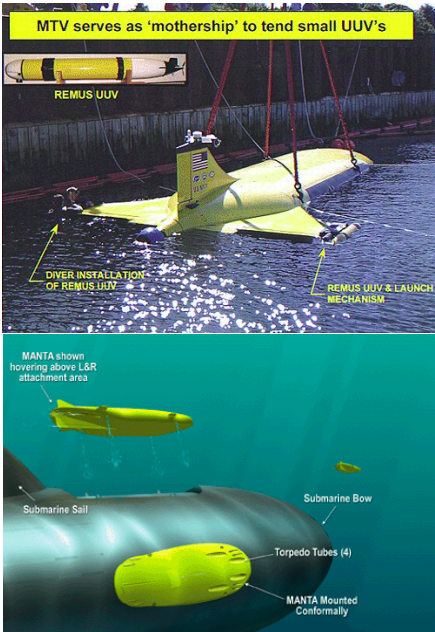


图 2 美国“曼塔”水下航行器
Fig.2 The undersea vehicle Manta in the United States

新一代翼身融合水下滑翔机(X-Ray)由华盛顿大学应用物理实验室在美国海军研究办公室

(office of naval research, ONR)资助研发^[10]。该滑翔机创造性地采用翼身融合布局外形,在为能源和有效载荷提供足够空间的同时,还能实现高升阻比和大滑翔比(见图 3)。X-Ray 翼展 6.1 m,滑翔速度 1~2 kn,用于探测和跟踪浅水域的安静型潜艇。美国军方宣称 X-Ray 可以在指定区域内迅速部署并进行长达数月的运行,监测范围超过 1 000 km。Z-Ray 是 X-Ray 的下一代产品,具有更好的水动力性能,其所有子系统在 2010 年 3 月进行了不同深度(最大深度 300 m)的海洋试验,试验结果十分理想。



(a) X-Ray



(b) Z-Ray

图 3 翼身融合水下滑翔机
Fig.3 Blended-wing-body underwater glider

“深海浮沉载荷”(upward falling payloads, UFP)是由美国国防高级研究局(defense advanced research projects agency, DARPA)提出的一种水下预置无人系统^[11]。该系统为在 4 000 m 深海布置的密封吊舱,内置传感器、无人机、导弹等有效载荷,潜伏期长达数年,并在需要时远程遥控激活,吊舱浮出水面,释放有效载荷,执行军事任务。UFP 项目研究分为 3 个阶段:概念测试阶段(2013 年)、样机开发阶段(2014 年)、演示验证阶段(2015 年~2016 年)。美海军计划于 2017 年进行 UFP 实战化部署。图 4 为 UFP 概念图。



图 4 “深海沉浮载荷”概念图

Fig.4 Concept map of upward falling payloads(UFP)

3) UUS 的集群化发展

随着各类水下航行器潜深、航程越来越大, 功能越来越多样化, UUS 集群也取得了突飞猛进的发展。美国先后开发了多型海陆空联合作战网络体系, 利用 UUV 作为水下移动节点, 与其他固定/移动节点构成水下预警系统, 实现海洋数据采集、军事侦察及信息对抗等任务^[12-14]。

美国海军自 1998 年起多次进行广域海网 (Seaweb) 的海底水声通信试验, 旨在提升未来海军作战能力。Seaweb 是一种典型的海底水声传感器网络, 通过水声通信链路将固定节点、移动节点和网关节点连接成网 (见图 5)。美国在 2001 年的 Seaweb2001 演习中共布设了 40 个通信节点, 并利用潜艇“USS Dolphin”号在布网区域中现场进行有关网络性能的测试。

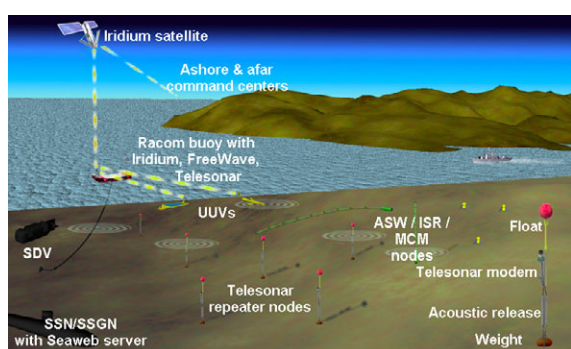


图 5 海网示意图

Fig.5 Schematic of Seaweb

可部署自主分布式系统 (deployable autonomous distributed system, DADS) 是美国 ONR 和 SPAWAR 联合研发的未来海军濒海防雷反潜项目, 如图 6 所示。美国海军在 2001 年 6 月进行了

