

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GONGCHENG LIUTI LIXUE

工程流体力学

刘向军 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power

TB126/46

2007

普通高等教育“十一五”规划
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUI

GONGCHENG LIUTI LIXUE
工程流体力学

刘向军 编
杜广生 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。本课程为北京市精品课程。

本书根据流体力学学科自身的规律，完整而系统地介绍流体力学的基础知识及工程应用。在内容安排上以牛顿第二定律为主线索，采用微元分析的方法构建方程，从自然界最基本的质量、能量与动量守恒出发，由一维到二维、三维，由理想流体到黏性流体，由不可压缩流体到可压缩流体，展开全书内容。全书共九章，内容包括流体力学的基本概念、流体静力学、流体动力学基础、黏性流体流动基础、理想流体的有势流动和旋涡流动基础、黏性流体的多维流动、相似原理与量纲分析、气体动力学基础及热气体相对于大气的静止与运动规律。前八章涵盖了能源动力类学科工程流体力学课程教学的基本要求，第九章供选用。

本书可作为高等院校热能动力、机械、化工、环境等专业的本科生教材，也可供其他专业选用。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学/刘向军编. —北京: 中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-5874-1

I. 工... II. 刘... III. 工程力学: 流体力学—高等学校—教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 094346 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 397 千字
印数 0001—3000 册 定价 26.50 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

流体力学是宏观力学的分支,它是研究流体平衡、运动以及流体和固体相互作用所遵循规律的一门学科。工程流体力学还注重研究这些规律在工程实际中的应用。

流体力学是人类在长期的生产实践中发展起来的一门学科。人类很早就在从事农业生产中为了用水方便开始认识和利用水流的规律,开沟引渠,实现人工灌溉。中国古代已开始大规模治理黄河、沟通连接五大水系的大运河,并在公元前 256~前 210 年间修建了著名的都江堰等工程。公元前 250 年,阿基米德提出了浮力定律,这是人类最早利用流体力学的原理定量分析实际问题。到 17 世纪,流体力学开始系统形成与发展,1647 年帕斯卡揭示了流体静力学的基本规律;1687 年牛顿在理论分析和实验研究的基础上,提出了黏性流体的切应力公式,即牛顿内摩擦定律;1738 年,伯努利建立了不可压缩流体流动的能量方程——伯努利方程;1755 年欧拉在其论著中系统地建立了流体的连续性方程和理想流体的运动微分方程,提出了描述流体运动的欧拉法,欧拉被公认为是理论流体力学的奠基人。到 19 世纪初,纳维和斯托克斯先后提出了黏性流体的运动微分方程,即 N-S 方程,流体力学得以突破性的进展。19 世纪末到 20 世纪初,流体力学加速发展,著名的雷诺实验揭示了黏性流体的层流和湍流两种流态;普朗特提出了边界层的概念,建立了边界层理论;雷诺、瑞利和伯金汉等人建立和完善了相似原理和量纲分析的理论;雷诺和普朗特对湍流进行了系统的研究,提出了雷诺应力等概念,奠定了湍流研究的理论基础;尼古拉兹、莫迪等人采用实验研究揭示了管流的阻力规律,有压管流的水力计算基本成熟;空气动力学研究的成果在此时期大量涌现,库塔和儒可夫斯基分别揭示了物体绕流的升力规律,建立了翼型理论;儒可夫斯基采用保角变换计算得到了一种理想的翼型;黎曼和马赫通过理论和实验研究揭示了激波规律;普朗特开始了气体动力学的系统研究;布泽曼在普朗特的工作基础上改进设计得到了第一座超声速风洞;中国科学家钱学森提出了平板可压缩层流边界层的解法,该方法在机翼理论中广泛使用。空气动力学理论的成熟使得人类的航空航天事业得以迅猛发展,到 20 世纪 50 年代后期,人类飞行和进入太空的理想已基本实现,超音速飞机、人造卫星和航天飞机的成功也标志着流体力学已形成一个系统严密的学科。

流体力学发展到现代,其研究内容和发展方向有了明显的改变。一方面,研究问题的难度与复杂程度加大,湍流、旋涡运动、非稳定流动的研究不断深入;另一方面,流体力学在各个工业技术领域不断应用,深入研究与解决能源、化工、海洋、运输、环境等行业中的流体力学问题是流体力学的一个新的发展方向,相应地,出现了许多新的学科分支和交叉学科,如生物流体力学、多相流体力学、非牛顿流体力学、环境流体力学、地球物理流体力学、磁流体力学、稀薄气体流体力学等。流体力学发展到今天,目前已很难找到一个与流体力学无关的技术部门,几乎所有工业技术的发展都有流体力学的贡献。例如运输行业中现代汽车、船舶的设计;冶金工业中各种工业炉窑、燃烧装置和反应器中气体、液态金属等的流动与反应;水利工程、土木工程和市政建设中建筑的设计与管道的布置;航空工业中各种飞机和飞行器的设计;动力行业中所有动力设备的设计与安全运行;化工行业中反应器的优化

