

交通版

高等学校土木工程专业规划教材

JIAOTONGBAN GAODENG XUOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



# 流体力学

李欣 李帆

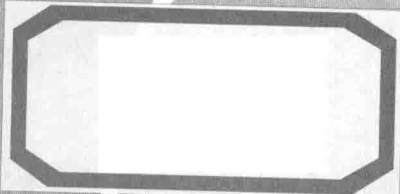
黄新 主编  
葛文璇 副主编  
郭仁东 主审



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

交通版

JIAOTONGBAN GAODENG XUEXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



# 流体力学

## Liuti Lixue

李欣 李帆 黄新 葛文璇 郭仁东  
副主编 主审



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书为交通版高等学校土木工程专业规划教材,根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》和专业认证(评估)的知识要求,针对土木工程专业的特点和实际需求,在结合多年的教学经验和吸取国内外同类教材优点的基础上编写而成。

全书共分十章。内容包括:绪论;流体静力学;流体动力学;流动阻力与水头损失;有压管流与孔口管嘴流动;明渠流动;堰流;渗流;气体一元流动;相似原理与模型试验。

本书可作为土木工程、道路桥梁与渡河工程、交通工程、环境工程、给排水科学与工程等专业流体力学(水力学)课程教学用书。建议教学时数为40学时。也可作为从事流体力学工作的工程建设人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

流体力学 / 黄新主编. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.8

交通版高等学校土木工程专业规划教材

ISBN 978-7-114-14718-0

I. ①流… II. ①黄… 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186811号

交通版高等学校土木工程专业规划教材

书 名:流体力学

著 者:黄 新

责任编辑:张征宇 赵瑞琴

责任校对:刘 芹

责任印制:张 凯

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.cpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:14.5

字 数:352千

版 次:2018年8月 第1版

印 次:2018年8月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14718-0

定 价:38.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

交通版

高等学校土木工程专业规划教材

编委会

(第二版)

---

主任委员: 戎 贤  
副主任委员: 张向东 李帼昌 张新天 黄 新  
宗 兰 马芹永 党星海 段敬民  
黄炳生  
委 员: 彭大文 张俊平 刘春原 张世海  
郭仁东 王 京 符 怡  
秘 书 长: 张征宇

---

(第一版)

---

主任委员: 阎兴华  
副主任委员: 张向东 李帼昌 魏连雨 赵 尘  
宗 兰 马芹永 段敬民 黄炳生  
委 员: 彭大文 林继德 张俊平 刘春原  
党星海 刘正保 刘华新 丁海平  
秘 书 长: 张征宇



中国土木工程学会工程教育分会  
交通版高等学校土木工程专业规划教材  
主编 王成华 副主编 王成华 王成华

随着科学技术的迅猛发展、全球经济一体化趋势的进一步加强以及国力竞争的日趋激烈,作为实施“科教兴国”战略重要战线的高等学校,面临着新的机遇与挑战。高等教育战线按照“巩固、深化、提高、发展”的方针,着力提高高等教育的水平 and 质量,取得了举世瞩目的成就,实现了改革和发展的历史性跨越。

在这个前所未有的发展时期,高等学校的土木类教材建设也取得了很大成绩,出版了许多优秀教材,但在满足不同层次的院校和不同层次的学生需求方面,还存在较大的差距,部分教材尚未能反映最新颁布的规范内容。为了配合高等学校的教学改革和教材建设,体现高等学校在教材建设上的特色和优势,满足高校及社会对土木类专业教材的多层次要求,适应我国国民经济建设的最新形势,人民交通出版社组织了全国二十余所高等学校编写“交通版高等学校土木工程专业规划教材”,并于2004年9月在重庆召开了第一次编写工作会议,确定了教材编写的总体思路。于2004年11月在北京召开了第二次编写工作会议,全面审定了各门教材的编写大纲。在编者和出版社的共同努力下,这套规划教材已陆续出版。

