

海洋大温差能发电的工程化发展模式研究

吴英^{1,2*}, 付强^{1,2}, 程兵^{1,2}, 王君傲^{1,2}, 朱琳^{1,2}, 徐静^{1,2}

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 海洋天然气水合物全国重点实验室, 北京 100028)

摘要: 海洋温差能环境友好、资源储量巨大且电力输出稳定, 但商业化进程进展缓慢, 其根本性瓶颈在于有限的自然温差导致现有热循环效率普遍低于 5%, 远低于传统火电甚至其他可再生能源。本文在系统梳理海洋温差能发电的基础上, 创新性提出了基于海洋地热能-深层冷海水的海洋大温差能发电并兼顾液化天然气冷能利用、海水淡化和海洋伴生战略矿产提取等多级利用的构思, 并深度剖析了海洋大温差能发电的技术装备可行性, 提出了海洋大温差能发电的工程化模式, 指出了工程化重点方向: 海洋大温差能发电高效热循环和热转化技术装备、海洋地热能取热技术装备、海洋伴生战略矿产提取技术装置。研究认为, 应加强海洋地热能资源及海洋地热水和海水中战略稀缺矿产资源的勘查力度, 并加大海洋大温差能发电、海水淡化及海洋伴生战略矿产提取的核心技术和关键装备攻关, 同时加快设立海洋大温差能发电示范工程, 并辅以政策和投入的精准支持, 以推动我国海洋大温差能发电商业化进程, 促进我国海洋能源资源高效融合利用, 为我国能源保障和海洋经济高质量发展做出贡献。

关键词: 海洋大温差能发电; 工程化发展模式; 海水淡化; 海洋伴生战略矿产提取; 海洋地热能; 海水资源

中图分类号: T-1 **文献标识码:** A

Engineering Development Model of Ocean Large-Temperature-Difference Energy Generation

Wu Ying^{1,2*}, Fu Qiang^{1,2}, Cheng Bing^{1,2}, Wang Jun'ao^{1,2}, Zhu Lin^{1,2}, Xu Jing^{1,2}

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 2. State Key Laboratory of Offshore Natural Gas Hydrate, Beijing 100028, China)

Abstract: Ocean thermal energy conversion (OTEC) is environmentally friendly, has huge resource reserves, and offers stable power output. However, its commercialization has been slow. The fundamental bottleneck lies in the limited natural temperature difference, which leads to existing thermal cycle efficiencies generally remaining below 5%, far lower than those of conventional thermal power plants and even other renewable energy sources. Based on a systematic review of OTEC, this study proposes a concept of ocean large-temperature-difference energy generation, leveraging ocean geothermal energy and deep cold seawater, while considering multi-level utilization such as cold energy utilization of liquefied natural gas, seawater desalination, and extraction of ocean-associated strategic minerals. It analyzes the technical and equipment feasibility of ocean large-temperature-difference energy generation, proposes an engineering model for this technology, and identifies key engineering directions: efficient thermal cycle and thermal conversion technology and equipment for ocean large-temperature-difference energy generation, equipment for harnessing ocean geothermal energy, and technical devices for extracting ocean-associated strategic minerals. The study advocates for intensified exploration of ocean geothermal energy and ocean-associated strategic mineral resources. Moreover, it is imperative to address core technologies and

收稿日期: 2025-11-04; 修回日期: 2026-01-20

作者简介: *吴英, 中海油研究总院有限责任公司高级工程师, 研究方向为海洋资源发展战略; E-mail: wuying6@cnooc.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“推动能源强国建设战略研究(二期)”(2025-PP-07), “海上能源一体化协同开发战略研究”(2025-HZ-30)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

key equipment for ocean large-temperature-difference energy generation, seawater desalination, and the extraction of ocean-associated strategic minerals. It is also essential to expedite the establishment of demonstration projects, supplemented by precise policy and investment support, thus to promote the commercialization of ocean large-temperature-difference energy generation, facilitate the efficient and integrated utilization of ocean energy resources in China, and contribute to China's energy security and high-quality development of the marine economy.

Keywords: ocean large-temperature-difference power generation; engineering development model; seawater desalination; extraction of ocean-associated strategic minerals; ocean geothermal energy; seawater resources

一、前言

党的二十大报告提出了发展海洋经济,保护海洋生态环境,加快建设海洋强国的宏伟目标,标志着海洋事业在国家整体战略布局中的核心地位得到空前强化。党的十九届四中全会及国家“十五五”规划建议进一步细化了这一顶层设计,明确指出要提高经略海洋能力,推动海洋经济高质量发展,加快建设海洋强国,加强海洋科技创新,巩固提升海洋装备制造优势,壮大海洋新兴产业,推进海洋能源资源和海域海岛开发利用。这一系列紧密衔接、层层递进的战略部署清晰地表明,我国已将发展海洋经济、建设海洋强国、特别是加强海洋能源资源的战略开发和可持续利用,提升至前所未有的历史新高,并进入了系统推进、全面攻坚的新阶段。

海洋温差能发电是海洋资源综合利用较有前途的重要方向之一,是海洋经济和海洋强国建设重要的组成部分,长久以来被视为极具潜力的可再生能源利用方向。其原理是利用热带和亚热带海域表层温海水与深层冷海水之间稳定的温度差(通常为 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$),通过热力循环驱动发电机发电。该构想提出已逾一个世纪,中国、美国、日本等国家先后建立了多个千瓦级或小型兆瓦级的示范装置,验证了其技术可行性^[1-2]。然而,尽管环境友好、资源储量巨大且电力输出稳定,海洋温差能的商业化进程却步履维艰。其根本性瓶颈在于热力学上的“低品位”特性:有限的自然温差导致现有朗肯循环或闭式循环的热循环效率普遍低于 5% ,远低于传统火电甚至其他可再生能源^[3-6]。由此,为获取有经济价值的电力输出,必须建造极其庞大且昂贵的冷水管、热交换器和发电平台,单位千瓦投资成本高昂,运维挑战巨大,经济性始终难以突破。而显著提升海洋温差能发电系统的发电可利用温差被认为是提高海洋温差能热循环效率乃至热转化效

率最有效的方式之一^[7,8],可能是打破效率天花板、降低单位成本、实现海洋温差能发电商业化的有效途径。利用海洋地热能-海水的海洋大温差能发电即可实现这一有效途径,引入温度显著高于表层海水的海底地热资源(可达 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 甚至更高),可作为高温热源替代或辅助仅为 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的表层温海水,从而与约 $2\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的深层冷海水共同构成一个高达数十甚至上百摄氏度的驱动温差。这一变革性的热源升级,有望将热循环效率提升数倍,从根本上改写海洋温差能的经济方程。

本文在深度剖析海洋温差能发电和海洋地热能发电模式各自优势和局限的基础上,提出了利用海洋地热能-深层冷海水的海洋大温差能发电,论述海洋大温差能发电的技术背景和潜力,剖析海洋大温差能的技术装备可行性,并提出工程化模式、工程化重点发展方向和对策建议,以为我国海洋能源资源综合利用提供前瞻构思。

二、海洋大温差能发电的技术背景与潜力

海洋大温差能发电(见图1)是基于海洋温差能发电,结合地热能发电、液化天然气(LNG)冷能利用、海水淡化和海洋伴生战略矿产提取技术,创新性提出来的,因此在研究海洋大温差能发电工程化发展模式前,有必要对前面基础技术进行阐述。

(一) 海洋大温差能发电的技术背景

1. 海洋温差能发电

海洋温差能发电技术的研究已有150多年的历史,美国、日本、法国等国家是海洋温差能开发的早期研究先行者,早在20世纪就开始对海洋温差能开发技术开展了大量研究工作,在原理上和示范应用上取得了实质性进展。随着海洋温差能发电技术的不断推动和发展完善,全球陆续涌现众多海洋温差能示范与规划拟建项目,其中美国、日本两国占

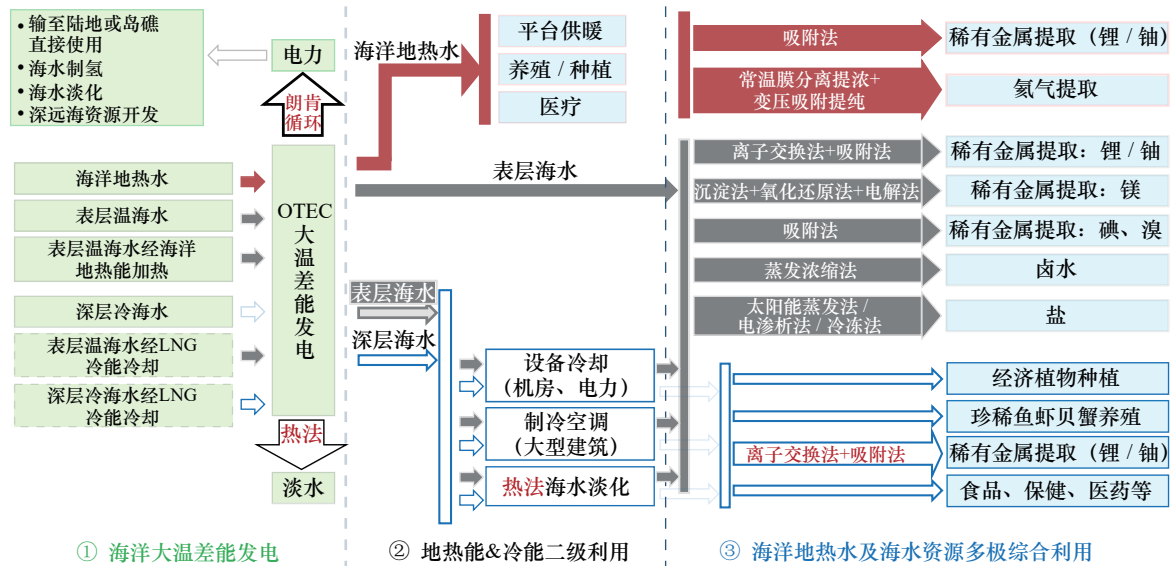


图1 海洋大温差能发电（兼顾海洋地热能与海水资源综合利用）技术路线图

注：OTEC为海洋热能转换。

据主导，已建成5 MW海洋温差能发电站，技术装备处于世界领先水平，总体来看：建设形式上采用岸式（占比60%）和浮式（占比40%），循环系统大多采用闭式（占比60%），循环工质为氨或者氨水混合、冷水管材质都采用高密度聚乙烯（HDPE），换热器材质大多采用钛（占比80%）、种类多采用板式（占比60%）。

