

高等院校规划教材

GONGCHENG LIUTI LIXUE

工程流体力学

主 编 蒋新生



重庆大学出版社

高等院校规划教材

工程流体力学

主 编 蒋新生
副主编 王 冬 杜 扬
编 者 欧益宏 周琳莉 薛 松

重庆大学出版社

内容提要

本书重点介绍工程流体力学的基本概念、基本理论、基本实践及工程应用。本书共分 11 章。其中前 6 章介绍工程流体力学的基本概念和理论,涵盖流体物理性质、流体静力学、流体运动学基础、一元不可压缩流体动力学基础、相似原理与量纲分析、管流阻力及能量损失等;第 7 章、第 8 章介绍管道恒定流、非恒定流的基本理论、计算方法及工程应用;第 9 章介绍不可压缩理想流体的流动;第 10 章介绍黏性流体力学基础;第 11 章介绍一元气体动力学基础等。

本书可作为高等院校能源工程、油料化学、石油与天然气工程、油料储运工程、油料勤务指挥、油料管理工程、油库安全与防护工程、石油化工等专业教材,还可供相关专业的科研人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学 / 蒋新生主编. — 重庆:重庆大学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5689-0668-5

I. ①工… II. ①蒋… III. ①工程力学—流体力学 IV. ①TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第169575号

工程流体力学

主 编 蒋新生

责任编辑:曾显跃 版式设计:曾显跃

责任校对:王 倩 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆华林天美印务有限公司印刷

*

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:20.75 字数:505 千

2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—1 500

ISBN 978-7-5689-0668-5 定价:46.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

随着工程的基础科学范围日益扩大,许多工程专业都开设有工程流体力学课程。对于工程专业来说,流体力学与固体力学、热力学、材料学及电学一样,已成为主要专业技术基础课程。

本书是在中国人民解放军陆军勤务学院(原中国人民解放军后勤工程学院)系列《工程流体力学》教材的基础上,结合高等学校石油与天然气工程专业工程流体力学教学基本要求和作者多年教学实践的基础上编写而成。在编写中充分考虑了专业的工程应用特点,对一些理论性强并超出大纲要求的内容作了一定的压缩。在绪论中介绍了工程流体力学的主要研究内容、方法及其发展简史,便于读者自学;在流体的主要物理性质中更加突出流体黏性的地位和作用,给出了常用油品黏温特性三参数指数公式的计算系数和相对密度随温度变化的计算公式;调整、新增了流体运动学基础和一元不可压缩流体动力学基础,使课程内容体系结构更加合理;在相似原理与量纲分析中强化理论联系实际,理论服务于工程实践,学以致用;在管流阻力及能量损失计算中压缩过于复杂烦琐的理论推导,突出工程流体力学实验研究的价值和作用;重新编写了计算机在管道水力计算中应用的部分计算程序;对不可压缩理想流体流动的部分内容进行了调整,突出军事能源工程、油料化学、油料储运工程、油料装备与管线指挥等专业的实际需要;在黏性流体力学基础部分压缩、合并了层流、紊流边界层的计算及曲面边界层分离、绕流阻力、卡门涡街等内容。本书继续保持了课程的系统性、连贯性和应用性,虽为军事能源工程、油料化学、油料储运工程、油料装备与管线指挥等专业教材,但对于土木工程、建筑设备工程、环境工程以及机械与动力工程等相近专业,也可作为流体力学课程的教学参考书,同时还可以供相关专业的科研人员、工程技术人员学习、参考。

全书共分为 11 章,其中前 6 章为基础理论部分,第 7、8 章及第 11 章为专题应用部分,第 9、10 章为知识拓展部分。各章均有大量的习题,便于读者学习、巩固。本书汲取了解放军陆军勤务学院流体教研室教员们几十年来在讲授该课程中积累的宝贵经验,参考、引用了大量的国内外文献,在此谨向诸位前辈、同事及文献作者表示诚挚的谢意!

本书由中国人民解放军陆军勤务学院蒋新生、王冬、杜扬、欧益宏、周琳莉、薛松共同编写。其中蒋新生编写绪论、第 3 章、第 9 章、第 10 章;王冬编写第 1 章,第 7 章的 7.5、7.7 节,第 8 章;杜扬编写第 6 章、第 7 章的 7.1—7.4 节;欧益宏编写第 2 章、第 4 章;周琳莉编写第 5 章;薛松编写第 11 章及附录。对本书作出贡献的还有梁建军、周建忠、刘慧姝、张培理、周毅等教员以及王波、何标、徐建楠、吕科宗等研究生。全书由蒋新生任主编,王冬、杜扬任副主编。张伟明教授、邓松胜教授、蒋明教授对全书进行了审阅,提出了宝贵修改意见,在此表示衷心感谢!

