



石油高等教育“十三五”规划教材

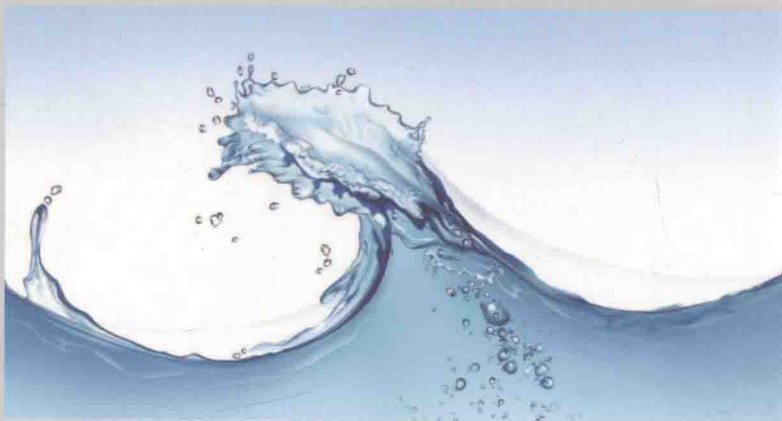
应用流体力学

Applied Fluid Mechanics

主编 宇波

参编 桂南 王艺 孙恒 孙旭

主审 陈硕



 中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



石油高等教育“十三五”规划教材

应用流体力学

主编 宇 波

参编 桂 南 王 艺 孙 恒 孙 旭

主审 陈 硕

图书在版编目(CIP)数据

应用流体力学/宇波主编. —东营:中国石油大学出版社,2015.12

ISBN 978-7-5636-5029-3

I. ①应… II. ①宇… III. ①应用力学—流体力学—教材 IV. ①O368

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 283529 号

书 名:应用流体力学

主 编:宇 波

责任编辑:秦晓霞(电话 0532—86983567)

封面设计:向 月

出 版 者:中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址:<http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱:shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者:青岛国彩印刷有限公司

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0532—86981531,86983437)

开 本:185 mm×260 mm 印张:16 字数:389 千字

版 次:2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:26.00 元



前 言

PREFACE

“卓越工程师教育培养计划”(简称“卓越计划”)是国家为培养造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量工程技术人才而实施的一项重大改革,为国家走新型工业化发展道路、建设创新型国家和人才强国战略服务。根据“卓越计划”提高学生工程应用能力和创新能力的要求,编者在多年的“工程流体力学”教学实践的基础上,对传统的教学内容进行了重新整合,编写了这本《应用流体力学》教材。本教材力图做到有针对性地选材和有侧重点地讲解,可用于石油工程、油气储运工程、石油机械工程及石油安全工程等专业的教学,也可供相关工程技术人员参考。书中对管流的知识进行了重点讲解,尤其适用于油气储运工程专业的教学。

本教材主要有以下三方面特点:

(1) 基本概念明晰。本书重视基本概念的系統介绍,将同一类知识点尽量整合在同一章节进行集中阐述,以便学生准确掌握各类概念的内涵及相互联系,避免混淆;同时注重学习思路和方法的系统归纳,以便学生集中理解、辨析基本概念,不陷于烦冗的数学推导,不分散太多精力在数学细节上。

(2) 应用特色突出。本书注重知识点与实际相结合,尽量突出每个知识点的应用背景,培养学生应用基本概念解决实际问题的能力。每章都配有思考题,引导学生应用流体力学基本概念合理解释生产生活中的一些常见现象。

(3) 探究能力强化。本书第八章引入计算机编程法求解管路水力计算问题,既可锻炼学生的计算机应用能力,又能够使得学生对工艺设计有一个初步的体会,这在同类教材中是少见的。同时,本书设计了一些没有标准答案的开放性习题,培养学生自主探究的学习能力。

本书共分为十章,由宇波、桂南、王艺、孙恒、孙旭编写。其中,孙旭编写绪论,王艺、桂南编写第一章,宇波编写第二、第三、第四、第九章,孙旭、宇波编写第五章,宇波、孙恒编写第六章,桂南、王艺编写第七章,宇波、桂南编写第八章,王艺编写第十章。全书由宇波统稿。

