

船舶动力学

船舶动力学

(試用本)

武漢水運工程學院

毛主席語錄

思想上政治上的路綫正确与否是决定一切的。

教育必須为无产阶级政治服务，必須同生产劳动相结合。

学制要縮短。課程設置要精簡。教材要彻底改革，有的首先刪繁就簡。

要提倡唯物辯証法，反对形而上学和煩瑣哲学。

对于外国文化，排外主义的方針是錯誤的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借鏡；盲目搬用的方針也是錯誤的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

目 录

第一篇 流体力学基础

第一章 流体的性质及其对船体的作用力	1
§ 1 流体的性质.....	1
§ 2 流体对船体的作用力.....	3
第二章 流体静力学概述	6
§ 1 流体的静压力及其特性.....	6
§ 2 流体静力学的基本方程式.....	6
§ 3 静压力分布图及压力中心.....	7
§ 4 静止流体的浮力.....	9
第三章 流体的运动	10
§ 1 理想流体运动.....	10
§ 2 层流和乱流.....	10
§ 3 定常运动与非定常运动.....	12
第四章 流体力学的几个基本方程	14
§ 1 流线、迹线和流管的基本概念.....	14
§ 2 连续性方程.....	14
§ 3 伯努利方程.....	15
§ 4 动量方程.....	20

第二篇 船舶阻力

第一章 船舶阻力的成因及其组成	23
§ 1 概述.....	23
§ 2 船舶阻力的成因及其分类.....	23
§ 3 影响船舶阻力的因素.....	25
§ 4 摩擦阻力.....	28
§ 5 形状阻力.....	32
§ 6 兴波阻力.....	33
§ 7 浅水对阻力的影响.....	45
§ 8 附加阻力.....	46
第二章 船模试验及阻力估算方法	48
§ 1 船模试验和相似理论.....	48
§ 2 阻力换算方法.....	53

目 录

§ 3	船舶阻力和馬力近似估算方法	57
第三章	船型对阻力的影响	71
§ 1	船长的影响	71
§ 2	长宽比 (L/B) 和船宽吃水比(B/T)的影响	72
§ 3	稜形系数 φ 的影响	72
§ 4	方形系数 δ 和舦剖面系数 β 的影响	74
§ 5	横剖面面积曲线形状的影响	75
§ 6	滿載水綫形状的影响	77
§ 7	艏艉形状的影响	78
§ 8	球鼻船艏对阻力的影响	80

第三篇 船舶推进器

第一章	关于船舶推进器概述	82
§ 1	船舶推进器的研究对象和方法	82
§ 2	馬力及效率	83
§ 3	船舶螺旋桨的几何性征和制造工艺	86
第二章	螺旋桨的理论基础	95
§ 1	螺旋推进器的动量理论	95
§ 2	机翼的特性	99
§ 3	敞水中螺旋桨的作用力及效率	107
§ 4	船后螺旋桨的作用力及效率	109
§ 5	螺旋桨的模型試驗和性征曲线	116
第三章	螺旋桨的设计	121
§ 1	設計螺旋桨时应考虑的若干因素	121
§ 2	設計問題与設計方法	124
§ 3	B型螺旋桨設計图谱及其应用	126
§ 4	螺旋桨的空泡现象和强度計算問題	152
§ 5	螺旋桨的总图繪制	171
§ 6	关刀車叶的設計簡介	177
§ 7	内河小船螺旋桨設計簡易图谱	181
第四章	特种推进器	187
§ 1	导管螺旋桨及其設計	187
§ 2	噴水推进器	202
§ 3	双反转螺旋桨	206

目 录

§ 4 可调螺距螺旋桨.....	212
§ 5 串列螺旋桨.....	214
附 录.....	215

第四篇 船舶摇摆与操纵性

第一章 船舶摇摆	223
§ 1 船舶摇摆概述.....	223
§ 2 静水中无阻力的横摇.....	225
§ 3 静水中有阻力的横摇.....	229
§ 4 船舶在规则波上的横摇.....	231
§ 5 影响船舶摇摆性能的因素.....	239
第二章 船舶操纵性	245
§ 1 船舶操纵性概述.....	245
§ 2 船舶迴转运动过程的分析.....	246
§ 3 船舶在迴转过程中的横倾.....	250
§ 4 舵的设计.....	252
§ 5 几种特种操纵装置简介.....	280
§ 6 船舶的迴转试验.....	284

