普通高等教育"九五"国家级重点教材

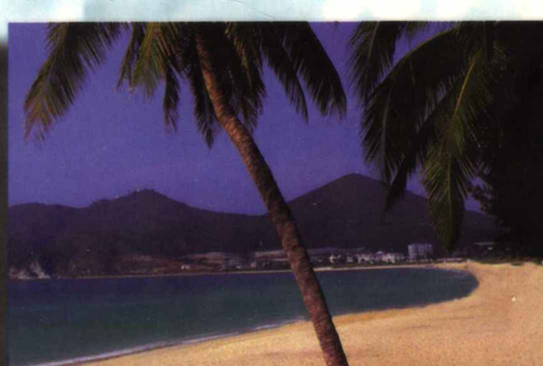
PUTONGGAODENGJIAOYUJIUWUGUOJIAJIZHONGDIANJIAOCAI

海岸动力学

第三版

〔港口航道与海岸工程专业〕

吴宋仁/主编
严以新/主审



人民交通出版社

普通高等教育“九五”国家级重点教材

Haian Donglixue

海岸动力学

第三版

（港口航道与海岸工程专业）

吴宋仁　主编
严以新　主审

人民交通出版社

图书在版编目(CIP)数据

海岸动力学 / 吴宋仁主编. -3 版. 一北京：人民交通出版社，1999.10
ISBN 7-114-03501-2

Ⅰ.海… Ⅱ.吴… Ⅲ.海浪,击岸-动力学 Ⅳ.P731.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 44156 号

普通高等教育“九五”国家级重点教材

海 岸 动 力 学

第 三 版

(港口航道与海岸工程专业)

吴宋仁 主编

严以新 主审

责任印制：杨柏力 正文设计：周 园 责任校对：张 捷

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街 10 号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

北京鑫正大印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：11.5 字数：280 千

1988 年 12 月 第 1 版

1995 年 5 月 第 2 版

2000 年 2 月 第 3 版 第 1 次印刷

印数:0001－3000 册 定价：18.00 元

ISBN 7-114-03501-2

U·02511

内 容 提 要

本书是《海岸动力学》第三版。全书包括两大部分:第一部分为海岸动力因素,包括波浪、近岸波浪流和海岸带潮波;第二部分为海岸泥沙运动及其岸滩演变,包括沙质海岸泥沙运动、淤泥质海岸泥沙运动和岸滩演变。

本书由吴宋仁主编,各章编写人员为:吴宋仁编写前言、绪论、第一、二章,周华君编写第三、四、五章,张庆河编写第六、七章。全书由吴宋仁统稿,严以新主审,最后由交通部组织专家审定,并确定作为普通高等教育“九五”国家级重点教材。

本书为高等学校港口航道及海岸工程专业本科生教材,亦可作为本专业技术人员及研究生和相近专业师生的参考书。

前　　言

本书是在1980年和1988年分别出版的第一、二版《海岸动力学》教材基础上修订而成的。

随着我国社会主义建设事业不断发展和社会主义市场经济不断完善，要求我国教育必须尽快转变观念，改变思想，深化改革，培养适应21世纪需要的具有厚基础、宽专业、强能力、高素质的人才。据此，高等学校港口及航道工程教学指导委员会进行了深入研讨，在1996年和1997年年会上提出了“21世纪港口航道及海岸工程专业人才培养目标、规格和培养模式初步意见”，确定了课程设置模式框架，审定了本课程教学大纲和教材修订意见，奠定了本书的修订基础。在修订编写中，我们根据10多年来使用该教材教学的经验和考虑了与本课程关系密切的课程如水力学、水文学和河流动力学等教材的修订情况，对本书内容进行了较大的调整和修改。与第二版教材相比，本书第一章波浪理论中删去了斯托克斯二阶波的数学推导，将第二版教材第二章中随机波理论简介及第四章中的水波中的辐射应力精简后并入第一章，并增加了驻波概念；第二章波浪传播、变形和破碎中，删去了深水弥散与传播，增加了波浪在水流中传播的特性；将第二版教材中第四章近岸波浪流改为第三章并进行了精简；第四章改为海岸带潮波运动，重点叙述潮波动力理论、潮波传播与变形及河口潮波特征；第五章波浪作用下的泥沙运动改为沙质海岸的泥沙运动，加深了波流共同作用下泥沙运动的内容；第六章海滩上的泥沙运动与岸滩演变改为岸滩演变，增加了岸滩演变的研究方法；第七章淤泥质海岸的泥沙运动中增加了淤泥质海岸的岸滩演变。全书力求反映我国近年来在海岸动力学、港口航道工程、海岸工程和入海河口治理等领域的科技进步和最新实践成果。

