

中等专业学校教学用书

流体机械

齐大信 主编



ZHONGDENG
ZHUANYE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书是冶金工业部中等专业学校统一编写的“九五”规划教材。

书中内容除工程流体力学的基础知识外,着重讲述离心泵和通风机、活塞式空气压缩机的工作理论、构造、运行、调节、维修、选型计算。对冶金厂矿常用的轴流式通风机、离心式鼓风机、罗茨鼓风机、真空泵,油隔离泵也有介绍。本书知识覆盖面宽,工程实用性强,便于教学。

本书适于中专、高职、大专、中技、职业高中机械类或相近专业使用,也可供厂矿工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体机械/齐大信主编.-北京:冶金工业出版社,
1997.8
中等专业学校教学用书
ISBN 7-5024-2046-0

I. 流… II. 齐… III. 流体机械-专业学校-教材
IV. TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 13036 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)
中国人民警官大学印刷厂印刷;冶金工业出版社出版;各地新华书店发行
1997 年 8 月第 1 版,1997 年 8 月第 1 次印刷
787mm×1092mm 1/16;17.5 印张;421 千字;269 页;1-2500 册
22.00 元



前 言

本书是冶金工业部职业教育学校的统编教材,是根据冶金部 1994 年 3 月下达的冶金机械专业教学计划所制定的《流体机械》教学大纲,并按照《冶金工业部关于编审冶金中等专业学校专业课教材的几项原则》的要求编写的。其内容包括:流体静力学基础,流体动力学基础,粘性流体运动及其阻力计算,离心式水泵和通风机的工作理论,离心式水泵,离心式通风机,活塞式空气压缩机和其它类型泵和风机。

本书适合于中专、高等职业教育、大专、中技、职业高、中等学校机械类或相近专业使用,也可供厂矿工程技术人员参考。

为适应教学改革的需要,更好地满足教学要求,本书在编写过程中,特别注意了以下几点。

1. 尽量简化理论推导,突出基本公式的意义讨论和实际应用,每章附有小结,对本章内容作了简要概括,根据教学大纲提出教学要求,并附有一定数量的习题(包括思考题),便于学生掌握和消化知识。

2. 本书知识覆盖面宽,除重点讨论离心泵、离心通风机和活塞式空气压缩机外,增编了其它类型泵和风机一章,内容有轴流式通风机、离心式鼓风机、罗茨鼓风机、真空泵和油隔离泵等。本书内容既能满足一般冶金工厂的需要,也兼顾了流体机械在矿山的应用,具有较强的专业通用性。

3. 为了适应培养应用型人才的需要,本书还加强了如安装、运转、维护、修理等实用性内容,具有较强的工程实用性。

4. 采用法定计量单位,并尽可能采用最新的国家标准和行业标准。

参加本书编写工作的有:株洲冶金工业学校齐大信(绪论,第 3 章);上海冶金工业学校胥百琴(第 1 章)、季明善(第 6 章);河北省冶金工业学校侯维芝(第 2 章);昆明冶金工业学校韩宏(第 4 章);安徽省冶金工业学校胡慧萍(第 5 章);山东省冶金工业学校李士军(第 7 章);攀钢冶金工业学校华建慧、马秀清(第 8 章)。齐大信任主编,季明善、韩宏任副主编,株洲冶金工业学校叶文亮任主审。

编写过程中,得到了冶金工业部教育咨询服务中心、全国冶金中专《冶金机械》课程组、安徽省冶金工业学校、株洲冶金工业学校、昆明冶金工业学校和其它各参编学校的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,加之时间仓促,缺点错误在所难免,诚恳欢迎读者批评指正。

编 者

1997 年 4 月 株洲

主 要 符 号 表

A	面积
b	通风网路全压系数
c	绝对速度
d	相对密度, 直径
e	比机械能
F	力
g	重力加速度
H	水泵扬程 (压头)
H_d	水泵动压头
H_{ss}	泵的允许吸上真空高度
H_{st}	水泵静压头
H_T	水泵有限叶片理论压头
$H_{T\infty}$	水泵无限叶片理论压头
$[H_s]$	泵的允许吸水高度
h_f	沿程水头损失
h_j	局部水头损失
h_w	总水头损失
i	水力坡度
K	环流系数
L	升
m	质量
$(NPSH)_a$	有效汽蚀余量
$(NPSH)_r$	必须汽蚀余量
n_s	比转数
P	功率、总压力
$\bar{p}$	全压系数
p	压强、风机压力
p_a	大气压强
p_d	风机动压
p_n	饱和蒸汽压强
p_o	相对压强
p_{st}	风机静压
p_T	风机有限叶片理论压力
$p_{T\infty}$	风机无限叶片理论压力
Q	体积流量、排气量

