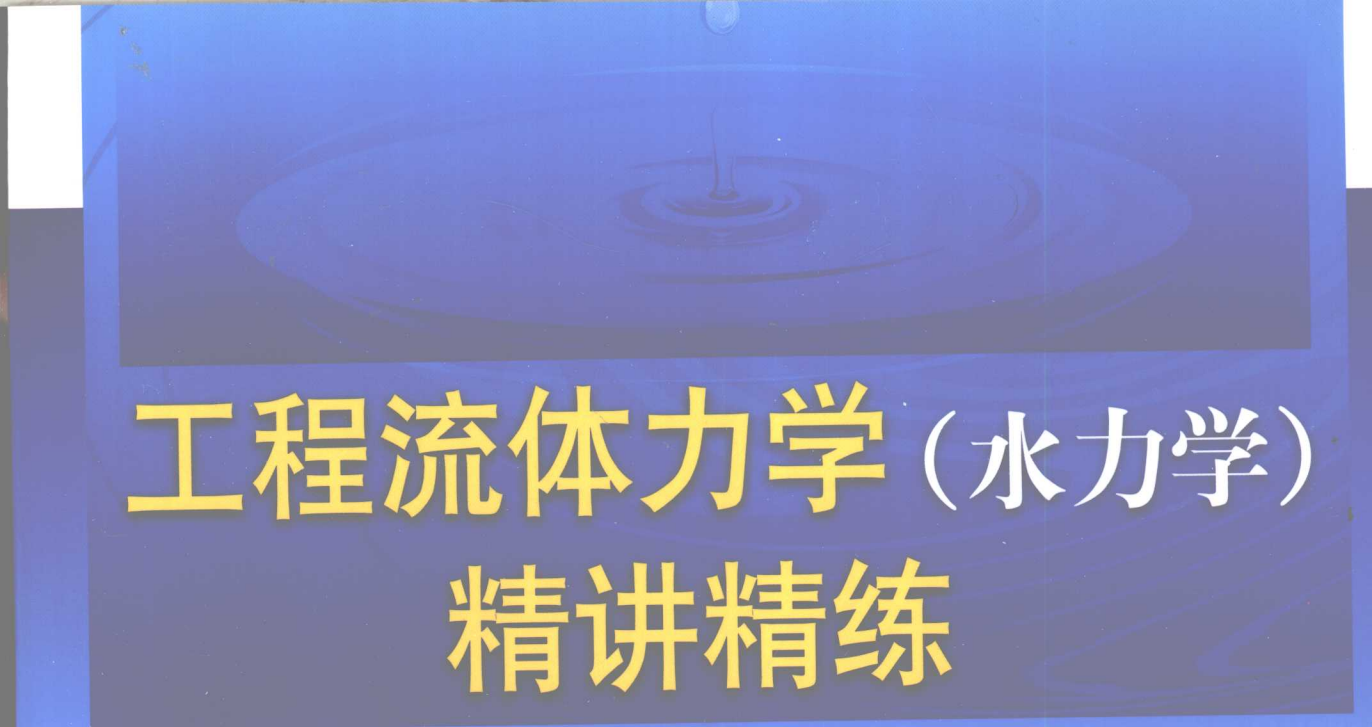




工程流体力学 (水力学) 精讲精练

钱焕群 主 编 陈文兵 王锦平 副主编

GONGCHENG LIUTI LIXUE
(SHUILIXUE)
JINGJIANG JINGLIAN



化学工业出版社

工程流体力学(水力学) 精讲精练

钱焕群 主 编 陈文兵 王锦平 副主编

GONGCHENG LIUTI LIXUE
(SHUILIXUE)
JINGJIANG JINGLIAN

TB126
Q205



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书按照从简单到复杂、从一维到多维和从理论到应用的原则精心编写,内容力求精讲理论,注重应用,提炼基本,按需拓宽。主要包括:绪论,流体静力学,流体动力学基础,量纲分析与相似原理,流动阻力与水头损失,不可压缩流体的管道流动,无压流动。针对硕士研究生招生考试,收集了往年的流体力学试题,整理成模拟试题10套,并作了详细解答。

本书可作为从事电力、化工、钢铁、机械、环境、建筑和石油等行业在校大学生和科技工作者的参考书,也可作为参加研究生招生和有关注册公用设备工程师考试的复习指导书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学(水力学)精讲精练/钱焕群主编. —北京:化学工业出版社, 2010.3
ISBN 978-7-122-07694-6

I. 工… II. 钱… III. ①工程力学:流体力学-高等学校-教学参考资料②水力学-高等学校-教学参考资料
IV. ①TB126②TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 046510 号

责任编辑:左晨燕

文字编辑:颜克俭

责任校对:蒋宇

装帧设计:张辉



出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张12¼ 字数319千字 2010年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

流体力学在连续性介质假设的基础上将经典场论用于描述流体运动,采用数学方法描述流体运动的质量守恒、动量守恒和能量守恒的规律,从基本概念到基本方程的一系列定量描述,从理论分析到科学实验,已经成为一支严密的力学理论,并随着多个基础学科的发展在研究内容上形成了多个流体力学的分支。因此,流体力学是一门非常重要的自然科学的基础理论。

