B L L L J B L Z H

普通高等教育船舶类规划教材

波浪理论及波浪载荷

李远林 编

华南理工大学出版社

普通高等教育船舶类规划教材

波浪理论及波浪载荷

李远林　编

工大学出版社
广州·

图书在版编目（CIP）数据

波浪理论及波浪载荷/李远林编．—广州：华南理工大学出版社，1994．11

ISBN 7-5623-0680-X

Ⅰ．波…

Ⅱ．李…

Ⅲ．波浪理论及载荷—水动力学

Ⅳ．TK7

华南理工大学出版社出版发行

（广州五山·邮码 510641）

责任编辑：李彩英

各地新华书店经销

华南理工大学出版社电脑室排版

广州东盛印刷厂印装

1994 年 11 月第 1 版　1994 年 11 月第 1 次印刷

开本：787×1092　1/32　印张：9.25　字数：215 千

印数：0001～1000 册

定价：5.20 元

前　言

随着人类利用海洋资源程度的增加，对海洋波浪与海洋结构物相互作用的研究也日益深入和发展。特别是近一二十年中，随着近海石油开发工作的展开，海上钻探、海上采油、海上补给和海上运输等都正向更具挑战性的海域推进，因而将面临越来越严酷的海洋环境。为设计安全可靠、经济合理的海上结构，促使人们更加深入地了解和研究海洋波动及其影响。本书正是为适应这一需要而编写的。

我们知道，海洋中存在各种各样的波动，从典型周期约为 10^{-2}秒的声波至大约 100 天的超长周期的行星波。然而，特别引起重视的是，由常见风暴引起的风浪和涌浪；以及虽不常见却会带来严重后果的地震津波。它们都能在水面引起显著的波动，并且都以重力作为主要恢复力，所以称为表面重力波，简称表面波。本讲义主要论述这一类型的表面波。并且只论述表面波的描述方面，而对表面波的形成、发展的机理问题，因属于更为专门的课题，这里没有介绍。有兴趣者可参阅有关的专著。

表面波是依赖时间变化的，这种依赖性表现在不同的时间尺度上，长的时间尺度和短的时间尺度。以小时、天，甚至年为单位的测量，一般称为长期预报，常用随机过程分析手段进行研究。对海洋结构疲劳破坏，误工分析等方面的研究来说相当重要。另一个则是以分、秒为单位的测量，主要讨论波动现象的详细特性，涉及波长、周期、波高和波速等。对海洋结构物的受力状态和运动响应等方面将是至为重要

的。

本书是为海洋工程、船舶工程等专业的研究生，以及相应专业的高年级本科生编写的。目的在于，在回顾流体力学基本概念的基础上，系统介绍水波动力学的基本原理，着重介绍表面波的基本特性，及有关的基本问题、基本理论和基本方法，强调目前世界上水波理论的最新研究成果，并通过几个专题讨论，培养学生解决实际问题的能力，为今后独立从事开拓性研究打下基础。本书共六章。前三章为理论部分，包括背景理论、线性表面波和非线性表面波；第四、五章为规则波的应用部分，包括固定结构上的波浪力和浮漂体上的波浪力；最后一章处理不规则波及相关问题。

第一章（绪论）介绍波浪理论及其应用中所面临的主要数学基础和完整的边值问题。数学知识主要简介场论初步、积分定理（散度定理，Green 定理和 Stokes 定理）、Fourier 级数、Bessel 函数。作为背景理论，本章还将在简单复习流体力学的基础上建立波浪理论所要解决的完整边值问题，并以此出发讨论所面临问题的分类。

第二章讨论线性表面波理论。主要从前一章建立的完整边值问题出发，作量纲分析，在一些基本假定下建立线性边值问题。并且给出线化边值问题的一些简单近似解，详细讨论了线性波的基本性质，本章中还专门讨论了 Fourier 变换和点源解的问题，给出了无限水深和有限水深的三维解，以及二维脉动源和涡的解。

第三章中讨论非线性表面波理论。主要包括 Stokes 波理论和浅水波理论。其中 Stokes 波部分集中介绍了二阶近似和三阶近似的详细推导过程，并特别对三阶理论结果作了专门讨论。同时给出了五阶理论的主要结果。浅水波部分中主要

