

普通高等教育“十五”规划教材



ENGINEERING FLUID MECHANICS
SECOND EDITION

工程流体力学 (第二版)

周云龙 洪文鹏 合 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十五”规划教材



ENGINEERING FLUID MECHANICS
SECOND EDITION

工程流体力学

(第二版)

周云龙 洪文鹏 合编
王松岭 主审



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

全书共分七章,内容包括导论、流体静力学、流体动力学基础、不可压缩流体的有旋流动和二维无旋流动、不可压缩流体二维边界层概述、黏性流体的一维定常流动和气体一维高速流动。各章均附有一定数量的例题、复习思考题、习题和英文习题。附录中列出了流体力学词汇(部分)英汉对照。

本书为高等学校自动化专业以及相近专业的工程流体力学课程的教材,也可作为热能与动力工程、建筑环境与设备工程、土木工程、环境工程、轻化工程等专业少学时工程流体力学课程的教材。同时可作为高等函授热能动力类专业的教材及工厂和设计部门中有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/周云龙,洪文鹏合编. —2版. —北京:中国电力出版社,2004

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2398-X

I. 工… II. ①周…②洪… 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(2004)第 059753 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1997 年 11 月第一版

2004 年 8 月第二版 2004 年 8 月北京第五次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 302 千字

印数 13081—16080 册 定价 19.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业技术发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222）

中国电力教育协会

第三版前言

工程流体力学是一门重要的专业基础课程,该课程的目的是为学习专业课以及从事技术工作提供必要的基础理论和实验技能。

薛祖绳、周云龙合编的《工程流体力学》,作为一门重要的专业基础课程的教材,已经在东北电力学院和其他兄弟院校使用达六年之久。这次是在总结教学实践经验的基础上结合兄弟院校老师提出的许多宝贵意见进行修订的。修订后的教材,保留了原教材的基本内容,并根据需要对教材的内容和体系进行了一些必要的调整。删去了水位计的基本原理等内容。在各章中均增添了一些新内容,例如流体力学的任务及发展概况,浮体与潜体的稳定性,动量矩方程,液体的空化和空蚀现象,水击现象等。同时各章均增添了例题、复习思考题、习题以及英文习题。对教材章节作了某些调整,不可压缩流体二维边界层单独列一章。为了使读者掌握流体力学的英文专业词汇,在附录中列出了流体力学词汇(部分)英汉对照。附录中还列出了流体力学中常用的单位制换算对照表。调整后的教材内容和体系更加符合专业教学需要。此外,对于教材中各物理量的名称、单位和符号均按《中华人民共和国国家标准——量和单位》进行了修订。

本教材由东北电力学院博士生导师周云龙教授和洪文鹏副教授合编。导论,第一章,第四章,第六章,第七章中第一节、第二节和第三节以及流体力学词汇英汉对照由周云龙编写。第二章,第三章,第五章,第七章中第四节、第五节由洪文鹏编写。全书最后由周云龙教授统稿。华北电力大学博士生导师王松岭教授任主审。王松岭教授对书稿逐字逐句进行了认真的审阅,提出了许多宝贵意见和建议,使本教材的质量得以提高,在此表示衷心感谢!

东北电力学院流体力学教研室的李岩、张玲、孙斌也审阅了书稿,提出了修改意见,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,本教材中难免存在缺点和不足,恳请读者批评指正。

周云龙 教授

洪文鹏 副教授

2004年4月

于东北电力学院

第一版前言

本教材是根据 1995 年 5 月在湖北宜昌召开的电力部高等学校热能动力专业教学指导委员会流体力学及泵与风机教学组会议审定的自动化专业《工程流体力学》课程修定教学大纲，在原薛祖绳主编的《工程流体力学》教材的基础上修定而成的。

