



TSINGHUA UNIVERSITY

粘性流体力学

章梓雄 董曾南

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 提 要

本书系统地讲述以水为代表的不可压缩粘性流体力学的基本理论。全书共分十二章。前五章为粘性流体力学的基本理论与方程。第六至第八章为紊流的基本理论与方程。第九至第十二章分别讲述各种典型的紊流流动：射流、尾流、圆管紊流、紊流平板边界层及明槽紊流。在附录中给出“场论与张量基本运算知识”。

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液体为对象的工程专业研究生粘性流体力学课程教材或教学参考书。本书有助于广大水力学教师提高理论修养，深入理解现代流体力学的基本内容。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

粘性流体力学/章梓雄,董曾南编著. —北京:清华大学出版社,
1998.4

ISBN 7-302-02852-4

I. 粘… II. ①章… ②董… III. 粘性流体: 不可压缩流体-流体力学 IV. 0357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 02278 号

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学校内, 邮编 100084)

因特网地址: www.tup.tsinghua.edu.cn

印刷者: 清华大学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京科技发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 15.875 字数: 409 千字

版 次: 1998 年 6 月第 1 版 1998 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-02852-4/O · 191

印 数: 0001~2000

定 价: 20.00 元

光华基金会为支持学术专著和研究生教材的出版,给予我社资助,本书即为由光华基金会资助出版的专著之一。

序 言

这本《粘性流体力学》是章梓雄和董曾南两位教授在此专业特有心得之余的精心之作。此书基于两位作者汇集多年教学发展和科学研究的经验,自成一个丰硕严密而有独到的体系。对此专业发展的来龙去脉,有扼要的阐述。内容着重物理概念的启迪,宛宛道来,深入浅出,如步坦道。而定解要求,严谨有序。引导读者入门扣问之例凡多。在应用上结合所有相关专业所需,普及地在基础应用和工程技术上建立了一个结实的基石。

粘性流体力学是一个历史悠久而又富有新生命力的学科。它与人们日常生活,健康和行旅无不息息相关。早在纪元前希腊学者阿基米德即建立了液体载物的浮力理论,其领先远超越于力学建基之始。二千二百年前在李冰父子创导下,我国也建有利溉舒洪的都江堰。在实用上说,这个伟大工程确已掌握现今的水利学原则和近代的工程设计理论。在流体粘性效应的问题上,虽不乏先进接连攻关,终难胜克,足证其艰困之甚。直到1904年德国流体力学大师普朗特对粘性流在高雷诺数时绕过流线型物体的边界层引介了定解程序,并对在粘性效应下流体之流线自钝体分离时给了确切的准则。这两个重要文献被广誉为开创了基础应用(基础和应并重等价)学说之突破首例。这学说之所以能兼顾基础和应,乃缘于有深入剖析的物理概念,然后始能建立严密的定解程序和数学方法。对于这边界层理论的全面发展和有紊流情形下之现象,此书述

之,不憚其詳,由此建立了基本理论,以备预作将来这学科在新方向发展中的启源点。

近数年代里,由于工业发展的迫切需求,已促进不少新学科的萌芽滋长。诸如能源发展;海洋、大气和陆地交应干扰和持恒;农渔牧业的生物科技新探索;城市、河流和山岳的环境保护;疾病防治的医疗科学以及自然灾害之消减和救援等等都赋予流体力学新的使命。由此而有地球流体力学,海洋动力学,生物流体力学,环境流体力学,微型电气机械流体力学等新的综合学科的建立和发展。这些新田园中都需要在新的条件下作更深入的粘性流体力学的研究。欲求在新工作中能得心应手,自然先要对已有的基础理论能全面掌握,这是本书作者主要目的之一。

在这些基础上,两位作者希望此书将有助水力学教师们提升理论修养及裨益,供有关专业从事科研参考之用,看来必能如愿以偿。由于这书着重物理概念的了解和启发,写得循循善诱,似乎益可嘉惠自学的学生和学者,协助提高怡然领悟之乐趣。

