



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GONGCHENG LIUTI LIXUE

工程流体力学

杜广生 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA

TB126/42

2007

GONGCHENG LIUTI LIXUE
工程流体力学

主 编 杜广生
编 写 杜广生 田 瑞
王国玉 刘丽萍
主 审 赵振兴 槐文信



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书在教材内容、理论体系方面贯彻了“加强基础、淡化专业”的思想,以流体力学自身发展规律和认知规律指导编写,在兼顾理论体系完整性的同时注重了教学实用性,着力培养学生运用流体力学的基本理论、基本方法分析和解决问题的能力。本书主要内容包括:绪论,流体静力学,流体运动学,流体动力学基础,相似原理与量纲分析,管道阻力计算,气体一维定常流动,理想流体的有旋、无旋流动,平面势流叠加,黏性流体多维流动基础,气体流动的膨胀波和激波。

本书可作为能源动力类的热能动力工程、核工程与核技术、机械类的机械设计制造及其自动化、土建类的建筑环境与设备工程、环境与安全类的环境工程等专业相关课程的本科教材,并兼顾了其他相近专业的需要,同时也可作为其他专业研究生的流体力学基础课程教学用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学/杜广生主编. —北京:中国电力出版社,
2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5854 - 3

I. 工... II. 杜... III. 工程力学:流体力学—高等学校—教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 096445 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)
北京丰源印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 377 千字
印数 0001—3000 册 定价 26.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。书中贯彻了教育部普通高等学校力学教学指导委员会非专业类力学基础课程分委员会于2005年定稿的“工程流体力学教学基本要求”，突出了普通高等教育“加强基础，淡化专业”的思想，淡化为专业服务机能，着重学生在流体力学素质方面的培养要求，按照流体力学课程自身的规律编写本教材，适当扩大了本教材的适用专业面。本书内容以能源动力类的热能与动力工程、核工程与核技术、机械类的机械设计制造及其自动化、土建类的建筑环境与设备工程、环境与安全类的环境工程等专业的需要为主，同时兼顾其他相近专业的需要，也可作为其他专业研究生的流体力学基础课程教学用书。

为加强对学生在创新能力和素质方面的培养，本教材本着“宜广不宜深”原则编写，尽量避免篇幅较长的数学推导，着重物理概念和现象的叙述，适当增加流体力学在工程应用方面的典型范例。本书重视理论与工程实际的结合，在例题和习题、思考题的选取上，尽量与工程实际相结合。

贯彻少而精的原则，在教材内容的选取上体现实用性；在基本概念，基本理论叙述上做到层次清楚、简洁无误；文字上表述确切，简明通顺，图文并茂，文图密切结合。

本书第一~第三章、第五章、第六章由杜广生编写；第四章、第七章由田瑞编写；第八章、第九章由王国玉编写；刘丽萍编写了全书的思考题和第五章、第六章的习题，第七章第二节、第四节、第十二节和第十三节。杜广生担任主编，负责统稿。本书由河海大学赵振兴教授和武汉大学槐文信教授审稿，他们学术造诣精深、教学经验丰富，给书稿提出了许多宝贵意见和建议，对提高书稿质量大有裨益。

本书配套多媒体教学课件，详情请登录 <http://jc.cepp.com.cn>。由于水平所限，书稿中难免有不足之处，恳请各位读者批评指正。

编 者

2007年6月于山东大学

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 流体力学的研究内容和方法	1
第二节 流体力学的发展简史及工程应用	2
第三节 流体的定义及特征	5
第四节 流体的连续介质模型	6
第五节 流体的密度 相对密度 比容	6
第六节 流体的压缩性和膨胀性	8
第七节 流体的黏性	11
第八节 液体的表面性质	17
第九节 作用在流体上的力	19
思考题	20
习题	20
第二章 流体静力学	23
第一节 流体静压强及其特性	23
第二节 欧拉平衡微分方程 等压面 力函数	24
第三节 重力场中流体的平衡	26
第四节 液体的相对平衡	35
第五节 静止液体作用在固体壁面上的总压力	40
第六节 液体作用在浮体和潜体上的总压力	46
思考题	48
习题	48
第三章 流体动力学基础	54
第一节 流体运动的描述方法	54
第二节 流动的类型	57
第三节 流体动力学的基本概念	59
第四节 系统 控制体 输运公式	63
第五节 连续性方程	65
第六节 动量方程和动量矩方程	67
第七节 能量方程	73
第八节 伯努利方程及其应用	75
第九节 流线法线方向速度和压强的变化	78
思考题	80
习题	80