工程流体力学是自动化专业的一门重要的专业基础课，该课程的目的是为学习热力设备和热工参数测量及仪表等专业课，以及从事本专业工程技术工作提供必要的理论基础。

薛祖绳主编的原教材《工程流体力学》，作为自动化专业一门重要专业基础课的教材，已在东北电力学院和其他兄弟院校使用十多年。在此期间，使用过该教材的兄弟院校的同行们曾以各种方式提出了许多宝贵的意见。这次是在总结教学实践经验的基础上对该教材进行修订。修订后的教材保留了原教材的基本内容，并根据专业需要，对教材的内容和体系进行了一些必要的调整。删去了旋转容器中液体的相对平衡、连通器、节流式流量计、动量矩方程、用皮托-静压管测量流量、五孔球形测压管、用皮托-静压管测量气流中的压力和速度等内容。在各章中均增添了一些新内容，例如流体的分类、流动分类、拉格朗日法等，并且在各章中均增加了应用举例的内容，同时增加了例题和习题。对教材章节作了某些调整，如将边界层的概念、绕物体的阻力移动流体的二维流动中等。为了使读者掌握流体力学（fluid mechanics）的英文专业词汇，在第一次出现专业词汇的同时给出了它的英文名称。调整后的教材内容和体系更加符合专业教学需要。此外，对于教材中各物理量的名称、单位和符号均按《中华人民共和国国家标准 量和单位》和流体力学及泵与风机教学组会议上统一的意见进行了修定。

本教材除适用于自动化专业外，也可作为化工、石油、冶金以及其他少学时相近专业工程流体力学的教材。

本教材由东北电力学院薛祖绳教授和周云龙教授合编，从第一章到第六章全部由周云龙编写，薛祖绳作为学术指导。山东工业大学孔珑教授任主审，本教材的主审对书稿修订作了大量细致的工作，提出了许多宝贵意见和建议，才使本教材的质量得以提高，在此表示感谢！

由于编者水平有限，本教材中还难免存在有缺点和错误，恳请读者批评指正。

薛祖绳 教授

周云龙 教授

1997 年 6 月

目 录

序	
第二版前言	
第一版前言	
第一章 导论	1
第一节 流体力学的任务及发展概况	1
第二节 流体的特征和连续介质假设	3
第三节 流体的主要物理性质	4
第四节 作用在流体上的力	16
复习思考题	17
习题	17
第二章 流体静力学	21
第一节 流体静压强及其特性	21
第二节 流体平衡微分方程	23
第三节 重力作用下的流体平衡	26
第四节 流体静力学基本方程的应用	29
第五节 平面上的静水总压力	36
第六节 曲线上的静水总压力	40
第七节 浮体与潜体的稳定性	43
复习思考题	45
习题	46
第三章 流体动力学基础	55
第一节 描述流体运动的两种方法	55
第二节 流体运动的一些基本概念	58
第三节 流体流动的连续性方程	64
第四节 理想流体的运动微分方程	68
第五节 理想流体微元流束的伯努利 (Bernoulli) 方程	69
第六节 伯努利 (Bernoulli) 方程的应用	71
第七节 定常流动的动量方程和动量矩方程	75
第八节 液体的空化和空蚀现象	78
复习思考题	80
习题	80
第四章 不可压缩流体的有旋流动和二维无旋流动	86
第一节 流体微团运动分析	86
第二节 有旋流动和无旋流动	91

第三节 无旋流动的速度势函数	94
第四节 二维平面流动的流函数	95
第五节 基本的平面有势流动	98
第六节 平面势流的叠加流动	103
复习思考题	109
习题	110
第五章 不可压缩流体二维边界层概述	112
第一节 边界层的基本概念	112
第二节 边界层的动量积分方程	113
第三节 曲面边界层分离现象 卡门涡街	116
第四节 绕流阻力和阻力系数	119
复习思考题	120
习题	120
第六章 黏性流体的一维定常流动	122
第一节 黏性流体总流的伯努利方程	122
第二节 黏性流体的两种流动型态	125
第三节 流动损失分类	129
第四节 圆管中流体的层流流动	130
第五节 圆管中流体的紊流流动	134
第六节 沿程阻力系数的实验研究	142
第七节 非圆形截面管道沿程损失的计算	147
第八节 局部损失的计算	149
第九节 管道水力计算	154
第十节 水击现象	158
复习思考题	161
习题	162
第七章 气体一维高速流动	167
第一节 微弱扰动波的传播	167
第二节 气体一维定常等熵流动	171
第三节 气体一维定常等熵变截面管流	174
第四节 正激波	179
第五节 应用举例	182
复习思考题	186
习题	187
附录 I 流体力学词汇 (部分) 英汉对照	188
附录 II 常用单位换算	199
参考文献	200