DADS 应用的舰队作战 (FBE-I) 试验。该试验系统由 14 个固定节点及数个移动节点组成, 包括 2 个传感器节点、2 个浮标网关节点和 10 个遥控声呐中继节点, UUV 作为移动节点加入网络, 网络服务器部署在岸基指挥中心。

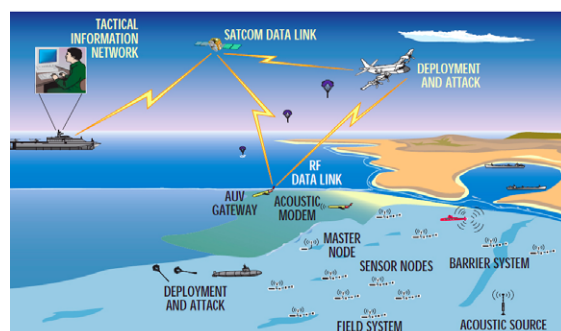


图 6 可部署自主分布式系统示意图

Fig.6 Schematic of deployable autonomous distributed system(DADS)

先进可布放系统 (advanced deployment system, ADS) 由美国洛克希德-马丁公司设计和开发。每个 ADS 由 4 个互联的阵列安装模块组成, 每个安装模块可释放 UUV, UUV 沿预设路线展开体内的光缆和水听器阵列 (见图 7), 实现对潜艇和水面舰船的探测跟踪, 监测水雷布放活动。ADS 之间还可以通过浮标相互通信, 形成更大的水下探测网络 (见图 8)。

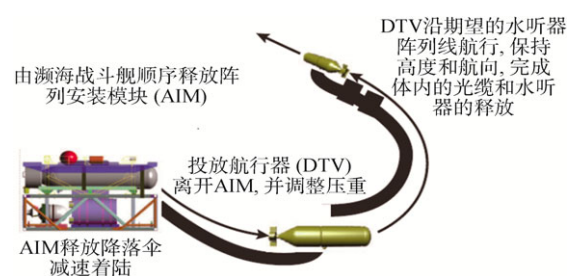


图 7 先进可布放系统布放展开过程示意图

Fig.7 Implementation process of advanced deployment system(ADS)

水下持续监视网 (persistent littoral underwater surveillance network, PLUSNet) 于 2006 年开始研制, 它以巡航导弹核潜艇为母节点, 以核潜艇携带的 UUV 为移动子节点, 以水下潜标、浮标、水声探测阵为固定子节点, 构成一种潜布式海底固定加机动的水下网络, 如图 9 所示。

该系统可获取海洋环境信息、探测水下目标,

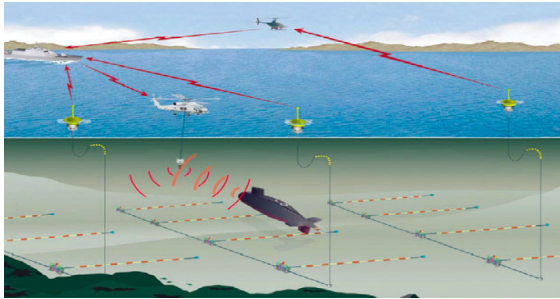


图 8 ADS 示意图
Fig.8 Schematic of ADS

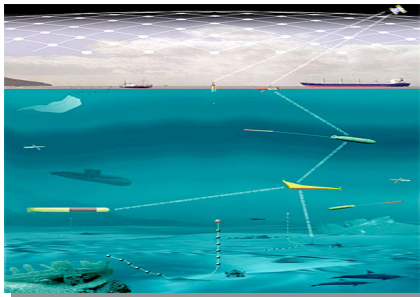


图 9 水下持续监视网示意图
Fig.9 Schematic of persistent littoral underwater surveillance network (PLUSNet)

