

普通高等教育规划教材



工程流体力学

[港口航道工程、水利工程专业]

张贤明 吉庆丰 主编



人民交通出版社

China Communications Press

普通高等教育规划教材

Gongcheng Liuti Lixue
工程流体力学

(港口航道工程、水利工程专业)

张贤明 吉庆丰 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书内容主要有流体及其物理属性、流体力学基本概念、流体力学基本方程、流体静力学、流体力学方程的解析解、流体的涡旋运动、流体的波动、流体力学方程的试验解、流体力学方程的数值解及场论和张量初步等。

本书可作为港口航道工程、水利工程、近海工程、环境工程、市政工程、能源工程及工程力学等专业的硕士研究生教材,亦可供相关专业的本科生选用,以及有关单位设计、科研和教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/张贤明,吉庆丰主编. —北京:人民交通出版社, 2010. 1

ISBN 978-7-114-08077-7

I. 工… II. ①张…②吉… III. 工程力学:流体力学—研究生—教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 217761 号

普通高等教育规划教材

书 名: 工程流体力学

著 者: 张贤明 吉庆丰

责任编辑: 钱悦良

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京密东印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 12.5

字 数: 293 千

版 次: 2010 年 1 月 第 1 版

印 次: 2010 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08077-7

印 数: 0001—1000 册

定 价: 36.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

《工程流体力学》是港口航道工程、水利工程、近海工程、环境工程、市政工程、能源工程及工程力学等专业研究生及本科生的重要课程。开设该课的目的是为了让学生掌握流体力学基本概念,了解粘性不可压缩流体运动基本方程的建立过程和求解方法,以解决相关领域中的流体力学问题。课程从流体力学的基本原理出发,推导出流体力学基本方程组,并讨论方程组的求解方法,特别是通过对方程组简化,得出流体力学一维总流三大方程,使学生在工程流体力学领域得到更深层次的训练。

国内外同类教材分两种,一种是理论流体力学,主要供工程力学及相关专业学生使用,以研究流体动力学为主,与实际问题结合较少,教材名称为《流体力学》;另一种是工程流体力学,主要是与流体(水、大气、石油等)相关的工科专业(水利工程、交通工程、机械工程、土建工程、能源工程、环境工程、航空航天、海洋、气象、生物、化工、体育等)学生使用,以应用为主,其中以水为代表的液体作为研究对象时又称《水力学》,所以教材名称有《工程流体力学》和《水力学》两种,这两种教材繁多。以上教材基本是面向本科生,而主要面向研究生,并突出工程应用的流体力学教材很少,本书将弥补这一空缺。

本书在内容上着重讨论不可压缩流体,并且以粘性流体为主线,把理想流体看作一定条件下和一定范围内对粘性流体的近似。粘性不可压缩流体既适用于液体,也适用于低速气流,因此,符合近代流体力学在内容构成和研究方法上的特点,并可以减少重复,节省学时,使读者脉络清楚,概念明确,易于掌握。同时,教材注重理论联系实际的原则,注意与水力学的联系,把三维分析所得的结论通过一维处理简化成常见的水力学公式,又将已经熟知的水力学解法,运用流体力学原理来解释。对于没有水力学基础的读者阅读本书也不困难。

现代流体力学专著和教材中广泛使用场论和张量等数学工具。为了使流体力学的概念表达明确、方法描述简洁,不纠缠在繁琐的数学推导过程中,适量地采用场论和张量工具,能收到事半功倍的效果。因此,教材以起点高、少而精、学以致用原则在附录中系统地介绍了相关内容,该部分内容可安排在第三章前进行介绍。

本书第一、二章及附录 A 由东南大学交通学院李天明编写,第三、五、八章由东南大学交通学院张贤明编写,第四、七章及附录 B 由东南大学交通学院耿艳芬编写,第六、九章及附录 C 由扬州大学水利科学与工程学院吉庆丰编写。全书由

张贤明副教授统稿并担任主编,吉庆丰教授对全书进行了认真审阅并担任主编。

本书的编写得到东南大学研究生院《工程流体力学》精品课程建设和研究生优秀教学用书建设的资金资助,在此深表感谢。

东南大学交通学院周福田教授在本书编写及出版过程中提出了不少宝贵意见,谨此致谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2009年10月

