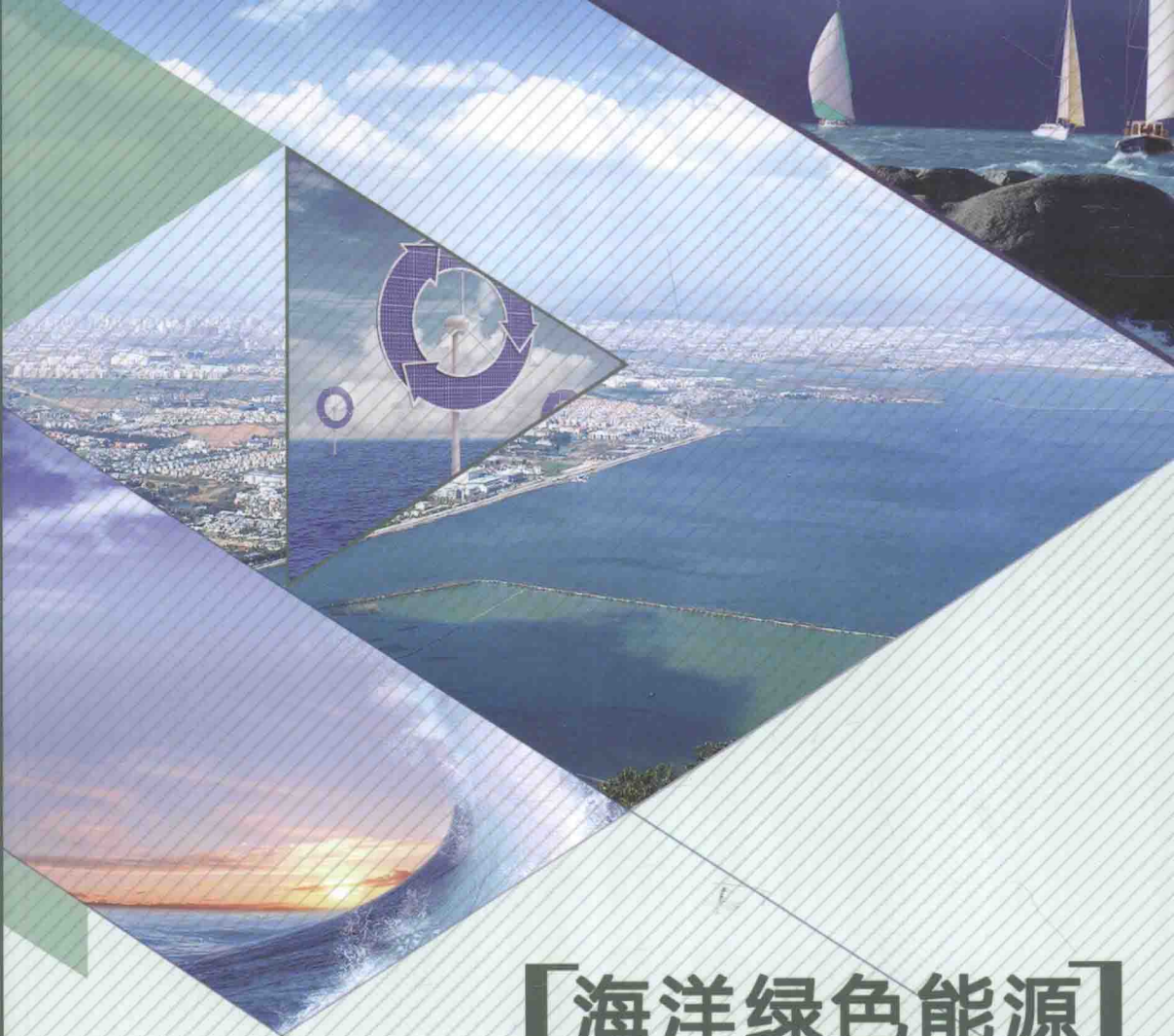




【海洋绿色能源】

Oceanic green energy

董昌明 编著

 科学出版社

海洋绿色能源

董昌明 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

海洋约占地球表面积的 2/3, 蕴藏着大量可再生能源, 又称绿色能源。本书从物理海洋学基本理论出发, 在海洋能源原理、开发技术、对环境的影响等几个方面详细介绍各种海洋绿色能源: 波浪能、潮汐能、温差能、盐差能、近岸风能, 同时还对中国近海海洋绿色能源的蕴藏量、开发现状和前景进行介绍。

