



普通高等教育“十一五”力学规划教材
湖北省精品课程教材

工程流体力学

Engineering Fluid Mechanics

赵汉中 主编



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

普通高等教育“十一五”力学规划教材
湖北省精品课程教材

工程流体力学

赵汉中 主编

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书介绍了流体力学的基本原理及其在工程中的应用,是为机械、材料、热能与动力、船舶与海洋及环境等工程类专业所编写的教材。全书包括绪论、流体静力学、理想流体动力学基础、黏性流体动力学基础、可压缩流体的一元流动、量纲分析与相似原理、理想不可压缩流体的势流和旋涡运动、黏性不可压缩流体的运动、激波与膨胀波,以及流动传输基础等内容。书中对每部分讲述的内容都列举了示范例题,配置了较多的习题,并编写了思考题。

本书可作为工程类专业本科生的教材,也可作为研究生和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/赵汉中 主编.—武汉:华中科技大学出版社,2011.8
ISBN 978-7-5609-7067-7

I. 工… II. 赵… 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(2011)第 090801 号

工程流体力学

赵汉中 主编

策划编辑:徐正达

责任编辑:刘 飞

封面设计:刘 卉

责任校对:周 娟

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:仙桃市新华印务有限责任公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:21

字 数:442千字

版 次:2011年8月第1版第1次印刷

定 价:32.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据机械、材料、热能与动力、船舶与海洋及环境等工程类专业“工程流体力学”课程的教学要求,并参考教育部水力学和流体力学教学指导小组制定的《工程流体力学课程教学基本要求》编写的教材。

流体力学是一门基础学科,也是一门应用学科。“工程流体力学”是许多工程专业的重要学科基础课程,并被多个专业列为基础课“平台”课程。作为多个工程类专业的学科基础课程,该课程一方面要能够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,学会处理流体力学问题的一般方法,为学习后续选修课程建立扎实的基础;另一方面也要求课程内容具有一定的广泛性,以满足不同专业背景学生的需要。本书为满足上述教学要求而编写。全书共十章,大体分为两部分,前六章为第一部分,可以供相关工程类专业学科基础课程使用;后四章为第二部分,可以供热能与动力及环境工程类等需要更多流体力学知识的专业选用。

教学不仅要传授知识,更要注重提高学生的素质,培养学生分析和解决实际问题的能力。这是我们在教学实践中努力的方向,也是编写教材的指导思想。在本书的编写中,编者力求做到突出物理概念和基本原理,启发学生进行思考,激发学生的兴趣,强调解决问题的一般方法,落脚于实际工程问题。为了有利于学生自主学习,本书对每部分讲述的内容都列举了示范例题,配置了较多的习题,并编写了思考题。

本书是在2005年华中科技大学出版社出版的《工程流体力学》(I)、(II)的基础上,根据几年来的教学使用情况,由四位具有丰富教学经验和教材编写经验的教师重新编写而成的。各章的编写分工为:赵汉中,第1、2、4、8、9章;陈波,第3章;李万平,第5、7章;陈瀚,第6、10章。全书由赵汉中统稿。

本书的编写和出版获得了华中科技大学教材建设基金的支持。

编 者

2011年7月

主要符号表

A	面积
\mathbf{a}	加速度矢量
a_x, a_y, a_z	加速度分量
B, b	宽度
c_p	(质量)定压热容
c_v	(质量)定容热容
C_D	阻力系数
C_p	压强系数
c	声速,水击波波速
D, d	直径
E	能量,(固体)弹性模量
e	(质量)内能
Eu	欧拉数
F	力
\mathbf{F}	力矢量
F_D	阻力
Fr	弗劳德数
f	单位质量力矢量
f	频率
f_x, f_y, f_z	单位质量力分量
G	重量
g	重力加速度
H	高度
h	高度,(质量)焓
K	体积模量
L, l	长度
m	质量
M	力矩
Ma	马赫数
P	功率
p	压强

