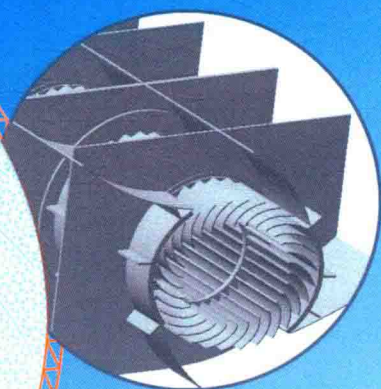
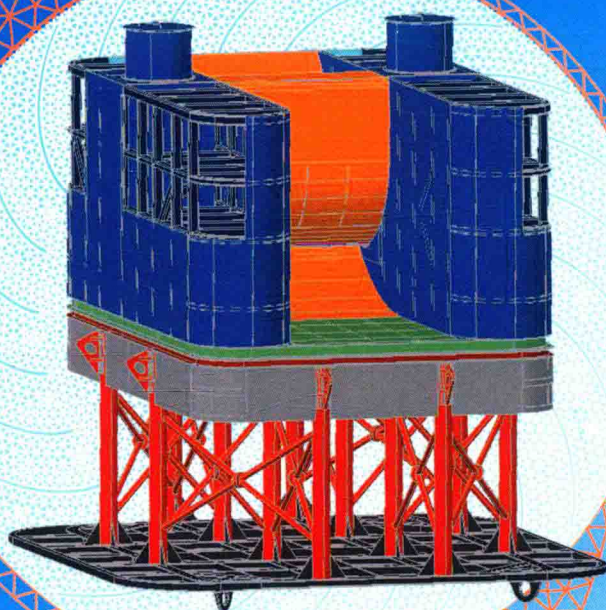


郭晓晨 谭水位 著

双击式水轮机波能发电装置 研发理论与实践



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

双击式水轮机波能发电装置 研发理论与实践

郭晓晨 谭水位 著

常州大学图书馆
藏书章



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

波能是一种巨大的能源资源,但目前大部分尚未被开发,因此波能的开发研究一直是海洋可再生能源研究的一个重要课题。本书针对波浪随机波动的不确定性和恶劣海洋环境等不利因素,深入研究了双击式水轮机转子和加速流道组成的波能发电装置,提出了宽频带波能捕获理论。同时,在此基础上研究流道水体的振幅和相位特性,阐述阻尼对波能捕获效率的影响规律。通过物理模型试验和数值模拟分析,对所提出的理论进行了验证,对波能发电装置结构参数进行了优化研究。最后,研制了工程样机,在海上进行了实海况发电测试。

本书可为其他海洋可再生能源装置的研究提供参考,还可供相关领域的工程技术人员、管理人员及高等院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

双击式水轮机波能发电装置研发理论与实践 / 郭晓晨, 谭水位著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-5170-6083-3

I. ①双… II. ①郭… ②谭… III. ①双击式水轮机—波浪能—水力发电—装置 IV. ①TK735②TM612

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第288729号

书 名	双击式水轮机波能发电装置研发理论与实践 SHUANGJISHI SHUILUNJI BONENG FADIAN ZHUANGZHI YANFA LILUN YU SHIJIAN
作 者	郭晓晨 谭水位 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.75印张 279千字
版 次	2017年11月第1版 2017年11月第1次印刷
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

FOREWORD

全世界波能的理论估算值为 10^9 kW 量级, 我国沿海波浪年平均功率理论值约为 $1.3 \times 10^7 \text{ kW}$ 。波能如此巨大, 存在如此广泛, 自古就吸引着沿海的能工巧匠们, 想尽各种办法, 企图驾驭海浪为人所用。我国东临太平洋, 海域辽阔, 南北纵跨三个气候带, 领海总面积约 470 万 km^2 , 海岸线曲折而漫长, 大陆岸线长达 18000km, 岛屿岸线长达 14000km。这种优越的自然地理条件, 决定了我国波能资源丰富且开发潜力巨大。

在 18 世纪后期就有波能开发利用的专利, 现代波能利用的研究主要源于 20 世纪 70 年代出现的石油危机。波能发电装置种类繁多, 根据工作原理可分为点头鸭式、摆式、振荡水柱式、筏式、直驱水轮机式、漫溢式和振荡浮子式等。大部分的装置还处于实验室研发阶段, 只有几种装置在进行实海况测试。其中较著名的是英国 500kW 振荡水柱式波能发电装置 (Limpet) 和葡萄牙 750kW 筏式波能发电装置 (海蛇号)。我国在山东省即墨市大管岛研建了 30kW 摆式波能发电装置, 在大万山岛建成了 3kW 振荡水柱式波力电站, 在广东汕尾建成了 100kW 振荡水柱式波力电站, 后来又研制了一批 10W 振荡浮子式波能发电装置。现有波能发电技术的不足在于波能捕获的效率低, 被转换的二次能不稳定, 以及对海域环境的适应性差等。