在教材的使用过程中,我们也发现有些教材存在诸如知识体系不够完善问题,适用性、准确性存在问题,相关教材在内容衔接上不够合理以及随着规范的修订及本学科领域技术的发展而出现的教材内容陈旧、亟待修订的问题。为此,新改组的编委会决定于2010年底启动了该套教材的修订工作。

这套教材包括“土木工程概论”、“建筑工程施工”等31门课程,涵盖了土木工程专业的专业基础课和专业课的主要系列课程。这套教材的编写原则是“厚基础、重能力、求创新,以培养应用型人才为主”,强调结合新规范、增大例题、图解等内容的比例并适当反映本学科领域的新发展,力求通俗易懂、图文并茂;其中对专业基础课要求理论体系完整、严密、适度,兼顾各专业方向,应达到教育部和专业教学指导委员会的规定要求,对专业课要体现出“重应用”及“加强创新能力和工程素质培养”的特色,保证知识体系的完整性、准确性、正确性和适应性,专业课教材原则上按课群组划分不同专业方向分别考虑,不在一本教材中体现多专业内容。

反映土木工程领域的最新技术发展、符合我国国情、与现有教材相比具有

明显特色是这套教材所力求达到的,在各相关院校及所有编审人员的共同努力下,交通版高等学校土木工程专业规划教材必将对我国高等学校土木工程专业建设起到重要的促进作用。

交通版高等学校土木工程专业规划教材编审委员会  
人民交通出版社股份有限公司

# 前言

QIANYAN



本书是“交通版高等学校土木工程专业规划教材”中的一本专业基础课教材。可作为土木工程、环境工程、交通工程、机械工程等相关专业的教学用书。

在编写过程中,根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》和土木工程等专业评估(认证)对流体力学知识点和内容的要求,充分吸取国内外优秀流体力学和水力学教材的精华,结合编者多年的教学经验,进行了内容与章节的安排,以理解和应用为目的,简化了部分公式的推导,注重培养学生解决实际问题的能力,各章均有一定量的例题和思考题与习题。

本书由南京林业大学黄新教授担任主编并统稿,沈阳大学李欣副教授、河北工业大学李帆副教授、南通大学葛文璇副教授担任副主编。全书10章的分工如下:南京林业大学黄新(第1章、第10章);沈阳大学李欣(第2章、第9章);河北工业大学李帆(第3章);南通大学葛文璇(第4章、第8章);沈阳城市学院段少陪(第5章);南京林业大学薛红琴(第6章);南京林业大学刘亚利(第7章)。

本书由沈阳大学郭仁东教授主审,在审阅过程中,郭仁东教授提出了十分宝贵的修改意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,时间较紧,在内容的编排、选取和论述等方面如有不妥和不足之处,恳请广大读者与专家批评指正。

编者

2018年6月

# 目录

MULU

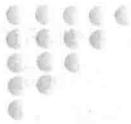
第1章 绪论	1
1.1 流体力学及其任务	1
1.2 流体力学研究方法	2
1.3 流体的主要物理性质	2
1.4 作用在流体上的力	9
思考题与习题	10
第2章 流体静力学	12
2.1 流体静压强及其基本特性	12
2.2 欧拉平衡微分方程	14
2.3 重力作用下的流体平衡	16
2.4 压强的度量与测量	17
2.5 重力和惯性力同时作用下的流体平衡	20
2.6 作用在平面上的液体总压力	23
2.7 作用在曲面上的液体总压力	25
2.8 浮力及浮体与潜体的稳定性	27
思考题与习题	28
第3章 流体动力学	31
3.1 描述流体运动的两种方法	31
3.2 欧拉法的基本概念	33
3.3 恒定总流的连续性方程	39
3.4 恒定总流的能量方程	41
3.5 恒定总流的能量方程	43
3.6 恒定总流动量方程	50
思考题与习题	57
第4章 流动阻力与水头损失	62
4.1 液流阻力与水头损失的类型	62
4.2 雷诺实验	64