由于编者水平所限,加上时间仓促,难免有不当和错漏之处,敬请读者批评指正。

编 者
2017 年 6 月

目 录

绪论	1
0.1 工程流体力学的研究内容和方法	1
0.2 工程流体力学发展简史	2
第1章 流体的主要物理性质及作用在流体上的力	8
1.1 流体及连续介质的概念	8
1.2 流体的主要物理性质	9
1.3 流体的黏性	13
1.4 流体的表面张力与毛细现象	16
1.5 流体的热力学性质	18
1.6 作用在流体上的力	20
习题	21
第2章 流体静力学	23
2.1 流体静压强及其性质	24
2.2 流体静力学基本方程	25
2.3 重力作用下流体静压强的基本计算公式	28
2.4 流体压强的测量	32
2.5 流体的相对平衡	36
2.6 静止流体作用在平壁面上的总压力	41
2.7 静止流体作用在曲面上的总压力	45
2.8 浮力及潜(浮)体的平衡与稳定性	49
习题	51
第3章 流体运动学基础	57
3.1 描述流体运动的方法	58
3.2 流体运动有关概念	61
3.3 流体微团的运动分析	66
3.4 运动连续性微分方程	69
习题	71

第4章 一元不可压缩流体动力学基础	73
4.1 恒定总流的连续性方程	73
4.2 伯努利方程及应用	75
4.3 恒定总流的动量方程及其应用	83
4.4 动量矩方程	87
习题	87
第5章 相似原理与量纲分析	91
5.1 相似原理和相似判据	91
5.2 量纲分析	99
5.3 模型实验	106
习题	108
第6章 管流阻力及能量损失	110
6.1 管流阻力及能量损失的分类	110
6.2 流体的两种流动形态及其判据	112
6.3 管流切应力与沿程损失关系的基本方程	116
6.4 圆管中的层流运动	117
6.5 圆管中的紊流运动	121
6.6 管流沿程摩阻系数	129
6.7 局部阻力及局部损失	141
习题	145
第7章 管道恒定流及孔口、管嘴出流	149
7.1 概述	149
7.2 简单管道的水力计算	150
7.3 串并联管道的水力计算	159
7.4 复杂管道的水力计算	167
7.5 计算机在管道水力计算中的应用	176
7.6 图解分析法的管道水力计算	191
7.7 孔口及管嘴出流、变水头泄流	195
习题	202
第8章 管道水击	207
8.1 水击现象、水击波及其传播速度	207
8.2 水击基本微分方程	215
8.3 水击计算的特征线法	218
8.4 管道水击问题的求解	221
8.5 减少水击压强的措施	235
习题	236

第 9 章 不可压缩理想流体的流动	238
9.1 理想流体的欧拉运动方程及其积分	238
9.2 有旋流动	241
9.3 无旋流动及速度势函数	245
9.4 平面运动和流函数	246
9.5 简单平面势流及其叠加	249
习题	257
第 10 章 黏性流体力学基础	259
10.1 黏性流体运动微分方程	259
10.2 层流 N-S 方程精确解	265
10.3 边界层基本概念及基本方程	270
10.4 平面边界层的近似计算与应用	274
10.5 曲面边界层分离现象及卡门涡街	283
10.6 绕流阻力与阻力系数	289
习题	292
第 11 章 一元气体动力学基础	294
11.1 音速与马赫数	294
11.2 一元恒定气体流动基本方程	298
11.3 一元恒定等熵气流的基本特性	302
11.4 气流参数与通道面积的关系	306
11.5 等温气体管道的流动	308
11.6 绝热有摩擦气体管道中的流动	310
习题	313
附录	315
附录 I 常见流体的物理性质	315
附录 II 各种管件的当量长度和局部阻力系数	316
附录 III 常用管材规格	318
附录 IV 中外人名对照表	320
参考文献	321

绪 论

0.1 工程流体力学的研究内容和方法

工程流体力学是研究流体平衡和运动的规律及其在工程实践中应用的一门科学,是力学的一个重要分支。工程流体力学的研究对象为液体和气体。

工程流体力学的基本任务在于建立描述流体运动的基本方程,确定流体经各种通道(如管道)及绕流不同物体时速度、压强的分布规律,探求能量转换及各种损失的计算方法,并解决流体与限制其流动的固体壁之间的相互作用问题。

