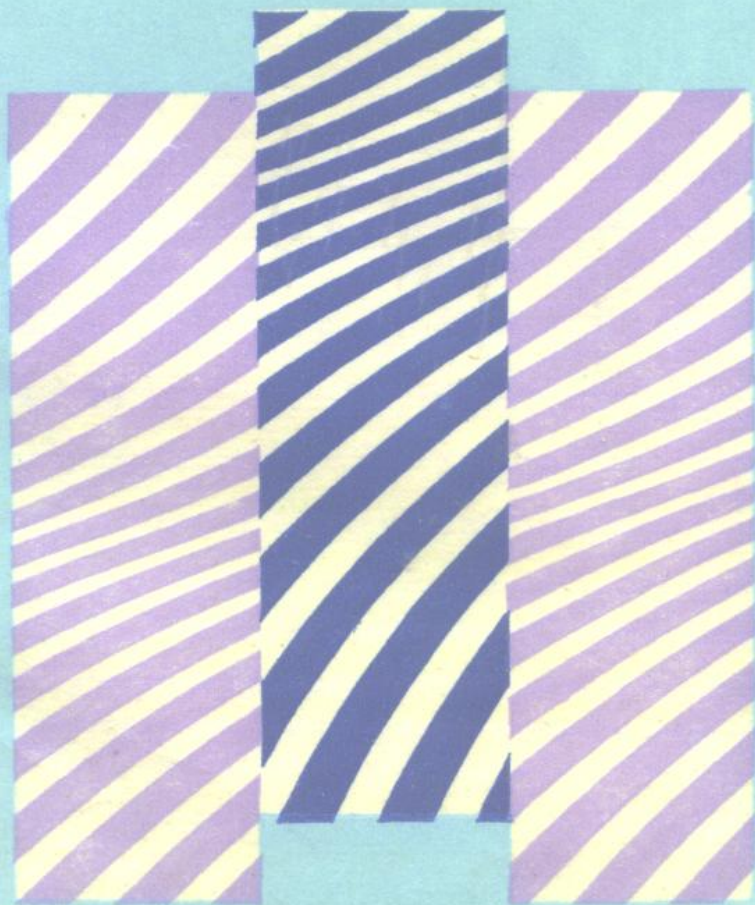


# 海洋工程流体力学及 结构动力响应

黄祥鹿 陆鑫森 编



上海交通大学出版社

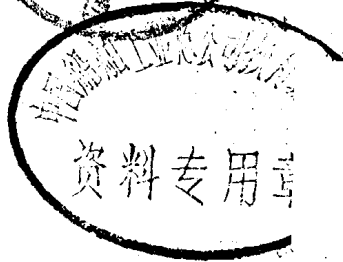
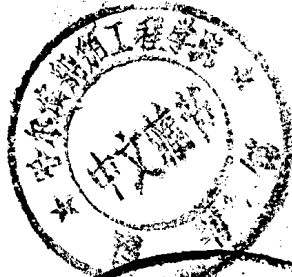
P75

H73

3  
45868316

# 海洋工程流体力学及 结构动力响应

黄祥虎 陆鑫森 编



00458683

上海交通大学出版社

(沪)新登字 205 号

DIU62/06  
内 容 提 要

本书为中国船舶工业总公司船舶工程教材之一。本书共分十章,包括:波浪理论,小直径管柱结构的波浪载荷,大物体结构的波浪载荷,浮动结构的动力载荷及运动,海洋工程结构的系泊及定位,风载荷,地基分析,涡激振动,海洋结构的动力响应等。

本书以流体与结构的相互耦合作用为重点,以典型海洋工程结构物为背景,系统地阐述了分析流体载荷与结构动力响应的基本理论和方法。本书内容新颖,取材广泛,着重工程实用,理论联系实际。