设计；机械工业中的润滑、冷却、液压传动、气力输送、液压和气动控制问题；石油工业中石油的开采与输送；电子产品的生产和计算机运行的冷却问题；海洋潮汐、飓风及天气预报；人类环境的保护、大气污染的治理、污水垃圾的治理与利用；人体内部循环系统等等，上述所有问题的解决都要用到流体力学的基本原理。流体力学的发展带动了工业技术的发展，同时，流体力学在各行业的应用中也不断发现新的问题，解决不断出现的问题，又推动了流体力学自身的发展。

流体力学是几乎所有的工业技术部门都必须应用和研究的一门重要学科，对于工科许多专业，流体力学都属于技术基础课程。流体力学是高等工科院校能源动力、机械、工物、汽车、化工、液压、环保、土木等专业的专业基础课，是学习上述专业课程、掌握相应专业知识以及在专业领域进一步深造的必要条件。

本教材根据流体力学学科自身的规律，完整而系统地介绍流体力学的基础知识及工程应用。在内容安排上以牛顿第二定律为主线索，采用微元分析的方法构建方程，从自然界最基本的质量、能量与动量守恒出发，由一维到二维、三维，由理想流体到黏性流体，由不可压缩流体到可压缩流体，展开全书内容。全书共分九章，其中第一章流体力学的基本概念、第二章流体静力学、第三章流体动力学基础、第四章黏性流体流动基础、第五章理想流体的有势流动和旋涡流动基础、第六章黏性流体的多维流动、第七章相似原理与量纲分析、第八章气体动力学基础。前八章涵盖了能源动力类学科工程流体力学课程教学的基本要求。考虑到目前高等院校能源动力类学科课程设置及学时的特点，第九章介绍热气体相对于大气的静止与运动规律，供师生选用。本教材可作为高等院校热能与动力、机械、化工、环境等专业的本科生教材，也可供其他专业选用。

北京科技大学“工程流体力学”课程于2007年被评为北京市精品课程，相关教学资源的获取请登录 <http://seam.ustb.edu.cn>。

本书由北京科技大学刘向军编写。山东大学杜广生教授和北京科技大学郭鸿志教授审阅了全书，对本书的编写提出了大量的宝贵意见，在此表示感谢。

限于编者的水平和经验，书中不足与不妥之处在所难免，恳请读者指评指正。

编者

2007.06

目 录

前言

第一章 流体力学的基本概念	1
1-1 流体的定义与连续介质假设	1
1-2 流体的密度与比体积	3
1-3 作用在流体上的力	5
1-4 流体的流动性	6
1-5 流体的黏性	7
1-6 流体的膨胀性和压缩性、不可压缩流体	12
1-7 液体的表面特性	14
习题	16
第二章 流体静力学	18
2-1 流体的静压强及其特征	18
2-2 流体的平衡微分方程	19
2-3 重力作用下静止流体的压强分布	22
2-4 压强的表示方法与测压仪表	25
2-5 相对平衡	29
2-6 静止流体作用在平板和曲面上的总压力	32
习题	36
第三章 流体动力学基础	40
3-1 研究流体流动的方法	40
3-2 流体流动的分类	42
3-3 流线与迹线	44
3-4 有效截面、流量与平均流速	46
3-5 连续性方程	47
3-6 理想流体沿流线的运动微分方程和伯努利方程	49
3-7 沿流线法向方向压强和速度的变化	52
3-8 一维稳定管流的伯努利方程	54
3-9 理想不可压缩流体一维管流伯努利方程应用举例	56
3-10 稳定管流的动量方程和动量矩方程	61
习题	65
第四章 黏性流体流动基础	71
4-1 不可压缩实际流体稳定管流的伯努利方程	71
4-2 管流能量损失的两种类型	74
4-3 雷诺实验、层流与湍流	75

