

# 我国海洋监测仪器装备发展分析及展望

王军成<sup>1,2,3\*</sup>, 孙继昌<sup>1,2,3</sup>, 刘岩<sup>1,2,3</sup>, 刘世萱<sup>1,2,3</sup>, 张颖颖<sup>1,2,3</sup>, 陈世哲<sup>1,2,3</sup>, 漆随平<sup>1,2,3</sup>,  
王波<sup>1,2,3</sup>, 厉运周<sup>1,2,3</sup>, 曹焯<sup>1,2,3</sup>, 高杨<sup>1,2,3</sup>, 郑良<sup>1,2,3</sup>

(1. 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 海洋仪器仪表研究所, 山东青岛 266100; 2. 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 海洋技术科学学院, 山东青岛 266100; 3. 国家海洋监测设备工程技术研究中心, 山东青岛 266100)

**摘要:** 海洋监测仪器装备是关心海洋、认识海洋、经略海洋的基础保障和重要前提, 虽然我国海洋监测仪器装备技术水平与业务化应用近年来进步显著, 但相比海洋发达国家仍在“卡脖子”技术、关键设备研制方面存在一定差距。本文从全球海洋立体观测网、国家近海业务化观测系统、海洋环境监测探测技术与核心装备3个层面着手, 辨识并剖析了我国海洋监测仪器装备的发展需求, 梳理了我国海洋监测仪器装备发展现状; 对标国际先进水平, 阐述了我国海洋监测仪器装备在政策及机制体制、原始创新与基础科研、共性关键技术、技术标准及测试、国产化与产业化等方面存在的问题, 进一步展望了相关领域的重点发展方向。提出了构建海洋监测仪器创新体系、壮大海洋监测仪器产业、建设海洋公共试验基础设施等建议, 可为我国业务化海洋立体监测体系发展研究提供参考。

**关键词:** 海洋监测; 仪器装备; 全球海洋立体观测; 近海业务化观测

**中图分类号:** P745 **文献标识码:** A

## Research Progress and Prospect of Marine Monitoring Instruments and Equipment in China

Wang Juncheng<sup>1,2,3\*</sup>, Sun Jichang<sup>1,2,3</sup>, Liu Yan<sup>1,2,3</sup>, Liu Shixuan<sup>1,2,3</sup>, Zhang Yingying<sup>1,2,3</sup>,  
Chen Shizhe<sup>1,2,3</sup>, Qi Suiping<sup>1,2,3</sup>, Wang Bo<sup>1,2,3</sup>, Li Yunzhou<sup>1,2,3</sup>, Cao Xuan<sup>1,2,3</sup>,  
Gao Yang<sup>1,2,3</sup>, Zheng Liang<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266100, Shandong, China; 2. School of Ocean Technology Sciences, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266100, Shandong, China; 3. National Marine Monitoring Equipment Engineering Technology Research Center, Qingdao 266100, Shandong, China)

**Abstract:** Marine monitoring instruments and equipments are crucial for understanding and managing the ocean. In recent years, significant achievements have been obtained in the technologies and application of marine monitoring instruments and equipments in China. However, China still lags behind developed countries in terms of core technologies and equipment for marine monitoring. This

**收稿日期:** 2023-03-28; **修回日期:** 2023-04-25

**通讯作者:** \*王军成, 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 海洋仪器仪表研究所研究员, 中国工程院院士, 研究方向为海洋监测技术及仪器装备; E-mail: wjc@sdoi.com

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“中国海洋监测仪器装备发展战略研究”(2022-XY-21), “山东省海洋信息智能感知技术体系建设与产业化应用战略研究”(2022-DFZD-35), “海洋安全工程科技未来20年发展战略研究”(2021-XBZD-13); 山东省重点研发计划项目(2023ZLYS01)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

study analyzes the development requirements and development status of China's marine monitoring instruments and equipment from the aspects of global ocean stereoscopic observation system, national nearshore operational observation system, and technologies and core equipment for marine environment monitoring and detection. Moreover, it elaborates on the problems existing in China's marine monitoring instruments and equipment in terms of policies and mechanisms, original innovation and basic scientific research, common key technologies, technical standards and testing, as well as cincization and industrialization. Furthermore, we propose key development directions and several suggestions including (1) establishing an innovative system of marine monitoring instruments, (2) expanding the marine monitoring instrument industry, and (3) building a marine public test infrastructure, hoping to provide a reference for the development and research of China's operational marine stereoscopic monitoring system.

**Keywords:** marine monitoring; instruments and equipments; global ocean stereoscopic observation system; national nearshore operational observation system

## 一、前言

当前,世界格局出现深刻变化,海洋在经济发展、国家安全、地缘政治中的作用更加明显。沿海国家高度重视海洋开发,积极制定相关战略<sup>[1-3]</sup>。在我国,发展海洋经济、保护海洋生态环境、加快建设海洋强国成为重大战略要求;客观来看,我国目前仅是海洋大国,还不是海洋强国<sup>[4]</sup>;而海洋权益维护、深海资源开发、海上粮仓建设、21世纪海上丝绸之路等的推进,标志着我国正由海洋大国向海洋强国迈进<sup>[5]</sup>。

海洋科学研究和技术创新在国家科技体系中的基础性、战略性作用日益凸显。海洋监测仪器装备是国家综合科技实力、海洋管控能力的体现,加快建设海洋强国的关键支撑。与科技进步、学科交叉及融合的趋势相对应,海洋监测仪器装备的研究外延不断拓展,逐步由传统的传感器、仪器扩大至综合性更强、功能更多、时空更广的“空、天、地、海”一体化观测体系<sup>[6]</sup>。

我国海洋监测仪器装备的发展面临新机遇、新要求、新挑战。在地缘性海洋权益竞争与摩擦加剧的背景下,对海洋监测技术和装备需求迫切,而部分关键核心技术、关键仪器面临着“卡脖子”问题。海洋是全球最大的活跃碳储库,在积极应对全球气候变化、稳健推进“碳中和”的过程中,相关海洋监测技术成为新的发展点。海洋环境安全保障系统也是发展亟需,将从传统海洋动力环境安全扩展到海洋环境大安全,涵盖生态环境安全、资源开发安全、海洋空间权益安全等。面向未来,全球海洋探测与应用开发技术朝着更广、更深、更精的方向发展。