第一篇 流体力学基础

第一章 流体的性质及其对船体的作用力

毛主席教导说：“大家明白，不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事物的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事。”我们知道，船舶乃是在流体中运动的物体，因此我们在研究船舶运动的各种性能时，就必须对流体的性质及其对船体的作用力作一分析。例如船舶在水中航行时，我们看到，船会兴起波浪，船尾有旋涡，螺旋桨旋转会产生推力使船前进，操舵能使舵叶产生舵力使船舶迴转等等。这些物理现象，都是流体与船体之间相互作用的结果，它们之间以一定的规律联系着。我们要研究这些规律就必须首先对流体的性质及其对船体的作用力加以研究。

§1 流体的性质

流体就是容易流动的介质，自然界中的流体主要有液体和气体两种。由于流体分子之间的内聚力较小，它们的各部分间容易发生相对的推移，也就是说，流体具有容易流动的特性。

流体力学只研究流体的宏观运动，不去追究个别分子的运动，为了从分子运动总结出宏观的统计规律，在流体力学中提出了连续性假设。连续性假设的要点有二：

1. 研究流体的基本单位是流体微团（或称流体质点），其中包含足够多的分子；
2. 流体由流体微团连续组成，不管在静止或运动时，流体微团都是连成一片，其间没有任何间隙。

综上所述，流体的主要属性，我们可以概括地说：流体就是容易流动的连续介质。

通常，流体的基本性质可以用重度、密度、压缩性和膨胀性、粘性来表征。

1. 重度和密度：

水的重度是单位体积水的重量。即

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (\text{吨/米}^3) \quad (1-1)$$

式中：W为具有体积为V的水的重量。

通常在标准温度15°C时，淡水的重度 $\gamma = 1$ 吨/米³，海水的重度 $\gamma = 1.025$ 吨/米³。

水的密度为单位体积水的质量。即

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^3) \quad (1-2)$$

式中：M为具有体积为V的水的质量。

显然，密度和重度有如下关系：

$$\gamma = \rho g. \quad (g \text{ 是重力加速度, } 9.81 \text{ 米/秒}^2)$$

对于造船工程来说，一般认为水的密度是不变的。淡水 $\rho = 102 \text{公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$ ，海水 $\rho = 104 \text{公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$ 。但是空气的密度随温度和压力变化很大。空气在一个大气压， 15°C 时的密度 $\rho = 0.125 \text{公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$ ，因此水的密度比空气的密度大800多倍。

2. 压缩性和膨胀性

流体的体积随压力增加而变小的特性叫压缩性；流体的体积随温度的增加而变大的特性叫膨胀性。

实验证明，在常温下，当压力从一个大气压增到100个大气压时（相当于1000米深的水下），水的密度只增大0.5%。当温度自 4°C 增到 45°C 时，水的密度只减少1%。所以在造船工程中，通常对水的压缩性和膨胀性是忽略不计的。

3. 粘性及其摩擦力

我们知道，船舶在水中航行时由于水对船产生阻力使船要消耗燃料。水的阻力的一部分就是由于水具有粘性而产生的。粘性表现在，当流体（如水）的某一层对其相邻的一层有相对运动时，就发生了切应力（内摩擦力）。

参阅图1-1，两平面中间充满粘性的液体，其间的距离为 λ_0 。设下平面固定不动，而上平面以速度 U 向右移动。贴近两平面处的流体质点，由于粘性作用必附着于板面，故与上平面贴近的流体质点同样以速度 U 向右移动，而与下平面贴近的流体质点的移动速度为零。在两平面之间，液体质点的速度分布如图1-1所示。

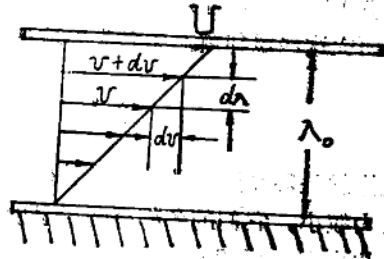


图 1-1

若两平面之间的距离 λ_0 很小，则可以认为速度的分布规律是直线，反之，则速度分布规律是曲线。

设移动上平面时，单位面积所需的力为 τ_0 ，根据实验结果知， τ_0 与 U/λ_0 成正比，因此可写成： $\tau_0 = \mu \frac{U}{\lambda_0}$

