

高等学校教材

工程流体力学

第二版

山东工业大学 孔 珑 主编



高等学校教材

工程流体力学

第二版

山东工业大学孔珑 主编

中国电力出版社

内 容 简 介

本书共有九章。内容包括：绪论，流体静力学，流体运动的基本概念和基本方程，相似原理和量纲分析，管流损失和水力计算，气体的一维流动，理想流体的有旋流动和无旋流动，粘性流体绕过物体的流动以及气体的二维流动。各章均有一定数量的例题和习题。

本书为高等学校热动力类专业及其相近专业流体力学课程的教材，又可作为有关工厂和设计部门工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学/孔珑主编. -2版.-北京:中国电力出版社,1998重印

高等学校教材

ISBN 7-80125-630-1

I.工… I.孔… III.工程力学:流体力学-高等学校-教材 N.TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 00577 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1979 年 12 月第一版

1992 年 11 月第二版 2006 年 1 月北京第十五次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.25 印张 456 千字

印数 103371—105370 册 定价: 18.60 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

序 言

本教材是根据能源部高等学校热能动力类专业教学委员会流体力学及泵与风机教学组第二次扩大会议(1989年)审定的电厂热能动力工程专业《工程流体力学》修订大纲、在原山东工学院、东北电力学院合编《工程流体力学》的基础上修订而成的。

这次修订,根据专业需要和使用该教材十余年来的教学实践,对教材的内容和体系都作了一些必要的调整。在内容方面,与原教材相比,主要的调整有:比较全面系统地阐述了积分形式的基本方程及其应用,适当地充实了相似原理和量纲分析、气体一维流动的内容;其他各章也增添了一些内容,例如毛细压强的导出,正压流体的势函数,拉格朗日法,圆管中紊流沿程损失系数的导出,液体的出流,直接水击和间接水击及气穴和气蚀的概念,理想流体流动的定解条件,边界层的控制,气流折转角的计算等。与此同时,对某些重复的或不需要单独阐述的内容,进行了归并,例如理想流体一维流动的欧拉方程、伯努利方程等;对某些宜在专业课中阐述或偏于专门的内容,进行了删节,例如叶型上的压强分布,管箱的声振计算,绕翼型近声速和超声速流动的定性分析等;考虑到电子计算机的应用已较普遍,所用计算机语言不一,删去了原教材中用ALGOL60语言编制的计算程序,由使用本教材的师生自行处理。在体系方面,将原教材的七章调整为九章;相似原理和量纲分析单独成章,放在基本方程之后和一维流动之前,以加强流体力学实验研究的理论基础,为后面讨论有关流体力学问题的实验研究作好准备;气体的一维流动也单独成章,提前到管流损失和水力计算之后,使工程应用最为广泛的一维流动集中在教材的前面,而在工程应用上更深入一步的二、三维流动集中在教材的最后三章。这样,既符合由浅入深、先易后难的认识发展规律,又可使学生较早接触与专业工程实际密切相关的流体力学问题,也便于不同需要的相近专业选用。其他章节有些内容的位置也作了调整,例如将作用在流体上的力前移到绪论中,将粘性流体总流的伯努利方程前移到基本方程中,将管道入口段中的流动前移到管流损失中,将环形管道中、二平行平板间的层流流动和流体动力润滑后移到纳维-斯托克斯方程之后去讨论等。此外,对于教材中各物理量的名称、单位和符号,也都按《中华人民共和国国家标准 量和单位》和流体力学及泵与风机教学组第二次扩大会议统一的意见进行了订正。

这次修订,孔珑编写引言、第一、四、五、六、九章,田名振编写第二章,蔡国琰编写第三章,薛祖绳编写第七、八章。孔珑担任主编,王文琪担任主审。

这本教材从出版至今已经11年。在此期间,使用过该教材的兄弟院校同行们曾在有关会议上或以书信的形式提出过一些宝贵意见和建议;山东工业大学流体力学教研室曾经组织试讲和讨论过教材的重点章节,提出过一些宝贵意见和建议;本教材的主审对修订书稿又提出了