第一章 导 论

第一节 流体力学的任务及发展概况

流体力学是一门基础性很强和应用性很广的学科,是力学的一个重要分支。它的研究对象随着生产的需要与科学的发展在不断地更新、深化和扩大。20 世纪 60 年代以前,它主要围绕航空、航天、大气、海洋、航运、水利和各种管路系统等方面,研究流体运动中的动量传递问题,即局限于研究流体的运动规律,和它与固体、液体或大气界面之间的相互作用力问题。60 年代以后,能源、环境保护、化工和石油等领域中的流体力学问题逐渐受到重视,这类问题的特征是:尺寸小,速度低,并在流体运动过程中存在传热、传质现象。这样,流体力学除了研究流体的运动规律以外,还要研究它的传热、传质规律。同样,在固体、液体或气体界面处,不仅研究相互之间的作用力,而且还需要研究它们之间的传热、传质规律。

工程流体力学是研究流体(液体、气体)处于平衡状态和流动状态时的运动规律及其在工程技术领域中的应用。

流体力学的基础理论由三部分组成:一是流体处于平衡状态时,各种作用在流体上的力之间关系的理论,称为流体静力学;二是流体处于流动状态时,作用在流体上的力和流动之间关系的理论,称为流体动力学;三是气体处于高速流动状态时,气体的运动规律的理论,称为气体动力学。工程流体力学的研究范畴是将流体流动作为宏观机械运动进行研究,而不是研究流体的微观分子运动,因而在流体动力学部分主要研究流体的质量守恒、动量守恒和能量守恒及转换等基本规律。

流体力学在工程技术中有着广泛的应用。在能源、化工、环保、机械、建筑(给排水、暖通)等工程技术领域的设计、施工和运行等方面都涉及到流体力学问题。不同工程技术领域的流体力学问题有各自不同的特点,概括起来主要有三种不同流动形式:一是有压管流,如流体在管道中的流动;二是绕流,如流体在流体机械中绕过翼型的流动;三是射流,如流体从孔口或管嘴喷出的流动。流体力学就是要具体地研究流体流动形式中的速度分布、压力分布、能量损失,以及流体同固体之间的相互作用,同时也要研究流体平衡的条件。

流体力学作为一门独立的学科,同其他自然科学一样是人类为了满足自身生活和生产的需要,在认识与改造自然的斗争中,随着实践经验的不断积累,技术与知识水平的不断提高才形成和发展起来的,有着漫长的发展历程。其发展既依赖于科学实验和生产实践,又受到许多社会因素的影响。我国是世界上三大文明古国之一,有着悠久的历史 and 灿烂的文化,由于生产发展的需要,远在两三千年的以前,古代劳动人民就利用孔口出流的原理发明了刻漏、铜壶滴漏(西汉时期的计时工具),同时又发明了水磨、水碾等。在唐代以前,我国就出现了水轮翻车,宋元时代出现的水轮大纺车比英国早四五百年(英国在 1796 年发明)。北宋时期,在运河上修建的真州复闸,与 14 世纪末在荷兰出现的同类船闸相比约早 300 多年。清