4-4	圆管内不可压缩流体的稳定层流运动	78
4-5	湍流的基本概念	81
4-6	圆管内的湍流流动	85
4-7	管流沿程损失系数	90
4-8	非圆形截面管流的沿程损失	93
4-9	局部能量损失	95
4-10	节流式流量计	100
4-11	管路计算	102
4-12	不可压缩流体孔口与管嘴的出流	107
	习题	110
第五章	理想流体的有势流动和旋涡流动基础	117
5-1	多维流动的连续性方程	117
5-2	理想流体的欧拉运动微分方程	119
5-3	流体微团的运动分析	121
5-4	稳定无旋流场的伯努利方程	126
5-5	速度势和流函数	127
5-6	旋涡运动的基本概念与斯托克斯定理	131
5-7	旋涡运动特性	133
5-8	几种简单的平面势流	135
5-9	平面无旋流的叠加	138
5-10	平行流绕圆柱体有环流的流动	143
5-11	叶栅与机翼的工作原理	145
	习题	147
第六章	黏性流体的多维流动	149
6-1	黏性流体的运动微分方程(纳维-斯托克斯方程)	149
6-2	几种简单的层流运动	153
6-3	边界层的基本概念	156
6-4	层流边界层的微分方程	159
6-5	边界层的动量积分方程	160
6-6	平板层流边界层的近似计算	162
6-7	平板湍流边界层的近似计算	165
6-8	平板混合边界层的近似计算	168
6-9	曲面边界层分离	169
6-10	绕流阻力与卡门涡街	171
6-11	球形颗粒的绕流阻力与沉降速度	174
6-12	自由射流	176
	习题	181
第七章	相似原理与量纲分析	184
7-1	流场力学相似的概念	184

7-2	动力相似准则	186
7-3	相似定律	188
7-4	量纲分析的基本原理与方法	190
7-5	模型实验方法	195
	习题	197
第八章	气体动力学基础	199
8-1	气体流动的基本概念和基本方程	199
8-2	声速和马赫数	203
8-3	小扰动在运动气流中的传播	205
8-4	可压缩气体流动的参考状态	207
8-5	变截面管道内的定熵流动	210
8-6	喷管定熵流动计算	212
8-7	有摩擦和热交换的气体管流	219
8-8	激波与膨胀波的基本概念	222
8-9	正激波前后参数的变化	224
8-10	斜激波	228
	习题	230
第九章	热气体相对于大气的静止与运动规律	233
9-1	物体在流体中受的浮力	233
9-2	热气体的静力学规律	234
9-3	相对于大气的热气体管流的伯努利方程	236
9-4	工业炉门孔的逸气与吸气	239
9-5	烟囱的工作原理及计算	242
	习题	246
附录	单位与表示方法	247
	习题答案	248
	参考文献	254

第一章 流体力学的基本概念

本章主要介绍流体及流体力学的基本概念,为后续的学习打下基础。首先介绍流体的定义以及研究流体力学问题的最基本的假设——连续介质假设,随后介绍流体的物理性质,如流体的密度、比体积等概念。本书研究的是流体的力学规律,在1-3节中介绍作用在流体上的力:质量力和表面力,随后的1-4节~1-7节介绍流体在质量力和表面力的作用下,表现出的与固体相区别的力学性质:流体的流动性、流体的黏性、流体的可压缩性和液体的表面特性。本章的重点内容是流体的黏性及牛顿内摩擦定律。

1-1 流体的定义与连续介质假设

1. 流体的定义

液体与气体这些能流动的物体统称为流体。明确流体的概念与特征,可由它与固体的直观区别、力学特征及微观构成等几个方面加以说明。

流体与固体最直观的区别在于:固体有确定的形状,而流体的形状取决于与流体接触的固体边界。从力学特征而言,固体和流体可以从其切应力与变形量间关系的不同来理解。一般而言,固体在一定的切应力作用下会产生固定的变形,力不变,变形量一般也不变。固体在所受到的应力小于其屈服应力的情况下,应力取消后,所产生的变形就会消失,只有在所受应力超过其屈服应力的情况下,固体才会产生永久的变形,或是断裂。而就流体而言,只要有切应力作用在流体上,不论这切应力的大小如何,都将使流体发生连续的变形,即使流体流动。流体不能在任何微小的切应力的作用下保持静止。

在微观分子结构和分子运动形式方面,物质固态、液态与气态的区别,在于其分子间平均距离和微观运动形式不同。固体分子间的平均距离最小,分子间的吸引力很强,固体的分子只能在其平衡位置上振动,固体具有刚性;液体分子间的平均距离则较大,分子间的吸引力较弱,分子能较自由地运动;气体分子间的平均距离则更大,分子间的吸引力更弱,因而气体的分子能更自由地运动,这就是流体具有很大的流动性的原因,而且气体的流动性远大于液体。

在分析与处理一般工程问题时,流体力学作为一门宏观学科,一般不涉及流体的分子结构与分子运动问题,而是将流体看作是连续不断、其中没有空隙的介质,即所谓的连续介质,在此前提下,就可用连续函数的概念来分析与解决问题。