本书可作为高等院校海洋工程及有关专业研究生和本科生的教材或教学参考书,也可作为工程设计人员参考书。

### 海洋工程流体力学及结构动力响应

出 版: 上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

发 行: 新华书店上海发行所

印 刷: 立信常熟印刷联营厂

开 本: 850×1168(毫米) 1/32

印 张: 6.375

字 数: 164,000

版 次: 1992年1月 第一版

印 次: 1992年2月 第一次

印 数: 1—1,400

科 目: 264—306

ISBN 7—313—00989—5/P·75

定 价: 2.10元

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
§ 1—1 海洋工程的基本情况 & 本课程的任务.....	1
§ 1—2 海洋工程结构的型式分类.....	3
§ 1—3 离岸工程结构设计的基本方法.....	5
<b>第二章 波浪理论</b> .....	8
§ 2—1 波浪的流体动力基本方程及其边界条件.....	8
§ 2—2 线性波理论 (Airy 波理论).....	9
§ 2—3 波浪的能量及能量传播速度.....	12
§ 2—4 有限振幅波理论 (Stokes 波理论).....	13
§ 2—5 椭圆余弦波理论 (Cnoidal 波理论).....	17
§ 2—6 流函数理论.....	24
§ 2—7 波浪与流联合的情况.....	26
§ 2—8 实际海洋波浪的随机特征.....	27
§ 2—9 波能谱密度函数.....	29
§ 2—10 波浪的统计特征及其与波能谱密度函数间的 关系.....	30
§ 2—11 波谱资料.....	33
<b>第三章 小直径管柱的流体动力计算</b> .....	37
§ 3—1 概述.....	37
§ 3—2 直立桩柱的波浪力计算.....	39
§ 3—3 流体动力系数的讨论.....	42
§ 3—4 Morrison 公式中的系数的试验测定.....	50
§ 3—5 各种因素对 Morrison 公式计算水平力的影 响.....	52
§ 3—6 倾斜桩柱的流体动力计算.....	54

§ 3—7	随机波作用下的波浪力计算	56
<b>第四章</b>	<b>大物体结构的波浪载荷</b>	<b>62</b>
§ 4—1	线性反射问题	63
§ 4—2	直立圆柱	65
§ 4—3	任意形状大物体的波浪力计算	69
§ 4—4	其它的简化算法	75
<b>第五章</b>	<b>浮动结构的流体动力载荷及运动</b>	<b>78</b>
§ 5—1	浮动平台的运动概述	79
§ 5—2	浮式结构运动的线性理论	81
§ 5—3	切片理论	85
§ 5—4	半潜平台的运动计算	91
§ 5—5	在不规则随机波浪上的运动计算	99
<b>第六章</b>	<b>海洋工程结构的系泊及定位</b>	<b>102</b>
§ 6—1	海洋结构物在波浪上的漂移力及其运动	103
§ 6—2	慢漂运动的阻尼问题	108
§ 6—3	系泊系统的流体动力问题	110
§ 6—4	单点系泊系统的平衡位置的稳定性	117
<b>第七章</b>	<b>风载荷</b>	<b>124</b>
§ 7—1	风速的分布	124
§ 7—2	风载计算	130
<b>第八章</b>	<b>地基分析</b>	<b>135</b>
§ 8—1	地基土的力学性质	135
§ 8—2	桩基分析	141
§ 8—3	重力式平台的基础分析	147
<b>第九章</b>	<b>涡激振动</b>	<b>153</b>
§ 9—1	流对结构动力分析的影响	153
§ 9—2	流的速度及其对波谱的影响	153
§ 9—3	旋涡引起的振动	155
<b>第十章</b>	<b>离岸结构的动力响应</b>	<b>171</b>
§ 10—1	结构的模型化	171

§ 10—2	数学模型 .....	173
§ 10—3	确定性方法 .....	185
§ 10—4	随机分析方法 .....	188
§ 10—5	结构响应的统计评估 .....	191
§ 10—6	疲劳分析 .....	194

