



## 极区环境下载人潜水器作业关键技术研究

刘以旭, 许学伟, 赵晟娅, 傅文韬, 黄晓霞, 齐海滨, 李德威, 程斐, 孙永福

### Research on key technologies for manned submersible operations in polar environments

Liu Yixu, Xu Xuewei, Zhao Shengya, Fu Wentao, Huang Xiaoxia, Qi Haibin, Li Dewei, Cheng Fei, Sun Yongfu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb20260020>

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 潜水器水动力系数计算与运动稳定性判断的数值研究

Numerical study on the calculation of hydrodynamic coefficient and judgment of motion stability of submersibles  
海洋学报. 2025, 47(12): 114–125 <https://doi.org/10.12284/hyxb20250131>

##### 海底AUV关键技术综述

A review of subsea AUV technology  
海洋学报. 2023, 45(10): 1–12 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023153>

##### 盐温耦合作用下深海软黏土动态流变特性研究

Dynamic rheological properties of deep-sea soft clay under the coupled influence of temperature and salinity  
海洋学报. 2025, 47(10): 90–98 <https://doi.org/10.12284/hyxb2025093>

##### 基于多层感知器的风涌浪分离方法

Separation method of wind-wave and swell based on the multilayer perceptron  
海洋学报. 2023, 45(2): 1–12 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023001>

##### 极地船舶冰区航行中冰激结构疲劳的累积损伤分析

Cumulative damage analysis of ice-induced structural fatigue for polar ships navigating in ice-covered regions  
海洋学报. 2023, 45(7): 102–109 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023051>

##### 基于地球系统模式的局地化粒子滤波器与集合卡尔曼滤波器同化实验

Data assimilation experiments using localized particle filter and ensemble Kalman filter with community earth system model  
海洋学报. 2021, 43(10): 137–148 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021139>

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘以旭, 许学伟, 赵晟娅, 等. 极区环境下载人潜水器作业关键技术研究[J]. 海洋学报, 2026, 48(2): 1–10, doi:10.12284/hyxb20260020  
Liu Yixu, Xu Xuewei, Zhao Shengya, et al. Research on key technologies for manned submersible operations in polar environments[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(2): 1–10, doi:10.12284/hyxb20260020

# 极区环境下载人潜水器作业关键技术研究

刘以旭<sup>1</sup>, 许学伟<sup>1</sup>, 赵晟娅<sup>1,2</sup>, 傅文韬<sup>1</sup>, 黄晓霞<sup>3</sup>,  
齐海滨<sup>1,4</sup>, 李德威<sup>1</sup>, 程斐<sup>5</sup>, 孙永福<sup>1\*</sup>

(1. 国家深海基地管理中心, 山东 青岛 266237; 2. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150006; 3. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572000; 4. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 5. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

**摘要:** 中国“蛟龙”号载人潜水器于 2025 年成功完成首次北极冰区载人深潜, 标志着我国深海探测迈出了从“全海深”到“全海域”的关键第一步。本次科考面临极区低温、动态海冰、地磁异常及复杂水声环境等多重挑战, 我们对“蛟龙”号进行了系统性极区适应性改造, 并在潜水器布放回收作业模式、冰下安全上浮引导与导航定位探测方面取得关键技术突破。本文系统梳理了极区环境下载人深潜作业面临的核心难题, 重点阐述了潜水器针对性改造方案以及世界首次极区双潜器协同作业中的关键技术, 旨在为我国未来常态化开展极区深海探测、生境研究与资源勘查提供技术参考与工程范式。

**关键词:** 极区深潜; 载人潜水器; “蛟龙”号; 导航定位; 双潜器协同

中图分类号: P754.3 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2026)02-0001-10

## 1 引言

极地海域是全球气候系统的关键调节器, 也是地球系统科学的前沿制高点, 蕴藏着独特的生物资源与地质奥秘。近年来, 随着全球气候变暖及海冰加速融化, 极区矿物和航道等资源逐渐呈现可开发态势, 已成为各国科技与战略关注的焦点<sup>[1-4]</sup>。然而, 该区域常年被海冰覆盖, 具有水面极端低温、高纬度、地磁场水平分量弱且变化剧烈、活跃的电离层扰动, 以及持续漂移的海冰, 共同构成了对深海探测装备与技术体系的极限考验<sup>[5]</sup>。因此, 极区冰下, 尤其是密集冰区的载人深潜作业因技术复杂性极高、安全风险突出, 长期被国际深海工程界视为尚未完全攻克的世界性难题。

北极深海探索的早期实践, 多属于高技术风险的探索性任务。1958 年, 美国“鹦鹉螺”号核潜艇从格陵

兰海出发(代号“阳光行动”), 经过约 11 天、近 3 000 km 的潜航, 抵达北极点正下方后继续在冰下航行 96 h, 最终在格陵兰岛东北部外海浮出水面, 实现了人类历史上首次从水下穿越北极点的航行, 证明了核潜艇在北极冰盖下的战略机动能力, 验证了冰下导航和通信的可行性<sup>[6]</sup>。2007 年俄罗斯借助“和平-1”号与“和平-2”号两艘载人潜水器, 在 Arktika 级核动力破冰母船的保障下, 于北极点完成了人类首次载人深潜海底探测, 下潜深度 4 302 m<sup>[7,8]</sup>。该任务的核心技术挑战在于, 潜水器需在下潜数小时后, 在持续漂移且可能重新冻结的海冰中, 精准定位并安全返回唯一的初始下潜通道——冰间湖出口。这凸显北极载人深潜是一项高风险、难以实现业务化运行的探险活动, 尚未形成一套可支持系统性、常态化科学考察的完整技术体系。自 1999 年首次开展北极科考以来, 我国已累计执行十余次北冰洋科学考察任务<sup>[9]</sup>, 但极区载人

