

当代科技重要著作·交通领域

# 海岸及海洋工程手册

(第一卷)

李玉成 陈士荫 俞聿修 等译



大连理工大学出版社

全国水运工程标准技术委员会系列文献 012(1992)

# 海岸及海洋工程手册

## 第一卷

### 波浪现象及海岸建筑物

[美] 赫尔别克 主编  
李玉成 陈士荫 俞聿修等译  
李玉成 陈士荫 校

大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

## 内 容 简 介

本书涉及波浪、海水位和海岸工程结构的广泛内容,诸如重力波基本理论,流函数理论,短峰波,海浪谱,深浅海的波浪推算,台风浪,设计波的确定,波浪参数的分析,潮汐,风暴潮,海啸,海水位升高对人类的影响,温室效应,波浪与水流的相互作用,波浪爬高,越浪;随机波与直堤相互作用,堆石堤及其新发展,桩基防波堤,离岸堤,柔性结构防波堤,防波堤设计的最新发展,防波堤的概率设计,海堤、丁坝、人工岛及极地建筑物等,共 24 章。本书作者 19 人遍及欧美日澳中等国家,多数系海岸及海洋工程领域著名的专家学者。

全书内容兼顾理论与实用,附有大量图表及详尽的文献目录。既可作为教学参考书,又可作为工程实用手册。可供海洋物理、海洋流体力学、海岸工程、海洋工程、造船工程、水产工程和水利工程各专业工程技术人员、研究人员及大专院校师生在工程设计、施工、研究与教学中参考。

## 海 岸 及 海 洋 工 程 手 册

Haian ji Haiyang Gongcheng Shouce

(第一卷)

### 波浪现象及海岸建筑物

[美] 赫尔别克主编

李玉成 陈士荫 俞聿修等译

李玉成 陈士荫校

---

大连理工大学出版社出版发行

邮政编码:116024

辽宁师范大学计算机系激光照排

大连海运学院印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16

印张:57

字数:1312 千字

1992 年 2 月第 1 版

1992 年 2 月第 1 次印刷

印数:001—1000 册

---

责任编辑:水舟 刘杰

封面设计:姜严军

责任校对:寸 土

---

ISBN 7-5611-0733-1/U·26

定价:56.00 元

# 译 者 序

《海岸及海洋工程手册》(《Hand book of Coastal and Ocean Engineering》),由美国著名的海岸及海洋工程专家 John B. Herbich 教授主编,美国、日本等国家的五十多位有关专家参加编著。全书分为三卷,约三千页,由美国海湾出版社于 1990 年 10 月到 1991 年 3 月用英文出版。它是当今世界上版本最新,范围最广,内容最全,最具权威性的海岸及海洋工程手册。

鉴于该手册版本新,议题广泛,取材丰富,叙述深入,并附有应用说明等特点,它将有助于我国海岸及海洋工程界及时了解当前国际上在这一领域内的历史沿革、研究现状与发展前景,也有助于了解在工程设计及应用方面的世界水平及动向。它既是一本工程手册,一套工程百科全书,又是一部研究指南。在目前我国经济建设进入一个以科技发展为主要推动力的新时期内,相信本手册中译本的出版对我国海岸及海洋工程方面的工程技术人员、研究人员、高校教师、本科生及研究生将提供一部有价值的参考书。

在翻译出版本手册第一卷的过程中,我们得到了全国水运工程标准技术委员会、交通部水运规划设计院、交通部第一航务工程勘测设计院、交通部第三航务工程局及其设计所、交通部第三航务工程勘测设计院的慷慨资助和大力支持,使本译著得以出版,在此谨表深切谢意。

参加本卷翻译工作的有申震亚(第 1 及 9 章),俞聿修(第 2、3、4、5、16、17、18 及 19 章),潘锦嫦(第 6、7 章),陈士荫(第 8、21、22、23 及 24 章),李乃杨(第 10 及 11 章),包文俊(第 12 及 13 章),以及李玉成(第 14、15、20 章及其它部分)。最后由李玉成、陈士荫负责校译。

大连理工大学出版社为本书中译本的编辑、出版付出了辛勤的劳动。

1991 年 6 月

# 原文序

为了提供在海岸及海洋工程方面最新的技术发展,特别是研究工作的近期成果,迫切需要一本海岸及海洋工程手册。近几十年来,在这些领域中取得了巨大的发展,有关成果已大量发表在各种专业杂志和会议论文集上。