目 录

第一章 流体及其物理属性	1
第一节 流体力学简介.....	1
第二节 流体的定义和特性.....	4
第三节 流体的连续介质假定.....	5
第四节 流体的密度.....	6
第五节 流体的压缩性与膨胀性.....	7
第六节 流体的表面张力.....	7
第七节 流体的扩散性和导热性.....	8
第八节 流体的粘性.....	9
第九节 流体的分类.....	11
习题.....	12
第二章 流体力学基本概念	13
第一节 作用在流体上的力.....	13
第二节 研究流体流动的方法.....	14
第三节 流线与迹线.....	18
第四节 流体的运动分析.....	20
第五节 流体运动分类.....	23
习题.....	25
第三章 流体力学基本方程	28
第一节 系统法与控制体积法.....	28
第二节 连续方程.....	29
第三节 积分形式的动量方程.....	32
第四节 运动流体中的应力场.....	34
第五节 应力形式的运动微分方程.....	41
第六节 纳维—斯托克斯方程与欧拉方程.....	42
第七节 能量方程.....	43
习题.....	45
第四章 流体静力学	47
第一节 流体静力学方程.....	47
第二节 静止流场的基本特性.....	47
第三节 重力场中静止流体的压强分布.....	49
第四节 非惯性坐标系中的静止流体.....	52

习题	54
第五章 流体力学方程的解	57
第一节 流体力学解的讨论	57
第二节 恒定平行直线运动	59
第三节 伯努利方程及应用	63
第四节 二维无旋运动	69
第五节 基本的平面有势流动	73
第六节 平面势流的叠加流动	77
第七节 流体绕圆柱流动	79
习题	85
第六章 流体的涡旋运动	88
第一节 基本概念	88
第二节 涡量输运方程	92
第三节 环量守恒定理	94
第四节 边界层简介	96
习题	101
第七章 流体的波动	102
第一节 概述	102
第二节 理想流体的基本方程、边界条件和初始条件	104
第三节 微幅平面势波	107
第四节 波浪运动特性	112
习题	119
第八章 流体力学问题试验解	121
第一节 相似及相似准则	121
第二节 确定相似准则的方法	123
第三节 相似理论的基本定理及其应用	133
第四节 正态定床河工模型试验	136
第五节 变态定床河工模型试验	139
习题	141
第九章 计算流体力学简介	142
第一节 有限差分法	142
第二节 有限元法	150
第三节 有限体积法	164
习题	173
附录 A 场论基础知识	175
附录 B 张量初步	183
附录 C 正交曲线坐标系	189
参考文献	193

第一章 流体及其物理属性

第一节 流体力学简介

流体力学涉及专业较多,包括机械(风力机、水轮机、汽轮机、燃气轮机、液压传动、润滑)、土建(给排水、水工建筑物)、环境(大气和水)、能源(水电、火电、风力电及潮汐发电)、动力(水动力和蒸气动力)、交通(桥涵、水运、载运工具制造)、水利(防洪、灌溉)、化工石油冶金(管流)、航空航天(飞行器制造)、航海(船舶制造)、气象(大气运动)等等。因此,流体力学在各专业技术领域有着广泛的应用。

一、流体力学的研究内容

流体力学是研究流体平衡和运动规律的一门科学,是力学的一个重要分支。

流体力学的基本任务在于建立描述流体运动的基本方程,确定流体流经各种通道及绕流不同物体时速度、压强的分布规律,探求能量转换和各种损失计算方法,并解决流体与固体之间的相互作用的问题。

流体力学按其研究内容侧重方面的不同,分为理论流体力学(通称流体力学)和应用流体力学(通称工程流体力学)。前者主要采用严密的数学推理方法,力求准确性和严密性;后者则侧重于解决工程实际中出现的问题,而不严格追求数学上的严密性。当然,两种方法有时都须借助于实验研究,得出经验或半经验的公式。

流体力学研究的对象包括液体和气体,它们统称为流体。液体和气体各有特性,又具有共性。

根据物质的分子构造理论,自然界中的所有物质主要存在于固体、液体、气体或这些形式的混合状态之中,它们具有稳定的物理和化学性质。从外观上看,液体和气体很不相同,但是从某些动力性能方面来看,液体和气体又是相似的。通常把液体和气体统称为流体,以与固体相对应。

在技术科学中,力学是研究机械运动以及与其他运动形态相互作用的科学。流体力学是应用力学中的一个分支,它是以理论分析、数值计算及实验研究的方法,来研究流体处于平衡、运动及流体与固体相互作用的力学规律,以及这些规律在实际工程中的应用。流体力学包括液体力学和气体力学两部分。通常以水作为液体的代表,因此液体力学又称为水动力学。水动力学的主要特点是认为所研究的流体是不可压缩的,这既适用于液体,也适用于低速气流。所以,水动力学是研究液体和低速气体的运动规律的一门学科。

