

我国极地装备技术发展战略研究

于立伟, 王俊荣, 王树青, 李华军

(中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266100)

摘要: 当前极地地区的战略地位日益凸显, 极地资源开发与利用成为国际社会关注的焦点, 而极地装备是科学认知极地、合理开发利用极地资源的基础保障。极地装备主要分为极地科学装备、极地船舶装备、极地资源开发装备等三大类, 针对此三类装备, 本文梳理了国外极地装备技术的发展态势, 分析了我国极地装备的发展现状及存在的差距与问题, 研判了极地装备的发展趋势与关键技术, 总结了我国极地装备技术领域的发展战略。针对我国极地科学装备不足且冰下观测能力有限、极地船舶能力建设缺乏、极地资源开发装备研发设计能力欠缺等问题, 从建设北极环境观测与通信导航装备、攻克极地航行船舶关键技术、发展极地资源勘探关键装备三方面提出了我国面向 2035 年的极地装备重点发展方向及对策建议, 以期为 21 世纪下半叶极地夏季商业航线的大规模开发提供装备和技术研究支持。

关键词: 极地装备; 极地科学观测与通信导航; 极地船舶; 极地油气资源开发; 关键技术

中图分类号: T-1 **文献标识码:** A

Development Strategy for Polar Equipment in China

Yu Liwei, Wang Junrong, Wang Shuqing, Li Huajun

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

Abstract: The polar regions are now becoming strategically important. The exploitation of polar resources is becoming the focus of international community's attention. Polar equipment is the guarantee for humans to scientifically understand and sustainably exploit the polar resources; they primarily include equipment for scientific observation, navigation, and oil and gas exploitation in the polar regions. This study first summarizes the development of polar equipment in various countries, and the development status and problems of the polar equipment in China. Then, it analyzes the development trend and key technologies of polar equipment. China does not possess sufficient polar scientific equipment and its under-ice observation capacity is not strong. China also lacks the capacities for building polar vessels and the research and design capacities for polar resource development equipment. To promote the development of polar equipment by 2035, China should promote the Arctic environment observation, communication, and navigation technologies, make breakthroughs in key technologies regarding polar vessels, and develop key equipment for polar resource exploration, hoping to support the commercial development of the polar summer routes for the second half of the 21st century.

Keywords: polar equipment; scientific observation, communications, and navigation in the polar regions; polar vessels; oil and gas resources exploitation in the polar regions; key technologies

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

近年来,随着科技不断进步、全球气候变暖以及海冰加速融化 [1], 极地地区油气和航道资源将逐步具备开发利用价值, 经济、军事和政治等战略地位凸显, 成为世界各国关注的焦点。尤其是美国、俄罗斯、欧洲等近北极国家和地区, 正在积极布局极地装备, 提升极地科学考察、商业航运、资源开发能力, 切实保障未来在极地地区的资源开发活动。

极地地区对我国具有重要的战略意义。2018 年, 国务院发布的《中国的北极政策》白皮书中指出, 中国是北极事务的重要利益攸关方, 在地缘上是近北极国家, 北极的自然状况及其变化对中国的气候系统和生态环境有着直接影响, 进而关系到中国在农业、林业、渔业、海洋等领域的经济利益。极地地区是关系到我国是否能够成为海洋强国的关键区域, 我国积极参与极地开发、发展极地装备与技术, 对建立有效的全球治理模式具有重要意义。

极地装备指在极地地区开展科学考察、商业航行、油气资源开发、旅游休闲等活动的装备, 是认识极地、开发极地、利用极地的载体。目前, 国际上将极地装备主要分为极地科学装备、极地船舶装备、极地资源开发装备等。本文调研目前世界主要国家和地区在极地科学观测与通信导航装备、极地船舶装备、极地油气资源开发装备的发展态势, 梳理我国极地装备的发展现状与存在问题, 总结极地装备未来发展趋势与关键技术, 重点分析我国极地装备与技术的需求紧迫度, 为面向 2035 的极地装备重点发展方向论证提供支撑。

二、国际极地装备技术的发展态势

(一) 全球极地科学装备的发展现状

极地科学装备指在极地地区开展相关科考活动所需的装备, 是认识极地的载体, 主要包括极地科考船、极地科学观测、通信导航装备等。

在极地科考船方面, 美国、俄罗斯、欧盟等极地科学优势国家和地区都维持一定数量的极地科考船。其中, 美国有重型和中型极地破冰科考船 4 艘, 拟新建 3 艘覆盖全极圈的重型科考破冰船; 欧盟各

