

普通高等院校教材

www.jccbs.com.cn
免费课件下载

LIUTI LIXUE

流体力学



主编 许淑惠

中国建材工业出版社

LIUTI
LIXUE

013070737

035
115

普通高等院校教材

流体力学

主编 许淑惠



中国建材工业出版社



北航

C1678215

035

115

013070810

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学/许淑惠主编. —北京: 中国建材工业出版社, 2013. 8

普通高等院校教材

ISBN 978 - 7 - 5160 - 0470 - 8

普通高等院校教材

I. ①流… II. ①许… III. ①工程力学 - 流体力学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 137510 号

内 容 简 介

本书根据高等院校土木工程专业的本科生流体力学课程教学大纲, 同时参照注册结构工程师等考试大纲要求编写而成。全书共分为 10 章, 内容分别为: 绪论, 流体静力学, 一元流体动力学基础, 流动阻力和水头损失, 孔口、管嘴出流和有压管道恒定流, 明渠恒定均匀流, 渗流, 相似原理和量纲分析, 流体运动参数的测量和实验。书中对主要的流体力学术语标注了英文, 每章配有课后习题。

本书可作为高等院校土木工程专业流体力学课程的教材, 也可作为环境类专业和给排水等专业工程流体力学或水力学课程的辅助教材, 或可供其他专业及有关科技人员参考。

本教材有配套课件, 读者可登录我社网站免费下载。

流体力学

主编 许淑惠

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 9.75

字 数: 240 千字

版 次: 2013 年 8 月第 1 版

印 次: 2013 年 8 月第 1 次

定 价: 25.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

本书编委会

主 编 许淑惠

副主编 牛润萍

参 编 马坤茹 张莉莉 周 琦 李艳松 王文红

主 审 张永贵

1.2.3 粘性	1
1.2.4 抗压性	6
1.3.2 无粘性土	8
第2章 流体静力学	9
2.1 流体的压强	11
2.2 流体静压强的分布规律	12
2.2.1 流体静压强的基本方程	13
2.2.2 流体静压强的分布规律	14
2.2.3 流体静压强的分布规律	15
2.2.4 流体静压强的分布规律	15
2.3 压强	15
2.3.1 压强	15
2.3.2 压强	16
2.4 作用于平面	17
2.4.1 静水压力	17
2.4.2 图解法	19
2.5 作用于曲面的静水压力	21
2.5.1 曲面上的静水压力	21
2.5.2 压力体	22
本章习题	24

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学/许淑惠主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2013.5

ISBN 978-7-5160-0470-8

普通高等院校教材

ISBN 978-7-5160-0470-8

前言

本书是根据土建类人才培养方案和高等院校土建类本科生流体力学课程教学大纲, 同时参照注册结构工程师、公用设备工程师考试大纲编写而成。本书的编写以“概念准确、基础扎实、突出应用、淡化过程”为基本原则, 突出特点一是体现学科体系的完整, 保证学生有坚实的数理学科基础; 二是重视学生的认知规律, 科学系统地表述流体力学的基本概念、基本知识和基本计算; 三是注重与工程实践应用相结合, 加强工程实践的训练环节, 培养学生正确判断和解决工程实际问题的能力; 四是注重加强学生综合能力和素质的培养, 以满足 21 世纪我国建设事业对专业人才的要求; 五是注重内容便于理解, 例题和习题都经过精心编写和设计。

全书共分为 10 章: 绪论, 流体静力学, 一元流体动力学基础, 流动阻力和水头损失, 孔口、管嘴出流和有压管恒定流, 明渠恒定均匀流, 渗流, 相似原理和量纲分析, 流体运动参数的测量和实验。书中对主要的流体力学术语标柱了英文。

本书可作为高等学校土木工程专业流体力学课程的教材, 也可作为环境工程、建筑环境与能源应用工程、能源与动力工程和给排水科学与工程等专业流体力学或水力学课程的辅助教材, 或可供其他专业及有关科技人员参考。

