

三沙海洋可再生能源的开发利用^{*}

刘富铀,马治忠,孟洁,张榕,姜波,杜小平,张松,徐辉奋,武贺,白杨

(国家海洋技术中心 天津 300111)

摘 要:三沙管理与发展离不开能源与淡水。开发利用海洋可再生能源是解决三沙能源和淡水供应的可行性方案。根据波浪能、温差能和海洋风能调查与评价的结果,在分析总结国内外开发利用技术现状与发展趋势的基础上,提出三沙海洋可再生能源开发利用的建议。

关 键 词:三沙;海洋可再生能源;波浪能;温差能;海洋风能;开发利用

1 引言

我国海南省三沙市远离大陆,其能源和淡水供给是加强我国在西、南、中沙群岛及其海域管控能力,促进海南省三沙市建设和发展,落实并行使海南海洋行政管辖权,有效维护海南海洋权益的基本保障。目前,海水淡化技术成熟且已实用化,因此能源供给的问题就更加突出。有了充足的能源也就有了淡化水。海洋可再生能源是三沙市能源供给的最优选择。

海洋可再生能源通常是指海洋中所特有的、依附于海水的可再生的自然能源。即潮汐能、潮流能、海流能、波浪能、海水温差能及盐差能。广义的海洋可再生能源还包括海上风能、海上太阳能和海洋生物质能。

三沙海洋可再生能源以波浪能、温差能和海洋风能最具有开发利用的价值,本文主要研究三沙这 3 种海洋可再生能源的开发利用。

(1)波浪能

海面在风力的作用下产生的波动现象,称为波浪,波浪运动所具有的能量称为波浪能。在单位波峰宽度(即垂直于波浪前进方向的迎波面)、一个波长内波浪运动的总能量由波动中水质点运动产生的动能和波面相对平均水面的垂直位移所具有的势能两部分组成,势能和动能相等。单位海表面面积内波浪的平均能量与波高的平方成正比。波

浪在单位时间通过单位波峰宽度的波浪能为波浪能功率密度,其大小与波高的平方和周期成正比。

(2)温差能

海洋接受太阳能的 15%左右,作为热能储存于海洋中,主要集中在表层海水。由于海水导热系数较低,水温随深度增加而递减。热带海洋海水表层温度超过 25℃,而表层以下 1 km 的海水温度仅 5℃~10℃。这种在低纬度海洋中,以表层与深层海水的温度差的形式所储存的热能称为温差能,是海洋可再生能源中最稳定的一种。其能量与具有足够温差(通常要求不小于 18℃)海域的暖水量和温差成正比。温差能是可持续提供电力供应的海洋可再生资源。

(3)海洋风能

海洋风能指的是海洋上空大气流动所产生的动能。风能资源是经过测定在量和质上可供人类开发利用的风能,决定于风功率密度和可利用的风能年累积小时数。

2 三沙海洋可再生能源开发的资源基础

2003 年,党中央、国务院批准实施“我国近海海洋综合调查与评价”专项(简称“908 专项”),对我国近海的潮汐能、潮流能、波浪能、海洋风能、温差能、盐差能进行了调查和评价^[1-3],为我国海洋可再生能源的开发利用提供了基础数据资料。

^{*} 基金项目:我国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-NY,908-02-05-01,908-ZC-I-21,908-ZC-II-05,GD908-02-11,ZJ908-04-04);质检公益性行业科研专项(200810807)。

2.1 波浪能资源

由调查与数值模拟结果,可显示出南海北部年平均波浪能资源分布,波浪能资源区划等级如表 1 所示。由表 1 可知,波浪能功率密度(P) ≥ 4 kW/m 已属于波浪能丰富区,而西沙近岸波浪能年平均功率密度达到 6~8 kW/m,附近海域达到 20 kW/m,波浪能资源非常丰富。中沙群岛近岸也属丰富区。

表 1 波浪能资源区划等级

区划等级	区划类别编号	$P/(\text{kW}/\text{m})$
丰富区	1	$P\geq 4$
较丰富区	2	$4>P\geq 2$
可利用区	3	$2>P\geq 1$
贫乏区	4	$P<1$

