

(高等院校试用教材)

流 体 力 学

《 水 力 学 》

上 册

魏亚东 闻德蓀 李兆年 等编

TB126

新
学
社

PDG

TB126
7/1

序

为了解决环境工程专业和给水排水工程专业对流体力学和水力学教材的需要，我们三所院校的几位教师组成了流体力学（水力学）编写组。

本书在编写过程中，注意贯彻以下一些原则：加强基础理论，理论联系实际的原则；要“面向现代化、面向世界、面向未来”的原则；传授知识与培养能力相结合的原则，并注意到适宜于自学。书中各章都选编了较多数量且难易结合的例题与习题。为了适应科学技术的发展，部分章节还编写了电算方法以及相应的计算程序。

本书在我们教学实践的基础上，学习和参考了兄弟院校的教材和教学经验，在内容和体系等方面与目前相近教材有所不同。以期达到使今天的教育适合明天的需要。

本书共十四章，前七章可认为是基础理论部份，主要讨论流体力学（水力学）的基本概念和基本方程；后七章则注重于应用和有关专题。

本书可作为环境工程、给水排水工程专业的教科书，但在内容上各有所侧重，在教学过程中可按教学计划的要求作相应的删减。同时也可作为其他相近专业的师生和工程技术人员的参考书。

本书编写采取集体讨论，分工执笔，主编审订的方式。参加执笔的有：重庆建筑工程学院魏亚东（第一、二、十一章）、范世斌（第三、四章）、邢增辉（第二章）；南京工学院闻德荪（第五、六、七、十三章）、王世和（第五、十章）；北京建筑工程学院李兆年（第八、九、十二、十四章）。由魏亚东主编。

本书在编写过程中得到了上述三个学院、系领导的大力支持在此表示谢意。

由于水平所限，时间较紧，书中缺点和错误在所难免，恳切希望得到各方面的指正。以便改进。

编者

1985年10月



目 录

上 册

第一章 绪论	1
§1-1 流体力学的任务及其发展简史.....	1
§1-2 流体的定义.....	2
§1-3 流体连续介质假说.....	3
§1-4 流体的主要物理性质和力学模型.....	3
§1-5 流体的热力特性.....	10
§1-6 气体状态方程.....	12
§1-7 作用在流体上的力.....	14
§1-8 流体力学的研究方法.....	15
习题.....	16
第二章 流体静力学	17
§2-1 流体静压强及其特性.....	17
§2-2 流体平衡的微分方程及其积分.....	19
§2-3 流体静力学基本方程.....	22
§2-4 压强量测.....	24
§2-5 液体的相对平衡.....	29
§2-6 流体作用在平面上的总压力.....	33
§2-7 流体作用在曲面上的总压力.....	40
§2-8 潜体及浮体的平衡和稳定.....	44
§2-9 可压缩流体的压强变化.....	49
习题.....	51
第三章 流体运动学	58
§3-1 研究流体运动的方法.....	58
§3-2 流体质点的加速度.....	59
§3-3 流线和迹线.....	61
§3-4 流体运动的分类.....	63
§3-5 流体运动的一些基本概念.....	65
§3-6 流体运动的连续性方程.....	67
§3-7 流体微团运动的基本形式.....	72

§ 3—8	有涡流和无涡流	77
§ 3—9	恒定平面势流	83
	习题	100
第四章	流体动力学	104
§ 4—1	理想流体的运动微分方程—欧拉运动方程	104
§ 4—2	实际流体的运动微分方程—纳维埃—斯托克斯 (Navier—Stokes) 方程	106
§ 4—4	实际流体元流的伯努利方程	115
§ 4—5	过流断面的压强分布	116
§ 4—6	实际流体总流的伯努利方程	118
§ 4—7	伯努利方程的几何表示	120
§ 4—8	总流伯努利方程的应用	121
§ 4—9	不可压缩气体的伯努利方程	128
§ 4—10	总流的动量方程	132
	习题	135
第五章	相似原理与量纲分析	142
§ 5—1	流动相似的概念	142
§ 5—2	相似准则	145
§ 5—3	准则方程	153
§ 5—4	量纲分析	155
§ 5—5	相似条件	163
	习题	164
第六章	流动阻力和能量损失	168
§ 6—1	流体的两种流动型态	168
§ 6—2	沿程损失的表示式	173
§ 6—3	圆管中层流沿程损失的分析 and 计算	175
§ 6—4	紊流运动	178
§ 6—5	紊流沿程损失的分析 and 计算	189
§ 6—6	局部损失的分析 and 计算	203
	习题	213
第七章	边界层和绕流运动	219
§ 7—1	边界层微分方程—普朗特边界层方程	220
§ 7—2	边界层的动量积分方程	223
§ 7—3	平板上的层流边界层	225
§ 7—4	平板上的紊流边界层	228
§ 7—5	绕流运动	233
	习题	239

