

高等学校教材

工程流体力学

(修订本)

东北工学院 李诗久 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

符 号	代 表 意 义	单 位	符 号	代 表 意 义	单 位
$R, (r)$	阻力, 离心惯性力	N	β	动量修正系数	
Re	雷诺数		Γ	速度环量	m^2/s
s	行程, 弧长, 流线, 曲线坐标	m, mm	γ	重度	N/m^3
S	面积	m^2, mm^2		指数	
St	斯特罗哈数		δ	厚度, 间隙, 边界层厚度	mm
$T(t)$	时间, (时间)	s, min, h	ϵ	绝对糙度, 当量糙度	mm
	热力学温度	K		相对误差, 孔隙率	
t	摄氏温度	$^{\circ}C$		断面收缩系数, (线变形率)	(s^{-1})
	间隙, 螺距	mm	$\eta, \eta_h, \eta_p, \eta_m$	总效率, 水力, 容积, 机械效率	
U	力势函数	J, $N \cdot m$	θ	(角度), 变形角速度	$(^{\circ}), s^{-1}$
u	速度, 圆周速度, 牵连速度	m/s	κ	指数, 绝热系数, 常数, 比热比	
$u', (u_f)$	脉动速度, (切应力速度)	m/s, cm/s	λ	沿程阻力系数, 速度系数	
$u^2/(2g)$	速度水头	m	μ	动力粘度	$Pa \cdot s$
V	体积, 容积, 压力体	m^3, cm^3		流量系数, 粒子间内摩擦系数	
$v, (v')$	速度, 平均流速, (脉动速度)	m/s, cm/s	ν	运动粘度	m^2/s
$v_0, (v_s)$	悬浮速度, (粒子速度)	m/s	ξ, ζ	局部阻力系数	
v	比容	m^3/kg		距离	m
W	力, 总质量力	N	ρ	密度	kg/m^3
w	相对速度, 瞬时速度, (含水率), [声功率]	m/s, (%), [W]	σ	正应力	Pa, N/m^2
We	韦伯数		τ	切应力, 内摩擦应力	Pa, N/m^2
X, Y, Z	单位质量力的分量	m/s^2	φ	流速系数, 速度比, 相对湿度	
z	位置水头	m		角度	$(^{\circ})$
	叶片数			速度势函数	m^2/s
α	角度, 叶片工作角	$(^{\circ})$	x	湿周, 摩擦周长	m
	数, 系数, 指数, 动能修正系数		ψ	流函数	m^2/s
β	角度, 叶片安装角	$(^{\circ})$		压缩因数, 计算系数	
	系数, 指数, 压强比		ω	角速度, 涡旋分量	s^{-1}

前 言

本书是根据原铸造专业教材分编审委员会于1983年审订的铸造专业教学计划和工程流体力学教学大纲以及修订版教材编写原则和兄弟院校提出的修改意见等，在第一版基础上，进行了较大的删改加工而编写的。

修订版教材包括绪论及八章内容：第一章流体的主要物理性质；第二、三、四、五、六章（流体静力学、流体动力学基础、粘性流体运动及能量损失、管路及孔口管嘴出流计算、可压缩气体一元流动基本理论）是本课程的基本内容，第三、四章是本课程的理论核心与计算应用基础；第七章气力输送两相流理论基础；第八章泵与风机，包括构造分类、工作原理、性能曲线和调节与选择。

修订版教材在编写中，注意反映如下几点：

（1）注意加强理论，如总流伯努利方程及其推广、动量方程的普遍形式及其应用以及N-S方程等；

（2）注意明确概念，如对紊流的脉动特征、流速分布与 λ 系数、人工及工业糙管的流区边界雷诺数的划分，以及两种糙管的异同等内容，作了较明确的阐述；

（3）注意更新内容，如将初版的运动物体阻力及悬浮速度，更新为气力输送两相流理论基础，并编进了国内近期研究 λ 系数的新成果；

（4）注意培养能力，如例、习题加宽加深，以促进培养分析问题和解决问题的能力。

本书可用作高等工业院校“铸造工艺与设备”专业及机械类专业工程流体力学课程的教材，七、八章任选一章，适于50学时讲授，也可供从事机械类专业的科研、设计、技术人员参考。

本书由东北工学院李诗久教授（执笔绪论、三、四、六、七章）主编，合肥工业大学郑传宁副教授（执笔一、二、八章）及东北工学院燕宁副教授（执笔第五章）协编，郑传宁副教授协助主编进行核查文图、资料及数据等重要工作，起到了副主编的作用；衡阳工学院汪兴华教授主审。

在本书编审过程中，得到了原铸造专业分编审委员会、机械电子工业部教材编辑室、衡阳工学院、合肥工业大学、东北工学院等单位的大力支持与指导，高英学、李君玲、周晓君、归彤及燕红等同志，协助编者作了大量工作，在此一并致以衷心感谢。

