

# “海鳐”波浪滑翔器研究进展及发展思路

田应元, 吴小涛, 王海军, 熊童满, 王华明, 班伟, 吴文辉

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北宜昌 443003)

**摘要** 波浪滑翔器是一种能够完全借助自然能源长周期运行的小型水面无人航行器, 具有超强的续航能力和一定的控位能力, 能够执行长时间、大范围、持续的海洋环境观测, 水面水下目标探测, 跨域通信及信息传递等任务。在国家“863计划”和国家重点研发计划等领域项目的支持下, 中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所研制的“海鳐”波浪滑翔器在平台技术及应用研究上均取得了重要的进展, 整体技术水平处于国内领先、世界先进, 为在我国军事、海洋环境监测、海洋资源开发利用等领域的应用推广奠定了坚实的平台基础。同时, 波浪滑翔器仍是一种有限能力的小型无人航行器, 在实际应用中还有许多需要完善和提高的地方。介绍了“海鳐”波浪滑翔器的最新研制进展, 总结了研制过程中的部分关键技术, 并根据波浪滑翔器在实际应用中存在的一些问题对其技术的发展方向进行了初步探讨。

**关键词** 波浪滑翔器; 无人航行器; 潜航器; 多体动力学; 人工智能

**中图分类号** U674.941      **文献标识码** A      **文章编号** 2096-5753(2020)02-0111-12

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.02.005

## Research Progress and Development Thinking of “Sea Ray” Wave Glider

TIAN Yingyuan, WU Xiaotao, WANG Haijun, XIONG Tongman, WANG Huaming,  
BAN Wei, WU Wenhui

(No.710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

**Abstract** Wave glider is a small unmanned surface vehicle which can fully rely on natural energy to do long-period operation with supper endurance and certain position control capabilities. Wave glider can perform long-term, large-scale and continuous marine environmental monitoring, surface and underwater target detection, cross-domain communication and information transmission tasks. Supported by National 863 and National Key R & D Program, “Sea Ray” wave glider developed by CSIC-710 has made major breakthroughs in platform technology and application research, making the overall technical level domestically leading and world advanced. It has laid a solid platform base for the application and promotion in the fields of military, marine environmental monitoring and marine resources development and utilization. In addition, wave glider is still a small unmanned surface vehicle with limited capacity which needs to be improved in practical application. In this paper, the latest development of “Sea Ray” wave glider is introduced and some key technologies in the development process are summarized. In view of the existing problems, development direction of the technology is also discussed.

**Key words** wave glider; unmanned surface vehicle; submersible vehicle; multi-body dynamics; artificial intelligence

收稿日期: 2020-03-19

作者简介: 田应元(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水中兵器总体及海洋无人平台设计等研究。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)“波浪滑翔器无人自主海洋环境观测系统”2014AA09A508; 国家重点研发计划项目“海洋滑翔机改造与协作关键技术”No.2017YFC0305902; 国防科技创新特区项目 18-H863-05-ZT-002-001-03; 国防科技创新特区项目 19-H863-05-ZD-005-005-02; 中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所科技创新基金“波浪滑翔器关键技术研究”MZ102.2013.BHXQ。

### 0 引言

波浪滑翔器 (Wave Glider) 是一款能够完全借助自然能源长周期运行的波浪驱动水面无人飞行器。波浪滑翔器主要由水面艇、挂缆、水下驱动单元、舵机、控制舱、用户舱、太阳能板、任务载荷等组成。图 1 为搭载海洋环境传感器的波浪滑翔器系统的基本组成。

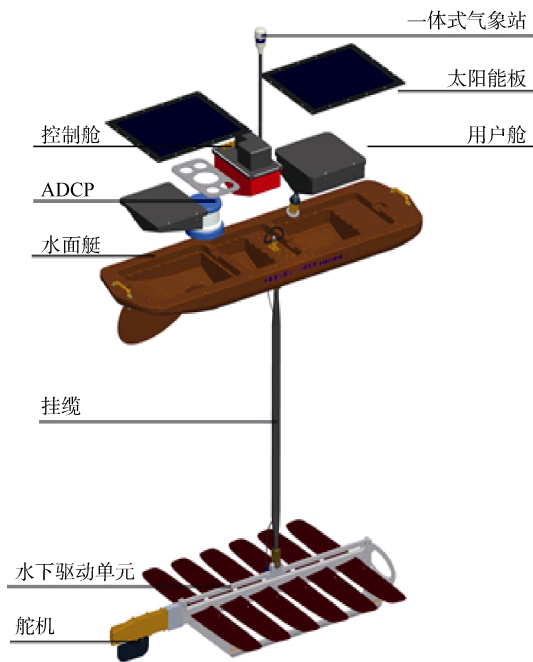


图 1 波浪滑翔器系统基本组成示意图  
Fig. 1 System basic composition of wave glider

早在 2005 年，美国波浪滑翔器首席设计师 Roger Hine 为了跟踪研究驼背鲸的生活习性，发明了最初的波浪滑翔器原型样机，其能够借助波浪的动力在海洋中长期跟随鲸群进行观测取样。2007 年，Roger Hine 及其同事成立了 Liquid Robotics 公司，专注于生产波浪滑翔器，并将应用市场扩展到科考、商业、环境保护以及特殊领域。2008 年第 1 台波浪滑翔器作为商品成功交付使用，标志着美国的波浪滑翔器技术从研发走向成熟。自 2009 年开始，Liquid Robotics 公司先后推出了 2 款商业化的波浪滑翔器 SV2 和 SV3。这 2 款波浪滑翔器问世以来，受到外界的广泛关注。2017 年 9 月，美国公布了新一代波浪滑翔器，具备更大的作业半径，

增大了功率和负载空间，可搭载更多先进传感器，可在高海况和高纬度地区长期执行海上监视和环境观测任务。美国波浪滑翔器已经累计进行了数万公里海试，以及长达 1 年的连续航行实验。目前已经销售数百台，在多个行业都有应用<sup>[1-3]</sup>。

近年来波浪滑翔器已成为国内外研究的热点。由于波浪滑翔器在技术上的巨大创新，以及在特殊敏感领域的大量应用，该项技术难以直接引进。由于国外的技术封锁，我国波浪滑翔器均为自主研发，起步相对较晚，无论在波浪滑翔器平台技术，还是在隐蔽导控、综合运用，特别是在环境监测、水下目标探测、多传感器载荷集成应用技术等方面，与国外还存在一定差距。

