

高耀保 Tomiji Watabe

著

# 海洋波浪能量 综合利用

Principle and Device of  
the Ocean Wave  
Energy Conversion

上海科学技术出版社

# 海洋波浪能量综合利用

Principle and Device of the Ocean  
Wave Energy Conversion

間耀保 Tomiji Watabe 著

上海科学技术出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

海洋波浪能量综合利用/阎耀保,(日)渡部富治著. —上海:上海科学技术出版社,2011. 1

ISBN 978-7-5478-0366-0

I. ①海... II. ①阎...②渡... III. ①海洋一波能—综合利用—研究 IV. ①P743. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 194713 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 889×1194 1/32 印张:6.375

字数:153 千字

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-0366-0/TK·1

定价:38.00 元

---

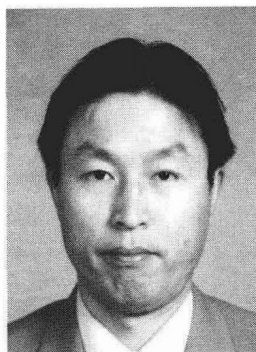
本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,  
请向工厂联系调换

## 内 容 提 要

本书内容涉及日本、欧洲海洋波浪能量综合利用的基本理论、研究进展和工程实现方法。包括海洋波浪能量转换原理,典型转换器件理论模型和潮汐能量转换器元件结构,潮汐能量转换器的优化设计方法与运行实例,浮动潮汐能量转换器,沉降与俯仰浮标,小型海洋发电站,海洋能量转换器件应用等。

本书适用于海洋能源开发科研人员,机械、电子、仪器仪表、装备等行业的专业技术人员阅读,也可供能源、船舶、机械、海洋等专业的师生参考。

## 著者介绍



阎耀保 (YIN YAobao)

1965年湖北省麻城市出生。

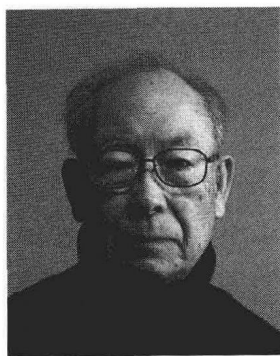
1984~1991年上海交通大学本科和硕士研究生毕业。

1991~1996年上海航天控制技术研究  
所工程师、高级工程师。

1996~1999年日本国立埼玉大学博  
士研究生毕业,获博士(工学)学位。

1999~2005年日本 TOKIMEC INC  
正社员,研究职。从事先进流体计测与控制  
的理论与应用研究。

2005年至今,同济大学教授、博士生导师。从事极端环境下的  
流体传动与控制基础理论研究。



Tomiji Watabe

1927: was born in Tokyo.

1950: graduated from Tokyo  
Technical College.

1970: Dr. Engineering Tokyo  
University.

1950~1977: Machine Designer or  
Researcher, Hitachi Co. Ltd. .

1977~1993: Prof. Muroran Institute  
of Technology.

1993~present: Voluntary consultant.

Major activities: Development and Design of Mining machinery,  
Industrial machinery, Power transmission, Ocean wave energy  
converter and Wind turbine.

Patents: 160.

# 前 言

地球资源有限,人类正在寻求一种新的,清洁、安全、可靠的可持续发展的能源系统。各国都在研究能源对策和国家能源战略。世界各国已将海洋列为重点争夺的资源。海洋能是一种重要的可再生能源。部分风能以波浪运动的形式存储在海洋中。海洋波浪运动的能量密度非常高,在海洋中传播广泛,正因为如此,即使远离海洋数千里远的地方也能利用波浪的能量。在这漫长的行程中,波浪逐渐稳定,在合适的区域可以高效地再生海洋能源并产生电能。所以,海洋能已成为有很大潜力的一种再生资源。

众所周知,波浪是靠近自由表面的水的振动产生的。波浪能量转换器的原理和无线电的天线理论相似:天线接收电磁波中的波共振信号。经过长途跋涉,海浪到达能量转换器,并由转换器共振吸收能量。由于媒介性质不同,无线电系统和海洋波系统的激励方式有所不同。

