

获上海市优秀教材三等奖
上海市教育委员会高校重点教材建设项目

工程流体力学

(第2版)

ENGINEERING FLUID MECHANICS

主编 宋秋红 夏泰淳 王世明 兰雅梅

组编 上海市教育委员会



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本教材是上海市教育委员会普通高等学校教材重点建设项目,是水产类院校及普通高等院校工科专业流体力学课程教材。本教材的主要内容有:绪论、流体静力学、流体运动学、理想流体动力学、平面势流理论、水波理论、黏性流体动力学、有压管流和明渠流、边界层理论、一维气体动力学基础。

本书针对一般工科院校学生的基础及专业特点,注意加强理论基础,注重对学生能力的培养,论述简洁明了、深入浅出,物理概念清楚。各章均有一定数量的例题以及结合教材内容的习题,有助于读者的理解及自主学习。为配合教学,编写出版《工程流体力学习题指导》以及教学课件 ppt(可在上海交通大学出版社网站免费下载)。

本教材可作为高等院校海洋工程、热能动力工程、暖气与通风工程、机械工程等专业本科教材,也可供建筑工程、环境工程、水利工程等专业本科生及从事上述专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/宋秋红等主编. —2 版. —上海:上海交通大学出版社,2012

ISBN 978-7-313-09005-8

I. 工... II. 宋... 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(2012)第 219476 号

工程流体力学

(第 2 版)

宋秋红 夏泰淳 王世明 兰雅梅 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市文化印刷有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:19.25 字数:459 千字

2012 年 9 月第 2 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

印数:3 020

ISBN 978-7-313-09005-8/TB 定价:42.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:0512-52219025

序

流体力学是力学的一个分支,是一门应用范围异常广阔的学科。它向其他学科的渗透力很强,几乎与所有基础和技术学科都可形成交叉学科。故在普通工科院校非力学专业本科阶段设置工程流体力学课程,对学生知识结构的组成和创新潜能的培养是十分必要的。

作者长期从事于水产院校工科专业的流体力学教学,该教材是作者集 20 多年的教学和教改之经验并结合科研工作中的实践,精心编撰而成。

教材的编写既考虑到理论的严谨性,又照顾到读者的基础程度,循循善诱,深入浅出。全书贯彻了基本、实用、简练的原则,摒弃繁琐的推导,着重于对流动现象、基本公式和定理的物理意义之解释与分析,特别强调这些基本原理在工程实践中的应用。教材的内容比较全面,覆盖了流体力学的基本理论,因此教材的适用对象相对较广。

该教材的一个显著特点是在加强例题分析的基础上,配置了相应的实用性较强的习题。同时编著了配套的习题指导和解析。这有助于训练学生解决实际问题的能力,提高教学效果。

相信该书的出版,为一般非力学类工程专业的学生和有关工程技术人员提供了一本使之能迅速、牢固、系统地掌握流体力学基本原理的合适教材和参考书。

力学前辈武际可先生在庆祝中国力学学会四十周年的文章“力学——迎接 21 世纪新的挑战”中激情满怀地写道:“搞建设,力学是墙根;攻科技,力学是刀刃。砌墙根要好砖,学力学要好男好女。……一个现代社会的成员,缺少了力学文化,寸步难行。每个成员的这种文化素质提高了,将为社会增加无形的财富,减少有形的损失,社会的生产效率提高将是难以估计的。”有感于武先生的情怀与哲理,作为全国高等学校力学教学指导委员会的一员,深感提高力学教学质量的意义和责任;承蒙作者抬爱,邀我作序;为耕耘者潜心写书精神之所动,欣然命笔。

刘桦

2005 年 12 月

再版前言

《工程流体力学》教材自 2006 年 2 月出版至今已逾 6 年,在此期间先后重印了 3 次,共计 11 130 册,受到了广大教师和学生们的欢迎,并于 2007 年荣获上海市教委优秀教材三等奖。

为适应 21 世纪的需要,通过多年的教学实践,本教材对第 1 版进行了修订。《工程流体力学》(第 2 版)在内容上更重视“三基”训练,即基础理论、基本知识和基本技能,而且也吸纳、介绍了近年来在流体力学领域中的新知识、新进展。文字方面仍保持少而精的原则,重点更加突出,简明实用。本次修订,在广泛征求和收集部分院校师生对原教材意见的基础上,对全书内容进行了更新、充实和修改,注意拓宽知识面和实际工程上的应用,增加了第 8 章明渠流动的内容。为了便于学生复习和自测,还增添了模拟试卷,以利于学生的自主复习和总结提高。全书由宋秋红、夏泰淳、王世明、兰雅梅执笔编写,最后由宋秋红、夏泰淳统稿完成。

