

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2016.05.003

后弯管波浪能利用技术及样机设计

吴必军^{1,2,3}, 李 猛^{1,2,3,4}, 伍儒康^{1,2,3,4}, 陈天祥^{1,2,3,4}

(1.中国科学院广州能源研究所,广东 广州 510070;2.中国科学院可再生能源重点实验室,广东 广州 510070;
3.广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室,广东 广州 510640;4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:分析总结了目前世界上发展的后弯管波浪能利用技术。历史资料表明,水槽规则波模型实验俘获宽度比最大值达到了 79.1%,水池规则波实验最高值达到 172.8%,而且都呈现较宽的通频带。水池随机波实验俘获宽度比平均值最高为 52%。后弯管技术表现出优良的波浪能量转换特性。基于前期的研究基础,经过对模型的改进和水槽规则波实验,研究发现模型从波浪能到气动功率的俘获宽度比最高值达到了 99%,远超过历史文献最好值 79.1%。样机设计表明,基于后弯管技术发展的波浪能利用装置具有良好的经济性。

关键词:波浪能;后弯管;俘获宽度比

中图分类号: P743.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-2029(2016)05-0010-07

海洋波浪能蕴藏量丰富,开发利用潜力巨大^[1]。开发利用波浪能对于我国海洋资源开发、海岛建设、海防、海洋观测、海水淡化等具有重要意义。

目前波浪能利用技术种类繁多,但基于漂浮式技术发展的装置由于可以工厂批量低成本生产、建造受海洋环境影响小、适用面广而成为国际上发展的主流技术。漂浮式波浪能技术种类繁多,但绝大部分波浪能利用技术是在波浪直接作用下利用载体(空气、海水、结构物)与结构物(支撑平台)的相对运动转换波浪能量,还有一部分是利用载体受波的压力产生形变或通过压电效应转换能量。形变或压电效应转换波浪能量由于波浪产生的压头不高而转换效率不高,这两类技术转换效率最高不超过 5%^[2]。不同的转换载体后续的转换机构是不一样的,如图 1 所示,这些机构的复杂程度和建造成本差别很大。

漂浮式技术中,通过结构物(一般称振荡浮子)这种载体转换能量的形式很多,有圆饼型^[3]、长条形^[4],其最突出代表是点头鸭形式^[5]。这些技术前级能量转换特征是波浪能转换为结构物的机械能,是目前国内外技术发展的主流。1974 年,著名波浪能专

家 Salter 提出了点头鸭式技术,其特点是利用特殊设计的外形和运动形式,提高一级转换效率,使二维正弦波水槽试验的俘获宽度比超过 90%。在宽水池实验中,在松弛系泊系统作用下,其正弦波俘获宽度比不超过 40%^[6],而在刚性构架作用下,其正弦波俘获宽度比超过 160%。点头鸭技术高效的关键是鸭体具有圆形的后部,以及其转轴基本固定。然而通过结构物与结构物形成漂浮相对运动转换能量这种双(多)浮体形式,综合成本(材料成本、建造成本、系泊成本、投放成本、维护成本等)做到低成本的空间小,结构物之间在恶劣海况下相互运动出现超限几率大,相撞事件不可避免,安全系数低。以液压系统作为后续转换机构复杂,液压系统中采用油作为工质有对海洋环境产生污染的风险。

漂浮式技术中,通过海水这种载体转换能量最突出代表是欧洲多国合作的 Wave Dragon 波力装置,其特点是单浮体(承载平台),装置要承担转换载体(海水)的重量,因此其结构规模强劲和庞大,在风、波和流共同作用的海况下,系泊系统设计复杂,投资大,水轮机同海水接触,受海生物附着影响大,发展缓慢^[7]。

收稿日期:2016-03-31

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助项目(XDA13040202);国家自然科学基金资助项目(51579231,51276185)

作者简介:吴必军(1965-),男,博士,研究员,主要从事海洋波浪能转换技术研究。E-mail:wubj@ms.giec.ac.cn

漂浮式技术中,通过空气这种载体转换能量就是所谓的漂浮振荡水柱技术,其前级能量转换过程也可理解为是波浪能转换为结构物的机械能过程,与漂浮振荡浮子转换原理一样,其特殊性是载体和承载平台合二为一。后续转换机构是管道、空气透平、发电机(或其它负载)。相对于相同装机功率的漂浮振荡浮子装置,由于去掉了强大的支撑平台,装置规模至少降低 2/3,将导致材料、建造、运输、投放、回收、系泊等成本大幅度降低。该技术总体结构简单,材料利用率高,运输、投放和回收工艺简单和成本低,维护成本低,海生物附着影响小,环境友好。

