

沈 华 主 编
杜嘉立 副主编
杨盐生 主 审

CHUANBO DONGLIXUE JICHU



船舶动力学基础

 大连海事大学出版社

船舶动力学基础

CHUANBO DONGLIXUE JICHU

主 编 沈 华

副主编 杜嘉立

主 审 杨盐生

大连海事大学出版社

© 沈 华 2004

图书在版编目 (CIP) 数据

船舶动力学基础 / 沈华主编. — 大连: 大连海事大学出版社, 2004.2

ISBN 7-5632-1726-6

I.船… II.沈… III. 船舶—动力学—高等学校—教材
IV.U661.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 114811 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌水桥 邮编: 116026 电话: 84728394 传真: 84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

丹东日报印刷厂印装 大连海事大学出版社发行

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 140 mm × 203 mm 印张: 5.875

字数: 147 千字 印数: 1~1 500 册

责任编辑: 姜建军 版式设计: 晓江

封面设计: 王艳 责任校对: 剑凌

定价: 9.00 元

内容提要

本书是航海类专业本科教材，主要介绍流体力学知识和船舶动力学基础知识，是根据航海类专业本科教学改革的要求编写的。

本书共分为9章：第一章流体的基本物理性质；第二章流体静力学；第三章流体运动学；第四章流体动力学；第五章波浪运动；第六章船舶阻力；第七章船舶推进；第八章船舶振荡性和第九章船舶操纵性。

本书可供航海类本科专业及相关专业本科生作为教材使用，也可供航运界从业人员作为参考书。

前 言

本书是根据航海类专业本科教学改革的要求编写的，内容包括两个部分，流体力学知识和船舶动力学基础知识，教材定名为《船舶动力学基础》。

本书前 5 章介绍流体力学的知识：第一章流体的基本物理性质；第二章流体静力学；第三章流体运动学；第四章流体动力学和第五章波浪运动。编写的指导思想是向学生讲清楚流体力学的基本原理、方法和概念，使学生掌握并能正确运用流体静力学和动力学的知识和相关的计算公式。为此，在内容的选择上力求简明扼要，避免沉入到过深过繁的数学演算中去，突出流体力学知识与实际的结合和应用。这一部分的内容是为后面学习船舶动力学打下基础。

本书后 4 章介绍船舶动力学基础知识：第六章船舶阻力；第七章船舶推进；第八章船舶摇荡性和第九章船舶操纵性。这部分内容具有较强的理论性，并且比较抽象，根据以往在航海类学生中讲授“船舶原理”课程中相关内容的经验，这次编写中注意化难为易、突出重点，在内容上更简洁。这部分内容是后续“船舶操纵”等课程的理论基础。

本书由沈华教授主编，杜嘉立副教授为副主编。杨益生教授担任本书的主审。在本书编写过程中，航海学院货运教研室的赵海莲、姜华和叶正兵等老师以及船艺教研室的洪碧光教授都提出了很多宝贵的意见，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，恳请读者指正。

编 者

2003 年 11 月



目 录

第一章 流体的基本物理性质	1
第一节 流体的密度和重度	1
第二节 流体的压缩性和膨胀性	3
第三节 流体的黏性	5
第四节 流体的力学特性和连续介质模型	10
第二章 流体静力学	13
第一节 作用在流体上的力	13
第二节 流体静压力及其特性	14
第三节 流体静力学基本方程	17
第四节 静止流体对平板的作用力计算	22
第五节 静止流体对曲面壁的作用力计算	25
第六节 浮体的平衡和稳性	29
第三章 流体运动学	37
第一节 关于流体运动的几个基本概念	37
第二节 流动的显示	43
第三节 流动的连续性方程	45
第四章 流体动力学	51
第一节 柏努利方程	51
第二节 柏努利方程的应用	58
第三节 动量定理和动量矩定理	64
第四节 动量定理的应用	67
第五节 相似理论和因次分析法	70
第五章 波浪运动	81
第一节 波浪概述	81
第二节 规则波	83