为了编著本手册,本人邀请了许多国际知名专家撰写各自专长的章节,并得到了他们的赞同。在编著中要求能反映有关海岸及海洋工程建筑物,地基基础、港口航道、海岸保护以及海岸工程和油污对环境影响诸方面的环境条件和设计准则等等的基本信息。在美国、日本及欧州,海岸保护已成为各有关国家全国范围关注的问题。由于海岸带污染的日益加剧,也由于旅游、工业和海岸带保护对近海地区提出互相矛盾的要求,近几十年来海岸工程显得更为重要,而油气勘探及开发也影响着海岸带。

手册的第一卷包括波浪现象及海岸建筑物。其第一部分涉及波浪的线性及非线性理论。波浪的预报及后报、波浪的统计学及概率论以及它们的设计应用。还详尽地讨论了波浪与水流的相互作用以及由许多物理现象所产生的水位变化问题。

本卷第二部分涉及海岸建筑物所受波浪力的计算,防波堤及海堤设计以及作用于人工岛上波浪力和冰荷载的确定问题。

来自全球的十九位专家为本卷作出了贡献,同时也反映了为本手册作出各种努力的许多工程师及科学家们的意见。所有各章均经本人初审、修改和终审,为此花费了无数个日日夜夜。本人希望所有错误均已被发现和改正。在此对为本手册作出过贡献的各位表示深切的谢意,同时对下述诸审阅人表示感谢:夏威夷大学的 Bretschneider 博士;美海岸研究中心和水道试验站的 Carver 先生,Y. H. Chu 博士,Crawford 博士,Kraus 博士,Swain 博士,Thompson 博士,Walton 博士和 Fowler 先生;得克萨斯农工大学的 Kim 博士,楼永嘉

博士, Randall 博士, Westerink 博士和 Reid 教授; 陆军工程兵寒冷带研究及工程实验室的 Sodhi 先生; 路易斯安那州立大学的 Adams 博士以及阿拉斯加大学的 Colonell 博士。

感谢 Hyden 女士为本手册汇总了所有手稿, 并为其中数章打了字。如果没有她的努力, 本手册的公开出版将推迟相当长时间。

本人还要特别感谢我的妻子 Polly, 她为出版本手册作了鼓励和耐心帮助。

要感谢 Marcel Dekker 出版公司, 它同意选用作者其它著作《近海管线设计要点》和《海洋建筑物设计指导, 海床冲刷》中的有关内容。同时也对各出版社及个人同意本手册选用已拥有版权的有关材料表示感谢。

美国得克萨斯农工大学 土木及海洋工程  
W. H. Bauer 教授, 博士 注册工程师 J. B. Herbich

## 美海湾出版社注记

《海岸及海洋工程手册》的编著出版是许多技术专家集体努力的结晶。它汇集了当今世界很有价值的信息, 它对科学家和工程师们为解决当前及长期的各类问题均颇有帮助。

在编辑和出版过程中已作了很大努力, 但对本书的准确性和完整性仍难以给予保证, 而且对今后可能提出的种种要求也不能承担任何责任。

手册中的各项说明和意见是代表各个作者的观点而并非是主编及出版社所必需表述的。而且, 书中所引用的专利和商品并不意味在使用这些专利及商品时, 其代表厂商业已同意或认可。

# 主编简介

J. B. Herbich 博士是美国得克萨斯农工大学(Texas A & M University)的土木及海洋工程教授以及疏濬工程的 W. H. Bauer(荣誉称号)教授. Herbich 博士是海岸和海洋工程专家,并特别擅长于海岸及疏濬工程及其技术发展。他在美国及国际工业界及政界有关海岸工程的发展及利用方面作了大量的咨询服务,并为国际研究委员会的若干委员会工作过,其中包括曾任国家疏濬署技术委员会的副主席。他是美国土木工程师协会的高级会员(fellow)。Herbich 博士在英国爱丁堡大学获土木工程的学士学位,在美国明尼苏达大学获流体力学的硕士学位,并在美国宾夕法尼亚州立大学获土木工程的博士学位。

