



# 海洋能

Ocean Energy

肖 钢 马 强 马 丽  编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



# 海洋能

Ocean Energy

肖 钢 马 强 马 丽  编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

大能源. 海洋能/肖钢,马强,马丽编著. —武汉:武汉大学出版社,2015.9  
ISBN 978-7-307-16746-9

I. 大… II. ①肖… ②马… ③马… III. ①能源—普及读物 ②海洋动力资源—普及读物 IV. ①TK01-49 ②P743-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 210125 号

责任编辑:郭 芳

责任校对:邓 瑶

装帧设计:吴 极

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu\_publish@163.com 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:8.25 字数:156千字

版次:2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16746-9 定价:860.00元(全九册)

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。



“能源”，并不总是人们茶余饭后津津乐道的话题。说起“能源”，不少人会想到石油和国内三大石油公司的强大，还会联想到环境污染和全球气候变暖，但很少有人会想到“能源”本身，以及自己与“能源”的关系。然而，穷人类历史之长，尽人类足迹之远，仰人类文明之高，“能源”可谓与我们的生活息息相关，休戚与共，我们时时、处处都在利用它、依赖它。也正因为如此，“能源”反而更易被人们忽略，就像直到窒息时才想起原来我们是多么地依赖空气一样。日常生活中，我们不可避免使用能源，但很难挑选使用何种能源，无法影响或决定能源的来源、生产方式和价格，更无法通晓纷繁芜杂的能源技术及其发展方向。

时至今日，改变正在发生。随着资源、环境和气候问题的凸显，全球正在一步步迈入新一轮的能源变革，陈旧的能源开采、转化、利用方式正被逐渐淘汰，而新能源事业正悄然兴起，新资源、新技术、新理念层出不穷，一个崭新的时代即将到来，届时人与能源的关系都将发生改变。对于老百姓，不再是被动地接受能源，而是积极地创造，主动地分享，智能地消费。在中国，大多数人可能还无法想象很多丹麦人已经可以轻松地通过电脑软件，随时选择并任意切换不同来源、不同价格的电力供应；更无法想象不少西班牙人每天都会关注全国各地的天气预报，来估算自己在不同地方买下部分股权的太阳能电池能发多少电，并给自己带来多少利润；而美国人已经考虑在自己的车库里安装电网连接设备，用低谷电价给自己的电动汽车充电，并在用电高峰时送电上网，赚取差价……

能源问题，是全球性问题，中国亦不可避免。从某种意义上来说，经济高速增长的中国存在着更为突出的能源问题，而中国人并非后知后觉，也不会熟视无睹。几百年的落后使国人自省，30多年的改革让国人自信，对变革的必要性我们有着清醒的认知，但使我们困惑和迷茫的是怎样付诸实践，向哪些国家学习，优先发展何种能源，以怎样的力度发展，达到怎样的效果，以及能否在改革中保持和谐稳定。

曾经听过一则寓言：一只青蛙遇到了一条蜈蚣，青蛙自忖自己有四条腿，



跳跃自如，而蜈蚣却有无数条腿，竟也行走流畅。青蛙觉得很奇怪，便问蜈蚣道：“你有这么多条腿，那你行走时都是先迈哪条腿呢？”蜈蚣听了青蛙的问话，不由地思考了起来。不料，蜈蚣一思考，竟从此不会走路了。原来蜈蚣从不曾执着于这个问题，只是目视前方，一心向前，自然而然就朝前走了。自从考虑先迈哪条腿后，它忘记了向前看，只盯着自己的脚，结果无数条腿互相磕绊，从此再也迈不开步子了。我想，蜈蚣不久就会明白：孰先孰后并不重要，重要的是认准方向，明确目标，一心向前。中国的能源改革同样如此，我们百般纠结于眼前的主次和先后之时，是否已经找到并确定了改革的正确方向和终极目标呢？

本套书介绍的是高效的能源转化技术、方兴未艾的非常规能源勘探开发技术、梯级利用的节能技术和绿色低碳的可再生能源技术，共包括《中国式低碳》《生物能源》《固体氧化物燃料电池》《二氧化碳》《分布式能源》《天然气水合物》《页岩气》《海洋能》《煤层气》9分册。编者旨在通过本套书来唤起更多人对我国能源问题的思考，提升同仁们对未来能源事业的参与度和积极性。

