

深海水下技术装备发展研究

陈旭光^{1*}, 寇海磊¹, 牛小东¹, 王传荣², 张林强¹, 李华军¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266100; 2. 中国舰船研究院, 北京 100101)

摘要: 深海水下技术装备是认知深海、开发深海资源以及保护海洋生态的关键, 拓展深海新空间面临复杂多变的环境挑战, 亟需高水平的深海水下技术装备作支撑。本文立足我国海洋强国建设的发展实际, 分析了深海水下技术装备的体系构成和发展需求, 从深海观测/探测与感知系统、水下施工作业装备、深海水下油气生产系统、深海矿产资源开发装备4个方面出发, 梳理了国外深海水下技术装备的发展现状和趋势。在此基础上, 总结了我国深海水下技术装备研制的发展现状, 分析了发展面临的工程挑战, 剖析了相关关键技术装备体系和关键物理-力学机制, 概括了深海水下技术装备的典型装备代表和装备图谱, 凝练了我国深海水下技术装备的共性关键技术, 涵盖智能化与自动化技术、精密元器件加工制造技术、高精度定位导航、高速率通信技术、大系统力学计算与分析 and 跨尺度工程设计方法与技术等方面。为实现我国深海水下技术装备的高质量发展, 研究建议: 加强深海水下工程技术发展的顶层设计, 推动构建共性关键技术协作体系; 增强我国深海水下技术规范 and 标准的行业影响力, 大力开拓国际市场; 高质量推进兼容通用的平台建设; 注重培养深海水下工程科技创新人才, 为加速实现海洋科技产业高水平发展提供支撑。

关键词: 深海装备; 关键技术; 观测/探测与感知; 水下施工; 油气生产; 深海采矿

中图分类号: U676.6 **文献标识码:** A

Development of Deep-Sea Underwater Technology and Equipment

Chen Xuguang^{1*}, Kou Hailei¹, Niu Xiaodong¹, Wang Chuanrong²,
Zhang Linqiang¹, Li Huajun¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 2. China Ship Research and Development Academy, Beijing 100101, China)

Abstract: Deep-sea underwater technology and equipment are crucial aspects to cognize the deep sea, exploit deep-sea resources, and protect the marine ecosystem. Expanding the deep-sea space faces complex environmental challenges and urgently requires support of high-level deep-sea underwater technologies and equipment. This study analyzes the components and demands for the deep-sea underwater technology and equipment and reviews the current status and development trends of the technology and equipment from four aspects: deep-sea observation/detection and perception, underwater construction, deep-sea oil and gas production, and deep-sea mineral resource collection. Moreover, this study analyzes the development status and engineering challenges in China, explores the key technology and equipment systems and key physical-mechanical mechanisms behind them, and summarizes the typical equipment and corresponding diagram. Additionally, the common key technologies of the deep-sea underwater equipment in China are

收稿日期: 2024-01-18; 修回日期: 2024-03-02

通讯作者: *陈旭光, 中国海洋大学工程学院教授, 研究方向为海洋工程; E-mail: chenxuguang1984@ouc.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“水下工程技术装备与产业链发展战略研究”(2023-XZ-32), “深海装备技术体系及发展战略研究”(2023-XZ-06)

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

summarized, including the intelligent and automation technology, precision component processing and manufacturing technology, high-precision positioning and navigation technology, high-speed communication technology, computational and analytical mechanics of large systems, and multiscale engineering design methods and technologies. Furthermore, countermeasures and suggestions are proposed aiming at achieving high-quality development of the deep-sea underwater technology and equipment in China: strengthening the top-level design of deep-sea underwater engineering to promote the establishment of a coordinating system for common key technologies, enhancing the industry influence of Chinese deep-sea underwater technical standards to explore the international market, promoting the construction of compatible and universal platforms with high quality, and training innovation professionals to provide support for the high-level development of the marine science and technology industry.

Keywords: deep-sea equipment; key technology; observation, detection, and perception; underwater construction; oil and gas production; deep-sea mining

一、前言

海洋约占地球表面积的70%，蕴藏着储量丰富的生物资源、矿产资源，具有广阔的可利用生存空间，对人类未来生存与可持续发展至关重要^[1,2]。陆地资源枯竭、生态环境的破坏以及气候变化的威胁推动人类寻找可持续和低碳的发展路径，保护自然资源成为当务之急，发展海洋已成为人类社会发展的必然选择。深海开发面临复杂多变的环境水下因素挑战，亟需高水平的深海水下技术装备作支撑。认知海洋是开发、保护海洋的前提，需要依赖水下探测感知装备的发展；海洋资源绿色开发则依赖深海资源水下勘探、施工、油气生产、矿产开发以及探测感知技术装备与产业链的协同保障；海洋生态环境保护则需依靠水下技术装备各体系间的协同合作^[3]。我国重视海洋利用与开发，将海洋强国作为国家的重要战略目标，提出了陆海统筹、加快建设海洋强国的战略部署。“十四五”规划纲要指出，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，推动海洋工程技术装备产业创新发展^[4]。

深海水下技术装备指用于开展深海环境和资源的调查、勘探及开发利用的技术与装备，涉及深海观测/探测与感知、水下施工作业、深海油气生产、深海矿产开发等装备领域。近年来，我国不断加大投入，在深海观/探测、施工作业、海洋油气开采、深海矿产开发等方面不断取得突破，研制了作业型载人潜水器“蛟龙号”、万米级载人潜水器“奋斗者号”、首套国产化水下采油树、“开拓一号”深海重载作业采矿车、国产全自研“挖-铺-埋”一体化水下施工作业装备等一批重大装备，服务于我国深水技术装备的可持续发展；形成了中国海洋石油集团有限公司、招商局工业集团有限公司、长沙矿

冶研究院有限责任公司、中国船舶科学研究中心等多个研发基地和以深海资源开发装备“研发-设计-制造-总装”为核心的产业链，为我国深海资源开发装备的自主可控发展提供有力支撑^[5]。

当前，水面船舶技术装备发展迅速，但水下技术装备领域的发展相对缓慢，具体表现在：技术及装备体系发展相对滞后，部分核心部件配套产品、业务应用依赖进口，面临国外科技封锁的风险^[6,7]；各行业发展相对独立、部分产业环节略显薄弱、融通性不够以及应对突发事件的韧性较弱等。面对当今世界百年未有之大变局，在新一轮全球海洋经济发展的背景下，亟需提高实现深海资源水下开发技术装备的自主可控水平，掌握战略主动权。为此，本文围绕深海资源水下开发技术装备的发展脉络，通过实地考察、问卷调查、文献调研等方式，梳理深海水下技术装备的国内外发展现状及趋势，凝练我国深海水下开发技术装备存在的共性关键问题，提出加快我国深海水下开发技术装备自主可控的针对性建议，为推动我国深海水下技术装备的快速发展提供基础参考。

二、深海水下技术装备的体系构成与需求分析

(一) 深海水下技术装备体系构成

1. 深海观测/探测与感知系统

深海观测/探测与感知系统主要包括：物理、生化传感器，地震及其他灾害监测预警传感器，地质、地形、地貌探测仪器，单体载人潜水器，深海空间站，远程遥控潜水器（ROV），无人自主潜水器（AUV），自主遥控潜水器，水下滑翔机，锚系潜标装备，原位静力触探仪（CPT），沉积物取样装置，温盐深测量仪（CTD）采水取样装备，海底观测网等。

2. 水下施工作业装备

水下施工作业装备主要包括：超深水打桩施工装备、深海工程钻探装备、深海水下挖沟装备、深海水下沉箱整平装备、深水疏浚和清淤装备、深海水下管道及电缆维护检修作业装备、深海水下切割破拆装备、深海水下焊接装备、深海水下打捞装备、深海水下钻探装备、深海水下观测取样装备（工程、科学考察）、深海水下作业机械手、深海水下摄像装备等。

3. 深海水下油气生产系统

深海水下油气生产系统主要包括：水下井口装置、水下采油树、密封组件、脐带缆、水下安全阀、地震波勘探油气储量装备、碳封存装备等。

4. 深海矿产资源开发装备

深海矿产开发装备主要包括：锰结核采集装备、多金属硫化物掘采装备、富钴结壳开采装备、深海富稀土开采装备、深海矿石管道输送装备、深海可燃冰开采装备、深海锚绞装备、超水深电力通信传输线缆装备等。

