

# 船舶流体力学

Chuanbo Liuti Donglixue

〔美〕 J.N.纽曼 著

周树国 译

王献孚 钱晓南 校

人 民 交 通 出 版 社

## 译者的话

本书系根据美国麻省理工学院海洋工程系教授 J.N. 纽曼著《船舶流体力学》一书译出。

本书从流体力学的理论高度，简明扼要地阐述了船舶动力学中有关快速性、耐波性和操纵性以及海洋工程学的基本原理，反映了美国在船舶动力学方面的教学内容。

本书阐述的流体力学虽然是基本的，但提供了一些重要的参考文献，为对相应章节有兴趣的读者提供了进一步研究的线索。此外并在各章的末尾附有适量的习题。

本书的特点是将原来分别描述的主题，从流体力学的观点上把它们统一起来了，例如螺旋桨，舵，减摇鳍，游艇龙骨和风帆等都是和升力面有关的。

本书可作为理工科大学“船舶流体力学”和“海洋工程学”专业的研究生和高年级学生的教科书，亦可用作船舶研究及工程技术人员以及有关专业人员的参考书。

在翻译过程中，对原著中个别印刷错误作了改正。

本书承武汉水运工程学院王献孚校，并由上海交通大学钱晓南复核。

**船舶流体力学**  
**Marine Hydrodynamics**  
by  
**J. N. Newman**

---

本书根据美国麻省理工学院出版社 1978 年版英文本译出

周树国 译 王献孚 钱晓南 校

人民交通出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
各地新华书店经售  
人民交通出版社印刷厂印

开本：850×1168 $\frac{1}{32}$  印张：12.5 字数：320千

1986年11月 第1版

1986年11月 第1版 第1次印刷

印数：0001—1,250册 定价：3.95元

## 内 容 提 要

本书系根据美国麻省理工学院 J. N. 纽曼教授所著《船舶流体动力学》一书译出。

本书基于流体动力学的理论，简明扼要地阐述了船舶动力学中有关快速性、耐波性和操纵性，以及海洋工程学等方面的基本原理。

本书可供理工科大学“船舶流体力学”和“海洋工程”等专业的研究生或高年级学生作教科书之用，亦可用作船舶研究和工程技术人员以及有关专业人员的参考书。

# 目 录

序言	1
第 1 章 绪论	3
第 2 章 模型试验	10
2.1 真空中的落体	11
2.2 摆	12
2.3 水波	12
2.4 球体的阻力	15
2.5 平板的粘性阻力	17
2.6 一般物体的粘性阻力	20
2.7 水翼的升力和阻力	22
2.8 螺旋桨	25
2.9 船体阻力	28
2.10 螺旋桨-船体的相互作用	33
2.11 作用于加速物体上的不定常力	35
2.12 涡的下泄	39
2.13 驻定物体上的波浪力	40
2.14 物体在波浪中的运动	43
2.15 船舶在波浪中的运动	46
习题	48
参考文献	51
第 3 章 粘性流体运动	53
3.1 流动的描述	54
3.2 质量守恒及动量守恒	56
3.3 输运定理	57
3.4 连续性方程	59

3.5	欧拉方程.....	59
3.6	牛顿流体中的应力关系.....	60
3.7	纳维尔-斯托克斯方程.....	62
3.8	边界条件.....	64
3.9	质量力及重力.....	64
3.10	两平行壁面之间的流动.....	65
3.11	管中的流动.....	67
3.12	流经平板的外部流动.....	68
3.13	平板的不定常运动.....	70
3.14	层流边界层: 流经平板的定常流动.....	73
3.15	层流边界层: 定常二元流动.....	78
3.16	层流边界层: 结束语.....	85
3.17	湍流流动: 概述.....	85
3.18	平板上的湍流边界层.....	88
3.19	1/7指数的近似法.....	95
3.20	粗糙度对湍流边界层的影响.....	96
3.21	湍流边界层: 结束语.....	97
	习题.....	98
	参考文献.....	100
<b>第4章</b>	<b>理想流体运动</b> .....	<b>101</b>
4.1	无旋流动.....	101
4.2	速度势.....	104
4.3	伯努利方程.....	105
4.4	边界条件.....	108
4.5	简单的势流.....	110
4.6	流函数.....	114
4.7	复势.....	117
4.8	保角变换.....	118
4.9	分离变量.....	122
4.10	静止物体和运动物体.....	125