式中： μ 是比例系数，称为动力粘性系数。

τ_0 实际上就是粘性液体作用于移动平面单位面积上的切应力（或摩擦力）。事实上，液体在运动时，各层之间都产生了内摩擦力。对于 $d\lambda$ 厚度来说，其相对运动速度是 dv ，按它的单位面积所受到的切应力是：

$$\tau = \mu \frac{dv}{d\lambda} \quad (1-3)$$

式中： $\frac{dv}{d\lambda}$ 表示速度沿垂直方向的变化率。

各种流体的动力粘性系数 μ 值各不相同，液体的 μ 值随温度的升高而降低，随压力的增高而增大；但是压力对于 μ 值的影响很小，所以在造船工程中，通常只考虑温度对液体 μ 值的影响。

空气的 μ 值变化和水的 μ 值变化特性相反，空气的 μ 值随温度的增加而增大。相对于水而言，空气的 μ 值很小，如在 15°C 时，

空气的 μ 值/淡水的 μ 值=0.0155

在船舶阻力计算中，空气的阻力比水的阻力小得多，故对空气的阻力不作专门的研究。

在实际计算中，常用到另一个所谓运动粘性系数 ν 的概念，它是动力粘性系数 μ 和密度 ρ 的比值，即：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

运动粘性系数 ν 与流体的性质有关。试验证明，它与 μ 一样是温度的函数。一般在标准温度 15°C 时：

淡水 $\nu = 1.14 \times 10^{-6}$ 米²/秒

海水 $\nu = 1.91 \times 10^{-6}$ 米²/秒

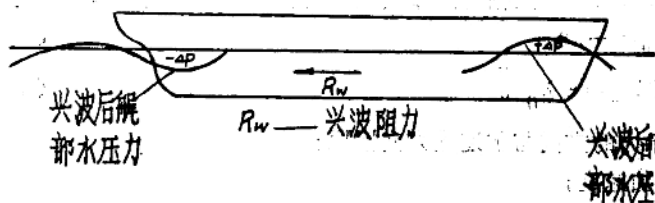
空气 $\nu = 0.125$ 厘米²/秒

从 $\tau = \mu \frac{dv}{d\lambda}$ 可看出，当流体处于静止状态(或相对静止状态)时， $\frac{dv}{d\lambda} = 0$ ，故切应力 τ 为零。换句话说，流体的静摩擦力不存在，所以只有当流体运动时才显示出粘性特性来。

§2 流体对船体的作用力

船舶在水中运动时，一定要受到水对它的作用力。水对船体的作用力，按其产生的原因分类，可分为粘性力和非粘性力，前者包括摩擦阻力和涡旋阻力，后者包括兴波阻力和由于船舶变速所引起的惯性力。

若按作用力的方向分类，可分为垂直于固体表面的压力和平行于固体表面的切向力。压力在沿船舶运动方向的分力的总和称为压力差阻力。波浪的形成，在舰波峰处压力增加，在波谷处压力降低，因此形成了舰艏压力差，如图1-2(a)所示，这个压力差就导致兴波阻力。



(a)