## 本卷编著者

- C. L. Bretschneider, Professor Emeritus, University of Hawaii at Manoa, Department of Ocean Engineering, 811 Olomehani Street, Honolulu, HI 96813, U. S. A.
- P. Bruun, 34 Baynard Cove Road, Hilton Head Island, SC 29928, U. S. A.
- F. E. Camfield, USAE Waterways Experiment Station, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS 39180, U. S. A.
- R. G. Dean, Coastal and Oceanographic Engineering, 336 Weil Hall, University of Florida, Gainesville, FL 32611, U. S. A.
- Y. Goda, Department of Civil Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya - ku, Yokohama, 240, Japan
- E. H. Harlow, SOROS Associates, P. O. Box 441734, Houston, Texas 77244, U. S. A.
- J. B. Herbich, Ocean and Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas 77843 - 3136, U. S. A.
- R. A. Holman, College of Oceanography, Oregon State University, Oceanography Admin. Bldg. 104, Corvallis, OR 97331 - 5503, U. S. A.
- J. R. C. Hsu, Department of Civil Engineering, University of Western Australia, Nedlands, Western Australia 6009
- Y. C. Li 李玉成 Civil Engineering Department, Dalian University of Technology, Dalian, China 116024, China
- M. A. Losada, Dept. de Ciencias y Tecnicas de Aguay del Medio Ambiente, ETS Ingenieros de Caminos, C. y P., Universidad de Cantabria, Santander, Spain



- J. L. Machemehl, Ocean and Civil Engineering, Texas A& M University, College Station, Texas 77843 - 3136, U. S. A.
- C. C. Mei 梅强中 Ralph M. Parsons Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Rm 48 - 413, Cambridge, MA 02139, U. S. A.
- R. O. Reid, Department of Oceanography, Texas A&M University, College Station, Texas 77843, U. S. A.
- D. T. Resio, Offshore and Coastal Technologies, Inc., 911 Clay Street, Vicksburg, MS 39180, U. S. A.
- R. Silvester, Department of Civil Engineering, The University of Western Australia, Nedlands, Western Australia 6009
- J. G. Titus, Project Manager for Sea - Level Rise, USEPA, Code PM 211, Waterside Mall, Romm M3009E, Washington DC 20460, U. S. A.
- J. W. van der Meer, Delft Hydraulics Laboratory, P. O. Box 152, 8300 AD Emmeloord, The Netherlands
- C. L. Vincent, Coastal Engineering Research Center, U. S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS 39180, U. S. A.

# 海岸及海洋工程手册

**第一卷 波浪现象及海岸建筑物**

**第二卷 近海建筑物,海洋地基基础,泥沙运动及模拟问题**

**第三卷 港口,航道,河口及环境影响**

# 目 录

译者序  
原文序  
美海湾出版社注记  
主编简介  
本卷编著者

## 波 浪 现 象

- 第一章 重力波理论基础..... ([美]梅强中)(1)  
第二章 流函数波浪理论及其应用..... ([美]R. G. Dean)(45)  
第三章 短峰波..... ([澳]J. R. C. Hsu)(69)  
第四章 随机波浪和谱..... ([日]Y. Goda 合田良实)(129)  
第五章 浅水和深水波浪的预报和后报..... ([美]C. L. Vincent 和 D. T. Resio)(158)  
第六章 热带气旋..... ([美]C. L. Bretschneider)(189)

## 波 候 及 设 计 波

- 第七章 海况参数的分布和资料适线..... ([日]Y. Goda 合田良实)(271)  
第八章 设计波特征值的选用..... ([美]J. B. Herbich)(299)

## 水 位 变 化

- 第九章 潮汐和风暴潮..... ([美]R. O. Reid)(399)  
第十章 海啸..... ([美]F. E. Camfield)(446)  
第十一章 波的增水..... ([美]R. A. Holman)(482)  
第十二章 海平面升高对全世界海岸的影响..... ([挪]P. Brunn)(492)

第十三章	温室效应和海平面的升高 .....	([美]J. G. Titus)(514)
第十四章	波浪与水流的相互作用.....	([中]李玉成)(541)
第十五章	波浪爬高及越浪 .....	([美]J. B. Herbich)(561)

## 海 岸 建 筑 物

第十六章	随机波与结构的相互作用 .....	([日]Y. Goda 合田良实)(648)
------	-------------------	------------------------

### 防波堤

第十七章	抛石和人工块体防波堤 .....	([美]E. H. Harlow)(667)
第十八章	抛石堤——最近的改进 .....	([荷]J. W. vander Meer)(683)
第十九章	桩式和离岸式防波堤 .....	([美]J. B. Herbich)(694)
第 廿 章	柔性膜袋体防波堤 .....	([澳] R. Silvester)(715)
第廿一章	斜坡式防波堤设计的最新进展 .....	([西]M. A. Losada)(729)
第廿二章	防波堤的概率设计 .....	([荷]J. W. van der Meer)(822)

