

“黑珍珠”波浪滑翔器研发综述

孙秀军^{1,4}, 桑宏强², 李 灿³, 周 莹³, 于佩元¹, 王 雷¹

(1. 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387; 3. 中国海洋大学 海洋高等研究院, 山东 青岛 266100; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 通过讲述“黑珍珠”波浪滑翔器的研发进程, 总结了波浪滑翔器团队长达 8 年的发展经验。从国家科技计划全链条资助完成诸项开创式应用、波浪滑翔器型号化/产品化/国产化历程、团队多年发展壮大过程中的结构管理形式与知识产权布局等维度讲述了波浪滑翔器一类的高端海洋装备从机理研究、关键技术攻关、样机研制、技术固化到工程化建设的发展规律。广大读者能够更多了解波浪滑翔器的当前进展、使用价值及在其海洋环境观测及海上安全保障探测中起到的重要作用。

关键词: “黑珍珠”波浪滑翔器; 台风观测; 极端海况; 最大航程; 国产化率; 批量化生产

中图分类号: P715.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2020)12-0107-09

DOI: 10.11759/hyxx20200315001

从狭义上讲, 波浪滑翔器是美国 Liquid Robotics 公司研发的 Wave Glider 的中文翻译, 代指美国该型由波浪能和太阳能驱动的水面无人船。该无人船可以实现 1 年 10 000 km 的长期海上续航而无需人工维护, 搭载海洋学科传感器可以实现外海大洋海气界面的实时连续观测和监测^[1]。

从广义上来讲, 波浪滑翔器是指利用波浪动力实现前向驱动的无人自主航行器, 也就是说波浪滑翔器是以波浪动力高效转换作为关键核心技术的无人航行器^[2]。波浪滑翔器平台充分吸收外海大洋的丰富波浪能源并高效转换为前向动力, 这一波浪动力高效转换技术解决了无人航行器只能搭载有限的能源和动力这一技术瓶颈, 为无人航行器在理论上的无限续航创造了可能^[3]。

2004 年前后, 美国 Hine 等人在利用声学方法跟踪研究驼背鲸的生活习性的过程中发明了波浪滑翔器(Wave Glider)^[4]。2007 年, Liquid Robotics 公司成立并专注波浪滑翔器(Wave Glider)的研发、生产以及应用服务等^[5]。

我国“黑珍珠”波浪滑翔器样机研发开始于 2012 年, 相比美国晚了近 10 年时间, 2014 年我国国家高技术研究发展计划对波浪滑翔器的立项加快了“黑珍珠”波浪滑翔器技术的开发进程^[6]。

在我国国家高技术研究发展计划的资助下, “黑珍珠”波浪滑翔器研发团队经过多年的工艺技术尝

试和数次失败考验, 完成了平台的关键技术攻关、工艺技术固化、小批量生产并广泛应用于我国海洋环境观测之中。

2018 年初, “黑珍珠”技术团队在攻克波浪滑翔器的波浪动力高效转换这一关键核心技术之后, 将波浪动力转换技术与自主航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)、水面无人船(Unmanned Surface Vehicle, USV)以及水下滑翔机(Autonomous Underwater Glider, AUG)等平台进行大胆的技术融合, 完成了新一代波浪滑翔器的开发, 为引领国际波浪滑翔器技术发展前沿奠定了基础^[7-8]。

本文以“黑珍珠”波浪滑翔器的发展经历为链条, 从国家科技计划全链条资助完成诸项开创式应用、波浪滑翔器型号化/产品化/国产化历程、团队

收稿日期: 2020-03-15; 修回日期: 2020-07-02

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0305902); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室“问海计划”项目(2017WHZZB0101); 天津市自然科学基金重点基金(18JCZDJC40100); 山东省重点研发计划重大科技创新工程(2019JZZY020701)

[Foundation: National Key R&D Plan of China, No. 2017YFC0305902; Wenhai Program of Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, No. 2017WHZZB0101; Tianjin Municipal Natural Science Foundation, No. 18JCZDJC40100; Key R&D Program of Shandong Province, No. 2019JZZY020701]

作者简介: 孙秀军(1981-), 男, 山东淄博人, 博士, 教授, 主要从事海洋移动观测技术研究, 电话: 18222138339, E-mail: sxj@ouc.edu.cn; 桑宏强(1978-), 通信作者, 男(满族), 河北隆化人, 博士, 教授, 主要从事海洋无人平台技术研究, 电话: 15022040488, E-mail: sanghongqiang@tiangong.edu.cn