许多宝贵意见和建议，这都使书稿的质量得以不断的提高。山东工业大学流体力学教研室的同志和研究生还帮助誊清了书稿。在此一并表示由衷的谢忱。

限于我们的水平，教材中可能会有不足和不妥之处，恳切欢迎读者指正。

编 者

1990年11月

目 录

序 言

引 言

第一章 绪论	4
第一节 流体的定义和特征	4
第二节 流体作为连续介质的假设	4
第三节 作用在流体上的力 表面力 质量力	5
第四节 流体的密度	6
第五节 流体的压缩性和膨胀性	8
第六节 流体的粘性	10
第七节 液体的表面性质	17
习题	19
第二章 流体静力学	21
第一节 流体静压强及其特性	21
第二节 流体平衡微分方程式	22
第三节 流体静力学基本方程式	25
第四节 绝对压强 计示压强 液柱式测压计	28
第五节 液体的相对平衡	33
第六节 静止液体作用在平面上的总压力	38
第七节 静止液体作用在曲面上的总压力	41
第八节 静止液体作用在潜体和浮体上的浮力	45
习题	47
第三章 流体运动的基本概念和基本方程	54
第一节 研究流体流动的方法	54
第二节 流动的分类	56
第三节 迹线与流线	58
第四节 流管 流束 流量	59
第五节 系统与控制体	61
第六节 连续方程	63
第七节 动量方程与动量矩方程	64
第八节 能量方程	69
第九节 伯努利方程及其应用	71
第十节 沿流线主法线方向压强和速度的变化	75
第十一节 粘性流体总流的伯努利方程	76
习题	78
第四章 相似原理和量纲分析	84
第一节 流动的力学相似	84
第二节 动力相似准则	86

第三节	流动相似条件	90
第四节	近似的模型试验	92
第五节	量纲分析法	94
习题		99
第五章	管流损失和水力计算	102
第一节	管内流动的能量损失	102
第二节	粘性流体的两种流动状态	103
第三节	管道入口段中的流动	105
第四节	圆管中流体的层流流动	106
第五节	粘性流体的紊流流动	109
第六节	沿程损失的实验研究	116
第七节	非圆形管道沿程损失的计算	121
第八节	局部损失	122
第九节	综合应用举例	127
第十节	管道水力计算	133
第十一节	液体的出流	141
第十二节	水击现象	151
第十三节	气穴和气蚀简介	155
习题		156
第六章	气体的一维流动	162
第一节	微弱扰动的一维传播 声速 马赫数	163
第二节	气流的特定状态和参考速度 速度系数	165
第三节	正激波	169
第四节	变截面管流	178
第五节	等截面摩擦管流	189
第六节	等截面换热管流	196
习题		201
第七章	理想流体的有旋流动和无旋流动	204
第一节	微分形式的连续方程	204
第二节	流体微团运动的分解 有旋流动和无旋流动	206
第三节	理想流体的运动微分方程	211
第四节	欧拉积分式和伯努利积分式 伯努利方程	213
第五节	理想流体流动的定解条件	215
第六节	涡线 涡管 涡束 涡通量	216
第七节	速度环量 斯托克斯定理	217
第八节	汤姆孙定理 亥姆霍兹旋涡定理	219
第九节	有势流动 速度势和流函数 流网	222
第十节	几种简单的不可压缩流体的平面流动	226
第十一节	几种简单的平面无旋流动的叠加	231
第十二节	平行流绕过圆柱体无环流的平面流动	235
第十三节	平行流绕过圆柱体有环流的平面流动 库塔-儒可夫斯基公式	238
第十四节	叶栅的库塔-儒可夫斯基公式	241
第十五节	库塔条件	244

习题	246
第八章 粘性流体绕过物体的流动	249
第一节 不可压缩粘性流体的运动微分方程 (纳维-斯托克斯方程)	249
第二节 不可压缩粘性流体的层流流动	255
第三节 边界层的基本概念	262
第四节 层流边界层的微分方程	264
第五节 边界层的动量积分关系式	266
第六节 边界层的位移厚度和动量损失厚度	268
第七节 平板的层流边界层的近似计算	269
第八节 平板的紊流边界层的近似计算	271
第九节 平板的混合边界层的近似计算	274
第十节 曲面边界层的分离现象	275
第十一节 绕过圆柱体的流动 卡门涡街	278
第十二节 物体的阻力 阻力系数	280
第十三节 边界层的控制	283
第十四节 雷诺数很小时绕过静止圆球的定常平行流	284
第十五节 自由淹没射流	289
习题	293
第九章 气体的二维流动	296
第一节 微弱扰动在空间的传播 马赫锥	296
第二节 微弱扰动波	298
第三节 斜激波	303
第四节 激波的反射和相交	308
第五节 激波与边界层的相互干扰	311
习题	312
参考文献	314

