

流体

LIUTI LIXUE

◎ 主编 张红亚 王造奇

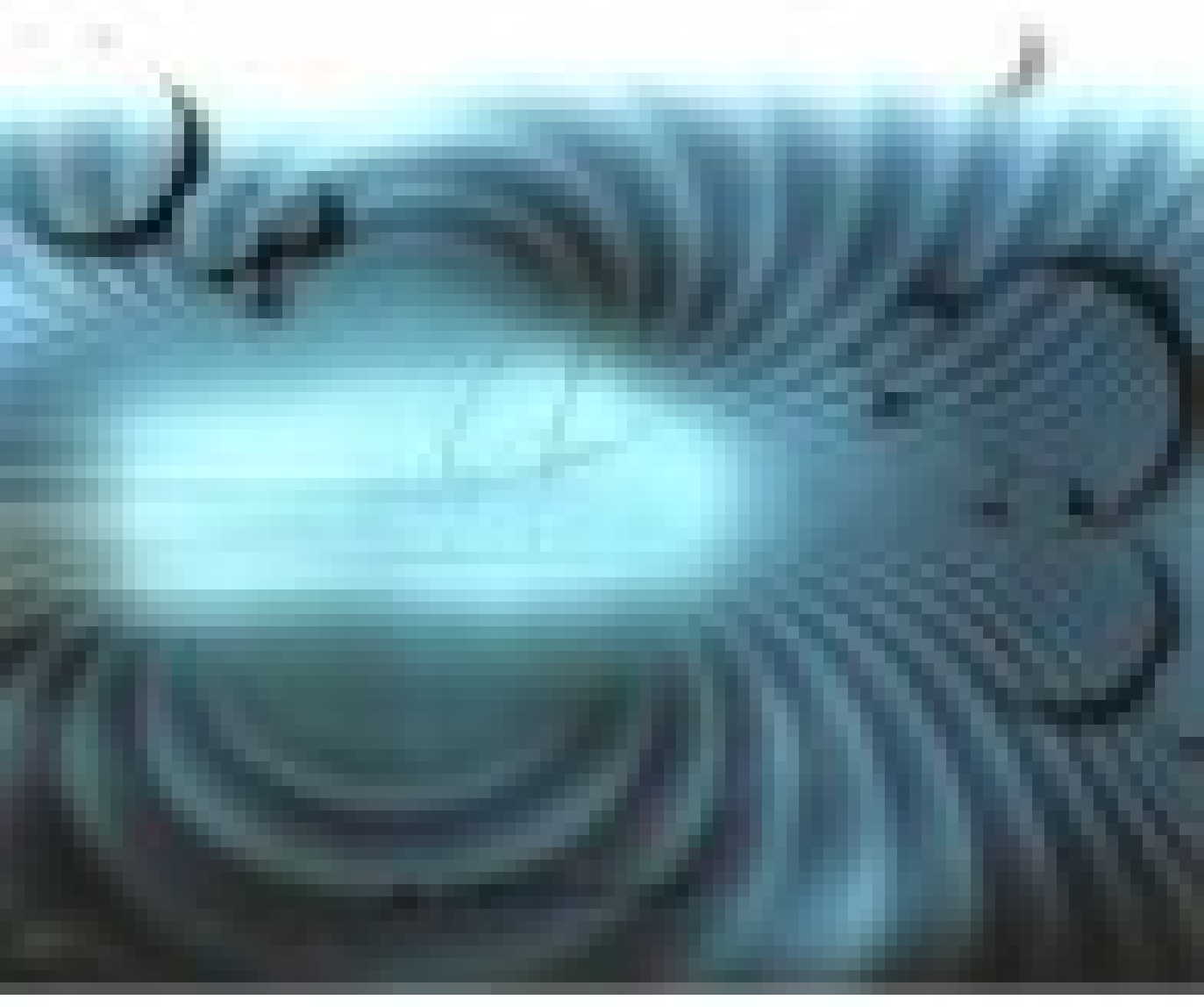
(第二版)

力学

 安徽科学技术出版社

流体

力学



035/86

2008

流 体 力 学

(第二版)

