

(第3版)

LIUTI LIXUE

流体力学

王家楣 张志宏 马乾初 编著

许汉珍 主审

大连海事大学出版社

流体力学

(第3版)

王家楣 张志宏 马乾初 编著

许汉珍 主审

大连海事大学出版社

© 王家楣, 张志宏, 马乾初 2010

图书在版编目(CIP)数据

流体力学 / 王家楣, 张志宏, 马乾初编著 .—3 版 .—大连: 大连海事大学出版社, 2010.6
ISBN 978-7-5632-2444-9

I. ①流… II. ①王… ②张… ③马… III. ①流体力学—高等学校—教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 101727 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

大连美跃彩色印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2010 年 6 月第 3 版

2010 年 6 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 19.75

字数: 513 千

印数: 1~1 500 册

责任编辑: 沈荣欣

封面设计: 王 艳

ISBN 978-7-5632-2444-9

定价: 39.00 元

内容提要

本书是为船舶与海洋工程本科专业流体力学课程编写的教材。内容包括：绪论、流体静力学、流体运动学、理想流体动力学、黏性流体动力学基础、黏性流体的一元流动、边界层理论、旋涡理论、势流理论、波浪理论、相似理论、机翼理论共十二章。适用学时为 60 ~ 76 学时。打“*”的内容可根据学时数的多少或需要进行取舍。

本书对流体力学的基本概念、理论和方法作了深入浅出、繁简适当的叙述，并对能结合专业的章节作了精心选材和内容更新，使之更具特色。各章都附有例题、思考题和习题，并附有习题答案。全书编排层次分明，兼顾了多学时与少学时的需要。

本书第一版于 1999 年获交通部“科技进步三等奖”。

本书也可作为相关专业的教材或参考书，也可供研究生和工程技术人员参考。

前 言

本书是在马乾初、王家楣主编的《流体力学》基础上的第二次修订。原书于 1999 年获交通部“科技进步三等奖”。

本书的第一次修订是基于原武汉交通科技大学流体力学教研室和海军工程大学力学教研室共同进行的湖北省立项的教学研究课题所提出的,于 2002 年完成修订出版,是湖北省精品课程《流体力学》的配套教材。

本次修订参考了教育部教学指导委员会 2009 年修订的《流体力学基础课程教学基本要求》和其他参考文献。考虑到工科专业加大实践性教学内容和环节的教学要求,本次修订在编排上作了适当调整,以便在本课程的基本教学内容完成之后学生能结合所学专业知尽快进入实践性教学环节。因学科的发展和专业要求以及教学计划和学时数的安排,在内容上也作了相应增减:流体静力学中删去了浮性与稳性、船舶正浮时排水体积和浮心坐标的计算、流体密度变化对船舶浮态的影响这几节内容;因计算流体动力学的快速发展,删去了势流理论中复势这部分内容;考虑到主要面向船舶与海洋工程专业,因而删去了明渠均匀流和渗流两章;此外,在边界层理论中将 Blasius 解的求解过程采用了简便推导,以便节省教学时数等等。

本书的前四章主要是流体力学本学科的基本内容,即绪论、流体静力学、流体运动学、理想流体动力学;接下来讲授真实流体流动的相关基础内容,这部分内容共有三章,即黏性流体动力学基础、黏性流体的一元流动、边界层理论;最后五章是船舶与海洋工程专业学生培养所要求的专题内容,即旋涡理论、势流理论、波浪理论、相似理论、机翼理论。

考虑到学生自学的方便,本次修订给出了各章习题的参考答案。

本书部分内容和习题引自国内外出版的有关著作,编者在此谨向这些作者表示感谢!

本次修订 1~7 章由王家楣执笔,8~12 章由海军工程大学张志宏执笔,全书由王家楣主编,马乾初教授作为顾问,为本书的编写提出了宝贵意见。

本书由武汉理工大学熊鳌魁教授初审,华中科技大学许汉珍教授主审,对本书的修订提出了宝贵意见,在此一并感谢!

