

流体力学基础

李翼祺 马素贞 编

●● 科学出版社

流体力学基础

李翼祺 马素贞 编

科学出版社

1983

内 容 简 介

本书是一本介绍流体力学的科技参考读物。全书共有五章：一、流体的物理性质；二、流体静力学；三、流体动力学；四、空气动力学；五、冲击波概说。

本书由浅入深、较系统地阐述了流体力学的基本知识，为照顾到不同程度读者的需要，书中尽量避免繁冗的数学推导。同时还介绍了流体力学在工业、农业、水利、航海、航空及核爆炸等方面的应用。

本书可供具有中学或大学低年级文化程度的学生、工程技术人员以及隔行科技工作者参考。

流 体 力 学 基 础

李翼祺 马素贞 编

责任编辑 徐一帆

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

长春新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 10月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1983年10月第一次印刷 印张：7 1/2

印数：0001—15,000 字数：163,000

统一书号：13031·2400

本社书号：3278·13-2

定价：0.95 元

前 言

随着科学技术的迅速发展，流体力学已被广泛地应用于工业、农业、航海、航空、航天及军事技术等各个方面。为了适应科学技术高速发展的需要，使更多的工人、技术人员及非流体力学专业的大专院校学生了解和掌握流体力学的基本原理及其应用，我们编写了这本书，以供具有中学或大学一、二年级文化程度的读者阅读，参考。

为使读者能较顺利地阅读本书，编写时我们尽量避免烦琐、高深的数学推导，并力求做到图文并茂，深入浅出。考虑到我国中学教学质量和中等科技人员的理论水平都在不断提高。所以，本书对某些必要的数学推导仍予以保留。但尽量用初等数学来表述，个别地方也用到高等数学中的微积分的概念。估计具有上述文化程度的读者可以看懂并掌握它。

本书首先介绍了流体的物理性质，然后由浅入深地较为系统地介绍了流体静力学，流体运动和流体动力学，空气动力学。最后也对冲击波作了扼要的介绍，使读者不仅了解流体力学的基本原理，同时对航空、核爆炸等尖端技术也有个初步的了解。

本书在编写过程中，得到范正翘等同志的热情帮助，蔡敏学、叶宏开等同志对本书稿做了仔细审阅，并提出许多宝贵意见，张理明同志为本书描绘了全部插图，在此一并表示衷心的感谢。

AGG 65/12

限于编者水平，本书难免有缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 流体的物理性质	1
§ 1-1 什么叫物质三态	1
§ 1-2 流体的重度、密度、比容和比重	2
§ 1-3 流体与运动	4
§ 1-4 流体的压强	7
一、液体因重力而产生的压强	8
二、因外力作用于液体而产生的压强	10
三、气体的压强	10
四、容器中液体对器底的总压力与液体的重量	11
§ 1-5 可压缩流体及不可压缩流体	14
§ 1-6 流体的粘性	16
§ 1-7 理想流体	20
§ 1-8 流体的扩散现象	22
§ 1-9 流体的压缩性和膨胀性	23
第二章 流体静力学	26
§ 2-1 作用于静止流体上的力	26
一、表面力	26
二、质量力（或称体积力）	27
§ 2-2 流体的静压力及其特性	27
一、流体静压力的描述	28
二、流体静压力的特性	28
§ 2-3 静止流体的平衡方程式	32
一、静止流体的基本方程式	32
二、几个名词的解释	33
三、流体静力学基本方程的图解	34
四、旋转容器中流体的状态	36

