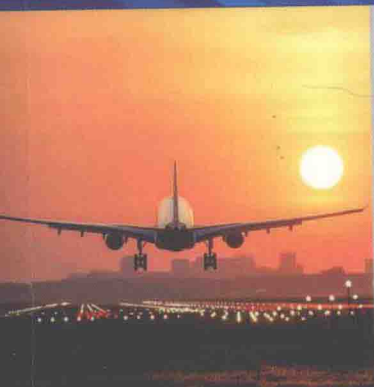




“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



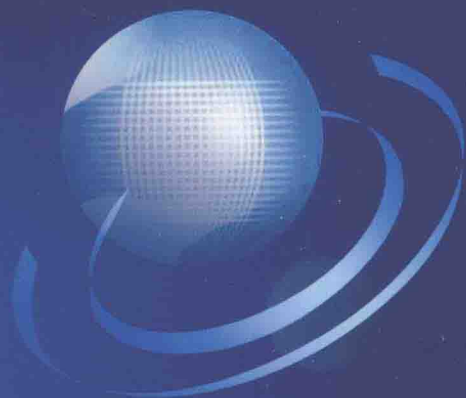
普通高等教育“十一五”国家级规划教材



流体力学

第4版

罗惕乾 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

流 体 力 学

第 4 版

主 编	罗惕乾		
副主编	程兆雪	谢永曜	
参 编	闻建龙	王军锋	康 灿
	王贞涛	王晓英	
主 审	周雪漪	王惠民	

机 械 工 业 出 版 社

流体力学是能源与动力工程专业的骨干专业基础课,也是所有工科类专业的重要技术基础课程。本书按拓宽后的机械类全国高等学校相应专业的要求编写。

全书共十二章。前六章针对机械工程类专业的要求精选内容,围绕实际流动讲述工程流体力学基础、工程中常见的流动问题及处理方法,使机械工程类专业读者具备解决他们常遇到的工程流体力学问题的能力;后六章针对动力工程类专业中涉及的流动问题及相关的研究方法做了较深入的介绍。

本书可作为能源与动力工程专业本科生的教材,也可作为机械类专业本科生和研究生的教材。对于广大的工程科技工作者和教师,本书也是一本极为实用的专业基础参考书。

本书配有电子课件,向授课教师免费提供,需要者可登录 www.cmpedu.com 下载。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/罗惕乾主编. —4版. —北京:机械工业出版社,2017.1

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-55726-5

I. ①流… II. ①罗… 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(2016)第306672号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 宋学敏 任正一

责任校对:陈延翔 封面设计:张 静

责任印制:常天培

保定市中华美印刷有限公司印刷

2017年2月第4版第1次印刷

184mm×260mm·25印张·608千字

标准书号:ISBN 978-7-111-55726-5

定价:54.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版



前言

流体力学是长期以来人们在利用流体的过程中逐渐形成的一门学科，它起源于公元前3世纪阿基米德对浮力的研究，并在近几个世纪中与数理学科互相推动而得到迅速发展。在现代科学体系中，流体力学已经成为航空航天、能源动力、机械、环保、生物等工程学科的重要基础之一。因此在高等工科院校的教学过程中，流体力学已经成为上述相关专业的核心基础课程之一。

本书第1版自1999年出版以来，已经先后于2003年、2007年进行了修订和完善。承蒙广大读者与同仁的抬爱，本书先后被评为普通高等教育“十一五”和“十二五”国家级规划教材，在能源与动力工程专业以及机械类相关专业广泛使用，获得了读者的肯定与好评，以及许多宝贵的意见和建议。本次修订进一步突出了流体力学的基本理论与基本方法，并结合教学实践与工程实践的有关知识及当代流体力学的发展，充分考虑到专业的覆盖性，在原有教材结构体系、内容取材和知识深度不变的情况下，进一步对基本概念进行了科学而严谨的阐述，力图文字更加流畅、层次更加分明、特色更为明显。

本次修订工作由江苏大学的罗惕乾教授主持，第一章和第六章由罗惕乾教授编写，第二章和第三章由王军锋教授和王贞涛副教授编写，第四章由王晓英副教授编写，第五章、第七章和第十一章由闻建龙教授编写，第八章由程兆雪教授编写，第九章和第十章由谢永曜教授编写，第十二章由康灿教授编写。全书整理工作由王贞涛负责。