第四章 相似原理和量纲分析	87
第一节 流动的力学相似	87
第二节 动力相似准则	89
第三节 流动相似条件	92
第四节 近似模型试验	94
第五节 量纲分析法	96
思考题	101
习题	101
第五章 黏性流体的一维流动	103
第一节 黏性流体总流的伯努利方程	103
第二节 黏性流体管内流动的两种损失	104
第三节 黏性流体的两种流动状态	105
第四节 管道进口段中黏性流体的流动	107
第五节 圆管中的层流流动	108
第六节 黏性流体的紊流流动	111
第七节 沿程损失的实验研究	116
第八节 局部损失	120
第九节 管道的水力计算	124
第十节 孔口管嘴出流	130
第十一节 水击现象	136
第十二节 空化和空蚀简介	138
思考题	139
习题	140
第六章 气体的一维定常流动	145
第一节 气体一维流动的基本概念	145
第二节 微小扰动在空气中的传播	148
第三节 气体一维定常流动的基本方程	149
第四节 气流的三种状态和速度系数	150
第五节 气流参数和通道截面之间的关系	153
第六节 喷管流动的计算和分析	154
第七节 实际气体在管道中的定常流动	158
思考题	161
习题	161
第七章 理想不可压缩流体的有旋流动和无旋流动	163
第一节 流体流动的连续性方程	163
第二节 流体微团的运动分析	165
第三节 有旋流动和无旋流动	169
第四节 理想流体运动微分方程式 欧拉积分和伯努利积分	170
第五节 理想流体的旋涡运动	172

第六节 二维旋涡的速度和压强分布	177
第七节 速度势和流函数	178
第八节 几种简单的平面势流	182
第九节 简单平面势流的叠加	184
第十节 流体绕过圆柱体的流动	187
第十一节 均匀等速流绕圆柱体有环流的流动	189
第十二节 叶栅的库塔—儒可夫斯基公式	191
第十三节 库塔条件	193
思考题	194
习题	194
第八章 黏性流体绕物体的流动	196
第一节 不可压缩黏性流体的运动微分方程	196
第二节 蠕流	200
第三节 边界层的概念	204
第四节 平面层流边界层的微分方程	206
第五节 边界层的动量积分关系式	208
第六节 边界层的位移厚度和动量损失厚度	210
第七节 平板边界层流动的近似计算	211
第八节 边界层的分离与卡门涡街	216
第九节 物体的阻力与减阻	218
第十节 自由淹没射流	220
思考题	224
习题	225
第九章 膨胀波和激波	227
第一节 膨胀波	227
第二节 激波	229
第三节 正激波前后的参数关系	231
第四节 斜激波	234
第五节 激波的反射与相交	236
第六节 拉瓦尔喷管内的正激波	238
思考题	239
习题	239
参考文献	241

第一章 绪 论

第一节 流体力学的研究内容和方法

流体力学是力学的一个重要分支,是研究流体平衡和运动规律及其应用的一门技术科学。

根据研究问题侧重点的不同,流体力学可分为理论流体力学(统称为流体力学)和应用流体力学(统称为工程流体力学)。前者采用数学推理的方法,强调逻辑性、准确性和严密性,偏重于对流体力学理论的研究。后者采用对工程实际问题作近似处理的方法得出结果、结论,而不去追求数学上的严密性。

流体力学的基本任务在于建立及求解描述流体运动和平衡的基本方程,以获得流体流过各种通道和绕流不同物体时的速度和压强分布规律、能量转换的关系以及各种损失的确定方法,解决在运动和平衡状态下流体和固体之间的相互作用力问题。

一般流体力学以气体和液体作为研究对象,它们具有各自的特性,在某些方面又具有共性。气体没有一定的体积,不存在自由液面,易于压缩。液体具有一定的体积,有自由液面,不易压缩。但当气流速度较低时可以忽略其压缩性,气体和液体就具有不可压缩的共性;而在研究水下爆炸、水击等问题时必须考虑水的压缩性,这时气体和液体就具有可压缩的共性。在具有上述共性的流体中运动的物体的受力情况将是一样的。流体力学研究的是大量流体分子的平均物理属性和宏观机械运动,而不考虑孤立分子的具体运动。

流体力学研究的内容可包括静力学和动力学。前者研究流体的平衡规律以及在平衡状态下流体和固体的作用力问题,后者研究流体的运动规律以及运动状态下流体和固体的作用力。本教材主要讲述流体力学的基本概念、基本理论及其在实际中的应用问题。