流体力学和固体力学为力学的两大分支,二者研究的运动形式相同,是研究机械运动以及它与其他运动形态相互作用的科学,但物质对象不同。它们采用相同的连续介质模型并遵从



相同的牛顿力学定律,即力学现象一般满足牛顿第二定律。

然而,流体有着不同于固体的力学性质,并且流体运动的描述方法、流体运动的基本形式和流体运动的具体分类,都和固体运动有所不同。

流体力学所研究的机械运动乃是物质的宏观运动,亦即大量分子所组成的质点系统的运动,不涉及物质的微观运动及其量子效应。而且所研究的流体运动速度远小于光速,因此也不必考虑相对论效应。

流体力学的研究内容包括流体在静止或运动时的受力情况;流体运动时的运动规律、压强分布、流速变化、能量变化及与固体壁面之间的相互作用力等。

二、流体力学的研究方法

流体力学的研究方法和物理学中其他领域一样,有理论分析、数值计算和实验研究三种。三种方法取长补短,相互促进,彼此影响,从而促使流体力学得到飞速发展。

1. 理论方法

根据流体运动,设计理论模型;根据普遍定律,建立方程;根据初始条件和边界条件解方程,得到解。经过长期研究,得到大量经典公式,并在此基础上研究出更多理论问题。如边界层理论即是理想流体与实际流体的统一。

理论分析的一般过程是:建立力学模型,用物理学基本定律推导流体力学数学方程,用数学方法求解方程,检验和解释求解结果。

目前流体力学理论研究的主攻方向是:湍流、流动稳定性、涡旋运动、水动力学、水波动力学、复杂流动、多相流动等。

理论分析结果能揭示流动的内在规律,具有普遍适用性,但分析范围有限。

2. 数值计算

物理方程解析解有一定困难,虽然公式的简化可以解决某些实际问题。有时必须用数值方法来计算,如计算流体力学、计算水力学等。

数值研究的一般过程是:对流体力学数学方程作简化和数值离散化,编制程序作数值计算,将计算结果与实验结果比较。

常用的数值方法有:有限差分法、有限元法、有限体积法、边界元法、谱分析法等。

计算的内容包括:飞机、汽车、河道、桥梁、涡轮机等流场计算;湍流、流动稳定性、非线性流动等数值模拟。大型工程计算软件已成为研究工程流动问题的有力武器。

数值方法的优点是能计算理论分析方法无法求解的数学方程,比实验方法省时省钱,但毕竟是一种近似解方法,适用范围受数学模型的正确性和计算机的性能所限制。

3. 实验方法

与工程实际问题结合起来进行研究,一般采用模型试验方法。

水槽试验和管道试验实验研究的一般过程是:在相似理论的指导下建立模拟实验系统,用流体测量技术测量流动参数,处理和分析实验数据。

典型的流体力学实验有:风洞实验、水洞实验、水池实验等。

测量技术有:热线、激光测速;粒子图像、迹线测速;高速摄影;全息照相;压力、密度测量等。

现代测量技术在计算机、光学和图像技术配合下,在提高空间分辨率和实时测量方面已取

得长足进步。

实验结果能反映工程中的实际流动规律,发现新现象,检验理论结果等,但结果的普适性较差。

以上三种方法各有优缺点,应取长补短,互为补充。

三、流体力学的发展简史

流体力学是物理学中最古老的分支之一。流体力学的发展与数学和普通力学的发展密切相关,它是人类长期与自然界进行斗争的结果,是人类集体创造的财富。造船、海洋、航空等工业促进了水动力学的产生和发展。以下仅介绍和本教材内容有关的流体力学发展的主要阶段。

从古代起人们就开始注意到固体与它周围介质——空气或水之间相互作用力这一流体动力学中的实质性问题。要特别指出的是阿基米德(Archimedes,公元前287~前212年)的功绩,他是液体平衡理论,特别是物体浮力理论的创立者。他的著名定律直到现在还是液体静力学的基础。

流体力学的主要发展是从牛顿(Newton,1642~1727年)时代开始的。1687年,牛顿在他的名著《原理》中讨论了流体的阻力、波浪运动等内容,已经有了与近代概念很接近的论述,它使流体力学开始变成力学中一个独立分支。

流体动力学的名字是伯努利(Bernoulli,1700~1783年)于1738年在他的名著《流体动力学》一书中首先引用的。在该书中提出了著名的伯努利方程,即在流体的压力、高度和运动速度之间建立了普遍关系,直到现在仍是流体力学中一个主要定律。

欧拉(Euler,1707~1783年)于1755年在他的著作《流体运动的一般原理》中提出了理想流体概念,并建立了理想流体的基本方程和连续方程,同时提出了速度势的概念。