海洋绿色能源的开发是中国可持续发展战略的重要组成部分。本书将为中国海洋绿色能源开发提供参考, 也为有志于海洋事业的学子们开启发展新思路。

图书在版编目(CIP)数据

海洋绿色能源/董昌明编著. —北京: 科学出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-03-048397-3

I. ①海… II. ①董… III. ①海洋动力资源-再生能源-研究
IV. ①P743

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 117158 号

责任编辑: 胡 凯 王腾飞 曾佳佳/责任校对: 张凤琴

责任印制: 张 伟/封面设计: 许 瑞 琦 蓉

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张: 12 1/8

字数: 244 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

人类在地球上已经繁衍生息了几百万年，可最近一百多年来，人类过度燃烧煤炭和石油燃料，大气层中的温室气体（如二氧化碳）含量急剧增高，引起温室效应，导致全球变暖、海平面上升、恶劣天气频发。另一方面，地球上煤炭、石油等不可再生资源的储藏量是有限的，寻找可以替代煤炭和石油的可再生能源已经成为人类继续在这个星球上生存的重要前提条件。

海洋约占地球表面积的 $2/3$ ，蕴藏了大量的可再生能源，又称绿色能源。本书从物理海洋学的基本理论出发，在海洋能源原理、开发技术、对环境的影响等几个方面详细介绍各种海洋绿色能源：波浪能、潮汐能、温差能、盐差能、近岸风能，同时还对中国近海海洋绿色能源的蕴藏量、开发现状和前景进行介绍。

第 1 章波浪能，包括海面波浪中的动能和势能。波浪的能量主要来源于海表上空的风能，波浪能的传递速率取决于风速大小，同时还取决于风和海水的作用距离。目前波浪能主要转化为电能使用，或者为远海的国防和海洋建筑设施提供能量，另外波浪能还可用来供热、抽水、制氢和淡化海水。

第 2 章潮汐能，指在涨潮和落潮过程中产生的势能。潮汐能的强度和潮头数量与落差有关，通常潮头落差大于 3m 的潮汐才具有开发利用价值。潮汐能是一种绿色清洁的海洋能源，分布广泛，蕴藏量巨大，没有季节变化，是一种可持续发展的稳定能源。

第 3 章温差能，指海洋表层海水和深层海水之间水温差的热能，是海洋能源中的一种重要形式，温差能的主要利用方式为发电，也可利用海水的温差对海洋探测仪器中电池进行持续充电。

第 4 章盐差能，指海水和淡水之间或两种含盐浓度不同的海水之间的化学电位差能，是以化学能形态出现的海洋能，主要存在于江河与海洋的交接处。盐差能是海洋能中能量密度最大的一种可再生能源。

第 5 章近岸风能，是地球表面大量空气流动所产生的动能。在海洋上，风力比陆地上更加强劲，方向也更加单一，据专家估测，一台同样功率的海洋风电机在一年内的产电量比陆地风电机高 70% 。风能发电是将风力作用于叶轮，将动能转换成机械能，从而推动叶轮旋转，再通过增速机将旋转的速度提升，来促使发电机发电。

第 6 章介绍了中国近海海洋绿色能源的分布和开发情况。

本书是在南京信息工程大学海洋数值模拟与观测实验室完成的，该实验室团

队是一支有志于海洋事业的朝气蓬勃的科研队伍。除实验室主任董昌明教授外，参与各个章节撰写的还有：曹玉晗和余洋（第1章），蒋琳和董蔚远（第2章），秦丹迪和高晓倩（第3章），王青玥和蒋琳（第4章），张宇彤、崔静璇和刘娴（第5章），徐广珺（第6章），余洋、孙轶和蒋星亮负责最后文献的整理和初稿的排版，余洋同时负责本书出版联系事宜。

