

高等专科学校教学用书

GAODENG  
ZHUANKE  
XUEXIAO  
JIAOXUE  
YONGSHU

# 工程流体力学与 流体机械

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书

# 工程流体力学与流体机械

长沙工业高等专科学校 雷赐贤 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

高等专科学校教学用书

**工程流体力学与流体机械**

长沙工业高等专科学校 雷赐贤 主编

\*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

河北省阜城县印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张16.5 字数389千字

1994年6月第一版 1994年6月第一次印刷

印数1~4100册

ISBN 7-5024-1388-X

TK·17 (课) 定价: 7.80元

## 前 言

本教材是根据《1991~1995年冶金、有色高等专科学校教材出版规划》的安排，按照《冶金工业部关于编审冶金专科学校专业课教材的几项原则》和本课的教学要求进行编写的。全书分为两篇共八章：第一篇是工程流体力学基础，包括流体的基本概念，流体平衡与机械运动的基本规律以及这些规律在有压管路、孔口、管嘴出流等方面的应用。同时，为了满足液压课程教学的需要，介绍了缝隙流的基本知识。第二篇是流体机械，论述涡轮机的构造、工作原理及性能；介绍有关矿井通风和排水的基本知识，着重于泵和风机的运转、选型、安装、维护、检修等内容。

本书适合于作高等专科学校矿山机械、采矿、选矿专业的教学用书。

参加本书编写工作的同志有赵广发（第一篇第一、二、五章，第二篇第八章第四节）、雷赐贤（第一篇第三、四章，第二篇第六章第一节至第八节及第八章第十节）、高粹琛（第二篇第六章第九节、第七章及该篇其余章节）。雷赐贤担任主编，并负责全书的整理工作。

本书在编写过程中，从编写大纲的制定到最后定稿审查，都得到了全国冶金高校流体力学及流体机械学科组的专家、同行们的大力支持，特别是李诗久教授，纪祥、秦芳以及赵广发副教授直接参与指导，对提高教材编写质量起到了重要作用。在此表示衷心感谢。

编者限于水平，书中难免有缺点和错误，希望读者批评指正。

编者

1991.12.长沙

# 目 录

<b>第一篇 工程流体力学基础</b> .....	1
<b>第一章 流体及其主要物理性质</b> .....	1
第一节 流体的概念及连续介质 .....	1
第二节 流体的主要物理性质 .....	2
第三节 作用在流体上的力 .....	7
习题 .....	8
<b>第二章 流体静力学</b> .....	10
第一节 流体静压强的特性 .....	10
第二节 流体的平衡微分方程及其积分 .....	12
第三节 流体静力学基本方程 .....	17
第四节 压强单位和测压仪表 .....	21
第五节 静止液体作用于平面壁上的总压力 .....	26
第六节 静止液体作用于曲面壁上的总压力 .....	30
习题 .....	33
<b>第三章 流体动力学基础</b> .....	36
第一节 研究流体运动的方法 .....	36
第二节 流体动力学的基本概念 .....	38
第三节 连续性方程 .....	41
第四节 无粘性流体的运动微分方程 .....	45
第五节 无粘性流体微元流束的伯努利方程 .....	46
第六节 粘性流体总流的伯努利方程 .....	50
第七节 伯努利方程的应用实例 .....	56
第八节 定常流动总流的动量方程 .....	61
习题 .....	65
<b>第四章 粘性流体运动及其阻力计算</b> .....	68
第一节 流体运动和流动阻力的两种形式 .....	68
第二节 层流、紊流和雷诺判据 .....	69
第三节 均匀流动基本方程 .....	74
第四节 流体在圆管中的层流运动 .....	75
第五节 液体在缝隙中的流动 .....	79
第六节 流体在圆管中的紊流运动 .....	84
第七节 沿程阻力系数 .....	87
第八节 非圆形截面均匀紊流的阻力计算 .....	94
第九节 粘性流体的不均匀流动 .....	95
习题 .....	104
<b>第五章 管路、孔口和管嘴的水力计算</b> .....	106
第一节 管路水力计算概述 .....	106
第二节 简单管路的水力计算 .....	106