为水下作战提供支撑,已于 2015 年形成作战能力。美国电船公司基于巡航导弹核潜艇,已经为 PLUSNet 开发了一种新型搭载系统进行隐蔽布放(见图 10)。美国海军计划通过 PLUSNet 和 ADS 一起构成未来水下反潜网络^[15]。

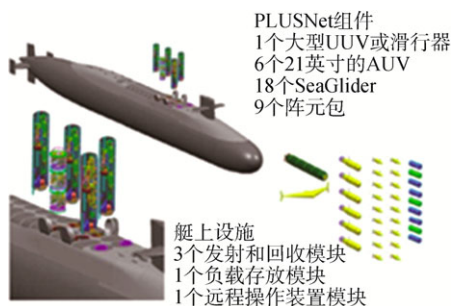


图 10 美国电船公司开发的新型搭载系统 PLUSNet
Fig.10 New type of boarding system for PLUSNet developed by Electric Boat Company

4) 其他新项目的研发

2015 年,美国加大了该领域的研究力度,并发布了多个新项目的研发计划^[2]。

美国科学应用国际公司为 DARPA 研制的反潜战持续追踪无人艇(ASW continuous trail unmanned vessel, ACTUV)项目,旨在应对未来安静型

柴电潜艇的威胁。该艇具有探测、跟踪、告警及规避功能,能够进行无线和卫星等多种通信。艇体采用复合材料,暴露在水面上的部分以及雷达反射截面较小,具有很好的隐蔽性和浅海航行能力。航速达到 27 kn,作战半径达到 3 000 km,续航时间为 3 个月,具有极佳的前沿部署能力及大范围反潜能力。

大直径无人水下航行器(large displacement unmanned undersea vehicle, LDUUV)具有扫雷、跟踪、情报侦察、自主工作、智能化攻击的能力,可搭载各种类型的导弹、炸弹甚至核弹进行自主攻击;既可独立使用,也可在包括巡航导弹核潜艇、弗吉尼亚级攻击核潜艇和水面舰艇等多种平台部署。该潜器计划 2017 年服役,2020 年具备完全作战能力。

2016 年 5 月,英国 BAE 公司开始为 DARPA 研发“深海导航定位系统”(POSYDON)项目。该系统由固定部署在海底的大量水声传感器组成,水下航行器无需浮上水面寻求 GPS 定位,也无需释放任何射频传输信号,即可根据传感器的坐标推算出自身位置信息,因此可最大限度地降低被探测的风险、成本和动力消耗。该项目研制时间暂定 48 个月,分 3 个阶段进行。

1.1.2 俄罗斯

近年来,俄罗斯大力发展 UUV 颠覆性技术。2015 年 11 月,俄披露了正在研发的一种水下高速自主航行器——“海洋多用途系统 Status-6”,该航行器可携带核弹头,并可在沿海地区破坏敌方重要经济区域,造成大范围的放射性污染。该航行器下潜深度约 1 000 m,速度可达 56 kn,续航约 10 000 km。该航行器预计于 2019 年生产出原型机^[2]。

1.1.3 欧洲

瑞典萨博(SAAB)公司一直致力于 UUV 的研究,在 2015 年的英国防务展上,该公司展出了该领域的多项研发成果。其中,AUV62-MR 水雷探测系统具有水雷探测、反水雷、远程作业与高阶自主能力,采用模块化设计,可执行多种任务;多功能水下航行器 SUBROV 则是一种最新型的远程操作 UUV,可被任何潜水艇运载发射,适于 21 英寸标准级鱼雷发射管;海黄蜂(Sea Wasp)是

一种水下非常规爆炸处理装置,采用模块化设计,具有优异的适航性,可执行多任务^[2]。

英国南安普敦海洋中心研制的海洋调查与监视水下航行器 AutoSub 是一个大潜深、远航程的多用途水下航行器,最大工作深度 1 600 m,航程 500 km。

德国阿特拉斯电子公司研制的无人水下侦察航行器 DeepC,重 2.4 t,续航时间达 60 h,最大航程 400 km,巡航速度 4 kn,最大航速 6 kn,有效载荷 300 kg,最大潜深 4 000 m。

1.2 国内发展现状

近年来,我国针对单 UUV 技术的研究已取得突出进展,中国科学院沈阳自动化研究所、哈尔滨工程大学、西北工业大学、天津大学、上海交通大学等单位都在该领域进行了大量研究。