深海水下技术装备体系的构成情况如图1所示。

(二) 深海水下技术装备的需求分析

1. 深海水下技术装备与认知海洋

认知海洋是一个新兴的研究领域，旨在通过海洋监测设备和观测、探测、感知系统，深入了解和解释海洋的物理、化学和生态过程^[9]。目前，人类对海洋的认知和了解水平仍有待提高，尤其是需要加强对深海等重要区域的认知。各类载人潜水器、全海深无人深潜器以及在深海布置的海洋观测网络和各类移动观测设备，为认知深海提供了全新的视角和研究手段。深海监测仪器和观测、探测、感知系统的发展，提升了人类对海洋的认知水平。随着深海水下技术装备的不断创新，深海物理过程、生态系统和气候变化等重要问题将被破解，为海洋保护和资源可持续开发利用提供更多的科学依据。

2. 深海水下技术装备与开发海洋

开发深海，首先要借助地质、地形、地貌探测仪器对海洋环境、地质及周边生态等进行全方位和

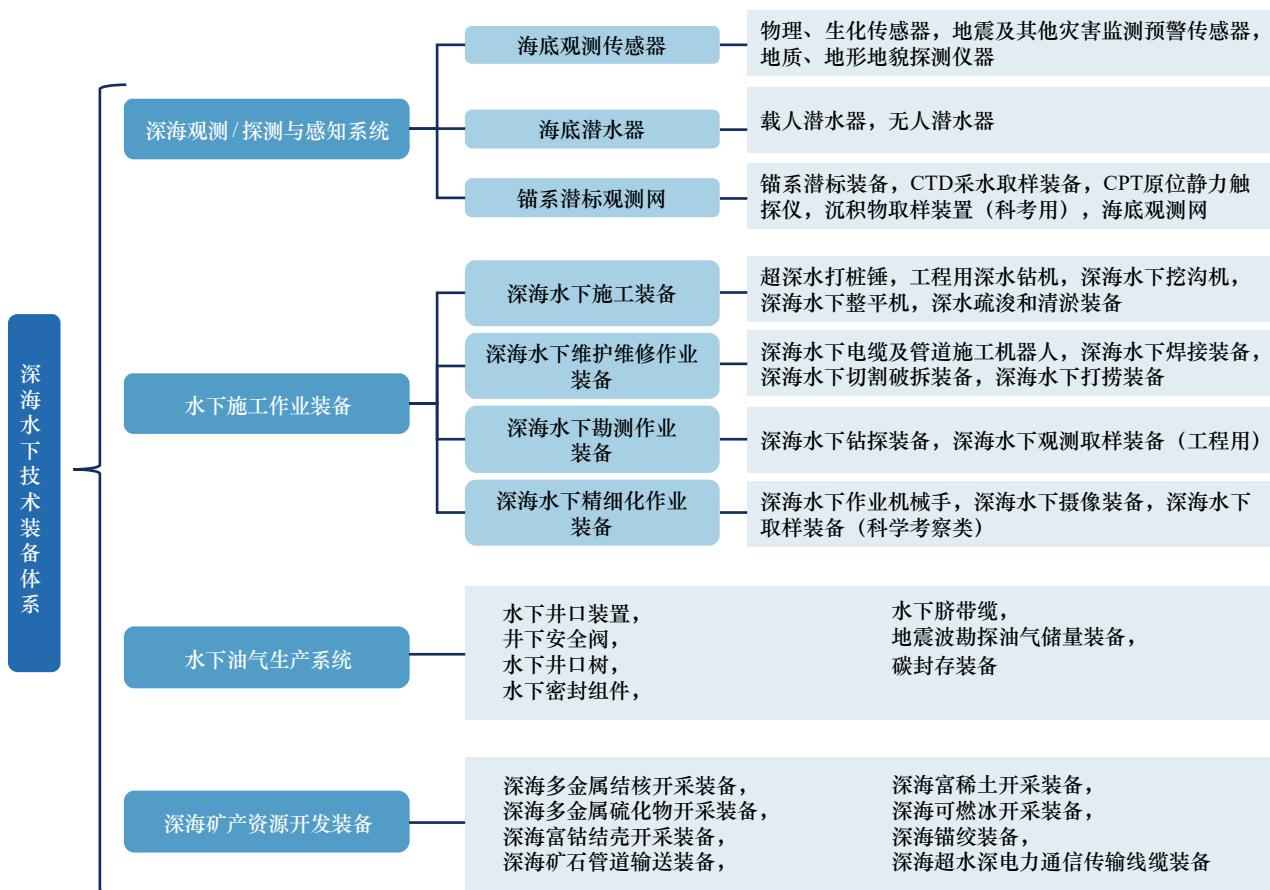


图1 深海水下技术装备体系构成

系统性了解^[4]，如海底光学摄像系统可以在海洋矿产资源的勘查中发挥重要作用。然后，利用深海水下采油树等水下油气生产装备开发海底石油、天然气等资源，利用海底矿产资源开发装备开发多金属结核、硫化物、富钴结壳及富稀土。此外，深海水下技术装备的快速发展与“气-液-固”耦合动力学、气泡动力学的研究息息相关^[9]，为解决深海资源开发及利用过程中的技术、工程难题提供了新方案和新视角。深海水下技术装备通过在各个领域和系统交叉配合，可以更好地开发和利用海洋资源，为缓解全球资源供需失衡贡献力量。

3. 深海水下技术装备与保护海洋

保护海洋，实现海洋健康发展对促进全球生物多样性和减缓气候变化至关重要。海洋水质、生化监测感知装备为海洋环境科学研究、有效监测、管理决策提供了重要支撑，提高了人类对海洋环境变化的实时监测能力^[9]。水下施工作业装备的体系化发展也为海洋保护事业发挥了关键作用。无人深潜器等装备使海洋施工和维护变得更加高效和安全，如海底管线维护、海洋废物清理以及海底油气管道的抢修等^[10]。另外，基于水下施工作业装备建设的人工岛屿、人工珊瑚礁等构筑物有助于恢复和保护海洋生态系统，促进海洋生物多样性。

基于上述分析，深海水下技术装备在认知海洋、开发海洋及保护海洋的进程中扮演着重要的科研和工程角色，水下技术装备的快速稳定发展对提升海洋认知水平、绿色高效开发海洋资源以及实现海洋健康意义重大。

三、国外深海水下技术装备的发展现状及趋势

（一）深海观测/探测与感知系统

深海观测/探测与感知系统主要包深海监测、观测传感设备，深海潜航器以及锚系潜标观测网。欧洲、美国、日本、俄罗斯、澳大利亚等国家和地区研发了新型深海压力传感器^[9]、RDI Workhorse Navigator ADCP、Imagenex Delta-T 成像声呐、Sonardyne-Solstice 3000 多孔径侧扫声呐等深海观测/探测与感知传感器。以新型传感器为基础，水下机器人（如ROV、AUV）逐渐发展成为水下探索和作业的重要装备^[10]。近年来，美国、俄罗斯、挪威、日本等国家已研制出具备深海作业能力的水

下机器人，并应用于海洋科学、资源开发、军事等领域。除此之外，欧洲、美国、日本、俄罗斯、澳大利亚等构建了锚系潜标观测网。其中，美国和加拿大的海洋观测网基于有缆方式进行构建，实现了对海洋的全方位、多尺度和跨时空动态观测；欧洲的海底观测网络遍布欧洲主要海域，致力于发展多学科（海洋物理、海洋生物、海洋化学），多目标（海洋环境监测、海洋资源开发、海洋灾害预警），多时空尺度（从厘米到千米、从秒到年）的海洋观测能力，以监测海洋环境、开发海洋资源、预警海洋灾害^[11]。

目前，国际上的深海观测/探测与感知传感器朝着更高精度、更大作业水深、更多细分功能的方向发展。在潜水器领域，大水深环境机器人成为未来的主流发展方向，同时各国科学家也在不断提高潜水器的智能水平；深海潜水器装备将聚焦高自治、大水深、长续航等方向。为有效实现海洋探测、观测、感知与开发，各国海底观测网向更大组网范围、跨时空尺度、全天候、多目标、长期、动态、实时原位的目标发展。

（二）深海水下施工作业装备

深海水下施工作业装备是先进制造、信息科技和新材料的集成以及海洋工程的重要支撑，具有高技术、高投入、高产出、高附加值、高风险的特点。目前，美国、欧洲等国家和地区在水下施工作业装备领域处于领先地位，尤其是在海洋工程装备的核心设计和关键配套方面具有绝对优势。