引 言

流体力学是研究流体平衡和运动规律的科学。它研究流体流动的基本规律；研究流体绕过某种物体或流过某种通道时的速度分布、压强分布、能量损失及流体同固体间的相互作用。作为基础和满足工程实际需要，它也研究流体平衡时的条件及其压强分布规律。

流体力学在许多工业技术中有着广泛的应用。水利工程的建设、造船工业的发展是同水静力学的建立和水动力学的发展密切相关的。航空工业中各种飞机和飞行器的设计都要依据空气动力学和气体动力学的基本原理。在电力工业中，不论是水电站、火电站，还是核电站、地热电站，它们的工作介质都是流体，所有动力设备的设计都必须符合流体流动的规律。机械工业中的润滑、冷却、液压传动、气力输送以及液压和气动控制问题的解决，都必须应用流体力学的理论。在冶金工业中，也会遇到像气体在炉内的流动、液态金属在炉内或铸模内的流动以及冷却、通风等流体力学问题。化学工业中的流体力学问题则更多，因为大部分化学工艺流程都是伴随有化学反应、传质、传热的流动过程。石油工业中也有大量的流体力学问题，例如油、水、气的渗流问题，油、气的自喷、抽吸和输送问题，以及原油中多种产品的提炼、分离，等等。土木建筑中的给水排水、采暖通风是流体力学问题，海洋中的波浪、环流、潮汐以及大气中的气旋、环流和季风等都是流体力学问题。人体的循环系统也是流体系统，因此像人工心脏、心肺机、助呼吸器等的设计都要依据流体力学的基本原理。这样看来，流体力学确是许多工业技术部门必须应用和研究的一门重要学科。

高等学校的电厂热能动力工程专业为电力工业培养德、智、体全面发展的电厂热能动力工程的高级工程技术人材。而在电厂，各种热力设备中的工作介质都是流体，诸如水、油、汽、空气、烟气以及低沸点的流体（如地热电站中用的丙酮、氯乙烷、氟里昂等）和热等离子体（磁流体发电）等，因此热能动力工程技术人员只有切实地了解 and 掌握流体在各种热力设备中的流动规律，才能熟悉和掌握这些设备的性能和运行规律，也才能在电力生产中充分发挥这些设备的效益，更好地为社会主义的四个现代化服务。流体力学和热力学、传热学等都是热能动力工程专业的主要专业基础课，是本专业必修的基础课程。

本教材不可能讲述所有这些流体在各种热力设备中的特殊流动规律，而只能讲述那些基本的共同的流动规律。在学习本课程时，应着重于掌握流体力学的基本概念、基本原理、基本计算方法和实验技能，为学好后继课程，为从事电力生产和热力设备的革新，为进一步研究特殊流体（如两相流、等离子体等）的流动和流体在热力设备中的特殊流动规律打下坚实的基础。

本教材共分九章。第一章绪论，主要讲述流体的连续介质假设、作用力和流体的几个主要物理性质。第二章流体静力学，主要讲述流体处于平衡状态的条件和压强分布规律。第三章流体运动的基本概念和基本方程，主要讲述研究流体运动的方法，有关基本概念，