我们力求第 2 版教材有所改进和提高,以适应大多数院校的教学需要。同时,我们也恳请教材使用者,能发现问题,给予指正,使本教材能不断臻于完善。

作者

2012. 7. 28

前 言

随着科学技术的日益发展,流体力学这门学科的重要性也渐显出来。可以毫不夸张地说,现在几乎所有的工程专业都直接或间接地与流体力学有关。由于流体力学学科的渗透力很强,与所有基础和专业学科之间都有交叉学科形成,因此各类工程专业,即使是非力学专业,开设流体力学课程也十分必要。但是,由于流体力学中的一些概念比较抽象,再加上流体运动本身十分复杂,因此学生在学习中往往存在不少困难。为了帮助一般工科专业学生迅速、牢固、系统地掌握流体运动的基本概念,作者依据 20 多年来在教学上的体会和心得编写了本书,并尽可能使教材具有简洁明了和深入浅出的特点。考虑到水产专业及一般工科专业学生的基础和专业需要,本教材尽可能简化对公式、定理的数学推导,而着重于对其物理概念的阐明、理解和应用,强调知识点的工程背景,以引导学生建立正确的物理概念和力学模型;本书加强了例题分析,这些例题具有典型性和实用性,既有助于学生增强对现象、概念和结论的理解,也有利于学生掌握解决实际问题的能力和方法;书中还配置了相应的实用性较强的习题,有助于学生进一步消化和理解教材的内容。这是理论与实践相结合的重要环节。为了引导学生少走弯路,方便学生自主学习,作者还为本教材所有习题配套编写了习题指导和解析。上海交通大学出版社网站提供本教材试卷的电子版本及参考答案。

本教材共分 10 章,前 6 章主要是以不考虑黏性的理想流体为主要研究对象,分别讲述了绪论、流体静力学、流体运动学、理想流体动力学,以及研究理想流体运动极为重要的平面势流理论和简单的水波理论;第 7 章至第 9 章主要阐明黏性流体的量纲分析和相似原理,圆管中的流动以及边界层理论;最后,第 10 章简单介绍了一维可压缩气体的理论基础。由于教材的内容既有一定的广度,也有一定的深度,因此适用的对象相对比较广。本书的主要使用对象是非力学类工程专业,如机械、热能、动力、能源、暖通、船舶、环保、海洋工程及相关专业的本科生,也可供从事有关流体力学工作的教师及工程技术人员参考。不同对象可根据需要取舍,也适合系统学习。

在本书编写过程中,上海交通大学刘桦、刘岳元教授等对本教材提出过很多积极建议,并分别审阅了部分章节。上海水产大学教授周应祺对作者从事的流体力学课程教学与书稿提出过许多宝贵意见和建议,特在此表示衷心的感谢。赵汉取和张杰承担了全部书稿的制图和打印工作,付出了不少辛勤劳动,在此也一并致谢。

本书编写时,有些内容及部分习题是从主要参考文献中的教材中引用的,在此特向有关作者和出版社表示感谢。

本书是上海市教委普通高等院校重点建设教材,但在编写过程中,限于作者水平和能力,书中如有不当之处,恳请专家和读者提出批评与指正。

作 者
2005 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 流体力学的任务与研究对象	1
1.2 作用在流体上的力	2
1.3 流体的主要力学性质	4
习题	13
第 2 章 流体静力学	15
2.1 流体静力学的基本方程	15
2.2 流体静压强的分布规律	17
2.3 压强计示方式与量度单位	19
2.4 流体的相对静止	23
2.5 液体对平壁的总压力	24
2.6 液体对曲壁的总压力	28
2.7 浮力与稳定性	33
习题	36
第 3 章 流体运动学	41
3.1 描述流体运动的两种方法	41
3.2 流体运动的分类、迹线和流线	47
3.3 连续性方程	55
3.4 流场中一点邻域内相对运动分析	58
3.5 势流及速度势函数	61
3.6 平面流动和流函数	64
3.7 几种简单的平面势流	69
习题	75
第 4 章 理想流体动力学	78
4.1 欧拉运动微分方程式	78
4.2 伯努利方程	79
4.3 伯努利方程的实际应用	83
4.4 恒定流动的动量定理和动量矩定理	94

