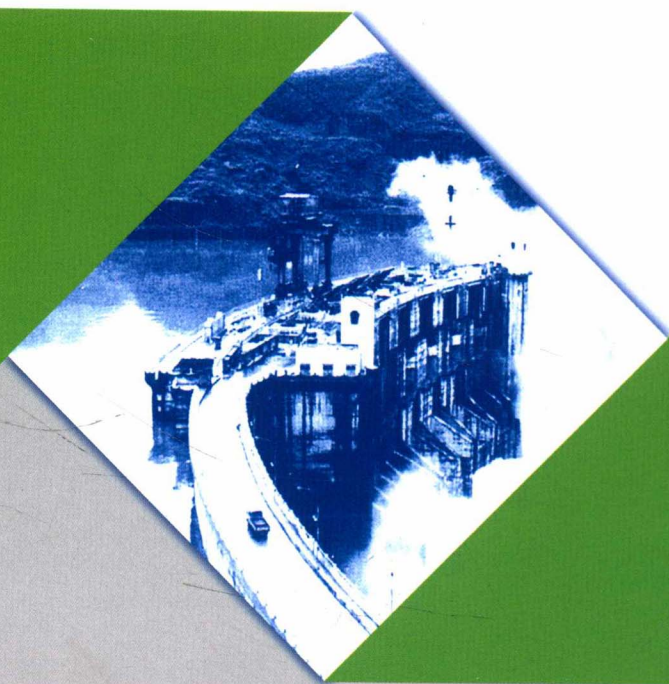


高等学校电气工程类系列教材

工程流体力学

(第二版)

齐鄂荣 曾玉红 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

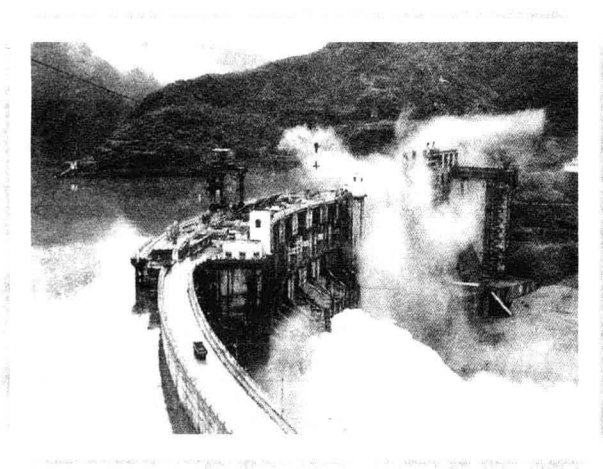
武汉大学出版社

高等学校电气工程类系列教材

工程流体力学

(第二版)

齐鄂荣 曾玉红 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/齐鄂荣,曾玉红编著. —2版. —武汉:武汉大学出版社, 2012. 12

高等学校电气工程类系列教材

ISBN 978-7-307-10151-7

I. 工… II. ①齐… ②曾… 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(2012)第236043号

责任编辑:李汉保 责任校对:黄添生 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北民政印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:29.25 字数:703千字

版次:2005年8月第1版 2012年12月第2版

2012年12月第2版第1次印刷

ISBN 978-7-307-10151-7/TB·38 定价:44.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校电气工程类系列教材