第一章 绪 论

§1-1 流体力学的任务及其发展简史

流体力学主要研究流体的平衡和机械运动规律及其在实践中如何应用的一门技术科学。研究的对象主要是水和不可压缩的气体，也涉及可压缩的气体。它一方面根据基础科学中的普遍规律，如质量守恒、能量守恒和动量定理以及牛顿力学定律等为基础，结合流体特点，建立理论基础，同时又紧密联系工程实践，发展学科内容。

我们所研究的液体和气体统称为流体，都是在一定的边界范围如管道内、河渠内流动的流体，不同的边界有不同的流动特性，边界控制流体，流体反抗边界的约束，两者相互作用形成形形色色的各种流动状态。流体力学与水力学的主要任务就是研究流体与边界的相互作用，分析它们之间的作用力，为与流体有关工程的勘测、设计、施工和运转管理等方面提供理论依据。

流体力学是许多生产部门必不可少的一门学科，它广泛地应用于水利建设、农田灌溉、给水排水工程、环境工程、能源、交通、化工等部门。以城镇的工业用水和生活用水为例来说明这个问题。这些用水，一般都是从水厂集中供水，水从河、湖或井中用泵抽上来，经过处理、过滤、消毒后，再通过管路系统把水输送到用户。有时，为均衡水泵负荷，还需要修建水塔。在这些过程中都需要解决一系列的水力学问题，如取水口的布置、管路布置、管路直径和水塔高度等的计算，水泵容量和井的涌水量计算等等。

流体力学和水力学，同其他自然学科一样，是在大量生产实践和科学实验的基础上发展起来的，这就是认识来源于实践。首先人们为了农业灌溉的需要，为了与洪水灾害作斗争，就需要控制水流，需要修建一系列的水利工程，在此基础上不断总结水流运动规律而形成了古典的水动力学或古典流体力学。

我国是文明古国，我们的祖先在与水作斗争的过程中，逐步加深了对水流运动规律的认识。相传四千多年前的大禹治水，就表明我国古代就进行过大规模的治河工作。人们在实践中认识到，治水必须“顺水之性”。在公元前256~210年间的我国秦代修建的都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程都说明当时对明渠水流和堰流等水流运动规律的认识，已达到相当高的水平。特别是位于四川的都江堰工程，无论就规划、设计、施工以及所总结的“深淘滩、低作堰”的六字诀等方面都具有相当高的科学水平和创造性，至今仍发挥效益。古代我国曾以铜壶滴漏作为一种计时工具，就是根据孔口出流的原理来计算时间的，表明对孔口出流规律已有相当的认识。宋元以来，随着堤防、抢险、堵口、分洪、导流等技术的不断改善，治河的理论水平也有所提高，如明朝时期，潘季驯提出了“筑堤束水，以水攻沙”和“借清刷黄完全符合水力学原理的治水方针。清朝雍正年间，何梦瑶在《算迪》一书中提出了流量为过水断面上平均流速乘以过水断面的计算方法。

十四世纪以前,我国的科学技术在世界上是处于领先地位的。但是近几百年来由于反动的封建专制,对内实行腐朽的君主集权的官僚制度,对外实行闭关锁国政策,压制科学技术的发展,使我国的科学技术和生产力大大地落后了,以致造成我们伟大的祖国从十九世纪中期起到1949年止的漫长岁月中处于世界列强奴役压迫侵略的时代。也就使得流体力学和水力学始终处于概括的定性阶段而未形成严密的科学理论。

就世界范围来说,水力学和流体力学的第一篇论述,要算距今2200多年前在西西里岛上的阿基米德写的“论浮体”一文,他对静止时流体的力学性质作了第一次科学总结。但这以后一直到十五世纪以前水力学和流体力学在理论上的进展都很少。直到十六世纪以后,资本主义在欧洲兴起,由于城市建设、航海和机械工业的发展,在这些工业部门的推动下,逐步形成了近代自然科学,流体力学和水力也随之得到发展。在这个发展过程中为本门学科奠定基础的当推伯努利和欧拉。他们分别在1738年提出了液体运动的能量计算,1769年提出了液体运动的解析方法。这些成就为研究流体运动规律奠定理论基础。

从十八世纪中叶以后,流体力学和水力学各自沿着互不联系的方向发展,前者运用严密的数学工具建立有关理想流体及实际粘性流体的基本运动方程。而后者为了适应工程技术迅速发展的需要,则采用试验手段,针对具体问题,直接求得各运动要素间的定量经验关系,用以解决与流体运动有关的实际问题。这二者都各有其局限性,如流体力学只注重理论的推导而脱离实际的应用,使得许多基本方程一方面由于理论中的假设与实际不尽相符,另一方面由于流体运动的复杂性在数学上求解有困难,所以理论难以运用于实际问题。但是水力学着重于实验,由于理论指导不足,其经验公式和系数往往有局限性,难以解决复杂的问题。十九世纪末期后,由于科学技术的迅猛发展,由于电子计算的普及,使得求解方程的能力大大提高,以及新的量测技术的引用使得流体力学和水力学走上相互联系和相结合的道路,使理论和实践紧密结合。