R 水力半径、通风网路阻力系数

Re 任意雷诺数

Re_k 下临界雷诺数

u 圆周速度、点速

V 体积

v 均速

W 重力

z 叶片数

β 叶片安装角

γ 重度

δ 层流边层厚度

ϵ 管壁粗糙度

ζ 局部阻力系数

η 粘度、效率

η_h 流力效率

η_m 机械效率

η_v 容积效率

λ 沿程阻力系数

ν 运动粘度

ρ 密度

τ 切应力

Ω 反作用度

ω 角速度

目 录

绪论	1
1 流体静力学基础	2
1.1 流体的主要物理性质	2
1.2 流体静压强	8
小结	21
习题	21
2 流体动力学基础	24
2.1 流体动力学基本概念	24
2.2 流体流动的连续性方程	29
2.3 伯努利方程	30
小结	41
习题	42
3 粘性流体运动及其阻力计算	44
3.1 流体运动和流动阻力的两种形式	44
3.2 雷诺实验	45
3.3 圆管中的层流	49
3.4 圆管中的紊流	51
3.5 粘性流体的不均匀流动	56
3.6 管路水力计算	59
小结	64
习题	65
4 离心式水泵和通风机的工作理论	67
4.1 概述	67
4.2 离心式水泵和通风机的基本方程	74
4.3 离心式水泵和通风机的理论压头(或压力)特性曲线	78
4.4 离心式水泵和通风机的实际运转特性曲线	81
4.5 离心式水泵和通风机在管网中的工作	87
4.6 相似定律在泵和风机中的应用	95
小结	107
习题	111
5 离心式水泵	113
5.1 离心式水泵的构造	113
5.2 离心式水泵轴向推力及平衡方法	123
5.3 离心式水泵的汽蚀	126
5.4 离心式水泵的调节	134

5.5 离心式水泵的安装、运转与维修	138
5.6 离心式水泵的选择计算	141
小结	153
习题	153
6 离心式通风机	155
6.1 离心式通风机的构造	155
6.2 离心式通风机的调节	162
6.3 离心式通风机的联合工作	167
6.4 离心式通风机的安装与运行	170
6.5 离心式通风机的维护与修理	176
6.6 离心式通风机的选择计算	180
小结	190
习题	191
7 活塞式空气压缩机	193
7.1 概述	193
7.2 活塞式空压机的工作理论	197
7.3 活塞式空压机的构造	202
7.4 活塞式空压机的运行与维修	219
小结	231
习题	231
8 其它类型的泵和风机	233
8.1 轴流式通风机	233
8.2 离心式鼓风机	244
8.3 罗茨鼓风机	252
8.4 真空泵	258
8.5 油隔离泵	266
小结	267
习题	268
主要参考文献	269

绪 论

在冶金厂矿,广泛地应用着各种流体机械,如用于冶金炉和轧钢机等冷却水的排送、矿井坑道排水以及其它生产用水供排系统中的水泵;又如用于烧结机的抽风助燃、高炉炼铁生产中的热风供给、冶炼炉的鼓风及烟道通风、车间的通风换气、各种除尘设备以及矿井中的各类通风机和鼓风机。空气压缩机产生的压缩空气一直是矿山采用的原动力之一,用以带动凿岩机、风镐及其它风动机械进行工作。在钢铁企业,气动工具的操纵、各种气动装置(如料仓闸门、炉门)的启闭、溶体的搅拌、冶金炉的助燃等也都离不开压缩空气。流体机械也同样广泛地用于其它工业领域,如化工、石油、电子、轻工、纺织、机械等。总之,流体机械是现代企业中不可缺少的通用机械。

流体机械的使用量大、面广、耗能多。在我国,泵和风机所消耗的电能几乎要占全国总用电量的三分之一。随着工农业生产和科学技术的发展,泵和风机等产品正朝着标准化、通用化、系统化、大型化、高速化、高效率、低噪声、多样化的方向发展。

泵和风机等流体机械的理论基础是工程流体力学。工程流体力学是研究流体的平衡和运动规律及其应用的科学。作为其研究对象的流体,包括以水为代表的液体和常温、常压、低速下的气体。冶金厂矿中涉及到工程流体力学知识的技术问题还有很多,如液压传动、离心浇注、润滑密封、水力轴承、供气供油、旋风除尘等等。