受我国海洋局的委托, 2010 年年底中国水利水电科学研究院承担了直驱水轮机式波能发电装置的海洋可再生能源专项资金项目, 并开展了研究。本研究针对我国波能密度小、周期短的特点, 深入研究了双击式水轮机转子和加速流道组成的波能发电装置, 提出宽频带波能捕获理论。在此基础上研究流道水体的振幅和相位特性, 阐述阻尼对波能捕获效率的影响规律。通过物理模型试验和数值模拟分析, 对所提出的理论进行了验证, 对波能发电装置

结构参数进行了优化研究，并成功研发了一套新型、高效、结构简单的波能发电装置——横轴转子水轮机波能发电系统。本书是对上述所有研究成果的归纳与总结。

本书的完成得到了国家海洋局海洋可再生能源专项资金项目(GHME2010ZC02)的资助，在此谨向提供上述资金资助的单位表示感谢。

由于作者学识有限，书中难免存在缺陷和疏漏之处，敬请读者批评指正。

作者

2017年11月

目录

CONTENTS

前言

第 1 章 波能发电概述	1
1.1 波能简介	1
1.2 波能发展概况	4
1.3 波能利用的优点	5
1.4 波能发电装置的分类	6
1.5 波能控制系统研究	18
1.6 波能发电的关键技术和难题	18
1.7 研究内容	20
1.8 研究方案	20
1.9 本章小结	22
第 2 章 横轴转子波能发电系统水体振荡理论分析	23
2.1 水体振荡的数学模型	23
2.2 宽频带波能捕获理论	25
2.3 本章小结	26
第 3 章 固定式装置物理模型试验结果分析	27
3.1 引言	27
3.2 物理模型试验原理	29
3.3 波能的计算方法及装置转换效率计算	32
3.4 试验概况	33
3.5 模型设计	34
3.6 比尺为 1 : 2.5 模型的试验结果及分析	36
3.7 进、出口水位幅值和相位的优化分析	58
3.8 1 : 5 比例模型的试验结果分析	63
3.9 不同负载电阻对系统波能捕获效率的影响	70
3.10 阻尼对装置波能捕获的影响分析	73
3.11 本章小结	74
第 4 章 基于数值波浪水槽的装置水动力学特性分析	75
4.1 引言	75
4.2 VOF 方法简介	75

4.3	滑移网格	76
4.4	转子动态运动过程描述	79
4.5	湍流模型的选择	79
4.6	Fluent 软件中 VOF 模型的应用原则	80
4.7	基于 Fluent 波浪水池数值建模	81
4.8	不同叶片数对系统波能捕获效率的影响	84
4.9	不同波高对系统波能捕获效率的影响	86
4.10	转子直径为 250cm 时, 周期与平均功率、效率的关系	89
4.11	阻尼对功率的影响	90
4.12	本章小结	91
第 5 章	漂浮式装置物理模型试验研究	93
5.1	漂浮式波能发电装置在波浪中的运动分析	93
5.2	漂浮式波能发电装置垂荡动力模型	94
5.3	漂浮式装置物理模型试验	96
5.4	本章小结	102
第 6 章	波能发电装置应力分析与结构设计	104
6.1	装置的结构设计	105
6.2	装置浮箱的计算	107
6.3	装置浮力	110
6.4	装置所受波浪力的计算	113
6.5	装置上部有限元分析	115
6.6	装置侧面受力有限元分析	120
6.7	装置背面受力有限元分析	122
6.8	装置阻尼盘受力分析	124
6.9	装置整体受力分析	126
6.10	本章小结	128
第 7 章	陆地试验报告	129
7.1	试验装置介绍	129
7.2	试验步骤	132
7.3	2013 年试验成果	132
7.4	2014 年试验成果	138
7.5	不同装置加工精度对样机发电的影响分析	142
7.6	本章小结	147
第 8 章	工程样机实海况试验	148
8.1	试验大纲	148
8.2	波能计算方法	156
8.3	第一次实海况试验数据分析	164
8.4	第二次实海况试验数据分析	168

8.5 本章小结	172
第9章 结语	173
9.1 振荡水体数学模型的理论分析	173
9.2 数值波浪水槽对装置进行流场数值模拟的结论	173
9.3 室内物理模型试验的结论	173
9.4 工程样机的陆地试验	174
9.5 工程样机的实海况试验	174
9.6 对“横轴转子水轮机波能发电系统”研究的评价	175
参考文献	176

