

海洋科考装备技术发展战略研究

董胜, 廖振焜, 于立伟, 李华军

(中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266100)

摘要: 海洋科考装备是发展海洋科学的重要基础。近年来我国自主研发的海洋科考装备接连取得突破, 部分装备已达到国际先进水平, 但依然存在诸多技术问题。本文以海洋科考装备发展战略需求为导向, 围绕科考船、潜水器、浮标潜标、海洋传感器和海洋观测系统等调研国内外海洋科考装备发展现状; 分析我国海洋科考装备技术发展在关键组件、技术发展、数据管理、基础保障、需求匹配等方面遇到的问题; 总结面向深远海和极地的绿色化、无人化、智能化、协同化的未来发展趋势; 梳理总体和各分类装备发展中需要注重的关键核心技术。在此基础上, 从梳理短板技术重点突破、加强统筹协调提高保障能力、完善创新机制促进多学科交叉融合、强化市场思维推动产业化进程、依托先进科考平台拓展国际合作等方面提出发展建议, 以期为进一步推动海洋科考装备快速发展提供参考。

关键词: 海洋科考; 深海装备; 极地海洋装备; 海洋观测系统; 智能化; 装备研发

中图分类号: T-1 **文献标识码:** A

Development Strategy for Marine Scientific Equipment and Technologies

Dong Sheng, Liao Zhenkun, Yu Liwei, Li Huajun

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: Marine research equipment is critical for the development of marine science. In recent years, China has made breakthroughs regarding the independent research and development of marine research equipment, and some types of the equipment have reached the advanced international level; however, technologies for the equipment still face various challenges. In this paper, the current status of the marine research equipment is reviewed, including research vessels, underwater vehicles, buoys, marine sensors, and marine observation networks. The problems encountered in the technical development of China's marine research equipment are analyzed from the aspects of key components, technology research and development, data management, basic support, and demand matching. The future development trends are summarized, namely, green, unmanned, intelligent, and collaborative development for deep sea and polar sea research needs. Meanwhile, the key and core technologies for the overall and each category of marine research equipment are analyzed. To provide references for further promoting the rapid development of marine research equipment, the following development suggestions are proposed: sorting out the technical shortcomings, strengthening the coordination of resources to improve supporting capacity, improving the innovation mechanism to promote interdisciplinarity, strengthening the role of the market to promote the industrialization process, and relying on advanced scientific research platforms to expand international cooperation.

Keywords: marine scientific research; deep-sea equipment; polar marine equipment; marine observation system; intellectualization; equipment development

收稿日期: 2023-04-05; 修回日期: 2023-05-08

通讯作者: 李华军, 中国海洋大学工程学院教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为海洋工程; E-mail: huajun@ouc.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋装备重大基础技术与创新能力建设战略研究”(2022-HYZD-07)

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

一、前言

海洋蕴含着丰富的油气资源、矿产资源、生物资源、化学资源、空间资源和可再生资源。在气候变化、人口增长、陆地资源枯竭以及生态和环境破坏等大背景下，发展海洋是必然趋势。海洋占到全球面积的71%，但目前人类对海洋的认知还远远不够。十八大以来，“建设海洋强国”成为重要的国家战略目标，十九大提出“陆海统筹，加快建设海洋强国”的战略部署，二十大再次强调要“加快建设海洋强国”。海洋科学技术的进步，是推动新时代海洋事业高质量发展、加快海洋强国建设的重要支撑。对海洋的探索和研究，围绕海洋暖化、海洋酸化、深海研究、北极研究等全球重大海洋问题开展科学考察工作^[1]，需要依托功能强大的海洋科考装备。

海洋科考装备具有高精尖技术集成度高，多学科交叉紧密，在海洋装备中具备前瞻性和引领性等特点^[2]。海洋科考装备能够衡量海洋科研创新技术水平，反映科研基础设施建设能力，该类装备的技术突破将带动其他海洋装备创新发展，以满足海洋防灾减灾、海洋环境保护、海洋资源开发、海洋安全保障等相关领域需求。

海洋科考装备经历了从“机械装备为主”到“计算机和自动化为主”再到“逐步迈向集成化、无人化、智能化和网络化”发展阶段^[3]。其覆盖的种类多样，分类方式不一，既包含各种运载平台，如科考船、潜水器和浮标潜标，也包含了实现具体科考功能的各类探测设备和传感器。此外由多种装备共同组成的观测网络系统也属于海洋科考装备的范畴。

目前在国际上，海洋科考装备仍由欧美国家、日本、俄罗斯等海洋强国所领先^[2]。近年来，我国自主研制的各类海洋科考装备接连取得重大突破，部分装备已达到国际领先水平^[4]，可更好地服务科学认知海洋、开发利用海洋、积极保护海洋和有效管控海洋等方面需求^[5]。从整体来看，我国海洋科考装备在装备级和部件级上进展较快，但在核心部件和元器件层面上突破不够，在材料、能源、通信、智能、工艺等方面依然存在诸多短板，受制于国外。