深海水下施工作业装备主要用于海底开沟埋管、海底地形平整、疏浚、维修维护等，以保护海底光缆、管道及桩基等基础设施，具有广阔的应用前景^[12]。深海水下施工作业装备的典型代表有：荷兰IQIP公司和德国Menck公司研制的超深水打桩水锤，可以实现2000 m水深打桩作业^[13]；荷兰Royal IHC公司研发了世界上第一台四履带海底挖沟机Hi-Traq，Deep Ocean公司和IKM Subsea公司的深水挖沟机作业深度可达1500~3000 m。深海水下维护维修作业装备主要包括：深海水下管道及电缆维护检修作业装备、深海水下焊接装备、深海水下打捞装备。目前，全球大型管道服务、电缆敷设等行业的跨国企业均开发了系列具有专用功能的水下施工机器人，广泛应用于全球各大海上油田管道、电

缆敷设等施工作业中。例如,法国 SIMEC 公司的 HECTOR 水下无人机器人可适应海底 3000 m 海况;英国 ACSM 公司开发的 CMROV 电缆检修机器人可在全球范围内极端环境条件和各种海底土壤中运行,额定水深为 2000 m;澳大利亚 Seatools 公司开发的海底梭子鱼金刚石绳锯,设计水深达 3000 m。

随着信息技术、材料科学、能源技术等相关领域的快速发展,水下施工作业装备作为推动海洋产业向深远海发展的主要推动力,正朝着智能化、集成化、深远化方向加速演进。这些装备在具备高效能、高精度作业能力的同时,兼具稳定性和安全性。另外,随着深海开发的深入,水下作业需求的功能也逐渐增多,需要针对不同的作业需求进行专门的设计和制造,以满足深海环境复杂多变的特点,同时深海水下作业装备领域的发展还呈现出细分化的发展趋势。

(三) 深海水下油气生产系统

深海水下油气生产系统是海洋油气资源开发的重要装备,负责将海底油气输送到陆上平台终端,属于海洋工程高技术装备,具有多学科综合协调的特征^[14]。水下油气生产系统由井口、采油树、水下控制系统、水下多功能管汇和脐带缆等复杂模块组成,不仅能采集和输送海底油气,还能传输液压、电气信号和生产信息,是实现海底油气高效开采的关键装备。

美国在 20 世纪 50 年代便开始着手水下油气生产系统的研发工作,并首次提出了“水下井口”的概念;经过多年的技术演进,已从最初依赖潜水员作业发展到现在的智能化全电控系统,奠定了美国在水下采油树领域的技术领先地位。英国、挪威等国家也注重水下油气生产系统的研发,突破了深海油气开发技术装备的关键问题,领跑世界海洋油气开采。目前,全球已有 500 多个水下油气生产系统项目成功投产^[15],但关键技术装备被少数欧洲、美国等国家和地区垄断,如超深水 (>3000 m) 水下采油树产品在国际上仅有美国 FMC 公司、贝克休斯公司、One Subsea 公司,挪威阿克世盛公司等可以提供。水下脐带缆是油气生产系统的另一个关键技术装备。当前,来自欧洲、北美和巴西等国家和地区的企业是全球领先的脐带缆供应商,拥有成熟的设计和制造能力,产品种类丰富,可满足不同的

应用需求。目前,挪威 SINTEF Ocean 公司、挪威船级社等垄断了脐带缆的测试认证技术,致使脐带缆市场存在竞争不充分、准入条件高等问题。水下油气生产系统的装备设计技术壁垒较高^[16,17],欧洲、美国等国家和地区在海底油气开发方面积累了丰富的装备设计和建造经验,构建了较为完备的水下油气生产系统技术装备产业链。以深海井口成套设备建造技术为例,全球前五大油气技术服务公司占据了 75% 以上的市场份额。

随着陆地和浅海油气资源的日益枯竭,深水和超深水地区的油气开采迫在眉睫。今后,深海油气生产将更加重视数字化转型,注重远程监控、智能传感器和自主作业的应用。此外,由于深海油气生产的环境保护和可持续性日益受到关注,深海水下油气生产系统开始趋于使用更加先进的环境保护技术,以期减少对海洋生态系统的影响,并在废弃阶段开展适当的生态修复工作。总体而言,国际深海水下油气生产系统将朝着更深水域、更数字化、更环保和更可持续的方向发展。

(四) 深海矿产资源开发装备

深海中蕴藏着储量丰富的战略金属资源,包括多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物等,这 3 种矿产资源所富含的钴、锰、镍等稀有金属储量远超陆地^[18-20]。早在 20 世纪 70 年代,传统海洋强国就已实现了深海采矿技术装备的突破,在 5000 m 深的太平洋底成功收集到了锰结核。此后,欧盟、俄罗斯、德国、日本、韩国、印度等国家和地区纷纷设立深海采矿研究项目,逐步突破深海采矿关键技术、评估深海采矿环境扰动,并开展海上试验研究工作、完善技术装备体系,为深海采矿的商业化进程奠定基础^[21,22]。

经过海试研究,国外在深海矿产资源开发技术装备方面取得了突破性进展,构建了较为完善的技术方案体系,并掌握了关键技术研发和核心装备研制能力,主要有:海底矿石开采装备的安全行走和高效采集、船舶-立管-集矿机的整体协同控制、深水重载装备的布放回收等。欧洲、美国、日本、韩国等国家和地区在海底采矿领域的发展起步较早,技术装备先进化程度较高,总体水平领先我国 8~10 年。2021 年,比利时 GSR 公司在东太平洋 Clarion Clipperton 矿区完成了 4500 m 水深海试,采

集效率为110~120 t/h。加拿大TMC公司在2022年完成了深海采矿车的研制，在NORI-D矿区完成了4300米级的采集提升试验，采集效率为86.4 t/h。加拿大TMC公司、比利时GSR公司等企业发展迅速，近几年将实现对海底矿山资源的商业开采^[23-25]。

深海矿产资源开发是当前人类可操纵的最大规模的深海作业，涵盖勘查、采矿、选冶、运输等产业链，融合了海底作业、水下输送、动力输配、中央控制和水面支持等全方位平台和系统装备体系。目前，全球尚无适合商业化开发的深海采矿系统，多数装备仍处于研制和试验阶段。未来，深海采矿装备仍需进一步向高效率、低扰动的方向发展。

四、我国深海水下技术装备研制现状

（一）深海观测/探测与感知系统

1. 工程挑战

深海观测/探测与感知系统的构建可为“关心海洋、认知海洋、经略海洋”的顺利开展提供技术装备保障，但也面临着一系列挑战。一是深海观测/探测与感知系统面临极端环境挑战。深海环境具有高压、低温、黑暗、腐蚀性强等特点，对观测/探测与感知装备提出了极高的要求。二是水的高吸水性使得深海水下无线通信困难，而有线通信又受到深海环境的限制，发展超远距离、高效通信是深海观测/探测与感知系统面临的重要挑战。三是在深海中进行长时间观测/探测需要可靠的能源供应，高效的能源供给系统至关重要。因此，进一步利用海洋能源或采用高效的电池技术以为深海观测/探测与感知系统提供能源，是当前迫切需要解决的问题。此外，深海观测/探测与感知系统还需要精准定位、耐久性材料、智能化等方面的支持。

2. 关键技术体系

近年来，深海观测/探测与感知技术获得了飞速发展，为探测、监测及感知深远海环境，提供了立体化、长周期、全天候、实时、智能的数据反馈，推动了海洋认知和开发的不断进步。推动深海观测/探测与感知技术进步所涉及的关键技术主要包括：获取深海复杂环境数据的智能感知分析技术，进行深海无人潜航器能量传输的智能无人装备高效安全供能技术，用于深远海监测仪器装备的能源补给技术和水下无人装备自主航行与作业技术，

用于实现协同工作和合作的水下有人及无人装备集群智能协同技术，用于保护设备和结构完整性的水下密封技术，用于实时多设备协调与同步的实时同步技术、功能材料及元器件加工技术。

深海观测/探测与感知系统的技术体系涉及声学、电磁学、光学、流体力学和材料科学等多个知识领域，亟需多学科交叉融合。声学、电磁学、光学是深海观测/探测与感知领域中最常用的技术原理，包括利用声波测定海底地形地貌、水下物体和海洋生物，利用电磁感应和电磁散射探测金属物体、磁性物质和地质构造，利用光学传感器捕获图像信息、实现数据高速传输等。基于声学、光学和电磁学耦合原理建立高精度、全方位的多模态信息融合框架，提升智能化水平，是解决深海观测/探测与感知技术面临挑战的关键所在。深海流体与观测/探测与感知系统的相互作用也是该领域的关键科学问题之一，亟需明晰深海环境的水动力（如涡流）特征，用于指导和调整水下设备姿态、路径的部署决策。同时，深海装备在高压、腐蚀环境中的力学响应机制和耐久性能，是深海观测/探测与感知系统进行结构设计和强度分析的基础考量，以确保设备在深海环境中具有足够的强度和安全稳定性。