由于编者才疏学浅,缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2010 年 3 月

目 录

第一章 绪论	1
§1-1 流体力学与专业的关系	1
§1-2 连续介质模型	3
§1-3 流体的性质	4
§1-4 作用于流体上的力	8
思考题	15
习题	16
第二章 流体静力学	18
§2-1 欧拉平衡微分方程式	18
§2-2 流体静力学基本方程式	20
§2-3 常用的测压仪表	21
§2-4 静止流体对平板上的作用力及压力中心	23
§2-5 静止流体对曲面的作用力	25
§2-6 阿基米德原理	27
思考题	30
习题	31
第三章 流体运动学	35
§3-1 研究流体运动的两种方法	35
§3-2 几个基本概念	40
§3-3 连续性方程式	44
§3-4 流体微团运动的分析	49
§3-5 旋涡运动与无旋运动	54
§3-6 速度势函数与流函数	56
思考题	65
习题	65
第四章 理想流体动力学	69
§4-1 欧拉运动微分方程式	69
§4-2 拉格朗日积分式	70
§4-3 伯努利积分式及其应用	72
§4-4 伯努利方程的几何意义和能量意义	81
§4-5 动量定理及动量矩定理	83
思考题	90
习题	91
第五章 黏性流体动力学基础	94
§5-1 黏性流体的运动微分方程式	94
§5-2 二元平板间黏性流体的流动	99

思考题.....	103
习题.....	103
第六章 黏性流体的一元流动.....	106
§6-1 管路计算的基本方程式.....	106
§6-2 流体的两种流动状态及判别方法.....	109
§6-3 圆管中的层流流动.....	110
§6-4 湍流流动及其特征.....	113
§6-5 直圆管内的湍流流动.....	120
§6-6 沿程阻力系数.....	123
§6-7 局部阻力.....	125
*§6-8 薄壁孔口出流.....	126
*§6-9 管嘴出流.....	130
*§6-10 管路水力计算.....	133
思考题.....	140
习题.....	141
第七章 边界层理论.....	144
§7-1 边界层的概念.....	144
§7-2 边界层基本微分方程.....	146
§7-3 边界层动量积分方程.....	152
§7-4 边界层的排挤厚度和动量损失厚度.....	156
§7-5 平板层流边界层.....	157
§7-6 平板湍流边界层.....	159
§7-7 平板混合边界层.....	161
§7-8 船体摩擦阻力的计算.....	164
§7-9 曲面层边界层的分离现象及形状阻力.....	165
§7-10 物体的阻力.....	167
§7-11 减小黏性阻力的方法.....	169
思考题.....	174
习题.....	174
第八章 旋涡理论.....	177
§8-1 旋涡运动的基本概念.....	177
§8-2 汤姆逊定理.....	181
§8-3 海姆霍兹定理.....	183
§8-4 毕奥—沙伐尔定理.....	185
§8-5 旋涡诱导速度的一般提法.....	188
§8-6 兰金组合涡.....	189
思考题.....	193
习题.....	193
第九章 势流理论.....	196
§9-1 几种简单的平面势流.....	197
§9-2 达朗贝尔谬理.....	202

§9-3 麦格鲁斯效应	206
§9-4 附加惯性力与附加质量	209
*§9-5 作用于物体上的流体动力和力矩	212
思考题	216
习题	217
第十章 波浪理论	219
§10-1 微振幅波的基本方程与边界条件	219
§10-2 波速、波长与周期	222
§10-3 水波按水深进行分类	224
§10-4 流体质点的轨道运动	224
§10-5 前进水波中的压力分布	226
§10-6 波群与波群速	227
§10-7 船波	229
§10-8 波能的传递与兴波阻力	230
思考题	235
习题	235
第十一章 相似理论	237
§11-1 相似概念	237
§11-2 相似理论	240
§11-3 方程分析法	240
§11-4 因次分析法与 Π 定理	244
思考题	251
习题	251
第十二章 机翼理论	253
§12-1 机翼的几何特性	253
§12-2 库塔—儒可夫斯基定理	257
*§12-3 绕翼剖面流动的数值解	259
§12-4 机翼的流体动力特性	264
§12-5 有限翼展机翼	269
思考题	285
习题	285
习题参考答案	288
附录 矢量运算及场论公式	303
参考文献	306

第一章 绪论

§ 1-1 流体力学与专业的关系

流体力学是研究流体的宏观平衡和流体的宏观机械运动规律及其在工程实际中的应用的一门学科。流体力学研究的对象是流体,包括液体和气体。

流体最基本的特征是它具有流动性,也就是说流体在一个微小的剪切力作用下,就能够连续不断地发生变形,即发生流动,只有在外力停止作用后,变形才能停止,这正是流体不同于固体最基本的特征。固体则不同,固体能维持它固有的形状,它可以承受一定的拉力、压力和剪切力。液体由于具有流动性,因此没有一定的形状,它随容器的形状而变。液体具有自由表面,不能承受拉力,静止时不能承受剪切力。气体不能承受拉力,静止时不能承受剪切力,具有明显的压缩性,因此也不具有一定的体积,可以充满整个容器。