装备的整体性能和先进水平与关键核心技术的掌握程度息息相关，往往由于某些技术短板而导致

装备无法满足现实需求，与国外领先水平产生差距。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中指出围绕海洋工程、海洋资源、海洋环境等领域要突破一批关键核心技术。我国要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，把装备制造牢牢抓在自己手里，需要不断推动海洋科考装备关键核心技术攻关，提升自主创新能力。

当前我国海洋科考装备已进入发展的新阶段，尽快突破关键核心技术是实现海洋科考装备自主可控的重要前提。本文围绕科考船、潜水器、浮标潜标、海洋传感器和海洋观测网络系统等海洋科考装备，对国内外发展现状进行调研、梳理技术发展趋势和关键核心技术、总结装备发展面临的新需求新问题，并提出相应的发展建议，以期为进一步推动海洋科考装备快速发展提供参考。

二、国际海洋科考装备发展现状

(一) 科考船

目前全球拥有较大规模、具备多功能多用途的海洋科考船的国家主要有美国、俄罗斯、英国、德国、日本、挪威等海洋科研强国^[4]。其中科考船队实力最强的是美国，拥有70余艘长度大于30 m的船舶^[6]。欧洲也拥有数量众多的科考船，其中8艘科考船可在深海部署全套深海探测设备，9艘科考船具备破冰能力，24艘科考船可在冰区航行^[7]。日本的科考船主要集中在日本海洋科学技术中心(JAMSTEC)，该中心拥有全球级/大洋级海洋科考船6艘，包括一艘深海钻探船“地球号”，该船曾创下7740 m世界最深海底钻探纪录。俄罗斯对北极科考给予重点关注，拥有先进的极地科考船。2020年俄罗斯新型北极科学考察船“北极”号在圣彼得堡海军部造船厂下水，该船特殊的外形和功能设计，使其具备强大的北极长期观测能力。

(二) 潜水器

潜水器按是否载人可以分为两大类：载人潜水器(HOV)和无人潜水器(UUV)。无人潜水器种类较多，可进一步细分为有缆遥控水下机器人(ROV)和自主水下机器人(AUV)、水下滑翔机(UG)和近年新出现的自主遥控潜水器(ARV)等。

在载人潜水器方面,从1960年第一艘载人型潜水器“曲斯特I”号研制以来,国际上已研发多类型、具备全海深下潜能力的载人潜水器。美国、俄罗斯、日本、欧洲等国家和地区均建造了先进的载人潜水器,如美国的“阿尔文”号、“极限因子”号,俄罗斯的MIR系列,日本的“深海6500”号和法国的“鸚鵡螺”号等。国外目前拥有万米载人潜水器的国家仅有美国,日本正在规划建造万米级载人潜水器。

在无人潜水器方面,美国、俄罗斯、日本、欧洲等国家和地区的技术较为成熟,并形成系列化产品。ROV是最早得到开发和应用的无人潜水器,其商业化水平最高,欧美开展业务化的ROV已达到6000 m。在AUV领域,多潜深多用途的AUV已获得广泛发展,俄罗斯、法国等少数国家AUV业务化能力达到3000 m,其中俄罗斯建造的“勇士”号于2020年下沉至马里亚纳海沟的底部,成为世界上第一个到达海洋最深处的AUV。而ARV技术相对领先的国家有美国、英国、法国,以美国的伍兹霍尔海洋研究所最具代表性,其研制的ARV“Nereus”号,潜深可达11 000 m,具有AUV、ROV两种作业模式。水下滑翔机概念最早由美国提出,发展及应用主要集中于美国、法国、英国和澳大利亚等国家。目前斯洛库姆(Slocum),斯普雷(Spray),西格莱德(Seaglider)三型水下滑翔机是当前应用最多的水下滑翔机产品^[8]。

(三) 浮标潜标

浮标和潜标是海洋观测系统中的重要组成部分,相对其他海洋科考装备在观测时间和空间上具有优势。目前在全球范围内发展最快、应用最广的是Argo浮标。Argo地转海洋学实时观测阵计划由美国和日本于1998年推出,当前已在全球布设超4000枚Argo浮标,能实现2000 m水深内的海水温度、盐度和深度全球观测^[9]。潜标相对浮标更加隐蔽,以自容式观测仪器组成监测平台系统,相关先进技术当前主要由加拿大、美国、德国、英国等西方国家掌握,实现了水下测量数据实时下载和传输。

