

高等学校教学用书

流体力学

上海交通大学船舶制造系編

北京科学教育出版社

高等学校教学用书



流 体 力 学

上海交通大学船舶制造系編

北京科学教育出版社



本书系根据高等工业学校船舶制造系流体力学教学大纲编写而成。全书共計十章,主要讲述不可压缩流体。除一般基本理論外,側重于物体在流体中的运动、波浪及粘性流体动力学。最后一章概要地介绍了气体动力学(可压缩性流体动力学)方面的基础知識。本书可以作为高等工业学校船舶制造系流体力学課程的試用教科书,也可以作为其他有关专业的教学参考书。教学时数約为 100 学时左右。

流 体 力 学

上海交通大学船舶制造系編
北京科学教育出版社出版
商务印书館上海厂印刷
新华书店上海发行所发行

开本: 850×1168 1/32 印張: 13 6/16 字數: 318,000
印教: 1-1,830

1961年8月第1版 1961年8月上海第1次印刷

定价: 1.91 元

編 者 序

本教材是根据高等工业学校船舶制造系流体力学課程的教学大綱編写而成,在取材方面側重于船舶制造系的需要。

流体力学是船舶制造系一門重要的基础理論課程,是研究船舶靜力学、船舶阻力、船舶推进、船舶搖摆以及船舶操纵的主要理論基础之一。由于目前已經出版的一些流体力学书籍都不太适合于船舶制造系的需要,因此我們在教学实践的过程中早已开始酝酿要編写一本适用于船舶制造系的流体力学教材。1959年初,在大跃进形势的鼓舞下,我系部分师生結合編写了本教材的初稿,复經个别教师的仔細修改,于該年的教学中第一次試用。在使用以后,我們根据教学过程中所发现的問題,重新修訂了該課程的教学大綱,但由于其它的教学任务繁重,一直沒有能对原編教材内容作相应的修改。本年四月开始,为了巩固教学改革成果和更好地提高教学质量,我們組織了几位教师,花了約二个月的时间,对原編教材作了一次全面的修改补充,以便更能符合船舶制造系的要求,并修正其中的一些缺点和錯誤。

本教材的主要編写和修訂者是盛振邦同志。吳善勤、吳藻华、錢曉南、楊占明及彭乐生等同志也参加了編写或修訂工作,吳善勤同志还担任了最后的校閱工作。

华南工学院的胡志安等同志,曾在我們原編教材的基础上增删修改后进行教学,我們这次修改教材时曾作了参考,特致深切的謝意。

由于我們的水平和經驗不够,本教材的缺点和錯誤在所难免。

我們懇切地希望采用本教材的各校師生能提出寶貴的批評和意見，以便今後修改教材時，能在大家的幫助和支持下，進一步提高教材的質量。

編 者

1961年6月于上海交通大學船舶製造系

目 录

編者序

第一章 緒論	1
§ 1. 流体力学的研究对象	1
§ 2. 流体主要的力学性质	2
§ 3. 流体中作用力的分类	7
第二章 流体静力学	10
§ 1. 流体静压力及其特征	10
§ 2. 流体静力学的平衡方程式	12
§ 3. 等压面	15
§ 4. 静压力的分布规律、压力与高度的相当性	17
§ 5. 液体的相对静止	21
§ 6. 静止液体作用在固体表面上的力	25
§ 7. 物体浮沉 理論簡述	31
第三章 流体运动学	36
§ 1. 分析流体运动的两种方法	36
§ 2. 流体运动的分类、迹綫及流綫	40
§ 3. 連續性方程式	45
§ 4. 流体微团的运动	53
§ 5. 势流及速度势函数	58
§ 6. 平面流动及流函数	62
§ 7. 势流的迭加原理	66
第四章 理想流体动力学	68
§ 1. 欧拉运动微分方程式	68
§ 2. 葛罗米柯运动微分方程式	70
§ 3. 拉格朗日运动微分方程式	72
§ 4. 运动微分方程式的积分	73
§ 5. 起始条件和边界条件	77
§ 6. 柏努利方程式中各項的物理意义及其应用举例	80
§ 7. 稔定流动的动量定理及动量矩定理	94
§ 8. 理想流体的动能定律	100