### 海堤、丁坝及人工岛

第廿三章	护岸与丁坝的设计 .....	([澳]R. Silvester)(828)
第廿四章	人工岛及极地建筑物上的波浪力及冰压力 .....	([美]J. L. Machemehe)(845)

汉英名词对照.....	(885)
-------------	-------

# 第一章 重力波理论基础

梅强中

(美国麻省理工学院教授)

## 内容

### 基本公式 2

假定和控制方程 2

微幅波线性化 3

### 在等水深中传播的规则波 4

速度和压力场 4

群速和能量传递 5

### 在缓变地形上的折射 6

水深缓慢变化时的射线法 7

等深线为平行的直线  $h = h(\bar{x})$  9

焦散点的邻域 11

窄频带波的折射 13

关于等深线为曲线形海底的注释 14

在缓变流中的折射 14

射流中的波 16

### 微幅波的绕射 17

绕射问题的公式 17

一维绕射 19

二维散射 22

一般恒等式 29

对任意水深与波长比的注释 30

### 折射与绕射的联合 31

缓坡方程 31

抛物方程法 32

沿岸沙坝的强反射 34

### 非线性理论的文献 38

致谢语 40

符号 40

参考文献 41

## 基本公式

### 假定和控制方程

在海上,影响工程活动的一个现实情况就是波的无所不在.海洋中水体的运动可由自然界的或者人为的各种因素所引起,例如风、日、月间的引力,海底的火山爆发,船舶的运动等等.由于多种因素,如重力、表面张力、可压缩性或地球的转动的影响,海水的运动就产生了波.波的周期可在极宽的范围内变化.如行星波可达几个月,潮波为半天,风暴潮为几个小时,海啸为几十分钟,涌浪为几秒钟,而张力波则不足一秒.在本章中将主要考察由风引起的重力波.除了很短的张力波以外,水的微小粘性在实际问题中所起的作用较小.这里不包括高速传播并与流体压缩性有关的水下声波.所以我们将假定流体为不可压缩的而且是无粘性的.对海洋工程的很多问题,密度成层性的影响并不重要,所以我们将流体的密度  $\rho$  视为均匀.

流体在空间点  $\boldsymbol{x}$  和时间  $t$  时的速度以  $\boldsymbol{u}$  表示.由不可压缩性的假定,流体的体积膨胀率为零,所以

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \quad (1.1)$$

令  $P$  表示在  $\boldsymbol{x}$  及  $t$  时的压力,由流体的动量守恒可得

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u} = - \nabla \left( \frac{P}{\rho} + gz \right) \quad (1.2)$$

方程右边最后一项代表重力的影响,粘性应力则被忽略.

在这一组方程中,未知函数为  $\boldsymbol{u}$  和  $P$ .流体力学中一个基本量为涡量,它是流体微元的转动率,  $\frac{1}{2} \nabla \times \boldsymbol{u}$ .对动量方程取旋度并利用连续性方程,可以看出:对无粘性、不可压缩的、均匀密度的流体,涡量是不变的.最简单的情况是在初始时刻处处无涡,从而流动在全部时间内无涡.这种流动叫无涡运动,它的速度可以表示为一个标量  $\Phi$  的梯度:

$$\boldsymbol{u} = \nabla \Phi \quad (1.3)$$

利用质量守恒可得简单的拉普拉斯方程式

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (1.4)$$

它控制整个流体的运动.标量函数  $\Phi(\boldsymbol{x}, t)$  叫作速度势.

动量方程可对空间坐标积分,得

$$- \frac{P}{\rho} = gz + \Phi_t + \frac{1}{2} |\nabla \Phi|^2 \quad (1.5)$$

这就是伯诺里方程.当速势求出后,就可给出压力  $P$ .上式忽略了一个任意积分常数,它至多是一个时间的函数,因为它不影响速度场.我们也可定义一个动压力  $P$  即可不计静压力  $\rho gz$

$$P = P + \rho gz = - \rho \left( \Phi_t + \frac{1}{2} |\nabla \Phi|^2 \right) \quad (1.6)$$

在任意物面上的边界条件之一为:流动必须与该面相切.假若该面是固定的,例如海

底  $z = -h(x, y)$ , 法向速度必须为零, 即

$$\Phi_z = -h_x \Phi_x - h_y \Phi_y, \quad z = -h \quad (1.7)$$

但是, 假若界面是运动的自由液面,  $z = \zeta(x, y, t)$ , 则流体质点在该自由面上的法向速度必须等于该面本身的法向速度, 即

$$\zeta_t + \zeta_x \Phi_x + \zeta_y \Phi_y = \Phi_z, \quad z = \zeta \quad (1.8)$$

这些条件即为运动学条件, 因为它们只和流体的运动有关.

