

海洋可再生能源 开发利用与技术进展

刘伟民¹, 麻常雷², 陈风云¹, 刘 蕾¹, 葛云征¹,
彭景平¹, 吴浩宇¹, 王泉斌¹

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局 海洋技术中心, 天津 300112)

摘要:综述了国内外潮汐能、潮流能、波浪能、海洋温差能、盐差能等海洋可再生能源的开发利用与技术进展, 通过开发利用现状分析, 认为国际潮汐能技术已达到商业化运行阶段, 潮流能技术已进入全比例尺样机实海况测试阶段, 波浪能技术已进入工程样机实海况测试阶段, 温差能技术已进入比例样机实海况测试阶段, 盐差能技术尚处于实验室验证阶段。通过对国内外技术比较认为我国潮汐能技术与国际先进水平差距不大, 潮流能、波浪能、温差能、盐差能等海洋能技术与国际先进水平差距较大, 潮流能和波浪能等主流海洋能技术基本处于比例样机的海试阶段, 在关键获能技术和安全性方面尚待进一步的突破。海洋可再生能源的发展趋势: 更大规模的环境友好型潮汐能技术将成为新的研究方向; 大型潮流能机组与小型潮流能机组并重, 漂浮式技术成为未来发展方向之一; 波浪能发电装置稳定性和生存性稳步提高, 探索装置阵列化应用; 海洋温差能混合工质高效热力循环的使用和海水淡化、空调制冷的综合利用; 盐差能技术发展的方向是低成本专用膜的规模化生产。

关键词:海洋可再生能源; 技术进展; 潮汐能; 潮流能; 波浪能; 温差能; 盐差能

中图分类号: P743

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2018)01-0001-18

doi: 3969/j.issn.1671-6647.2018.01.001

海洋可再生能源通常是指海洋特有的依附于海水的潮汐能、潮流能、波浪能、温差能和盐差能^[1]。除潮汐能和潮流能是月球和太阳引潮力的作用产生以外, 其他的均产生于太阳辐射。

在我国, 海洋能开发利用意义重大, 中国拥有长达 1.8 万 km 的大陆海岸线和 1.4 万 km 的岛屿海岸线, 1 万多个大小不同的海岛和岛礁, 海岛缺电现象严重。开发海洋能资源, 发展海洋能发电和海水淡化等综合利用, 为边远海岛提供充足、稳定的能源和淡水供给, 建设宜居可守海岛, 维护国家主权和海洋权益, 是中国海岛、海防建设的迫切需要。

海洋能具有开发潜力大、可持续利用、绿色清洁等优势, 国际上非常重视海洋能的开发利用, 将其作为战略性资源开展技术储备^[2]; 但海洋能利用也存在开发难度较大、能量密度不高、稳定性较差、分布不均匀等不足, 国际海洋能技术研发还面临着诸多风险和不确定性。目前, 国际潮汐能技术已达到商业化运行阶段, 潮流能技术已进入全比例样机实海况测试阶段, 波浪能技术已进入工程样机实海况测试阶段, 温差能技术已进入比例样机实海况测试阶段, 盐差能技术尚处于实验室验证阶段^[3]。同时, 为了充分高效的获取海洋可再生能源, 根据海洋能资源的条件不同, 各种新技术不断涌现。

收稿日期: 2017-09-20

资助项目: 中韩海洋科学共同研究中心研究项目——中韩海洋能源开发与利用技术交流合作(PI-2018-1); 国家自然科学基金项目——海洋温差发电混合工质热力循环二次热回收影响机理研究与试验验证(51709055); 国家海洋能专项——南海温差能综合利用系统总体设计(A201680); 国家海洋能专项——海洋能海上公共检测场及海洋能发电示范(KZS0118001)

作者简介: 刘伟民(1964-), 男, 山东潍坊人, 研究员, 博士, 主要从事海洋可再生能源方面研究。E-mail: lwmxjtu@163.com

(陈 靖 编辑)

1 国外现状

1.1 潮汐能

潮汐能是指受月球和太阳对地球产生的引潮力的作用而周期性涨落所储存的势能。潮汐能发电技术一般是通过建筑拦潮坝,利用潮水涨落形成的水位差,使具有一定水头的潮水流过安装在坝体内的水轮机带动发电机发电的技术,原理与水力发电相似。

传统潮汐能开发利用主要有单库双向、单库单向、双库单向及双库双向等几种方式。作为最成熟的海洋能发电技术,传统拦坝式潮汐能技术早在数十年前就已实现商业化运行。目前,国际上在运行的拦坝式潮汐电站主要采用单库方式。如建于 1966 年的法国朗斯电站(240 MW),采用单库双向工作方式,即通过拦坝形成一个水库,在涨潮时或落潮时均可发电,平潮时不发电;建于 1984 年的加拿大安纳波利斯电站(20 MW),采用单库单向工作方式,只有一个水库,且只在落潮时发电^[4]。

朗斯电站和安纳波利斯电站建成时间较早,长期示范运行效果良好。近年来,国际潮汐能开发利用又得到了重视。例如,韩国于 2011 年建成始华湖潮汐电站(图 1),装机容量达 254 MW^[5],电站采用单库单向发电方式,装有 10 台 25.4 MW 的灯泡贯流式水轮机组,为目前世界上最大的潮汐电站,设计年发电量 5.5 亿 kW·h,每年可减少 CO₂ 排放 31.5 万 t。电站建成运行后,由于引入了外界海水,湖内水体化学需氧量(COD)指标由 17×10^{-6} 降到了目前的 2×10^{-6} ,较好地解决了始华湖水体富营养化严重的状况,2014 年始华湖电站发电量为 4.92 亿 kW·h。此外,韩国还计划在加露林、江华、仁川等地建设更大的潮汐电站^[6]。



(a)发电站外景

(b)发电机房

图 1 韩国始华湖潮汐电站及发电机房^[5]

Fig.1 The Sihwa Lake tidal power plant and the engine room in Korea^[5]

除了传统拦坝式潮汐能技术之外,英国、荷兰等国研究机构还开展了开放式潮汐能开发利用技术研究,提出了潮汐潟湖(Tidal Lagoon)、动态潮汐能(Dynamic Tidal Power, DTP)等具有环境友好特点的新型潮汐能技术。英国潮汐潟湖电力公司(Tidal Lagoon Power, TLP)在塞文河口附近的斯旺西海湾论证了建设潮汐潟湖电站的可能性,即利用天然形成半封闭或封闭式的潟湖,在潟湖围坝上建设潮汐电站,利用潟湖内外涨落潮时形成的水头推动涡轮机发电,由于无需在河口拦坝施工,因而对海域生态损害很小。2014 年, TLP 公司向英国政府申请建造世界上首个潮汐潟湖电站(图 2,引用自网站 <http://www.tidallagoonpower.com/projects/swansea-bay/>),该电站规划为双向潮汐发电,在电站设计寿命为 35 a 的情况下,建造首个潮汐潟湖电站的发电成本约合 1.68 元/(kW·h)^[7]。

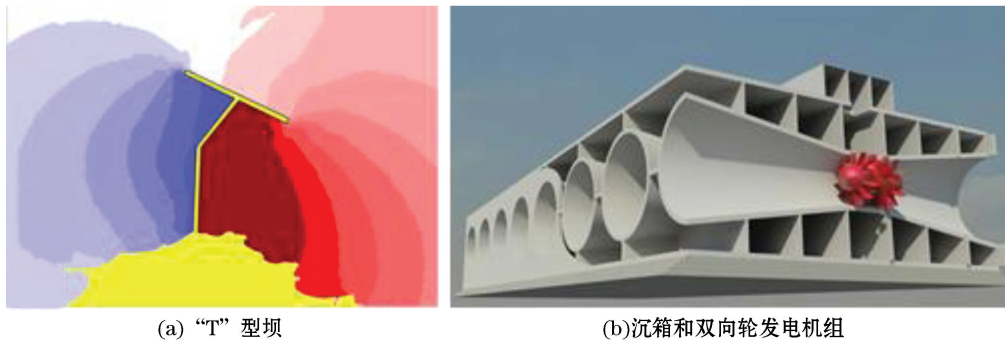
动态潮汐能理论由荷兰海岸工程师 Kees Hulsbergen 和 Rob Steijn 于 1997 年首次提出^[8],垂直于海岸建造一个长度为 50~100 km 的延伸到海中的坝体,在大坝远端建造一个长度不低于 30 km 的与海岸平行