主 编	张红亚
	王造奇
主 审	徐得潜
编 者	方廷勇
	牛 权
	章 瑾



安徽科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/张红亚,王造奇主编. —合肥:安徽科学技术出版社,2005.7

ISBN 978-7-5337-3119-9

I. 流… II. ①张…②王… III. 流体力学-高等学校-教材 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 006527 号

本书是根据高等院校工科基础课流体力学教学大纲编写的,可作为给水排水工程、土木工程、建筑环境与设备工程、环境工程等专业的教材。

全书共分 11 章,内容包括绪论,流体静力学,流体运动学,流体动力学基础,流动阻力和能量损失,孔口、管嘴和管道的流动,一元气体动力学基础,明渠恒定均匀流,明渠恒定非均匀流,堰流和闸孔出流,渗流,相似性原理和量纲分析。并且各章附有习题和答案。

本书主要针对土建类专业特点,既注重加强理论基础知识的学习,又注重对学生实践能力的培养,论述简明扼要,便于教学。

本书也可作为有关工程技术人员的自学参考书。

流体力学

张红亚 王造奇 主编

出版人:朱智润

责任编辑:岑红宇

封面设计:武迪

出版发行:安徽科学技术出版社(合肥市政务文化新区圣泉路 1118 号)

出版传媒广场,邮编:230071)

电话:(0551)3533330

网址:www.ahstp.com.cn

E-mail:yougoubu@sina.com

经销:新华书店

排版:安徽事达科技贸易有限公司

印刷:合肥中德印刷培训中心印刷厂

开本:787×1092 1/16

印张:15.5

字数:390 千

版次:2008 年 1 月第 2 版 2008 年 1 月第 2 次印刷

定价:32.00 元

(本书如有印装质量问题,影响阅读,请向本社市场营销部调换)

前 言

流体力学是土建类各专业的一门重要技术基础课,它研究流体的机械运动规律及其在工程上的应用。

本书从流体力学课程的基础地位出发,系统地阐述了流体力学的基本概念和基本理论及其在工程中的应用。在不削弱一元流动理论的同时,加强运用基本方程分析流动问题,注意训练学生对流动现象全面细致的观察能力和运算分析能力。根据流体力学的发展趋势,要特别重视对学生理论分析、实验和数值计算三方面综合能力的培养。同时,随着现代科学技术的飞速发展和国家经济建设的迫切需要,我们必须摒弃过去力学教学那种偏重数学理论、轻实践应用的教学模式,积极引导学生重视对物理概念、物理本质的理解,通过研讨工程实例,理论联系实际,学以致用。

本书根据本科教学的特点,在编写中力求深入浅出,便于掌握,内容深度、难度适宜,说理清晰。书中附有类型多样、数量适度的例题,并且各章后面附有习题,帮助学生正确理解各章的主要概念,掌握计算原理和方法。

本次修订是在第1版的基础上,由王造奇对前三章的内容(包括绪论)进行了重新编写,以期更好地满足教学要求。全书由张红亚、王造奇主编,合肥工业大学土木工程学院徐得潜教授对全书内容进行了审阅。本书的编写出版得到了安徽建筑工业学院汤利华、马建国、李义宝、汪力君等老师及有关兄弟院校教师及安徽科学技术出版社的帮助与支持,编者在此表示衷心感谢!

由于编者的教学经验和业务水平不足,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评和指正。

本书的出版得到安徽省高校首批“给水排水工程省级教改示范专业”建设项目(教高[2002]026号)的资助。

编 者

目 录

绪论	1
第一节 作用在流体上的力	1
第二节 流体的主要物理性质	2
第三节 表面张力和毛细现象	8
第四节 流体力学的模型和研究方法	9
习题	9
第一章 流体静力学	11
第一节 流体静压强及其特征	11
第二节 流体平衡微分方程	12
第三节 重力作用下的流体平衡基本方程	14
第四节 流体压强的表示方法	16
第五节 流体的相对平衡	18
第六节 静止流体作用在平面上的压力	21
第七节 静止流体作用在曲面上的压力	24
习题	27
第二章 流体运动学	30
第一节 研究流体运动的方法	30
第二节 流体运动的基本概念	31
第三节 流体的连续性方程	35
第四节 流体微团运动的分析	36
第五节 有旋流动和无旋流动	38
习题	49
第三章 流体动力学基础	51
第一节 流体运动微分方程	51
第二节 恒定元流的能量方程	52
第三节 恒定总流的能量方程	54
第四节 恒定气流的能量方程	59
第五节 恒定流动的动量方程和动量矩方程	60
习题	64
第四章 流动阻力和能量损失	67