习题	99
第 5 章 平面势流理论	103
5.1 平面势流的复势	103
5.2 复速度	106
5.3 求解平面势流复势的方法	109
5.4 作用在物体上的力和力矩	135
习题	137
第 6 章 水波理论	141
6.1 二维波动的数学表达	141
6.2 波浪运动的基本方程与边界条件	143
6.3 深水微幅简谐波	146
6.4 有限深度微幅波动	152
6.5 界面波	158
6.6 波群和波群速	160
6.7 波浪的能量和波阻	161
习题	167
第 7 章 黏性流体动力学	168
7.1 黏性流体的运动微分方程式	168
7.2 量纲分析	172
7.3 相似理论	180
7.4 模型实验基础	184
习题	187
第 8 章 有压管流和明渠流	191
8.1 雷诺实验、层流和湍流	191
8.2 圆管层流运动	194
8.3 圆管湍流运动	197
8.4 湍流的沿程水头损失	202
8.5 管道流动的局部水头损失	210
8.6 明渠流动	213
习题	223
第 9 章 边界层理论	226

9.1	边界层概念	226
9.2	平板层流边界层	234
9.3	平板湍流边界层	235
9.4	平板混合边界层	236
9.5	沿曲面的边界层及其分离现象	239
9.6	绕流阻力	242
	习题	246
第 10 章	一维气体动力学基础	248
10.1	声速和马赫数	248
10.2	气体一维恒定流动的基本方程	253
10.3	喷管的等熵出流	264
10.4	可压缩气体管道流动	266
	习题	271
附录 A	符号表	273
附录 B	常见截面的几何特征量	276
附录 C	几种典型物体绕流的阻力因数	278
附录 D	模拟试卷	280
	习题参考答案	290
	参考文献	296

第 1 章 绪 论

1.1 流体力学的任务与研究对象

1.1.1 流体力学的任务

流体力学是一门宏观力学,它研究由于外部原因而引起的流体运动,而对于流体的分子运动是不予考虑的。它是航空、水利、建筑、制冷、渔业、造船及机械等近代工业的理论基础。

流体力学主要研究流体运动的规律,以及流体与固体、液体及气体界面之间的相互作用力问题。随着近代能源、环境保护、化工和石油等生产的发展,流体力学与工程技术的关系愈来愈密切。

流体力学与祖国现代化建设有着密切的联系。研究各种水上或水下运动物体(如船舰、潜艇、各种网具等),可以了解它们的水动力学性能,以便获得阻力小、性能佳的物体形状;研究河流、渠道和流体在各种管道中的流动,特别是流体与各种壁面之间的作用力,可以掌握它们的运动规律,获得节能高效的工程设计;研究大气和海洋运动,可以更好地为农业、渔业、航海技术服务。

流体力学学科的渗透性很强,几乎与所有基础和技术学科形成了交叉学科。因此,在非力学专业开设流体力学课程十分必要。没有流体力学的发展,现代工业和高新技术的发展是不可能的。流体力学在推动社会发展方面作出过重大贡献,今后仍将在科学与技术的各个领域中发挥更大的作用。

1.1.2 流体力学的研究对象

流体力学的研究对象就是流体以及在其中运动的物体。流体包括液体和气体两大类。它们的共性是,由于流体质点之间的内聚力很小,所以具有很大的流动性。所谓流动性是指,流体在无论多么微小的剪切力作用下,都会发生连续剪切变形,直至剪切力停止作用为止。但是液体和气体也具有各自的个性:对于液体来说,它具有一定的容积,往往存在一个自由表面;对于气体来说,它不具有固定的容积,不存在自由表面,但容易压缩。在研究某个问题过程中,如果液体或气体各自的个性可忽视的话,那么这两者之间便具有大致相同的规律。

例如,当研究在空气中飘行的气球和深水中运动的水雷时,由于水雷在深水中运动,自由表面对其的影响可以忽略不计;而气球运动的速度很小,气体的压缩性也可不予考虑,因此,这两个物体尽管在不同的流体中运动,它们的力学规律是完全相同的。

1.1.3 流体力学的一个最基本假设

在研究流体力学时,认为流体完全充满它所占有的空间而不存在任何空隙。这就是说流体力学研究对象是一种所谓的连续介质,且不考虑流体的分子运动。以空气为例,在 0°C

时,1个大气压下 1 cm^3 体积内含有 2.96×10^{19} 个分子。换言之,若以 10^{-3} mm 为边长的正方体内(体积为 10^{-9} mm^3)含有 2.96×10^7 个分子,则从宏观工程的角度来看,如此小的体积完全可看作一个几何点(称为流体质点)。有了这个连续介质假设,每个流体质点就具有确定的宏观物理量。当流体质点位于某个空间点 (x, y, z) 时,若将流体质点的物理量 $B(t)$ 作为该空间点的量,就可以建立该物理量的空间连续分布函数 $B(x, y, z, t)$ 。例如,流体的一切力学特征如:速度、密度及压强等都可以看作坐标及时间的函数,就有可能利用有效的数学工具来计算。在数学上,连续的确切含义是可以无限分割,实数系是一个连续系,空间的连续系就构成了“场”。

