

中国海洋可再生能源技术进展

刘伟民¹, 刘蕾¹, 陈风云¹, 麻常雷², 葛云征¹, 彭景平¹

1. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

2. 国家海洋技术中心, 天津 300112

摘要 综述了现阶段中国潮汐能、潮流能、波浪能、温差能等海洋可再生能源的技术进展, 将中国江夏 4.1 MW 潮汐能电站、浙江大学 650 kW 潮流能电站、中国科学院广州能源研究所 500 kW 波浪能电站、自然资源部第一海洋研究所 15 kW 温差能电站在关键技术参数和装置规模上与国外先进的海洋能装置进行了比较。中国在发电关键技术能量转化效率方面总体上接近国际先进水平, 但在装机功率、海试时间及装置可靠性上仍存在一定的差距。建议在研发关键获能技术的同时, 开展海洋能装备共性技术的研发, 以提高海洋能装置运行的可靠性和安全性。同时, 积极开展海洋能绿色技术和海洋能综合利用的研究, 促进海洋能关键技术的转化, 推进海洋能装备的产业化进程。

关键词 海洋可再生能源; 潮汐能; 潮流能; 波浪能; 温差能; 盐差能; 发电装置

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, 除潮汐能和潮流能由月球和太阳引潮力的作用产生以外, 其他均产生于太阳辐射^[1]。

中国拥有长达 1.8 万 km 的大陆海岸线、1.4 万 km 的岛屿海岸线^[2], 1 万多个大小不同的海岛和岛礁^[3], 海岛缺电现象严重, 海洋能开发利用意义重大。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, 是中国海岛经济建设和开发的迫切需要。

中国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^[4]; 但海洋能开发利用也存在开发难度较大、能量密度不高、稳定性较差、分布不均匀等难题, 海洋能技术研发还面临着诸多风险和不确定性。目前, 中国的潮汐能技术已达到商业化运行阶段, 具有代表性的是装机功率为 4.1 MW 装机功率的江夏潮汐试验电站^[5]; 潮流能最大单机装机功率为浙江大学研制的 650 kW^[6-8]机组, 总装机功率最大的是浙江联合动能研制的 1.7 MW 的潮流发电站, 现已实现并网发电^[9]; 波浪能电站上网单机装机功率最大的为中国科学院广州能源研究所

收稿日期: 2020-06-18; 修回日期: 2020-07-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41976204); 国家自然科学基金青年基金项目(51709055); 中韩海洋能源开发与利用技术交流合作(PI-2018-4); 青岛市蓝色经济区建设专项资金扶持项目(Q1402)

作者简介: 刘伟民, 研究员, 研究方向为海洋温差能开发利用, 电子邮箱: lwmxjtu@163.com

引用格式: 刘伟民, 刘蕾, 陈风云, 等. 中国海洋可再生能源技术进展[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 27-39; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.14.002

研制的 500 kW 电站^[10];自然资源部第一海洋研究所研制的 15 kW 温差能电站已实现试验机组发电^[11];盐差能技术尚处于实验室验证阶段^[12]。

1 中国海洋可再生能源发电装置技术发展现状

1.1 潮汐能开发利用与技术现状

20 世纪六七十年代,中国先后建设了 100 多座小型潮汐电站^[13],由于电站技术水平、地方规划、运营管理等多种因素,目前在运行的只有浙江江夏潮汐试验电站和浙江海山电站(正在实施改造)^[14]。其中江夏电站是中国运行时间最长、装机容量最大的潮汐能电站,电站采用单库双向方式运行,即一个水库,涨潮落潮都能发电;海山潮汐电站采用双

库单向工作方式,即一个上水库和一个下水库,分别采用涨潮、落潮时发电。发电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等型式。其中,半贯流式分为灯泡式、轴伸式和竖井式,中国潮汐能电站大多采用灯泡贯流式,江夏电站的 1 号机组为三叶片新型双向卧轴灯泡贯流式机组^[15]。

2010 年以来,中国先后完成了健跳港、乳山口、八尺门、马銮湾、瓠飞等多个万千瓦级潮汐电站工程预可研工作^[16]。此外,还开展了利用海湾内外潮波相位差发电、动态潮汐能等新技术的研究^[17-18]。

江夏潮汐电站总装机容量 4.1 MW(图 1),仅次于 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 的加拿大安娜波利斯 Annapolis 电站,位居世界第四^[19]。



