

普通高等教育“十三五”规划教材

工程流体力学 (第二版)

ENGINEERING FLUID MECHANICS

(SECOND EDITION)

李伟锋 刘海峰 龚欣 编著

普通高等教育“十三五”规划教材

工程流体力学

(第二版)

李伟锋 刘海峰 龚 欣 编著



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/李伟锋 刘海峰 龚欣编著. —2 版.
—上海:华东理工大学出版社,2016.2

ISBN 978-7-5628-4525-6

I. ①工… II. ①李… ②刘… ③龚… III. ①工程力学-流体力学-高等学校-教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 025283 号

项目统筹 / 焦婧茹

责任编辑 / 陈新征

装帧设计 / 方 雷

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地址:上海市梅陇路 130 号,200237

电话:021-64250306

网址:press.ecust.edu.cn

邮箱:press_zbb@ecust.edu.cn

印 刷 / 上海展强印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 13

字 数 / 321 千字

版 次 / 2009 年 2 月第 1 版

2016 年 2 月第 2 版

印 次 / 2016 年 2 月第 1 次

定 价 / 32.00 元

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

全书共 9 章,主要包括绪论、流体静力学、流体动力学基础、阻力损失及其计算、不可压缩流体流动、典型流体流动、流体输送机械、流体力学实验研究和测试方法、数值模拟方法及软件简介。

本书可作为高等工科院校化工、热能动力工程等专业本专科学学生教材,也可作为相关领域科研人员参考用书。

第二版前言

第一版教材自 2009 年 2 月出版以来,已在华东理工大学热能与动力工程专业使用了 7 届,外校也有不少兄弟单位选用了本教材。另外,以本教材为重要成果,《流体力学》课程先后获得了华东理工大学和上海市精品课程称号。在本教材的使用过程中,得到了专家、同行和学生的许多建议,因此决定对第一版教材进行修订。

第二版教材在第一版的基础上,修订了一些文字疏漏和错误,更新和增补了部分内容,增加了部分例题、习题和简要答案。相比第一版,内容约增加了三分之一,具体改动和变化如下:

第一章增加了流体可压缩性、表面张力和流体力学新兴领域的介绍。第四章增加了可压缩流体管路计算的相关内容。第五章增加了无旋流动内容的介绍,强化了 N-S 方程和边界条件的介绍。第六章更新了绕流、射流和撞击流的相关知识,体现了本团队的新近研究成果。第七章增加了气体输送机械。第八章标题改为流体力学实验研究和测试方法,增加了流动相似性准则及分析方法,更新了部分实验方法和测试仪器的介绍,以期满足学科最新进展。第九章强化了湍流半经验公式的介绍。

第二版教材的出版得到了上海市和华东理工大学精品课程建设经费的支持和资助;在修订过程中,屠功毅博士、施浙航博士和钱文伟、魏艳等研究生参与了部分资料的搜集和整理工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,时间仓促,书中难免存在不足之处,敬请专家和读者批评指正。

编 者

2015 年 12 月

前 言

流体力学是热能与动力工程专业的一门十分重要的专业基础课。但由于基本理论多、概念抽象、公式多且推导复杂,对本科学生有一定难度,因此选用一本合适的教材就显得很重要。在近几年给热能工程专业讲授流体力学的过程中,编者感觉现有的教材尽管内容丰富,但是课时偏多、重点不突出,并且没有反映流体力学的工程应用和流体力学的最新发展。参考国内已有大量的流体力学教材过程中,发现或多或少存在上述问题。因此,编写一本课时合适、重点突出、理论和应用并重且体现流体力学学科最新发展的教材就显得尤为迫切。

本教材的特色如下。

一、内容的选取与组织上体现理论与应用并重

流体力学是一门理论性很强的学科,没有相关的理论,流体力学无从谈起,但是流体力学又有相当强的应用性,直接应用在工业生产的各个方面。因此,本教材将流体力学基本概念进一步浓缩、提炼,在内容上有所取舍:删减了流体力学中关于水利、航空方面的章节;压缩了泵与风机方面的篇幅;增加了诸如流体测量、流动显示以及流体力学数值模拟的相关内容;强化了典型流体流动的介绍。因此,本教材前五章为流体力学基础理论部分,后四章为流体力学知识的应用和进展。

