



TSINGHUA UNIVERSITY

非粘性流体力学

董曾南 章梓雄

清华大学出版社

内 容 简 介

本书系统地讲述非粘性流体力学的基本理论,并讲述了以水流运动为主要对象的明槽流动和波浪理论。全书共分 10 章,并在附录中给出有关的一些基本数学知识。

本书可作为水利、水电、土木、环境、海洋、港口、海岸、船舶、机械及其他以流体,特别是以液体为对象的工程专业研究生流体力学课程教材或教学参考书。本书有助于提高广大水力学教师的理论修养。与作者于 1998 年由清华大学出版社出版的《粘性流体力学》相配合,可以帮助读者深入理解不可压缩流体力学的全部内容。本书也可作为有关专业从事科研、教学及工程工作的科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

非粘性流体力学/董曾南,章梓雄编著. —北京:清华大学出版社,2003

ISBN 7-302-06747-3

I. 非… II. ①董… ②章… III. 非粘性流体—流体力学 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 046106 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

责任编辑: 潘敏贞

印 刷 者: 北京鑫丰华彩印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 140×203 印张: 16.25 字数: 407 千字

版 次: 2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06747-3/O·309

印 数: 1~3000

定 价: 38.00 元(平装)

60.00 元(精装)

序

本书是 1998 年出版的两位作者的力作《粘性流体力学》一书的姊妹篇。两本著作共同涵盖了不可压缩流体力学的全部内容。对主要感兴趣于非粘性流体即理想流体运动的读者,本书也自成体系。

这部著作基本上保持了《粘性流体力学》的写作风格。既照顾到理论的严谨,又注重物理概念的描述。循循善诱,深入浅出。是水利、土木、环境等专业的研究生、教师以及工程技术人员用于提高流体力学水平的一部好教材。

流体都是有粘性的。但所幸的是,我们日常生活中最常见的两种流体——水和空气——都是粘性较小的流体。作为一种近似,对流体忽略粘性在很多情况下是可以允许的。对于大雷诺数流动,则边界层以外的流动仍然可以按非粘性流动处理。这便给非粘性流体力学创造了广阔的应用空间。

非粘性流体力学,特别是势流理论部分,凝结了许多杰出的数学家和力学家的智慧,有许多精美的理论用于解决实际问题的光辉典范。两位作者基于他们多年从事教学和科研工作的经验,把这些理论的精华编制在一本适合于工程专业研究生学习的专著内,与书市上众多的流体力学教材卓然不同。

两位教授是本领域的权威,本书是由他们多年的教学、科研经验转化而来的精心之作,美不胜收。深信读者钻研之余,定然获益良多,故欣然为之作序,并以此将本书郑重推荐给广大读者。

中国科学院院士

林秉南

前 言

人类的生存、生活和发展都离不开以水和空气为代表的流体,因此作为研究流体运动规律的流体力学具有强大的生命力。流体力学自 18 世纪成为一门学问,二百余年来随着社会和生产的进步,得到了不断的充实与发展。航空航天技术的不断更新形成了近代的空气动力学。化学、材料和食品工业的发展以及近年来生命科学的突飞猛进使非牛顿流体力学得到了巨大的推动。核反应堆、高坝和推进器的技术使两相流力学更趋完善。紊流力学不仅在研究阻力和能量损失中具有重大意义,而且紊流力学对随机性和非线性的研究已广泛应用于现代社会科学和自然科学的各个领域。新的科学技术领域要求有新的流体力学分支诞生和发展,同时使得作为一切流体力学分支赖以生存和发展的流体力学基本理论得到不断的深化、完善和充实。

对于水利、土木、环境、海洋、港口等以及一切以水为对象的工程专业研究生,流体力学是一门重要的基础学科。对于从事有关专业的青年学者、工程师、教师,掌握深入系统的流体力学理论将有利于事业的发展。作者编著的《粘性流体力学》于 1998 年由清华大学出版社出版后,半年时间即告售罄,并于次年第 2 次印刷,说明社会上对这个层次的书籍需求甚殷。这一现象也鼓舞了作者下决心编写这本《粘性流体力学》的姊妹篇《非粘性流体力学》。这两本书的总和,可以比较全面地概括流体力学的基本理论。

《非粘性流体力学》(Inviscid Fluid Mechanics)以不考虑粘性的“理想流体”作为主要研究对象。全书共分 10 章。前 3 章讲述流体运动学、流体运动的基本方程及流体静力学;第 4 章介绍分析