图 1-2

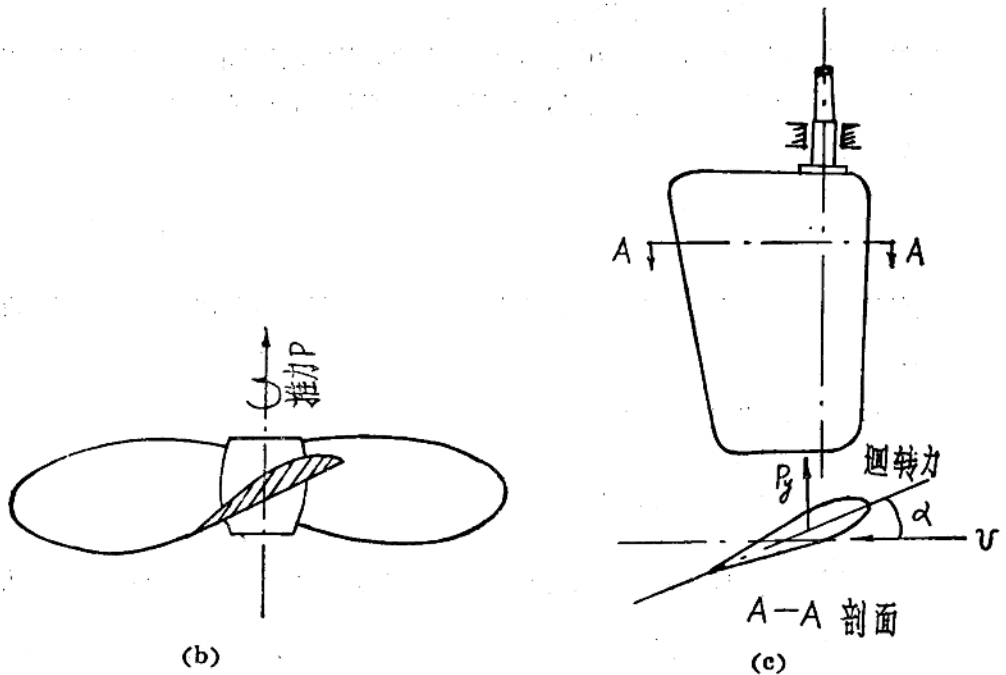


图 1-2

而艉部涡旋造成低压区将导致产生涡旋阻力，因此兴波阻力和涡旋阻力实质上都是压力差阻力。另一方面，螺旋桨的推力，舵的迴转力也都是压力合力的作用，如图1-2(b)(c)所示。

切向力(摩擦力)在船舶运动方向分力的总和就是水对船舶的摩擦阻力。

什么是流体作用于船体的惯性力呢？

我们知道，要使一个物体产生加速度，一定要给物体一个力，同样要使流体产生加速度，也要给流体以作用力。而船舶在水中作变速运动时（如运动起始阶段、迴航、在波浪上摇摆等），也必然使周围一部分流体一起作变速运动，即周围一部分流体以同一加速度与物体一起运动，这就是说，船体给了流体作用力。根据作用与反作用原理，流体就要给船体一个反作用力，这个力就是惯性力和惯性力矩，其方向和船舶运动的加速度方向相反。其大小等于作加速运动的流体质量或对某轴的流体质量矩与物体加速度或物体角加速度的乘积，即：

$$\text{惯性力 } F_u = -\lambda a \quad (1-5)$$

$$\text{惯性力矩 } M_{u_x} = -\lambda_{\theta} \ddot{\theta} \quad (1-6)$$

式中：负号表示力的方向与加速度方向相反；

a 是物体加速度；

$\ddot{\theta}$ 是物体角加速度；

λ 是附连水质量；

λ_{θ} 是附连水质量惯性矩。

附录：水的运动粘性系数 $\nu \times 10^{-6}$ (米²/秒)

淡水 ν	水温 $^{\circ}\text{C}$	海水 ν
1.7922	0	—
1.7313	1	—
1.6739	2	—
1.6194	3	—
1.5678	4	—
1.5189	5	1.5650
1.4725	6	1.5191
1.4284	7	1.4755
1.3864	8	1.4339
1.3463	9	1.3942
1.3081	10	1.3563
1.2718	11	1.3202
1.2370	12	1.2857
1.2037	13	1.2527
1.1719	14	1.2211
1.1413	15	1.1907
1.1122	16	1.1617
1.0842	17	1.3380
1.0574	18	1.1071
1.0315	19	1.0813
1.0067	20	1.0565
0.9829	21	1.0327
0.9599	22	1.0098
0.9379	23	0.9878
0.9167	24	0.9664
0.8962	25	0.9458
0.8765	26	0.9261
0.8575	27	0.9070
0.8391	28	0.8885
0.8214	29	0.8706
0.8043	30	0.8533

第二章 流体静力学概述

§ 1 流体的静压力及其特性

在静止的流体中，取任意形状的一团流体来考察，如图 1—3 所示。

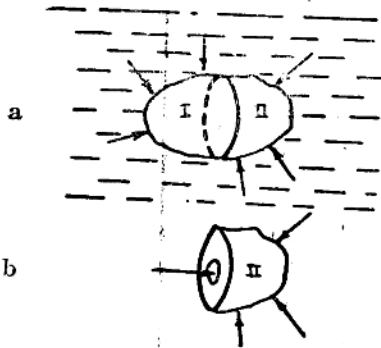


图 1—3

这团流体的表面受有静压力作用，如图 1—3 (a) 所示。现在我们分析其中第 II 部分脱离体，如图 1—3 (b) 所示。为了使脱离体继续保持平衡，在面积 ω 上应该有一个作用力 P 。这个力我们称为作用在面积 ω 上的流体总压力。而面积 ω 我们称为流体总压力的作用面。二者的比值我们称为流体平均静压力（流体力学中的压力，其实就是压强），用 \bar{p} 来表示，即：