本书得到了国家自然科学基金项目（项目编号：41476022）、国家海洋局国际合作项目（项目编号：GASI-IPOVAI-05）以及江苏省创业创新团队项目等的大力支持。

海洋绿色能源的开发是中国可持续发展战略的一个重要乐章，然而有关这个方向的研究还处于初始阶段，本书的出版希望能为中国海洋绿色能源开发提供参考，也为有志于海洋事业的学子打开一扇窗户。本书难免存在这样或那样的缺憾，敬请读者批评指正。

编 者

2016年6月

目 录

前言

第 1 章	波浪能	1
1.1	波浪	1
1.1.1	波浪的分类	1
1.1.2	波浪的简谐波形式	3
1.1.3	波浪的要素	4
1.1.4	简单波浪运动理论	5
1.1.5	近岸环境对波浪的影响	7
1.1.6	海浪谱概念	12
1.2	波浪能理论	16
1.2.1	波浪能定义	16
1.2.2	波浪能的传输	17
1.2.3	波浪能的分布	18
1.2.4	波浪能可行性评估	19
1.2.5	波浪的观测	20
1.3	波浪能技术	22
1.3.1	波浪能技术发展沿革	22
1.3.2	波浪能技术发展现状	25
1.3.3	波浪能技术发展前景及问题	30
1.4	波浪能提取的环境影响	32
1.4.1	概述	32
1.4.2	波浪能的区域资源概况可行性分析	33
1.4.3	波浪能的开发对环境的影响	34
第 2 章	潮汐能	37
2.1	潮汐理论和潮汐能理论	37
2.1.1	潮汐	37
2.1.2	潮流	40
2.1.3	潮汐能	40
2.1.4	潮汐能的分布情况	41
2.2	潮汐能发电技术	43

2.2.1	发电技术	43
2.2.2	潮汐能资源的计算方法	50
2.2.3	发展现状及前景	55
2.2.4	潮汐能发电的优势和局限性	57
2.3	潮汐能发电站的环境效应	58
2.3.1	潮汐能开发的环境效应	58
2.3.2	环境影响因子	61
2.3.3	环境受体	66
2.3.4	挑战与建议	70
第3章	温差能	72
3.1	理论概述	72
3.1.1	海洋温度的分布特征	72
3.1.2	海洋温差能的分布	75
3.2	技术原理与工厂设置	76
3.2.1	温差能的技术原理	76
3.2.2	海洋温差能电力工厂的设置和分类	79
3.3	OTEC 循环系统性能指标的计算	81
3.3.1	循环系统简介	81
3.3.2	相关性能指标的计算	82
3.4	发展现状	85
3.4.1	国际研究进展	85
3.4.2	国内研究进展	89
3.5	对环境的影响	90
3.5.1	存在问题	90
3.5.2	应对措施	92
3.6	展望	93
3.6.1	发展前景	93
3.6.2	认识与建议	96
第4章	盐差能	98
4.1	理论概述	98
4.1.1	海洋盐度	98
4.1.2	盐差能	103
4.2	发电技术	107
4.2.1	理论装置	107
4.2.2	发展现状与前景	110

4.3 综合影响	114
4.3.1 水文学与水体化学影响	114
4.3.2 对底栖生物的影响	118
4.3.3 环境影响可能性讨论	118
4.3.4 社会影响	120
第5章 沿岸风能	121
5.1 海洋沿岸风能理论	121
5.1.1 风的形成	121
5.1.2 风的分类	122
5.1.3 风能的形成	126
5.1.4 风和风能的描述	127
5.1.5 海上风能的发展	128
5.2 风能的利用原理与应用技术	132
5.2.1 风力涡轮发电机技术	132
5.2.2 风帆助航	137
5.2.3 风力致热技术	143
5.2.4 风力提水技术	145
5.3 海上风力发电对环境的影响	147
5.3.1 海上风力发电的优势	147
5.3.2 海上风电也是一把“双刃剑”	147
5.3.3 中国海上风电——在曲折中不断发展	152
第6章 中国近海海洋能资源	154
6.1 波浪能资源	154
6.1.1 波浪能资源分布	154
6.1.2 波浪能资源的开发条件	157
6.1.3 我国波浪能资源利用现状	157
6.1.4 波浪能资源开发的建议	158
6.2 潮汐能资源	158
6.2.1 潮汐能资源分布	159
6.2.2 潮汐能资源的开发条件	160
6.2.3 我国潮汐能资源利用现状	160
6.2.4 潮汐能资源开发的建议	162
6.3 温差能资源	162
6.3.1 温差能资源分布	162
6.3.2 温差能资源的开发条件	163

