

海洋工程发展趋势与技术挑战

李华军, 刘福顺, 杜君峰, 常安腾, 李 良,
徐 琨, 陈旭光, 侯会敏, 宋 虹

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 海洋是生命的摇篮、资源的宝库、交通的命脉和战略的要地, 海洋工程是高质量、可持续开发与利用海洋的重要基础和关键支撑。在海洋强国建设及“双碳”目标等政策驱动下, 我国海洋工程在全球发展格局中的核心支撑作用日益凸显, 也面临着重要发展机遇与技术挑战。本文以我国海洋资源开发重大需求为导向, 分析全球发展趋势, 明确我国海洋工程发展的现状与短板; 在此基础上, 重点围绕海洋油气、海上风电、海上光伏、海底采矿及海洋养殖工程五大关键领域, 深入分析关键领域所面临的新形势、新趋势及发展机遇。通过梳理其中关键科学问题、优势方向及不足, 阐明瓶颈问题及技术挑战, 指出重点突破方向, 以期今后的海洋资源开发利用以及海洋工程的发展提供科学指导和参考依据。

关键词: 海洋工程; 海洋油气; 海上风电; 海上光伏; 海底采矿; 海洋养殖

中图分类号: P751

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)04-0283-18

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220518001

引用格式: 李华军, 刘福顺, 杜君峰, 等. 海洋工程发展趋势与技术挑战[J]. 海岸工程, 2022, 41(4): 283-300. LI H J, LIU F S, DU J F, et al. Development trend and technical challenges of ocean engineering[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(4): 283-300.

海洋是地球上远未充分开发的资源宝库, 对人类社会的持续发展有着重要的影响和作用。我国是海洋大国, 拥有绵长的海岸线、广阔的海洋国土以及上万个岛屿, 蕴藏着丰富的海洋资源和广泛的海洋战略利益。正如 2021 年 Sala 等和 Viridin 等分别在《Nature》和《Science》刊文中提到的: 全球海洋是生物多样性的宝库, 可以为人类提供具有巨大价值的生态系统服务^[1]; 随着海洋商业利用的加速, 海洋经济正在快速增长, 各国政府对其关注度也在增加^[2]。重视海洋资源、加强对海洋的开发利用也是解决我国资源供需矛盾、推动国民经济持续增长的重要途径, 建设海洋强国是实现中华民族伟大复兴的重大战略任务。

传统的海洋工程主要服务于海洋食物资源的获取, 来自海洋的食物至今依旧是人类重要的蛋白质来源, 占全球食用肉类产量的 17%^[3]。长期以来, 随着工程技术的发展和海洋资源需求的增长, 海洋工程的内涵也更加广泛, 涵盖码头、人工岛、海岸防护结构、岛礁、海洋平台、海上风电、海洋牧场、跨海大桥、海底隧道等海上设施, 正逐步发展为重要的现代综合性和战略性产业, 成为人类开发利用海洋空间、油气、能源、矿产以及渔业等资源的核心支撑, 对经济可持续发展、海上国防安全等至关重要。与陆上结构物不同, 海洋工程构筑物 and 装备工作环境恶劣、规模庞大、投资费用高昂, 一旦发生结构失效或破坏, 极易造成重大人员伤亡、巨额财产损失以及难以修复的生态环境破坏。加强海洋强国建设, 提高海洋资源开发利用能力, 对海洋工程提出了新的紧迫需求, 海洋工程的设计分析、建造施工和安全运维均面临着新的挑战。

本文将首先围绕现阶段海洋工程总体发展质量无法满足海洋资源开发需求的问题, 阐述我国对海洋资源开发的重大工程和科技需求。其次回顾国内外海洋工程科技发展取得的显著成效, 并阐述海洋工程全球发展趋势与我国发展现状。继而从海洋油气、海上风电、海上光伏、海底采矿及海洋养殖工程五大关键领域入手, 深入分析我国海洋工程面临的发展机遇及技术挑战。最后, 总结本文工作, 并指出未来服务海洋资源

收稿日期: 2022-05-18

资助项目: 国家自然科学基金基础科学中心项目——多场多体多尺度耦合及其对海工装备性能与安全的影响机制(52088102)

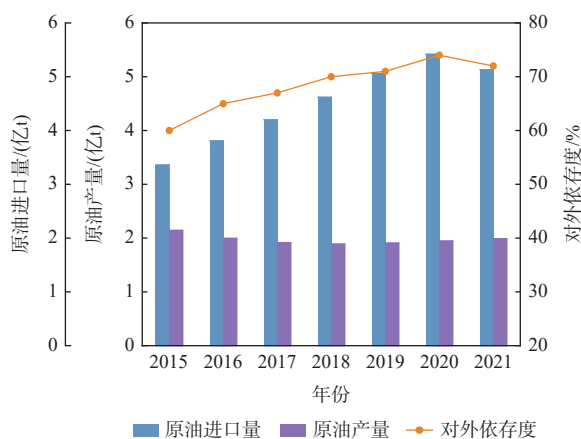
作者简介: 李华军(1962—), 男, 中国工程院院士, 博士, 主要从事海洋工程方面研究。E-mail: huajun@ouc.edu.cn

(王 燕 编辑)

开发利用的工程科技创新发展方向。

1 我国海洋资源开发重大需求

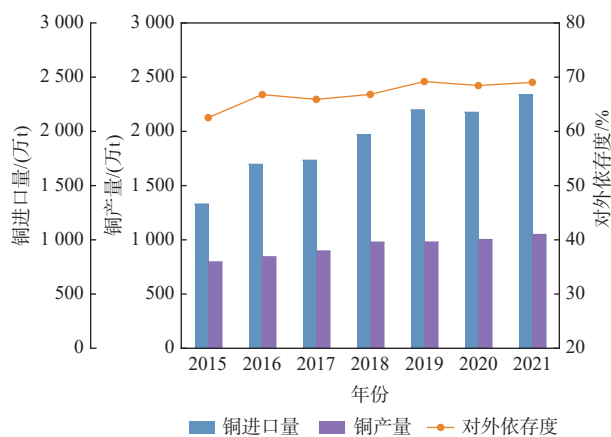
中国是能源资源消耗大国,供给与消费之间存在较大的矛盾。2021年,中国进口原油5.13亿t,对外依存度72%(见图1),远超国际公认警戒线^[4],天然气的对外依存度高达45%,能源安全极为严峻。同时,中国更是矿产资源贫乏的国家,2021年,中国进口铜2339万t,对外依存度69%(见图2),钴的对外依存度71%,镍的对外依存度98%,严重影响航空航天、电子、动力电池等产业发展,易被卡脖子。海洋中蕴藏着丰富的油气、可燃冰、风能和波浪能等能源资源,并且拥有地球上绝大部分锰、钴、铜、镍等超高品位、极具战略意义的金属矿物,其分布之广、品位之高、储量之大,远远超过陆地^[5]。除此之外,海洋中的食物资源构成全球粮食系统的重要组成部分,海产品是全球超过30亿人的重要蛋白质来源。中国海洋面积相当于陆地面积的三分之一,拥有丰富的空间、能源、矿产、食物等资源和广泛的海洋战略利益,是保障经济高质量、可持续发展的新空间。党的十九大报告提出加快建设海洋强国战略,发达的海洋经济是建设海洋强国的重要支撑,发展海洋产业则是推动我国海洋经济高质量发展的重要引擎。



注:数据来源于中国海关总署^[6-12]、中国统计年鉴^[13-19]。

图1 2015年至2021年中国原油对外依存状况

Fig. 1 China's crude oil foreign dependence from 2015 to 2021



注:数据来源于中国海关总署^[6-12]、中国统计年鉴^[13-19]。

图2 2015年至2021年中国铜对外依存状况

Fig. 2 China's copper foreign dependence from 2015 to 2021

然而,中国海洋产业的开发规模、质量尚无法满足日益增长的资源需求,并且随着进军深海、大洋与两极等前沿课题的提出,势必会出现新问题和新的挑战:(1)各种海洋活动需要大量的海洋空间,存在争夺有限海洋空间资源的矛盾^[20]。随着海洋开发利用活动的不断扩大,不同海洋活动、不同利益相关方、开发利用与生态保护等之间的冲突和矛盾不断凸显,亟需综合规划与管理,以实现海洋空间的综合、有效与可持续开发利用^[21-22]。(2)深海能源开发面临着更加复杂严酷的作业环境,台风、巨浪、内波等极端海况不确定性强,破坏力惊人;开发深水油气资源的装备系统更加复杂,其几何特征、物理属性和力学特性等差异显著,动力耦合分析、施工安装和运行维护等基础共性关键技术严重不足;我国目前尚不具备深海油气资源开发高端装备的自主设计研发能力。亟须针对大型海工结构系统开展深入研究,突破深远海工程设计分析和施工运维关键技术,为我国深海能源开发提供核心技术与装备支撑。(3)海上风能、波浪能与海上光伏等开发成本高,并且随着海上可再生能源的开发正从近浅海向深远海迈进,漂浮式结构系统的作业环境更加复杂严酷,浮体运动、系泊变形、塔架弹性变形以及叶轮转动、动态海缆之间存在强烈的耦合作用。亟须发展多物理场、多浮体、多尺度的耦合分析与设计方法,并且在保证结构安全的前提下,降低海上可再生能源的开发成本,促进可再生能源向大型化、规模化、智慧化发展,提高新型能源核心竞争力。(4)深海矿产开采装备作为人类有