十方来，十方去，共成十方事；万人施，万人用，同结万人缘。我诚望书中的一些知识能对有缘的读者提供小小的启发，并在此恭候各位的批评指正。

丛书主编 肖钢



## 肖钢博士简介

肖钢，英国皇家化学会院士（FRSC），中国国家“千人计划”特聘专家，美国Case Western Reserve University客座教授，现为能源央企首席科学家。著有《页岩气及其勘探开发》《天然气水合物综论》《新能源经济引领新经济时代》《低碳经济与氢能开发》《大规模化学储能技术》《分布式能源综论》《还碳于地球——碳捕获与封存》《燃料电池技术》《黑色的金子——煤炭开发、利用与前景》等书。作为主要发明人，享有国际及中国授权和受理的专利180余项。



## 序 言

当前，人类活动同自然界之间的相互影响进一步加深。面对全球温室气体排放及其引发的气候变化，有效促进资源可持续利用、环境可持续发展，努力实现人与自然的和谐，已经成为一个世界性的重大课题。这就需要我们开辟更多的途径，找到更好的办法，而优化能源结构、提高能源转化和使用效率尤其重要。

纵观当今世界，“绿色”不再是业余消遣，不再是流行口号，而是逐渐真正成为发展、建造、设计、制造、工作及生活的方式。当把环境保护等所有的成本都纳入进来时，包括非常规油气在内的新能源变成了最时尚、最有效率、成本最低的做事方式，这是世界正在经历的最伟大的转变。绿色从只是流行变得更加可用，从一种选择变成了一种必需，从一种时尚变成了必胜的战略选择，从一个无法解决的问题变成了一个巨大的机遇。

我们有理由深信：发展清洁的新能源和高效能源技术将会变成决定未来50年国家经济地位、环境健康、能源安全及国家安全的战略选择。这场清洁技术革命关系到国家强大与否。今天，我们为了走上绿色道路所做的每一件事都会使我们国家更强大、更健康、更安全、更具创新力、更有竞争力、更能受到尊重。我们在解决自身问题的同时也在帮助全世界解决问题。

从本质上来说，科技决定未来能源。在替代能源发展过程中，到底哪一种能源应该占主导地位，各种新能源应该如何布局，应该由技术论证、环境评测和市场验证来决定。对于这点，科技界提出了林林总总的方案，有些具备了产业化的条件，有些正在开发，有些处于研究阶段，还有些则属于大胆的设想。这些人类的大课题涵盖了很多的学科领域、很广的技术专业、很深的知识层面及很大的行业范围，因此很少有人以通俗易懂的方式将这些技术情况系统地展现给读者。

恰逢此时，我很高兴看到肖钢博士及其合作者正在编写一套“新能源丛书”，该丛书系统地介绍了高效能源转化技术、非常规天然气技术及可再生能源技术等诸多方面的最新进展，这对科研人员掌握国际上新能源发展现状大有裨益，也为希望了解新能源技术概况的人士提供了有用的信息。

肖钢博士是国家引进的海外高级人才，在能源领域成果丰硕。他已经出版了数本学术专著，希望他主持编著的这套《大能源》也会受到读者喜爱。

中国工程院院士 曾恒一



### 曾恒一院士简介

曾恒一，海洋石油工程专家，中国工程院院士。主持设计、建造了我国第一代海上石油钻探船、海上石油平台导管架下水大型驳船、海上浮式生产储油轮等。主持国家“863”工程的“海洋边际油气田资源开发技术”项目研究并组织编制了海上油气田总体开发方案。主持完成的科研成果“渤海五号、七号自升式钻井船”获国家科技进步二等奖。



## 前言

能源短缺已成为当今世界亟待解决的难题。煤炭、石油等常规能源资源越来越紧缺，价格日趋攀升，对环境的污染也越来越严重，石化能源的生态代价和经济代价越来越高，已威胁到社会可持续发展。在能源危机步步紧逼的大环境下，开发和利用替代能源特别是可再生能源已刻不容缓。