2. 流体质点的概念及流体连续介质假设

流体和其他物质一样是由大量作无规则运动的分子组成的,且分子之间的间距远大于分子本身,从微观结构上看,流体是不连续的介质。流体力学作为宏观力学的分支,并不关心流体的微观结构与微观运动问题,而是研究流体在外力作用下的各种宏观特性。其最小研究对象是包含足够多分子、且具有稳定的宏观特性的流体微团——流体质点。

以下以流体密度的定义为例，对流体质点的概念进行深入讨论。

如图 1-1 (a) 所示，自流体内部划分出一块流体，其体积为 $\delta\Omega$ ，质量为 δm ，此块流体内部包含一点 P ， P 点的坐标为 $P(x, y, z)$ 。体积 $\delta\Omega$ 内流体的平均密度为 $\delta m / \delta\Omega$ 。现将 $\delta\Omega$ 缩小趋近于 P 点，图 1-1 (b) 所示为 $\delta\Omega$ 缩小过程中 $\rho = \delta m / \delta\Omega$ 的变化。起初，体积 $\delta\Omega$ 内分子很多，流体平均密度为一确定的值，能代表宏观特性，但随着 $\delta\Omega$ 逐渐缩小，其内所包含的分子数目越来越少，当 $\delta\Omega$ 缩小至小于 $\delta\Omega'$ 以后，该体积内只包含少量的分子，由于分子无规则的运动， $\delta m / \delta\Omega$ 的值发生剧烈的起伏变化，因而无法给 ρ 一个确定的数值，所以，流体内部一点的流体密度 ρ 只能定义为

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

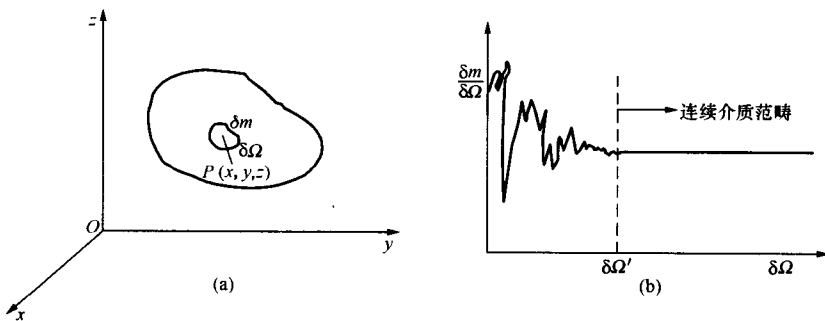


图 1-1 流体质点的概念及流体连续介质假设

因此， $\delta\Omega'$ 是使流体具有宏观特性所允许的最小体积，体积小至 $\delta\Omega'$ 的流体微团，就称为流体质点。流体质点虽小，但却包含了为数众多的分子。以空气为例，在标准状态下， 1cm^3 的空气包含 2.7×10^{19} 个分子，当用常规方法对空气进行实验测定时（例如，采用皮托管、热丝风速仪等等），即使这些仪器探头的尺寸小到体积为 10^{-9}cm^3 ，在此微小体积内，标准状态下包含的空气分子数目还会有 2.7×10^{10} 个。如此巨大的分子数足以表现出与分子数无关的宏观特性。而对于流体力学的研究对象，一般问题能了解到体积为 10^{-9}cm^3 就已足够精确了。

综上所述，引入流体质点的概念后，就可认为流体是由无数个连续分布的流体质点所组成的连续介质，即在充满流体的空间内每一点都被相应的流体质点所占据，其中没有间隙。可见连续介质是一个宏观概念，在此概念下不需要考虑流体单个分子的情况，流体质点就是构成流体连续介质的最小物质单位。在连续介质假设的前提下，流场空间内流体的密度 ρ 就可以用连续函数表示为

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

上式中 t 为时间。流体的其他参数，如压强、速度等，也一样在连续介质的假设下为空间和时间的连续函数。

连续介质假设是分析流体力学问题时的基本假设，但由上述连续介质假设的引入可见，流体质点的概念是流体连续介质假设的基础，流体质点作为宏观最小研究单元必须包含足够的流体分子，同时研究对象内又必须包含足够的流体质点，此时流体连续介质假设才能成立。也就是说，流体连续介质假设的条件是：流体质点的尺度需远大于分子的运动尺度，

同时又远小于研究对象的特征尺度。因此也只有宏观研究对象远大于分子的运动尺度时，不需要考虑分子微观运动，才能定义流体质点，采用流体连续介质假设研究问题。实践结果表明，流体连续介质假设在研究流体宏观运动时是合理的，基于流体连续介质假设建立起来的流体力学理论是正确的。