参加本书编写的有: 许淑惠 (第 3 章、第 4 章、第 6 章)、牛润萍 (第 1 章、第 2 章)、马坤茹 (第 5 章)、李艳松 (第 7 章)、张莉莉 (第 8 章)、王文红 (第 9 章) 和周琦 (第 10 章), 许淑惠任主编, 张永贵任主审。

由于编者学识所限, 书中难免有疏漏和不足之处, 恳请读者批评指正。

编者

2013.5

出版发行: 中国水利水电出版社

地址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮编: 100044

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫万泰印刷有限公司

开本: 787mm×1092mm 1/16

印张: 9.75

字数: 240 千字

版次: 2013 年 5 月第 1 版

印次: 2013 年 5 月第 1 次

定价: 35.00 元

本社网址: www.water.com.cn

本书如出现印刷质量问题, 由发行单位负责调换, 电话: 010-68336066



中国建材工业出版社
China Building Materials Press

我们提供

图书出版、图书广告宣传、企业/个人定向出版、设计业务、企业内刊等外包、
代选代购图书、团体用书、会议、培训，其他深度合作等优质高效服务。

编辑部
010-88386119

图书广告
010-68361706

出版咨询
010-68343948

图书销售
010-68001605

设计业务
010-88376510转1008

邮箱: jccbs-zbs@163.com

网址: www.jccbs.com.cn

发展出版传媒 服务经济建设

传播科技进步 满足社会需求

(版权专有, 盗版必究。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本
书的任何部分。举报电话: 010-68343948)

目 录

第1章 绪论	1
1.1 作用在流体上的力	1
1.1.1 质量力	1
1.1.2 表面力	2
1.2 流体的主要物理性质	2
1.2.1 流动性	2
1.2.2 惯性	3
1.2.3 粘性	3
1.2.4 压缩性和热胀性	6
1.2.5 液体的表面张力特性和毛细管现象	7
1.2.6 抗压性	8
1.3 流体的力学模型	8
1.3.1 连续介质模型	8
1.3.2 无粘性流体模型	9
1.3.3 不可压缩流体模型	9
本章习题	9
第2章 流体静力学	11
2.1 流体静压强特性	11
2.2 流体静压强的分布规律	12
2.2.1 流体静压强的基本方程	12
2.2.2 等压面	13
2.2.3 流体静压强的分布规律	14
2.2.4 测压管水头	15
2.3 压强的计算基准和度量单位	15
2.3.1 计算基准	15
2.3.2 压强的度量单位	16
2.4 作用于平面的液体压力	17
2.4.1 解析法	17
2.4.2 图解法	19
2.5 作用于曲面的液体压力	21
2.5.1 曲线上的液体压力	21
2.5.2 压力体	22
本章习题	24

第3章 一元流体动力学基础	28
3.1 描述流体运动的两种方法	28
3.1.1 拉格朗日法	28
3.1.2 欧拉法	29
3.2 流场中的基本概念	29
3.2.1 恒定流和非恒定流	29
3.2.2 流线和迹线	30
3.2.3 流管、流束、过流断面、元流和总流	30
3.2.4 流量、断面平均流速	31
3.3 恒定流动的连续性方程	31
3.3.1 恒定元流的连续性方程	31
3.3.2 恒定总流的连续性方程	32
3.4 理想元流的伯努利方程	33
3.4.1 理想元流的伯努利方程	34
3.4.2 理想元流伯努利方程的物理意义和几何意义	35
3.4.3 理想元流伯努利方程的应用	35
3.4.4 粘性流体元流的伯努利方程	36
3.5 恒定总流的伯努利方程	36
3.5.1 渐变流过流断面的压强分布	36
3.5.2 粘性流体总流伯努利方程	37
3.5.3 总流伯努利方程的物理意义和几何意义	38
3.5.4 总流伯努利方程应用	39
3.5.5 水头线	42
3.5.6 恒定气流的伯努利方程	43
3.6 恒定总流动量方程	44
本章习题	47
第4章 流动阻力和水头损失	50
4.1 沿程损失和局部损失	50
4.1.1 流动阻力和能量损失的分类	50
4.1.2 损失的计算公式	51
4.2 层流与紊流, 雷诺数	51
4.2.1 层流与紊流	52
4.2.2 雷诺数	53
4.2.3 流态分析	54
4.2.4 粘性底层	55
4.3 沿程水头损失和切应力的关系	56
4.3.1 均匀流动方程式	56
4.3.2 圆管过流断面上切应力分布	57
4.4 圆管中的层流运动	57