二、内容上增加编者所在团队的研究成果

编者所在的华东理工大学洁净煤技术研究所(煤气化教育部重点实验室)长期从事气流床煤气化过程研究,在射流和撞击流等学术领域有近 20 年的研究与积累,部分学术研究已有一定的影响,相关成果已经直接应用到了工业化装置上,取得了巨大的成功。因此,编者将“射流—受限射流—同轴射流—撞击流”的基本理论及工程应用在本教材中进行专门介绍,教材中一些图片及数据来自编者所在团队的最新学术研究成果,这是本书的最大特色之一。

本书第一章为绪论,主要介绍流体的物理性质、作用在流体上的力、流体力学模型及研究方法;第二章为流体静力学,主要介绍了压强及压力的特征和计算方法;第三章为流体动力学基础,介绍流体流动的基本概念、流动形态、伯努利方程;第四章主要介绍了阻力损失及其计算;第五章为不可压缩流体流动,主要介绍流体微团运动、有旋运动及 N-S 方程的基本知识;第六章为典型流体流动过程,介绍绕流、射流(自由射流、受限射流和同轴

射流等)与撞击流的基本理论及其在工程中的应用;第七章为流体输送机械,主要介绍离心泵的工作原理及相关计算;第八章讲述流场显示及流体测量仪器及方法;第九章介绍流体数值模拟方法及软件。讲授本书的全部内容约需要 60 学时,如果学时不够,后四章可适当略讲。

本书由李伟锋博士、刘海峰教授和龚欣教授合编。博士生姚天亮参与了大量资料搜集、整理以及习题演算工作,赵辉、孙志刚、周华辉和栗涛等研究生也参与了部分资料搜集和整理工作,国家 973 项目首席科学家王辅臣教授和于广锁教授对本教材进行了审定,在此一并表示感谢。

本书的顺利出版得到了“华东理工大学优秀教材出版基金”和国家 973 项目“大规模高效气流床煤气化技术的基础研究”的资助,在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限,时间仓促,书中难免存在不少瑕疵和不当之处,敬请专家和读者批评指正。

编 者

2008 年 11 月

目 录

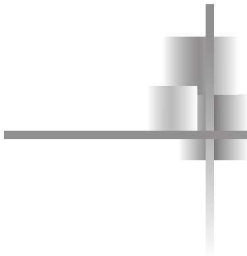
第一章 绪论	1
1.1 流体力学的范畴及其发展简史	1
1.1.1 流体力学的范畴	1
1.1.2 流体力学的发展简史	2
1.2 作用在流体上的力	4
1.2.1 质量力	4
1.2.2 表面力	5
1.3 流体的物理属性和力学特性	5
1.3.1 易变形性	5
1.3.2 密度和可压缩性	6
1.3.3 黏性	6
1.3.4 非牛顿流体	9
1.3.5 表面张力	10
1.4 流体力学模型	14
1.4.1 连续介质模型	14
1.4.2 理想流体模型	15
1.4.3 不可压缩流体模型	15
1.5 研究流体运动的基本方法	16
1.5.1 理论分析法	16
1.5.2 实验研究法	16
1.5.3 数值计算法	17
1.6 流体力学的新兴领域	17
1.6.1 超临界流体	17
1.6.2 超流体	18
1.6.3 磁流体	18
习题	19
第二章 流体静力学	20
2.1 压强及其性质	20
2.2 压强的单位和计算	21
2.2.1 压强的计算基准	21
2.2.2 压强的单位	22
2.2.3 液体静压强的计算	22
2.3 作用于平面和曲面的液体压力	24
2.3.1 作用于平面的液体压力	24