图 1 江夏潮汐电站及 6 台机组

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,截至 2019 年底,江夏电站的累计发电量超过了 2.2 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运行工况,使电站总装机容量由 3200 kW 增加到 3900 kW。2012 年,1 号机组开始扩容增效改造,单机容量由 500 kW 增加至 700 kW,2015 年 8 月完成改造后,机组在复杂工况下运行效率达到了世界先进水平,截至 2015 年 10 月,机组已稳定运行超 1000 h^[20]。

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^[21-24]所示。

由表 1 可以看出,江夏潮汐电站与其他国家潮汐电站相比,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体相同,但在电站装机规模上存在较大差距。

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)、瓠飞(451 MW)等多个万千瓦级潮汐电站工程的预可研设计,测算的平均出厂电价区间为 1.386~2.6 元/(kW·h)^[25],与其他国家潮汐能电站发

表1 江夏潮汐电站与世界三大潮汐电站机组的主要参数

项目	始华湖电站	朗斯电站	安纳波利斯电站	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	254	10	17.8	0.7	0.7
额定流量/(m ³ ·s ⁻¹)	548	192	407	30.0(正向)	31.6(正向)
				25.0(反向)	27.0(反向)
额定效率/%		86	89.1	85.0(正向)	89.4(正向)
				78.0(反向)	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	

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和动态潮汐能技术研究等。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,但没有开展后续建设工作。

1.2 潮流能开发利用与技术现状

中国潮流能开发利用研究始于20世纪80年代。近年来,在国家科技计划和专项资金等项目支持下,中国潮流能技术得到了快速发展。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、大连理工大学和杭州林东新能源科技股份有限公司;水平轴装置研发起步较晚,但发

展迅速,以浙江大学、中国海洋大学、东北师范大学、哈尔滨工程大学、国电联合动力等高校和企业为代表;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研制等^[26]。

据不完全统计,中国现有潮流能装置39个,其中32个完成了海试:100 kW以下装置21个,17个装置完成了海试;100 kW以上装置18个,15个装置完成海试^[27];装置大部分处于比例样机海试阶段,主要存在如下问题:海试运行时间短,发电效率不高,装置易损坏。这些装置表明中国潮流能装置在实海况下运行的可靠性、稳定性等相关技术有待突破^[28]。

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,也可以变桨,比较适合在水深较深的海域应用。中国目前已开发了20多个水平轴潮流能机组,最大单机装机容量650 kW,最小单机容量1 kW^[29]。

以浙江大学水平轴潮流能机组为例,2014年5月浙江大学研制的60 kW半直驱水平轴潮流能机组工程样机开始在舟山摘箬山岛海域海试^[30]。其



图2 浙大650 kW机组入水及海试夜景

后浙江大学进一步研制并投入的120 kW和650 kW水平轴潮流能机组(图2)分别于2015年5月和2017年11月下海并网发电^[31]。截至2020年4月底,摘箬山岛海域试验基地累计发电量超过200万kW·h。

代表世界潮流能先进水平的英国SeaGen发电装置与浙大半直驱潮流能机组的主要参数对比,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和海试时间较早,装机容量1.2 MW^[32-36],于2008年实现并网,安装方式为固定式;由浙江大学研制的650 kW潮流能机组是中国目前最大的潮流能机组,于2017年并入国家电网,安装方式为漂浮式^[6]。

表2 浙大650 kW潮流能机组与英国SeaGen的主要参数

电站	SeaGen潮流能装置	浙大半直驱潮流能机组
海试时间	2008年	2017年
装机容量	1.2 MW	650 kW
启动流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.7	0.7
额定流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2.25	2.5
叶片转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	14.3	15
设计获能系数	0.45	0.4
年发电量/($\text{GW}\cdot\text{h}$)	0.75	0.36
是否并网	2008年并网	2017年并网
安装方式	固定式	漂浮式

垂直轴机组是指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,其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8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^[37]。以

哈尔滨工程大学垂直轴潮流能机组为例,“海能III”号机组于2013年12月起在岱山海域开展1年海试(图3),因系统走锚而进行回收,经修复后现已重新运行。



图3 “海能III”海试

意大利Kobold潮流能装置与哈尔滨工程大学“海能III”号机组主要参数^[38-39]如表3所示。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

表3 “海能III”号潮流能机组与意大利Kobold潮流能装置的主要参数

项目	意大利Kobold潮流能装置	“海能III”号潮流能机组
固定方式	漂浮式	漂浮式
海试时间	2002年	2013年
装机容量/kW	120	2×300
叶轮直径/m	6	6
额定流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2	3
运行状态	正常运行	试运行
是否并网	2005年并网	未并网

容量 120 kW, 2005 年实现并网, 安装方式为漂浮式; “海能 III” 号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。