拉格朗日(Lagrange,1736~1813年)总结了前人的工作,进一步发展了流体力学的解析方法。他对速度势的存在性做了较严格的证明,并于1781年首先引进了流函数的概念。至此,对于平面问题,如果满足拉普拉斯方程的速度势和流函数分别存在,就可以把流体力学的问题转化为寻求一个解析的复变函数,即复势的纯数学问题。

达朗倍尔(Dalenber,1717~1783年)把现在称之为达朗倍尔原理用到流体力学中来,于1744年提出了著名的达朗倍尔疑题,即在理想流体假定下,物体在水中匀速运动时不受阻力作用,说明了理想流体假定的局限性。

与此同时,理想流体运动力学中重要分支——波浪理论也得到了发展。牛顿、拉格朗日、柯希(Cauchy)、拉普拉斯(Laplace)、泊松(Poisson)、艾瑞(Airy)、斯托克斯(Stokes)、密切尔(Micheil)等人对重力作用下流体表面上的波浪理论都作出了贡献。

19世纪后半期出现了流体的旋涡运动理论,应该把亥姆霍兹(Helmholtz)认作是这一理论的创始人。他于1858年指出了理想流体中旋涡的许多基本性质以及旋涡运动理论,并于1878年提出了脱体绕流理论。

柯希早在1815年和斯托克斯在1847年就已提出了旋涡概念的解释,汤姆孙(Thomson,1856~1940年)也对旋涡理论做了许多工作。流体力学的经典理论包括理想流体中的两种极端情况:一种是只考虑惯性而忽略粘性的影响,即势流理论;另一种是只考虑粘性而忽略惯性的影响,即蠕流理论。从以上介绍看出,到19世纪末,水动力学的经典理论已接近完整了。理



想流体的概念是为了便于数学处理而提出的,但要认识到,理想流体仅是想象中的流体模型,在自然界是不存在的。

随着水力和水工机械的发展,很多学者开始研究和观察流体本身的流动特点,从而开始建立流体力学的另一个分支,即粘性流体力学。

纳维(Navier, 1785 ~ 1836年)在1826年和斯托克斯在1845年先后独立发表了接近现代形式的粘性流体运动理论。关于粘性流体在小直径管中流动的详细试验工作是由伯赛依尔(Poiseuille)在1840年和雷诺(Reynolds, 1842 ~ 1919年)在1876年先后完成的,并发现了流动中两种不同的流态——层流和湍流。

普兰特(Prandtl, 1875 ~ 1953年)在1904年提出了边界层理论。他假定流体在接近固体边界很薄的一层内(边界层内)存在粘性影响,在边界之外是理想流体流动。这一理论很好地解释了阻力的产生,并把势流理论和粘性流体理论两者建立了联系。随着边界层理论的完善和近代实验技术的发展,它已成为了独立的流体力学分支。

现代机翼理论的发展与航空科学的发展密切相关。1878年雷利(Rayleigh, 1842 ~ 1919年)研究了圆柱体绕流问题,并且解释了弹道学中的马格纳斯(Magnus)效应。兰切斯特(Lanchester, 1878 ~ 1946年)、库塔(Kutta, 1867 ~ 1944年)和茹考夫斯基(Myhbeckuu, 1847 ~ 1921年)分别独立地建立了机翼升力和空气围绕机翼的环行流动之间的关系。普兰特于1918年首先提出了升力线理论,使机翼产生的升力可以用数学的方法来处理。在此之后,随着航空事业的发展,与航空密切相关的空气动力学也得到了飞速发展。

古典流体力学在研究流体平衡和运动规律时一般是从严格的数学推理出发,追求问题的严密性和精确性。由于实际流体运动现象十分复杂,许多工程问题很难用数学解析方法来表达和求解。近年来,随着计算机的发展,在流体力学的各个分支中数值计算方法都得到了迅速发展,许多过去不能解决的复杂问题,都可以数值求解,形成了计算流体力学这一重要的学科。

总之,从流体力学发展进程来看,有以下特点:首先,中外研究重点不同,中国注重实际应用,如都江堰、长江三峡等伟大工程较多,而国外重视理论研究,建立了很多重要公式;其次,流体力学的发展道路是曲折的,先后经历了四个阶段:①经典流体动力学阶段,着重理论研究,如欧拉方程,适用于理想流体;②工程应用阶段即水力学阶段,工程师根据工程需要,如建造水渠、管道、水坝等,建立经验公式,如谢才公式,适用于明渠水流;③流体动力学阶段,建立了以N-S方程为代表的考虑了真实流体的流体力学方程;④现代流体力学阶段,以理论分析为主要内容的流体动力学和以应用为主要内容的水力学正互相渗透,互相促进,共同发展;第三,流体力学的发展进程很不平衡:公元前至17世纪,流体力学理论发展缓慢;从17世纪中叶牛顿提出流体摩擦定律开始,流体力学进入了黄金发展时期,其中以水力学为代表的流体力学发展到20世纪初普兰特提出了边界层理论;而20世纪至今,伴随着航空航天工业的发展,与之密切相关的空气动力学的发展推动了流体力学的发展。