4.4.1 流动特征和速度分布	57
4.4.2 沿程水头损失的计算	58
4.5 紊流运动	59
4.5.1 紊流运动的特征与时均法	59
4.5.2 紊流切应力	61
4.5.3 混合长度理论	62
4.6 紊流的沿程水头损失	63
4.6.1 尼古拉兹实验	63
4.6.2 沿程阻力系数的计算公式	66
4.6.3 非圆管的沿程水头损失	70
4.7 局部水头损失	72
4.7.1 局部损失的一般分析	72
4.7.2 几种典型的局部阻力系数	74
4.7.3 局部阻碍之间的相互干扰	77
4.8 边界层概念与绕流阻力	78
4.8.1 边界层概念	78
4.8.2 曲面边界层及其分离现象	80
4.8.3 绕流阻力的计算	81
本章习题	83
第5章 孔口、管嘴出流和有压管道恒定流	87
5.1 孔口恒定自由出流	87
5.2 孔口恒定淹没出流	88
5.3 管嘴出流	89
5.3.1 圆柱形外管嘴恒定出流	89
5.3.2 收缩断面的真空	90
5.3.3 圆柱形外管嘴的正常工作条件	90
5.4 有压管流	91
5.4.1 短管的水力计算	91
5.4.2 长管的水力计算	94
本章习题	97
第6章 明渠恒定均匀流	101
6.1 明渠均匀流	102
6.1.1 明渠均匀流形成的条件及特征	102
6.1.2 过流断面的几何要素	103
6.1.3 明渠均匀流的基本公式	103
6.1.4 明渠均匀流的水力计算	104
6.1.5 水力最优断面和允许流速	104
6.2 无压圆管均匀流	106
6.2.1 无压圆管均匀流的特征	106

6.2.2 过流断面的几何要素	106
6.2.3 无压圆管的水力计算	107
6.2.4 最大充满度、允许流速	107
本章习题	108
第7章 渗流	110
7.1 渗流达西定律	111
7.1.1 达西定律	111
7.1.2 达西定律的适用范围	112
7.1.3 渗透系数的确定	112
7.2 井和集水廊道	113
7.2.1 井	113
7.2.2 集水廊道	115
本章习题	116
第8章 相似原理和量纲分析	118
8.1 相似原理	118
8.1.1 相似概念	118
8.1.2 相似准则	119
8.1.3 模型律	120
8.2 量纲分析	122
8.2.1 量纲的概念	122
8.2.2 量纲和谐原理	123
8.2.3 量纲分析法	123
本章习题	126
第9章 流体运动参数的测量	128
9.1 流速测量	128
9.1.1 总压管	128
9.1.2 毕托管	129
9.1.3 微型螺旋桨式流速仪	129
9.2 流量测量	130
9.2.1 文丘里流量计	130
9.2.2 孔板流量计	130
9.2.3 量水堰	130
9.3 压强测量	131
9.3.1 测压管	131
9.3.2 水银测压计	131
9.3.3 弹力测压计	132
本章习题	132
第10章 实验	134
10.1 静水压强实验	134

10.1.1 实验目的	134
10.1.2 实验装置	134
10.1.3 实验原理	135
10.1.4 实验方法及步骤	135
10.1.5 注意事项	136
10.2 有压管沿程水头损失实验	136
10.2.1 实验目的	136
10.2.2 实验装置	136
10.2.3 实验原理	136
10.2.4 实验方法及步骤	138
10.2.5 注意事项	138
附录 部分习题参考答案	139
主要参考文献	145

流体力学不仅用于解决土木工程中的水和水气的问题,更能帮助工程技术人员进一步认识土木工建与大气和水环境的关系。大气和水环境对建筑结构和构筑物作用是长期的、多方面的。如台风、洪水通过直接侵袭房屋、桥梁、堤坝,造成巨大的自然灾害;另一方面,兴建大型厂矿、公路、桥梁、隧道、水利发电取水坝等,都会对大气和水环境造成不利的影响,导致生态环境恶化,甚至加重自然灾害。这方面国内外已有惨痛的教训。只有处理好土木工程与大气和水环境的关系,做到保护环境,减轻灾害,才能实现国民经济可持续发展。

