

海上无人波浪滑翔机的应用与发展

郑皆倬¹, 孙文秋实^{2*}, 李超¹

1. 航天科工海鹰集团有限公司, 北京 100070

2. 中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100036

摘要 波浪滑翔机是一种小型无人海上作业平台, 根据科考观测、海上作业、数据中继等不同任务搭载不同载荷, 在高海况的远洋海域执行连续的作业任务。论述了波浪滑翔机的基本原理、结构对比、应用领域。提出可以以波浪滑翔机为中间桥梁, 利用其长期远洋存在的特性, 结合卫星通信技术, 打造天海一体的海洋立体观测数据服务平台, 形成自我运营的海上监测装备和数据服务能力的应用构想。

关键词 波浪滑翔机; 海洋环境观测; 海洋安全

长期以来, 中国尚未建立成熟的海洋监测和测绘体系, 因此一直缺席“蓝色空间”的话语权。近几年, 为了实现中国海军、海洋经济的向海图强, 国家相继提出海洋强国战略、“21世纪海上丝绸之路”倡议, 大力开展海洋探测应用和装备的研发工作。构建全球海洋立体观测网, 是进行海洋资源科学开发, 保护海洋生态环境, 维护国家海洋权益, 建设海洋强国的有力支撑。当前, 全球的海洋立体监测成本不菲, 无人化、长续航、高海况、零污染、高隐蔽的超高要求, 一直是海洋科学观测进一步发展的重要阻碍, 而海上无人波浪滑翔机(UMV)的出现改变了这种状况。以中国北斗波浪滑翔机为例, 详细阐述和展望中国海上无人波浪滑翔机的发展和市场应用。

1 波浪滑翔机的基本原理

波浪滑翔机是一种无人化海上观测平台, 可在不同的海况条件下对海洋环境进行持续、有效的观测。最早研发设计波浪滑翔机的是美国公司 Liquid Robotics, 其于 2009 年研发完成全球第一款——Red Flash, 该波浪滑翔机采用双体设计的海浪推进式无人水面艇(USV), 水面有一个表面浮体平台, 平台下面的“滑翔机”部分通过电缆系在平台下方约 7 m 处(据 Liquid Robotics 测试, 7 m 为推进效率的最佳距离)。浮体和滑翔机协同工作, 以鲸类运动模式为原理, 利用从海洋波浪作用中收集的能量将平台推进水中。当浮体随着表面上的波浪作用而上升和下降时, 滑翔机部分在距离“相对海

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-08-06

作者简介: 郑皆倬, 工程师, 研究方向为空间信息应用技术等, 电子信箱: scmz Zheng@163.com; 孙文秋实(通信作者), 工程师, 研究方向为科技管理、项目管理、产业化运作管理等, 电子信箱: sunwenqiushi@sina.com

引用格式: 郑皆倬, 孙文秋实, 李超. 海上无人波浪滑翔机的应用与发展[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 134-143; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.21.017

面”7 m 相对静止的水中,将从平台之间的联接产生的垂直运动转换为向前的推力。由于平台的滑翔机部分低于大多数海况下的大部分表面波动作,因此附着在滑翔机上的“水翼”随着波浪作用上下旋转,从而将海洋表面的波浪能转化为机体前进的动力(图1)。由于波浪能在海洋表面长期存在,因此能够从根本解决常规海上观测作业平台对能

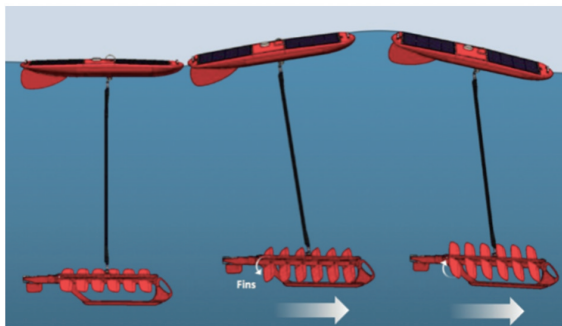


图1 波浪滑翔机原理

源的需求问题。目前,Liquid Robotics 设计完成的波浪滑翔机已完成了一系列海上试验,并成功实现产品化,并在军事、海洋观测等领域得到了广泛应用(该公司2016年被美国波音公司收购)^[1]。

2 波浪滑翔机的结构及国内外对比

波浪滑翔机由纯机械式推进系统构成,在使用过程中无需任何电力,其浮体部分可以搭载船舶自动识别装置,用于导航或自动避开障碍物,必要时可以通过远程进行遥控操作^[2];可以搭载卫星通信系统,以便通过卫星回传各类采集数据;可以搭载各类型传感器,以便获取全方位海洋观测数据,实现海洋区域的环境立体监测。此类设备的能量提供者是为搭载在波浪滑翔机浮体上表面部分的太阳能收集装置^[3]。浮体结构如图2^[4]所示。