的坝体,形成一个庞大的“T”型坝,“T”型坝的存在将干扰沿海岸平行传播的潮汐波,在坝体两侧引起潮汐相位差,从而产生水位差,并推动安装在坝体内的双向涡轮机进行发电(图 3)。



图 2 Swansea 潮汐潟湖电站规划

Fig.2 The planning of Swansea tidal lagoon power station



(a) “T” 型坝

(b) 沉箱和双向轮发电机组

图 3 动态潮汐能发电原理示意图^[8]

Fig.3 Sketch plot for planning of dynamic tidal energy conversion system^[8]

1.2 潮流能

潮流能是指月球和太阳的引潮力使海水产生周期性的往复水平运动而形成的动能。潮流能的发电原理和风力发电类似,即将水流的动能转化为机械能,进而将机械能转化为电能。

潮流能发电装置按获能装置工作原理,可分为水平轴叶轮式、垂直轴叶轮式、振荡式和其它方式;按照支撑载体固定形式的不同,可分为桩基式、坐底式、悬浮式和漂浮式;按有无导流装置,可分为有导流罩式和无导流罩式。国际潮流能技术基本成熟,单台机组最大功率已超过 1 MW,基本完成了全比例样机实海况测试,并进入试商业化运行^[9]。

根据《2014 年联合研究中心(JRC)海洋能现状报告》的初步统计^[10],全球有 13 个国家从事潮流能技术研发,英国和美国的潮流能技术和装置较多,尤其是英国潮流能技术始终处于世界领先地位,加拿大、挪威等国也积极跟进,研发了一系列潮流能利用装置。国际上大多数潮流能发电装置都处于技术研发阶段,仅小一部分装置达到了全比例海上示范阶段。报告对全球主要潮流能装置进行了分类统计和分析:76%的技术以水平轴为主,12%为垂直轴,4%为振荡水翼,8%为其他类型;68%的技术设计为全水下作业;68%的技术为单一涡轮机结构;64%的潮流能涡轮机具有可变速传动系统;56%载体结构为非桩基式海底刚性连接,36%通过锚系漂浮式结构,4%为桩基式;48%利用变速箱和发动机系统,44%利用直驱永磁发动机;16%为带导流罩设计;

28%使用间距调节,16%使用超速调节,8%使用失速调节,还有 32%未说明^[11]。

英国目前是潮流能发电技术最先进的国家。2003 年,英国海洋涡轮机公司(MCT)在德文郡的 Lynmouth 外海布放了首台 300 kW 的 SeaFlow 型潮流能发电机组;2008-04,1.2 MW 的 SeaGenS 型潮流能发电机组(图 4)在北爱尔兰 Strangford 湖并网运行,截至 2014-02,累计发电已超过 900 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ^[13]。目前,MCT 公司正在研发适应深水区的漂浮式潮流能发电装置 SeaGenU(3 MW),计划在加拿大芬迪湾布放测试^[14]。

国际上正在进行的全球最大的潮流能发电场项目—MeyGen 计划(图 5,引自网站 <https://www.atlantisresourcesltd.com/projects/meygen/>)于 2015-01 开工,总装机 398 MW,项目公司由摩根士丹利公司(MS)、燃气苏伊士国际能源公司(SUEZ EI)、英国亚特兰蒂斯资源公司(ARC)三家企业合资成立。项目一期(9 MW)已通过成立融资银团的方式筹集到 5 000 万英镑,包括亚特兰蒂斯公司、英国能源气候变化署、英国皇家财产局、苏格兰可再生能源投资基金(REIF)、国家电网公司等,由汇丰银行作为项目担保受托方。MeyGen 计划一期将由 1 台 ARC 公司的 AR1500 及 3 台 Hammerfest 公司的 HS1000 机组组成^[15]。该项目的成功建设将促进全球潮流能发电市场,预示着潮流能发电将从示范项目成功转向商业应用^[16]。

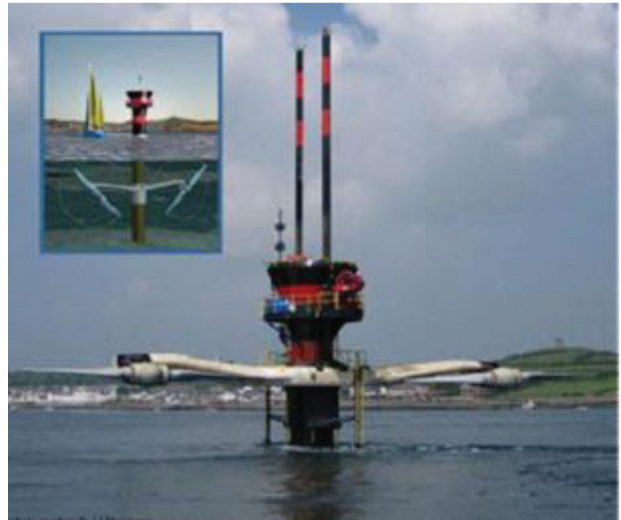
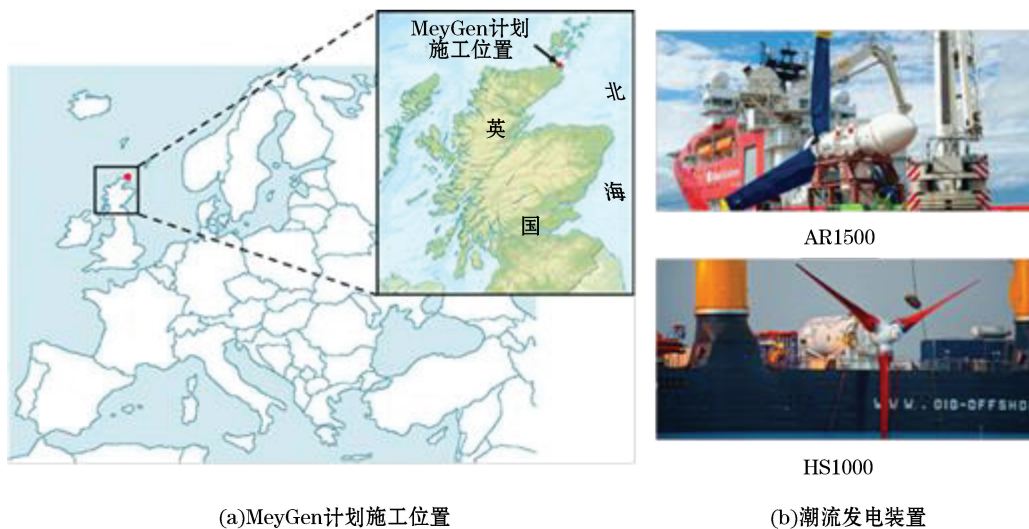


图 4 英国 SeaGenS 潮流能发电装置^[12]

Fig.4 The SeaGenS tidal current energy conversion system in Britain^[12]



(a)MeyGen计划施工位置

(b)潮流发电装置

图 5 英国 MeyGen 计划位置示意图及选用的机组

Fig.5 The location and turbines of MeyGen Tidal Energy Project

1.3 波浪能

海洋波浪能是由风能转化而来的一种能量,风吹过海洋,通过海-气相互作用把能量传递给海水,形成波浪,将能量储存为势能(水团偏离海平面的位势)和动能(通过水体运动的形式)。波浪能发电是利用物体在

波浪作用下的运动、波浪压力的变化及波浪在海岸的爬升等所具有的机械能进行发电。波浪能发电装置由能量俘获系统(一级能量转换系统)、二级能量转换系统和三级能量转换系统组成。依据能量俘获系统的不同,波浪能发电技术可分为点吸收型式、截止式、消耗式等,依据二级能量转换系统的不同,可分为气动式、液压式、液动式、直驱式等。

随着各国投入大量资金进行波浪能发电装置的研究,波浪能技术得到了迅速发展,但波浪能技术种类比较分散,尚未进入技术收敛期。根据美国能源部海洋和水动力数据库(MHD),全球有 16 个国家在进行波浪能发电研究^[17],英国、美国、澳大利亚、丹麦和西班牙等国的波浪能开发技术和应用规模居世界领先地位^[18](图 6)。

