



普通高等教育“十二五”规划教材

FUNDAMENTAL ENGINEERING FLUID MECHANICS

工程流体力学基础

FUNDAMENTAL ENGINEERING

MECHANICS

韩占忠 王国玉 主编

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学基础

主编 韩占忠 王国玉

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是在传统流体力学教学内容的基础上,增加了数值模拟实践的内容,将当前最新的研究方法与手段融入课程教学中,力图给读者一个研究平台、提供一个研究手段,以利于创新人才的培养,适应于当前社会发展的需求。

本书适用于高等学校机械类专业 32、48 和 64 学时流体力学课程作为教材使用,也可作为广大工程技术人员的自学参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学基础/韩占忠,王国玉主编. —北京:北京理工大学出版社, 2012. 7

ISBN 978 - 7 - 5640 - 6219 - 4

I. ①工… II. ①韩… ②王… III. ①工程力学 - 流体力学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 148630 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 17

字 数 / 389 千字

版 次 / 2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 4000 册

定 价 / 35.00 元

责任编辑 / 多海鹏

张慧峰

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换



序 言

流体是气体与液体的总称,流体力学是研究流体与流体、流体与固体之间相互作用的一门科学。这是一门既古老又存在许多未解之谜的学科,风为什么不停地吹,水为什么不停地流,鸟儿为什么会飞翔,鱼儿为什么能在水中游来游去,船儿为什么不沉,飞机为什么会在天上飞,风吹树梢为什么会有响声,等等,都吸引着人们不停地去探索、去研究。只要有流体流动的地方,就需要有流体力学的知识去解释、去研究与设计,故流体力学已经成为现代工程师必备的基础。

从阿基米德时代到现在,经过数代科学工作者的努力探索与研究,流体力学已经发展成为一门深入各个科学领域的重要学科,特别是随着航空、航天、航海以及石油运输、能源利用等行业的发展,迫切需要解决许多有关流体力学的问题,同时也极大地促进了流体力学本身的发展。随着计算技术的飞速发展,特别是微型计算机计算速度和存储能力的提升,流体力学的研究从以实验为主导转换为以数值模拟为先导,并使数值模拟、理论分析与实验研究并行的研究方法成为可能。同时,数值模拟的方法也已经成为现代工程流体力学相关学科的必备方法和研究手段。流体力学的教学内容与教学方法,目前基本上是沿袭着传统的内容,以理论分析为主,强调流体力学中的基本概念和基本方法,这无疑是很重要的。随着现代科技的发展,以及现代工程研究对科技人员的要求,流体力学的教学内容与方法也应与时俱进,把当前最新的研究方法和研究成果融入到课程中来,这对培养创新型人才具有重要意义,也是适应社会对人才需求的一种回应。为此,本书的编写宗旨就是在流体力学基本知识 with 基本方法和内容的基础上,将当前最新的研究方法与手段融入到教学中,力图给读者一个研究平台,为读者的新思想、新设计提供一个研究手段,有利于创新人才的培养,适应于当前社会发展的需求。基于这一宗旨,本书特别增加了数值模拟方法与实践的教学内容,对教学中的文丘里流量计、动量定理等进行模拟计算,并与实验相比较,使读者能完成理论分析、数值模拟和实验研究这样一个完整的研究过程。在介绍新方法的同时,力图使读者养成良好的研究习惯,这也是编者的一个愿望。

本书共分 9 章,可适用于 32、48 和 64 学时的教学,对教学内容建议如下:

- (1) 对于 32 学时的教学,可选用第 1 章到第 5 章,第 8 章的第 1 节到第 4 节,并介绍第 9 章数值模拟练习 1——缩放管道内的流动数值模拟方法。
- (2) 对于 48 学时的教学,应再增加第 6 章和第 7 章的内容,并介绍第 9 章的全部内容。
- (3) 对于 64 学时的教学,应讲解书中的全部内容。