3. 典型装备代表

目前，我国的海洋观测/探测与感知系统整体上处于“跟跑”阶段，主要应用于浅海，其中，深海观测传感器在智能实时响应、轻量化设计、功能材料等方面仍与发达海洋国家存在一定的差距。20世纪70—90年代，国家海洋技术中心、中国科学院声学研究所、山东省科学院海洋仪器仪表研究所等科研机构通过联合攻关，先后研制了1000 m和3000 m自容式CTD，性能领先并接近国际先进水平。此后，我国CTD传感器技术发展迅速，研发了多款新型CTD传感器和仪器，填补了国内相关技术装备的空白，打破了相关技术的国际垄断，为我国海洋科学研究和海洋资源开发提供了有力支撑。目前，我国代表性的深海观测/探测与感知系统有：①中国科学院海洋研究所研发的耐高温拉曼光谱探针，是国际上首个可以直接插到450℃深海热液喷口的拉曼光谱探针^[26]；②传感技术联合国家重点实验室联合中国科学院深海科学与工程研究所，成功研制了我国首套应用于深海的微机电系统（MEMS）气相色谱仪，可获得深海背景区二氧化碳和冷泉区

二氧化碳及甲烷的原位定量测试数据；③中国科学院地质与地球物理研究所海底地震仪领域取得了一系列重大突破，实现了从无到有、从“跟跑”到“并跑、领跑”的跨越式发展；④山东大学研究了新型海床式静力触探及取样系统，实现了3000米级深海海底沉积物多参数原位测试和低扰动取样^[27]。我国观测/探测与感知系统代表性的传感器及仪器图谱如图2所示。

近年来，在海洋强国战略的推动下，我国海洋技术装备取得飞速发展，观测/探测与感知系统逐步摆脱了海洋发达国家的技术封锁。自“十二五”时期以来，我国加强对深海关键技术与装备的投入支持，在深海科技领域取得了一系列成果突破，如“蛟龙号”载人潜水器、“深海勇士号”载人潜水器、“奋斗者号”载人潜水器、“海翼号”水下滑翔机、“海斗一号”全海深无人潜水器等。深海观测/探测与感知系统的国产化进程表明，我国深海资源开发实力正在稳步增强、关键核心技术装备持续获得突破^[28]。

(二) 水下施工作业装备

1. 工程挑战

随着对海洋资源和深远海开发的日益重视，国

际上对深远海水下安全施工作业深水化、多元化、精细化、智能化的技术需求日益增长。在此背景下，水下施工作业装备在精确导航与定位、设备密封性与抗压性、高效动力系统等方面都面临严峻挑战。进一步确保水下施工设备性能稳定、降低故障率，加强设备有效维护和保养，成为维持水下设备可靠性和高效率的关键问题；同时，亟需研发更先进的通信设备和控制系统，以保证实时监控和控制的有效性。此外，在水下施工的同时要注重对深海环境的保护，如减少噪音和光污染、减少海底沉积物的扰动等，避免对生物造成伤害，减少对海底生态的破坏，成为当前深海水下施工作业面临的重要问题。

2. 关键技术体系

水下施工作业装备是海洋工程的重要支撑，在海洋石油开采、海底管道铺设、海下设施建设等领域发挥着重要作用。水下环境与陆地环境存在较大差异，对水下施工作业装备提出了更高要求，其关键技术主要包括：用于深水设备制造和加工的特种材料制造加工技术，用于深水设备的控制和动力传输的水下液压技术，用于深水设备高效、安全和可靠运行的智能电动化技术，用于海洋设备稳定和性能优化的自适应调节控制技术、轻量化设计技术、

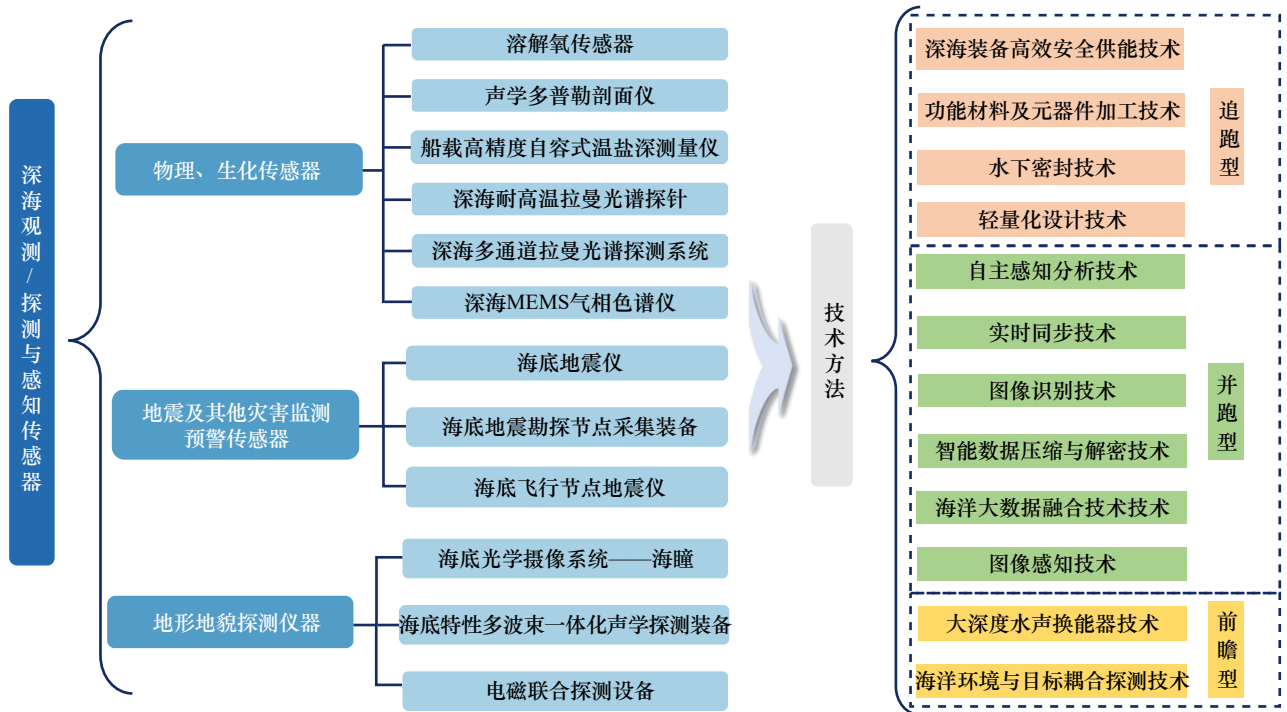


图2 深海观测/探测与感知系统的代表性技术装备图谱

深海供电技术，用于保持有效密封和抵御高压的密封耐压技术，用于实现设备自动化、智能化和协同化操作的集成智能控制技术。

上述水下施工作业装备技术体系的构建，需要流体力学、材料力学等多学科的交叉融合，其关键的物理及力学原理包括：深水腐蚀-疲劳耦合机理与复杂环境下的低温脆化机制、高压液体动力传输机理、电磁兼容和电磁干扰耦合机制、水动力学效应与结构动力学理论、结构力学与拓扑优化理论、物联网与智能控制算法等。总之，水下施工作业装备是一个复杂的系统工程，需要综合考虑水下作业环境、平台设计、感知控制、人机交互、能源通信、安全可靠等因素，以实现水下施工作业的智能化、自动化、安全化发展。

3. 典型装备代表

水下作业环境恶劣，需要使用定制化的设备进行作业，水下施工作业装备成为海洋工程领域的重要组成部分。2023年，我国自主研发了首台2500米级超深水打桩锤，并成功完成海试，填补了国内超深水打桩核心装备技术空白；中国海洋石油集团有限公司在南海东部油田首创国内深水表层人造金刚石（PDC）喷射钻井技术，创造了国内深水作业表层机械钻速的新纪录。目前，我国海上钻井技术和作业能力已进入“超深水时代”，深水钻探技术水平逐步与国际接轨。