本书编写过程中，承蒙国家海洋总局梁其荀总工（教授），天津大学赵今声教授、秦崇仁教授，大连理工大学李玉成教授，青岛海洋大学李春柱教授，河海大学严以新教授、洪广文教授、钟瑚穗教授、潘少华教授、王谅博士、曾小川博士，南京水利科学研究院左其华副院长（研究员）等提出了许多宝贵意见和指导，编者谨致以衷心的谢忱。

限于编者水平，本书定有不少谬误，敬希读者批评指正。

编　者

目　　录

绪　论

地球表面面积的71%是海洋,总面积约为3.6亿km^2。海洋与陆地邻接部分为海,渤海是我国的内海,黄海、东海和南海是近海,它们均连接着太平洋,四海的总水域面积约为470万km^2。我国主要河流的辽河、海河、黄河、长江、钱塘江、闽江、珠江等分别注入上述四海,沿海形成我国广大的海岸带和入海河口地区。

海岸带和入海河口地区资源丰富,交通便利,自古以来即为人类栖息、生产、商贸活动的主要地带。世界人口约有2/3居住于沿海地区。我国东西两部,国土面积相当,而东部地区的人口密度比西部内陆地区高8倍,南方沿海地区人口密度更大,工农业产值东部约占90%。近代工业发展之后,在海岸和河口地区建设了许多大城市,成为重要的政治、经济、文化、科技教育中心和交通运输枢纽。改革开放以来,我国在沿海地区建立了许多经济特区和经济开发区,它们成为我国对外开放的窗口,对我国近年的高速发展起到了重大作用。

为了更好开发海岸带和入海河口地区的资源、发展经济、便利交通、保护环境和人民生命财产,我国从1980年开始,进行了大规模的海岸带和海涂资源等的综合调查工作,成立了全国海岸带及海涂资源综合调查办公室,并在沿海各省、市、自治区等成立了相应的调查机构,经过6年努力,这一规模巨大的调查工作业已完成。以此调查成果为基础,90年代中组织全国50多个单位,数百名专家、学者开展了我国海洋开发战略研究,既研究了全国及区域的海洋开发战略,又研究了传统工业,新兴产业和未来产业的开展战略,还研究了海洋调查、海洋科学技术、海洋管理和海洋服务等发展战略。1998年"国际海洋日"当天,我国政府发表了《海洋》白皮书,全面阐述了我国海洋开发战略、基本政策和发展前景。标志着我国人民在21世纪中将和世界各国人民一道把开发、利用和保护海洋放在重要的地位。

海岸带是陆地和海洋的交界地带,沿海岸滩与平均大潮高潮面的交线称为海岸线。全世界海岸线总长约44万km。我国海岸线漫长,共长3万余公里(包括大陆海岸线1.8万km,岛屿海岸线1.4万km),但海岸线系数(海岸线与国土面积之比)仅为0.00188,居世界94位。按海岸形态、成因、物质组成和发育演变阶段等地貌特征综合考虑,我国海岸有基岩海岸、砂砾质海岸、淤泥质海岸、红树林海岸和珊瑚礁海岸等五种类型,其中基岩海岸和淤泥质海岸所占比例较大,各约占全国大陆海岸线总长的1/4,即4000余公里。

海岸受海岸动力因素包括风、浪、流和潮汐等的作用而处于动态变化状态。海岸动力因素有两大类:一类是长期因素,如风、波浪、潮汐、近岸流和海平面的变化等;另一类为短期因素如台风、巨浪、风暴潮和海啸等。长期因素具有周期性和相对确定性,例如我国沿海大部分地区受季风影响,冬天盛行偏北风,夏季多为偏东南风,沿海地区大多为正规半日潮等,它们均有一定规律。长期因素作用下海岸变化也具有"规律性"且相对稳定。短期因素具有偶然性,例如我国台风一般只发生在夏季,路径也不一,海啸更为偶见,短期因素作用下海岸变化呈"随机性",但往往起决定性作用。如台风掀起的巨浪,常引起大片海岸坍塌,海岸建筑物毁坏,航道骤淤等非常事件。风暴引起的风暴潮或地震引起的海啸,可使大量海水涌上陆地,使沿岸低平地区受淹而遭致巨大损失和各类建筑物严重破坏,据统计,世界上平均每年因沿海风暴潮灾害

而造成的经济损失达 60 ~ 70 亿美元。因此,人类要开发、利用和保护好海岸这个阵地,就需要不断地和这些破坏性的动力因素作斗争。

海岸动力学的任务就是要研究上述自然动力因素,主要是波浪、潮汐、潮流对于海岸与海岸建筑物的作用。它对于利用与开发海岸带、保护海岸的事业是必不可少的,特别是对于海港的建设尤为重要。港口的选址与规划,港口建筑物的设计,港池与航道的开挖与疏浚维护,港区附近海岸的保护等都需要这方面的知识。