借此再版之际，向对本书编写提供帮助的读者和同仁表示由衷的感谢。限于编者水平，书中存在错误和不妥之处在所难免，恳请读者给予批评和指正。

编者
于江苏大学

常用符号表

一、英文字母符号

符 号	名 称	单 位	符 号	名 称	单 位
A	面 积	m^2	M	力矩, 转矩, 力偶矩	$N \cdot m$
a	加速度	m/s^2		空间偶极子强度	m^4/s
c	声 速	m/s	Ma	马赫数	
C	常 数		m	质 量	kg
C_f	摩擦阻力系数			平面偶极子强度	m^3/s
C_p	压力系数, 压强阻力系数		Nu	努塞尔数	
C_l	二维升力系数		n	旋转速度, 旋转频率	$s^{-1}, r/min$
C_L	三维升力系数		P	功 率	W
C_d	二维阻力系数			动 量	$kg \cdot m/s$
C_D	三维阻力系数		Pr	普朗特数	
c_p	比定压热容	$J/(kg \cdot K)$	p	压 强	Pa
c_v	比定容热容	$J/(kg \cdot K)$	Q	热 量	J
D	阻 力	N		空间源, 汇强度	m^3/s
D, d	直 径	m	q	* 流量	m^3/s
E	能 (量)	J	q_m	质量流量	kg/s
E	弹性模量	Pa	q_v	体积流量	m^3/s
Eu	欧拉数		q	单宽流量	m^2/s
e	比 能	J/kg	q	平面源, 汇强度	m^2/s
F	力	N	R	水力半径	m
Fr	弗劳德数		R, r	半 径	m
f	单位质量力	N/kg	Re	雷诺数	
	弯 度	m	S	面 积	m^2
	频 率	Hz		熵	J/K
G	重 力	N	Sr	斯特劳哈尔数	
g	重力加速度	m/s^2	s	比 熵	$J/(kg \cdot K)$
H	焓	J	S	弧 长	m
H, h	水头 (能头), 水深	m	T	周 期	s
h	比 焓	J/kg		热力学温度	K
h_f	沿程损失	m	t	摄氏温度	$^{\circ}C$
h_j	局部损失	m		时 间	s
h_w	总水头损失	m		栅距, 翼型厚度	m
I	惯性矩	m^4	U	力势函数	m^2/s^2
J	转动惯量	$kg \cdot m^2$		热力学能	J
K	体积模量	Pa	u	比热力学能	J/kg
	比例系数		$u (v, w)$	速 度	m/s
L	升 力	N	V	体 积	$m^3, L (l)$
	动量矩	$kg \cdot m^2/s$	$\bar{v}$	断面平均流速	m/s
$L (l)$	长 度	m	W	复 势	m^2/s
l	弦 长	m		功	J
	翼 展	m	z	位置水头	m

注: * 由于本书基本上只使用体积流量, 故未特别说明之处, q 表示体积流量。

二、希腊文字母符号

符 号	名 称	单 位	符 号	名 称	单 位
α	动能修正系数		κ	等熵指数	
	冲角	($^{\circ}$)		射流特性系数	
	射流扩散角	($^{\circ}$)		(体积) 压缩率	Pa^{-1}
	(气流的) 转折角	($^{\circ}$)	λ	沿程阻力系数	
α_v	体膨胀系数	K^{-1}		展弦比	
β	动量修正系数			热导率	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
	激波角	($^{\circ}$)	μ	流量系数	
	(叶片的) 安放角	($^{\circ}$)		马赫角	($^{\circ}$)
	射流核心收缩角	($^{\circ}$)		动力黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Γ	环 量	m^2/s	ν	运动黏度	m^2/s
	切应变		ρ	密 度	kg/m^3
Δ	绝对粗糙度	m	τ	切应力	N/m^2
δ	边界层(名义)厚度	m	Φ	(速度) 势函数	m^2/s
δ^*	边界层排挤厚度	m	φ	流速系数	
δ^{**}	边界层动量损失厚度	m	χ	湿 周	m
ε	线应变		Ψ	流函数	m^2/s
ζ	局部阻力系数		ω	角速度	$\text{s}^{-1}, \text{rad}/\text{s}$
η	效 率		Ω	(速度) 旋度	s^{-1}
θ	体应变				