另外,在使用本书进行教学的过程中,还应该在教学实验的基础上,重视数值模拟与实验结果之间的对比,增强学生研究能力的培养。

本书内容的选取与编写得到了北京理工大学流体机械研究所各位老师的大力帮助与支持，在图形绘制方面还得到硕士研究生周鹏飞等同学的支持，在此对其表示衷心的感谢。

本书在内容与教学方法上的编写还仅仅是一个大胆的尝试，还有许多问题需要编者与读者一起探索，不当之处，望大家不吝赐教。

编 者



目 录

绪论	1
一、流体力学的研究内容	1
二、流体力学的发展简史	2
三、流体力学的研究方法	4
第 1 章 流体的物理属性	6
第 1 节 流体的连续介质假设	6
第 2 节 流体的主要物理属性	7
第 3 节 非牛顿流体	14
第 1 章习题	15
第 2 章 流体静力学	17
第 1 节 质量力、流体静压强及其特性	17
第 2 节 流体静平衡微分方程及其积分	19
第 3 节 流体静压强的分布规律	22
第 4 节 压强的计算标准和度量单位	24
第 5 节 静压强的测量	25
第 6 节 作用于平面上的静压力	27
第 7 节 作用在曲面上的液体压力	30
第 8 节 相对静止状态下的流体静压强分布	34
第 2 章习题	37
第 3 章 流体动力学基础	40
第 1 节 流体运动的描述方法	40
第 2 节 关于流场的一些基本概念	43
第 3 节 流体一元流动的连续性方程	46
第 4 节 理想流体一元流动能量方程	47
第 5 节 总流的伯努利方程	52
第 6 节 动量方程式	57
第 7 节 动量矩方程	65
第 3 章习题	67
第 4 章 黏性流体内流动阻力和能量损失	71
第 1 节 沿程损失和局部损失	71

第2节 层流、紊流与雷诺数	72
第3节 圆管中的层流流动	76
第4节 圆管中的紊流流动	81
第5节 管路中的沿程阻力	86
第6节 管路中的局部阻力	93
第4章习题	97
第5章 相似理论与量纲分析	100
第1节 几何、运动和动力相似	100
第2节 动力相似准则	101
第3节 相似模型试验	104
第4节 量纲分析	106
第5章习题	112
第6章 理想流体的有旋与无旋流动	114
第1节 流体流动微分形式的连续性方程	114
第2节 流体微团运动分解定理	115
第3节 理想流体运动微分方程及其积分	121
第4节 二元有势流动的势函数与流函数	125
第5节 基本平面势流的流函数与势函数	128
第6节 几种典型的有势流动	133
第7节 圆柱体的无环量绕流——平行来流与偶极流的叠加	136
第8节 圆柱体有环量绕流——平行来流、偶极流和点涡的叠加	138
第9节 叶栅的库塔——儒可夫斯基升力公式	141
第10节 理想流体的有旋流动	143
第6章习题	145
第7章 黏性流体动力学基础	147
第1节 不可压缩黏性流体的运动方程	147
第2节 N-S 方程的精确解	150
第3节 紊流基本方程——雷诺方程	153
第4节 边界层概论	155
第5节 边界层的分离现象	157
第6节 绕圆柱体流动——卡门涡街	158
第7节 物体阻力与阻力系数	159
第7章习题	161
第8章 一元气体动力学基础	162
第1节 音速与马赫数	162
第2节 一元气流基本特性	165
第3节 一元气体可压缩流动基本方程式	167
第4节 喷管中的可压缩气体流动	175
第5节 等截面绝热摩擦管中的气体流动	179

第 6 节 等截面加热管中的气体流动	187
第 7 节 正激波	193
第 8 章习题	201
第 9 章 流体流动数值模拟	203
数值模拟练习 1 缩放管道内的流动	203
数值模拟练习 2 水流冲击平板的流动	221
数值模拟练习 3 孤立翼型的气体绕流	241
参考书目录	260