国内较早开展波浪滑翔器技术研究的有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、哈尔滨工程大学、中国海洋大学、中科院沈阳自动化所等<sup>[4-8]</sup>。这些科研院所在波浪滑翔器技术领域开展了大量基础研究，形成了较多原理样机和试验成果，但目前成熟可用的产品还不多。中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所研制的“海鳐”波浪滑翔器已完成了系统仿真、原理样机研制、工程样机研制及应用研究，并结合应用开展了一系列深度创新。图 2 为中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所研制的“海鳐”波浪滑翔器批量生产产品。



图 2 “海鳐”波浪滑翔器批量产品  
Fig. 2 Batch products of “Sea Ray” wave glider

波浪滑翔器技术不但需要研究影响其性能的科学问题，还需要关注实际海洋环境中长期运行需要解决的工程问题。本文主要介绍了“海鳐”波浪

滑翔器的最新研究进展, 并就波浪滑翔器主要关键技术及未来发展思路进行初步探讨, 以供相关研究和应用技术人员参考。

### 1 “海鳐”波浪滑翔器研究进展

“海鳐”波浪滑翔器自 2015 年完成原理样机研制后, 2016 年开始开展了大量海上性能试验及应用研究, 在平台性能、可靠性及任务载荷搭载应用上取得了一系列突破性进展。

#### 1.1 “863” 结题考核试验

在国家高技术研究发展计划 (863 计划) “波

浪滑翔器无人自主海洋环境观测系统”的资助下, 中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所自 2014 年开始波浪滑翔器的研制, 其“海鳐”波浪滑翔器在 2017 年 11 月一次性通过国家科技部第三方见证海上试验验收。在黄海中部千里岩岛周围 13 km 范围内, 绕岛航行近 80 圈, 历时 92 d, 航行里程达 3 242 km。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、剖面流速) 等参数的测量。图 3 为“海鳐”波浪滑翔器海上验收长航程试验岸站监测画面。

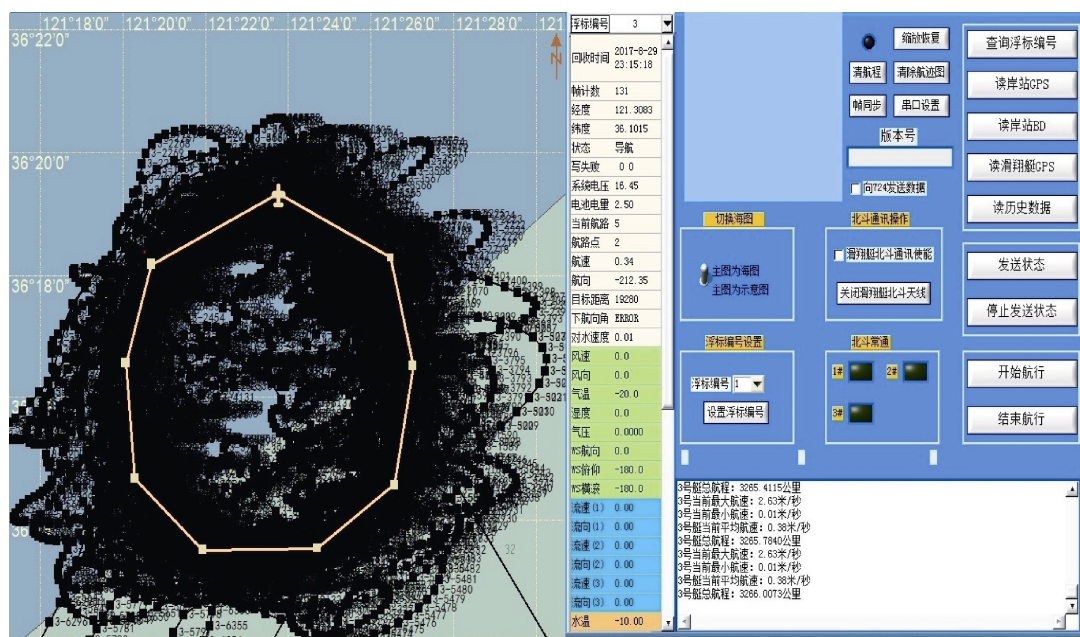


图 3 长航程试验岸站监测画面

Fig. 3 Monitoring interface of long range test by shore station

经过海上实航试验验证, “海鳐”波浪滑翔器负载能力、航行速度、航行精度、定点锚泊精度、海洋环境探测功能等各项性能指标均达到或优于指标要求, 代表了我国波浪滑翔器技术的最高水平。此后“海鳐”波浪滑翔器在国家重点研发计划及其他项目支持下, 陆续开展了多次海上长时间应用, 其性能和可靠性得到进一步提升。该产品目前处于定型状态, 进入批量生产及应用示范阶段。图 4 为结题考核试验海试中的“海鳐”波浪滑翔器。

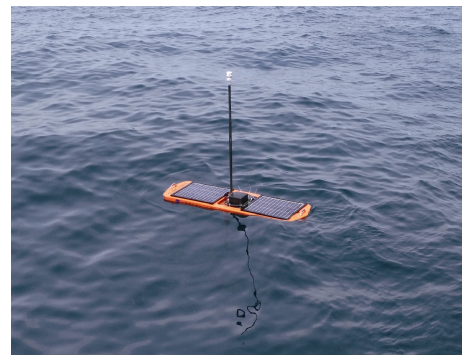


图 4 结题考核海试中的“海鳐”波浪滑翔器  
Fig. 4 “Sea Ray” wave glider in final examination sea test



“海鳐”波浪滑翔器整体技术水平处于应用推广阶段,主要技术指标与 Liquid Robotics 公司研制

的第 2 代波浪滑翔器“SV”相当。两者主要技术指标对比如表 1。

表 1 “海鳐”波浪滑翔器与“SV2”主要技术指标对比  
Table 1 Comparison of main technical indicators between “Sea Ray” and “SV2”

名称	航行速度/kn	航行精度	虚拟锚泊精度	有效载荷/kg	负载功率/W	续航能力/km	连续工作时间/d
“海鳐”	SS1: 0.5 SS4: 1.3	直线跟踪精度在 100 m 范围内概率大于 80%	虚拟锚泊半径小于 100 m 的误差概率大于 50%	≤ 40	连续负载 15 峰值 200	≥ 6 000	≥ 180
“SV2”	SS1: 0.5 SS4: 1.5	CEP50 半径 3 m	CEP90 半径 40 m (SS3: 流速 ≤ 0.5 kn)	≤ 18	40	≥ 10 000	≥ 365

