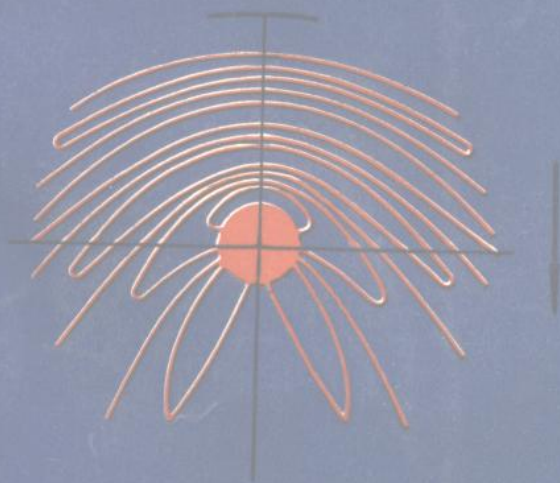


近海力学导论

毕家驹 编著



同济大学出版社

近海力学导论

毕家驹

同济大学出版社

内 容 提 要

本书主要包括波浪理论、小物体上的波浪力问题、绕射问题、辐射问题以及固定式近海结构的随机动力分析等近海力学基本内容。本书内容主要取材于70年代以来国内外的各种学报和会议录、专著和文集、大学研究报告和学位论文以及外国学者的讲课、讲学材料等。

本书着重阐明上述力学问题的基本概念、基本理论和求解方法。叙述中注重理论的严密性又尽可能阐明问题的物理概念。

本书可以用作大学理工科本科高年级或研究生课程的教材或参考书，也可供工程技术人员、应用科学研究人员学习参考之用。如果土木、水利或造船等方面的科技人员因为工作需要转向近海工程领域，但对近海力学不甚了解，那么本书可以帮助这样的读者较快地入门，并从而获得进一步领略最新文献的能力。

责任编辑 吴家龙

封面设计 徐 繁

近 海 力 学 导 论

毕家驹 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.375 字数: 214千

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数: 1—900 定价: 2.20元

ISBN 7-5608-0309-1/O · 36

前 言

近几十年来，由于政治、经济和军事等方面的需要以及海洋科学和相关学科所取得的新成就，促使近海工程迅速发展，特别是60年代以来的近海石油工程进展尤速。因而各式近海结构大量兴建，结构所处的位置越益趋向更深的海域。1946年，第一座钢桩近海平台建造在墨西哥湾离岸8公里，水深仅有5.8米的地方。而如今已有许多近海平台屹立在水深一二百米，风浪环境条件十分恶劣的海域中。其中突出的例子如Cognac平台，它所在海域的水深已达312米，而更高的平台又在筹建。目前海洋勘探工作已进入水深超过千米的海域，这必将促使近海工程在更广泛的范围内向更高的水平发展。

与此同时，近海力学(Offshore Mechanics)在传统力学理论的基础上，为了满足新的需求，也迅速发展起来，逐步形成自己的学科体系。它的内容覆盖了波浪，波浪力，海浪谱，各种可动式、固定式包括顺应式近海平台的结构动力分析，各种贮罐、立管、海底管线等结构的力学分析，流体-结构相互作用、波-流相互作用、地基基础-上部结构相互作用等各种相互作用问题，流动引起的振动，结构抗震，结构抗冰，疲劳与断裂，结构可靠性分析等各个方面。有理论研究、实验与现场测试研究，也有计算方法研究。

但是近海力学这门学科在国际上至今还没有成熟的教材，专著的数量也不多：70年代末有英国Hallam, Heaf和Wootton(1978)的《海洋建筑物动力学》、Brebbia和Waller(1979)的《海上建筑物的动力学分析》。80年代初有美国Sarpkaya和Isaacson(1981)的《近海结构的水动力学》、Wilson(1984)主编的《近海结构动力学》。最近新书有美国Chakrabarti(1987)《近海结构的水动力学》。因此，要了解有关近海力学的研究成果少不了直接查阅近一二十年来的各种学报、会议录、博士论文