(四) 海洋传感器

自20世纪90年代以来,国际海洋传感器技术取得了长足的进步。海洋传感器功能强大,种类繁

多。常见的海洋传感器包括声学多普勒流速剖面仪(ADCP)、温盐深传感器(CTD)、潮位仪、测波仪、生物化学传感器(pH、溶解氧、硝酸盐、叶绿素、浊度)等,是海洋观测不可或缺的基础设备。海洋传感器也是市场化最深的海洋科考装备。在温盐深传感器方面,美国海鸟(Sea-Bird)公司的产品一直居于全球市场主导地位;美国洛克马丁斯皮坎公司和日本鹤见精机公司联合,垄断了投弃式剖面测量设备的市场。当前海洋传感器主要市场在欧美国家,占比近95%^[2]。但现在国际上海洋传感器已经近20年没有更新^[10],亟待开发新一代海洋传感器设备。

(五) 海洋观测系统

科考船、潜水器是单点海洋科考装备,由多种装备组成的海洋观测系统则是全方位、立体化对海洋进行探索和观测。美国是最早开展海洋观测系统建设的国家,2009年美国通过了“海洋观测行动”(Ocean Observatories Initiative)计划,旨在收集至少25年的海洋数据,该计划系统由多装备组成,同时观测多海洋要素^[11]。国际上其他国家也建立了各自的海洋观测网络,如加拿大海底观测网(ONC)、欧洲海底观测系统(EMOS)、日本海底观测网(DONET和S-net)等^[12]。在极地观测方面,美国经多年积累开始研发北极移动观测系统(AMOS)。另外,俄罗斯于2012年启动研发“北极综合监测系统”。

三、我国海洋科考装备发展现状

(一) 科考船

近年来,我国建造了一批具有强大海洋科研能力、达到国际先进水平的科考船,其中大部分由我国自主设计建造^[13],如综合科考船“嘉庚”号、“东方红3”号、“中山大学”号,新型地球物理综合科考船“实验6”号,极地科考船“雪龙2”号以及全球首艘智能型无人系统母船“珠海云”号等。这些科考船在搭载装备、功能实现、环境影响等方面均与国际先进水平看齐,如“东方红3”号是国内首艘获得水下辐射噪声最高静音科考级的科考船,“中山大学”号配备最新科考设备并具有I类无限航区全球航行能力。在组织运营方面,我国于

2012年正式成立国家海洋调查船队，统筹协调船只。成立之后不断加入新建造的科考船，调查船队整体向着综合化、大型化、谱系化发展。

（二）潜水器

在潜水器方面，我国自主发展突破显著，已初步形成“蛟龙”“潜龙”“海龙”三龙系列和“海马”“海星”“海斗”“海翼”“海燕”五海系列^[4]。潜水器国产率不断提升，突破了一系列关键技术。针对不同科考环境，在多个潜深研发对应装备，如我国首台用于冷泉科考的国产AUV“探索4500”。不论是载人潜水器还是无人潜水器，均建造有实现万米潜深的装备，如“奋斗者”号、“海斗”号和“悟空”号等。目前我国已具备进入世界海洋最深处进行科考和作业的能力^[14]。此外，通过成功建造“奋斗者”号，并已开展常态化深海载人科考作业，使我国成为当前世界上万米下潜次数和人数最多的国家^[15]。

（三）浮标潜标

我国开展海洋浮标技术研究较早，通过不断摸索逐渐走向了满足业务应用的成熟阶段，并已构造浮标业务化网络，正在运行的超200套，浮标型号以FZF3-1、SBF3-2和FZF4-1为主，包括大、中、小圆盘浮标以及波浪浮标等，构成了世界第二大锚系浮标监测网络^[6]。另外，通过在缅甸海布放我国第一个进入全球海洋观测系统的7000米级浮标“白龙”，打破了美国和日本的技术垄断^[7]。在环境恶劣的西风带海域，我国浮标可实现在位连续运行20个月。在小型化浮标领域，我国创新研制了“蓝海星”系列漂流式海气界面浮标，该浮标成本低、可靠性好，具备了全球业务化观测能力。在潜标研究方面，虽然我国研制起步较晚，但发展迅速，已能够建造实现6000 m实时数据传输的海底潜标系统^[18]，目前还有多款潜标设备正在海上试验^[19]。

（四）海洋传感器

进入21世纪以来，在国家高技术研究发展计划和国家重点研发计划等项目的支持下，我国物理海洋传感器技术得到了快速发展，突破了高精度CTD测量、海流剖面测量及海面流场测量等关键技术，取得了一批具有世界先进水平的高技术成果，并初

步实现了产品化。当前已成功研制了“OST”全系列温盐深测量仪，可适用于多种应用平台和海区，包括南北极海域、万米级深海海域，基本实现部件级的全国产化。“定点式温盐深测量系统”应用海试突破5915 m，创造了国产高精度温盐深测量仪最大试验水深记录^[20]。此外，在波浪传感器方面，已成功研制“前哨”系列波浪传感器，实现对波浪方向谱的观测。