学习流体力学,要理解和掌握基本理论、基本概念和基本方法,注意理论联系实际,学会准确分析和解决工程中的各种流体力学问题,并培养深入研究和探讨流体力学学科发展的能力。

本书主要采用国际单位制,例如:长度用“米”,符号为 m ;时间用“秒”,符号为 s ;质量用“千克”,符号为 kg ;力是导出单位,采用“牛顿”,符号为 N , $1\text{ N} = 1\text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。在某些专业设备上,仍有采用工程单位制的习惯。使用时,必须注意两种单位的换算。基本换算关系是 $1\text{ kgf} = 9.807\text{ N}$ 。

1.2 作用在流体上的力

流体运动状态发生变化的外因是流体受到了力,因此首先必须分析作用在流体上的力。流体中作用力按作用方式可以分为质量力和表面力两大类。

1.2.1 质量力

质量力是施加在每个流体质点上的力。它具有以下几个特点:若在流体中取出一团被封闭表面 A 所包围的某一任意体积 V 的流体,质量力是作用在体积 V 内所有流体质点上,力的大小与这一流体质点的质量成正比,而与在体积 V 外流体的存在无关。质量力是分布力,它是分布于各流体质点的体积上,质量力又称为长程力,它能穿越空间作用到所有的流体质点上。一般来说,质量力包括重力和惯性力两种。

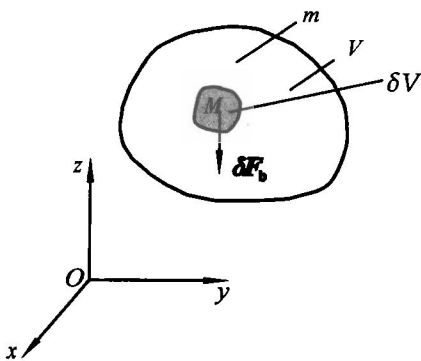


图 1.1 质量力

在流体力学中,质量力的大小通常以作用在单位质量上的力来表示。

在流体中取质量为 m 的一团流体,其体积为 V ,流体质点 M 在其中,包围 M 点的流体元体积为 δV ,设流体元的密度为 ρ ,作用于流体元的总质量力为 δF_b (图 1.1),定义 M 点单位质量的质量力

$$f = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta F_b}{\delta m} = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta F_b}{\rho \delta V}$$

这个力简称质量力。

在直角坐标系中质量力 f 的分量式为

$$f = f_x i + f_y j + f_z k$$

在国际单位制中,质量力的单位是 m/s^2 ,与加速度的单位相同,总质量力的单位是 N 。

在图 1.1 中,假设质量为 δm 的流体受到总质量力 δF_b 作用,产生的加速度

$$a = \frac{\delta F_b}{\delta m}$$

则

$$f = a$$

分量形式为:

$$\begin{cases} f_x = a_x \\ f_y = a_y \\ f_z = a_z \end{cases} \quad (1.1)$$

式(1.1)表示质量力在坐标轴上的投影分别等于质量力产生的加速度 a 在坐标轴上的投影。

举例如下,一辆小车内盛装液体并以加速度 a 作直线运动,如图 1.2 所示。在自由液面上取一点 O 作为原点,并建立坐标系如图,那么,这些液体受到的质量力可以表示为

$$f_x = -a, f_y = 0, f_z = -g$$

或

$$f = -ai - gk$$

1.2.2 表面力

表面力是直接作用在流体表面上的力,它是分布力,但分布于面积上。这个力的施力体主要取决于流体与流体接触还是与物体接触,前者施力体是流体,后者施力体是物体。表面力又称为短程力,是指相邻的流体与流体,流体与物体之间通过分子作用(如分子碰撞、内聚力、分子动量交换等)产生的力,它只有在分子间距的量级上才是显著的。随着两个质点的间距增大,短程力急剧减小为零。一般来讲,表面力包括压力和黏性力两种。