收稿日期: 2026-02-10; 修订日期: 2026-04-09。

基金项目: 国家自然科学基金(42504007); 国家重点研发计划项目(2023YFC2812900, 2024YFC2813203)。

作者简介: 刘以旭(1991—), 男, 山东省潍坊市人, 从事水下导航定位相关研究工作。E-mail: lyx@ndsc.org.cn

\* 通信作者: 孙永福, 研究员, 研究方向为海洋地质学。E-mail: sunyongfu@ndsc.org.cn

深潜此前并未开展相关工作。

为推动我国形成极区载人深潜作业能力,我国于2025年夏季组织实施了迄今规模最大的北冰洋综合科学考察。“蛟龙”号载人潜水器在“雪龙2”号的破冰保障下,依托“深海一号”母船,在楚科奇海作业区成功完成了我国首次北极冰区载人深潜任务<sup>[10]</sup>,标志着我国载人深潜能力迈出从“全海深”到“全海域”的关键第一步。任务中,“蛟龙”号与遥控式无人潜水器实现了全球首次北极海底有人/无人协同作业,并与“探索三号”船搭载的“奋斗者”号载人潜水器完成了全球首次双载人潜水器极区水下协同作业。这一系列成就,不仅验证了我国在北极密集冰区开展连续、协同深潜作业的综合能力,更从工程实践层面验证了极区环境深潜作业关键技术体系的工程适用性。该航次取得的成果,提升了深海装备与关键技术的极区作业水平,推动了联合国“海洋十年”数字化典型深海生境大科学计划的实施,为极区生物多样性保护与生态环境评价提供有力支撑,加快了海洋科技创新的步伐。

为突破极区常态化作业的瓶颈,近年来国际上面向冰下环境感知、长航时自主导航等技术研究持续深入。在极区冰下观测网络方面,美国正系统性地推进极区观测能力建设。2012年,美国国防部高级研究计划局启动“极地态势感知”项目,重点发展冰下、冰面态势感知技术。2019年,发展了北极移动观测系统,旨在集成冰下声学探测与通信中继等技术,以构建克服冰层阻隔的广域监测体系<sup>[11]</sup>。中国科学院声学研究所、哈尔滨工程大学等单位长期致力于水声通信与信息技术研究,在该领域取得了一系列代表性成果,推动了极地水下导航定位技术的进步<sup>[12-14]</sup>。潜水器为完成冰下科考任务,需要在预定作业点下潜并沿预定航线航行,高精度冰下导航技术是保证安全和效率的前提<sup>[12]</sup>。目前对非极区水下导航定位技术的研究已相对成熟<sup>[15-18]</sup>。在极区冰下导航定位方面,2008年,JAKUBA等部署了长基线定位系统,使用直升机上的声学测距仪进行信标标定,回收时直升机定位冰下信标,破冰船在定位点破冰回收,但布设的6只信标中有4只未能回收<sup>[19]</sup>。2015年,美国伍兹霍尔海洋研究所在波弗特海和楚科奇海北部边缘冰区部署了冰下远程声学导航通信系统<sup>[12,20]</sup>。为应对冰下潜航器与冰基浮标间通信受限的挑战,挪威理工大学的研究人员于2020年提出并验证了利用单个浮标实现紧耦合组合导航或构建虚拟长基线进行导航<sup>[21]</sup>。中科院沈阳自动化所研发的Polar ARV(Autonomous Remote Vehicle)和TS-1 000 AUV(Autonomous Under-

water Vehicle)已应用于北极和南极水下调查<sup>[22,23]</sup>。“悟空6000”AUV搭乘“中山大学极地”号完成极区首次下潜,为第15次北极科考提供了重要的水/冰下观测技术装备。虽然国内外单位针对极区特殊环境探测手段进行了研究,但极区现有通信导航方法仍存在高纬度覆盖不足、手段及精度受限等瓶颈。

本文围绕“蛟龙”号潜水器北极首潜及协同作业的工程实践,对其中所验证的关键技术体系进行了系统性提炼与总结,以期为我国构建常态化、业务化的极区深海探测能力提供可复制的工程范式与技术基础。

## 2 极区复杂作业环境特征与挑战分析

极区海洋环境在物理特性、地球物理场及动力过程方面,与中低纬度常规海域存在本质性区别。其中,极端低温气候、高纬度特有的几何效应、频繁的地磁扰动与活跃的电离层扰动,以及高度动态的海冰覆盖,并非孤立存在的环境要素;这些要素相互耦合、彼此强化,共同构成了对深海探测技术体系的复合挑战。上述环境的耦合效应,对载人深潜作业平台的长期可靠性、导航与控制系统的环境适应性,以及全流程作业的安全性,提出了较常规深海任务更为复杂和苛刻的技术要求。

### 2.1 极端低温气候

极区作业环境以持续性极端低温、强风暴雪与浓雾、极昼/极夜为主要特征,为科考人员甲板作业、装备可靠性和作业窗口期均带来较大挑战。虽然北极平均气温在再创新高,但海水表层温度长期处于冰点附近,区域年平均气温仅为 $-22.3^{\circ}\text{C}$ <sup>[13]</sup>。与常规大洋显著不同的是,极区从海面至底层的水体温度整体分布于 $[-2^{\circ}\text{C}, 3^{\circ}\text{C}]$ 的低温区间,而开阔大洋的典型温度范围则在 $[2^{\circ}\text{C}, 30^{\circ}\text{C}]$ 之间。这种全域性低温对载人潜水器及其支持系统的材料与物理化学性能构成了基础性约束。

当前,载人潜水器的动力源以锂电池为主。尽管不同体系的锂电池低温特性存在差异,但其电化学活性、放电容量及功率输出均随环境温度降低而呈现规律性衰减<sup>[24]</sup>。“蛟龙”号新升级了充油式锂电池系统,有效缓冲了外界温度剧烈波动对电池组内部电化学反应环境的影响,从而提升了其在低温条件下的工作稳定性和可靠性。与此同时,极区持续低温环境对载人潜水器及其支持系统的液压部件构成了基础性约束,可能会导致液压回路中的精密阀件与密封元件韧性降低,大幅增加了密封失效或构件损伤的风险。装备中各类润滑油与液压介质的流变特性会发生显