把握国际海洋科技前沿,建设全球海洋立体观测网、国家近海业务化精准观测系统,自主研制海洋环境监测探测技术与核心装备,是我国海洋监测

仪器装备领域的主攻方向。本文力求全面分析并展望我国海洋监测仪器装备的发展。

## 二、我国海洋监测仪器装备发展需求分析

### (一) 全球海洋立体观测网建设

海洋约占地球面积的71%,而目前人类对其探索仅为5%。海洋是全球治理的新疆域,也是我国向海图强、向海而兴的主阵地。构建多学科、持续性、实时或准实时的全球海洋立体观测网,是支撑海洋强国建设的重要保障<sup>[7]</sup>。

#### 1. 海洋科学研究需求

全球海洋研究尚有众多前沿科学问题没有解决,海气多尺度相互作用及气候效应<sup>[8-10]</sup>、海洋多尺度动力过程变异机理及预测<sup>[11,12]</sup>、深海大洋热与碳吸收过程及机制<sup>[13,14]</sup>、深海物理与地球化学环境变化对资源及气候的影响<sup>[15]</sup>、洋底过程探索、深海资源-能源-灾害分布规律及异常观测<sup>[16,17]</sup>等是研究热点。构建全球海洋立体观测网,将实质性推动探索和解决这些科学问题,也将显著提升我国在全球海洋科技领域中的地位。

#### 2. 海洋权益维护与全球治理需求

随着国际地缘政治环境、海洋安全形势的变化,我国海洋权益及海洋安全面临挑战,海洋强国建设离不开精准有效的海上管控能力<sup>[18]</sup>。针对全球性海洋治理问题,以海洋环境保护为导向,需要进一步完善海上船舶航行、公海渔业捕捞、深海资源开采相关的法律制度。针对海洋垃圾(如微塑料)、海洋酸化等问题,国际社会正在讨论制定技术规则和法律规章<sup>[19]</sup>。参与海洋开发、制定相应规则,都需要全球海洋立体观测网提供自主、安全、可控的数据并以此为依据。在此背景下,亟待海洋环境立体观测方面的重大技术突破。

### 3. 全球气候应对需求

极端恶劣天气频发，全球气候应对工作迫在眉睫。海洋气象预报是全球性、复杂的系统工程，与人类活动密切相关，能够保护人类的生命与财产安全。现有的海洋观测集中在海气界面常规要素层面，而在能量交换、物质交换等方面，观测站位稀疏，观测数据匮乏<sup>[20]</sup>。“一站一地”式的海洋观测数据，对提高和改进海洋气象预报水平作用不明显；而构建覆盖全球的海洋立体观测网，才能高效获取并充分利用海洋观测大数据，实质性解决海洋气象现代化面临的“卡脖子”问题。

## (二) 国家近海业务化精准观测系统建设

国家近海业务化精准观测系统是我国海洋防灾减灾、生态保护与修复、海洋经济发展的基础性保障设施。构建覆盖我国管辖海域的“空、天、地、海”业务化精准观测系统，开展时/空精细化观测、多要素精准化测量，丰富海洋生态业务化观测参数库，增强对极端海洋事件的预报预警能力。

### 1. 海洋防灾减灾需求

海洋防灾减灾工作是国家综合减灾体系的重要组成部分，直接影响沿海地区居民的生命财产安全，事关海洋资源开发利用和经济社会的可持续发展。全球气候变暖，海平面上升，风暴潮、灾难性海浪、海岸侵蚀、有害赤潮等海洋灾害的破坏性进一步加大，给人口密集、生产发达的沿海地区造成极大损失（每年直接经济损失为数十亿元）。然而，沿海重点区域、重点目标的海洋灾害期间应急观测预警能力相比防灾减灾需求存在明显差距，如海洋预警预报产品的形式及内容不够丰富，产品的时效性、精准度仍待提高，尤其缺少针对核电站、石化区、养殖区、沿海港口、渔港等典型生态系统重点目标的精细化预警预报产品。

### 2. 生态保护与修复需求

我国进入全面建设社会主义现代化强国的新时期，加强生态保护和修复对于推进生态文明建设、保障国家生态安全具有重要意义。《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021—2035年）》将海岸带生态保护和修复列为重大工程。党的二十大报告提出，深入推进污染防治，提升生态系统多样性、稳定性、持续性，积极稳妥推进碳达峰、碳中和，提升生态系统碳汇能力。加强海洋污

染监控是新时期海洋生态环境保护的重要举措，海洋监测仪器装备则是实现海洋污染监控的必要手段。加强海-气CO<sub>2</sub>通量、水汽通量、水质等要素的自动监测能力，是进行碳收支研究和碳中和决策的基础支撑。海洋碳环境和海水污染要素监测的新形势，对自动化、智能化海洋监测仪器装备提出迫切需求和更高要求。

### 3. 海洋经济高质量发展需求

21世纪是人类大规模开发利用海洋的新世纪，海洋是维护国家主权、发展国家经济、构建人类命运共同体的重要疆域和连接纽带。党的二十大报告提出，要发展海洋经济，保护海洋生态环境，加快建设海洋强国。《中华人民共和国国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出，要积极拓展海洋经济发展空间，建设现代海洋产业体系，围绕海洋工程、海洋资源、海洋环境等领域突破一批关键核心技术。发展海洋经济、向海洋要资源，需着力提高海洋高新科技水平，高质量发展海洋产业；加强海洋环境监测是提高海洋资源开发能力的基本前提，而海洋监测仪器装备是实现海洋环境监测的基础手段。为落实国家发展海洋经济与保护海洋生态环境兼顾的任务要求，需在现有海洋监测技术成果的基础上，提高自主海洋监测仪器装备质量，立足国内市场并积极开拓国际市场，加快我国海洋监测仪器产业化进程。此外，海洋重大工程、海水养殖、海上风电、海洋生物制药、海洋能源开发、滨海旅游等海洋产业的发展，与海洋环境监测密切相关，也对海洋环境监测技术及装备应用提出了直接需求。