和研究流体运动的一般方法——量纲分析与相似原理;第5章研究流体的有涡运动;自第6、7、8章深入阐述对研究理想流体运动极为重要的势流理论,包括平面势流、翼型理论和三维空间势流由于粘性的作用往往主要表现为物体壁面附近的边界层流动,而边界层以外的广大流域可由势流求解,因此势流理论具有十分的重要性;第9章和第10章给出了具有自由水面的明槽水流运动和水面波浪运动的基本现象与原理。本书中的某些部分也涉及流体的粘性,但有关粘性流体力学的主要内容则在《粘性流体力学》一书中阐述。

时代和科学的进步并没有降低一些基本理论的价值,对于流体力学也是如此。尽管由于电子计算机的迅猛发展,计算流体力学的突飞猛进,使得很多流体运动问题都可通过计算机得到解答,但是假如应用和运行这些计算机的人没有很好的流体力学基本理论的知识 and 修养,就难以判断结果的正确性并使之发展。做学问讲究“三知”,谓“知其始、知其中、知其终”。“始”是问题的提出,“中”是问题的求解,而“终”则是对结果的判断、理解和深化,是“三知”中最难的一个阶段,从而也可以体现出不同的水平。计算机帮助了人类而不能代替人类智慧的大脑,它主要完成的是“中”的阶段而不能代替人们对“始”和“终”的提出和认识。人类应驾驭计算机而不能为计算机所驾驭,这就是我们坚持年轻学者需要提高理论修养的一点管窥之见。

这本书于1998年开始编著,历时四年。本书仍将着力于对流体运动物理本质的揭示和阐述,并使用一些必要的数学工具。数学的描述和物理的解释紧密结合,使读者在认真研读本书后能有一个深厚的流体力学基础。本书的出版如能引导年轻学者抛开社会上的某些浮躁和急功近利的心绪,静下心来,以人类几千年积累的智慧武装自己并在为社会和人民服务的过程中用自己的智慧去丰富和深化流体力学的基本内容,则作者幸甚。

• VI •

本书编写时所参考的有关书籍均列于全书最后的参考书目中,而在编写某些章节时所参考的一些专门书籍则在每章后列出。书中插图凡引自其他书籍或文献,均在图名后注明。引自全书参考书目中者用圆括弧()标明该书序号,引自某章后所列书目中者则用方括弧[]标明其序号。作者在这里向有关出版社和作者表示深切的感谢。

本书在成书过程中得到清华大学陈永灿教授、李玉柱教授、贺五洲教授和其他同仁的关心、支持和帮助。贺五洲教授提供了他讲授有关课程的讲稿提纲,余锡平教授通读了全部书稿,提出了不少有益的建议。中国科学院院士林秉南先生在我们出版了《粘性流体力学》一书后给了我们很多鼓励,现在又亲自为本书作序。在这里我们对他们表示衷心的感谢。

虽然作者在编著本书时殚尽心力、字斟句酌,但是我们人生的经历告诉我们,世界上没有完美无瑕的东西。何况我们能力有限,因此诚请读者批评指正。

董曾南
章梓雄 共识

2001年12月



董曾南 原籍天津静海县, 1932年11月生。1955年毕业于清华大学水利工程系。现为清华大学水利水电工程系教授, 水力学河流动力学专业博士生导师, 清华大学学术委员会委员。并任中国水利学会名誉理事, 《中国科学》等期刊编委。曾任国际水利工程与研究协会(International Association of Hydraulic Engineering and Research)理事、副主席, 清华大学水利工程系主任, 国家教委工科力学教学指导委员会委员, 中国大百科全书《水利》卷编委, 高速水力学国家重点实验室学术委员会副主任, 中国水利名词审定委员会委员等。

多年来从事水力学, 流体力学的教学和研究工作。曾为密云、三门峡、苏州河、三峡等多项重要水利工程进行水工模型试验研究。在水工建筑物明流边界层、明槽紊流及水工水力学等方面发表论文50篇。曾获国家教委科技进步二等奖3项、三等奖1项, 北京市普通高校优秀教学成果一等奖, 北京市优秀教师。主编《水力学》上册, 合编有《粘性流体力学》。



章梓雄 原籍浙江鄞县，1944年11月生于上海市。1965年毕业于香港珠海书院。1967年于加拿大Saskatchewan大学获硕士学位。1971年于美国加州理工学院(Caltech)获博士学位。现任香港大学非线性力学中心主任及何东机械工程讲座教授，清华大学、西安交通大学、天津大学、中山大学，大连理工大学、四川大学、武汉大学及华南理工大学客座教授，上海交通大学及复旦大学顾问教授，中国科学院力学研究所、河海大学及北京航空航天大学名誉教授，美国土木工程师学会、美国机械工程师学会、香港工程师学会及英国机械工程师学会资深会员，香港工程院院士。

多年来从事粘性流动、波浪理论、非线性水波、两物体相互作用下的水动力学问题、通过多孔介质的流动、水下声学、海港设计与研究等方面的研究工作。发表论文258篇。合编有《粘性流体力学》。

