

普通高等教育“十五”规划教材

流体力学

第2版

Mechanics of Fluids

江苏大学 罗惕乾 主编

甘肃工业大学 程兆雪
四川工业学院 谢永曜 副主编

普通高等教育“十五”规划教材
普通高等教育“九五”部级重点教材
普通高等教育机电类规划教材

流体力学

第 2 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
主 审 周雪漪

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。本教材按拓宽后的机械类全国高等学校相应专业的要求编写,为原机械工业部重点教材。

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. —2版. —北京:机械工业出版社, 2003.8
普通高等教育“十五”规划教材
ISBN 7-111-06870-X

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(2003)第042097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:邓海平 冯春生 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣
封面设计:张静 责任印制:路琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2003年7月第2版第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·24印张·591千字
定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版



罗惕乾 湖南衡东人，1938年5月生。1961年毕业于华中工学院水力机械专业，1981年至1983年英国威尔士大学访问学者，现任江苏大学能源与动力工程学院教授、博士生导师。长期从事高等学校教学和科研工作，讲授流体力学、多相流动力学、工程数学等近十门课程。科研主要从事荷电两相流理论及应用、实验流体力学、激光多普勒技术、流体工程等方面，主持和参加完成国家自然科学基金项目3项、博士点基金和省部级课题十余项、国际合作课题1项、其它课题20余项，部分成果已投入生产应用，获国家实用新型专利4项。

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的研究，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音速飞机。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。如此原来的热能工程、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 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—93，GB3101—93，GB3102.1—93 ~ GB3102.13—93。

本书由江苏理工大学罗惕乾博导任主编，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

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

常用符号表

一、英文字母符号

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

下角标符号	含 义	下角标符号	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

序言		
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	2	
第三节 作用在流体上的力	2	
第四节 流体的粘性	3	
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	8	
第一节 研究流体运动的两种方法	8	
第二节 流体运动的基本概念	14	
第三节 连续性方程	17	
第四节 流体微团的运动分析	19	
第五节 理想流体运动微分方程	23	
第六节 欧拉平衡微分方程及其应用	26	
第七节 伯努利 (Bernoulli) 方程	34	
第八节 动量方程和动量矩方程	42	
习题	46	
第三章 管路、孔口、管嘴的水力计算	52	
第一节 粘性流体的两种流动状态	52	
第二节 管路的水力计算	54	
第三节 管路中的水击	68	
第四节 孔口与管嘴出流	72	
习题	76	
第四章 相似理论与量纲分析	79	
第一节 相似理论	79	
第二节 量纲分析	88	
习题	92	
第五章 流动的测量与显示技术	94	
第一节 压强的测量	94	
第二节 流速的测量	98	
第三节 流量的测量	103	
第四节 流动显示技术	106	
习题	108	
第六章 理想流体动力学	109	
第一节 平面势流	109	
第二节 速度势函数和流函数	110	
第三节 复势与复速度	116	
第四节 几种基本的平面势流	117	
第五节 势流的叠加	120	
第六节 圆柱体绕流	123	
第七节 理想流体的旋涡运动	130	
第八节 理想流体旋涡运动的基本定理	132	
第九节 旋涡的诱导速度	137	
第十节 卡门涡街	140	
第十一节 空间势流	141	
习题	149	
第七章 粘性流体动力学基础	151	
第一节 粘性流体运动的纳维-斯托克斯方程	151	
第二节 在简单边界条件下纳维-斯托克斯方程的精确解	157	
第三节 边界层的概念	164	
第四节 边界层方程组及边界条件	166	
第五节 平板层流边界层的精确解	168	
第六节 边界层动量积分关系式	172	
第七节 平板边界层计算	174	
第八节 边界层分离及减阻	180	
第九节 湍流概述	183	
第十节 雷诺方程及雷诺应力	185	
第十一节 湍流的半经验理论	188	
第十二节 湍流模式理论	196	
习题	201	
第八章 气体的一元流动	203	
第一节 声速与马赫数	203	
第二节 一元恒定等熵气流的基本方程	206	
第三节 一元恒定等熵气流的基本特性	208	
第四节 气流参数与通道面积的关系	210	
第五节 喷管	212	

