

工程流体力学

祁德庆 编著

同济大学出版社

内容提要

本书是根据高等学校建筑结构类专业的工程流体力学课程教学基本要求编写的,着重阐明基本概念以及流体力学在工程上的应用。内容力求深入浅出,适合读者自学,每章后附有复习思考题和习题,以便读者巩固基本概念和运用基本方程解决一些实际问题。

全书共分十章,内容包括:绪论,流体静力学,流体运动学,理想流体动力学,相似理论,圆管中的流动,旋涡基本理论,平面势流理论,粘性流体动力学和波浪理论。

此书可作为建筑结构类专业、环境类专业、海洋工程等专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

责任编辑 孟玉恩

封面设计 王肖生

工程流体力学

祁德庆 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

苏州市望电印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14.5 字数 370 千字

1995 年 6 月第 1 版 2002 年 2 月第 4 次印刷

印数 7 001 - 10 000 定价:16.50 元

ISBN 7 - 5608 - 1535 - 9/0·130

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向本社出版科联系调换

前 言

本书是为高等学校建筑学专业、环境类专业编写的工程流体力学教材，是多年来作者在给土建、工业与民用建筑专业教学中所编写的工程流体力学讲义的基础上，根据作者的教学经验以及吸收国内外有关教材的优点修改编写而成的。

工程流体力学是研究流体平衡和运动的力学规律及其在工程中应用的学科。而建筑结构、环境类的工程建设与水、气方面的理论分析和计算息息相关。根据现代科学技术的发展，国内外的教学经验，在工业与民用建筑专业中开设工程流体力学这门课，对于拓宽专业面、更好地学习掌握专业知识是很有必要的。特别是在分析与计算柔性结构、高耸结构与流体相互作用方面打好扎实的理论基础。

本书试图根据内容，建立一个既符合学科系统性又符合教学和认识规律的体系，来阐述工程流体力学的基础概念、基本原理和基本方法，并考虑到建筑结构工程专业对工程流体力学知识的要求，即流体与结构相互作用的力学原理与计算方法。全书共分十章，主要内容有绪论，流体静力学，流体运动学，理想流体动力学，相似理论，圆管中的流动，旋涡基本理论，平面势流理论，粘性流体动力学基础，波浪理论初步。其中第一章至第九章是教学的主要内容，第五章“相似理论”是指导工程实验的一种分析问题的方法，具有相对独立性。对于工程师来说，掌握这个简单的有效手段将是有益的。第十章“波浪理论初步”是专为海洋结构工程专业而写的，可供读者进一步学习时参考。

课程的基本要求是：学生在学习高等数学和理论力学课程的基础上，掌握工程流体力学的基本概念、基本原理和基本方法。学会分析计算流体的运动规律、压力分布以及变化规律。掌握流体对建筑物的作用力（矩）的计算方法及其产生的原因和影响因素。分析建筑物在流体环境荷载作用下的结构设计，了解一般工程试验理论和管路计算方法。

本书在叙述方法上，力求由浅入深，注重于讲清基本概念、原理和工程应用要点。为了巩固和加深对基本理论的理解，提高计算技能以及培养分析问题、解决问题的能力，各章均配有系统性的复习思考题、例题和习题。

本书在编写过程中，得到上海交通大学朱超教授的热情指导和帮助，还有同济大学学报编辑部的孟玉恩同志的认真和过细的工作，极大地减少了书中的错误和疏漏之处，在此深表谢意。

欢迎来自读者和同行专家们的批评指教。

祁德庆

1994年10月于上海同济大学

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 工程流体力学研究的内容和方法	1
§ 1-2 流体力学发展简史	3
§ 1-3 单位制简介	4
§ 1-4 流体的宏观模型及物理性质	5
第二章 流体静力学	17
§ 2-1 流体静压强及其特性	17
§ 2-2 静力学基本方程及其应用	18
§ 2-3 静止流体对平板的作用力	26
§ 2-4 静止流体对柱面的作用力	28
§ 2-5 静止流体对曲面的作用力——浮力	33
§ 2-6 浮体和潜体的稳定性	35
§ 2-7 相对平衡	37
第三章 流体运动学	45
§ 3-1 研究流体运动的两种方法	45
§ 3-2 速度场的几何表示	50
§ 3-3 连续性方程	55
§ 3-4 曲线坐标系的连续方程	59
§ 3-5 流体微团运动分析	63
§ 3-6 流体的无旋运动概念	69
第四章 理想流体动力学	81
§ 4-1 欧拉运动方程	81
§ 4-2 伯努利方程	87
§ 4-3 拉格朗日方程及其物理意义	90
§ 4-4 伯努利方程的应用	96
§ 4-5 动量定律及动量矩定律	101
§ 4-6 动量及动量矩定律的应用	104
第五章 相似理论	114
§ 5-1 相似的概念	114
§ 5-2 量纲分析法和 π 定理	117
§ 5-3 相似准数	119
§ 5-4 模型试验	124
第六章 圆管中的流动	130
§ 6-1 流动的两种状态	130
§ 6-2 湍流的随机性	131