地球上71%的面积都是海洋，因而人类向大海索取资源已成为必然趋势。海洋能清洁干净、可再生，被联合国环境组织视为目前最理想、最有前景的替代能源之一，是亟待开发和利用并具有战略意义的新能源。特别是在陆地能源不足的今天，海洋能源已引起全世界的关注，许多国家正在加紧进行海洋能源的开发研究。

我国是全球能源消费和尾气排放的“双冠王”，必须加以排放控制和产业结构调整，把能源结构调整、环境保护作为经济发展的基本目标和制约条件，统筹发展速度、产业结构和能源消费模式。

海洋能是海水中蕴藏着的一切能量资源的总称，通常指海洋中所蕴藏的可再生的自然能源。广义的海洋能，甚至还包括海洋上空的风能、海洋表面的太阳能，以及海洋生物质能、海洋地热能等。狭义的海洋能，通常是指蕴藏于海洋中的可再生资源，它们都以海水为能量载体，以潮汐、波浪、温度差、盐度梯度、海流等形式存在于海洋之中，形成了潮汐能、波浪能、温差能、盐差能和海流能。除了潮汐能和海流能来源于太阳和月亮对地球的引力作用以外，其他几种能源都来源于太阳辐射。按存在形式，海洋能可分为机械能、热能和化学能。其中，潮汐能、海流能和波浪能为机械能，海水温差能为热能，海水盐差能为化学能。

我国海洋能开发水平与国外相比，还存在一定的差距。在技术方面，海洋能发电涉及机械、电气、仪表控制、结构等领域，但目前我国海洋能技术还仅仅停留在部分学科，技术集成手段薄弱，技术研发手段不系统、不全面。在产业化方面，我国海洋能项目停留在科研和小试项目，示范工程较少，缺乏孵化和培育机制，产业化基础薄弱。与国外海洋能项目由企业主导相比，我国海洋能开发以高校为主，存在一定的局限性。目前，国内高校各自为战，缺乏与制造领域和施工领域的合作，海洋能设备的能量转换效率低、装置可靠性和稳定性较差，缺乏可持续运行的保障。着眼未来，应不断了解国外潮流能、波浪能、温差能的技术路线，掌握海洋能前沿技术发展方向；对比和分析国外有代表性的海洋能商业化项目，了解和掌握选址标准、结构形式、设备选型、电力控制、海上安装和维护工程等成套关键技术；不断缩短与国外海洋能研发手段、实验室以

及产业基地建设的技术差距。

我国海洋能资源非常丰富，在严峻的能源形势下，国家已非常重视海洋能的开发与利用，我国海洋能的开发与利用有望迎来新一轮发展契机，开发利用的前景十分广阔。我们相信，开发海洋能将是21世纪人类的必然选择！

编 者

2015年6月



### 马强简介

马强，男，1983年出生，浙江宁波人。毕业于中国石油大学（北京），硕士学历。现供职于中海油研究总院，主要研究方向为国内外海洋能资源开发利用，参与了我国首个多能互补海洋能独立电力示范工程项目，发表论文数十篇。



### 马丽简介

马丽，中国科学院大连化学物理研究所工学硕士。曾参与肖钢博士《燃料电池技术》专著编写，并与肖钢博士合著了《黑色的金子——煤炭开发、利用与前景》《还碳于地球——碳捕获与封存》。目前，主要研究方向为新能源汽车技术，CO<sub>2</sub>资源化利用与埋存，以及煤层气开发技术等。