国目前共拥有 9 艘具有破冰能力的极地科考船 [2]; 俄罗斯拥有 2 艘极地科考船; 日本、加拿大和韩国各有 1 艘极地科考船。

在极地观测与通信导航装备方面, 极区是海冰覆盖的高纬度海洋, 与世界上其他海洋不同的是, 海冰阻隔了无线电信号的传输, 难以为水下仪器实现定位和通信, 如北冰洋也曾发生潜艇碰撞事件。此外, 高纬度地区通信与导航卫星覆盖少, 这对极区通信导航带来挑战。多年来, 国际上在海洋科学观测领域的研究有了长足进展, 但极区观测与通信导航领域的发展仍相对滞后, 许多在其他海域普遍应用的技术在极区却无法使用, 克服海冰和高纬度的影响成为极区开发取得进展的关键。因此, 极地冰下观测网络、极地导航通信网络成为近年来极地装备发展的焦点。

在极区冰下观测网络方面, 美国立足多年积累开始研发军民两用的北极移动观测系统, 未来将成为主导北极观测与监视能力的关键平台。2012 年, 美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 启动“极地态势感知”项目, 重点发展冰下、冰面态势感知技术。冰下感知采用水下传感器结合结构、深度和其他测量法, 分析部署区域冰下环境的声传播、噪声及非声特征; 冰面感知采用冰面浮标结合计算机网络、大数据等新技术分析部署区域的电磁和光学现象、海冰分布特征及航道信息 [3]。2019 年, 美国开始构建北极移动观测系统 (AMOS), 主要发展声学探测、定位、通信系列技术以及冰基声学和卫星通信的中继技术等, 以支持冰下仪器和潜艇的活动, 构建对敌方水下舰艇和装备的探测能力。该系统具有战略前瞻性和技术先进性, 一旦完成部署, 将完全克服北极冰层的影响, 实现对北冰洋的系统观测和实时监测。

在极地通信导航网络上, 现有通信卫星难以覆盖北纬 76° 以上区域, 地面通信系统受海洋和海冰阻隔难以部署, 铱星通信系统可以提供极区通信服务, 但可靠性不高且带宽有限 [4]。目前, 美国和欧洲等国家和地区积极发展极地卫星通信技术, 如挪威计划于 2022 年发射 2 颗高纬度轨道通信卫星, 实现北纬 65° 以上区域的 24 h 的宽带通信 [5]; 2012 年, 俄罗斯航天局启动北极综合监测系统研发工作, 用于北极地区环境监视及通信, 2017 年发射

首颗卫星，2018年系统建成应用 [3]。在卫星定位导航方面，俄罗斯的格洛纳斯定位系统在极区的覆盖最好，但极地地区的定位精度尤其是垂向运动的定位精度相较其他地区偏低，多星双频技术在减少干扰、提高极地定位精度方面有很大应用前景 [5]。

（二）全球极地船舶装备发展现状

随着极地航道的开辟和极地资源的开发，各国对极地船舶的需求不断上升，极地船舶成为各国推进极地战略的重要依托。极地船舶指在极地地区开展商业航行、油气开发、旅游休闲等活动的船舶装备，主要包括极地破冰船、极地运输船、极地观光船、极地渔船等。

在极地破冰船方面，截至2017年，全球共有（含在建）94艘极地破冰船 [6]，其中俄罗斯（44艘）、加拿大（6艘）、北欧国家（丹麦、芬兰、瑞典，21艘）均有较大规模的破冰船队。俄罗斯拥有全球规模最大的破冰船队，世界上功率最大的“北极号”核动力破冰船在2019年试航，2020年10月正式交付使用；预计到2024年还将新

造至少9艘破冰船，以保持俄罗斯在极地地区的开发潜力 [7]。目前，全球近60%的破冰船船龄超过20年，更新需求迫切。美国仅有1艘建造于20世纪70年代的重型破冰船，为此近期以保护极区利益为由开始组建极地安全破冰船队，其中至少包括3艘重型极地破冰船。

在极地运输船舶方面，北极海冰面积逐年减少，按当前全球变暖趋势测算，2045年北极82%的海域将夏季无冰，适合常规船舶航行 [8]，届时东亚到欧洲的航行时间将缩短40%。截至2017年，各国拥有的极地运输船舶情况如表1所示 [6]。从北极航道的发展趋势来看，多用途船、油船、液化天然气（LNG）船、集装箱船将成为未来极地海域的四大主力运输船型 [9]。极地多用途船方便灵活、装卸效率高，适用于北极地区初期的多种货运需求，因此现阶段各国多采用极地多用途船来试水北极航道 [9]。随着北极油气资源的开发，极地LNG船的需求也将快速增长，目前俄罗斯已有12艘Arc7破冰型LNG船投入北极Yamal LNG项目运营；近期北极LNG项目Arctic LNG 2预计订购15艘

表1 世界各国拥有的极地运输船（截至2017年） [6]

