

普通高等教育“十二五”规划教材

流体力学

(少学时)

何川 主编



普通高等教育“十二五”规划教材

流体力学

(少学时)

主 编 何 川
参 编 潘良明 李海霞 阴继翔
刘宏丽 宁 智



机械工业出版社

本书是大学工科本科层次的流体力学少学时教材。

全书共有四章：第一章绪论，介绍流体的基本特征及流体力学的发展、应用情况；第二章流体静力学，介绍流体平衡的基本特点、压强的度量以及流体静止时对固体壁面作用力的分析方法；第三章流体动力学基础，介绍描述流体运动的方法、流体运动的基本概念、基本原理、基本控制方程以及运动流体与固体壁面间的相互作用；第四章管内流动与水力计算，介绍流体力学基本知识的应用。

本书在基本概念及基本理论的叙述中力求简明，从基本理论到应用关系式的推导注重详尽、清晰，应用关系式的具体应用采用以说明、讨论、举例及思考题、习题的方式展开。在静压强分析、静止及运动流体与固体壁面间的作用力分析等基本及疑难点问题上，给出了心得式的提示和讨论。

本书适合机械工程、动力工程、土木工程、化学工程、采矿工程、环境工程及相关专业本科层次的大学生作为教材使用，也可供相关专业的工程技术人员参考。在学校使用的教学学时数可安排 32 ~ 40 学时。

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学：少学时/何川主编. —北京：机械工业出版社，2010.6

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 30838 - 6

I. ①流… II. ①何… 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 103140 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：蔡开颖 责任编辑：章承林

版式设计：霍永明 责任校对：吴美英

封面设计：张 静 责任印制：杨 曦

北京市朝阳展望印刷厂印刷

2010 年 8 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 9.75 印张 · 232 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-30838-6

定价：19.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者服务部：(010) 68993821

封面防伪标均为盗版

教材编审委员会

(按姓氏笔画排列)

主任:	郭烈锦	西安交通大学		
副主任:	王立	北京科技大学	张华	上海理工大学
	王如竹	上海交通大学	沈胜强	大连理工大学
	邓海平	机械工业出版社	高翔	浙江大学
	张力	重庆大学		
委员:	王军	华中科技大学	杨茉	上海理工大学
	王丽	北京石油化工学院	杨昭	天津大学
	王灵梅	山西大学	汪建文	内蒙古工业大学
	冉景煜	重庆大学	陆靓燕	武汉工程大学
	刘永峰	北京建筑工程学院	周玉明	重庆科技学院
	刘忠宝	北京工业大学	周静伟	中国计量学院
	吕太	东北电力大学	金苏敏	南京工业大学
	孙奉仲	山东大学	姜水生	南昌大学
	朱天宇	河海大学	闻建龙	江苏大学
	齐学义	兰州理工大学	徐斌	河南科技大学
	何伯述	北京交通大学	袁文华	邵阳学院
	何宏舟	集美大学	袁镇福	浙江大学宁波理工学院
	吴锋	浙江大学	郭培红	河南理工大学
	吴静怡	上海交通大学	高青	吉林大学
	张卫正	北京理工大学	崔海亭	河北科技大学
	张文孝	大连水产学院	章学来	上海海事大学
	李人宪	西南交通大学	程有凯	大连水产学院
	李仁年	兰州理工大学	舒水明	华中科技大学
	李明海	大连交通大学	谢晶	上海海洋大学
	李惟毅	天津大学	谢诞梅	武汉大学
	杜小泽	华北电力大学	颜伏伍	武汉理工大学
	杨历	河北工业大学	黎苏	河北工业大学
秘书:	蔡开颖	机械工业出版社		

前 言

本书是为希望用较少学时学习和掌握流体力学基本理论与基本方法的工科大学生编写的教材。

我们生活的地球是一个地表被水和空气覆盖的星球。可以毫不夸张地说，人们的生活和各种工程几乎都自觉或不自觉地和流体打交道。流体的特点以及分析方法在力学中极有特色，掌握有关流体力学的基本知识，对于希望在地球上生活幸福、工作顺利的人们有着或多或少的助益。为了帮助人们用较少的时间获得基本的流体力学概念，学习应用流体力学知识分析常见工程问题的方法，来自全国不同高校的长期从事流体力学教学的一线教师共同编写了这本少学时的流体力学教材。

全书共有四章：第一章绪论，介绍流体的基本特征及流体力学的发展、应用情况；第二章流体静力学，介绍流体平衡的基本特点、压强的度量以及流体静止时对固体壁面作用力的分析方法；第三章流体动力学基础，介绍描述流体运动的方法、流体运动的基本概念、基本原理、基本控制方程以及运动流体与固体壁面间的相互作用；第四章管内流动与水力计算，介绍流体力学基本知识的应用。