第一节	沿程损失和局部损失	67
第二节	黏性流体的两种流态——层流和紊流	68
第三节	圆管中的层流运动	71
第四节	紊流运动	74
第五节	圆管紊流的沿程损失	78
第六节	非圆管的沿程损失	83
第七节	管道流动的局部损失	84
第八节	绕流运动	88
	习题	96
第五章	孔口、管嘴和管道的流动	100
第一节	孔口出流	100
第二节	管嘴出流	103
第三节	简单管道的水力计算	106
第四节	复杂管道	110
第五节	管网计算基础	112
第六节	有压管道的水击	116
第七节	自由紊流射流	118
	习题	122
第六章	一元气体动力学基础	125
第一节	理想气体一元恒定流动的基本方程	125
第二节	可压缩气体的几个基本概念	128
第三节	变截面的等熵流动	132
第四节	可压缩气体的等温管道流动	135
第五节	可压缩气体的绝热管道流动	139
	习题	140
第七章	明渠恒定均匀流	142
第一节	概述	142
第二节	明渠类型及明渠均匀流特征	142
第三节	明渠均匀流的水力计算	144
第四节	明渠均匀流水力计算的其他问题	149
第五节	无压圆管的水力计算	153
	习题	154
第八章	明渠恒定非均匀流	156
第一节	明渠水流的流态	156

第二节	断面单位能量(比能)与临界水深	159
第三节	水跃和水跌	163
第四节	明渠恒定非均匀渐变流水面曲线分析	167
第五节	明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	175
习题		177
第九章	堰流和闸孔出流	179
第一节	堰流及其特征	179
第二节	薄壁堰	181
第三节	实用堰	185
第四节	宽顶堰	186
第五节	闸孔出流的水力计算	188
习题		193
第十章	渗流	195
第一节	概述	195
第二节	渗流的基本概念	196
第三节	渗流的基本定律	198
第四节	地下河槽中恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	200
第五节	无压恒定缓变渗流的基本方程及其浸润线	202
第六节	井的计算	206
第七节	土坝渗流	211
第八节	渗流的基本方程	217
习题		218
第十一章	相似性原理和量纲分析	220
第一节	相似性原理	220
第二节	量纲分析	226
习题		230
习题参考答案		232
附录		236
参考文献		237

绪 论

流体力学是研究流体平衡和机械运动规律及其应用的科学,是力学的一个重要分支。它的任务是通过流体的运动规律,研究流体之间及流体与各种边界之间的相互作用力,并将它们应用于解决科研和实际工程问题。在水利、动力、土建、航空、化工、机械等领域里,都日益广泛地应用流体力学,同时正是这些领域的发展,也推动了流体力学的发展和深入。液体和气体统称为流体。

学习流体力学,要注意基本概念、基本研究方法的理解和掌握,做到理论联系实际。

本书主要采用国际单位制(SI制),取质量(kg)、长度(m)、时间(s)和温度(K)为基本单位,其他为导出单位。考虑到我国工程上常采用工程单位,要注意两种单位的换算,如 $1\text{ kgf}=9.807\text{ N}$ 等。

第一节 作用在流体上的力

在研究流体力学的规律之前,必须首先分析作用在流体上的力。

隔离一小部分流体微团,外界作用于微团上的力按力的作用方式不同,可分为质量力和表面力。

一、质量力

质量力是指作用在微团的每个质点上并与其质量成正比的力。重力是最常见的质量力,在非惯性系中为了能使用牛顿运动定律而人为引入的惯性力 $\vec{F}_I = -m\vec{a}$,这也是质量力,在研究流体相对平衡时,由于采用非惯性系,要加入惯性力。