编 委 会

- | | | |
|-------|-----------|--------------------------|
| 主 任 | 刘涤尘 | 武汉大学电气工程学院,教授、博士生导师 |
| 副 主 任 | 张步涵 | 华中科技大学电气与电子工程学院,教授、系副主任 |
| | 曾祥君 | 长沙理工大学电气与信息工程学院,教授、院长 |
| | 李欣然 | 湖南大学电气与信息工程学院,教授、系主任 |
| | 陈少华 | 广东工业大学自动化学院,教授、系主任 |
| | 廖家平 | 湖北工业大学电气与电子工程学院,教授、院长 |
| | 高 亮 | 上海电力学院电力与自动化工程学院,教授、副教授 |
| | 王渝红 | 四川大学电气信息学院,高级工程师 |
| | 查晓明 | 武汉大学电气工程学院,教授、副院长 |
| | 常 勇 | 武汉大学电气工程学院,教授级高工、副院长 |
| 编 委 | (按姓氏笔画为序) | |
| | 卫志农 | 河海大学电气工程学院,教授 |
| | 江玉蓉 | 上海电力学院电力与自动化工程学院,讲师 |
| | 孙春顺 | 长沙理工大学电气与信息工程学院,副教授 |
| | 何瑞文 | 广东工业大学自动化学院,副教授、重点实验室副主任 |
| | 李裕能 | 武汉大学电气工程学院,教授 |
| | 李如琦 | 广西大学电气工程学院,副教授 |
| | 李朝生 | 南京工程大学电气工程学院,副教授 |
| | 李咸善 | 三峡大学电气工程学院,副教授 |
| 执行编委 | 杨丽徙 | 郑州大学电气工程学院,教授 |
| | 李汉保 | 武汉大学出版社,副编审 |
| | 谢文涛 | 武汉大学出版社,编辑 |

序

电力工业是国民经济生产的基础能源工业，对于现代化建设具有举足轻重的作用，涉及工业、农业、国防建设、科学技术以及国民经济建设的各个领域。我国电力工业正在蓬勃发展，发电装机容量迅速增长，电网规模不断扩大、网架日趋紧密，2020年，我国发电装机容量将稳居世界第一。未来20年，中国将是全球电力工业和电工制造业的最大市场。目前我国电力工业的规模已居世界第二位，大部分地区电力需求能得到满足。然而，我国电气化水平和发达国家还有相当一段差距，尤其在人均用电量方面，仅为世界平均水平的1/3。因此，培养适应新时期电气工程类专业的高级人才，促进电力工业建设，对于21世纪我国实现跨越式发展具有重要意义。

电气工程专业是一门历史悠久的专业。经过一百多年的不断发展，电气工程专业已逐步发展成为一个新兴的电气工程学科。至今，电气工程学科已形成成为学科覆盖面广、学科理论体系完善、工程实践成功、应用领域宽广的一门独立学科。电气工程给人类社会的许多方面带来了巨大而深刻的影响。近一百年来，电气工程专业在我国高等教育中一直占据着十分重要的地位，为国家培养了大批的规划、设计、建设、生产及管理科技人才，他们为我国电气工程的建设及其他领域的工作作出了巨大的贡献。

为了提高高等学校电气工程类课程建设、教材建设水平，由武汉大学电气工程学院和武汉大学出版社联合倡议，组建了高等学校电气工程类系列教材编委会，并联合若干所高等学校编写电气工程类教材，为我国高等学校从事电气工程类教学的教师，尤其是长期在教学和科研一线积累了丰富的教学经验的教师搭建了一个研讨交流的平台，以此联合编写教材，交流教学经验，研讨教学方法。同时，通过相互讨论学习，确保教材的编写质量，突出课程的基本特色，有利于教材的不断更新，极力打造精品教材。

本着上述原则和方法，我们组织编撰出版了高等学校电气工程类系列教材。根据国家教育部电气工程类本科人才培养方案以及编委会成员单位（高校）电气工程类本科人才培养方案明确了教材种类（课程内容），并根据专业（课程）特色进行分工和编排，旨在提高高等学校电气工程类课程的教学质量和教材建设水平。

参加高等学校电气工程类系列教材编委会的高校有：

武汉大学，华中科技大学，四川大学，湖南大学，河海大学，南京工程大学，广东工业大学，郑州大学，三峡大学，湖北工业大学，上海电力学院，广西大学，长沙理工大学等院校。

武汉大学出版社是被中共中央宣传部与国家新闻出版署联合授予的全国优秀出版社之一，在国内享有较高的知名度和社会影响力，感谢其在出版过程中给予了许多有益的建议。

议。我们愿与各位朋友真诚合作，力争将该系列教材打造成为国内同类教材中的精品教材，为高等教育的发展作出更大的贡献！

高等学校电气工程类系列教材编委会

2011年4月

前 言

电力工业是国民经济生产的能源基础，是一切经济建设和国民生活的排头兵和先行官。电力的生产一般来自于热能（火力发电）、水能（水力发电）、核能，以及风能、太阳能，等等。而上述能源的生产活动是以水为代表的液体和以空气为代表的气体的运动和相互作用紧密相关的。液体与气体统称为流体。认识与了解流体的运动规律，并按流体的运动规律组织和实施上述能源生产，可以将各类非电力能源顺利地转化为电能，并且可以达到效率最大化。