主要符号表

p_a	大气压强
p_R	相对压强
p_v	真空压强
Q, q	体积流量
Q_m	质量流量
R	半径, 气体常数
Re	雷诺数
Sr	斯特罗哈数
T	热力学温度
t	时间, 摄氏温度
U	速度
u, v, w	速度分量
V	体积, 速度
v	速度矢量
W	功, 复位势
α	角度, 动能修正系数
β	角度, 动量修正系数
Γ	速度环量
γ	(质量)热容比
Δ	壁面粗糙度
δ	边界层厚度, 黏性底层厚度
ϵ	截面收缩系数, (固体)应变
ζ	局部损失系数
λ	沿程损失系数
μ	动力黏度, 流量系数, 马赫角
ν	运动黏度, 普朗特-迈耶函数
Π	力势函数, 无量纲综合参数
θ	角度
ρ	密度
σ	正应力, 表面张力系数
τ	切应力
φ	速度势函数
ψ	流函数
Ω	涡矢量
ω	角速度
ω	角速度矢量

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	(1)
1.1 流体与流体力学	(1)
1.2 连续介质模型	(3)
1.3 流体的密度及黏性	(4)
1.4 作用在流体上的力	(9)
1.5 表面张力	(11)
小结	(12)
思考题	(13)
习题	(14)
第 2 章 流体静力学	(15)
2.1 流体平衡微分方程	(15)
2.2 重力作用下静止流体中的压强分布	(16)
2.3 相对静止液体中的压强分布	(22)
2.4 静止液体作用在物体壁面上的总压力	(25)
小结	(30)
思考题	(30)
习题	(32)
第 3 章 理想流体动力学基础	(36)
3.1 描述流体运动的两种方法	(36)
3.2 迹线、流线与流管	(41)
3.3 连续性方程	(44)
3.4 理想流体的运动微分方程	(47)
3.5 理想流体定常运动的伯努利方程	(49)
3.6 总流的伯努利方程	(52)
3.7 伯努利方程应用举例	(55)
3.8 叶轮机械内流体相对运动的伯努利方程	(57)
3.9 动量方程及动量矩方程	(58)
小结	(66)
思考题	(67)
习题	(68)

第 4 章 黏性流体动力学基础	(74)
4.1 水头损失及流动状态	(74)
4.2 圆管定常层流流动	(78)
4.3 湍流的基本特征及湍流应力	(80)
4.4 圆管定常湍流流动	(83)
4.5 局部水头损失	(95)
4.6 有压管流的水力计算	(99)
4.7 管道系统中的水击	(106)
4.8 孔口和管嘴出流	(110)
小结	(115)
思考题	(116)
习题	(117)
第 5 章 可压缩流体的一元流动	(121)
5.1 可压缩气体一元定常流动的基本公式	(121)
5.2 微弱扰动波的传播及声速	(125)
5.3 一元等熵流动的基本关系	(130)
5.4 一元等熵气流在变截面管道中的流动	(134)
5.5 有摩擦和热交换的一元流动	(143)
小结	(149)
思考题	(149)
习题	(151)
第 6 章 量纲分析与相似原理	(154)
6.1 单位与量纲	(154)
6.2 量纲分析与 Π 定理	(157)
6.3 流动相似原理	(161)
小结	(167)
思考题	(168)
习题	(169)
第 7 章 理想不可压缩流体的势流和旋涡运动	(171)
7.1 流体微团的运动分析	(171)
7.2 速度环量与旋涡强度	(178)
7.3 旋涡运动的基本概念	(181)
7.4 不可压缩流体势流的基本求解方法	(185)
7.5 基本的平面有势流动	(194)
7.6 平面势流的叠加	(202)

