



海洋波浪能转换

[美] M. E. 麦考密克 著

海洋出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了波浪力学和波能转换的基本原理；从物理和数学两方面阐述了波能转换技术、性能及应用；详细讨论了机-电转换的方法以及环境对波能转换的影响等重要问题；总结了七十年代中期以来的波浪能开发利用的研究成果。

本书适用于从事能源开发的科技人员、管理人员阅读，也可作为大学有关专业的选修课教材。

Ocean Wave Energy Conversion
Michael E. McCormick
John Wiley & Sons, Inc. 1981.

海洋波浪能转换

[美] M. E. 麦考密克 著

许 适 译

刘鹤守 校

海 洋 出 版 社 出 版 (北京市复兴门外大街)
新华书店北京发行所发行 三环印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：8 1/8 字数：160千字

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷

印数：2000

统一书号：13193·0383 定价：1.60元

序

1974年，斯蒂文·索尔特 (Steven Salter) 在《自然》(Nature) 上发表的论文引起了公众对波能转换这一课题的注意。几乎在同时，《新科学家》(New Scientist) 上的一文报道了克里斯托弗·科克雷尔 (Christopher Cockrell) 对波面筏所作的实验。由于英国各岛的西海岸位于世界最狂暴的海区，波能理应受到该国的注意。因此，1975年英国能源部 (The United Kingdom's Department of Energy) 开始了一项研究从海洋波浪中用各种方法获取能量的宏伟规划，这一规划仍在继续进行，而且对这项工作已拨款约1500万英镑 (3000万美元)。

在开展海洋波浪能的研究中，其他国家也制定了它们自己的规划。在日本——这个也由风暴包围的国家，长期以来一直对这一课题感兴趣。早在四十年代，军官益田发明并制造了一种以波浪作动力的空气透平，这一透平的确利用日本海的波浪发出了少量的电。挪威人布多尔 (Budal) 和法尔内斯 (Falnes) 也发展了一种波能转换浮子。在瑞典、法国和美国，也对一批不同类型的系统进行了研究。

所有这些工作的第一个结论是：波浪产生的电力是很昂贵的。当1978年四种原始系统的初步设计指出，电力成本为20—50便士/千瓦·时 (40—100美分/千瓦·时) 时，英国的规划面临着真正的信任危机。在该领域内绝大多数的研究

工作者所作的实验指出，他们初步设计的电力成本均在此相同的范围内。

然而，波能界不会轻易放弃他们的努力。一年之内，成本降低到5—15便士/千瓦·时（10—30美分/千瓦·时），范围广泛的各种不同的解决方法已产生了鼓舞人心的结论。最近的工作正在证明，在现代技术范围内的工程，成本降低到接近上述值的下限是完全可能的。

我本人相信，海洋波浪所产生的电力成本将接近化石燃料能量的成本。世界波能界同人紧密组合的研究小组创造性的献身的劳动，将使这一结果得以实现。

当然，这一奖赏是不会轻易获得的。固然在风暴中看到海洋的巨大动力，我们不要忘记海洋波能作为一种能源是极为分散的。从如此恶劣的环境中攫取如此分散的能量，要求有很高水平的设计思想以及对流体动力学的和工程问题的充分学识。

麦考密克教授过去几年所作的贡献使我们对这些课题的了解受益不浅。正因为如此，我怀着极为高兴的心情向那些寻求了解这一非常吸引人的课题的人们推荐聪慧的麦克这几年内对我们都有用的编著。

英国波浪能技术支持组 (UK Wave Energy
Technology Support Unit)

计划经理人 (Program Manager)

C.O.J. 格罗夫-帕尔默 (Clive O.J. Grove-
palmer)

校 者 前 言

《海洋波浪能转换》(Ocean Wave Energy Conversion) 系威莱父子出版公司(John Wiley & Sons, Inc.) 出版的一套替代能源丛书中的一种。该丛书目的是介绍可再生能源的技术、经济性及其广泛应用。已刊书目除本书外, 还有: 阿尼荷特利(O. P. Agnihotri) 和古普塔(B. K. Gupta) 著的《有选择能力的太阳能吸收面》(Solar Selective Surface) 以及亨利·本基(Henry Bungay) 著的《生物质的另一种选择: 能源》(Energy the Biomass Options)。