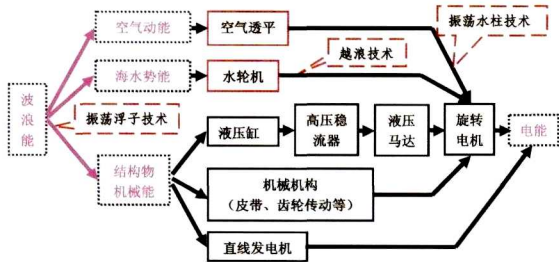


图 1 波浪能到电能的后续转换机构

漂浮振荡水柱式技术优秀代表是后弯管技术^[8-9],其突出特点是装置整体摇、荡运动的充分利用,使其俘获宽度比(指气动功率与装置迎波面宽度内的入射波功率之比,由于“聚波”效应,有的条件下装置入射波功率远大于装置迎波面宽度内的波浪功率,这就是两者之比大于 100%的原因)较高(窄水槽试验接近 80%^[8-9],宽水池试验达到 172.8%^[11])。本文介绍后弯管技术的发展历程和样机设计。

1 国外后弯管技术重要进展

1986 年,著名波浪能专家 Masuda^[10]提出了后弯管技术概念,如图 2 所示。该装置由一个 L 形的导管、一个浮室、一个气室、一个空气透平和一个发电机组成,海水从导管的后部开口端进入,推动气室内的空气运动,运动的空气推动空气透平驱动发电机输出电能。该技术从波浪能到电能转换一般分为两级,初级转换(Primary Conversion)是从波浪能到气动能量,第二级转换(Secondary Conversion)是从气动能量到电能。

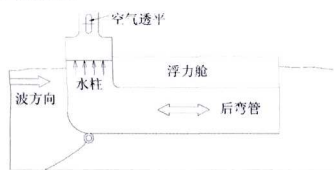


图 2 后弯管波浪能装置示意图

从收集的文献可知,1999 年,印度人 Pathak 等同 Masuda 合作,对一个前方后圆(未延伸)长 1.2 m、宽 0.87 m、高 0.9 m 的后弯管模型以及弯管向后分别延伸 0.32 m、0.47 m 和 0.62 m 共 4 种模型进行了水池试验研究。水池长 30 m、宽 30 m、深 3 m,弯管气室水线面积为 0.87 m×0.27 m=0.234 9 m²,模型吃水深度为 0.45 m。研究表明,适当延长后弯管的长度不仅提高了俘获宽度比的峰值,而且拓宽了频率响应宽度。研究表明,在波高 0.25 m、周期 1.65 s 规则波作用下,气动功率达到了 155 W,俘获宽度比达到了 172.8%。研究表明,在 JONSWAP 波谱作用下,向后延伸 0.47 m 的后弯管模型俘获宽度比平均值达到了 52%(入射波功率按 $P_w=0.55H_s^2 T_z B$ (kW/m) 计算, H_s 入射波有义波高(m), T_z 入射波平均周期(s), B 浮体迎波宽度(m))^[11]。2011 年,日本学者 Imai 等对一个前方后方(未延伸)长 0.85 m、宽 0.78 m、高 0.6 m 的后弯管模型(Type-A)以及弯管向后分别延伸 0.15 m(Type-B)、0.47 m(Type-C)共 3 种模型进行了水槽和水池试验研究。造波水槽长 18 m、宽 0.8 m、深 1.2 m,造波水池长 65 m、宽 5 m、深 7 m,模型吃水深度都为 0.35 m。规则波实验研究表明,未延伸后弯管的俘获宽度比在水槽实验中最高可到 70%(水槽宽度与模型宽度之比为 1.03),而在水池实验中达到了大约 108%(水池宽度与模型宽度之比为 6.41)。水槽规则波实验表明,向后延伸的后弯管模型俘获宽度比要低于未延伸的后弯管模型。未延伸模型尺度放大 3 倍在水池中进行了发电实验,此时模型尺度为长 2.55 m、宽 2.34 m、高 1.8 m,吃水 1.05 m,空气透平为带导叶的冲动透平。规则波实验研究表明,其俘获宽度比最高为 78%(水池宽度与模型宽度之比为 2.14),从波浪能到电的转换效率最高为 49%^[12]。最近几年未查到有关后弯管能量转换性能的实验研究文献。

