



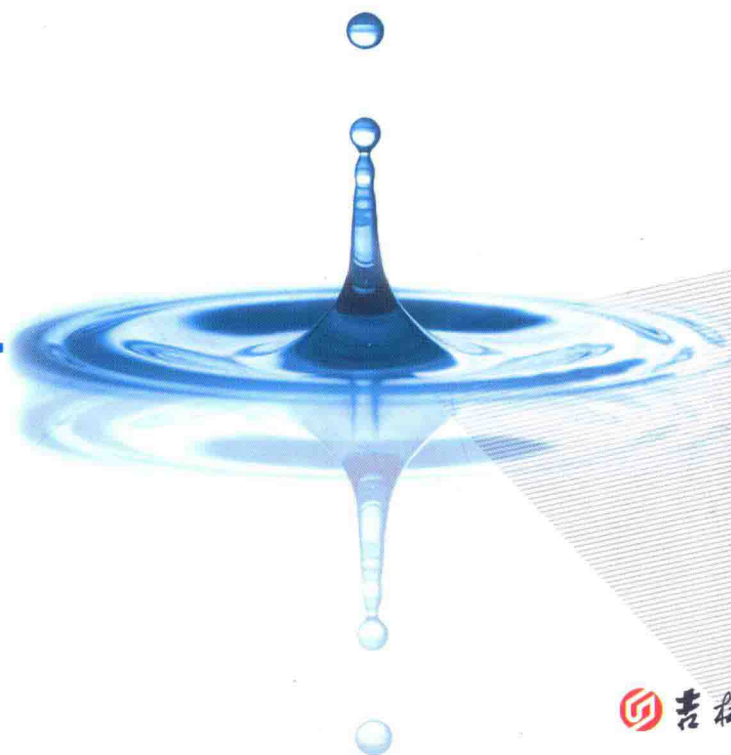
面向十二五规划教材

教育部高等教育课程改革和建设规划教材

工程流体力学

GONG CHENG
LIU TI LI XUE

孟凡英 主编



吉林大学出版社

面向十二五规划教材
教育部高等教育课程改革和建设规划教材

工程流体力学

主 编：孟凡英
副主编：于静梅 李国威

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学 / 孟凡英主编. — 长春: 吉林大学出版社, 2012. 7
ISBN 978-7-5601-8475-3

I. ①工… II. ①孟… III. ①工程力学—流体力学 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 128759 号

书 名: 工程流体力学

作 者: 孟凡英 主编

责任编辑: 李国宏 责任校对: 崔晓光

吉林大学出版社出版、发行

开本: 787×1092 毫米 1/16

印张: 13.75 字数: 295 千字

ISBN 978-7-5601-8475-3

封面设计: 刘 瑜

北京市宣武广内印刷厂 印刷

2012 年 7 月第 1 版

2016 年 5 月第 3 次印刷

定价: 29.80 元

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路 501 号 邮编: 130021

发行部电话: 0431-89580026/28/29

网址: <http://www.jlup.com.cn>

E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

内 容 提 要

本书是为热能与动力、机械、矿物以及环境等工程类专业学科基础课程“流体力学”而编写的教材。内容包括绪论、流体静力学、理想流体动力学基础、粘性流体动力学基础、可压缩流体的一元流动、量纲分析与相似原理、理想流体的旋涡运动和势流运动以及多元不可压缩粘性流体动力学等。书中对每部分讲述内容都列举了示范例题。配置了思考题和习题。

本书可作为工程类专业专、本科生的教材，也可供工程技术人员参考。

编写前言

本书是热能与动力、机械、矿物以及环境等工程类专业高职、高专、函授及全日制本科生的流体力学课程适用教材。

流体力学是一门基础学科，也是一门应用学科。流体力学课程是许多工程专业的重要学科基础课程。目前的教学改革对流体力学课程的教学提出了更高的要求，需要在较少的教学学时内，使学生牢固掌握流体力学的基本概念、基本原理和掌握处理流体力学问题的一般方法，为学习后续课程建立扎实的基础。教学不仅要传授知识，更要注重培养学生的能力，提高学生的素质，这是在教学实践中应努力的方向，也是编写教材的指导思想。在本书编写中，力求使之适应教学改革的要求，做到突出物理概念和基本原理，强调解决问题的一般方法，着眼于实际工程问题。为了有利于学生自主学习，本书对每部分内容都列举了典型例题，配置了思考题和习题。