目 录

绪论	1
0.1 流体	1
0.2 连续介质假设	3
0.3 流体的粘性	5
0.4 流体的压缩性	8
第 1 章 流体运动学	11
1.1 描述流体运动的两种方法	11
1.1.1 拉格朗日法	12
1.1.2 欧拉法	13
1.1.3 两种流动描述方法之间的关系	15
1.2 雷诺输运方程	15
1.3 连续方程	17
1.4 流线、迹线、色线和流管	19
1.4.1 流线	19
1.4.2 迹线	22
1.4.3 色线	23
1.4.4 流管	25
1.5 环量、涡量, 涡线和涡管	26
1.5.1 环量与涡量	26
1.5.2 斯托克斯定理	27

1.5.3	涡线与涡管	31
1.6	亥姆霍兹速度分解定理	33
1.7	有势流动	38
第2章	流体运动的基本方程	42
2.1	流体中的作用力	43
2.2	纳维-斯托克斯方程	45
2.2.1	雷诺第二输运方程	45
2.2.2	动量方程	46
2.2.3	偏应力张量	49
2.2.4	牛顿流体的本构方程	51
2.2.5	纳维-斯托克斯方程	54
2.2.6	纳维-斯托克斯方程的初始条件和 边界条件	55
2.3	欧拉方程	59
2.4	欧拉方程的积分——伯努利方程	60
2.4.1	兰姆-葛罗米柯方程	60
2.4.2	伯努利方程	62
2.4.3	无涡流动的伯努利方程	66
2.4.4	恒定总流的伯努利方程	67
2.4.5	当考虑动水压强时的伯努利方程	73
第3章	流体静力学	76
3.1	静止流体的平衡方程式	76
3.1.1	平衡方程式	76
3.1.2	流体静止的质量力条件	77
3.1.3	静止流体的分界面	79
3.1.4	重力场中的平衡方程式	80

3.1.5	巴斯加原理	81
3.2	重力场中静止液体作用于物体壁面上的合力	82
3.2.1	平面上的静水总压力	82
3.2.2	曲面上的静水总压力	85
3.2.3	潜体与浮体所承受的静水总压力	85
3.3	潜体与浮体的平衡与稳定	87
3.3.1	潜体的平衡及其稳定性	87
3.3.2	浮体的平衡及其稳定性	88
3.3.3	油船的平衡稳定性	92
3.4	非惯性坐标系中的静止液体	94
3.4.1	直线等加速运动容器中的静止液体	94
3.4.2	等速旋转运动容器中的静止液体	96
	参考书目	98
第4章	量纲分析与相似原理	99
4.1	量纲	100
4.2	量纲和谐原理	103
4.3	π 定理	107
4.4	流动相似与相似理论	112
4.4.1	流动相似	113
4.4.2	相似条件	116
4.5	相似理论的应用	121
4.5.1	流体运动中的相似准数	121
4.5.2	模型相似准则	127
	参考书目	131
第5章	有涡流动	132
5.1	有涡流动	132
	• X •	

5.2	亥姆霍兹涡量方程	135
5.3	开尔文定理	140
5.3.1	开尔文定理	140
5.3.2	拉格朗日定理	142
5.4	亥姆霍兹定理	142
5.4.1	涡线保持定理	143
5.4.2	涡管强度保持定理	144
5.5	旋涡的产生、发展和消失	145
5.5.1	流体粘性的作用	145
5.5.2	斜压流体中旋涡的形成	148
5.5.3	外力无势所产生的旋涡运动	151
5.6	旋涡的诱导流速	154
5.6.1	不同旋涡的诱导流速	155
5.6.2	由涡量场诱导流速场的普遍公式	161
第 6 章	平面势流	167
6.1	流速势函数	167
6.2	流函数	171
6.3	流网	174
6.4	复势与复速度	177
6.5	几个基本的平面势流	180
6.5.1	均匀流动	180
6.5.2	源、汇与涡	181
6.5.3	绕角流动	184
6.5.4	偶极子	189
6.6	圆柱绕流	193
6.6.1	无环量圆柱绕流	193
6.6.2	有环量圆柱绕流	196