本书在基本概念及基本理论的叙述中力求简明，从基本理论到应用关系式的推导注重详尽、清晰，应用关系式的具体应用采用说明、讨论、举例及思考题、习题的方式展开。

作为本书的一个特点，作者在静压强分析、静止及运动流体与固体壁面间的作用力分析等基本及疑难点问题上专门给出了心得式的提示和讨论，希望能对初学者有所帮助。

本书适合机械工程、动力工程、土木工程、化学工程、采矿工程、环境工程及相关专业本科层次的大学生作为教材使用，也可供相关专业的工程技术人员参考。在学校使用的教学时数可安排32~40学时。

本书由潘良明编写第一章，李海霞、何川编写第二章，阴继翔、何川编写第三章，刘宏丽、宁智、何川编写第四章。何川担任主编。潘良明、李海霞、阴继翔、刘宏丽还分别制作了各章节相关的电子教学材料。

介于编者的学识及水平所限，虽经多次修改，仍难免有不尽如人意的地方，欢迎并恳请广大读者批评指正、提出宝贵意见（主编邮箱：hechuan@cqu.edu.cn）。

编 者

目 录

前言

第一章 绪论 1

第一节 流体与流动现象及其在工程中的应用 1

第二节 流体力学的发展简史 2

第三节 流体的定义及连续介质的概念 3

第四节 流体的密度、压缩性与膨胀性 5

第五节 流体的粘性及牛顿内摩擦定律 9

第六节 作用在流体上的力 15

第七节 液体的表面性质 16

小结 18

思考题 19

习题 20

第二章 流体静力学 22

第一节 流体静压强及其特性 22

第二节 静止流体中的力平衡关系 24

第三节 重力场中流体静压强的分布规律 26

第四节 流体压强的度量 28

第五节 静止流体与固体壁面间的作用力 33

小结 41

思考题 42

习题 42

第三章 流体动力学基础 47

第一节 描述流体运动的方法 47

第二节 流场的若干概念 48

第三节 质点导数与系统导数 52

第四节 流体运动的基本物理定律及基本方程 56

第五节 平行直线流断面上的压强关系式 61

第六节 定常流动中的机械能关系 63

第七节 运动流体与固体壁面间的作用力 75

第八节 层流与湍流 79

小结 86

思考题 87

习题 87

第四章 管内流动与水力计算 91

第一节 概述 91

第二节 圆管内的层流与湍流 95

第三节 管道流动阻力系数的研究 100

第四节 管路的水力计算 113

第五节 管内流动的阻力特性曲线 131

第六节 有压管中的水击 133

小结 136

思考题 136

习题 137

习题参考答案 140

常用名词 143

参考文献 145

第一章 绪 论

第一节 流体与流动现象及其在工程中的应用

流体是液体和气体的总称。人们无时无刻不在与流体打交道，在人们的生活和生产活动中，可以说难于找到一个生产部门与流体没有或多或少的联系。

流体力学是研究流体平衡和运动规律及其应用的学科。由于研究内容和方法上的差异，通常又将其分为理论流体力学和应用流体力学（即工程流体力学）两门学科。理论流体力学着重数理分析，主要用严密的数学逻辑推理方法去研究流体运动的相关问题。工程流体力学则着眼于工程应用，以理论分析与实验研究相结合的方法研究流体宏观的平衡和运动的规律及其在工程技术上的应用。现在，两者正逐渐接近起来。

流体力学非常广泛地应用于各种技术领域，在水利电力、航空航海、宇航技术、热能动力、机械工程、冶金采矿、天文气象、土建环保、石油化工、军工核能、农业技术等部门，都有许多流体力学问题。因此，对于许多工程技术专业来说，“工程流体力学”作为一门重要的技术基础课是理所当然的，是必需的。

流体力学的研究方法有理论分析、实验研究和数值计算三种。理论分析方法一般是指运用基本的物理概念和力学定律去分析某一具体流动问题，提出适当的假定，抽象出理论模型，运用数学工具得出问题的普遍解。实验研究方法是指将实际流动问题按相似原理建立实验模型，通过实验观察现象，并用各种测试技术，测定有关数据。在测定出大量数据的基础上，进行整理分析，按照一定的方法推测实际结果。近代电子计算机的使用，使流体力学研究中的数值计算方法获得了新的活力。在流体力学基本原理的基础上，对研究对象建立起较精确的数学模型，通过电子计算机，求得解答。这就形成了流体力学的一个新的分支——计算流体力学。用数值计算的方法来研究流体力学问题，常需要采用一定程度的近似和简化，这种近似和简化是否正确往往需要用实验加以检验，而实验的进行又需要分析所得的理论来指导。所以，上述三种研究方法是相辅相成、相互补充的。它们各有自己的理论，也各有优缺点。随着科学技术的进步，先进的流场显示和测试技术的发展，高速大容量电子计算机的推广，为流体力学的研究和发展开辟了广阔的前景。

