

海洋科学装备研究进展与发展建议

宋宪仓, 杜君峰, 王树青, 李华军

(中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266100)

摘要: 海洋科学装备是知海、用海、护海的重要基础。本文从深入认知海洋、合理利用海洋、积极保护海洋、有效管控海洋四方面对我国海洋科学装备的需求进行了剖析, 系统梳理了世界海洋强国在海气界面观测装备、水下移动式观测装备、海底观测网络系统等海洋科学观测平台领域的发展现状, 总结了未来海洋科学装备的发展趋势; 阐述了我国在海洋遥感卫星、海洋科考船、海洋深潜器、海底观测网络等海洋科学装备领域取得的进展, 对标国际先进水平分析了通用技术、核心装备、集成系统等方面存在的差距与不足。研究提出了适合国情的发展建议, 包括基础理论研究和关键技术突破、新型海洋科学装备研发和成果转换、海洋科学装备共享机制和综合服务平台、国际合作机制和标准体系建立, 以期海洋科学装备更好服务于国家海洋强国战略实施提供方向参考。

关键词: 海洋科学装备; 深海观测平台; 海气界面观测; 水下移动式观测; 海底观测网络; 装备研发

中图分类号: T-1 **文献标识码:** A

Research Progress of Marine Scientific Equipment and Development Recommendations in China

Song Xiancang, Du Junfeng, Wang Shuqing, Li Huajun

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

Abstract: Marine scientific equipment is an essential tool for better understanding oceans, and it is also the foundation for exploiting and protecting oceans. This study analyzes the urgent requirements for developing highly efficient marine scientific equipment in China from four aspects, including understanding oceans, exploring oceans, protecting oceans, and maintaining ocean rights and interests. In addition, it provides reviews on the state-of-the-art techniques associated with the marine scientific observation platforms, namely air-sea interface observation platform, mobile underwater observation platform, and seafloor observation network system, in the countries that are believed to lead the field, and the development trends associated therewith are then identified. The remarkable achievements obtained in marine scientific equipment in China are presented such as the marine remote-sensing satellites, marine research ships, deep-diving submersibles, and seafloor observation networks. By comparing to the international advanced level, the issues China encountered in the general technologies, core equipment, and integrated system of marine scientific equipment are given. Several key development suggestions associated with the marine scientific equipment development in China are provided in terms of basic theories and key technologies, novel equipment development and achievement conversion, sharing mechanism and service platform, as well as international cooperation and standard system establishment, enabling the marine scientific equipment to better serve the implementation of the national marine power strategy.

Keywords: marine scientific equipment; deep-sea observation platform; air-sea interface observation; mobile underwater observation; seafloor observation network; equipment development

收稿日期: 2020-10-25; 修回日期: 2020-11-09

通讯作者: 李华军, 中国海洋大学工程学院教授, 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“海洋装备发展战略研究”(2020-ZD-02)

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

一、前言

海洋蕴藏着丰富的生物资源、矿产资源、药物资源、空间资源、海水资源和多种能源,是人类解决资源短缺、拓展生存发展空间战略必争之地。深入认知海洋科学奥秘、高效开发利用海洋资源、有效保护海洋环境、有力维护海洋权益都离不开海洋科学的发展和海洋科学装备的支撑。

海洋科学装备是在自然条件下观测海洋中自然现象、规律所采用的工具,在海洋科学研究中起着重要作用甚至是决定性作用,主要分为:①海洋观测/探测传感器,如干涉高度计、海洋激光雷达、合成孔径雷达、海洋通量传感器、温盐深传感器、声学多普勒流速剖面仪、海洋生物探测仪、多类型声学传感器、多类型地磁探测传感器等;②海洋观测/探测平台,如海洋遥感卫星、水面科考船、多类型水面浮标、多类型水下潜标、多类型深潜器、多参数水下滑翔机、自沉浮式剖面探测浮标等;③海洋通信传输装备,如空中无线通信装备、水面微波通信装备、水下声学通信装备、水气界面通信中继装备、海洋数据智能处理分析装备等[1]。