（五）海洋观测系统

相比于欧美等发达国家和地区，我国的海洋观测网发展时间较短，经历了“十一五”时期规划，“十二五”时期建设，“十三五”时期拓展的发展过程^[21]。我国于2017年开始建设国家海底科学观测网，将在东海和南海典型海域实现从海底、水层到海气界面的长期实时立体综合观测^[22]。此外，我国基于自主开发的潜标在南海构建潜标观测网，并以此为基础发展“南海立体观测网”，已成为世界上规模最大的区域海洋观测系统^[23]。在全球海洋观测方面，自然资源部国家海洋技术中心正在建设“国家全球海洋立体观测网”。中国科学院海洋研究所自主建成西太平洋实时科学观测网并实现稳定运行，已成功获取多年温度、盐度和海流等数据。

四、我国海洋科考装备发展新需求新问题

（一）国产关键组件精度和可靠性有待提升

当前我国海洋科考装备已取得举世瞩目的进展，部分装备已达到国际先进水平，国产化水平不断提高。但也应该看到我国海洋科考装备主要在装备级和部件级上突破较快，如科考船、载人潜水器、浮标潜标等。而在核心部件和元器件层面上，突破不够，还大量依赖进口，如载人潜水器使用的大深度水密连接件、核心的导航定位元件，海洋传感器所用到的模拟数字（A/D）转换器、单片芯片、紫外探测光电二极管等。部分原因是因为国内暂未研发对标产品，但更多的是目前国内已有产品无法达到装备要求的精度和可靠性能。

（二）各项技术发展参差不齐，短板技术亟需突破

装备的整体先进水平会受制于处于短板的技术，目前我国在材料、能源、通信、结构、软件、

工艺等方面的技术发展参差不齐,一批关键技术和基础技术与国际先进水平仍有差距,亟需突破。如载人潜水器的耐压壳体建造方面,在材料上我国已取得很大突破,已研究出1000 MPa、1200 MPa级别强度的高强韧钛合金材料,然而目前在制备工艺技术上未能跟进,加工制造存在困难,制约了其在载人潜水器上的应用^[24]。

(三) 海洋大数据获取、处理和管理发展需求紧迫

海洋科考装备正向体系化、网络化发展,世界各海洋强国均在构造海洋观测网络。要实现“透明海洋”,需要依托足量的信息和数据。当前我国自主获取的海洋数据总量严重不足,区域碎片化、信息单一化、时空分辨率低、数据传输延期等问题显著^[9]。在增加数据获取的同时,随着装备智能化水平的推进,数据的处理、存储、传输等多方面能力需要大幅提升。在数据管理方面,我国已建立如国家海洋科学数据中心等数据库,但远远不足以满足需求,更多的数据还分散在各个高校、研究机构、企业,并且公开数据集较少,共享程度不够。

(四) 能源供给和作业保障能力还需加强

面向深远海和极地开展海洋科考工作,如何在更加恶劣的海洋环境条件下的科考作业时间,以实现更加长期的海洋观测,是各类海洋科考装备都要面临的问题。例如,延长科考船单次续航能力,在功能提升能耗增加的背景下保证远海大型浮标的能源供应,建造深海空间站实现水下长期驻留,构建水下观测网络开展业务化观测,这些均需要可靠的能源供给与保障相关技术。

(五) 装备研发与实际需求不匹配

近年来,我国各类海洋科考装备层出不穷,但也同时存在粗放式发展、重复建造等问题。自上而下的统一规划和资源调度需要进一步强化,装备发展与实际的科研需求、市场需求存在脱节。如科考船,国内诸多涉海单位已建造大量科考船,科考功能涵盖多学科领域,然而当前船舶能力和用船需求之间的供需不平衡问题依然突出。再如潜水器,目前国内潜水器的谱系化比较混乱,从研发到应用以及产业化出现断层,产业生态体系建设不足,不利于配套零部件的生产以及对接市场。

五、海洋科考装备未来发展趋势及关键核心技术

(一) 海洋科考装备技术未来发展趋势

1. 无人化

随着海洋科考逐渐走向深海和极地,面对更加恶劣的科考环境,在北极冰下、深海热液等极端环境,人类科考作业时间十分有限,也无法出舱作业。海洋面积广阔,平均水深超3800 m,要实现“透明海洋”目标需要更长期和广泛的观测。在深海探索方面,目前万米级载人潜水器仅能乘载2~3人,水下作业时间不超过1天^[14],科考效率较低,成本较高。而无人潜水器能以低得多的代价执行长时间的任务^[25]。无人化海洋科考装备在恶劣环境中作业具有优势。

2. 智能化

随着海洋科学的不断发展,科考任务更加复杂。智能化一方面能够辅助科考船、载人潜水器的操作人员,另一方面可以强化浮标潜标、AUV、水下滑翔机等无人装备的自主工作能力。智能化的海洋科考装备能够自动感知装备自身、周边环境、协同装备的信息,并实时做出处理分析。这在构造更加庞大复杂的海洋观测网络中显得极为重要。随着人工智能算法、新型传感技术的发展,各海洋科考装备的智能化程度不断发展,正在逐渐实现观测网络从“自动化”向“智能化”的升级换代^[26]。