中国科学院沈阳自动化研究所研制的系列化水下航行器,包括“探索者”号航行器、“CR01”航行器、“CR02”航行器、“潜龙一号”、“潜龙二号”航行器等。其中“潜龙二号”在“潜龙一号”的基础上,在机动性、避碰能力、快速 3D 地形地貌成图、浮力材料国产化方面均有较大提高,为我国海底多金属硫化物调查和勘探提供高效、精细、综合的先进手段。

哈尔滨工程大学在“十二五”国家 863 计划支持下,完成了 300 kg 级小型自主水下航行器(智水-)的研制,在蓬莱海域实现了自主连续航行 110 km 和自主布放等多项功能演示,最大潜深达 1 000 m。

西北工业大学在“十一五”、“十二五”期间分别研制了“300 m 航深、300 km 航程”和“500 m 航深、500 km 航程”远程智能水下航行器,突破了航行器低速横向平移与回旋、水下悬停矢量推进与操纵、新型稀土永磁推进电机等关键技术,具有航路自主规划和安全布放回收能力。此外,西北工业大学还研制了 50 kg 级便携式水下航行器,航程 50 km,最大工作水深 200 m,具有安全可靠、便于操作、易于维护等优点,可快速灵活扩展功能模块,满足海洋环境探测和水下观测的需求。

天津大学研制的“海燕”号水下滑翔机,采用变浮力滑翔、螺旋桨推进的混合运动模式,在南海北部水深大于 1 500 m 海域不间断工作 30 天,

最大航程超过 1 000 km,创造了中国水下滑翔机无故障航程最远、时间最长、剖面运动最多、工作深度最大等诸多纪录。

目前,国内的研究主要集中于单 UUV 技术阶段,在航行器集群协同方面开展了一些前期研究,同时需具备航程数千公里、最大工作水深数千千米指标的 UUV。此外,还应重视产品的体系化发展,研发远离岸基、自主远程隐蔽航渡、自行展开军事对抗的关键装备,加强对新概念航行器的探索。

2 UUS 关键技术

UUS 是多学科交叉、融合的综合系统,蕴涵着大量的基础科学和前沿技术,是一个庞大的系统工程。围绕解决 UUS“自主性、互操作、数据链、多平台协同”等核心问题,需要重点突破以下共性关键技术。

2.1 自主航行技术

为了确保 UUS 能够在复杂海洋环境中自主协同地完成各项任务,必须解决环境自适应、自主对接与回收、编队协同控制、协同导航与定位等技术问题。

1) 环境自适应技术

UUV 执行任务时,能够根据海洋环境、任务需求、运动约束、通信约束等多时空约束,合理规划出最优的航迹或者航路点,以节约能源、规避危险区域等。航行过程中,由于海洋环境的变化,UUV 根据实时测量信息,需要避开在其航行路径上的障碍物或者危险区域,因此 UUV 还要求有自主避障的能力,以适应环境的变化。

此外,一些任务中 UUV 要在海底隐蔽航行,为了保证 UUV 的安全性,要求能够与海底保持一定的高度航行,因此,在海底起伏的情形下,UUV 要能够根据海底地形自主调节距底高度。

2) 自主对接与回收技术

为了实现 UUV 能源补给、数据传输的功能,必须解决 UUV 与水下基地的自主对接与回收问题。目前,美国已经实现了在自主海洋采集网络(autonomous ocean sampling network, AOSN)中通过固定的水下回收器收集 UUV 的数据并对其补充能量。国内中科院沈阳自动化研究所和哈尔滨

工程大学已经进行了一些水面舰船和潜艇通过释放回收器实现 UUV 回收的研究, 西北工业大学则开展了潜艇发射管回收 UUV 时的流体动力和微速控制方面的研究^[16-17]。

为此, 围绕 UUV 在复杂海洋环境下长时间作业的需求, 应重点解决水下自主对接非定常力学特性分析、水下自主对接过程微速操纵性分析、基于声学/光学信息融合的水下对接目标定位与定向等关键技术。