## (三) 自主化海洋环境探测技术装备研制

### 1. 海洋立体观测网建设需求

建设全球海洋立体观测网、近海业务化精准观测系统，需要发展自主可控的全球海洋观测和探测技术，建立具有自主知识产权的先进装备体系，补齐海洋动力监测、海洋生物化学监测、海洋地球物理探测、多圈层监测等海洋装备技术短板。通过海洋环境探测技术装备的国产化，实现装备和数据的自主、安全、可控，培育和壮大高端海洋装备产业，带动上、下游产业的快速优质发展。

### 2. 科学研究领域需求

海洋技术进步推动人类对海洋的认知。海洋遥

测及探测技术的进步,有助于全面提升对海洋与气候变化之间相互作用的认识。随着全球气候变化、环境保护、经济社会发展需求增多,人类对更加精确认知海洋的需求更显迫切。海洋监测是形成海洋科学认知的基础手段,仪器装备是重要支撑。研发原创性海洋观测技术,运用新理论、新方法、新技术,推动原创性装备实用化,弥补现有海洋监测技术手段不足,满足海洋科学研究、海洋调查等观测需求。

### 3. 技术自主可控需求

推动海洋科技实现高水平自立自强,加强原创性、引领性科技攻关,引领装备制造发展趋势已是国家宏观要求。正向研发海洋观测和探测的技术与仪器装备,才能真正满足自主创新与国产化替代需求。然而在我国海洋观测领域,进口产品仍占据市场优势地位,国产仪器装备长期滞留于市场的中低端。着力攻关传感器材料和工艺等“卡脖子”技术环节,稳步提高使用性能和国产化率,才能实现国产海洋仪器装备的自主创新发展。

## 三、我国海洋监测仪器装备的发展现状

### (一) 海洋立体观测体系建设

着眼海洋防灾减灾、海洋开发、海洋管控、气候变化研究等需求,建设全球海洋立体观测网,是实现海洋强国的必经之路。

“十三五”时期,我国将全球海洋立体观测网列为重大工程,自主发展由HY-1B、HY-1C、HY-1D、HY-2B、HY-2C、HY-2D、中法海洋卫星7个星座组成,覆盖海洋水色、海洋动力、海洋监视和监测三大系列的遥感卫星系统,逐步形成多种观测技术优化组合的全球海洋观测与数据获取能力<sup>[21]</sup>。后续将开展国家海洋环境实时在线监控系统、海外观测站点建设,建成全球海洋立体观测系统,保障海洋生态、洋流、气象等观测应用。

在全球海洋观测站点覆盖方面,我国在西太平洋、东印度洋、南极、北极等海域部署观测站点,初步开展全球重点海区观测<sup>[22]</sup>。“十三五”时期,我国积极整合国家海洋观测能力,深度参与国际Argo计划、热带太平洋观测系统计划,建设覆盖太平洋台风活跃区、厄尔尼诺区等重点区域的长期观测系统,成为国际海洋观测的重要参与国。此外,

我国参与建设国际岛礁生态链和观测系统,与21世纪海上丝绸之路沿线国家共建海洋观测系统,提升对全球海洋预报观测的贡献度。

在全球海洋数据通信方面,随着北斗卫星导航系统全球服务能力的形成,基于北斗卫星通信的海上实时传输终端应用趋于成熟<sup>[23]</sup>。天通一号卫星星座建设完毕,覆盖太平洋、印度洋大部分海域,具备基本的数据通信能力。低轨通信卫星星座有望在5~10年内进入全面应用。基于水声通信的水下无线传感器网络研究深入开展,试验结果基本达到国外主流水平。蓝绿光通信技术进入海上试验阶段,标志着无线光通信技术进入工程化应用研究阶段<sup>[24]</sup>。

在海洋大数据管理方面,我国初步建成以气象局、海洋局等机构为主体的海洋立体观测数据业务处理平台,但管理方式、数据标准、数据共享等有待协调统一。传统海洋强国积极建设海洋数据管理及共享机制,海洋环境监测规范及标准、海洋科学数据共享平台较为完备,支撑了资料收集、组织、存储、检索、维护、共享工作有序展开;随着国际海洋资源竞争加剧,各国间的数据资料趋向利益互换、协商交换的共享模式。相较之下,我国海洋大数据管理与应用水平有待加强。

### (二) 近海业务化观测网

我国初步建立以卫星遥感、海洋浮标、岸基台站为核心,地波雷达、断面调查、志愿船等手段为辅助的近海业务化观测网,观测参数包含气象、水文、生态等环境参数,覆盖渤海、黄海、东海、南海(近岸)等海洋区域。观测参数、站位分布密度、长期连续性等基本满足海洋业务化观测需求,积累了大量资料数据,在数据处理、管理模式、体系建设等方面形成系列标准和规范。

在海洋业务观测网分布方面,根据《海洋技术进展2021》数据,在位海洋站观测系统有330多个,海岛(海上平台)自动气象站有310多个,强风观测站有200多个,船载自动气象站有100多个,业务化锚系浮标有230多套,表层漂流浮标有200多套,Argo浮标有200多套,潜标有40多套。专业河口水文站、验潮站、气象站、雷达站等也有一定规模。国家海洋调查船队常年调查的海洋标准断面调查站位有100多个,海上志愿观测船有数百艘。

“十四五”时期,围绕海洋环境安全保障能力

提升，重点发展海洋自主传感器研制能力（如可移动观测的海洋生物化学原位传感器、电磁场传感器、声学智能探测仪），高可靠智能固定观测平台技术（如高可靠性实时通信潜标、海气交互大剖面综合观测浮标），易布放式移动观测平台技术<sup>[25,26]</sup>。开展海上试验，促进新研传感器、平台、组网技术的规范化。构建自主可控的南海观测示范系统、西太平洋深海科学观测网等<sup>[27]</sup>，发展自主同化及预报技术，实现重点海区观测水平、预报产品、预警能力的跨越式发展。开发海洋生态环境保护、治理、修复等共性关键技术，支撑海洋生态文明建设。