由于编者水平有限，不妥之处在所难免，敬请批评指正，以便进一步修改。

编者 1989年8月

本书所用符号表

符 号	代 表 意 义	单 位	符 号	代 表 意 义	单 位
$A, a, (a)$	面积(边长)	$m^2, cm^2(m, mm)$	$i, (i_p)$	总(测压管)水头线坡度	$m(\text{液柱})/m$
a	加速度	m/s^2		单位热焓	J/kg
	声速	m/s		谐波次序	
	体积膨胀系数		J	惯性矩, (转动惯量)	$m^4, (kg \cdot m^2)$
B, b	宽度	m, mm	K	常数或系数	
b	边长	m, mm		流量模数	m^3/s
	实验数值, 数, 系数		κ	常数, (体积压缩系数)	$(Pa^{-1}, m^2/N)$
C	常数, 阻力系数		$L, l, (l)$	距离, 长度, 混合长, (迹线)	m, mm
c	绝对速度, 压强波传播速度	m/s	L	比功, 比能, 单位压缩功	J/kg
			L_p	声压(分贝)	dB
c_v, c_p	定容比热容, 定压比热容	$J/(kg \cdot K)$	M	马赫数	
$D, d, (d)$	直径, (粒径)	m, mm	m	质量	kg
E	能量, 功, 动能	$J, N \cdot m$	m	混合比, 指数, 个数	
	功率	$W, J/s$	Ne	牛顿数	
	总扬程	m	$n, (n_s)$	转速, (比转速)	$r/min, (r/min)$
e	比能, 内能	J/kg		多变指数, 指数, 粗糙系数	
	偏心距, 壁厚	m, mm	$o-o$	基准面, 自由面	
$E_v(E_p)$	欧拉数, (位能函数)	(J/kg)	P	功率	W
F	力, 合力, 总压力	N	p	压强(压力), 平均压强, 风机风压	$Pa, N/m^2$
	面积	m^2, mm^2	p_0	滞止压强, 液面压强	$Pa, N/m^2$
f	频率	s^{-1}, min^{-1}	$p_a, (p_c)$	大气压强, (临界压强)	$Pa, N/m^2$
	系数		p_M	相对压强, 表压强	$Pa, N/m^2$
Fr	弗劳德数		p_v	真空度, 汽化压强	$Pa, N/m^2$
G	重力	N	Δp	压差, 压降, 压损	$Pa, N/m^2$
g	重力加速度	$9.81m/s^2$	p/γ	压强	m
H, h	水头, 压头, 扬程, 深度, 高度	m, mm	q_m	质量流量	$kg/s, kg/h$
$h, (h_m)$	液柱高度, (损失水头)	$m, mm, (m)$	q_v	体积流量	$m^3/s, m^3/h$
$h_f, (h_j)$	沿程(局部)损失水头	m	$R, (r)$	半径(半径), 水力半径, 曲率半径	m, mm
I	直线惯性力	N		气体常数	$J/(kg \cdot K)$

目 录

绪论	1	§ 4-1 能量损失及其两种形式	97
第一章 流体的主要物理性质	2	§ 4-2 流动状态与雷诺实验	93
§ 1-1 流体的特征及连续介质的概念	2	§ 4-3 管中层流运动规律	96
§ 1-2 流体的密度、比容及重度	3	§ 4-4 缝隙层流运动	100
§ 1-3 流体的压缩性及膨胀性	4	* § 4-5 相似原理与量纲分析法	107
§ 1-4 流体的粘性定律及非牛顿 流体简介	7	§ 4-6 紊流的脉动机理与切应力	115
§ 1-5 作用在流体上的力	11	* § 4-7 管中紊流的流速分布	121
习题	12	§ 4-8 人工及工业糙管的流区与 摩阻系数	127
第二章 流体静力学	14	§ 4-9 局部损失及局部阻力系数的测定	137
§ 2-1 流体静压强及其特性	14	习题	145
§ 2-2 流体平衡微分方程及等压面	16	第五章 管路及孔口管嘴出流计算	150
§ 2-3 重力作用下流体静压强的 分布规律	18	§ 5-1 长管与短管的概念、短管 水力计算	150
§ 2-4 液柱式测压计	23	§ 5-2 长管水力计算	152
§ 2-5 重力及惯性力作用下液体的 相对平衡	25	§ 5-3 管网计算简介	158
§ 2-6 平面上的液体总压力及压力中心	28	§ 5-4 有压管路中的水击及空蚀现象	161
§ 2-7 曲线上的液体总压力、压力体及 浮力原理	32	§ 5-5 孔口及管嘴出流	165
习题	38	§ 5-6 变水头孔口及管嘴出流	169
第三章 流体动力学基础	44	习题	171
§ 3-1 流场及描述流体运动的方法	44	第六章 可压缩气体一元流动基本 理论	175
§ 3-2 迹线与流线	48	§ 6-1 热力学知识、声速与马赫数	175
§ 3-3 连续方程	51	§ 6-2 流速与断面变化关系及临界状态	179
* § 3-4 流体微团运动的分析	54	§ 6-3 一元等熵流动参数变化规律	181
§ 3-5 旋流与势流、速度势函数与 流函数	57	§ 6-4 渐缩喷管与拉瓦尔喷管	189
§ 3-6 理想流体的运动微分方程	63	§ 6-5 可压缩粘性气体的等径管流	193
§ 3-7 理想流体的伯努利方程	64	习题	198
* § 3-8 粘性流体的运动微分方程 (N-S 方程)	68	第七章 气力输送两相流理论基础	200
§ 3-9 粘性流体的伯努利方程	72	§ 7-1 气力输送及特性参数	200
§ 3-10 总流伯努利方程的应用与推广	76	§ 7-2 运动物体的阻力及悬浮速度	207
§ 3-11 动量方程及其应用	80	§ 7-3 输料管中粒群的运动理论	218
习题	85	§ 7-4 气固两相流的压损	226
第四章 粘性流体运动及能量损失	91	§ 7-5 弯管附加压损的离心沉降理论	229
		§ 7-6 气力输送的经济风速	231
		习题	232
		第八章 泵与风机	233