流体作为物质的一种基本形态,必须遵循自然界一切物质运动的普遍规律,如牛顿的力学定律、质量守恒定律和能量守恒定律等有关物体宏观机械运动的一般规律。因而,流体力学中的基本定理实质上都是这些普遍规律在流体力学中的具体体现和应用。

流体力学在许多工业部门中都有着广泛的应用。航空工业中飞机的制造离不开空气动力学;造船工业部门要用到水动力学。空气动力学、水动力学都是流体力学的一个分支。电力工业中,无论是水电站、火电站,还是核电站、地热电站,工作介质都是流体。机械工业中的润滑、冷却、液压传动都要用到流体力学基本原理。冶金工业中,炉内气体的流动、冷却、通风等有着许多流体力学问题。水利工程中的水资源运用、泄洪消能、河道整治、灌溉排水等有着大量水力学问题。此外,化工流程、石油输送、环境保护、交通运输等等也都遇到不少流体力学问题。所以,可以说流体力学在几乎所有的工业部门中都有着广泛的应用。

流体力学和土建类各专业有着更加密切的关系。在土建工程中,城市的生活和工业用水,从开拓水渠、取水口布置、水的净化与消毒,到水泵选型、水塔修建、管路布置等,都需要解决一系列水力学问题。在公路与桥梁工程中,路基的沉陷、崩塌、滑坡、排水,桥梁、涵洞、倒虹吸管和透水路堤的修建都与水密切相关。采暖通风工程中,热风采暖、冷风降温、燃气输送都以流体为工作介质。土建工程施工中,修建围堰、基坑排水、污水排放都要用到水力学的基本原理。因此,只有掌握好流体的各种力学性质和运动规律,才能正确有效地解决工程实际中所遇到的各种流体力学问题。

结构工程(无论是钢结构,还是钢筋混凝土结构)中,也有大量的流体力学问题。例如船舶结构设计和计算中涉及水动力学;桥梁结构设计中要考虑风致振动以及水动力问题;海洋工程如石油钻井平台,防波堤受到的外力除了风的作用力还有波浪、潮汐的作用力等,高层建筑的设计要考虑抗风能力;船闸的设计直接与水动力有关等等。

流体力学是在人类同自然界作斗争、长期的生产实践中,通过科学实验逐步发展起来的。早在几千年以前,随着农业、航运事业的发展,人们逐渐认识了一些水流运动规律。我国古代劳动人民早在春秋战国和秦朝时期就已修建了都江堰、郑国渠和灵渠。以后则有汉渠和唐徕渠,

大大发展了灌溉事业。特别是都江堰工程所总结的“深淘滩，低作堰”，反映了当时人们对明渠水流和堰流已有了一定的认识。公元前 485 年开始修建，隋朝最后完成的从杭州到北京的大运河长达 1 782 km，大大改善了我国南北运输的条件，特别是在运河上大量地使用船闸，表明我国劳动人民的高度智慧。公元 1363 年制作的我国古代计时工具——铜壶滴漏就是利用孔口出流，水位随时间变化的规律制成的，反映当时人们对孔口出流已有相当认识。与我国情况相类似，早在几千年前，在埃及、古巴比伦、希腊和印度等地，为了发展农业和航运事业，也修建了大量的渠系。古罗马人则修建了大规模的供水管道系统。这些事例说明人们在大量的生产实践也认识了一些水流运动的规律。但是，真正对流体力学这门学科的形成最早作出贡献的是古希腊的阿基米德，他在公元前 3 世纪撰写了《论浮体》，奠定了流体静力学的基础。