2.2 温差能资源

我国 90% 以上温差能分布在南海,如果以温差能补偿周期为 1 000 年来计算^[4],则南海海域表层与深层海水温差不小于 18℃ 水体的温差能蕴藏量为 3.67×10^8 kW,理论年发电量 3.22×10^{12} kW·h;技术可开发量为 $2\,570\times 10^4$ kW,年发电量 $2\,251\times 10^8$ kW·h。

西沙群岛为一群坐落在 900~1 000 m 的大陆坡台阶上的岛礁,其边坡陡峻,是良好的陆基式或陆架式温差电站站址。

表 2 为 2009 年 9 月西沙群岛附近海域实测温差数据,通过分析计算得出各站点单位面积、最大温差和温差能蕴藏量。温差能资源区划等级见表 3。

表 2 西沙群岛附近海域单位面积温差能蕴藏量

序号	坐标		站位水深 /m	最大温差 /℃	能量密度 /(10 ⁴ kJ·m ⁻²)
	纬度(N)	经度(S)			
1	17°7.39′	110°19.39′	1 191	24.55	582.6
2	16°58.91′	111°19.39′	436	19.88	208.9
3	17°4.72′	111°46.40′	891	24.32	423.3
4	16°57.60′	111°50.48′	941	24.47	517.7
5	16°50.93′	111°54.38′	891	24.97	373.9
6	16°44.59′	111°58.55′	891	24.22	419.8
7	16°37.54′	112°2.60′	846	24.37	415.9
8	16°30.72′	112°6.94′	841	23.54	320.7
9	16°23.86′	112°11.07′	891	24.56	287.8

表 3 温差能资源区划等级

区划等级	区划类别编号	$P/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
丰富区	1	$P\geq 200$
较丰富区	2	$200>P\geq 100$
可利用区	3	$100>P\geq P_{18}^*$
贫乏区	4	$P<P_{18}^*$

注: * 为 P_{18} 海洋表层与深层温差等于 18℃ 的海域温差能的功率密度。

2.3 海洋风能资源

由调查与数值模拟结果,可显示出南海北部年平均风速分布以及年平均风能资源分布。近海风能资源区划等级如表 4 所示。南海北部年平均风速为 6~7 m/s。西沙近岸风能年平均功率密度(P)为 200~250 kW/m,属丰富区,西沙附近海域则达到 300~400 kW/m,风能资源非常丰富。中沙群岛近岸风能年平均功率密度为 300~400 kW/m,也属丰富区。

表 4 近海风能资源区划等级

区划等级	区划类别编号	$P/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
丰富区	1	$P\geq 200$
较丰富区	2	$200>P\geq 150$
可利用区	3	$150>P\geq 100$
贫乏区	4	$P<100$

3 开发利用状况与趋势

3.1 国际现状

3.1.1 技术现状

国际上各种海洋可再生能源开发利用技术水平和产业化程度参差不齐,潮汐能和海洋风能技术成熟度较高,商业化程度较好。

(1)波浪能

全球波浪能总蕴藏量约为 32×10^{12} (kW·h)/a,约为 2008 年全球电力供应量的两倍^[7]。该数据并未考虑地理、技术和经济等因素。如果波浪能功率密度大于 30 kW/m 的近岸海域,波浪能装置的转化效率达到 40%,则全球波浪能技术可开发量为 5×10^8 kW^[7]。