§1-2 流体的定义

物质可以按其存在的物理形式分为固体、液体和气体。液体和气体称为流体,所以流体是物质存在的一种形式。我们知道,液体和气体有完全不同的外观,所以,我们必须找出能够把它们都归入流体这一类的共同特征。在研究流体运动时,我们感兴趣的是处于运动中的流体性态以及这种性态对作用力和力矩的关系。当受到切应力时,液体和气体都有一种明显的反映形式,即在剪切应力的作用下,无论这个应力多么小,流体将不断地变形。这就是它们的“流动性”,也就是液体和气体的共同特征。除此之外,我们还必须了解液体和气体之间的区别。

液体具有一定大小的体积,因而具有自由面(即液体和气体的交界面),气体没有固定的体积,能充满任何容器;液体与固体一样能承受压力,而且不易被压缩,而气体则很容易被压缩。液体的粘滞性随温度的增加而减少,而气体则相反。

液体和固体之间的主要区别在于:固体既具有体积的大小又具有形状,固体既能抵抗压力又能抵抗拉力和切力。

液体具有气体和固体之间的过渡地位。它在高温时类于气体状态,而在低温时又类于固体状态。

§1-3 流体连续介质假说

流体，无论是液体还是气体，都是由大量不断运动着的分子所组成。从微观的角度来看流体的物理量（如流速、压强等）在空间上是不连续分布的，这是因为分子之间总是存在间隙。同时，由于分子的随机运动，又导致任一空间点上的物理量在时间上的不连续性。这样从微观的角度看，流体物理量的分布在空间和时间上都是不连续的。

但是在流体力学和水力学中，我们所讨论工程问题的尺寸往往远大分子之间的距离，以液体为例，在标准状态下，每立方厘米的液体中，约有 3.3×10^{22} 个液体分子，相邻分子间的距离约为 3×10^{-8} 厘米。可见分子间的距离是相当微小，而在很小的体积中，包含了难以计数的分子。这样，我们有理由不以分子作为研究对象，而只注重流体的宏观特性，即大量分子的统计平均特性。因而引进流体连续介质假说，认为占据一定空间的液体或气体是不留任何空隙的，其中没有真空，也没有分子间的间隙，把流体视为连续介质。

流体连续介质假说，还认为流体的物理量是坐标和时间的连续函数，由此，可采用有关连续函数的一切结论作为数学工具来研究流体运动。

实践证明，采用流体的连续介质模型，解决一般工程中的流体力学问题是完全可以满足要求的。但是当我们所研究的问题的特征尺寸接近或小于流体质点的特征尺寸时，连续介质的假说将不再适用。例如，在高空稀薄气体中飞行的火箭，由于空气稀薄相应的质点特征尺寸较大，以致于与火箭的特征尺寸具有相同的量级，在此情况下连续介质假说就不再适用。可是，如果我们研究的是具有很大尺寸的物体，则高空稀薄气体又可视作连续介质。可见流体的连续介质假说是一个具有相对意义的概念。

§1-4 流体的主要物理性质和力学模型

外因是变化的条件，内因是变化的依据，外因要通过内因起作用。因此要研究流体的机械运动规律，就必须首先对所研究的对象——流体的物理性质有所了解，下面介绍流体运动有关的几个主要物理性质。

一、惯性

惯性就是物体维持原有状态的性质，运动状态的任何改变都必须施力。表达惯性的物理量是物体质量，质量愈大，运动状态愈难改变，因而惯性也愈大。当物体受其它物体的作用力而改变运动状态时，此物体反抗原有运动状态的改变而作用于其它物体上的反作用力称为惯性力。设物体的质量为 M ，加速度为 a ，则惯性力 F 的数值为

$$F = -Ma \quad (1-1)$$

负号表示惯性力的方向与物体加速度的方向相反。

流体的质量常以密度来反映。对于均质流体，单位体积的质量称为密度，以 ρ 表示。

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-2)$$

式中 ρ —— 流体的密度, 千克/米³ (Kg/m³)
 M —— 体积为 V 流体质量, 千克 (Kg)
 V —— 流体的体积, 米³ (m³)

对于非均质流体, 根据连续介质假说, 则

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

在一般情况下液体的密度随压强和温度的变化而发生的变化甚微, 故液体的密度可以视为常数。例如水的密度, 实用上就以一个大气压下温度为 4℃ 时的最大密度值作为计算值, 其数值为 1000kg/m³。不同温度下的密度值见表 1—1。