在实际工程的许多领域里,工程流体力学一直起着十分重要的作用,并得到广泛的应用。在石油及天然气工业中,钻井、采油工艺、石油化工、石油及油品的储存及运输、天然气的输送,都要涉及流体力学问题。输油管道的的设计,管道直径的确定,输油泵的选择与安装,泵站位置确定,管道水击现象的分析与控制,储油、气罐的设计以及收发油系统的操作与管理,都必须依据流体力学的基本原理进行分析与计算。

在机械工业中,水轮机、燃气轮机、蒸汽轮机、喷气发动机、液体燃料火箭、内燃机等,都是以流体能量为原动力的动力机械;水压机、水泵、油泵、风扇、通风机、压缩机等,都是以流体为工作对象的流体机械。它们的工作原理、性能、使用和实验都是以工程流体力学为理论基础的。

在其他工程领域,如航空航天、航海、天文气象、土木建筑、环境保护、城市给排水、水利水电、食品、化工、消防、冶金采矿、生物、大气、海洋、军工核能等,都有许多流体力学的应用问题。因此,工程流体力学是一门应用极为广泛的科学,也是一门许多工程类相关专业的主要技术基础课程。

作为一门技术基础课程,工程流体力学主要介绍流体力学的基本概念、基本理论以及基本应用。

作为一门技术科学,工程流体力学的研究方法也遵循“实践—理论—实践”的基本规律。其研究方法大致可以归纳为以下4个过程:

①对自然界和生产实践中出现的工程流体力学现象进行观察、研究,从中找出共性问题

作为研究课题;

②对自然现象和实践问题进行研究,从中找出主要因素,忽略次要因素,建立抽象的数学模型;

③对数学模型进行理论分析和实验研究,总结并验证基本规律,形成理论;

④以得到的基本理论去指导实践,并在实践中检验、修正理论,使其逐步完善。

0.2 工程流体力学发展简史

工程流体力学是一门既古老又新兴、有着很强的生命力、应用和发展前途极为广泛的科学。工程流体力学作为经典力学的一个重要分支,其发展与数学、力学的发展密不可分。它同样是人类在长期与自然灾害作斗争的过程中逐步认识和掌握自然规律,并逐渐发展形成的,是人类集体智慧的结晶。它的发展可以追溯到远古的历史。当时,人们对流体的认识是从水开始的。因为人类在和大自然的接触中,与水的联系最为密切。自古以来,人类逐水草而居,水是人类赖以生存的最起码的物质条件。水既有用,也有害。人类为了生存,就必须要了解水的流动现象、水的物理性质以及它的运动规律。在这一方面,我国古代劳动人民作出了积极的贡献,在工程流体力学的发展史上占有重要地位。

人类最早对工程流体力学的认识是从治水、灌溉、航行等方面开始的。在同大自然作斗争的过程中,我国古代劳动人民积累了丰富的经验。他们兴水利,除水害,建起了许多水利工程,也发明了各种利用水能的水力机械。

4 000 多年前的禹治水,说明我国古代已有大规模的治河工程。秦代,在公元前 256—210 年间便修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程,特别是李冰父子带领修建的都江堰,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。说明当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—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 1 100 年。

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 300 多年。

明朝的水利家潘季驯(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《河防一览》。

清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。

这些工程标志着我国古代经济、文化的繁荣和科学技术的进步。而欧洲最早的水利工程是古罗马水道,它是公元 100 年前后古罗马统治者为供应生活用水而建造的。但在我国,据最近河南出土文物表明早在 2 000 多年前就有着大型的供水管道,比欧洲早几百年。此外,我国古代的造船、航海技术也走在世界的前列。在水力学、水文、水力机械上,我国古代也是领

先的。早在秦汉时代就不断改进水磨、水车和水力鼓风设备,汉代张衡发明了水力带动的浑天仪。另外,我国早已根据铜壶滴漏的孔口泄流原理而发明了水钟。以上这些充分说明了我们的祖先对水流的性质及其规律已有了充分的认识。但由于长期的封建统治,生产力得不到发展,加上历代都重视文章,轻视科学,使得我国的科学长期停留在经验的形式上,未能形成系统的理论,工程流体力学也不例外。因此,一方面为我们民族光辉灿烂的文明史而感到自豪,另一方面也为在现代科学技术理论中中华志士很少占有一席之地而感到极为遗憾。以下将会看到,现在所要学习的工程流体力学理论,是从西欧发展起来的。