2008-2011 年,爱尔兰基于后弯管技术研建的 1:4 OE Buoy 海试样机投放成功运行,装置自重 28 t,经受住了几次强飓风的考验(图 3)^[13]。

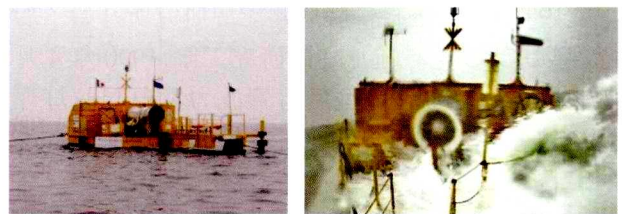
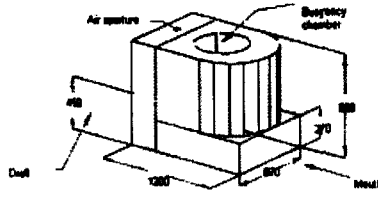
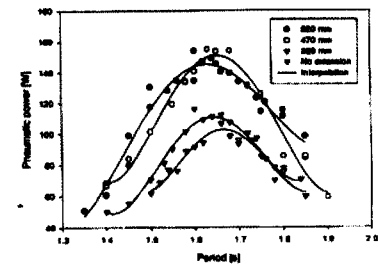
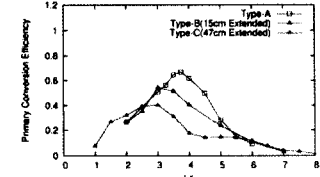
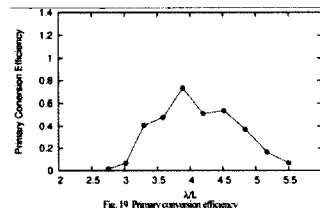
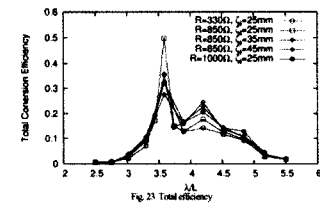


图 3 海试中的 OE Buoy 装置(2006 年)

表 1 国外后弯管模型能量转换性能研究进展

时间	模型	实验工况	最高俘获宽度比
1999 年规则波	 <p>Fig. 1 Sketch of WBF2 showing principle dimensions (in mm)</p>	<p>水池长 30 m、宽 30 m、水深 3 m，模型质量 85 kg，喷嘴比为 1.04%。</p>	 <p>172.8% (入射波功率依据波高 0.25 m、周期 1.65 s、迎波宽度 0.87 m 计算得 89.7 W，气动峰值功率图上估计 155 W)</p>
1999 年随机波			<p>俘获宽度比平均值为 52%</p>
2011 年	 <p>Fig. 7 primary conversion efficiency</p>  <p>Fig. 10 Primary conversion efficiency</p>  <p>Fig. 21 Total efficiency</p>	<p>水槽规格为长 18 m、宽 0.8 m、深 1.2 m(2D)，水池规格为长 65 m、宽 5 m、深 7 m (3D)。</p>	<p>最高俘获宽度比 70%(Type-A)</p> <p>Type-A 放大 3 倍最高俘获宽度比为 78%</p>
	<p>Type-A</p>		<p>带导叶冲动式透平 波浪到电最高转换效率达到 49%</p>

2 我国后弯管技术的重要进展

1989 年，中国科学院广州能源研究所开始了后弯管型波力发电导航浮标的研究工作，1990 年 4 月研制出第一台双胴体型后弯管波力发电导航灯浮标，当时造波水池试验表明，其俘获宽度比比传统的中心管型波力发电导航浮标高 1 倍；1993 年又研制出新一代前方后圆浮室后弯管波力发电导航灯浮标，性能较双胴体型又有了很大提高，更适应浅

水微浪水域的要求，生产了 3 台样机，分别在湛江和珠江口伶仃洋北面水域进行实用试验。1994 年，中国科学院广州能源研究所向日本出口一套 WBF2.86×2.2A 型后弯管波力发电导航灯浮标，并于 1995 年 4 月为其研制了配套用 BD4501 型波力发电装置，日本波能专家益田善雄先生于 1995 年 9 月在日本明古屋西南的三河湾进行了海上试验，结果表明，在相同地点、相同波况、外形尺寸近同条件下发电量为日本自己研制的双胴体后弯管波力发电装置的 10 倍，获得益田善雄先生高度赞赏。中国