第三节	串联管路 .....	110
第四节	并联管路 .....	111
第五节	连续均匀出流管路 .....	113
第六节	孔口定常出流 .....	114
第七节	管嘴定常出流 .....	118
习题	.....	123
<b>第二篇</b>	<b>流体机械设备</b> .....	<b>127</b>
第六章	涡轮机的理论基础 .....	127
第一节	涡轮机的概念和分类 .....	127
第二节	涡轮机的工作原理及主要工作参数 .....	128
第三节	涡轮机的理论压头或压力 .....	131
第四节	涡轮机的理论流量 .....	138
第五节	涡轮机的理论压头或压力曲线 .....	139
第六节	涡轮机的运转特性曲线 .....	143
第七节	涡轮机的外部管网特性 .....	149
第八节	涡轮机的工况及工作区 .....	154
第九节	涡轮机的相似原理 .....	157
习题	.....	166
第七章	矿井通风设备 .....	167
第一节	概述 .....	167
第二节	矿用通风机构造 .....	169
第三节	矿井主通风机设备及其布置 .....	177
第四节	通风机的调节 .....	182
第五节	通风机的联合工作 .....	187
第六节	矿井主通风机设备选型设计 .....	191
第七节	矿井通风机设备的安装、运转及维修 .....	198
第八节	通风机的噪音及其控制 .....	202
习题	.....	205
第八章	矿井排水设备 .....	206
第一节	概述 .....	206
第二节	矿用离心式水泵的构造及轴向推力 .....	207
第三节	矿井主排水设备及其布置 .....	215
第四节	无底阀水泵在矿山排水中的应用 .....	220
第五节	离心式水泵的汽蚀和吸水高度 .....	223
第六节	离心式水泵的调节 .....	228
第七节	离心泵的联合工作 .....	234
第八节	矿井主排水设备的选型设计 .....	235
第九节	矿井排水设备的安装、运转及维修 .....	242
第十节	水仓的机械化清理简介 .....	245
习题	.....	249
附表	.....	250
参考文献	.....	256

# 第一篇 工程流体力学基础

## 第一章 流体及其主要物理性质

### 第一节 流体的概念及连续介质

#### 一、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体均称为流体。

在固体中，分子绕固定位置振动，分子间隙较小，分子间引力大，分子排列整齐。因此，固体既能保持一定的体积，也能保持一定的形状，固体有抵抗压力、拉力、剪切力的性能。流体与固体不同，流体中分子间隙比固体大，分子运动范围也比在固体中的运动范围大。流体中分子的移动与转动为其主要的运动形式；流体分子间隙大，分子间引力很小，分子间很容易相互移动或滑动。所以，流体实际上不能抵抗拉力、静止流体不能抵抗剪力、只能承受压力；因为任何微小的剪力均能使流体发生连续的剪切变形。因此，流体无一定形状，而且有流动性。

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空间，则其体积将无限地膨胀。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。在极大的压力作用下，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空间，而只占据其原有体积，其上表面与空气相接触，形成自由表面。

由上述可知，液体与气体共同的特性是：它们均无一定的形状，具有流动性。它们相异之处是：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。

在流体力学中，液体流动的有关规律，也适用于气体。例如，当气体的流速不大，比容变化不多，压缩性的影响可略去不计（如通风机中的气体流动）时，液体流动的各种规律对于气体也是适用的。

#### 二、连续介质模型

液体与气体都是由分子构成，流体的性质及其运动都是与分子的状态密切相关。但是在许多工程中所涉及的装置系统，其尺寸与流体分子距离及分子运动的自由行程相比，是非常大的。此时不必要探讨流体个别分子的微观运动性质，而应该研究其大量分子运动的统计平均的宏观性质，即工程流体力学是研究流体的宏观力学规律，而引入连续介质作为流体的宏观模型。即不考虑个别分子，而把流体看成是由无限多个无空隙而连续分布的微小流体团组成的连续介质。这种微小的流体团也称为流体质点。质点本身的几何尺寸，相对于流动空间或流体中的固体而言是充分小，可以忽略不计；相对于分子尺寸和分子自由行程而言，则足够大而包含有大量流体分子，因而质点的各种参数，即为大量分子的宏观