但是，在较深入分析一些问题的时候，也常需要从流体真实的微观性质来分析问题，例如，研究流体的黏度系数、导热系数与扩散系数的机理，流体动力学基本方程建立的依据及其可靠性等等，都需要从微观的流体分子运动理论等出发来研究考察。而在研究微尺度流动（如直径为 $8 \times 10^{-4} \text{ cm}$ 的红血球在直径为 10^{-3} cm 微血管内流动）或高空稀薄气体流动等问题时，研究对象的尺度和微观运动尺度相当，不能采用连续介质假设，也需要从微观的流体分子运动理论出发来研究。上述问题不是本书的研究内容。

1-2 流体的密度与比体积

1. 流体的密度

如上节所述，密度是指单位体积流体所具有的质量，它表征流体质量在空间的密集程度，对于均质流体，流体密度 ρ 的定义为

$$\rho = \frac{m}{\Omega} \quad (1-3)$$

式中 m ——流体的质量，kg；

Ω ——流体的体积， m^3 ；

ρ ——密度， kg/m^3 。

由密度的定义可知，流体的密度与温度和压强有关，但一般液体的密度随温度和压强的变化幅度小，对于一般工程问题，可认为液体的密度不随压强和温度的变化而改变。

在气体压强不太高，而温度又远高于其液化温度的情况下，气体的密度与温度及压强的关系可按完全气体（热力学中的理想气体）的状态方程写为

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1-4)$$

式中 p ——绝对压强， N/m^2 或 Pa；

T ——绝对温度，K， $T = t^\circ\text{C} + 273$ ；

R ——气体常数， $\text{N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$ 。

在可以将气体的压强看作是常数的情况下，常按以下方程计算不同温度下气体的密度

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t} \quad (1-5)$$

$$\alpha = 1/273^\circ\text{C}$$

式中 ρ_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的气体密度， kg/m^3 ；

ρ_0 ——温度为 0°C 时气体的密度， kg/m^3 。

表 1-1 和表 1-2 所示为 1atm 下不同温度时水和常见流体的密度。表 1-3 所示为标准大气压下空气在不同温度下的密度。

表 1-1 水在不同温度的密度

温度 (°C)	密度 (kg/m ³)	温度 (°C)	密度 (kg/m ³)	温度 (°C)	密度 (kg/m ³)
0	999.87	20	998.23	60	983.24
4	1000.0	25	997.00	70	977.80
5	999.99	30	995.70	80	971.80
10	999.73	40	992.24	90	965.30
15	999.13	50	988.00	100	958.40

表 1-2 常用流体的密度

液体	密度 (kg/m ³)	温度 (°C)	液体	密度 (kg/m ³)	温度 (°C)
海水	1025	20	煤油	808	20
酒精	789	20	润滑油	890~920	15
水银	13550	20	氧气	1.429	0
甲醇	791.3	20	氮气	1.251	0
苯	895	20	氢气	0.0899	0
甘油	1258	20	二氧化碳	1.976	0
石油	880~890	15	二氧化硫	2.927	0
普通汽油	700~750	15	水蒸气	0.804	0

表 1-3 空气在不同温度的密度

温度 (°C)	密度 (kg/m ³)	温度 (°C)	密度 (kg/m ³)	温度 (°C)	密度 (kg/m ³)
0	1.293	25	1.185	70	1.029
5	1.273	30	1.165	80	1.000
10	1.248	40	1.128	90	0.973
15	1.226	50	1.093	100	0.946
20	1.205	60	1.060		

2. 流体的相对密度

工程上还经常用到相对密度的概念,流体的相对密度是指流体的密度与 4°C 时水的密度的比值,通常用 d 表示,即

$$d = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1-6)$$

式中 ρ_w ——4°C 时水的密度, kg/m³。

显然,相对密度是一个无量纲量。

3. 流体的比体积

密度的倒数称为比体积,记为 v ,即

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

比体积的单位为 m³/kg,它表示单位质量的流体所占有的体积。

4. 混合气体的密度

工程中常见的煤气和烟气等都是混合气体,混合气体的密度可按各组分气体所占的体积百分数计算,即

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \cdots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (1-8)$$

式中 ρ_i ——混合气体中各组分气体的密度；

α_i ——混合气体中各组分气体所占的体积百分比。

【例 1-1】 氧气瓶容积为 0.02m^3 ，瓶内绝对压强为 $1.0133 \times 10^7 \text{Pa}$ ，温度为 15°C 。放出部分氧气后，压强下降为 $7.7011 \times 10^6 \text{Pa}$ ，温度降为 10°C 。问放出的氧气重量是多少？[氧气的常数 $R = 260 \text{N} \cdot \text{m} / (\text{kg} \cdot \text{K})$]