表 0-1

SI 单位与公制工程单位对照换算表

量的名称	SI				单位			公制工程单位		1 公制工程单位换成 SI 单位时应乘的系数	备注
	类别	名称	符号		用基本单位表示的关系式	名称	用公制基本单位表示的关系式	1 公制工程单位换成 SI 单位时应乘的系数	备注		
			中文	国际							
长度	基本单位	米	千克(公斤)	米	kg	m	米	$m^{-1} \cdot \text{kgf} \cdot \text{s}^2$	9.80665	在公制工程单位中为导出单位	
时间	基本单位	秒	开	s	K	s	秒	s			
热力学温度	基本单位	开尔文				K	摄氏度(°C)			SI 单位中也使用 C, $273.15 + t^{\circ}\text{C} = T^{\circ}\text{K}$	
平面角	辅助单位	弧度	球面度	rad		rad	球面度				
立体角	辅助单位	球面度	球面度	sr		sr	球面度				
力	导出单位	牛顿	牛	N		$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	公斤力(千克力)	kgf	9.80665	在公制工程单位中为基本单位	
力矩	导出单位	牛顿米	牛·米	$\text{N} \cdot \text{m}$		$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	公斤力米	kgf·m	9.80665		
压力(压强)、应力	导出单位	帕斯卡	帕	Pa		$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	公斤力每平方米	kgf·m ⁻²	9.80665		
表面张力	导出单位	牛/米	牛/米	N/m		$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	公斤力/米	kgf·m ⁻¹	9.80665		
密度	导出单位	千克每立方米	千克/米 ³	kg/m^3		$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}$	工程制质量单位每立方米	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kgf} \cdot \text{s}^2$	9.80665		
动能	导出单位	焦耳	焦	J		$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	公斤力秒每平方米	kgf·s·m ⁻²	9.80665		
功	导出单位	焦耳	焦	J		$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	公斤力米	kgf·m	9.80665		
功率	导出单位	瓦特	瓦	W		$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$	公斤力米每秒	kgf·m·s ⁻¹	9.80665		
热容量	导出单位	焦耳/开尔文	焦/开	J/K		$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	千卡每度	kcal·K ⁻¹	4186.8		
比热容	导出单位	焦耳/千克开尔文	焦/(千克·开)	J/(kg·K)		$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	千卡每公斤度	kcal·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	4186.8		
比热容、比焓	导出单位	焦耳/千克开尔文	焦/千克	J/kg		$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	千卡每公斤度	kcal·kg ⁻¹	4186.8		
热导率(导热系数)	导出单位	瓦特/米开尔文	瓦/(米·开)	W/(m·K)		$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	千卡每米秒度	kcal·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·K ⁻¹	4186.8		
面积	导出单位	平方米	米 ²	m ²		m ²	平方米	m ²			
体积	导出单位	立方米	米 ³	m ³		m ³	立方米	m ³			
比重(比体积)	导出单位	立方米每千克	米 ³ /千克	m ³ /kg		$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	立方米每公斤力	m ³ ·kgf ⁻¹			
速度	导出单位	米每秒	米/秒	m/s		$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	米每秒	m·s ⁻¹			
加速度	导出单位	米每秒钟	米/秒 ²	m/s ²		$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	米每秒钟平方	m·s ⁻²			
角速度	导出单位	弧度每秒	弧度/秒	rad/s		rad/s	弧度每秒	rad/s			
角加速度	导出单位	弧度每秒钟平方	弧度/秒 ²	rad/s ²		rad/s ²	弧度每秒钟平方	rad/s ²			
频率	导出单位	赫兹	赫	Hz		s ⁻¹	赫兹	s ⁻¹			

广泛应用的连续方程、动量方程和能量方程。前三章是全书的基础。第四章相似原理和量纲分析，主要讲述流动相似的条件和相似准则，量纲分析法和 π 定理，它们是流体力学试验研究的理论基础。第五章管流损失和水力计算，主要讲述粘性流体管内流动的规律、能量损失和水力计算。第六章气体的一维流动，主要讲述微弱扰动波、正激波等基本概念和计算以及气体在管内的几种基本类型的流动。这两章讲述的是热能动力工程中最常遇到的各类管流的计算问题。第七章理想流体的有旋流动和无旋流动，主要讲述微分形式的基本方程，流体微团运动的分解，有旋运动的几个基本定理，几种典型的二维势流和绕过叶栅、叶型的库塔-儒可夫斯基公式。第八章粘性流体绕过物体的流动，主要讲述粘性流体运动微分方程及其应用，边界层的概念、近似计算和分离现象等。第九章气体的二维流动，主要讲述二维超声速流中的微弱扰动波、斜激波及其计算，激波的反射和相交等。最后三章主要讲述理想流体的、粘性流体的和可压缩流体的二维流动，但它们的基本方程、基本定理都是按三维流动推导和讲述的，这样，便加强了理论基础，为分析和进一步研究工程实际中更复杂的流动问题奠定了必要的基础。