五、等加速直线运动液体的平衡	37
六、连通器及其应用	38
七、帕斯卡原理及其应用	41
§ 2-4 流体的表面张力, 毛细现象	45
一、表面张力	45
二、毛细现象	48
§ 2-5 液体的浮力——阿基米德定律	51
一、浮力的产生	52
二、阿基米德定律	53
§ 2-6 物体在液体中的平衡与稳定	55
一、物体在液体中的几种平衡状态	55
二、潜体的平衡与稳定	56
三、浮体的平衡与稳定	58
§ 2-7 理想气体的状态方程	61
一、等温过程	61
二、等压过程	62
三、等容过程	63
四、理想气体的状态方程	65
§ 2-8 标准大气	66
第三章 流体运动和流体动力学	70
§ 3-1 流体运动的基本概念	70
一、定常流和非定常流	71
二、流线与时线	73
三、流线与迹线的意义及其关系	76
四、流管、流束、过流(水)断面和流量	78
五、流网	80
§ 3-2 不可压缩理想流体的伯努利方程	81
一、伯努利方程式的推导	81
二、伯努利方程式的意义	83
§ 3-3 伯努利能量方程式的应用	87
一、文丘利管及皮托管	87
二、重力作用下容器的小孔出流	91
三、密封容器内部有超压的出流	94
四、射流真空泵的工作原理——流动流体的吸力	94

§ 3-4 驻压强和总压强	96
§ 3-5 流体流动的动量定理及其应用	98
一、动量定理	98
二、动量定理的一些性质	100
三、动量矩定理	101
四、动量定理的应用	102
§ 3-6 非理想流体的能量方程式	108
一、关于流体摩阻的基本定律	109
二、水力阻力和水头损失	109
§ 3-7 层流和紊（湍）流及雷诺数	112
一、层流和紊（湍）流	113
二、雷诺数	119
§ 3-8 层流的水头损失	122
一、圆管中的层流运动	123
二、两平行平面间的层流运动	125
三、管路计算	127
§ 3-9 水击现象——水锤作用	133
一、有压管路中阀门突然关闭或开启时的水击现象	133
二、水击现象中弹性波传播速度 c 的推导	143
三、有压管路中阀门逐渐关闭时的水击	145
四、减少水击危害的一些措施	147

第四章 空气动力学

德文李德

§ 4-1 概述	150
一、什么叫空气动力学	150
二、空气动力学的发展	151
三、研究空气动力学的任务	153
§ 4-2 气体动力学的一些基本方程	154
一、质量守恒方程	154
二、动量守恒方程	155
三、能量守恒方程	156
四、状态变化方程	157
§ 4-3 飞机的升力和阻力	158
一、飞机飞行时的阻力	158
二、飞机的升力（也叫举力）	172

§ 4-4 亚音速流、跨音速流及超音速流	180
一、音速的传播	180
二、冯·卡门关于超音速流空气动力学的三个法则	184
三、亚音速流、跨音速流及超音速流	186
§ 4-5 空气动力加热	200

第五章 冲击波概说

§ 5-1 空气中的波和波的传播	204
一、什么叫波？波又是怎样产生的？	204
二、波的传播速度	206
§ 5-2 冲击波的产生与特性	209
§ 5-3 核爆炸引起的冲击波	211
§ 5-4 核爆炸时冲击波参数的确定	215
一、冲击波阵面上各个参数之间的关系	215
二、自由大气中核爆炸冲击波各个参数的确定	220
三、核爆炸地面冲击波参数的确定	222
§ 5-5 冲击波对地面物体的环流、滞止压力与动压的 概念与计算	226
一、冲击波对地面物体的环流	226
二、环流压力的确定、滞止压力与动压的概念	227
三、核爆炸地面冲击波最大动压的确定	229

参考文献	231
------------	-----

第一章 流体的物理性质

§ 1-1 什么叫物质三态

自然界的物质一般以三种形态存在于宇宙间，即气态、液态和固态，通常称为气体、液体和固体。

固体有一定的形状和体积，若要改变固体的形状，必须对固体施加适当的外力，固体才会有一微小的变形。若要改变固体的体积，在一般情况下是不可能的。而液体没有固定的形状，它随着容器形状的不同而不同，液体在方容器中是方的，在圆容器中是圆的。在一般情况下，液体的体积是不变的。气体的形状和体积可以随着容器的形状和大小的不同而变化。例如 1 立方米的空气，它可以充满于 2 立方米（甚至更大）的容器中。反之，5 立方米的气体也可以将它压缩到 1 立方米（或更小）的体积中。又如 75 立方米的氧气可以把它压缩到仅有 0.5 立方米体积的氧气瓶中，到需要使用时，可以把它慢慢的释放出来，还原到原有的体积。气体的这种性质，我们称之为可压缩性。