在流体力学中,表面力通常以单位面积上的表面力来表示。

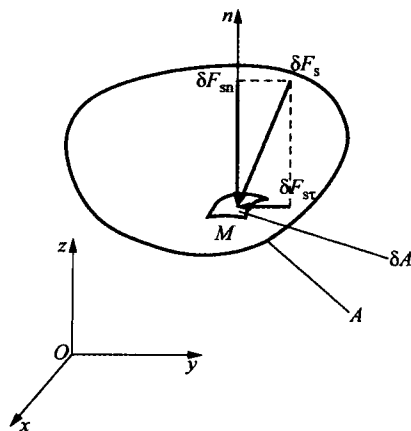


图 1.3 表面力

在运动流体中,设某团流体与外界接触的表面为 A ,在 A 上取一小块微小面积 δA ,其中流体质点 M 在 δA 内(图 1.3)。若作用在 δA 上的总表面力为 δF_s ,将其沿 δA 的法向和切向分解为两个分力 δF_{sn} 和 δF_{st} ,则定义:

$$p = \frac{\delta F_{sn}}{\delta A}$$

为 δA 上的平均压应力;

$$\tau = \frac{\delta F_{st}}{\delta A}$$

为 δA 上的平均切应力,

取极限

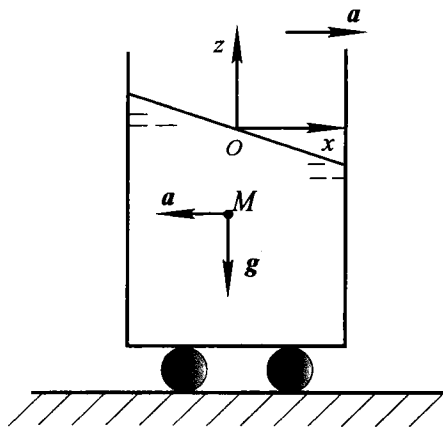
$$p_M = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F_{sn}}{\delta A}$$


图 1.2 重力和惯性力

称为 M 点的压应力,习惯上将其称作 M 点的压强。

$$\tau_M = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F_{\text{切}}}{\delta A}$$

称为 M 点的切应力,习惯上将其称作 M 点的黏性应力。压强和切应力的单位是帕斯卡 (Pascal),以符号 Pa 表示, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$, 工程单位为 kgf/m^2 或者 kgf/cm^2 。换算关系是 $1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。

1.3 流体的主要力学性质

在研究流体的平衡及运动时,必须知道流体的力学性质。流体最主要的力学性质是惯性、黏性以及压缩性和热胀性。

下面阐述这几个力学性质。

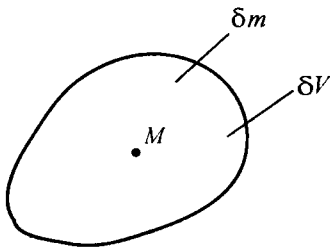
1.3.1 惯性

所谓惯性是指物体维持原有运动状态的性质,要改变物体的运动状态,则必须克服惯性的作用。一般用物体的质量来表征物体惯性的量度。在地球引力场里,由于物体的重量与质量成正比,因此重量也是惯性的量度。但是在多数情况下,流体的总质量或者总重量是没有意义的。因此往往用密度和重度来表征流体的惯性。

1. 密度

密度是单位体积流体的质量,以符号 ρ 来表示。

设一团流体体积为 δV , 质量为 δm , 流体质点 M 在其中(图 1.4), 则这团流体的平均密度为:



$$\rho_{\text{平均}} = \frac{\delta m}{\delta V}$$

式中:

ρ —— 流体的密度, kg/m^3 ;

δm —— 流体的质量, kg ;

δV —— 该流体的体积, m^3 。

定义流体质点 M 的密度为

$$\rho_M = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V}$$

各点密度不完全相同的流体,称为非均质流体;而各点密度完全相同的流体,称为均质流体;如果流体的密度始终不变,则称为不可压缩流体,可用 $\rho = \text{常量}$ 来表示。

2. 重度

重度或称容重,是单位体积流体的重量,以符号 γ 来表示。

如图 1.4 所示,这团流体的重量为 $\delta G = \delta m \cdot g$, 则这团流体的平均重度

$$\gamma_{\text{平均}} = \frac{\delta G}{\delta V}$$

式中 $\gamma_{\text{平均}}$ 的单位为 N/m^3 。

定义流体质点 M 的重度为

$$\gamma_M = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta G}{\delta V}$$