第五章 旋渦运动的理論基础	106
§ 1. 旋渦运动的基本概念	106
§ 2. 环量和旋渦强度間的关系——斯托克斯定理	108
§ 3. 湯姆逊定理	113
§ 4. 海倫霍茲定理	116
§ 5. 平面圓旋	117
§ 6. 毕奥-薩伐尔关于旋渦誘导速度的公式	124
第六章 物体在理想流体中运动的平面問題	128
§ 1. 复变数函数的簡要复习	128
§ 2. 复势及复速度	131
§ 3. 几种簡单的平面势流	134
§ 4. 在均流中的圓筒	141
§ 5. 圓筒在靜止流体中的运动情况	145
§ 6. 作用在物体上的力及力矩	148
§ 7. 繞經圓柱体有环流的流动	153
§ 8. 保角变换概述	157
§ 9. 用保角变换法确定复势的几个簡单例子	160
§ 10. 茹可夫斯基翼型	164
§ 11. 机翼剖面变形的研討	171
§ 12. 作用在茹可夫斯基翼型上的力及力矩	175
§ 13. 其他的理論翼型	178
§ 14. 薄翼理論	181
§ 15. 平面翼槽的基本概念	188
§ 16. 分离繞流概述、平板滑行理論	192
§ 17. 研究流体势流的电比拟法	203
第七章 物体在理想流体中运动的空間問題	212
§ 1. 繞經圓球的流体运动	212
§ 2. 軸对称流动的流函数	214
§ 3. 源汇分布法	218
§ 4. 回轉体的纵向繞流	221
§ 5. 有限展弦比机翼	224
§ 6. 誘导阻力最小的机翼	238
§ 7. 机翼在实际流体中的情况	243
§ 8. 筒壁干扰概述	248
§ 9. 短翼理論概述	251
第八章 波浪	259
§ 1. 波动作用的基本概念	259

§ 2. 基本方程及边界条件	262
§ 3. 初始条件	267
§ 4. 正弦波	268
§ 5. 波群速	278
§ 6. 两种液体分界面上的波浪	280
§ 7. 坦谷水波(摆线波)	285
§ 8. 波能传播及波阻概述	299
§ 9. 长波	302
§ 10. 海上水波的测量	307
第九章 粘性流体动力学	311
§ 1. 粘性流体的运动微分方程式	311
§ 2. 量纲分析与相似理论	318
§ 3. 雷诺试验、层流及紊流	325
§ 4. 圆管中的层流	327
§ 5. 紊流的特性及紊流附加应力	331
§ 6. 普朗特氏混合长度理论	336
§ 7. 光滑圆管中的紊流	338
§ 8. 管路计算	344
§ 9. 边界理论	356
§ 10. 平板层流边界的计算	362
§ 11. 光滑平板紊流边界的计算	369
§ 12. 光滑平板混合流边界的计算	379
§ 13. 沿曲面的边界及边界分离现象	382
§ 14. 表面粗糙度对阻力的影响	385
第十章 气体动力学基础知识	389
§ 1. 基本概念	389
§ 2. 音速、弱扰动和强激波	393
§ 3. 气流一元基本方程	396
§ 4. 能量方程式	399
§ 5. 气体出流问题	402
§ 6. 定型激波	408
§ 7. 激波前后的气流参数	410
§ 8. 激波绝热压缩及机械能的损失	417

第一章 緒論

§ 1. 流体力学的研究对象

流体力学是研究流体的平衡和运动規律、以及流体与固体之間相互作用問題的一門科学，它是近代許多技術部門如：航空、造船、水利及机械等工业的理論基础。

流体包括液体和气体两种。組成流体的各个微团之間的內聚力很小，所以具有很大的流动性。正如其他任何物理体一样，流体是由不断运动着的分子所組成的，而分子的运动是由分子力所引起的，即使流体处于平衡状态（例如液体置于靜止的容器中）时，也发生这种运动。除內部分子力所引起的运动以外，还存在着由于外部原因（例如重力、压力差、摩擦力等作用）而引起的流体运动。这样，流体的运动包括分子运动（微觀运动）和由外部原因而引起的运动（宏觀运动）。

流体力学仅研究由于外部原因而引起的流体运动，而对于流体的分子运动不予考虑。換句話說，流体力学只是研究流体的“宏觀运动”以及流体和固体間的相互作用。因此，在流体力学中，我們不考虑流体是由分子所构成这一事实，而认为流体完全充滿它所占有的空間并不形成任何空隙。这样，流体力学研究的对象就是一种連續的流体介质，而流体介质的一切力学特性如：速度、密度及压力等等都可看作是坐标及時間的函数，因而在解决流体力学的实际問題时，就有可能利用强有力的数学工具。