4.11	格林定理及奇点分布	126
4.12	流体动压力引起的力	131
4.13	无边界流体中运动物体上的力	135
4.14	附加质量系数的一般特性	140
4.15	简单形状的附加质量	144
4.16	物体的质量力	148
4.17	不均匀流动中物体上的力	150
4.18	映象法	153
	习题	155
	参考文献	158
<b>第 5 章</b>	<b>升力面</b>	<b>159</b>
5.1	二元水翼理论	160
5.2	线性化二元理论	164
5.3	升力问题	168
5.4	简单的机翼形状	171
5.5	二元机翼的阻力	176
5.6	二元源及二元涡的分布	177
5.7	奇异积分方程	180
5.8	三元涡	187
5.9	三元平面升力面	190
5.10	诱导阻力	195
5.11	升力线理论	199
5.12	空泡流	205
5.13	对称空泡流	207
5.14	超空泡的升力机翼	213
5.15	不定常水翼理论	217
5.16	随时间变化的振荡问题	224
5.17	正弦型阵风问题	227
5.18	瞬态问题	228
	习题	230

参考文献	232
<b>第6章 波浪及波浪效应</b>	<b>234</b>
6.1 线性化的自由表面条件	235
6.2 平面前进波	237
6.3 有限深度的影响	240
6.4 非线性效应	243
6.5 质量迁移	248
6.6 平面波的迭加	250
6.7 波群速度	254
6.8 波能	258
6.9 二元船波	264
6.10 三元船波	268
6.11 稳定相方法	273
6.12 能量的辐射及兴波阻力	276
6.13 兴波阻力的薄船理论	279
6.14 波型分析	281
6.15 物体在规则波中的响应	283
6.16 流体静力学	287
6.17 阻尼及附加质量	292
6.18 波浪扰动力和力矩	298
6.19 规则波中漂浮物体的运动	305
6.20 海洋波	309
6.21 不规则波中物体的运动	317
习题	319
参考文献	323
<b>第7章 细长体的流体动力学</b>	<b>326</b>
7.1 无边界流体中的细长体	327
7.2 纵向运动	332
7.3 横向力	336
7.4 船舶操纵, 流体动力合力	341



7.5	船舶操纵：运动方程	346
7.6	波浪中的细长体	352
7.7	船舶运动的切片理论	359
7.8	浅水中的细长体	371
	习题	379
	参考文献	381
	附录 度量制单位和物理常数	384
	主要名词英汉对照	386

## 序 言

近年来流体动力学在造船及海洋工程中的应用已经有了惊人的发展。船舶的设计已越来越多地与科研成果联系起来，而且由于近海资源的利用又出现了一个新的关于海洋工程的领域。科技论文集和期刊杂志的数目也随着这种发展而成倍地增加，但教科书的出版却未能跟上步伐。本书是把流体动力学应用于船舶问题的一本教科书，是为满足这方面教材的需要而编写的。书中的材料由讲稿演变、发展而来，原讲稿是为麻省理工学院（MIT）海洋工程系研究生一年级课程准备的，后来这份讲稿在其它几所大学的本科生和研究生课程中也采用了。虽然大多数学生已学过流体力学的导论性课程，但是，本书对必要的基础还是自成系统地提了出来。学习本课程时，是假定读者已具备了包括矢量分析和复变函数在内的高等数学知识的。

题材主要是根据内容的实际重要性来选择的，并考虑了篇幅及内容的复杂程度，以便能容纳在一本教科书里。显然没有编入计算流体动力学方面的专题，例如象三元边界层计算，包括螺旋桨理论的升力面计算方法以及波浪-物体问题的各种数值解。有关这些主题的教科书应是本教程的姊妹篇。

由于世界上大多数国家已经采用了国际单位制（SI），所以，除去偶而用“节”作为航速单位外，本书也采用国际单位制。附录中有英制单位的换算因子表，还有水和空气有关物理常数的简表。尽管在某些场合有特殊的约定符号，但本书还是采用了统一的符号。笛卡儿坐标取  $y$  轴方向朝上。力，力矩和物体速度采用的标记符号，与船舶操纵的标准符号是有区别的。字母  $L$  仍然留作表示升力， $D$  表示阻力。这样，长度用  $l$  表示，而直径则用  $d$  来表示。取船舶前进运动方向为  $x$  轴的正方向，这和造船