流体力学在工程技术方面具有非常广泛的应用。伯努利能量方程和阻力计算公式广泛用于水、蒸汽、石油和天然气等管道工程的设计与运行;在明渠流中谢才公式、曼宁公式、堰流和闸孔出流等计算公式广泛用于排水管道和渠道的工程设计;有关渗流的计算公式则是给水排水工程、水利工程和石油工程等领域的设计基础。因此,掌握工程流体力学是学习各种专业课程的基础。

为了更好地学习工程流体力学,本书内容按照从简单到复杂、从一维到多维和从理论到应用的原则做了精心选编,编写内容求精讲理论,注重应用;倡导启发学习,强化分析计算;提炼基本,按需拓宽。为了反映当前有关工程流体力学参考书和教材的进展,本书向读者提供对概念和现象富有新意的阐述,对例题、习题和模拟题做了筛选,并提供物理概念更明确、计算方法更简单的解题方法。

本书可作为从事电力、化工、钢铁、机械、环境、建筑和石油等行业在校大学生和科技工作者的参考书及复习指导书,也可作为参加研究生招生和有关注册公用设备工程师考试的复习参考书,也适合于电大、函大、职大和参加高等教育自学考试的学生使用,以及教师的教学参考用书。

本书的第1~5章由钱焕群执笔,第6章和第7章的渗流由陈文兵执笔,第7章的明渠流和堰流由王锦平执笔,硕士研究生入学考试模拟题由徐琳和李保瑞完成,全书由钱焕群主编并统稿。郭敏、魏建平、李阳、王军、杨冬、于明志、刘江伟、胡爱娟、朱义成、张浩、房从从、刘学亭、吴亚男、张元彬、赫连雅馨、于坤华和戴秋霞等参与了编写工作。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评、指正。

编者

2010.1

主要符号表

A ——面积, m^2	Ma ——马赫数
a ——加速度, m/s^2	M ——质量量纲
B ——水面宽度, m	m ——质量, kg ; 边坡系数
b ——底宽, m	P ——总压力, N
C ——谢才系数; 常数值	p ——压强, Pa
c ——水击波速, m/s	P_a ——大气压强, Pa
d ——管径, m	Q ——体积流量, m^3/s
Eu ——欧拉数	R ——水力半径, m
e ——断面单位能量, m	r ——半径, m
Fr ——弗劳德数	Re ——雷诺数
G ——重力, N	S_0 ——比阻, s^2/m^6
g ——重力加速度, m/s^2	T ——黏性力, N ; 绝对温度, $^{\circ}\text{C}$; 时间量纲
H ——作用水头, m	t ——时间, s ; 摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
h_w ——水头损失, m	U ——质量力势函数
h_f ——沿程损失系数	u ——点流速, m/s
h_m ——局部水头损失, m	V ——体积 m^3 ; 平均速度, m/s
h_v ——真空高度, m	X, Y, Z ——单位质量力分量, m/s^2
I ——惯性力, N	x, y, z ——坐标
i ——渠道底坡	ζ ——局部阻力系数
J ——水力坡度	φ ——流速系数; 速度势函数
K ——流量模数, N/m^2 ; 体积弹性系数	ψ ——流函数
α ——动能修正系数; 温度膨胀系数	χ ——湿周, m
β ——动量修正系数; 体积压缩系数	ω ——角速度, rad/s
γ ——容重, N/m^3	Ω ——涡量
ρ ——密度, kg/m^3	τ ——切应力, N
μ ——动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; 流量系数	Γ ——速度环量
ν ——运动黏度, m^2/s	Δ ——壁面粗糙度, m
π ——圆周率	δ ——黏性底层厚度, m
ε ——收缩系数	λ ——沿程阻力系数
η ——效率	Θ ——温度量纲
κ ——卡门常数	
L ——长度量纲	
l ——长度, m	

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 流体的主要物理性质	1
1.2 作用在流体上的力	5
1.3 流体力学的学习指导	7
1.4 习题	8
第 2 章 流体静力学	9
2.1 流体静压强	9
2.2 流体平衡方程	12
2.3 液体相对平衡	15
2.4 静水总压力	18
2.4.1 平面上的静水总压力	18
2.4.2 曲面上的静水总压力	20
2.5 阿基米德原理	21
2.6 习题	24
第 3 章 流体动力学基础	28
3.1 描述流体运动的两种方法	28
3.2 欧拉法的几个基本概念	32
3.3 流体力学三大基本方程	35
3.3.1 连续性方程	35
3.3.2 伯努利方程	37
3.3.3 动量方程	40
3.4 理论流体力学初步	43
3.4.1 流体微团的运动	43
3.4.2 恒定无旋流动	44
3.4.3 基本平面势流	46
3.4.4 不可压缩黏性流体的微分方程——Navier-Stokes 方程	50
3.5 习题	51
第 4 章 量纲分析与相似原理	54
4.1 量纲分析	54
4.1.1 量纲、单位和无量纲数	54
4.1.2 量纲齐次性原理和量纲分析法	55
4.2 相似原理	58
4.3 习题	64
第 5 章 流动阻力与水头损失	66
5.1 流动阻力与水头损失的两种形式	66
5.2 流体运动的流型及判别	66
5.3 均匀流动基本方程及圆管中的层流运动	67
5.3.1 均匀流的基本方程	67
5.3.2 圆管中的层流运动	68

