



LIUTILIXUE

高等工科院校创新人才培养教材

流体力学(第三版)

张伟 陈文义 主编

新人才培养教材

流体力学

(第三版)

张 伟 陈文义 主编

内 容 简 介

本书内容包括绪论,流体静力学,流体运动学基础,流体动力学基础,相似理论与量纲分析,有压管中流动及能量损失,孔口、管嘴出流与气体射流,绕流运动,明渠流动和堰流共9章。

本书可作为高等院校热能工程、建筑环境与设备工程、矿物加工工程、环境与给排水工程、土木工程等专业流体力学课程的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学 / 张伟,陈文义主编. —3 版. —天津:
天津大学出版社,2018.7
ISBN 978-7-5618-6167-7

I. ①流… II. ①张… ②陈… III. ①流体力学—高
等学校—教材 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 144919 号

出版发行	天津大学出版社
地 址	天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话	发行部:022-27403647
网 址	publish.tju.edu.cn
印 刷	廊坊市海涛印刷有限公司
经 销	全国各地新华书店
开 本	185mm×260mm
印 张	12.75
字 数	331 千
版 次	2018 年 8 月第 1 版
印 次	2018 年 8 月第 1 次
定 价	32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

为实现 21 世纪人才培养模式和目标,配合教学体制改革的深入与发展,适应当前普通高等院校流体力学课程授课学时大幅度压缩的现状,我们编写了这本 50~60 学时的流体力学教材。编写本教材的目的是满足高等理工院校热能工程、建筑环境与设备工程、矿物加工工程、环境与给排水工程、土木工程等相关专业的教学需要。全书共分 9 章,* 号内容为选讲内容,书中内容在整体安排上尽可能考虑到更多专业的教学要求。教师在讲授时可根据具体专业不同适当取舍授课内容。

本书由黑龙江科技学院陈文义,天津城市建设学院张伟、史艳娇,天津商业大学陆蓓蕾,长安大学刘静,天津理工大学焦士龙共同编写。全书由陈文义、张伟主编并负责统稿,由哈尔滨工业大学王成敏主审。

编写教材是一项艰苦的工作,编出好教材更加困难。在此感谢天津大学刘正先博士、河北科技学院郭德教授、天津大学姜楠教授、哈尔滨工业大学王成敏教授对书稿提出的审读和修改意见;感谢山东工商学院张云起教授、天津大学梁兴雨博士、天津城市建设学院杨贤聪同学在本书编写过程中所给予的热情支持和帮助。

限于编者水平,加之编写时间比较短促,书中错误和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2003 年 10 月

第三版前言

本教材第一版于2004年出版,已经过多年教学实践应用。为了使教材不断完善,紧跟教学形势发展,第三版对第二版做了进一步的勘误和修正,并补充了一些内容,具体包括:①增加了“主要符号表”;②在每章的开头和结尾增加了“本章的学习目的”和“本章小结”;③添加了多媒体资源,对某些抽象、难于理解的力学概念进行解读,旨在增加教材的趣味性和生动性,增强学习效果;④为便于教学,作者特制作了与本版教材配套的PPT教学参考课件,对于有需求的教师,可发邮件至 hxj8321@126.com 索取。

第三版仍由天津城建大学张伟与河北工业大学陈文义主编。全书由张伟和陈文义负责统稿。

本教材内容精练,适用于少学时课程教学,全书共分九章,主要内容包括绪论,流体静力学,流体运动学基础,流体动力学基础,相似理论与量纲分析,有压管中流动及能量损失,孔口管嘴出流与气体射流,绕流运动,明渠流动和堰流。“*”号标注的章节为选讲内容,授课教师可根据具体情况进行取舍。

本教材适用于高等院校土建、水利、热能、建环、冶金、给排水、宇航、化工及环保等相关专业流体力学课程教学,并配套有《流体力学习题解析》,可供本科生自学使用,也可作为研究生入学及注册工程师考试的科目参考书,同时也适用于相关科研及工程技术人员参考使用。