(1) 准备阶段

古希腊学者阿基米德(Archimedes, 公元前287—212)在公元前250年发表学术论文《论浮体》。第一个阐明了相对密度的概念,发现了物体在流体中所受浮力的基本原理——阿基米德原理。它不但是工程流体力学的一条重要定律,而且也为物理学的产生奠定了基础。此外,他还发现了杠杆原理,发明了阿基米德螺旋线和抽水用的“水蜗牛”。他的学生克特比集曾发明水泵、气枪和抽水唧筒。克特比集的学生赫伦发明了救火水泵和虹吸管。这是古希腊人对于工程流体力学的贡献,但自从古希腊日趋衰退以后,欧洲处在古罗马的统治之下,这个时期是个昏暗时期,科学停滞不前。直到1453年土耳其的奥斯曼帝国攻占了东罗马帝国(亦称拜占庭帝国)首都君士坦丁堡以后,才出现了文艺复兴运动。当时,文艺复兴的代表人物之一达·芬奇(Leonardo. da. Vinci, 1452—1519)是个伟大的画家,他的不朽之作《最后的晚餐》和《蒙娜丽莎》一直保留到现在,成为最珍贵的名画。可是达·芬奇这位伟大的天才不仅是个艺术家,而且还是水力学的奠基人。他在米兰附近设计并建造了第一座大型水闸,从而进入了水利工程的时代。此外,他还研究鸟类的飞行,并发展了一些关于飞鸟受力的思想。他还作了大量的水力学试验,如射流、旋涡形成、水跃和连续性原理等,系统地研究了物体的沉浮、孔口出流、物体的运动阻力,以及管道、明渠中水流等问题,为近代流体力学的诞生奠定了基础。进入17世纪,产业革命爆发,工程流体力学随之得到发展。斯蒂文(S. Stevin, 1548—1620)将用于研究固体平衡的凝结原理转用到流体上。伽利略(Galileo, 1564—1642)研究了流体的稳定性,论证了自由落体定律,并作了著名的比萨斜塔试验,还研究了质点运动学,为牛顿力学的诞生开辟了道路。托里拆利(E. Torricelli, 1608—1647)于1643年提出孔口泄流定律并作了著名的大气压强试验。帕斯卡(B. Pascal, 1623—1662)于1650年提出压强传递原理。科学巨人牛顿(I. Newton, 1642—1727)于1687年出版了《自然哲学的数学原理》,研究了物体在阻尼介质中的运动,建立了流体摩擦定律,为黏性流体力学初步奠定了理论基础,并讨论了波浪运动等问题,提出了物质运动的基本定律,发明了微积分。

(2) 创立阶段

到了18世纪,第一次技术革命(蒸汽机)给近代自然科学的发展带来了黎明,工程流体力学也伴随其他科学有了较大的发展,并形成独立的学科。这时期对古典流体力学作出巨大贡献,被称为流体力学奠基人的是瑞士数学家伯努利(D. Bernoulli, 1700—1782),他在1738年出版的名著《流体动力学》中,建立了流体位势能、压强势能和动能之间的能量转换关系——伯努利方程。在此历史阶段,诸学者的工作奠定了流体静力学的基础,促进了流体动力学的发展。

欧拉(L. Euler, 1707—1783)是经典流体力学的奠基人,1755年发表《流体运动的一般原理》,提出了流体的连续介质模型,建立了流体平衡微分方程、连续性微分方程和理想流体的

运动微分方程,并推证了伯努利积分,给出了不可压缩理想流体运动的一般解析方法。他提出了研究流体运动的两种不同方法及速度势的概念,并论证了速度势应当满足的运动条件和方程。另外,针对流体运动会产生摩擦阻力的现象,法国数学家达朗伯(J. le R. d'Alembert, 1717—1783)于1744年提出“理想流动没有运动阻力”的著名假说,但此假说与实际有出入,(他还提出达朗伯原理),于是科学家和工程师又试图从实验的角度来解决工程流体力学的问题,这样又出现了一个新的分支——水力学。以后,它们在各自的道路上得到了新的发展。此时,还有法国数学家拉格朗日(J. L. Lagrange, 1736—1813)提出了新的工程流体动力学微分方程,使工程流体动力学的解析方法有了进一步发展。他严格地论证了速度势的存在,并提出了流函数的概念,为应用复变函数去解析流体定常的和非定常的平面无旋流动开辟了道路。此外,他还确立了波动的基本微分方程和波速传播方式。至此,理论流体力学形成,它主要是利用数学解析的方法来试图解决工程流体力学的问题。