公元 15 世纪至 17 世纪，达·芬奇、伽利略、E·托里拆利、B·帕斯卡、I·牛顿等人用实验方法研究了水静压力、大气压力、孔口出流、压力传递和水的切应力等问题。公元 18 世纪以后，流体力学得到了较快的发展。流体运动规律的研究大致可分为两大类：一类是用数学分析的方法进行比较严格的推导，建立流体运动的基本方程，包括伯努利方程、欧拉方程、纳维—斯托克斯方程、雷诺方程等等。但是由于这些纯理论的推导所作的某些假定与实际不尽相符，或由于数学上难于求解，所以无法用于解决实际工程中一些复杂问题。另一类的研究是为了解决生产实际问题，从大量的实验和实际观测中总结出来一些经验关系式，并根据简化后的一维方程进行数学分析，建立各运动要素间的定量关系。从事这类研究并做出贡献的主要有：H·毕托、G·B·文丘里、A·de 谢才、R·曼宁等人。使上述两类研究得到统一的是由德国人 L·普朗特在 1904 年创立的边界层理论，这一理论既明确了理想流体的适用范围，又能计算实际物体运动时所遭受的摩擦阻力。

20 世纪以来，随着生产和科学技术的发展，特别是航空技术的迅速发展，使得理论分析和实验方法日益结合，形成了现代流体力学。根据不同侧重，将侧重于理论分析的流体力学称为理论流体力学，将侧重于应用研究的流体力学称为工程流体力学。

对船舶工程专业而言，船舶航行时，它和周围流体（包括空气和水）发生了相对运动，因此流体力学和造船科学有着密切的关系。

首先遇到的是“浮性”问题。若把几克重的铁扔在水中，它就会下沉。而像船这样一个钢铁制造的庞然大物，能够浮于水面的原因是浮力的作用。这一点在今天看起来十分简单，但在古时候，人们甚至不敢用比水重的材料来造船，其原因就是当时并没有真正懂得阿基米德原理。

其次，造船工程师在进行船舶稳性计算时，要搞清楚风压的大小及风压中心的位置，这也是一个流体力学的问题。

还有阻力问题。船舶航行时要受到水作用的阻力。为了较好地理解阻力产生的原因以及阻力的计算，都必须研究水和船的相互作用。按照阻力的一般划分，船舶受到的阻力分为摩擦阻力、旋涡阻力及兴波阻力等。而这些阻力的深入研究和流体力学的一些领域，如边界层理论、兴波理论等研究密切相关。

为了克服阻力，使船舶获得前进的速度，必须装置推进器，因此必须研究推进器产生推力的原理及推力的计算。螺旋桨（图 1-1）叶片剖面具有机翼剖面的形状，因此应用流体力学中机翼理论的典型方法（涡旋法）来研究推进理

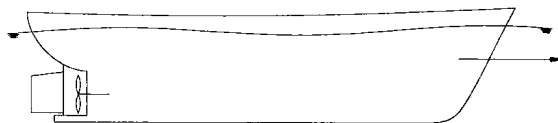


图 1-1

论时,取得了很大的成功。

此外,舵的剖面形状为对称翼形,因此舵的设计特别是高性能舵的研究与流体力学密切相关。

以上所述流体力学与船舶工程的一般问题,其他如船舶摇摆和船舶操纵问题的深入研究,更富有流体力学的特色。船舶原理许多领域的进展,发展了船舶流体力学这门学科。

新型特种船舶的研制,如水翼船、气垫船、破冰船等,以及当今世界关注的较高速度大吨位船舶的开发,又给流体力学提供了许多新的研究课题。

§ 1-2 连续介质模型

流体是由流体分子组成的,流体分子无时无刻不在进行无规则的、随机的布朗运动。从微观角度看,流体分子之间是不连续的、有间隙的,流体分子之间存在着比分子尺度大得多的间隙。因此,若将流体分子作为研究对象,流体是不连续的,因而流场中各空间点上的流体物理量本质上也是不连续的。

流体不连续,将会给数学处理带来很大的麻烦。由于流体力学的研究不关心单个流体分子从哪里来,要到哪里去,也不可能去研究单个流体分子的热运动,而感兴趣的是许许多多的大量流体分子运动的宏观统计特性。因此,流体力学本质上是一门宏观力学。

为了避免由于流体分子之间本质上的不连续所带来的数学处理上的困难,欧拉提出了连续介质模型。为了给出连续介质模型这个概念,首先引入流体质点的概念。

(1) 流体质点(或称流体微团):是“既大又小”的点,所谓大,是指该流体质点内部包含了大量流体分子,能够反映流体分子的宏观统计特性;所谓小,是指流体质点的体积无限小,小到就是空间上一个可以忽略尺寸的点。