史以来规模最大的工业系统,从海面的母船、穿越深达几千米的软管到海底持续活动的采矿机器人,是一个从海面到海底的庞大复杂的多物体、多物理场、多尺度结构的耦合作用系统,亟需开展深入系统的研究工作,阐明其中的多场多体多尺度耦合作用机制,为深海高端采矿装备的研发提供科学指导与关键核心技术。(5)受过度捕捞、环境污染、渔业资源衰退等的影响,世界渔业正由以海洋捕捞为主体的发展模式向现代养殖业转变^[23]。但是,目前养殖装备的抗风浪性能与结构安全理论研究仍存在不足,自动投饵、排污、起捕等技术不够完善,锚泊与定位控制技术、电力推进与驱动控制技术亟待突破^[24]。此外,深远海养殖装备离岸较远,能源供给难度较大,深远海养殖平台的新能源供给支撑体系尚未完全建立^[25]。深远海养殖平台对生态环境的潜在影响以及对海洋和自然资源的竞争性利用也有待深入研究^[26]。

2 海洋工程全球发展趋势与我国发展现状

海洋工程是集浮体结构、安装建造、信息及新材料等于一体的多领域、多学科、复杂的系统工程,具有高风险、高技术、高投入的特点。国外海洋工程的起步较早,其发展可以追溯到 19 世纪 90 年代。世界上第一口海上钻井于 1897 年在美国加州 Summerland 滩的潮汐地带诞生。为统筹利用优质海洋资源,助推海洋工程产业发展,20 世纪 50 年代起,美、英、日、韩等国根据本国产业基础和科技水平,制定了适合本国发展的海洋工程产业支持政策(见表 1)。世界各海洋强国不断加大海洋探测和开发领域的研发投入,相应的海洋工程装备技术取得了突飞猛进的提升。20 世纪 90 年代后,在高新技术牵引作用影响下,国外海洋工程产业已逐渐进入成熟期,其产业链条完整、技术规范相对完善,多种装备基本实现规模应用,呈现出优势特色各异的特点(见表 2)。总体而言,以美国和欧洲为代表的先进海洋工程发展水平在产业规模、产业综合竞争力、国际市场占有率、政策支撑等方面具有明显优势,主要体现在^[27]:(1)规范体系具有话语权,从根本上引领了全球海洋工程装备设计、建造的技术标准核心;(2)设计分析理论体系相对完善,针对海洋工程基础共性问题发展了科学可靠的工程分析理论和运维保障技术;(3)具备自主知识产权的设计分析工具和分析理论,几乎垄断了高端海洋工程产品研发核心技术和主流的海洋工程分析软件。

表 1 国外各国的海洋工程产业发展战略与支持政策

Table 1 Development strategies and supporting policies of offshore engineering industry in foreign countries

国 家	海洋工程产业发展战略和支持政策
美国	<ol style="list-style-type: none"> 1. 1990 年,《90 年代海洋科学:确定科技界与联邦政府新型伙伴关系》,强调要以海洋技术来满足不断增长的需求 2. 1997 年,“全球海洋科学规划”,把发展海洋科技提到全球战略的位置 3. 2009 年 2 月,美国推行《2009 年美国复兴与再投资法》(American Recovery and Reinvestment Act, ARRA),加大海洋产业的投资
英国	<ol style="list-style-type: none"> 1. 1990 年 3 月,“海洋科技发展战略”,提出优先发展对实现海洋开发具有战略意义的高新技术及其产业 2. 2007 年,《2007—2012 年海洋战略研究规划》 3. 2010 年 2 月,《英国海洋战略 2010—2025》 4. 2010 年 3 月,《海洋能源行动计划 2010》,提出在政策、资金、技术等多方面支持海洋能源发展
日本	<ol style="list-style-type: none"> 1. 1968 年,《日本海洋科学技术》,推广海洋技术研发与应用 2. 1990 年,《海洋开发基本构想及推进海洋开发方针政策的长期展望》,提出着重开发海洋高新装备技术 3. 1995 年,《日本海洋开发计划》,把部分海洋高新装备技术的产业化列为重点研究课题 4. 2005 年,《海洋与日本:21 世纪海洋政策建议书》,把海洋工程产业列为重点
澳大利亚	<ol style="list-style-type: none"> 1. 1988 年,《海洋财富报告》,对海洋科技的工业和商业前景做出了评估 2. 1998 年,《澳大利亚海洋政策》,该政策首次针对澳大利亚广大海域提出了基于生态系统的综合管理框架 3. 2003 年,《澳大利亚海洋产业发展战略》,指明了今后重点发展的海洋产业 4. 2004 年,《东南海域计划》,强调海洋部门和海域管辖权的协调
韩国	<ol style="list-style-type: none"> 1. 20 世纪 80 年代以后,韩国设立“特定研究开发事业费”,推动加快海洋产业的发展 2. 2008 年,韩国政府公布《国家能源基本计划》,用于加快海洋新能源产业的发展

表 2 国外各国的优势海洋工程产业分布情况

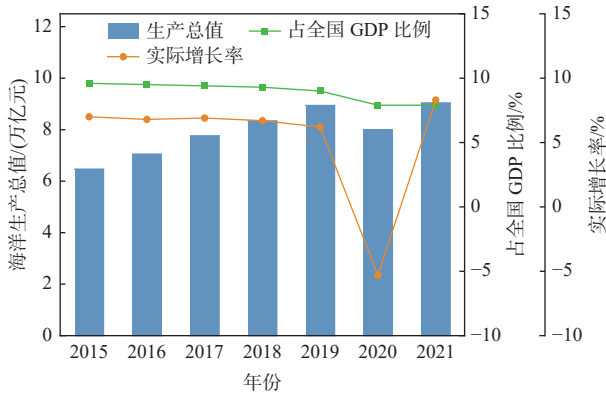
Table 2 Distribution of offshore engineering industry in foreign countries

国 家	各国主要优势海洋工程产业及其起步时间
美国	海洋装备业(20世纪50年代)、海洋新能源业(20世纪50年代)、海洋生物医药业(20世纪70年代)、海水淡化(20世纪50年代)、深海产业(20世纪90年代)
日本	海洋矿产开发(20世纪60年代)、海水利用业(20世纪60年代)、海洋生物制药业(20世纪70年代)、海洋新能源业(20世纪60年代)、深海产业(20世纪90年代)
澳大利亚	海洋生物医药业(20世纪80年代)、海洋新能源业(20世纪60年代)、海水淡化业(20世纪70年代)、深海产业(20世纪90年代)
英国	海洋装备业(20世纪50年代)、海洋商贸(20世纪60年代)、海洋休闲(20世纪70年代)、海洋新能源业(20世纪60年代)
韩国	海水淡化(20世纪80年代)、海洋装备(20世纪80年代)、海洋新能源业(20世纪80年代)、海洋生物医药业(20世纪60年代)

与国外高精尖海洋工程装备和成熟的技术体系相比,我国海洋工程从浅水开始起步,正逐步寻求深水海域的布局与突破。为实现海洋工程装备与技术的快速发展,“十一五”以来,我国出台了一系列与海洋资源开发及其配套装备产业发展相关的国家战略和政策,以国务院发布的《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030年)》(国发[2013]8号)为核心,指出要大力发展海洋探测、资源开发利用、海上作业保障装备及其关键系统和专用设备,为国家海洋安全、资源/能源开发、环境监测和灾害预警预报等提供支撑。在第十二届全国人大第四次会议审议通过的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》中明确提出“拓展蓝色经济空间,发展海洋经济,科学开发海洋资源”的总体规划,国家发展改革委和原国家海洋局发布的《全国海洋经济发展“十三五”规划》(发改地区[2017]861号)将“推进海洋产业优化升级”确立为海洋经济发展的重点任务,国务院发布的《中国制造2025》(国发[2015]28号)更是将海洋工程装备制造业确定为十大重点领域之一,成为我国战略性新兴产业的重要组成部分和高端装备制造业的重点发展方向。在国家政策指引下,我国加大了海洋开发装备的投入,紧紧围绕制约行业发展的关键技术瓶颈开展攻关,“海洋石油981”“海洋石油982”“蓝鲸1号”半潜式钻井平台、“海斗一号”“奋斗者号”深潜器、“东方红3号”科学考察船、“鲲龙500”海底集矿车、“天鲲号”自航绞吸船、“铁建风电01”重型风电安装船等“大国利器”成功研制,实现了我国深海、远海作业从零起步到跟跑、并跑,甚至在某些方面领跑的跨越式发展,诸多主力装备实现批量化建造,逐渐在全球海洋探测与开发方面具有竞争力和话语权。

当前,我国海洋工程装备与技术的发展呈现着良好的势头,深海开发能力初步形成,已经具备全链条海上作业能力,一定程度上缩小了我国与发达海洋国家在装备技术上的差距。尽管如此,在推动海洋工程向高端、高质量发展的进程中,我国目前还处于“萌芽”状态、基本停留在“空白”阶段,与国际先进水平相比尚存在较大差距,主要体现在:(1)海洋工程产业的引领作用薄弱。我国历年海洋生产总值占全国GDP比重不足10%(见图3),以海洋化工业、海洋新能源、海洋船舶工业、海洋工程建筑等为代表的海洋工程产业体量依然很小(见图4),产业结构和区域布局均处于优化调整和转型升级阶段^[28]。(2)海洋工程科技自主创新和转化能力不足。我国海洋工程科技创新链、技术链、产业链不完整,对海洋工程中的核心耦合机制、力学行为的理论描述、数值预报、设计准则的探索和分析依然有限,关键技术难题的把握和认识严重不足,制约着新型高端海洋工程装备研发与应用。根据2020年发布的全球海洋科技创新指数报告(2020)显示,我国海洋科技创新指数位于全球第二梯队,与世界领先水平仍有较大差距。同时,我国海洋工程科技创新缺乏有效的成果转化机制,成果应用机构与研究机构结合不紧密,人才比例、创新体系均有待进一步完善^[29]。(3)海洋调控管理体制机制不完善。在海洋管理方面,仍存在“政出多门、多头指挥”的现象,海洋、渔业、环保海事等多个部门对海洋产业内事务重复交叉管理。加之政策措施协调不足,现有的产业扶持政策实施中缺乏部门协调,使得政策效应难以充分发挥,海洋工程相关企业缺乏基本的制度保障,在培育和管理模式方面都落后于国外^[30-31]。基于国内海洋工程发展现状,我国应在把握发展机遇的同时,正视海洋工程发展与国际先进水平的差距,进