多年发展壮大过程中的结构管理形式与知识产权布局等维度讲述了波浪滑翔器 8 年的研发历程。经过 30 余名技术人员坚守和专注研发,“黑珍珠”波浪滑翔器技术日趋成熟,并在气象水文调查、水质生态监测、海洋声学观测、卫星遥感验证等领域得到推广应用,成为我国国产化高端海洋装备知名品牌。10 余项国家级和省部级项目资助基本覆盖了国家科技资助计划的全链条,8 次台风观测验证了平台在极端海况下的生存能力,单次最大航时 320 d,航程 14 271.4 km 表明了其外海大洋常态化观测的极大潜能,20 余家海洋权威机构的应用诠释了无人移动平台在未来海洋观测中的巨大市场需求,100 余套的批量生产和 6 次我国市场公开招投标销售标志着产业化进程的开始。此外,20 余项发明专利、30 余篇论文,95%以上的国产化率以及近 10 种产品型号系列等体现“黑珍珠”波浪滑翔器技术的核心竞争力。高端海洋装备研发周期长,资金投入大,正所谓“十年磨一剑,一剑磨十年”。把准方向、团结协作、持之以恒、攻坚克难是专业人员研发高端海洋装备取得成功的必要条件。

1 国家科技计划全链条资助,创多项记录硕果累累

1.1 国家/省部级课题 10 余项覆盖国家科技资助计划全链条

自 2014 年以来,“黑珍珠”波浪滑翔器技术研究课题基本覆盖了国家科技资助计划的全链条,依次完成了理论研究、关键技术攻关、样机研制、应用拓展、协作组网以及工程化开发等环节的研究任务^[9-10]。

2014 年 1 月,“黑珍珠”波浪滑翔器获得国家高新技术研究发展计划(863 计划)深远海海洋动力环境监测关键技术与系统集成重大项目资助,课题名称为“混合驱动自主航行监测波浪能滑翔器观测系统”(课题编号:2014AA09A507),国拨经费 580 万元。

2014 年 4 月,“黑珍珠”波浪滑翔器获得天津市科技支撑计划重点项目资助,项目名称为“自主远洋巡航监测波浪滑翔器系统开发与产品定型”(项目编号:14ZCZDSF00010),市财政资助 100 万元。

2017 年 7 月,“黑珍珠”波浪滑翔器获得国家重点研发计划重点专项项目资助,项目名称为“多节点无人无缆潜水器组网作业技术研究及示范系统”,

子课题名称为“波浪滑翔器改造与协作观测技术”(课题编号:2017YFC0305902),国拨与配套经费合计 1 595.5 万元。

2018 年 4 月,“黑珍珠”波浪滑翔器获得青岛海洋科学与技术试点国家实验室“问海计划”项目资助,项目名称为“波浪滑翔器海气通量观测技术开发与应用”(项目编号:2017WHZZB0101),国拨专项经费 690 万元。

2019 年 1 月,“黑珍珠”波浪滑翔器获得国家自然科学基金面上项目资助,项目名称为“基于流体-多体耦合动力学的波浪滑翔器运动性能研究”(项目编号:51875540),国拨经费共计 70.24 万元。

2019 年 11 月,“黑珍珠”波浪滑翔器获得山东省重点研发计划重大科技创新工程项目资助,开展波浪滑翔器的生产线建设,项目名称为“波浪滑翔器工程化技术研究开发”(项目编号:2019JZZY020701),该项目国拨经费 350 万元,青岛海舟科技有限公司配套 200 万元。

除了以上所列,自 2014 年来,“黑珍珠”波浪滑翔器的研制共计获得国家级和省部级项目资助十余项,国拨研发经费愈亿元。其中,部分项目和课题正在执行期内,其余部分业已完成验收工作。

2017 年 11 月,“黑珍珠”波浪滑翔器通过科技部第三方专家见证的海上试验验收,完成了青岛 99 d 共计 3 600 km 的长航程试验和南海“天鸽”和“帕卡”两次台风极端海况测试(经历最大浪高 9.2 m),实现了气象参数(风速、风向、气温、气压、湿度)和水文参数(水温、盐度、浪高、浪周期和剖面流速)等参数的测量。

2018 年 1 月,“黑珍珠”波浪滑翔器通过国家高新技术研究发展计划(863 计划)课题验收。中国 21 世纪议程管理中心在北京组织召开了“混合驱动自主巡航波浪滑翔器观测系统”(课题编号:2014AA09A507)课题验收会。验收专家组听取了课题组的验收汇报,审阅了课题组提交的验收材料,一致同意该课题通过验收。

2018 年 2 月,“黑珍珠”波浪滑翔器通过天津市科技支撑计划项目验收。天津市科学技术评价中心在天津组织召开了“自主远洋巡航监测波浪滑翔器系统开发与产品定型”(项目编号:14ZCZDSF00010)项目验收会。验收专家组听取了项目组验收汇报,审阅了项目组提交的验收材料,一致同意该项目通过验收。

1.2 单次航程航时与累计航程航时均创造国内记录

“黑珍珠”波浪滑翔器创造了国内单次航程和航时^[11]最长(单次最长航时 320 d、单次最长航程 14 271.4 km), 累计航程和累计航时^[12]最长(累计最长航程 36 750 km、累计最长航时 1 203 d)等诸多记录。