船型	船东国别	载重吨（DWT）总和 / t	平均船龄 / 年	船舶数量 / 艘
极地多用途船	德国	3 397 955	11	356
	荷兰	2 512 961	12	242
	俄罗斯	720 079	23	76
	中国	250 134	7	13
	土耳其	200 300	22	33
	挪威	177 485	15	27
	加拿大	142 701	15	14
	极地油船	希腊	7 416 062	12
俄罗斯		3 307 385	14	59
挪威		1 003 759	13	8
德国		989 941	11	24
瑞典		968 810	10	22
意大利		923 981	7	25
丹麦		864 000	10	20
极地LNG船	俄罗斯	178 279	1	2
	希腊	123 313	4	14
	加拿大	510 000	1	6
	中国	255 000	1	3
	挪威	96 740	8	1
	荷兰	32 931	2	3

Arc7 破冰型 LNG 船, 将在 2023—2026 年交付, 船舶以 LNG 为动力, 功率为 45 MW, -52°C 以上可以在 2.1 m 厚度冰层上航行。

(三) 全球极地资源开发装备发展现状

极地地区尤其是北极地区的油气资源储量丰富, 根据美国地质调查局发布的评估报告显示 [10,11], 北极地区未探明石油储量为 1.84×10^{11} t, 天然气储量为 4.7×10^{15} m³, 分别约占世界未探明石油和天然气资源量的 13% 和 30%, 这些资源主要分布在北极附近的 7 个主要盆地。目前, 许多国家和石油公司将北极油气资源的开发提上日程, 着手开展相关装备的研发工作。然而, 极地油气资源开发是一项难度极高的系统工程, 北极地区严酷的风、浪、流、冰气候以及复杂的冻土地质条件, 给极地油气开发装备带来了极大考验。世界主要油气开发公司都在加大资源投入, 研发兼顾抗冰性能和经济性能的新型极地油气开发装备。

俄罗斯于 2012 年发布了《2030 年前大陆架石油和天然气开发计划》, 详细规划了未来在北极地区石油和天然气资源的开发任务 [12]。俄罗斯目前唯一的极地海上油气田是距离 Pechora 海离岸 60 km 的 Prirazlomnoye 油田, 该油田采用抗冰钢筋混凝土重力式开发平台, 集石油钻井、开采、储存、处理、卸载功能于一体, 上部组块质量为 2.9×10^4 t, 混凝土沉箱质量为 9.7×10^4 t; 将设计 32 口油井, 截至 2018 年年底已有 16 口井投产, 年原油产量约 3.2×10^6 t。俄罗斯在北极地区还有两个大型陆上 LNG 气田 Yamal LNG、Arctic LNG 2: 前者于 2017 年投产, 年产气为 1.65×10^6 t, 由韩国大宇集团建造的 15 艘 Arc7 破冰型 LNG 船也已投入运营, 其中 14 艘由我国中远海运能源运输股份有限公司参与投资和运营; 后者预计在 2023 年投产, 已向俄罗斯红星造船厂订购 15 艘 Arc7 型破冰 LNG 船。

2015 年, 由荷兰皇家壳牌集团投资、瑞士越洋钻探公司建造的“Polar Pioneer 号”极地钻井平台投入作业, 该平台上的钻机和管汇由低温碳钢建造, 平台操作区域全封闭并配有主动加热装置, 适应北极地区的钻井作业环境 [13]。针对北极地区的严酷气候条件, 德尼西布美信达公司 (Technip FMC) 将自升式平台和混凝土技术结合, 开发了新概念北

极抗冰平台, 可实现极地全年钻井作业 [14]。荷兰豪氏威马 (Huisman) 公司设计了可适应近北极钻探的半潜平台, 采用锚泊定位方式, 作业水深可达 1500 m, 抗冰结构可承受 2 m 厚冰的冲击, 能在近北极地区全年作业 [13]。荷兰古斯特 (GustoMSC) 公司也推出了适应北极严苛气候条件的 Nanuq Q5000 钻井船, 在极区的年作业天数可达 120 d, 能承受的最大冰厚为 4 m, 作业水深可达 1500 m [13]。目前, 多数极地油气平台都处于研发设计阶段, 距离实际投产应用仍有一定差距。

综上, 美国、俄罗斯、欧洲等近极地国家和地区在各自极地发展战略的支持下, 形成了雄厚的极地装备实力, 在极地科考、极地航运、油气资源开发等方面拥有显著优势。随着极区特别是北极战略地位和商业价值的日益凸显, 各国都在大力发展极地装备与技术, 全面构建极地调查、通信、破冰航行、资源开发能力, 用于支持未来北极地区的战略行动和商业活动。