7.7 不可压缩流体基本轴对称势流及其叠加	(209)
小结	(215)
思考题	(215)
习题	(217)
第 8 章 黏性不可压缩流体的运动	(221)
8.1 黏性流体中的应力	(221)
8.2 不可压缩黏性流体运动的基本方程	(225)
8.3 N-S 方程的解析解	(228)
8.4 边界层的基本概念及基本方程	(238)
8.5 平板层流边界层的相似性解	(244)
8.6 边界层动量积分方程	(247)
8.7 湍流边界层与混合边界层	(251)
8.8 边界层分离及物体阻力	(255)
8.9 自由淹没射流	(262)
小结	(265)
思考题	(266)
习题	(267)
第 9 章 激波与膨胀波	(271)
9.1 正激波	(271)
9.2 斜激波	(277)
9.3 膨胀波	(286)
小结	(291)
思考题	(292)
习题	(293)
第 10 章 流动传输基础	(295)
10.1 流体中的质量传输	(295)
10.2 扩散方程及传输方程	(296)
10.3 静止流体中的扩散	(300)
10.4 直线均匀流场中的随流传输	(309)
小结	(312)
思考题	(313)
习题	(313)
附录 柱坐标系和球坐标系下的常用公式	(315)
习题答案	(318)
参考文献	(324)

第 1 章 绪 论

1.1 流体与流体力学

力学是研究物质机械运动基本规律的科学。力学有许多学科分支,在不同的分支中研究对象和研究方法都有所不同。流体力学是力学的重要分支学科之一,它的研究对象是流体。

流体和固体是物质存在的主要形态。与固体相比,流体更容易变形。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,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,无论力多小,都会使它发生连续的变形;只要剪切力不停止作用,流体就永远不会达到静止平衡状态。

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。

流体力学研究流体的运动规律和力的相互作用规律,研究流体运动过程中动量、能量和质量的传输规律。一方面,流体力学与物理学、数学等学科一样,所阐明的规律具有普遍性,因此流体力学是一门基础学科。另一方面,流体力学的一般原理及所获得的结论又被广泛地用于分析和解决各种与流动相关的实际问题中,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。

流体力学学科的历史非常悠久,人类早在公元前就开始研究流体的运动和受力规律了,早期最著名的研究成果就是阿基米德(Archimedes)浮力定律。公元 18 世纪,随着牛顿(I. Newton)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)等建立了无黏性流体的理论流体力学,从而使流体力学的基本理论初步成形。到了 19 世纪,纳维(C. Navier)和斯托克斯(G. 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则建立了真实流体的实验力学。流体力学在 19 世纪末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管道流动实验,发现流体存在着两种不同的流动状态,即层流和湍流。十几年后,雷诺又运用时均方法建立了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,现代意义上的流体力学形成于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,许多新的研究领域由此被开拓出来。例如,设计高速、高敏捷性的飞机需要解决大量的空气动力学问题,从而使空气动力学这个流体力学的分支学科得到了完善和发展;大型火箭和航天飞机的研制,则在高超音速气动力学、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产生了大量的研究成果;大型水利枢纽的设计提出了许多需要研究的水力学问题,这些问题的逐步解决使水动力学又得到了新的发展;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教训,引起了力学和工程界的密切关注,后来形成了风工程学科;大型汽轮机、燃气轮机等现代动力机械的研制促进了独特的翼栅理论、多相流理论的形成;20世纪以来,气象预报精确度有很大的提高,这又得益于地球流体力学这个新分支学科的产生和完善。

由流体力学的发展历史不难看出,流体力学学科在不断解决自然界中和工程技术领域中所提出问题的过程中逐步地发展和完善着,而流体力学的发展和完善又推动了相关领域科学技术的发展。

人类社会发展到今天,所提出的流体力学问题越来越多,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,舰船的阻力,汽车和高速列车的风阻,市政工程中的通风、通水,高层建筑的风载,污染物在水和大气中的扩散,等等,所涉及的技术领域也越来越广。