随着观测技术、传感设备的发展，观测需求的增加，新型传感设备进入近海业务化观测网成为常态，观测参数不断丰富、观测精度不断提高、覆盖范围不断扩展。

### （三）自主化海洋环境探测技术装备

#### 1. 海洋观测平台技术

海洋观测平台是各类传感器的载体、全球海洋立体观测网建设的核心节点，我国已基本掌握固定海洋观测平台的核心技术。大型浮标平台技术相对成熟，规格系列化的海洋浮标产品供应市场，整体达到国际先进水平；特别是大型浮标，在极端恶劣海况下的可靠性达到国际领先水平，满足沿海海域业务化运行需求。潜标研制工作起步较晚但发展迅速，潜标观测系统关键技术基本获得突破，数据实时传输、长期在位观测、水声探测等技术进展良好。海底观测网已在东海海域进行示范运行，验证了相关技术成果。

水下、水面、空中无人航行器等移动观测平台发展迅速，有效载荷和续航能力进一步提高，技术层面进步显著；保持多样化发展态势，种类分布与国际主流同步。在无人潜器研制方面，波浪能滑翔器、无人水面艇、无人帆船、深海Argo，部分遥控水下机器人（ROV）、自主水下机器人（AUV）、载人水下机器人（HOV）、水下滑翔机等装备的整体性能接近或达到国际先进水平<sup>[28,29]</sup>。深海环境中的水下导航与定位、浮力材料、水下高能量密度电池等技术则有待研究和突破。

在卫星平台方面，发展了海洋水色、海洋动力环境、海洋监视监测等系列海洋卫星，多颗卫星在

轨运行。逐步建设由国产卫星主导的海洋空间监测网，基本实现全球海洋环境的逐日观测。此外，在水色遥感、海洋要素反演、卫星精密定轨等技术方向成果丰硕，支持了业务化监测应用与示范。

#### 2. 传感器技术

传感器技术是构建海洋观测能力的基础和前提。近年来，我国在海洋环境传感器技术方向进展显著，新型传感器不断涌现，促进海洋观测、监测、探测朝着实时、原位、精细、立体、智能方向发展；但对比国际先进，国产化海洋传感器技术整体水平仍处于“跟跑”阶段。在“十二五”“十三五”时期国家重点研发计划等渠道的支持下，约70%的近海、常规传感器实现国产化；但超过80%的深远海、高端传感器依赖进口，潜在的市场垄断和技术封锁不可忽视。国产原位在线生态传感器的长期可用性仍待提高。在传感器通用技术方面，受工业基础、原材料、关键元器件等制约，敏感元件、微弱光电信号检测与处理、功能材料等系列关键技术尚存差距<sup>[30]</sup>。

## 四、我国海洋监测仪器装备发展存在的问题

我国海洋监测仪器装备相比国外存在差距，重要原因是长期以跟踪仿制国外产品为主，忽视原理创新、技术创新、材料创新、工艺创新。国产海洋监测仪器装备的研制水平、产品性能与可靠性等长期落后于国外产品，导致典型应用领域中高端产品依赖进口的局面未能彻底改变。存在的问题主要涉及5个方面。

### （一）政策及机制体制问题

民用海洋监测仪器装备研发相关的工程/项目支持较少，科研资金支持、政策激励等缺乏连续性。研发过程强调“短平快”，而对研制周期长、研发难度大的海洋传感器重视程度不足，对原创类海洋传感器及相关仪器装备更是缺乏针对性支持。相关研发力量较多分布在高校、科研院所，很多研发工作在取得关键技术突破后随着课题任务结束而搁置；后续的产品开发工作未能及时展开，导致技术迭代和固化难以进行。技术研发与市场有效结合的机制缺失，普遍存在重技术突破、重系统集成，轻产品化、轻产业化的情况。

海洋监测仪器装备产业具有投资回报周期长、风险大,技术门槛高的特点,涉及原理创新、技术工艺突破、产品化、产业化、业务化应用等全链条,产业高质量发展是长期和基础性的系统工程。目前,此领域的针对性政策扶持与激励措施有所不足,未能有效激发生产企业的参与动力,而研究成果工程化、产业化进程缓慢,长期处于低端无序的发展状态。此外,尚未建立国家标准实验站,导致国产海洋监测仪器装备的性能比对测试、可靠性试验等未能顺利开展,不利于相关产品迭代提高;国产海洋监测仪器装备的性能指标验收标准多套用进口设备,片面追求高精度,而对仪器稳定性的关注不够。

## (二) 原始创新和基础问题

一直以来,我国海洋监测仪器装备研究几乎没有出现源头、原理、方法上的创新,多为跟踪国外研究、模仿成熟产品。专门化、前瞻性、基础性的领域发展规划缺失,叠加研究资助碎片化、研究力量分散化,导致领域自主创新能力不足,从而表现出核心关键技术对外依存度高、易出现“卡脖子”的情况。

前期支持项目多是“短平快”导向,简单对照国外产品指标,没有形成协同创新生态链,鲜有机构和团队愿意“沉下心来”进行高性能敏感材料、敏感探头制备工艺、封装材料及工艺等仪器核心技术的探索和研发。例如,高精度温盐深仪测量仪器的自主研发超过20年,但所需的高精度压力传感器压电晶体、万分之一精度石英谐振传感器等仍不能自主生产;微机电系统芯片、高稳定性光源、高灵敏度光电转换器件等的国产化能力也明显滞后,可能面临潜在的进口受限而阻碍海洋监测进展。

各类海洋监测仪器装备面临的共性问题,如仪器防腐、防生物污损、多种复合材料传感器探头封装后的长期稳定性可靠性、不同温度与压力条件下的传感器密封,直观上是应用问题,但实质上是基础问题,离不开理论分析、材料特性等基础研究的突破。在实际海洋监测仪器装备研发与应用中,亟需加强海洋监测技术相关的基础研究,解决工程实践背后的核心科学问题,以技术科学研究引领技术源头性创新,以技术创新带动海洋监测仪器装备系统的研制。

## (三) 共性关键技术方面的问题

对于以万米级深渊科考及观测为代表的深海探测,需要在万米级深水观测平台材料、结构、通信、能源等技术方向上进行创新突破,而主要设备国产化水平低,设备功耗、数据传输、水下生物腐蚀等问题依然制约仪器装备的工程应用。针对深海条件下的耐压、密封工艺,开展的系统性思考与设计依然缺乏,理论分析、数值模拟研究的广度和深度远远不够。