我国海洋温差能发电技术研究和装备研发工作起步晚，但进步较快。“十一五”期间，我国重点开展了15 kW闭式循环海洋温差能系统装置的研究，于2012年建立并于同年5月成功运行，使我国成为继美国和日本后第三个独立掌握并实现海洋温差能发电技术的国家。2023年9月，我国首套20 kW海洋漂浮式温差能发电装置在南海成功完成海试（1900 m水深），成功攻克了小温差宽负荷透平发电、深海保温取水及冷水管路安装工艺等核心关键技术，实现装置100%国产化，且整机体积仅为常规同等规模温差能发电设备的1/3。2023年9月，国内可应用于工程设计的最大功率50 kW海洋温差能发电系统于湛江一次投料成功发电，并网电功率达50 kW以上，验证了整体系统的技术可行性及运行稳定性，其成功运行标志着我国海洋温差能研究正逐步从理论试验迈向工业化阶段。2024年又一50 kW装置研发成功^[9]。2025年2月，国内首台50千瓦级磁悬浮海洋温差发电系统在实验中取得

了重大突破^[10]，集发电、制冷、制淡水功能于一体的零碳能源系统，已全天候稳定运行，团队正积极策划面向南海岛礁开发300 kW工程示范项目，预计将可实现日供淡水300 t、净余发电150 kW，满足岛礁全天候稳定能源供应。

2. 海洋地热能发电

国际海洋地热能以海水为载热工质进行发电处于理论构思和设计研究阶段^[11]，尚未有成功案例。墨西哥、意大利（全球提出的第一个海上地热能发电——意大利马西利项目）和冰岛的相关理论研究具有可行性^[12]，但存在发电效率低、资源分布及经济性问题。后期可拓展就近岛礁发电、废旧油气平台发电等经济工程模式，同时可考虑与海上风光、海洋能、油气等联合发电，提高经济性，改变深远海资源开发模式。

我国陆地地热发电从1970年的广东丰顺发电试验开始，经过50多年发展，已形成从地质理论、勘探评价、开发工程到工业发电、综合利用的完整技术装备体系和成熟商业运行经验，正逐渐向中深层高温地热发展，可为海洋地热能发电提供借鉴与参考。

3. 海水淡化

海水淡化在全球得到大规模利用^[13]，已有150多个国家为约3亿人提供清洁水，其中热法造水规模约占世界总造水规模的30%左右，但热法能耗高，如

沙特阿拉伯每天耗费百万桶石油用于海水淡化，目前正联合水利和电力部门实施“地热能+海水淡化”的发展研究。利用清洁、廉价且近乎可再生的海洋地热能作为海水淡化供能，是一条兼具经济效益与环保效益的创新路径，不仅能显著减少化石能源消耗，还可以有效降低碳排放。研究表明，在我国渤海或南海沿海地区，技术上无需建新井，可直接利用现有油气井，采用陆地建厂模式并结合板式换热器，即可用80℃海洋地热水将海水加热至70℃以上。成本分析显示，在传统的燃煤供能海水淡化项目中，热源成本占比综合成本高达80%。若利用海洋地热能，百吨级项目综合成本可从6.2元/t大幅降至1.12元/t，千吨级项目综合成本则可从4元/t降至1.03元/t，成本降幅高达75%~80%，因此，海上地热能淡化海水在理论上技术可行，并具备明显的经济效益^[14]。

4. 海洋伴生战略矿产提取

锂、铀、氦气等是支撑储能材料和新能源发展的核心战略物资，其中锂被誉为“21世纪的能源金属”和“白色石油”，铀被称为“强核基石、核电粮仓”，氦气被称为黄金气体。我国70%的锂、80%的铀、85%的氦气依赖进口，因此在海洋大温差能发电的同时，实现海洋伴生战略矿产提取^[15,16]，战略意义凸显。

(1) 海洋地热水提取锂 / 铀 / 氦气

全球海洋地热水提锂目前处于萌芽阶段。近年来，国内外研究了超过6种从陆地地热卤水中提取锂的方法^[17-20]，其中吸附法适合低浓度含锂提取，比较适合海上地热水提锂，目前从气田水中提取锂还处于摸索阶段^[21]。欧美国家正致力于开发和测试地热提锂新技术，尚未达到工业化应用。2023年，我国依托“吸附法+膜浓缩”技术，在西藏启动建设国内首个从超低浓度（17 mg/L）的发电陆地地热水中提取电池级碳酸锂的产业化项目^[22]。

海洋地热水提取铀鲜少提及。陆地热液型铀矿与地热资源在成矿时间、空间分布和成因机制上具有密不可分的关联性，以此研究海洋地热水中的铀含量，不仅有助于丰富地地质学理论，也有助于深部矿产资源和高温干热岩勘探，可为实现更大范围的矿-热资源共采提供理论依据。

全球海洋地热水提取氦气处于理论构思阶段，近年我国陆地地热水溶氦气提取研究取得可喜进

展，于2016—2020年先后完成了提取试验装置，提取、提浓试验等，建立了我国首个“地热井水溶氦提取试验站”，成功贯通了从陆地地热水中提取、浓缩、提纯水溶氦气的工艺技术路线链条^[23]。

(2) 海水提取锂 / 铀

全球海水提取锂 / 铀尚无大规模产业化，我国走在了世界前列。2023年，我国全球首个海水提取锂（从海水淡化后的浓盐水中提取锂，类似于从陆地卤水中提取锂）工厂建设项目在青岛落地，标志着海水提锂（通过锂离子筛材料进行离子交换+吸附）从工程化验证转向产业化新阶段。目前考虑到操作可行性、成本效益和选择性，吸附法是海水提铀最有效的方法^[24]。2023年，我国最大的海水提铀试验平台建成投用。目前海水提铀面临的最主要挑战^[24-28]是缺少低成本、高效环保、循环性高的海水铀吸附材料^[29]。

我国盐湖提锂、提钾已实现产业化。2025年我国盐湖提锂产能迎来了井喷式发展，实现约 1.8×10^5 t产能，提锂浓度下限达到50 mg/L；我国盐湖提钾（钾肥）处于世界比较领先的地位，察尔汗盐湖钾肥年产量为 5×10^6 t，藏歌年产硫酸钾 2×10^6 t、罗布泊年产硫酸钾 1.6×10^6 t，均处于世界排名前列，合计年产量约千万吨，目前提钾浓度下限达到了5000 mg/L。这些都为海洋伴生矿产提取奠定了坚实的技术装备和经验基础。

(二) 海洋大温差能发电的潜力

1. 海洋大温差能发电的物质基础

据联合国教科文组织统计和海洋学家估计，我国仅南海就拥有海洋温差能理论可再生量 3.67×10^8 kW·h。我国近海仅渤海湾盆地、珠江口盆地、北部湾盆地和莺琼盆地的水热型海洋地热能 8.676×10^{21} J^[1]，按照2%可采率和2.5%利用率，折算为 1.205×10^{12} kW·h。LNG（-162℃）气化过程会释放大量的能量，约为240 kW·h/t，2020—2024年我国年均LNG进口量为 6.966×10^7 t，一年释放的冷能相当于 1.67×10^{10} kW·h电量，其中2024年我国的LNG进口量为 7.665×10^7 t，理论上蕴含的冷能总量为 1.84×10^{10} kW·h，按国际先进水平LNG冷能利用率（30%）计算，冷能可利用量约为 5.5×10^9 kW·h。另外，海水中含锂 2.3×10^{11} t（浓度为0.17 mg/L）、含铀 4.5×10^9 t（比陆地铀矿高约1000倍，河水每年

还可补充约 2.7×10^4 t, 浓度为 $3.3 \mu\text{g/L}$)。2025年, 我国全社会用电量为 1.04×10^{13} kW·h, 而近海水热型海洋地热能发电就可满足我国年用电量的 1/8。综上, 我国海洋大温差能发电兼顾海水淡化和海洋伴生战略矿产资源开发的工程化实施物质基础丰富。

2. 海洋大温差能发电经济性

虽然目前估算的海洋温差能发电成本为 $0.15 \sim 0.25$ 美元/(kW·h), 远高于其他可再生能源和化石能源, 但从长远看, 石油等不可再生能源的枯竭以及对气候和环境的不良影响, 加之大多数可再生能源也不是无限制的, 如风能和太阳能, 只在有风和阳光的情况下才能产生电力。海洋温差能发电可以 24 h 全天候运作, 可视为 21 世纪可再生能源的有力“候补成员”, 成为主流发电方式之一。

随着技术进步, 海洋温差能发电成本将接近煤炭和太阳能。据估算, 随着海洋温差能发电技术的不断进步, 建造一座 100 MW 的海洋温差发电场大约需要花费 7.9 亿美元, 如果把建造费用和运行成本都计算在内, 电费约为 18 美分/(kW·h), 与美国能源部门估算的煤炭和太阳能电费接近 (前者为 14 美分/(kW·h), 后者为 14~16 美分/(kW·h))。