由于编者的学识和经验有限,第三版仍会存在不足,敬请读者不吝指出,以利于本教材的不断完善。

主要符号表

	出现位置 (章)		出现位置 (章)
1. 拉丁字母		F_x, F_y, F_z 质量力的坐标轴向分量	2
A 面积	2;6;9	力的坐标轴向分量	4
A_C 收缩断面面积	7	F_v 黏性力	5
Ar 阿基米德准数	7	f 单位质量力	2;4
a 高度/矩形长度	2	G 重力	2
加速度	5	g 重力加速度	1;2;6
当地音速	5	H 水头/液柱高度	4;9
紊流系数	7	H_0 作用水头	7;9
a_x, a_y, a_z 加速度的坐标轴向分量	3	H_P 测压管水头	4
B 水面宽度	9	h_f 沿程水头损失	6
C 形心	2	h_l 单位重量流体能量损失	6
谢齐系数	9	水头损失	6
C 绕流阻力系数	8	h_m 局部水头损失	6
C_f 摩擦阻力系数	8	h_v 真空高度	6
C_L 升力系数	8	I_C 过形心轴的惯性矩	2
CS 控制面	4	I_x 惯性矩	2
CV 控制体	4	i 明渠的底坡	9
D 直径	2	J 水力坡度/总水头线坡度	6;9
压力中心	2	J_P 测压管水头线坡度	9
射流边界层直径	7	水面坡度	9
d_e 当量直径	6	K 管壁粗糙度	5
E 体积弹性模量	1;5;6	流量模数	9
E_0 壁面材料弹性模量	6	L 长度	1
Eu 欧拉数	5	长度量纲	4
F 力	1;4	L_m 模型的特征长度	5
质量力	2	L_n 原型的特征长度	5
F_B 浮力	8	M 力矩	1
F_D 绕流阻力	8	质量量纲	4
平板单侧的摩擦阻力	8	偶极矩	8
F_E 弹性力	5	Ma 马赫数	5
F_G 重力	5	m 质量	2
F_I 惯性力	5	堰流的流量系数	9
F_L 绕流升力	8	边坡系数	9
F_P 压力	5	m_0 考虑行进流速影响的流量系数	9
F_r 弗劳德数	5	n 转速	1

续表

		出现位置 (章)			出现位置 (章)
	单位法向矢量	2	S_t	斯特劳哈尔数	8
	液体总压力	2	T	温度	1
	曼宁粗糙系数	9		时间量纲	4
P_n	法向应力	2		水击波的周期	6
P_x, P_y, P_z	压力的坐标分量	2	t	时间	6
p	压强	1;2	T_0	射流出口断面温度	7
	相对压强	2	T_2	射流质量平均温度	7
	静压	4	T_e	周围气体温度	7
p_0	液面压强	2	T_m	射流轴心温度	7
	总压强	4	U	速度	1
p_f	沿程压强损失	6	u	速度	1;3;4
p_m	局部压强损失	6	u, v, w	直角坐标轴向速度分量	3;8
p_n	法向压强	2	$u_{\max}$	轴线速度/最大速度	6;8
p_v	真空压强	2	u_t	沉降速度	8
$\bar{p}$	平均压强	2	u_∞	无穷远处速度	8
	时均压强	6	u'	脉动速度	6
p_∞	无穷远压强	8	u_*	壁面摩擦速度	6
p'	绝对压强	2	$\bar{u}$	时均流速	6
	脉动压强	6	V	体积	1
Q	体积流量	3		压力体体积	2
R	气体常数	1	v	比容	1
	曲率半径	1		断面平均速度	3
	水力半径	6;9	v_c	下临界流速	6
	射流边界层半径	7	v'_c	上临界流速	6
$\bar{R}$	无量纲半径	7	v_{cr}	临界速度	8
Re	雷诺数	5;6	$v_{\max}$	不冲允许流速	9
Re_c	下临界雷诺数	6	$v_{\min}$	不淤允许流速	9
Re'_c	上临界雷诺数	6	v_r, v_θ, v_z	柱坐标系的速度分量	3;8
r	半径	3;6	X, Y, Z	单位质量力的坐标轴分量	2;5
r, θ, z	柱坐标系坐标分量	2;3;8	x, y, z	笛卡儿坐标分量	2;4
r, θ, φ	球坐标系坐标分量	2	x_0	喷嘴出口至极点距离	7
r_0	射流出口断面半径	7	y_c	形心的 y 坐标	2
S_H	管路阻抗	6	y_D	压力中心的 y 坐标	2
S_n	核心长度	7	y'	射流轴心的偏离值	7
S_P	气体的管路阻抗	6	z_0	自由液面的坐标	2