海岸动力学研究内容以海洋水文、流体动力学,河流动力学和高等数学为基础,与海洋学、地貌学及计算科学等也有密切关系。20 世纪后半叶,这门学科在理论和实践上取得了巨大的进展。但从微观上而言,上述的动力因素的许多方面尚不能确切地加以描述,特别是近岸地带波浪与水流受到地形与建筑影响而更加复杂化。从宏观方面而言,海岸地区的泥沙 运动以及岸滩演变在时间及空间上的跨度都很大,给研究工作带来很大困难。因此,这门科学远未成熟,尚有许多重要问题还没有获得满意的解答,多数问题的解决仍停留在定性阶段。以致直至现在,我们还不能完全有信心地应用现有的认识去解决与海岸泥沙运动,岸滩演变有关的工程问题,例如要确切地定量计算海港、航道的泥沙冲淤就常常有着一定的困难。

本课程——《海岸动力学》要讨论的问题首先是作用在海岸上的动力因素,其中最主要的是波浪,关于波浪的一般理论基础在水力学中已有讲述,至于波浪的形成机理、预报、观测与资料整理以及波浪在近岸浅水区传播时的变形、折射等问题在水文学中也有深度不等的论述。本课程除了进一步讨论外,对于波浪在浅水中其他一些特性,如波浪在岸边的破碎、破碎后的变化、波浪与海床的相互作用以及波浪在近岸区产生的水流将重点地加以叙述。潮汐与潮流在近岸地区也是重要的动力因素,在水文学中对于潮汐的成因、潮位资料的分析和预报已有比较充分的论述。本课程中对潮波理论、潮波传播与变形、河口潮波运动特征等将作进一步的分析。波浪作用下的泥沙运动以及由此引起的岸滩演变是本课程的重点。因为波浪作用下的泥沙运动理论基本上是从河流的泥沙运动理论衍生出来的,而且潮流的挟沙与河流的挟沙有相似之处,因此常常要从单向水流作用下的泥沙运动理论讲起。除此之外,还要重点讲述海滩上的泥沙运动,海滩剖面的变化与岸线变形等问题。关于淤泥质海岸的泥沙运动,由于有许多独特的规律和我国淤泥质海岸较多,在本书的最后将专列一章进行探讨。

海岸动力学的研究方法主要包括如下几方面:

(1)理论分析;

(2)实验室试验研究;

(3)现场原型观测研究;

(4)数学模拟研究。

理论分析方法是根据现象的物理力学关系,应用基本的力学原理,建立起现象各要素之间的数学力学关系。这种方法在其它课程里早已熟悉。海岸动力学的基础是流体力学,应用流体力学的基础理论去解决近岸地区各种动力现象的内在联系。但是,由于所涉及因素的复杂性,往往对于自然条件要作不同程度的简化,在数学上也常要作不同程度的近似处理,从而使理论与实际现象之间有或多或少的偏离。许多问题还没有从理论上圆满地解决,需要今后进一步去探索研究。

实验室的试验研究与现场的调查在海岸动力学的研究中有着特别重要的地位。事实上,许多现象本身就要通过实验室或现场的研究来揭示,各物理因素之间的关系需要通过这些研究来建立。更多的情况是分析研究所建立的数学力学关系中一些不能肯定的因素,需要用实

验室或现场研究的资料加以确定，例如确定一些经验系数等。所以，海岸动力学中所提出的一些关系式大都是经验或半经验的。至于在具体的工程实践中，由于自然条件的复杂性，现场的调查研究与实验室研究更是不可缺的手段。然而，遗憾的是，在这门学科里，这两种方法也往往遇到困难。在实验室里，除了模拟自然条件的困难以外，还存在着比尺关系上的困难。这指的是在实验室里所研究的对象是小比尺的，在这种条件下所建立的关系能否应用到自然条件中去常常存在问题。目前世界上各有关实验室的设备趋向于大型化，例如建立能产生接近于天然波况（随机的方向波）的大型波浪槽或大型多功能港池就是为了解决这一困难。

关于现场原型观测研究，近年来得到特别的重视，有些规模十分庞大，例如由英、美、荷、德等国联合进行的“联合北海波浪计划”（JONSWAP），美国的近岸输沙研究（NSTS），我国天津新港回淤研究和连云港的回淤研究等，都是联合了许多部门，采用了许多现代高新技术，如卫星定位系统（GPS）、遥感技术、同位素跟踪观测技术等，耗费巨大人力物力来进行的。现场研究避免了实验室研究中比尺效应带来的问题，实现了所谓 1:1 的模型研究。但是现场观测不仅耗资巨大而且观测周期要长，还存在观测上的某些困难，例如大风大浪条件下的观测资料难于确切地获得，而这些资料又是分析研究中最必要的。此外，现场研究所碰到的因素是多种多样的，各种因素掺合在一起，不容易把我们感兴趣的因素分离出来。由于以上所说的种种原因，虽然对于这门学科的研究工作已经作了巨大的努力，取得了重大的进展，但还必须承认这门学科还没有发展到成熟阶段。往往有这样的情况：对于同一问题，不同学者提出了不同的方法，得出不同的结果，这给初学者带来了不少的困难。在各种方法之间，评价其优劣，也常常成为一个重要的问题。