5.4 紊流理论初步	71
5.4.1 紊流运动要素的脉动及时均化	71
5.4.2 圆管中的紊流	71
5.4.3 紊流流速分布	73
5.5 阻力与能量损失计算	77
5.5.1 阻力计算	77
5.5.2 局部能量损失的计算	81
5.6 习题	83
第6章 不可压缩流体的管道流动	85
6.1 孔口与管嘴出流	85
6.1.1 孔口出流	85
6.1.2 管嘴恒定出流	87
6.1.3 孔口的变水头出流	89
6.2 有压管流水力计算	90
6.2.1 短管的水力计算	90
6.2.2 长管的水力计算	92
6.3 管网计算基础	99
6.4 有压管路的水击	103
6.5 习题	104
第7章 无压流动	108
7.1 明渠流	108
7.1.1 明渠均匀流	108
7.1.2 明渠均匀流的水力计算	111
7.1.3 无压圆管均匀流的水力计算	115
7.1.4 明渠非均匀流	117
7.1.5 水跃	123
7.1.6 棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的分析	126
7.2 堰流与闸孔出流	131
7.2.1 堰流及其类型	131
7.2.2 堰流的基本公式	131
7.2.3 堰流的水力计算	132
7.2.4 闸孔出流	136
7.3 渗流	138
7.3.1 渗流的基本概念	138
7.3.2 渗流模型	138
7.3.3 达西定律	139
7.3.4 渗流运动的基本方程及其解法	140
7.3.5 地下明渠定常均匀渗流与渐变渗流	141
7.3.6 集水廊道和井	142
7.4 习题	146
硕士研究生入学考试模拟题	151
硕士研究生入学考试模拟题答案	168
参考文献	190

第 1 章

绪 论

流体就是在剪切应力作用下能连续变形的物质,它包括所有的气体和大部分的液体。流体力学就是研究流体本身的静止状态和运动状态,以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律。流体的一个基本特征就是易流动性,正是因为流体易剪切变形,流体的运动即表现出丰富的流动现象,其广泛存在于众多领域,如航空航天、工业、农业、医疗卫生和日常生活等。流体力学的发展已经使得人类对许多流动现象做出合乎实际的定性判断或者定量预测,解决了各个领域的许多流体流动问题,创造了一个又一个人类征服自然、改造自然的奇迹,推动了人类的文明。

鉴于内容的侧重点不同,流体力学可作下述分类:如果内容侧重于理论的,主要采用严密的数学推理方法,力求准确性和严密性的流体力学,称为理论流体力学;侧重于应用的,主要为解决工程实际问题的,称为工程流体力学;如果偏向于研究水流的且侧重于应用的,称为水力学。虽然它们的名称不同,但是它们的基本概念、基本原理和基本方法在很多方面皆是相同的。

流体力学现象广泛存在于众多领域,如日常生活、工业、农业、交通、天文地理和医疗卫生等。人类已经依据流体力学知识,对许多流体力学现象做出合乎实际的定性判断和定量预测,解决了各个领域的大量流体力学问题,创造了一个又一个人类征服自然、改造自然的奇迹,推动了人类的文明。

今后,人们一方面将根据工程技术方面的需要进行流体力学应用性的研究,另一方面将更深入地开展基础研究以探求流体的复杂流动规律和机理。

1.1 流体的主要物理性质

流体的运动与流体的物理性质有密切的关系,如物质的动量与质量、重力与重度等。在大多数情况下中,系统通常是流体微元体,因此流体的物理性质一般被认为是空间的点的函数,是连续的。值得指出的是,在一般的流体力学中系统是平衡的,所以平衡状态下的物理性质同样适用于流体的运动,至于非平衡态如化学反应和核反应不在本流体力学中讨论。

(1) 密度 单位体积所包含的流体质量,称之为密度,以 ρ 表示。若质量为 M ,体积为 V 的均质流体,其密度为:

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

对于非均匀质流体,为:

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

密度的单位: kg/m^3 ; 密度的量纲: $\rho = [ML^{-3}]$ 。

(2) 重度 单位体积流体所受的重力称为重度或容重,以 γ 表示。这是研究静止液体的压强分布和重力驱动下流体运动的重要参数。

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{Mg}{V} = \rho g \quad (1-3)$$

式中, g 为重力加速度。

重度的单位: N/m^3 , 重度的量纲: $[\gamma] = [ML^{-2}T^{-2}]$, 流体的重度也随温度变化。空气和几种常见流体的重度见表 1-1。

表 1-1 空气和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/ (N/m^3)	11.82	133280	6664~7350	7778.3	15600	9996~10084
测定温度/ $^{\circ}\text{C}$	20	0	15	15	20	15

在 1atm (101325Pa) 下, 纯净水的密度和重度随温度的变化见表 1-2。

表 1-2 水的密度和重度

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

在水力计算中, 常取 4°C 纯净水的重度作为水的重度, $\gamma = 9800 \text{N}/\text{m}^3$ 。

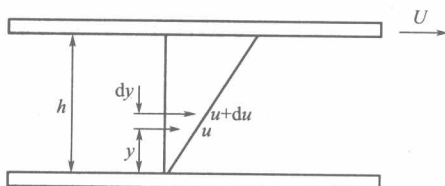


图 1-1 流体的运动

(3) 黏性 当流体处于运动状态时, 若流体质点之间 (或者流层之间) 存在相对运动, 则质点之间将产生一种内摩擦力来抗拒这种相对运动, 流体的这种物理性质, 称为黏性 (或黏滞性), 相应的力称之为黏性力, 也称牛顿剪切应力或者摩擦力。