事物总是在不断地运动着、发展着的，物质的三态也不是固定不变的。在一定的条件下也能互相转化，例如在标准大气压下的水，常温时是液体，温度低于 0°C 变成固体（冰），高于 100°C 时变成气体（水蒸汽）。又如在标准大气压下，氧气低于 -182.8°C 时变为液氧，氮气低于 -195°C 时变为液氮，人们认识和掌握不同形态的物体，在特定条件下能互相

转换形态的物理性能后，就可以利用这种特性来为人类服务。如在机械工程上，常将固态的金属加高温后，使其熔化成液态金属而浇铸成型。

上述物质三态中的气体和液体，我们通称为流体。

随着科学技术的新发展，科学家们已趋向于把物质分成五态，即气态、液态、固态、等离子态和超固态，特别是随着近代物理的进展，后面两种物态，在理论研究和应用方面都有新的进展。

§ 1-2 流体的重度、密度、

比容和比重

同固体一样，流体具有体积、重量和密度。流体的体积常称为容积，以 V 表示之，单位常用〔立方米〕。重量是地球对流体的吸引力——重力的量值，以 G 表示之，单位常用〔千克〕，质量是物质多少的量度，以 m 表示之，重量和质量的

关系为 $G = mg$ ，式中 g 为重力加速度，一般 $g = 9.8 \text{ 米/秒}^2 (\text{m/s}^2)$ ，由上式可得质量的单位为〔千克·秒²/米〕($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$)。

由于流体的特殊性，特别是气体很容易压缩或膨胀，即一定重量的气体的体积会随温度、压力等外界条件而变。因此，当我们说某气体的体积有多少〔米³〕，必须指出当时的外界条件，这样就比较烦琐，为此，在工程上规定了一个标准，通常我们规定标准温度为 0°C 、标准压力为760毫米水银柱（即一个大气压）时的〔米³〕为标准体积，作为气体体积的计量单位，并以〔Nm³〕表示之。

流体的体积或重量不能完全反映出流体的物理性质，只有用重度、密度和比容才能反映出流体的性质。如当油水混合时，不管油的总重量比水大还是小，油总是浮在上面。又如水和水银合在一起，总是水浮在上面。这里就体现了油、水、水银三种液体的物理性质。即说明若两种不能混合的液体放在同一容器中，单位体积重量小的液体必定浮在容器的上面，由此就产生了重度、密度的概念，并分别定义如下：

流体单位体积的重量，称为流体的重度，以 γ 表示，其单位是 $\text{千克}/\text{米}^3$ 。即 $\gamma = G/V$ 。

流体单位重量的体积，称为流体的比容，以 v 表示，其单位是 $\text{米}^3/\text{千克}$ 。 $v = V/G$ 。

流体单位体积的质量，称为流体的密度，以 ρ 表示，其单位是 $\text{千克} \cdot \text{秒}^2/\text{米}^4$ 。即 $\rho = m/V$ 。

它们之间的关系是

$$\gamma = 1/v \quad \text{或} \quad v = 1/\gamma$$

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \gamma/g$$

不同流体有不同的重度和密度，表 1-1 列出了标准状态 (0°C , 760 毫米水银柱) 时一些流体的 γ 值。

液体的重度随着温度、压力的不同而变化，当压力不变时，不同温度下的各种液体重度可由下式求得：

$$\gamma_t = \frac{\gamma_{t_1}}{1 + \alpha(t - t_1)}$$

式中 α ——液体的体积膨胀系数；

γ_{t_1} ——温度为 $t_1^\circ\text{C}$ 时液体的重度 (查表 1-1)。

当温度不变时，不同压力下液体重度可由下式求得

$$\gamma_p = \frac{\gamma_{p_1}}{1 - \beta(p - p_1)}$$

式中 β ——液体的体积压缩系数；

γ_{p_1} ——压力为 p_1 时的液体重度。

习惯上，当压力变化小于 50 大气压时，可不计液体的重度变化。

液体的比重 S 定义为：某一液体的重度(或密度)相对于水的重度之比。因为液体的重度或密度，都随着温度而变，所以在计算比重时应说明温度是多少。一般把水在 4°C 时的重度作为标准状态。由于比重是两个重度或两个密度之比，所以比重是无量纲的。