2019 年 3 月 9 日, “黑珍珠”波浪滑翔器于西太平洋海域进行长航程、长航时极限测试, 设备布放点为 130°E, 24°N。海试试验区周长约 3 000 n mile, 覆盖面积约为 1 200 000 n mile²。2019 年 3 月 9 日至 2020 年 1 月 23 日波浪滑翔器完成单次累计航时 320 d, 单次累计航程为 14 271.4 km 的壮举, 成功完成最大航程航时自我突破。

2017 年 8 月 17 日, “黑珍珠”波浪滑翔器于中国南海海域进行长期波浪与流速实时观测, 设备布放点为 118°E, 22°N。海试试验区周长约 800 n mile, 覆盖面积约为 40 000 n mile²。2017 年 8 月 17 日至 2017 年 9 月 3 日波浪滑翔器完成单次累计航时 26 d, 单次累计航程为 356 km, 首次实现长期波浪与流速观测应用。

2017 年 5 月 20 日, “黑珍珠”波浪滑翔器于中国青岛千里岩附近海域进行长期性能测试, 设备布放点为 121°30'E, 36°17'N。海试试验区周长约 40 n mile, 覆盖面积约为 100 n mile²。2017 年 5 月 20 日至 2017 年 8 月 30 日波浪滑翔器完成单次累计航时 99 d, 单次累计航程为 3 594 km, 首次完成长期性能测试。

2018 年 10 月 10 日, “黑珍珠”波浪滑翔器于西太平洋海域进行长航程长航时气象水文实时观测, 设备布放点为 130°E, 21°N。海试试验区周长约 2 500 n mile, 覆盖面积约为 100 000 n mile²。2018 年 10 月 10 日至 2019 年 2 月 21 日波浪滑翔器完成单次累计航时 131 d, 单次累计航程为 8 116 km, 实现长期自主气象水文观测应用。

2018 年 12 月 22 日, “黑珍珠”波浪滑翔器于中国东海海域进行气象水文实时观测, 设备布放点为 123°35'E, 30°19'N。海试试验区周长约 1 000 n mile, 覆盖面积约为 60 000 n mile²。2018 年 12 月 22 日至 2019 年 1 月 30 日波浪滑翔器完成单次累计航时 38 d, 单次累计航程为 2 168 km, 完成东海海域自主气象水文观测应用。

2019 年 5 月 11 日, “黑珍珠”波浪滑翔器于中国南海海域进行虚拟锚泊与路径折返跟踪观测应用, 设备布放点为 116°E, 19°20'N。海试试验区周长约

800 n mile, 覆盖面积约为 40 000 n mile²。2019 年 5 月 11 日至 2019 年 9 月 16 日波浪滑翔器完成单次累计航时 125 d, 单次累计航程为 4 212.8 km, 完成波浪滑翔器锚泊与路径折返观测应用。

2019 年 8 月 5 日, “黑珍珠”波浪滑翔器于中国南海和菲律宾海域进行路径跟踪与实时气象水文观测应用, 设备布放点为 124°40'E, 19°4'N。海试试验区周长约 2 500 n mile, 覆盖面积约为 100 000 n mile²。2019 年 8 月 5 日至 2019 年 11 月 25 日波浪滑翔器完成单次累计航时 110 d, 单次累计航程为 3 884 km, 完成长航程路径跟踪观测应用。

2019 年, “黑珍珠”波浪滑翔器进行各类海试共计 15 次, 全年累计航时 1 074 d, 累计航程 28 576 km, 验证了“黑珍珠”波浪滑翔器的各项性能和功能, 进一步提升和验证了使用可靠性。

1.3 完成我国首次台风观测, 唯一具备台风常态化观测能力

“黑珍珠”波浪滑翔器作为国内首次也是唯一开展过台风常态化观测的波浪滑翔器平台^[13], 在 2017 年至 2020 年期间, 完成了 8 次台风观测, 包括 2017 年的 13、14 和 15 号台风“天鸽”(Hato)、“帕卡”(Pakhar)和“玛娃”(Mawar), 以及 2019 年的 05、07、11、13 和 18 号台风“丹娜丝”(Danas)、“韦帕”(Wipha)、“白鹿”(Bailu)、“玲玲”(Lingling)和“米娜”(Mitag)等^[14]。如今, 30 余人的技术开发队伍经近 8 年的优化改进, 完成了从工艺到技术的多次更新迭代, 使“黑珍珠”波浪滑翔器的工作可靠性得以显著增强^[15-16]。

1) 台风“天鸽”、“帕卡”和“玛娃”观测

2017 年 8 月 17 日晚上 7 点, “黑珍珠”波浪滑翔器搭载的试验船从汕头经济特区码头出发, 行驶大约 12 h 到达 180 km 外的目标海域, 进行 863 计划验收单项性能指标试验, 设备于坐标 118°E, 22°N 处布放。试验期间, “黑珍珠”波浪滑翔器先后经历了第 13 号台风“天鸽”, 第 14 号台风“帕卡”, 第 16 号台风“玛娃”, 设备于 2017 年 9 月 3 日成功回收。根据设备回传的气温、气压、风速、风向数据分析, 台风“天鸽”、“帕卡”和“玛娃”经过时最大风速分别为 15.248 m/s、16.105 m/s 和 15.995 m/s, 气压也有显著降低, 符合台风经过时天气变化特征。

