

四川省省级精品课程配套教材



普通高等学校  
建筑环境与能源应用工程系列教材

Building Environment  
and Energy Engineering

# 工程流体力学

(第2版)

主编 / 赵 琴 杨小林 严 敬

主 审 / 龙天渝



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

四川省省级精品课程配套教材



普通高等学校  
建筑环境与能源应用工程系列教材

Building Environment  
and Energy Engineering

# 工程流体力学

(第2版)

主 编 / 赵 琴 杨小林 严 敬

主 审 / 龙天渝

重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书是普通高等学校建筑环境与能源应用工程专业基础课教材,也是四川省省级精品课程“流体力学”的配套教材。其内容包括:流体力学的研究任务、方法及流体的主要力学性质,流体静力学,流体动力学基础,明渠流,堰流与闸孔出流,渗流,气体动力学基础,湍流射流。本书符合人才培养目标及课程的基本要求,深度适宜,科学理论与概念阐述准确,注重理论联系实际。与本书配套的有教学软件和试题库,可供读者使用。

本书可供建筑环境与能源应用工程、热能与动力工程、水利水电工程、给排水科学与工程、环境工程等多个专业的本科教学使用,也可供相关专业本科自学考试参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/赵琴,杨小林,严敬主编.—2版.—重庆:重庆大学出版社,2014.5

普通高等学校建筑环境与能源应用工程系列教材  
ISBN 978-7-5624-8130-0

I. ①工… II. ①赵…②杨…③严… 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(2014)第 073623 号

普通高等学校建筑环境与能源应用工程系列教材

### 工程流体力学

(第 2 版)

主 编 赵 琴 杨小林 严 敬

主 审 龙天渝

责任编辑:张 婷 版式设计:张 婷

责任校对:贾 梅 责任印制:赵 晟

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

万州日报印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:18.25 字数:456 千

2014 年 5 月第 2 版 2014 年 5 月第 3 次印刷

印数:6 001—8 000

ISBN 978-7-5624-8130-0 定价:34.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

## 特别鸣谢单位

(排名不分先后)

天津大学	重庆大学
广州大学	江苏大学
湖南大学	南华大学
东南大学	扬州大学
苏州大学	同济大学
西华大学	江苏科技大学
上海理工大学	中国矿业大学
南京工业大学	南京工程学院
华中科技大学	南京林业大学
武汉科技大学	武汉理工大学
山东科技大学	天津工业大学
河北工业大学	安徽工业大学
合肥工业大学	广东工业大学
重庆交通大学	福建工程学院
重庆科技学院	江苏制冷学会
西安交通大学	解放军后勤工程学院
西安建筑科技大学	伊犁师范学院
安徽建筑工业学院	江苏省建委定额管理站

# 第2版前言

本书自第1版以来,因具有内容体系完整、适用面较广、难度适中等特点,已为多所高校所选用。为了更好地为教学服务,满足相关专业的后续专业课程学习的需求,契合我校能源与动力工程专业国家级特色专业的建设,对本教材进行了修订,对部分章节进行必要的调整和修改,对发现的错误和疏漏进行订正。

这次修订工作主要体现在以下几个方面:

- (1) 尽量保持教材原有特色和风格,框架结构和章节体系基本不变;
  - (2) 对第2章曲面压力计算内容进行补充,增加了水平分力和垂直分力计算公式及推导过程,并对相对平衡压强分布式的推导方法进行调整;
  - (3) 对第3章欧拉法的基本概念进行了补充,增加了均匀流特性的实验证明;
  - (4) 在第4章中增加了孔口淹没出流量计算公式的推导,完善了孔口、管嘴出流的示意图,以更直观的形式展现出流形态,同时调整了该章水击传播过程的阐述方式;
  - (5) 对第6章速度势函数和流函数的求解方法进行了调整,直接用函数的定义予以求解,更加简洁;
  - (6) 在第11章气体动力学基础部分增加扩压管内容,以满足建环专业后续课程的学习;
  - (7) 对部分章节的语言不规范,略显累赘的问题,在此次修订中予以了改善。
- 原主编严敬教授委托赵琴老师为本次修订的第一作者,全权主持本次的修订工作。修订教材由赵琴、杨小林任主编,严敬任名誉主编。
- 限于作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2013年9月

