



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材

高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

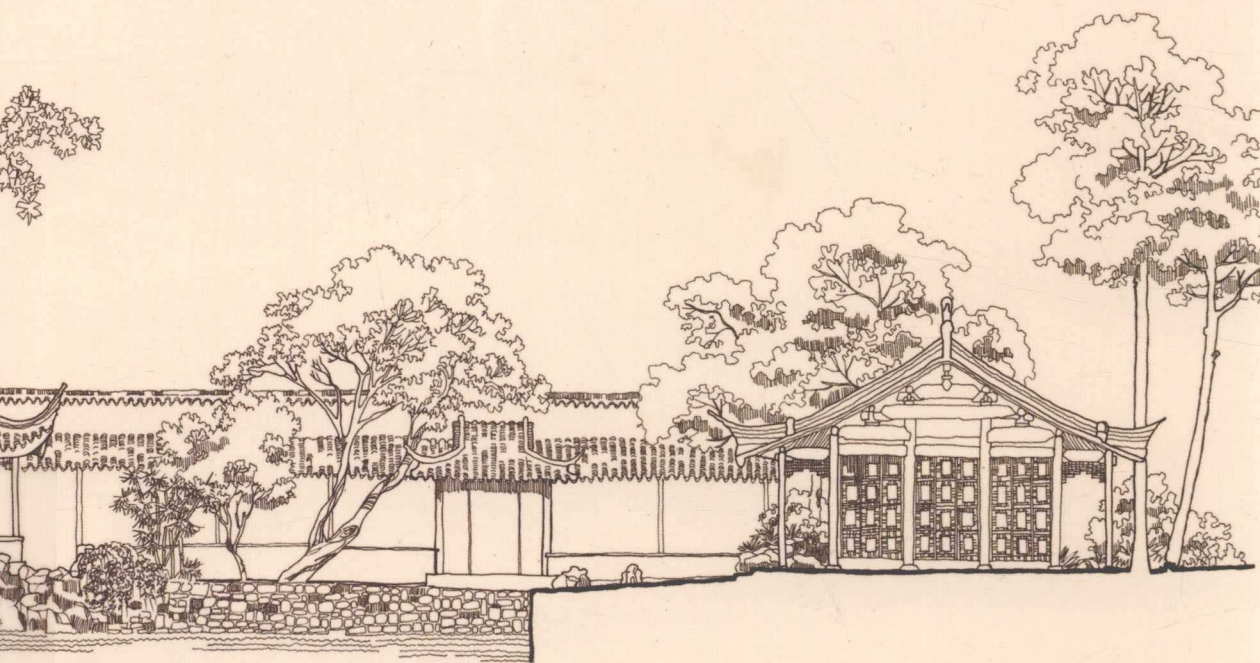


流体力学

(第三版)

Fluid Mechanics

龙天渝 蔡增基 主编



中国建筑工业出版社

书号 (130) 国家规划教材

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材

高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

流体力学

(第三版)

龙天渝 蔡增基 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学/龙天渝, 蔡增基主编. —3 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 12

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材. 住房城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材. 高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 978-7-112-22818-8

I. ①流… II. ①龙…②蔡… 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(2018)第 234517 号

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
住房城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

流 体 力 学

【第三版】

龙天渝 蔡增基 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19¼ 字数: 474 千字

2019 年 2 月第三版 2019 年 2 月第二十二次印刷

定价: 42.00 元(附网络下载)

ISBN 978-7-112-22818-8

(32933)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书是为全国普通高等学校建筑环境与能源应用工程专业“流体力学”课程(80~100学时)编写的教材,是高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材。全书包括绪论,流体静力学,一元流体动力学基础,流动阻力和能量损失,孔口管嘴管道流动,气体射流,不可压缩流体动力学基础,流体运动基本方程的求解,一元气体动力学基础,明渠流动与渗流以及相似性原理和因次分析等内容。每章均有要点提示、小结和习题,书末有部分习题答案。