				续表	
		出现位置 (章)			出现位置 (章)
射流中心的 z 坐标		7	λ	沿程阻力系数/达西系数	6
2. 希腊字母			μ	动力黏性系数/动力黏度	1
α	热胀系数	1		流量系数	7
	动能修正系数	4	ν	运动黏度	1
	射流扩散角(极角)	7	σ	法向应力	2
	马赫角	8		表面张力系数	1
	无压圆管不满流的充满度	9	π	π 定理	5
α_0	动量修正系数	4	ρ	密度	1;3
β	角度	1	ρ_a	空气的密度	4
	体积压缩系数	1	$\bar{\rho}$	时均密度	6
	宽深比	9	ρ'	密度的脉动值	6
β_h	水力最优断面的宽深比	9	τ	切应力	1;2
γ	液体重度	1;2	τ_0	总流表面的平均切应力	6
γ_a	空气的容重	4	τ_l	黏性切应力	6
δ	相对密度	1	τ_t	紊流惯性切应力/雷诺应力	6
	间隙厚度	1	τ_w	壁面处的切应力	8
	黏性底层厚度	6	$\bar{\tau}$	平均切应力	2
	管壁厚度	6	φ	流速系数	4;7
	边界层厚度	8		速度势函数	8
	堰壁厚度	9		圆形过水断面的中心角	9
ε	角变形速度	3	χ	湿周	6;9
	孔口断面的收缩系数	7	ψ	流函数	8
ζ	局部阻力系数	6	ω	角速度	2
η	涡黏性系数	6	$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	角速度的坐标轴向分量	3
θ	角度	2	Δ	绝对粗糙度	6
	射流收缩角	6	Γ	环流强度	8
	渠底与水平线间的夹角	9		速度环量	8

目 录

1	绪论	1
1.1	流体力学的任务和研究对象以及发展概况和研究方法	1
1.2	流体的连续介质假定	3
1.3	流体的主要物理力学性质	3
	思考题	11
	习题	11
2	流体静力学	13
2.1	作用在流体上的力	13
2.2	静止流体中应力的性质	14
2.3	流体平衡微分方程及其积分	16
2.4	重力场中静止流体压强的分布规律	17
2.5	压强的测量	18
2.6	液柱式测压计	20
2.7	等角速度旋转的液体平衡	22
2.8	作用在平面上的液体总压力	24
2.9	作用在曲线上的液体总压力	28
	思考题	30
	习题	31
3	流体运动学基础	38
3.1	描述流体运动的两种方法	38
3.2	描述流场的几个概念	41
3.3	连续性方程	45
3.4	流体微团运动分析	48
	思考题	52
	习题	53
4	流体动力学基础	55
4.1	量纲、单位及量纲和谐原理	55
4.2	理想不可压缩流体运动微分方程	56
4.3	实际流体的运动微分方程	57
4.4	沿流线方向的欧拉运动微分方程及其积分	58
4.5	实际流体总流伯努利方程	61
4.6	总流伯努利方程的应用	64

4.7	气体总流伯努利方程	66
4.8	定常总流动量方程	68
	思考题	71
	习题	72
5	相似理论与量纲分析	78
5.1	相似理论	78
5.2	量纲分析	87
	思考题	91
	习题	91
6	有压管中流动及能量损失	93
6.1	层流和紊流	93
6.2	圆管中的层流	96
6.3	圆管中的紊流	100
6.4	圆管紊流流动沿程损失	103
6.5	非圆形管路沿程损失	106
6.6	局部损失	107
6.7	管路计算	113
*6.8	有压管路中的水击现象	119
	思考题	124
	习题	125
7	孔口、管嘴出流与气体射流	129
7.1	孔口自由出流	129
7.2	孔口淹没出流	131
7.3	管嘴出流	133
7.4	无限空间淹没紊流射流	136
*7.5	有限空间射流	146
	思考题	149
	习题	149
8	绕流运动	152
8.1	势流理论基础	152
8.2	边界层理论基础	162
*8.3	平板层流边界层的近似解	165
*8.4	平板紊流边界层的近似计算	167
8.5	边界层分离与压差阻力	168
8.6	绕流阻力和升力	169
	思考题	173
	习题	174