海洋大温差能发电比海洋温差能的温差更高, 热循环效率和发电效率更高, 至少可提高 3 倍或以上, 成本会降低。因此, 未来随着技术进步、大规模运行以及与其他能源协同开发深度结合, 加之政府补贴和市场激励等措施^[30], 海洋大温差能发电规模化将会成为可能, 潜力很大。

3. 海洋大温差能发电优势

海洋大温差能发电优势明显。① 清洁、稳定。所需能量来自于海洋地热能和海水, 全程不排放 CO₂ 等有害气体, 全天候 24 h 发电, 可提供持续稳定的电力输出。② 与传统的海洋温差能发电相比, 提高了热循环效率和热转化效率。温差越大, 热循环和热转化效率越高, 同时可考虑利用塞贝克效应, 直接热电转化。③ 具有综合利用优势, 附加值高, 可为海洋产业提供多种支持服务。将深海富营养盐类的海水抽到上层来, 有利于海洋生物的生长繁殖, 如将发电伴生矿产提取、制药、海水养殖、冷水空调、深海采矿及海水淡化结合, 可促进海洋经济发展, 开发海洋生物资源和医药资源, 取得更好经济效果。④ 解决深远海资源开发海上工程用电问题。海上移动式大温差能发电装置可随海上工程

活动进行移动, 满足离岸用电使用需求, 大大增强海洋资源的开发能力。⑤ 解决沿海、岛屿尤其是深远海岛屿用电问题, 维护国家领土安全。岛礁独立电网大多依靠高价柴油发电, 易破坏岛礁脆弱的生态^[31], 成本高; 若能以发电方式因地制宜地利用岸基/岛礁模式开发环岛周围的海洋大温差能, 为岛屿提供电力能源, 则能大大促进岛礁发展。

因此, 海洋大温差能发电技术背景和物质基础扎实, 优势明显, 工程化发展前景广阔。

三、海洋大温差能发电的技术要素

由于海洋大温差能发电与海洋温差能发电都是利用温差能, 因此技术装备可相互借鉴。海洋温差能发电装置的核心技术包括透平机技术、装置平台及平台定位技术、换热器技术、冷水管技术和水下电缆技术等, 大部分技术较可行且成熟^[32]。

目前海洋温差能发电技术装备已从构思到设计再到实验室、并从试验走向了工程海试, 虽然还没有大规模实施, 但已在研发上迈进了一大步。因此仿效海洋温差能发电原理, 利用海洋地热水加热表层温海水和深层冷海水或用 LNG 气化后的表层温海水的海洋大温差能发电在技术上是可行的。但海洋温差发电目前面临的最大挑战之一就是热循环效率较低, 因此提高海洋温差能发电的热循环效率是解决海洋温差能发电规模化的有效手段之一。提高热循环效率的有效途径有增加海水温差、优化循环系统、多级循环优化, 其中最有效和最直接的就是增加海水温差, 而海洋大温差能发电能恰好满足上述 3 个途径, 能大大提高温差量, 可大幅改善海洋温差能发电存在热循环效率整体偏低的问题, 因此海洋大温差能发电技术可行。

(一) 海洋大温差能发电系统热力循环和转化方式

海洋大温差能发电是利用工质基于特定热力循环而输出电力, 其效率取决于系统的热力循环方式。根据工质和流程的不同, 热力循环方式主要包括开式循环、闭式循环、混合式循环^[33]等, 其中闭式循环包括朗肯循环、卡琳娜循环、上原循环、国海循环等。闭式朗肯循环^[34,35]技术成熟稳定, 这也是目前较常用的循环方式。卡琳娜循环^[36,37]是在朗肯循环基础上的重大改进, 采用氨-水工质, 通

过变温蒸发和浓度调控高效回收余热，系统集成提升整体循环效率。有学者提出，卡琳娜循环在大温差时比朗肯循环具有显著优势^[38]。上原循环是海洋温差发电的一种高效循环系统，热循环效率可达4.97%^[39]，二次热回收使热循环效率达5.25%^[40]，为目前最高的热循环方式。我国研究人员在卡琳娜循环的基础上设计提出了一种新的循环方式——“国海循环”^[41-44]，将温差能转换理论循环热效率提高至5.10%，成为当前效率第二高的循环方式，在海洋热能转换原理上取得的巨大进步，为海洋温差能开发利用奠定了良好的理论基础^[45]。塞贝克效应下的材料热电转换效率约为10%，高于朗肯循环，但应用到温差能发电较少，未来是重点的攻关方向。2019年，基于塞贝克效应设计了一种温差发电热电联供系统，可摆脱对化石燃料的依赖；成功利用人体体温和环境的温差做出了人体体温温差发电电池。总体来说，海洋大温差能发电系统热力循环方式成熟，通过比较优缺点以及借鉴全球经验（见表1），建议起初采用技术成熟稳定的闭式朗肯循环，这也是目前较常用的循环方式，待技术发展成熟，可逐渐采用热效率较高的卡琳娜循环、上原循环、国海循环，未来可考虑塞贝克效应热力转换方式。

（二）海洋大温差能发电系统循环工质

海洋温差能发电系统的循环工质也是影响系统循环效率的关键因素之一，寻求更加安全高效的工质对海洋温差能的发展意义不言而喻。海洋大温差能发电系统循环工质成熟。闭式朗肯循环工质筛选应从技术匹配、环保性和经济性来考虑（见表2），并满足以下基本条件^[46]：① 临界温度高于热力循环中的最高温度，避免跨临界循环可能引起的压力升高及设备造价增加；② 最高温度对应的饱和压力不应过高，避免过高压力导致机械无法承受，但循环中最低饱和压力应保持正压，以防外界空气漏入凝汽器而影响循环性能；③ 等熵工质或干工质，以防汽轮机内部发生汽蚀；热传导率高，热稳定性和热力学性能良好，与冷热源温度匹配较好，并具有良好的传热性能；④ 不易燃易爆、无毒，与设备材料和润滑油具有较好的兼容性；⑤ 环境友好（低消耗臭氧潜能值（ODP）和全球变暖潜能值（GWP））；⑥ 价格低廉、方

便储存与运输。

研究表明，正丁烷（R600）具有较高热循环效率，且凝结压力与蒸发压力均适合海洋温差能发电循环系统^[47]。通过分析氨（R717）、四氟乙烷（R134a）和正丁烷（R600）这3种工质的性能参数和蒸发压力的关系发现，氨（R717）蒸发压力操作范围较大，热效率高，是当前较理想的海洋温差能发电工质^[48]。卡琳娜循环中氨水混合工质的配比对循环效率具有显著影响，当氨水质量分数为91%时循环效率最高^[49]。通过在闭式循环中对四氟乙烷（R134a）、氨（R717）、正丁烷（R600）等3种常见工质进行优选研究，综合考虑工质的安全性、环保性、技术匹配性及经济性，且从兆瓦级温差能发电系统工程化应用和安全性的角度，认为四氟乙烷（R134a）是最优循环工质^[50-56]。

已有研究成果表明，混合工质可有效减少热能损失，提高系统的整体效率，因此，未来混合工质以及配比优化是海洋大温差能发展的重点研究方向之一，优选采用典型的低沸点工质，如低沸点、低潜热、小比热容的二氧化碳、氮气等，就可不使用传统OTEC技术所采用的昂贵钛合金换热器，而改用不锈钢、铝合金或碳钢制造的普通无腐蚀压力容器^[57]，绿色无公害的工作介质将完全消除对环境的负面影响，且极大降低对建筑材料的要求。

（三）海洋大温差能发电系统换热器

换热器（蒸发器、冷凝器、闪蒸器）是海洋温差能发电系统的关键设备，对发电装置的效率、结构和经济性有直接的重要影响，是影响OTEC发电系统循环效率的另一关键因素。日本对100 MW海上温差能发电装置的造价分析发现，换热器造价费用最高，占比达40%。目前大温差能发电系统换热器基本成熟，影响其性能的主要方面是结构型式和表面材料，其中，板式换热器因其体积小、传热效果好、换热效率高、造价低而被广泛应用在闭式循环中（见表3）。

日本佐贺大学通过大量的试验和数值模拟研究发现，表面呈凹凸状的钛材料板式换热器可以更好地促进氨水混合介质的传热，且防腐性能良好，循环效率提高约10%，冷、热水流量均达到3300 m³/h的设计值^[58,59]，但钛价格过于昂贵，可能会限制其大规模商业应用。而美国的阿贡实验室研究发现，