流体的“宏觀表象”与固体的“宏觀表象”的基本区别就在于流

体有很大的流动性。固体在运动时只发生比较小的变形,而流体能够有任意大的变形,本身没有固定的形状(其形状随容器而变)。流体能抵抗压应力,几乎不能承受拉应力。对于切应力的抵抗较弱,而且这种抵抗只有在流体微团间有相对运动时才显示出来。因此,流体没有静摩擦力,很小的作用力就能破坏流体微团之间相对静止的状态。由此可知,流体的两个基本特性即为易流性和连续性。

在流体力学中,以连续的流体介质来代替流体的分子结构是十分合理的,因为流体所占有的空间比起分子的尺寸来是大得无可比拟的,例如:在正常情况下,一立方毫米的空气约包含 2.7×10^{20} 个分子。大家知道,不管在那一个技术部门中,毕竟没有用到这样精确的数字。因此,根据流体是连续介质这一假定来研究流体力学,可以得出完全适合于实际要求的解答。

在流体力学中,认为流体是连续介质以后,还经常应用流体微团、流体质点、流体质点的速度及流体质点的密度等概念。这样使我们可以区分出有关质点(或微团)的各种物理量的大小,例如:质点的线性尺度是一阶小量,它的表面积和体积则分别是二阶及三阶小量。因此,一切与质点体积成正比的物理量(如质量、重量)都是三阶小量,而与表面积成正比的物理量(如压力、粘性力)都是二阶小量。在进行对比的情况下,高阶小量就可以忽略不计。必须注意,上面所建立的概念只是经过极限化的数学概念。我们决不能认为流体微团或流体质点是无限的小或接近于分子结构的尺度。由于宏观力学所进行的实验观察中使用的最小尺度与分子尺寸还相差很远,所以我们通常认为流体质点是很小的,但比起分子尺寸来说还是很大的。

§ 2. 流体主要的力学性质

在研究流体的平衡及运动时,必须知道作为连续介质的流体

的力学性质。流体最主要的力学性质是密度、粘性及表面張力等，現分別說明如下：

(一) 密度：

从流体所占据的空間中取出某一体积 ΔV ，設这一体积内流体的质量为 ΔM ，則比值：

$$\rho_{cp} = \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-1)$$

即为这一体积内流体的平均密度。若将 ΔV 縮小至零为极限，使其集中于内部的某一点，則比值：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-2)$$

即为該点处的密度。密度 ρ 的計量单位是 (公斤-秒²/米⁴)。

流体的密度与重度(每单位体积的重量)之間的关系是：

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中， g 为重力加速度。重度 γ 的計量单位是(公斤/米³)。

流体密度的大小視流体的性质以及所处的条件而定。例如：在 15°C 和 1 大气压时，淡水的密度是 $\rho = 102$ 公斤-秒²/米⁴，而空气的密度是 $\rho = 0.125$ 公斤-秒²/米⁴。对于某种一定的流体說来，其密度随压力及温度而变化，即：

$$\rho = f(p, T) \quad (1-4)$$

液体(也称滴状流体)的密度随压力的变化很小。例如：当压力从 1 个大气压增加至 100 个大气压时，水的体积只减小 0.5%，也就是說其密度只增加了 0.5%。液体的密度随温度的变化也是很小的，例如：在 1 个大气压时，当温度由 0°C 增加至 100°C 时水的密度約减小 4%。因此，在計算中一般可以认为水的密度是不变的，淡水的密度取作 $\rho = 102$ 公斤-秒²/米⁴，海水的密度取作 $\rho = 104$ 公斤-秒²/米⁴。

气体的密度随压力及温度的变化很大。在压力不变的情况

下,温度增加 100°C 时气体的密度约减小 27%。在温度不变的情况下,气体的密度变化与压力的增减成正比例。空气的密度随温度及压力的变化规律可用下式表示:

$$\rho = 0.125 p \frac{273+15}{273+t} \text{ (公斤-秒}^2\text{/米}^4\text{)} \quad (1-5)$$

式中, p 是空气的压力,以大气压计。

t 是空气的温度,以摄氏度数计。

根据流体密度随压力或温度而变化的程度的不同,可以把流体分为可压缩流体(或称弹性流体)和不可压缩流体两种。在研究液体的平衡及运动时,一般可以认为 $\rho = \text{常数}$, 亦即认为液体是不可压缩流体。对于气体说来,由于其密度随压力及温度的变化很大,所以是可压缩流体。应该注意,这种划分也并不是绝对的。例如:在研究水的运动时一般可认为它是不可压缩流体,但在研究水下爆炸和管路中水锤现象时,就决不能忽略其密度的变化,否则所得结果与实际不符。在研究空气的运动时,也不应该总认为它是一种压缩性流体。因为当空气的运动速度不大时(不超过 50—70 米/秒),其密度的变化实际上可以忽略不计,在这种情况下,空气就可作为不可压缩流体进行研究。由此可见,某一种流体究竟是属于可压缩流体或不可压缩流体,应视需要解决的问题的条件来决定。