著改变,其粘度随温度下降而急剧上升,直接导致传动阻力增大、响应迟滞及效率衰减。

此次北极深潜中,首潜作业水面母船计划通过液压驱动装置布放其船载超短基线定位系统基阵。由于环境温度过低,液压油温降至工作范围以下,致使基阵无法正常释放。作业团队采取了更换低温液压油并对液压油箱进行持续 24 h 预热的技术措施,保障了后续潜次中基阵的可靠布放。同时,由于低温环境下液压介质流变特性显著改变、密封材料韧性降低、传动系统内压力聚集,抵达楚科奇海域后,潜水器布放回收水面支持系统 A 型架马达端盖出现漏油现象。作业团队通过更换密封圈、增涂密封胶达到密封效果,通过增加回油支路减缓系统压力聚集;同时在潜水器布放回收作业前预先开启泵站并增加外置加热装置,通过各执行机构动作,让系统高温介质充满各执行机构油缸,将系统油液温度维持在 30°左右,后续未再出现 A 型架马达漏油现象。这些实例印证了低温环境对作业装备可靠性的直接影响,也凸显了针对性的装备适应性改造升级在极区深潜工程中的必要性。

## 2.2 高纬度地理与地球物理场特性

高纬度地区独特的地理空间结构与复杂多变的地球物理场环境相互耦合,对深海潜水器作业底图基准,以及所依赖的导航、定位及通信等关键技术形成了复合约束效应。

### (1) 地图投影变形影响

极区高纬度作业面临的首要地理制约源于经线向极点的急剧收束。这一几何特性导致通用横轴墨卡托等常规海图投影在极区产生严重的系统性形变<sup>[25,26]</sup>。当地理纬度超过北纬 80°时,传统地图投影的变形迅速加剧,导致常规导航方法失效或精度急剧下降。由此引入的投影偏差,使得基于此类海图进行的航路规划、目标定位及航迹绘算均会承载显著的地理空间位置误差。

载人潜水器作业高度依赖事前精确规划,一般情况下需要提前获取计划作业区域的多波束测深地形图,为载人潜水器水下测线规划提供基础。作业前,预定的海底作业点坐标需从转换至航行投影平面,再导入潜水器导航系统。若坐标转换所依据的投影模型与极区实际空间几何不符,导航系统所引导抵达的“理论下潜点”将与真实的“地理下潜点”产生系统性偏移。在深海复杂地形区,此类偏移不仅可能导致科考任务失败,更会因误判地形而将潜水器置于危险境地。因此,极区深潜作业必须采用如通用极球面投影

等适用于极区的专用投影体系,并在从全局任务规划到局部实时导航的全流程中,实现严格的现场与图上空间位置统一。

### (2) 卫星定位衰减与惯性导航初始对准困境

高纬度区域对全球卫星导航系统的可用性与可靠性构成了结构与环境的双重挑战。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。在几何构型层面,受限于 GNSS 卫星轨道倾角,其在极区天顶方向的分布显著稀疏,导致卫星几何精度因子恶化<sup>[27]</sup>,定位解算的精度根基薄弱。更为严峻的挑战源于活跃的电离层物理过程<sup>[28]</sup>,在地球磁场的引导下,来自太阳的带电粒子集中注入极区大气,引发频繁且剧烈的电离层闪烁与磁暴<sup>[29]</sup>。此类扰动可使信号衰减深度、载波相位噪声及伪距误差增至中低纬度地区的数倍乃至十倍,造成 GNSS 信号深度衰落、周跳甚至持续失锁,致使母船及潜水器在水面的实时定位结果出现严重偏差或中断。

GNSS 信号的衰减与失效,直接破坏了惯性导航系统完成高精度初始对准所必需的外部绝对位置基准<sup>[30]</sup>。初始对准旨在为惯导系统精确赋定初始位置、航向及水平姿态<sup>[31,32]</sup>,系统固有的陀螺漂移与加速度计零偏等误差始终存在,若参考信号不可靠导致初始对准失败,这些误差将无法被有效补偿,从而对导航精度产生影响,并随水下航行时间呈累积放大。对于长航时、大范围的冰下作业而言,将直接影响潜水器导航精度,对任务成功与潜水器安全构成威胁。

此次北极深潜作业中,在进入北极圈前的潜次,GNSS 信号可在较短时间内锁定,并完成惯导系统的初始校准。然而,随着潜次作业纬度不断升高,惯导系统的有效对准时间显著延长,甚至在多个高纬度作业点位反复出现对准失败、无法获取可信初始基准的情况。这一现象不仅直接挤占了宝贵的作业准备时间,更从实践层面凸显了在极区极端环境下,GNSS 信号进行惯导对准的脆弱性。

### (3) 地磁场异常对导航传感器的干扰

高纬度地区地磁场的异常与不稳定,使得惯性导航系统失去了进行航向校准与维持所依赖的可靠外部基准,而航向信息对于潜水器安全作业和航行至关重要。在极区导航中,磁罗经作为关键辅助传感器,其作用是在 GNSS 失效时为惯导系统提供初始真北方向并持续修正其航向漂移。然而,在磁极附近,地磁场水平分量急剧衰减,导致磁方向定义模糊、磁罗

经输出失效而产生大幅偏差<sup>[26]</sup>。这种“磁北”基准的丧失,对惯导系统构成双重制约:其一,系统在初始对准阶段无法获得可靠的航向参考,导致初始航向误差增大;其二,在水下航行期间(潜水器海底航行时间通常在4 h以上),惯导系统则失去利用磁罗盘提供的绝对航向信息来抑制螺漂移所引起航向累积误差的能力。这导致惯导系统的航向误差无法被有效约束,

从而加速整个导航解算误差的累积与发散,严重威胁长航时冰下导航的精度与可靠性。

### 2.3 动态海冰的多重制约

海冰构成了极区作业中最具主导性、动态性和复杂性的环境障碍。即便在夏季科考窗口期,北冰洋中央海盆的海冰覆盖率仍普遍高于80%,形成连片密集冰区,对载人深潜作业构成多维度制约(图1)。