第1章 波能发电概述

1.1 波能简介

波能是指海洋表面波浪所具有的动能和势能。波浪的能量与波高的平方、波浪的运动周期以及迎波面的宽度成正比。波能是海洋能源中能量最不稳定的一种能源。波能是由风把能量传递给海洋而产生的,它实质上是吸收了风能而形成的。能量传递速率和风速有关,也和风与水相互作用的距离(即风区)有关。水团相对于海平面发生位移时,使波浪具有势能,而水质点的运动,则使波浪具有动能。储存的能量通过摩擦和湍动而消散,其消散速度的大小取决于波浪特征和水深。深水海区大浪的能量消散速度很慢,从而导致了波浪系统的复杂性,使它常常伴有局地风和几天前在远处产生的风暴的影响。波浪可以用波高、波长(相邻两个波峰间的距离)和周期(相邻两个波峰间的传播时间)等特征来描述。

海浪的破坏力大得惊人。扑岸巨浪曾将几十吨的巨石抛到20m高处,也曾把万吨轮船举上海岸。海浪曾把护岸两三千吨重的钢筋混凝土构件翻转。许多海港工程,如防浪堤、码头、港池,都是按防浪标准设计的。

在海洋上,波浪中再大的巨轮也只能像小木片那样上下漂荡。大浪可以倾覆巨轮,也可以把巨轮折断或扭曲。假如波浪的波长正好等于船的长度,当波峰在船中间时,船首船尾正好是波谷,此时船就会发生“中拱”;当波峰在船头、船尾时,中间是波谷,此时船就会发生“中垂”。一拱一垂就像折铁条那样,几下子便把巨轮拦腰折断。20世纪50年代就发生过一艘美国巨轮在意大利海域被大浪折为两半的海难。此时,有经验的船长只要改变航行方向,就能避免厄运,因为航向改变即改变了波浪的“相对波长”,就不会发生轮船的“中拱”和“中垂”了。

1.1.1 波能开发

波浪能量如此巨大,存在如此广泛,自古就吸引着沿海的能工巧匠们,想尽各种办法,企图驾驭海浪为人所用。

台风导致的巨浪,其功率密度可达每米迎波面数千千瓦,而波能丰富的欧洲北海地区,其年平均波浪功率也仅为20~40kW/m,中国海岸大部分的年平均波浪功率密度为2~7kW/m,功率密度较低。

全世界波能的理论估算值为 10^9 kW量级。利用中国沿海海洋观测台站资料估算得到,中国沿海理论波浪年平均功率约为 1.3×10^7 kW。但由于不少海洋台站的观测地点处于内湾或风浪较小的位置,故实际的沿海波浪功率要大于此值。其中浙江省、福建省、广东



省、山东省和台湾省沿海为波能丰富的地区。

将波能收集起来并转换成电能或其他形式能量的波能发电装置有设置在岸上的和漂浮在海里的两种。按能量传递形式分类有直接机械传动、低压水力传动、高压液压传动、气动传动 4 种。波能发电装置五花八门，不拘一格，有点头鸭式、波面筏式、波力发电船式、环礁式、整流器式、海蚌式、软袋式、振荡水柱式、多共振荡水柱式、波流式、摆式、结合防波堤的振荡水柱式、收缩水道式等十余种。

1.1.2 我国波能资源的分布

根据 1989 年完成的《中国沿海农村海洋能资源区划》利用波浪观测资料计算统计，全国沿岸波能资源平均理论功率为 12.85GW。需要特别指出的是，全国沿岸海域还有很多著名的大浪区，因迄今尚无实测资料，故无法把这些资源计算在内。其中以台湾省沿岸的波能资源最为丰富，为 4.29GW，占全国总量的 1/3；其次是浙江省、广东省、福建省和山东省，在 1.61~2.05GW 之间，合计为 7.06GW，占全国总量的 55%，其他省（自治区、直辖市）沿岸则较少，仅在 $144 \times 10^3 \sim 563 \times 10^3 \text{ kW}$ 之间（表 1.1.1）。特别需要指出的是，全国沿岸波能功率密度最高的区段是浙江中部（大陈岛）6.29kW/m、台湾岛南北两端（南湾和富贵角至三貂角）6.21~6.36kW/m、福建海坛岛以北（北礮和台山）5.32~5.51kW/m、渤海海峡（北隍城）7.73kW/m 和西沙地区沿岸 4.05kW/m，这些地区年平均波高大于 1m，平均周期多大于 5s，是全国沿岸波功率密度较高，资源储量最丰富的地区；其次是浙江南部和北部 2.76~2.82kW/m、广东东部（遮浪）3.62kW/m、福建海坛岛以南 2.25~2.48kW/m、山东半岛南部沿岸 2.23kW/m，这些地区波功率密度中等，资源储量也较丰富。