表1 海洋大温差能发电热循环 / 转化方式

热能转换方式	热循环 / 转化方式	循环介质	热循环 / 转化效率	优点	缺点	优选
热能↓ 机械能↓ 电能	开式 朗肯循环	海水	2%~3%	① 减少热损失；② 发电，生产淡水；③ 清洁无污染；④ 结构简单，容易操作	① 透平尺寸大，机械能损耗大，单位功率占用面积大，施工困难；② 局限不超过 3 MW	
	闭式 朗肯循环	纯氨（单工质）	约 3%	① 结构简单，透平尺寸小，降低机械损耗，提高系统转换效率，装置小型化，易商业化发展；② 闭路循环，无不凝性气体影响	① 二次换热，增加热损失；② 蒸发器和冷凝器体积较大，金属耗量大，维护困难；③ 必须有性能优良的热交换器；④ 工质泄露可能会对环境产生影响；⑤ 只发电，不生产淡水	示范工程应用较多
	卡琳娜循环	不固定组分非共沸循环介质（氨-水混合物，混合工质）	4.50%	朗肯循环的重大升级和改进。对于 100 °C 左右低温热水和 250 °C 低温热源的热电转换，实现朗肯循环无法实现的热电转换效率；对于 350 °C 以上中温热源的热电转换，利用朗肯循环-卡琳娜循环联合循环实现高效、合理热电转换；更适合大温差	① 系统复杂，成本较高、技术难度大；② 部分学者认为：小温差不适合	适合大温差
	上原循环	氨-水混合工质	4.97% / 5.25%	中间抽气两级透平，以及主循环和蒸发分离循环的联合，大大提高了热循环效率	结构复杂，氨有毒且腐蚀性强，对材料要求高	
	国海循环	氨-水混合工质	5.10%	提高效率，节省占地面积	理论研究	
	混合式 朗肯循环	海水+氨	3%~3.5%	即发电又产淡水；蒸发器体积小、维护简单；闭式循环获取动力，效率高，机械损耗小	结构复杂、工程造价高	
热能↓ 电能	塞贝克效应		约 10%（热转化效率）	一次能量转换，效率高	目前还没有商业应用到温差能发电上	

表2 循环工质优选考虑因素

技术匹配	环保性	经济性
临界温度	无毒、不易燃易爆	热效率
透平入口压力	环境友好性优良	单位工质做功能力
循环中最低饱和压力和压力	价格、储存和运输困难	换热器热负荷
等熵工质或干工质	—	—

在腐蚀的暖海水环境下，改进后的钎焊铝换热器寿命达 30 年以上，有望成为板式换热器的未来材料之星。

我国自然资源部第一海洋研究所完成了 SOS316L 材料板式换热器设计，冷、热水流量分别为 129 m³/h、125.3 m³/h^[60,61]，后续需要进一步提高换热器的效率指标，以达到工程应用目标；同时，

表3 海洋大温差能发电换热器比较

换热器（按结构分类）	优点	缺点	综合优选
板式换热器	接触充分、换热效率高，为壳式换热器面积的1/2~1/4即可达到同样效果	制造工艺复杂，价格高，易堵塞	适合大温差能发电
壳式换热器	结构紧凑	放热系数较大	
管式换热器	制造工艺简单，成本比壳管式低，广泛应用于中小机组	接触面积小，设备费高，比壳管式效率低	应用较广

利用环境友好型臭氧进行换热器防污试验研究，极大程度减小了换热器的污染问题，提高了使用效率。另外，热交换器表面容易附着生物使表面换热系数降低，对整个系统经济性影响很大，美国阿贡实验室发现每天进行1 h间断加氯，可有效控制生物附着，后期可进一步研究寻找更合适的方法，以降低对环境的影响。

（四）海洋大温差能发电系统透平机

透平机作为动力输出环节，是海洋大温差能发电系统中最重要的装置，透平的设计和研发在很大程度上决定了整个发电系统的性能。

国内外学者早在20世纪60年代就对向心透平进行了气动设计并进行工况计算等理论分析研究，目前理论研究相对成熟。低温透平发电机设备被欧美国家垄断，主要厂家有美国通用电气公司、法国CRYOSTAR公司、瑞典阿特拉斯·科普柯集团等。国内学者已开始对有机工质透平进行设计^[62]，自然资源部第一海洋研究所牵头开展了10 kW型海洋温差发电透平机研究，制造厂家有西安陕鼓动力股份有限公司、锦西化工机械集团有限公司等，但在大型商业化透平装置方面与国际先进水平仍存在差距^[63]，部分核心部件目前依然需要进口，还需加大研发投入。

（五）海洋大温差能发电系统深海长距离大口径冷水管技术

深海长距离大口径冷水管制造和铺设接口施工是海洋大温差能发电中的另一个技术难点和主要成本来源，冷水管的材质、保温性与可靠性在很大程度上决定了海洋大温差能发电的技术可行性和经济性。通过研究深海冷水管提水过程中海水升温特性发现，新型高密度聚乙烯（HDPE）冷水管的保温

性能明显好于钢制冷水管^[64]。美国马凯公司在建成的美国夏威夷海洋温差能示范工程中便采用新型聚乙烯管道作为冷水空调系统的深海冷水管，并联合洛克希德·马丁空间系统公司研制了一种新型的玻璃纤维冷水管^[65,66]。相比于HDPE材料，玻璃纤维冷水管的强度更大、更耐久（见表4），国内外海洋温差能示范工程的冷水管都采用HDPE。我国在大口径冷水管界面设计、强度分析、动态稳定性、动力响应特征以及安装铺设方法等方面的研究较多，如模拟发现将热海水温度提高5~20 K，成本越低，钢管对应平准化度电成本下降与玻璃纤维管一致、甚至更低^[67]。但冷水管研制报道较少，仅在2023年见过一次报道：广州海洋地质调查局牵头研发的20 kW海洋漂浮式温差能发电装置搭载“海洋地质二号”船成功在南海完成海试，该装置攻克小温差宽负荷透平发电、深海保温取水、冷水管路安装工艺等核心关键技术，装置国产化率为100%，最大发电功率为16.4 kW，试验发电总时长为4.78 h，有效发电利用率达17.7%，这也是我国冷水管研制的首次报道。目前我国冷水管技术需加以积累，中短期可支撑大型电站工程建设。

四、我国海洋大温差能发电的工程化模式

按照海洋温差能示范工程模式以及我国海洋油气开发模式，提出4种可能的我国海洋大温差能发电的工程化模式，并进行比较和优选。

表4 深海长距离大口径冷水管材质类型对比

深海冷水管类型	优点	缺点
钢制管道	保温性能一般	便宜
HDPE管道	保温性能好	价格较贵
玻璃纤维管道	强度大、更耐久	价格贵

(一) 岸基 / 岛礁模式

岸基模式发电厂已在全球(如美国、日本)开展多个示范, 岛屿成为第一批海洋温差发电站的“宠儿”。

在岸基 / 岛礁模式海洋大温差发电中(见图2), 热水可用地热水、表层温海水经海洋地热能加热或表层温海水; 冷海水可用表层温海水经LNG气化变冷、深层冷海水或深层冷海水经LNG气化变冷; 循环方式可先使用开式朗肯循环, 再使用闭式朗肯循环, 最后过渡到卡琳娜循环, 随着成熟度逐渐推进和过渡升级; 发电输送至陆地或岛礁直接使用, 并直接生产淡水, 还可考虑使用深层冷海水养殖, 未来考虑海洋伴生战略矿产提取; 适合近陆地和岛礁、浅水、大中型海洋地热能或有大量LNG冷能; 具有场地面积不受限优势, 便于操作维护, 长期具有较好的经济性, 如果海洋地热水和海水可作其他用途, 其经济性还可提高, 同时还能兼顾地热和LNG冷能、实现更大温差、循环方式灵活、提高热循环效率等优势, 但适用水深有限、地理位置要求较为苛刻。

(二) 导管架模式

导管架模式海洋大温差能发电(见图3)的工程载体为废旧导管架, 热水可考虑采用地热水、表层温海水经海洋地热能加热、表层温海水; 冷海水可采用深层冷海水; 循环方式可采用闭式朗肯循环或卡琳娜循环; 发电可与海上风电、光伏发电一并

运输至周边陆地或岛礁直接用, 或制氢、海水淡化、深远海资源开发, 未来还可考虑兼顾海洋伴生战略矿产提取; 在浅海和中深海区使用较为经济; 具有结构简单、作业平稳、安全可靠等优点, 结合废旧平台经济性更佳; 但也存在制造和安装周期长、海上安装工作量大、灵活性和适应性差的缺点。

(三) 浮式 / 船式模式

岸基 / 岛礁模式和导管架模式的海洋大温差能发电站建造地点离海岸越远, 造价就会越高, 因此不能离岸太远, 而建造成本低的船不受此约束, 因此可利用船等海上浮式装置, 将海洋大温差能发电装置建造在海上, 不但可将水管长度减短, 海水输运过程中的热损失也相应减少。目前海上装置有船式(浮动)设计、半潜式设计以及全潜式设计。船式海洋大温差能发电装置的建造技术可参考造船技术, 该技术比较成熟, 且已有示范工程。半潜式和全潜式海洋温差能装置还处于概念设计阶段。

在浮式 / 船式模式大温差能发电中(见图4), 热水为地热水、表层温海水经海洋地热能加热、表层温海水, 冷海水为深层冷海水, 利用闭式朗肯循环或卡琳娜循环方式, 发电可自身利用、深远海资源开发、制氢、海水淡化、输送陆地, 未来考虑海洋伴生战略矿产提取, 对远离陆地的深远海洋地热能优势明显: 集于一体、重复使用、稳定安全; 适用水深范围广、降低热损失; 可扩展插拔式、一键式智能系统; 可躲避台风等恶劣情况, 同时也存在空间和承重受限、能耗高、维护成本高等劣势。国内外学者认为, 浮式发电模式代表着该技术的未

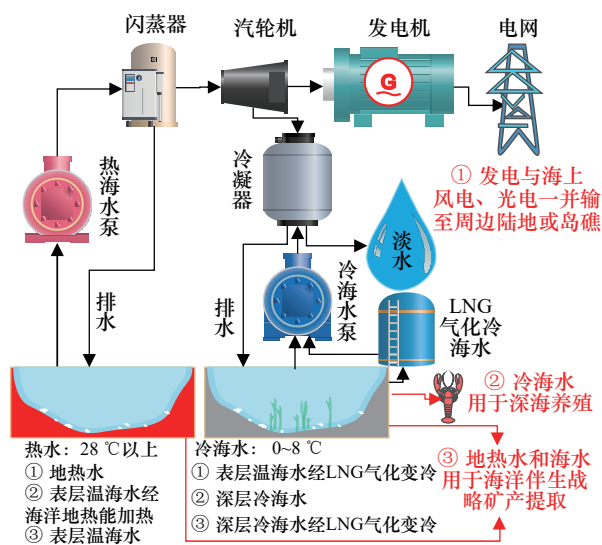


图2 岸基 / 岛礁工程模式 (以开式朗肯循环为例)