(3) 发展阶段

19世纪,第二次技术革命(内燃机)使近代自然科学走向全面繁荣,工程流体力学理论逐步完善,水力学也取得了迅速的发展。

1) 工程流体力学

①无旋流 法国的柯西(Cauchy, 1789—1857)于1815年严密推证了Lagrange无旋流的理论,法国的泊松(Poisson, 1781—1846)于1826年解决了第一个空间流动——无旋的绕圆球流动问题。法国的拉普拉斯(Laplace, 1794—1827)于1827年提出著名的Laplace方程。英国的朗肯(Rankine, 1820—1872)指出,理想不可压流动的位势和流函数分别满足Laplace方程,因此,理想不可压流体动力学问题是运动学问题。

②旋涡流动 Cauchy于1815年和英国的斯托克斯(Stokes, 1819—1903)于1847年分别提出涡旋概念,将涡旋解释为流体微元体的转动。亥姆霍兹(H. von Helmholtz, 1821—1894)和基尔霍夫(G. R. Kirchhoff, 1824—1887)对旋涡运动和分离流动进行了大量的理论分析和实验研究,提出了表征旋涡基本性质的旋涡定理、带射流的物体绕流阻力等学术成就。

19世纪流体力学还产生了两个重要分支:黏性流体动力学和气体动力学。

③黏性流 法国工程师纳维(Navier, 1785—1880)于1826年最先导出黏性液体运动方程。泊松(Poisson, 1781—1840)于1822年、圣维南(Saint-Venant, 1797—1866)于1842年也导出黏性液体运动方程。英国的斯托克斯(Stokes)严格地导出了这些方程,并将流体质点的运动分解为平动、转动、均匀膨胀或压缩及由剪切所引起的变形运动。后来引用时,便统称该方程为纳维—斯托克斯方程。英国的雷诺(O. Reynolds, 1842—1912)于1883年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,找到了实验研究黏性流体流动规律的相似准则数——雷诺数,以及判别层流和紊流的临界雷诺数,为流动阻力的研究奠定了基础。雷诺是紊流理论的创始者。1895年,他推出了平均紊流切应力N-S方程——雷诺方程。

④非恒定流 著名的有英国的兰姆(Lamb, 1849—1934)和瑞利(Rayleigh, 1842—1919), 1902年意大利学者阿列维(Allievi)导出了管道不稳定流的微分方程。

2) 水力学

法国的谢才(A. de Chézy, 1718—1798)于1755年便总结出明渠均匀流公式——谢才公式,一直沿用至今。法国的皮托(Henri do Pitot, 1695—1771)制出了测量流动压强的仪器——皮托测压管。英国的文丘里(Giovanni Battista-Venturi, 1746—1822)制出了测量流量的仪

器——Venturi 流量计。法国医生泊肃叶 (Jean Louis Poiseuille, 1799—1869) 制出了测量流体黏度的仪器——黏度计。德国水利工程师魏斯巴赫 (Julius Weisbach, 1806—1871) 和法国工程师达西 (Henry Philibert Gaspard Darcy, 1803—1858) 分别通过试验总结了管道流动的阻力计算公式——Weisbach Darcy 阻力公式。爱尔兰工程师曼宁 (Robert Manning, 1816—1897) 总结了渠道粗糙情况的公式——曼宁公式。瑞利 (L. J. W. Reyleigh, 1842—1919) 在相似原理的基础上, 提出了实验研究的量纲分析法中的一种方法——瑞利法。

佛汝德 (W. Froude, 1810—1879) 对船舶阻力和摇摆的研究颇有贡献, 他提出了船模试验的相似准则数——佛汝德数, 建立了现代船模试验技术的基础。

19 世纪, 气体动力学和热力学也得到了较快的发展。库塔 (M. W. Kutta, 1867—1944) 1902 年就曾提出过绕流物体上的升力理论, 但没有在刊物上发表。