和研究报告。近海力学论文常见于各种世界性的工程学报和力学学报。而最年轻的学报有1979年创刊的“应用海洋研究”(Applied Ocean Research)和1987年问世的“近海力学与北极工程学报”(Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering)。主要的专业性国际学术会议有一年一度在美国召开的近海技术会议(Offshore Technology Conference),每三年一次轮流在挪威、英国、美国和荷兰召开的国际近海结构性能会议(International Conference on Behaviour of Offshore Structures),还有每年基本上都在美国召开的国际近海力学和北极工程会议(International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering)。这些会议都有会议录出版。我国学者文圣常和余宙文(1984)的《海浪理论与计算原理》,邱大洪(1985)的《波浪理论及其在工程上的应用》是国内有关近海力学的主要著作。前者是关于海浪理论的专著,后者论述了波浪理论和波浪对工程建筑物的作用。但是,有关近海结构动力分析的著作,则尚未见在国内问世。

作者1981~1982年在美国访问期间收集了有关近海力学的资料。1982年回国后编了一本《海洋结构动力分析》讲义,1983年以来,在同济大学工程力学专业“海洋结构动力学”课程中连续使用了五次。该课程受到学生欢迎,效果良好,1985年获得同济大学教学改革优秀成果奖二等奖。1986年,作者又对该讲义作了较多的修改和补充,成为本书的初稿。同年8月,澳大利亚新南威尔士大学结构工程系聘作者为客座教授,为该系博士研究生开设“波浪与近海结构动力学”课程。这门课程的内容基本上取材于本书初稿。在新南威尔士大学授课之余,作者又一次有机会收集有关资料。1987年,作者在同济大学固体力学和海洋工程两专业的研究生课程中再次使用本书初稿为教材。此后,本书在这两次使用的基础上,再经过修改才最后定稿付印。

本书主要包括波浪理论、小物体上的波浪力问题、绕射问题、辐射问题以及固定式近海结构动力分析等方面的内容。这些都是

近海力学中最基本的内容。

近海结构要承受风、浪、流、冰以及地震等环境荷载的作用。其中以风引起的波浪为最重要的动力荷载，而波浪运动是一种随机现象，所以不仅要对波浪运动及其对结构物的作用力作确定性分析，还应该作随机分析。

柔性结构，如高度较大的固定式平台，对于波浪动力荷载有较大的敏感性。结构的动力分析是必不可少的。

在波浪作用下，柔性结构本身的运动往往是不可忽略的。结构的运动与流体质点的运动互相影响、互相制约。因此，流体与结构的相互作用问题是一个重要的问题。

流体对结构物的阻力是与流体质点运动速度的平方成正比的，而当考虑流体与结构的相互作用时，则与流体质点相对于结构的运动速度的平方成正比。速度的平方项给运动微分方程带来非线性。因此，非线性问题是波浪作用下结构动力分析的主要难点之一。

当物体横截面特征尺度比波浪的波长小得多时，可以认为物体的存在与否对波浪场无甚影响，物体所承受的波浪力可以按 Morison 公式计算。但是当这一特征尺度大于一定的限度时，物体的存在明显地使波浪场发生改变，因此必须研究物体存在于波浪场时引起的绕射问题以及辐射问题。

本书着重从力学的角度阐明上述问题的基本概念、基本理论和求解方法。阐述中注重理论的严密性又尽可能阐明问题的物理概念。本书可以用作大学理工科本科各专业，特别是力学专业和海洋工程专业，或有关研究生一学期课程的教材或参考书。本书也适宜于工程技术人员、应用科学研究人员学习参考之用。近年来不少本来从事土木、水利或造船等方面工作的工程科技人员，因为新的需要转向近海工程领域，他们已具有原来专业的理论基础和工作经验，但是对近海力学还不甚了解，那么本书可以帮助这样的读者较快入门并着手工作。

本书第一章波浪理论，着重讲述 Airy 小振幅波理论和随机

波理论，介绍常用的海浪谱。在这一章中还对 Stokes 高阶波等有限振幅波理论以及波浪的破碎问题作了概括的阐述。

第二章小物体上的波浪力，主要讲的是 Morison 公式，并对公式中的阻力系数、惯性力系数、阻力的线性化以及如何考虑流体与结构的相互作用等问题作了阐述。在这一章的后半部分讲述随机波浪力的基本理论，导出了随机波浪力的方差、相关函数、谱密度函数等与海浪谱的关系式。

第三章大物体上的波浪力，主要研究圆柱体的绕射和辐射问题。阐明用半解析法求解 Laplace 方程边值问题中的特征解的一般方法，并给出了水中铅直圆柱体绕射问题、辐射问题以及水下铅直圆柱体辐射问题的解。在这一章还讨论了由于地震引起的、对水中或水下圆柱体的水动力。