二、重力特性——重量和容重

物体受地球引力的性质, 称为重力特性。这个引力就是重力, 用重量 G 来表示。设物体的质量为 M , 重力加速度为 g , 则重量为

$$G = Mg \quad (1-3)$$

G 的数值单位用牛顿 (N) 表示。

流体单位体积内所具有的重量称为容重, 用 γ 表示。它是重力特性的具体反映。对于均质流体, 设其体积为 V , 重量为 G , 则

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad N/m^3 \quad (1-4)$$

密度和容重虽然定义不同, 单位也不相同, 但它们之间有密切的联系, 将式 (1—3) 两端同除以流体的体积, 则

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

液体的容重也随压强和温度的变化而有所变化, 但在一般情况下, 可看作常数, 水的容重在工程上常采用的数值为 9800N/m³ 或 9.8KN/m³。不同温度下水的容重见表 1—1。

三、粘滞性

在运动状态下, 流体具有抵抗剪切变形的性质, 称为粘滞性。在剪切变形过程中, 流体质点间或流层间存在着相对运动, 使流体内部出现成对的剪力, 也称为内摩擦力。其作用是抗拒流体内部的相对运动, 从而影响着流体的运动状态。粘滞性是流体的固有属性之一, 由于它的存在, 流体在运动过程中因克服内摩擦力而做功, 必然消耗流体内部的机械能量, 所以粘滞性是流体能量损失的根源。

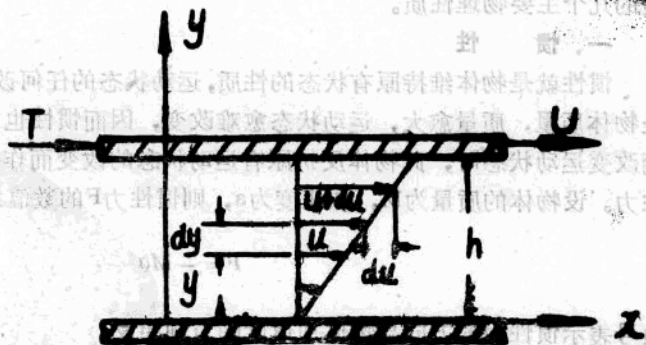


图 1—1

流体的粘滞性可以用实验来验证，图 1—1 为实验的示意图。

设有两块相距为 h 的平板，两板间充满流体。平板面积 A 足够大，以致可以忽略四周边界的影响。下板固定，上板在切向力 T 的作用下，以速度 U 作匀速直线运动。由于壁面和流体之间粘性的作用，紧靠壁面的流体粘附在壁面上，因而粘附在上层平板上的流体以速度 U 运动，下层平板壁面上的流体速度为零。

由实验发现，流动具有下列特点：

(1) 两板间的流体速度呈线性分布，即



$$u = \frac{U}{h}y \quad (1-6)$$

(2) 内摩擦力（或切力） T 的大小与平板面积或流层间相接触的面积 A 成正比，与比值 U/h 成正比，其数学表达式为

$$T \propto A \frac{U}{h}$$

或

$$T = \mu A \frac{U}{h} \quad (1-7)$$

其单位面积上的切应力为

$$\tau_{yx} = \mu \frac{U}{h} \quad (1-8)$$

第一个下标 y 表示作用面的法线方向，第二个下标 x 表示切应力的指向。

进一步实验证明，可以把这个结论推广到任意作层流直线运动中去，如管流中去。在管流中或其他流动中流速分布一般为曲线，是非线性分布，其相应的切应力为

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

这个公式通常称为牛顿（Newton）切应力（或内摩擦力）公式。一般情况下将下指标去掉，即 τ_{yx} 用 τ 表示。现对各项阐述如下：

(1) τ ——切应力，即单位面积上的内摩擦力，其单位为牛/米²（ N/m^2 ）简称帕（Pa）。切应力 τ 不仅有大小，还有方向。作用在两相邻流层之间的 τ 是成对出现的，数值相等，方向相反。运动较慢的流层作用于运动较快流层上的切应力，其方向与运动方向相反；运动较快的流层作用于运动较慢的流层的上切应力，其方向与运动方向相同。这里顺便指出，内摩擦力虽是流体抗拒相对运动的性质，但它不能从根本上制止流动的发生，因此，流体易于流动的特征，不因为有内摩擦力存在而消失。当然，在流体质点间没有相对运动（在静止或相对静止状态）时，也就没有内摩擦力表现出来。

(2) $\frac{du}{dy}$ ——流速梯度，表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率，单位为 1/秒。它实际上是表示流体微团的剪切变形速率。这可以阐明如下。

为了便于说明起见，在运动的流体中取一矩形微团 ABCD 如图 1—2 所示。经过 dt 时段后该流体微团运动至 $A'B'C'D'$ 。由于各流层流速不等，微团除平移运动外，还有剪切变形，即由矩形 ABCD 变成平行四边形 $A'B'C'D'$ 。AB 或 CD 都发生了角变量 $d\theta$ 。

$$d\theta = \frac{du}{dy} dt$$

因此单位时间的剪切变形为 $\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$ 由此可以得出一个有关流体的重要特性，即流体中的切应力与剪切变形的速率成比例。这一点与固体不同，固体的切应力是与剪切变形的大小成比例。