2.3.2	作用于曲面的液体压力	26
2.4	压强的测量	28
2.4.1	液柱式测压计	28
2.4.2	金属弹簧压力表	30
2.4.3	压力传感器	31
	习题	31
第三章	流体动力学基础	33
3.1	流体运动的基本概念	33
3.1.1	定常流动和非定常流动	33
3.1.2	迹线和流线	34
3.1.3	流管、流束和总流	34
3.1.4	过流断面及水力半径	35
3.1.5	过流断面的压强分布	35
3.2	质量守恒	36
3.3	动量守恒	37
3.4	机械能守恒	38
3.4.1	理想流体的机械能守恒	38
3.4.2	实际流体管流的机械能衡算	41
	习题	43
第四章	阻力损失及其计算	45
4.1	沿程阻力损失和局部阻力损失	45
4.2	流体流动形态	46
4.2.1	层流和湍流	46
4.2.2	雷诺数	47
4.3	湍流的基本特征	48
4.3.1	脉动速度和时均速度	48
4.3.2	湍流强度	49
4.3.3	湍流尺度	49
4.3.4	湍流黏度	50
4.4	黏性流体圆管中的层流运动	50
4.5	黏性流体在圆管中的湍流流动	52
4.5.1	边界层和黏性底层	52
4.5.2	圆管湍流的速度分布	53
4.6	沿程摩擦阻力系数计算	55
4.6.1	沿程摩擦阻力系数计算公式	55
4.6.2	摩擦系数曲线图	56
4.6.3	非圆形管的当量直径	56
4.7	局部阻力损失	58
4.7.1	局部阻力损失的计算	58
4.7.2	突然扩大与突然缩小	58

4.8 管路计算	61
4.8.1 简单管路	61
4.8.2 复杂管路	64
4.8.3 可压缩流体的管路计算	67
习题	71
第五章 不可压缩流体流动	73
5.1 流体微团运动	73
5.1.1 描述流体流动的两种方法	73
5.1.2 流体微团运动	74
5.2 连续性方程	78
5.3 无旋流动	79
5.4 有旋流动	83
5.5 黏性流体的运动方程	84
5.5.1 N-S 方程的建立	84
5.5.2 欧拉方程	88
5.5.3 运动方程的定解条件	89
5.5.4 N-S 方程的求解	90
习题	94
第六章 典型流体流动	95
6.1 绕流	95
6.1.1 曲面边界层分离	95
6.1.2 绕流阻力	96
6.1.3 绕球体的流动	97
6.1.4 圆柱绕流	100
6.1.5 理想流体绕圆柱流动	101
6.2 射流	104
6.2.1 自由射流	104
6.2.2 受限射流	110
6.2.3 同轴射流	110
6.3 撞击流	113
6.3.1 撞击流基本原理	113
6.3.2 撞击流的分类	113
6.3.3 撞击流的工业应用	116
习题	121
第七章 流体输送机械	122
7.1 泵与风机的类型	122
7.1.1 叶片式泵与风机	122
7.1.2 容积式泵与风机	122
7.2 离心泵的主要构件及性能参数	123
7.2.1 离心泵的主要构件	123

7.2.2	离心泵的性能参数	124
7.3	泵与风机的理论和实际特性曲线	125
7.3.1	泵与风机的理论特性曲线	125
7.3.2	泵与风机的损失与效率	127
7.3.3	泵与风机的实际特性曲线	128
7.4	泵的扬程与安装高度	129
7.4.1	泵的扬程计算	129
7.4.2	离心泵的安装高度	131
7.5	离心泵的流量调节和组合操作	134
7.5.1	离心泵的管路特性曲线	134
7.5.2	离心泵的工作点	135
7.5.3	流量调节	136
7.6	泵的选择与安装	138
7.6.1	泵的选型原则	138
7.6.2	泵的选型	138
7.7	气体输送机械	140
7.7.1	通风机	140
7.7.2	鼓风机	142
7.7.3	压缩机	143
7.7.4	真空泵	145
习题		146
第八章	流体力学实验研究和测试方法	148
8.1	流动相似准则及其分析方法	148
8.1.1	流动相似原理	148
8.1.2	相似准则及其分析方法	149
8.2	流动可视化技术	152
8.2.1	氢气泡技术	152
8.2.2	空气泡技术	153
8.2.3	烟线技术	154
8.2.4	高速摄像技术	154
8.3	流量测量技术	156
8.3.1	孔板流量计	156
8.3.2	文丘里流量计	157
8.3.3	转子流量计	158
8.3.4	涡街流量计	159
8.4	流速测量技术	160
8.4.1	皮托管	160
8.4.2	热线风速仪	161
8.4.3	激光多普勒测速技术	163
8.4.4	粒子图像测速技术	163