出于科学目的,而不是出于工业考虑,人类研究和发明了大量的控制系统。许多研究人员在理论研究的初期阶段作出了贡献。尽管研究了许多构想,包括海洋作业,但从长远来看,其结果并没有产生明确的前景。提出的系统总会有这样或那样的问题,因此,需要以批判的眼光寻找能冲破阻碍的新的系统。为此,海洋波浪能源综合利用技术应运而生。

1912年德国建设首座潮汐发电站以来,美国、日本等都相继建设海洋能量发电站,如潮汐发电站、波力发电站、温差发电站,以及利用海洋能量转换装置的海水脱盐纯净水制造装备、海洋热能

转换利用装备、深海海水循环泵送渔业装备。我国海洋能量利用装备的建设相对滞后。在本书中,作者以多年来的研究成果为基础,介绍日本、欧洲多年来形成的海洋波浪能量综合利用的基本理论、研究进展和工程实现方法。全书共分为7章,内容包括海洋波浪能量及其利用规则,海洋波浪能量转换原理、海洋能量转换器件基本要求,典型转换器件和结构,潮汐能量转换器的基本理论和运行实例,浮动潮汐能量转换器,沉降与俯仰浮标,小型海洋发电站及其应用技术,海洋能量转换器件前沿技术等。本书旨在对接中国国家能源战略计划,为攻克我国海洋能和可再生能源开发、利用的重大关键技术及装备,为我国进行可再生能源技术的原始创新、集成创新,探索海洋能源装备新的技术途径或解决方案的研究、开发、设计提供参考。

本书由同济大学閻耀保教授和日本国立室兰工业大学 Tomiji WATABE 教授撰写。部分内容为 Tomiji WATABE 研究成果,全书由閻耀保统一撰写。在出版过程中得到了上海科学技术出版社、上海市新闻出版局的支持和帮助。同济大学硕士研究生李玉杰,以及同济大学閻耀保教授研究室 2009 级硕士研究生以及 2009 届本科毕业生协助进行资料整理工作。作为同济大学博士研究生、硕士研究生教材已在教学中使用。

限于作者水平,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

# 目 录

<b>第 1 章 海洋波浪能量及其利用规则</b> .....	1
1.1 海洋能利用概要 .....	1
1.1.1 潮汐发电 .....	3
1.1.2 波力发电 .....	7
1.1.3 温差发电 .....	10
1.1.4 中国海洋能量利用 .....	11
1.2 海洋能利用规则 .....	15
1.3 水压传动技术 .....	17
1.3.1 海水的性质 .....	17
1.3.2 水压传动 .....	19
参考文献 .....	23
<b>第 2 章 海洋波浪能量转换原理</b> .....	25
2.1 基本数学模型 .....	25
2.2 海洋波浪的性质 .....	28
2.3 能量转换模式 .....	32
2.4 振荡水柱转换器 .....	33
2.5 海洋能量转换器件基本要求 .....	35
2.5.1 环境友好型能量转换器件 .....	35
2.5.2 能量转换成本 .....	36
2.5.3 传统能量转换器件 .....	37



参考文献 .....	38
<b>第3章 典型转换器件 .....</b>	<b>40</b>
3.1 线性模型理论 .....	40
3.2 振荡水柱 .....	41
3.3 潮汐能量转换器性能 .....	44
3.3.1 Mighty Whale 型能量转换器频率响应 .....	44
3.3.2 Mighty Whale 型能量转换器数值计算 .....	47
3.3.3 浮动型能量转换器特点 .....	49
3.4 潮汐能量转换器的线性模型 .....	51
3.5 潮汐能量转换器非线性模型 .....	58
3.5.1 潮汐能量转换器仿真模型 .....	58
3.5.2 潮汐能量转换器数值模拟 .....	61
3.6 传统潮汐能量转换器的改进 .....	66
3.7 海水液压泵和摆动马达 .....	69
参考文献 .....	78
<b>第4章 潮汐能量转换器结构 .....</b>	<b>79</b>
4.1 柱塞液压泵式潮汐能量转换器 .....	79
4.2 摆动叶片泵式潮汐能量转换器 .....	81
4.3 海洋现场测试技术 .....	83
4.4 系统耐久性 .....	86
4.4.1 潮汐能量转换器耐久性 .....	87
4.4.2 “海蛇”潮汐能量转换器改进措施 .....	92
参考文献 .....	98
<b>第5章 潮汐能量转换器研究与开发 .....</b>	<b>99</b>
5.1 系统理念 .....	99
5.2 系统动力学及其优化 .....	100