同济大学陈硕教授审定了本书,哈尔滨工业大学李凤臣教授、蔡伟华副教授和中国石油

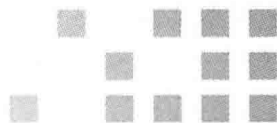
大学(北京)李振林教授、张永学教授、刘稳文博士为本书提出了很多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中参考了70余本教材及习题集,详见参考文献;编者的研究生们积极参与了本书的资料收集和图表绘制等方面的工作,一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在疏漏或不当之处,恳请读者不吝批评指正。

编 者

2015年8月15日



目 录

CONTENTS

绪 论	1
第 1 章 基本概念	5
1.1 流体定义及连续介质假设	5
1.2 流体的主要力学性质	7
1.3 作用在流体上的力	15
1.4 流体的分类	17
练习题	19
第 2 章 流体静力学	21
2.1 流体静压力的方向特性和静压强大小的特性	21
2.2 流体平衡方程	23
2.3 重力作用下的流体平衡基本方程	25
2.4 重力和惯性力作用下流体的相对平衡	30
2.5 静止流体作用在平面上的总压力	33
2.6 静止流体作用在曲面上的总压力	38
练习题	43
第 3 章 流体运动学	51
3.1 描述流体运动的两种方法	51
3.2 流体运动学的基本概念	55
3.3 流体微团运动分析	60
3.4 流体运动的分类	65
3.5 涡流与势流	68
练习题	73

第 4 章 量纲分析与相似原理	76
4.1 量纲分析	76
4.2 流动相似条件	81
4.3 相似准则和模型实验	83
练习题	87
第 5 章 流体运动基本方程	90
5.1 雷诺输运方程	90
5.2 连续性方程	93
5.3 动量方程	96
5.4 动量矩方程	99
5.5 理想流体运动微分方程及伯努利方程	102
5.6 不可压缩牛顿流体运动微分方程及定解条件	104
练习题	108
第 6 章 不可压缩恒定总流的基本方程及其应用	112
6.1 不可压缩恒定总流的连续性方程	112
6.2 不可压缩恒定总流的伯努利方程	113
6.3 不可压缩恒定总流的动量方程	120
练习题	126
第 7 章 流动阻力与水头损失	131
7.1 流动阻力与水头损失的分类	131
7.2 流体运动的两种流态	133
7.3 湍流基本概念与理论	136
7.4 圆管充分发展恒定层流理论分析	142
7.5 圆管充分发展恒定湍流理论分析	145
7.6 管道流动的沿程阻力系数与水头损失	150
7.7 局部阻力系数	157
7.8 边界层理论基础及绕流阻力	160
练习题	165
第 8 章 管路与孔口出流	168
8.1 管路概述	168
8.2 简单管路的水力计算	170
8.3 复杂管路的水力计算	174
8.4 管网的水力计算	177
8.5 管中水击	181

8.6 孔口出流	185
练习题	189
第 9 章 一元气体的可压缩流动	194
9.1 气体动力学的基本概念	194
9.2 一元恒定气体流动方程	199
9.3 一元恒定绝热和等熵气流的基本特性	202
9.4 一元恒定等熵流动气流参数与流通面积的关系	206
9.5 一元恒定等截面可压缩气体管流	208
练习题	213
第 10 章 流体力学实验	216
10.1 流体静压强测量实验	216
10.2 文丘里管流量测量实验	220
10.3 毕托管流速测量实验	223
10.4 不可压缩恒定总流伯努利方程应用实验	225
10.5 不可压缩恒定总流动量方程应用实验	227
10.6 雷诺实验	229
10.7 沿程水头损失和阻力系数测量实验	231
10.8 局部水头损失和阻力系数测量实验	234
附 录	237
参考文献	245