流体力学还与其他学科结合产生了一些边缘学科，如生物流体力学、化学流体力学、电磁流体力学等。

近代，随着很多科学及技术部门如航空、火箭技术、宇航技术、动力、造船以及大型水利工程等的飞速发展，随着生产实践和科学实验不断对流体力学提出新的要求，流体力学的研究及应用范围将不断扩大，其基本定律及研究方法也将向其他学科和更广泛的技术领域渗透，从而使流体力学这门学科不断发展。

第二节 流体力学的发展简史

流体力学是在人类同自然界作斗争和在生产实践中逐步发展起来的。古时中国有大禹治水疏通江河的传说；秦朝李冰父子带领劳动人民修建的都江堰，至今还在发挥着作用；大约与此同时，古罗马人建成了大规模的供水管道系统等。

对流体力学学科的形成作出第一个贡献的是古希腊的阿基米德，他建立了包括物理浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论，奠定了流体静力学的基础。15 世纪，意大利达·芬奇的著作谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题；16 世纪，帕斯卡阐明了静止流体中压力的概念。

17 世纪，力学奠基人牛顿研究了在流体中运动的物体所受到的阻力，得到阻力与流体密度、物体迎流截面积以及运动速度的平方成正比的关系。他针对粘性流体运动时的内摩擦力提出了牛顿粘性定律。之后，法国皮托发明了测量流速的皮托管；达朗贝尔对运河中船只的阻力进行了许多实验工作，证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系；瑞士的欧拉采用了连续介质的概念，把静力学中压力的概念推广到运动流体中，建立了欧拉方程，用微分方程组描述了无粘流体的运动；伯努利从经典力学的能量守恒出发，研究供水管道中水的流动，精心地安排了实验并加以分析，得到了流体定常运动下的流速、压力、管道高程之间的关系，即伯努利方程。欧拉方程和伯努利方程的建立，是流体动力学作为一个分支学科建立的标志，从此开始了用微分方程和实验测量进行流体运动定量研究的阶段。

从 18 世纪起，位势流理论有了很大进展，在水波、潮汐、涡旋运动、声学等方面都阐明了很多规律。法国拉格朗日对于无旋运动，德国亥姆霍兹对于涡旋运动作了不少研究。在上述的研究中，流体的粘性并不起重要作用，即所考虑的是无粘流体。这种理论当然阐明不了流体中粘性的效应。

19 世纪，工程师们为了解决许多工程问题，尤其是要解决带有粘性影响的问题。于是他们部分地运用流体力学、部分地采用归纳实验结果的半经验公式进行研究，这就形成了水力学，至今它仍与流体力学并行地发展。1822 年，纳维建立了粘性流体的基本运动方程；1845 年，斯托克斯又以更合理的基础导出了这个方程，并将其所涉及的宏观力学基本概念论证得令人信服。这组方程就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程（简称 N-S 方程），它是流体动力学的理论基础。欧拉方程正是 N-S 方程在粘度为零时的特例。普朗特学派从 1904 年到 1921 年逐步将 N-S 方程作了简化，从推理、数学论证和实验测量等各个角度，建立了边界层理论，能实际计算简单情形下，边界层内流动状态和流体同固体间的粘性力。同时，普朗克又提出了许多新概念，并广泛地应用到飞机和汽轮机的设计中去。这一理论既明确了理想流体的适用范围，又能计算物体运动时遇到的摩擦阻力，使上述两种情况得到了统一。

20 世纪初，飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。航空事业的发展，期望能够揭示飞行器周围的压力分布、飞行器的受力状况和阻力等问题，这就促进了流体力学在实验和理论分析方面的发展。以茹科夫斯基、恰普雷金、普朗克等为代表的科学家，开创了以无粘不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论，阐明了机翼怎样受到举力，从而使空气把很重的飞机托上天空。机翼理论的正确性，使人们重新认识无粘流体的理论，肯定了它指导工程设计的重大意义。

机翼理论和边界层理论的建立和发展是流体力学的一次重大进展,它使无粘流体理论同粘性流体的边界层理论很好地结合起来。随着汽轮机的完善和飞机飞行速度提高到 50m/s 以上,又迅速扩展了从 19 世纪就开始的、对空气密度变化效应的实验和理论研究,为高速飞行提供了理论指导。20 世纪 40 年代以后,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞行器速度超过声速,进而实现了航天飞行,使气体高速流动的研究进展迅速,形成了气体动力学等分支学科。

以这些理论为基础,20 世纪 40 年代,关于炸药或天然气等介质中发生的爆轰波又形成了新的理论,为研究原子弹、炸药等起爆后,激波在空气或水中的传播,发展了爆炸波理论。

