



世纪高等教育规划教材

流体力学基础与应用

韩国军◎主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

免费电子课件

035/111

2012

21 世纪高等教育规划教材

流体力学基础与应用

主 编 韩国军

参 编 吴义民 王浩宇 楚文军 钟 春

主 审 李晓燕

北方工业大学图书馆



C00267630



机械工业出版社

本书是针对建筑环境与设备工程专业本科教学编写的, 主要介绍流体力学基本知识, 离心式泵与风机的工作原理与特性, 流体力学在管网输配中的应用, 共三方面内容。其目的是让学生掌握流体力学和泵与风机的基本知识, 了解流体力学在管网水力计算和工况分析中的应用, 加强学生应用能力的培养并与后续的专业课很好地衔接。

全书共 11 章, 具体内容包括: 绪论, 流体静压强与静压力, 一元流体动力学基础, 管道流动阻力与能量损失, 流体的恒定出流与有压管路流动, 气体射流, 可压缩气体一元流动, 量纲分析与相似原理, 离心式泵与风机的构造原理与工作特性, 泵和风机与管路系统的匹配, 流体力学在流体输配管网中的应用。每章后均附有思考题与练习题。

本书也可作为机械、热能与动力、燃气工程、供热通风与空调工程技术等专业的教材。

本书配有电子课件, 免费提供给选用本书的授课教师。需要者请根据书末的“信息反馈表”索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学基础与应用/韩国军主编. —北京: 机械工业出版社, 2011. 12
21 世纪高等教育规划教材
ISBN 978-7-111-36385-9

I. ①流… II. ①韩… III. ①流体力学—高等学校—教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 227746 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘 涛 责任编辑: 刘 涛 章承林

版式设计: 张世琴 责任校对: 申春香

封面设计: 陈 沛 责任印制: 乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2012 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16.5 印张 · 404 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-36385-9

定价: 34.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据应用型人才培养需求,针对建筑环境与设备工程专业本科教学编写的,可作为建筑环境与设备工程专业相应课程的教材,也可用于高等职业教育供热通风与空调工程技术专业的参考教材及相关企业技术人员的培训教材,同时还可作为机械、热能与动力、燃气工程等工程类本科专业学生学习的参考书。

本书在编写过程中,坚持“以培养应用能力为主,兼顾学生工程素质提高”的原则,着重于基本概念的理解和基本原理的应用,强调解决问题的一般方法,落脚于实际工程问题。本书主要特点是通俗易懂,实用性强,作为专业基础课教材起着承上启下的作用。

本书内容是在长期教学实践经验基础上,结合专业特点进行精选后确定的,主要涵盖流体力学和泵与风机两方面的内容;最后一章介绍了流体力学和泵与风机在管网水力计算和水力工况与水力稳定性分析中的应用,其目的是加强学生应用能力的培养并与后续的专业课很好地衔接。为了便于学生自主学习,本书各部分内容均有示范例题,并配置了较多的思考题与练习题。

本书由韩国军主编。其中,第1、2章由吴义民编写,第3、4、5、11章由韩国军编写,第6、7章由王浩宇编写,第8章由钟春编写,第9、10章由韩国军、楚文军编写。

本书由李晓燕教授主审,李教授提出了许多意见和建议,在此表示感谢。在本书的编写过程中还参考了许多相关书籍和资料,在此对相关作者一并致谢。

由于编者能力有限,不妥和错误之处在所难免,敬请广大读者提出批评改进意见。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 流体的主要物理性质	2
1.3 作用在流体上的力	10
思考题与练习题	11
第2章 流体静压强与静压力	12
2.1 流体静压强及其特性	12
2.2 流体平衡的基本规律	15
2.3 重力作用下流体静压强的分布规律	17
2.4 液体相对平衡下的压强分布规律	29
2.5 作用于平面上的液体静压力	35
2.6 作用于曲线上的液体静压力	43
思考题与练习题	47
第3章 一元流体动力学基础	54
3.1 描述流体运动的基本概念	54
3.2 恒定流连续性方程	58
3.3 恒定流能量方程	60
3.4 恒定流能量方程的应用	65
3.5 总水头线和测压管水头线	72
3.6 恒定气流能量方程	74
3.7 总压线和势压线	76
3.8 恒定流动量方程	77
思考题与练习题	80
第4章 管道流动阻力与能量损失	84
4.1 沿程损失与局部损失	84
4.2 流体的两种流动形态及其判别准则	85
4.3 圆管中层流运动的沿程损失	88
4.4 湍流运动的特征和湍流阻力	90
4.5 湍流沿程阻力系数的实验研究	93
4.6 湍流阻力系数经验公式与莫迪图	95
4.7 非圆形断面管的沿程损失	98
4.8 管道流动的局部损失	100
思考题与练习题	105
第5章 流体的恒定出流与有压管路流动	107
5.1 孔口恒定出流	107

