



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

流体力学

第3版

主 编 罗惕乾
副主编 程兆雪 谢永曜



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

流体力学

第3版

主 编 罗惕乾
副主编 程兆雪 谢永曜
参 编 王 泽 闻建龙 姚大康 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

流体力学是动力工程类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。前五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;后七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作较深入的介绍。

本书可作为动力工程类专业本科生的教材,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。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/罗惕乾主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2007.5
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-06870-9

I. 流… II. 罗… III. 流体力学-高等学校-教材 IV.035

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第061377号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:蔡开颖 版式设计:冉晓华 责任校对:张晓蓉
封面设计:张静 责任印制:杨曦
北京机工印刷厂印刷(北京双新装订有限公司装订)
2007年7月第3版第1次印刷
184mm×260mm·25印张·615千字
标准书号:ISBN 978-7-111-06870-9
定价:40.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 88379713
封面无防伪标均为盗版

序 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，由于与数理学科和流体工程学科互相推动而得到发展。例如，诞生于20世纪初的飞机，在设计中需要计算机翼在飞行时所受的升力和阻力。当时的流体力学知识尚不能解决这些问题，于是促进了空气动力学研究，研究的结果又被用来改进飞机的设计，终于发展到今天的超声速飞机。在现代科学体系中，流体力学已经成为航空航天、动力、机械、环境、生物等工程学科的基础之一。因此，在这些专业的本科教学中，都把流体力学作为它们的核心技术基础课程。

我国高等教育长期采用划分过细的专业教育模式，现有的流体力学教材也基本上是在这一模式下围绕各个专业的需要而编写的。在内容上过分强调服务于专业，未能突出流体力学的基本理论和基本方法，同时也没有很好地反映新的进展。进入20世纪90年代以后，教学改革力度开始加大，原国家教委对本科专业目录进行了大规模的调整，减少了专业设置。为此，原来的热能工程、制冷与低温技术、水利水电动力工程、流体机械与流体工程、热力发动机等5个专业合并成为一个专业——热能与动力工程，以拓宽专业口径。本书正是在这种背景下编写的，并得到了流体机械与流体工程专业教学指导小组的审定认可。本书作者多年从事流体力学的教学工作，有丰富的教学经验，全书内容选取适当，适用面广，能满足机械类各专业和动力类专业的要求，是一本具有改革特色的新教材。其特点如下：

1) 与现有教材相比，在内容方面作了较大幅度的调整。压缩和删掉了部分过于陈旧或过分专业的内容，加强了基础理论、实验和计算机应用，同时以实际流体作为研究对象贯穿全书。

2) 本书由基础部分和专业部分两大模块组成。基础部分可用于机械类专业，专业部分则进一步介绍了动力类专业还需具备的流体力学知识。这样既满足了“加强基础，淡化专业，拓宽口径”的要求，又考虑了高校的专业设置状况。

我相信，本书的出版无论是对高校动力、机械工程类专业的教学改革，还是对流体力学的教学工作都会起到积极的作用。

陈次昌

于江苏理工大学

第3版前言

本教材第1版1999年出版,是原国家机械工业部普通高等学校“九五”部级重点教材,主要供动力工程类和机械工程类专业学生使用。三年后根据使用教材的读者反馈的意见和编者在教学、科研实践工作中发现的问题,对教材进行了较为全面的修订,于2003年出版了本教材的第2版,并且被列为普通高等学校“十五”规划教材。本教材基本符合我国高等教育改革的原则和方向,满足动力类工程专业指导性教学计划的要求,2005年被评为江苏省高等教育精品教材。幸蒙广大读者和同仁抬爱,2006年本教材被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本教材出版以来,赖以众多同仁的器重,鼓励之余,见仁见智,提出了不少中肯的意见和建议;特别是全国高等学校教学名师河海大学王惠民教授,他的建议是具有远见和建设性的。因此,借修订再版的机会,按照诸位同仁的意见和作者在教学、科研中的一些新的认识,对本书进行了充实和修订。在原有教材结构体系、内容取材和知识深度不变的情况下,进一步对概念进行了较为准确和严谨的阐述,力图文字更加流畅、层次更加分明、特色更为鲜明。本次修订紧密结合工程实践的有关知识和当代流体力学的发展,增加了许多新内容。

本次修订由江苏大学罗惕乾教授主持,第二章及第三章由王军锋副教授、王晓英博士、王贞涛博士和康灿博士共同编写;第十一章由闻建龙教授编写;其余各章由原编者进行了修订和校正。全书校正整理工作由王晓英博士和王贞涛博士共同进行。