目前已经确认的 50 多个波浪能转换装置分别处于不同的技术发展阶段^[7]。以欧美为代表

的 Pelamis、PowerBuoy 及 Wave Hub 等多种技术开展了规模化的商业性示范(表 5)。

表 5 世界上产业化前景较好的波浪能技术

分类	国家	机 构	电站/技术名称	单机功率 /kW	产业化前景
振荡 水柱式	英国	波浪发电公司	LIMPET 岸基波浪能装置	500	好
	英国	波浪发电公司	“鱼鹰”波浪能发电装置	2 000	好
	英国	Orecon 公司	MRC1000	1 000	较好
	澳大利亚	Oceanlink 公司	肯布拉港波浪能电站	500	较好
	挪威	克瓦纳布鲁格公司	克瓦纳布鲁格波浪能电站	500	较好
摆体式	美国	海洋电力技术公司	PowerBuoy 波浪能浮标	40 150	好
	英国	海蛇波浪电力公司	“海蛇”波浪能装置	750	好
	挪威	弗雷德奥尔森公司	FO ³ 波浪能装置	2 500	较好
	英国	AWS 海洋可再生能源公司	阿基米德波浪摆	2 000	较好
	英国	海蓝宝石波浪能公司	“牡蛎”波浪能装置	1 000	较好
	丹麦	波浪之星能源公司	“波浪之星”波浪能装置	3 000	较好
越浪式	丹麦	波龙公司	波龙发电装置	750	较好

(2)温差能

温差能比其他类型的海洋可再生能源蕴藏量大,广泛分布于热带海域。乐观估计^[7],全球温差能蕴藏量为 $30\times10^{12}\sim90\times10^{12}$ (kW·h)/a。最近,Nihous 计算认为,全球每年可提供大约 44×10^{12} kW·h 的稳定电力。Pelc 和 Fujita 认为,全球每年可发电 88×10^{12} kW·h,而且不会影响海洋的热结构。

1981 年联合国新能源和可再生能源会议文件

确认:“海洋热能转换是所有海洋可再生能源转换系统中最重要”^[5]。这一论断促使温差能的研究更加活跃,美国、日本、印度持续加大对海洋温差能的研究和资金投入。1979 年在夏威夷州海面一艘驳船上成功运转了一台 MINI-OTEC 闭式发电机组,系统发出 50 kW 的电力,净输出功率 15 kW。1981 年日本在瑙鲁建成了世界上第一座功率为 120 kW 的岸式温差能试验电站。海洋温差能技术目前大多处于初期样机培育阶段(表 6)。

表 6 国外建成、建设中的温差发电站址、设备情况

时 间	地 点	开发方式	装机容量/kW	发电和试验情况
1979.8	美国夏威夷海面	漂浮式、闭式	50	8月3日至11月16日,发电 500 h
1981	美国夏威夷海面	闭式	1 000	试验热交换器
1984	美国夏威夷	岸基和平台,闭式	40 000	设计研究
1993	美国夏威夷海岸	岸基,闭式	210	发电并用于空调、水产养殖灌溉水果蔬菜
1994.9	美国夏威夷西海岸	岸基,开式	255	发电
1981.9	瑙鲁岛	岸基,闭式	100	日本研建,发电
1982.9	日本鹿儿岛县德之岛	岸基,混合式	50	发电
1986.1	日本佐贺县伊万里	岸基,闭式	75	发电试验
1990	日本鹿儿岛县冰永良部岛	岸基,闭式	1 000	发电,水产养殖,空调
1989	印度尼西亚近海	平台,闭式	100 000	计划 1995 年建成
1994	印度泰米尔纳德邦近海	平台,闭式	10 000	研建中

(3)海洋风能

全球海域蕴藏着丰富的风能资源,大部分海域为风能资源富集区,尤其富集在南北半球西风带。

1990 年丹麦安装了第一台单机容量为 220 kW 的近海示范风电机组,到 2010 年底的 21 年间,全球已建成 43 个海上风电场,安装了 1 339 台风电机组,总容量 366.6×10^4 kW^[6]。

2010 年,全球海上风电新增装机 144.4×10^4 kW,同比增长 110%,占全球风电新增装机的 3.7%,主要分布在欧洲的英国、丹麦、比利时和

德国。其中:英国海上新增装机 92.5×10^4 kW,成为海上风电的全球领跑者。

德国近两年采用 0.5×10^4 kW 和 0.6×10^4 kW 大型风电机组建设海上风电场,成为海上风电的后起之秀。

2010 年 6 月 8 日,上海东海大桥海上风电场 10×10^4 kW 风机并网试运行,为我国大规模建设海上风电场积累了设备制造、工程施工以及运营维护的经验。

