

工程流体力学

GONGCHENG LIUTI LIXUE



张英 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高 等 院 校 试 用 教 材

工程流体力学

GONGCHENG LIUTI LIXUE

张英 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是为高等院校土木工程、交通工程等专业的流体力学（水力学）课程编写的教材，适用于 50 学时。本书主要内容包括：绪论，流体静力学，流体动力学基础，相似原理和量纲分析，流动阻力和水头损失，有压管道流动及孔口与管嘴出流，明渠均匀流，明渠非均匀流，渗流等。

本书可作为高等院校土木工程、交通工程等专业本科生使用的教材，也可以供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学/张英主编. —北京：中国水利水电出版社，2002

ISBN 7-5084-1498-5

I. 工… II. 张… III. 工程力学：流体力学-高等学校-教材
IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 077519 号

书 名	工程流体力学
作 者	张英 主编
出版 发行	中国水利水电出版社（北京市三里河路 6 号 100044） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话：(010) 63202266（总机）、68331835（营销中心）
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 10.5 印张 249 千字
版 次	2002 年 12 月第 1 版 2004 年 6 月第 2 次印刷
印 数	2401—5400 册
定 价	18.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书是根据全国高等院校工科水力学、流体力学教学指导委员会审定的水力学课程教学基本要求，以及全国注册结构工程师流体力学考试大纲的要求编写的，适合于土木工程、交通工程等专业的本科生、大专生作为流体力学（水力学）课程的教材。

本书的编写注重由浅入深、由易到难，在介绍工程流体力学的基本概念、基本方程时特别注重了突出物理概念，力求符合工科院校学生的认知规律，以便于教学或学生自学。编写中还避免了一些复杂的推导过程，力求缓解课内学时不足的矛盾。全书注重理论联系实际，以培养学生分析问题解决问题的能力。

本书的第一、二章由中南大学土建学院王英编写；三、五、七章由北京工业大学张英编写；第四、六章由南京工业大学邓风编写；第八章由北京工业大学张英、李长平共同编写；第九章由北京工业大学白玉华、长春工程学院龙北生共同编写；全书由张英担任主编。本书由北京工业大学李根芳担任主审。

本书的编写得到了北京工业大学建筑工程学院的领导和市政工程学科部的大力支持，在此谨致谢意。

由于编者学识有限，时间仓促，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

前 言	
第 1 章 绪论	1
1.1 工程流体力学的任务和研究方法	1
1.2 流体的连续介质模型	1
1.3 流体的主要物理性质	2
1.4 作用在流体上的力	8
习题	9
第 2 章 流体静力学	11
2.1 静水压强及其特性	11
2.2 流体的平衡微分方程及其积分	13
2.3 流体静力学基本方程	15
2.4 流体静力学基本方程讨论	16
2.5 作用在平面壁上的静水总压力	23
2.6 作用在曲面壁上的静水总压力	27
习题	30
第 3 章 流体动力学基础	33
3.1 描述流体运动的方法	33
3.2 欧拉法的基本概念	34
3.3 连续性方程	37
3.4 恒定总流能量方程	39
3.5 恒定总流动量方程	47
习题	50
第 4 章 相似原理和量纲分析	54
4.1 力学相似原理	54
4.2 相似准则	56
4.3 模型律	58
4.4 量纲分析法	60
习题	66
第 5 章 流动阻力和水头损失	67
5.1 水头损失及其叠加	67
5.2 粘性流体的两种流态	69
5.3 圆管中的均匀流动	71

5.4 紊流运动	74
5.5 紊流的沿程水头损失	78
5.6 局部水头损失	84
习题	89
第6章 有压管道流动及孔口与管嘴出流	92
6.1 简单短管的水力计算	92
6.2 长管的水力计算	96
6.3 孔口和管嘴出流	98
习题	101
第7章 明渠均匀流	104
7.1 概述	104
7.2 明渠均匀流的水力特征和基本公式	108
7.3 明渠水力最优断面	109
7.4 明渠均匀流的水力计算	111
7.5 复式断面明渠均匀流的水力计算	114
7.6 无压圆管均匀流的水力计算	116
习题	120
第8章 明渠非均匀流	122
8.1 明渠均匀流的产生和水力现象	122
8.2 临界水深及临界底坡	122
8.3 明渠非均匀渐变流的基本微分方程式	132
8.4 明渠恒定急变流	134
8.5 明渠非均匀渐变流水面曲线分析	138
8.6 水面曲线计算(分段求和法)	142
习题	145
第9章 渗流	147
9.1 概述	147
9.2 渗流的基本概念	148
9.3 渗流的基本定律	150
9.4 地下水向取水构筑物的稳定渗流	153
习题	157
参考文献	159