5.2 管嘴恒定出流	112
5.3 有压管路流动	115
思考题与练习题	121
第6章 气体射流	125
6.1 概述	125
6.2 无限空间淹没湍流射流的特征	126
6.3 圆断面射流的运动分析	129
6.4 平面射流	133
6.5 温差或浓差射流及射流弯曲	134
6.6 有限空间射流简介	139
思考题与练习题	143
第7章 可压缩气体一元流动	144
7.1 理想气体一元恒定流动的运动方程	144
7.2 声速、滞止参数、马赫数	147
7.3 气体一元恒定流动的连续性方程	151
7.4 可压缩气体管道流动	153
思考题与练习题	157
第8章 量纲分析与相似原理	159
8.1 量纲分析	159
8.2 相似原理	161
8.3 流体力学中的常见相似准则	163
思考题与练习题	167
第9章 离心式泵与风机的构造原理与工作特性	168
9.1 泵与风机概述	168
9.2 离心式泵与风机的基本构造	169
9.3 离心式泵与风机的工作原理与主要性能参数	175
9.4 离心式泵与风机的理论性能	177
9.5 离心式泵与风机的实际性能曲线	183
9.6 离心式泵与风机性能的相似转换与比转速	187
思考题与练习题	192
第10章 泵和风机与管路系统的匹配	194
10.1 管路性能曲线与泵和风机的	

工作点	194	附录 B	IS 型单级单吸悬臂式离心泵	
10.2 泵与风机的联合运行工况	196	性能表 (摘录)	244	
10.3 泵与风机运行工况的调节	201	附录 C	T4—72 型离心通风机性能表	246
10.4 泵的型谱图与风机的选择性能		附录 D	KT4—68—22NO6.3E 型风机	
曲线	208	性能表	247	
10.5 泵与风机的选择	209	附录 E	IS 型离心泵型谱图	248
10.6 泵的汽蚀与安装	214	附录 F	S 型单级双吸离心泵型谱图	250
思考题与练习题	219	附录 G	圆形风管规格	251
第 11 章 流体力学在流体输配管网中		附录 H	热力网路水力计算表	
的应用	221	(摘录)	252	
11.1 流体输配管网水力计算	221	附录 I	热水网路局部阻力当量长度表	
11.2 管网水力工况与水力稳定性分析	233	(摘录)	253	
思考题与练习题	240	附录 J	给水钢管水力计算表 (摘录)	254
附录	243	参考文献	255	
附录 A	BL 型水泵性能表 (摘录)			
	243			

第 1 章

绪 论

流体包括液体和气体。无论是在日常生活中，还是在实际工程和生产中，都离不开流体。如人的生命离不开空气和水，工业生产中的液压和气压传动，石油化工生产中的传热、传质过程离不开液体和气体，暖通空调工程中离不开水和空气等。了解流体的特性和运动规律并在实际中加以应用，可使流体更好地为人们的生活和生产服务。举个简单例子：如图 1-1 所示，我们每天都接触的洗面盆下的污水管都折成 U 形，就是根据流体在静止状态下的力学特性而设计出的简单水封装置，它可有效地防止异味进入房间。

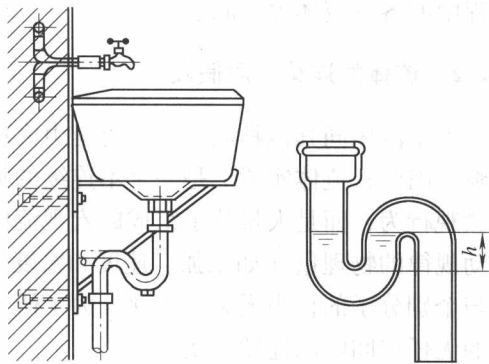


图 1-1 排污管水封装置

本章的中心内容是阐述流体的概念、流体力学的研究对象、任务、研究方法以及作用于流体上的力和流体的主要物理性质。目的是为后面进一步学习流体静力学、流体动力学知识打下基础。

1.1 概述

1.1.1 流体力学的研究对象和任务

流体力学的研究对象是流体，即液体和气体。液体和气体同固体比较，分子间引力小，间距大，分子排列疏松。这使得液体和气体与固体间存在着一个很大的不同，即流体不能保持一定的形状，具有很大的流动性。因此，流体不同于固体的基本特征就是具有流动性。