$$\bar{p} = \frac{P}{\omega}$$

当面积 ω 向某一确定点缩小而接近于零时，平均静压力也将接近于个极限值 p ，即：

$$p = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(\frac{P}{\omega} \right) \quad (1-7)$$

p 叫做作用于该点的静压力。其单位通常用公斤/厘米²或公斤/米²。

流体静压力有两个重要的基本特性：

- 1, 流体静压力的方向永远沿着作用面的内法线方向。
- 2, 任意一点上各方向的流体静压力均相等。

§ 2 流体静力学的基本方程式

液体与气体的分界面叫作液体的自由液面。作用在自由液面上的压力叫做外压力，以符号 p_0 表示。现在决定自由液面下任意深度 h 处 x 点的静压力。

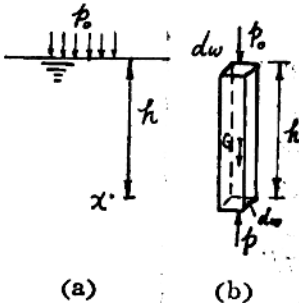


图 1—4

如图 1—4 (a) 所示，通过 x 点垂直向上作一截面积为 $d\omega$ 的微小稜柱体，并取其脱离体如图 1—4 (b) 所示。

我们着重考虑垂直方向的平衡条件，此稜柱体受到垂直方向的作用力（取向上为正，向下为负）有：

- 1, 上底面： $-p_0 d\omega$ （方向向下）；
- 2, 下底面： $p d\omega$ （方向向上）， p 为 x 点处的压力；
- 3, 稜柱体本身的重量： $-\gamma h d\omega$ （方向向下）。

此外，稜柱体侧面上受到的压力具有水平的方向，在垂直方向的投影为零。

这样，根据力学的平衡条件，沿垂直方向的合力应等于零，即：

$$p d\omega - p_0 d\omega - \gamma h d\omega = 0$$

消去 $d\omega$ 后, 变成

$$p = p_0 + \gamma h \quad (1-8)$$

式中: γ 是液体的重度。(1-8)式称为流体静力学的基本方程式。式中, 静压力 p 称为绝对静压力, γh 称为相对静压力。

举例: 试求在平衡液体中, 深度为10米处某点 x 的绝对静压力和相对静压力, 如图1-5所示。设液体的重度 $\gamma = 0.001$ 公斤/厘米³, 自由表面大气压 $p_0 = 1$ 公斤/厘米²。

解: 根据(1-8)式:

$$\begin{aligned} \text{绝对静压力 } p &= p_0 + \gamma h \\ &= 1 \text{ 公斤/厘米}^2 + 0.001 \text{ 公斤/厘米}^3 \times 1000 \text{ 厘米} \\ &= 2 \text{ 公斤/厘米}^2. \end{aligned}$$

相对静压力

$$\begin{aligned} p_m &= \gamma h = 0.001 \text{ 公斤/厘米}^3 \times 1000 \text{ 厘米} \\ &= 1 \text{ 公斤/厘米}^2. \end{aligned}$$

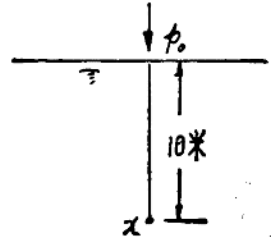


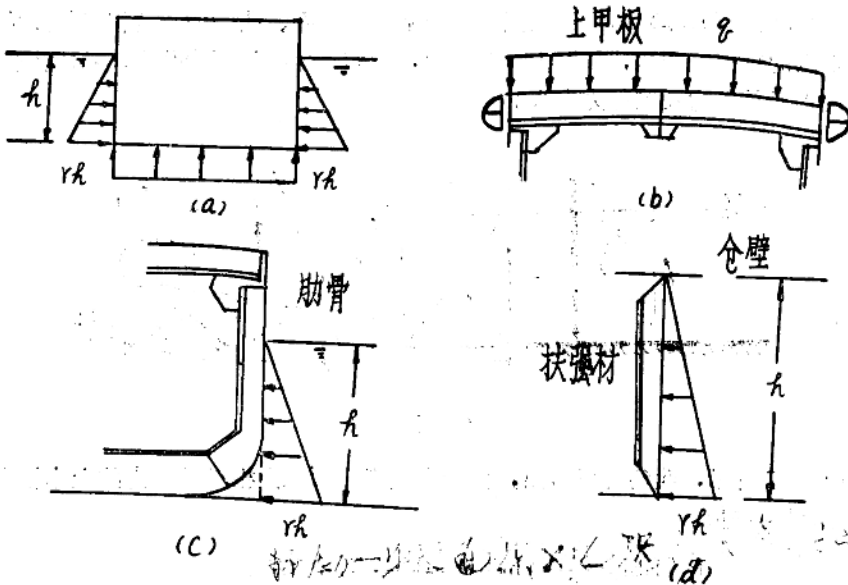
图 1-5

从这个例题中可以看出, 自由表面下每深10米压力增加1公斤/厘米²。在工程实际中, 我们将这一数值称为一个工程大气压或简称大气压, 即1大气压=1公斤/厘米²=10米水柱。以上各单位都可以作为静压力的单位。