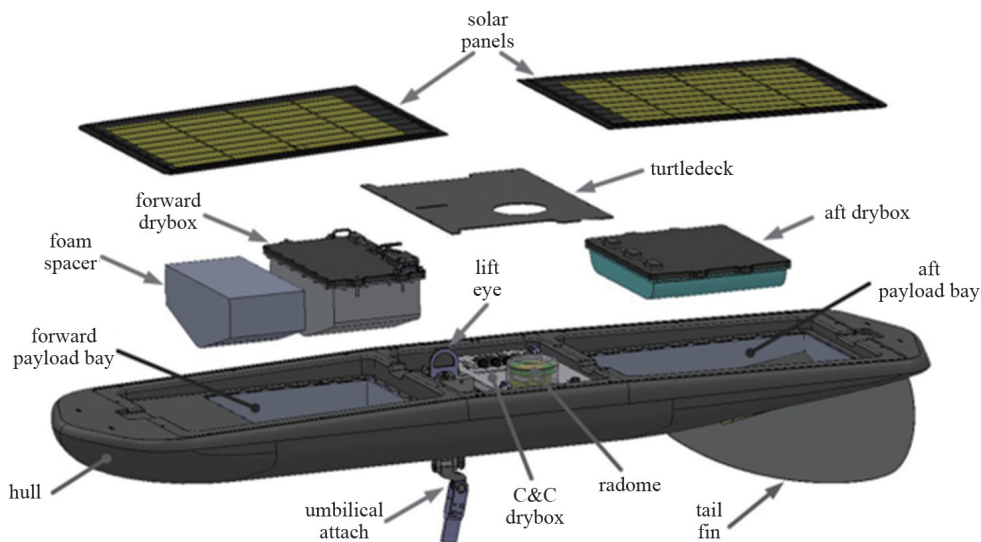


图2 波浪滑翔机浮体结构

2.1 Liquid Robotics 设计的波浪滑翔机

Liquid Robotics 是全球领先的波浪滑翔机制造商和服务商,该公司的产品线计划从低成本、可一次性使用的SV1(可以部署在集群中),一直发展到可承载大型复杂有效载荷的大型SV7^[5],目前已实际投产完成SV3。2019年10月,该公司发布了改

进型的SV3,在使用新型的太阳能电池、装载工具的前提下,利用NVIDIA Tegra 芯片组提高平台的边缘计算能力^[6]。

SV3曾在2011—2013年穿越太平洋,是“无人船”最远航程的世界纪录保持者。SV2、SV3结构数据如表1^[7]所示。

表1 SV2和SV3的结构数据对比

型号名称	浮动尺寸	滑翔机尺寸	水翼翼展/cm	重量/kg	续航时间/年	水流速度/kt	浮深额定值/m	电池/(W·h)	太阳能/W
SHARC SV2	210 cm×60 cm	40 cm×191 cm	107	90	>1(定期保养)	0.5(SS1), 1.3(SS4)	2(短暂下沉)	665(锂离子电池可充电电池)	86(峰值),用于电池充电、电子设备和有效负载
SHARC SV3	290 cm×67 cm	21 cm×191 cm	143	122	>1(定期保养)	1(SS1), 1.7(SS4)	2(短暂下沉)	980(锂离子电池可充电电池)	170(峰值)

SV3在机械部分是SV2的升级版本,但它与SV2的根本性改变是搭载了一个云操作平台,实现了船岸一体化运行,让运营商可以通过系统在云端和船上进行操作。云操作使运营商能够创建模拟机器人环境,在该环境中,运营商可以运行波浪滑翔机的场景,实现了端到端的情报、监视和侦察(ISR)网络的枢纽能力。而该系统的网络把自动水下航行器(AUV)到波浪滑翔机(M)再到人工导航的飞机、无人机、卫星等纳入一个群体,实现空间一体化,进一步证明了波浪滑翔机的联网能力。波浪滑翔机可以安装各种有效载荷,从用于海洋监测的载荷到反潜作战系统均可实现。目前,该平台最大的问题之一是由机载传感器系统收集的数据上传时,卫星通信使用费用昂贵的问题。针对该问题,Liquid Robotics提出一种方法,通过WiFi将SV3波浪滑翔机进行星状组网,并选择网内有4G通信传输数据的SV3进行统一数据传输。目前,Liquid Robotics还在考虑在持续监控等任务中引入更大程度的智能化。例如,系统仅在识别出感兴趣的内容后发出警报并发送数据,这将有助于减轻通信链路的负担并减轻运营商的工作量^[8]。

2.2 中国基于北斗的波浪滑翔机

中国在波浪滑翔机研究方面起步较晚。2014年,国家高技术研究发展计划(863计划)海洋技术领域指南中首次提出开展波浪滑翔机相关技术研究。目前已知的中国航天科工集团第三研究院(以下简称航天科工三院)、哈尔滨工程大学、中科院沈阳自动化研究所、浙江大学、中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所、国家海洋技术中心、中国海洋大学等机构正在开展相关研究和试用工作。其中,航天科工三院于2016年为构建可长期存在、

具有灵活机动特性的水面水下一体化监测体系而开展波浪滑翔机自研工作,并于2016年9—10月、2016年12月—2017年1月、2017年5月—2017年7月完成3次海试。图3、图4为航天科工三院自主研发设计并制作的波浪滑翔机样机及海试轨迹。中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所于2019年通过承担国家重点研发计划,研究试制了“海鳐”波浪滑翔机,并在中国南海进行了自测模拟海试。哈尔滨工程大学相关研究团队的研究成果已在潜龙2号海洋科考等数个任务中具有真实应用案例。其他如吕元博^[9]对波浪滑翔机设计与性能开展了研究;曹守启等^[10]对波浪滑翔机水下牵引机结构进行了设计与分析;于振江等^[11]对波浪滑翔机推进装置翼片的启动阶段水动力学进行了分析研究;孙秀军等^[12]对波浪滑翔器水下牵引机滑翔动力方面进行了分析研究。