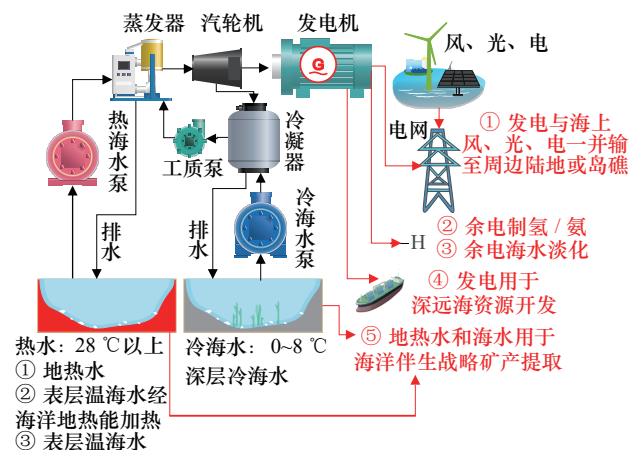


图3 导管架工程模式 (以闭式朗肯循环为例)

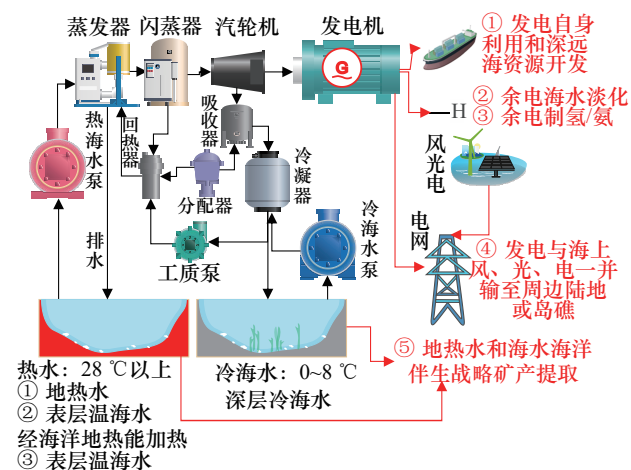


图4 浮式/船式工程模式(以卡琳娜循环为例)

来,为了解决通过海底电缆向海岸输电的难题,可考虑将电能原地利用,如海水制氢、再储氢。据估算,一艘10 MW的海洋温差能发电船可生产1.3 t/h的液态氢,未来极具发展前景。

(四) 水下模式

海上平台甲板面积有限,且已安置各种必需油气生产装置。若后期增加地热发电装置,需重新进行结构校核,增加空间仅满足有限的发电。且热水经过100~1500 m水深后,温度有十几到几十度的损失,造成井口温度过低,发电效率降低,因此未来可考虑水下模式。

水下模式海洋大温差能发电(见图5)是把工程载体放置在水下,热水可采用地热水、表层温海水经海洋地热能加热,冷海水可采用深层冷海水,循环方式可采用闭式朗肯循环、卡琳娜循环或热电效应,发电可进行自身利用、深远海资源开发、制氢、海水淡化、输送到陆地,对远离陆地的深远海洋地热能优势明显,具有避免建造昂贵的海上平台、降低地热热量流失、提高发电效率的优势,但也面临挑战,如工程工艺复杂、技术装备投入较高,还需克服海洋工作环境恶劣、设备损坏率高以及环保等一系列问题,最后还需要与其他新能源技术相互协调,以形成一个更加完善和互补的能源产业链,降低成本。

综上,优选位置,以陆地岸基/岛礁模式示范推进我国先导试验工程模式,逐步完善大温差能发电材料、技术和装备,作为近期发展目标 and 规划;

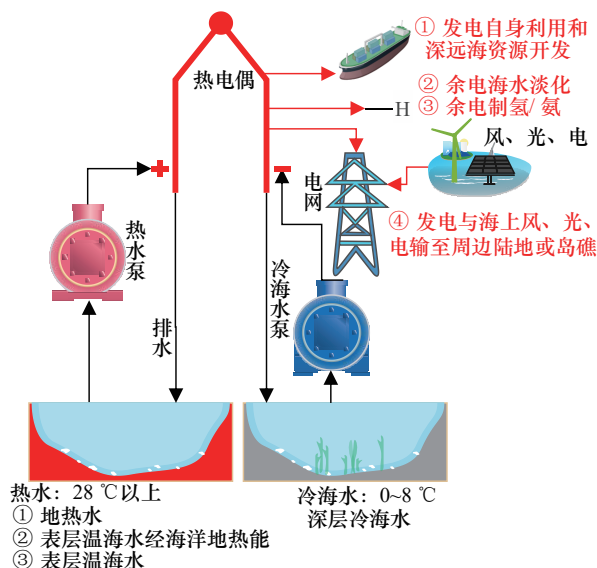


图5 水下工程模式(以热电效应为例)

待岸基和岛礁模式逐渐发展成熟并规模化后,可利用废旧平台进行导管架工程模式的大温差能发电;针对深远海可采用浮式平台模式,借此向深远海地热能迈进;水下模式可以作为未来远期目标尝试和实践(见表5)。

未来,海洋大温差能发电会朝着三个趋势发展,一是海洋大温差能发电装置向规模化、大型化发展,并深度结合多极综合利用的趋势越发明显,以实现经济性和工程化可能^[68,69];二是尽可能提高海洋大温差能发电的温差幅度,提高热转换效率;三是深远海和岛屿将成为海洋大温差能发电的主要潜力区和输出区。

五、我国海洋大温差能发电工程化重点方向

(一) 海洋大温差能发电高效热循环和热转化技术装备

根据热力学第二定律,提高大温差幅度、技术及装备的效率等是提高海洋大温差能发电效率的重要途径,因此从如下几个方向提升海洋大温差能发电高效热循环效率和热转化效率。

1. 高效率换热器

高效率换热器是实现海洋大温差能发电的核心装置。首先,突破换热器的材料与涂层技术,研发兼具高强度、优异耐腐蚀性与极高导热性能的新型

表5 海洋大温差能发电工程化模式综合对比及推荐

工程化模式	优势	劣势	综合对比	适用典型海域
岸基 / 岛礁模式	场地面积不受限, 便于操作维护, 长期经济性较好; 可兼顾地热和 LNG 冷能, 实现更大温差, 提高热循环效率	适用水深有限; 地理位置要求较为苛刻	优选位置 示范推进	南海
导管架模式	结构简单、作业平稳、安全可靠; 结合废旧平台经济性更佳	水深增加, 费用显著增加; 制造安装周期长, 安装工作量大; 灵活性和适应性差	利用 废旧平台	南海 / 渤海
浮式 / 船式模式	集于一体、重复使用、稳定安全; 适用水深范围广, 降低热损失; 可扩展插拔式一键智能系统、躲避台风	空间和承重受限、能耗高、维护成本高	深远海 灵活	南海
水下模式	避免建造昂贵的海上平台; 降低地热热量流失、提高发电效率	工程工艺复杂、海底电缆造价高	未来布局	南海

材料(如钛合金复合材料、高性能铝合金及陶瓷涂层)。发展长效防生物污损的智能涂层或表面处理技术, 维持换热器长期高效、降低维护成本。其次, 创新结构设计与制造工艺, 重点发展超紧凑、大面积的高效传热结构, 如三维肋片、仿生微通道等, 以最大化传热面积与效率。最后, 在系统集成与智能化运维方面, 未来换热器将不再是孤立部件, 而是与热力循环(如工质选择、涡轮机设计)深度耦合优化, 同时, 集成先进的传感器与监测系统, 实现换热器性能的实时监控、污损预警与智能化清洗维护, 保障系统在全生命周期内稳定高效运行。

2. 海洋大温差能发电透平机

海洋大温差能发电透平机作为海洋大温差能发电系统的核心动力转换部件, 其未来发展将围绕“高效率、高可靠性与低成本”来设计。未来特殊设计的高压涡轮机需考虑到流体动力学、结构力有机闪蒸循环(OFC)透平学、材料科学等多方面因素, 并进行叶片气动优化、多级膨胀技术升级, 材料选择钛合金(Ti-6AL-4V)或双相不锈钢(抗氨应力腐蚀), 同时进行末级叶片加装疏水纳米涂层(接触角 $>150^\circ$)的防水蚀设计, 加装可调导叶机构和磁悬浮轴承, 以适应特殊工况, 未来可考虑超临界 $\text{CO}_2(\text{sCO}_2)$ 透平和有机闪蒸循环(OFC)透平, 并兼顾数字孪生运维技术、实时性能预测, 提前预警叶片结垢或腐蚀情况。