国内外高度重视海洋科学装备的研发,发布了一系列科技发展计划、中长期发展规划,支持高端海洋科考船、海洋观测设备、海洋探测平台的建设。随着海洋研究领域朝着深远海、南北极拓展,知海、用海、护海对智能化、自动化、高端化的海洋科学装备提出了新要求,未来15年将是高端海洋科学装备发展的关键阶段。系统梳理海洋科学装备的发展现状,凝练我国相关装备的短板和不足,思考我国海洋科学未来发展方向和发展策略,以期为我国海洋科学装备的快速稳健发展提供理论依据。

二、海洋科学装备需求分析

(一) 科学认知海洋的需求

海洋对人类的生存和发展至关重要。一方面,海洋作为全球气候调节器,向大气提供了70%的氧气和87.5%的水汽,同时存储了大量的热量;另一方面,海洋作为全球物理系统的重要组成部分,其中的质能过程、生物过程、地质过程变化会对海洋和陆地生命产生显著影响。海洋面积约占地表总面积

的71%;相比海洋面积,水深大于200 m的黑暗海洋占比为95%,水深大于3000 m的深海海洋占比为89%。人类对海洋的探知和了解程度很低,集中在浅海、近海区域,而深远海、南北极是人类知之甚少的科学“盲区”;由于缺乏对深海、极地等重要区域的认知,人类尚无法解读海洋中的某些特殊现象和规律[2]。

科学认知深远海和南北极的物理、化学、生物、地质过程,需要以海洋科学装备为支撑。目前,海洋强国已经研发了可在深海海域工作的载人潜器、适用于全海深的无人潜器,在部分海域布置了海底观测网络、移动式观测系统;然而,现有观测装备几乎不具备智能属性,在空间布局上以点、线为主,覆盖面较小,且2000 m深度以下的深海观测尚属空白。因此,需要进一步发展高端海洋科学装备,构建全海深、一体化、实时、高时空分辨率的观测能力。

(二) 开发利用海洋的需求

资源和能源是人类生存发展的物质基础。随着经济社会的高速发展,我国油气资源的对外依存度不断攀升,能源保障形势较为严峻。广阔的海洋,尤其是深海作为尚未被人类充分认知和利用的潜在资源宝库,蕴藏了地球上绝大部分的锰、钴、铜、镍等金属矿物和丰富的油气资源、可燃冰等。深海资源和能源的开发利用,对我国资源供应安全、国民经济发展具有战略价值。

海洋资源和能源大部分赋存于深海海底,开发利用难度极大。我国对深海海底成矿成藏机理的认知还不够充分,无法实现海底地质调查、海底地球物理场长时间探测;南海可燃冰即将进入大规模开采阶段,对海底地质稳定性监测、海底环境保护提出了新要求;对于太平洋、西印度洋多金属硫化物矿区的开采区块,迫切需要精选成矿富集区域以满足《联合国海洋法公约》规定的专属勘探权区块要求[1]。因此,需要发展和应用高端海洋科学装备来推进海洋资源的开发利用。

(三) 积极保护海洋的需求

当前,我国海洋环境保护面临着严峻挑战。受工业废水排放、近海养殖活动的影响,近海海域的水质存在较严重的污染,导致赤潮和浒苔时常爆发、

海岸生态系统退化 [2]。近海海域的污染物随着洋流移动逐渐向深远海转移, 每年约有数百万吨海洋垃圾流入深远海, 绝大部分被洋流携带至海底峡谷, 对深远海生态系统造成破坏。在深海资源和能源的开发过程中, 海洋工程事故屡有发生, 原油泄漏、有害物质释放等破坏了附近海域的生态环境 [3]。

由于缺乏对近海、深远海海域的连续立体综合观测能力, 导致难以判断海洋环境问题的起源和演化过程, 无法认知海岸带、海洋整体系统对自然灾害的反应, 制约了海洋环境问题的根本性解决。需要进一步发展海洋科学装备, 建立完善海洋立体观测系统, 实现对关键海域的精确、实时、动态观测, 为海洋物理、海洋化学、海洋生物、海洋地质过程研究提供基础数据支持 [4]。

(四) 有效管控海洋的需求

海洋事关国家利益和长远发展, 涉海国家高度重视海洋权益。除渤海以外, 我国黄海、东海、南海海域与周边国家均存在领海争议 [5]。我国领海海域水面和水下监测装备匮乏, 水下安全问题突出, 不利于海洋国土安全、海洋空间权益的有效保护。