实践是一致的，但和空气动力学中的常规约定是相反的；幸而，当定义逆时针方向为环量的正方向时，升力向上的水翼将具有正环量。

(以下为致谢部分及协作关系的叙述，从略——译者)

**J.N. 纽曼**

## 第1章 绪论

流体动力学在造船学和海洋工程学中的应用包括许多独立的专题，并涉及到广泛的先进技术。专题有多种多样，如船舶推进和船舶操纵，以及系泊浮筒或石油钻井平台在波浪中的运动等。更早的造船学中的经典问题都是基于阿基米德的流体静力学的。从科学和工程的观点来看，浮筒和平台是较为近代的问题。从凭经验设计的方法到理论研究活动，精心设计和制造的程度方面是各不相同，至于理论研究活动的合理性，则要根据广泛领域的应用结果来判断。

工程技术问题也是名目繁多的，为了解决这些问题，不仅需要流体力学，而且需要固体力学的知识（特别是对于描述系泊系统），控制论（包括人-机系统），以及统计学和随机过程（涉及到高度不规则的海洋环境）。与其它应用流体力学的工程学科不同，书中将要把注意力集中在流体动力学的独特性方面。

面临经验设计知识与深奥理论之间的选择，书中将寻求一个折衷的方案，以便对灵巧的计算和经验手段提供必要的基础，并作为对更专门的问题进行研究的入门。这种处理方法具有好处，即可以把有时看来是矛盾的观点调和折衷起来。它还把表面上不相同的各种船舶流体动力学问题，不是当作相互无关的问题，而是当作流体动力学的一般原理在有关问题上的应用，这样就使它们统一起来了。例如，推进器、舵、减摇鳍、游艇龙骨和帆等都是主要与机翼和水翼有关，或者说与升力面有关的，因此可以一起进行处理和理解。同样，在波浪中的船舶、浮筒或平台的不定常运动，以及船舶或潜水艇非直线航行的操纵性问题，在某种程度上可以用同样的基本运动方程来分析。然而实际上，操纵性问题一般包含流线分离和升力效应，而物体在波浪中的运动并不受

粘性和涡旋的严重影响。

和刚体动力学一样，流体的动力学也是由各种力和力矩的相互作用所制约，当它们不是明显地被包括在内时，那也是隐含着的。在流体动力学中，不能再认为力是作用在个别的点上，或系统的离散点上；相反地，它们必须以相对平顺或连续的方式分布在整个流体质点上。只有假定离散的流体分子可以当作连续介质来分析时，力的分布及流体运动的描述在实际上才是连续的。

具体地说，可以预期力的作用过程与流体的惯性、它的重量、粘性应力以及诸如表面张力一类二次效应有关。通常，惯性力、重力和粘性力三个因素是比较重要的。除去极少数情况以外，无论用理论还是用实验，都难以分析如此复杂的情况，所以要么舍去，要么尝试以理智来评价各个因素的力，期望能对它们进行双方处理。下面将要看到，即使处理相对简单的流体运动也仍然充满着许多困难。

先估算一下惯性力、重力和粘性力的数量级是有益的。假定可以用物理量的长度  $l$ 、速度  $U$ 、流体密度  $\rho$ 、重力加速度  $g$  和流体的粘性系数  $\mu$  来表征手边的问题。于是可以估算这三个力：

力的类型	数量级
惯性力	$\rho U^2 l^2$
重力	$\rho g l^3$
粘性力	$\mu U l$

不应当对这些估价作过于死板的理解。可能有这样的论点，例如，由伯努利方程知道，应当把  $1/2$  这个因子与惯性力的大小联系起来。不过，任何一个物理量  $l$ 、 $U$ 、 $\rho$ 、 $g$  或  $\mu$  的变化必定会影响上述诸力，从这个意义上来看，以上的估价是正确的。这样，假定长度尺度增大一倍，例如，要对作用于一艘 100 m 长的船舶和另一艘 200 m 长的船舶的力进行直接的比较，两船的航速相同；那么，相应的惯性力、重力和粘性力将分别乘以因子  $2^2$ 、 $2^3$  及  $2$ 。所以，当长度尺度改变时，三种力之间的基本平衡也将