本书由多位具有丰富教学经验和教材编写经验的教师合作编写，在制定编写大纲的过程中广泛地征求了相关专业教师的意见。各章的编写分工为：第1章由孟凡英教授编写，第2章至第4章由李国威讲师编写，第5章至第8章由于静梅副教授编写。全书由孟凡英教授统稿。

由于时间有限，书中难免有错误和不当之处，请读者给予指正。

作者

2012年6月



目 录

第1章 绪 论	1
1.1 流体与流体力学概述	1
1.1.1 流体	1
1.1.2 流体力学及发展历史	1
1.2 连续介质模型	3
1.3 流体的主要物理性质	4
1.3.1 惯性	4
1.3.2 压缩性和膨胀性	4
1.3.3 黏性	7
1.3.4 液体的表面张力特性	9
1.4 作用在流体上的力	11
1.4.1 质量力及单位质量力	11
1.4.2 表面力	12
章后习题	12
第2章 流体静力学	14
2.1 流体静压强及其特性	14
2.1.1 流体静压强	14
2.1.2 流体静压强两个基本特性	15
2.2 流体平衡微分方程	16
2.2.1 流体平衡微分方程	16
2.2.2 流体平衡微分方程的一般积分式	17
2.2.3 等压面	18
2.3 重力作用下静止流体的压强分布	19
2.3.1 流体静力学基本方程	19
2.3.2 流体静力学基本方程式的意义	20
2.3.3 可压缩流体中压强的分布规律	21
2.4 压强的测定	22
2.4.1 压强的计量	22
2.4.2 压强的量度单位	23
2.4.3 液柱式测压计	24
2.5 相对容器平衡液体的压强分布	28
2.5.1 等加速直线运动容器中液体的相对平衡	28



2.5.2 等角速旋转容器中液体的相对平衡	29
2.6 静止液体作用在固体壁面上的总压力	32
2.6.1 静止液体作用在固体平壁面上的总压力	32
2.6.2 静止液体作用在固体曲面上的总压力	36
章后习题	38
第3章 理想流体动力学基础	43
3.1 描述流体运动的方法	43
3.1.1 流场	43
3.1.2 流体运动的描述方法	43
3.2 流体动力学基本概念	46
3.2.1 流体流动的分类	46
3.2.2 流线和迹线	47
3.2.3 元流与总流	49
3.2.4 过流断面、湿周和水力半径	49
3.2.5 流量和平均流速	50
3.3 流体的连续性方程	51
3.3.1 系统与控制体	51
3.3.2 微分形式的连续性方程	52
3.3.3 恒定流中总流的连续性方程	53
3.4 理想流体的运动微分方程	54
3.5 理想流体恒定流的伯努利方程	56
3.5.1 理想流体沿流线的运动微分方程	56
3.5.2 理想流体沿流线的伯努利方程	57
3.5.3 伯努利方程的意义	58
3.6 压强沿流线法向的变化	59
3.7 总流的伯努利方程	61
3.7.1 均匀流和非均匀流	61
3.7.2 总流的伯努利方程	62
3.7.3 伯努利方程应用	64
3.8 相对运动的伯努利方程	67
3.9 动量方程和动量矩方程	69
3.9.1 动量方程	69
3.9.2 动量矩方程	72
章后习题	73
第4章 黏性流体动力学基础	77
4.1 黏性流体的伯努利方程	77
4.1.1 黏性流体元流的伯努利方程	77