9 明渠流动和堰流	175
9.1 明渠均匀流	175
9.2 明渠均匀流的水力最优断面和允许流速	179
9.3 堰流	186
思考题	190
习题	190
参考文献	192

1 绪 论

本章的学习目的

- 理解流体质点的概念以及连续介质假定的意义。
- 理解掌握流体的易流动性、黏性及压缩性等主要力学性质;明确动力黏度与运动黏度的表示符号及其单位。
- 知晓理想流体假定及不可压缩流体假定的物理内涵及其适用性。
- 应用牛顿内摩擦定律求解黏性流体内摩擦(应)力。

1.1 流体力学的任务和研究对象以及发展概况和研究方法

1.1.1 流体力学的任务和研究对象

流体力学研究流体的平衡和运动规律及其工程应用,包括流体的传热和传质规律。它的研究对象是流体,包括液体和气体。

流体力学分为理论流体力学和工程流体力学。理论流体力学重视数理分析,属于基础科学范畴;工程流体力学强调工程应用,属于应用科学范畴。

流体力学的应用十分广泛。例如:研究大气和海洋运动,提供天气和海洋预报的资料;研究飞机、人造卫星、导弹等空间飞行器和舰船、潜艇、鱼雷等水域航行器的运动,以便得到阻力小、稳定性高的最佳物体外形;研究流体在核反应堆、动力设备中的冷却系统、热交换器、水暖系统及化工设备中的流动,为了解它们的运动规律,掌握它们在壁面处的传热、传质规律。此外,环境保护、地下水的利用、矿物加工、油气田开发、机械润滑等均与流体力学密切相关。这些不同的研究领域,极大地丰富了工程流体力学的具体研究内容;流体力学与相邻学科的结合又催生出许多新的交叉分支学科(如多相流体力学、生物流体力学等),进一步充实了流体力学的研究内容并扩展了它的研究范围和应用领域。

1.1.2 流体力学的发展概况和研究方法

流体力学同许多其他学科一样,是随着人类生活、生产的需要以及人类探索和利用大自然的过程而逐渐发展起来的。

早在古代,为了抗洪、发展农业、航运和改善饮用水,各文明古国均大力整治河道、兴修水利、开凿运河和发展灌溉。如我国治理黄河,开凿联系五大水系的大运河和修建闻名世界的都江堰;埃及开发法雍地区,建造联系尼罗河与红海的苏伊士运河;古罗马为了城市发展修建了大规模的供水管路系统。这些实践活动提高了人们对水流运动规律的认识。公元1世纪我国

发明了用于控制船舶航行的木橹和尾舵,这是对世界造船业的一大贡献。水车的运用以及水磨和风车的出现,标志着人类对自然力的进一步利用和控制。公元前 360 年墨子曾对浮力现象作过详细观察和定量概括,直到约公元前 250 年古希腊的科学家阿基米德(Archimedes)才提出了浮力的定量理论,并被认为是真正奠定了流体静力学的基础。

在阿基米德时代之后到 15 世纪这段相当长的时期内,流体力学也像其他科学领域一样,进展缓慢。在这漫长时间里堆积着猜想和迷信,也埋藏着事实和真理。文艺复兴使欧洲的思想家和科学家们最先从封建迷信和教会的精神桎梏中得到解脱,并率先把流体力学的宝藏挖掘出来。1500 年意大利科学家和艺术大师达·芬奇(da Vinci)正确地推导出了一维不可压缩流体的质量守恒方程。此外,他还对水跃、波动和自由射流等问题进行了描述和研究。随后,伽利略(Galileo)、帕斯卡(Pascal)和托里拆利(Torricelli)等人分别用实验方法研究了运动物体的阻力和流体静力学中的一些基本问题。