在浮力材料、能源供给、线缆与水密连接件、液压控制、水下驱动与推进单元、信号无线传输、水声通信、可再生能源等方面,相比国际前沿存在较大的技术差距。恶劣海况下环境信息精准观测与目标透明探测、水下信息感知探测与传输组网、复杂海洋环境下智能无人系统自主控制与协同等,也是存在研究空白和亟待解决的难题。为此,在探测与作业的范围及精度,集成化程度与功率,操作的灵活性、精确性、便利性等方面,需要加强总体设计和技术攻关。

## (四) 技术标准和测试问题

海洋监测仪器装备的研发和生产长期以国外产品指标为跟踪目标,导致典型海洋监测仪器装备的指标体系参照国外;对技术指标的定义与设计、规范化测试及标准等的研究不系统、不深入,没有真正掌握国外产品指标的设计理念。相关国家标准、行业标准的研究和更新不及时,不能满足海洋监测技术研究、产品测试、产品应用的需求。

海洋监测仪器装备一直处于“重研究、轻测试”的发展局面,导致检测、试验所需的硬件条件不健全。尤其是很难依托现有条件(海上试验场、海上平台、载人/无人潜水器、着陆器、拟建的海底观测网)开展长周期、反复性的测试验证,使相关产品的长期稳定性、可靠性难以准确评价以及持续改善,从而形成发展“怪圈”:产品质量不可靠导致用户应用信心不足,应用不足又无法有效提升质量和可靠性。以海洋温盐深传感器为例,国产典型产品的技术指标达到国际先进水平,但缺乏长期、严格且与国际接轨的检定、测试、现场验证,导致稳定性、可靠性不及国外产品,因用户信任度不够而在市场竞争中处于劣势。

### （五）国产化和产业化问题

传统海洋强国形成了数字化、智能化、模块化、标准化的传感器体系，相关产品在包括我国市场在内的国际市场上占据主导地位。在我国，深海温盐深仪、海流计、光学传感器等核心传感器较多依赖进口，而部分技术和产品面临封锁、垄断、禁运；约70%的近海、常规传感器基本实现国产化，但是国内市场仍由进口传感器主导，国产传感器的规模化应用较少；深远海、高端传感器几乎全部依赖进口，国产化率非常低。国产传感器在准确性、长期稳定性、环境适应性等方面存在明显不足。

海洋监测仪器装备只有在产品化、产业化之后才能真正摆脱进口依赖。前期参研单位极少是企业，加上科技成果转移转化不畅的羁绊，很多技术成果没有对接市场、走产业化发展道路。从事海洋监测仪器的企业，获得的政策、资金、项目支持有限，市场生存压力大，导致我国在此领域一直未能出现知名企业。多数企业以进口敏感元件、芯片的二次开发，面向中低端领域的集成应用为主，自主研发能力薄弱，产业化瓶颈未能突破；自研的仪器设备实际应用机会少，检验、测试、评估反馈不足。海洋监测仪器设备种类繁多，企业因成本和收益考虑参与产品化、产业化积极性不足，难以真正推动实现产品化、系列化。

整体来看，国产海洋传感器在可靠性、稳定性、准确性等方面落后国际先进水平。有关前沿技术更是落后传统海洋强国10~15年；在代表传感器发展方向的微小型传感器、智能化海洋传感器方面，国内处于起步阶段。

## 五、我国海洋监测仪器装备的发展方向

### （一）全球海洋立体观测网建设

#### 1. 一体化、可视化、智能化

为实现我国海洋立体观测网的能力覆盖全球，应以需求为牵引，按照顶层规划分步实施。立足现有海洋观测网络基础，逐步扩大覆盖范围，由我国近海向中、远海拓展，重点典型海域向全球海域发展，水面向水下、海底延伸。综合应用固定观测、移动观测、遥感观测等平台，形成全球立体观测平台与能力，建成“空、天、地、海”一体化、可视化、智能化的全球海洋立体观测网，为我国周边和

全球的海洋科学研究、作业活动提供全维信息支持。

#### 2. 实时、精细、长期化

着眼全球海洋立体观测网建设需求，弥补传感器、平台、组网等技术短板，加强智能化、覆盖范围、观测方式、综合保障、数据共享等方面的能力建设。持续完善观测平台技术，如地球同步轨道海洋卫星观测，“天、空、海”“水面、水中、海底”智能组网观测；发展在全球大洋快速机动组网观测、在重点区域进行长期观测的技术能力，以立体观测部署多样化、静/动态设备组合化、观测规模扩大化支持“实时、精细、长期化”的海洋观测。积极参与国际合作计划，完善监测区域分级制度，逐步提升对全球海洋、气候、环境变化过程的监测及预测能力。

#### 3. 智慧应用与服务

连接观测数据与应用的纽带在于全球海洋观测数据管理。发展全球海洋观测大数据实时通信与传输技术，提升全球海洋数据实时获取与自主可控水平。延续现有观测数据业务处理平台，扩充面向国际、服务不同层级用户的智慧型终端产品，进行海洋观测大数据的集中存储、处理、分发、共享；高效利用全球海洋数据，支持防灾减灾、经济发展、气候变化、环境保护、权益维护等海洋领域应用需求。

### （二）国家近海业务化精准观测系统建设

#### 1. 精细化、精准化、标准化、一体化观测

构建覆盖管辖海域，“空、天、地、海”一体的业务化监测系统，提升近海业务化的精准观测能力，支持空间/时间精细化观测、多要素精准化测量。建立具有国际先进水平的区域精细化海洋监测业务系统，改善“风浪流潮”等动力要素的观测数据质量，提升观测要素精度、观测设备可靠性、观测数据准确性。同步开展观测数据协议、传感设备接口标准化建设。

#### 2. 生态要素业务化观测

以海洋业务观测形成的水文气象参数为基础，进一步扩展观测要素种类，如生态环境要素原位自动观测、海洋碳源/碳汇观测、生物光学测量、海水表皮层光学特性测量、海水化学成分测量、海表面大气成分测量，形成精细化的海洋监测业务系统。实现生态要素的现场自动监测，融入业务化观测体系，支持海洋生态灾害预报预警、生态治理与修复。