第二节 流体的定义和特性

流体——易流动的物质;或受任何微小剪切都能连续变形的物质。

自然界物质存在的主要形态有三种,即固态、液态和气态。物质的存在形式与温度有密切

关系,研究三态的转变可知流体存在的机理。当温度低,分子能量低,运动不剧烈,分子相互吸引,分子间距为 d_0 (分子直径, $d_0 = 3 \times 10^{-10} \text{ m}$),表现出固态性质;当温度升高,分子运动剧烈,间距增大,但不远离,分子间距达 2 倍 d_0 ,分子之间有引力,使流体分子集合在一起,又由于分子间有空隙,可以自由移动,表现为液态性质;当温度继续升高,分子运动加剧,分子间距达 $10d_0$,这时分子间引力较小,表现为自由运动,呈现出气态性质,如图 1-1 所示。

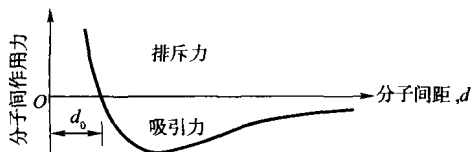


图 1-1 分子间作用力示意图

所以,液体和气体分子间距大,与固体相比,分子间相互作用力小,表现为易流动或不能保持一定形状,其中气体分子间距较大,呈自由运动状态,总是充满整个容器;液体分子间距与分子直径大体相当,分子间有引力,但有自由运动空间,故在重力的作用下易流动,总是有一个自由表面。

液体的特性是容积一定,存在一个自由液面(水表面)。气体的特性是没有固定容积,不存在自由表面,易于压缩。在不考虑自由液面和压缩性的影响时,液体和气体就具有共性了。也就是在讨论深水中的问题时,距离水面较远,水面的影响可不予考虑。在研究低速流动的空气时,可不考虑压缩性所引起的误差。在这两种情况下,水和空气将遵守相同的客观规律。因此空气中的气球和深水下的水雷,它们的受力情况是一样的。如果一杯水倒在平板上,在重力的作用下将连续不断地发生变形,最终达到一个新的水平面,或在表面张力作用下使水面保持一个最小的高度。在同样条件下,固体只能产生有限的变形。因此我们可以说,流体,不管是液体还是气体,在无论多么小的切应力作用下都将发生连续不断的变形;与此相反,固体的变形与作用的应力成比例,经一段时间变形后将达到平衡,而不会无限增加。流体,包括气体和液体,和固体的这个差别是明显的,正因为如此,可以把流体作为独立的对象进行研究。

第三节 流体的连续介质假定

流体是不连续的物质,分子间有间距(特别是气体),分子大小和间距不一致,但描述流体的运动最好利用现有的数学工具,这就要求流体是一种连续物质。而且一种流体的宏观运动表现并不是单个分子所具有的,而是由大量分子所形成,所以只能研究其中一定量的分子组成微团的流体的运动。由此提出质点的概念:从宏观看,体积无穷小,但包含大量分子;从微观看,质点是无穷大,能反映统计平均值的稳定性,同时也要反映各物理量随位置的变化。对质点而言,我们视它们之间无间隙,在空间连续分布。

流体的连续介质假定就是把流体看成是由宏观无穷小,微观无穷大的连续分布的质点所组成的物质。该假定是 1753 年由欧拉提出,又称欧拉连续介质模型。这样,流体物理量均为空间坐标的单值连续可微分函数,用数学工具可解决流体力学问题。

以下问题有助于理解流体的连续介质模型:

(1) 1 mm^3 的气体中有 7×10^{16} 个分子,若取 0.01 mm 作为质点特征尺寸,则在体积 10^{-6} mm^3 中有 7×10^{10} 个分子;

(2) 具有相对性:假设质点尺度 L ,分子平均自由行程 L_0 ,所研究问题的特征尺寸 L_1 ,如果 $L_0 \ll L \ll L_1$,即满足质点大小要求;



(3) 对于密度而言, $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V'} \frac{\Delta m}{\Delta V}$, 如图 1-2 所示。