4.3	恒定均匀流基本方程	67
4.4	圆管中的层流运动	69
4.5	圆管中的紊流运动简介	71
4.6	沿程水头损失的分析与计算	79
4.7	局部水头损失的计算	88
4.8	边界层基本概念及绕流阻力	92
	思考题与习题	96
<b>第5章</b>	<b>孔口管嘴和管路流动</b>	<b>99</b>
5.1	孔口管嘴出流	99
5.2	短管的水力计算	104
5.3	长管、串联管和并联管水力计算	108
5.4	管网计算基础	112
5.5	有压管路中的水击	115
	思考题与习题	119
<b>第6章</b>	<b>明渠流动</b>	<b>121</b>
6.1	明渠的几何特征	121
6.2	明渠均匀流	123
6.3	明渠均匀流的水力最优断面及容许流速	130
6.4	明渠流的两种流态与弗汝德数	134
6.5	明渠恒定非均匀流基本微分方程	139
6.6	恒定渐变流水面曲线、连接、计算	140
6.7	水跌和水跃	147
	思考题与习题	150
<b>第7章</b>	<b>堰流</b>	<b>152</b>
7.1	堰的定义、分类和基本公式	152
7.2	薄壁堰	154
7.3	宽顶堰	157
7.4	实用堰	160
	思考题与习题	162
<b>第8章</b>	<b>渗流</b>	<b>163</b>
8.1	渗流的基本概念	163
8.2	达西定律	165
8.3	无压恒定渐变渗流的基本公式	168
8.4	集水廊道及井的渗流计算	173
	思考题与习题	180

<b>第9章 气体一元流动(一元气体动力学)</b> .....	182
9.1 声速和马赫数 .....	182
9.2 一元气流的流动特征 .....	186
9.3 等熵和绝热气流的基本方程式与基本概念 .....	190
9.4 收缩喷管与拉瓦尔喷管的计算 .....	192
思考题与习题 .....	196
<b>第10章 量纲分析与水工模型试验</b> .....	198
10.1 量纲概念和量纲和谐原理 .....	198
10.2 量纲分析法 .....	200
10.3 水工模型试验简介 .....	204
10.4 相似理论 .....	205
10.5 模型设计 .....	211
思考题与习题 .....	213
<b>参考答案</b> .....	214
<b>参考文献</b> .....	220

# 第 1 章 绪论



## 1.1 流体力学及其任务

流体力学(fluid mechanics)是力学的一个分支,主要研究在各种力的作用下,流体本身的静止状态和运动状态以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动规律。

流体(fluid)的研究对象包括液体(liquid)和气体(gas)。

流体与固体的主要区别就是流体具有流动性(mobility)。流动性是指在任何微小切力的作用下,流体都会连续变形,直到切力消失,流动才会停止。这种变形称为流动。另外,无论流体静止或运动,流体几乎不能承受拉力,只能承受压力。

流体力学研究的内容是物体机械运动规律。流体运动遵循机械运动的普遍规律,如质量守恒定律、牛顿运动定律、能量转化和守恒定律等,这些普遍规律是流体力学研究的理论基础。

与所有物质相同,流体也是由大量的分子构成的。由于分子之间存在空隙,描述流体的物理量(如密度、压强和流速等)在空间的分布是不连续的;分子的随机热运动又导致了空间任一点上流体物理量在时间上变化的不连续。流体力学的研究内容是流体的宏观运动规律,它是研究对象中所有分子微观运动的宏观表现。欧拉(L. Euler,瑞士数学家与力学家,1707—1783)于1755年首先提出了连续介质(continuum)的假设,即把流体看成是由密集质点构成的、内部无空隙的连续体。这里的质点是指与流动空间相比体积可以忽略不计而又具有一定质量的流体微团。连续介质假设的提出既可避开分子运动的复杂性,又可将流体运动中的物理量视为空间坐标和时间变量的连续函数,有利于用数学分析方法来研究流体运动。