1.1 工程流体力学的任务和研究方法

流体力学是力学的一个分支,其任务是:从力学的观点出发,研究流体的平衡和机械运动规律。随着人类社会的发展,流体力学越来越广泛地渗透到了人们生产和生活的各个方面,各行各业中与流体力学有关的问题也越来越多。特别是在工程技术领域,土木、交通、建筑、水利、机械、动力、环保、化工等领域中,涉及大量的流体力学问题。如建筑工程中风对高层建筑的荷载和风振问题;建筑物基础施工时的基坑排水、基坑抗渗处理等;桥梁工程中渡桥的设计、各种水工建筑物的设计、道路边沟排水等;建筑工程中建筑内部的给水排水、供热、通风、空调的设计和选用等,都离不开流体力学。工程流体力学的任务是:研究工程技术领域中的流体力学问题,从理论上揭示流体的平衡和运动规律,并且提出解决工程实际问题的方法和理论依据。工程流体力学是土木工程中各个领域共同的专业技术基础。

纵观流体力学的历史发展过程,流体力学的最初起源只是一些实践和经验的总结,借助于经典力学和数学才得以进一步的发展。流体力学研究流体运动不仅使用实验方法,也使用理论分析方法。所谓理论分析,指借助于数学分析方法,运用经典力学的基本原理,如牛顿力学中的质量守恒定律、动能定理、动量定理等来建立流体运动的基本方程。而另一方面,由于实际流体运动的复杂性,使得某些实际的流体力学问题仅仅依靠纯理论分析方法不能得到满意的解答。实际研究液流运动时,总是通过实验来认识运动的特点,抽象出流体运动的主要矛盾,然后通过理论分析,得到流体运动规律,再回到实验中去检验修正。在工程实际中,当理论分析还不能完全解决问题时,常常是通过对大量实验结果进行分析提出一些经验性的规律,以满足实际应用上的需要。因此流体力学的研究方法是实验方法和理论分析方法的相结合,两者相辅相成,缺一不可。

工程流体力学的研究对象是以水作为代表的液体。但本书中所论述的一般规律也适用于其它普通液体和某些低速气流,一般指速度小于 50m/s 的气体运动。

1.2 流体的连续介质模型

流体是由大量的分子组成的,按照分子运动理论,流体分子之间都有一定的空间距离,而且每个分子都处于无休止的随机热运动之中。无论宏观上的运动流体还是静止流体,从微观上看,由于分子永不停歇的热运动,决定了流体在时间、空间上都充满着不均

匀性、离散性、随机性，从而导致了描述流体的物理量在时间、空间上的不连续性。

欧拉在 1753 年采用了一个基本假说，认为液体和气体在充满一个体积时，是不留任何空隙的，其中没有真空，认为流体是连续介质。实践证明，采用连续介质模型，解决一般工程中的流体力学问题是可以满足要求的。而且也可以采用有关连续函数的数学工具来研究流体运动。

流体力学所研究的流体，都是具有一定规模，一定体积的流体。而体积是个宏观概念，即使对于相当小的体积，所包含的液体分子也是相当多的。例如，在标准状态下， 1cm^3 的水，约有 3.34×10^{22} 个水分子，分子间隙为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$ 。假如取一个微小体积 ΔV ，可以令 ΔV 等于 1cm^3 的千分之一或万分之一，或者更小， ΔV 中所包含的分子数仍然是相当多的。因此， ΔV 是一种特征体积，宏观上充分小，小到几何上没有维度，只是空间上的一个点，而微观上充分大，包含足够多的分子。流体力学把 ΔV 中所有流体分子的集合称为流体质点，或流体微团。可见，流体质点是一个由大量流体分子组成的分子团，由于质点包含了足够多的流体分子，因此，质点的物理特征就是分子团中所有分子特征的统计平均值，并且单个分子出入分子团，不影响分子团的总体物理特征。宏观上，质点的尺度远远小于所研究的问题的特征尺度。因此，物质在空间分布的不均匀性及物理特征的不稳定性趋于零；微观上，如果分子团尺度太小，与分子运动尺度同数量级时，由于单个分子的随机出入不能随时平衡，分子数的增减会使分子团的物理特征（如密度等）随机脉动。综上所述，分子团的特征是：宏观上充分小，微观上充分大，没有维度，没有尺寸，但具有流体的一切物理特征，而且描述其物理特征的各种物理量是均匀的、稳定的、连续的。