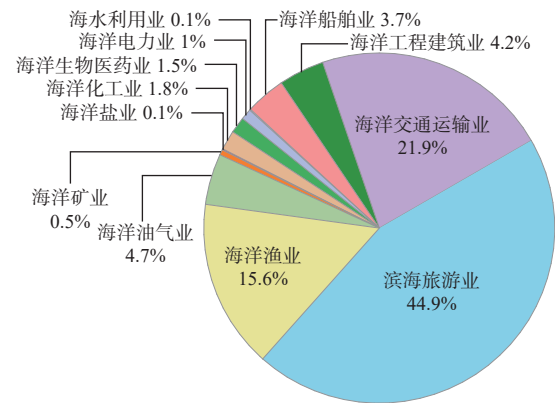
行系统的梳理和总结, 确定重点发展方向, 做好战略布局, 才能取得更加长远的发展和进步, 成为实现海洋可持续发展和推动我国海洋经济高质量发展的重要引擎^[32]。



注: 数据来源于《中国海洋经济统计公报》^[33-39]。

图3 2015年至2021年中国海洋产业产值比例

Fig. 3 Proportion of output value of China's marine industry from 2015 to 2021



注: 数据来源于《2021年中国海洋经济统计公报》^[39]。

图4 2021年主要海洋产业增加值构成

Fig. 4 Composition of value-added of major marine industries in 2021

3 我国海洋工程面临的发展机遇及技术挑战

3.1 海洋油气工程

从1956年莺歌海油气田调查算起, 我国海洋油气资源开发至今已经走过了60多年的发展历程。我国海洋油气工程经历了二十世纪六七十年代的开发能力、装备制造落后阶段, 八九十年代的引入国际标准、实现技术突破阶段, 以及进入21世纪后的开发能力迅速提升、迈向国际市场阶段。随着经济社会发展, 我国油气资源对外依存度持续攀升, 2021年石油对外依存度超过70%, 天然气对外依存度高达45%。而我国南海深水区油气资源丰富^[40], 因此, 聚焦深水油气田勘探与开发, 是保障国家能源安全的战略需求, 也是我国石油工业自身发展的现实需要^[41]。随着“海洋石油981”(见图5)、“蓝鲸1号”深水半潜式钻井平台、“海洋石油201”深水铺管起重船、“海洋石油701”大型深水综合勘察船、“海洋石油751”震源船、“深海一号”深水半潜式生产储卸油平台等深水装备的相继投入使用, 我国深海油气勘探开发能力得到了大幅提升, 海洋油气行业随之得到长足发展(见图6)。《2021年中国海洋经济统计公报》^[39]显示, 2021年海洋油、气产量分别比上年增长6.2%和6.9%, 海洋原油增量占全国原油增量的78.2%, 有效保障了我国能源稳定供给和安全。

然而, 我国的海洋油气工程技术与装备“大而不强”的问题依旧突出^[43], 具有起步晚、起点低、规模小、竞争力不够强等问题。目前我国拥有自主知识产权的工程装备基本局限于浅海海域, 深水工程技术和高端装备制造技术对国外依赖性强, 核心技术研发能力不足, 严重制约了我国海洋油气资源的规模性开发。我国目前在深水钻完井、水下生产系统、深水流动安全等深水油气田开发技术相较国外落后7年左右; 深水海管和立管、深水浮式平台等技术与国外相比落后12年左右; 深水油气田开发工程装备与国外先进水平相比, 仍存在着5~10年的差距。

我国海洋石油工程装备领域仍存在诸多“卡脖子”的技术装备, 如高效高精度海上多缆采集装备、半潜式钻井平台配套关键设备、深水钻井船研发和建造技术、深水浮式设施建造应用及配套关键设备、水下生产系统关键装置等, 均亟待创新与突破。未来我国在海洋油气开发领域将面临的主要技术挑战及相关战略发展重心包括: (1) 关键装备产业化和核心技术国产化。促进新型深水钻完井技术装置研发, 推动模块钻机智能

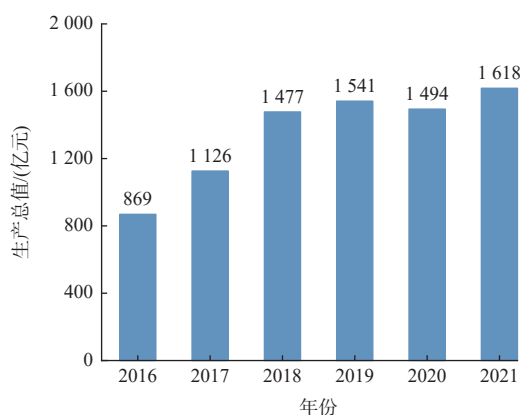
化、多样化发展。掌握深水生产平台上钻井系统的成套技术与关键设备设计、制造技术,实现自主设计、建造深水生产平台用钻修井设备,推进我国深水油气田开发的进程。建设深水浮式生产设施,重点攻关深水浮式平台、浮式生产储油外输装置、浮式液化天然气储存装置(Floating Liquefied Natural Gas, FLNG)新型深水浮式生产装置、水下生产系统、深水浮式平台设计软件中的卡脖子问题,形成独立自主的核心技术体系。(2)研发大型海上施工作业装备,开展深远海补给和运维保障技术研发与体系建设。建成强大的综合海上作业与保障团队,为海上大型油气田的开发和大型平台的潜在需求提供支撑,避免现有的作业船队无法满足需求而必须借助国外昂贵的大型作业装备,也为我国油田服务行业占领国际市场提供保障。(3)借鉴智能化的理念、技术,开展深远海油气井工程智能风险管控和智能应急技术研究,解决深远海油气井工程动态风险管控和应急救援中面临的数据数量大、种类多,以及现场监测数据规律变化快等问题。推进大数据、云计算、人工智能和深海资源开发装备和技术的深度融合,研发新一代深海智能装备,建设新时代数字化的智慧油田,助力“建设海洋强国”“中国制造 2025”和“中国人工智能 2.0”国家战略。



注:图片来源于央视网^[42]。

图 5 海洋石油 981 深水半潜式钻井平台

Fig. 5 HAI YANG SHI YOU 981 deepwater semi-submersible drilling platform



注:数据来源于《2021年中国海洋经济统计公报》^[33-39]。

图 6 2015 年至 2021 年中国海洋油气业生产总值

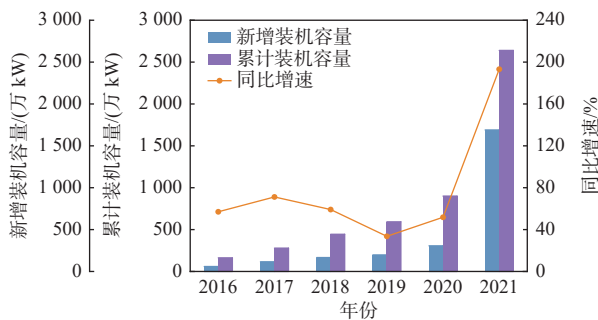
Fig. 6 GDP of China's offshore oil and gas industry from 2015 to 2021

3.2 海上风电工程

相较于海洋油气资源,海上风力资源的开发利用在我国起步较晚。我国首座规模型海上风电场东海大桥 100 MW 项目直至 2010 年才正式运行。由于起步较晚,海上风电在我国仍是一种区域性的补充能源,仅占全国装机总量的 1.2%^[44]。而海上风电在英国等风电强国已经成为了一种重要的替代能源^[45],一些国家甚至开始尝试海上风电制氢,将过剩的风电能源转化成清洁化学能源进行储存。虽然海上风力发电在我国总体能源结构中份额很低,但其增长率与体量均居世界前列。受益于国家能源局《风电发展“十三五”规划》(国能新能[2016]314号)、国家发改委《关于海上风电上网电价政策的通知》(发改价格[2021]833号)等一系列支持政策,我国海上风电装机同比增长率在“十三五”期间始终保持在 15% 以上(见图 7)。2021 年,我国海上风电新增装机更是达到 1 690 万 kW,累计装机突破 2 639 万 kW^[44],跃居世界首位。随着我国 2060 年前实现碳中和历史性目标的确立,可以预见海上风力发电将进入新一轮高速增长期,对我国能源体系的贡献度将进一步增大。

海上风电在高速增长过程中,也逐渐呈现出一些发展趋势:(1)机组大型化。机组大型化是海上风电进一步提高单机功率、降低发电成本的必由之路,这一点已在业界取得共识。中国可再生能源学会公布的数据

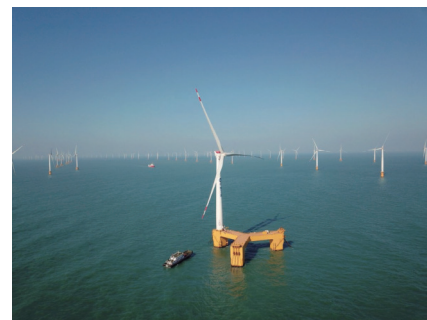
显示,我国海上风电平均单机容量在“十三五”期间由 3.8 MW 增至 4.9 MW^①。一些风电厂商已经开始研制超大容量海上风电机组,例如东方电气在 2021 年底公布了拥有完全自主知识产权的海上 13 MW 级机型。(2)深远海布局。深远海风电场风能密度高、选址限制因素少,在近海风力资源开发日趋饱和的背景下将成为海上风电产业下一阶段的发力点,加大漂浮式风机技术研究势在必行,我国首个漂浮式海上风电机组“三峡引领号”于 2021 年成功并网发电^[46](见图 8)。国家发改委和国家能源局发布的《“十四五”现代能源体系规划》(发改能源〔2022〕210 号)中明确指出要推进海上风电向深水远岸区域布局。(3)海洋资源一体化开发。对海上风电、海洋牧场、绿色制氢等海洋资源进行综合开发利用有助于平摊成本,甚至可以实现多能互补。一些沿海省份已经出台政策鼓励对海洋资源一体化利用的探索。广东省人民政府办公厅印发的《广东省海洋经济发展“十四五”规划》(粤府办〔2021〕33 号)提出,支持海洋资源综合开发利用,推动海上风电项目开发与海洋牧场、海上制氢、观光旅游等相结合。