流体力学借鉴了一般力学的研究方法,即理论分析、实验研究和数值计算的方法。

理论分析的方法以实际问题为对象建立模型,进行严密的数学推导求解。通过对流体物理性质和流动特性的科学抽象,确立合理的理论模型。该理论模型为根据流体宏观机械运动的普遍规律建立的闭合方程组,将原来的具体流动问题转化为数学问题,在相应的边界条件和初始条件下求解。理论研究方法的关键在于如何确立理论模型,并能运用数学方法求出理论结果,达到揭示流体运动规律的目的。流体力学和一般力学相比,也有其自身的一些特殊的理论分析方法,例如微分体积法、速度势法、保角变换法等,根据这些方法,运用数学工具可以解决一些重要的流体力学理论问题和应用问题。由于数学上的困难,许多实际流动问题还难以用理论分析的方法精确求解。但有些问题用理论分析的方法得到了比较理想的结果,如圆管中的层流、理想流体绕流圆柱体、势流等问题就是用理论分析的方法解决的。理论分析的方法优点在于各种影响因素清晰、结果具有普遍性,是实验研究和数值模拟计算的理论基础。

实验研究方法一般要对实际流体力学问题的影响因素分清主次,抓住主要因素,根据

相似原理建立实验模型,选择流动介质;通过实验测定有关相似准则数中的物理量,实验设备可以是水槽、水洞、水池、风洞、激波管、测试管系、水电比拟以及有关测试仪器等;将实验数据整理成相似准则数,并通过对实验数据的拟合找出准则方程式,便可推广应用于相似的流动。该方法更加接近实际,只要实验模型的设计合理,即模型流场与实际流场相似,测量无误,准则方程的拟合精确度高,实验结果是可靠的;如果由于模型尺寸、流动介质等的限制,设计模型时只能使主要相似准则数相等,实验结果只是近似的;另外还有许多流体力学问题,诸如大气环流、碳酸岩油田的渗流、可控热核聚变中的高温等离子体流动等,无法在实验室内进行实验研究,只能进行观察、实测或用数值计算方法进行研究,再者实验研究需要投入人力和物力,但是,它是佐证理论研究和数值模拟计算结果的必要手段。

数值计算方法一般按照抽象物理模型、选取合理的数学模型,在此基础上合理选用计算方法,它们可以是有限差分方法、特征线方法、有限元方法、边界元方法、谱方法等;通过编制计算程序或者用商业计算机软件上机计算,得到近似解,分析答案,以确定是否符合精确度要求。该方法的优点是,过去许多用数学解析方法不能求解的流体力学问题,用电子计算机通过数值计算便可得到解决。从一定意义上讲,它是理论分析方法的延伸和拓宽。此外,在电子计算机上用数值计算方法可以很好地模拟流体力学实验,计算结果可以在计算机上显示,并给出丰富的流动信息,可观察到各种流动细节,并可对多个实验研究方案进行比较和优选,从而可大大节省实验研究的时间和经费。特别是,在某些无法进行实验或实验耗资巨大的工程领域中,数值计算方法更能显现突出的优越性。但数值计算方法也有它的局限性,它的数学模型的确立必须以理论分析和实验研究为基础,而且往往难于包括实际流动的所有物理特性。有时物理模型的尺度和计算方法还受到计算机性能方面的制约。

第二节 流体力学的发展简史及工程应用

流体力学作为经典力学的一个重要分支,其发展和数学、普通力学的发展密不可分,也是人类长期和自然界斗争的结果,是人类智慧的结晶。

人类最早对流体力学的认识是从治水、灌溉、航行等方面开始的。四千多年前的大禹治水说明,我国古代已有大规模的治河工程。秦代,在公元前 256~前 210 年间便修建了都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程,特别是李冰父子领导修建的都江堰,既有利于岷江洪水的疏排,又能常年用于灌溉农田,并总结出“深淘滩,低作堰”、“遇弯截角,逢正抽心”的治水原则。其设计思想之巧妙,至今仍为国内外游人称道。这说明,那时对明槽水流和堰流流动规律的认识已经达到相当水平。西汉武帝(公元前 156~前 87)时期,为引洛水灌溉农田,在黄土高原上修建了龙首渠,创造性地采用了井渠法,即用竖井沟通长十余里的穿山隧洞,有效地防止了黄土的塌方。在古代,以水为动力的简单机械也有了长足的发展,例如用水轮提水,或通过简单的机械传动去碾米、磨面等。东汉杜诗任南阳太守时(公元 37 年)曾创造水排(水力鼓风机),利用水力,通过传动机械,使皮制鼓风囊连续开合,将空气送入冶金炉,较西欧约早了一千一百年。古代的铜壶滴漏(铜壶刻漏)——计时工具,就是利用孔口出流使铜壶的水位变化来计算时间的。这说

明,那时对孔口出流已有相当的认识。北宋(960~1126)时期,在运河上修建的真州船闸与14世纪末荷兰的同类船闸相比,约早三百多年。明朝的水利家潘季顺(1521~1595)提出了“筑堤防溢,建坝减水,以堤束水,以水攻沙”和“借清刷黄”的治黄原则,并著有《两河管见》、《两河经略》和《河防一揽》。史实说明,15世纪以前,我国的科学技术在世界上处于领先地位;近几百年来,由于封建统治阶级轻视科学,将其贬为雕虫小技,严重地阻碍了我国科学技术的发展,致使我国的科学技术基本上处于经验的定性的阶段,而未能上升为严密的系统的科学理论。