我国在深海水下挖沟机装备的研发方面起步较晚。中国海洋石油集团有限公司在2018年引进了我国第一台大型挖沟机VMP500型深水海底管道犁式挖沟机^[29]，主导实施了首次深水犁式挖沟机海试作业，填补了我国相关领域的技术空白。此外，上海中车艾森迪海洋装备有限公司在2018年陆续发布了6000米级的深海探采作业机器人、3000米级的深海管缆挖沟机、2000米级的电缆敷设犁等整机装备。

近年来，我国水下沉箱发展迅速^[30]。中交第一航务工程局有限公司在长江口深水航道治理工程中，建造了长度为10.88 km的充砂半圆体沉箱混合堤，预制安装了544个半圆体沉箱。由中交第一航务工程局有限公司和上海振华重工股份有限公司联合研发的“一航津平2”，是当前世界上船体规模最大、设备最先进的自升式碎石铺设整平船，巩固了我国在海底隧道基础施工领域的世界领先地位。中交四航局第三工程公司自主研发了轻型液压水下铺

石整平一体机，成为轻量化整平机的代表。我国也一直努力发展深水疏浚和清淤装备，如中交广州航道局有限公司自主改造建成国内首艘清淤专用船“捷龙号”，解决了深中通道项目回淤强度大的技术难题。我国水下施工作业代表性技术装备图谱如图3所示。

（三）深海水下油气生产系统

1. 工程挑战

深海油气开采指在水深超过500 m的海域进行石油和天然气开采。近年来，由于陆地油气资源日益枯竭，深海油气开采已成为重要的能源战略。深海水下油气开采面临“入地、下海”等诸多难题和工程挑战，主要体现在深海油气开采技术及设备安全运营和环境保护等方面。在技术层面，深水钻井技术有别于陆地和浅海的钻井技术，需要浮式作业平台、水下井口以及自相匹配的生产与管汇系统。这不仅增加了深水油气开采作业的潜在风险，同时也增加了技术系统的复杂性和工程建设成本。在安全运营层面，深海高压、低温等极端环境条件，对水下油气开采系统提出了极高的要求，需要材料研发、装备设计建造、检修维护等方面适应深海环境；生产系统的安全管理、突发事件的应急响应能力亦是重中之重。在环境保护层面，深海油气开采对海洋生态系统有一定的影响，包括破坏底栖生物栖息地、减少生物多样性、阻碍生物迁徙路径等；同时深海油气开采存在原油泄漏的风险，一旦发生泄漏，将对海洋生态系统产生严重威胁。

2. 关键技术体系

针对深海环境的特殊性，水下油气生产系统开发技术未来发展将更多关注深海工程技术的突破，包括更先进的深海设备和工具、更有效的海底基础设施建设等。其中，数字化转型和智能化技术的快速发展将持续推动深海水下油气生产系统在智能、高效、安全生产等方面的发展。深海水下油气生产系统的关键技术主要包括：用于千米级深海油气生产的深水、超深水水下采油技术，用于实时监测诊断水下控制系统、水下管汇、水下连接器故障、及时故障报警的水下生产系统智能化技术，用于监控油气田生产作业压力、温度、流量等一系列重要参数的水下传感技术，用于保持较高的传输压力和流量、实现远距离运输的水下油气增压系统，用于高

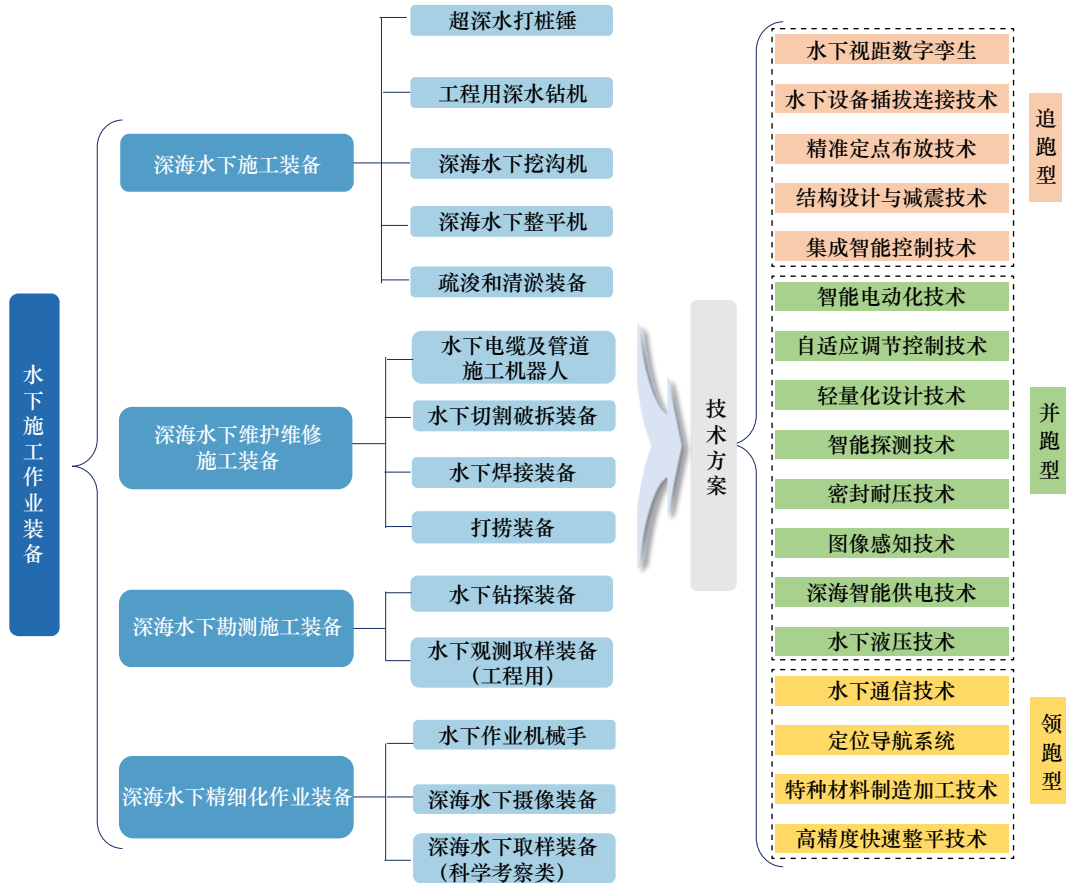


图3 我国水下施工作业代表性技术装备图谱

精度、高质量和高效零件加工过程的精密元器件加工制造技术，用于海洋领域中实现两个物体之间的准确获取和连接的采集对接控制技术，用于解决深海油气田在开采过程中流动堵塞的热油管道流动保障技术，用于在油气勘探和生产中取得更远钻井射程和更优钻井效果的水下油气处理技术。油气生产技术的成熟和发展与多相流运动理论、远距离信号传输与处理理论、水下机器人控制力学、防腐材料化学、多物理场耦合作用理论、气泡动力学、气液固耦合动力学等的发展息息相关。深入了解和应用这些物理和力学机制可以提高深海水下油气生产的勘探、开发和生产效率，同时降低生产风险。

3. 典型装备代表

我国在深海水下油气生产系统领域的研究起步较晚。相关前期研究集中在 300 m 以内的浅海领域，致使我国深海油气生产技术与国际水平存在较大差距^[1]。由我国自主研发的首套水下采油树系统于 2021 年在渤海油田海底安装测试成功，标志

着水下油气生产装备国产化实现了跨越式发展。2022 年，我国独立研发的水下油气生产系统在南海东方 1-1 气田东南区乐东块投入使用，进一步提升了水下油气生产装备的国产化水平。2023 年，位于南海珠江口盆地的中国海油恩平 15-1 平台搭载我国首套海上二氧化碳封存装置，正式启动了二氧化碳回注井的钻井作业；该装备的核心部件包括二氧化碳压缩机橇、分子筛、冷却器等。

水下脐带缆是海洋油气开发装备系统中的关键部件。我国积极开展水下脐带缆的核心技术攻关，加强自主研发，缓解了受制于人的局面，确保了海洋油气开发的战略安全^[2]。中海油研究总院有限责任公司在 2010 年成功制备了脐带缆初样，标志着我国在脐带缆制造领域取得了突破性进展。青岛迪玛尔海洋工程有限公司联合青岛汉缆股份有限公司成功研制了动态脐带缆，可以承受水深 3000 m、压力 69 MPa 的环境。上海亨通海洋装备有限公司在 2018 年生产了世界上首根长度为 18.15 km、整根无

接头的500 kV超高压海缆，是我国单根无接头最长的超高压海缆。中天科技海缆股份有限公司研发了水下生产系统用钢管型光电液复合脐带缆，样品试制和检测全过程通过了挪威船级社的认证。