本书是为动力与能源类专业大学本科专业基础课《工程流体力学》所编写的教材。由于动力与能源类专业具有涵盖面广的特点，如水电力行业需要了解水击、堰闸和明渠流动等知识点；热能、核能行业需要了解气体有关的可压缩流体流动的知识点。本教材不仅应涵盖工程流体力学课程所必需的基本内容，还应包括热能、核能行业的气动特点和水电动力行业的水利特点，也应适合其他的相近专业。这是本教材编写的背景和指导思想。

本书也是为准备学习流体力学基础知识的工科专业的本科生编写的。纵观大学的工科专业，有许多专业是直接或间接与流体及流体流动有关系的，也就是与流体力学领域有关系的。另外，从本教材所涵盖的基础内容来看，涉及了较宽的知识面，完全符合当前宽口径、厚基础的办学思想。从编写内容来看，可以作为其他相近专业工程流体力学或流体力学课程的参考书。这也是本教材的特色之一。

多年以来，本书作者长期从事工程流体力学的教学、科研工作，在撰写本书时，作者注意融汇平时的教学经验和体会，力求对一些基本概念和难点进行深入浅出的叙述，方便读者的自学和初学者的入门。在本书的选材上，作者注意理论基础与相关专业和工程实践的结合，无论是求学的学生或是需充电的在职技术人员，都可从中获得收益。为适应当前科技的发展，本书还在管网、水击及明渠水面曲线等方面的计算，引入了一些数值计算的方法和电算程序，可以对读者解决一些复杂工程问题起到抛砖引玉的作用。本书各章之后配置了适量的复习思考题和习题，可以帮助读者复习和思考，能加深读者对基础理论的理解。全书后给出了习题答案，可以帮助读者自我检查，方便读者自学。

工程流体力学是一门专业基础课或技术基础课，为保证有足够的篇幅叙述基本原理和基本概念，有些偏重于专业的内容，如气体动力学中的等截面摩擦管流、斜激波等；水击中的调压井计算；明渠定常流中的河道水面曲线的计算；堰流中有关堰型的计算；有势流动中的叶栅，等等，本教材作了删减，都留到相关专业课中讲授。这样做可以适应当前课内学时减少的需要，也使全书结构更紧凑，表述更流畅。

本书系统地论述了：绪论，流体静力学，流体运动的基本概念和基本方程，流体运动的流态与水头损失，有压管道中的定常流与孔口、管嘴出流，有压管道中的非定常流，气体动力学基础，明渠中的定常流、堰流，理想流体的旋涡运动，理想不可压缩流体的无旋

运动，实际流体绕过物体的流动，量纲分析与相似原理。

由于本学科理论性较强，涉及较多的高等数学、物理学、力学等学科的知识，建议读者在复习各基础学科相关内容的基础上，注意基础理论和基本技能的学习，积极参与各种实验和实践环节的活动，踏踏实实地多做各种练习。在学习的过程中，注意体会流体力学观察现象和分析问题的思路，注意培养自己解决实际问题的能力。另外由于本学科还具有工程应用的特点，建议读者要联系实际的学习，逐步培养良好的工程观念。包括：计算和解题时学会配合清晰的图来表达；所需的已知条件和未知条件要交代清楚，所用参数的来源及取值要交代清楚，所用的方程和公式要交代清楚；解题的过程简练清晰，步骤一目了然；最后得到的解要有分析，分析是否合理，验算是否妥当。