西方有记载的最早从事流体力学研究的是古希腊学者阿基米德(Archimedes,公元前287~212),其《流体静力学》和《论浮体》是人类最早的流体力学专著。他第一个阐明了相对密度的概念,发现了各种不同的物体有不同的比重——比重原理;发现了流体静力学的基本原理——浮力定律。他证明了任何一种液体的液面,在静止时与地球表面呈同一曲面,此曲面的中心即地心。他的这些著名论断至今还是流体静力学的重要基础。

在此后的一段较长的历史时期中,没有有关流体力学发展情况的记载。

直到15世纪末和16世纪初著名物理学家和艺术家列奥纳德·达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452~1519)在米兰附近设计建造了一个小的水渠,系统地研究了沉浮、孔口出流、物体的运动阻力等问题,促进了这一时期水力学和流体力学的发展。

1687年牛顿(Newton, 1642~1727)在他的《原理》一书中讨论了流体的阻力、波浪运动等问题,有了与近代较接近的流体力学理论。

伯努利(Daniel Bernoulli 1700~1783)1738年在其名著《流体动力学》一书中最早引用流体力学的名字。该书首先建立了流体位置高度、压强和动能之间的普遍关系——伯努利方程。

欧拉(Leonard Euler, 1707~1783)可称为理论流体力学的奠基人,1755年在其《流体运动的一般原理》一书中提出了速度势的概念,建立了连续性方程和理想流体的运动微分方程,并将其应用于人体的血液流动;他在《航海科学》、《船舶制造和结构全论》与《论船舶的左右及前后摇晃》等著作中,系统地论述了船型、船的平衡、船的摇晃、风力作用下的运动等问题。

拉格朗日(Lagrange, 1736~1813)在前人的基础上进一步发展了流体力学的解析方法,严格地论证了速度势的存在,并提出了流函数的概念,运用这些概念可将复杂的流体力学问题转化为纯数学问题。

法国学者达朗伯(d'Alembert, 1717~1783)1744年提出了达朗伯疑题,即在理想流体的假定下,在流体中运动的物体既没有升力也没有阻力,从反面说明了理想流体假定的局限性。

这一时期伽利略(Galileo, 1564~1642)在他的论文中建立了沉浮的基本理论;帕斯卡(Pascal, 1623~1662)证明了流体中压力传递的基本定律;牛顿建立了内摩擦定律;19世纪初纳维尔(Navier)和斯托克斯(Stokes)先后提出了黏性流体的运动微分方程即著名的N-S方程,使流体力学得到空前的发展。由于理论解析研究方法方面的局限性,有些问题的解决必须依靠实验来完成,所以从这一时期开始在流动问题的研究中出现了两个体系。一种是依靠数学理论的严密推导,力求从理论上解决问题,常称之为“经典流体力学”或“理论流体力学”;另一种是以实验为主,侧重于解决工程实际问题,称为“水力学”。在水力学

的研究中实验占主导地位,依靠实验得出的经验和半经验公式指导实际工程设计,由于其采用了大量的系数,所以又称其为“系数科学”。在这一时期还派生出另一门重要的学科——“空气动力学”。

随着人类社会的进步和生产力的发展,大大加速了“流体力学”和“水力学”的发展,同时由于数学、实验手段的进步和实际工程问题的需要加速了两者结合的进程,使两者逐渐结合起来,在这一过程中量纲分析和相似原理起了重要作用。

19世纪末到20世纪初,众多学者对流体力学也做出了重要的贡献。雷诺(Reynolds)用实验证实了黏性流体的两种流动状态——层流和紊流的客观存在,并找到了判别层流和紊流的准则数——雷诺数,为流动阻力和损失的研究奠定了基础。瑞利(Reyleigh)的量纲分析法和雷诺、佛鲁德(Froude)等人在相似理论方面的贡献,使理论分析和实验研究建立了有机联系。1904年普朗特(Prandtl, 1875~1953)提出了边界层理论,解释了阻力产生的机制,并将势流理论和黏性流体理论建立了联系,随着边界层理论的完善和近代实验技术的进步,已经形成一个独立的流体力学分支。库塔(Kutta, 1867~1944)、儒可夫斯基(Жуковский, 1847~1921)建立的翼形绕流理论,解释了升力和环流的关系,奠定了空气动力学的基础。近年来我国科学家钱学森(Qian Xuesen)在空气动力学方面的新理论、周培源(Zhou Peiyuan)的紊流理论、吴仲华(Wu Zhonghua)翼栅的三元流理论为世人所瞩目。