流体的流动性是由它的力学特性决定的。固体具有一定的抵抗压力、拉力和切力的能力，在外力作用下，通常发生很小的变形，而且变形发展到一定的程度会自然停止。流体则不同，它只能抵抗压力，不能抵抗拉力和切力。当流体受到拉力和切力作用时，无论这个拉力和切力多么小，都会使流体发生连续不断的变形。流体的这一性质，称为流动性。它是流体便于在管道中输送，适宜作为供热、空气调节等工程中的工作介质的主要原因。

流体力学是研究流体静止和运动时的力学规律及其应用的一门学科。流体力学按其研究

内容侧重方面的不同,分为理论流体力学(通称为流体力学)和应用流体力学(通称为工程流体力学)。前者侧重研究理论体系,注重数学推理;后者侧重运用流体力学基本规律解决工程技术中的实际问题。本教材属于后者。

流体力学广泛应用于航空、船舶、水利、交通、石油、能源、建筑、机械、采矿、冶金、化工等各个领域,在人们生产和生活中占有重要的地位。就暖通与空调工程领域而言,供热、空气调节、通风除尘等工程都是以流体作为工作介质,通过应用流体的各种物理特性对流体的流动有效地加以组织来实现的。例如,在暖通空调中,管路的设计、管路的阻力计以及系统的风机和泵的选型等,都是依据流体力学的知识进行计算完成的。因此,流体力学是建筑环境与设备工程专业一门重要的专业基础课程。只有学好流体力学,才能对专业中的流体力学现象作出科学的定性分析和精确的定量计算;才能正确地解决工程中所遇到的流体力学方面的设计和计算问题。

学习流体力学,要注意基本概念、基本方法的理解和掌握,要学会理论联系实际地解决工程中的各种流体力学问题。

1.1.2 流体的连续介质假设

由于流体同其他物质一样,也是由大量不断运动着的分子组成的,且分子间具有一定的间隙。因此,流体实质上是一个不连续的物体。但是,由于流体力学所研究的不是个别分子的微观行为,而是大量分子组成的宏观流体的整体特性和运动规律,而反应宏观流体特性及运动规律的物理量(如压强、速度和密度等),又都是大量分子行为和作用的平均效果,几乎与个别分子的行为无关。因此,为了研究上的方便,常把流体看成是由无数流体质点所组成的无任何间隙的连续介质。

由上述知,连续介质是对真实流体的一种假设。这个假设不仅使我们在研究流体的运动规律时可以不考虑复杂的微观分子运动的影响,而且为我们运用数学分析中的连续函数工具研究流体物理量之间的关系提供了可能。鉴于这个假设在一般情况下是合理的,因此本书后面所分析的内容都将流体视为连续介质。

1.2 流体的主要物理性质

流体的主要物理性质有:惯性、重力特性、压缩性与热胀性、粘滞性和表面张力特性等。

1.2.1 惯性

流体保持原有运动状态不变的性质,称为流体的惯性。质量是流体惯性大小的表征。对于均质流体,单位体积的质量称为密度,其数学表示式为

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

式中 ρ ——流体的密度 (kg/m^3);

m ——流体的质量 (kg);

V ——流体的体积 (m^3)。

各点密度相同的流体,称为均质流体。

各点密度不完全相同的流体,称为非均质流体。非均质流体中某点的密度为

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

式中 ρ ——某点流体的密度 (kg/m^3);

ΔV ——包含该点在内的流体体积 (m^3);

Δm ——体积 ΔV 内的流体质量 (kg)。

密度的倒数称为比体积,记作 v ,即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-3)$$

比体积的单位是 m^3/kg ,它表示单位质量的流体所占有的体积。

1.2.2 重力特性

流体受地球引力作用而具有重量的特性,称为重力特性,常用重度来表征。对于均质流体,单位体积所受的重力称为重度,也就是重度等于重力除以体积,其数学表示式为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-4)$$

式中 γ ——流体的重度 (N/m^3);

G ——流体的重量 (N);

V ——流体的体积 (m^3)。

由重量 G 等于质量 m 与加速度 g 的乘积,可得重度与密度之间的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

式中 g ——重力加速度,一般取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$;

其他符号意义同上。

常用流体的密度和重度为:

水: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 9807 \text{ N/m}^3$

水银: $\rho = 13595 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 133326 \text{ N/m}^3$

干空气 [1 atm (1 atm = $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$), 20°C 时]: $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 11.77 \text{ N/m}^3$

【例 1-1】已知 0.4 m^3 的润滑油的质量为 360 kg ,求该油的密度和重度。

解:根据式 (1-1),可得油的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} = \left(\frac{360}{0.4} \right) \text{ kg/m}^3 = 900 \text{ kg/m}^3$$