统计平均值。

流体既被看作是连续介质，因而反映流体质点运动特性的各种物理量（如速度、密度、压强等）也应该是空间坐标的连续函数。这样就可以用数学解析方法来分析流体平衡和运动的规律。

在工程流体力学中，不考虑流体内部的分子间隙与分子运动，仅从宏观的角度，研究流体质点因受外力作用而引起机械运动，可使复杂问题大大简化，从而可用数学工具描述这些运动规律，以解决工程实际问题。这是提出连续介质的主要原因。至于流体的某些宏观特性，如粘性、表面张力等，还需要从微观分子运动的角度来说明其产生的原因，但不用来分析流体的机械运动。

## 第二节 流体的主要物理性质

流体状态（运动或静止）的变化与所受外力有关，也与它本身的下列物理性质有关。

### 一、惯性

物体具有反抗外力作用而维持其固有的运动状态的性质，称为惯性。由于具有惯性，一切物体都反抗因外力而引起的运动状态的改变。物体包含的物质越多，它的惯性就越大。测度物体惯性的量，叫做这个物体的质量。在工程中，常常从流体的重力（重量）求出流体的质量，以质量的多少表示流体的惯性大小。根据牛顿运动第二定律，流体的重力等于流体的质量与重力加速度的乘积，即

$$G = mg \quad (1-1)$$

式中  $G$ ——流体的重力，N；

$m$ ——流体的质量，kg；

$g$ ——重力加速度， $m/s^2$ 。

流体所具有的质量，不因流体所在位置不同而变化。但重力加速度却因位置差异而有不同之值，在中纬度附近为 $9.8065 m/s^2$ ，本书计算中取 $g = 9.8 m/s^2$ 。质量相同的流体可能在不同的地方有不同的重力。

工程中也常用体积表示流体的量的多少。为了便于比较，把单位体积的流体质量，称为流体的密度，即

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

单位体积的流体重力，称为流体的重度，即

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

上两式中  $m$ ——流体的质量，kg；

$V$ ——流体的体积， $m^3$ ；

$G$ ——流体的重力，N；

$\rho$ ——流体的密度， $kg/m^3$ ；

$\gamma$ ——流体的重度， $N/m^3$ 。

由式（1-1）、（1-2）、（1-3）可得

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$



注意，重度不应与比重相混。比重是指物体质量与同体积的4℃蒸馏水的质量相比之值，为无量纲的纯数。

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 ℃	重度 $\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )		密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		温度 ℃	重度 $\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )		密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	
	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	990.2	1.11

由表1-1可知：当温度不高时，水的重度与密度变化很小。因此，在常温常压下进行水力计算时，可采用固定不变的值，即采用 $\gamma = 9800\text{N/m}^3$ ， $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ 。

一般矿山坑下排出的水，因夹带泥砂，并溶解有某些矿物质，故其重度较大。金属矿山坑下水的重度约为9947~10045N/m<sup>3</sup>（即密度约为1015~1025kg/m<sup>3</sup>）。对于水砂充填的矿山，水含泥砂更多，重度可能达到11270~11760N/m<sup>3</sup>。它们的实际数据，因各矿井而异。

在100kPa压强下，其他几种常用流体的重度、密度与比重值列于表1-2中。

表1-2 几种常用流体的重度、密度与比重 (在100kPa压强下)

流体名称	温度(℃)	重度 (N/m <sup>3</sup> )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比重
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	8722~9010	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
乙醇	4	7938	810	0.81
苯	0	8624	880	0.88

**例题1-1** 容积为0.5m<sup>3</sup>的容器盛满35℃的清水，水的重力G为4876N。问此水的质量m、密度 $\rho$ 、重度 $\gamma$ 及比重d各为若干？

**解** 从上述各式的物理概念得

$$m = \frac{G}{g} = \frac{4876}{9.8} = 497.55 \text{ kg}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{497.55}{0.5} = 995.1 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma = \rho g = 995.1 \times 9.8 = 9752 \text{ N/m}^3$$

$$d = \frac{\gamma}{\gamma_4} = \frac{\rho}{\rho_4} = \frac{995.1}{1000} = 0.9951$$