### 3. 精准应用与服务

以防灾减灾、海洋生态保护等业务化观测为主导，统筹陆/海系统建设，优化站点布局 and 分布密度，增强对海洋动力、海洋生态等要素的精准测量能力。研发多源观测数据同化技术，形成业务化产品，提高现场长期观测的准确性、稳定性、可靠性，构建生态要素的现场自动监测能力。针对海洋环境污染防治、生态保护修复、海洋碳中和等研究与应用需求，提高海洋动力灾害预报准确率、生态灾害早期精准预警能力。

## (三) 自主化海洋环境探测技术装备研制

### 1. 自主可控与产品化

突破海洋探测装备中的“卡脖子”技术，提高海洋环境观测仪器装备的自主可控水平，逐步实现高端、核心仪器装备的自主供给。开展海洋传感器技术工程化、标准化、产业化、成熟化研究，改善传感器的功耗、寿命、稳定性、可靠性，提高装备对复杂海况、恶劣环境的适应性。支持国内海洋仪器品牌发展，形成包括研发、设计、建造、配套、试验、运维等环节在内的全产业链产业化能力，积极参与国际市场合作与竞争。

### 2. 原始创新与智能化

吸收并转化人工智能、智能制造、大数据等新兴技术成果，研究和应用新原理、新技术、新方法、新材料、新能源，支持海洋传感器核心技术、水下氢燃料电池等能源供给技术<sup>[31,32]</sup>攻关，为原创、高端传感器及装备自主研制筑牢科技基础。注重智能化传感器及装备研发，在多功能模块设计、高精度导航定位、控制算法、信息传输、负荷搭载、浮力材料等方面进行系统突破，提高装备及应用的智能化水平。

### 3. 协同观测与网络化

在信息感知、物联网、云计算等新兴技术的推动下，利用组网协同技术增强装备的观测和探测能力，实现海洋环境测量参数综合化、观测系统模块化、数据传输实时化、观测服务网络化。

## 六、我国海洋监测仪器装备研发重点

### (一) 高性能海洋传感器基础研发

一是开展新型海洋传感器研究与应用。突破传

统思路和技术惯性，探索新测量原理和方法，为全面解决海洋传感器的高灵敏度、高精度、高响应速度、高信噪比、高可靠性、高耐受环境能力、微小体积及重量等要求提供新路径。深入研究传感器阵列技术、等离子体共振技术、膜技术、生物传感技术等，完善海洋监测传感器关键技术体系。

二是发展微型化、智能化、集成化、网络化传感器技术。研发具有自补偿、自校准、自诊断、远程设定、状态组合、信息存储及记忆等功能的智能化传感器，实现传感器的紧凑体积、极小质量、极低功耗，适应单功能到多功能的集成需求。

三是发展深远海、极地、极端海洋环境、特殊事件应用传感器技术。开展深海高压、极地极寒等极端恶劣环境下的新型传感测量、水密耐压、极寒环境供电等关键技术研究，自主研发海洋系统多圈层探测和观测技术装备。

## (二) 海洋环境立体监测关键共性技术

一是水下监测实时通信技术。① 大水深和全水深深海数据实时传输技术，具备深海数据长距离稳定传输、全水深实时传输节点接力及错时通信、实时观测系统小型便携、大水深/全水深实时潜标海上布放回收等能力，实现深海潜标全水深观测数据的实时回传。② 深海潜标和岸基站的双向通信技术，根据实时回传数据结果，发出指令改变设备的观测频率、分层、数据回传周期等，为科研和业务用户提供更可靠的服务。③ 深海实时通信多要素、多平台组网观测技术，建立海洋多学科参数集成观测系统，增建坐底和悬浮观测平台，消除已有潜标系统在边界层、水平面上的观测盲区。

二是深远海海洋监测仪器装备能源补给技术。① 海洋可再生能源发电技术，涵盖波浪能深远海阵列式应用技术及装备，海流能规模化智能化关键技术及装备，海洋温差能发电及综合利用，漂浮式风电技术及装备，海泥电池、同位素电池、海水温差发电等。② 海底充电桩技术，在大洋海底建立电力储能装置，利用海洋能产生的电力进行转化储存，克服深海海底电力储能材料、发（充）电设备小型化等应用瓶颈。③ 供电技术，通过电力转换并在海底建设充电桩泊位，为水下移动监测仪器设备充电；通过有缆供电方式，为锚系潜标、海底观测网等固定平台提供补充电力，满足水下监测设备一年



以上周期的电力需求。

三是海洋环境多光谱联合的多参数同步原位探测技术。①发挥光谱探测具有的非接触、免定标、快速响应等优势，开发基于多种光谱、多功能联合的探测技术，通过共享器件方式在一台设备中实现多种技术兼容并行，形成海洋多种参数的同步测量与监测能力。②开展多种技术的交叉验证，更精细地反映海洋实际状况，形成高通量、多参数的原位快速检测分析方法，攻关基于多光谱联合的水下原位定标、高灵敏度探测、准确定量分析、关键器件国产化等技术瓶颈。③研发紫外深海拉曼光谱仪，开展针对深海热液系统的多光谱联合探测技术应用；发展激光诱导击穿光谱与拉曼光谱联合的系统、具有多种光谱联合探测能力的新型光谱类传感器。

### （三）国际化海洋传感器检定校准测试体系建设

一是构建与国际评价体系接轨的我国海洋传感器检定校准测试体系，形成统一的海洋监测仪器测试环境。开展海洋传感器校准测试的基础理论方法研究，发展海洋传感器新传递量值标准器、量值溯源传递体系。建立海洋传感器标定、校准实验条件并达到国际一流水平，革新海洋传感器标定与校准体系并提高检定校准及评价水平。

二是借鉴国际海洋传感器评价方面的先进技术及标准，构建系统完备、运行高效的我国海洋标准化评价体系。建设计量校准检测技术支撑平台，形成海洋标准计量质量“三位一体”工作模式，体现严谨公正，达到国际领先水平。实施“海洋标准化+”工程，推动标准融入海洋领域各细分方向，改善标准制定、修订的速度与质量。

三是开展海洋监测仪器检测评价、标准化、质量控制方面的国际合作。建设全球海洋传感器计量检测技术交流合作平台，逐步扩大我国海洋传感器评价体系的国际影响力，推动海洋标准、海洋监测仪器计量校准结果的国际互认。