(2) 连续介质模型:流体由流体质点组成,流体质点连续的、无间隙的分布于整个流场中。连续介质假设将流体视为由流体质点组成的连续流场,因此表征流体属性的压力、速度、密度等物理量可以表述成空间坐标和时间变量的函数。并可方便地利用高等数学中连续函数、微积分这一强有力的数学工具。

以上对流体质点所作的定义和对流体所作的连续介质假设,在常见的工程问题中是合理的。从直观上可以感觉到,河水的流动和风的运动都是连续的。这是因为在标准状态下,在非常小的流体体积内,确实含有大量的流体分子。

例如:空气分子: 2.7×10^{16} 个/ mm^3 ; 水分子: 3.4×10^{19} 个/ mm^3 。

如上所述如此小的体积内包含足够多的流体分子,因此以流体质点而非分子作为研究对象,就能够反映流体的宏观统计特性。但在研究高空大气层外航天飞船的运动时,由于空气稀薄,不能满足在一个流体质点内含有足够多流体分子的条件。因此,连续介质的假设就不能适用。还有,在高速掺气水流(两相流)中,水下爆炸时产生的冲击波波面上,连续介质假设也不成立,需另行处理。

§ 1-3 流体的性质

一、真实流体和理想流体

就宏观来看, 流体具有流动性、压缩性和黏性。液体的压缩性非常小, 低速流动的气体压缩性亦不显著。因此在处理液体的流动和气体的低速流动问题时, 可以假设流体为不可压缩的, 由此引起的误差较小, 实践证明是合理的。

流体的黏性表现之一是, 当流体运动时, 相互接触的流体层之间存在剪切力的作用; 流体黏性的另一表现是, 流体质点附着于固体表面。在某些流动问题中, 当流体的黏性力比惯性力小得多的情况下, 可以忽略黏性效应, 可以将这样的流体称为理想流体或无黏性流体。

真实流体与理想流体的主要差别如下:

- (1) 真实流体流动时, 相互接触的流体层之间存在剪切应力, 理想流体则没有;
- (2) 真实流体附着于固体表面, 即在固体表面上其流速与固体的速度相同, 而理想流体在固体表面上发生相对滑移。

二、流体的密度和重度

流体的密度——单位体积流体所包含的流体质量。以 ρ 表示, 其单位为 kg/m^3 。

在流场中某一点 A , 取流体体积 ΔV , 所包含的流体质量为 Δm , 则 A 处密度 ρ_A 可表示为

$$\rho_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

流体的重度——单位体积流体所包含的流体重量。以 γ 表示, 其单位为 N/m^3 。

在流场中某一点 A , 取流体体积 ΔV , 所包含的流体重量为 ΔG , 则 A 处重度 γ_A 可表示为

$$\gamma_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-2)$$

由于 $\Delta G = g\Delta m$, g 为重力加速度, 因此密度和重度之间的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

流体的密度随流体所受的压强和温度而变化, 液体的变化比气体的小, 特别是随压强的变化更小。例如, 如果压强增加 $9.81 \times 10^4 \text{ Pa}$, 水的密度增加的相对值约为 $1/20\,000$ 。其他液体的密度随压强的变化也非常小。所以在一般情况下, 可将液体作为不可压缩流体处理。

气体在高速流动时, 密度与流场中的压力和温度有密切的关系, 可表示为 $\rho = f(p, T)$ 。船舶工程中遇到的气体流动问题, 大多属于气体的低速流动 (远低于音速)。这类问题中气体密度的变化非常小, 也可将气体作为不可压缩流体处理。

在 1 个大气压条件下, 温度为 15°C 时, 淡水、海水和空气的密度和重度分别为

淡水: $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 9\,800 \text{ N/m}^3$;

海水: $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 9\,996 \text{ N/m}^3$;

空气: $\rho = 1.226 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 12 \text{ N/m}^3$ 。