4.1.2 黏性流体总流的伯努利方程	78
4.2 流体的流动阻力与流动状态	78
4.2.1 流体的流动阻力	78
4.2.2 流体的流动状态	79
4.3 均匀流基本方程式	81
4.4 圆管层流流动及沿程阻力损失	83
4.5 圆管紊流流动及沿程阻力损失	85
4.5.1 紊流流动的脉动和时均化	85
4.5.2 紊流切应力和混合长度理论	86
4.5.3 圆管紊流沿程阻力损失	88
4.6 沿程阻力系数研究	90
4.6.1 尼古拉兹实验	90
4.6.2 莫迪曲线图	92
4.7 管道流动的局部阻力损失	93
4.7.1 局部阻力损失产生的原因	93
4.7.2 局部阻力损失	94
4.8 孔口和管嘴出流	97
4.8.1 孔口自由出流	98
4.8.2 孔口淹没出流	99
4.8.3 管嘴出流	100
4.9 有压管流的水力计算	101
4.9.1 简单管路	101
4.9.2 串联管路	102
4.9.3 并联管路	102
4.10 有压管路中的水击	103
4.10.1 水击现象产生机理	103
4.10.2 水击的分类	106
4.10.3 水击压强的计算	106
4.10.4 水击的防止与利用	107
4.11 缝隙流动	108
4.11.1 平行平面之间的缝隙流动	108
4.11.2 环形缝隙流动	111
章后习题	112
第5章 可压缩流体的一元流动	116
5.1 可压缩气体一元恒定流的基本方程	116
5.1.1 完全气体状态方程	117
5.1.2 连续性方程	117



5.1.3	欧拉运动方程	117
5.1.4	热力学常数	117
5.1.5	能量方程	118
5.1.6	等熵关系式	119
5.2	微弱扰动波的传播及声速	120
5.2.1	声波及声速	120
5.2.2	马赫(Mach)数	122
5.3	一元等熵流动的基本参数关系式	124
5.3.1	滞止状态	124
5.3.2	临界状态	125
5.3.3	最大速度状态	126
5.4	一元等熵气流在变截面管道中的流动	128
5.4.1	管道截面积变化对流动的影响	128
5.4.2	喷管的质量流量	131
5.4.3	收缩喷管	132
5.4.4	缩放喷管	133
	章后习题	136
第6章 量纲分析与相似原理		139
6.1	单位与量纲	139
6.1.1	量纲	139
6.1.2	量纲一致性原则	140
6.2	量纲分析与 π 定理	142
6.2.1	量纲分析	142
6.2.2	雷利法	142
6.2.3	π 定理(布金汉法)	143
6.3	流动相似原理	145
6.3.1	流动相似性概念	145
6.3.2	动力相似准则	147
6.3.3	自模化	152
	章后习题	152
第7章 理想流体的旋涡运动和势流运动		155
7.1	流体微团的运动分析	155
7.2	流体的旋涡运动基本理论	161
7.2.1	涡线、涡管、涡束和旋涡强度	162
7.2.2	速度环量、斯托克斯定理	163
7.3	流体的势流运动基本理论	166
7.3.1	速度势函数	166



7.3.2 流函数	167
7.3.3 速度势函数和流函数的关系	168
7.4 基本平面势流	170
7.4.1 均匀等速流	170
7.4.2 点源和点汇	171
7.4.3 点涡	172
7.5 平面势流的叠加	174
7.5.1 点汇和点涡叠加——螺旋流	174
7.5.2 点源和点汇叠加——偶极流	175
章后习题	178
第8章 多元不可压缩黏性流体的动力学	180
8.1 不可压缩黏性流体运动的基本方程	180
8.1.1 黏性流体的应力	180
8.1.2 应力表示的黏性流体运动微分方程式	180
8.1.3 应力和变形速度关系的本构方程式	181
8.1.4 纳维-斯托克斯方程	184
8.2 绕流运动与附面层流动的基本方程	187
8.2.1 附面层的形成及其性质	187
8.2.2 管流入口段附面层	188
8.2.3 附面层微分方程及动量积分关系式	189
8.2.4 附面层的位移厚度和动量损失厚度	192
8.3 平板上附面层的近似计算	194
8.3.1 层流附面层的近似计算	194
8.3.2 紊流附面层的近似计算	196
8.4 曲面附面层的分离现象与卡门涡街	198
8.4.1 曲面附面层的分离现象	198
8.4.2 卡门涡街	199
8.5 绕流阻力和升力	200
8.5.1 绕流阻力	200
8.5.2 悬浮速度	202
8.5.3 绕流升力的概念	203
章后习题	205
参考文献	207