§ 6-3	光滑圆管中的层流流动	133
§ 6-4	管路计算的概念	136
第七章	旋涡的基本理论	148
§ 7-1	涡量场	148
§ 7-2	开尔文速度环量定理	151
§ 7-3	亥姆霍兹定理	152
§ 7-4	旋涡的诱导速度	154
§ 7-5	二元旋涡的速度分布和压力分布	156
§ 7-6	卡门涡街	158
第八章	平面势流理论	165
§ 8-1	平面势流问题的提出	165
§ 8-2	势函数、流函数与复势的简单性质	167
§ 8-3	复变函数的概念	168
§ 8-4	简单的解析函数及其叠加	170
§ 8-5	绕圆柱体无环流流动	176
§ 8-6	绕圆柱体有环流流动	181
§ 8-7	作用力和作用力矩的卜拉休斯(Blasius)公式	185
§ 8-8	附加惯性力和附加质量	188
第九章	粘性流体动力学基础	199
§ 9-1	粘性流体的表面应力	199
§ 9-2	主应力、粘性流体压力	201
§ 9-3	用应力表示的运动微分方程	203
§ 9-4	广义的牛顿内摩擦定律	204
§ 9-5	纳维尔-斯托克斯方程	207
§ 9-6	二元平板间粘性流体的流动	209
第十章	波浪理论初步	213
§ 10-1	波浪的概念及其数学提法	213
§ 10-2	长峰规则波	216
§ 10-3	简单波的叠加	220
§ 10-4	平面余弦波的能量	224

第一章 绪论

§ 1-1 工程流体力学研究的内容和方法

流体力学是研究流体平衡和运动规律的一门科学，是力学的一个重要分支。

流体力学的基本任务在于建立描述流体运动的基本方程，确定流体经各种通道及绕流不同物体时速度、压强的分布规律，探求能量转换和各种损失计算方法，并解决流体与固体之间的相互作用的问题。

流体力学按其研究内容侧重方面的不同，分为理论流体力学（通称流体力学）和应用流体力学（通称工程流体力学）。前者主要采用严密的数学推理方法，力求准确性和严密性。后者则侧重于解决工程实际中出现的问题，而不去追求数学上的严密性。当然，两种方法都须借助于实验研究，得出经验或半经验的公式。

流体力学研究的对象包括液体和气体，它们统称为流体。液体和气体各有特性，而且具有共性。液体的特性是容积一定，存在一个自由液面（水表面）。气体的特性是没有固定容积，不存在自由液面，却易于压缩。

在不考虑自由液面和压缩性的影响时，液体和气体就具有共性了。也就是在讨论深水的问题时，距离水面较远，水面的影响可不予考虑。在研究低速流体的空气时，可不考虑压缩性所引起的误差。在这两种情况下，水和空气将遵守同一的客观规律。因此空气中的气球和深水下的水雷，空气中的飞船和水下的水滴形潜艇，低速飞机的机翼和水翼艇的深潜水翼等等，它们的受力情况将是一样的。

根据物质的分子构造理论，自然界中的所有物质主要存在于固体、液体、气体或这些形式的混合状态之中，它们具有稳定的物理和化学性质，从外观上看，液体和气体很不相同，但是从某些动力性能方面来看，液体和气体是相似的。通常把液体和气体统称为流体，它与固体相对应。固体是指那些能对剪切变形提供阻力的物质，像石块、木材等。与此相反，流体对剪切变形不能提供任何阻力，像空气、水等。如果一杯水反倒在平板上，在重力的作用下将连续不断地发生变形，最终达到一个新的水平面，或在表面张力作用下使水面保持一个最小的高度。在同样条件下，固体只能产生有限的变形。因此我们可以说，流体，不管是液体还是气体，在无论多么小的剪应力（切向）作用下都将发生连续不断的变形；与此相反，固体的变形与作用的应力成比例，经一段时间变形后将达到平衡，而不会无限增加。流体，包括气体和液体，和固体的这个差别是明显的，正因为如此，可以把流体作为独立的对象进行研究。

在技术科学中，力学是研究机械运动以及与其它运动形态相互作用的科学。流体力学是应用力学中的一个分支，它是以理论分析、数值计算及实验研究的方法，来研究流体处于平衡、运动及流体与固体相互作用的力学规律，以及这些规律在实际工程中的应用。流体力学包括液体力学和气体力学两部分。通常以水作为液体的代表，因此液体力学又称为水动力学。水动力学的主要特点是认为所研究的流体是不可压缩的，这既适用于液体，也适用于低速气流。所以，水动力学是研究液体和低速气的运动规律的一门学科。在气体力

学中则要考虑气体的压缩性。

空气、水、油等都属于流体。因此，流体是人类生活和生产中经常遇到的物质形式，许多科学技术部门都和流体力学有关。例如海洋土建工程、造船、航空、机械、石油、水利、冶金、化工、生物等学科。事实上，目前很难找到与流体力学无关的专业和学科。

工程流体力学主要讲述流体力学的基本概念、基本理论及其在工程实际中的应用。

近十几年来，随着我国经济突飞猛进的发展，高层建筑建得越来越高，柔度系数越来越大，斜拉桥，吊桥的大量建设都带来了一个振动控制问题，其中就涉及到流体与固体相互作用的力学问题。因此，流体力学也就成为结构工程师必备的理论基础。

随着近十几年来中国海洋石油的开发与发展以及海洋资源的综合开发，为土木工程开辟了新的领域，在设计建造这类建筑物时必须要考虑流体环境对结构物的作用力、动力响应以及破坏等。特别是在土建、港口工程中，流体动力的精确预估对平台、港口建筑物的结构设计、强度校核和安全性都具有相当重要的意义。例如：海洋平台在水中的浮性和抵抗外界扰动的稳性，以及仓室破损后的抗沉性等都与流体静力学密切相关。水流对桥梁桥墩的水动力计算，海上建筑物在外界环境条件下的运动情况及对风浪的抵抗能力，也要根据流体力学原理进行预报或模型试验。因此，流体力学是科技人员从事设计计算海上（海岸）建筑物在环境条件下的运动情况，波浪对结构物响应、波浪荷载计算的理论基础。