显然密度 ρ 和重度 γ 之间的关系为 $\gamma = \rho \cdot g$ ，其中 g 是重力加速度。

压强和温度的变化对液体的密度影响很小，一般可视液体的密度为常量，如采用水的密度为 $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$ ，水银的密度为 $13\,600\text{ kg}/\text{m}^3$ 。但压强和温度的变化对气体的密度影响较大，一个标准大气压下， 0°C 空气的密度为 $1.29\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

在一个标准大气压下，水的密度见表 1.1，几种常见流体的密度见表 1.2。

表 1.1 水的密度

温度/ $^\circ\text{C}$	0	4	10	20	30
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	999.87	1 000.00	999.73	998.23	995.67
温度/ $^\circ\text{C}$	40	50	60	80	100
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38

表 1.2 几种常见流体的密度

流体名称	空气	酒精	四氯化碳	水银	汽油	海水
温度/ $^\circ\text{C}$	20	20	20	20	15	15
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.20	799	1 590	13 550	700~750	1 020~1 030

在一些工程问题中，还经常用到比重这一概念。流体的比重是指该流体的重度与水在温度为 4°C 时的重度之比。或者讲该流体的密度与 4°C 水的密度之比。比重用符号 d 表示。

由于比重比密度更容易记，在工程上用得较多，例如水银的比重为 13.6，酒精的比重为 0.8，相应的密度分别是 $13.6 \times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $800\text{ kg}/\text{m}^3$ 。比重的公式如下：

$$d = \frac{\gamma}{\gamma_{4^\circ\text{C水}}} = \frac{\rho}{\rho_{4^\circ\text{C水}}}$$

很显然，比重是一个无量纲量。

1.3.2 黏性

1. 黏性的表象

当用棒旋拨盆中的水时，盆内的水被带动而作整体旋转运动。将棒取出后，水旋转速度渐渐减小，直至静止。这个例子说明：流体除了流动性外，还有带动或阻止邻近流体运动的特征。流体在运动时，流体内部的流体质点或流体流层之间因相对运动而产生内摩擦力（或内切向力），以抵抗相对运动，这种性质称为黏性。而此内摩擦力称为黏滞力。在流体力学研究中，流体黏滞力十分重要。

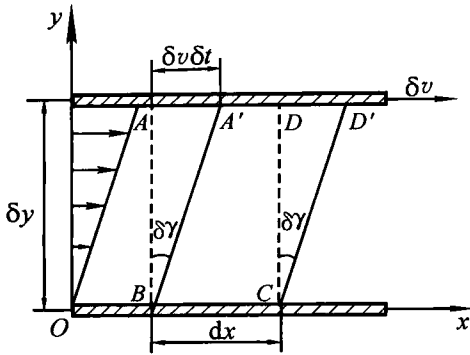


图 1.5 黏性

为了说明流体的黏性,可参阅图 1.5,两块水平放置的无限大平行平板,相距 δy ,两板间充满黏性流体。设下平板固定不动,而上平板上施加一个力 δF ,使其以速度 δv 向右运动。由不滑移假设,贴近上、下平板的流体质点必附着于板面,与下平板贴近的流体质点其速度为零,而与上平板贴近的流体质点同样以平板的运动速度 δv 向右运动。在两平板间,每层流体质点的速度如图 1.5 所示。倘若两平板之间的距离 δy 很小,而且平板移动速度 δv 不大时,可以认为平板间每层流体的速度分布是直线分布,否则就是曲线分布。

2. 牛顿内摩擦定律

牛顿曾做过此类实验,设移动上平板时单位面积上所需的力为 τ_0 ,那么

$$\tau_0 \propto \delta v \quad \text{且} \quad \tau_0 \propto \frac{1}{\delta y}$$

或者可写成:

$$\tau_0 = \mu \frac{\delta v}{\delta y}$$

式中 μ 是比例系数,称为黏度系数(或黏度),单位是 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$,以符号 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 表示。

τ_0 代表黏性流体作用于移动平板单位面积上的切向力或者摩擦阻力。实际上,流体在运动时,各层之间都会产生摩擦阻力。设任意两层流体,它们之间的距离为 dy ,它们之间的速度差为 dv ,则这两层流体之间单位面积所受到的切向力(简称切应力)为

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.2)$$

式中, $\frac{dv}{dy}$ 是速度在法线方向的变化率,称为速度梯度。式(1.2)就是牛顿内摩擦定律。

观察由虚线所围的矩形流体元 $ABCD$ 的变形。如图 1.5 所示,根据不滑移假设,经过 δt 时间后, AD 线移动到 $A'D'$,移动的距离为 $\delta v \delta t$, AB 和 DC 线的偏转角均为 $\delta \gamma$,矩形变成平行四边形。偏转角 γ 对时间 t 的导数 $\dot{\gamma}$ 称为角变形速率,简称切变率。即