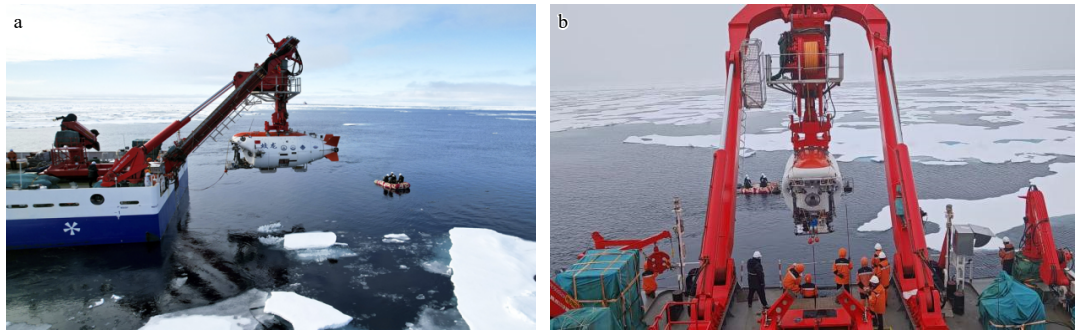


图1 动态海冰环境布放“蛟龙”号

Fig. 1 Deploying the *Jiaolong* in a dynamic sea ice environment

首先,连续冰层物理阻断了海-气界面的直接交换,使得潜水器无法像在开阔海域那样,在任意位置上浮并与回收。这从根本上改变了上浮-回收的作业模式。其次,尽管有“雪龙2”号破冰船辅助开辟作业区(图2),但在风与洋流驱动下,海冰持续漂移,导致预先开辟的冰间湖或通道可能在数小时内闭合或显著位移。因此,潜水器必须具备水下实时冰情探测和上浮点动态调整能力,否则将面临被困冰下的重大安全风险。第三,冰层与海水界面的声阻抗差异,导致声波发生强烈的反射、散射与吸收,引发多径效应和信号衰减,这直接造成潜水器与母船之间的水声通信可靠性下降、测距误差增大,尤其使得依赖声学信号的超短基线和长基线定位系统精度显著降低。因此,海冰不仅是物理屏障,更从根本上影响了水下导航、

定位与信息传输所依赖的声学环境,成为制约冰下高可靠作业的核心瓶颈。

## 3 载人潜水器系统组成及极区适应性与改造

### 3.1 “蛟龙”号载人潜水器系统

“蛟龙”号载人潜水器是中国首台自主设计与集成研制的作业型深潜装备(图3),于2007年完成总装,并于2012年在马里亚纳海沟创下了7 062 m的当时世界同类型载人潜水器最大下潜深度纪录<sup>[33]</sup>。自交付以来,“蛟龙”号经历了系统的维护与升级,目前累计下潜次数已超过400次,其技术状态通过周期性大修、中修与多次针对性升级得以持续保持与提升。

“蛟龙”号是一个复杂的系统工程,由总体、舾装、推进、电力、声学、控制、液压等共计11个分系统构成。2025年,“蛟龙”号进行了迭代升级和关键部

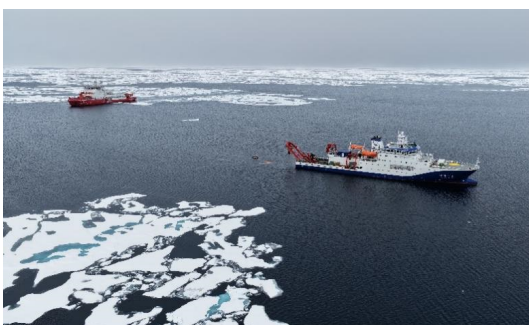


图2 “蛟龙”号载人潜水器在“雪龙2”号破冰保障下于冰间湖回收的作业场景

Fig. 2 The *Jiaolong* manned submersible retrieving equipment from an ice lake, supported by icebreaking operations of the *Xuelong-2*



图3 “蛟龙”号载人潜水器

Fig. 3 The *Jiaolong* manned submersible

件国产化替代,主要包括7000 m级大容量、高密度柔性锂电池系统和高效直驱型低噪直流推进等关键部件升级,同时优化液压系统、视像传输系统、作业工具包和故障诊断辅助决策等系统。

“蛟龙”号的标准海上作业流程包括:出航前维护、下潜前准备、甲板起吊与布放、水面漂浮、可控下潜、坐底或悬停作业、任务完成后抛载上浮、出水漂浮、拖曳回收及母船系固等关键阶段。这一成熟流程是其在开阔海域可靠作业的基础,但在极区冰盖环境下,其上浮回收等关键环节则面临根本性改变。

### 3.2 极区作业关键技术适应性改造

为应对北极密集冰区带来的导航信号衰减、上浮点不确定及水下通信环境恶化等系列挑战,“蛟龙”号在执行北极任务前进行了专项关键技术攻关与系统

升级,重点突破了以下三项关键技术。

#### (1)多级可视化安全上浮引导技术

极区作业的核心风险在于潜水器上浮过程中与浮冰发生碰撞。为破解这一难题,项目团队研发并应用了一套多级、可视化的安全上浮引导技术(图4)。该技术体系整合了二次抛载精确悬停控制、水下光学引导灯阵与近水面高清摄像观测。其工作逻辑在于:通过二次抛载使潜水器在水下200 m至50 m的关键上浮阶段具备“定得住”的悬停能力;利用引导灯阵为潜航员提供“找得准”的母船相对方位指引;最终借助近水面摄像实现“看得清”的冰层与出口实时观测。这一协同机制使得潜水器能够精准识别并锁定有限的冰间湖或无冰窗口,从而将上浮路径的动态选择与末端出水过程的安全冗余度提升至工程可接受的水平。



图4 “蛟龙”号基于多级可视化安全引导上浮(a)和水下“蛟龙”号摄像机画面(b)