(二)粘性:

流体在运动时产生内切应力的特性称为粘性(或内摩擦),这是由于流体分子的结构及分子间的吸引力所引起,它表现在当流体的某一层对其相邻的层有相对运动时就发生了摩擦力。

参阅图 1-1, 两平面中间充满粘性液体,两平面间的厚度为 λ_0 , 设下平面固定不动,而上平面以速度 V 向右移动。贴近两平面之流体质点必附着于板面,与上平面贴近的流体质点同样以速

度 V 向右移动, 而与下平面貼近的流体质点之移动速度为零。在两平面間, 液体质点的速度分布如图 1-1 所示。

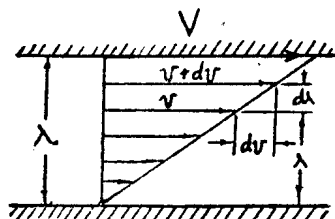


图 1-1

若两平面間之厚度甚薄, 則可以认为速度的分布規律是直綫。如果厚度較大, 則速度的分布規律是曲綫。設移动上平面时每单位面积

所需的力为 τ_0 , 根据实验結果, $\tau_0 \propto V/\lambda_0$, 或可以写成:

$$\tau_0 = \mu \frac{V}{\lambda_0} \quad (1-6)$$

式中, μ 是比例常数, 称为粘性系数(或动力粘性系数)。

τ_0 也代表粘性流体作用于移动平面单位面积上的切应力或摩擦阻力。事实上, 液体在运动时, 各层之間都产生摩擦阻力。对于 $d\lambda$ 层厚度来說, 单位面积所受到的切应力是:

$$\tau = \mu \frac{dv}{d\lambda} \quad (1-7)$$

式中, $\frac{dv}{d\lambda}$ 称为速度梯度。流体相邻两层間微面积 dS 上所受到的

摩擦阻力 dR 是: $dR = \tau dS$ 。

粘性系数 μ 是有因次的物理量, 在工程单位制中 μ 的单位通常用公斤-秒/米²。在绝对单位制中 μ 的单位是达因-秒/厘米² 或称为泊司。

$$1 \text{ 泊司} = \frac{1}{9.81} \text{ 公斤-秒/米}^2 = 0.01019 \text{ 公斤-秒/米}^2$$

各种流体的粘性系数 μ 值各不相同。液体的粘性系数随温度的增高而降低, 随压力的增高而增大。但是压力对于 μ 数值的影响很小, 故一般可以忽略不計。空气的粘性系数随温度之增高而增大。

流体的粘性系数 μ 与其密度 ρ 的比值称为运动粘性系数,即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

运动粘性系数 ν 也是有因次的物理量,其单位是米²/秒。水及空气的动力粘性系数均随温度而变化,如图 1-2 所示。

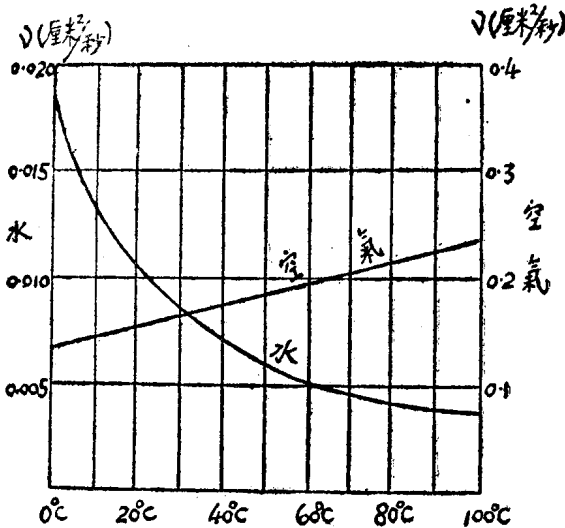


图 1-2

当流体处于静止状态(或相对静止状态)时,其切应力为零。换句话说,流体的静摩擦力实际上并不存在,只有当流体在运动时其粘性才有意义。

于此附带提及关于内聚力和表面张力的概念。

流体中分子间相互吸引的结果产生了内聚力。内聚力是内力,且相互平衡,只在流体的边界上,这种力才显示出来。流体的内聚力很小,实用上可以认为不能抵抗拉伸。水抵抗拉伸的阻力是 3.6×10^{-4} 公斤/厘米²。