近年来，数值解法已日益成为解决各门学科许多问题的重要手段，对海岸动力学也不例外。特别在实际工程问题中，数学模型在研究波浪、潮流及其它流场以及岸滩冲淤变化方面已越来越得到广泛的应用。与物理模型相比较，它有以下突出的优点：

（1）数学模型避免了物理模型中的比尺效应问题；

（2）数学模型可以处理大的空间范围问题，平面尺度可达几十公里甚至几百公里，因而可以为小范围物理模型提供所需要的边界条件；

（3）数学模型可以很快地处理各种各样的方案，因而在详细的物理模型研究以前往往可以作为比较预选方案的手段。

然而，数学模型或数值解法的基础是力学机理关系与物理模式。只有在正确的力学机理关系与物理模式的基础上，数学模型或数值解法才有意义。因此，我们的注意力还是首先要放在建立正确的力学机理关系与物理模型的基点上。

如前所述，海岸动力学与其它多种学科有着密切的关系。首先是河流动力学。河流泥沙运动规律的研究，虽然有类似的困难，但由于研究历史较长，已取得比对海岸泥沙运动规律的研究更大的进展。两者的动力因素虽不全相同，但作用的对象却是相同的。因此，海岸动力学可以从河流动力学取得不少借鉴。其次，其它研究海岸的学科，例如海岸地貌学、海岸地质学（沉积学）、海洋环境学等也同海岸动力学有密切的联系。海岸地貌学是从宏观方面研究岸滩的演变。它应用对比历史上与现在的海岸地貌的方法来研究岸滩的演变，建立了各种海滩的分类，描述了各种海滩的结构并研究了它们在历史上的发展过程与动力条件。因此，它常能很好地说明岸滩演变的历史与现状。海岸地质学（沉积学）是通过海岸沉积物的分析来研究海岸的发展历史。它根据地层的钻深资料，沉积物的沉积环境、年代与沉积顺序来研究海滩的沉积过程，从而了解岸滩的历史发展过程。它对海滩沉积物特性的研究，主要是通过对泥沙的组

成、粒度与粒径分配，颗粒的圆度及形状，沿海滩方向及垂直于海岸方向的粒径分布以及不同沉积物在平面上分布的研究，来了解海岸上的动力强度，搞清泥沙的来源与运动方向。海洋环境学是研究自然因素和人类生活、生产活动对海洋的影响。海岸带环境在自然因素综合作用下按其自身的一定规律变化，而人类活动往往对海岸带环境带来重大影响。如港口建设、河口治理、围海工程、河流拦蓄、河流植被破坏、水质污染和生态破坏等都会使海岸变化产生重大变化，并反过来又影响人工建筑物的有效性和可靠性。因此，在海岸泥沙运动与岸滩演变的研究上，把海岸动力学与海岸地质地貌和环境的研究结合起来，往往可以更好地解决所研究的问题。对于我们学习这方面的有关知识也是很有助益的。

中华人民共和国成立以后，特别是改革开放以来，我国已加强了海岸和海洋调查，在领海设置了原型观测站，进行了许多海洋波浪、潮汐、泥沙等观测，海流测量；测绘了我国领海的海冰和水下地形；研究台风活动规律及其造成的危害，改进了海岸防护；开展了海岸带地质地貌调查；新建、扩建了许多沿海商港、军港和渔港。对淤泥质海岸港口的淤积，如天津新港、连云港等，开展了现场调查，对波浪潮流作用下泥沙运动规律进行了试验研究。结合新的港口工程设计技术规范的制定，80 年代末，成立了“全国水运工程标准技术委员会海岸动力分委会”，对波浪预报、设计波浪选择、波浪对建筑物作用力、波浪绕射、波流相互和共同作用、沙质和淤泥质海岸沿岸输沙等开展了大量科学研究，取得了一定的成果，有些成果已在海岸和港口工程中广泛应用。在河口方面，对长江口、珠江口和钱塘江口等河床演变特性、拦门沙淤积规律、潮波的传播等作了调查研究，并将长江口和珠江口治理列为国家“八五”攻关科研项目，进行了模型试验研究，提出了治理方案并正在逐步付诸实施。此外，在河口潮流挟沙能力、沿岸输沙数学模拟等方面也取得重大进展，展示出我国在海岸动力学、海岸和河口治理研究领域中已取得丰硕成果，在许多方面已达到国际先进水平，有些方面已处于国际领先地位。