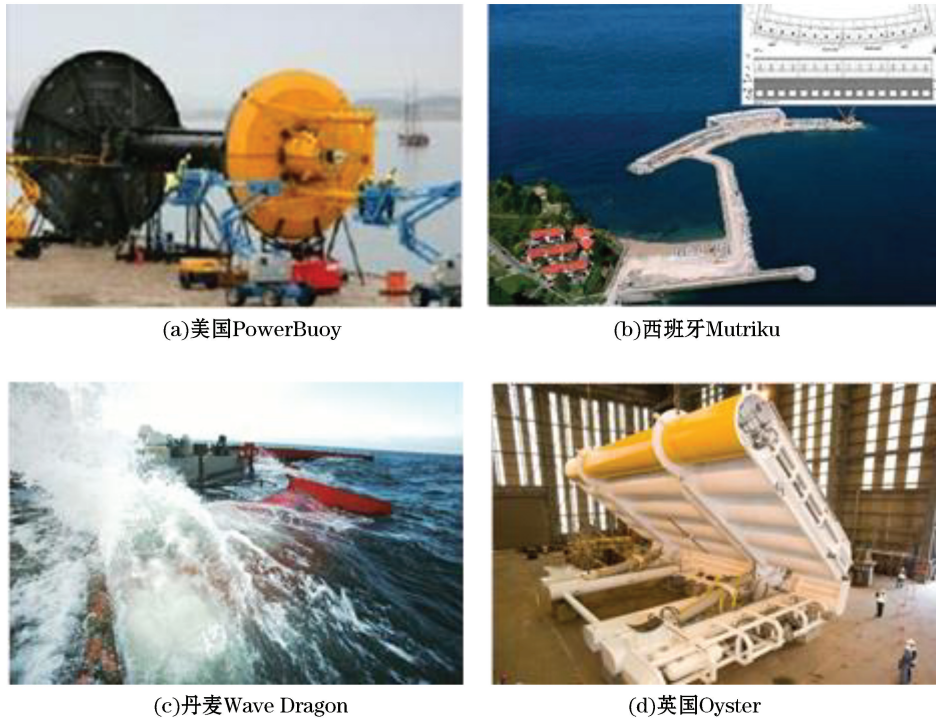


图 6 国际代表性波浪能发电装置^[16]
Fig.6 Representative wave energy conversion systems in the world^[16]

其中有代表性的点吸收式波浪发电技术如美国海洋电力公司(OPT)的 PowerBuoy 发电装置,该公司已在世界各地布放了 11 套系统。有代表性的振荡水柱式波浪能发电技术中,西班牙 Mutriku 振荡水柱式波浪能电站,自 2011-07 开始运营以来已发电超过 65 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ^[19]。有代表性的越浪式波浪能技术,如丹麦浪龙(Wave Dragon)波浪能装置,2003 年在 Nissum Brednig 试验了 20 kW 样机并实现并网发电,累计运行 20 000 多 h,目前,浪龙计划在威尔士建设 7 MW 示范项目,在葡萄牙开展 50 MW 发电场建设工作等^[20]。摆式波浪能技术如英国绿色能源公司的 Oyster 装置,于 2009-11 实现 300 kW 样机并网发电,其 800 kW 型全比例样机于 2012-06 在英国 EMEC 进行业务化测试并实现并网发电^[21],Oyster 目前已在全球多个海域获得波浪能电站建设许可。

尽管全球有不少波浪能发电装置进行了长期海试,但恶劣环境下装置的生存性、长期工作可靠性、高效能量转换等关键技术问题仍然有待突破^[22]。前面提到的美国 PowerBuoy 波浪发电浮标已基本实现了商业化应用,OPT 公司已成功研发单机功率 40 和 150 kW 两种产品,2011-01,PowerBuoy 150 型(PB150)通过了劳氏船级社认证;同年,第 1 台 PB150 型装置在苏格兰北海区域完成海试^[23];目前正在美国俄勒冈州开展的商业化波浪能发电厂一期工程将建造 10 台 PB150;同时,OPT 与美国海军在新泽西州合作进行了

PowerBuoy 的军事应用研究,用于为水下侦听系统长期供电;OPT 正在开发 500 kW 型装置,并计划用于在俄勒冈州 Coos 湾建设 100 MW 波浪能商业电站,在澳大利亚维多利亚建设 19 MW 波浪能电站。

1.4 温差能:开展了比例样机海试和综合利用示范

海水温差能是指以表层海水和深层海水的温度差的形式所储存的海洋热能,具有储量大且随时间变化相对稳定的特性。海洋温差能转换(OTEC)发电技术的基本原理是利用海洋表面的温海水加热某些低沸点工质并使之汽化,或通过降压使海水汽化以驱动透平发电,同时利用从深层提取的冷海水将做功后的乏汽冷凝,使之重新变为液体,形成系统循环。根据所用工质及流程的不同,热力循环一般可分为开式循环、闭式循环和混合式循环。

海洋温差能发电的概念最早于 1881 年由法国物理学家雅克-阿尔塞纳·达松瓦尔(Jacques-Arsène D'Arsonval)提出,1926 年全球首个温差能试验装置在古巴坦萨斯海湾沿海建成^[24]。从全球 OTEC 专利统计可知:20 世纪七八十年代,国际 OTEC 进入第一轮开发热潮,这一时期,美国、日本先后建立了 4 座 OTEC 试验电站,验证了通过温差能获取电能的工程可行性。此后 20 a 间,OTEC 因经济可行性等问题而沉寂。

2005 年之后,随着高效热循环技术、陆上温差发电技术、大型热交换器、海上浮式工程技术、先进材料技术等进步,OTEC 在全球迎来了新一轮开发热潮,例如,日本于 2013 年在冲绳建造的 100 kW OTEC 示范电站成功发电(图 7,引自网站 <http://otecokinawa.com/en>);美国于 2009 年拨出 1.48 亿美元专款支持洛克希德马丁公司开发 OTEC 关键组件以及完善实验电厂方案,并成功建造了具有 2~4 MW 测试能力的装置,2011 年由洛克希德马丁公司建造的 40 kW OTEC 试验电站投入运营;法国国有船舶制造企业(DCNS)集团从 2009 年起在位于印度洋的法属留尼旺岛进行 OTEC 发电可行性调研和实践,正在塔希提开展 10 兆瓦级 OTEC 电站建设可行性研究;韩国海洋科学与技术研究所(KIOST)于 2013 年建成 20 kW OTEC 试验电站,2014 年建成了混合式循环 OTEC 示范电站;印度于 2012 年在米尼科伊岛(Minicoy)建造了日产淡水约 100 t 的温差能制淡示范电站^[25]。



图 7 日本冲绳 100 kW OTEC 示范电站

Fig.7 The Okinawa prefecture OTEC demonstration facility

1.5 盐差能:原理样机研发阶段

盐差能主要存在于河海交接处,是指海水和淡水之间或 2 种含盐浓度不同的海水之间的化学电位差能,以化学能的形态存在。盐差能发电技术主要包括缓压渗透法、反向电渗析法以及蒸汽压法,其中,缓压渗透

法和反向电渗析法的研究较多,其核心技术主要在渗透膜的研究上。

全球首个盐差能发电示范系统,是由挪威 Statkraft 公司于 2009 年建成的 10 kW 盐差能示范装置(图 8,引自网站 <http://www.stakraft.com/>),该装置采用缓压渗透式发电技术,即淡水和海水经过预处理后在装置膜组件半透膜两侧形成渗透压差,淡水向浓水渗透,使高压浓水体积增大,盐差能转化为压力势能,推动涡轮发电。2013-10,荷兰 REDStack 公司和日本富士胶片公司合作在荷兰 Afsluitdijk 拦海大坝开工建设 50 kW 基于反向电渗析原理的盐差能示范电站,即采用阴离子渗透膜和阳离子渗透膜交替放置,中间间隔处交替充以淡水和盐水的方式,膜界面由于浓度差产生电位差,从而进行发电。



图 8 挪威 Statkraft 公司盐差能示范装置
Fig.8 The Norwegian Statkraft osmotic energy conversion demonstration system