另外, 2016 年 LHD 林东模块化垂直轴设计装机容量为 3.4 MW, 实际装机容量 1 MW 的大型潮流能发电机组在舟山岱山正式安装下海, 后经扩容现机组容量为 1.7 MW^[8,40]。



图4 LHD 海洋潮流能发电机组

1.3 波浪能开发利用与技术现状

在国家自然科学基金委员会、科技部、中国科学院相关科技计划和专项资金等的支持下, 尤其是 2010 年海洋能专项设立以后, 十几个研究所和大学开展了振荡浮子式、摆式、筏式等波浪能转换装置的研究, 主要机构包括: 中国科学院广州能源研究所、国家海洋技术中心、中国海洋大学、华南理工大学、山东大学、大连理工大学、上海交通大学、中国船舶重工集团公司第七一〇研究所等^[41-43]。各机构目前的研究阶段不同, 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, 且基本实现了波浪能技术的自主创新, 正在解决可靠性、实用化、高效转换等技术难点。

据不完全统计, 中国目前开发的波浪能装置 50 余个, 装机容量范围 10 W~500 kW。其中装机容量 500 kW 的装置 1 个, 招商局重工(深圳)有限公司于 2020 年 6 月 30 日正式将 500 kW “舟山号” 交付中国科学院广州能源研究所, 7 月开始海试, 是中国单台装机功率最大的波浪能发电装置。装置采用半潜式结构搭载吸波浮体和能量转换设备, 具有较高的转换效率与工程便利性; 采用四角抛锚方式与海底连接, 在风暴来临前通过调节锚泊系统

和吸波浮体主动下潜的方式大幅度降低结构受力, 保障平台安全。同时内部还采用双套液压发电系统, 互为备用, 提升装置海上运行的可靠性。100 kW 以下 29 个装置完成海试, 100 kW 以上 7 个装置完成海试, 且装置大部分处于初级海试阶段^[44-52]。波浪能发电装置形式较多, 但从技术发展阶段来看, 大多数装置因基础理论研究不够, 在实海况条件下运行效果较差。

在中国研发的约 50 个波浪能装置中, 23 个采用振荡浮子式, 最大单机装机容量 500 kW, 最小不足 1 kW^[53]。以中国科学院广州能源研究所漂浮式波浪能发电装置为例, 2012 年 12 月开始, 第一代 10 kW 鹰式装置工程样机“鹰式一号”在珠海市万山岛进行了 1.5 年的海试(图 5), 该装置在此期间单次无故障连续运行超过 6 月^[54]; 2015 年 12 月, 第二代 100 kW 鹰式装置工程样机“万山号”在珠海市万山岛开展海试, 并于 2017 年 4 月实现并网为珠海万山岛供电; 2018 年 1 月, 第二代 260 kW (其中波浪能 200 kW, 太阳能 60 kW) 波光互补海上可移动能源平台“先导一号”在海南开展远海试验(图 6), 并于 2018 年 8 月 31 日通过海底电缆成功连接到偏远海岛电网; 2020 年 7 月, 第三代“舟山号”500 kW (图 7) 开始海试。目前中国科学院广州能源研究所正在开展单台装机 1 MW 的波浪能发电装置研建。

英国 Pelami(海蛇)装置、美国 PowerBuoy 装置与中国鹰式装置对比, 如表 4 所示^[55-58]。Pelamis(海



图5 “鹰式一号”10 kW 波浪能发电装置



图6 海上可移动能源平台 260 kW “先导一号”



图7 鹰式波浪能 500kW 发电装置“舟山号”

表4 鹰式波浪能装置与国外波浪能发电装置对比

类型	Pelamis 筏式	PowerBuoy 振荡浮子式	“鹰式” 振荡浮子式
俘获宽度比/%			27
第1代装机容量/kW	750	40, 150	10
海试时间	2004年	2011年	2018年
第2代装机容量/kW	750	500	100, 200
目前进展	2009年海试	研发中	2018年 海试
第3代装机容量/kW			500
海试时间			2020年

蛇)装置形式为筏式,装机容量 750 kW,第二代装置已开展海试;美国 PowerBuoy 装置形式为振荡浮子式,装机容量有 40 kW 和 150 kW,第二代装置正

在研发中;鹰式波浪能装置形式为振荡浮子式。

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。同时,为海上观测仪器及设备提供电力也是发展方向之一。

1.4 温差能开发利用与技术现状

中国海洋温差能资源丰富,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率先开展了海洋温差能利用研究^[59]。在温差能发电装置及关键设备方面,2005年,天津大学理论研究了海洋温差能 200 W 氨饱和蒸汽试验用透平^[60];自然资源部第一海洋研究所于 2012 年利用电厂温排水,研制了 15 kW 温差能发电试验装置,建成了中国第一套实运行温差能试验电站,并于 2017 年开展了高效氨透平、热交换器等关键技术研发^[61-64];2012 年,中国海洋大学完成首个吸收式海洋温差能发电试验系统。在温差能其他利用方面,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℃ 的温差产生浮力驱动^[65-67];2011 年,国家海洋技术中心针对小型海洋观测平台供电问题,开展了 200 W 温差能发电技术研究^[68]。