近年来, 世界海洋强国纷纷在深远海、公海大洋、南北极等新的海洋疆域拓展空间, 开展新一轮的“蓝色圈地”活动。提升深远海、极地认知能力和装备水平, 成为维护国家海洋权益、保持国际性海洋资源话语权、赢得海洋发展竞争优势的重要支撑。在认知海洋、开发利用海洋的基础上, 利用自动化、智能化的海洋科学装备, 构建我国的空/天/海基立体观测和预警系统, 支持“一带一路”建设, 拓展深远海、南北极等海洋新疆域。

三、国际海洋科学装备发展现状

(一) 海气界面观测装备

海水与大气的交界面即为海气界面, 海洋与大气在此区域发生能量交换和物质迁移。海气界面观测为基础研究提供支撑, 如海气多尺度相互作用、跨圈层气-流-固耦合机制等。

1. 海洋遥感卫星

美国 1978 年发射了世界首颗专用海洋卫星, 搭载主动式和被动式微波传感器、雷达高度仪、微波测风散度计、合成孔径雷达等探测设备, 波高测

量精度约为 2~20 cm [6]; 后续发射了海洋水色专用监测卫星、海面风速测量卫星、海面风场测量卫星, 建成了第三代“白云”电子侦察型海洋监视卫星系统 [7]。欧洲重点发展综合观测卫星系统, 由多颗海洋遥感卫星构成; 2010 年发射的“冷卫星-2”观测卫星携带合成孔径干涉雷达高度计, 测量对极地冰盖的表面高度变化率、海洋浮冰厚度和面积等 [6]。1967—1989 年, 苏联发射了 32 颗实用型海洋监测卫星, 建成了“宇宙”卫星系统, 由电子型海洋监视卫星、核动力雷达海洋监视卫星构成。日本 2012 年发射的“水珠”号卫星配备了微波辐射计, 空间分辨率较高, 可对全球降水量、水蒸气量、海洋风速、温度等参数进行测量; 后续发射了多颗海洋监测专用卫星, 构建了全球海洋 24 h 监测体制 [6]。

2. 海洋科考船

美国拥有世界上数量最多、设备最先进的海洋科考船队, 含全球级科考船 16 艘、大洋级科考船 23 艘、地区级科考船 6 艘、当地级科考船 6 艘; 例如, “斯库里奥克号”极地科考船配备了艏侧推器, 静水最大航速为 26.3 km/h, 破冰等级为 PC5, 自持力为 45 d [8]。欧洲拥有数量庞大、设备先进的科考船队, 如英国拥有大洋级科考船 3 艘, 法国拥有大洋级科考船 4 艘, 德国拥有全球级新型综合科考船。英国“RSS 大卫·阿滕伯勒爵士号”极地科考船, 破冰等级为 PC4, 静水最大航速为 31.9 km/h, 自持力为 60 d; 配置专业科考仪器和设备, 对大气、海洋、海底圈层进行科考研究。此外, 日本“Kaimei 号”海洋科考船续航能力为 1.67×10^4 km, 航速约为 22.22 km/h, 配备动力定位系统、3000 m 长 4 缆三维地震测量系统、12 000 m 长温盐深剖面仪装置, 3000 米级无人缆控深潜器 (ROV) 海底资源取样装置等, 可执行海底资源分布、生成环境调查, 大气及海洋环境变化调查等科考研究。

(二) 水下移动式观测装备

水下移动式观测装备一般分为载人深潜器 (HOV)、ROV、无人自主式深潜器 (AUV)、水下滑翔机等, 可以搭载不同类型的传感器和采集设备, 对海面到海底大范围区域进行详细探测 [9]。

1. 载人深潜器

美国“阿尔文号”深潜器是世界上最早的载

人深潜器,设计下潜深度为 1829 m,可到达全球约 63% 的海底,单次下潜作业时长为 6~8 h,主要用于海洋生物采集、海洋地质调查、海洋遗迹考察等;2012 年美国伍兹霍尔海洋研究所升级改造了“阿尔文号”,使其设计下潜深度拓展至 6500 m;累计完成下潜作业超过 5000 次 [10]。法国“鸚鵡螺号”深潜器建于 1985 年,设计最大下潜深度为 6000 m,累积下潜作业 1700 余次,主要用于多金属结核区域勘探、深海海底生态系统调查和沉船、有害废料搜索等。日本“深海 6500”载人深潜器建于 1989 年,设计最大下潜深度为 6500 m,单次下潜作业时长为 8 h,累计下潜 1000 余次,完成了海洋斜坡、断层调查,日本海域地震、海啸观测研究。