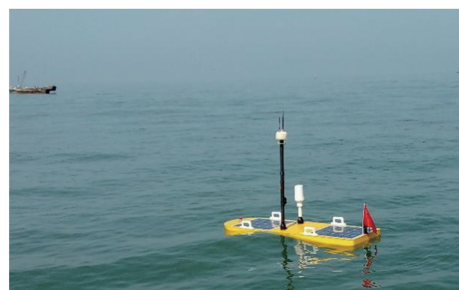
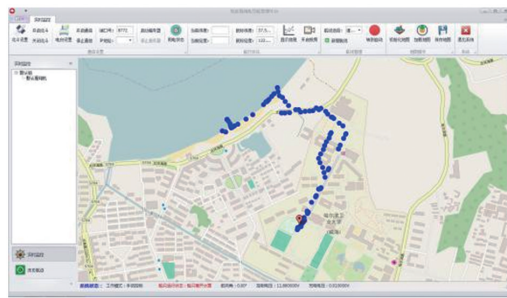
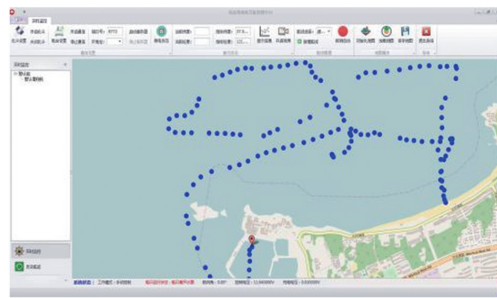


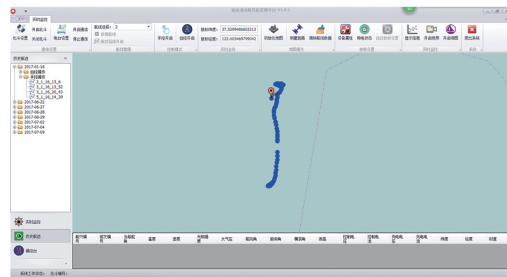
图3 波浪滑翔机海试



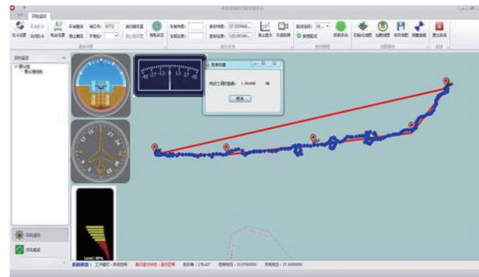
(a) 地面测试



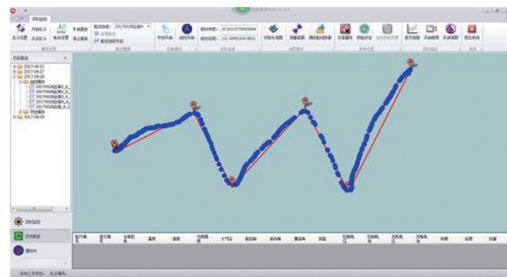
(b) 近海船上测试



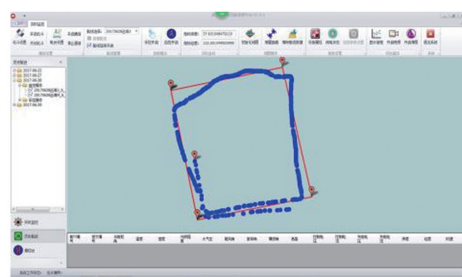
(c) 直线运动测试



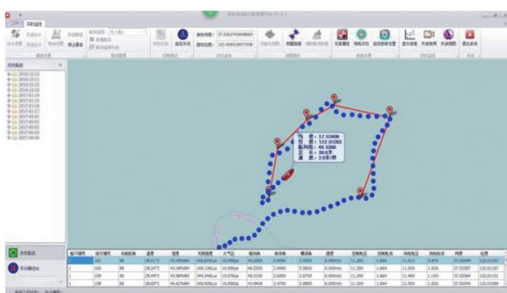
(d) 曲线运动测试



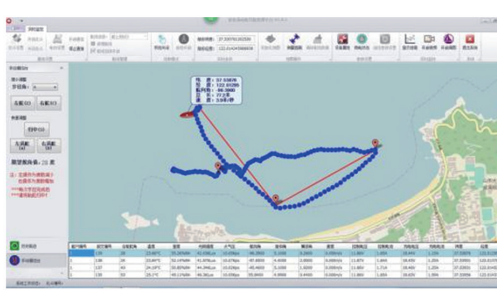
(e) 之字型航线运动测试



(f) 矩形封闭航线运动测试



(g) 多边形航线测试



(h) 直角航线测试

图4 波浪滑翔机海试轨迹

中国以北斗作为远洋位置和通信基础的波浪滑翔机(图5),其机体结构由水面的浮体与水下的拖体两部分组成,水下拖体可直接利用海浪的运动进行驱动,通过方向舵(电力驱动)操控其航向。内

