



装备科技译著出版基金

ISWEC: a Gyroscopic Wave Energy Converter

基于惯性技术的 波浪能转换器

【意大利】Giovanni Bracco 著

刘丽 周宇英 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

基于惯性技术的 波浪能转换器

ISWEC: a Gyroscopic Wave Energy Converter

[意大利] Giovanni Bracco 著
刘丽 周宇英 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-201 号

图书在版编目(CIP)数据

基于惯性技术的波浪能转换器 / (意) 布拉科 (Bracco, G.) 著; 刘丽, 周宇英译. —北京: 国防工业出版社, 2015. 7

书名原文: ISWEC: a Gyroscopic Wave Energy Converter

ISBN 978-7-118-10052-5

I. ①基... II. ①布... ②刘... ③周... III. ①波浪能—海浪发电—转换器 IV. ①TM612

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 159240 号

ISWEC: a Gyroscopic Wave Energy Converter/

978-3-8484-0652-4/Giovanni Bracco

Copyright © 2012 by the author and LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG and licensors

All rights reserved. Saarbrücken 2012

Publication of this translation in consultation with Omniscryptum GmbH&Co. KG

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 4 字数 104 千字

2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 60.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

译者序

开发波浪能发电是当今世界各国海洋开发探索的技术热点之一。有助于沿海岛屿的开发利用,有助于提高我国海洋蓝色经济开发的能力,符合我国有效利用清洁、可再生能源的国家能源战略发展方针。对提高我国海洋资源开发能力,建设海洋强国意义重大。开发利用波浪能研究在我国越来越受到重视,但目前尚未找到一条有效的技术途径,尚处于探索摸索阶段。

惯性波浪能转换技术,是一种极具特色的波浪能开发利用新兴技术。惯性波浪能转换器,是基于高速旋转转子特有的陀螺力效应原理,通过巧妙的结构设计和方法从海浪中提取波浪能。惯性波浪能转换器转换的波浪功率与波浪频率平方成正比,这种波浪能开发技术对短周期海浪波浪能具有较高的转换效率,适用于内海(如地中海,波浪虽然不大,但波浪频率较高);其次,惯性波浪能转换装置完全封闭在浮子壳体内,没有活动部件与海水直接接触,降低了对设备制造材料的要求,有利于提高整个系统抗海水腐蚀的能力;便于浮子及系泊装置设计,有利于整个系统抗浪能力、抗台风等恶劣海况能力的提高,具有较强的海洋环境系统生存能力。

本书译自 Giovanni Bracco 所著的 ISWEC: a Gyroscopic Wave Energy Converter,是一本论述惯性波浪能转换技术的专著。原著详细介绍了基于惯性技术的波浪能转换装置(ISWEC)的研究开发过程,系统地阐述了惯性波浪能转换技术的基本理论、工程设计及实现方法、研究进展及应用发展前景。希望能对我国从事波浪能发电技术研究及开发利用的科研工程人员及相关院校的师生有所帮助。

本书的翻译得到装备科技译著出版基金的资助,在翻译过程中,王晓东、马军和张雪做了大量工作,在此深表感谢。

限于译者水平有限,加上时间紧迫和相关资料较少,书中难免存在翻译错误和不妥之处,恳请各位朋友和专家批评指正。

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 波浪能资源	1
1.2 波浪能转换器	4
1.2.1 振荡水柱式	5
1.2.2 阿基米德波浪摆	6
1.2.3 海蛇	6
1.2.4 鸭式	8
第 2 章 系统动力学	10
2.1 ISWEC 工作原理	10
2.2 机械方程	11
2.3 线性化	13
2.4 提取功率	15
2.4.1 电动机扭矩	16
第 3 章 小比例原型机设计	18
3.1 爱丁堡弧形造波水池	18
3.2 设计参数	19
3.3 设计过程	20
3.4 与非线性模型对比	23
3.5 机械设计	25
3.6 PTO	27