注: 数据来源于国家能源局^[47-52]。

图 7 2016 年至 2021 年我国海上风电增长

Fig. 7 Development of offshore wind energy sector from 2016 to 2021



注: 图片来源于环球网^[46]。

图 8 漂浮式海上风电机组三峡引领号

Fig. 8 Sanxia Yinling Hao floating offshore wind turbine

虽然海上风电发展前景广阔,但需审视当前所面临的诸多技术挑战:(1)跨尺度基础空气力学^[53]。风电场性能全面评估涉及跨尺度空气动力学,也是海上风电与陆上风电的共性问题。在宏观尺度,风电场上方气象条件决定了区域内的风力资源总量,是风电场勘测的核心依据;在微观尺度,气流与叶片的相互作用决定了发电机组的实际工作性能。因此,需完善跨尺度空气动力学基础理论框架。(2)大尺度、轻质化叶片的气弹性。机组大型化的直接体现是叶片长度大幅增加,令叶片的气弹性凸显成为一个关键的技术问题。类似于超大浮体的水弹性^[54],大尺度叶片在风物理场中会发生十分显著的弹性变形。叶片的质心、剪切中心、扭转中心都会在气弹变形过程中发生偏移,使得叶片实际载荷承载情况与设计要求存在较大差异,对结构稳定性造成不利影响。科技部发布的《国家重点研发计划重点专项 2019 年度项目申报指南》中就提出开展新型轻量超长柔性叶片技术、超长叶片一体化设计技术方面的研究。(3)深远海漂浮式风电耦合分析。浮式风电系统采用浮式平台作为机组支撑结构,其力学问题涉及气动力学、水动力学、伺服控制、结构力学,并且在耦合作用下变得更为复杂^[55],如何进行一体化分析是需要解决的重要技术问题^[53]。2021 年 12 月,汤广福院士曾在中国工程院重大咨询研究项目“海上风电支撑我国能源转型发展战略研究”结题评审会上指出我国深远海风电技术存在严重不足。(4)海洋风电场的维护。海上风电场选址距陆地较远,环境条件较陆地风场更为恶劣,加之海上交通与人力的限制,海上风电场的有效维护时间被大大压缩。海上风电维护由于需租赁专业工程船,其维护成本远高于陆地风机维护成本。

① 中国可再生能源学会. 2020 年中国风电吊装容量统计简报. 2020.

3.3 海上光伏工程

太阳能作为优质的清洁能源,是我国能源产业发展重点。从陆地延伸到水面,再向空间更广阔、资源更丰富的海洋发展,光伏下海是光伏产业发展的必然趋势。海上光伏可利用海洋空间广阔,不占用土地资源,不受地形、建筑遮挡;海水对光伏板具有冷却效果,结合水面对阳光的反射,可提高光伏发电效率;海上光伏距离电力需求较高的东部沿海地区更近,输电损耗更低;光伏平台的平面特征和发电特点,使其既可独立发电也能够与海上风电、波浪能、潮流能等其他海洋能源融合发展,实现高效互补的综合利用^[56]。鉴于光伏面板的生产已经拥有一个高度发达的生产链,业界预计海上光伏产业发展速度将比海上风电产业更快。国际可再生能源署预测海上光伏将在2025年后进入生产规模扩大的阶段,现有示范项目预计于2025年达到50 MW左右的规模,海上光伏产业有潜力在2030年形成年度新增安装产能达1 GW的新兴产业。目前,国内海洋光伏的项目储备已经超过500万kW^[57],例如安徽淮南漂浮式光伏项目^[58](见图9)。天津、广西、江苏、河北、山东、浙江、福建等省份的重点区域都有相应的项目规划。其中《关于促进浙江省新能源高质量发展的实施意见(修改稿)》特别提到,鼓励光伏风电用海立体分层设权,拓展海域立体利用空间,鼓励利用围海养殖区、近海滩涂区、围而未填海域等海域空间建设滩涂光伏项目。《山东省海上光伏建设工程行动方案》意见建议明确了海上光伏的建设方案,布局“环渤海”“沿黄海”两大千万千瓦级海上光伏基地,总规模4200万kW以上,加快桩基固定式海上光伏开发,积极稳妥推动漂浮式海上光伏发展,打造“风光同场”一体化开发模式。

海上光伏将经历一个由近及远的发展过程,从最适合起步的避风海域开始发展,然后随着技术和产业链的成熟,逐渐扩展到更深更远的海域,进入更恶劣的环境。目前,海上光伏的技术仍处于起步阶段,如何从技术层面控制风险、优化投资,还需要更基础的研究探索^[59]。现阶段海上光伏平台主要采用固定式和漂浮式两种基础形式:固定式基础在浅水区和潮间带具有较好的经济性,但向深水发展面临巨大的安全性和经济性挑战,漂浮式基础则因具备出色的海域适应性而成为必然选择。近年来我国近海新能源开发空间日渐紧张,漂浮式光伏平台是未来海上光伏产业向深远海规模化发展的重点发展方向^[60]。目前市场上已经出现了近十个海上漂浮式光伏平台的概念设计,大多源自欧洲的创新企业,例如德国Sinn Power海上风电光伏融合发展概念设计(见图10)。有几个概念已进入海洋环境的示范阶段,但规模均没有超过0.5 MW。对于未来的示范,有多家公司宣布了明确的兆瓦级示范项目,规模在2~4 MW之间,预计在2~3年内对技术可行性和经济性做出验证,并在随后进入规模化项目示范阶段^[61]。



注:图片来源于搜狐网^[58]。

图9 安徽淮南漂浮式光伏项目

Fig. 9 Floating photovoltaic project in Huainan, Anhui Province



图10 德国Sinn Power海上风电光伏融合发展概念图

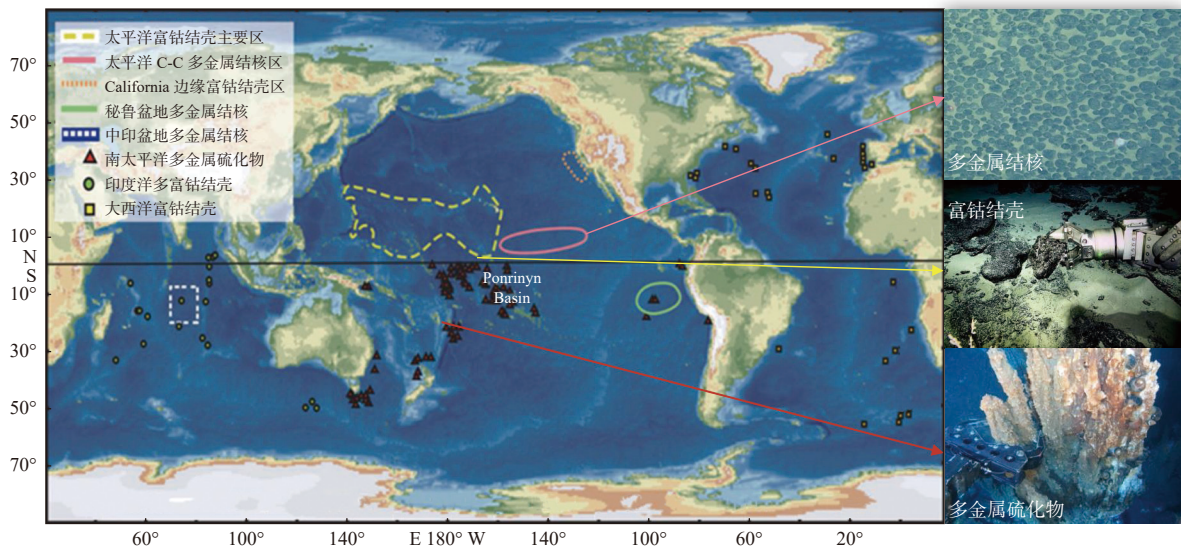
Fig. 10 Concept map of offshore wind power photovoltaic integration development of Sinn Power in Germany

为推进海上光伏的应用发展,亟需突破以下技术瓶颈:(1)海上光伏拥有空间、效率及融合发展等多重优势,但是由于海洋环境的特殊性,传统海工结构设计造价昂贵,而湖泊、内河所应用的漂浮式光伏结构则无法在海上正常运行,甚至不同海域的技术方案都需要定制式设计。(2)海洋环境中的光伏应用将面临更严峻

的环境负荷, 来自波浪、风和水流的循环载荷可能会导致光伏组件发生偏转和应力, 导致模块出现微裂纹, 从而导致产能和耐用性下降, 所以要针对海洋环境对光伏面板做加固处理^[62]。风浪流等海洋环境载荷的存在可能导致作用在平台结构上的过大载荷, 因此意味着平台材料、金属框架需要更具安全性的设计。(3) 因为容易堆积生物污垢, 海上光伏可能需要更频繁地进行运维活动, 以保持电力生产不受影响, 同时确保水质不受影响。所以, 平台设计要在减少生物污垢和提升运维的方便程度上有系统性的思考。(4) 如果单模块光伏结构发生事故, 系统之间发生碰撞的可能性和严重性会增加, 所以需要提前制定、设计和考虑适当的应急计划, 以最大限度减少碰撞风险。同时, 包括建设安装和运营维护在内的经济性因素也是制约海上光伏产业发展的主要瓶颈问题^[63]。