第1章 绪论

要点提示

1. 掌握感性认识方面及力学方面对流体的定义及其两方面的差异；掌握流体与固体的特征差异及气体与液体的特征差异。
2. 掌握流体的连续介质模型的含义及意义。
3. 掌握流体的流动性、流体的压缩性和膨胀性、流体的黏性概念的本质及表征属性的物理量。
4. 掌握作用在流体上的两种不同性质的力：质量力和表面力。
5. 了解液体具有的表面性质。

1. 1 流体与流体力学概述

1. 1. 1 流体

流体和固体是物质存在的主要形态。从力学分析的角度来看，流体与固体的主要差别是抵抗外力能力的不同。固体能够抵抗一定程度的压力、拉力和剪切力；流体一般不能抵抗拉力，在静止状态下也不能抵抗剪切力。如果对固体施加剪切力，那么只要剪切力不超过一定限度，固体在发生变形后其内部应力与外力相平衡，从而达到新的静止平衡状态。如果对流体施加剪切力，则无论力多小，它都将发生连续的变形；只要剪切力不停止作用，流体就永远不会达到静止平衡。这种在剪切力作用下所发生的连续变形通常称为流动。

大量与人类生活密切相关的物质，如水、空气、油、酒精等，都是流体。流体包括液体和气体。液体与气体在力学性质上的主要差别是后者比前者更容易被压缩。

1. 1. 2 流体力学及发展历史

流体力学是力学的重要学科分支之一，它是研究流体机械运动基本规律的科学。流体力学研究流体的运动规律和力的相互作用规律，研究流动过程中动量、能量和质量的传输规律。与物理学、数学等学科一样，流体力学所阐明的规律具有普遍性，因此流体力学是一门基础学科。在另一方面，流体力学的一般原理和分析方法又被广泛地用来解决各种与流动相关的实际问题，它在许多工程技术领域中有着广泛的应用性，因此流体力学又是一门应用学科。

流体力学的历史非常悠久。人类早在公元前就开始研究流体的运动和受力规律,早期最著名的研究成果就是阿基米德(Archimedes)浮力定律。18世纪,随着牛顿运动定律和微积分的建立,一批著名的欧洲科学家,如欧拉(L. Euler)、伯努利(D. Bernoulli)、达朗贝尔(J. d. Alembert)、拉格朗日(J. Lagrange)和拉普拉斯(P. Laplace)等,都为建立无黏性流体的理论流体力学学科做出了重大贡献,从而初步形成流体力学的基本理论。到了19世纪,纳维(C. Navier)和斯托克斯(C. Stokes)进一步建立了黏性流体的运动方程,完善了经典流体力学的理论体系。在此时期,哈根(G. Hagen)、泊肃叶(J. Poiseuille)和谢才(A. Chezy)等一批著名的实验科学家建立了真实流体的实验力学。流体力学在19世纪末叶的另一重要进展是湍流研究。1883年英国科学家雷诺(O. Reynolds)用不同直径的圆管做了一系列的实验,发现流动存在着两种不同的状态,即层流和湍流。后为,雷诺又运用时均方法建立湍流流动的运动方程组,从而为湍流的研究奠定了理论基础。进入20世纪后,航空的发展提出了大量需要解决的流体力学问题。为了找到计算飞行器阻力的有效途径,德国科学家普朗特(L. Prandtl)在1904年提出了边界层理论。许多学者认为,现代意义下的流体力学形成于20世纪初,以边界层理论的诞生为标志,而普朗特、冯·卡门(V. Karman)、泰勒(C. Taylor)等一批流体力学家在空气动力学、湍流和旋涡理论等方面所取得的卓越成就则奠定了现代流体力学的基础。

在整个20世纪,流体力学不断地与各种应用学科交叉融合,开拓了许多新的领域。例如,设计高速、高敏捷性的飞机解决了大量的流体力学问题,从而使流体力学学科分支之一的空气动力学得到了完善和发展;大型火箭和航天飞机的研制,则在高超声速气动力学、物理化学流体力学、稀薄气体动力学等一系列流体力学的新分支内取得了大量的研究成果;设计大型水利枢纽时,遇到了许多流体力学新问题,这些问题的逐步解决使水动力学得到了新的发展;各种大型建筑物,如火电站的冷却塔和大跨度桥梁等,遭风载破坏的现象,引起了力学和工程界学者的密切关注,因此就形成了风工程学科;大型汽轮机、燃气轮机等现代动力机械的研制则催生了独特的翼栅理论、多相流理论等;20世纪以来,气象预报精确度有了很大的提高,这得益于地球流体力学这个新分支学科的产生和完善。