Fig. 4 *Jiaolong* ascends safely guided by multi-level visual safety protocols (a) and underwater footage captured by *Jiaolong*'s camera (b)

#### (2)极地浮冰区潜水器定点回收模式

在传统的开阔海域作业中,通常采用“船找潜器”的回收模式,即潜水器抛载上浮至水面后,由母船机动接近潜水器并实施回收。然而,在浮冰密布、船舶机动严重受限的极区,这种模式的效率与安全性均无法保证。为此,本次科考作业首创了适用于极地的“潜器找船”定点回收模式。在该模式下,水面支持母船利用动力定位系统保持固定的位置与艏向,形成稳定的回收基准点。潜水器完成水下作业安全出水后,依靠自身动力,主动航行至母船舰尾预定的回收区域(图5)。这一模式的转换,使回收作业的主动权由受冰情制约的水面船舶,转移至更具环境适应性的潜水器自身,显著提高了在动态冰区环境中作业流程的确定性、效率与整体安全水平。

#### (3)潜水器极区多系统导航探测技术

导航与探测能力的强化是支撑上述两项作业创新的技术基础。“蛟龙”号的声学系统原本已集成水声通信机、测深侧扫声呐、避碰声呐、成像声呐、声

学多普勒计程仪及超短基线系统等设备。为应对极区高纬度地磁异常、GNSS信号衰减等因素干扰,本次升级重点聚焦于声学探测与自主导航体系的增强。

此次科考出航前,“蛟龙”号升级加装了适应极区环境的高精度惯性导航系统,以提供连续可靠的运动参数与航位推算;为补偿近水面区域因超短基线定位系统空间开角扩大导致的几何精度劣化,专门加装了冰基长基线定位系统,旨在为关键作业阶段提供高精



图5 “蛟龙”号在近水面悬停机动航行至船艉

Fig. 5 The *Jiaolong* is manoeuvring towards the stern while hovering near the surface

度绝对位置基准,从而为母船实时跟踪潜水器近水面位姿提供可靠数据。此外,通过加装向上多波束探测系统,潜水器具备了直接探测头顶冰层下表面形态与分布的能力(图6),可辅助潜航员识别海面浮冰与冰间湖,从而为选择安全上浮窗口提供决策依据。

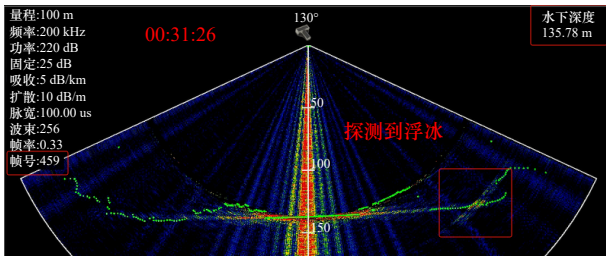


图6 “蛟龙”号加装对冰多波束系统探测海面浮冰

Fig. 6 A multi-beam ice detection system has been installed on the *Jiaolong* submersible, enabling it to explore sea ice floes

为应对极区环境的作业挑战,“蛟龙”号开展了主动上浮安全引导、主动定点回收与精准导航探测三项关键技术攻关,成功实现了潜水器在极端条件下的安全、高效布放、作业与回收全过程。该成果标志着我国已完整掌握了在极地深海极端环境下实施潜水器作业的核心技术能力。

## 4 极区双潜器协同关键技术

极区科考面临作业窗口期短、环境瞬息万变的挑战,传统单潜器串行作业模式在效率和数据覆盖面上存在局限。发展双潜器乃至多潜器协同作业能力,是提升极区深海探测效率、实现复杂科学目标的有效手段。2025年中国第15次北冰洋科学考察中,依托“深

海一号”支持母船,完成极区“蛟龙”号载人潜水器与遥控式无人潜水器(Remotely Operated Vehicle, ROV)单船双潜器协同首潜,这也是世界首次极区有人/无人系统协同作业。

基于上述经验积累,“深海一号”与“探索三号”两艘支持母船在楚科奇海作业区汇合,组织“蛟龙”号与“奋斗者”号双载人潜水器实施了联合下潜作业。此举标志着我国极区深潜作业能力从单一平台独立作业向多平台、体系化协同作业的跨越。此次协同作业的成功实施,得益于高效、可靠的安全作业规范、团队协作以及定位通讯技术的支撑。

### 4.1 双潜器作业模式及高效布放与回收技术

#### (1) 单船异构双潜器时序协同作业流程

在单母船同时支持载人潜水器与ROV作业的场景下,受限于甲板空间、人员等因素,创新采用“分阶段布放-协同定位搜寻-联合精细作业-分阶段回收”的完整协同作业模式。

首先,按常规作业流程布放“蛟龙”号,待其下潜至预定作业深度并完成均衡调整后,即按计划开展自主科学调查任务。此时,母船指挥中心依据超短基线系统提供的连续定位数据,在确认与“蛟龙”号保持足够安全距离前提下,开始布放ROV(图7a)。由于“蛟龙”号无缆系缚,具备更高的机动自由度,因此由母船作为指挥中枢,基于对两套定位信息的综合研判,引导“蛟龙”号主动抵近位置相对固定的ROV,基于可视化系统发现彼此后,继而展开既定的联合精细作业(图7b)。

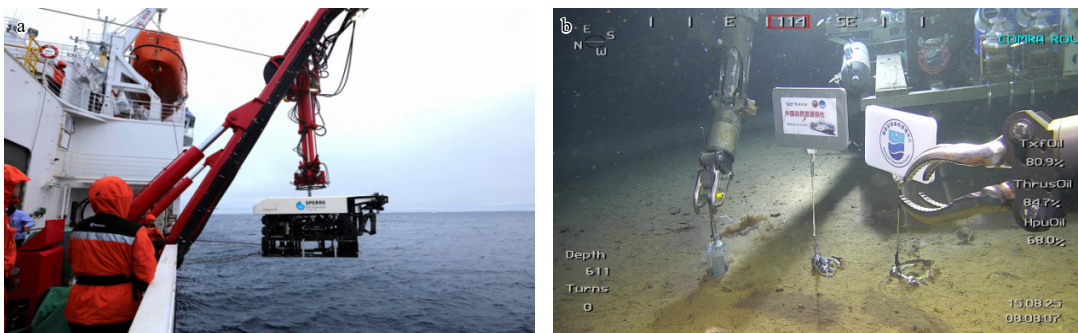


图7 “深海一号”船布放ROV(a)和“蛟龙”号与ROV水下联合作业(b)