式中 $\gamma_4$ 及 $\rho_4$ 分别表示温度为4℃时清水的重度及密度,  $\gamma_4 = 9800 \text{ N/m}^3$ 。

## 二、压缩性与膨胀性

压缩性(膨胀性)是指流体的体积随压力(温度)而变化的特性。

### 1. 压缩性

常以体积压缩系数 $\beta$ ,表示流体压缩性的大小,即温度一定时,每改变单位压强所引起的体积相对变化量,为

$$\beta = - \frac{\frac{dV}{V}}{\frac{dp}{p}} = - \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp} \quad (1-5)$$

式中  $\beta$ ——体积压缩系数,  $\text{m}^2/\text{N}$ ;

$dp$ ——压力的变化值,  $\text{N/m}^2$ ;

$V$ ——流体原来的体积,  $\text{m}^3$ ;

$dV$ ——改变 $dP$ 后引起的体积变化值,  $\text{m}^3$ ;

$\frac{dV}{V}$ ——体积的变化率(即相对变化量)。

因为压强与体积的变化相反,即 $dp$ 为正时 $dV$ 为负, $dp$ 为负时 $dV$ 为正,故在式(1-5)等号右边冠以负号,以便 $\beta$ 为正。

液体的压缩性非常微小,例如水的体积压缩系数 $\beta = 4.859 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ ,因此在工程上解决实际问题时,可以看成液体是不可压缩的。但一些特殊情况例外,如水锤的计算等,则须考虑液体的压缩性(本书从略)。

### 2. 膨胀性

常以体积膨胀系数 $\alpha$ 表示流体膨胀性的大小,即压强一定时,温度每改变1℃所引起的流体体积相对变化量,为

$$\alpha = \frac{\frac{dV}{V}}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-6)$$

式中  $\alpha$ ——体积膨胀系数,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$dt$ ——流体的温度变化量,  $^\circ\text{C}$ ;

$dV$ ——温度改变 $dt$ 时流体体积相应改变值,  $\text{m}^3$ ;

因温度升高体积随之增大,故 $dt$ 与 $dV$ 同号。

液体的膨胀性非常小,例如水在100kPa压强下,温度变化在0℃~20℃时, $\alpha = 150 \times 10^{-6}$ 。因此在工程上解决实际问题时,可将液体看成是不膨胀的流体。

气体的压缩性(膨胀性)非常显著,是可压缩的流体。但在低温低压下,流动速度较小(如通风机输送空气的情况)时,它的重度与密度变化甚微。因此,其压缩性与膨胀性均可忽略不计,把空气看成不可压缩的流体,在本书中一并讨论。

## 三、粘性(粘滞性)

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,遂使

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。

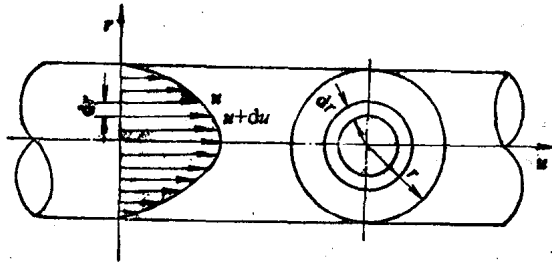


图 1-1 圆管中流速的分布

若将此时的液体看成许多无限薄层,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;反之,流动较慢的薄层阻滞流动较快的薄层。这样,在任意快慢两层间相互滑过的接触面上,将产生一对等值反向的内摩擦力(切向力)。这种因流体层之间呈现相对运动,而产生内摩擦力的性质,叫做流体的粘性或粘滞性。

牛顿的研究证明,流体层之间存在相对流动时所产生的内摩擦力与流体流动时的速度梯度成正比,与流体的种类及其温度有关,而与压强无关。此关系称为牛顿内摩擦定律,其数学式为