质点和空间点的区别是, 空间点是固定不变的, 表示空间中一个点的几何位置, 因而它是个几何点。而质点是从作为连续介质流体中取出的既大(包含着大量分子)又小(与运动范围相比)的流体微团, 由于它的体积小, 我们可以把它作为一个几何点来处理, 但它是可以不断运动着的, 并具有一定的物理量, 因此质点是一个物理点。某一空间点, 在某一瞬间为某一质点所占据, 而在另一瞬间又为另一质点所占据, 即在连续的时间过程中, 同一空间点先后由不同的质点所占据和经过。

把流体作为连续介质处理的必要性和可能性: 由于采用了连续介质的假说, 流体质点是连续分布的。相应地, 其各种物理量也是连续分布的, 从而构成了各种物理量场。故把流体作为连续介质处理的必要性就在于不失问题本质的情况下, 能用数学分析工具来较简便地描述和解决流体力学问题。而其可能性就在于在实际流体中, 这种“既大又小”的质点是确实可选定的。

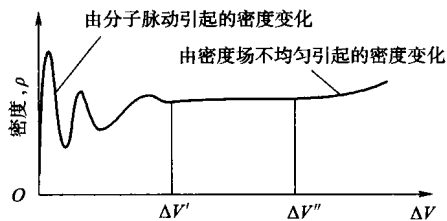


图 1-2 流体密度随质点大小变化情况

第四节 流体的密度

根据定义, 流体的密度

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V'} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

式中, ρ 是单位体积流体所具有的质量 (kg/m^3); ΔV 是流场中一微元体积; Δm 是该微元流体的质量。 ΔV 趋于一质点 $\Delta V'$ 。但由于 $\Delta V'$ 小得可以看作为零, 为利用数学分析这一有利工具, 我们仍然采用数学定义所表达的物理量的定义, 即

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

在任意时刻, 空间任意点上的流体质点的密度都具有确定的数值, 因此密度是坐标点 (x, y, z) 及时间 t 的函数, 即

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (1-2)$$

对于均质不可压缩流体, 可取平均密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3)$$

来表示流体密度这一物理量。

式中, V 是均质流体的体积 (m^3); m 是相应流体的质量 (kg)。

水在标准大气压和常温下可看作均质流体。4℃ 时水的密度为 $1000 \text{kg}/\text{m}^3$, 表 1-1 列出部分温度时水的密度。

表 1-1

℃	0	10	20	40	60	80	100
kg/m^3	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.37

流体的密度与4℃时水的密度之比

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

称相对密度。相对密度又称比重。4℃时水的比重为1,海水的比重为1.03。

第五节 流体的压缩性与膨胀性

流体质点的体积或密度可以随压力的改变而改变的性质称为流体的压缩性。当质量不变时,体积的缩小意味着密度的增加。

流体的压缩性通常以压缩性系数来表示,它表示在一定温度下升高一个单位压力时,流体体积的相对缩小量,即

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-5)$$

式中, κ 称为流体的体积压缩系数(m^2/N); dp 为流体压强的增加量(Pa); $\frac{dV}{V}$ 表示流体体积变化率。因为压强增加时,流体体积减小,故在表达式右侧加负号。

压缩系数的倒数就是流体的体积弹性模量 E ,它是单位体积相对变化所需要的压力增量,即

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

对于不同的流体, E 有不同的数值。弹性模量越大,流体就越不容易压缩。水在20℃时,1个大气压下的弹性模量为 $E_w = 2.1 \times 10^9 \text{N/m}^2$,每增加一个大气压 $dp = 1.013 \times 10^5 \text{N/m}^2$, $-\frac{dV}{V} = \frac{dp}{E_w} \approx 0.5 \times 10^{-4}$,体积缩小2万分之一,故若流场中压力差别不是非常大的情况下,水可以认为是不可压的,水的密度在整个流场中为常数。

在一定压强作用下,流体的体积随温度升高而增大的性质称为流体的膨胀性。流体膨胀性的大小用温度膨胀系数 α 表示,它表示压强不变时,单位温度升高所引起的流体体积变化率,即

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-7)$$

式中, α 是流体的体积膨胀系数($1/^\circ\text{C}$); dT 为流体温度的增加量($^\circ\text{C}$); $\frac{dV}{V}$ 表示流体体积变化率。