流体力学是研究流体平衡和运动的规律，特别是研究水（或空气）和建筑物之间作用和反作用这一对特有的矛盾和科学。

流体力学的中心问题有两个：

(1) 研究流体中速度和压力的分布以及变化的规律；

(2) 研究流体对物体的作用力和力矩。研究它们产生的原因、计算方法，以及影响它们大小的因素。

流体力学也和理论力学一样可以分为：流体运动学（用几何观点来研究流体的运动，而不牵涉力的问题），流体动力学（用力学的观点来研究流体的运动，研究力和运动之间的关系，特别是研究压力和速度之间的关系）和流体静力学（流体动力学的特例，研究流体平衡时压力的分布）。

流体力学的研究方法有实验方法和分析方法两种。流体力学有它本身一些特殊的分析方法，例如微分体积法、速度势法、保角变换法……，根据这些方法运用数学工具可以获得一些重要的结论。另外还可以采用实验方法来研究流体力学的问题，可以通过具体流动图形的观察和计算，或速度场和压力场的实际测量来归纳和掌握流体的运动规律，从而发现新的理论。这两种方法是相辅相成、不可偏废的。实践是检验真理的唯一标准，分析的结果需要经过实验来验证，而实验的进行又需要用分析所得到的理论来指导。所以这两种方法必须很好结合才便于解决工程流体力学的问题。

近代电子计算机的使用，以及物理学的新发展对这两种方法都有所促进。特别是由于有限元素法、差分法等等的引入，使得分析方法获得了新的活力，因而产生了更为深远的影响。

§ 1-2 流体力学发展简史

流体力学是物理学中最古老的分支之一。流体力学的发展与数学和普通力学的发展密切相关，它是人类长期与自然界进行斗争的结果，是人类集体创造的财富。造船、海洋、航空等工业促进了水动力学的产生和发展。以下只介绍和本教材内容有关的流体力学发展的主要阶段。

从古代起人们就开始注意到固体与它周围介质——空气或水之间相互作用力这一水动力学中的实质性问题。要特别指出的是阿基米德(Archimedes, 公元前 287—前 212 年)的功绩，他是液体平衡理论、特别是物体浮力理论的创立者。他的著名定律直到现在还是液体静力学的基础。

流体力学的主要发展是从牛顿(Newton, 1642—1727 年)时代开始的。1687 年，牛顿在他的名著《原理》中讨论了流体的阻力、波浪运动等内容，已经有了与近代概念很接近的论述，它使流体力学开始变成力学中一个独立分支。

流体动力学的名字是伯努利(Daniel Bernoulli, 1700—1783 年)于 1738 年在他的名著《流体动力学》一书中首先引用的。在该书中提出了著名的伯努利方程，即在流体的压力、高度和运动速度之间建立了普遍关系，直到现在仍是流体力学中一个主要定律。

欧拉(Leonard Euler, 1707—1783 年)于 1755 在他的著作《流体运动的一般原理》中提出了理想流体概念，并建立了理想流体的基本方程和连续方程，同时提出了速度势的概念。

拉格朗日(Lagrange, 1736—1813)总结了前人的工作，进一步发展了流体力学的解析方法。他对速度势的存在性做了较严格的证明，并于 1781 年首先引进了流函数的概念。至此，对于平面问题，如果满足拉普拉斯方程的速度势和流函数分别存在，就可以把流体力学的问题转化为寻求一个解析的复变函数，即复势的纯数学问题。

达朗倍尔(D'Alembert, 1717—1783 年)把现在称之为达朗倍尔原理用到流体力学中来，于 1744 年提出了著名的达朗倍尔疑题，即在理想流体假定下，物体在水中匀速运动时不受阻力作用，说明了理想流体假定的局限性。

与此同时，理想流体运动力学中重要分支——波浪理论也得到了发展。牛顿、拉格朗日、柯希(Cauchy)、拉普拉斯(Laplace)、波阿松(Poisson)、艾瑞(Airy)、斯托克斯(Stokes)、密切尔(Micheil)等人对重流体表面上的波浪理论都做出了贡献。

19 世纪后半期出现了流体的旋涡运动理论，应该把亥姆霍兹(Helmholtz)认作是这一理论的创始人。他于 1858 年指出了理想流体中旋涡的许多基本性质以及旋涡运动理论，并于 1878 年提出了脱体绕流理论。

柯希早在 1815 年和斯托克斯在 1847 年就已提出了旋涡概念的解释，汤姆孙(Thomson, 1856—1940)也对旋涡理论做了许多工作。

流体力学的经典理论包括理想流体中的两种极端情况：一种是只考虑惯性而忽略粘性的影响，即势流理论；另一种是只考虑粘性而忽略惯性的影响，即蠕流理论。从以上介绍看出，到 19 世纪末，水动力学的经典理论已接近完整了。理想流体的概念是为了便于数学处理而提出的，但要认识到，理想流体仅是想象中的流体模型，在自然界是不存在的。