1686 年, 著名科学家牛顿做了两平板间的流动试验, 如图 1-1 所示。在两层很大的平行平板间夹一层很薄的流体, 将下层平板固定, 而使上层平板运动, 则夹在两层平板间的流体发生了相对运动。

实验发现, 两层平板间流体的内摩擦力 F , 与接触面积 A 成正比, 与流体相对运动的速度梯度 U/δ 成正比。因平板间距 δ 很小, 可认为流体速度呈线性分布 $U/\delta \sim du/dy$ 。

$$F \propto A \frac{du}{dy}$$

引入比例系数 μ , 可将上式写成等式:

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中, μ 为动力黏度 (或动力黏性系数)。

这就是著名的牛顿内摩擦定律。 μ 值大小与流体种类和温度有关, 黏性大的流体 μ 值高, 黏性小的流体 μ 值低。

牛顿内摩擦定律, 也可用单位面积上的内摩擦力 τ 来表示:

$$\frac{F}{A} = \tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

可以证明：流速梯度 $\frac{du}{dy}$ ，实质上代表流体微团的剪切变形速率。

如图 1-2 所示，在相距 dy 的两层流体 1-1 及 2-2 之间，任取一矩形微团 $ABCD$ ，经过 dt 时间后，该流体微团经平移和变形，由矩形 $ABCD$ 变成平行四边形 $A'B'C'D'$ 。设 A 点的速度为 u ，根据一阶泰勒级数，则 D 点的速度为 $u + du$ ，那么该两点之间的相对速度为 du 。经过 dt 时间， AD 或 BC 产生了角变位 $d\theta$ ，由于 $du dt$ 为微量，则 $d\theta$ 也为微量，因此可认为：

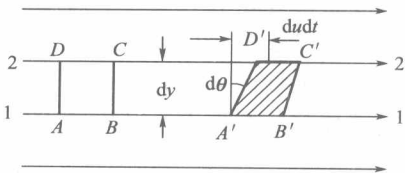


图 1-2 流体微团的运动

$$d\theta \approx \tan(d\theta) = \frac{du dt}{dy}$$

相应的角变形速率 $\frac{d\theta}{dt}$ 为：

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

因此，式(1-5) 又可写成：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{d\theta}{dt} \tag{1-6}$$

式(1-6) 表明黏性力也是流体抵抗角变形速率的能力。

根据牛顿内摩擦定律把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如水、空气、汽油、煤油、甲苯、乙醇等；不符合的流体叫做非牛顿流体，如接近凝固的石油、聚合物溶液、含有微粒杂质或纤维的流体（如泥浆）等。正因此，流体力学分为牛顿流体力学和非牛顿流体力学。

μ 的单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，动力黏度的量纲为 $[\mu] = [ML^{-1}T^{-1}]$ 。

流体的黏性还可以用 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 表示， ν 称为运动黏性系数或运动黏度，其单位是 m^2/s 。运动黏度的量纲为 $[\nu] = [L^2T^{-1}]$ 。

水的运动黏性系数 ν 可用下列经验公式计算：

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \tag{1-7}$$

其中， t 为水温，以 $^{\circ}\text{C}$ 计， ν 以 cm^2/s 计。为了使用方便，在表 1-3 中列出不同温度时水的 ν 值。

表 1-3 不同水温时的 ν 值

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	2	4	6	8	10	12
$\nu/(\text{cm}^2/\text{s})$	0.01775	0.01674	0.01568	0.01473	0.01387	0.01310	0.01239
温度/ $^{\circ}\text{C}$	14	16	18	20	22	24	26
$\nu/(\text{cm}^2/\text{s})$	0.01176	0.0118	0.01062	0.01010	0.00989	0.00919	0.00877
温度/ $^{\circ}\text{C}$	28	30	35	40	45	50	60
$\nu/(\text{cm}^2/\text{s})$	0.00839	0.00803	0.00725	0.00659	0.00603	0.00556	0.00478

如果不考虑流体的黏性摩擦力，或者流体的黏性摩擦力不起主要作用，则称该流体为理想流体，否则称之为黏性流体或实际流体。但是不能认为黏性摩擦力为 0 的流体即为理想流体，如静止的流体。虽然实际流体非常普遍，但是理想流体的运动规律对于解决实际流体的