第三节	不规则波.....	85
第四节	风浪的等级.....	88
第六章	船舶阻力	91
第一节	船舶阻力的分类.....	91
第二节	基本阻力.....	93
第三节	附加阻力.....	104
第七章	船舶推进	113
第一节	螺旋桨的构造和主要几何参数.....	113
第二节	螺旋桨的工作原理.....	117
第三节	船体和螺旋桨的相互影响.....	126
第四节	螺旋桨的空泡现象.....	130
第五节	螺旋桨的传送功率和推进效率.....	133
第六节	可调螺距螺旋桨.....	134
第八章	船舶的摇荡性	137
第一节	船舶摇荡运动的基本概念.....	137
第二节	静水无阻尼横摇.....	142
第三节	静水有阻尼横摇.....	147
第四节	静水无阻尼纵摇和垂荡.....	149
第五节	船舶在波浪中的横摇.....	151
第六节	减摇装置.....	156
第九章	船舶的操纵性	161
第一节	船舶操纵性的基本概念.....	161
第二节	船舶操纵运动方程.....	162
第三节	回转圈.....	165
第四节	K 、 T 指数.....	170
第五节	舵力.....	173
参考文献	181



第一章 流体的基本物理性质

流体的平衡和运动都与流体的力学性质有关，本章讨论流体的力学性质包括流体的密度、重度、压缩性、膨胀性和黏性等，这些统称为流体的基本物理性质。

第一节 流体的密度和重度

一、流体的密度

对于质量均匀分布的流体，流体的密度是指单位体积内流体具有的质量，表示为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1.1)$$

式中： ρ ——流体的密度；

M ——流体的质量；

V ——流体的体积。

对于质量不是均匀分布的流体，流体的密度表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV}$$

本书中研究的对象为质量均匀分布的流体。

流体密度的单位是 kg/m^3 或 t/m^3 。

二、流体的重度

对于质量均匀分布的流体，流体的重度是指单位体积的流体具有的重量，表示为

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1.2)$$

式中： γ ——流体的重度；

W ——流体的重量；

V ——流体的体积。

对于重量不是均匀分布的流体，流体的重度表示为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta V} = \frac{dW}{dV}$$

流体重度的单位是 N/m^3 或 kN/m^3 。

三、流体的密度和重度的关系

流体的密度和重度之间的关系，可以表示为

$$\gamma = \rho g \quad (1.3)$$

式中： g ——当地的重力加速度。

因此，流体的密度是一个绝对量，流体的重度是一个相对量，它因地理位置不同、重力加速度 g 不同而改变。

四、比重的概念

液体的比重定义为：在标准大气压下，液体的重量与温度为 4°C 同体积的蒸馏水的重量之比。因此，比重是一个没有单位的数。比重与密度和重度之间的关系为

$$s = \frac{\gamma_{\text{liquid}}}{\gamma_{\text{water}}} = \frac{\rho_{\text{liquid}}}{\rho_{\text{water}}} \quad (1.4)$$

在一个标准大气压下，测得常用的几种液体的比重如表 1.1。

表 1.1 常用的几种液体的比重

液体名称	温度/°C	密度/(kg/m ³)	重度/(N/m ³)	比重
蒸馏水	4	1 000	9807	1
海水	15	1 020~1 030	9996~10 094	1.02~1.03
普通汽油	15	700~750	6 860~7 350	0.70~0.75
石油	15	880~890	8 624~8 722	0.88~0.89
柴油	15	875	8 575	0.875
润滑油	15	890~920	8 722~9 010	0.89~0.92
液压油	15	860~900	8 428~8 820	0.86~0.90
酒精	15	790~800	7 742~7 840	0.79~0.80
水银	0	13 600	13 3280	13.60
空气	0	1.293	12.68	0.001293
空气	20	1.205	11.82	0.001183

第二节 流体的压缩性和膨胀性

当作用在流体上的压力增加时，流体的体积将变小，流体的这种特性称为压缩性。当温度升高时，流体的体积将变大，这种特性称为膨胀性。这表明，一定质量的流体的密度将随压力和温度的改变而变化。