绪 论

◆ 流体力学的研究内容

根据物理和化学性质的不同,自然界中的物质可以分为固体、液体和气体等种类。其中,液体和气体具有非常相似的力学特性,通常统称为流体。流体在自然界和工程中随处可见,如水、空气、蒸汽、油、烟气、血液等,与人类的生产和生活息息相关。作为力学的一个重要分支,流体力学就是研究流体的平衡和运动规律的一门科学。它的基本任务是建立描述流体静止和运动的基本方程,确定流体静止和运动时的压强分布、流速变化以及能量的转化与损失,并计算流体与固体之间的相互作用力。

根据研究内容所侧重的方向不同,流体力学可以分为理论流体力学(通常简称为流体力学)和应用流体力学(也称作工程流体力学)。其中,理论流体力学是通过严格的数学推导、基于解析解对各种流动问题进行分析的,强调分析过程的严密性和准确性;应用流体力学则更加侧重解决工程中的实际问题,关注流体力学的基本概念、基本理论、基本方法及其在工程中的应用过程。

◆ 流体力学的发展简史

流体力学学科是在人类不断认识和改造自然的过程中逐渐发展形成的,其发展过程大致可以分为以下三个阶段。

(1) 流体力学的起源阶段。

人类对于流体力学的研究最早是从治水、灌溉等领域开始的。其中,我国古代在治水方面取得了举世瞩目的成就。早在距今 4 000 多年前,我国就有大禹治水的传说,表明我国很早就出现了大规模治理洪水的活动。秦朝时期,李冰(公元前 302—公元前 235 年)父子主持修建了都江堰水利工程,利用防洪堤、泄洪道等对岷江进行分流,达到了防洪和灌溉的双重目的,并一直沿用至今。公元前 486 年到公元 1293 年间,我国修建了长达 1 797 km 的京杭大运河,它是世界上修建最早、距离最长的一条人工河流。然而,由于科学研究在我国封建社会一直没有得到足够的重视,我国在治水方面的认识一直停留在经验和定性阶段,并没有形成系统的理论。

流体力学的理论研究最早是在欧洲出现的。公元前 250 年前后,阿基米德(古希腊,公元前 287—公元前 212 年)在其发表的《论浮体》中提出了物体在流体中所受浮力的基本原理——阿基米德原理,标志着流体力学理论研究的开端。文艺复兴时期,达·芬奇(意大利,1452—1519 年)针对射流、旋涡形成、水跃等现象进行了水力实验,并研究了沉浮、孔口出流、物体运动阻力、流体在管道和水渠中的流动等问题。在达·芬奇的带动下,更多人开始研究流体力学现象。其中,1612 年,伽利略(意大利,1564—1642 年)建立了关于物体沉浮的基本原理;1643 年,托里拆利(意大利,1608—1647 年)论证了孔口出流的基本规律;1650 年,帕斯卡(法国,1623—1662 年)提出了描述液体中压强传递规律的帕斯卡原理;1687 年,牛顿(英国,1643—1727 年)在他的名著《自然哲学的数学原理》中提出了流体黏性的概念,并建立了牛顿内摩擦定律。这些研究为流体静力学、黏性流体力学的形成奠定了基础。

(2) 流体力学的创立和完善阶段。

18 世纪初,在第一次工业革命的推动下,无黏流动问题的研究取得了较大进展。1738 年,伯努利(瑞士,1700—1782 年)在其出版的《流体动力学》中建立了流体位能、压能和动能之间的转换关系——伯努利方程;1755 年,欧拉(瑞士,1707—1783 年)发表了《流体运动的一般原理》,提出了流体运动的描述方法、流体连续介质模型以及无黏流体运动方程,他还提出了速度势的概念,并对无黏无旋流体的平面和空间运动进行了研究;1781 年,拉格朗日(法国,1736—1813 年)提出了流函数的概念以及应用复变函数解析求解平面势流的方法;之后,拉普拉斯(法国,1749—1827 年)提出了理想不可压缩流动的速度势函数和流函数方程——拉普拉斯方程。