温差能发电关键技术是热力循环技术,主要包括开式循环、闭式循环和混合式循环。自然资源部第一海洋研究所研制的闭式热力循环在 20℃ 温差下,理论循环效率为 5.13%,并利用研制的 10 kW



图8 10 kW 海洋温差能实验装置

海洋温差能实验室模拟系统(图8)对构建的高效循环模型进行了循环性能和效率的试验验证^[69]。对研建的15 kW朗肯循环温差能发电系统的试验表明,当温差为19.7℃时,即达到额定功率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%^[11,70],处于国际先进水平。

国内外主要温差能发电装置^[71-80]如表5所示。由表5可以看出,与其他国家相比,中国温差能发电技术研究起步较晚,装置的装机容量较小,还处于试验验证阶段,下一步研究方向应放在实海况示

表5 中国温差能装置与国外温差能装置

电站	建成年份	额定功率	峰值功率/kW
美国夏威夷开式循环海洋温差能电站	1992	255 kW	103
美国夏威夷闭路循环温差能电站	1979	53 kW	18
日本德岛混合循环温差能发电示范电站	1982	50 kW	
日本瑙鲁工程闭路循环海洋温差能电站	1981	120 kW	31.5
日本冲绳温差能示范电站	2013	50 kW	
韩国1 MW温差能电站	2019	1 MW	338
中国温差能发电装置	2012	15 kW	16.1

范运行方面。

1.5 盐差能开发利用与技术现状

中国盐差能利用技术还处于原理研究阶段,目前仅有中国海洋大学在海洋能专项支持下,开展了100 W缓压渗透式盐差能发电关键技术研究,该项目于2017年通过验收^[81]。

2 中国海洋能发电装置技术现状分析

综上所述可以看出,中国潮汐能技术与国际先进水平差距不大,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^[82],温差能、盐差能等技术与国际先进水平存在一定的差距。

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^[83],中国百千瓦级潮流能机组(“海能I”)2012年才进入海试^[84];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^[85],英国Oyster 800 kW波浪能发电样机于2012年海试并实现并网^[86],中国500 kW波浪能装置“舟山号”正在开展海试^[10];在温差能技术方面,韩国1 MW海洋温差能发电装置已实现发电,日本和美国在20世纪90年代前后已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^[87-91];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,中国的盐差能发电技术还停留在实验室原理验证阶段。

2.1 海洋能基础研究

目前中国在能量俘获与转换机理、装置的环境适应性、最佳功率跟踪及负载特性匹配等海洋能基础理论研究方面取得了长足的进步,装置的工作原理大部分也从模仿国外技术,到充分考虑中国资源状况下的自主创新,转换效率也进一步得到了提高。

2.2 海洋能关键技术

中国海洋能装备研发在获能技术方面与世界先进水平差距不大,在可靠性、稳定性等生存能力方面,除潮汐能外,潮流能、波浪能、温差能等均与国际先进水平存在着一定的差距,这和中国潮流能机组、波浪能机组开展海试时间尚短有关。国际上150~750 kW波浪能装置已完成了最长接近10年的海试^[92-93],而中国百千瓦级波浪能技术刚进入海试并网阶段,技术的成熟度和稳定性有待进一步提高。

2.3 海洋能示范工程进展

受海洋能资源品质不高等因素的影响,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,远低于国际上的兆瓦级水平。除浙江大学 650 kW 潮流能机组和中国科学院广州能源研究所正在海试的 500 kW 波浪能机组外,浙江岱山岛、广东大万山岛、山东大管岛、斋堂岛等海洋能示范工程中,潮流能和波浪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 Sea-Gen 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^[94-95]。

为降低海试风险,海洋能发电装置海试之前,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经验不足,导致装置需要频繁维护甚至重新加工,导致研发成本增加和示范工程进展较慢。

3 海洋能发展趋势

3.1 潮汐能发电站

潮汐传统拦坝式电站向更大装机规模发展。拦坝式潮汐发电的工作原理与水力发电很相似,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高的经济效益。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能研究人才队伍,法国、加拿大、俄罗斯等国家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。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