人类社会发展到今天,所提出的流体力学问题越来越多,所涉及的技术领域也越来越广,例如,动力工程中的能量转换,机械工业中的润滑、液压传动、气力输送,高温液态金属在炉内或铸型内的流动,燃烧气体在炉内的运动,船舶的兴波阻力,汽车的风阻,市政工程中的通风、给排水,高层建筑的风载,污染物在大气中的扩散等等。要分析和解决科学研究和实际工程中所提出的这些问题,就需要掌握流体力学的一般原理和分析方法,了解流体运动和受力的基本规律。

流体力学学科的任务就是解决科学技术发展和工程实际中所提出的与流体运动相关的问题。流体力学研究所采用的主要手段为理论分析、实验研究和数值计算。理论分析是应用基本物理定律建立方程,通过数学分析找出流体在各种流动状态下相关参数之间的依赖关系;实验研究主要是在配备有各种测量和观察手段的专门实验设备(如

风洞、水槽、管道等)中对流动现象进行观察和测量,找出流动的规律;数值计算则是使用计算机对流动现象进行数值模拟。正确的理论分析结果可以揭示流体运动的本质特性和规律,具有普遍的适用性;实验结果能够反映真实的流动规律,发现新的物理现象,检验理论分析和数值模拟的结果;数值计算则能够求解复杂的流动问题,能够模拟多种工况,比实验经济、省时。三种手段相辅相成,使流体力学学科日益完善和不断发展。

工程流体力学是机械、材料、热能与动力、船舶与海洋以及环境等工程类专业的学科基础课程,其内容并不包括流体力学学科的全部知识,主要涉及流体力学的基本原理和基本方法,并通过大量实例,说明如何运用这些原理和方法去分析和解决与流体运动相关的实际问题。相对于流体力学学科范畴内的其他课程,工程流体力学更偏重于基础理论和基本方法,也更偏重于解决工程实际问题。

1.2 连续介质模型

流体由分子组成,分子不断地运动并且相互碰撞。从微观来看,流体并不是一种连续分布的介质,因而流体中的物理参数也不是连续分布的。从微观角度来研究流体力学问题时,需要运用分子动力学理论,从分析分子的微观运动出发。分子的运动是不规律的,而且分子很小,通常在很小体积的流体内都会含有非常多的分子,所以要在分子水平上研究问题非常困难。不过在绝大多数实际流体力学问题中,人们感兴趣的并不是个别分子的微观运动特征而是流体的宏观运动特征,如翼型表面上的流体压强变化规律,管道中流体速度沿轴向或者沿管截面的变化规律等。流体力学测量仪器能够反映出来的也正是这样一些宏观物理参数,而这些宏观物理参数表征的是许许多多分子相应物理参数的统计平均值。在流体中取微小的流体微团,对流体微团内所有分子的物理参数进行统计平均,并把统计平均值作为流体微团的相应物理参数,只要这样的微团相对于物理参数宏观变化的特征尺寸足够小,微团内和微团间的参数变化就能够充分反映出流体的宏观运动特征。如,当所取流体微团的尺寸相对于翼型的特征尺寸足够小时,沿翼型表面微团间的压强变化就能够充分反映出翼型表面上的流体压强变化规律;当所取流体微团的尺寸相对于管道截面的特征尺寸足够小时,微团间的速度变化就能够充分反映出管道截面上流体速度的变化规律。