进入 19 世纪,有旋流动、黏性流动问题也得到了更多关注。1815 年,柯西(法国,1789—1857 年)首次提出了涡的概念;1845 年,亥姆霍兹(德国,1821—1894 年)提出了一系列涡的基本概念以及描述旋涡运动特性的第一、第二定理,并于 1860 年提出了亥姆霍兹速度分解定理;1823 年和 1845 年,纳维(法国,1785—1836 年)和斯托克斯(英国,1819—1903 年)分别推导出了黏性流体运动的基本方程,即沿用至今的纳维-斯托克斯方程,奠定了流体动力学的基础,其中,斯托克斯还对流体中缓慢运动球体的阻力进行了研究,并提出了斯托克斯公式;1883 年,雷诺(英国,1842—1912 年)通过圆管流动实验发现了黏性流体流动的两种状态:层流和湍流,并推导了不可压缩湍流流动控制方程,为湍流理论的发展奠定了基础。

(3) 近、现代流体力学阶段。

20 世纪初,航空工业迅猛发展,人们对机翼、圆柱等结构的绕流问题进行了大量研究。其中,1902 年,库塔(德国,1867—1944 年)提出了绕流物体的升力理论;1904 年,普朗特(德国,1875—1953 年)建立了边界层理论,对外流流场特性进行了准确描述,解决了众多情况下绕流物体阻力的计算问题,此外,他还针对工程常见湍流边界层流动问题提出了混合长度理论;1906 年,儒科夫斯基(俄国,1847—1921 年)研究了翼型升力与绕流环量之间的关系,为二维升力理论奠定了数学基础;1911 年和 1912 年,冯·卡门(美国,1881—1963 年)发现了尾流中的旋涡结构——卡门涡街,并分析了其与结构受力之间的关系。这些研究为近代流体力学的发展奠定了基础。

随着石油工业的快速发展,压力管道的水力计算也开始受到关注。1913 年,布拉修斯(德国,1883—1970 年)提出了计算湍流光滑管阻力系数的经验公式;1933 年,尼古拉兹(德国,1894—1979 年)通过实验得到了人工粗糙管内水流阻力系数曲线——尼古拉兹曲线;

1944年,莫迪绘制了实用管道的当量粗糙阻力系数图——莫迪图。这些研究大大促进了工业输流管道的发展。

20世纪中叶以来,随着电子计算机的问世,人们开始采用数值计算方法分析流动问题。基于有限差分、有限容积、有限元等方法发展起来的计算流体力学逐渐成为流体力学的重要分支。此外,在解决水利、海洋、航空航天、石油、化工、能源、环保等工业领域流体力学问题的过程中,流体力学还呈现出与其他学科相互渗透的趋势,出现了许多新的研究方向,如地球流体力学、环境流体力学、生物流体力学、电磁流体力学、非牛顿流体力学、多相流体力学、物理-化学流体力学等。与经典流体力学不同,这些新方向所涉及的流动问题更加复杂,不仅要考虑流动过程中的动量传递,通常还要考虑质量传递、热量传递、物理或化学反应等过程,给流体力学的发展带来了新的挑战和机遇。

◆ 流体力学的研究方法

研究流体力学的主要方法有理论分析、实验研究和数值计算三种。

理论分析是基于质量守恒、动量守恒和能量守恒等普遍规律建立流体控制方程,然后经过严格数学推导分析流体物理参数变化规律的一种方法。其主要步骤包括:① 针对实际流动问题的特点,通过引入假设建立可以反映其力学本质的数学模型;② 推导得出数学模型的解析解,并分析所得结果的物理含义;③ 与实验结果进行对比,考察所得解析解以及所建立模型的适用范围。理论分析方法可以直接给出各流动参数间的变化关系式,具有较好的普适性。其缺点在于,由于目前大部分流动方程还无法得到解析解,该方法的应用范围非常有限。

实验研究是基于相似原理和模型实验对实际流动问题进行分析的方法。其主要步骤包括:① 分析原型流动问题的影响因素,找出起主导作用的力并确定相似准则,根据相似准则建立实验模型;② 进行模型实验,测定关键流动参数;③ 整理、分析实验结果,将所得结果与已有结果进行对比,分析和总结所得现象和规律。与另外两种方法相比,实验研究结果与实际最为接近,有助于发现新的流动现象和规律。然而,对于大气环流等特殊流动问题,目前还无法通过实验进行研究。