流体力学作为一门独立的学科在诸多领域中得到广泛的应用。例如航海业中的船舶航行;航空业中的飞机飞行;水利工程中的引水与防洪;动力工程中的水力与火力发电;机械工程中的液压传动与润滑;石油工程中的固井、采油与输油;化学工程中的分离、成型与输送;医疗领域中的体内微循环与血液流变;军事工程中的导弹与鱼雷;农业的喷灌;水利工程中的导流与泄洪;市政工程的输配水;环境工程中的废水与废气处理;通风与空调工程中的气流组织;土木工程中建筑物所承受的风荷载与波浪荷载、基坑排水以及道路桥涵等方面涉及的一系列流体力学问题。

## 1.2 流体力学研究方法

流体力学和其他学科一样大致有以下三种研究方法。

### 1. 理论分析方法

根据连续介质和液体质点假设,理论分析方法主要是对液体流动现象作物理描述,其中以液体质点作对象,按照隔离体受力情况建立液体运动的质量守恒、能量守恒、动量定律等微分方程,从中求解,以确立液体质点各有关物理要素(如压强、流速等)的空间分布。

### 2. 实验方法

科学实验是自然科学发展的基础。流体力学中的实验手段主要是验证和充实理论成果,对一些液体复杂运动特性通过一些经验系数加以粗化描述,运用一些经验公式以简化理论分析。常用的实验方法有以下两种。

#### (1) 原型观测

所谓原型,即实际工程建筑物。原型观测可获得第一手资料,但规律性观测操作难度较大。

#### (2) 模型实验

所谓模型,即按一定比例尺将原型缩小或放大的实物或工程建筑物。此法除可作验证理论的手段外,还可预演各种设计条件的结果,是流体力学中不可缺少的常用手段。

### 3. 数值计算法

此法利用当代电子技术进行快速计算,如有限差分法、有限元法等,它可求解理论分析所得极其复杂的数学模型(数学方程),还可配合实验研究作数据监测、采集和处理。目前由此发展起来的数据实验和模拟计算已成为新型研究方法,开创了流体力学研究的新途径。

## 1.3 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流动状态的内在因素,它是分析与计算流体运动规律的要素。流体主要有如下物理性质。

### 1.3.1 密度和重度

#### 1. 密度

物体中所含物质数量,称为质量,常用符号  $m$  表示;单位体积内所含液体的质量,称为液体的密度,常用符号  $\rho$  表示。按定义有

$$\left. \begin{array}{l} \text{均质液体} \\ \text{非均质液体} \\ \text{一般} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \rho = \frac{m}{V} \\ \rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \\ \rho = \rho(x, y, z, t) \end{array} \quad (1-1)$$

式中:  $V$ ——液体体积;

$t$ ——时间。

式(1-1)表明,按连续介质假说,流体的密度是空间坐标  $x, y, z$  的函数,而且可随时间变化。对于液体而言,在一般情况下,压强和温度对  $\rho$  的影响极小,而且不随时间变化。在理论分析和工程应用中都把液体看成是均质体,并取  $\rho = \text{常数}$ 。在一个标准大气压下,水的密度见表 1-1,水力计算中常取水的密度  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $t = 0 \sim 30^\circ\text{C}$  时,密度变化很小,其密度只减小了 0.4%,但当  $t = 80 \sim 100^\circ\text{C}$  时,其密度比  $4^\circ\text{C}$  时的密度减小可达 2.8%~4%。因此,在温差较大的热水循环系统中,应设膨胀接头或膨胀水箱,以防管道或容器被水胀裂。此外,  $t = 0^\circ\text{C}$  时,冰的密度和水的密度不同。冰的密度  $\rho_{\text{冰}} = 916.7 \text{ kg/m}^3$ , 水的密度  $\rho_{\text{水}} = 999.87 \text{ kg/m}^3$ , 有

$$\frac{V_{\text{冰}}}{V_{\text{水}}} = \frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{冰}}} = \frac{999.87}{916.7} = 1.0907$$