本书作者M.E. 麦考密克(M. E. McCormick) 是(美) 马里兰州安纳波利斯的美国海军学院海洋工程系(Department of Naval Systems Engineering, U.S. Naval Academy Annapolis Maryland) 教授和系主任, 也是国际能源机构波浪能执行委员会(Wave Energy Executive Committee of the International Energy Agency) 的美国代表。他曾在美国海岸警卫队(U.S. Coast Guard) 的支持下作过波力发电助航的研究, 其后在(美) 能源研究和发展局(Energy Research and Development Administration) 从事波浪、海流和盐度差能转换的规划工作。1973年著《海洋工程波浪力学》(Ocean Engineering Wave Mechanics) 一书。七十年代以来陆续发表过许多波浪能转

换方面的论文。1982年12月，在北京召开的中美能源与环境会议上曾发表“气动式波浪能转换”(Pneumatic Wave Energy Conversion)一文。本书是作者根据研究、规划和教学中取得的经验写成的。

本书叙述海洋波浪能及其转换为电能的全过程。重点在波浪能的第一次转换即波浪能-机械能的转换上。作者把众多的转换方法归纳为九类，在原理、性能上作了物理和数学上的描述。本书特点是例题较多，使概念具体化。书中大部分数学推导对具有初等数学基础的人都可以理解。此外，附有较详细的参考文献目录。本书值得从事海洋能开发的科研、技术和管理人员详细阅读，亦可作为大学选修课程的教材，对一般关心海洋和能源开发的读者也是有益的。

译校本书时，删去了原书中的不重要部分：“丛书前言”、“作者前言”、每章后的参考文献（保留全书总参考文献）以及附录中的“若干波能转换专利”。为了方便我国读者，补编了专用名词中西文对照索引。

本书译校工作是由中国科学院广州能源研究所海洋能研究室组织的。在整理过程中，得到了周立无、梁贤光、蒋念东、冯满枝等同志的帮助。

刘鹤守

1983年10

目 录

第一章	绪言	(1)
第二章	波浪特性	(8)
2.1	线性波	(8)
2.2	非线性波	(17)
	A. 斯托克斯波	(18)
	B. 孤立波	(22)
2.3	不规则海浪	(24)
2.4	小结	(29)
第三章	波浪变换	(31)
3.1	折射	(31)
3.2	反射	(35)
3.3	衍射	(39)
第四章	波能转换	(48)
4.1	波浪能转换的基本方法	(48)
	A. 垂荡体和纵摇体	(49)
	B. 空腔共振器	(65)
	C. 压力装置	(77)
	D. 涌浪能量转换器	(83)
	E. 粒子运动转换器	(89)
4.2	近代的波能转换方法	(96)
	A. 索尔特点头鸭	(96)

	B. 科克雷尔筏	(107)
	C. 拉塞尔整流器	(119)
	D. 聚波方法	(127)
4.3	小结	(145)
第五章	能量转换、输送和贮存	(147)
5.1	机械-电能转换的基本方法	(147)
	A. 机械驱动发电机	(148)
	B. 气动和液动发电机	(153)
5.2	近代机械-电能转换的方法	(160)
	A. 线性感应	(160)
	B. 压电	(164)
	C. 质子传导	(170)
5.3	功率按比例换算	(173)
5.4	能量的传输和贮存	(176)
	A. 电缆	(176)
	B. 能量密集产品	(179)
5.5	小结	(181)
第六章	环境和系泊	(182)
6.1	环境考虑	(182)
	A. 公海作业	(183)
	B. 海岸区作业	(188)
6.2	锚系	(193)
	A. 公海作业	(194)
	B. 海岸区作业	(204)
附录一	符号解释	(210)
附录二	术语说明	(221)

附录三	参考文献	(226)
附录四	单位换算系数	(232)
附录五	名词中英对照索引	(233)
附录六	专用名词中英对照索引	(241)