表 1.1.1 中国沿岸波能资源区划 ($H_{1/10}$) 单位: m

省 (自治区、直辖市)	分 区				波功率 /MW
	一类区 $H_{1/10} \geq 1.3$	二类区 $0.7 \leq H_{1/10} < 1.3$	三类区 $0.4 \leq H_{1/10} < 0.7$	四类区 $H_{1/10} < 0.4$	
台湾	周围各段				4291.29
浙江	大陈地区	嵎山*、南麂 区段*			2053.40
广东	遮浪区段	云澳*、表角*、 荷包、博贺、 碓洲区段	下川岛（南澳湾） 附近、雷州 半岛西岸		1739.50
福建	台山、北礮*、 海坛区段	流会、崇武、 平海、围头区段	东山区段		1659.67
山东		北隍城*、千里 岩区段*	龙口、小麦岛、 石臼所区段	成山头、石岛 区段	1609.78
海南	西沙（永兴岛） 附近*	铜鼓咀、莺歌海*、 东方区段	玉包、榆林区段		562.77
江苏			连云港（东西连岛） 附近	吕泗区段	291.25

续表

省 (自治区、直辖市)	分 区				波功率 /MW
	一类区 $H_{1/10} \geq 1.3$	二类区 $0.7 \leq H_{1/10} < 1.3$	三类区 $0.4 \leq H_{1/10} < 0.7$	四类区 $H_{1/10} < 0.4$	
辽宁			大鹿岛、芷锚湾、 老虎滩区段	小长山、鲛鱼 圈区段	255.07
上海		佘山、饮水船 区段*			164.83
河北			秦皇岛、塘沽区段		143.64
广西			涠洲、白龙尾区段	北海区段	72.02

* 为波能开发条件较好的区段, $H_{1/10}$ 为十分之一大波, 即波列中按波高大小排列后, 取前十分之一波的平均波高。

从表 1.1.1 可以看出, 波能资源大多分布在我国的渤海及东南沿海地区。显然, 研究开发波能可为缓解我国沿海地区能源短缺提供一条新的途径。波能属于取之不尽、用之不竭的清洁能源。波能的大规模利用, 可以缓解我国常规能源紧缺、降低温室气体排放。在海洋开发过程中, 波能是包括常规能源在内的所有能源中最廉价的能源。波能还是海洋能中分布最广泛的能源^[8]。发展波能, 还可以促进我国的海洋开发。

尽管我国的波能密度远小于欧洲等其他波能丰富地区, 但与其他可再生能源比, 波能仍属于能流密度较大的可再生能源, 达到 $2 \sim 5 \text{ kW/m}$ 。由于具有能流密度高的特点, 波能在技术上容易实现小型化, 有助于海洋开发和海防建设^[9]。该技术研究的意义还在于我国海岸线长, 岛屿众多, 海洋能源蕴藏丰富, 波能的利用具有资源保证。其次, 我国 90% 以上的波能资源分布在常规能源缺乏的沪浙闽粤沿岸, 可为缓和沿海以及岛屿电力紧缺提供宝贵的能源补充^[7,9]。波能的有效利用对发展沿海和海岛区域经济、巩固国防以及维护祖国海洋权益的意义不言而喻。波能的利用体现了国家的需求。

由表 1.1.1 可知, 就浙江省而言, 其波能资源在内陆省份中最为丰富, 具备较好的开发资源条件, 但因技术瓶颈等原因, 这些宝贵资源基本处于未开发状态, 至今尚未有任何形式有效的波能发电装置在浙江省海域范围内发电的报道。由于浙江省工农业发展兴旺, 电力需求量大, 而省内煤炭等化石资源匮乏, 大型水电站数量有限, 电力供应紧张, 据浙江省经济贸易委员会和统计局联合发布的《2005 年浙江省能源与利用状况》中提到, 2005 年浙江全省总发电量 1456 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 从外省共调入电量 203 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$; 电力最大负荷缺口约 680 万 kW , 而且浙江省岛屿众多, 海上供电就更为困难。因此开发可再生能源装置关键技术研究, 可为缓解浙江省能源短缺与沿海和岛屿区域的经济社会发展开辟一条可再生能源利用的新途径。

1.1.3 波能开发的意义

1. 经济效益

随着陆地资源的日益消耗, 海洋开发必将成为 21 世纪的热点, 波能开发利用的力度将日益增大, 这就要求波能发电装置具有良好的性能、低廉的成本, 易于实现批量生产, 形成海洋波能发电场, 才能够满足不同客户的需求, 并具有广阔的产业化前景。

目前大陆附近海岛柴油发电成本为 3 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，在距大陆 30km 以上的岛屿，电力成本已经超过 3 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。在西沙群岛和南沙群岛，电力的成本远高于上述价格。因此，若技术成熟后，装置的年发电量 0.65 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，以电价 3 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ 计，一套装置年盈利 1.95 万元，在不便于常规能源供应的海域，电价高于 5 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，经济效益更高。