数值计算是利用数值方法求解流体控制方程的近似解,从而实现流动问题分析的一种方法。其主要步骤包括:① 按照理论分析方法的第一步建立待研究流动问题的数学模型;② 根据流动问题的特点,选择相应的数值解法对求解区域进行网格剖分、对控制方程进行离散;③ 编制程序并进行计算;④ 将计算结果与其他方法所得结果进行对比,分析算法的精度和所建数学模型的适用范围。采用数值计算方法,可以对很多尚不能实现理论分析的复杂流动问题进行近似求解。然而,数值计算方法是以前数学模型的确立为前提的,对于工程中尚缺乏完善数学模型的复杂流动问题,该方法是无法求解的。

可见,理论、实验和数值计算这三种方法是各有利弊、相辅相成的。其中,实验是理论分析和数值计算的依据和基础,是流体力学新现象、新规律发现的源泉;理论分析为实验和数值计算提供指导,可以使它们更加准确、高效;数值计算则是实验和理论分析的重要辅助,可以准确、快速地实现复杂流动问题的定量分析。在实际流动问题的分析过程中往往综合应用这三种研究方法。

◆ 流体力学在石油工业中的应用

在油气开发、输送、储存以及加工的过程中,几乎每一个环节都与流体力学息息相关。其中,在油田开发过程中,需要研究石油在地下岩层中的运动过程,涉及液体在多孔介质中的渗流问题;在油气集输过程中,需要对采出的原油(通常都是油、气、水的混合体)进行计量和分离,涉及多相流动问题;在油气长距离输送过程中,需要分析管道内流动规律及压强、阻力等参数,以便合理设计管道参数并布置泵站,涉及流体动力学问题;在油气储存过程中,为了校核油罐以及其他储液容器的强度,需要对容器内油品、液化天然气等流体的压强分布以及对结构的作用力进行分析,涉及流体静力学问题;在海上油气田开发的过程中,还要考虑风、浪、流对海洋钻井平台、立管等结构的影响,涉及外流流动问题。可以说,流体力学问题在石油工业的很多关键环节中都是需要重点解决的问题。因此,作为从事石油专业的科研工作者和工作人员,学习流体力学的基本知识及其在石油工业中的应用过程是非常必要的。

作为一本以石油专业为背景的应用流体力学教材,本书将重点围绕油气储存、输运等过程中所涉及的流体静力学、运动学和动力学问题进行系统地阐述。通过本书的学习,可以帮助相关专业人员掌握流体力学的基本概念、理论、方法及其应用,以便在工程流动问题分析、工程的建设与管理中发挥更大的作用,继续推动我国石油工业的快速发展。

第 1 章

基本概念

流体的宏观运动与受力关系是流体力学的主要研究内容。流体的属性会影响其运动与受力关系。本章从流体力学的角度讨论流体及其属性,主要介绍连续介质假设、流体的主要力学性质以及作用在流体上的力等基本概念,为后续章节奠定基础。

1.1 流体定义及连续介质假设

流体是在剪切力作用下能产生连续变形的物质^①,这种连续变形的特征称为流动性。通常,流体是指液体和气体。液体和气体通常由分子组成,分子之间存在间距且不停地做无规则热运动。如果通过研究每个分子的微观运动来研究流体的宏观物理量(如密度、速度、压强等),那将是极其复杂、困难和没有必要的,因为追踪大量分子的无规则运动非常困难,并且单个分子的运动对于流体力学所研究的宏观规律而言在统计意义上已无影响。因此,用分子模型来研究流体的宏观流动是不合适的,需要重新确定一种度量宏观物理量的流体模型。