在叙述本教材的主要内容之前，要说明一下本教材采用我国法定计量单位。国际单位制(SI)是我国法定计量单位的基础。为了便于进行新旧单位的换算，特将与流体力学有关的SI单位和公制工程单位的对照和换算关系列于表0-1，SI词头列于表0-2。

表 0-2 SI 词 头

因 数	词 头 名 称	符 号		因 数	词 头 名 称	符 号	
		中 文	国 际			中 文	国 际
10^{18}	艾可萨(exa)	艾	E	10^{-1}	分(déci)	分	d
10^{15}	拍它(peta)	拍	P	10^{-2}	厘(centi)	厘	c
10^{12}	太拉(téra)	太	T	10^{-3}	毫(milli)	毫	m
10^9	吉咖(gi ga)	吉	G	10^{-6}	微(micro)	微	μ
10^6	兆(mega)	兆	M	10^{-9}	纳诺(nano)	纳	n
10^3	千(kilo)	千	k	10^{-12}	皮可(pico)	皮	p
10^2	百(hecto)	百	h	10^{-15}	飞母托(femto)	飞	f
10^1	十(déca)	十	da	10^{-18}	阿托(atto)	阿	a

第一章 绪 论

第一节 流体的定义和特征

通常说能流动的物质为流体。从力学的特征讲，流体是一种受任何微小剪切力作用时都能连续变形的物质。只要这种力继续作用，即使力的大小没有变化，流体仍将继续变形（流动）；只有当外力停止作用时，变形才会停止。固体则不同，当受到剪切力作用时，固体仅产生一定程度的变形，只要作用力保持不变，固体的变形也就不再变化。由此可见，流体与固体不同，流体具有容易变形（流动）的特征，这就是流体的流动性。

流体按其集态的不同又可分为液体和气体。气体是比液体更易变形和流动的物质，因为气体的分子分布比液体要稀疏得多。在相同的外界条件下，气体分子与液体分子相比，大小并无显著差异，但气体所占的体积可以达到相同质量液体体积的约 10^3 倍。可见，气体的分子距很大（与约为 2.5×10^{-10} m 的分子直径相比），分子间的吸引力是微不足道的。因而，气体的分子除去跟器壁和自身相互碰撞外，可以自由运动，故气体极易变形和流动，而且总是充满它能够达到的全部空间。液体的分子距较小，分子间的吸引力较大，在周围分子的作用下，液体分子能够作没有一定方向和没有固定周期的无规则振动，同时也能在其他分子间移动，但不能像气体分子那样自由运动，所以，液体的流动性不如气体。此外，一定质量的液体具有一定的体积，并取容器的形状，但不像气体那样能够充满全部空间。当液体和气体接触时便会出现液体和气体间的交界面，这种交界面称为液体的自由表面。

第二节 流体作为连续介质的假设

众所周知，任何流体都是由无数分子组成的，分子与分子间有空隙，这就是说，从微观角度看，流体并不是连续分布的物质。但是，流体力学并不研究微观的分子运动，而只研究流体的宏观机械运动。在研究流体的宏观运动中，所取的最小的流体微元是体积为无穷小的流体微团（或称流体质点）。流体微团虽小，但却包含着为数甚多的分子。在工程上， 1 mm^3 是很小的体积，但它在标准状态（ 0°C ， 101325 Pa ）下所包含的气体分子的数目约有 2.7×10^{16} 个，而包含的水分子的数目约有 3.4×10^{19} 个，可见，流体分子及其间的空隙都是极其微小的。在研究流体运动时，只要所取的流体微团包含有足够多的分子，使各物理量的统计平均值有意义，就可以不去研究无数分子的瞬时状态（这是分子动力学的研究内容），而只研究描述流体运动的某些宏观属性（例如密度、速度、压强、温度、粘度、内能等）。这就是说，可以不去考虑分子间存在的空隙，而把流体视为由无数连续分布的流体微团所组成的连续介质，这就是流体的连续介质假设。

既然在流体力学中把流体作为连续介质来处理，那么表征流体属性的密度、速度、压强、温度等物理量一般在空间也应该是连续分布的。因为，如果流体内某点（即该点的流体微团）的属性发生了变化，则分子运动所产生的扩散作用或流体微团紊乱运动所进行的质量、动量和热量交换，必然引起它周围流体的同一属性也发生变化，而这种变化在空间上和时间上必然是逐渐地连续地进行的。当然，例外的情况也有，例如超声速气流中出现激波时，激波前后的流体参数将发生突变，这将在可压缩流体的流动中加以讨论。由此可以认为：除个别情况外，对于流体的连续流动，表征流体属性的各种物理量应该是空间和时间的单值连续可微函数，这样就有可能利用微分方程等数学工具去研究流体的平衡和运动的规律了。

