海洋工程水动力学基础

刘应中　缪国平　编

海　洋　出　版　社

海洋工程水动力学基础

刘应中　缪国平　编

海　洋　出　版　社

1991·北京

内 容 简 介

本书以势流理论为主，选择了海洋工程水动力学中广泛应用的几种数学方法，把各种相关的应用问题作为例子贯穿在一起。除第一章回顾理想流体力学基本知识外，以下各章即阐述了这些数学方法及其典型应用。这些数学方法分别是分离变量法、格林函数法、保角变换法、奇异摄动理论和积分变换法。应用范围涉及波浪理论、浮体运动理论、波浪与结构物相互干扰及机翼理论等方面。

本书编排体例新颖，内容充实而有实用性，旨在充填基础流体力学和当前实际应用之间的间隙，为读者提供进一步学习和应用的基础。本书可供从事流体力学、船舶工程、海洋工程等专业的教师、科研人员和工程技术人员参考，亦可作为这些专业高年级本科生和研究生的教材或参考用书。

（京）新登字087号

海洋工程水动力学基础

刘应中　缪国平　编

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）
新华书店北京发行所发行　海洋出版社印刷厂印刷
开本：787×1092 1/32　印张：12.875　字数：290千字
1991年8月第一版　1991年8月第一次印刷
印数：1—800
ISBN 7-5027-1218-6/TV·13　定价：7.50 元

前　　言

近二十年来，船舶流体力学得到了巨大的发展。可以说，与60年代相比，船舶流体力学的一些主要领域已经面目一新。今天，用理论计算方法设计和预估螺旋桨性能是司空见惯的，甚至已不大有人再愿意进行大量的系列图谱试验了。兴波阻力理论，尤其是线性兴波阻力理论，已在中速船型的设计中发挥了作用，而用理论方法准确地计算船舶兴波阻力的日子也为期不远了。船舶操纵性的理论研究也有长足的进步，在理论与试验数据相结合的基础上，已经能够预报给定船型的操纵性能。船舶耐波性的发展尤其令人瞩目。目前，用切片理论预报船舶在波浪上的运动，对相当一类船舶，其精确程度已足与试验相媲美，且已在设计实践中被广泛采用。这些变化，要求今天从事船舶工程的技术人员必须掌握更多的流体力学知识。

离岸工程技术的崛起对流体力学提出了更高的要求。离岸工程结构物长年暴露在恶劣的环境中，要能够经受住狂风恶浪的袭击，在设计时就必须以精确的流体动力载荷数据为依据。海洋工程作为一种新兴技术，尚无足够的经验可资依循，而且由于结构复杂，环境条件苛刻，进行可靠的模拟试验绝非易事，因而不得不更多地依赖理论计算作为指导。事实上，流体动力计算在离岸工程结构物设计中已经是不可或缺的模块。显然，从事海洋开发的工程技术人员必须具备更

高的流体力学理论修养，当是无疑的了。

在海洋结构物的有关流体动力理论中，有小物体与大物体之分。小物体所受流体动力以粘性为主，常用半经验的莫里森（Morison）公式来估计；大物体所受的流体动力则按势流理论计算。从这个意义上说，大物体海洋结构与多数船舶流体力学问题是共通的。从这点出发，我们把两者结合起来，在势流理论范围内，姑且定名为海洋工程水动力学。而本书的任务，就是以基础流体力学为起点，为读者提供进一步学习和应用海洋工程水动力学的基础。

在材料的安排上，我们选择了海洋工程水动力学中常用的几种数学方法，把各种不同的问题作为例子贯穿在一起。这些数学方法是分离变量法、格林函数法、保角变换法、奇异摄动理论（主要是匹配渐近展开法）和积分变换法。在叙述时，我们的着重点并不是数学方法本身，而是这些方法在海洋工程水动力学问题中的应用，因而并不去追求数学上的严密性。

作为对一种基础流体力学有关知识的回顾，在第一章中，我们建立了理想流体的基本运动方程及其在无旋运动假定下的特例——拉普拉斯(Laplace)方程；并进而讨论了定解问题的组成和边界条件的描述，为以后各章服务。

在第二章分离变量法中，我们首先展示了线性波浪的基本特性，接着通过例子介绍了波浪的辐射、反射和透射，最后阐述了近年来文献中经常出现的流域匹配法的原理。这种方法将不同流域的速度势解在其公共边界上加以匹配，从而得到整个流场中的解。这一章里，我们虽然局限于用分离变量法获取不同流域的解，但流域匹配的观念却广泛得多，各