位差进行发电等,这些新技术对海洋生态环境基本没有影响。

3.2 潮流能发电装置

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^[94],很难对不同形式的装置进行精确评定;但是,根据 MEM(Marine Energy Matters)发布的《2015 年全球海洋能技术回顾》^[96],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“第一代涡轮机”。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“第二代涡轮机”,但目前该机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^[97]。

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^[98],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,可以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(International Renewable Energy Agency)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将很快下降^[99]。

3.3 波浪能装置

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

装置海上运行时间是波浪能发电的关键技术指标,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,进而提高装置的稳定性和海上运行时间。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、阵列式比单一装置更有效,并且有利于降低成本。因此,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,则会因地制宜地开发小型装置。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^[100]。

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^[101],目前还没有波浪能设备安装在离岸6 km以外、50 m深度以下的海域。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。

3.4 温差能发电装置

根据目前研究进展,海洋温差能开发利用发展方向主要包括装置的大型化、更高效的热力循环和温差能综合利用。

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的不断突破,国际温差能技术的大型化趋势愈发明显。韩国于2019年成功研制了兆瓦级温差能发电机组,并计划于2022年在太平洋塔拉瓦岛(Tarawa)建设完成1 MW海洋温差能电站,法国已启动10 MW级示范电站建设,美国、日本也开展了10 MW级海洋温差能研究。

海洋温差能关键获能技术是热力循环技术,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5%左右。

海洋温差能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愈发明显。海洋温差能技术除了用于发电外,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海洋温差能派生的海水养殖业已投入5000万美元,用于养殖龙虾、比目鱼、海胆和海藻等。

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,这些岛屿通过将海洋温差能发电技术与海水空调制冷和海水淡化等功能相结合,可对温差能技术更好的发挥综合利用的效果。

3.5 盐差能

总体上看,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,其成本占到了盐差能发电装置总成本的50%~80%,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。

4 结论

总体上来看,中国在海洋能技术和装置研发方面与国际先进水平相比,在发电关键技术能量转化效率上接近国际先进水平,在装机功率规模上相对偏小,在装备的可靠性上仍存在一定差距。

从海洋能获能技术上看,各种海洋能获能技术逐渐收敛。在继续提高海洋能装置获能效率研究的同时,建议开展海洋能装备所需的抗台风、抗生物附着、抗腐蚀等共性技术,以提高海洋能装置运行的可靠性和安全性。

另外,建议加大力度开展海洋能绿色技术的研发和海洋能综合利用研究的力度,同时积极开展技术转化,推进海洋能装备的产业化。

致谢 国家海洋技术中心麻常雷提供、校订了海洋能装置数量、建设时间和验收数据;浙江大学

李伟提供、校订了潮流能装置数据;中国科学院广州能源研究所盛松伟、王振鹏提供、校订了波浪能装置数据;中国电建集团华东勘测设计研究院陈国海提供、校订了潮汐能装置数据。

参考文献(References)