2) 台风“丹娜丝”和“韦帕”观测

2019 年 5 月 11 号, “黑珍珠”波浪滑翔器于南海东沙群岛南侧海域进行比测试验, 设备布放点为

116°E, 19°N。此次试验历时 71 d, 累计航程为 2 832 km, 先后经历了第 5 号台风“丹娜丝”, 第 7 号台风“韦帕”, 成功获取台风期间气象水文数据。台风“丹娜丝”和“韦帕”经过时的波浪滑翔器测得风速明显增大, 气温、气压显著降低, 符合台风经过的气象变化, 回传的水文气象数据连续有效, 证明了波浪滑翔器台风观测的可行性。

3) 台风“白鹿”、“玲玲”和“米娜”观测

2019 年 8 月 5 日, “黑珍珠”波浪滑翔器搭载科考船到达菲律宾海海区, 并于坐标点 124.671 684°E, 19.0618°N 处布放。在菲律宾海以及中国南海完成了为期 110 d 航程 3 884 km 的连续航行, 期间获取了“白鹿”、“玲玲”和“米娜”3 个台风期间的气象水文数据, 并于 2019 年 11 月 25 日在三亚近海成功回收。台风“白鹿”、“玲玲”和“米娜”经过时的风速明显增强(16.788 m/s、16.404 5 m/s 和 14.110 95 m/s), 气压明显降低, 并形成显著降温区; 波浪滑翔器集成气象水文传感器对台风“白鹿”的观测效果明显, 回传的气温、气压、风速、风向、SST 数据真实有效, 证明波浪滑翔器台风观测切实可行。

我国台风所等单位的权威人士表示, “黑珍珠”波浪滑翔器在以上 8 次台风期间所获取的气温、气压、风速、风向、海表温度等数据具有较高的可信度, 能有效地为相关机构开展台风研究和预警提供可靠的观测支撑^[17]。

1.4 我国首次尝试且唯一实现多台组网常态化西太平洋观测

“黑珍珠”波浪滑翔器作为国内首次也是唯一实现西太平洋多台组网常态化观测的波浪滑翔器平台, 在 2018 年至今一直开展西太平洋多台组网常态化观测, 连续实时记录了热带西太平洋风速、风向、气温、气压以及海表水温等数据, 填补我国在外海大洋利用移动平台进行组网常态化观测的空白, 为海洋和气候模式的验证和改进提供观测数据支撑^[18]。

2018 年 5 月 10 日上午 9 点 30 分, “黑珍珠”波浪滑翔器搭乘“海大一号”科考船从薛家岛码头出发, 行驶大约 10 天到达目标海域, 并于 144°36'E, 32°18'N 处布放, 这是“黑珍珠”波浪滑翔器在西北太平洋海域的首次布放, 布放数量 2 套。设备布放后通过铱星回传的数据包括 AirMar 气象数据、水面温盐数据和波浪数据等。

2018 年 10 月 5 日下午 19 点 34 分, “黑珍珠”

波浪滑翔器搭乘“科学号”科考船从舟山码头出发, 行驶大约 5 天到达目标海域, 并于 130°E, 24°N 处布放, 这是“黑珍珠”波浪滑翔器在西北太平洋海域的第二次布放, 布放数量 1 套。设备布放后通过铱星回传的数据包括 AirMar 气象数据和水面温盐数据等。

2019 年 3 月 1 日上午 8 点 34 分, “黑珍珠”波浪滑翔器搭乘“海大一号”科考船从崂山码头出发, 行驶大约 9 天到达目标海域, 并于 130°E, 24°N 处布放, 这是“黑珍珠”波浪滑翔器在西北太平洋海域的第三次布放, 布放数量 1 套。设备布放后通过铱星回传的数据包括 AirMar 气象数据和水面温盐数据等。

2019 年 9 月 4 日下午 15 点 12 分, “黑珍珠”波浪滑翔器搭乘“东方红三号”科考船 19 年秋季航次从崂山码头出发, 行驶大约 4 天到达目标海域, 并于 144°38'E, 32°24'N 处布放, 这是“黑珍珠”波浪滑翔器在西北太平洋海域的第四次布放, 布放数量 2 套。设备布放后通过铱星回传的数据包括 AirMar 气象数据、水面温盐数据和波浪数据等。

2019 年 10 月 31 日下午 13 点 55 分, “黑珍珠”波浪滑翔器搭乘“东方红三号”科考船从崂山码头出发, 行驶大约 5 天到达目标海域, 并于 143°29.12'E, 32°12.20'N 处布放, 这是“黑珍珠”波浪滑翔器在西北太平洋海域的第五次布放, 布放数量 2 套。设备布放后通过铱星回传的数据包括 AirMar 气象数据、水面温盐数据和波浪数据等。