本书由浅入深,通俗易懂,注意加强基础理论和能力的培养,力求体系完整,思路清晰,物理概念明确,物理意义透彻。本书不仅可作为建筑环境与能源应用工程专业本科生教材,而且还可作为土木、环境、动力等有关专业本科生的教材或教学参考书。

配套素材下载地址: www.cabp.com.cn/td/cabp22813.rar

* * *

责任编辑:齐庆梅 姚荣华

责任校对:芦欣甜

第三版前言

本书是为全国普通高等学校建筑环境与能源应用工程专业“流体力学”课程编写的教材,适用于80~100学时的教学安排。本书也可作为土木、环境、动力等有关专业本科生流体力学课程的教材或教学参考书。

本书是对“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《流体力学》(第二版)的修订,以适应新形势下高等教育人才培养模式和教育教学改革的需要。

在对国内外著名的流体力学教材进行分析研究并汲取有关专家意见的基础上,本次修订除保持原教材从一元流动推进到三元流动,由浅入深、循序渐进的体系外,力求有所改进和提高。主要修订的内容有:(1)对第二版中的第7章“不可压缩流体动力学基础”和第8章“绕流运动”进行较大幅度调整和增删。第7章主要阐述不可压缩流体动力学的基本方程和定解条件,而第8章针对第7章中的基本方程,对其求解方法进行阐述。第8章包括解析求解方法;在无法解析求解的情况下,如何针对特定的条件对方程作相应的简化,简化后进行解析求解的方法,如对于无旋流动、边界层流动等的求解;以及数值求解方法等内容。考虑到数值模拟技术的快速发展和广泛应用,在第8章中增加数值求解方法的内容。(2)针对“宽基础”的教学要求,增加第10章“明渠流动与渗流”。此外,对全书进行全面修订和校核。

本书阐述流体力学的基本概念、基本原理和处理流体力学问题的基本方法。全书共11章:绪论,流体静力学,一元流体动力学基础,流动阻力和能量损失,孔口管嘴管路流动,气体射流,不可压缩流体动力学基础,流体运动基本方程的求解,一元气体动力学基础,明渠流动与渗流以及相似性原理和因次分析。全书内容符合建筑环境与能源应用工程专业规范对流体力学课程的基本要求,注重对学生实际流动问题的建模能力、分析与计算能力、实验能力和自学能力等能力的培养。

本次修订全部由龙天渝完成,感谢苏州科技大学的张维佳教授对新增的第10章“明渠流动与渗流”的编写所给予的帮助。

为方便教学,本书制作了配套的电子课件,可在中国建筑工业出版社官网下载。

由于作者水平有限,不妥之处恳请读者和专家批评指正,以便今后不断完善。

第 二 版 前 言

本书是为全国普通高等学校建筑环境与设备工程专业流体力学课程编写的教材，适用于 80~100 学时的教学安排。本书也可作为土木、环境、动力等专业流体力学课程的教材或教学参考书。

本书是 2004 年出版的《流体力学》教材的修订版。本教材精选教学内容、力求体系完整并使之符合学生的认识规律。教材采用一元流动到三元流动的体系，由浅入深、循序渐进。在编写过程中，注意加强理论联系实际、特别是专业实际，注重能力的培养，力求思路清晰、物理概念明确、内容通俗易懂。

本书阐述流体力学的基本概念、基本原理和基本方法。全书共 10 章：绪论，流体静力学，一元流体动力学基础，流动阻力和能量损失，孔口管嘴管路流动，气体射流，不可压缩流体动力学基础，绕流运动，一元气体动力学基础以及相似性原理和因次分析。全书内容符合建筑环境与设备工程专业新制定的专业规范对流体力学课程的基本要求。