参加本书编写工作的有齐鄂荣（第1章~第8章、第11章），曾玉红（第9章、第10章、第12章），全书由齐鄂荣主编。硕士生邱兰、贺翠华绘制了本书的插图，并对全书初稿进行试读，提出了许多很好的建议。在此，作者对他们表示感谢。同时，感谢各位关心本书编写、出版的老师和同事们。

由于作者水平所限，本书中难免出现缺点和错误，在此恳请读者批评斧正。

作者

2012年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 工程流体力学的任务及在实际工程中的应用	1
§ 1.2 流体的定义和特征以及连续介质的概念	2
§ 1.3 流体的主要物理性质	3
§ 1.4 作用在流体上的力	12
§ 1.5 工程流体力学的研究方法	13
复习思考题 1	14
习题 1	15
第 2 章 流体静力学	17
§ 2.1 流体静压强及其特性	17
§ 2.2 流体平衡的微分方程及等压面	20
§ 2.3 重力作用下的液体平衡	23
§ 2.4 压强的计量与压强的测量	28
§ 2.5 若干种质量力同时作用下的液体平衡	33
§ 2.6 静止液体对平面的作用力	36
§ 2.7 静止液体对曲面的作用力	42
复习思考题 2	46
习题 2	47
第 3 章 流体动力学基础	54
§ 3.1 研究流体运动的两种基本方法	54
§ 3.2 流体运动的几个基本概念	57
§ 3.3 流体运动的连续性方程	65
§ 3.4 理想流体的运动方程	68
§ 3.5 实际流体总流的能量方程	74
§ 3.6 定常总流的动量方程	84
§ 3.7 空化和空蚀	89
复习思考题 3	90
习题 3	91

第4章 流体运动的流态与水头损失	98
§ 4.1 流动阻力与水头损失	98
§ 4.2 实际流体的两种流动型态	100
§ 4.3 流体的层流流动	104
§ 4.4 流体的紊流流动	107
§ 4.5 紊流的结构与沿程水头损失系数的实验研究	113
§ 4.6 计算沿程水头损失的谢才公式	124
§ 4.7 局部水头损失的计算	127
复习思考题 4	132
习题 4	132
第5章 有压管道中的定常流与孔口、管嘴出流	136
§ 5.1 简单管道的水力计算	136
§ 5.2 复杂管道的水力计算	152
§ 5.3 管网的计算原理与方法	155
§ 5.4 孔口、管嘴出流	164
复习思考题 5	172
习题 5	173
第6章 有压管道中的非定常流	181
§ 6.1 水击现象	181
§ 6.2 水击基本方程	190
§ 6.3 水击简化方程的解析法	195
§ 6.4 水击方程的特征线法	202
§ 6.5 减小水击压强的措施与调压井	208
§ 6.6 计算实例	210
复习思考题 6	215
习题 6	216
第7章 气体动力学基础	217
§ 7.1 气体动力学基本方程组	217
§ 7.2 声速与马赫 (Mach) 数	219
§ 7.3 微弱扰动在可压缩流体中的传播	222
§ 7.4 气体的一维等熵定常流动	225
§ 7.5 正激波	233
§ 7.6 截面面积变化的管流	243
复习思考题 7	259
习题 7	259

第 8 章 明渠中的定常流、堰流	262
§ 8.1 明渠的几何特性	262
§ 8.2 明渠均匀流	265
§ 8.3 缓流、急流、临界流	271
§ 8.4 水跃	281
§ 8.5 明渠非均匀渐变流	285
§ 8.6 堰流	298
复习思考题 8	308
习题 8	308
第 9 章 理想流体的旋涡运动	312
§ 9.1 流体微团运动的分析	312
§ 9.2 有旋流动与无旋流动	319
§ 9.3 有涡流动中的几个基本概念	321
§ 9.4 速度环量、斯托克斯定理	322
§ 9.5 汤姆逊定理、亥姆霍兹旋涡定理	328
§ 9.6 旋涡的诱导速度	333
§ 9.7 旋涡的形成、卡门涡街	341
复习思考题 9	347
习题 9	348
第 10 章 理想不可压缩流体的无旋运动	351
§ 10.1 有势流动与速度势函数	351
§ 10.2 基本方程及其定解条件	353
§ 10.3 平面流动的流函数	356
§ 10.4 平面势流运动与流网	359
§ 10.5 平面势流运动的叠加	364
§ 10.6 绕圆柱体无环量平面流动	374
§ 10.7 绕圆柱体有环量平面流动、库塔—儒可夫斯基公式	378
§ 10.8 平面叶栅绕流简述	381
复习思考题 10	384
习题 10	384
第 11 章 实际流体的流动与动边界层	387
§ 11.1 不可压缩粘性流体的运动方程	387
§ 11.2 不可压缩粘性流体的层流流动	394
§ 11.3 粘性流体绕圆球的小雷诺数流动	398
§ 11.4 边界层的基本概念及边界层厚度	404
§ 11.5 层流边界层方程	407