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

本书主要采用国际单位制,基本单位是:长度用米,代号为m;时间用秒,代号为s;质量用千克,代号为kg;力用牛顿,代号为N。

由于我国长期采用厘米-克-秒制,某些教材仍采用厘米-克-秒制单位,学习者必须注意两种单位的换算,掌握换算关系—— $1\text{kg}=9.8\text{N}$ 。

1.1 作用在流体上的力

研究流体运动规律,首先要分析作用于流体上的力,力是使流体运动状态发生变化的外因。按力作用方式的不同,分为质量力和表面力。

1.1.1 质量力

质量力(mass force)是作用在流体的每个质点上的力,质量力的大小与流体的质量成正比。

设在流体中M点附近取质量 Δm 的微团,其体积为 ΔV ,作用于该微团的质量力为 ΔF 。

第1章 绪 论

教学要求：了解流体力学在土木工程领域的应用；理解作用在流体上的力；掌握流体的主要物理性质；理解流体力学的力学模型。

液体和气体，统称为流体。

流体力学（fluid mechanics）是力学的一个分支，它研究流体静止和运动的力学规律，及其在工程技术中的应用。

流体力学广泛应用于土木工程的各个领域，例如，在建筑工程和桥梁工程中，研究解决风对高耸建筑物的荷载作用和风振问题，要以流体力学为理论基础；进行基坑排水、地基抗渗稳定处理、桥渡设计都有赖于水力分析和计算；建筑给水排水系统和供热、通风及空调系统，都是以流体作为工作介质，通过流体的各种物理作用，对流体的流动有效地加以组织来实现的。可以说，流体力学已成为土木工程各领域共同的专业理论基础。

流体力学不仅用于解决土木工程中的水和气的问题，更能帮助工程技术人员进一步认识土木工程与大气和水环境的关系。大气和水环境对建筑物和构筑物的作用是长期的、多方面的，如台风、洪水通过直接摧毁房屋、桥梁、堤坝，造成巨大的自然灾害；另一方面，兴建大型厂矿、公路、桥梁、隧道、江海堤坝和水坝等，都会对大气和水环境造成不利的影响，导致生态环境恶化，甚至加重自然灾害，这方面国内外已有惨痛的教训。只有处理好土木工程与大气和水环境的关系，做到保护环境，减轻灾害，才能实现国民经济可持续发展。

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

本书主要采用国际单位制，基本单位是：长度用米，代号为 m ；时间用秒，代号为 s ；质量用千克，代号为 kg ；力为导出单位，用牛顿，代号为 N ， $1N = 1kg \cdot m/s^2$ 。

由于我国长期采用工程单位，专业设备上某些量有时仍表示为工程单位，学习者必须注意两种单位的换算，掌握换算的基本关系—— $1kgf = 9.8N$ 。

1.1 作用在流体上的力

研究流体运动规律，首先必须分析作用于流体上的力，力是使流体运动状态发生变化的外因。按力作用方式的不同，分为两类。

1.1.1 质量力

质量力（mass force）是作用在流体的每个质点上的力。质量力的大小与流体的质量成比例。

设在流体中 M 点附近取质量 dm 的微团，其体积为 dV ，作用于该微团的质量力为 dF ，

则称极限

$$\lim_{dV \rightarrow M} \frac{dF}{dm} = f$$

为作用于 M 点的单位质量的质量力，简称为单位质量力，用 f 或 (X, Y, Z) 表示。

设均质体的质量为 m ，所受质量力为 F ， F 在 x, y, z 坐标轴上的分量分别为 F_x, F_y, F_z ，则单位质量力的轴向分力可表示为

$$\left. \begin{aligned} X &= F_x/m \\ Y &= F_y/m \\ Z &= F_z/m \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