5.3	水箱室剖面形状设计 .....	102
5.4	摆动装置参数设计 .....	104
5.5	阻尼器液压泵设计 .....	106
5.6	液压传动系统与元件设计 .....	108
5.6.1	液压马达 .....	110
5.6.2	蓄能器 .....	112
5.7	系统优化设计方法 .....	113
5.8	海洋潮汐能能量密度 .....	119
	参考文献 .....	119
<b>第6章</b>	<b>浮动式潮汐能量转换器与小型海洋发电站 .....</b>	<b>121</b>
6.1	浮动式潮汐能量转换器 .....	121
6.2	沉降和俯仰浮标 .....	126
6.3	小型海洋发电站 .....	129
	参考文献 .....	132
<b>第7章</b>	<b>海洋能量转换器件前沿技术 .....</b>	<b>133</b>
7.1	风能和海洋潮汐能比较 .....	133
7.1.1	风能 .....	133
7.1.2	海洋潮汐能 .....	134
7.1.3	风力发电成本 .....	137
7.1.4	波浪发电电量 .....	139
7.2	基于海洋潮汐能的海水脱盐纯净水制造技术 .....	142
7.2.1	逆渗透作用的麦凯布泵 .....	143
7.2.2	海洋能量转换器直接输送海水的逆渗透作用 .....	145
7.3	基于潮汐能量转换器的海洋热能转换系统 .....	152
7.4	基于潮汐能量转换器的深海海水循环泵送系统 .....	157
7.5	潮汐能量转换器液体静压传动装置 .....	161
7.5.1	漂浮式潮汐发电装置 .....	161

7.5.2	250 kW 潮汐发电装置 HST .....	162
7.5.3	旋转式叶片泵 .....	163
7.5.4	柱塞式液压马达 .....	164
7.5.5	控制阀 .....	165
7.5.6	其他零件 .....	165
	参考文献 .....	166
	<b>附录</b> .....	167
	附录 1 潮汐能量转换模型 .....	167
	第一部分 左腔为水室的潮汐能量转换器 .....	168
	第二部分 右腔为水室的潮汐能量转换器 .....	173
	第三部分 固定摆式潮汐能量转换器 .....	178
	参考文献 .....	184
	附录 2 海洋波浪能量利用现场图片 .....	185
	<b>后记</b> .....	191

# 第 1 章

## 海洋波浪能量及其利用规则

### 1.1 海洋能利用概要

地球接受太阳照射,日照受热不均匀形成了大气层空气的运动,比如风,风在海上形成了海洋波浪。风能以波浪运动的形式储存在运动的海水里,且能传播到很远的地方,甚至跨过海洋。海洋的能量密度比风大得多。据美国能源机构估计,地球上潜在的潮汐能为 200 万~300 万兆瓦,在海洋中有利的地理位置,按照海岸线的长度计算,波浪能量密度的平均值可达到  $40 \text{ MW/km}^{[1]}$ 。图 1.1 所示为美国能源部公布的全球海洋波浪能源分布图,图中以  $\text{kW/m}$  为单位计算海洋波浪能量<sup>[1]</sup>。