2. 社会效益

我国大部分有人居住的海岛不通电网，需要靠船运的方式解决电力和淡水供应问题。运送到海岛上的柴油和淡水成本很高。在遇到恶劣海况时，电力和淡水供应无法保证。

一旦波能发电装置研制成功，可为岛上电力和淡水供应提供一个重要的手段，利用海岛周围丰富的波浪资源可以发电，多余的电力可以进行海水淡化，为海岛提供电力和淡水，波能发电装置不占用岛屿上宝贵的土地资源，装机容量不受限制，在面积较小的岛屿上其优势特别突出。

海岛具有宜人的气候、特殊的地理环境、清新的空气、4S [阳光 (Sun)、沙滩 (Sand)、大海 (Sea)、海鲜 (Seafood)] 资源、独有的植物资源，有些还具有丰富的人文资源，对旅游者具有较大的吸引力，但是由于岛上电力及淡水供应问题，限制了岛上旅游业的发展。采用波能发电装置为海岛提供电力和淡水，其优势表现在：①装置投放在海上，不会对人们的视觉产生障碍，不破坏原有的自然景观，不挤占农田及自然植被用地；②部分甚至全部替代柴油机，可以降低岛上机械噪声和废弃物的排放量，对于改善岛屿的环保效益非常明显。

3. 军事价值

岛礁在维护国家海洋权益中占据着非常重要的地位。我国西沙、南沙一些岛礁面积非常小，守军十分分散，后勤保障靠船运方式解决。这些岛礁远离大陆，电力和淡水成本十分昂贵，守卫部队生活条件十分艰苦。在恶劣海况下，船运方式无法保证供应，无疑影响岛屿的守卫。采用波能发电装置提供电力和淡水，具有目标小，易隐蔽，不易受到攻击的特点，可以灵活地布置在岛礁的周围，波能发电会源源不断地为岛礁提供电力，保障驻军的电力和淡水供应。有了这种装置可以大大提高岛上驻军的生活质量，对扩大海疆的守卫范围具有重要的意义。因此，这种装置在军事上有重要的意义。

1.2 波能发展概况

海浪是一个巨大的、大部分未开发的能源资源，从海浪中提取能量的潜力是相当大的。通过这一领域的研究，可以达到利用可再生能源的目标，但相比其他可再生能源开发技术，波能开发技术还远未成熟。这里介绍波能利用的一般状况，并对当前的海浪能量转换 (WEC) 技术的设备类型进行评估。波能利用系统由三部分组成：波能捕获系统、能量传递系统、发电系统。波能捕获系统的关键是波能捕获效率的研究。而能量传递系统和发电系统主要是能量转化效率 and 如何得到稳定电力的研究。本章主要介绍能量捕获系统，然后简要介绍一下控制策略。

在 18 世纪后期就有波能开发利用的专利，现在波能利用的研究主要源于 20 世纪 70 年代出现的石油危机。由于全球气候的变化和 CO_2 排量的增加，人们更加关注如何利用



可再生能源来发电，从而推动了这一领域的发展。

据估计全球可再生波能资源为 2TW ($1\text{TW}=10^{12}\text{W}$) 左右，这里说的是波能再生率，Heronemus 估计的是 2.2TW ，而 Isaacs 和 Seymour 估计的是 2.5TW 。

王传崑利用 1960—1969 年中国海洋站的年、月平均波高和平均周期，计算了中国海岸沿岸各站（各省若干代表站）的年平均波功率密度，并得到全国沿岸理论波功率为 70MkW 。中国 2010 年底的发电装机容量为 9.5 亿 kW ，波能功率差不多占总发电装机功率的 10%。

在几篇关于波能发电装置的综述性文献中涉及几个概念性的装置设计，大部分的装置还处于研发阶段，只有几个装置在进行大范围实海况测试，其中最著名的是英国 500kW Limpet 振荡水柱式波能发电装置（图 1.2.1），2000 年 11 月在苏格兰艾拉岛建成。装置的能量采集系统由三个气室和两套威尔斯透平发电机机组构成，发电机的单机装机容量为 250kW ，透平的直径为 2.6m 。发电上网后，为 400 户当地居民供电，稳定性较好。



图 1.2.1 Limpet 振荡水柱式波能发电装置

2008 年 9 月，另一个商业化的波能发电装置“海蛇号”开始在葡萄牙北部工作。由英国海蛇波能发电公司（原名海洋动力传递公司 Ocean Power Delivery）研制。