介绍孤立波、椭余波和流函数理论。而对余摆线波和破碎波理论仅作了一般的介绍。最后还专门对各种波浪理论作了详细的比较，给出了各种波浪理论的适用范围和应用中需注意的问题。

第四章论述作用在固定结构上的波浪力。对较小桩柱上的波浪力和 Morison 方程作了详细分析，特别讨论了 Morison 方程的基本假设和使用中所面临的一些问题。本章重点介绍了作用在大型固定结构上的波浪力的理论计算方法，讨论了大直径圆柱体上波浪力的一种解析解。以及一般结构的 Green 函数法。同时讨论了计算固定结构波浪力的各种方法的适用性。为便于港口工程方面的研究者学习，本章还简要介绍了作用在垂直墙上的波压力的计算问题。

第五章讨论作用在漂浮体上的波浪力。首先介绍一个自由度运动问题。通过近海工程中常见结构——铰接塔的分析，研究了风流浪联合作用下结构的受力和运动响应问题。本章的重点是论述计算漂浮体上作用力的切片理论，包括流体静力、流体动力和扰动力的计算公式的详细推导过程。涉及的 Frank 二维源分布方法也作了详细介绍。同时，还着重介绍了海洋工程面临的特殊问题——二阶波浪力的计算，包括压力积分方法和动量守恒方法，并专门讨论了各种方法的适用性问题。

第六章中讨论了不规则波及结构响应问题。对海浪理论作梗概介绍，着重论述不规则波浪场中波浪和结构响应的谱分析方法。最后作为应用的例子，提供了 Morison 力谱的推导方法，以及波群谱和二阶力谱的概念。

由于课时等方面的原因，本书不可能包括波浪理论及波浪载荷的所有方面，即使已编入的，有些内容也往往没有深

入展开，这是希望读者谅解的。

本书初稿成稿于 1986 年，作为讲义已经多年使用，现在此基础上，经修改、加工和补充而成。虽然如此，由于编者水平有限，错误、不足之处在所难免，敬请指正。

本书承中船总船舶工程教材委员会组织专家评审和审定，上海交通大学刘应中教授主审，提供了许多宝贵的意见；出版过程中，得到本人所在系的领导和老师们的多方帮助。谨此表示深切的谢意。

李远林

1993. 11

目　录

第一章　绪　　论

在这一章中，我们先复习一下向量运算和流体力学中某些基本问题，介绍流体力学基本方程和理想无旋流动的若干一般结论。这是为对这些问题不太熟悉的读者准备的。

§1-1　数学基础

在流体力学中，我们所遇到的许多物理量都是空间分布的，例如流域中流体的位移、速度、压力等等，都是整个流域的分布函数。如果我们在某一空间区域上定义一个物理量的分布函数，则称这个空间区域为该物理量的场。

如果所研究的物理量是标量函数，则称此场为标量场、如压力场。

如果所研究的物理量是向量函数，则称为向量场，如速度场。

一、向量代数

如果取两两正交的单位向量：e_1, e_2, e_3，根据向量加法和向量乘法的定义，任一向量 a 可写成

$$a = a_1e_1 + a_2e_2 + a_3e_3$$

因此，向量可以用有序数组来表示，即行矩阵和列矩阵的形式。

$$a = (a_1, a_2, a_3)$$

或

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$$

这种描述方法可推广到高维甚至无穷维空间的向量表示。

(一)向量的内积

二向量的内积也称为点乘或数量积。向量$\boldsymbol{a}$和$\boldsymbol{b}$的内积为一数量(标量),记作 $\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b}$

$$\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b} = ab\cos\theta$$

其中a,b分别为向量$\boldsymbol{a}$和$\boldsymbol{b}$的大小(长度),θ是$\boldsymbol{a}$和$\boldsymbol{b}$的夹角。

在取定的正交系下,向量的内积可用矩阵乘表示

$$\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b} = (a_1, a_2, a_3) \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

$$= a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3$$

注意,左乘向量要用行矩阵表示,右乘向量要用列矩阵表示。

显然,$\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b} = \boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{a}$