3. 深海超长距离大口径冷水管材质研制、铺设和维护

深海超长距离($>2\text{ km}$)大口径冷水管是保证

取到足够冷水的关键。深海超长距离大口径冷水管材质将从全金属(如HDPE、钢材)转向智能增强热塑性复合材料(如玻璃钢/碳纤维增强塑料), 具有直径不小于 5 m 、高性能、高强度、轻量化、优异的耐腐蚀性、更低的全生命周期(至少30年)成本、保温、绝热、防生物附着功能的多层复合管材结构; 管材中嵌入光纤传感器网络或分布式传感元件, 实现管道应力、形变、泄漏和内部流态的实时原位监测。适应复杂海况的新型铺管船、动态定位系统及布放控制工艺等高效动态铺设系统与装备是未来的重点方向, 着重解决大质量柔性管在深海强流环境下的精准、安全布放与连接难题, 实现高效、低风险的规模化施工作业; 适应冷水管环境的自主水下机器人巡检技术, 搭载高精度检测设备, 对管外腐蚀、附着物、锚害等进行自动化巡检, 同时发展非侵入式在线清洗和原位修复技术, 减少维护成本与停机时间。深海油气管道如挪威北海海底油气管网系统、巴西盐下油田超深水管道以及我国南海海底油气管网的运维实践, 可提供更好经验借鉴。未来, 深海超长距离冷水管技术将通过新材料革命降低核心成本, 通过智能化、精准化的工程装备解决铺设难题, 并最终依靠数字化、智能化的运维体系保障其数十年的安全可靠运行, 从而为大温差能发电的大规模商业化铺平道路。

4. 塞贝克效应的高性能热电材料及热电转化效率

塞贝克效应是实现大温差能直接发电的核心物理原理, 其应用高度依赖于热电材料的性能, 高性能热电材料的核心指标是无量纲热电优值(ZT),

ZT值越高，热电转换效率越佳。未来开发具有ZT和高塞贝克系数的热电材料，如室温附近性能最优的铋锑合金和硫化铋、通过填充原子“声子玻璃-电子晶体”特性而在中温区表现出色的方钴矿和笼状化合物，以及利用超晶格、纳米线，通过量子限域和界面散射，大幅降低热导率的低维与纳米结构等高性能热电材料，继而大幅降低热导率。同时，通过能带工程（如能带收敛、共振能级）提升功率因子，同时利用纳米尺度缺陷、复杂晶体结构（如高通量筛选）高效散射声子，来控制热电材料的复杂晶体结构和成分，以降低晶格的电导率和热导率，优化材料内部的热电转换过程，改进热电转换器的结构和工艺，减少能量损失，提高温度差异幅度，提高热电转化效率。

（二）海洋地热能取热技术装备

海洋地热能取热技术装备是实现海洋大温差能发电的先决条件。研发适应高压（>30 MPa）、高温（>200 °C）及复杂地质环境的模块化智能钻机，实现海洋地热钻井，再借鉴热液喷口自然对流原理，开发高效、抗结垢的闭环式海底热交换阵列，减少对热储层工程扰动，应用井下机器人、光纤传感网络实时监测热储状态，并实施精准的水力或化学刺激以增强取热效率。研发兼具高强度、耐海水腐蚀、抗氢脆及耐热疲劳的钛基复合材料或高熵合金涂层，用于取热管、压力壳体等核心部件。开发高效绝热与相变储热材料，用于高温工质的长距离海底输送管线，减少热损失并平抑波动。重点研发高效、耐腐蚀、低成本、低环境影响的增强型地热系统（EGS）建井技术和井下换热器，可移植陆地ESG工程，如法国上莱茵地堑示范工程和河北唐山马头营凸起区干热岩试验性发电项目的技术并加以改进。

（三）海洋伴生战略矿产提取技术装置

一是研发高通量、高选择性的“智能捕获”吸附材料。装备效能的核心瓶颈在于吸附/分离材料，下一代材料将超越传统偕胺胍基或离子筛，向仿生识别材料、金属有机框架材料和多功能复合材料等方向演进，在复杂海水离子环境中，对锂、铀等目标离子的吸附容量提升一个数量级，同时循环使用寿命突破千次；提氢需要重点研发高效、低阻

的深海沉积物原位气体分离膜材料，减少提升能耗。二是提取装置系统紧凑集成、易嵌入和生态化，打造“海洋资源绿色综合利用”综合体。重点开发“吸附-膜-电化学”多技术工艺耦合的集成紧凑装备系统，易嵌入大流程中，实现从同一股海洋中“一步法”或多步顺序提取淡水、溴、镁、锂、铀等多种产品，多资源联产，最大化资源价值与能源效率。更宏大的愿景是构建“海上移动式资源工厂”或“岛礁基资源-能源-淡水联合供给平台”，将矿产提取与海水淡化、海洋大温差能发电、深海冷水养殖甚至二氧化碳封存相结合，形成可持续发展的蓝色经济闭环，不仅解决关键资源的可持续供应问题，更将催生一个全新的海洋高端装备产业。

六、我国海洋大温差能发电发展建议

（一）发展目标和重点任务

在当前千瓦级海洋温差能发电装置海试成功、发电成功以及海洋伴生战略矿产提取技术基础上，分三步走。

近期，开展岸基/岛礁海洋大温差能发电先导示范。验证关键技术装置的技术可行性，以及综合利用开发如耦合海水淡化、冷链、伴生战略矿产提取等应用场景的可行性。同时，制定海洋大温差能发电设计、施工及并网标准，支撑行业规范发展。

中期，推动海洋大温差能发电浮式平台关键技术突破。突破抗台风、低运动响应的兆瓦级漂浮式海洋大温差能发电平台技术，以期建成我国首个适用于深海环境的海洋大温差能发电浮式平台并实现长期稳定运行，完成从近岸示范向远海应用的跨越，形成具备商业前景的浮式平台标准化方案。

远期，布局以海洋大温差能发电为主体的深海多能连产系统。构建以海洋大温差能发电为核心、深度融合多种海洋可再生能源与资源梯级综合利用的“深海绿色能源综合体”，实现海洋大温差能发电、海上风、光、电、海水淡化、深海冷水养殖、低碳制氢及海洋伴生矿产铀/锂提取等功能的协同优化，形成能源自持、资源高效、生态友好的海上基地新模式，成为支撑国家深远海开发与“蓝色经济”发展的战略性基础设施。

(二) 战略举措和对策建议

1. 加强海洋地热能和海水资源勘察

建议系统整合我国海洋功能区划, 将海洋地热能、海洋油气区块及其他海洋新兴能源纳入国家顶层设计, 实行统一规划与归口审批。重点加强海洋地热能和海洋伴生战略矿产资源的勘探力度, 全面查明海洋地热能和海洋伴生战略矿产资源的分布特征、资源储量和开发潜力, 为海洋大温差能发电、海洋伴生矿产资源提取及海洋地热能和海水资源综合利用提供科学依据, 进一步夯实稳定可靠的基荷能源补充。

2. 加大海洋大温差能发电核心技术和关键装备攻关力度

建议设立海洋大温差能发电国家级研究中心, 强化基础理论研究, 对海洋大温差能发电的核心技术和关键装备进行创新, 重点突破浮式平台技术、高效率换热器、大温差透平发电机和深海长距离大口径冷水管的研制, 以及地热能和海水冷能二级利用技术、海洋伴生战略矿产提取技术和装置研发, 将海洋打造成战略性矿产资源接替区, 实现以海洋大温差能发电为主导的海洋地热能与海水综合利用。

3. 加快设立海洋大温差能发电示范工程

在海洋地热能和 LNG 冷能距离相近且丰富区设立海洋大温差能发电示范工程, 推动能源结构转型、促进海洋经济发展。在实施过程中, 应充分考虑技术、环境、经济等方面的风险和挑战, 加强技术研发和创新, 确保示范工程的顺利实施和稳定运行, 形成可复制、可推广的技术模式和商业模式, 同时考虑海洋地热水、海上油气田卤水、海上深层卤水、海水叠加进行多水多矿提取, 以及与风光、波浪能结合, 富余电力生产绿氢 / 绿氨等, 延长产业链, 提高经济性和协同性。

4. 加强海洋大温差能发电的政策引导和投入支持

建议国家有关部门借鉴海上风电和光伏项目经验, 出台相应的海洋大温差能发电产业发展规划、补贴政策和财税减免支持, 鼓励企业积极投入布局 and 参与海洋大温差能发电、海洋伴生战略矿产资源提取等海洋能源资源协同开发, 推动海洋资源能源共用、共享。同时增设专项资金和出台激励措施, 支持企业开展相关技术创新和装备研发。

海洋大温差能凭借其持续稳定的输出特性, 是海上综合能源系统中理想的基荷电源, 能与间歇性可再生能源有效互补。更重要的在于其发电可同步实现深海冷水、淡水、战略矿产和绿氢 / 氨等联产; 有力牵引深海管道、高端材料等关键装备的研发与产业链升级, 推动海洋经济向“稳定供能-资源利用-产业联动”高级形态发展, 对建设海洋强国和海上综合能源系统具有重要意义。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 4, 2025; **Revised date:** January 20, 2026

Corresponding author: Wu Ying is a senior engineer from the CNOOC Research Institute Co., Ltd. Her major research field is development strategy of marine resource. E-mail: wuying6@cnooc.com.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering projects “Strategic Research on Promoting Energy Power Country Building (II)” (2025-PP-07), “Strategic Research on Integrated and Coordinated Development of Offshore Energy” (2025-HZ-30)

参考文献

- [1] 荆丰梅, 王心如, 梅云雷. 海洋能利用技术发展现状与关键技术难题 [J]. 船舶工程, 2025, 47(1): 14–28.
Jing F M, Wang X R, Mei Y L. Development and key technological challenges of ocean energy utilization technologies [J]. Ship Engineering, 2025, 47(1): 14–28.
- [2] 付强, 王国荣, 周守为, 等. 温差能与低温海水资源综合利用研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 52–60.
Fu Q, Wang G R, Zhou S W, et al. Comprehensive utilization of temperature difference energy and low-temperature seawater resources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 52–60.
- [3] 孙慧慧, 邓乾, 李坚, 等. 海洋能海上试验场进展及其启示 [J]. 海岸工程, 2025, 44(2): 99–115.
Sun H H, Deng Q, Li J, et al. Progress of marine energy test sites and its inspiration [J]. Coastal Engineering, 2025, 44(2): 99–115.
- [4] 麻常雷, 历鑫, 张彩琳. 中国海洋能产业发展分析 [J]. 油气与新能源, 2024, 36(1): 16–21.
Ma C L, Li X, Zhang C L. An examination of the growth of the ocean energy sector in China [J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(1): 16–21.
- [5] 郑洁, 杨淑涵, 柳存根, 等. 海洋可再生能源装备技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 22–32.
Zheng J, Yang S H, Liu C G, et al. Development of marine renewable energy equipment and technologies [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 22–32.
- [6] 位巍, 刘成名. 海洋温差能发电技术要点 [J]. 中国船检, 2021 (12): 74–80.
Wei W, Liu C M. Key points of ocean temperature difference energy power generation technology [J]. China Ship Survey, 2021 (12): 74–80.