三、我国极地装备的发展现状与面临的问题

(一) 极地装备发展现状

极地地区是关系到我国能否成为海洋强国的关键区域, 极地装备也是我国开发、利用、保护极地地区的重要保障。目前, 我国通过持续投入、优化布局, 建立极地工作体系, 加强能力建设, 构建了相对完善的极地考察装备支撑平台和体系。经过 30 多年的积累, 我国在极地科技领域取得了长足进展。

1. 极地科学装备研发取得突破

我国研发了极地冰盖深冰芯钻、冰架热水钻、冰下地质钻、冰盖观测机器人、空间天气监测系统、大气激光雷达、海-冰-气无人冰站、巡天望远镜等一批先进的技术装备, 成功应用于极地现场的样品和数据采集; 北斗卫星导航系统在极地地区得到应用推广。2020 年, 我国设计建造的“雪龙 2 号”破冰科考船成功服役, “雪龙号”“雪龙 2 号”破冰船合作完成了我国首次“双龙探极”, 为我国未来的极地科学考察提供了基础保障。

2. 极地航行与资源开发装备正在起步

在极地航行方面, “雪龙号”破冰船完成了北极东北、中央、西北航道的探索工作, 航道海冰预

报技术和精度得以提高。我国自中国远洋海运集团“永盛轮”首航北极以来，夏季北极航行已经常态化(见图1)；通过设计建造“雪龙2号”破冰科考船，初步掌握了极地破冰船的设计分析与建造技术。

在极地资源开发方面，2016年我国“海洋石油720”物探船完成了北极圈海域两个区域的三维地震物探工作。“一带一路”倡议实施后，我国深度参与了首个极地能源重大项目——北极圈内 Yamal LNG 项目，承担了项目大部分模块的建造工作，推动我国的极地冷海钻机、钻井及相关配套技术在项目中的应用。此外，我国中远海运能源运输股份有限公司参与投资运营了该项目中14艘破冰LNG船以及4艘常规LNG船，其中4艘常规LNG船由沪东中华造船(集团)有限公司建造。目前，Yamal LNG项目正通过“冰上丝绸之路”源源不断向我国输送清洁能源，仅2020年就完成了31航次的LNG运输。

目前，我国极地装备发展已取得了一定进步，但与美国、俄罗斯等极区国家相比仍有不小的差距。因此，积极开展极地装备发展战略研究，基于国际发展趋势进行技术预见，从国家顶层设计出发，形成明确的发展战略方向；提出相关产业发展激励政策，提升极地开发综合竞争力，维护我国极地海洋权益。

(二) 极地装备发展面临的问题

我国作为北极的利益攸关方，极地装备是极地区域开发的保障，相关装备发展迫在眉睫。也要注意，我国在极地装备发展方面仍存在“战略政策未落地、创新研究未展开、设计研发不系统”等一系列问题。

1. 极地科学装备不足，冰下观测能力有限

目前，我国仅在南极冰盖底部结构、北极海洋酸化、极区空间环境等少数前沿领域取得突破，在



图1 我国冰级 3.6×10^4 t 多用途船“天祐轮”在北极航线航行

南极冰下湖探测等最新前沿领域尚未有足够的技术储备。在极地冰下自主水下机器人(AUV)、北极冰区组网观测等重大装备以及北极技术研发与应用方面滞后明显，缺少能够开展极地海洋要素实时观测网络，制约着我国在极地地区的观测与通信导航能力。此外，我国极地地区的研究成果相对零散，对国家需求的支撑作用远不如美国、欧洲等国家和地区。

2. 极地船舶能力建设严重不足

我国在极地船舶的研究、设计、建造方面起步较晚，目前只有2艘用于渤海湾破冰的破冰船、2艘“雪龙”系列极地科考船，极地运输船的数量也很少(见图2)。在我国深度参与的Yamal LNG项目中，15艘破冰型LNG船全部由韩国船厂建造，而我国船厂仅参与了4艘常规LNG船的建造。此外，亚欧集装箱航运贸易是世界集装箱贸易的重要部分，与中国相关的货运量超过70%，未来中国对北极集装箱航运需求巨大。我国极地船舶能力建设严重不足，亟需加强极地船舶基础研究、设计分析和建造全链条的技术储备与能力建设。

3. 极地资源开发装备研发设计能力缺乏

目前全球主要石油公司都在加大资源投入，研发新型极地油气开发装备，做好未来极地资源开发的技术储备工作。近年来，我国在海洋资源开发装备的研发、设计和建造上已经有了明显进步，但在极地资源开发装备的研发和设计方面还基本处于空白，装备建造仍以组装为主。应明确切入点，开展新一代极地钻井装备的研发设计和技术攻关，为未来极地资源开发奠定技术基础。