“海蛇号”波能发电装置是离岸漂浮式的，由若干个圆柱形钢壳结构单元（直径 3.5m ）通过两自由度铰接单元铰接而成，每个铰接单元相当于一个万向节，每个铰接单元的中心有一个复杂的能量转换系统，包含四个可以水平和垂直运动的液压缸，在波浪力的驱动下，液压缸相当于泵，将波能转换成液压能，进而驱动液压马达带动发电机，最后将波能转换成电能。液压缸和液压马达之间安装有蓄能器，隔断液压缸和液压马达之间的直接连接，能够达到平稳液压油的压力和得到稳定的电流的目的。装置中应用的所有元件都是工业上的成品件。“海蛇号”装置实际为筏式波浪能装置的变种。“海蛇号”装置装机容量为 750kW ，放置在水深为 $50\sim 60\text{m}$ 深的海面上。

2004 年 8 月 23 日做了一周实海况发电试验。2006 年开始在葡萄牙建造世界上第一个波能发电场——阿古萨多拉波能发电场，第一期发电场由 3 个“海蛇号”构成，总装机容量 2.25MW 。2008 年建成，装置运行正常。

2010 年初，美国《福布斯》杂志评出了全球最大的可再生能源发电项目，葡萄牙阿古萨多拉电厂为其中之一。

1.3 波能利用的优点

波能作为一种可再生能源，相比于其他可再生能源（风能、太阳能），具有以下优点。

(1) 波能在可再生能源中具有最高的能量密度。波浪由风产生, 而风由太阳能产生。太阳能在水平平面上单位面积的平均能量密度是 $0.3\text{kW}/\text{m}^2$, 而在垂直波浪传播方向上的单位面积的平均波能密度为 $2\sim 3\text{kW}/\text{m}^2$ 。

(2) 波能开发利用中产生很小的负面环境影响。Thorpe 分析了波能开发对环境的负面影响, 并且给出了近岸波能利用装置在一个生命周期内排放量的估计。在一般情况下, 离岸波能利用装置具有更低的潜在环境影响。

(3) 波能在年度内的分布, 与人类活动的电力需求相适应。也就是当人类需求更多电能时, 正是波能较丰度的季节。

(4) 波浪传输很长的距离, 而其能量的损失却很小。如在惯常的西风作用下, 大西洋西侧的风暴很容易就传播到欧洲西海岸。

(5) 据文献报道, 波能利用设备可以在 90% 时间内运行, 而风能利用设备和太阳能利用设备只有约 20%~30% 的时间可以运行。

1.4 波能发电装置的分类

波能发电装置的种类繁多, 有关波能发电装置的发明专利超过 1500 种, 大部分的发明专利在日本及北美洲和欧洲申请。但这些装置大部源于几种基本原理: 利用物体在波浪作用下的振荡和摇摆运动; 利用波浪压力的变化; 利用波浪的沿岸爬升将波能转换成水的势能等。

波能利用装置可按照所处的位置、类型和运行方式进行分类。

1.4.1 按位置分类

(1) 岸线波能发电装置。岸线波能利用装置具有距离电网近、容易维护的优点, 不需要锚固和深水电缆。由于在浅水中波浪会变形, 所以在极端天气下, 岸线波能利用装置不易被损坏。但也有缺点, 就是浅水中的波能密度较低, 这一方面可能因为近岸地形具有聚波能力而得到改善。另外, 对岸线装置来说, 潮汐造成的水位变化对装置的应用也是一个问题, 因为装置的淹没水深一般会影响到装置的运行效率。而且根据岸线装置的特点, 其对岸边的地形和地质也有特殊的要求, 还要考虑如何保存海岸风光。所以岸线波能利用装置很难做到大规模量产。

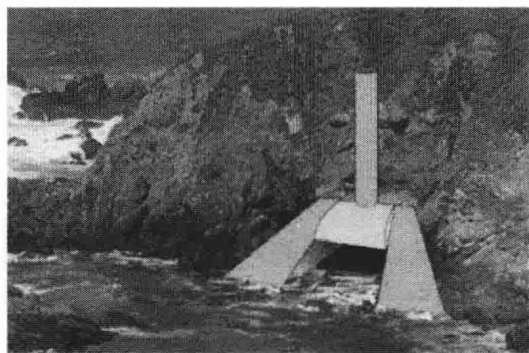


图 1.4.1 振荡水柱式装置示意图

三种主要的波能利用装置为: 振荡水柱式 (OWC) (图 1.4.1)、内聚水道式 (TAPCHAN) (图 1.4.2、图 1.4.3)、岸式摆式 (PEDULOR) (图 1.4.4、图 1.4.5)。