顺便提及，把流体作为连续介质来处理，对于大部分工程技术问题都是正确的，但对于某些特殊问题则是不适用的，例如，当分子的自由行程和所涉及的最小有效尺寸可以相比拟时（如火箭在高空非常稀薄的气体中飞行以及高真空技术等），必须舍弃宏观的连续介质的研究方法，而代之以微观的分子动力论研究方法。

第三节 作用在流体上的力 表面力 质量力

为了研究流体的宏观运动，可先分析一下作用在处于运动状态的流体上的力。这些力分为两类：表面力和质量力。

一、表面力

表面力即作用在所取分离体表面上的力。这种力通常指的是分离体以外的流体通过接触面作用在分离体上的力。

如果在流动的实际流体中任取一面积为 V 、表面积为 A 的流体作为分离体，则分离体以外的流体通过接触面必定对分离体以内的流体有作用力。如图 1-1 所示，在分离体表面的 b 点取一微小面积 δA ，作用在它上面的表面力为 $\delta \vec{F}$ 。一般情况下， $\delta \vec{F}$ 可以分解为沿法线方向 \vec{n} 的法向力 $\delta \vec{F}_n$ 和沿切线方向 $\vec{\tau}$ 的切向力 $\delta \vec{F}_\tau$ 。以微小面积 δA 除表面力并取极限，便可求得作用在 b 点单位面积上的表面力：

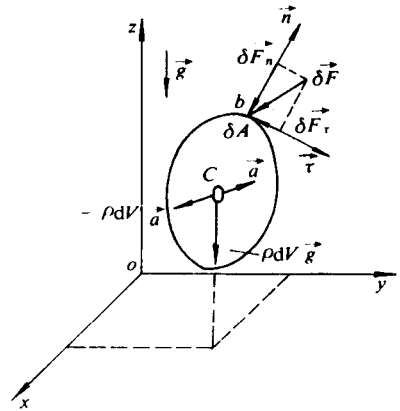


图 1-1 作用在流体上的表面力和质量力

$$\vec{p}_n = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \vec{F}}{\delta A} \quad (1-1)$$

\vec{p}_n 称为应力。通常 \vec{p}_n 与 \vec{n} 的方位不一致，它的大小不仅与 b 点的位置有关，而且还与作用面的方位和时间 t 有关，即 $\vec{p}_n = f(x, y, z, n, t)$ 。作用在 b 点单位面积上的法向力和切向力分别为

$$\vec{p}_{nn} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \vec{F}_n}{\delta A} = \frac{d\vec{F}_n}{dA} \quad (1-2)$$

$$\vec{p}_{nr} = \vec{\tau} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \vec{F}_r}{\delta A} = \frac{d\vec{F}_r}{dA} \quad (1-3)$$

它们分别称为法向应力和切向应力，是研究流体流动时经常遇到的两种表面力。

如前所述，在液体与异相物质接触的自由表面上还有表面张力，它是一种特殊类型的表面力，它不是接触面以外物质的作用结果，而恰恰是由液体内的分子对处于表面层的分子的吸引而产生的。

二、质量力（体积力）

质量力即某种力场作用在流体的全部质点（全部体积）上的力，是和流体的质量成正比的力，例如，重力场中地球对流体全部质点的引力作用所产生的重力，磁场和电力场对磁性物质和带电物质所产生的磁力和电动力等。如图 1-1 所示，在分离体内的 C 点取一微元体 dV ，如微元体的平均密度用 ρ 表示，则重力场作用在它上面的质量力可表示为 $\rho dV \vec{g}$ 。对所有其它微元体均可这样表示。

当应用达朗伯（J. Le. R. D' Alembert）原理去研究流体的加速运动时，虚加在流体质点上的惯性力也属于质量力。这种力，在直线加速运动中只有沿直线的惯性力；在一般曲线运动中则有切向惯性力和离心惯性力；在相对运动中，当牵连运动为转动时，还可能有哥氏惯性力。如图 1-1 所示，若微元体的平均绝对加速度为 \vec{a} 时，则虚加在微元体上的惯性力可表示为 $-\rho dV \vec{a}$ 。对所有其它微元体均可这样表示。