吳耀祖
1996年腊月。

• 吳耀祖是美国科学院院士,美国加州理工学院教授

• IV •

前 言

流体之有粘性乃不争之事实。但是,在流体力学的发展历史上,由于考虑流体运动中的粘性作用而使流动问题的解决变得十分复杂与困难,因而曾经把流体作为无粘性,即理想流体来处理。对于工程中的某些问题,特别是当处理某些粘性影响并不显著的流动问题,例如波浪运动、远离固体壁面的流动等,这样的处理可以得到相当满意的解答。但是对于更多的与流体有关的工程问题,忽略粘性则会导致与真实流动完全不同的结果,如历史上著名的达朗贝尔佯谬(d'Alembert paradox)。在水利、水电、土木、环境工程中的流体流动问题,多需考虑流体的粘性,从而粘性流体力学是这些领域的科技人员必须具备的基础理论知识。

粘性流体力学的有关教科书或专著众多,而且其中不乏优秀的作品。但专门为水利、水电、土木、环境或其它以水为对象的工程专业研究生作为学习流体力学的教科书或教学参考书而编写者则尚付阙如,这本书就是为此目的而编著。同时本书也可供有关学科高等学校教师及相关专业科技人员作为奠定粘性流体力学基础,提高理论修养的一本参考书。本书的特点在于密切结合相关专业要求,研究以水为代表的不可压缩流体的粘性流动为主。对于专业中常常遇到的具有自由水面的明槽流动给予了特别的注意。作者们根据多年科学研究和教学工作经验,使本书形成了一个严密完整的理论体系,思路清晰,并着重于物理概念的深入阐述,易于为

读者所接受。本书并对粘性流动中最为重要的紊流流动给予了特别的重视。作者希望这本书能为读者在工程技术中应用现代粘性流体力学的成果打下牢固的基础。

流体力学是一门古老的科学。但在近二百多年的时间里,随着人类社会和生产的进步,很多著名流体力学家的不懈努力,使流体力学得到了巨大的发展。人们在学习粘性流体力学的过程中往往会被人类智慧放射的光芒所激动。希望这本书能展现其中的一部分。使读者不仅能学习到工程实践中极为有用的一些粘性流体力学的知识,而且能使读者感受到严谨治学的乐趣。

本书共分十二章。第一章与第二章介绍粘性流动的基本概念与基本方程。第三至第五章介绍边界层理论。第六至第八章阐述紊流的基本理论与方程。第九至第十二章则分别讨论工程中最常见的一些紊流流动。本书是在章梓雄(Allen T. Chwang)、董曾南分别在美国衣阿华大学(University of Iowa)和中国清华大学多年讲授有关课程的讲稿、讲义和研究成果的基础上编著的。作者有志于把流体力学的近代发展和工程实践中普遍应用的水力学密切结合起来,以期提高水力学研究的理论水平,并有利于解决众多的现代工程技术中的流体流动问题。这也是近代流体力学和水力学发展中一个重要的趋势。

清末民初的著名国学家王国维先生(1877年—1927年)曾留有名句,谓“古今之成大事业、大学问者,必须经过三种之境界:昨夜西风凋碧树,独上高楼,望尽天涯路。衣带渐宽终不悔,为伊消得人憔悴。众里寻他千百度,蓦然回首,那人却在,灯火阑珊处。”望有志于作学问者能从中得到重大的启迪。

美国科学院院士、加州理工学院教授吴耀祖(T. Yaotsu Wu)先生对本书的写作给予了热情的鼓励和帮助。吴先生并亲为作序,使本书蓬荜增辉。清华大学贺五洲副教授通读了全部书稿,并提出不少有益的建议。作者在这里向他们表示衷心的感谢。

本书成书过程中虽数易其稿,但因粘性流体力学内容博大精深,而作者才疏学浅,难免有错误和不足之处,还望广大读者给以批评指正。

章梓雄
董曾南 共识

1996年12月



章梓雄 原籍浙江。1944 年 11 月生于上海市。1965 年毕业于香港珠海学院。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：香港大学机械工程系系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、中山大学及大连理工大学客座教授；上海交通大学及河海大学顾问教授；中国科学院力学研究所名誉教授；美国土木工程师学会、美国机械工程师学会及香港工程师学会资深会员；美国力学学院及纽约科学院院士。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 160 篇。