我国水下油气生产系统的水下多相流量计、水下管口连接器、水下保温材料、水下多功能液压快速接头、超深水下装备密封、浅水泥面系统防腐蚀材料等功能性高端产品研发仍显弱势。近年来，我国水下油气生产系统取得了较大进展，但部分装备的自主化水平亟待提高，仍面临一些挑战：尚未完全拥有水下油气生产系统关键技术装备的自主知识产权，部分技术对外依存度高（如油气系统安装、检修、深水定位等）。我国水下油气生产系统的部分关键技术装备图谱如图4所示。

(四) 深海矿产资源开发装备

1. 工程挑战

深海中蕴藏着储量丰富的矿产资源，对其精准勘探、合理开发将带动相关产业发展，创造新的经济增长点。深海矿产资源所处位置特殊，资源勘探、开发利用面临诸多挑战，如多金属结核分布于4000~6000 m的洋底表面。① 深海底部的高压、低温、黑暗、腐蚀环境，对深海矿产资源勘探、开采，材料和结构设计都提出了严峻考验。以深海资源勘探为例，当前的声学定位精度和传输速率难以

满足其海量数据融合分析和大集群实时协同的勘探需求。② 不同的矿产资源需要不同的采矿方式，如对于多金属结核可以采用液力采集，而对于富钴结壳则需要机械采矿；在保证运营成本的同时，进一步开发高效集矿作业系统、优化采矿工艺、提高不同矿种的采集效率，是当前开展商业化深海采矿布局的挑战之一。③ 深海采矿活动在一定程度上会扰动海底沉积物、破坏海底地形、影响底栖生物栖息环境、增加海水浊度、释放海底重金属、产生噪声污染等。深海采矿带来的环境影响是当前国际关注的焦点，处理好海底环境保护和海底矿产资源开采的关系是开展海底矿产资源开采的关键。

2. 关键技术体系

针对深海矿产资源的商业化开采，目前有关装备稳定性、可靠性、监测预警以及应急处理的要求有待进一步提高，在技术方案制定、关键设备研发、系统可靠性测试、环境影响与修复研究等诸多方面仍需开展深入研究与验证。开展深海矿产资源开发的关键技术主要包括：用于深海环境下多个矿用车辆协同作业控制的智能化多采矿车分布式协同作业控制技术，用于预测和监测矿用卡车在极端工作条件下运行情况的矿车作业极端工况预报监测技术，用于在水下环境中确定位置和进行导航的水下定位导航技术，用于深海环境中实现车辆智能行走、安全运行和稳定控制的矿车智能安全平稳自主

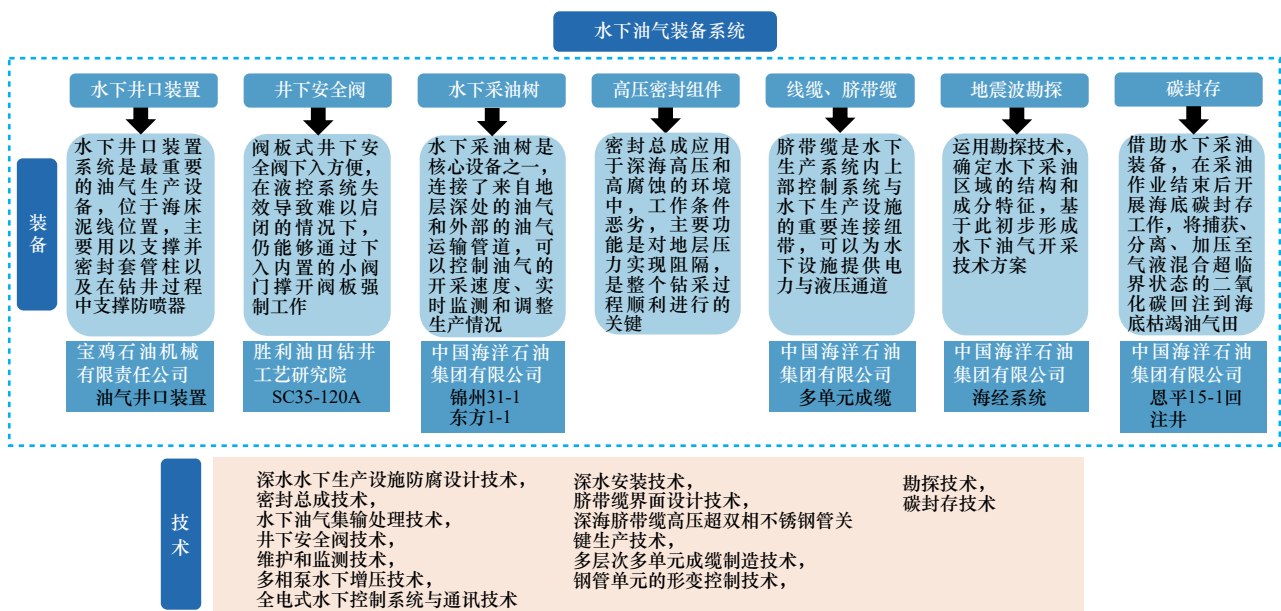


图4 我国水下油气生产部分关键技术装备图谱

行走技术，用于实现车辆稳定运动和精确控制的采矿车水中运动姿态自动控制技术，用于降低对海洋环境干扰、提高矿石采集效率的多金属结核低扰动采集技术，用于在深水环境中提供高功率液压的深水大功率液压控制技术，用于在深水环境中提供高压电力的深水高压电力能源供给技术，用于回收水下装备布放回收姿态的自动控制技术，用于深海资源勘查的原位高保真勘测取样技术等。深海采矿技术体系涉及多种物理理论和力学机制，包括多体动力学与协同控制理论、地面行车力学与预测控制理论、多传感器信息集成处理机制、车辆系统控制理论、射流-稀软土耦合机制、液压力学与液压回路能源转换机制、多系统跨尺度耦合动力学与系统控制等。这些理论和机理的理解与应用，有助于优化深海采矿活动的设计和执行以及加强对海洋环境的保护。

3. 典型装备代表

深海矿产资源（如多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物）开发装备，是当前海洋工程中规模最大的装备体系。经过多年的发展，我国于2017年研制出400米级的富钴矿开采试验车，可以在线实时监测富钴矿的赋存情况，获取探矿层厚度和调节开采头的切割与破碎量。2018年，由中国五矿长沙矿冶研究院牵头研制的“鲲龙号”海底采矿车成功完成500米级海试^[33,34]，其水下定位精度可达0.72 m，实现了我国深海采矿领域里程碑式的重大突破^[33]。上海交通大学团队于2021年成功研制出深海重载采

矿装备样机“开拓一号”^[35]，具有海底作业环境感知、智能自主控制、高效水力集矿等作业能力，已在我国南海开展了海底智能行进与路径跟踪试验，取得圆满成功。“开拓一号”深海重载采矿装备样机的成功海试标志着深海重载作业采矿车研发向工程化、智能化迈出了重要的一步，正逐步接近世界先进水平。2022年，北京先驱高技术开发有限责任公司联合上海交通大学等单位研制了新概念深海多金属结核原位集矿技术验证平台“曼塔号”，采用了原创性的浮游行式集矿技术方案^[36]。中国船舶集团有限公司联合多家单位机构共同攻关，于2023年研制了适用于深海硫化物开采的重载四履带独立悬挂行走系统样机，显著提高了集矿车在深水复杂地形下的行走速度。深海矿产资源开发的代表性技术装备图谱如图5所示。

(五) 深海水下共性关键技术

深海水下共性技术指深海水下环境中的通用技术，涵盖工程、科学研究、资源开发等领域。由于深海水下技术体系复杂，多种技术相互依存，本文对深海水下共性技术体系进行凝练，总结了阻碍深海装备发展、需优先攻关的共性关键技术，具体包括：智能化与自动化技术、多机理水下高精度定位与高速率通信技术、轻量化设计技术、水下定位导航技术、深海供电技术、水下液压技术、水下密封技术、精密元器件加工制造技术、腐蚀控制技术、水下目标探测与定位技术、海洋监测与控制技术、