不同温度情况下的密度和重度, 见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 水的物理性质

温度 $t/^{\circ}\text{C}$	重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	密度 ρ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	动力黏度 μ / ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动黏度 ν / ($\text{m}^2\cdot\text{s}$)	弹性系数 E_p / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	表面张力 σ / ($\text{N}\cdot\text{m}$)
0	9.805	999.8	1.781×10^{-3}	1.785×10^{-6}	2.02×10^{-6}	0.0756
5	9.807	1000.0	1.518×10^{-3}	1.519×10^{-6}	2.06×10^{-6}	0.0749
10	9.804	999.7	1.307×10^{-3}	1.306×10^{-6}	2.10×10^{-6}	0.0742
15	9.798	999.1	1.139×10^{-3}	1.139×10^{-6}	2.15×10^{-6}	0.0735
20	9.789	998.2	1.002×10^{-3}	1.003×10^{-6}	2.18×10^{-6}	0.0728
25	9.777	997.0	0.890×10^{-3}	0.893×10^{-6}	2.22×10^{-6}	0.0720
30	9.764	995.7	0.798×10^{-3}	0.800×10^{-6}	2.25×10^{-6}	0.0712
40	9.730	992.2	0.653×10^{-3}	0.658×10^{-6}	2.28×10^{-6}	0.0696
50	9.689	988.0	0.547×10^{-3}	0.553×10^{-6}	2.29×10^{-6}	0.0679
60	9.642	983.2	0.466×10^{-3}	0.474×10^{-6}	2.28×10^{-6}	0.662
70	9.589	977.8	0.404×10^{-3}	0.413×10^{-6}	2.25×10^{-6}	0.0644
80	9.530	971.8	0.354×10^{-3}	0.364×10^{-6}	2.20×10^{-6}	0.0626
90	9.466	965.3	0.315×10^{-3}	0.326×10^{-6}	2.14×10^{-6}	0.0608
100	9.399	985.4	0.282×10^{-3}	0.294×10^{-6}	2.07×10^{-6}	0.0589

表 1-2 标准压力下空气的物理性质

温度 $t/^{\circ}\text{C}$	重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	密度 ρ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	动力黏度 μ / ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动黏度 ν / ($\text{m}^2\cdot\text{s}$)
-40	1.515	14.86	1.49×10^{-5}	0.98×10^{-6}
-20	1.395	13.68	1.61×10^{-5}	1.15×10^{-6}
0	1.293	12.68	1.71×10^{-5}	1.32×10^{-6}
10	1.248	12.24	1.76×10^{-5}	1.41×10^{-6}
20	1.205	11.82	1.81×10^{-5}	1.50×10^{-6}
30	1.165	11.43	1.86×10^{-5}	1.60×10^{-6}
40	1.128	11.06	1.90×10^{-5}	1.68×10^{-6}
60	1.060	10.40	2.00×10^{-5}	1.87×10^{-6}
80	1.000	9.81	2.09×10^{-5}	2.09×10^{-6}
100	0.946	9.28	2.18×10^{-5}	2.31×10^{-6}
200	0.747	7.33	2.58×10^{-5}	3.45×10^{-6}

三、流体的压缩性与膨胀性

1. 流体的压缩性

如果温度不变，流体的体积随压强增加而缩小，这种特性称为流体的压缩性，通常用体积压缩系数 β_p 来表示。它指的是在温度不变时，压强增加一个单位所引起的流体体积相对缩小量，即

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-4)$$

流体体积压缩系数的倒数就是流体的体积弹性模量 E 。它指的是流体的单位体积相对变化所需的压强增量，即

$$E = \frac{1}{\beta_p} \quad (1-5)$$

通常可取水的 E 值为 $19613 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

2. 流体的膨胀性

如果压强不变，流体的体积随温度增高而增大，这种特性称为流体的膨胀性，通常用体积膨胀系数 β_t 表示。它指的是在压强不变时，温度增加一个单位所引起的流体体积相对增量，即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-6)$$

例如，在 0.1 MPa （1 个大气压），温度为 $10 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，水的 β_t 值为 $1.5 \times 10^{-4} (1/^\circ\text{C})$ 。

四、流体的黏性

著名科学家牛顿在 17 世纪论述了流体的黏性。他提出了“流动内部的剪切应力与垂直于流体运动方向的速度梯度成正比”的论断，其实实验的示意图如图 1-2 所示。相距为 h 的上下两平行平板之间充满均质黏性流体。两平板的面积均为 A ，其值足够大，以致可略去平板四周边界的影响。将下板固定不动，而以力 F 拖动上板使其作平行于下板的匀速直线运动。实验发现：