朝雍正年间,何梦瑶在《算述》一书中提出了流量为过水断面上平均流速乘以过水断面面积的计算方法。我国在防止水患、兴修水利方面也有着悠久的历史。相传 4000 多年前的禹治水,就表明我国古代进行过大规模的防洪工作。在公元前 256 年至前 210 年间修建的都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程,两千多年来效益卓著。以上都说明了我国劳动人民的聪明智慧,当时对流体流动规律的认识已达到相当高的水平。14 世纪以前,我国的科学技术在世界上是处于领先地位的。但是,近几百年来由于闭关锁国使我国的科学得不到应有的发展,以致在流体力学方面由古代的领先地位而落在后面。

有明确记载的最早的流体力学原理是在公元前 250 年,希腊数学家及力学家阿基米德(Archimedes)发表了一篇《论浮体》的论文,提出了浮体定律,这是流体力学的第一部著作。由于奴隶制、神权和宗教观念的束缚,直到 15 世纪文艺复兴时期,尚未形成系统的理论。16 世纪以后,在欧洲由于封建制度的崩溃,资本主义开始萌芽,生产力有了发展。在城市建设、航海和机械工业发展需要的推动下,逐步形成近代的自然科学,流体力学也随之得到发展。意大利的达·芬奇(Vinci, L. da)是文艺复兴时期出类拔萃的美术家、科学家兼工程师,他倡导用实验方法了解水流性态,并通过实验描绘和讨论了许多水力现象,如自由射流、旋涡形成原理等等。1612 年伽利略(Galilei)提出了潜体的沉浮原理;1643 年托里拆利(Torricelli, E.)给出了孔口泄流的公式;1650 年帕斯卡(Pascal, B.)提出液体中压力传递的定理;1686 年牛顿(Newton, I.)发表了名著《自然哲学的数学原理》,对普通流体的黏性性状作了描述,即现代表达为黏性切应力与速度梯度成正比——牛顿内摩擦定律。为了纪念牛顿,将黏性切应力与速度梯度成正比的流体称为牛顿流体。

18~19 世纪,流体力学得到了较大的发展,成为独立的一门学科。古典流体力学的奠基人是瑞士数学家伯努利(Bernoulli, D.)和他的亲密朋友欧拉(Euler, L.)。1738 年,伯努利推导出了著名的伯努利方程,欧拉于 1755 年建立了理想流体运动微分方程,以后纳维(Navier, C. - L. - M. - H.)和斯托克斯(Stokes, G. G.)建立了黏性流体运动微分方程。拉格朗日(Lagrange)、拉普拉斯(Laplace)和高斯(Gosse)等人将欧拉和伯努利所开创的新兴的流体动力学推向完美的分析高度。但当时由于理论的假设与实际不尽相符或数学上的求解困难,有很多疑难问题不能从理论上给予解决。

19 世纪末以来,现代工业迅猛发展,生产实践要求理论与实际更加密切结合才能解决问题。1883 年,雷诺(Reynolds, O.)用不同直径的圆管进行实验,研究了黏性流体的流动,提出了黏性流体存在层流和紊流两种流态,并给出了流态的判别准则——雷诺数。12 年后,他又引进紊流(或雷诺)应力的概念,并用时均方法建立了不可压缩流体作紊流运动时所应满足的方程组,雷诺的研究为紊流的理论研究奠定了基础。1891 年,兰彻斯特(F.W.)提出速度环量产生升力的概念,这为建立升力理论创造了条件,他也是第一个提出有限翼展机翼理论的人。

进入 20 世纪以后,流体力学的理论与实验研究除了在已经开始的各个领域继续开展以外,在发展航空航天事业方面取得了迅猛的发展。在运动物体的升力方面,库塔(W.M.)和儒可夫斯基(N.E.)分别在 1902 年和 1906 年独立地提出特殊的与一般的库塔—儒可夫斯基定理和假定,奠定了二维升力理论的基础。至于运动物体的阻力问题,至此仍缺乏完善的

理论,人们普遍认为尾涡是物体阻力的主要来源,遂将注意力转向物体尾流的研究。1912年,卡门(T.von)从理论上分析了涡系(即卡门涡街)的稳定性。1904年普朗特(Prandtl, L.)提出了划时代的边界层理论,使黏性流体概念和无黏性流体概念协调起来,使流体力学进入了一个新的历史阶段。