表1-1 0°C ，760 毫米水银柱时部分流体重度 γ (千克/米³)

空气	1.2916	乙烯	1.2063
氮	1.2495	水	999.87
氧	1.4279	水银	13595.50
氢	1.7826	甲醇	806.70
氟	0.8703	乙醇	806.30
氯	0.1345	甘油	1273.40
氩	0.08982	重油	948.00
二氧化碳	1.9757	轻油	900.00
一氧化碳	1.2495	燃料油	964.00
苯	0.7167	甲苯	885.50
乙烷	1.3553	丙酮	812.50
乙炔	1.1740	乙醚	726.30
氯乙烷	0.7705	四氯化碳	1632.60
氯	3.2115	一硫化碳	1292.70

由于 4°C 时水的重度 $\gamma = 1000 \text{ 千克/米}^3 = 1 \text{ 克/厘米}^3$ ，所以在相同条件下，许多流体的比重和重度的绝对值是相同的。

§ 1-3 流体与运动

流体和其他物质一样，处于永不停息的运动之中。氧气

瓶中的氧，储油桶里的油，粗看起来好像是静止不动的，这仅仅是相对而论，其实它一方面随地球旋转作整体运动，另一方面流体内部微粒也在剧烈运动，为了深刻认识流体的性质和流体的运动，有必要简单介绍一下流体内部的构造及其内部运动形式。

流体同其他物质一样是由彼此间有一定距离的微粒——分子所组成的，而分子则由更小的微粒——原子所组成，有的流体（如氮、氟、氙）的分子是由一个原子组成的，叫单原子分子；有的流体（如氢、氧）的分子是由两个原子组成的，叫双原子分子；两个以上的原子组成的分子，叫做多原子分子，例如水，油等等。

分子是很小的，如果把一般的气体分子看成小球，其直径只有几个埃（1埃= 10^{-8} 厘米）那么大，若把它们放大几亿倍后也只有乒乓球那么大。分子虽然很小，但数量却很巨大。例如在通常情况下，一立方厘米的空气中含有 2.68×10^{19} 个分子，一立方厘米的水中含有 3.35×10^{22} 个分子。

气体容易被压缩，是因为气体分子之间有较大的空隙，其间隙 $\delta = (3 - 4) \times 10^{-7}$ 厘米。液体一般讲不能压缩，但液体的分子之间也有间隙，其间隙 $\delta = (3 - 4) \times 10^{-8}$ 厘米。如把50厘米³的水与50厘米³的酒精混在一起，混合后的体积小于100厘米³。这就是因为水分子和酒精分子之间有间隙，混合后互相填补间隙，体积就要小一些。工程上常利用，物质的分子间隙的性质，如在制氧工程中，利用铝硅酸盐的分子间隙，做成“分子筛”，让空气的分子通过“分子筛”，以达到清除空气中的二氧化碳或乙炔等污染物质的目的。

由实验知道，分子在不停地作极不规则的运动，它的速度大小和方向，随时间而变，分子的这种无规则的运动，叫

布朗运动。

上面我们把流体（气体和液体）看成是由分子所组成的，由于分子力的作用，这些分子总是不断作杂乱而又无规则的运动。因此，如果要从研究一个分子的运动出发，进而掌握整个流体平衡与运动的规律，那是很困难的。因为每一个分子的运动是很复杂的，而且即使在一个很小的体积内所包含的分子数目也相当多，要列出这些分子的运动方程几乎是不可能的（即使是使用现代化电子计算机也无济于事）。因此我们必须寻找一条既符合实际，而又方便的道路来，下面我们引出关于流体作为连续介质的概念。