3. 绿色化

在全球变暖、气候变化的大背景下,随着投入更多的科考装备以及开展更加频繁的科考活动,人们对科考装备在绿色环保、低碳高效、环境友好方面提出了更高的要求。以海洋科考船为例,先进科考船应围绕环境、安静、洁净的“一体化设计新理念”^[4],达到生命周期中以绿色环保、节能减排为原则的“绿色船舶”要求^[27],符合ICES CRR209和DNV Silent Class Notation对水下噪声的限制^[6]。未来将在节能高效、减少排放、新能源、新材料等方面开展更多的研究。例如,德国于2022年建造了一艘甲醛动力科考船“Uthörn”号,美国威斯康辛大学苏必利尔湖研究所(LSRI)准备建造一种新型低排放电池混合动力科考船,美国斯诺公司正在建造插电式混合动力科考船等。

4. 协同化

目前海洋科考观测已由点向面再向立体化方向发展,未来将形成“海陆空天潜”协同的立体观测网络,这使得单一的科考装备不能满足需求。不同装备定位功能不同,需要更多的装备协同作业,构造更加强大的海洋观测系统,以完成科考任务目标。如以科考船为信息中心,连接海洋卫星、水上无人机、沿岸台站、海面浮标、水下潜水器和海底观测网络,协调组织各装备,形成从天空至海底的立体海洋观测网络。当前已有多种科考装备协同作业的实践和经验,如美国和俄罗斯均已开展双载人潜水器水下协同作业;2018年,“深海勇士”号与“海马”号ROV开展有人/无人协同作业,共同对“海马冷泉”区开展科学考察;2020年“奋斗者”号与“沧海”号着陆器开展联合作业等^[15]。

(二) 海洋科考装备关键核心技术

为了推进深海、极地等海洋环境研究,构造全方位立体化的海洋调查能力,需要更加先进、功能更加强大的海洋科考装备。海洋科考装备种类繁多,各类科考装备既有普遍应用的通用技术,又有实现特定功能的专用技术,但未来无疑将从绿色、智能、设计制造等方面进行突破。在绿色低碳方面,需要开发节能技术、新能源利用技术、燃气排放处理技术、水下辐射噪声控制技术。在无人化、智能化方面,在加强数据收集和共享的基础上,搭建大数据平台,从而推进深度学习技术、人工智能技术、各设备集成互联技术、仿真模拟技术、人机交互技术、数字孪生技术等海洋科考装备中的应用。在发展硬件技术的同时,也应当重视发展程序、算法等软件技术,如浮体和锚系流固耦合动力响应分析技术、基于运动传感器的波浪反演技术、极区作业海洋科考装备的冰水动力学与结构性能分析技术等。当前我国在理论、设计、材料等方面已积累一定经验,部分已达国际先进水平,但受限于某些高端制造工艺能力不足,制造未能跟上,因此相关的配套技术也需要给予关注和推进。各分类装备关键核心技术梳理如下。

1. 科考船

在可预见的未来,科考船将继续在海洋科学研究、观测和监测中发挥关键作用,将向稳定可靠、环境友好、无人智能等方向发展,进一步集成更多

的科研仪器和设备,增强其在海洋科考中所起到的中枢作用。在数据收集和采样、自动化及人工智能等新技术迅速发展的背景下,可能会从根本上改变海洋研究的方式,朝着碳中和的方向发展也将改变科考船的设计方向。未来新建造的科考船将具备更多功能,配备更强大的科学仪器和设备,数据处理和数据传输能力更高,水下噪声特征降低,大型仪器的部署和回收能力增强。相应的海洋科考船总体设计技术、作业保障技术(动力定位技术、高精度航行控制技术、数据处理和通信技术)、极端环境(如极地)作业技术等方向需要重点发展^[28,29]。

2. 潜水器

我国已初步建立全海深和谱系化的不同类型深海潜水科考装备。随着观测深度和广度以及功能的拓展,潜水器装备和技术将不断革新。当前载人潜水器能够搭载人员较少,水下作业时间较短,未来将向多舱多人的大型化、延长生存作业能力等方向发展,如可供科研人员长期停驻的深海空间站。无人潜水器将从专业化、模块化、集群化、智能化等方面进一步发展。此外,为便于投放和布置,轻量化设计对于潜水器的运输方式以及工作方式可能产生变革性影响。从核心关键技术看,大深度水密连接器技术、潜水器轻量化设计与材料技术、多人多舱技术、载人无人潜水器协同作业技术、高速水声通信技术、极端环境下通信和精确导航技术、深海驻留技术、复杂环境智能感知技术等将是未来发展的前沿方向^[30,31]。