绪 论

一、流体力学的研究内容

流体力学（Fluid Mechanics）是力学的一个重要分支，是研究流体的运动与平衡、流体与流体之间、流体与固体之间相互作用的一门学科。流体力学应分两部分来理解：第一是流体，即什么是流体；第二是力学，即力学是干什么的。关于什么是流体，一般认为易于流动的物质称为流体。这里举一个例子：有一个容器，里面装有物质，若在容器底部开一个适当大小的孔，物质在重力的作用下向外流动，则这种物质就是流体吗？如果里面装的是沙子，沙子也会向外流动，那么沙子（沙粒）是流体吗？沙粒显然不是流体，因此，笼统地说易于流动的物质就是流体是不严格的。流体应该是在连续介质假定下，在任意点上都不能承受切应力的物质，只要有切应力存在，流体就会用连续的变形来平衡切应力。关于这一点，后面的连续介质假设中还要论及。关于力学，就是指物质之间的相互作用。因此，流体力学是关于流体的平衡与运动、流体与流体之间以及流体与固体之间相互作用规律的一门科学。

自然界中有许多现象是需要用流体力学知识来解释的，比如：为什么铁块放在水中会沉，铁块做成船就不沉了？为什么风吹电线会发出美妙的声音呢？为什么水只能从高处往低处流，而且什么是它流动的动力呢？等等，这类问题举不胜举。

根据研究对象的不同，力学可分为理论力学、固体力学和流体力学。理论力学的研究对象是受力后不变形的绝对刚体；固体力学的研究对象是受力后产生微小变形的固体；而流体力学的研究对象则是在受力后产生大变形的流体，其中包括液体和气体，流体是气体和液体的总称。

流体力学可分为流体静力学、流体运动学和流体动力学。流体静力学只讨论作用力的大小及压强的分布，不讨论作用力对流体运动的影响；流体运动学只讨论流体运动过程，而不讨论引起运动的原因；流体动力学则既讨论流体的运动规律，又讨论引起运动的原因。

从力学模型来说，流体可分为理想流体、黏性流体、不可压缩流体、可压缩流体、牛顿流体和非牛顿流体，故流体力学又可分为理想流体动力学、黏性流体动力学、不可压缩流体动力学、可压缩流体动力学（气体动力学）、非牛顿流体动力学和多相（例如流场中既有气体又有液体等）流体动力学等。

流体力学是一门应用非常广泛的科学，航空航天、船舶海运、流体机械、动力工程、水力发电、化学工程、气象预报以及环境保护等学科均以流体力学为其重要的理论基础。20世纪初，世界上第一架飞机出现后，飞机以及其他各类飞行器得到迅速发展。航空航天事业的发展是与流体力学的一个分支——空气动力学的发展密切相连的。各种发动机的工作与燃烧理论密切相关，而燃烧是离不开气体的，燃烧过程涉及的许多化学反应和热能变化的流体力学问题是物理—化学流体力学的内容之一。爆炸是猛烈的瞬间能量变化和传递过程，所涉及的气体动力学问题形成了爆炸力学。血液在血管中的流动、气体在人体中的流动，这些也是

流体力学问题,由此又发展成为生物流体力学。由此可见,流体力学是一门既包含了自然科学的基础理论,又涉及工程技术和生物科学的一门内容非常广泛的学科。

二、流体力学的发展简史

流体力学是人类在长期的生产实践中逐步发展起来的。例如我国秦代的李冰父子根据“深淘滩,低作堰”的经验,修建了四川都江堰工程,具有很高的科学水平,反映了当时人们对堰流的认识已经达到相当高的程度。隋代修建的京杭大运河工程,全长 1 782 km,大大改善了我国南北水运条件。自秦汉时代我国劳动人民就已经开始利用水力能源,创造并不断地改进了水磨、水车等工具,汉代张衡还创造了由水力带动的浑天仪,这些都充分说明水利机械在当时已经有了很大的进展。另外,我国古代计时所用的滴漏就是利用孔口出流,即水位随时间变化的规律制造的,如此不一而足。与我国类似,古罗马人修建了供水管道系统,埃及、印度、希腊等国修建了水渠,并以此来发展农业和航运事业等。