为了解决这一问题,欧拉提出了连续介质假设,把微观上由大量不连续的分子组成的流体在宏观上看成由无数紧密相连的质点组成的连续介质,从而用连续介质模型来描述流体。该模型如图 1.1.1 所示, a 表示流体质点的大小(例如平均直径)。流体质点具有微观上充分大、宏观上充分小的特点。从微观上看,流体质点内包含了众多分子,质点大小 a 充分大,远大于分子间距 l_1 (液体约为 10^{-10} m,气体约为 10^{-9} m),即 $a \gg l_1$ 。因此,流体质点的性质可用其包含的众多分子微观性质的统计平均值来描述。从宏观上看,质点大小 a 充分小,远小于所研究问题的尺度 l_2 (如输油管道直径为 1 m 左右),即 $a \ll l_2$ 。因此,在研究流体流动问题时可忽略流体质点的大小,将其视为无体积的几何点。采用连续介质假设以后,流体性质与运动状态既由微观上不连续的分子决定,又在宏观上连续变化的空间点上具有确定

^① 对于牛顿流体,任何微小剪切力都能使其产生连续变形;对于某些非牛顿流体,剪切力必须大于一定值才能使其产生连续变形。详见 1.4 节。

的值,使问题得到了合理的简化。

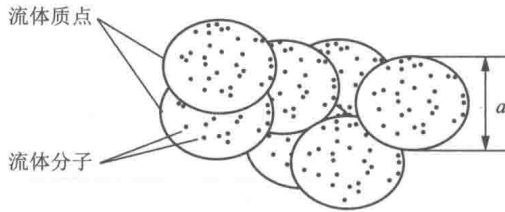


图 1.1.1 连续介质模型示意图

为了进一步解释连续介质假设中的“微观上充分大、宏观上充分小”这一概念,下面以密度为例进行说明。如图 1.1.2 所示,在空间某点 (x, y, z) 附近取一流体微元,则该微元内的流体平均密度可以表示为该微元体的质量与体积之比 $\Delta m / \Delta V$ 。必须指出,微元体过大或过小所得出的平均密度均不能反映流体在该处的密度值。如果 ΔV 过小,会导致微元体仅包含少数分子,那么少数分子的无规则运动会引起微元体内的密度出现随机波动,如图 1.1.3 虚线 A 左侧区域所示,即 ΔV 在微观上过小。如果 ΔV 过大,微元体内的密度会受到周围密度分布不均匀的影响而变化,如图 1.1.3 虚线 B 右侧区域所示,即 ΔV 在宏观上过大。在这两种情况下,密度都不具有确定的值。只有在 ΔV 趋于某一体积 V^* ($\Delta V_A \leq V^* \leq \Delta V_B$) 时,微元体内的密度既与分子运动无关又与密度的空间变化无关,才具有确定的统计平均值,即 ΔV 同时满足微观上充分大和宏观上充分小,从而微元体内的密度可以代表所取空间点处的流体密度,用数学中极限的概念可表达如下

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow V^*} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1.1.1}$$

注意此时的 V^* 在宏观上已足够小,因此相对于图 1.1.2 中的宏观坐标系而言 $V^* \rightarrow 0$, 上式可改写为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1.1.2}$$

$\Delta V \rightarrow 0$ 的含义为流体微元趋近于流体质点,本书中其他章节出现类似符号时含义与此相同。

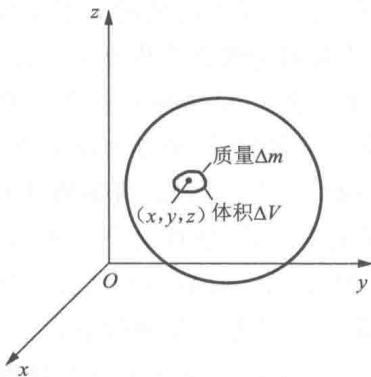


图 1.1.2 流体微元密度示意图

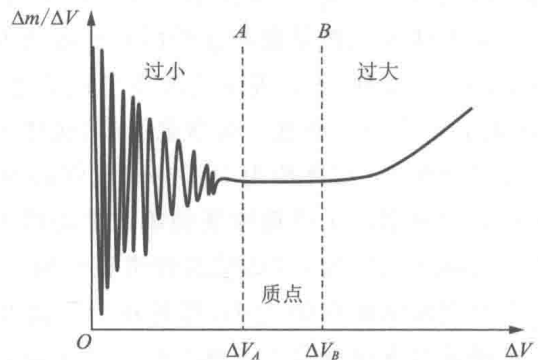


图 1.1.3 流体密度随微元体积的变化

式(1.1.2)直观地展示了连续介质假设带来的好处:物理本质上不连续的流体被近似为连续的物质,从而使流体的宏观物理量可以表示成空间和时间的连续函数,进而可以利用数