2. 无人缆控深潜器

美国“Jason 号”ROV 由配套母船提供动力并控制作业,深潜器本身采用高耐压浮力材料,在水下作业过程中处于自由悬浮状态;最大下潜深度为 6500 m,配备了声呐、影像、照明、数字采样系统,具有高精度的水下探测和采样能力 [11];累计下潜作业超过 1000 次,平均下潜作业时长为 21 h,最大下潜作业时长达 100 h。其他代表性装备有法国 6000 米级 Victor6000 ROV,英国 1000~3000 米级 Demon、Venom 系列 ROV,日本 7000 米级 Kailo ROV 等。

3. 无人自主式深潜器

AUV 能够自主控制水下航行、自主进行水下探测,在军事领域具有较好的应用前景,世界海洋强国高度重视此类深潜器的研制 [10]。具有代表性的是美国“Sentry 号”“REMUS 号”深潜器:前者设计下潜深度为 6000 m,通过智能算法控制深潜器规避水下障碍物,实现水下完全自主航行,既可水下独立作业,又可与其他 HOV 或 AUV 协同作业;后者作为多任务小型潜水器,体积和重量更小、能耗更低、续航能力更强,可携带远程环境监测装置,目前已形成谱系化装备。

4. 水下滑翔机

水下滑翔机是一种新型的水下移动式观测装备,通过调整净浮力和姿态角度获得推进力,能耗极小,具有效率高、续航能力强、维护费用低、可重复使用的优点,适用于长周期、大范围的海洋探索。美国水下滑翔机技术非常成熟,发展了斯洛库姆、Spray、海洋滑翔机等多个系列,可靠性和实

用化程度较高,部分产品实现商业化。2008 年,法国 ACSA 公司发布了商业化的混合推动水下滑翔机,可在 AUV、滑翔机工作模式之间切换,结合水下声学定位系统可实现水下自主定位,适用于长期海洋监测和冰下测量。

(三) 海底观测网络

海底观测网络指将多种观测仪器设备安置在海底,对海水层、海底层、海底岩石层进行全天候、长期、动态、实时原位观测的平台 [7],一般由海底观测节点、海岸基站组成;通过电缆网络将海底基站和各观测节点(分布在海底)连接起来形成系统,观测数据可用于自然灾害、气候变化、海洋生态系统研究。

美国海洋观测网(OOI)属于有缆长期观测网络,2016 年建成,分为区域网、近岸网、全球网三部分:区域观测网是由长度为 880 km 的海底光纤电缆将 7 个海底主节点串联而成,近岸观测网、全球观测网均由深海试验平台和移动式观测平台组成。OOI 实现了从海面到海底全范围的立体观测、从厘米级到百米级的跨尺度观测、从秒级到年代级的跨时空观测,主要用于海洋化学循环、极端环境生命、海洋地质过程、海洋动力变化、海啸等关键性海洋过程的精确观测 [12]。

加拿大海底观测网络(ONC)为有缆观测网络,包括维多利亚海底试验站、“海王星”海底观测网:前者为海洋观测技术和相关设备的原位试验提供试验平台,同时配备了用于研究 300 m 水深海洋和生物作用的多类型传感器;后者是由长度为 800 km 的海底光纤电缆将 5 个海底主节点进行串联而形成的主干网络,可对离岸 300 km,水深 20~2660 m 的海洋环境进行长期、动态观测。ONC 重点开展海底地质过程、生物过程、化学过程的长期、实时、连续观测,在海气相互作用、海洋灾害监测、海洋污染监控、海洋资源勘探、海洋权益于海洋安全、海洋科技创新等方面发挥了重要作用 [12]。

欧洲海底观测网络(EMSO)是覆盖欧洲主要海域的分散式科研观测网络系统,由一系列具有特定功能的海底及水体观测装备组成,包含 4 个浅海海底试验节点、11 个深海海底节点;对海洋水体、海洋生物、海底圈层及其相关作用过程进行长期、连续、实时观测,为海洋气候变化、海洋灾害预测、