利用纳米材料二维薄膜进行发电是一种有前景的盐差发电方式,利用压力梯度或者盐浓度梯度产生的渗透势来驱动电解质通过窄孔的电动力学现象,称作“流动电势”。由于水穿透膜的能力和膜的厚度成反比,因此二维材料制备的薄膜在利用“流动电势”发电方面展现出了极大的优势。而在二维材料中,由于 MoS_2 具有丰富的亲水表面位点,且具有比石墨烯更好的水运输性能,因而显得更有潜力。Feng 等利用“流动电势”这一现象,发明一种在单层二硫化钼(MoS_2)薄膜上引入纳米孔道的方法,从而构建出一种渗透压纳米发电机,其能量密度可高达 $1 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ [26]。

2 国内现状

2.1 潮汐能

中国江夏潮汐电站采用单库双向工作方式,即一个蓄水库,涨潮落潮都能发电;海山潮汐电站采用双库单向工作方式,即上水库和下水库各 1 个,分别采用涨潮时或落潮时发电。近年来,开展的万千瓦级潮汐能预可研项目中健跳港、乳山口、八尺门、马銮湾、瓯飞等潮汐电站均计划采用单库单向工作方式。潮汐能发电的机组型式主要采用贯流式水轮机,贯流式水轮机分为全贯流式和半贯流式,其中半贯流式又分为灯泡式、轴伸式和竖井式。中国潮汐能电站大多采用灯泡贯流式机组。

20 世纪 50 年代以来,中国先后建设了 100 多座小型潮汐电站,由于电站技术水平、地方规划、运营管理等多种因素,目前在运行的潮汐电站只有浙江江夏潮汐试验电站和浙江海山潮汐电站(正在实施改造)。江夏潮汐试验电站采用新型双向卧轴灯泡贯流式机组,目前在进行 1 号机组增效扩容改造。

2010 年以来,中国先后完成了健跳港、乳山口、八尺门、马銮湾、瓯飞等多个万千瓦级潮汐电站工程预可研。此外,还开展了利用海湾内外潮波相位差发电、动态潮汐能等环境友好型潮汐发电新技术研究。

江夏潮汐试验电站总装机容量 4.1 MW(图 9),规模小于 254 MW 的韩国始华湖(Sihwa Lake)电站、240 MW 的法国朗斯(La Rance)电站、20 MW 的加拿大安纳波利斯(Annapolis)电站,位居世界第四。



(a)发电站外景

(b)发电机组

图9 江夏潮汐电站及6台机组^①Fig.9 The Jiangxia tidal power station and generator unit^①

江夏潮汐试验电站自建成以来运行良好,积累了较为丰富的潮汐电站运行数据,截止到2014年年底,江夏电站的累计发电量超过1.9314亿kW·h。2007年,江夏电站6号机组进行了技术改造,新型双向卧轴灯泡贯流式机组增加了正反向水泵运行工况,电站总装机容量由3200kW增加到3900kW。2012年,1号机组开始扩容增效改造,单机容量由500kW增加至700kW,2015-08完成改造,机组在工况复杂程度、机组效率等方面达到世界先进水平,截止到2015-10已稳定运行超1000h。

江夏潮汐试验电站与世界三大潮汐电站的机组主要参数如表1所示。

表1 江夏潮汐电站与世界三大潮汐电站机组主要参数

Table 1 Major Parameters of Jiangxia tidal power station and three largest stations in the world

参 数	电 站				
	始华湖	朗斯	安纳波利斯	江夏潮汐试验电站	
				1#	6#
工况	单向发电	双向发电、泄水、泵水	单向发电	双向发电、泄水、泵水	双向发电、泄水、泵水
转轮直径/m	7.5	5.35	7.6	2.5	2.5
叶片数	4	4	4	3	4
导叶数		24	18	16	16
水头范围/m		3~9	1.4~7.1	0.8~5.5	1.2~5.5
额定水头/m	5.8	5.8	5.5	3.0	3.0
额定功率/MW	25.4	10	17.8	0.7	0.7
额定流量/m ³ ·s ⁻¹	48	192	407	30.0(正向) 25.0(反向)	31.6(正向) 27.0(反向)
额定效率/%		86	89.1	85.0(正向) 78.0(反向)	89.4(正向) 84.0(反向)
额定转速/r·min ⁻¹		93.8	50		125
飞逸转速/r·min ⁻¹			98		391
总装机/MW	254	240	17.8		4.1

注:空白表示无数据

① 国家海洋技术中心.中国海洋能技术进展 2017,2017:20.

江夏潮汐电站与国外潮汐电站相比,水轮机的转轮直径、额定水头、额定流量、额定功率及总的装机功率较小,额定效率与国外电站大致相同。但在电站装机规模上差距较大。

万千瓦级潮汐电站预可研,2009—2015年,中国先后开展了健跳港(21 MW)、乳山口(40 MW)、八尺门(36 MW)、马銮湾(24 MW)、瓯飞(451 MW)等多个万千瓦级潮汐电站工程预可研项目,测算的平均出厂电价区间为 1.386~2.6 元/(kW·h),与国际潮汐能电站发电价格相当,但与其他可再生能源电价相比仍处于较高水平。

新型潮汐能发电技术,主要开展了利用海湾内外潮波相位差发电研究,即利用海湾内外潮波相位差进行潮汐能发电,目前已完成福建三沙湾新型潮汐能利用方式可行性分析;动态潮汐能技术研究,即通过建造一个垂直于海岸且长度不低于 30 km 的“T”型水坝,干扰沿大陆架海岸平行传播的潮汐波,从而在大坝两侧引起潮汐的相位差,并产生水位差来推动坝体内的双向涡轮机进行发电,目前已完成数模分析方法、适用模型机组水力学特性研究、福建东山岛等潜在开发利用站址初选等工作。

2.2 潮流能

中国潮流能开发利用技术研究开始于 20 世纪 80 年代,近年来,在国家相关科技计划和专项资金等的支持下,中国潮流能技术得到快速发展。中国潮流能装置主要分为垂直轴和水平轴两种形式,垂直轴装置研发起步较早,但装置较少,研发单位有哈尔滨工程大学和大连理工大学;水平轴装置研发起步较晚,但发展迅速,以浙江大学、哈尔滨工程大学、中国海洋大学和东北师范大学为代表的高校研制了多个装置;此外,还有部分装置对叶轮形式和形状进行了创新改造,如中国海洋大学开展的柔性叶片潮流能发电装置研发,上海交通大学开展的变几何水轮机发电装置的研制等^[27]。

据 2014 年统计,中国潮流能装置有 29 个,其中 18 个已完成了海试。100 kW 以下的装置 19 个,14 个装置完成了海试;100 kW 以上装置 10 个,4 个装置完成海试^[28]。2017 年浙江大学完成了 650 kW 潮流能机组试运行,目前,装置大部分处于比例样机海试阶段,但大多数海试效果不佳,海试过程中会出现运行时间短、发电效率不高、装置易损坏等问题,表明中国潮流能装置实海况下运行的可靠性、稳定性等技术有待突破^[29]。

1) 水平轴潮流能技术

水平轴式机组与风机原理类似,机组在水中必须按水流方向放置,叶片可以是固定桨距,也可以是变桨的,比较适合在水深较深的海域应用。截至目前中国已开发的水平轴式潮流能机组,最大单机装机容量 650 kW,最小单机容量 1 kW。

2014-05 浙江大学研制的 60 kW 半直驱水平轴潮流能机组工程样机(图 10)开始在舟山摘箬山岛海域进行海试^[30],截至 2015-04,累计发电量超过 2 万 kW·h。目前在该技术基础上,已完成 120 kW 和 650 kW 半直驱水平轴潮流能发电机组的研制与海试。



图 10 海试机组入水及海试夜景^[30]

Fig.10 The sea trial unit^[30]

世界先进水平的英国 SeaGen 潮流能发电装置与浙江大学半直驱潮流能机组的主要参数如表 2 所示。两个装置启动流速、设计获能系数等参数相差不大,英国 SeaGen 潮流能装置技术研发、海试时间较早,装机容量 1.2 MW,2008 年实现并网,安装方式为固定式;浙江大学的潮流能机组采用独立电网,装机容量 60 kW,安装方式为漂浮式。