在国际单位制中，质量力的单位是牛顿， N 。单位质量力的单位为 m/s^2 ，与加速度单位相同。

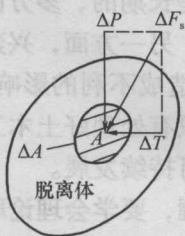
流体力学中常见的质量力有重力和惯性力，但更普遍情况是流体所受的质量力只有重力，重力 $G = mg$ 。在惯用的直角坐标系中， Z 轴铅垂向上为正，重力在各向的分力为 $F_x = 0, F_y = 0, F_z = -mg$ ，单位质量力轴向分力为

$$X = F_x/m = 0, Y = F_y/m = 0, Z = F_z/m = -g$$

即 $(X, Y, Z) = (0, 0, -g)$ 。

1.1.2 表面力

表面力 (surface force) 是通过直接接触，作用在所取的流体表面上的力。在运动流体中，取隔离体为研究对象 (图 1-1)，周围流体对隔离体的作用以分布的表面力代替。表面力在隔离体表面某一点的大小用应力来表示。



设 A 为隔离体表面上的一点，包含 A 点取微小面积 ΔA 上的总表面力为 ΔF_s ，将其分解为法向分力 (压力) ΔP 和切向分力 ΔT ，则

$$\left. \begin{aligned} \bar{p} &= \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ p &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 $\bar{p}$ —— 面积 ΔA 上的平均压应力或平均压强；

图 1-1 表面力

p —— A 点的压应力或压强。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\tau} &= \frac{\Delta T}{\Delta A} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 $\bar{\tau}$ —— 面积 ΔA 上的平均切应力；

τ —— A 点的切应力。

压强 (pressure) 和切应力 (shear stress) 的单位为帕斯卡，以 Pa 表示。 $1Pa = 1N/m^2$ 。

1.2 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流体流动状态的内在因素。

1.2.1 流动性

流动性是流体不同于固体的基本特征。什么是流动性？观察流动现象，例如，微风吹过

平静的池水，水面因受气流的摩擦力（沿水面作用的剪切力）作用而波动；斜坡上的水，因受重力沿坡面方向的切向分力而往低处流动……。这些现象表明，流体在静止时不能承受剪切力，或者说任何微小的剪切力作用，流体都将产生连续不断的变形，只要剪切力存在，流动就持续进行，这就是流体的流动性。

1.2.2 惯性

惯性（inertia）是物体所具有的维持原有运动状态的物理性质，主要由质量决定。单位体积流体的质量为流体密度（density）。对于均质流体，设流体的质量 Δm ，单位 kg，该质量流体的体积为 ΔV ，单位 m^3 ，则该流体的 ρ 为

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-4)$$

在计算中液体的密度随压强和温度的变化很小，一般可视为常数，如水的密度为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，水银的密度为 $13600 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

气体的密度随压强和温度而变化。在一个标准大气压，温度为 20°C 时，干空气的密度为 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

作用于单位体积流体的重量称为容重。对于均质流体，设流体所受的重量 ΔG ，单位 N，该流体的体积为 ΔV ，单位 m^3 ，则该流体的容重 γ 为

$$\gamma = \frac{\Delta G}{\Delta V} (\text{N}/\text{m}^3) \quad (1-5)$$

容重和密度的重要关系：

$$\gamma = \rho g \quad (1-6)$$

1.2.3 粘性

粘性（viscosity）是流体固有的物理性质，可从两个方面去认识。

1. 粘性现象

观测两块平行平板（图 1-2），其间充满静止流体，两平板间距离 h ，以 y 轴为法线方向。保持下平板固定不动，使上平板沿所在平面，以速度 U 运动。于是粘附于上平板表面的一层流体随平板以速度 U 运动，并一层一层地向下影响，各层相继运动，直至粘附于下平板流速为零的流层。在 U 和 h 都较小的情况下，各流层的速度，沿法向 y 方向呈直线分布。

上平板带动粘附在上平板上的流层运动，而且能影响到内部各流层运动，表明内部各流层之间，存在着剪切力，即内摩擦力，这就是流体的粘性。粘性是流体的内摩擦特性。

2. 牛顿内摩擦定律

牛顿（Newton, I. 1643—1727）1687 年在所著《自然哲学的数学原理》中提出，并经后人验证：流体的内摩擦力 T 与速度梯度 du/dy 成比例；与流层的接触面积 A 成比例；与流体的性质有关；与接触面的压力无关，即