如果用 \vec{f} 表示作用在单位质量流体上的质量力，用 f_x 、 f_y 、 f_z 表示作用在单位质量流体上的质量力沿直角坐标轴的分量，则

$$\vec{f} = f_x \vec{i} + f_y \vec{j} + f_z \vec{k}$$

在研究流体的宏观运动时，最常遇到的流体属性是流体的压强、密度和粘度。不论是在各种管道的流动计算中，还是在绕过物体的流动计算中，它们都是要用到的主要物理量。在研究深水作业、水击现象和高速气流的流动时，必须考虑流体可压缩的属性，即流体的压缩性与膨胀性。在液体与气体及液体与固体之间有交界面时，如液滴的形成、小股液体射流以及毛细管中的毛细现象，液体的表面性质必须加以考虑。在气蚀等现象中还会用到饱和蒸汽压强，在可压缩流体的流动中还会用到内能、熵等，由于这些物理量在热力学中已经作了较详细的讨论，这里不再赘述。下面将分别讨论以上经常遇到的一些流体属性。

第四节 流体的密度

一、流体的密度

流体的密度是流体的重要属性之一，它表征流体在空间某点质量的密集程度。如流体中围绕着某点的体积为 δV ，其中流体的质量为 δm ，则比值 $\delta m / \delta V$ 为体积 δV 内流体的平均密度。令 $\delta V \rightarrow 0$ 而取该比值的极限，便可得到该点处的流体密度，即

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-4)$$

ρ 表示流体单位体积内所具有的质量，单位为 kg/m^3 。

必须指出，正如在流体的连续介质假设中所讨论的那样，这里数学上的 $\delta V \rightarrow 0$ ，从物理上应理解为体积缩小为无穷小的流体微团，它的体积同被考察的流体体积相比是完全可以忽略不计的；但它必须包含足够多的分子，而不失去把流体当作连续介质来处理的基础。以后遇到的类似情况都应该这样去理解。

假如流体是均匀的流体，显然流体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-4a)$$

式中 m ——流体的质量 (kg)；

V ——流体的体积 (m^3)。

表1-1列出了在标准大气压下几种常用流体的密度，表1-2列出了在标准大气压和不同温度下的水、空气和水银的密度。

表 1-1 常用流体的密度

流 体 名 称	温 度 (°C)	密 度 (kg/m ³)	备 注
蒸 馏 水	4	1000	
海 水	15	1020~1030	
普通汽油	15	700~750	
石 油	15	880~890	
润 滑 油	15	890~920	
酒 精	15	790~800	
水 银	0	13600	
熔化生铁	1200	7000	
空 气	0	1.293	
氧	0	1.429	
氮	0	1.251	
氢	0	0.0899	
一氧化碳	0	1.250	
二氧化碳	0	1.976	
二氧化硫	0	2.927	
水 蒸 气	0	0.804	为便于计算而推算到 0 °C

表 1-2 不同温度下的水、空气和水银的密度 (kg/m³)

流体名称	温 度 (°C)						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空 气	1.293	1.247	1.205	1.128	1.060	1.000	0.9465
水 银	13600	13570	13550	13500	13450	13400	13350

二、流体的相对密度

流体的相对密度通常是指某流体的密度与4℃时水的密度的比值，用 d 表示，即

$$d = \rho_f / \rho_w \quad (1-5)$$

式中 ρ_f ——流体的密度 (kg/m^3)；

ρ_w ——4℃时水的密度 (kg/m^3)。

三、流体的比容 (比体积)

流体密度的倒数称为比容 (比体积)，即单位质量的流体所占有的体积，用 v 表示，即

$$v = 1/\rho \quad (1-6)$$

它的单位为 m^3/kg 。

四、混合气体的密度

混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数计算，计算式如下：

$$\rho = \rho_1 a_1 + \rho_2 a_2 + \cdots + \rho_n a_n = \sum_{i=1}^n \rho_i a_i \quad (1-7)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——混合气体中各组分气体的密度；

a_1, a_2, \cdots, a_n ——混合气体中各组分气体所占的体积百分数。

【例 1-1】 已经测得锅炉烟气各组分气体的体积百分数分别为： $a_{\text{CO}_2} = 13.6\%$ ， $a_{\text{SO}_2} = 0.4\%$ ， $a_{\text{O}_2} = 4.2\%$ ， $a_{\text{N}_2} = 75.6\%$ ， $a_{\text{H}_2\text{O}} = 6.2\%$ ，试求烟气的密度。