本次修订对原书中内容的阐述方面做了进一步的推敲并对部分内容进行了修改，每章增加“要点提示”和“本章小结”，对个别例题和习题进行了删除或替换。本次修订由原编者重庆大学龙天渝修订第 2、3、7、8 章；重庆大学蔡增基修订第 1、4、10 章；西安建筑科技大学陈郁文修订第 5、6、9 章。龙天渝、蔡增基担任主编。

为方便教学，本书制作了配套的电子课件，可到 www.cabp.com.cn/td/cabp22813.rar 下载。

由于编者的学识及水平所限，难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2013 年 1 月

第一版前言

本书是为全国普通高等学校建筑环境与设备工程专业流体力学课程（80~100学时）编写的教材，是普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材。本书也可作为土木、环境、动力等专业相应课程的教材或教学参考书。

本书是在原教材《流体力学泵与风机》（第四版）（蔡增基 龙天渝 主编）上篇“流体力学”的基础上修订而成。《流体力学泵与风机》自1979年首版至今已二十多年，在建筑环境与设备工程专业（原供热通风空调工程和燃气工程专业）以及纺织、交通、冶金、陶瓷等专业中广泛使用，对各专业的发展起了积极的作用，为适应目前建筑环境与设备工程专业课程体系的调整，特编写本教材。

本书根据专业的需要，介绍了工程流体力学的基本概念、基本原理、基本方法。书中采用一元流动到三元流动的体系，由浅入深，循序渐进。在编写过程中，作者注意加强基础理论和能力的培养，力求体系完整，思路清晰，通俗易懂，物理概念明确，物理意义透彻。

本书主要采用国际单位制，主要物理量的符号使用国标《量和单位》GB 3100~3102—93给出的符号。

由于各院校的学时数不同，要求不完全一样，因此，任课教师可根据具体情况，对某些章节进行取舍。

本书由重庆大学龙天渝、蔡增基主编。编写分工：龙天渝教授编写2、3、7、8章，蔡增基教授编写1、4、10章，西安建筑科技大学陈郁文教授编写5、6、9章。

由于作者水平所限，不妥之处恳请读者及专家批评指正。

编者

2004年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 作用在流体上的力	1
1.2 流体的主要力学性质	3
1.3 流体的力学模型	11
本章小结	12
习题	12
第 2 章 流体静力学	14
2.1 流体静压强及其特性	14
2.2 流体静压强的分布规律	16
2.3 压强的计算基准和量度单位	22
2.4 液柱测压计	25
2.5 作用于平面的液体压力	27
2.6 作用于曲面的液体压力	31
2.7 流体平衡微分方程	35
2.8 液体的相对平衡	38
本章小结	44
习题	44
第 3 章 一元流体动力学基础	52
3.1 描述流体运动的两种方法	52
3.2 恒定流动和非恒定流动	53
3.3 流线和迹线	54
3.4 一元流动模型	55
3.5 连续性方程	57
3.6 恒定元流能量方程	59
3.7 过流断面的压强分布	62
3.8 恒定总流能量方程式	65
3.9 能量方程的应用	68
3.10 总水头线和测压管水头线	72
3.11 恒定气流能量方程式	75
3.12 总压线和全压线	78
3.13 恒定流动量方程	81
本章小结	85
习题	86

第4章 流动阻力和能量损失	92
4.1 沿程损失和局部损失	92
4.2 层流与紊流、雷诺数	93
4.3 圆管中的层流运动	97
4.4 紊流运动的特征和紊流阻力	101
4.5 尼古拉兹实验	105
4.6 工业管道紊流阻力系数的计算公式	108
4.7 非圆管的沿程损失	115
4.8 管道流动的局部损失	118
本章小结	126
习题	127
第5章 孔口管嘴管路流动	132
5.1 孔口自由出流	132
5.2 孔口淹没出流	134
5.3 管嘴出流	137
5.4 简单管路	140
5.5 管路的串联与并联	144
5.6 管网计算基础	146
5.7 有压管中的水击	148
本章小结	151
习题	152
第6章 气体射流	156
6.1 无限空间淹没紊流射流的特征	156
6.2 圆断面射流的运动分析	160
6.3 平面射流	165
6.4 温差或浓差射流	166
6.5 有限空间射流	171
本章小结	175
习题	175
第7章 不可压缩流体动力学基础	177
7.1 流体微团运动的分析	177
7.2 应力和变形速度的关系	181
7.3 不可压缩流体连续性微分方程	184
7.4 不可压缩流体运动微分方程	187
7.5 流体流动的初始条件和边界条件	190
7.6 不可压缩黏性流体紊流运动的基本方程及封闭条件	192
本章小结	193
习题	193