# 前 言

本书是四川省省级精品课程——“流体力学”的配套教材。

经过多年教学改革的实践与探索，“强化基础”已成为高校办学思路的共识。流体力学是工科多个专业的学科基础课，这种定位反映了工程部门对学生知识结构和能力素质的客观需求，强调了基础理论对培养学生分析、解决问题的能力的基础性作用，并为后续专业发展作好了准备，从而扩大了学生就业范围。在精品课程建设及本书的编写过程中，编者充分注意到工科高等教育对基础课的肯定和要求。本书系统地介绍了工程流体力学（水力学）的核心内容，理论体系较为完整。这些基本概念、基本定理反映了工程问题对本课程的要求，是学生今后创造性工作的基础。考虑到所覆盖的专业面以及开拓学生的知识面，本书也包括了一些专业特殊要求的内容。理论和专业内容相结合，构成了一个有机整体，有利于增强学生对今后工作的适应能力。本书可供建筑环境与设备工程、水利水电工程、给排水科学与工程、热能与动力工程、环境工程等专业本科教学使用，各专业理论教学学时控制在 70 学时左右，另外，可开设 8~10 学时的配套实验教学。

自高校扩招以来，越来越多的学生有条件接受高等教育，本科高等教育不再都以培养学术精英为目标。培养目标的变化也反映到本书编写的指导思想中。为突出本书应用性特点，在保证内容体系完整性的同时，避免使用一些超越本科生要求的数学、力学方法作为推证基础，行文力求简洁清楚，不将一些理论色彩过浓的非核心内容编入本书。这样，有利于帮助学生牢固掌握本课程的基本概念和原则，并能在后继课程及日后工作中熟练地加以应用。本书后给出了书中全部计算习题的解答，供学生解题时参考。

本书编者有长期从事本科流体力学（水力学）的教学经验，前期所完成的省级流体力学重点课程为本书的编写奠定了基础。

根据工程需求和课程体系要求，编者经过反复讨论后确定了本书大纲和编写原则，分工执笔完成了全书内容，并集体审阅了初稿。与本书配套的教学软件和试题库也已完成，供读者使用。

本书共分 12 章，参与编写的有：严敬（西华大学，第 2, 4, 6, 10 章）、赵琴（西华大学，第 7, 8, 9, 12 章）、杨小林（西华大学，第 1, 3, 5, 11 章）。本书由重庆大学龙天渝教授主审。

由于时间紧促，水平有限，本书中不妥之处请读者批评指正。

编 者

2006 年 8 月

# 目 录

---

1 绪 论 .....	1
1.1 流体力学的研究任务与研究方法 .....	1
1.2 流体的连续介质模型 .....	2
1.3 流体的主要物理性质 .....	3
习题 .....	10
2 流体静力学 .....	12
2.1 作用于流体的外力 .....	12
2.2 流体静压强特性 .....	13
2.3 理想流体运动微分方程和流体平衡微分方程 .....	14
2.4 流体静压强基本方程 .....	15
2.5 流体的相对平衡 .....	17
2.6 作用于平面上的液体总压力 .....	19
2.7 作用于曲面上的液体总压力 .....	22
习题 .....	24
3 流体动力学基础 .....	27
3.1 研究流体运动的两种方法 .....	27
3.2 欧拉法的基本概念 .....	30
3.3 连续性方程 .....	36
3.4 元流的伯努利方程 .....	39
3.5 总流的伯努利方程 .....	42