在再版印行之际,向在修订过程中对本书提供各种帮助的读者和同仁表示深切的致意,衷心地感谢机械工业出版社为本教材再版所做的大量工作。

限于编者水平,书中错误和不妥之处,恳请读者给予批评和指正。

编者
于江苏大学

第2版前言

本教材第1版于1999年5月出版后,在动力工程类和机械类专业中使用已三年。编者广泛收集和听取了使用本教材的教师和学生的反馈意见,认为本教材基本遵从了我国高等教育改革拓宽专业口径和增强适应性的原则,符合了动力工程类专业指导性教学计划的要求,同时指出了本教材存在的问题和错误,并提出了修改意见。

为了更好地为教学服务,根据读者的意见和建议,对本教材进行修订。对部分章节进行了必要的调整和修改,对第1版中已发现的错误和疏漏进行了订正。

本教材这次修订由罗惕乾教授主持,第二章流体力学的基本方程由江苏大学王军锋博士编写,第四章相似理论与量纲分析由江苏大学闻建龙博士编写,其余各章由原编者进行修订和校正。

限于作者水平,书中难免错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

于江苏大学

第1版前言

为了发展和改革我国的高等教育,培养面向21世纪的高级专门人才,以适应我国社会主义建设的需要,国家对普通高等学校本科专业目录进行了调整。第二届全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会按照拓宽专业口径和增强适应性的要求,制定了新专业目录中动力工程类专业指导性教学计划。本书是根据这一教学计划编制,并经该委员会审定的编写大纲编写的。本书为原机械工业部普通高等学校“九五”部级重点教材。

流体力学是动力工程类专业的一门骨干专业基础课程。本教材在确保流体力学的系统性和严密性的原则下,根据专业的特点,对内容和体系进行了调整。本教材涵容了不可压缩和可压缩流体力学两方面内容,压缩了静力学,增加了湍流基本方程及模式理论、气体射流、流动量测技术、流动数值模拟等章节。在方法上运用场论等数学工具,使之与现代流体力学接轨,力图使读者具有系统的流体力学理论基础,同时对实验流体力学和计算流体力学具有一定的基础。

本书针对机械工程类专业的要求精选内容,围绕实际流动重点介绍流体流动的共性问题,工程常见流动问题及处理方法,使机械工程类读者具备解决他们常遇到的流体力学问题的能力;针对动力工程类专业中涉及的流动现象和相关的研究方法作较深入的介绍。所以,本书不仅是动力工程类专业的教材,也可作为机械类专业本科生和研究生的教材。

全书中常用物理量的名称、符号和单位均遵守有关量和单位的国家标准:GB3100—1993, GB3101—1993, GB3102.1—1993 ~ GB3102.13—1993。

本书由江苏理工大学罗惕乾教授任主编,甘肃工业大学程兆雪教授和四川工业学院谢永曜教授任副主编,清华大学周雪漪教授任主审。书中第1、5章由罗惕乾编写,第2、3章由王泽编写,第4、8、9、10章由谢永曜编写,第6章由闻建龙编写,第7、12章由程兆雪编写,第11章由姚大康编写。

限于编者水平有限,书中错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者
1998年6月

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_τ	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	总压力	N
C_d	二维阻力系数			功 率	W
C_D	三维阻力系数			动量	$kg \cdot m/s$
c_p	比定压热容	$J/(kg \cdot K)$	Pr	普朗特数	
c_v	比定容热容	$J/(kg \cdot K)$	p	压 强	Pa
D	阻 力	N	Q	热 量	J
D, d	直 径	m		空间源, 汇强度	m^3/s
E	能 (量)	J	q	* 流量	m^3/s
E	弹性模量	Pa	q_m	质量流量	kg/s
Eu	欧拉数		q_v	体积流量	m^3/s
e	比 能	J/kg	q	单宽流量	m^2/s
F	力	N	q	平面源, 汇强度	m^2/s
Fr	弗劳德数		R	水力半径	m
f	单位质量力	N/kg	R, r	半 径	m
	弯 度	m	Re	雷诺数	
	频 率	Hz	S	面 积	m^2
G	重 力	N		熵	J/K
g	重力加速度	m/s^2	Sr	斯特劳哈尔数	
H	焓	J	s	比 熵	$J/(kg \cdot K)$
H, h	水头 (能头), 水深	m	S	弧 长	m
h	比 焓	J/kg	T	周 期	s
h_f	沿程损失	m		热力学温度	K
h_j	局部损失	m	t	摄氏温度	$^{\circ}C$
h_w	总水头损失	m		时 间	s
I	惯性矩	m^4		栅距, 翼型厚度	m
J	转动惯量	$kg \cdot m^2$	U	力势函数	m^2/s^2
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	($^{\circ}$)		动力粘度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Γ	环 量	m^2/s	ν	运动粘度	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