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

或写成切应力形式

$$\tau = \frac{T}{A} = -\mu \frac{du}{dr} \quad (1-8)$$

式中  $A$ ——两摩擦层的接触面积,  $m^2$ ;  
 $T$ ——接触面积上的内摩擦力,  $N$ ;  
 $\tau$ ——接触面积上的摩擦切应力,  $N/m^2$ ;  
 $du$ ——两薄层间的速度差值,  $m/s$ ;  
 $dr$ ——两薄层间的微小间距,  $m$ ;

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

$\mu$ ——比例常数,其值与流体的种类及其温度有关,称为流体的动力粘性系数,  $N \cdot s/m^2$ 。

式(1-7)及(1-8)中右侧加负号,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,再加负号,则使 $T$ 或 $\tau$ 为正。

由上述两式可知,当 $du/dr = 0$ 时, $T$ 和 $\tau$ 等于零。即流体呈静止状态或流体层间无相对运动时,不显示内摩擦力,不呈现粘性。只有存在相对运动的流动状态中,流体才显示内摩擦力,才呈现粘性。

动力粘性系数 $\mu$ 的物理意义为：从式(1-8)中去掉负号，取绝对值，可得：

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dr}} \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知，当速度梯度数值等于1时，动力粘性系数即是流体层间单位接触面积上的内摩擦力，此时 $\mu = \tau$ 。由此可知，动力粘性系数 $\mu$ 代表流体的一种重要的物理性质。 $\mu$ 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。

动力粘性系数 $\mu$ 的单位可以从式(1-9)导出。在国际单位制中，切应力 $\tau$ 的单位是 $N/m^2$ ， $du/dr$ 的单位是 $1/s$ ，故 $\mu$ 的单位是 $N \cdot s/m^2$  ( $Pa \cdot s$ )。而在CGS单位制中， $\mu$ 的单位是达因·秒/厘米<sup>2</sup> ( $dyn \cdot s/cm^2$ )，又称为泊(P)。两者的换算关系是： $1Pa \cdot s = 10P$ 。目前工程上的图表数据大都是采用泊作为 $\mu$ 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)的单位，故 $1P = 100cP$ 。

无论采用哪种单位制度， $\mu$ 的单位中均含有动力学的量纲，因之称为动力粘性系数。

在流体力学或液压系统的计算中，常出现动力粘性系数 $\mu$ 与流体密度 $\rho$ 的比值。为了方便，常以 $\nu$ 表之，称之为运动粘性系数，即

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

在国际单位制中，运动粘性系数 $\nu$ 的单位为 $m^2/s$ 。在CGS单位制中， $\nu$ 的单位为 $cm^2/s$ ，简称斯(st)。它们相互换算关系为： $1m^2/s = 10^4st$ 。工程中的图表数据大都是采用斯单位，但因为斯单位太大，有时应用不方便，而取百分之一斯，即厘斯(cst)的单位，故 $1st = 100cst$ 。

无论采用哪种单位制， $\nu$ 的单位中均含有运动学的量纲，因之称为运动粘性系数。

不同的流体有不同的 $\mu$ 与 $\nu$ 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 $t = 0 \sim 40^\circ C$ 时，水与空气的运动粘性系数 $\nu$ 值列于表1-3中。

表1-3 水与空气的运动粘性系数 (100kPa压强下)

温度 (°C)	运动粘性系数, $m^2/s$		温度 (°C)	运动粘性系数 $m^2/s$	
	水	空气		水	空气
0	$1.792 \times 10^{-6}$	$0.137 \times 10^{-4}$	20	$1.007 \times 10^{-6}$	$0.157 \times 10^{-4}$
4	$1.56 \times 10^{-6}$	$0.141 \times 10^{-4}$	25	$0.893 \times 10^{-6}$	$0.162 \times 10^{-4}$
10	$1.31 \times 10^{-6}$	$0.147 \times 10^{-4}$	30	$0.804 \times 10^{-6}$	$0.166 \times 10^{-4}$
15	$1.14 \times 10^{-6}$	$0.152 \times 10^{-4}$	40	$0.661 \times 10^{-6}$	$0.176 \times 10^{-4}$