3.6.1 阻尼实现	28
3.7 电动机	30
第4章 参数分析	33
4.1 PTO 刚度	33
4.2 PTO 阻尼系数	34
4.3 飞轮转速及纵摇角	36
4.4 波浪频率	38
4.5 本章小结	40
第5章 台架试验	42
5.1 海浪模拟试验台	42
5.2 传感器	44
5.2.1 测力传感器	44
5.3 数据采集系统	46
5.3.1 滤波	47
5.4 阻尼系数	49
5.5 额定条件下的台架试验(配置 A)	51
第6章 水池测试	54
6.1 爱丁堡水池	54
6.2 试验设备	55
6.3 主要测试	57
6.4 波浪能量估算	61
第7章 水槽测试	64
7.1 水槽	64
7.2 陀螺传感器	65
7.2.1 与有线传感器的比较	67
7.3 浮子	68

7.4	试验设备	69
7.5	前期试验:设备关闭	71
7.6	主要试验	72
7.6.1	额定条件	72
7.6.2	波能估算	74
7.6.3	力学分析	75
7.6.4	降低陀螺转速	77
7.7	本章小结	80
第8章	1:8 原型系统设计	81
8.1	水池	81
8.2	原型系统设计	82
8.3	非线性仿真	84
8.4	摩擦损耗	86
8.5	工程系统	89
8.5.1	飞轮	90
8.5.2	真空外壳	91
8.5.3	终端限位器	91
8.5.4	轴承	92
8.5.5	电动机	93
8.5.6	PTO	94
8.5.7	真空泵	94
8.5.8	浮子	94
8.6	Cfg. A	95
8.7	系统效率	96
第9章	ISWEC 工程	98
9.1	全尺寸系统	98
9.2	小结	102
9.3	试验发电站的可选位置	103

9.4 两自由度系统	105
第 10 章 结论	108
附录 A 主要性能参数	111
A.1 PTO	111
A.2 Electric motor	114
A.3 Pantelleria measurement station	116
参考文献	118

第1章 引言

自20世纪70年代,欧洲就开始了对波浪能的调查和研究。1974年,爱丁堡大学的Stephen Salter教授提出了一种早期的波浪能转换器,他将其称之为“鸭子”(Duck)^[1]。从那时起,许多波浪发电装置被提出,并且其中有些已经实现商业化。本章将对波浪能资源及一些典型波浪能转换器进行介绍。

1.1 波浪能资源

水面在风的吹拂下形成波浪,但波浪生成机理十分复杂,至今尚未被彻底研究清楚。目前将波浪生成过程归纳、总结为3个主要步骤^[2]:

(1) 吹拂的风形成一个水面切线压力,从而产生波浪并持续增强形成的波浪;

(2) 大气湍流产生压力和剪应力波动,若剪应力波动与波浪同相,则将产生更多的波浪;

(3) 当波浪形成一定规模,风将在波浪的迎风面作用一个更大的力,从而使波浪进一步生长。

波浪能由风能产生,而风能原本从太阳能产生,故波浪能可视为太阳能的存储。功率密度大约为 $100\text{W}/\text{m}^2$ (平均每天)^[3]的太阳能,最终可转化为功率密度超过 $100\text{kW}/\text{m}$ 的波浪能(说明:波浪能功率密度单位为 kW/m ,太阳能功率密度单位为 W/m^2)。波浪是一种有效的能量传输方式:风暴能在当地生成波浪,并形成涌浪从而长距离传播。波浪的特性由3个因素决定:风速、持续时间和风浪区。风浪区指风吹过而将能量传递到水上的距离。

一个规则波可用它的波高 H 、周期 T 及波长 λ 来描述。波高 H 为波峰和波谷间的垂直距离。波长 λ 为波的传播方向上两波峰之间的水平距离。波周期 T 为两个连续的波峰通过一个固定点所需的时间。规则波形状是正弦曲线形,可以由式(1-1)描述。式(1-1)中, x 是沿波传播方向的坐标, z 是相对于静水面的波高。角频率 $\omega = 2\pi/T$ 及波数 $K = 2\pi/\lambda$,从时间和空间上定义了波的周期性。波峰速度 v 等于波长 λ 除以波周期 T 。

$$z(x, t) = \frac{H}{2} \sin(\omega t - Kx) \quad (1-1)$$

根据线性波浪理论^[4-7], 正弦波的波能功率密度 P_D 可由式(1-2)计算。如果 P_D 以单位波峰宽度的波浪功率表示,则它近似等于波高的平方乘以波的周期。

$$P_D = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T \left(\frac{W}{m} \right) \approx H^2 T \left(\frac{kW}{m} \right) \quad (1-2)$$