表 2 浙江大学 60 kW 潮流能机组与英国 SeaGen 的主要参数

Table 2 Major Parameters of tidal current energy conversion system of Zhejiang University and British SeaGen

潮流能装置	海试时间	装机容量	启动流速 /m·s ⁻¹	额定流速 /m·s ⁻¹	叶片转速 /r·min ⁻¹	设计获能 系数	年发电量 /GW·h	是否并网	安装方式
SeaGen 潮流能装置	2008 年	1.2 MW	0.7	2.25	14.3	0.45	0.75	2008 年并网	固定式
浙大半直驱 潮流能机组	2014 年	60 kW	0.6~0.8	2	30	0.4	0.02	否	漂浮式

2) 垂直轴潮流能技术

垂直轴式机组的转轴在垂向上与水流方向保持正交,或者在水平方向与水流方向保持正交,在浅水区或者狭窄且深的水道中有更大应用优势。中国目前已开发了 5 个垂直轴式潮流能机组,最大单机装机容量 300 kW,最小单机容量 15 kW。以哈尔滨工程大学垂直轴潮流能机组为例,2013-12 起“海能 III”在岱山海域开展一年海试(图 11),因系统走锚而进行回收,经修复后现已重新运行。

意大利 Kobol 潮流能装置与哈尔滨工程大学“海能 III”机组主要参数如表 3 所示。

表 3 “海能 III”潮流能机组与意大利 Kobold 潮流能装置的主要参数

Table 3 Major Parameters of tidal current energy conversion system of Ocean Energy III and Italian Kobold

潮流能装置	固定方式	海试时间	装机容量 /kW	叶轮直径 /m	额定流速 /m·s ⁻¹	运行状态	是否并网
意大利 Kobold 潮流能装置	漂浮式	2002 年	120	6	2	正常运行	2005 年并网
“海能 III”潮流能机组	漂浮式	2013 年	2×300	6	3	试运行	否

两个装置叶轮直径、额定流速等参数相差不大,意大利 Kobold 潮流能装置技术研发、海试时间较早,装机容量 120 kW,2005 年实现并网,安装方式为漂浮式;“海能 III”潮流能机组采用独立电网,装机容量 600 kW,安装方式为漂浮式。

2016 年 LHD 林东模块化垂直轴 1.0 MW 大型海洋潮流能发电机组正式在舟山岱山安装下海,该机组由 2 台 300 kW 和 2 台 200 kW 潮流能发电机组组成(图 12,引自网站 http://www.lhd-tech.com/lhd/news_view.php?nid=265)。

图 11 海能 III 海试^②

Fig.11 Tidal current energy conversion system of Ocean Energy III^②



图 12 LHD 海洋潮流能发电机组

Fig.12 Tidal current energy conversion system of LHD

2.3 波浪能

在国家自然科学基金会、科技部、中国科学院相关科技计划和专项资金的支持下,尤其是 2010 年海洋能专项资金设立以后,有十几个研究所和大学开展了振荡浮子式、摆式、筏式等波能转换装置的研究,主要研究机构包括:中国科学院广州能源研究所、国家海洋技术中心、上海交通大学、华南理工大学、中国海洋大学、中船重工 710 所和大连理工大学等。有的完成了实验室模型试验,有的研制了工程样机并进行了海试,基本实现了自主创新的技术过程,正在解决可靠性、实用化、高效转换等方面的技术难点。

据不完全统计,中国目前开发的波浪能装置 39 个,装机容量范围 10 W~300 kW,其中 100 kW 以下装置 31 个,29 个装置完成海试,100 kW 以上装置 8 个,6 个装置完成海试;装置大部分属于初级海试阶段^[31]。波浪能发电装置形式较多,但从技术发展阶段来看,大多数装置的基础理论研究不够,致使装置在实海况条件下运行效果较差,海试过程中出现发电效率不高、装置易破坏等问题,装置在实际海况下运行的可靠性、稳定性等技术有待突破。

漂浮式波浪能发电装置。在中国研发的 39 个波浪能装置中,17 个采用振荡浮子式工作方式,最大单机装机容量 100 kW,最小装机容量不足 1 kW^[32]。以中国科学院广州能源所漂浮式波浪能发电装置为例,2012-12,10 kW 鹰式波浪能装置进行了一年半的海试(图 13,引自网站 http://www.giec.cas.cn/xwdt/kydt/201511/t20151123_4471370.html),运行期间,装置单次无故障连续运行超过 6 个月。

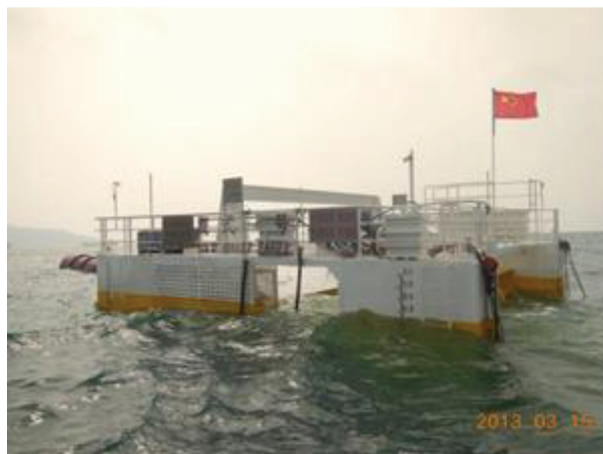


图 13 鹰式一号装置海试

Fig.13 Hawk wave energy conversion system

在该技术基础上,2014 年开始研制 100 kW 鹰式波浪能发电装置工程样机,截止到 2015-12,100 kW 鹰式装置(万山号)已完成布放,正在进行海试并成功发电。英国 Pelami(海蛇)装置、美国 PowerBuoy 装置与中国鹰式装置的主要参数如表 4 所示。

^② 同①26.

表 4 鹰式波浪能装置与国外波浪能发电装置相关参数

Table 4 Parameters of domestic and foreign wave energy conversion system

电 站	类 型	第 1 代装机容量/kW	海试时间	第 2 代装机容量/kW	目前进展
Pelamis(英国)	筏式	750	2004 年	750	2009 年海试
PowerBuoy(美国)	振荡浮子式	40, 150	2011 年	500	研发中
鹰式(中国)	振荡浮子式	10	2012 年	100	2015 年海试

Pelamis(海蛇)装置形式为筏式,装机容量 750 kW,第 2 代装置已开展海试;美国 PowerBuoy 装置形式为振荡浮子式,装机容量为 40 和 150 kW,第 2 代装置正在研发中;鹰式波浪能装置形式为振荡浮子式,装机容量为 10 kW,第 2 代装置正在进行海试。

针对中国近海波浪能功率密度普遍不高的情况,中国波浪能开发利用应注重开发高效、可靠性高的波浪能装置,逐步向阵列规模化方向发展,并可为海上观测仪器及设备提供电力。

2.4 温差能

中国海洋温差能资源比较丰富,技术研发起步较晚。20 世纪 80 年代初,中国科学院广州能源研究所、中国海洋大学和国家海洋技术中心等单位开始开展海洋温差能利用研究。在海洋温差能发电技术方面,2005 年,天津大学研制出用于混合式海洋温差能利用的 200 W 氨饱和蒸汽试验用透平;国家海洋局第一海洋研究所于 2012 年利用电厂温排水,研制了 15 kW 温差能发电试验装置,在温差为 19.7 °C 时,达到额定功率 15 kW,透平发电效率约为 73%,2017 年进行了高效氨透平、热交换器等关键技术研发。在温差能其它利用方面,2004 年,天津大学和国家海洋技术中心合作研发了温差能驱动水下滑翔器试验样机,利用水域表面与深水层约 10 °C 的温差产生浮力驱动^[33];2011 年国家海洋技术中心针对小型海洋观测平台供电问题,进行了 200 W 温差能发电技术研究。

海洋温差能发电关键技术热力循环方式可分为开式循环、闭式循环和混合式循环三类,国家海洋局第一海洋研究所研制的闭式热力循环效率目前处于国际领先水平,已试制了 15 kW 闭环式循环温差能发电装置样机与 10 kW 海洋温差能实验室模拟系统(图 14)^[34]。