流体力学中常采用单位质量力作为分析质量力的基础。任取质量为 Δm 的微团,其体积为 ΔV ,作用于该微团的质量力为 $\Delta \vec{F}$,则称其极限

$$\vec{f} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta m} \text{ N/kg} \quad (0-1)$$

为该微团的质量力。

由于力是矢量,在直角坐标系中

$$f_x = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta m}$$

$$f_y = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta m}$$

$$f_z = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta m} \quad (0-2)$$

对常见的重力:

$$f_z = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{-\Delta m g}{\Delta m} = -g$$

二、表面力

表面力是指作用在所研究流体外表面上与表面积大小成比例的力,单位面积上的表面力称为应力。在流体中任取一微团,其微团表面积为 ΔA ,作用于该微团的表面力为 $\Delta \vec{F}$,则称其极限

$$\vec{\sigma} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta A} \text{ N/m}^2 \text{ 或 Pa} \quad (0-3)$$

为作用在该微团上的应力。

为研究方便,常将应力分为切向应力 τ (切应力)和法向应力 p (压强),如图 0-1 所示。

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta A}$$

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad (0-4)$$

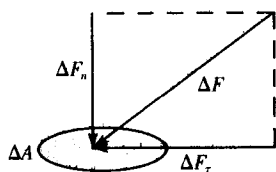


图 0-1

切应力是流体有相对运动时,由于流体具有黏性而产生的内摩擦力。静止的流体只有压强而无切应力,由于表面力是微团以外的物体对微团的作用,方向指向表面,从图 0-1 可见,其压强只能是内法线方向,因此流体只能承受压力,几乎不能承受拉力。

质量力与表面力的区别在于:流体具有质量就肯定有质量力,这是流体本身的属性;表面力是研究对象以外的物体对它的作用力,它具有传递性。

第二节 流体的主要物理性质

惯性、黏性、压缩和膨胀性是流体的三个主要物理性质。

一、惯性

流体有质量就具有惯性,在流体力学中用密度 ρ 来表征流体的惯性。取微团的体积为 ΔV ,质量为 Δm ,则

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \text{ kg/m}^3 \quad (0-5)$$

对于均匀流体

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (0-6)$$

其倒数

$$v = \frac{1}{\rho} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (0-7)$$

称为比容。

表 0-1 列出了在标准大气压下水和空气在不同温度下的密度。

表 0-1 水和空气的密度

流体密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	温度($^{\circ}\text{C}$)									
	0	5	10	15	20	30	40	60	80	100
水	999.9	1000.0	999.7	999.1	998.2	995.7	992.2	983.2	971.8	958.4
空气	1.292	1.269	1.247	1.225	1.204	1.165	1.127	1.060	0.9996	0.9461

二、黏性

黏性是流体的重要属性。由于黏性的存在,当流体有相对运动或有相对运动的趋势时,就存在内摩擦力,此力称为黏性力。从分子的微观运动角度看,黏性力是由于分子间的相互吸引力和分子不规则热运动的动量交换产生的。在流体力学中,流体的黏性是很重要的研究内容。

1. 牛顿内摩擦定律

1686 年牛顿(Newton)通过大量的实验得到了牛顿内摩擦定律。

图 0-2 为两块水平放置的平行平板,间距为 z ,两板间充满某种黏性流体,使上板向右运动,下板保持静止,由于紧临上板的流体层随上板以同一速度向右运动,紧贴下板的流体层附着于下板保持静止,如果把上下板间的流体看成是许多无限薄的流层作平行运动,测得的流体速度为线形分布,显然在有相对运动的薄层内,存在着内摩擦力。

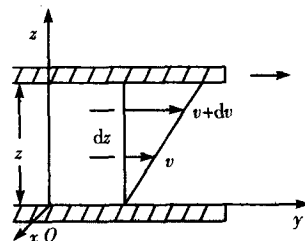


图 0-2

通过实验可知,内摩擦力 F 与速度梯度 $\frac{dv}{dz}$ 及流层的接触面积 A 成正比,即

$$F \propto A \frac{dv}{dz}$$

如果写成等式,要乘以比例系数 μ ,即

$$F = \mu A \frac{dv}{dz} \quad (0-8)$$

这就是牛顿内摩擦定律。如用切应力表示,即

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (0-9)$$

其中:

(1) 速度梯度 $\frac{dv}{dz}$

它表示速度沿垂直于速度方向的变化率,如图 0-3 所示,取一小方块流体,其上表面的速度为 $v+dv$,下表面速度为 v ,在 dt 的时间内,上表面运动了 $(v+dv)dt$,下表面运动了 vdt ,两者之差为 $dvdt$,引起上下表面变形的角度为 $d\theta$,由于 dt 很小,所以 $d\theta$ 也很小,有

$$d\theta \approx \tan d\theta = \frac{dvdt}{dz}$$

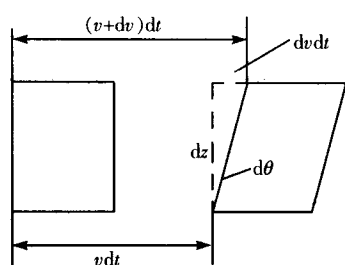


图 0-3

$$\frac{dv}{dz} = \frac{d\theta}{dt}$$

这正是角变形速度,也称剪切变形速度,表示剪切变形的快慢。显然,没有相对运动,就没有速度梯度,也就没有内摩擦力。

流体和固体在摩擦规律上是不同的,固体间摩擦力取决于正压力,与速度大小无关;而流体间摩擦力取决于速度梯度的大小。

(2) 动力黏度系数 μ

由于 μ 的量纲为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$, 具有动力学量纲, 故称为动力黏度系数。在工程中还常出现动力黏度系数与密度的比值, 用 ν 表示, 则

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ m}^2/\text{s} \quad (0-10)$$

由于 ν 的量纲为 m^2/s , 具有运动学量纲, 故称为运动黏度系数。例如, 水的动力黏度系数虽然比空气大得多, 可是运动黏度系数只是同温度空气的几十分之一, 说明水比空气的流动性要大。所以运动黏度系数更能反映其抵抗流动的特征。表 0-2 列出了水和空气的黏度系数。

表 0-2 水和空气的黏度系数

流体		温度(°C)				
		0	5	10	15	20
动力黏度系数 $\mu(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$	水	1.792×10^{-3}	1.519×10^{-3}	1.308×10^{-3}	1.140×10^{-3}	1.005×10^{-3}
	空气	1.71×10^{-5}	1.73×10^{-5}	1.76×10^{-5}	1.80×10^{-5}	1.82×10^{-5}
运动黏度系数 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$	水	1.792×10^{-6}	1.519×10^{-6}	1.308×10^{-6}	1.140×10^{-6}	1.007×10^{-6}
	空气	1.32×10^{-5}	1.36×10^{-5}	1.41×10^{-5}	1.47×10^{-5}	1.51×10^{-5}

流体		温度(°C)				
		30	40	60	80	100
动力黏度系数 $\mu(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$	水	0.801×10^{-3}	0.656×10^{-3}	0.469×10^{-3}	0.357×10^{-3}	0.284×10^{-3}
	空气	1.86×10^{-5}	1.87×10^{-5}	1.97×10^{-5}	2.07×10^{-5}	2.17×10^{-5}
运动黏度系数 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$	水	0.804×10^{-6}	0.661×10^{-6}	0.477×10^{-6}	0.367×10^{-6}	0.296×10^{-6}
	空气	1.60×10^{-5}	1.66×10^{-5}	1.86×10^{-5}	2.07×10^{-5}	2.29×10^{-5}

从表中可以看出, 水和空气的黏度系数随温度的变化规律是不同的, 温度升高, 分子间的吸引力降低, 动量增加; 反之亦然。对于液体, 分子间距离较小, 分子间的吸引力是主要的, 温度上升, 黏度系数减小; 对于空气, 分子间距离较大, 动量交换是主要的, 温度上升, 黏度系数增大。