自 2018 年至今, “黑珍珠”团队通过 5 个西太平洋航次合计布放波浪滑翔器 8 套, 分别为 2018 年 5 月 10 日布放了 2 套, 2018 年 10 月 5 日布放了 1 套, 2019 年 3 月 1 日布放了 1 套, 2019 年 9 月 4 日布放了 2 套, 2019 年 10 月 31 日布放了 2 套。“黑珍珠”波浪滑翔器在西太平洋的局部海域一直保持 3 套以上数量进行编队常态化观测^[19]。

此外, 根据国家重点研发计划项目要求, “黑珍珠”波浪滑翔器于 2019 年在我国南海开展了为期 3 个月的海上编队观测试验, 验证了波浪滑翔器编队与水下滑翔机编队进行异构组网的功能。

2 国产自控工艺稳定, 市场肯定成就精品

2.1 产品型号系列化, 集成负载多样化

经过 30 余名工程技术人员 8 年的优化改进, 完

成了工艺和技术的多次更新,使“黑珍珠”波浪滑翔器的工作可靠性得以显著增强。目前,“黑珍珠”产品系列相比国内其他同类产品而言最为全面。自2012 年开展研发以来,已经形成了微型、小型、中型、大型和巨型五种规格的波浪滑翔器系列化产品,系列化型号可以为“黑珍珠”的集成载荷匹配恰当的发电功率和负载能力等^[20-21]。

另外,研发团队又根据客户需求和应用环境特点陆续推出了其他新概念的波浪滑翔器系列产品,如有些装备可应用于3 m左右水深的近海海域环境,有些装备可以在强流海域实现高精度控位和导航,

有些装备可以集成较大质量和较大功耗的负载等。

研发团队在发展“黑珍珠”波浪滑翔器不同产品系列的同时,也根据应用需求尝试集成了不同类型的各种负载。如针对海洋哺乳动物调查加装了单通道的水听器,针对台风观测加装了气象站、波浪以及温盐传感器等,针对水下固定设备的水面通讯中继加装了水声通讯模块,针对海流测量加装了声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP),针对中法卫星遥感验证加装了波浪谱传感器,针对水质生态监测加装了叶绿素、溶解氧传感器等^[22-24]。

表1 产品型号系列的指标参数

Tab. 1 Index parameters of product series

产品型号	长度/m	质量/kg	发电功率/W	负载能力/kg	航行速度/(m/s)	航时/a	航程/万 km
微型	1.2	50	60	10	≥0.5	≥1	≥1
小型	1.6	75	80	20	≥0.5	≥1	≥1
中型	2.0	100	100	40	≥0.5	≥1	≥1
大型	2.4	120	150	60	≥0.5	≥1	≥1
巨型	3.0	200	240	80	≥0.5	≥1	≥1

表2 “黑珍珠”波浪滑翔器集成传感器列表

Tab. 2 Table of integrated sensors for “Black Pearl” Wave Glider

传感器	型号	测量要素
超声波微型气象站	AirMar 200WX-IPX7	空气温度、气压、风速、风向
温度传感器	TD0820	温度、压力、电导率(盐度)
波浪传感器	SWS-1	波高、波周期、波向
温湿传感器	MP100h	温度、湿度
ADCP	RDIworkhorse 300K	流速、流向
单通道水听器	BK 8103	水声信息
水声通讯模块	Evologics S2C	水声通讯
波浪谱传感器	SZF 波浪仪	波谱、波高、波向、波周期
叶绿素传感器	Seapoint Chlorophyll Fluorometer	叶绿素浓度
浊度计	Seapoint TurbidityMeter	浊度
溶解氧传感器	AMEROOS61	水氧含量
太阳辐射传感器	LICOR LI200X	响应光谱
核放射性传感器	FWG-N 型水下环境放射性 γ 能谱仪	γ 谱

2.2 我国首次市场公开招投标销售, 中标销售次数最多

2018 年至 2020 年期间,“黑珍珠”波浪滑翔器凭借其可靠的质量、完善的服务、良好的口碑和信誉,顺利并多次中标。“黑珍珠”波浪滑翔器产品得到市场的认可,团队的科研付出和产品的技术水平的得到肯定。

2017 年 12 月 27 日,“黑珍珠”小型波浪滑翔器参与中山大学的公开招标并成功中标。此次中标的“黑珍珠”小型波浪滑翔器由青岛海舟科技有限公司生产,并授权给北京海洋明天科技有限公司进行投标销售。根据中山大学需求,该次中标产品将在未来使用过程中集成气象站、波浪传感器和水面温盐传感器等。