从流体力学的发展过程可以看出,它的产生和发展,始终是与社会生产实践紧密地联系在一起。在现代科学技术高度发展的情况下,随着电子计算机的出现,计算技术被引入到流体力学领域,使以前因计算过于繁杂而影响进一步探讨的流体力学问题逐步得以解决,计算流体力学在今天已成为研究流体力学的重要方法。近年来,流体力学开始了和其他学科的互相交叉渗透,形成新的交叉学科或边缘学科,如物理-化学流体动力学、磁流体力学、生物流变学、两相(气液或气固)流体力学等。这些新型学科的出现和发展,使流体力学这一古老学科更富有活力。

鉴于篇幅和学时数所限,本书将主要介绍流体力学的基本理论,应用方面则侧重于工业中最常见的管内流动问题。

第三节 流体的定义及连续介质的概念

一、流体的概念

从力学的观点看,流体是一种在任何微小的剪切力作用下即会发生连续变形的物质。只要剪切力仍在继续作用,变形量就会继续增加。流体具有的这种容易变形(流动)的特性,就是流体的流动性。流动性既是流体命名的由来,也是流体区别于固体的根本标志。当固体受到剪切力作用时,仅产生一定程度的变形,只要作用力保持不变,固体的变形也就不再变化。作用力与变形之间存在确定的对应关系。另外,固体有固定的形状,流体则没有。静止固体内可以存在切应力,而静止液体内不可能存在切应力。固体能承受拉力,流体则不能承受拉力。

流体按照集态的不同又可分为液体和气体。

液体分子之间距离较小(分子间距大约等于其分子的平均直径),分子间的吸引力较大。液体中的每一个分子,常常在其邻近分子的凝聚力场中,它能够作没有一定方向和没有固定周期的无规则振动,同时也能在其他分子间作移动,但不能像气体分子那样自由运动。故液体的流动性不如气体大。另外,液体具有一定的体积,其体积与盛装液体的容器大小无关。液体无一定形状,与容器的形状保持一致。当液体和气体接触时会出现液体同气体的交界面;此交界面称为液体的自由表面。

气体的显著特点是分子间距大,因而单位体积内分子数少,表现为密度较低。气体分子的平均间距约为分子平均直径的 10 倍。所以,分子间的吸引力是十分微弱的。分子可以自由运动,分子运动的自由行程大,分子间相互掺混,进行动量交换。实验发现,其自由运动

平均行程约为分子平均直径的 200 倍。这就使气体极易变形和流动，而且总是充满它所能达到的全部空间。

二、流体质点的概念

如上所述，流体是由分子组成的，分子之间有空隙，它们处于混乱的热运动状态，流体力学并不研究个别分子的微观运动，而是研究由大量分子所组成的宏观流体在外力（如重力、压力差等）作用下的机械运动。

宏观流体的物理属性即物理量，如压力、速度、密度、温度等都是大量分子的行为和作用的平均效果——统计平均值。而这些宏观物理量都可以从实验中直接观测到。那么，什么是宏观流体的最小基本单元呢？

流体的一个重要参数是密度，从密度的定义看，所考察的体积应该趋于无穷小，但如果很细致地进行精密的实验，随着考察体积的无限缩小，将出现如图 1-1 所示的密度测量值。很显然，要得到有意义的密度值，所考察的体积必须大于图 1-1 中所示的 V_0 值。

把使流体具有宏观物理特性所允许的最小体积，视为宏观流体的最小单元，称它为流体质点。这是研究流体平衡和运动的宏观规律时必须引用的理论模型。

所谓流体质点，就是由足够多的流体分子组成的微观上充分大、宏观上充分小的且在一定时刻占有确定的空间位置的一个物理实体。其特点有：

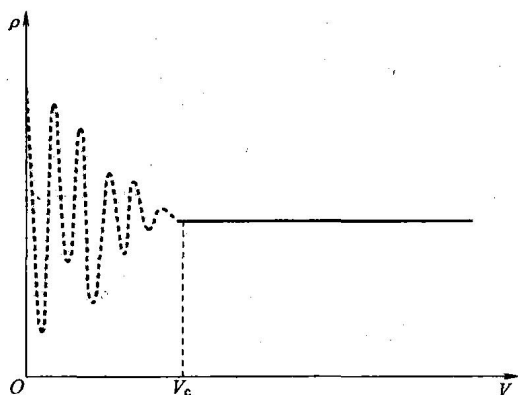


图 1-1 随体积趋于无穷小时流体的密度特性

1) 从体积上，“微观上充分大”是指流体质点相对于分子和分子间距的尺寸来说是足够大的。“宏观上充分小”是指质点对于流动空间和放置在流体中的固体物（如汽车、飞机、管道等）的尺寸来说是充分小的，是微不足道的。即质点所占据的宏观体积为无穷小，并以某一确定的空间坐标点为极限。