第 8 章 流体运动基本方程的求解	194
8.1 无旋流动	194
8.2 平面无旋流动	200
8.3 绕流运动与附面层	208
8.4 绕流阻力和升力	212
8.5 层流解析解举例	216
8.6 数值求解方法简介	218
本章小结	223
习题	224
第 9 章 一元气体动力学基础	226
9.1 理想气体一元恒定流动的运动方程	226
9.2 声速、滞止参数、马赫数	230
9.3 气体一元恒定流动的连续性方程	235
9.4 等温管路中的流动	237
9.5 绝热管路中的流动	241
本章小结	244
习题	245
第 10 章 明渠流动与渗流	247
10.1 明渠均匀流	247
10.2 明渠流动状态	250
10.3 水跃和水跌	255
10.4 棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析	258
10.5 渗流	262
本章小结	265
习题	265
第 11 章 相似性原理和因次分析	268
11.1 力学相似性原理	268
11.2 相似准数	270
11.3 模型律	274
11.4 因次分析法	278
本章小结	281
习题	281
部分习题答案	283
中英文索引	289
主要参考文献	296

第 1 章 绪 论

【要点提示】本章是流体力学的开篇，主要阐述作用在流体上的力，流体的主要力学性质，连续介质模型和无黏性流体以及不可压缩流体的概念。这些基本知识是学习流体力学理论的基础。

液体和气体，统称为流体。

流体力学是力学的一个分支，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。

流体在建筑环境与能源应用工程中应用得非常广泛。热的供应、空气的调节、燃气的输配、排毒排湿、除尘降温等，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。学好流体力学，才能对专业范围内的流体力学现象作出合乎实际的定性判断，进行足够精确的定量估计，正确地解决专业范围内的流体力学的问题。

流体作为自然界中物质的一种形态，其宏观运动遵循物质运动的普遍规律，如质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律等。流体力学的基本定理实质上都是普遍规律在流体运动中的具体体现。学习流体力学，要注意基本理论、基本概念、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 (SI Units)，基本单位是：长度用米，符号为 m；时间用秒，符号为 s；质量用千克，符号为 kg；力为导出单位，采用牛顿，符号为 N。1N = 1kg · m/s²。

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。根据力作用方式的不同，可以分为质量力和表面力两类。

1.1.1 质量力

质量力是作用在流体的每一个质点（或微团）上的力。

设在流体中 M 点附近取质量为 Δm 的微团，其体积为 ΔV ，作用于该微团的质量力为 $\Delta \vec{F}_B$ ，则称极限

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}_B}{\Delta m} = \vec{f}$$

为作用于 M 点的单位质量的质量力，简称为单位质量力，用 $\vec{f}$ 或 (X, Y, Z) 表示。设 $\Delta \vec{F}_B$ 在 x, y, z 坐标轴上的分量分别为 ΔF_{Bx} , ΔF_{By} , ΔF_{Bz} ，则单位质量力的轴向分力可表示为

$$\left. \begin{aligned} X &= \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{Bx}}{\Delta m} \\ Y &= \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{By}}{\Delta m} \\ Z &= \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{Bz}}{\Delta m} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