8.4.5 激光诱导荧光技术	165
习题	165
第九章 数值模拟方法及软件简介	166
9.1 计算流体力学概述	166
9.2 数值计算方法	167
9.3 湍流数值模拟	168
9.3.1 湍流理论简介	168
9.3.2 湍流模式理论	169
9.4 CFD 的求解过程	172
9.5 常用的 CFD 商业软件应用示例	174
9.5.1 建立计算模型	174
9.5.2 利用 Fluent 进行求解计算	175
9.5.3 显示计算结果	177
习题	177
附录	178
I 水的物理性质	178
II 干空气的物理性质	179
III 压强国际单位与工程单位换算关系	180
IV 工业管道的当量粗糙度	180
V 管件和阀件的局部阻力系数	180
VI 某些流体在管道中的常用流速范围	181
VII IS 型单级单吸离心泵性能表	181
VIII 饱和水蒸气(以温度为准)	185
IX 饱和水蒸气(以压强为准)	186
X $Re \approx 10^5$ 时二元物体的总阻力系数	188
XI 三维物体的总阻力系数	189
XII 量纲分析方法	189
XIII 习题简要参考答案	191
参考文献	194



第一章

绪 论

液体和气体,统称为流体。流体力学(fluid mechanics)是力学的一个分支,它研究流体静止和运动的力学规律及其在工程技术中的应用。1738年伯努利(Bernoulli)出版他的专著时,首先采用了水动力学(hydrodynamics)这个名词并作为书名;1880年前后出现了空气动力学(aerodynamics)这个名词;1935年以后,人们概括了这两方面的知识,建立了统一的体系,统称为流体力学。

本章重点讲述流体力学的范畴、流体的基本物理性质、流体力学的模型和流体力学的研究方法等。通过本章的学习,要重点领会流体不同于固体的性质,掌握流体的黏性。

1.1 流体力学的范畴及其发展简史

1.1.1 流体力学的范畴

在人们的生活和生产活动中随时随地都可遇到流体,所以流体力学是与人类日常生活和生产事业密切相关的。大气和水是最常见的两种流体,大气包围着整个地球,地球表面的70%是水面。大气运动、海水运动(包括波浪、潮汐、涡旋和环流等)乃至地球深处熔浆的流动都是流体力学的研究内容。除水和空气以外,流体还指水蒸气、润滑油、地下石油、含泥沙的江水、血液以及超高压作用下的金属和燃烧后产生成分复杂的气体和高温条件下的等离子体等。气象、水利的研究,船舶、飞行器、叶轮机机械和核电站的设计及其运行,可燃气体或炸药的爆炸,以及天体物理的若干问题等,都广泛地用到流体力学知识。许多现代科学技术所关心的问题既受流体力学的指导,同时也促进了它不断地发展。

20世纪初,世界上第一架飞机出现以后,飞机和其他各种飞行器得到迅速发展。20世纪50年代开始的航天飞行,使人类的活动范围扩展到其他星球和银河系。航空航天事业的蓬勃发展是同流体力学的分支学科——**空气动力学**和**气体动力学**的发展紧密相连的。这些学科是流体力学中最活跃、最富有成果的领域。

石油和天然气的开采,地下水的开发利用,要求人们了解流体在多孔或缝隙介质中的运动,这是流体力学分支之一——**渗流力学**研究的主要对象。渗流力学还涉及土壤盐碱化的防治,化工中的浓缩、分离和多孔过滤等技术问题。

燃烧离不开气体,这是有化学反应和热能变化的流体力学问题,是**物理-化学流体动力学**的内容之一。爆炸是猛烈的瞬间能量变化和传递过程,涉及气体动力学,从而形成了**爆炸力学**。

