

普通高等教育“十五”规划教材



ENGINEERING FLUID MECHANICS

工程流体力学

杜广生 主 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

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



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书是中国电力教育协会高等教育“十五”规划教材,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。其主要内容包括: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。

本书主要适用对象为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,也兼顾了其他相近专业的需要。

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, 2004

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2581-8

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(2004)第 089508 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

*

2005 年 1 月第一版 2005 年 1 月北京第一次印刷
278 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 386 千字
印数 0001—3000 册 定价 26.00 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，反映相关专业科技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本教材供选择使用。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 010-63416237）

中国电力教育协会

前言

本书是中国电力教育协会普通高等教育“十五”规划教材。书中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。本教材按照流体力学课程自身的规律编写，适当扩大了适用专业面。主要以满足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，兼顾其他相近专业的需要。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。

为加强对学生在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。重视理论与工程实际的结合，在例题和习题的选取上，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，并配有适当插图，文图密切结合。

本书第一至第三章、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；刘丽萍编写了第四章至第七章的习题和第七章的第四节、第十二节和第十三节。杜广生担任全书主编。赵振兴负责审稿，并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。

由于水平所限，书稿中难免有谬误之处，恳请各位读者批评指正。

编 者

2004年5月于山东大学

目 录

序

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	5
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	20
习题	21
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	25
第三节 重力场中流体的平衡	27
第四节 液体的相对平衡	36
第五节 静止液体作用在固体壁面上的总压力	41
第六节 液体作用在浮体和潜体上的总压力	48
习题	50
第三章 流体动力学基础	57
第一节 流体运动的描述方法	57
第二节 流动的类型	60
第三节 流体动力学的基本概念	62
第四节 系统 控制体 输运公式	66
第五节 连续性方程	69
第六节 动量方程和动量矩方程	71
第七节 能量方程	78
第八节 伯努利方程及其应用	79
第九节 流线法线方向速度和压强的变化	83
习题	85
第四章 相似原理和量纲分析	91
第一节 流动的力学相似	91

第二节	动力相似准则	93
第三节	流动相似条件	97
第四节	近似模型试验	98
第五节	量纲分析法	101
习题		106
第五章	黏性流体的一维流动	109
第一节	黏性流体总流的伯努利方程	109
第二节	黏性流体管内流动的两种损失	110
第三节	黏性流体的两种流动状态	111
第四节	管道进口段中黏性流体的流动	114
第五节	圆管中的层流流动	115
第六节	黏性流体的紊流流动	118
第七节	沿程损失的实验研究	123
第八节	局部损失	128
第九节	管道的水力计算	132
第十节	孔口管嘴出流	139
第十一节	水击现象	145
第十二节	空化和空蚀简介	148
习题		149
第六章	气体的一维定常流动	155
第一节	气体一维流动的基本概念	155
第二节	微小扰动在空气中的传播	158
第三节	气体一维定常流动的基本方程	160
第四节	气流的三种状态和速度系数	160
第五节	气流参数和通道截面之间的关系	163
第六节	喷管流动的计算和分析	165
第七节	实际气体在管道中的定常流动	169
习题		172
第七章	理想不可压缩流体的有旋流动和无旋流动	174
第一节	流体流动的连续性方程	174
第二节	流体微团的运动分析	176
第三节	有旋流动和无旋流动	180
第四节	理想流体运动微分方程式 欧拉积分和伯努利积分	181
第五节	理想流体的旋涡运动	184
第六节	二维旋涡的速度和压强分布	189
第七节	速度势和流函数	190
第八节	几种简单的平面势流	194
第九节	简单平面势流的叠加	197
第十节	流体绕过圆柱体的流动	200

第十一节	均匀等速流绕圆柱体有环流的流动	202
第十二节	叶栅的库塔—儒可夫斯基公式	205
第十三节	库塔条件	207
习题		207
第八章	黏性流体绕物体的流动	210
第一节	不可压缩黏性流体的运动微分方程	211
第二节	蠕流	214
第三节	边界层的概念	219
第四节	平面层流边界层的微分方程	221
第五节	边界层的动量积分关系式	223
第六节	边界层的位移厚度和动量损失厚度	225
第七节	平板边界层流动的近似计算	226
第八节	边界层的分离与卡门涡街	231
第九节	物体的阻力与减阻	234
第十节	自由淹没射流	236
习题		240
第九章	膨胀波和激波	243
第一节	膨胀波	243
第二节	激波	245
第三节	正激波前后的参数关系	248
第四节	斜激波	251
第五节	激波的反射与相交	253
第六节	拉瓦尔喷管内的正激波	255
习题		256
参考文献		258

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。

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。

数值计算方法一般按照理论分析方法确定数学模型,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,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。

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；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。

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。而流体则是与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，流体只能够停止变形，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 为流体的密度,表示单位体积内流体具有的质量,单位为 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 ($^{\circ}\text{C}$)	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 ($^{\circ}\text{C}$)	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	0.0000899
二氧化碳	0	1.976	—

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

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

式中 ρ_f ——流体的密度, kg/m^3 ;

ρ_w —— 4°C 时水的密度, 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,表达式为

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

其单位为 m^3/kg 。

混合气体的密度用下式计算:

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

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 $\rho_{\text{CO}_2} = 1.976 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{SO}_2} = 2.927 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{O}_2} = 1.429 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{N}_2} = 1.25 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.804 \text{ kg/m}^3$ 。将已知数据代入式 (1-4), 得烟气在标准状态下的密度

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

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