学中的连续函数相关理论来描述和分析流体的宏观运动规律,只着眼于流体质点的运动而摆脱了对纷繁复杂的分子运动的研究,既方便又有足够的精确性。因此,连续介质假设是流体力学的基本假设。

值得注意的是,连续介质假设有一定的适用条件:宏观尺度比分子间距大得多以至于分子间隙可以忽略。对于稀薄气体流动等特例,由于分子间距已经大到与宏观流动的尺度相近,分子间隙不可忽略,此时找不到微观上充分大宏观上充分小的流体质点,连续介质假设不再成立,只能从分子角度来解决这类问题。

1.2 流体的主要力学性质

1.2.1 密度及相关物理量

单位体积流体所具有的质量称为密度,用 ρ 表示,其国际单位为 kg/m^3 。根据式(1.1.2)和导数的定义,密度的定义可进一步写为

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (1.2.1)$$

对于均质流体,各处密度相等,则上式可简化为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.2.2)$$

流体密度与 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 纯水密度的比值称为相对密度,用 d 表示,其表达式为

$$d = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1.2.3)$$

式中, ρ_w 表示 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时纯水的密度, kg/m^3 。

工程中常见液体的相对密度见表 1.2.1。

表 1.2.1 常见液体的相对密度

液 体	相对密度	温度/ $^\circ\text{C}$	液 体	相对密度	温度/ $^\circ\text{C}$
蒸馏水	1.00	4	航空汽油	0.65	15
海 水	1.02~1.03	4	轻柴油	0.83	15
重质原油	0.92~0.93	15	润滑油	0.89~0.92	15
轻质原油	0.86~0.88	15	沥 青	0.93~0.95	15
煤 油	0.79~0.82	15	丙三醇	1.26	0
航空煤油	0.78	15	水 银	13.6	0
普通汽油	0.70~0.75	15	酒 精	0.79~0.80	15

单位质量流体所具有的体积称为比体积,用 v 表示,其国际单位为 m^3/kg 。根据比体积的定义可知,其为流体密度的倒数

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.2.4)$$

单位体积流体所具有的重量称为重度或容重,用 γ 表示,其国际单位为 N/m^3 。根据重量与质量之间的关系可以很容易得到重度和密度之间的关系如下

$$\gamma = \rho g \quad (1.2.5)$$

1.2.2 压缩性与膨胀性

在恒定温度下,流体在压强作用下体积缩小的性质称为压缩性,通常用体积压缩系数来度量流体被压缩的难易程度,其定义为单位压强增量产生的体积相对减小率,表达式如下

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1.2.6)$$

式中, β_p 为体积压缩系数, Pa^{-1} ; V 为流体体积, m^3 ; dV 和 dp 分别为流体的体积增量和压强增量, m^3 , Pa 。

dV 与 dp 的变化方向始终相反,即压强增加时体积减小,故负号是为了保证体积压缩系数为正值,从而表示流体被压缩的程度。

根据上式可知, β_p 的单位为 Pa^{-1} ,也就是压强单位的倒数。体积压缩系数越大,流体压缩性越强,压缩流体越容易;体积压缩系数越小,流体压缩性越弱,压缩流体越困难。

对于理想气体,由状态方程 $pV = nRT$ 可知,等温条件下该气体的压强增大一倍,体积就会缩小一半,可见气体的压缩性很大^②。由状态方程和式(1.2.6)可进一步推得其体积压缩系数的表达式为

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{d}{dp} \left(\frac{nRT}{p} \right) = -\frac{nRT}{V} \left(-\frac{1}{p^2} \right) = \frac{1}{p} \quad (1.2.7)$$

流体的压缩性也可用 β_p 的倒数即体积弹性模量 E_v 来描述

$$E_v = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{dp}{dV/V} \quad (1.2.8)$$