1个大气压下,温度较低时(10~20℃),每升高1℃,水的体积增加万分之一点五。故水在常温下可不考虑体积的膨胀。

第六节 流体的表面张力

在日常生活中,我们常发现如下现象,水滴悬在水龙头出口而不滴落;细管中的液体自动



上升或下降一个高度(毛细管现象);铁针浮在液面上而不下沉等。这些现象有一个共同的特点,就是液体的自由表面与气体或固体接触。

液体分子吸引力的作用范围大约在以3~4倍平均分子间距为半径的球形范围内,该球形范围称为“影响球”。液体厚度小于“影响球”半径的液面下的薄层称为表面层。表面层中的液体分子都受到指向液体内部的拉力作用,如图1-3所示。单位长度上的这种拉力称为表面张力 σ (N/m)。

流体表面分子间的引力作用,表现为拉力。在液面很小时,将形成曲面,如一个小水滴。在工程中要求水面的尺寸尽量大,使表面张力影响减小到最小程度,并不具体计算表面张力的

大小。
与流体表面张力相对应的就是流体的内聚力。液体分子间的吸引力称为内聚力;液体与固体分子间的吸引力称为附着力。当液体与固体壁面接触时,可能存在两种情况:内聚力大于附着力或者内聚力小于附着力。当内聚力小于附着力时,液体会浸湿固体表面,并上升一定高度,表现为毛细现象,如将细玻璃管放在水中,管中液面向上湿润并延伸一定高度 h ,如图1-4a)所示;若将细玻璃管放在水银中,管中液面将下沉一定高度 h ,如图1-4b)所示,说明水银的内聚力大于附着力。高度 h 可由以下方法计算

$$\pi d \sigma \cos \theta = \rho g \frac{\pi d^2}{4} h$$

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\rho g d}$$

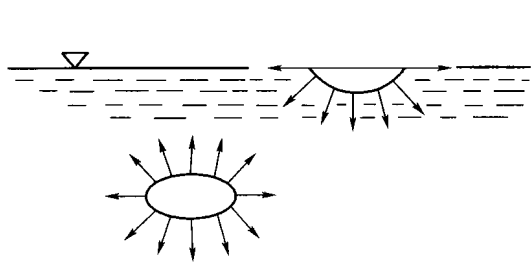


图1-3 流体表面张力示意图

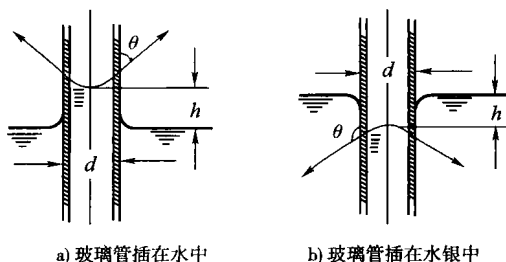


图1-4 玻璃管中的毛细现象

毛细现象在日常生活中有重要的应用,如煤油沿灯芯上升;地下水沿土壤中的毛细管上升,持续不断地补充植物所需水分。但也有不利的方面,如测压管必须具有一定直径,不能太细,当测压管直径为10mm时,由毛细现象引起的测压管水面上升高度为3.02mm。

第七节 流体的扩散性和导热性

当静止的流体混合物中存在浓度差时,由于分子不规则运动,存在质量交换现象,使不同流体层内的质量均匀化。这种分子运动所具有的质量输运性质叫扩散现象。流体的扩散现象可写成

$$J = - \gamma \frac{dC}{dy} \tag{1-8}$$

式中, γ 表示流体的扩散系数,扩散系数大小表示单位浓度梯度下流体的扩散能力; J 称为扩

散速率; $\frac{dC}{dy}$ 表示扩散方向 y 上的浓度梯度; 负号表示扩散方向与浓度梯度方向相反。

当流体中存在温度差时, 会发生热量传递现象, 表示流体导热能力的物理量是导热系数 λ 。导热规律可用下式表示

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dy} \quad (1-9)$$

式中, Q 表示单位时间内流体传导的热量; λ 为导热系数; A 为垂直热流方向上的截面积; $\frac{dT}{dy}$ 为热流方向 y 上的温度梯度; 负号表示热流方向与温度梯度方向相反。

第八节 流体的粘性

流体内部各流体微团之间发生相对运动时, 流体内部会产生摩擦力(即粘性力)的性质叫流体的粘性。流体的粘性可由库仑实验所证实。

库仑(Coulomb, 1736 ~ 1806 年)实验(图 1-5): 把一薄圆板用细丝平吊在液体中, 将圆板转过一角度后放开, 圆板作往返摆动, 逐渐衰减, 直至停止, 测量其衰减时间。实验用三种圆板: ①普通板; ②表面涂蜡; ③表面胶一层细砂。实验结果表明三种板的衰减时间相同。