海洋生态系统演变等研究提供观测数据。EMSO 的特色在于发展多学科、多目标、多时空尺度的海洋观测能力,但受限于经费、环境许可等因素,相关能力尚未完全建成;部分节点已经处于运行状态,获得了丰富的观测数据 [12]。

日本在其领海布设了地震和海啸观测密集网络 (DONET、DONET2),在日本海沟海底构建了地震海啸观测网络 (S-set)。DONET 包含 22 个密集观测点 (间距约为 15~20 km),以有线方式连接在一起,实现了观测数据的实时传输。DONET2 通过长度为 450 km 的复合缆将 2 个登陆点、7 个科学节点、29 个观测平台连接在一起,形成实时观测网络能力。DONET、DONET2 密集覆盖了日本从近岸到海沟的广阔海域,为日本南部海域地震和海啸预警提供了实时监测数据。S-net 观测网络由 6 个子系统组成 (每个子系统包含长度为 800 km 的复合缆线、25 个观测站),连接在各个子系统之间的复合缆线总长度约为 5700 km,覆盖海域面积达 $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$;实现了每个里氏 7.5 级地震源区配置 1 个观测站的布局目标,使地震预警有望提前 30 s,海啸预警提前 20 min [12]。

四、我国海洋科学装备发展现状

限于基础研究积累不足、国外技术严格封锁,我国海洋科学装备整体发展缓慢,尚未形成完善的体系;目前主要在部分重点方向上实施突破,力争尽快构建多层次、多维度、多平台协同的海洋立体观测/探测能力。经过多年发展,我国“深海进入”能力明显增强,并逐步转向“深海探测”“深海开发”新阶段。

(一) 海洋遥感卫星

我国利用空间遥感手段开展海洋研究起步较晚,2002 年发射了“海洋一号”卫星,作为实验性业务卫星用于海洋水色探测。后续进展较快,2011 年发射了“海洋二号”A 卫星,配备了星载铷原子钟、微波遥感器,可全天候、全时段、大范围地获取海洋动力环境数据,为灾害性海洋环境预警预报提供了实测数据;2016 年发射了“高分三号”卫星,配置了 C 频段多极化合成孔径雷达,可对全球陆地及海洋资源进行全天候、全时段的监测;

2018 年发射了“海洋一号”C 卫星、“海洋二号”B 卫星、中法海洋卫星,与后续发射的“海洋二号”C、D 卫星,“观澜号”海洋科学卫星组网运行,共同支持海洋灾害预警监测、海洋生态环境监测、极地海冰与航行保障等。

(二) 海洋科考船

近年来,我国着力提升海洋科考装备的技术水平,促使海洋科考船队向综合性、现代化、大型化、谱系化方向发展,形成了“向阳红”系列、“雪龙”系列、“东方红”系列、“大洋”系列科考船队,基本满足近海、中海、远海、南北极的海洋科考需求。“东方红 3 号”科考船是一艘大洋级综合科考船,国内首艘、国际第 4 艘获得水下辐射噪声最高等级—静音科考级证书。“中山大学号”科考船是国内规模最大、全球排名第 3 位的海洋综合科考实习船,设计排水量约为 6800 t,自持力约为 60 d,续航能力约为 $2.778 \times 10^4 \text{ km}$;具有 I 类无限航区全球航行能力,配备先进科考和科研设备,执行定点、走航式连续探测任务。

(三) 海洋深潜器

近年来,我国在 HOV、ROV、AUV、水下滑翔机等方面的研究和应用取得较大进展,部分技术达到世界先进水平。例如,“蛟龙号”HOV 完成了潜深 1000 m、3000 m、5000 m、7000 m 海试,2012 年在马里亚纳海沟实验海区创造了下潜 7062 m 的载人深潜记录,这表明我国 HOV 具备了全球 99.8% 以上深海区域的潜水作业能力。

“海龙 II 号”是我国自主研发的潜深 3500 米级 ROV,配备了动力定位系统、虚拟控制系统、摄像监控系统、图像声呐系统,机械手臂可提取质量为 250 kg 的重物,水下航速约 5.56 km/h。“海龙 III 号”是我国自主研发的潜深 6000 米级 ROV,具备水下自主巡航、重型设备作业能力,可在高温、高压、复杂地形等条件下开展海洋调查和科考作业。