6.3.3	我国温差能资源利用现状	164
6.3.4	温差能资源开发的建议	165
6.4	盐差能资源	165
6.4.1	盐差能资源分布	166
6.4.2	盐差能资源的开发条件	166
6.4.3	我国盐差能资源利用现状	166
6.4.4	盐差能资源开发的建议	166
6.5	近海风能资源	167
6.5.1	近海风能资源分布	167
6.5.2	近海风能资源的开发条件	169
6.5.3	我国近海风能资源利用现状	169
6.5.4	近海风能资源开发的建议	172
6.6	海洋能资源开发的发展前景	172
参考文献		174
后记		185

第1章 波浪能

波浪是海洋中一种海水的运动形式，其具有相当大的机械能。本章主要介绍波浪运动的基本理论、基本方程、提取波浪能的技术以及波浪能提取对环境的影响。

1.1 波浪

早期人类对波浪一般怀着敬畏之心，想着怎么去防范它对海岸工程的破坏，并未曾想过去利用波浪，去掌控波浪。随着科学技术的日益进步，以及人类对资源的渴求，海洋能源作为一种绿色清洁的能源逐渐进入人类的视线，波浪能是海洋能源中开发利用最早的一种能源。

当具有自由表面特征的液体受到扰动后，局部的质点离开原本的平衡位置做周期性的起伏运动，这便形成了波浪，波浪运动能够传播能量。

1.1.1 波浪的分类

波动是海水运动的常见形式之一。波动是指受到外力后水质点离开原本平衡的位置做准周期性或周期性的运动。但因为流体的连续性，会带动周围的水质点一起运动，造成其在空间上传播的运动状态。从波动的恢复力来划分，引起波动的力有表面张力、重力和科里奥利力等。

由风驱动的波动现象是最为人们熟知的，其周期在几秒至几十秒之间。太阳能量通过辐射传递到地球，由于地貌和位置的不同，各区域所产生的温度不同，导致气压不同，形成了风，因此风是太阳能量的衍生物之一。风再将能量传输到海洋上，也就产生了波浪，因此波浪是海气相互作用中重要的动力因素。

风时：指在同一个方向上，风连续作用于海面的时间。

风区：指存在这样一个水域，水域里各点风速和风向基本相同。其中沿着风向，自风区的下沿至上沿的距离为风区的长度，即风距。

风生波浪由于其作用的时间、区域、力大小的差异，又可将波浪分为风浪、涌浪、混合浪。

风浪：指在风的直接作用下产生的海面波动。其主要特征为波形杂乱无章，波面陡且粗糙，常伴有浪花和大片泡沫，其波高、波长、周期无固定大小，传播方向大致与风向一致，且波浪的大小与风力的等级和作用时间密切相关。

涌浪：指风浪离开风区后，传播至风力甚小或者无风区的波动现象，通常也指风浪所在风区的风速、风向突然改变后的波动现象。其主要特征为波形规则有序，波面平滑，具有长波峰线和长周期。