3.6	总流的动量方程 .....	50
3.7	动量矩方程 .....	54
	习题 .....	56
4	管路、孔口和管嘴的水力计算 .....	60
4.1	流动阻力和水头损失 .....	60
4.2	黏性流动的两种流态 .....	61
4.3	圆管中的层流流动 .....	63
4.4	湍流流动沿程水头损失的分析与计算 .....	65
4.5	局部水头损失的分析与计算 .....	68
4.6	孔口、管嘴出流 .....	70
4.7	管路的水力计算 .....	73
4.8	管路中的水击 .....	76
	习题 .....	78
5	相似理论与量纲分析 .....	81
5.1	相似理论 .....	81
5.2	量纲分析 .....	90
	习题 .....	95
6	理想流体动力学 .....	97
6.1	流体微团的运动分析 .....	97
6.2	速度势函数与流函数 .....	100
6.3	几种基本平面势流 .....	106
6.4	势流的叠加 .....	109
6.5	圆柱体绕流 .....	111
6.6	理想流体的旋涡运动 .....	115
6.7	理想流体旋涡运动的基本定理 .....	118
6.8	旋涡诱导速度 .....	119
6.9	平面有势流动的复势 .....	121
	习题 .....	122
7	实际流体动力学基础 .....	124
7.1	纳维—斯托克斯方程 .....	124
7.2	边界层的基本概念 .....	129
7.3	边界层的动量方程 .....	131
7.4	平板边界层计算 .....	132
7.5	边界层的分离现象 .....	137
7.6	绕流阻力 .....	138



习题 .....	141
<b>8 明渠流 .....</b>	<b>143</b>
8.1 明渠的几何特性及分类 .....	143
8.2 明渠均匀流 .....	147
8.3 明渠流动状态 .....	157
8.4 水跃和水跌 .....	164
8.5 棱柱体明渠非均匀渐变流水面曲线的分析 .....	170
8.6 明渠非均匀渐变流水面曲线的计算 .....	178
8.7 天然河道水面曲线计算 .....	183
8.8 明渠弯道水流简介 .....	187
习题 .....	190
<b>9 堰流与闸孔出流 .....</b>	<b>193</b>
9.1 堰流的类型及计算公式 .....	193
9.2 薄壁堰流的水力计算 .....	196
9.3 实用堰流的水力计算 .....	197
9.4 宽顶堰流的水力计算 .....	203
9.5 闸孔出流的水力计算 .....	208
9.6 泄水建筑物下游的水流衔接与消能 .....	212
习题 .....	219
<b>10 渗流 .....</b>	<b>221</b>
10.1 渗流的基本概念 .....	221
10.2 渗流基本规律 .....	222
10.3 地下无压水的渐变渗流 .....	225
10.4 井和井群 .....	226
10.5 渗流对建筑物安全性的影响 .....	229
习题 .....	230
<b>11 气体动力学基础 .....</b>	<b>232</b>
11.1 声速与马赫数 .....	232
11.2 气体一维恒定流动的基本方程 .....	236
11.3 气体一维恒定流动的参考状态 .....	238
11.4 气流参数与通道截面积的关系 .....	240
11.5 喷管 .....	243
11.6 扩压管 .....	247
11.7 等截面有摩擦的绝热管流 .....	249
习题 .....	253

<b>12 湍流射流</b> .....	255
12.1 射流的一般属性 .....	255
12.2 圆断面淹没射流 .....	257
12.3 平面淹没射流 .....	263
12.4 温差或浓差射流 .....	267
习题 .....	268
<b>习题参考答案</b> .....	269
<b>附录</b> .....	275
附录 I 梯形、矩形断面渠道正常水深 $h_0$ 的图解 .....	275
附录 II 梯形断面临界水深 $h_c$ 的图解 .....	276
附录 III 梯形、矩形断面渠道共轭水深 $h_1, h_2$ 的图解 .....	277
附录 IV 矩形断面明渠底流消能水力计算求解图 .....	278
<b>参考文献</b> .....	279