关于“潜龙”系列 AUV,“潜龙一号”设计潜深为 6000 m,对海底微地貌、海底水文参数、海底多金属结核丰富程度进行探测;“潜龙二号”“潜龙三号”潜深为 4500 米级,采用鱼形仿生结构来提高水下运动性能,搭载海底热液探测、海底微地貌

探测、海底地磁力探测等高端设备，为深海海底矿产资源的勘探提供了能力支持。

水下滑翔机研制进展较快，具备了大规模应用条件。在作业性能方面，“海燕”系列水下滑翔机实现了无故障连续运行 141 d、连续航行 3619.6 km；在作业深度方面，“海燕”万米级水下滑翔机在马里亚纳海沟下潜至 10 619 m 的世界记录，“海翼号”水下滑翔机实现了 7000 米级深度的连续观测；在协作与组网应用方面，实现了 12 台水下滑翔机的同步操控。

（四）海底观测网络

2012 年起，中国科学院声学研究所联合国内多家涉海研究机构，在东海、南海建设海底观测网试验系统。南海海底观测网试验系统以海南为岸基基站，利用长度为 150 km 的海底光电复合缆连接位于 1800 m 水深的多套海洋物理、海洋化学、海底动力观测平台，构建了海底地震、海水物质、海洋生物等学科参数的长期观测能力。我国在西太平洋、南海、印度洋布放了 3 套大型浮标、20 套深海潜标，共计 1000 余件海洋科学观测设备，初步构建了“两洋一海”海洋观测网络；同步观测了西太平洋上层赤道流系（垂直分辨率为 8 m）、西边界流、中深层环流（垂直分辨率为 500 m），全部要素的观测时间分辨率为 1 h，达到国际领先水平。

五、海洋科学装备领域未来发展趋势

（一）海洋科学装备的智能化、无人化

随着海洋开发活动逐渐走向深远海，人类干预海洋探测 / 监测设备的活动将越来越困难，深远海探测 / 观测将逐步发展到无人值守自动化、智能化。例如，新型智能潜器可以长期潜伏在设定海域，监测范围内出现异常情况时，探测传感器自动激活设备，对目标进行智能跟踪；新型智能浮标、潜标可以根据实际情况自动选择合适的信息传输、供电方式，各子系统根据海况自主选择适当的工作模式；水下航行器可搭载人工智能（AI）、深度学习技术，自动识别海底障碍物、控制推进器进行自主规避。

（二）海洋科学装备谱系化、观测系统立体化

随着应用水深的增加、观测参数类型的变化，

功能单一的海洋科学装备无法满足未来探测和观测的综合需求，多参数、多功能、谱系化成为相关装备的发展方向。在长期探测 / 观测作业的过程中，倾向于采用多类型海洋科学设备联合协同作业的模式，即多种类型的海洋科学设备通过功能分工和互补，构成立体化的观测系统。例如，美国、日本的海洋观测系统一般由空基设备（卫星、飞机、无人机）、陆基设备（水文观测站、数据管理中心）、海基设备（科考船、无人艇、水面浮标）、海床基设备（水下潜标、水下潜器、水下传感器）组成，通过协同作业实现单一装备无法完成的复杂任务。

（三）海洋科学装备的综合化、全球化

海洋作为一个联系紧密的系统，某个区域的变化将会引起其他区域的连锁反应；但海洋体量过于庞大，仅凭少数国家无法建立覆盖整个海洋的探测 / 观测体系。各国协作建立全球化的海洋探测 / 观测体系，将是海洋科学技术与装备未来的发展趋势之一。我国在发展海洋科学装备的过程中，应重视海洋探测 / 观测技术创新的全球化趋势，参与制定国际探测 / 观测计划、国际标准，开展国际合作与交流，高效推进领域的创新发展。

六、我国海洋科学装备面临的问题

（一）海洋科学装备通用技术研究明显滞后

海洋科学装备研究进展重在集成，而原创性成果不多，在通用技术方面的突破与创新较少。在高性能材料、水下能源供给、智能控制、动力驱动、信息传输线缆等技术方向，装备稳定性、可靠性、操作灵活性、精确性、方便性等相比世界海洋强国仍有差距，使得国产装备先进性不够、量产困难、良品率低。