混合浪：海洋里经常出现既有风浪又有涌浪，多种波系叠加而成的波动现象，即为混合浪。

流体力学指出：两种密度不同的流体之间发生运动时，其分界面上就会产生波动。空气和海水发生相对运动，在海面上就会形成波动，即风浪。随着风速的增长，波高也随之增长，其随着风速的变化速度甚至快于其随深度的变化速度。风浪的发展主要取决于三个因素：风速、风时、风区。图 1.1 描述的是风浪随其中一个要素成长的分布图，图中风的风向沿 Ox 方向， O 点处即为风区的上沿，在风区内选定一个 A 点， OA 的长度为该选定点的风区长度，即该风区的风距。假设风速是一个定值，风向也是固定不变的，则风区内各点生成的波形均相同，各点风浪沿着图示风向传播的过程中汲取风中的能量，不断成长，因此 A 点处的风浪是由风区的上沿处传播来的。距离 A 点较近的点，传播到 A 点的时间较短， A 点从该点汲取的能量也较少，而距离 A 点较远的点，传播到 A 点的时间较长，因此汲取的能量较多，直到图中 O 点处的波浪传播到 A 点处时， A 点处的风浪成长到最大值，即为定常状态。从 A 点风浪的成长过程来看，风浪的大小由风速和风距决定。 A 点处风浪达到定常状态后， A 点右侧的波浪大小尺度与 A 点相同，但是这些点处的风浪并未达到定常状态，风区最上沿 O 点的波浪传到这些点还需一段时间，也就是说，下沿方向的点还能继续汲取能量，继续成长，这个阶段称为过渡状态，此时下沿处的点的风浪大小就受到风时的控制（文圣常，1984）。

然而，当风速为定值时，即使风距和风时都非常大，风浪也不会无限期成长，因为风浪在成长过程中汲取能量的同时，也在不断地耗散能量。当能量的收支达到一个平衡时，波浪就处于一个充分成长的状态。

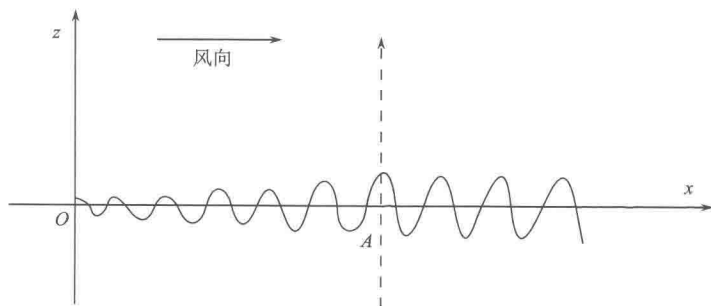


图 1.1 风浪随风区的成长示意图

涌浪在传播过程中会发生波高逐渐减小的现象，主要是由于以下三个原因：一是海水的涡动黏滞性和空气阻力的影响，二是弥散作用，三是角散作用。

弥散：弥散作用又可称为离散作用。指不同周期、不同波长、不同振幅的波列，在传播的过程中由于波速的不同，相互分离开的现象。

角散：波浪传播出风区后，各个波列向不同方向分散传播（或扇形散开）的现象。

涌浪还有一个重要特点，即在传播的过程中波高虽然在减小，但波长和周期仍在增长，而波速又和波长成正比（在下文中有详细的公式），所以涌浪的传播速度非常快，传播距离很长。

1.1.2 波浪的简谐波形式

根据涌浪的特征，可以将其视为一个简谐波。

简谐波可以表示为

$$\xi = a \cos(kx - \omega t) \quad (1.1)$$

式中 ξ 为波面， a 为振幅（即波面离开水平面的最大垂直距离）， k 为波数（即 2π 距离里波的数量）， ω 为圆频率或角速度（即 2π 个单位时间里波振动的振动数），波形如图 1.2 所示。