解：由完全气体的状态方程式： $\rho = \frac{p}{RT}$

因为 $G = \rho g \Omega$ ，所以瓶中气体的重量可计算为 $G = \frac{\rho g \Omega}{RT}$

则瓶中原有气体的重量为

$$G_1 = \frac{1.0133 \times 10^7 \times 9.81 \times 0.02}{260 \times 288} = 26.55 \text{N}$$

放出部分氧气后瓶中气体的重量为

$$G_2 = \frac{7.7011 \times 10^6 \times 9.81 \times 0.02}{260 \times 283} = 20.53 \text{N}$$

所以放出的氧气重量为

$$\Delta G = G_1 - G_2 = 6.02 \text{N}$$

1-3 作用在流体上的力

作用在流体上的力可分为两大类。其一是体积力，例如重力、离心力、带电流体上作用的电磁力等等，它们可以远距离地作用在流体内每一流体质点上。由于体积力可以远距离作用，因此，对于一小块流体而言，可认为其中所受的体积力处处相同，流体所受的总体积力是与流体的体积成正比的，所以将这种力称为体积力。体积力与流体的体积成正比，因此也与流体的质量成正比，故也将体积力称为质量力。设 \vec{f} 表示作用在单位质量流体上的质量力，则体积为 $d\Omega$ 、密度为 ρ 的一块流体上所受的质量力为

$$d\vec{F} = \vec{f} \rho d\Omega$$

单位质量力 \vec{f} 的单位为 N/kg 或 m/s^2 。将单位质量力 \vec{f} 在 x 、 y 、 z 三个方向上的分量分别用 f_x 、 f_y 、 f_z 表示，则

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

作用在流体上的另一类力就是表面力，例如压力、内摩擦力等。表面力是直接作用在所约定的流体表面上的力，一块约定的流体表面上总表面力的大小，与此表面积的大小成正比。

如图 1-2 所示，自流体内划定一块面积 A ，面积 A 可以在流体内部、在两种流体的界面上，也可以是在流体与固体的接触面上。 δA 为面积 A 上的一微元面积， a 为 δA 上的一点， \vec{n} 为 δA 的外法向方向。与 δA 相接触的流体或固体作用在 δA 上的总表面力为 \vec{F} 。将 \vec{F} 分解为垂直于 δA 的分量 \vec{F}_n 及与 δA 相切的分量 \vec{F}_τ 。分量 \vec{F}_n 即为法向表面力，若其方向与

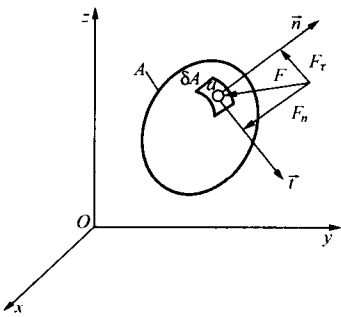


图 1-2 流体的表面力

\vec{n} 一致, 则为拉力, 定义为正; 若其方向与 \vec{n} 相反, 则为压力, 定义为负。 δA 面积上的平均法向应力 $\bar{\sigma}$ 为

$$\bar{\sigma} = \frac{F_n}{\delta A}$$

令 δA 缩小趋近于点 a , 就得到流体的法向应力为

$$\sigma = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{F_n}{\delta A} \quad (1-9)$$

分量 F_t 称为流体的切向力, 一般是流体的内摩擦力, δA 面积上流体的平均切应力 $\bar{\tau}$ 为

$$\bar{\tau} = \frac{F_t}{\delta A}$$

流体内任意一点的切应力定义为

$$\tau = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{F_t}{\delta A} \quad (1-10)$$

流体在表面力和体积力的作用下, 表现出与固体相区别的力学性质: 流体的流动性、流体的黏性、流体的可压缩性和液体表面具有张力的性质, 本章的随后内容就分别讨论流体的上述力学性质。

1-4 流体的流动性

流体的流动性最直观的体现就是流体易于变形, 没有固定的形状。流体的流动性可以从受力特征和应力与应变的关系更明确地体现出来。

首先从受力特征看, 一般情况下, 固体能承受一定的压力、拉力、切向力, 在上述一定限度内的力的作用下一般能保持一定的形状不变。而流体一般不能承受拉力, 在静止状态下也不能承受切向力, 在任何微小切向力的作用下, 流体就会变形, 产生流动。

从应力与应变的关系看, 如图 1-3 所示, 有一立方体的固体, 下端固定, 有一切向力 F 作用于固体的顶部, 根据剪切形变的虎克定律, 在一定变形限度内, 切应力与切应变成正比, 因而对于固体, 一定的切应力对应一定的切应变, 应力不变, 应变也不变。