流体力学真正成为一门科学的过程可大致分为以下三个阶段。

1 经典流体力学的发展

古希腊的阿基米德建立了包括浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,由此奠定了流体静力学的基础。有一个著名的故事,说国王要求检验头上的王冠是否为纯金打造,就是讲述阿基米德发现浮力定律的故事。相传,叙拉古的希洛王叫工匠做一顶纯金王冠,王冠做得非常精致,可有人告发说,工匠在制作王冠时用银子偷换了金子。国王叫阿基米德想办法在不损伤王冠的情况下得出王冠里是否掺了假。阿基米德冥思苦想考虑如何解决这个问题。一天,他洗澡躺进澡盆时,发现自己身体越往下沉,盆里溢出的水就越多,而他则感到身体越来越轻。突然间,阿基米德欣喜若狂地跳出了澡盆,甚至忘记了穿衣服就直奔王宫,边跑边喊:“找到了,找到了!”阿基米德找到了什么?他找到的不仅是鉴定金王冠是否掺假的方法,而且是一个重要的科学原理,即浸没于水中的物体受到一个向上的浮力,浮力的大小等于它所排开液体的重量,并据此计算了王冠中金和银的含量。

流体力学是从 17 世纪开始形成的一门学科。首先是牛顿在他的著作《自然哲学的数学原理》一书中,研究了黏性流体的剪应力公式,即剪切应力大小与变形速率之间的关系式,提出了著名的牛顿内摩擦定律。伯努利在 1738 年提出了著名的伯努利方程;1752 年,达朗贝尔提出了连续性方程;特别是欧拉于 1775 年提出了流体运动描述方法和理想流体运动方程组,推动了理想流体运动的研究。欧拉运动方程和伯努利方程的建立,是流体力学作为一个学科的重要标志,所以称欧拉是理论流体力学的奠基人。

19 世纪的主要研究进展是对有旋流动和黏性流动的初步研究。纳维和斯托克斯分别于 1823 年和 1845 年导出了黏性流体流动的基本方程组,即著名的 N-S 方程。由 N-S 方程解出的圆管层流流动的流量公式,得到了哈根、泊肃叶的实验验证,由此奠定了黏性流体动力学理论的基础,也是实际流体流动的最基本的控制方程组。

2 近代流体力学的发展

从 19 世纪末开始,流体力学主要研究黏性流动和高速流动的特性,使理论流体力学可以真正用来指导实践。这一时期的主要成就如下:

1883 年,雷诺从实验中发现黏性流体的流动具有两种运动形态:层流和紊流。这一发现推动了一个世纪的紊流研究,尽管直到现在,紊流流动问题还在困扰着人们,但对这一问题

的深入了解有助于理解 and 解决大量的实际问题，故这一发现是具有划时代意义的。

1904 年，普朗特凭借丰富的实践经验和物理直觉，提出了著名的边界层理论。这一理论解决了黏性流体力学与理论流体力学之间的冲突（达朗伯悖论），使得在不能求解 $N-S$ 方程之前，解决了阻力问题，所以说普朗特是近代流体力学的奠基人。

注 1：达朗伯悖论

【法国科学家 J. le R. 达朗伯提出的一个流体力学中的问题。他从 1744 年开始采用分析的方法求解物体在流体中的运动阻力，1752 年，他根据理想流体的有势流动理论，经过严格的计算，指出物体在无界不可压缩无黏性流体中做匀速直线运动时所受到的合力等于零。这显然与实际不符，故称为达朗伯悖论，又称达朗伯疑题，详见第 7 章。】

1910 年，泰勒提出了湍流的涡扩散理论。1923 年，在对两个同心圆筒间流动的研究中，得出流动失稳的条件，形成所谓的泰勒涡，并于 1935 年，建立了均匀各向同性湍流理论。泰勒的工作特点是善于把深刻的物理观察与数学方法相结合，并擅长设计简单的专门实验来验证其理论，这一点是很值得称赞和学习的。

1911 年，卡门对圆柱尾涡的流动及其稳定性进行了深入研究，这就是著名的卡门涡街。根据这一研究，解释了桥梁风振、机翼颤振等现象。冯·卡门出身于奥匈帝国一个教育学教授的家庭，1902 年毕业于布达佩斯皇家工学院，1906 年去德国哥廷根大学求学，在普朗特（Ludwig Prandtl, 1875—1953）的指导下，于 1908 年获得博士学位。自 1928 年起定居美国后，在加州理工学院建立了古根海姆空气动力学实验室，汇集了几乎世界上最优秀的人才，成为当时全世界空气动力学研究中心，为人类的航空航天事业奠定了基础，故卡门被誉为航空航天大师。卡门的成果集中在气动方面，其中包括机翼的举力面理论、亚声速流动近似理论、跨声速相似理论等。