种混杂法，甚至渐近匹配法中无不浸透着这种思想。

第三章格林函数法中主要介绍流体力学中广泛流行的奇点法，但着重有自由表面存在时的情形。对无限流场，除了赫斯-史密斯（Hess-Smith）的源分布法外，我们特意把卞宝琦的偶分布法作了介绍。对物体绕流，通常是诺依曼（Neumann）问题，但卞宝琦在巧妙地引入内部流动后，把它化成狄利克雷（Dirichlet）问题，从而用偶分布求解，计算量和源分布基本相同，精度有所提高。对线性波浪问题，传统上都用满足线性自由面条件的格林函数法求解。自1973年杨伟春提出用基本源法求解有自由面问题的混杂法后，基本源法已为大家所接受，而且已应用到非线性自由面问题上去。这一章中所讲的晃荡问题就是一例。

第四章保角变换法中，我们选用了一种古典的办法讲解薄翼的定常和不定常运动，这种讲法在今天的标准流体力学教材中已经不多见了。但是它在解边值问题这一点上，与后面所介绍的多极展开、斯托克斯波是共同的。应该说，在船舶流体力学中，保角变换法被广泛用于解空泡流问题，但是空泡问题在海洋工程中尚不多见，故未列入本书。

第五章奇异摄动理论基础中只介绍了匹配渐近展开法，这自然是极不完整的。但匹配渐近展开法在海洋工程水动力学问题中应用最为广泛，也是事实。由于奇异摄动法的应用内容丰富，本章作为基础，只选了海洋工程水动力学问题中几个比较简单而基本的例子。

第六章积分变换可看作是第三章的补充，主要限于导出几个用到的格林函数。通过这些推导，展示出积分变换的用法。

这本书中的材料，除第六章外，从1982年起曾在上海交通大学为高年级本科生和一年级研究生讲授过多遍。这次修改出版，吸收了他们不少意见，特此致谢。

编　者
一九八四年十一月

目　录

第一章 绪　论

1.1 引　言

随着人类文明的进步和对资源需求的日益增长，海洋已不仅只是利用来作为渔场和航道。近几十年来，人类以极大的进取精神，致力于海洋资源的开发和海洋空间的探索。除了传统的水产业外，以海底石油开发和海洋矿产资源开采为先导的新兴工业部门正在吸引越来越多的注意，并已经取得了卓有成效的进展。海洋能的利用，包括潮汐发电、波浪发电、温差发电等，亦因其能源的洁净和无公害而越益引人注目。在海洋空间开发方面，除了在海上油田建造海底贮油罐外，还出现了设置海洋石油中转基地、石油贮备基地、深水港口和外海泊位的计划，甚或产生了建设海上机场和海上城市的设想。总之，占地球表面积70.8%的海洋将在人类生活和文明建设中发挥日益重要的作用。

由于海洋开发的重要性和多样性，目前建造和正在研制的海洋结构物的种类和数量逐年增加，结构形式更加多样化和复杂化。海洋结构物常年在海洋自然环境中使用，它的设计和施工条件与陆上结构物有很大的不同，特别是近年来，海洋开发的海域逐渐向深海区拓展，对风、浪、流等流体动力现象的理解和对流体与结构物间相互作用的定量和定性分

析都提出了更高的要求。这就要求设计者，特别是研究工作者，掌握比基础流体力学更为深化的知识。

流体力学就其研究对象而言，大致可分成两大类。一类是粘性流体力学，另一类是理想流体力学。理想流体是当流体的粘性小到可以忽略时的一种理想化模型。流体力学在海洋工程各领域中的应用十分广泛。限于篇幅，不可能对所有的分支进行面面俱到的论述。在本书中，研究的对象将限制为理想流体的一个特例，即均匀的不可压缩理想重流体。研究这类流体在运动过程中速度、压力的变化规律及有关的动力学问题。在理想流体中不存在粘性，没有摩擦力，因而也就不存在剪应力。忽略表面张力时，压力就是理想流体的唯一的表面应力，且必定沿着作用表面的内法线方向，其大小与作用面的方向无关。在整个流场中流体被认为是均匀的或至少是分块均匀的。除了流场中某些有限个点、面或体积之外，整个流场是无旋和无源的。也就是说，本书所研究的流动是有势的，且在流动过程中流场内没有流体质量的增加和减少。