§ 11.6 层流边界层方程的精确解	411
§ 11.7 边界层的动量积分关系式	413
§ 11.8 平板边界层的近似计算	416
§ 11.9 边界层的分离现象、绕流阻力	423
复习思考题 11	425
习题 11	425
第 12 章 量纲分析和相似原理	428
§ 12.1 量纲分析的意义与量纲和谐原理	428
§ 12.2 量纲分析方法	431
§ 12.3 流动的力学相似	435
§ 12.4 模型相似准则	437
§ 12.5 相似原理的应用	442
复习思考题 12	444
习题 12	444
习题参考答案	446
参考文献	453

第1章 绪论

§ 1.1 工程流体力学的任务及在实际工程中的应用

工程流体力学是研究流体机械运动及其在实际工程中应用的一门技术基础学科。该学科是力学的一个分支。其研究对象是包括液体和气体在内的流体。工程流体力学的任务是使用实验和理论分析的方法研究流体处于平衡状态时的规律和流体在作机械运动时的规律,并将这些规律用于工程实际。

工程流体力学所研究的基本规律主要在两方面:其一,流体处于平衡状态时,研究作用于流体上各种力之间的关系,以及流体平衡时的条件等;其二,流体处于运动状态时,研究作用于流体上的力与运动要素之间的关系,以及流体的运动特性和能量转换等。由于工程流体力学是将流体的运动作为宏观机械运动进行研究,而不是作为微观分子运动来研究,因而工程流体力学主要运用物理学和理论力学中的质量守恒、动量守恒和能量守恒等基本规律来研究流体流动,以及从能量的转换、热量和异质的扩散等方面探讨流体流动的内部结构和形态。另外,工程流体力学除了讨论液体的流动外,还以一定的篇幅讨论气体的流动。而气体在流速较大的状态下,具有可压缩性,其流动规律不同于液体,这时除了压强外,气体的密度、温度等运动要素都随流动而不断变化。因而还需要增加物理学和热力学中关于热能和机械能转化等的基本规律来研究气体的流动。因此,物理学、理论力学和热力学等都是学习工程流体力学的必要基础课。作为描述和分析流体流动的主要手段和工具,高等数学也是一门重要的基础课。

工程流体力学作为一门技术性学科,在工程实际中有着广泛的应用。如水利工程中的农田水利、水力发电、水工建筑及施工、机电排灌等方面都与水的运动有关,都需要应用工程流体力学解决与水的运动规律有关的生产技术问题;如电力工业中,无论是水电站、热电站,还是核电站和地热电站,其生产运行的工作介质都是水、气和油等流体,所有的动力设备的设计和运行都必须符合流体流动规律;航空航天工业中,飞机、火箭和导弹等各种飞行器的运行环境都在大气中,这些飞行器的设计和运行都必须符合空气动力学的基本原理;机械工业中,大量遇到的润滑、冷却、液压传动、气体传动以及液压和气体控制等问题都需应用流体力学的原理加以解决;土木建筑工程中的给水排水、采暖通风等行业,各种设施和设备都与水、气体等流体流动有关,在设计和施工中需充分利用流体力学的基本原理;化学工业中大部分化学工艺流程都伴随有化合物的化学反应、传质和传热的流动问题;石油工业中的油、气和水的渗流、自喷、抽吸和输送问题;以及海洋中的波浪、环流、潮汐和大气中的气旋、环流、季风等都是流体力学的问题,都需根据流体力学的基本原理进行研究和解决。总的来说,工程流体力学是许多行业和部门必须应用和研究的一门重要学科,可以说,只要有流体