式中: ρ 是水的密度; g 是重力加速度。

水的深浅影响波浪的主要参数。当 $d/\lambda > \frac{1}{2}$ 时,我们认为波在深水环境中运动;另一方面,当 $d/\lambda < 1/20$ 时,认为波在浅水环境中运动;当水深在这两种情况之间,则认为波在中层水中运动。表1-1表示了随水深不同,波的主要关系。

表 1-1 线性波浪理论回顾

波浪属性	浅水波 $d/\lambda < \frac{1}{20}$	中水波 $\frac{1}{2} < d/\lambda < \frac{1}{20}$	深水波 $d/\lambda > \frac{1}{2}$
传播关系	$\omega^2 = gK^2 d$	$\omega^2 = gK \tanh Kd$	$\omega^2 = gK$
波长—周期关系	$\lambda = T \sqrt{gd}$	$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh \frac{2\pi d}{\lambda}$	$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \approx 1.56 T^2$
群速度	$c_g = c$	$c_g = \frac{1}{2} c \left(1 + \frac{2Kd}{\sin 2Kd} \right)$	$c_g = \frac{1}{2} c$

真实海浪是由许多不同波高、周期及传播方向的规则波组成的。为了估计波的特性,在大海上部署一个波测量传感器。这个传感器可以是一个骑浪式浮子,或者是一个利用声纳及高精度压力计来检测波面升沉的浸没系统。

通过波高一时间记录(图 1-1 画出了一个采样时间记录),可从中提取出有义波高 H_s 及能量周期 T_e ^① 这两个参数。有义波高用 4 倍的表面升沉相比于平均水位的均方根值来估计。波浪能功率密度 P_D 由下式计算:

$$P_D = \frac{cH_s^2 T_e}{16} \approx \frac{H_s^2 T_e}{2} \quad (1-3)$$

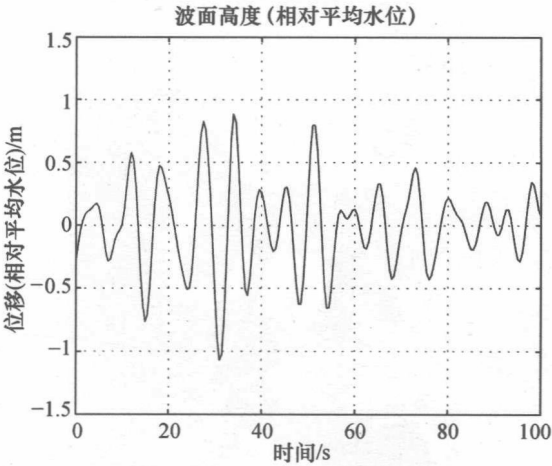


图 1-1 波浪高度—时间记录

波浪能功率密度在全球范围非常可观,经检测,其最高值在两个半球的纬度 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间的大洋分布(见图 1-2 和图 1-3,引自参考文献[8]“Wave Energy Utilization in Europe Current Status and Perspectives”)。位于欧洲西海岸的英国、爱尔兰、挪威及葡萄牙的波能

① 实例详见 7.6.2 节

功率密度最高。

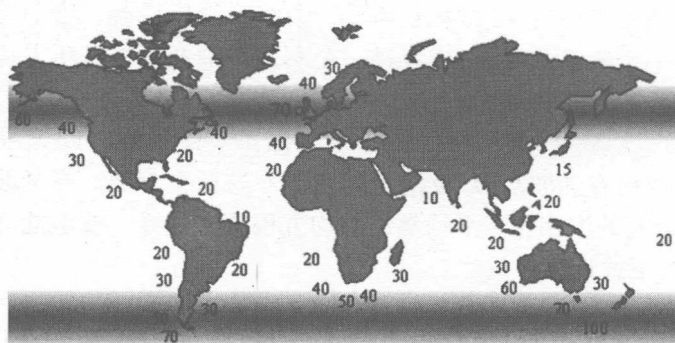


图 1-2 世界波浪能功率密度年平均值分布图(单位 kW/m)