在流体力学学科取得显著发展的同时,也留下了许多待解决的难题,例如,湍流的机理解释及湍流计算、旋涡运动的机理解释及旋涡运动的控制、非线性水波和风浪的相互作用问题、多相流及非牛顿流体的相关力学问题、渗流力学问题、热及化学非平衡流体力学问题、微尺度流动及传热问题,等等。在人类所关心的全球气候变化、环境保护、能源开发及利用、海洋开发、防灾减灾等问题中都还有许多待解决的流体力学难题,许多工程技术的发展仍然有赖于流体力学研究的新成果。

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实验设备(如风洞、水槽、管道等)上对流动现象进行模拟、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,计算出反映流动和受力规律的数据。正确的理论分析结果可以揭示流体运动的本质特性和基本规律,具有普遍的适用性;实验结果能够

反映真实流体的实际运动规律,发现新的物理现象,检验理论分析和数值模拟的结果;数值计算则能够用于研究复杂的流动问题,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。

工程流体力学是热能与动力、机械、材料、土木、船舶与海洋及环境等工程类专业的学科基础课程。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。本书作为课程的教材,主要介绍流体力学的基本原理和基本方法,并且将通过大量实例去说明如何运用这些原理、方法去分析和解决与流体运动相关的实际问题。

1.2 连续介质模型

流体由分子组成,分子不停地运动并相互碰撞。分子的运动具有较大程度的随机性,其规律比较复杂。从微观上来看,由于分子之间存在着空隙,流体是不连续分布的介质,因此在流体区域中分子运动参数的空间分布也不连续。通常把流体分子的运动称为微观运动。由于分子运动的随机性及其参数空间分布的不连续性,由微观运动着手来研究流动问题是相当困难的。

也可以把流体看做是由许多个含有大量分子的微团组成的介质。按照分子运动论的观点,流体微团的物理特征表现为其中所有分子的统计平均特征,只要流体微团所包含的分子足够多,其统计平均特征相对稳定,不具有随机性。如果微团紧密分布,相互之间没有空隙,那么微团的运动参数在流体空间上就是连续分布的。与微观运动的概念相对应,流体微团的运动称为宏观运动。由宏观运动着手研究流动比由微观运动着手研究流动要容易得多。

由宏观运动着手研究流动的更重要理由是,在绝大多数实际问题中人们感兴趣的只是流体的宏观运动特征。例如,在工程中所关心的翼型表面上的流体压强变化规律、管截面上的流体速度分布规律等问题中,压强和速度等都是宏观运动参数。事实上,常规测量仪器能够测量的流体力学参数也是一定面积或者体积上的宏观运动参数。例如,目前最精细的激光测速仪的感受体积(激光测速聚焦点)大约为 10^{-6} mm^3 ,在常规条件下,这样小的空气体积内含有大约 2.7×10^{10} 个空气分子。也就是说,激光测速仪所测出的速度值反映的是大约 2.7×10^{10} 个分子运动的整体特征。

同时,为了能够充分反映流体宏观运动的参数变化规律,流体微团中不仅应该含有足够多个分子,它的尺寸相对于实际问题的特征尺寸还必须足够小。例如,当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才能够充分反映出翼型表面上的流体压强变化规律;当流体微团的尺寸相对于管道截面的特征尺寸足够小时,微团间的速度变化才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,例如体积为 10^{-10} mm^3 的水中含

有大约 3.3×10^9 个分子。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看成只是一个“点”,因此也可以把流体微团称为流体质点。

把流体看做是由内含足够多个分子的微团(或质点)所构成的连续介质,这就是所谓的连续介质模型或者连续介质假设。根据连续介质模型,流体的质量在空间上连续分布,反映流体运动和受力的各物理参数,如压强、速度、密度、温度等,都是连续分布的变量。提出连续介质模型的根本目的就是要运用连续函数来描述流体中的物理参数,从而可以在流体力学研究中使用微积分等数学工具。连续介质模型是传统流体力学理论得以建立的基础。