随着水力和水工机械的发展，很多学者开始研究和观察流体本身的流动特点，从而开

始建立流体力学的另一个分支，即粘性流体力学。

纳维 (Navier, 1785—1836) 年在 1826 年和斯托克斯在 1845 年先后独立发表了接近现代形式的粘性流体运动理论。关于粘性流体在小直径管中流动的详细试验工作是由伯赛依尔 (Poiseuille) 在 1840 年和雷诺 (Reynolds, 1842—1919 年) 在 1876 年先后完成的，并发现了流动中两种不同的流态——层流和湍流。

普兰特 (Prandtl, 1875—1953 年) 在 1904 年提出了边界层理论。他假定流体在接近固体边界很薄的一层内 (边界层内) 存在粘性影响，在边界之外是理想流体流动。这一理论很好地解释了阻力的产生，并把势流理论和粘性流体理论两者建立了联系。随着边界理论的完善和近代实验技术的发展，它已成为了独立的流体力学分支。

现代机翼理论的发展与航空科学的发展密切相关。1878 年雷利 (Rayleigh, 1842—1919 年) 研究了圆柱体绕流问题，并且解释了弹道学中的马格纽斯 (Magnus) 效应。兰切斯特 (Lanchester, 1878—1946 年)、库塔 (Kutta, 1867—1944 年) 和茹考夫斯基 (Myhbckuu, 1847—1921 年) 分别独立地建立了机翼升力和空气围绕机翼的环行流动之间的关系。普兰特于 1918 年首先提出了升力线理论，使机翼产生的升力可以用数学的方法来处理。在此之后，随着航空事业的发展，与航空密切相关的空气动力学也得到了飞速发展。

古典流体力学在研究流体平衡和运动规律时一般是从严格的数学推理出发，追求问题的严密性和精确性。由于实际流体运动现象十分复杂，许多工程问题很难用数学解析方法来表达和求解。近年来，随着计算机的发展，在流体力学的各个分支中数值计算方法都得到了迅速发展，许多过去不能解决的复杂问题，都可以数值求解，形成了计算流体力学这一重要的学科。

§ 1-3 单位制简介

根据国务院发布的《关于在我国统一法定计量单位的命令》，本书全部采用法定计量单位，即“SI”制。

目前，在国内现有的流体力学、水动力学和空气动力学等教材中，并存着各种不同的单位制。为便于读者参阅有关的参考文献和书籍，现将并存的几种单位制简介如表 1-1 所示。

表 1-1 公制基本单位

单位制		长度		质量		力(重力)		时间		备注
		名称	符号	名称	符号	名称	符号	名称	符号	
公制	绝对制	厘米	cm	克	g	达因	dyn	秒	s	CGS 制
		米	m	千克 (公斤)	kg	牛顿	N	秒	s	MKS 制
	工程制	米	m	质量工程单位	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$	公斤力	kgf	秒	s	MKFS 制

将法定单位，即 (SI) 制的基本单位和辅助单位列于表 1-2 中。

表 1-2 法定单位制(SI)的基本单位和辅助单位

序号	量的名称	单位名称	单位符号	
			中文	英文
基本单位				
1	长度	米	米	m
2	质量	千克	千克	kg
3	时间	秒	秒	s
4	电流	安培	安	A
5	热力学温度	开尔文	开	K
6	物质的量	摩尔	摩尔	mol
7	光亮度	坎[德拉]/每平方米	坎/平方米	cd/m ²
辅 助 单 位				
1	平面角	弧度	弧度	rad
2	立体角	球面度	球面度	sr

目前在工程计算中, 仍存在几种单位制。作为一个工程技术人员, 应熟练地掌握各种单位制之间的换算关系。为查阅方便起见, 现将我国目前广泛采用的公制工程制和法定单位制之间的各参数换算关系列于表 1-3 中。

表 1-3 SI 制与公制工程制单位换算表

物理量	SI 制		公制工程制		换算关系
	名称	符号	名称	符号	
力	牛顿	N	公斤力	kgf	1kgf = 9.81N
压强、应力	帕斯卡	Pa		kgf/cm ²	1kgf/cm ² = 9.81 × 10 ⁴ Pa
密度		kg/m ³		kgf·s ² /m ⁴	1kgf·s ² /m ⁴ = 9.81kg/m ³
粘度	帕·秒	Pa·S		kgf·s/m ²	1kgf·s/m ² = 9.81Pa·s
能; 功	焦耳	J	公斤力·米	kgf·m	1kgf·m = 9.81J
功率	瓦	W		kgf·m/s	1kgf·m/s = 9.81W

§ 1-4 流体的宏观模型及物理性质

在讨论流体力学的主要内容之前, 我们首先对本学科所用到的一些术语和假定, 以及流体的宏观物理性质给出明确的定义和说明。

流体力学中的系统是指其边界没有质量交换的任意空间体积。像固体一样, 在系统中可以有动量和能量的变化, 而没有质量的变化。系统可以是静止的, 也可以是运动的。在运动的系统中, 其边界随系统一起运动, 但系统中质量是不变的, 系统的边界可以是真实的或假想的表面。