2) 质点具有一定的宏观物理量，即具有密度、速度、温度等。

3) 质点的形状可以任意划定。

三、流体的连续介质模型

在以上对流体最小基本单元——质点的假设基础上，对流体整体进行模型化，用宏观流体模型代替微观有空隙的分子结构，建立一种连续介质模型，这是对流体连续性（稠密性）的基本假设，是流体力学中一个带根本性的假设。

所谓连续介质，就是将流体看成是由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续体。

通常将流体中任意小的一个微元部分称作流体微团，当流体微团的体积无限缩小并以某一坐标点为极限时，流体微团就成为处在这个坐标点上的一个流体质点，它在任何瞬时都应具有一定的物理量。因而在连续介质的流体中，质点的一切物理量必然都是坐标和时间变量的单值、连续、可微函数（除个别奇点、奇线、奇面有间断外），从而形成各种物理量的场（包括标量场和矢量场），流体力学中称为流场。这样就可利用连续函数和场论等数学工具去研究流体的平衡和运动规律，并建立各物理量之间的数量关系。

应该指出, 将流体作为连续介质来处理, 对于大部分工程技术问题都是正确的, 但对于某些特殊问题则是不适用的。例如, 当航天器在地球外层空间飞行时, 由于当地气体异常稀薄, 以致分子的自由行程与飞行器的特征尺寸具有相同数量级, 这时连续介质概念已失去意义。在微小尺度空间中的气体, 其空间尺度与分子的自由行程也处于相同的数量级, 连续介质概念同样不适用。对于这类问题, 就必须舍弃宏观的连续介质的研究方法, 而代之以分子动力论的微观方法。这类问题属于稀薄气体动力学或分子动力学研究的范畴。

第四节 流体的密度、压缩性与膨胀性

一、流体的密度

物质每单位体积中所含的质量称为密度。

根据连续介质模型, 流体在空间某点的密度为

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

式中 ρ ——液体密度 (kg/m^3);

ΔV ——以所考虑的点为中心的微小体积 (m^3);

Δm —— ΔV 中包含的流体质量 (kg)。

空间不同点上的密度随该点的温度、压强状况而改变。

应该指出, 正如在流体的连续介质模型中所讨论的那样, 这里数学上的 $\Delta V \rightarrow 0$, 在物理上应理解为体积缩小为无穷小的流体质点, 该点的体积同被考察的流体体积相比是完全可以忽略不计的, 但它必须包含足够多的流体分子, 而不失去将流体作为连续介质来处理的基础。今后遇到的类似情况均应如此理解。

如果流体是均匀流体, 那么流体的密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中 m ——流体的质量 (kg);

V ——流体的体积 (m^3)。

表 1-1 列出了在标准大气压下几种常见流体的密度。

表 1-2 列出了在标准大气压下水、空气和水银的密度随温度而变化的数值。

表 1-1 常用流体的密度 (标准大气压下)

流体名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ (kg/m^3)	流体名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ (kg/m^3)
蒸馏水	4	1000	空气	0	1.293
海水	15	1020 ~ 1030	氧	0	1.429
普通汽油	15	700 ~ 750	氮	0	1.251
石油	15	880 ~ 890	氢	0	0.0899
润滑油	15	890 ~ 920	一氧化碳	0	1.25
酒精	15	790 ~ 800	二氧化碳	0	1.976
水银	0	13600	二氧化硫	0	2.927
熔化生铁	1200	7000	水蒸气	0	0.804 ^①

① 为便于计算而推算到 0°C 。

表 1-2 不同温度下的水、空气和水银的密度 (单位: kg/m³)

流体名称	温度/℃						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空气	1.29	1.24	1.2	1.12	1.06	0.99	0.94
水银	13600	13570	13550	13500	13450	13400	13350

二、相对密度

某物质的密度 ρ_1 与另一参考物质的密度 ρ_2 之比值, 称为该物质的相对密度。

$$d = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (1-3)$$

式中 d ——相对密度。显然, 相对密度的量纲为 1。

对于液体, 通常所取参考物质为标准大气压下、4℃ 的蒸馏水。此时 $\rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。

对于气体, 所取参考物质为特定的温度和压强下的氢气或者空气, 它没有统一的规定, 必须视具体给定条件而定。

三、流体的比体积

流体密度的倒数称为比体积, 即单位质量的流体所占的体积。比体积用 v 表示, 单位为 m^3/kg 。

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-4)$$

四、混合气体的密度

混合气体的密度可按组成该混合气体的各种气体的体积分数计算, 即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \cdots + \rho_n V_n}{V}$$

$$\text{由} \quad = \rho_1 \frac{V_1}{V} + \rho_2 \frac{V_2}{V} + \cdots + \rho_n \frac{V_n}{V}$$

$$= \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \cdots + \rho_n \varphi_n$$

$$\text{即} \quad \rho = \sum_{i=1}^n \rho_i \varphi_i \quad (1-5)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——混合气体中各组分气体的密度;