《流体机械》是冶金机械、矿山机械等专业的一门专业课。它包括工程流体力学基础和流体机械两大部分。作为理论基础部分的工程流体力学,属于技术基础课的范畴,具有较强的理论性和系统性。而流体机械部分则与其它专业课程一样,具有很强的实践性。因此,在学习本课程时,要注意课程特点和学习方法。

积极参加实践教学,充分利用参观、生产实习等深入生产现场的机会,解决好感性知识缺乏的问题,并认真上好每一堂实验课。

坚持理论与实际相结合的学风。密切结合身边的生产、生活实际进行学习,联系实际地分析工程技术中的流体力学问题,加强自身动手能力和实用技能的培养和提高。

注重基本概念、基本理论和基本方程等基础知识的理解和应用,打好基础,循序渐进,全面系统地掌握知识。

根据课程内容特点,学习时可以多采用归纳比较的方法。例如流体力学与刚体力学、离心式与轴流式泵与风机及通风机、鼓风机与压风机等都可以从各方面进行分析比较,找它们之间的相同点和不同点,重点在于找不同点,找特点。通过归纳比较,可以理顺学过的知识,使之条理化,便于消化和记忆。

总之,工程流体力学基础是机械工程技术人员必须具备的基础技术理论,泵和风机等常用流体机械的原理、构造、运转、选择和维护等是机械工程技术人员必须掌握的知识和技能。因此,我们每一个同学都应该努力学习好这门课程。

1 流体静力学基础

流体静力学是研究不可压缩流体在静止状态下的力学规律，以及这些规律在工程技术上的应用。流体在各种不同水力现象中的状态和性质，都与它们的物理性质有关，因此有必要首先了解之。

1.1 流体的主要物理性质

1.1.1 流体的概念

凡不像固体那样能保持一定形状而具有流动性的物质均称为流体。

流体有两种，一种是气体，另一种是液体。

气体分子排列松散，分子间的引力较弱，若对气体施加压力，则其体积极易缩小；反之，将气体充入压强极低的空间，则其体积将无限制地膨胀，所以通常称之为可压缩的流体。

液体分子排列较紧密，分子间的作用力较强，在极大的外力作用下，其体积只能发生极微小的变化，而视为具有一定的体积，因而通常称之为不可压缩的流体。

将液体注入压强极低的空间时，不能像气体那样充满容纳它的全部空间，只占据其原有体积，其上表面与空气相接触，形成自由表面。

由上述可知，液体和气体的共同特性是，它们均无一定的形状，具有流动性。相异之处是，液体不可压缩（压缩性非常微小），在容器里形成一定的自由表面；相反，气体可压缩，又因其膨胀后可充满整个容器，故不能形成自由表面。

流体是由大量分子组成的，分子之间有一定的间隙。组成流体的分子永远处于杂乱的热运动之中。为了避免研究分子微观运动的繁难，引入流体具有连续性的假设，即认为流体不是由分子组成，流体中没有空隙存在，它是由完全充满所占空间的无数流体质点所组成的连续介质，并忽略分子内部的微观运动。

同时，假定流体是均质的，即在所占据的空间中，其质量均匀分布。在一定情况下，这个假设与客观事实基本相符，而在某些特定情况下，必须将它们看成非均质的，本书只研究均质流体。

引入均质、连续介质这一概念，使得流体的一些特性如速度、密度、压强等均看作是空间坐标的连续函数，从而可以利用数学工具研究流体平衡与运动的规律，能够简便而有效地解决工程实际问题。

1.1.2 流体的主要物理性质

流体的物理性质对流体力学及流体机械的研究是重要的。

A 重度、密度和相对密度

所有物体，不论是固体还是流体，都被引力拉向地心，这种力称为重力，重力与物体的质量成正比。定义如下：

$$W = mg \quad (1.1)$$

式中 W —— 重力，N；

m —— 质量, kg;

g —— 重力加速度。其值常取 9.8m/s^2 。

单位体积流体的重量叫做流体的重度, 以 γ 表示:

$$\gamma = W/V \quad (1.2)$$

式中 γ —— 重度, N/m^3 ;

W —— 重力, N;

V —— 容积 (体积), m^3 。

单位体积流体的质量叫做流体的密度, 以 ρ 表示:

$$\rho = m/V \quad (1.3)$$

式中 ρ —— 密度, kg/m^3 ;

m —— 质量, kg;