很小的流体微团内仍然含有数目巨大的分子,例如在体积为 10^{-10} mm^3 (相当于一粒灰尘大小)的空气中仍然含有大约 2.7×10^6 个分子,体积为 10^{-10} mm^3 的水里含有大约 3.3×10^9 个分子。所以,即使流体微团相对于一般工程问题中的特征尺寸非常小,但它含有许多个分子。在这样的微团上对物理参数进行统计平均,所得到的值是相对稳定的,它们不会随微团中个别分子的运动变化而产生明显的突然变化。在另一方面,相对于一般工程问题中的宏观特征尺寸,含有足够多个分子的流体微团的体积可以小到被近似地看成只是一个“点”,所以流体微团也称为流体质点。如果把流体看做是由这样的流体质点(或微团)连续分布而构成的,那么流体就是一种连续介质,而且流体



中的物理参数,如压强、质点速度、密度、温度等也都是连续分布的变量。把流体当作由质点(或微团)组成的连续介质,即所谓的连续介质模型或者连续介质假设。提出连续介质模型,就是为了用连续函数来描述流体中的物理参数,从而在流体力学研究中可以使用微积分等数学方法。

连续介质模型是流体力学理论得以建立的基础。事实证明,除了少量的特殊问题外,在这个模型基础上对绝大多数流动问题进行分析,所得到的结果是与实际现象相符合的。在一些特殊的问题中,宏观特征尺寸与流体分子的平均自由程相近(或者同量级),如,航天器在空气稀薄的高空飞行时,航天器的特征尺寸与大气分子的平均自由程具有相同的量级;超声速气流中激波的厚度与分子的平均自由程具有相同的量级;微机系统中部分零部件和流道的特征尺寸与气体分子的平均自由程具有相近的量级;生物系统中动植物内部有些微细的液体流动流道的特征尺寸与流体分子的平均自由程具有相近的量级等。在这些特殊情况下,连续介质模型不成立,如果仍然采用基于连续介质模型的传统流体力学理论来分析,其结果一般会有较大误差。对于那些不能运用连续介质模型的流体力学问题,一般要运用分子动力学理论和统计学理论来研究。

1. 3 流体的主要物理性质

1. 3. 1 惯性

惯性是物体维持原有运动状态的性质,流体的惯性大小用密度表征。流体的密度是指单位体积流体所具有的质量。在均质流体中,如果体积 V 内的流体质量为 m ,则密度

$$\rho = m/V \quad (1.3.1)$$

在国际单位制中,密度 ρ 的单位是 kg/m^3 。

对于非均质流体,各点的密度不相同,密度的定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \Delta m / \Delta V \quad (1.3.2)$$

这里 $\Delta V \rightarrow 0$ 只是趋于含有足够多个分子的流体质点(或微团)的体积,而不是趋于严格数学意义上的零。不过,由于流体质点的体积相对于一般流体力学问题中的特征尺寸是非常小的,所以在处理流体力学问题时对这类极限的处理与处理数学中的极限并无差别。

密度的倒数称为比体积,记作 v ,即

$$v = 1/\rho \quad (1.3.3)$$

比体积的单位是 m^3/kg ,它表示单位质量的流体所占有的体积。

在计算中,水的密度 $\rho = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$;汞的密度 $\rho_{\text{Hg}} = 13590 \text{kg}/\text{m}^3$;干空气的密度 $\rho_a = 1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ (压强为 760mmHg ,温度为 20°C)。

1. 3. 2 压缩性和膨胀性

流体的密度与压强和温度有关,因为流体具有压缩性和膨胀性。流体在压强一定



条件, 温度升高, 体积膨胀, 密度减小的性质, 称为流体的膨胀性。流体在温度一定条件下, 压强增大, 体积缩小, 密度增大的性质, 称为流体的压缩性。

压缩性

液体的压缩性大小, 一般用体积压缩系数 β_p 来表示。它是在一定温度下, 单位压强增量引起的体积变化率。

设体积为 V 的流体, 密度为 ρ , 当压强增加 $d p$ 时, 密度增加 $d \rho$, 体积减小 $d V$, 体积变化率为 $d V / V$, 则 $d V / V$ 与 $d p$ 的比值, 称为液体的体积压缩系数 β_p , 即

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{d V}{d p} \quad 1 / P a \quad (1.3.4)$$