凡服从牛顿内摩擦定律的流体, 称为牛顿流体, 如多数分子结构简单的液体和气体都属于牛顿流体, 如图 0-4 所示, 切应力 τ 与速度梯度 $\frac{dv}{dn}$ 是过原点的直线关系。非牛顿流

体种类很多,通常分为塑型流体(如牙膏、污泥浆等)、拟塑型流体(如高分子溶液、水泥浆等)、膨胀性流体(如浓糖溶液、浓淀粉糊等),非牛顿流体多数在化工、食品、建筑等工业中出现,本书只讨论牛顿流体。

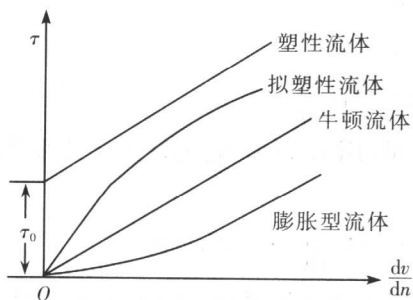


图 0-4

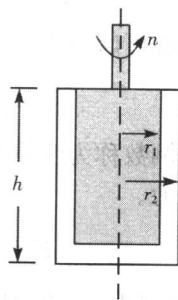


图 0-5

【例 0-1】旋转圆筒黏度计外筒固定,内筒转速 $n=10 \text{ r/min}$,内外筒间充入实验液体(内外筒底部的液体厚度不计),如图 0-5 所示。内筒 $r_1=1.93 \text{ cm}$,外筒 $r_2=2 \text{ cm}$,内筒高 $h=7 \text{ cm}$,转轴上扭矩 $M=0.0045 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。求该实验液体的动力黏度系数。

【解】由牛顿内摩擦定律公式

$$\tau = \mu \frac{du}{dr} = \mu \frac{\omega r_1 - 0}{r_2 - r_1}$$

其中 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$

由已知条件 $M = \tau A r_1 = \tau \cdot 2\pi r_1 h \cdot r_1 = 0.0045$

得

$$\mu = 0.952 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

三、压缩性和膨胀性

1. 压缩性

流体分子间有一定的间隙,当作用在流体的压力增加时,其分子间的距离缩小,使流体的体积减小,密度增加,这种性质称为流体的压缩性。

在一定温度下,密度的变化率与压强的变化成正比,即

$$\frac{d\rho}{\rho} \propto dp$$

如果写成等式,要乘以比例系数 β ,即

$$\frac{d\rho}{\rho} = \beta dp$$

有

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \text{ m}^2/\text{N} \quad (0-11-a)$$

β 就是流体的压缩系数。

利用流体被压缩其质量不改变的性质,有

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

得

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

故压缩系数也可以写成

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{d\rho} \quad (0-11-b)$$

压缩系数的倒数称为流体的弹性模量,用 E 表示,它表征处于压缩状态下的流体产生一种向外膨胀力。

$$E = \frac{1}{\beta} = \rho \frac{dp}{d\rho} = -V \frac{dp}{dV} \text{ N/m}^2 \text{ 或 Pa} \quad (0-12)$$

表 0-3 列出了水在 0°C 时,不同压强下的压缩系数(表中 at 是工程大气压的符号, $1 \text{ at} = 98070 \text{ N/m}^2$)。

表 0-3 水的压缩系数

压强 $p(\text{at})$	5	10	20	40	80
压缩系数 $\beta(\text{m}^2/\text{N})$	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

可见液体的压缩系数是非常小的,在很多工程中,可把液体按不可压缩处理,但在研究液体的冲击时,则要考虑它的压缩性。

2. 膨胀性

流体随温度的变化,其体积发生相应变化的这种性质,称为流体的膨胀性。

在一定压强下,体积的变化率与温度的变化成正比,即

$$\frac{dV}{V} \propto dT$$

如果写成等式,要乘以比例系数 α ,即

$$\frac{dV}{V} = \alpha dT$$

有

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \text{ 1/K} \quad (0-13)$$

α 就是流体的膨胀系数。

表 0-4 列出了在一个大气压下不同温度时水的膨胀系数。

表 0-4 水的膨胀系数

温度 $t(^{\circ}\text{C})$	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
膨胀系数 $\alpha(1/\text{K})$	0.14×10^{-4}	0.15×10^{-4}	0.42×10^{-4}	0.55×10^{-4}	0.72×10^{-4}