Fig. 7 Deployment of an ROV from the support vessel *Shenhai-1* (a) and joint underwater operations between the *Jiaolong* submersible and ROV (b)

联合任务完成后,为规避回收过程中的潜在干涉,“蛟龙”号率先驶离至指定安全区域开展小范围科学考察任务。随后,母船优先回收ROV至甲板,并在进行完备的现场安全确认后,按照极区作业规程完成“蛟龙”号回收。整个流程以母船为指挥节点,通过严

格的时序与空间规划,安全、高效的实现了单船异构双潜器协同作业。

#### (2) 双船双载人潜水器并行协同作业流程

在两艘独立母船(“深海一号”与“探索三号”)分别支持两艘载人潜水器(“蛟龙”号与“奋斗者”号)作业

场景下,在作业潜力提升的同时,也引入了跨平台协同的复杂性。为此,确立具备双潜器同步定位能力的“深海一号”为指挥船,负责全局任务协调与信息汇聚。

作业前,基于高分辨率海底地形数据,共同选定地形平缓、空间开阔的联合作业区,并约定一个精确的水下坐标点作为协同行动的基准。布放阶段,两艘母船按预定方案就位,两艘载人潜水器可实现近乎同

步的布放入水。抛载近底后,依托同步水声定位与通信技术,在母船指挥下,“蛟龙”号与“奋斗者”号以约定的中间点相向航行并抵近会合,完成了标志性协同动作(交换各自“LOGO”名片)及既定的联合科学任务(协同采样、互拍作业高清影像)(图8)。任务结束后,两潜器按计划有序驶离,各自开展后续科考任务,最终由各自母船独立完成回收。



图8 极区首次双载人潜水器联合作业场景

Fig. 8 Scenario of the first joint operation of two manned submersibles in the polar regions

此并行作业模式在提升整体可靠作业效率的同时,也对技术体系提出了更高要求。一方面,需要实现跨平台的精确定位与信息同步;另一方面,也必须保障水声通信链路在全作业周期内的持续稳定。

#### 4.2 双潜器同步水声定位与通讯技术

##### (1)“一对多”同步水声定位技术

在双潜器模式下,精准的定位信息是确保双潜器安全航行和会师的重要前提。其关键技术在于,将传统的船载超短基线定位系统从“一对一”模式升级为“一对多”模式(图9)。在此模式下,系统采用码分多址原理实现目标区分。每个潜器搭载应答器被赋予一个独特的伪随机编码序列,船载基阵向水下广播询问信号,各潜器使用自身唯一的编码调制并回复应答信号。船载主机通过相关处理,从混合的回波信号中

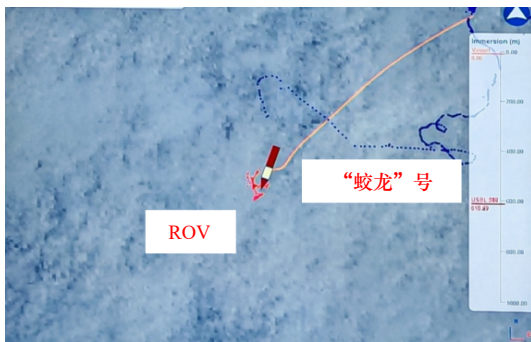


图9 单船双潜器同步定位

Fig. 9 Single-vessel, dual-submersible synchronous positioning

红色点为ROV定位坐标,蓝色点为“蛟龙”号定位坐标

Red dots indicate ROV coordinates and blue dots indicate Jiaolong coordinates

识别、分离出具有特定编码的信号,进而独立解算出每个目标的位置。最终,系统在同一显控界面上实时显示双潜器的精确三维相对位置(图10)。

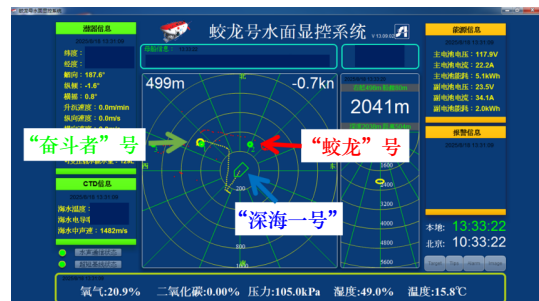


图10 双船双潜器同步定位轨迹显示

Fig. 10 Synchronous positioning trajectories of dual-vessel dual-submersible operation.

点1为“奋斗者”号下潜点,点2为“蛟龙”号下潜点

Point 1: diving location of Fendouzhe; point 2: diving location of Jiaolong

这种“一对多”的同步定位能力,使水面指挥中心、潜航员及ROV操作员均能清晰掌握彼此动态位置关系,为保持安全距离、规划会合路径提供了至关重要的信息保障,从而保证了双潜器在海底的“顺利会师”。

##### (2)“双船-双潜器”一体化水声通信网络

在更为复杂的双船双载人潜水器模式下,需构建一个跨平台的协同通信网络,建立四方共享的水声通信链路。除了每艘支持母船需独立完成对两台潜水器的定位外,系统通过采用兼容的声学通信协议与精

密的时隙调度机制,将“双船-双潜器”整合入同一通信网络。在此网络下,任何一方(任一潜航员或水面指挥员)发出的语音指令或数据报文,均可被其他三方同步接收,实现了近乎透明的跨平台直接协调。这不仅极大提升了协同作业的实时性与决策灵活性,也为紧急情况下的应急处置提供了关键的冗余通信通道。该模式的实现,要求对四方节点的信号收发时序和编码识别进行严格协调,以避免相互干扰。