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\delta \gamma}{\delta t} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\delta v \delta t}{\delta y \delta t} = \frac{dv}{dy}$$

故式(1.2)也可写成:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \dot{\gamma} \quad (1.3)$$

式(1.3)表示:黏度 μ 的物理意义是产生单位切变率所需切应力的大小。在一定的切应力作用下,黏度大的流体产生的切变率小,流得慢;黏度小的流体产生的切变率大,流得快。

温度对流体黏度的影响很大。液体的黏度随温度升高而减小,气体的黏度随温度升高

而增大。这是由流体黏性的微观机制决定的：液体的黏性主要由分子内聚力决定。当温度升高时，液体分子运动幅度增大，分子间平均距离增大，由于分子间吸引力随间距增大而减小，使内聚力减小，黏度也相应减小；气体的黏度主要由分子动量交换的强度决定。当温度升高时，分子运动加剧，动量交换剧烈，表现切应力增大，使黏度也相应增大。压强对于 μ 值影响很小，故一般可以忽略不计。只有发生几百个大气压变化时，黏度才有明显变化。在高压作用下，液体和气体的黏度都将随压强的升高而增大。

牛顿内摩擦定律只适用一般流体，如水和空气等，它们均为牛顿流体，而将不满足该定律的流体称为非牛顿流体，如泥浆、污水、油漆和高分子溶液等。

如果既考虑流体的惯性，同时又考虑流体的黏性，则定义运动黏度：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.4}$$

式中， ν 的单位是 m^2/s ，由于在 ν 的单位中没有力的单位，只具有运动学的要素 m 和 s ，故称 ν 为运动黏度。

表 1.3 中列举了不同温度时水的黏度。

表 1.3 不同温度下水的黏度

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
0	1.792	1.792	40	0.654	0.659
5	1.519	1.519	45	0.597	0.603
10	1.310	1.310	50	0.549	0.556
15	1.145	1.146	60	0.469	0.478
20	1.009	1.011	70	0.406	0.415
25	0.895	0.897	80	0.357	0.367
30	0.800	0.803	90	0.317	0.328
35	0.721	0.725	100	0.284	0.296

表 1.4 中列举了一个大气压下(压强为 98.07 kPa)不同温度时空气的黏度。

表 1.4 不同温度下空气的黏度

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
0	1.72	13.7	90	2.16	22.9
10	1.78	14.7	100	2.18	23.6
20	1.83	15.7	120	2.28	26.2
30	1.87	16.6	140	2.36	28.5
40	1.92	17.6	160	2.42	30.6
50	1.96	18.6	180	2.51	33.2
60	2.01	19.6	200	2.59	35.8
70	2.04	20.5	250	2.80	42.8
80	2.10	21.7	300	2.98	49.9

3. 理想流体

在研究流体力学问题时,如果考虑表面力中的切应力(黏性力),会带来数学上的困难,而且从牛顿内摩擦定律中可以看出,当流体的黏度 μ 很小, $\frac{dv}{dy}$ 也很小时,则 τ 可以忽略不计,并能得到实用的精确度。因此在流体力学中引入了非黏性流体或理想流体的概念。这种流体其表面力中只有压强而没有黏性力(切应力)。这一抽象,在科学和实用上有很大的价值,它使讨论的问题大为简化,易于得到简单明了的解答。

4. 理想流体压强的性质

在理想流体中,某一定点处表面力中只有压强。参阅图 1.6, A 为某一流体质点,要描述 A 点的压强,必须过 A 点作作用面 I-I, 或 II-II, 等等。那么沿着作用面内法线方向就分别表示 A 点的压强 $p_{A\text{I}}$ 和 $p_{A\text{II}}$, 显然 p_A 的方向是和作用面有关的。那么 $p_{A\text{I}}$ 和 $p_{A\text{II}}$ 的大小是否相等呢? 下面用微分体积法来证明它们的关系。