- [7] 金珊, 倪章华. 我国海洋能规模化利用现状研究与发展建议 [J]. 团结, 2025 (5): 16–20.
Jin S, Ni Z H. Research on the present situation of large-scale utilization of marine energy in China and development suggestions [J]. Unity, 2025 (5): 16–20.
- [8] 高中扬, 陈曦. 不同级数温差发电器的输出特性 [J]. 化学工程, 2023, 51(2): 7–12.
Gao Z Y, Chen X. Output characteristics of thermoelectric generator with different stages [J]. Chemical Engineering, 2023, 51(2): 7–12.
- [9] 刘新宇, 张理, 吴鹏飞, 等. 海洋温差能发电测试平台设计及试验研究 [J]. 动力工程学报, 2024, 44(4): 582–589.
Liu X Y, Zhang L, Wu P F, et al. Design and experimental research of an ocean thermal energy experimental plant [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(4): 582–589.
- [10] 商船学院高文忠教授团队海洋温差发电系统获重大突破 [EB/OL]. (2021-12-24)[2025-11-30]. <https://mmc.shmtu.edu.cn/2025/0208/c4877a241623/page.htm>.
Professor Gao Wenzhong's team from Merchant Marine College has made a major breakthrough in the ocean thermal energy conversion system [EB/OL]. (2021-12-24)[2025-11-30]. <https://mmc.shmtu.edu.cn/2025/0208/c4877a241623/page.htm>.
- [11] 付强, 程兵, 吴英, 等. 我国海洋地热能开发利用研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 222–233.
Fu Q, Cheng B, Wu Y, et al. Development and utilization of marine geothermal energy in China [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 222–233.
- [12] Armani F B, Paltrinieri D. Perspectives of offshore geothermal energy in Italy [J]. EPJ Web of Conferences, 2013, 54: 02001.
- [13] 傅泽凯, 王慈云. 海水淡化技术现状及其应用探析 [J]. 中国设备工程, 2023 (15): 259–262.
Fu Z K, Wang C Y. Present situation and application of seawater desalination technology [J]. China Plant Engineering, 2023 (15): 259–262.
- [14] 刘睿贤, 田红, 窦斌. 海南地热能海水淡化可行性探讨 [J]. 海洋科学, 2020, 44(1): 46–51.
Liu R X, Tian H, Dou B. Feasibility of seawater desalination powered by geothermal energy in Hainan [J]. Marine Sciences, 2020, 44(1): 46–51.
- [15] 马来波, 路绍琰, 武海虹, 等. 电化学法海水提锂研究进展 [J]. 盐湖研究, 2024, 32(6): 115–124.
Ma L B, Lu S Y, Wu H H, et al. Progress in electrochemical extraction of lithium from seawater [J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(6): 115–124.
- [16] 赵雪媚. 海洋铀、锂资源开发的关键材料制备及其性能研究 [D]. 海口: 海南大学(硕士学位论文), 2020.
Zhao X M. Key materials preparation and performance research for marine uranium and lithium resource development [D]. Haikou: Hainan University (Master's thesis), 2020.
- [17] Gerald D L, Mary L L. Radially expandable downhole fluid jet cutting tool: US7434633 [P]. 2008-10-14.
- [18] Goldberg V, Winter D, Nitschke F, et al. The potential of raw material extraction from thermal brines Successful milestones of the brine mine project [J]. Oil Gas European Magazine, 2021, 47(1): 26–33.
- [19] Chen S Q, Chen Z S, Wei Z W, et al. Titanium-based ion sieve with enhanced post-separation ability for high performance lithium recovery from geothermal water [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 410: 128320.
- [20] 陈新军, 李倩文. 江汉盆地卤水锂资源特征及开发利用前景 [J]. 国土资源情报, 2021 (11): 44–49.
Chen X J, Li Q W. The characteristics and exploitation prospect of brine lithium in Jiangnan Basin [J]. Land and Resources Information, 2021 (11): 44–49.
- [21] 西南油气田提锂试验获突破 [J]. 浙江化工, 2022, 53(7): 48.
Breakthrough in lithium extraction test in southwest oil and gas field [J]. Zhejiang Chemical Industry, 2022, 53(7): 48.
- [22] 彭刚. 西南油气田“天然气+新能源”融合发展 [N]. 中国石油报, 2023-03-14(03).
Peng G. The “natural gas + new energy” integrated development of southwest oil and gas field [N]. China Petroleum News, 2023-03-14(03).
- [23] 张福礼, 孙启邦, 邹彦荣. 渭河盆地水溶含氦天然气资源评价及综合利用 [R]. 郑州: 中国石油化工股份有限公司华北油气分公司, 2008.
Zhang F L, Sun Q B, Zou Y R. Evaluation and comprehensive utilization of water-soluble helium-containing natural gas resources in the Weihe Basin [R]. Zhengzhou: North China Branch of Sinopec Corporation, 2008.
- [24] 李子明, 牛玉清, 宿延涛, 等. 海水提铀技术最新研究进展 [J]. 核化学与放射化学, 2022, 44(3): 233–245.
Li Z M, Niu Y Q, Su Y T, et al. Latest research progress of uranium extraction from seawater [J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2022, 44(3): 233–245.
- [25] Aguila B, Sun Q, Cassady H, et al. Design strategies to enhance amidoxime chelators for uranium recovery [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(34): 30919–30926.
- [26] Seko N, Katakai A, Hasegawa S, et al. Aquaculture of uranium in seawater by a fabric-adsorbent submerged system [J]. Nuclear Technology, 2003, 144(2): 274–278.
- [27] Ladshaw A P, Das S, Liao W P, et al. Experiments and modeling of uranium uptake by amidoxime-based adsorbent in the presence of other ions in simulated seawater [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(15): 4241–4248.
- [28] Kuo L J, Pan H B, Wai C M, et al. Investigations into the reusability of amidoxime-based polymeric adsorbents for seawater uranium extraction [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(40): 11603–11611.
- [29] 朱学蕊, 赵琦. 我国明确海水提铀路线图 [N]. 中国能源报, 2021-05-10(12).
Zhu X R, Zhao Q. China has outlined a clear roadmap for seawater uranium extraction [N]. China Energy News, 2021-05-10(12).
- [30] 国际能源署海洋能源系统(IEA-OES). 2021 海洋温差能白皮书 [EB/OL]. (2021-10-18)[2025-10-20]. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-position-papers/document/white-paper-on-otec/>.