### 1.2 主要应用进展

#### 1) 协同组网观测试验。

2019 年 5 月 11-13 日, 国家重点研发计划“无人无缆潜水器组网作业技术与应用示范”项目“海洋滑翔机改造与协作关键技术”课题在南海中东部海域开展了联合组网协同观测试验。本次试验由课题牵头单位天津大学组织, 子课题单位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、中国海洋大学以及第三方监理单位参加。主要开展了波浪滑翔器与水下滑翔机的联合走航观测、位置保持联合观测等试验, 并对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、中国海洋大学这 3 家单位研制的波浪滑翔器进行了性能比测试验。中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所研制的“海鳐”波浪滑翔器航行及位置保持性能优异, 样机可靠性高, 得到了行业专家的高度认可。图 5 为 3 家单位直线走航性能比测结果, 上、中、下 3 条规划水平直线长度为 100 km, 间距为 30 km。其中 2 套“海鳐”波浪滑翔器参加比测试验, 分别为中线和下线, 绿色为往返实测航迹(本结果为试验组织方提供)。

试验期间, “海鳐” 2 号、“海鳐” 3 号、“海鳐” 4 号波浪滑翔器分别开展了 21 d、46 d、17 d 位置保持编队定点观测试验, 位置保持轨迹如图 6 所示。

试验结果显示, “海鳐”-2 号波浪滑翔器连续 15 h 位置保持精度小于 40 m, “海鳐”-3 号波浪滑翔器连续 14 h 位置保持精度小于 70 m, “海鳐”-4 号波浪滑翔器连续 17 h 位置保持精度小于 140 m。

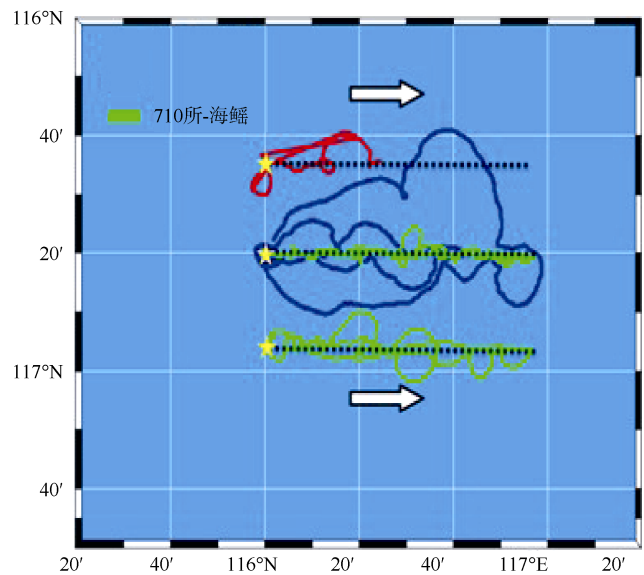


图 5 直线走航性能比测结果

Fig. 5 Performance comparison result of straight course

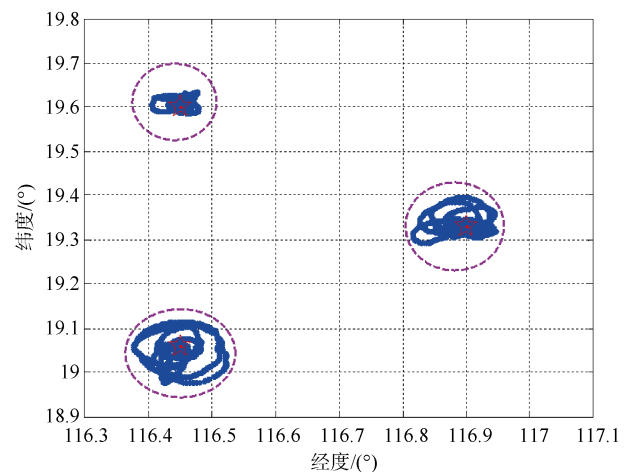


图 6 3 套“海鳐”波浪滑翔器的位置保持轨迹

Fig. 6 Position-holding trajectory of three “Sea Ray” wave gliders

图 7 为“海鳐”-4 号波浪滑翔器直线航行速度测试结果, 30 km 直线航速测试结果显示, 1 h 平均速度大于 1.5 kn, 16 h 平均航速 1.04 kn。

“海鳐”-3 号经过了 2019 年 4 号台风“木恩”、5 号台风“丹娜丝”、7 号台风“韦帕”、9 号台风“利奇马”的考验, 其中“木恩”台风经过时最大

浪高达 6.6 m。“海鳐”-2 号经过了“木恩”台风考验, “海鳐”-4 号经过了台风“丹娜丝”、“韦帕”、“利奇马”的考验。台风期间, “海鳐”波浪滑翔器保持了良好的控位能力, 连续 12 h 定点控位精度保持在 300 m 以内。所有参试样机整个试验过程均性能稳定, 功能完好。