科学院广州能源研究所独创的灯船用后弯管波力发电装置,已于1993年10月通过鉴定,先后有3艘波力发电灯船在琼州海峡中水道、北水道和珠江口投入使用。1995年,中国科学院广州能源研究所研制成功当时世界上装机容量最大的5 kW后弯管波力发电装置(图4),装置自重19 t,1996年1月5 kW装置成功投放在珠江口桂山岛西南面海域,地点为东经113°47′24″、北纬22°06′12″,试验中记录到最大发电功率为5.7 kW^[14]。在1996年3月通过相关部门验收。

在后弯管技术研究中,我国波浪能专家梁贤光等人作出了重要贡献,见表2。1995年,梁贤光等人在文献[15]中描述了4种后弯管模型实验研究成果,这4种后弯管模型分别为双胴体后弯管浮体模型、单胴体后弯管浮体模型、圆柱形浮室后弯管浮体模型、前方后圆浮室后弯管浮体模型。研究表明前方后圆浮室后弯管浮体模型在波高0.1 m、周期1.25 s、模型质量30 kg条件下,得到最高40.5%的俘获宽度比^[15]。为改进后弯管波力发电浮标的性能,1997年,梁贤光等人在文献[16]中对6种模型(前方后圆浮室后弯管浮体、横轴半圆浮室后弯管浮体、横轴半圆加宽后弯管浮体、90°圆弧后弯管浮体、前方后圆浮室后伸型后弯管浮体(I)、前方后圆浮室后伸型后弯管浮体(II))进行了新一轮试验研究,测定了它们的气室平均输出气流功率随波周期的变化曲线,最后确定了最佳浮体“前方后圆浮室后伸型后弯管浮体(II)”。研究表明前方后圆浮室后伸型后弯管浮体(II)模型在波高0.1 m、周期1.25 s、模型质量24 kg条件下,得到最高俘获宽度比为73.3%,而且高效区周期宽度扩大^[16]。为进一步提高后弯管能量转换性能,2000年,梁贤光等在文献[17]描述了4种新的前方后圆浮室后伸型后弯管浮体模型的能量转换性能。试验研究表明,将后弯管水平段适当向后延伸,有利于波能转换效率的提高,并使特性变得较为平缓,扩大响应波周期范围^[17]。为了研究多点系泊下后弯管浮体波能转换性能、锚泊力和运动规律,以获得多点系泊下的最佳后弯管浮体模型和最佳系泊方式,梁贤光等人采用前方后圆浮室后伸型模型在水池中进行了多种工况下的性能实验。研究表明,系泊系统对后弯管浮体波能转换性能有很大影响,在波高0.1 m、周期1.271 s、3点松弛系泊下可使俘获宽度比达到150.7%^[18]。为了降低大型装置的建造成本,梁贤光等人以前期最佳模型为基础采用双联和三联方式对后

弯管波力发电浮体模型性能进行了试验研究。结果表明并联式后弯管浮体模型的最佳响应周期同单体模型基本一样,各单元浮体性能略有差异,位于中间的单元浮体性能略低于两侧的浮体,波能转换性能随浮体数量增加而下降,多点系泊使并联式后弯管装置效率提高。并联式后弯管波力发电装置采用标准化单元设计,灵活组成不同装机容量的装置,将大大降低锚泊系统、海底电缆系统的费用^[19]。2014年,刘臻等考察了气室内水柱振荡幅度与入射波波高和入射波周期之间的关系,分析了气室完全开敞、输气管添加负载以及弯管横管长度对气室内水柱振荡的影响^[20]。