【解】 由表1-1查得标准状态下的 $\rho_{\text{CO}_2} = 1.976\text{kg}/\text{m}^3$ ， $\rho_{\text{SO}_2} = 2.927\text{kg}/\text{m}^3$ ， $\rho_{\text{O}_2} = 1.429\text{kg}/\text{m}^3$ ， $\rho_{\text{N}_2} = 1.251\text{kg}/\text{m}^3$ ， $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.804\text{kg}/\text{m}^3$ 。将已知数据代入式 (1-7)，得烟气在标准状态下的密度：

$$\begin{aligned} \rho &= 1.976 \times 0.136 + 2.927 \times 0.004 + 1.429 \times 0.042 + 1.251 \times 0.756 + 0.804 \times 0.062 \\ &= 1.336 (\text{kg}/\text{m}^3) \end{aligned}$$

第五节 流体的压缩性和膨胀性

随着压强的增高，体积便缩小；随着温度的升高，体积便膨胀，这是所有流体的共同属性，即流体的压缩性和膨胀性。

一、流体的压缩性和膨胀性

流体的压缩性用单位压强所引起的体积变化率表示，称为压缩系数，以 κ 表示之。当温度不变时，压缩系数由下式确定：

$$\kappa = -\frac{\delta V/V}{\delta p} = -\frac{\delta V}{V \delta p} \quad (1-8)$$

式中 δp 为压强的增量， $\delta V/V$ 为流体相应的体积变化率。由于压强增大，体积缩小， δp 与 δV 异号，故在等式的右侧加一负号。 κ 的单位为 m^2/N 。式 (1-8)表明，对于同样的压强增量， κ 值大的流体，其体积变化率大，较易压缩； κ 值小的流体，其体积变化率小，较难压缩。

压缩系数的倒数为体积模量，用 K 表示

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

工程上常用体积模量去衡量流体压缩性的大小。显然， K 值大的流体的压缩性小， K 值小的流体的压缩性大。 K 的单位与压强相同，为 Pa。

在一定温度下水的体积模量与压强的关系列于表 1-3。由表中可见，水的 K 值很大，即它的压缩性很小。通常在工程计算中近似地取水的 $K = 2.0 \text{ GPa}$ 。

表 1-3 水的体积模量 (GPa)

温 度 (°C)	压 强 (MPa)				
	0.490	0.981	1.961	3.923	7.845
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
5	1.89	1.91	1.93	1.97	2.03
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
15	1.93	1.96	1.99	2.05	2.13
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

流体的膨胀性用单位温升所引起的体积变化率表示，称为体胀系数，以 α_v 表示之。当压强不变时，体胀系数由下式确定：

$$\alpha_v = \frac{\delta V/V}{\delta T} = \frac{\delta V}{V\delta T} \quad (1-10)$$

式中， δT (或 δt) 为温度的增量， $\delta V/V$ 仍为流体相应的体积变化率。由于温度升高，体积膨胀，故 δT 与 δV 同号。 α_v 的单位为 $1/\text{K}$ 或 $1/^\circ\text{C}$ 。流体的体胀系数在工程计算中有时也会用到。在一定压强作用下水的体胀系数与温度的关系列于表 1-4。

表 1-4 水的体胀系数 α_v ($1/^\circ\text{C}$)

压 强 (MPa)	温 度 (°C)				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.0981	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
9.807	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
19.61	72×10^{-6}	183×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	
49.03	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
88.26	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

由表 1-4 可以看出，当温度低于 50°C 时，水的体胀系数 α_v 随压强的增加而增大；当温度高于 50°C 时， α_v 却随压强的增加而减小。

一般情况下，需要同时考虑压强和温度对气体体积和密度变化的影响。完全气体^①的

① 热力学中的理想气体在这里称为完全气体，以便与无粘性的理想流体相区分。