连续介质模型并不是对客观事物的真实描述,它只是一个数学模型,其正确性需要由实践来验证。实践证明,除了少数的特殊问题外,在这个模型基础上对绝大多数流动问题建立方程并由此求解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,宏观特征尺寸的量级与流体分子平均自由程的量级相同或者相近。例如:航天器在高空稀薄气体中飞行时,其特征尺寸的量级与大气分子平均自由程的量级相同;超声速气流中激波厚度的量级与气体分子平均自由程的量级相同;微机电系统中部分流道特征尺寸的量级与气体分子平均自由程的量级相近;生物系统中有些微细流道特征尺寸的量级与流体分子平均自由程的量级相近;等等。在这样一些特殊情况下,连续介质模型不成立,如果仍然采用基于连续介质模型的流体力学基本方程来分析这类流动问题,其结果往往会有较大误差。对于那些不能运用连续介质模型的流体力学问题,一般都是运用分子动力学理论和统计理论,从分析分子运动的统计规律着手来研究流体宏观运动的规律。这些内容已经超出了本书的讨论范围。

1.3 流体的密度及黏性

1. 流体的密度

流体的密度是单位体积流体所具有的质量。用 ρ 表示流体的密度。在均质流体中,如果体积 V 内的流体质量为 m ,则密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

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

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.2)$$

这里 $\Delta V \rightarrow 0$ 只是趋于含有足够多个分子的流体微团(或质点)的体积,而不是趋于严格数学意义上的零。不过,由于流体微团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,因此在处理流体力学问题时对这类极限的处理与在数学问题中并

无差别。

密度的倒数称为比体积,记作 v ,即

$$v=1/\rho \quad (1.3)$$

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。

流体的密度与压强和温度有关。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。液体密度与温度之间的关系可以由下式描述:

$$\rho=\rho_0[1-\alpha_v(T-T_0)] \quad (1.4)$$

其中, T 是热力学温度,单位为 K ; ρ_0 是温度 T_0 下的密度; α_v 是膨胀系数,单位为 $1/\text{K}$,一般液体的 α_v 值都具有 10^{-3}K 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表示,即

$$p=p(\rho, T) \quad (1.5)$$

常见的气体大多数服从完全气体的状态方程,即

$$p=R\rho T \quad (1.6)$$

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

常见流体的密度值可见表 1-1、表 1-2 和表 1-3。

根据流体密度的变化能否被忽略,可以把流体分类为不可压缩流体和可压缩流体。液体的密度受压强和温度变化的影响较小,在多数情况下可以作为不可压缩流体来处理;气体的密度受压强和温度变化的影响较大,在很多情况下要作为可压缩流体来处理。在一些特殊情况下也可以有不同。例如,在水下爆炸波的传播问题中压强和温度的变化都十分剧烈,而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

表 1-1 水的物理性质

温度 / $^{\circ}\text{C}$	密度 ρ / (kg/m^3)	动力黏度 μ / $(10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s})$	运动黏度 ν / $(10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	温度 / $^{\circ}\text{C}$	密度 ρ / (kg/m^3)	动力黏度 μ / $(10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s})$	运动黏度 ν / $(10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$
0	999.8	1.785	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	0.893	90	965.3	0.315	0.326
30	995.7	0.798	0.800	100	958.4	0.282	0.294

表 1-2 标准大气压下空气的物理性质

温度 /°C	密度 ρ / (kg/m ³)	动力黏度 μ / (10 ⁻⁵ Pa·s)	运动黏度 ν / (10 ⁻⁶ m ² /s)	温度 /°C	密度 ρ / (kg/m ³)	动力黏度 μ / (10 ⁻⁵ Pa·s)	运动黏度 ν / (10 ⁻⁶ m ² /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

表 1-3 常见液体的物理性质 ($\rho=1.0132 \times 10^5 \text{ Pa}, t=20 \text{ }^\circ\text{C}$)