20世纪中叶以后,流体力学的研究内容有了明显的转变,除了一些较难较复杂的问题,如紊流、流动稳定性与过渡、涡流动力学和非定常流等继续研究外,更主要的是转向研究石油、化工、能源、环保等领域的流体力学问题,并与相关的邻近学科相互渗透,形成许多新分支或交叉学科,如计算流体力学、实验流体力学、可压缩气体力学、磁流体力学、非牛顿流体力学、生物流体力学、多相流体力学、物理—化学流体力学、渗流力学和流体机械流体力学等。一般来说,这些新的分支或交叉学科所研究的现象或问题都比较复杂,要想很好地解决它们,实际上是对流体力学研究人员的一次大挑战。现有的流体力学运动方程组不能完全准确地描述这些现象和新问题,试图用现有的方程组和纯计算的方法去解决这些问题是相当困难的,唯一可行的道路是采用纯实验或实验与计算相结合的方法。近年来在一些分支或交叉学科(如多相流等)中采用这种方法,获得了较好的效果,大大推动了实验技术的发展。

13世纪以前,我国在流体力学原理的应用方面做出了巨大贡献,曾领先于世界。新中国建立以后,随着工农业的建设,在这方面的工作得到迅猛发展,建造了众多的各级重点实验室,不仅解决了无数的生产实际问题,而且还培养了一支具有较高水平的理论和实验队伍。完全可以相信,在今后的社会主义现代化建设事业中,通过流体力学工作者的不断努力,我国的流体力学事业必将有更大的发展。

第二节 流体的特征和连续介质假设

一、流体的定义和特征

物质常见的存在状态是固态、液态和气态,处在这三种状态下的物质分别称为固体、液体和气体。通常说能流动的物质为流体,液体和气体易流动,我们把液体和气体称之为流体。但这样说是不严格的,严格地说应该用力学的语言来叙述:在任何微小剪切力的持续作用下能够连续不断变形的物质,称为流体。根据上述定义,流体显然不能保持一定的形状,即具有流动性。但流体在静止时不能承受切向力,这显然与固体不同。固体在静止时也能承受切向力,发生微小变形以抗拒外力,一直达到平衡为止。只要作用力保持不变,固体的变形就不再变化。

流体和固体具有上述不同性质是由于分子间的作用力不同造成的。在相同体积的固体和流体中,流体所含的分子数目比固体少得多,分子间的空隙就大得多,因此流体分子间的作用力小,分子运动强烈,从而决定了流体具有流动性和不能保持一定形状的特性。流体中所包括的液体和气体除具有上述共同特性外,还具有如下的不同特性:液体的分子距和分子的有效直径差不多是相等的,当对液体加压时,只要分子距稍有缩小,分子间的斥力就会增大以抵抗外压力。所以,液体的分子距很难缩小,即液体很不易被压缩,以致一定重量的液体

具有一定的体积,液体的形状取决于容器的形状,并且由于分子间吸引力的作用,液体有力求自身表面积收缩到最小的特性。所以,当容器的容积大于液体的体积时,液体不能充满容器,故在重力的作用下,液体总保持一个自由表面(或称自由液面),通常称为水平面。

气体的分子距比液体的大,在 0°C 、1个标准大气压强(101325Pa)下,气体的平均分子距约为 $3.3 \times 10^{-7}\text{cm}$,其分子平均直径约为 $2.5 \times 10^{-8}\text{cm}$,分子距比分子平均直径约大十倍。因此,只有当分子距缩小很多时,分子间才会出现斥力。可见,气体具有很大的压缩性。此外,因其分子距与分子平均直径相差很大,以致分子间的吸引力微小,分子热运动起决定性作用,所以气体没有一定形状,也没有一定的体积,它总是能均匀充满容纳它的容器而不能形成自由表面。