3.4 海底采矿工程

深海海底有丰富的多金属结核、富钴结壳以及多金属硫化物等固体矿石资源^[64-65](见图 11), 多金属结核矿石储量就达数百亿吨^[66], 其中的钴锰镍是新能源产业的关键原料, 需求极为庞大并具有重要战略意义^[67], 也是我国严重依靠外国进口的矿产^[68], 2021 年我国对这些战略资源类金属等矿产需求的对外依存度最高超过 90%。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中, 多次提到深海资源开采相关科研和产业。2021 年 9 月, 中国工程院院士金东寒在中国工程科技发展战略天津研究院重大咨询研究项目“新形势下深海采矿战略研究”启动会致辞中表示: 深海采矿是我国深海战略的重要组成部分, 深入研究我国深海采矿战略, 对于我国加快建设海洋强国, 实现高水平科技自立自强具有重要意义。至今, 我国在国际海底共申请了五块矿区勘探权^[69](见表 3)。根据联合国海洋法公约及其相关文件, 享有优先开采权^[70]。然而, 我国在深海资源开发技术研发领域起步较晚^[71], 作业水深达 6 000 m 的矿产资源开发更需要大力创新和技术跨越式升级。



注: 图片来源于 Hein 和 Koschinsky^[64]。

图 11 海底矿产与分布

Fig. 11 Seabed minerals and distribution

表 3 中国向国际海底局申请的矿区

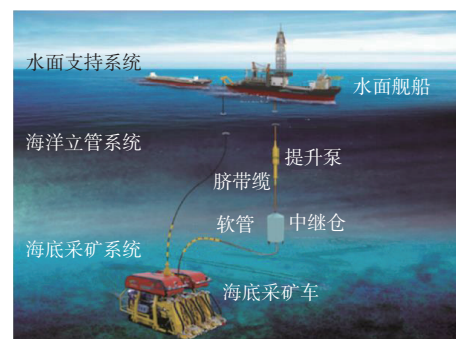
Table 3 Mining area applied by China to the International Seabed Authority

矿产类型	承包商	合同日期	到期日期	是否延期	地点
多金属结核	中国大洋矿产资源研究开发协会 (COMRA)	2001 年 5 月 22 日	2016 年 5 月 21 日	是	克拉里昂-克利珀顿断裂带
	中国五矿集团公司	2017 年 5 月 12 日	2032 年 5 月 11 日		克拉里昂-克利珀顿断裂带
	北京先锋科技发展公司	2019 年 10 月 18 日	2034 年 10 月 17 日		西太平洋
富钴锰铁结壳	中国大洋矿产资源研究开发协会 (COMRA)	2014 年 4 月 29 日	2029 年 4 月 28 日		西太平洋
多金属硫化物	中国大洋矿产资源研究开发协会 (COMRA)	2011 年 11 月 18 日	2026 年 11 月 17 日		西南印度洋脊

注: COMRA 全称为 China Ocean Mineral Resources R & D Association; 矿区相关信息来源于中华人民共和国驻国际海底管理局代表处^[69]。

深海采矿系统大体可分为海面支持系统, 海洋立管运输系统与海底采矿系统三大部分^[72](见图 12)。深海采矿系统与深海石油开采系统既有诸多相通之处, 如涉及超大水面平台-超长立管-单点海底装备的多体多尺度系统之间的相互影响, 及多体结构与多场环境之间强非线性流固耦合作用^[73]。同时, 海底矿面式赋存形态又导致与固定静止的深水石油开采平台不同而独具特色: 如采矿系统呈现水面平台巡弋、立管受迫振动和海底采矿车主动运动的多模态交互式干涉^[74]。我国自 20 世纪 80 年代末开始深海矿产资源勘探、开采及加工利用技术研究^[75], 已完成 230 m 水深矿井提升试验、结核和富钴结壳采输关键技术及装备研发、500 m 级矿石输送系统海试^[76]。2021 年 6 月 27 日, 李家彪院士在中国工程院主办的“第 331 场中国工程科技论坛—海洋装备发展战略论坛”《深海采矿技术智能绿色发展的前景和挑战》报告中认为“深海采矿是复杂的工程技术难题与严苛的海洋环保需求高度融合的技术集合体”。

深海采矿系统设计开发涉及众多领域, 存在多项理论和技术瓶颈亟需突破: (1) 深海采矿超大尺度系统安全设计理论与方法。深海采矿系统需要从海底穿越数千米海水到达海面, 海底复杂地形、水体海流以及海面波浪流形成复杂环境动力场^[77]。因此需要构建超大系统健康监测模型与安全风险评估理论和方法^[78]。(2) 适应海底稀软土作业的深海装备设计理论与方法。深海多金属结核矿区底质是与陆地及近海黏土完全不同的稀软沉积物^[79], 采矿车在行走过程中极易出现履带打滑、沉陷等严重限制深海采矿效率的技术问题。深海采矿作业装备必需适应底质土工力学特性, 才能稳定高效作业。(3) 海底矿产资源绿色高效采集技术。深海多金属结核赋存在海底沉积物表面^[80], 对其开采的过程本质上就是利用水射流形成的流场将结核从沉积物中剥离并输送到集矿车中^[79]。目前对水射流采集方法中各项射流参数仍需进一步优化, 同时采集头需要满足根据海底地形变化自适应的要求。(4) 长距离粗颗粒固液混输与输送泵设计技术。目前深海采矿扬矿泵的典型泵流道冗余复杂, 颗粒通过路径长, 转子工作条件恶劣, 同时电机输送通道内极易发生堵塞^[81]。需研发长距离粗颗粒高浓度固液混输模型, 研究粗颗粒固液多相流输送泵设计理论和方法。(5) 深海复杂环境下超大系统智能控制技术。深海采矿系统作业环境条件存在不确定性, 系统组成装备多, 采矿环节多, 均需要系统具备智能化^[82]。需建立超大系统多工况复杂环境条件的仿真模型, 预测典型工况和极端工作条件, 建立基于数字孪生技术的实时预警方法, 构建系统智能控制方法。(6) 深海矿区生态系统维持机制与环境修复方法^[83]。按照开发规章要求, 海底采矿作业不应造成永久不可恢复的破坏^[84]。为此, 需开展海底环境基线研究, 掌握深海矿区生态系统维持机制^[85]; 针对深海采矿对海洋环境的影响, 开展环境修复方法研究, 提出有效的应对策略。



注: 图片来源于 Cho 等^[72]。

图 12 深海采矿系统

Fig. 12 Deep ocean mining system

3.5 海洋养殖工程

为减轻近海养殖压力, 拓宽海洋养殖空间, 发展深远海养殖是海洋渔业转型的重点方向。“十三五”以来, 农业农村部、生态环境部、自然资源部等十部委联合发布了《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》, 明确提出支持发展深远海绿色养殖, 鼓励深远海大型智能化养殖渔场建设, 提高养殖设施和装备水平。深远海养殖工程设施是深远海养殖产业发展的基础保障。近些年, 我国建造、生产、研发了一批开放式和封闭式深远海养殖设施。其中, 典型的开放式深远海养殖设施包括国内首座深远海智能化坐底式网箱“长鲸 1 号”、全球第一座全潜式深海渔业养殖装备“深蓝 1 号”、全球首个单柱式半潜深海渔场“海峡 1 号”、国内首座船型半潜桁架结构网箱“德海 1 号”等(见图 13); 作为典型的封闭式海洋养殖设施, 全球首艘十万吨级智慧渔业大型养殖工船“国信 1 号”已于 2022 年 3 月正式交付运营。海洋养殖平台装备正向深远海发展, 并呈现大型化、智能化趋势。



注: 图 a 来源于新华网^[86], 图 b 来源于臧一文^[87], 图 c 来源于 Fishfarmingexpert^[88], 图 d 来源于 Norway Exports^[89]

图 13 典型的深远海养殖平台

Fig. 13 Typical deep-sea aquaculture platforms

深远海养殖环境下, 存在大水深、强流、巨浪以及风暴潮等恶劣海况^[90-91]。国内外学者针对大型养殖平台^[92-95]和养殖工船^[96-97]的水动力特性研究取得了一定的进展; 但是, 养殖装备的抗风浪性能与结构安全理论研究仍存在不足, 自动投饵、排污、起捕等技术不够完善, 锚泊与定位控制技术、电力推进与驱动控制技术亟待突破, 信息化、数字化、智能化等现代物联网技术的应用率较低。深远海养殖装备离岸较远, 能源供给难度较大, 深远海养殖平台的新能源供给支撑体系尚未完全建立^[25]。深远海养殖平台对生态环境的潜在影响以及对海洋和自然资源的竞争性利用也有待深入研究^[26]。近年来, 深远海养殖产业与海洋新兴产业融合发展迅速, 比如深远海养殖工程和海上清洁能源相结合, 共享海上空间资源, 共同建设和运维, 并且海上清洁能源可以为海洋养殖工程设施就近供电, 降低两者的开发和运维成本, 推动海上清洁能源和海洋养殖的智能化发展^②。

② 陈鹏. 海洋融合发展深度之路探讨. 北京, 中国海上风电工程技术大会. 2020.