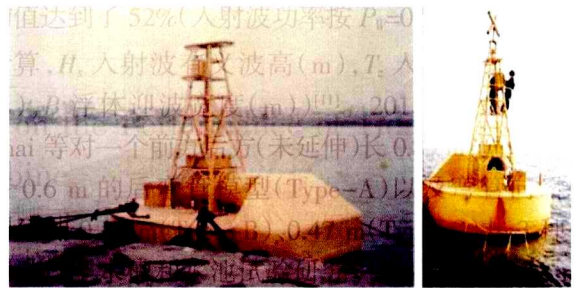


图4 我国5 kW后弯管装置(1996年)及海试

3 近期后弯管技术模型试验结果

2014年12月(从2001年到2015年时隔15 a),对模型C的能量转换效率进行了重新测试,测试水槽长56 m、宽1.2 m、水深为0.925 m,自然垂链,锚链长2.4倍水深,即222 cm,吃水24 cm,总重 $12.129+25=37.129(\text{kg})$,研究得到的结果如表3所示,最高为80.8%。该结果同文献[17]的结果相当,说明尽管时隔了10多年,尽管采用的浪高仪、差压传感器等不同,但得到了几乎一样的结果,互相进行了验证,两个时间段的测量结果是可信的。

2015年,为了进一步提高转换效率,依据一些理念对模型进行了一些改进,从传统的后圆浮室改成了后三角浮室,如表3中的模型D。大量实验表明,模型D俘获宽度比有一定的提高,最高达到了82.5%。模型D的俘获宽度比随周期的变化情况可查看表3模型D对应的图。对模型D进一步改进得到模型E,见表3中的模型E。水槽实验表明,模型E俘获宽度比最高达到了99.15%,而且有较宽的通频带(为随机波条件下得到较高的转换效率创造了条件)。

表2 我国后弯管模型能量转换性能研究进展

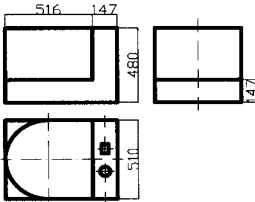
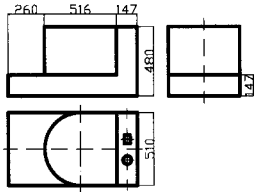
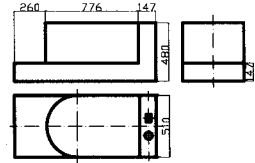
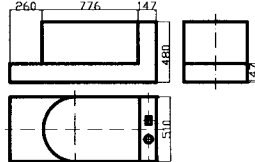
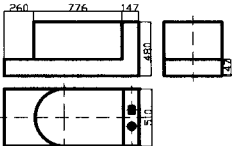
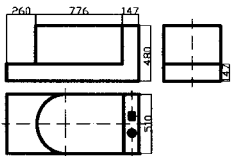
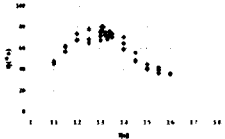

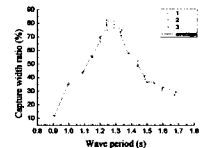
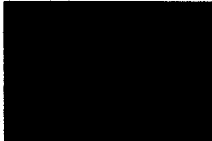
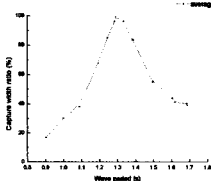
时间	模型	实验工况	最高俘获宽度比
1995年 模型A		水槽长 18 m、宽 1.2 m、水深 0.8 m, 波高 0.1 m, 模型质量 30 kg, 喷咀比为 0.01。单点前端系泊。	40.5%
1997年 模型B		水槽长 27 m、宽 1.2 m、水深 0.8 m, 波高 0.1 m, 模型质量 24 kg, 喷咀比为 0.01。单点前端系泊。	73.3%
2000年 模型C		水槽长 40 m、宽 1.2 m、水深 0.9 m, 波高 0.1 m, 模型质量 27 kg, 喷咀比为 0.01。单点前端系泊。	79.1%
2001年 模型C		水池长 200 m、宽 6 m、水深 0.9 m, 波高 0.1 m, 模型质量 27 kg, 喷咀比为 0.01。三点系泊。	150.7%

表3 最新模型实验结果

时间	模型	实验工况	最高俘获宽度比
2000 模型C		水槽长 40 m、宽 1.2 m、水深 0.9 m, 波高 0.1 m, 模型质量 27 kg, 喷咀比为 0.01。单点前端系泊。	79.1%
2014 模型C		水槽长 56 m、宽 1.2 m、水深 0.925 m, 波高 0.1 m, 模型质量 37 kg, 喷咀比为 0.01。单点前端系泊。	 80.8%
2015 模型D		水槽长 56 m、宽 1.2 m、水深 0.925 m, 波高 0.1 m, 模型质量 37 kg, 喷咀比为 0.01。单点前低端中点系泊。	 最高值 82.5%
2016 模型E	 模型长 1.186 m、宽 0.522 m、高 0.643 m, 吃水 0.38 m。	水槽长 56 m、宽 1.2 m、水深 0.92 m, 波高 0.1 m, 模型质量 46.6 kg, 喷咀比为 0.01。单点前低端中点系泊。浮力舱排开水的质量为 33.7 kg。	 最高值 99.15%