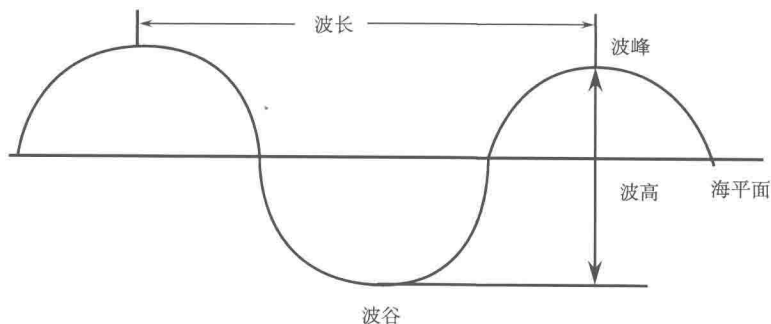


图 1.2 波浪要素的简谐波示意图

波峰：波剖面高出海平面部分，最高点称作波峰顶。

波谷：波剖面低于海平面部分，最低点称作波谷底。

波长 λ ： $\lambda = 2\pi / k$ ，相邻波谷（波峰）之间的距离。

周期 T ： $T = 2\pi / \omega$ ，相邻波谷（波峰）先后通过一个固定的点，所经历的时间。

波高 H ： $H = 2a$ ，定义为波浪振幅值的两倍，指波峰与相邻波谷间的垂直距离。

波速 c ： $c = \lambda / T$ ，波谷（波峰）在单位时间内的水平位移。

波陡 δ ： $\delta = H / \lambda$ ，表示波形的陡峭程度的量，波浪超过一定波陡，就会发

生破碎。

波令 β : $\beta = c/v$, 其中 v 是风速, 即波令为波速和风速的比值, 表示波浪发展程度的量。

波峰线: 指通过波峰与波浪传播的方向垂直的线。

波向线: 指正交于波峰线的线。

1.1.3 波浪的要素

波浪的运动是一种随机的现象, 在风的作用下波浪的波高、波长、周期等都不是一个固定的值。描述一个波系的大小, 通常采取两种方法: 特征波分析法和波谱分析法。特征波的分析方法是对波高和周期进行统计分析。特征波有两种定义方法, 一是欧美国家多采用的部分大波平均值的方法, 二是苏联采用的超值累计率法。波谱分析法主要是描述波浪的能量相对于方向和频率等其他变量的分布情况。

根据特征波的性质, 定义以下几种具有代表性的波高:

平均波高: 指将连续观测到的波高值逐个相加, 再将总和值除以波高的总个数, 得到的值就是平均波高 $\bar{H}$, 表达式为

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (1.2)$$

式中 N 为观测的波高总个数; i 为观测到的波的序列号, 下文公式中出现的 N 和 i 沿用同样的定义。

三分之一波高 (有效波高 SWH): 一般将大约连续 100 个波作为统计分析的波列标准段, 在该波列中各波浪的波高按从大到小排列, 取前三分之一大波波高的平均值作为三分之一波高值。

十分之一波高 (显著波高): 波列标准段中最大的 10 个波的波高平均值, 这种波高常用于工程设计中。

累计频率波高: 这是一种特征波高, 通过给定累计的频率在波列中寻得对应的波高, 用 H_F 表示, 反映该波高值在波列中出现次数的概率性。

均方根波高: 波列中所有波高平方和的平均值开根号所得的值, 表达式为

$$H_{\text{rms}} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

目前特征波的波长统计分布函数是一种经验性函数, 服从瑞利分布

$$f(L) = \frac{\pi}{2} \frac{L}{\bar{L}^2} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{L}{\bar{L}} \right)^2 \right] \quad (1.4)$$

式中 $\bar{L}$ 为平均波长； L 为深水波长。

特征波的周期具有统计性质， $\bar{T}$ 称为特征周期，表达式为

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (1.5)$$

特征周期是相邻波峰越过空间某一固定点（可以将该点定义为跨零点）经历的时间间隔。若将跨零点作为固定点，该周期即为跨零周期，即可把跨零点定义的平均周期变为不规则波在单位时间内横截零线的次数问题，以便于理论的处理。

类比有效波高，同样有效波周期可以定义为波列中前三分之一大波的平均周期，表达式为

$$T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} T_i \quad (1.6)$$

1.1.4 简单波浪运动理论

描述波浪运动有两个最著名的理论：微振幅波理论和有限振幅波理论。

1) 微振幅波理论

微振幅波可以看做二维的正弦波，理论假设波动的振幅相对波长无限小（文圣常，1984）；忽略海水内摩擦力，认定重力是其唯一恢复力；流体为无黏不可压缩的且做有势运动；海底水平光滑；流体表面压强等于大气压。