$\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_n$ ——混合气体中各组分气体的体积分数。

五、流体的压缩性

流体在其所受压强增大时体积会缩小的性质, 称为压缩性。

在某一温度和压强下, 温度保持不变, 流体单位压强升高所引起的体积相对减少值, 称为该温度和压强下流体的 (体积) 压缩率 κ (Pa^{-1})。

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-6)$$

式中 dp ——流体压强的增量 (Pa);

dV ——流体体积相应的减小量 (m^3);

V ——流体原来的体积 (m^3)。

由于压强增大时, 体积缩小, dp 与 dV 异号, 故等式的右端加一负号, 以使 κ 为正。

体积的变化也反映了密度的变化。故流体的 (体积) 压缩率也可用密度的相对变化率来表示。因为, 当流体质量一定时, 即

$$\rho V = m$$

由于质量守恒, 式中 m 为定值。

对上式两端微分, 有

$$\begin{aligned}\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} &= 0 \\ \frac{d\rho}{\rho} &= -\frac{dV}{V}\end{aligned}$$

即质量一定时, 密度的相对改变量和体积的相对改变量大小相等, 符号相反。

所以, 流体的 (体积) 压缩率又可表示为

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-7)$$

流体的 (体积) 压缩率 κ 的数值很小, 工程上常用其倒数, 称为体积模量, 用 K 表示

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-8)$$

K 的单位是 Pa 。它的物理意义是: 当温度不变时, 每产生一个单位体积的体积变化量所需要的压强变化量。

由此可见:

1) K 值越大 (κ 值越小) 表示流体越不容易压缩。

2) 体积模量的量纲和单位与压强相同。

水在不同温度和压强下的 K 值, 见表 1-3。

表 1-3 水在不同温度和压强下的 K 值

(单位: 10^8 Pa)

温度/ $^{\circ}\text{C}$	压强/ atm				
	5	10	20	40	80
0	18.522	18.62	18.816	19.11	19.404
5	18.914	19.11	19.306	19.698	20.302
10	19.11	19.306	19.698	20.09	20.776
15	19.306	19.6	19.849	20.482	21.266
20	19.404	19.796	20.188	20.776	21.727

注: $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ 。

从表中可以看出, 水的体积模量受温度和压强的影响而变化的量是很微小的。在工程计算中, 通常近似地取水的 $K = 2.0 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。

气体的压缩性比液体显著得多, 这是因为气体分子间距较液体大得多的缘故。

从物理学中已经知道, 当气体的压强或温度改变时, 将引起气体密度、比体积的显著变化。它们之间的关系可由完全气体 (流体力学中称理想气体为完全气体) 状态方程式表示出来。即

$$pv = RT$$

或

$$p = \rho RT \quad (1-9)$$

式中 p ——气体的绝对压强 (Pa);

v ——气体的比体积 (m^3/kg);

T ——气体的绝对温度 (K);

R ——因种类而异的气体常数 [$\text{m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$].

根据以上完全气体状态方程式,可直接得出气体在等温过程、等压过程以及绝热过程等不同的压缩(或膨胀)条件下相应的体积模量。

六、流体的膨胀性

流体在温度升高时体积会有所增大的性质称为膨胀性。流体膨胀性的大小用体膨胀系数 α_v 来表示。

压强不变时,体膨胀系数 α_v 为

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-10)$$

式中 dT ——温度的增量 ($^{\circ}\text{C}$)。

α_v 的单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ 或 $1/\text{K}$ 。

体膨胀系数的物理意义是:当压强不变时,每增加单位温度所引起的流体体积的相对变化率。

当温度增加时,体积膨胀。所以 dT 与 dV 符号相同。水在不同温度和压强的情况下的体膨胀系数 α_v ,见表 1-4。

表 1-4 水在不同温度和压强下的 α_v 值 (单位: $10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$)

压强/atm	温度/ $^{\circ}\text{C}$				
	1 ~ 10	10 ~ 20	40 ~ 50	60 ~ 70	60 ~ 100
1	14	150	422	556	719
100	43	165	424	548	704
200	72	183	426	539	—
500	149	236	42	523	661
900	229	289	437	514	621

注: $1\text{atm} = 101325\text{Pa}$ 。

七、不可压缩流体的概念

压缩性是流体的基本属性。任何流体都是可以压缩的,只不过可压缩的程度不同而已。液体的压缩性都很小,随着压强和温度的变化,液体的密度仅有微小的变化,在大多数情况下,可以忽略压缩性的影响,认为液体的密度是一个常数。

气体的压缩性较大。从热力学中可知,当温度不变时,完全气体的体积与压强成反比,压强增加一倍,体积减小为原来的一半;当压强不变时,温度升高 1°C ,体积就比 0°C 时的体积膨胀 $1/273$ 。所以,通常把气体看成是可压缩流体,即它的密度不能作为常数,而是随压强和温度的变化而变化的。把密度随温度和压强变化的流体称为可压缩流体。