注 2：塔科玛大桥垮塌事故与卡门涡街

【20 世纪 40 年代，美国塔科玛大桥（Tacoma Narrow Bridge）垮塌事故的惨痛教训，使人们认识到流体力学知识对建筑安全上的重要作用。1940 年，美国华盛顿州的塔科玛峡谷上花费 640 万美元，建造了一座主跨度 853.4 m 的悬索桥。建成 4 个月后，于 1940 年 11 月 7 日碰到了一场风速为 19 m/s 的风。风虽不算大，但桥却发生了剧烈的扭曲振动，且振幅越来越大（接近 9 m），直到桥面倾斜到 45° 左右，使吊杆逐根拉断并导致桥面钢梁折断而损毁，坠落到峡谷之中。当时正好有一支好莱坞电影队在以该桥为外景拍摄影片，记录了桥梁从开始振动到最后毁坏的全过程，此记录后来成为美国联邦公路局调查事故原因的珍贵资料。冯·卡门 1954 年在《空气动力学的发展》一书中写道：塔科玛海峡大桥的毁坏，是由周期性旋涡的共振引起的。卡门涡街交替脱落时会产生振动，并发出声响效应，这种声响是由于卡门涡街周期性脱落时引起的流体中的压强脉动所造成的声波，如日常生活中所听到的风吹电线的风鸣声就是涡街脱落引起的。】

以普朗特为代表的应力学学派的主要特点是工程科学同数学紧密结合，流体力学的研究也从理论回到生产实践，解决了飞行器设计所面临的关键技术问题，同时也推动了流体力学自身的发展，使黏性流动和可压缩流动的理论得到完善，为现代流体力学的发展奠定了基础。

3 现代流体力学的发展

所谓现代流体力学是指用现代的理论方法、计算工具和试验技术研究流体流动问题的学

科领域,采用理论分析、数值计算、试验模拟相结合的方法,这是一个以非线性问题为重点,各分支学科并进的发展时期,主要成就如下。

计算流体力学日臻成熟——出现了有限差分、有限元、有限分析、谱方法等,建立了计算流体力学的完整理论体系。计算流体力学在高速气体动力学和湍流的直接数值模拟中发挥了重大作用,前者主要用于航天飞机的设计,后者要求分辨率高且计算工作量大。目前已经出现较为成熟的商业软件,为相关产品的流体动力学研究与设计提供了模拟计算平台,可以说,计算流体力学几乎已经渗透到流体力学的每个分支领域。

现代流体力学产生的一些新兴的学科分支如下。

生物流体力学——主要研究人体的生理流动,如心脏和血管内血液的流动,呼吸系统等,这方面的研究为生物医学工程的发展作出了贡献。

磁流体力学和等离子体物理——主要研究在磁场中的流体运动规律,包括磁流体力学波的稳定性。磁流体力学这门学科是在 20 世纪 40 年代建立的,在天体与空间物理中得到应用。

物理化学流体力学——这是一个与扩散、聚并、燃烧和毛细流等物理化学现象有关的流体力学分支,最先是在 20 世纪 50 年代由列维奇倡导。

多相流体动力学——研究两相以上同种或异种化学成分物质组成的混合物的流动,比如采用单流体模型研究泡沫流和栓塞流;采用双流体模型研究液固、气固或气液流动等。多相流在自然界与化工、冶炼以及石油工业中有着广泛的应用。

随着世界范围内能源需求的扩大与供应的紧张,必须加速与能源有关的工业的发展,例如风力发电、水力发电等。另外,石油的开采与输运问题涉及流体力学的理论与应用。人口增长与工业发展使人类面临严峻的环境问题,涉及气候、生态、污染和灾害等多学科交叉问题,这些都存在着大量的流体力学问题。流体力学在生物技术和生物工程的细胞层次上进行研究也是未来生物流体力学的发展趋势。所以,流体力学有着极其广阔的应用前景,对人类的经济建设各个方面有着越来越重要的作用。