水深 h 为定值的前提下，波剖面方程可表示为（冯士筭等，2006）：

$$\xi = a \sin(kx - \omega t) \quad (1.7)$$

g 为重力加速度，频散关系可表示为

$$\omega^2 = kg \tanh(kh) = kg \tanh(2\pi h/\lambda) \quad (1.8)$$

如果 $h \geq \frac{1}{2}\lambda$ ，此时的波动称为深水波或短波， x （向右为正方向）和 z （向上为正方向）方向上的速度分量 u 、 w 可表示为

$$\left. \begin{aligned} u &= ack \exp(-kz) \sin(kx - \omega t) \\ w &= -ack \exp(-kz) \cos(kx - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

式中 c 为波形的移动速度，大小等于角速度与波数的比值。

从式（1.9）可以得到波运动在水平和垂直方向上都具有周期性，随着海水深度的增加而减小。由于该理论假设振幅相对波长无限小，水质点运动的距离小，所以公式（1.9）中的 x 和 z 可以由平衡位置的 (x_0, z_0) 来表示，可得到公式（1.10）：

$$\left. \begin{aligned} u &= ack \exp(kz_0) \sin(kx_0 - \omega t) \\ w &= -ack \exp(kz_0) \cos(kx_0 - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

对式 (1.10) 积分后作平方和, 并且消去 t , 即可得到

$$(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 = a^2 \exp(2kz_0) \quad (1.11)$$

由公式 (1.11) 可以得到水质点的运动轨迹为圆形, $a \exp(kz_0)$ 是水质点运动的半径, 在海表面处 $z_0 = 0$, 水质点的半径为 a , 海表面以下, 半径随深度 z 指数递减, 水质点运动速度分布如图 1.3 所示, 从图中可以看出水质点速度分布的特点是波峰和波谷处水平速度达到最大, 垂直速度为零, 而在平均海平面处, 水平速度为零, 垂直速度达到最大。若水质点处于波峰前的波面与平均海平面的交点位置时, 其垂直速度向上, 形成海水辐聚区; 若在波峰后的交点处, 其垂直速度向下, 形成海水辐散区。因此波形随着水质点这种规律且连续的运动不断向前传播。

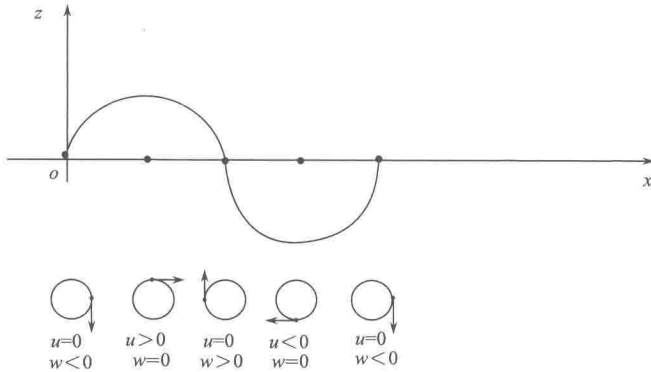


图 1.3 水质点运动速度分解示意图

在微振幅波理论中波速与波长的关系可表示为 (冯士筭等, 2006)

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh(kh)} \quad (1.12)$$

波长和周期的关系可表示为 (冯士筭等, 2006)

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (1.13)$$

波速与周期的关系可表示为 (冯士筭等, 2006)

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \quad (1.14)$$

以上三个表达式是波动里的普遍关系式, 均可适用于计算长波和短波两种波动形式。

深水波的条件是 $h \geq \frac{1}{2}\lambda$ ，即 $\tanh(kh)$ 可以近似地看做 1，那么以上三个表达式可以简化为公式 (1.15)：

$$\left. \begin{aligned} c^2 &= \frac{g\lambda}{2\pi} \\ c &= \frac{gT}{2\pi} \\ \lambda &= \frac{gT^2}{2\pi} \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