2009—2010 年全球近海风电场装机情况^[6]见表 7。

表 7 2009—2010 年全球近海风电场装机情况

国家	2009 年装机容量 /(10 ⁴ kW)	2009 年累计装机容量 /(10 ⁴ kW)	2010 年装机容量 /(10 ⁴ kW)	2010 年累计装机容量 /(10 ⁴ kW)	占 2010 年全球总装机 容量百分比/%
英国	30.6	89.4	92.5	181.9	51.18
丹麦	22.8	62.6	20.7	83.3	23.44
荷兰	0	24.7	0	24.7	6.94
比利时	0	3	16.5	19.5	5.49
德国	6	6	10.8	16.8	4.73
瑞典	3	16.3	0	16.3	4.59
中国	6.3	6.3	3.9	10.2	2.87
爱尔兰	0	2.5	0	2.5	0.7
挪威	0.23	0.2	0	0.2	0.06
总计	68.9	211	144.4	355.4	100

3.1.2 激励政策

许多国家政府都制定了鼓励政策以推动海洋可再生能源的发展。有关政策和措施主要分为六大类:① 装机容量或发电量目标;② 资金补助和财政激励,包括各种奖励;③ 市场激励;④ 产业发展;⑤ 基础设施研究和试验;⑥ 准入/空间/资源分配制度、各种标准和协议。

一般来说,在海洋可再生能源政策方面出台具体措施的国家在海洋可再生能源相关技术研发和实践中也处于领先地位。由于相关技术还处在发展初级阶段,政府支持对技术发展和计划实施至关重要。表 8 列出了截至 2010 年底各国所实施的海洋可再生能源政策。

表 8 各国海洋可再生能源政策

政策分类	国 家	示 例
装机容量或发电量目标		
自定目标和预测目标	英国	到 2020 年英国 3%电力来自海洋可再生能源
	西班牙(巴斯克区)	到 2020 年巴斯克区装机 5 000 kW
	加拿大	加拿大发布 2050 年路线图(海洋可再生能源工作组)
立法目标(总电量)	爱尔兰	到 2020 年爱尔兰总量达 50×10^4 kW
	葡萄牙	到 2020 年葡萄牙总量达 55×10^4 kW

续表		
政策分类	国 家	示 例
资金补助和财政激励		
研发计划/补助	美国 中国	美国能源部风力和水电计划(研发资金补助以及加快市场化) 高新技术研发计划(“863”计划)
样机开发资金补助	英国 新西兰 中国	海洋可再生能源检验基金 海洋可再生能源发展基金 海洋可再生能源重点项目
项目开展资金补助	英国	海洋可再生能源发展基金
奖励	苏格兰	蓝十字奖(为首台在两年内连续发电量达 $1\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的装置提供 1 000 万英镑奖金)
市场激励措施		
返税	葡萄牙 爱尔兰/德国	设定海洋可再生能源发电保证价格[美元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)]
可再生能源义务可交易证书	英国	可再生能源义务体系——海洋可再生能源发电可交易认证制度[美元/($1\,000\text{ kW}\cdot\text{h}$)]
行业发展计划		
行业和区域发展补助	苏格兰地区,英国等	集群发展
产业协会支持	爱尔兰,新西兰	政府为成立产业协会提供财政支持
基础设施研究和测试		
国家海洋可再生能源中心	美国	成立了两个中心(俄勒冈/华盛顿波浪能/潮流能中心,夏威夷 OTEC/波浪能中心)
海洋可再生能源试验中心	苏格兰地区,加拿大等	欧洲海洋可再生能源中心,加拿大 Fundy 海洋可再生能源研究中心
海上基地	英国	波浪能基地,提供装置接入设施
准入/空间/资源分配制度、标准和协议		
标准/协议	国际电工 技术委员会	波浪能、潮流能、海流能国际标准的制定
准入制度	英国	彭特兰湾皇家地产投标许可制度
空间/资源分配制度	美国	内政部制定的美国外大陆架准入制度