在国际单位制中,质量力的单位是牛顿, N。单位质量力的单位是 N/kg 或 m/s^2 , 其单位与加速度相同。

流体力学中碰到的普遍情况是流体所受的质量力只有重力。由于重力 $\vec{G}$ 的大小与流体的质量 m 成正比, $G=mg$, 所以流体所受的单位质量力的大小等于重力加速度的值, $G/m=g$ 。当采用常用的直角坐标系时, 若 Z 轴铅垂向上为正, 重力在各向的分力为 G_x , G_y , G_z , 则单位质量重力的轴向分力为

$$\left. \begin{aligned} X &= G_x/m = 0 \\ Y &= G_y/m = 0 \\ Z &= G_z/m = -g \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

即 $(X, Y, Z) = (0, 0, -g)$ 。

在研究流体的相对平衡时, 例如盛装液体的容器作直线加速运动或旋转运动等, 也将流体运动的惯性力看成是作用在流体上的质量力。

1.1.2 表面力

在流体中取出一块由封闭表面所包围的一部分流体, 称为分离体或隔离体。表面力是作用在所考虑的流体即分离体表面上的力。尽管流体内部任一对相互接触的表面上, 这部分和那部分流体之间的表面力是大小相等, 方向相反, 相互抵消, 但在流体力学里分析问题, 常常从流体内部取出一个分离体, 研究其受力状态, 这时与分离体相接触的周围流体对分离体作用的内力又变成了作用在分离体表面上的外力。总之, 表面力针对所研究的流体系统而言, 它可能是周围同种流体对分离体的作用, 也可能是另一种相邻流体对其作用, 或是相邻固壁的作用。例如, 敞开容器内的液体, 如把整个液体作为研究系统, 则它仅受到自由面上的大气和相接触的容器壁面的作用; 若把和固壁接触的自由面附近的部分液体取作分离体, 则上述三种表面力都存在。

流体力学中研究流体的运动时, 正确地分析作用在所考虑的流体系统上的表面力极其重要。

质量力的表达形式常用单位质量力的坐标分量来表示, 类似地, 表面力常采用单位表面力的切向分力和法向分力来表示。

设在流体分离体的表面上, 围绕任意点 A 取一面积 ΔA , 设 ΔA 的外法线方向为 $\vec{n}$ 。一般地, 可将作用在该面上的表面力 $\Delta \vec{F}_s$ 分解为表面法线方向的分力 ΔP 和切线方向的分力 ΔT 。因为流体内部不能承受拉力, 所以, 表面法线方向的力只有沿内法线方向的压力。因此, 表面应力可分解为

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

$\bar{p}$ 称为面积 ΔA 上的平均正应力或平均压强, $\bar{\tau}$ 称为面积 ΔA 上的平均切应力。如果令面积 ΔA 无限缩小至 A 点, 则

$$\left. \begin{aligned} p &= \lim_{\Delta A \rightarrow A} \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow A} \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

p 称为 A 点上以 $\vec{n}$ 为作用面的法线的压强或法向应力或正应力, τ 称为 A 点的切应力。在国际单位制中, 单位是帕斯卡, 以 Pa 表示。1Pa=1N/m²。

单位质量力 $\vec{f}$ 是空间坐标 x, y, z 和时间 t 的函数, 即

$$\vec{f} = \vec{f}(x, y, z, t)$$

它是质量力在空间中的分布密度; 而压强 p 和切应力 τ 不仅有赖于空间位置和时间, 同时也与作用面的方位有关, 也就是与作用面的法线方向 $\vec{n}$ 有关, 因此被称为是作用面上的分布密度。中学物理讲述的往往是分布密度“均匀”的情况。