- [1] 夏登文, 康健. 海洋能开发利用词典[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [2] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴[R]. 北京: 国家海洋局, 2017.
- [3] 国家海洋局. 海岛统计调查公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2015.
- [4] European Commission. Blue energy: Action needed to deliver on the potential of ocean energy in European seas and oceans by 2020 and beyond[R]. Brussels: European Commission, 2014.
- [5] Li Y, Pan D Z. The ebb and flow of tidal barrage development in Zhejiang Province, China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 380-389.
- [6] Li Y J, Liu H W, Lin Y G, et al. Design and test of a 600-kW horizontal-axis tidal current turbine[J]. *Energy*, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.154.
- [7] 高效水平轴650kW海流能发电机组优化后再运行—单机功率最大![EB/OL]. (2020-01-19)[2020-04-08]. <http://me.zju.edu.cn/mecn/2020/0119/c6200a1957587/page.htm>.
- [8] Technology Collaboration Programme on Ocean Energy Systems. OES annual report[R]. Lisbon: Ocean Energy Systems (OES), 2019.
- [9] Technology Collaboration Programme on Ocean Energy Systems. OES annual report[R]. Lisbon: Ocean Energy Systems (OES), 2018.
- [10] “南海兆瓦级波浪能示范工程建设”项目首台500kW鹰式波浪能发电装置“舟山号”正式交付[EB/OL]. [2020-07-01]. http://www.giec.cas.cn/ttxw2016/202007/t20200701_5614043.html.
- [11] 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.
- [12] Huckerby J, Jeffrey H, Jay B. An international vision for ocean energy[R]. Lisbon: Ocean Energy Systems (OES), 2011.
- [13] 张宪平. 海洋潮汐能发电技术[J]. *电气时代*, 2011(10): 30-32.
- [14] 石洪源, 郭佩芳. 我国潮汐能开发利用前景展望[J]. *海岸工程*, 2012(1): 76-84.
- [15] Pang M Y, Tang S J, Zhang L X, et al. Integrated energy and economic evaluation of a case tidal power plant in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 38-45.
- [16] 王传崑. 我国潮汐能开发利用的成就及其有关问题[J]. *海洋开发与管理*, 1989(2): 14-19.
- [17] 张俊彪, 缪斌, 许雪峰, 等. 海湾内外的动态水位差模拟研究——一种全新的潮汐能开发方式的探索[J]. *海洋技术*, 2012, 31(4): 83-86, 90.
- [18] 赵建春, 陈国海, 周鹏飞. 动态潮汐能工程对区域海洋水动力环境的影响分析[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(12): 3108-3114.
- [19] Wikipedia. List of tidal power stations [EB/OL]. [2020-04-08]. http://en.volupedia.org/wiki/List_of_tidal_power_stations.
- [20] 中国电力出版社. 中国水力发电年鉴[R]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [21] 游亚戈, 李伟, 刘伟民, 等. 海洋能发电技术的发展现状与前景[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(14): 1-12.
- [22] Park Y H. Analysis of characteristics of dynamic tidal power on the west coast of Korea[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 461-474.
- [23] Charlier R H. Forty candles for the Rance River TPP tides provide renewable and sustainable power generation[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(9): 2032-2057.
- [24] I. N. 尤萨切夫, 赵秋云. 世界潮汐发电发展前景展望[J]. *水利水电快报*, 2009, 30(10): 37-41.
- [25] 邹健健, 赵丽萍. 潮汐能发电电价的敏感性分析[J]. *科技资讯*, 2009(8): 120-121.
- [26] 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.
- [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] 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.
- [29] 马舜, 李伟, 刘宏伟, 等. 25kW独立运行式水平轴潮流能发电系统[J]. *电力系统自动化*, 2010(14): 23-27.
- [30] Xu Q K, Liu H W, Lin Y G, et al. Development and experiment of a 60 kW horizontal-axis marine current power system[J]. *Energy*, 2015, 88: 149-156.