流体力学把流体质点作为最基本的研究单位，从而摆脱了由于分子间隙和分子的随机运动所导致的物理量不连续的问题（分子之间是有间隙的，但分子团之间是没有间隙的），并且采用连续介质模型，即：流体是由连续分布的流体质点组成的连续介质，流体物理量是坐标和时间的连续函数，但允许在孤立的点、线或面上不连续。采用连续介质模型，既可摆脱复杂的分子运动，也可以满足工程上的精度要求，而且只有在这一前提下，才可以把流体的一切物理量包括密度、压强、速度等作为连续函数来处理，从而可应用数学工具来研究流体运动规律。

1.3 流体的主要物理性质

流体力学研究流体平衡和机械运动规律。流体的平衡状态或者机械运动状态，一方面决定于作用在流体上的力，另一方面决定于流体本身的物理性质。外因通过内因而起作用，外力对流体的作用是通过流体本身的物理性质来表现的，因此，从宏观角度探讨流体的物理性质是研究流体运动的出发点。

关于流体的物理性质，流体力学中所讨论的是能够对流体的机械运动和流体的平衡产生影响的一些重要的物理性质，如，惯性特征、重力特征、流动性、粘滞性、压缩性等。

1.3.1 流体的重度和密度

流体本身是一种物质，与所有其它物质一样具有物质属性。即：具有质量，具有重

量，分别用密度 ρ 和重度 γ 来表示。

1. 流体的密度 ρ

对于均质流体，单位体积流体所具有的质量为流体的密度。体积为 V 的流体，质量为 M ，则流体的密度为

$$\rho = M/V \quad (1-1)$$

对于非均质流体，根据连续性的假定，有

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

密度的国际单位是： kg/m^3 。

质量是度量物体惯性的，质量越大的物体，其运动状态改变越困难，因流体的密度为单位体积流体具有的质量，故流体的密度 ρ 反映了流体的惯性特征。

2. 流体的重度 γ

对于均质流体，单位体积流体所具有的重力为流体的重度。流体重力即地球对流体产生的引力，用 G 表示，则

均质流体的重度为

$$\gamma = G/V \quad (1-3)$$

非均质流体的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-4)$$

重度的单位是： N/m^3 。

重度 γ 也称容重，反映了流体的重力特征，由于重力 $G = Mg$ 则有

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{Mg}{V} = \rho g \quad (1-5)$$

由于重度 γ 与重力加速度 g 有关，而重力加速度 g 与地理位置有关，随地理位置的不同而变化。一般工程流体力学计算中采用 $g = 9.80\text{m}/\text{s}^2$ 。

流体的密度、重度均随压力和温度而变化，但一般情况下重度随压力和温度的变化很小，工程计算中，可以将水看成均质流体，通常取淡水在常温、常压下的数值： $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ ， $\gamma = 9800\text{N}/\text{m}^3$ 。

纯净的水，在一个标准大气压下的密度、重度随温度的变化见表 1-1，几种常见流体的重度见表 1-2。

表 1-1 水的密度和重度

t (°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
密度 ρ (kg/m^3)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
重度 γ (N/m^3)	9798.73	9800.00	9797.35	9782.65	9757.57	9723.95	9683.09	9635.75	9523.94	9392.12

表 1-2

几种常见流体的重度

流体名称	空 气	水 银	汽 油	酒 精	四氯化碳	海 水
重度 γ (N/m ³)	11.82	133280	6664~7350	7778.3	15600	9996~10084
测定温度 (°C)	20	0	15	15	20	15