§ 3 静压力分布图及压力中心

静压力分布图是根据流体静力学基本方程式 $p = p_0 + \gamma h$ 或 $p_m = \gamma h$, 按着一定的比例尺, 用绘制一次方程式图象的方法来表示作用在某一壁面上各点静压力的分布情况。根据这个图形, 可以立即看出壁面上各处的静压力的大小, 这在工程上应用比较方便。

下列各图形分别为各种平面壁及曲面壁上的静压力分布图, 如图1-6所示。



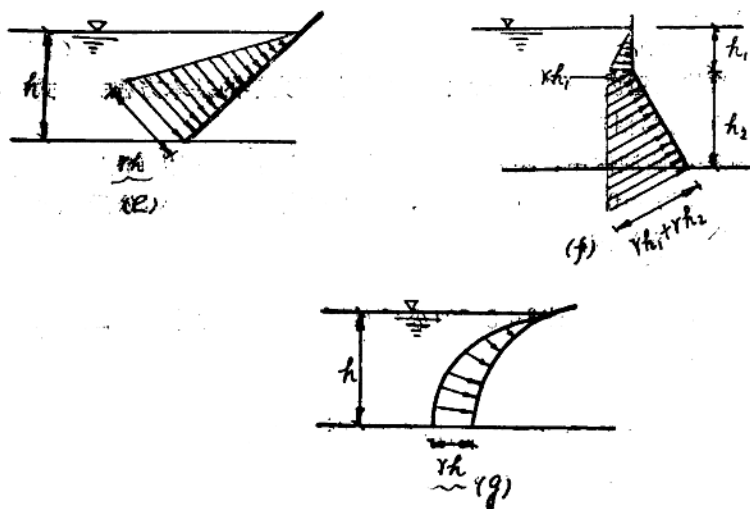


图 1-6

图1-6 (a) 为作用在船体框架上的液体相对静压力分布图。舷侧为三角形分布，船底为均匀分布。这个载荷分布图在刚架计算时用到。

图1-6 (b) 为作用在甲板横梁上的液体相对静压力分布图。横梁上静压力均匀分布，在进行甲板上浪计算时用到。

图1-6 (c) 为作用在肋骨上的液体相对静压力分布图，肋骨上的相对静压力分布为三角形，在进行肋骨计算时用到。

图1-6 (d) 为作用在仓壁扶强材上的液体相对静压力分布图。

图1-6 (e), (f), (g) 为作用在倾斜平面壁上或折面、曲面壁上的相对静压力分布图。

对于垂直的矩形平面壁，如图1-7所示，我们可以根据压力分布图，求出作用在垂直的平壁上的相对总压力及其压力中心。

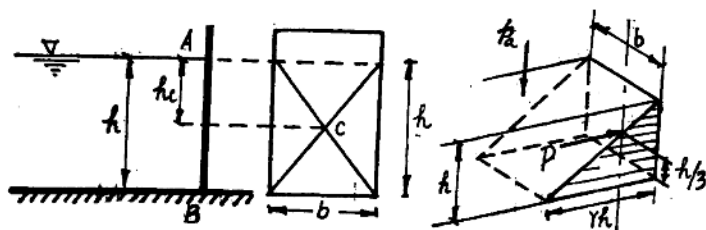


图 1-7

如图1-7所示，我们可以看出，作用在垂直平面壁上相对总压力的大小相当于压力分布图立体体的重量。

$$\text{即} \quad P = S b = \frac{1}{2} \gamma h \cdot h \cdot b = \frac{1}{2} \gamma h^2 b$$

S 为静压力分布图形的面积 $S = \frac{1}{2} \gamma h^2$ 。

液体对平面上总压力的作用点，我们称为压力中心。对于垂直矩形平面壁的压力中心，从图 1-7 看出，压力中心与压力分布图立体体积的重心在同一水平轴上。即 P 的压力中心距水面 $\frac{2}{3}h$ ，宽度方向在 $\frac{b}{2}$ 处。