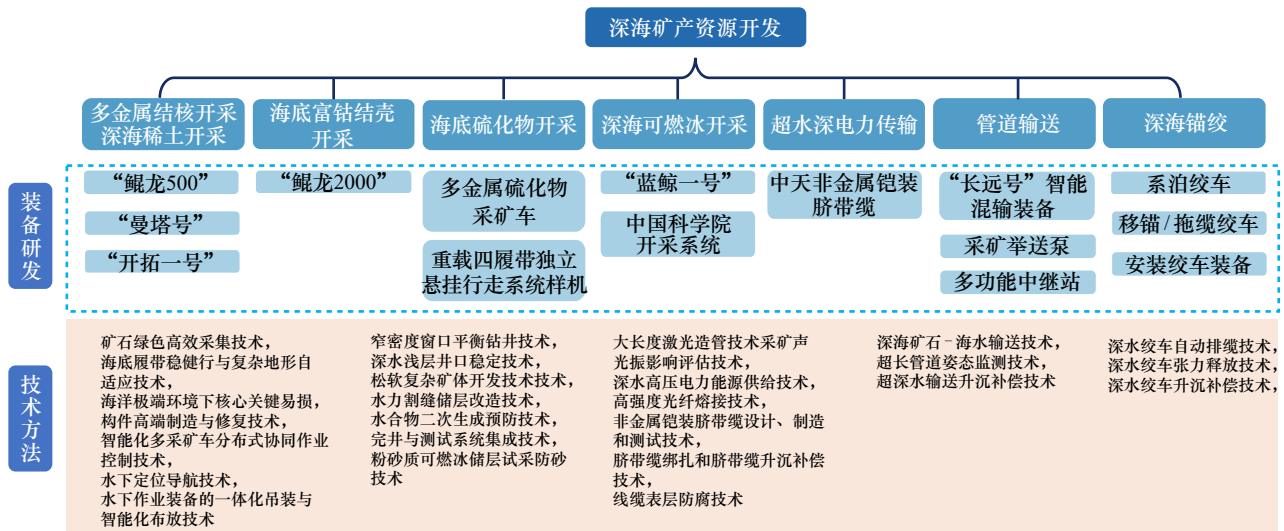


图5 我国深海矿产资源开发的代表性技术装备图谱

人机交互技术、大系统力学计算与分析技术、跨尺度工程设计方法与技术等。

五、我国深海水下技术装备面临的问题与发展建议

（一）面临的问题

1. 核心科技限制与创新能力不够

一是我国深海水下技术装备中的部分关键装备与核心技术存在受制于人、被国际封锁的问题。我国水下装备制造企业面临核心零部件“卡脖子”问题，如海底作业装备高性能控制系统研发及制造技术；核心技术遭受封锁进一步导致外围配套和下游接续技术研发及产品制造受阻，如深水导航定位和集成控制系统等。二是国产深海水下技术装备的产品精度、可靠度与国际先进水平相比存在一定的差距。受基础研究相对薄弱以及通用技术水平限制，我国水下装备材料、零部件应用效果或耐久性欠佳。其中，我国生产的千米级水密接插件主要性能指标与国外产品存在较大差距，如国产深海装备涂料设计使用寿命为5~6年，国际同类高端产品可达8年。

2. 市场空间狭窄与需求潜力巨大的错位并存

一是我国深海水下技术装备的现有市场空间较为狭窄。目前，我国深水装备的作业能力、高端制造能力和智能化水平逐步提高，但国外相关设备生产企业凭借较强的技术实力和市场影响力占据了我国的深海水下技术装备市场，如深海水下井口系统、水下采油树等。二是深海水下技术装备需求潜力巨大。近年来，“北溪”海底管道事件、日本核废水排海事件、南海权益争端等凸显了深海水下技术与装备产业发展的重要性；深潜探险、深海考古、观光旅游等为水下开发技术装备市场提供了新的发展空间；深入推进“一带一路”建设，亟需大规模高质量水下工程技术装备的支持。

3. 高端平台缺失与专业人才匮乏

我国深海装备领域涉及多个关键平台，如深海载人装备国家重点实验室、海洋石油高效开发国家重点实验室、深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室等。然而，这些平台所属行业领域各不相同，缺乏更为密切的协同分工，尤其缺乏国家级高端专业平台，导致产品研制以定制化为主，生产企

业规模较小、分布零散，难以形成产业规模并实现市场化生产。同时，我国深海水下技术装备领域专业人才匮乏，尽管在相关领域有一定数量的专业人才，但由于平台之间缺乏协作，人才的交流与合作受到限制，进一步制约了行业的发展。

（二）发展建议

1. 加强深海水下工程技术发展的顶层设计，推动构建共性关键技术协作体系

聚焦未来深海水下工程技术装备产业发展的关键领域和主攻方向，坚持水下工程技术装备的深海—深空一体化模式，形成获得国家支持的深海水下工程技术装备创新联盟，组织和构建跨国界、跨领域、跨学科创新的协作模式；以创新为核心，以中国特色为主线，协同编制深海水下工程技术装备图谱；瞄准国家海洋强国的战略目标，推进海洋重大工程建设，积极布局深海水下工程产业高精尖领域共性技术平台建设；加速汇聚高端创新要素，不断贯通“产学研用”链条，推动构建多层次、宽领域、功能型、开放式的新型共性技术协作支撑体系。

2. 增强我国深海水下技术规范 and 标准的行业影响力，大力开拓国际市场

建议组织国内海洋领域的科研院所与高等院校，加快深海水下工程技术体系及标准的建设。注重打造创新研发基地与示范工程，增强我国在深海水下工程领域国际标准、行业规范的影响力，实现在水下工程仪器装备国际标准、规范制定方面的突破，提升我国在水下技术领域的国际话语权。谋划和推动我国深海水下工程技术装备产业“走出去”，鼓励相关的装备、软件、标准和解决方案积极解决国际工程问题。依托对外开放政策，加强国际间的合作与交流，拓宽合作领域，做大做强深海水下工程技术装备产业体系和产业集群，提升我国深海水下工程技术装备的国际市场竞争力。

3. 高质量推进兼容通用的平台建设

瞄准我国深海技术装备创新发展的实际需求，搭建兼容通用的深海水下工程装备建造平台。建议行业主管部门积极推动和开展校企专项对接活动，突破技术转化壁垒，建立校企合作高效通道。定期对深海水下工程各领域装备研发过程中遇到的“卡脖子”技术进行摸底，深入学习“卡脖子”技术背

后的物理原理和力学机制,突破制约深海水下工程装备发展的关键共性技术瓶颈,推动技术装备持续更新。

4. 注重培养深海水下工程科技创新人才

围绕深海水下工程技术装备领域的多学科特征,结合土木、机械、自动化、信息、材料等学科的课程体系,建立和健全深海水下工程技术装备的创新复合型人才培养体系。加强高校与企业之间的深度合作,创新人才培养模式,解决传统校企衔接模式下知识与实践脱节的问题。强化企业为人才培养过程提供实际案例、技术支持和实践机会的力度,实现高校与企业人才培的无缝对接,培养具备跨学科知识、视野和专业技能的人才,不断满足深海水下工程领域对工程科技创新人才的需求。

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: January 18, 2024; **Revised date:** March 2, 2024

Corresponding author: Chen Xuguang is a professor from the College of Engineering, Ocean University of China. His major research field is marine engineering. E-mail: chenxuguang1984@ouc.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of Underwater Engineering Technology Equipment and Industry Chain” (2023-XZ-32), “Research on Deep-Sea Equipment Technology System and Development Strategy” (2023-XZ-06)