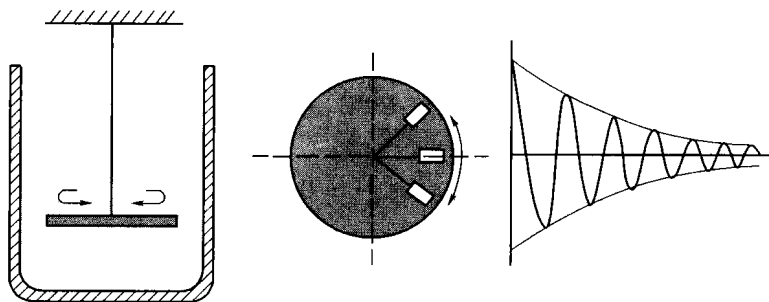


图 1-5 库仑实验

库仑实验证明衰减原因不是圆板与液体间的摩擦, 而是液体内部的摩擦, 即内摩擦。流体内部摩擦是两层流体间分子内聚力的宏观表现。

流体内摩擦是两层流体之间的摩擦力, 流体与固壁之间的摩擦力属于粘附于固壁上没有相对运动的流体与邻近流体之间存在相对运动而产生的摩擦力, 这种相对运动存在于流体内部, 但对固壁形成粘性切应力。

牛顿假设: 在层流运动中, 流体内摩擦力与两层流体间的相对速度成正比。以平行平板流动为例, 下板静止, 上板速度为 U , 两板间距为 h , 在两板间产生速度 u , 间距为 dy 的两层流体的相对速度称为速度梯度 $\frac{du}{dy}$, 如图 1-6 所示。

设 x 方向单位面积上的流体内摩擦力为 τ , 称为粘性切应力。按牛顿粘性假设

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式中, 比例系数 μ 称为动力粘度 ($N \cdot s/m^2$ 或 $Pa \cdot s$)。

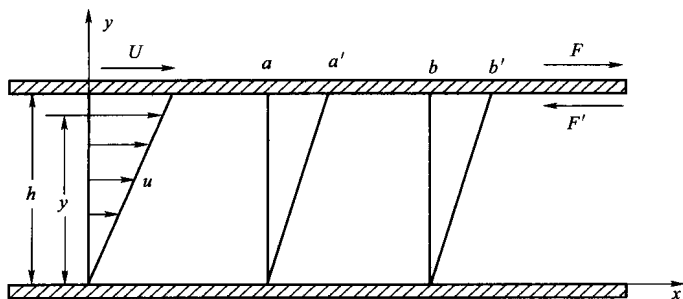


图 1-6 牛顿平板实验

粘度为常数的流体称为牛顿流体。经过大量试验,证明了牛顿假设的合理性,因此称为牛顿粘性定律,也称为牛顿内摩擦定律。

牛顿内摩擦定律表明:①粘性切应力与速度梯度成正比;②粘性切应力与角变形速率成正比;③比例系数称动力粘度,简称粘度。

在常温下(15~20℃)水和空气的粘度分别为:

$$\mu_{\text{水}} = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_{\text{空气}} = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

工程计算中常用运动粘度,运动粘度定义为动力粘度与流体密度之比值

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-11)$$

运动粘度的单位是 m^2/s 。在常温下(15~20℃)水和空气的运动粘度分别为:

$$\nu_{\text{水}} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\nu_{\text{空气}} = 15 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} = 0.15 \text{ cm}^2/\text{s}$$

温度对流体的粘度影响较大,当温度增大时,所有的液体的粘度会变小,而所有的气体的粘度会变大,如图 1-7 所示。

原因是对于液体,分子内聚力是产生粘度的主要因素。当温度升高时,分子间距增大,分子内聚力减小,导致内摩擦力减小,所以粘度变小。

对于气体,分子热运动引起的动量交换是产生粘度的主要因素。当温度升高时,分子热运动加剧,动量交换增强,引起内摩擦力增大,所以粘度变大。

压力对流体粘度的影响不大,一般可忽略不计。

例 1-1 一平板距另一固定平板 $\delta = 0.5 \text{ mm}$, 两板水平放置, 其间充满液体, 上板在单位面积上为 $\tau = 2 \text{ N/m}^2$ 的力的作用下, 以 $U = 0.25 \text{ m/s}$ 的速度匀速移动, 求该流体的动力粘度。

解: 根据牛顿内摩擦定律

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

由于两平板间隙很小, 速度分布可认为是线性分布, 可用增量来表示微分, 即

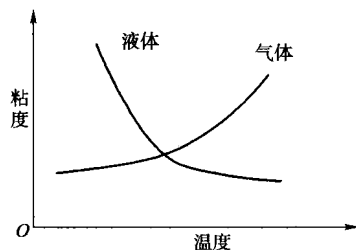


图 1-7 流体粘度随温度变化曲线