三、流体力学的研究方法

流体力学是在不断总结生产经营与实验研究的基础上产生并逐步发展起来的。在不同的历史时期,有着不同的研究方法,到现代,涉及流体动力学的研究方法有实验研究、理论分析与数值计算。

18 世纪中叶以前是流体力学的发展初期,主要运用初等数学来解决流体静力学与运动学问题,只涉及少量的流体动力学问题,实验与测量方法也比较简单。

18 世纪中叶以后,开始形成独立的流体力学学科,并运用高等数学,采用理论分析的方法来研究流体的平衡与机械运动规律,流体动力学得到较大的发展。所谓理论分析的方法就是在实验的基础上对运动流体提出合理的假设,建立简化的力学模型,并根据力学原理与定律建立基本方程。最后利用边界条件及初始条件对方程进行求解,再与实验进行比较。在这方面,欧拉和拉格朗日是“理论流体力学”的奠基人。

20 世纪 60 年代后,计算方法和计算技术的飞速发展,使得计算流体力学得以用于实际的研究中,计算流体力学广泛采用有限差分法、有限单元法、边界元法与谱方法等数值算法。数值计算方法能求解许多理论分析无法完全解决的问题,还可节省实验研究所需的

人力物力。但是，数值计算无法取代实验研究与理论分析。首先，理论分析与数值计算结果需要实验的验证与启迪。此外，理论分析是数值计算的基础，对实验研究亦有指导意义。

总之，实验研究、理论分析和数值计算这三种方法是相互补充、相互促进、相互渗透的，是现代流体力学与流体工程研究缺一不可的。

第 1 章

流体的物理属性

本章重点讲述连续介质模型与流体的物理属性，包括流体的密度、黏性与可压缩性。要求读者理解流体的连续介质假设，并掌握流体基本物性及其表征方法。

第 1 节 流体的连续介质假设

流体和固体一样，是由分子构成的，这些分子处于不规则的热运动中，且分子之间的间隙比分子的尺度大得多，所以从微观上讲流体是离散的，流体中各空间点上的物理量是随时间而变化的。这也就是说，如果以分子为最小单位来研究流体，则流体的物理量是不确定的。例如，当区域尺度小于分子自由程时，区域内质量（分子个数）受热运动的影响，是一个不确定的数，则流体的密度就无法确定了，如图 1-1 所示。

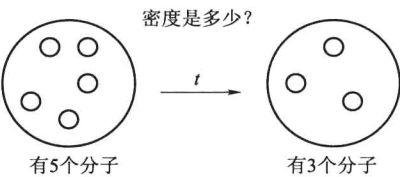


图 1-1 连续介质假定说明

流体力学是一门宏观力学，研究的是流体宏观的平衡与运动规律，对微观的分子热运动不感兴趣，故只考虑分子热运动的统计平均特性即可。为此，欧拉在 1753 年首先提出的连续介质力学模型的假设如下：

流体是由流体微团（质点）组成的，这个微团满足：

(1) 体积充分大，使得微团内的统计平均特性不受个别分子热运动的影响。

(2) 体积充分小，使得在几何上可以看做是一个点。

在这个假设前提下，首先可以不考虑分子间隙和分子的热运动对宏观物理量的影响，认为流体就是由这些微团连续分布的整个空间；其次表征流体属性的物理量，如密度、速度、压强、温度等在流体连续流动中是时间和空间坐标的单值连续可微函数。这样就可利用数学分析的方法和工具来研究并确定流体的平衡与运动规律了。

尽管流体力学属于连续介质力学的范畴，有时还要利用分子运动论和统计力学的观点来解释流体的物理现象和运动规律。例如流体黏性的产生及随温度的变化原因是由于各流层中流体分子的热运动及相互作用的结果等。

注：在通常的工程问题中，连续介质假设是完全合理的。研究表明，在标准状态下（1 个标准大气压，温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），对于空气而言， 1 mm^3 体积中含有 2.7×10^{16} 个空气分子，分子平均自由程为 $7 \times 10^{-5}\text{ mm}$ ；对于水来说则含有 3.4×10^{19} 个水分子，分子平均自由程为 $3 \times 10^{-5}\text{ mm}$ 。可见，在工程问题中，所要研究的流体线性尺度或流体微团的大小远远大于分子的大小及其运动尺度，所以流体质点（微团）中包含有足够多的分子，微团的物理特性不会受个别分子热运动的影响。但是，当所研究问题的特征尺度接近或小于分子大小或分子运