三、下标符号

下标符号	含 义	下标符号	含 义
n	法向的	x, y, z	直角坐标
τ	切向的	r, θ, z	柱坐标
s	沿弧长的	R, θ, β	球坐标



目录

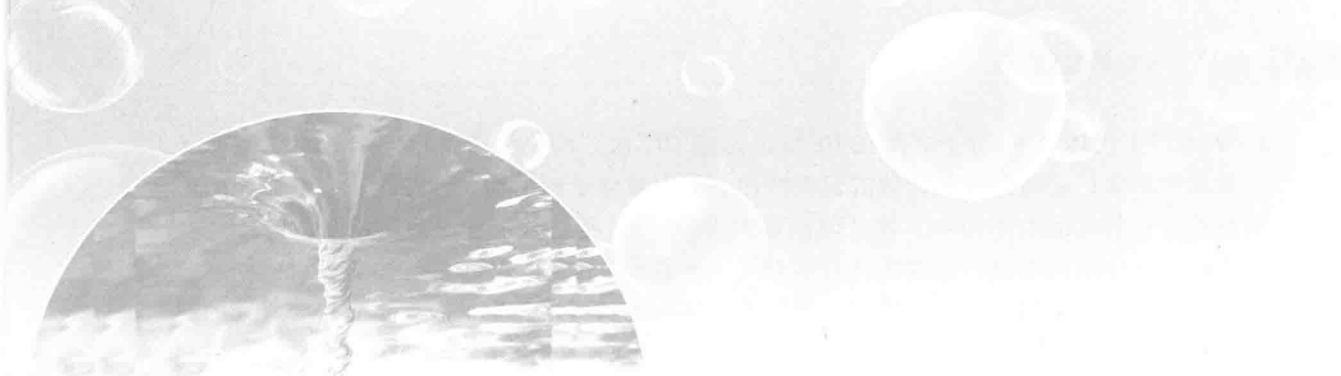
前言

常用符号表

第一章 绪论	1
第一节 流体力学的研究对象	1
第二节 连续介质模型	1
第三节 作用在流体上的力	2
第四节 流体的黏性	3
第五节 流体的物理性质	4
习题	6
第二章 流体运动学基础	8
第一节 描述流体运动的方法	8
第二节 流体运动的基本概念	13
第三节 连续性方程	16
第四节 流体微团的运动分析	18
习题	23
第三章 流体力学的基本方程	25
第一节 理想流体运动微分方程	25
第二节 流体静力学	29
第三节 伯努利 (Bernoulli) 方程	36
第四节 动量方程和动量矩方程	47
习题	51
第四章 管路、孔口、管嘴的水力 计算	56
第一节 黏性流体的两种流动状态	56
第二节 圆管的层流运动	58
第三节 圆管的湍流运动	61
第四节 流动阻力与能量损失	64
第五节 管路的水力计算	73
第六节 管路中的水击	77
第七节 孔口与管嘴出流	81
习题	86

第五章 相似理论与量纲分析	89
第一节 相似理论	89
第二节 量纲分析	99
习题	103
第六章 流动的测量与显示技术	104
第一节 压强的测量	104
第二节 流速的测量	107
第三节 流量的测量	118
第四节 流动显示技术	122
习题	124
第七章 理想流体动力学	126
第一节 平面势流	126
第二节 速度势函数和流函数	127
第三节 复势与复速度	134
第四节 几种基本的平面势流	135
第五节 势流的叠加	138
第六节 圆柱体绕流	141
第七节 理想流体的旋涡运动	148
第八节 理想流体旋涡运动的基本定理	150
第九节 旋涡的诱导速度	156
第十节 卡门涡街	158
第十一节 空间势流	159
习题	167
第八章 黏性流体动力学基础	170
第一节 黏性流体运动的纳维-斯托克斯 方程	170
第二节 在简单边界条件下纳维-斯托克 斯方程的精确解	176
第三节 边界层的概念	183
第四节 边界层方程组及边界条件	185
第五节 平板层流边界层的精确解	187

第六节 边界层动量积分关系式	191	第五节 有限体积法	300
第七节 平板边界层计算	193	习题	307
第八节 边界层分离及减阻	200	第十二章 机翼理论与叶栅理论基础	308
第九节 湍流概述	203	第一节 机翼升力原理	308
第十节 雷诺方程及雷诺应力	205	第二节 机翼与翼型的几何参数	310
第十一节 湍流的半经验理论	208	第三节 翼型的空气动力特性	311
第十二节 湍流模式理论	216	第四节 儒可夫斯基翼型与保角变换法	313
习题	221	第五节 奇点分布法	325
第九章 气体的一元流动	224	第六节 有限翼展机翼简述	329
第一节 声速与马赫数	224	第七节 亚声速机翼	334
第二节 一元恒定等熵气流的基本方程	227	第八节 跨声速机翼	339
第三节 一元恒定等熵气流的基本特性	229	第九节 超声速机翼	341
第四节 气流参数与通道面积的关系	232	第十节 叶栅概述	344
第五节 喷管	233	第十一节 叶栅的特征方程	349
第六节 有摩擦的管内流动	238	第十二节 保角变换法解平面叶栅流动 问题	352
第七节 有热交换的管内流动	242	第十三节 平面叶栅流动的奇点分布 解法	360
习题	246	第十四节 跨声速叶栅	373
第十章 激波	248	第十五节 超声速叶栅	376
第一节 正激波与斜激波	248	第十六节 叶栅三元流动解法简述	378
第二节 正激波的波前与波后	250	习题	381
第三节 突跃压缩与等熵压缩的比较	255	附录	384
第四节 斜激波的波前与波后	258	附录 A 气体动力函数表 ($\kappa=1.4$)	384
第五节 激波极线	262	附录 B 空气动力函数表 ($\kappa=1.3$)	384
第六节 压缩波与膨胀波	264	附录 C 有摩擦一元流动函数表 (法诺线 $\kappa=1.4$)	385
第七节 膨胀波、激波的反射与相交	268	附录 D 有热交换一元流动函数表 (瑞利线 $\kappa=1.4$)	386
第八节 波阻	272	附录 E 正激波表 ($\kappa=1.4$)	387
习题	273	参考文献	389
第十一章 计算流体力学基础	275		
第一节 概述	275		
第二节 通用微分方程	279		
第三节 有限差分法	281		
第四节 有限元法	289		