第四章随机波浪力作用下的结构动力分析的主要研究对象是固定式框架结构。首先建立了在随机波浪力作用下考虑流体与结构相互作用的结构运动方程，应用统计等效线性化方法近似地将非线性阻力项线性化。然后采用振型叠加法将求解耦合方程组的问题转化为非耦合，在此过程中用一个在统计意义上的等效对角阻尼矩阵来代替原来的耦合阻尼矩阵，整个数值计算过程要用迭代法进行。最后导出了各响应量的自相关函数、谱密度函数以及峰值均值等，并给出一个较完整的算例。

本书主要内容取材于 70 年代以来国内外的各种学报和会议录、专著和文集、大学研究报告和学位论文以及外国学者的讲课、讲学材料等，其中有些资料是在国内不易找到的。作者根据自己的经验将有关素材系统地、有些部分比原著更详细地加以阐述。以此为基础，读者可能获得领略最新文献的能力。本书中还适当引入作者本人和工程力学系的同事们共同取得的一些工作成果。

近海力学是一门综合性很强的学科。阅读本书需要有大学本科流体力学和结构动力学等方面的力学基础。还要运用数学物理方法、概率统计和随机过程等方面的数学工具。但是作者不打算

用这些内容来扩大本书的篇幅，只想在此推荐几本合适的参考书，即郭敦仁（1965）、Hildebrand（1976）、Papoulis（1984）和Newland（1975）的有关著作。

读者们在读了本书以后，如果正在从事近海力学方面的科技工作，则一定会感到最好是自己直接去查阅一些国外的有关文献。为了方便读者，本书末附有英汉术语对照和一百余种参考文献目录。

作者愿借此机会对美国北卡罗来纳州州立大学土木系的 C. C. Tung 教授表示由衷的感谢。作者在该校访问期间从 Tung 教授那里得到的关怀和教益是令人难忘的。作者还要感谢工程力学系的同事和合作者王志培和何颖强，他们对本书初稿作了详细校阅，改正了一些疏误之处，提出了许多很好的修改意见。作者特别珍惜他们真诚而坦率的合作精神。本书稿最后经邱大洪教授悉心审阅，作者在此郑重地向他表示感谢。

如果这本书能被读者认为确实有些用处的话，那将使作者获得莫大的欣慰。真诚欢迎读者评论指正！

同 济 大 学

毕 家 驹

1987 年 11 月，上海

目 录

第一章 波浪理论	(1)
第一节 引言.....	(1)
第二节 基本方程与边界条件.....	(5)
一、基本假设.....	(5)
二、基本方程.....	(6)
三、边界条件.....	(9)
第三节 小振幅波的线性理论.....	(10)
一、基本方程和边界条件的线性化.....	(10)
二、有限水深中的前进波.....	(11)
三、无限水深中的前进波.....	(13)
四、群速.....	(2)
五、波能及其传递.....	(24)
六、空间波浪运动.....	(27)
第四节 有限振幅波的非线性理论概述.....	(23)
一、波浪理论的分类和概述.....	(28)
二、Stokes波理论概述.....	(31)
三、波浪理论的比较.....	(41)
四、波的破碎.....	(45)
第五节 随机波浪理论.....	(48)
一、基本假设.....	(48)
二、海浪谱.....	(51)
三、自由表面高程.....	(61)
四、波浪场.....	(63)
第二章 小物体上的波浪力	(70)
第一节 引言.....	(70)

一、问题的提出	(70)
二、流动现象	(71)
第二节 Morison 波浪力公式	(75)
一、基本公式	(75)
二、阻力系数 C_D 和惯性力系数 C_M	(77)
三、阻力的线性化	(84)
四、流体与结构的相互作用	(88)
五、波与流的相互作用	(90)
六、倾斜构件	(90)
七、群柱干扰效应	(93)
八、应用 Airy 波理论时波浪力的适用范围	(95)
九、用线性波浪理论与非线性波浪理论计算波浪 力的比较	(96)
第三节 横向振动力	(98)
第四节 随机波浪力	(103)
一、波浪力方差 σ_H^2	(103)
二、波浪力自相关函数 $R_{ff}(\tau)$	(104)
三、波浪力频谱 $S_{ff}(\omega)$	(109)
四、波浪力系数估计	(111)
第三章 大物体上的波浪力	(113)
第一节 引言	(113)
第二节 绕射和辐射问题的基本理论	(116)
一、边值问题	(116)
二、特征解	(119)
第三节 圆柱体绕射问题	(123)
第四节 圆柱体辐射问题	(137)
一、水中铅直圆柱体的辐射	(137)
二、水中铅直圆柱体的地震分析	(139)