- [31] 王榕榕. 海流发电“点亮”海岛—高效水平轴海流发电系列装备与“海能海用”系列研发记[N]. 中国海洋报, 2019-2-13(3).
- [32] 刘伟民, 麻常雷, 陈风云, 等. 海洋可再生能源开发利用与技术进展[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(1): 1-17.
- [33] Macenri J, Reed M, Thiringer T. Power quality performance of the tidal energy converter, SeaGen[C]//ASME International Conference on Ocean. Rotterdam, The Netherlands: ASME, 2011.
- [34] Fraenkel P L. Tidal current energy technologies[J]. Ibis, 2006, 148(Suppl 1): 145-151.
- [35] Westwood A. SeaGen installation moves forward[J]. Renewable Energy Focus, 2008, 9(3): 26-27.
- [36] 陈雪梦. 基于BEM-CFD模型的水平轴潮流能发电装置叶轮优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [37] 白杨, 杜敏, 周庆伟, 等. 潮流能发电装置现状分析[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(3): 57-63.
- [38] Pontedi Archimede International[EB/OL]. [2020-04-18]. <http://www.pontediarchimede.com>.
- [39] 张亮, 李新仲, 耿敬, 等. 潮流能研究现状2013[J]. 新能源进展, 2013(1): 57-72.
- [40] Technology Collaboration Programme on Ocean Energy Systems. OES annual report[R]. Lisbon: Ocean Energy Systems (OES), 2017.
- [41] 顾煜炯, 谢典, 耿直. 波浪能发电技术研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 83-87.
- [42] 王猛, 李蒙, 夏增艳, 等. 浮力摆式波浪能发电装置模型试验[J]. 海洋技术, 2013(1): 83-86.
- [43] 唐泽成. 点吸收式波浪能发电装置水动力性能研究与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [44] 王项南, 贾宁, 薛彩霞, 等. 关于我国海洋可再生能源产业化发展的思考[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(12): 14-18.
- [45] 盛松伟, 王坤林, 齐红军, 等. 100 kW 鹰式波浪能发电装置“万山号”实海况试验[J]. 太阳能学报, 2019, 40(3): 709-714.
- [46] 洪岳, 潘剑飞, 刘云, 等. 直驱波浪能发电系统综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 1886-1899.
- [47] 吴金明. 鸭式波浪能转换单元的锁定控制与阵列布局设计的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [48] 杨景. 漂浮摆波浪能开发装置关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [49] 胡聪, 毛海英, 尤再进, 等. 中国海域波浪能资源分布及波浪能发电装置适用性研究[J]. 海洋科学, 2018, 42(3): 144-150.
- [50] 刘延俊, 贺彤彤. 波浪能利用发展历史与关键技术[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(4): 76-81.
- [51] 李琳娜, 史宏达, 董晓晨. 波浪能研究发展概况[J]. 中国水运, 2017, 17(7): 256-257.
- [52] 郑明月. 振荡浮子式波浪能发电技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [53] Xia D W, Ma C L. New wave energy devices developed in China[J]. Sea Technology, 2014, 55(5): 20.
- [54] 盛松伟, 游亚戈, 王坤林, 等. 10kW 鹰式波浪能发电装置研究[C]//第二届中国海洋可再生能源发展年会暨论坛论文集. 广州: 国家海洋技术中心, 2013: 378-384.
- [55] Henderson R. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2006, 31(2): 271-283.
- [56] Executive committee of OES annual report 2015[R]. Lisbon: Creative Studio, 2016: 87-88.
- [57] 余志, 蒋念东, 游亚戈. 大万山岸式振荡水柱波力电站的输出功率[J]. 海洋工程, 1996, 14(2): 77-82.
- [58] 盛松伟, 张亚群, 王坤林, 等. 鹰式装置“万山号”总体设计概述[J]. 船舶工程, 2015(S1): 10-14.
- [59] 陈风云, 刘伟民, 彭景平. 海洋温差能发电技术的发展与展望[J]. 绿色科技, 2012(11): 246-248.
- [60] 赵伟阁. 试验用200W 氨饱和蒸汽透平的研究与开发[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [61] 彭景平. 15 kW 海洋温差发电系统的试验与研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
- [62] 葛云征, 彭景平, 吴浩宇, 等. 海洋温差能向心透平的气动设计及性能研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(10): 1560-1566.
- [63] 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.
- [64] 薛海峰. 双引射器海洋温差发电循环特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [65] 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.
- [66] 王延辉, 张宏伟, 武建国. 新型温差能驱动水下滑翔器系统设计[J]. 船舶工程, 2009, 31(3): 51-54.
- [67] 王树新, 王延辉, 张大涛, 等. 温差能驱动的水下滑翔器设计与实验研究[J]. 海洋技术, 2006, 25(1): 1-5.
- [68] 王兵振, 张巍, 段云棋. 小型温差能发电装置发电特性分析与试验[J]. 太阳能学报, 2018, 39(12): 14-22.
- [69] 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.