与系统不同, 流体力学中的控制体积是指其边界存在质量、动量和能量交换的任意空间体积。控制体积的边界, 称为控制面, 它总是封闭的表面。相对运动流体而言, 控制

体积是静止的，流体一边流进控制体积，而在另一边流出。

系统和控制体积这两个概念在流体力学的分析中是很重要的，因为自然界的一些基本定律，如质量守恒定律、牛顿第二定律和能量守恒定律等都是对系统或控制体积写出的。

一、流体连续介质假设

从分子物理学的观点来看，流体和一切物质一样是由大量做不规则运动的分子组成的，分子和分子之间存在空隙。在标准条件下， 1mm^3 空气含有 2.7×10^{16} 个分子，分子之间的距离为 10^{-6}cm ，在 1s 内，分子之间要碰撞 10^{26} 次。对于流体， 1mm^3 含有 3×10^{21} 个左右的分子，分子之间的距离是 10^{-7}cm 。由此可见，流体分子和分子之间的距离都是极其微小的。

在我们所研究的流体力学宏观问题中，在流动空间和时间上所采用的一切特征尺度和特征时间都比分子距和分子碰撞时间大的多，我们感兴趣的是大量分子的平均统计特性，而不是个别分子的性能。事实上，个别分子的行为根本不影响大量分子统计平均后的宏观物理量。

根据上述事实，1753 年欧拉 (Euler) 首先采用连续介质作为流体宏观流动模型，即不考虑流体分子的存在，把真实的流体看成是由无限多流体质点组成的稠密而无间隙的连续介质，甚至考虑到流体距离固体边壁接近零的极限情况也认为如此，这个假设叫流体连续介质假设或稠密性假设。这里所谓的流体质点是流体的基本体积元，它的体积相对于流动空间和流体中固体的体积来说小到可以把它近似看成几何上没有体积的一点，同时它相对于分子尺度来说又是足够大的，使包含的大量分子统计平均后能得到稳定的数值。

用通常的测量仪器，像各种传感器、热线风速仪等，可以很容易证明流体性质的连续和光滑的变化，从而表明了连续介质假定的可靠性。当然，各种仪器的测量体积都应选在使测量结果不随体积而变化的范围之内，若测量体积小至仅包含少数分子的程度，那么测量结果将发生统计波动。例如，在 10^{-9}cm^3 的测量体积内，仍包含多于 10^{10} 个空气分子，根据统计理论中的大数定律，在这一体积中的平均性质是与实际分子数无关的，即得到稳定的平均值。

流体连续介质假设是流体力学中第一个带根本性的假设。将真实流体看成为连续介质，意味着流体的一切宏观物理量，如密度、压力、速度等，都可作为时间和空间位置的连续函数，使我们有可能用数学分析来讨论和解决流体力学中的问题。

作为说明，我们下面讨论在给定点上的流体密度的定义。如图 1-1 所示，在连续流体中 $P(x, y, z)$ 的周围，取一微体积 δV ，其中含有微质量 δm 。在这一微体积中流体的平均密度是 $\delta m / \delta V$ 。若 δV 逐渐向 P 点收缩， $\rho = \delta m / \delta V$ 的变化如图 1-2 所示。从图中看出，若 $\delta V < \delta V'$ ，由于 δV 中含的分子太少而使平均密度发生波动，当 $\delta V \leq \delta V'$ 时不能得到 ρ 的确定值。这样， P 点的密度定义为

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V'} \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1-1)$$

它应是 P 点坐标位置和时间的函数，因此可以写成

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (1-2)$$

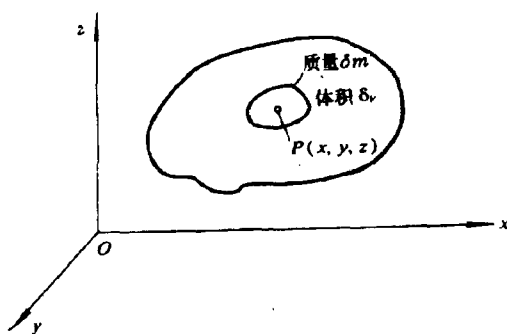


图 1-1 密度定义

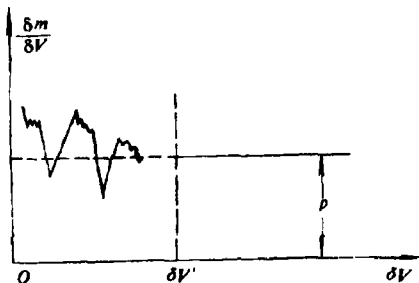


图 1-2 密度变化

流体连续介质假设是相对的，在某些特殊情况下不能应用这个假设。例如，在高真空的真空泵中，分子距和真空泵的尺度是可以比拟的，这时的流动是稀薄气体的“分子流”问题，而不能把气体看成连续介质。再如，在研究高空稀薄气体中飞行的火箭时，空气的分子距很大，它可以和火箭尺度相比拟，因此连续介质假设不再适用了。

表 1-4 中列出了水、空气和水银这三种最常用流体在标准大气压下不同温度时的密度。

表 1-4 不同温度下的水、空气和水银的密度 (kg/m^3)

流体	温度($^{\circ}\text{C}$)							
	0	4	10	20	40	60	80	100
水	999.87	1000	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空气	1.29		1.24	1.20	1.12	1.06	0.99	0.94
水银	13600		13570	13550	13500	13450	13400	13350

在工程估算中，一般认为在常温（指 $0\sim 20^{\circ}\text{C}$ ）、常压（指一个标准大气压左右）下，水的密度取 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，重度取 $9810\text{N}/\text{m}^3$ ；空气的密度取 $1.25\text{kg}/\text{m}^3$ ；水银的相对密度取 13.6。这是几个常用数据，应当记住。