3. 浮标潜标

我国虽在近海建设了国家业务化海洋环境浮标监测网,但与发达国家相比,布网密度相对较低,且在智能化、网络化、全球化等方面存在很大的差距。目前Argo浮标阵列只能对浅于2000m的海洋进行观测,在极区还不具有智能探测海冰的能力,无法在非冰区上浮并与卫星的通信。面向深海和极地,迫切需要智能化、精细化的新一代海洋潜浮标装备,未来潜浮标技术将朝着生存能力更强、测量参数更多、智能化水平更高等方向发展,能源供给和数据传输能力需要跟进,包括海洋综合信息的智能传感测量技术、海洋环境智能感知技术、浮标的自主驱动智能应用技术、多源互补大功率供电技术、数据实时传输技术、自主组网与协同观测技术、深海大型浮标系留技术、数据压缩处理与加密

技术等^[16, 26]。

4. 传感器

当前国际海洋传感器已经近二十年没有更新换代，但是在过去二十年，材料技术、信息技术、集成电路技术等取得了很大的进步，可预想海洋传感器的重大突破将要来临。未来海洋传感器将向多参数化、小型化、模块化、智能化等方向发展。当前我国研发的传感器在部件级已取得较大突破，国产率不断上升，但用到的元器件依然大量依赖进口，并且在精度和稳定性方面需要进一步提升。其对应的重要技术有传感器长期稳定性技术、传感器材料及加工技术、传感器防污涂料涂层技术、高耐久度敏感材料制备技术、高集成度芯片级传感技术、光学多参数传感技术、传感器原始输出数据在线质量控制技术等^[32, 33]。

5. 海洋观测系统

海洋观测系统是现代海洋技术的集大成者，未来我国海洋观测系统将包括天基观测网，全球海气界面观测网，深远海水体观测网和海底观测网四个层次，形成对全球及核心海区海洋环境信息的实时、立体、高分辨率、多要素获取能力。这需要在能源、通信和材料等方面给予可靠保障。具体在新型海洋观测集成技术、海面移动和定点平台互连观测与探测技术、海底接驳盒技术、海底高效率高压高频电能变换技术、海底高稳定高压广域直流输电技术、海底工程布设技术、海底广域实时信息传输与精确时间同步技术、水下可插拔连接器应用技术等方面给予重点关注^[34, 35]。

六、我国海洋科考装备技术发展建议

党的二十大要求以国家战略需求为导向，集聚力量进行原创性引领性科技攻关，坚决打赢关键核心技术攻坚战。当前我国海洋科考装备发展面临的技术问题众多，应当发挥社会主义制度优势，统筹资源配置，走中国式海洋科考装备关键技术突破道路。通过完善科技创新体制机制，强化顶层设计和组织形式，明确海洋科考装备总体和各分类装备的关键技术优先级，基于不断健全的新型举国体制，集合高校、科研院所、企业等创新力量，加大经费投入，着重培养海洋交叉学科复合型人才，以国家重大工程与专项开展系统性攻关^[36]。

（一）梳理短板技术，重点突破关键问题

针对深海和极地等极端科考环境，应当定期对各科考装备研发过程中遇到的“卡脖子”或发展瓶颈技术进行摸底，找出制约海洋装备发展的关键核心技术问题，同时关注相应的配套技术能否满足要求，依托国家重点研发计划等国家项目和企业自主研发项目，整体推进海洋科考装备技术水平。

（二）加强统筹协同，提高基础保障能力

在国家层面，加强各海洋科考装备发展的顶层设计，对装备需求组织常态化调研，加强标准规范的制定，对装备产业链上、中、下游中的薄弱环节给与重点支持。在基础保障方面，建立国家级的海上试验场，强化国家海洋数据中心职能和海洋大数据管理，加强科考装备的基地建设。

（三）完善创新机制，促进多学科交叉融合

经过多年发展，我国在海洋科考装备方面已逐渐从模仿追赶转向自主发展，应当继续鼓励创新，完善创新体制机制。海洋科考装备的开发是一项系统工程，未来构造更加复杂的海洋观测系统需要更多领域的技术支撑，加强绿色、智能、无人、大数据、通信、网络、核能、遥控、材料、工艺等各种新技术融合。

（四）强化市场思维，以产品和服务为导向

鼓励高校、科研院所与企业之间开展切实的“产学研”合作，以开发产品为目标，注重高效成果转化，将技术研发落实为稳定可靠的海洋科考装备，不以论文论，而以产品论。以市场需求为导向，探索多种商业模式，前期加强推广，做好售后与服务，积累装备使用的反馈，优化装备性能，促进科考装备的良性循环发展。

（五）依托先进科考平台，拓展国际合作

当前我国已拥有世界领先水平的先进科考船队和深海载人潜水器，可集中优势，依托先进装备开展面向全球开放的海洋科考项目，拓展与国际间的合作。在合作中了解国际海洋科考的最新需求，交流海洋科考装备的发展趋势。通过在国际上引领重大海洋科学问题的研究，实现海洋科学的信息共享。

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: April 5, 2023; **Revised date:** May 8, 2023