为保障深远海养殖有序发展,亟需突破以下技术瓶颈:(1)深远海养殖工程装备安全保障技术。不同海域海况环境复杂多变,为抵抗强风、巨浪、强流的冲击,亟需开展安全保障技术研究,包括水动力分析、主体结构安全评估方法、锚泊敷设以及网具装配工艺等^[98]。(2)深远海养殖工程装备基础研发技术。虽然我国已经能够建造多个大型深远海养殖工程装备,但我国深远海养殖工程装备的设计研发水平相对落后,深远海养殖产业仍处于起步发展阶段,一些关键性、基础性研究亟待开展,包括游弋式、浮式、半潜式等适用于不同养殖海域和条件的大型专业化多功能养殖船型和平台构建技术研究^[99]。(3)精准控制配套设施与智能监测技术。养殖装备向精准控制方向发展是必然趋势,如投饵的精准决策、环境的精准监测、鱼群的精准评估、死鱼的精准判别、作业流程的精准规划等关键技术是实现深远海养殖智能化管理必须解决的技术难题。智能化养殖需要对养殖过程所有生产要素包括养殖生物、养殖环境、养殖设施和配套装备进行科学管控,利用智能感知技术获取信息,5G通信技术传递信息,大数据分析技术挖掘信息,人工智能技术决策信息,并程序化指导深远海网箱养殖生产全过程,以实现深远海无人驻守养殖^[100]。(4)海洋多产业融合发展关键技术。海上清洁能源与深远海养殖工程的相互作用过程和机制亟须研究,比如深远海养殖设施与海上风机、光伏等清洁能源设施融合布局设计、环境友好型海上清洁能源设施研发与应用、增殖型清洁能源设施基础研发与应用、环保型施工和智能运维技术的研发与应用、深远海养殖设施与海上风机、光伏等清洁能源设施配套设施研发及应用,以及海上清洁能源设施对深远海养殖工程设施资源环境影响观测与综合评价等^[101]。

4 结语与展望

本文聚焦海洋工程科技前沿,对海洋工程产业的发展趋势进行分析,围绕海洋油气工程、海上风电工程、海上光伏工程、海底采矿工程和海洋养殖工程五个关键领域,梳理了我国海洋工程领域面临的关键科技问题,阐述了我国海洋工程面临的发展机遇及技术挑战,希望对今后的海洋资源的开发利用以及海洋工程的发展提供借鉴意义。

随着资源供应紧张与人口迅速增长的矛盾日益突出,扩大海洋资源的开发利用规模势在必行。海洋工程作为重要的现代综合性和战略性产业,是人类开发利用海洋空间、资源、能源的核心支撑,也是国家实施海洋强国战略的基础和重要支撑,对经济可持续发展、海上国防安全等至关重要。当前,我国海洋工程装备与技术的发展势头良好,重大海工装备的研发建造能力显著提高,海上作业体系日趋完备,然而对其多场多体多尺度耦合机制、力学行为的理论描述、数值预报、设计准则的探索和分析依然有限,在深海、大洋与两极等前沿领域与国际先进水平尚存在差距。因此,应系统梳理和总结关键技术难题,着力推动海洋工程科技革命,突破海洋高端装备关键设备、核心技术,推进大数据、云计算、人工智能和海洋工程装备及技术的深度融合,实现海洋工程设计、施工与运维的信息化和智能化,引导海洋工程向高端、智能、绿色发展,促进其真正成为实现海洋可持续发展和推动我国海洋经济高质量发展的重要引擎。

参考文献 (References):

- [1] SALA E, MAYORGA J, BRADLEY D, et al. Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate[J]. *Nature*, 2021, 592: 97-402.
- [2] VIRDIN J, VEGH T, JOUFFRAY J B, et al. The Ocean 100: transnational corporations in the ocean economy[J]. *Science Advances*, 2021, 7(3): 8041-8054.
- [3] COSTELLO C, CAO L, GELCICH S, et al. The future of food from the sea[J]. *Nature*, 2020, 588: 5-100.
- [4] 罗佐县. 我国原油对外依存度下降并非拐点出现[J]. *中国石化*, 2022(3): 68. LUO Z X. The decline of China's foreign dependence on crude oil is not an inflection point [J] *Sinopec Monthly*, 2022(3): 68.
- [5] 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, LÜ H N, et al. Deep-sea mining equipment in china: current status and prospect[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 1-9.
- [6] 中华人民共和国海关总署. 2015年12月全国进口重点商品量值表(人民币值) [EB/OL]. (2016-01-13) [2022-05-17]. <http://www.>

- [customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/303713/index.html](http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/303713/index.html). General Administration of Customs of the people's Republic of China. Table of national import value of key commodities in December 2015 (RMB value) [EB/OL]. (2016-01-13) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/303713/index.html>.
- [7] 中华人民共和国海关总署. 2016年12月全国进口重点商品量值表(人民币值) [EB/OL]. (2017-01-13) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/630941/index.html>. General Administration of Customs of the People's Republic of China. Table of national import value of key commodities in December 2016 (RMB value) [EB/OL]. (2017-01-13) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/630941/index.html>.
- [8] 中华人民共和国海关总署. 2017年12月全国进口重点商品量值表(人民币值) [EB/OL]. (2018-01-12) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/1416441/index.html>. General Administration of Customs of the People's Republic of China. Table of national import value of key commodities in December 2017 (RMB value) [EB/OL]. (2018-01-12) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/1416441/index.html>.
- [9] 中华人民共和国海关总署. 2018年12月全国进口重点商品量值表(人民币值) [EB/OL]. (2019-01-14) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/2166536/index.html>. General Administration of Customs of the People's Republic of China. Table of national import value of key commodities in December 2018 (RMB value) [EB/OL]. (2019-01-14) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/2166536/index.html>.
- [10] 中华人民共和国海关总署. 2019年12月全国进口重点商品量值表(人民币值) [EB/OL]. (2020-01-14) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/2833811/index.html>. General Administration of Customs of the People's Republic of China. Table of national import value of key commodities in December 2019 (RMB value) [EB/OL]. (2020-01-14) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/2833811/index.html>.
- [11] 中华人民共和国海关总署. 2020年12月全国进口重点商品量值表(人民币值) [EB/OL]. (2021-01-14) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/3511738/index.html>. General Administration of Customs of the People's Republic of China. Table of national import value of key commodities in December 2020 (RMB value) [EB/OL]. (2021-01-14) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/3511738/index.html>.
- [12] 中华人民共和国海关总署. 2021年12月全国进口重点商品量值表(人民币值) [EB/OL]. (2022-01-13) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/4122175/index.html>. General Administration of Customs of the People's Republic of China. Table of national import value of key commodities in December 2021 (RMB value) (2022-01-13) [2022-05-17]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/4122175/index.html>.
- [13] 国家统计局. 中国统计年鉴——2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015. National Bureau of statistics. China Statistical Yearbook: 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [14] 国家统计局. 中国统计年鉴——2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. National Bureau of statistics. China Statistical Yearbook: 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [15] 国家统计局. 中国统计年鉴——2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. National Bureau of statistics. China Statistical Yearbook: 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [16] 国家统计局. 中国统计年鉴——2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. National Bureau of statistics. China Statistical Yearbook: 2018[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [17] 国家统计局. 中国统计年鉴——2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. National Bureau of statistics. China Statistical Yearbook: 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [18] 国家统计局. 中国统计年鉴——2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. National Bureau of statistics. China Statistical Yearbook: 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [19] 国家统计局. 中国统计年鉴——2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of statistics. China Statistical Yearbook: 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [20] KATSANEVAKIS S, STELZENMÜLLER V, SOUTH A, et al. Ecosystem-based marine spatial management: review of concepts, policies, tools, and critical issues[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2011, 54(11): 807-820.
- [21] 李加林, 沈满洪, 马仁锋, 等. 海洋生态文明建设背景下的海洋资源经济与海洋战略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(4): 829-849. LI J L, SHEN M H, MA R F, Marine resource economy and strategy under the background of marine ecological civilization construction[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(4): 829-849.
- [22] FOLEY M M, HALPERN B S, MICHELI F, et al. Guiding ecological principles for marine spatial planning[J]. *Marine Policy*, 2010, 34(5): 955-966.
- [23] Food and Agriculture Organization of United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2020-sustainability in action [EB/OL]. [2022-05-18]. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>.