# 1

## 绪 论

---

### 1.1 流体力学的研究任务与研究方法

#### 1.1.1 研究任务

流体力学是研究流体在平衡或运动时所遵循的基本规律及其在工程中应用的科学,是力学的一个重要分支学科。

自然界的物质一般以固体、液体和气体 3 种形式存在。宏观地看,固体有一定的体积和形状,不易变形;液体有一定的体积而无一定的形状,不易压缩,形状随容器形状而变,有自由表面;气体则既无一定的体积又无一定的形状,容易压缩,气体将充满整个容器,没有自由表面。

液体和气体统称为流体,流体力学的研究对象是流体。流体在其运动的过程中表现出与固体不同的特点,其主要差别在于它们对外力的抵抗能力不同。固体由于其分子间距离很小,内聚力很大,能抵抗一定的拉力、压力和剪切力。而流体由于分子间距离较大,内聚力较小,几乎不能承受拉力,运动的流体具有一定的抗剪切能力,但静止的流体则不能抵抗剪切力,即使在很小的剪切力作用下,静止流体都将发生变形或流动,这种特性称为流体的易流动性。流体的易流动性是流体的基本特征。

流体作为物质的一种基本形态,必须遵循自然界一切物质运动的普遍规律,如牛顿第二定律、质量守恒定律、动量定理和动量矩定理等。所以,流体力学中的基本定理实质上都是这些普遍规律在流体力学中的具体体现和应用。

在工农业生产的许多部门,如航空航海、天文气象、地球物理、水利水电、热能制冷、土建环保、石油化工、气液输送、燃烧爆炸、冶金采矿、生物海洋、军工核能等部门,都会遇到大量与流体运动规律有关的生产技术问题,要解决这些问题必须具备流体力学知识。因此,流体力学是高等工科院校多个专业的一门重要技术基础课。

## 1.1.2 研究方法

流体力学的研究方法大体上分为以下 3 种：

### 1) 理论分析

针对实际流体的力学问题,建立反映问题本质的“力学模型”;再根据物质机械运动的普遍规律,如质量守恒、能量守恒、动量定理等,建立控制流体运动的基本方程组,在相应的边界条件和初始条件下,运用数学分析方法求出理论结果,达到揭示流体运动规律的目的。但由于实际流体运动的多样性,对于某些复杂的流动,完全靠理论分析来解决还存在许多困难。

### 2) 科学实验

一方面可以检验理论分析结果的正确性,另一方面当有些流体力学问题在理论上暂时还不能完全得到解决时,通过实验可以找到一些经验性的规律,以满足实际应用的需要。流体力学实验包括原型实验和模型实验,它们都是通过对具体流动的观测和测量来认识流体的流动规律。流体力学实验以模型实验为主。

### 3) 数值模拟

采用有限差分、有限元等离散化方法建立各种数值模型,通过计算机进行数值计算获得定量描述流场的数值解,从而求解出许多原来无法用理论分析求解的复杂流体力学问题的数值解。随着流体力学计算方法的发展,现已形成一门专门学科——计算流体力学。

理论分析、科学实验和数值模拟互相结合补充,相辅相成。科学实验需要理论指导,才能从分散的、表面上无联系的现象和实验数据中得出规律性的结论;理论分析和数值模拟则要依靠科学实验给出流体流动图案和数据,以建立流动的力学模型和数值模型。最后,还须依靠实验来检验这些模型的完善程度。这 3 种方法的相互结合,为发展流体力学理论、解决复杂工程技术问题奠定了基础。

## 1.2 流体的连续介质模型

流体是由大量不断作无规则热运动的分子所组成的。从微观角度看,由于流体分子间存在着间隙,所以流体的物理量(如密度、压力和速度等)在空间上的分布是不连续的;同时,由于分子的随机运动,又导致任一空间点上的流体物理量随时间的变化也是不连续的。因此,从微观角度看,流体物理量的分布在空间和时间上都是不连续的。