17 世纪末至 20 世纪初是流体力学初步形成和发展的时期。1678 年科学巨匠牛顿(Newton)首先提出了黏性流体的剪切力公式,为黏性流体运动方程组的建立创造了条件。1738 年伯努利(Bernoulli)提出了著名的定常不可压缩流体的伯努利定理。1775 年微积分大师欧拉(Euler)提出流体运动的描述方法和无黏性流体运动的方程组,并开始研究理想无旋流体的平面和空间运动,从而为理论流体力学奠定了基础。随后拉格朗日(Lagrange)引入流函数概念,建立了拉格朗日定理,完善了理想无旋流动的基本理论。纳维(Navier)和斯托克斯(Stokes)分别采用不同的假设和方法,同时建立了不可压缩与可压缩黏性流体的运动方程组,带动了此后的黏性流体运动的研究。1883 年雷诺(Reynolds)发现了层流和紊流,并引入了雷诺应力的概念,为紊流理论奠定了基础。在此期间实验手段得到了发展,一些工程问题用实验方法得到了解决。

进入 20 世纪以来,流体力学理论和实验研究的发展,围绕航空航天业的需要加快了步伐。1904 年普朗特(Prandtl)提出了著名的边界层理论。1912 年卡门(Karman)从理论上分析了卡门涡街的稳定性。1910 年至 1945 年间,机翼理论和实验方面的研究得到了极大发展。

1947 年第一台电子计算机问世后,利用计算机求流体力学中复杂的微分方程的数值解成为可能。特别是 20 世纪 60 年代后,计算技术的提高、巨型计算机的出现及计算方法的发展和逐渐成熟,使得数值方法继理论分析和实验方法之后,成为解决流体力学问题的第三种颇具光明前景的研究方法。

如果说流体力学领域的第一篇论文,即阿基米德关于流体浮力的《论浮体》标志着流体力学这门学科开始萌芽的话,那么当今的流体力学已成长为一棵枝繁叶茂的大树:关于流体力学自身领域问题的研究和认识日益深化;新的数学工具和方法,如人工神经网络(ANN)方法、小波(Wavelets)分析方法和格子(Boltzmann)方法(LBM)等,被广泛应用于分析和解决各种流体力学问题;流体力学辐射和渗透的工程领域亦愈来愈广泛,在很大程度上促进和加深了对诸多工程问题实质的了解及技术的完善。

目前流体力学还有如下问题未获圆满解决:紊流、涡旋运动、流动稳定性、非定常流动、非线性水波、流体力学的新分支及交叉学科的发展。随着实践的发展,新的流体力学问题还会出现。有关的流体力学问题还有待从事流体力学、应用数学和计算机技术等领域的科学家和研究人员的共同努力,同时也特别寄希望于本书的读者。

1.2 流体的连续介质假定

1.2.1 流体质点

微观上看流体是由分子组成的,分子作随机热运动,分子间有比分子尺度大得多的间距,在某一时刻流体分子离散、不连续地分布于流体所占有的空间,并随时间不断地变化着。

流体力学研究流体的宏观运动规律,而不是以这些物质粒子本身为直接的研究对象,即不是从微观角度去考虑单个粒子的运动及其物理量,而是考虑大量分子的平均运动及其统计特性,如速度、密度和温度等。因此,必须给出流体的宏观描述。这里引入**流体质点**的概念,它是较微观粒子结构尺度大得多而其宏观特征尺度又很小的流体微团。流体质点应是微观上充分大,即要比分子自由程大得多,包含有足够多的分子,不至于因个别分子的行为而影响流体质点的总体统计平均特性;但在宏观上要充分小,体积小小到它的尺度与流动问题的特征尺度相比可以近似地看作一个几何点。流体质点具有的物理量应是确定的,是所在尺度上很多微观粒子的统计平均值,如流体质点的温度就是流体质点所包含的分子热运动的统计平均值,流体质点的压强就是质点所包含分子热运动互相碰撞从而在单位面积上产生的压力的统计平均值,流体质点的流速、动量、动能及内能等宏观物理量均有类似的统计平均上的概念。