根据式 (1-5),可得油的重度为

$$\gamma = \rho g = (900 \times 9.81) \text{ N/m}^3 = 8829 \text{ N/m}^3$$

1.2.3 压缩性与热胀性

在温度不变条件下,流体的体积随压力的变化而变化的特性,称为流体的压缩性;在一定压力下,流体的体积随温度的变化而变化的特性,称为流体的热胀性。

1. 液体的压缩性和热胀性

液体的压缩性和热胀性很小, 常用体积压缩率和体膨胀系数来表示。

体积压缩率 κ : 表示压强每变化 1Pa (N/m^2) 时, 液体体积或密度的相对变化量, 其数学表示式为

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-6)$$

或
$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta p} \quad (1-7)$$

式中 κ ——体积压缩率 (m^2/N);

V ——液体原体积 (m^3);

ΔV ——液体的体积变化量 (m^3);

Δp ——作用在液体上的压强变化量 (N/m^2);

ρ ——液体原密度 (kg/m^3);

$\Delta \rho$ ——液体的密度变化量 (kg/m^3);

“ $-$ ”表示 ΔV 与 Δp 的变化方向相反。

工程上也常用体积模量 K 表示液体的压缩性。体积模量是体积压缩率的倒数, 即

$$K = \frac{1}{\kappa} \quad (1-8)$$

式中 K ——体积模量 (N/m^2)。

表 1-1 列出了水在 0°C 时, 不同压强下的体积压缩率和体积模量。

表 1-1 水在 0°C 时, 不同压强下的体积压缩率和体积模量

压强/at ^①	5	10	20	40	80
$\kappa/(10^{-9}\text{m}^2/\text{N})$	0.538	0.536	0.531	0.528	0.515
$K/(10^9\text{N}/\text{m}^2)$	1.859	1.866	1.883	1.894	1.942

① 工程大气压 $1\text{at} = 98066.5\text{Pa}$ 。

体膨胀系数 α_v : 表示温度每变化 1°C (K) 时, 液体体积或密度的相对变化量, 其数学表示式为

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1-9)$$

或
$$\alpha_v = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \quad (1-10)$$

式中 α_v ——体膨胀系数 ($1/\text{K}$);

ΔT ——温度变化量 (K);

ΔV ——液体的体积变化量 (m^3);

V ——液体原体积 (m^3);

ρ ——液体的原密度 (kg/m^3);

$\Delta \rho$ ——液体的密度变化量 (kg/m^3), “ $-$ ”表示 $\Delta \rho$ 与 ΔT 的变化方向相反。

表 1-2 列出了水在 1atm 下, 不同温度时的密度和重度。

从表 1-1 和表 1-2 中的数值可看出，压强每升高 1atm，水的密度约增加 1/20000；温度每增加 1℃，水的密度减小万分之几。这说明水的压缩性和热胀性是很小的，一般情况下可忽略不计。只有在特殊情况下，如水击、热水采暖等问题中才需考虑。

表 1-2 水在 1atm^①下的密度和重度

温度/℃	密度/(kg/m ³)	重度/(kN/m ³)	温度/℃	密度/(kg/m ³)	重度/(kN/m ³)
0	999.8	9.805	40	992.2	9.730
5	1000.0	9.807	50	988.0	9.689
10	999.7	9.804	60	983.2	9.642
15	999.1	9.798	70	977.8	9.589
20	998.2	9.789	80	971.8	9.530
25	997.0	9.777	90	965.3	9.466
30	995.7	9.764	100	958.4	9.399

① 标准大气压 1atm = 101325Pa。

2. 气体的压缩性与热胀性

气体的压缩性与热胀性非常显著，即温度和压强的变化对气体体积和密度的影响很大。在温度不过低、压强不过高时，气体密度、压强和温度三者之间的关系，服从理想气体状态方程式，即

$$p = \rho RT \tag{1-11}$$

式中 p ——气体的绝对压强 (N/m²)；

T ——气体的热力学温度 (K)；

ρ ——气体的密度 (kg/m³)；

R ——气体常数[J/(kg·K)]， $R = \frac{R_m}{M}$ ， R_m 为摩尔气体常数， $R_m = 8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ，

M 为气体摩尔质量(kg/mol)。

由式 (1-11) 很容易得到：对于同种气体，当 T 一定时，有 $p_1/\rho_1 = p_2/\rho_2$ ，即密度与压强成正比；当 p 一定时，有 $\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2$ ，即温度与密度成反比。