在科学技术高度发达的今天,流体力学所研究的问题更加广泛深入,和其他学科相互浸透,派生出许多分支,形成许多边缘学科,例如电磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、地球流体力学、高温气体动力学、非牛顿流体力学、爆炸力学、流变学、计算流体力学等等。这些新兴学科的出现和发展,使流体力学这一古老的学科焕发出新的生机和活力。

现代许多工业部门都涉及到流体流动的问题,风机、水泵、空气压缩机、汽轮机、内燃机、水轮机、喷气发动机等都是以流体为工作介质的机械。下面以热能动力工程及机械类专业常涉及到的问题为对象来说明流体流动在能量转换过程中的重要性。

煤粉随同空气喷入锅炉的燃烧室,靠空气流动产生的扰动效应和空气混合,使之尽可能地充分燃烧。燃烧产生的热量加热水冷壁管的水,被加热的水和蒸汽进入过热器,产生过热蒸汽,完成煤燃烧产生的化学能转化为过热蒸汽的热能的过程。过热蒸汽在汽轮机叶栅槽道中膨胀加速,推动汽轮机转子旋转输出机械能。转子旋转带动发电机发出交流电,完成机械能转换为电能的过程。在这些能量转换过程中主要的工作介质是水和蒸汽,它们在汽轮机和水泵中进行能量交换,在热交换器、冷凝器中进行热交换。在这些能量交换和热交换过程中如何组织流体合理流动至关重要,因为它直接影响这一庞大动力机械的动力性和运行经济性。

内燃机作为动力机械被广泛应用,其工作介质也是流体。如柴油机,在工作过程中随着活塞在气缸中下行,空气经空气滤清器被吸入气缸,完成进气过程。随着活塞的上行,气缸内的气体被压缩,温度升高,压强增大,此时喷入气缸内的柴油受到气缸内运动气流的扰动,完成雾化并与压缩空气混合,当达到自燃温度时迅速燃烧进入爆发过程,燃烧后的高温高压气体推动活塞下行,通过连杆机构将活塞的往复运动转化为曲轴的旋转运动而输出机械能,完成燃料燃烧的化学能转化为机械能的过程,在这一过程中作为工质的气体始终处于复

杂的运动状态之中。另外在柴油机的喷油系统中的柴油和曲轴轴承中的润滑油的运动也是一个复杂的流体力学过程。在这些过程中流动过程组织的是否合理,将直接影响柴油机的动力性和经济性。

由上述两例充分显示了流体力学在动力机械工程中的重要性。在其他许多工业部门中流体力学也处于十分重要的地位。机械工业中润滑、冷却、液压传动、气力输送等都应用了流体力学的理论;在冶金行业中,工业炉窑中炉料、燃料和气体的相对运动,铸模中液态金属的流动和冷却等问题也属于流体力学的研究范畴;许多化工问题也涉及到流体的流动问题;在石油行业流体力学的应用则更加广泛,如油、气、水的渗流问题,油、气的自喷、抽吸和输送等等;在航空、航天领域,飞行器的设计必须依靠流体力学的基本理论;土木工程中的给水、排水、通风、建筑物的气动力载荷等都要涉及流体力学理论,图 1-1 为建筑物利用风能的例子。人体的血液循环系统、呼吸系统也是流体系统,所以像人工心脏、心肺机助呼吸器等的设计都要依据流体力学的基本原理。总之流体力学对于许多工业部门来说都是非常重要的一门学科。

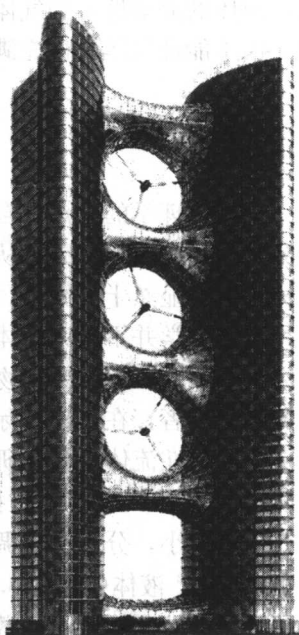


图 1-1 新型节能建筑

第三节 流体的定义及特征

自然界中的物质均由分子构成,按照分子的聚集状态可将其分为两大类,即固体和流体,后者可进一步细分为气体和液体。有时又将它们称为固相、液相和气相。固体分子的密集程度最大,液体次之,气体又次之。通俗地讲,能够流动的物质叫流体,如果按照力学的术语进行定义,则在任何微小的剪切力的作用下都能够发生连续变形的物质称为流体。所以气体、液体通称为流体。