由表1-3中可知，液体的运动粘性系数随温度升高而减小，气体则相反，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，阻止质点相对滑动的内摩擦力较大，故

其粘性较大。当液体温度升高时，分子间距加大，引力减弱，粘性降低。

气体则相反，其分子间距较大，相互间引力较弱。分子间运动的自由行程大，相邻两层间速度快慢不同的分子互相掺混，从而阻碍了质点的相对滑动。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的升高而增加。

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，引入一个理想流体的概念。它没有粘性，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。然后考虑实际流体有粘性，对研究结果进行相应的修正，而得出符合实际流体运动的规律，

**例题1-2** 在宽度极大的平板A、B之间充满水，如图1-2所示。板间距离 $\delta = 1\text{mm}$ 。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，均等于 $u$ 。如 $u = 1\text{ m/s}$ ，水的运动粘性系数 $\nu = 0.0156\text{ cm}^2/\text{s}$ ，试求作用在平板B单位面积上的阻力有多大？

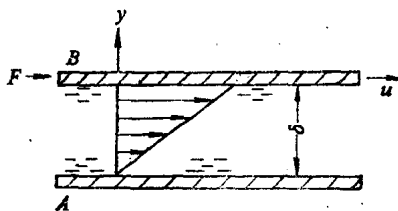


图 1-2 平板间的液体流动

**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，即各液层间的切应力相等，包括B板面上附着层与其下面邻层间接触面的切应力，即B板面上切应力，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 $u/\delta$ 代替速度梯度 $du/dy$ 。

已知动力粘性系数等于密度与运动粘性系数的乘积，即：

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

将 $\mu$ 值代入牛顿内摩擦定律公式，得切应力：

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

B板上的这一切应力 $\tau$ 的方向与速度 $u$ 的方向相反。

### 第三节 作用在流体上的力

作用在流体上的力按其作用形式的不同可分为表面力和质量力两类。

#### 一、表面力

表面力是作用在被研究流体体积表面上，并与表面面积成正比的力。

设在管中流动的流体中隔离出某一块体积，如图1-3所示。该体积四周的流体必然有力作用在它的表面上。在这个体积表面上围绕 $a$ 点取一个微小面积 $\Delta A$ ，四周流体作用于其上的力为 $\Delta F$ 。一般来说，这个力与微小面积 $\Delta A$ 斜交，并和它的法线成一夹角 $\alpha$ 。

为了研究方便起见，一般把力 $\Delta F$ 分为两个分力：一个是沿微小面积法线方向的分力 $\Delta P$ ，通常称为总压力；另一个是沿微小面积切线方向的分力 $\Delta T$ ，称为切向力或摩擦力。

比值 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 表示微小面积上的平均压强。当微小面积 $\Delta A$ 无限小而趋近于 $a$ 点时，比值 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 的极限叫做 $a$ 点的压强，并用 $p$ 表示，即：

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

比值  $\frac{\Delta T}{\Delta A}$  表示微小面积  $\Delta A$  上的平均切应力。当微小面积  $\Delta A$  无限小而趋近于  $a$  点时，

比值  $\frac{\Delta T}{\Delta A}$  的极限叫做  $a$  点的切应力，并用  $\tau$  表示，即

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-12)$$

在国际单位制中，压强  $p$  和切应力  $\tau$  的单位为

$$Pa = \frac{N}{m^2}$$

## 二、质量力

质量力是作用在流体的每一质点上并与受作用的流体的质量成正比的力，例如重力、离心力等。在均质流体中，质量力与受作用的流体的体积成正比，所以又叫体积力。

质量力的大小用单位质量力来度量。所谓单位质量力就是作用在单位质量流体上的质量力。

设均质流体的质量为  $m$ ，所受的质量力为  $\vec{W}$ ，则单位质量力为  $\frac{\vec{W}}{m} = \vec{q}$  ( $W = m \vec{q}$ )。若在各个直角坐标轴上的投影为  $W_x$ 、 $W_y$  和  $W_z$ ，则单位质量力  $\vec{q}$  在各个坐标轴上的投影  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  为

$$X = \frac{W_x}{m} = q_x \quad Y = \frac{W_y}{m} = q_y \quad Z = \frac{W_z}{m} = q_z \quad (1-13)$$