部部件包括气象传感器、天线(北斗导航、卫星通信及AIS等天线)、航标灯、太阳能电池板、控制舱、前后负载设备仓、吊放设备、水翼、舵、水下仪器安装架等。北斗波浪滑翔机长2.1 m,宽0.6 m,重量达

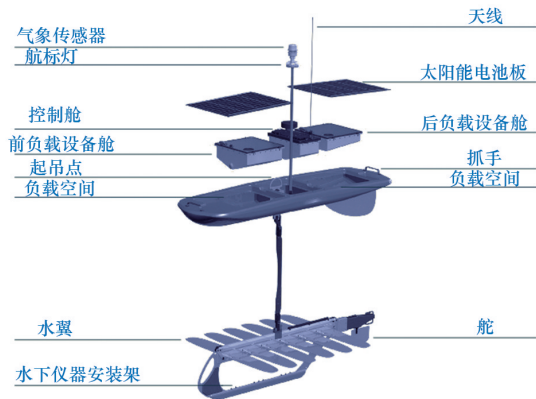


图5 北斗波浪滑翔机产品示意

75 kg,排水约 150 kg。工作海况为 6 级,30~40 kn 风速,具有 6 级以上的抗浪性能。一般航速可达 1~3 kn,且风浪越大,速度越高。负载太阳能板电池可达 86 W,具备 665 W·h 储能能力,电负载能力为 3~5 W,可实现 9~12 月以上的续航能力。船体通过北斗数传与 4G 自组网实现船岸通信,并配备 AIS 系统。

搭载各类传感设备的北斗长航时波浪滑翔机,配合定制北斗船载终端设备,具有基于北斗定位导航和高分对地观测系统的海洋动态监测服务平台功能。波浪滑翔机系统结构包含机体、机体控制系统、动力及能源管理系统、通信系统、导航定位系统、任务及传感器系统等(图6)。

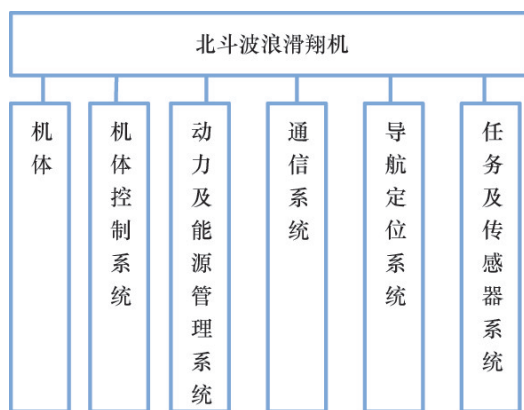


图6 北斗波浪滑翔机系统结构

其中在机体控制系统方面,北斗波浪滑翔机水面载体加装方向舵与舵机控制系统,实现平台的方向控制。控制系统将接收平台挂载的各个传感器

及北斗导航定位系统的数据并进行信息融合处理,同时负责自身姿态信息的解算,做出控制决策。能源系统则主要包含水密封锂电池与太阳能电池。在导航系统方面,包含导航定位系统及惯导系统,以接收实时经纬数据及姿态数据。通信系统则分为内部和外部两个部分。北斗波浪滑翔机各个模块之间内部数据传输通过控制器局域网(controller area network, CAN)总线完成,与外部单元的长数据传输之间通过无线电方式收发,短报文依靠北斗系统完成,而任务及传感器系统则根据需要进行搭载。

就目前研究而言,波浪滑翔机研发和工程化应用过程中的关键技术主要包含以下 6 个部分。

1) 机理技术。浮体和拖体的结构外形、拖体的运动效率、浮体的能量转换效率以及浮体和拖体之间的拖缆连接是影响波浪滑翔机运动的重要机理。从理论研究出发,需尽可能地对浮体和拖体的尺寸、形状、形式进行优化,进而更高地将水面、水下动能差转化为前进的能量,实现更高的远海运行效率,并且方便集群应用中的快速调度。

2) 新型材料成型及加工技术。为保障波浪滑翔机在恶劣环境下执行长期任务,船体在设计 and 集成过程中需采用无磁、耐腐蚀复合材料模具成型,结合高强度浮力材料加工完成,相较于现今金属艇体在保证艇体强度的同时,应尽可能地降低艇体重量并优化艇体结构,使其便于生产制造和具有更好的水动力模型。

3) 电气控制仓密封技术。基于北斗长航时海面集群自主观测平台的海上长航时作业特点,其电气控制应采用密封技术、模块化设计,实现可插拔式安装连接,最大程度地降低海上恶劣环境对于电气设备的影响。

4) 定点锚定控制技术。为保障波浪滑翔机能够在海上定点观测,需要设计一套在海上保持位置状态的锚定控制功能,通过机器人运动模型与动力系统的分析,实现北斗长航时海面集群自主观测平台在水中的动力定位功能。

5) 观测平台水面附体与水下拖体的协同控制技术。运动控制方面,由于海洋模型复杂、滑翔机

的结构也不是一个完全的刚体,因此传统的建模方法很难真实有效地描述控制模型,需要通过机器学习等方法对其运动模型进行辨识,对波浪滑翔机的动力系统和结构进行大量力学、水动力学仿真实验,不断地对模型和设计进行优化。