(2) 近岸波能发电装置。近岸波能发电装置是指装置位于相对浅的海水中。浅水一般是指水深小于波长 $\frac{1}{4}$ 的情况。

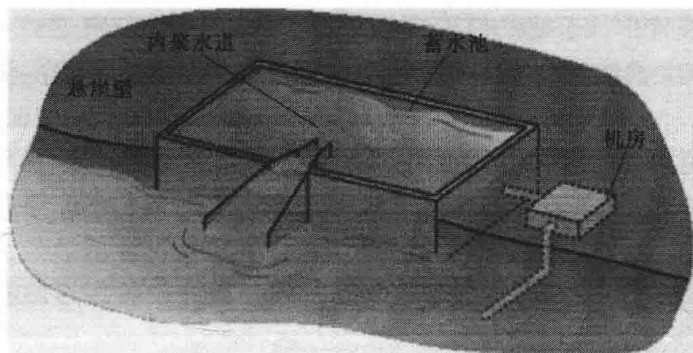


图 1.4.2 内聚水道式装置示意图



图 1.4.3 内聚水道式装置工作图

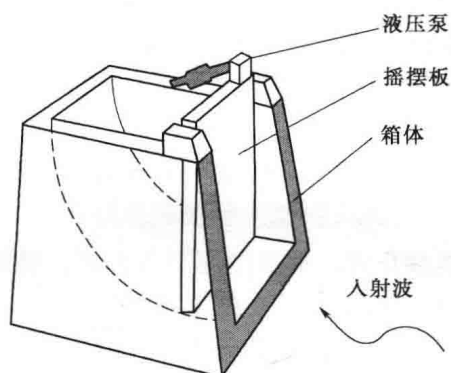


图 1.4.4 岸式摆式装置示意图



图 1.4.5 岸式摆式装置工作图

近岸波能发电装置一般安装在海床上，因此这些装置较漂浮式波能利用装置稳定。同岸线装置一样，由于位于浅水区，波能密度较低，限制了装置的波能捕获能力。

(3) 离岸波能发电装置。离岸波能发电装置有不同的定义，有人认为是数十米，还有人认为是 $\frac{1}{3}$ 波长。离岸波能发电装置的好处是由于深水中的波能存量较大，所以装置能够捕获较多的能量。然而，离岸装置不易制造和维护。由于需要应付极端天气情况，装置需要超标准设计以应对这种情况，所以增加了装置的造价。尽管如此，有人认为离岸波能发电装置可以获得较多的波能，在经济上还是划算的。

值得注意的是波能主要集中在海水的表面。接近 95% 的波能位于海水表面和水下 $\frac{1}{4}$ 波长范围内。

1.4.2 按类型分类

尽管波能发电装置相关的专利有很多,但是按其对波流影响的原理划分,可以划分为三类。

(1) 消耗式。消耗式波能发电装置平行于波浪传播的方向,骑在波浪上。其典型的一个例子是“海蛇号”(图 1.4.6)。该类波能发电装置仅能吸收一部分入射能量,背浪一侧仍有绕射的波浪。

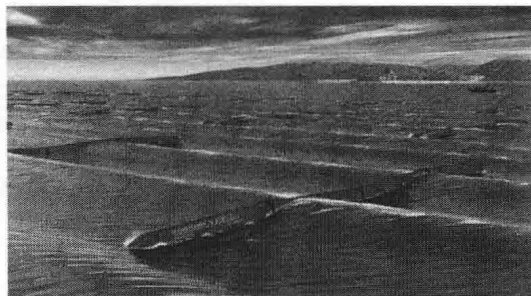


图 1.4.6 “海蛇号”波浪场示意图

(2) 截止式。截止式波能技术巧妙利用自身的几何形状避免了波能向后辐射,降低了兴波阻力,出现了许多构思设计精妙的波能发电装置,如点头鸭装置、聚波围堰装置和摆式装置等。

(3) 点吸收式。点吸收式波能发电装置相对于入射波来说具有体积小特点。可以是漂浮结构,随着波浪上下起伏,也可以是水下结构,淹没在水下,利用波浪起伏造成的压力差来工作。点吸收式(也称振荡浮子式)波能技术近年来发展很快,该技术采用浮子俘获波能,通过与浮子连接的液压装置或机械装置将波能转换成某种机械能,再通过发电机转换成电能或通过其他设备制造淡水或冰。

1.4.3 按运行方式分类

按装置的工作原理,有消耗型筏式、点头鸭型截止式、聚波围堰型截止式、摆式截止型、摆式消耗型、漂浮摆式消耗型、振荡浮子式点吸收型、振荡水柱型、直驱水轮机式等。

(1) 消耗型筏式波能发电装置。1996 年建成的英国麦凯布波浪泵(MWP)波能发电装置(图 1.4.7)由三个成直角的钢质浮筒构成,通过横梁铰链在一起,总长度 40m,具有自动朝向来波的功能。该装置可驱动海水淡化系统获得可饮用的纯净水,或驱动发电机发电。