随着我国社会主义现代化建设的进展，海岸带资源的开发和利用、港口的建设、河口治理将提出越来越多的海岸动力学课题。由于我国海岸的自然条件复杂，各类海滩齐备，更由于本学科的不成熟，随时随地都可碰到一些困难的问题要求我们去解决。我国目前在海岸工程方面已有着一支有一定力量的建设队伍与科学研究队伍，积累了不少的经验，但与某些发达国家相比尚存在一定的差距。这些，应激起我们更大的求知热情，立志于探索、研究和实践，把我国海洋科学和海岸工程科学在新的世纪中推向更高的水平。

第一章 波浪理论

第一节 概 述

一、海洋波动概念和波浪分类

波浪是海洋中最常见的现象之一，是岸滩演变、海港和海岸工程最重要的动力因素和作用力。引起海洋波动的原因很多，诸如风、大气压力变化、天体的引潮力、海洋中不同水层的密度差和海底的地震等。大多数波浪是海面受风吹动引起的，人们把这种波浪称为“风浪”或“海浪”。风浪的大小取决于风速、风时和风距的大小。迄今海面上观测到的最大风浪高达34m。

风浪直接受风力作用，是一种强制波，它常表现为海面连续变化的紊乱的波峰和波谷，波形极不规则，波浪传播方向也变化不定。

当风平息后或风浪移动到风区以外时，受惯性力和重力的作用，水面继续保持振动，这时的波动属于自由波，这种波浪称为“涌浪”(swell)或“余波”(surge)。涌浪与风浪不同，海面呈现出较为规则的波峰和波谷，波形也较为圆滑，离风区愈远，波形愈规则。涌浪在深水传播过程中，由于水体内部的摩擦作用和波面与空气的摩擦等会损失掉一部分能量，主要能量则是在进入浅水区后受底部摩阻作用以及破碎时紊动作用所消耗掉。波浪对于沿岸地区的泥沙运动起着关键作用，波浪不仅能掀动岸边的泥沙，而且还会引起近岸水流，这种水流对搬运泥沙又起着重要作用。因此，了解波浪运动的特性是研究近岸泥沙运动和岸滩演变的基础。

为了研究波浪的特性，对所生成的波浪或传播中的波浪加以分类是十分必要的。

1. 按波浪所受的干扰力和周期分类

金斯曼(Kinsman)1965年根据波浪周期或周期的倒数即波频率并结合主要干扰力与恢复力来阐明海洋波浪分类及其能量的近似分布如图1-1所示，图内标明了各种波浪名称、生成力

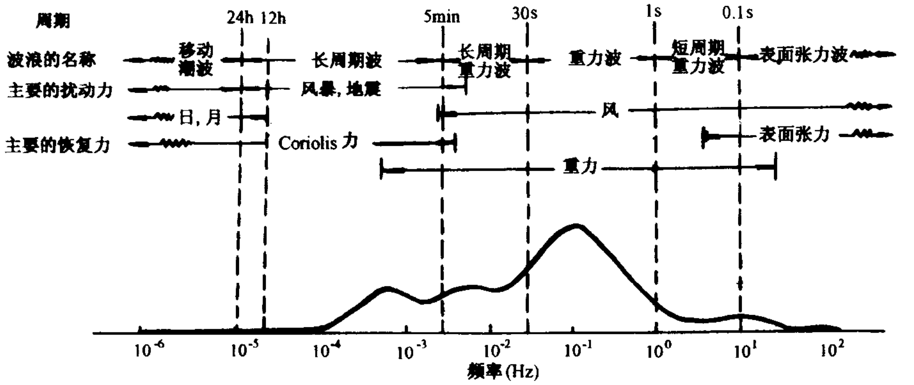


图1-1 各种类型波浪的波能分布图

及相应的波能。周期最短的波浪称为表面张力波，其波长小于 1.7cm，最大波高为 1 至 2mm，波能也很小，风是它的生成力，表面张力是它的恢复力，故称表面张力波。图 1-1 中那些归入重力波区具有周期 1 ~ 30s 的波浪，其主要干扰力是风，重力是它的恢复力，故称重力波。长周期波是风暴或地震所生成。风暴引起气压下降而导致水面上升的大浪，称为风暴潮；海底地震或海底火山爆发引起的波动称为海啸。潮波是天体作用造成的，其周期最长。对于周期很长的波，恢复力主要是柯氏力。图 1-1 中能量最大的波浪是周期 5 ~ 15s 的风成重力波，它在海港和海岸工程出现的问题中往往起着重要的作用，是本课程的主要讨论对象。

2. 按波浪形态分类

根据波浪形态可分为规则波和不规则波。规则波波面平缓光滑、波形规则，具有明显的波峰波谷，二维性质显著，离开风区后自由传播时的涌浪接近于规则波。大洋中的风浪，波形杂乱，波高、波周期和波浪传播方向不定，空间上具有明显的三维性质，因此这种波称为不规则波或称随机波。风浪和涌浪有时同时存在，叠加形成的波浪称为混合浪。