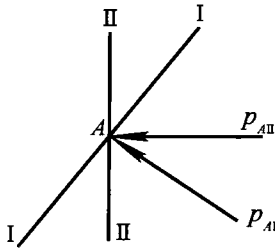


图 1.6 流体质点的压强方向

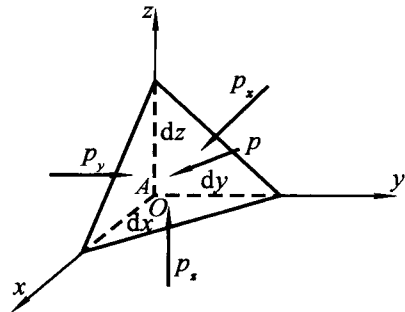


图 1.7 微分四面体平衡

参阅图 1.7, 理想流体在某瞬时,以 A 为顶点取一微分四面体,其三条棱长在直角坐标系中分别为 dx , dy , dz 。作用于此微分四面体各表面上的总压力分别是 $p\delta A$, $p_x\delta A_x$, $p_y\delta A_y$, $p_z\delta A_z$ 。其中, p 为沿微分四面体斜面法线方向的压强, δA 为该斜面的面积。

除表面力外,作用于该微分四面体上还有质量力。总质量力在 x , y , z 轴上的投影分别是

$$f_x \rho \frac{1}{6} dx dy dz; \quad f_y \rho \frac{1}{6} dx dy dz; \quad f_z \rho \frac{1}{6} dx dy dz$$

根据平衡条件,可得

$$\begin{cases} p_x \delta A_x - p \delta A \cos(n, x) + f_x \rho \frac{1}{6} dx dy dz = 0 \\ p_y \delta A_y - p \delta A \cos(n, y) + f_y \rho \frac{1}{6} dx dy dz = 0 \\ p_z \delta A_z - p \delta A \cos(n, z) + f_z \rho \frac{1}{6} dx dy dz = 0 \end{cases}$$

式中, $\cos(n, x)$, $\cos(n, y)$, $\cos(n, z)$ 分别为微分四面体的斜面 δA 的法线与 x , y , z 轴的方向余弦。对于微分四面体而言,各微面积之间有如下关系,即

$$\begin{cases} \delta A_x = \delta A \cos(\mathbf{n}, x) \\ \delta A_y = \delta A \cos(\mathbf{n}, y) \\ \delta A_z = \delta A \cos(\mathbf{n}, z) \end{cases}$$

若当 $dx, dy, dz \rightarrow 0$ 过程中, 由于高阶微量可以忽略不计, 并应用上式关系, 即可得

$$p_x = p_y = p_z = p \quad (1.5)$$

这表明在理想流体中, 流体质点的表面力仅是压强, 该压强的大小与作用面的方向无关, 而仅是该点坐标及时间的函数, 即

$$p = f(x, y, z, t) \quad (1.6)$$

对于静止流体而言, 则

$$p = f(x, y, z) \quad (1.7)$$

沿任意方向压强的变化, 可以用下式来表示:

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz \quad (1.8)$$

例 1.1 在图 1.8 中, 已知圆管中流体的速度分布为 $u = C\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$, 其中 C 为常数。试求管中切应力 τ 的分布公式。

解 管中任意两层流体距离为 dr , 其速度差为 du , 即 $du = C \frac{-2rdr}{R^2}$, 根据牛顿内摩擦定律(1.2)式, 则 $\tau = \mu \frac{du}{dr} = -\frac{2\mu Cr}{R^2}$, 式中负号仅表示方向而已。

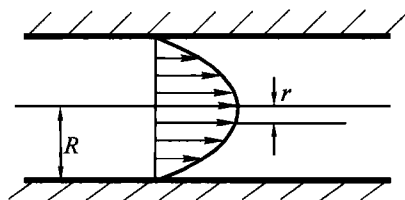


图 1.8 圆管中流速分布

例 1.2 一个底面积为 $40 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$, 高为 1 cm 的木块, 质量为 5 kg , 沿着涂有润滑油的斜面等速向下运动(图 1.9)。已知 $v = 1 \text{ m/s}$, $\delta = 1 \text{ mm}$, 求润滑油的黏度系数 μ 。

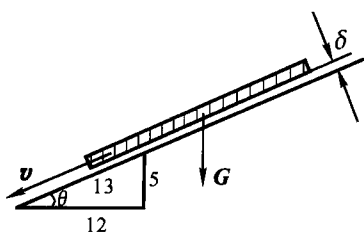


图 1.9 木块在斜面上的运动

解 最上层润滑油黏附在木块上同木块一起, 以 $v = 1 \text{ m/s}$ 运动; 最下层润滑油黏附在斜面上, $v = 0$ 。其中上层油连木块受到沿斜面方向的作用力

$$F = G \sin \theta = \frac{5 \times 9.81 \times 5}{13} = 18.87 \text{ N}$$

单位面积上作用力

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{18.87}{0.40 \times 0.45} = 104.83 \text{ Pa}$$

应用牛顿内摩擦定律(式 1.2), 上、下两层流体的切应力

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$