(3) μ —粘滞系数，它是一个比例系数，其单位为牛·秒/米² (N·S/m²) 即帕秒 (Pa·S)。粘滞系数 μ 是流体粘性大小的度量。 μ 值愈大，粘滞性作用愈强。同一流体的粘滞系数与流体的温度有很大关系，而与压力的关系不大一般可以忽略。气体与液体的粘滞系数随温度的变化规律是不一样的。气体的 μ 值随温度的升高而增大，而液体则随温度的升高而降低。

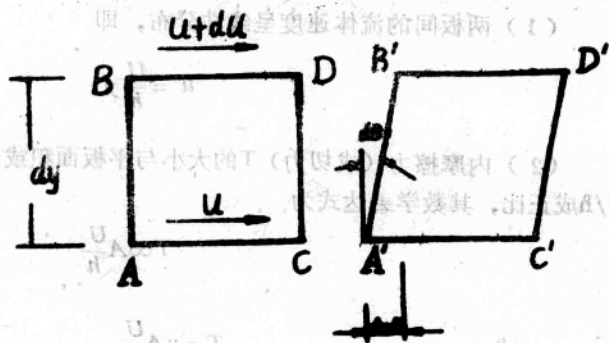


图 1—2

其原因可定性地简单解释如下：由于液体的分子间距较小，相互吸引力起主要作用，当温度升高时，间距增大，吸引力减小，因而使同样剪切变形速率所发生的切应力相应减小。气体的分子间距较大，吸引力影响很小，根据分子运动理论，分子的动量交换率因温度升高而加剧，因而使切应力也随之增大。

在流体力学中，粘滞系数 μ 经常与流体密度 ρ 结合在一起以 μ/ρ 的形式出现，用 ν 表示，

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-10)$$

ν 的单位是米²/秒 (m²/s) 或厘米²/秒 (cm²/s)，具有运动的量纲，所以称为运动粘滞系数，而 μ 含有力的量纲则称为动力粘滞系数。

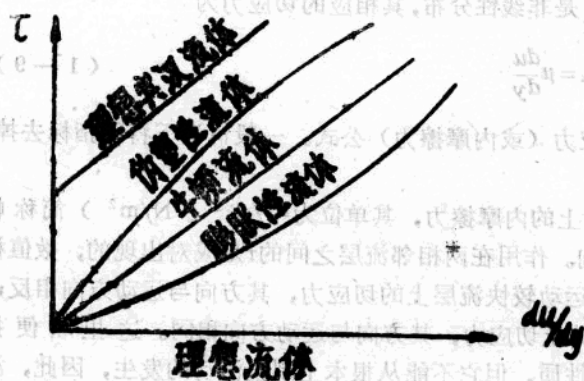


图 1—3

应当特别指出，牛顿切应力公式只适用于部份流体且作层状运动，即所谓层流运动。对于非层流运动的切应力规律将在以后讨论。

我们把符合牛顿切应力公式的流体称作牛顿流体。一般气体和分子结构简单的液体如水都是牛顿流体。不符合该式的流体称为非牛顿流体，如泥浆，血浆，聚合物溶液等等。牛顿流体和非牛顿流体之间以及非牛顿流体相互之间的差别可以用图 1—3 来表示。本书只限于讨论牛顿流体。关于非牛顿流体属于流变学讨论的范畴。

真实流体都具有粘性，但是为了便于分析研究流体的运动规律，而忽略粘性的影响，这种不考虑粘性作用的流体称理想流体，其力学模型称为理想流体力学模型。

四、压缩性

流体受到外界压力时，当压强增大体积缩小，密度增大的性质，称流体的压缩性。流体受热，体积膨胀，密度减小的性质称流体的热胀性。流体的压缩性实际上也可以称为弹性。弹性力就是流体受外力压缩变形时所产生的企图恢复原状的内力，其作用是抵抗压缩变形时所产生的内压力。

流体的压缩性，一般用压缩系数 β 来表示。其值为流体的相对压缩值 dV/V 与流体压强增量 dp 之比，即

$$\beta = -\frac{dv/v}{dp} \quad (1-11)$$

式中负号表示压强增大体积缩小，上式说明 β 值愈大愈易压缩。另外，根据质量为密度与体积的乘积，流体压强的增加伴随着密度的增加，所以 β 也可看作流体密度的相对增加值与流体压强增值 dp 之比。

$$\beta = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (1-12)$$

β 的单位为米²/牛 (m²/N)。

压缩系数的倒数称为弹性系数，即

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{dp}{dv/v} \quad (1-13)$$

其单位为牛/米² (N/m²)