参考文献

- [1] 刘超,刘传岩,刘健,等.水下油气生产系统概述及其发展现状[J].石油工程建设,2021,47(6):29-34.
Liu C, Liu C Y, Liu J, et al. Overview and development status of subsea oil and gas production system [J]. Petroleum Engineering Construction, 2021, 47(6): 29-34.
- [2] 牟雨言.水下油气生产控制系统风险分析与可靠性研究[D].北京:中国石油大学(北京)(硕士学位论文),2021.
Mu Y Y. Risk analysis and reliability research of subsea oil and gas production control system [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing) (Master's thesis), 2021.
- [3] 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.
- [4] 董胜,廖振焜,于立伟,等.海洋科考装备技术发展策略研究[J].中国工程科学,2023,25(3):33-41.
Dong S, Liao Z K, Yu L W, et al. Development strategy for marine scientific equipment and technologies [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 33-41.
- [5] 周守为.以产学研深度融合推进海洋石油科技创新高质量发展[J].中国科技产业,2023(9):3-4.
Zhou S W. Promoting the innovation and quality development of offshore oil science and technology with the deep integration of industry-university-research [J]. Science & Technology Industry of China, 2023 (9): 3-4.
- [6] 李志刚,贾鹏,王洪海,等.水下生产系统发展现状和研究热点[J].哈尔滨工程大学学报,2019,40(5):944-952.
Li Z G, Jia P, Wang H H, et al. Development trend and active research areas of subsea production system [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(5): 944-952.
- [7] 钱思成.深水水下生产设施防腐设计综述[J].海洋工程装备与技术,2018,5(2):133-137.
Qian S C. Summary for corrosion control design of deepwater subsea production facilities [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2018, 5(2): 133-137.
- [8] Zhang A M, Li S M, Cui P, et al. A unified theory for bubble dynamics [J]. Physics of Fluids, 2023, 35(3): 033323.
- [9] 王军成,孙继昌,刘岩,等.我国海洋监测仪器装备发展分析及展望[J].中国工程科学,2023,25(3):42-52.
Wang J C, Sun J C, Liu Y, et al. Research progress and prospect of marine monitoring instruments and equipment in China [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 42-52.
- [10] 李硕,刘健,徐会希,等.我国深海自主水下机器人的研究现状[J].中国科学:信息科学,2018,48(9):1152-1164.
Li S, Liu J, Xu H X, et al. Research status of autonomous underwater vehicles in China [J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2018, 48(9): 1152-1164.
- [11] 宋完仓,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.
- [12] 王家豪.破碎锤水下清礁装备施工方式优化的有限元分析[J].四川水利,2022,43(S2):23-27.
Wang J H. Finite element analysis on construction mode optimization for underwater reef clearing equipment with breaking hammer [J]. Sichuan Water Resources, 2022, 43(S2): 23-27.
- [13] 李江昊,肖文生,于文太,等.超深水打桩锤系统的可靠性分析与分配研究[J].工程设计学报,2023,30(4):485-494.
Li J H, Xiao W S, Yu W T, et al. Reliability analysis and allocation research of ultra-deep water pile hammer system [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023, 30(4): 485-494.
- [14] 王玮,孙丽萍,白勇.水下油气生产系统[J].中国海洋平台,2009,24(6):41-45.
Wang W, Sun L P, Bai Y. Investigation on subsea production systems [J]. China Offshore Platform, 2009, 24(6): 41-45.
- [15] 张智,王博,刘和兴,等.南海某深水高温高压气井SS-15型井口头系统薄弱点安全评价[J].中国安全生产科学技术,2023,19(4):107-113.
Zhang Z, Wang B, Liu H X, et al. Safety evaluation on weak points of SS-15 wellhead system in a deep water high temperature and high pressure gas well in South China Sea [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(4): 107-113.

- [16] 孔一颖. 高达37层楼 钻井深度超马里亚纳海沟 全球最大海上钻井平台“蓝鲸一号” [J]. 海洋与渔业, 2018 (8): 32–36.
Kong Y Y. The world's largest offshore drilling rig, the Blue Whale I, is 37 stories high and drills deeper than the Marianas Trench [J]. Ocean and Fishery, 2018 (8): 32–36.
- [17] 汤晓勇, 陈俊文, 郭艳林, 等. 可燃冰开发及试采技术发展现状综述 [J]. 天然气与石油, 2020, 38(1): 7–15.
Tang X Y, Chen J W, Guo Y L, et al. Development status of combustible ice mining and test production technologies [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(1): 7–15.
- [18] Jones A T. Trends in deep seabed mining technology [J]. Offshore Technology, 2003, 11(1): 37–40.
- [19] 杨建民, 刘磊, 吕海宁, 等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 1–9.
Yang J M, Liu L, Lyu H N, et al. Deep-sea mining equipment in China: Current status and prospect [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 1–9.
- [20] 王国荣, 黄泽奇, 周守为, 等. 深海矿产资源开发装备现状及发展方向 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 1–12.
Wang G R, Huang Z Q, Zhou S W, et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 1–12.
- [21] 常琳, 张永波, 马哲, 等. 深海稀土矿产资源研究现状及开发利用前景 [J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(12): 1–7.
Chang L, Zhang Y B, Ma Z, et al. Research frontiers in exploitation and utilization of rare earth mineral resources in the deep-sea sediments [J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(12): 1–7.
- [22] 谢梦琪, 陈丹东, 余倩, 等. 深海采矿矿物处理技术及发展趋势研究 [J]. 现代矿业, 2021, 37(9): 139–141, 152.
Xie M Q, Chen D D, Yu Q, et al. Research on mineral treatment technology and development trend of deep-sea mining [J]. Modern Mining, 2021, 37(9): 139–141, 152.
- [23] 邹丽, 孙佳昭, 孙哲, 等. 我国深海矿产资源开发核心技术研究现状与展望 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(5): 708–716.
Zou L, Sun J Z, Sun Z, et al. Deep-sea mining core technology in China: Current situation and prospects [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(5): 708–716.
- [24] 徐吉磊. 深海采矿扬矿管输送系统内流影响下的特性研究 [D]. 青岛: 山东科技大学(硕士学位论文), 2019.
Xu J L. Research on Characteristics of Lifting Pipe Conveying System under the Influence of Inflow in Deep-sea Mining [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology (Master's thesis), 2019.
- [25] 陈秉正. “鲲龙500”采矿车履带行驶机构的研制与试验研究 [J]. 采矿技术, 2019, 19(5): 125–128.
Chen B Z. Development and experimental study on crawler running mechanism of “Kunlong 500” mining vehicle [J]. Mining Technology, 2019, 19(5): 125–128.
- [26] 谢桂鑫. 基于空间偏移拉曼光纤探针研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学(硕士学位论文), 2023.
Xie G X. Fiber probe based on spatially offset raman [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology (Master's thesis), 2023.
- [27] 吴天元, 江丽霞, 崔光磊. 水下观测和探测装备能源供给技术现状与发展趋势 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 898–909.
Wu T Y, Jiang L X, Cui G L. Status and trends of energy power supply technologies for underwater equipment [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 898–909.
- [28] 王程. 3000米级海床式液压静力触探及取样系统研究 [D]. 济南: 山东大学(硕士学位论文), 2023.
Wang C. Research of 3000 m Seabed Cone Penetration Testing and Sampling System Based on Hydraulic Drive [D]. Jinan: Shandong University (Master's thesis), 2023.
- [29] 陈晓明, 蒋喻栓. 犁式挖沟机在海上施工作业技术研究与应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(20): 184–186.
Chen X M, Jiang Y S. Research and application of plow type trenchers in offshore construction operation technology [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(20): 184–186.
- [30] 李书兆, 沈晓鹏, 李伟, 等. 水下沉箱冲淤特性模型实验研究 [J]. 中国海上油气, 2023, 35(3): 217–226.
Li S Z, Shen X P, Li W, et al. Model experiment study on scouring and depositing characteristics around subsea caissons [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(3): 217–226.
- [31] 陈斌, 张汝彬, 曹波波, 等. 水下控制系统技术在采油树先导试验中的应用 [J]. 中国海洋平台, 2023, 38(5): 75–80.
Chen B, Zhang R B, Cao B B, et al. Application of subsea control system technology in domestic Christmas tree pilot test [J]. China Offshore Platform, 2023, 38(5): 75–80.
- [32] 蒋兵兵, 曹聚杭, 张捷, 等. 深水脐带缆预调试概述 [J]. 海洋工程装备与技术, 2023, 10(3): 13–23.
Jiang B B, Cao J H, Zhang J, et al. Overview of deepwater umbilical pre-commissioning [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2023, 10(3): 13–23.
- [33] 李小艳, 程阳锐, 郑皓, 等. 新一代海底履带式集矿车“鲲龙500”行走性能分析 [J]. 矿冶工程, 2020, 40(5): 1–4.
Li X Y, Cheng Y R, Zheng H, et al. Simulation analysis of the mobility of “Kunlong 500” deep sea crawler collector [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(5): 1–4.
- [34] 彭建平. 多金属结核水力集矿机构离地高度控制研究 [J]. 矿冶工程, 2020, 40(3): 20–23.
Peng J P. Research on controlling ground clearance of hydraulic collectors in polymetallic nodules mining [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(3): 20–23.
- [35] 苏强, 吕海宁, 杨建民, 等. 履带式深海采矿车软底质行走性能分析 [J]. 海洋工程, 2022, 40(2): 162–168.
Su Q, Lyu H N, Yang J M, et al. Analysis of the walking performance of tracked deep-sea mining vehicle on soft sediment [J]. The Ocean Engineering, 2022, 40(2): 162–168.
- [36] 李家彪, 王叶剑, 刘磊, 等. 深海矿产资源开发技术发展现状与展望 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 92–102.
Li J B, Wang Y J, Liu L, et al. Current status and prospect of deep-sea mining technology [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 92–102.