董曾南 原籍天津，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，系学术委员会主任，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。并担任中国水利学会理事，水利学专业委员会副主任，国际水利学研究协会（International Association for Hydraulic Research）副主席，国家高速水利学重点实验室学术委员会副主任，《中国科学》、《科学通报》等期刊编委。多年来从事水利学方面的研究工作，参加和主持的水工模型试验 10 余项，在水工建筑物明流边界层，明槽紊流等方面发表论文 35 篇。获国家教委科技进步奖二等奖 3 项。

目 录

第一章 粘性流动的基本概念与方程	1
1-1 粘性流体流动	1
1-1-1 引言	1
1-1-2 粘性流动举例	3
1-1-3 流体的粘性	10
1-2 粘性流动的基本方程式	13
1-2-1 研究流体运动的两种方法	13
1-2-2 雷诺输运方程	17
1-2-3 连续方程	19
1-2-4 雷诺第二输运方程	20
1-2-5 动量方程	20
1-2-6 能量方程	26
1-2-7 粘性流动中一点的偏应力张量	27
1-2-8 粘性流动基本方程式	29
1-2-9 变形速率张量	30
1-2-10 本构方程	36
1-2-11 纳维-斯托克斯方程	39
1-2-12 纳维-斯托克斯方程的边界条件和 初始条件	41
1-3 明槽流动的纳维-斯托克斯方程	44

1-3-1	不可压缩粘性流体在无界流场内 的流动	44
1-3-2	纳维-斯托克斯方程中的压强项改变为 流体动压强	45
1-3-3	明槽水流纳维-斯托克斯方程	47
1-4	粘性流动的相似律	48
1-5	涡量方程	49
第二章	纳维-斯托克斯方程的解	58
2-1	平行流动	58
2-1-1	库埃特流动	59
2-1-2	泊肃叶流动	62
2-2	运动平板引起的流动	67
2-2-1	突然加速平板引起的流动 (斯托克斯第一问题)	67
2-2-2	振动平板引起的流动(斯托 克斯第二问题)	68
2-3	平面驻点流动(希门茨流动)	71
2-4	重力作用下的平行流动	77
2-5	平行平面间的脉冲流动	80
2-6	奇异摄动法简介	82
2-7	低雷诺数流动	87
2-7-1	斯托克斯方程	88
2-7-2	斯托克斯方程的一些基本解	91
2-7-3	绕过球体的均匀流动	94
2-7-4	奥辛近似	98
2-8	边界层流动	101

第三章 边界层微分方程式	109
3-1 边界层的基本特征	109
3-2 边界层微分方程式	114
3-2-1 二维平面边界层微分方程式	115
3-2-2 沿二维弯曲壁面及轴对称曲面的 边界层方程	119
3-3 边界层厚度	125
3-3-1 边界层位移厚度	126
3-3-2 边界层动量损失厚度	127
3-3-3 边界层能量损失厚度	128
3-3-4 举例	128
3-4 边界层方程的相似性解	129
3-5 边界层的分离现象	135
3-5-1 分离现象	135
3-5-2 边界层流速分布特点与分离现象	137
第四章 边界层微分方程式的精确解	143
4-1 绕顺流放置平板的边界层流动	143
4-2 绕过楔形体的流动	157
4-3 绕过柱体的流动	163
4-4 顺流放置平板的尾流	169
4-5 平面层流射流	174
4-6 圆形层流射流	181
4-7 二维管道进口段流动	185
第五章 边界层微分方程式的近似解	188
5-1 边界层动量积分方程式与能量积分 方程式	188