沙漠迁移、河流泥沙运动、管道中煤粉输送、化工中催化剂的运动等,都涉及流体中带有固体颗粒或液体中带有气泡等问题,这类问题是**多相流体力学**研究的范围。

等离子体是自由电子、带等量正电荷的离子以及中性粒子的集合体。等离子体在磁场作用下有特殊的运动规律。研究等离子体的运动规律的学科称为**等离子体动力学和电磁流体力学**,它们在受控热核反应、磁流体发电、宇宙气体运动等方面有广泛的应用。

风对建筑物、桥梁、电缆等的作用使它们承受载荷并激发振动;废气和废水的排放造成环境污染;河床冲刷迁移和海岸遭受侵蚀。研究这些流体本身的运动及其同人类、动植物间的相互作用的学科称为**环境流体力学**(其中包括环境空气动力学、建筑空气动力学)。这是一门涉及经典流体力学、气象学、海洋学、水力学、结构动力学等的新兴边缘学科。

生物流变学研究人体或其他动植物中有关的流体力学问题,例如血液在血管中的流动,心、肺、肾中的生理流体运动和植物中营养液的输送。此外,生物流变学还研究鸟类在空中的飞翔,动物在水中的游动等。

在热能工程领域,很多设备和过程中都涉及流体力学的知识。以华东理工大学开发的多喷嘴对置式水煤浆气流床煤气化技术为例,在水煤浆的制备工序中涉及了非牛顿流体和流体黏性的知识;在水煤浆的输送和计量时,涉及管道阻力计算、流量测量和流体输送机械的问题;在气化炉内物料的流动涉及射流和撞击流知识。可以说,流体力学问题在热能工程中应用几乎无处不在,并且往往是最核心和最重要的问题。

因此,流体力学既包含自然科学的基础理论,又涉及工程技术科学方面的应用。此外,如从流体作用力的角度,则可分为**流体静力学**、**流体运动学**和**流体动力学**;从对不同“力学模型”的研究来分,则有**理想流体动力学**、**黏性流体动力学**、**不可压缩流体动力学**、**可压缩流体动力学**和**非牛顿流体力学**等。

1.1.2 流体力学的发展简史

流体力学是在人类同自然界做斗争和在生产实践中逐步发展起来的。古时中国有大禹治水疏通江河的传说;秦朝李冰父子带领劳动人民修建的都江堰,至今还在发挥着作用;大约与此同时,古罗马人建成了大规模的供水管道系统等。

对流体力学学科的形成作出第一个贡献的是古希腊的阿基米德(Archimedes),他建立了包括物理浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,奠定了流体静力学的基础。此后千余年间,流体力学没有重大发展。

直到15世纪,意大利达·芬奇(Da Vinci)的著作才谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题;17世纪,帕斯卡阐明了静止流体中压力的概念。但流体力学尤其是流体动力学作为一门严密的科学,却是随着经典力学建立了速度、加速度、力、流场等概念,以及质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律三个守恒定律奠定之后才逐步形成的。

17世纪,力学奠基人牛顿(Newton)研究了在流体中运动的物体所受到的阻力,得到阻力与流体密度、物体迎流截面积以及运动速度的平方成正比的关系。他针对黏性流体运动时的内摩擦力也提出了牛顿黏性定律。但是,牛顿还没有建立起流体动力学的理论基础,他提出的许多力学模型和结论同实际情形还有较大的差别。

之后,法国皮托(Pitot)发明了测量流速的皮托管;达朗贝尔(D'Alembert)对运河中船只的阻力进行了许多实验工作,证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系;瑞士的欧拉

(Euler)采用了连续介质的概念,把静力学中压力的概念推广到运动流体中,建立了欧拉方程,正确地用微分方程组描述了无黏性流体的运动;伯努利从经典力学的能量守恒出发,研究供水管道中水的流动,精心地安排了实验并加以分析,得到了流体定常运动下的流速、压力、管道高程之间的关系——伯努利方程。