# 第一章 绪 论

## § 1—1 海洋工程的基本情况及本课程的任务

海洋工程是一门年青的科学。从本世纪 40 年代在墨西哥湾开发石油开始,为了近海石油开发的需要,在海上开始建造固定式的钻井平台。随着石油开发活动日益向深海发展,固定式海上钻井平台的建造技术日益先进,同时出现了一些新型的钻探及采油技术,以及浮动式的平台,如半潜平台等。60 年代欧洲北海油气田的开发,由于北海的环境条件苛刻,对于近海工程技术的发展起了强大的推动作用。目前,海上固定式平台已经达到三百多米水深,适应海上石油钻探、开采、运输的要求,已经发展了一系列多种型式的装置及结构,而这些装置和结构的设计和建造提出了一系列的力学问题和实际问题。本课程的目的,就是介绍海洋工程中的一些主要结构型式设计中,有关的流体力学及结构动力学问题。

海洋工程结构大多数都是在海上长期工作,固定于一定的地点,它对于海上的恶劣天气,如风暴等,不能象船舶那样,预先躲避。因此,它的设计必须考虑到海上可能发生的最恶劣情况,设计的考虑如果不周密将会造成严重的灾害性事故,在短短的三四十年内,灾害性事故比较著名的有:1979 年挪威北海“ALEXANDER KJELAND”居住平台的倾覆事故,1981 年加拿大半潜平台“OCEAN RANGE”号的倾覆事故,造成了重大的经济损失和人员伤亡。这些事故发生的原因是多方面的,其中有操作上的原因,以及超过预先估计的恶劣环境条件,但与原设计的缺陷或考虑

不周也是有一定关系的。例如“ALEXANDER KJELIAND”居住平台，它是一五角星形的立柱浮式半潜式平台，由于在严重风暴中一条腿断裂，引起整个平台的倾覆，如果在原设计中能够适当考虑破损稳性，也可能避免或减轻事故的损失。

海洋工程结构物的型式是多种多样的，而又在复杂的海洋环境条件下工作。因此，它的设计计算牵涉到相当复杂的问题，加上海洋工程是最近发展起来的，历史短，进展快，不象在船舶设计上那样有长期的实践经验资料，可以作为经验依据。因此，对于结构在各种海洋环境条件，主要是波浪，以及风海流等作用下的载荷以及动力响应等，必须从理论上及实验上进行细致深入的分析，从而为结构的设计求得可靠的依据。

海洋工程结构设计牵涉的问题很广，作为一门工程科学，它的发展也是在一些有关的学科基础上发展起来的，与固定式平台等近海结构相联系，有相当一部分的理论与试验研究是以港湾工程为基础的。特别是关于固定平台的波浪载荷的研究，在理论方法及试验手段上都是从有关港工的方法上发展起来的。由于石油开发的重大经济意义，许多土木工程方面的港工研究室都转向研究海洋工程结构，而对于另外一类浮动式海洋工程结构，它们则与船舶有密切的关系。在60年代初期，浮式平台开始投入应用，而在船舶理论中，应用随机理论预报船舶在波浪上运动的方法也发展成熟，并且发展了相应的试验技术及建造了大规模的试验池。因此，一些船模试验池开始进行有关海洋工程结构的试验研究工作，其中最著名的有荷兰瓦根宁根船模试验池。现在船模试验池的试验项目中，海洋工程结构的试验所占的比重日益增加，并且各试验室还发展了理论计算方法。所以可以这样说，浮动式的海洋结构研究和船舶的研究实际上是不可分割的。

本课程的目的，是从工程应用角度，简要介绍海洋工程结构的流体力学，以及结构动力学的基本问题，将着重阐述在工程应用方面如何处理问题的方法，对一些理论细节推导将不涉许多，以节省篇幅，读者可以参考其它资料。