二、流体连续介质假设

从微观角度看,流体和其他物体一样,都是由大量不连续分布的分子组成,分子间有间隙。但是,流体力学所要研究的并不是个别分子的微观运动,而是研究由大量分子组成的宏观流体在外力作用下的宏观运动。因此,在流体力学中,取流体微团来作为研究流体的基元。所谓流体微团是一块体积为无穷小的微量流体,由于流体微团的尺寸极其微小,故可作为流体质点看待。这样,流体可看成是由无限多连续分布的流体微团组成的连续介质。这种对流体的连续性假设是合理的,因为在流体介质内含有为数众多的分子。例如,在标准状态下, 1mm^3 气体中有 2.7×10^{16} 个分子; 1mm^3 的液体中有 3×10^{19} 个分子。可见分子间的间隙是极其微小的。因此在研究流体宏观运动时,可以忽略分子间的间隙,而认为流体是连续介质。

当把流体看作是连续介质后,表征流体性质的密度、速度、压强和温度等物理量在流体中也应该是连续分布的。这样,可将流体的各物理量看作是空间坐标和时间的连续函数,从而可以引用连续函数的解析方法等数学工具来研究流体的平衡和运动规律。

流体作为连续介质的假设对大部分工程技术问题都是适用的,但对某些特殊问题则不适用。例如,火箭在高空非常稀薄的气体中飞行以及高真空技术中,其分子距与设备尺寸可以比拟,不再是可以忽略不计了。这时不能再把流体看成是连续介质来研究,需要用分子动力论的微观方法来研究。本书只研究连续介质的力学规律。

第三节 流体的主要物理性质

一、流体的密度

1. 流体的密度

流体的密度是流体的重要属性之一,它表征流体在空间某点质量的密集程度。流体的密度定义为:单位体积流体所具有的质量,用符号 ρ 来表示。

对于流体中各点密度相同的均质流体,其密度

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

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg;

V ——流体的体积, m^3 。

对于各点密度不同的非均质流体, 在流体的空间中某点取包含该点的微小体积 ΔV , 该体积内流体的质量为 Δm , 则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

2. 流体的相对密度

流体的相对密度是指某种流体的密度与 4℃ 时水的密度的比值, 用符号 d 来表示。

$$d = \frac{\rho_f}{\rho_w} \quad (1-3)$$

式中 ρ_f ——流体的密度, kg/m^3 ;

ρ_w ——4℃ 时水的密度, kg/m^3 。

表 1-1 列出了一些常用液体在标准大气压强下的物理性质, 表 1-2 列出了一些常用气体在标准大气压强和 20℃ 下的物理性质。

表 1-1 在标准大气压下常用液体的物理性质

液体种类	温度 t (℃)	密度 ρ (kg/m^3)	相对密度 d	动力黏度 $\mu \times 10^4$ ($Pa \cdot s$)
纯水	20	998	1.00	10.1
海水	20	1026	1.03	10.6
20% 盐水	20	1149	1.15	—
乙醇 (酒精)	20	789	0.79	11.6
苯	20	895	0.90	6.5
四氯化碳	20	1588	1.59	9.7
氟利昂-12	20	1335	1.34	—
甘油	20	1258	1.26	14900
汽油	20	678	0.68	2.9
煤油	20	808	0.81	19.2
原油	20	850-958	0.85-0.93	72
润滑油	20	918	0.92	—
氢	-257	72	0.072	0.21
氧	-195	1206	1.21	2.8
水银	20	13555	13.58	15.6

表 1-2 在标准大气压和 20℃ 常用气体性质

气 体	密 度 ρ (kg/m^3)	动力黏度 $\mu \times 10^5$ ($Pa \cdot s$)	气体常数 R [$J/(kg \cdot K)$]	气 体	密 度 ρ (kg/m^3)	动力黏度 $\mu \times 10^5$ ($Pa \cdot s$)	气体常数 R [$J/(kg \cdot K)$]
空 气	1.205	1.80	287	氮	1.16	1.76	297
二氧化碳	1.84	1.48	188	氧	1.33	2.00	260
一氧化碳	1.16	1.82	297	甲 烷	0.668	1.34	520
氢	0.166	1.97	2077	饱和水蒸气	0.747	1.01	462
氢	0.0839	0.90	4120				