着眼未来，我国极地科学、船舶、资源开发装备的需求将日益强烈。应以国家需求为牵引，推动极地装备在研发、设计、建造、作业等关键技术方面实现突破，自主打造我国的立体观测网、极地船队、极地油气装备，提高极地观测和开发利用能力。

四、极地装备发展趋势与关键技术分析

(一) 极地装备发展趋势与需求

极地区域在资源、交通、地缘战略等方面的价值日益突出，极地装备是认识、开发、利用极地区域的重要支撑。目前，美国、俄罗斯等国家都在加

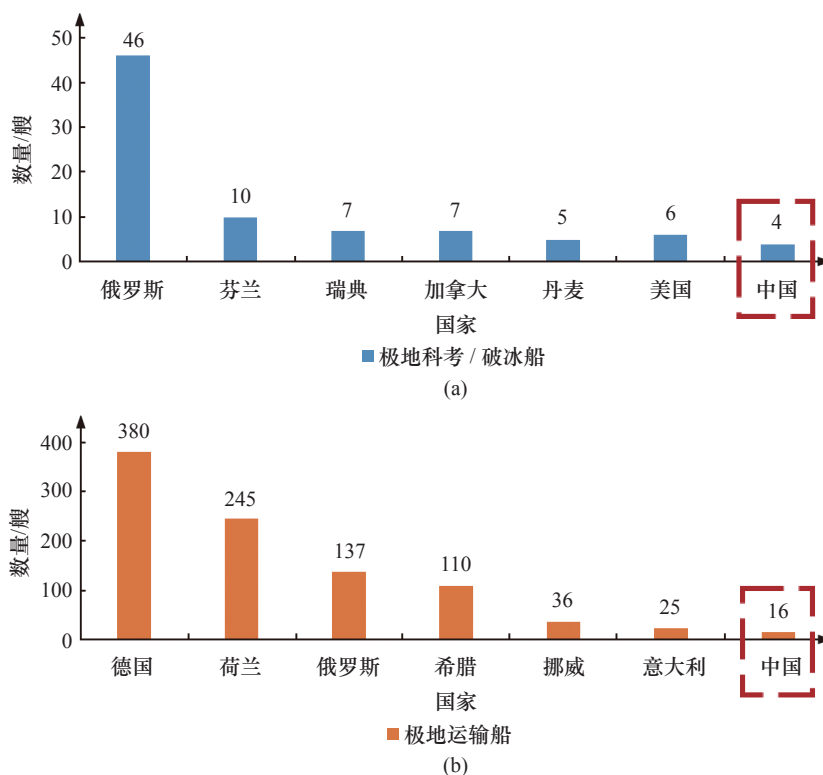


图 2 主要国家的极地科考 / 破冰船与极地运输船数量情况 (截至 2017 年)

大对包括极地科学装备、极地船舶装备、极地资源开发装备在内的极地装备投入, 极地装备的发展呈现出一些新的趋势。

1. 极地科学观测与通信导航装备

目前, 极地观测与通信导航能力存在严重不足, 极地观测能力薄弱, 通信导航精度差, 极地调查研究不充分, 对极地气候变化规律的观测研究有限。各国尤其是近极地国家均加快了极地观测与通信导航装备方面的技术布局, 主要趋势包括: ①研发新一代破冰科考船, 提高极地科考装备的搭载能力; ②发展极地卫星遥感与通信导航系统, 提高获得极地大尺度海冰冰情的能力, 保障极地通信导航精度与可靠性; ③构建集冰浮标、冰下无人潜器、冰下滑翔机和冰基气象系统等观测仪器于一体的极地环境观测系统, 探清极地区域环境变化机制, 为极地航行和极地海洋资源开发提供数据与技术支持。预计到 2050 年, 美国、俄罗斯等国家将在北极地区基本建成集太空卫星、水面科考船、极地环境观测系统为一体的极地观测和通信系统。

2. 极地船舶装备

北极航道的开辟可以有效降低海上运营成本,

满足资源开发需求。目前, 主要国家的极地船舶船龄普遍较大, 正迎来极地船舶更新换代的高峰, 美国、俄罗斯、欧洲等近极地国家和地区都将建造新一代极地船舶纳入未来极地发展规划。主要趋势包括: ①针对极地环境, 开展极地航行保障技术和船舶抗冰技术研究, 保障极地船舶航行的安全性; ②规划建设极地重型破冰船, 开辟北极航道, 保持并进一步提高极地活动能力; ③发展极地多用途船舶, 开展北极航道的先行试水, 同时为满足极地油气资源外运需求而研发建造极地 LNG 船和油船, 为未来极地航运和资源开发活动提供支撑。预计到 2035 年, 主要国家将初步建立北极航道导航系统、冰情监测和预报系统, 用于极地多功能船舶、LNG 船的搭建和运行; 到 2050 年, 将出现商业化的北极地区夏季运输船队。