液体和气体的压缩性和膨胀性表现出不同的特性，下面将分别讨论。

一、液体的压缩性和膨胀性

在温度不变的条件下，液体的体积将随着压力的增加而变小。液体的体积改变用一个体积压缩系数 β_p 表示，定义为

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1.5)$$

式中： V ——液体的体积；

dV ——体积的改变量；

dp ——压力的改变量。

体积压缩系数 β_p 的单位是 m^2/N ，为正值。该系数越大表明液体的可压缩性越大；反之则表示可压缩性小。如在 20°C 及标准大气压下，水的体积压缩系数 $\beta_p = 4.532 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ ，在同样条件下，理想气体的体积压缩系数 $\beta_p = 9.869 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{N}$ 。由此可见，水的可压缩性要远远小于气体。在工程实际中，一般把液体看作不可压缩的流体，只有在特殊情况下，如水下爆炸，才考虑到液体的可压缩性。

体积压缩系数的倒数称为体积弹性系数，用 K_p 表示。

液体的膨胀性用体积膨胀系数 β_t 表示，其定义为

$$\beta_t = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1.6)$$

式中： dt ——温度的增量，温度单位采用热力学温度 K 。

以水为例，在一个大气压条件下，温度在 $274 \sim 283 \text{ K}$ 之间，温度每升高 1 K ， β_t 只改变 $14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。由此可见，水的膨胀性是很小的，其他液体的膨胀性与水相似。因此，在一般情况下，可以不考虑液体的膨胀性。

二、气体的压缩性和膨胀性

与液体不同，气体在压力和温度改变时，其密度的变化较大。对于气体的压缩性和膨胀性，可以用理想气体的状态方程来表示

$$\frac{p}{\rho T} = R \quad (1.7)$$

式中： p ——绝对压力；

T ——绝对温度， $T=273+t$ ， $^\circ\text{C}$ ；

ρ ——气体的密度；

R ——气体常数，在标准状态下， $R = 287 \text{ (N} \cdot \text{m, kg} \cdot \text{K)}$ 。

对气体来说，压力的变化会引起温度的变化，所以气体的压缩性与热力学过程有关。可以证明，气体在等温压缩过程中，体积弹性系数 K_p （体积压缩系数 β_p 的倒数）的大小等于作用在气体上的压力 p 大小；在绝热压缩过程中，体积弹性系数 K_p 的大小与压力 p 成正比，即 $K_p = k p$ ，比例系数 k 称为此种气体的绝热指数。

气体在膨胀的过程中也会引起温度的改变，一般情况下压缩的过程中温度升高，膨胀的过程中温度降低。

三、不可压缩流体的概念

如前所述，液体的压缩性很小，通常可以把液体看作不可压缩的。气体的压缩性要比液体大，但是在特定的条件下，比如压力和温度变化不大，气体的流速小于 70 m/s 时，通常也可以将气体看作不可压缩的。对于不可压缩的流体来说，流体的密度为常数。

本书中涉及到的流体主要是水，因此书中的内容属于不可压缩的流体力学问题。

第三节 流体的黏性

一、黏性的概念

在日常生活中，我们对流体黏性的感受来自于对流体的流动速度和流动形态观察。溪水流动跳跃有声；油的流动较慢，并且油还具有在流动中维持自身凝聚在一起的特点，向四周扩散较慢；由于蜂蜜、浆糊等物质比油更为黏稠，流动的情况比油更为缓慢。由此，感觉告诉我们，水的黏性要比油的黏性小，而油的黏性又比蜂蜜、浆糊等物质的黏性小。黏性越小的流体越容易流动。

黏性是什么？从力学的观点来说，黏性是一种阻碍流体内部发生相对运动的力。对于液体来说，这种力主要是分子之间的内聚力和附着力；对于气体来说，这种力主要是气体分子运动中相互碰撞