以国家海洋局第一海洋研究所的温差能发电装置为例,从 2008 年起,开始了闭式温差能发电装置研发;2012 年成功研制了 15 kW 微型氨透平,并利用电厂温排水搭建了中国第一套温差能发电系统样机,试运行 3 个月,验证了高效循环等关键技术,当温差为 19.7 °C 时,达到额定功率 15 kW,此时透平发电效率约为 73%,系统的循环效率最高达 3.07%。利用该高效循环模型,搭建的海洋温差能发电装置样机实现了温差能技术的实验室连续运行,通过了验收。

国内外主要温差能发电装置参数如表 5 所示。可知,中国温差能发电技术研究起步较晚,装置的装机容量较小,下一步的工作重点应放在实海况示范运行上。

图 14 10 kW 海洋温差能实验装置^③Fig.14 The 10 kW OTEC plant^③

③ 本期封面图即为本实验装置,由项目组陈风云拍摄。

表 5 温差能装置主要参数

Table 5 Parameters of domestic and foreign OTEC plants

电 站	建成年份	额定功率/kW	峰值功率/kW	淡水产量/L·s ⁻¹
美国夏威夷开式循环海洋温差能电站	1992	255	103	0.4
美国夏威夷闭路循环温差能电站	1979	53	18	/
日本德岛混合循环温差能发电示范电站	1982	50		/
日本瑞鲁工程闭路循环海洋温差能电站	1981	120	31.5	/
日本冲绳温差能示范电站	2013	50		/
中国温差能发电装置	2012	15		/

注:空白表示无数据;“/”表示无此项

2.5 盐差能

中国盐差能利用技术还处于原理研究阶段,中国海洋大学开展了 100 W 缓压渗透式盐差能发电关键技术研究,于 2017 年通过验收。

3 国内外海洋能开发利用与技术对比分析

中国潮汐能技术与国际先进水平差距不大,潮流能、波浪能、温差能、盐差能等海洋能技术与国际先进水平差距较大,潮流能和波浪能等主流海洋能技术基本处于比例样机的海试阶段,大约相当于 2005 年前后的国际水平^[35]。

例如,在潮流能技术方面,英国 SeaFlow 300 kW 潮流能比例样机于 2003 年开始海试并取得较好的效果,中国百千瓦级潮流能机组(海能 I)2012 年进入海试;在波浪能技术方面,丹麦浪龙 20 kW 波浪能发电样机于 2003 年海试并实现并网,英国 Oyster 300 kW 波浪能发电样机于 2009 年海试并实现并网,中国百千瓦级波浪能装置(鸭式 3 号)2013 年进行海试;在温差能技术方面,日本和美国在 20 世纪 90 年代前后就先后研建了百千瓦级试验电站,中国于 2012 年研建了 15 kW 温差能试验样机;在盐差能技术方面,挪威 10 kW 盐差能样机于 2009 年开始示范运行,中国的盐差能还停留在实验室原理验证阶段。

与国际先进技术相比,中国海洋能技术主要存在以下问题:海洋能基础研究比较薄弱,原创性技术较少;装置转换效率、可靠性和稳定性普遍不高;示范工程进展和效果不如预期。

3.1 海洋能基础研究相对薄弱

目前中国海洋能研究对能量俘获与转换机理、装置的环境适应性以及最佳功率跟踪及负载特性匹配等基础理论研究比较薄弱,海洋能装置的工作原理大部分是模仿国外技术,未充分考虑中国的资源状况和海况条件,缺乏自主创新,装置难以达到设计的装机容量且转换效率较低。

3.2 海洋能关键技术未取得突破

中国海洋能利用核心装备技术尚未取得重大突破,装置转换效率、可靠性和稳定性普遍不高。除了潮汐能技术,潮流能、波浪能、温差能等技术均存在转换效率及可靠性不高,稳定性及海上生存能力较差等问题,距离产品化尚有较大差距。特别需要指出的是,中国海洋能发电装备系统集成技术、关键部件设计与制造技术、海洋能装备试验测试技术等核心技术仍未取得根本突破。中国潮流能机组开展海试时间尚短,装置可靠性、长期生存性、发电成本等距离国际先进水平尚远;中国百千瓦级波浪能技术刚进入海试阶段,而国际上 150~750 kW 装置已完成了最长接近 10 a 的海试。

3.3 海洋能示范工程进展和效果不如预期

受到海洋能资源品质不高等影响,目前中国自主研发的海洋能发电装置中,单机功率超过 100 kW 的很少,使得中国海洋能装置示范应用规模通常在百千瓦级,远小于国际上的兆瓦级水平。例如,浙江岱山岛,广东大万山岛,山东大管岛、斋堂岛等开展等海洋能示范工程中,潮流能和波浪能等海洋能发电装置装机基本都不足 500 kW,有的仅约 100 kW。而国际兆瓦级海洋能示范计划已开展了多年,例如英国 SeaGen 潮流能机组,自 2008 年开始示范运行,装机容量 1.2 MW,到 2014 年累计发电已超过 900 万 kW·h。

海洋能发电装置海试之前,为降低海试风险,通常需要开展较长时间的实验室测试。中国很多海洋能技术研发机构进入该领域时间较晚,相关理论基础及海洋工程等经验不足,较多海洋能发电装置未通过反复的实验室验证就开始进行海试,导致装置频繁需要维护甚至重新加工,既大大增加了研发成本,又影响了示范效果。

4 发展趋势

4.1 潮汐能

潮汐传统拦坝式电站向更大装机规模发展。从工作原理看,拦坝式潮汐发电与水力发电很相似,但海水腐蚀性及海生物附着等对电站及水轮机有影响,建造拦坝对当地海域生态环境也会有一定影响,使得各国建设潮汐电站都较为谨慎。同时,在资源条件一定的前提下,只有更大的电站装机规模才会产生更好的经济效益。近期,一方面为了保持各自潮汐能技术的国际领先优势,另一方面也为了维持潮汐研究人才队伍,法国、加拿大、俄罗斯等国都启动了更大装机规模的潮汐电站建设研究。

环境友好型潮汐能技术成为新的研究方向。传统拦坝式潮汐电站建设一定程度上会对当地海洋生态海洋造成影响,从国际上看,潮汐潟湖发电、动态潮汐能、海湾内外相位差发电等环境友好型潮汐能利用技术已成为国际潮汐能技术新的研究方向。例如,除了前面提到的潮汐潟湖发电、动态潮汐能发电技术以外,澳大利亚 Woodshed 技术公司还研究了利用天然港湾内外潮汐相位差进行发电,利用半岛或海峡等自然海岸形态对潮汐的迟滞影响形成的潮位差进行发电,对海洋生态环境基本没有影响。

4.2 潮流能

水平轴式技术成熟度更高。潮流能装置发展至今已有数十种形式,技术多样。从获能装置形式分析,现阶段还缺少长期运行的技术性能和成本数据^[36],很难对不同形式的装置进行精确的评定;但是,根据 MEM (Marine Energy Matters)发布的《2015 年全球海洋能技术回顾》^[37],潮流能获能技术形式已进入收敛期,尽管在转子数量、转子直径及装机功率等方面还存在一些不同的研究方向,但大部分机组采用了成熟度较高的水平轴式技术。

漂浮式技术成为未来发展方向之一。从载体结构形式分析,目前无论是水平轴式装置还是垂直轴式装置,大都采用固定式安装方式,也就是欧洲国家所说的“第 1 代涡轮机”;随着技术的进步,欧洲国家开始向潮流能资源丰富的较深水域发展,固定式安装方式不再适用,例如 MCT 公司等潮流能装置研发机构开始研制漂浮式涡轮机,即漂浮式“第 2 代涡轮机”,但目前尚未达到第一代涡轮机的稳定性,还需要开展全尺度装置样机海试^[38]。

大型潮流能机组与小型潮流能机组并重。《SI Ocean Gaps and Barriers》报告提到^[39],开发兆瓦级装机容量的潮流能装置可有效保障潮流能开发目标的实现,而研发小装机容量的潮流能技术既适合于浅水区安装,还可以有效降低成本和风险,更好地促进技术积累和经验获取,为未来向大功率机组发展奠定基础。IRENA 研究报告认为,相对于兆瓦级潮流能机组,小型潮流能机组在短期内研建潮流发电项目具有一定的