表 1-3 列出了在 1atm 下，不同温度时空气的密度和重度。

表 1-3 1atm 下空气的密度和重度

温度/℃	密度/(kg/m ³)	重度/(N/m ³)	温度/℃	密度/(kg/m ³)	重度/(N/m ³)	温度/℃	密度/(kg/m ³)	重度/(N/m ³)
0	1.293	12.70	25	1.185	11.62	60	1.060	10.40
5	1.270	12.47	30	1.165	11.43	70	1.029	10.10
10	1.248	12.24	35	1.146	11.23	80	1.000	9.81
15	1.226	12.02	40	1.128	11.05	90	0.973	9.55
20	1.205	11.80	50	1.093	10.72	100	0.947	9.30

3. 不可压缩流体的概念

不可压缩流体就是被忽略了压缩性的流体，它是实际流体在某种条件下的简化模型。实际流体都具有压缩性和热胀性。但由于液体的压缩性和热胀性很小，一般情况下可以忽略不计，所以工程上常把液体看成是不可压缩流体。气体的压缩性和热胀性虽然较大，但当压力和温度变化较小时，其密度仍可看做常数，这时的气体也可以看做不可压缩流体。如暖通空调工程中常见的通风管道，气流速度不大，远小于声速（约 340m/s），气体在流动过程中，

密度没有明显变化, 仍可作为不可压缩流体处理。

本书着重讨论不可压缩流体。

【例 1-2】一重力循环室内采暖系统, 如图 1-2 所示。膨胀水箱用于容纳由于温度升高而膨胀出的多余水。若系统内水的总体积 $V = 10\text{m}^3$, 水的温度最大升高 55°C , 水的体膨胀系数 $\alpha_v = 0.0005\text{K}^{-1}$ 。求膨胀水箱的最小容积。

解: 由式 (1-9), 有

$$\begin{aligned}\Delta V &= \alpha_v V \Delta T \\ &= (0.0005 \times 10 \times 55) \text{m}^3 = 0.275 \text{m}^3\end{aligned}$$

所以膨胀水箱的最小容积为 0.275m^3 。

【例 1-3】在 1atm 下, 温度为 0°C 时, 某气体的密度为 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$, 求 500°C 时该气体的重度。

解: 当压力一定时, 温度与密度成反比, 即 $\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2$, 故

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 T_1}{T_2} = \left(\frac{0.9 \times (0 + 273)}{500 + 273} \right) \text{kg}/\text{m}^3 = 0.318 \text{kg}/\text{m}^3$$

$$\gamma_2 = \rho_2 g = (0.318 \times 9.81) \text{N}/\text{m}^3 = 3.12 \text{N}/\text{m}^3$$

所以该气体在 500°C 时的重度为 $3.12\text{N}/\text{m}^3$ 。

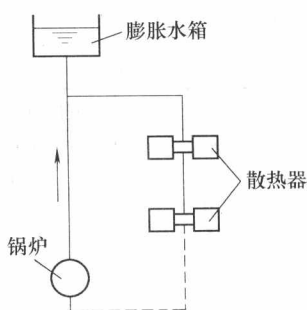


图 1-2 室内采暖系统

1.2.4 粘滞性

1. 粘滞性的概念

为了说明粘滞性的概念, 让我们观察一个现象: 设有两块平行的平板, 其间充满静止流体, 如图 1-3 所示。若将下板固定, 使上板以速度 u_0 匀速水平移动。由于流体的粘附作用, 顶层流体的流速将与上板的运动速度相同; 底层流体的流速将为零; 而中间层流体的流速将介于零和 u_0 之间, 并随高度增加而递增。

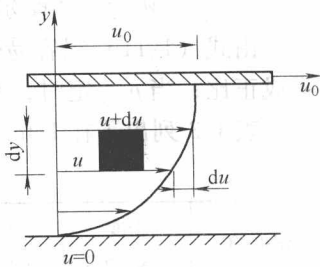


图 1-3 流体粘滞性分析图

这一现象说明, 流体在流动时, 不同的流层之间存在着一个力的作用。由于这个力产生于流体内部, 且阻碍流体的相对运动, 因此称为内摩擦力或粘性力。而流体的这一特性, 即流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力以反抗相对运动的性质, 称为流体的粘滞性。

2. 牛顿内摩擦定律

为了确定内摩擦力的大小, 牛顿作了大量的实验研究。实验结果表明: 对于大多数流体, 内摩擦力 T 的大小与两流层的速度差 du 成正比, 与两流层间的距离 dy 成反比; 与流层的接触面积 A 成正比; 与流体的性质有关; 而与接触面上的压力无关, 即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 又称牛顿内摩擦定律。若以 τ 表示单位面积上的内摩擦力, 则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-13)$$

式中 T ——内摩擦力 (N);

μ ——流体的动力粘度, 也称动力粘性系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

A ——两个流层的接触面积 (m^2);

u ——流层的速度 (m/s);

y ——流层间的垂直距离 (m);