二、流体的易流动性与状态方程

物质的宏观性质与其分子结构及分子间的作用有关，我们首先简单说明一下分子间的作用形式。在两个分子间距离很小时，分子间是相互排斥的，对于简单分子而言，这个距离大约在 10^{-8}cm 左右。当分子间距离较大时，分子间必定产生吸引力，否则气体将不能聚集在一起。图 1-3 表明了分子间作用力与分子间距离之间的关系，其中 d_0 是分子间作用力为零时的距离。

若给出分子质量和流体的密度就可以计算出相邻分子的平均距离。在标准温度和压力下，简单分子的气体分子间的平均距离大约是 $10d_0$ 左右，除了两个分子彼此接近外，它们之间的内聚力是很弱的，分子运动接近自由运动状态。因此气体没有固定的形状和大

小。在标准状态下的液体，分子间距离是 d_0 数量级，这时存在较强的量子型作用力，分子不能自由运动，但没有固定的平衡位置，也不能保持不变的流体形状，但能保持一定的流体体积。固体的情况与流体不同，它们的分子间距离很小，这时存在很强的量子型作用力，分子只能在平衡位置附近做微小的振动。固体具有一定的形状和大小。

从以上分析看出，流体和固体的主要区别在于它们分子间的作用力不同。固体分子间的作用力最强，它能保持一定的体积和形状，并通过变形来抵抗一定数量的拉力、压力和剪切力。流体分子间的作用力较弱，它不能保持固定的形状，在很小剪切力作用下就要发生流动。流体一般不能承受拉力，处于静止下的流体也不能抵抗剪切力，即流体在很小剪切力的作用下将连续不断地变形，直至剪切力消失为止。流体的这个宏观性质称为易流动性。正因为如此，才出现了流体力学这门学科。

流体和固体对外力抵抗能力的差别不是绝对的。有些物质介于两者之间，例如沥青、油漆等物质。

流体力学的主要内容是把力学的普遍定律用于流体介质，但在对流体应用这些定律时常伴随有热力学变化。如果在某系统内流体的能量从一种形式转换到另一种形式，或系统和周围环境具有做功的转换，这时在流体系统内都要发生热力学变化。反之，这些热力学变化也影响物质状态和它们的运动。表述热力学性质间关系的基本方程称为状态方程。对于不同物质，状态方程具有不同的形式。工程上感兴趣的大多数物质状态方程有如下简单的数学形式

$$\rho = f(p, T) \quad (1-3)$$

式中： ρ ——物质的密度；

p ——压力；

T ——绝对温度。

从上式看出，密度 ρ 是压力 p 和绝对温度 T 的函数，一般说来，气体和液体的压力 p 和温度 T 是独立的。

我们首先讨论气体的情况，常温下的空气实验结果表明，在等温过程中压力对密度的比值是常数，这里的压力是指由真空量起的绝对压力。在气体膨胀或压缩过程中，若通过对系统增加或减少热量的方法使气体的温度保持不变，那么绝对压力对密度的比值仍是常数。

对于等压系统而言，实验发现气体的密度和绝对温度的乘积是常数。图 1-4 是等温过程和等压过程的压力 p 和密度 ρ 曲线图。在该图上任意两点，如 1 点和 3 点，都能和等温及等压过程联系起来，即可以把 1 和 3 看成等温过程 1 点和 2 点与等压过程 2 点和 3 点的联合。对于 1 点和 2 点，这时存在关系

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} = \frac{p_3}{\rho_3}$$

对于 2 点和 3 点，则有 $\rho_2 T_2 = \rho_3 T_3 = \rho_1 T_1$

上两式中，因为 $p_2 = p_1$ ， $\rho_2 T_2 = \rho_3 T_3 = \rho_1 T_1$

上两式中，因为 $p_2 = p_1$ ， $T_1 = T_2$ 。若把两式对应相除则得到完全气体的状态方程为：

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} = \frac{p_3}{\rho_3 T_3} = R = \text{常数} \quad (1-4)$$