三、水下铅直圆柱体的辐射	(147)
四、水下铅直圆柱体的地震分析	(153)
第五节 绕射问题的工程实用计算方法	(159)
第四章 随机波浪力作用下的结构动力分析	(167)
第一节 引言	(167)
第二节 分析原理	(171)
一、结构计算模型	(171)
二、随机波和波浪力理论回顾	(172)
三、运动方程	(173)
四、统计等效线性化方法	(174)
五、耦合阻尼矩阵的对角化	(176)
六、动力响应的统计特性	(179)
七、迭代量 σ_i, τ_i 和 $E[\dot{Y}_i, \dot{Y}_i]$ 的计算	(183)
八、穿越分析和峰值统计特性	(186)
第三节 实例分析	(193)
一、结构计算模型的简化处理	(193)
二、波浪力的简化处理	(197)
三、简化处理后的计算公式	(200)
四、数值计算	(203)
主要符号说明	(217)
英汉术语对照	(227)
参考文献	(241)

第一章 波浪理论

第一节 引言

从 19 世纪到现在，人们广泛地研究了波浪理论，目前还正在继续向非线性波浪理论和随机波浪理论方面进行研究。在本章中，从近海结构的环境荷载角度出发，仅着重讨论风和重力所引起的海洋波浪运动。

形形色色的海洋表面波浪可以按扰动力和恢复力，或按周期（或频率）进行分类。图 1-1 表示了 Kinsman (1965) 给出的一个粗略的划分。在图中 Kinsman 还对海浪的能量分布作了一个定性的估计。从图中的曲线可以看出，海浪的大部分能量集中在周期为 1~30 秒的范围内。这一周期范围内的海浪主要是由风作为扰动力、重力作为恢复力而产生的，叫做风生成的重力波。因为它蕴育着巨大的能量，所以作为近海结构的环境荷载来考虑，当然必须首先予以充分的重视，这是从能量的角度来看的。另一

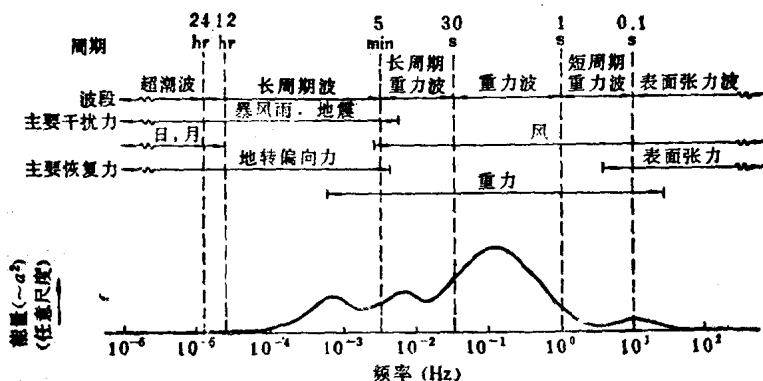


图 1-1 海洋表面波能量频谱示意图
(Kinsman, 1965)

方面,从周期(或频率)的角度来分析,典型的近海结构的自振周期约为 $1\sim 3$ 秒,正好落在上述重力波的周期范围内。而海水越深,结构越柔,结构自振周期值越大,海浪荷载的动力作用就越为重要。Burke 和 Tikh (1971)对四座塔式近海结构的分析指出,当水深超过120米,结构自振周期约达到2.4秒时,结构的动力响应就开始明显起来。现在近海结构正日益向更深的海域发展。结构将具有更大的柔性,其自振周期值也将随着增大。例如Cognac近海平台(offshore platform)的周期已达到6秒,它更加接近风生重力波能量峰值所在的周期值——10秒。结构自振周期与风生重力波周期范围的吻合,进一步说明这种重力波对于近海结构来说是一种重要的动力荷载。

从数学处理的角度来看,研究波浪理论的主要困难在于方程和边界条件中的Euler加速度所含对流项(convective term)是非线性的,以及波浪的自由表面作为边界条件之一是未知的。因此至今尚未能找到一个对于各种波浪运动都适用的普遍解。即使对于一些很简单的运动情况,也只能求得近似解。人们只能将波浪按不同特征进行分类,并分别作相应的假设和近似处理,以求得数学解答。这样,波浪理论就发展成为一个分门别类的系列。