3. 极地油气资源开发装备

北极地区油气资源储量丰富, 极地钻井是极地油气资源开发的关键作业设备, 而北极严酷的气候条件和复杂的地质条件, 使极地海洋资源的开发利用面临着巨大考验。目前, 大多数极地油气平台仍处于研发设计阶段, 距离投产应用有一定差距, 世

界各国都在大力推动新一代极地钻井装备研发，主要趋势包括：①发展极地环境条件下油气资源开发、输运、处理等关键技术；②研发具有抗冰、防寒功能的极地勘探、钻探与油气资源开采专用装备以及极地冰区溢油处理技术和装备，为极地油气资源开发利用提供技术保障。预计到2035年，各国极地油气资源开发装备将在北极地区初步运行；到2050年，将迎来北极地区油气资源的大规模商业开发利用。

（二）我国极地装备关键技术分析

极地装备的发展依赖于若干关键技术的突破与进步，亟需发展的极地装备关键技术如下：①极地卫星遥感观测技术、通信定位技术、大批量数据传输和处理技术；②冰区海洋观测与环境监测技术，又可细分为基于声通信的冰下定位导航网络技术，冰下实时监测技术，极地水文、气象、航道、冰清等环境信息感知、监测和评估技术，针对关键海域的精细化海冰预报技术；③极地航行船舶冰载荷预报技术、船舶智能冬装技术、低温材料和涂层技术、极地船舶结构完整性管理和新型破冰技术、北极航行应急救援技术、极地航行船舶实时监测系统及安全航行智能决策系统、极地船舶综合性能预报技术；④冰-船相互作用的实验室物理模拟技术，大型冰池实验室是进行极地重型装备测试的必需条件，国内目前仅有的天津大学冰池（多适用于渤海海冰），仍需加强对北极海冰的试验技术研究；⑤新型极地抗冰勘探与钻井平台设计、极地低温钻井技术、全封闭抗冰抗低温平台技术。

极地装备的发展还依赖于材料和能源等共性关键技术的突破，包括：①适用于极地开发的材料，如耐低温高韧性新型材料（新型金属材料、复合材料等）、耐低温耐腐蚀灰冰涂层材料、低温焊接材料与技术等；②绿色环保能源的持续供给技术，如高密度清洁能源利用技术、能源自动供给技术、蓄电池低温长时间续航技术、小型化核能利用技术、混合能源供给模式等。

上述技术的突破，将有效促进我国极地装备的发展，为保护我国在北极地区的利益提供有力保障。表2总结了我国极地核心装备与技术面向2035年和2050年的需求紧迫度情况，可为后续极地装备

重点发展方向深化论证提供支撑。

五、对策建议

极地地区战略地位重要，我国积极参与极地地区开发意义重大。目前，我国极地观测/勘测装备匮乏、能力不足，对极地的认识尚不能满足对极地开发利用与保护的需求。因此，亟需研发极区海洋环境观测、航行与资源勘探装备与技术，提升认识极地的水平，为极地的可持续开发利用提供保障。基于我国极地开发需求与开发能力现状，建议在近期加强极地开发的极区海洋环境观测与资源勘探关键装备的研发力度，同时针对极地航行船舶开展技术储备和能力建设，为21世纪下半叶极地夏季商业航线的大规模开发提供技术支撑。

（一）建设北极环境观测与通信导航装备

由于北极气候条件严酷、通信导航网覆盖低，对极地气候变化因子的长期观测数据十分稀少，观测能力的缺失制约了北极科学研究与开发利用。为提升极区环境的观测能力和预报能力，借鉴海洋监测系统发展经验，结合极区复杂动力环境的特殊性，研发空基、冰基、海基智能观测设备，建立绿色智能的空天-冰面-水下一体极地监测网络，建设极区通信导航网络，为极地区域的科学研究、空间利用、资源开发、生态保护提供支撑。

1. 空基智能化观测技术与设备

重点发展极地可见光和微波遥感探测技术、高光谱信号深度学习反演算法，突破机载高分辨率冰雷达探测技术，发展极地短波卫星通信设备和无人机自动驾驶技术；对极地海冰/海水、冰盖冰架、冰川/冰山/浮冰的高程、厚度、表面冻融、漂移轨迹等变化规律进行长期连续监测，建立极地气-冰-海动力分析模型和冰情准确预报方法。

2. 冰基无人观测技术和观测站

重点发展极地智能化气象观测技术、宽频地震波发射和回收技术、冰盖电磁观测系统，对极地区域的气候变化规律、冰盖内部结构及地质构造特征进行解析，重点突破冰基设备、冰下设备能源自动供给技术和信息智能交换技术；以黄河科考站为中心，在北极关键区域内布置若干无人观测站，建立