可见液体的膨胀系数也是很小的,但这也是相对的,如在热水采暖系统中,为防止由于水温升高引起管道胀裂而设置膨胀水箱,使水有自由膨胀的余地,就是考虑了水的膨胀

性。

式(0-11)、(0-13)分别是流体压缩系数和膨胀系数的定义式,对于气体,在温度不太低、压力不太高时,都服从理想气体状态方程,即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (0-14)$$

式中 R 是气体常数。 $R = \frac{8 \cdot 314}{m} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 其中 m 为气体的摩尔分子量(用 kg 表示)。如空气的气体常数 $R = \frac{8 \cdot 314}{0.029} = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。对一些常见的过程,将理想气体状态方程代入压缩系数和膨胀系数的定义式,可使表达式更简捷:

(1) 等温过程

$$\frac{p}{\rho} = c$$

有

$$dp = c d\rho = \frac{p}{\rho} d\rho$$

即

$$\frac{d\rho}{dp} = \frac{\rho}{p}$$

则

$$\beta|_T = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} = \frac{1}{p} \quad (0-15)$$

(2) 等压过程

$$\rho T = c$$

有

$$T d\rho + \rho dT = 0$$

即

$$\frac{d\rho}{dT} = -\frac{\rho}{T}$$

则

$$\alpha|_p = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{T} \quad (0-16)$$

(3) 绝热过程

$$\frac{p}{\rho^k} = c$$

式中 k 为绝热指数

有

$$dp = c k \rho^{k-1} d\rho = \frac{p}{\rho^k} \cdot k \rho^{k-1} d\rho = k \frac{p}{\rho} d\rho$$

即

$$\frac{d\rho}{d\rho} = \frac{\rho}{k\rho}$$

则

$$\beta|_k = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\rho} = \frac{1}{k\rho} \quad (0-17)$$

气体虽然比液体的压缩性和膨胀性大,但在流速较低(远小于音速)时,密度变化很小,可把气体按不可压缩处理(见第六章);然而工程中有些情况,如气体在长输有压管线的输运中,就要考虑气体的压缩膨胀性了。

第三节 表面张力和毛细现象

水龙头的出口处悬挂着水滴,这表明液体自由表面有明显的力图使自身体积缩为最小的趋势,引起这种收缩趋势的力称为表面张力。表面张力是由分子的内聚力引起的,因此在液体的自由表面能够承受极其微小的拉力,我们将单位长度上受到的这种张力定义为表面张力系数,用 σ 表示,单位是 N/m。表面张力系数除了与液体和管壁材料的种类有关,还与温度有关,它随温度的上升而减小,见表 0-5。

表 0-5 水的表面张力系数

温度 $t(^{\circ}\text{C})$	0	10	20	30	40	60	80	100
表面张力系数 $\sigma(\text{N/m})$	0.075.6	0.074.2	0.072.8	0.071.2	0.069.6	0.066.2	0.062.6	0.058.9

从表上可见,表面张力系数是很小的,在一般计算中可不考虑,只有当液体自由表面的边界尺寸很小时,如很细的玻璃管等,才必须计及。

气体不存在表面张力,因为由于气体分子的扩散作用,不存在自由表面,所以表面张力是液体特有的性质。它不仅在液体与气体的接触面上发生,还会在液体与固体、一种液体与另一种液体的接触面上发生。

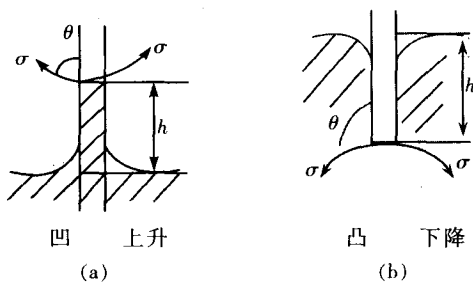


图 0-6

当把两端开口的细管插入液体时,液体与细管边壁接触,它们之间存在着吸引力,通常称为附着力,当附着力大于液体的内聚力时,为了保持平衡,液体将沿管壁向上伸展,使液面向上弯曲成为凹面,这种现象称为“浸润”,如水、酒精能“浸润”玻璃,如图 0-6(a)所示;反之液面向下弯曲成为凸面,这种现象称为“不浸润”,如水银“不浸润”玻璃,如图 0-6(b)所示。我们把这种使管内液体出现