- [24] ZHANG S, ZHOU X, WANG K, et al. Review of marine livestock ecological urbanization hypothesis and marine ranching construction key-technology against blue growth background[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(1): 81-96.
- [25] ZHENG X Y, ZHENG H D, LEI Y, et al. An offshore floating wind-solar-aquaculture system: concept design and extreme response in survival conditions[J]. *Energies*, 2020, 604(13): 1-23.
- [26] NAYLOR R L, HARDY R W, BUSCHMANN A H, et al. A 20-year retrospective review of global aquaculture[J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 551-563.
- [27] “中国海洋工程与科技发展战略研究”项目综合组. 世界海洋工程与科技的发展趋势与启示[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(2): 126-130. Task Force for the Study on Development Strategy of China's Marine Engineering and Technology Comprehensive Research Group. Development trends and implication in marine engineering and technology[J]. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(2): 126-130.
- [28] 殷克东, 李雪梅, 关洪军, 等. 中国海洋经济发展报告(2019—2020)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2020. YIN K D, LI X M, GUAN H J, et al. China marine economic development report (2019—2020)[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2020.
- [29] 亓文婧, 郑玉刚. 海洋科技协同创新与成果转化[J]. *科学管理研究*, 2019, 37(1): 39-42. QI W J, ZHENG Y G. Collaborative innovation and transformation of achievements in marine science and technology[J]. *Scientific Management Research*, 2019, 37(1): 39-42.
- [30] 殷克东, 宋磊. 中国沿海地区海洋事务调控管理能力综合评价研究[J]. *中国渔业经济*, 2010, 28(4): 128-137. YIN K D, SONG L. Comprehensive evaluation on the ability of regulation and management of marine affairs in Chinese coastal regions[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2010, 28(4): 128-137.
- [31] 陈宁, 赵露. 美国海洋科技政策特征及其对中国的启示[J]. *科技导报*, 2021, 39(8): 9-16. CHEN N, ZHAO L. Characteristics of US marine science and technology policy and its enlightenment to China[J]. *Science and Technology Review*, 2021, 39(8): 9-16.
- [32] 宁凌, 欧春尧. 中国海洋新兴产业研究热点: 来自1992—2016年CNKI的经验证据[J]. *太平洋学报*, 2017, 25(7): 44-53. NING L, OU C Y. Research focuses of Chinas emerging marine industry: evidence from CNKI in 1992—2016[J]. *Pacific Journal*, 2017, 25(7): 44-53.
- [33] 自然资源部. 2015年中国海洋经济统计公报[EB/OL]. (2016-03-07) [2022-05-17]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798493.html. Ministry of Natural Resources. Statistical bulletin of China's marine economy in 2015 [EB/OL]. (2016-03-07) [2022-05-17]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798493.html.
- [34] 自然资源部. 2016年中国海洋经济统计公报[EB/OL]. (2017-03-16) [2022-05-17]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798494.html. Ministry of Natural Resources. Statistical bulletin of China's marine economy in 2016 [EB/OL]. (2017-03-16) [2022-05-17]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798494.html.
- [35] 自然资源部. 2017年中国海洋经济统计公报[EB/OL]. (2018-03-01) [2022-05-17]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798495.html. Ministry of Natural Resources. Statistical bulletin of China's marine economy in 2017 [EB/OL]. (2018-03-01) [2022-05-17]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798495.html.
- [36] 自然资源部. 2018年中国海洋经济统计公报[EB/OL]. (2019-04-11) [2022-05-17]. http://gi.mnr.gov.cn/201904/t20190411_2404774.html. Ministry of Natural Resources. Statistical bulletin of China's marine economy in 2018 [EB/OL]. (2019-04-11) [2022-05-17]. http://gi.mnr.gov.cn/201904/t20190411_2404774.html.
- [37] 自然资源部. 2019年中国海洋经济统计公报[EB/OL]. (2020-05-09) [2022-05-17]. http://gi.mnr.gov.cn/202005/t20200509_2511614.html. Ministry of Natural Resources. Statistical bulletin of China's marine economy in 2019 [EB/OL]. (2020-05-09) [2022-05-17]. http://gi.mnr.gov.cn/202005/t20200509_2511614.html.
- [38] 自然资源部. 2020年中国海洋经济统计公报[EB/OL]. (2021-03-31) [2022-05-17]. http://gi.mnr.gov.cn/202103/t20210331_2618719.html. Ministry of Natural Resources. Statistical bulletin of China's marine economy in 2020 [EB/OL]. (2021-03-31) [2022-05-17]. http://gi.mnr.gov.cn/202103/t20210331_2618719.html.
- [39] 自然资源部. 2021年中国海洋经济统计公报[EB/OL]. (2022-04-06) [2022-05-17]. http://gi.mnr.gov.cn/202204/t20220406_2732610.html. Ministry of Natural Resources. Statistical bulletin of China's marine economy in 2021 [EB/OL]. (2022-04-06) [2022-05-17]. http://gi.mnr.gov.cn/202204/t20220406_2732610.html.
- [40] 贾承造. 中国石油工业上游发展面临的挑战与未来科技攻关方向[J]. *石油学报*, 2020, 41(12): 1445-1464. JIA C Z. Development challenges and future scientific and technological researches in China's petroleum industry upstream[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1445-1464.
- [41] 谢彬, 曾恒一. 我国海洋深水油气田开发工程技术研究进展[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(1): 166-176. XIE B, ZENG H Y. Research advancement in offshore deep-water oil and gas development engineering technologies in China[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(1): 166-176.
- [42] 央视网. “海洋石油981”正式开钻, 我国油气勘探进入“超深水区” [EB/OL]. (2012-05-09) [2022-05-17]. <http://news.cntv.cn/china/20120509/109006.shtml>. CCTV Network. “HAI YANG SHI YOU 981” officially started drilling, and China's oil and gas exploration entered the ultra-deep water area [EB/OL]. (2012-05-09) [2022-05-17]. <http://news.cntv.cn/china/20120509/109006.shtml>.

- [43] 陈荣旗. 海洋油气生产装备智能制造发展现状及前景展望[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 152-157. CHEN R Q. Current development status and prospects of the intelligent manufacturing of offshore oil and gas production equipment[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 152-157.
- [44] 国家能源局. 国家能源局举行新闻发布会发布2021年可再生能源并网运行情况等并问答[EB/OL]. [2022-05-17]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/29/content_5671076.htm. National Energy Administration The press conference of National Energy Administration to release the operation of grid-connected renewable energy in 2021 and answered questions. [EB/OL]. [2022-05-17]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/29/content_5671076.htm.
- [45] UK Department for Business. Energy and industrial strategy[J]. Energy Trends, 2022.
- [46] 环球网. 走向深远, 漂浮式海上风电机组前景无限 [EB/OL]. (2022-04-26) [2022-05-17]. <https://energy.huanqiu.com/article/471PEFCs716>. HuanqiuNet.The trends far-reaching and the prospect of floating offshore wind turbines is unlimited [EB/OL] (2022-04-26) [2022-05-17] <https://energy.huanqiu.com/article/471PEFCs716>.
- [47] 国家能源局. 海上风电发展关键是降成本 [EB/OL]. (2016-05-26) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2016-05/06/c_135338713.htm. National Energy Administration. Cost reduction is the key to offshore wind power development [EB/OL]. (2016-05-26) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2016-05/06/c_135338713.htm.
- [48] 国家能源局. 砥砺奋进的五年| 好风凭力 领跑全球 [EB/OL]. (2017-08-22) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2017-08/22/c_136545890.htm. National Energy Administration. Five years of hard work | With good wind power Leading the world [EB/OL]. (2017-08-22) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2017-08/22/c_136545890.htm.
- [49] 国家能源局. 我国海上风电装机规模全球第三 [EB/OL]. (2018-06-21) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2018-06/21/c_137270814.htm. National Energy Administration. China's offshore wind power installed capacity ranks third in the world [EB/OL]. (2018-06-21) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2018-06/21/c_137270814.htm.
- [50] 国家能源局. 国家能源局2020年一季度网上新闻发布会文字实录 [EB/OL]. (2020-03-06) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2020-03/06/c_138850234.htm. National Energy Administration. Transcript of the online press conference of the National Energy Administration in the first quarter of 2022 [EB/OL]. (2020-03-06) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2020-03/06/c_138850234.htm.
- [51] 国家能源局. 国家能源局2021年一季度网上新闻发布会文字实录 [EB/OL]. (2021-01-30) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/30/c_139708580.htm. National Energy Administration. Transcript of the online press conference of the National Energy Administration in the first quarter of 2021 [EB/OL] (2021-01-30) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/30/c_139708580.htm.
- [52] 国家能源局. 国家能源局2022年一季度网上新闻发布会文字实录 [EB/OL]. (2022-01-28) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/28/c_1310445390.htm. National Energy Administration. Transcript of the online press conference of the National Energy Administration in the first quarter of 2022 [EB/OL]. (2022-01-28) [2022-05-17]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/28/c_1310445390.htm.
- [53] VEERS P, DYKES K, LANTZ E, et al. Grand challenges in the science of wind energy[J]. Science, 2019, 366(6464): 443-453.
- [54] WU Y S. Hydroelasticity of floating bodies[D]. Brunel: University of Brunel, 1984.
- [55] MOAN T, GAO Z, BACHYNSKI E E, et al. Recent advances in integrated response analysis of floating wind turbines in a reliability perspective[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2020, 142(5): 052002-1-052002-22.
- [56] 张芳, 邹俊. “十四五”时期我国光伏产业市场培育的前景, 困境与路径选择[J]. 湖北经济学院学报(人文社会科学版), 2021, 18(3): 43-46. ZHANG F, ZOU J. Prospect, dilemma and path choice of China's photovoltaic industry market cultivation during the 14th Five Year Plan period[J]. Journal of Hubei University of Economics (Humanities and Social Sciences), 2021, 18(3): 43-46.
- [57] HELVESTON J, NAHM J. China's key role in scaling low-carbon energy technologies[J]. Science, 2019, 366(6467): 794-796.
- [58] 搜狐网. 中国采煤沉陷区上建起的水上太阳能发电站 [EB/OL]. (2017-06-18) [2022-05-17]. https://www.sohu.com/a/149971152_491905. SOHU Floating solar power stations built on coal mining subsidence areas in China [EB/OL]. (2017-06-18) [2022-05-17]. https://www.sohu.com/a/149971152_491905.
- [59] 吕鑫, 祁雨霏, 董馨阳, 等. 2020年光伏及风电产业前景预测与展望[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2020, 22(2): 6. LÜ X, QI Y f, DONG X y, et al. Outlook and prospect of the photovoltaic and wind power industry in 2020[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2020, 22(2): 6.
- [60] JERNECK M. Financialization impedes climate change mitigation: evidence from the early American solar industry[J]. Science Advances, 2017(3): e1601861-1-e1601861-12.
- [61] 尚丽萍. 全球光伏产业发展形势及预测[J]. 太阳能, 2020(5): 16-22. SHANG L P. Global PV industry development situation and forecast[J]. So-lar Energy, 2020(5): 16-22.
- [62] CHERP A, VINICHENKO V, TOSUN J, et al. National growth dynamics of wind and solar power compared to the growth required for global climate targets[J]. Nature Energy, 2021(6): 742-754.
- [63] 周屹. 浙江: 大力推广应用新能源技术——新能源战略: 力推光伏海上风电是未来方向[J]. 机械设计与制造工程, 2011(6): 51-54. ZHOU