## § 1—2 海洋工程结构的型式分类

这里要说明“海洋工程”这一名词，对现在所讨论的问题是不够确切的。因为海洋工程包涵的内容很广泛，它包涵了研究海岸及港湾工程结构的海岸工程，以及前面提到的与近海石油开发有关的近海工程，或离岸工程。在这一课程中所讨论的是离岸工程，不包含海岸工程在内。离岸工程结构主要是用于在近海，从几十米水深到近千米水深，开发石油和天然气等矿藏的工程结构，它的型式很多样，它的任务主要是钻探、开采及运贮三个方面。下面就其中一些主要的型式作一些介绍。

### 1. 固定平台

固定的海洋(离岸)工程结构，大多是用作采油或气的生产平台，在离岸工程结构中是属于最大量的。据统计，到目前为止，这一类平台投入使用的在全世界已经上万台，其中从结构上又可分为空间桁架结构的导管架平台，和由大型构件组成的重力式平台。由于它们都是用桩腿或者自身重量固定于海底，靠自身的刚性抵抗波浪等外力的冲击，保持位置的，因此，一般适用于较浅的海域。当使用水深加大时为保持足够的刚度，结构尺寸将增加很快。目前最大的导管架平台，是1980年在美国沿海COGNAC油田架设的平台，该处水深达到330米，该平台包含59000吨钢材。重力式平台主要靠其自身的重量立于海底，保持稳定，它的水下浮箱通常用作贮油罐。大多数的重力式平台，应用于北海油田，通常用水泥建造。

### 2. 移动式平台

移动式平台是60年代发展起来的，可以移动位置的平台结构，它们有自升式平台及半潜式平台等，主要用于钻探工作，其中，半潜平台是最重要的一种型式，它的特点是与固定平台不同；在工作

时平台漂浮于海面,依靠锚链等系泊装置,保持一定的位置。由于海上的波浪及海流风等的作用,平台的运动是难以避免的,因此,半潜平台必须在大多数的海洋环境条件下,都能保证其运动不超过钻探作业所允许的最大运动幅度,半潜平台的设计的基本原则也在于此,这就是为什么半潜平台都具有小的水线面,大部分排水量集中于水下较深处的缘故。除半潜平台以外,移动式平台中另一种型式即自升式,这种平台在工作时桩腿着地,实际上是一种非永久性固定平台,在移动位置时,拔起桩腿,平台漂浮于水面,成为一漂浮结构。

### 3. 单点系泊

在采油过程中,油气的集输常采用海底输油管线,直接输到岸上。但是,对于一些中小贮量的油田,或者技术上铺管有困难时,常采用一些系泊装置,系泊油轮进行装卸。属于这一类装置的,有浅海中的开敞式码头,及单点系泊系统,其中单点系泊系统应用很广,目前已成为浮式早期生产系统中的主要型式。

### 4. 顺应式结构

上面介绍的结构型式,是属于目前应用较广的结构型式。但是随着石油开发的日益向深水发展,这些结构型式都逐渐不适用。例如,对固定平台,在水深加大时,尺度加大,结构将变“软”,为了保持足够的刚度,必须加大构件尺寸,将耗费大量的钢材,在经济上将不合算。因此,为了解决深水作业问题,近十年来发展了一种介于浮动式与固定式之间的概念,即所谓顺应式结构,它的基本思想是,在固定式的基础上,允许平台在外扰动力的作用下有微小的幅度运动,而应用系泊一类的拉索或张力腿,以限制这一运动,使结构保持位置。由于允许结构在外力作用下作微幅运动,从而大大减小了结构的内应力,而将拉索结构等作为一整体,可以设计使其在外载荷作用下有最小的动力响应。作为这一类结构的例子,有张力腿平台,以及拉索塔两种,这两种结构分别在最近投

入使用。

### § 1—3 离岸工程结构设计的基本方法

离岸工程结构长期设置于开敞海面从事作业,海况、气象等环境条件对结构的安全,以及开工作业率影响很大。因此,确定设计所依据的海况及气象条件,是离岸工程结构设计中的重要前提,设计中应该考虑的环境条件内容很广,包括海底地形、水深、波浪、风、海流、潮、冰以及地震等,视具体设计的形式而异,而其中占中心位置的则是波浪。