欧拉方程和伯努利方程的建立,是流体动力学作为一个分支学科建立的标志,从此开始了用微分方程和实验测量进行流体运动定量研究的阶段。从18世纪起,位势流理论有了很大进展,在水波、潮汐、涡旋运动、声学等方面都阐明了很多规律。法国拉格朗日(Lagrange)对于无旋运动,德国亥姆霍兹(Helmholtz)对于涡旋运动做了大量研究。在上述的研究中,流体的黏性并不起重要作用,即所考虑的是无黏性流体。这种理论当然阐明不了流体中黏性的效应。

19世纪,工程师们为了解决许多工程问题,尤其是要解决带有黏性影响的问题,部分地运用流体力学基本理论,部分地采用归纳实验结果的半经验公式进行研究,这就形成了水力学,至今它仍与流体力学并行发展。1822年,纳维(Navier)建立了黏性流体的基本运动方程;1845年,斯托克斯(Stokes)又以更合理的基础导出了这个方程,并将其所涉及的宏观力学基本概念论证得令人信服。这组方程就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程(简称N-S方程),它是流体动力学的理论基础。上面说到的欧拉方程正是N-S方程在黏度为零时的特例。1883年,英国物理学家雷诺(Reynolds)发表了一篇重要经典文章《平行渠道中决定水的运动是直线还是曲线的情况以及阻力定律的实验研究》,提出了黏性流体存在层流和湍流两种流动状态,并且第一次明确地引进了一个特别重要的特征量——雷诺数,它在黏性流体中起着极其重要的作用。

普朗特(Prandtl)学派从1904年到1921年逐步将N-S方程作了简化,从推理、数学论证和实验测量等各个角度,建立了边界层理论,能实际计算简单情形下,边界层内流动状态和流体同固体间的黏性力。同时普朗克(Planck)又提出了许多新概念,并广泛地应用到飞机和汽轮机的设计中去。这一理论既明确了理想流体的适用范围,又能计算物体运动时遇到的摩擦阻力,使上述两种情况得到了统一。

20世纪初,飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。航空事业的发展,期望能够揭示飞行器周围的压力分布、受力状况和阻力等问题,这就促进了流体力学在实验和理论分析方面的发展。20世纪初,以普朗克等为代表的科学家,开创了以无黏不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论,阐明了机翼怎样会受到举力,从而空气能把很重的飞机托上天空。机翼理论的正确性,使人们重新认识无黏性流体的理论,肯定了它指导工程设计的重大意义。

机翼理论和边界层理论的建立和发展是流体力学的一次重大进展,它使无黏性流体理论同黏性流体的边界层理论很好地结合起来。随着汽轮机的完善和飞机飞行速度提高到每秒50米以上,从19世纪就开始的对空气密度变化效应的实验和理论研究又迅速得到了发展,为高速飞行提供了理论指导。20世纪40年代以后,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞行器速度超过声速,进而实现了航天飞行,使气体高速流动的研究进展迅速,形成了气体动力学、物理-化学流体动力学等分支学科。

以这些理论为基础,20世纪40年代,关于炸药或天然气等介质中发生的爆轰波又形成了新的理论,为研究原子弹、炸药等起爆后激波在空气或水中的传播,发展了爆炸波理论。此后,流体力学又发展了许多分支,如高超声速空气动力学、超音速空气动力学、稀薄空气动力学、电磁流体力学、计算流体力学和两相(气液或气固)流等。

这些巨大进展是和采用各种数学分析方法以及建立大型、精密的实验设备和仪器等研究手段分不开的。从 20 世纪 50 年代起,电子计算机不断完善,使原来用分析方法难以进行研究的课题,可以用数值计算方法来进行,出现了计算流体力学这一新的分支学科。与此同时,由于民用和军用生产的需要,液体动力学等学科也有很大进展。

20 世纪 60 年代,根据结构力学和固体力学的需要,出现了计算弹性力学问题的有限元法。经过十多年的发展,有限元分析这项新的计算方法又开始在流体力学中应用,尤其是在处理低速流和流体边界形状甚为复杂的问题时,优越性更加显著。近年来又开始了用有限元方法研究高速流的问题,也出现了有限元方法和差分方法的互相渗透和融合。