4 样机设计

基于模型 E 的实验研究结果,我们设计了一些样机并进行比对,如表 4 所示。显然,对于同一尺度和同一吃水深度的模型,由于材料密度及厚度不同,将导致模型总质量不同。本实验模型采用了木质材料,木板厚度为 7 mm,木板浮力大,导致在一定吃水条件下,模型总质量过大,达到了 46.6 kg。我们以模型浮力舱排开水的重量来计算样机的重量。模型 E 排开水的质量计算为 33.7 kg。根据相似理论,当模型放大 5 倍得到实型,那么波浪能样机发电装置的迎波宽为 2.61 m,长为 5.93 m,重量为 4.2 t

(包括压舱物的重量),在波峰周期 2.9 s、波高为 0.5 m 条件下,输出气动功率为 1.87 kW,气动功率到电的转换效率按 25%计,可输出平均电功率 0.47 kW(目前国际上气动能量到电的转换效率实海况统计数据已接近 60%^[21])。当模型放大 20 倍得到实型,那么波浪能样机发电装置的迎波宽为 10.44 m,长为 23.72 m,重量为 239.7 t,在波峰周期 5.8 s、波高为 2 m 条件下,输出气动功率为 239.7 kW,如果气动功率到电的转换效率按 25%计,可输出平均电功率 60 kW,如果气动功率到电的转换效率按 50%计,可输出平均电功率 120 kW。从模型试验到样机的多种物理和几何特性表现看,后弯管技术具有良好的经济性。

表 4 新型发电浮体特性比较

名称	模型	0.5 kW(5:1)	5 kW(10:1)	25 kW(15:1)	70 kW(20:1)	150 kW(25:1)
宽/m	0.522	2.61	5.2	7.83	10.44	13.1
长度/m	1.186	5.93	11.86	17.79	23.72	29.65
吃水深度/m	0.38	1.9	3.8	5.7	7.6	9.5
总重/t	0.033 7	4.2	33.7	113.7	269.6	526.6
设计波高/m	0.1	0.5	1	1.5	2	2.5
设计周期/s (单点系泊,锚链是水深的 1.8 倍)	1.3	2.9	4.1	5.0	5.8	6.5
气动功率(规则波下)/kW	0.006 7	1.87	21.2	87.6	239.7	523.4
发电功率/kW		0.47	5.4	22.0	60.0	130.7

注:气动功率到电的转换效率按 25%计算,目前国际上从气到电的转换效率实海况已接近 60%^[21]。

5 结论

(1) 基于后弯管振荡水柱技术发展的漂浮式波浪能装置由一个简单结构物构成,其材料、建造、运输、投放、回收、系泊实现低成本的空间大,由于没有结构物与结构物超限运动相撞问题,其可靠性高,生存能力强。后续转换机构位于水面上,便于维修,也避免了海生物附着的影响;

(2) 后弯管技术水槽规则波实验波浪能到气动功率俘获宽度比已达到 99%,水池规则波实验俘获宽度比达到 172.8%,同著名的点头鸭技术相当(转轴固定),在海洋工程上优于点头鸭技术。后弯管技术在随机波条件下从波浪能到气动功率的俘获宽度比达到 52%。

(3) 基于后弯管振荡水柱技术发展的波浪能发电装置在几何尺度、质量方面等相对目前发展的其它波浪能利用技术有优越性。

参考文献:

- [1] Ocean Energy. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN)[R]. 2011.
- [2] M E McCormick. Ocean Wave Energy Conversion[M]. Mineola, New York: Dover Publications, INC.1985.
- [3] <http://www.pelamiswave.com/>
- [4] Dalton G J, Alcorn R, Lewis T. Case Study Feasibility Analysis of the Pelamis Wave Energy Converter in Ireland, Portugal and North America[J]. Renewable Energy, 2010, 35: 443-455.
- [5] Salter S H. Wave Power[J]. Nature, 1974, 249: 720-724.