微观尺度下的流体质点

1.2.2 连续介质假定

借助于流体质点的概念,宏观上可以把流体看成是由无数个流体质点组成的稠密无隙的**连续介质**。就是说,质点是组成流体的最小基元,质点间不存在间隙。既然流体质点在宏观上可视为只有质量而无体积的“点”,而且连续充满流体所占有的空间,那么每个质点在其运动空间就唯一地占据一个空间点,反之亦然。因而流体质点的各物理量(如密度、压强及速度等)必然是空间和时间(x, y, z, t)的单值、连续、可微函数,由此形成各种物理量的标量场和矢量场,而且可以方便地利用数学工具建立方程,研究流体的平衡和运动问题。由于这些方程与分子结构和性质无关,因而对于气体和液体同样适用。

1.3 流体的主要物理力学性质

1.3.1 易流动性

就力学性质而言,流体与固体不同,其主要差别在于二者抵抗外力的能力不同。固体具有抵抗一定量的拉力、压力和剪切力的能力;而流体可以抵抗压力,但不能承受拉力,特别是静止流体不能抵抗剪切力。当流体受到很小的剪切力作用时,就会发生变形,只要这种剪切力连续施加,流体就会发生连续的变形,流体的这种性质称为**易流动性**。

1.3.2 流体的密度、相对密度和重度

密度、相对密度和重度是流体最基本的物理量。根据连续介质模型, 流场中每一空间点都被相应的流体质点所占据, 从而空间某点的密度可以定义为

$$\rho = \rho(x,y,z,t) = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V'} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$
 (1-1)

其中, $\Delta V'$ 为流体质点的特征尺度。显然, 密度是空间位置和时间的连续函数, 单位为 kg/m^3 。表 1-1 和表 1-2 分别给出了水和空气在不同温度下的若干物理力学参数。注意水在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的密度为 $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$ 。

单位体积流体的重量称为重度, 用 γ 表示, 单位为 N/m^3 , 与密度的关系为

$$\gamma = \rho g$$
 (1-2)

式中, g 为重力加速度。

表 1-1 水的物理力学参数

温 度 t $^{\circ}\text{C}$	重 度 γ 10^3 N/m^3	密 度 ρ kg/m^3	动力黏度 μ $10^{-3}\text{ N}\cdot\text{s/m}^2$	运动黏度 ν $10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$	体积弹性模量 E 10^6 kPa	表面张力系数 σ N/m
0	9.805	999.8	1.781	1.785	2.02	0.075 6
5	9.807	1 000.0	1.518	1.519	2.06	0.074 9
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.074 2
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.073 5
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.072 8
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.072 0
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.071 2
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.069 6
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.067 9
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.066 2
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.064 4
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.062 6
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.060 8
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.058 9

表 1-2 空气的物理力学参数

温 度 t $^{\circ}\text{C}$	密 度 ρ kg/m^3	重 度 γ N/m^3	动力黏度 μ $10^{-5}\text{ N}\cdot\text{s/m}^2$	运动黏度 ν $10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$
-40	1.515	14.86	1.49	0.98
-20	1.395	13.68	1.61	1.15
0	1.293	12.68	1.71	1.32
10	1.248	12.24	1.76	1.41
20	1.205	11.82	1.81	1.50
30	1.156	11.43	1.86	1.60
40	1.128	11.06	1.90	1.68
60	1.060	10.40	2.00	1.87
80	1.000	9.807	2.09	2.09
100	0.946	9.28	2.18	2.31
200	0.747	7.33	2.58	3.45

流体的**相对密度**是该流体质量与同体积水在 4℃ 时的质量之比,或该流体密度与 4℃ 水的密度之比。相对密度用 δ 表示,即

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{4^{\circ}\text{C水}}} \quad (1-3)$$

在流体力学中还用到**比容积**的概念。比容积是密度的倒数,即单位质量流体所占有的体积,以 v 表示

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-4)$$

单位为 m^3/kg 。

【例题 1-1】若水的重度是 $9.807 \times 10^3 \text{ N/m}^3$,水银的相对密度为 13.6,求水的密度和水银的密度及重度。

【解】水的密度为

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{9.807 \times 10^3}{9.807} = 1\,000 \text{ kg/m}^3$$

水银的密度为

$$\rho = \delta \cdot \rho_{\text{水}} = 13.6 \times 10^3 = 1.36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$$