但大量的实验表明,在气体速度不大时,因气体流动而造成其密度的变化可以忽略不计。在工程上为了研究问题简单方便,又不致引起较大的误差,假定有这么一种流体,它们在受压时体积不减小,受热时体积不增大,即其体积压缩率和体膨胀系数完全为零,这类流

体称为不可压缩流体。液体和低速运动的气体由于其体积变化很小，通常条件下，可忽略其压缩性，假定其体积压缩率为零，同时，利用分段取特征温度的方法代替温度变化对密度的影响，将流体视为不可压缩流体。这样简化的结果，既有利于对问题的分析研究，也能得到有一定准确度的结果，有很好的实用性。例如，在锅炉尾部烟道和通风管道中，气体在整个流动过程中，压强和温度的变化都很小，其密度变化很小，可作为不可压缩流体处理。再如，当气体对物体流动的相对速度比声速要小得多时，气体的密度变化也很小，也可以近似地看成是常数，当做不可压缩流体处理。

不可压缩均质流体的密度、比体积均为常数，即

$$\rho = C \quad (1-11)$$

需要指出，不可压缩流体是人们研究流体时所采用的一种简化模型，其适用的条件是压力和温度的改变所引起的密度变化在一定的工程误差范围内可以忽略。当压力、温度变化剧烈时，流体密度也往往发生较大幅度的变化，不可压缩流体模型不能使用。例如，研究管道中水击和水下爆炸时，水的压强变化较大，而且变化过程非常迅速，这时水的密度变化就不可忽略，必须考虑水的压缩性，把水当做可压缩流体来处理。

第五节 流体的粘性及牛顿内摩擦定律

一、粘性的概念

粘性是流体反抗切向力的物理属性。流体具有流动性，即在受到任意微小的剪切力时，都会发生连续的变形。不同的流体在同样大小剪切力的作用下，变形的快慢是不一样的。流体的粘性就是流体抵抗剪切变形的性质。

为了说明流体的粘性，试观察流体以均匀分布的速度流过水平静止固壁表面的情况。

当流体流经静止固壁时，由于流体与壁面之间存在着附着力，紧靠壁面的流体质点粘附在壁面上，静止不动。而由于流体内部质点间内聚力的作用，紧靠这一静止流体层的另一层流体质点受到阻滞，速度降低，同时这种阻滞作用一层一层向远离固壁表面的方向传递出去，在垂直于固壁的方向上速度从零逐渐增加至与来流同样大小。壁面法线上某流动断面上的速度分布如图 1-2 所示。由内聚力的阻滞使层间产生相对运动从而引起流体内部层间接触面上产生了摩擦剪切力，称为流体内摩擦力。

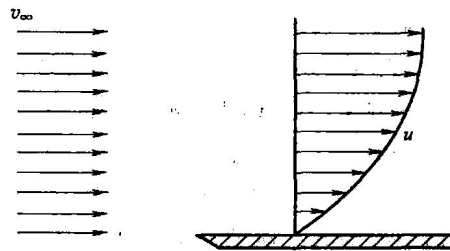


图 1-2 壁面法线上某流动断面上的速度分布

存在于自然界中的所有流体不论是液体还是气体，都具有一定的粘性。粘性使流体得以粘附于它所接触的固体表面，与固壁表面具有相同的速度，流体与固壁表面间无滑移。粘性形成流体的内摩擦，它是流体产生机械能损失的根源。

二、牛顿内摩擦定律

在流体中取一面积为 A （垂直于 y 轴），厚度为 dy 的流体层，其下层速度为 u ，上层速度为 $u + du$ ，由于上下层流速的不同，使这块流体变形，层间表面上产生内摩擦力。牛顿实验发现，摩擦力 F_T 的大小与面积 A 和速度梯度 du/dy 成正比，并与流体的粘度 μ 的大小有

关, 与压力的大小无关。这称为牛顿内摩擦定律, 用数学式表示为

$$F_T = \mu \frac{du}{dy} A \quad (1-12)$$

单位面积上的内摩擦力称为内摩擦应力或切应力, 用 τ 表示, 则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-13)$$

上式表明, 作用在流层上的切向应力与速度梯度成正比。

同样的流体, 其速度梯度大时, 切应力大, 能量损失也大; 速度梯度小时, 切应力小, 能量损失也小。当流体处于静止状态, 或以相同的速度流动 (即流层间没有相对运动), 则速度梯度为零, 切应力也为零, 流体的粘性作用表现不出来。

速度梯度 du/dy 表示流速在其法线方向上的变化率, 它有明确的物理意义。

在运动流体中取出一个矩形的平面流体微元, 如图 1-3 所示, 由于流体上下的流速不相等, 经过无限小的时间间隔 dt 之后, 原来为矩形的流体微元平面 $abcd$ 变成了平行四边形 $abc'd'$, 原来的直角变为 $\angle d'ab$, 角度减小了 $d\phi$, 于是角变形速率 $d\phi/dt$ 可由几何关系得到