1.2 流体的主要力学性质

本节阐述与流体运动有关的流体的主要力学性质。

1.2.1 流动性

在生产和生活中, 有许多流体流动现象, 如水在河中流动, 风从门窗流入, 燃气从喷孔喷出等。这些现象表明了流体不同于固体的基本特征, 就是它的流动性。

和固体比较, 固体存在着抗拉、抗压和抗剪切三方面的能力。如果要将某一固体拉裂、压碎或切断, 或使其产生很大变形, 必须加以足够的外力, 否则拉不裂、压不碎、切不断。但是, 流体则不相同, 如要分裂、切断水体, 几乎不需什么气力。流体的抗拉能力极弱, 抗剪切能力也很微小, 静止时不能承受剪切力, 只要受到剪切力作用, 不管此剪力怎样微小, 流体都要发生不断变形, 各质点间发生不断的相对运动。流体的这个性质, 称为流动性, 这是它便于用连续管道、渠道进行输送, 适宜作供热、供冷等工作介质的主要原因。流体的抗压能力较强, 这个特性和流动性相结合, 使我们能够利用水压推动水力发电机, 利用蒸汽压力推动汽轮发电机, 利用液压、气压传动各种机械。

1.2.2 惯性

惯性是物体维持原有运动状态的能力的性质。表征某一流体的惯性大小可用该流体的密度。对于均质流体, 单位体积的质量称为密度, 以 ρ 表示:

$$\rho = m/V \quad (1-5)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m³;

m ——流体的质量, kg;

V ——该质量流体的体积, m^3 。

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

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-6)$$

式中 ρ ——某点流体的密度;

Δm ——为微小体积 ΔV 内的流体质量;

ΔV ——为包含该点在内的流体体积。

在计算中常用的流体密度如下:

水的密度

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

汞的密度

$$\rho_{\text{Hg}} = 13595 \text{ kg/m}^3$$

干空气在温度为 290K, 压强为 760mmHg 时的密度为 $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$

1.2.3 黏性

流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力(内力)以反抗相对运动的性质, 叫做黏性。此内摩擦力称为黏滞力或黏性力。

为了说明流体的黏性, 现以流体在管中流动为例, 如图 1-1 所示。当流体在管中流动时, 紧贴管壁的流体质点, 粘附在管壁上, 流速为零。位于管轴上的流体质点, 离管壁的距离最远, 受管壁的影响最小, 因而流速最大。介于管壁和管轴之间的流体质点, 将以不同的速度向右移动, 它们的速度将从管壁至管轴线, 由零增加至最大。图 1-1 (a) 是黏性流体在管中缓慢流动时, 流速 u 随垂直于流速方向 y 而

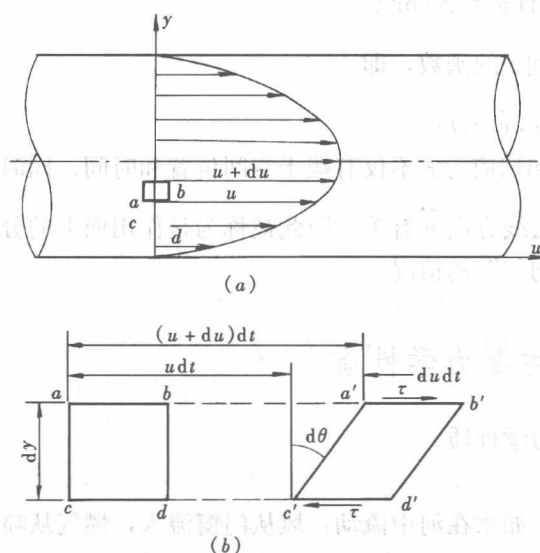


图 1-1 流体质点的直角变形速度

变化的函数关系图, 即 $u = f(y)$ 的函数关系曲线, 称为流速分布图。由于各流层的速度不相同, 因而各质点间便产生了相对运动, 从而产生内摩擦力以抗拒相对运动。在流体作层流(层流和紊流的概念, 将在第 4 章讲述)剪切流动时, 内摩擦力(或切力) T 的大小, 经过无数的试验证明:

(1) 与两流层间的速度差(即相对速度) du 成正比, 和流层间距离 dy 成反比;

(2) 与流层的接触面积 A 的大小成正比;

(3) 与流体的种类有关;