固体和流体具有以下不同的特征:在静止状态下固体的作用面上能够同时承受剪切应力和法向应力。而流体只有在运动状态下才能够同时有法向应力和切向应力的作用,静止状态下其作用面上仅能够承受法向应力,这一应力是压缩应力即静压强。固体在力的作用下发生变形,在弹性极限内变形和作用力之间服从虎克定律,即固体的变形量和作用力的大小成正比。而流体则是角变形速度和剪切应力有关,层流和紊流状态下它们之间的关系有所不同,在层流状态下,二者之间服从牛顿内摩擦定律。当作用力停止作用,固体可以恢复原来的形状,流体只能停止变形,而不能返回原来的位置。固体有一定的形状,流体由于其变形所需的剪切力非常小,所以很容易使自身的形状适应容器的形状,并可以在一定的条件下维持下来。

与液体相比气体更容易变形,因为气体分子比液体分子稀疏得多。在一定条件下,气体和液体的分子大小并无明显差异,但气体所占的体积是同质量液体的 10^3 倍。所以气体的分子距与液体相比要大得多,分子间的引力非常微小,分子可以自由运动,极易变形,能够充满所能到达的全部空间。液体的分子距很小,分子间的引力较大,分子间相互制约,分子可以作无一定周期和频率的振动,在其他分子间移动,但不能像气体分子那样自由移动,因

此,液体的流动性不如气体。在一定条件下,一定质量的液体有一定的体积,并取容器的形状,但不能像气体那样充满所能达到的全部空间。液体和气体的交界面称为自由液面。

第四节 流体的连续介质模型

根据物理学的观点,自然界中的所有物质都是由分子构成的,流体也不例外。由于分子和分子间存在间隙,因此从微观上看流体是不连续的。若从分子运动论入手研究流体的宏观机械运动,显然十分困难,甚至是不可能的。

流体力学并不研究流体分子的微观运动,而关心众多流体分子的宏观机械运动。描述流体运动或平衡状态的宏观物理量,都是众多流体分子平均运动的效果,都可以从实验中直接观测到。再者,在工程实际中流体流动所涉及到的物体的特征尺度大得与分子间距无法比拟。因此,在流体力学的研究中将流体作为由无穷多稠密、没有间隙的流体质点构成的连续介质,这就是1755年欧拉提出的“连续介质模型”。这种假设是合理的,因为通常情况下流体分子距很小,分子非常稠密。例如,在标准状态下, 1mm^3 的气体中,就包含 2.7×10^{16} 个分子; 1mm^3 液体中包含 3.4×10^{19} 个分子。所以,在这一假设之下,流体力学的研究就不必再顾及孤立的流体分子的微观运动,而研究模型化了的连续介质。

在连续性假设之下,表征流体状态的宏观物理量,如速度、压强、密度、温度等,在空间和时间上都是连续分布的,都可以作为空间和时间的连续函数,从而可以用连续函数的解析方法等数学工具去研究流体的平衡和运动规律,为流体力学的研究提供了很大的方便。

在连续性的假设中,认为构成流体的基本单位是流体质点。这里所谓的流体质点是包含有足够多流体分子的微团,在宏观上流体微团的尺度与流动所涉及到的物体的特征长度相比充分的小,小到在数学上可以作为一个点来处理。而在微观上,微团的尺度和分子的平均自由行程相比又要足够大,以致能够包含有足够多的流体分子,使得这些分子的共同物理属性的统计平均值有意义。

必须指出的是,连续介质模型的应用是有条件的,这就是研究所涉及到的物体的特征长度与分子的平均自由行程相比必须足够大,否则这一模型就不适用。例如,在高空稀薄空气中运动的飞行器,其特征尺寸和分子的平均自由行程具有同一数量级,这时连续介质模型就不适用了,必须借助气体分子运动论来解决有关问题。

第五节 流体的密度 相对密度 比容

密度是流体的重要物理属性之一,它表征流体在空间的密集程度。对于非均质流体,若围绕空间某点的体积为 δV , 其所包容的质量为 δm , 则它们的比值 $\delta m / \delta V$ 为 δV 内的平均密度,令 $\delta V \rightarrow 0$, 取该比值的极限,便可得到该点处的密度,其定义式如下:

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

式中 ρ ——流体的密度,表示单位体积内流体具有的质量, kg/m^3 。

式中 $\delta V \rightarrow 0$ 并不是数学意义上的趋向于一个点,而是趋向于一个微团的体积,这一微

团必须包含有足够多的流体分子，使得这些分子的共同物理属性的统计平均值有意义。

对于均质流体，密度的定义式如下：

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

式中 m ——流体的质量，kg；

V ——质量为 m 的流体的体积， m^3 。

由流体密度的定义知，对于一定质量的流体，密度的大小与体积有关，而体积与温度、压强有关，所以流体的密度必然受温度和压强的影响。

表 1-1 给出了标准大气压下水、空气和水银的密度随温度变化的数值，表 1-2 给出了常见流体在一定温度下的密度。

表 1-1 标准大气压下水、空气、水银的密度随温度变化的数值

温度 (°C)	水的密度 (kg/m ³)	空气的密度 (kg/m ³)	水银的密度 (kg/m ³)
0	999.87	1.293	13600
4	1000.00	—	—
5	999.99	1.273	—
10	999.73	1.248	13570
15	999.13	1.226	—
20	998.23	1.205	13550
25	997.00	1.185	—
30	995.70	1.165	—
40	992.24	1.128	13500
50	988.00	1.093	—
60	983.24	1.060	13450
70	977.80	1.029	—
80	971.80	1.000	13400
90	965.30	0.973	—
100	958.40	0.946	13350

表 1-2 常用流体的密度和相对密度

流 体 名 称	温度 (°C)	密度 (kg/m ³)	相 对 密 度
蒸馏水	4	1000	1
海 水	20	1025	1.025
航空汽油	15	650	0.65
普通汽油	15	700~750	0.70~0.75
润 滑 油	15	890~920	0.89~0.92
石 油	15	880~890	0.88~0.89
矿物油系液压油	15	860~900	0.86~0.90
10 号航空液压油	0~20	833.85	0.833
酒 精	15	790~800	0.79~0.80
甘 油	0	1260	1.26
水 蒸 气	—	0.804	0.000804
氧 气	0	1.429	0.001429
氮 气	0	1.251	0.001251
氢 气	0	0.0899	0.000899
二氧化碳	0	1.976	—

相对密度是指在标准大气压下流体的密度与 4℃ 时纯水的密度的比值, 用符号 d 表示, 定义式为

$$d = \rho_t / \rho_w \quad (1-2)$$

式中 ρ_t ——流体的密度, kg/m^3 ;

ρ_w ——4℃ 时结水的密度, kg/m^3 。

流体的比容是指单位质量流体所占的体积, 即密度的倒数。用符号 v 表示, 其单位为 m^3/kg , 表达式为

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

混合气体的密度用式 (1-4) 计算:

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \cdots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (1-4)$$

式中 ρ_i ——混合气体中各组分气体的密度;

α_i ——混合气体中各组分气体所占体积的百分比。

【例 1-1】 锅炉烟气各组分气体所占体积的百分比分别为 $\alpha_{\text{CO}_2} = 13.6\%$, $\alpha_{\text{SO}_2} = 0.4\%$, $\alpha_{\text{O}_2} = 4.2\%$, $\alpha_{\text{N}_2} = 75.6\%$, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 6.2\%$, 试求烟气的密度。

解 由表 1-1、表 1-2 查得标准状态下的 $\rho_{\text{CO}_2} = 1.976 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{SO}_2} = 2.927 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{O}_2} = 1.429 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{N}_2} = 1.251 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.804 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。将已知数据代入式 (1-4), 得烟气在标准状态下的密度

$$\begin{aligned} \rho &= 1.976 \times 0.136 + 2.927 \times 0.004 + 1.429 \times 0.042 + 1.251 \times 0.756 \\ &\quad + 0.804 \times 0.062 = 1.336 \text{ kg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

第六节 流体的压缩性和膨胀性

流体在一定的温度下压强增大, 体积减小; 在压强一定时, 温度变化体积也要发生相应的变化。所有流体都具有这种特性, 流体的这种性质称为流体的压缩性和膨胀性。

一、流体的压缩性

在一定的温度下, 单位压强增量引起的体积变化率定义为流体的压缩性系数, 用以衡量流体压缩性的大小, 其表达式为

$$k = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{dV}{Vdp} \quad (1-5)$$

式中 dp ——压强增量, Pa ;

dV/V —— dp 引起的体积变化率。

由于压强增大, 体积就要减小, dp 和 dV 异号, 为了保证压缩性系数的直观性, 在等式的右端冠以负号。 k 的单位为 m^2/N 。由上述定义式可以看出, 在同样的压强增量之下, k 值大的流体体积变化率大, 容易压缩, k 值小的流体体积变化率小, 不容易压缩。

工程中往往还涉及到流体的体积弹性模量, 用 K 来表示, 定义为压缩性系数的倒数, 其表达式为

$$K = \frac{1}{k} = -\frac{Vdp}{dV} \quad (1-6)$$

上式表明, K 大的流体压缩性小, K 小的流体压缩性大。 K 的单位和压强的单位相同, 为 Pa 或 N/m^2 。在一定温度下水的体积弹性模量示于表 1-3。由表可知水的体积弹性模量很大, 所以不容易压缩。工程计算中常近似地取为 $K=2.0\text{GPa}$ 。

表 1-3 水的体积弹性模量 (GPa)