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

以应力表示

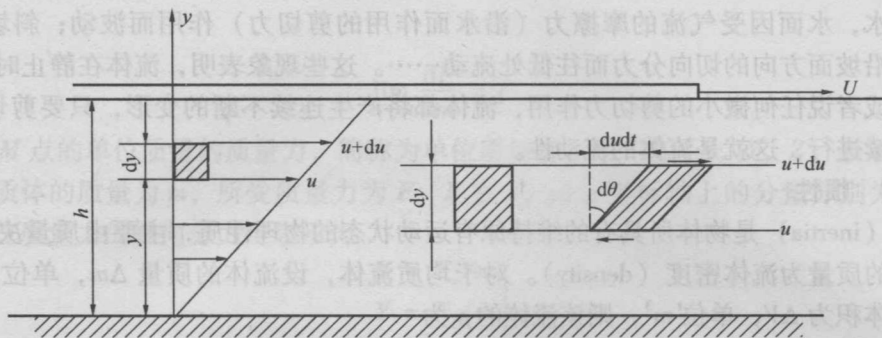


图 1-2 流体的粘性

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

式 (1-7) 和式 (1-8) 称为牛顿内摩擦定律。

式中 $\frac{du}{dy}$ ——流层的速度在法线方向的变化率，称为速度梯度。

当 U 和 h 较小时， $\frac{du}{dy} = \frac{U}{h}$ 。为进一步说明该项的物理意义，在距离为 dy 的上、下两流层间取矩形流体微团 (图 1-2)，微团上、下两层的速度相差 du ，经 dt 时间，微团除发生位移外，还有剪切变形量 $d\theta$

$$d\theta \approx \tan d\theta = \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

可知速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 实为流体微团的剪切变形速度 (剪切应变率)。

μ 是比例系数，称为动力粘度 (dynamic viscosity)，简称为粘度，单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。动力粘度是流体粘性大小的度量，同一种流体 μ 值越大，流体的粘性越大。粘度随温度而变化，不同温度下水和空气的粘度见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 水的粘度

t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)
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 1-2 一个大气压下空气的粘度

t (°C)	μ ($10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	t (°C)	μ ($10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)
0	1.72	13.7	90	2.16	22.9
10	1.78	14.7	100	2.18	23.6
20	1.83	15.7	120	2.28	26.2
30	1.87	16.6	140	2.36	28.5
40	1.92	17.6	160	2.42	30.6
50	1.96	18.6	180	2.51	33.2
60	2.01	19.6	200	2.59	35.8
70	2.04	20.5	250	2.80	42.8
80	2.10	21.7	300	2.98	49.9

在分析流体运动规律时，粘度 μ 和密度 ρ 经常以比的形式出现，将其定义为运动粘度 ν

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-10}$$

式中，运动粘度 ν (kinematic viscosity) 的单位为 m^2/s 。

由表 1-1、表 1-2 看出，水和空气的粘度随温度变化的规律是不同的，水的粘度随温度升高而减小，空气的粘度随温度升高而增大。这是因为粘性是分子间的吸引力和分子不规则的热运动产生动量交换的结果。温度升高，分子间的吸引力降低，动量交换增大；反之，温度降低，分子间吸引力增大，动量交换减小。对于液体，分子间的吸引力是决定性因素，所以液体的粘度随温度升高而减小；对于气体，分子间的热运动产生的动量交换是决定性因素，所以气体的粘度随温度升高而增大。常见液体的动力粘度 μ 随温度的变化关系，可参见下列公式

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha(T - 273.15) + \beta(T - 273.15)^2} \tag{1-11}$$

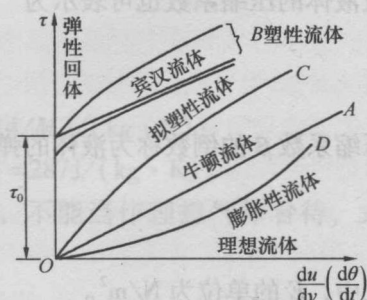
式中 μ_0 —— $T=273.15\text{K}$ 时的动力粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