3.1.3 发展目标

各国制定了各种指导目标和法定目标。大多数海洋可再生能源特定目标都与装机容量有关,辅之以其他一般性目标(如其他可再生能源的发展比例等)。2008 年起,美国联邦政府开始明显加大投入力度。但目前实施计划持续时间最长、规模最大、综合性最强的国家是英国。

IPCC^[7]总结了已经开始实施的各国政府资助研究计划和政策激励,指出:一些国家已经提出了不具约束力的海洋可再生能源装机目标和时间表。例如,英国政府的目标是到 2020 年达到 $200\times 10^4\text{ kW}$,加拿大、美国、葡萄牙和爱尔兰也正在制定类似的装机目标时间表。同时,大多数海

洋资源丰富的国家尚未摸清其海洋可再生能源资源的蕴藏量,当然也就不能确定装机目标。在这种情况下,IPCC 汇总的预测结果是(不包括海洋风能):海洋可再生能源近期(2020 年)装机发电目标为 $0.3\times 10^8\sim 11.9\times 10^8(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{a}$;远期(2050 年)装机发电目标为 $2.5\times 10^8\sim 194.3\times 10^8(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{a}$ 。

目标差距之所以如此巨大,说明各种方案的假设条件具有高度不确定性,所采用的分析体系不尽相同,也未考虑未来新政策的影响。尽管如此,我们还是可以看到各国政府开发利用海洋可再生能源的愿望和决心。

3.2 国内现状

3.2.1 技术现状

20 世纪 80 年代,我国开始波浪能和温差能

利用技术的研究与开发,经过 30 多年的积累,已形成了一批实验样机和工程样机,开展了一些应用试验(表 9)。

表 9 国内海洋可再生能源技术发展现状及产业化前景分析

类型	技术现状及特点	应用现状	产业化前景
波浪能	研建了 100 kW 振荡水柱式和 30 kW 摆式波浪能发电试验电站,波浪能供电的海上导航灯已形成产品并对外出口,100 kW 鸭式和漂浮式波浪能电站在研 技术特点:摆式、漂浮式、振荡浮子式、振荡水柱式、“点头鸭”式	已具备百千瓦级波浪能电站的设计制造能力,航标灯商业化,30 kW 摆式波浪能电站初步具备示范应用能力(广州能源所、国家海洋技术中心)	鸭式和漂浮式波浪能电站产业化前景较好
温差能	致力于提高转换效率,仅完成了实验室原理试验	国家海洋局第一海洋研究所、天大、能源所	处于培育期
海洋风能	我国 6 000 kW 海上风机已下线,并具备建设大型海上风电场的能力 开始研制 1 万千瓦级海上风机	第一座大型海上风电场:东海大桥 10×10 ⁴ kW 海上风电场;规模最大的海上风电场:江苏如东 15×10 ⁴ kW 一期工程	较好

目前,海洋风能已进入规模开发阶段,波浪能发电技术正在开展多项应用示范,温差能发电技术也在进行实验室原理试验。

“十一五”期间,《国家中长期科学和技术发展规划纲要》将“可再生能源低成本规模化开发利用”列为优先主题,划拨经费 3 200 万元设立国家科技支撑计划项目,开展了 100 kW 漂浮式波浪能电站、100 kW 摆式波浪能电站、20 kW 海流能装置、150 kW 潮流能电站、15 kW 温差能发电装置以及海洋可再生能源发电系统综合测试技术等研究与示范课题。

2010 年起,为了加快推进我国海洋可再生能源开发利用工作,国家设立了海洋可再生能源专项资金,每年划拨引导资金两个亿,促进社会对海洋可再生能源事业的投入。2010 年专项资金立项项目 26 项,2011 年专项资金新增立项项目 39 项,这些项目涵盖了海洋可再生能源海岛独立电力系统及并网示范工程、关键技术产业化、新技术研究与试验以及标准和公共支撑服务体系建设等 4 个重点支持方向。2012 年专项资金项目也已经开始实施。

3.2.2 激励政策

随着海洋可再生能源战略地位的日益凸现,海洋可再生能源开发利用受到沿海发达海洋国家的高度重视,相继制定了鼓励海洋可再生能源开发利用的法规、政策,推进海洋可再生能源开