3. 按波浪传播海域的水深分类

理论分析和实验研究表明，水质点的运动速度是由水面向下逐渐衰减的，如果海域的水深足够深，因而不影响表面波浪运动时，这时的波浪称为深水波，否则称为有限水深波或浅水波。一般按 $h/L=0.5$ 作为划分深水波与有限水深波的界限（即 $h/L\geqslant 0.5$ 时为深水波，其中 h 为水深，L 为波长）。$h/L=0.05$ 作为有限水深波和浅水波的界限，即有限水深波的范围为 $0.5>h/L>0.05$。

4. 按波浪运动状态分类

振荡波 推进波

波动中若水质点的运动是周期性的，虽然各质点均具有水平和垂直的速度分量，但是运动每经过一个周期后没有明显的向前推移，也就是说各质点基本上是围绕其静止位置沿着某种固有轨迹运动，这种波浪称为振荡波，风成波一般就是这类波。振荡波中若其波剖面对某一参考点作水平运动，又称推进波。若波剖面无水平运动，只有上、下振荡，则为立波。波动中若水质点具有一个与波浪传播方向相同的推移，在任一时刻的任一断面上，沿水深的各质点具有几乎相同的速度，这种波浪称为推移波。近于推移波的波动有潮波、地震波、洪水波等。

5. 按波浪破碎与否分类

不论风浪或涌浪，当它由深水区向浅水区传播时，因种种原因而产生变形，最后破碎。因此可把波浪分为破碎波，未破碎波和破后波。

此外根据波浪运动的运动学和动力学处理方法，还可以把波浪分为微小振幅波和有限振幅波两大类。由于前者得出的微分方程是线性的，后者则是非线性的，故有时也分别称为线性波和非线性波。

二、波浪运动的描述方法和控制方程

1. 波浪运动的描述方法

如前所述，风浪是极其复杂的，它具有非线性三维特征和明显的随机性，无法用流体力学方法进行描述。但是对于二维规则波浪运动，迄今已有许多不同理论来描述其运动特性。传统上，描述一般水流运动方法有两种，一种叫欧拉法，亦称局部法，它是以空间某一固定点为研究对象，研究任一质点流过固定点的运动特性，诸如速度、加速度等；另一种方法叫拉格朗日法，亦称全面法，它以空间某一质点为研究对象，研究该质点相对于初始条件的各个不同时间的位置、速度和加速度等。拉氏法研究的是某一质点的位置变化，即质点运动轨迹或称迹线

(path line)；欧氏法研究的是某一流场的变化，它能给出某一固定时刻空间各点的速度大小和方向，亦即给出流线(stream line)。虽然这两种方法研究对象不同，但它们之间是可以互换的，并且结果是恒等的。其选用并无原则差别，而主要是根据实际需要。波浪运动也是一种水流运动，通常也用这两种方法来描述。

描述简单波浪运动的理论很多，其中最著名的理论有两个：一个是艾利(Airy)1845 年提出的微幅波理论，另一个是斯托克斯(Stokes)1847 年提出的有限振幅波理论。艾利波理论是最基本的波浪理论，它较清晰地表达出波浪的运动特性，易于应用于实践，是研究其它较复杂的波浪理论以及不规则波的基础，因而极为重要。在数学上，艾利波理论可以看作是对波浪运动进行完整的理论描述的一阶近似值。对于某些情况，用有限振幅波理论来描述波浪运动会得到更加符合实际的结果。应该提到，第一个有限振幅波理论是格斯特纳(Gerstner)1802 年提出的，称为余摆线波理论，这一理论虽负有历史盛名，但由于它所描述的水质点运动并不符合实际观测的结果，而失去实用价值。斯托克斯提出的有限振幅波理论远较余摆线波理论优越，因而至今仍获得广泛的应用。

椭

对于浅水区，科特威格(Korteweg)和德夫里斯(De Vries)1895 年提出了椭圆余弦波理论，它能很好地描述浅水条件下的波浪形态和运动特性，但是由于它存在着计算上不方便，在工程实践上未引起足够注重，近年来许多学者根据这一理论编制出各种专门图表和计算程序，使其便于应用。拉塞尔(Rusell)1834 年发现了孤立波的存在，这种波可视为椭圆余弦波的一种极限情况，在近岸浅水中，应用孤立波理论可获得满意的波浪运动的描述，因而亦被广泛应用。

随着计算机和计算技术的迅速发展，近一二十年来不少研究工作者提出了许多直接数值计算波理论，首先要提到的是迪安(Dean)1965 年提出的流函数波理论，这是一种类似高价斯托克斯波理论的有限振幅非线性波理论，迪安将波浪运动用流函数表示，从而建立起一个数值计算方法。任内克尔(Reinercker)和芬顿(Fenton)1982 年在流函数波理论的基础上，提出了一种傅里叶(Fourier)级数数值计算波理论，该理论不仅给出了便于工程上应用的各种波浪运动特性的表达式，而且适用于各种水深情况，对于波高较大的陡波，精度也较高。