表 2 我国极地装备与技术的需求紧迫度

类别	技术 / 核心装备	名称	至2035 年 紧迫度	至2050 年 紧迫度
极地科学装备	技术	极地海洋观测与环境预报技术	+++	+++
		极地导航技术	+++	+++
		极地通信技术	+++	+++
	核心装备	极地破冰科考船	+++	+++
极地船舶装备	技术	冰浮标、冰下无人潜器、冰下滑翔机等仪器装备	+++	+++
		极地冰载荷预报技术	+++	+++
		智能冬装、低温材料涂层技术	++	+++
		船舶新型破冰技术	++	+++
		北极航行应急救援技术	++	+++
		极地船舶实时监测及安全航行智能决策技术	++	+++
	核心装备	极地破冰船队	+	++
		极地多用途船队	++	+++
		极地LNG船队	+++	+++
		极地邮轮	+	+
极地资源开发装备	技术	新型极地抗冰勘探与钻井平台设计	++	+++
		极地低温钻井技术	+	+++
		全封闭抗低温平台技术	+	+++
		“冰情参数-物模-装备设计制造-安全运行-冰情监测-预警保障”全生命周期配套技术	+++	+++
	核心装备	极地抗冰钻井船 / 平台	+	++
		极地抗冰勘探船 / 平台	+	++

注：“+++”代表非常紧迫；“+”代表需求紧迫度不高。

极区关键区域能源供给和通信网络。

3. 极地通信技术及数据共享平台

重点研究水声通信和电磁波通信转换技术，打通天基观测网络、冰基观测网络、海基观测网络通信壁垒，构建天基-冰基-海基立体化、绿色、智能极地观测网络；形成极地区域气候、冰盖、地质、海洋环境条件数据共享平台和基于观测数据的极地气候与海洋环境预报模型，为极地区域科学研究、航道开辟、资源探测提供数据、技术和设备支持。

(二) 攻克极地航行船舶技术

随着全球气候变暖，到 21 世纪下半叶，北极可能会出现夏季无冰的商业化航线，各国对极地船舶的需求将不断上升。目前俄罗斯、欧洲、美国等近极地国家和地区对极地船舶的需求最为迫切，在极地破冰船、多用途船、LNG 船方面具有

绝对技术优势，我国短期内实现追赶难度较大。因此，在北极夏季无冰商业化航线来临之前，建议依托国内在船舶装备建造技术和能力方面的优势，积累极地船舶装备相关基础技术，开展北极航道航线保障关键技术、极地大型绿色智能货运平台技术的研发。

1. 北极航道航线保障关键技术

在冰区航行环境监测预报技术方面，开展极地海冰基本物理和工程力学性质的研究，建立适用于工程尺度的精细化海冰数值模式，发展基于冰区实船监测的海冰要素监测系统；揭示北极海冰快速变化的机制并进行预测，对极地航行过程中的水文、气象、航道、冰情等环境信息进行感知、监测和评估。

在北极航行安全与环境救援技术和装备研发方面，开展北极环境下遇险船舶的险情分析、船舶应

急救技术、遇险人员转运技术、船舶急救专用装备研发,实现救助技术的无人化、智能化、多功能化、水冰两栖化。

在极地冰区船舶溢油应急处置技术和装备研发方面,开展冰油分离格栅、碎冰装置、加热系统、模块化装置设计,利用生物表面活性剂促进黏附于海冰上和漂浮在海水表面的溢油分散、乳化、溶解;研发基于上述技术的综合生物清除溢油装备。

2. 极地大型绿色智能货运平台技术

在极地航行船舶设备防寒技术装备及低温材料与涂层技术方面,研究船舶防冻除冰技术与装备、北极船舶设备冬装化风险分析与决策技术、北极航行船舶机械设备运行的可靠性评价与管理技术、极地船舶逃生救生技术与装备等。

在极地船舶结构完整性管理及新型破冰技术方面,建立准确描述海冰真实力学性能的本构关系、精确再现海冰真实破损场景的仿真手段、有效模拟船-水-冰相互作用的数值技术;研发基于冰载荷直接预报的高级结构分析与安全评估技术,建立随机动态冰载荷作用下船体结构疲劳强度分析方法。

在极地船舶综合性能预报及智能货运平台方面,运用理论分析、数值计算、物模试验、虚拟仿真、实船试验等方法,评价船舶综合水动力性能,兼顾冰/水动力特性;综合考虑无冰和冰区航行状态,发展冰环境条件下船舶性能主要影响因子的预报技术,进而建立极地船舶优化设计技术,开发绿色船型,提升极地船舶能效。