# 目 录

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| <b>1 海洋资源概述</b> .....                                   | 1  |
| 1.1 海洋能概况 .....                                         | 3  |
| 1.2 海洋能总体概况 .....                                       | 5  |
| 1.2.1 潮汐能 .....                                         | 5  |
| 1.2.2 波浪能 .....                                         | 6  |
| 1.2.3 温差能 .....                                         | 6  |
| 1.2.4 盐差能 .....                                         | 6  |
| 1.2.5 海流能 .....                                         | 7  |
| 1.3 国内外海洋能发展概况 .....                                    | 7  |
| <b>2 潮流能</b> .....                                      | 13 |
| 2.1 概述 .....                                            | 15 |
| 2.2 潮流能资源 .....                                         | 17 |
| 2.3 潮流能利用的原理与关键技术 .....                                 | 19 |
| 2.3.1 水平轴式海 / 潮流能发电技术 .....                             | 21 |
| 2.3.2 垂直轴式海 / 潮流能发电技术 .....                             | 22 |
| 2.4 潮流能发电项目概况 .....                                     | 24 |
| 2.4.1 英国 Marine Current Turbines Limited (MCT) 公司 ..... | 24 |
| 2.4.2 英国 SMD Hydrovision 公司 .....                       | 28 |
| 2.4.3 爱尔兰 OpenHydro 公司 .....                            | 29 |
| 2.4.4 美国 Verdant Power 公司 .....                         | 30 |
| 2.4.5 美国 UEK 公司 .....                                   | 31 |

|          |                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.6    | 英国 Pulse Tidal Ltd 公司 .....                              | 34        |
| 2.4.7    | 英国 Ocean Flow Energy 公司 Evopod .....                     | 36        |
| 2.4.8    | 英国 Atlantis Resources Co 公司 AK-1 000 <sup>TM</sup> ..... | 37        |
| 2.4.9    | 英国 Neptune Renewable Energy (NRE) 公司 NP1 000 .....       | 38        |
| 2.4.10   | 英国 Engineering Business 公司 .....                         | 40        |
| 2.4.11   | 英国 Tidal Energy Ltd 公司 .....                             | 41        |
| <b>3</b> | <b>波浪能 .....</b>                                         | <b>43</b> |
| 3.1      | 概述 .....                                                 | 45        |
| 3.2      | 波浪能资源 .....                                              | 46        |
| 3.2.1    | 全球波浪能资源 .....                                            | 46        |
| 3.2.2    | 我国波浪能资源 .....                                            | 47        |
| 3.3      | 波浪能发电技术 .....                                            | 49        |
| 3.3.1    | 波浪能发电系统的基本构成 .....                                       | 49        |
| 3.3.2    | 波浪能发电系统的安装模式 .....                                       | 55        |
| 3.3.3    | 波浪能发电系统的技术难点 .....                                       | 57        |
| 3.4      | 波浪能发电项目概况 .....                                          | 58        |
| 3.4.1    | 英国 WaveGen 公司 LIMPET .....                               | 58        |
| 3.4.2    | 英国 OSPREY .....                                          | 59        |
| 3.4.3    | 美国 AquaEnergy 公司 Buoy .....                              | 60        |
| 3.4.4    | 英国爱丁堡大学 Salter's Duck .....                              | 61        |
| 3.4.5    | 英国 OPD 公司 Pelamis .....                                  | 62        |
| 3.4.6    | 日本室兰工业大学摆式波浪发电站 .....                                    | 64        |
| 3.4.7    | 挪威 Wave Energy A S 公司 Tapchan .....                      | 65        |
| 3.4.8    | 英国 AWS 海洋能源公司阿基米德海浪发电装置 .....                            | 68        |
| 3.4.9    | 英国 Trident Energy 公司 CETO 漂浮系统 .....                     | 68        |
| 3.4.10   | 中国大万山岛 3 kW 和 20 kW 的岸基 OWC .....                        | 69        |