从 20 世纪 60 年代起,流体力学开始了和其他学科的互相交叉渗透,形成新的交叉学科或边缘学科,如物理-化学流体动力学、磁流体力学等;原来基本上只是定性描述的问题,逐步得到定量的研究,生物流变学就是一个例子。

从阿基米德时期到现在两千多年,特别是从 20 世纪以来,流体力学已发展成为基础科学体系的一部分,同时又在工业、农业、交通运输、天文学、地学、生物学、医学等方面得到广泛应用。今后,人们一方面将根据工程技术方面的需要进行流体力学应用性的研究;另一方面将更深入地开展基础研究以探求流体的复杂流动规律和机理,主要包括:通过湍流的理论和实验研究多相流动、流体和结构物的相互作用、边界层流动和分离、生物地学和环境流体流动等问题,以及各种更先进的流体力学实验设备和仪器的设计与开发等。

1.2 作用在流体上的力

研究流体运动规律,首先必须分析作用于流体上的力,力是使流体运动状态发生变化的外因。根据作用方式的不同,力可以分为质量力和表面力。

1.2.1 质量力

质量力(body force)是作用在流体的每一个质点(或微团)上的力。

设在流体中 M 点附近取质量为 dm 的微团,其体积为 dV ,作用于该微团的质量力为 dF ,则称极限

$$\lim_{dV \rightarrow M} \frac{dF}{dm} = f$$

为作用于 M 点的单位质量的质量力,简称**单位质量力**(unit body force)。用 f 或 (X, Y, Z) 表示。设 dF 在 x, y, z 坐标轴上的分量分别为 dF_x, dF_y, dF_z ,则单位质量力的轴向分力可表示为

$$\left. \begin{aligned} X &= \lim_{dV \rightarrow M} \frac{dF_x}{dm} \\ Y &= \lim_{dV \rightarrow M} \frac{dF_y}{dm} \\ Z &= \lim_{dV \rightarrow M} \frac{dF_z}{dm} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

在国际单位制中,质量力的单位是牛顿,N。单位质量力的单位是 N/kg,其量纲与加速度的量纲相同,是 LT^{-2} 。通常流体所受的质量力只有重力,采用惯用的直角坐标系时,单位质量重力的轴向分力可写为 $(X, Y, Z) = (0, 0, -g)$ 。

1.2.2 表面力

作用在所考虑的流体(或称分离体)表面上的力称为**表面力**(surface force)。表面力常采用单位表面力的切向分力和法向分力来表示。设在流体的表面上,围绕任意点 A 取面积 ΔA ,一般地,可将作用在该面上的表面力分为表面法线方向的分力 ΔP 和切线方向的分力 ΔT 。因为流体内部不能承受拉力,所以表面法线方向的力只有沿内法线方向的压力。因此,表面应力可分为

$$\left. \begin{aligned} \bar{p} &= \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \bar{\tau} &= \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中, $\bar{p}$ 为面积 ΔA 上的平均法向应力或平均压强; $\bar{\tau}$ 为面积 ΔA 上的平均切应力。

如果令面积 ΔA 无限缩小至 A 点,则

$$\left. \begin{aligned} p &= \lim_{\Delta A \rightarrow A} \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow A} \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中, p 为 A 点的**压强**(pressure)或**法向应力**或**正应力**; τ 为 A 点的**剪切应力**(shear stress)。法向应力和切应力的量纲均为 $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$,在国际单位制中单位是帕斯卡,以 Pa 表示, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。

1.3 流体的物理属性和力学特性

从力学的角度看,流体显著区别于固体的特点是:流体具有易变形性、可压缩性、黏性和表面张力特性。

1.3.1 易变形性

流体没有固定的形状,其形状取决于限制它的固体边界;流体在受到很小的切应力时,就要发生连续不断的变形,直到切应力消失为止,这就是流体的**易变形性**或者**流动性**。简言之,流动性即流体受到切应力作用发生连续变形的行为。流体中存在切应力是流体处于运动状态的充分必要条件。

固体存在抗拉、抗压和抗剪三方面的能力。而流体的抗拉能力极弱,抗剪切能力也很微小,静止时不能承受切力,只要受到切力作用,不管此切力怎样微小,流体都要发生不断变