β_p 值愈大, 则流体的压缩性也愈大。流体被压缩时, 其质量并不改变, 即

$$d m = d(\rho V) = \rho d V + V d \rho = 0$$

所以

$$d \rho / \rho = -d V / V$$

故体积压缩系数又可以表示为

$$\beta_p = \frac{1}{\rho} \frac{d \rho}{d p} \quad 1 / P a \quad (1.3.5)$$

工程上还常用液体的弹性模量来表征液体的压缩性, 它是体积压缩系数 β_p 的倒数, 以 E 表示。即

$$E = \frac{1}{\beta_p} = -V \frac{d p}{d \rho} = \rho \frac{d p}{d \rho} \quad P a \quad (1.3.6)$$

表 1. 3. 1 列出了水在温度为 0°C 时, 不同压强下的体积压缩系数。

水的体积压缩系数 (0°C 时)

表 1. 3. 1

压强 p / at	5	10	20	40	80
体积压缩系数 β_p / Pa^{-1}	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

膨胀性

流体的膨胀性大小, 一般用体积膨胀系数 β_T 来表示。它是在一定压强下, 单位温升引起的体积变化率。

设体积为 V 的流体, 密度为 ρ , 当温度增加 $d T$ 时, 密度减小 $d \rho$, 体积增加 $d V$, 体积变化率为 $d V / V$, 则 $d V / V$ 与 $d T$ 的比值, 称为液体的体积膨胀系数 β_T , 即

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{d V}{d T} \quad 1 / K \quad (1.3.7)$$

β_T 值愈大, 则液体的膨胀性也愈大。体积膨胀系数也可表示为

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho} \frac{d \rho}{d T} \quad 1 / K \quad (1.3.8)$$

在一般情况下, 压强变化几乎不会对液体的密度产生影响, 但温度变化时液体的密度会稍有改变。液体密度随温度的变化而变化的规律可用下式表示。

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta_T (T - T_0)] \quad (1.3.9)$$

其中, T 为热力学温度, 单位为 K ; ρ_0 为温度 T_0 下的密度; β_T 为体积膨胀系数, 单位为 $1 / K$ 。一般液体的 β_T 值都在 $10^{-3} (1 / K)$ 的量级。



压强变化和温度变化都会对气体密度产生显著的影响。气体密度通常随压强的增高而增大, 随温度的升高而减小。密度 ρ 、压强 p 和热力学温度 T 之间的关系可以用热力学状态方程来表示, 即

$$p = p(\rho, T) \quad (1.3.10)$$

常见的气体大多数服从完全气体的状态方程

$$p = R_\rho T \quad (1.3.11)$$

其中, R 为气体常数, 对于空气, $R = 287 \text{ m} \cdot \text{N}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

常见流体的密度值如表 1.3.2、1.3.3 和 1.3.4 所示。

水的物理性质

表 1.3.2

温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 ρ $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	动力黏度 μ $/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	运动黏度 ν $/(\text{m}^2/\text{s})$	温度 t $/^\circ\text{C}$	密度 ρ $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	动力黏度 μ $/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	运动黏度 ν $/(\text{m}^2/\text{s})$
0	999.8	1.781	1.785	40	992.2	0.653	0.658
5	1000	1.518	1.519	50	988.0	0.547	0.553
10	999.7	1.307	1.306	60	983.2	0.466	0.474
15	999.1	1.139	1.139	70	977.8	0.404	0.413
20	998.2	1.002	1.003	80	971.8	0.354	0.364
25	997.0	0.890	0.891	90	965.3	0.315	0.326
30	995.7	0.798	0.800	100	958.4	0.282	0.294

标准大气压下空气的物理性质

表 1.3.3

温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 ρ $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	动力黏度 μ $/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	运动黏度 ν $/(\text{m}^2/\text{s})$	温度 t $/^\circ\text{C}$	密度 ρ $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	动力黏度 μ $/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	运动黏度 ν $/(\text{m}^2/\text{s})$
-40	1.515	1.49	9.8	30	1.156	1.86	16.0
-20	1.395	1.56	11.2	40	1.128	1.91	17.1
-10	1.350	1.62	12.0	60	1.060	2.03	19.2
0	1.293	1.68	13.0	80	1.000	2.15	21.7
10	1.248	1.73	13.9	100	0.946	2.28	24.3
20	1.205	1.80	14.9	200	0.747	2.58	34.5