V

§ 8-1 泵与风机的分类.....	233	工作点及联合运行.....	251
§ 8-2 离心式泵与风机的构造、工作 原理及形式.....	233	§ 8-7 离心式泵的气蚀与安装高度.....	254
§ 8-3 离心式泵与风机的基本方程.....	241	§ 8-8 离心式泵与风机的调节和选择.....	256
§ 8-4 离心式泵与风机的特性曲线.....	245	§ 8-9 罗茨鼓风机及水环真空泵.....	260
§ 8-5 离心式泵与风机的相似定律及比 转数.....	248	* § 8-10 风机的噪声及其防治	264
§ 8-6 离心式泵与风机的管路特性曲线、		习题	267
		参考文献	268

绪 论

自然界存在大量的流体物质，生产实践中涉及许多有关流体的应用与处理问题。流体的平衡、运动及其与固体的相互作用，构成各种物理或力学现象，直接影响着生产过程。人们在长期生产实践中，不断探索、总结经验，逐步认识流体平衡、运动及其与固体相互作用的客观规律：如公元前250年，阿基米德提出了浮力定律、1650年巴斯加提出了液体中压力传递定律、1686年牛顿建立了流体的内摩擦定律；待至18世纪，如1738年伯努利建立了流动液体的能量方程、1755年欧拉建立了宏观流体的连续介质模型，进而提出了流体平衡与运动的微分方程，从而建立了流体运动及其中作用力的普遍规律，为流体力学建立起比较完整的理论基础，而形成一门独立的流体力学；伴随生产发展的需要，有关粘性流体运动、旋涡运动、边界层和紊流等理论以及相似原理和实验研究方法等，都在不断深入发展，并取得了一些重要成果。

流体力学是应用力学的分支。工程流体力学则着重于探讨和研究宏观流体的平衡与机械运动的基本规律，以及这些规律在工程中的实际应用。

在机械类专业教学计划中，工程流体力学是一门技术基础课，它的任务是为后续课程及从事专业工作奠定基本的流体力学理论基础。

机械工程中涉及的流体力学理论问题很多，例如：水轮机、汽轮机和喷气发动机等，都是以流体作为原动力的动力机械；机床、汽车、采矿冶金机械等，广泛采用的液压传动和气压传动，都是以流体作为工作介质的传动机械；水泵、通风机和油压机等，都是以流体为对象的工作机械。上述这些流体机械，其工作原理、性能和试验，都是以流体力学作为理论基础的。又如：测试计量中的测压计、流量计和水力测功仪；铸造中的离心浇注、水力清砂和造型散料的气力输送；机械中的冷却系、润滑系和增压系；车间中的供油、供水、送风以及通风除尘设备等，都与流体力学理论密切相关。所以，机械类专业学习工程流体力学，是有其重要作用的。

工程流体力学同其它学科一样，主要有两种研究方法：一种是理论方法，即对影响问题的主次因素作出分析假定，抽象出理论模型(如连续介质、理想流体、不可压缩流体等)，运用数学工具寻求流体运动规律的理论解；另一种是实验方法，即将实际流动问题按相似理论建立相似的模型实验，观察现象，测定数据，综合实验结果，然后推广应用于相似系统。

近年来随着电子计算机的发展，出现了新的分支“计算流体力学”，它是根据理论分析与实验观测，拟定计算方案，编制程序，输入数据，用电子计算机算出答案，或进一步建立主要参数之间的关联方程。随着计算流体力学研究的深入，流体力学将得到进一步的发展。

第一章 流体的主要物理性质

§ 1-1 流体的特征及连续介质的概念

一、流体的特征

液体和气体统称为流体。流体是一种受任何微小剪力时都能产生连续变形的物体。

从力学性质分析，固体能承受拉力、压力和剪力，内部相应产生拉应力、压应力和剪应力以抵抗变形，外力或应力不大到一定数值，固体形状不会被破坏。流体不能承受拉力，因而流体内部永远不存在抵抗拉伸变形的拉应力；流体在宏观平衡状态下不能承受剪力，任何微小的剪力都会引起流体的连续变形而形成流动。流体的这种连续变形的流动性，是与固体在力学性质上的主要区别。

液体的分子距和分子有效直径几乎相等，如对液体加压，由于分子距稍有缩小就出现强大的分子斥力来抵抗外压力，因而液体的分子距很难缩小，能保持一定的体积。通常将液体称为不可压缩的流体。气体的分子距较大，例如在常温、常压下空气的分子距为 3×10^{-7} cm，而分子有效直径的数量级为 10^{-8} cm，当分子距缩小很多时才会出现分子斥力，因而通常将气体称为可压缩流体。

当所研究的问题没有涉及到压缩性时，所建立的流体力学规律既适用于液体也适用于气体；当涉及到压缩性时，气体和液体就需分别处理。但在某些流动情况下，如空气流速为 50 m/s 时，其密度的相对变化只有 1% ，若工程上可忽略这一相对变化，而近似地把空气流的密度看成常量，这样液体运动的基本理论就可以适用于气体。至于在流动中密度变化较大的情况，则属气体动力学问题(详见本书第六章)。