流体的种类不同，其 β 和 K 值也就不同。同一种流体的 β 和 K 也随温度和压强而变化，不同温度下的 K 值见表1-1。从表中可看出，压强每升高一个大气压，水的体积仅缩小约二万分之一。在温度较低时(10°~20°C)，温度每增加1°C，水的体积增大约万分之一点五。即使水温较高(90~100°C)时，其体积也只增大万分之七。这说明水的压缩性和热胀性都是很小的，一般情况下均可忽略不计。只有在某些特殊情况，如水击、热水输送等问题时，才需考虑水的压缩性和热胀性。

气体虽然是可压缩和热胀的，但在一般速度不高(远小于音速)的气体流动，也可以把密度和容重视为常数，当做不可压缩的流体来处理。反之，当气体的速度较高(接近或超过音速)时，在流动过程中其压强和温度的变化很大，密度和容重已不能视为常数，这种流体称为可压缩流体。真实流体都是可压缩的，如果忽略流体的压缩性，把密度和容重视为常数，这样的流体称为不可压缩流体，其力学模型称为不可压缩流体力学模型。

五、表面张力

表面张力是液体的自由表面、两种液体的接触面、液体与固体相接触的表面，在分子作用半径的范围内，由于分子引力大于斥力，因而沿表面方向产生张力，这种张力就叫表面张力。

——气体不存在表面张力，因为气体分子的扩散作用，不存在自由表面。所以表面张力是液体

的特有性质，即使对液体来说表面张力的产生也是有条件的，表面张力并不发生在平面上，因为那里的力处于平衡状态，只有在曲面上表面张力才产生附加压力维持平衡。所以表面张力的作用是使液体表面拉紧收缩，从而对液体的运动状态产生影响。

表面张力的大小可用液体表面上单位长度所受的张力即表面张力系数 σ 来表示。其单位为牛/米(N/m)。 σ 的数值随液体的种类、温度和表面接触情况的变化而变化。由于表面张力系数 σ 值不大，如空气和水的交界面上，在20℃时 σ 值为0.0728N/m，空气和水银的接触面上，在20℃时 σ 值为0.514N/m，所以在一般情况下表面力张可以忽略不计。但当表面为曲面并且曲率半径很小，表面张力的合力所引起的液体附加压强达到相当大的数值时，就必须加以考虑。

六、汽化压强

液体分子逸出液面向空间扩散的过程称为汽化。液体汽化为蒸汽。汽化的逆过程称为凝结。蒸汽凝结为液体。在液体中，汽化和凝结可同时存在，当这两个过程达到动平衡时，宏观的汽化现象停止，此时液面压强称为饱和蒸汽压强，或汽化压强。汽化压强的产生是由于蒸汽分子运动的结果。液体的汽化压强随温度的升高而增大。

当流体某处的压强低于汽化压强时，在该处发生汽化，形成空化现象，对流体运动和流体与固体相接触的壁面均产生不良影响。

以上讨论了流体的六个物理性质，其中惯性、重力特性、粘滞性等是流体本身所固有的力学性质，它们在流体力学中占有重要的地位。其它三个特性只在某些特殊情况下才加以考虑，一般情况下均可忽略不计。

表 1—1 水的物理特性

温度 ℃	容重 γ (KN/m ³)	密度 ρ (Kg/m ³)	粘滞系数 μ (10 ⁻³ N·s/m ²)	运动粘滞系数 ν (10 ⁻⁶ m ² /s)	体积弹性系数 K (10 ⁹ N/m ²)	表面张力系数 σ (N/m)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	2.02	0.0756
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.0749
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.0742
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.0735
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.0728
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.0720
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.0712
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.0696
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.0679
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.0662
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.0644
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.0626
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.0608
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.0589

表 1-2

标准大气压下空气的物理特性

温 度 ℃	密 度 ρ Kg/m ³	容 重 γ N/m ³	粘 滞 系 数 $\mu \times 10^6$ N · S/m ²	运 动 粘 滞 系 数 $\nu \times 10^6$ m ² /s
-20	1.395	13.68	1.61	1.15
0	1.293	12.68	1.71	1.32
10	1.248	12.24	1.76	1.41
20	1.205	11.82	1.81	1.50
30	1.165	11.43	1.86	1.60
40	1.128	11.06	1.90	1.68
60	1.060	10.40	2.00	1.87
80	1.000	9.81	2.09	2.09
100	0.946	9.28	2.18	2.31
200	0.747	7.33	2.58	2.45

例 1-1 如果某种液体的粘滞系数为 $4.9 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ，运动粘滞系数为 $3.49 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。其容重为多少？

解： 由 $\mu = \frac{\mu}{\rho}$;

$$\therefore \rho = \frac{\mu}{\nu} = \frac{4.9 \times 10^{-3}}{3.49 \times 10^{-6}} = 1404 \text{kg/m}^3$$

$$\gamma = \rho g = 1404 \times 9.80 = 13759 \text{N/m}^3$$

例 1-2 一个圆柱体的直径为 0.30m ，而另一个固定的圆柱体的直径为 0.31m ，两者的长度均为 0.30m 。一个圆筒的转速为 $60 \text{r} \cdot \text{p} \cdot \text{m}$ 其所需的转矩为 $0.98 \text{N} \cdot \text{m}$ ，求液体的粘滞系数。