波浪的主要特征参数是波高 H 、波长 L 和周期 T 。如图1-2所示,波高是从波峰(crest)到波谷(trough)的距离,波长是相邻两波谷(峰)间的距离。而波剖面(wave profile)的特性则主要由波高、波长和静水深度 d 所组成的无量纲参数所决定。波浪的三个常用的无量纲特征参数是 H/L 、 H/d 和 L/d 。 H/L 称为波陡(wave steepness), H/d 称为相对波高,而 L/d 的倒数称为相对水深。

H/L 、 H/d 和 L/d 三个值都很小的波浪可归类为深水区和过渡区的小振幅波。其波剖面如图1-3(a)所示。这种小振幅波的线性理论将在本章第三节中阐述。这是波浪理论中最基本的内容,也是近海工程中作为波浪荷载应用得最广泛的部分。 H/L 、 H/d 和

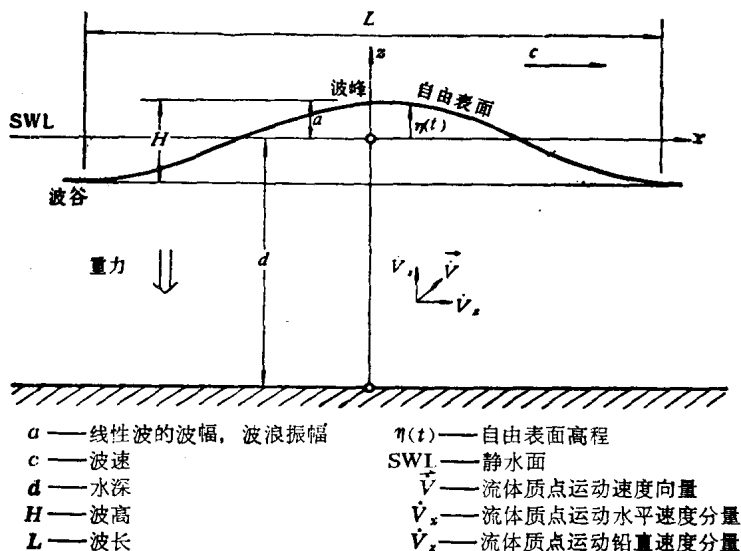


图 1-2 波浪特征示意图

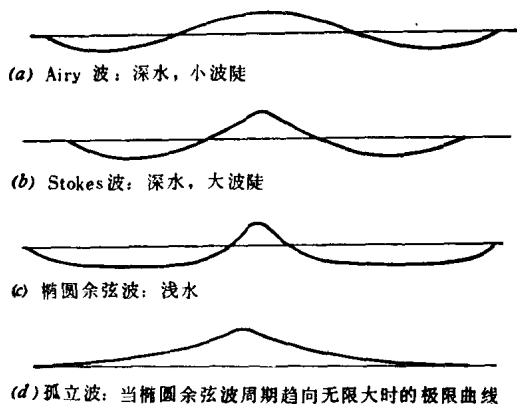


图 1-3 各种波剖面示意图

(Le Mehaute, 1976)

L/d 值并不都很小的其他各种情况下的有限振幅波主要有 Stokes 波、椭圆余弦波和孤立波等, 它们的波剖面分别如图 1-3(b)、(c)、(d) 所示。本章第四节将综述这些波浪理论的特点并说明其

适用范围。

以上所述都是把海浪看作单一波长的波，利用流体动力学的方法，在 H/L 、 H/d 和 L/d 为各种不同值的情况下，分别建立各种不同的波浪理论。这样得到的单一波（single wave）的运动规律，可用来解释自然界中出现的一些简单波浪运动现象。当然，在一定条件下还可以把单一波叠加起来以说明较复杂的波浪现象。这些理论的特点是采用确定的函数来描述波浪运动的变化，通常称为确定性的分析理论。

但是实际的海浪参差不齐、此起彼伏、瞬息万变，是一种随机现象。反映海浪性质的各物理量将随时间和位置而变，从而可视为随机过程。图 1-4 所示是从宽广深水海域中互相邻近的三个测点上同时测得的海浪波动水面相对于静水面的高度 η （ η 示于图 1-2）随时间 t 变化的记录。这些记录曲线形状复杂，各不相