Corresponding author: Li Huajun is a professor from the College of Engineering of Ocean University of China, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is ocean engineering. E-mail: huajun@ouc.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on Major Basic Technology and Innovation Capability Development of Marine Equipment” (2022-HYZD-07)

参考文献

- [1] 高峰, 王辉, 王凡, 等. 国际海洋科学技术未来战略部署 [J]. 世界科技研究与发展, 2018, 40(2): 113–125.
Gao F, Wang H, Wang F, et al. Future strategic deployment of international marine science and technology [J]. World Sci-Tech R & D, 2018, 40(2): 113–125.
- [2] 中国海洋装备工程科技发展战略研究院. 中国海洋装备发展报告 2021 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2021.
China Strategy Institute of Ocean Engineering. China marine equipment development report 2021 [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2021.
- [3] 牟健. 我国海洋调查技术的发展 [J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(10): 78–82.
Mou J. The development of China’s marine survey equipment technology [J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(10): 78–82.
- [4] 吴刚, 秦琦. 中国海洋科考装备的现状分析与建设展望 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 166–182.
Wu G, Qin Q. Present status and development proposals of marine research equipment in China [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 166–182.
- [5] 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.
- [6] 孙月明, 李茂林, 姚忠山. 海洋调查船装备建设发展趋势研究 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(19): 170–174.
Sun Y M, Li M L, Yao Z S. Research on the development trend of marine research vessels equipment construction [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(19): 170–174.
- [7] Nieuwejaar P, Mazauric V, Betzler C, et al. Next generation European research vessels: Current status and foreseeable evolution [R]. Ostend: European Marine Board, 2019.
- [8] 李硕, 赵宏宇, 封锡盛. 中国深海机器人研究进展与发展建议 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 49–59.
Li S, Zhao H Y, Feng X S. Research progress and development suggestions on deep-sea unmanned underwater vehicles in China [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 49–59.
- [9] 吴立新, 陈朝晖, 林霄沛, 等. “透明海洋”立体观测网构建 [J]. 科学通报, 2020, 65(25): 2654–2661.
Wu L X, Chen C H, Lin X P, et al. Building the integrated observational network of “Transparent Ocean” [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(25): 2654–2661.
- [10] 闫亚飞. 海洋传感器产业分析报告 [J]. 高科技与产业化, 2021 (307): 44–51.
Yan Y F. Report of marine sensor industry analysis [J]. High-Technology & Commercialization, 2021 (307): 44–51.
- [11] 陈书海, 顾春卫. 国内外海洋观测网现状分析 [C]. 北京造船工程学会: 2018—2019年学术论文论, 2020: 026556.
Chen S H, Gu C W. Analysis of the current status of domestic and international ocean observation networks [C]. Naval Architecture and Marine Engineering: 2018—2019 Academic Proceedings of Beijing Society of, 2020: 026556.
- [12] 吴园涛, 任小波, 段晓男, 等. 构建自立自强的海洋科学观测探测技术体系的思考 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 861–869.
Wu Y T, Ren X B, Duan X N, et al. Thoughts on constructing self-reliance and self-strengthening marine scientific observation and detection technology system [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 861–869.
- [13] 陈连增, 雷波. 中国海洋科学技术发展 70 年 [J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 3–22.
Chen L Z, Lei B. Marine science and technology development over the past 70 years in China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 41(10): 3–22.
- [14] 杨波, 刘焯瑶, 廖佳伟. 载人潜水器——面向深海科考和海洋资源开发利用的“国之重器” [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 622–631.
Yang B, Liu Y Y, Liao J W. Manned submersibles—Deep-sea scientific research and exploitation of marine resources [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(5): 622–631.
- [15] 徐芑南, 胡震, 叶聪, 等. 载人深潜技术与应用的现状和展望 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 36–48.
Xu Q N, Hu Z, Ye C, et al. Present situation and prospect of deep-sea manned submersible technology and its application [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 36–48.
- [16] 王军成, 厉运周. 我国海洋资料浮标技术的发展与应用 [J]. 山东科学, 2019, 32(5): 1–20.
Wang J C, Li Y Z. Development and application of ocean data buoy technology in China [J]. Shandong Science, 2019, 32(5): 1–20.
- [17] 路晓磊, 陈默, 王小丹, 等. 我国海洋水文调查设备的发展历程 [J]. 海洋开发与管理, 2020 (9): 44–48.
Lu X L, Chen M, Wang X D, et al. Developing history of marine hydrologic survey equipment in China [J]. Ocean Development and Management, 2020 (9): 44–48.
- [18] 李楠, 黄汉清, 赵晓. 水下实时观测潜标系统技术发展 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4(2): 99–106.
Li N, Huang H Q, Zhao X. Research on technology development of underwater real-time observation submerged buoy system [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2021, 4(2): 99–106.
- [19] 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 (1): 112–120.
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 (1): 112–120.
- [20] 李春芳, 贾文娟. 打造海洋调查国产利器 [EB/OL]. (2021-04-