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{du dt / dy}{dt} = \frac{du}{dy}$$

可以看出, 这里的速度梯度表示流体的微团角变形速率的大小。

应该指出:

1) 牛顿内摩擦定律数学表达式 (1-13) 只适用于流动状态为层流的情况, 而不适用于湍流情况 (层流和湍流以后讨论)。

2) 式 (1-13) 只适用于牛顿流体, 而不适用于非牛顿流体。所谓牛顿流体, 是指完全遵循牛顿内摩擦定律的流体。或者说, 凡作用在流体上的切应力与它所引起的角变形速率 (或速度梯度) 之间存在线性关系的流体称为牛顿流体。例如气体、水、汽油、煤油、甲苯、乙醇等都属于这一类。不遵循牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体。例如油漆、油墨、血浆、泥浆、纸浆、牙膏等都是非牛顿流体。非牛顿流体已不属于普通流体力学所研究的范畴。

3) 若流速 u 与其法向距离 y 呈线性变化关系, 即 $du/dy = C$, 则式 (1-13) 可表示为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1-14)$$

在工程中, 对于小间隙的牛顿流体流动问题, 如润滑、液力耦合器等问题, 都可以采用式 (1-14) 来计算切应力。

三、粘度

1. 动力粘度 μ

粘性是流体抵抗变形运动的性质。由式 (1-13) 可见, 当 τ 一定时, μ 越大的流体变形越缓慢, 因而 μ 是反映流体粘性大小的特性参数。根据牛顿内摩擦定律, μ 的量纲为

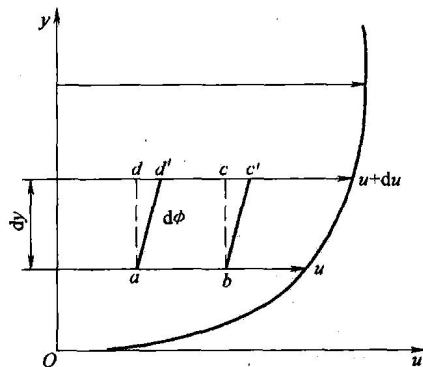


图 1-3 不均匀流动的流体微元变形

$$[\mu] = \left[\frac{\tau}{du/dy} \right] = ML^{-1}T^{-1}$$

μ 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。它具有动力学的量纲，故常称为动力粘度。

流体动力粘度 μ 的大小取决于流体的种类，所处环境的温度、压强等参数。

温度对流体粘性的影响很大。但由于液体和气体的内摩擦机理并不相同，所以温度对这两类流体动力粘度变化的影响正好相反。

对于液体，分子间的吸引力（内聚力）是构成粘性的主要因素。当温度上升时，分子间空隙增大，吸引力减小。故液体的动力粘度降低。

对于气体，分子间的吸引力非常小，构成气体粘性的主要因素是气体分子作混乱运动时在不同流速的流层间所进行的动量交换。因此，温度越高，气体分子的掺混运动越强烈，动量交换越频繁，气体的动力粘度越大。

在高压作用下，气体和液体的动力粘度均将随压力的升高而增大。例如，水在 $1.01 \times 10^{10} \text{Pa}$ 压力作用下的动力粘度可以增大到水在 $1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ 压力下动力粘度的两倍。普通的压力对流体的动力粘度几乎没有什么影响。因此，在一般情况下，可以认为流体的动力粘度只随温度变化，不考虑压强对动力粘度的影响。

下面介绍两个经验公式。

1) 水的动力粘度与温度的关系式。

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-15)$$

式中 μ_0 ——水在 0°C 时的动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)；

t ——水温 ($^\circ\text{C}$)；

2) 在压强小于 1MPa 时，气体的动力粘度与温度的关系常用苏士兰 (Sutherland) 公式计算。

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{1.5} \frac{273 + C}{T + C} \quad (1-16)$$

式中 μ_0 —— $T = 273 \text{K}$ 时气体的动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)；

C ——因气体种类而定的 Sutherland 常数 (K)；

T ——气体的热力学温度 (K)。

上式适用于压力不太高的情况 (例如 $p \leq 1 \text{MPa}$)，因为此时气体的动力粘度可视为与压力无关。式中 μ_0 、 C 可查表 1-5。

表 1-5 常用气体的动力粘度、相对分子质量 M 和 Sutherland 常数 C

流体名称	$\mu_0 \times 10^6 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	M	C/K
空气	17.25	28.96	111
氧	19.20	32.00	125
氮	16.60	28.02	104
氢	8.40	2.016	71
一氧化碳	16.80	28.01	100
二氧化碳	13.80	44.01	254
二氧化硫	11.60	64.06	306
水蒸气 ^①	8.63	18.01	961

① 为便于计算而推算到 0°C 。