工程上常用体积弹性模量来衡量流体压缩性的大小,其单位与压强单位相同。 E_v 值越大,流体的压缩性越小,反之则压缩性越大。水的体积弹性模量见表 1.2.2。

表 1.2.2 水的体积弹性模量

单位: 10^9 Pa

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	10	20
4.90	1.85	1.91	1.94
9.81	1.86	1.93	1.98
19.62	1.88	1.97	2.02
39.24	1.91	2.01	2.08
78.48	1.94	2.08	2.17

在恒定压强下,流体温度升高时体积增大的性质称为膨胀性,通常用体积膨胀系数来度量流体膨胀的难易程度,定义为单位温度增量产生的体积相对增加率,表达式如下

^② R 为摩尔气体常数,也称为通用气体常数,其值为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1.2.9)$$

式中, β_T 为体积膨胀系数, 单位为 K^{-1} , 也就是温度单位的倒数。

体积膨胀系数越大, 膨胀性越强, 流体膨胀越容易; 体积膨胀系数越小, 膨胀性越弱, 流体膨胀越困难。

表 1.2.3 显示水的体积膨胀系数的量级为 $10^{-4} K^{-1}$, 且在不同压强和温度下变化不大, 可见液体的膨胀性很小。

表 1.2.3 水的体积膨胀系数

单位: $10^{-4} K^{-1}$

温度/ $^{\circ}C$ 压强/(10^5 Pa)	0~10	10~20	40~50	60~70	90~100
1	0.14	1.50	4.22	5.56	7.19
100	0.43	1.65	4.26	5.48	7.04
500	1.49	2.36	4.29	5.23	6.61

与体积压缩系数类似, 由理想气体状态方程 $pV = nRT$ 和式(1.2.9)可推得满足该方程的气体体积膨胀系数的表达式为

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = \frac{1}{V} \frac{d}{dT} \left(\frac{nRT}{p} \right) = \frac{1}{V} \frac{nR}{p} = \frac{1}{T} \quad (1.2.10)$$

上式表明, 在 $0 \sim 100^{\circ}C$ (即 $273 \sim 373 K$) 范围内理想气体的体积膨胀系数的量级为 $10^{-3} K^{-1}$, 可见气体的膨胀性比液体大得多。

1.2.3 黏性

1784年, 库仑把一块薄圆板用细金属丝平吊在静止流体中, 将圆板绕中心旋转一角度后放开, 圆板开始往复摆动, 摆动幅度逐渐衰减, 直至静止(图 1.2.1 和图 1.2.2)。流体所具有的这种阻碍流体流动, 即阻碍流体质点间相对运动的性质称为黏滞性, 简称黏性。库仑分别测量了表面粗糙程度不同的普通板、涂蜡板和细沙板的摆动幅度衰减时间, 发现三种圆板的摆动幅度衰减时间均相等。这说明使圆板停下来的阻力不是来源于圆板表面与流体之间的摩擦(说明流体分子附着于圆板表面以相同速度随其运动), 而是来源于流体内不同部分之间的摩擦(说明流体不同部分之间存在相对运动和变形), 称为内摩擦力, 该力与流体的黏性密切相关。

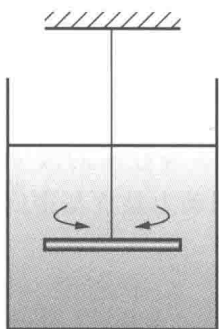


图 1.2.1 库仑实验示意图

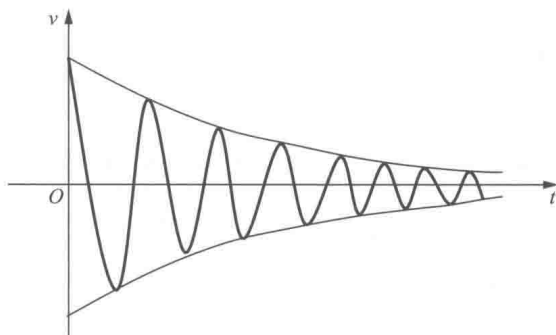


图 1.2.2 圆板摆动速度变化示意图