解： 内圆柱的转动速度为

$$V = r\omega = r \frac{2\pi n}{60} = \frac{0.15 \times 2\pi \times 60}{60} = 0.943 \text{m/s}$$

由于圆柱之间的距离很小，其速度分布可以认为是线性的，于是

$$\frac{du}{dy} = \frac{V}{y} = \frac{0.943}{0.005} = 188.6 \text{s}^{-1}$$

$$\text{阻力矩} = \tau \times (2\pi \times 0.15 \times 0.30) \times 0.15$$

$$\therefore \tau = \frac{0.98}{(2\pi \times 0.15 \times 0.3) \times 0.15} = 23.11 \text{N/m}^2$$

因为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

于是

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} = 0.123 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

例1-3 从一个高为h的很窄的裂缝中，置一个大而薄的平板并使之以速度V运动，平板的一边充满粘滞系数为 μ_1 的液体，而另一边充满粘滞系数为 μ_2 的液体，如图1-4所示。在下面不同的条件下确定平板的位置。1. 平板两边的切应力是相等的；

2. 加在平板上的拉力最小。

解：1. 设平板上，下面的切应力分别为 τ_1 和 τ_2 则

$$\tau_1 = \mu_1 \frac{du}{dy} = \mu_1 \frac{V}{h-y}$$

$$\tau_2 = \mu_2 \frac{du}{dy} = \mu_2 \frac{V}{y}$$

由 $\tau_1 = \tau_2$ 得

$$\mu_1 \frac{V}{h-y} = \mu_2 \frac{V}{y}$$

$$\therefore y = \frac{\mu_2 h}{\mu_1 + \mu_2}$$

2. 设每单位面积上加于平板上的拉力为F，则

$$F = \mu_1 \frac{V}{h-y} + \mu_2 \frac{V}{y}$$

当F为最小时，则有 $dF/dy = 0$

$$\text{而 } \frac{dF}{dy} = \frac{\mu_1 V}{(h-y)^2} - \frac{\mu_2 V}{y^2} = 0$$

$$\therefore y = \frac{h}{1 + \sqrt{\mu_1/\mu_2}}$$

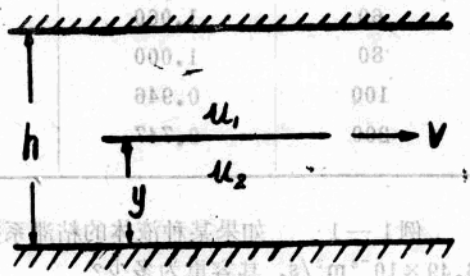


图1-4

§1-5 流体的热力特性

研究流体运动时，常常涉及流体的热量传输问题，为此需要了解流体的一般热力特性。

一、比热

单位质量的物质吸收的热量与温度变化的比值，称为比热或单位热容量，用C表示，于是

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\Delta T} \quad (1-14)$$

C的数值与过程有关，最重要的是等容过程和等压过程，与之相应的等容比热 C_V 及等压比热 C_P ，它们分别表示体积和压强不变时单位质量的流体温度每升高一度所吸收的热量，

$$C_v = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\delta Q}{\Delta T} \right)_v \quad (1-15)$$

$$C_p = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\delta Q}{\Delta T} \right)_p \quad (1-16)$$

当体积不变时，对外界所作的功为零，根据热力学第一定律，即

$$\delta Q = \Delta E \quad (\text{单位质量物质内能的增量})$$

于是

$$C_v = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta e}{\Delta T} \right)_v = \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_v \quad (1-17)$$

当压强不变时， $\delta Q = \Delta e + P \Delta V$ ，代入 (1-16) 式得

$$C_p = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta e + p \Delta V}{\Delta T} \right)_p = \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_p + p \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (1-18)$$

二、内能

内能就是组成系统的大量分子所具有的总能量。气体的内能就是气体分子所具有的能量。它包括动能（分子的移动能、转动能和振动能）和位能（由分子间的相互作用力形成）。动能主要是气体温度的函数而位能主要是气体比容（单位质量的物质所具有体积，称比容，用 v 表示）的函数。内能用 E 表示，单位为焦耳 (J)。单位质量的内能称为比内能，用 e 表示，单位焦耳/千克 (J/kg)。在实际应用中，我们关心的不是内能的绝对量，而是它的变化。一般情况下内能是温度 T 和比容 v 的函数，对于理想气体来说，内能仅是温度的函数，可根据下式确定。

$$de = C_v dT \quad (1-19)$$

三、焓

焓是一个组合状态参数，其定义为

$$i = e + p/\rho = e + pv \quad (1-20)$$

式中 i —— 焓 J/kg

e —— 比内能 J/kg

p —— 绝对压强 N/m² (Pa)

v —— 比容 m³/kg

焓可以理解为内能 e 与压力位能（或称推动功） pv 之和。

对于理想气体来说，焓仅是温度的函数，可由下式计算

$$di = C_p dT \quad (1-21)$$

四、熵

熵是一个由热量和温度导出的状态函数，其关系为

$$S = \int \frac{\delta Q}{T} \quad (1-22)$$

式中 S —— 熵 J/kg·K。

(在实际应用中, 我们关心的主要不是熵的绝对值, 而是熵的变化 (ds 或 Δs)。故对上式微分可得

$$(81-1) \quad ds = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{或} \quad Tds = \delta Q$$