3) 编队协同控制技术

多 UUV 协作过程中, 需能够自主进行任务分配。巡航过程中, UUV 通过与其他平台的信息交互, 使多个平台之间保持一定的距离航行, 并随时共享相互间的探测信息, 当 UUV 探测到环境信息变化需要改变队形时, UUV 能够通过相互之间的协调来自主完成队形变换。当对目标进行协同攻击时, UUV 之间能够根据指定的方式对目标实施打击。图 11 为 UUV 编队协同控制示意图。

4) 协同导航与定位技术

高精度的导航定位是多 UUV 系统完成任务的基础。通过 UUV 间导航信息的共享, 即多 UUV 间的协同导航, 在提高系统整体导航定位精度的同时, 既可降低导航定位成本, 还可摆脱基阵/母船的束缚, 使用区域灵活。目前, 协同导航与定位主要有领航跟随式和分布式 2 种。领航跟随式中, 领航 UUV 配置高精度导航传感器, 跟随 UUV 配置低精度导航传感器, 领航 UUV 的数量一般 2~4 个, 理论上跟随 UUV 数量不受限制; 跟随 UUV 一般需与领航者通信, 并且领航 UUV 间需要具备配合能力。分布式中, 每个 UUV 具有相同的导航传感器配置与同等地位, 一般要求 UUV 与多个邻居通信, 由于目前世界先进的美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)研制的水声通信系统 Modem 较可靠的通信率也只有 32 Bytes/10 s, 故适合于 UUV 数量较少的场合。

2.2 水下数据链通信技术

为了实现 UUV 多平台间的数据共享, 必须解决水下远程高速动态通信、水下网络与空中网络互联等技术问题。

1) 水下远程高速动态通信技术

在执行大范围、远航程任务时, 航行器之间以及航行器与母平台之间需要进行远程高速动态

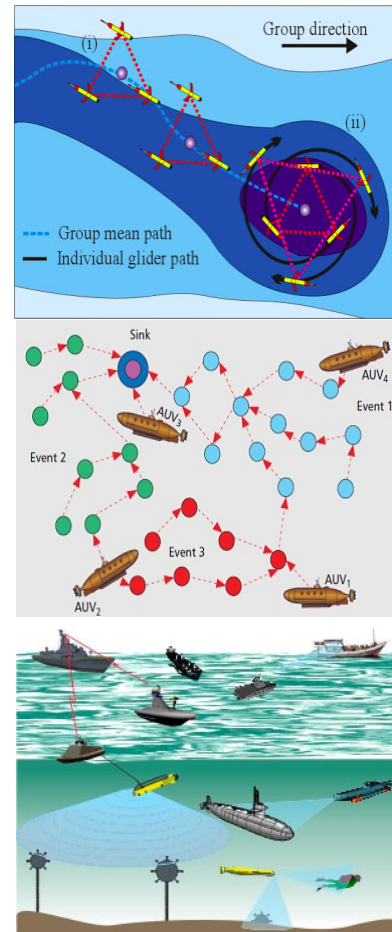


图 11 水下航行器编队协同控制

Fig.11 Formation coordinated control of unmanned undersea vehicle(UUV)

通信, 以实现信息传输与共享。为了实现水下远程高速动态通信, 重点需要突破深海声信道远程通信技术、远程低误码率指令信息传输技术以及信息传输抗截获技术等。

2) 水下网络与空中网络互联技术

UUV 主要以声学通信为主, 然而水声通信存在着水声信道时域和空域不断变化、多途效应扩展严重、具有频率选择性信道衰落、可用频带资源有限等限制, 使得 UUV 的通信距离和带宽受到限制, 并且误码率高。为了实现水下网络与空中网络的互联, 重点需要突破基于移动节点的水声组网通信技术、水下中继水声通信技术、水下网络-浮标-卫星中继通信技术等。通过多个移动节点之间的相互通信, 构建水下移动声学网络, 将水面浮标作为中继, UUV 可以与卫星实现通信, 从而实现海空天三位一体协同工作。

3 结束语

海洋是我国经济可持续发展的重要战略空间,更是国家安全的重要屏障。UUS作为海洋防卫的重要装备,是我国现代海军崛起、建设蓝水海军的重要组成部分。

当今各军事大国都在加紧各类UUS的研制和开发,美国在该领域的研究更在体系化、集群化以及对新概念水下航行器的探索等方面凸现其技术优势。相比而言,我国尚需在系统的集群协同、超远航程与超大潜深、自主隐蔽作战等方面加大投入和研发。