动平均自由程时,连续介质假设就不再适用了。例如研究火箭在高空稀薄气体中飞行时,空气的特征尺寸较大(120 km 高空处空气分子的平均自由程为 1.3 m),与火箭的特征尺寸有相同的数量级,此时,连续介质假设就不再合理,需要用分子运动论与统计力学的微观方法进行研究。

第2节 流体的主要物理属性

流体是一种连续介质,流体力学是从宏观上研究流体质点的运动,流体的物理属性也是基于连续介质假设前提下进行定义的,这些物理量是时间与空间的单值连续可微函数。

1. 密度与重度

质量就是物质的多少,是物质的基本属性之一,也是物体惯性大小的度量。根据牛顿第二定律,惯性是物体所具有的维持原有运动状态的物理性质,它主要取决于质量。质量越大,惯性也越大,其运动状态也越难改变。

密度:单位体积流体所含物质的多少,称为流体的密度。设流体体积为 ΔV , 质量为 ΔM , 则该流体的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-1)$$

重度:单位体积流体的重量称为流体的重度。设流体体积为 ΔV , 质量为 ΔG , 则该流体的重度为

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

由于 $G=Mg$, 故密度与重度之间的关系为

$$\gamma = \rho g$$

2. 压缩性与膨胀性

作用在流体上的压力变化可引起流体体积和密度的变化,这一现象称为流体的可压缩性(Compressibility)。流体的压缩性可用体积压缩系数 β 或体积弹性模量 K 来表示。

若原体积为 V 的流体,当压强增加 Δp 时,其体积减少了 ΔV , 如图 1-2 所示, $\Delta V/V$ 是其体积的相对缩小值。我们定义流体的体积压缩系数为流体体积的相对缩小值与压强的增量之比,如式(1-3a)所示。

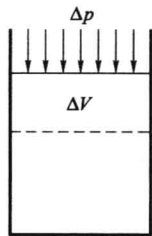


图 1-2 流体的可压缩性

$$\beta = -\frac{\Delta V/V}{\Delta p} \quad (1-3)$$

这里的负号表示当压强增大 ($\Delta p > 0$) 时,体积必然缩小 ($\Delta V < 0$)。当压强的增量很小时,也可写成微分形式

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

β 的意义就是当压强增大一个单位时,流体体积的相对减少量。

流体的压缩性在工程上常用体积弹性模量 E 来表示, 二者之间的关系为

$$E = 1/\beta \quad (1-5)$$

流体的体积膨胀性 (Expansibility) 用体积膨胀系数 α 来表示, 指在一定压强下, 单位温度升高所引起的体积相对变化率, 定义式为

$$\alpha = \frac{dV/V}{dT} \quad (1-6)$$

注 1: 式 (1-4) 中的负号是由于 dV 与 dp 总是逆号的, 即压强的增加总是使流体体积减小, 要使体积压缩系数保持为正值, 需要加一个负号。

注 2: 在体积为 V 内的流体质量为 M , 由于在压缩和膨胀过程中流体质量不变, 则有

$$M = \rho V = \text{Const}$$

$$\rho dV + V d\rho = 0$$

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

故式 (1-4) 和式 (1-6) 可分别写成

$$\beta = \frac{d\rho/\rho}{dp}, \quad \alpha = -\frac{d\rho/\rho}{dT} \quad (1-7)$$

注 3: 由定义可知, α 、 β 与 E 的含义如下:

