

· 新能源丛书 ·

海洋能

——日月与大海的结晶

Ocean Energy — The Fruit of
the Sun , the Moon , and the Sea

肖 钢 马 强 马 丽 © 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



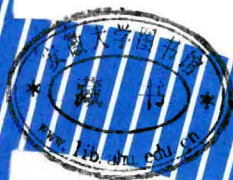
· 新能源丛书 ·

海洋能

——日月与大海的结晶

Ocean Energy — The Fruit of
the Sun, the Moon, and the Sea

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

海洋能——日月与大海的结晶/肖钢,马强,马丽编著. —武汉: 武汉大学出版社, 2013.7

新能源丛书

ISBN 978-7-307-10686-4

I. 海… II. ①肖… ②马… ③马… III. ①海洋动力资源—资源开发
②海洋动力资源—资源利用 IV. P743

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第070082号

责任编辑: 曲生伟 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: 湖北恒泰印务有限公司

开本: 787×1092 1/16 印张: 8.5 字数: 154千字

版次: 2013年7月第1版 2013年7月第1次印刷

ISBN 978-7-307-10686-4 定价: 49.00元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 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从通过电脑软件，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？

此套丛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。编者旨在通过此套丛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。



◎ 序 言（一）

（翻译稿）

能源是人类发展过程中最重要的因素，是发展的主要资源，对人类的衣、食、住、行等方面具有决定性的影响。同时，新能源对当今世界的重要性正在得到人们的普遍认同。作为世界工业催化行业的领军企业，哈尔杜·托普索公司也认为我们的世界正面临一个清晰而紧迫的需求——能源的新型、清洁和高效的利用方式。

我已经100岁了，比肖钢博士年长48岁，我们是难得的忘年交。大约20年前，年轻的肖钢博士在托普索公司开始他的职业生涯时，托普索家族就了解他并彼此成为好朋友了。从一开始结识他，他的才干以及他对多学科知识的驾驭能力便给我留下了深刻印象。我非常享受与他见面的时光，与他的每一次见面都是一个让我了解更多能源系统与大千世界的绝妙机会。时光飞逝，现在肖钢博士已经成长为一名世界级的领军科学家。他的科学技术知识面十分宽广，横跨无机化学、有机化学、电化学、物理化学和地球科学。他的热情、做事时的巨大激情以及他独特的人格魅力让人印象深刻。肖钢博士是英国皇家化学会院士，这是化学界一个殊胜的头衔，我为有这样年轻而优秀的朋友感到自豪。

肖钢博士近日告诉我他正在为中国读者编写一套“新能源丛书”。我非常高兴能为这套丛书作序，并借此机会向所有对新能源的进步感兴趣的同仁推荐肖钢博士的作品。

哈尔杜·托普索

托普索先生序言原稿

Energy is the most significant factor in human growth since it is the main resource for development and it determines food, transport, industry, housing and so on. At the same time, it is widely recognized that new energy is an area of increasing importance to our world. As one of the leading companies in the catalysis industry, Haldor Topsoe company fully shares the view that this world has a clear and compelling need to use our energy resources in new, clean and efficient ways.

I am now 100 years old. With an age difference of 48 years, I have enjoyed a friendship with Dr. Gang Xiao between generations. The Topsoe family has known Dr. Gang Xiao for 20 years, since he as a young man began his career with the company many years ago. Right from the beginning I was impressed by his talents and multidiscipline approach and I have always enjoyed his presence, and every time we are together I use the opportunity to learn more about energy systems and the wider world. Since our early encounters Dr. Xiao has developed into a world leading scientist with active knowledge across a broad spectrum of science and technology, including inorganic and organic chemistry, electrochemistry, physical chemistry, and geosciences. His enthusiasm, tremendous passion, and his unique appealing personality have always impressed me very much. Dr. Gang Xiao is a Fellow of the Royal Society of Chemistry (UK). This is a distinguished title in the chemistry world. I feel honored to have such a young and outstanding friend.

Dr. Gang Xiao recently told me that he is writing a set of books on new energy technologies to the Chinese readers. I am delighted to recommend Dr. Gang Xiao's books to all those interested in the progress and possibilities in the field of new energy.



哈尔杜·托普索先生简介

哈尔杜·托普索，1936年毕业于丹麦技术大学（DTU），1940年创立哈尔杜·托普索公司。公司成立70多年来，一直秉持着只有通过应用基础研究才能建立和保持独一无二的催化市场地位的理念，是世界工业催化领域家喻户晓的领军企业。由于成绩斐然，对社会的贡献巨大，哈尔杜·托普索先生曾被授予诸多国际荣誉，包括丹麦皇室授予的皇家大爵士勋章。

◎ 序 言（二）

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置。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，希望他主持的这套“新能源丛书”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。

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

2012 年 11 月

目 录

1 海洋资源概述	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
2 潮流能	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

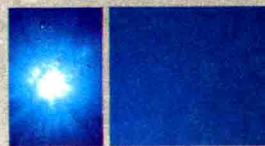
2.4.6	英国 Pulse Tidal Ltd 公司	34
2.4.7	英国 Ocean Flow Energy 公司 Evopod	36
2.4.8	英国 Atlantis Resources Co 公司 AK-1 000 TM	37
2.4.9	英国 Neptune Renewable Energy (NRE) 公司 NP1 000	38
2.4.10	英国 Engineering Business 公司	40
2.4.11	英国 Tidal Energy Ltd 公司	41
3	波浪能	43
3.1	概述	45
3.2	波浪能资源	46
3.2.1	全球波浪能资源	46
3.2.2	我国波浪能资源	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
4	温差能	77
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
5	盐差能	91
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
6 潮汐能	101
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
展望	117
参考文献	119

◎ 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