现代物理学研究表明,在标准状态下,1 cm<sup>3</sup>水中约有  $3.3 \times 10^{22}$  个水分子,1 cm<sup>3</sup> 气体约有  $2.7 \times 10^{19}$  个分子,流体的分子平均自由程很小,往往远小于所讨论问题的特征尺寸,并且人们感兴趣的是流体的宏观特性,即大量分子的统计平均特性。这样,人们就有理由不以流体分子作为研究对象,而是引进流体的连续介质模型。

流体的连续介质模型:假定流体是由连续分布的流体质点所组成,即认为流体所占据的空间完全由没有任何空隙的流体质点所充满,流体质点在时间过程中作连续运动。这里所说的流体质点,是指流体中宏观尺寸非常小而微观尺寸又足够大的任一物理实体,它具有以下特点:宏观尺寸非常小,无尺度,可视为一个点;微观尺寸足够大,内含足够多的流体分子;具有质量、密度、压强、流速、动能等宏观物理量,这些物理量是流体质点中大量流体分子的统计平均值;流体质点的形状可任意划定,因而质点与质点之间可以完全没有空隙。

根据流体的连续介质假设,表征流体性质和运动特性的物理量和力学量一般为空间坐标和时间变量的连续函数,这样就可以用数学分析方法来研究流体运动,解决流体力学问题。

### 1.3 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流体运动状态的内在因素,同流体运动有关的主要物理性质有流体的密度、压缩性、黏滞性、表面张力等。

#### 1.3.1 流体的密度

单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度。

对于均质流体,若流体的质量为  $m$ , 体积为  $V$ , 则其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

对于非均质流体,即各点密度不完全相同的流体,若包含  $A$  点的微元体积  $\Delta V$  中的流体质量为  $\Delta m$ , 则该流体中  $A$  点的密度为

$$\rho_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.2)$$

一般来说,流体的密度随压强和温度而变化。不过,液体的密度随压强和温度的变化很小,通常情况下可视为常数,如水的密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 水银(汞)的密度为  $13600 \text{ kg/m}^3$ 。气体的密度随压强和温度的变化则较大,一般不能视为常数;对于理想气体,可用气体状态方程来表示密度和压强、温度的关系,即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1.3)$$

式中  $p$ ——气体的绝对压强, Pa;

$\rho$ ——气体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$T$ ——气体的热力学温度, K;

$R$ ——气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

表 1.1 列出了在标准大气压下几种常见流体的密度。表 1.2 列出了在标准大气压下,不同温度下水、空气和水银的密度。

表 1.1 几种常见流体的密度

流体名称	空气	水银	水	酒精	四氯化碳	汽油	石油	海水
温度/°C	0	0	20	20	20	15	15	15
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1.293	13 600	998	799	1 590	700 ~ 750	880 ~ 890	1 020 ~ 1 030

表 1.2 不同温度下水、空气和水银的密度

温度/°C	0	10	20	40	60	80	100
水/(kg·m <sup>-3</sup> )	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空气/(kg·m <sup>-3</sup> )	1.293	1.247	1.205	1.128	1.060	1.000	0.9465
水银/(kg·m <sup>-3</sup> )	13 600	13 570	13 550	13 500	13 450	13 400	13 350

在流体力学中还经常用到流体的比容等概念。

密度的倒数,即单位质量的流体所具有的体积称为比容,以  $v$  表示,单位为 m<sup>3</sup>/kg,即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.4)$$

### 1.3.2 流体的压缩性和膨胀性

#### 1) 流体的压缩性

流体受压,体积减小,密度增大,去掉压力后流体能恢复原有的体积和密度,这种性质称为流体的压缩性。流体的压缩性用体积压缩系数  $k$  来表示,单位为 Pa<sup>-1</sup>。它指的是在一定的温度下,增加单位压强所引起的流体体积相对变化值。若流体的体积为  $V$ ,压力增加  $dp$  后,体积减小  $dV$ ,则体积压缩系数为

$$k = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1.5)$$

由于流体受压后体积减小,因此  $dp$  和  $dV$  符号相反。为保证  $k$  为正值,式(1.5)右侧加负号。

又因为增压前后质量无变化,则

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

得

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

故体积压缩系数  $k$  又可表示为

$$k = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}$$

工程上常用流体体积压缩系数的倒数来表征流体的压缩性,称为流体的体积弹性模量  $K$ ,单位为 Pa,即

$$K = \frac{1}{k} = -V \frac{d\rho}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1.6)$$