可见在  $t = 0^\circ\text{C}$  时,冰的体积比水约大 9%,故路基、水管、水泵及盛水容器在冬季均需加防冰冻破坏措施。

不同温度下纯水的物理特性

表 1-1

$t$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\mu$ ( $\times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )	$\nu$ ( $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ )	$p_s$ (kPa)	$\sigma$ ( $\text{N/m}$ )	$E$ ( $\times 10^{-6} \text{ kPa}$ )
0	9.805	999.9	1.781	1.785	0.61	0.0756	2.02
4	9.800	1000.0	1.567	1.567	—	—	—
10	9.804	999.7	1.307	1.306	1.23	0.0742	2.1
15	9.798	999.1	1.139	1.139	1.70	0.0735	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.34	0.0728	2.18
25	9.777	997.0	0.890	0.893	3.17	0.0720	2.22
30	9.746	995.7	0.798	0.800	4.24	0.0712	2.25
40	9.730	992.2	0.653	0.658	7.38	0.0696	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	12.33	0.0679	2.29
60	9.642	983.2	0.466	0.474	19.92	0.0662	2.28
70	9.589	977.8	0.404	0.413	31.16	0.0644	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	47.34	0.0626	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	70.10	0.0608	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	101.33	0.0589	2.07

注:  $t$ -水温;  $\gamma$ -重度;  $\rho$ -密度;  $\mu$ -动力黏度;  $\nu$ -运动黏度;  $p_s$ -汽化压强;  $\sigma$ -表面张力系数;  $E$ -体积弹性模量。

气体的密度随压强和温度而变化,一个标准大气压下  $0^\circ\text{C}$  空气的密度为  $1.29 \text{ kg/m}^3$ , 见表 1-2。

空气的密度

表 1-2

$t$ ( $^\circ\text{C}$ )	-20	0	10	20	30
$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	1.395	1.293	1.248	1.205	1.165
$t$ ( $^\circ\text{C}$ )	40	60	80	100	120
$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	1.128	1.060	1.000	0.946	0.747

## 2. 重度

流体所受地球的引力,称为重量,常用符号  $G$  表示;单位体积中的流体重力,称为重度,常用符号  $\gamma$  表示。按定义有

$$\text{均质流体} \quad \gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

$$\text{非均质流体} \quad \gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} = \gamma(x, y, z, t) \quad (1-3)$$

与密度情况类似,在流体水力计算中常把流体看成均质体,并取  $\gamma = \text{常数}$ ,且有

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

式中: $g$ ——重力加速度,一般取  $g = 9.8 \text{m/s}^2$ 。

在国际单位制中,质量单位为千克(kg),长度单位为米(m),时间单位为秒(s),力的单位为牛顿(N);重度单位为  $\text{N/m}^3$ 。

对于液体而言,一般情况下,压强和温度对重度的影响极小,而且不随时间变化,理论分析和工程应用中,都把水看成均质体,水力计算中常取水的重度  $\gamma = 9800 \text{N/m}^3 = 9.8 \text{kN/m}^3$ ,水银的重度  $\gamma = 133.28 \text{kN/m}^3$ 。在一个标准大气压下,不同温度时纯水的物理特性见表 1-1,几种常见液体的重度见表 1-3。

几种常见液体的重度

表 1-3

名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
$t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	20	0	15	15	20	15
$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	0.01182	133.28	6.664 ~ 7.350	7.7783	15.6	9.996 ~ 10.084

### 1.3.2 黏滞性

流体一旦承受剪切力(尽管切力很小,只要切力存在)就会连续变形(即流动),这种特性称为易流性。

液体在流动(连续不断变形)过程中,其内部会出现某种力抵抗这一变形。不同性质的液体,如水或油,它们抵抗变形的能力是不同的。在流动状态下液体抵抗剪切变形速率能力的度量称为液体的黏滞性(亦称黏性)。