二、流体的压缩性和膨胀性

随着压强的增加, 流体体积缩小; 随着温度的增高, 流体体积膨胀, 这是所有流体的共同属性, 即流体的压缩性和膨胀性。

1. 流体的膨胀性

在一定的压强下, 流体的体积随温度的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体积膨胀系数 α_V 来表示, 它表示当压强不变时, 升高一个单位温度所引起流体体积的相对增加量, 即

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-4)$$

式中 α_V ——流体的体积膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$, $1/\text{K}$;

dt ——流体温度的增加量, $^\circ\text{C}$, K ;

V ——原有流体的体积, m^3 ;

dV ——流体体积的增加量, m^3 。

实验指出, 液体的体积膨胀系数很小, 例如在 $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$ 下, 温度在 $1 \sim 10^\circ\text{C}$ 范围内, 水的体积膨胀系数 $\alpha_V = 14 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; 温度在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内, 水的体积膨胀系数 $\alpha_V = 150 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 。在常温下, 温度每升高 1°C , 水的体积相对增量仅为万分之一点五; 温度较高时, 如 $90 \sim 100^\circ\text{C}$, 也只增加万分之七。其他液体的体积膨胀系数也是很小的。

流体的体积膨胀系数 α_V 还取决于压强。对于大多数液体, α_V 随压强的增加稍为减小。水的 α_V 在高于 50°C 时也随压强的增加而减小, 只有在低于 50°C 时随压强的增加而增大。

在一定压强作用下, 水的体积膨胀系数与温度的关系如表 1-3 所示。

表 1-3 水的体积膨胀系数 α_V ($1/^\circ\text{C}$)

压 强 (10^5Pa)	温 度 ($^\circ\text{C}$)				
	1 ~ 10	10 ~ 20	40 ~ 50	60 ~ 70	90 ~ 100
0.98	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
98	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
196	72×10^{-6}	83×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	
490	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
882	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

2. 流体的压缩性

在一定的温度下, 流体的体积随压强升高而缩小的性质称为流体的压缩性。流体压缩性的大小用体积压缩系数 κ 来表示。它表示当温度保持不变时, 单位压强增量引起流体体积的相对缩小量, 即

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

式中 κ ——流体的体积压缩系数, m^2/N ;

dp ——流体压强的增加量, Pa ;

V ——原有流体的体积, m^3 ;

dV ——流体体积的增加量, m^3 。

由于压强增加时, 流体的体积减小, 即 dp 与 dV 的变化方向相反, 故在上式中加个负号, 以使体积压缩系数 κ 恒为正值。

实验指出, 液体的体积压缩系数很小, 例如水, 当压强在 $(1 \sim 490) \times 10^7 Pa$ 、温度在 $0 \sim 20^\circ C$ 的范围内时, 水的体积压缩系数仅约为二万分之一, 即每增加 $10^5 Pa$, 水的体积相对缩小约为二万分之一。表 1-4 列出了 $0^\circ C$ 水在不同压强下的 κ 值。

表 1-4 $0^\circ C$ 水在不同压强下的 κ 值

压强 p ($\times 10^5 Pa$)	4.9	9.8	19.6	39.2	78.4
κ ($\times 10^{-9} m^2/N$)	0.539	0.537	0.531	0.523	0.515

气体的压缩性要比液体的压缩性大得多, 这是由于气体的密度随着温度和压强的改变将发生显著的变化。对于完全气体, 其密度与温度和压强的关系可用热力学中的状态方程表示, 即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-6)$$

式中 p ——气体的绝对压强, Pa ;

ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;

T ——热力学温度, K ;