V —— 容积 (体积), m^3 。

密度与重度有如下关系:

$$\rho = \gamma/g \quad (1.4)$$

相对密度是指流体质量与同体积的 4°C 蒸馏水的质量之比值, 用 d 表示:

$$d = \frac{\rho}{\rho_4} \quad (1.5)$$

水和空气的重度与密度随温度的变化值列于表 1.1 中。

表 1.1 水和空气的重度与密度 (在 100kPa 压强下)

温度 ($^\circ\text{C}$)	重度 γ (N/m^3)		密度 ρ (kg/m^3)		温度 ($^\circ\text{C}$)	重度 γ (N/m^3)		密度 ρ (kg/m^3)	
	水	空气	水	空气		水	空气	水	空气
0	9789	12.6	999.9	1.29	25	9779	11.72	997.1	1.19
4	9800	12.49	1000	1.27	30	9767	11.45	995.7	1.17
10	9797	12.23	999.7	1.25	35	9752	11.26	995.1	1.15
15	9791	12.03	999.1	1.23	40	9737	11.07	992.2	1.13
20	9789	11.82	998.2	1.21	45	9720	10.88	999.2	1.11

由表 1.1 可知: 当温度不高时, 水的重度变化很小。因此, 在常温下进行水力计算时, 可采用固定不变的值, 即采用 $\gamma=9800\text{N/m}^3$, $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 。同样, 为了方便计算, 常取空气的重度 $\gamma=11.82\text{N/m}^3$, $\rho=1.2\text{kg/m}^3$ 。

在 100kPa 压强下, 其他几种常用流体的重度、密度与相对密度值列于表 1.2 中。

B 压缩性和膨胀性

压缩性和膨胀性是指流体的体积随压强及温度而变化的特性。

在温度不变的情况下, 流体体积随压强增加而减小的性质, 叫做流体的压缩性。在压强不变的情况下, 流体体积随温度升高而增大的性质, 叫做流体的膨胀性。

液体的压缩性和膨胀性都非常微小, 在一般水力工程计算中, 压强和温度的变化不是很大时不考虑液体的压缩性和膨胀性。

气体的压缩性和膨胀性非常显著, 是可压缩的流体。需要指出的是: 常温、常压、低

速下的气体，这种性质也可以被忽略。例如通风系统中的气体压强在计算时可以看作和液体一样不可压缩，这样，液体的平衡和运动规律就同样适用于通风系统中。

表 1.2 几种常用流体的重度、密度与相对密度（在 100kPa 压强下）

流体名称	温度 (℃)	重度 (N/m³)	密度 (kg/m³)	相对密度
海 水	15	9996~10094	1020~1030	1.02~1.03
飞 机 汽 油	15	6370	650	0.65
普 通 汽 油	15	6860~7350	700~750	0.70~0.75
石 油	15	8624~8722	880~890	0.88~0.89
润 滑 油	15	8722~9100	890~920	0.89~0.92
煤 油	15	7450	760	0.76
酒 精	15	7742~7840	790~800	0.79~0.80
甘 油	0	12348	1260	1.26
水 银	0	133280	13600	13.6
乙 醚	0	7252	740	0.74
甲 醇	4	7938	810	0.81
苯	0	8624	880	0.88

C 粘性

流体流动时，由于流体与固体壁间存在附着力，流体本身各部分之间有内聚力，故流体流动时，各处的速度产生差异。以圆管中层流为例，紧贴管壁的液体由于附着力的作用，速度为零；离界壁越远流速越大，轴心处的流速最大。即通过管道的横截面上各点流体的速度按抛物面规律分布，如图 1.1 所示。

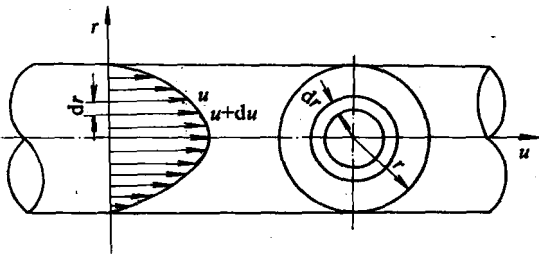


图 1.1 圆管中流速的分布

若将此时的流体看成许多无限薄的流体层组成，则显然各薄层的流速彼此不等。流动较快的薄层带动流动较慢的薄层；由流动较慢的薄层阻滞流动较快的薄层。这样，当速度较快的薄层在速度较慢的薄层上滑过时，有相对运动的两接触液层间的相互制约，很类似于固体摩擦过程，所以，在流体层之间产生内摩擦力或切应力。这种流体流动时，有相对运动的两接触层间产生内摩擦力的性质叫做流体的粘性。