2019 年 8 月 8 日,“黑珍珠”小型波浪滑翔器

参与自然资源部第二海洋研究所的公开招标并成功中标。本次中标的两台“黑珍珠”小型波浪滑翔器均需要搭载 AirMar 气象站、水温传感器和波浪传感器等^[25]。

2019 年 8 月 26 日,“黑珍珠”小型波浪滑翔器参与自然资源部第三海洋研究所的公开招标并成功中标。根据三所的使用需求,本次中标的一台“黑珍珠”小型波浪滑翔器在未来使用过程中将集成气象站、波浪传感器和水面温盐等仪器设备。

2019 年 12 月 13 日,“黑珍珠”波浪滑翔器参与海南大学的公开招标并成功中标。此次中标的波浪滑翔器是“黑珍珠”中型波浪滑翔器,由青岛海舟科技有限公司生产,并授权给三沙国海通信发展有限公司进行投标销售。根据海南大学需求,该次中标产品需集成微型气象站和水面温盐深 CTD 等传感器,此外,还需集成惯性导航和多波束测深等大功率载荷等。

2.3 国产化率高,初步开展产业化推进

研究团队自研发初期就一直秉承完全国产化的研发目标,在波浪驱动原理、船体成型工艺、铠装缆成型工艺、牵引机成型工艺以及核心控制算法上进行了最底层的开发。“黑珍珠”基本避开了目前国内水下装备产业关键核心部件依靠进口的这一瓶颈问题,国产化率 95%以上。由于所有核心技术都由团队掌握,其制造周期、加工成本和型号化进程也较国外品牌有独特优势。

2018 年,“黑珍珠”研究团队推动我国首个波浪滑翔器技术专业公司-青岛海舟科技有限公司的成立。公司主要从事波浪滑翔器技术开发、产品销售、应用推广、观测服务和支撑全球外海大洋实时观测数据等,设置产品中心、服务中心和数据中心三个主营业务内容,全方位支撑海气界面各种要素的长期实时常态化观测,为气象水文调查、水质生态监测、背景噪声测量以及卫星遥感验证等海洋应用提供技术解决方案。

“黑珍珠”波浪滑翔器技术的研发与产业化推广,是我国高端海洋装备产业化中较为成功的一例。仅 2019 年,青岛海舟科技有限公司就以优质和高效的服务赢得了清华大学、中山大学、自然资源部第二海洋研究所、自然资源部第三海洋研究所、海南大学和中国船舶重工集团公司第七一〇研究所等诸多单位的订单。“黑珍珠”波浪滑翔器的产业化在产生经济效益的同时,也产生了广泛的社会效益。

“黑珍珠”技术团队自 2012 年成立以来,围绕波浪滑翔器技术攻关,专业于机械结构设计、控制系统设计、导航算法设计、水动力计算、有限元计算、数据质量控制、卫星与设计等,形成了波浪动力转化、导航控制设计、集成拓展应用、远程岸基监控等关键核心技术群。截至 2020 年 3 月,“黑珍珠”波浪滑翔器已批量生产 100 余套,国内市场占有率 90%以上。

3 团队结构层次完善,知识产权全面布局

3.1 团队结构层次完善,专业分工明确

自 2012 年以来,“黑珍珠”团队紧紧围绕波浪滑翔器及其应用进行技术攻关,形成了一支稳固而专业的技术开发与服务团队。当前核心团队规模 30 余人,其中固定人员 20 余人,在读硕士 10 余人。固定人员中 2 人具有博士学位,8 人具有硕士学位,本科及以上学历 10 余人。

团队成员专业分工明确,分为机械结构设计、控制系统设计、导航算法设计、水动力计算、有限元计算、数据质量控制、卫通与监控设计等不同岗位。各成员相互合作,共同攻关,拥有波浪滑翔器的波浪动力转换、导航控制设计、集成拓展应用、远程岸基监控等关键核心技术的自主知识产权。

团队成员共同聚焦于发展波浪滑翔器技术,重点突出长期性、智能性、规模化等特征,完成精准导航、在线智能、同构组网等核心技术攻关。致力于构建全球外海大洋常态化和业务化的无人观测体系,开启海洋观测和探测的新时代。

此外,在与相关海洋技术研发机构的合作过程中逐渐发展形成了一支宏观技术队伍,不同海洋技术人才针对“黑珍珠”开展技术开发工作,如配套传感器研发、海洋观测方法研究、海洋数据专业解析、业务化体系维护等。

同时,团队成员与海洋科学研究部门合作,共同专注于“黑珍珠”的气象水文调查、水质生态监测、环境噪声记录、卫星遥感验证、台风原位观测、哺乳动物监听以及波浪谱测量等海洋科学应用研究^[26-27]。