(1) 由于流体的黏性，与平板直接接触的流体质点将与平板一起移动而无滑移，因此与上板接触的流体质点速度为 U ，而与下板接触的流体质点速度为 0 ，测量结果表明两板之间的速度呈线性分布，即

$$u(y) = \frac{U}{h} y$$

(2) 比值 F/A 与 U/h 成正比：

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

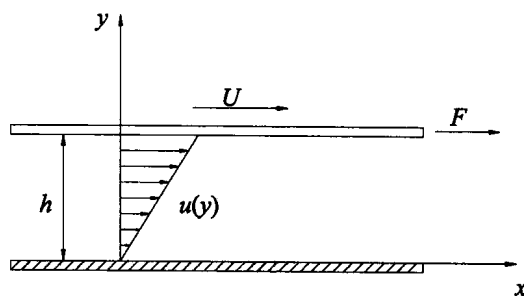


图 1-2

式中, μ 为比例系数, 称为动力黏性系数, 简称黏性系数; 比值 F/A 也就是流体内部的剪切应力 τ 。

以后进一步的实验表明, 当两板间具有其他(非直线)速度分布 $u(y)$ 时, 有

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

由于上板的移动, 作用于下板的剪切应力为

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0} \quad (1-8)$$

式(1-7)称为牛顿内摩擦定律。黏性系数 μ 是流体黏性大小的一种量度, 它是与流体物理性质有关的物理常数, 其单位可由(1-7)直接导出。

在国际单位制(SI制)中

$$[\mu] = \text{牛} \cdot \text{秒}/\text{米}^2 = \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = \text{帕} \cdot \text{秒} = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

在工程单位制中

$$[\mu] = \text{公斤力} \cdot \text{秒}/\text{米}^2 = \text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2;$$

换算关系为 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 0.101972 \text{ kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

在研究流体的运动时, 还常采用所谓运动黏性系数, 其定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

式中 ρ 为流体的密度。

在国际单位制中, 运动黏性系数的单位为

$$[\nu] = \text{米}^2/\text{秒} = \text{m}^2/\text{s}。$$

ν 称之为运动黏性系数的原因是, 它的单位只包含运动学的量: 长度 $[L]$ 及时间 $[T]$ 。

实验表明, 动力黏性系数 μ 主要与温度有关, 而与压力的关系不大。但须指出, 液体与气体的黏性系数随温度变化的趋势是不同的。一般液体的 μ 和 ν 值随温度的升高而减小, 而气体的 μ 和 ν 值则随温度的升高而增大(见图1-3)。液体和气体的黏性系数随温度呈不同变化规律的原因是因为气体的黏性主要是由于分子间的动量交换, 而液体的黏性主要是分子内聚力的结果。

表1-1和表1-2列出了水与空气的 ρ , γ , μ , ν 随温度变化的值。

最后还必须指出, 凡遵循牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体, 例如空气、水、汽油、煤油、甲醇、乙醇、甲苯等。凡不遵循牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体, 例如泥浆、有机胶体、油漆、污水等。图1-4是牛顿流体与各种非牛顿流体的应力与变形速度之间的关系。