1.3.2 流体的流动性和粘滞性

1. 流体的流动性

流体具有易流动性，不能维持自身的形状，即流体的形状就是容器的形状。这是因为流体的分子之间的作用力比固体分子之间的作用力要弱得多，所以不能维持自身形状，静止流体几乎没有承受拉力和剪切力的能力。无论何等微小的剪切力一经作用于静止流体，流体立即破坏其原来的静止平衡状态而开始变形，无限制的连续变形即为流动。所以易流动性是流体最基本的特征，静止流体几乎不能抵抗任何微小的拉力和剪切力，仅能抵抗压力。流体的流动性是受粘滞性制约的，流体的粘滞性越强，易流动性越差。

2. 流体的粘滞性

(1) 粘滞性的概念。流体在运动状态下，抵抗剪切变形的能力，即为流体粘滞性。任何一种流体都具有粘滞性。

牛顿通过著名的平板实验说明了流体的粘滞性，提出了牛顿内摩擦定律。

牛顿平板实验如图 1-1，两个平置的平行平板，平板相距为 h ，其间充满流体，平板面积足够大，以至可忽略边缘对液流的影响。使下板固定不动，上板受一拉力 F 的作用，以匀速 U 向右运动。此时，两板中间的流体自然会发生运动，因任何微小的剪切力都会引起流体流动，上板受到的拉力 F ，使中间的流体处于运动状态。

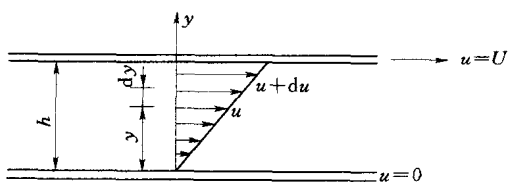


图 1-1 牛顿平板实验

由于流体分子的附着力，与平板相接触的一层流体粘附于平板上，故粘附于下层平板上的流体速度为零，粘附于上层平板上的流体速度为 U 。实验表明，当 U 不大时，沿 y 轴方向，各层流体的运动速度一般呈线性分布（图 1-1）。

根据上述实验现象，分析两个相互接触的流体层之间的相对运动可以得出：每一运动较慢的流体层，都是在运动较快的流体层的带动下才运动的，同时，运动较快的流体层则受到运动较慢的流层的阻碍，而不能运动的更快。可见当两流体层之间存在速度差，即两流层之间存在相对运动时，相对运动速度为 du 快层对慢层产生一个拖力，使慢层加速，而慢层对快层产生阻力，使快层减速。从两流体层相对运动的角度来看，快层相对于慢层而言，其相对运动方向为速度 u 的正向，受到的力是阻力 F ，与其本身的相对运动方向相反；而慢层相对于快层而言，慢层的相对运动方向是速度 u 的反向，所受到力是拖力 F' ，也与其相对运动方向相反。阻力和拖力是大小相等、方向相反的一对力，分别作用在两流体层的接触面上，而且无论是阻力还是拖力都与该层的相对运动方向相反，如图 1-2 所示。流体层之间这一对相互作用的力即

为粘滞力，或称内摩擦力。只有流体作相对运动时，才会在流体内部产生粘滞力，故流体的粘滞性即为：流体内部流层之间或质点之间因相对运动而产生粘滞力，以抵抗相对运动的性质。

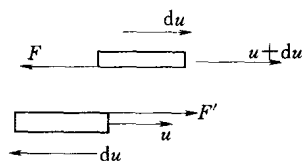


图 1-2 两流层相对运动

(2) 牛顿内摩擦定律。为了确定流体的粘滞力的大小，前人做了大量的实验，其中很典型的就就是牛顿平板实验。牛顿于 1686 年阐述了流体作层状运动时，其内摩擦力有下列特征：①与速度梯度 du/dy 成正比；②与接触面积 A 成正比；③与流体性质有关；④与接触面上的压力无关。

大量的实验结果证明了内摩擦力的特征并整理出了如下数学表达式，称为牛顿内摩擦定律：

$$T = \pm \mu \frac{du}{dy} A \quad (1-6)$$

$$\tau = \frac{T}{A} = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中 T ——内摩擦力，N；