- 08) [2023-01-30]. https://www.mnr.gov.cn/dt/hy/202104/t20210408_2619682.html.
- Li C F, Jia W J. Build domestic sharp tools for marine research [EB/OL]. (2021-04-08) [2023-01-30]. https://www.mnr.gov.cn/dt/hy/202104/t20210408_2619682.html.
- [21] 马蕊, 赵修涛, 柳存根. 海洋水下立体观测技术装备发展研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 19–25.
- Ma R, Zhao X T, Liu C G. Development of marine equipment for underwater stereoscopic observation [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 19–25.
- [22] 吕枫, 翦知湔. 海底观测网技术研究与应用进展 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 79–91.
- Lyu F, Jian Z M. Technology research and application progress of seafloor observation network [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 79–91.
- [23] 王红梅. 二十年磨一剑 深耕南海踏浪行——记“南海立体观测网”的构建与应用 [EB/OL]. [2023-01-30]. <https://news.ouc.edu.cn/hlg78/>.
- Wang H M. Two decades of construction in the South China Sea—The construction and application of “South China Sea Stereo observation Network” [EB/OL]. [2023-01-30]. <https://news.ouc.edu.cn/hlg78/>.
- [24] 杨锐, 马英杰. 深潜装备用关键材料现状与展望 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 145–156.
- Yang R, Ma Y J. Status and prospect of key materials for deep submergence facilities [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 145–156.
- [25] 汪品先. 从南海 10 年展望深海科技前景 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 9–19.
- Wang P X. Decadal survey in the south china sea: prospects of deep-sea technologies [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 9–19.
- [26] 王军成. 新一代海洋监测技术——综合智能观测浮标 [J]. 智能系统学报, 2022, 17(3): 447.
- Wang J C. A new generation of ocean monitoring technology—Comprehensive intelligent observation buoy [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2022, 17(3): 447.
- [27] 郑洁, 柳存根, 林忠钦. 绿色船舶低碳发展趋势与应对策略 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 94–102.
- Zheng J, Liu C G, Lin Z Q. Low-carbon development of green ships and related strategies [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 94–102.
- [28] 叶松, 周树道, 李争. 科考船总体设计及关键技术研究 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(6): 57–61.
- Ye S, Zhou S D, Li Z. Research on the overall design and key technologies of scientific research vessel [J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(6): 57–61.
- [29] 朱英富, 刘祖源, 解德, 等. 极地船舶核心关键基础技术现状及我国发展对策 [J]. 中国科学基金, 2015, 29(3): 178–186.
- Zhu Y F, Liu Z Y, Xie D, et al. Advancements of the core fundamental technologies and strategies of China regarding the research and development on polar ships [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2015, 29(3): 178–186.
- [30] 吴有生, 赵羿羽, 郎舒妍, 等. 智能无人潜水器技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 26–31.
- Wu Y S, Zhao Y Y, Lang S Y, et al. Development of autonomous underwater vehicles technology [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 26–31.
- [31] 徐文, 李建龙, 李一平, 等. 无人潜水器组网观测探测技术进展与展望 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 60–78.
- Xu W, Li J L, Li Y P, et al. Networks of unmanned underwater vehicles for ocean exploration: advances and prospects [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 60–78.
- [32] 李红志, 闫晨阳, 贾文娟. 海洋温盐深传感器技术自主创新与产业发展的几点思考 [J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(3): 249–256.
- Li H Z, Yan C Y, Jia W J. Some thoughts on independent innovation and industrial development of ocean ctd sensor technology [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(3): 249–256.
- [33] 耿家营. 海洋扫描声呐技术综述 [J]. 中阿科技论坛(中英文), 2022, 43(9): 128–132.
- Gen J Y. Survey of marine scanning sonar technology [J]. China-Arab States Science and Technology Forum (Chinese and English), 2022, 43(9): 128–132.
- [34] 李林阳, 柴洪洲, 李姗姗, 等. 海洋立体观测网建设与发展综述 [J]. 测绘通报, 2021 (5): 30–37, 95.
- Li L Y, Chai H Z, Li S S, et al. Summary of the establishment and development of marine stereoscopic observation network [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021 (5): 30–37, 95.
- [35] 张涛, 夏茂栋, 张佳宇, 等. 水下导航定位技术综述 [J]. 全球定位系统, 2022, 47(4): 1–16.
- Zhang T, Xia M D, Zhang J Y, et al. Review of underwater navigation and positioning technology [J]. GNSS World of China, 2022, 47(4): 1–16.
- [36] 李哲. 面向国家战略需求的关键核心技术攻关组织模式研究 [J]. 人民论坛·学术前沿, 2023 (1): 12–22.
- Li Z. Research on the organizational model of core technology research in key fields for national strategic needs [J]. Frontiers, 2023 (1): 12–22.