而产生的。

二. 牛顿内摩擦定律

现在观察如下的实验，参见图 1.1。将两块平板之间充满液体，下平板固定，上平板以速度 u_{\max} 向前运动。两平板之间各液体层速度分布，

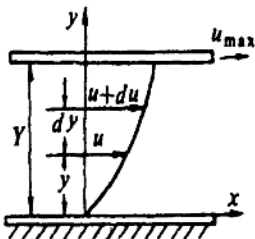


图 1.1 牛顿内摩擦定律

度分布，从下而上由 0 到 u_{\max} 增加。当运动速度快的液体层在运动速度慢的液体层上面滑过时，速度慢的液体层将阻碍速度快的液体层向前运动；同时，速度快的液体层将带动下面速度慢的液体层向前运动。这表明流动的液体各层之间存在着一种力，这种力通常称为流体内摩擦力。流体各层之间的内摩擦力的大小，可以表示为

$$T = \pm \mu A \frac{du}{dy} \quad \text{或}$$

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1.8)$$

式中： T ——内摩擦力；

A ——接触面积；

τ ——内摩擦应力；

μ ——动力黏性系数；

du/dy ——速度梯度，即平板垂直方向上单位长度内速度的变化率。

式 (1.8) 也称为牛顿内摩擦定律。它表明流体的内摩擦力的大小与流体的动力黏性系数 μ 成正比， μ 的大小决定于流体的性质、温度和压力等；同时内摩擦力的大小与流体内部速度的变化率 du/dy

成正比，该值越大内摩擦力越大。从该定律可以看出，当流体静止时， $\tau=0$ ，这说明静止的流体内部是没有摩擦力的。在温度一定时，流体的动力黏性系数 μ 保持为常数。

大量的实验表明，大多数气体、水和润滑油以及低碳氢化合物溶液都符合牛顿内摩擦定律，这样的流体称为牛顿流体。但是在自然界中，还有许多流体不遵循牛顿内摩擦定律，这类流体称为非牛顿流体，主要有聚合物溶液、含有悬浮微粒的液体等。非牛顿流体中内摩擦力的大小与流体内部速度的变化率 du/dy 成非线性关系。本书仅限于讨论牛顿流体。

三、黏度

衡量流体黏性大小的物理量称为黏度。常用的黏度表示方法有 3 种：动力黏度、运动黏度和相对黏度。

1. 动力黏度

动力黏度用 μ 表示，就是式 (1.8) 中的动力黏性系数。 μ 值的测定方法为，当速度梯度等于 $1s^{-1}$ 时，测得接触面上内摩擦应力的 大小就是 μ 。动力黏度的单位是 $N \cdot s/m^2$ 或 $Pa \cdot s$ 两种。在生产中，还常见两种以工程单位制表示的动力黏度，即泊 (P) 和厘泊 (cP)。上述单位之间的换算方法为

$$1 N \cdot s/m^2 = 1 Pa \cdot s = 10 P = 1000 cP$$

2. 运动黏度

运动黏度用 ν 表示，它是动力黏度 μ 与密度 ρ 的比值，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.9)$$

运动黏度的单位是 m^2/s 。工程单位制是斯 (St) 或厘斯 (cSt) 它们之间的换算关系为

$$1 m^2/s = 10^4 St = 10^6 cSt$$

3. 相对黏度

相对黏度是用间接的方法测定流体的黏度。相对黏度应用最为广泛，这是因为动力黏度和运动黏度直接测定比较困难。相对黏度的测定方法一般用一定量的液体（200 mL），通过一根规定长度（直径为 280 mm）细管所用的时间 t_1 (s) 与同体积的蒸馏水从同一根管中流出所用的时间 t_2 (s) 之比表示。

常见的恩氏黏度表示为 $^{\circ}E = t_1/t_2$ ，与运动黏度之间的换算关系为

$$\nu = 7.31^{\circ}E - \frac{6.31}{^{\circ}E} \quad (1.10)$$

四、温度和压力对黏度的影响

影响黏度的因素有两个，即温度和压力。一般认为压力对黏度的影响可以略去不计，温度对黏度的影响较大。对于液体来讲，温度越高，黏性越小；气体正好相反，温度越高，黏性越大。其中原因是液体分子间的吸引力比气体分子要大得多。当温度升高时，液体分子的活动能力增强，相互间的吸引力减少，宏观表现为黏性变小。但是气体分子随着温度的升高，活动能力增强，相互之间发生碰撞的机会和强度都提高，宏观表现为黏性变大。