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	压 强 (MPa)				
	0.490	0.981	1.961	3.923	7.845
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
5	1.89	1.91	1.93	1.97	2.03
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
15	1.93	1.96	1.99	2.05	2.13
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

【例 1-2】 求水在等温状态下, 将体积缩小 5/1000 时所需要的压强增量。

解 由式 (1-6) 知

$$\delta p = -\frac{\delta V}{V}K = \frac{5}{1000} \times 2.0 \times 10^9 = 10^7 \text{Pa}$$

二、流体的膨胀性

当压强一定时, 流体温度变化体积改变的性质称为流体的膨胀性, 膨胀性的大小用温度膨胀系数来表示, 其表达式为

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT} = \frac{dV}{VdT} \quad (1-7)$$

式中 dT 或 dt 为温度增量; dV/V 为相应的体积变化率。由于温度升高体积膨胀, 故二者同号。 α_v 的单位为 $1/\text{K}$ 或 $1/^{\circ}\text{C}$ 。水在不同温度下的膨胀系数如表 1-4 所示。

表 1-4 水的温度膨胀系数

压强 (MPa)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.0981	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	536×10^{-6}	719×10^{-6}
9.807	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
19.61	72×10^{-6}	183×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	—
49.03	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
88.26	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

由表可知水的体积膨胀系数和压强之间的关系在 50°C 附近发生转变, 当温度小于 50°C 时, 体积膨胀系数随着压强的增大而增大; 温度大于 50°C 时, 随着压强的增大而减小。

一般情况下气体需要同时考虑温度和压强对体积和密度的影响, 工程中经常涉及到的气体往往可以作为完全气体 (热力学中的理想气体) 来处理, 可用理想气体的状态方程式来进行有关计算, 完全气体的状态方程式为

$$pv = RT \text{ 或 } \frac{p}{\rho} = RT \quad (1-8)$$

式中 p ——气体的绝对压强, Pa;

v ——气体的比体积, m^3/kg ;

ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;

R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T ——热力学温度, K 。

由式 (1-8) 知, 气体的比体积和压强成反比, 和热力学温度成正比。

对于气体, 其体积弹性模量随气体的变化过程的不同而不同, 例如在等温过程中

$$pv = C$$

C 为常数, 上式微分后得

$$p dv + v dp = 0 \text{ 或 } \frac{dv}{v} = -\frac{dp}{p} \quad (1-9)$$

因为气体比体积的相对变化率等于体积的相对变化率, 所以

$$K = -\frac{v}{dv} dp \quad (1-10)$$

将式 (1-9) 代入上式, 则有

$$K = \frac{p}{dp} dp = p \quad (1-11)$$

由上式知当气体作等温压缩时, 气体的体积弹性模量等于作用在气体上的压强。

当气体作等熵压缩时则有

$$pv^\kappa = C_1$$

C_1 为常数, κ 为等熵指数, 上式微分后得

$$p\kappa v^{\kappa-1} dv + v^\kappa dp = 0$$

整理后, 则有

$$\frac{dv}{v} = -\frac{1}{\kappa} \frac{dp}{p} \quad (1-12)$$

将上式代入式 (1-6) 则得

$$K = \frac{p\kappa}{dp} dp = \kappa p \quad (1-13)$$

由式 (1-13) 知气体作等熵压缩时, 其体积弹性模量等于绝热指数和压强的乘积。例如气体在一个标准大气压下作等熵压缩时, $K = 1.4 \times 101325 = 1.419 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

由上述知, 气体和液体都是可压缩的, 只是压缩性的大小有所区别, 通常情况下由于液体的压缩性较小, 常常作为不可压缩流体来处理, 此时密度等于常数, 这样给问题的处理带来很大的方便。气体的压缩性比较大, 由完全气体的状态方程式知, 当温度不变时, 完全气体的体积和压强成反比, 压强增大一倍, 体积缩小为原来的一半; 当压强不变时, 温度升高 1°C , 体积就比 0°C 时的体积膨胀 $1/273$ 。所以通常气体作为可压缩流体来处理, 其密度不能作为常数, 必须同时考虑压强和温度对密度或比容的影响。

可压缩流体和不可压缩流体都是相对而言的, 实际工程中要不要考虑流体的压缩性, 要视具体情况而定。例如在研究水下爆炸、管道中的水击和柴油机高压油管中柴油的流动过程时, 由于压强变化比较大, 而且过程变化非常迅速, 必须考虑压强对密度的影响, 即要考虑液体的压缩性, 将液体作为可压缩流体来处理。又如, 用管道输送煤气时, 由于在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来处理。再如气流绕流物体时当气流速度比声速小得多时, 气体的密度变化很小, 可近似地看成常数, 也可以作为不可压缩流体来处理。