§ 4 静止流体的浮力

设有一个方形物体完全淹没在液体内，称为潜体（图 1-8），我们来求液体对它的总压力。

水平总压力：

因为在相同深度处的压力相同，

$P_{左} = P_{右}$ ，因此相互一一抵消。

垂直总压力：

上底面： $-(p_0 + \gamma h_1) S$ （方向向下）；

下底面： $[p_0 + \gamma(h_1 + h)] S$ （方向向上）。

因此垂直总压力 P_z 为：

$$P_z = [p_0 + \gamma(h_1 + h)] S$$

$$- (p_0 + \gamma h_1) S$$

$$= \gamma h S = \gamma V \quad (1-9)$$

式中： $V = hS$ 就是物体所排开

的液体体积，而 γV 就是物体所排开液体的重量，即静止流体的浮力。由此可得到如下结论：

沉没于液体中的物体，必然受到浮力（垂直向上的总压力）的作用，浮力的大小等于它所排开液体的重量。浮力作用线必通过物体所排开液体体积的形心。这就是著名的阿基米德原理。

这一原理，我们只是对方形物体的特殊情况作了简单的证明，对任意形状物体阿基米德原理的结论同样是正确的，只是理论上的证明稍复杂一点，实践早已作了证明。

阿基米德原理同样也适用于浮体，如水面船舶。当船舶的全部重量（排水量） D 等于浮力 γV 时，船舶就具有浮于水面的能力，这时船舶的重心与浮心位于同一铅垂线上，我们称船舶处于正浮状态，如图 1-9 所示。

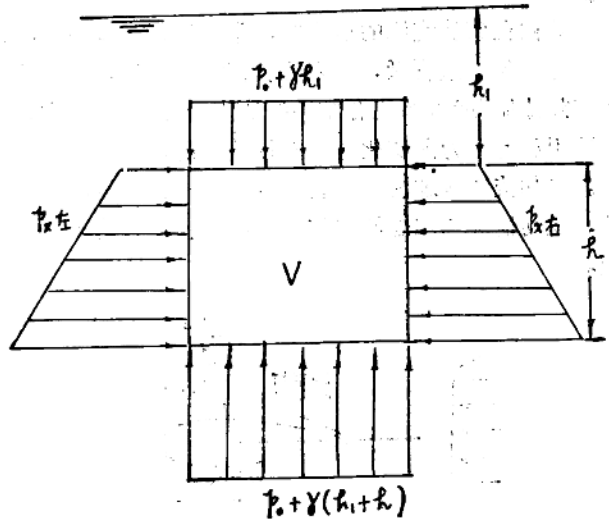


图 1-8

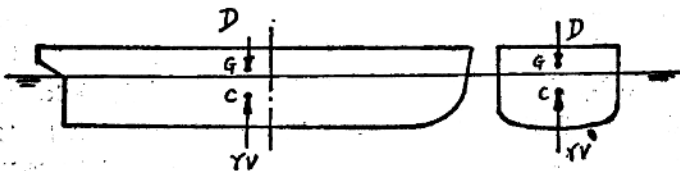


图 1-9

54

第三章 流体的运动

§ 1 理想流体运动

伟大导师列宁说：“物质的抽象，自然规律的抽象，价值的抽象以及其他等等，一句话，一切科学的（正确的、郑重的、非瞎说的）抽象，都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。”

我们在研究流体的运动时，常常进行一些抽象，建立一些理想模型，“理想流体”的概念就是一例。这样做，可以抓住问题的本质，忽略次要因素，从而使问题大大简化。所谓“理想流体”就是没有粘性的流体。例如兴波阻力，它是压力在运动方向分力的积分，而因波浪引起的压力的变化是与粘性无关的，因此研究兴波阻力时，就可以把流体看作是理想流体。又如流体流过梳线型物体（图 1—10）时，除了靠近物体表面的一薄层（称为边界层）外，运动情况与理想流体的流动没有什么大的差异，因此也可以当作理想流体的运动来研究。