二、连续介质的概念

从微观角度看，流体和一切物体都是由大量不断运动着的分子所组成，分子之间存在着间隙，因而流体的有关物理量在空间是不连续分布的。但是流体力学并不是研究个别分子的微观运动，而是研究大量分子组成的宏观流体在外力(如重力、压力差)的作用下引起的机械运动。宏观流体的物理量(如压强、速度和密度等)是大量分子的统计平均值，而且这些宏观物理量都是可以从实验中直接观测的。

1753年欧拉(Euler)首先采用“连续介质”这一假设进行流体力学的研究，就是将实际流体看成是一种假想的由无限多流体质点(或称微团)组成的稠密无间隙的连续介质，而这些连续介质仍具有宏观的一切基本力学性质。将流体看成为连续介质也是符合实际的，因为即使是微小的流体质点，甚至其体积相对于流动空间(或流体中的固体)来说，是充分的小而可以忽略不计，但它相对于分子距和分子的平均自由行程的尺寸来说，却是足够的大，即质点中含有大量的分子。例如，在标准状态下(温度为 0°C ，压强为标准大气压(即 0.1013MPa))， 1 mm^3 液体中有 3×10^{21} 个分子， 1 mm^3 气体中有 2.7×10^{16} 个分子，所以忽略分子间隙是可行的。这样，反映流体质点运动的特征参数(密度、压强、速度等)都可看作为连续分布并可以运用连续函数这个重要的数学工具，来描述它们的变化关系，以解决

流体力学实际问题。

当然，流体的连续性假设是相对的。例如，在高真空泵中，当温度为293K时，稀薄空气的分子距约为4.5mm，这时真空泵内的气体流动，则属于稀薄气体分子流问题，不能看作为连续介质。本书只研究连续介质的力学规律及应用。

§ 1-2 流体的密度、比容及重度

一、密度

流体和其他物质一样具有质量。单位体积流体所具有的质量称为流体的密度，以 ρ 表示。在所研究的流体中，不同位置各点密度均相同者称为均质流体，均质流体密度的表达式为

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

式中 m ——流体的质量， $[m]$ 为kg；

V ——流体的体积， $[V]$ 为 m^3 。

气体的比容，是指单位质量气体所占有的体积，以 v 表示，显然它与密度互为倒数，即

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-2)$$

二、重度[⊖]

任何物体由于地心的作用，都受到重力，单位体积流体所受到的重力称为重度，用 γ 表示。对均质流体其重度表达式为

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

式中 G ——流体的重力， $[G]$ 为N；

V ——流体的体积， $[V]$ 为 m^3 。

在重力场条件下，根据牛顿第二定律可知密度与重度关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

式中 g 为重力加速度，在纬度为 45° 的海平面上 $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ ，在工程流体力学中取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。在地球上的不同处 g 值是不同的，因而流体的重度将随流体所处的位置而异；而流体的密度则与位置无关。

对于由几种气体组成的混合气体，其重度可按下式计算，即

$$\gamma = \gamma_1 a_1 + \gamma_2 a_2 + \cdots + \gamma_n a_n \quad (\text{N} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (1-5)$$

式中： $\gamma_1, \gamma_2, \cdots, \gamma_n$ ； a_1, a_2, \cdots, a_n 为混合气体中各组分气体的重度和体积百分比（ $a_1 + a_2 + \cdots + a_n = 1$ ）。

式(1-5)亦可改写为

$$\gamma = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n G_i \quad (\text{N} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (1-6)$$

⊖ 在GB3102.3中没有列入重度这一物理量，但工程流体力学中引入重度（指：单位体积所受的重力）这一量有利于处理某些工程问题，故本教材仍保留重度概念。

式中 V ——混合气体的总体积, $[V]$ 为 m^3 ;
 G_i ——各组分气体所受的重力, $[G_i]$ 为 N 。

工程上认为水和一般液体是不可压缩的, 因此在流体力学计算中, 常以 4°C 时蒸馏水的密度来表示水的密度, 即 $\rho = 1000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $\gamma = 9810\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ 。标准状态下空气密度、比容及重度值分别为 $\rho_0 = 1.293\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $v_0 = 0.773\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\gamma_0 = 12.66\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ 。常见流体的密度见表1-1。

表1-1 几种常见流体的密度 (10^5Pa 气压下)

液体名称	$\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$t / ^\circ\text{C}$	气体名称	$\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$t / ^\circ\text{C}$
水	1000	4	空气	1.293	0
水银	13600	0	氧	1.429	0
酒精	789	20	氮	0.0899	0
润滑油	900~930	15	一氧化碳	1.250	0
重油	890~940	15	二氧化碳	1.976	0
铜合金	8200	1000	氩	3.217	0
钢	7200	1550	氢	0.179	0
熔化生铁	6800~7000	1200~1280	氦	2.927	0
铝合金	2600	720~810	二氧化硫	1.251	0

【例1-1】 已知 500dm^3 水银的质量为 6795kg , 求其密度、重度。

解:
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{6795}{500 \times 10^{-3}} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 13590 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma = \rho g = 13590 \times 9.81 \text{ N/m}^3 = 133 \text{ kN/m}^3$$