第一章

绪 论

第一节 流体力学的研究对象

力学是研究物质受力和运动规律的科学。在一定的外界条件下,根据组成物质的分子间的距离和相互作用的强弱不同,物质的存在状态可分为气态、液态和固态。气态物质在标准状态(0°C , 101325Pa)下分子间的平均距离大于分子直径的10倍,分子间的相互作用微弱,不能保持一定的体积和形状,当外部压力增大时,其体积按一定的规律缩小,具有较大的可压缩性。液态物质分子间平均距离约为分子直径的1倍,分子间相互作用较大,通常可以保持其固有体积,但不能保持其形状。固态物质则具有固定的形状和体积。

从物质受力和运动的特性来看,物质又可分为两大类:一类物质不能抵抗切向力,在切向力的作用下可以无限地变形,这种变形称为流动,这类物质称为流体,其变形的速度即流动速度与切向力的大小有关,气体和液体都属于流体;另一类是固体物质,它能承受一定的切应力,其切应力与变形的大小呈一定的比例关系。

流体与固体之间并没有明显的界线,同一物质在不同的条件下可以呈现不同的力学特性,即可能呈现流体的特性,也可能呈现固体的特性。众所周知的例子是沥青,在短期载荷下可做固体处理,而在长期载荷下,表现出流体特性。介于流体和固体力学特性间的还有其他的物质形态,例如黏弹体、塑体等。

综上所述,根据力学特性可以将物质分为流体和固体两大类,呈现流体力学特性的都属于流体,如空气、水和油等。宏观地研究流体受力和运动规律的科学称为流体力学,它是力学的一个重要分支。

第二节 连续介质模型

从微观上看,流体分子间存在着间隙,因此流体的物理量在空间上不是连续分布的;同时,又由于分子的随机运动,空间上一点的物理量对时间而言也不是连续的。但是在通常情况下,一个很小的体积内流体的分子数量极多,例如在标准状态下, 1mm^3 体积内含有

2.69×10^{16} 个气体分子, 分子之间在 10^{-6} s 内碰撞 10^{20} 次, 而流体力学是宏观地研究流体受力和运动的科学, 它研究的是流体的宏观特性, 即大量分子的平均统计特性。一般研究的工程问题的特征长度远大于 1 mm , 特征时间远大于 10^{-6} s , 所以有足够的理由将流体看作是由连续分布的流体质点组成, 即在流体力学中将流体假设为由连续分布的流体质点组成的连续介质。流体力学研究的是连续介质这一流体的物理模型。连续介质中的流体质点与研究的问题的特征尺寸相比足够小, 即宏观足够小, 而又包含足够多的流体分子, 呈现大量分子平均特性, 即微观足够大的流体微团。

根据流体的连续介质模型, 任一时刻流动空间的每一点都被相应的流体质点占据, 表征流体性质和运动特性的物理量和力学量一般为时间和空间的连续函数, 就可以用数学中连续函数这一有力手段来分析和解决流体力学问题。

在一些特殊的场合, 例如研究高空稀薄气体中飞行的物体, 此时研究问题的特征尺寸与分子平均自由行程达到同一数量级时 (例如在 120 km 高空处空气平均自由行程约为 1.3 m) 就不能用这一假设了。

第三节 作用在流体上的力

从流体中任意取出一流体块, 其体积为 V , 界面为 S (图 1-1), 作用在这一流体块上的力可分为两大类: 表面力、质量力或者体积力。

一、表面力

流体块界面 S 上受到的力称为表面力。根据 S 面的具体情况, 表面力可以是 S 面所分隔的同质流体或者其他种类流体作用在流体块上的, 也可以是流体容器壁面或者固体作用在流体块上的。表面力通常是位置和时间的函数, 一般用应力表示。