的地方,就有流体力学的用武之地。

本教材不可能具体讲述在上述行业中流体在各种具体的设施和设备中的流动规律,作为一本基础性和入门性教材,只能讲述基本的和共同性的流体流动规律。通过本课程的学习,力争使学生掌握工程流体力学的基本概念、基本原理、基本计算方法和基本实验技能,为各类后续课程的学习打下坚实的基础,也为今后从事各种以流体为工作介质、工作对象的生产 and 研究工作奠定必要的理论基础。

§ 1.2 流体的定义和特征以及连续介质的概念

1.2.1 流体的定义和特征

自然界物质的存在通常为三种状态:固体、液体和气体。这三种物质分子之间的结构是不相同的。反映在宏观上,固体能保持其固定的形状和体积;液体有固定的体积,无固定的形状;气体则无固定的形状和体积。由于液体和气体具有无固定形状、能流动的共同特点,一般称为流体。流体与固体的主要区别在于变形方面。在外力的作用下,固体虽然会发生微小变形,但只要不超出弹性限度,在去掉外力后,固体的变形可以消失。而流体在静止状态时,只能承受压力,不能承受切力。哪怕所承受的切力再微小,只要时间足够长,原先处于静止的流体将发生变形并流动。流体一般也不能承受拉力。这种特性就是流体的易流动性。从严格意义上说,只要具有易流动性特性的物质可以定义为流体。因此,除了液体和气体为流体外,等离子体、熔化的金属也属于流体。

流体和固体所具有上述不同的特性,是因为其内部的分子结构和分子之间的作用力不同而造成的。一般来说流体的分子间距比固体的分子之间距大得多,流体分子之间的作用力相对固体要小得多,流体的分子运动比固体较为剧烈,因此流体就具有易流动性,也不能保持其一定的形状。

流体中液体和气体的主要区别在于其压缩性。由于液体的分子间距远小于气体的分子间距,当液体受压时,只要分子间距稍有变小,则分子之间的排斥力就会增大以抵抗所施加的压力,使得液体的分子间距再很难变小,也就是液体很不易被压缩,或液体的压缩性极小。这也是液体具有一定的体积的原因,而且也使得液体具有自由表面。而气体由于分子间距很大,分子之间的吸引力微小,分子之间的热运动起主要作用,就使得气体没有一定的形状,也没有一定的体积,总能均匀充满容纳气体的容器,没有自由表面,具有很大的压缩性。

1.2.2 连续介质的概念

从分子的微观结构来看,流体是由分子所组成的。例如在标准状态下,气体的平均分子间距约为 $3.3 \times 10^{-7} \text{ cm}$,平均分子直径约为 $2.5 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 。在 1 mm^3 的体积内,气体的分子数为 2.7×10^{16} 个。水的平均分子间距约为 $3.1 \times 10^{-8} \text{ cm}$,平均分子直径约为 $2.5 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 。在 1 cm^3 的体积内,水的分子数为 3.34×10^{22} 个。

从上述分子结构来看,流体是由大量作随机运动的分子所组成的,这些离散分子之间是存在着空隙的,分子之间相互碰撞,交换着动量和能量。从微观角度来看,流体内部的质量分布存在着不连续和不均匀分布的情况,反映流体状况的物理量也会因为分子的随机运

动在空间和时间上呈现不连续的情况。然而,对日常所见的水等流体的宏观流动,用仪器和肉眼观察所见流体的流动是均匀的和连续的,反映流体运动特征的物理量是连续的,并且这些所观察的物理量是确定的和确实存在的。也就是说,流体所反映的微观结构和运动在时间和空间上都充满着不均匀性、离散性和随机性,而宏观结构和运动又明显呈现出均匀性、连续性和确定性。这两种如此不同的特性,而又和谐地统一在流体这个物质中,形成了流体运动的两个重要方面。