液体的黏度与温度的关系，可用经验公式表示

$$\mu_t = \mu_0 (t_0/t)^k \quad (1.11)$$

式中： μ_0 ——在一个大气压下，某一标准温度 t_0 °C 时液体的动力黏度；

μ_t ——在一个大气压下，温度为 t °C 时液体的动力黏度；

k ——根据液体种类而定的常数，对油液来说， $k \approx 2$ 。

表 1.2 中表示水和空气的运动黏度与温度的关系。从表中可以

看出水的运动黏度随着温度的升高而减小；但是空气的运动黏度正好相反，随着温度的升高而增大。

表 1.2 水和空气的黏度与温度的关系

温度 $t/^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	80	100
$\nu_{\text{水}}(\text{m}^2/\text{s})$	1.80	1.30	1.01	0.80	0.66	0.56	0.48	0.37	0.30
$\nu_{\text{空气}}(\text{m}^2/\text{s})$	13.2	14.2	15.1	16.0	17.0	18.0	19.2	21.7	24.5

注：表中的值均需乘以 10^{-6} 。

四、理想流体的概念

在自然界中，凡是流体都具有一定的黏性，通常称具有黏性的流体为真实流体。但是在流体力学中，为了研究的方便，引进了理想流体的概念。所谓理想流体是一种不具有黏性的流体，显然在自然界中实际上并不存在理想流体。理想流体的概念对于流体力学来讲是十分重要的概念，比如后面将要讨论的流体动力学的柏努利方程、水表面的波浪运动，就是按理想流体进行研究的。

由于理想流体没有黏性，所以没有内摩擦力，不存在流体内部层面之间的黏性切应力，压力是理想流体内部层面中惟一的作用力，这样将大大简化流体对固体作用力的计算。

五、理想不可压缩的流体

如前所述，在一般情况下液体被认为是不可压缩的，液体在大多数情况下被看作为理想不可压缩的流体。当空气运动速度远小于音速，温度变化很小的条件下，空气也可以被看作为理想不可压缩的流体。

理想不可压缩流体是流体力学研究的一个重要对象。许多流体力学的实际问题按理想不可压缩流体处理会使问题大为简化，由此研究得到的结果对解决实际问题具有指导意义。

第四节 流体的力学特性和连续介质模型

一、流体的力学特性

气体和液体通称为流体。流体与固体相比，其分子的吸引力较小，分子的运动较剧烈，分子之间排列松散，本身没有一定的形状。从力学的角度看，固体具有抵抗压力、拉力和切力的能力，在外力的作用下，通常只发生较小的变形；但是，流体只能承受压力，不能承受拉力，当它受到切力时，就会发生连续的变形，称为流动。这些就是固体与流体在力学性质上的显著区别。

气体和液体除了上述的共性外，还有以下不同的特性。

液体分子之间的距离和分子的有效直径相当，因此对液体施加压力时，液体分子之间的距离稍有缩小，就会受到很大的排斥力来抵抗压力，液体分子间的距离很难再缩小，液体通常表现出不可压缩的特性。由于液体分子间吸引力的作用，液体具有力求自身表面收缩到最小的特性，所以液体在容器中只占据一定的体积，形成自由表面。

在通常情况下，气体分子之间的距离比它的有效直径要大得多，因此只有当分子间的距离缩小到一定程度后，才表现出分子间的相互排斥力，这就是气体通常可以压缩的原因。气体分子间的距离大，也决定了气体分子间的吸引力很小，气体的受热会引起其分子的更剧烈的运动，所以气体没有一定的形状和体积。气体在容器中会充满整个空间，不会形成自由表面。

二、流体的连续介质模型

从微观角度看，无论是气体还是液体，它们的分子之间都存在着间隙，因此流体的质量在空间上不是连续分布的。同时，由于分子运动的随机特性，又导致在空间上流体质量对于时间的不连续性。