τ ——切应力 (N/m^2);

du/dy ——速度梯度 (s^{-1}), 也称角变形速度, 表示速度沿垂直于速度方向的变化率。

为了说明速度梯度的意义, 在图 1-3 中垂直于速度方向的 y 轴上, 任取一个厚度为 dy 的矩形流体微团 $abcd$, 经 dt 时间后, 该流体微团将运动到 $a'b'c'd'$, 如图 1-4 所示。

由于两流层间存在一定的速度差 du , 所以微团除平移运动外, 还产生了角变形 $d\theta$, 由于 dt 很小, 所以 $d\theta$ 很小, 因此有

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

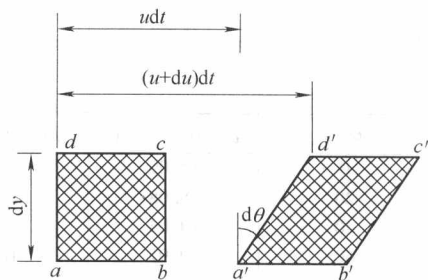


图 1-4 流体微团的角变形速度

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-14)$$

可见, 速度梯度就是直角变形速度。由于这个角变形速度是在切应力的作用下发生的, 所以也称剪切变形速度。因此, 牛顿内摩擦定律也可理解为切应力与剪切变形速度成正比。

3. 粘度

不同的流体, 其粘度值不同。粘度越大的流体, 粘性越大, 流动性越差。

由式 (1-13) 知, 动力粘度 μ 即为速度梯度等于 1 时的切应力, 它是从力的方面反应流体的粘性。

在流体力学的分析和计算中, 常出现动力粘度 μ 与密度 ρ 的比值, 为简单起见, 以 ν 表示之, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-15)$$

ν 的单位为 m^2/s , 它的物理意义是: 速度梯度为 1 时的切应力对单位体积质量的流体作用产生的阻力加速度。它是从速度角度反映流体的粘性, 故称为流体的运动粘度。

表 1-4 列出了在常压下不同温度时水的粘度值。

表 1-5 列出了空气在 1 atm 下, 不同温度时的粘度值。

由表 1-4 和表 1-5 可知, 温度对流体的粘度有影响, 且这种影响对气体和液体是截然不同的。液体的粘度随温度的升高而减小, 气体的粘度随温度的升高而增大。这是因为气体和液体产生粘性的主要因素不同。气体的粘性主要是由分子不规则热运动产生的动量交换形成的。当温度升高时, 分子热运动加快, 动量交换频率增多, 因此气体的粘性增大。液体的粘

性主要是由分子间的吸引力形成的。当温度升高时，分子间距离增加，分子间的吸引作用减弱，因此液体的粘性减小。

压力对流体粘度也有影响，但影响很小，一般不需考虑。

表 1-4 不同温度下水的粘度值（101325Pa 压强下）

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.140	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

表 1-5 1atm 下空气的粘度

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
0	17.09	13.20	260	28.06	42.40
20	18.08	15.00	280	28.77	45.10
40	19.04	16.90	300	29.46	48.10
60	19.97	18.80	320	30.14	50.70
80	20.88	20.90	340	30.08	53.50
100	21.75	23.00	360	31.46	56.50
120	22.60	25.20	380	32.12	59.50
140	23.44	27.40	400	32.77	62.50
160	24.25	29.80	420	33.40	65.60
180	25.05	32.20	440	34.02	68.80
200	25.82	34.60	460	34.63	72.00
220	26.58	37.10	480	35.23	75.20
240	27.33	39.70	500	35.83	78.50

4. 理想流体的概念

实际流体都是有粘性的。粘性的存在，给流体运动规律的研究带来极大困难。为了简化理论分析，特引入理想流体概念。

理想流体就是不考虑粘性的流体，这一概念的引入具有重要意义。一方面，对于粘性不起作用或不起主要作用的问题，可以忽略流体的粘性，把流体直接当成理想流体来处理，这样减小了问题的复杂性；另一方面，对于粘性影响较大的问题，也可先按理想流体来研究，得出理论结果，然后再考虑实际流体的粘性作用，对理论结果进行实验修正，使之与实际相符，从而简化了研究过程。

【例 1-4】如图 1-5 所示，气缸内壁的直径 $D=10\text{cm}$ ，活塞的直径 $d=9.96\text{cm}$ ，活塞的长度 $L=10\text{cm}$ ，活塞与气缸之间充满了 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的润滑油，若活塞以 $u=1\text{m/s}$ 的速度往复运动，求活塞受到的粘性力。