液体名称	密度 ρ / (kg/m ³)	动力黏度 μ / (10 ⁻³ Pa·s)	运动黏度 ν / (10 ⁻⁶ m ² /s)	液体名称	密度 ρ / (kg/m ³)	动力黏度 μ / (10 ⁻³ Pa·s)	运动黏度 ν / (10 ⁻⁶ m ² /s)
苯	895	0.65	0.726 3	煤油	808	1.92	2.376 2
四氯化碳	1 588	0.97	0.610 8	水银	13 550	1.56	0.168 5
原油	856	7.20	8.411 2	液氧	1 206	0.28	0.232 2
汽油	678	0.29	0.427 7	SAE10 油	918	82	89.32
甘油	1 258	1 490	1 184	SAE30 油	918	440	479.3

温度的变化幅度都很小,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。

2. 流体的黏性

把盛有液体的圆桶放到旋转台上让其一起转动,桶内的液体会被圆桶带动而作整体的旋转运动。当圆桶停止转动,桶内液体的旋转也会逐渐停止。桶内液体之所以会产生运动或者停止运动,是因为紧靠桶壁的流体黏附在壁面上随桶一起旋转或静止,而相邻两层流体之间发生相对运动时又会在交界面上产生内摩擦作用,从而相互带动。流体的这种特性称为黏性。流体内摩擦的概念是牛顿在 1687 年最早提出的。

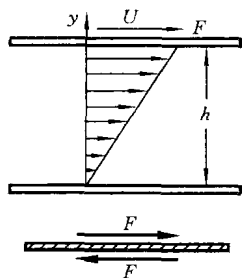


图 1-1 平板拖曳实验

图 1-1 所示的平板拖曳实验(通常也称为牛顿平板实验)更为直观地描述了黏性是怎样影响流体运动的。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 。观测发现,紧靠上板的流体黏附在上板壁面上,以速度 U 随上板一起运动;紧靠下板壁面的流体黏附在下板上,其速度为零;在两板之间流体的速度呈线性分布。任取一层流体(见图 1-1)作为隔离体并分析其受力。流体层上、下表面

上均作用有大小等于 F , 方向却相反的摩擦力。上层流体速度较大, 它通过对下层流体施加与速度方向相反的摩擦力 F 使之产生运动; 下层流体速度较小, 它对上层流体施加与速度方向相反的摩擦力 F , 减缓其运动。流体层之间的摩擦力就是牛顿所说的内摩擦力。内摩擦力也称为黏性剪切力。

牛顿指出, 内摩擦力与流体层之间的相对运动有关, 与速度梯度成正比。如果流体层之间的接触面积为 A , 则内摩擦力

$$F = \mu A \frac{U}{h} \quad (1.7)$$

其中, U/h 是流体的速度梯度; μ 是一个反映流体物理特性的参数, 称为动力黏度, 单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。 F 的单位是 N (牛顿), h 、 A 和 U 的单位分别是 m 、 m^2 和 m/s 。

根据气体分子动力学理论, 流体的黏性现象是动量运输的结果。由于运动速度大的流体层和速度小的流体层分别具有动量较大和动量较小的分子, 当相邻流体层的分子发生交换时, 速度大的流体层损失了动量, 速度小的流体层增加了动量, 由此使运动趋于均匀, 这就是流体层相对运动时产生内摩擦力的原因。

当速度梯度等于零时, 流体层之间没有相对运动, 也就不会产生内摩擦力。可见, 只有当流体与流体之间有相对运动时, 黏性的作用才会显现出来。

流体的黏性还表现在流体对固体表面所具有的黏附作用。在流体与固体的交界面上, 流体分子可以进入固体表面, 实现分子量级的接触, 分子之间的内聚力使流体黏附在固体表面上, 随固体一起运动或者静止。这就是所谓的流体与固体在其交界面上“无滑移”。尽管无滑移现象还很难由实验严格证明, 但它早已被人们广泛接受。