或

$$Tds = \delta Q$$

利用熵函数热力学第二定律可用数学式表示为

$$ds \geq \frac{\delta Q}{T}$$

即可以找这样一个状态函数熵, 它在可逆过程中的变化等于系统所吸收的热量与热源绝对温度之比, 在不可逆过程中, 这个比值小于熵的变化。从热力学第二定律还可推出熵增加原理: 一个孤立系统的熵永不减少, 即 $ds \geq 0$

§1-6 气体状态方程

气体的 P, u, T 之间的关系式称为状态方程式, 其一般表达式为

$$f(P, v, T) = 0 \quad (1-23)$$

亦可表示为

$$P = f_1(T, v)$$

$$T = f_2(P, v)$$

$$u = f_3(P, T)$$

不同的物质具有不同的状态方程式。理想气体的状态方程式则有最简单的形式。

所谓理想气体是这样一种假想的气体: 其分子本身不具有体积, 分子间无作用力。在工程上, 当气体比容大到足以使气体分子的体积和分子间相互作用力可以忽略不计时, 均可当作理想气体来处理。这在实际中是很普遍的, 如在常温常压下的氧、氮、氢、二氧化碳, 空气等等。所以, 理想气体的概念无论在理论上还是在实际上都是有意义的。根据气体实验定律可得出理想气体的状态方程为

$$\frac{PV}{T} = \text{常量} \quad (1-25)$$

上式是理想气体状态方程的一种形式, 式中常量的大小决定于气体质量的多少。在标准状态下, 即 $p = p_0 = 1$ [大气压], $T_0 = 273.15\text{k}$ 时, 一克分子任何气体的容积是 $V_0 = 22.4\text{l}$, 因此 (1-25) 可写作

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}$$

很明显, 在理想气体的条件下, $p_0 V_0 / T_0$ 是一个对任何气体都适合的恒量, 与气体的性质无关, 所以称为普适气体恒量, 一般以 R 表示。因此,

$$\frac{pV}{T} = R \quad (1-26)$$

$$pV = RT$$

或

上式为一克分子的理想气体的状态方程。

对于质量为M，克分子量为μ的气体，用简单比例计算，得状态方程为

$$pV = \frac{M}{\mu} RT \quad (1-27)$$

上式就是通用的气体状态方程，称为克拉珀龙 (Clapeyron) 方程。

现在来确定气体恒量R的单位和数值。由于 $R = p_0 V_0 / T_0 = 101300 \times 22.4 \times 10^{-3} / 273.15 = 8.31$ 焦耳/克分子·开尔文 [J/mol·k] (1-28)

气体状态方程具有两种含义，第一，它说明在任一状态时，气体的p、V、T、M四个量之间的关系，假如知道其中任何三个量就可以求出第四个量；它说明一定量的气体，在状态变化过程中任何两状态的参量之间的关系。

对于单位质量的理想气体，其状态方程为

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R}{\mu} T = R_0 T \quad (1-29)$$

或

$$p = \rho R_0 T$$

式中

$$R_0 = \frac{R}{\mu}$$

例1-4 内容积为35l的贮气瓶，试求在温度为15℃时，充氧气到 $196 \times 10^5 \text{N/m}^2$ (表压力) 时，氧气的重量是多少？该氧气瓶经过使用后，在温度为30℃时测其压力为 $147 \times 10^5 \text{N/m}^2$ ，试问使用了多少标准立方米氧？

解：氧气作为理想气体，按 (1-27) 式计算

$$P = 196 \times 10^5 + 1.01 \times 10^5 = 197 \times 10^5 \text{N/m}^2$$

$$V = 35\text{l} = 35 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

$$T = 273 + 15^\circ\text{C} = 288\text{k}$$

$$R_0 = \frac{R}{\mu} = 8.31 \times 10^3 / 32 = 0.26 \times 10^3 \text{J/kg}\cdot\text{k}$$

$$M = PV / R_0 T = \frac{197 \times 10^5 \times 35 \times 10^{-3}}{0.26 \times 10^3 \times 288} = 9.21 \text{kg}$$

$$= 9.21 \text{kg}$$

$$G = Mg = 9.21 \times 9.8 = 90.26 \text{N}$$

使用之后瓶内氧气重量，按上式相同求法：