第一章 绪 言

表面波浪是海洋能最引人注目的形式。波的能量易于转移——从其原始位置带走。波浪能有下列四种形式：（1）物体在表面上或靠近表面处运动产生的低能量、短周期的波；（2）风生成的海浪和涌浪；（3）地震扰动引起的“潮波”（不恰当的名称）或海啸；（4）月球和太阳的引力场引起的最大的波浪——潮汐（真正的潮波）。芒克（Munk）等人（1957）已估算了这些波的相对能量，如图 1·1 所示。潮汐是可预测的，如果风的特性已知，风成波也是可预测的。

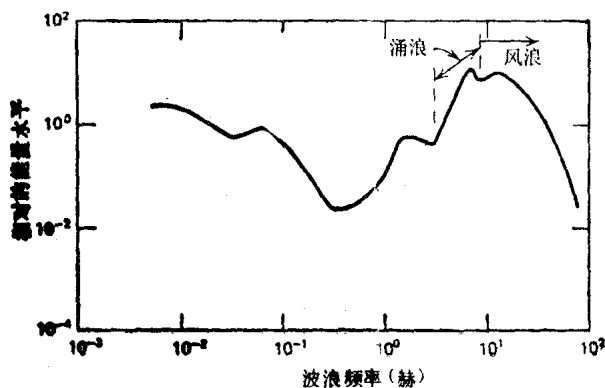


图1·1 自然生成的水波的相对能谱

(芒克, 1957)

图1·1所示两种类型的波均具有最高的相对能量。本书着重

在把风浪能量转换为更有用的型式上。在一大批出版物中已经讨论了潮汐能转换的问题，其中最值得注意的是由格雷 (Gray) 和加索斯 (Gashus, 1972) 编辑的书以及韦恩 (Wayne) 的报告 (1977)。

正确地说，风浪是太阳能的一种型式，因为风能主要源于太阳。陆地和水域两者均收集太阳辐射，而水是两者中更为有效的收集器。在被加温水体上的空气受热，温暖的空气上升到高层替代了较冷的、密度较大的空气，这些空气接着就下降，于是产生了热空气流。除这些垂直方向的气流之外，赤道水域上的暖空气上升并向空气较冷的极地移动。在极地，空气冷却下降并再次流向赤道，这样也形成了风的循环。这些风循环形式因陆地存在和地球回转而变化。图 1·2 所表示的是全球风循环图。有关风生成方面气象问题的深入

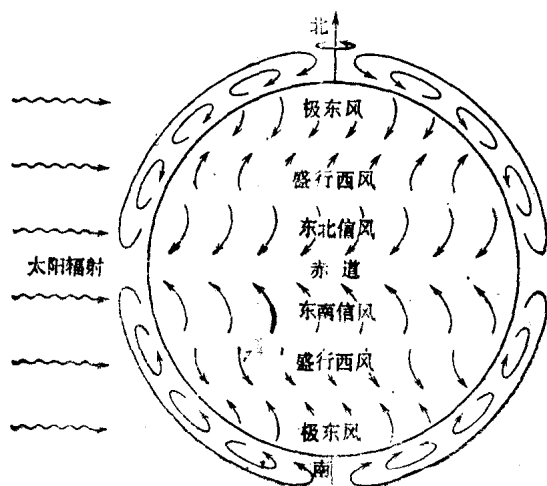


图1·2 太阳产生的风循环图

讨论，读者可以参考沃斯 (Voss) 1972 年的有关著作及迪特里希 (Dietrich, 1963) 的有关著作。

饶有兴趣的是，太阳能每转换一次，功率密度（与能量传播方向相垂直的单位面积的功率）都有所增加。例如，北纬 15° 的平均太阳日照为 0.170 千瓦/米²。该纬度太平洋中部地区的风速近似为 20 节（10 米/秒；指东北信风），因此，功率密度达 0.580 千瓦/米²，而由该风所产生的平均波浪功率密度达 8.42 千瓦/米²。然而，按全球上的功率比较，波浪平均功率密度是低的。威克 (Wick) 和艾萨克斯 (Isaacs, 1976) 对五种海洋能的总功率作了估计，如图 1.3 所示。