R ——气体常数, $J/(kg \cdot K)$ 。

常用气体的气体常数见表 1-2。

在工程上, 不同压强和温度下气体的密度可按下列式计算:

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273 + t} \frac{p}{101325} \quad (1-7)$$

式中 ρ_0 为标准状态 ($0^\circ C$ 、 $101325 Pa$) 下某种气体的密度。如空气的 $\rho_0 = 1.293 kg/m^3$; 烟气的 $\rho_0 = 1.34 kg/m^3$ 。 ρ 为在温度 $t^\circ C$ 、压强 $p N/m^2$ 下, 某种气体的密度。

3. 可压缩流体和不可压缩流体

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。 $d\rho/dt = 0$ 的流体称为不可压缩流体, 而密度为常数的流体称为不可压均质流体。

气体的压缩性都很大。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 $1^\circ C$ 体积就比 $0^\circ C$ 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。我们把密度随温度和压强变化的流体称为可压缩流体。

把液体看作是“不可压缩流体”, 气体看作是“可压缩流体”, 都不是绝对的。在实际工程中, 要不要考虑流体的压缩性, 要视具体情况而定。例如, 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, 即要考虑水的压缩

性,把水当作可压缩流体来处理。又如,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,可以近似地看成是常数,也可当作不可压缩流体处理。

三、流体的黏性和牛顿内摩擦定律

1. 流体的黏性

黏性是流体抵抗剪切变形的一种属性。由流体的力学特点可知,静止流体不能承受剪切力,即在任何微小剪切力的持续作用下,流体要发生连续不断地变形。但不同的流体在相同的剪切力作用下其变形速度是不同的,它反映了抵抗剪切变形能力的差别,这种能力就是流体的黏性。

现通过一个实验来进一步说明流体的黏性。将两块平板相隔一定距离水平放置,其间充满某种液体,并使下板固定不动,上板以某一速度 u_0 向右平行移动,如图 1-1 所示。由于流体与平板间有附着力,紧贴上板的一薄层流体将以速度 u_0 跟随上板一起向右运动,而紧贴下板的一薄层流体将和下板一样静止不动。两板之间的各流体薄层在上板的带动下,都作平行于平板的运动,其运动速度由上向下逐层递减,由上板的 u_0 减小到下板的零。在这种情况下,板间流体流动的速度是按直线变化的。显然,由于各流层速度不同,流层间就有相对运动,从而产生切向作用力,称其为内摩擦力。作用在两个流体层接触面上的内摩擦力总是成对出现的,即大小相等而方向相反,分别作用在相对运动的流层上。速度较大的流体层作用在速度较小的流体层上的内摩擦力 F ,其方向与流体流动方向相同,带动下层流体向前运动;而速度较小的流体层作用在速度较大的流体层上的内摩擦力 F' ,其方向与流体流动方向相反,阻碍上层流体运动。通常情况下,流体流动的速度并不按直线变化,而是按曲线变化,如图 1-1 虚线所示。

2. 牛顿内摩擦定律

根据牛顿(Newton)实验研究的结果得知,运动的流体所产生的内摩擦力(切向力) F 的大小与垂直于流动方向的速度梯度 du/dy 成正比,与接触面的面积 A 成正比,并与流体的种类有关,而与接触面上压强 p 无关。内摩擦力的数学表达式可写为

$$F \propto A \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

写成等式为

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

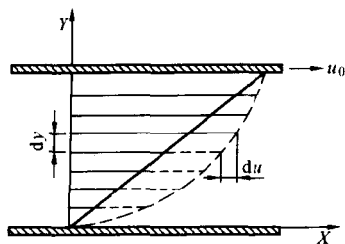


图 1-1 流体的黏性实验

式中 F ——流体层接触面上的内摩擦力, N;
 A ——流体层间的接触面积, m^2 ;
 du/dy ——垂直于流动方向上的速度梯度, $1/s$;
 μ ——动力黏度, $Pa \cdot s$ 。

流层间单位面积上的内摩擦力称为切向应力, 则

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