τ ——单位面积上的内摩擦力，或称粘滞切应力， N/m^2 ；

μ ——动力粘滞系数，是与流体种类、温度有关的系数， $Pa \cdot s$ ；

du/dy ——速度梯度，即：速度在其法线方向上的变化率， s ；

A ——接触面积， m^2 。

式中的正负号是由于粘滞力是成对出现的，大小相等，方向相反，分别作用在两流层的接触面上。故其方向与所研究的流层有关，计算时根据具体情况判断。一般表达式，也可将正负号略去。

凡符合牛顿内摩擦定律的流体，即 τ 与 du/dy 呈过坐标原点的正比例关系的流体称为牛顿流体。自然界中大部分流体如水、酒精、一般气体及各种油类都属于牛顿流体，而有些流体，如胶态溶液，血浆泥浆、纸浆油漆、高分子聚合物溶液等，则属于非牛顿流体。本书仅讨论牛顿流体。

(3) 粘滞系数。粘滞系数 μ 是一个反映液体粘滞性大小的量。根据粘滞切应力表达式 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 有

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (Pa \cdot s) \quad (1-8)$$

可见 μ 是一个有量纲的系数，因其具有动力学的量纲，故称为动力粘滞系数。

流体力学的分析计算中，常出现动力粘滞系数 μ 与流体的密度 ρ 的比值，为简便起见，以 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (m^2/s) \quad (1-9)$$

因为 ν 具有运动学量纲，故称为运动粘滞系数。

目前在工程上，动力粘滞系数 μ 的单位也常用泊司 (Poise)，简称泊 (P)， $1P = 0.1Pa \cdot s$ 。运动粘滞系数 ν 的单位常用斯托克斯 (Stokes)，简称斯，即 m^2/s 。

(4) 粘性系数的影响因素。粘滞力实质上是流体微观分子运动的宏观表现，即分子不规则运动的动量交换和分子间吸引力两方面所形成的阻力。不同的流体，其微观分子结构不同，分子之间的作用力不同，故不同种类的流体，粘滞系数不同，因此粘滞系数首先取决于流体种类。温度、压力对粘滞系数的影响也不同。

温度对粘滞系数的影响比较显著。这种影响关系对于气体和液体是截然不同的，液体的粘性随温度增高而减小，而气体的粘性则随温度增高而增大。其原因是：液体产生粘性的主要原因是分子间内聚力的作用，当温度升高时，分子动能增加，分子间内聚力显著下降，所以粘性减小。而气体产生粘性的主要原因是分子间的动量交换，当温度升高时，热运动增强，动量交换加剧，因而气体粘性增大。

水的运动粘滞系数与温度的关系，可用如下经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1-10)$$

式中 t ——水的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

ν ——流体的运动粘滞系数， m^2/s 。

水的粘滞系数与温度的关系见表 1-3。

表 1-3

水的粘滞系数

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	$\mu \times 10^3$ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	$\nu \times 10^6$ (m^2/s)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	$\mu \times 10^3$ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	$\nu \times 10^6$ (m^2/s)
0	1.781	1.785	40	0.653	0.658
5	1.518	1.519	50	0.547	0.553
10	1.307	1.306	60	0.466	0.474
15	1.139	1.139	70	0.404	0.413
20	1.002	1.003	80	0.354	0.364
25	0.890	0.893	90	0.315	0.326
30	0.798	0.800	100	0.282	0.294

流体压力对粘滞系数的影响极小一般不考虑，这一点正是流体与固体本质上的区别，固体摩擦力的大小与正压力有关，而流体的内摩擦力与流体几乎无关。

1.3.3 流体的压缩性和膨胀性

流体受压力作用时，分子间距减小，流体的宏观体积减小，这种性质称为压缩性。温度升高，流体的宏观体积增大，这种性质称为膨胀性。

1. 压缩性

流体的压缩性可以用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 E 来量度。设压缩前的体积为 V ，压强增量为 $d p$ ，相应的体积减小量为 $d V$ ，体积变化率为 $\frac{d V}{V}$ ，则体积压缩系数为

$$\beta = - \frac{\frac{d V}{V}}{d p} \quad (\text{m}^2/\text{N}) \quad (1-11)$$

由于 $d p$ 为正时， $d V$ 必为负值，故上式加一负号，以保持 β 为正值。由上式可知，

压缩系数 β 即为在一定的温度下, 增加一个单位压力时, 流体体积的相对缩小量。

流体的压缩性也可用弹性模量来表示。因流体受压时, 体积压缩, 同时导致了分子间巨大排斥力的出现, 形成流体内部的压应力, 一旦外力取消, 则流体在其内部压应力的作用下, 恢复原来的体积, 故压缩性也称为弹性。