(二)向量的外积

二向量的外积也称为叉乘或向量积。向量$\boldsymbol{a}$与$\boldsymbol{b}$的外积仍为向量,记在 $\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$.

$$\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = \boldsymbol{k} ab\sin\theta$$

这里θ为向量$\boldsymbol{a}$转到$\boldsymbol{b}$的有向角,$\boldsymbol{k}$为垂直于$\boldsymbol{a}$和$\boldsymbol{b}$的单位向量,规定为由$\boldsymbol{a}$转到$\boldsymbol{b}$时的右手螺旋进动方向。在取定的正交坐标系中,$\boldsymbol{a}$与$\boldsymbol{b}$的外积为

$$
\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_1 & \boldsymbol{e}_2 & \boldsymbol{e}_3 \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix}
$$

二向量的外积也可表示成矩阵乘的形式。

如令

$$
A=\begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \qquad B=\begin{bmatrix} 0 & -b_3 & b_2 \\ b_3 & 0 & -b_1 \\ -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix}
$$

则 $$\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}=A\cdot\boldsymbol{b}$$

或 $$\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}=\boldsymbol{a}\cdot B$$

其中 A 和 B 所对应的量是二阶反对称张量。

显然 $\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}=-\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{a}$

(三)基本性质

根据向量内积和外积的定义,我们得到

(1) 如果 $\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}=0$,则 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{b}$ 正交。

(2) 如果 $\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}=0$,则 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{b}$ 平行。

(3) 如果如果 $\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{c}$ 共面,则 $\boldsymbol{a}\cdot(\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c})=0$

(4) $\boldsymbol{a}\cdot(\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c})=\boldsymbol{b}\cdot(\boldsymbol{c}\times\boldsymbol{a})=\boldsymbol{c}\cdot(\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b})$

(5) $\boldsymbol{a}\times(\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c})=\boldsymbol{b}\cdot(\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{c})-\boldsymbol{c}(\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b})$

二、标量场的梯度

没有方向的物理量在空间的分布就构成标量场。在物理和力学中,我们常可遇到各种不同的标量场,如温度场、压力场、密度场等等都是标量场。

(一)标量场的几何表示(图1-1)

标量场一般可表示成位置和时间的函数。设标量场

$$
\varphi=\varphi(p,t)
$$

其中 p 为空间的点,t 为时间,则在某一给定的时刻 $t=t_0$。

$$\varphi(p \cdot t_0) = c$$

(c 为常数)表示一个曲面，把空间分为二部分，在此曲面的一侧 $\varphi > c$，而另一侧 $\varphi < c$。这种曲面称为标量场的等位面。

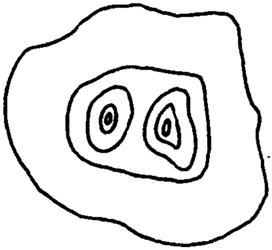

图1-1　标量场的几何表示

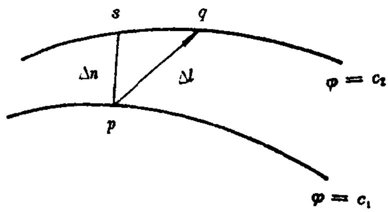

图1-2

取一系列的不同常数值，将在空间中得到一组与之对应的等位面。这样则可根据等位面的疏密情况，看出标量场的不均匀性程度。例如，等位面靠得近的地方函数变化快，离得远的地方就变化得慢，函数值的改变主要发生在等位面的法线方向，沿等位面的切线方向移动。函数值并不改变。

(二)标量场的梯度

所谓标量场的梯度就是标量场不均匀性的度量。

设 p、q 为空间相邻二点，并且

$$\overline{pq} = \Delta l = \Delta l \cdot l^0$$

其中 l^0 为 $\overline{pq}$ 的单位向量。见图 1-2。

过 p、q 分别作等位面 $\varphi = c_1$，和 $\varphi = c_2$，过 p 点作曲面 $\varphi = c_1$ 的外法线，交曲面 $\varphi = c_2$ 于点 s，这样

$$\begin{aligned}\delta\varphi &= c_1 - c_2 \\ &= \varphi(p, t_0) - \varphi(q, t_0)\end{aligned}$$

$$\approx \frac{\partial \varphi}{\partial n}\Delta n$$

因为 $\Delta n = \boldsymbol{n}\cdot\Delta \boldsymbol{l}$,这里 $\boldsymbol{n}$ 为曲面 $\varphi=c_1$ 的单位外法线向量。