升高或下降的现象称之为“毛细现象”,把能产生毛细现象的细管称为“毛细管”。

毛细现象中的液柱上升或下降高度 h 可由图 0-6 求得,设液面与管壁的接触角为 θ ,细管的半径为 r ,液体的密度为 ρ ,由液柱重力与表面张力垂直分量的平衡,有

$$2\pi r \sigma \cos\theta = \pi r^2 h \rho g$$

可得

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g r} \quad (0-18)$$

式中 θ 取决于流体的种类、管壁材料等因素, $h > 0$, 表示液柱上升; $h < 0$, 表示液柱下降。从式(0-18)可见, $h \propto 1/r$, 越细的管子, 毛细现象越明显, 这就是为什么楼房底层的墙壁容易潮湿的原因。

第四节 流体力学的模型和研究方法

流体是由大量不断运动着的分子所组成, 分子与分子间是有空隙的, 这就是说, 从微观角度看, 流体实际上在空间是不连续的。但是, 流体力学只研究流体宏观的、由外因引起的机械运动, 而不研究微观的分子运动。所以可以近似地把流体看做是由无数个连续分布的流体微团所组成的连续介质。流体微团虽小, 但却包含着为数甚多的分子, 并具有一定的质量、能量等, 一般将这种微团称为质点。流体的这种“连续介质模型”的建立, 是对流体物质结构的简化, 使我们可以运用数学的连续函数工具来深入研究流体, 对研究流体力学提供了很大的方便。

流体是有黏性的, 为了得出流体的主要结论, 一般先设流体是无黏性的, 即理想流体, 然后再通过实验等方法, 考虑黏性的影响, 对结论加以补充或修正, 这也是一般科学研究的方法。

为了更简化, 常将流体(特别是液体)按不可压缩处理, 即密度为常数, 然后再讨论密度不是常数的情况。

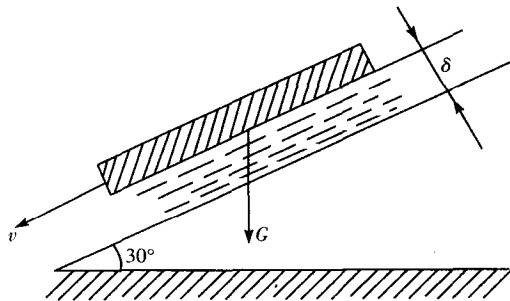
以上是对流体力学建立的一些主要模型, 研究的方法有理论分析方法、实验方法、数值方法等, 它们相互配合, 相互补充。

习 题

0-1 倾角 $\theta = 30^\circ$ 的斜面涂有厚度 $\delta = 0.5 \text{ mm}$ 的润滑油。一块质量未知、底面积 $A = 0.02 \text{ m}^2$ 的木板沿此斜面以等速度 $v_1 = 0.2 \text{ m/s}$ 下滑, 如题 0-1 图所示。如果在板上加一个 $G = 5 \text{ N}$ 的重物, 则下滑速度为 $v_2 = 0.6 \text{ m/s}$ 。求润滑油的动力黏度系数。

0-2 一圆锥体绕其铅垂中心轴等速旋转, 锥体上部 $R = 0.3 \text{ m}$, 高 $H = 0.5 \text{ m}$, 如题 0-2 图所示, 锥体与固定壁间的距离 $\delta = 1 \text{ mm}$, 所充油的动力黏度系数 $\mu = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 当旋转角速度 $\omega = 16 \text{ rad/s}$ 时, 求作用于圆锥的阻力矩。

0-3 题 0-3 图为一采暖系统图。由于水温升高引起水的体积膨胀, 为了防止管道胀裂, 特在系统顶部



题 0-1 图