常见液体的物理性质 ($p = 1.0132 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T = 20^\circ\text{C}$)

表 1.3.4

液体名称	密度 ρ $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	动力黏度 μ $/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	运动黏度 ν $/(\text{m}^2/\text{s})$	温度 t $/^\circ\text{C}$	密度 ρ $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	动力黏度 μ $/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	运动黏度 ν $/(\text{m}^2/\text{s})$
苯	895	0.65	0.7263	30	808	1.92	2.3762
四氯化碳	1588	0.97	0.6108	40	13550	1.56	0.1685
原油	856	7.20	8.4112	60	1206	0.28	0.2322
汽油	678	0.29	0.4277	80	918	82	89.32
甘油	1258	1490	1184	100	918	440	479.3

根据流体密度的变化能否被忽略, 可以把流体划分为不可压缩流体和可压缩流体两类。液体的密度受压强和温度变化的影响相对较小, 在多数情况下可作为不可压缩流体来处理; 而气体在很多情况下都要作为可压缩流体来处理, 在少量情况下作特殊处理。如, 在水下爆炸波的传播时水的压强和温度的变化都十分剧烈, 爆炸波正是通



过对水的压缩而传播的,在研究这类问题时就必须把水作为可压缩流体来考虑。与此相反,在气体低速流动问题中,压强和温度的变化都很小,因而气体密度的相对变化也不大,这时又可以把气体作为不可压缩流体来处理。

1.3.3 黏性

牛顿平板实验

相邻两层流体之间或者流体与固体表面之间在发生相对运动时会产生内摩擦作用,流体的这种特性称为黏性。图 1.3.1 所示为牛顿平板实验描述了黏性影响流体运动的情况。两块平行放置的平板相距 h , 板之间充满流体, 固定下板, 在上板上施加外力 F , 使它在自身平面内产生均匀的速度 u 。

实验发现, 外力 F 、速度 u 、板间距离 h 和板面积 A 之间关系为

$$F = \mu A \frac{u}{h} \quad (1.3.12)$$

其中, μ 是一个比例系数, 称为流体的动力黏度。 F 的单位是 N(牛顿), h 、 A 和 U 的单位分别是 m、 m^2 和 m/s, 由式(1.3.12)不难看出, 动力黏度 μ 的单位是 $N \cdot s/m^2$ 或 $Pa \cdot s$ 。

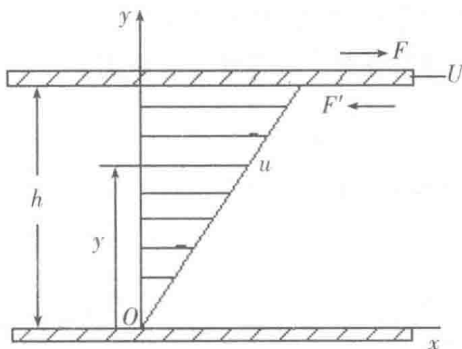


图 1.3.1 平板黏性实验

通过观察还发现, 由于流体的黏性作用, 紧靠上板的流体以速度 u 随上板一起运动, 而紧靠下板的流体则黏附在下板上, 其速度为零。在平板间流体的速度呈线性分布。分析平板的受力, 流体对板所作用的摩擦阻力为 $\mu Au/h$, 它与外力 F 平衡, 所以平板才能保持匀速运动。事实上, 取出任意一层流体作为隔离体并分析作用在上面的力就可以知道, 流体层上、下表面上黏性剪切力的大小均为 $\mu Au/h$, 而方向则是相反的。上层流体速度较大, 它通过对下层流体施加剪切力而使之产生运动; 下层流体速度较小, 它对上层流体施加反向的摩擦阻力, 从而减缓它的运动。这对力称为内摩擦力或者黏性剪切力。由此可以看到, 只有在流体层之间有相对运动时流体黏性的作用才能显现出来。

内摩擦是流体层之间分子内聚力和分子动量交换的宏观表现。在常温常压下, 静止液体中分子之间的平均距离为平衡距离, 分子之间的吸引力和排斥力相平衡。当液体层之间发生相对运动时, 分子的平均距离增大, 分子之间的吸引力也增大, 于是产