所以
$$\delta\varphi=\left(\frac{\partial \varphi}{\partial n}\boldsymbol{n}\right)\cdot\Delta \boldsymbol{l}$$

$$\text{记 } \mathrm{grad}\varphi=\frac{\partial \varphi}{\partial n}\boldsymbol{n}$$

称之为标量场 φ 在 p 点的梯度,其大小为 $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$,方向为 $\boldsymbol{n}$。它描述了 p 点邻域内函数 φ 的变化状况,即标量场不均匀性的度量。

根据梯度的定义,容易看出:

(1) $\delta\varphi=\mathrm{d}\boldsymbol{l}\cdot\mathrm{grad}\varphi$($\delta\varphi$为沿 φ为沿 $\boldsymbol{l}^0$ 方向的微分 —— 方向微分)

(2) $\frac{\partial \varphi}{\partial l}=\boldsymbol{l}^0\cdot\mathrm{grad}\varphi$(梯度在 $\boldsymbol{l}^0$ 方向的投影等于该方向上的导数)。

(3) 如沿任一方向 $\boldsymbol{l}^0$有

$$\delta\varphi=\boldsymbol{l}^0\cdot\boldsymbol{a}$$

则
$$\boldsymbol{a}=\mathrm{grad}\varphi$$

(4) 向量场 $\boldsymbol{v}(p_1, t)$,在某一时刻 $t=t_0$ 沿任一封闭曲线 C 有

$$\oint_C \boldsymbol{v}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}=0$$

则此时刻 ($t=t_0$) 存在标量场 $\varphi(p,t)$,使

$$\boldsymbol{v}=\mathrm{grad}\varphi$$

反之,如在所考虑的空间中,处处有 $\boldsymbol{v}=\mathrm{grad}\varphi$,则沿任一周线 C(C 所围区域为单连通区域)有

$$\oint_C \boldsymbol{v}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}=0$$

(5) 在直角坐标系中，梯度 $\mathrm{grad}\varphi$ 在 x、y、z 轴方向的投影分别等于 x、y、z 方向的导数，于是

$$\mathrm{grad}\varphi=\frac{\partial \varphi}{\partial x}e_1+\frac{\partial \varphi}{\partial y}e_2+\frac{\partial \varphi}{\partial z}e_3$$

三、矢量场的散度和旋度

(一)矢量场的散度

给定一矢量场 $a(p\cdot t)$，p 为空间的点。

在场内任取一点 M，用封闭曲面 S 包围起来，令所围体积为 V。令 n 为 S 面上某一给定点的外法线方向单位矢量。则矢量 a 通过 $\mathrm{d}S$ 的通量用下式表示：

$$a\cdot n\mathrm{d}S=a_n\mathrm{d}S$$

于是矢量 a 通过 S 面的通量

$$\oint_S a_n\mathrm{d}S$$

与所围体积的比值，当 $V\to 0$ 时，极限

$$\lim_{V\to 0}\frac{\oint_S a_n\mathrm{d}S}{V}$$

定义为矢量 a 的散度，记为 $\mathrm{div}a$、在直角坐标系中，散度的表达式为：

$$\mathrm{div}a=\frac{\partial a_x}{\partial x}+\frac{\partial a_y}{\partial y}+\frac{\partial a_z}{\partial z}$$

$\mathrm{div}a=0$ 的矢量场称为无源场，无源场具有如下几个基本性质：

(1) 无源的矢量场 a 经过矢量管任一横截面上的通量保持同一数值。如图 1-3 所示，封

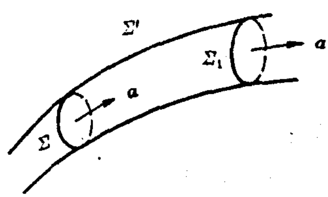

图1-3