如图 1-1 所示, 设 A 为界面 S 上的点, ΔS 为包含 A 点的微元面积, 作用其上的表面力为 $\Delta \mathbf{F}_s$, 则 $\Delta \mathbf{F}_s$ 在 ΔS 收缩到 A 点时的极限

$$p_A = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F_s}{\Delta S} \quad (1-1)$$

称为 S 面上 A 点处的表面应力。表面应力可分成两个分量, 一个是沿表面法线方向作用的法向应力 (通常称为压强) p_n , 另一个是沿表面切线方向作用的切向应力 τ 。

二、质量力

直接作用在流体块中各质点上的非接触力称为体积力或质量力, 例如重力、惯性力等。质量力与受力流体的质量成比例, 单位质量流体上承受的质量力称单位质量力。

在图 1-1 中, 设 B 为流体块中的点, ΔV 为包围 B 点在内的流体微元体积, 其包含的流体质量为 Δm , 承受的质量力为 $\Delta \mathbf{F}$, 当 ΔV 收缩到 B 点时, 亦即其包含的流体质量 $\Delta m \rightarrow 0$ 时的极限

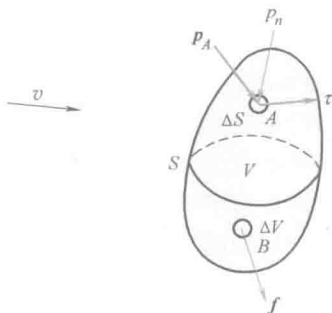


图 1-1 作用在流体上的力

$$f = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta m} \quad (1-2)$$

称为 B 点处的单位质量力。

第四节 流体的黏性

流体是不能承受剪切力的，即在很小的剪切力作用下，流体会连续不断地变形。但不同的流体在相同的剪切力作用下其变形的速度是不同的，也就是不同的流体抵抗剪切力的能力不同，这种能力称为流体的黏性。流体的黏性是流体的一种基本属性。

一、牛顿（Newton）内摩擦定律，流体的黏度

17 世纪牛顿在其名著《自然哲学的数学原理》中研究了流体的黏性。设有两块相距很近的平板，平板之间充满流体（图 1-2）。下平板固定不动，上平板在牵引力的作用下以均匀速度 U 运动，与平板接触的流体附着于平板的表面，带动两板之间的流体做相对运动，使流体内部流层之间出现成对的切向力，称为内摩擦力。

在平板间距离 h 和速度 U 不大的情况下，两板之间流体的速度呈线性分布。

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

经实验验证和后来的分子运动理论表明，外力 F 的大小（也就是流体对上板摩擦力 F 的大小）与流体的性质有关，与流速梯度 U/h 和接触面积 A 成正比，而与接触面上的压力无关。

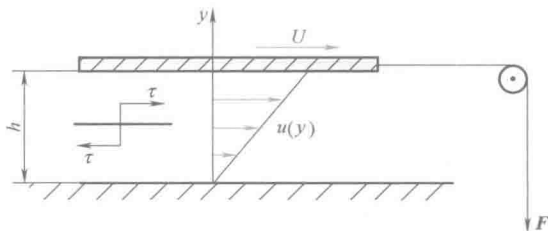


图 1-2 平行平板间的黏性流动

$$F = \mu A \frac{U}{h} \quad (1-3)$$

设 τ 为单位面积上的内摩擦力即黏滞切应力，则

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

当速度分布不是直线规律时，任一点的速度梯度为 du/dy ，因而切应力大小为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 称为牛顿黏性公式，也称牛顿内摩擦定律。

比例系数 μ 表征了流体抵抗变形的能力，即流体黏性的大小，称为流体的动力黏度，或简称为黏度。工程中还常用动力黏度 μ 和流体密度 ρ 的比值来表示黏性，称为流体的运动黏度 ν ，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

黏度是流体的重要属性，它是流体温度和压强的函数。在工程常用温度和压强范围内，黏度

主要依温度而定，压强对黏度的影响不大。

由式 (1-4) 和式 (1-5) 可知，动力黏度和运动黏度的量纲分别是 $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$ 和 L^2T^{-1} ，相应的单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 和 m^2/s 。表 1-1 为水和空气的黏度数值，与过去广泛应用的物理单位 ($\text{c}\cdot\text{g}\cdot\text{s}$ 制单位) 中相应单位 P (泊) 和 St (斯) 的换算关系为

$$1\text{Pa}\cdot\text{s} = 10\text{P}, \quad 1\text{m}^2/\text{s} = 10000\text{St}$$