地球表面积约为 5.1 亿平方公里,其中陆地面积为 1.4 亿平方公里,占总面积的 29%,海洋面积达 3.61 亿平方公里,占总面积的 71%。据估计,海洋能源约占世界能源总量的 70% 以上。海洋能是蕴藏于海水中的再生能源,包括潮汐能、波浪能、海流能、温差能、盐差能以及海上太阳能和风能等自然资源。海水受到海面上风的吹动和日照的辐射以及冷却条件的不平衡,造成了不同海域温度不同,含盐量各异。这些差异产生的各种各样的海洋能源可以转化利用。比如海水潮汐、海流、波浪等能源属于机械能,将其转变为发电机的动力能直接发电;海洋热能的利用一般是用热力循环方式把海水温差能转化为机械能,再用机械能发电;盐差能

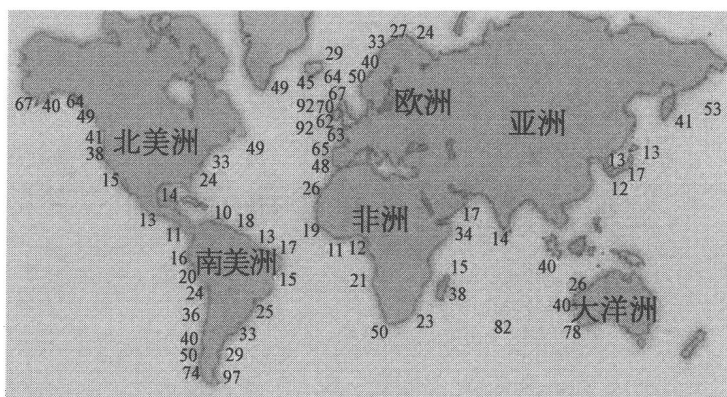


图 1.1 美国能源部公布的全球海洋波浪能源分布图

则属于化学能,通过化学方式转变为电能。

海洋能的储量,按粗略的估计,全世界的潮汐能约为 27 亿千瓦,波浪能约为 25 亿千瓦,海流能约为 50 亿千瓦,温差能约为 20 亿千瓦,盐差能约为 26 亿千瓦。此外,海面上的太阳能蕴藏量约为 80 亿千瓦,风能为 10 亿~100 亿千瓦。

我国海洋能资源非常丰富,而且开发利用的前景广阔。全国大陆海岸线长达 18 000 多公里;还有 6 000 多个岛屿,其海岸线长约 14 000 多公里;整个海域达 490 万平方公里。其地处低纬度的南海,海域达 360 万平方公里。入海的河流淡水水量约为 2.3 万亿立方米/年。如果将我国的海洋能资源转换为有用的动力值,至少可达 1.5 亿千瓦,相当于我国目前电力总装机容量的两倍多。

合理开发和利用海洋能的目的是建立一个可持续发展的和谐社会。利用海洋波浪的能量能保持环境清洁,减少有害排放物,还有助于创造新的就业机会。为了得到合适的能源利用结果,必须采用一种安全经济的能源利用方式。

利用海洋能量进行发电主要有以下三种形式<sup>[1-3]</sup>:潮汐发电、波力发电以及温差发电。下面就这三种形式的发电方法分别进行介绍。

### 1.1.1 潮汐发电

#### 1.1.1.1 潮汐发电概述

宇宙系中太阳、月亮和地球等天体作周期性的相对运动,它们之间相互存在着吸引力和平衡力系的作用,因此地球上整个海面都发生着相应的周期性相对运动。海面海水的上下运动称为潮汐运动,海水的水平方向运动称为潮流,它们的运动周期几乎相同,约为半日或一日。潮汐发电的原理和潮流发电的原理相似,前者利用海水的位能,即势能,后者利用海水的动能。通常情况下人们把潮汐和潮流统称为潮汐,因而潮汐发电和潮流发电也统称为潮汐发电。潮汐高度和速度取决于地球的质量和半径、天体(月球或太阳)的质量、地球与天体之间的中心距离、潮汐在海面上所处的方位以及海面的海水温度等。