§ 1-3 流体的压缩性及膨胀性

流体受压, 体积缩小, 密度增大; 流体受热, 体积膨胀, 密度减小, 这种物理现象称为流体的压缩性及膨胀性。在这两种性质上液体与气体差别很大, 下面分别讨论。

一、液体的压缩性及膨胀性

(一) 压缩性

在温度不变的条件下, 液体在压强(压力)改变时能改变自身体积的特性, 称为液体的压缩性。用 κ 表示每改变单位压强时所引起的体积相对变化量。即

$$\kappa = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}) \quad (1-7)$$

式中 Δp ——压强增量, $[\Delta p]$ 为 N/m^2 ;

ΔV ——体积变化量, $[\Delta V]$ 为 m^3 。

由于压强增加, 体积减小, 因而 Δp 与 ΔV 异号, 加上负号使 κ 为正。

表1-2 列出 0°C 的水在不同压强下的 κ 值。

表1-2 不同压强对应的水的 κ 值

(温度0°C)

压强 $p / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	5×10^5	10×10^5	20×10^5	40×10^5	80×10^5
$\kappa / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	0.533×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.523×10^{-9}	0.515×10^{-9}

(二) 膨胀性

在压强保持不变的条件下, 改变液体温度后所引起体积变化的特性称为膨胀性。用 a_V 表示每改变单位温度时所引起的体积相对变化量。即

$$a_V = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta T} \quad (\text{K}^{-1}) \quad (1-8)$$

式中 ΔT ——流体的温度增量, $[\Delta T]$ 为 K。

表 1-3 列出不同温度下水的膨胀系数值。

表1-3 不同温度下水的膨胀系数 a_V 值

压 强 $p / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	下 列 温 度 下 的 a_V / K^{-1}				
	1~10°C	10~20°C	40~50°C	60~70°C	90~100°C
1×10^5	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
100×10^5	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
200×10^5	72×10^{-6}	183×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	691×10^{-6}
500×10^5	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
900×10^5	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

表1-2、1-3说明了水的压缩系数和膨胀系数都很小。如水, 压强每改变 10^5Pa 时, 体积只改变 $0.5/10000$; 在 10^5Pa 、 $283 \sim 293 \text{K}$ 范围内, 每改变 1K , 体积相对改变量只有 $1.5/10000$, 其它液体也有类似性质。因而, 在研究液体运动规律时, 若整个流场中温度及压强差别不大, 则可认为流体的密度在整个流场上为常数。但是, 在特殊情况下, 例如水锤作用, 高压液压传动系统及高压锅炉中的液体, 就应当考虑到液体的压缩性和膨胀性。

二、气体的压缩性及膨胀性

当压强和温度改变时, 气体的密度变化很大, 一般用气体状态方程来描述它们之间的关系。在温度不甚低、压强不过高时, 气体的密度、压强和温度三者之间的关系服从理想气体状态方程, 即

$$pv = RT \quad (1-9)$$

式中 p ——气体的绝对压强, $[p]$ 为 N/m^2 ;

v ——气体的比容, $[v]$ 为 m^3/kg ;

T ——气体热力学温度, $[T]$ 为 K;

R ——气体常数, $[R]$ 为 $\text{N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

R 的物理意义是: 质量 1kg 的气体在定压下, 温度每升高 1K 所作的膨胀功。空气的 R 值为:

$$R = \frac{p_0 v_0}{T_0} = \frac{101325 \times 0.773}{273} \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 287.33 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

为简便起见，一般取空气的 R 值为 $287 \text{ N} \cdot \text{m} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ 。
式(1-9)也可写成：

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-10)$$

当气体温度不变时，式(1-9)和式(1-10)可改写为

$$\left. \begin{aligned} p v &= \text{常数, 即 } p_1 v_1 = p_2 v_2 \\ \frac{p}{\rho} &= \text{常数, 即 } \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

式(1-11)表明：在等温情况下，单位质量理想气体的体积和压强成反比；而压强和密度成正比。

当气体压强保持不变时，式(1-9)和式(1-10)可改写为：

$$\left. \begin{aligned} \frac{v}{T} &= \text{常数, 即 } \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \\ \rho T &= \text{常数, 即 } \rho_1 T_1 = \rho_2 T_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

式(1-12)表明，在压强不变时，一定质量气体的体积随温度升高而膨胀，此即盖·吕萨克(Gaylussac)定律。表1-4中列举在标准大气压下不同温度对应的空气密度值。

表1-4 大气压力下空气的密度

温 度 $t / ^\circ\text{C}$	密 度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	温 度 $t / ^\circ\text{C}$	密 度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	温 度 $t / ^\circ\text{C}$	密 度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
0	1.293	25	1.185	60	1.060
5	1.270	30	1.165	70	1.029
10	1.248	35	1.146	80	1.000
15	1.226	40	1.128	90	0.973
20	1.205	50	1.093	100	0.947

若气体在状态变化过程中与外界没有热交换，即没有散热，也没有吸热，则称为绝热过程。由热力学可知绝热方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{p}{\rho^\kappa} &= \text{常数, } p v^\kappa = \text{常数} \\ \rho &= \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/\kappa} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中： $\kappa = c_p / c_v$ ， κ 称为绝热指数。对空气及多原子气体， $\kappa = 1.4$ 。 c_p 称为定压比热容， c_v 称为定容比热容。