尽管对流体和流动作了上述种种限制，但海洋工程中大量的流体力学问题仍可归于这类流体的动力学范畴。这是因为海洋工程中经常遇到的流体介质是水，而在大部分实际问题中，水可以被认为是无粘性、均匀和不可压缩，流动可认为是无旋的缘故。亦正因为如此，本书简称为“水动力学”。

广义来说，为海洋开发所建造的结构物都是海洋结构物。在这个意义上，船舶也可认为是海洋结构物之一；另一方面，从水动力学角度而言，它与通常所指的海洋结构物有

其共通之处。因此，在本书的若干章节中也包括了某些船舶工程中的水动力学问题。

作为本书的宗旨，作者试图通过一些方法论及其应用的介绍，为读者提供解决水动力学问题的一般思想，并尽可能地结合介绍一些船舶与海洋工程中与势流理论有关的近代研究进展和具有普遍应用意义的研究成果，以期对读者日后进行理论性较强的研究有所裨益。

在开始本书的叙述之际，简要地回顾一下基础流体力学中已经提及的有关基本方程和理论，并引进某些一般性的概念为全书服务是必要的。这就是本章绪论的任务。

1.2 关于坐标系与一些符号、记法的说明

一、坐标系

本书中用到的坐标系计有右手直角坐标系$o\text{-}xyz$、圆柱坐标系$o\text{-}r\theta y$和球坐标系$o\text{-}r\theta\lambda$。这里取y轴垂直向上。这三个坐标系及直角坐标与圆柱坐标、球坐标的转换关系见图1.1。

速度矢量$\vec{v}$或其他物理矢量在各坐标轴上的分量均以相应的下标表示，如在直角坐标中，$\vec{v}=\{v_x, v_y, v_z\}$。

以后如没有特别说明，坐标系即因循以上规定。

二、张量记法

为叙述简洁计，有时我们采用一些张量表示。在张量记

法中，直角坐标记以x_1，x_2，x_3，它们分别相应于坐标x，y，z。类似地，矢量在坐标轴上的分量相应地以下标1，2，3表示之。例如速度矢量$\vec{v}$即记为$\vec{v}=\{v_1, v_2, v_3\}=\{v_x, v_y, v_z\}$。

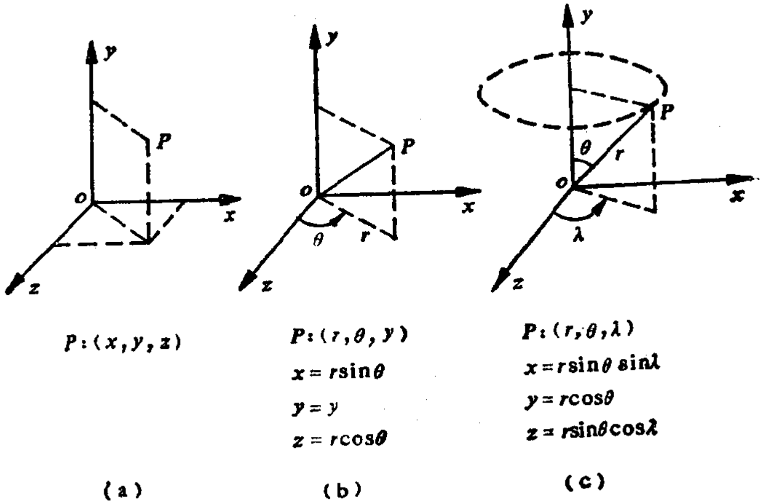

图1.1 三个坐标系之定义

(a)——直角坐标系(x, y, z)；

(b)——圆柱坐标系(r, θ, y)；

(c)——球坐标系(r, θ, λ)

(1) a_i表示一个矢量，i为自由下标。如无特别说明，i可分别取1，2，3。自由下标亦可取其他字母，如j，l，k，m，n等等。

例如$\nabla\phi$可用张量记法表示为$\partial\phi/\partial x_i$。

(2) 约定求和法则(summation convention)：在同一项中若有两个自由下标相同时，若不特别说明，就表示要

对这个下标从1到3求和。如

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

$$\frac{\partial a_i}{\partial x_i} = \frac{\partial a_1}{\partial x_1} + \frac{\partial a_2}{\partial x_2} + \frac{\partial a_3}{\partial x_3} = \nabla \cdot \vec{a}$$

$$a_j \frac{\partial b_i}{\partial x_j} = (\vec{a} \cdot \nabla) \vec{b}$$

$$\frac{\partial^2 a_j}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\partial a_j}{\partial x_i}\right) = \nabla \cdot \nabla \vec{a} = \nabla^2 \vec{a}$$