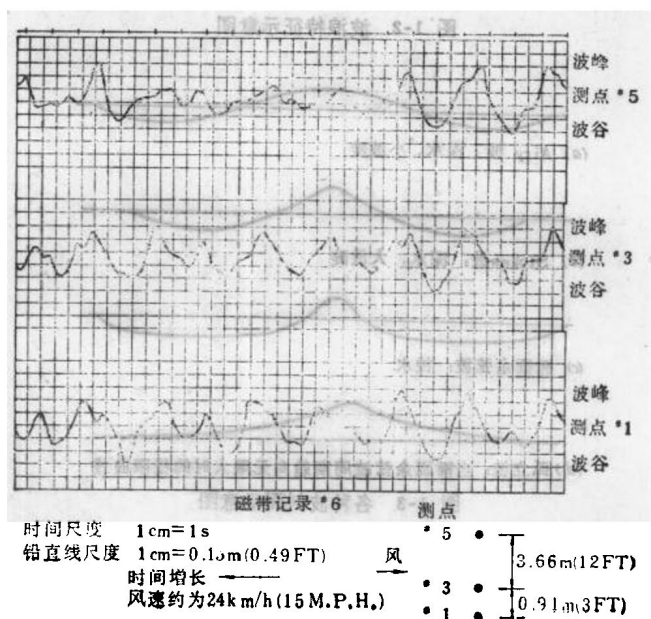


图 1-4 自由表面高程记录总体
(Kinsman, 1965)

同，也不重现，但是反映了同一海浪状态和特性，充分显示了海浪的随机性。因此 $\eta(t)$ 可以看作是一随机过程。许多这样的记录构成随机过程 $\eta(t)$ 的总体，而任一观察记录称为此过程的一次现实。

50年代以来，人们将许多振幅、频率、方向和位相不同的单一波叠加起来作为海浪模型，但和上面说的确定性分析不同的是认为各组成波的振幅或位相是随机量，从而叠加所得构成一随机过程，以此反映海浪的随机性。30多年来这种随机性的分析理论有了很大的发展，并已成为波浪理论的一个重要组成部分。本章第五节将着重阐述随机波浪理论。

综上所述，本章以第三节小振幅波的线性理论为基本内容，第五节随机波浪理论为重点，并在第一、四节中概括介绍波浪理论其他方面的情况。而作为理论基础，在下一节中首先阐明波浪运动的基本方程和边界条件。

第二节 基本方程与边界条件

一、基本假设

关于波浪运动，假设流体是理想不可压缩的、运动是无旋的。流场底部以光滑水平固壁为界，即水深 d 为常数，上部与空气接触形成自由表面，水中没有流（current）。在重力场作用下，若流体处于静止状态，则按流体静力学原理，其自由表面必为水平面，称为静水面（still water level, SWL）。若由于某种外界干扰使流体的表面离开了静水面位置，则重力必力图使自由表面恢复到原来的位置，从而使流体产生运动。这种运动是不定常的，以波的形式在流体中传播。波剖面的形状是固定不变的，波的传播速度 c 是常数。自由表面上的压强 p ，通称压力，也为常数，且与所接触的大气压力 p_a 相同。

在一般情况下，可取直角坐标 $OXYZ$ ，其中 XOY 平面与静水面重合， Z 轴铅直向上。流体质点运动速度为 $\vec{v}(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ ，

而 $\eta(x, y, t)$ 是自由表面高程 (free surface elevation)。对于平面波浪运动, 可取其传播方向与 X 轴的正向一致, 则在所有与 XOZ 平面平行的平面中, 运动情况均相同, 没有 Y 方向的运动, 运动与 Y 坐标无关, 其示意图见图 1-2。

二、基本方程

1. 连续性方程

根据质量守恒定律, 连续性方程可表达如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1-1)$$

其中 ∇ 是向量微分算子, 即

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{e}_1 + \frac{\partial}{\partial y} \vec{e}_2 + \frac{\partial}{\partial z} \vec{e}_3$$

式中 $\vec{e}_1$ 、 $\vec{e}_2$ 、 $\vec{e}_3$ 分别是 X 、 Y 、 Z 方向的单位向量。

如果流体是不可压缩的, 则密度 ρ 为常数, 连续性方程简化为

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1-2)$$

如果流体运动同时是无旋的或有势的, 则必存在速度势 φ , 并有

$$\nabla \varphi = \vec{V} \quad (1-3)$$

则连续性方程成为

$$\nabla \cdot (\nabla \varphi) = 0$$

此即 Laplace 方程

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1-4)$$

对于不可压缩流体的平面无旋波浪运动, 连续性方程可表示为

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1-5)$$

2. 运动方程

(1) Euler 运动方程