运动非常重要，有时只要对理想流体的运动规律加以修正即可用于实际流体。

(4) 压缩性 压强增高时，分子间的距离减小，液体宏观体积减小，这种性质称为压缩性，也称弹性。温度升高，液体宏观体积增大，这种性质称为膨胀性。

液体的压缩性大小可用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 来量度。设压缩前的体积为 V ，压强增加 Δp 后，体积减小 ΔV ，其相对变化为 $\frac{\Delta V}{V}$ ，则体积压缩系数为：

$$\beta = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (1-8)$$

当 Δp 为正时， ΔV 必为负值，故上式右端加一负号，保持 β 为正数。

β 的单位为 m^2/N ，量纲为 $[\beta] = [M^{-1}LT^2]$ 。

体积弹性系数 K 是体积压缩系数 β 的倒数，即：

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (1-9)$$

K 的单位为 N/m^2 ，量纲为 $[K] = [ML^{-1}T^2]$ 。

液体种类不同，其 β 或 K 值不同。同一液体， β 或 K 随温度和压强而变化，但变化不大。因此，液体并不完全符合弹性体的虎克定律。

在一般工程设计中，水的体积弹性系数 K 可近似地取为 $2 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。此值说明，若 Δp 为 1 atm ， $\frac{\Delta V}{V}$ 约为两万分之一，因此，在 Δp 不大的条件下，水的压缩性可以忽略，水的密度和重度可视为常数。因此，根据流体的压缩性可将流体分为可压缩流体和不可压缩流体。虽然液体的压缩性很小，但是在讨论管道水击或者长距离的输送问题时，则不可忽略液体的压缩性。

虽然气体的压缩性比液体大，但是如果气体流速小于 68 m/s ，则可忽略气体的压缩性将之看作不可压缩流体。

(5) 表面张力 表面张力是指流体表面在分子作用半径内的一薄层分子，由于引力大于斥力而在流体表层沿表面方向产生的拉力。表面张力的大小可用表面张力系数 σ 来量度。 σ 是流体表面上单位长度上所受的拉力，单位为 N/m ，量纲为 $[\sigma] = [MT^{-2}]$ 。

σ 值随流体的种类和温度而变化，如 20°C 的水， $\sigma = 0.074 \text{ N/m}$ ；水银为 0.54 N/m 。

流体的表面张力很小，在流体力学计算中一般不需考虑它的影响。但在某些情况下，它的影响也是不可忽略的，如微小液滴（如雨滴）的运动、水深很小的明渠水流和堰流等。

在流体力学实验中，经常使用盛水或水银的细玻璃管作测压管，由于表层流体分子与固壁分子的相互作用会发生毛细管现象，如图 1-3 所示。

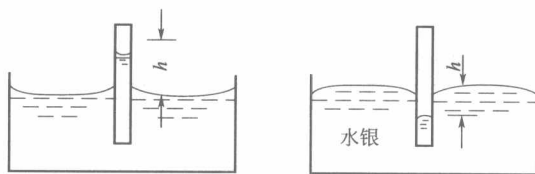


图 1-3 毛细管现象

对于 20°C 的水，玻璃管中的水面高出容器水面的高度 h 约为：

$$h = \frac{29.8}{d} \quad (\text{mm})$$

对于水银，玻璃管中汞面低于容器汞面的高度 h 约为：

$$h = \frac{10.5}{d} \quad (\text{mm})$$

上面两式中的 d 为玻璃管的内径，以毫米计。由于毛细管现象的影响，使测压管读数产生误差。 h 称为毛细影响高度。因此，通常测压管的直径不小于 1cm。

(6) 汽化压强 液体分子逸出液面向空间扩散的过程称为汽化，液体汽化为蒸气。汽化的逆过程称为凝结，蒸气凝结为液体。在液体中，汽化和凝结同时存在，当这两个过程达到动平衡时，宏观的汽化现象停止，此时液体的压强称为饱和蒸气压强，或汽化压强。液体的汽化压强与温度有关，水的汽化压强见表 1-4。

表 1-4 水的汽化压强

水温/℃	0	5	10	15	20	25	30
汽化压强/(kN/m ²)	0.61	0.87	1.23	1.70	2.34	3.17	4.24
水温/℃	40	50	60	70	80	90	100
汽化压强/(kN/m ²)	7.38	12.33	19.92	31.16	47.34	70.10	101.33

当水流某处的压强低于汽化压强时，该处会发生汽化，形成气泡，称为空化现象。当气泡被水流带到压力较高的地方，就会溃灭。大量气泡的溃灭会使邻近的固壁颗粒松动，脱落，称为气蚀现象。

【例 1-1】 整桶机油净重 2943N，油桶直径 0.6m，高 1.2m，试求机油的密度与重度。

解： 设油桶体积为 V ，油的质量为 M ，则：

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4}, M = \frac{G}{g}$$

机油的密度：

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{4G}{\pi g d^2 h} = \frac{4 \times 2943}{\pi \times 9.81 \times 0.6^2 \times 1.2} = 884 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

机油的重度：

$$\gamma = \rho g = 884 \times 9.81 = 8672.04 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

【例 1-2】 已知标准大气压下海平面处的海水密度为 1025kg/m³，海水体积弹性模量数的平均值为 23400bar，海底绝对压强为 817bar，试求海水的密度。

解： 根据弹性模数的定义：

$$K = -V \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

又有：

$$\frac{V}{\Delta V} = -\frac{\rho}{\Delta \rho}$$

则：

$$\Delta \rho = \frac{\rho \Delta p}{K}$$

海底处海水密度：

$$\rho + \Delta \rho = \rho + \frac{\rho \Delta p}{K} = \rho \left(1 + \frac{\Delta p}{K} \right)$$

海平面处的标准大气压可近似取为 1.013bar，代入数据，得：

$$\rho + \Delta \rho = 1025 \times \left(1 + \frac{817 - 1.013}{23400} \right) = 1061 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