3.2 申请发明专利,知识产权全面布局

研发团队围绕波浪滑翔器技术发表数篇相关学术论文,研究内容涉及波浪滑翔器的动力学建模、控

制算法、CFD 模拟仿真、海洋数据分析等诸多领域,为“黑珍珠”波浪滑翔器的产品定型及技术升级提供理论支撑。

动力学建模的研究为波浪滑翔器结构优化和控制系统优化提供理论基础^[28];控制算法的深入研究保障波浪滑翔器具有较高的轨迹逼近精度^[29];CFD 模拟仿真的研究为支撑波浪滑翔器结构优化,降低优化成本;海洋数据分析为海洋科学家提供第一手资料,并指导波浪滑翔器提高数据测量的准确性和精度。

研究团队对波浪滑翔器的机械结构、电控、测试装置进行了深入的研究与探索,并对研究成果进行了知识产权的保护。研究团队授权代表性专利数项,内容涉及创新型机械结构、高效测试装置、新型控制系统等诸多领域。此外,研究团队也十分注重商业性知识产权的保护,对现有的设备进行了品牌化包装。2017 年至今,成功完成了“黑珍珠”、“Black Pearl”和“海哨兵”等商标的注册。

研究团队在发展过程中也参与本科生和研究生的培养,为研究生和本科生开设了《波浪滑翔器技术及其海洋观测应用》、《自主水下航行器优化设计》、《无人移动海洋观测平台技术导论》等课程,此外,研究生参与波浪滑翔器项目研发,实践中增长了海洋技术和理论知识,产出了一大批高水平学位论文等。

4 结束语

高端海洋装备的研发需要机械、电控、软件等专业背景,此外,还需要遵循由机理研究、关键技术攻关、样机研制、技术固化到工程化建设的发展规律。“黑珍珠”波浪滑翔器经过近 30 位专业技术人员 8 年的坚守和专注,方可促使该技术从 0 到 1,然后再从 1 到 N 的发展。

“黑珍珠”波浪滑翔器技术是我国最早开展研发并且持续时间最长,资助研究课题最多且资助额度合计最大,我国首次亦是唯一完成台风常态化观测,我国单次航程航时最长且累积航程最远;产品系列最全且拓展应用最广,开展新概念研发并拥有自主知识产权,批量生产规模最大且产业化推进相对成功,团队结构层次完善并专业分工明确,我国首次市场公开招投标销售且中标次数最多,我国首次尝试并唯一实现西太平洋多台组网常态化观测的波浪滑翔器技术。

当前,研究团队正致力于构建全球外海大洋海气界面观测阵列并使之常态化运行,同时也正面向海洋观测需求发展创新技术以提升波浪滑翔器的功

能和性能。“黑珍珠”波浪滑翔器技术的发展道路困难重重,研发团队仍需任重道远,朝着既定的目标不断前行。“黑珍珠”波浪滑翔器技术的发展离不开团队的紧密协作,在此感谢广大研发人员的共同努力,同时也感谢与“黑珍珠”团队密切合作的诸位海洋科学家与海洋工程专家。

参考文献:

- [1] Daniel T, Manley J, Trenaman N. The Wave Glider: enabling a new approach to persistent ocean observation and research[J]. *Ocean Dynamics*, 2011, 61(10): 1509-1520.
- [2] Manley J, Willcox S. The Wave Glider: a persistent platform for ocean science[C]// IEEE. *Oceans*. Sydney Nsw: IEEE, 2010: 1-5.
- [3] Manley J, Willcox S. The Wave Glider: A new concept for deploying ocean instrumentation[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2010, 13(6): 8-13.
- [4] Hine R, Willcox S, Hine G, et al. The Wave Glider: a wave-powered autonomous marine vehicle[C]// IEEE. *Oceans*. Biloxi MS: IEEE, 2009: 1-6.
- [5] 吴俊飞, 杜照鹏, 熊学军. 新型仿生波浪滑翔器水翼设计与水动力性能研究[J]. *机械制造*, 2017, 55(8): 20-23.
- [6] 杜照鹏. 新型仿生波浪滑翔器的设计与研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.
- [7] 胡滕艳, 孙秀军, 王兵振, 等. 利用 Fluent 仿真分析波浪滑翔器的水动力性能[J]. *海洋技术学报*, 2018, 37(3): 8-12.
- [8] 付诚翔. 波浪滑翔器的浮体阻力及运动性能分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [9] 李灿. 波浪滑翔器动力学分析及性能优化[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- [10] 胡合文. 波浪滑翔机的水动力分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.