单位质量力及其投影的单位为  $m/s^2$ ，它与加速度的单位相同。

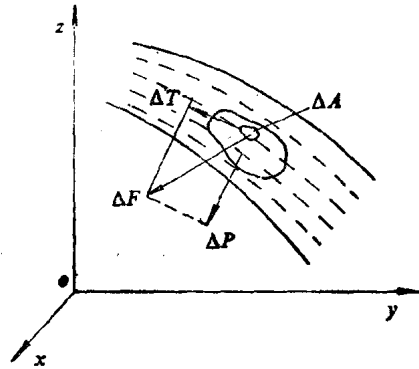
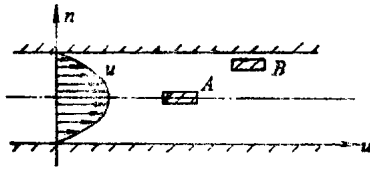


图 1-3

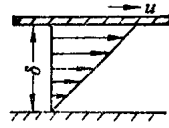
## 习 题

- 1-1 有一个水箱，长1.2m，宽0.8m，高1.0m，试问要4℃的水多少公斤才能充满水箱？
- 1-2 温度在0℃时，酒精的比重为0.807。酒精的重度  $\gamma$  为若干  $N/m^3$ ，酒精的密度  $\rho$  为若干  $kg/cm^3$ ？
- 1-3 石油在50℃时的重度  $\gamma = 900 \text{ dyn/cm}^3$ ，动力粘性系数  $\mu = 58.86 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，求石油的运动粘性系数  $\nu$ 。
- 1-4 一种液体的比重为1.046，动力粘性系数  $\mu$  为1.85cP，其运动粘性系数  $\nu$  为若干  $st$ ？
- 1-5 两平板间有水流动，流速分布如图1-4所示，当从水中取水层A及B作分析时，试确定水层A及B上下两平面上所受切应力  $\tau$  的方向。

1-6 如图1-5所示，一平板在油面上作水平匀速运动，已知运动速度  $u = 1\text{ m/s}$ ，平板与固定边界的距离  $\delta = 1\text{ mm}$ ，油的动力粘性系数  $\mu = 9.72\text{ P}$ ，由平板所带动油层的流速呈直线分布，试求作用在平板单位面积上的粘滞力  $\tau$ 。



题1-4 附图



题1-5 附图

## 第二章 流体静力学

流体静力学是流体力学的一个基础部分。它研究流体在静止状态下的力学规律，以及在实际中应用这些规律的方法。

在一般情况下，液体可以被看成是既不可压缩也不会膨胀的物质，在研究中可认为重度 $\gamma$ 或密度 $\rho$ 为常量。

静止液体不显示出粘滞性，即没有剪切力，又因流体实际上不能抵抗拉力，故静止流体只能承受压力。因而在流体静力学中，主要是研究液体静压强的分布规律以及它在测量压强和测量液柱方面的应用。

### 第一节 流体静压强的特性

由上章已知，流体的压强为： $p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}$ 。在静止流体中，流体静压强具有下列两个特性。