1.2 作用在流体上的力

作用在流体上的力，按其物理性质分，有重力、摩擦力、惯性力、弹性力、表面张力

等。但在流体力学中分析流体运动时,主要是从流体中分出一封闭表面所包围的流体,作为隔离体来分析。从这一角度出发,可将作用在流体上的力分为表面力和质量力两大类。

(1) 表面力 作用在流体表面上的力称为表面力,是相邻流体或与其他物体壁面相互作用的结果。根据连续介质的概念,表面力连续分布在隔离体表面上,因此,在分析时常采用应力的概念。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或流体内摩擦力。

压强 p 垂直于作用面:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-10)$$

切应力平行于作用面:

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-11)$$

顺便指出,在静止流体中,流体间没有相对运动,即 $\frac{du}{dy} = 0$, 或者在理想流体中, $\mu = 0$, 则 $\tau = 0$, 则作用在 ΔA 上的力就只有法向力 ΔP 。

在国际单位制中, ΔP 及 ΔT 的单位是 N 。 p 及 τ 的单位是 N/m^2 , 也称为 Pa 。其量纲为 $[p] = [\tau] = [ML^{-1}T^{-2}]$

(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,其大小与流体的质量成正比。最常见的是重力;此外,对于非惯性坐标系,质量力还包括惯性力。

质量力常用单位质量力来量度。若隔离体中的流体是均质的,其质量为 M ,总质量力为 F ,则单位质量力 f 为:

$$f = \frac{F}{M} \quad (1-12)$$

总质量力在坐标上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则单位质量力在相应坐标的投影为 X 、 Y 、 Z 。

$$X = \frac{F_x}{M}, Y = \frac{F_y}{M}, Z = \frac{F_z}{M}$$

即:

$$\vec{f} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k} \quad (1-13)$$

单位质量力为加速度的单位: m/s^2 ; 单位质量力的量纲: $[f] = [LT^{-2}]$ 。

【例 1-3】 如图 1-4 所示,两种不相混合的液体有一个水平的交界面 $O-O$,两种液体的

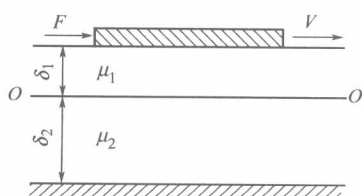


图 1-4 例 1-3 图

动力黏度分别为 $\mu_1 = 0.14 Pa \cdot s$, $\mu_2 = 0.24 Pa \cdot s$; 两液层厚度分别为 $\delta_1 = 0.8 mm$, $\delta_2 = 1.2 mm$, 假定速度分布为直线规律,试求推动底面积 $A = 1000 cm^2$ 的平板在液面上以匀速 $V = 0.4 m/s$ 运动所需的力 F 。

解: 设两层液体交界面处的液体运动速度为 V_0 。

交界面处,下层液体对上层液体的摩擦切应力为 τ_1 ,上层液体对下层液体的摩擦切应力为 τ_2 ,根据两层液体中的

的速度梯度不难得出:

$$\tau_1 = \frac{\mu_1 V_0}{\delta_1}$$

$$\tau_2 = \frac{\mu_2 (V - V_0)}{\delta_2}$$

显然,这两个在交界面处的切应力应该是大小相等、方向相反的一对作用力与反作用力。由:

$$\frac{\mu_1 V_0}{\delta_1} = \frac{\mu_2 (V - V_0)}{\delta_2}$$

解出:

$$V_0 = \frac{\mu_2 V}{\delta_2 \left(\frac{\mu_1}{\delta_1} + \frac{\mu_2}{\delta_2} \right)} = \frac{\delta_1 \mu_2 V}{\mu_1 \delta_2 + \mu_2 \delta_1}$$

所以:

$$\tau_1 = \frac{\mu_1 \mu_2 V}{\mu_1 \delta_2 + \mu_2 \delta_1} = \tau_2 = \tau$$

作用在平板上的摩擦力:

$$F = \tau A = \frac{\mu_1 \mu_2 V A}{\mu_1 \delta_2 + \mu_2 \delta_1} = \frac{0.14 \times 0.24 \times 0.4 \times 0.1}{0.14 \times 0.0008 + 0.24 \times 0.0012} = 3.36 \text{ (N)}$$

【例 1-4】 图 1-5 所示为一运水车厢沿与水平面成 $\theta = 30^\circ$ 角的路面行驶,其加速度为 $a = 2.5 \text{ m/s}^2$,试求作用于单位质量水体上的质量力在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

解: 车中水体受力如图所示,其质量力有重力和惯性力,总质量力:

$$F = mf = G + I$$

单位质量力:

$$f = g - a$$

其各分量:

$$X = a \cos \theta = 3 \times \cos 30^\circ = 2.60 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

$$Y = 0$$

$$Z = a \sin \theta - g = 3 \times \sin 30^\circ - 9.8 = -8.3 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