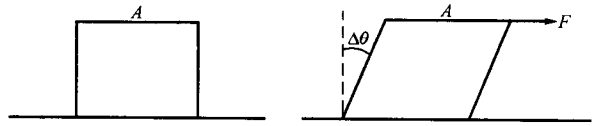


图 1-3 固体的剪切形变

而流体则不同, 如图 1-4 所示, 假设两平板间充满流体, 下板固定, 上板上作用一切向拖力 F , 只要有切向力 F 作用在上平板上, 上平板将以一定速度运动, 流体将持续不断地变形。由此可见, 在任何切应力作用下, 流体都会产生持续变形, 只要切应力不停止作用, 流体就永远不会达到静止, 这就是流体流动性的表现。

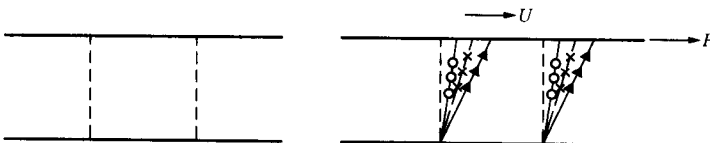


图 1-4 流体的流动性

1-5 流体的黏性

1. 流体的黏性与牛顿内摩擦定律

流体的黏性是指流体微团之间或流体与固体表面之间存在相对运动时, 流体产生内摩擦力阻碍彼此分离的特性。黏性是流体的重要属性, 所有的实际流体都具有黏性。当然, 流体处于静止时, 没有相对运动, 不呈现黏性。

如图 1-5 所示, 在平行平板间充满黏性流体, 下平板固定, 上平板以速度 U 缓慢移动, 平板间的流体将呈现层状运动。在此情况下, 可以认为, 平板间的流体是分为无限多、无限薄与平板平行的流体层向右移动。实验研究表明, 黏附在下平板上的流体层固定不动, 速度为零, 而黏附在上平板上的流体层将随平板以速度 U 向右运动, 并带动与其相邻的下层流体向右运动。由于流体的内摩擦, 上层流体对其下层流体有一个向前的拖力, 带动下层流体向前运动, 而下层流体对上层流体有一与运动方向相反的阻力。待平板间流体的运动达到稳定后, 板间流体的速度分布如图 1-5 所示。此时, 为维持平板间流体的运动, 必须在上平板上保持切向拉力 F' , 而在平板下方, 将作用有一大小相等方向相反的流体阻力。

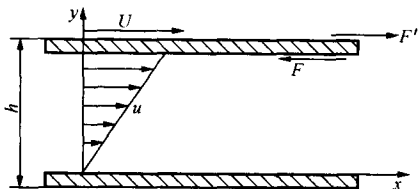


图 1-5 下平板固定上平板移动下的黏性流体运动

显然拖动平板的力是用于克服流体的摩擦阻力, 当流动稳定时, 两者大小相等, 方向相反。大量的实验研究表明, 对于像水、气体等一般流体而言, 摩擦阻力 F 的大小与平板表面积 A 成正比, 与流体内的速度梯度 du/dy 成正比, 同时与流体的种类有关, 可以表达成

$$F = \eta A \frac{du}{dy} \quad (1-11)$$

式 (1-11) 中, 比例系数 η 取决于流体的种类, 是流体黏性大小的表征, 称为流体的绝对黏度系数或动力黏度系数, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

若用流体的内摩擦切应力 τ 来表示, 式 (1-11) 可写为

$$\tau = \pm \eta \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

在式 (1-12) 中加上“ \pm ”号, 是在速度梯度为负时取负号, 使 τ 保持为正值。式 (1-12) 通常称为牛顿内摩擦定律。可以看出, 当 $du/dy = 0$, 流体内部没有相对运动, 内摩擦切应力 τ 为零, 流体不呈现黏性。

2. 黏度的表示方法

流体的黏度是流体黏性大小的度量, 常用动力黏度、运动黏度和相对黏度来表示。

由式 (1-12), 动力黏度系数的大小为

$$\eta = \frac{\tau}{du/dy} \quad (1-13)$$

η 在数值上是与流体速度梯度 du/dy 为 1 时, 所产生的内摩擦应力 τ 大小相同。在国际单位制中, 应力的单位为 Pa , 相应地, 动力黏度系数 η 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$, 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。对于黏性小的流体, 如水、酒精、空气等, η 值较小, 对于很黏滞的流体, 如甘油等, η 值则