〔例1-2〕 压强为 3500 N/m^2 水的体积 $V_1 = 1 \text{ m}^3$ ，当压强增加到 24 kN/m^2 时，体积减小到 0.99 m^3 。试问：当压强增加到 7 kN/m^2 时，水的体积 V_2 将为多少？

$$\text{解: } \kappa = - \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} = - \frac{(0.99 - 1.00)/1}{(24000 - 35000)} \frac{\text{m}^2}{\text{N}} = \frac{1}{2.05 \times 10^6} \text{ m}^2/\text{N}$$

$$\Delta V = -\kappa V \Delta p = -1 \times (7000 - 3500) \times \frac{1}{2.05 \times 10^6} \text{ m}^3 = -0.0017 \text{ m}^3$$

$$V_2 = V_1 + \Delta V = (1 - 0.0017)m^3 = 0.9983 \text{ m}^3$$

〔例1-3〕 在大气压作用下空气在180°C时的密度为多少?

解: 按等压情况处理, 即 $\rho_0 T_0 = \rho T$

$$\rho = \frac{\rho_0 T_0}{T} = \frac{1.293 \times 273}{(273 + 180)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.78 \text{ kg/m}^3$$

§ 1-4 流体的粘性定律及非牛顿流体简介

一、粘性的概念

当流体层与层之间发生相对运动时, 速度快的流层对速度慢的流层产生拖动力, 而使慢层加速; 速度慢的流层, 对速度快的流层产生阻力, 而使快层减速。拖动力和阻力是大小相等方向相反的一对力, 分别作用在速度不同的相邻流层上, 流层间产生阻力称为内摩擦力或粘性阻力。粘性阻力的存在, 是流体在运动时产生能量损失的根本原因。

实际上, 粘性是流体阻止发生剪切变形或角变形的一种特性, 这是由于内聚力的存在和流层间的动量交换而形成的。内摩擦力就是这种特性的表现形式。当流体处于静止或各部分之间的相对速度为零时, 流体的粘性就表现不出来, 内摩擦力等于零。

二、牛顿内摩擦定律

现在来观察牛顿平板试验, 如图 1-1 所示。A、B 为宽度和长度足够大的平板, 相互间保持平行, 相距为 y , 其间充满某种流体, 当保持 A 板不动, 拉动 B 板并以等速 v 沿 x 轴向运动时, 由于流体与固体间的附着力, 所以与 B 板接触的流体, 同样以 v 的速度沿 x 轴方向运动; 而与 A 板接触的流体, 其流速为零, 两板之间的流体流速 u 则随 y 的增长而呈线性增长(但在一般情况下, 多为曲线分布)。要保持 B 板以等速运动, 必须在板上施以力 F , 该力的大小应等于板面下流体粘性产生的摩擦阻力 F_R 。试验证明, 各流体层作层状相对运动时, 内摩擦力 F_R 与两流层间接触面积 A 成正比, 与速度梯度 du/dy 成正比, 其比例常数与流体种类及其温度有关, 这就是牛顿于 1686 年阐述的内摩擦定律。即

$$F_R = \mu A \frac{du}{dy} \quad (\text{N}) \quad (1-14)$$

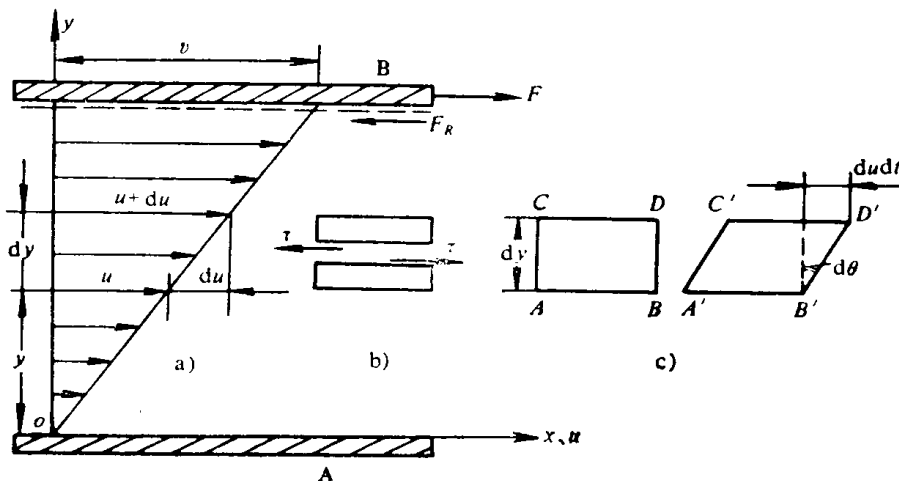


图1-1 流体的分层运动

式中 μ ——流体动力粘度, $[\mu]$ 为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

单位面积上的内摩擦力, 称为剪应力, 以 τ 表示, 即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{N}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (1-15)$$