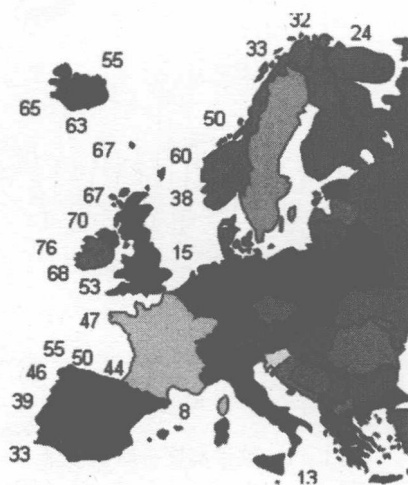


图 1-3 欧洲波浪能功率密度年平均值分布图(单位 kW/m)

1.2 波浪能转换器

波浪能转换器可以依据其尺度函数及入射波方向进行分类^[9],

如图 1-4 所示。点吸式(Point Absorber)波浪能转换器是一种相对于波长可忽略其水平方向尺寸的装置。点吸式波浪能转换器可以吸收远宽于其物理宽度范围的波浪能(理论最大吸收宽度为 $\frac{\lambda}{2\pi}$)。截止式(Terminator)和衰减式(Attenuator)波浪能转换器相对波浪具有确定的外形尺寸,通常为一个主要的水平尺寸。截止式波浪能转换器的物理原理是通过拦截入射波活动能量;而衰减式波浪能转换器是在波浪通过其长度方向时提取能量。

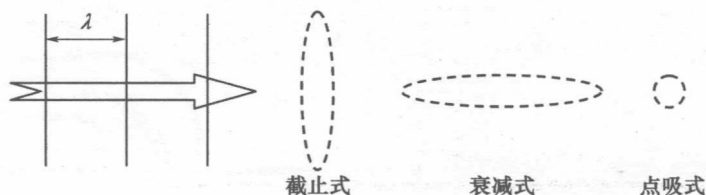


图 1-4 波浪能转换装置的一种分类体系

波浪能转换器也可根据它们的放置来进行分类:

- (1) 固定到海床(通常在浅水区);
- (2) 离岸漂浮(深水区);
- (3) 系泊在中水区。

在过去 40 年间,人们发明了多种波浪能转换器。随后,将对一些著名波浪能转换装置进行一个简要回顾^[8-11]。

1.2.1 振荡水柱式

振荡水柱式(OWC)波浪能转换装置,主要由一个气腔和一个涡轮机构成。部分气腔浸没在水中,而水线下气腔是开口的,从而海水表面的升沉运动压迫气腔中的气体通过涡轮机。由于波的振荡特性,气体被推进和拉出涡轮机,导致交替气流的产生。韦尔斯气动涡轮机利用这个交替气流,产生单向连续旋转。韦尔斯气动涡轮机采用对称翼设计,对称翼的对称面在转动面上并垂直于气流。因此空气在两个方向上流经具有相同空气动力学特性的桨叶,从而实现了

气动双向性。

如图 1-5 所示,振荡水柱式波浪能转换装置的气腔可以在海岸线上筑成一个防浪堤,也可集成在一个在浅水漂浮的浮标中。亚速尔群岛中皮克岛上的欧洲试验发电站^[12-14]和英国的帽贝^[15]是振荡水柱式波浪能转换装置在欧洲的两个主要应用实例。前者是一个 400kW 的发电站,为该岛提供部分能源需求;而后者是 1991 年建在苏格兰艾雷岛的 75kW 原型机。

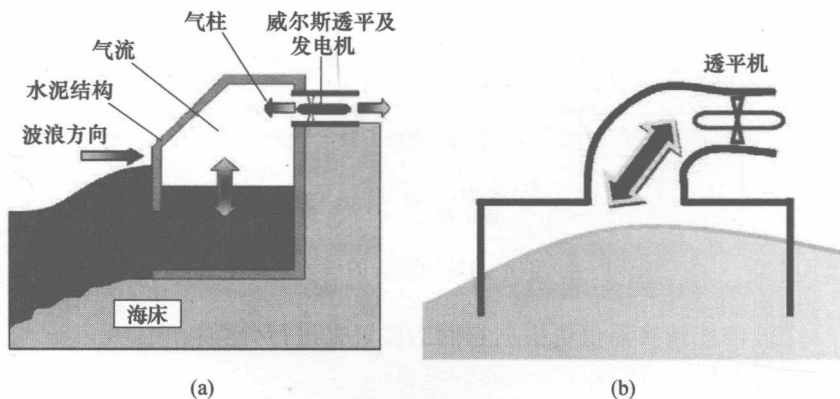


图 1-5 OWC 方案

(a) 固定式振荡水柱;(b) 漂浮式振荡水柱。

1.2.2 阿基米德波浪摆

阿基米德波浪摆(AWS)^[16-18]是一个浸没在水中、充满空气的活塞,活塞随着波浪压力膨胀和收缩。图 1-6 展示了其外形和内在机理。阿基米德波浪摆的外壳与固定于海床的固定部分之间产生相对运动,并通过内置在防水气腔中的线性电机产生电能。这种波浪能转换器特性与质量—弹簧—阻尼系统相似,在与入射波共振时捕获最大能量。