(三) 发展极地资源勘探关键装备

极地地区特别是北极潜在资源丰富,随着技术不断进步以及海冰的逐年减少,北极资源开发将很快具有可行性。世界各国围绕北极资源可持续开发利用的博弈正在加剧,在环境保护前提下的北极资源可持续开发成为北极地区核心要务。目前,北极资源的勘探程度较低且装备缺乏,提高极区资源勘探装备能力是未来北极资源经济可持续发展的重要方向。

1. 建设极地冰区资源勘探装备体系,形成冰区资源自主勘探能力

开展冰区多功能勘探船/平台及其核心装备的研发、设计与建造,完善极地勘探装备的总装设计及建造能力,打造由破冰船-拖船-勘探船或平台-

供给船组成的极地资源勘探船队;基本形成冰区资源全天候自主勘探能力,为极地资源的可持续开发利用奠定基础,推动建立我国极地装备工业体系。

2. 发展适应极地恶劣环境和严苛环保要求的资源勘探配套装备与技术

认识资源勘探过程中低温及大温变条件下的固液特性与变化机制,攻克极地低温和冻土钻井技术,研发冰下/水下气枪声波物探装备、低温钻机、全封闭作业环境抗冰平台等极地勘探所需的关键装备,为极地资源的高效勘探提供保障。

致谢

本专题研究工作得到中国工程院“海洋装备发展战略研究”项目组的大力支持,在此表示诚挚的感谢!

参考文献

- [1] Danish Meteorological Institute. Northern hemisphere sea ice extent [EB/OL]. (2020-01-20) [2020-08-12]. <http://ocean.dmi.dk/arctic/icecover.uk.php>.
- [2] Nieuwejaar P, Mazauric V, Betzler C, et al. Next generation European research vessels: Current status and foreseeable evolution [R]. Ostend: European Marine Board, 2019.
- [3] 蓝海星, 王国亮, 魏博宇. 国外北极地区装备技术发展动向 [J]. 军事文摘, 2018, 431(23): 31-33.
Lan H X, Wang G L, Wei B Y. Development trends of foreign Arctic equipment technology [J]. Military Digest, 2018, 431(23): 31-33.
- [4] Plass S, Clazzer F, Bekkadal F. Current situation and future innovations in Arctic communications [C]. Boston: IEEE 82nd Vehicular Technology Conference, 2015.
- [5] Kirkko-Jaakkola M, Leppälä L, Ferrara G, et al. Challenges in Arctic navigation and geospatial data: User perspective and solutions roadmap [R]. Helsinki: Ministry of Transport and Communications, 2020.
- [6] 师桂杰, 高大威. 我国极地船舶能力分析与发展建议 [J]. 极地研究, 2018, 30(4): 429-438.
Shi G J, Gao D W. China's polar shipping capacity and suggestions for development [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2018, 30(4): 429-438.
- [7] The Barents Observer. Russia moves to expand its Arctic icebreaker fleet, already the world's largest [EB/OL]. (2019-09-20) [2020-08-08]. <https://www.themoscowtimes.com/2019/09/20/russia-moves-to-expand-its-arctic-icebreaker-fleet-already-the-worlds-largest-a67370>.
- [8] Melia N, Haines K, Hawkins E. Future of the sea: Implications from opening Arctic sea routes foresight [R]. London: Government Office for Science, 2017.
- [9] 张侠, 寿建敏, 周豪杰. 北极航道海运货流类型及其规模研究 [J]. 极地研究, 2013 (2): 167-175.
Zhang X, Shou J M, Zhou H J. A Study on scale and scope of

- maritime cargoes through the Arctic passages [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2013 (2): 67–75.
- [10] Gautier D L, Bird K J, Charpentier R R, et al. First ever release of USGS offshore Arctic resource assessment [J]. Offshore, 2009, 69(8): 46–50.
- [11] Moore T E, Gautier D L. The 2008 Circum-Arctic resource appraisal [R]. Reston: U.S. Geological Survey, 2017.
- [12] 王琦, 石莉. 浅析俄罗斯极地资源开发战略与实践 [J]. 国土资源情报, 2012 (9): 16–21.
Wang Q, Shi L. Study on the strategy and practice of polar resource development in Russia [J]. Land and Resource Information, 2012 (9): 14–19.
- [13] 孙琦, 纪国栋, 汪海阁, 等. 极地钻井装备现状及发展趋势浅析 [J]. 石油钻探技术, 2012, 40(6): 47–50.
Sun Q, Ji G D, Wang H G, et al. Status and development trend of Arctic drilling equipment [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(6): 43–46.
- [14] Cahay M. Full year drilling season for MODU in Arctic area [C]. Fort Lauderdale: The 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2019.