6) 群体协同控制技术。由于波浪滑翔机的承载能力相较于大型科考船只较弱,在承担大型复杂任务时需要采取群体协同的工作方式,故此其船载控制系统需要保障其在海上弱通信状态下仍然能够实现群体编队、协同导航、协同观测等群体任务。在现实工作状态下,群体的通信拓扑结构在复杂环境尤其是在具有强烈干扰的环境中,很难保持固定的通信拓扑结构,而应是以切换的通信拓扑结构形式工作(图7)。

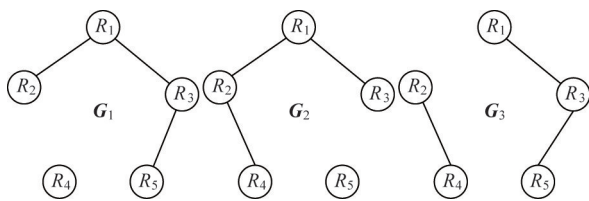


图7 群体切换通信拓扑结构

根据这种情况,需要设计一种能够保障群体系统稳定及实现渐进一致性的控制策略,并通过算法仿真实验及样机实验,突破此项技术难点。

3 波浪滑翔机主要应用领域

波浪滑翔机能够搭载各类传感器和电气设备,进行海底测绘、气象与海况动态监测、生态环境动态监测、渔业调查、岛屿巡护、海底数据链中继等工作。以波浪滑翔机为基础,可建立一套长时间在海洋中自主运行、对海洋信息进行实时动态监控、可远程控制和组网的集群监测体系,这是满足国家政策要求,适应海洋监测应用场景需求、成本经济的理想产品形态。

波浪滑翔机具备易部署、不易被雷达发现、长时间续航等特点,在军事应用领域主要应用在建立封锁和反封锁网络,对重点航线、区域、岛屿进行无人巡视等方面。同时根据其搭载探测设备的不同,能够有效地参与到反潜、反水雷的作业中。同时,该平台还可以作为空气与水两种介质的通信路由,承担地面控制端与水下战斗或探测端的通信中继工作。

波浪滑翔机民用应用领域可分为设施保障和环境监测两类,其中设施保障可主要用作海上油气平台巡视、海底管线维护作业等。环境监测可由监测类别细分为渔业资源探测(鱼群)、污染、气象、海况、水文洋流、海底测绘、灾害预警(地震、海啸、火山喷发等)及科学调查等。波浪滑翔机应用领域如图8^[3]所示。

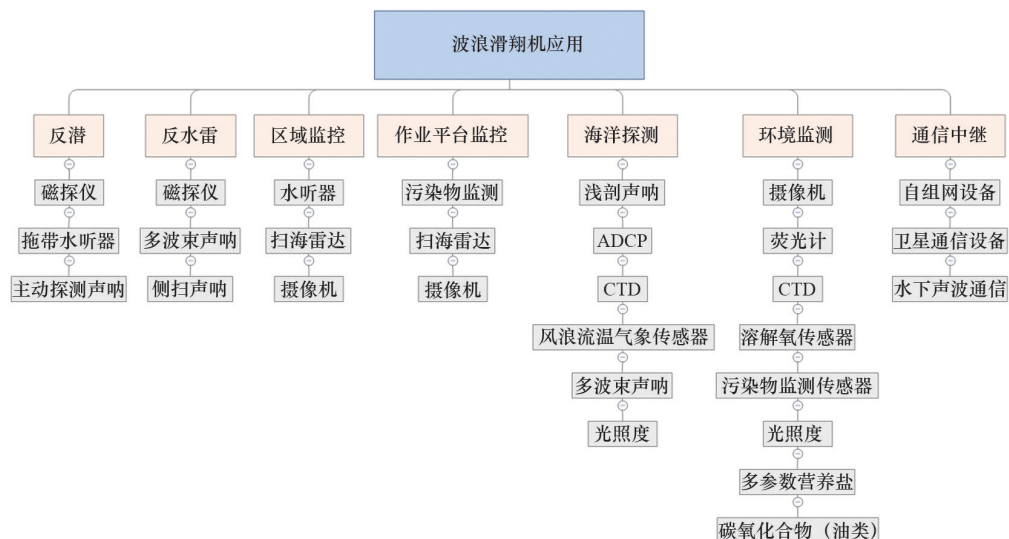


图8 波浪滑翔机主要应用领域

4 波浪滑翔机应用案例

波浪滑翔机具有使用成本低、应用范围广、扩展能力强、续航时间长及环境适应能力强等特点,为各型水面、水下探测设备提供可靠、高速、实时通信手段,便于各项信息及时获取以及对各型设备的远程控制,并且由于采用自然能源推进,具有低噪声及良好的隐蔽性等特性,在军事上可以实现秘密侦查、海域警戒等任务,目前在全球范围内主要聚焦应用于环境调查与科研、计算节电平台、军事、海警和海洋科普5个方面。

4.1 国外波浪滑翔机的应用案例

4.1.1 反潜、反水雷等军事应用

波浪滑翔机因其隐蔽性强、成本经济的特点,被美国等国家大量应用于军事领域。以美国为例,在军事侦察和巡逻方面,美海军基于波浪滑翔机高隐蔽、低噪音的优点,将其用于海岸巡逻、入侵侦察和跟踪索马里海盗等。军用海洋测绘方面,美国海军气象与海洋司令部采购了超过150套波浪滑翔机,用来长期对远洋区域进行常态化海洋及海洋大气数据采集,建立海洋立体数字战场环境,支撑军事部署等任务。情报收集方面,美国情报机构采购200套以上波浪滑翔机,依靠卫星通信将海洋中的音视频数据传回基地^[14]。