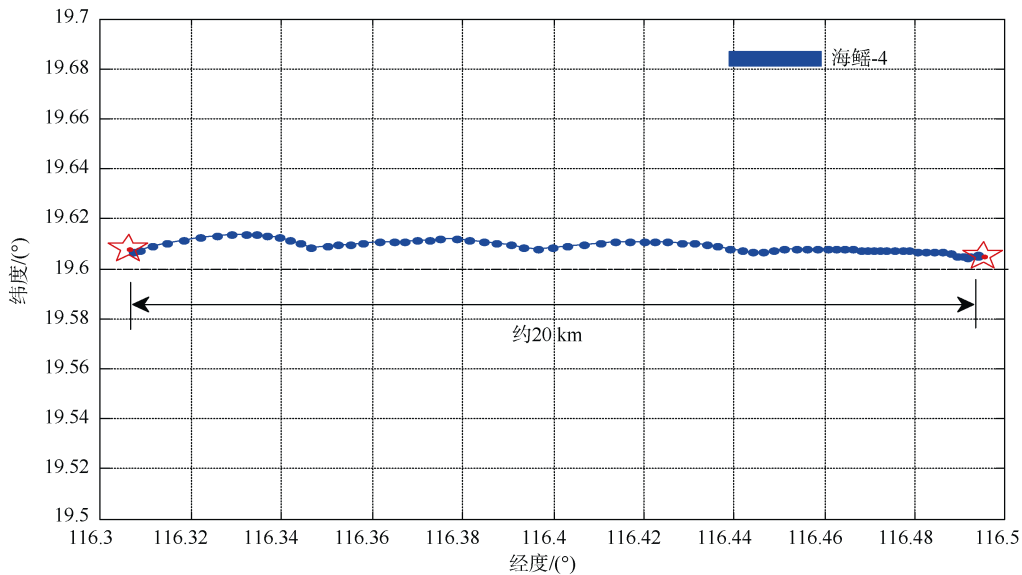


图 7 “海鳐-4”波浪滑翔器的直线航行速度测试  
Fig. 7 Straight speed test of “Sea Ray-4” wave glider

2) 通信定位组网试验。

2019 年 12 月 14 日-2020 年 2 月 16 日(受“新冠肺炎”疫情影响提前回收了样机), 中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所与哈尔滨工程大学在南海中东部海域联合开展了通信定位组网海上试验。本次试验主要开展了波浪滑翔器搭载声学通信定位系统与水下节点进行区域定点联合通信定位试验。图 8 为搭载声学系统的“海鳐”波浪滑翔器。

该航次试验 12 月 14 日 19 时从湛江港出发, 航行约 480 km 后到达东沙群岛西南部海域, 12 月 16 日上午 10 点试验团队将波浪滑翔器在距离水下节点约 220 km 处布放。随后波浪滑翔器自主航行, 于 12 月 25 日 21 时进入水下节点布放区域, 开始沿以水下节点为中心, 半径 3 km 的圆航行。完成 3 km 半径通信定位试验后又进行了半径 1 km 圆周航行, 在作圆周运动的同时, 开展了水面水下声学

通信定位等相关测试。图 9 为“海鳐”波浪滑翔器走航轨迹。



图 8 搭载声学系统的“海鳐”波浪滑翔器  
Fig. 8 “Sea Ray”wave glider with acoustic system

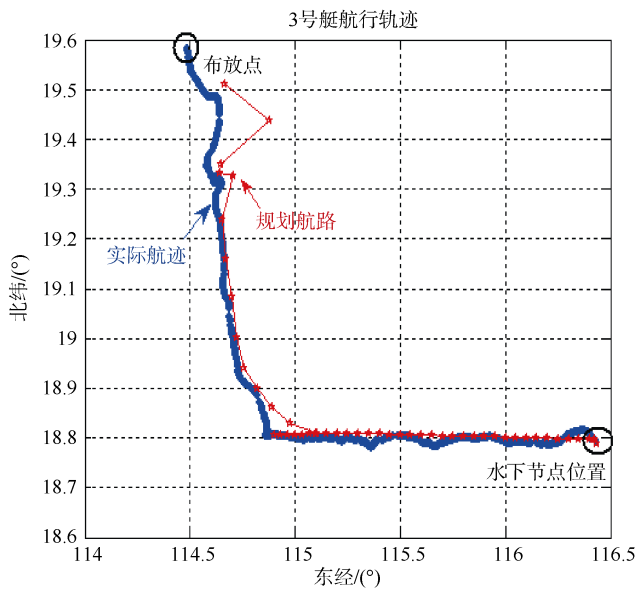


图 9 “海鳐”波浪滑翔器的走航轨迹  
Fig. 9 Trajectory of “Sea Ray” wave glider

由于走航过程需要波浪滑翔器平台以最短的时间到达目标海域，走航的控位精度偏差设置较大（设置值 2 km），实际控位精度在设置范围以内。

图 10 是“海鳐”波浪滑翔器定点圆周走航轨迹，在连续绕圈走航测试中，系统的平均定位精度始终保持在 200 m 以内，连续 2 h 的走航控位精度最高达到 50 m 以内。走航过程中与水下节点保持稳定的水声通信和数据传输。本次试验，波浪滑翔

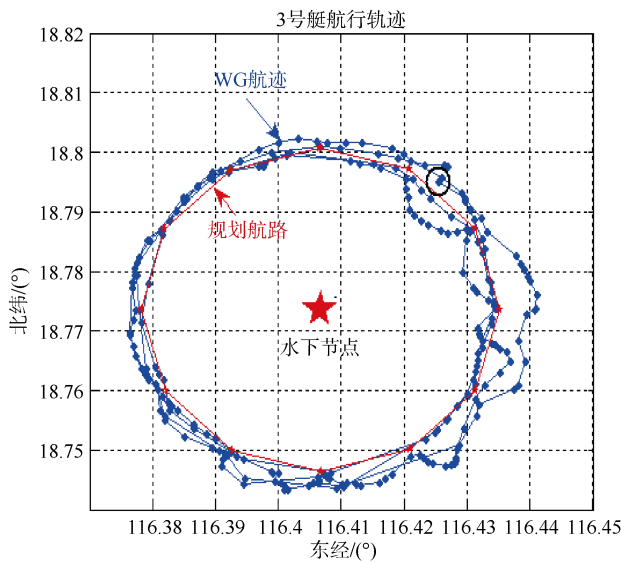


图 10 “海鳐”波浪滑翔器的定点圆周走航轨迹  
Fig. 10 Trajectory of circular motion around a point

器平台搭载声学通信定位载荷的区域航行控位能力得到充分检验。

系统功耗方面，白天正常工作状态下，声学系统开机后电压稳定，能够满足声学系统对电能的需求。台风过境期间由于无法正常充电，系统电压略有下降，但未出现明显降压现象，能够保证系统的用电安全。

## 2 波浪滑翔器关键技术

波浪滑翔器作为一种新型创新度较高的水面无人飞行器，其运动原理、系统可靠性及使用维护等方面存在许多关键技术。只有突破并掌握这些关键技术，才有可能开发出可用、好用的波浪滑翔器产品。

### 2.1 水动力布局与流体动力和运动仿真

波浪动能的转化效率直接影响系统的运动性能，因此对于波浪滑翔器合理的水动力布局至关重要。一旦水动力布局不合理，系统捕获波浪动能的效率将显著降低，将直接影响实际海况下风浪流综合影响的航行和控位性能，极易导致波浪滑翔器系统随波逐流，成为价格昂贵的“表面漂流浮标”。此外，在合理水动力布局的基础上，水动力性能优化和流体动力仿真需要考虑的因素包括系统的平衡及姿态配置、艇体的阻力性能、挂缆的长度，以及水下滑翔体翼板的翼型、投影面积、旋转角度范围、预紧力大小等。