(4) 现代发展阶段及趋势

20 世纪, 世界进入第三次工业革命, 即电子和计算机时代, 科学技术迅猛发展, 新科学、新技术不断涌现。自从 1907 年第一架飞机在美国首飞成功, 直到火箭、原子弹、人造卫星、宇宙飞船、航天飞机, 使世界进入了计算机时代和航天时代。航天器的研究需要大量流体力学的理论。因此, 20 世纪的流体力学进入了现代革命阶段, 并使得古典流体力学和水力学走上了融为一体的道路, 出现了一个新的应用学科——工程流体力学。

普朗特 (L. Prandtl, 1875—1953) 建立了边界层理论, 解释了阻力产生的机制。当时就像爱因斯坦提出的相对论一样, 人们对此觉得不可理解。但现在回过来看一看, 简直是一项划时代的贡献。之后他又针对航空技术和其他工程技术中出现的紊流边界层, 提出混合长度理论。1918—1919 年, 论述了大展弦比的有限翼展机翼理论, 对现代航空工业的发展作出了重要的贡献。

儒科夫斯基 (Н. Е. Жуковский, 1847—1921) 从 1906 年起, 发表了《论依附涡流》等论文, 找到了翼型升力和绕翼型的环流之间的关系, 建立了二维升力理论的数学基础。他还研究过螺旋桨的涡流理论以及低速翼型和螺旋桨桨叶剖面等。他的研究成果, 对空气动力学的理论和实验研究都有重要贡献, 为近代高效能飞机设计奠定了基础。

卡门 (T. von Kármán, 1881—1963) 在 1911—1912 年连续发表的论文中, 提出了分析带旋涡尾流及其所产生的阻力的理论, 人们称这种尾涡的排列为“卡门涡街”。1921 年, 由微分形式的边界层方程通过积分得出动量积分方程。由雷诺方程积分得到紊流的动量积分方程, 但需要建立紊流切应力项的模型。在 1930 年的论文中, 建议重叠层混合长度与离壁面的距离成比例, 提出了计算紊流粗糙管阻力系数的理论公式。此后, 在紊流边界层理论、超声速空气动力学、火箭及喷气技术等方面都有不少贡献。

布拉休斯 (H. Blasius) 在 1913 年发表的论文中, 提出了计算紊流光滑管阻力系数的经验公式, 并于 1908 年得出均匀流动下平板边界层的相似解。

布金汉 (E. Buckingham) 在 1914 年发表的《在物理的相似系统中量纲方程应用的说明》论文中, 提出了著名的 π 定理, 进一步完善了量纲分析法。

尼古拉兹 (J. Nikuradze) 在 1933 年发表的论文中, 公布了他对沙粒粗糙管内水流阻力系数的实测结果——尼古拉兹曲线, 据此他还给紊流光滑管和紊流粗糙管的理论公式选定了应有的系数。后来, 谢维列夫对实际钢管作了同样的试验, 得出钢管的摩阻系数实验曲线。

柯列布鲁克 (C. F. Colebrook) 在 1939 年发表的论文中, 提出了将紊流光滑管区和紊流粗

糙管区联系在一起的过渡区阻力系数计算公式。

莫迪(L. F. Moody)在1944年发表的论文中,给出了他绘制的实用管道的当量糙粒阻力系数图——莫迪图。至此,有压管流的水力计算已渐趋成熟。

我国科学家的杰出代表钱学森(Qian Xuesen)早在1938年发表的论文中,便提出了平板可压缩层流边界层的解法——卡门—钱学森解法。他在空气动力学、航空工程、喷气推进、工程控制论等技术科学领域作出过许多开创性的贡献。

吴仲华(Wu Zhonghua)在1952年发表的《在轴流式、径流式和混流式亚声速和超声速叶轮机械中的三元流普遍理论》和在1975年发表的《使用非正交曲线坐标的叶轮机械三元流动的基本方程及其解法》两篇论文中所建立的叶轮机械三元流理论,至今仍是国内外许多优良叶轮机械设计计算的主要依据。

周培源(Zhou Peiyuan)多年从事紊流统计理论的研究,取得了不少成果,1975年发表在《中国科学》上的《均匀各向同性湍流的涡旋结构的统计理论》便是其中之一。