既然抵抗剪切变形的力和液体的剪切变形速率以及黏性之间存在着某种联系,那么它们之间一定有某种关系存在。下面可以通过液体沿固体壁面作二元平行直线运动(见图 1-1)来分析。设液体质点在运动过程中,每层始终沿着各自的路线流动,相邻两层间没有混掺地向前运动(这种流动状态亦称为层流运动,将在第 4 章详细讨论),当液体流过固体边界时,由于紧贴边界的极薄液层与边界之间无相对运动(称为实际液体的无滑动条件),则液体与固体之间不存在摩擦力,这样液流中的摩擦力均表现为液体内各流层之间的摩擦力,故称液体内摩擦力。设液流中某点的流速为  $u$ ,与流速相垂直的方向为  $y$ ,而沿  $y$  向取微小距离  $dy$  的流速增量为  $du$ (见图 1-1),则液体内摩擦力  $F$  与液层间接触面面积  $A$  和流速梯度  $\frac{du}{dy}$ (沿  $y$  向的流速变化率)成正比,并与液体的黏滞性有关,而与接触面上的压力无关。这一结论于 1686 年由牛

顿首先提出,后经大量的实验验证了它的正确性,故称为牛顿内摩擦定律(以区别固体的摩擦定律),可表示为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

将式(1-5)两端同除以面积  $A$ , 可得出牛顿内摩擦定律的另一种形式, 即

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

式中的  $\tau$  为单位面积上的内摩擦力, 亦称为切应力。

式(1-5)和式(1-6)可表述为: 液体运动时, 相邻液层间所产生的切力或切应力, 与剪切变形的速率成正比。此两式均为牛顿内摩擦定律的表达式。

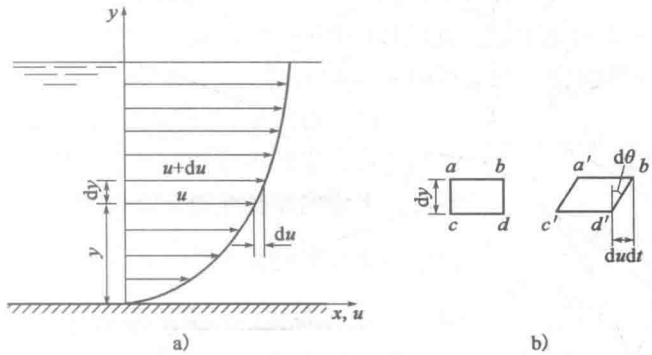


图 1-1

作用在两相邻液层之间的  $\tau$  与  $F$  都是成对出现的, 数值相等, 方向相反。运动较慢的液层作用于运动较快的液层上的切力或切应力, 其方向与运动方向相反; 运动较快的液层作用于运动较慢的液层上的切力或切应力, 其方向与运动方向相同。

其中  $\mu$  为比例系数, 称为黏度或黏滞系数, 量纲是  $ML^{-1}T^{-1}$ , 国际单位是  $Pa \cdot s$ 。其中  $Pa$  是压强的单位, 称为帕斯卡,  $1Pa = 1 N/m^2$ 。由于  $\mu$  含有动力学的量纲, 亦称为动力黏度, 简称黏度。黏度  $\mu$  是黏滞性的度量,  $\mu$  值愈大, 黏滞性作用愈强。 $\mu$  的数值随液体的种类而各不相同, 并随压强和温度的变化而发生变化, 但压强对它的影响甚微, 可不考虑。温度是影响  $\mu$  的主要因素。温度升高时液体的  $\mu$  值降低, 而气体的  $\mu$  值则加大。其原因为: 液体和气体的微观结构不同, 由于液体的分子间距较小, 液体的黏性主要取决于液体分子间的相互吸引力, 温度越高, 液体分子热运动越激烈, 分子摆脱互相吸引的能力越强, 导致液体的黏度随温度的升高而减小。气体的黏性主要取决于气体分子间相互碰撞引起的动量交换, 温度越高, 气体分子间的动量交换越激烈, 导致气体的黏度随温度的升高而增大。液体黏度的大小还可以用  $\nu$  来表达。 $\nu$  为黏度  $\mu$  与密度  $\rho$  的比值, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-7)$$