发利用快速发展。同时,沿海发达海洋国家加大了研究与商业化示范的规模,为大规模开发利用海洋可再生能源进行技术储备。

我国 2006 年颁布的《可再生能源法》明确将海洋可再生能源纳入可再生能源范畴,并明确了专项资金支持方向。《国家海洋事业发展规划纲要》《国家“十一五”海洋科学和技术发展规划纲要》和《全国科技兴海规划纲要(2008—2015 年)》中,均明确了要推进海洋可再生能源的发展。

在新一届政府职能部门定位中,国务院将“海洋可再生能源的研究、应用与管理”的职责赋予了国家海洋局,从而进一步明确了我国海洋可再生能源的职能管理部门,为我国海洋可再生能源事业的快速稳定发展奠定了基础。

为进一步落实职能,近年来国家加大了海洋可再生能源研究与开发的力度,资金总额远远超过了新中国成立以来海洋可再生能源科研经费的总和。

3.3 技术水平评价

(1)波浪能技术

波浪能利用正处在技术攻关阶段,能够持续在海中运行的离岸波浪能装置已有多种形式,如英国的改良筏式装置海蛇(Pelamis)、浮力摆装置牡蛎(Oyster)以及美国的点吸收装置 Power Buoy 等。振荡水柱式波浪能转换系统是目前具有

实际应用价值的波浪能装置,为导航设备如浮标灯等提供电力。

我国较为系统的波浪能研究已经开展了 30 多年,但目前波浪能技术还处于实海况示范研究阶段。我国所研究的岸式波浪能装置都具备持续工作能力,但存在着总体转换效率低、造价高和可靠性差等方面的问题;离岸波浪能装置是现在波浪能利用技术研究的主流,还有待于技术上的突破。

(2)温差能技术

温差能发电目前达到实用程度的发电方法只有蒸汽动力循环发电,没有什么特殊的关键技术问题。目前利用难度主要是投资非常高而效率低。温差能发电的副产品,即循环冷凝水是质量很好的淡水。在远离大陆的海岛可以同时获得电力和淡水的意义重大。

(3)海洋风能技术

海上风电技术已经成熟,我国已有建设海上风电场的技术、装备和建设经验。我国海上风电已进入快速发展期,未来海上风电市场份额将超过陆地。我国已能够生产 5 000 kW 和 6 000 kW 的海上风电机组,万千瓦海上风电机组研制已列入我国“十二五”规划。

4 结论与建议

三沙的发展必须解决能源和淡水的供给问题。就地开发利用海洋可再生能源是最具可行性、也是最为经济的方法。近期(2011—2015 年)可首先开发利用海洋风能和太阳能,实验开发波

浪能,进行温差能研究与开发。中期(2016—2020 年)应开展波浪能实际应用,并进行百千瓦级温差能发电装置的应用试验。远期(2021—2030 年)可考虑建设万千瓦级波浪能海上发电场;温差能在西沙、南沙应成为替代能源,装机容量达到万千瓦,并进行综合利用(制淡水、种植、养殖、冷水空调、制氢)以降低成本。

参考文献

[1] 韩家新. 我国近海海洋可再生能源调查与研究(908-01-NY)[R]. 天津:国家海洋技术中心, 2011.

[2] 刘富铀. 海洋可再生能源开发与利用前景评价(908-02-05-01)[R]. 天津:国家海洋技术中心, 2011.

[3] 韩家新. 我国近海海洋可再生能源调查与研究成果集成(908-ZC-I-21)[R]. 天津:国家海洋技术中心, 2011.

[4] 王传崑, 卢苇. 海洋能资源分析方法及存储评估[M]. 北京:海洋出版社, 2009.

[5] 世界能源理事会. 新的可再生能源·未来发展指南[M]. 阎季惠等, 译. 北京:海洋出版社, 1998.

[6] 沈德昌. 全球海上风电发展现状[J]. 太阳能, 2011(20): 52—53.

[7] IPCC. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Chapter 6 Ocean Energy. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2011:497—533.