施加于流体表面单位面积上的黏性剪切力又称为切应力, 记作 τ 。由式(1.7), 切应力

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h}$$

如图 1-2 所示, 对于更一般的平面平行剪切流(所有的流体质点沿 x 方向作平行直线运动, 速度沿 y 方向发生变化), 速度分布表示为 $u(y)$, 速度梯度为 du/dy , 切应力表示为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.8)$$

式(1.8)称为牛顿内摩擦定律, 它指出, 由黏性产生的切应力与流体运动的速度梯度成正比。

出现在式(1.8)中的速度梯度 du/dy 同时也是平行剪切流中的剪切变形率。为了说明这一点, 在平面平行剪切流中取图 1-2 所示边长为 Δx 、 Δy 的流体微团 $ABCD$ 。任意的时刻 t 微团为矩形, Δt 时段后微团运动到一个新的位置, 其形状也发生了改变。

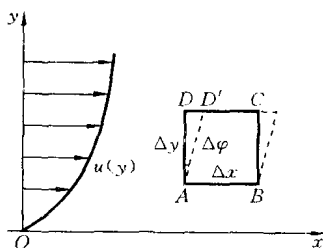


图 1-2 平行剪切流中流体微团的角变形

不考虑微团的位置变化,只考虑它的变形,变形使点 D 移到点 D' 处。设点 A 的速度为 u ,点 D 的速度可以表示为 $u + \frac{du}{dy}\Delta y$ 。 Δt 时段后,点 D 在水平方向相对于点 A 的位移为 $\frac{du}{dy}\Delta y\Delta t$,于是流体线 AD 倾斜,成为 AD' , AD 的旋转角为

$$\Delta\varphi = \frac{\frac{du}{dy}\Delta y\Delta t}{\Delta y}$$

图 1-2 中微团的变形称为剪切变形,由于剪切变形而在单位时间内所产生的变形角称为剪切变形率或角变形率。由上式可得剪切变形率为

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{du}{dy}$$

由此可见,切应力与流体的剪切变形率成正比。这里的讨论仅仅是针对一个平面上的平行流动,在后面的章节中,我们还将针对更为复杂的流动建立应力与变形率之间的关系。

工程中还经常使用运动黏度来描述流体的黏性性质。运动黏度记作 ν ,定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.9)$$

其单位是 m^2/s 。

流体黏度的大小与流体的种类、流体中的温度及压强有关。压强变化对黏度的影响相对较小,一般可以忽略;温度变化对黏度的影响则多数情况下需要考虑。常见液体的黏度随温度的升高而减小,常见气体的黏度则随温度的升高而增大。

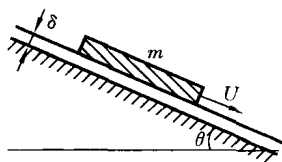
流体的黏度由实验测定。常见流体的黏度值可见表 1-1、1-2 和 1-3。

例 1-1 如图 1-3 所示,面积 $A = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 、质量 $m = 200 \text{ kg}$ 的平板沿长斜面下滑,斜面与水平面之间夹角 $\theta = 30^\circ$,板与斜面之间为厚度 $\delta = 0.05 \text{ mm}$ 的油膜,其动力黏度 $\mu = 2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。试求板下滑的极限速度。

解 当板重力沿斜面方向的分力与黏性摩擦力相平衡时,板下滑的速度达到极限值 U 。由牛顿内摩擦定律,此时切应力

$$\tau = \mu \frac{U}{\delta}$$

板的力平衡关系为



$$mg \sin\theta = \tau A = \mu A \frac{U}{\delta}$$

由此解出

$$U = \frac{mg\delta \sin\theta}{\mu A} = \frac{200 \times 9.8 \times 5 \times 10^{-5} \times \sin 30^\circ}{2 \times 10^{-3} \times 4} \text{ m/s} \\ = 6.125 \text{ m/s}$$

图 1-3 例 1-1 图