## 七、我国海洋监测仪器装备发展建议

### （一）构建海洋监测仪器装备创新体系

立足自主创新，支持海洋监测仪器基础性、原创性研究，开展新材料、新原理、新方法、新工艺

攻关，提高仪器设计、结构、材料、共性通用（通信、能源、防护）技术等方面的研究水平。

论证确立顶层规划，辨识主攻发展方向，争取重大项目支持，着力攻克制约行业发展的“卡脖子”技术。围绕海洋监测仪器核心关键技术，集中国内优势力量开展联合攻关，强化关键小件、敏感材料、基础工艺研发，实现核心技术自主可控，支撑海洋核心传感器与仪器行业优质发展。

构建“产学研用”协同创新体系，支持国产海洋监测仪器装备的推广应用，鼓励在战略性海洋科技工程中优先采用自主产品。发挥政策引导作用，面向国产海洋传感器和仪器装备，设立标准规范的制定、修订绿色通道；对国产化仪器设计指标要求宜合理适度，不片面追求高精度，转而关注稳定性和实用性；针对海洋监测仪器的软件开发、应用推广、维护服务等给予扶持，推动产品方案优化和迭代。

国家层面可协调多个管理部门，协同推动全球海洋观测系统建设。在我国海洋科学研究、海洋开发等逐渐由浅海走向深海，由国内走向全球背景下，利用商船、渔船开展基于志愿船的全球海洋观测系统建设价值明确，可由交通、气象、海洋等管理部门联合推动“船联网”建设，进而增强全球海洋观测系统能力。

### （二）壮大海洋监测仪器装备产业

建议出台海洋监测仪器产业发展激励政策，涵盖市场引导、市场投入、市场应用、专业人才培养，推动建立以企业为主体，高校、科研院所、企业协调运作的海洋监测仪器产业体系。建立多渠道、多元化的融资机制，强化海洋监测仪器产业的发展要素。设立海洋监测仪器科技成果孵化器、创投基金，激发创新创业热情和海洋监测仪器市场活力。

着力发展需求量小、亟待国产化的海洋监测仪器装备，建立企业参与的海洋环境监测仪器装备研发体系，由产业化公司主导仪器装备产品发展，覆盖基础科研、技术攻关、系统研制、试验验证、应用推广等环节。

鼓励科研业务单位积极采购和使用国产海洋监测仪器设备，给予用户一定的政策性优惠，将应用国产设备的比例纳入应用考核指标体系。根据国产

海洋监测仪器的功能、性能,科学设置评价指标,引导海洋监测仪器的精准示范和推广应用。

加大海洋技术专业人才培养力度,支撑海洋监测仪器装备产业高质量发展。人才是科技发展的关键因素,在作为代表性交叉融合学科的海洋监测仪器装备领域表现得尤为明显;而当前海洋监测技术专业人才培养不足,具有技术方向交叉背景的复合型人才稀缺,直接制约了产业发展高度。

### (三) 建设海洋公共试验基础设施

建设业务化运行的国家海洋综合试验场,形成长期、连续、实时、综合、面向真实海况(浅水、深水、背景场)的试验验证能力。在建设过程中即与国际主流的测试方法标准接轨,为海洋监测仪器及模型提供高质量、标准化的配套服务。

按需整合资源,合理支持已有实验基地的业务运行,建设国家海洋监测仪器装备公共检验检测平台、深远海监测仪器装备应用推广示范平台。开展真实海况下海洋监测仪器的可靠性、稳定性、环境适应性评估与评价,解决海上试验尤其是深远海试验的高风险、高成本、长周期问题。以公共试验基础设施支持海洋监测仪器产品定型和产品化,促进海洋高新技术企业和小微企业的良性发展。

对标国际海洋监测仪器标准,建立我国海洋监测仪器标准体系,实现与国际相关标准的接轨。在数据处理、管理模式、体系建设等方面形成系列标准和规范,优化我国现有海洋监测仪器装备标准的可实施性,为国产海洋监测仪器装备开拓国际市场筑牢基础。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** March 28, 2023; **Revised date:** April 25, 2023

**Corresponding author:** Wang Juncheng is a research fellow from the Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences) and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is marine monitoring technology and instrumentation. E-mail: wjc@sdoi.com

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of Marine Monitoring Instruments and Equipment in China” (2022-XY-21), “Research on the Construction and Industrialization Application Strategy of Marine Information Intelligent Perception Technology System in Shandong Province” (2022-DFZD-35),

and “Research on the Development Strategy of Marine Safety Engineering Science and Technology in the Future 20 Years” (2021-XBZD-13); Shandong Province Key Research and Development project (2023ZLYS01)

#### 参考文献

- [1] “中国海洋工程与科技发展战略研究”项目综合组. 世界海洋工程与科技的发展趋势与启示 [J]. 中国工程科学, 2016, 18(2): 126–130.  
Task Force for the Study on Development Strategy of China's Marine Engineering and Technology Comprehensive Research Group. Development trends and implication in marine engineering and technology [J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(2): 126–130.
- [2] 李双建, 于保华. 美国海洋战略研究 [M]. 北京: 时事出版社, 2016.  
Li S J, Yu B H. Maritime strategy of the United States [M]. Beijing: Current Affairs Press, 2016.
- [3] 陈明义. 海洋战略研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 2014.  
Chen M Y. Maritime strategy research [M]. Beijing: China Ocean Press, 2014.
- [4] “中国海洋工程与科技发展战略研究”海洋运载课题组. 海洋运载工程发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2016, 18(2): 10–18.  
Task Force for the Study on Development Strategy of China's Marine Engineering and Technology Marine Transportation Research Group. Research on China's development strategy for marine transportation engineering [J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(2): 10–18.
- [5] Alan P T, Harold V T. 海洋学导论 [M]. 张荣华, 李新正, 李安春, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2017.  
Alan P T, Harold V T. Essentials of oceanography [M]. Translated by Zhang R H, Li X Z, Li A C, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [6] 宋宪仓, 杜君峰, 王树青, 等. 海洋科学装备研究进展与发展建议 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 76–83.  
Song X C, Du J F, Wang S Q, et al. Research progress of marine scientific equipment and development: recommendations in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 76–83.
- [7] 韩林生, 王祎. 全球海洋观测系统展望及对我国的启示 [J]. 地球科学进展, 2022, 37(11): 1157–1164.  
Han L S, Wang Y. Prospect of global ocean observing system and enlightenment to China [J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(11): 1157–1164.
- [8] Cronin M F, Meinig C, Sabine C L, et al. Surface mooring network in the kuroshio extension [J]. IEEE Systems Journal, 2008, 2(3): 424–430.
- [9] Wang C Z, Zhang L P, Lee S K, et al. A global perspective on CMIP5 climate model biases [J]. Nature Climate Change, 2014, 4(3): 201–205.
- [10] Yu L S. Global air–sea fluxes of heat, fresh water, and momentum: Energy budget closure and unanswered questions [J]. Annual Review of Marine Science, 2019, 11: 227–248.
- [11] Wunsch C, Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2004, 36: 281–314.
- [12] Ferrari R, Wunsch C. Ocean circulation kinetic energy: Reser-