2. 波浪运动控制方程和定解条件

现研究一列沿正 x 方向以波速 c 向前传播的二维运动的自由振荡推进波，如图 1-2 所示，x 轴位于静水面(Still Water Level—SWL)上，z 轴竖直向上为正。波浪在 xz 平面内运动。为描述波浪运动，常用到如下特征参数：

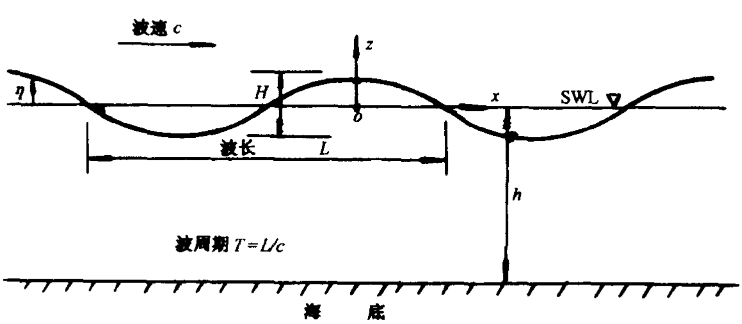


图 1-2 推进波各基本特征参数定义图

基本参数
- 空间尺度参数
  - 波高 H——波谷底至波峰顶的垂直距离；
  - 振幅 a——波浪中心至波峰顶的垂直距离；
  - 波面 η——波面至静水面的垂直位移 $\eta=\eta(x,t)$；
  - 波长 L——两个相邻波峰顶之间的水平距离；
  - 水深 h——静水面至海底的垂直距离。
- 时间尺度参数
  - 波周期 T——波浪推进一个波长所需的时间；
  - 波频率 f——单位时间波动次数 $f=\dfrac{1}{T}$；
  - 波　速 c——波浪传播速度 $c=L/T$。

复合参数
- 波动角(圆)频率 σ——$\sigma=2\pi/T$；
- 波数 k——$k=2\pi/L$；
- 波陡 δ——$\delta=H/L$；
- 相对水深——h/L 或 kh。

一般而言，任何一个特定的波列将由参数 H、L 和 h 或 H、T 和 h 所确定。因此任一种波浪理论均在于根据这 3 个基本参数来确定其运动特性，如波浪传播速度、水质点运动速度和轨迹等。为方便起见常常也用一些无量纲的参数来表征一个波列，例如波高可用 H/gT^2(g 为重力加速度)、波陡 H/L 或相对波高 H/h 表示，水深则常用 h/gT^2、kh 或相对水深 h/L 表示。对于浅水波常常用到一种特殊的参数——厄塞尔(Ursell)数 $U=HL^2/h^3$ 来判别波列的类型。

建立简单波理论时，为了简化起见一般作如下假设：

流体是均质和不可压缩的，其密度为一常数；流体是无粘性的理想流体；自由水面的压力是均匀的且为常数；水流运动是无旋的；海底水平、不透水；流体上的质量力仅为重力，表面张力和柯氏力可忽略不计；波浪属于平面运动，即在 xz 平面内作二维运动。

必须指出，上述假设对研究大多数海岸工程问题而言，是允许的，但当其中某一个假设不符合某一特定问题的实际情况时，则仍应采用较严格的理论。

根据流体力学原理，在上述假定下的波浪运动为势运动，这种波浪称为势波。其水质点的水平分速 u 和垂直分速 w 可由速度势函数 $\phi(x,z,t)$ 导出，即

$$u(x,z,t)=\frac{\partial\phi}{\partial x} \tag{1-1a}$$

$$w(x,z,t)=\frac{\partial\phi}{\partial z} \tag{1-1b}$$

由于流体是不可压缩和密度为常数，流体的连续方程可表示为

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{1-2}$$

将式(1-1)代入上式得

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial z^2}=0 \tag{1-3}$$

或记作

$$\nabla^2\phi=0 \tag{1-4}$$

这就是势波运动的控制方程，即著名的拉普拉斯(Laplace)方程。数学上式(1-3)或式(1-4)是属二元二阶偏微分方程，它有无穷多解。为了求得定解需要有定解条件，包括初始条件和

边界条件,由于我们所研究的波浪是自由波动,这是一种有规则的周期性运动,因而初始条件可不予考虑,定解条件均为边界条件。二维波动应满足的边界条件有:

(1)在海底表面,水质点垂直速度应为零,即

$$w\Big|_{z=-h} = 0 \tag{1-5}$$

或写为

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \qquad z = -h \text{ 处} \tag{1-6}$$