发电成本优势,这也是目前国际上有不少公司致力于小型潮流能机组研发的主要原因,但随着兆瓦级潮流能技术进入商业化应用步伐的加快,大型潮流能机组的发电成本下降很快^[40]。

4.3 波浪能

波浪能技术种类较多,兆瓦级波浪能发电装置正在加紧研发。总体上看,国际波浪能技术正朝着高效率、高可靠、易维护的方向发展。

发电装置稳定性和生存性稳步提高。波浪能装置海上试验时间是波浪能发电技术的关键指标,波浪能装置需要经过海试来验证其在恶劣环境下的生存能力,提高装置的稳定性,增强海上生存能力,增加在海上运行时间,开发人员才能据此来获得足够的运行经验,促进技术发展,最大限度地减少运行和维护服务次数。

探索装置阵列化应用。由于各国海域地理位置不同,波浪能资源形态各有特点,所需波浪能装置的大小规格不同。波浪能技术类别分散,处于不同的技术发展阶段,并且发电装置的合理规格尚未在实践中得到验证。波浪能发电要实现规模化,阵列式的发电设备机组比单一装置更有效,并且有利于降低成本,相对于适合开展大型化波浪能装置的国家下一步会从单独的全尺度装置向低成本的阵列式布放转变。而对于有些国家海域布放条件并不适合大型化的波浪能发电装置,则会因地制宜的开发小型装置。另外一些水下监听等特殊军事需求仍然需要小型波浪能发电装置^[41]。

布放海域由近岸向深远海发展。2013年JRC海洋能研究报告指出,目前还没有波浪能设备安装在离岸6 km以远、50 m以深的海域。而离岸越远的海域波浪能资源越好,可以捕获的能量就越大,下一代波浪能装置预计会布放在离岸更远、水深更深、波浪能资源更好的开放海域。

4.4 温差能

温差能装置大型化趋势明显。随着大口径冷海水管制造、海上浮式工程技术等关键技术的不断突破,国际温差能技术的大型化趋势益发明显。美国、法国等都已准备启动10兆瓦级示范电站建设,韩国也与基里巴斯在2014-10签署合作协议,将在太平洋塔拉瓦岛(Tarawa)建设1 MW OTEC电站。

混合工质高效热力循环的使用。海洋温差能由于冷热源之间的温差较小,在20℃温差下,理论最大热力循环效率为6.77%,朗肯循环效率仅为3%,混合工质高效热力循环使目前的热力循环效率提升到了5%左右。

综合利用有较大发展空间。国际温差能技术综合利用的趋势益发明显。除了用于发电外,在海水淡化、制氢、空调制冷、深水养殖等方面有着广泛的综合应用前景。例如,在深海冷水养殖方面,目前在美国夏威夷海洋农场由OTEC派生的海水养殖业已投入5 000万美元,用于养殖龙虾、比目鱼、海胆和海藻。

热带岛屿国家成为温差能发电应用的潜在市场。从温差能资源以及经济可行性角度来看,海洋温差能技术非常适合于热带海域的偏远岛屿国家,这些岛屿的海洋热能转换发电技术可以与海水空调制冷和海水淡化等功能相结合。

4.5 盐差能

国际盐差能技术目前仍处于关键技术突破期,渗透膜、压力交换器等关键技术和部件研发仍需突破。尤其是渗透膜技术,其成本占到了盐差能发电装置总成本的50%~80%,因此,实现低成本专用膜的规模化生产是盐差能技术的发展重点。

5 结 论

通过对国内外潮汐能、潮流能、波浪能、海洋温差能、盐差能开发利用现状分析,得到海洋可再生能源目前开发利用技术水平、未来发展趋势,总结如下:

1) 国际潮汐能技术已达到商业化运行阶段,潮流能技术已进入全比例样机实海况测试阶段,波浪能技术已进入工程样机实海况测试阶段,温差能技术已进入比例样机实海况测试阶段,盐差能技术尚处于实验室验证阶段。

2) 中国潮汐能技术与国际先进水平差距不大,潮流能、波浪能、温差能、盐差能等海洋能技术与国际先进水平差距较大,潮流能和波浪能等主流海洋能技术基本处于比例样机的海试阶段,大约相当于2005年前后的国际水平,在关键获能技术和安全性上尚待进一步的突破。

3) 各种海洋可再生能源发展趋势如下:更大规模的环境友好型潮汐能技术成为新的技术研究方向;大型潮流能机组与小型潮流能机组并重,漂浮式技术成为未来发展方向之一;波浪能发电装置稳定性和生存性稳步提高,探索装置阵列化应用,布放海域由近岸向深远海发展;海洋温差能混合工质高效热力循环的使用和海水淡化、空调制冷的综合利用;低成本专用膜的规模化生产是盐差能技术发展的重点。

参考文献 (References):

- [1] XIA D W, KANG J. Dictionary of ocean energy[M]. Beijing: Ocean Press, 2014: 1. 夏登文, 康健. 海洋能开发利用词典[M]. 北京: 海洋出版社, 2014: 1.
- [2] European Commission. Blue energy: action needed to deliver on the potential of ocean energy in European seas and oceans by 2020 and beyond[R/OL]. [2017-09-10]. European Commission, 2014. http://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/ocean_energy/index_en.htm.
- [3] HUCKERBY, JEFFREY, MORAN. An International Vision for Ocean Energy[R/OL]. [2017-09-10]. OES, 2011. http://www.ocean-renewable.com/wp-content/uploads/2011/05/oes_vision_brochure_2011.pdf.
- [4] Marine Renewables Canada. Marine renewable energy in Canada & the global context: state of the sector report -2013[R/OL]. [2017-09-10]. 2013. <http://www.marinerenewables.ca/wp-content/uploads/2012/11/State-of-the-Canadian-MRE-Sector-20131.pdf>.
- [5] SAWIN J L, SEYBONTH K, SVERISSON F, et al. Renewables 2017 global status report[R/OL]. [2017-09-10]. REN21, 2017. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf.
- [6] XIA D W. Study on the development of marine renewable energy to 2020 in China[M]. Beijing: Ocean Press, 2016: 13-15. 夏登文. “十三五”海洋能开发利用战略研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2016: 13-15.
- [7] Executive Committee of OES. Annual Report 2014[R/OL]. [2017-09-10]. LISBON: Creative Studio, 2015: 102-104. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/annual-reports/document/oes-annual-report-2014/>.
- [8] Executive Committee of OES Annual Report 2010[R/OL]. [2017-09-10]. LISBON: Creative Studio, 2011: 28-29. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/annual-reports/document/oes-annual-report-2010/>.
- [9] JIN X L. Thought about 13th five-year marine renewable energy development strategy [J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(5): 1-2. 金翔龙. “十三五”期间我国海洋可再生能源发展的几点思考[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(5): 1-2.
- [10] D MAGAGNA, A UIHLEIN. 2014 JRC Ocean Energy Status Report[R/OL]. [2017-09-10]. Joint Research Centre, 2015. <https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/2014-JRC-Ocean-Energy-Status-Report.pdf>.
- [11] Executive Committee of OES. Annual Report 2011[R/OL]. [2017-09-10] LISBON: Creative Studio, 2012: 33-36. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/annual-reports/document/oes-annual-report-2011/>.
- [12] Executive Committee of OES. Annual Report 2013[R/OL]. [2017-09-10]. LISBON: Creative Studio, 2012: 36. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/annual-reports/document/oes-annual-report-2013/>.
- [13] Renewable UK. Export nation a year in UK wind, wave and tidal exports[R/OL]. [2017-09-10]. RenewableUK, 2017. http://c.yimcdn.com/sites/www.renewableuk.com/resource/resmgr/publications/RUK_Export_Report_final_web_.pdf.
- [14] Executive Committee of OES. Annual Report 2016[R/OL]. [2017-09-10]. LISBON: Creative Studio, 2017: 72-75. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/annual-reports/document/oes-annual-report-2016/>.
- [15] RenewableUK. Ocean energy race, the UK's inside track[R/OL]. [2017-09-10]. RenewableUK, 2017. https://c.yimcdn.com/sites/renewableuk.site-ym.com/resource/resmgr/publications/OER_inside_track_final_.onl.pdf.
- [16] MA C L, XIA D W, WANG M, et al. Study on the progress of international marine renewable energy technology[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(4): 7. 麻常雷, 夏登文, 王萌, 等. 国际海洋能技术进展综述[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(4): 7.
- [17] THRESHER. First draft roadmap: the United States marine hydrokinetic renewable energy technology roadmap[R/OL]. [2017-09-10]. NREL, 2010. <http://www.oceanrenewable.com/wp-content/uploads/2010/05/1st-draft-roadmap-rwt-8April10.pdf>.