表 1-1 水和空气的黏度数值

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

二、牛顿流体与非牛顿流体

并不是所有的流体都遵守牛顿内摩擦定律，即流动过程中黏性切应力和速度梯度（也称为剪切变形率）成正比。据此，将流体分为两大类：凡遵守牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，反之称为非牛顿流体。常见的牛顿流体有水、空气等，非牛顿流体有泥浆、纸浆、油漆、油墨等。

非牛顿流体流动中切应力和变形率之间的关系很复杂，有的与切应力作用的时间长短有关，有的与切应力的大小有关，而有的只有应力高于其屈服应力时才表现出流体的特性。研究非牛顿流体受力和运动规律的学科称为流变学。本书只讨论牛顿流体。

三、实际流体与理想流体

实际流体都具有黏性。当研究某些流动问题时，由于流体本身黏度小，或者所研究区域速度梯度小等，使得黏性力与其他力（例如惯性力、重力等）相比很小，可以忽略。此时，可以假设动力黏度 $\mu=0$ ，即流体没有黏性，这种无黏性的假想的流体模型称为理想流体。引入理想流体模型后，大大简化了流体力学问题的分析和计算，能近似反映某些实际流体流动的主要特征，为实际流体分析计算奠定基础，或者通过修正得到满足工程要求的结果。

第五节 流体的物理性质

流体的物理性质都用反映流体宏观特性的物理量来描述，这些物理量通常都是空间和时间的函数。

一、密度 ρ

设流体中包含某点的微元体积 ΔV 中的流体质量为 Δm ，则 ΔV 向该点收缩时的极限

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

称为该点处流体的密度。

二、比体积（质量体积） v

单位质量流体的体积称为比体积或质量体积，所以它是密度的倒数。

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

三、流体的压缩性和膨胀性

流体的体积随压强变化而变化，通常压强增大，流体的体积减小，所以流体体积随压强变化的属性称为流体的压缩性。流体的体积也随温度的变化而变化，通常温度升高，流体的体积增大，所以流体体积随温度变化的属性称为流体的膨胀性。流体的这两个特性分别用体积压缩率和体膨胀系数来表征。

1. 流体的压缩率和体积模量

在某一温度和压强下，温度保持不变，流体单位压强升高所引起的体积相对减少值，称为该温度和压强下流体的（体积）压缩率 κ (Pa^{-1})

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-8)$$

式中， dp 为压强的增值； V 为流体原来的体积； dV 为流体体积的变化值。

κ 值越大，流体的压缩性越大。工程上常用流体的压缩率的倒数来表征流体的压缩性，称为流体的体积模量 K (Pa)

$$K = \frac{1}{\kappa} \quad (1-9)$$

K 越大，流体的压缩性越小。

2. 可压缩流动与不可压缩流动

流体的压缩率及相应体积模量是随流体的种类、温度和压强而变化的。通常液体的压缩性不大，以水为例，在 0°C 和 0.5MPa 时，压强升高 0.1MPa ，其体积变化约为十万分之五，而气体的压缩性则大得多。压缩性对流动的影响与所研究的流动问题有关，当流体的压缩性对所研究的流动影响不大，可以忽略不计时，这种流动称为不可压缩流动，反之称为可压缩流动。例如，通常管道中的水流问题，可以作为不可压缩流动处理，而在研究水下爆炸和水击等压强变化很大的场合，则必须计及水的压缩性。而气体的压缩性很大，只有当流动过程中压强变化很小时，才能作为不可压缩流动处理。

3. 流体的体膨胀系数

在某一压强和温度下，压强保持不变，流体的温度升高一度所引起的体积相对变化值称为该温度和压强下流体的体膨胀系数 α_v (K^{-1})

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-10)$$

式中， dT 为温度的增值； V 为流体温升前的体积； dV 为温升引起的流体体积变化。

α_v 随流体的种类、温度和压强而变化。通常液体的体膨胀系数很小，一般工程问题中当温度变化不大时，可不予考虑，而气体的体膨胀系数很大。表 1-2 为标准大气压 (101325Pa) 下常见液体的物理性质。