改变。如果要预估长度尺度更大的变化（达到 10 或 100 的量级），如小尺度模型和实船比较，则这种影响将更为显著。

用一定缩尺的模型作试验以预测全尺度现象时，任何一个单独作用力的绝对值，可以用一个适当的倍增因子来进行修正。通常主要关心的是：所有三种力是同时作用的，而且它们之间的相对值应当保持不变，这样得到的流动就是动力相似的。为了达到这个目的，显然要组成三个力的比值，使它组成一组用来描述流体运动的无量纲参数：

$$\frac{\text{惯性力}}{\text{重力}} = \frac{\rho U^2 l^2}{\rho g l^3} = \frac{U^2}{gl}$$

$$\frac{\text{惯性力}}{\text{粘性力}} = \frac{\rho U^2 l^2}{\mu U l} = \frac{\rho U l}{\mu}$$

$$\frac{\text{重力}}{\text{粘性力}} = \frac{\rho g l^3}{\mu U l} = \frac{\rho g l^2}{\mu U}$$

三个比值中的任意两个能够派生出第三个比值，亦即，足以确定流体运动中力的相对比例关系。习惯上，常把前面两个比值写成下面的形式。

$$F = \text{傅汝德数} = \frac{U}{(gl)^{1/2}}$$

$$R = \text{雷诺数} = \frac{\rho U l}{\mu} = \frac{U l}{\nu}$$

式中  $\nu = \mu/\rho$  为流体的运动粘性系数。在附录中给出了一个简短的关于水和空气的密度和粘性系数的表。典型的运动粘性系数  $\nu_{\text{水}}$  为  $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  ( $10^{-5} \text{ft}^2/\text{s}$ )，空气为  $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$  ( $1.5 \times 10^{-4} \text{ft}^2/\text{s}$ )。通常雷诺数  $R$  很大，因而粘性力与惯性力相比可略去不计。一般，这是正确的，但在作出关于粘性可以完全忽略的结论以前，人们必须持较为谨慎的态度。事实上，对于大部分流体可以忽略粘性，但在某些特殊的范围内，例如，在非常贴近物体的边界层内部必须考虑粘性。

在以上的分析中，曾经默认运动是定常的，因而特征速度  $U$

为常数。如果运动是随时间而振荡的，如浮筒在波涛汹涌的海面摇荡的情况，则特征速度  $U$  应当由乘积  $\omega l$  来代替，式中  $\omega$  是以单位时间内的弧度计的振荡频率。与这种运动相对应的傅汝德数是无量纲参数  $\omega(l/g)^{\frac{1}{2}}$ 。或者可选择另一个参数  $\lambda/l$ ，式中  $\lambda$  是波长，即相继波峰之间的距离，因为，可以直接把  $\lambda$  与  $\omega$  联系起来（对深水波有关系式  $\lambda = 2\pi g/\omega^2$ ）。

在考查流体的运动学和热力学方面时，将产生另外一些重要的参数。其中最熟悉的就是空气动力学中的马赫数，它是速度  $U$  对流体介质中声速的比值；当考虑流体的弹性或可压缩性时就会遇到马赫数。在海洋运载工具的运动和性能中，这些参数的影响并不重要，因为在我们所关心的航速内，水并不产生明显的压缩性；至于马赫数，注意到在水中的声速约为  $1500\text{m/s}$  或  $3000\text{kn}$ ，这意味着以水为基础的运载工具的马赫数小到可以忽略不计，亦即可压缩性的影响不大。另一方面必须考虑在一定情况下发生空泡现象的可能性，因为当流体中的压力减小到低于汽化压力  $p_v$  时，液体的物理状态突然转变为气体状态。虽然流体对于压缩差不多是非弹性的，即能承受很大的压力，它却不能承受明显的法向张力。根据量纲分析提出的空泡数为

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2}\rho U^2}$$

它是用来衡量发生空泡现象可能性的一个量度，并以参数形式描绘空泡以后的细节。这里， $p_0$  为流体的特征压力，例如研讨对象所在水深处的静水压力，汽化压力  $p_v$  与流体的性质及温度有关。如果空泡数大到不会发生空泡现象，这时精确的  $\sigma$  值对于描述和分析流动情况是不重要的。如果空泡数足够小以致流场中发生空泡现象，则只有当对应的空泡数相等时才能保持动力相似。在正常的温度下， $p_v$  大大地小于大气压力，所以空泡现象只是在非常高的速率时才是值得注意的。