鉴于UUS的发展趋势,未来研究方向及重点应基于以下几方面:1)仿生技术、人工智能技术将在UUS中扮演越来越重要的角色,也是我国实现弯道超车的技术突破点;2)应尽快召集国内相关技术优势单位,在充分调研的基础上,制定我国UUS的发展路线图,指导相关技术研究;3)将UUV与无人水面船、无人地面车辆、无人机等无人系统统筹考虑,同时开展多种异构无人平台的联合协同作战研究。

参考文献:

- [1] 熊思齐,姚直象,杨新友,等.无人水下航行器发展现状及若干关键技术探讨[J].声学技术,2015,34(2):262-264.
Xiong Si-qi, Yao Zhi-xiang, Yang Xin-you. The Investigation of UUV's Development Status and Key Techniques[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(2): 262-264.
- [2] 李经.水下无人作战系统装备现状及发展趋势[J].舰船科学技术,2017,39(1):1-5.
Li Jing. Existence and Development Trend of Navy Autonomous Underwater Combat System[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(1): 1-5.
- [3] 钱东,唐献平,赵江.UUV技术发展及系统设计综述[J].鱼雷技术,2014,22(6):401-415.
Qian Dong, Tang Xian-ping, Zhao Jiang. Overview of Technology Development and System Design of UUVs[J]. Torpedo Technology, 2014, 22(6): 401-415.
- [4] Department of the Navy, United States of America. The Navy Unmanned Undersea Vehicle(UUV) Master Plan[R]. U.S.: Department of the Navy, 2000.
- [5] Department of the Navy, Department of the Navy. The Navy Unmanned Undersea Vehicle(UUV) Master Plan[R]. U.S.: Department of the Navy, 2004.
- [6] Department of Defense. Unmanned Systems Roadmap 2007-2032[R]. U.S.: DoD, 2007.
- [7] Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics. Next-Generation Unmanned Undersea Systems[R]. U.S.: USD, 2016.
- [8] Daniel E. Sgarioto. Steady State Trim and Open Loop Stability Analysis for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle[C]//IEEE International Conference on Control and Automation. Christchurch, New Zealand: IEEE, 2009.
- [9] 郭魁俊.自主式水下航行器水动力系数数值研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [10] ONR. Liberdade XRay Advanced Underwater Glider [EB/OL]. [2006-04-19] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Liberdade_XRay_underwater_glider.jpg.
- [11] DARPA“深海浮沉有效载荷”(UFP)项目发展概况 [EB/OL].[2016-06-14]. http://www.360doc.com/content/16/0614/22/33578855_567823318.shtml.
- [12] 王汉刚,刘智,张义农,等.水下作战的发展分析与启示[J].舰船科学技术,2015,37(4):241-245.
Wang Han-gang, Liu Zhi, Zhang Yi-nong, et al. The Analysis and Elicitation of Development on Undersea Warfare[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(4): 241-245.
- [13] 牛铁峰,沈林成,戴斌,等.无人作战系统发展[J].国防科技,2009,30(5):1-11.
Niu Yi-feng, Shen Lin-cheng, Dai Bin, et al. A Survey of Unmanned Combat System Development[J]. National Defense Science and Technology, 2009, 30(5): 1-11.
- [14] 李耐和.外军构建水下作战网络[J].现代军事,2007(12):46-50.
- [15] 陈强,孙嵘.支持美国海军作战的无人系统[M].北京:海潮出版社,2015.
- [16] 张伟,张明臣,郭毅,等.一种回收过程中UUV对运动母船的跟踪方法[J].哈尔滨工程大学学报,2015,36(6):795-800.
Zhang Wei, Zhang Ming-chen, Guo Yi, et al. An Approach for UUV Tracking the Moving Mothership in the Recovery Stage[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(6): 795-800.
- [17] 潘光,杨智栋,杜晓旭.UUV水下带缆回收纵向运动研究[J].西北工业大学学报,2011,29(2):245-250.
Pan Guang, Yang Zhi-dong, Du Xiao-xu. Longitudinal Motion Research on UUV Underwater Recovery with a Deployable Tether[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(2): 245-250.

(责任编辑:杨力军)