浅水波的条件为 $h < 20\lambda$ ， $\tanh(kh)$ 近似等于 $2\pi\frac{h}{\lambda}$ ，波速可表示为

$$c = \sqrt{gh} \quad (1.16)$$

2) 有限振幅波理论

有限振幅波理论与微振幅波理论的区别就在于其振幅较长，与实际海浪的波形更相近，且波面形状不等同于正弦波，是一种波峰陡峭、波谷平坦的非对称曲线。该理论最早是由斯托克斯提出，斯托克斯波剖面可以近似地看做是一条摆线，波峰陡而窄，波谷平且宽，与涌浪的剖面类似，其水质点振动中心在平均海平面上方 $\frac{1}{2}ka^2$ 处。

在该理论下波速与波高的关系式为（冯士筭等，2006）

$$c^2 = \frac{g\lambda}{2\pi}(1 + k^2a^2) = \frac{g\lambda}{2\pi}(1 + \pi^2\delta^2) \quad (1.17)$$

实际海洋中，水质点的运动轨迹是不封闭的，有限振幅波理论描述的水质点轨迹也是不封闭的，因此其水平和垂直方向上的运动位移分别可表述为（冯士筭等，2006）

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= -a \exp(kz_0) \sin(kx_0 - \omega t) + k^2a^2c \exp(2kz_0) \cdot t \\ \eta &= a \exp(kz_0) \cos(kx_0 - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

1.1.5 近岸环境对波浪的影响

波浪传播至近岸后由于各种原因会产生一系列变化，例如波浪的折射、反射、绕射、浅水效应以及波浪破碎等。在近岸，除了波浪的波高、波长等因素会发生变化，波能也会随时间、空间而改变，因此人类建设波能提取的设施时应当充分考虑近岸环境对波能的影响。

1) 波浪的折射

波浪折射发生的主要原因是水深的减小。在浅水处，波列速度随着水深的减小而变慢，波浪的传播方向也发生了相应的变化，波列的波峰线会随海底地形发生弯曲，直至与等深线平行。在近岸海域，等深线与海岸线相平行，因此波峰线到达岸边也会近似平行于海岸线。波浪折射过程中，周期虽然不变，但是其波长会减小，且波高发生变化。海浪折射现象如图 1.4 所示，图中线 MN 为等深线， h_1 为外海的深度， c_1 为波速， h_2 为波浪传至靠近海岸一侧的深度， c_2 为 h_2 处的波速， AB 和 $A'B'$ 为波峰线， α_1 和 α_2 是波峰线和等深线相交的角度。

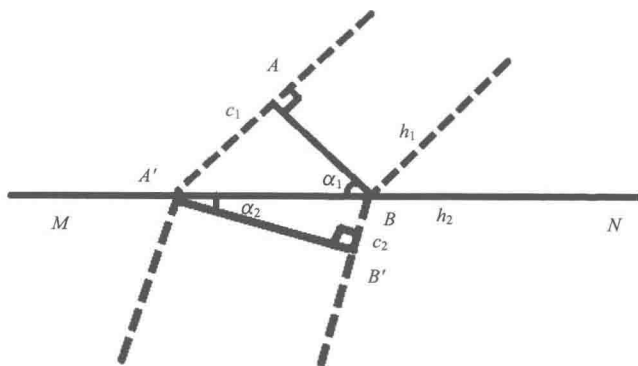


图 1.4 海浪折射示意图

波浪的折射会使得沿岸波能分布不均，发生折射区域的能量就会发生辐聚和辐散，其中拥有更大波高的波动与区域的辐聚有关，如图 1.5 所示。假设在传播过程中波浪周期不变，忽略能量损失，即能量恒定，则

$$Encb = E_0 n_0 c_0 b_0 \quad (1.19)$$

式中 E 为浅水中单位面积水柱内的波动能量； E_0 为深水中单位面积水柱内的波动能量； b 为浅水区域中两个波向线间的距离； b_0 为深水区域中两个波向线间的距离； n 为浅水波能传播率； n_0 为深水波能传播率； c 为浅水波速； c_0 为深水波速。 E 正比于波高 H 的平方，公式 (1.19) 可变化为

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \sqrt{\frac{n_0 c_0}{nc}} = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \sqrt{\frac{n_0 L_0}{nL}} = K_r K_s \quad (1.20)$$

上式说明波高的变化主要是取决于折射因子 K_r 和浅水系数 K_s 两个因素：