- IEA-OES. White paper on ocean thermal energy conversion 2021 [EB/OL]. (2021-10-18)[2025-10-20]. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-position-papers/document/white-paper-on-otec/>.
- [31] 敬佳佳, 黄顺潇, 钟林. 深远海岛礁能源保障模式研究 [J]. 中国重型装备, 2022 (4): 18–21.
Jing J J, Huang S X, Zhong L. Research on the energy guarantee modes for pelagic islands and reefs [J]. *China Heavy Equipment*, 2022 (4): 18–21.
- [32] 朱汉斌. 我国海洋温差能发电海试成功 [N]. 中国科学报, 2023-09-13(01).
Zhu H B. Successful ocean thermally driven power generation test in China [N]. *China Science News*, 2023-09-13 (01).
- [33] 丁策. 面向海洋温差能利用的向心透平设计与气动特性研究 [D]. 南京: 东南大学(硕士学位论文), 2022.
Ding C. Design and aerodynamic characteristics study of centrifugal turbine for utilizing ocean temperature difference energy [D]. Nanjing: Southeast University (Master's thesis), 2022.
- [34] 岳娟, 刘伟民, 张理, 等. 单工质朗肯循环海洋温差能发电系统优化研究 [J]. 海洋技术, 2014 (4): 31–38.
Yue J, Liu W M, Zhang L, et al. Study on the optimization of Rankine cycle using ammonia working fluid for ocean thermal energy conversion [J]. *Ocean Technology*, 2014 (4): 31–38.
- [35] 陈旭立. 船舶余热喷射式有机朗肯循环系统特性分析及设计 [D]. 大连: 大连海事大学(硕士学位论文), 2017.
Chen X L. Characteristic analysis and design of ship waste heat injection organic Rankine cycle system [D]. Dalian: Dalian Maritime University (Master's thesis), 2017.
- [36] Kalina I A. Generation of energy: United States of America: US 4489563 [P]. 1984-11-25.
- [37] 薛彬. 卡琳娜循环和上原循环海洋温差能发电系统的性能研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京)(硕士学位论文), 2020.
Xue B. Performance study of Karina cycle and upwelling cycle ocean thermal energy generation system [D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing (Master's thesis), 2020.
- [38] 徐晓虹. 低品位热源驱动朗肯循环和卡琳娜循环的性能对比 [J]. 现代盐化工, 2018, 45(5): 58–59.
Xu X H. Comparison of energy performance of Rankine and Kalina cycles for low-grade waste heat recovery [J]. *Jiangsu Salt Science & Technology*, 2018, 45(5): 58–59.
- [39] Uehara H. OTEC system using a new cycle with absorption and extraction process [R]. Orlando: The 12th International Conference on the Properties of Water and Steam, 1994.
- [40] 陈风云, 彭景平, 刘蕾, 等. 海洋温差发电混合工质二次热回收循环系统理论和实验研究 [J]. 海洋科学进展, 2024, 42(1): 185–195.
Chen F Y, Peng J P, Liu L, et al. Theoretical and experimental study on secondary heat recovery cycle system of mixed working fluid for ocean thermal energy conversion [J]. *Advances in Marine Science*, 2024, 42(1): 185–195.
- [41] 徐莹, 何宏舟. 海洋温差能发电研究现状及展望 [J]. 能源与环境, 2016 (2): 17–18, 21.
Xu Y, He H Z. Research status and prospect of ocean thermoelectric power generation [J]. *Energy and Environment*, 2016 (2): 17–18, 21.
- [42] 刘蕾, 陈风云, 彭景平, 等. 海洋温差能发电系统新型热力循环理论分析 [J]. 科技导报, 2021, 39(6): 84–89.
Liu L, Chen F Y, Peng J P, et al. Theoretical analysis of a novel thermodynamic cycle for ocean thermal energy conversion [J]. *Science & Technology Review*, 2021, 39(6): 84–89.
- [43] 刘伟民, 陈风云, 王义强, 等. 海洋温差能闭式循环进展及新型循环系统研究 [R]. 北京: 中国可再生能源学会 2011 年学术年会, 2011.
Liu W M, Chen F Y, Wang Y Q, et al. Progress in closed cycle of ocean temperature difference energy and research on new circulation systems [R]. Beijing: 2011 Academic Annual Meeting of China Renewable Energy Society, 2011.
- [44] 陈风云. 海洋温差能发电装置热力性能与综合利用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学(博士学位论文), 2016.
Chen F Y. Research on thermal performance and comprehensive utilization of ocean temperature difference energy generation Device [D]. Harbin: Harbin Engineering University (Doctoral dissertation), 2016.
- [45] 吴浩宇, 彭景平, 葛云征, 等. 一种高效海洋温差能发电循环的性能分析 [J]. 海洋科学进展, 2020, 38(3): 513–521.
Wu H Y, Peng J P, Ge Y Z, et al. Study on performance analysis of the high-efficiency OTEC cycle [J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(3): 513–521.
- [46] 兰志刚, 张一平, 吴勇虎. 海洋温差能发电热力循环系统的工质优选 [J]. 能源与环境, 2023 (5): 17–19, 29.
Lan Z G, Zhang Y P, Wu Y H. Engineering quality selection of thermal cycle system for marine thermoelectric power generation [J]. *Energy and Environment*, 2023 (5): 17–19, 29.
- [47] 王辉涛, 王华. 海洋温差发电有机朗肯循环工质选择 [J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 119–123.
Wang H T, Wang H. Selection of working fluids for ocean thermal energy conversion power generation organic Rankine cycle [J]. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(2): 119–123.
- [48] 李大树, 张理. 海洋温差发电系统蒸发压力及工质优选分析 [J]. 可再生能源, 2017, 35(7): 1101–1106.
Li D S, Zhang L. Numerical analysis on evaporating pressure and working fluids of ocean thermal energy conversion [J]. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(7): 1101–1106.
- [49] 刘煜森, 张华, 赵巍. 卡琳娜海洋温差发电循环性能研究 [J]. 海洋技术学报, 2017, 36(2): 105–110.
Liu Y S, Zhang H, Zhao W. Study on the performance of kalina ocean thermal energy conversion cycle [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2017, 36(2): 105–110.
- [50] 刘强, 高翔, 于广欣, 等. 面向工程化的兆瓦级海洋温差能发电系统研究 [J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 148–155.
Liu Q, Gao X, Yu G X, et al. Engineering-oriented megawatt-scale ocean thermal energy conversion system [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(1): 148–155.
- [51] Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, et al. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles [J]. *Energy*, 2007, 32(7): 1210–1221.
- [52] Ge Y L, Chen L G, Sun F R, et al. Thermodynamic simulation of performance of an Otto cycle with heat transfer and variable spe-

- cific heats of working fluid [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2005, 44(5): 506–511.
- [53] Chen H J, Goswami D Y, Stefanakos E K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 3059–3067.
- [54] Wang E H, Zhang H G, Fan B Y, et al. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery [J]. *Energy*, 2011, 36(5): 3406–3418.
- [55] 张治国, 王丽丽, 赵军, 等. 基于低温余热发电的有机朗肯循环工质的多目标评价 [J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 46(5): 57–63, 72.
Zhang Z G, Wang L L, Zhao J, et al. Multiobjective evaluation of organic Rankine cycle working fluid based on low-temperature waste heat power generation [J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2025, 46(5): 57–63, 72.
- [56] Sun F M, Ikegami Y, Jia B J, et al. Optimization design and exergy analysis of organic Rankine cycle in ocean thermal energy conversion [J]. *Applied Ocean Research*, 2012, 35: 38–46.
- [57] 张全. 海洋温差能液力发电系统: CN106438242A [P]. 2017-02-22.
Zhang Q. Marine temperature difference energy hydraulic power generation system: CN106438242A [P]. 2017-02-22.
- [58] 张继生, 唐子豪, 钱方舒. 海洋温差能发展现状与关键科技问题研究综述 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1): 55–64.
Zhang J S, Tang Z H, Qian F S. A review of recent advances and key technologies in ocean thermal energy conversion [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(1): 55–64.
- [59] 全球唯一处于运转状态的海洋温差发电设备 [EB/OL]. (2013-04-02)[2025-11-30]. <http://finance.people.com.cn/2013/0402/c348883-20999640.html>.
The world's only operational marine thermoelectric power generation equipment [EB/OL]. (2013-04-02)[2025-11-30]. <http://finance.people.com.cn/2013/0402/c348883-20999640.html>.
- [60] 国家海洋技术中心. 中国海洋能技术进展—2016 [M]. 北京: 海洋出版社, 2016.
National Ocean Technology Center. Progress in China's ocean energy technology: 2016 [M]. Beijing: Ocean Press, 2016.
- [61] Chen F Y, Liu L, Peng J P, et al. Theoretical and experimental research on the thermal performance of ocean thermal energy conversion system using the Rankine cycle mode [J]. *Energy*, 2019, 183: 497–503.
- [62] 王晓奇, 张鲲鹏, 杜晓东, 等. 海洋温差发电用向心式透平机性能分析 [J]. *机电设备*, 2022, 39(4): 20–25.
Wang X Q, Zhang K Y, Du X D, et al. Performance analysis of turbine for ocean thermal energy conversion [J]. *Mechanical and Electrical Equipment*, 2022, 39(4): 20–25.
- [63] 研发海洋温差能发电, 运用可再生能源 [EB/OL]. (2017-05-05)[2024-11-30]. http://qdlg.qingdao.gov.cn/kjcx_112/gzdt_112/202203/t20220325_5002013.html.
Develop ocean thermal energy generation and utilize renewable energy [EB/OL]. (2017-05-05)[2024-11-30]. http://qdlg.qingdao.gov.cn/kjcx_112/gzdt_112/202203/t20220325_5002013.html.
- [64] 施伟, 刘伟民, 刘蕾, 等. 海洋温差电站垂向冷海水管内海水温升特性数值分析 [J]. *海洋技术学报*, 2016, 35(4): 93–96.
Shi W, Liu W M, Liu L, et al. Numerical analysis on the temperature rise characteristics of seawater in vertical cold-water pipe in OTEC power plant [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2016, 35(4): 93–96.
- [65] 兰志刚, 于汀, 焦婷, 等. 基于专利信息海洋温差能发电技术成熟度预测及关键技术领域分析 [J]. *中国海上油气*, 2020, 32(6): 185–190.
Lan Z G, Yu T, Jiao T, et al. Maturity prediction and key fields analysis of ocean thermal energy conversion technology based on patent information [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(6): 185–190.
- [66] Makai connects world's largest ocean thermal plant to U.S. grid [EB/OL]. (2015-08-31)[2024-11-30]. <https://oceannews.com/news/energy/makai-connects-world-s-largest-ocean-thermal-plant-to-u-s-grid/#elementor-action%3Aaction%3Dpopup%3Aopen%26settings%3DeyJpZCI6IjM4NTE0IiwidG9nZ2x1IjpmYWxzZX0%3D>.
- [67] 吴红华, 杨欣, 李正农, 等. 基于南海海域的深海温差能利用开发效益分析 [J]. *太阳能学报*, 2024, 45(11): 536–544.
Wu H H, Yang X, Li Z N, et al. Benefit analysis of deep-sea temperature difference energy utilization based on South China Sea [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(11): 536–544.
- [68] 李明杰, 李军. 国外深层海水开发利用现状及未来我国开发设想 [J]. *海洋开发与管理*, 2012, 29(5): 52–55.
Li M J, Li J. Present situation of deep seawater development and utilization abroad and future development in China [J]. *Ocean Development and Management*, 2012, 29(5): 52–55.
- [69] 山城保雄. 久米島海洋温度差発電複合利用 [J]. *海洋深層水研究*, 2010, 11(1): 155–120.
Yasuo Yamashiro. Combined utilization of ocean temperature difference in Kume Island by power generation [J]. *Deep Ocean Water Research*, 2010, 11(1): 155–120.