庄逢甘(Zhuang Fenggan)院士在流体力学的湍流基本特性研究中得出了湍流耗散定律。在激波绕射、高超音速等研究和旋涡形成的机理与控制方面取得突出成果。

张涵信(Zhang Hanxin)院士在高超声速绕流、三维流动分离判据、旋涡沿轴向的分叉演化规律、横截面流态的拓扑规律,以及建立无波动、无自由参数的耗散差分计算体系和云粒子侵蚀实验模拟理论等方面作出突出贡献,并在航空航天飞行器设计和试验中发挥了重要作用。用摄动法成功地解决了当时国际上难以解决的钝头体高超声速绕流及其熵层问题,发展了钝头细长体绕流的熵层理论,提出了高超声速流动中第二激波形成的条件。首次提出了判定三维流动分离的数学条件;发现了三色色散项和差分解在激波处出现波动的联系;提出了建立高分辨率差分格式的物理构思,并建立了无波动无自由参数的耗散(NND)差分算法。

(5) 发展趋势

目前工程流体力学已进入了一个用理论分析、数值计算、实验模拟相结合,以非线性问题为重点,各分支学科同时并进的大发展时期。这一时期渐近分析方法日臻成熟,已经成为一门独立的学科分支,Sturrock和Whitham分别提出了多重尺度法和平均变分法, Van Dyke的延伸摄动级数理论扩大了适用的参数范围。纯粹数学中泛函、群论、拓扑学,尤其是微分动力系统的发展为研究非线性问题提供了有效的手段。由于建成了适合于研究不同马赫数、雷诺数范围典型流动现象的风洞、激波管、弹道靶,以及水槽、水洞、转盘等实验设备,发展了热线技术、激光技术、超声技术,以及速度、温度、浓度及涡度的测量技术,流动显示和数字化技术延长了人的感官,可以观察新的物理现象,并获得更多的信息。最重要的是计算机的迅猛发展,从根本上改变了流体力学面临非线性方程束手无策的状况,大量数据采集和处理也就成为可能,因为实际问题大多是学科交叉的,新兴学科领域的出现也是十分自然的。在这一时期的成就主要有:

计算流体力学已发展成熟,出现了有限差分、有限元、有限分析、谱方法和辛算法,建立了计算流体力学完整的理论体系,即稳定性理论、数值误差耗散、色散原理、网格生成和自适应技术、迭代与加速收敛方法等,提出了许多有效格式,如TVD、ENO、拉格朗日算法,以及求解自由边界问题的MAC方法,为提高分辨率的紧致格式等。计算流体力学在高速气体动力学和湍流的直接数值模拟中发挥了重大作用。前者主要用于航天飞机的设计,由于物体几何形状和流场极其复杂,涉及宽阔的流动范围,要考虑内自由度激发和化学反应。此外,还研究了

非定常流的控制,超临界翼的设计等问题。后者要求分辨到耗散尺度,计算工作量极大,如果没有先进的计算机是不可能完成的。目前,超级计算机、工作站的性能有了飞跃,并行度也在提高,因此,人们已经可以用欧拉方程、雷诺平均方程求解整个飞机的流场。同时,也出现了一批以 Fluent、CFX 和 ADINA 为代表的流场数值仿真软件。计算流体力学几乎渗透到流体力学的每个分支领域。

非线性流动问题取得重大进展,发展了求解非线性发展方程完整的理论和数值方法,并被广泛应用于其他学科领域。三维非线性波和与波有关的流动相互作用是这一领域的研究前沿。非线性稳定性的研究主要针讨转捩问题,探讨不稳定波的发展情况、涡结构的转捩方式、湍流斑的形成。由于理论分析的局限性,要结合数值方法才能描述转捩的全过程,湍流的基础研究从统计方法转向拟序结构的研究,因为拟序结构对于动量、能量、质量的传输起着决定性的作用,也便于控制。

近年来由于工业生产和高新技术的发展需要,如长距离大流量管道输送、复杂管道系统设计与建设、多油品顺序输送、特定条件下的油料收发,以及大型风洞设计与建造、冲压发动机的设计与建设、运载工具的气动研究、非定常旋涡主导的空气动力学研究、并行计算技术及燃烧、化学反应动力学等,促使工程流体力学和其他学科相互浸透,形成了许多边缘学科,随着工程流体力学应用越来越广泛,分支学科越来越多,既相互交叉,又有横向联系,它们互相渗透,互相补充,互相促进,使得理论、实验和数值计算紧密结合,解决许多工程应用问题,成为全新的学科体系,形成了大量的学科分支。

这些分支的新学科有:(普通)流体力学、黏性流体力学、流变学、气体动力学、稀薄气体动力学、计算流体力学(水力学)、环境流体力学(水力学)、能源流体力学、渗流力学、非牛顿流体力学、多相流体力学、磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、地球流体力学等。可以预测,现代流体力学将进入各个工程领域,而且只要有数学模型,就可以借助计算机来求解。当今流体力学的发展趋势大致为以下几个方面:

- ①紊流的机理和紊流模型的研究;
- ②各种新兴边缘学科的发展及应用(如多相流、非牛顿流体、环境污染、生物流体等);
- ③实验模拟和计算机模拟及应用。

第 1 章

流体的主要物理性质及作用在流体上的力

1.1 流体及连续介质的概念

1.1.1 流体的定义

流体(包括液体和气体)与固体是物质的不同表现形式,它们具有以下三个物质的基本属性:由大量的分子组成;分子不断地作随机热运动;分子间存在着分子力的作用。但这三个物质的基本属性表现在气体、液体、固体方面却有着量和质的差别。由于同体积内分子数目、分子间距、分子的内聚力、排列顺序以及热运动状况等方面的物质内部微观差异,导致了它们宏观表象的不同:固体有一定的体积和一定的形状;液体有一定的体积而无一定的形状,有自由表面;气体无一定的体积,无一定的形状,也无自由表面。

流体与固体在微观结构上的差别使得流体在力学性能上有如下两个特点:

- ①流体几乎不能承受拉力,因而可以认为流体内部不存在抵抗拉伸变形的张应力;
- ②流体在平衡状态下不能承受剪切力,任何微小的切力作用都会使流体发生连续变形。

固体显然没有这两个特点。它除了与流体一样能承受压力外,还能受切力和拉力,因而其内部相应产生压应力、切应力和拉应力(张应力),以抵抗变形,如果应力达不到一定数值时,形状不会被破坏。

概括流体的这两个特点可定义:流体是一种受任何微小切应力作用都会发生连续变形的物质。流体的这个特点称为流体的易流动性。易流动性既是流体命名的由来,也是流体区别于固体的根本标志。

1.1.2 连续介质的概念

连续介质概念的内容:流体是由无数多个流体质点(微团)组成的连续介质的整体,每个质点具备流体的一切基本力学性质。流体质点有两个含义:①由分子组成,②分子之间没有间隙。

如前所述,流体是由大量作随机运动的分子组成。从微观角度来看,分子之间存在着间隙,因此,流体的一切物理量在空间内是非连续分布的。同时,由于分子的随机运动,又导致

任一空间点上流体物理量对时间的不连续性。因此,描述分子各自运动的理论将是十分复杂的,它已远远超出人们目前的知识水平。然而,分子的体积是很小的,分子之间的空隙尺度也很小,它与常用的宏观尺度相比是微不足道的。工程流体力学是论述流体的宏观特性,研究流体宏观机械运动规律,因此,将流体当作一种连续分布的介质处理,在大多数场合下是合理的。这一概念的含义是:认为流体不是由独立的分子所组成,而假想为无限多的、其间毫无空隙的流体质点所组成的连续介质或连续体,这种连续介质仍然具有流体的一切基本力学特性。

流体中任意小的一个微元部分称为流体微团,当流体微团的体积无限缩小并以某一坐标点为极限时,流体微团就成为处于这个坐标点上的一个流体质点,它在任何瞬时都具有一定的物理量,如质量、密度、压强、流速等。因而在连续介质中,流体质点的一切物理量都是坐标和时间变量的连续函数,形成各种物理量的标量场或矢量场,这样就可以应用连续函数和场论等数学工具来研究流体的平衡及运动规律,这就是将流体假定为连续介质的作用。

1.2 流体的主要物理性质

1.2.1 密度、重度和相对密度

(1) 密度和比容

单位体积内所含有的流体质量称为流体密度,以 ρ 表示。对于均质流体,若在流体内任取一微元体积 ΔV 内所含有的质量为 ΔM ,则密度 ρ 表示为

$$\rho = \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1.1)$$

对于非均质流体,根据连续介质的假设密度 ρ 表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \quad (1.2)$$

该密度称为点密度。

一般而言,流体密度随空间位置和时间发生变化。密度的单位为 kg/m^3 。

比容是流体单位质量所占有的体积,它与密度的关系为

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.3)$$

(2) 重度和相对密度

流体单位体积内具有的重量称为重度,以 γ 表示。对于均质流体,如果微元体积 ΔV 中含有重力为 ΔG ,则

$$\gamma = \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1.4)$$

在 SI 制中, γ 的单位为 N/m^3 。

对于非均质流体,点的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1.5)$$

根据重力与质量的关系,可得到 γ 、 ρ 及 v 的换算关系式,即