工程流体力学是一门研究流体宏观运动特性和规律的学科。从宏观角度来看,对于所讨论的一些实际工程问题,如各种设备、管道等的特征尺寸,往往远大于流体的分子间距和分子自由程;这些实际工程的时间尺度,远大于分子运动的时间尺度;反映这些宏观运动状态的物理量实际是大量分子的运动所贡献的,是大量分子的统计平均值。因此,瑞士学者欧拉(Euler)在1753年提出了以连续介质的概念为基础的研究方法,该方法在流体力学的发展上起了巨大作用。连续介质的概念认为流体是由流体质点连续地、没有空隙地充满了流体所在的整个空间的连续介质。在此,作为被研究的流体中最基本要素的流体质点,是指微观上充分大,宏观上充分小的分子团。也就是说,对于质点这个在宏观上非常小的体积内,微观中含有大量的分子,这些分子的运动具有统计平均的特性,使得这个质点所表现的物理量在宏观上是确定的。例如边长 10^{-3}cm 的立方体,容积为 10^{-9}cm^3 ,在宏观上是非常小的一个点,而在这个体积内,在标准状态下,却包含有 2.69×10^{10} 个气体分子。在 10^{-6} 秒这个对宏观来说非常短的时间尺度内,在 10^{-9}cm^3 体积内的气体分子互相碰撞的次数将达 10^{14} 次,这个时间尺度对微观来说是足够长的。可见用连续介质的概念作为工程流体力学的基本假设是合理的。

这样一来,连续介质的观点认为流体质点是连续而不间断的紧密排列的,那么表征流体特性的各物理量的变化,在时间和空间上是连续变化的。也就是说,这些物理量是空间坐标和时间的单值连续函数。因此,可以利用以连续函数为基础的高等数学来解决工程流体力学中的问题。

需要指出的是,流体连续介质的概念对大部分工程实际问题都是正确的,但对某些问题却是不适用的。如果所研究的问题的特征尺度接近或小于分子的自由程,连续介质的概念将不再适用。如在高空飞行的火箭、导弹,由于空气稀薄,分子的间距很大,可以与物体的特征尺度相比拟,虽然能找到可以获得稳定平均值的分子团,显然这个分子团是不能当做质点的。又如激波内的气体运动,激波的尺寸与分子的自由程同阶,激波内的流体只能看做分子而不能当做连续介质来处理。

§ 1.3 流体的主要物理性质

流体的运动形态和运动规律,除了与边界等外部影响因素有关外,还取决于流体本身的物理性质和特征。在全面系统地研究流体的平衡和运动之前,应首先讨论流体的一些主要物理性质。

1.3.1 流体的质量和重量

质量是物质的一个基本属性,质量与物体的惯性和重量紧密相连。质量是物体惯性大

小的量度,质量越大,惯性则越大。根据理论力学中的达朗贝尔(D'Alembert)原理,惯性力的表达式为

$$F = -ma \quad (1-1)$$

式中: F —— 惯性力; m —— 物体的质量; a —— 加速度。负号表示惯性力的方向与物体加速度的方向相反。

流体与其他物质一样,具有质量。对于流体所具有的质量,可以用密度 ρ 来表征。密度 ρ 的定义是单位体积的流体所具有的质量。

对于均质流体,即任意点处的密度均相同的流体,其密度表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中: m —— 流体的质量; V —— 流体的体积。

对于非均质流体,即各点处的密度不相同的流体,其密度表达式为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-3)$$

在国际单位制(SI)中,质量的单位是 kg,体积的单位是 m^3 ,密度的单位是 kg/m^3 。

地球上的物体,无论是处于运动状态的还是处于静止状态的,都要受到地心引力的作用。物体的重量就是地心引力的结果,因此也称为重力,用 G 表示。设流体的质量为 m ,重力加速度为 g ,则重量 G 为

$$G = mg \quad (1-4)$$

流体所具有的重量,可以用重度 γ 来表征。重度 γ 的定义是单位体积的流体所具有的重量。重度也称容重、重率。重度与重量、体积的关系式为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-5)$$