体积弹性模量  $K$  随流体的种类、温度和压强而变化,它的大小表征着流体压缩性的大小。 $K$  值越大,流体的压缩性越小;反之, $K$  值越小,流体的压缩性越大。

由上述可知,流体的压缩性是流体的基本属性之一,任何流体都是可压缩的,只是可压缩程度有所不同而已。当流体的压缩性对所研究的流动问题影响不大时,可忽略其压缩性,这种流体称为不可压缩流体,不可压缩流体是理想化的力学模型。

通常液体的压缩性很小,在相当大的压力变化范围内,密度几乎不变,可视为常数。因此,对于一般的液体平衡和运动问题,可按不可压缩流体处理。但是,在水击现象和水中爆炸等问题中,则不能忽略液体的压缩性,必须按可压缩流体来处理。气体的压缩性远大于液体,是可压缩流体。如果气体在流动过程中密度变化不大,若忽略密度的变化也不会对所处理的问题产生较大的误差时,则可忽略气体的压缩性。例如,动力工程中的空气、烟气管道内的流速均低于  $30 \text{ m/s}$ ,就可按不可压缩流体处理。

## 2) 流体的膨胀性

流体受热,体积增大,密度减小,温度下降后流体能恢复原有的体积和密度,这种性质称为流体的膨胀性。流体的膨胀性用体积膨胀系数  $\alpha_V$  来表示,它指的是在一定的压强下,增加单位温度所引起的体积相对变化值。若流体的体积为  $V$ ,温度增加  $dT$  后,体积增大  $dV$ ,则体积膨胀系数为

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1.7)$$

体积膨胀系数  $\alpha_V$  随流体的种类、温度和压强而变化,单位为  $\text{K}^{-1}$ 。通常液体的体积膨胀系数很小,一般工程问题中当温度变化不大时,可不予考虑,而气体的体积膨胀系数却很大。

### 1.3.3 流体的黏滞性

由于流体具有易流动性,因而静止的流体没有抵抗剪切变形的能力,而运动的流体当流体质点之间发生相对运动时,质点之间就会产生摩擦阻力(切向阻力)抵抗其相对运动,即运动的流体具有一定的抵抗剪切变形的能力,且不同的流体抵抗剪切变形的能力不同,这种特性称为流体的黏滞性。黏滞性是流体的重要属性,它与流体的运动规律密切相关,是流体运动中产生阻力和能量损失的原因。

#### 1) 牛顿内摩擦定律

17 世纪,牛顿在所著的《自然哲学的数学原理》中研究了流体的黏滞性。如图 1.1 所示,设有两块平行平板,其间充满流体,下板固定不动,上板在牵引力的作用下沿所在平面以速度  $U$  匀速向右运动。由于附着力,黏附于固体表面的流体速度与固体速度相同,所以与上板接触的流体将以速度  $U$  向右运动,与下板接触的流体速度为 0。设两板间的流体做有条不紊的,一层一层互不混掺的层流运动,其速度的大小由下板的 0 增加至上板的平移速度。这样,速度较大的上层流体将带动速度较小的下层流体向右运动,而下层流体将阻滞上层流体的运动,相互间便产生大小相等、方向相反的切向阻力,也称为内摩擦阻力或黏滞力,以  $T$  表示。