波浪滑翔器是一个由水面艇体、水下滑翔体和连接两者的柔性挂缆组成的复杂多体系统，系统在波浪环境下产生较复杂的耦合运动。系统的运动仿真需要考虑的因素较多，在运动仿真方面，由于系统涉及相关联的多刚体，因此相比于常规无人飞行器要复杂很多。采用联合仿真的方法对波浪滑翔器在水中的运动进行研究能充分利用单刚体研究成果，且通过适当的数据交换能实现多刚体耦合计算，模型和计算结果都能更好地反应物理系统的运行状态。

波浪滑翔器系统建模的核心分为复杂计算和多体动力学两部分。复杂计算部分由 MATLAB 求解，多体动力学部分由 ADAMS 求解。多体动力学

计算平台 (ADAMS) 负责根据刚体受力解算刚体的运动学方程和动力学方程, 得到刚体的位置、姿态、速度和角速度等信息。MATLAB 根据刚体当前的位置、姿态、速度、角速度等信息和控制参数, 计算应该施加给刚体的力和力矩。因此求解过程形成如图 11 所示的闭合回路。

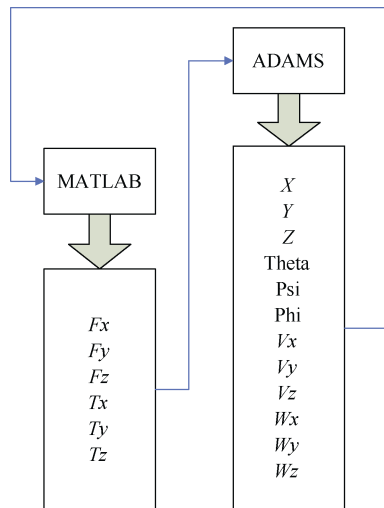


图 11 联合仿真回路示意图

Fig. 11 Schematic diagram of co-simulation loop

流体动力与运动仿真是研究波浪滑翔器原理的基础, 在波浪滑翔器研制初期具有一定的指导意义。但是复杂系统的仿真通常都对系统的物理和数学模型作了大量简化处理, 这些简化处理很大程度上降低了复杂系统仿真的难度, 但也会降低仿真结果的可信度。随着研究的深入, 仿真工作还应结合试验验证结果对数学和物理模型进行修正和优化, 逐步完善影响仿真结果的关键因素并指导波浪滑翔器样机研制和试验研究。

## 2.2 导航控制与路径规划

波浪滑翔器的导航控制需要与系统的运动性能和环境参数匹配, 才能够达到最佳运动效果和最小的规划航路偏差。主要解决的问题有微动力下抗流导航和航路自动规划、遥感信息提前辅助, 人工判断和干预等。

尽管波浪滑翔器始终处于水面, 能够保持与卫星的通信, 方便人工干预, 其航路也可以提前由人工完整规划好, 但航路自动规划仍是波浪滑翔器执

行远程任务必要的功能。人工提前规划完整航路无法全面考虑海洋及气象环境变化带来的影响, 并且人工不可能全天候对波浪滑翔器进行航路干预, 这既浪费人力也不现实。航路自动规划需要波浪滑翔器或者岸站系统结合初始规划路径和实际航路以及实时海洋温度、流向、流速、风向、风速、波浪大小等因素进行综合判断, 自动计算出最佳航路。对于单套波浪滑翔器, 因为可能缺少其周边的海洋和气象同步测量信息, 可根据波浪滑翔器当前航速、航向、历史航路及目标航路, 通过评估这些信息指导波浪滑翔器实现航路自适应追踪并及时修正。当然, 航路自动规划仍有必要借助遥感信息提前辅助, 或者是人工判断和干预。

## 2.3 跨域通信

通信可靠性是波浪滑翔器平台自身航行控制以及完成任务必须具有的重要性能。波浪滑翔器水面与水下的特殊组合结构使其具有作为跨域通信节点的天然优势。水面以上可通过卫星、无线等与岸基或水面其他节点通信, 水面以下可用水声通信与水下固定和移动节点进行信息传递。通过波浪滑翔器开展水面以上和水面以下信息交互有广阔的应用前景, 如用波浪滑翔器为水下航行体或固定节点进行定位、导航和授时服务, 水下监测网利用波浪滑翔器将采集的数据实时回传等。

目前通信卫星的数据传输速率较小, 如北斗和铱星通信数据传输能力都非常有限。大数据量实时通信有着现实的强烈需求, 天通卫星移动通信系统是我国自主建设的首个卫星移动通信系统, 随着系统的成熟和完善, 其海上通信业务可为波浪滑翔器提供宽带通信的保障。为确保通信的可靠性, 卫星通信模块可采用多种卫星集成的方式, 通信模式可选择、可任意组合。由于波浪滑翔器水面以上部分较少, 卫星通信模块露出水面的高度较小, 高海况下艇体上浪对卫星通信可靠性的影响还需要深入研究。

在波浪滑翔器水下滑翔体上搭载水声换能器可进行水声通信, 根据已有的海上试验经验, 能够可靠地与水下移动或固定节点实现远程通信和数据传输。



## 2.4 能源获取及管理

波浪滑翔器系统控制、通信及载荷等能源需求依靠蓄电池及太阳能充电满足。由于能够携带的蓄电池及太阳能板功率十分有限,一旦系统功耗较大且连续无光照天气较多时,蓄电池及太阳能就难以满足系统对能源的持续需求。

解决波浪滑翔器能源问题需从2方面入手:1)尽量多获取补充能源;2)科学的能源管理。波浪滑翔器能源获取除了尽可能提高太阳能板功率,还需要考虑其他能源的有效获取,以满足大功率载荷的用电需求。一种可能的方式是将挂缆在波浪中产生的张力部分转化为电能。根据海上实测,挂缆的瞬时张力能够达到几十至几百千克力。这样大的张力转化不仅能获取可观的额外电能,还能减小波浪对系统的冲击力,有利于波浪滑翔器平台的结构强度和可靠性。但仍需要深入研究挂缆张力缓冲后对系统运动性能的影响。在不需要考虑系统隐蔽性的情况下,还可以考虑在艇体上增加风帆,风帆可直接将风力转化为系统的推力,提高系统的航行速度和控位精度。风帆的另一大好处还能提高系统的抗流能力,即在海流较大的海域实现逆流前进。风帆的缺点是系统复杂度较高,自动控制技术难度大。极限海况下,风帆如果不能折叠,还可能导致系统运动稳定性降低,甚至导致系统损毁,直接降低了系统的极限海况生存能力。其他方式如海洋化学能、生物能等在波浪滑翔器平台上开展探索性研究也是十分有意义的。