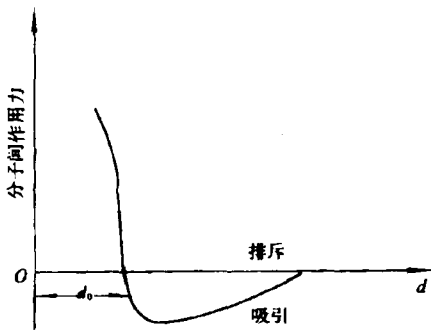


图 1-3 分子间作用力

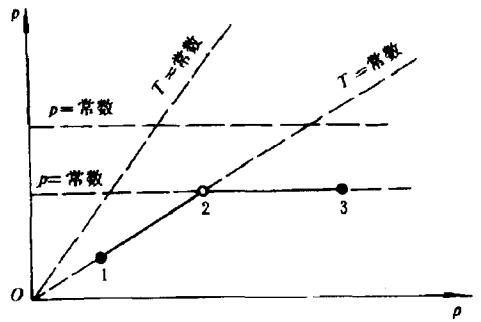


图 1-4 $\rho-p$ 变化图

或者把上式改写一下，则得到 $\rho = p / RT$

式中： p ——绝对压力 (N/m^2)；

T ——绝对温度，即开尔文温度(K)；

R ——气体常数。

不同的气体，有不同的气体常数 $R(N \cdot m / kg \cdot k)$ ，它通常由标准状态下的参数决定，对于空气而言，气体常数为

$$R = 287.33 N \cdot m / kg \cdot k$$

气体常数 R 的物理意义是，在等压条件下 $1kg$ 质量的气体加热 1 度时所做的膨胀功。

一般情况下，流体的密度是压力和温度两个变量的函数，而这两个变量是独立的，这样的流体又称斜压流体。若密度仅与压力有关而与温度无关时，这样的流体称为正压流体，即

$$\rho = f(p) \quad (1-6)$$

三、流体的粘性与理想流体模型

如果流体的各种特性在空间是均匀分布的，流体将处于平衡状态。若流体的某些特性是不均匀的，那么在相邻的流体元之间就要发生力学或热力学性质的交换，交换的结果是使流体趋于平衡状态，即使不均匀性变成光滑。具有不同性质的两个流体元进行交换总是同某一守恒定律相联系，即一部分流体元特性增加，另一部分流体元特性减小，两者在数量上相等，这样的交换叫传输现象，它有三种基本类型，即质量传输、能量传输和动量传输，质量传输在宏观上表现为扩散现象，能量传输表现为热交换现象，而动量传输即表现为粘性现象。

以下从动量传输的角度来讨论流体的一个重要属性——粘性。

假设流场的速度分布是不均匀的，这时各流体层之间产生相对运动。由于分子的不规则运动，当快层中的分子移到慢层中去时，它把多余的动量交给了慢层中的分子，使慢层加快，产生切向的向前拖力。反之，慢层中的分子移到快层中去时，动量交换的结果使快层减慢速度，产生一个切向阻力。因此，在流体中动量交换就形成了内摩擦力或粘性阻

力。由于流体层之间的相互运动，在两层之间产生了内摩擦力以阻止相对运动，流体本身所固有的这一性质，叫流体的粘性。

我们考虑一个简单的剪切流动，它在直角坐标系中的速度分量为 $u(y, 0, 0)$ ，见图 1-5。在距离为 $2\Delta y$ 的位置取两层流体，上一层较快，下一层较慢。较慢的一层力图使快层变慢。因为分子作用只是在很小的距离内存在，所以 Δy 是一个小量。一般各流层间分子动量传输仅与流体的速度分布有关，即取决于速度的局部梯度 du/dy 。对于不太大的 $|du/dy|$ ，假定应力的切向分量与速度梯度 du/dy 成线性关系，这表明

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中： τ_{xy} ——剪应力 [N/m^2];

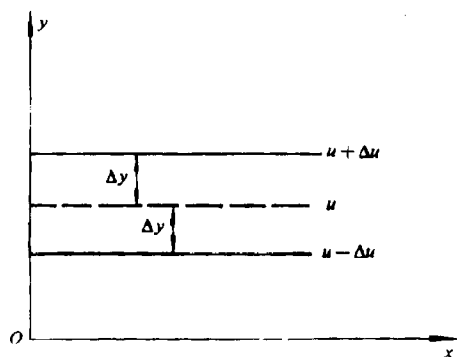


图 1-5 动量传输

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度 [s^{-1}];

μ ——比例系数，称为动力粘性系数 [$N/m^2 \cdot s$].

式(1-7)称为牛顿内摩擦定律，这个定律是牛顿 (Newton) 在 1687 年通过测量平行平板间内摩擦阻力首先得到的。

这里要特别指出，牛顿内摩擦定律只适用于流体作层状流动情况，即所谓层流流动。对于非层流情况将在以后讨论。

当所研究的面是被快层带动的慢层时，该面所承受的剪应力 τ 与运动方向一致；而另一面上的 τ 与运动方向相反。因此，剪应力总是成对出现的。若流速分布是均匀的，即 $du/dy = 0$ 时，则剪应力为零。也就是说流体处于静止状态或相对静止状态时不存在内摩擦力。

粘性系数 μ 取决于流体的特性，它是流体的粘性（内摩擦力）的一个量度。根据式(1-7)，流体动力粘性系数 μ 的单位是

$$[\mu] = \frac{N}{m^2} \cdot s = Pa \cdot s (\text{帕} \cdot \text{秒}) \quad (1-8)$$

在式(1-7)中，为什么剪应力会与速度梯度成正比呢？为了回答这个问题，让我们分析一下速度梯度 du/dy 的物理意义，设有一直线层状流动的流场，在时间 t 取一断面为 $ABDC$ 的微矩形体积， AB 边流体的速度是 u ， CD 边的速度是 $u+du$ 。经过 dt 时间后 $ABDC$ 各点分别流到 $A'B'D'C'$ 位置，见图 1-6 图，由图中的关系看到

$$\overline{C'C''} = \overline{CC'} - \overline{AA'} = (u + du)dt - udt = dudt$$

若在 dt 时间内变形是个小量，那么角变形 $d\theta = \text{tg}(d\theta) = \frac{\overline{C'C''}}{dy}$ 。

上式两边，除以微距离 dy 得

$$\frac{du}{dy} = \frac{\overline{C'C''}}{dt dy} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-9)$$