速度梯度 du/dy 表示流体的剪切变形角速度。设某瞬时, 在作层状运动的流体中取一 y 向为 dy 的微小矩形 $ABCD$ (图1-1c), AB 边流体速度为 u , CD 边流体速度为 $u + du$ 。经 dt 时间后, 微小流体 $ABCD$ 移至 $A'B'C'D'$ 的位置, 其形状也发生相应的变化, 即其剪切变形角为 $d\theta$, 又因 $d\theta$ 角很小, 可近似地认为 $d\theta = \text{tg}d\theta = du dt / dy$, 因而有关系式 $du/dy = d\theta/dt$ 。 $d\theta/dt$ 表示所取微小矩形流体在单位时间内的剪切变形角, 称为剪切变形角速度。因而, 流体层作相对运动时, 流层间剪应力 τ 与剪切变形角速度成正比, 即角变形愈快, 产生的剪应力愈大。

三、粘性系数

将式(1-15)改写成

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s}) \quad (1-16)$$

μ 在数值上相当于速度梯度为 1 个单位时的内摩擦应力 (或剪应力) 值。 μ 的单位为 $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\cdot\text{s}\right]$ 或 $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ 。在 CGS 制中, 动力粘度的单位为泊 (P), 即 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 泊的百分之一为厘泊 (cP), 其换算关系为:

$$1 \text{ cP} = 10^{-2} \text{ P} = 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

μ 值反映流体粘性的强弱, μ 值越大, 流体的粘性也越大。

在流体力学中, 常遇到动力粘度 μ 与该流体密度 ρ 的比值, 将此比值称为运动粘度, 以 ν 表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}) \quad (1-17)$$

ν 的单位为 m^2/s , 而 1 斯托克斯 (St) $\ominus = 1 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 。

温度对流体粘度影响很大, 温度升高时, 液体的粘度降低, 流动性增高; 气体则相反, 温度升高时, 粘度增大。这是因为液体的粘性, 主要是由分子内聚力引起的, 当温度升高时, 分子内聚力减小, μ 值就降低; 气体的粘性主要是由分子热运动引起的, 即宏观速度不同的相邻层间, 由于分子热运动的动量交换, 而产生内摩擦力。温度升高, 气体分子热运动速度加大, 动量交换加剧, μ 值就增大。

水的运动粘度与温度的关系, 可用下面的经验公式计算, 即

$$\nu = \frac{1.78}{1 + 0.00337t + 0.000221t^2} \times 10^{-6} \quad (\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}) \quad (1-18)$$

式中 t ——水温, $[t]$ 为 $^{\circ}\text{C}$ 。

气体的动力粘度与温度的关系可用下面的经验公式来计算, 即

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s}) \quad (1-19)$$

\ominus St 为 CGS 制单位。

式中 μ_0 ——0 °C时气体动力粘度, [μ_0]为Pa·s;
 T ——气体热力学温度, [T]为K;
 C ——与气体性质有关的常数 (见表1-5)。

表1-5 常用气体的 μ_0 和 C 值

流体名称	$\mu_0/(10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu_0/(10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	C
空气	17.09	13.20	111
氧	19.20	13.40	125
氢	8.40	93.50	71
氮	16.60	13.30	104
一氧化碳	16.80	13.50	100
二氧化碳	13.80	6.98	254
二氧化硫	11.60	3.97	306
水蒸气	8.93	11.12	961

注: 为了便于计算, 表中水蒸气的数值已推算到0 °C时数值。

表1-6及表1-7列出了水及空气的 μ 、 ν 值与温度关系数据。

表1-6 水的 μ 、 ν 值与温度关系 (10⁵Pa)

温度 $t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	温度 $t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
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	1.141	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1-7 空气的 μ 、 ν 值与温度关系 (10⁵Pa)

温度 $t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	温度 $t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
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	20.6	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

实验证明, 只要压强不是特别高, 压强对粘度的影响就很小。但在液压传动中, 当压强高达 $200 \times 10^5 \text{Pa}$ 以上时, 必须要考虑油液的粘度随压强变化的影响, 常用下面经验公式表示, 即

$$\nu = \nu_0 e^{bP} \quad (\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}) \quad (1-20)$$

式中 ν_0 ——10⁵Pa气压下的运动粘度, [ν_0]为 m^2/s ;

p ——油液工作压强, $[p]$ 为Pa;

b ——与油液种类有关的常数, $[b]$ 为 10^5Pa^{-1} 。

四、粘性系数的测定

工程上使用较多的是恩格勒 (Engler) 粘度计, 如图 1-2 所示。它是由一黄铜制贮液器 1 及焊接在其底部的黄铜锥管 3 组成, 贮液器放在水槽 2 中, 黄铜锥管内插入孔径为 3 mm 的白金锥管 4, 并由其将被测液体自贮液器中引出。它是以 200cm^3 的液体流出粘度计所需的时间 t_1 与 200cm^3 (293 K) 的蒸馏水流出同一仪器所需的时间 t_2 的比值来表示恩氏度 $^\circ \text{E}$, 即

$$^\circ \text{E} = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-21)$$

这是一种粘度的相对表示法, 恩氏度与运动粘度 ν 的换算关系可用下面经验公式表示, 即

$$\nu = 0.0732 \text{ }^\circ \text{E} - \frac{0.0631}{^\circ \text{E}} \quad (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (1-22)$$

〔例 1-4〕 某油液的密度 $\rho = 850 \text{kg/m}^3$, 用恩氏粘度计测得流满 200cm^3 的时间 $t_1 = 408 \text{s}$, 试以国际单位制, CGS 单位制及工程单位制表示 μ 值。