在离岸工程结构设计中,一般考虑两种设计状态:生存状态和作业状态。

生存状态是考虑结构在最恶劣的外力条件下的情况,主要是保证在极限负荷下的安全。因此,要按长期波浪统计资料,取五十或一百年一遇的最恶劣海况中的极大波,作为设计条件。作业状态则是考虑与结构或装置在一年中的作业率,或作业时间,以及疲劳强度有关的问题(对浮动式平台主要是考虑作业率,对固定平台则是疲劳强度),根据这些因素确定有关的发生概率高的波浪,作为设计依据。在生存状态下由于是在极限波浪作用下,非线性问题不可避免,因此,在设计计算的方法上,通常采用所谓“设计波法”。而对作业状态,则可以作一定程度的线性化,因而适用线性统计分析理论,通常采用“设计谱法”。在离岸工程结构设计中的非线性问题,大致包含以下几个方面:一是波浪的非线性,另外,由于粘性力的平方关系引起的波浪力的非线性,也是非线性因素之一。这两种非线性在一定程度内,可以用线性化的方法处理。但是,对于系泊系统等问题所引起的强非线性问题,则一般不能加以简化。针对这一情况,通常在设计中有两种不同的方法,即设计波法与设计谱法,下面分别加以叙述。

## 1. 设计波法

设计波法的基本步骤如图 1-1 所示。

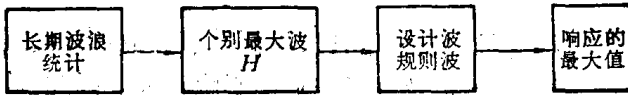


图 1-1 设计波法框图

这一方法是从 40 年代以来,近海石油钻探装置设计的基本方法。这方法最主要的是根据长期统计资料,求得五十年一遇或一百年一遇的最大波,然后,换算成相应波高及波周期的规则波,作为结构波浪载荷计算的依据。此法的优点在于容易计入非线性的影响,以及估计流的作用等。缺点是不能考虑波浪的不规则性,并且设计波周期的决定也有任意性。

## 2. 设计谱法

设计谱法的基本步骤如图 1-2 所示。

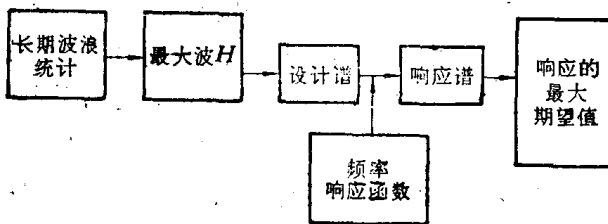


图 1-2 设计谱法框图

这一方法是根据长期统计资料来选择最大波,然后求得相应的波谱作为设计谱,由设计波谱及结构响应的频率响应函数,可以求得响应谱,从而求得结构对该波浪响应的最大期望值。这一方法的优点,是理论上比较严密,有一定连贯性,并且可以估计波浪不规则性的影响。缺点是难于处理非线性问题。设计谱法多用于浮动式结构的运动响应计算,以及与疲劳强度有关的结构动力学问

题等。

为了估计一些包含非线性环节的结构动力系统在不规则波作用下的响应情况,在设计谱法的基础上发展了一种时间域模拟法,这一方法的基本步骤如图 1-3 所示。

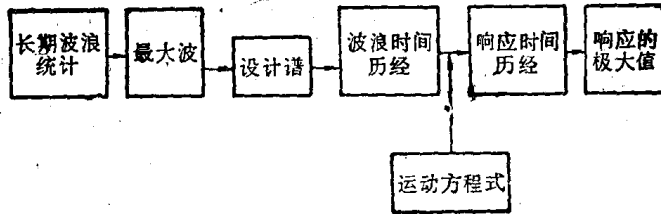


图 1-3 时域模拟法框图

这一方法首先是将已经确定的设计谱转化到时间域,以求得相应于此一谱的波浪时间历程(包括波浪下的流场),然后直接用数字积分结构在此一波浪下的运动微分方程,这也就是通常所谓的数值模拟,求得具体的结构响应中的非线性问题的解,同时也可以计及波浪不规则性,但计算太费时,是不经济的。