实验证明, 流体流动时产生的内摩擦力的大小与流体流动时的速度梯度成正比, 与接触面积成正比, 与流体种类及其温度有关, 与流体内的压强无关, 此关系称为牛顿内摩擦定律, 即

$$F = -\eta A \frac{du}{dr} \quad (1.6)$$

或写成切应力形式

$$\tau = \frac{F}{A} = -\eta \frac{du}{dr} \quad (1.7)$$

式中 F —— 内摩擦力, N;

τ —— 内摩擦应力 (切应力), N/m²;

A —— 两摩擦层的接触面积, m²;

$\frac{du}{dr}$ —— 速度梯度, 1/s; 为在垂直于流速的半径方向上单位距离内的速度变化率;

η —— 比例系数, 其值与流体的种类及温度有关, 称为动力粘度, N·s/m²。

式 (1.6)、(1.7) 右侧加负号, 这是因为速度 u 随半径 r 的增加而减小, 即 $\frac{du}{dr}$ 本身为负值, 再加负号, 则使内摩擦力 F 或 τ 为正值。

由上两式可知, 当 $\frac{du}{dr}=0$ 时, $F=0$, 或者说流体呈静止状态时, 不显示内摩擦力, 不呈现粘性。只有在流动状态中, 流体才显示内摩擦力, 才呈现粘性。

粘性的大小用粘度表示, 常用的粘度有三种: 动力粘度、运动粘度和相对粘度。

a 动力粘度

根据牛顿内摩擦定律, 从式 (1.6) 中去除负号, 取绝对值得

$$\eta = F/A \cdot \frac{du}{dr} = \tau / \frac{du}{dr} \quad (1.8)$$

式中 η 称为动力粘度, 其物理意义为: 当速度梯度为 1 时, 有相对运动的接触液层间单位面积上的内摩擦力, 此时 $\eta=\tau$ 。由此可知, 动力粘度 η 代表流体的一种重要物理性质。 η 值大, 即表示流体流动时内摩擦切应力大, 流动困难; 反之, 内摩擦切应力小, 流动较易。它直接关系到流体流动的阻力。

在国际单位制中, 切应力的单位是 N/m², 速度梯度 $\frac{du}{dr}$ 的单位是 1/s, 故动力粘度 η 的单位是 N·s/m² (Pa·s)。而在 CGS 单位制中, η 的单位是 dyn·s/cm², 又称为泊 (P)。两者的换算关系是 1Pa·s=10P。目前工程上的图表数据大都采用泊作为 η 的单位。同时因泊的单位太大, 有时应用不便, 而取百分之一泊, 即厘泊 (cP) 做单位, 故 1P=100cP。

无论采用哪种单位制, η 的单位中均含有动力学的量纲, 因此称为动力粘度。

b 运动粘度

动力粘度与流体密度之比, 称为运动粘度, 以 ν 表示

$$\nu = \eta / \rho \quad (1.9)$$

在国际单位制中, 运动粘度 ν 的单位为 m²/s; 在 CGS 单位制中, ν 的单位为 cm²/s, 简称斯 (St)。它们的换算关系为: 1m²/s=10⁴St。常取百分之一斯, 即厘斯 (cSt) 做单位, 1St=100cSt。

无论采用哪种单位制， ν 的单位中均含有运动学的量纲，因此称为运动粘度。

不同的流体有不同的 η 与 ν 值，并且流体的粘性随温度与压强而变化。但压强对它的影响较小，在一般情况下可忽略不计，仅考虑温度对它的影响。但对某些特殊情况如油压系统的压强过高时，则应考虑压强对粘性的影响。

根据实验测出温度 $t=0\sim 40^\circ\text{C}$ 时，水与空气的运动粘度 ν 值列于表 1.3 中。

表 1.3 水与空气的运动粘度 (100kPa 压强下)

温度 ($^\circ\text{C}$)	运动粘度 (m^2/s)		温度 ($^\circ\text{C}$)	运动粘度 (m^2/s)	
	水	空气		水	空气
0	1.792×10^{-6}	0.137×10^{-4}	20	1.007×10^{-6}	0.157×10^{-4}
4	1.56×10^{-6}	0.141×10^{-4}	25	0.895×10^{-6}	0.162×10^{-4}
10	1.31×10^{-6}	0.147×10^{-4}	30	0.804×10^{-6}	0.166×10^{-4}
15	1.14×10^{-6}	0.152×10^{-4}	40	0.661×10^{-6}	0.176×10^{-4}