潮汐现象是海水在一定时间内作有规律的涨落运动,是由于月亮、太阳对地球上海水的吸引力和地球的自转而引起海水周期性、有节奏的垂直涨落现象。海水白天涨落叫“潮”,晚上涨落叫“汐”,合称为“潮汐”。海洋的潮汐中蕴藏着巨大的能量。在涨潮的过程中,汹涌而来的海水具有很大的动能,随着海水水位的升高,就把大量的海水的动能转化为势能;在落潮的过程中,海水又奔腾而去,水位逐渐降低,大量的势能又转化为动能。海水在涨落潮运动中所包含的大量动能和势能,称为潮汐能。海水潮汐能的大小随潮差而变,潮差越大,潮汐能也越大。潮汐涨落形成的水位差,即相邻高潮潮位与低潮潮位的高度差,称为潮差。通常,海洋中的潮差比较小,一般仅几十厘米,多者只有 1 m 左右。而喇叭状海岸或河口的地区,潮差就比较大。例如加拿大芬地湾、法国的塞纳河口、中国的钱塘江口、英国的泰晤士河口、巴西的亚马孙河口、印度和孟加拉国的恒河口等,都是世界上潮差较大的地区。其中,芬地湾的潮差最高达 18 m,是世界上潮差最大的地方。如果在 1 平方公里的海面上,潮差为 5 m 时,其潮汐能发电的最大功率为 5 500 kW;而潮差为 10 m 时,最大发电功

率可达 32 000 kW。据初步统计,全世界海洋蕴藏的潮汐能约有 27 亿千瓦,每年的发电量可达 33 480 万亿度。人们将潮汐能称为“蓝色的油田”。

人们早在 15~18 世纪就逐步认识了潮汐能。潮汐发电的工作原理和一般的水力发电原理是相近的。利用潮汐涨落的位差能来推动水力涡轮发电机组发电。全球潮汐能发电储量约有 2 000 亿度。潮汐发电的实际应用始于 1912 年德国胡苏姆兴建的一座小型潮汐电站;后来,1966 年法国建成了朗斯潮汐发电站,装机容量为 24 万千瓦,年均发电量为 5.44 亿千瓦时,是当时最大的潮汐电站。目前,潮汐能开发的趋势是偏向大型电站,如俄罗斯计划建设的美晋潮汐电站设计能力为 1 500 万千瓦,英国塞汶电站为 720 万千瓦,加拿大芬地湾电站为 380 万千瓦。预计到 2030 年,世界潮汐电站的年发电总量将达到 600 亿千瓦时。

现在,国外利用潮汐发电的新技术、新装备不断涌现。在英国,潮汐式水轮机技术发展迅速。由于潮汐式水轮机技术已发展为标准设计,并制成标准的组装件,从技术投入到资金回收只需要很短的时间。而大型水电工程、挡潮建筑物或其他土建工程比重较大的项目,从投资到资金回收并获利的时间可能需要许多年。水轮机一般是批量安装。调查发现,许多有潜能的地方相当大,足以容纳数百台水轮机,因此很有可能将海洋中特定的地点作为大量增加安装容量的场所,这将形成相当大的经济规模以降低发电成本。英国潮汐式水轮机公司(MCT)开发了已取得多项专利的新水轮机方案,要点是通过千斤顶支撑的驳船安装单一钢桩,按照需要钻孔和利用船上的起重机安装钢桩。整套系统可以在对水下运行条件无任何要求的情况下进行安装、维修或更换,每项工作既可以利用千斤顶支撑的驳船完成,也可以利用停靠在海面的工作船完成。在挪威,第一座商用水下潮汐发电站已于 2004 年并网发电。这座电站运行成功,在 5 年内有数十万人用上了这种新能源。这座潮汐能发电站类似一个水下的风车,发电装置被固定在海底高 20 m 的钢柱顶端,当海水流过时,直径为 10 m 的叶片就会随之

转动,从而产生电能。它的功率为 300 kW,可供位于哈默菲斯特的 30 个家庭使用。尽管这种发电机还只是原型机,但这是全世界第一次让潮汐能产生的电力并入大电网。