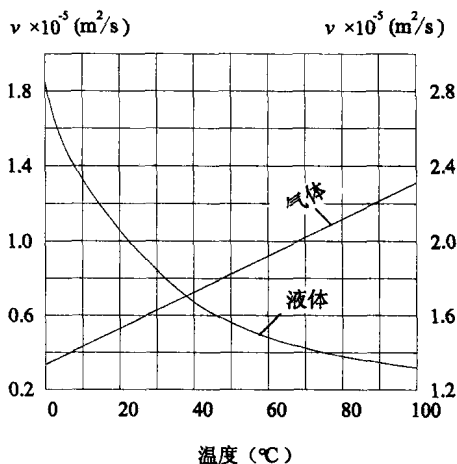


图1-3

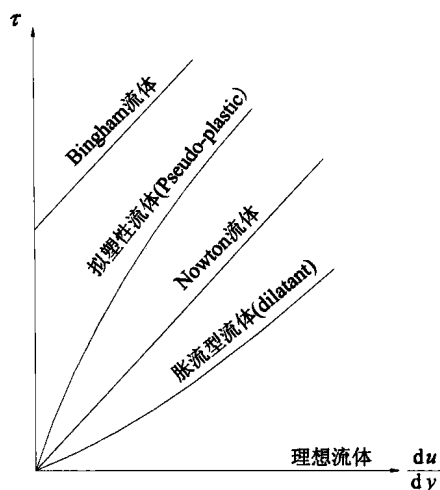


图 1-4

§ 1-4 作用于流体上的力

在建立流体运动的基本方程式时，必须了解作用于流体上力的性质。

作用于流体上的力有两类：质量力和表面力。为更清楚地看出这两种力，我们采用取脱离体的方法。

设想在某个瞬时，在运动的流体中，取出一个脱离体，其体积为 V ，如图 1-5 所示。

1. 质量力

均匀作用于流体微团内部全部质量上的力称为质量力，其大小和其质量（或者说体积）成正比的力。例如重力、惯性力以及电磁力等均属于质量力。

设该流体微团的体积是 ΔV ，质量为 Δm ，作用

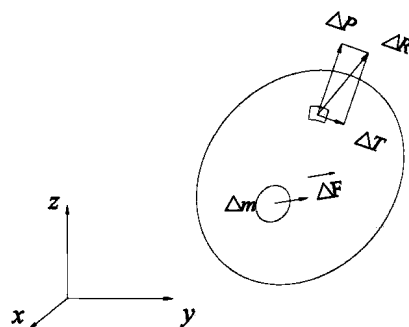


图 1-5

于其上的合力是 $\Delta \vec{F}$ 。 $\Delta \vec{F}$ 在三个坐标方向的分量用 ΔF_x ， ΔF_y ， ΔF_z 表示。设 $M(x, y, z)$ 为 ΔV 中的一点，则作用于 M 点处单位质量的质量力定义为

$$\begin{cases} X = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta m} \\ Y = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta m} \\ Z = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta m} \end{cases} \quad (1-10)$$

一般来说单位质量的质量力 X, Y, Z 是空间坐标 x, y, z 和时间 t 的函数。对于某些具体的工程实际问题, 质量力的分布往往是已知的, 例如重力场, 有 $X=0, Y=0, Z=-g$ 。

2. 表面力及应力

如图 1-5 所述的脱离体, 某确定面积上受到的力称为表面力, 其大小用单位面积上的受力来表示。表面力是脱离体 V 相接触的流体或固体施加的, 总表面力的大小和受力面积成正比。

设微元面积 $\Delta\sigma$ 上受到的表面力为 $\Delta\vec{R}$, 则

$$p_n = \lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta\sigma} \quad (1-11)$$

p_n 称之为应力, n 为 $\Delta\sigma$ 的外法向单位矢量, 表明 p_n 的方向为受力面积的外法矢。若将 $\Delta\vec{R}$ 分解为法向力 ΔP 和切向力 ΔT , 这里的切向以及法向是指微元面积 $\Delta\sigma$ 的切向及外法向。正应力即法向分量和切应力 (或剪切应力) 分别定义为

$$p = \lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\sigma} \quad (1-12)$$

$$\tau = \lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta\sigma} \quad (1-13)$$

对于静止流体或理想流体, 不存在切应力, 又由于流体不能承受拉力, 因此压力是唯一的表面力。单位面积上的压力或称压强, 但习惯上在流体力学中常称之为压力, 而将整块面积上作用的压力称为总压力。正应力和切应力的单位均为 N/m^2 。

压力 (压强) 的大小按计算的基准不同有三种表示法:

(1) 绝对压力 p_{abs} 。它是以绝对真空为基准计算的压力。

(2) 相对压力 p 。它是以测量处的大气压 p_a 为基准计算的, 其值即为绝对压力超过当地大气压的数值。相对压力俗称表压。一般压力表所指示的压力均为表压。

根据定义有:

$$p = p_{\text{abs}} - p_a \quad (1-14)$$

在计算物体的受力情况时, 一般都采用表压。因物体各个方向都受大气压力的作用, 起有效作用的是相对压力。

(3) 真空度 p_v 。当流体中某点的绝对压力小于大气压力时, 该处相对压力就为负值, 这时称该处存在着某种程度的真空。真空的大小用真空度表示:

$$p_v = p_a - p_{\text{abs}} \quad (1-15)$$

显然, 这样定义的真空度其值总是正的。绝对压力、相对压力以及真空度三者的关系见图 1-6。

常用的压力单位如下:

(1) 国际单位制 (SI): N/m^2 或 Pa ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$)。

(2) 用液柱高表示: 液柱高为长度单位, 但需注明液体种类。常用的有水银柱高、水柱高等。

(3) 用大气压表示: 有标准大气压和工程大气压。

1 标准大气压 (atm) $= 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mm (Hg)} = 10.33 \text{ m (H}_2\text{O)}$