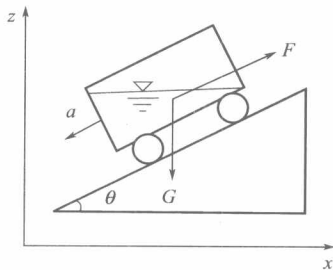


图 1-5

1.3 流体力学的学习指导

在流体力学的发展过程中,流体力学的研究大都采用实验方法。人们在研究实际流体运动过程中,通过大量的实验获得对流体运动的认识,在此基础上运用思维能力对其进行概括和提炼,提出描述流体运动的概念和规律,所有这些再回到实验和实际中去检验修正,如此反复,形成描述流体运动的相关理论和计算公式。所以,在流体力学的学习过程中必须重视流体力学的实验教学,并且注意观察日常生活中发生的流体力学的现象,这对流体力学的概念和规律的理解有很大的帮助。为了深入研究流体力学问题,掌握流体力学的实验方法和测量技术非常重要,就是在现代科学技术发展的今天,许多复杂的流体力学的问题还是要依赖于实验研究,量纲分析和相似理论就是进行流体力学实验所必须掌握的基本理论。

流体力学已经发展成为力学领域的一个重要学科,与数学和经典力学有着密切的联系。在流体力学的发展中理论解析方法也是非常重要的研究方法。这在 20 世纪 70 年代之前尤其突出,如流体力学的理论解、近似解析解、流动稳定性理论等,这些为许多工程实际问题的解决和学科理论的发展提供了重要的理论基础。纵观流体力学的内容,描述流体运动仍然引用牛顿力学三大定律、动能定理、动量定理、能量守恒定律和质量守恒定律等来建立其基本

方程，因此固体力学的有关知识将有助于流体力学的学习与理解。掌握牛顿剪切应力定律是学习流体力学的关键，其贯穿整个流体力学。基于这个定律，建立了描述实际流体流动的 Navier-Stokes 微分方程。围绕牛顿剪切应力定律演绎和提出了管内流动和明渠流动的阻力计算公式。因此，在学习流体力学的过程中必须抓住流体力学的重要内容，由重要的内容再扩展，这样做将会取得事半功倍的效果。值得提醒的是，任何复杂的问题都隐含着基本问题或者简单问题的本质规律，所以在学习流体力学过程中注意理想流体运动与实际流体运动之间的关系，注意静止流体与运动流体之间的联系，注意体会在流体力学中处理复杂问题的方法。作为力学的一个分支，其中的内容大部分都是用数学方法进行推导分析的，所以在学习中不断复习与巩固连续、微分、积分和级数等数学知识，这对提高流体力学的理论解析能力有很大帮助。反过来，流体力学中的概念也会加深对抽象的数学概念的理解，如流线方程与矢量，势函数和流函数与常微分方程、线积分，连续性假设与函数的连续，如此等。要提高对流体力学问题的解析能力，除了听课外，必须加强流体力学方面的推导和计算练习。

随着科学技术的发展，数值模拟已经成为流体力学的不可缺少的研究手段。虽然本书内容没有讨论，但是读者如果有兴趣可以将势流理论、水箱放水以及渗流三个部分作为数值模拟的对象。目前，数值模拟已经有很多商业软件，如 Fluent、CFX、ANSYS 和 CFX-Design 等，这些商业软件可以解决许多科研与工程实际问题，缩短了研发周期，减少了投资。但是数值模拟不能完全取代实验和理论分析，重要的流体力学问题还需要进行实验验证甚至依靠实验。

1.4 习题

1-1 设水的重度 $\gamma=9.71\text{kN/m}^3$ ，动力黏性系数 $\mu=0.599\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，求其运动黏性系数。

[$6.05\times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$]

1-2 体积 $V=10.0\text{m}^3$ 的液体重 $G=7.84\times 10^4\text{N}$ ，求其密度、重度和相对密度。

[800kg/m^3 , 7840N/m^3 , 0.8]

1-3 欲使水的体积减小 10%，则压强应增加多少？

[200atm]

1-4 相距 10mm 的两块平行平板水平放置，其间充满 $\mu=0.972\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的油。当两板相对速度为 1.5m/s 时，求切应力。

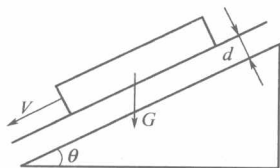
[145.8N/m^2]

1-5 有一矩形断面的宽渠道，其水流速度分布为：

$$u=0.002\frac{\gamma}{\mu}\left(hy-\frac{y^2}{2}\right)$$

式中， γ 为水的容重； μ 为水的动力黏性系数； y 为水深， $h=0.5\text{m}$ 。试求渠底（ $y=0$ ）处的切应力 τ_0 。

[9.8N/m^2]



题 1-6 图

1-6 一底面积为 $40\text{cm}\times 45\text{cm}$ ，高为 1cm 的木块，质量为 5kg，沿着涂有润滑油的 30° 斜面向下作等速运动，如题 1-6 图所示。已知木块运动速度 $V=1\text{m/s}$ ，油层厚度 $\delta=1\text{mm}$ ，由木块所带动的油层运动呈直线分布，求油的动力黏性系数 μ 。

[$0.136\text{N}\cdot\text{s/m}^2$]

第 2 章

流体静力学

流体静力学是研究流体处于静止状态时的力学规律及其在实际工程中的应用。所谓“静止状态”是指流体质点之间不存在相对运动，而处于相对静止或相对平衡状态的流体，作用在每个流体质点上的全部外力之和等于零。