流体力学 第3版

信息反馈表

尊敬的老师：

您好！感谢您多年来对机械工业出版社的支持和厚爱！为了进一步提高我社教材的出版质量，更好地为我国高等教育发展服务，欢迎您对我社的教材多提宝贵意见和建议。另外，如果您在教学中选用了本书，欢迎您对本书提出修改建议和意见。

一、基本信息

姓名：_____ 性别：_____ 职称：_____ 职务：_____
邮编：_____ 地址：_____
任教课程：_____ 电话：_____ — _____ (H) _____ (O)
电子邮件：_____ 手机：_____

二、您对本书的意见和建议

(欢迎您指出本书的疏误之处)

三、对我们的其他意见和建议

请与我们联系：

100037 机械工业出版社·高等教育分社 蔡编辑 收

Tel: 010—8837 9713 (O), 6899 4030 (Fax)

E-mail: cky@mail. machineinfo. gov. cn

目 录

序言		
第3版前言		
第2版前言		
第1版前言		
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 流体的粘性	2	
第五节 流体的物理性质	4	
习题	6	
第二章 流体力学的基本方程	7	
第一节 研究流体运动的方法	7	
第二节 流体运动的基本概念	12	
第三节 连续性方程	15	
第四节 流体微团的运动分析	17	
第五节 理想流体运动微分方程	22	
第六节 流体静力学	26	
第七节 伯努利 (Bernoulli) 方程	33	
第八节 动量方程和动量矩方程	43	
习题	48	
第三章 管路、孔口、管嘴的水力计算	54	
第一节 粘性流体的两种流动状态	54	
第二节 管路的水力计算	56	
第三节 管路中的水击	70	
第四节 孔口与管嘴出流	74	
习题	78	
第四章 相似理论与量纲分析	81	
第一节 相似理论	81	
第二节 量纲分析	90	
习题	94	
第五章 流动的测量与显示技术	95	
第一节 压强的测量	95	
第二节 流速的测量	98	
第三节 流量的测量	109	
第四节 流动显示技术	112	
习题	114	
第六章 理想流体动力学	116	
第一节 平面势流	116	
第二节 速度势函数和流函数	116	
第三节 复势与复速度	123	
第四节 几种基本的平面势流	124	
第五节 势流的叠加	127	
第六节 圆柱体绕流	130	
第七节 理想流体的旋涡运动	136	
第八节 理想流体旋涡运动的基本定理	138	
第九节 旋涡的诱导速度	144	
第十节 卡门涡街	146	
第十一节 空间势流	147	
习题	155	
第七章 粘性流体动力学基础	158	
第一节 粘性流体运动的纳维-斯托克斯方程	158	
第二节 在简单边界条件下纳维-斯托克斯方程的精确解	164	
第三节 边界层的概念	171	
第四节 边界层方程组及边界条件	172	
第五节 平板层流边界层的精确解	175	
第六节 边界层动量积分关系式	178	
第七节 平板边界层计算	180	