体积弹性系数 E 是体积压缩系数的倒数:

$$E = \frac{1}{\beta} = - \frac{dp}{\frac{dV}{V}} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-12)$$

流体的种类不同, 其 β 值或 E 值不同。同一种液体, β 或 E 随温度和压强变化, 但变化不大。流体并不完全符合弹性体的胡克定律。

一般工程设计中, 水的压缩性常常忽略不计, 因常温下水的弹性模量为

$$E = 2.1 \times 10^9 \quad (\text{N/m}^2)$$

如增加一个大气压, 体积的相同缩小量小于 2 万分之一。所以, 工程上一般不考虑水的压缩性, 把水当作不可压缩流体来处理。当然一些特殊情况除外, 如水击等。压力相当大时, 则必须考虑压缩性对系统造成的影响。

2. 膨胀性

流体的膨胀性用体积膨胀系数 α 表示。压强一定的条件下, 体积为 V 的流体, 温度增高 dT , 相当的体积增加量为 dV , 则体积膨胀系数为

$$\alpha = \frac{\frac{dV}{V}}{dT} = - \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{dT} \quad (1/^{\circ}\text{C}) \quad (1-13)$$

体积膨胀系数即为: 温度每增加 1°C 时, 流体体积的相对增加率或流体密度的相对减小率。

1.3.4 表面张力特性

1. 流体的表面张力

由于流体分子之间具有吸引力(内聚力), 在流体内部, 分子受到的力在各个方向都相等, 因此流体内部是平衡的, 而在流体自由表面上的分子, 只受到流体一侧的分子吸引力作用, 与气体分子相接触的一侧, 几乎没有分子之间吸引力的作用, 两侧不能平衡, 因此流体自由表面内侧分子内聚力的作用, 有力图使表面缩小的趋势, 这种使自由表面受到张紧的力为表面张力。