表 1-2 标准大气压 (101325Pa) 下常见液体的物理性质

液体	温度 /℃	密度 /kg·m ⁻³	比体积 /m ³ ·kg ⁻¹	体积压缩率 /Pa ⁻¹	动力黏度 /Pa·s	运动黏度 /m ² ·s ⁻¹
蒸馏水	4	1000	1×10 ⁻³	0.485×10 ⁻⁹	1.52×10 ⁻³	1.52×10 ⁻⁶
原油	20	856	1.17×10 ⁻³	—	7.2×10 ⁻³	8.4×10 ⁻⁶
汽油	20	678	1.47×10 ⁻³	—	0.29×10 ⁻³	0.43×10 ⁻⁶
甘油	20	1258	0.79×10 ⁻³	0.23×10 ⁻⁹	1490×10 ⁻³	1184×10 ⁻⁶
煤油	20	803	1.24×10 ⁻³	—	1.92×10 ⁻³	2.4×10 ⁻⁶
水银	20	13590	0.074×10 ⁻³	0.038×10 ⁻⁹	1.63×10 ⁻³	0.12×10 ⁻⁶
润滑油	20	918	1.09×10 ⁻³	—	440×10 ⁻³	479×10 ⁻⁶
水	20	998	1.002×10 ⁻³	0.46×10 ⁻⁹	1.00×10 ⁻³	1.00×10 ⁻⁶
海水	20	1025	0.976×10 ⁻³	0.43×10 ⁻⁹	10.8×10 ⁻³	1.05×10 ⁻⁶
酒精	20	789	1.27×10 ⁻³	1.1×10 ⁻⁹	1.19×10 ⁻³	1.5×10 ⁻⁶

4. 气体状态方程

气体与液体不同，具有较明显的压缩性和膨胀性，实验及理论指出，在没有外电场、磁场及其他类似的力场作用时，平衡状态下系统只有两个自由度，即其状态是由两个独立的参数确定的，其余的参数都是这两个独立参数的函数。对理想气体，压强 p 是体积和温度的函数，即

$$pv = RT \quad (1-11)$$

式中， R 为摩尔气体常数； v 为比体积； T 为气体的热力学温度。

此式称为克拉珀龙 (B. P. E. Clapeyron) 气态方程式。对实际气体，其关系要复杂得多，为了获得更为准确的关系，在此方程的基础上，通过实验研究，提出了一些更为复杂的修正方程。研究表明，式 (1-11) 只有在压强不太高时才正确，也不能外推到过分低的温度。

习 题

1-1 物质是按什么原则分为固体和液体两大类的？

1-2 何谓连续介质假设？引入连续介质模型的目的是什么？在解决流动问题时，应用连续介质模型的条件是什么？

1-3 底面积为 1.5m^2 的薄板在液面上水平移动 (图 1-3)，其移动速度为 16m/s ，液层厚度为 4mm ，当液体分别为 20°C 的水和 20°C 时密度为 856kg/m^3 的原油时，移动平板所需的力各为多大？

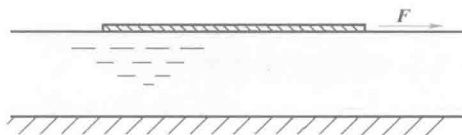


图 1-3 题 1-3 图

1-4 在相距 $\delta=40\text{mm}$ 的两平行平板间充满动力黏度 $\mu=0.7\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的液体 (图 1-4)，液体中有一边长为 $a=60\text{mm}$ 的正方形薄板以 $u=15\text{m/s}$ 的速度水平移动，由于黏性带动液体运动。假设沿垂直方向速度大小的分布规律是直线。

1) 当 $h=10\text{mm}$ 时，求薄板运动的液体阻力。

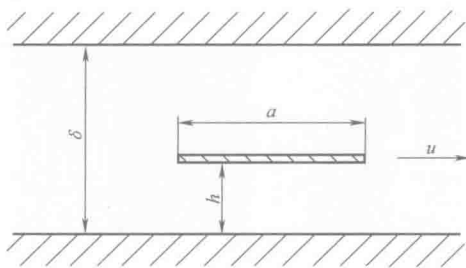


图 1-4 题 1-4 图

2) 如果 h 可改变, h 为多大时, 薄板的阻力最小? 并计算其最小阻力值。

1-5 直径 $d=400\text{mm}$, 长 $l=2000\text{m}$ 输水管做水压试验, 管内水的压强加至 $7.5 \times 10^6 \text{ Pa}$ 时封闭, 经 1 小时后由于泄漏压强降至 $7.0 \times 10^6 \text{ Pa}$, 不计水管变形, 水的压缩率为 $0.5 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$, 求水的泄漏量。

1-6 一种油的密度为 851 kg/m^3 , 运动黏度为 $3.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 求此油的动力黏度。