此次极区双潜器协同作业成功攻克了多项关键技术,先后开创了密集冰区(7-8成冰)“两船一潜器”、少冰区(1-2成冰)“一船两潜器”和“两船两潜器”三类协同作业模式。通过系统性的工程实践,积累了宝贵的极区作业经验,不仅显著提升了极区深海探测与采样的效率,也增强了在复杂深海生境中进行海底资源精细化调查的作业能力。

## 5 总结

面向北极密集冰区低温、高纬及动态海冰等多重复杂环境挑战,我国在第15次北冰洋科学考察中,成功组织实施了“蛟龙”号首次北极冰区载人深潜及多潜器协同科考任务,标志着我国具备了极区载人深潜能力。本文基于此次科考工程实践,系统梳理并总结了任务中所验证的关键技术体系,主要结论如下:

首先,针对“蛟龙”号载人潜水器本体,开展了面向极区环境的系统性适应性改造与技术升级。通过对二次抛载机构、水面引导灯阵及导航探测系统的针对性增强,“蛟龙”号已具备冰下环境自主感知与应

对能力。其次,在作业流程层面,突破了极区冰下安全作业的关键技术瓶颈。针对冰层遮蔽上浮通道带来的重大风险,重点发展了多级可视化安全上浮引导技术,并创新提出了“潜器找船”定点回收作业模式,系统优化并提升了传统开阔海域作业流程在极区冰下的安全性与可靠性。再者,在体系化协同探测层面,开创并实践了极区多潜器协同的作业。本次科考成功实现了单船支持下的“载人潜水器+ROV”异构协同作业,以及双船双载人潜水器的同步协同作业。通过攻克“一对多”同步水声定位、跨平台协同通信等关键技术,构建了具备实践基础、可复制的技术模式,为未来深海多潜器集群作业奠定了基础。

此次北极科考所获取的大量珍贵水体、沉积物及生物样品,以及包括高清影像、环境参数、海底地形在内的观测数据,为深入研究北极快速变化背景下的海洋地质过程与生态系统响应等,提供了不可替代的第一手科学依据,也为我国持续开展极区深海科学探索奠定了基础。

**致谢:**衷心感谢国家重点研发计划“深海和极地关键技术与装备”专项“蛟龙号关键作业技术能力提升及科学应用”(2023YFC2812900)项目和“‘蛟龙’号载人潜水器适应性改造和北冰洋海试及科学应用”课题(2024YFC2813203)对“蛟龙”号作业能力技术升级提供的支持。向所有参与此次北极科考的科考队员表示感谢并致以崇高的敬意。

## 参考文献:

- [1] 康文中. 大国博弈下的北极治理与中国权益[D]. 北京: 中共中央党校, 2012.  
Kang Wenzhong. Arctic governance and China's rights and interests under great power competition[D]. Beijing: Party School of the CPC Central Committee, 2012.
- [2] 杨剑. 北极航运与中国北极政策定位[J]. 国际观察, 2014(1): 123-137.  
Yang Jian. Arctic shipping and China's Arctic policy[J]. International Review, 2014(1): 123-137.
- [3] Post E, Forchhammer M C, Bret-Harte M S, et al. Ecological dynamics across the Arctic associated with recent climate change[J]. *Science*, 2009, 325(5946): 1355-1358.
- [4] 李振福. 北极航线的中国战略分析[J]. 中国软科学, 2009(1): 1-7.  
Li Zhenfu. Analysis of China's strategy on Arctic route[J]. China Soft Science, 2009(1): 1-7.
- [5] 程建华, 刘佳鑫, 赵琳. 极区航海导航与定位保障技术发展综述[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(5): 16-29.  
Cheng Jianhua, Liu Jiaxin, Zhao Lin. Survey on polar marine navigation and positioning system[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(5): 16-29.
- [6] Althoff W F. Arctic Mission: 90 North by Airship and Submarine[M]. Annapolis: Naval Institute Press, 2011.
- [7] 宋德勇, 刘浩, 杨申申. 极地环境载人潜水器发展关键技术分析[J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(2): 54-57.  
Song Deyong, Liu Hao, Yang Shenshen. Analysis of key technologies for development of manned submersible in polar environment[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(2): 54-57.
- [8] Nonboe M L. Is Russia an Arctic status quo power?[J]. *Politik*, 2011, 14(1): 25-32.
- [9] 高悦. 中国北极考察二十年[EB/OL]. (引用日期) [2020-08-21]. <http://www.cocc.net.cn/c/2020-08-21/72623.shtml>.  
Gao Yue. Twenty years of China's Arctic expeditions[EB/OL]. (引用日期) [2020-08-21]. <http://www.cocc.net.cn/c/2020-08-21/72623.shtml>.