由表 1.3 中可知，水的运动粘度随温度升高而减小，空气则相反，它随温度增高而增大。这是由于液体与气体具有不同分子结构的缘故。

液体中分子间距较小，分子间相互作用力较强，当温度升高时，分子间距加大，引力减弱，粘性降低。

气体则相反，其分子的间距较大，相互间引力较弱，分子运动的自由行程大，相邻两层速度快慢不同的分子互相掺混，从而减小了质点的相对滑动。当温度升高时，其内能增加，分子运动加剧，掺混现象增强，阻止流体质点相对滑动的内摩擦力加大，所以气体的粘性随温度升高而增加。

运动粘度和动力粘度均难以直接测量，所以工程上也常采用另一种可用仪器直接测出的粘度单位，叫相对粘度或条件粘度。

c 相对粘度

相对粘度是以流体的粘度与水的粘度的间接比值来表示流体粘度的大小。国际上采用的相对粘度单位有赛氏、富氏及恩氏粘度。我国目前采用恩氏粘度，以 $^\circ\text{E}$ 表示。

恩氏粘度用恩氏粘度计测定。恩氏粘度计结构如图 1.2 所示。在水槽 2 中安置有球状底的黄铜圆筒 1，在其底部焊接黄铜管 3，在黄铜管内安装有白金锥管 4。测定流体的粘度时，先将白金锥管堵塞，然后将被测液体注入圆筒内，使液面与标点针 5 的尖端平齐，此时筒内放入的液体恰好是 200cm^3 。借水槽内的水温使被测液体始终保持一定的温度，用温度计 6 与 7 测定之。然后将锥管开启，观察筒内 200cm^3 的液体流出直径为 2.8mm 手锥管小孔所需时间 t 。再测出同温度同体积的蒸馏水流出所需时间 t_0 ， t 与 t_0 的比值即为该液体的恩氏粘度值

$$^\circ\text{E}_t = t/t_0 \quad (1.10)$$

式中 t_0 —— 20°C 时一般为 $50\sim 52\text{s}$ ，计算时可取平均值 51s 。

工业上常以 20 、 40 、 50 及 100°C 作为测定恩氏粘度的标准温度，并以相应的符号 $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{40}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$ 、 $^\circ\text{E}_{100}$ 表示之。

实际流体均呈粘性，流动时均产生内摩擦力，它给流体运动的研究带来了困难，因之，

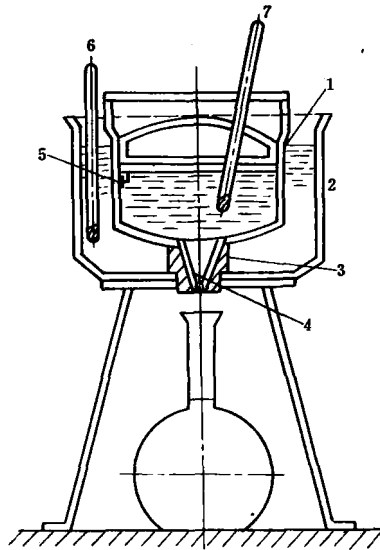


图 1.2 恩氏粘度计

1—黄铜圆筒；2—水槽；3—黄铜管；4—白金锥管；
5—标点针；6—温度计；7—温度计

引入理想流体的概念。理想流体没有粘性，在运动中不产生内摩擦力，用来简化对流体运动的研究，容易找出它的主要规律。然后考虑实际流体的粘性，对研究结果进行相应的修正，即可得出符合实际流体运动的基本规律。

例题 1.1 在宽度极大的平板 A 、 B 之间充满水，如图 1.3 所示。板间距 $\delta = 1\text{mm}$ 。开始时水处于静止状态。在下平板 A 固定不动时，拉动上平板 B 向右以匀速 u 运动，发现两平板间各层的水以不同速度向右运动，其分布规律呈直线变化，与平板 A 相接触的液层速度为零，越向上速度越大，直到与平板 B 相接触的液层（附着层）速度与平板 B 运动速度相同，等于 u 。如 $u = 1\text{m/s}$ ，水的运动粘度 $\nu = 0.0156\text{cm}^2/\text{s}$ ，试求作用在平板 B 单位面积上的阻力有多大？