(2)在波面 $z=\eta$ 处,应满足两个边界条件:一个是动力边界条件,另一个为运动边界条件。

拉格朗日积分方程

由假设自由水面压力为常数并令 $p=0$,根据伯努利方程,自由水面动力边界条件可写为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t}\Big|_{z=\eta} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2\right]\Big|_{z=\eta} + g\eta = 0 \tag{1-7}$$

$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gh = 0$

由于上式中含有$\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2\right]$项(称为对流惯性项),故这个边界条件是非线性的。

自由水面 $z=\eta(x,t)$ 是一个随时间和空间位置而变的变量,故自由水面上各点的上升速度 dz/dt 可由下式确定

$z=\eta(x,t)$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x}\frac{dx}{dt}$$

自由水面形状是由位于自由水面上的各水质点所组成,因此自由水面上各点的运动速度应等于位于自由水面上各水质点的运动速度,即

$$\frac{dx}{dt} = u = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$\frac{dz}{dt} = w = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$z-\eta(x,t)=F(x,z,t)$

$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x}\frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z}\frac{\partial F}{\partial z} = 0.$

于是可得自由水面的运动边界条件为

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x}\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \qquad z = \eta \text{ 处}$$

$-\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial x}\cdot\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z}\cdot 1 = 0$ (1-8)

显然这也是一个非线性边界条件。

(3)波场上、下两端面边界条件:

对于简单波动,常认为它在空间和时间上呈周期性,从空间上看同一相位点的波要素是相同的,在时间上看一个周期后的波要素也应是相等,故波动场上、下两端面边界条件可表示为

$$\phi(x,z,t) = \phi(x+L,z,t) = \phi(x,z,t+T)$$

对于二维推进波,波场上、下两端面边界条件可写为

$$\phi(x,z,t) = \phi(x-ct,z) \tag{1-9}$$

式中:c——波速,$x-ct$ 表示波浪沿 x 正方向推进。

方程式(1-3)或(1-4)加上式(1-6)~(1-9)构成波动方程的定解问题。数学上把这种只是给定边界条件而不需给定初始条件的方程定解问题称为边值问题。若求得这一边值问题的解,波场中的各运动要素便确定了。

要精确解出上述二维波列的定解,将遇到如下两个困难:

(1)自由水面边界条件是非线性的;

(2)自由水面位移 η 的值是未知的,即自由水面边界条件是不确定的。

因此,要求得上述波动方程的边值解,最简单的方法是先将边界条件线性化,将问题化为

线性问题求解。

第二节　微幅波理论

一、微幅波控制方程和定解条件

为了把上节所述的波动问题线性化，假设运动是缓慢的，波动的振幅 a 远小于波长 L 或水深 h，即 H 或 $a \ll L$ 和 h。微幅波理论即由此假设而得名，它首先由艾利 1845 年提出，故又称艾利波理论。根据微小振幅这一假设可知式(1-7)和(1-8)中的非线性项与线性项之比是小量，因而可略去，这样便使问题得到线性化，因此艾利波理论又可称为之线性波理论。

在微幅波中，自由水面处(即 $z=\eta$ 处)边界条件可近似地认为在静水面(SWL)处(即 $z=0$ 处)得到满足，这样边界条件(1-7)和(1-8)分别可化简为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \qquad z = 0\text{处} \tag{1-7'}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \qquad z = 0\text{处} \tag{1-8'}$$

$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$

式(1-7′)可改写为

$$\eta = -\frac{1}{g}\frac{\partial \phi}{\partial t} \qquad z = 0\text{处} \tag{1-10}$$

将式(1-10)代入到式(1-8′)得

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \qquad z = 0\text{处} \tag{1-11}$$

于是微幅波理论控制方程和定解条件可综合写成如下

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = 0 & (1\text{-}4) \\ \dfrac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \qquad z = -h\text{处} & (1\text{-}6) \\ \dfrac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g\dfrac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \qquad z = 0\text{处} & (1\text{-}11) \\ \eta = -\dfrac{1}{g}\left(\dfrac{\partial \phi}{\partial t}\right) \qquad z = 0\text{处} & (1\text{-}10) \\ \phi(x,z,t) = \phi(x-ct,z) & (1\text{-}9) \end{cases}$$

二、微幅波理论解——微幅波势函数和弥散方程

采用分离变量法求解。根据定解条件假设速度势具有如下形式的解

$$\phi(x,z,t) = A(z)\sin(kx - \sigma t) \tag{1-12}$$

式中：$A(z)$——待定函数。

将上式代入拉普拉斯方程可得

$$A''(z) - k^2 A(z) = 0 \tag{1-13}$$

这样就把解偏微分方程问题化为解以 z 为唯一变量的常微分方程问题。解此常微分方程得到

$$A(z) = C_1 e^{kz} + C_2 e^{-kz} \tag{1-14}$$