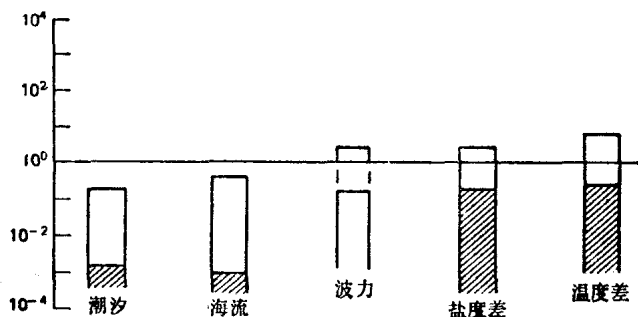


图 1.3 各种不同海洋能源的功率密度
(据威克和艾萨克斯, 1976)

由于波浪能是如此引人注目，因此，鼓舞了很多发明者去研究把海洋波浪能转换为更为有用形式的方法。例如，1898年3月1日，P. 赖特 (P. Wright) 提出了如图 1.4 所示的专利装置。在二十世纪初期，法国的波契克斯-普莱西克 (Bouchaux-Praceigue) 也建成了一套运转系统，帕姆 (Palme) 对此作了描述 (1920)。该系统的草图如图 1.5 所示。

该图是从麦考密克（1976）的论文中摘录出的。从图1·5看出，水表面的升起和下降激励了在其上部的空气柱，而空气柱接着驱动透平发电机。据说，该系统供给了布契克斯-普莱西克的全部电力需要。图1·4和图1·5所示只是很多波能转换设想中的两种。

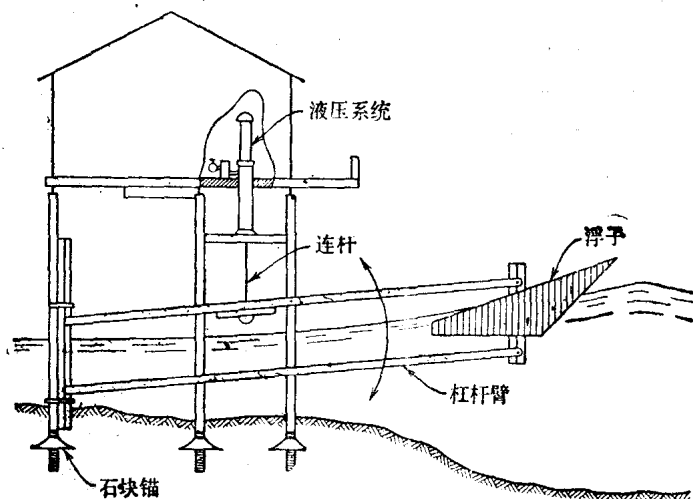


图1·4 赖特“波马达”专利草图

美国专利号599756 1898.3.1

(有悬臂的结构)。

实际上，在日本、北美、西欧以及英国有超过1000种波能转换技术的专利。而绝大多数专利设想只是少数几种最基本的概念的变化，这些基本概念将在本书第四章中讨论。

波浪能转换的经济性取决于：（1）波浪能源的大小和可靠程度；（2）转换系统的建造和维护费用；（3）从波能位置到使用地点的传送。麦考密克（1976）根据美国陆军

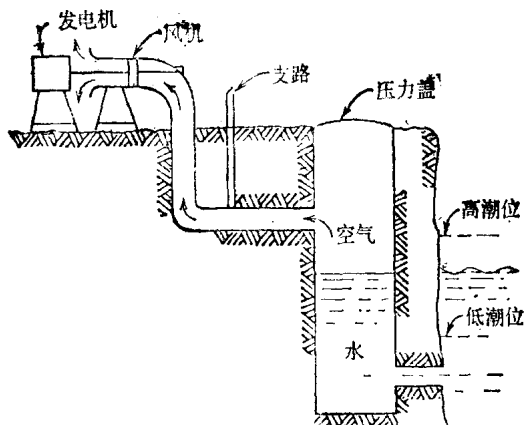


图1·5 布契克斯-普莱西克波能转换器
(据帕姆, 1020)