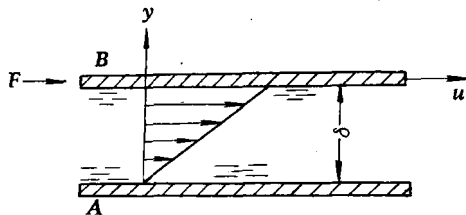


图 1.3 平板间的液体流动

解 由于板间液体运动速度呈直线分布, 流速梯度 du/dy 等于常数, 即液层的切应力相等, 包括 B 板上附着层与其下面邻层间接触面的切应力, 即 B 板上切应力, 也就是作用于平板 B 单位面积上的阻力。在 u 为线性分布情况下, 可用 u/δ 代替速度梯度 du/dy 。

已知动力粘度等于密度与运动粘度乘积, 即

$$\eta = \rho\nu = 1000 \times 1.56 \times 10^{-6} = 1.56 \times 10^{-3} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$$

将 η 值代入牛顿内摩擦定律公式, 得切应力

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} = \eta \frac{u}{\delta} = 1.56 \times 10^{-3} \times \frac{1}{0.001} = 1.56 (\text{N}/\text{m}^2)$$

平板 B 板上的这一切应力 τ 的方向与速度 u 的方向相反。

1.1.3 流体作用力的性质分析

处于平衡或运动状态的流体, 都受有各种力的作用。作用于流体上的力, 按其物理性质来看, 有重力、惯性力、弹性力、摩擦力、表面张力等等。如果按其作用特点, 这些力可分为表面力和质量力两大类。

A 质量力

质量力作用于被研究流体的所有质点上, 与该流体的质量成正比。重力、离心力、惯性力均为质量力。在均质流体中, 质量和体积成正比, 故质量力又称体积力。

质量力除用总作用力来度量外, 也常用单位质量力来度量。若有一质量为 m 的均质流体, 作用于其上的总质量力为 F , 则所受的单位质量力 f 为

$$f = F/m \quad (1.11)$$

单位质量力具有和加速度一样的量纲, 故又称之为加速度质量力。

B 表面力

表面力是作用于流体的表面上, 并与受作用的表面面积成正比的力。表面力反映在所研究流体的外部表面上或内部截面上, 如大气压强, 液体内部某点的液柱压力。

表面力的大小除用总作用力来度量以外, 也常用单位面积上所受的表面力(即应力)来度量。若表面力与作用面垂直, 此应力称为压应力或压强; 若表面力与作用面平行, 此应力称为切应力。这里所说的切应力是指流体流动时所引起的单位接触面积上的摩擦力。

1.2 流体静压强

1.2.1 流体静压强概念

流体处于静止状态, 包括两种情况: 一种是流体整体相对于地球没有运动, 处于绝对静止; 另一种是流体整体对地球有相对运动, 但流体对于容器或者流体质点之间没有相对运动, 处于相对静止。本书讨论流体绝对静止的问题。

由于静止流体不存在内摩擦力, 不显示粘性, 因而这里所讨论的力学规律无须考虑理想流体与实际流体的区别。

若静止流体中某点 A 周围微小面积 ΔA 上的总作用力是 ΔF (只能是垂直于作用面 ΔA 的压力, 下面将讲述), 则在面积 A 上的平均流体静压强为

$$p_m = \Delta F / \Delta A \quad (\text{N}/\text{m}^2) \quad (1.12)$$

当面积 A 趋近于零时, $\Delta F / \Delta A$ 的极限值, 叫做 A 点的静压强。

$$p_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1.13)$$

按式 (1.12) 求得平均流体静压强, 只能是某已知面积上的平均值, 只有在水平作用面的情况下, 各部分的平均流体静压强才会是一样的。显然, 在垂直或倾斜的作用面情况下, 其不同部分上的平均流体静压强是不一样的, 式 (1.13) 是点的流体静压强的计算式。