比较式(1-2)与式(1-5),重度与密度有下列关系

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-6)$$

在国际单位制(SI)中,重量的单位是 N,重力加速度的单位是 m/s^2 ,重度的单位是 N/m^3 。

流体的质量与流体在地球上所处的位置无关,而流体的重力则与流体在地球上所处的位置有关。从式(1-4)可见,这是因为流体的重力与重力加速度成正比,而其中的重力加速度是随地球的纬度和海拔高度而变化的。在计算时,可以取北纬 45° 海平面上重力加速度值 $g = 9.80665 m/s^2$,作为近似,可以取 $g = 9.81 m/s^2$ 或 $g = 9.8 m/s^2$ 。

作为流体,无论是气体还是液体,其密度都随压强和温度而变化。但对于液体,这种变化一般极其微小,因此液体的密度常常可以视为常数。如水的密度,由表 1-3 可见,密度随温度的变化是非常小的。在计算时,一般取水在一个大气压下,温度为 $4^\circ C$ 时的最大密度值,即 $\rho = 1000 kg/m^3$ 。

表 1-1 给出了一些常用气体在标准大气压和 $20^\circ C$ 下的物理性质,表 1-2 给出了一些常用液体在标准大气压下的物理性质,表 1-3 给出了水在不同温度下的物理性质。

表 1-1 在标准大气压与 20℃下常用气体的物理性质

气 体	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	动力粘度 $\mu \times 10^5 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	气体常数 R $/ [J / (\text{kg} \cdot \text{K})]$
空 气	1.205	1.80	287
二氧化碳气	1.84	1.48	188
一氧化碳气	1.16	1.82	297
氮 气	0.166	1.97	2 077
氢 气	0.0839	0.90	4 120
氮 气	1.16	1.76	297
氧 气	1.33	2.00	260
甲 烷	0.668	1.34	520
饱和蒸汽	0.747	1.01	462

表 1-2 在标准大气压下常用液体的物理性质

液体种类	温度 $t / (^\circ\text{C})$	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	动力粘度 $\mu \times 10^4 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$
纯 水	20	998	10.1
海 水	20	1 026	10.6
20% 盐水	20	1 149	
乙醇(酒精)	20	789	11.6
苯	20	895	6.5
四氯化碳	20	1 588	9.7
氟利昂-12	20	1 335	
甘 油	20	1 258	14 900
汽 油	20	678	2.9
煤 油	20	808	19.2
原 油	20	850 ~ 928	72
润滑油	20	918	
氢(液态)	-257	72	0.21
氧(液态)	-195	1 206	2.8
水 银	20	13 555	15.6

表 1-3 不同温度下水的物理性质

水温 $t / (^\circ\text{C})$	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	重度 $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	动力粘度 $\mu / (10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	运动粘度 $\nu / (10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	体积弹性模量 $K / (10^9 \text{Pa})$	表面张力系数 $\sigma / (\text{N}/\text{m})$
0	999.9	9.805	1.781	1.785	2.02	0.075 6
5	1000.0	9.807	1.518	1.519	2.06	0.074 9
10	999.7	9.804	1.307	1.306	2.10	0.074 2
15	999.1	9.798	1.139	1.139	2.15	0.073 5
20	998.2	9.789	1.002	1.003	2.18	0.072 8
25	997.0	9.777	0.890	0.893	2.22	0.072 0
30	995.7	9.764	0.798	0.800	2.25	0.071 2
40	992.2	9.730	0.653	0.658	2.28	0.069 6
50	988.0	9.689	0.547	0.553	2.29	0.067 9
60	983.2	9.642	0.466	0.474	2.28	0.066 2
70	977.8	9.589	0.404	0.413	2.25	0.064 4
80	971.8	9.530	0.354	0.364	2.20	0.062 6
90	965.3	9.466	0.315	0.326	2.14	0.060 8
100	958.4	9.399	0.282	0.294	2.07	0.058 7