能源管理可设计自适应能源与功耗管理系统,动态统计每个传感器的工作频率,依据设备之间的相互关联性,推算出整个系统功耗。同时,比对当前电池剩余电量和太阳能板输出功率情况,以此决定是提高还是降低传感器的工作频率。在这套机制中,用户可以设定剩余能源“低”和“极低”两个级别,在剩余能源到达“低”这个级别后,采取降低系统工作频率、关闭部分传感器等降低功耗的措施;当到达“极低”级别后,采取关闭所有传感器并停止航向控制的措施,仅低频率向岸站报告航位和电池电量等预警信息。

## 2.5 载荷适配性

波浪滑翔器平台上可搭载声、光、电、磁等任务载荷,能够执行包括海洋环境探测、跨域通信、目标探测、监视警戒等任务。波浪滑翔器平台与任务载荷首先需要在尺寸、重量、电气、能源等方面进行匹配。对于有特殊使用要求的任务载荷,如较大长度的温度链,长度会产生较大的拖曳阻力,底部的铅鱼外形和重量还需要保证拖曳过程中温度链的铅锤度和较小的阻力。搭载需要远离波浪滑翔器本体并柔性悬挂一定深度的声学拖体时,声学拖体的拖曳阻力对波浪滑翔器的影响需要评估并拖曳水池测试验证,同时波浪滑翔器平台运动产生的震动和噪声对声学载荷的影响也需要通过减阻隔振等措施进行消除或降低。其他传感器如气象站在艇体上搭载的高度,既需要考虑最低高度的使用要求,还需要考虑支杆与艇体的连接强度,满足生存海况下的样机安全要求。

## 2.6 岸基显控系统

波浪滑翔器海上作业根据不同任务的需求,搭载的仪器设备和传感器种类庞杂、数据格式不统一。通常只能使用各厂商特有的工具分别导出和转换原始数据,各种仪器的操作使用和科研数据的融合处理为科研引入额外的复杂度。

岸基显控系统是波浪滑翔器和波浪滑翔器集群以及其他海洋无人平台的信息收发、显控和信息融合、决策中心,根据使用需求分为固定式和便携式两种。

岸基显控系统具备同时接收、发送多组北斗、铱星等卫星数据的能力,具有固定式和便携式的接收岸站,能够接入多种采用卫星通信的深远海作业设备,如浮标、表面漂流浮标、水下滑翔机、UUV、无人艇、潜标等。在地图中统一显示各接入设备的实时位置和航行轨迹,绘制设备回传参数的实时/历史曲线,在同一界面远程操控接入设备,配置参数。开放同其他设备的交互接口,能够接入其他厂商的海洋设备。集成国内外公开的海底地形数据、海洋遥感资料、船测数据、浮标资料、气象信息等。

岸基显控系统综合存储多种类设备的多维度数据,结合对数据的汇总统计分析,构建综合信息



平台,用户可以通过系统接口获取统一格式的多种类的实时/历史数据。图 12 为“海鳐”波浪滑翔器的便携式岸站系统。



图 12 “海鳐”波浪滑翔器的便携式岸站系统

Fig. 12 Portable shore station system of “Sea Ray” wave glider

## 2.7 辅助推进

波浪滑翔器由波浪环境获取的航速很低,3 级海况以下速度低于 1 kn,这样的航速与很多海域的面流大小非常接近。在有海流的海区,当海况较低、无法获取足够大的航速时,一旦波浪滑翔器的目标航向与流向相对,波浪滑翔器就很难前进,甚至会倒退并随波逐流。当远程航行需要跨越较大面流海区或在海流区进行控位作业时,短时间的辅助推进就很有必要。此种情况辅助推进的速度不需要太高,推进器工作的时间也较短,因此不需要太多额外能源,但辅助推进仍需与系统运动及能源进行匹配。

## 2.8 布放、回收及应急保障

无人平台安全布放、回收和应急保障功能已成为制约其应用的一个关键因素。传统的布放与回收模式效率低,难以适应未来无人平台/集群快速机动部署、安全回收需求。波浪滑翔器布放回收需重点突破集群快速布放、精确回收控制等关键技术,实现波浪滑翔器平台/集群快速、高精度布放,有效提高无人系统布放与回收成功率及任务可靠性。

波浪滑翔器尽管体积小、重量轻,但是一种复杂多体结构,并且上下两部分连接长度较长,不便于海上布放和打捞。直接整体吊布仅能在平静海况下船舷较高的大船上实施,尽管人力辅助可在较小

的船(如渔船)上分体布放,但在布放过程中极易发生碰撞或缠绕导致样机或人员的安全事故。在一般海况下,采用简易的辅助布放和打捞设备可实现波浪滑翔器的快速安全布放和打捞。采用简易支架与可解脱捆扎带,布放时首先将艇体与水下滑翔体捆扎在一起,整体吊放至水面后解脱捆扎带即可。打捞时首先勾住艇体,起吊一定高度后,采用带打捞绳的钩挂工具顺着挂缆下滑至水下滑翔体,勾住自锁后起吊完成打捞。海况较好时,也可将艇体起吊后直接提拉挂缆,将水下滑翔体打捞上船。

海上作业不仅与气象、海况有关,还受作业档期等条件限制。一旦出海,如因海况较高等因素影响无法实施布放,将造成巨大的经济和科研损失。因此,波浪滑翔器的布放、打捞有必要解决较高海况下安全作业问题。当海况较高时,吊布将十分困难,此时应考虑整体推布。如采用可伸缩旋转支架,将波浪滑翔器固定在支架上,手动或电动操作伸出船舷外并斜向下一体化推布入水。打捞时,由于水面目标小难以发现,可在艇体上安装无线示位装置。