水银的重度为

$$\gamma = \rho g = 13.6 \times 10^3 \times 9.807 = 133.4 \text{ kN/m}^3$$

1.3.3 流体的压缩性与膨胀性

1.3.3.1 液体的压缩性与膨胀性

如果温度不变,液体的体积会随压强的增加而缩小,这种特性称为液体的**压缩性**。如果压强不变,液体的体积随温度的升高而增大,这种特性称为液体的**膨胀性**。

液体的压缩性,一般以压缩系数 β 和体积弹性模量 E 来度量。设液体的体积为 V ,压强增加 dp 后,体积减小 dV ,则压缩系数 β 定义为

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-5)$$

当 dp 为正值时, dV 必为负值,故上式中加一负号,以便使 β 保持为正值。

压缩系数的倒数为液体的体积弹性模量

$$E = \frac{1}{\beta} \quad (1-6)$$

不同温度下,水的体积弹性模量值可参见表 1-1。液体的压缩性和热胀性都非常小,一般不予考虑,故通常把液体看作不可压缩流体,即其密度可视为常数。但在个别情况中,例如,当流速较大的水管上的闸门突然关闭时,会产生水击现象,此时就必须考虑液体的压缩性。

液体的膨胀性,通常以热胀系数 α 表示,单位为 $1/\text{K}$ 。在一定压强下,温度升高 1 K 时液体体积变化率为 dV/V ,则热胀系数 α 定义为

$$\alpha = \frac{\frac{dV}{V}}{dT} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-7)$$

1.3.3.2 气体的压缩性与膨胀性

与液体不同,气体具有较为明显的压缩性和膨胀性。在温度不过低(大于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)、压强不过高(小于 20 MPa)时,气体压强、温度和密度之间的关系服从理想气体状态方程,即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-8)$$

式中, p 为气体的绝对压强, Pa ; ρ 为气体的密度, kg/m^3 ; T 为气体的热力学温度, K ; R 为气体常数。对于速度远低于声速的低速气流(小于 68 m/s),若压强和温度的变化较小,例如通风工程中的气流,其气体密度变化非常小,可按不可压缩流体来处理。

【例题 1-2】 容器中盛有某种液体。当压强为 10^6 Pa 时,液体的体积为 $1\,000\text{ cm}^3$;当压强增为 $2 \times 10^6\text{ Pa}$ 时,体积为 995 cm^3 。试求该液体的等温压缩系数 β 和体积弹性模量 E 。

【解】 根据公式(1-5)得

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} = -\frac{\frac{995 - 1\,000}{1\,000}}{2 \times 10^6 - 1 \times 10^6} = 5 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{N}$$

根据公式(1-6)得

$$E = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{5 \times 10^{-9}} = 2 \times 10^8\text{ Pa}$$

1.3.4 流体的黏性

虽然静止流体不能承受任何切力,但当流体运动时,如其内部出现相对运动,则各质点之间或流体层之间会产生切向的内摩擦力以抵抗其相对运动。流体的这种性质称为黏性。产生的内摩擦力也称为黏滞力。

1687 年牛顿(Newton)通过研究层状流体的运动,首先论述了流体的黏性。其实验示意图如图 1-1 所示。两块相距 h 的平行平板,面积均为 A ,板间充满均匀的液体,平板面积足够大,以至可以忽略平板边界的影响。下平板固定不动,上平板在切向力 F 作用下以速度 U 沿 x 方向做匀速直线运动。实验结果说明如下。

(1)附着于上、下平板上的流体质点的速度分别为 U 和 0 ,两板间液体速度 u 呈线性分布,与速度梯度 $\frac{U}{h}$ 成正比,即 $u = \frac{U}{h} y$ 。

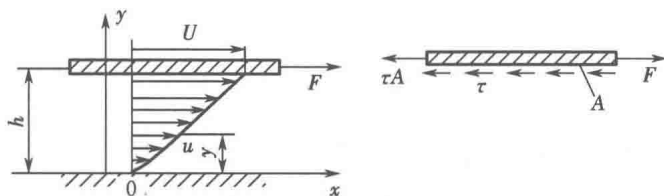


图 1-1 牛顿平板实验

(2)比值 F/A 与 U/h 成正比,即

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h} \quad (1-9)$$

式中, μ 为比例系数,称为动力黏性系数,也称为动力黏度;比值 $\tau = F/A$ 是流体内部的切应力。