解：因为油塞与气缸壁之间的间隙（ δ ）很小，因此其间油层的速度分布可视为直线分布，故

$$\frac{du}{dy} = \frac{u-0}{\delta} = \left(\frac{1}{0.5 \times (10-9.96) \times 10^{-2}} \right) 1/\text{s} = 5 \times 10^3 1/\text{s}$$

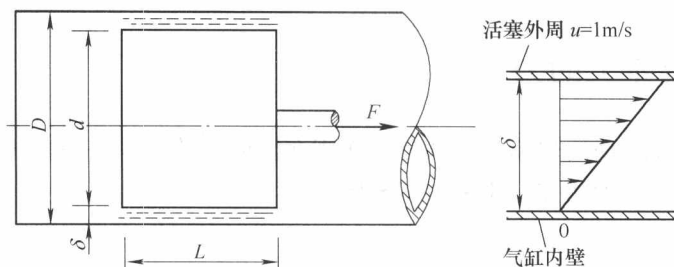


图 1-5 活塞运动的粘性阻力

又因为

$$A = \pi dL = (\pi \times 0.0996 \times 10 \times 10^{-2}) \text{m}^2 = 0.03 \text{m}^2$$

所以

$$T = \mu A \frac{du}{dy} = (0.1 \times 0.03 \times 5 \times 10^3) \text{N} = 15 \text{N}$$

1.2.5 表面张力特性

液体表面有自动收缩的趋势，这是因为有表面张力的作用。硬币放在矿泉水的液面上可以不下沉，空气中的小肥皂泡和水中的小气泡呈圆球形，这些都是表面张力存在的典型例子。

液体表面相邻两部分之间相互牵引的力称为表面张力。液体在自由表面上能承受微小张力的特性称为表面张力特性。在绝大多数情况下，相对于其他类型的力（如重力、压力、粘性力等），表面张力的作用微不足道。但是，在特殊情况下，它的作用却不容忽视。例如，将一根两端敞口的、很细的玻璃管竖立在液体中时，液面为曲面（玻璃管很细），表面张力在垂直方向产生一个附加压力，在该压力下，液体便会在细管内上升或下降一定的高度，显著影响到液柱高度的读数，如图 1-6 所示。这种现象又称为毛细管现象。

由于气体不能形成固定的自由表面，因此表面张力特性是液体特有的性质。

液体与固体壁面接触时，若液体间的牵引力小于液体与固体壁面间的附着力，就会产生液体能润湿固体的现象，例如水在玻璃壁面上将出现浸润现象，如图 1-7a 所示；反之，则不能湿润固体，如水银和玻璃接触，如图 1-7b 所示。

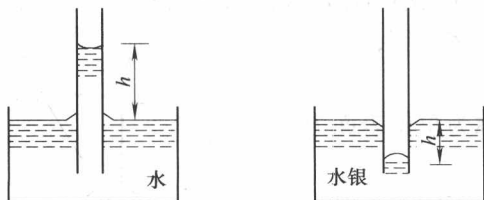


图 1-6 毛细管现象

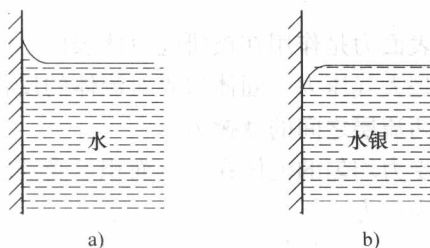


图 1-7 液体润湿固体现象

表面张力在曲面上会产生一个附加压力，这个附加压力将参与液体的受力平衡，使液体的平衡状态发生变化。自然界中存在着许多表面张力作用的现象。一般情况下，其影响可不予考虑。但在液滴、气泡的形成等问题中，表面张力起着重要作用，因此不可忽略。

1.3 作用在流体上的力

研究流体静止和运动的规律，要从分析作用在流体上的力入手。作用于流体上的力按其作用方式的不同可以分为两类：质量力和表面力。

1.3.1 质量力

质量力是作用于流体每一个质点上的非接触力。质量力的大小与其作用的流体的质量成正比。由于质量与体积密切相关，所以质量力也称体积力。常见的质量力有重力和惯性力。

质量力有大小，也有方向，所以用矢量表示。质量力的大小常用单位质量力表示，所谓单位质量力就是单位质量流体受到的质量力。

在对流体进行受力分析时，质量力常用单位质量力在三个垂直方向上的分力来表示，而且在惯性直角坐标系中，常用 X 、 Y 、 Z 表示这三个分力。

设均质流体的质量为 m ，所受质量力为 F ，则单位质量力 f 为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-16)$$