表面张力在流体和气体的周界面上、在液—气、液—固、液—液(如汞—水)的接触面上, 均可发生。气体不存在表面张力。

表面张力是流体特有的性质, 表面张力在平面上不产生附加压力, 只有在曲面上才产生附加压力以维持平衡。

2. 毛细现象

两端开口的玻璃细管竖立在流体中, 流体会在细管中上升或下降 h 高度, 此现象为毛细现象。

毛细现象是表面张力和流体附着力共同作用的结果。当流体对固体的附着力大于流体

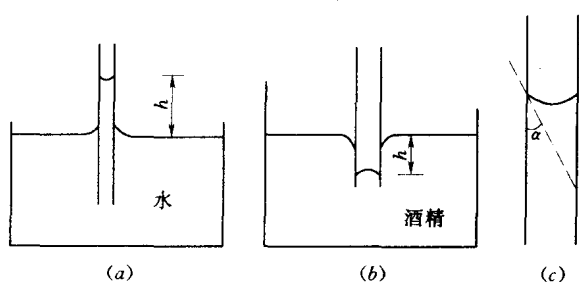


图 1-3 毛细管现象

分子之间的内聚力时，流体能湿润管壁，如水、酒精等流体，管内液面将高于管外液面，反之对于不能湿润管壁的流体，如水银等，管内液面低于管外液面，如图 1-3 所示。

3. 表面张力系数

表面张力系数用 σ 表示，用来度量表面张力的大小， σ 为单位表面上单位长度受到的张力，单位：N/m。

由于重力与表面张力产生的附加压力的铅直分力相平衡，即

$$\pi \gamma^2 h \gamma = 2 \pi \gamma \sigma \cos \alpha \quad (1-14)$$

则

$$h = \frac{4 \sigma \cos \alpha}{\gamma d}$$

式中 α ——流体与玻璃内壁的接触角；

σ ——流体表面张力系数，N/m；

d ——玻璃内径，m；

γ ——流体重度，N/m³；

h ——液面上升或下降的高度，m。

h 与 d 成反比关系，当 d 很大时， h 值很小，可以忽略不计。但管径很小时， h 值不能忽略，故测量压强的玻璃管的直径不能过小，一般应大于 10mm。

1.4 作用在流体上的力

任何物体的平衡和机械运动都是力的作用结果。所以，研究流体的平衡和机械运动规律，首先应分析作用在流体上的力。按力的作用方式不同，一般可分为两类：质量力和表面力。

1.4.1 表面力

表面力作用在流体表面上，与作用面面积成正比，表面力是相邻流体或其它物体的作用结果。根据连续介质的概念，这个力连续分布在隔离体表面上，因此分析时采用应力的概念，与作用面正交的应力称为压应力或压强；与作用面平行的应力称为切应力。

在静止流体中任取一如图 1-4 所示的隔离体作为研究对象，在隔离体表面上取微元面积 ΔA ，作用在 ΔA 上的力，可以分解为法向力和切应力，设法向力为 ΔP ，切向力为 ΔT ，则作用在微元面积 ΔA 上的平均法向力为 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ ，作用在微元面积 ΔA 上的平均切向力为 $\frac{\Delta T}{\Delta A}$ 。

由于作用在流体上的表面力为连续函数，故微元面积 ΔA 上的某一点的应力，可以通过平均值的极限求得，即当 $\Delta A \rightarrow$

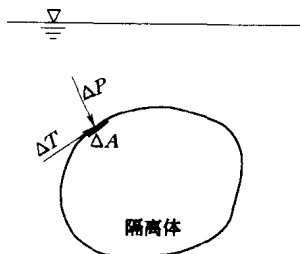


图 1-4 隔离体表面受力

0 时, 微元面积趋于一点, 则该点的法向应力为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-15)$$

切向应力为

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-16)$$

法向力 ΔP 和切向力 ΔT 的单位是牛顿 (N), 压强 p 和切应力 τ 的单位是牛/米² (N/m²), 或称为帕斯卡 (Pa), 简称帕。

需要指出的是, 表面力是一个相对的概念, 当选定某一部分流体作为隔离体进行研究时, 表面力指作用在所研究的这部分流体的外表面上的力。流体内部仍存有压力和切向力, 但对隔离体而言, 则属于内力, 而且它们总是成对出现的, 方向相反, 所以内力的总和与总力矩都等于零。但是, 流体运动时, 内力所作的功是不等于零的 (如流体流动时, 粘滞力做功引起能量损失等)。

1.4.2 质量力

质量力是指作用在隔离体内每个流体质点上的力, 其大小与流体质量成正比。最常见的如重力 $\vec{G} = m\vec{g}$, 惯性力 $\vec{F} = m\vec{a}$ 。均质流体中, 质量与体积成正比, 故质量力也称体积力。

质量力常用单位质量力来度量, 如隔离体中的流体是均质的, 其质量为 m , 总质量力为 $\vec{F}$, 则单位质量的流体所受到的质量力为单位质量力 $\vec{f}$:

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{m} = \left\{ \frac{F_x}{m}, \frac{F_y}{m}, \frac{F_z}{m} \right\} \quad (1-17)$$

总质量力在各坐标轴上的分量为 F_x, F_y, F_z , 则单位质量力在相应坐标轴上的分量为 X, Y, Z , 即

$$\begin{aligned} X &= \frac{F_x}{m} \\ Y &= \frac{F_y}{m} \\ Z &= \frac{F_z}{m} \end{aligned}$$

单位质量力在数值上等于加速度, 具有加速度量纲。

当质量力是重力时, 则 $\vec{F} = \vec{G} = m\vec{g}$, 总质量力的三个分量分别为: $F_x = F_y = 0, F_z = -mg$, 则单位质量力分别为

$$\begin{aligned} X &= 0 \\ Y &= 0 \\ Z &= \frac{-mg}{m} = -g \end{aligned}$$

习 题

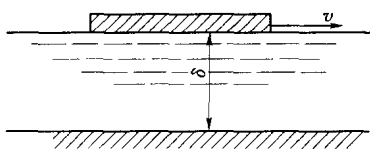
1-1 流体的容重和密度有何区别及联系?