5-2	动量积分方程应用于顺流放置的平板边界层流动	191
5-3	二维流动的卡门-波豪森近似方法	196
5-4	边界层方程近似解与精确解的比较	206
第六章	紊流	211
6-1	由层流到紊流的转换	213
6-1-1	圆管流动的转换	213
6-1-2	壁面边界层流动的转换	215
6-2	层流稳定性理论	217
6-2-1	层流稳定性基本概念	217
6-2-2	奥尔-佐默费尔德方程	220
6-2-3	奥尔-佐默费尔德方程的主要特性	223
6-2-4	稳定性理论应用于顺流放置的平板边界层流动	224
6-2-5	曲壁面层流边界层的稳定性问题	226
6-2-6	影响层流稳定性的其它因素	232
6-3	猝发现象	237
6-4	紊流的统计平均方法	243
6-4-1	时间平均法(时均法)	244
6-4-2	空间平均法	246
6-4-3	统计平均法(系综平均法)	247
6-4-4	各态遍历假设	249
第七章	紊流的基本方程	255
7-1	紊流连续方程和雷诺方程	255
7-2	紊流能量方程	259
7-2-1	紊流瞬时流动的总能量方程	259

7-2-2	紊流时均的总能量方程	261
7-2-3	紊流时均流动部分的能量方程	263
7-2-4	紊流脉动部分的能量方程	264
7-2-5	能量方程的积分形式	265
7-3	紊流的涡量方程,旋涡的拉伸	268
7-4	紊流计算模型的偏微分方程式	274
7-4-1	紊流脉动动能方程(κ 方程)	275
7-4-2	紊流能量耗散率方程(ϵ 方程)	279
7-5	紊流的半经验理论	280
7-5-1	涡粘性模型	280
7-5-2	混掺长度理论	282
7-5-3	涡量传递理论	286
7-5-4	卡门相似性理论	288
7-5-5	普适流速分布律	291
7-6	紊流的基本特性	297
第八章	紊流扩散与离散	299
8-1	分子扩散的费克定律	300
8-2	移流扩散方程	301
8-2-1	移流扩散方程	301
8-2-2	扩散方程	303
8-3	随机游动与分子扩散	305
8-4	紊流扩散	309
8-4-1	泰勒紊流扩散理论	309
8-4-2	欧拉法紊流扩散方程	313
8-5	剪切流中的离散	316
第九章	紊动射流及尾流	321

9-1	射流及尾流	321
9-2	紊动射流及尾流的厚度和中心流速 的沿程变化	323
9-2-1	恒定射流	326
9-2-2	尾流	327
9-3	平面紊动射流	330
9-3-1	微分方程解	330
9-3-2	动量积分解	334
9-4	圆形紊动射流	337
9-4-1	圆形紊动射流的流速分布	337
9-4-2	圆射流的紊动特性	339
9-5	单独物体后的平面尾流	343
9-5-1	平面尾流的流速分布	343
9-5-2	平面尾流的紊动特性	346
第十章	圆管紊流	351
10-1	圆管中的流速分布律	352
10-2	圆管紊流的阻力	359
10-3	粗糙圆管	364
10-3-1	管道流动按粗糙的分区	365
10-3-2	粗糙圆管的流速分布	367
10-3-3	粗糙圆管的阻力规律	373
10-3-4	实用管道	374
10-4	管流的紊动特性	375
10-4-1	管流中脉动流速与紊流切应力	376
10-4-2	圆管紊流的断面能量平衡	380
10-4-3	圆管紊流的频谱	387

第十一章 紊流平板边界层	391
11-1 紊流平板边界层的流速分布与分区 结构	391
11-2 紊流平板边界层的紊动特性	398
11-3 紊流平板边界层的能量平衡	404
11-4 紊流平板边界层厚度和阻力	410
11-5 粗糙平板紊流边界层	415
第十二章 明槽紊流	422
12-1 明槽紊流的分区结构与流速分布	423
12-1-1 二维明槽均匀紊流理论分析	423
12-1-2 分区结构与流速分布	428
12-2 明槽紊流的阻力	432
12-3 明槽紊流的紊动特性	434
12-3-1 涡粘度与混掺长度	434
12-3-2 紊流度	436
12-3-3 明槽紊流的能量平衡	443
12-4 粗糙壁面明槽紊流	445
12-4-1 粗糙壁面的理论零点	446
12-4-2 粗糙壁面明槽紊流的流速分布	448
12-4-3 粗糙壁面明槽紊流的紊流度分布	449
12-4-4 河流中的紊流	452
参考书目	457
附录 场论与张量基本运算知识	459
1. 标量, 向量与张量	459
2. 场	459