- Hu Hewen. Hydrodynamic analysis of Wave Glider[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [11] 廖煜雷, 李晔, 刘涛, 等. 波浪滑翔器技术的回顾与展望[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(9): 1227-1236.
- Liao Yulei, Li Ye, Liu Tao, et al. Unmanned Wave Glider technology: state of the art and perspective[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(9): 1227-1236.
- [12] 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.
- Yang Yan, Zhang Sen, Shi Jian, et al. Wave Glider marine environmental monitoring system[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(1): 109-114.
- [13] 孙秀军, 王雷, 桑宏强. “黑珍珠”波浪滑翔器南海台风观测应用[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(5): 562-569.
- Sun Xiujun, Wang Lei, Sang Hongqiang. Application of Wave Glider “Black Pearl” to typhoon observation in south china sea[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2019, 27(5): 562-569.
- [14] Mitarai S, McWilliams J C. Wave Glider observations of surface winds and currents in the core of typhoon Danas[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(21): 312-319.
- [15] 卢旭. 波浪滑翔器总体技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- Lu Xu. Research on the general technology of Wave Glider[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [16] 王娉. 获取 3 个台风第一手数据, 青岛自主研发台风“捕手”连续航行 3 884 km[EB/OL]. [2020-03-08]. <https://wap.peopleapp.com/article/rmh12006842/rmh12006842?from=singlemessage>.
- [17] 侯霞. “海哨兵”波浪滑翔器顺利完成菲律宾海与中国南海台风观测[EB/OL]. [2020-03-06]. <http://www.qnlnm.ac/page?a=5&b=2&c=218&p=detail>.
- [18] 桑宏强, 游宇嵩, 孙秀军. 波浪滑翔器网络版岸基监控中心设计[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(5): 521-528.
- Sang Hongqiang, You Yusong, Sun Xiujun. Design of Wave Glider network edition shore base monitoring center[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2019, 27(5): 521-528.
- [19] 韩俊梅. “问海计划”支撑“透明海洋”工程[EB/OL]. [2019-09-26]. <http://www.qnlnm.ac/page?a=14&b=1&c=669&p=detail>.
- [20] 贾立娟. 波浪动力滑翔机双体结构工作机理与动力学行为研究[D]. 天津: 国家海洋技术中心, 2014.
- Jia Lijuan. Study of operation principle of two-part architecture and dynamic behavior of Wave Glider[D]. Tianjin: National Ocean Technology Center, 2014.
- [21] 李小涛. 波浪滑翔器动力学建模及其仿真研究[D]. 武汉: 中国舰船研究院, 2014.
- Li Xiaotao. Dynamic model and simulation study based on the Wave Glider[D]. Wuhan: China Ship Research and Development Academy, 2014.
- [22] Smith R N, Das J, Hine G, et al. Predicting Wave Glider Speed from Environmental Measurements[J]. Mine Warfare & Ship Self-Defense, 2015, 12(1): 19-28.
- [23] 吴小涛. 由海洋环境要素预估波浪滑翔器速度[J]. 水雷战与舰船防护, 2015, 23(1): 70-76.
- Wu Xiaotao. Predicting Wave Glider speed from environmental measurements[J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2015, 23(1): 70-76.
- [24] Ngo P, Das J, Ogle J, et al. Predicting the speed of a Wave Glider autonomous surface vehicle from wave model data[C]// IEEE. International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, IL: IEEE, 2014: 2250-2256.
- [25] 桑宏强, 李灿, 孙秀军. 波浪滑翔器纵向速度与波浪参数定量分析[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(1): 16-22.
- Sang Hongqiang, Li Can, Sun Xiujun. Quantitative analysis on longitudinal velocity and wave parameter of Wave Glider[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(1): 16-22.
- [26] 杨鲲, 卢倪斌, 隋海琛, 等. 基于 D-H 方法的波浪滑翔器动力学仿真分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(1): 145-152.
- Yang Kun, Lu Nibin, Sui Haichen, et al. Dynamic simulation analysis on Wave Glider based on D-H approach[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(1): 145-152.
- [27] 李小涛, 王理, 吴小涛, 等. 波浪滑翔器原理和总体设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(12): 128-131.
- Li Xiaotao, Wang Li, Wu Xiaotao, et al. Principle and system design of a Wave Glider[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(12): 128-131.
- [28] 丁乃蓬. 波浪驱动滑翔器工作机理分析与水下滑翔体的结构设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- Ding Naipeng. Analysis of operation principle of Wave Glider and research of structure design for underwater glider[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [29] 杨富茗, 王大政. 波浪能滑翔机理论和数值计算研究现状[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(15): 1-4.
- Yang Fuming, Wang Dazheng. Research status on theory and numerical calculation of Wave Glider[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(15): 1-4.

Research review on “Black Pearl” Wave Glider

SUN Xiu-jun^{1,4}, SANG Hong-qiang², LI Can³, ZHOU Ying³, YU Pei-yuan¹,
WANG Lei¹

(1. Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Institute for Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Received: Mar.15, 2020

Key words: the “Black Pearl” Wave Glider; typhoon observation; extreme sea conditions; maximum voyage; localization rate; batch production

Abstract: With the support of national science and technology program thoroughly, the Wave Gliders has completed various pioneering applications, and has completed the difficult transformation of localization, model and production, and the Wave Glider team has also developed a strong form of structural management and intellectual property layout. From these dimensions, this paper describes the development law of high-end marine equipment such as wave glider from mechanism research, key technology research, prototype development, technology solidification to engineering construction. So that readers can learn more about the current progress of Wave Glider, its use value and its important role in marine environment observation and marine security detection.

(本文编辑: 刘珊珊)