1-2 已知水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，求其容重。若有这样的密度的水 5L，它的质量和重力各为多少？

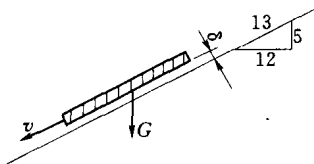
1-3 水的容重 $\gamma = 9.71 \text{ kN/m}^3$ ， $\mu = 0.599 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，求它的运动粘滞系数 ν 。

1-4 题图 1-4 示为一水平方向运动的木板，其速度为 1 m/s 。平板浮在油面上， $\delta = 10 \text{ mm}$ ，油的 $\mu = 0.09807 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。求作用于平板单位面积上的阻力。

1-5 温度为 20°C 的空气，在直径为 2.5 cm 的管中流动，距管壁上 1 mm 处的空气速度为 3 cm/s 。求作用于单位长度管壁上的粘滞切力为多少？



题 1-4 图



题 1-6 图

1-6 一底面积为 $40 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ ，高为 1 cm 的木块，质量为 5 kg ，沿着涂有润滑油的斜面等速向下运动（题 1-6 图）。已知 $v = 1 \text{ m/s}$ ， $\delta = 1 \text{ mm}$ ，求润滑油的动力粘滞系数。

1-7 水在常温下，由 5at 压强增加到 10at 压强时，密度改变多少？

1-8 体积为 5 m^3 的水，在温度不变的情况下，当压强从 1at 增加到 5at 时，体积减少 1L，求水的压缩系数及弹性模量。

1-9 作用在流体上的质量力应包括：①压力；②粘滞力；③重力；④表面张力。

第 2 章

流 体 静 力 学

流体静力学是研究流体在静止状态下的平衡规律及其在实际中的应用。

所谓“静止”，一般指物体相对于地球没有运动，若流体相对于地球而言没有运动，流体质点之间也不存在相对运动，则为静止流体。若流体相对于地球虽然是运动的，但流体质点之间及流体质点与容器之间不存在相对运动，这种运动状态称为相对静止或相对平衡状态。本章主要讨论静止流体的平衡规律。

绪论中曾指出，流体是质点间存在相对运动时，会产生粘滞切应力。故静止流体中不存在切应力，又由于静止流体几乎不能承受任何微小的拉力和剪切力，所以静止流体质点间的相互作用是通过压应力形式呈现出来。因此流体静力学的主要任务是研究静水压强的分布规律及其在实际工程中的应用。

2.1 静水压强及其特性

2.1.1 静水压强的定义

从静止（或相对平衡）状态的均质流体中，任取一体积 V ，如图 2-1 所示。设用任一平面 $ABCD$ 将此体积分分为 I、II 两部分，假定将 I 部分移去，并以与其等效的力 ΔP 代替它对 II 部分的作用，显然，余留部分不会失去原有的平衡。则力 ΔP 为作用在面积 ΔA 上的总作用力。在流体力学中， $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 称为面积 ΔA 上的平均静水压应力强度，简称平均压强，以 $\bar{p}$ 表示，当 ΔA 无限缩小到点 O 时，平均压强 $\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A}$ 便趋近某一极限值，此极限值定义为该点的静水压强，通常用符号 p 表示

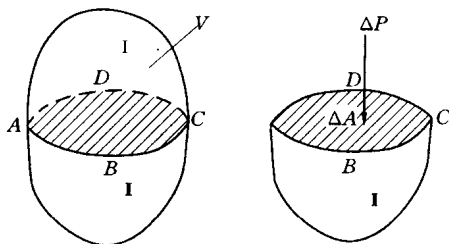


图 2-1 表面力

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA}$$

2.1.2 静水压强的特性

(1) 第一特性。静水压强的第一特性是：静水压强方向与作用面的内法线方向重合。采用反证法来证明。

在静止流体中，取一分离体，或假设周围流体对分离体表面上 ΔA 的作用力 F 沿任意方向，而任意方向的作用力 F 均可分解为沿作用面法线方向的法向力 ΔP 和沿切线方