第一特性，流体静压强的方向必然重合于受力面的内法线方向。

如图2-1所示，设想在平衡流体中沿E-F-G-H面去掉上面那部分流体。

(1) 如果在a点处承受应力 $p_1$ ，则 $p_1$ 是拉应力。拉应力一经出现便破坏流体平衡状态而开始流动，即不能是拉应力 $p_1$ 。

(2) 如果在b点处承受应力 $p_2$ ，则将形成平行于截面E-F-G-H的切应力，这样，也会破坏流体的平衡状态而使之流动。即也不能是 $p_2$ 。

因此，在平衡流体中的任意点上，只能承受如图所示c点的压应力，故称为流体静压强，它的方向必然重合于受力面的内法线。

第二特性，平衡流体中任意点的静压强值只能由该点的坐标位置来决定，而与该压强的作用面方位无关。即沿各个方向作用于同一点的压强是等值的。

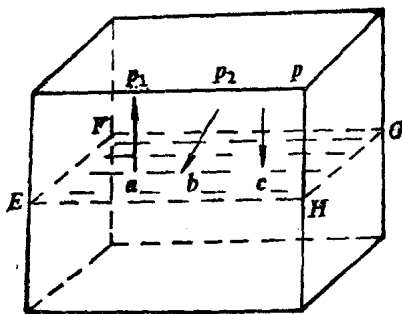


图 2-1 水静压强方向

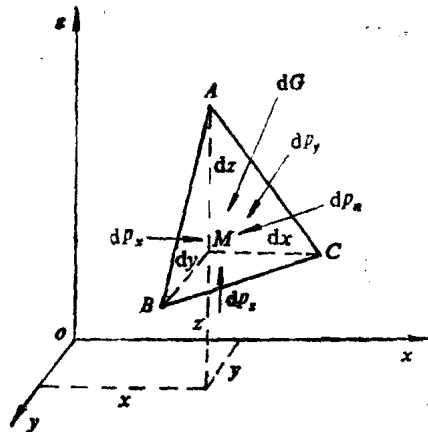


图 2-2 微小平衡四面体



关于这一特性，可证明如下：

设想以平衡流体中某点 $M$ （坐标为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ ）为顶点划取一个四面体流体微团 $MABC$ ，如图2-2所示，其中与 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴平行的边长分别为 $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$ ， $d\vec{W}$ 表示此四面体所具有的质量力， $dp_x$ 、 $dp_y$ 、 $dp_z$ 、 $dp_n$ 分别表示此四面体的四个面上所承受的表面力。此流体微团在这些力的作用下处于平衡状态。

### 1. 质量力和表面力的性质

(1) 质量力是作用于流体微团内所有质点上的力，其大小与微团的质量成正比。例如重力。如命 $\vec{q}$ 表示单位质量力，它在相应坐标轴上的投影 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ， $\rho$ 表示流体的密度。则某一确定方向的质量力 $d\vec{W}$ 及其投影可以分别表示为

$$d\vec{W} = \frac{1}{6} \rho dx dy dz \vec{q}$$

$$dW_x = \frac{1}{6} \rho dx dy dz X$$

$$dW_y = \frac{1}{6} \rho dx dy dz Y$$

$$dW_z = \frac{1}{6} \rho dx dy dz Z$$

(2) 表面力系相邻流体（或固体）作用于此流体微团各个表面上的力。由于所划取的是一个微元四面体，同一微元面上各点的压强均可用该面上的平均压强（即该面上重心处的压强） $p_x$ 、 $p_y$ 、 $p_z$ 及 $p_n$ 表示之。各面上的总压力分别为

$$dP_x = p_x \times \frac{1}{2} dy dz \quad (\text{垂直指向} AMB \text{面})$$

$$dP_y = p_y \times \frac{1}{2} dx dz \quad (\text{垂直指向} AMC \text{面})$$

$$dP_z = p_z \times \frac{1}{2} dx dy \quad (\text{垂直指向} BMC \text{面})$$

$$dP_n = p_n dA \quad (\text{垂直指向} ABC \text{面})$$

$dA$ 为三角形 $ABC$ 的面积。

### 2. 平衡关系

根据力学中的平衡理论，沿 $x$ 轴 $\Sigma F_x = 0$ ，即

$$p_x \times \frac{1}{2} dy dz - p_n dA \cos(\widehat{n, x}) + \frac{1}{6} \rho dx dy dz X = 0$$

由于 $\cos(\widehat{n, x})$ 系三角形 $ABC$ 的外法线与 $x$ 轴所夹角的余弦，其值等于 $ABC$ 面与 $AMB$ 面所夹角的余弦，故有

$$dA \cos(\widehat{n, x}) = \text{三角形} ABM \text{的面积} = \frac{1}{2} dy dz$$

以之代入上述平衡方程，得

$$p_x \times \frac{1}{2} dy dz - p_n \times \frac{1}{2} dy dz + \frac{1}{6} \rho dx dy dz X = 0$$