位于液体表面的各微团之间相互牵引,因此产生了表面张力,

在液体的表面上好象形成了具有独特形状的膜,要使这膜破裂,必須加上某些外力。水在 20°C 时的表面張力是 7.4×10^{-3} 公斤/米。由于流体的內聚力和表面張力很小,故在实际計算时一般可以忽略不計。

§3. 流体中作用力的分类

在流体中取出被封闭表面 S 所包围的某一任意体积 V (图 1-3)。作用在体积 V 上的各种力可以分为质量力 (或称体积力) 及表面力两类。

质量力作用在体积 V 內所有的流体微团上,力的大小与这一体积的质量成正比,而与 V 以外流体的存在无关。重力、离心力等都是质量力。在流体力学中,质量力通常是以单位质量来計算的。設单

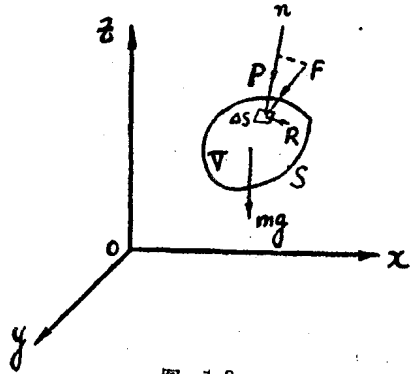


图 1-3

位质量的质量力在 x, y, z 軸上的投影是 X, Y, Z , 則 X, Y, Z 即为加速度在坐标軸上的投影。茲举例說明如下: 設作用在流体上的力只是重力, 且 xoy 面取作水平面, z 軸垂直向上 (图 1-3), 則单位质量的质量力在各坐标軸上的投影是:

$$X=0, Y=0, Z=-\frac{mg}{m}=-g,$$

此外, 由于周围流体对体积 V 作用的结果, 沿表面 S 上将受到切向力和法向力的作用。通常表面力都是用单位表面面积来計算的。設在表面 S 上取一微面积 ΔS , 此微面积上所受的力是 F , 将 F 分解成为切向力 R 和法向力 P , 則切向应力和法向应力 (压

力)是:

$$\tau_{cp} = \frac{R}{\Delta S}; \quad p_{cp} = \frac{P}{\Delta S}$$

若将此微面积 ΔS 趋于零为极限, 则:

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{R}{\Delta S}, \quad p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{P}{\Delta S}$$

称为流体中某一既定点的切应力和压力。由此可见, 粘性力和压力是表面力。

在解决流体力学问题时, 考虑切应力(粘性力)会引起许多数学上的困难, 而且在许多情况下, 在一定的流动区域内流体的粘性并不起决定性的作用, 因而可以忽略不计。例如水或空气流经物体时, 除了靠近物体表面的一薄层(称为边界层)内粘性有作用以外, 边界层外面的流体运动事实上和理想流体的运动没有什么区别(图 1-4)。所以在边界以外的区域中, 粘性力完全可以略去, 并能得到实际所允许的精确度。因为这个缘故, 在流体力学中引入了理想流体(非粘性流体)的概念。这种流体没有粘性, 不能抵抗剪切, 有绝对的流动性, 其表面力只有法向应力。必须指出, 理想流体

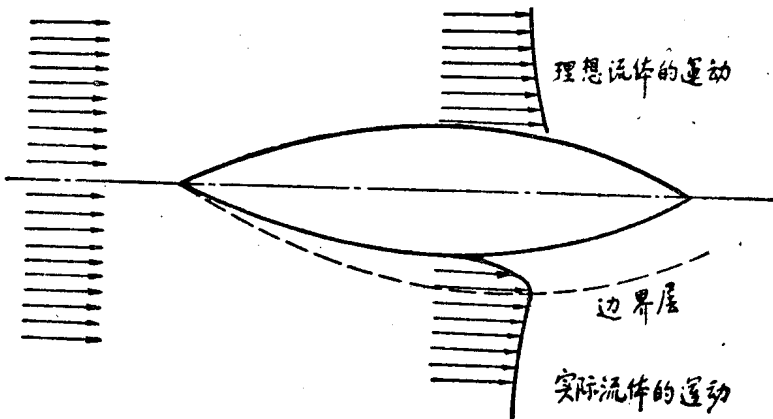


图 1-4

是簡化了的实际流体的模型,在自然界中是不存在的,所以是一种抽象。这一抽象,在科学上和实用上有很大的价值。因为經過抽象以后,能使所討論的問題大为簡化,易于得到簡單明了的解答。根据这些解答可以进一步分析实际流体的运动,从而建立解决实际問題的基本途徑。基于上述原因,在流体力学中就有必要比較全面地討論理想流体运动的基本規律。