在自由面上, 压力必须与大气压力相联系, 如忽略表面张力, 并假定大气压力为  $P_a$ , 则伯诺里方程为

$$g\zeta + \Phi_t + \frac{1}{2} |\nabla \Phi|^2 = -\frac{P_a}{\rho}, \quad z = \zeta \quad (1.9)$$

这是一个与力相关联的条件, 因而就被称作动力学边界条件.

在水面上, 速势  $\Phi$  和自由水面的位移  $\zeta$  均为未知. 这使问题高度非线性化, 并成为水波理论中数学上的最大困难.

### 微幅波的线性化

为了从理论上分析一个物理问题, 必须首先决定该问题的适当尺度. 对于水波问题, 特征波长  $\lambda$  和波周期  $T$  就是它的空间和时间尺度, 它们被用来度量所有其它长度和时间量. 令自由面的振幅为  $A$ , 则自由面上的流体速度必须与  $O(A/T)$  同阶. 因为  $\Phi$  的梯度是速度, 则可推断  $\Phi$  的尺度应为  $A\lambda/T$ . 假若我们把有代表性的线性项和非线性项作一比较, 则有关比值的阶为

$$\begin{aligned} (\zeta_x \Phi_x) / \zeta_t &\sim \left( \frac{A}{\lambda} \frac{A}{T} \right) / \frac{A}{T} \sim \frac{A}{\lambda} \\ |\nabla \Phi|^2 / \Phi_t &\sim \frac{1}{\lambda^2} \left( \frac{A\lambda}{T} \right)^2 / \frac{1}{T} \frac{A\lambda}{T} \sim \frac{A}{\lambda} \end{aligned} \quad (1.10)$$

二者都与  $A/\lambda$  同阶. 这个比值表示的是自由水面的坡度或波陡. 当  $A/\lambda \ll 1$  时, 非线性项就可忽略; 只有线性项在自由表面的两个条件中需要保留. 这样我们就有了小坡度波的线性化的边界条件.

自由边界的位置仍然是未知的. 假若我们对速度势在静水面  $z = 0$  处作泰勒展开, 得

$$\Phi_i(x, y, \zeta, t) = \Phi_i(x, y, 0, t) + \zeta_{xi}(x, y, 0, t) + \dots \quad (1.11)$$

右端的每一项都在静水面  $z = 0$  上计算. 式(1.10)中的二次项与线性项的比值系与  $A/\lambda$  同阶. 因而, 对于小波陡, 我们可以略去展开式中的二次项. 从而, 自由面上的两个条件变为

$$\zeta_t = \Phi_z, \quad z = 0 \quad (1.12)$$

及

$$g\zeta + \Phi_t = -\frac{P_a}{\rho}, \quad z = 0 \quad (1.13)$$

通过这样的线性化, 我们就可消去非线性项, 并在求解以前, 就知道了应用边界条件的位置, 这样就将问题大为简化.

最后, 运动学条件和动力学条件可联合给出.

$$g\Phi_z + \Phi_u = -\frac{1}{\rho}P_a, \quad z = 0 \quad (1.14)$$

## 在定常水深中传播的规则波

### 速度和压力场

对于等水深  $h$ , 水底处的边界条件为

$$\Phi_z = 0, \quad z = -h \quad (1.15)$$

现在, 所有控制条件都是线性的且系数为常数. 若不计大气压力:  $P_a = 0$ , 就存在一个基本解, 它代表沿  $x$  轴方向的自由推进波:

$$\Phi(x, z, t) = \text{Re} \left[ -\frac{igA \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} e^{ikx - i\omega t} \right] \quad (1.16)$$

式中

$$\omega = \omega(K) \equiv \sqrt{gk \tanh kh} \quad (1.17)$$

相应的自由表面升高为

$$\zeta(x, t) = \text{Re} \{ A e^{ikx - i\omega t} \} \quad (1.18)$$

式中,  $A$  为波幅. 作为简化, 符号  $\text{Re}$  (实部) 可以省略,  $k$  为波数,  $\omega$  为频率, 它们分别按下式与波长和周期成反比:

$$k = 2\pi/\lambda, \quad \omega = 2\pi/T \quad (1.19)$$

式(1.17)表明: 对每一个  $\omega$ , 只能有一个确定的  $k$ . 由基础物理学可知, 波的相速是下述的比值:

$$C = \frac{\omega}{k} = \left( \frac{g}{k} \tanh kh \right)^{1/2} \quad (1.20)$$