- Y. Zhejiang: vigorously promote the application of new energy technology—New Energy Strategy: promoting photovoltaic offshore wind power is the future direction[J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2011(6): 51-54.
- [64] HEIN J R, KOSCHINSKY A. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules[M]. Netherlands: Elsevier, 2014.
- [65] 张建松, 岑志连. 海底有山山有“花园”随科学号看深海秘境[EB/OL]. (2018-04-12) [2022-05-17]. <http://news.iqilu.com/china/gedi/2018/0412/3884800.shtml>. ZHANG J S, CEN Z L. Undersea mountains where garden lies in. Explore the secret underwater realm with the scientific. [EB/OL]. (2018-04-12) [2022-05-17]. <http://news.iqilu.com/china/gedi/2018/0412/3884800.shtml>.
- [66] 王明和. 深海固体矿产资源开发[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015. WANG M H. The development of deep seafloor solid mineral resources[M]. Changsha: Central South University Press, 2015.
- [67] 李军, 袁伶俐. 全球海洋资源开发现状和趋势综述[J]. *国土资源情报*, 2013(12): 13-16, 32. LI J, YUAN L L. Overview of the current situation and trend of global marine resources development[J]. *Land and Resources Information*, 2013(12): 13-16, 32.
- [68] 程少逸, 高正波, 曹建. 我国战略性矿产资源供应安全的挑战与应对[J]. *矿冶*, 2022, 31(1): 126-130. CHENG S Y, GAO Z B, CAO J. Challenges and countermeasures on supply security of strategic mineral resources in China[J]. *Mining and Metallurgy*, 2022, 31(1): 126-130.
- [69] 中华人民共和国驻国际海底管理局代表处. 国际海底信息 [EB/OL]. (2020-02-17) [2022-05-17]. <http://isa.china-mission.gov.cn/dbcxx/dbckw/gzhdxx/>. Pemanent Mission of PRC to International Seabed Authority. International seabed information [EB/OL]. (2020-02-17) [2022-05-17]. <http://isa.china-mission.gov.cn/dbcxx/dbckw/gzhdxx/>.
- [70] 中国大洋协会办公室. 国际海底区域资源探矿和勘探规章[M]. 北京: 海洋出版社, 2015. COMRA Office. Regulations on prospecting and exploration for resources in the international seabed area[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.
- [71] 本刊记者. 上海交通大学校长、中国工程院院士林忠钦——深海资源开发需要更先进装备[J]. *船舶物资与市场*, 2018(6): 12. REPORTER. Lin Zhongqin, president of Shanghai Jiao Tong University and academician of the Chinese academy of engineering: the development of deep-sea resources needs more advanced equipment[J]. *Marine Equipment/Materials and Marketing*, 2018(6): 12.
- [72] CHO S G, PARK S, OH J, et al. Design optimization of deep-seabed pilot miner system with coupled relations between constraints[J]. *Journal of Terramechanics*, 2019, 83: 25-34.
- [73] SONG Q H, JIANG H Y, SONG Q J, et al. Analysis of longitudinal coupling dynamic characteristics of deep sea mining vessel and stepped lifting pipe[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-17.
- [74] WU Q, YANG J M, LU H N, et al. Effects of heave motion on the dynamic performance of vertical transport system for deep sea mining[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101(7): 102188-1-102188-11.
- [75] 刘少军, 杨保华, 刘畅, 等. 从市场、技术和制度看国际海底矿产资源的商业开采时机[J]. *矿冶工程*, 2015, 35(4): 126-129. LIU S J, YANG B H, LIU C, et al. Discuss the right time for commercial exploitation of deep-seabed mineral resources from international waters in terms of market, technique and institution[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2015, 35(4): 126-129.
- [76] KANG Y, LIU S. The development history and latest progress of deep-sea polymetallic nodule mining technology[J]. *Minerals*, 2021, 11(10): 1132.
- [77] MILLER K A, THOMPSON K F, JOHNSTON P H, et al. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 4: 1-24.
- [78] GLASBY G P. Lessons learned from deep-sea mining[J]. *Science*, 2000, 289(5479): 551-553.
- [79] HEIN J R, MIZELL K, KOSCHINSKY A, et al. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 51: 1-14.
- [80] HAMMOND A L. Manganese nodules (II): prospects for deep sea mining[J]. *Science*, 1974, 183(4125): 644-646.
- [81] 康娅娟, 刘少军. 深海采矿提升系统研究综述[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(20): 232-243. KANG Y J, LIU S J. Summary of research on lifting system of deep sea mining[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(20): 232-243.
- [82] CHO S, PARK S, CHOI S, et al. Multi-objective design optimization for manganese nodule pilot miner considering collecting performance and manoeuver of vehicle[C]//Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium. OnePetro, 2013.
- [83] DUNN D C, VAN DOVER C L, ETTER R J, et al. A strategy for the conservation of biodiversity on mid-ocean ridges from deep-sea mining[J]. *Science advances*, 2018, 4(7): eaar4313-1-eaar4313-15.
- [84] VAN DOVER C L. Tighten regulations on deep-sea mining[J]. *Nature*, 2011, 470(7332): 31-33.
- [85] MOSKVITCH K. Health check for deep-sea mining: European project evaluates risks to delicate ecosystems[J]. *Nature*, 2014, 512(7513): 122-124.
- [86] 新华网. “长鲸一号”助力山东海洋牧场建设[EB/OL]. (2019-07-22) [2022-05-17]. <http://www.hellosea.net/Pasture/tec/3/2019-07-22/67064.html>. Xinhua Net. "Long Whale 1" contributes to the construction of marine pasture in Shandong[EB/OL]. (2019-07-22) [2022-05-17]. <http://www.hellosea.net/Pasture/tec/3/2019-07-22/67064.html>.
- [87] 臧一文. 国内首座深海渔场“深蓝1号”未受台风影响[EB/OL]. (2019-08-14) [2022-05-17]. <http://www.wanzefeng.com/news/zxxw/178>.

- html. ZANG Y W. The first domestic deep-sea fishing ground “Deep Blue No. 1” was not affected by the typhoon[EB/OL]. (2019-08-14) [2022-05-17]. <http://www.wanzefeng.com/news/zxxw/178.html>.
- [88] Fishfarmingexpert. A new mega-cage sets off for the sea[EB/OL]. [2022-05-17]. <https://www.fishfarmingexpert.com/article/a-new-mega-cage-sets-off-for-the-sea/>.
- [89] Norway Exports. New development licenses spur ocean farming [EB/OL]. [2022-05-17]. <https://www.norwayexports.no/news/new-development-licenses-spur-ocean-farming/>.
- [90] CHU Y I, WANG C M, PARK J C, et al. Review of cage and containment tank designs for offshore fish farming[J]. *Aquaculture*, 2020, 519: 734928-1-734928-16.
- [91] XU Z, QIN H. Fluid-structure interactions of cage based aquaculture: from structures to organisms[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107961-1-107961-20.
- [92] ZHAO Y P, GUAN C T, BI C W, et al. Experimental investigations on hydrodynamic responses of a semi-submersible offshore fish farm in waves[J]. *Journal of Marine and Science Engineering*, 2019, 238(7): 1-19.
- [93] YU Z L, AMDAHL J, KRISTIANSEN D, et al. Numerical analysis of local and global responses of an offshore fish farm subjected to ship impacts[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 194: 106653-1-106653-17.
- [94] HUANG X H, LIU H Y, HU Y, et al. Hydrodynamic performance of a semisubmersible offshore fish farm with a single point mooring system in pure waves and current[J]. *Aquacultural Engineering*, 2020, 90: 1-9.
- [95] MIAO Y J, DING J, TIAN C, et al. Experimental and numerical study of a semi-submersible offshore fish farm under waves[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 225: 108794-1-108794-10.
- [96] LI L, JIANG Z Y, HØILAND A V, et al. Numerical analysis of a vessel shaped offshore fish farm[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2018, 140: 041201-1-041201-11.
- [97] LI L, JIANG Z Y, ONG M C, et al. Design optimization of mooring system: an application to a vessel-shaped offshore fish farm[J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109363-1-109363-15.
- [98] 黄小华, 庞国良, 袁太平, 等. 我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述[J/OL]. *渔业科学进展*, 2022: 1-12[2022-04-08]. <https://doi.org/10.19663/j.issn2095-9869.20210816003>. DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210816003. HUANG X H, PANG G L, YUAN T P, et al. Review of engineering and equipment technologies for deep-sea cage aquaculture in China[J/OL]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022: 1-12[2022-04-08]. <https://doi.org/10.19663/j.issn2095-9869.20210816003>. DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210816003.
- [99] 麦康森, 徐皓, 薛长湖, 等. 开拓我国深远海养殖新空间的战略研究[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 90-95. MAI K S, XU H, XUE C H, et al. Study on strategies for developing offshore as the new spaces for mariculture in China[J]. *Engineering Sciences*, 2016, 18(3): 90-95.
- [100] 徐琰斐, 徐皓, 刘晃, 等. 中国深远海养殖发展方式研究[J]. *渔业现代化*, 2021, 48(1): 9-15. XU Y F, XU H, LIU H, et al. Research on the development way of deepsea mariculture in China[J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(1): 9-15.
- [101] 杨红生, 茹小尚, 张立斌, 等. 海洋牧场与海上风电融合发展: 理念与展望[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(6): 700-707. YANG H S, RU X S, ZHANG L B, et al. Industrial convergence of marine ranching and offshore wind power: concept and prospect[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(6): 700-707.

Development Trend and Technical Challenges of Ocean Engineering

LI Hua-jun, LIU Fu-shun, DU Jun-feng, CHANG An-teng, LI Liang,
XU Kun, CHEN Xu-guang, HOU Hui-min, SONG Hong
(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The ocean, the cradle of life and the treasure house of resources, is strategically important to connect the world and promote high-quality development. Ocean engineering is an essential subject and key support for sustainable exploration and utilization of the ocean resources. Driven by policies such as the marine power, peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality, research studies on China's ocean engineering have played a pivotal role in supporting the global development landscape and have required addressing tremendous development opportunities and technical challenges. Taking into account the above situations, the global development trend, status and limitations of China's ocean engineering have been reviewed in this paper. To maximize the utilization of ocean resources, new situations, latest trends and development opportunities have been also analyzed in the key areas, which include offshore oil and gas, offshore wind power, offshore photovoltaic, seabed mining and marine aquaculture engineering. Meanwhile, the key scientific problems such as technical challenges, bottleneck issues and the breakthrough directions, have been discussed with details. Finally, this study has provided invaluable suggestions on the development of ocean engineering and the realization of building China into a strong maritime country in the future.

Key words: ocean engineering; offshore oil and gas; offshore wind power; offshore photovoltaic; seabed mining; marine aquaculture

Received: May 18, 2022