值得注意的是, 在工程上往往将压强称为压力, 而把实际意义的压力称为总压力或作用力。

1.2.2 流体静压强特性

流体静压强的产生来自于流体的自重及表面所承受的力。流体静压强有两个基本特性。

(1) 流体静压强的方向永远沿着作用面的内法线方向, 此为流体静压强的第一个重要特性。

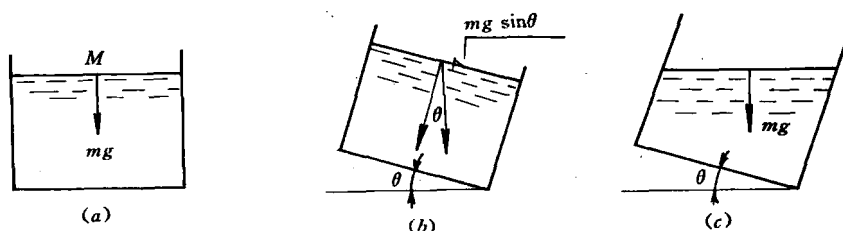


图 1.4 流体的静压强方向

这是因为静止的流体质点之间没有相对运动, 流体内不存在切向应力, 因此流体内只有法向的压力, 即静压强。如图 1.4 (a) 所示, 在静止流体中质点 M 所受的重力垂直于液面, 液体保持静止。若将液面倾斜一角度 θ , 则重力 mg 在平行于液面的方向上产生一切应力 $mg \sin \theta$, 如图 1.4 (b) 所示。而静止流体不能承受切向力, 故液体必将发生流动, 直至液面恢复水平, 切向力消失, mg 与液面垂直时静止的状态才可以保持, 如图 1.4 (c) 所示。

(2) 流体内任一点所受各方向静压强的大小均相等。静止流体内某一点的压强不因通过该点的面的方向不同而改变它的数值, 即是说流体内任一点的静压强不论来自何方皆相等。这是流体静压强的第二个重要特性。以下证明这一特性。

在平衡的液体中任取一点 O , 并设置坐标系如图 1.5 所示。在坐标系上取包括原点 O 在内的任意无限小四面体 $ABCO$ 。设想将四面体以外的流体除去, 为了保持平衡, 必须在四面体的各面上加以与原来液体作用等价的静压强 p_x 、 p_y 、 p_z 和 p_n (p_n 是斜面上的静压强), 它们的方向沿着各作用面的内法线。

我们认为在无限小四面体边界面上的静压强是均匀分布的, 各面上的流体总压力是:

对于平面 AOB , 为 $1/2 p_x dy dz$;

对于平面 BOC , 为 $1/2 p_y dx dy$;

对于平面 AOC , 为 $1/2 p_z dx dz$;

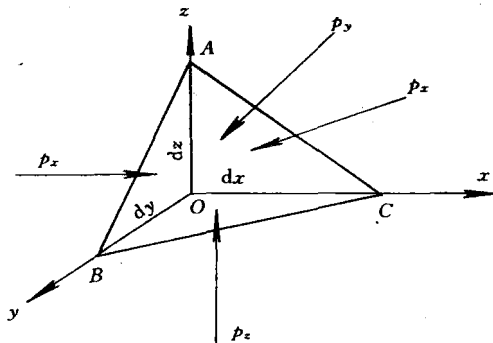


图 1.5 一点处沿所有方向静压强相等

对于平面 ABC , 为 $\frac{1}{2}p_n dA$ (dA 为 ABC 的面积)。

无限小四面体的质量力在 x 轴上的投影为 $\rho X \frac{1}{6} dx dy dz$, 其中 X 为单位质量力在 x 轴上的投影, ρ 为液体的密度, 列出以上各力对 x 轴的平衡方程式, 得

$$p_x \frac{1}{2} dy dz - p_n dA \cos \alpha + X \frac{1}{6} \rho g dx dy dz = 0 \quad (1.14)$$

式中 α 为 p_n 与 x 轴的夹角, 从几何关系知

$$dA \cos \alpha = \frac{1}{2} dy dz$$

此外方程式 (1.14) 的第三项是三阶无穷小, 可以忽略, 因此式 (1.14) 变成下面形式

$$p_x \frac{1}{2} dy dz - p_n \frac{1}{2} dy dz = 0$$

故得 $p_x = p_n$

同理可得

$$p_y = p_n; \quad p_z = p_n$$

$$\text{由此可见 } p_x = p_y = p_z = p_n = p \quad (1.15)$$

式 (1.15) 为流体静压强的第二特性表达式, 即在静止流体中, 任一点静压强的大小在各方向上均相等。根据这个特性, 可知静压强不是一个矢量, 而只是一个标量, 它决定于空间的位置, 是空间点的坐标 x 、 y 、 z 的单值连续函数, 即

$$p = f(x, y, z) \quad (1.16)$$

1.2.3 流体静力学基本方程

A 流体静力学基本方程的建立和意义

流体静力学基本方程是研究静止流体中某点的流体静压强的大小, 以及流体在平衡时静压强分布规律的数学表达式。

如图 1.6 所示, 观察盛于容器中的静止液体, 设作用于液体自由面上的压强为 p_0 , 且不等于大气压强。为确定液面以下, 深度为 h 处 A 点的静压强 p , 假想在液体中分出一个