- voirs, sources, and sinks [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, 41: 253–282.
- [13] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling [J]. *Nature*, 2013, 501(7467): 403–407.
- [14] Chen X Y, Tung K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration [J]. *Science*, 2014, 345(6199): 897–903.
- [15] Claustre H, Antoine D, Boehme L, et al. Guidelines towards an integrated ocean observation system for ecosystems and biogeochemical cycles [EB/OL]. (2010-11-01)[2023-02-15]. [https://www.go-ship.org/Docs/Claustre\\_OO09.pdf](https://www.go-ship.org/Docs/Claustre_OO09.pdf).
- [16] 李三忠, 金宠, 戴黎明, 等. 洋底动力学——国际海底相关观测网络与探测系统的进展与展望 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(5): 131–143.  
Li S Z, Jin C, Dai L M, et al. Marine geodynamics—Advances and perspectives of international oceanfloor-related observatory network and exploration technique system [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 131–143.
- [17] 何琦, 汪鹏. 深海能源开发现状和前景研究 [J]. *海洋开发与管理*, 2017, 34(12): 66–71.  
He Q, Wang P. Current situation and prospect of deep sea energy development [J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(12): 66–71.
- [18] 孟祥尧, 马焱, 曹渊, 等. 海洋维权无人装备发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 49–55.  
Meng X Y, Ma Y, Cao Y, et al. Development of unmanned equipment in marine rights protection [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 49–55.
- [19] 章成, 杨嘉琪. 百年未有之大变局下的全球海洋治理: 变革趋势与中国应对 [J]. *决策与信息*, 2023 (3): 59–66.  
Zhang C, Yang J Q. Global ocean governance within a wider context of the once-in-a-century changes: Trends of change and China's response [J]. *Decision & Information*, 2023 (3): 59–66.
- [20] 吴立新, 荆钊, 陈显尧, 等. 我国海洋科学发展现状与未来展望 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 1–12.  
Wu L X, Jing Z, Chen X Y, et al. Marine science in China: Current status and future outlooks [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 1–12.
- [21] 刘建强, 蒋兴伟, 林明森. 我国海洋卫星发展历程、现状与建议 [J]. *卫星应用*, 2021 (9): 14–18.  
Liu J Q, Jiang X W, Lin M S. The development history, current situation, and suggestions of ocean satellites in China [J]. *Satellite Application*, 2021 (9): 14–18.
- [22] 程晓, 范双双, 郑雷, 等. 极地环境探测关键技术 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 921–931.  
Cheng X, Fan S S, Zheng L, et al. Critical technologies for detection of polar environment [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(7): 921–931.
- [23] 杨君琳, 杨长风, 毛国辉. 中国卫星导航建设现代化管理研究 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(2): 31–40.  
Yang J L, Yang C F, Mao G H. Modernized governance for the construction of China's satellite navigation system [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(2): 31–40.
- [24] Ma Y L, Zhang Q F, Wang H L. 6G: Ubiquitous extending to the vast underwater world of oceans [J]. *Engineering*, 2022, 8: 12–17.
- [25] 杨益新, 韩一娜, 赵瑞琴, 等. 海洋声学目标探测技术研究现状和发展趋势 [J]. *水下无人系统学报*, 2018, 26(5): 369–386.  
Yang Y X, Han Y N, Zhao R Q, et al. The competitiveness research on China shipbuilding industry [J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2018, 26(5): 369–386.
- [26] 禹润田, 李昊, 冯师军, 等. 潜浮标技术发展应用及展望 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2022, 39(1): 112–116.  
Yu R T, Li H, Feng S J, et al. Development, application and prospect of submarine buoy technology [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2022, 39(1): 112–116.
- [27] 汪嘉宁, 王凡, 张林林. 西太平洋深海科学观测网的建设和运行 [J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(6): 1471–1479.  
Wang J N, Wang F, Zhang L L. Construction and operation of a deep-sea scientific observation network in the western pacific [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1471–1479.
- [28] 李彦庆, 韩光, 张英香. 我国船舶工业竞争力及策略研究 [J]. *舰船科学技术*, 2003, 25(4): 61–63.  
Li Y Q, Han G, Zhang Y X. The competitiveness research on China shipbuilding industry [J]. *Ship Science and Technology*, 2003, 25(4): 61–63.
- [29] 孙秀军, 桑宏强, 李灿, 等. “黑珍珠”波浪滑翔器研发综述 [J]. *海洋科学*, 2020, 44(12): 107–115.  
Sun X J, Sang H Q, Li C, et al. Research review on “black pearl” wave glider [J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(12): 107–115.
- [30] 张鑫, 李超伦, 李连福. 深海极端环境原位探测技术研究现状与对策 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 932–938.  
Zhang X, Li C L, Li L F. In situ detection technology for deep sea extreme environment: Research status and strategies [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(7): 932–938.
- [31] 刘应都, 郭红霞, 欧阳晓平. 氢燃料电池技术发展现状及未来展望 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(4): 162–171.  
Liu Y D, Guo H X, Ouyang X P. Development status and future prospects of hydrogen fuel cell technology [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(4): 162–171.
- [32] 何琦, 汪鹏. 深海能源开发现状和前景研究 [J]. *海洋开发与管理*, 2017, 34(12): 66–71.  
He Q, Wang P. Current situation and prospect of deep sea energy development [J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(12): 66–71.