- [6] Carmichael A D. An Experimental Study and Engineering Evaluation of the Salter Cam Wave Energy Converter [R]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., Report No.MITSG 72-22, 1978.
- [7] Parmeggiani S, Chozas J F, Pecher A, et al. Performance Assessment of the Wave Dragon Wave Energy Converter Based on the Equimar Methodology[C]// Proc of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference, Southampton, UK, 2011.
- [8] Yasutaka IMAI, Kazutaka TOYOTA, et al. Duct Extension Effect on the Primary Conversion of a Wave Energy Converter "Backward Bent Duct Buoy"[R/OL] <http://www.ioes.saga-u.ac.jp/archive/15-6.pdf>.
- [9] 梁贤光, 孙培亚, 等. 多点系泊下后弯管波力发电浮体模型试验研究[J]. 海洋工程, 2001, 19(1): 70-78.
- [10] Masuda Y. Experience in Pneumatic Wave Energy Conversion in Japan [C]// Proceeding of ASCE Specialty Conference on Utilization of Ocean Waves-Wave Energy Conversion, 1986.
- [11] A G Pathak, V A Subramaniam, Masuda Y. Performance Studies on a Scaled Model BBDB Under Regular and Random Waves[C]// Proceedings ISOPE, 1999: 139-141.
- [12] Yasutaka Imai, Kazutaka Toyota, Shuichi Nagata, et al. An Experimental Study on Generating Efficiency of a Wave Energy Converter "Backward Bent Duct Buoy"[C]// The 9th European Wave and Tidal Energy Conference, Southampton, UK 2011.
- [13] Rea J, Kelly J, Alcorn R, et al. Development and Operation of a Power Take-off Rig for Ocean Energy Research and Testing[C]// Proc 9th European Wave Tidal Energy Conf, Southampton, 2011.
- [14] 梁贤光, 蒋念东, 王伟, 等. 5 kW 后弯管波力发电装置的研究[J]. 海洋工程, 1999, 17(4): 55-63.
- [15] 梁贤光, 王伟, 蒋念东, 等. 5 kW 后弯管波力发电浮标模型性能的试验研究[J]. 新能源, 1995, 17(6): 4-10.
- [16] 梁贤光, 王伟, 杜斌, 等. 后弯管波力发电浮标模型性能试验研究[J]. 海洋工程, 1997, 15(3): 77-86.
- [17] 梁贤光, 孙培亚, 王伟, 等. 后弯管波力发电浮体模型试验研究[J]. 新能源, 2000, 22(2): 10-15.
- [18] 梁贤光, 孙培亚, 等. 多点系泊下后弯管波力发电浮体模型试验研究[J]. 海洋工程, 2001, 19(1): 70-78.
- [19] 梁贤光, 孙培亚. 并联式后弯管波力发电浮体模型性能试验研究[J]. 海洋工程, 2003, 21(3): 83-88.
- [20] 刘臻, 肖翔, 吕小龙, 等. 后弯管式波力发电装置气室结构的试验研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2014, 2: 106-111.
- [21] Yasutaka IMAI, Kazutaka TOYOTA, et al. Duct Extension Effect on the Primary Conversion of a Wave Energy Converter "Backward Bent Duct Buoy"[R/OL]. <http://www.ioes.saga-u.ac.jp/archive/15-6.pdf>.
- [22] 梁贤光, 孙培亚, 等. 多点系泊下后弯管波力发电浮体模型试验研究[J]. 海洋工程, 2001, 19(1): 70-78.

Research on the Backward Bent Duct Buoy Wave Energy Conversion Technology and Prototype Design

WU Bi-jun^{1,2,3}, LI Meng^{1,2,3,4}, WU Ru-kang^{1,2,3,4}, CHENG Tian-xiang^{1,2,3,4}

1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China;
2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: This paper summarizes the backward bent duct buoy (BBDB) wave energy conversion technologies utilized across the world. Historical data show that the maximum capture width ratio (CWR) reaches 79.1% in 2D regular tank experiments and 172.8% in 3D regular tank experiments. The relatively wide pass-band width is also present in 2D and 3D regular experiments. The maximum average CWR is 52% in 3D random experiments. The BBDB technology shows high wave power conversion efficiency. Based on previous studies, through improvement of the BBDB prototype and 2D regular experiments, it is found that the maximum CWR of the new model is 99%, far higher than the best historical literature value 79.1%. Prototype design indicates that the wave energy converter based on the BBDB technology is economically outstanding.

Key words: wave energy; backward bent duct buoy (BBDB); capture width ratio (CWR)