（二）国产装备能耗高、可靠性差，核心传感器依赖进口

由于基础科学研究薄弱，海洋科学装备用核心传感器技术发展迟缓，如水文监测、生态监测、海流监测、海气通量监测、水声监测等国产传感器性能难以满足实际应用，表现为体积较大、功耗较高、可靠性和稳定性较差，与小型化、智能化、低功耗的实用要求相距较远。目前，高端海洋科学装备的

进口比例仍达到 80%，常用的重、声、电、磁、震等类别的传感器几乎全部依赖进口，制约了海洋科学领域的全面突破。

（三）关键装备的技术成熟度与商业应用水平不高

关键性的海洋科学装备，如 HOV、ROV、AUV、水下滑翔机等，除少部分已经实现产品化和小规模生产，大多数还处于工程样机阶段，加之多数为国家政策和科研项目支持，商业化动力明显缺失。相比之下，世界海洋强国的重大海洋科学装备，其技术研发均由市场和企业推动，在海洋科考、海底矿物开发、海洋油气开发等领域形成了良性可持续发展的商业发展模式。

（四）海洋立体观测网尚不完善，数据共享程度低

我国海底观测网络建设仍处于起步阶段，仅发展了“两洋一海”海洋观测网络，观测点较少，不能完全覆盖领海空间，距离建成全海深、一体化、实时、高分辨率的海洋立体观测网络还有很长的路要走。此外，缺失以 HOV、ROV、AUV、水下滑翔机为核心的快速部署观测能力，观测数据的集成和共享管理机制，使得观测数据存放分散、由不同的机构掌握，造成信息资源的严重浪费 [13]。

（五）高新技术融合应用滞后

我国海洋科学装备与高新技术，如 AI、大数据、物联网等的融合应用程度偏低。如不能尽快探索和建立基于 AI、大数据的“透明海洋”观测技术体系及其核心装备，我国在海洋技术体系方面将再次面临被世界海洋强国甩下的局面，技术体系的滞后将导致核心关键技术突破难度的进一步放大。

七、对策建议

（一）加强海洋科学基础理论研究，攻克高端海洋科学装备设计研发关键技术

加强深海/极地新型特殊材料，水下/冰下实时通信，传感器系统观测，能源自主补给，水下/冰下高精度导航定位，水下/冰下自主探测识别，水下/冰下自动对接、接驳、布放、回收，海洋 AI 等关键基础技术研究布局，筑牢新型深海和极地科

学观测仪器、设备及系统的发展基础。

开展极地物理声场特性研究，发展适合极区、深海极端环境下的声学水听器和换能器技术；加强水气界面、冰气界面声学反射与散射特性、半声道与全声道同存条件下声场传播与水声通信技术研究，填补技术空白，保障深远海资源开发、北极规划实施需求。

（二）研发多功能智能化海洋科学装备，加速技术成果向货架产品的转换进程

明显扭转跟踪国外成熟海洋传感器研发的被动局面，探索海洋观测的新概念、新原理、新方法，着力研发小型化、智能化、高精度的动力环境、生物地球化学要素、生物基因、声场、电磁、重力等的新型深海多学科传感器；支持开展深海芯片级、量子型新原理海洋传感器前沿研究，打破世界海洋强国在传统海洋传感器方面的技术垄断。

聚焦全海深观测能力建设，突破耐压、功耗、导航、平台稳定性、传感器搭载能力等方面的制约，研发新一代多参数智能化 AUV、ROV、水下滑翔机等移动观测设备，发展谱系化实时浮/潜标、新概念固定基观测设备；研制适应移动基、固定基的共形化专用动力环境和生态环境等多学科传感器，全面提升深海跨学科多平台协同组网的实时观测能力。

（三）完善海洋科学装备共享机制和综合服务平台，在更大范围内发挥海洋科学装备的作用

建议推进海洋领域的优势资源协同，联合领域内的管理部门、科研院所、高校，构建统一高效的专门管理体系；搭建国家级大型海洋科学装备共享平台，建立统一的使用标准，明确共享范围、共享标准、共享流程，统筹安排共享单位、其他使用单位、个人的使用装备申请，公开发布共享计划。

建议采取海洋科学装备有偿使用的原则，初期可以国家补贴形式启动实施，后期统一管理有偿服务的经费，力争实现运维管理、服务收费的自我循环；制定共享仪器、装备的管理办法，避免装备重复采购、能力重复建设、设施闲置浪费。