若 F 在三维坐标轴上的分量为 F_x 、 F_y 、 F_z ，则相应的单位质量力在三个坐标轴上的分量为

$$X = \frac{F_x}{m}, Y = \frac{F_y}{m}, Z = \frac{F_z}{m} \quad (1-17)$$

$$f = Xi + Yj + Zk \quad (1-18)$$

若作用在流体上的质量力只有重力，则 $F_x = F_y = 0$ ， $F_z = -mg$ ，单位质量力为

$$X = 0, Y = 0, Z = \frac{F_z}{m} = \frac{-mg}{m} = -g \quad (1-19)$$

负号表示重力方向与 z 轴的方向相反。

质量力的单位为 N（牛顿），单位质量力的单位为 m/s^2 。

1.3.2 表面力

表面力是作用在被研究流体表面上的接触力，其大小与作用表面的面积成正比。表面力可以是大气压力、固体边界对流体的反作用力和摩擦力等，也可以是两流层之间的摩擦力。

受力均匀的流体在单位面积上受到的表面力称为单位表面力也称为应力。

表面力也是矢量。表面力的表示方式与质量力不同，一般是用单位表面力（应力）在作用面切向和法向上的分力来表示。切向分力又称切应力，一般用 τ 表示；法向分力又称压应力或压强，一般用 p 表示。如图 1-8 所示， ΔF 为作用于 ΔA 上的表面力， ΔP 为 ΔF 在 ΔA 法向方向上的分力， ΔT 为 ΔF 在 ΔA 切向方向上的分力，则

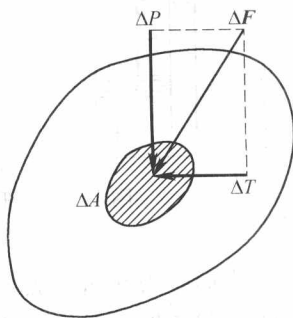


图 1-8 表面力

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-20)$$

$$\tau = \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-21)$$

τ 和 p 的单位均为 N/m^2 。

思考题与练习题

- 1-1 何谓流体？流体的基本特征是什么？气体和液体有何区别？
- 1-2 流体的密度和重度有何区别与联系？
- 1-3 何谓流体的粘滞性？动力粘度和运动粘度之间有何关系？
- 1-4 何谓流体的压缩性与热胀性？它们对流体的重度和密度有何影响？
- 1-5 什么是理想流体？引入这一概念有何意义？
- 1-6 什么是毛细管现象？毛细管现象是如何产生的？
- 1-7 作用于流体上的力可分为哪两类？一般如何表示？

1-8 有密度为 $\rho = 850\text{kg/m}^3$ 的润滑油 20L，求其重量和质量。

1-9 烟气在 1atm、0℃时的密度为 1kg/m^3 ，求 900℃时烟气的重度。

1-10 已知海水在 20℃时的重度为 10100N/m^3 ，试求其密度。

1-11 水的重度 $\gamma = 9.71\text{kN/m}^3$ ， $\mu = 0.599 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，求其运动粘度 ν 。

1-12 空气的重度 $\gamma = 11.5\text{N/m}^3$ ， $\nu = 0.157\text{cm}^2/\text{s}$ ，求其动力粘度 μ 。

1-13 用一个 30L 的敞口容器将水从 15℃加热到 85℃，水的体膨胀系数 $\alpha_v = 0.0004\text{K}^{-1}$ ，求水不溢出的最大允许加水量。

1-14 如图 1-9 所示，一块 50cm × 50cm 的薄板，在温度为 15℃的水面上，以 $u = 1\text{m/s}$ 的速度水平运动，已知水面厚度 $\delta = 12\text{mm}$ ，求薄板所受的摩擦阻力。

1-15 当汽车上路时，轮胎内空气的温度为 20℃，绝对压强为 395kPa，行驶后，轮胎内空气温度上升到 50℃，试求这时的压强。

1-16 厚度为 5mm，底面积为 50cm × 50cm 的矩形木板，质量为 7.5kg，以速度 $u = 1\text{m/s}$ 沿与水平面成 30°倾角的斜面向下匀速运动，如图 1-10 所示。已知木板与斜面间的油层厚度 $\delta = 1\text{mm}$ ，求油的动力粘度和运动粘度。（油的密度为 800kg/m^3 ）

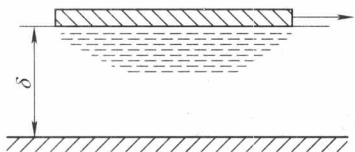


图 1-9 题 1-14 图

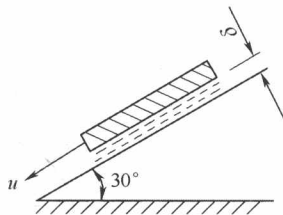


图 1-10 题 1-16 图