消耗型筏式波能发电装置的优点是具有较好的整体性,抗波浪冲击能力较强,具有较好的能量传递效率,发电稳定性好,但其长度方向顺浪布置,迎波面较小,与垂直于波浪方向同等尺度的波能装置比,筏式装置吸收波能的能力较为逊色,单位价值材料所获取的能量较小,导致实体尺寸过大。

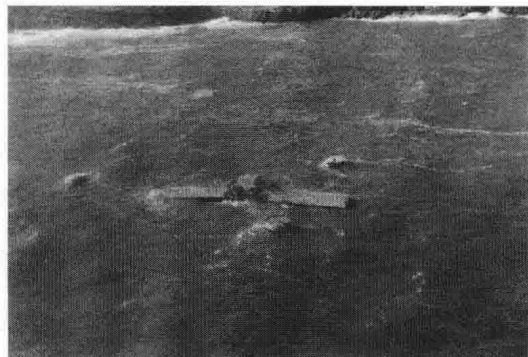


图 1.4.7 麦凯布波浪泵

另外,这种装置是靠波浪坡度的变化来工作的,它的问题是波浪的波长必须与浮筒长



度匹配(图 1.4.6)或中间浮体正好位于波峰或波谷上(图 1.4.7)麦凯布波浪泵。在波长很长的波浪中,波陡度很小,四个浮筒一起上下运动,就难以利用坡度变化来发电;对于小浪,每个浮筒受力差不多,也不能形成有效的角度变化。在带负载时,由于液压油的不可压缩性,其关节部分会“僵硬”,关节处遇到波谷或波峰形成角度时,海蛇往往不会弯曲,而是通过翻滚来逃避发电,只能把液压降得低一些,而这又降低了输出功率,还有一个就是应力集中的问题,每个圆筒长达几十 m,这样会形成很大的弯矩,就不得不靠增加材料强度来提高抗风抗浪能力,增加成本。

2008 年 9 月在葡萄牙里斯本外海 5km 建设的“海蛇号”波力电站,经过 3 年开发之后,运行几个星期就问题不断,目前已经宣布失败,功亏一篑。

(2) 点头鸭型截止式波能发电装置。英国爱丁堡大学索尔特教授于 1974 年在他的论文中介绍了一种独特的波能发电方法,如图 1.4.8 所示,这种装置的形状和运行特性酷似鸭的运动,因而称其为“点头鸭”。该装置用浮子绕中心轴线的纵摇代替升降,利用入射波的运动使得动压力有效地推动鸭身绕轴线转动,此外,流体静压力的改变也使接近鸭嘴的浮体部分作上升和下沉的往返运动,由于这两种压力所产生的运动是同相位的,在波浪运动的一个周期内,点头鸭将动能和位能二者同时通过液压装置转化出去,然后再由液压/电力系统把动能转化成电能。在理想运行条件下,点头鸭效率接近 90%,在不规则波作用下,系统的效率要低很多。中国科学院广州能源研究所研制的一座 300W 点头鸭式波能发电装置,采用振荡浮子装置的动力摄取技术,以求降低点头鸭式装置的成本。

索尔特点头鸭虽然是一种有效的波能发电装置,但是它也有明显的缺点:一方面它结构复杂又有许多部件暴露在海水中,易发生腐蚀卡死等现象,可靠性不高;另一方面,索尔特点头鸭长条形的浮式结构太脆弱,在风浪大的时候根本无法抵抗波浪的破坏力,抗浪性较差。

(3) 聚波围堰型截止式波能发电装置。聚波围堰型截止式波能发电技术依靠逐渐收缩的波道俘获波能,使波高在逐渐收缩的波道中放大,直到波浪越过波道顶进入高于海面的水库。进入水库的水的势能通过水轮发电机转换成电能。这种转换方法的优点在于波能转换为水的势能的过程中没有活动的部件,可靠性好,维护费用低,且出力稳定。

最早的聚波围堰型波能发电装置是挪威波能公司于 1986 年建造的一座装机容量为 350kW 的聚波围堰电站(图 1.4.9)。其围堰波道开口约 60m 宽,经过呈喇叭形逐渐变窄

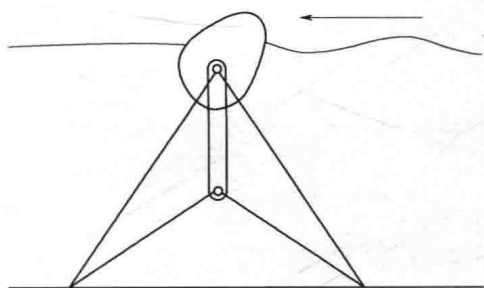


图 1.4.8 点头鸭型截止式波能发电装置示意图



图 1.4.9 挪威 350kW 聚波围堰电站