- [10] 刘诗平. “蛟龙”潜冰洋[N]. 新华每日电讯, 2025-10-08(003).  
Liu Shiping. “Jiaolong” Submersible Penetrates the Ice Ocean[N]. Xinhua Daily Telegraph, 2025-10-08(003).
- [11] 于立伟, 王俊荣, 王树青, 等. 我国极地装备技术发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 84-93.  
Yu Liwei, Wang Junrong, Wang Shuqing, et al. Development strategy for polar equipment in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 84-93.
- [12] 程驰宇, 郑翠娥, 张居成, 等. 极地冰下声学定位导航技术现状及发展趋势[J]. 导航与控制, 2024, 23(5/6): 15-24.  
Cheng Chiyu, Zheng Cui'e, Zhang Jucheng, et al. Research status and development trend of polar under-ice acoustic positioning and navigation technology[J]. *Navigation and Control*, 2024, 23(5/6): 15-24.
- [13] 尹力, 王宁, 殷敬伟, 等. 极地水声信号处理研究[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 306-313.  
Yin Li, Wang Ning, Yin Jingwei, et al. Research on underwater signal processing in Arctic region[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(3): 306-313.
- [14] 李启虎, 黄海宁, 尹力, 等. 北极水声学研究的新进展和新动向[J]. 声学学报, 2018, 43(4): 420-431.  
Li Qihu, Huang Haining, Yin Li, et al. Progresses and advances in arctic underwater acoustic study[J]. *Acta Acustica*, 2018, 43(4): 420-431.
- [15] Liu Yixu, Xue Shuqiang, Qu Guoqing, et al. Influence of the ray elevation angle on seafloor positioning precision in the context of acoustic ray tracing algorithm[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 105: 102403.
- [16] Liu Huimin, Zhao Shuang, Wang Zhenjie, et al. An in-situ sound speed profile correction scheme for the tight-coupling integration of SINS/USBL in deep-sea ARV navigation[J]. *Satellite Navigation*, 2025, 6(1): 31.
- [17] Zhao Shuang, Yang Yuanxi, Xue Shuqiang, et al. A novel GNSS-Acoustic positioning model for a seafloor hybrid constellation with fixed and moored beacons[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 9701314.
- [18] Liu Yixu, Sun Yongfu, Wang Xiangxin, et al. An adaptive stratification algorithm based on gradient fitting deviation and its application to acoustic ray-tracing algorithm[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 311(Pt 1): 118809.
- [19] Jakuba M V, Roman C N, Singh H, et al. Long-baseline acoustic navigation for under-ice autonomous underwater vehicle operations[J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25(11/12): 861-879.
- [20] Freitag L, Ball K, Partan J, et al. Long range acoustic communications and navigation in the Arctic[C]//OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington. Washington: IEEE, 2015: 1-5.
- [21] Norgren P, Mo-Björkelund T, Gade K, et al. Intelligent buoys for aiding AUV navigation under the ice[C]//2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV). St. Johns: IEEE, 2020: 1-7.
- [22] Zeng Junbao, Li Shuo, Liu Ya. Application of unmanned underwater vehicles in polar research[J]. *Advances in Polar Science*, 2021, 32(3): 173-184.
- [23] Fan Shuangshuang, Bose N, Liang Zeming. Polar AUV challenges and applications: a review[J]. *Drones*, 2024, 8(8): 413.
- [24] 林春景, 李斌, 常国峰, 等. 不同温度下磷酸铁锂电池内阻特性实验研究[J]. 电源技术, 2015, 39(1): 22-25.  
Lin Chunjing, Li Bin, Chang Guofeng, et al. Experimental study on internal resistance of LiFePO<sub>4</sub> batteries under different ambient temperatures[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2015, 39(1): 22-25.
- [25] Jiao Chenchen, Wan Xiaoxia, Li Houpu, et al. Dynamic projection method of electronic navigational charts for polar navigation[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(4): 577.
- [26] Salavasidis G, Munafò A, McPhail S D, et al. Terrain-aided navigation with coarse maps—toward an arctic crossing with an AUV[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2021, 46(4): 1192-1212.
- [27] Di Mingwei, Guo Bofeng, Ren Jie, et al. GNSS real-time precise point positioning in arctic northeast passage[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(10): 1345.
- [28] Spogli L, Alfonsi L, De Franceschi G, et al. Climatology of GNSS ionospheric scintillation at high latitudes[C]//Proceedings of the American Geophysical Union, Fall Meeting 2009. Noordwijk, Netherlands, 2009. (查阅网上资料, 未找到本条文献出版信息, 请确认)
- [29] Jacobsen K S, Andalsvik Y L. Overview of the 2015 St. Patrick's day storm and its consequences for RTK and PPP positioning in Norway[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2016, 6: A9.
- [30] 宁一鹏. GNSS/INS 组合导航系统初始对准及其故障修复研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
Ning Yipeng. Study on the initial alignment and fault repair of GNSS/INS integrated navigation system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [31] 杨艳娟. 捷联惯性导航系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.  
Yang Yanjuan. Study on the crucial technology of SINS[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2001.
- [32] Zhang Fubin, Gao Xiaohua, Song Wenbo. A vision aided initial alignment method of strapdown inertial navigation systems in polar regions[J]. *Sensors*, 2022, 22(13): 4691.
- [33] 刘涛, 王璇, 王帅, 等. 深海载人潜水器发展现状及技术进展[J]. 中国造船, 2012, 53(3): 233-243.  
Liu Tao, Wang Xuan, Wang Shuai, et al. The current status and technical development of deep sea manned submersible[J]. *Shipbuilding of China*, 2012, 53(3): 233-243.

## Research on key technologies for manned submersible operations in polar environments

Liu Yixu<sup>1</sup>, Xu Xuewei<sup>1</sup>, Zhao Shengya<sup>1,2</sup>, Fu Wentao<sup>1</sup>, Huang Xiaoxia<sup>3</sup>,  
Qi Haibin<sup>1,4</sup>, Li Dewei<sup>1</sup>, Cheng Fei<sup>5</sup>, Sun Yongfu<sup>1</sup>

(1. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China; 2. Harbin Engineering University, Harbin 150006, China; 3. Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China; 4. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 5. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

**Abstract:** In 2025, China's manned submersible, the *Jiaolong*, successfully completed its first manned deep-sea dive in the ice-covered waters of the Arctic, marking a pivotal first step in advancing China's deep-sea exploration from 'full ocean depth' to 'all ocean regions'. The expedition faced numerous challenges, including extremely low temperatures, shifting sea ice, geomagnetic anomalies and intricate underwater acoustic conditions. We made systematic adaptations to the *Jiaolong* submersible, achieving key technological breakthroughs in deployment and recovery, under-ice ascent guidance, and ice-zone navigation and positioning. This paper outlines the core challenges of manned deep-sea operations in polar environments. It focuses on the submersible's tailored modification plan and the key technologies implemented during the world's first coordinated dual-submersible mission in polar waters. This paper aim to provide technical references and engineering paradigms for China's future routine polar deep-sea exploration, habitat studies and resource surveys.

**Key words:** polar deep-sea diving; manned submersible; *Jiaolong*; navigation and positioning; dual-submersible collaboration