较大。

在分析流体流动问题的时候，常常使用动力黏度系数 η 与流体密度 ρ 的比值，定义：

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-14)$$

式中 ν ——流体的运动黏度系数，单位为 m^2/s 。

液体的黏度常用恩氏黏度计来测定，表示为恩氏黏度 ($^{\circ}\text{E}$)。其测量方法是：将 200cm^3 的被测液体装入恩氏黏度计的容器内，测量它在某温度下（通常是 20°C ）从容器下部直径为 2.8mm 的小孔中流出的时间 t_1 ；再将 200cm^3 的蒸馏水加入容器中，测量 20°C 的蒸馏水从小孔流出的时间 t_2 ， t_1 和 t_2 的比值就是被测液体的恩氏黏度 $^{\circ}\text{E}$ ，按以下公式可将恩氏黏度 $^{\circ}\text{E}$ 换算为液体的运动黏性系数 ν

$$\nu = \left(0.0731^{\circ}\text{E} - \frac{0.0631}{^{\circ}\text{E}}\right) \times 10^{-4} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (1-15)$$

3. 流体黏性产生的原因和影响因素

流体的黏性是流体的微观结构和微观运动体现出来的宏观特性。黏性产生的原因有两种：

其一是分子间的相互吸引力。当流体微团之间存在相对运动时，相邻分子间的吸引力阻碍彼此分离，产生内摩擦阻力。

其二是分子不规则热运动的动量交换产生的阻力。一方面流体分子总是在作不规则的热运动的，另一方面各层流体以各自的宏观流动速度向前运动，如原来在低速度层的流体分子由于分子的热运动，跃迁至流速较高的流层内，将引起动量的变化；同理，若原来在高速度的流体分子由于分子的热运动，运动至流速较低的流层内，也将引起动量的变化。根据动量定理，两层流体间就产生一对平行于宏观运动方向的力，即为内摩擦阻力。

流体的黏性是上述两方面原因共同作用的结果。对于气体，气体分子间的间距大，分子间的相互吸引力小，分子不规则热运动剧烈，气体的黏性主要是分子作不规则热运动引起的；对于液体，液体分子间的间距远远小于气体，分子间吸引力大，液体分子热运动较弱，所以形成液体黏性的主要原因是分子间的引力。

流体的黏度与压强和温度有关，但实验研究表明，一般情况下，可以认为流体的绝对黏度系数 η 与压强无关，仅只随流体的温度而改变。

由于液体的黏性主要决定于分子间的引力，温度升高，液体分子间的距离加大，分子间的引力减小，故液体的黏性随温度的增高而下降。在以重油为燃料的炉子上，为降低重油的黏性，以改善其流动，常将重油加热到一定温度，以便输送及改善重油的雾化。

水的动力黏度系数 η 与温度的关系，常用式 (1-16) 表示：

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-16)$$

式中 η_0 —— 0°C 时水的动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

t ——水温， $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1-4 所示为常见液体的 20°C 时的黏度。表 1-5 为 1atm 下水的黏度随温度的变化。

气体的黏性主要决定于分子作不规则热运动的程度，温度越高，则其分子的热运动程度越剧烈，气体的黏性越大，气体的黏性随气体温度的增高而增大。

在压强小于 1MPa 时, 气体的动力黏度系数 η 与温度的关系常用苏士兰德公式计算:

$$\eta = \eta_0 \frac{273 + S}{T + S} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.5} \quad (1-17)$$

式中 η_0 ——0°C 时气体的动力黏度, Pa·s;

T ——气体的热力学温度, K;

S ——苏士兰德常数。

常见气体 0°C 时的黏度和苏士兰德常数见表 1-6。表 1-7 所示为 1atm 下空气的黏度随温度的变化。

表 1-4 常见液体的黏度 (20°C)

液体名称	$\eta (\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu (\times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
水 银	1.56	0.1685
苯	0.65	0.7263
汽 油	0.29	0.4277
煤 油	1.92	2.3762
四氯化碳	0.97	0.6108

表 1-5 水的黏度随温度的变化

温度 (°C)	$\eta (\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu (\times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	温度 (°C)	$\eta (\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu (\times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
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

表 1-6 常见气体 0°C 时的黏度、分子量和苏士兰德常数

气体名称	$\eta_0 (\times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu_0 (\times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	M	S
空气	17.09	13.20	28.96	111
氧	19.20	13.40	32.00	125
氮	16.60	13.30	28.02	104
氢	8.40	93.50	2.016	71
一氧化碳	16.80	13.50	28.01	100
二氧化碳	13.80	6.98	44.01	254
二氧化硫	11.60	3.97	64.06	306
水蒸气	8.93	11.12	18.01	961