目前,Liquid Robotics还致力于开发一个发射和回收系统(LAR),该系统能够从一个集装箱大小的单元中实现大容量自动发射和回收船只。同时将在其他领域承担包括更大的情报、监视和侦察(ISR)及反潜战(ASW)等任务,并为美国海军开发一种重达8 t的波浪滑翔机^[15]。

4.1.2 声学探听等监控应用

美国将搭载了声学装置的波浪滑翔机投放于南加州近海海军训练场所。通过收集西海岸海军训练范围内基于滑翔机的声学监测数据集,测试基于滑翔机的无源声学监测能力。基于波浪滑翔机持久性、无声操作、无中断存在以及由移动性提供的广域监测覆盖能力,对各类声学信号进行检测、分类和定位,可使其在公海中能够执行军演边界监控、航道情报收集和哺乳动物研究等任务^[16]。

4.1.3 海洋执法等作业监控

Liquid Robotics曾透露,美国超声波成像仪(ultra sonic image, USI)的哨兵被动声学传感器已在SV3波浪滑翔机上应用,并在夏威夷附近海域进行了测试。该项工程是假设许多船只禁用自动信息系统(AIS),就将造成无法对其进行跟踪的问题,而在SV3上部署该系统即可解决该问题^[17]。同时,在美国国务院主办的第三届鱼客松(Fishackathon)大赛上,Liquid Robotics透漏其波浪滑翔机将大量用于支持可持续捕捞渔业与打击非法捕鱼活动。

4.1.4 海洋探测方面

海底测绘方面,Liquid Robotics将带有侧扫声呐的拖鱼挂接在波浪滑翔机水下牵引机尾端,实现了地形地貌映射,实验效果良好。海洋生态与动植物探测方面,斯克里普斯海洋研究所(Scripps Institution of Oceanography, SIO)等机构利用搭载了高频声学记录包的波动滑翔机,对海洋哺乳类动物活动、海藻生长等进行长期跟踪研究。洋流监测方面,美国公司Teledyne改变以往测量手段,在波浪滑翔机上搭载通过带有声学多普勒流速测量仪(ADCP),实现了洋流的实时无人监控。海洋大气方面,美国国家海洋大气管理局利用波浪滑翔机测量海洋中的温室气体,以研究化石燃料燃烧造成的环境变化影响。Liquid Robotics与波音达成10亿美元合作,在飞机航线上布设船队,用以监测飞机航线气象海况。风能资源调查方面,美国能源发展公司希望利用波动滑翔机调查海上风力分布情况,以研究可用的海岸风电场。

4.1.5 环境监测方面

环境保护方面,英国石油公司BP购买了波浪动力滑翔机,用来巡视海上钻井平台,对海上泄油、外来船只入侵等事件进行预警,同时日本东海岸大量投放波动滑翔机进行核辐射监测。海水检测方面,可将波浪滑翔机投放到北极融化冰山附近测量海水盐度^[18]。

4.1.6 通信中继方面

海底分布式网络(UDN)是一种不断增长的无人系统类别,在域中运行,不会因物流和成本而受到影响。海底分布式网络利用声学信号和声音传

播来传递水面下的信息。从情报、监视和侦察 (ISR)任务,到无人水下飞行器(UUV)控制,到速度和深度(CSD)与潜艇的通信,水下网络有可能成为海底战争中的力量倍增器。为了使在水面下发生的数据传输有用,必须将通信从声学信号转换为空气/水界面处的电磁信号。目前,该转换是通过配备声学调制解调器和卫星通信调制解调器的网关节点进行的。这些调制解调器通常是系泊浮标的一部分,但系泊浮标造价昂贵,深水维护困难,易受海上船只篡改和碰撞等问题。因此,波浪滑翔机的出现为系泊网关节点提供了一种重要替代方案。以波浪滑翔机为平台,可用于与部署在附近区域的UUV进行通信。UUV操作的一个难点是必须在水面处或附近操作。波浪滑翔机可以通过声学路径提供与UUV通信的有用链接,允许UUV在通信时保持完全浸没。这将消除UUV在水面上方展示或

延伸桅杆以将通信传输给决策者的需要^[18]。

4.2 基于北斗的中国波浪滑翔机应用体系

通过波浪滑翔机的实时数据采集与处理,与高分系列卫星的综合利用,可实现海岸带遥感动态监测、海岸线遥感动态监测、海冰动态监测、海岛动态遥感监测、海洋环境遥感动态监测、海洋环境灾害应急监测等服务。以北斗短报文通信服务为核心的北斗海洋监测服务平台,动态采集和回传各项海洋生态、环境和业务数据,并按照北斗提供的时空数据标签开展海洋大数据实时分析,面向远洋渔业、海洋牧场、国际海运、油气采集、海洋气象、海上风电、海洋旅游、港口等领域提供数据采集、作业支撑、周界安防、海况预报等信息服务,支撑海洋经济行业、政府及相关安全管理部门工作;平台支持远程控制和调度,能够满足各类应急、抢险等特殊任务需求。北斗海洋监测服务平台架构如图9所示。