(4) 与流体的压力大小无关。

内摩擦力的数学表达形式可写成

$$T \propto A \frac{du}{dy}$$

或

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

这就是牛顿内摩擦定律。若以 τ 代表单位面积上的内摩擦力，称切应力。则

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

式 (1-8) 就是常用的黏滞力的计算公式。现对各项阐述如下：

(1) $\frac{du}{dy}$ ——速度梯度。表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率，单位为 s^{-1} 。为了理解速度梯度的意义，可在图 1-1 (a) 中垂直于速度方向的 y 轴上，任取一边长为 dy 的流体小方块 $abcd$ 。为清楚起见，将它放大成图 1-1 (b)。由于小方块下表面的速度 u 小于上表面的速度 $(u+du)$ ，经过 dt 时间后，下表面所移动的距离 udt ，小于上表面所移动的距离 $(u+du)dt$ ，因而小方块 $abcd$ 变形为 $a'b'c'd'$ 。也就是说，两流层间的垂直接连线 ac 及 bd ，在 dt 时间中变化了角度 $d\theta$ 。由于 dt 很小，因此， $d\theta$ 也很小。所以

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

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

可见，速度梯度就是直角变形速度。这个直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。由于流体的基本特征是流动性，在切应力的作用下，只要有充分的时间让它变形，它就有可能无限变形的可能性，因而只能用变形速度来描述它的剪切变形的快慢。所以，牛顿内摩擦定律也可以理解为切应力与剪切变形速度成正比。

(2) τ ——切应力，常用的单位为 Pa。切应力 τ 不仅有大小，还有方向。现以图 1-1 (b) 小方块变形后的 $a'b'c'd'$ 来说明它的方向的确定：上表面 $a'b'$ 上面的流层运动较快，有带动较慢的 $c'd'$ 流层前进的趋势，故作用于 $a'b'$ 面上的切应力 τ 的方向与运动方向相同；下表面 $c'd'$ 下面的流层运动较慢，有阻碍较快的 $a'b'$ 流层前进的趋势，故作用于 $c'd'$ 面上的切应力 τ 的方向与运动方向相反。对于相接触的两个流层来讲，作用在不同流层上的切应力，必然是大小相等，方向相反。这里顺便指出：内摩擦力的产生虽是流体抗拒相对运动的性质，但它不能从根本上制止流动的发生。因此，流体的流动性，不因有内摩擦力的存在而消失。当然，在流体质点间没有相对运动（在静止或相对静止状态）时，也就没有内摩擦力。

(3) μ ——动力黏度，简称黏度，单位为 $N/(m^2 \cdot s)$ ，以符号 $Pa \cdot s$ 表示。不同流体有不同的 μ 值，同一流体的 μ 值愈大，黏性愈强。 μ 的物理意义可以这样来理解：当取 $\frac{du}{dy} = 1$ 时，则 $\tau = \mu$ ，即 μ 表征单位速度梯度作用下的切应力，因此，它反映了黏性的动力性质。

在流体力学中，经常出现 μ/ρ 的比值，用 ν 表示。即

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-10)$$

式中， ν 的单位为 m^2/s 。如果考虑密度就是单位体积质量，则 ν 的物理意义，也可以这样来理解： ν 是单位速度梯度作用下的切应力对单位体积质量作用产生的阻力加速度，故称 ν 为运动黏度。流体流动性是运动学的概念，所以，衡量流体流动性应用 ν 而不用 μ 。

在表 1-1 中，列举了在不同温度时水的黏度。在表 1-2 中，列举了压强为 98kPa（一个大气压）时不同温度下空气的黏度。

水的黏度表 1-1

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

压强为 98kPa (一个大气压) 时的空气的黏度表 1-2

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	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

从表 1-1 及表 1-2 中还可看出：水和空气的黏度随温度变化的规律不同，水的黏度随温度升高而减小，空气的黏度随温度升高而增大。这是因为黏度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，分子间吸引力降低，动量增大；反之，温度降低，分子间吸引力增大，动量减小。对于液体，分子间的吸引力是决定性因素，所以液体的黏度随温度升高而减小；对于气体，分子间的热运动产生动量交换是决定性的因素，所以气体的黏度随温度升高而增大。