具有几何相似但有关的物理量不相等的流体运动，只要对应

的无量纲参数，如傅汝德数和雷诺数彼此相等，就称它们为动力相似。由此可知，惯性力、粘性力和重力之间的相对比例关系是不变的，所导致的流体动力效应，包括流速、压力和作用于流体边界上的力，都能通过两个不同流动之间的关系来进行分析。假如用小尺度的模型试验用来设计大尺度的实体，显然希望做到动力相似。但要同时满足傅汝德数和雷诺数相等是不可能的，至少在和实物运行介质一样的水中进行横型试验，是不可能同时满足傅汝德数和雷诺数相等的。为此看看雷诺数与傅汝德数的比值  $g^{-\frac{1}{2}} l^{-\frac{3}{2}} / \nu$  它必须保持常数。对于模型而言，其长度大大地小于实体的长度，为了使上述比值保持常数，或者重力加速度必须增大一个数量级，或者运动粘性系数必须降低一个数量级。为了满足前者，有人建议用离心机，为了满足后者，则必须用超流体，但这都超出本课程所讨论的范围了。

由动力相似的讨论看出，用模型试验方法来预测海洋船舶的流体动力时，通常还需要作些假定和简化。如果想根据力学推导去寻求严格的分析预测方法，则作些假定和简化，即令不是更好，也是同样有用的。所以，最终必须同样寄希望于试验和理论的应用，并补充以实际现象观察，以检验原来的预测。

在运动学理论方法中，为定义流体质点随时间和空间而变的情况，通常是用的流体质点的矢量速度，或者是速度的三个标量。利用牛顿方程把这个未知的速度函数和作用于流体的力联系起来；这就导出了一个偏微分方程组。对于具有常规应力关系的流体，推导所得的基本方程组就是纳维尔·斯托克斯方程，并辅以表示流体质量守恒的连续性方程。按理可以满足流体边界面上的边界条件求解所述方程。如果这个步骤能顺利地实现，那么就有可能计算得出任意雷诺数和傅汝德数下寻求的答案，难以满足模型试验全相似的困境就可能加以避免了。但实际上，除了少数乍看起来与船舶形状无关的简单几何体以外，还未曾精确地解出过纳维尔·斯托克斯方程。

如果在纳维尔·斯托克斯方程中忽略粘性力，即假定流体无



粘性的或者是理想的，那么就能获得较大的分析进展。这样，对流经实物形状的物体的流动建立数学解是行得通的，甚至包括波浪运动对自由表面的效应，不过还要作进一步的理想化。显然，忽略粘性将导致仅仅具有学院兴趣的结果，除非有比数学上欲简化一个偏微分方程组更为恰当的理由才能这样做。对于预测船舶阻力而言，傅汝德假设最先提供了这样的理由，傅汝德假设认为，阻力可由摩擦阻力和剩余阻力两部分所组成。摩擦阻力这个分量与一个十分简单的几何体，即与一块深沉的平板联系起来，从而仅与雷诺数有关。假定剩余阻力这个分量仅与傅汝德数有关。傅汝德假设基本上是一个经验的假设，认为它正确的主要依据是，在由船模试验推算实船的剩余阻力方面得出了一个实际可行的步骤，其预估值总的来说与实船的实际值还符合。关于处理流动的某些方面问题时忽略粘性，以及关于船体摩擦阻力可以与长度和面积相同的平板联系起来的傅汝德假设，在普兰特（Prandtl）提出边界层理论后就找到更正当的理由了。显然，在造船师和空气动力学者感兴趣的较大的雷诺数下，粘性应力只是在贴近诸如船体和飞机那样的刚性表面非常薄的流体层内才有意义。在薄层以外的流体基本上是无粘性的，这不是因为粘性突然改变了，而是因为粘性应力是由流体速度的大梯度所引起，以及这些大梯度被限制在紧临边界处的缘故。此外，如果物面的曲率半径较边界层厚度大得多，那么，就边界层的形成而言，物面曲率的影响是不显著的。普兰特边界层理论的结论看来就是傅汝德假设的基础，值得注意的是傅汝德比普兰特要早三十年。

在以下各章的编排中，首先要讨论的是模型试验，着重讲述量纲分析在保持模型与全尺度流动之间的动力相似中的应用。这个对“真实世界”的一瞥是为了在以后各章中引出理论服务的。理论方法从研究粘性流动开始，为的是能够把粘性的重要性放到恰当的位置上。

每一章从论述基础开始，接着是较为专门的和深入的材料。阅读本书的次序可因各人的兴趣和所具有的基础而异。如果读者