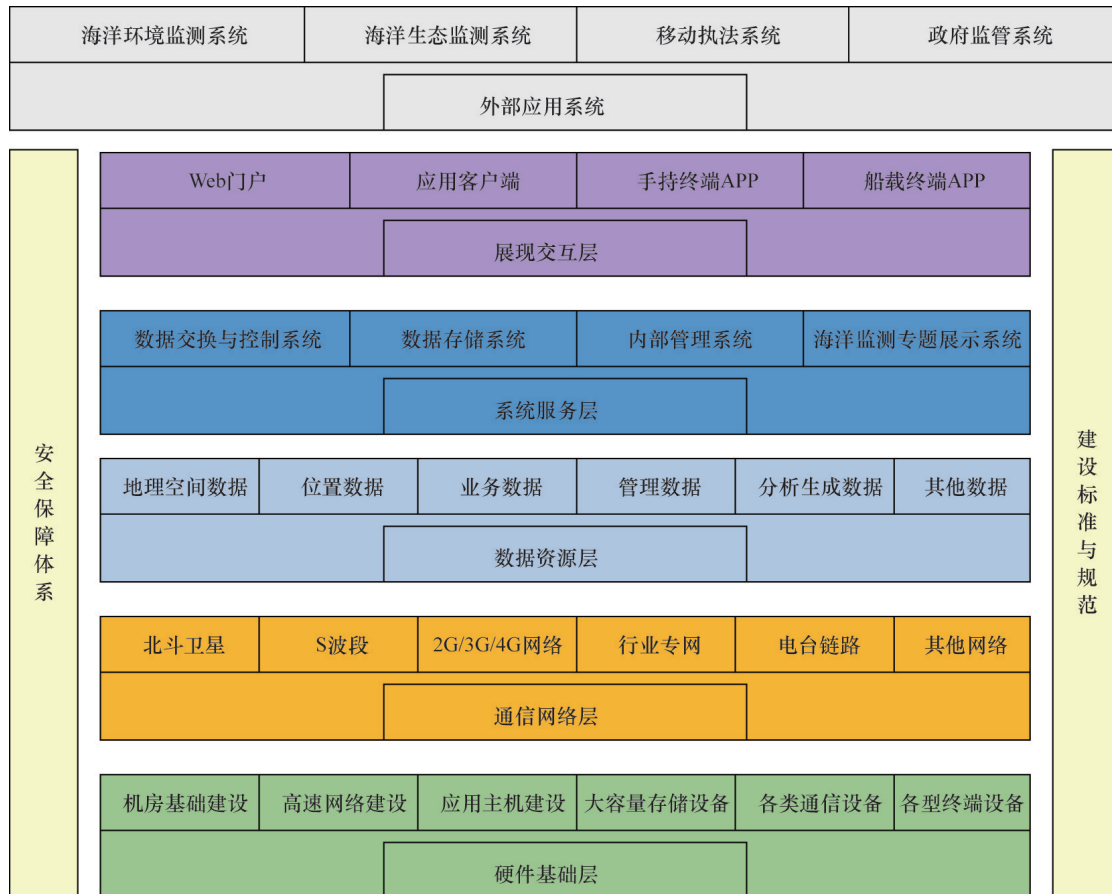


图9 北斗海洋监测服务平台架构

硬件基础层主要是为保障平台高效、安全运行提供一系列硬件基础设备,主要包括机房基础设备(例如机房新风系统、供电系统、屏蔽系统等)、高速网络、高性能应用主机、大容量存储设备、各类通信设备(北斗指挥机、电台等)及所需的其他终端设备。通信网络层依托北斗一代链路、北斗大S波段、2G/3G/4G网络、电台链路及行业专线等通信链路,实现平台和波浪滑翔机、各级平台之间、平台和其他应用系统之间的网络连接和信息传输。数据资源层为满足项目业务需求,对数据资源实现有效的管理与整合。系统服务层是为使用部门提供的系统服务,可划分为北斗海洋监测数据交换与控制系统、北斗海洋监测数据存储系统、平台内部管理系统、北斗海洋监测专题展示系统等多重应用系统。展现交互层根据各级使用部门以及相关企事业单位的需求,实现以网站、应用客户端、智能手持设备、船载终端显示屏等多种实用载体。外部应用系统则预留与其他相关单位应用系统之间的数据传输接口,将平台内有价值的数据与外部系统进行共享,以达到数据服务的目的。最终以波浪滑翔机为中间桥梁,实现海空一体的“天网云”观测体(图10)。

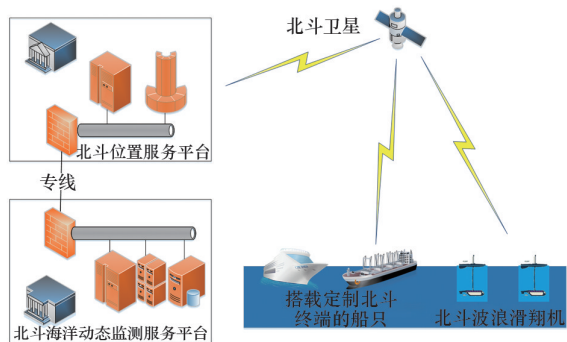


图10 海洋动态监测服务总体结构示意图

5 结论

波浪滑翔机作为一个新型的承载平台,相较于浮标等其他传统平台,拥有低成本、高隐蔽性、可操控、可移动、抗风浪等优势,其应用领域具备较好的延展性,可基于不同领域的用户需求,有针对性地