通常的压强对流体的黏度影响不大，可以认为，流体的动力黏度 μ 只随温度而变化。例如，气体在小于几个大气压的压强作用下，就可以认为它们的动力黏度 μ 与压强无关。但是，在高压作用下，气体和液体的动力黏度都将随压强的升高而增大。

牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，它对某些特殊流体不适用。为此，将在作纯剪切流动时满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。如水和空气等，均为牛顿流体。而将不满足该定律的称为非牛顿流体。如泥浆、污水、油漆和高分子溶液等。本书仅限于研究牛顿流体。对非牛顿流体，可参阅有关的专门著作。

最后，还需指出，如果流体的流动是非纯剪切流动，那么，即使是牛顿流体，一般地也不满足式 (1-7) 或式 (1-8)。对于在一般的三元流动情况下，是否是牛顿流体的判别

式则是广义牛顿公式，将在 7.2 中讲述。

【例 1-1】 在图 1-2 (a) 中气缸内壁的直径 $D=12\text{cm}$ 、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 ，润滑油的 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，试问作用在活塞上的黏滞力为多少？

【解】 因黏性作用，粘附在气缸内壁的润滑油层速度为零，粘附在活塞外沿的润滑油层与活塞速度相同，即 $v=1\text{m/s}$ 。因此，润滑油层的速度由零增至 1m/s ，油层间因相对运动产生切应力，用 $\tau=\mu\frac{du}{dy}$ 计算。该切应力乘以活塞面积，就是作用于活塞上的黏滞力 T 。

将间隙 n 放大，绘出该间隙中的速度分布图 1-2 (b)。由于活塞与气缸的间隙 n 很小，速度分布近似认为是直线分布。故

$$\frac{du}{dy} = \frac{v}{n} = \frac{1\text{m/s}}{\frac{1}{2} \times (0.12 - 0.1196)\text{m}} = 5 \times 10^3 \text{ 1/s}$$

由牛顿内摩擦定律，有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = 0.1\text{Pa}\cdot\text{s} \times 5 \times 10^3 \text{ 1/s} = 5 \times 10^2 \text{ N/m}^2$$

接触面积 $A = \pi dl = \pi \times 0.1196\text{m} \times 0.14\text{m} = 0.053\text{m}^2$

所以 $T = A\tau = 0.053\text{m}^2 \times (5 \times 10^2)\text{Pa} = 26.5\text{N}$

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，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，一般用压缩系数 α_p 来表示。设某一体积 V 的流体，密度为 ρ ，当压强增加 dp 时，体积减小，密度增大 $d\rho$ ，密度增加率为 $d\rho/\rho$ ，则 $d\rho/\rho$ 与 dp 的比值，称为流体的压缩系数。即

$$\alpha_p = \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{dp} \tag{1-11}$$

α_p 值愈大，则流体的压缩性也愈大。 α_p 的单位为 Pa^{-1} 。

流体被压缩时，其质量并不改变，即

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

所以 $d\rho/\rho = -dV/V$

故体积压缩系数又可以表示为

$$\alpha_p = -\frac{dV/V}{dp} \tag{1-12}$$

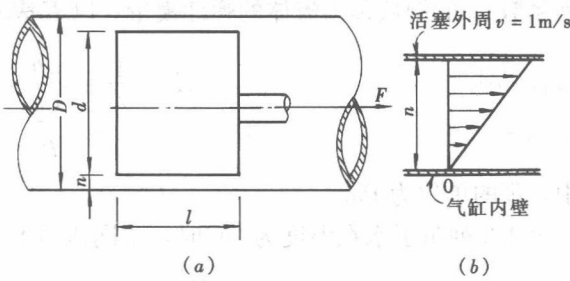


图 1-2 活塞运动的黏性阻力