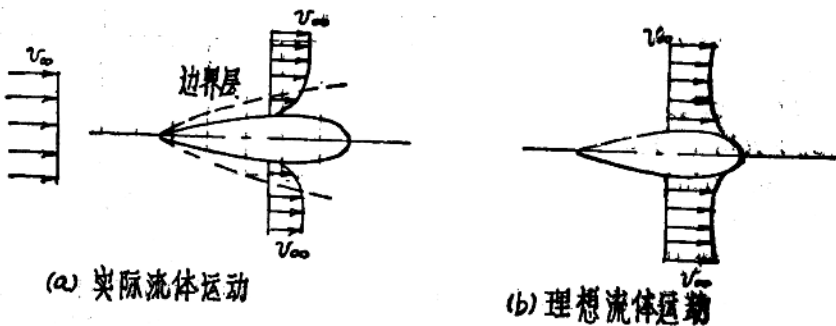


图 1—10

利用理想流体的运动规律可以求得船舶的兴波阻力和机翼的升力等工程实际中常遇到的流体动力，因此尽管理想流体的运动是一种假设的情况，仍具有实际意义。

§ 2 层流和乱流

观察实际水流，发现流体的运动存在两种性质截然不同的流动状态。一种叫层流，流体成层的流动，即流体质点相互之间互不干扰混杂的流动；另一种叫乱流或叫紊流，是一种流体质点相互干扰混杂的流动。这两种流态在实验室中可以清楚地看出来。图 1—11 为一实验设备的示意图。试验时，使水箱内的水位保持恒定和平静。微开旋塞 k ，使玻璃管内液体缓慢地流动，此时我们就看到水流中的着色液体呈现一条笔直的细线（图 1—12(a)），它与周围水流相混合，此即流体的层流流动。逐渐开大旋塞后，就会看到着色液体开始波动（图 1—12(b)）。继续开大旋塞，其波动加剧，最后其着色液体很快与周围水流相混杂，流动呈

现混乱的状态，最后着色液体线消失不见了（图1—12(c)），此即流体的乱流流动。

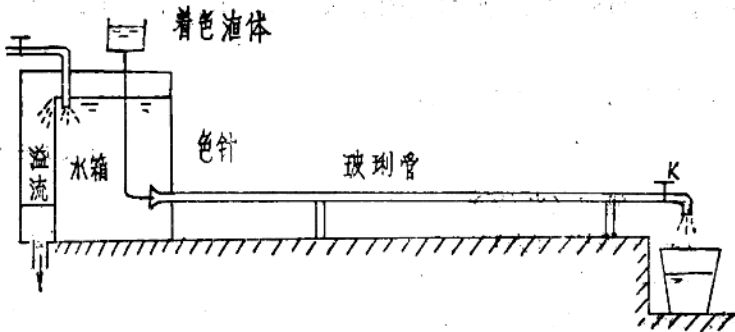


图 1—11

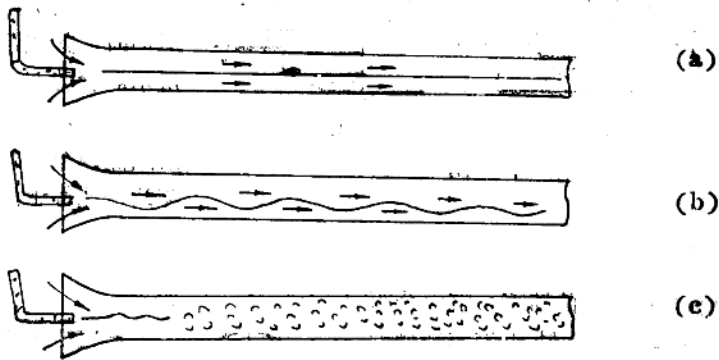


图 1—12

流体运动的两种状态，不仅出现在管流中，而且也出现在其他任何边界形式的流动中，如船体表面附近的液流，机翼表面附近的气流等，都存在层流和乱流两种流动状态。

上述试验证明，同一流体，同一管道，但由于流速不同，可以形成性质完全不同的流动型态，即层流和乱流。我们把流动状态由层流转变为乱流时的流速叫临界流速。

根据雷诺试验得出临界流速 $v_{临}$ 与管径 d 及流体的运动粘性系数 ν 有关，列出表达式即：

$$v_{临} \propto \frac{\nu}{d} \quad \text{或} \quad v_{临} = c \frac{\nu}{d}$$

在工程实际中，系数 c 经常用 $R_{临}$ 来代替，称为临界雷诺数，即：

$$R_{临} = \frac{v_{临} d}{\nu} \quad (1-10)$$

经多次试验，临界雷诺数 $R_{临} \approx 2300$ ，所以我们经常用此临界雷诺数来判别流体流动的型态。