6.7	柱体受力的布拉休斯公式	201
6.8	镜像定理	205
6.8.1	平面壁镜像定理	205
6.8.2	对源	208
6.8.3	圆柱壁镜像定理——米尔-汤姆逊圆 定理	211
6.9	绕圆柱流动中的作用力	214
6.9.1	无环量圆柱绕流的作用力——达朗贝 尔疑题	214
6.9.2	有环量圆柱绕流的作用力——库塔-儒可 夫斯基升力	215
第7章	翼型理论	218
7.1	翼型的几何参数与流体动力特性	218
7.2	保角变换	224
7.2.1	保角变换基本原理	224
7.2.2	源、汇与涡的变换	228
7.2.3	简单解析函数	229
7.3	儒可夫斯基变换	233
7.3.1	儒可夫斯基变换式	233
7.3.2	均匀流绕椭圆流动	235
7.3.3	均匀流绕平板流动	239
7.3.4	有冲角均匀流绕过平板的流动	241
7.4	库塔-儒可夫斯基条件	244
7.5	对称儒可夫斯基翼型	253
7.6	圆弧翼型	259
7.7	儒可夫斯基翼型	264
7.8	施瓦兹-克里斯托弗变换	267

7.8.1	简单封闭多边形	267
7.8.2	施瓦兹-克里斯托弗变换	267
7.8.3	施瓦兹-克里斯托弗变换举例	271
	参考书目	273
第8章	空间势流	274
8.1	轴对称空间势流的流速势与流函数	274
8.1.1	圆柱坐标表示的空间势流	275
8.1.2	球坐标表示的空间势流	277
8.2	流速势函数方程式的解	280
8.3	基本空间势流	282
8.3.1	均匀流动	282
8.3.2	原点的源(或汇)	284
8.3.3	偶极子	286
8.4	三维半体绕流	287
8.5	圆球绕流	289
8.6	兰金体绕流	291
8.7	线源	294
8.8	巴特勒球定理	296
8.9	格林定理	299
8.9.1	内部流动	299
8.9.2	外部流动	300
8.10	达朗贝尔疑题	304
8.11	附加质量	307
第9章	明槽水流运动	313
9.1	明槽水流运动的基本方程	314
9.1.1	简述	314

9.1.2	明槽水流运动的微分方程式	315
9.1.3	明槽总流方程	318
9.2	明槽水流运动的两种流态——缓流和急流	323
9.2.1	明槽中的微波波速	323
9.2.2	比能、临界水深	329
9.3	明槽均匀流与渐变流	332
9.3.1	明槽均匀流动	332
9.3.2	临界底坡	335
9.3.3	明槽恒定非均匀渐变流动	337
9.4	明槽水流运动中两种流态的过渡	343
9.4.1	由缓流到急流的过渡——水跌	343
9.4.2	由急流到缓流的过渡——水跃	348
9.5	缓流与急流中的弯道水流	356
9.5.1	缓流弯道水流	356
9.5.2	急流弯道水流	361
9.6	明槽水流非恒定流动	366
9.6.1	非恒定渐变流动	367
9.6.2	非恒定急变流动	371
9.7	明槽水流运动的相似	375
	参考书目	377

第 10 章 波浪运动 378

10.1	概述	379
10.2	波浪运动基本方程与边界条件	382
10.2.1	连续方程	382
10.2.2	运动方程——欧拉方程	382
10.2.3	波浪运动的边界条件	383
10.2.4	波浪运动的初始条件	387

10.3	微幅波理论	387
10.3.1	微幅波理论中的控制方程和 边界条件	388
10.3.2	微幅进行波	391
10.3.3	微幅进行波的特性	393
10.4	微幅波的叠加	405
10.4.1	驻波	405
10.4.2	不完全驻波	411
10.4.3	波群	412
10.5	水波的反射、折射和绕射	416
10.5.1	水波的反射	416
10.5.2	水波的折射	419
10.5.3	水波的绕射	425
10.6	恒定流动中的波	430
10.7	船行波与兴波阻力	435
10.7.1	船行波	435
10.7.2	兴波阻力	442
	参考书目	448

附录 I	场论与张量基本运算知识	449
1.1	标量、向量与张量	449
1.2	场	449
1.3	标量场的梯度	450
1.4	向量场的散度	451
1.5	向量场的旋度	451
1.6	高斯公式	452
1.7	张量的表示法、二阶张量	453
1.8	单位张量 δ 和置换张量 ϵ_{ijk}	456

I.9	二阶对称张量与二阶反对称张量	457
I.10	并矢	458
I.11	二阶张量的代数运算	458
I.12	雅可比行列式	460
附录 II	正交曲线坐标	463
II.1	正交曲线坐标、拉梅系数	463
II.2	正交曲线坐标单位向量	465
II.3	正交曲线坐标中的散度	467
II.4	正交曲线坐标中的旋度	468
II.5	圆柱坐标	469
II.6	球坐标	470
附录 III	复变函数基本知识	472
III.1	复数	472
III.2	复数的运算	473
III.3	复变函数	476
III.4	解析函数	476
III.5	奇点	478
III.6	科西定理	478
III.7	复变函数的高阶导数	479
III.8	用级数表示解析函数	479
III.9	留数定理	481
III.10	奇点的类型	481
III.11	留数的计算	482
参考书目		483
名词索引		485
人名索引		501