打造不同产品型号,扩展海上数据采集手段和传感器种类,积累数据及算法模型,用以持续升级换代。虽然国外相关企业在技术和产业化方面领先国内企业,但包括中国航天科工三院在内的多家单位均已开展了相关研究,在相关课题和项目的牵引下具备快速产业化应用的基础。当前,在中国提出经略海洋战略、透明海洋工程的背景下,利用波浪滑翔机长期远洋存在的特性,结合卫星通信技术,能够为中国水下监测体系与空天监测体系之间搭建桥梁,打造天海一体的海洋立体观测数据服务平台,形成自我运营的海上监测装备和数据服务能力,将在中国海洋环境研究、海洋环境监测与保护、渔业生产智能化、海洋安全与权益保障、海防力量增强等方面具有较高的应用前景与社会价值。

参考文献(References)

- [1] Alaaeldeen M E A, Duan W Y. Overview on the development of autonomous underwater vehicles (AUVs)[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(6): 768-787.
- [2] 李小涛, 王理, 吴小涛. 波浪滑翔器原理和总体设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(12): 128-131.
- [3] 杨燕, 张森, 史健, 等. 波浪动力滑翔机海洋环境监测系统[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(1): 109-114.
- [4] Timothy W R. Wave-powered unmanned surface vehicle as a station-keeping gateway node for undersea distributed networks[R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2012.
- [5] Williams H. AUVSI 2013: Liquid Robotics plots growth path for wave glider[J]. Jane's International Defence Review, 2013(46): 22.
- [6] Liquid Robotics Inc. Liquid Robotics announces newest wave glider platform for operational efficiency and performance[EB/OL]. (2019-09-10)[2020-08-29]. <https://www.liquid-robotics.com/press-releases/liquid-robotics-announces-newest-wave-glider-platform-for-operational-efficiency-and-performance/>.
- [7] Liquid Robotics Inc. Jane's unmanned maritime vehicles and systems wave glider[R]. Washington, DC: IHS Jane's, 2013.
- [8] Williams H. AUVSI 2015: Liquid Robotics outlines SV3 enhancement plans[R]. Atlanta: Jane's International De-

- fence Review, 2015.
- [9] 吕元博. 波浪滑翔机设计与性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [10] 曹守启, 冯江伟. 波浪滑翔机水下牵引机结构设计与分析[J]. 海洋工程, 2020, 38(2): 92-100.
- [11] 于振江, 常宗瑜, 郑中强, 等. 波浪滑翔机推进装置翼片的启动阶段水动力学分析[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(4): 121-127.
- [12] 孙秀军, 王力伟, 桑宏强, 等. 波浪滑翔器水下牵引机滑翔动力分析[J]. 水下无人系统学报, 2020, 28(3): 252-258.
- [13] 郑炳焕. 基于波浪能的海面滑翔机研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [14] Grace J. Navy League 2016: Boeing-Liquid Robotics partnership yielding persistent unmanned maritime ISR capability[R]. Washington, DC: Jane's Navy International, 2016.
- [15] Grace J. Boeing-Liquid Robotics partnership to yield new undersea ISR offerings[J/OL]. Jane's International Defence Review, (2015-05-18)[2020-03-10]. <http://janesihs.com>.
- [16] John A, Wiggins H, Wiggins S, et al. West coast naval training range demonstration of glider-based passive acoustic monitoring[R]. San Diego: University of California San Diego, 2013.
- [17] Liquid Robotics Inc. AUVSI 2014: Wave glider set to deploy with acoustic sensor system[R]. Orlando: IHS Jane's, 2014.
- [18] Joseph N B. Integration of an acoustic modem onto a wave glider unmanned surface vehicle[R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2012.

Market application and development of wave gliders

ZHENG Jieliang¹, SUN Wenqiushi^{2*}, LI Chao³

1. Hiwing Group of CASIC Corporation Limited, Beijing 100070, China
2. Systems Engineering Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Beijing 100036, China

Abstract Wave glider is a small unmanned offshore operation platform that carries different loads according to different tasks, such as scientific observation, offshore operation, and data relay, and performs continuous operation tasks in high sea conditions in the ocean waters. Based on a large number of investigations and combined with the research progress of the Third Research Institute of China Aerospace Science and Industry Corporation in the field of wave gliders, this article mainly discusses the basic principles of wave gliders, and compares domestic and foreign situations in terms of structure, main application areas and application cases. It also points out that wave glider can be used as an intermediate bridge using its long-term ocean-going existence characteristics, and that combined with satellite communication technology, wave glider can create an integrated ocean stereo observation data service platform, forming a self-operated maritime equipment for monitoring and data service. They will have high application prospects and social value in such as marine environmental research, marine environmental monitoring and protection, intelligent fishery production, marine safety and rights protection, and enhancement of coastal defense forces.

Keywords wave glider; marine environment observation; marine safety ●



(责任编辑 王志敏)