第六节	有摩擦的管内流动	216			
第七节	有热交换的管内流动	220			
	习题	224			
第九章	激波	226			
第一节	正激波与斜激波	226			
第二节	正激波的波前与波后	228			
第三节	突跃压缩与等熵压缩的比较	232			
第四节	斜激波的波前与波后	235			
第五节	激波极线	240			
第六节	压缩波与膨胀波	241			
第七节	膨胀波、激波的反射与相交	245			
第八节	波阻	249			
	习题	250			
第十章	湍流射流	252			
第一节	湍流射流的一般属性	252			
第二节	圆断面射流	255			
第三节	平面射流	260			
第四节	温差射流与浓差射流	263			
	习题	266			
第十一章	流动数值计算基础	267			
第一节	常用数值方法概述	267			
第二节	有限差分近似	269			
第三节	几种常用差分格式	276			
第四节	平面不可压粘性流动的流函数—— 涡量法	279			
第五节	伽辽金 (Galerkin) 法	281			
第六节	有限元法	282			
第七节	圆柱绕流的有限元解法	287			
	习题	291			
第十二章	机翼理论与叶栅理论基 础	292			
第一节	机翼升力原理	292			
第二节	机翼与翼型的几何参数	294			
第三节	翼型的空气动力特性	295			
第四节	儒可夫斯基翼型与保角变换 法	297			
第五节	奇点分布法	309			
第六节	有限翼展机翼简述	312			
第七节	亚声速机翼	317			
第八节	跨声速机翼	322			
第九节	超声速机翼	324			
第十节	叶栅概述	327			
第十一节	叶栅的特征方程	332			
第十二节	保角变换法解平面叶栅流动 问题	334			
第十三节	平面叶栅流动的奇点分布 解法	342			
第十四节	跨声速叶栅	355			
第十五节	超声速叶栅	358			
第十六节	叶栅三元流动解法简述	360			
	习题	363			
附录		366			
附录 A	气体动力函数表 ($\kappa = 1.4$)	366			
附录 B	空气动力函数表 ($\kappa = 1.3$)	366			
附录 C	有摩擦一元流动函数表 (法诺线 $\kappa = 1.4$)	367			
附录 D	有热交换一元流动函数表 (瑞利线 $\kappa = 1.4$)	368			
附录 E	正激波表 ($\kappa = 1.4$)	369			
参考文献		371			



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的变形，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的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。

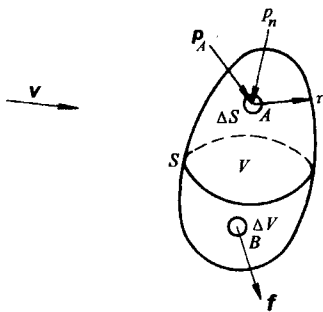


图 1-1 作用在流体上的力

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。

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。

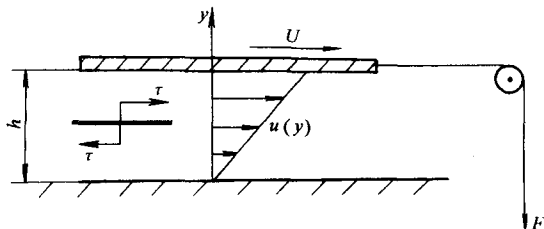


图 1-2 平行平板间的粘性流动

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 $\frac{U}{h}$ 和接触面积 A 成正比，而与接触面上的压力无关。

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

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 $\frac{du}{dy}$ ，因而切应力大小为

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

此式称为牛顿粘性公式，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 的比值来表示粘度，称为流体的运动粘度 ν 。

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

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，压强对粘性的影响不大。

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 1P (泊) = $1\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ 和 1St (斯) = $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ 的换算关系为

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

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}

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 $\mu = 0$ ，即流体没有粘度，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。

（一）流体的体积压缩率和体积模量

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})

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

其中， 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。工程上常用流体的体积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。

（二）可压缩流动与不可压缩流动

流体的体积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。

（三）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积膨胀系数 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 /°C	密度 /kg·m ⁻³	比体积 /m ³ ·kg ⁻¹	体积压缩率 /Pa ⁻¹	动力粘度 /Pa·s	运动粘度 /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

(四) 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

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

式中, R 为气体常数; 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,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?

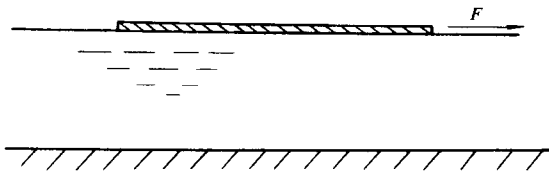


图 1-3 题 1-3 图

1-4 在相距 $\delta = 40\text{mm}$ 的两平行平板间充满动力粘度 $\mu = 0.7\text{Pa}\cdot\text{s}$ 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,由于粘性带动液体运动。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。