对长波或在浅水区,  $kh = 2\pi h/\lambda \ll 1$ . 则式(1.20)可近似地表示为

$$C = \sqrt{gh} \quad (1.21)$$

这样, 相速对所有波长都是相同的, 对于短波或深水波,  $kh \gg 1$ , 则由式(1.20)可得

$$C = \sqrt{g/k} = \sqrt{g\lambda/2\pi} \quad (1.22)$$

所以, 较短的波, 波速就比较慢, 对于中等的  $kh$  值,  $C$  单调地随  $kh$  增长. 在线性化的范围内, 任何二维扰动都可以被认为是许多正弦波的叠加, 其中各组成波都按上述规律传播. 这样, 在波生成后, 长波将在前而短波在后. 这种按波长而产生的分解的过程称为色散. 因而式(1.17)被称作色散关系. 由式(1.17)可知, 在极浅水中的长波是非色散的.

取式(1.16)的空间梯度可得速度分量

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{gkA}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{ikx - i\omega t} \\ v &= 0 \\ w &= -\frac{igkA}{\omega} \frac{\sinh k(z+h)}{\cosh kh} e^{ikx - i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (1.23)$$

为了简化, 式中的符号  $\text{Re} \{ \}$  已略去. 由线性化的伯诺里方程, 总压力为



$$p = \rho(gz + \Phi_1) \quad (1.24)$$

由式(1.16),易于看出

$$p = P + \rho gz = \rho g \zeta \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad (1.25)$$

对于极浅水,  $kh \ll 1$ , 可得如下极限

$$\begin{aligned} u &= \frac{gkA}{\omega} e^{ikx - i\omega t} \\ w &= 0 \end{aligned} \quad (1.26)$$

这样,流体的运动基本上是水平的,而且水平速度基本上是沿水深均匀分布的.总的水平压力可以写成

$$P = \rho g(\zeta - z) \quad (1.27)$$

这样,压力基本上是静水压力.

当水很深时,  $kh \gg 1$ , 式(1.23)和式(1.25)可近似地写成

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{gk}{\omega} A \\ w &= -\frac{igkA}{\omega} \\ P &= \rho g A \end{aligned} \right\} e^{kz} e^{ikx - i\omega t} \quad (1.28)$$

此时,垂直速度和水平速度的振幅相同,从而可知,流体质点的轨迹是圆.同样,速度和压力按  $z$  的指数衰减,流体的运动主要发生在厚度约为一个波长的水层内,根据随水深衰减这一特性,重力波是水面波.

### 群速度和能量传递

假若有两列正弦波,其频率略有差别,  $\omega_1 = \omega + \Delta\omega$ ,  $\omega_2 = \omega - \Delta\omega$ , 其相应的波数也仅有差别,  $k_1 = k + \Delta k$ ,  $k_2 = k - \Delta k$ . 由于两个波列必须满足相同的色散关系,由泰勒展开式可得

$$\Delta\omega = \left( \frac{d\omega}{dk} \right) \Delta k \quad (1.29)$$

当  $\Delta\omega$  或  $\Delta k$  为微量时,导数  $d\omega/dk$  是在中心波数上计算的.利用这一结果,我们可以把两个波列之和表示为

$$\begin{aligned} \zeta &= A[e^{i(k_1 x - \omega_1 t)} + e^{i(k_2 x - \omega_2 t)}] \\ &= Ae^{ikx - i\omega t} \left\{ \exp\left[ i\Delta k \left( x - \frac{d\omega}{dk} t \right) \right] + \exp\left[ -i\Delta k \left( x - \frac{d\omega}{dk} t \right) \right] \right\} \\ &= \left\{ 2A \cos\left[ \Delta k \left( x - \frac{d\omega}{dk} t \right) \right] \right\} e^{ikx - i\omega t} \end{aligned} \quad (1.30)$$

这个式子可以看作是一个载波波频为  $\omega$  及波数为  $k$  的近似正弦波列.波包的最大波幅为  $2A$  并且按下式对  $x$  和  $t$  被缓慢而简谐地调制着:

$$2A \cos\left[ \Delta k \left( x - \frac{d\omega}{dk} t \right) \right] \quad (1.31)$$

波包线可看作为正弦群,且其群长为  $2\pi/\Delta k$ ,群传播速度为