$\nu$  的量纲为  $L^2T^{-1}$ , 常用的单位是  $m^2/s$ 。由  $\nu$  的量纲可知, 它仅含运动学的量纲, 故称  $\nu$  为运动黏度。不同温度时水的  $\mu$  和  $\nu$  值列于表 1-1。

流速梯度  $\frac{du}{dy}$  实质上是表示液体的切应变率 (亦称剪切应变率) 或角变形率。在图 1-1a) 中垂直于流动方向的  $y$  轴上任取一厚度为  $dy$  的方形微小水体  $abcd$ , 见图 1-1b)。由于其上表面

的流速  $u + du$  大于其下表面的流速  $u$ , 经过  $dt$  时段以后, 上表面移动的距离  $(u + du)dt$  大于下表面移动的距离  $udt$ , 因而矩形微小水体  $abcd$  变为平行四边形  $a'b'c'd'$ , 角变形为  $d\theta$  (亦称为切应变)。由于  $d\theta$  和  $dt$  都是微小量, 这样可有

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

即

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-8)$$

式中,  $\frac{d\theta}{dt}$  是单位时间的角变形, 称为角变形率或称为切应变率。

需要说明的是, 固体与液体有所不同, 对于固体, 在应力低于比例极限的情况下, 切应力与切应变呈线性关系 (剪切胡克定律), 而液体的切应力与切应变率呈线性关系。虽然仅一字之差, 却表明了固体和液体的应力与变形的关系的不同。

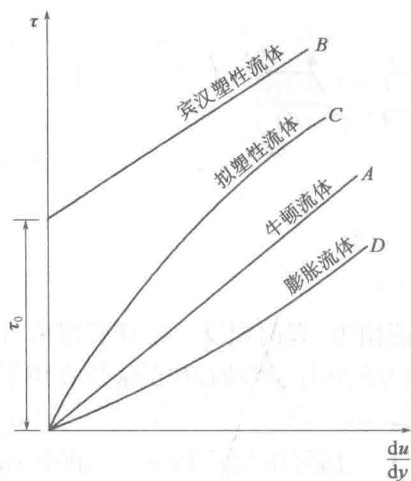


图 1-2

值得注意的是, 牛顿内摩擦定律仅适用于牛顿流体, 也就是符合牛顿内摩擦定律的流体均为牛顿流体。当然, 不符合牛顿内摩擦定律的流体为非牛顿流体。可将切应力与切应变率的关系绘于图 1-2。横坐标取为  $\frac{du}{dy}$ , 纵坐标为  $\tau$ , 图中各条线的斜率就是动力黏度  $\mu$  值。

图 1-2 中线 A 代表牛顿流体, 如水、空气、汽油、酒精和水银。线 B、C、D 均代表非牛顿流体。其中线 B 代表宾汉塑性流体, 当切应力低于屈服应力  $\tau_0$  时, 该塑性流体静止并有一定的刚度。当切应力超过屈服应力  $\tau_0$  时, 流体开始流动, 但切应力与切应变率仍然呈线性关系。如泥浆、血浆、牙膏等均属宾汉塑性流体。线 C 为拟塑性流体, 其黏度随切应变率的增加而减小, 如橡胶、油画用的颜料、油漆等。线 D 为膨胀流体, 其黏度随切应变率的增加而增加, 如生面团、淀粉糊等。所以在应用牛顿内摩擦定律解决实际问题时, 一定要注意其适用范围, 切勿用错。本书仅限于研究牛顿流体。对于非牛顿流体, 可参阅有关的专著。