应急保障方面,波浪滑翔器应配备专用保障设备及通用检测仪器,包括检测设备、预置器、通信单元、总装调试系统、专用工具等。其功能是检查波浪滑翔器各模块的功能和主要技术指标,能将故障定位到功能置换件。要对波浪滑翔器系统操作技术人员进行培训,确保应急状态下能够快速恢复系统功能。

## 2.9 波浪模拟试验装置

一般试验水池或湖上没有可直接试验的波浪环境,海上的海况不受控制、海试成本过高、周期过长、试验可重复性较差。造波水池要么深度不够,要么长度有限。同样受试验成本过高的影响,在这些环境中,波浪滑翔器的性能测试难以得到准确的量化参数。因此,在波浪滑翔器研制早期,波浪模拟试验装置是一种非常必要且十分有效和低成本的试验辅助设备。波浪模拟试验装置由卷扬机、控制盒、辅助支架等组成,安装在艇体上表面,由岸电提供电能。利用调整卷扬机提升水下滑翔体的幅度和周期模拟各级海况下波浪滑翔器的运动,并测

试系统的各项性能参数,在测试过程中不断调整波浪滑翔器系统的配置参数,如水上水下衡重、姿态角、挂缆长度、翼板转角等,最终获得设计状态下的系统最佳配置。波浪模拟试验装置不能完全模拟真实的海洋环境,但是可以提供标准的试验测试环境,操作方便、可重复性强、成本低,并且获得的优化参数同样适用于真实环境下的系统状态。图 13 为采用波浪模拟试验装置的“海鳐”波浪滑翔器湖上性能试验。



图 13 采用波浪模拟试验装置的“海鳐”波浪滑翔器湖上性能试验

Fig. 13 Lake test of “Sea Ray” wave glider with wave simulation test device

### 2.10 可靠性设计

可靠性是任何海洋工程装备获得应用的关键,对于长期在海面恶劣环境中运行的波浪滑翔器,可靠性尤为重要。

可靠性设计依据波浪滑翔器的寿命剖面,建立基本可靠性模型;依据任务剖面,建立任务可靠性模型。由于事件、时间、环境条件、组成单元和系统不同,分配的可靠性指标也不同。可靠性设计一般方法包括对失效率较高或重要的电子元器件、零部件以及关键机械连接部分的强度等进行降额设计,防瞬态过应力设计,元器件、零部件的选择与控制等。波浪滑翔器可靠性设计需要重点关注的几个问题包括:1) 长时间水密性和耐海水腐蚀及防污能力;2) 挂缆、滑翔翼、舵机等机械运动组部件波浪环境下冲击和疲劳状态长期工作的可靠性;3) 电源系统长时间充放电的可靠性;4) 数据存储装置频繁读写的可靠性;5) 其他电气控制系统软

硬件的可靠性。

波浪滑翔器防腐防污方面,如果有过多海洋生物附着,将增大系统的阻力并直接影响系统的运动性能。在关键部位(如水下滑翔体翼板或舵板上)附着海洋生物,还会导致系统捕获波浪动能的功能丧失。图 14 是经过海上 94 d 连续可靠运行的“海鳐”波浪滑翔器状态。艇体水线以上部分喷涂了普通油漆,艇体底部及水下滑翔体翼板涂敷防污涂料,不锈钢及挂缆无涂料。可以看出,有防污涂料的地方防海洋生物附着的效果非常明显,但也存在海洋生物在翼板上下表面生长不均的情况。因此,还需要根据海洋生物在波浪滑翔器上的生长情况开展深入研究和试验验证。

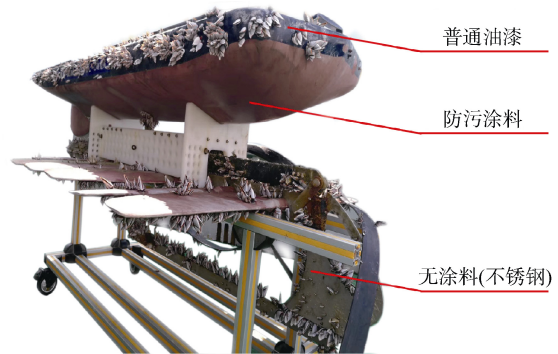


图 14 海上运行 94 d 后的“海鳐”波浪滑翔器  
Fig. 14 “Sea Ray” wave glider after 94 days offshore operation

波浪滑翔器电子系统可靠性方面,需要考虑海面温度、盐度、湿度、气温、波浪冲击等环境因素对电子元器件的影响,产品应进行环境适应性设计。

## 3 波浪滑翔器发展思路

尽管波浪滑翔器有很多其他无人飞行器无法比拟的优秀特点,并具有广泛的应用前景,但它仍是一种有限能力的小型水面无人飞行器。在实际应用中,它还存在着许多缺陷,如生存能力不强、搭载能力有限、无法快速隐蔽投送等。波浪滑翔器技术的进步需要持续的技术创新。

### 3.1 安全隐蔽型波浪滑翔器研制

波浪滑翔器的致命缺陷是其水面低速航行的

特点带来的极低生存能力。“海鳐”波浪滑翔器在长航程试验期间,多次遭到渔船非法打捞或被渔网意外拖挂破坏,在某次南海试验时还被某域外国家的渔船非法打捞。很大程度上,波浪滑翔器的续航能力取决于是否被人为破坏,而不是系统可靠性。因此,开发安全隐蔽型波浪滑翔器将具有十分重要的意义。一种可能的手段是在常规波浪滑翔器系统上增加自主警戒和应急潜伏功能,利用声、光、电、水声探测并辅以 AIS 识别近距离水面船,当确认目标逼近警戒距离后启动海水泵为核心部件的大调节量快速浮力调节系统,确保系统能够在危险目标靠近时快速稳定下沉到安全深度。自主警戒及应急潜伏带来的技术问题是增加了系统的复杂度,降低了系统有效载荷搭载能力,也可能降低系统的可靠性。同时,自主警戒和应急潜伏技术在波浪滑翔器上的应用还存在较多的技术难题,主要体现在自主警戒的虚警率和功耗、浮力调节系统的小型化和减重、上浮下潜的深度和稳定性控制、复杂系统设计及集成等。