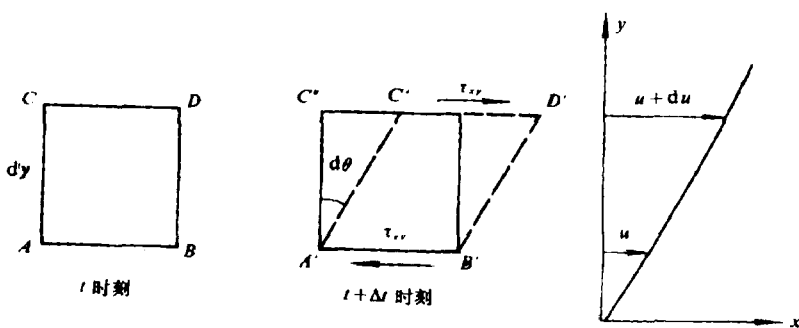


图 1-6 流层变形关系

因此，剪应力为

$$\tau_{xy} = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-10)$$

式(1-9)表明，速度梯度是流体在流动中产生的变形角速度，它与所承受的剪应力大小成比例。

在流体力学的分析和计算中，常出现动力粘性系数 μ 与流体密度 ρ 的比值 μ/ρ 。为此，我们把具有运动学量纲的这个比值定义为运动粘性系数，事实上，它是动量的耗散度，并用 ν 表示之：

$$\nu = \mu / \rho \quad [\text{m}^2 / \text{s}] \quad (1-11)$$

同一流体的粘性系数与流体的温度有很大关系，而与压力关系不大。气体的 μ 值随温度的升高而增大，液体的 μ 值随温度增高而减少。一般以 $t = 15^\circ\text{C}$ 作为标准温度，相应的粘性系数为

水： $\mu = 1.140 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$

$\nu = 1.145 \times 10^{-6} \text{m}^2 / \text{s}$

空气： $\mu = 1.785 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$

$\nu = 1.450 \times 10^{-5} \text{m}^2 / \text{s}$

在表 1-5 中给出了水的粘性系数与温度的关系。

表 1-5 淡水的粘性系数与温度的关系

温度 $t[^\circ\text{C}]$	μ [$\times 10^3 \text{N} / \text{m} \cdot \text{s}$]	ν [$\times 10^6 \text{m}^2 / \text{s}$]	温度 $t[^\circ\text{C}]$	μ [$\times 10^3 \text{N} / \text{m} \cdot \text{s}$]	ν [$\times 10^6 \text{m}^2 / \text{s}$]
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

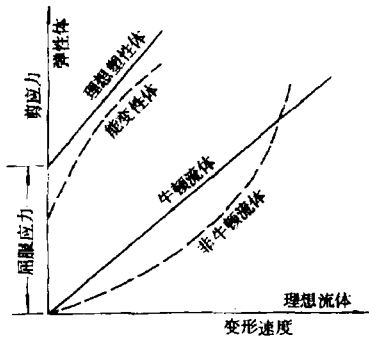


图 1-7 剪应力变形速度之间关系

在一定的范围内，固体在外载荷作用下能产生有限和一定的变形，而变形速度为零，当剪应力大于物体的屈服应力时，这时固体将以某一变形速度不断地变形，固体和流体具有相同的特性。因此可以说固体的主要特征是在屈服应力之内能保持有限变形。

由于流体粘性的存在，流体在流动过程中除了产生法向应力外还要产生切向应力。然而考虑剪应力来研究流体的运动将使问题变得十分复杂。对于像水和空气这样粘性较小的流体，在某些情况下，不计流体粘性，可以较方便地揭示出流动的主要特征。我们把忽略粘性影响或假定没有粘性的流体称为理想流体。这样的流体是理想的，所以在自然界是不存在的。理想流体是真实流体的一种抽象模型，在某些情况下，理想流体能给出真实粘性流体的有价值的信息。

理想流体不考虑流体层之间剪应力作用，因此理想流体相邻两层之间可以相互毫无影响地以不同速度进行运动，即所谓滑动。当理想流体通过物体边界时，流层必须沿着几何边界滑动，而考虑粘性之后，流体和物体边界之间是没有相对切向速度的。实际上，剪应力是流层之间所共有的动力特征，如果不考虑剪应力的存在，流层之间的联系就完全消失了。

在许多问题中，只是在物体表面很薄的一层（所谓边界层）中才显示出粘性的影响，在这一薄层之外，可以认为是粘性为零的理想流体。像研究船舶的兴波阻力、船体在波浪中的纵向运动等用理想流体模型能得到相当满意的结果。本书将把理想流体作为一个重要内容加以讨论。

四、流体的压缩性和膨胀性

流体的压缩性是指流体在压力作用下改变自己体积的特性。膨胀性是指由于温度变化，流体改变自己体积的特性。由于气体和液体的这两种性质差别很大，因此我们将分别加以讨论。

若系统的质量是一定的，那么密度和体积成反比。由流体状态方程 $p = f(V, T)$ 根据微分法则，系统的压力变化可以用系统相应的温度变化和体积变化来表示，即

$$\Delta p = \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T \Delta V + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V \Delta T \quad (1-12)$$

在自然界中，许多流体，像空气、水、汽油等剪应力和变形速度之间满足牛顿定律所确定的线性关系，这一类流体称为牛顿流体，见图 1-7。在该图中，牛顿流体变化直线的斜率是流体的动力粘性系数。对于不考虑流体粘性的理想流体，剪应力和变形速度的变化直线是沿 x 轴方向的，它表明在没有剪应力作用下便可以产生任意变形。

非牛顿流体是剪应力和变形速度之间成非线性关系的物质，所以把这类物质叫流体，是因为变形速度是零时所承受的剪应力也是零，换句话说，在产生变形速度之前不能承受剪应力。像沥青那样的厚流体属于非牛顿流体。