实际的液体都是有黏性的。由于黏性的存在, 给研究液体的运动规律带来较大的困难。为了简化理论分析, 引入理想液体的概念, 所谓理想液体, 就是忽略黏性效应的液体 (图 1-2 的横坐标代表的就是理想液体)。在不考虑黏性的情况下, 流动方向大为简化, 从而容易得出结果。所得的结果, 对某些黏性影响较小的流体, 能够较好地符合实际; 而对黏性影响较大的流体, 则需要通过实验加以修正。这是分析和处理黏性液体运动的实用办法。几种常见流体的黏度见表 1-4。

几种常见流体的黏度 (20℃)

表 1-4

流体名称	氢气	氧气	二氧化碳	四氯化碳	水银	煤油	原油	SAE10 润滑油	甘油
$\mu$ ( $\times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )	0.009	0.020	0.015	0.970	1.56	1.92	7.20	82.0	1499
$\nu$ ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )	107.1	15.04	8.043	0.611	0.115	2.38	8.41	89.3	1191



**例 1-1** 如图 1-3 所示,相距 20mm 的两平行平板间充满 20℃ 的某种润滑油,油中有一面积  $A=0.5\text{m}^2$ 、厚度忽略不计的薄板,该薄板与两平板平行并与一侧平板间距  $h_1=7\text{mm}$ 。若以速度  $u=0.1\text{m/s}$  拖动薄板,试求拖动该薄板所需的拉力。

**解** 查表 1-4 得  $\mu=0.082\text{Pa}\cdot\text{s}$

由式(1-5)得拖动薄板上表面所需拉力为

$$F_{V1} = \mu A \frac{du}{dy} = 0.082 \times 0.5 \times \frac{0.1}{0.007} = 0.586\text{N}$$

拖动薄板下表面所需拉力为

$$F_{V2} = 0.082 \times 0.5 \times \frac{0.1}{0.013} = 0.315\text{N}$$

$$F_V = F_{V1} + F_{V2} = 0.586 + 0.315 = 0.901\text{N}$$

**例 1-2** 一涂有厚度为  $\delta=0.5\text{mm}$  润滑油的斜面,其倾角为  $\theta=30^\circ$ 。一块重量未知、底面积为  $A=0.02\text{m}^2$  的木板沿此斜面以等速度  $U=0.2\text{m/s}$  下滑,如图 1-4 所示。如果在板上加一个重量  $G_1=5.0\text{N}$  的重物,则下滑速度为  $U_1=0.6\text{m/s}$ 。试求润滑油的动力黏度  $\mu$ 。



图 1-3 油中薄板

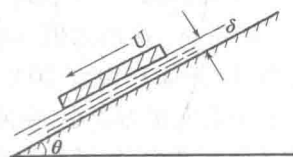


图 1-4 油中薄板

**解** 当板下滑时,在其底面受到的黏性切力为  $F = \mu AU/\delta$ ,而板的自重为  $G$ 。由于板是匀速下滑,所以沿着板的下滑方向加速度为零,则作用在板上所有外力的和为零。即

$$G \sin\theta = \mu A \frac{U}{\delta}$$

若板上再加上重物  $G_1$ 后,则

$$(G + G_1) \sin\theta = \mu A \frac{U_1}{\delta}$$

将上两式相减后可得

$$G_1 \sin\theta = \mu A \frac{U_1 - U}{\delta}$$

将  $G_1, \theta, U_1, U, A, \delta$  的值代入,解得  $\mu = 0.1563(\text{N}\cdot\text{s})/\text{m}^2$ 。

### 1.3.3 压缩性

流体的体积随所受压力的增大而减小的特性称为流体的压缩性。

流体压缩性的大小可用体积压缩系数  $\beta$  来表示。设流体原体积为  $V$ ,当所受压强(单位面积上的压力)的增量为  $dp$  时,体积增量为  $dV$ ,则体积压缩系数

$$\beta = -\frac{dV}{V dp} \quad (1-9)$$

$\beta$  的物理意义是压强增量为一个单位时单位体积流体的压缩量。 $\beta$  值愈大,表示流体越易压缩。因流体体积总量随压强增大而减小,即  $dV$  为负值,为使  $\beta$  值为正,故式(1-9)右边取