在流体力学的研究中，我们将流体加以理想化，我们假想流体不是由大量分子所组成，而把流体假想成为是一种“无间隙的充满了它们所占据的空间的连续介质。而且这种连续介质仍然具有流体的一切基本力学性质”。我们将流体当作是一种连续介质，这是否可能呢？我们知道，虽然流体是由大量的分子所组成，而分子又在作不规则的布朗运动，似乎很难得出一个运动规律来，但这是从微观的角度来讲，其实在工程上所研究的流体总是具有一定的体积。更重要的在于，从工程实用观点来看，主要是要研究流体的宏观运动规律。（关于流体的微观分子运动，则不属于本书所讨论的范围之内）。例如，在桌子上放一杯水，如果从分子运动的观点来看，水中分子始终在不断运动，因此这杯水不是静止的，如果从宏观的角度来看，把流体看成为连续介质，它并没有运动，因此这杯水是静止的。（这个简化对我们研究工程流体力学来说，带来了极大的方便）。很显然，从工程实用观点，后者才是我们所要研究的。由此可见，我们在研究宏观机械运动的时候，完全有可能把流体当作连续介质

来处理。

把流体当作连续介质以后，不但使我们撇开了流体内部复杂的分子运动，而仅考虑流体在外力作用之下宏观的机械运动，便于我们抓住客观事物的本质。同时可以把流体中的速度、压力等运动要素看成是连续分布的，可以应用连续函数来描述，因此在研究流体力学时，可以利用根据连续函数得出的一系列数学成果，来解决流体力学中的各类问题。

综上所述，将流体看成是一种连续介质，不仅是必要的，而且是完全可能的，同时在研究中将具有极大的优越性。因此在今后我们不再从分子的角度出发，而把流体看成是一种连续介质来研究流体的性质。

§ 1-4 流体的压强

在学物理学的力学部分时，曾经讨论到物体受到外力作用后，要产生加速度。在阐明力和加速度之间的关系时，我们利用了牛顿定律。只考虑物体所受外力的大小和方向，并认为力的作用都集中在一点上，而不考虑受力面积的大小，这是因为物体受力面积的大小，对于它的运动变化没有关系。

但是在另一种情况下，如把机器安装在机座上，机器对机座有一个向下的压力，这就要考虑机座的大小了。如果机座做得太小，就有可能被压坏。人挑担也感到有压力，如果扁担做得宽一些，则在人的肩上就感到舒服一些，所以压力作用在物体上的效果，与受力面积大小有关，这就引出了压强的概念。

所谓流体的压强就是作用在流体单位面积上的压力强度，可以用下式表示之：

$$p = F/A$$

式中 p 是压强 (通常称压力), F 是总压力, A 是总压力的作用面积。因此压强也可以认为是单位面积上所受的力 p 。压强的常用单位是: 千克/平方厘米 (kg/cm^2)。

根据流体的特性, 流体在容器中是和容器的器壁密切接触的, 因此流体与器壁相互作用, 必然是分布在整个接触面上, 而不是集中在某一点, 因此我们研究流体的传力作用时, 必须弄清力在作用面上的分布情况, 也就是要弄清压强的大小。

一、液体因重力而产生的压强

如果液体的表面是自由的, 也就是液体表面仅受到大气的压力, 当容器里盛着液体的时候, 容器底部必然受到因液体重力而引起的压力, 因而容器底面上受到一定的压强。很容易看出, 同一容器, 液面越高, 底面所受到的压强也越大。

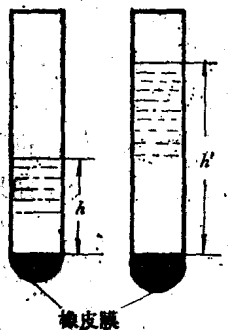


图1-1 液体对容器底的压强

从图 1-1 中我们可以计算出压强的大小, 如容器底部的截面积为 A , 液面高为 h , 液体的重量为 γ , 那末容器中的液体重量为 $\gamma h A$ 。 $\gamma h A$ 重的液体作用于容器底部, 则容器底部所受的压强 $p = \gamma h A / A$, 得 $p = \gamma h$, 从上式中可知如果液面高度由 h 增大到 h' , 那末压强也必然由 $p = \gamma h$ 增大到 $p' = \gamma h'$, 图 1-1 中由于 $h' > h$, 所以压强 $p' > p$ 。

液体不但对容器底部有压强作用, 而且对容器的侧壁也