- [18] XIA D W, LI T C, DING Y Y, et al. Study on the technology innovation system for marine renewable energy industry[M]. Beijing: Ocean Press, 2015: 35-36. 夏登文, 李拓晨, 丁莹莹, 等. 海洋能产业技术创新体系研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2015: 35-36.
- [19] Executive Committee of OES Annual Report 2015[R/OL]. [2017-09-10]. LISBON: Creative Studio, 2016: 87-88. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/annual-reports/document/oes-annual-report-2015/>.
- [20] LUO X Y, XIA D W. Report of the development of marine renewable energy in China[M]. Beijing: Ocean Press, 2014: 7-8. 罗续业, 夏登文. 海洋可再生能源开发利用战略研究报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2014: 7-8.
- [21] MA C L, XIA D W. Research on the utilization of marine renewable energy in China[J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(3): 17. 麻常雷, 夏登文. 海洋能开发利用发展对策研究[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(3): 17.
- [22] China Association for Science and Technology. Report on advances in marine science[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2016: 181-183. 中国科学技术协会. 2014-2015 海洋科学学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016: 181-183.
- [23] Executive Committee of OES. Annual Report 2012[R/OL]. [2017-09-10]. LISBON: Creative Studio, 2013: 67-69. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/annual-reports/document/oes-annual-report-2012/>.
- [24] LEWIS, ESTEFEN, HUCKERBY, et al. Ocean energy in IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 503.
- [25] Executive Committee of OES. Annual Report 2013[R/OL]. [2017-09-10]. LISBON: Creative Studio, 2014: 99-101. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/annual-reports/document/oes-annual-report-2013/>.
- [26] FENG J D, Michael Graf, LIU K, et al. Single-layer MoS₂ nanopores as nanopower generators[J]. Nature, 2016, 536(7615):197.
- [27] GAO Y B, LI Y, MA C L. China funds development of new tidal current energy devices[J]. Sea Technology, 2011, 52(4): 45-46.
- [28] National Ocean Technology Center. Development of marine renewable energy in China in 2014[M]. Beijing: Ocean Press, 2014: 28-32. 国家海洋技术中心. 中国海洋能技术进展 2014[M]. 北京: 海洋出版社, 2014: 28-32.
- [29] LUO X Y, ZHU Y Q, YANG M Z, et al. Study on the policies for marine renewable energy in China[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016: 65. 罗续业, 朱永强, 杨名舟, 等. 中国海洋能政策研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社: 2016: 65.
- [30] LI W, LIU H W, LIN Y G, et al. Sea trial of 60 kW horizontal axis tidal current energy conversion system[C]//China Marine Renewable Energy Development Conference Annual Meeting and Forum, 2015. 李伟, 刘宏伟, 林勇刚, 等. 60kW 水平轴潮流能发电机组海上试验[C]//中国海洋可再生能源发展年会暨论坛. 2015.
- [31] National Ocean Technology Center. Development of marine renewable energy in China in 2015[M]. Beijing: Ocean Press, 2015: 21-30. 国家海洋技术中心. 中国海洋能技术进展 2015[M]. 北京: 海洋出版社, 2015: 21-30.
- [32] XIA D W, MA C L. New wave energy devices developed in China[J]. Sea Technology, 2014, 55(5): 20.
- [33] CHEN L, PAN B B, CAO Z L, et al. Research status and prospects of automatic profiling floats[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(2): 5-6. 陈鹿, 潘彬彬, 曹正良, 等. 自动剖面浮标研究现状及展望[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(2): 5-6.
- [34] National Ocean Technology Center. Development of marine renewable energy in China in 2016[M]. Beijing: Ocean Press, 2016: 26. 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: 26.
- [35] OECD. The future of the ocean economy, Exploring the prospects for emerging ocean industries to 2030[R/OL]. [2017-09-10]. OECD, 2012. <http://www.oecd.org/futures/Future%20of%20the%20Ocean%20Economy%20Project%20Proposal.pdf>.
- [36] IEA OES. International levelised cost of energy for ocean energy technologies[R/OL]. [2017-09-10]. IEA OES, 2015. <https://www.ocean-energy-systems.org/documents/65931-cost-of-energy-for-ocean-energy-technologies-may-2015-final.pdf/>.
- [37] Marine Energy Matters. Marine energy global technology review 2015[R/OL]. [2017-09-10]. Marine Energy Matters, 2015. <http://www.marine-energy-matters.com/wp-content/plugins/email-before-download/download.php? dl=b38006051bd1bf5eb1a58444095dff2c>.
- [38] Low Carbon Innovation Coordination Group. Technology innovation needs assessment marine energy summary report[R/OL]. [2017-09-10]. Carbon Trust, 2012. <https://www.carbontrust.com/media/168547/tina-marine-energy-summary-report.pdf>.
- [39] MACGILLIVRAY, JEFFREY, HANMER, et al. Ocean Energy Technology: Gaps and Barriers[R/OL]. [2017-09-10]. SI Ocean, 2013. http://www.policyandinnovationedinburgh.org/uploads/3/1/4/1/31417803/gaps_and_barriers_report_fv.pdf.
- [40] MOFOR L, GOLDSMITH J, JONES F. Ocean energy technology readiness, patents, deployment status and outlook[R/OL]. [2017-09-10]. IRENA, 2014. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Ocean_Energy_report_2014.pdf.
- [41] MAGAGNA, MACGILLIVRAY, JEFFREY, et al. Wave and Tidal Energy Strategic Technology Agenda[R/OL]. [2017-09-10]. SI Ocean, 2014. http://www.policyandinnovationedinburgh.org/uploads/3/1/4/1/31417803/si_ocean_-_wavidetal_strategic_technology_agenda.pdf.

Exploitation and Technical Progress of Marine Renewable Energy

LIU Wei-min¹, MA Chang-lei², CHEN Feng-yun¹, LIU Lei¹, GE Yun-zheng¹,
PENG Jing-ping¹, WU Hao-yu¹, WANG Quan-bin¹

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *The National Ocean Technology Center, SOA, Tianjin 300112, China*)

Abstract: In this paper, the exploitation and technical progress of marine renewable resources has been analyzed and reviewed at both national and international levels, including tidal energy, tidal current energy, wave energy, ocean thermal energy, and osmotic energy. Based on our analysis, we concluded that tidal energy technology has reached the stage of commercial operation, tidal current energy technology has entered a phase of sea test for full scale prototype, wave energy technology has arrived at the stage of real sea test for engineering prototype, ocean thermal energy technology has attained at a stage of real sea test for scale prototype, while osmotic energy has been still in the laboratory verification stage. Our comparison study has shown that the domestic and international advanced levels of tidal energy technology are quite similar; however, there is a relatively large gap between domestic and the international advanced levels of tidal current energy, wave energy, ocean thermal energy, and osmotic energy. The mainstream marine energy technology is basically in the stage of real sea trial for scale prototype, and further breakthroughs are needed in key technologies and security. A few development trends are expected as follows: tidal energy technology will be more eco-friendly and large-scaled; tidal current energy technology will tend to have combinations of large and small units with floating technology; the stability and survivability of the wave energy conversion device will be steadily improved, the applications of the device array will be continually carried out and placement area will increasingly expand to the deep sea; the use of the efficient thermodynamic cycle and comprehensive utilization of seawater desalination and air-conditioning refrigeration for ocean thermal energy; and the large-scale production of low-cost special film will become the main direction of the osmotic energy development.

Key words: marine renewable energy; technical progress; tidal energy; tidal current energy; wave energy; ocean thermal energy; osmotic energy

Received: September 20, 2017