## 第二章 波浪理论

在离岸工程结构设计计算中，首先要确定的是它的工作环境条件，即其工作海域的风浪及海流的大小，而其中最重要的是波浪条件。为了计算波浪作用在结构上的流体动力载荷，首先必须确定设计所依据的波浪要素，在确定了波浪的基本参数，如波高、波长、波周期等之后，还须要确定波浪下的整个流场，包括波浪下水分子速度、加速度的分布，以此作为计算波浪作用在离岸工程结构上的流体动力载荷的依据，这也就是通常“设计波法”的步骤。为此，在本章中，将介绍几种海洋工程中常用的波浪理论，作为设计计算的参考。

由于实际海上的波浪是随机的，不规则的。对于这一随机的现象必须应用随机统计的方法处理。此外，在具体设计计算中，还要求根据波浪统计资料确定设计依据的最大波，这也要求应用统计的方法。因此，在本章的第二部分，将介绍波浪的随机理论及有关资料。

### § 2—1 波浪的流体动力基本方程及其 边界条件

在实际海洋中流体是有粘性的，并且在水表面还存在着表面张力，这些因素对波浪运动都会有一定的影响。但是粘性及表面张力的影响大小，与波浪的频率有关，在一般对离岸工程重要的波浪频带内，这些影响很小，可以忽略。因此在这里假设流体为理想流体，只考虑重力作用，故流动是无旋的，具有速度势  $\varphi$ ，取右手坐标系， $Oxy$  面在水平面上，速度势  $\varphi$  可以认为是空间点的位置及

时间  $t$  的函数:  $\varphi(x, y, z; t)$ , 此一速度势应满足 Laplace 方程:

$$\Delta\varphi = 0, \quad \text{在 } z < 0. \quad (2-1)$$

同时满足如下边界条件:

(1) 在波浪表面  $z = \zeta$  处应满足

动力学条件: 即表面上的压力为常数。根据压力的 Bernoulli 公式, 此条件可写成:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial\varphi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\zeta = f(t). \quad (2-2)$$

运动学条件: 即自由面上的水分子, 在运动中, 应保持在波面上的条件, 可以写成:

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} + \frac{\partial\varphi}{\partial x} \cdot \frac{\partial\zeta}{\partial x} - \frac{\partial\varphi}{\partial z} = 0, \quad \text{在 } z = -d \text{ (} d \text{ 为水深)}. \quad (2-3)$$

(2) 水底条件: 即在底部, 垂向速度为零, 即

$$\frac{\partial\varphi}{\partial z} = 0, \quad \text{在 } z = -d. \quad (2-4)$$

(3) 波浪的周期性条件: 假设波浪传播方向沿  $x$  轴, 则

$$\varphi(x, z; t) = \varphi(x - Ct, z), \quad (2-5)$$

其中  $C$  为波速。

从上面几个公式可以明显的看出, 波浪速度势所应满足的边界条件, 或定解条件, 是非线性的。这是因为, 首先这一条件中的自由面条件, 必须在未知的自由表面上满足, 另外, 这些条件中有相当一部分, 本身就是非线性的, 这也就是波浪问题求解的困难之处。

## § 2—2 线性波理论(Airy 波理论)

上面提出的波浪速度势的求解, 由于其非线性, 存在困难, 其最主要的困难是自由面条件, 必须在未知的波浪表面上满足, 而这一波浪表面正是所要求的结果。通常求解这一非线性问题, 采用摄动法, 求其不同阶的近似解。现先介绍最简单的一阶近似, 即所