解:
$$^\circ \text{E} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{408}{51} = 8$$

$$\nu = \left(0.0731 \times 8 - \frac{0.0631}{8} \right) \text{cm}^2/\text{s}$$

$$= 0.577 \text{cm}^2/\text{s}$$

$$= 0.577 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$$

$$\mu = \nu \rho = 0.577 \times 10^{-4} \times 850 \text{Pa} \cdot \text{s} = 0.0493 \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$= 0.005 \text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

五、非牛顿流体简介

凡 τ 与 du/dy 成正比关系的流体, 称为牛顿流体, 如空气、水、润滑油及低碳氢化合物之类, 见图 1-3 中曲线 1。

某些相对分子质量很大的胶体悬浮液及聚合物溶液, 却明显地偏离牛顿特性, 为非线性曲线, 如图 1-3 中 2、3、4 曲线。 τ 与 du/dy 成非线性关系的流体称为非牛顿流体, 非牛顿流体大致可分为三类。即:

(一) 塑性流体

常见的塑性流体有淤泥浆、钻井泥浆、污水、有机胶体等。如图中曲线 2, 塑性流体的流变方程为

$$\tau - \tau_0 = \mu_p du/dy \quad (1-23)$$

式中 μ_p ——刚度系数(塑性粘性系数)。

(二) 假塑性流体

常见的假塑性流体有油漆、纸浆、高分子溶液等。如图 1-3 中曲线 3 所示。假塑性流体

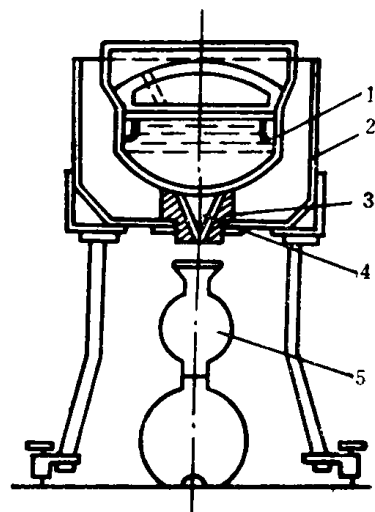


图 1-2 恩格勒粘度计

1—黄铜贮液器 2—水槽 3—黄铜锥管
4—白金锥管 5—量筒

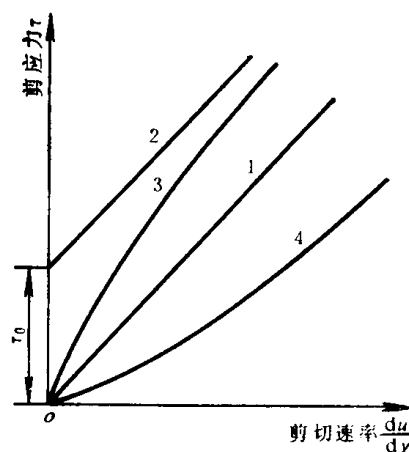


图 1-3 牛顿流体及非牛顿流体

1—牛顿流体 2—塑性流体 3—假塑性流体 4—胀塑性流体

的流变方程为

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (1-24)$$

式中： $n < 1$ ， K 为比例常数。

(三) 胀塑性流体

胀塑性是指随剪切速率 du/dy 的增加，粘性增加，如淀粉糊等。见图1-3中曲线4所示。胀塑性流体的流变方程为

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (1-25)$$

式中： $n > 1$ ， K 为比例常数。

本书内容只限于牛顿流体，关于非牛顿流体可参阅其它有关资料。

六、理想流体与实际流体

自然界中存在的流体都具有粘性，统称为实际流体或粘性流体。不考虑粘性作用的流体，称为理想流体，这是一种客观上不存在的假想的流体。粘性的存在，给流体运动的数学描述和处理带来很大的困难，如果将实际流体假设为理想流体而进行运动规律的分析，再借助实验研究的结果来考虑粘性的影响，则可对理想流体运动规律加以补充，最后得出实际流体运动规律。所以，将实际流体在一定条件下当作理想流体处理，可使研究的问题大大简化。尽管现代科学技术的发展为研究粘性流体运动提供了有力的工具，但在流体力学研究中，理想流体模型仍然起着重要的作用。

§ 1-5 作用在流体上的力

作用在流体上的力按作用方式的不同可分为两类：表面力和质量力。

一、表面力

表面力是指作用在流体表面上，且与表面积的大小成正比的力，是由与流体相接触的其它物体（可以是流体，也可以是固体）的作用产生的。表面力包括两种，一种是与流体表面相垂直的法向力，即 $\Delta F = p \Delta A$ ；另一种是与流体表面相切的切向力，即 $\Delta F_\tau = \tau \Delta A$ 。因为流体在宏观上可视为连续介质，所以表面应力（ p 、 τ ）也呈连续分布。

二、质量力（或称体积力）

作用在流体每一个质点上的力，其大小与流体的质量成正比。质量力也包括两种，一种是重力；另一种是动力学问题按静力学求解时虚拟的惯性力。通常用单位质量流体的质量力，即单位质量力来衡量质量力的大小，并以 X 、 Y 、 Z 表示单位质量力在 x 、 y 、 z 轴上的分量。如对 m 质量流体以 W_x 、 W_y 、 W_z 分别表示质量力在 x 、 y 、 z 轴的分力，则单位质量力的分力为

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{W_x}{m} \\ Y &= \frac{W_y}{m} \\ Z &= \frac{W_z}{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-26)$$