### 3.2 人工智能在波浪滑翔器上的应用

人工智能是未来波浪滑翔器能够执行复杂任务需要的核心技术。与其他海上无人装备类似,波浪滑翔器人工智能首先要解决的问题是环境感知。水面是一个相对复杂的环境,建立正常通讯往往并不容易。波浪滑翔器能够自主决策,首先需要感知周边状态,识别水面和水下固定和移动目标,这就需要有远程目标探测以及近距离目标精细识别的能力。有了这些能力,基本具备航路自主规划和执行任务的前提条件。

协同作战是未来智能化战争中无人系统最重要的作战能力。智能协同技术是通过一系列协同机制、方法与手段,将具有一定任务能力的无人系统与无人系统之间、有人系统与无人系统之间进行智能编组,实现平台、编队、任务、指挥控制等不同层级协同能力的过程。通过无人系统智能协同技术可以实现无人系统与编组内其他成员的无缝连接,具备扩大作战范围、实现能力互补、降低任务成本、发挥体系优势等优点,最终达到作战效能大幅提高的目的。为支持有人无人协同作战、无人系统集群

作战、无人系统跨域协同作战等典型协同作战样式,需要从人、平台、系统 3 个要素间的内在联系出发,开展人-机自然交互与智能协同技术、有人-无人自主协同系统技术、无人集群系统技术、智能化作战控制技术等关键技术研究。

单套波浪滑翔器的能力十分有限,多套波浪滑翔器集群协同作业是完成特定任务的必要条件。多波浪滑翔器以及波浪滑翔器与其他有人/无人平台的集群和协同,也就是能将大量数据进行融合,科学合理地规划航路与执行任务。多套波浪滑翔器集群的协同控制能力是实现多平台协同作业的基础,编队控制是多波浪滑翔器协作研究中的一类典型问题,也是许多协作问题的研究基础。多波浪滑翔器编队控制是一种聚集的特例,即多个波浪滑翔器聚集成预定的几何配置队形(编队生成),并保持该聚集队形(编队保持)。多波浪滑翔器系统聚集成既定队形后,再结合行为主义法和虚拟结构法等方法,就可完成编队避障、编队围捕等复杂的上层任务。因此,多波浪滑翔器编队控制主要解决 2 个问题:1) 编队构成/重构,包括任务前编队生成问题,遇到障碍时编队的拆分、重建等问题,增加或减少波浪滑翔器的编队重构问题等;2) 编队保持,包括任务中编队保持问题,在不同几何形态间的编队切换问题,保持几何形态不变条件下的编队收缩、扩张、旋转控制问题等。显然,底层的编队位置跟踪和保持算法是完成上述高层任务的基本前提,目前,此类算法包括领航-跟随法、基于行为法、虚拟结构法、图论法等,它们都是通过群体中个体间的信息沟通,建立控制策略,再对个体实现逐一控制来达到预期目标。

### 3.3 波浪滑翔器快速隐蔽投送技术

在军事应用领域,装备时效性非常重要,第一时间到达任务海区是完成作战任务的首要条件。受波浪滑翔器自身的航行速度限制,依靠自己无法实现快速长途奔袭或阵地转移。发展空投、潜布或 UUV 搭载布放的特种波浪滑翔器可有效解决快速隐蔽投送的问题。空投型需解决飞机挂载接口、空中减速、入水冲击等问题。在海上作战无人化发展的背景下,空投型波浪滑翔器应重点发展适用于无

人机空投的型号装备,无人机空投还需解决系统轻量化、低阻封装、可靠挂载等技术问题。潜布或UUV 搭载布放应解决一体化封装搭载、水下密封耐压、自动释放展开等问题。

### 3.4 新型潜航器研发

由于传统波浪滑翔器存在隐蔽性较差、抗自然和人为破坏的生存能力不强等问题,目前在军事上仅应用于可控区域的水下目标跟踪探测、导弹末端弹道测量等,无法实现军事领域的广泛应用。借鉴传统波浪滑翔器直接利用波浪能驱动的创新思想,开发一型不依赖自身能源的超长服役期和超远航程的潜水器,可实现新型潜水器多功能和多任务的军事应用,发挥巨大的军事价值。同时,这种潜水器还适合大范围测量水层和海底附近环境参数相关的海洋地理研究任务,在民用领域也能够发挥巨大的作用。新型潜航器既具有传统波浪滑翔器超强续航和可控位等优点,也能够规避传统波浪滑翔器隐蔽性差、生存能力弱等缺陷。新型潜航器正常航行时能够将主体结构没入水面以下,具有隐蔽潜航、表面充电、大深度潜伏、快速隐蔽推进等多运动模式,同时具有水面目标自主警戒和应急潜伏功能。

新型潜航器需解决总体原理设计、关键技术验证、体系化应用等一系列难题。中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所正在相关领域的资助下开展新型潜航器的研制,目前项目研究进展顺利。

## 4 结束语

“海鳐”波浪滑翔器作为国内波浪滑翔器的典型代表,已完成了前期基础研究和样机的全方位考核试验,并经过了多次海上长时间实际应用的检验,其性能和可靠性均在国内领先,达到世界先进水平。尽管“海鳐”波浪滑翔器的极限续航能力还未得到充分检验,但已具备工程应用和推广的基

础,相信在各领域的实际应用中可以不断完善波浪滑翔器平台的功能并持续提升产品的性能。

用工匠精神打造一流的产品,用持续的技术创新引领波浪滑翔器技术的发展。中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所波浪滑翔器技术团队将结合中国国情,研发出适用于我国近海、远洋并满足不同任务要求的波浪滑翔器和新型潜航器精品,为我国海洋环境探测、海洋资源勘探开发以及海洋国土安全贡献力量。

## 参考文献

- [1] HINE R, WILLCOX S, HINE G, et al. The wave glider, a wave powered autonomous marine vehicle[C]// Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2009. Biloxi: MTS/IEEE, 2009.
- [2] MANLEY J, WILLCOX S. The wave glider: a persistent platform for ocean science[EB/OL]. [2010-10-19]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabsall.jsp?arnumber=5603614>.
- [3] MANLEY J, WILLCOX S. The wave glider: a persistent platform for ocean science[C]// Proceedings of IEEE OCEANS 2010. Sydney: IEEE, 2010.
- [4] 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.
- [5] 李小涛. 波浪驱动水面机器人动力学建模及其仿真研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2014.
- [6] 卢旭. 波浪驱动水面机器人总体技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [7] 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.
- [8] 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: 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(9): 1227-1235.

(责任编辑: 曹晓霖)