建议国家相关主管部门合理简化非盈利组织的申请程序，给予适当的税收优惠政策；鼓励企

业和事业单位参与国家基础科学研究、大型装备运维等活动并提供资源支持。

(四) 加强国际合作, 参与国际深海观测仪器、设备和系统的标准、规范、标定能力构建

建议组织国内海洋科学研究力量, 积极参与国际合作计划与相关协同计划, 推动国际合作与交流。以新型深海和极地海洋观测仪器、设备、系统为突破口, 注重创新研发和典型应用, 参与构建涵盖深海、极地观测标准规范的国际标准体系, 实现海洋观测仪器装备国际标准、规范制定方面的突破, 提高我国在深海/极地观测仪器、设备、系统方面的国际影响力。针对深海/极地观测对传感器精度的苛刻要求, 构建多元化、系统化的深海传感器标定体系, 加强我国在深海观测数据方面的国际话语权。

参考文献

- [1] 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 Z H, Lin X P, et al. Building the integrated observational network of “Transparent Ocean” [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(25): 2654–2661.
- [2] 孙松, 孙晓霞. 对我国海洋科学研究战略的认知与思考 [J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(12): 1285–1292.
Sun S, Sun X X. Future ocean and our research strategy [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(12): 1285–1292.
- [3] 刘康. 国际海洋开发态势及其对我国海洋强国建设的启示 [J]. 科技促进发展, 2013 (5): 57–64.
Liu K. Dynamic and implication of world ocean development [J]. Science & Technology for Development, 2013 (5): 57–64.
- [4] 李大海, 吴立新, 陈朝晖. “透明海洋”的战略方向与建设路径 [J]. 山东大学学报(哲学社会科学版), 2019 (2): 130–136.
Li D H, Wu L X, Chen Z H. Strategic direction and construction path of transparent oceans [J]. Journal of Shandong University (Philosophy and Social Sciences), 2019 (2): 130–136.
- [5] 郑礼建. 特种船舶体系——我国海洋发展战略的重要基石 [J]. 国防科技工业, 2012 (10): 43–44.
Zheng L J. Special ship system: An important foundation for marine development strategy [J]. Defence Science & Technology Industry, 2012 (10): 43–44.
- [6] 汪文杰, 贾东宁, 许佳立, 等. 全球海洋遥感卫星发展综述 [J]. 测绘通报, 2020 (5): 1–6.
Wang W J, Jia D N, Xu J L, et al. Review of the development of global marine remote sensing satellite [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020 (5): 1–6.
- [7] 赵勇, 徐永胜. 国外海洋监视卫星系统的现状与发展趋势 [J]. 电讯技术, 2002, 42(5): 154–160.
Zhao Y, Xu Y S. Current status and developing trend of foreign sea surveillance satellite systems [J]. Telecommunication Engineering, 2002, 42(5): 154–160.
- [8] 苏振东, 余军浩, 王凯, 等. 中美海洋科考船对比分析 [J]. 舰船科学技术, 2016, 38(1): 154–157.
Su Z D, Yu J H, Wang K, et al. A comparative analysis of China and U.S. marine research vessel [J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(1): 154–157.
- [9] 史先鹏, 刘保华. 美国载人潜水器的应用和管理及其启示 [J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(8): 67–71.
Shi X P, Liu B H. The application and management of manned submersibles in USA and its enlightenment [J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(8): 67–71.
- [10] National Deep Submergence Facility. Alvin’s electrical and mechanical interfaces [EB/OL]. (2018-12-01)[2020-09-31]. <https://ndsf.whoi.edu/alvin/using-alvin/systems>.
- [11] 杜志元, 杨磊, 陈云赛, 等. 我国与美国潜水器的发展和对比 [J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(10): 55–60.
Du Z Y, Yang L, Chen Y S, et al. The development and comparison of the scientific deep-sea submersibles between China and the United States [J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(10): 55–60.
- [12] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 321–328.
Li F H, Lu Y G, Wang H B, et al. Research progress and development trend of seafloor observation network [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 321–328.
- [13] 王建村, 景春雷, 天旭. 美国大型海洋装备运维现状及对我国的启示 [J]. 海洋科学, 2020, 44(2): 171–179.
Wang J C, Jing C L, Tian X. Current status of the operation and maintenance of large-scale marine equipment in the United States and its enlightenment to China [J]. Marine Science, 2020, 44(2): 171–179.