α 、 β ——取决于液体种类的系数。例如，对于水， $\alpha = 33.69 \times 10^{-3}$ ， $\beta = 22.1 \times 10^{-4}$ ，
而 $\mu_0 = 1.792 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

对于气体（空气）有

$$\mu = [17040 + 56.02(T - 273.15) - 0.1189(T - 273.15)^2] \times 10^{-9} \tag{1-12}$$

牛顿内摩擦定律只适合于一般流体，它对某些特殊流体是不适用的。为此，将在做纯剪切流动时满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体 (Newtonian fluid)。如水和空气等，均为牛顿流体。而将不满足该定律的流体称为非牛顿流体 (Non-Newtonian fluid)。如泥浆、污水、油漆和高分子溶液等。牛顿流体与非牛顿流体切应力随速度梯度变化关系 (图 1-3)。本书仅限于牛顿流体。



【例 1-1】 有一气缸 (图 1-4)，内壁的直径 $D=12\text{cm}$ ，图 1-3 切应力随速度梯度的变化

活塞的直径 $d = 11.96\text{cm}$, 活塞的长度 $l = 14\text{cm}$, 活塞往复运动的速度为 1m/s , 润滑油液的粘度 $\mu = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。试求作用在活塞上的粘性力是多少?

【解】 因粘性作用, 粘附在气缸内壁的润滑油层速度为零, 粘附在活塞外周的润滑油层与活塞速度相同, 润滑油层间因相对运动产生粘性力 T 。因间隙很小, 速度近似直线分布。活塞外周的切应力为

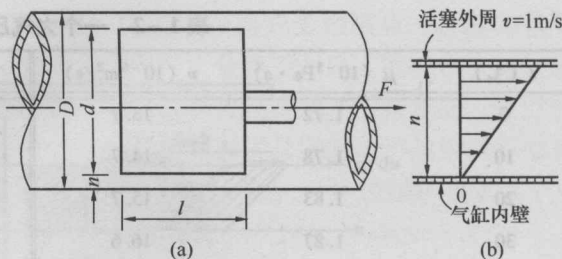


图 1-4 活塞运动的粘性阻力

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{U}{n} = \left[0.1 \times \frac{1}{(0.12 - 0.1196)/2} \right] \text{N/m}^2 = 5.0 \times 10^2 \text{N/m}^2$$

活塞外周与润滑油的接触面积

$$A = \pi dl = (\pi \times 0.1196 \times 0.14) \text{m}^2 = 0.053 \text{m}^2$$

$$T = A\tau = 26.5 \text{N}$$

1.2.4 压缩性和热胀性

流体受压, 体积缩小, 密度增大的性质, 称为流体的压缩性。流体受热, 体积膨胀, 密度减小的性质, 成为流体的热胀性。

1. 液体的压缩性和热胀性

液体的压缩性, 用压缩系数 β 来表示, 它表示在一定温度下, 压强增加 1 单位, 体积的相对缩小率。设液体的原体积为 V , 压强增加 dp 后, 体积减小 dV , 则液体的压缩系数为

$$\beta = - \frac{dV/V}{dp} \quad (1-13)$$

由于液体受压体积缩小, dp 和 dV 异号, 式中的右侧加负号, 保证 β 为正值。液体的 β 值越大, 越容易被压缩。 β 的单位是 $1/\text{Pa}$ 。

液体被压缩时, 其质量并不改变, 即

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

得

$$-dV/V = dp/\rho$$

故液体的压缩系数也可表示为

$$\beta = \frac{dp/\rho}{dp} \quad (1-14)$$

压缩系数 β 的倒数称为液体的弹性模量, 用 E 来表示, 即

$$E = \frac{1}{\beta} = \frac{dp}{dV/V} = - \frac{dp}{dV/V} \quad (1-15)$$

式中, E 的单位为 N/m^2 。

液体的压缩系数随温度和压强变化, 表 1-3 列举了水在温度为 0°C 、 10°C 和 20°C 时,