#### 1.1.1.2 中国的潮汐发电技术

我国潮汐能开发已有 50 余年的历史,中国潮汐发电大致经历了四个阶段<sup>[4-5]</sup>。

20 世纪 50~60 年代是我国潮汐发电的第一个阶段。1956 年,中国第一座小型潮汐电站在福州市建成。据 1958 年 10 月召开的“全国第一次潮汐发电会议”统计,全国兴建了 41 座潮汐电站,总装机容量 583 kW,当时正在兴建的还有 88 处,总装机容量 7 055 kW。但这一时期建设的潮汐电站由于选址不当、施工水平有限、设备简陋、管理不善等原因,大部分在建的潮汐电站后来纷纷下马。

20 世纪 70 年代为中国开发利用潮汐能的第二个阶段。在此阶段,人们总结了 50 年代潮汐发电的经验教训,注重科学和施工质量,建成了一批较好的潮汐电站,有的至今仍在运行。如位于浙江省温岭市南郊的江夏潮汐试验电站,总装机容量 3 900 kW,迄今仍在世界潮汐电站中位居第三。江夏电站工程在 1972 年由国家计委立项建设,1980 年第一台机组发电,1985 年 5 台机组全部投产。二十几年来,电站一直保持正常运行,至 2000 年底,累计发电 9 600 万千瓦时,综合利用效益巨大,科学试验成果丰硕。

20 世纪 80 年代为中国试验电站建设阶段,一批大型潮汐电站投入使用,如江夏潮汐电站和幸福洋电站,并对以前建设的潮汐电站及其设备进行了治理和改造。潮流发电的研究也在稳步进行。20 世纪 80 年代初,采用漂浮系泊的竖轴、自调直叶、摆线式水轮机方案,开始潮流发电研究。80 年代中期完成的 1 kW 装置,在河流中进行了试验,具有较高效率。

20 世纪 90 年代至今是大型潮汐电站的设计和 research 阶段。1991 年 9 月,从全国潮汐能第二次普查获得的浙闽沿海数十个万千瓦以上的站址中,筛选出几个条件较好的站址进行了重点实施。同时,我国东方电机和哈尔滨电机生产的大型潮汐电站设备进入



韩国市场;浙江富春江水电设备公司为韩国始华潮汐电站承制多种大型水电设备。这些都为我国今后大中型潮汐电站的建设奠定了基础。江夏电站的单机容量为 500 kW 和 700 kW 的灯泡型贯流式双向水轮发电机组等设备和工程,全部由国内各个单位联合攻关完成研究、设计、施工,并获得国家科技进步二等奖,预留的第 6 个机坑,于 2007 年在国电龙源集团公司研制安装了 1 台 700 kW 的新型机组,现装机容量 3 900 kW。2008 年,福建八尺门潮汐能发电项目正式启动;2009 年 5 月,浙江三门 2 万千瓦潮汐电站工程启动。现在,我国潮汐发电量仅次于法国、加拿大,位居世界第三位。

中国潮汐发电技术经过 50 多年实践,先后共建成潮汐电站 76 座,其中长期运行发电的 8 座如表 1.1 所示。我国的潮汐发电技术整体上已经建成一批性能良好、效益显著的潮汐电站。但是,整体开发规模和单机容量还很小,水工建筑物形式和施工方法还欠先进,电站单位装机造价高于低水头水电站,在常规电站不计外部环境成本的现状下,尚不具备与其竞争的能力,这些均是我国潮汐电站存在的主要问题。

表 1.1 国内已建成的主要潮汐电站

站名	所在地	装机容量(MW)	运行方式	建成时间(年)
江夏	浙江	0.5/0.6/2.1/3.9	单库双向	1985
沙山	浙江	0.04	单库单向	1959
幸福洋	福建	1.28	单库单向	1989
海山	浙江	2×0.075	双库连程	1975
白沙口	山东	0.96	单库单向	1978
浏河	江苏	2×0.075	单库双向	1976
岳浦	浙江	4×0.075	单库单向	1971
果子山	广西	0.04	单库单向	1977