|                                              |           |
|----------------------------------------------|-----------|
| 3.4.11 中国广东汕尾 100 kW 的岸基 OWC .....           | 69        |
| 3.4.12 中国科学院广州能源研究所后弯管式波浪发电装置 .....          | 70        |
| 3.4.13 日本“海明号” .....                         | 70        |
| 3.4.14 日本“巨鲸号” .....                         | 72        |
| 3.4.15 其他项目 .....                            | 72        |
| 3.5 小结与展望 .....                              | 74        |
| <b>4 温差能</b> .....                           | <b>77</b> |
| 4.1 概述 .....                                 | 79        |
| 4.2 温差能资源 .....                              | 80        |
| 4.3 温差能发电原理 .....                            | 80        |
| 4.3.1 开式循环系统 .....                           | 80        |
| 4.3.2 闭式循环系统 .....                           | 81        |
| 4.3.3 混合循环系统 .....                           | 82        |
| 4.3.4 直接温差发电 .....                           | 83        |
| 4.4 温差能发电项目概况 .....                          | 83        |
| 4.4.1 美国 MINI-OTEC——世界第一座温差能电站 .....         | 84        |
| 4.4.2 日本鹿儿岛 1 000 kW 温差能电站——世界最大的温差能电站 ..... | 86        |
| 4.4.3 中国在温差能上的研究 .....                       | 88        |
| 4.5 小结与展望 .....                              | 89        |
| <b>5 盐差能</b> .....                           | <b>91</b> |
| 5.1 概述 .....                                 | 93        |
| 5.2 盐差能资源 .....                              | 94        |
| 5.3 盐差能发电原理 .....                            | 94        |
| 5.3.1 渗透压法 .....                             | 95        |
| 5.3.2 蒸汽压法 .....                             | 97        |
| 5.3.3 浓差电池法 .....                            | 98        |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 5.4 盐差能典型项目 .....        | 99         |
| <b>6 潮汐能 .....</b>       | <b>101</b> |
| 6.1 概述 .....             | 103        |
| 6.2 潮汐能资源 .....          | 103        |
| 6.3 潮汐能发电技术 .....        | 104        |
| 6.3.1 潮汐能发电原理 .....      | 104        |
| 6.3.2 潮汐能发电站的组成 .....    | 109        |
| 6.4 潮汐能发电项目概况 .....      | 111        |
| 6.4.1 法国朗斯潮汐能电站 .....    | 112        |
| 6.4.2 加拿大安纳波利斯潮汐电站 ..... | 113        |
| 6.4.3 俄罗斯基斯拉雅潮汐电站 .....  | 114        |
| 6.4.4 中国江厦潮汐电站 .....     | 114        |
| 6.5 小结与展望 .....          | 116        |
| <b>展望 .....</b>          | <b>117</b> |
| <b>参考文献 .....</b>        | <b>119</b> |

## ◎ 1 海洋资源概述

海洋能资源通常是指蕴藏于海洋中的可再生资源。它们都以海水为能量载体，以潮汐、波浪、温度差、盐度梯度、海流等形式存在于海洋之中，形成了潮汐能、波浪能、温差能、盐差能和海流能。





## 1.1 海洋能概况

浩瀚的海洋,蕴藏着丰富的资源,远远超过了陆地上已知的同类资源的蕴藏量。海洋生物资源、海底矿产资源、海水化学资源、海洋能源及海洋空间的开发,是海洋资源开发的主要领域。随着陆地资源的不断消耗、逐渐减少,人类赖以生存与发展的能源,将越来越依赖海洋。拥有地球上最丰富资源的海洋,是一个新兴的具有战略意义的开发领域。

海洋能是海水中蕴藏着的一切能量资源的总称,通常指海洋中所蕴藏的可再生的自然能源。广义的海洋能,甚至还包括海洋上空的风能、海洋表面的太阳能,以及海洋生物质能、海洋地热能等。狭义的海洋能,通常是指蕴藏于海洋中的可再生资源,它们都以海水为能量载体,以潮汐、波浪、温度差、盐度梯度、海流等形式存在于海洋之中,形成了潮汐能、波浪能、温差能、盐差能和海流能。除了潮汐能和海流能来源于太阳和月亮对地球的引力作用以外,其他几种能源都来源于太阳辐射。按存在形式,海洋能可分为机械能、热能和化学能。其中,潮汐能、海流能和波浪能为机械能,海水温差能为热能,海水盐差能为化学能。