这里必须注意$a_i a_i$与（a_i）^{2}的区别。

（3）克罗内克尔δ（Kronecker δ）：我们定义

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & （当 i \neq j） \\ 1 & （当 i = j） \end{cases}$$

（4）交变张量ε_{ijk}：定义

$$\varepsilon_{ijk} = \begin{cases} 0 & （i,\ j,\ k\ \text{中有两个以上下标相同}） \\ 1 & （i,\ j,\ k\ \text{成偶排列}） \\ -1 & （i,\ j,\ k\ \text{成奇排列}） \end{cases}$$

用交变张量表示时

$$\vec{a} \times \vec{b} = \varepsilon_{ijk} a_j b_k$$

$$\nabla \times \vec{a} = \varepsilon_{ijk} \frac{\partial a_k}{\partial x_j}$$

（5）$\varepsilon-\delta$恒等式：

$$\varepsilon_{ijk} \cdot \varepsilon_{ist} = \delta_{js} \delta_{kt} - \delta_{jt} \delta_{ks}$$

三、阶符（order symbol）

在本书中，尤其是在第五章的奇异摄动理论中，常用到

量级比较，这里我们给出量级符号（或称阶符）的数学涵义。

（1）$O(\varepsilon)$：设M是一个不依赖ε的正常数．当$\varepsilon\to0$时，若有$|y/\varepsilon|<M$，则记$y=O(\varepsilon)$，并称y是与ε同阶或同量级的。

（2）$o(\varepsilon)$：如果当$\varepsilon\to0$时，有$|y/\varepsilon|\to0$，则记$y=o(\varepsilon)$，并称y与ε相比是个高阶量。

（3）如果说当$x\to0$时，有$|y-f(x)|=o(f(x))$，则记$y\sim f(x)$，并称$f(x)$是$x\to0$时y的渐近表达式。

这些符号在摄动理论中还可更加严格地定义，但对我们的应用来说，上述略为粗糙的理解已是足够了。

我们不加证明地列出若干阶符的基本运算法则：

（1）若 $f(x)=O(\varphi)$，$\varphi=O(\psi)$，则
$$f(x)=O(\psi)$$

（2）若 $f(x)=O(\varphi)$，$\varphi=o(\psi)$，则
$$f(x)=o(\psi)$$

（3）$O(f)+O(g)=O(f+g)$

（4）$O(f)\cdot O(g)=O(f\cdot g)$

（5）$o(1)\cdot O(f)=o(f)$

（6）$O(1)\cdot o(f)=o(f)$

（7）$O(f)+o(f)=O(f)$

（8）$o(f)+o(g)=0(|f|+|g|)$

（9）$o(f)\cdot o(g)=o(f\cdot g)$

（10）$\{O(f)\}^k=O(f^k)$，k是自然数

（11）$\{o(f)\}^k=o(f^k)$

（12）若 $f\sim g$，$g\sim\varphi$，则

$$f \sim \varphi$$

以上法则都容易验证，可参见文献[1]。

1.3 传输公式与理想流体动力学基本方程

一、实质导数的概念

实质导数(substantial derivative) $\frac{\mathrm{D}A}{\mathrm{D}t}$ 表征流场中某物理量$A(x_1, x_2, x_3, t)$在运动过程中对时间t的变化率。这个物理量可以是标量或矢量。实质导数的表达式为

$$\frac{\mathrm{D}A}{\mathrm{D}t}=\frac{\partial A}{\partial t}+v_i\frac{\partial A}{\partial x_i} \tag{1.1}$$

式中$\frac{\partial A}{\partial t}$为局部导数，表征在某一固定点上由于时间变化所引起的物理量的变化。后三项亦可记为$(\vec{v}\cdot\nabla)A$，为变位导数，表述在同一瞬间物理量由于空间位置变化而引起的变化。$\vec{v}$为流体质点的速度。

这里所谓的运动过程可以是流体的运动过程，此时所选的空间点就不是任意的空间点，而是流体质点在运动过程中先后经过的位置，显然$x_i=x_i(t)$实际上是流体迹线的参数方程，v_i即为流体质点的运动速度。

更一般些，这一运动过程也可以抽象地看作是某种“载体”的运动过程，例如说是人为选定的控制体的运动。它可以与流体运动无关。这时$x_i=x_i(t)$是给定的“载体”的轨