海岸保护手册(U.S. Army's Shore Protection Manual, 1973)所提供的观测波高和波周期数据算出了沿美国大陆海岸单位波峰长度的波浪功率。计算结果如图1·6所示。图中表示了月份单位波峰长度平均功率的季节变化。图1·6说明只在沿西北海岸线才有丰富的波能。皮尔逊(Pierson)和萨尔菲(Salfi, 1976)证实远离西北海岸的深水区的能量比图1·6所表示的数值大一个数量级。在这些深水波浪到达海岸期间,第三章中将要论及的频散和浅水变形过程减少了其单位波峰长度波浪功率。从能源估计看,深水区波能转换比在近岸水域更可行。深水区波能转换所引起的问题是找出一种经济地从转换位置向能量市场传送能量的手段。这个问题在海洋热能转换(OTEC)也同样存在。在这种转换中,能源主要在赤道水域中,也就是说位于北纬 20° 和南纬 20° 之间。

在海洋热能转换方面，已对能量传送问题作过彻底研究，读者可参见科罗佩卡 (Konopka) 等人 (1977) 的著作以便对这一课题获得更多的资料。在离岸80英里即128公里距离时，直流电传送是可能的。进而，能量转换地点离岸超过80英里 (128公里) 时，可制造能量密集产品，例如铝。这样，深

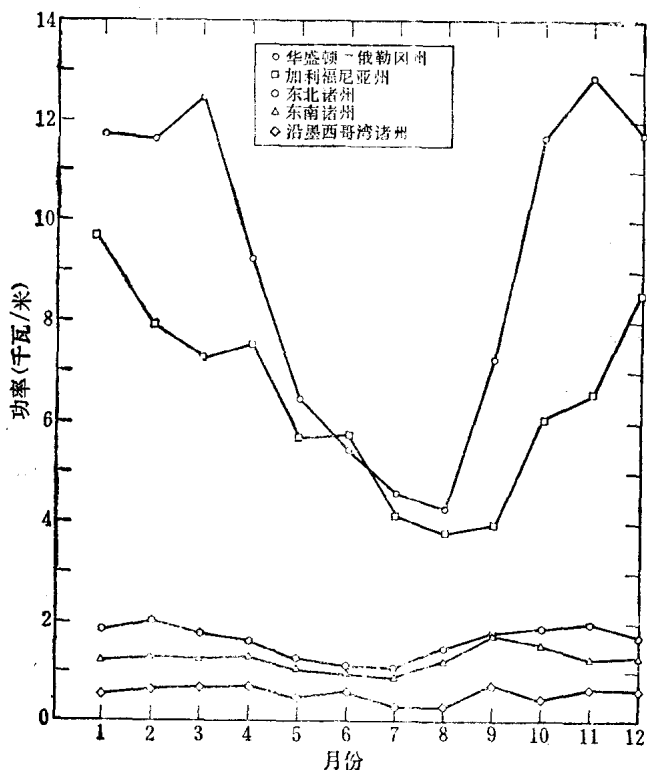


图1·6 一年间波能的变换
 根据海岸水域数据，但按深水假设计算。
 据麦考密克 (1976)

水域波能转换不仅是可行的，而且在经济上也许是合算的。

在本章绪言中所提到的所有课题均在后面各章中作较为透彻的讨论。

第二章 波浪特性

水波的两个可测量的特性是波高和波周期。这些特性可用种种波浪仪测量，在某些情况下也可用眼估测。记录波浪的许多数据实际上是眼睛观察出来的。据研究，观察到的波高与平均波高是不一致的，而与最高的三分之一波高的平均值很为接近。这种统计平均波称为有义波。

本章侧重介绍水波的数学描述。为了使读者了解这里所述材料的工作知识，在每一课题之后举了很多数字例子。应该注意到，还没有一种数学理论能精确地描述水波的性能。各种波浪理论只是在一定程度上对实际现象的简单近似。按本书的宗旨，我们应用了最简单的艾里 (Airy) 波浪理论，即线性波浪理论。书中列出了这种理论的结果，但不作推导。对波浪力学研究方面有兴趣的读者，建议阅读威格尔 (Wiegell, 1964)、麦考密克 (1973) 及伊彭 (Ippen, 1966) 编辑的书。

2.1 线性波

涌浪是波长较长而波高较小的波。当风暴在海上盛行时，生成了不同波高和周期的波。然而，当这些波从风暴区传开后，短周期的波消失而只留下了较长周期的波（即涌浪）。涌浪是最经常观察到的波，正因为如此，在波能转换上