(1) E 越大 (β 越小), 表示流体越不易被压缩, 当 $E \rightarrow \infty$ 时, 表示该流体绝对不可压缩。

(2) 不同的流体, 其 α 、 β 与 K 也不同。

(3) α 、 β 与 E 随温度和压强而变化。

(4) α 值越大, 则流体的膨胀性也越大。

注 4: 水的体积弹性模量 $E=2 \times 10^9$ Pa, 说明当 $\Delta p=10^5$ Pa (约为一个大气压) 时, $\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{20\,000}$ 。故在 Δp 不大的条件下, 水的压缩性可以忽略不计, 可认为是密度不变的不可压缩流体。但在研究水下爆炸、水击等问题时, 由于压力变化剧烈, 则必须要考虑其压缩性。

【例 1-1】理想气体做等温压缩, 试求其体积压缩系数表达式。

解: 对于理想气体, 由状态方程和等温压缩条件可得

$$p = \rho RT$$

$$dp = RT d\rho = \rho RT \frac{d\rho}{\rho}$$

则由式 (1-7), 有

$$\beta = \frac{d\rho/\rho}{dp} = \frac{1}{p}$$

可见, 随着压强的变化, 其体积压缩系数也发生着变化。

注 5: 对于理想气体, 有 $p = \rho RT$, 其中 p 为气体的绝对压强; ρ 为气体的密度; T 为热力学温度; R 为气体常数, 对于空气 $R=287(\text{J/kg} \cdot \text{K})$, 对于其他气体, 在标准状态下,

$$R = \frac{8314}{n} \quad (n \text{ 为气体的分子量}).$$

【例 1-2】使水 ($E=2\,000\text{ MPa}$) 的体积减小 1%, 则压强需要增大多少?

解: 根据式 (1-5), 有

$$E = \frac{1}{\beta} = -\frac{dp}{dV/V} \quad \Rightarrow \quad dp = -E \frac{dV}{V}$$

当体积减小 1% 时, 压强应增加

$$\Delta p = -E \frac{\Delta V}{V} = -2\,000 \times (-1\%) = 20 \text{ (MPa)}$$

3. 黏性

流体抵抗剪切变形的能力称为黏性 (Viscosity), 是流体的固有属性。

实验: 对于如图 1-3 所示的装置, 当转动右侧圆盘 A 时, 左侧的圆盘 B 是否会慢慢地跟着转动起来? 为什么?

实验结果说明, 当转动右侧圆盘 A 时, 左侧圆盘 B 也会同向转动, 这是什么原因呢? 当 A 盘转动时, 靠近 A 盘的空气会跟着一起转动, 使得处于 A 、 B 盘之间的空气受到剪切变形, 为了抵抗这种变形, 其左侧的空气也会跟着转动起来。这个实验也说明了流体黏性的存在。

黏性是流体所具有的固有属性, 无论是气体还是液体都具有黏性。1686 年, 牛顿通过大量的实验, 总结出了“牛顿内摩擦定律”, 如图 1-4 所示。

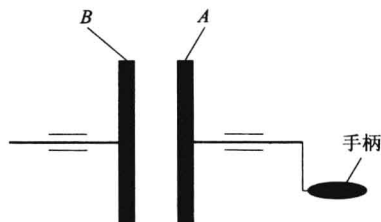


图 1-3 流体黏性实验示意

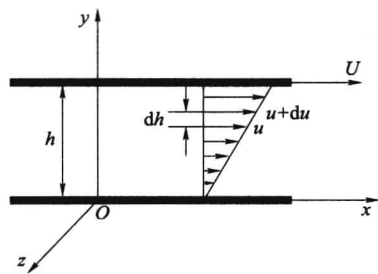


图 1-4 牛顿内摩擦定律示意

在图 1-4 所示的流动中, 两个水平放置的、间距为 h 的平行平板之间充满液体。使上板以 U 的速度向右运动, 下板保持不动。由于流体与板之间存在着附着力, 故紧邻于上板的流体以速度 U 随同上板一起向右运动, 而紧邻于下板的流体则随同下板静止不动, 两板间的流体做平行于平板的流动。

根据试验结果, 平板所受黏性阻力 T 的大小与平板的湿面积 A 、平板运动速度 U 和两板间距 h 有着如下关系

$$T = \mu A \frac{U}{h} \quad (1-8)$$

式中, μ 为与流体性质有关的比例系数, 称为动力黏度, 单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

若取相距为 dy 的流体薄层, 其速度差为 dv , 则由上式可得到

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$