第八节 边界层分离及减阻	187	第三节 有限差分法	280
第九节 湍流概述	190	第四节 有限元法	288
第十节 雷诺方程及雷诺应力	191	第五节 有限体积法	298
第十一节 湍流的半经验理论	194	习题	304
第十二节 湍流模式理论	203		
习题	207		
第八章 气体的一元流动	210	第十二章 机翼理论与叶栅理论基	
第一节 声速与马赫数	210	础	306
第二节 一元恒定等熵气流的基本方		第一节 机翼升力原理	306
程	213	第二节 机翼与翼型的几何参数	308
第三节 一元恒定等熵气流的基本特性 ..	214	第三节 翼型的空气动力特性	309
第四节 气流参数与通道面积的关系	217	第四节 儒可夫斯基翼型与保角变换	
第五节 喷管	219	法	311
第六节 有摩擦的管内流动	223	第五节 奇点分布法	323
第七节 有热交换的管内流动	227	第六节 有限翼展机翼简述	326
习题	231	第七节 亚声速机翼	331
		第八节 跨声速机翼	336
		第九节 超声速机翼	338
		第十节 叶栅概述	341
第九章 激波	233	第十一节 叶栅的特征方程	346
第一节 正激波与斜激波	233	第十二节 保角变换法解平面叶栅流动	
第二节 正激波的波前与波后	234	问题	348
第三节 突跃压缩与等熵压缩的比较	240	第十三节 平面叶栅流动的奇点分布	
第四节 斜激波的波前与波后	242	解法	356
第五节 激波极线	247	第十四节 跨声速叶栅	369
第六节 压缩波与膨胀波	248	第十五节 超声速叶栅	371
第七节 膨胀波、激波的反射与相交	252	第十六节 叶栅三元流动解法简述	374
第八节 波阻	256	习题	377
习题	257		
		附录	380
第十章 湍流射流	259	附录 A 气体动力函数表 ($\kappa=1.4$)	380
第一节 湍流射流的一般属性	259	附录 B 空气动力函数表 ($\kappa=1.3$)	380
第二节 圆断面射流	261	附录 C 有摩擦一元流动函数表	
第三节 平面射流	267	(法诺线 $\kappa=1.4$)	381
第四节 温差射流与浓差射流	270	附录 D 有热交换一元流动函数表	
习题	273	(瑞利线 $\kappa=1.4$)	382
		附录 E 正激波表 ($\kappa=1.4$)	383
第十一章 计算流体力学基础	274		
第一节 概述	274	参考文献	385
第二节 通用微分方程	278		

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。物质是由分子组成的,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,在短期载荷下可作固体处理,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,例如粘弹体、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 1mm ,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120km高空处空气平均自由行程约为1.3m)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 ΔP ,则 ΔS 收缩到 A 时的极限

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

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 ΔF ,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

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

称为 B 点处的单位质量力。

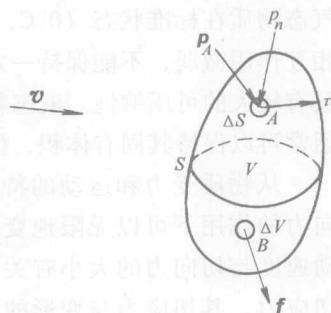


图1-1 作用在流体上的力

第四节 流体的粘性

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粘性。流体的粘性是流体的一种基本属性。

一、牛顿(Newton)内摩擦定律,流体的粘度

17世纪牛顿在其名著《自然哲学的数学原理》中研究了流体的粘性。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作相对运动, 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。

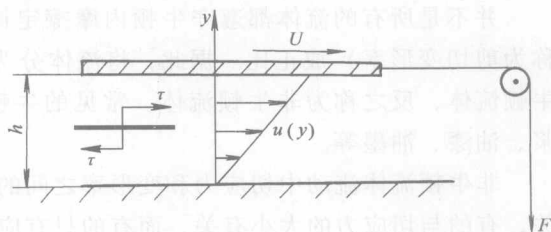


图 1-2 平行平板间的粘性流动

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

设 τ 为单位面积上的内摩擦力即粘滞切应力, 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) 称为牛顿粘性公式, 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, 即流体粘性的大小, 称为流体的动力粘度, 或简称为粘度。工程中还常用动力粘度 μ 和流体密度 ρ 的比值来表示粘性, 称为流体的运动粘度 ν , 即

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

粘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, 粘度主要依温度而定, 压强对粘度的影响不大。

由式 (1-4) 和式 (1-5) 可知, 动力粘度和运动粘度的量纲分别是 $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$ 和 L^2T^{-1} , 相应的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 和 m^2/s 。表 1-1 为水和空气的粘度数值, 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

表 1-1 水和空气的粘度数值

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}

1 Pa · s = 10 P, 1 m²/s = 10000 St

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,即流动过程中粘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。本教材只讨论牛顿流体。

三、实际流体与理想流体

实际流体都具有粘性。当研究某些流动问题时,由于流体本身粘度小,或者所研究区域速度梯度小等,使粘性力与其他力,例如惯性力、重力等相比很小,可以忽略。此时,假设动力粘度 $\mu = 0$,即流体没有粘性,这种无粘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

流体的物理性质都由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,流体的体积减少,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 为压力的增值; 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 / $^\circ\text{C}$	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比体积 / $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	体积压缩率 / Pa^{-1}	动力粘度 / $\text{Pa} \cdot \text{s}$	运动粘度 / $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
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

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