流体质点之间没有相对运动时，流体的黏滞性便不起作用，故静止流体质点间无切应力；又由于流体几乎不能承受拉应力，所以，静止流体质点间以及质点与固壁间的相互作用形式为压力，也称静压强。流体静力学的主要任务一方面就是根据力的平衡条件获得静止流体中的压强分布规律；另一方面就是静压强分布规律确定各种情况下的静水总压力，以解决工程实际中力的荷载问题。流体静力学也是学习流体动力学的基础。

2.1 流体静压强

(1) 流体静压强的定义 在静止的液体中，围绕某点取一个微小作用面，设其面积为 ΔA ，作用在该面积上的压力为 ΔP ，当 ΔA 无限缩小到一点时，则平均压强 $\Delta P/\Delta A$ 趋近于某一极限值，此极限值便定义为该点的静压强（一般指静水压强），通常用符号 p 表示，即：

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (2-1)$$

静压强的单位为 N/m^2 (Pa)，量纲为 $[p] = [ML^{-1}T^{-2}]$ 。

流体静压强有两个基本特征：静压强方向与作用面的内法线方向重合；静压强的大小与其作用面的方位无关，只与该点的位置有关，亦即任何一点处各方向上的静压强大小相等。

静压强的大小与作用面的方向无关，该特征给流体力学的力的分析带来非常的方便。该特征可以在流体中任取一个二维流体微元或者三维四面体微元获得证明，这里留给读者加以练习。

(2) 重力作用下静压强分布规律 工程实际中经常遇到的流体平衡问题是流体相对于地球没有运动的静止状态，此时流体所受的质量力仅限于重力。

在质量力只有重力的静止流体中，任取一个圆柱形微元体，如图 2-1 所示。设微元的横截面面积为 ΔA ，由于微元体是静止的，则在 z 方向上受力的合力为 0，其力的平衡方程为：

$$P_1 - P_2 = -mg$$

从而有：

$$p_1 \Delta A - p_2 \Delta A = -(\rho \Delta A \Delta z)g$$

即：

$$\frac{dp}{dz} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta z} = -\rho g = -\gamma$$

也可以写为：

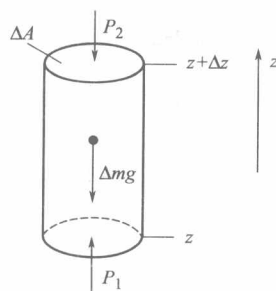


图 2-1 重力作用下的静压强

$$dz + \frac{dp}{\gamma} = 0$$

对不可压缩均质流体，重度 γ 为常数，积分上式得：

$$z + \frac{p}{\gamma} = C \quad (2-2)$$

式中， C 为积分常数。

式(2-2)表明，在重力作用下，不可压缩静止流体中各点的 $\left(z + \frac{p}{\gamma}\right)$ 值相等。式中 z 代表某点到基准面的位置高度，称为位置水头； $\frac{p}{\gamma}$ 代表该点到自由液面单位面积的液柱质量，称为压强水头； $z + \frac{p}{\gamma}$ 称为测压管水头。对其中的任意两点 1 和 2，式(2-2)可写成：

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad (2-3)$$

这就是重力作用下静止流体应满足的基本方程式，是静力学的基本方程式。

在自由表面上， $z = z_0$ ， $p = p_0$ ，则 $C = z_0 + \frac{p_0}{\gamma}$ 。代入式(2-2)即可得出重力作用下静止流体中任意点的静压强计算公式：

$$p = p_0 + \gamma(z_0 - z)$$

或：

$$p = p_0 + \gamma h \quad (2-4)$$

式中， $h = z_0 - z$ 表示该点在自由液面以下的淹没深度。

式(2-4)即计算静压强的基本公式。它表明，静止流体内任意点的静压强由两部分组成：一部分是表面压强 p_0 ，它遵从帕斯卡定律等值地传递到流体内部各点；另一部分是液重压强 γh ，也就是从该点到流体自由表面的单位面积上的液柱质量。

还可以看出，淹没深度相等的各点静压强相等，故水平面即为等压面，它与质量力（即重力）的方向相垂直。但必须注意，这一结论仅适用于质量力只有重力的同一种连续介质。对于不连续的流体（如流体被阀门隔开，或者一个水平面穿过两种及以上不同介质）位于同一水平面上的各点压强并不一定相等，水平面不一定是等压面。

【例 2-1】 一封闭容器内盛水，水面压强为 p_0 ，当容器自由下落时，求水中压强分布规律。

解：考虑惯性力与重力在内的单位质量力为：

$$X=0, Y=0, Z=-g+g=0$$

代入式 $dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz)$ 中积分得 $p = p_0$ ，即水中任一点的压强都相等且为液面压强 p_0 。

【例 2-2】 液体的静压式是 $Z + \frac{p}{\rho g} = C$ 。某容器盛有两种互不相混杂的液体，上、下两层液体的密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 ，静压式的常数分别为 C_1 和 C_2 ，上层液体比下层液体轻， $\rho_1 < \rho_2$ ，求证： $C_1 > C_2$ 。

解：上、下层液体的静压式分别为：

$$Z + \frac{p}{\rho_1 g} = C_1$$

$$Z + \frac{p}{\rho_2 g} = C_2$$