1-7 存放 4 m^3 液体的储液罐, 当压强增加 0.5 MPa 液体体积减小 1 L , 求该液体的体积模量。

1-8 压缩机向气罐充气, 绝对压强从 0.1 MPa 升到 0.6 MPa , 温度从 20°C 升到 78°C , 求空气体积缩小百分数为多少。



第二章

流体运动学基础

在流体力学中,不考虑力和能量的前提下,分析流体的速度和运动轨迹的研究,称为运动学。本章介绍描述流体运动的方法,给出一些有关流动的基本概念,重点对流体进行运动学分析。

第一节 描述流体运动的方法

流体力学以“连续介质”作为物理模型,认为流体是由流体质点组成,主要研究流体质点的宏观运动。通常,把充满运动流体质点的空间及其物理量的分布称为流场。流体质点的物理量如压强、速度、密度等随着流动的进行在空间区域内发生变化,研究流体的运动就是研究流场中这些物理量的变化。

在流动空间里,某一时刻每个流体质点占据着一个空间位置,空间点作为几何点不具备物理量,占据该空间点的流体质点的物理量称为空间点的物理量。通常可以采用两种方法描述流体的运动:一种是给出每一个流体质点的物理量随时间的变化,称之为拉格朗日法;另一种是给出流场中空间点的物理量分布也就是流体质点的物理量分布,不管这些质点是从哪里来,以及将要到哪里去,称之为欧拉法。

一、拉格朗日法 (Lagrange)

拉格朗日法着眼于每个流体质点,综合所有流体质点的运动可以获得整个流体的运动规律,类似于理论力学中对质点系的研究方法。在流体力学中,确定不变的流体质点的集合称为流体系统,拉格朗日法就是描述流体系统内所有流体质点的运动。这种方法通过建立流体质点的运动方程来描述流体系统的运动特征,如运动轨迹、速度和加速度等,又称为轨迹法。为了区分系统中不同的流体质点,拉格朗日法以初始时刻 $t=t_0$ 时每个流体质点的空间坐标 (a, b, c) 来做区分,不同的流体质点在初始时刻只有唯一的空间坐标 (a, b, c) ,即 a, b, c, t 是各自独立的变量,而流体质点 (a, b, c) 的空间位置 (x, y, z) 随时间 t 变化。采用流体质点初始时刻的空间坐标 (a, b, c) 与时间变量 t 共同表达流体运动规律的方法称为拉格朗日法, (a, b, c, t) 称为拉格朗日变数。因此,任一流体质点在 t 时刻

的空间位置可以表示为

$$\left. \begin{aligned} x &= x(a, b, c, t) \\ y &= y(a, b, c, t) \\ z &= z(a, b, c, t) \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

或

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(a, b, c, t) \quad (2-2)$$

这就是流体质点的运动方程，它表示了流体质点的运动规律。当 a 、 b 、 c 为已知时，式 (2-2) 代表了流体质点的运动轨迹；当 t 给定时，式 (2-1) 代表了 t 时刻各流体质点所处的空间位置。流体质点速度的拉格朗日表示为

$$\left. \begin{aligned} v_x(a, b, c, t) &= \frac{\partial x(a, b, c, t)}{\partial t} \\ v_y(a, b, c, t) &= \frac{\partial y(a, b, c, t)}{\partial t} \\ v_z(a, b, c, t) &= \frac{\partial z(a, b, c, t)}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

或

$$\mathbf{v}(a, b, c, t) = \frac{\partial \mathbf{r}(a, b, c, t)}{\partial t} \quad (2-4)$$

流体质点的加速度为

$$\left. \begin{aligned} a_x(a, b, c, t) &= \frac{\partial^2 x(a, b, c, t)}{\partial t^2} \\ a_y(a, b, c, t) &= \frac{\partial^2 y(a, b, c, t)}{\partial t^2} \\ a_z(a, b, c, t) &= \frac{\partial^2 z(a, b, c, t)}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

或

$$\mathbf{a}(a, b, c, t) = \frac{\partial^2 \mathbf{r}(a, b, c, t)}{\partial t^2} \quad (2-6)$$

同样，流体质点的密度 ρ 、压强 p 和温度 T 也是拉格朗日变数 (a, b, c, t) 的函数

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho(a, b, c, t) \\ p &= p(a, b, c, t) \\ T &= T(a, b, c, t) \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

二、欧拉法

与拉格朗日法不同，欧拉法的着眼点是流场中的空间点，认为流体的物理量随空间点及时间而变化。即研究表征流场内部流体流动特性的各种物理量的矢量场和标量场，例如速度场、压强场和密度场等，并将这些物理量表示为坐标 (x, y, z) 和时间 t 的函数，即

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_x(x, y, z, t) \\ v_y &= v_y(x, y, z, t) \\ v_z &= v_z(x, y, z, t) \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

矢量式为