海洋被认为是地球上最后的资源宝库,也被称为能量之海。地球表面的总面积约 5.1 亿平方千米,其中海洋的面积为 3.6 亿平方千米,占地球表面总面积的 71%,汇集了地球 97% 的水量。占据地球表面 71% 的海洋,是个超级巨大的太阳能接收体和存储器。太阳辐射到地球的能量,大部分落在海洋的上空和海水中,其中一部分被海洋吸收,转化为各种形式的海洋能,包括波浪能、温差能、盐差能、海流能等,每年大约对应 37 万亿千瓦时( $3.7 \times 10^{13} \text{ kW} \cdot \text{h}$ )的电量。每平方千米的大洋表面水层所含有的能量,相当于 3 800 桶石油燃烧放出的热量,因此有人把海洋称为“蓝色油田”。

蕴藏于海水中的海洋能是十分巨大的,其理论储量是目前全世界各国每年能耗量的几百倍甚至几千倍。而且,这些海洋能可以不断得到补充,都是取之不尽、用之不竭的可再生能源。根据联合国教科文组织 1981 年出版物的估计数字,5 种海洋能理论上可再生的总量为 766 亿千瓦。其中,温差能为 400 亿千瓦,盐差能为 300 亿千瓦,潮汐能和波浪

能各为 30 亿千瓦,海流能为 6 亿千瓦。实际上,上述能量是不可能全部取出利用的,只能利用较强的海流能、潮汐能和波浪能,以及大降雨量地域的盐度差,而温差能的利用则受热机卡诺效率的限制。估计技术上允许利用的总功率约为 64 亿千瓦,其中,盐差能 30 亿千瓦,温差能 20 亿千瓦,波浪能 10 亿千瓦,海流能 3 亿千瓦,潮汐能 1 亿千瓦。也有学者估计,全球海水温差能可利用功率达 100 亿千瓦,潮汐能、波浪能、海流能及海水盐差能等可再生功率均为 10 亿千瓦。

中国是个陆地大国,更是海洋大国。中国海洋面积达 299.7 万平方千米,约为陆地面积的 1/3。从拥有海洋资源的绝对数量来看,我国海岸线长度为 1.8 万千米,居世界第四位;大陆架面积位居世界第五;200 海里专属经济区面积为世界第十。

我国海洋能资源主要分布在东海和南海沿岸。据初步估算,我国海洋能资源总蕴藏量约为 4.31 亿千瓦,仅潮汐能和海流能两项,年理论发电量可达 3 000 亿度,我国海洋能资源的开发潜力是巨大的。

我国沿海潮汐能资源丰富,如浙江、福建两地潮汐能理论发电量就占了全国的 81.2%。我国沿海潮汐能总蕴藏量达 1.1 亿千瓦,理论年发电量为 2 750 亿千瓦时。我国沿海波浪能资源总蕴藏量为 0.23 亿千瓦,主要集中在台湾、广东、福建、浙江、山东等地,其中,台湾最多,占全国的 1/3。我国海流能资源主要分布在沿海的 130 个水道,据测算,可开发的装机容量约为 0.383 亿千瓦,理论年发电量约 270 亿千瓦时。其中,浙江、广东、海南和福建沿海的可开发资源量就占全国的 90%,能流密度较高的地方有杭州湾口、金塘水道、老山水道等。我国海水温差能按海水垂直温差大于 18℃ 的区域估算,具有商业开发前景的区域达 3 000 多平方千米,主要分布在南海中部深海区域,可供开发的温差能资源约为 1.5 亿千瓦,但分布极不平衡,东海沿岸最多,约占全国总量的 70%。目前温差能和盐差能是两种潜在的海洋能源,其商业开发尚需假以时日。

海洋能的特点主要体现在以下几个方面:

- ①蕴藏量丰富。海洋水体中蕴藏的能量巨大,而且可以持续再生,取之不尽,用之不竭。
- ②稳定性较好或者变化有规律。海洋能作为自然能源是随时变化着的,但海洋是个庞大的蓄能库,可以将太阳能以及派生的风能等以热能、机械能等形式储蓄在海水里,不像在陆地和空中那样容易散失。

海洋能中的温差能和海流能比较稳定,昼夜波动小,只稍有季节性的变化。潮汐能(包括因海水涨落带来势能的潮汐能和因潮水流动产生动能的潮流能)虽然变化,但其变化有规律可循。人们根据潮汐、潮流的变化规律,编制出各地逐日、逐时的潮汐与潮流预