谓的线性波或 Airy 波理论。

线性波理论是将非线性的波浪自由面条件，近似以线性的边界条件代替，这一线性边界条件相应于波高很小的情况。下面可以看到，这一边界条件也就是摄动解的一阶解条件。

假设波浪的振幅足够小，其乘积项可以忽略，并且可以认为其自由面条件在波浪表面的平均位置  $z = 0$  上满足，这样线性化的自由面条件成为：

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + g\xi = 0, \quad (2-6)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (2-7)$$

式(2-6)，(2-7)可进一步化为：

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (2-8)$$

及

$$\xi = -\frac{1}{g} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)_{z=0}. \quad (2-9)$$

应用分离变量法，设  $\varphi$  具有如下形式

$$\varphi = Z(z) \cdot \Phi(x - Ct). \quad (2-10)$$

将式(2-10)代入 Laplace 方程，得到

$$\Phi''(x - Ct)Z(z) + Z''(z)\Phi(x - Ct) = 0,$$

或

$$-\frac{\Phi''(x - Ct)}{\Phi(x - Ct)} = \frac{Z''(z)}{Z(z)}. \quad (2-11)$$

式(2-11)可以写成如下两个微分方程的形式：

$$Z''(z) - k^2 Z(z) = 0, \quad (2-12)$$

$$\Phi''(x - Ct) + k^2 \Phi(x - Ct) = 0. \quad (2-13)$$

$k$  为一待定常数，在这里决定  $k^2$  前的正负号时，考虑了  $\Phi$  沿  $x$  的周期性。式(2-12)，(2-13)的通解为：

$$Z(z) = A_1 \text{ch}(kz) + A_2 \text{sh}(kz), \quad (2-14)$$



$$\Phi(x-Ct) = A_3 \cos [k(x-Ct)] + A_4 \sin [k(x-Ct)]. \quad (2-15)$$

积分常数  $A_1, A_2, A_3, A_4$  可根据边界条件确定。如果令波峰经过  $x=0$  的时刻作为起始时刻  $t=0$ , 则根据式 (2-9) 得  $A_3=0$ , 同时由水底条件式 (2-4) 可得:

$$A_2 = A_1 \operatorname{th}(kd).$$

这样将  $A_3, A_2$  以及式 (2-14) 代入式 (2-10) 中, 求得:

$$\varphi = \frac{A \operatorname{ch}[k(z+d)]}{\operatorname{ch}(kd)} \sin[k(x-Ct)], \quad (2-16)$$

其中:  $A = A_1 \cdot A_2$ 。由式 (2-9) 可得:

$$A = \frac{gH}{2} \cdot kC. \quad (2-17)$$

最后得到速度势  $\varphi(x, z; t)$  为:

$$\varphi(x, z; t) = \frac{gH}{2kC} \cdot \frac{\operatorname{ch}[k(z+d)]}{\operatorname{ch}(kd)} \sin[k(x-Ct)]. \quad (2-18)$$

由式 (2-18) 及 (2-9) 可以求得波形为:

$$\xi(x; t) = \frac{H}{2} \cos[k(x-Ct)].$$

因此,  $H$  为波高, 即波振幅的两倍,  $k$  称为波数, 可以表示为

$$k = \frac{2\pi}{L}.$$

其中:  $L$  为波长,  $k \cdot C = \omega$  为波浪频率,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ,  $T$  为波浪周期,

$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k}$  为波形的移动速度, 即波速。由式 (2-8), 可以求得  $\omega$  与  $k$  的关系, 又称为色散关系。

$$\omega^2 = gk \operatorname{th}(kd). \quad (2-19)$$

对于无限水深的情况, 即  $d \rightarrow -\infty$  时式 (2-18) 转化为:

$$\varphi(x, z; t) = \frac{gkCH}{2} e^{kz} \sin[k(x-Ct)]. \quad (2-20)$$