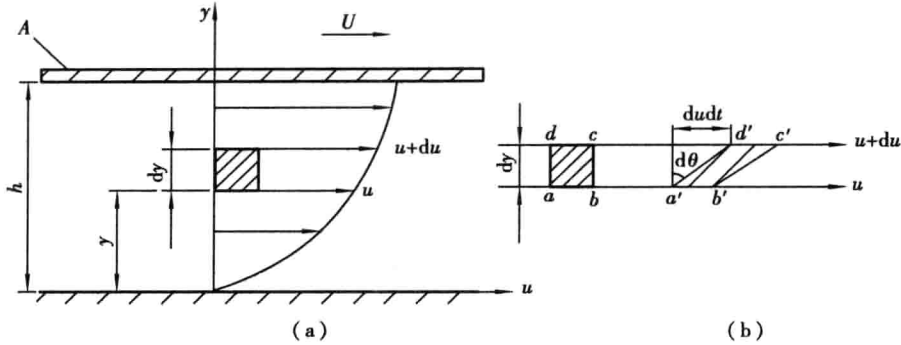


图 1.1 平行平板间的黏性流动

实验证明, 流体内摩擦阻力(或切力) $T$ 的大小与速度梯度 $du/dy$ 和接触面积 $A$ 成正比, 并与流体的性质有关, 而与流体的压力大小无关, 其数学表达式为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.8)$$

式中  $\mu$ ——流体的动力黏度, 与流体的种类、温度及压强有关,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

$A$ ——流层的接触面积,  $\text{m}^2$ ;

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度, 表示流动速度在其法线方向的变化率,  $\text{s}^{-1}$ 。

单位面积上的摩擦阻力称为切应力, 以  $\tau$  表示, 则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.9)$$

式(1.8)和式(1.9)称为牛顿内摩擦定律。

当两平板间的距离  $h$  和速度  $U$  不大时, 流速  $u$  沿其法线方向呈线性分布, 即

$$u(y) = \frac{U}{h} y$$

等式两边对  $y$  求导, 得

$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{h}$$

则内摩擦阻力

$$T = \mu A \frac{U}{h}$$

切应力

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{U}{h}$$

为了进一步说明速度梯度的物理意义, 在运动流体中取矩形平面微元  $abcd$ , 如图 1.1 所示。因上、下层流速相差  $du$ , 经  $dt$  时段, 矩形微元平面发生角变形, 变形角为  $d\theta$ , 角变形速度为  $d\theta/dt$ 。根据几何关系, 可得

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



$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt}$$

式(1.9)可改写成

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt}$$

上式指出,切应力的大小与流体的角变形速度成正比。

在流体力学中,动力黏度 $\mu$ 经常与流体密度 $\rho$ 结合在一起以 $\mu/\rho$ 的形式出现。为此,我们将这个比值定义为运动黏度 $\nu$ ,单位为 $\text{m}^2/\text{s}$ ,故

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.10)$$

黏度是流体的重要属性,它与流体种类、温度和压强有关。在工程常用的温度和压强范围内,黏度受压强的影响较小,主要随温度变化。表 1.3 列出了在标准大气压下,不同温度下水和空气的黏度。

表 1.3 不同温度下水和空气的黏度

温度/ $^{\circ}\text{C}$	水		空气	
	$\mu/(\text{10}^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(\text{10}^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$\mu/(\text{10}^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(\text{10}^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
0	1.792	1.792	0.0172	13.7
10	1.308	1.308	0.0178	14.7
20	1.005	1.007	0.0183	15.7
30	0.801	0.804	0.0187	16.6
40	0.656	0.661	0.0192	17.6
50	0.549	0.556	0.0196	18.6
60	0.469	0.477	0.0201	19.6
70	0.406	0.415	0.0204	20.6
80	0.357	0.367	0.0210	21.7
90	0.317	0.328	0.0216	22.9
100	0.284	0.296	0.0218	23.6

由表 1.3 可知,水的黏度随温度升高而减小,即空气的黏度却随温度升高而增大。这是因为液体分子间距小,内聚力强,黏性作用主要来源于分子内聚力,当液体温度升高时,其分子间距加大,内聚力减小,黏度随温度上升而减小;而气体和液体不同,气体的内聚力极小,可以忽略,其黏性作用可以说完全是分子热运动中动量交换的结果,当气体温度升高时,热运动加剧,其黏度随温度升高而增加。