- [70] Liu W M, Xu X J, Chen F Y. A review of research on the closed thermodynamic cycles of ocean thermal energy conversion[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109581.
- [71] Vega L A, Nihous G C. At-sea test of the structural response of a large-diameter pipe attached to a surface vessel[C]//Offshore Technology Conference. Houston, USA: SPE, 1988: 473-480.
- [72] Uehara H. The present status and future of ocean thermal energy conversion[J]. *Solar Energy*, 1995(16): 217-231.
- [73] Trimble L C, Owens W L. Review of mini-OTEC performance[C]//Proceedings of the Fifteenth Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. New York, USA: IEEE, 1980: 1331-1338.
- [74] Mitsui T, Ito F, Seya Y, et al. Outline of the 100 kW OTEC pilot plant in the republic of naure[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, PAS-102(9): 3167-71.
- [75] Lennard D E. Ocean thermal energy conversion-past progress and future prospects[J]. *Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education-Reviews, IEE Proceedings A*, 1987, 134(5): 381-391.
- [76] 陈云生. 日本久米岛的海洋温差发电试验[J]. *电世界*, 2015(6): 33.
- [77] 刘伟民. 15kW 温差能发电装置研究及试验[J]. *中国科技成果*, 2014, 15(10): 17.
- [78] Technology Collaboration Programme on Ocean Energy Systems. OES annual report[R]. Lisbon: Ocean Energy Systems (OES), 2016.
- [79] Technology Collaboration Programme on Ocean Energy Systems. OES annual report[R]. Lisbon: Ocean Energy Systems (OES), 2015.
- [80] 岳娟, 于汀, 李大树, 等. 国内外海洋温差能发电技术最新进展及发展建议[J]. *海洋技术学报*, 2017, 36(4): 82-87.
- [81] 田明. 反电渗析法海洋盐差能发电过程研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [82] OECD. The future of the ocean economy, Exploring the prospects for emerging ocean industries to 2030[R/OL]. [2020-04-18]. <http://www.oecd.org/futures/Future%20of%20the%20Ocean%20Economy%20Project%20Proposal.pdf>.
- [83] Renewable UK. Export nation a year in UK wind, wave and tidal exports[R/OL]. [2020-04-18]. http://c.yecd.com/sites/www.renewableuk.com/resource/resmgr/publications/RUK_Export_Report_final_web_.pdf.
- [84] 谢长军. 我国首座海上漂浮式立轴潮流能示范电站建成[J]. *东方电机*, 2013(4): 80.
- [85] Kofoed J P, Frigaard P, Friis-Madsen E, et al. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(2): 181-189.
- [86] Aquamarine power[EB/OL]. [2020-04-20]. <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/>.
- [87] 王义强. 海洋温差发电上原循环系统的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
- [88] 沈卫凯. OTEC 海洋温差发电系统热力循环分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
- [89] 苏佳纯, 曾恒一, 肖钢, 等. 海洋温差能发电技术研究现状及在我国的发展前景[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(4): 84-98.
- [90] Uehara H, Nakaoka T. Development and future of ocean thermal energy conversion and spray flash desalination [J]. *Bulletin of the Society of Sea Water Science Japan*, 1999, 53(1): 2-11.
- [91] Vega L A. Ocean thermal energy conversion primer[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2002, 36(4): 25-35.
- [92] António F. de Falcão O. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 14(3): 899-918.
- [93] 陈绍艳, 王芳, 张多, 等. 我国波浪能产业化进展现状分析[C]//第八届海洋强国战略论坛论文集. 厦门: 中国海洋学会, 中国太平洋学会, 2016: 121-125.
- [94] SeaGen[EB/OL]. [2020-04-20]. http://www.tidalenergy.eu/sea_gen.html.
- [95] The European Marine Energy Centre (EMEC) Ltd. The first grid connected tidal device in scotland[EB/OL]. (2008-05-27) [2020-04-18]. http://www.tidalenergy.eu/sea_gen.html
- [96] Marine Energy Matters. Marine energy global technology review 2015[R/OL]. [2020-04-18]. <http://www.marine-energy-matters.com/wp-content/plugins/email-before-download/download.php?dl=b38006051bd1bf5eb1a58444095dff2c>.
- [97] Low Carbon Innovation Coordination Group. Technology innovation needs assessment marine energy summary report[R/OL]. [2020-04-18]. <https://www.carbontrust.com/media/168547/tina-marine-energy-summary-report.pdf>.
- [98] Magagna D, Jeffrey H. Ocean energy technology: Gaps

- and barriers[R/OL]. [2020-04-18]. http://www.policyandinnovationedinburgh.org/uploads/3/1/4/1/31417803/gaps_and_barriers_report_fv.pdf.
- [99] Mofor L, Goldsmith J, Jones F. Ocean energy technology readiness, patents, deployment status and outlook[R/OL]. [2020-04-18]. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Ocean_Energy_report_2014.pdf.
- [100] Magagna D, Macgillivray A, Jeffrey H, et al. Wave and tidal energy strategic technology agenda[R/OL]. [2020-04-18]. http://www.policyandinnovationedinburgh.org/uploads/3/1/4/1/31417803/si_ocean_-_wavid_tidal_strategic_technology_agenda.pdf.
- [101] European Commission. Ocean energy: Technology development report[R/OL]. [2020-04-18]. <https://setis.ec.europa.eu/publications/relevant-reports/ocean-energy-technology-development-report>.

Technical progress of marine renewable energy in China

LIU Weimin¹, LIU Lei¹, CHEN Fengyun¹, MA Changlei², GE Yunzheng¹, PENG Jingping¹

1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

2. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

Abstract This paper reviews the technical progress of power generation devices of tidal energy, tidal current energy, wave energy, ocean thermal energy and salinity gradient energy in China. The 4.1 MW Jiangxia tidal power station, 650 kW tidal current energy power station of Zhejiang University, 500 kW wave energy power station of Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences and 15 kW ocean thermal energy power station of First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources are compared with the advanced marine energy equipments abroad in terms of the scale and the key technical parameters. The results show that the energy conversion efficiency of power generation is close to the international advanced level, but there are still some gaps in the installed power, sea trial time and device reliability. Then this paper suggests that the research and development of common technology of marine energy devices should be carried out at the same time of developing the key technology, so as to improve the reliability and safety of marine energy equipments. Researches on green technology and comprehensive utilization of marine energy should be carried out actively to promote the transformation of key technologies of marine energy, and to promote industrialization of marine energy equipments.

Keywords marine renewable energy; tidal energy; tidal current energy; wave energy; ocean thermal energy; salinity gradient energy; power generation device ●



(责任编辑 刘志远)