1.2.3 海蛇

海蛇为半浸没铰链式结构,由特殊关节铰链到一起的柱形部分

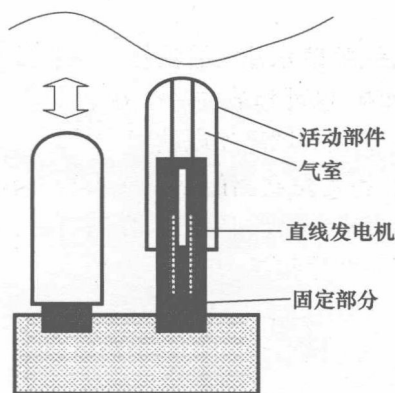


图 1-6 AWS 概念

组成^[19-21]。每个节点都配置了液压油缸,这些液压油缸像泵一样工作,将柱形部分之间的相对运动转化为液压能。被挤压的液体流经蓄能器进行平滑,然后驱动液压马达,从而驱动发电机。液压回路设置了油-水换热器,用来消耗最大海况下产生的多余能量,并在掉网时作为耗能的热载荷。P-750 型号长 150m,由 3 个关节连接 4 个柱形部分组成。当波浪能密度为 $55\text{kW}/\text{m}$ 时,其额定功率为 750kW ^[22]。图 1-7 和图 1-8 描述了海蛇波浪能转换器的原型及装置工作原理。



图 1-7 海蛇波浪能转换装置图片

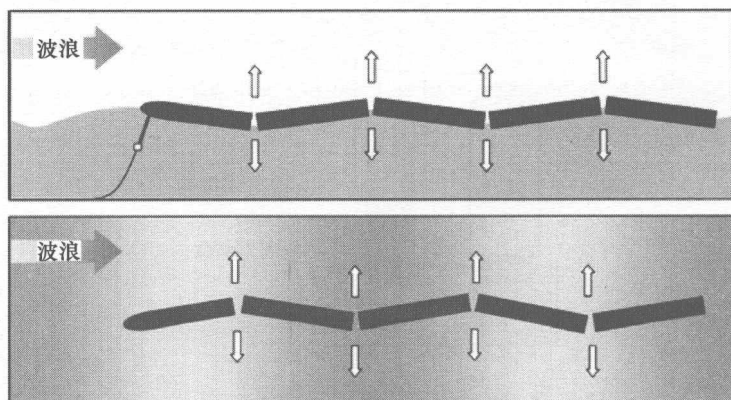


图 1-8 海蛇工作原理

1.2.4 鸭式

1974 年, Salter 提出“鸭”式波浪能转换器构想, 是欧洲最早的一种波浪能转换器^[1,24-26]。“鸭”式是一个点头的、非对称的、松弛系泊的、漂浮的深水区波浪能转换器。每个“鸭”都能沿着一个连接所有装置的脊柱旋转。由于每个“鸭”的放置相对于入射波都不同, 导致点头运动的相位各不相同, 于是作用到(扭转刚性)脊柱上的平均扭矩为空。脊柱允许弯曲, 以缓解极端压力并能有助于吸收波浪功率。“鸭”阵列可归类为截止式波浪能转换器。

图 1-9 所示为一种“鸭”式结构, 通过利用“陀螺房”将其摇摆运动转化为电能^[27-29]。陀螺房中装有成对的 4 个大陀螺: 配对的两个陀螺以相反的方向旋转, 并感应其摇摆运动, 驱动高压凸轮泵。高压油被送往高速旋转的液压马达从而驱动发电机。利用陀螺房, 巧妙地避免了脊柱和“鸭”之间扭矩的传递问题。

利用陀螺效应将浮体摇摆转化为电能的思想在基于惯性技术的波浪能转换器(ISWEC)中得以延续, 并进一步发展, 提出许多创新思想。